

Proceedings of the Annual Joint Conference,
the Mineralogical Society of Korea and
the Petrological Society of Korea

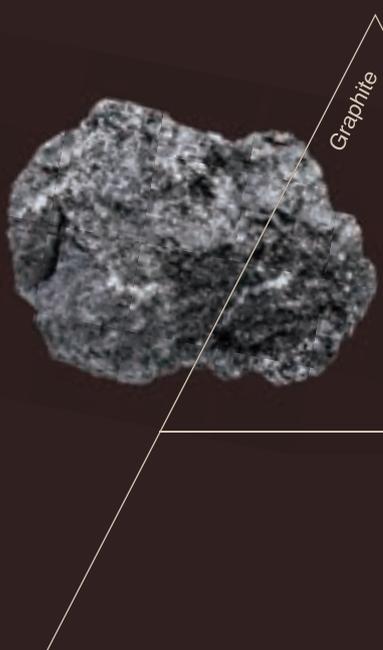
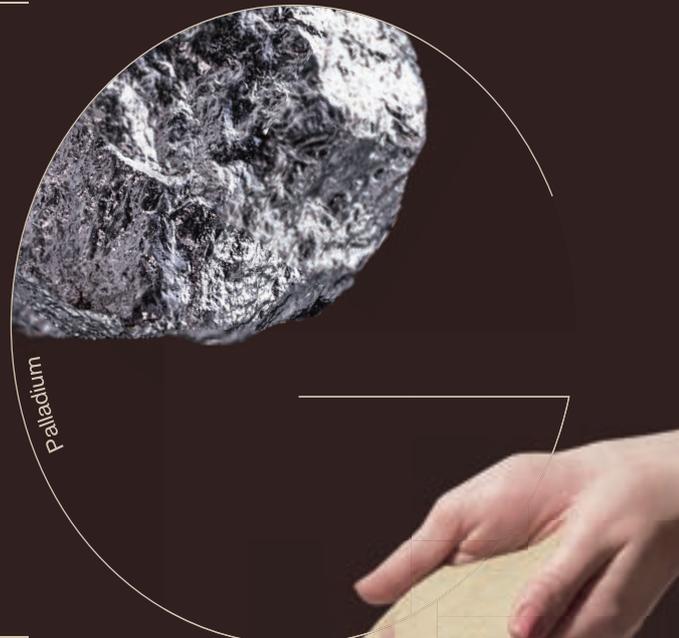
2023
(사)한국광물학회·한국암석학회
공동학술발표회
논문집

2023년 6월 22일(목) - 23일(금)
공주대학교 자연과학대학(11동)

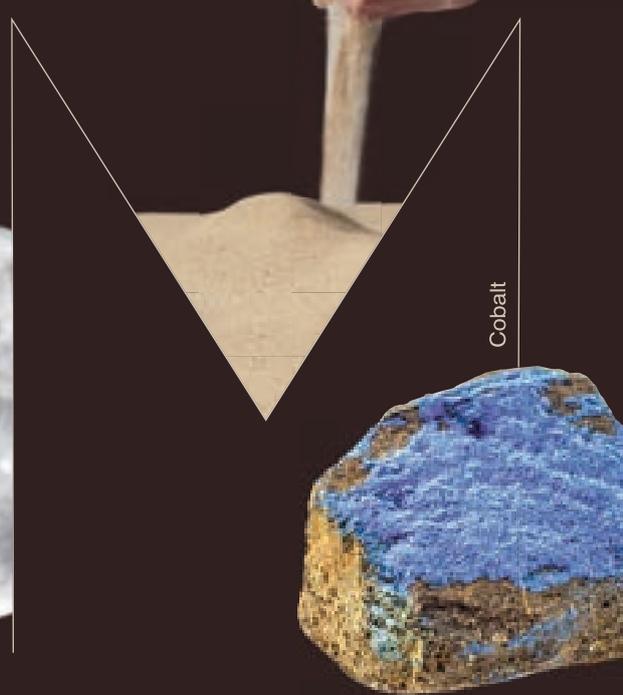
주최 | (사)한국광물학회 · 한국암석학회

주관 | (사)한국광물학회 · 한국암석학회 · 공주대학교 황해지질환경연구소

후원 | 한국지질자원연구원 · 클라리언트코리아(주) · (주)성신 · (주)지오그린21 · (주)에니스환경건설
(주)케이디 · 엔시스 · 충청북도 영동군 · 안동대학교 산학협력단 토양분석센터
공주대학교 CCUS 인력양성사업 · (주)청맥지이티 · 한국기초과학지원연구원
(주)만진교역 · 아미텍코리아(주) · 옥스포드인스트루먼트 · 자이스코리아
(주)지울코리아 · 지질과학 · 한국지질자원연구원 화산연구단



Korea Institute of
Geoscience and
Mineral Resources



KIGAM

대한민국 과학기술 분야의 국가대표

핵심광물 생산국 KOREA, 우주자원부국 KOREA,
대한민국 과학기술 국가대표, KIGAM이 앞장섭니다.

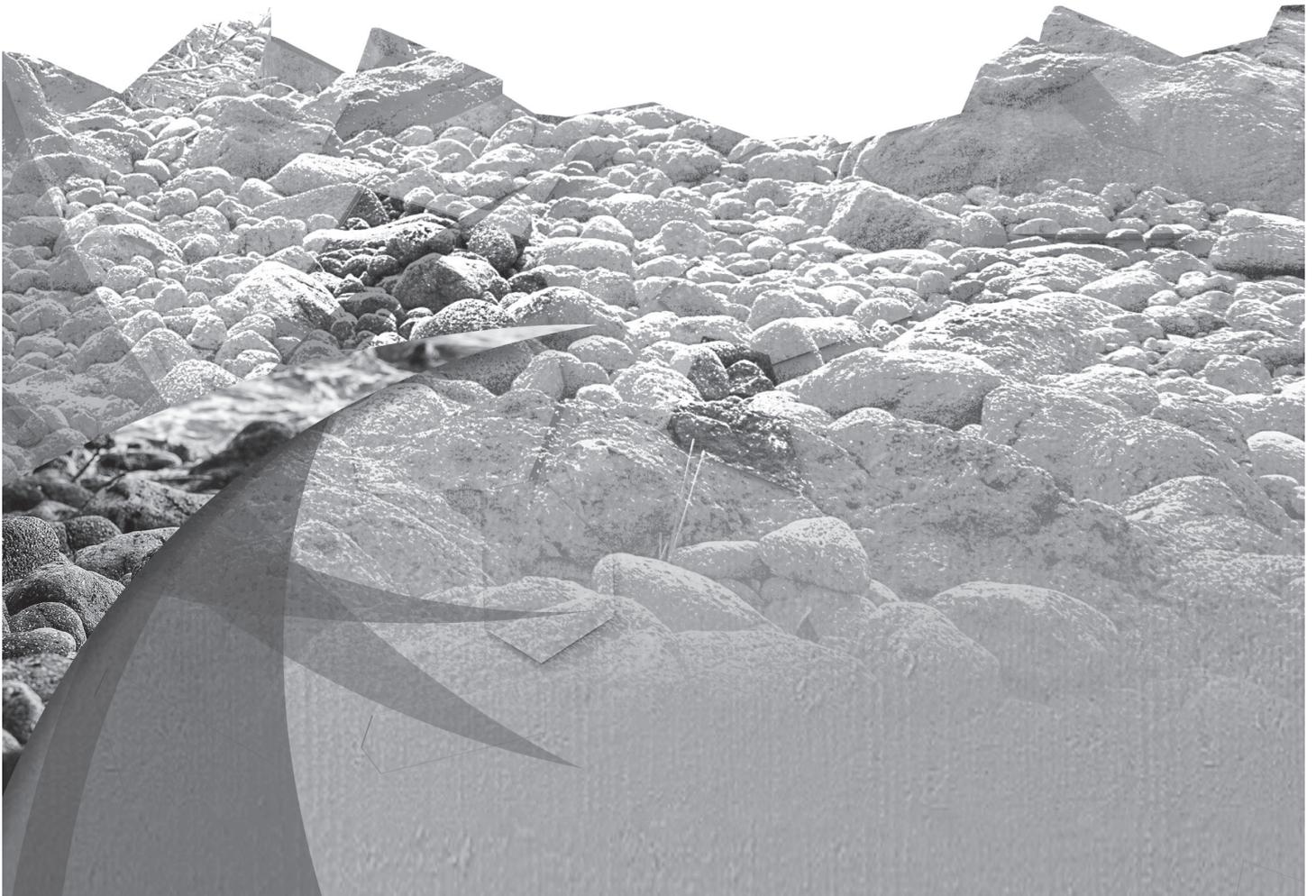
Proceedings of the Annual Joint Conference,
the Mineralogical Society of Korea and
the Petrological Society of Korea

2023

(사)한국광물학회·한국암석학회

공동학술발표회 논문집

2023년 6월 22일(목) - 23일(금)
공주대학교 자연과학대학(11동)



공동학술발표회 및 총회 일정

6월 22일 목요일

(사)한국광물학회 (대강의실 B1)		한국암석학회 (가이아 239호)		포스터 발표
9:00-9:35	등 록	9:00-9:40	등 록	포스터 부착시간: 9:30-18:00
9:35-9:45	개회사	9:40-9:45	개회사	
09:45-10:45	구두발표 I	09:45-10:45	구두발표 I	
10:45-11:00	휴 식	10:45-11:00	휴 식	
11:00-12:00	구두발표 II	11:00-12:00	구두발표 II	
12:00-13:00	중 식	12:00-13:00	중식 및 포스터 발표	
13:00-13:45	공동특별강연	13:00-13:45	공동특별강연	
13:45-14:00	휴 식	13:45-14:00	휴 식	
14:00-15:15	일라이트 특별세션 I	14:00-15:00	한국암석학회 정기총회	
15:15-15:30	휴 식	15:00-16:15	구두발표 III	
15:30-16:15	(사)한국광물학회 정기총회	16:15-16:45	Poster session	
16:15-16:45	Poster session & 일라이트 특별세션 II	16:45-18:00	구두발표 IV	
16:45-17:45	구두발표 III	18:00~	폐회 및 간찬회	
17:45-18:00	우수발표상 시상 및 폐회			
18:00~	간찬회			

6월 23일 금요일

09:00-14:00	석조문화재 답사(공주대학교 이찬희 교수님)
-------------	-------------------------

Proceedings of the Annual Joint Conference

the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,
June 22-23, 2023, Korea

6월 22일 (사)한국광물학회 (발표 12분, 질문 3분, 총 15분) 공동특별강연 1편, 구두발표 17편, 포스터 33편

시 간	발표자	제 목	좌 장
9:00-9:35	등 록		
9:35-9:45	개회사		
9:45-10:00	이수진(부산대)·이현승(부산대)·성동훈(전남대) ·김현수(전남대)·김표상(전남대)·이용문(부산대)	Cs-, Sr-, Cd-, Pb-로 치환된 합성 모데나이트의 결정구조 비교 연구	이아침
10:00-10:15	손상보(강원대)·권기덕(강원대)	방해석 성장 과정에서 일어나는 비전통 안정동위원소 분별에 대한 양자역학 계산 연구	
10:15-10:30	김영철((주)한미보석감정원)·최현민 (첨단보석분석연구소)	천연 다이아몬드와 램 그로운(합성) 다이아몬드의 감별	
10:30-10:45	오토곤-에르덴 다바수렌(한국지질자원연구원) ·고상모(한국지질자원연구원)·김남운(강원대) ·이범한(한국지질자원연구원)	무쉬가이-후닥 광상의 REE 광화 작용과 몽골 남부의 중생대 후기 지구조 진화	
10:45-11:00	Coffee Break		
11:00-11:15	이승열(충북대)	신종광물 Valleyite 와 Xuite의 발견	박선영
11:15-11:30	이아침(서울대)·이성근(서울대)	상부 맨틀 환경에서 압력 및 물의 함량에 따른 붕규산염 용융체의 양이온 배위 환경 변화: 행성 내부 함수 마그마의 붕소 동위 원소 조성 및 물의 용해 기작에 관한 미시적 고찰	
11:30-11:45	김영재(부경대)·이호준(부경대)	회석 내 황(S) 치환의 에너지 및 구조적 특성에 대한 양자역학 모델링: 지질환경에서 인회석을 산소분압계로 사용하기 위한 열역학적 고찰	
11:45-12:00	최진형(연세대)·Rachel J. Husband(Notkestr) ·황희정(광주과학기술연구원)·김태현(연세대) ·방윤아(연세대)·윤서희(연세대)·이정민(연세대) ·심희현(연세대)·김상수(포항공과대학교)·남대웅 (포항공과대학교)·채복남(포항공과대학교) ·Hanns-Peter Liermann(Notkestr)·이용재(연세대)	X-선 자유전자레이저를 이용한 철과 휘발성 물질의 반응 연구와 이의 초기 지구에서의 환원성 대기 형성 과정에 대한 함의	
12:00-13:00	중식		
13:00-13:45	공동특별강연 : 무기 자연 수소의 성인과 부존 가능성 김형수(고려대)		김순오
13:45-14:00	Coffee Break		
14:00-14:15	이남구(연세대)·박한범(연세대)·성세제(영동군청)·한동 훈(영동군청)·김화진(영동군청)·김진욱(연세대)	충청북도 영동군 동창일라이트의 광물학적·지화학적 특성 연구; 새로운 일라이트 표준시료로서의 가능성 고찰	양기호
14:15-14:30	백은지(공주대)·이유나(공주대)·유병용(공주대) ·신동복(공주대)·김영석(공주대)·박선영 (한국지질자원연구원)	영동일라이트 광체와 변질대의 광물학적 특성 비교 연구	
14:30-14:45	구태희(연세대)·Yuki Morono(JAMSTEC) ·Fumio Inagaki(JAMSTEC)·박한범(연세대) ·김진욱(연세대)	고온, 고압 환경에서의 생지구화학적 일라이트 형성에 대한 회분식 실험 연구	
14:45-15:00	박한범(연세대)·양기호(연세대, 부산대)·구태희(연세대) ·강인성(연세대)·Yuzuru Yamamoto (Department of Planetology)·김진욱(연세대)	IODP 348항차 난카이 해구 퇴적물 코어 내 유기물이 풍부한 블랙 셰일층에서의 국지적 생물기원 일라이트 형성 연구	
15:00-15:15	문동현(국립문화재연구원)·구효진(경상국립대) ·김효임(경상국립대)·김소진(국립문화재연구원) ·남상원(문화재청)	고대 토기의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물: 발견 및 기술적 의의	
15:15-15:30	Coffee Break		
15:30-16:15	(사)한국광물학회 정기총회		
16:15-16:45	Poster session		
16:45-17:00	김수현(부산대)·박찬우(부산대)·박규영(부산대) ·양기호(부산대)	남대서양 중앙해령 횡단 퇴적물 점토광물을 이용한 고기후 및 기원지 변동 추정	이용문
17:00-17:15	이성근(서울대)	지구/행성 내부의 깊은 low-z 원소분배의 미시적 기원	
17:15-17:30	김진욱(연세대)	Naturally Occurring Microbe-Clay mineral Interaction	
17:30-17:45	김효임(경상국립대)·조현구(경상국립대)·이상미 (경상국립대)·구효진(경상국립대)·홍종국(극지연구소) ·진영근(극지연구소)	라만 분광분석을 이용한 북극해 망가니즈 단괴 내 산화망가니즈 광물의 공간적 분포 규명	
17:45-18:00	우수 발표상 시상 및 폐회		
18:00	간담회		

6월 22일 한국암석학회 (발표 12분, 질문 3분, 총 15분) 공동특별강연 1편, 구두발표 18편, 포스터 9편

시 간	발표자	제 목	좌 장
09:00-09:40	등 록		
09:40-09:45	개회사		
09:45-10:00	양수민(KBSI)·김정민(KBSI)·김승섭(충남대)	동위원소 및 지질연대 데이터베이스 구축과 데이터 공유와 재사용을 위한 애플리케이션 개발	김태환
10:00-10:15	박창근(극지연)·김화영(극지연)	전자현미분석기를 이용한 달의 저어코놀라이트 연대 측정	
10:15-10:30	박용(서울대)	변형된 녹렴석 청색편암의 변형미구조 및 지진파 특성과 따뜻한 섭입대에서의 지진파 속도 및 이방성에 대한 의의	
10:30-10:45	이재석(서울대)·정해명(서울대)	Lattice-preferred orientation (LPO) of olivine and amphibole in amphibole peridotites and neighboring hornblendites from Gapyeong, South Korea and implications for seismic anisotropy	
10:45-11:00	Coffee Break		
11:00-11:15	한석영(서울대)·강지훈(안동대)·정해명(서울대)	영남육괴 청송지역 석회질규산염암의 석영, 석류석의 미구조와 변형기작에 대한 연구	박문재
11:15-11:30	강동혁(서울대)·우주선(서울대)·길영우(전남대)	화산암상 분석을 통한 제4기 한탄강 현무암 지대의 물리·화산학적 특성 및 분출 과정 연구	
11:30-11:45	류충렬(지자연)·김창민(지자연)·김태형(지자연)·이호일(지자연)·이태호(지자연)·최이레(지자연)·김동은(지자연)·배한경(지자연)·최진혁(지자연)	공주단층계의 공주분지 북동부 공주 청룡리 일대의 활성단층: 청룡리단층	
11:45-12:00	강지훈(안동대)	2017 포항지진(Mw 5.4) 동시성 지표변형의 특성	
12:00-13:00	중식		
13:00-13:45	공동특별강연 : 무기 자연 수소의 성인과 부존 가능성 김형수(고려대)		
13:45-14:00	Coffee Break		
14:00-15:00	한국암석학회 정기총회		
15:00-15:15	김봉주(서울대)·박정우(서울대)·박규승(서울대)·박규찬(서울대)·허철호(지자연)	미얀마 깔레이미오 오피올라이트의 친철성 원소 거동: 부분용융과 맨틀-용융체 상호반응의 영향	이병훈
15:15-15:30	이유영(KBSI)·조문섭(서울대)·김정민(KBSI)·정연중(KBSI)	영남육괴 산청 회장암 내 석류석-사방휘석 백립암질 포획암의 (초)고온 변성작용과 준등압냉각	
15:30-15:45	오창환(전북대)·가와구찌 겐타(전북대)·정지완(KyushuUniversity)	Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of Triassic plutons in the eastern Gyeonggi Massif, Korean Peninsula: Magma genesis and geodynamic implications for East Asia	
15:45-16:00	이승구(지자연)·고경태(지자연)·송교영(지자연)·홍발(지자연)·기원서(지자연)·이병훈(전남대)	한반도 남부 맨틀기원 화강암의 Eu동위원소 조성의 지구화학적 의의	
16:00-16:15	조문섭(서울대)	“옥천층” 명명 100주년을 기리며: 경기외연대와 지구조-층서	
16:15-16:45	포스터발표 및 Coffee Break		
16:45-17:00	Hongda Hao(서울대)·박정우(서울대)	화산호 맨틀의 Nd 및 Hf 동위원소	박용
17:00-17:15	김지인(충남대)·최성희(충남대)	제주도 현무암류 내 감람석의 산소 동위원소 성분으로 유추한 근원맨틀의 특성 (예비연구)	
17:15-17:30	이현우(서울대)	우리나라 신생대 현무암의 비활성 기체 지화학 연구	
17:30-17:45	김윤섭(충북대)·한기운(충북대)·김태환(극지연)·김태훈(극지연)·이유영(KBSI)	남극 북빅토리아랜드 윌슨 암체의 광역 변성작용: 변성시기, 잠재적 열원, 쌍변성대의 형성	
17:45-18:00	김태환(극지연)	남극 북빅토리아랜드의 캄브리아기 고압 변성작용	
18:00-	폐회 및 간담회		

6월 22일 포스터발표((사)한국광물학회)

포 스텐 발 표		좌 장
1	박선영(한국지질자원연구원)	라만 기반 비전통 저류층 가스분포 특성 분석 연구
2	홍지수(전남대)·조영태(전남대)·박정훈(전남대)	폐금속광산의 토양오염물질 위해성평가에 관한 연구: 옥령광산을 중심으로
3	안현호(부산대, 한국해양과학기술원)·정재우 (한국해양과학기술원)·김수현(부산대)·김종욱 (한국해양과학기술원)·형기성(한국해양과학기술원) ·고영탁(한국해양과학기술원)·양기호(부산대)	서태평양 마젤란 해산군 망가니즈각 기반암 변질테의 Fe-smectite 분석을 통한 고환경 복원 연구
4	이현승(부산대)·이수진(부산대)·이용문(부산대)	고온 고압 환경에서 제올라이트 X의 상전이 비교 연구
5	강인성(연세대)·박영규(연세대)·유규철(극지연구소) ·이민경(극지연구소)·김진욱(연세대)	서남극 도슨-갯츠 트러프 퇴적물 내 점토광물 분석 결과에 대한 통계적 접근을 통한 퇴적물 공급지 및 퇴적환경 복원
6	박영규(연세대)·유규철(극지연구소)·황청연 (서울대)·이민경(극지연구소)·김성한(극지연구소) ·이재일(극지연구소)·김진욱(극지연구소)	빙상 하부 퇴적물에서 미생물에 의한 점토광물의 물리적, 화학적 특성 변화 연구: 남극반도 크리스탈 사운드 지역
7	김주현(강원대)·권기덕(강원대)	층상형 광물의 마찰 거동에 대한 원자 수준의 이해
8	김상건(강원대)·손상보(강원대)·현성필 (한국지질자원연구원)·권기덕(강원대)	스트론튬-함유 방해석의 결정구조 및 용해도 연구
9	Shujia Li(서울대)·이성근(서울대)	Configuration transformation of network modifier cation in amorphous earth materials above megabar pressures
10	노세형(서울대)·이성근(서울대)	양자화학 계산을 이용한 물 분자의 Clumped 안정동위원소의 분배계수 특성
11	김형규(공주대)·박창근(극지연구소)·박선영 (한국지질자원연구원)·김현나(공주대)	달운석(DEW 12007)에서 관찰되는 알칼리 장석의 특징
12	김용현(서울대)·이성근(서울대)	제일원리 계산을 통한 극한 압력 환경에서의 주석 산화물 결합 구조 및 전자 구조 전이 연구
13	박보경(공주대)·김현나(공주대)	고에너지 볼 밀을 이용한 몬모릴로나이트 분쇄 시 분쇄 방법에 따른 입도 및 결정도 변화 연구
14	박상우(전남대)·김현수(전남대)·김표상(전남대)·성동 훈(전남대)	세슘(Cs)이 흡착된 층상규산염 광물의 열물성 비교 연구
15	후인휘화(충남대)·유재형(충남대)	초분광 영상 시스템을 사용한 석회석 순도 매핑: 옥계광산의 사례연구
16	김중원(전남대)·김계홍(전남대)·김표상(전남대) ·김현수(전남대)·박상우(전남대)·성동훈(전남대)	고온 고압 하에서 합성 베네사이트를 이용한 탄소 반응 연구
포스터 부착 09:30 - 18:00· 발표자 대기 시간 16:15 - 16:45 ※ 발표자 대기 시간이 짧은 관계로 학술발표시간 이외에 자유로운 토의를 부탁드립니다.		

이범한

포스터 발표			
17	Grace Malvine MOUGHOA BOUSSOUGHOU NGOLO(충남대)·유재형(충남대)·후인휘화 (충남대)	초분광 원격 탐사를 이용한 자연 발생 석면 모암의 식별 및 분류: 실험실 접근법	이범한
18	김이정(한국지질자원연구원)·고상모 (한국지질자원연구원)·Otgon-Erdene Davaasuren(한국지질자원연구원)·안기문 (한국지질자원연구원)·김대영 (극지연구소)·김태환(극지연구소)·이범한 (한국지질자원연구원)	충남 유구지역 사문암 니켈 잠재성 예비 연구	
19	임현승(안동대)·추현욱(안동대)·박종삼 (대구보건대)·임우택(안동대)	Zr ₆ Ti ₁₁ ⁹⁺ 클러스터가 도입된 Zeolite A의 합성	
20	문대준(한국에너지공과대)·김후식(안동대) ·임현승(안동대)·추현욱(안동대)·임우택(안동대)	제올라이트 Y에서 Zn ₄ S ⁶⁺ 및 Zn ₂ S ²⁺ 양자점 합성	
21	문대준(한국에너지공과대)·김후식(안동대) ·임현승(안동대)·추현욱(안동대)·임우택(안동대)	Zn ²⁺ 가 이온교환된 Zeolite Y에서의 3Al 6-rings을 분석을 위한 결정화 및 NMR연구	
22	이상미(경상국립대)·김효임(경상국립대)	수심에 따른 동시베리아해 비구형 망가니즈단괴 내 산화망가니즈 광물종 산출 특성	
23	송병철(안동대)·김재민(안동대)·송혜원(안동대) ·임경수(안동대)·탁현아(안동대)·김영훈(안동대) ·김정진(안동대)	수산화나트륨을 이용한 중금속 수용액의 중화반응 시 생성되는 침전물의 특성 연구	
24	김재민(안동대)·송혜원(안동대)·송병철(안동대) ·임경수(안동대)·탁현아(안동대)·김영훈(안동대) ·김정진(안동대)	소성 환을 이용한 인공산성배수 정화 효율 평가	
25	김재민(안동대)·송혜원(안동대)·송병철(안동대) ·임경수(안동대)·김영훈(안동대)·김정진(안동대)	Ca, Mg-탄산염 및 수산화물의 중금속 오염수 중화효율 평가	
26	이유나(공주대)·송인선(한국지질자원연구원) ·김현나(공주대)	단층비지의 입도 및 구성광물이 초임계 CO ₂ 와의 반응에 미치는 영향 연구	
27	김계홍(전남대)·고경철(전남대)·성동훈(전남대)	밀도범함수이론을 바탕으로 산화광물과 탄산염광물을 이용한 탄소 저감 활용가능성 연구	
28	전예린(공주대)·김현나(공주대)·김은경(공주대)	고압환경에서 수화된 조장석 용융체의 H ₂ O 기포 크기 분포 분석 : 백두산 상부 마그마 시스템의 거동 분석을 위한 예비 연구	
29	박진근(안동대)·박해성(안동대)·김영훈(안동대) ·김정진(안동대)·이병춘(경북대)·김경우(지오그린) ·차용훈(지오그린)·서지호(지오그린)·최기호 (지오그린)	금호강 최적물 성상 및 오염도 평가	
30	최지영(한국지질자원연구원)·김성안 (한국지질자원연구원)	비투멘 반사도 기반 유기물 열적성숙도 특성 분석 연구	
31	구효진(경상국립대)·이상미(경상국립대)·조현구 (경상국립대)·김효임(경상국립대)	동시베리아해에서 산출되는 망가니즈단괴의 형태학적·지화학적 특성	
32	Gerica Joie P. Castro(강원대)·권기덕(강원대)	버나다이트 분자동역학 시뮬레이션 연구	
일라이트 특별세션 II			
33	백은지(공주대)·이유나(공주대)·김현나(공주대)	영동 일라이트 분말제품의 입도에 따른 광물학적 특성 분석	
포스터 부착 09:30 - 18:00 발표자 대기 시간 16:15 - 16:45 ※ 발표자 대기 시간이 짧은 관계로 학술발표시간 이외에 자유로운 토의를 부탁드립니다.			

Proceedings of the Annual Joint Conference,

the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,

June 22-23, 2023, Korea

6월 22일 포스터발표(한국암석학회)

포 스텐 발 표		좌 장
1	박문재(충북대)	페리도타이트 포획암의 미구조와 유체포유물에 기록된 상부맨틀의 불균질성(미국 리오 그란데 리프트를 중심으로)
2	경세진(서울대)·정해명(서울대)	중국 Shuanghe 지역에서 산출된 후퇴변성작용을 받은 에클로자이트의 미세구조 연구
3	채광석(산림과학원)·구남인(산림과학원)·이영근(산림과학원)·양희문(산림과학원)·박기형(산림과학원)	국내외 골재 수출입 동향 연구
4	김준하(서울대)·정해명(서울대)	캘리포니아 서부 Jenner와 Ring Mt. 지역에서 채취한 각섬암 내부 각섬석의 변형미구조와 지각 내 지진파 비등방성에의 적용
5	하윤해(서울대)·정해명(서울대)	청색 편암과 후퇴변성된 에클로자이트에 포함된 광물들의 격자선호방향과 지진파 비등방성 연구
6	김지혁(서울대)·박경우(서울대)·이미경(극지연)·이종익(극지연)·Phillip R. Kyle (New Mexico Institute of Mining and Technology)·Xia Wang (China University of Geosciences)·Zaicong Wang(China University of Geosciences)	남극 플레이아데스 알칼리 마그마 시스템의 황화물 및 친동성원소 지구화학: 대륙 하부 지각의 친동성원소 분배에 대한 고찰
7	이승구(지자연)	동위원소자료의 지구화학적 응용을 위한 암석시료의 지구화학적 전처리의 중요성에 대한 토의
8	최승순(서울대)·정해명(서울대)	고압에서 변형된 로소나이트 청색편암의 변형미구조와 지진파 특성 연구
9	한기운(충북대)·김윤섭(충북대)·김태환(극지연)·이승렬(지자연)·이승구(지자연)	Emplacement Age, Crustal Assimilation and Tectonic Setting of Gabbroic Rocks in the Tiger Gabbro Complex, northern Victoria Land, Antarctica
<p>포스터 부착 9:30 - 18:00 발표자 대기시간 16:15-16:45</p> <p>※ 발표자 대기시간이 짧은 관계로 학술발표시간 이외에 자유로운 토의를 부탁드립니다.</p>		이보영

2023

(사)한국광물학회 학술발표회 일정

June 22, 2023

6월 22일 / 목

09:00-09:35	등 록
09:35-09:45	개회사
09:45-10:45	구두발표 I
10:45-11:00	휴 식
11:00-12:00	구두발표 II
12:00-13:00	중 식
13:00-13:45	공동특별강연
13:45-14:00	휴 식
14:00-15:15	일라이트 특별세션 I
15:15-15:30	휴 식
15:30-16:15	(사)한국광물학회 정기총회
16:15-16:45	Poster session & 일라이트 특별세션 II
16:45-17:45	구두발표 III
17:45-18:00	우수 발표상 시상 및 폐회
18:00-	간담회

6. 22 / Thu.

(사)한국광물학회

좌장:이아침

9:00-09:35

등 록

9:35-09:45

개회사

09:45-10:00

이수진, 이현승, 성동훈, 김현수, 김표상, 이용문
Cs-, Sr-, Cd-, Pb-로 치환된 합성 모데나이트의 결정구조 비교 연구

10:00-10:15

손상보, 권기덕
방해석 성장 과정에서 일어나는 비전통 안정동위원소 분별에 대한 양자역학
계산 연구

10:15-10:30

김영출, 최현민
천연 다이아몬드와 랩 그로운(합성) 다이아몬드의 감별

10:30-10:45

오토곤-에르덴 다바수렌, 고상모, 김남운, 이범한
무쉬가이-후닥 광상의 REE 광화 작용과 몽골 남부의 중생대 후기 지구조
진화

10:45-11:00

Coffee Break

좌장:박선영

11:00-11:15

이승열
신종광물 Valleyite 와 Xuite의 발견

11:15-11:30

이아침, 이성근
상부 맨틀 환경에서 압력 및 물의 함량에 따른 붕규산염 용융체의 양이온 배위
환경 변화: 행성 내부 함수 마그마의 붕소 동위 원소 조성 및 물의 용해 기작
에 관한 미시적 고찰

11:30-11:45

김영재, 이호준
회석 내 황(S) 치환의 에너지 및 구조적 특성에 대한 양자역학 모델링: 지질
환경에서 인회석을 산소분압계로 사용하기 위한 열역학적 고찰

11:45-12:00

최진혁, Rachel J. Husband, 황희정, 김태현, 방윤아, 윤서희, 이정민,
심희현, 김상수, 남대웅, 채복남, Hanns-Peter Liermann, 이용재
X-선 자유전자레이저를 이용한 철과 휘발성 물질의 반응 연구와 이의 초기 지
구에서의 환원성 대기 형성 과정에 대한 함의

6. 22 / Thu.

(사)한국광물학회

12:00-13:00

중 식

좌장:김순오

13:00-13:45

공동특별강연 : 김형수
무기 자연 수소의 성인과 부존 가능성

13:45-14:00

Coffee Break

좌장:양기호

14:00-14:15

이남구, 박한범, 성세제, 한동흔, 김화진, 김진욱
충청북도 영동군 동창일라이트의 광물학적·지화학적 특성 연구; 새로운 일라이트
표준시료로서의 가능성 고찰

14:15-14:30

백은지, 이유나, 유병용, 신동복, 김영석, 박선영
영동일라이트 광체와 변질대의 광물학적 특성 비교 연구

14:30-14:45

구태희, Yuki Morono, Fumio Inagaki, 박한범, 김진욱
고온, 고압 환경에서의 생지구화학적 일라이트 형성에 대한 회분식 실험 연구

14:45-15:00

박한범, 양기호, 구태희, 강인성, Yuzuru Yamamoto, 김진욱
IODP 348항차 난카이 해구 퇴적물 코어 내 유기물이 풍부한 블랙 셰일층에서
의 국지적 생물기원 일라이트 형성 연구

15:00-15:15

문동혁, 구효진, 김효임, 김소진, 남상원
고대 토기의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물: 발견 및 기술적 의의

15:15-15:30

Coffee Break

15:30-16:15

(사)한국광물학회 정기총회

16:15-16:45

Poster session

6. 22 / Thu.

(사)한국광물학회

좌장:이용문

16:45-17:00

김수현, 박찬우, 박규영, 양기호
남대서양 중앙해령 횡단 퇴적물 점토광물을 이용한 고기후 및 기원지 변동 추정

17:00-17:15

이성근
지구/행성 내부의 깊은 low-z 원소분배의 미시적 기원

17:15-17:30

김진욱
Naturally Occurring Microbe-Clay mineral Interaction

17:30-17:45

김효임, 조현구, 이상미, 구효진, 홍종국, 진영근
라만 분광분석을 이용한 북극해 망가니즈 단괴 내 산화망가니즈 광물의 공간적 분포 규명

17:45-18:00

우수 발표상 시상 및 폐회

18:00~

간담회

2023

한국암석학회 학술발표회 일정

June 22, 2023

6월 22일 / 목

09:00-9:40	등 록
09:40-9:45	개회사
09:45-10:45	구두발표 I
10:45-11:00	휴 식
11:00-12:00	구두발표 II
12:00-13:00	중 식
13:00-13:45	공동특별강연
13:45-14:00	휴 식
14:00-15:00	한국암석학회 정기총회
15:00-16:15	구두발표 III
16:15-16:45	포스터 발표 및 휴식
16:45-18:00	구두발표 IV
18:00-	폐회 및 간담회

6. 22 / Thu.

한국암석학회

좌장: 김태환

9:00–09:40

등록

9:40–9:45

개회사

9:45–10:00

양수민, 김정민, 김승섭
동위원소 및 지질연대 데이터베이스 구축과 데이터 공유와 재사용을 위한 애플리케이션 개발

10:00–10:15

박창근, 김화영
전자현미분석기를 이용한 달의 저어코놀라이트 연대 측정

10:15–10:30

박용
변형된 녹렴석 청색편암의 변형미구조 및 지진파 특성과 관련한 섭입대에서의 지진파 속도 및 이방성에 대한 의의

10:30–10:45

이재석, 정해명
Lattice-preferred orientation (LPO) of olivine and amphibole in amphibole peridotites and neighboring hornblendites from Gapyeong, South Korea and implications for seismic anisotropy

10:45–11:00

Coffee Break

좌장: 박문재

11:00–11:15

한석영, 강지훈, 정해명
영남육괴 청송지역 석회질규산암의 석영, 석류석의 미구조와 변형기작에 대한 연구

11:15–11:30

강동혁, 우주선, 길영우
화산암상 분석을 통한 제4기 한탄강 현무암 지대의 물리 화산학적 특성 및 분출 과정 연구

11:30–11:45

류충렬, 김창민, 김태형, 이호일, 이태호, 최이레, 김동은, 배한경, 최진혁
공주단층계의 공주분지 북동부 공주 청룡리 일대의 활성단층: 청룡리단층

11:45–12:00

강지훈
2017 포항지진(Mw 5.4) 동시성 지표변형의 특성

6. 22 / Thu.

한국암석학회

12:00-13:00	중식
13:00-13:45	공동특별강연
13:45-14:00	Coffee Break
14:00-15:00	한국암석학회 정기총회

좌장: 이병춘

15:00-15:15	김봉주, 박정우, 박규승, 박규찬, 허철호 미얀마 깔레이미오 오피올라이트의 친철성 원소 거동: 부분용융과 맨틀-용융 체 상호반응의 영향
15:15-15:30	이유영, 조문섭, 김정민, 정연중 영남육괴 산청 회장암 내 석류석-사방휘석 백립암질 포획암의 (초)고온 변성 작용과 준등압냉각
15:30-15:45	오창환, 가와구찌 겐타, 정지완 Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of Triassic plutons in the eastern Gyeonggi Massif, Korean Peninsula: Magma genesis and geodynamic implications for East Asia
15:45-16:00	이승구, 고경태, 공교영, 홍발, 기원서, 이병춘 한반도 남부 맨틀기원 화강암의 Eu동위원소 조성의 지구화학적 의의
16:00-16:15	조문섭 “옥천층” 명명 100주년을 기리며: 경기외연대와 지구조-층서
16:15-16:45	포스터발표 및 휴식

6. 22 / Thu.

한국암석학회

좌장: 박 용

16:45-17:00

Hongda Hao, 박정우
화산호 맨틀의 Nd 및 Hf 동위원소

17:00-17:15

김지인, 최성희
제주도 현무암류 내 감람석의 산소 동위원소 성분으로 유추한 근원맨틀의 특성
(예비연구)

17:15-17:30

이현우
우리나라 신생대 현무암의 비활성 기체 지화학 연구

17:30-17:45

김윤섭, 한기운, 김태환, 김태훈, 이유영
남극 북빅토리아랜드 윌슨 암체의 광역 변성작용: 변성시기, 잠재적 열원, 쌍변
성대의 형성

17:45-18:00

김태환
남극 북빅토리아랜드의 캄브리아기 고압 변성작용

18:00~

폐회 및 간담회

6. 22 / Thu.

포스터발표((사)한국광물학회)

좌장: 이범한

1	박선영	라만 기반 비전통 저류층 가스분포 특성 분석 연구
2	홍지수, 조영태, 박정훈	폐금속광산의 토양오염물질 위해성평가에 관한 연구: 옥령광산을 중심으로
3	안현호, 정재우, 김종욱, 형기성, 고영탁, 양기호	서태평양 마젤란 해산군 망가니즈각 기반암 변질대의 Fe-smectite 분석을 통한 고환경 복원 연구
4	이현승, 이수진, 이용문	고온 고압 환경에서 제올라이트 X의 상전이 비교 연구
5	강인성, 박영규, 유규철, 이민경, 김진욱	서남극 도슨-갯즈 트리프 퇴적물 내 점토광물 분석 결과에 대한 통계적 접근을 통한 퇴적물 공급지 및 퇴적환경 복원
6	박영규, 유규철, 황청연, 이민경, 김성한, 이재일, 김진욱	빙상 하부 퇴적물에서 미생물에 의한 점토광물의 물리적, 화학적 특성 변화 연구: 남극반도 크리스탈 사운드 지역
7	김주혁, 권기덕	층상형 광물의 마찰 거동에 대한 원자 수준의 이해
8	김상건, 손상보, 현성필, 권기덕	스트론튬-함유 방해석의 결정구조 및 용해도 연구
9	Shujia Li, 이성근	Configuration transformation of network modifier cation in amorphous earth materials above megabar pressures
10	노세형, 이성근	양자화학 계산을 이용한 물 분자의 Clumped 안정동위원소의 분배계수 특성
11	김형규, 박창근, 박선영, 김현나	달운석(DEW 12007)에서 관찰되는 알칼리 장석의 특징
12	김용현, 이성근	제일원리 계산을 통한 극한 압력 환경에서의 주석 산화물 결합 구조 및 전자 구조 전이 연구
13	박보경, 김현나	고에너지 불 밀을 이용한 몬모릴로나이트 분쇄 시 분쇄 방법에 따른 입도 및 결정도 변화 연구
14	박상우, 김현수, 김표상, 성동훈	세슘(Cs)이 흡착된 층상규산염 광물의 열물성 비교 연구
15	후이휘화, 유재형	초분광 영상 시스템을 사용한 석회석 순도 매핑: 옥계광산의 사례연구
16	김중원, 김계홍, 김표상, 김현수, 박상우, 성동훈	고온 고압 하에서 합성 버네사이트를 이용한 탄소 반응 연구
17	Grace Malvine MOUGHOUA BOUSSOUGHOU NGOLO, 유재형, 후인휘화	초분광 원격 탐사를 이용한 자연 발생 석면 모암의 식별 및 분류: 실험실 접근법

6. 22 / Thu.

포스터발표((사)한국광물학회)

좌장: 이범한

18	김이정, 고상모, Otgon-Erdene Davaasuren, 안기문, 김대영, 김태환, 이범한	충남 유구지역 사문암 니켈 잠재성 예비 연구
19	임현승, 추현욱, 박종삼, 임우택	ZrI ₆ Tl ₁₁ ⁹⁺ 클러스터가 도입된 Zeolite A의 합성
20	문대준, 김후식, 임현승, 추현욱, 임우택	제올라이트 Y에서 Zn ₄ S ⁶⁺ 및 Zn ₂ S ²⁺ 양자점 합성
21	문대준, 김후식, 임현승, 추현욱, 임우택	Zn ²⁺ 가 이온교환된 Zeolite Y에서의 3Al 6-rings을 분석을 위한 결정학 및 NMR연구
22	이상미, 김효임	수심에 따른 동시베리아해 비구형 망가니즈단괴 내 산화망가니즈 광물종 산출 특성
23	송병철, 김재민, 송혜원, 임정수, 탁현아, 김영훈, 김정진	수산화나트륨을 이용한 중금속 수용액의 중화반응 시 생성되는 침전물의 특성 연구
24	김재민, 송혜원, 송병철, 임정수, 탁현아, 김영훈, 김정진	소성 환을 이용한 인공산성배수 정화 효율 평가
25	김재민, 송혜원, 송병철, 임정수, 김영훈, 김정진	Ca, Mg-탄산염 및 수산화물의 중금속 오염수 중화효율 평가
26	이유나, 송인선, 김현나	단층비지의 입도 및 구성광물이 초입계 CO ₂ 와의 반응에 미치는 영향 연구
27	김계홍, 고경철, 성동훈	밀도범함수이론을 바탕으로 산화광물과 탄산염광물을 이용한 탄소 저감 활용가능성 연구
28	전예린, 김현나, 김은정	고압환경에서 수화된 조장석 용융체의 H ₂ O 기포 크기 분포 분석 : 백두산 상부 마그마 시스템의 거동 분석을 위한 예비 연구
29	박진근, 박해성, 김영훈, 김정진, 이병춘, 김정우, 차용훈, 서지호, 최기호	금호강 최적물 성상 및 오염도 평가
30	최지영, 김성안	비투멘 반사도 기반 유기물 열적성속도 특성 분석 연구
31	구효진, 이상미, 조현구, 김효임	동시베리아해에서 산출되는 망가니즈단괴의 형태학적·지화학적 특성
32	Gerica Joie P. Castro, 권기덕	버나다이트 분자동역학 시뮬레이션 연구

일라이트 특별세션 II

33	백은지, 이유나, 김현나	영동 일라이트 분말제품의 입도에 따른 광물학적 특성 분석
----	---------------	---------------------------------

6. 22 / Thu.

포스터발표(한국암석학회)

좌장: 이보영

1	박문재	페리도타이트 포획암의 미구조와 유체포유물에 기록된 상부맨틀의 불균질성(미국 리오 그란데 리프트를 중심으로)
2	정세진, 정해명	중국 Shuanghe 지역에서 산출된 후퇴변성작용을 받은 에클로자이트의 미세구조 연구
3	채광석, 구남인, 이영근, 양희문, 박기형	국내외 골재 수출입 동향 연구
4	김준하, 정해명	캘리포니아 서부 Jenner와 Ring Mt. 지역에서 채취한 각섬암 내부 각섬석의 변형미구조와 지각 내 지진과 비등방성의 적용
5	하운해, 정해명	청색 편암과 후퇴변성된 에클로자이트에 포함된 광물들의 격자선호방향과 지진과 비등방성 연구
6	김지혁, 박정우, 이미정, 이종익, Phillip R. Kyle, Xia Wang, Zaicong Wang	남극 플레이아데스 알칼리 마그마 시스템의 황화물 및 친동성원소 지구화학: 대륙 하부 지각의 친동성원소 분배에 대한 고찰
7	이승구	동위원소자료의 지구화학적 응용을 위한 암석시료의 지구화학적 전처리의 중요성에 대한 토의
8	최승순, 정해명	고압에서 변형된 로소나이트 청색편암의 변형미구조와 지진과 특성 연구
9	한기운, 김윤섭, 김태환, 이승렬, 이승구	Emplacement Age, Crustal Assimilation and Tectonic Setting of Gabbroic Rocks in the Tiger Gabbro Complex, northern Victoria Land, Antarctica

◀◀ 구두발표 (사)한국광물학회 ▶▶



- | | |
|--|---|
| <p>■ Cs-, Sr-, Cd-, Pb-로 치환된 합성 모데나이트의 결정구조 비교 연구</p> | <p>이수진, 이현승, 성동훈, 김현수, 김표상, 이용문</p> |
| <p>■ 방해석 성장 과정에서 일어나는 비전통 안정동위원소 분별에 대한 양자역학 계산 연구</p> | <p>손상보, 권기덕</p> |
| <p>■ 천연 다이아몬드와 랩 그로운(합성) 다이아몬드의 감별</p> | <p>김영출, 최현민</p> |
| <p>■ 무슈가이-후닥 광상의 REE 광화 작용과 몽골 남부의 중생대 후기 지구조 진화</p> | <p>오토콘-레르덴 다바수렌, 고상모, 김남운, 이법한</p> |
| <p>■ 신종광물 Valleyite 와 Xuite의 발견</p> | <p>이승열</p> |
| <p>■ 상부 맨틀 환경에서 압력 및 물의 함량에 따른 붕규산염 용융체의 양이온 배위 환경 변화: 행성 내부 합수 마그마의 붕소 동위 원소 조성 및 물의 용해 기작에 관한 미시적 고찰</p> | <p>이아침, 이성근</p> |
| <p>■ 회석 내 황(S) 치환의 에너지 및 구조적 특성에 대한 양자역학 모델링: 지질환경에서 인회석을 산소분압계로 사용하기 위한 열역학적 고찰</p> | <p>김영재, 이호준</p> |
| <p>■ X-선 자유전자레이저를 이용한 철과 휘발성 물질의 반응 연구와 이의 초기 지구에서의 환원성 대기 형성 과정에 대한 합의</p> | <p>최진혁, Rachel J. Husband, 황희정, 김태현, 방운아, 윤서희, 이정민, 심희현, 김상수, 남대웅, 채복남, Hanns-Peter Liermann, 이용재</p> |
| <p>■ 공동특별강연 : 무기 자연 수소의 성인과 부존 가능성</p> | <p>김형수</p> |
| <p>■ 충청북도 영동군 동창일라이트의 광물학적·지화학적 특성 연구; 새로운 일라이트 표준시료로서의 가능성 고찰</p> | <p>이남구, 박한범, 성세제, 한동훈, 김화진, 김진욱</p> |
| <p>■ 영동일라이트 광체와 변질대의 광물학적 특성 비교 연구</p> | <p>백은지, 이유나, 유병용, 신동복, 김영석, 박선영</p> |
| <p>■ 고온, 고압 환경에서의 생지구화학적 일라이트 형성에 대한 회분식 실험 연구</p> | <p>구태희, Yuki Morono, Fumio Inagaki, 박한범, 김진욱</p> |
| <p>■ IODP 348항차 난카이 해구 퇴적물 코어 내 유기물이 풍부한 블랙 셰일층에서의 국지적 생물기원 일라이트 형성 연구</p> | <p>박한범, 양기호, 구태희, 강인성, Yuki Morono, 김진욱</p> |
| <p>■ 고대 토기의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물: 발견 및 기술적 의의</p> | <p>문동혁, 구효진, 김효임, 김소진, 남상원</p> |
| <p>■ 남대서양 중앙해령 횡단 퇴적물 점토광물을 이용한 고기후 및 기원지 변동 추정</p> | <p>김수현, 박찬우, 박규영, 양기호</p> |
| <p>■ 지구/행성 내부의 깊은 low-z 원소분배의 미시적 기원</p> | <p>이성근</p> |
| <p>■ Naturally Occurring Microbe-Clay mineral Interaction</p> | <p>김진욱</p> |
| <p>■ 라만 분광분석을 이용한 북극해 망가니즈 단괴 내 산화망가니즈 광물의 공간적 분포 규명</p> | <p>김효임, 조현구, 이상미, 구효진, 홍종국, 진영근</p> |

Cs-, Sr-, Cd-, Pb-로 치환된 합성 모데나이트의 결정구조 비교 연구
Comparative crystal structure of Cs-, Sr-, Cd-, and Pb-exchanged synthetic
mordenite

이수진(Soojin Lee)¹·이현승(Hyunseung Lee)¹·성동훈(Donghoon Seoung)²
·김현수(Hyeonsu Kim)²·김표상(Pyosang Kim)²·이용문(Yongmoon Lee)^{1,*}

¹부산대학교 지질환경과학과, 부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2

²전남대학교 지구환경과학부, 광주광역시 북구 용봉로 77

본 연구에 사용된 합성 모데나이트(Na-Mordenite, Na-MOR, $\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_4\text{O}_{96}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$)는 천연 모데나이트와 동일한 골격구조를 가진다. 사방정계의 *Cmcm* 공간군에 속하며 격자상수는 $a=18.256 \text{ \AA}$, $b=20.534 \text{ \AA}$, $c=7.542 \text{ \AA}$ 로 알려져 있다.

합성 모데나이트의 높은 양이온 교환능력을 이용하여 중금속(Cd^{2+} , Pb^{2+}) 또는 핵종 양이온(Cs^+ , Sr^{2+})으로 치환한 모데나이트의 구조적 변화를 관찰하였다. 치환체의 정확한 구조식 도출을 위해 에너지 분산 X-선 분광법과 열중량 분석을 실시하였다. 치환체의 결정 화학적인 특성을 이해하기 위한 X-선 분말 회절실험을 포항가속기연구소 내 5A 및 3D 빔라인에서 수행하였다. 치환 전 물질인 Na-MOR과 비교하였을 때, 치환체의 (110)면과 (200)면의 회절강도가 명확하게 변화하였으나, 전체적인 피크의 위치는 거의 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

치환체 단위포의 부피는 치환된 양이온 전기음성도의 증가에 따라 선형적으로 비례하였으며, 부피 증가율은 양이온의 전하에 따라 독립적인 경향을 보였다. 1가 치환체의 경우 2가 치환체보다 증가율이 약 9.15배 이상 높은 것으로 확인하였다.

획득한 분말 회절 패턴에 대해 GSAS 프로그램을 사용한 리트벨트 방법(Rietveld method)으로 치환체의 구조 모델을 계산하였다. 1가 치환체(Cs-, Na-MOR)의 경우, Cs-MOR은 양이온이, Na-MOR은 물 분자가 각각 4MR에 주로 분포하였으며, 이는 양이온의 크기로 인한 분포 특성이 달라지는 것으로 판단된다. 반면, 2가 치환체(Sr-, Cd-, Pb-MOR)는 4MR보다 8MR의 주변에 양이온들이 분포하고 있음을 확인하였다.

방해석 성장 과정에서 일어나는 비전통 안정동위원소 분별에 대한 양자역학 계산 연구

Quantum mechanical research on the non-traditional stable isotope fractionation during calcite crystal growth

손상보(Sangbo Son)¹·권기덕(Kideok Kwon)^{1*}

¹강원대학교 지질학과

자연에서 형성된 방해석(동굴생성물, 생물 골격 등)의 비전통 금속 안정동위원소 비율은 침전 당시 환경 및 원소 순환 과정을 유추하기 위한 지화학 지시자(geochemical proxies)로 활용되고 있다. 최근 실험연구 결과들을 종합하면, 방해석 내 2가 금속이온들의 안정동위원소 비율은 성장 속도가 증가함에 따라 Ca의 이온반경을 기준으로 평형값에서 정반대의 방향으로 멀어지는 것이 확인되었다. 이 비평형(non-equilibrium) 동위원소 분별의 방향이 금속이온의 크기에 따라 정반대인 이유는 성장하는 방해석 표면으로 이동하는 수용성 금속 이온의 탈수화(dehydration) 또는 확산(diffusion) 속도와 같은 반응속도론적 효과(kinetic effects)에 의한 결과로 설명되고 있다. 한편, 방해석의 성장에서는 결정 내부(bulk)구조와 화학적 결합력 차이를 보이는 표면에서 일어나는 열역학적 동위원소 평형 분별 현상이 전체적인 광물의 동위원소 조성을 결정짓는 주요 기작이 될 수 있다. 그러나, 현재 광물 표면의 동위원소 비율을 벌크와 완전히 분리하여 측정할 수 없기 때문에, 방해석 성장에서 일어나는 표면의 열역학적 동위원소 분별의 영향을 확인한 연구는 전무한 상황이다. 이번 학회에서는 방해석 표면-물 계면(interface)에서 일어나는 2가 금속(Ni, Mg, Zn, Ca, Sr, Ba) 및 산소의 안정동위원소 평형 분별에 대한 양자역학 기반의 밀도범함수이론 계산연구 결과를 발표한다. 이론 계산으로 얻은 방해석 내부와 표면-물 계면에서 일어나는 동위원소 평형 분별 크기의 차이는 기존 실험에서 보고된 성장 속도 증가에 따른 동위원소 분별계수 변화 경향과 일치하였다. 이는 방해석의 성장 속도가 빠를수록, 광물의 전체적인 동위원소 비율이 내부보다 표면에 의한 평형값을 반영하는 방향으로 진행되는 것을 지시한다. 이번 결과는 그동안 방해석 안정동위원소 연구에서 간과되어 온 표면에서의 평형 분별 기작의 역할을 재조명하며, 방해석뿐만 아니라 타 광물 역시 (특히, 표면적이 큰 나노광물) 표면에서 일어나는 안정동위원소 평형 분별이 광물의 동위원소 조성을 결정짓는 주요 기작일 수 있다는 새로운 연구 방향을 제시한다.

천연 다이아몬드와 랩 그로운(합성) 다이아몬드의 감별 Identification of Natural and Laboratory-grown (Synthetic) Diamond

김영출(Young-chool Kim)¹·최현민(Hyun-min Choi)^{2*}

¹㈜한미보석감정원

²첨단보석분석연구소

1. 서언

천연 다이아몬드는 그 빛나는 아름다움과 높은 가치로 인해 수세기동안 가장 귀중한 광물로 여겨왔다. 수 억년동안 지구의 깊은 곳에서 높은 온도와 압력을 견디며 뛰어난 물리적, 광학적 특성과 화학적 안정성을 지니므로 인해 주얼리 보석뿐 만 아니라 산업용 도구, 반도체, 우주산업 등 다양한 산업에서의 활용 영역을 넓혀가고 있다. 근래의 랩 그로운(Laboratory-grown) 다이아몬드 성장 기술의 급성장은 기존 산업에 더하여 다양한 산업에서 활용될 것으로 기대하고 있다. 보석 시장에서도 중국에서 2014년부터 제조되기 시작한 멜리(melee, 2부 미만의 나석 다이아몬드) 사이즈 무색 고온고압(HPHT, high pressure and high temperature) 랩 그로운 다이아몬드가 2016년을 기점으로 국내외에서 대량으로 유통되기 시작하면서 랩 그로운 다이아몬드의 유통량이 급격히 증가하기 시작했다. 2018년 9월에는 영국의 드비어스(De Beers)에서 화학기상증착(CVD, chemical vapor deposition) 랩 그로운 다이아몬드를 ‘라이트박스(Lightbox)’라는 브랜드로 판매를 개시함으로써 CVD 랩 그로운 다이아몬드의 본격적인 등장을 알렸다. FTC(Federal Trade Commission, 미국연방거래위원회)는 이 다이아몬드에 기존의 ‘Synthetic(합성)’이라는 용어 대신에 ‘Laboratory-grown(랩 그로운)’ 용어를 사용하기를 권장하기 시작했다.

현재 중국은 여전히 보석용 HPHT 랩 그로운 다이아몬드 생산의 1위 자리를 지키고 있으며, CVD 랩 그로운 다이아몬드는 최근 인도가 주요 생산센터로 부상하고 있다. 랩 그로운 다이아몬드의 생산기술의 발전은 품질의 향상과 보석용 다이아몬드 생산량의 증가로 이어졌고, 보석용 다이아몬드의 유통량의 급증은 유통과정에서 천연 다이아몬드와 섞여 유통되는 경우를 초래했다. 때문에 국내외의 보석관련 연구기관에서는 랩 그로운 다이아몬드로부터 천연 시장을 지키기 위한 노력을 수행해 왔다. 수 년 동안 많은 감정기관에서는 명시되지 않은 랩 그로운 다이아몬드로부터 천연 다이아몬드를 구별해 내기 위한 연구를 시행해 왔다. 본 논문에서는 그동안 본 감정기관에서 연구해 온 천연 다이아몬드와 랩 그로운 다이아몬드를 감별하는데 사용되는 기술들과 식별특징을 제시하고, 더불어 랩 그로운 다이아몬드의 성장기술, 생산현황 등에 대해서도 제시하고자 한다.

2. 결과 및 고찰

기존의 랩 그로운 다이아몬드에는 몇 가지 특징적인 내포물이 있다. HPHT 랩 그로운 다이아몬드는 결정 성장 과정 중에 완전히 용해되지 못한 금속 플럭스가 존재할 수 있으며, 존재하는 경우 길고 불규칙한 튜브 모양, 직사각형의 흑색화된 직사각형 모양 등 다양한 형태로 발견된다. 금속성 플럭스의 존재는 랩 그로운 다이아몬드가 자성을 띠는 원인이 된다. 그러나 최근에 제조되는 HPHT 랩 그로운 다이아몬드에는 금속 플럭스가 거의 발견되지 않는다. 때문에 자성도 띠지 않는다. CVD 랩 그로운 다이아몬

드 또한 천연 다이아몬드와 식별되는 특징적인 내포물을 가지고 있지 않다.

