

특별세션 |
광해 · 광업 표준

K
S
R
E

광해 및 광업 분야 국제표준화 동향 및 국가 표준 관리 방향

김덕민^{1)*}

Trend of International Standardization on Mine Hazard Management and Mining and Direction of Managing National Standards

Duk-Min Kim^{1)*}

ISO/TC 82(광업)와 관련하여 수요가 증가하는 분야인 ISO/TC 82/SC 7(지속가능한 광업 및 폐광)의 간사국은 우리나라이며, 최근 지역진흥을 포함하는 사회적 측면(ISO/TC 82/SC 7/WG 4), 갱도 내 광물찌꺼기 되메움(ISO/TC 82/SC 7/WG 5), 광산폐기물의 가치 창출(ISO/TC 82/SC 7/WG 6) 등이 활발하게 국제표준을 제정하고 있다. 이중 갱도 내 광물찌꺼기 되메움 표준과 연계 가능한 폐광산 복원용 갱내충전재 국가표준 제정 검토가 추진되고 있다. 또한 2018년 신규 설립되어 스마트 마이닝을 다루는 ISO/TC 82/SC 8(자동화 및 자율화 광업 시스템)에도 17개국이 참여하여 국제표준 1건(ISO 23725:2024 Autonomous system and fleet management system interoperability)을 발간하여 국가표준으로의 부합화 검토가 추진되고 있다. 또한 최근 개정되고 있는 광업 용어 국제표준들의 국가표준 부합화도 병행하여 추진되고 있다. 광석 분석 분야에서는 국내에서 아연 및 철강 등을 생산하는 대기업 등에서 광석 내 구리 및 납 정량 방법 등에 대한 KOLAS 공인시험기관을 운영 중이며, 해당 표준의 지속적인 검토 필요성이 있다. 한편, ISO/TC 82/SC 7에서는 페루 등의 검토 요청으로 광산유산관리(광해관리)에 대해 국제표준 인증을 하는 시스템(CASCO) 적용 여부를 검토할 예정이다.

사 사

본 연구는 국가기술표준원 산업표준개발사업(2025-75, 2025-83) 및 한국광해광업공단의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: kdukmin8@sangji.ac.kr

1) 상지대학교 건설환경공학과 부교수

스마트마이닝 국제표준(ISO 23725:2024) 및 부합화 방향

최요순^{1)*}

Smart Mining International Standard (ISO 23725:2024) and Direction for Harmonization

Yosoon Choi^{1)*}

본 발표에서는 2024년 제정된 스마트마이닝 상호운용성 국제표준 ISO 23725의 주요 내용과 기술적·제도적 의미를 분석하고, 국내 표준과의 부합화 방향을 고찰하고자 한다. ISO 23725는 노천광산 환경에서 자율운반시스템(Autonomous Haulage System, AHS)과 생산관리시스템(Fleet Management System, FMS) 간의 상호운용성을 확보하기 위한 표준화된 소프트웨어 인터페이스를 정의한 국제표준이다. 기존 광산 현장에서는 장비 제조사 및 시스템 공급사별로 상이한 독자적 연계 방식이 적용되어 시스템 통합 비용 증가, 벤더 종속성 심화, 확장성 제약 등의 문제가 발생해 왔다. ISO 23725는 이러한 한계를 극복하기 위해 메시지 구조와 기능적 인터페이스 범위를 규정함으로써, 반복적인 현장 맞춤형 연동을 최소화하고 개방형 스마트마이닝 생태계 조성을 지원한다. 본 발표에서는 ISO 23725의 적용 범위와 설계 철학을 기존 GMG 가이드 라인 및 관련 ISO 안전표준과의 관계 속에서 정리하고, 다수 벤더 환경, 시스템 교체 및 확장, 디지털 트윈 기반 운영 등 실제 적용 시나리오를 통해 기대효과를 제시한다. 또한 국내 스마트마이닝 연구개발 및 실증 사업에서의 활용 가능성과 향후 KS 표준화 연계 방향을 제안함으로써, 국제표준 기반의 체계적 스마트마이닝 확산 전략을 모색하고자 한다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

글로벌 핵심광물 공급망 안정화와 주도권 확보를 위한 한국의 표준 및 분석기술 전략 연구

양인재^{1)*}, 허준²⁾, 이건희³⁾

Study on South Korea's Standardization and Analytical Technology Strategies for Stabilizing Global Critical Mineral Supply Chains and Securing Leadership

InJae Yang^{1)*}, Jun Heo²⁾ and KunHee Lee³⁾

최근 전기차 배터리, 반도체, 재생에너지 등 첨단 산업의 확산으로 핵심광물의 전략적 중요성이 증대됨에 따라, 글로벌 자원 무기화 리스크에 대응하기 위한 국가 차원의 표준화 전략이 시급한 과제로 부상하고 있다. 본 연구는 주요국 간의 핵심광물 확보 경쟁과 ISO/TC 298(희토류) 등 국제 표준화 동향을 분석하고, 한국의 자원 안보를 강화하기 위한 실질적인 정책 프레임워크와 기술적 대응 방안을 제시하고자 한다.

연구 결과, 글로벌 시장은 중국의 공급망 지배력에 대응하여 EU의 핵심원자재법(CRMA), 미국의 인플레이션 감축법(IRA) 등 규제를 강화하고 있으며, 이에 따라 탄소발자국, 재활용 원료 함량, 추적성(Traceability) 등의 국제 표준 준수가 시장 진입의 필수 조건이 되고 있다. 이에 본 연구는 한국의 생존 전략으로 다음의 네 가지 핵심 요소를 제안한다.

1. 정책 및 제도적 기반 강화: '국가자원안보특별법'을 중심으로 조기경보시스템(EWS)을 고도화하고, 2030년까지 특정 국 의존도를 50%대로 완화하기 위한 비축 및 공급망 다변화 전략을 추진해야 한다.
2. 국제 표준 주도권 확보(Rule Setter): ISO 24181-1, ISO 22928-1 등 최신 국제 표준에 부합하는 KS 표준을 정립하고, 국내 고유 기술을 ISO 표준에 반영하여 글로벌 시장에서의 영향력을 확대해야 한다.
3. 고정밀 분석 기술 및 데이터 신뢰성: ICP-MS/MS 등 첨단 장비를 활용한 초미량 불순물 분석법을 표준화하고, ALCOA+ 원칙에 기반한 디지털 데이터 무결성(Data Integrity) 체계를 구축하여 글로벌 규제에 대응하는 투명성을 확보해야 한다.
4. 재자원화 및 순환 경제 실현: 2030년까지 핵심광물 재자원화율 20% 달성을 목표로 폐배터리 및 폐자석 내 희토류 회수 기술의 표준화와 재생원료 인증제를 도입하여 자원 자립도를 높여야 한다.

결론적으로, 한국은 단순한 표준 수용자(Rule Taker)에서 벗어나 표준, 분석 기술, 데이터 무결성이 통합된 거버넌스를 구축함으로써 글로벌 핵심광물 공급망의 중심 허브로 도약해야 한다. 본 연구가 핵심광물 value chain 업계의 ESG 대응과 국가 자원 안보 확립을 위한 가이드라인을 제시할 수 있기를 기대한다.

키워드: 핵심광물, 국제 표준(ISO), 공급망 안정화, 자원안보특별법, 재자원화, 데이터 무결성, 희토류 분석

References

- 한국광해광업공단, 2021. 광해관리 표준화사업 중장기전략 수립 및 국가표준 개발 용역
한국자원공학회, 2025. 광업분야 표준화의 현황과 전망에 관한 기초사업에 대한 연구
ISO, 2024, Rare earth — Determination of non-rare earth impurities in individual rare earth metals and their oxides — ICP-AES — Part 1, ISO 24181-1:2024.
ISO, 2024, Rare earth — Analysis by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry (WD-XRFS) — Part 1, ISO 22928-1:2024.