랩 그로운 다이아몬드에는 특징적인 형광 및 인광 반응이 존재한다. 천연 다이아몬드에 형광 반응이 있는 경우는 자외선 단파장보다 장파장에서 형광반응이 더 강한 반면에 HPHT 랩 그로운 다이아몬드는 자외선 장파장보다 단파장에서 더 강하게 나타난다. 인광 반응은 붕소를 함유한 HPHT 랩 그로운 다이아몬드에서 나타나며 천연 다이아몬드의 인광 반응은 매우 드물다. CVD 랩 그로운 다이아몬드의 일부 분은 형광 반응이 존재하나 인광 반응은 없으며, 핑크의 경우 대부분 강한 형광을 나타낸다.

천연 다이아몬드의 대부분은 결정구조 내에 질소 원자를 함유하고 있다. 이 질소 원자는 다이아몬드 내부에 불순물로 함유되며 대부분 type Ia의 결함을 보인다. 그러나 랩 그로운 다이아몬드는 질소 원자가 거의 존재하지 않은 type II에 속한다. 천연 다이아몬드에도 type II의 결함이 존재하는데 이는 약 2% 내외이다. 이는 적외선 분광기로 관찰이 가능하며 질소와 관련된 결함 이외에도 수소와 붕소 등의 결함을 통해 천연과 랩 그로운 다이아몬드를 식별 할 수 있다. 천연 다이아몬드에서는 수소와 관련된 결함이 3107cm^{-1} 에서 발견되며, CVD 랩 그로운 다이아몬드는 3123 과 3323cm^{-1} 에서 발견된다.

그림1. 천연 다이아몬드와 랩 그로운 다이아몬드의 적외선 분광 스펙트럼. 수소와 관련된 결함이 천연 다이아몬드에서는 3107cm^{-1} 에서, CVD 랩 그로운 다이아몬드는 3323 과 3123cm^{-1} 에서 나타난다.

랩 그로운 다이아몬드를 제조하기 위한 CVD 리액터에는 내부를 들여다 볼 수 있는 윈도우가 있다. 이 윈도우는 대부분 실리카(silica)이며 결정성장 과정에서 윈도우 일부가 식각되면서 CVD 랩 그로운 다이아몬드 내에 미세하게 함유된다. 실리콘(Si)과 관련된 결함은 PL 분광기로 관찰하면 736.6nm 와 736.7nm 에서 발견되며, 다이아몬드 내 실리콘과 관련된 결함의 존재는 랩 그로운 다이아몬드의 식별 특징이 될 수 있다. 잘 알려진 다이아몬드 결함 특징 이외에 알려지지 않은 결함 특징도 있다. 597nm 와 597nm 의 더블피크는 CVD 랩 그로운 다이아몬드에서만 나타나는 특징이며, 아직까지 이 결함의 원인은 밝혀지지 않았다.

3. 결론

랩 그로운 다이아몬드가 대량으로 유통되기 시작 했을 때 본 감정기관에 천연으로 의뢰된 멜리사이즈 다이아몬드 한 묶음에서 다수의 랩 그로운 다이아몬드가 발견됐다. 이러한 현상은 우리나라뿐만 아니라 미국, 일본, 중국, 인도 등의 감정기관에서도 동일하게 발생됐다. 랩 그로운 다이아몬드가 어떻게 만들어 지고, 감별은 어떻게 해야 하는지, 내재된 특징은 무엇인지, 어느 유통 경로를 따르는지 등을 이해하는 것은 다이아몬드 및 주얼리 산업에 있어서 천연과 랩 그로운 다이아몬드 산업이 어느 선까지 공존할 수 있는지를 분석하는데 매우 중요하다. 공정한 거래를 통한 소비자의 신뢰와 랩 그로운 다이아몬드 시장의 형성을 위해 천연 다이아몬드와 랩 그로운 다이아몬드는 반드시 구분되어야 한다. 랩 그로운 다이아몬드의 감별 특징은 다이아몬드 성장 기술의 진보에 따라 변해왔기에 끊임없는 관심이 요구된다.

REE Mineralization in the Mushgai–Khudag Deposit and Late Mesozoic Tectonic Evolution of Southern Mongolia

오트곤-에르덴 다바수렌(Otgon-Erdene Davaasuren)¹·고상모(Sang-Mo Koh)¹

·김남훈(Namhoon Kim)²·이범한(Bum Han Lee)^{1,*}

¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부

²강원대학교 지구자원연구소

*교신저자: leebh@kigam.re.kr

Abstract

Economically significant rare earth element (REE) mineralization is discovered in the Mesozoic carbonatites of the Mushgai–Khudag, Khotgor, and Bayan Khoshuu complexes in southern Mongolia. These complexes primarily consist of nepheline syenites, syenite, and equivalent volcanic rocks. They are located in the Gobi–Tien Shan rift zone, where carbonatites typically form dikes, plugs, or intrusions into brecciated rocks. REEs in mineralized carbonatites commonly occur as fluorocarbonates (bastnäsite, synchysite, parisite) and apatite. However, the origin and tectonic environment of these complexes are still a matter of debate, particularly the REE-enriched alkaline complexes like the Mushgai–Khudag complex. Our research employs petrology, geochemistry, in situ zircon U–Pb ages, and Lu–Hf isotopes to gain a better understanding of the genesis and mantle source of the carbonatites and associated syenite rocks. U–Pb dating, utilizing a sensitive high-resolution ion microprobe (SHRIMP), yielded ages of 140.3–137.9 Ma and 141.5 Ma for zircon samples from carbonatite and syenite, respectively. The zircons exhibit positive ϵ_{Hf} values, indicating late Neoproterozoic to early Devonian continental crust growth originating from a depleted mantle source. The carbonatite samples show low SiO₂ and high CaO concentrations, distinguishing them from primary calciocarbonatites. Both the carbonatite and syenite exhibit similar REE compositional trends, implying a cogenetic relationship. Consequently, we propose that the zircon grains found in the carbonatite are xenocrysts originating from the associated syenite. In situ LA–ICP–MS analyses suggest that the Mushgai–Khudag apatite is derived from the carbonatite–silicate magma series, and the emplacement ages and trace-element compositions of the syenite and carbonatite suggest an origin influenced by liquid immiscibility. Based on the previous and present researches, we have developed a late Mesozoic tectonic evolution model, indicating alkaline magmatism and REE mineralization associated with carbonatite during the late Mesozoic period along the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB). This was followed by late Cretaceous magmatic activities resulting from within-plate extension in the Mongolian Alkaline Province, leading to the formation of REE deposits in southern Mongolia.

상부 맨틀 환경에서 압력 및 물의 함량에 따른 붕규산염 용융체의 양이온 배위 환경
변화: 행성 내부 합수 마그마의 붕소 동위 원소 조성 및 물의 용해 기작에 관한
미시적 고찰

Pressure/water-driven cation coordination transformation of hydrous borosilicate
melts in the upper mantle: Implications for boron isotope contents and water
dissolution mechanism in hydrous silicate melts in planetary interior

이아침(A. Chim Lee)¹·이성근(Sung Keun Lee)^{1*}

¹서울대학교 지구환경과학부, 서울시 관악구 관악로 1

물은 지구 표면 및 내부에서 풍부한 휘발성 성분이며, 규산염 마그마 내에 용해된 물은 지구 및 행성 내부의 물의 순환에 영향을 미칩니다. 붕소는 미량원소이며 친수성이 강하여 일반적으로 유체에 부화하여 지하 약 300 km까지 섭입될 수 있다는 것이 밝혀졌습니다(De Hoog and Savov, 2018). 고온 환경에서 붕소 동위 원소(¹¹B/¹⁰B) 분배는 붕소의 배위 환경(³B 및 ⁴B)에 영향을 받습니다. 규산염 용융체에 물이 용해되면, 용융체의 원자 구조가 바뀌며, 이는 붕소의 동위 원소 조성에 영향을 줍니다. 상부 맨틀 깊이에서 물이 어떻게 규산염 용융체 내에 용해되는지에 대한 기작은 맨틀의 동역학 성질을 이해하는 데 도움을 줍니다. 이러한 지질학적 중요성에도 불구하고, 유체가 풍부한 맨틀 용융체가 생성될 수 있다고 알려진, 상부 맨틀 약 240 km 깊이에 해당하는 압력 범위에서 물의 함량에 따른 합수 규산염 용융체의 원자 구조 변화는 규명되지 않았습니다. 이번 발표에서는 고해상도 고상 핵자기 공명 분광 분석(NMR)을 이용하여 물의 함량뿐만 아니라 압력에 따른 양이온의 배위수 변화 규명을 하고, 이를 통해 붕소 동위 원소 조성 및 물의 용해도 기작에 대해 토의하고자 합니다. 고압 환경에서 물의 원자 구조에 대한 영향을 확인하기 위해 물을 함유하지 않은 규산염 용융체의 양이온 배위수와 비교하였습니다(Lee et al., 2022; Lee and Lee, 2023). NMR 실험 결과, 6 및 8 GPa 압력 환경하에서 물의 함량이 약 1-4 wt%로 증가함에 따라 4 배위수 붕소(⁴B)가 증가하지만, 고배위수 알루미늄(^{5,6}Al)의 생성은 억제되었습니다. 8 GPa 환경에서, 물의 함량이 8 wt%로 증가하였더니, ⁶Al 생성이 [5]Al에 비해 촉진되었습니다. 고배위수 규소(^{5,6}Si)는 관찰되지 않았습니다. 물의 함량이 4 wt%로 동일할 때, 압력이 6에서 8 GPa로 증가함에 따라 ^{5,6}Al 함량은 증가하고, ⁴B 분율은 감소하였습니다. 합성한 합수 유리의 ¹⁷O 및 ¹H NMR 스펙트럼을 획득하였고, 고압 환경에서 고배위수 붕소 및 알루미늄을 형성하기 위해서는 가교 수산기(bridging hydroxyl, Si-OH-⁴B/^{5,6}Al)의 형태로 용해되어있음을 제안합니다. 본 연구의 결과는 양이온의 배위 환경이 조성 및 압력에 복잡한 의존도를 지니는 것을 보여줍니다. 규산염 용융체에 물이 포함되면, 연결 산소의 결합을 끊으면서 중합도를 낮추는 역할을 하고, 압력 영향에 의해 가교 수산기를 생성하면서 붕소 및 알루미늄의 배위수를 증가시킵니다. 6 및 8 GPa 압력하에서, 약 1-4 wt%까지 물의 함량이 증가할 때는 알루미늄보다는 붕소가 Si-OH와 반응하여 Si-OH-[4]B 결합을 생성할 것입니다. ⁴B 분율은 6 GPa 압력 환경에서 물이 4 wt% 첨가되었을 때 가장 컸으며(~99%), 이는 지구 내부에서 물에 의한 ¹¹B 선호 정도가 비선형적임을 시사합니다. 압력과 물의 붕소 동위 원소 조성에 대한 종합적인 영향을 유추하였을 때, 1373 K의 고온, 6 GPa 압력하에서 물이 4 wt% 포함되

Proceedings of the Annual Joint Conference

the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,

June 22-23, 2023, Korea

있을 때 규산염 용융체의 붕소 동위 원소 조성 차이는 약 1.1‰에 이를 수 있습니다. 맨틀 암석이 용융 되었을 때, 생성된 규산염 용융체가 물을 함유할 때, 가벼운 ^{10}B 를 더 선호한다는 것을 의미합니다.

참고문헌

- De Hoog, J. C. M. and Savov, I. P., Boron isotopes as a tracer of subduction zone processes, in: Marschall, H. and Foster, G. (Eds.), Boron isotopes: The Fifth Element. Springer International Publishing, Cham. pp. 217-247, 2018
- Lee, A. C. et al., Pressure-induced structural evolution in boron-bearing model rhyolitic glasses under compression: Implications for boron isotope compositions and properties of deep melts in Earth's interior, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 332, 220-238, 2022
- Lee, A. C. and Lee, S. K., Water-driven structural evolution of hydrous boron-bearing aluminosilicate melts at high pressures up to 8 GPa: Implications for dynamic properties and boron isotope content in hydrous mantle melts, submitted, 2023

인회석 내 황(S) 치환의 에너지 및 구조적 특성에 대한 양자역학 모델링:
지질환경에서 인회석을 산소분압계로 사용하기 위한 열역학적 고찰
Quantum-mechanical modeling of the energetic and structural properties of sulfur
(S) substitution in apatite: the thermodynamic basis for using this system as an
oxybarometer

김영재(YoungJae Kim)^{1*}·이호준(Ho June Lee)¹

¹부경대학교 지구환경시스템과학부 환경지질과학전공

*이메일: youngjkm@pknu.ac.kr

1. 서언

인회석 그룹 광물($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})_2$)은 지구에서 나타나는 가장 풍부한 인산염(PO_4^{3-}) 광물이다. 주요 음이온이 F, OH 또는 Cl인지에 따라 불소인회석(fluorapatite), 수산인회석(hydroxylapatite), 염소인회석(chlorapatite)으로 세부분류 된다. 과거 문헌에서는 황산염(SO_4^{2-})이 인산염(PO_4^{3-})을 치환하는 메커니즘을 통해 S^{6+} 가 인회석 구조 내 존재하는 유일한 황(S) 산화수로 보고되었다(cf. Parat et al., 2011). 하지만 Konecke et al. (2017, 2019)의 최근 연구는 인회석이 고철질 규산염 용융체(mafic silicate melt)에서 결정화될 때 산소분압(f_{O_2})조건에 따라 다양한 양의 S^{6+} , S^{4+} , 그리고 S^{2-} 가 인회석 내에 병합되는 것을 처음으로 정량적으로 관찰하였다. 구체적으로, X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy (XANES) 분석을 통해 $f_{\text{O}_2} = \text{FMQ}$ 인 조건에서 결정화된 인회석 내에서 S^{2-} 가 우세한 산화 상태이며 f_{O_2} 가 FMQ+1.2에서 FMQ+3로 증가함에 따라 S^{6+} 가 S^{4+} 나 S^{2-} 보다 우세해지는 것이 관찰되었다(Fig. 1). Sadove et al. (2019)은 미국 뉴욕주의 필립스 광산(Phillips Mine)에 위치한 magnetite-sulfide 광상에서 나타나는 인회석에서 다양한 황 산화수(S^{6+} , S^{4+} , S^{1-} , S^{2-})가 동시에 존재함을 확인하였다. 해당 연구는 $\text{S}^{1-}/\text{S}^{2-}$ 산화수를 지닌 황 화학종이 환원된 열수로부터 결정화된 후 이차적인 변질(교대변성작용)에 의해 산화된 황 화학종(S^{6+} , S^{4+})이 구조적으로 병합된 것으로 제안하였다. 언급된 최신 연구결과들은 인회석 내 $\text{S}^{6+}/\Sigma \text{S}$ 비율이 결정화가 일어나는 용융체와 유체의 산화환원 조건을 기록할 수 있음을 입증한다. 이 임상연구들은 또한, 인회석 구조 내 황 화학종 치환의 구조 및 열역학적 안정성에 관한 이론적 이해의 필요성을 보여준다. 본 연구는 양자역학 계산을 적용하여 인회석 내 병합되는 다양한 산화수(S^{6+} , S^{4+} , S^{1-} , S^{2-})를 지니는 황 화학종의 에너지 및 구조적 특성을 정량적으로 평가한다. 제안되는 계산 방법론은 인회석 내 황 이온치환의 에너지 선호도(energetic favorability)와 황치환에 의한 구조적 뒤틀림(structural distortion)을 예측한다. 또한, 인회석 내 황 치환을 결정하는 화학 및 결정학적 요인들을 규명한다. 본 연구의 결과는 인회석 내 황이 화성 및 화성-열수 시스템에서 산화환원 조건을 추적할 수 있는 지시자로 활용될 수 있는 계산방법 체계를 제공한다.

2. 연구방법

에너지 최적화(energy optimization) 과정은 양자역학 코드인 CASTEP(Segall et al. 2002)를 활용하여 수행한다. 최적화 과정 동안 광물 구조모델의 최소 에너지를 얻기까지 단위포 또는 수퍼셀(supercell)의 격자 상수와 구성 원자들의 위치가 조정된다. 계산 코드는 밀도범함수이론(density functional theory)에 기반하여 수행된다. 인회석 단종 광물에 대한 초기 모델은 자연적으로 나타나는 인회석 구조($P6_3/m$; Hughes et al., 1990)를 사용한다(Fig. 2).

Fig. 1. 1000 °C, 300 MPa, 서로 다른 f_{O_2} 조건에서 고철질 용융체 내에서 결정화된 인회석의 S XANES 분석결과.

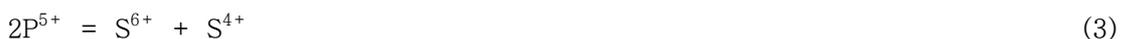
Fig. 2. 황 치환 인회석 모델의 예. 플루오르인회석 구조 내에서 황산염과 아황산염이 구조적으로 병합되어 있다.

3. 결과 및 고찰

인회석 내에서 S^{6+} 산화수를 지니는 황산염(SO_4^{2-})이 인산염(PO_4^{3-})을 치환할 때 서로 다른 전하를 보상하기 위해 쌍쌍치환(coupled substitution)이 필요하다. 기존 연구에서 황산염 치환은 아래와 같은 균형반응식으로 이루어짐이 잘 알려져 있다(Streck and Dilles 1998; Pan and Fleet 2002).



Brian Konecke (2017)은 S^{4+} 산화수를 지니는 아황산염(SO_3^{2-})이 황산염(SO_4^{2-})과 함께 인회석에 병합되는 구조를 제안한 바 있다 (Eq. 3).



모델링 결과 아황산염과 황산염의 구조적 병합은 아황산염의 고립전자쌍이 인회석 구조 내 c축을 따라 F, Cl, OH가 위치하는 column anion 자리에서 멀어질 때(Fig. 3b)보다 column anion 자리를 향할 때(Fig. 3a) 더 안정한 것으로 나타난다(약 15 kJ/mol 차이).

황화이온(S^{2-})의 완전치환과 부분치환은 column anion 자리에서 발생하며 각각 $[Ca_{10}(PO_4)_6S]$ 과 $[Ca_{20}(PO_4)_{12}SX_2]$ ($X = F, Cl, \text{ 또는 } OH$) 화학식에 해당하는 구조에서 모델링을 수행한다. 완전치환 (즉, 모든 column anion 자리(X)를 황화 이온으로 대체) 시에 S^{2-} 는 에너지 최적화된 구조 내에서 $z = 0.5$ ($z = 1/4$ 와 $z = 3/4$ 사이의 대칭 평면의 중간지점)에 위치한다. 부분치환에 대한 모델링(Fig. 4) 결과, 에너지 최적화된 구조에서 S^{2-} 가 주변 화학종(F^- , Cl^- 또는 OH^-)에 따라 $z = 1/4$ 또는 $3/4$ 대칭 평면으로부터 1.0-1.6 Å만큼 이동됨이 확인된다. 인회석 내 치환된 S^{2-} 의 에너지적 안정도는 불소인회석과 수산인산염보다 염소인회석(chlorapatite) 구조 내에서 높은 것으로 나타난다.

본 연구의 결과는 인회석 내 S의 산화 상태 (S^{6+} , S^{4+} , S^{2-})에 대한 열역학적으로 가능한 이온 치환 메커니즘과 구조적 왜곡 및 전자 구조 변화를 설명한다. 최근에 출간된 실험 및 야외지질 관찰(Konecke et al., 2017; Sadove et al., 2019)와 더불어 우리 모델링 결과는 S^{6+} , S^{4+} 및 S^{2-} 가 인회석 내에 구조적으로 병합될 수 있으며, 인회석 내의 $S^{6+}/\Sigma S$ 비율은 산소분압에 의해 통제될 수 있음을 보여준다. 본 연구의 계산 결과와 언급된 임상 데이터를 결합하면, 인회석 내 황을 이용하여 화성 및 화성-열수 시스템의 산소분압 변화를 추적하는 지구화학적 지표로 활용할 수 있는 기초를 마련할 수 있을 것이다.

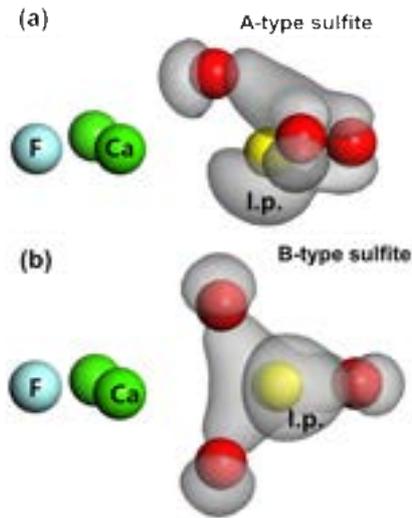


Fig. 3. 아황산염의 고립전자쌍이 (a) column anion 자리를 향한 경우와 (b) 멀리 있는 경우에 대한 분자구조 모델.

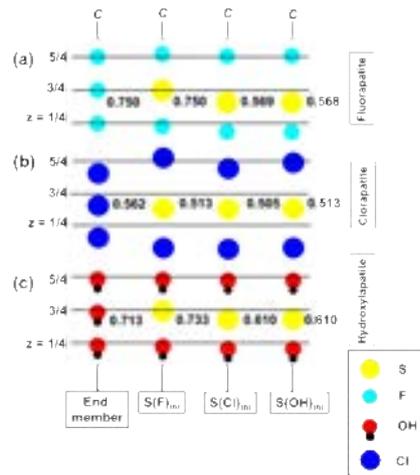


Fig. 4. 황화이온(S^{2-})이 부분치환된 인회석에 대한 9개의 $1 \times 1 \times 2$ 수퍼셀 모델로 각 숫자는 에너지 최적화된 구조에서 S^{2-} 의 위치값(z 값으로 표현)을 보여줌.

참조문헌

- Hughes J. M., Cameron M. and Crowley K. D. (1990) Crystal structures of natural ternary apatites; solid solution in the $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$ ($\text{X} = \text{F}, \text{OH}, \text{Cl}$) system. *American Mineralogist* 75, 295–304
- Konecke B. A., Fiege A., Simon A. C., Parat F. and Stechern A. (2017) Co-variability of S^{6+} , S^{4+} , and S^{2-} in apatite as a function of oxidation state: Implications for a new oxybarometer. *American Mineralogist* 102, 548–557
- Konecke B. A., Fiege A., Simon A. C., Linsler S. and Holtz F. (2019) An experimental calibration of a sulfur-in-apatite oxybarometer for mafic systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 265, 242–258
- Pan Y. and Fleet M. E. (2002) Compositions of the apatite-group minerals: substitution mechanisms and controlling factors. *Reviews in mineralogy and geochemistry* 48, 13–49
- Parat F., Holtz F. and Klügel A. (2011) S-rich apatite-hosted glass inclusions in xenoliths from La Palma: constraints on the volatile partitioning in evolved alkaline magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 162, 463–478
- Sadove G., Konecke B. A., Fiege A. and Simon A. C. (2019) Structurally bound S^{2-} , S^{1-} , S^{4+} , S^{6+} in terrestrial apatite: The redox evolution of hydrothermal fluids at the Phillips mine, New York, USA. *Ore Geology Reviews* 107, 1084–1096
- Segall M., Lindan P. J., Probert M. a., Pickard C. J., Hasnip P. J., Clark S. and Payne M. (2002) First-principles simulation: ideas, illustrations and the CASTEP code. *Journal of physics: condensed matter* 14, 2717
- Streck M. J. and Dilles J. H. (1998) Sulfur evolution of oxidized arc magmas as recorded in apatite from a porphyry copper batholith. *Geology* 26, 523–526

신종광물 Valleyite 와 Xuite의 발견 Discovery of new minerals of valleyite and xuite

이승열(Seungyeol Lee)^{1*}

¹충북대학교 지구환경과학과

미국 아이다호주 Menan 화산체의 홍적세 후기 현무암질 스킨(scoria)에서 신종광물 Valleyite (IMA 2017-026; Lee et al. 2019)와 Xuite (IMA 2018-135a; Lee and Guo, 2022)를 발견했다. 두 신종광물 모두 스킨의 형성 중 현무암 유리(glass)의 산화 생성물이며 적철석(α -Fe₂O₃), maghemite(γ -Fe₂O₃), luogufengite(ϵ -Fe₂O₃) 및 석영과 공존하며 산출한다. 방사광 X선 분말 회절(XRD)법과 투과전자현미경(TEM)을 사용하여 광물의 산출상 및 결정 구조와 화학조성을 조사했다.

Valleyite 광물은 소달라이트(sodalite) 구조로 I-43m 공간군에 속한다. 실험적 화학식은 (Ca_{3.61}Mg_{0.39})(Fe_{3.97}Al_{1.91}Ti_{0.09})O₁₃이며 250에서 500nm의 크기로 산출이 된다. 밀도범함수이론(Density functional theory, DFT) 계산은 Valleyite 광물이 낮은 온도 영역에서는 준안정(metastable)하다는 것을 보여주었다. Valleyite 광물의 퀴리온도는 645K로 측정되었고 자기 이력 곡선(Magnetic Hysteresis Loop)은 연자석(Soft Magnet)의 특징을 보인다. Xuite 광물은 석류석(garnet) 구조를 가졌으며 Ia-3d 공간군에 속한다.

실험적 화학식은 (Ca_{0.92}Mg_{0.08})₃(Fe_{0.96}Ti_{0.04})₂[(AlO₄H)_{0.44}(FeO₄H)_{0.33}(SiO₄)_{0.05}(□O₄H₄)_{0.18}]₃이며 200nm에서 800nm의 크기로 산출된다. 푸리에변환 적외선(FTIR) 분광법은 xuite 광물이 3682cm⁻¹ 와 3579cm⁻¹ 에서 흡수 대역을 보여주었고 이것은 결정구조 내에 OH⁻의 존재를 나타낸다. *In-situ* 가열(heating) 방사광 X선 회절법과 열중량분석기(TGA) 및 시차열량주사계(DSC) 분석은 Xuite 광물이 236°C부터 396°C까지 영역 내에서 탈수반응(dehydration reaction)에 의한 brownmillerite (Ca₂FeAlO₅)로의 상변이를 보여주었다.

이번 연구는 방사광 X선 회절법, 투과전자현미경, 및 다양한 분석법의 조합으로 지질학적 환경에서 신종광물을 발견하고 다양한 특성들을 연구할 수 있는 유용한 연구법을 보여준다. 앞으로 본 연구방법을 활용해서 더 많은 신종광물을 찾는 것이 기대된다.

참고문헌: Lee et al. (2019). American Mineralogist, 104(9), 1238-1245; Lee, S., & Guo, X. (2022). American Mineralogist 107(5), 930-935.

**X-선 자유전자레이저를 이용한 철과 휘발성 물질의 반응 연구와
이의 초기 지구에서의 환원성 대기 형성 과정에 대한 함의**

**XFEL-induced iron-volatile reactions and its implication on the formation of
reduced atmosphere in the early Earth**

최진혁(Jinhyuk Choi)¹·Rachel J. Husband²·황희정(Huijeong Hwang)^{2,3}·김태현(Taehyun Kim)¹
·방윤아(Yoonah Bang)¹·윤서희(Seohee Yun)¹·이정민(Jeongmin Lee)¹·심희현(Heehyeon Sim)¹
·김상수(Sangsoo Kim)⁴·남대웅(Daewoong Nam)⁴·채복남(Boknam Chae)⁴
·Hanns-Peter Liermann²·이용재(Yongjae Lee)^{1,*}

¹연세대학교 지구시스템학과

²Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Notkestr. 85, Hamburg, Germany

³광주과학기술연구원 지구환경공학부

⁴포항가속기연구소

달 형성 대충돌 (Moon-forming impact)은 초기 지구의 진화 과정에서 발생하는 대기와 마그마 바다의 산화-환원 과정에 있어 매우 중요한 역할을 함에도 불구하고 해당 시점의 암석 기록이 존재하지 않아 그 과정을 명확히 밝혀내는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서는 대충돌 당시 충돌체인 Theia의 핵과 초기 지구의 대기 및 규산염 지구에 존재하는 휘발성 기체(H₂O, CO₂ 등)가 고온-고압의 동적 압축 환경하에서 반응을 일으키는 상황을 상정하였으며, 이를 실험실 환경에서 구현하기 위해 펨토초 단위의 매우 빠른 가열 및 가압과 함께 구조 변화를 관찰하는 것이 가능한 X-선 자유전자 레이저(X-ray free electron laser; XFEL)를 이용한 펄스-프로브 기법을 활용하여 철과 H₂O 및 CO₂의 혼합물을 가열-가압함과 동시에 실시간 X-선 회절 데이터를 획득하였다. 초기 압력이 10 GPa 미만인 환경에서 철과 H₂O 및 CO₂는 각각 반응하여 철 산화물인 우스타이트(FeO)와 수소(H₂), 일산화탄소(CO) 기체를 생성하였다. 반면, 초기 압력이 10 GPa 이상인 환경에서는 철이 H₂O의 수소를 구조 내로 비가역적으로 받아들여, γ-FeHx 상을 형성하였으며, FeO와 CO₂가 추가로 반응하여 능철석(siderite; FeCO₃)를 생성하였다. 이러한 초기 압력에 따른 반응 양상의 차이는, 마그마 바다 약 300 km 깊이에서의 산화-환원 경계(redox boundary)의 존재 가능성을 보여준다. 또한, 반응 생성물에 대한 정량 분석을 통해, 충돌체가 생성된 위치의 태양으로부터의 거리, 그리고 충돌체의 질량에 대한 상, 하한 조건과 함께 대충돌에 의해 맨틀에 추가될 수 있는 FeO의 양에 대한 범위를 제시하였으며, 이는 Theia에 의한 대충돌과 달의 형성 가설을 뒷받침한다. 본 연구 결과는 충돌체의 핵을 구성하는 철의 초기 지구로의 유입에 의해 환원성 대기가 일시적으로 생성될 수 있음을 실험적으로 보여주어, 초기 지구에서의 유기물 합성에 유리한 대기 조건 형성에 대한 메커니즘을 제시한다.

무기 자연 수소의 성인과 부존 가능성 Origin and potential reservoir of abiotic native hydrogen

김형수¹

¹고려대학교 지구환경과학과

요약

무기 자연 수소(H₂; native hydrogen)는 천연가스의 주요 구성성분이며, 친환경적인 재생 가능한 에너지로써 글로벌 에너지 분야에서 그 중요성이 부각되고 있다. 이번 발표는 무기 자연 수소가 암석권에서 대량 생성된다는 최근 논문들을 바탕으로 자연 수소의 발생 기작과 이와 관련된 다양한 지질학적 특징들을 다루었다. 지금까지 확인된 자연 수소의 주요 근원암은 (1) 고철질암, (2) 철(Fe²⁺)이 풍부한 암석으로 구성된 기반암, (3) 우라늄이 풍부한 암석이다. 이 암석들은 선캄브리아 시대 결정질 기반암 그리고 중앙 해령과 대륙기반의 오피올라이트(ophiolite), 페리도타이트(peridotite) 암체에서 사문암화된 고철질암 이다(Zgonnik, 2020). 이 근원암들에서 자연 수소를 생성하는 작용은 (a) 구산염 광물(예, 감람석)의 Fe²⁺이 산화되는 동안 물의 환원, (b) 방사성 붕괴로 인한 수전해, (c) 규산염 암석의 기계적 파괴(예, 단층) 동안 물과 표면 라디칼의 반응 등이다 (Fig. 1).

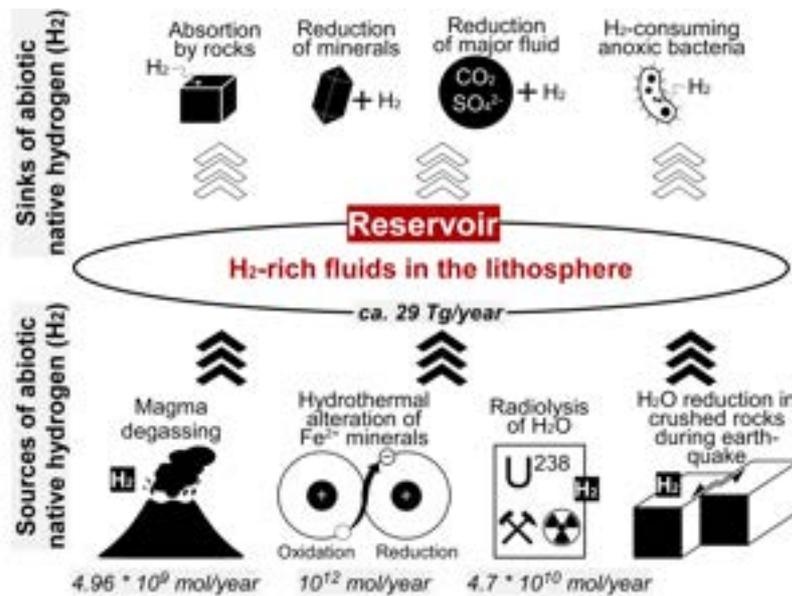


Fig. 1. Schematic representation of main geological sources and sinks of abiotic native hydrogen with their respective estimated annual fluxes (modified from Klein et al., 2020; Zgonnik, 2020).

이들 중, 지각과 상부 맨틀에서 Fe²⁺의 산화작용은 광물/암석-유체(fluids)의 상호작용으로 인해 광물/암석의 화학조성이 광역적 또는 국부적으로 변화되어 암석의 재평형을 유발하는 과정(예, 변

성 교대작용과 열수 변질작용)의 일부이다. 따라서, 지표환경에서 다양한 암석에서 산화-환원 반응으로 생성되는 자연 수소가 발생할 수 있으며, 자연 수소의 함량은 (1) 모암의 광물화학 조성에 따른 2차 광물의 종류, (2) 유체의 화학조성, (3) Fe^{3+} 와 Fe^{2+} 의 분포 등에 따라 차이를 갖는다.

자연 수소는 자유 기체(51%), 다양한 광물 내의 유체포유물(29%), 지하수의 용존기체(20%) 형태로 존재한다. 최근 자연 수소를 연구/탐사하는 국외 연구자들과 산업체들은 가까운 미래에 자연 수소가 깨끗하고 재생 가능한 획기적인 에너지원 역할을 할 것으로 전망하고 있다. 우리나라의 경우, 자연 수소의 부존 가능성은 아직 판단하기 어려운 상황이다. 그러나 대륙 연변부에서 빈번한 마그마 활동으로 수반되는 접촉변성작용과 열수 변질작용을 겪은 한반도의 지질은 자연 수소의 생성과 부존 가능성을 증가시킬 수 있다. 경상분지의 경우, 초고철질암의 존재 그리고 페름기-제3기 동안 광범위한 마그마의 관입/분출은 분지 퇴적물의 숙성작용과 접촉 변성작용을 광범위한 지역에서 발생시켰을 뿐만 아니라, 자연 수소의 수직적 확산 속도를 감소시키는 덮개암 또는 준대수층(aquitards)을 형성하는 데 중요한 역할을 하였다. 수소의 특성상, 지하 심부에서 생성된 수소는 부존 기간이 짧지만, 탄화수소와 달리 수소를 생성하는 반응은 현재 진행 상태이기 때문에 지속적으로 자연 수소를 재공급할 수 있다. 결론적으로 우리나라에서 자연 수소의 경제적 활용을 위한 부존지 탐사와 심부에서 암석-유체 상호작용에 관한 통합 연구를 통해 아직 알려지지 않은 자연 수소의 성인과 부존지 탐사는 차세대 핵심 연구임이 분명하다.

충청북도 영동군 동창일라이트의 광물학적·지화학적 특성 연구;
새로운 일라이트 표준시료로서의 가능성 고찰
Study of Dongchang Illite from Yeongdong, Chungcheongbuk-do:
Candidate for a new potential source clay

이남구(Namgu Lee)¹·박한범(Hanbeom Park)¹·성세제(Sei Jei Seong)²·
한동훈(Dong Heun Han)²·김화진(Hwa jin Kim)²·김진욱(Jinwook Kim)^{1*}

¹연세대학교 지구시스템학과

²영동군청 경제과

*교신저자: jinwook@yonsei.ac.kr

일라이트는 전 지구상에 널리 분포하며, 다양한 산업 분야에서의 활용성이 높은 점토광물이다. 충청북도 영동군에 위치한 일라이트 광맥은 운모 편암의 열수변질에 의해 생성되었으며, 가장 큰 일라이트 광맥 중 한 곳으로 알려져 있다. 그 매장량은 5억 톤가량으로 추정되어, 새로운 일라이트 표준시료 후보로서 매우 높은 가능성을 보여준다. 동창일라이트의 광물학적·지화학적 특성을 규명하기 위하여 원심분리와 동결건조를 통해 다섯 종류의 입도(Bulk, >2 μm , 0.5-2 μm , 0.2-0.5 μm , <0.2 μm)로 분리하였으며, X-선 회절분석(XRD)과 주사전자현미경분석(SEM), 투과전자현미경분석(TEM)을 통해 광물조성과 일라이트 결정도, 개별 일라이트 입자의 크기를 측정하였다. 동창일라이트 Bulk 시료에서는 석영의 분포가 확인되었지만 2 μm 이하 입도에서는 관찰되지 않았으며, 일라이트가 우세하게 분포하는 것을 확인하였다. 동창일라이트는 2M₁ 폴리타입과 높은 Al/Si 함량비(0.6059) 및 K 함량(1.15 wt.%)을 보였으며, 영동군 내 다른 광산인 용궁일라이트(2M₁ 또는 1M, Al/Si = 0.5327, K 함량 = 0.71 wt.%)와 차이가 관찰되었다. 이러한 차이는 두 광산의 열수변질 정도에 의한 것으로 추측된다. 추가적으로, 전자현미분석(EPMA)을 통해 동창일라이트의 결정구조식을 계산하며, 푸리에변환적외선분광분석(FTIR)을 통해 X-선 회절분석에서 검출되지 않는 미량의 불순물 분포를 분석할 예정이다.

영동 일라이트 광체와 변질대의 광물학적 특성 비교 연구
Comparative study on mineralogical characteristics of Yeongdong illite ore
and alteration zone

백은지(EunJi Baek)¹·이유나(Yu Na Lee)¹·유병용(Byeongyong Yu)¹·
신동복(Dongbok Shin)^{1,2}·김영석(Youngseuk Keehm)^{1,2}·김현나(Hyun Na Kim)^{1,2*}

¹공주대학교 지질환경과학과

²공주대학교 황해지질환경연구소

세일이나 사암에서 가장 풍부하게 산출되는 일라이트는 장석이나 운모로부터 열수변질에 의해 형성된다(Choo, 2001). 자연계에서 산출되는 일라이트는 여러 광물이 함께 존재하며 산출 위치에 따라 광석의 일라이트 함량 및 품위는 달라질 수 있다. 산업적으로 활용하기 위한 고품위의 일라이트 광체를 개발하기 위해서는 산출 위치에 따른 광석의 광물학적 특성을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 충청북도 영동지역 일라이트 광체 및 변질대를 포함한 다양한 구역에서 일라이트 광석 시료를 채취하여 구역별로 일라이트의 조직과 구성광물 종류 및 함량을 알아보고자 하였다.

본 연구에서 채취한 일라이트 광석을 박편으로 제작하여 편광현미경 분석을 진행한 결과, 일라이트 광체 시료의 경우 일라이트화 작용이 상당히 진행되어 기질의 대부분은 일라이트이고 세립의 석영이 산재되어 나타나는 조직이 특징적으로 나타났다. 반면에 변질대 시료의 경우 석영과 장석이 주를 이루고 있으며, 일라이트는 상대적으로 소량 관찰되었다. 따라서 영동지역 일라이트는 주로 석영과 장석의 열수변질에 의해 형성되었음을 알 수 있다. X-선 회절 분석 결과, 일라이트 광체와 변질대 시료에서 일라이트 및 백운모, 석영, 장석의 회절피크가 관찰되었으나 구성광물 함량의 차이가 나타났다. 일라이트 함량이 증가할수록 장석의 함량이 뚜렷하게 감소하는 경향이 나타났으며 이를 통해 장석의 일라이트화가 일라이트 형성에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. X-선 형광 분석 결과, 일라이트 광체 시료에서는 변질대 시료에 비해 Al_2O_3 , K_2O , L.O.I 값이 더 높게 나타났다. 이는 변질대에서 일라이트 광체로 일라이트화가 진행됨에 따라 나타나는 결과로 생각된다.

본 연구에서는 일라이트 광체 및 변질대 시료의 결과에서 차이가 나타남을 확인하였고 열수가 유입된 단층대에서 멀어질수록 일라이트 함량에 큰 차이가 나타날 수 있으므로 향후 다양한 분야에 일라이트를 효율적으로 활용하기 위해서는 정기적인 평가가 필요하다.

고온, 고압 환경에서의 생지구화학적 일라이트 형성에 대한 회분식 실험 연구
**A batch experimental study on biogenic illitization under high-temperature
and high-pressure condition**

구태희(Tae-hee Koo)¹·Yuki Morono²·Fumio Inagaki³·박한범(Hanbeom Park)¹
·김진욱(Jin-wook Kim)^{1*}

¹연세대학교 지구시스템학과과 생지구화학연구실

²JAMSTEC, Kochi Institute for Core Sample Research

³JAMSTEC, Institute for Marine-Earth Exploration and Engineering; and Tohoku University

고온, 고압 환경을 유지할 수 있는 유압배양기를 활용해 실제 속성작용이 일어나는 고온(80°C -140°C), 고압(55 MPa) 환경에서의 생지구화학적 일라이트 형성에 대해 철 환원도를 중심으로 한 광물학적, 지화학적 특성을 확인하였다. 최근 자연시료에서 미생물의 대사작용에 의해 생지구화학적으로 형성된 일라이트가 보고됨에 따라 고온, 고압 환경에서의 미생물의 역할을 확인하는 것이 중요했음에도 불구하고, 극한 미생물 균주의 까다로운 배양조건 등으로 인해 직접적인 실험과 관찰에 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 유압배양기를 이용한 고온, 고압 미생물 배양이 가능한 일본 JAMSTEC 연구진과의 공동연구를 통해 난카이 해구 지역의 심해저 퇴적물 코어(IODP Exp. 370, Site C0023)의 일부구간(660-855 mbsf)을 대상으로 하여 4개월간의 배양실험을 수행하였고, X-선회절분석, 전자현미경분석 및 습식분석을 적용하였다. 이를 통해 I/S 혼합층 및 조건에 따른 일부 스멕타이트의 구조내 3가철 환원, 환원적 용출 등이 확인되었고, 이것은 기존에 확인된 미생물에 의한 일라이트 형성 과정 촉진에 대한 온도, 압력 범위를 크게 확장한 연구성과이다. 본 발표에서는 이러한 성과를 도출한 유압배양기에 대한 소개와 더불어 고온, 고압에서 일어나는 생지구화학적 일라이트 형성이 가지는 의의에 대한 논의를 통해 일라이트 형성 메커니즘에 대한 이해를 높이고자 한다.

IODP 348항차 난카이 해구 퇴적물 코어 내 유기물이 풍부한 블랙 셰일층에서의
국지적 생물기원 일라이트 형성 연구

Local biogenic illite formation in the organic matter rich black shale; Nankai
Trough sediment core, IODP expedition 348

박한범(Hanbeom Park)¹·양기호(Kiho Yang)^{1,2}·구태희(Tae-hee Koo)¹

·강인성(Insung Kang)¹·Yuzuru Yamamoto³·김진욱(Jinwook Kim)^{1,*}

¹연세대학교 지구시스템과학과

²부산대학교 해양학과

³Department of Planetology, Kobe University

*교신저자: jinwook@yonsei.ac.kr

자연상에서 일어나는 생물체에 의한 스멕타이트-일라이트 상전이 반응은, 고전적 개념의 스멕타이트-일라이트 상전이 반응의 이해와 더불어, 퇴적물 내에서 생물학적으로 이용할 수 있는 철의 공급원 및 심부 생물권에서 미생물 군집의 발전과 진화에 영향을 미치는 중요한 기작으로 연구가 진행되어 오고 있다. 본 연구에서는 온도·압력 조건으로 인한 고전적 개념의 스멕타이트-일라이트 상전이 반응이 아닌, 유기물 및 생명체의 작용을 통한 스멕타이트 구조 내 철의 환원으로 인한 국지적 생물기원 일라이트 형성을 규명하였다. 난카이 해구 퇴적층 내, 동일 온도·압력 조건의 같은 깊이에 분포하는 유기물이 풍부한 블랙 셰일층 및 유기물이 결여된 벤토나이트층에서 일라이트의 분포가 관찰되었으나, 각 층에서 관찰되는 일라이트는 결정 구조, 원소 조성 및 구조 내 철의 산화수 등에서 차이가 나타남을 확인하였다. 동일 깊이에 교호하는 두 퇴적층은, 종속영양 미생물을 통한 3가 철의 환원을 촉진할 수 있는 유기물 함량을 제외한 퇴적층 내 다른 물리·화학적 조건은 거의 동일하며, 유기물의 함량 차이로 인해 두 층에서 관찰되는 일라이트의 서로 다른 특성 차이가 나타나는 것으로 확인하였다. 본 연구의 물리·화학적으로 다른 특성을 보이는 일라이트의 규명을 통하여, 유기물이 풍부한 블랙 셰일층에서 국지적 생물기원 일라이트 형성을 확인하였으며, 본 연구 결과는 앞으로 자연상에서 일어나는 미생물에 의한 스멕타이트-일라이트 상전이 반응을 이해하는 데 있어 새로운 지시자로 활용될 것을 기대한다.

고대 토기 표면 채색부의 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물: 발견 및 기술적 의의

Illite-Smectite Mixed Layer Minerals in surface pigmented layer of the Ancient Earthenware: Discovery and Technical Significance

문동혁(Dong Hyeok Moon^{1,*}·구효진(Hyo Jin Koo)²·김효임(Hyo Im Kim)²
·김소진(So Jin Kim)¹·남상원(Sang Won Nam)³

¹국립문화재연구원 보존과학연구소

²경상국립대학교 지질학과

³문화재청 운영지원과

고대로부터 세라믹 제품의 제작에 사용되는 가장 기본적인 원료인 점토질 토양 내 점토광물의 조성은 토제 유물의 소성지문(firing fingerprint)으로써 높은 잠재성을 가진다. 그럼에도 불구하고, 토기 내 점토광물의 정확한 식별을 위한 기초적 접근방법인 점토입자 분별시편에 대한 연구는 지금까지 활발히 수행되지 않았다. 본 연구는 대한민국 서울에 위치한 고대 백제 유적지 출토토기 표면의 유색 점토층(pigmented slip)에서 채집한 점토입자의 방향성 시편을 X-선 회절분석(XRD)하였다. 그 결과, 원암의 분말시료에 대한 XRD결과에서 확인되었던 일라이트 외에, 소성 과정에서 소멸되지 않은 카올린 및 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물 등의 존재가 추가적으로 확인되었다. 이들은 각각 550 °C 미만과 750 °C 미만의 온도를 지시하는 소성지문으로 활용될 수 있으며, 특히 일라이트-스멕타이트 혼합층 광물의 경우 일라이트 구조 내 잔류한 팽창성층(expandable layer)의 재수산화(rehydroxylation)에 의하여 형성된 것으로 판단된다. 따라서 점토입자 분리시편을 통한 세부적인 점토광물조성의 검토 및 재확인인 기존의 원암분말시편 XRD결과에서 검출된 일라이트의 존재만으로 제시할 수 있는 550~900 °C의 다소 광범위한 소성온도 추정범위를 세분화 및 재평가할 수 있게 한다. 이와 같이 본 연구에 적용된 미량의 점토광물 식별방법은 숨겨진 소성온도 추정 인자로서 활용 가능하므로 추후 점토질 원료로 제작된 다양한 유형의 토제유물에 대한 적용확대가 기대된다.

남대서양 중앙해령 횡단 퇴적물 점토광물을 이용한
고기후 및 기원지 변동 추정

Estimating Paleoclimate and Provenance Variations using Clay Minerals in
the South Atlantic Transect Sediments

김수현(Su-Hyun Kim)¹·박찬우(Chanwoo Park)¹·박규영(Kyuyoung Park)¹·양기호(Kiho Yang)^{1,2*}

¹부산대학교 해양학과

²부산대학교 해양연구소

IODP 390항차를 통해 획득된 남대서양 퇴적물을 이용하여 고퇴적환경을 복원하기 위해 광물학적 분석을 진행하였다. 선행 고기후 연구는 대부분 특정 정점 혹은 남북 즉 위도 별 변동에 초점을 맞추어 연구가 진행되었으나 경도 별 변동에 관한 연구는 수행되지 않았다. 퇴적물을 구성하는 점토광물은 형성 환경과 기원지 특성을 반영하므로 고환경 프록시로서 사용되며 이는 전지구적 기후 후 변동을 반영할 것으로 사료된다. 또한 대서양은 태평양에 비해 탄산염질 퇴적물이 잘 보존되어 있으며 육상 유입도 많은 해역이므로 육상과 해양 환경 변화 모두를 추정할 수 있을 것이다. 퇴적물 분석을 수행한 결과 퇴적물은 크게 탄산염이 풍부한 ooze chalk와 점토가 풍부한 silt clay 두 가지 유형으로 구분되었다. Silt clay는 석영이 가장 우세하였고 ooze chalk는 탄산염이 가장 우세하게 나타나는 광물학적 구성을 보였으며 수심에 따른 광물 구성의 변동을 보이지는 않았다. 그러나 점토광물은 모든 시료에서 공통적으로 나타났지만 XRD 패턴 피크 변동을 보인 것으로 보아 점토광물 유입 변동이 있었던 것으로 추정된다. 점토광물 함량을 살펴보았을 때, 스�멕타이트와 일라이트는 정반대의 관계성을 보이며 큰 변동성을 보인 반면, 클로라이트와 카올리나이트는 유사한 관계성을 보이며 현재로 올수록 증가하는 경향을 보였다. 이에 따라 점토광물은 기후 변동보다는 기원지 변동을 반영한 것으로 보이며 유입 당시 우세한 유입 기작 (해류, 바람 등)에 의해 분포 양상이 달라졌을 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 점토광물을 통해 기원지 및 유입 기작을 복원하고 더 나아가 주요 신생대 기후 변동과의 연관성을 살펴보고자 한다. 이를 통해 고해상도의 고퇴적환경 복원이 가능할 것으로 보이며 향후 다양한 연구 분야와의 연계를 통해 다양한 연구 및 해석 가능성을 제시할 수 있다.

지구/행성 내부의 깊은 low-z 원소분배의 미시적 기원 Deep Low-z Element Cycles in Planetary Interiors

이성근 (Sung Keun Lee)^{1,*}

¹서울대학교 지구환경과학부

지구나 기타 거대외계행성을 구성하는 물질들은 압력-온도 등의 열역학적 조건과 생물학적 요인을 포함한 생성환경의 reciprocal 한 상호관계에 의하여, 다양한 지구-행성 시스템의 다양한 진화역사의 기록을 보유하고 있습니다. 특히, 주기율표상에서 상대적으로 원자번호가 작은 원소(low-z elements)들로 이루어진 물질들이나, 이들이 함유된 다양한 행성물질들의 자세한 원자-전자 구조들의 규명을 통하여 행성내부의 원소분배나, 이들의 분포를 결정하는 다양한 행성시스템의 과정들에 대한 실마리를 구할 수 있습니다. 물질 연구에 광범위하게 이용되는 x-선 회절과 같은 탄성 x-선을 이용한 경우, 전자의 수가 적은 low-z 원소들의 거동을 규명하는 것이 상대적으로 용이하지 않습니다. 이러한 한계로 인하여, 중요성에도 불구하고, 행성물질의 Low-z 원소에 대한 정보가 상대적으로 제한적입니다. 본 발표자의 연구실에서는 이러한 low-z 원소의 구조 연구에 특화된 실험방법론 [예, 핵자기 공명 분광분석 (NMR)과 비탄성 X선 산란(IXS)]과 양자계산을 포함한 이론적 방법론들을 이용하여, 다양한 지구-행성물질(결정질-비정질)의 기존에 알려지지 않았던 지표와 행성내부의 극한환경에서의 low-z 원소들의 거동을 규명하고 있습니다. 특히, 획득한 원자단위의 정보를 바탕으로 극한환경에서의 low-z 원소를 포함한 비정질 마그마의 구조와 동위원소조성의 변화의 미시적 원인을 보고하였습니다 (1-3). 본 발표에서는 극한 환경에서 원자 구조 - 물질의 성질 - 지질/행성 시스템의 과정들의 연관성을 정립한 최근의 연구결과들을 중심으로, 극한환경 하의 마그마의 지진파의 전달속도의 감소, 지구맨틀의 결정질 비정질 규산염의 수소-물 치환 기작의 규명을 통한 맨틀의 동력학적 성질의 변화, 그리고, 수백만 기압이상의 극한 고압에서의 탄소로 구성된 행성의 진화과정을 토의합니다 (4).

- 1) Kim, E. J., Fei, Y., and Lee, S. K., *Geochimica et Cosmochimica Acta* 224 327-343 (2018)
- 2) Lee, A. C., Kim, E. J., Lee, S. K., *Geochimica et Cosmochimica Acta* 332 220-238 (2022)
- 3) Lee, J., Lee, S. K., *Acta Materialia* 241 118413 (2022)
- 4) Lee, S. K., Yi, Y., Kim, Y., Kim, H., Chow, P., Xiao, Y., Eng, P., Shen, G., *Science Advances* 9 eadg4159 (2023)

Naturally Occurring Microbe–Clay mineral Interaction

김진욱(Jin-wook Kim)^{1,*}

¹연세대학교 지구시스템과학과 생지구화학연구소

The naturally occurring microbial interaction with clay mineral is a consequence of a bacterial survival and growth strategy. Particularly, this reaction may control the smectite-to-illite transformation, source of bioavailable iron in the sediments, and evolution of microbial community in the deep biosphere. In the present study, role of microbial activity in the modification of clay minerals (e.g., mineral transformation and physico-chemical properties) in the extreme environments including cryospheric region contrast with a deep burial diagenetic setting will be presented.

라만 분광분석을 이용한 북극해 망가니즈 단괴 내
산화망가니즈 광물의 공간적 분포 규명

Spatial distribution of manganese oxide minerals in the natural
ferromanganese nodule of the Arctic Sea: A view from Raman spectroscopy

김효임(Hyo-Im Kim)^{1,*}·조현구(Hyen Goo Cho)¹·이상미(Sangmi Lee)¹·구효진(Hyo Jin Koo)¹
·홍종국(Jong Kuk Hong)²·진영근(Young Keun Jin)²

¹경상국립대학교 지질학과

²한국해양과학기술원 부설 극지연구소

자연계에서 산출되는 망가니즈 단괴 내 다양한 산화망가니즈 광물(예, 토도로카이트, 버네사이트 등)의 공간 분포를 연구하는 것은 단괴의 형성 과정 및 이와 관련된 지구화학적 조건의 변화를 이해하는데 필수적이다. 본 연구에서는 북극해 중 동시베리아해에서 산출되는 구형의 망가니즈 단괴를 연구의 대상으로 삼아, 마이크로 라만 분광분석을 이용하여 단괴의 성장에 따른 구성 광물의 변화 양상을 관찰한 결과를 제시하였다[1]. 라만 분광분석은 산화망가니즈 광물의 구조 분석에 최적화된 실험 조건으로 구형의 망가니즈 단괴를 절단하여 관찰되는 동심원상의 절단면에서 중앙으로부터 가장자리까지 약 100 μm 단위로 스펙트럼 수집 위치를 이동하며 수행되었다. 단괴의 중심에서 얻은 라만 스펙트럼에서는 대표적인 터널형 광물인 토도로카이트의 특징적인 라만 밴드인 ~ 733 , ~ 508 , $\sim 240 \text{ cm}^{-1}$ 신호가 선명하게 관찰되었다. 반면, 스펙트럼 수집 위치가 중심부에서 가장자리로 멀어짐에 따라 토도로카이트를 지시하는 라만 신호는 감소하는 반면, 층상의 산화망가니즈 광물인 버네사이트를 지시하는 $\sim 588 \text{ cm}^{-1}$ 신호는 증가한다. 이는 단괴의 중심부에서는 토도로카이트가 우세하며 성장에 따라 이 비율이 지속적으로 감소함을 보여준다. 이 양상의 체계적으로 관찰하기 위하여 토도로카이트의 존재를 직접적으로 지시하는 $\sim 733 \text{ cm}^{-1}$ 의 신호 강도(I_{733})를 반정량적으로 측정하였다. 단괴의 중심에서 I_{733} 은 약 ~ 0.7 이고, 단괴의 중심으로부터 약 7500 μm 까지 신호 획득 위치가 옮겨감에 따라 ~ 0.7 에서 ~ 0.2 로 명확히 감소하는 양상을 보여준다. 이는 단괴 내 상대적인 토도로카이트 비율이 단괴의 성장에 따라 크게 감소한다는 것을 나타낸다. 이 연구결과는 북극해 망가니즈 단괴 내 산화망가니즈 광물의 고해상도 공간 분포의 이해를 가능하게 함으로써 단괴 성장에 따른 지속적인 환경 조건에 변화가 수반되었음을 시사한다.

[1] Kim, H. I., Cho, H. G., Lee, S., Koo, H. J., Hong, J. K., & Jin, Y. K. (2023). Spatial distribution of manganese oxide minerals in the natural ferromanganese nodule of the Arctic Sea: A view from Raman spectroscopy. *Chemical Geology*, 623, 121398.

《<< 구두발표 한국암석학회 >>》



- 동위원소 및 지질연대 데이터베이스 구축과 데이터 공유와 재사용을 위한 애플리케이션 개발

양수민, 김정민, 김승섭
- 전자현미분석기를 이용한 달의 저어코놀라이트 연대 측정

박창근, 김화영
- 변형된 녹렴석 청색편암의 변형미구조 및 지진파 특성과 따뜻한 섭입대에서의 지진파 속도 및 이방성에 대한 의의

박용
- Lattice-preferred orientation (LPO) of olivine and amphibole in amphibole peridotites and neighboring hornblendites from Gapyeong, South Korea and implications for seismic anisotropy

이재석, 정해명
- 영남육괴 청송지역 석회질규산염암의 석영, 석류석의 미구조와 변형기작에 대한 연구

한석영, 강지훈, 정해명
- 화산암상 분석을 통한 제4기 한탄강 현무암 지대의 물리 화산학적 특성 및 분출 과정 연구

강동혁, 우주선, 길여우
- 공주단층계의 공주분지 북동부 공주 청룡리 일대의 활성단층: 청룡리단층

류충렬, 김창민, 김태형, 이호일, 이태호, 최이레, 김동은, 배한경, 최진혁
- 2017 포항지진(Mw 5.4) 동시성 지표변형의 특성

강지훈
- 공동특별강연 : 무기 자연 수소의 성인과 부존 가능성

김형수
- 미얀마 깔레이미요 오피올라이트의 친철성 원소 거동: 부분용융과 맨틀-용융체 상호반응의 영향

김봉주, 박정우, 박규승, 박규찬, 허철호
- 영남육괴 산청 회장암 내 석류석-사방휘석 백립암질 포획암의 (초)고온 변성작용과 준등압냉각

이유영, 조문섭, 김정민, 정연중
- Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of Triassic plutons in the eastern Gyeonggi Massif, Korean Peninsula: Magma genesis and geodynamic implications for East Asia

오창환, 가와구찌 겐타, 정지완
- 한반도 남부 맨틀기원 화강암의 Eu동위원소 조성의 지구화학적 의의

이승구, 고경태, 송교영, 홍발, 기원서, 이병춘
- “옥천층” 명명 100주년을 기리며: 경기외연대와 지구조-층서

조문섭
- 화산호 맨틀의 Nd 및 Hf 동위원소

Hongda Hao, 박정우
- 제주도 현무암류 내 감람석의 산소 동위원소 성분으로 유추한 근원맨틀의 특성 (예비연구)

김지인, 최성희
- 우리나라 신생대 현무암의 비활성 기체 지화학 연구

이현우
- 남극 북빅토리아랜드 윌슨 암체의 광역 변성작용: 변성시기, 잠재적 열원, 쌍변성대의 형성

김윤섭, 한기운, 김태환, 김태훈, 이유영
- 남극 북빅토리아랜드의 캄브리아기 고압 변성작용

김태환

동위원소 및 지질연대 데이터베이스 구축과 데이터 공유와 재사용을 위한 애플리케이션 개발

Development of Isotope and Geochronology Database and
Application for Data Sharing and Reusability

양수민(Sumin Yang)¹²·김정민(Jeongmin Kim)¹·김승섭(Seung-Sep Kim)²³

¹한국기초과학지원연구원

²충남대학교 우주·지질학과

³충남대학교 지질환경과학과

1. 서언

과학 기술 발달에 따른 데이터의 양과 복잡성 그리고 데이터 처리 속도의 증가로 연구자의 데이터 크기와 범위에 대한 의존이 증가하고 있다. 지질학에서 데이터 수집에 많은 시간과 예산이 소요되며, 한 번 손실된 데이터를 다시 얻기 어렵기 때문에 데이터의 수집, 저장 및 공유가 중요하다. 또한, 자연 현상을 관찰하는 첫 번째 패러다임인 실험 과학에서 시작하여 이론과학과 계산 과학을 거쳐 오늘날 데이터 중심의 과학이라는 네 번째 패러다임에 이르렀다. 이에, 수집된 정보를 컴퓨터가 처리할 수 있는 형태로 변형하는 데이터 캡처와 필요한 데이터를 식별하는 큐레이션 그리고 데이터 분석이 연구를 진행하는데 중요한 요소가 되었다. 국외에서는 연구자 간의 데이터 공유를 위한 다양한 플랫폼이 개발되어있다. 대표적으로 EarthChem은 지구화학, 광물학 그리고 암석학 데이터를 문헌과 분석 시료에 따라 제공해주는 플랫폼으로 데이터의 보존과 검색 등의 서비스를 제공한다. 국내에서도 유관기관 간의 연구데이터 검색, 공유, 관리 등을 서비스하고 오픈 API를 통해 메타정보 조화가 가능한 플랫폼이 개발되었다. 그러나 동위원소 및 지질연대 데이터의 경우, 데이터의 부족과 재사용 및 재가공의 어려움 등의 문제가 존재한다. 동위원소 및 지질연대 데이터는 암석에 기록된 지질학적 사건의 해석을 용이하게 하고 지구물리학, 암석학 등 지질학의 기초자료로 활용되기 때문에 데이터베이스를 구축하여 데이터를 관리하고 공유하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 동위원소 및 지질연대 데이터를 관리하고 공유하기 위한 관계형 데이터베이스를 구축하고 오픈소스 기반의 웹 애플리케이션을 구축하여 데이터의 접근성과 재사용성을 향상 시키고자 한다. 또한, 한국기초과학지원연구원(이하 KBSI)에서 개발 중인 동위원소 및 연대측정 공동활용 홈페이지를 고도화하여 모바일 서비스를 제공하고, 현재 서비스되고 있는 데이터 외에 지속적으로 획득되고 있는 데이터에 대해 데이터베이스를 추가 구축하여 연구자에게 다양한 데이터 및 서비스를 제공하고자 한다.

2. 동위원소 및 지질연대 데이터베이스 구축 및 시각화

데이터베이스의 구축을 위하여 문헌과 분석 시료 그리고 지질연대와 연대를 도출하기 위해 사용된 분석 결과값에 대한 인자 분석을 실시하였다.

1) 문헌의 경우, 일반적으로 제목, 저자, 저널명과 게재일, 권, 호, 페이지 및 DOI로 구성되어있다. 그러나 일부 오래된 문헌의 경우 DOI 정보가 제공되지 않을 수 있으므로, 본 연구에서는 URL 인자를 추가하여 사용자의 접근성을 높이고자 하였다. 이에 따라, 제목, 저자, 저널명, 게재일, 권, 호, 페이지, DOI, URL의 9가지 인자를 문헌에 대한 인자로 정의하였다.

2) 분석 시료의 경우, 분석 시료명과 샘플 취득 위치 정보 및 암석 종류가 포함되어있다. 따라

서 본 연구에서는 분석 시료명, 위도, 경도, 암석 종류와 이름의 5가지를 분석 시료에 대한 인자로 정의하였다.

3) 지질연대의 경우, 하나의 분석시료에 여러 연대가 존재할 수 있지만, 본 연구에서는 가장 오래된 연대를 기준으로 정보를 제공하였으며, 지질 시대(Era, Period, Epoch)를 결정하였다. 따라서 연대, 최솟값, 최댓값, Era, Period, Epoch의 6가지 인자를 지질연대에 대한 인자로 정의하였다.

4) 지질연대 도출에 사용된 분석 방법별 분석 결과값의 인자는 규칙이 정해져 있지 않았으며, 문헌의 형식에 따라 다양한 인자가 사용되었다. 따라서 사용된 모든 인자를 분석 결과값에 대한 인자로 정의하였다.

인자 분석 결과를 기반으로 동위원소 및 지질연대 데이터를 저장하고 관리하기 위해 4개의 테이블을 정의하였고(Reference, Sample, Age, Analysis Result), 각각의 정보를 식별할 수 있는 중복성 없는 키를 통해 관계형 데이터베이스를 구축하였다(그림 1).

그림 125. 동위원소 및 지질연대 데이터의 인자 분석 결과를 기반으로 구축된 관계형 데이터베이스

정의한 키는 각 테이블 내에서 굵은 글씨로 확인할 수 있으며, Analysis Result Table의 키인 ID는 RefID, Sample_seq, Method_cd의 조합으로 이를 통해 Age Table에 접근한다. 이러한 데이터베이스 구조는 새로운 분석법에 따른 지질연대 데이터가 추가될 때, 기존의 구조 변경 없이 Analysis Result Table에 새로운 인자만 추가하면 된다는 장점이 있다. 데이터 전처리와 시각화를 위하여 패키지를 사용하여 간단한 코드로 데이터 전처리가 가능한 프로그래밍 언어 R과 HTML, CSS로 개발하는 애플리케이션과 동등하게 구현이 가능한 Shiny 패키지를 사용하였다. Shiny 패키지는 자바스크립트와 HTML 위젯 등을 사용하여 확장 가능하며, 오픈소스 기반으로 개발되어 재사용 및 재가공이 가능하다.

3. Web Application

3-1. CHIP(geoCHronology Interactive Personal database)

R Shiny 기반의 애플리케이션 CHIP은 GPLv3 라이선스에 따라 Github (<https://github.com/CNUGeophysics/chip>)을 통해 소스 코드와 데이터베이스를 제공하고 있으며, runCHIP.R을 통해 구동 가능하다.



그림 33-(a). U-Pb 분석 방법에 따른 문헌, 분석 시료, 분석 결과값 데이터를 보여주는 CHIP



그림 2-(b). 지질연대와 분석 방법에 따른 데이터를 지도의 형식으로 보여주는 CHIP



그림 2-(c). 데이터를 추가를 위한 중복성 평가



그림 2-(d). 추가된 데이터 자동 동기화

그림 2-(a)는 U-Pb 분석 방법을 사용한 문헌과 해당 문헌에서 사용된 분석 시료와 분석 결과값을 보여준다. CHIP은 7가지의 분석 방법에 따른 문헌 정보를 제공할 뿐만 아니라 지질연대에 따라 제공하기도 하며, 지도의 형태로 데이터를 제공하기도 한다(그림 2-(b)). 앞서 언급한 데이터들은 연구자가 다운로드 받을 수 있게 하여 데이터의 재사용성과 재가공성을 높이고자 하였다. 또한, 데이터베이스의 확장성을 향상시키기 위해 CHIP에서 제공하는 매뉴얼과 템플릿을 활용하여 사용자가 중복성 평가를 거쳐 연구데이터를 추가할 수 있는 기능을 탑재하였다(그림 2-(c)). 추가된 데이터는 자동으로 동기화되어 즉시 확인할 수 있으며(그림 2-(d)), 추가된 데이터는 기존의 데이터베이스와 분리하여 수집 및 관리된다.

3-2. 한국형 동위원소 빅데이터 활용 플랫폼

KBSI에서 2022년도 한국형 동위원소 빅데이터 활용 플랫폼 프로토타입을 개발완료하고, 2023년 현재 자료 보강 및 고도화 작업을 수행중이다(그림 3-(a)). 해당 플랫폼은 분석 방법, 지질연대 및 저널과 논문에 따라 분석 시료 데이터를 서비스하고 있으며(그림 3-(b)), 해당 분석 시료의 위치 정보, 지질연대, 논문 정보 등을 확인할 수 있다(그림 3-(c)). 또한, 지도 정보와 결합된 동위원소 분석 자료의 시각화를 위해 지도의 형식으로 데이터를 서비스하고 있다(그림 3-(d)).



그림 34-(a). 한국형 동위원소 빅데이터 활용 플랫폼

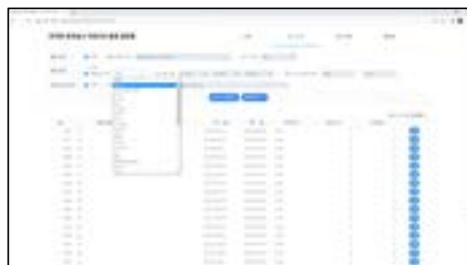


그림 3-(b). 분석 방법에 따른 분석 시료 데이터

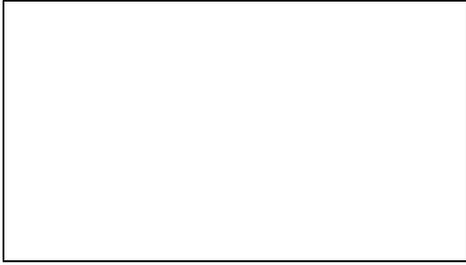


그림 3-(c). 분석 시료 데이터 상세 페이지



그림 3-(d). 추가된 데이터 자동 동기화

4. 향후 계획

Opencitation API를 활용하여 게재된 논문을 기준으로 데이터를 추가하는 기능 외에도 KBSI에서 자체적으로 생산/취득한 데이터를 추가하는 기능을 탑재하고자 한다. 더 나아가 IsoplotR을 활용하여 Ar-Ar, Rb-Sr, U-Pb 등의 분석법에 따른 그래프를 생성하는 기능을 추가하여, 생성된 그래프를 통해 필요한 자료인지 판단할 수 있도록 하고자 한다. 마지막으로, 모바일 홈페이지를 개발하여 이용자의 편의성 제고와 데이터 활용을 촉진하고자 한다.

전자현미분석기를 이용한 달의 저어코놀라이트 연대 측정

Lunar Zirconolite Dating using EPMA

박창근(Changkun Park)^{1*}·김화영(Hwayoung Kim)¹

¹극지연구소 지권연구본부

저어코놀라이트(zirconolite; $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$)는 달의 현무암과 화강암에서 발견되는 보조 광물로서, U, Th, Pb이 포함되어 있어 연대 측정에 활용 가능하다^[1-5]. 월석이나 달운석에서 산출되는 저어코놀라이트는 일반적으로 약 1-2 μm 의 좁은 폭을 가진 바늘 모양의 형태를 보이기 때문에 이차이온질량분석기를 이용한 일반적인 이연대측정 분석법을 사용하기가 까다롭다. 이러한 한계를 극복하기 위해 저어코놀라이트 연대 측정에는 공간 분해능이 좋은 전자현미분석기(15 keV 가속 전압에서 $\sim 1 \mu\text{m}$)를 사용하려는 시도가 있어 왔다. 그러나 전자현미분석기를 사용한 화학 연대 측정의 정밀도는 이차이온질량분석기 정밀도에 비해 좋지 못한 단점이 있다. 최근 전자현미분석기를 이용한 미량 원소 분석의 발전은 저어코놀라이트 연대 측정에서 더 높은 정밀도를 달성할 수 있는 가능성을 보여 주고 있다. 본 연구에서는 전자 현미분석기의 MAN(평균 원자 번호) 배경 보정법^[6]을 이용하여 달 화강암편의 저어코놀라이트 연대측정법과 그 결과를 제시한다.

극지연구소 2012년 남극에서 발견한 달운석 DEW 12007에 있는 화강암질 암편이 있는 박편을 연구하였다. K-장석, 실리카, 철감람석이 주 구성 광물이고, 저어콘, 바텔리아이트, 저어코놀라이트, 트랜퀼리티이트(tranquillityite), 인회석 등의 보조 광물로 구성되어 있다. 저어코놀라이트는 길이가 최대 100 μm 에 이르는 얇은 바늘 모양의 형태($< 2\mu\text{m}$)를 보인다. 광물 화학 조성 분석은 극지연구소의 전계방출 전자현미분석기(FE-EPMA; JEOL JXA-8530F)를 사용하여 분석했다. 분석 조건은 가속 전압 15kV, 빔 전류 100nA, 빔 크기는 표준물질 3 μm , 저어코놀라이트 1 μm 로 설정했다. 데이터 정밀도를 높이고 분석 시간을 줄이기 위해 Probe for EPMA(PfE) MAN 배경 보정 및 블랭크 보정 방법을 사용했다. 분석 시간은 Ti와 Zr의 경우 20초, Ca와 Fe의 경우 40초, Si, Al, Y의 경우 100초, Ce, Cr, Mn, Mg, Nd, Sm, Dy, Ho, Er, Yb, Hf, Nb의 경우 200초, Gd와 Tb의 경우 300초, Th와 Sc의 경우 400초, Tm과 Pr의 경우 600초, La의 경우 700초, Eu의 경우 800초, U, Pb, Lu, Ta의 경우 1000초가 소요되었다. 이 조건에서 U, Th 및 Pb의 검출 한계는 각각 30ppm, 40ppm 및 30ppm이며, 저어코놀라이트의 미량 원소 농도를 정확하게 측정하기 위해 91500 지어콘 표준 시료의 알려진 미량원소 농도를 보정을 하였다.

화강암 암편의 저어코놀라이트는 U, Th, Pb의 평균 농도가 각각 3402ppm, 13307ppm, 7570ppm으로 분석되었으며, 보통 납이 없다고 가정하고 이들 농도로부터 계산^[7]한 저어코놀라이트의 결정화 연대는 4404 ± 120 (2σ) Ma이다. 이 화학적 연대는 SHRIMP로 분석한 같은 암편내 저어콘의 Pb-Pb 연대(4340.9 ± 7.5 (2σ) Ma)^[8]와 일치한다. 이 연구에서 달성한 정밀도는 기존 연구에서 전자현미분석기로 측정한 달 저어코놀라이트의 화학 연대에 비해 크게 향상되었지만 여전히 이차이온질량분석기로 분석한 연대의 정밀도 보다는 크게 떨어진다. 하지만 전자현미분석은 비파괴 분석이고 빔 크기가 매우 작기 때문에 더 많은 반복 분석이 가능해 정밀도를 향상시킬 수 있다. 따라서 이러한 화학 연대 측정법은 외계 물질, 특히 달과 화성에서 돌아온 시료에 포함된 미세한 U-Th-Pb 함유 광물에도 적용될 수 있을 것이다.

Proceedings of the Annual Joint Conference,

the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,
June 22-23, 2023, Korea

<달의 DEW 12007의 화강암질 암편의 Zr, Ca, Ti를 각각 적색, 녹색, 청색으로 합성한
이미지(좌)와 저어코날라이트의 후방산란전자 이미지(우).>

<참고문헌>

- [1] Wark D. et al. 1973. 4th Lunar Planet. Sci. Conf. pp. 764-766.
- [2] Rasmussen B. et al. 2008. Geochim. Cos-mochim. Acta 72, 5799-5818.
- [3] Wang N. et al. 2021. Progress in Earth and Planetary Science 8, 51.
- [4] Seddio S. et al. 2013. Am. Mineral 98, 1697-1713.
- [5] Rasmussen B. & Fletcher I. R. 2004. Geology 32(9):785-788
- [6] Donovan J. J. & Tingle T. N. 1996. Microscopy and Microanalysis 2, 1-7.
- [7] Montel J.-M. et al. 1996. Chem. Geol. 131, 37-53.
- [8] Han et al. 2015. abstract #5170, 78th Annual Meeting of the Meteoritical Society

변형된 녹렴석 청색편암의 변형미구조 및 지진파 특성과 따뜻한 섭입대에서의 지진파 속도 및 이방성에 대한 의의

Deformation microstructures and seismic properties of deformed epidote blueschist
and their implications for seismic velocity and anisotropy in warm subduction zones

박 용(Yong Park)^{1,*}

¹서울대학교 기초과학연구원

따뜻한 섭입대에서 섭입하는 판 상부에서의 암석의 변형미구조와 지진파 특성을 이해하기 위하여, 녹렴석 청색편암상의 온도, 압력에서 암석의 단순전단변형실험을 수행하고, 변형된 암석의 지진파 속도 및 이방성을 계산하였다. 실험 시료는 이탈리아 볼트리(voltri) 지역에서 산출된 녹렴석 청색편암으로, 서울대학교 지구환경과학부 지체구조물리학 연구실에 있는 고압고온 암석변형실험기기를 사용하여 0.9–1.5 GPa의 압력과 400–500 °C의 온도에서 전단변형($\dot{\gamma}$)과 전단변형률($\dot{\epsilon}$)이 각각 $\dot{\gamma}=0.4\text{--}4.5$, $\dot{\epsilon}=1.5\times 10^{-5}\text{--}1.8\times 10^{-4}$ s⁻¹인 조건으로 변형되었다. 실험 후에는 전자후방산란회절(electron backscattered diffraction, EBSD) 기법을 이용하여 암석의 주요 구성 광물들의 격자선호방향(lattice preferred orientation, LPO)을 측정하였고, 고해상도 EBSD 기법과 투과전자현미경(HR-TEM)을 이용하여 변형된 광물들의 결정 내 변형미세구조들과 전위(dislocation) 구조들을 관찰하였다. 그리고 실험 후 측정된 주요 구성 광물들의 LPO 데이터와 이전 연구들에서 보고된 각 광물의 탄성강체계수(elastic stiffness coefficient)를 사용하여 변형된 녹렴석 청색편암의 지진파 속도와 이방성을 계산하였다.

변형된 암석의 대표 구성 광물인 남섬석(glaucophane)과 녹렴석(epidote)의 LPO를 측정한 결과, 전단변형 값이 작은 경우($\dot{\gamma}\leq 1$) 변형된 남섬석의 LPO는 [001] 결정축이 전단방향에 아평행한 방향으로 배열되고 (010) 결정면의 극(pole)이 전단면에 거의 수직하게 배열된 양상을 보여준 반면 (Type-1), 전단변형 값이 큰 경우($\dot{\gamma}> 2$)에는 남섬석의 [001] 결정축은 그대로 전단방향에 아평행한 방향으로 배열되나 [100] 결정축이 전단면에 거의 수직하게 배열된 양상을 보여주었다 (Type-2). 변형된 녹렴석은 전단변형 값이 작은 경우($\dot{\gamma}< 2$) LPO가 약하게 형성되었으나, 전단변형 값이 $2<\dot{\gamma}< 4$ 일 때 녹렴석의 (010) 결정면의 극(pole)이 전단방향에 아평행한 방향으로 배열되고 [100] 결정축이 전단면에 거의 수직한 방향으로 배열된 LPO를 보여주었다 (Type-1). 전단변형 값이 $\dot{\gamma}=4.5$ 일 때 변형된 녹렴석의 LPO는 [001] 결정축이 전단방향에 아평행한 방향으로 배열되고, (010) 결정면이 전단면에 거의 평행하게 배열되는 양상을 보여주었다 (Type-2). 변형된 남섬석에서 관찰된 많은 결정 내 변형미세구조들과 전위구조들은 남섬석의 LPO 형성에 있어 결정 내 전위크리프(dislocation creep)가 주요 메커니즘으로 작용하였음을 시사하였고, 이와 동시에 전단변형 값이 클 때 형성된 파쇄유동(cataclastic flow)구조들은 남섬석의 변형 정도에 따라 파쇄유동이 함께 주요 메커니즘으로 작용하였음을 시사하였다. 한편 전단변형 값이 $2<\dot{\gamma}< 4$ 인 녹렴석에서 관찰된 많은 전위구조들과 아결정 경계(subgrain boundary), 변형 쌍정(deformation twin)들은 녹렴석의 Type-1 LPO 형성에 있어 결정 내 전위크리프가 주요 메커니즘으로 작용하였음을 시사하였다. 반면 전단변형 값이 $\dot{\gamma}> 4$ 일 때 HR-TEM으로 관찰되는 수십 나노미터 크기의 결정들에 둘러싸여 있으면서 변형쌍정이 보존된 상대적으로 큰 녹렴석 결정과 FE-SEM으로 관찰되는 파쇄유동 구조들은 녹렴석의 Type-2 LPO 형성에 있어 파쇄유동에 의한 강체 회전(rigid body rotation)이 주요 메커니즘으로 작용하였음을 시사하였다.

변형된 녹렴석 청색편암의 지진파 속도와 이방성을 계산한 결과, P파 평균속도는 7.19–7.63

km/s, S파 평균속도는 4.22-4.47 km/s로 각각 계산되었고, P파의 이방성은 4.5-11.0%, S파의 최대 이방성은 3.91-6.40%로 각각 계산되었다. 변형된 녹렬석 청색편암의 지진파 속도를 섭입하는 판 주변 암석권 맨틀에서의 지진파 속도와 비교하였을 때, P파 평균속도는 약 8-13%, S파 평균속도는 약 6-11% 감소하는 것으로 계산되었고, 이는 녹렬석 청색편암이 섭입대의 슬랩 상부에서 주로 관측되는 지진파 저속도층에 기여할 수 있음을 보여주었다. 또한 섭입하는 해양지각이 녹렬석 청색편암으로만 이루어져 있다는 가정 하에, 섭입각과 암석 구성 광물의 부피 비를 달리하여 해양지각의 S파 지연시간을 계산한 결과, 섭입각과 남섬석의 부피 비가 증가할수록 지연시간이 늘어나는 양상을 보였다. 그리고 섭입하는 해양지각을 구성하는 남섬석과 녹렬석의 LPO 종류와 섭입각을 다르게 하여 S파 이방성을 계산한 결과, 섭입대의 전호지역에서 관측되는 빠른 S파 편파 방향이 남섬석과 녹렬석의 LPO 종류와 섭입하는 판의 섭입각에 따라 해구에 수직한 방향 또는 수평한 방향으로 다르게 나타날 수 있음을 보였다.

변형된 녹렬석 청색편암의 변형미구조 관찰 결과들은 전단변형 값의 크기와 구성 광물들의 유변학적 대비(rheological contrast)가 섭입대에서의 남섬석과 녹렬석의 LPO 형성에 주요한 역할을 할 수 있음을 보여주었다. 또한 변형된 녹렬석 청색편암의 지진파 이방성 계산 결과들은 구성 광물들의 부피 비와 남섬석과 녹렬석의 LPO 종류, 그리고 섭입하는 판의 섭입각 등이 따뜻한 섭입대에서 관측되는 지진파 속도 및 이방성을 결정하는데 주요한 요소가 될 수 있음을 보여주었다.

**Lattice-preferred orientation (LPO) of olivine and amphibole in
amphibole peridotites and neighboring hornblendites from Gapyeong,
South Korea and implications for seismic anisotropy**

이재석(Jaeseok Lee), 정해명(Haemyeong Jung)*
서울대학교 지구환경과학부 지체구조물리학연구실

Amphibole peridotites and neighboring hornblendites are often found in subduction zones. To understand the effect of amphibole-rich rocks on seismic anisotropy in subduction zones, we studied the lattice-preferred orientation (LPO) of olivine and amphibole in amphibole peridotites and neighboring hornblendites in Gapyeong, South Korea. The major minerals of amphibole peridotites were olivine (31-51% in volume), amphibole (28-47%), and orthopyroxene (7-16%). Amphibole in amphibole peridotites showed relatively high SiO₂ and low TiO₂ and Na₂O contents (S-type amphibole), indicating that it was formed under supra-subduction conditions. Amphibole in amphibole peridotites showed the type-I, type-II, and type-IV LPO, whereas amphibole in neighboring hornblendites showed the type-III and type-IV LPO. In the case of olivine, most samples showed a mixture of A- and B-type LPO, and one sample showed a mixture of B- and C-type LPO. Many serpentine inclusions were found in olivines. Fourier-transform infrared (FTIR) analysis of the samples showed that the olivines contained a large amount of water (~29000-45000 ppm H/Si). We also found many dislocations in olivines. These observations indicate that samples showing a mixture of A- and B-type LPO and a mixture of B- and C-type LPO of olivine were deformed under water-rich conditions by dislocation creep. In amphibole peridotites, the P-wave anisotropy of olivine was relatively low, in the range of 0.9-4.8%, whereas the P-wave anisotropy of amphibole was high, in the range of 6.5-17.7%. The maximum S-wave anisotropy of olivine was also relatively low, in the range of 0.87-2.89%, whereas the maximum S-wave anisotropy of amphibole was high, in the range of 3.81-15.19%. In hornblendites, the P-wave anisotropy and the maximum S-wave anisotropy of amphibole was high, in the range of 6.9-13.6% and 4.27-10.61%, respectively. The P-wave anisotropy and maximum S-wave anisotropy of amphibole peridotites was in the range of 2.6-8.4% and 1.73-7.30%, respectively. The seismic velocity and anisotropy pattern of amphibole peridotites were more similar to those of amphibole than those of olivine, indicating that the seismic properties of amphibole peridotites were more strongly affected by amphibole than by olivine. Furthermore, the seismic anisotropy of the mixture of amphibole peridotite and hornblendite in subduction zones was also found to be significantly affected by the amphibole LPO in hornblendite.

영남육괴 청송지역 석회질규산염암의 석영, 석류석의 미구조와 변형기작에 대한 연구

Microstructures and deformation mechanism of quartz and garnet from calc-silicate rocks
in the Cheongsong, Yeongnam Massif

한석영(Seokyoung Han)¹·강지훈(Ji-Hoon Kang)²·정해명(Haemyeong Jung)^{1*}

¹서울대학교 지구환경과학부

²안동대학교 지구환경과학과

석류석은 변성암에서 흔하게 관찰되는 광물이며, 대륙 하부지각이나 섭입판, 맨틀 등을 이루는 다양한 암석에 포함되어 있다. 또한 석영은 상부, 중부 지각을 이루는 거의 모든 암석에서 관찰되는 중요한 구성광물로, 석영과 석류석이 자연적인 환경에서 어떤 변형기작을 통하여 변형되는지를 이해하는 것은 주요 지체구조들을 구성하는 암석들의 유동학적 특성을 파악하는 데 있어 중요하다. 영남육괴 북동부 지역과 백악기 경상분지의 경계에 위치한 청송 지역에서는 선캠브리아기의 편마암과 고생대의 석회질규산염암과 편마암, 각섬암 등이 산출된다. 이들이 이루는 변성복합체는 페름기-트라이아스기 지구조운동과 관련된 화강암체들과 가까이 위치해 있으며, 다양한 단계의 취성, 연성 변형작용과 화강암질 암맥의 관입작용으로 형성된 지질구조가 노두에서 관찰된다. 특히 본 연구지역에서는 석회질규산염암을 구성하는 석류석의 연성변형구조가 노두에서 관찰되며, 함께 산출되는 석영의 미구조 분석 결과와 비교하여 석류석의 변형기작을 이해하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 본 연구에서는 청송 지역에서 산출하는 석회질규산염암과 변성퇴적암을 채취하여, 전계방사 주사전자현미경에 부착된 전자후방산란회절(electron backscattered diffraction, EBSD)분석기를 사용하여 주구성광물의 격자선호방향(lattice preferred orientation, LPO)을 분석하였다. 빠른 분석 속도를 바탕으로 한 EBSD 면분석(mapping)기법은 광학현미경에서 관찰하기 힘든 광물 내부의 미세 변형구조를 자세히 연구할 수 있으며, 또한 전위 크리프(dislocation creep)를 통한 연성변형시 활성화된 슬립계(slip system)를 파악하여 변형작용이 발생한 조건에 대한 정보를 추출할 수 있다.

본 연구에서 분석된 5개의 시료는 암상에 따라 주로 석영과 방해석, 장석으로 이루어져 있으며, 일부 시료에서는 접촉변성작용의 결과물인 규회석, 투회석, 석류석이 관찰되고, 소량의 티탄석, 인회석, 프리나이트(prehnite), 펌펠리석(pumpellyite)이 포함되어 있다. EBSD 분석 결과, 석영의 경우 c축의 분포는 basal<a>, rhomb<a>, prism<a> 슬립계를 주로 지시하였다. 한편, 박편에서 석영 입자가 완전히 동적재결정화작용을 받은 것이 관찰되는 시료들의 경우 prism<c> 슬립계를 보여 주어 비교적 높은 변형온도를 지시하였다. 특히 이 시료들의 EBSD 면분석 결과에서 석류석이 아입자 경계를 보이거나 동적재결정화작용을 받은 모습을 보여 석류석이 전위 크리프에 의한 연성변형을 받았음을 지시하였다. 석류석의 연성변형구조, 석영의 prism<c> 슬립계와 c축 LPO의 큰 열립각을 바탕으로, 석회질규산염암의 변형온도가 비교적 높았던 것(섭씨 600도 이상)으로 추정할 수 있다. 특히 작은 크기의 석류석 입자들에서 네 입자 접합부(four-grain junction)가 관찰되었다. 이는 석류석 입자가 결정립계 미끄럼(grain boundary sliding)에 의해 영향을 받았음을 의미하는 증거이며, 석류석의 입자 크기가 석류석의 연성변형기작을 결정하는 중요한 요소 중 하나임을 지시한다. 추가적인 분석을 통해 석류석과 석영의 변형조건을 특정함으로써 지각과 맨틀 등 암석권을 이루는 주요 지체구조들의 유동학적 특성을 이해하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

화산암상 분석을 통한 제4기 한탄강 현무암 지대의 물리 화산학적 특성 및 분출 과정 연구

Deciphering depositional architecture and emplacement history of Quaternary Hantangang
Basalt in the Hantangang River Volcanic Field through modified facies analysis

강동혁(Donghyeok Kang)¹·우주선(Jusun Woo)¹·길영우(Youngwoo Kil)²

¹서울대학교 지구환경과학부

²전남대학교 에너지자원공학과

1. 서언

한탄강 현무암은 북한의 오리산과 680 m의 무명고지에서 약 51만 년에서 15만 년에 걸쳐 분출해 저지대를 따라 흘렀으며 현재 남한의 철원, 포천, 연천 지역 등에 걸쳐 분포한다. 지금까지 한탄강 현무암의 지화학적, 연대측정 연구는 진행됐지만 물리 화산학적 연구 연구는 상대적으로 부족하다. 현무암에 대한 물리 화산학적 연구는 용암의 종류, 유동학적 특성, 형태, 구조 및 조직을 분석하고 그 특징을 결정짓는 프로세스에 대한 이해를 목표로 한다. 이러한 특징에 대한 이해는 더 큰 구조에서의 현무암의 아키텍처, 정치 과정, 층서 등의 이해로 직결된다.

본 연구에서는 화산암상 분석(volcanic facies analysis)를 통해 한탄강 현무암의 물리 화산학적 특성 및 정치 과정을 이해하고자 한다. 연구지역은 용암대지의 분포에 따라 철원, 포천, 연천 지역으로 나누었고 각 지역에서 나타나는 현무암의 특징에 따라 기재, 분류했다. 본 연구를 통해 한탄강 현무암의 작은 규모에서부터 용암 대지 규모의 물리적 특징에 대한 이해와 더불어 추후 연구될 지화학, 연대측정, 층서 연구에 도움이 될 것으로 기대한다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

본 연구는 범람 현무암의 계층적 구조를 이해하기 위해 도입된 Jerram(2002)과 Single and Jerram(2004)의 화산암상 모델을 일부 수정해 적용했다. 본 연구에서 화산암상(volcanic facies)은 냉각된 경계로 구분 지어지며 개별의 냉각 및 기공 형성 과정을 겪은 용암류 단위를 의미한다. 또한 화산암상을 구성하는 내부 구조, 절리 특성, 기공 구조 등을 화산암 내부상(intrafacies)으로, 성인적으로 연관되어 있는 화산암상을 묶어 화산암상 조합(facies association)으로 정의한다. 현무암 대지 규모에서의 구조를 아키텍처로 기술한다.

야외 지질조사를 통해 한탄강 현무암의 분포를 조사했다. 앞서 설명한 수정된 화산암상 모델을 바탕으로 현무암의 형태, 구조 등이 기재되었고 퇴적체와 퇴적구조 등이 인지되었다. 용암지대의 큰 규모에서의 구조 변화를 관찰하기 위해 총 24개의 지점에서 1:200 스케일의 주상도가 작성되었으며 습득된 사진 자료를 바탕으로 삼차원 노두 모델이 작성되었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 화산암상 분석

화산암상 분석을 통해 작은 용암류(small lobe), 베개 용암(pillow lava), 엽상 용암류(lobate flow), 판상 용암류(sheet flow)의 네 가지의 화산암상이 인지되었다. 작은 용암류는 수십 센티미터에서 수 미터의 두께, 수 미터의 폭과 길이를 가진 용암류 및 이들의 중첩과 병치로 나타난다.

이 화산상은 상대적으로 적은 용암 공급량에 의해 형성되었다. 베개용암은 작은 용암류와 비슷한 규모를 보이지만 수 센티미터의 유리질 외각에 둘러싸여 있으며 내부는 방사상의 절리를 보이는 괴상의 구조로 이루어져 있다. 베개 용암은 판상 용암류 하부에 놓이며 하성 퇴적체와 흔히 교호하는 베개 용암 및 기울어진 형태(foreset)의 베개 용암 두 종류로 분류되었다. 각각의 베개 용암은 용암류가 물속에서 또는 지표에서 물속으로 분출하면서 형성되었다. 위의 두 용암상은 용암대지의 경계 부분 또는 하부에 분포한다. 엽상 용암류는 최대 16 미터, 수십에서 수백 미터의 폭, 수십 미터의 길이를 가진 엽상 형태의 용암류이며 중간 정도에서 높은 용암 공급량 조건에서 형성되었다. 판상 용암류는 최대 36 m의 두께, 수평적으로 넓게 발달한 판상의 용암체로 높은 용암 공급으로 인해 형성되었다. 엽상용암류와 판상용암류는 기공이 발달한 상층부(upper crust), 절리가 발달한 중앙부(core), 하부(lower crust)로 구성되어있다.

3-2. 화산암상 조합

네 개의 화산암상과 다른 퇴적체 및 퇴적 구조를 묶어 FA1: 넓은 분지에 분출한 용암류(wide basin), FA2: 좁은 계곡에 분출한 용암류, FA3: 하성 환경에 분출한 용암류(flow field over fluvial system), FA4: 용암대지 경계부(subaerial upslope margin), FA5: 용암 삼각주(lava delta), 총 다섯 개의 화산암상 조합으로 분류했다. FA1은 작은 용암류, 엽상 용암류, 판상 용암류로 이루어져 있으며 상대적으로 넓은 분지 형태의 철원지역을 채우고 있다. FA2는 주로 판상 용암류로 이루어져 있고 포천지역의 좁은 계곡에 용암이 공급되면서 형성되었다. FA3는 베개용암, 판상 용암류 및 하성 퇴적물과 하성 침식 구조로 이루어져 있다. 이는 용암류가 하성 환경 위에 분출한 것으로 해석되며 주로 연천지역에 분포한다. FA4는 수평으로 놓여 있거나 수직으로 쌓여 있는 엽상 용암류와 작은 용암류로 이루어져 있다. 이는 용암대지의 경계부에서 용암의 공급량이 줄어들면서 형성된 것으로 해석된다. FA5는 기울어진 형태의 베개 용암과 팔라고나이트 기질로 이루어져 있으며 FA4 위에 놓여있다. 이는 이전에 분출한 용암이 하천을 막아 형성된 호수에 분출한 용암으로 생각된다. FA4와 5는 연천지역 한탄강 현무암 대지의 상류 경계면에 분포한다.

3-3. 한탄강 현무암의 기본 층서

철원 지역에서는 크게 두 개의 용암류가 관찰되었다. 이를 각각 층서 유닛(stratigraphic unit) SU1-1과 1-2로 구분했다. 포천 지역에서는 세 개의 용암류에 더불어 계곡 중간에서 기저 한 유닛을 관찰해 총 네 개의 유닛 SU2-1, 2-2, 2-3과 2-4로 구분했다. 연천지역의 현무암은 기존 연구에서 오래된 순서로 전곡과 차탄 현무암으로 분류되었으며 이에 따라 각각 SU3-1과 3-2로 지정했다. 화산암상 분석, 기존의 연대측정 자료와 작성된 주상도를 바탕으로 지역 간의 유닛을 대비했다. SU1-1은 SU2-3으로, SU1-2는 SU2-4로 대비된다. SU2-1은 SU3-1을 형성한 것으로 추정된다. SU2-2, 2-3 과 2-4는 SU3-2를 형성한 것으로 생각되며 이중 가장 부피가 큰 SU2-3이 SU3-2를 형성하는데 더 많은 역할을 했다.

3-4. 한탄강 현무암의 아키텍처 및 정치 과정

철원 지역에 분출한 용암은 분지의 크기에 비해 공급된 양이 적어 하나의 잘 발달된 판상 용암류로 발달하지 못한 채 복합 망상구조(compound-braided architecture)를 이루었다. 이전에 분출한 현무암은 분지 저지대를 채웠고(ponded architecture) 이후 분출한 용암에 의해 현재 지형을 이루었다. 한편, 포천 지역의 좁은 계곡에 정치한 용암류는 잘 발달한 판상 용암류를 형성하며 판상 구조(classic-tabular architecture)를 형성했다. 이후 한탄강의 침식작용으로 현재의 계곡 양쪽

에 현무암이 분포하는 형태(ribbon shape architecture)를 만들었다. 마지막으로 연천 지역에 분출한 현무암은 분출 당시 또는 분출 이후 지속적으로 지표 환경과 상호작용했다. 용암류 하부의 하성 퇴적층, 베개 용암과 침식 구조는 하성 환경과의 상호작용을 의미하며 기울어진 베개 용암과 팔라고나이트 기질은 호성 환경과의 상호작용을 지시한다. 연천 지역 용암대지의 경계부는 지형 및 경사로 인해 용암 공급량이 줄어들며 복합 망상구조(compound-braided architecture)를 이루었다.

Jerram, D.A., 2002. Volcanology and facies architecture of flood basalts. Spec. Pap. Geol. Soc. Am. 362, 119-132.

Single, R.T., Jerram, D.A., 2004. The 3D facies architecture of flood basalt provinces and their internal heterogeneity: Examples from the Palaeogene Skye Lava Field. J. Geol. Soc. London. 161, 911-926.

공주단층계의 공주분지 북동부 공주 청룡리 일대의 활성단층: 청룡리단층

Active Fault in the northeastern part of the Gongju Basin along the Gongju Fault System
around Cheonryong-ri, Gongju, Korea: Cheongryongri Fault

류충렬(Chung-Ryul RYOO)^{1*}·김창민(Chang-Min Kim)¹·김태형(Taehyung Kim)¹·

이호일(Hoil Lee)¹·이태호(Tae-Ho Lee)¹·최이레(Yire Choi)¹·

김동은(Dong-Eun Kim)¹·배한경(Hankyung Bae)¹·최진혁(Jin-Hyuck Choi)¹

¹한국지질자원연구원 지질재해연구본부 활성지구조연구센터

1. 서언

옥천대 남서쪽의 공주에서 세종, 오창과 청주, 증평을 지나 북동쪽으로 음성에 이르는 북북동 방향의 대단층대인 공주단층대 중앙부이자 공주분지의 북동단부 일대에서 제4기의 퇴적층을 자르는 제4기 단층이자 활성단층이 확인되었다. 단층이 발견된 지점은 충남 공주시 의당면 청룡리 101-16 일대 공사장의 북쪽 사면이며, 절개사면은 남북 방향으로 개석 되어져 있다. 이 단층이 확인된 마을의 지명을 따 ‘청룡리단층’이라고 이름하고, 이를 간략히 논의하고자 한다.

2. 청룡리의 활성단층과 논의

공주단층대의 일부에 해당하는 공주분지 북단부의 북서쪽 경계부단층은 북북동 방향으로 달리며, 동쪽의 역암을 주로 하고 응회암질 셰일을 협재하는 중생대 백악기 지층이, 서측의 반상쇄설편마상화강암과 단층 접촉(공주도폭, 1976) 또는 유라기 반상화강암과 단층 접촉(광성도폭, 1974)하는 것으로 기재된 바 있다. 북북동 방향으로 달리는 대상의 공주분지의 북단부는 남-북 방향의 단층(계룡산단층)에 의해 좌수향으로 잘리고 있다(공주도폭, 1976).

공주시 의당면 청룡리에서 확인된 제4기 단층(청룡리단층)은 약 50 m 길이의 남북 방향의 절개사면 북부에 사면에 사교하는 북북동 방향의 주향으로 발달하고 있으며, 미약하게 엽리가 발달하는 화강암질암과 함께 이를 부정합으로 덮고 있는 제4기층을 자르며 발달하고 있다(Fig. 1). 이 단층은 풍화가 심하게 진행된 반상쇄설편마상화강암과 백악기의 엽기성 내지 중성질 암맥 사이의 경계부단층을 따라 발달하며, 북북동 방향의 주향에 거의 수직하거나 동쪽으로 고각도로 경사하는 기반암단층이 제4기층의 퇴적 후에 역단층운동을 수반하는 좌향의 주향이동성운동으로 재활동하여, 서측의 기반암과 이를 부정합으로 덮고 있는 제4기층을 외견상 동측의 기반암이 상반으로 올라탄 양상을 보인다(Fig. 1). 청룡리단층의 단층면 주향은 이 지역에 발달하는 공주단층대의 일반적인 방향인 북북동-남남서 방향과 평행한 주향을 보이고 있다.



Fig. 1. 공주 청룡리 일대에서 확인된 활성단층인 ‘청룡리단층’의 노두 전경. 절개사면은 남북 방향이며, 사진의 왼쪽이 북쪽이다. 북북동-남남서 방향에 고각도를 보이는 단층면을 따라 역단층성 성분을 약간 수반한 좌향의 주향이동성 단층운동의 양상을 보이고 있다. 외견상, 북쪽(사진의 왼쪽)의 기반암인 화강암질암을 부정합으로 덮고 있는 제4기의 미고결퇴적층 상위에 남측의 기반암인 백악기의 암맥이 올라타고 있는 양상을 보여, 남측의 상반이 북으로 이동한 역단층의 형태를 보이고 있다. 스케일용 팽이의 크기는 약 1m 이다.

단층면에서 확인되는 단층조선은 비교적 뚜렷한 최후기의 것으로 보이는 남쪽으로 완만하게 침강하고 있어, 약간의 경사 이동 성분을 포함하는 주향이동성 운동의 존재를 지시하고 있다. 제4기층에서 나타나는 역들의 배열이나 단층면에서의 특징 등을 고려하면, 제4기 동안 좌향의 주향이동성 운동이 있었던 것으로 분석된다.

하반의 기반암 내에는 거의 수직하는 다양한 방향의 단층(대)들과 암맥들이 발달하고 있으며, 제4기 풍화토 내지는 제4기 역층에 의해 부정합으로 덮인 양상을 보인다. 특히, 기반암 내에 거의 수직으로 발달한 암맥들이 지표 근처인 상부에서는 풍화되어 중력에 의해 사면이 경사진 서측 방향으로 토양포행하여 거의 수평에 가까운 자세를 보임이 특징적이다. 이들 토양포행 최하부면 내지는 토양층이 하부의 기반암과 부정합을 이루는 면 위로 이를 자르며 상반으로 기반암이 올라탄 기하를 보이므로, 제4기 단층(또는 활성단층)이 확실시 되고 있다.

청룡리의 제4기 단층의 경우와 같이, 기반암이 풍화암으로 존재하거나 이동량이 크지 않은 상태로 거의 제자리에서 토양화 된 경우, 기반암과 제4기층과의 구분이 모호하여, 제4기 단층으로의 확인이 어려운 점이 있다. 그러나 토양포행화된 층의 존재와 이로부터 연속성을 가지는 면 상위의 층들을 자르며 기반암이 상반으로 단층 접촉을 하는 경우, 제4기 단층으로의 판단에 주요한 한 방편이 될 수 있음을 지시하고 있다. 하반의 부정합면 근처에 발달하는 기반암과 그 내부의 단층대들이 제4기 단층에 의해 드래그된 양상 또한 역단층성운동을 수반한 좌향의 주향이동운동의 존재를 지시하고 있다. 이 지역 일대에 대한 선상구조의 분석 결과, 남-북 방향의 인장대와 이를 유도

한 북북동 방향의 좌향 또는 우향의 주향이동단층들이 제4기에 재활동한 활성단층일 것으로 해석된다. 이 제4기 단층의 외견상의 변위량은 수 십 cm 이내의 변위를 보이거나 좌향의 주향이동성 운동의 결과는 더 큰 변위량으로 계산될 것으로 추정된다. 단층변위량과 단층길이의 관계식들에 의하면, 약 50 cm의 지표변위는 수백 m 내지 수 km의 연장성을 보이며, 지진규모는 규모 6.0 이상에 해당하는 것으로 알려져 있다.

이 청룡리의 활성단층은 공주시 도시지역의 북단부에 위치하고 있고, 관련 단층이나 선상구조가 공주시 중심부(도심지)를 지나는 것으로 분석되어 천년고도이자 학원(교육)도시인 공주시 지진재해의 분석과 대비에 중요한 역할을 할 것으로 보여, 보다 자세한 다양한 조사가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 최근에 공주단층대를 따라 확인된 활성단층인 단층대 북부 음성의 백마령단층(류충렬 외, 2022; 김태영 외, 2023), 중부 청주 근처 외북동의 외북단층(김태형 외, 2023), 세종시 남서부인 장군면 송학리의 단층(김창민 외, 2023), 그리고 최근 확인되어 추가조사중인 감사와 부여 북부의 단층 등과 함께 공주단층대를 따른 행정수도인 세종시와 오창, 청주와 음성, 그리고 공주와 부여 등 여러 도시들의 지진지질재해 대비에 중요한 자료로 활용될 것으로 보인다. 아울러 고구려와의 군사적 요인으로 한강 근처에서 475년부터 백마강 유역에서 시작된 웅진(공주의 백제시대 옛이름)시대가 그로부터 63년 뒤인 538년 사비(부여의 옛이름)로 천도하여 사비시대를 시작하게 된 역사적 사건의 자연재해 가설로 서기 530년대(538년 직전)의 활성단층운동과 이에 따른 지진 활동의 존재 또한 검토해 볼 점으로 제기하고자 한다.

3. 감사의 말

이 연구는 한국지질자원연구원 활성지구조연구센터에서 수행하는 ‘관내부 활성지구조특성 연구 및 단층분절모델 개발’ 과제와 관련된 것임을 밝힌다.

2017 포항지진(Mw 5.4) 동시성 지표변형의 특성

Characteristics of coseismic ground deformations
of the Pohang Earthquake, South Korea

강지훈(Ji-Hoon Kang)¹

¹국립안동대학교 지구환경과학과

2017년 11월 15일 Mw 5.4의 포항지진은 흥해지역 지하 약 4 km의 진원 깊이에서 발생하여 포항시에 막대한 피해를 끼쳤다. 포항분지의 중부에 해당하는 흥해지역은 백악기 경상누층군과 백악기 말~고신생기 초 불국사 화성암류를 기반암으로 하여 포항분지 충전물인 신신생기 연일층군이 분포한다. 여기서는 포항지진 동시성 지표변형물인 모래화산과 지표균열 그리고 팝업구조 등에 대한 구조지질학적 연구를 통하여 포항지진 동시성 지표변형의 특성을 고찰해 보았다.

지진 발생 동안 및 직후에 토양 액화 및 유동화된 모래가 지표로 방출되어 형성된 대표적인 지진 동시성 지표 변형물인 모래화산(sand volcanoes)은 포항지진 발생 이후 진앙 분포지를 중심으로 광범위하게 관찰된다. 모래화산은 대체로 선상배열을 보이고, 이러한 선상배열은 종종 지표균열과 (준)평행하게 나타난다. 지표균열은 종종 모래화산을 수반한다. 지표균열의 우세 방향성은 서북서, 북서, 북북동과 북동 그리고 동북동, 북북서 순으로 나타난다. 가장 우세한 서북서 방향의 지표균열은 포항지진의 최대수평응력의 방향인 N80°W의 방향과 일치한다. 포항지진의 진앙지로부터 (남)남서쪽으로 약 2~3 km 떨어진 포항시 북구 흥해읍 성곡리 일대에서는 포항지진의 최대수평응력에 의해 인공구조물이 팝업(pop-up)되거나 경동된 습곡양상의 포항지진 동시성 지표변형이 인지된다. 이러한 팝업 내지 습곡된 영역에서는 경동축(tilt axis)에 평행한 남-북 내지 (북)북동 방향의 지표균열과 이에 수직한 동-서 내지 서북서 방향의 지표균열이 함께 관찰된다. 또한 전자의 지표균열은 좌굴습곡작용(buckling folding) 동안에 발생된 습곡 외부호(outer arc)의 층평행 인장응력에 의해 형성되었고, 후자의 지표균열은 역시 포항지진 발생 응력원의 최대수평응력에 수직한 인장응력에 의해 형성된 지시자들이 현장에서 종종 관찰된다. 이는 남-북 내지 (북)북동 방향 팝업구조 내지 습곡과 지표균열 그리고 동-서 내지 서북서 방향의 지표균열은 각각 좌굴습곡, 좌굴습곡의 종절리(longitudinal joint)와 교차절리(cross joint)에 해당하는 포항지진 동시성 지표 변형물이고, 이들은 포항지진 발생 응력원의 최대수평응력에 의한 구조적 활동의 결과로 형성되었음을 지시한다.

따라서 본 연구결과 포항지진 동시성 지표변형물 중에 남-북 내지 (북)북동 방향의 경동축을 갖는 팝업구조 내지 습곡과 지표균열 그리고 동-서 내지 서북서 방향의 지표균열 등은 포항지진 발생 응력원의 최대수평응력에 의한 지진원 단층의 역이동성 운동과 이에 수반된 상반지괴의 좌굴 습곡작용에 의해 형성되었으며, 이러한 구조적 활동은 지진원 단층의 상반지괴에 해당하는 포항시 흥해읍 중심으로 광범위하게 발생하여 이곳에 지반 상승과 함께 막대한 재산 피해를 끼친 것으로 고찰된다.

사사: 이 연구는 행정안전부 지진위험분석 및 관리기술 개발 사업의 지원을 받아 수행되었음 (2022-MOIS62-001)

무기 자연 수소의 성인과 부존 가능성

Origin and potential reservoir of abiotic native hydrogen

김형수¹

¹고려대학교 지구환경과학과

요약

무기 자연 수소(H_2 ; native hydrogen)는 천연가스의 주요 구성성분이며, 친환경적인 재생 가능한 에너지로써 글로벌 에너지 분야에서 그 중요성이 부각되고 있다. 이번 발표는 무기 자연 수소가 암석권에서 대량 생성된다는 최근 논문들을 바탕으로 자연 수소의 발생 기작과 이와 관련된 다양한 지질학적 특징들을 다루었다. 지금까지 확인된 자연 수소의 주요 근원암은 (1) 고철질암, (2) 철(Fe^{2+})이 풍부한 암석으로 구성된 기반암, (3) 우라늄이 풍부한 암석이다. 이 암석들은 선캄브리아 시대 결정질 기반암 그리고 중앙 해령과 대륙기반의 오피올라이트(ophiolite), 페리도타이트(peridotite) 암체에서 사문암화된 고철질암 이다(Zgonnik, 2020). 이 근원암들에서 자연 수소를 생성하는 작용은 (a) 규산염 광물(예, 감람석)의 Fe^{2+} 이 산화되는 동안 물의 환원, (b) 방사성 붕괴로 인한 수전해, (c) 규산염 암석의 기계적 파괴(예, 단층) 동안 물과 표면 라디칼의 반응 등이다 (Fig. 1).

Fig. 1. Schematic representation of main geological sources and sinks of abiotic native hydrogen with their respective estimated annual fluxes (modified from Klein et al., 2020; Zgonnik, 2020).

이들 중, 지각과 상부 맨틀에서 Fe^{2+} 의 산화작용은 광물/암석-유체(fluids)의 상호작용으로 인해 광물/암석의 화학조성이 광역적 또는 국부적으로 변화되어 암석의 재평형을 유발하는 과정(예, 변성 교대작용과 열수 변질작용)의 일부이다. 따라서, 지표환경에서 다양한 암석에서 산화-환원 반응으로 생성되는 자연 수소가 발생할 수 있으며, 자연 수소의 함량은 (1) 모암의 광물화학 조성에

따른 2차 광물의 종류, (2) 유체의 화학조성, (3) Fe^{3+} 와 Fe^{2+} 의 분포 등에 따라 차이를 갖는다.

자연 수소는 자유 기체(51%), 다양한 광물 내의 유체포유물(29%), 지하수의 용존기체(20%) 형태로 존재한다. 최근 자연 수소를 연구/탐사하는 국외 연구자들과 산업체들은 가까운 미래에 자연 수소가 깨끗하고 재생 가능한 획기적인 에너지원 역할을 할 것으로 전망하고 있다. 우리나라의 경우, 자연 수소의 부존 가능성은 아직 판단하기 어려운 상황이다. 그러나 대륙 연변부에서 빈번한 마그마 활동으로 수반되는 접촉변성작용과 열수 변질작용을 겪은 한반도의 지질은 자연 수소의 생성과 부존 가능성을 증가시킬 수 있다. 경상분지의 경우, 초고철질암의 존재 그리고 페름기-제3기 동안 광범위한 마그마의 관입/분출은 분지 퇴적물의 속성작용과 접촉 변성작용을 광범위한 지역에서 발생시켰을 뿐만 아니라, 자연 수소의 수직적 확산 속도를 감소시키는 덮개암 또는 준대수층(aquitards)을 형성하는 데 중요한 역할을 하였다. 수소의 특성상, 지하 심부에서 생성된 수소는 부존 기간이 짧지만, 탄화수소와 달리 수소를 생성하는 반응은 현재 진행 상태이기 때문에 지속적으로 자연 수소를 재공급할 수 있다. 결론적으로 우리나라에서 자연 수소의 경제적 활용을 위한 부존지 탐사와 심부에서 암석-유체 상호작용에 관한 통합 연구를 통해 아직 알려지지 않은 자연 수소의 성인과 부존지 탐사는 차세대 핵심 연구임이 분명하다.

미얀마 깔레이미요 오피올라이트의 친철성 원소 거동 : 부분용융과 맨틀-용융체 상호반응의 영향

Examining HSE geochemistry of the Kalaymyo ophiolite, Myanmar
: The effect of partial melting and melt-rock reactions

김봉주(Bongju Kim)^{1,*}, 박정우(Jung-woo Park)¹, 박규승(Gyuseung Park)¹

박규찬(Gyuchan Park)¹, 허철호(Chul-ho Heo)²

¹서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부

²한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원탐사개발연구센터

1. 서언

부분용융과 맨틀-용융체 상호반응은 상부맨틀이 겪는 주요한 지질학적 기작이다. 상부 맨틀은 부분용융을 통해 현무암질 마그마를 형성하는 과정에서 결핍되며 이후 암석권 맨틀에서 다양한 용융체와 반응하며 조성의 변화를 겪는다. 이 과정에서 친철성 원소의 거동은 잘 알려져 있는 반면, 친철성 원소의 거동은 비교적 잘 알려지지 않았다. 친철성 원소가 상부맨틀에서 주로 황화물에 함유되는 것은 알려져 있지만, 상부 맨틀에서 황화물의 상(Bockrath et al. 2004; Ballhaus et al. 2006; Zhang and Hirschmann 2016), 분배계수(Brenan et al. 2016) 등은 정확히 규제되지 않은 상태이기 때문이다. 또한, 최근 실험 암석학 연구결과에 의하면 부분용융의 정도가 높아지면 합금의 역할 또한 커질 것이라고 제시되고 있다(Fonseca et al. 2012). 한편 연약권에서 부분용융에 의해 형성된 용융체는 상부로 이동하며 황화물을 포함한 암석권 맨틀의 조성에 영향을 줄 것이다. 따라서 맨틀암이 겪는 주요 과정에 따른 친철성 원소의 거동을 연구하기 위해 황화물 및 합금에 대한 정보는 필수적이다.