*Corresponding Author: ygloria@komir.or.kr

- 1) 한국광해광업공단 기술연구원 분석평가처장
- 2) 한국광해광업공단 기술연구원 광물분석팀장
- 3) 한국광해광업공단 기술연구원 환경분석팀 차장

CCU 분야 국제표준화 동향 및 우리나라의 국제표준 제안

이봉재^{1)*}, 윤수영¹⁾

International Standardization Trends in CCU and Korea's New Work Item Proposal for International Standards

Bong Jae Lee^{1)*} and Soo Young Yun¹⁾

탄소중립 달성을 위한 핵심 기술 중 하나로 이산화탄소 포집·활용·저장(CCUS) 기술의 중요성이 국제적으로 확대되고 있으며, 이에 따라 관련 기술의 설비 또는 제품에 대한 성능 및 품질평가 뿐만 아니라 온실가스 감축효과 산정 및 인증을 위한 국제표준 개발이 활발히 추진되고 있다. 특히 CCUS 기술의 적용이 확대됨에 따라 기술 및 제품의 감축 성능 및 품질을 객관적으로 검증할 수 있는 기준에 대한 필요성이 점차 커지고 있다. 이에 따라 ISO를 중심으로 한 국제표준을 개발하기 위하여 다양한 논의가 진행될 뿐 아니라 ISCC와 같은 민간 인증 체계 및 다양한 국내외 규제에서도 CCUS 관련 기준과 방법론에 대한 논의가 지속적으로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 국제표준 ISO에서 논의 중인 CCUS 관련 국제표준화 현황을 포함하여 국제적인 CCUS 표준 및 인증 동향을 소개하고, 우리나라에서 추진 중인 국제표준화 활동 사례로서 ISO/TC 265에서 진행 중인 광물탄산화 기반 이산화탄소 포집량 산정 방법과 ISO/TC 71/SC 8에서 검토되고 있는 광물탄산화 제품의 정량 시험분석 방법에 대한 표준안의 주요 내용과 추진 현황을 소개한다. 이를 통해 국내 기술의 국제표준 반영 가능성을 검토하고 향후 CCUS 분야의 국제표준화 전략에 대한 시사점을 제시하고자 한다.

사 사

본 연구는 한국연구재단의 글로벌 C.L.E.A.N. 사업(No. RS-2025-02308870)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Bong Jae Lee, Jeong Il Lee., 2020. Methodology to Calculate the CO₂ Emission Reduction at the Coal-Fired Power Plant: CO₂ Capture and Utilization Applying Technology of Mineral Carbonation. Sustainability, 2020, 12, 7402

*Corresponding Author: jae8076@ktr.or.kr

1) 한국화학융합시험연구원

특별세션

핵심광물 ODA 현황과 전망

K
S
R
E

핵심광물 공급망 협력을 위한 한국의 전략적 ODA 활용

김호인^{1)*}

The Strategic Use of Korea's ODA for Critical Mineral Supply Chain Cooperation

Hoin Kim^{1)*}

글로벌 핵심광물 공급망에서 한국은 자원 기반이 제한적이어서 상류 단계의 경쟁력은 상대적으로 약한 반면, 정련·소재 화와 배터리·전자 등 중·하류 단계에서는 높은 기술력과 산업 생태계를 보유하고 있다. 이러한 구조로 인해 특정 국가에 대한 원료 의존도가 높아 수급 리스크에 취약하며, 이에 따라 공급선 다각화가 중요한 전략 과제로 부상하고 있다. 때문에 글로벌 사우스와 협력은 점차 강조되고 있다. 그러나 핵심광물 부존량이 풍부한 개발도상국의 상당수는 제도적 기반, 기술 역량, 인력 양성 측면의 제약으로 인해 가치사슬에 참여하더라도 이를 부가가치 창출로 연결하기 어려운 구조적 한계를 지닌다. 이러한 제약은 해당 국가의 산업 기반 확장을 제한할 뿐 아니라 글로벌 핵심광물 공급망의 안정성과 다변화를 저해하는 요인으로도 작용한다.

산업통상부는 공급망 ODA를 통해 핵심광물 가치사슬 관점에서 한국의 공급망 전략과 개발협력 정책 간 연계성을 모색하고, 유망 협력국의 산업기술 역량 강화를 지원하며 경제안보 협력 거점을 구축하고 있다. OECD 개발원조위원회에 따르면 공적개발원조(ODA)는 정부 및 공공기관이 개발도상국의 경제발전과 사회복지 증진을 목적으로 제공하는 자금 또는 지원을 의미한다. 국내에서는 ODA를 빈곤 해소나 인도주의적 지원 중심으로 인식하는 경향이 있으나, 개발도상국의 경제발전을 지원한다는 본질적 목적을 유지하면서도 상호 이익을 창출할 수 있는 분야로서 핵심광물에 대해 주목할 필요가 있다. 특히 한국의 공공 부문은 채굴을 제외한 핵심광물 가치사슬 전반에서 높은 경쟁력을 보유하고 있어 탐사, ESG 관리, 선광, 제련, 순환경제 등 다양한 분야에서 개발도상국 이해관계자의 수요에 부합하는 개발협력 모델을 제시할 수 있는 역량을 갖추고 있다. 현재 몽골, 우즈베키스탄, 베트남, 카자흐스탄, 인도네시아 등 5개국에서 공급망 ODA 사업이 추진되고 있으며, 탄자니아 사업 역시 지난해 타당성조사를 거쳐 신규 예산 확보 절차가 진행 중이다. 최근에는 EDCF 자금이 투입되는 유상원조에서도 공급망 협력을 위한 인프라 사업 발굴이 강조되고 있어 향후 사업 간 시너지 창출이 기대된다. 다만, 이러한 ODA가 장기적인 공급망 협력으로 정착하기 위해서는 지속가능성 확보, 양국 민간 부문의 참여 확대와 시장 기반 협력 메커니즘 구축 등이 중요한 과제로 남아 있다.

*Corresponding Author: hoin.kim@kiat.or.kr

1) 한국산업기술진흥원 산업기술ODA전략실

핵심광물 분야 ODA 사업의 준비와 실행 전략

김찬중^{1)*}

Preparation and Implementation Strategies for ODA Projects in the Critical Minerals Sector

Chan J. Kim^{1)*}

본 발표는 핵심광물 분야 공적개발원조(ODA) 사업의 준비와 실행 과정에서 고려해야 할 핵심 요소와 전략적 시사점을 제시하고자 한다. 핵심광물 분야 ODA는 일반 개발협력사업과 달리 자원개발, 산업협력, 기술이전, ESG, 공급망 안정성, 외교적 협력 등 복합적 요소가 결합되는 전략 분야이다. 특히 대상국의 산업 성장, 고용 창출, 수출 확대 및 GDP 기여 가능 성과 연계되는 만큼, 단순 기자재 지원이 아닌 국가 차원의 전략 수립이 필요하다. 준비 단계에서는 수원국 정책 및 수요 분석, 문제 정의, 이해관계자 설정, 산업 및 시장성 검토, 성과체계 수립, 위험요인 분석이 중요하며, 실행 단계에서는 파트너십 운영, 현지 맞춤형 사업관리, 성과관리, 유지관리 체계 및 지속가능성 확보가 핵심 과제로 작용한다. 또한 국내 기업의 진출 방향 제시와 전략적 협력안 구축을 통해 후속 투자, 기술협력, 제도협력으로 연계되는 지속적 협력 기반 마련이 필요하다. 본 발표는 대한민국 핵심광물 ODA가 제도, 인력, 기술, 산업생태계를 통합적으로 설계하는 방향으로 발전해야 함을 제안한다.

사 사

본 연구는 자원공학회의 주요사업(16-330)의 지원으로 수행되었습니다.

1) 주식회사 네이처앤드피플 대표이사

몽골희소금속협력센터(ODA) 구축 및 핵심광물 확보 전략

전호석^{1)*}, 김성민¹⁾, 고병헌¹⁾, 박은영¹⁾, 장한권¹⁾

Establishment of Mongolia Rare Metals Cooperation Center (ODA) and Strategy for Securing Critical Minerals

Hoseok Jeon^{1)*}, Seongmin Kim¹⁾, Byunghun Go¹⁾, Eunyeong Park¹⁾ and Hankwon Chang¹⁾

세계에서 가장 많은 자원을 보유하고 있는 중국이 2,000년 전까지만 해도 글러벌 원료공급 국가였지만, 빠른 경제성장으로 글러벌 공급을 줄이고 자국 산업을 위해 세계 자원을 독점하면서부터 자원확보 경쟁이 시작되게 되었다. 중국을 중심으로 한 자원 독점 및 통제를 해결하기 위해 2022년 8월에 미국을 중심으로 한국 등 11개 국가가 참가하여 인플레이션 감축법을 발효하여 미국 시장에서 중국제품의 수출을 통제하는 법안이 만들어졌다. 그러나 2023년에는 유럽연합을 중심으로 또 다른 핵심원자재법이 추진되면서 글러벌 핵심광물 확보를 위한 경쟁이 시작되었다. 특히, 영국지질조사소에서 발간하는 핵심광물 공급리스크 목록 17종 중 12종을 중국이 주도적 생산하고 있어, 핵심 광물의 안정적 확보는 더욱더 어려워지게 되었으며, 우리나라는 전량 수입에 의존하고 있는 핵심광물의 90%를 중국에 의존하고 있어 핵심광물의 안정적 확보를 위한 전략과 방안이 구체화 되었다.