깔레이미요 오피올라이트 맨틀암은 다양한 정도의 부분용융과 맨틀-용융체 상호작용을 겪었다. Park et al. (2022)에서는 부분용융과 맨틀-용융체 상호작용을 겪은 맨틀암을 침정석의 Cr# 및 암석 기재를 통해 두 그룹으로 구분하였다. 그룹1 하즈버가이트는 부분용융을 겪은 후 용융체와의 반응을 겪지 않은 것으로 생각되는 잔여 맨틀 하즈버가이트로 0.3보다 낮은 Cr#(<0.3) 크롬침정석을, 그룹2 하즈버가이트는 부분용융 이후 용융체와 반응을 겪은 것으로 생각되는 하즈버가이트로 높은 Cr#(>0.3) 크롬침정석을 함유한다. 그룹2 하즈버가이트는 침정석의 Cr#와 TiO₂가 완만한 양의 상관관계를 갖으며, 이는 그룹2 하즈버가이트와 반응한 용융체의 근원이 섭입대 기원임을 지시한다. 따라서, 깔레이미요 오피올라이트 맨틀암은 해양 상부맨틀의 부분용융 및 맨틀-용융체 상호작용 정도에 따른 친철성 원소의 변화를 확인하기에 이상적인 노두이다.

본 연구에서는 미얀마 깔레이미요 오피올라이트의 초염기성 암괴중 하나인 보피봄지역에서 채취한 감람암의 친철성 원소의 함유량을 분석하고 백금족원소 합금의 산상을 보고하였다. 부분용융 및 맨틀-용융체 반응의 지시자의 변화에 따른 친철성 원소의 조성 변화를 통해 해양암석권 내에서 친철성 원소의 거동과 백금족 원소 합금의 성인을 논의하였다. 본 논의를 통해 깔레이미요 오피올라이트가 겪어온 암석지구화학적 진화 과정과 지구조 환경 해석에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

이 연구에 사용된 하즈버그아이트는 2013년부터 2018년까지 서울대학교 지구환경과학부 연구진이 한국지질자원연구원 및 미얀마 지질조사광물탐사국(DGSE)과 공동으로 실시한 지질조사에서 채취한 노두 및 시추공 시료이다.

전암 주원소, 부원소 및 미량원소는 서울대학교 공동기기원의 X선 형광분석기(XRF), 해양과학기술원의 레이저사박 유도결합플라즈마 질량분석기(LA-ICP-MS)로 측정됐다. 표준물질은 MUH-1을 이용한 주원소의 오차범위 2.8% 이내로 측정되었으며, 부원소 및 미량원소는 오차범위 15% 이내의 원소를 이용했다. 전암 친철성 원소 분석은 Park et al. (2012)의 니켈-황화물 불꽃 시험(fire assay) 및 동위원소 희석법을 이용했다.

규산염 광물의 주, 부원소는 서울대학교 지구환경과학부의 JSM-7100F 주사전자현미경에 부착된 에너지 분산형 분광분석법(EDS)을 사용한 반정량 분석법을 통해 측정하였다. 침정석의 화학분석은 서울대학교 기초과학 공동기기원의 JXA-8530F 전자주사전미분석기(EPMA)을 이용해 분석하였다. 분석의 정확도는 스미소니언 표준시료(NMMNH111312-44, NMNH117733, NMNH117075) 분석을 통해 모니터링하였다.

백금족원소 함금은 서울대학교 지구환경과학부의 전계방출 주사전자현미경 JSM-7100F을 이용한 박편관찰을 통해 관찰하였다. 후방산란전자 이미지의 밝기 임계값을 황화물 백금족원소 및 백금족원소와 유사하게 사용하여 원자량이 높은 입자의 분포를 확인하였다. 전자현미경을 통한 정량 분석은 합금내 수 μm 의 매우 작은 크기와 주변 광물의 간섭으로 제한되며 EDS 스펙트럼을 통해 백금족원소의 주요 성분을 확인했다.

3. 결과 및 토의

3-1. 부분용융에 따른 친철성 원소의 거동

부분용융에 따른 친철성 원소의 변화를 맨틀암의 부분용융 지시자인 전암 알루미늄 함량과 함께 이원도표에 도시하여 확인할 수 있다. 친철성 원소의 부분용융 모델은 황화물에 대한 분배계수에 상당한 영향을 받으며, 높은 분배계수를 갖는 IPGE는 부분용융이 진행됨에 따라 증가하는 경향, 낮은 분배계수를 갖는 PPGE 및 Re는 감소하는 모델이 계산된다. 전암 친철성 원소의 함량 분석 결과, 일부 시료를 제외하면 두 그룹 모두에서 부분용융의 정도가 증가함에 따라 IPGE(Os, Ir, Ru)의 함량이 높아지는 경향성이 확인되었다. 이러한 경향성은 일부 시료에서 나타나는 중복 분석 결과의 차이를 제외하면, 용융 모델과 일치한다. 반면에, 그룹1에서는 PPGE(Pd, Pt)의 함량이 부분용융의 정도가 증가함에 따라 감소 혹은 대체로 일정하게 유지되는 반면, 그룹2에서는 PPGE의 함량이 상대적으로 넓은 범위(Pd=3.1-8.0 ppb, Pt=5.5-12.9 ppb)에 걸쳐 분포한다. 특징적으로 그룹2의 친철성 원소 데이터는 중복 분석 간의 큰 차이를 보이고, 그룹1에 비해 친철성 원소의 불균질성이 높게 나타난다. 또한, Re의 함량은 부분용융 정도가 증가할수록 두 그룹에서 모두 감소하는 경향이 있다. 중복 분석으로 인한 함량 차이와 더불어, 그룹2에서도 IPGE 함량이 황화물 소진 후에도 부분용융에 따라 증가하는 경향은 하즈버그아이트가 탈황화 과정을 거치면서 안정된 백금족 원소 함금에 의해 조절된 것으로 생각된다.

3-2. 맨틀-용융체 상호반응에 따른 친철성 원소의 거동

그룹2 하즈버그아이트는 다양한 정도의 맨틀-용융체 상호반응을 겪었다. 침정석의 TiO_2 와 Cr#의 양의 상관관계, 자형의 침정석 및 다양한 조직적 증거들은 그룹2 하즈버그아이트가 명백히 맨틀-용

용체 상호작용을 겪었음을 지시한다. 한편 그룹2 하즈버그아이트의 PPGE 함량 및 Pd/Ir은 넓은 분포를 보이며 부분용융 모델의 예상치를 초과하는 높은 값을 보인다. 또한, 그룹2 하즈버그아이트의 Pd 중복 분석 간의 높은 차이를 보인다. 높은 정도의 부분용융으로 인해 그룹2 하즈버그아이트의 이차 황화물이 대부분 소진되었음에도 발생한 Pd의 중복 분석 간의 함량 차이는 이차 황화물의 유입으로 발생할 수 있다. 이는 부분용융을 겪으며 Pd/Ir이 낮아진 결핍 맨틀이 다양한 정도의 맨틀-용융체 상호작용을 겪으며 용융체로부터 이차 황화물과 함께 PPGE가 유입되었을 가능성을 시사한다. 그룹2 하즈버그아이트의 PPGE 함량이 Cu 함량과 양의 상관관계를 보이는 것과 달리, IPGE 함량과는 상관관계가 보이지 않는 것은 이차 황화물의 유입으로 IPGE는 유의미하게 유입되지 않았음을 의미한다. 그룹2의 황화물 침전모델과 PPGE 함량의 유사한 경향은 이차 황화물의 유입을 뒷받침한다. 이러한 섭입대 용융체에 의한 PPGE의 유입은 단사휘석을 침투한 섭입대 기원 각섬석과 함께 침전된 이차 황화물 및 Pt-Fe 합금을 통해 확인할 수 있다. 따라서 맨틀-용융체 상호반응은 그룹2 하즈버그아이트에 PPGE를 유입시킨 것으로 생각된다. 한편, 맨틀-용융체 상호반응 및 이차황화물의 유입에도 불구하고 증가하지 않은 Re의 함량은 섭입대 용융체의 높은 산화도에 의해 Re이 불호정적으로 거동한 것으로 생각된다.

참고문헌

- Ballhaus, C., et al. (2006). "Fractionation of the noble metals by physical processes." *Contributions to Mineralogy and Petrology* 152(6): 667-684.
- Bockrath, C., et al. (2004). "Fractionation of the platinum-group elements during mantle melting." *Science* 305(5692): 1951-1953.
- Brenan, J. M., et al. (2016). "Experimental results on fractionation of the highly siderophile elements (HSE) at variable pressures and temperatures during planetary and magmatic differentiation." *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 81(1): 1-87.
- Fonseca, R. O., et al. (2012). "New constraints on the genesis and long-term stability of Os-rich alloys in the Earth's mantle." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 87: 227-242.
- Park, G., et al. (2022). "Distribution of mantle-melt interaction zone: A petrological exploration tool for podiform chromitite deposits in the Kalaymyo ophiolite, Myanmar." *Journal of Geochemical Exploration* 232: 106878.
- Park, J.-W., et al. (2017). "A Geochemical indicator in exploration for the Kalaymyo chromitite deposit, Myanmar." *Economic and Environmental Geology* 50(6): 423-433.
- Zhang, Z. and M. M. Hirschmann (2016). "Experimental constraints on mantle sulfide melting up to 8 GPa." *American Mineralogist* 101(1): 181-192.

영남육괴 산청 회장암 내 석류석-사방휘석 백립암질 포획암의 (초)고온 변성작용과 준등압냉각

(Ultra)high-temperature metamorphism and near-isobaric cooling of garnet-orthopyroxene granulite xenoliths in the Sancheong anorthosite, Yeongnam Massif, Korea

이유영(Yuyoung Lee)^{1*}·조문섭(Moonsup Cho)²·김정민(Jeongmin Kim)³

정연중(Youn-Joong Jeong)³

¹한국기초과학지원연구원 환경분석연구부

²서울대학교 지구환경과학부

³한국기초과학지원연구원 연구장비운영부

Elevated heat flow associated with mafic magmatism in an accretionary orogen has often been proposed as a driving mechanism for (ultra)high-temperature (UHT) metamorphism. The Sancheong-Hadong anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) complex, situated in the southern Yeongnam Massif, Korea, is renowned for the Paleoproterozoic (ca. 1.87-1.86 Ga) emplacement in association with a variety of granulite-facies gneisses; all of these lithologies are interpreted to represent an orogenic core affected by intense thermal influx. Here, we present new findings on the UHT metamorphism and near-isobaric cooling of garnet-orthopyroxene granulite xenoliths entrained in the Sancheong anorthosite. These xenoliths record evidence for a varying degree of deformation near the contact with anorthosite, and contain leucosomes typified by peritectic garnet and orthopyroxene. The presence of garnet coronas or garnet-quartz symplectites at the interface between orthopyroxene and plagioclase in the granulite is attributed to near-isobaric cooling under a relatively low f_{H_2O} condition. P - T pseudosection modelling of the garnet-orthopyroxene granulite reveals peak metamorphic conditions reaching 940-960 °C and ~8 kbar, followed by near-isobaric cooling and subsequent melt crystallization at 730-740 °C and ~6 kbar. Such a UHT condition of granulite is corroborated by ca. 886-894 °C estimated from the Ti-in-zircon thermometry. SHRIMP U-Pb analyses of zircon from two garnet-orthopyroxene granulites and one leucosome yielded the weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages that are identical within errors: 1857 ± 13 Ma, 1868 ± 10 Ma, and 1865 ± 6 Ma for the cores; and 1859 ± 6 Ma, 1859 ± 5 Ma, and 1861 ± 5 Ma for the rims, respectively. In addition, U(-Th)-Pb analyses of monazite in two granulite samples yielded the weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of 1864 ± 9 Ma and 1862 ± 12 Ma, respectively, and an upper intercept age of 1860 ± 13 Ma for the leucosome. These results indicate a (near-)complete resetting of the U-Pb geochronometry at ca. 1860 Ma during the UHT event. The oxygen isotopic compositions of zircon are relatively uniform, ranging from 8.05‰ to 8.30‰, except for 7.69‰ estimated from zircon rims of the leucosome; thus, the oxygen isotopic system is homogenized during the in-situ melting at the UHT condition. Our results suggest that lower crustal granulite in the southern Yeongnam Massif has most likely undergone ca. 1.86 Ga UHT metamorphism in association with the AMCG magmatism. The near-isobaric cooling path of granulites is further accounted for by extensional tectonics prominent at the late stage of the Paleoproterozoic hot orogenesis.

Geochemistry, zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of Triassic plutons in the eastern Gyeonggi Massif, Korean Peninsula: Magma genesis and geodynamic implications for East Asia

오창환(Oh Chang Whan)¹,가와구찌 겐타(Kawaguchi Kenta)¹,정지완(Jeong Ji Wan)²

¹전북대학교 지구환경과학과

²Graduate School of Integrated Sciences for Global Society, Kyushu University



Fig. 1. (a) Map showing the Permo-Triassic plutons of the Korean Peninsula with tectonic boundaries. Abbreviations: NCC: North China Craton; SCC: South China Craton; CAOB: Central Asian Orogenic Belt; KJB: Khanka–Jiamusi–Bureya Massifs; DB: Dumangang Belt; KM: Kwanmo Massif; MB: Machollyong Belt; NM: Nangrim Massif; IB: Imjingang Belt; N-GM: northern Gyeonggi Massif; S-GM: southern Gyeonggi Massif; TB: Taebaeksan Basin; OB: Ogcheon Belt; YM: Yeongnam Massif; GB: Gyeongsang Basin; HS: Hongseong area; YP: Yangpyeong area; OD: Odesan area. (b) Geological map of the Yangyang area, northeastern Gyeonggi Massif. (c) Geological map of the Gangneung area, southeastern Gyeonggi Massif. The sample locations, zircon U-Pb ages, and average ϵ Hf(t) values of zircons in this study are shown on this map together with the published SHRIMP zircon U-Pb ages of the Triassic plutonic rocks

(d) Map showing the distribution of four types of Permo-Triassic igneous rocks formed in the subduction, post-collision, slab roll-back, and delaminated lower crust related tectonic setting, respectively, in East Asia, including the Korean Peninsula, proto-Japan, and China. HS: Hongseong area; YP: Yangpyeong area; OD: Odesan area; YY: Yangyang area. The ages of the Permo-Triassic igneous rocks are from this and previous studies.

The spatial-temporal distribution of the Triassic post-collision-related and arc-related plutons in the Korean Peninsula is key to unraveling the positions of the Triassic collisional boundary and subduction zones in East Asia (Fig. 1). Zircon U-Pb dating of the Hajodae Granite, part of the granite-syenite-gabbro complex in the Yangyang area of the northeastern Gyeonggi Massif, gives a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 228.0 ± 2.3 Ma as

the time of magmatism with a low zircon crystallization temperature of $\sim 770^\circ\text{C}$. The Hajodae Granite and two-mica granites from the same complex belong to the shoshonitic to high-K and ferroan series and show high Rb/Sr and Rb/Ba ratios, suggesting melting of upper crustal materials and subsequent fractional crystallization. They plot in the post-collisional tectonic setting fields in trace element discrimination diagrams. Monzogabbros from the same complex are characterized by enrichment in LREEs and depletion in HREEs similar to those of OIB, with inherited subduction enrichments, suggesting their post-collisional tectonic setting. The southern limit of the post-collision-related Triassic plutons ($\sim 235\text{-}225$ Ma) in the Korean Peninsula marks a clear line defined as the Hongseong-Yangpyeong-Odesan (HYO) Belt within the Gyeonggi Massif, implying that the belt is the collisional boundary between the North China and South China Cratons (Fig. 1). The Namhangjin Diorite in the southeastern Gyeonggi Massif yields weighted average zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 224.9 ± 2.0 Ma and 220.2 ± 2.1 Ma as the time of magmatism. They are characterized by low Y contents (9-12 ppm) and high Sr/Y ratios (91-135), indicating their adakitic nature. They are highly depleted in HREEs with convex-downward patterns between MREEs and HREEs in the C1 chondrite-normalized diagram, suggesting the presence of residual garnet and hornblende. They are characterized by high contents of compatible elements, including Cr (150-290 ppm), Ni (50-70 ppm), and MgO (3.47-5.24 wt%), have high Mg# of 60.4-63.4, and show higher zircon crystallization temperatures of $\sim 820\text{-}850^\circ\text{C}$, suggesting that the Namhangjin Diorite was generated by the partial melting of delaminated lower crust due to extension related to slab roll-back of the subduction zone along the margin of northeastern Asia. Together with previous data, this study indicates that the Triassic igneous activity in the northern Gyeonggi Massif occurred in a post-collisional tectonic setting, whereas that in the southern Gyeonggi Massif, Ogcheon Belt, and Yeongnam Massif occurred in a subduction- or slab roll-back-related tectonic setting (Figs. 1d, 2). The Triassic subduction zone along the eastern margins of the Northeast Asia formed by the connection of subduction zones in the southeastern margin of the South China Craton, eastern margin of the North China Craton and the eastern margin of the CAOB or KJB (Fig. 3).

Fig. 2. Schematic illustration showing the various genesis for Triassic magmatism in the Korean Peninsula and the Japanese Islands. (a) Subduction of the oceanic slab between the NCC and SCC under the NCC before ~ 280 Ma. (b) Subduction-related igneous activity at the southern margin of the SCC due to the continental collision between the NCC and SCC during $\sim 280\text{-}235$ Ma. The SCC connected to the previously subducted oceanic slab was subducted below the NCC. (c) Post-collision- and subduction-related Triassic igneous activities in the NCC and SCC, respectively, at $\sim 235\text{-}230$ Ma. (d) Post-collision- and slab roll-back-related Triassic igneous activities in the NCC and SCC after 230 Ma. Abbreviations: NCC: North China Craton; SCC: South China Craton; N-GM: northern Gyeonggi Massif; IB: Imjingang Belt; NM: Nangrim Massif; S-GM: southern Gyeonggi Massif; OB: Ogcheon Belt; YM: Yeongnam Massif; HYO line: Hongseong-Yangpyeong- Odesan line.

Fig. 3. Tectonic model for the continental collision among the NCC, SCC, Eastern CAOB, and KJB and the estimated positions of the subduction zones of East Asia during Permo-Triassic time modified after Oh and Kusky (2007). CAOB: Central Asian Orogenic Belt; KJB: Khanka–Jiamusi–Bureya Massifs.

* This study was published in *Lithos* 436-437 (2023), 106955

한반도 남부 맨틀기원 화강암의 Eu동위원소 조성의 지구화학적 의의

Geochemical implication of Eu isotope composition in the granite derived from mantle
source material

이승구(Seung-Gu Lee)^{1*}, 고경태(Kyoungtae Ko)¹, 송교영(Syo-Young Song)¹, 홍발(Paul
Hong)¹, 기원서(Weon-Seo Kee)¹, 이병춘(Byung Choon Lee)²

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부

²전남대학교 지구환경과학과

Eu은 ¹⁵¹Eu (47.81%), ¹⁵³Eu(52.19%)의 동위원소를 갖고 있다. ¹⁵¹Eu은 실제로는 5×10^{18} yr의 반감기(α 붕괴)를 거쳐 ¹⁴⁷Pm(자연계에는 존재하지 않는 희토류원소)으로 붕괴되지만, 반감기가 매우 길기 때문에 안정동위원소로 볼 수가 있다. 두 개의 동위원소만으로 구성되어 있는 원소의 안정동위원소비 측정은 MC-ICP-MS로는 어렵기 때문에, 일반적으로 스파이크원소를 내부표준원소로 사용하여 측정한다. 최근 Lee and Tanaka (2019, 2021a)는 Sm을 내부표준물질로 활용하여 Eu 동위원소비를 정확하면서 정밀하게 측정하는 실험법을 개발하였다. 또한 다양한 화성암류에서의 희토류원소의 함량과 Eu 동위원소비를 측정/비교한 결과, 화성암을 형성시킨 기원마그마의 분화과정이 Eu의 동위원소 분별작용을 일으켰음을 확인하였다 (Lee and Tanaka, 2021b; Lee et al. 2023). 이 결과는 희토류원소 중 Eu의 안정동위원소 분별작용이 어느 규칙성을 가지고 일어난다는 세계 최초의 연구결과이다. 이와 더불어, 최근 미국 시카고대학 Dauphas교수팀은, 핵공명 비탄성 X-ray분산(Nuclear Resonant Inelastic X-ray Scattering, NRIXS)법에 의한 실험결과를 토대로, Eu의 현저한 동위원소 분별작용이 열수용액에 의해 일어날 수 있음을 예측하였다 (Hu et al., 2023). 거의 동시기에 서로 다른 연구방법으로 보고된 Lee et al. (2023)과 Hu et al. (2023)의 연구결과는 자연계내에 Eu 동위원소분별작용의 존재와 그 연구 가치의 중요성을 알리는 계기가 될 것이다. 특히 Lee and Tanaka (2019)와 Lee et al. (2023)의 연구결과는 Hu et al. (2023)의 예측을 실험적으로 발견하여 보고한 첫 번째 사례가 될 것이다. 그리고 후속연구에서는 Lee et al. (2023)의 연구결과를 토대로 심성암인 화강암을 형성시킨 기원마그마의 생성환경에 따라 Eu의 동위원소 분별작용이 다르게 일어날 수 있다는 가정을 설정하고 실험을 수행하였다. 따라서, 이 발표에서는 한반도 남부에 분포하는 화강암류에서의 희토류원소 분포도와 Eu 동위원소 조성을 가지고서 마그마의 생성환경이 동위원소 분별작용에 어떤 영향을 주었는지를 토의하고자 한다.

이승구(2023)동위원소자료의 지구화학적 응용을 위한 암석시료의 지구화학적 전처리의 중요성에 대한 토의. 한국암석학회 2023학술대회 요약집.

Proceedings of the Annual Joint Conference

the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,

June 22–23, 2023, Korea

Lee, S-G. and Tanaka, T. (2019) Determination of Europium isotopic ratio by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry using a Sm internal standard, *Spectrochim. Acta Part B*, 156, 42–50.

Lee, S-G. and Tanaka, T. (2021a) Gd matrix effects on Eu isotope fractionation using MC-ICP-MS: Optimizing Europium isotope ratio measurements in geological rock samples. *Inter. Jour. Mass Spec.*, 469, 116668.

Lee, S-G. and Tanaka, T. (2021b) Europium isotope fractionation in highly fractionated igneous rocks with large Eu negative anomaly, *Geochem. Jour.*, 55, e9–e17.

Lee, S-G., Tanaka, T. and Lee, M.J. (2023) Geochemical implication of Eu isotopic ratio in anorthosite: new evidence of Eu isotope fractionation during feldspar crystallization. *Geosci. Jour.* <https://doi.org/10.1007/s12303-023-0009-6>

Hu, J.Y., Dauphas, N., Nie, N.X., Roskosz, M., Chen, X., Heard, A., Zhnag, Z.J., Zeng, H., Alp, E.E., Hu, M.Y. and Zhao J. (2023) Equilibrium fractionation of REE isotopes in nature: Insights from NRIXS and DFT+U studies of Eu and Dy phonon density of states. *Geochim. Comochim. Acta*, 348, 323–339.

“옥천층” 명명 100주년을 기리며: 경기외연대와 지구조-층서

조 문 섭

서울대학교 지구환경과학부 (moonsup@snu.ac.kr)

올해는 Nakamura(1923)가 “옥천층”을 제안한지 100주년이 되는 해이다. 지난 한 세기 동안 “옥천층”을 비롯해 옥천대에 대한 해석은 꾸준히 변화해 왔다. 특히, 층서, 절대 연령, 변성-변형 작용, 지체구조 발달사 등에 대한 연구결과는 다양한 만큼이나 아직 이론의 여지가 많이 남아 있다.

이 발표에서는 옥천대에 대한 그간의 연구 결과들을 간단히 리뷰하고, 최근의 연구 결과들에 대해 검토해 보고자 한다. 특히, Cho et al.(2017, 2018)이 명명한 경기외연대(Gyeonggi Marginal Belt)를 중심으로 그 제안의 배경과 지구조-층서에 관련된 중요한 이슈들을 토의하고자 한다. 옥천대는 잘 알려진 바와 같이 옥천변성대와 태백산분지로 나뉘며, 이 발표에서는 주로 전자에 대한 연구결과들을 검토하기로 한다.

우리가 경기외연대를 제안할 수 있었던 배경에는 무엇보다 SHRIMP 고분해능 질량분석기를 사용해 얻은 정확한 U-Pb 저어콘 연대 분석 결과들이 자리 잡고 있다. 특히, 시대미상의 변성퇴적암들에 대한 쇄설성 저어콘 연대 분석을 통해 옥천변성대를 구성하는 각각의 암석-지구조 단위에 대한 퇴적 시기를 제한할 수 있게 되었다(Cho et al., 2013). 더 나아가 피반령 지구조 단위의 변성사암들이 보이는 쇄설성 저어콘의 연대 분포 양상은 태안-홍성 복합체의 태안층과 임진강대의 임진층군 변성사암들에서 보고된 것들과 매우 유사하다. 이러한 유사성은 상원누층군의 쇄설성 저어콘에서 관찰되는 동일한 연대 패턴과 함께 옥천변성대가 다른 두 개의 (변성)구조대와 서로 대비됨을 말해준다. 이를 바탕으로 세 구조대를 함께 묶어 경기외연대라는 새로운 용어를 제안하게 되었으며, 그동안 별개로 취급되어왔던 이들 구조대가 지질-지체구조적으로 서로 연계되어 있음을 표현할 수 있게 되었다.

이러한 통합적 해석은 매우 흥미로운 지구조-층서 해석을 가능케 한다. 즉, 태백산분지에서 대결층에 해당되는 데본기 지층이 상원누층군 퇴적암과 함께 경기외연대 곳곳에서 산출하기 때문이다(Fig. 1; Cho et al., 2017). 또한, 평안누층군의 상부층들이 경기외연대에서는 부재하므로, 옥천변성대의 최고변성작용 시기인 약 270-250 Ma에(Cho et al., 2018) 지구조 나페(tectonic nappe; Cluzel et al., 1990)가 점진적으로 형성되었을 것으로 추정된다. 이 옥천조산운동은 Cluzel et al.(1990)이 추정했던 고생대 중기(소위 칼레도니아 시기)가 아닌 페름기 중-후기에 일어났다. 왜냐하면 옥천변성대의 주구성원인 이질암층(예, 비봉층)에서 페름기 초기의 식물화석이 발견되었기 때문이다(Lim et al., 2005). 한편, 이 조산운동이 일어난 약 20 m.yr.의 오랜 기간 동안 태백산분지에서는 평안누층군 퇴적이 계속되었으며, 그 결과 옥천조산운동의 기록은 찾아보기 어렵다.

옥천변성대가 경기외연대의 다른 두 구조대와 잘 대비됨은 특히 Kim et al.(2021)이 최근 보고한 서창리층의 쇄설성 저어콘 연대 연구 결과로부터 알 수 있다. 서창리층이 상원누층군으로부터 유래된 변성사암이라면, 이는 옥천변성대와 북중국 강괴(craton) 사이의 대비 관계가 적절함을 대변해준다. 더 나아가 약 780-750 Ma의 각섬암이 서창리층을 관입하고 있으므로, 북중국 강괴의

Proceedings of the Annual Joint Conference

the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,

June 22-23, 2023, Korea

동쪽 연변부를 차지했던 경기외연대는 토너스기(Tonian) 후기에 로디니아 초대륙 분열에 따르는 판내부 열개작용을 경험했음을 시사한다(Cheong and Cho, in review).

경기외연대는 우리나라의 조산운동과 지체구조 진화사를 이해하는데 유용한 개념이다. 물론 아직 밝혀져야 할 세부 사항들이 많이 남아 있지만, 필자는 경기외연대가 향후 한반도와 중국, 일본 사이의 지질-지체구조 대비를 위한 디딤돌 역할을 감당하리라 기대하고 있다.

참고문헌

Cho, M., Cheong, W., Ernst, W.G., Yi, K., Kim, J., 2013. SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in metasedimentary rocks of the central Ogcheon fold-thrust belt, Korea: Evidence for tectonic assembly of Paleozoic sedimentary protoliths. *J. of Asian Earth Sci.*, 63, 234-249.

Cho, M., Lee, Y., Kim, T., Cheong, W., Kim, Y., Lee, S., 2017. Tectonic evolution of Precambrian basement massifs and an adjoining fold-and-thrust belt (Gyeonggi Marginal Belt), Korea: An overview. *Geosci. J.* 21, 845-865.

Cho, M., Min, K., Kim, H., 2018. Geology of the 2018 Winter Olympic site, Pyeongchang, Korea. *Int. Geol.* 60, 267-287.

Cluzel, D., Cadet, J.P., Lapierre, H., 1990. Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics.* 183, 41-56.

Kim, M.J., Ha, Y., Choi, J.E., Park, K.H., Song, Y.-S., 2021. U-Pb ages and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the Seochangni Formation of the northeastern Okcheon Metamorphic Belt: Implications to the crustal evolution of the Sino-Korean craton since Paleoproterozoic. *Lithos* 400-401, 106340.

Lim, S.-B., Chun, H.-Y., Kim, Y.B., Kim, B.K., Cho, D.-L., 2005. Geologic ages, stratigraphy and geological structures of the metasedimentary strata in Bibong-Yeonmu area, NW Okcheon belt, Korea. *J. Geol. Soc. Korea* 41, 335-368 (in Korean with English abstract).

Nakamura, S.(中村新太郎), 1923. 충청북도광상조사보문(報文), 조선광상조사보문. v. 8 (in Japanese).

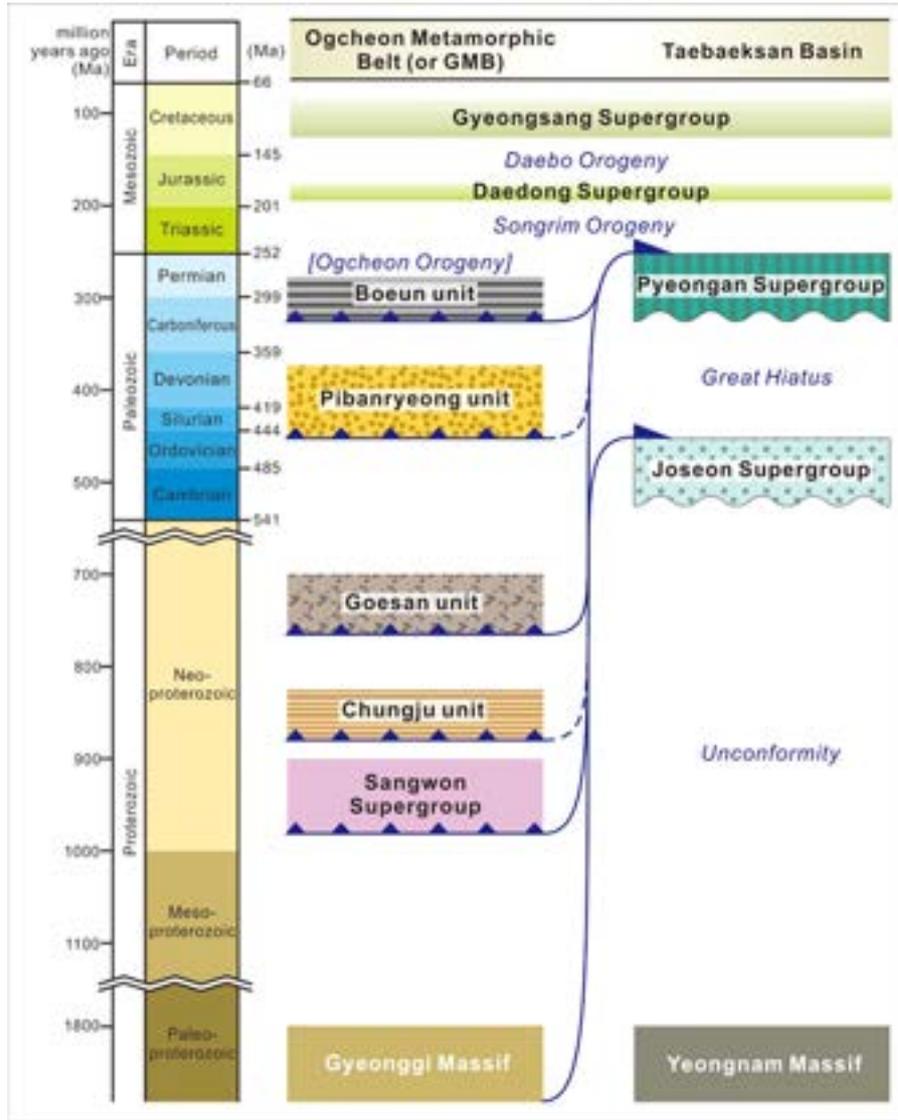


Fig. 141. 경기외연대(옥천변성대 포함)와 태백산분지의 지구조-층서 (Cho et al., 2017, 2018). 전자의 경우, 후자의 부정합과 대결층에 해당되는 시기에 변성퇴적체들이 층상단층에 의해 서로 병치되는 점이 흥미롭다. 특히, 옥천조산운동은 태백산분지의 평안누층군이 쌓이는 동안 일어났음에 주목할 필요가 있다. 즉 태백산분지에서는 페름기 중-후기에 일어난 옥천조산운동이 기록되지 않았다. 이후 트라이아스기 중-후기에 일어난 송림조산운동에 의해 옥천변성대와 태백산분지는 서로 통합되었다. 대동누층군이 퇴적된 이후 일어난 대보조산운동은 대동누층군을 고생대 퇴적층 위로 층상(thrust)시키는 결과를 낳았다.

화산호 맨틀의 Nd 및 Hf 동위원소

Nd and Hf isotopic characteristics of the arc mantle

Hongda Hao¹, 박정우(Jung-Woo Park)¹

¹서울대학교 지구환경과학부

대륙 지각의 형성과 Nd 및 Hf 모델 연령을 계산할 때 결핍된 중앙해령 현무암 맨틀(depleted mid-ocean ridge basalt mantle)의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 과 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 비가 사용됐다. 하지만, 대륙 지각의 형성은 대부분 섭입대에서 발생한다. 따라서, 더 현실적인 대륙 지각의 형성에 대한 정보를 얻기 위해서는 화산호의 밑에 있는 맨틀 웨지의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 과 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 비를 사용한 모델 연령이 고려되어야 한다. 본 연구에서 18개의 대표적인 해양 화산호에서 산출하는 현무암질(basalt-basaltic andesite) 화산암의 Nd 및 Hf 동위원소 값을 취합하여 평균값을 산출한 결과, 화산호 맨틀의 평균 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값은 0.512959($\epsilon\text{Nd} = +6.3$)로 95%의 신뢰 수준에서 0.513115($\epsilon\text{Nd} = +9.3$)에서 0.512613($\epsilon\text{Nd} = -0.5$)의 변화를 보이고 평균 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 값은 0.283144($\epsilon\text{Hf} = +13.2$)로 95%의 신뢰 수준에서 0.283272($\epsilon\text{Hf} = +17.7$)에서 0.282927($\epsilon\text{Hf} = +5.5$)의 변화를 보인다. 화산호 맨틀의 Nd 및 Hf 동위원소 값은 맨틀의 불균질성과 섭입 물질의 양과 종류에 따라서 크게 세 그룹으로 나눌 수 있다. 높은 ϵ 그룹($\epsilon\text{Nd} > +5.7$ and $\epsilon\text{Hf} > +10$)은 원양성 퇴적물 및 철-망간 산화물에서 기원한 유체가 큰 영향을 끼쳤지만 전이적 ϵ 그룹($\epsilon\text{Nd} < +5.7$ and $\epsilon\text{Hf} > +10$)은 용융체의 역할이 더 클 것으로 생각된다. 낮은 ϵ 그룹($\epsilon\text{Nd} < +5.7$ and $\epsilon\text{Hf} < +10$)은 섭입하는 퇴적물의 용융체 중에서 특히 저어콘이 풍부한 저탁암의 영향을 크게 받았다. 본 연구에서 제시한 화산호 맨틀의 평균 Nd 및 Hf 비를 이용하여 계산된 화산호 맨틀의 진화 곡선을 대륙 지각의 성장을 연구하는데 활용할 것을 제안한다.

제주도 현무암류 내 감람석의 산소 동위원소 성분으로 유추한 근원맨틀의 특성 (예비연구)

Mantle source characteristics of Jeju basaltic rocks inferred from oxygen isotopic
compositions of olivines (Preliminary study)

김지인(Ji-In Kim)¹ · 최성희(Sung Hi Choi)^{1,2,*}

¹충남대학교 대학원 우주·지질학과 (chois@cnu.ac.kr)

²충남대학교 지질환경과학과

제주도 현무암류에서 분리한 감람석 반정에 대한 산소 동위원소 성분 분석을 수행하였다. 지역적 안배를 고려하여 채취한 10개 시료를 연구 대상으로 하였다. 분석한 감람석 반정의 CaO 함량은 모두 0.1 wt% 이상으로, 맨틀 포획결정이 아닌 현무암질 마그마에서 정출한 반정이다. 초고분해능 동위원소 현미경 시스템 (IMS1300-HR³)를 사용하여 측정된 제주도 감람석의 산소 동위원소 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{Ol}}$) 값은 4.5-5.3‰ 범위이다. 이는 전형적인 맨틀 감람석($\delta^{18}\text{O}_{\text{Ol}} = 5.2 \pm 0.2\%$)의 범위에 해당하거나 더 낮다. 선행연구에 의하면 제주도 화산암류의 전암 Sr-Nd-Pb 동위원소 조성은 결핍 맨틀(DMM)-부화맨틀 타입2(EM2) 성분이 혼합된 특성을 보인다. 그러나 전형적인 EM2 해양도 현무암류가 가지는 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ol}}$ 값($\sim 5.6 \pm 0.2\%$)에 비교했을 때, 제주도 현무암의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ol}}$ 값은 다소 낮은 편이다. 선행연구에서 제주도 화산암류의 EM2 단성분은 맨틀로 유입된 최근 퇴적물에 의한 것으로 해석된 바 있다. 그러나 퇴적물이 가지는 매우 높은 산소 동위원소 값(예, 규산쇄설성 퇴적물의 $\delta^{18}\text{O} = 10-20\%$, 탄산염 퇴적물의 $\delta^{18}\text{O} = 20-30\%$)과 대조적으로 제주도 현무암의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ol}}$ 값이 상대적으로 낮은 것은, 제주도 근원 맨틀에 퇴적물 외에 낮은 산소 동위원소 값을 가지는 다른 물질이 존재했음을 시사한다. 시료의 전암 Sr 동위원소와 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ol}}$ 값을 비교 분석한 결과, 고온의 열수변질을 경험한 재활성화된 하부 해양지각이 근원 맨틀에 존재한 낮은 산소 동위원소 조성의 성인일 가능성이 제기된다. 제주도 현무암류의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{Ol}}$ 값을 초래한 근원 물질 및 이의 맨틀로의 유입과 재활성화 과정 그리고 지구화학적인 관점에서의 기여도 등에 대한 보다 정확한 규명을 위하여 전암의 Nd 동위원소 성분 분석이 추후 수행될 예정이다.

우리나라 신생대 현무암의 비활성 기체 지화학 연구

Noble gas geochemistry of Cenozoic basalts in Korea

이현우(Hyunwoo Lee)^{1,*}

¹서울대학교 지구환경과학부

비활성 기체(Noble gases)는 화학적으로 반응성이 없는 특징을 지니며, 특히 헬륨 동위원소(helium isotope) 성분을 이용하여 전 세계적으로 암석 시료들에 대한 마그마의 기원 추적 연구들이 다수 수행되었다. 헬륨은 ³He (primordial)과 ⁴He (radiogenic)의 두 동위원소를 가지며, 대기 중에 5 ppm으로 존재하는 헬륨의 동위원소비는 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = 1.4 \times 10^{-6}$ 으로 알려져 있다. 이 값을 1 Ra로 정의하며, 중앙해령현무암(mid ocean ridge basalt)에 대한 헬륨 동위원소의 성분은 8 Ra, 하부맨틀로부터 기원한 플룸 기원의 암석들은 5 ~30 Ra, 암석권 맨틀은 5~7 Ra, 대륙지각은 0.01 Ra로 나타나고 있다.

본 발표에서는 우리나라에서 산출되는 신생대 현무암의 기원에 대한 정보를 제공하기 위해, 백두산, 제주도, 울릉도, 독도, 한탄강 등에서 획득한 현무암의 헬륨 동위원소 분석결과를 논의하고자 한다. 헬륨 동위원소의 분석은 현무암 시료 내 비교적 마그마의 초기 성분을 대표하는 감람석, 휘석 반정들을 고진공 상태에서 파쇄(Crushing)하여 추출한 가스를 비활성 기체 동위원소 질량분석기(noble gas mass spectrometer)를 이용해 수행하였다. 분석된 결과는 하부맨틀의 영향은 전혀 나타나지 않으며, 암석권 맨틀 값의 범위와 유사한 5~7 Ra의 범위를 보인다. 이러한 암석 내의 헬륨 동위원소 성분 범위는 전 세계 여러 대륙 열곡대 지역(East African Rift, Eger Rift, West Antarctic Rift)에서 암석권 맨틀의 영향을 받은 마그마에서 나타날 수 있다고 보고되었다.

따라서, 본 발표는, 분석결과를 우리나라 주변의 맨틀 동역학적 관점에서 고려하여, 연약권 맨틀의 용승을 통한 상부의 암석권 맨틀과의 상호작용(asthenosphere-lithosphere interaction)이 신생대 마그마 생성에 중요한 역할을 했음을 제안한다.

남극 북빅토리아랜드 윌슨 암체의 광역변성작용: 변성 연령, 잠재적 열원, 쌍변성대 형성

Regional metamorphism of the Wilson Terrane in northern Victoria Land, Antarctica:
Metamorphic age, heat source and implications for the development of paired metamorphic
belt

김윤섭(Yoonsup Kim)^{1,*}·한기운(Giun Han)¹·김태환(Taehwan Kim)²

김태훈(Taehoon Kim)³·이유영(Yuyoung Lee)⁴

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Division of Earth Sciences, Korea Polar Research Institute

³Geoanalysis Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

⁴Division of Analytical Science, Korea Basic Science Institute

The metamorphic/intrusion ages of two meta-sedimentary rocks and six associated granitoids around O'Kane Glacier in northern Victoria Land, Antarctica, were examined to understand potential heat source and development of paired metamorphic belt. Sedimentary protolith in the study area consists of sandstone, carbonate and pelite, and underwent the Buchan-type regional metamorphism up to migmatization (700–750 °C and 4–5 kbar). Zircon crystals from a meta-carbonate sample yielded the weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 492.3 ± 3.4 Ma ($t\sigma$, MSWD=1.17) with relatively high $\delta^{18}\text{O}$ values (13.2–15.3 ‰). The age is reproduced in that of monazite (491.3 ± 3.7 Ma; $t\sigma$, MSWD=2.67) from a migmatitic gneiss sample. Granitoid samples were collected from boudinaged/folded patches in the sedimentary layers, and show a variety of deformation microstructure. Monazite crystals from a strongly sheared leuco-granite sample yielded the weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 502 ± 23 Ma ($t\sigma$, MSWD=2.7). Those of zircon from five deformed granitoid samples are in the range of ~497–500 Ma, except for ~489 Ma from least-deformed granitoid sample. The earlier ages are coeval with high- P metamorphism in the Lanterman Range, and together with their arc-magmatic geochemical affinity such as negative Nb, Ta and Ti anomalies in the spidergram, are interpreted as the final stage of arc magmatism in the Ross orogen. On the other hand, the younger age is considered as post-orogenic magmatism subsequent to the regional metamorphism. Another heat source is thus necessary to elevate the geothermal gradient for the Buchan-type metamorphism in the region.

남극 북빅토리아랜드의 캄브리아기 고압 변성작용

Cambrian high-pressure metamorphism in northern Victoria Land, Antarctica

김태환(Taehwan Kim)^{1,*}

¹극지연구소 지권연구본부

곤드와나 초대륙 형성 이후, 동곤드와나 경계부(East Gondwana margin)는 고태평양판의 섭입에 수반된 오랜 기간 동안의 안데스형 조산운동을 경험하였다. 남극 대륙을 가로지르는 남극중단 산맥 기저부의 다양한 화성-변성-퇴적암류에는 에디아카라기-오르도비스기 로스 조산운동(Ross orogeny)의 지질역사가 잘 기록되어 있으며, 이는 같은 시기 호주 동부의 델러머리언(Delamerian) 조산운동과 잘 대비된다. 특히 산맥의 북쪽 끝자락에 위치한 북빅토리아랜드(northern Victoria Land)에는 쌍변성대(paired metamorphic belt) 발달, 대륙호환경 화성활동, 수동형-활동형 경계부(passive-active margin) 퇴적작용, 터레인의 부가(terrane accretion) 등을 포함한 조산운동 전반의 과정이 잘 알려져있다. 그 중에서도 윌슨과 바워스 터레인(Wilson and Bowers terranes) 경계부에 산출하는 고압 변성암류는 로스 조산대에서 드물게 보고된 것일 뿐만 아니라, 시기적으로 중-저압형 변성작용, 대륙호 화성활동, 부가와 관련된 것으로 의심되는 바워스 터레인 퇴적작용 중단, 나아가 모암의 신원생대 열곡대(rift) 화성활동 등과 관련되어 있어 북빅토리아랜드 형성을 포함한 조산대 주요 지질활동을 이해하는데 매우 중요하다. 또한 최근 로스 조산대 화성암류와 태백산 분지 캄브리아기 저어콘 공급원의 관련성이 제안되는 등 우리나라 지질과의 연계성도 논의가 시작되어 국내 학계의 관심이 요구된다.

이러한 배경 하에 본 발표에서는 남극 북빅토리아랜드 중부 랜터만 산맥(Lanternman Range)에 산출하는 에클로자이트를 포함한 고압 변성암류에 대한 기존 연구결과를 정리하고, 새로운 자료와 더불어 짧게 향후 연구방향에 대해 제안하고자 한다. 고압 변성암류에 대한 암석학적 기초 자료와 더불어, 지난 수 년 간의 연구를 통해 부딘형 에클로자이트 내 캄브리아기 변성저어콘 성장/재결정 과정의 불연속성과 이에 근거한 섭입과정의 동력학적인 의의, 신원생대 대륙열곡대 화성모암의 호주로의 대비 등이 밝혀졌다. 그 외에도 변성퇴적암류의 쇄설성 저어콘 연대패턴 대비와 기원지 추적, 신원생대 대륙열곡대 화성활동과 처트 기원 함망간규암(manganiferous quartzite)의 존재로 대표되는 해양-대륙기원 암석의 병치과정(juxtaposition), 고압 변성작용과 유체활동 특성 규명 등에 대한 후속연구가 필요하다.

<< 포스터발표 (사)한국광물학회 >>



- 라만 기반 비전통 저류층 가스분포 특성 분석 연구

박선영
- 폐금속광산의 토양오염물질 위해성평가에 관한 연구:
옥령광산을 중심으로

홍지수, 조영태, 박정훈
- 서태평양 마젤란 해산군 망가니즈각 기반암 변질테의
Fe-smectite 분석을 통한 고환경 복원 연구

안현호, 정재우, 김수현, 김종육,
형기성, 고영탁, 양기호
- 고온 고압 환경에서 제올라이트 X의 상전이 비교 연구

이현승, 이수진, 이용문
- 서남극 도슨-갯즈 트리프 퇴적물 내 점토광물 분석 결과에
대한 통계적 접근을 통한 퇴적물 공급지 및 퇴적환경 복원

강인성, 박영규, 유규철, 이민경,
김진욱
- 빙상 하부 퇴적물에서 미생물에 의한 점토광물의 물리적,
화학적 특성 변화 연구: 남극반도 크리스탈 사운드 지역

박영규, 유규철, 황청연, 이민경,
김성한, 이재일, 김진욱
- 층상형 광물의 마찰 거동에 대한 원자 수준의 이해

김주혁, 권기덕
- 스트론튬-함유 방해석의 결정구조 및 용해도 연구

김상진, 손상보, 현성필, 권기덕
- Configuration transformation of network modifier cation in
amorphous earth materials above megabar pressures

Shujia Li, 이성근
- 양자화학 계산을 이용한 물 분자의 Clumped 안정동위원소의
분배계수 특성

노세형, 이성근
- 달운석(DEW 12007)에서 관찰되는 알칼리 장석의 특징

김형규, 박창근, 박선영, 김현나
- 제일원리 계산을 통한 극한 압력 환경에서의 주석 산화물
결합 구조 및 전자 구조 전이 연구

김용현, 이성근
- 고에너지 불 밀을 이용한 몬모릴로나이트 분쇄 시 분쇄
방법에 따른 입도 및 결정도 변화 연구

박보경, 김현나
- 세슘(Cs)이 흡착된 층상규산염 광물의 열물성 비교 연구

박상우, 김현수, 김표상, 성동훈
- 초분광 영상 시스템을 사용한 석회석 순도 매핑: 옥계광산의
사례연구

후인휘화, 유재형
- 고온 고압 하에서 합성 버네사이트를 이용한 탄소 반응 연구

김중원, 김계홍, 김표상, 김현수,
박상우, 성동훈
- 초분광 원격 탐사를 이용한 자연 발생 석면 모암의 식별 및
분류: 실험실 접근법

Grace Malvine MOUGHOA
BOUSSOUGHOU NGOLO, 유재형,
후인휘화

- 충남 유구지역 사문암 니켈 잠재성 예비 연구
 김이정, 고상모, Otgon-Erdene Davaasuren, 안기문, 김대영, 김태환, 이범한
- $ZrI_6Tl_{11}^{9+}$ 클러스터가 도입된 Zeolite A의 합성
 임현승, 추현욱, 박종삼, 임우택
- 제올라이트 Y에서 Zn_4S^{6+} 및 Zn_2S^{2+} 양자점 합성
 문대준, 김후식, 임현승, 추현욱, 임우택
- Zn^{2+} 가 이온교환된 Zeolite Y에서의 3Al 6-rings을 분석을 위한 결정학 및 NMR연구
 문대준, 김후식, 임현승, 추현욱, 임우택
- 수심에 따른 동시베리아해 비구형 망가니즈단괴 내 산화망가니즈 광물종 산출 특성
 이상미, 김효임
- 수산화나트륨을 이용한 중금속 수용액의 중화반응 시 생성되는 침전물의 특성 연구
 송병철, 김재민, 송혜원, 임정수, 탁현아, 김영훈, 김정진
- 소성 환을 이용한 인공산성배수 정화 효율 평가
 김재민, 송혜원, 송병철, 임정수, 탁현아, 김영훈, 김정진
- Ca, Mg-탄산염 및 수산화물의 중금속 오염수 중화효율 평가
 김재민, 송혜원, 송병철, 임정수, 김영훈, 김정진
- 단층비지의 입도 및 구성광물이 초임계 CO₂와의 반응에 미치는 영향 연구
 이유나, 송인선, 김현나
- 밀도범함수이론을 바탕으로 산화광물과 탄산염광물을 이용한 탄소 저감 활용가능성 연구
 김계홍, 고경철, 성동훈
- 고압환경에서 수화된 조장석 용융체의 H₂O 기포 크기 분포 분석 : 백두산 상부 마그마 시스템의 거동 분석을 위한 예비 연구
 전예린, 김현나, 김은정
- 금호강 최적물 성상 및 오염도 평가
 박진근, 박해성, 김영훈, 김정진, 이병춘, 김정우, 차용훈, 서지호, 최기호
- 비투멘 반사도 기반 유기물 열적성숙도 특성 분석 연구
 최지영, 김성안
- 동시베리아해에서 산출되는 망가니즈단괴의 형태학적·지화학적 특성
 구효진, 이상미, 조현구, 김효임
- 버나다이트 분자동역학 시뮬레이션 연구
 Gerica Joie P. Castro, 권기덕

일라이트 특별세션 II

- 영동 일라이트 분말제품의 입도에 따른 광물학적 특성 분석
 백은지, 이유나, 김현나

라만 기반 비전통 저류층 가스분포 특성 분석 연구
Raman-based characteristic analysis of gas distribution
in unconventional reservoir

박선영(Sun Young Park)¹

¹한국지질자원연구원 석유에너지연구센터

저류층 내 가스의 거동을 이해하는 것은 가스의 생산이나 이산화탄소 저장에 있어서 매우 중요하다. 저류층 내 존재하는 가스의 총량을 측정하여 가스의 양을 측정하는 방법도 있지만 가스가 저류층 내 공극이나 광물에 흡탈착 하는 과정을 이해하기 위해서는 공극 내 존재하는 가스의 분포를 공간적으로 관찰할 필요가 있다. 라만 분광 분석은 라만 산란 현상에 기초한 방법으로 가시광선 영역의 레이저를 시료에 주입했을 때 광자들의 진동수가 시료와의 상호작용에 의해 변화되는 것을 측정하여 시료의 구조를 규명하는 것이다. 따라서 성분이 같으나 구조가 다른 동질이상 광물의 규명이 가능하며 시료의 상에 관계없이 기체, 액체, 고체의 시료에 대해 모두 분석할 수 있기 때문에 저류층 내 가스에 대한 분석도 가능하다. 또한 라만 장비에는 현미경이 장착되어 있어 초점 거리를 조절하여 시료의 표면에서부터 깊이방향으로 시료의 손상 없이 시료의 상변화를 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 라만 분석 시스템을 활용하여 사암 저류층 시료 내 CH₄ 가스의 피크 관찰을 수행하였다. 라만 분석을 통해 시료의 공극 내 가스 분포 관찰을 위해서 시료 내 가스를 주입할 수 있는 압력셀을 제작하였으며 세일 가스 저류층을 모사하는 모델 시료인 사암을 압력셀에 넣고 CH₄ 가스를 채워 실험을 수행하였다. 현미경으로 관찰한 결과 시료 내에는 주로 석영이 존재하는 것이 확인되었고 수 마이크로에서 수십 마이크로 크기의 공극이 관찰되었다. 공극에서 라만 분석을 수행한 결과 2917 cm⁻¹에서 CH₄ 가스의 피크가 선명하게 관찰되는 것을 확인할 수 있었다. 공극 주변으로 이차원 매핑을 수행한 결과 공극의 형태를 따라 CH₄ 가스가 분포하고 있는 것을 가시적으로 확인할 수 있었다. 본 연구결과를 통해 저류층 내 존재하는 공극 내 가스 분포를 라만 분석으로 규명할 수 있는 가능성이 확인되었으며 향후 다양한 조성 및 공극 특성을 가진 저류층을 대상으로 라만 매핑 분석을 수행하여 가스 분포 특성을 비교할 수 있을 것으로 생각된다.

폐금속광산의 토양오염물질 위해성평가에 관한 연구: 옥령광산을 중심으로 A Study on Risk Assessment for Soil Contamination of Abandoned Metal Mines: Focused on Okryeong Mine

홍지수(Ji-su Hong)¹·조영태(Young-tae Jo)¹·박정훈(Jeong-hun Park)^{1*}

¹전남대학교 환경에너지공학과

1. 서론

현재 우리나라는 토양 및 수질 오염을 유발시킬 개연성이 있는 휴·폐광산이 전국적으로 산재되어 있다. 이들 대부분은 다량의 폐석과 광미가 방치되어 있으며, 독성원소인 As, Cd, Cu, Pb 등을 함유한 광산폐기물은 주변 지표수, 지하수 및 토양을 오염시켜 농작물에 전이함으로써 인근 주민들의 건강에 심각한 위해를 초래할 수 있다. 이에 따라, 중금속 노출로 인해 발생될 수 있는 영향을 정량적으로 추정할 수 있는 토양오염물질 위해성 평가가 오염물질의 관리 및 오염된 환경 복원 전략에 중요한 과정이라고 할 수 있다.^{1,2,3)}

2015년 환경부에서는 효율적인 폐금속광산 관리를 위해 기초환경조사가 수행된 폐금속광산 중 그 우선순위가 높은 5개의 광산을 대상으로 정밀조사를 실시했다. 본 연구의 위해성평가 대상인 옥령광산은 5개의 광산 중 하나로 강원도 평창군에 위치하며 주요 오염물질은 As, Pb 이다.^{4,5)}

따라서, 본 연구의 목적은 강원지역에 소재한 옥령 폐금속광산의 주변 토양으로부터 유출된 중금속 오염도를 조사하고, 그 결과로부터 일일평균노출량, 비발암위해도인 총 위험지수(Total hazared quotient, THQ), 발암위해도인 총 초과발암위해도(Total excess cancer risk, TCR)를 산출하여 토양오염물질 위해성평가를 실시하고자 한다.

2. 연구방법

토양오염물질 위해성평가는 토양오염물질이 인체에 영향을 미치는 위해도에 대한 분석을 바탕으로 토양의 활용도를 고려하여 적정 정화수준을 허용하는 토양오염관리기법이다. 즉 사람이 환경적 위험에 노출되었을 경우, 발생 가능한 영향을 정성 또는 정량적으로 추정하는 과정이다. 유해물질에 대한 역학적, 임상적, 독성학적 및 환경학적 연구 결과로부터 모델을 이용한 외삽을 통해, 주어진 노출 조건하에서 인간에게 미칠 수 있는 건강 위해 범위를 예측하고 평가하는 것이다. 이러한 평가는 유해성확인, 노출평가, 독성평가 및 위해도결정의 주요 4단계를 통해 수행된다.^{5,6)}

3. 결과 및 고찰

3.1 발암 및 비발암위해도

연구지역의 발암위해도는 허용가능 총 초과발암위해도 기준($10^{-6} \sim 10^{-5}$)보다 높은 성인 5.44×10^{-5} , 어린이 5.81×10^{-5} 로 산정되어 발암위해도가 있는 것으로 나타났다. 총 발암위해도 대비 가장 큰 영향을 갖는 오염인자와 노출경로는 As와 토양접촉으로 산정되었다.