정부는 우리나라의 전략 핵심 산업인 첨단산업의 지속적 발전과 대외 경쟁력 확보를 위해 핵심광물의 확보 전략과 추진 목표를 수립하여, 핵심광물의 특정국 의존도를 50% 이하로 낮추는 즉, 중국 의존도를 줄이는 노력을 하고 있다. 이를 위해 위기대응 능력강화와 핵심광물 확보 다각화 그리고 핵심광물 확보 인프라구축 등을 추진하게 되었으며, 핵심광물 확보 다각화를 위해 자원 부국과의 양자 및 다자 자원협력을 수행하고 있다. 현재 몽골과 함께 수행하고 있는 ODA 사업은 저개발 무상원조 사업이지만, 몽골에 대량 부존되어 있는 핵심광물을 협력하여 함께 개발하는 양자협력 사업의 일환으로 핵심광물의 안정적 확보가 최종 목표이다.

몽골은 세계 10대 자원 부국 중 하나로 구리(세계 2위), 텅스텐, 몰리브덴(매장량 7위, 생산량 9위), 주석, 리튬, 아연, 납, 희토류, 니켈, 코발트, 흑연, 금, 우라늄과 석탄 및 형석 등 80여 종의 다양한 광물자원이 부존되어 있지만, 광산개발 기술이 낙후되어 있어 광업활동은 매우 미진하다. 하지만 광업은 몽골 GDP의 26%, 전체 산업 생산의 79%를 차지하고 있으며, 수출입의 95.4%를 이루고 있어 몽골의 경제발전에서 가장 중요한 부분이다. 현재 수행하고 있는 몽골 ODA 사업은 몽골에 희소 금속연구센터를 설립하고 한-몽 자원협력 체계를 구축하여 몽골은 광업에 의해 경제발전 기반을 구축하고, 우리나라는 전량 수입에 의존하고 있는 핵심광물을 안정적으로 확보할 수 있는 전진 기지를 구축하는데 있다. 이를 위해 몽골에 우수한 희소금속연구센터를 설립하고 최신 분석 및 선광/제련 연구장비를 구축하며, 광업 전문인력 양성하고 몽골 자원개발에 문제가 되는 애로기술 지원 그리고 많은 한국기업이 몽골에 진출하여 몽골 기업과 협력하여 JV 기업을 설립하여 실질적인 자원협력이 이루어지게 하는데 있다.

본 ODA 사업은 산업통상부와 외교부가 지원을 하고 KIAT가 총괄 관리를 하고 있으며, KIGAM이 주관기관으로 광해 공업공단과 (주)이산건설그룹이 참여기관으로 함께 수행하고 있고, 몽골은 산업광업자원부가 지원하고 GCRA가 주관기관으로 KIGAM과 협력하여 사업을 수행하고 있다. 이 ODA사업은 2023년부터 2027년까지 수행하게 되는데, 한국과 몽골 정부는 한-몽 자원협력의 지속을 위해 자립화 방안과 마스터플랜을 수립하여 한-몽 자원협력의 조직으로 운영하고자 정부 간 노력을 하고 있습니다.

사 사

본 연구는 산업통상협력개발지원사업인“몽골 희소금속 고부가가치화 및 상용화를 위한 희소금속센터 조성”(26-9801) ODA 과제(KIAT)의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: hsjeon@kigam.re.kr

1) 한국지질자원연구원 자원활용연구본부

공급망 확대를 위한 한-우즈벡 희소금속센터(ODA) 구축과 국제표준화

송요섭^{1,2)}, 김범성^{1,2)*}

Korea-Uzbekistan Rare Metal Center under ODA and International Standardization for Supply Chain

Yoseb Song^{1,2)} and Bum Sung Kim^{1,2)*}

본 연구에서는 공급망 확대를 위한 한-우즈벡 희소금속센터(ODA) 구축과 국제표준화 연계 방안에 대해 논의하고자 한다. 최근 반도체, 전기전자, 항공우주, 에너지 등 첨단산업의 발전에 따라 몰리브덴, 텅스텐과 같은 고용점 희소금속의 전략적 중요성이 지속적으로 증가하고 있다. 특정 국가 및 지역에 편중된 공급 구조를 완화하고 안정적인 글로벌 공급망을 확보하기 위한 협력이 더욱 중요해지고 있다. 본 사업은 우즈베키스탄의 자원 및 생산 잠재력과 한국의 소재·공정 기술력을 연계하여, 희소금속의 생산 기반 조성, 품질 고도화, 산업 생태계 확장을 동시에 도모하는 협력 모델로 추진되고 있다.

우즈베키스탄 치르치크 소재 한-우즈벡 희소금속센터를 거점으로 반도체 및 첨단산업용 고부가 희소금속의 생산을 위한 상용화 지원 기반을 구축하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 고용점 희소금속의 대표 원소인 몰리브덴과 텅스텐을 중심으로 고품위 희소금속 제품 생산에 필요한 가공 및 분석 장비 21종을 단계적으로 구축하여 현지 생산 환경에 적합한 공정 조건 확립과 품질관리 체계 정착을 함께 추진하고 있다. 장비를 활용한 기술 지도 3건을 통해 공정 운영 안정화, 제품 특성 향상, 시제품 생산 및 제품화 기반 마련을 지원하여 단순한 설비 도입을 넘어 실제 산업 적용이 가능한 생산 체계로 연결될 수 있도록 하고 있다. 현지 전문가 초빙, 국내 전문가 파견, 우즈베키스탄 소재 대학 및 연구기관과의 협력, 엔지니어 인력양성 프로그램 운영 등을 병행하여 기술이전과 지속 가능한 운영 체계 구축을 추진하고 있다. ODA 사업이 인프라 구축에 그치지 않고 현지 연구자와 기술 인력이 장비 운용, 분석 평가, 공정 개선, 제품 품질관리 등을 자립적으로 수행할 수 있도록 기반을 마련한다는 점에서 중요하다. 산·학·연 협력을 통한 현지 맞춤형 교육과 실습 중심의 인력양성은 장기적으로 센터의 독립적 운영 역량을 강화하고, 우즈베키스탄 내 희소금속 관련 산업 발전의 토대를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

본 사업과 연계된 국제표준화 관련 사업으로 단순한 생산 인프라 지원을 넘어, 희소금속 생산, 품질관리, 재활용, 공급망 협력으로 확장되고 있다. 희소금속은 자원 확보뿐만 아니라 원료의 품질 기준, 분석 방법, 공정 관리, 재활용 기술, 제품 신뢰성 평가 등 다양한 영역에서 국제적으로 통일된 기준 마련의 필요성이 커지고 있다. 이에 따라 ISO/TC 298(희토류) 등 국제표준화 활동과의 연계를 통해 개발도상국의 생산 기반 조성과 글로벌 공급망 참여를 지원하는 동시에 향후 희소금속 분야의 공정, 품질, 자원순환 관련 표준화 기반 마련 가능성을 함께 모색하고 있다. 이는 단순히 기술 협력 차원을 넘어, 국제 시장에서 상호 신뢰 가능한 품질체계를 형성하고 공급망의 안정성과 투명성을 높이는 데에도 기여할 수 있다.

ODA 기반 산업협력이 국제표준화와 결합될 때 개발도상국의 기술 자립과 산업 경쟁력 강화뿐 아니라 우리나라의 전략적 소재 공급망 다변화에 어떠한 시너지를 창출할 수 있다. 이를 통해 본 사업이 향후 희소금속 분야에서 전략적 공급망 협력과 국제표준화 연계의 실질적 모델로 발전할 가능성을 제시하고자 한다.

사 사

본 연구는 산업통상협력개발지원사업인 “한-우즈벡 희소금속센터 고품위 상용화 소재 생산 지원사업(PNK26190)” ODA 과제(KIAT)의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: bskim15@kitech.re.kr

1) 한국생산기술연구원 국가희소금속센터

2) 한국과학기술연합대학교대학원 산업소재·스마트제조공학

베트남 핵심광물 ODA사업의 전략 방향성 및 시사점

박정규^{1)*}

Strategic Directions and Implications of Korea's ODA Project on Critical Minerals in Vietnam

Jungkyu Park^{1)*}

핵심광물은 더 이상 개별 산업의 원료가 아니라 공급망 경쟁과 경제안보를 좌우하는 전략자산이 되었다. 특히 희토류를 포함한 핵심광물의 채굴과 가공이 일부 국가에 편중되면서, 자원 확보뿐 아니라 분리·정제 등 가공기술의 확보가 국가 경쟁력의 핵심 요소가 되고 있다. 우리나라는 첨단 제조업 기반은 강하지만 핵심광물의 공급과 가공기반을 해외에 크게 의존하고 있어, 공급망 다변화와 기술 내재화를 동시에 추진할 필요가 있다.

이러한 측면에서 베트남은 한국의 전략적 협력대상으로 주목된다. 베트남은 희토류, 티타늄, 니켈 등 핵심광물의 부존 잠재력이 크고, 이를 활용한 자원개발 및 광물가공 산업 육성을 정책적으로 추진하고 있다. 반면 고부가가치화를 위한 분리·정제 및 가공 분야에서는 기술적·재무적 한계가 존재하며, 이는 한국과의 기술협력 및 산업협력 수요로 이어지고 있다. 이에 2025년부터 추진된 베트남 핵심광물 ODA 사업은 현지 가공분야의 기술협력과 기업협력을 결합함으로써 양국 간 자원협력 기반을 구축하고, 중장기적으로 핵심광물 공급망 안정화에 기여하는 것을 목표로 한다.

본 발표는 베트남 핵심광물 ODA 사업의 전략을 세 가지 측면에서 제시한다. 첫째, 단순한 원광 확보보다 가공 및 부가가치 창출 단계에 협력의 초점을 두고 있다는 것이다. 둘째, 연구기관과 산업계가 함께 참여하는 기술협력-기업협력 연계 구조를 통해 현지 기반 구축과 후속 사업화 가능성을 동시에 모색한다. 셋째, 베트남을 거점으로 한 협력은 특정 국가 편중형 공급망을 완화하고, 한국의 핵심광물 공급망 다변화 전략과 연계될 수 있다는 점에서 전략적 의미를 가진다. 이 사업의 주요 시사점은 베트남 현지 희토류 연구기반을 확보하고, 이를 바탕으로 국내 희토류 연구 컨소시엄의 구성이 실현되며 나아가 한국과 베트남의 핵심광물 가공분야 국제공동연구를 촉진할 수 있다는 데 있다. 또한 중장기적으로 희토류 분리·정제 기술 확보의 기반을 마련하고, 국내 기업의 현지 진출 및 후속 협력사업 발굴로 이어질 가능성을 가진다. 나아가 본 사업은 ODA가 개발협력을 넘어 공급망, 기술협력, 산업협력을 연계하는 전략적 정책 수단으로 활용될 수 있음을 보여준다.

사 사

본 연구는 산업통상협력개발지원사업인 “베트남 핵심광물 공급망 기술협력 센터 조성” ODA 과제(KIAT)의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: jxpark@kigam.re.kr

1) 한국지질자원연구원 자원경제연구실

탄자니아 핵심광물 ODA 전략

조성준^{1)*}, 정수철¹⁾, 박준혁¹⁾, 신승욱¹⁾, 김찬중²⁾, 안태현²⁾, 김호인³⁾

Tanzania Critical Minerals ODA strategy

Seoung-Jun Cho^{1)*}, Soochel Jeong¹⁾, Junhyeok Park¹⁾, Seongwook Shin¹⁾,
Chanjoong Kim²⁾, Taehyeon An²⁾ and Hoin Kim³⁾

탄자니아는 금, 니켈, 희토류 등 풍부한 광물자원을 보유하고 있음에도 불구하고, 낮은 탐사율과 선광·가공 기술력 부족, 미흡한 ESG 관리 체계로 인해 광업 부문의 글로벌 경쟁력이 제한적인 실정이다. 특히 매장량 정보의 불확실성과 기술적 한계는 광물 가치사슬의 고부가가치화를 저해하며, 글로벌 스탠다드에 부합하는 제도적 기반 미비는 산업 발전의 주요 제약 요인이 되고 있다.

본 연구에서 소개하는 ‘탄자니아 핵심광물 ODA 사업’은 이러한 구조적 한계를 극복하고자 기획되었다. 본 사업은 탐사·선광-ESG를 아우르는 광물 가치사슬 전 주기에 걸친 통합적 역량 강화를 통해 탄자니아의 자원 자립도를 높이는 한편, 한국의 안정적인 핵심광물 공급망 확보를 위한 협력 기반 구축을 목적으로 한다.

주요 추진 과제로는 핵심광물 광업기술센터(Technical Center) 구축을 중심으로 △탐사 및 선광 인프라 현대화 △표준 공정 확립 △3D 지질 데이터 및 모델링 플랫폼 구축 △현지 전문인력 양성 △ESG 관리 체계 정립 등을 포함한다. 이는 한국의 고도화된 기술과 장비를 현지 기관에 단계적으로 이전하여 탄자니아 광업 생태계의 지속가능성을 확보하는 데 중점을 둔다.

또한, 본 사업은 정부의 대(對)탄자니아 ODA 정책 및 산업통상자원부의 ‘핵심광물 공급망 기술협력 전략’과 궤를 같이 하며, 글로벌 ODA 트렌드인 그린·디지털 전환 역량 강화에도 부합한다. 향후 5개년 로드맵에 따라 마스터플랜 수립부터 공동탐사, 운영 지원에 이르는 통합적 수행 모델을 제시함으로써, 자원국과 수요국이 상생하는 지속가능한 광업 역량 강화 모델로서 기여하고자 한다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업(26-3212)의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: mac@kigam.re.kr

1) 한국지질자원연구원 자원탐사개발연구본부

2) 네이처엔드피플(NNP)

3) 한국산업기술진흥원(KIAT)

기획세션

AI

K
S
R
E

AI 에이전트 기술의 현재와 물리탐사 적용 사례

윤대웅^{1)*}

AI Agent: Current Trends and Applications in Geophysical Exploration

Daeung Yoon^{1)*}

최근 대규모 언어모델(LLM)의 발전과 함께 AI 에이전트 기술이 빠르게 진화하고 있다. AI 에이전트는 단순한 질의응답을 넘어 스스로 추론하고, 외부 도구를 활용하며, 복잡한 태스크를 자율적으로 수행할 수 있는 시스템으로, 추론(Reasoning), 계획(Planning), 도구 활용(Tool Use), 메모리(Memory) 등의 핵심 메커니즘을 기반으로 한다. 현재 코딩, 검색, 업무 자동화 등 다양한 산업 분야에서 에이전트 기반 시스템이 실용화되고 있으며, 멀티 에이전트 협업을 통한 복잡한 워크플로우 자동화가 주요 연구 방향으로 부상하고 있다.

본 발표에서는 AI 에이전트의 핵심 개념과 구성요소, 주요 프레임워크 및 최신 기술 동향을 체계적으로 정리한다. 이를 통해 에이전트 기술이 현재 어디까지 발전했으며, 실제 응용에서 어떤 가능성과 한계를 가지는지 조망한다. 아울러 물리탐사 분야에서의 적용 가능성을 논의하고, 저자의 연구실에서 개발 중인 에이전트 기반 물리탐사 도구들을 간략히 소개한다. 이를 통해 AI 에이전트 기술에 대한 전반적인 이해를 제공하고, 자원공학 분야에서 에이전트 기반 자동화가 가져올 수 있는 실질적인 효용과 향후 발전 방향을 전망한다.

사 사

이 연구는 한국농어촌공사농어촌연구원에서 수행한 “딥러닝을 이용한 GPR 탐사자료 분석 용역”(2025-1436-01) 사업과 2026년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원(머신러닝 기반 해저면 특성 분류 기술 개발)(관리번호: 20220254)을 받아 수행되었습니다.