비발암위해도의 합인 위험지수(HI)는 성인 7.26×10^{-2} , 어린이 7.38×10^{-2} 로 위험지수기준 1

미만으로 비발암위해도는 없는 것으로 나타났다.(Table 3.1)

Table 3.1 Excess cancer risk(ECR) and hazard quotient(HQ)

Pathway		Intake Soil+Crop	Soil Contact	Intake Ground Water	Soil Inhalation	Outdoor Air Inhalation	TCR & HI
ECR	Adult	2.18E-05	3.22E-05	-	4.33E-07	-	5.44E-05
	Child	2.27E-05	3.53E-05	-	1.04E-07	-	5.81E-05
HQ	Adult	5.79E-02	1.44E-02	-	3.01E-04	-	7.26E-02
	Child	5.79E-02	1.58E-02	-	7.22E-05	-	7.38E-02

3.2 노출경로 별 위해도에 대한 기여도(%)

발암위해도는 성인과 어린이 모두 토양접촉 > 토양 + 농작물 섭취 > 실외 비산먼지 흡입 순으로 나타났으며, 비발암위해도는 성인과 어린이 모두 토양 + 농작물 섭취 > 토양접촉 > 실외 비산먼지 흡입 순으로 나타났다.(Fig 3.1)

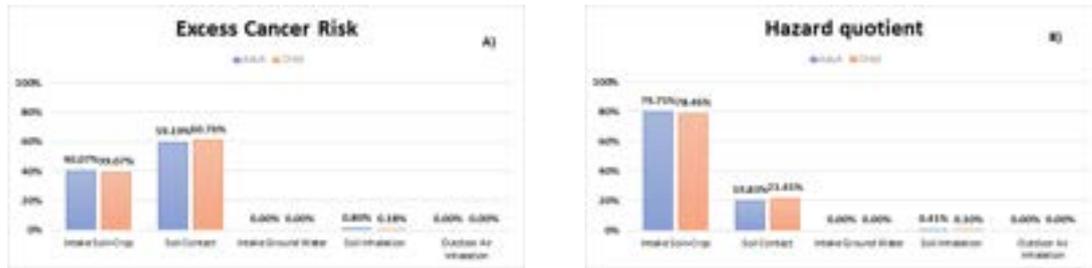


Fig 3.1 Contribution percent of Excess Cancer Risk (A) and Hazard Quotient (B) by media

3.3 중금속 별 인체 위해도에 대한 기여도(%)

발암위해도는 As에 의한 영향이 가장 높은 것으로 나타났다(100.00%). 이는 As가 다른 중금속 오염물질과는 다르게 노출경로 별 발암 독성자료가 대부분 존재하여 위해도 계산이 가능하다고 나타났다.⁷⁾ 비발암위해도는 As가 성인과 어린이에서 69.15%, 71.00%로 가장 높았고, 두 번째로 Cd가 각각 19.83%, 20.73%로 나타났으며, Cd는 비발암 독성자료가 As를 제외한 다른 중금속 오염 항목보다 더 많기 때문이라고 조사되었다.⁴⁾(Fig 3.2)

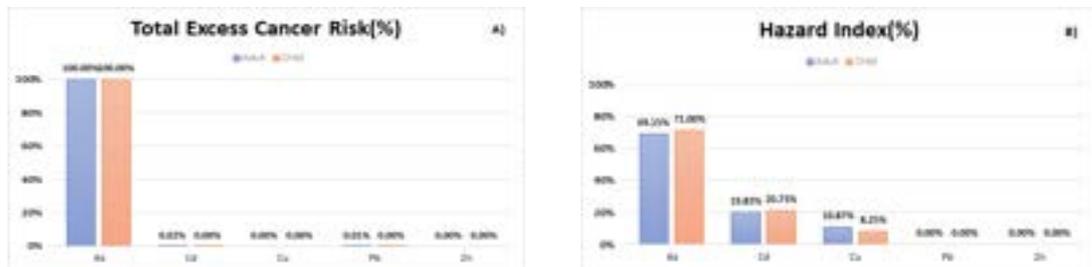


Fig 3.2 Contribution percent of Total Excess Cancer Risk (A) and Hazard Index (B) by each metal

3.4 정화목표치

정확목표치는 각 경로별로 산정되었다. 발암위해도를 목표수준 이하로 낮추기 위한 목표발암위해도의 기준은 10^{-5} , 목표비발암위해도는 0.7로 설정하여 계산하였다. 허용가능 초과발암위해도(10^{-5})를 기준으로 성인과 어린이를 고려하여 As의 경우 노출경로 중 토양접촉 경로에서 산정된 10.26 mg/kg로 나타났다. 비발암위해도 정확목표치는 대상 부지의 중금속 별 농도 값보다 높게 산출됨에 따라 대상 부지는 비발암위해도 면에서 안전한 것으로 조사되었다.

4. 결론

본 연구대상지인 옥령광산은 국내 폐금속광산과 유사하게 As가 주요 오염물질로 위해성이 큰 것으로 나타났으며, 토양분석결과 As, Cd, Cu, Pb, Zn 중금속 5종 중 As만이 위해성평가 결과 전반적으로 높은 위해성을 보이고 있다. 뿐만 아니라, Cu, Pb, Zn과 같은 중금속 오염물질의 노출농도가 존재하더라도 생물축적계수(BCF)의 부재(Pb, Zn), 피부흡수발암계수(SFabs)의 부재(Cd, Cu, Pb, Zn), 흡입단위위해도(URFinh)의 부재(Cu, Zn), 피부흡수비발암참고치(RfDabs)의 부재(Cu, Pb, Zn), 흡입노출참고농도(RfC)의 부재(As, Pb, Zn)로 인하여 해당 중금속 오염물질의 일부 노출경로에서 일일평균노출량(ADD), 초과발암위해도(ECR), 비발암위해도(HQ) 노출량이 산정되지 않는 경우가 많았다. 따라서, 실질적이고 타당한 위해성평가 결과를 산출하기 위해서는 필요한 노출인자들을 획득하기 위한 여러 연구와 지속적인 노력이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 안재민, 장순영, 황향란, 박대한, 이봄내, 김셋별, 이광희. 폐광산 인근 지역에서 생산되는 농산물의 중금속 오염도 평가. 한국환경농학회지, 39(1), 10-19, 2020.
- [2] 김민규, 김기준, 정교철. 폐광산 오염원인 분석 및 오염경로, 향후 지속가능성에 대한 평가. 대한지질공학회지, 28(3), 411-429, 2018.
- [3] 황원정, 김순오, 이상우, 차종문. 토양 내 중금속에 대한 위해성 평가 및 생물농축 계수 고찰. 한국자원공학회지, 51(6), 876-884, 2014.
- [4] 임태용, 이상우, 박미정, 이상환, 김순오. 국내 두 폐금속 광산의 중금속오염 인체위해성평가 비교. 대한환경공학회지, 37(11), 619-630, 2015.
- [5] 박정구 외. 2015년 폐금속광산 토양오염실태 정밀조사. 한국환경공단, 2015.
- [6] 윤정기. 토양오염 위해성평가의 이해. 한국환경농학회 학술발표논문집, 18(-), 128-137, 2018.
- [7] 신동, 박성재, 조영태, 봉재은, 박정훈. 토양오염 우려기준과 토양 자연배경농도에 대한 위해성평가. 한국지하수토양환경학회, 26(3), 37-49, 2021.

서태평양 마젤란 해산군 망가니즈각 기반암 변질테의 Fe-smectite 분석을 통한 고환경 복원 연구

Reconstruction of the paleoenvironment through Fe-smectite in the basaltic substrate of ferromanganese crust, the western Pacific Ocean

안현호(Hyeonho An)^{1,2}·정재우(Jaewoo Jung)²·김수현(Suhyun Kim)¹·김종욱(Jonguk Kim)²
·형기성(Kiseong Hyeong)²·고영탁(Yongtak Ko)²·양기호(Kiho Yang)^{1,3*}

¹부산대학교 해양학과

²한국해양과학기술원 대양자원연구부

³부산대학교 해양연구소

점토광물은 형성 환경을 반영하여 다양한 형태로 나타난다. 따라서 점토광물은 육성 기원, 열수기원, 자생 기원의 다양한 기원을 가지며, 형성 기원 및 환경에 따른 특징을 토대로 고환경 변화를 복원하는 지시자로 활용된다. 연구 지역인 서태평양 마젤란 해산군은 백악기에 형성된 현무암질 화산체로, 본 연구에서는 망가니즈각의 기반암에 나타난 변질테(alteration rim)에 형성된 점토광물을 이용하여 망가니즈각이 형성되기 전 해양 환경을 복원하고자 하였다. 망가니즈각 DGCR1314U는 한국해양과학기술원의 CR1302 항차(2014.02.14-03.13., 온누리호)에서 드렛지를 이용하여 해저산 OSM7 사면으로부터 획득하였다. 점토광물에 대한 광물학적, 지화학적 분석을 위해 X-선 회절 분석기, 주사전자현미경, 투과전자현미경을 활용하였다. 후방산란전자 이미지 분석 및 에너지 분산형 분광분석법 결과 점토광물을 지시하는 원소인 Al, Si, Fe, K이 변질테에서 상대적으로 높은 특징을 보였다. 집속 이온 빔을 활용하여 제작한 투과전자현미경 시료 분석 결과 1.2 nm의 면간거리를 가지는 Fe-smectite를 확인하였다. Fe-smectite의 화학 분석 결과 팔면체의 Fe 부화와 층간 양이온 중 K의 부화가 특징적으로 나타났다. 일반적으로 해양 환경에서 물-암석 상호작용으로 인해 형성된 Fe-smectite는 산화 환경을 지시하며, 점토광물 형성에 필요한 Al, Si, O 등의 원소가 꾸준히 공급되었음을 의미한다. 이는 망가니즈각의 최하부가 형성되기 이전 해양 환경을 반영하여 형성된 이차광물로 사료되며, 변질테의 이차광물은 망가니즈각이 피복되기 이전의 신생대 환경을 지시할 것으로 추정된다. 따라서, 신생대의 온난기 및 약 40 Ma의 드레이크 해협 개방 영향을 반영하고 있을 것으로 예상된다.

고온 고압 환경에서 제올라이트 X의 상전이 비교 연구 Phase transition of zeolite X under high pressure and temperature

이현승(Hyunseung Lee)¹·이수진(Soojin Lee)¹·이용문(Yongmoon Lee)^{1*}

¹부산대학교 지질환경과학과

1. 서언

제올라이트 X(zeolite X)는 등축정계의 Fd-3m 공간군에 속하며, 천연 제올라이트인 포자사이트(faujasite, $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Na}_2)_{29}\text{Al}_{58}\text{Si}_{134}\text{O}_{384}\cdot 240\text{H}_2\text{O}$)와 동일한 골격구조를 가지는 합성 제올라이트이다. 제올라이트 X는 격자 내부에 초동공과 크기가 다른 다수의 동공을 가지는 특성으로 인하여 산업체에서 일산화탄소 흡착제나 촉매제로 사용되고 있다. 현재까지 이루어진 제올라이트 X와 관련된 연구는 이온 흡착 및 치환 특성 또는 폐기물로부터의 합성 가능성 및 효율에 대한 보고가 주로 이루어져 왔다. 이를 이해하기 위한 제올라이트 X의 치환 특성, 열적 거동, 압축 특성 등의 독립적인 변수에 대한 기초연구가 주로 진행되어 왔다(Frising and Leflaive, 2008; Lee et al., 2007; Park et al., 2017; Yoldi et al., 2019). 그러나 고온 및 고압의 복합적인 환경하에서 제올라이트 X의 물성변화 및 상전이에 대한 보고는 빈약한 상태이다. 본 연구는 천연 포자사이트의 응용연구 및 지구과학적 연구를 진행하기 전 광물의 특성을 이해하기 위하여, 포자사이트와 동일한 구조를 가진 제올라이트 X를 이용하여 압력 및 온도, 압력전달매개체(pressure transmitting medium, PTM)에 따른 물질의 압축 특성 및 상전이 과정을 살펴보았다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

본 실험에 사용된 합성 제올라이트 X는 Alfa Chemistry(CAS No 68989-23-1, 미국)에서 구매하였다. 시료의 상동정 및 고온, 고압 실험은 포항공속기연구소 분말 회절 빔라인인 3D 빔라인에서 수행하였다. 측정된 피크들에 대한 동정(indexing)을 통해 등축정계인 Fd-3m 공간군에 해당 하는 것을 확인하였다. 격자상수는 $a = 24.9844(3) \text{ \AA}$ 이다.

상온, 상압에서 최대 250 °C, 5.15 GPa까지 온도와 압력을 상승시키며 X-선 분말 회절(X-ray powder diffraction, XRD) 데이터를 획득하였다. 시료의 가압을 위해 대칭형 다이아몬드 앤빌셀(symmetric diamond anvil cell, DAC, Beijing Scistar, China)을 이용하여 고압 환경을 조성하였다. 시료에 정수압(hydrostatic pressure)을 형성하기 위해 압력전달매개체로 3차 증류수 및 탄산수용액을 사용하였다. 탄산 수용액은 증류수에 이산화탄소 가스를 48시간 동안 용해시켜 제작하였으며 pH 미터를 이용해 측정된 탄산 수용액의 pH는 3.8이다. 시료의 가열은 오븐을 이용하여 DAC를 직접 가열하는 방식으로 이루어졌으며, 150, 200, 250 °C에서 각 1시간 동안 가열 후 상온에서 1시간 냉각 후 시료에 가해지는 압력을 측정하였다.

르바일의 전체 분말 패턴 분해법이 적용된 GSAS2 프로그램을 사용하여 각 압력 단계에서 물질의 격자상수를 도출하였다. 버치-머내한 2차 방정식이 적용된 EosFit 프로그램을 사용하여 각 제올라이트 X와 스멕타이트의 체적탄성계수를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

PTM으로 물을 사용한 실험(Fig. 1a)에서 제올라이트 X는 1.83 GPa, 150 °C에서 가열 후 그멜리나이트(gmelinite), 나트로라이트(natrolite)와 스멕타이트(smectite)와 동일한 구조를 가지는 물질로 상전이 하였다. 그멜리나이트는 제올라이트 X와 동일한 d6r 골격구조를 가지며, 제올라이트 X가 붕괴할 때 제올라이트 간 변환(interzeolite transformation) 과정을 통해 생성되었다(Mielby et al., 2022). PTM으로 탄산 수용액을 사용한 실험(Fig. 1b)에서는 물을 사용한 실험과는 달리 그멜리나이트와 나트로라이트 같은 제올라이트가 형성되지 않았으며, 스멕타이트로 한 번에 상전이가 일어났다. 제올라이트가 생성되는 pH 조건이 실험에 사용한 용액의 pH보다 높아 제올라이트 간 변환 과정이 발생하지 않은 것으로 생각할 수 있다.

두 가지 PTM 실험에서 공통적으로 최초 압력이 가해졌을 때 PTM이 구조 내로 들어가 제올라이트 X의 부피가 팽창하는 현상이 나타났다. 이후 압력 증가에 따라 부피는 등방적으로 감소하였다. 두 실험에서 제올라이트 X의 체적탄성계수는 기존 보고된 값($K_0 = 89(4)$ GPa)과 유사한 값($K_0 = 89 - 92(3)$ GPa)을 가지는 것을 확인하였다(Fig. 2). 상전이 생성물인 스멕타이트의 체적탄성계수는 탄산 수용액을 사용한 실험에서는 선형적인 체적탄성계수를 가진다. 반면, 물을 사용한 실험에서는 3.25 GPa 이후 스멕타이트의 부피 증가에 따라 비선형적인 체적탄성계수를 갖는다. 이는 해당 압력 단계에서 나트로라이트의 붕괴가 발생한 것을 원인으로 생각할 수 있다.

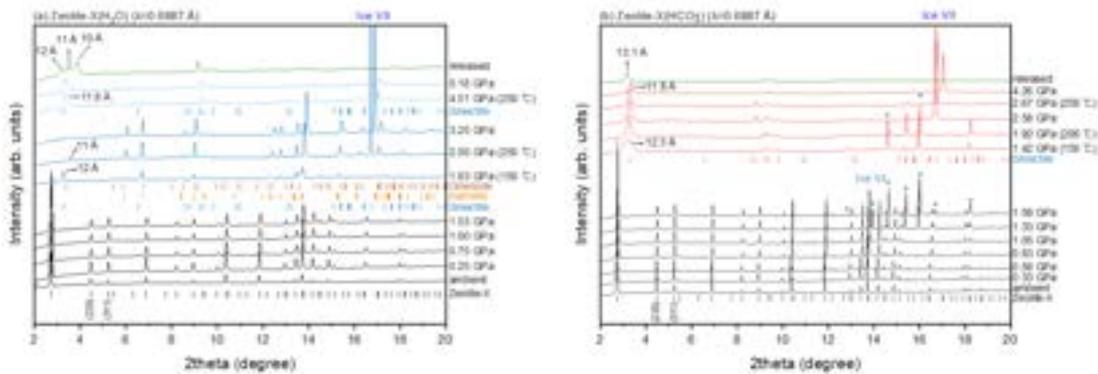


Figure 1. 제올라이트 X의 단색광 X선 회절 패턴 (a) PTM으로 물을 사용한 실험 (b) PTM으로 탄산 수용액을 사용한 실험

Figure 2. 압력에 따른 제올라이트 X와 스멕타이트의 단위포 부피 변화(골격 내 산소 원자 20개 기준, 20 O_f)

서남극 도슨-겟츠 트러프 퇴적물 내 점토광물 분석 결과에 대한 통계적 접근을
통한 퇴적물 공급지 및 퇴적환경 복원

Reconstruction of sedimentary environment investigation of sediment
provenances through clay mineral analysis using statistical approach:
Dotson-Getz trough, West Antarctica

강인성(Insung Kang)¹·박영규(Young Kyu Park)¹·유규철(Kyu cheul Yoo)²

·이민경(Min Kyoung Lee)²·김진욱(Jinwook Kim)^{1,*}

¹연세대학교 지구시스템과학과, 서울특별시 서대문구 신촌동

²극지연구소 빙하환경연구본부, 인천광역시 연수구 송도동

*Corresponding author: jinwook@yonsei.ac.kr

서남극 아문젠 해 도슨-겟츠 트러프에서 획득한 표층퇴적물 내 점토광물 분석 결과를 통한 군집분석을 수행하였다. 해양퇴적물 내 점토광물은 점토광물의 함량비, 일라이트 화학지수, 일라이트 결정도지수 등을 통해 퇴적물 공급지와 퇴적환경 연구에 널리 사용되어 왔다. 군집분석은 이러한 요소들의 상관관계를 통하여 지역을 여러 군집으로 나누고 각 군집의 구분되는 특징들을 제시할 수 있다. 본 연구에서는 점토광물의 군집분석 결과를 통하여 서남극 도슨-겟츠 트러프의 퇴적물 공급지와 퇴적환경을 유추하고자 한다.

군집분석 수행의 결과 도슨 빙봉의 서쪽 앞 지역과 그 외의 지역으로 총 두 군집으로 나누어지는 것을 확인하였다. 도슨 빙봉 서쪽 앞 지역 군집은 높은 일라이트와 클로라이트의 함량비, 낮은 스멕타이트의 함량비로 인해 다른 군집과 구분되는 특징이 나타나는 것을 확인하였다. 도슨 빙봉의 서쪽은 많은 양의 용빙수가 보고된 지역으로 대륙에서 공급되는 일라이트와 클로라이트의 공급이 많아질 수 있으며 국지적인 다른 공급지의 영향이 나타날 수 있는 지역이다. 추가적인 하부 코어의 분석을 통해 시간에 따른 빙봉의 이동과 퇴적환경의 변화 및 군집간 비교를 수행할 예정이다. 점토광물을 활용한 통계적 접근을 통해 서남극 지역의 퇴적물 공급지와 퇴적 환경에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

빙상 하부 퇴적물에서 미생물에 의한 점토광물의 물리적, 화학적 특성 변화 연구:
남극반도 크리스탈 사운드 지역

Variation in physico-chemical properties of clay mineral on microbial effect
in marine sediment: the Crystal Sound, Antarctic Peninsula

박영규(Young Kyu Park)¹·유규철(Kyu-Cheul Yoo)²·황청연(Chung Yeon Hwang)³
·이민경(Min Kyung Lee)²·김성한(Sung-Han Kim)²·이재일(Jaeil Lee)²
·김진욱(Jinwook Kim)^{1*}

¹연세대학교 지구시스템과학과, 서울시 서대문구 신촌동

²극지연구소, 인천시 연수구 송도동

³서울대학교 지구환경과학부, 서울시 관악구

크리스탈 사운드 (Crystal Sound)에서 획득한 해양 퇴적물을 이용하여 배양 실험을 실시한 결과, 철 환원 미생물에 의한 점토 광물의 물리적, 화학적 변화가 저온 조건임에도 촉진되었으며, 이는 점토 광물이 과거 빙상 하부 환경에서 환원 철의 중요한 공급원이 될 수 있음을 제시한다.

일반적으로 빙상 하부 환경은 빛이 없고 영양분이 공급되기 어려운 조건으로 남극에서도 생명체가 활동하기 어려운 매우 극한 환경이다. 하지만 최근 연구를 통해 빙저호와 같은 특수한 환경에서 용빙수와 기반암이나 퇴적층으로부터 기인한 광물이 화학자가영양균에 의해 환원 철을 사용하여 생지화학적 반응을 통해 탄소원과 에너지를 얻을 수 있음이 보고되었다. 이 과정에서 광물로부터의 환원 철의 공급은 아직까지 연구가 진행된 바가 거의 없다. 본 연구에서 시료를 획득한 크리스탈 사운드는 분지 지형에 두꺼운 혼탁류 층과 큰 역이 교호되며 나타났는데, 퇴적 당시 빙상 하부 조건으로 추정되며, 해당 시료를 저온, 혐기성 조건에서 배양했을 때 일라이트의 결정도가 나빠지고, 결정 구조의 무작위 배열이 증가하고 결정 크기가 감소했으며 일라이트 내 환원 철의 비율이 증가하는 결과를 보였다. 또한 철환원 미생물인 *Shewanella*균이 관찰되었다. 이를 통해 점토 광물이 빙상 하부 환경에서 환원 철의 공급원으로 고려될 수 있으며 남극의 철 순환에 기여할 수 있음을 제시한다.

층상형 광물의 마찰 거동에 대한 원자 수준의 이해 Atomic-scale understanding of frictional behaviors of layered-minerals

김주혁(Juhyeok Kim)¹·권기덕(Kideok D. Kwon)^{1*}

¹강원대학교 자연과학대학 지질학과

점토광물을 포함한 층상형 광물(layered-minerals)은 단층암의 기계적 특성을 결정하는 윤활유역할로 주목받고 있다. 산 안드레아스 단층 일부 섹션에서 비정상적인 포행(creep)이 관찰되는데, 점토광물이 윤활 작용을 한 것으로 이해되고 있다. 층상형 광물 마찰 특성은 수화/탈수에 따라 크게 달라질 것으로 예상되지만, 정확한 기작 규명을 위해서는 층간 물 함량 및 양이온에 의한 정전기적 상호작용 혹은 하중에 따른 수소결합 및 점탄성 변화가 층상형 광물의 마찰 강도에 어떤 영향을 주는 지 미시적 스케일의 연구가 필요하다. 특히, 층상형 광물의 {001} 표면에서 미끄러짐이 발생할 때, 광물의 격자 구조, 물 분자 및 층간 양이온 배열의 원자 수준 변화는 마찰 특성에 대한 주요 단서가 될 수 있다. 이번 연구에서는 원자 수준의 이해를 줄 수 있는 분자동역학 시뮬레이션(molecular dynamics simulation)을 이용하여 카올리나이트(kaolinite), 깁사이트(gibbsite), 버네사이트(birnessite)의 층간 물 함량에 따라 {001} 표면에서 미끄러짐 발생 시 광물의 마찰 특성을 분석하였다. 낮은 층간 물 함량에서는 stick-slip 현상이 발생했지만, 물 함량의 증가는 마찰계수의 감소와 함께 연속적인 미끄러짐을 유발했다. 이 연구는 층상형 광물의 윤활 작용에 대한 광물학적 기작을 규명할 수 있을 것으로 기대하며, 초기 연구 결과에 대해 토의한다.

스트론튬-함유 방해석의 결정구조 및 용해도 연구

A crystal structure and thermodynamics study of strontium-bearing calcite

김상건(Sanggeon Kim)¹·손상보(Sangbo Soni)^{1*}·현성필(Sung Pil Hyun)²

·권기덕(Kideok Kwon)¹

¹강원대학교 지질학과

²한국지질자원연구원

방해석에 함유된 스트론튬(Sr)은 광물 침전 당시의 환경을 유추하는 등 지질학 연구에 널리 사용되고 있으며, 스트론튬-방해석 연구는 방사성핵종인 ⁹⁰Sr의 이동성 저감기술 개발목적으로도 활발하게 진행되고 있다. 그러나, 화학분석이나 회절분석 만으로는 방해석 결정구조 내에 스트론튬의 화학종이나 스트론튬-함유 방해석의 열역학 정보가 명확히 정립되어 있지 않다. Mg-와 Zn-함유 방해석의 경우는 방해석 구조(R3c)의 끝 성분(end-member)인 CaCO₃/MgCO₃ 또는 CaCO₃/ZnCO₃의 고용체로 분석이 가능하지만, Sr의 경우는 SrCO₃ 끝 성분이 아라고나이트 구조(Pmcn)만을 가지기 때문에 스트론튬-함유 방해석을 고용체로 분석하는데 어려움이 존재한다. 이번 발표에서는 Sr 이온이 방해석 및 아라고나이트 결정구조 내에 동형치환 된 Ca_{1-x}Sr_xCO₃에 대해 Sr 함량 변화에 따른 구조적 특성과 열역학적 안정성을 양자역학 기반의 밀도범함수이론으로 계산한 연구 결과를 제시한다. 계산 결과, Sr의 함량이 증가할수록 방해석과 아라고나이트 부피 모두 증가하는 경향을 보였다. 방해석 구조에선 Ca²⁺와 마찬가지로 산소와 6배위, 아라고나이트 구조에선 9배위를 보였지만, Sr의 함량이 높은 방해석의 경우(x≥0.75) Sr²⁺이 6배위를 유지하지 못하였다. Sr-함유 탄산칼슘의 용해도곱 상수(solubility product constants)는 순수 방해석과 아라고나이트의 값과 크게 상이하지 않았지만, Sr의 함량이 증가할수록 방해석의 용해도는 증가하고 아라고나이트는 오히려 감소하였다. 따라서 저농도의 Sr은 방해석 구조에도 포함될 수 있지만, Sr의 농도가 높아질수록 방해석보다는 아라고나이트의 구조로 침전되기를 선호하는 경향을 갖는다. 결과적으로 암반 단열에 존재하는 고농도의 Sr-방해석은 용해될 가능성이 존재하기에 구조 내 포함하고 있던 Sr을 다시 이동시킬 수도 있을 것으로 보인다.

Configuration transformation of network modifier cation in amorphous earth materials above megabar pressures

Shujia Li¹·Sung Keun Lee^{1,2}

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826 South

²College of Natural Sciences, Institute of Applied Physics, Seoul National University, Seoul 08826 South
Korea

Network-modifier cations play a crucial role in determining the performance of glass by imparting additional disorder and flexibility into a network, altering network connectivity and associated properties. However, the knowledge of the electronic structure and bonding environment of network-modifier cations in densified glass networks is absent due to their complex topological structure and lack of in situ high-pressure element-specific probes. Non-resonant X-ray inelastic scattering (NRIXS) spectroscopy explores the electronic transitions in soft X-ray energy range utilizing hard X-ray, which make it possible to unveil the local bonding environments of low-*z* glasses within a high-pressure device.^{1,2} As the scattering cross-section of NRIXS is 4 to 6 orders of magnitude smaller than that of elastic X-rays, its application under ultra-high pressure has been challenging. Nevertheless, recent progress in X-ray optics allowed us to probe the structural transitions in oxide glasses and crystals above megabar pressure conditions.³⁻⁵ This study provides the first experimental evidence of electronic structure changes in network-modifier cations above megabar pressure through the NRIXS spectra analysis of alumina glass up to 140 GPa. This widely applied glass exhibits novel electrical and mechanical properties and embodies the critical composition of subducted mid-ocean ridge basalts.^{6,7} The energy of edge features remain unchanged until 100 GPa, then shift to higher and lower energy, respectively, upon further compression, indicating essential changes in the distance between modifier cation and neighbouring oxygen above megabar pressure. The pressure-enhanced pre-edge intensity of edges and the emergence of new edge features are indicative of an increasing average coordination number of modifier cation, enhanced distribution and distortion of polyhedrons. The results provide the novel experimental insight into the atomic configuration of the network-modifier cations up to megabar pressure and complete the missing part of the alumina glass network. Furthermore, it sheds light on the densification path of mid-ocean ridge basalts as they undergo subduction and eventually descend to the core-mantle boundary.

Reference

- (1) Lee, S. K.; Eng, P. J.; Mao, H. K., Probing of Pressure-Induced Bonding Transitions in Crystalline and Amorphous Earth Materials: Insights from X-ray Raman Scattering at High Pressure. *Rev. Mineral. Geochem.* 2014, 78 (1), 139–174.
- (2) Lee, S. K.; Eng, P. J.; Mao, H. K.; Meng, Y.; Shu, J., Structure of Alkali Borate Glasses at High Pressure: B and Li K-Edge Inelastic X-Ray Scattering Study. *Phys. Rev. Lett.* 2007, 98 (10), 105502.
- (3) Lee, S. K.; Kim, Y. H.; Yi, Y. S.; Chow, P.; Xiao, Y.; Ji, C.; Shen, G., Oxygen Quadclusters in SiO₂ Glass above Megabar Pressures up to 160 GPa Revealed by X-Ray Raman Scattering. *Phys. Rev. Lett.* 2019, 123 (23), 235701.
- (4) Kim, Y. H.; Yi, Y. S.; Kim, H. I.; Chow, P.; Xiao, Y.; Shen, G.; Lee, S. K., Pressure-Driven Changes in the Electronic Bonding Environment of GeO₂ Glass above Megabar Pressures. *J. Am. Chem. Soc.* 2022, 144 (22), 10025–10033.
- (5) Lee, S. K.; Yi, Y. S.; Kim, Y. H.; Kim, H. I., Chow, P.; Xiao, Y.; Eng, P.; Shen, G. Imaging of the Electronic Bonding of Diamond at Pressures up to two million atmospheres. *Sci. Adv.* 2023, in press.
- (6) Ricolleau, A.; Perrillat, J.-P.; Fiquet, G.; Daniel, I.; Matas, J.; Addad, A.; Menguy, N.; Cardon, H.; Mezouar, M.; and Guignot, N., Phase Relations and Equation of State of a Natural MORB: Implications for the Density Profile of Subducted Oceanic Crust in the Earth's Lower Mantle, *J. Geophys. Res.* 2010, 115 (B8), B08202.
- (7) Li, S.; Kweon, J. J.; Lee, S.; Lee, A. C.; Lee, S. K., Coordination Changes in Densified Aluminate Glass upon Compression up to 65 GPa: A View from Solid-State Nuclear Magnetic Resonance *J. Phys. Chem. Lett.* 2023, 14 (8), 2078–2086.

양자화학 계산을 이용한 물 분자의 Clumped 안정동위원소의 분배계수 특성 Equilibrium Fractionation of Clumped Isotopes in Water: Insights from Quantum Chemical Calculations

노세형(Sehyeong Roh)^{1*}·이성근(Sung Keun Lee)¹

¹서울대학교 지구환경과학부

지구물질에 존재하는 안정 동위원소의 평형상태에서의 분화(Equilibrium isotope fractionation of stable isotope)는 물질의 진동특성(Vibrational properties)에 기인하며, 물질이 지구시스템 내에서 겪는 다양한 과정들을 정량적으로 이해하는 데 도움을 준다. 다양한 지구물질 중 H₂O 분자는 지표의 70%를 차지하는 해양을 구성하는 유체이며, 지표에서는 대기 중 수증기나 빙하의 얼음으로 존재할 수 있고 행성 내부에서는 다양한 얼음상으로 전이하며 지구시스템의 산소 및 물질 순환에서 핵심적인 역할을 담당한다. 기존의 물 분자의 안정 동위원소 분화과정 연구들로부터, 증발과정 중 일어나는 16-산소와 18-산소의 질량 의존적 분화에 기반한 온도에 따른 해수와 빙하의 18-산소 이상치($\delta^{18}\text{O}$) 변화가 알려졌고 이는 지구환경변화의 정량적 설명에 기여하고 있다. 한편 여러 원자로 이루어진 분자의 동위원소의 분배 과정에서 무거운 동위원소 간의 선호가 발생할 수 있는데, 이렇게 묶여 있는 동위원소쌍을 Clumped 동위원소라고 부르며, 양자화학계산으로부터 이들 동위원소의 상대적인 분배/Clumping 특성을 규명할 수 있다. 최근의 양자계산 연구에서는 물 분자의 18-산소와 중수소 사이의 Clumping 관계가 보고되었으나(Liu, GCA, 256, 2016), 17-산소나 삼중수소를 고려한 전체 동위원소의 분배특성은 현재까지 보고된 바 없다.

본 연구에서는 16/17/18 산소와 수소/중수소/삼중수소의 조합으로 만들어지는 물 분자에 대한 무거운 원소 간의 Clumping 세기를 정량적으로 정의하여 계산하고, 그 결과로부터 산소와 수소 질량수 변화에 따른 Clumping 세기 변화 패턴을 분석하였다. 분배 함수 계산에 필요한 물 분자의 진동수는 전자범밀도 함수이론(Density Functional Theory)에 기반한 전자 교환-상관(Exchange-correlation) 에너지와 다양한 기저함수(Basis set)를 이용하여 Gaussian 16 프로그램으로 계산하였다.

양자계산 결과로부터 계산된 물의 3개의 진동모드의 진동수는 동위원소 질량수(m) 증가에 따라 감소하며, 최적화된 분자구조의 평형 결합길이(Bond length)와 결합각(Bond angle)은 각각, 0.963 Å 과 104.6°로 일정하다. m에 따라 구조는 변하지 않으나, Zero-point 에너지는 m이 증가함에 따라 감소한다. 로그 스케일로 변환한 분배함수의 비율[= $1000 \cdot \ln(\beta)$]은 산소와 수소의 m에 비례하여 증가한다. 산소가 바뀌는 경우 분자량에 따라 $\ln(\beta_{m-16})$ 값이 정비례에 가깝게 증가하며, 수소가 바뀌는 경우 $\ln(\beta_{D-H})$ 에 비해 $\ln(\beta_{T-H})$ 는 약 140% 크기이다. 또한 산소가 바뀌는 경우의 $\ln(\beta_{m-16})$ 보다 수소가 바뀌는 경우의 $\ln(\beta_{m-H})$ 이 매우 큰데, 이로부터 분배함수 비율은 치환되는 동위원소의 질량수 비율에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 정량적으로 계산한 Clumping 세기[Δ

Proceedings of the Annual Joint Conference

the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,

June 22-23, 2023, Korea

$= \delta H_2^*O^* - \delta H_2^*O - \delta H_2O^*$]는 18-산소와 삼중수소 사이에서 가장 크며, 17-산소와 삼중수소의 Clumping이 18-산소와 중수소의 Clumping보다 크다. 이로부터 Clumping 또한 질량수 비율이 더 큰 수소의 치환에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

본 계산 결과는 17-산소와 삼중수소를 포함한 Clumped 동위원소분배의 경향을 최초로 정립한 연구이다. 향후, 자연계에서 산소-수소 동위원소 조성의 기원을 보다 정량적으로 이해하기 위하여서는 온도의 영향을 고려하는 것이 필요하며, 비조화적 (Anharmonicity) 진동이 고려된 동위원소 분배계수의 계산 또한 필요하다. 상기한 연구 결과는 물 분자의 다양한 지표환경에서의 clumped 동위원소의 측정과 이를 기반으로 한 지질환경변화 기작을 설명하는 데 사용될 것으로 기대한다.

달 운석(DEW 12007)에서 관찰되는 알칼리 장석의 특징 Characteristics of alkali feldspar observed in lunar meteorite (DEW 12007)

김형규(Hyeong-Gyu kim)¹·박창근(Changkun Park)²·박선영(Sun Young Park)³
·김현나(Hyun Na Kim)^{1,4*}

¹공주대학교 지질환경과학과, 충청남도 공주시 공주대학로 56

²극지연구소 지권연구본부, 인천광역시 연수구 송도미래로 26

³한국지질자원연구원 석유에너지연구센터, 대전광역시 유성구 과학로 124

⁴공주대학교 황해지질환경연구소

1. 서언

Na-K, Ca-Na 고용체를 이루는 장석[feldspar, (K,Na,Ca)(Al,Si)₄O₈]은 지각을 구성하는 암석 및 달, 분화된 행성 또는 소행성 등에서 관찰되는 주요 규산염 광물이며 화학조성의 함량비에 따라 Ab-An-Or 의 삼각다이어그램에서 장석의 종류를 구분할 수 있다. 운석 또는 운석이 충돌한 크레이터(crater)에서 관찰되는 장석 조성의 비정질 상은 마스크리나이트(maskelynite)로 알려져 있으며, 셔고타이트(Shergottite) 운석에 존재하는 라브라도라이트(labradorite) 조성의 등방성 유리질 물질(isotropic glass)로 최초 정의되었다(Tschermak, 1872). 수십 GPa의 강력한 충격변성 작용에 의해 형성되는 것으로 알려진 마스크리나이트는 일반적으로 미분화 운석인 콘드라이트(chondrite)의 충격 변성 정도를 지시하는 지표로 활용된다(El Goresy et al., 2013; Krot et al, 2014).

본 연구 대상 시료인 Mount DeWitt(DEW) 12007 달 운석은 암석학적 연구를 통한 화강암질 마그마의 성인에 대한 연구 및 저콘의 U-Pb를 통한 연대학적 연구가 진행되어왔으며(Han et al., 2015), 장석의 충격변성에 따른 화학적 불균형에 관하여 최근 연구되었다(Kim et al., 2019). 더불어 비정질 사장석 조성의 마스크리나이트에 대해서는 많은 연구가 진행되어왔지만, 알칼리 장석의 결정도와 화학조성과의 상관관계에 대한 체계적인 연구는 미흡한 실정이다.

고용체 광물인 장석은 조성에 따라 비정질화 온도 및 압력의 차이가 존재하므로, 장석의 용융에 따른 화학조성을 변화를 연구함으로써 암석의 온도-압력 변화에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 암석학적 관찰 및 라만분광분석을 통해 DEW 12007 내 존재하는 암편에서 비정질상의 알칼리 장석이 관찰됨을 확인하였다. 알칼리 장석 비정질이 존재하는 달 운석의 연구를 통해 달에서의 화성활동 및 달 표면에서 일어났던 충돌(impact)에 관하여 중요한 정보를 획득할 수 있는 아주 좋은 기회이다. 따라서 본 연구는 달의 화성활동 및 충격변성작용을 해석하기 위한 예비연구로서, 암석학적 특징관찰, 라만분광분석 및 화학성분분석을 통해 Mount DeWitt(DEW) 12007에서 관찰되는 알칼리 장석을 연구하였다.

2. 시료 및 실험 방법

본 연구에 활용된 달운석(DEW 12007)은 2012-2013년 대한민국-이탈리아 남극 합동 조사에서 빅토리아 지역의 DeWitt mount 근처 청빙(blue ice)에서 발견되었다. 크기는 $7 \times 3 \times 3$ cm 이며, 총 무게 94.2 g 이다.

라만 분광분석은 한국지질자원연구원 석유해저연구본부에 설치된 Renishaw(inVia confocal raman microscope) 라만 분광기를 활용하였다. 532 nm파장의 레이저를 사용하였으며, 1800 gr/mm의 격자(grating), x100 대물렌즈, 출력은 50%로 시료의 파괴를 방지하면서 최대의 분석강도를 얻고자 하였다. 각 스펙트럼의 노출시간은 10초로 6번 반복 측정하였다. 광물의 화학분석은 극지연구소의 전계방사전자현미분석기(Field Emission EPMA, JEOL JXA-8530F)을 통하여 수행되었다. 가속전압 15 kV, 전류세기는 20 nA, $1 \mu\text{m}$ 의 전자빔을 사용하였다. 5개의 과장분산분광분석기(WDS)를 통해 TAPH(Na, Mg), TAP(Si, Al), PETL(K, Ca), LiF(Fe, Mn), LiFH(Cr, Ti)등 4개의 크리스탈을 활용하여 10개의 원소를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 관찰한 영역은 달운석에 존재하는 7개의 암편(clast) 중 하나로, 그레노파이어(granophyre) 암편(C3-2)이며, 1.5×0.8 mm의 직사각형 형태이다. 주로 사장석, 알칼리장석, 석영으로 구성되어 있으며 부수적으로 감람석, 티탄철석, 지르코놀라이트, 인회석 등이 관찰된다(Han, 2016). 알칼리 장석의 전계방사 전자현미분석결과 세니딘 조성으로 50-90 wt.%의 포타슘(K)함량 범위를 보인다.

관찰된 알칼리 장석은 조직 및 화학적 특성을 기준으로 광물결정 내부에 균열이 발달되어 있으며, K의 함량이 ~70~86 wt.%의 범위를 가지는 유형1(Type-1)과 균열이 거의 존재하지 않는 매끈한 표면을 가지며, 균열이 많은 광물입자 사이를 충전하고 있는 형태로 K의 함량이 ~50-63 wt.%의 범위를 가지는 유형2(Type-2)로 구분된다.

조직관찰 및 화학적 특징으로 구분된 두 가지 유형의 알칼리장석에 대해 라만분광분석을 진행하였다. 라만 스펙트럼의 관찰 범위는 $200-1400 \text{ cm}^{-1}$ (raman shift)이다. 약 480 및 505 cm^{-1} 의 라만 스펙트럼은 T-O-T (T = Si 또는 Al 사면체) 결합의 대칭적인 신축진동(symmetrical stretch)으로 알려져 있으며, Si-O-Si 결합의 대칭적인 신축진동은 $1040-1120 \text{ cm}^{-1}$ 에서 관찰된다. 약 114, 126, 154, 164 및 285 cm^{-1} 피크는 격자진동양상(lattice vibrational mode)으로 관찰되는 피크이다(Heymann and Horz, 1990; Matson et al., 1986). 분광분석 결과 약 285, 475, 510, 584, 815, 1120 및 1200 cm^{-1} 에서 강한 피크를 보이는 것을 확인하였으며, 스펙트럼의 반치전폭(FWHM, full width at half maximum)의 너비가 좁은 결정질의 특징을 보이는 스펙트럼은 유형1에서 관찰되며, 너비(width)가 넓은 비정질의 특징은 유형2에서 관찰되었다. 특징적으로 유형1은 약 283 cm^{-1} 에서 강한 피크를 보이나, 유형2의 경우에는 이 피크가 사라져 보이지 않는 것을 확인하였다. 결정질에서만 관찰되고, 비정질에서는 관찰되지 않는 283 cm^{-1} 피크를 활용하여 유형1과 유형2가 동시에 존재하는 영역에 대해 라만 분석(mapping)을 진행하였다.

본 연구에서는 달 운석 내 암편에 존재하는 알칼리 장석의 조직관찰 및 화학적 분석을 근거로 구분한 결과와 라만분광분석 결과가 상호 일치함을 보이는 것을 확인하였다. 특히, 라만 분광분석 실험방법은 비정질 상(phase)인 알칼리 장석의 분포와 결정의 알칼리 장석을 확인하는데 매우 유용함을 알 수 있었다. 달 운석의 암편에서 관찰되는 알칼리 장석의 비정질상은 운석 전반에서 관찰되는 사장석 조성의 마스컬리나이트 연구와 더불어 달의 형성 및 화성활동, 그리고 달 표면에서 일어났던 충돌(impact)에 관하여 중요한 단서를 제공해 줄 것으로 기대된다. 달 지각의 형성 및 진화사를 자세히 알기 위해서는 추후 알칼리 장석 내부의 미소 영역에서 미량원소 거동, 화학 조성변화 및 원자 단위 구조의 규명이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- El Goresy, A., Gillet, P., Miyahara, M., Ohtani, E., Ozawa, S., Beck, P. and Montagnac, G. (2013) Shock-induced deformation of Shergottites: Shock pressures and perturbations of magmatic ages on Mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 101, 233-262.
- Han, J., Kwon, S-T., Lee, K. W., Kim, T., Lee, M. J., Park, C., Lee, J. I., (2015). Petrography, geochemistry, and age of a granophyre clast in the lunar meteorite DEW 12007. 78th Annual Meeting of the Meteoritical Society.
- Han, J. (2016). Petrography, geochemistry, and age of granophyre clast in the lunar meteorite DEW 12007, Yonsei University.
- Heymann, D. and Horz, F. (1990) Raman-spectroscopy and X-ray diffractometer studies of experimentally produced diaplectic feldspar glass. *Physics and Chemistry of Minerals*, 17, 38-44.
- Kim, H. N., Park, C., Park, S. Y., Kim, H., & Kim, M. S. (2019). Partial melting-induced chemical evolution in shocked crystalline and amorphous plagioclase from the lunar meteorite Mount DeWitt 12007. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 1852-1863
- Krot, A. N., Keil, K., Scott, E. R. D., Goodrich, C. A. and Weisberg, M. K., (2014) *Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships, Meteorites and Cosmochemical Processes*, 1(Second Edition). Elsevier, 1-63
- Matson, D. W., Sharma, S. K., Philpotts, J. A. (1986). Raman Spectra of Some Tectosilicates and of Glasses along the Orthoclase-anorthite and Nepheline-anorthite Joins. *American Mineralogist*, 71, 694-704
- Tschermak, G. (1872) Die Meteoriten von Shergotty und Gopalpur. *Sitzungsberichte / Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch - Naturwissenschaftliche Klasse Abteilung I*, 65, 122-146.

제일원리 계산을 통한 극한 압력 환경에서의 주석 산화물
결합 구조 및 전자 구조 전이 연구

First principles calculation of structural and electronic transitions
in tin oxide at high pressure

김용현(Yong-Hyun Kim)^{1,*}·이성근(Sung Keun Lee)¹

¹서울대학교 지구환경과학부

암석형 행성의 하부 맨틀을 구성하는 산화물은 극한 압력 환경에서 배위 환경의 전이를 수반하는 구조 변화를 겪습니다[1]. 이러한 원자 구조 변화는 지구 및 슈퍼-지구와 같은 암석형 행성의 내부 구조에 대한 간접적인 정보를 제공할 수 있습니다. 지구 하부 맨틀의 압력 환경은 약 ~1.3 메가바에 달하며, 슈퍼-지구의 경우 크기에 따라 수-수십 메가바에 달할 것으로 예상됩니다. 암석형 행성의 층상 구조 및 분화 과정에 대한 광물학적 이해가 필요하지만, 수-수십 메가바의 극한 환경에서 산화물이 겪는 구조 전이를 규명하는 것은 어려움이 많습니다. 이때 구조적인 유사성을 갖는 물질을 이용하면, 접근이 가능한 압력 범위에서 거대 행성 내부에서 나타나는 구조 전이에 대한 정보를 추론할 수 있습니다[2]. 본 연구에서는 맨틀의 주요 구성 물질인 SiO₂의 수 메가바 환경에서의 전이 과정을 추론할 수 있는 SnO₂ 광물의 전자 구조 변화를 조사하였습니다. SnO₂ 동질이상 광물의 전자 구조 및 산소 비탄성 X-선 산란 스펙트럼은 온포텐셜-평면보충과 (FP-LAPW) 방법론을 바탕으로 하는 WIEN2k 프로그램으로 계산하였습니다. 극한 환경에서 SnO₂ 결정의 양이온 배위수가 6(대기압), 7(41 GPa), 8(61 GPa)으로 증가하며, 음이온인 산소의 배위 환경 역시 ^[3]O에서 점차 ^[4]O으로 변화합니다. 이 과정에서 산소 주변의 전자 구조는 상당한 비편재화를 겪으며, 산소 비탄성 X-선 산란 스펙트럼의 ~15 eV 영역(E-E_F)에서 새로운 형태의 전자 분포가 형성된다는 사실을 확인할 수 있습니다. 또한 전자가 많은 양이온과 결합한 산화물에서는 결합에 참여하지는 않는 산소 d-오비탈의 분포가 증가한다는 사실을 확인하였습니다. SnO₂의 배위 환경 전이는 메가바 이하에서 진행되어, 실험을 통해 거대 행성의 하부 맨틀에서 나타나는 배위 환경 전이를 직접적으로 규명할 수 있을 것으로 예상됩니다. 또한 슈퍼-지구와 같은 행성에서는 하부 맨틀 내에 배위수 변화를 동반하는 광물 상전이 현상으로 인해 새로운 전이대가 분포하고 있을 것으로 생각되며, 비편재화된 전자 구조에서 기인하는 독특한 특성으로 지구와 같은 소형 행성과는 다른 진화 경로를 겪었을 것으로 예상됩니다.

Reference

- [1] Lee, S. K., Kim, Y.-H., Yi, Y. S., Chow, P., Xiao, Y., Ji, C., and Shen, G. (2019), Oxygen quadclusters in SiO₂ glass above megabar pressures up to 160 GPa revealed by X-ray Raman scattering, *Physical Review Letters* 123(23), 235701.
- [2] Kim, Y.-H., Yi, Y. S., Kim, H.-I., Chow, P., Xiao, Y., Shen, G., and Lee, S. K. (2022), Pressure-driven changes in the electronic bonding environment of GeO₂ glass above megabar pressures, *Journal of the American Chemical Society* 144(22), 10025-10033.

**고에너지 볼 밀을 이용한 몬모릴로나이트 분쇄 시 분쇄 방법에 따른
입도 및 결정도 변화 연구**
**Effect of grinding method on particle size and crystallinity of Montmorillonite
using high energy ball mill**

박보경(Bo Gyeong Park)¹·김현나(Hyun Na Kim)^{1,2*}

¹공주대학교 지질환경과학과

²공주대학교 황해지질환경연구소

점토광물인 몬모릴로나이트는 벤토나이트의 주 구성 광물로, 다양한 산업에서 활용된다. 점토광물은 입도 분포에 따라 물성이 변화할 수 있으며, 이는 분쇄 방법에 따라 달라질 수 있다. 분쇄 방법은 건식 분쇄와 습식 분쇄로 구분되며 습식 분쇄 시 용매의 종류가 입도와 결정도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 적합한 분쇄 방법을 선택하는 것이 중요하다. 몬모릴로나이트는 습식 분쇄 시 용매에 따라 팽윤성이 변하므로 용매의 종류가 분쇄에 큰 영향을 줄 수 있다. 하지만 습식 분쇄에 사용되는 용매에 따른 몬모릴로나이트의 입도 변화에 대한 연구는 부족하여, 본 연구에서는 건식과 습식 분쇄를 비교하고, 습식 분쇄 시 증류수와 에탄올을 사용하여 용매에 따른 입도 감소와 결정도 변화를 알아보려고 하였다.

고에너지 볼 밀을 사용하여 분쇄를 진행하였으며, X-선 회절분석(XRD), 주사전자현미경 분석(SEM)을 진행하여 입도 및 결정도 변화를 알아보았다. X-선 회절분석 결과, 건식 분쇄 시 피크 세기가 전체적으로 감소한 반면, 습식 분쇄 시 주로 (001)면의 피크 세기가 감소하였다. 해당 변화는 증류수보다 에탄올 습식 분쇄에서 뚜렷하였다. 반면 고각에 존재하는 피크 세기 감소는 증류수에서 더 잘 관찰되었다. 이와 같은 결정도 변화는 건식 분쇄 시 모든 방향에 대한 비정질화를 의미하며, 습식 분쇄 시 (001)면의 박리가 발생함을 지시한다. 또한 박리 정도는 증류수보다 에탄올 용매에서 우세함을 시사한다. 주사전자현미경 분석 결과, 입도 감소는 습식 분쇄보다 건식 분쇄에서 뚜렷하였으며, 용매에 따른 차이는 미미하였다. 입자 모양은 건식 분쇄 시 비정형을 보였으며, 증류수보다 에탄올 습식 분쇄에서 더 얇은 두께의 판상형태가 관찰되었다. 이러한 입도 및 입자 형태 변화는 건식 분쇄 시 분쇄 효율의 증가와 에탄올 사용 시 박리 현상 발생을 지시한다. 따라서 분석 결과는 분쇄 방법과 습식 분쇄의 용매 종류에 따른 결정도 및 입도 변화가 존재함을 시사한다.

본 연구에서는 광물 분쇄 시 분쇄 방법과 용매에 따라 몬모릴로나이트의 입도 및 결정도 변화를 확인하였다. 이와 같은 결과는 분쇄 방법과 용매 종류를 적절히 선택함으로써 원하는 입도와 입자 형태 조절이 가능하다는 것을 의미한다. 따라서 벤토나이트와 관련된 다양한 산업적 활용 시에 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

세슘(Cs)이 흡착된 층상규산염 광물의 열물성 비교 연구 Comparative thermal behaviors study of Cs-sorbed phyllosilicates minerals

박상우(Sangwoo Park)¹·김현수(Hyeonsu Kim)¹·김표상(Pyosang Kim)¹

·성동훈(Donghoon Seoung)^{1*}

¹전남대학교 지질환경과학과

1. 서언

2011년 일본 후쿠시마 제1 원자력발전소 사고로 인한 일본 후쿠시마 지역의 심각한 환경오염 이후 점토광물에 대한 세슘의 흡착 거동과 탈착에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 원자력 발전 후 발생하는 고준위 방사성 폐기물의 처분은 현재 여러 나라에서 큰 문제이다. 고준위 방사성 폐기물의 처분장을 설계하기 위해 인공 방벽 시스템(Engineered Barrier System, EBS)을 이용하고 있으며, 처분장을 구성하는 완충재로 벤토나이트(Bentonite)를 채택하고 있다. 벤토나이트의 주 구성광물인 몬모릴로나이트(Montmorillonite)가 세슘이온을 흡착할 수 있다는 점을 이용하여 몬모릴로나이트를 완충재로서의 성능과 적합성을 평가하기 위해 선행 연구가 진행되었다. 선행 연구에서 경주산 벤토나이트(KJ-II, Ca-type Montmorillonite)를 기반으로 세슘을 흡착하여 물로 포화된 환경에서 실시간 열물성 실험을 진행하였다. 본 연구는 이전의 선행연구에 사용된 몬모릴로나이트와 대조군으로 바이오타이트(Biotite)와 일라이트(illite)를 추가하여 몬모릴로나이트의 완충재로서의 적합성과 다른 층상 규산염 광물의 완충재로서의 가능성을 확인하기 위해 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

흡착은 질산 세슘($CsNO_3$) 1M 용액 20mL에 시료 2g을 첨가하여 60°C의 온도에 12시간 교반 후 진공펌프를 이용하여 증류수로 세척하는 과정을 총 4회 반복하였다. 흡착 전 후 시료의 화학조성을 확인하기 위해 X-선 형광 분석법(X-ray Fluorescence, XRF)으로 시료를 측정하였다. 물로 포화된 환경에서의 실시간 열물성 실험을 위해 포항가속기 연구소 3D(XRS) 빔라인에서 상온에서 최대 250°C까지 가열시키고 다시 상온으로 냉각하면서 X-선 회절 분석(X-ray Diffraction, XRD) 데이터를 획득하였다. 고온 유수 환경을 모사하기 위해 Heating Cell과 Capillary를 이용하여 실험을 진행하였다.

X-선 형광 분석을 통해 얻은 데이터는 Wt%(Weight Percent)를 At%(Atomic Percent)로 변환하여 화학조성을 확인하였다. X-선 회절 분석을 통해 얻은 데이터는 CMPR 프로그램을 이용하여 온도에 따른 d -spacing 변화를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

X-선 회절 분석 결과, 몬모릴로나이트는 세슘 흡착 후 $d(001)$ 이 13.97Å에서 12.42Å으로 감소하였다. 바이오타이트는 세슘 흡착 후 $d(001)$ 이 10.06Å에서 10.05Å으로 거의 변화하지 않았다. 일라이트는 세슘 흡착 후 $d(001)$ 이 10.05Å에서 9.97Å으로 거의 변화하지 않았다.

열물성 실험 결과, 몬모릴로나이트는 초기 상온의 물로 포화된 상태에서 $d(001)$ 이 18.88Å으로 크게 증가하였다. 가열과정에서 200°C부근 탈수작용이 일어나 $d(001)$ 이 10.52Å으로 크게 감소하였다. 냉각과정에서 $d(001)$ 이 14.39Å으로 일부 회복되었다. 몬모릴로나이트는 팽창성이 매우 높아 물로 포화된 상태에서 층간(Inter Layer)에 물을 흡수해 상온의 $d(001)$ 이 크게 증가하는 것으로 파악하였다. 세슘이 흡착된 몬모릴로나이트는 초기 상온의 물로 포화된 상태에서 $d(001)$ 이 12.55 Å으로 거의 변화하지 않았고, 가열과정에서 200°C부근 탈수작용이 일어나 $d(001)$ 이 11.49Å으로 감소하였다. 냉각과정에서 $d(001)$ 이 12.36Å으로 대부분 회복되었다. 세슘이 흡착된 몬모릴로나이트는 세슘이온의 크기 때문에 초기 상온의 물로 포화된 상태에서 층간에 물이 흡수하지 않는 것으로 파악하였다. 또한 가열과정에서 흡착 전에 비해 비약적으로 안정된 모습을 보였다. 바이오타이트와 일라이트 모두 가열과정과 냉각과정에서 변화가 거의 없었다. 세슘이 흡착된 바이오타이트와 일라이트 모두 열물성에 대한 안전성은 매우 뛰어났다.

그림 1. 열물성 실험 결과- 온도별 X-선 회절 패턴

A) 몬모릴로나이트 B) Cs-exchange 몬모릴로나이트

그림 2. 몬모릴로나이트의 온도별 $d(001)$ 의 변화-

A) 몬모릴로나이트 B) Cs-exchange 몬모릴로나이트

초분광 영상 시스템을 사용한 석회석 순도 매핑: 옥계광산의 사례연구
Limestone purity mapping using hyperspectral imaging system: A case study
of Okgye Mine, South Korea

후인휘화(Huynh Huy Hoa)¹·유재형(Yu Jaehyung)^{2*}

¹충남대학교 우주지질학과

^{2*}충남대학교 지질환경과학과

This study introduces a hyperspectral mapping approach on limestone purity mapping as well as mixture of different levels of metamorphism occurred on the limestone body by intrusion of intermediate dyke distributed over Okgye Quarry for the first time. The mineralogical analysis revealed the mineral composition for naturally occurring samples, showing various carbonate and silicate minerals, and we found calcite minerals existed in felsic dyke rocks. The Mg and Ca composition of limestone and dolostone varied significantly, inferring the mixture of minerals. The spectral characteristics of limestone, dolostone and felsic dyke rocks showed major absorption features of the target minerals mixed with the absorption features of accessory carbonate minerals affected by mineral composition. The prediction models of the purity levels were derived based on the chemical composition, spectral characteristics as well as laboratory analysis of field samples using hyperspectral camera, spectrometer and XRF analyzer. As the results, limestone purity mapping derived by RF, SVM and BLR showed good performance for purity mapping in over 130 samples with high overall accuracy, kappa coefficient. We strongly believe that the hyperspectral imaging technique in this paper has great potential for geological mapping and mineral resources exploration in the future.