1) 전남대학교 에너지자원공학과

지능형 멀티 인공지능 에이전트 기반의 자율형 가상 지구과학 연구소 설계 및 프로토타입 구현

오주원^{1)*}

Design and Prototype Implementation of an Autonomous Virtual Geoscience Laboratory Based on Intelligent Multi-AI Agents

Ju-Won Oh^{1)*}

현대 과학 연구는 다양한 전문 분야의 연구자들이 조직적으로 협력하는 연구소 체계를 기반으로 발전해왔다. 그러나 전문인력 확보의 어려움, 분야 간 협업 장벽, 연속적 연구 수행의 물리적 한계 등은 연구 생산성과 혁신의 속도를 제약하는 구조적 문제로 지적되어 왔다. 최근 대형 언어 모델 기반 AI 에이전트 기술의 급속한 발전은 이러한 제약을 근본적으로 재검토할 수 있는 가능성을 열고 있다. 단일 에이전트가 아닌 다수의 역할 특화 에이전트들이 조직적으로 협력하는 멀티 에이전트 시스템은 실제 연구소의 분업 구조와 협력 방식을 AI 환경에서 재현할 수 있는 잠재력을 가지고 있으나, 이를 특정 학문 도메인에 특화된 형태로 구현한 사례는 아직 매우 제한적이다.

본 발표에서는 이러한 개념을 지구과학·자원공학 분야에 적용하여 설계하고 있는 자율형 가상 연구소의 아키텍처와 프로토타입 구현 현황을 소개한다. 본 시스템은 실제 대형 연구소의 조직 구조를 모델로 하여 복수의 연구 본부와 센터로 구성되며, 각 단위는 해당 분야 전문성을 내재화한 AI 에이전트들이 담당한다. 에이전트들은 주어진 연구 과제를 분담하여 문헌 조사, 자료 분석, 시뮬레이션 수행, 결과 해석, 보고서 작성에 이르는 연구 사이클 전반을 자율적으로 수행하도록 설계되었다. 단순한 작업 자동화를 넘어 연구소로서의 조직적 협력과 지식 축적이 가능한 구조를 지향하며, 본 발표에서는 현재까지의 설계 원칙과 구현 경험을 공유하고자 한다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 디지털분야글로벌연구지원의 연구결과로 수행되었습니다 (Task No. RS-2024-00431580). 또한, 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었습니다(No. RS-2024-00410397).

*Corresponding Author: juwon24@jbnu.ac.kr

1) 전북대학교 토목/환경/자원·에너지공학부(자원·에너지공학) 부교수

MCP 기반 LLM-드론 연동 에이전트 AI 시스템의 설계 및 구현

조성준^{1)*}

Design and Implementation of an MCP-Based LLM-Drone Integrated Agent AI System

Seoung-Jun Cho^{1)*}

2022년 11월 ChatGPT의 출시를 기점으로 촉발된 거대언어모델(LLM) 개발 경쟁은 전 산업 분야에 걸쳐 인공지능(AI) 도입을 가속화하였으며, 자원공학 분야 또한 이러한 흐름의 예외가 아니다. 특히 2025년을 전후하여 본격화된 에이전트 AI 기술은 LLM이 단순한 대화형 인터페이스를 넘어 실질적 업무 수행이 가능한 자율적 시스템으로 진화할 수 있음을 보여주며, AI 기반 사회로의 전환을 촉진하고 있다. 자원공학의 물리탐사 분야는 머신러닝 및 딥러닝 등 다양한 AI 기법을 선도적으로 적용해 왔으며, 에이전트 AI 기술의 도입에서도 선도적 역할을 수행하고 있다. 그러나 AI의 적용이 자료처리 분야에서는 활발히 이루어지고 있는 반면, 자료획득 분야에서의 활용은 상대적으로 미진한 실정이다. 한편 드론은 물리탐사 자료획득 분야의 혁신을 견인하며, 3차원 지형 측량을 비롯하여 자력탐사, 방사능 탐사, 전자탐사 등으로 적용 범위를 지속적으로 확대하고 있다. 본 연구에서는 드론에 에이전트 AI 기능을 통합하여 자연어 기반의 자율 탐사, 즉 ‘바이브 탐사(vibe exploration)’의 실현 가능성을 탐색하고자 하였다. 이를 위해 Claude Desktop 환경에서 자연어 명령을 통해 드론을 원격 제어하는 시스템을 구현하였다. 시스템 아키텍처는 Claude Desktop, MCP(Model Context Protocol) 서버, 드론 제어 애플리케이션, 그리고 드론으로 구성된다. 드론은 SDK(Software Development Kit)가 제공되는 DJI Mavic Air를 사용하였으며, Claude Desktop을 통해 입력된 자연어 명령을 드론 제어 명령으로 변환하는 MCP 서버를 구축하였다. 드론 제어 애플리케이션은 Android Studio를 활용하여 개발하였고, Claude Desktop 및 MCP 서버가 구동되는 PC와 드론 조종기에 연결된 모바일 단말 간의 통신에는 WebSocket 프로토콜을 적용하였다. 전체 시스템의 소프트웨어 개발은 Claude AI 환경에서 바이브 코딩(vibe coding) 방식으로 수행하였다. 실험 결과, Claude Desktop을 통한 자연어 명령이 드론에 정확히 전달되어 의도된 동작이 수행됨을 확인하였다. 향후 본 시스템을 탐사 드론에 적용하여 활용 범위를 확대하고, 궁극적으로 로컬 LLM과의 연계를 통해 자율적 에이전트 AI 및 피지컬 AI로의 확장을 추진할 계획이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업(26-3212)의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: mac@kigam.re.kr

1) 한국지질자원연구원 광물자원연구본부

AI 에이전트에서 피지컬 AI까지: 자율 광산 시스템의 미래

최요순^{1)*}

From AI Agents to Physical AI: The Future of Autonomous Mining Systems

Yosoon Choi^{1)*}

최근 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기술은 데이터 분석 중심의 인지형 AI(Cognitive AI)에서 생성형 AI(Generative AI), 그리고 자율적 의사결정을 수행하는 에이전틱 AI(Agentic AI)로 빠르게 발전하고 있으며, 최근에는 물리적 환경에서 센싱·판단·행동을 통합적으로 수행하는 피지컬 AI(Physical AI)로 확장되고 있다. 이러한 기술 발전은 디지털 환경에서의 지능을 넘어 실제 산업 시스템과 물리적 장비를 제어하는 자율 시스템으로 인공지능의 적용 범위를 확대하고 있으며, 다양한 산업 분야에서 새로운 패러다임 변화를 촉발하고 있다. 특히 자원산업은 혹독한 작업 환경, 대규모 장비 운용, 안전 중심의 운영 구조 등으로 인해 로봇틱스, 센서 네트워크, 디지털 트윈, 자율 시스템 기술의 적용 가능성이 높은 대표적인 산업 분야로 평가된다. 최근에는 인공지능 기반의 데이터 분석 및 의사결정 지원 기술을 넘어, AI 에이전트와 로봇·장비 시스템을 결합한 자율 운영 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이는 궁극적으로 피지컬 AI 기반의 자율 광산 시스템(Autonomous Mining Systems)으로의 발전 가능성을 시사한다. 본 발표에서는 최근 인공지능 기술의 발전 흐름을 인지형 AI, 생성형 AI, 에이전틱 AI, 그리고 피지컬 AI의 단계적 진화 관점에서 살펴보고, 이러한 기술 패러다임이 자원산업에 미치는 영향과 적용 가능성을 분석한다. 마지막으로 향후 자원산업이 데이터 기반 의사결정 시스템을 넘어 AI 기반 자율 운영 시스템으로 발전할 가능성을 전망하고, AI 에이전트와 피지컬 AI 기술이 결합된 차세대 자율 광산 시스템의 연구 방향과 학술적·산업적 과제를 제시하고자 한다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

기획세션

고준위 방사성 폐기물

K
S
R
E

심층처분 부지조사에서의 지구물리탐사의 역할

오석훈^{1)*}, 권형석²⁾

Geophysical Methods for Site Characterization of Deep Geological Disposal

Seokhoon Oh^{1)*} and Hyoung-seok Kwon²⁾

고준위 방사성폐기물의 심층처분은 장기간에 걸쳐 환경과 인간을 보호하기 위한 핵심 관리 전략으로, 처분 부지의 지질학적 안정성과 장기적 격리 성능을 확보하는 것이 중요하다. 이를 위해 지질구조, 단층 및 파쇄대 분포, 암반 물성 등 지하 환경을 규명하는 부지조사가 수행되며, 지구물리탐사는 심부 지질 정보를 비파괴적으로 획득할 수 있는 핵심 기술로 활용된다. 최근 핀란드, 스웨덴, 프랑스, 캐나다 등 여러 국가에서 심층처분장 건설 및 부지 선정이 진행되면서, 처분장 부지 특성화와 장기 모니터링을 위한 지구물리탐사의 중요성이 더욱 증가하고 있다. 본 연구에서는 심층처분장 부지조사에서 활용되는 주요 지구물리탐사 기법과 국내의 적용 사례를 정리하고, 부지 평가 과정에서의 역할을 고찰하였다. 심층처분 부지조사에 활용되는 지구물리탐사는 탐사 위치에 따라 항공물리탐사, 지표물리탐사, 시추공물리탐사로 구분된다. 항공물리탐사는 광역적인 지질 구조와 이상대를 파악하여 후보 부지를 선별하는 데 활용되며, 대표적으로 항공자력 및 전자탐사가 사용된다. 지표물리탐사로는 반사법 탄성과 탐사, 전기비저항 탐사, AMT 탐사 등이 활용되어 심부 지질구조와 단층 분포를 규명한다. 시추공물리탐사는 물리검층과 시추공 영상촬영을 통해 절리 및 불연속면의 방향과 특성을 파악하며 암반 구조 모델 구축에 활용된다. 해외에서는 캐나다 Ignace 지역의 중력, 자력 자료 기반 3차원 지질모델링, 스위스의 2D 및 3D 반사법 탄성과 탐사, 중국 고비사막 지역의 AMT 탐사, 스웨덴 Forsmark의 시추공 조사 등이 수행된 바 있다. 국내에서도 KURT와 경주 방폐장 부지조사에서 다양한 물리탐사가 적용되어 심부 지질구조와 단층 파쇄대 특성을 규명하였다. 이러한 지구물리탐사는 후보지 탐색부터 정밀 부지 특성화까지 단계적으로 활용되며, 향후 다양한 물리탐사 자료의 통합 해석과 3차원 지질모델링을 통해 심층처분 부지 평가의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2024년도 정부(원자력안전위원회)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국원자력안전재단의(RS-2021-KN066110) 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: gimul@kangwon.ac.kr

1) 강원대학교 에너지자원공학과 교수

2) 강원대학교 지구자원연구소 연구교수

심층처분시설 부지조사를 위한 지구물리탐사 연구 현황

한만호^{1)*}, 이정환¹⁾, 권미진¹⁾, 김유한¹⁾, 신지호¹⁾

State of Geophysical Investigation Research for Deep Geological Repository Site Characterization

Manho Han^{1)*}, Jeong-Hwan Lee¹⁾, Mijin Kwon¹⁾, Yuhan Kim¹⁾ and Jiho Shin¹⁾

고준위 방사성폐기물을 처분하기 위하여 많은 나라에서 지하 심도 300~500m 깊이의 심층처분시설을 채택하고 있으며, 일부 처분 선도국의 경우 심층처분시설에 대한 건설 인허가를 진행하고 있다. 국내 제2차 고준위방폐물 관리 기본계획(안)에 따라 부지선정 절차를 착수하고 13년 이내에 심층처분시설 부지를 확보하는 것을 목표로 하고 있어, 체계적인 부지조사 항목의 선정과 효율적 활용이 요구된다.

부지선정을 위한 조사 절차는 크게 기본조사, 심층조사의 두 단계로 구분되어 추진될 예정이다. 기본조사 단계에서는 광역 및 지역 규모의 지하수 유동 경로 평가에 집중하여 후보지를 압축하고, 심층조사 단계에서는 이전 단계의 미결 현안 해소와 처분장 건설 예정 영역에 대한 정밀 데이터 확보에 초점을 맞춘다. 부지특성 요건 및 지질환경 평가 사항은 부지확보 정책을 기반으로 단계적·반복적 방법으로 검토된다. 현재 부지특성 평가의 주요 방안으로 다양한 지질조건과 생태 환경을 통합적으로 고려한 3D 부지특성 모델의 완성도를 제고하는 접근법이 널리 활용되고 있다.

심층처분 부지조사의 중요성과 특수성을 고려할 때, 지구물리탐사 기술의 활용성은 매우 높다. 본 연구에서는 심층처분 시설 부지조사에 적합한 지구물리탐사의 적용성을 검토하고, 단계별 수행방안 수립을 위한 연구 현황을 공유하고자 한다.

사 사

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단(iKSNF) 및 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구사업이다(No. RS-2021-KP002658).

*Corresponding Author: mhhan@korad.or.kr

1) 한국원자력환경공단 고준위기술개발원 처분기술팀

Forsmark 사용후핵연료 처분암반에서의 3차원 단열망의 열-역학적 진화 모델링

윤정석^{1,2)*}, Haimeng Shen^{1,3)}, Arno Zang³⁾, Flavio Lanaro⁴⁾

Thermo-mechanical evolution of a 3D DFN at the Forsmark SNF disposal rock mass

Jeoung Seok Yoon^{1,2)*}, Haimeng Shen^{1,3)}, Arno Zang³⁾ and Flavio Lanaro⁴⁾

사용후핵연료 심층지층처분시설의 장기 안전성 평가는 붕괴열에 의해 유도되는 열-역학(thermo-mechanical, TM) 현상과 이러한 현상이 처분암반에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것을 요구한다. 본 연구에서는 최근 건설 허가를 받은 스웨덴 Forsmark 사용후핵연료 최종처분장을 대상으로 처분장 스케일에서 단열의 열적 진화와 이에 따른 변형 거동을 분석하였다(Yoon & Zang 2019). 이를 위해 처분 이후 장기간에 걸친 처분장 암반의 열적 진화와 3차원 단열망의 거동을 분석할 수 있는 3차원 이산요소 기반 수치모델링을 수행하였다. 모델에서는 처분 패널의 위치, 주요 변형대, 그리고 확률적으로 생성된 3차원 단열망을 고려하였다. 다만 패널 내부의 상세한 처분터널 및 처분공 형상은 명시적으로 구현하지 않았으며, 처분심도를 통과하는 단열의 전단 변위를 통해 처분시설 규모에서 발생할 수 있는 단열 변형의 영향을 평가하였다. 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열은 시간 의존적 열발생 함수로 모사하였고, 패널 규모의 열부하 방식을 적용하였다. 분석에서는 동시 가열 시나리오와 순차 가열 시나리오를 비교하였다. 수치 해석 결과, 처분장 암반의 온도와 열 유도 응력의 진화는 처분 및 폐쇄 순서에 영향을 받는 것으로 나타났다. 순차 가열의 경우 동시 가열보다 열 축적이 점진적으로 진행되며 최대 온도도 상대적으로 낮게 나타났다. 단열의 전단 변위는 처분 패널 내부에서 초기 단계에 빠르게 증가하여 약 200년 시점에서 최대값에 도달한 뒤 점차 감소하는 경향을 보였다. 평균 최대 전단 변위는 약 2-3 mm 수준으로 평가되었으며, 패널 외부 단열은 장기간에 걸쳐 점진적인 변형을 보였다. 모든 시뮬레이션 결과에서 전단 변위는 Forsmark 처분장에서 고려되는 처분 용기 손상 기준인 약 50 mm보다 한 자릿수 이상 작은 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 열에 의해 유도되는 단열 전단 변형이 처분시설의 구조적 건전성에 직접적인 영향을 줄 가능성이 낮음을 시사한다. 다만 잔류 전단 변위에 따른 단열 개구 변화는 장기적으로 단열망의 수리적 특성에 영향을 줄 수 있으며, 이는 처분장 장기 거동 평가에서 고려될 필요가 있다.

사 사

본 연구는 SSM (Swedish Radiation Safety Authority)의 지원(과제번호: SSM2014-3668, SSM2020-6880)과 GFZ Helmholtz Center for Geosciences (과제명: ThermoQuakes)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Yoon, J.S., Zang, A., 2019. 3D Thermo-Mechanical Coupled Modelling of Thermo-Seismic Response of a Fractured Rock Mass related to the Final Disposal of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste in Hard Rock. SSM 2019:15, Swedish Radiation Safety Authority.

*Corresponding Author: js.yoon@dynafrax.com

1) DynaFrax UG LTD. 대표

2) 유한회사 다이내프랙스코리아 대표

3) GFZ Helmholtz Centre for Geosciences 연구원

4) Reijers AB Sverige 선임 컨설턴트

방사성폐기물처분장 주변 우라늄 거동 특성평가

한원식^{1)*}, 윤원우¹⁾

Prediction of Uranium Migration near a High-Level Waste Repository

Weon Shik Han^{1)*} and Won Woo Yoon¹⁾

The long-term safety assessment for a high-level waste (HLW) repository necessitates a thorough evaluation of the complex physicochemical phenomena using high-fidelity model. Furthermore, uncertainties in subsurface environment require that complex models be solved repeatedly across a high-dimensional input parameter space, which is computationally expensive. To resolve this problem, this study introduces a computationally efficient surrogate model for uranium transport problem under seawater intrusion utilizing a physics-informed neural network (PINN).