고온 고압 하에서 합성 버네사이트를 이용한 탄소 반응 연구 Carbon reaction studies using synthetic birnessite under high-temperature and high-pressure conditions

김중원(Joongwon Kim)¹·김계홍(GyeHong Kim)¹·김표상(Pyosang Kim)¹·
김현수(Hyeonsu Kim)¹·박상우(SangWoo Park)¹·성동훈(Donghoon Seung)^{1*}
¹전남대학교 지질환경과학과

1. 서언

버네사이트(birnessite)는 심해저환경에 분포하는 망가니즈단괴(manganese nodule)를 구성하는 망가니즈산화물(manganese oxide) 중 흔하게 관찰 되는 층상수화망가니즈산화물이다. Mn^{+3} , Mn^{+4} 의 망가니즈 이온 중심으로 산소가 6배위 하여 MnO_6 팔면체 형태의 층상구조를 이루며, Mn^{+3} 로 인한 구조적 음전하로 층간에 양이온과 물 분자가 결합하여 전기적으로 안정한 상태를 유지한다. 하지만 자연계에 존재하는 버네사이트는 구조적으로 불안정하고 불균질하며 여러종류의 양이온이 혼합되어 있다. 따라서 본 연구에서는 불순물 없고 구조가 안정하며 결정도 높은 합성 버네사이트를 사용하여 고온 고압 환경하에서 탄소와의 반응을 각 온도-압력 단계별 X-선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD) 실험을 진행했다.

2. 시료 합성 및 실험 방법

본 연구에서는 Feng et al.(2004)에서 사용된 산화-환원(reduction-oxidation, redox) 방법을 수정하여 합성 Na-버네사이트를 합성하였고 이를 고온고압 실험 시료로 사용하였다. 포항가속기연구소(Pohang Accelerator Laboratory, PAL) 5A 빔라인을 방문하여 고온고압 X-선 회절 분석실험을 진행했다. 압력을 만들기 위한 장치로 다이아몬드 앤빌셀(Diamond Anvil Cell, DAC)을 사용했다. 시료와 함께 루비볼(ruby ball)을 지름 250 μ m, 두께 100 μ m의 개스킷 구멍에 넣어 루비형광(ruby fluorescence)을 이용한 압력을 측정했고 압력전달매체(pressure transmitting medium, PTM)로는 이산화탄소 가스를 사용했다. 실험은 ex-situ로 진행됐으며 상온상압부터 300 $^{\circ}$ C, 4.34GPa과 압력해제까지 총 9차례 X-선 회절 분석 결과 값을 획득했다.

3. 결과 및 고찰

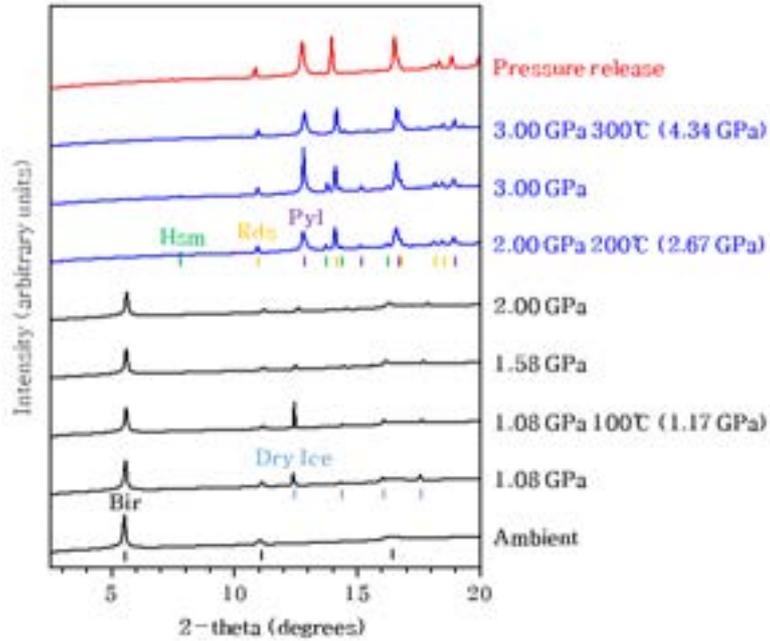


Figure 1. 포항가속기연구소(Pohang Accelerator Laboratory, PAL) 5A 빔라인 X-선 회절 분석자료. 0.692624Å의 파장을 사용했으며 Bir은 버네사이트(Birnessite), Hsm은 하우스만나이트(Hausmannite), Rds는 능망가니즈석(Rhodochrosite), Pyl은 연망가니즈석(Pyrolusite)를 뜻하는 IMA symbol이다.

상온상압환경에서 압력을 1.08GPa로 상승시켰을 때 압력전달매체로 주입했던 이산화탄소 가스가 드라이아이스 상태로 상전이 하였다. 압력을 2.00GPa에서 200°C로 가열시키고 1시간 동안 상온에 두어 온도평형을 맞춰주었다. 200°C, 2.00GPa(2.67GPa)에서 버네사이트의 망가니즈팔면체 층상이 붕괴되어 주변의 물질과 반응하여 상전이가 일어났다. X-선 회절 분석 결과를 데이터베이스의 광물과 비교 분석한 결과 연망가니즈석(Pyrolusite, P 4₂/mnm, MnO₂), 능망가니즈석(Rhodochrosite, R -3, MnCO₃), 하우스만나이트(Hausmannite, I 4₁/amd, Mn₃O₄)로 상전이 된 것을 확인했다. 이후 상승시킨 온도와 압력에서 하우스만나이트는 줄었고 연망가니즈석과 능망가니즈석은 모두 상을 유지했으며 최대 300°C, 3.00GPa(4.34GPa)에서도 상을 유지했다. 이후 압력을 해제했을 때 세 광물 모두 확인 되었으며 비가역적인 반응은 일어나지 않았다. 이는 고온고압에 의해 망가니즈팔면체 층상구조가 붕괴되어 망가니즈팔면체와 압력전달매체로 존재한 기체상태의 이산화탄소가 결합한 것이며 전체 생성물의 약 30%의 능망가니즈석이 형성된 것으로 사료된다.

초분광 원격 탐사를 이용한 자연 발생 석면 모암의 식별 및 분류: 실험실 접근법
Identification and classification of Naturally Occurring Asbestos host rocks
using Hyperspectral Remote Sensing: A Laboratory Approach

그레이스 말비느 무고아 부수구 골로(Grace Malvine MOUGHOA BOUSSOUGHOU NGOLO)¹

·유재형(Yu Jaehyung)^{2*}·후인휘화(Huynh Huy Hoa)¹

¹충남대학교 우주지질학과

^{2*}충남대학교 지질환경과학과

Asbestos has been recognized as harmful to human health, and, thus, many countries have decided to remove asbestos-containing materials. Previous studies have used hyperspectral data to recognize and identify asbestos, mainly asbestos-containing roofs. People are not always aware of the existence of naturally occurring asbestos. Naturally occurring asbestos (NOA) containing in rocks has not often been the subject of much study. In this paper we focus on the identification and the classification of NOA and associated rocks by using hyperspectral data and machine learning algorithms. A total number of 18 rock samples were scanned by using a Specim SWIR Hyperspectral Camera 384, which acquired data in 288 spectral channels, ranging from 930 to 2500 nm. The spectral characteristics of samples were compared to the reference library, and distinctive spectral differences were identified for limestone, dolostone, and peridotite. The data was trained on two different machine learning algorithms, random forest and support vector machine. The random forest classification showed an overall accuracy of 86.15% and support vector machine model also achieved an overall accuracy of 88.04%. Although support vector machine has a higher overall accuracy than random forest, the latter was more effective in detecting asbestos. The use of spectral feature fitting allowed distinct identification of asbestos, dolostone, limestone and peridotite. This study demonstrated that it is possible to identify and classify host rocks associated with naturally occurring asbestos using hyperspectral data.

충남 유구지역 사문암 니켈 잠재성 예비 연구 A preliminary study on the Ni potential of Yugu serpentinite

김이정(Ijeung Kim)¹·고상모(Sang-Mo Koh)¹·Otgon-Erdene Davaasuren¹
·안기문(Ahn Gi Moon)¹·김대영(Daeyeong Kim)²·김태환(Taehwan Kim)²·이범한(Bum Han Lee)^{1*}
¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부 희소금속광상연구센터
²극지연구소 지권연구본부

최근 배터리 핵심 원료인 니켈의 수요가 급격히 증가함에 따라 국내 니켈 자원의 잠재성을 확인하기 위해 충남 유구지역 사문암체에 대한 예비 조사를 수행하였다. 경기 육괴에 있는 충남 유구지역은 국내에서 가장 큰 규모의 초염기성암체가 노출된 곳으로, 사문석화가 다양하게 진행되어 있다. 유구지역 사문암의 암상은 미립질에서 반상과쇄조직의 다양한 형태로 나타나며, 반정은 주로 휘석으로 구성되고, 기질부는 감람석과 사문석이 채우고 있다. 사문암 내 사문석은 안티고라이트(Antigorite)로 확인되며, 변성 작용에 의한 자철석 층과 우백질 층의 엽리가 잘 발달되어 있다. 사문암 내 엽리와 단층은 다양한 방향으로 나타나며, 사문암체의 북쪽은 남동방향, 남쪽은 남서방향의 주향이 우세하게 발달되어 있다. 화학 조성 분석 결과 유구지역 사문암은 Sub-arc 혹은 Abyssal peridotite로부터 기원한 것으로 나타난다. 유구지역 사문암체의 다양한 조직과 변성 및 변형 정도로 미루어 볼 때 사문암의 형성은 한 번의 광역변성작용이 아닌 여러 차례의 복잡한 변성작용을 겪은 것으로 보인다. 휴대용 X-선 분광기(Portable X-ray Fluorescence analysis)로 분석한 유구지역 사문암 내 니켈의 함량은 1582-2235 ppm으로 비교적 높은 것으로 확인되어 Ni 광상 개발 잠재성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 경제적이고 체계적인 니켈 광체 확보를 위해 정확한 자원량 평가, 성인 연구, 선광 연구 등을 수행할 예정이다.

ZrI₆Tl₁₁⁹⁺ 클러스터가 도입된 제올라이트 A의 합성 Synthesis of ZrI₆Tl₁₁⁹⁺ cluster in Zeolite A

임현승(Hyeonseung Lim)¹·추현욱(Hyeonuk Choo)¹·박종삼(Jong Sam Park)²

·임우택(Woo Taik Lim)^{1*}

¹안동대학교 화학생명공학과

²대구보건대학교 방사선학과

1. 서언

제올라이트는 삼차원 결정성 고체이며 일반적으로 알루미늄, 실리콘 및 산소를 포함한 구조로 이루어져 있다. 또한 교환 가능한 양이온은 제올라이트의 공동에 위치할 수 있다. 이러한 제올라이트는 직경 2nm 미만의 기공이 규칙적으로 분포되어있기 때문에 공동에 분자나 클러스터를 나노 스케일로 도입을 할 수 있다. 제올라이트 A의 골격 외 위치에는 4가 이상의 양이온을 도입하는 것에 대한 이전연구에서는 이러한 양이온이 일반적으로 염화물-복합체 클러스터의 형태로 제올라이트 공동에 흡착되는 것으로 나타났다. 이전연구에서는 ZrCl₆ 2-, HfCl₆ 2-, TiCl₆ 2- 및 Zr₅Cl₁₈ 10+ 와 같은 염화물-복합체 클러스터의 도입이 된 것들을 확인할 수 있는데, 이러한 MCl₆ 2-(M = Zr⁴⁺, Hf⁴⁺ 또는 Ti⁴⁺) 클러스터는 라지 캐비티의 중심에서 팔면체로 Cl⁻ 이온과 결합하여 형성되었다. 이러한 연구들에서 제올라이트 공동 내부에 다양한 양이온이 포함된 염화복합체 클러스터의 구조는 보고된 바 있으나 브롬화물이나 요오드화물 이온과 같은 다른 할로젠화 이온을 포함하는 클러스터구조는 많이 보고된 바가 Cs, Na-A 내의 ZrBr₆ 2- 및 ZrI₆ 2- 구조만이 있다. 이러한 염화물 클러스터가 도입된 제올라이트의 일부는 발광특성을 나타내었다. 그리고 제올라이트 기반 형광체 또는 신틸레이터 내에서 할로젠화물 이온의 변화를 통해 발광의 넓은 스펙트럼을 나타낼 수 있다는 여러 연구 결과가 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 Tl-A에 ZrI₄(g)를 반응시켜 제올라이트 공동 내에 생성된 새로운 요오드화지르코늄 클러스터의 구조를 연구하고, 요오드화지르코늄 클러스터를 갖는 Tl-A가 새로운 발광 특성을 갖는지 연구하고자 하였다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

지름이 약 80mm의 제올라이트 A의 투명한 단결정을 pyrex모세관에 넣은 후 0.1M 농도의 Tl(C₂H₃O₂) 용액을 이용하여 완전히 이온교환시킨 Tl12-A 결정을 제작하였습니다. 이를 673K 온도와 1.5 x 10⁻⁴ Pa의 압력에서 완전히 진공 탈수시켰습니다. 이를 무수 ZrI₄분말과 함께 48시간 동안 623K의 온도와 6.0 x 10⁻³Pa 압력에서 반응시킨 후 결정내부나 근처에서 반응하지 않은 ZrI₄를 제거하기 위하여 623K에서 24시간 동안 더 가열하였습니다. 이를 통하여 노란색의 결정을 만들 수 있었고 이의 단결정 시료의 회절 데이터를 얻기 위하여 단결정 싱크로트론 X-선(포항공과대학교 2D 빔라인)을 사용하여 액체질소를 이용 294(1) K 조건에서 수집하였다.

3. 결과 및 고찰

Zr, I, Tl-A의 단위 셀당 0.25개의 Zr_4^+ 이온이 제올라이트 프레임워크에서 멀리 떨어진 큰 공동의 중심에 있습니다. 이 이온들은 라지캐비티에 점유됩니다. 그리고 구조에서 ZrI_6^{2-} 이온은 해당 위치의 완전한 대칭으로 일부 공동의 중심을 차지합니다. Zr, I, Tl-A에서 이러한 Zr_4^+ 이온 각각은 2.91(4) Å에서 6개의 I⁻ 이온에 팔면체로 결합합니다. 이것은 Zr_4^+ 와 I⁻ 이온 반지름의 합인 $0.78 + 2.20 = 2.98\text{Å}$ 과 거의 같다. ZrI_6^{2-} 이온은 Tl21 및 Tl22(I1-Tl21 = 3.35(3) Å 및 I1⁻)에서 6개의 모든 요오드화물 이온과 6개의 주변 Tl⁺ 이온 사이의 I⁻-Tl⁺ 결합에 의해 큰 공동에 각각 기본적으로 고정됩니다. Tl22 = 3.35(3)Å). I1에 있는 6개의 I⁻ 이온은 Tl13에 있는 8개의 Tl⁺ 이온과 추가로 상호 작용합니다. 6개의 I1 이온으로 이루어진 8면체 8개의 Tl⁺ 이온으로 이루어진 정육면체. 각 요오드화물 이온은 Tl13에서 4개의 Tl⁺ 이온으로부터 3.9Å이며, I1-Tl21 또는 Tl22 결합보다 훨씬 긴 거리인 3.35(3) Å 입니다. 이러한 상호 작용은 $ZrI_6Tl_3^+$ 클러스터를 큰 공동에 중심을 둔 높은 대칭 위치에서 지원하고 $y = z = 1/2$ 에서 I1을 위치시키는 역할을 합니다. 여기서 각각은 Tl13의 4개 이온에서 등거리에 있습니다. Tl13에서 단위 셀당 8개의 이온은 양이온 클러스터의 공식에 포함될 수 있으며, 그러면 단위 셀당 $ZrI_6Tl_{11}^{9+}$ 가 됩니다. 다른 두 개의 6-링 Tl-O 결합 길이인 Tl11-O3 및 Tl12-O3(표 3)보다 약 3.981(6) Å 더 긴 Tl13-O3 결합 길이로부터 분명합니다. Tl13은 제올라이트 골격에서 떨어져 양이온 클러스터와 관련됩니다. 예상과 달리 Zr, I, Tl-A는 UV나 X-ray 조사에 의한 발광 특성을 나타내지 않았다. $ZrI_4(g)$ 와 Cs, Na-A의 반응에 의해 생성된 Zr, I, Cs, Na-A는 이전에 연구된 ZrI_6 가 큰 공동의 중심에 있었고 Cs⁺이온으로 둘러싸여 있었다. X선 조사에 의해 640 nm의 발광 피크를 갖는 발광 특성을 보였다. 그러나 동일한 ZrI_6 그룹 주위에 서로 다른 클러스터를 형성한 이번 연구에서는 예상과 달리 발광 특성이 나타나지 않았다. 이는 ZrI_6 기를 둘러싸고 있는 Tl⁺ 이온이 발광 특성에 미치는 영향으로 보인다.

그림 1. ZrI_6 클러스터와 $ZrI_6Tl_{11}^{9+}$ 클러스터의 비교

그림 2. Zeolite A에 도입된 $ZrI_6Tl_{11}^{9+}$ 클러스터

4. 참고문헌

- He, J., Ba, Y., Ratcliffe, C., Ripmeester, J., Klug, D.D., Tse, J.S. and Preston, K.F., 1998, Encapsulation of silicon nanoclusters in zeolite Y. *Journal of the American Chemical Society*, 120, 10697–10705.
- Heo, N.H., Kim, S.H., Choi, H.C., Jung, S.W. and Seff, K., 1998, Crystal structure of indium-exchanged zeolite A containing sorbed disulfur. *Journal of the Physical Chemistry B*, 102, 17–23.
- Ibers, J. A. and Hamilton, W.C., 1974a, *International Tables for X-ray Crystallography*, Kynoch Press, Birmingham, England, 71–98.
- Ibers, J.A. and Hamilton, W.C., 1974b, *International Tables for X-ray Crystallography*, Kynoch Press, Birmingham, England, 148–150.
- Kim, J.Y., Kim, H.J., Heo, N.H. and Seff, K., 2017, Progress toward zeolite-based self-luminous sensors for radioactive isotopes such as ^{201}Tl and ^{137}Cs : structures and luminescence of Hf,Cl,Tl-A and Hf,Cl,Cs,Na-A. *Journal of the Physical Chemistry C*, 121, 19619–19633.
- Kim, J.Y., Lim, H.S., Heo, N.H., Kim, H.J. and Seff, K., 2019, Identification and structures of the X-ray induced luminescence centers in the zeolite Zr, X, Cs, Na-LTA, X = Cl, Br, and I. *Microporous and Mesoporous Materials*, 278, 443–454.

제올라이트 Y에서 Zn_4S^{6+} 및 Zn_2S^{2+} 양자점 합성 Synthesis of quantum dots of Zn_4S^{6+} and Zn_2S^{2+} in zeolite Y

문대준(Daejun Moon)²·김후식(Husik Kim)¹·임현승(Hyeonseung Lim)¹·추현욱(Hyeonuk Choo)¹
·임우택(Woo Taik Lim)^{1*}

¹안동대학교 화학생명공학과, 경상북도 안동시 경동로 1379

²한국에너지공과대학교, 전라남도 나주시 혁신로 200

1. 서언

황화아연은 다재다능한 나노구조를 가지고 있으며 잠재적인 응용 분야로서 우수한 발광 및 광화학으로 인해 디스플레이, 레이저 및 광전자 장치용 발광 다이오드로서 연구되어집니다. 또한 황화아연(ZnS)은 여기된 전자의 높은 에너지로서 환원 전위와 빠른 전자-정공 생성으로 인해 독성 또는 유기 수질 오염 물질을 제거하는 반도체 광촉매 역할을 할 수 있습니다. 제올라이트는 구조에 전하 균형을 맞추기 위해 존재하는 양이온으로 인해 이온 교환기 및 흡착제로 사용되는 나노다공성 물질입니다. 제올라이트 구조의 양이온은 다양한 화학 반응을 통해 얻은 게스트 음이온과 화학적 결합을 형성할 수 있습니다. 제올라이트 구조에 다양한 촉매 화합물을 클러스터 형태로 도입하여 제올라이트를 기능화하는 것도 가능합니다. 이온, 원자 및 클러스터를 포함한 다양한 화학종은 양이온과 규칙적인 3차원 내부 기공 모두에 의해 구조 내에서 안정화될 수 있어 반도체 재료 및 촉매에 대한 규칙적인 배열을 가진 양자점(QD)의 생성이 용이합니다. 이러한 3차원 채널에서 QD를 합성하고 규칙적인 배열로 캐비티를 만들면 일반적으로 제올라이트 A, X 및 Y의 소달라이트에서 $M5^{n+}$ 또는 $M4X^{n+}$ 형태를 존재하는 사면체 배열을 가진 QD가 생성됩니다. 소달라이트 공동에 있는 5^{n+} 또는 $M4X^{n+}$ QD의 중심 원자는 제올라이트 골격의 3개의 6-고리 산소 원자에 결합된 4개의 금속 양이온과 배위 결합되었습니다. 제올라이트 A, X 및 Y의 소달라이트 공동에서 다음과 같이 중심 사면체, 단일 원소 및 복합 양이온, $M5^{n+}$, QD가 개발되었습니다..

2. 시료 채취 및 실험 방법

0.2mm의 직경을 가지는 Na-Y를 25mL 코니칼튜브에 넣고 0.05M Zn수용액을 넣어 인큐베이터에서 294K에서 교반시킨다. 이러한 작업을 6회 반복하고 세척하지 않은 상태로 323K에서 24시간 건조시켰다. 건조 시킨 결정을 Pyrex 모세관에 넣은 후 0.1M의 Na_2S 용액을 10mL 흘려 처리를 해주었다. 이후 진공 탈수 장치를 이용하여 1×10^{-4} 압력에서 시간당 25K의 온도변화로 723K에서 48시간 진공탈수 시켜주었다 나타난 색은 짙은 회색빛을 띤 결정이 합성되었다. 분말의 합성도 단결정과 유사한 방법으로 제작되었다 먼저 Zeolite Y 분말을 50mL 코니칼튜브에 넣고 0.5M의 Zn 수용액을 통하여 294K에서 4시간동안 교반하였다. 이를 6회 반복해주고 323K에서 건조시킨 후 0.1M의 Na_2S 용액에서 2일정도 교반시켰다 그리고 이를 건조시켰다. 단결정 시료의 회절 데이터를 얻기위하여 단결정 싱크로트론 X-선(포항가속기연구소 2D 빔라인)을 사용하여 액체질소를 이용 294(1) K 조건에서 수집하였다. 또한 SEM-EDS와 Uv absorption 그리고 HR-TEM을 이용하여 결과를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

외부 골격에서는 황화아연 양이온 클러스터, Zn_4S^{6+} 및 Zn_2S^{2+} 가 제올라이트 Y(FAU, Si/Al = 1.56)에 도입되었습니다. 결정학적 연구는 소달라이트 공동의 중심에 있는 하나의 황화물 이온이 위치 I'에서 4개의 Zn^{2+} 이온과 배위하여 중심 정사면체 양이온 클러스터 Zn_4S^{6+} 를 제공하고, 소달라이트 공동의 6-고리 반대편에 있는 다른 황화물 이온이 제올라이트 Y의 소달라이트 공동의 6.3% 및 68.8%에서 구부러진 배열 Zn_2S^{2+} 를 갖는 양이온성 클러스터를 제공하기 위해 사이트 I'에 2개의 Zn_4S^{6+} 이온이 존재하였고 고해상도 투과전자현미경 이미지를 통한 황화아연 단위셀 1개 크기(약 3nm)에 수백 개가 분포한 양자점(QD)군이 확인되었다. UV-vis 확산 반사 분광법을 이용하여 제올라이트 Y의 구조에 포함된 황화아연 QD가 벌크 황화아연에 비해 양자 크기 효과로 인해 향상된 광학 활성을 나타냄을 확인하였다. 본 연구에서는 제올라이트 Y의 공동에 있는 반도체 화합물을 보다 쉽게 정량화하는 방법을 제시하고 그 특성을 보다 심도 있게 조사하였다. 결과는 제올라이트가 반도체 화합물의 양자화를 위한 양자 용기로 응용 및 사용될 수 있음을 입증했습니다.

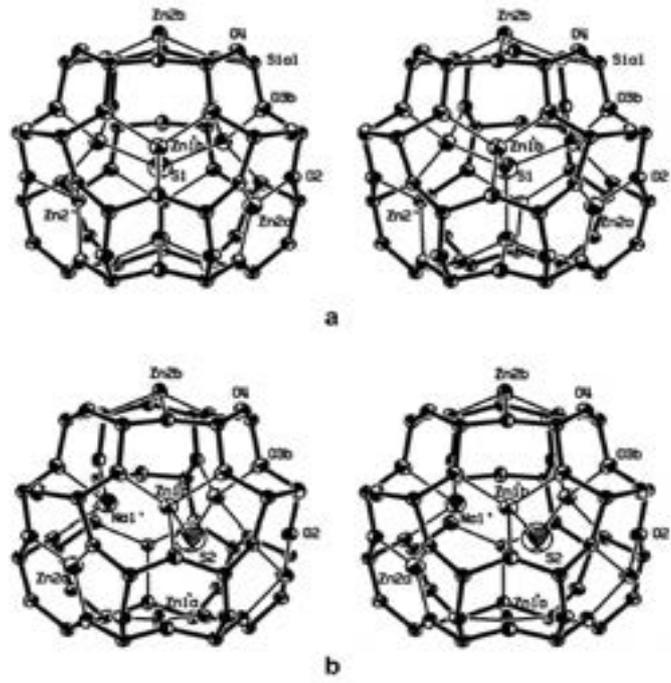


그림 1. Zeolite Y에 도입된 Zn_4S^{6+} 및 Zn_2S^{2+} 클러스터

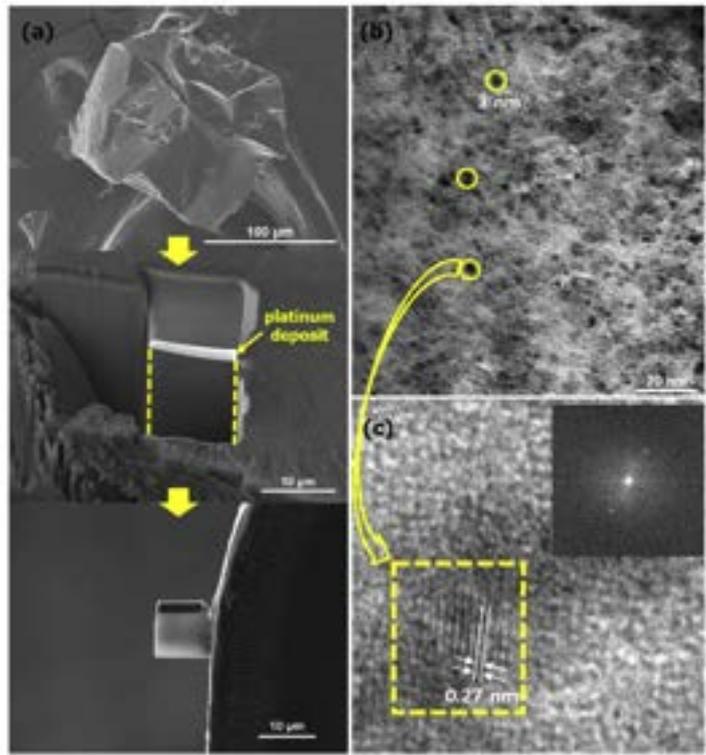


그림 2. HR-TEM으로 측정한 Zn_4S^{6+} 및 Zn_2S^{2+} 클러스터

4. 참고문헌

- C.H. Lai, M.Y. Lu, L.J. Chen, Metal sulfide nanostructures: synthesis, properties and applications in energy conversion and storage, *J. Mater. Chem.* 22 (2012) 19e30.
- D.J. Moon, W.T. Lim, B.K. Peterson, K. Seff, Using crystallography and NMR to count the number of three-aluminum six-rings in fully Zn²⁺-exchanged zeolite Y. These six-rings concentrate at single six-ring positions, *J. Phys. Chem. C* 125 (2021) 583e592.
- H.S. Kim, D.J. Moon, W.T. Lim, Crystallographic study on the selectivity, occupancy, and distribution of Sr²⁺ ions within zeolite Y in the presence of competing Na⁺ ions in aqueous exchange solution, *J. Porous Mater.* 26 (2019) 513e523.
- D.J. Moon, S.J. Choi, W.T. Lim, Crystallographic studies of fully dehydrated partially Zn²⁺-exchanged zeolite Y (FAU, Si/Al $\frac{1}{4}$ 1.56) depending on Zn²⁺ concentration of aqueous solution during exchange, *J. Porous Mater.* 25 (2018) 1427e1437.
- D.J. Moon, H.-K. Jeong, W.T. Lim, K. Seff, Crystal structure of a hydrogen sulfide sorption complex of anhydrous Mn²⁺-exchanged zeolite Y (FAU, Si/Al $\frac{1}{4}$ 1.56), *Microporous Mesoporous Mater.* 279 (2019) 432e438.
- D.J. Moon, W.T. Lim, K. Seff, Structure of a cyclohexane sorption complex of partially dehydrated, fully Mn²⁺-exchanged zeolite Y (FAU, Si/Al $\frac{1}{4}$ 1.56), *Microporous Mesoporous Mater.* 264 (2018) 139e146. D. Barthomeuf, Basic Zeolites: characterization and uses in adsorption and catalysis, *Catal. Rev. Sci. Eng.* 38 (1996) 521e612. D.W. Breck, in: *Zeolite Molecular Sieves*, John Wiley & Sons, New York, 1974, pp. 530e531.
- I.A.M. Ahmed, S.D. Young, J.F.W. Mosselmans, N.M.J. Crout, E.H. Bailey, Coordination of Cd²⁺ ions in the internal pore system of zeolite-X: a combined EXAFS and isotopic exchange study, *Geochem. Cosmochim. Acta* 73 (2009) 1577e1587.

Zn²⁺가 이온교환된 Zeolite Y에서의 3Al 6-rings을 분석을 위한 결정학 및 NMR연구 Count the Number of 3Al 6-rings at Fully Zn²⁺-Exchanged Zeolite Y using Crystallography and NMR

문대준(Daejun Moon)²·김후식(Husik Kim)¹·임현승(Hyeonseung Lim)¹

·추현욱(Hyeonuk Choo)¹·임우택(Woo Taik Lim)^{1*}

¹안동대학교 화학생명공학과, 경상북도 안동시 경동로 1379

²한국에너지공과대학교, 전라남도 나주시 혁신로 200

1. 서언

경제적 관점에서 제올라이트 Y는 세계에서 가장 중요한 산업 촉매입니다. 약 800K에서 수정된 제올라이트 Y와 몇 초간 접촉한 후 원유는 "분해"되어 휘발유 및 제트 비행기 연료와 같은 귀중한 분획물을 생성합니다. 또한 다른 촉매 및 수차 응용 분야에서 널리 사용됩니다. 그 변수는 가변적입니다. 프레임워크의 Si/Al 비율에서 프레임워크로 교환될 수 있는 광범위한 양이온에 이르기까지 구성은 전체 제품군을 구성합니다. 원형 24개 고리(12개의 산소 고리, 12개의 고리)는 내부와 슈퍼 케이지에 3차원으로 쉽게 접근할 수 있도록 합니다. 상대적으로 높은 구조 조성으로 견고하고 산에 안정적이며 고온에서 습기에 안정적입니다. 그것의 효용성과 별개로, 많은 부분이 아직 탐구되지 않은 매력적인 화학 작용이 크고 규칙적인 간격의 공극에서 관찰될 수 있습니다. 이 작업은 처음에 제올라이트 Na-Y가 OH⁻ 흡수 없이 Zn²⁺와 완전히(화학양론적으로) 교환되거나 H⁺의 부분 교환 후 탈알루미늄화 없이 완전히 탈수될 수 있는지 알아보기 위해 수행되었습니다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

직경이 0.2mm의 Na-Y를 이용하였습니다. Zn-Y의 결정은 0.05 M Zn 수용액을 25mL 코니칼 튜브에서 15mL의 Zn용액과 혼합하고 혼합물을 294K에서 4시간 동안 인큐베이터에서 교반 했습니다. 이 절차를 6번 반복 시켜주었습니다. 이것을 323K의 드라이오븐에서 24시간 건조를 시킨 후 Pyrex 모세관에 넣었습니다. 또 다른 방법으로는 Na-Y 단결정을 Pyrex 모세관에 넣은후 0.05M 농도의 Zn수용액으로 10mL 이온교환 시켜주었습니다. 이를 진공탈수장치에 부착한 후 1 × 10⁻⁴ Pa에서 각각 시간당 25K 의 온도변화로 523, 623, 723, 773 그리고 823K에서 48시간 동안 진공 탈수 시켜주었습니다. 이의 단결정 시료의 회절 데이터를 얻기위하여 단결정 싱크로트론 X-선(포항가속기연구소 2D 빔라인)을 사용하여 액체질소를 이용 100(1) K 조건에서 수집하였다.

3. 결과 및 고찰

연구된 15개의 결정 각각에서 Zn²⁺ 이온은 제올라이트 Zn-Y에서 6R의 3중 축에서 모두 6개의 등점을 부분적으로 차지합니다. 3개(Zn1, Zn1p 및 Zn1')는 D6R에 결합하고 나머지 3개(Zn2', Zn2p 및 Zn2)는 S6R에 결합합니다. 5개는 6R의 3개 산소 원자에 결합하는 3좌위, 거의 삼각뿔에서 삼각뿔형입니다. 여섯 번째 Zn²⁺ 위치인 Zn1은 D6R의 두 6R 사이에 있으며 여기서 6개의

산소 원자에 팔면체로 결합합니다. 완전히 탈수된 Zn-Y에서 두 개의 면내 위치인 Zn1p 및 Zn2p (각각 기존 위치 I' 및 II 근처)는 3개의 Al 원자를 포함하는 6R에 있습니다. 이러한 사이트는 Zn²⁺에 의해 완전히 점유됩니다. 완전히 탈수된 Zn-Y에서 단위 셀당 37.5개의 Zn²⁺ 이온 중 26개는 두 종류의 6-고리(6R, 6개의 산소 원자와 6개의 사면체 원자(Si 또는 Al)를 포함하는 고리)의 평면에 직접 놓여 있습니다. 다른 Zn²⁺ 이온은 Zn-O 거리가 0.1~0.3Å 더 긴 6R의 양쪽 위치를 차지했습니다. 이 평면의 Zn²⁺ 이온 수는 MAS-NMR 데이터를 사용하여 모의 어닐링으로 계산한 3-Al(3Al)6R 수와 거의 일치합니다. 이것은 Zn²⁺가 이온 크기와 채워진 외부 껍질로 인해 다소 독특하게 3Al 6R의 6R 평면에 놓일 수 있음을 나타냅니다. 그것은 주로 다른 6R, 주로 2Al 6R의 평면 밖에 놓여 있습니다. 따라서 단위 셀당 3Al 6R의 수를 세는 것이 가능합니다. 단위 셀당 32개의 D6R 6R 중 약 12개와 32개의 S6R 중 14개가 3Al 6R입니다. 이 차이는 "알루미늄 회피" 규칙의 결과입니다. 523 및 623 K에서 진공 탈수 후, 물 산소 원자(각각 10개 및 6개)가 단위 셀당 발견되었으며, 각각은 소달라이트 공동에서 2개의 Zn²⁺ 이온 사이트를 연결합니다. 이들은 브리징 수산화물 이온일 수 있습니다. 구조(각 탈수 온도에서 3개)는 모든 강도를 사용하여 최종 오류 지수(Fo > 4σ(Fo))에 대한 R1, 최저 탈수 온도에서 0.04와 최고에서 0.07 사이)를 사용하여 개선되었습니다.

그림 1. Zn²⁺가 이온교환된 Zeolite Y

4. 참고문헌

Degnan, T. F., Jr. Application of Zeolites in Petroleum Refining. Top. Catal. 2000, 13, 349-356.

Boddenberg, B.; Seidel, A. Zinc-exchanged Y Zeolites Studied with Carbon Monoxide and Xenon as Probes. J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1994, 90, 1345-1350.

Seidel, A.; Kampf, G.; Schmidt, A.; Boddenberg, B. Zeolite ZnY Catalysts Prepared by Solid-state Ion Exchange. Catal. Lett. 1998, 51, 213-218.

Moon, D. J.; Lim, W. T.; Seff, K. Structures of the Subnanometer Clusters of Cadmium Sulfide Encapsulated in Zeolite Y: Cd₄S₆⁺ and Cd(SHCd)₄ 6⁺. J. Phys. Chem. C 2016, 120, 16722-16731.

Kim, J. Y.; Heo, N. H.; Seff, K. The Pentatin Cation in Zeolite Y: Thallous Ion Exchange

- and Crystal Structure of $|\text{Sn}_{36}\text{Cl}_{11}| [\text{Si}_{128}\text{Al}_{64}\text{O}_{384}]$ -FAU Containing Sn^{5+} , Sn^{2+} , Sn^{3+} , and Sn^{4+} . *J. Phys. Chem. C* 2017, 121, 471–480.
- Moon, D. J.; Choi, S. J.; Lim, W. T. Crystallographic Studies of Fully Dehydrated Partially Zn^{2+} -Exchanged Zeolite Y (FAU, $\text{Si}/\text{Al} = 1.56$) Depending on Zn^{2+} Concentration of Aqueous Solution During Exchange. *J. Porous Mater.* 2018, 25, 1427–1437.
- Bae, D.; Zhen, S.; Seff, K. Structure of Dehydrated Zn^{2+} -Exchanged Zeolite X. Overexchange, Framework Dealumination and Reorganization, Stoichiometric Retention of Monomeric Tetrahedral Aluminate. *J. Phys. Chem. B* 1999, 103, 5631–5636.
- Bae, D.; Seff, K. Extensive Intrazeolitic Hydrolysis of $\text{Zn}(\text{II})$: Partial Structures of Partially and Fully Hydrated $\text{Zn}(\text{II})$ -Exchanged Zeolite X. *Microporous Mesoporous Mater.* 2000, 40, 233–245.

수심에 따른 동시베리아해 비구형 망가니즈단괴 내 산화망가니즈 광물종 산출 특성

Variations of the mineral species in the ferromanganese nodules from the East Siberian Sea with varying water depths

이상미(Sangmi Lee)¹·김효임(Hyo-Im Kim)^{1*}

¹경상국립대학교 지질학과 및 기초과학연구소

1. 서언

지각에서 세 번째로 풍부한 전이금속인 망가니즈는 주로 해양 퇴적물에 농축된 형태인 단괴로 존재하고 있다. 망가니즈단괴는 다양한 산화망가니즈 및 산화철 광물로 구성되어 있으며, 이는 생성 당시의 산화-환원 조건 및 온도 등 여러 환경적 요인에 따라서 구성 광물의 종류(예, 층상형 혹은 터널형 광물)나 결정도가 서로 다르게 나타나는 특징을 갖는다. 또한 이와 같은 광물종의 차이는 광물에 흡착되는 금속의 종류나 함량 등 물성에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(e.g., Kwon et al. 2013). 망가니즈단괴에 기록된 환경적 요인의 변동 단서인 광물종 변화 양상을 연구하는 것은 해당 물질이 형성된 시기에 대한 지질학적 정보를 획득하는 것뿐만 아니라, 광물의 자원적 가치를 이해하는 것에도 큰 도움이 될 수 있다.

북극해는 동시베리아해, 랍테프해, 카라해, 추크치해, 중앙북극해, 보퍼트해 등으로 구성되어 있고, 기존에 북극해에서 보고된 망가니즈 단괴들은 전형적인 천해적 특징을 갖는 반면 약 200 m의 천해 환경에서 수집된 동시베리아 망가니즈단괴는 높은 Mn/Fe비를 갖는다. 이와 같이, 천해에서 형성되는 단괴의 경우 유입되는 퇴적물, 해류 및 미생물 활동에 큰 영향을 받으며 성장하는 특징이 있어, 북극해 고환경 복원에 매우 중요한 단서를 제공하는 지구물질이다. 따라서, 수심에 따라서도 급격히 변화하는 해양 환경을 기록하고 있는 바, 서로 다른 수심에서 획득되는 단괴 내 광물종의 연구가 필요하다. 이에 현재까지 단괴가 산출되는 동시베리아해의 수심에 따라 단괴의 외형적 특징 및 지구화학적 특징에 차이가 있음이 밝혀져 왔으나(Koo et al. 2023), 구성 광물의 구체적인 종류 및 수심에 따른 성장 과정에 차이가 확인된 바 없다.

이에 본 연구에서는 서로 다른 수심을 갖는 동시베리아해 비구형 망가니즈단괴를 성장 방향에 따라 내부구조를 면밀히 관찰하고, 산화망가니즈, 산화철 광물의 분포를 관찰하고자 한다. 산화망가니즈 광물의 구조적 특성과 시료 내 공간적 분포 정보를 제공하는 비파괴 분석인 라만 분광분석을 이용하여 연구를 진행하고자 한다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

본 연구에서 사용된 망가니즈 단괴는 2018년 쇄빙연구선 아라온을 이용한 동시베리아 탐사 ARA09C 항차와, 2021년 ARA132B 항차 중 채취되었다. 각각의 탐사 기간동안 약 46 ~240 m인 총 12개의 정점에서 드래지 작업으로 회수된 망가니즈단괴 중 비구형(non-spherical)의 단괴를 선

정하여 분석을 수행하였다. 단괴 성장에 따른 광물 변화를 효과적으로 관찰하고 서로를 비교하기 위하여 단괴의 절단면에서 뚜렷한 조직이 관찰되는 시료를 선정하였다. 수심에 따른 비구형 단괴 내 구성 광물의 차이를 확인하기 위하여 73 m와 184 m에서 획득된 시료를 사용하였으며, 분석을 위하여 각각 단괴 시료를 에폭시 함침 후 연마편을 제작하였다. 핵의 중앙부로부터 방사형으로 교호 성장한 망가니즈-철 층의 효과적인 관찰을 위하여 다이아몬드 톱을 이용하여 절단하였다. 절단면 내 핵과 단괴의 물성 차이로 인한 연마시 발생하는 시료 손실을 방지하기 위하여 추가적으로 절단면 표면에 에폭시 처리를 수행하였다.

비구형 망가니즈 단괴의 조직과 화학 조성을 확인하기 위하여 경상국립대학교 첨단소재분석지원센터(High-Tech Core Facility)의 전계방사 전자현미분석기(JEOL JXA-8530F PLUS)를 사용하여 후방산란전자이미지와(Backscattered electron image, BSE) 에너지분산형 X-선 분광분석(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)를 획득하였다. 분석을 위하여 시료 표면에 ~ 20 nm 두께의 금 코팅을 진행하였다. 20 keV 전압에서 20 nA 전류의 조건을 사용하였다. 라만 분광분석은 경상국립대학교 공동실험실습관의 RAMANtouch(나노포톤 사) 라만 분광기를 이용하여 수행하였다. 785 nm 레이저를 이용하였고, 600 gr/mm의 격자(grating) 조건에서 50 배율 대물렌즈를 통해 레이저를 조사하였다. 레이저로 인한 망가니즈 산화물의 열화 및 파괴를 방지하기 위하여 레이저 출력을 0.3 mW로 조절하였고, 각 스펙트럼은 노출시간 60초로 6번의 레이저 조사를 통해 획득되었다.

3. 결과 및 고찰

수심 73 m 의 단괴는 매끄러운 표면 조직과 비교적 연한 노란-갈색의 외관을 가진 반면, 183 m 단괴는 거친 표면과 어두운 갈색-흑색의 외관을 가지고 있었다. 단면을 관찰하였을 때, 퇴적물 기원의 핵을 가진 것은 동일하였지만, 73 m의 경우 망가니즈-철 층이 수평으로 두껍게 발달하였지만, 그보다 깊은 수심에서 산출되는 단괴에서는 방향에 상관없이 일정한 두께로 성장함이 확인되었다. 더불어 73 m 의 단괴에서 관찰되었던 철 기질부는 184 m에서 관찰되지 않았다. 육안으로 관찰한 결과를 기반으로 라만 분광분석 및 EDS 원소 분석 결과를 해석하고자 한다.

단괴의 성장 방향에 따른 원소 분포 경향성을 확인하기 위하여, 임의로 정의한 단괴의 상방(upward), 수평 방향(horizontal), 하방(downward)으로 총 3가지 방향에 대해 EDS 선분석을 수행하였다. 단괴의 핵을 시작으로 외곽으로 진행하였을 때, 73 m 단괴는 서로 다른 3개의 층의 Mn과 Fe의 분포 양상이 서로 다르게 나타남을 확인하였다. Mn은 핵과 철 기질부에서 매우 결핍되었지만, Mn-Fe 층에서는 변동이 관찰되었다. 반면, Fe는 철 기질부에서 두텁하게 높은 함량이 확인 되었는데, Mn-Fe 층에서 상대적으로 저조하였다. 184 m 단괴는 철 기질부가 부재하기 때문에 두 가지 층의 Mn과 Fe의 분포 양상 차이만 확인되었다.

비구형 단괴의 성장방향에 따른 광물종의 특성을 확인하기 위하여 상기 기재된 EDS방향과 동일한 분석 경로로 망가니즈-철 층에 대한 라만 분광분석을 수행하였다. 3가지 진행방향(상방, 수평 방향, 하방)에서 단괴의 중심부로부터 외곽까지 약 100 μm 씩 레이저를 이동하며 각 위치에서의 스펙트럼을 획득하였다. 73 m 단괴의 상방에서 획득된 스펙트럼에서 철 수산화물인 페리하이드라

이트(ferrihydrite)와 대체적으로 넓은 밴드를 갖는 산화망가니즈 광물이 존재함을 알 수 있었다. 수평 방향의 경우 철 수산화물의 스펙트럼과 기존에 보고되었던 다양한 산화망가니즈 광물이 위치에 따라 다른 신호로 나타나고 있었다. 마지막으로 하방에서 획득한 결과의 경우 가장 좁은 반치폭의 뚜렷한 스펙트럼을 획득하였고 이는 상방, 수평 방향과 확연한 차이를 나타낸다. 라만 신호의 반치폭은 해당 광물의 결정도와 높은 연관성을 갖기 때문에 성장 방향에 따라 결정도 차이가 발생했음을 지시한다. 184 m 단괴의 라만 분광분석 결과 역시 단괴의 성장 방향에 따른 광물 특성에 차이를 확연히 보여주고 있다. 특히, 184 m 단괴의 하방에서도 높은 결정도의 버네사이트가 존재하며, 핵 근방에서 토도로카이트가 우세하게 나타나며 외곽부로 갈수록 감소하는 경향성이 관찰되었다. 다만, 수심이 깊은 곳에서 산출되는 단괴의 경우 토도로카이트를 지시하는 라만 신호의 변동성이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 수심에 따른 동시베리아 비구형 망가니즈 단괴 내 광물종 및 결정도에 대한 공간적 분포를 획득한 최초의 연구 결과로, 수심에 따라 구성하는 광물종 변동에 차이가 있음을 보여주고 있다. 이는 해당 물질들의 형성되는 과정에서 수심에 따른 산소 포화도, 유입 퇴적물 내 금속의 농도, 해류 등의 변화로부터 기인한 것으로 예측된다. 따라서, 본 연구 결과는 향후 수행될 다양한 수심에서 획득된 구형 및 비구형 단괴의 성장 과정에 관여하는 북극해 해양 환경 조건의 재구성에 광물학적 단서를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 참고문헌

Kwon, K. D., Refson, K., & Sposito, G. (2013). Understanding the trends in transition metal sorption by vacancy sites in birnessite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 101, 222-232.

Koo, H.-J. et al., 2023. Variations in Morphological and Geochemical Characteristics in Manganese Nodules from the East Siberian Arctic Shelf with Varying Water Depths. *Economic and Environmental Geology*, 56(1), 1-11

이상미, 구효진, 조현구, 김효임, 2022. 북극해 천해저 비구형 망가니즈단괴 내 광물종 분포 및 구조적 특성 규명을 위한 라만 분광분석 연구. *광물과 암석*, 35(4): 409-421.

수산화나트륨을 이용한 중금속 수용액의 중화반응 시 생성되는 침전물의 특성 연구

Studies on characteristics of precipitates formed during the neutralization reaction of heavy metal solutions using sodium hydroxide.

송병철(Byeong Cheol Song)¹·김재민(Jae Min Kim)¹·송혜원(Hye Won Song)¹
·탁현아(Hyeon A Tak)¹·임정수(Jeong Su Im)¹·김영훈(Young Hun Kim)²
·김정진(Jeong Jin Kim)^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과, ²안동대학교 환경공학과

1. 서 론

수산화나트륨은 산성을 중화시키기 위해 가장 널리 사용되는 염기로 강한 알칼리성을 가지며, 중화 과정에서 중금속 이온들과 반응하여 침전물을 형성한다. 본 연구에서는 인공적으로 제조한 단일 중금속 오염수의 중화 시 중금속의 종류에 따라 수산화나트륨의 양이 얼마나 필요하며 이때 생성되는 침전물이 어떤 것인지 연구하였다.

2. 연구 방법

중금속 수용액의 경우 각각의 중금속 Cd, Cu, Fe, Mn, Zn을 1000 mg/L로 제조하여 황산(H₂SO₄)으로 pH를 3까지 낮추어 사용하였다. 중금속 수용액을 중화시키기 위하여 1mol/L의 수산화나트륨을 이용하였으며, 중화 시 투입되는 수산화나트륨의 양과 pH를 측정하고 생성되는 침전물을 원심분리하여 105℃에서 건조해 X-선 회절분석을 진행하였다. 각 수용액에 중화제 투입 시 700rpm으로 교반하였으며, pH가 11이 될 때까지 투입되는 NaOH의 양을 측정하였다.

3. 결 과

인공산성배수 1000mg/L의 각 Cd, Cu, Fe, Mn, Zn 용액 및 현장에서 채취한 중금속오염지하수의 초기 pH는 약 3.7이며 pH를 상승시키면 모든 시료에서 침전물이 생성된다. 생성되는 침전물의 부피는 Zn>Cd>Fe>Cu=Mn순이다. 1M의 NaOH를 이용하여 pH를 11로 상승시킬 경우 소모되는 NaOH의 양은 중금속의 종류에 따라 다르다. NaOH의 소모량인 가장 적은 것은 Cd로 약 8mL이다. 구리와 아연은 약 13mL, 철은 18mL, 망간은 20mL정도 NaOH가 소모되며, 중금속오염지하수는 32mL정도이다. 초기에 가장 빨리 증가하는 항목은 망간으로 1mL 첨가 시 8까지 증가하지만 그후 서서히 증가하여 19mL 투입시 약 10.1정도로 증가한다. 카드뮴은 1mL첨가 시 약 6.0이며 7mL 첨가시 7.8정도이며, 8mL인 경우 11.5로 급격하게 증가한다. 아연은 1mL투입시 약 5.8정도로 증가하며 13mL투입시 7.9까지 서서히 증가하고 14mL투입시 11.8로 증가한다. 구리는 1mL투입시 약 5.2정도로 증가하며 13mL 투입 시 6.2까지 서서히 증가하고 14mL투입시 11.8로 증가한다. 철은 1mL투입시 약 5.2정도로 증가하며 17mL투입시 8.1까지 서서히 증가하고 18mL투입시

11.8로 증가한다. 중금속오염지하수는 4mL투입시 약 5.5정도로 증가하며 20mL투입시 8.0까지 서서히 증가하였으며, 24mL투입시 10, 32mL 투입시 11.0으로 증가한다. 침전물 X-선 회절분석 결과 Cd은 Cd(OH)₂의 형태로 검출되었으며 Cu는 Brochantite(Cu₄SO₄(OH)₆)와 Tenorite(CuO), Fe는 Goethite(FeO(OH))와 Magnetite(Fe₃O₄), Mn은 Hausmannite(Mn₃O₄), Zn은 ZnSO₄·xH₂O와 ZnO의 형태로 나타났다.

4. 결론

중금속 중 pH를 11까지 증가시키는 데 NaOH가 가장 적게 소모되는 항목은 카드뮴이며 가장 많은 양이 필요한 항목은 망간이다. NaOH를 투입하는 동안 각 중금속의 수용액의 pH가 서서히 증가하는 구간은 카드뮴 6.1-7.5, 구리 5.0-6.1, 철 5.0-8.0, 망간 8.0-10.1, 아연 5.5-6.9이다. 침전물은 수산화물과 황산화물, 산화물의 형태로 나타나며 생성되는 침전물의 부피가 가장 큰 것은 Zn이었으며 가장 작은 것은 Cu와 Mn이다.

5. 사 사

본 연구는 한국환경산업기술원(과제 번호: 2021002470002)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Table 1. Heavy metal concentration of AFAD

Sample No.	Cd (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)
AFAD	1000	1000	1000	1000	1000

*AFAD: Artificial Acidic Drainage

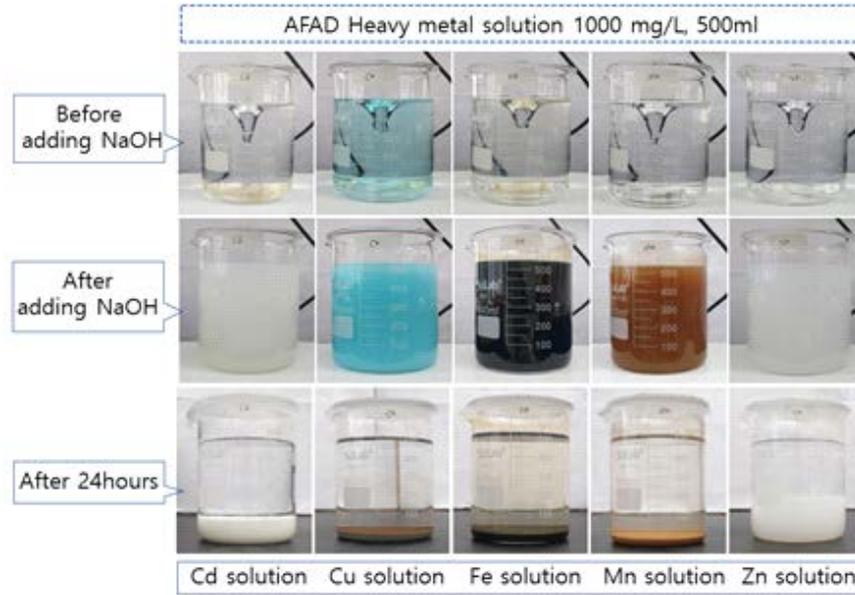


Fig. 1. Precipitates in artificial acidic drainage(AFAD) after adding NaOH

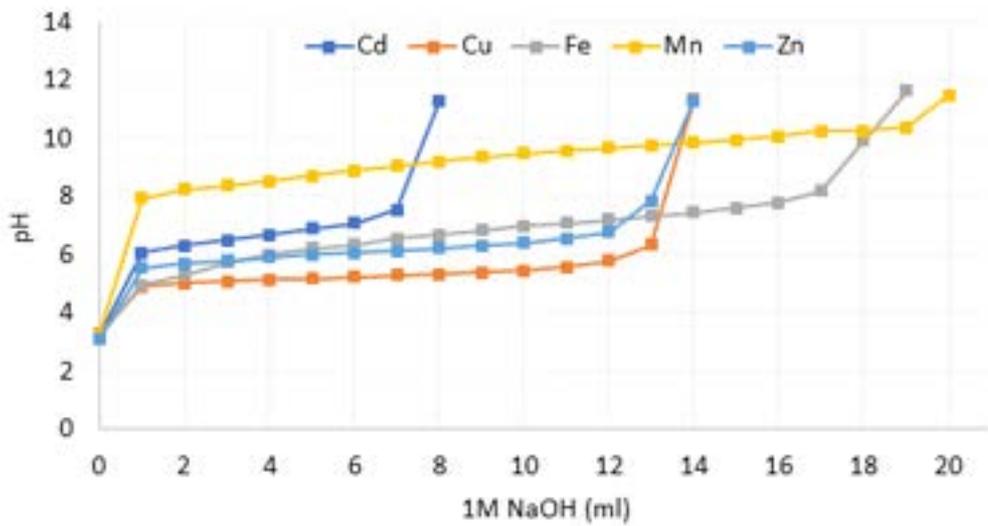


Fig. 2. Change in pH of 1000 mg/L artificial acidic drainage with adding 1mole NaOH

Fig. 3. XRD Results of precipitates

소성 환을 이용한 인공산성배수 정화 효율 평가

Evaluation of Efficiency in Artificial Acidic Wastewater Treatment Using Calcined Beeds

김재민(Jae Min Kim)¹·송혜원(Hye Won Song)¹·송병철(Byeong Cheol Song)¹·탁현아(Hyeon A Tak)¹·김영훈(Young Hun Kim)²·김정진(Jeong Jin Kim)^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과, ²안동대학교 환경공학과

1. 서 론

Ca, Mg-계열 반응 매질의 투입, 회수, 및 이를 이용한 인공 산성 중금속 오염수의 정화 효율을 높이기 위해 분말 형태의 고령토(Kaolinite)를 혼합하고 소성하여 환으로 제조하였다. 제조한 Ca, Mg-계열의 환을 이용하여 인공적으로 제조한 고농도 중금속 및 황산염 오염수와 24시간 반응 후 정화 효율을 평가하였다.

2. 실험 방법

실험은 각 매질을 250 mL 비커에서 100 mL(약 60g) 정도 채우고 인공 산성 중금속 오염수를 각각의 비커에 200ml씩 투입한 후 24시간 동안 시간대별로 pH를 측정하였다. 24시간 반응하며 상등액을 채수하여 ICP-AES로 중금속의 농도를 측정하여 제거 효율을 평가하였다.

3. 실험 결과

24시간 반응 시 pH의 변화는 CaCO₃ beads(30%)와 MgCO₃ beads(30%)에서 각각 5.39와 5.71로 pH가 6 이상으로 상승하지 못하였고 Ca(OH)₂ beads(50%), Mg(OH)₂ beads(50%)에서는 각각 10.12와 8.78로 보다 높은 값으로 나타났다. 중금속의 정화 효율을 평가하였을 때 24시간이 경과한 후 CaCO₃ beads(30%)에서는 Cu와 Fe이 각각 99.58%, 95.43%로 대부분 제거되었으나 Cd과 Mn, Zn의 경우 16.07%, 10.67%, 51.38%의 제거효율로 나타났다. MgCO₃ beads(30%)는 Cu와 Fe, Zn에서 각각 99.91%, 99.97%, 94.57%로 대부분 제거되었으나 Cd과 Mn에서 75.07%, 28.09%만 제거되었다. Ca(OH)₂ beads(50%)가 투입된 오염수의 경우 24시간이 경과하였을 때 Cd과 Mn에서 각각 97.85%, 95.53%의 제거율을 보였으며 나머지 Cu, Fe, Zn은 99%이상으로 대부분 제거가 되었다. Mg(OH)₂ beads(50%)에서도 Cd과 Mn에서 각각 97.91%, 93.65%의 제거율을 보이며 나머지 Cu, Fe, Zn은 99%이상으로 대부분 제거가 되었다.