The training dataset was generated using PFLOTRAN, a high-fidelity model configured to simulate key physicochemical processes such as groundwater flow, advection, diffusion, aqueous speciation, adsorption, and kinetic mineral reactions. Within these simulations, five critical input parameters governing uranium migration were systematically varied to create the dataset: fracture permeability, dry density of bentonite, pressure gradient, pyrite volume fraction, and the seawater mixing ratio. Subsequently, the PINN was trained to predict the total mass of uranium in each domain at 10,000 years. A mass balance equation was integrated into the loss function as a physical constraint to enhance the model performance.

Trained PINN achieved a predictive R2 value exceeding 0.985, while accelerating computations by a factor of 107 relative to the original high-fidelity model. Incorporating the physics-based constraint allowed the PINN to surpass a conventional deep neural network in terms of both predictive accuracy and physical laws. The developed surrogate model was then employed to conduct feature importance analyses using permutation feature importance and SHAP values. The results of the feature importance analyses helped to understand the relationships between the input parameters and long-term uranium migration, enabling the identification of the key input parameters. Moreover, the exceptional computational speed of the PINN enables swift exploration of the high-dimensional parameter space, which can be used to identify parameter combinations that meet specific safety standards.

사 사

This research was funded by Nuclear Research and Development project through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT [project number: RS-2021-NR056192]

References

Yoon, W.W., Han, W.S., 2025. Reactive transport modeling under environmental stress near high-level radioactive waste repository. *Journal of Hazardous Materials* 495, 138825.

*Corresponding Author: hanw@yonsei.ac.kr

1) 연세대학교 지구시스템과학과

처분안전성 향상을 위한 공학적방벽 실증시스템 구축 및 연구현황

김진섭^{1)*}, 권장순²⁾

Establishment of Engineered Barrier Demonstration Facility and Current Research Status to Enhance Disposal Safety

Jin-Seop Kim^{1)*} and Jang-Soon Kwon²⁾

한국원자력연구원 공학적방벽시스템 성능실증시험실은 고준위 방사성폐기물 처분기술 개발을 위한 국내 최대 규모의 공학규모 검증시설로서, 실내 기초실험과 지하연구시설(KURT) 현장실험을 연결하는 가교적 역할을 수행하는 것을 주요 목표로 한다. 본 시설은 약 400평 규모로 연구원 내에 구축된 처분연구 전용 실증 인프라이며, 공학적방벽시스템의 성능 검증과 장기 거동 평가를 위한 다양한 실험 모듈과 첨단 장비를 갖추고 있다. 주요 구성으로는 부식모듈, 완충재 모듈, 상호작용(침식·파이핑) 규명 모듈, 가스이동 특성 규명 모듈, 공학적방벽재 양산용 제작모듈, 암석모듈 등이 있으며, 종합 MTS 재료물성 측정장비와 공학규모 CT 장비 등 고가의 첨단 연구장비가 구축되어 있다. 본 시험실은 해외 처분연구 선진국들과의 국제공동연구를 수행하는 핵심 기반으로 활용되고 있으며, 향후에는 국민 수용성 향상과 사용후핵연료 관리 분야 전문 인력 양성을 위한 전초기지로서도 중요한 역할을 담당할 계획이다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단(2021M2E1A1085193, RS-2021-NR056198)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Kim, J.S. et al., Advancements in Long-term Safety Evaluation Technology for Engineered Barrier System (EBS): A Comprehensive Review of Korea's High-Level Waste Disposal R&D Program. *KJCE*, Vol. 42, pp.1301-1316, 2025

*Corresponding Author: kjs@kaeri.re.kr

1) 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 책임연구원

2) 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 부장

심층처분 안전성 확보를 위한 Safety Case의 역할과 과제

박진용¹⁾, 방제현¹⁾, 김정진^{2)*}

The Role and Challenges of Safety Case for Ensuring Safety of Deep Geological Disposal

Jinyong Park¹⁾, Jeheon Bang¹⁾ and Jeongjin Kim^{2)*}

고준위 방사성폐기물 심층처분의 핵심은 처분시설의 장기 안전성을 신뢰성 있게 확보하고 이를 객관적으로 입증하는 것이다. 현재 IAEA 등 국제기구와 처분 선도국들은 단순한 정량적 성능평가를 넘어, 기술적 데이터와 불확실성 관리, 그리고 안전성을 뒷받침하는 다양한 논거를 통합한 Safety Case를 안전성 입증의 핵심 체계로 강조하고 있다. 본 발표에서는 국내 규제 요건에 부합하는 종합안전성 입증 체계로서 Safety Case가 갖는 역할과 그 구성 요소를 고찰한다. 특히 처분시설의 개발 단계별로 반드시 구축되어야 할 Safety Case의 핵심 항목들을 살펴보고, 이를 통해 실질적인 처분 안전성을 확보하고 대국민 신뢰도를 제고할 수 있는 구체적인 방안에 대해 논의하고자 한다.

사 사

본 연구는 정부(원자력안전위원회)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행된 연구사업(RS2021-KN066010)을 통해 이루어졌다.

References

- IAEA, 2012, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- 원자력안전위원회, 2024, 고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준, 제2024-13호.

*Corresponding Author: jinyong@kins.re.kr

1) 한국원자력안전기술원 책임연구원

2) 한국원자력안전기술원 선임연구원

기획세션 |
CCUS

K
S
R
E

저장층 내 CO₂ 주입 시 미세 공극 기하구조가 열역학적 냉각 및 상변화에 미치는 영향

안수정^{1)*}, 소병달²⁾

Pore-Scale Geometric Effects on Thermodynamic Cooling and Phase Change of Injected CO₂

Soojung An^{1)*} and Byung-Dal So²⁾

이산화탄소 지중 저장(CCUS) 과정에서 저압 저장층으로 CO₂를 주입할 때 발생하는 열유체역학적 거동과 상변화는 주입성(injectivity)과 저장 안정성을 결정하는 핵심 요소이다. 주입된 CO₂가 저장층에 유출되는 부분은 압력 차에 의한 확산 효율성을 위해 입구가 좁고 출구가 넓은 노즐(nozzle)모양을 하고 있다. 고속으로 주입된 CO₂는 좁은 노즐 통로에서 속도가 증가하며 기체 압축성에 의해 천공터널(perforated tunnel)로 이어지는 넓은 출구에서 더욱 가속된다. 이 과정에서 단열팽창에 의한 냉각을 겪으며 극저온 환경이 조성되어 초임계상태에서 액화, 기화, 또는 가스하이드레이트 생성이 야기될 수 있다. 그러나 천공 터널 외부의 저장층은 사암 등 다공성 매질로 이루어져 있어 CO₂가 지나는 공간 너비가 좁아진다. 다공성 매질 내부의 복잡한 미세공극(pore throat)을 통과하는 CO₂는 급격한 기하학적 축소로 인해 국소적인 ‘미세 노즐(micro-nozzle)’ 효과를 겪게 된다. 본 연구에서는 단일 성분 다상(single-component multiphase) 격자볼츠만법(lattice Boltzmann method)을 활용하여, 공극 스케일에서 발생하는 CO₂의 팽창 냉각 및 상변화 거동을 3차원으로 수치모사하였다. 특히 계산 효율과 수치적 안정성을 극대화하기 위해 복잡한 다성분 유동 해석 대신, 고체 기질(solid matrix) 표면에 척력 기반의 젖음성 경계조건을 부여하여 염수막(brine film)에 의한 비젖음성(non-wetting) CO₂ 유동을 성공적으로 구현하였다.

본 연구에서는 초임계상태로 노즐을 통과한 CO₂는 미세공극으로 진입할 때 발생하는 유속 증가와 급격한 국소 압력 강하가 단열 팽창에 의한 냉각(Joule-Thomson cooling)을 유발함을 확인하였다. 이러한 국소적 온도 강하는 공극 입구 부근에서 즉각적인 상변화(flushing)를 야기하며, 유동 패턴과 상 분포에 지대한 영향을 미쳤다. 또한 미세공극 기하구조가 유도하는 국소적 열역학 변화를 규명함으로써, 지중 저장층 내 CO₂ 주입 시 발생할 수 있는 주입성 저하 현상을 이해하고 안정적인 저장 전략을 수립하는 데 중요한 수치적 시나리오를 제공한다.

사 사

본 연구는 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00254680).