4. 결 론

50%의 비율로 제조된 환에서 pH가 8.5이상으로 충분히 상승하며 5가지 중금속이 효과적으로 제거가 된다. 각각의 결과를 살펴보았을 때 최종적으로 제거가 되는 것은 비슷하나 Ca매질 보다

Mg매질이 반응성이 좋고 안정적으로 중금속이 제거되는 것을 알 수 있다. 분말형태로 정화처리에 사용하는 것보다 환의 형태로 제조하여 정화처리에 활용하게 되면 회수 및 분리가 용이해지며 지속적인 활용이 가능할 것으로 보인다.

5. 사 사

본 연구는 한국환경산업기술원(과제 번호: 2021002470002)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Table 1. Heavy metal concentration of HCAW

Sample No.	Cd (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)
HCAW	114	143	329	238	2457

*HCAW: Heavy metal Contaminated Acidic Water

Fig. 1. Precipitates from HCAW after 24 hours of treatment.

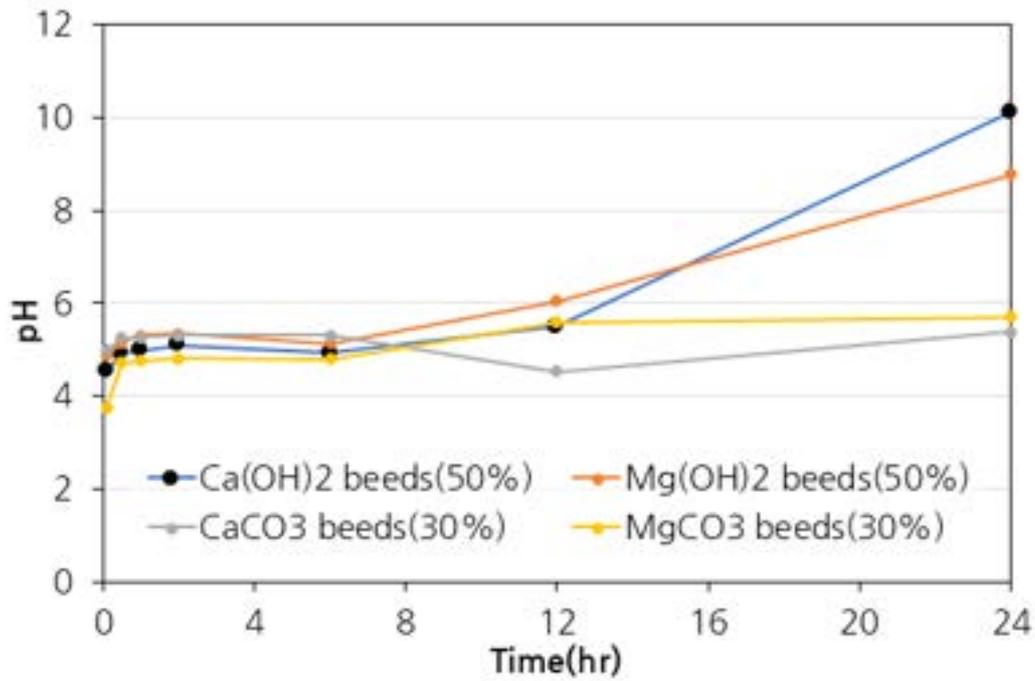


Fig. 2. pH variation with time after reaction of HCAW and bead

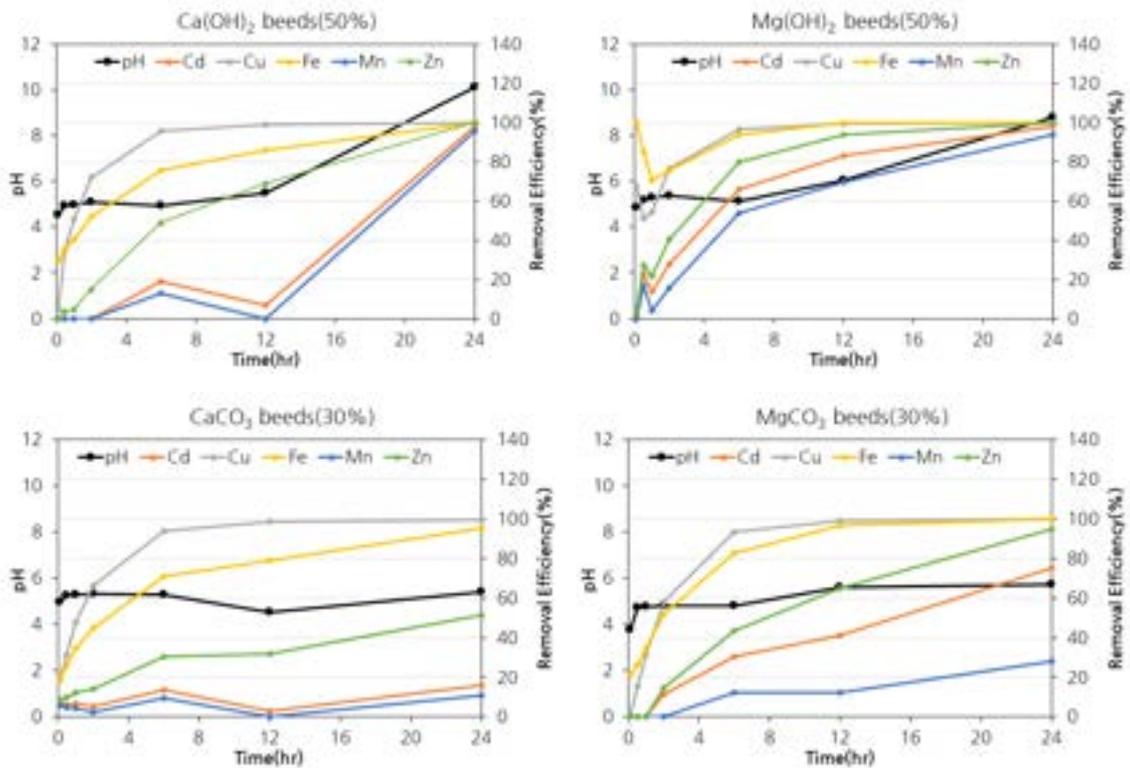


Fig. 3. Heavy metal removal efficiency after reaction of HCAW and bead

Ca, Mg-탄산염 및 수산화물의 중금속 오염수 중화효율 평가 Evaluation of Neutralization Efficiency of Heavy Metal-contaminated Wastewater using Calcium and Magnesium Carbonates and Hydroxides.

김재민(Jae Min Kim)¹·송혜원(Hye Won Song)¹·송병철(Byeong Cheol Song)¹

·임정수(Jeong Su Im)¹·김영훈(Young Hun Kim)²·김정진(Jeong Jin Kim)^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과,

²안동대학교 환경공학과

1. 서론

Ca, Mg-탄산염 및 수산화물은 수용액상에서 pH를 상승시켜 중금속을 정화할 수 있다. 본 연구에서는 중금속으로 오염된 지하수의 농도를 기반으로한 인공적인 산성 중금속 오염수를 소성 전, 후 Ca, Mg-매질을 이용하여 중금속 정화 효율을 평가하였다.

2. 실험 방법

인공 산성 중금속 오염수의 경우 중금속 Cd, Cu, Fe, Mn, Zn 시약을 각각의 농도에 맞춰제조하여 황산(H₂SO₄)으로 pH를 3까지 낮추어 사용하였다. Ca, Mg-매질의 경우 분말형태의 시료르 사용하였고 열분석기(TG-DTA)를 이용하여 분석을 실시 하였다. 소성 전, 후 매질을 실험에 사용하였으며 소성의 경우 각 매질이 충분히 상변화가 일어나는 800°C에서 시료를 1시간 소성하여 실험에 사용하였다. 소성 전 및 각 온도에서 소성한 시료에 대해 X-선 회절 분석을 수행하여 상전이 전후의 광물의 상태를 파악하였다. 중금속오염수의 정화 효율을 알아보기 위하여 각각 250ml에 시료 3g씩 투입하여 300rpm으로 2분간 교반 후 정지하여 일정 시간 간격으로 pH측정 및 분석시료를 채수하였다. 채수한 시료는 ICP/AES를 이용하여 분석하였다.

3. 실험 결과

열분석 결과 CaCO₃는 788°C에서 상변화하며 43.81%의 질량감소가 있고 Ca(OH)₂의 경우 441°C에서 상변화하며 26.14%의 질량이 감소한다. MgCO₃는 254°C, 443°C 두 번의 상변화가 일어나며 총 56.36%의 질량이 감소하고 Mg(OH)₂는 395°C에서 상변화하며 30.31%의 질량이 감소한다. X-선 회절분석결과 소성 전 시료들의 경우 CaCO₃와 Ca(OH)₂는 각각 Calcite와 Portlandite로 나타났다. MgCO₃와 Mg(OH)₂는 각각 Hydromagnesite와 Brucite로 나타났다. 800°C에서 소성한 시료의 경우 CaCO₃와 Ca(OH)₂는 모두 Lime(CaO)로 나타났으며 Ca(OH)₂의 경우 약간의 Portlandite가 남아있는 것으로 나타났다. 소성된 MgCO₃와 Mg(OH)₂는 모두 Periclase(MgO)로 나타났다. 인공 산성 중금속오염수의 정화효율을 평가한 결과 pH변화를 살펴볼 때 소성 전 시료 CaCO₃는 20시간이 지나 pH가 6.11이며 나머지 Ca(OH)₂는 12.79, MgCO₃는 8.45, Mg(OH)₂는 8.23이다. 소성 후 시료에서 CaCO₃는 20시간이 지나 pH가 11.90이며 Ca(OH)₂는 12.83, MgCO₃

는 10.13, $Mg(OH)_2$ 는 10.22이다. 중금속 제거 효율을 살펴보았을 때 Cd의 경우 소성 전 $CaCO_3$ 에서 20시간이 지나 70.14%의 제거율을 보이며 소성 전 $Mg(OH)_2$ 에서 91.83%의 제거율을 보인다. 나머지 시료에서는 99%이상 대부분의 제거가 되었음을 보인다. Mn의 경우도 마찬가지로 소성 전 $CaCO_3$ 와 $Mg(OH)_2$ 에서 각각 6.98%, 85.20%의 제거율을 보이며 나머지 시료들은 99%이상 대부분 제거가 되었다. Cu와 Fe의 경우 모든 시료에서 대부분 제거가 되었으며 Zn은 소성 전 $CaCO_3$ 시료에서 18.13% 제거가 되었으나 나머지 시료에서는 99%이상 대부분 제거가 되었다.

4. 결론

매질의 열분석 및 XRD분석 결과, 각각의 온도에서 상변화 되면서 Ca-매질은 CaO로, Mg-매질은 MgO 로 변화되는 것을 확인할 수 있다. 소성 전, 후 매질로 인공 산성 중금속 오염수를 정화하였을 때, 소성 후 매질이 모든 중금속 농도에서 효율이 좋으며 좀 더 적은 양으로도 pH 상승이 가능하고 각각의 매질에서 도달하는 최고 pH값도 상승한다.

5. 사 사

본 연구는 한국환경산업기술원(과제 번호: 2021002470002)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Table 1. Heavy metal concentration of HCAW

Sample No.	Cd (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Zn (mg/L)
HCAW	97	3	246	200	1869

*HCAW: Heavy metal Contaminated Acidic Water

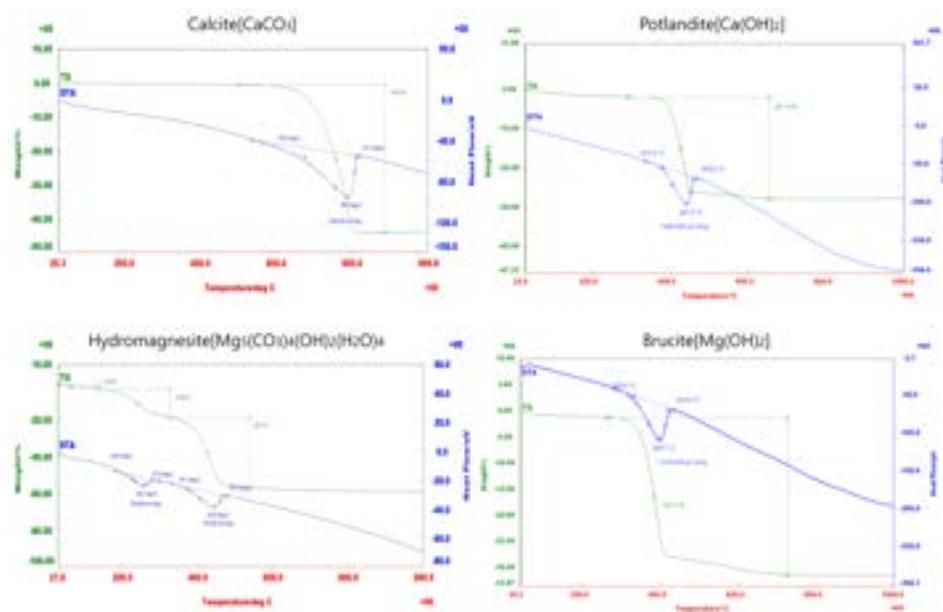


Fig. 1. TG-DTA results of Ca, Mg-carbonate and hydroxide

Fig. 2. XRD results of Ca, Mg-carbonate and hydroxide

단층비지의 입도 및 구성광물이 초임계 CO₂와의 반응에 미치는 영향 연구

Effect of the particle size and constituent minerals on the reaction of fault gouge and supercritical CO₂

이유나(Yu Na Lee)¹·송인선(Insun Song)²·김현나(Hyun Na Kim)^{1,3*}

¹공주대학교 지질환경과학과

²한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부 CO₂지중저장연구센터

³공주대학교 황해지질환경연구소

1. 서언

이산화탄소 지중저장 시, 저류층 내 이산화탄소 주입으로 인한 공극압 증가는 덮개암의 유효응력을 변화시켜 단층의 미끄러짐을 유발시키며, 이는 미소지진을 발생시킬 뿐만 아니라 덮개암의 투수율을 증가시켜 CO₂의 누출을 야기한다. 또한, 이산화탄소의 용해로 인해 조성된 산성환경은 단층대에 존재하는 단층비지와 반응하여 단층암의 조성 및 공극 구조의 변화를 가져오며 이는 단층의 재활성이나 재누출 통로를 발달시킬 수 있다. 따라서 이산화탄소 지중 저장 시 장기적인 안정성을 평가하기 위해서는 지중 주입된 CO₂와 단층암 물질 반응에 따른 광물학적 변화에 대한 정확한 이해와 이러한 변화가 단층거동에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

단층비지는 단층 미끄러짐 시 높은 전단변형으로 인해 비정질 나노입자 형태로 존재할 수 있으며, 이차적으로 유체와 반응하여 생성된 다량의 점토광물을 포함한다. 이러한 특성은 단층면의 점착력이나 마찰특성에 영향을 미치며, 낮은 마찰계수의 영향으로 단층의 지진 발생 잠재력에 영향을 미친다.

이와 같이 점토질의 비정질 미립자로 존재하는 단층비지는 단층 안정성을 조절하는 중요한 요소로 작용하며 입도와 구성광물에 따라 단층거동에 영향을 줄 수 있다. 그러나 이러한 단층비지의 특성이 단층비지와 CO₂ 반응에 미치는 영향은 아직 완전히 밝혀지지 않았으며, 단층거동에 주로 영향을 미치는 특성에 대한 연구는 거의 진행된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 단층비지의 특성이 CO₂ 반응에 미치는 영향을 입도와 구성광물로 비교하여 알아보려고 하였다. 이를 위해, 고에너지 볼 밀을 이용하여 낮은 입도를 모사한 인공단층비지와 점토광물의 종류를 달리한 인공단층비지를 제작하여 초임계 이산화탄소와의 반응실험 진행한 후, 광물학적 분석을 수행하였다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

본 연구에서는 입도를 달리한 인공단층비지 2종과 구성광물을 달리한 인공단층비지 3종을 제작하였다. 입도에 따른 CO₂ 반응성 차이를 알아보기 위하여 석영과 조장석, 미사장석을 고에너지 볼 밀(Retsch Emax)을 이용하여 1500 rpm의 속도로 분쇄를 진행하였다. 각 광물의 경도를 고려하여 석영은 12시간, 조장석과 미사장석은 1시간 분쇄한 후, 50:25:25의 중량비로 혼합하여 인공단층비지를 제작하였다. 인공단층비지의 구성광물에 따른 차이를 알아보기 위하여 팽창성이 서로 다

른 광물인 몬모릴로나이트와 일라이트를 각각 20 wt.% 혼합하여 인공단층비지를 제작하였다.

인공단층비지의 CO₂ 반응실험은 한국지질자원연구원의 다상유체유동실험장치를 이용하였다. 이산화탄소가 초임계상으로 존재할 수 있도록 반응 실험의 온도와 압력은 40°C와 75 MPa로 설정하였다. 고압셀 내부에 인공단층비지 시료를 다져 넣은 후, 40°C로 설정한 오븐에 넣어 물과 함께 최대 6주 동안 CO₂와 반응하였다.

CO₂ 반응실험이 종료된 시료는 온도 70°C에서 2시간 동안 건조한 후 3분 동안 손으로 분쇄하여 분말형태로 제작하였다. 이후, X-선 회절분석(X-ray Diffraction analysis, XRD)과 고분해능 주사전자현미경(HR FE-SEM -TESCAN, MIRA 3), 비표면적 분석(Surface area analysis, BET)을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

X-선 회절분석 결과, CO₂ 반응에 따른 구성광물 변화가 발생하였으며, 입도와 점토광물은 그 변화 정도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 분쇄 전 인공단층비지의 경우, CO₂ 반응에 따른 각 구성광물의 피크세기 변화가 거의 나타나지 않았으며 분쇄 후 모든 구성광물의 피크가 소폭 감소하였으나 그 정도는 매우 미미하다. 이와 같은 결과는 단층비지의 입도가 CO₂ 반응에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 점토광물에 종류에 따른 CO₂ 반응 후 구성광물 변화는 점토광물이 있는 인공단층비지에서 더 크게 나타났다. 점토광물이 없는 인공단층비지는 반응 6주 동안 구성광물의 피크세기 변화가 거의 관찰되지 않는 반면, 점토광물이 있는 인공단층비지의 경우 석영의 지속적으로 감소하고 조장석과 미사장석 피크가 감소하였다가 증가하는 경향을 보이며 그 정도는 몬모릴로나이트가 있는 인공단층비지에서 더 크게 나타난다. 이는 CO₂와 반응하여 점토광물의 용해가 발생하였으며, 반응환경의 pH를 변화시켜 구성광물의 용해·침전 반응을 촉진시키는 것으로 생각된다.

주사전자현미경분석 결과, CO₂ 반응기간이 증가함에 따라 입자의 형태 및 크기의 변화가 나타났으며, 입도에 따른 차이는 작으나 구성광물에 따른 차이는 크게 나타났다. 점토광물이 없는 단층비지와 일라이트가 있는 단층비지의 경우, 수십 μm 스케일 입자 표면에 수 μm 크기의 입자 형성이 관찰되었으며, 반응이 진행되어도 광물입자들의 각진 형태와 일라이트의 층상구조가 지속적으로 뚜렷하게 관찰되었다. 반면, 몬모릴로나이트가 있는 인공단층비지에서는 반응이 진행됨에 따라 nm 스케일의 초미세 입자들이 응집되어 나타나며, 입자 가장자리가 불분명하고 거친 형태로 관찰하였다. 이는 광물입자 표면에서 CO₂와의 반응이 활발하게 일어났음을 지시하며, X-선 회절분석 결과와 일치한다.

B.E.T 비표면적 분석 결과, CO₂ 반응기간 동안 분쇄에 따른 인공단층비지의 비표면적 변화가 크게 나타나지 않아 입도에 따른 변화가 관찰되지 않았다. 구성광물에 따른 비표면적 변화는 CO₂ 반응기간에 따라 점토광물이 없는 인공단층비지의 경우 0.1816 m²/g, 일라이트가 있는 인공단층비지는 0.4095 m²/g 나타난 반면, 몬모릴로나이트가 있는 인공단층비지의 경우 69.7709 m²/g로 반응기간이 길어질수록 비표면적이 크게 증가하였다. 이는 몬모릴로나이트가 있는 인공단층비지가 이산화탄소와 반응 후 침전된 미세입자 형성과 광물의 표면 위상 변화에 대한 결과로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 단층비지의 특성이 CO₂ 주입에 따른 단층비지와 반응에 미치는 영향을 알아보 고자 하였다. 그 결과, 인공단층비지의 입도에 따라 CO₂ 반응으로 인한 구성광물 및 구조적 변화 가 거의 관찰되지 않았다. 반면, 구성광물에 따라 CO₂ 반응으로 인한 광물학적 차이가 발생하였으 며, 그 차이는 점토광물이 있는 인공단층비지에서 더 크게 발생하였고 팽창성 점토광물인 몬모릴 로나이트가 포함된 인공단층비지에서 더 큰 변화가 나타났다. 따라서 CO₂가 단층비지와 반응하였 을 때, 단층비지의 입도보다 단층비지 내 존재하는 점토광물의 종류가 단층비지 변질에 더 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이는 단층비지의 구성광물에 따라 CO₂와의 반응속도가 달라지는 것 을 의미하므로, 덮개암의 조성에 따라 해당 지역에서 CO₂의 주입이 단층면에 미치는 영향에 대한 차이가 발생할 수 있음을 지시한다.

참고문헌

Choi, Won-Woo, Kang, Hyun-Min, Kim, Jae-Jung, Lee, Ji-Young, Lee, Min-Hee.(2009).Study for the Geochemical Reaction of Feldspar with Supercritical CO₂ in the Brine Aquifer for CO₂ Sequestration. *Economic and Environmental Geology* ,42(5),403-412.

Collettini, C., Niemeijer, A., Viti, C. and Marone, C., 2009, Fault zone fabric and fault weakness. *Nature*, 462, 907-910.

Eundoo Park, Sookyun Wang, Sunok Kim and Minhee Lee, 2014, The effects of the carbon dioxide stored in geological formations on the mineralogical and geochemical alterations of phyllosilicate minerals. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 50, no. 2, p. 231-240

Sangwoo Woo, Raehee Han, Chang-Min Kim, Gi Young Jeong, Jong Ok Jeong and Hikweon Lee, 2016, Relation between temporal change of fault rock materials and mechanical properties. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 52, no. 6, p. 847-861

밀도범함수이론을 바탕으로 산화광물과 탄산염광물을 이용한 탄소 저감 활용가능성 연구

Availability of carbon reduction using oxide and carbonate minerals in density functional theory

김계홍(Kim Gyeonghong)¹·고경철(Kyoungchul Ko)^{2*}·성동훈(Donghoon Seung)^{1*}

¹전남대학교 지질학과

²전남대학교 화학교육과

1. 서언

지구온난화를 일으키는 대표적인 온실가스로는 이산화탄소(CO₂)와 메탄(CH₄)가 있다. 이중 대기 중에 훨씬 고농도로 분포하는 이산화탄소에 대한 포집 및 저감 방법은 많은 연구가 진행되어있다. 하지만 이산화탄소보다 양은 적지만 대략 30배의 온실효과를 일으키는 메탄에 대한 연구는 조금 부족한 것이 사실이다. 미국의 셰일가스 혁명 이후 대기중의 메탄농도는 지속적으로 증가해왔으며, 이에 따라서 메탄가스도 저감할 수 있는 방법을 찾아야 한다. 본 연구에서는 가장 흔하게 알려진 이산화탄소 저감에 사용하는 산화광물을 이용하여 이산화탄소와 메탄가스를 아세트산으로 합성하여 두가지의 온실가스를 모두 저감하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 밀도범함수 이론을 바탕으로 양자계산을 실시하여 각각의 광물과 가스의 자유에너지를 비교하고자 하였다. 계산옵션의 경우 대중적으로 많이 쓰이는 GGA방식의 PBE function에서 고체계산을 위해 수정된 PBEsol 계산레벨을 사용하였고, 무거운 원자를 둘러싼 전자들의 상호작용을 고려하기 위해 relativistic atomic zora effect를 추가하였고, 각각의 원소의 상태에 맞게 spin과 charge를 추가하였고, 격자는 3x3x3 k-grid를 사용하였다. 계산은 오차 0.01eV/cell 이하로 수렴하였을 때 종료하였다. 온도변화에 따른 영향을 적용하기 위해서 phonon calculation을 진행하였다. 고체의 경우 진동모드, 기체의 경우 회전 병진 진동모드에 대해서 분자분배함수를 기반으로 통계열역학 처리를 한 식을 이용하여 계산을 진행하였다. 계산에 사용된 광물들의 화학식은 다음과 같다. MCO₃(s) + CH₄(g) → MO(s) + CH₃COOH(g) (M = Sr, Ca, Mg, Co, Zn, Cu) 모든 계산은 양자계산 프로그램인 FHI-aims 프로그램을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

CH₄ + CO₂ → CH₃COOH 반응식을 온도와 압력에 변화를 주면서 자유에너지의 변화량을 계산해 보았다.

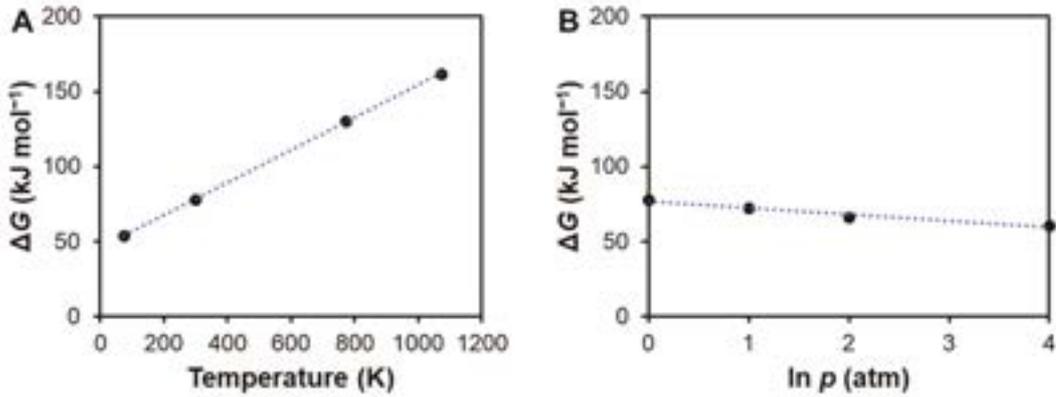


그림 1 계산된 $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$ 식에서의 깁스자유에너지의 변화량 (ΔG), 온도(A), 압력 (B)

계산된 결과에 따르면 온도변화를 통해서는 자발적인 반응을 이끌어 낼 수 없다.

그림2 (a)에 따르면 온도변화에 따른 화학식의 반응을 볼 때 산화광물이 이산화탄소와 만나서 탄산염 광물이 만들어지는 온도를 알 수 있다. 계산에 의하면 상온 상압에서 구리를 제외한 나머지 원소들은 탄산염 광물을 생성한다. 이후에 두 번째 화학식으로 아세트산 생성을 확인해보았다.

그림2 (b)에 계산된 결과에 따르면 Ca, Sr, Ba, Mg의 경우에는 아세트산이 만들어 지기 힘든 상황이고 Cu, Co, Zn의 경우 온도변화에 의해서 아세트산이 생성될 수 있다. 이에 따라 적절한 온도변화를 이용하여 온실가스인 이산화탄소와 메탄가스 두 가지를 모두 잡아서 아세트산으로 변화가 가능하다고 생각된다.

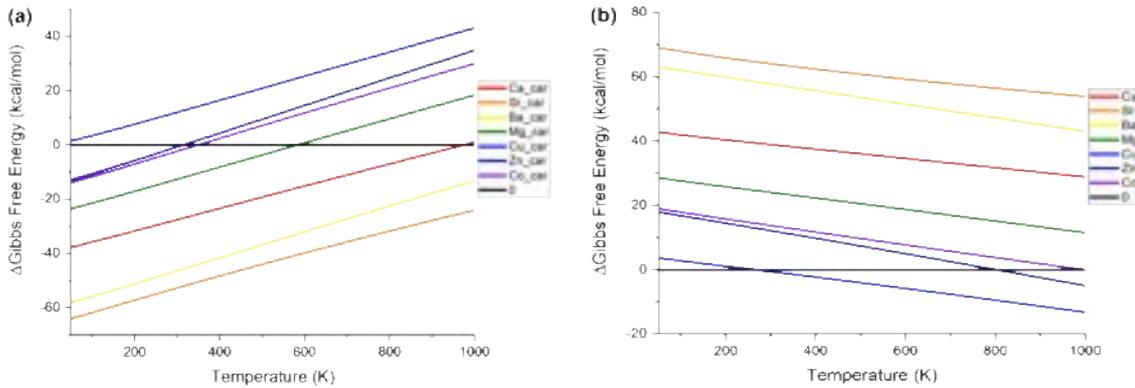


그림 2 (a) $\text{MO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{MCO}_3(\text{s})$ 식에서의 자유에너지 변화량.

(b) $\text{MCO}_3(\text{s}) + \text{CH}_4(\text{g}) \rightarrow \text{MO}(\text{s}) + \text{CH}_3\text{COOH}(\text{g})$ 식에서의 자유에너지 변화량

고압환경에서 수화된 조장석 용융체의 H₂O 기포 크기 분포 분석
: 백두산 상부 마그마 시스템의 거동 분석을 위한 예비 연구
Analysis of H₂O Bubble Size-Distribution in Hydrated Albite Melts under
High Pressure
: A Preliminary Study for the Behavior Analysis of the Upper Magma of Mt.
Baekdu

전예린(Yerin Jeon)¹·김현나(Hyun Na Kim)^{1,2}·김은정(Eun Jeong Kim)^{1*}

¹공주대학교 지질환경과학과

²공주대학교 황해지질환경연구소

백두산은 동아시아에서 가장 위협적인 활화산으로 폭발적으로 분화할 경우 전 세계적으로 큰 피해를 야기할 수 있다. 폭발형 화산 분화에 영향을 미치는 기포는 마그마 내 과포화된 휘발성 성분이 분리되며 생성되고 마그마의 점도를 변화시켜 마그마 상승을 제어하는 주요 요인으로 작용한다. 따라서 백두산 거동 연구를 위해 유문암질 마그마 내 기포의 크기와 움직임, 그에 따른 폭발 양상 연구가 필요하다. 본 연구에서는 백두산의 상부 조성인 유문암질 마그마의 모델 시스템으로 조장석 용융체를 사용해 마그마 내 H₂O 기포 크기 분포를 관찰하는 예비 연구를 진행하였다.

고압실험을 위한 원시료는 Na₃CO₃, Al₂O₃, 및 SiO₂ 파우더를 사용해 비정질 조장석으로 합성하였다. 1 GPa와 2 GPa의 고압 환경을 멀티 앤빌 프레스를 이용해 구현하였다. H₂O 기포 생성을 위해 압력에 따른 용해도를 확인하였고 1000°C, 1400°C일 때 1 GPa에서 11, 15 wt%, 2 GPa에서 27, 35 wt%로 H₂O를 첨가해 과포화 상태를 만들었다. 합성된 비정질 유리를 연마하여 후방산란전자(BSE) 이미지를 얻은 후 ImageJ 프로그램을 통해 유리과 기포를 각각 검정색과 흰색으로 이진화(binary)하여 H₂O 기포 크기 분포를 측정하였다. 분석 결과 1 GPa, 16 wt% 조건에서는 평균 0.49 μm² 크기의 기포가 약 18000개, 2 GPa, 35 wt% 의 조건에서는 평균 0.18 μm² 크기의 기포가 약 8000개 관찰되었다. 이는 전체면적의 약 1.5~2 % 정도의 비율이다. 지금까지는 2차원 이미지를 사용하여 기포의 크기를 측정하는 이전 연구 방식을 재현해보았으며 이후 토모그래피 기법을 사용해 3차원의 실제 기포 크기 분포를 측정할 수 있도록 할 예정이다.

본 연구에서는 유문암질 마그마 시스템의 이해를 위해 비정질 조장석 내 H₂O 기포의 크기 분석을 보고하는 예비 연구를 진행하였다. 이후 추가적인 실험을 통해 감압에 따른 화산 거동을 분석하고자 한다. 이를 통해 마그마 상승 과정에서의 기포 거동에 대한 이해를 고양하고 백두산과 같은 대륙판 내 화산의 분출 기작을 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

금호강 퇴적물 성상 및 오염도 평가 Contamination of Sediments in Geum-Ho River

박진근(JinGeun Park)¹·박해성(HaeSeong Park)¹·김영훈(YoungHun Kim)^{1*}·김정진(JeongJin Kim)²·이병준(ByungJoon Lee)³·김정우(JeongWoo Kim)⁴·차용훈(YongHun Cha)⁴·서지호(JiHo Seo)⁴·최기호(KiHo Choi)⁴

¹안동대학교 환경공학과

²안동대학교 지구환경과학과

³경북대학교 환경안전공학과

⁴(주) 지오그린21

1. 서언

퇴적물은 모래, 점토, 유기물질, 광물질을 모두 포함하고 있으며 호소, 하천 및 해양 등 수저에 육지로부터 유입되며 그 질과 양은 수역의 이용 및 환경에 영향을 미친다. 퇴적물은 오염물질의 저장소로 수질 및 수생태계의 건강성에 직·간접적인 영향을 미치는 매체이며, 오염도가 높은 퇴적물은 수자원으로서의 가치를 크게 훼손시키는 원인으로 작용하고 있다. 따라서, 수질의 개선 및 환경에 대한 피해를 최소화하기 위해 퇴적물의 오염도, 이동 특성 및 시·공간적 분포특성을 조사하여 적절한 퇴적물 관리 방안이 필요하다.

금호강 유역은 경상북도에서 가장 넓으며, 행정구역으로는 포항시·영천시·경산시 및 대구광역시를 관통하여 흐르고 있다. 선행연구에서 낙동강의 수질 개선을 위해 달성보 유역을 중심으로 유입지천인 금호강의 오염원 관리가 필요하다고 평가하였다. 또한, 물환경정보시스템에 의거하여 금호강 퇴적물(8지점)은 퇴적물 오염평가 기준으로 평가할 경우 최근 5년간 ‘약간 나쁨’ 및 ‘나쁨’ 등급에 해당하여 오염도가 높음을 확인할 수 있다.

본 연구는 금호강 본류 및 본류에서 유입되는 지류의 퇴적물 성상과 오염도를 정밀조사 하였으며, 오염 퇴적물의 이동 경향을 파악하기 위해 HSPF 모델링 연구를 함께 수행하였다. 오염도 평가 및 모델링을 위해 강우 전/후를 기준으로 수질은 4회, 퇴적물은 2회 시료 채취하였으며, 오염도 평가항목으로는 유기물(2종), 영양염류(2종) 및 중금속(8종)을 분석하였다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

시료 채취는 수질오염공정시험기준(ES 04160.2)에 준하여 수행하였으며, 본류 19지점, 지류 18지점에서 수질 및 퇴적물을 채취하여 중금속 및 영양염류, 유기물을 분석하였다. 퇴적물 중금속 분석은 마이크로웨이브 산분해법을 사용하였다. 수질 및 퇴적물의 영양염류 및 유기물은 수질오염공정시험기준에 의해 수행하였다. 이때 자외선, 가시선 분광법을 이용하는 분석법은 UV-Vis(Agilent, Cary 8454)을 사용하여 분석하였다. 분석된 각 항목별 시료의 농도는 수질 및 퇴적물 오염도 평가에 활용되었다.

3. 결과 및 고찰

퇴적물 입도분포

1, 2차 조사시 모든 조사지점에서 모래($63\mu\text{m} \leq \text{Particle} < 2\text{mm}$)가 높은 비율이 나타났으며, 본류에 비해 지류에서 상대적으로 실트와 점토가 높은 비율로 나타났다.

퇴적물 유기물 및 영양염류 오염도

일부 지점의 퇴적물은 LOI 및 T-N, T-P의 농도가 높게 분석되었으나, TOC의 경우 전체적으로 오염도가 높지 않았다. TOC는 0.12-3.42%의 범위로 분석되었으며, T-N은 335-4167 mg/kg, T-P는 90.2-1663mg/kg의 범위로 분석되었다. TOC와 T-P의 경우 하천퇴적물 오염평가 II등급 기준을 초과하지 않거나 약간 상회하는 것으로 나타났으며, T-N의 경우 하천퇴적물 오염평가 IV 등급 기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

Fig 1. 퇴적물 유기물 및 영양염류 분석결과(왼쪽: 1차 조사, 오른쪽: 2차 조사)

퇴적물 중금속 오염도

퇴적물의 중금속 8개항목(As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Hg)에서 하천 퇴적물 오염평가 III등급 기준을 초과하는 지점이 일부 있었으나, IV 등급을 초과하는 지점은 나타나지 않았으며, 1, 2차 조사를 비교했을 때, 조사지점을 기준으로 상대적으로 양호한 오염평가 등급이 나타났다. 다만, 대부분의 중금속 항목들은 하류로 갈수록 농도가 증가하며 증가 폭이 커지는 양상이 나타났다.

Fig 2. 퇴적물 중금속 분석결과(왼쪽: 1차 조사, 오른쪽: 2차 조사)

4. 결론

2차에 걸친 금호강 퇴적물의 오염도를 종합하면 다음과 같다. 1차 조사결과 유기물 및 영양염류

의 분석결과를 바탕으로 보통 19지점, 약간 나쁨 15지점, 나쁨 1지점으로 평가되었으며, 중금속의 경우 보통 4지점, 약간 나쁨 20지점, 나쁨 11지점으로 오염도가 높게 나타났다. 이는 금호강 중·하류에 인구 및 산업단지 밀집화의 요인으로 오염도가 높게 나타났을 것으로 판단된다.

2차 조사결과 유기물 및 영양염류의 분석결과를 바탕으로 보통 21지점, 약간 나쁨 15지점, 매우 나쁨 1지점으로 평가되었으며, 중금속의 경우 보통 2지점, 약간 나쁨 23지점, 나쁨 12지점으로 1차 조사 대비 비교적 높은 오염평가 등급이 나타났으며, 이는 강우로 인해 오염도가 높은 퇴적물이 하류로 퇴적되어 오염도가 높게 평가된 것으로 판단된다.

비투멘 반사도 기반 유기물 열적성숙도 특성 분석 연구
Study on the Thermal Maturity Characteristics of Organic Materials based on
Vitrinite Reflectance Analysis

최지영(Jiyoung Choi)¹ · 김성안¹

¹한국지질자원연구원 석유에너지연구센터

유기물의 열적성숙도를 측정하는 것은 유기물이 열적으로 성숙해가는 과정을 이해하고 파악하기 위한 중요한 과정이다. 유기물의 열적성숙도는 지반의 압력과 온도의 영향을 받으면서 변화하며, 이 변화는 유기물이 열적으로 성숙해가는 정도를 나타낸다. 전통적으로 유기물의 열적성숙도를 평가하기 위해서는 비트리나이트 반사도 측정 방법이 사용되었다. 그러나, 식물이 출현하기 이전에 퇴적된 지질층이나 해양 환경에서 퇴적된 유기물의 경우에는 비트리나이트가 존재하지 않아 반사도 측정이 어려울 수 있다 (Kenrick and Crane, 1997). 이러한 한계를 극복하기 위해 고형 비투멘에서 반사도를 측정하는 연구들이 이루어지고 있다 (Jacob, 1989, 1993; Bertrand, 1993; Landis and Castano, 1995). 고형 비투멘은 케로젠이나 오일의 이차적인 변질 과정에서 형성되며, 물리적으로 단단한 특성을 가지기 때문에 표면을 연마하여 빛을 반사할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 고형 비투멘에서 반사도를 측정하며, 측정된 반사도 값을 기반으로 유기물의 열적성숙도를 평가할 수 있다. 비투멘 반사도 측정을 위해서는 시료 선별, Pellet 제작, Pellet의 표면 연마, 현미경 관찰 및 반사도 측정의 과정을 거친다. 측정된 비투멘 반사도 값은 기존의 비트리나이트 반사도와 직접적인 상관관계를 갖는다. 따라서, 비투멘과 비트리나이트 반사도 값의 경험식을 사용하여 비투멘의 반사도 값을 열적 성숙도로 환산할 수 있다. 결과적으로, 고형 비투멘 반사도 측정 방법은 비트리나이트 반사도 측정 방법의 한계를 극복하여 유기물의 열적 성숙도를 정확하게 평가하는 데 도움을 줄 수 있다.

동시베리아해에서 산출되는 망가니즈단괴의 형태학적·지화학적 특성 Morphological and geochemical characteristics of manganese nodule from the East Siberian Sea

구효진(Hyo-Jin Koo)¹·이상미(Sang-Mi Lee)¹·조현구(Hyen-Goo Cho)¹
·김효임(Hyo-Im Kim)^{1*}
¹경상국립대학교 지질과학과

1. 서언

망가니즈단괴(manganese nodule)는 망가니즈와 철을 주성분으로 하며, 일반적으로 심해저의 퇴적물 위 또는 수 cm 이내에서 발견되는 금속덩어리를 말한다. 이들은 망간과 철 뿐만 아니라 니켈, 구리, 코발트, 희토류원소 등 다양한 금속을 다량으로 포함하고 있어, 가까운 미래에 개발 가능한 자원으로 관심을 받고 있다. 망가니즈단괴는 또한 해양퇴적물, 조개껍데기, 상어이빨 등의 핵(nucleus)을 중심으로 성장하기 때문에, 이들의 성장과정은 해저의 지질학적 역사와 기후변화가 해양 환경에 미치는 영향에 대한 정보를 제공할 수 있다. 쇄빙연구선 아라온호를 이용한 북극해 탐사는 2012년 ARA03B 탐사를 시작으로 총 5차례의 탐사(ARA07C, ARA09C, ARA10C, ARA12B)동안 동시베리아해 대륙붕-대륙사면에서 다량의 천해저 망가니즈단괴(shallow-water manganese nodule)를 발견했다. 이들은 수심 73-240 m에 위치하고 있어, 수심에 따른 천해저 망가니즈단괴의 특성 및 형성과정 변화를 규명하기에 매우 좋은 기회를 제공한다. 이번 발표에서는 지난 탐사동안 발견된 동시베리아해 망가니즈단괴의 분포와 이들의 형태학적·지화학적 특성에 대해 소개한다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

이번 연구에는 5차례의 아라온호 북극해 탐사동안 획득된 망가니즈단괴에 대하여 형태학적·지화학적 분석을 수행하고, 수심에 따른 단괴의 특성 변화를 고찰하였다. 망가니즈단괴의 형태학적 특성은 2,660개의 단괴에 대하여 세 축의 길이와 무게를 측정하고, 단괴의 색, 표면조직 및 외부형태가 기재되었다. 망가니즈단괴의 화학조성은 캐나다의 Actlabs에서 X-선 형광분석기(X-ray fluorescence spectroscopy, XRF) 및 유도결합 플라즈마 질량분석기(Inductively coupled plasma spectrometer, ICP-MS)를 이용하여 분석되었다.

3. 결과 및 고찰

망가니즈단괴의 형태는 구형(spherical), 타원체형(ellipsoidal), 판상형(tabular), 다단괴형(polynucleate), 원통형(tube), 불규칙형(irregular) 등 6가지 형태로 구분하였다. 관찰된 2,660개의 망가니즈단괴는 구형이 2,006개(75.4%)로 대부분을 차지하며, 탁상형이 320개(12.0%), 불규칙형이 142개(5.3%), 튜브형이 69개(2.6%)이다. 비구형 단괴의 비율은 수심이 얕아질수록 증가하는 경향을 보이는데, 비구형 단괴의 비율은 수심 204 m에서 0.6%인 반면, 수심 150 m에서는

97.1%, 수심 73 m에서는 100%로 확인되었다. 단괴의 색과 표면조직은 수심 150 m 이상의 모든 정점에서 흑색의 거친형(rough type)으로 구분되었다. 그러나, 수심 73 m의 단괴들은 노랑-갈색을 띠며, 대부분 매끄러운형(smooth type)으로 분류되었다.

동시베리아해 망가니즈단괴의 화학조성은 수심 160-240 m, 수심 150 m, 수심 73 m 등 3개의 수심으로 구분하여 비교되었다. 수심 160-240 m에서 회수된 단괴의 평균 화학조성은 Mn 27.0%, Fe 3.0%로, 8.9의 Mn/Fe를 가지며, Co+Ni+Cu의 함량은 488 ppm, 총 희토류 함량은 106.4 ppm이다. 수심 150 m의 6개 단괴의 평균 화학조성은 Mn 32.8%, Fe 2.2%로, 15.2의 Mn/Fe를 가지며, Co+Ni+Cu의 함량은 288 ppm, 총 희토류 함량은 85 ppm이다. 수심 73 m의 6개 단괴들의 평균 화학조성은 Mn 7.3%, Fe 13.5%로, 0.5의 Mn/Fe를 가지며, Co+Ni+Cu의 함량은 270 ppm, 총 희토류 함량은 128 ppm이다.

동시베리아해 망가니즈단괴는 수심에 따라 서로 다른 형태와 화학조성을 나타낸다. 수심 200 m 주변에서는 흑색의 구형 단괴가 주로 산출되며, 수심이 얕아질수록 비구형 단괴의 비율이 증가하여 수심 73 m에서는 모든 단괴가 비구형으로 산출된다. 그러나, 단괴의 색과 표면조직은 수심 150 m 이상에서 모두 동일하며, 이는 높은 Mn/Fe 비율과 관련될 수 있다. 반면, 수심 73 m의 단괴들은 노랑-갈색의 매끄러운 표면조직을 가지며 낮은 Mn/Fe를 가진다. 동시베리아해 망가니즈 단괴는 수심에 따른 특성 변화가 뚜렷하며, 향후 동시베리아해 망가니즈단괴의 형성과정에 대한 연구가 수행되면 천해저 망가니즈단괴에 대한 이해를 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

버나다이트 분자동역학 시뮬레이션 연구
A Molecular Dynamics Simulation Study of Vernadite

Gerica Joie P. Castro¹·권기덕(Kideok D. Kwon)^{1,*}

¹강원대학교 지질학과

Vernadite is a turbostratically stacked nanocrystalline layered Mn oxide mineral ubiquitous in soil, freshwater, and marine systems. X-ray diffraction and scattering research of δ - MnO_2 , a synthetic analog phase of vernadite, has provided insights into the mineral structure. However, the nanomineral structures are not yet unambiguously characterized because of its unique two-dimensional sheet structure and high disorder of the structure. For the first time, we have performed molecular dynamics (MD) simulations of Zn-sorbed vernadite in an aqueous phase. Our simulations predicted that Mn octahedral sheets are not flat but curved structures with an interlayer spacing of ~ 7 nm, while an X-ray scattering study proposed cylindrical and spherical models for them. The degree of the sheet curvature depends on the number of stacked sheets and the lateral size of particles. At the lateral edges, we found Zn forms only tetrahedral double-corner sharing surface complexes (i.e., octahedral Zn complexes are only at Mn vacancy sites). Our simulations propose the first long- and short-range atomic structure models of vernadite, which should guide experimental investigation of the nanomineral structures and chemical reactivity toward metal scavenging.

영동 일라이트 분말제품의 입도에 따른 광물학적 특성 분석 Analysis of mineralogical characteristics according to particle size of Yeongdong illite powder products

백은지(EunJi Baek)¹·이유나(Yu Na Lee)¹·김현나(Hyun Na Kim)^{1,2*}

¹공주대학교 지질환경과학과

²공주대학교 황해지질환경연구소

1. 서언

일라이트(Illite)는 점토질 퇴적암의 주성분으로 두 개의 사면체판(Tetrahedral sheet) 사이에 한 개의 팔면체판(Octahedral sheet)이 결합한 구조로 이루어져 있는 비팽창성 점토광물이다(Grim et al., 1937). 일라이트는 분말로 가공하여 입도와 순도에 따라 여러 분야에서 활용된다. 입도가 작고 일라이트 함량이 높은 제품의 경우 의약품 및 화장품에 활용되며 입도가 크고 일라이트 함량이 낮은 제품은 토양개량제 및 건축마감재 등에 활용된다(Choo, 2001). 또한 일라이트가 효율적으로 세습을 흡착할 수 있는 특성을 활용하여 방사성 핵종 제염제의 후보물질로서의 연구도 진행되어 있는데, 이러한 흡착 특성은 일라이트의 함량 및 입도에 따라 달라질 수 있다(Hwang et al., 2016).

충청북도 영동지역에서 산출되는 일라이트는 100 mesh, 325 mesh, 1000 mesh 등 다양한 입도로 판매되고 있다. 일라이트 분말제품의 활용도가 달라지기 때문에 분말제품의 입도 및 구성광물의 종류, 일라이트 함량을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 충청북도 영동지역에서 판매되고 있는 일라이트 분말제품의 구성광물, 함량, 입도, 백색도 등과 같은 광물학적 특성을 알아보려고 하였다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

본 연구에서는 충청북도 영동군에 위치한 일라이트 광산 중 현재 일라이트 분말제품을 입도별로 판매하고 있는 업체 2곳을 선정하였다. 일라이트 분말제품은 일라이트 광산에서 광석을 채취한 후, 가공하여 판매되고 있다. A 업체의 분말 제품 중, 100 mesh, 325 mesh, 1000 mesh, 2500 mesh의 4개 제품을 본 연구의 대상 시료로 선정하였으며 B 업체의 분말 제품에서는 200 mesh, 325 mesh, 1000 mesh의 3개 제품을 본 연구의 대상 시료로 선정하였다. A, B 업체 중 한 업체는 수비정제 방법으로 가공한 수비정제 제품 또한 판매하고 있었으며 이 제품도 본 연구의 대상 시료로 선정하였다.

총 8개의 일라이트 분말제품의 구성광물과 이를 정량적으로 분석하기 위해 경상국립대학교 공동 실험실습관에서 X-선 회절 분석(X-ray Diffraction analysis, XRD)을 진행하였다. 주성분 원소를 알아보기 위해 캐나다의 Actlabs에서 X-선 형광 분석(X-ray Fluorescence analysis, XRF)을 진행하였으며 입도를 정확히 파악하기 위해 한국지질자원연구원에서 레이저 회절 입도 분석기를 이

용하여 입도분석(Particle Size Analysis, PSA)을 진행하였다. 입자크기와 형태를 관찰하기 위해 공주대학교 공동실험실습관에서 주시전자현미경 이차전자이미지 분석(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 진행하였다. 또한 한국석회석신소재연구소에서 백색도 분석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

일라이트 분말제품의 X-선 회절 분석 결과, 충청북도 영동군에서 산출되는 일라이트의 주요 구성 광물은 일라이트 및 백운모 외에 석영과 장석이며 기타 광물의 X-선 회절피크는 나타나지 않았다. 정량분석 결과, A 업체 분말제품 중 100 mesh, 325 mesh, 1000 mesh의 경우 일라이트 및 백운모의 함량이 유사하게 나타났지만 2500 mesh의 경우 상대적으로 일라이트 및 백운모 함량이 약 10 wt.% 정도 높게 나타났다. B 업체 분말제품의 경우 구성광물의 비율이 거의 유사하게 나타났다. 정제방법을 달리한 수비정제 분말제품의 경우 본 연구에서 분석한 일라이트 분말 제품 중 일라이트 및 백운모 함량이 가장 높게 나타났으며 이는 수비정제 방법으로 입도가 작은 일라이트만을 정제할 수 있었던 결과로 생각된다.

X-선 형광 분석 결과, A, B 업체 분말제품의 주원소로 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O 등이 관찰되었으며 주원소와 일라이트 및 백운모 함량 사이 상관관계를 알아보았다. 그 결과 일라이트 및 백운모 함량이 증가함에 따라 SiO₂, Na₂O 함량은 감소하였고 Al₂O₃, K₂O 함량은 증가하였는데 일라이트 및 백운모 함량이 증가함에 따라 상대적으로 석영과 장석의 함량은 감소하기 때문이다.

입도 분석 결과, A 업체 분말제품의 경우 입도분포의 중앙값(D₅₀)이 100 mesh, 325 mesh, 1000 mesh, 2500 mesh 각각 15.8 μm, 12.0 μm, 4.6 μm, 4.8 μm로 나타났다. 100 mesh와 325 mesh 제품의 입도 분포가 유사하게 나타났으며 1000 mesh와 2500 mesh의 입도 분포가 서로 유사하게 나타났다. B 업체 분말제품의 경우 입도분포의 중앙값(D₅₀)이 200 mesh, 325 mesh, 1000 mesh 각각 12.8 μm, 12.7 μm, 5.0 μm로 나타났다. 200 mesh와 325 mesh의 입도가 유사하게 나타났으며 1000 mesh의 입도는 이들과 뚜렷하게 구별된다. 수비정제 제품의 경우 입도분포의 중앙값(D₅₀)이 7.9 μm로 나타났으며 1000 mesh 및 2500 mesh의 입도보다 크게 나타났다.

주시전자현미경 이차전자이미지 분석 결과, 모든 분말제품에서 판상형의 일라이트와 입방형의 석영 및 장석 입자를 관찰하였다. A 업체 분말제품의 경우 100 mesh, 325 mesh의 입자크기가 서로 비슷하고 1000 mesh, 2500 mesh의 입자크기가 서로 비슷하게 나타났지만 입도의 균일성은 입도가 작아질수록 증가하였다. B 업체 분말제품의 경우 100 mesh와 325 mesh의 입자크기가 서로 비슷하게 나타났고 1000 mesh에서 입자크기가 작아지고 균일성이 증가하였다. 수비정제 분말제품의 경우 분쇄를 하지 않았음에도 불구하고 입자의 크기가 약 10-20 μm이며 전체적으로 입자크기가 균일하게 나타났다.

백색도 분석 결과, A 업체 분말제품의 경우 백색도(Hunter L값)가 100 mesh, 325 mesh, 1000 mesh, 2500 mesh 각각 72.9, 74.0, 76.2, 77.5로 나타났다. B 업체 분말제품의 경우 백색도(Hunter L값)가 200 mesh, 325 mesh, 1000 mesh 각각 70.8, 70.2, 70.0으로 나타났다. 수비정제 제품의 경우 백색도(Hunter L값)가 84.9로 가장 크게 나타났다.

본 연구결과 충청북도 영동지역 일라이트 제품의 입도 및 정제방법에 따라 광물학적 특성이 다

Proceedings of the Annual Joint Conference

the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea,
June 22-23, 2023, Korea

르게 나타난다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 일라이트를 활용한 산업분야에 적용하여 체계적인 산업적 응용의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 참고문헌

Choo, C.O., 2001, Mineralogical characterization and applications of Illite. *Mineral and Industry*, 14(2), 29-37.

Grim, R. E., Bray, R. H. and Bradley, W. F., 1937, The mica in argillaceous sediments. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 22(7), 813-829.

Hwang, J.H., Choung, S.W., Park, C.S., Han, J.H. and Jeon, S.D., 2016, Application of Yeongdong illite to remove radiocesium for severe nuclear accidents, *Journal of the mineralogical society of Korea*, 29(4), 229-238.

<< 포스터발표 한국암석학회 >>



- 페리도타이트 포획암의 미구조와 유체포유물에 기록된 상부맨틀의 불균질성(미국 리오 그란데 리프트를 중심으로) 박문재
- 중국 Shuanghe 지역에서 산출된 후퇴변성작용을 받은 에클로자이트의 미세구조 연구 정세진, 정해명
- 국내의 골재 수출입 동향 연구 채광석, 구남인, 이영근, 양희문, 박기형
- 캘리포니아 서부 Jenner와 Ring Mt. 지역에서 채취한 각섬암 내부 각섬석의 변형미구조와 지각 내 지진파 비등방성에의 적용 김준하, 정해명
- 청색 편암과 후퇴변성된 에클로자이트에 포함된 광물들의 격자선 호방향과 지진파 비등방성 연구 하윤해, 정해명
- 남극 플레이아데스 알칼리 마그마 시스템의 황화물 및 친동성원소 지구화학: 대륙 하부 지각의 친동성원소 분배에 대한 고찰 김지혁, 박정우, 이미정, 이종익, Phillip R. Kyle, Xia Wang, Zaicong Wang
- 동위원소자료의 지구화학적 응용을 위한 암석시료의 지구화학적 전처리의 중요성에 대한 토의 이승구
- 고압에서 변형된 로소나이트 청색편암의 변형미구조와 지진파 특성 연구 최승순, 정해명
- Emplacement Age, Crustal Assimilation and Tectonic Setting of Gabbroic Rocks in the Tiger Gabbro Complex, northern Victoria Land, Antarctica 한기운, 김윤섭, 김태환, 이승렬, 이승구

**페리도타이트 포획암의 미구조와 유체포유물에 기록된 상부맨틀의 불균질성(미국
리오 그란데 리프트를 중심으로)**

Upper mantle heterogeneity recorded by microstructures and fluid inclusions from peridotite
xenoliths (a case study of the Rio Grande Rift, USA)

박문재(Munjae Park)^{1,*}

¹충북대학교 지구환경과학과

Mantle heterogeneity is closely related to the distribution and circulation of volatile components in the Earth's interior, and the behavior of volatiles in the mantle strongly influences the rheological properties of silicate rocks. In mantle xenoliths, these physicochemical properties of the upper mantle can be recorded in the form of microstructures and fluid inclusions. In this paper, I summarized and reviewed the results of previous studies related to the characteristics of microstructures and fluid inclusions from peridotite xenoliths beneath the Rio Grande Rift (RGR) in order to understand the evolution and heterogeneity of upper mantle. In the RGR, the mantle peridotites are mainly reported in the rift axis (EB: Elephant Butte, KB: Kilbourne Hole) and rift flank (AD: Adam's Diggings) regions. In the case of the former (EB and KB peridotites), the type-A lattice preferred orientation (LPO), formed under low-stress and low-water content, was reported. In the case of the latter (AD peridotites), the type-C LPO, formed under low-stress and high-water content, was reported. In particular, in the case of AD peridotites, at least two fluid infiltration events, such as early (type1: CO₂-N₂) and late (type-2: CO₂-H₂O), have been recorded in orthopyroxene. The upper mantle heterogeneity recorded by these microstructures and fluid inclusions is considered to be due to the interaction between the North American plate and the Farallon plate.

중국 Shuanghe 지역에서 산출된 후퇴변성작용을 받은 에클로자이트의 미세구조 연구

Microstructure of the retrograded eclogite from the Shuanghe, China

정세진(Sejin Jung)^{1,*}, 정해명(Haemyeong Jung)

¹서울대학교 지구환경과학부

중국 동부의 다비-술루 대륙충돌대는 페름기-트라이아스기에 북중국판 아래로 남중국판이 섭입하면서 형성된 것으로 알려져 있다. 다비-술루 대륙충돌대에서는 고압/초고압 변성의 증거가 나타나는 다수의 에클로자이트 노두들이 관찰된다. 본 연구에서는 중국 다비 충돌대의 Shuanghe 지역의 Hanchangchong area에서 채취한 후퇴변성작용을 받은 에클로자이트 시료의 미세구조를 분석하여, 후퇴변성 과정 중에 발달되는 미세구조를 연구하였다. 연구를 수행한 에클로자이트 시료는 후퇴변성작용에 의하여 녹회석이 단사회석 + 각섬석 + 사장석으로 구성된 심플렉타이트(symplectite)로 치환되어 있다. 에클로자이트가 후퇴변성 받은 정도에 따라서 남아있는 녹회석과 심플렉타이트가 공존하기도 하고, 녹회석이 완전히 후퇴변성 받아 심플렉타이트로 거의 대부분 교체되어 있기도 하다. 주사전자현미경의 후방전자산란회절(EBSD)을 활용한 분석 결과, 각섬석과 단사회석의 격자선호방향이 잘 일치하고 심플렉타이트 내부의 각섬석의 격자 방향이 일정하게 배열되어 있는 등 토평택틱(topotactic)한 성장에 의하여 각섬석의 격자선호방향이 발달된 증거를 발견하였다. 녹회석과 각섬석은 [001] 축이 강하게 선구조방향에 아평행하게 배열하고, [100] 축과 (110) 극이 선구조방향에 아수직하게 배열하는 격자선호방향(각섬석 type-IV 격자선호방향)을 보여주었다. 이러한 관찰 결과는 각섬석의 토평택틱한 성장에 의하여 각섬석 격자선호방향이 만들어질 수 있음을 보여준다.

국내외 골재 수출입 동향 연구

Study on the Trend of Exports and Imports of Aggregate

채광석(Kwang-Seok Chea) · 구남인(Namin Koo) · 이영근(Lee Young Geun)

· 양희문(Yang, Hee Moon) · 박기형*(Park Ki Hyung)

국립산림과학원 석재연구실

1. 골재 현황

골재(aggregate)는 콘크리트(concrete) 또는 아스팔트(asphalt)와 같은 안정화된 재료를 생산하는데 사용되며 주택, 산업, 도로, 에너지 및 건강에 대한 사회적 요구를 충족시키는데 기본이 된다. 2021년 세계 골재 생산량은 423억 5천만톤으로 전년도 419억 7천만톤과 비교하여 0.91% 증가하였고 중국, 인도, 유럽연합(EU) 및 미국(USA)만 20억만톤 이상 골재를 생산하여 점유율은 71.75%로 나타났다. 우리나라는 골재 생산이 지속적으로 증가하여 3억 9천만톤, 점유율 0.85%로 멕시코 및 일본을 추월하여 7위를 차지하였다. 전세계적으로 산업용 모래 및 자갈은 3억 5천만톤이 생산되었고, 상위 국가 순위는 중국, 미국, 네델란드, 이탈리아, 인도, 튀르키예 및 프랑스로 나타났다. 7개 국가만 천만톤 이상 생산하여 전체 점유율이 74.69%를 차지했다(KAA and KQA, 2022). 골재 수출액은 전년도 천연석 193.7억 달러, 인공석 109.3억 달러와 비교하여 천연석은 23.1억 달러, 인공석은 26.6억 달러 증가해 각각 216.8억 달러, 135.9억 달러로 나타났다. 모래 수출액은 총 17.1억 달러이며 상위 국가 순위는 미국, 네델란드, 독일 및 벨기에으로 나타났으며, 4개 국가만 1억 달러이상 수출하여 전체 점유율이 57.7%를 차지했다. 자갈 수출액은 총 27.5억 달러이며 상위 국가 순위는 중국, 노르웨이, 독일, 벨기에, 프랑스 및 오스트리아로 나타났고, 6개 국가만 1억 달러이상 수출하여 전체 점유율이 48.3%를 차지했다(WTE, 2022). 1950년대 이후 골재 채석은 인구 증가, 도시화, 기반 시설 개발 및 생활방식의 변화로 인해 급속도로 증가했다. 또한 해수면 상승으로 인한 토지 간척 및 홍수 방지를 위해 막대한 양의 골재를 필요로 한다. 2011~2060년에 골재 채석 규모와 수요가 연간 24Gt에서 55Gt로 두배로 증가할 것으로 예상된다. 그러나 골재 채취로 피해를 받는 생태계를 돌이킬 수 없는 상황까지 진행될 가능성이 높으며, 세계적으로 골재 부족과 사회적 갈등이 증가할 것으로 전망된다(Torres et al, 2021).

2. 골재 수입 및 수출

2021년 골재 수출액은 전년도 천연석 193.7억 달러, 사람 또는 장비의 힘으로 가공한 인공석 109.3억 달러와 비교하여 천연석은 23.1억 달러 증가하고, 인공석은 26.6억 달러 증가해 각각 216.8억 달러, 135.9억 달러로 나타났다(Table 1). 모래 수출액은 총 17.1억 달러로 모래 수출 상위 국가 순위는 미국, 네델란드, 독일 및 벨기에로 나타났다. 4개 국가만 1억 달러이상 수출하여 전체 점유율이 57.7%를 차지했다. 말레이시아를 포함한 5개 국가의 수출업체는 국제 시장으로 천연 모래 총 수출액의 61.4%를 차지하고 있다. 자갈 수출액은 총 27.5억 달러로 나타났고 상위 국가 순위는 중국, 노르웨이, 독일, 벨기에, 프랑스 및 오스트리아로 나타났다. 6개 국가만 1억 달러 이상 수출하여 전체 점유율이 48.3%를 차지했다(WTE, 2022).

Table 1. Export value of Aggregated stone from 2010 to 2021(AIM, 2023).

Year	Natural stone			Artificial stone			Total	
	mill.US \$	Index	%	mill.US \$	Index	%	mill.US \$	%
2010	16,350	100.0	78.5	4,480	100.0	21.5	20,830	100.0
2011	17,960	109.8	75.7	5,760	128.6	24.3	23,720	113.9
2012	19,360	118.4	76.1	6,090	135.9	23.9	25,450	122.2
2013	22,250	136.1	74.2	7,720	172.3	25.8	29,970	143.9
2014	22,870	139.9	74.0	8,940	179.5	26.0	31,810	152.7
2015	22,760	139.2	73.2	8,350	186.4	26.8	31,110	149.4
2016	21,100	129.1	72.7	7,920	176.8	27.3	29,010	139.3
2017	20,600	126.0	68.9	9,320	208.0	31.1	29,320	140.8
2018	20,150	123.2	65.1	10,810	241.3	34.9	30,960	148.6
2019	19,135	117.0	63.9	10,819	241.5	36.1	29,954	143.8
2020	19,370	118.5	63.9	10,932	244.0	36.1	30,302	145.5
2021	21,680	132.6	61.5	13,590	303.3	38.5	35,270	169.3

Fig. 1. Export value of natural and artificial stone from 2012 to 2021(Table 1).

3. 우리나라 골재 현황

국내 골재산업은 1970년대는 경제개발계획 추진으로 급속히 성장하고, 1980년대는 주택사업 및 올림픽 개최로 성숙되었으나 골재공급 문제가 발생하였고, 1990년대는 IMF 영향으로 경제가 위축되고 하천골재가 고갈되었다. 2000년대는 신도시 및 뉴타운 개발로 경제가 회복되었으나 건설사 구조조정으로 다시 위축되었고, 2010년대는 환경 및 민원 문제로 인해 석산개발이 어려워졌으며 바다골재 공급에 차질이 생겨 순환골재가 증가하였다(KIGAM, 2020).

2022년 전국의 골재 공급 실적은 레미콘 출하 실적, 지자체 허가 및 신고 물량 등을 기본으로 추정한 결과 약 232,190 천m³이며 산림골재(33%) 및 신고 등 기타(59.2%)가 대다수를 차지하며, 바다골재는 채취여건 악화 등으로 계획 대비 실적이 저조했다(MOLIT, 2022). 산림골재는 공급원으로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며(Table 2), 2019년 이후 전체 골재 공급량의 30% 이상을 안정적으로 공급하고 있으며, 특히 2020년에는 40.9%를 차지하여 많은 골재가 산림에서 공급되었다.

Table 2. Status of aggregate supply rate from 2014 to 2022 (MOLIT, 2022)

Source	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	(%)								
River	0.9	0.6	1.3	1.1	1.1	0.4	0.4	0.3	0.3
Sea	12.5	11.5	14.2	8.1	3.3	0.9	2.9	4.1	3.2
Forest	25.8	28.6	33.9	25.7	29.2	38.7	40.9	38.9	33.0
Land	2.0	2.2	1.9	6.8	6.3	6.5	5.7	5.6	4.3
Others	58.8	57.1	48.7	58.3	60.1	53.5	50.1	51.1	59.2
Total	100								

4. 결론

골재 수출액은 전년도 천연석 193.7억 달러, 인공석 109.3억 달러와 비교하여 천연석은 23.1억 달러 증가하고, 인공석은 26.6억 달러 증가해 각각 216.8억 달러, 135.9억 달러로 나타났다. 모래 수출액은 총 17.1억 달러이며 수출 상위 국가 순위는 미국, 네델란드, 독일 및 벨기에로 나타났으며, 4개 국가만 1억 달러이상 수출하여 전체 점유율이 57.7%를 차지했다. 자갈 수출액은 총 27.5억 달러이며 상위 국가 순위는 중국, 노르웨이, 독일, 벨기에, 프랑스 및 오스트리아로 나타났고 6개 국가만 1억 달러이상 수출하여 전체 점유율이 48.3%를 차지했다. 우리나라는 유럽과 비교하여 품질기준에 대한 현장 점검미흡, 골재 채취 종료 후 획일적 복구, 바다모래 채취 억제 정책, 석산 허가에 대한 복잡한 절차, 골재산업을 환경을 훼손시키는 부정적 개발사업이라고 인식하고 있다. 그러나 전략환경영향평가 중점검토 대상지역의 범위가 환경영향을 최소화하는 경우 예외적으로 양질의 산림골재 채취가 허용되어 환경친화적으로 개발하다면 국내 골재산업이 활성화 될것으로 판단된다.

참고문헌

AIM(Associazione Italiana Marmomacchine), 2023, Directory.
 KAA(Korea Aggregates Association) and KQA(Korea Quarrying Association), 2022, International seminar for the development of aggregate industry in korea.
 KIGAM(Korea institute of geoscience and mineral resources), 2020, Planning for comprehensive management of industrial stones and natural aggregate resources.
 MOLIT(Ministry of Land, Infrasture and Transport), 2014-2022, Report on aggregate collection status by cities and provinces.
 Torres, A., Simoni, M. U., Keiding, J. K., Muller, D. B., Ermgassen, S. O. S. E., Liu, J., Jaeger, J. A. G., Winter, M., Lambin, E. F., 2021, Sustainability of the global sand system in the Anthropocene, Journal of One Earth 4(5), 639-650.
 World's Top Exports(WTE), 2022, <https://www.worldstopexports.com>.

캘리포니아 서부 Jenner와 Ring Mt. 지역에서 채취한 각섬암 내부 각섬석의 변형미구조와 지각 내 지진파 비등방성에의 적용

Deformation fabrics of amphibole in amphibolite from Jenner and Ring Mt., western
California and implications for seismic anisotropy in the crust

김준하(Junha Kim)·정해명(Haemyeong Jung)
서울대학교 지구환경과학부 지체구조물리학 연구실

지각의 지진파 비등방성은 암석 내부 주요 구성광물들의 격자선호방향(lattice preferred orientation)에 영향을 받는다. 따라서 지진파 비등방성을 이용하여 지각의 내부구조를 분석하려면 해당 지역의 주요 구성 암석 내 광물들의 격자선호방향과 이를 기반으로 한 암석별 지진파 전파 특성 자료를 필요로 한다. 각섬석은 지각을 구성하는 주요 광물 중 탄성적으로 큰 이방성을 보인다. 따라서 본 연구에서는 미국 캘리포니아 서부지역 Jenner Headland와 Ring Mt.에서 채취한 각섬암 내부 각섬석의 격자선호방향을 전자현미경과 EBSD 기기를 통해 분석하고, 지진파 비등방성을 계산하였으며, 해당 지역에서 관측된 지진파 데이터와 비교하였다.

각섬석의 격자선호방향은 type III로 분류된, [100] 축이 엽리(foliation)에 아수직하고, [001] 축이 엽리상에서 거들(girdle)을 그리는 타입이 모든 샘플에서 관찰되었고, 일부 샘플에서는 약한 [100] 축의 거들도 함께 관찰되었다. 각섬석에서 관찰되는 지진파 비등방성은, P파는 18.8 - 20.7 %, 최대 S파는 13.5 - 16.6 % 로 샘플간에 비교적 작은 차이만을 보였다. 빠른 S파의 편파방향 역시 모든 샘플에서 선구조방향에 아평행하게 나타났다. 엽리면에 수직인 방향으로의 V_p/V_s 는 1.64 - 1.69로 관찰되었다. 이 값은 이전 연구(Zhu and Kanamori, 2000; Ozacar and Zandt, 2009)의 California의 지각에서 관찰된 V_p/V_s 값인 1.78 - 1.88에 비해 상당히 낮은 값이며, 기존의 연구(Christensen, 1996)에서 제시된 지각의 주요 광물들의 V_p/V_s 값 1.707 - 1.863 에 비해서도 상대적으로 낮은 값이다. 캘리포니아 서부지역의 각섬석이 보이는 이러한 높은 비등방성과 낮은 V_p/V_s 는 캘리포니아 뿐만 아니라 전세계 지각의 지진파 데이터 해석에 도움을 줄 수 있을것으로 생각된다.

청색 편암과 후퇴변성된 에클로자이트에 포함된 광물들의 격자선호방향과 지진과 비등방성 연구

Study on the crystallographic preferred orientation and seismic anisotropy of minerals in
blueschist and retrograded eclogite

하윤해(Yoonhae Ha)¹, 정해명(Haemyeong Jung)^{1,*}

¹서울대학교 지구환경과학부 지체구조물리학 연구실

1. 서언

청색 편암은 섭입하는 해양 지각의 주요한 변성상으로 남섬석, 녹렴석, 녹니석, 백운모와 같은 함수 광물들을 포함한다. 이 광물들은 매우 강한 탄성적 이방성을 가지기 때문에 이들의 격자선호 방향은 섭입대의 지진파 속도와 비등방성에 영향을 줄 수 있다. 이전 연구들에 따르면 청색 편암의 지진파 속도는 주변 맨틀 암석에 비해 느리고, 지진파 비등방성은 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 남섬석 편암의 변형 미구조에 관한 연구는 섭입하는 해양 지각의 지진파 전파 특성을 이해하는데 중요할 수 있으며, 섭입하는 해양판이 지구 내부에서 차지하는 부피가 맨틀에 비해 상대적으로 적음에도 섭입대에서 관찰되는 지진파 비등방성에 유의미한 영향을 줄 수 있다.

2. 시료 채취 및 실험 방법

본 연구에서는 캘리포니아의 제너 헤드랜드에서 산출되는 청색 편암과 에클로자이트의 변형 미구조와 지진파 전파 특성을 조사하였다. 청색 편암은 에클로자이트가 후퇴 변성 작용을 받은 증거를 보여, 대부분의 시료가 청색 편암과 에클로자이트의 광물 조합을 함께 포함하고 있다. 따라서 주요 광물의 비율에 따라 암석을 분류하였다. 청색 편암 시료들의 주 구성 광물은 남섬석, 녹렴석, 백운모이고, 에클로자이트 시료들은 주로 녹휘석, 각섬석, 녹렴석, 석류석으로 이루어져 있다. 서울대학교 지구환경과학부에 설치되어 있는 Field Emission Scanning Electron Microscope(FE-SEM)/Electron Backscattered Diffraction(EBSD)를 사용하여 주요 구성 광물들의 격자선호방향을 결정하였다. 그 결과와 함께 광물의 밀도, 탄성 계수를 이용하여 각각의 광물과 전체 암석의 지진파 비등방성을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

남섬석의 격자선호방향은 [001]축이 엽리에 아평행한 거들을 보이고 [100]축과 (110)의 극이 엽리에 강하게 아수직한 배열을 보였다. 녹렴석은 [001]축이 모두 엽리에 수직한 방향으로 강하게 배열되고, (110), (010)면의 극점들이 엽리에 아평행하게 배열되는 격자선호방향을 보였다. 녹휘석의 격자선호방향은 (010)축이 엽리에 수직하고 [001]축이 선구조에 아평행하게 배열되었다. 백운모는 [001]축이 모두 엽리에 수직하고 [100]축과 (110), (010)면의 극점들은 엽리에 평행한 거들을 보였다.

지진파 비등방성 계산 결과 남섬석은 P파는 5 - 15%, S파는 3 - 9%로 나타났다. 녹렴석의 P파와 S파 지진파 비등방성은 각각 4 - 10%, 6 - 16%였다. 녹휘석은 P파 최대 6%, S파 최대 4%로 다른 광물들에 비해 작은 지진파 비등방성을 보였다. 백운모는 P파의 경우 14 - 52%, S파의 경우 11 - 52%의 아주 강한 지진파 비등방성을 보였다.

전체 암석에서는 광물 조합에 따라 대체로 청색편암의 지진파 이방성이 에클로자이트보다 크게 나타났다. 이러한 결과들은 섭입대에서 관찰되는 지진파 비등방성을 해석하는데 도움이 될 것이다.

남극 플레이아데스 알칼리 마그마 시스템의 황화물 및 친동성원소 지구화학: 대륙 하부 지각의 친동성원소 분배에 대한 고찰

Sulfide minerals and chalcophile elements in The Pleiades alkalic magma system,
Antarctica: Implications for metal distribution in the continental lower crust

김지혁(Jihyuk Kim)¹·박정우(Jung-Woo Park)¹·이미정(Mi Jung Lee)²

이종익(Jong Ik Lee)²·Phillip R. Kyle³·Xia Wang⁴·Zaicong Wang⁴

¹서울대학교 지구환경과학부

²극지연구소 극지지구시스템 연구부

³Department of Earth and Environmental Science, New Mexico Institute of Mining and Technology

⁴State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences,
China University of Geosciences

맨틀 기원의 마그마는 맨틀의 친동성원소를 지각으로 운반하여 분배하는 역할을 한다. 지각을 통하여 상승하는 마그마에서 친동성원소의 거동은 마그마 분화 중 황화물의 형성 기작에 큰 영향을 받을 것이다. 이런 관점에서 볼 때 대륙 하부 지각에서 산출하는 황화물은 마그마형 열수 광상의 형성 및 대륙 지각의 조성과 진화를 연구하는데 유용한 정보를 제공한다. 하지만, 대륙 하부 지각 황화물의 특성, 지구화학적 조성 및 산출 양상은 제한된 하부 지각 시료로 인하여 아직 체계적인 연구가 부족하다. 최근에 화산호 시스템을 중심으로 하부 지각 황화물 연구 결과가 보고된 바 있지만, 대륙 알칼리 마그마 시스템에서는 황화물 포화와 친동성원소의 거동이 다를 것으로 예상된다. 본 연구에서는 남극 플레이아데스 알칼리 화산암과 하부 지각 포획암을 대상으로 황화물 암석기재, 전암 및 광물 친동성원소 지구화학, Cu-Zn-S 동위원소 연구를 수행하였다. 연구의 주요 목적은 대륙 알칼리 마그마 시스템의 황화물 및 친동성원소 분배 경향을 이해하는 것이다.

플레이아데스 화산암류는 지구화학과 광물 조합에 따라서 포타슘과 소듐 두 그룹으로 나뉜다. 포타슘 그룹은 동일한 실리카 함량에서 비교할 때 상대적으로 알칼리 원소 함량이 낮으며 넓은 Fo 함량변화(81-1.9)를 보이는 감람석 반정이 특징적이다. 반면에 소듐 그룹은 실리카 불포화 마그마이며 켈슈타이트(kaersutite) 반정이 전 분화 과정에서 관찰된다. 화산암에는 웨를라이트(wehrlite), 감람석 에섹사이트(essexite), 켈슈타이트 반려암, 감람석 섬록암, 켈슈타이트 섬록암, 섬장암 등 다양한 암상의 하부 지각 포획체가 관찰된다. 암석기재와 광물 지구화학적 연구 결과에 따르면 웨를라이트와 켈슈타이트 반려암은 소듐 그룹의 마그마에서 형성된 동원 포획물(autolith)이며, 나머지 암상들은 포타슘 그룹의 동원 포획물인 것으로 여겨진다.

플레이아데스 고철질 화산암에서는 반정과 기질에 화성 기원의 황화물이 관찰될 뿐만 아니라 고철질에서 규장질로 마그마가 진화하는 과정에서 친동성원소인 Pd, Cu 함량 및 Pd/Cu 비가 감소하는 경향성을 보인다. 이는 마그마 분화 초기에 황화물 포화가 발생했음을 지시한다. 소듐 그룹의 동원 포획물인 켈슈타이트 반려암에도 다량의 황화물이 켈슈타이트 및 티탄자철석과 함께 산출하며 황화물이 포화된 초기 마그마 조건을 뒷받침한다. 포타슘 그룹의 고철질 동원 포획물에도 황화물이 산출하지만 가장 황화물이 부화된 시료는 비교적 분화도가 높은 켈슈타이트 섬록암이다. 켈슈타이트 섬록암은 포타슘 그룹의 감람석 반려암 또는 섬록암이 하부 지각의 마그마 레저보어(reservoir)에서 간극 충전(interstitial) 멜트와 반응을 통하여 감람석 및 단사회석이 켈슈타이트로 교대되어 형성된 것으로 생각된다. 이 과정에서 간극 충전 멜트의 온도, FeO 함량 및 Fe^{3+}/Fe^{2+}

비가 감소하며 황화물 포화를 유도하고 PGE 및 Au가 결핍된 자류철석과 유사한 황화물이 형성된 것으로 설명할 수 있다. 화산암의 Cu-Zn-S 동위원소비가 결핍된 맨틀 값을 보이는 것에 근거할 때 황화물 포화에 지각 물질의 유입은 제한적인 것으로 보인다.

플레이아데스 화산암과 하부 지각 기원의 동원 포획암에 대부분 황화물이 산출하는 것은 플레이아데스 화산암의 진화 과정에서 연속적으로 황화물 포화 상태였음을 지시하며 이 지역의 대륙 하부 지각의 넓은 영역에 황화물을 분배하고 황화물을 함유하는 하부 지각 물질을 형성하였다. 하지만, 이 황화물은 대개 Fe가 풍부한 자류철석 또는 MSS (monosulfide solid solution)이며 PGE 및 Au가 결핍되었다. 분별 정출(fractional crystallization) 모델에 따르면 PGE 및 Au가 풍부한 층은 대륙 하부 지각의 제한된 영역에 국한되어 분포할 것으로 생각된다.

동위원소자료의 지구화학적 응용을 위한 암석시료의 지구화학적 전처리의
중요성에 대한 토의

An Importance of Geochemical Pretreatment of Rock Samples for
Geochemical Applications of Isotope Data

이승구(Seung-Gu Lee)*

한국지질자원연구원 국토지질연구본부

지구 혹은 암석의 생성 및 진화과정을 밝혀내는데 있어서 암석의 지구화학적 조성은 매우 중요한 지시자가 된다. 최근에는 국내에 XRF, EPMA 뿐만이 아니라 MC-ICP-MS (다중 검출기 유도 결합 플라즈마 질량분석기) 혹은 TIMS (열이온화 질량분석기)와 같은 첨단질량분석기가 다양한 연구기관에 보급됨으로써, 과거에 비해 연구자 자신이 직접 접근하여 자료를 획득할 수 있는 기회가 높아졌다. MC-ICP-MS와 TIMS는 동위원소비를 정확하고도 정밀하게 측정할 수 있는 최첨단 질량분석기이다. 특히 국내에 MC-ICP-MS가 다양한 연구기관에 널리 보급되어지고 있음으로 인해, 동위원소비를 이용한 암석 혹은 다양한 지질매체에서의 동위원소 지구화학적 연구를 보다 더 활발하게 수행할 수 있게 되었다. 최근 Lee and Tanaka (2019, 2021a)는 Eu 동위원소비를 정확하면서 정밀하게 측정하는 실험법을 개발하여 보고한 바 있다. 그리고 추가 연구를 통해, Eu 동위원소비가 화성암에서 규칙적인 변화를 가지면서 변한다는 것(Eu 동위원소 분별작용)을 발견하였다 (Lee and Tanaka, 2021b; Lee et al., 2023). 최근 프랑스 CNRS의 Boyet 교수팀(Nicol et al., 2023) 또한 Eu 동위원소비 측정법에 대한 논문을 보고하면서, Eu의 동위원소비 변화가 관찰되지 않는다고 보고하였다. Boyet 교수팀의 논문과 본 발표자의 논문의 큰 차이점은 Eu 동위원소분별작용의 규칙성의 존재여부에 있다. 이와 같은 차이는 Boyet 교수팀의 실험법과 Lee and Tanaka (2019, 2021a, 2021b)의 방법과는 resin의 사용면에서 다르고, 이와 더불어 회수율도 다르기 때문이다. 반면에 미국 시카고대학의 Dauphas교수팀 (Hu et al., 2023)은 핵공명비탄성X-ray분산(Nuclear Resonant Inelastic X-ray Scattering, NRIXS)법에 의한 실험결과를 토대로 Eu의 현저한 동위원소 분별작용이 열수용액에 의해 일어날 수 있다고 예측하였다. 따라서 이 발표에서는 MC-ICP-MS로 동위원소비를 측정할 때, 무의식적으로 발생할 수 있는 오류에 대해 토의하고자 한다. 희토류원소에서의 동위원소 분별작용연구는 전세계적으로 아직은 시작단계이지만, 지구시스템의 진화를 지구화학적으로 보다 더 깊이 이해할 수 있게 해줄 수 있는 강력한 동위원소 지구화학 지시자가 될 것이다.

참고문헌

- Hu, J.Y., Dauphas, N., Nie, N.X., Roskosz, M., Chen, X., Heard, A., Zhnag, Z.J., Zeng, H., Alp, E.E., Hu, M.Y. and Zhao J. (2023) Equilibrium fractionation of REE isotopes in nature: Insights from NRIXS and DFT+U studies of Eu and Dy phonon density of states. *Geochim. Comochim. Acta*, 348, 323-339.
- Lee, S-G. and Tanaka, T. (2019) Determination of Europium isotopic ratio by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry using a Sm internal standard, *Spectrochim. Acta Part B*, 156, 42-50.

Lee, S-G. and Tanaka, T. (2021a) Gd matrix effects on Eu isotope fractionation using MC-ICP-MS: Optimizing Europium isotope ratio measurements in geological rock samples. *Inter. Jour. Mass Spec.* 469, 116668.

Lee, S-G. and Tanaka, T. (2021b) Europium isotope fractionation in highly fractionated igneous rocks with large Eu negative anomaly, *Geochem. Jour.* 55, e9-e17.

Lee, S-G., Tanaka, T. and Lee, M.J. (2023) Geochemical implication of Eu isotopic ratio in anorthosite: new evidence of Eu isotope fractionation during feldspar crystallization. *Geosci. Jour.* <https://doi.org/10.1007/s12303-023-0009-6>

Nicol, L., Garcon, M., Boyet M. and Gannoun, A. (2023) High-precision measurement of europium isotopic composition of geological reference materials by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry (MC-ICP-MS). *Jour. Anal. Atom. Spec.* <https://doi.org/10.1039/d3ja00042g>

고압에서 변형된 로소나이트 청색편암의 변형미구조와 지진파 특성 연구

Deformation microstructures of experimentally deformed lawsonite blueschist and
implications for seismic property

최승순(Seungsoon Choi)^{1,2}·정해명(Haemyeong Jung)^{1,*}

¹서울대학교 지구환경과학부

²한국기초과학지원연구원 환경분석연구부

Seismic anisotropy and low velocity layers have been observed in the subducting slabs in cold subduction zones where lawsonite blueschist is considered to be widely stable under high pressure and low temperature conditions. To understand deformation microstructures of minerals (glaucophane and lawsonite) in lawsonite blueschist and resulting seismic properties, we conducted deformation experiments of lawsonite blueschist in simple shear using a modified Griggs apparatus. Lawsonite blueschist was deformed under the pressures ($P = 1-2.5$ GPa), temperatures ($T = 230-400^{\circ}\text{C}$), shear strain ($\gamma = 1-4$) and shear strain rates ($10^{-6}-10^{-4}\text{s}^{-1}$). We found that two types of crystal preferred orientations (CPOs) of glaucophane and lawsonite in lawsonite blueschist were developed with increasing shear strain. The CPOs found in this study are similar to those of natural lawsonite blueschists. Based on seismic properties calculated using the CPO data, glaucophane exhibited a high P-wave anisotropy (7.7-16.9%) and a relatively low maximum S-wave anisotropy (4.4-9.2%). In contrast, lawsonite showed much higher maximum S-wave anisotropy (8.3-20.7%) than glaucophane, but showed a low P-wave anisotropy in the range of 4.7-10.3%. Both P-wave and maximum S-wave anisotropies of whole rocks were calculated as 4.1-7.6% and 3.0-8.6%, respectively, showing lower values than those of individual glaucophane and lawsonite aggregates. Furthermore, whole rock seismic velocities of lawsonite blueschist were lower ($V_p = 7.70-7.85$ km/s and $V_s = 4.35-4.36$ km/s) than those of other surrounding mantle peridotites, indicating that the low velocity layers observed at the top of cold subducting slabs may be attributed to the CPOs of glaucophane and lawsonite in lawsonite blueschist.

Emplacement Age, Crustal Assimilation and Tectonic Setting of Gabbroic Rocks in the Tiger Gabbro Complex, northern Victoria Land, Antarctica

남극 북빅토리아랜드 타이거 반려암 복합체의 정치연령, 지각동화작용 및 지구조환경

한기운(Giun Han)¹·김윤섭(Yoonsup Kim)^{1*}·김태환(Taehwan Kim)²

이승렬(Seung-Ryeol Lee)³·이승구(Seung-Gu Lee)³

¹충북대학교 지구환경과학과

²극지연구소 지권연구본부

³한국지질자원연구원 국토우주지질연구본부

Mafic igneous rocks of complicated geochemical characteristics and equivocal emplacement ages commonly appear in paleo-orogenic belts, and disrupt the petrogenetic and tectonic interpretation. To tackle this issue, we carried out geochemical analyses including bulk-rock, and zircon U-Pb, O and Hf isotopes from gabbroic rocks of the Tiger Gabbro Complex (TGC), northern Victoria Land, Antarctica, from which an island-arc tectonic setting with contrary emplacement ages (~535 Ma vs. ~497 Ma) has been reported. Outcrops of gabbroic rocks in the TGC are conspicuous in two areas: (1) layered gabbro intruding the upper metasedimentary rocks; and (2) amphibole gabbro and hornblendite in the lower part. The bulk-rock geochemical analyses showed that the former samples were belonged to a calc-alkaline to tholeiite series of the N-MORB-like geochemical affinity with enriched incompatible elements such as Cs, Ba, Rb, and Sr. The latter samples were plotted along a tholeiite series with trace-elements patterns like those of BABB. Their bulk-rock $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}$ isotopic compositions yielded $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}=0.7039-0.7048$ and $0.7029-0.7034$, and $\epsilon_{\text{Nd}(t)} = +1.92$ -3.47 and +4.44-5.10 for the former and latter samples, respectively, which suggested the minimum and maximum 7% crustal contamination, respectively, based upon the mass-balance and AFC modelling. The crustal assimilation is also supported by zircon xenocrysts in two gabbro samples, which have a wide range of $\delta^{18}\text{O}$ ($=4.5-8.0$ ‰), $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ ($=-32.2-+2.2$), and apparent ages (2873-526 Ma). On the other hand, 4 spot analyses on zircon from an amphibole gabbro sample gave the mantle signature of O and Hf isotopic compositions ($\delta^{18}\text{O}=5.0-5.5$ ‰ and $\epsilon_{\text{Hf}(t)} = +8.5-20.5$), and yielded the weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 495 ± 11 Ma (t_0). Taken together, the TGC represents the mafic magma chamber of intra-arc rifting during formation of a back-arc basin at ~495 Ma.

입 회 신 청 서

성 명	인 또는 서명		
	영문:	한자:	
주 소 (학회지/소식지를 받아보실 주소)	㉠	직장	
		직위	
연 락 처	Tel.		Fax
	E-mail		
회원구분	학회지 구독 <input type="checkbox"/> 학회지 비구독 <input type="checkbox"/> 기관 <input type="checkbox"/> 종신 <input type="checkbox"/>		
전공 및 관심분야			
주요학력			
최종학위 취득학교		최종학위 취득년도	
추 천 인			
※ 정회원 1인 이상의 추천을 요하나, 불가한 경우에는 학회 추천을 통해 입회할 수 있음. ※ 학생회원인 경우 지도교수나 학과장 추천을 받으면 됩니다.			
소 속			
성 명	인 또는 서명		

☐ 우송처: 충청북도 청주시 충대로 1 충북대학교 자연과학대학 과학기술진흥센터 내 한국암석학회 / Tel: 043-261-3262, Fax: 043-263-3488, E-mail: office@pskorea.or.kr

한국암석학회장 귀하

M E M O

M E M O

M E M O

M E M O

MEMO

M E M O

M E M O

M E M O

M E M O

(사)한국광물학회 · 한국암석학회 2023년도 공동학술발표회 논문집

발행일 2023년 6월 22일

발행인 (사)한국광물학회 · 한국암석학회

편집인 (사)한국광물학회 · 한국암석학회

발행소 (사)한국광물학회

경상북도 안동시 경동로 1375, 안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과

대표전화: 82-54-820-7741

Homepage <http://www.mskorea.or.kr> E-mail: mskorea1986@naver.com

폰트출처

본 저작물은 제주특별자치도에서 공공누리 제1유형으로 개방한 '제주명조체'와 네이버에서 제공한 나눔글꼴 이용하여 제작되었습니다.

본 논문집에 수록된 논문의 내용, 그림 및 도표의 저작권은 (사)한국광물학회 · 한국암석학회에 있으므로 양 학회의 허락 없이 무단 복제 및 무단 전사할 수 없다.

2023년도
(사)한국광물학회·한국암석학회
공동학술발표회 논문집

준비위원장: 유봉철 · 이승렬

준비위원

- (사)한국광물학회: 김현나 · 송혜원
- 한국암석학회: 이기욱 · 박지영

발행: (사)한국광물학회 · 한국암석학회

● (사)한국광물학회 <http://www.mskorea.or.kr>

경상북도 안동시 경동로 1375 안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과

Tel : 054-820-7741 E-mail : mskorea1986@naver.com

● 한국암석학회 <http://www.pskorea.or.kr>

충청북도 청주시 서원구 충대로 1 충북대학교 자연과학대학 부설 과학기술진흥센터 내

Tel : 043)261-3262 Fax : 043)263-3488 E-mail : office@pskorea.or.kr



**새로운 자세, 새로운 각오로
고객의 입장에서 변화를 추구하는 클라리언트!**

**우리나라의 다양한 산업분야에서 사용되는 벤토나이트 제품과,
각종 염/안료 및 첨가제를 중심으로 하는 기능성 화학제품과,
고객의 다양한 요구에 따라 각종 석유화학제품의 다양한 화학
반응에 사용되는 촉매를 서비스하는 기업 클라리언트코리아(주)**

클라리언트코리아 주식회사

Clariant (Korea) Ltd.

본사, 공장 : 경북 포항시 남구 대송면 월강로 492번길 78

TEL : 054-278-2141-6 / Fax : 054-278-3202

서울지사 : 서울시 강남구 테헤란로 439, 삼성동 연당빌딩 11층

TEL : 02-510-8361 홈페이지 : www.clariant.com

what is precious to you?

(주)지오그린21

환경을 생각하고 지구를 보다 깨끗하고 안전하게 만드는 기업
Green Earth, Safe Earth with Geogreen21



www.geogreen21.com

서울특별시 구로구 디지털로33길 55, 901호 (주)지오그린21 Tel. 02-6330-2500 Fax. 02-6330-2507

Since 1998

ENIS (주)에니스

ENVIRONMENT INVESTIGATION AND SOLUTION Co.,Ltd.

토양
정화사업

지하수/수질
정화사업

퇴적물
정화사업

폐기물 종합
재활용사업

환경 컨설팅
/엔지니어링



오염토양
반입정화시설

토양세척설비

토양열탈착설비

토양경작시설

(주)에니스환경건설에서
(주)에니스로
새롭게 도약합니다.

서울사무소

서울시 송파구 정익로 7길 3층

영천반입정화시설

경북 영천시 북안면 유하큰길 43

TEL : 054-338-6654

FAX : 054-338-6650

E-mail : enis6654@daum.net

논산반입정화시설

충남 논산시 은진면 동산산업단지 124-16

TEL : 054-338-6654

FAX : 054-338-6650

www.enis.co.kr



세계적 수준의 측정 정밀도 구현으로 **유수율 증대**
스마트 미터링 원격검침시스템 - SU-meter



스마트 초음파 수도미터

초음파 시간차를 이용한 스마트 초음파 수도미터

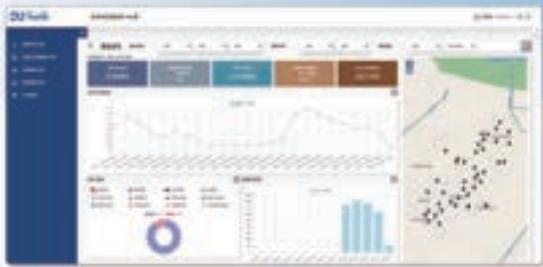
- 2개의 초음파 센서를 이용한 W형 센싱방법으로 측정 정밀도 제고
- 계측정밀도(Q3/Q1)250배율



멀티원격통신기

유선(TTL, RS232), 무선 LoRa & NB-IoT 통신방식을 이용한 멀티 원격통신기

- 무선 불통시 자동 복구 알고리즘 적용
- 결로방지장치(IP68)적용



스마트 미터링 관제 시스템

서버 & 관리프로그램

- 수도물 수요관리 정보제공
- 수집 데이터 모니터링
- 수집 데이터 관리 및 분석



디지털 수도미터

역류방지, 원격검침 호환가능



제2023-402호 **혁신제품** 인증
스마트 초음파 수도미터 및
원격검침시스템

- 지정기간 : 2022.12.26 ~ 2025.12.25
- 국가 또는 지방자치단체 수의계약 가능

중소벤처기업부
 구매조건부 신제품개발사업 성공제품 _ K water 한국수자원공사

구매조건부 신제품개발사업 성공제품 수의계약 가능

- 공공기관의 기술개발제품 우선구매 대상임
- 수요기관 : K-water(한국수자원공사)
- 유효기간 : 2021.12.07 ~ 2024.12.06, 3년간
- 관련규정 : 국가계약법 시행령 제26조 제1항 제3호 다목



경북물산업선도기업



본사 : 경상북도 구미시 해평면 월호3길 29 (해평농공단지 내)
 공장 : 대구광역시 달성군 구지면 국가산단대로 34길26 (국가 물산업클러스터 내)
 TEL : 053)636-0396(본사)/ 053)716-0395(공장)
 FAX : 053)636-0397(본사)/ 053)716-0396(공장)
 www.kbend.net / ked@kbend.net



연구개발 시설 · 장비 · 장치 · 시제품 전문 제작

- 환경 관련 수처리 / 대기오염 처리
- 설계 / 제작 / 시운전
- 전기계장 및 자동제어
- 공조 시설 및 장치

연구장비 및 기자재

- 기초실험장비 / 분석장비
- 실험소모품 / 비품 등

■ 대학 연구개발 시제품



■ 기업 연구개발 시제품



■ 수중 입자성물질 자동채수 장치



영동 일라이트 클러스터 구축

- ◆ 위 치 : 충북 영동군 용산면 한곡리 558번지(영동일반산업단지 內)
- ◆ 사업기간 : 2020년 ~ 2026년(7년간)
- ◆ 총사업비 : 299억원(국비 120, 도비 75, 군비 104)
- ◆ 사업면적 : 7,889㎡(지식산업센터 6,338㎡, 고순도 지원 1,551㎡)
- ◆ 사업내용 : 지식산업센터 건립 및 고순도 일라이트 지원시스템 구축
 - 지식산업센터 건립(지하1층 / 지상4층(전용면적(공장) 2,842㎡, 총 28호실)
 - 고순도 일라이트 가공(지상1층(연면적 1,551㎡, 가공 및 연구개발 기자재 구축 35종)
 - 일라이트 매장량 조사(일라이트 광산 시추공사 30개소)

□ 주요 추진현황

[일라이트 지식산업센터]

- 일라이트 지식산업센터 타당성조사 용역 완료 : 2019. 7.
- 지방재정 투자심사 조건부 승인(충청북도) : 2019. 10.
- 2020년 중기지방재정계획 반영 : 2019. 11.
- 지식산업센터(8차) 국비 확보 : 2020. 12.
- 건축공사 착공 : 2023. 2.
- 일라이트 지식산업센터 감리용역 착수 : 2023. 3.
- 일라이트 지식산업센터 준공 : 2024. 9.

[고순도 일라이트 지원]

- 일라이트 광산 정밀조사 추진 : 2022. 3. ~ 11.
- 지방재정 중앙투자심사 신청 : 2023. 6.
- 일라이트 광산 탐광시추 추진(30개소) : 2023. 12.
- 기본 및 실시설계 완료 : 2025. 5.
- 공사 착공 : 2025. 6.
- 도입장비 심사 추진 및 확정 : 2026. 12.
- 고순도 일라이트 지원시스템 구축사업 준공 : 2026. 12.

녹색성장을 위한 **CCUS 전문가 인력양성**에 기여하겠습니다.

에너지인력양성사업
녹색성장을 위한 CCUS 전문인력양성
Training program of CCUS for the green growth



CCUS 클러스터 활용 전문인력양성

- ▶ 국가균형 및 균형발전
다양화를 통한 종합적 지역발전
- ▶ 기술 고도화를 위한
클러스터 운영 및 에너지 전환
- ▶ 네트워크 강화를 위한
인프라 정비 구축 및 활용
- ▶ 혁신기술 및 시장마케팅 위한
CCUS 통합 교류시스템



도시환경을 안전하게! 주식회사 청맥지이티



지질 및 지반컨설팅

- 지질 및 지반 조사 및 분석
- 지층구조 및 지반특성 분석



전문안전진단기관

- 교량 및 터널 안전진단 전문기관
- 사면 및 옹벽 안전진단



자연재해 저감종합계획

- 산사태 위험도 분석
- 사면재해분야 계획수립



지하안전영향평가기관

- 최대깊이 10미터 이상
굴착사업 지하안정성 평가



전문광해방지사업자

- 토양개량복원 및 정화사업
- 지반침하방지 및 복원사업

(주)청맥지이티는 지질 및 토목환경에서 수반되는 위험성을 평가하고
대책 방안을 제시하여 안전한 사회가 조성될 수 있도록 끊임없이
노력하고 있습니다.



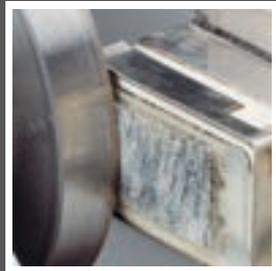
세계일류의 기초연구 플랫폼

한국기초과학지원연구원은

세계적 첨단연구장비의 운영을 통해
지질연대측정, 동위원소 빅데이터 및 활용연구 등
지구환경연구를 위한 다양한 사업을
수행하고 있습니다

• 공동연구 및 분석지원 의뢰
shrimp@kbsi.re.kr



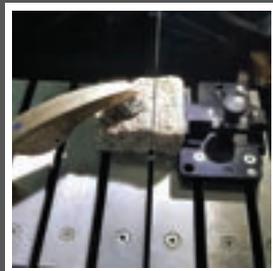


Accutom-100 자동 박편 그라인딩 머신

최종 두께까지 자동 연삭
직관적인 인터페이스로 매우 간단한 조작
5 μ m 단위의 정밀도

LaboSystem 자동 박편 연마기

자동 래핑 및 연마
Castiron disc를 사용해 최적의 평면 보장



Labotom-5 시편 절단기

수동 절단기
다양한 클램프로 암석절단 가능
매우 쉬운 조작방식

정기 세미나 개최

본사에서 직접 교육
연 2회 세미나 개최 (7월, 10월)
세미나 신청 문의 환영



Dating Volcanism on the Moon with LG-SIMS

U-Pb Analysis of Chang'E 5 Returned Samples

IMS 1300-HR³



Crater-counting chronology has been widely used to date terrains on the Moon. The radiochronology analyses of samples returned by the Apollo and Luna missions allowed scientists to anchor the chronology with absolute ages. In particular, they revealed a basaltic magmatism that occurred between 4.4 Ga and 2.9 – 2.8 Ga. But while crater-counting chronology suggested a more extended volcanism period (up to 1.2 Ga), no samples were returned to confirm those ages.

The Chinese sample-return mission Chang'E 5 landed specifically on young mare basalt units previously dated by crater-counting chronology at 1.2 to 2.1 Ga. These returned samples offer a unique opportunity to provide precise age through radioisotopic dating in order to extend the calibration of the Moon crater-counting chronology, achieving a better understanding of the timing and mechanism of late mare volcanism on the Moon.

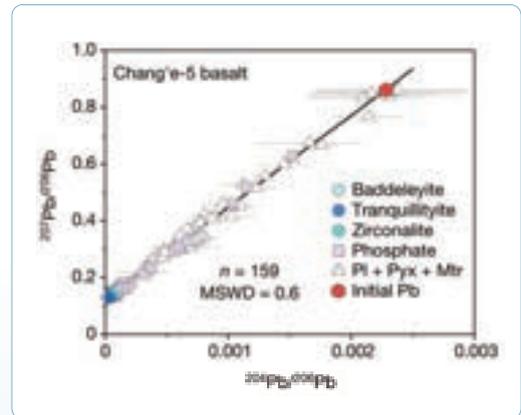
U-Pb (Uranium-Lead) dating requires in-situ isotopic analyses of individual mineral grains of micrometric size, for which Large-Geometry Secondary Ion Mass Spectrometry (LG-SIMS) is particularly suited. Indeed, LG-SIMS can achieve the necessary isotopic ratio accuracy and deliver fine-scale analyses, thus providing precise isochrons of the crystallization ages of lunar basalts. Over 150 grains were analyzed by Electron Probe Microanalysis (EPMA) for their elemental composition before U-Pb dating by LG-SIMS. The obtained isochrons reveal a crystallization age of 2.030 ± 0.004 Ga for those young lunar basalts (Figure 1), bringing conclusive evidence that volcanism on the Moon existed until at least 2 Ga.

While previously analyzed samples from the Apollo and Luna missions provided calibration points in the extreme ranges (0 – 0.8 Ga and 3.2 – 4.0 Ga), the new LG-SIMS radio-isotopic data obtained from Chang'E 5 samples fills an important gap in the middle range of the chronology (Figure 2). Precise and accurate age determination by LG-SIMS is key to this study, and once more contributes to shedding light on the evolution of the solar system.

Data collected on CAMECA SXFive-FE EPMA and IMS 1280-HR LG-SIMS at IGGCAS Beijing, China.

From Li, QL et al. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts. *Nature* 600, 54–58 (2021).

Figure 1: Pb–Pb isochron showing the mixing line between the Y intercept as radiogenic $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and the initial Pb compositions.



The black line is the best-fitted isochron with an intercept of 0.12510 ± 0.00028 giving an age of 2.030 ± 0.004 Ga.

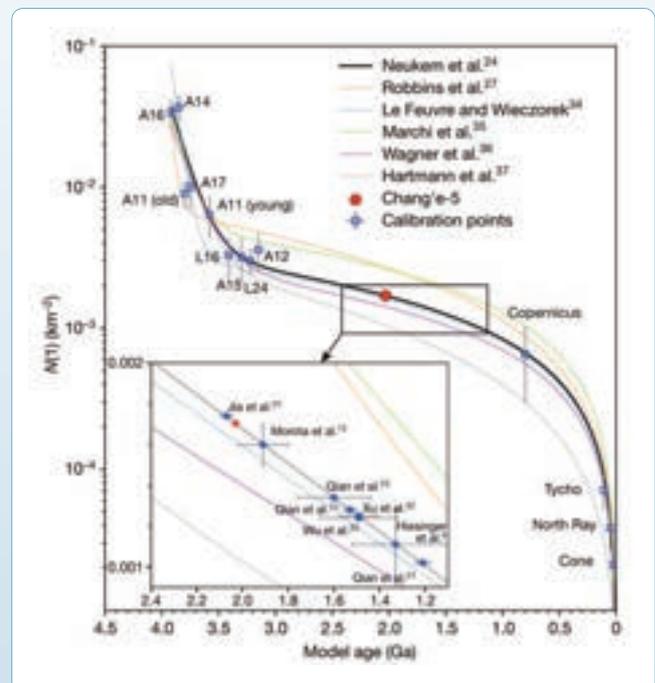


Figure 2: Critical reference point of the radio-isotope age of Chang'E-5 basalts (red point). The different lines represent different models of the crater-counting chronology. The blue squares are the calibration points established from Apollo and Luna samples.

Oi Solutions for Geology Research



For more information please visit: nano.oxinst.com/AZtecWave

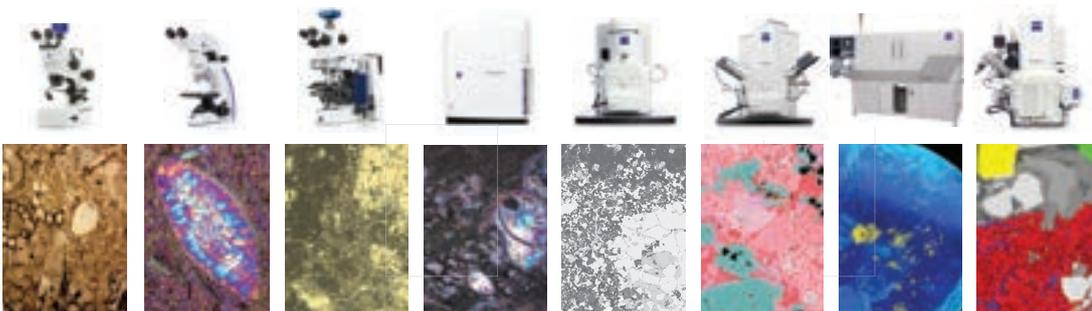
서울 송파구 충민로10 가든파이버튼 5층 D45호
옥스포드 인스트루먼츠 나노테크놀로지 툴스리미티드
02-2047-6462 | Enquireis.OIKR@oxinst.com



Understanding the fundamental processes that shape the universe



더 나은 암석학 연구를 위한 자이스 현미경 솔루션



Stereo
Microscopes

Teaching
Microscopes

Research
Microscopes

Slide Scanning
Microscopes

Scanning
Electron
Microscopes

Automated
Mineralogy
Systems

X-ray
Microscopes

FIB-SEM



Seeing beyond

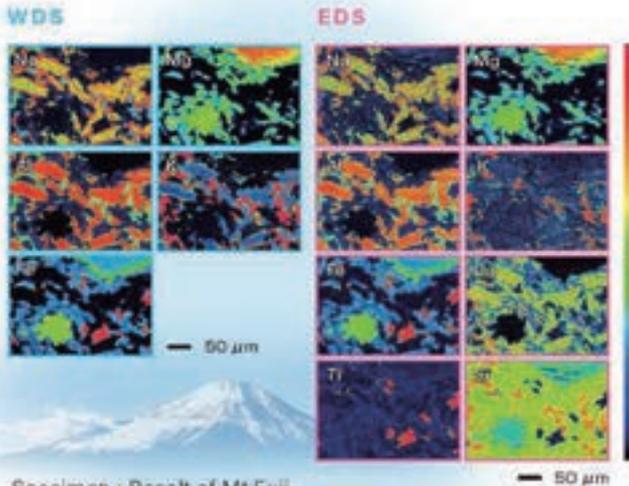
JXA-iHP200F / JXA-iSP100

Novice and Expert Collection *and Processing of Microanalysis Data*

Integrated Hyper Probe
JXA-iHP200F

Integrated Super Probe
JXA-iSP100

- *WD / ED integration*



- *High Expandability*



- *Auto loading & Stage Navigation*





지질 과학

SAMPLE PREPARATION

지질과학에서는 분석기기의 이용에 선행되는 암석시료의 전처리를 수행하고 있습니다.

주요사업

광물분리

저어콘, 모나자이트,
루틸 등의 암석 내 광물

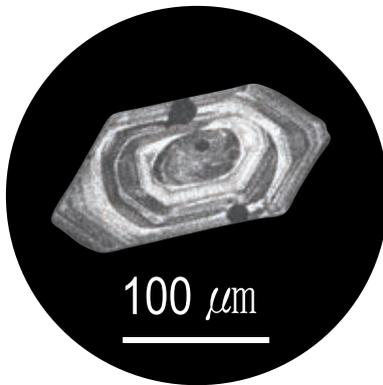
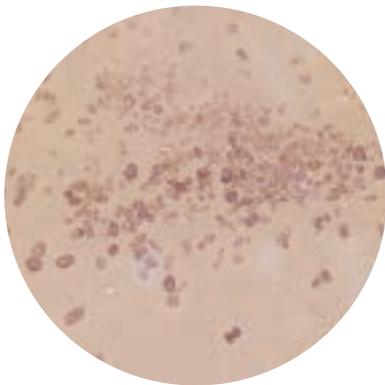
제작사이즈:
50*30mm~

칩 (chip) 제작

박편제작

제작사이즈:
48*28mm, 76*52mm

연구지원



광물분리 과정



시료 전처리 관련 문의

대표 엄 현 우 Email: ahw0504@naver.com / H.P. 010-8705-8559



한국지질자원연구원 화산연구단

연혁



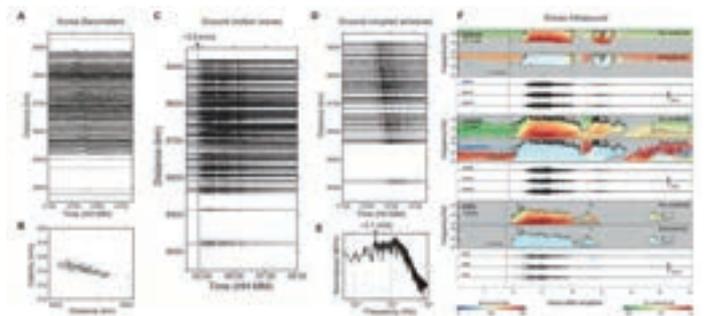
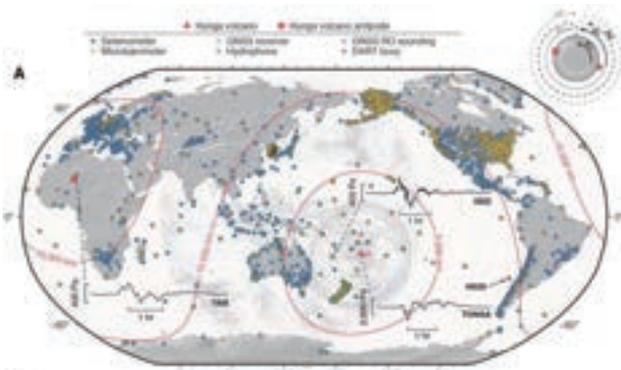
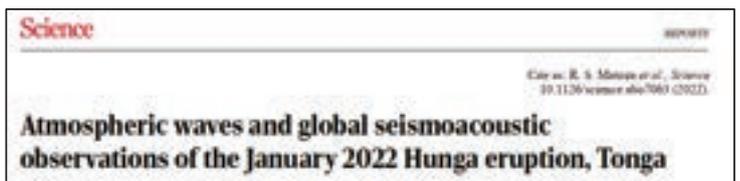
목표

한반도 활화산 활동 위험성 평가자료 확보 및 화산연구역량 강화를 통한
화산재해 대비·대응 및 백두산 연구 추진을 위한 발판 마련

연구내용 및 주요성과

1. 화산분화 위험성 평가 기반 기술 개발	2. 화산분화감시 기반 기술 개발	3. 국내 화산연구역량강화 및 기술수준 선진화
<ul style="list-style-type: none"> 화산체 형성 및 마그마 진화 규명 기술 개발 화산체 하부 지각구조 영상화 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 지진·GNSS·화산가스·원격탐사 통합 화산분화감시 기술 	<ul style="list-style-type: none"> 국내·외 화산연구 네트워크 구축 핵심 국외 화산연구기관과 기술교류

▶ 통가화산 연구결과 발표 (Science 저널 공동저자 참여)



(Matoza et al., 2022)

- 17개국 76명의 전문가 참여(지진, 공중음파, 쓰나미, 화산분야 등)
- KIGAM: 한국 지진-공중음파 네트워크에 기록된 관측자료 정리



誠愛敬信
堅實節儉
創意改善

성신은 고객을 소중히 여깁니다. 고객에 대한 정성과 믿음, 인간에 대한 사랑과 공경
성신이 추구하는 기본 가치입니다.

성신은 기본을 지켜 나갑니다. 화려하지 않으나 튼튼하고 내실 있는 기업
성신이 지향하는 모습입니다.

성신은 변화를 추구합니다. 현실에 안주하지 않는, 미래를 향한 변화와 도전
성신의 정신입니다.

1984년 성신광업을 창업하여 30여년이란 시간동안 비금속 광물 분야의 한 길을
걸어온 주식회사 성신은 '성애경신' '견실절검' '창의개선' 이란 세가지 가치를
지향하며 21세기 광업 선도 기업을 향해 나아가고 있습니다.



주식회사 성신
www.ssmining.co.kr

충청북도 충주시 산척면 인등로 1142-92
Tel 043-851-5855 Fax 043-852-7971



(사)한국광물학회 <http://www.mskorea.or.kr>

경상북도 안동시 경동로 1375 안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과
Tel : 054-820-7741 E-mail : mskorea1986@naver.com



한국암석학회 <http://www.pskorea.or.kr>

충청북도 청주시 서원구 충대로 1 충북대학교 자연과학대학 부설 과학기술진흥센터 내
Tel : 043)261-3262 Fax : 043)263-3488 E-mail : office@pskorea.or.kr