References

Ding, Hongbing, Yu Zhang, Yuanyuan Dong, Chuang Wen, and Yan Yang. 2023. “High-Pressure Supersonic Carbon Dioxide (CO₂) Separation Benefiting Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) Technology.” *Applied Energy* 339(October 2022): 120975. doi:10.1016/j.apenergy.2023.120975.

*Corresponding Author: ansj0603@kangwon.ac.kr

1) 강원대학교 지구물리학과 박사과정

2) 강원대학교 지구물리학과 교수

입자 군집 최적화 기반 대수층 수소 지중저장 쿠션 가스 운영 전략 및 시추공 위치 최적화

김동희¹⁾, 박은실¹⁾, 장대현¹⁾, 정지혜¹⁾, 김보희¹⁾, 조흥근¹⁾*

Optimization of Cushion Gas Injection Strategy and Well Placement for Underground Hydrogen Storage in Aquifer using Particle Swarm Optimization

Donghee Kim¹⁾, Eunsil Park¹⁾, Daehyeon Jang¹⁾, Jihye Jeong¹⁾, Bohui Kim¹⁾ and Honggeun Jo¹⁾*

전 세계적으로 탄소중립을 위해서 에너지 전환이 가속화됨에 따라 대규모·장주기 에너지 저장이 가능한 수소 지중저장(Underground Hydrogen Storage, UHS)이 주목받고 있다(Heinemann et al., 2021). UHS의 경제성을 확보하기 위해서는 지중에 주입된 수소의 회수율과 생산 수소의 순도를 극대화하는 것이 핵심 과제이다(Ramsari et al., 2025). 본 연구에서는 서해 군산 분지 대수층 모델(Cho et al., 2026)에 UHS 운영 및 저류층 인자에 대한 민감도 분석과 운영 및 시추공 위치 최적화를 수행한다. 기본 운영 시나리오는 저장층에 단일정 조건에서 3년 동안 매년 주입(4개월), 휴지기(1개월), 회수(5개월), 휴지기(2개월)를 반복하고 이후 추가 생산 기간(9개월)을 적용한다. 이 시나리오를 바탕으로 쿠션 가스 주입 기간, 주입량, 종류, 저류층 온도 및 기준 압력, 대수층 염도와 최대 잔류 가스 포화도를 입력 인자로 설정하여 수소 회수율에 대한 민감도 분석을 수행한다. 민감도 분석 이후 쿠션 가스 주입량, 쿠션 가스 주입 기간, 시추공 위치를 설계 변수로 설정하고 수소 회수율과 생산 수소의 순도를 최대화하며 최적화를 수행한다. 본 연구를 통해 대수층 UHS 시스템에서 수소 회수율과 순도 향상을 위한 운영 인자 및 최적 운영 조건을 제시하며, 향후 국내 대규모 수소 지중저장 설계 및 운영 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(RS-2025-14383289, 국문명: 동해대륙붕 세일층 CO₂ 기밀성 및 저장성 나노기술 기반 평가모델 개발)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2025-25436989, RS-2025-24803244).

References

- Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J. M., Hangx, S. J., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, C., ... & Rudloff, A. (2021). Enabling large-scale hydrogen storage in porous media—the scientific challenges. *Energy & environmental science*, 14(2), 853-864.
- Ramsari, M., Jafari, A., Namdar, H., & Khoozan, D. (2025). Evaluating the role of cushion gas in underground hydrogen storage: Impacts of wells and reservoir parameters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 100, 1338-1352.
- Sangin Cho, Hyunmin Kim, Jwagyum Kim, Honggeun Jo, Joongmoo Byun, PYUN SUKJOON and Eunsil Park. (2026). Assessment of Facies and Porosity Uncertainty in a West Sea CO₂ Storage Reservoir Using 3D Seismic-Driven Geostatistical Ensemble Modeling Techniques. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 29(1), 76-86

*Corresponding Author: honggeun.jo@inha.ac.kr

1) 인하대학교 에너지자원공학과

현무암 지대에서의 탄소 광물화 반응 평가 및 석탄재 첨가제 적용 가능성 연구

이준범¹⁾, 배상용²⁾, 정훈영³⁾, 정은혜^{3)*}

Evaluation of Mineral Carbonation Reactions in Basaltic Systems and the Potential Use of Coal Ash as an Additive

Junbeum Lee¹⁾, Sangyong Bae²⁾, Hoonyoung Jeong³⁾ and Eunhyea Chung^{3)*}

이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS)은 CO₂ 농도를 저감하기 위한 핵심 기술 중 하나로 주목받고 있으며, 특히 현무암 지대에서는 탄산염 광물 형성을 통한 장기적인 탄소 고정 가능성이 제시되고 있다(Hellevang et al., 2017). 현무암은 Ca, Mg, Fe 등의 반응성 금속을 다량 포함하고 있어 CO₂와 반응하여 안정한 탄산염 광물을 형성할 수 있는 잠재력을 지닌다. 이러한 특성으로 인해 현무암 지대에서의 탄소 광물화 반응은 CCS 기술의 안정성과 지속성을 확보하기 위한 중요한 연구 분야로 인식되고 있다.

본 연구에서는 현무암 지대에서의 탄소 광물화 반응 특성을 평가하기 위하여 현무암과 탄산염 수용액을 이용한 반응 실험을 수행하였다. 교반 배치 실험을 통해 현무암과 탄산염 수용액의 반응 특성을 확인하였으며, 현무암 단독 조건과 산업 부산물인 비산재가 혼합된 조건을 비교하여 반응 거동을 평가하였다. 실험 결과를 바탕으로 현무암 기반 탄소 광물화 반응의 특성을 평가하였으며, 비산재가 첨가된 조건에서는 반응 환경에 영향을 줄 수 있는 가능성이 확인되었다. 본 연구는 현무암 지대에서의 탄소 광물화 반응을 이해하고, 산업 부산물인 석탄재를 첨가제로 활용할 수 있는 가능성을 평가하기 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

사 사

이 논문은 2023 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00218913).

References

Hellevang, H., Haile, B. G., & Tetteh, A. (2017). Experimental study to better understand factors affecting the CO₂ mineral trapping potential of basalt. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 7(1), 143-157.

*Corresponding Author: echung@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지자원공학과 객원조교수
2) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정
3) 서울대학교 에너지시스템공학부 교수

서포트 벡터머신 기반 이산화탄소 지중저장 안전성 범위 평가

산체스 아이티아나¹⁾, 박은실¹⁾, 조흥근^{1)*}

Defining Environmental Safety Margins in Geological Carbon Storage Projects with Existing Legacy Wells Using Support Vector Machines

Aitiana Sanchez¹⁾, Eunsil Park¹⁾ and Honggeun Jo^{1)*}

In geological carbon storage sites containing existing wells, it is crucial to evaluate in advance the leakage risk arising from impaired well integrity. However, since storage safety is governed by the complex interplay of geological and engineering factors, it remains challenging to translate large-scale simulation results into practical design guidelines. To overcome this challenge, this study develops a machine-learning framework to derive environmental safety margins for geological CO₂ storage in deep saline aquifers containing adjacent wells. A dataset of approximately 7,000 CMG-GEM simulations is generated by varying reservoir, caprock, aquifer, and well integrity parameters, including injector-to-well distance and well damage severity (Moghadam et al., 2023). Storage outcomes are evaluated using an environmental storage integrity metric representing the fraction of injected CO₂ that remains securely trapped in the reservoir. A support vector machine classifier is applied to distinguish environmentally secure and non-secure storage conditions and identify the boundary separating both regimes in the design space. Bootstrap resampling is further used to quantify uncertainty and derive percentile-based safety margins (P10, P50, and P90). The results demonstrate that the proposed approach can transform large simulation datasets into practical and interpretable safety guidelines, supporting rapid screening and risk-informed design of carbon sequestration projects.

사 사

본 연구는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(RS-2025-14383289, 국문명: 동해대륙붕 세일층 CO₂ 기밀성 및 저장성 나노기술 기반 평가모델 개발)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2025-25436989, RS-2025-24803244).

References

Moghadam, A., Peters, E., & Nelskamp, S. (2023). Gas leakage from abandoned wells: A case study for the Groningen field in the Netherlands. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 126, 103906.

*Corresponding Author: honggeun.jo@inha.ac.kr

1) 인하대학교 에너지자원공학과

수치 모사를 통한 단층 회복이 CO₂ 누출에 미치는 영향 평가

장찬희^{1)*}, 소병달²⁾

Numerical Modeling of the Impact of Fault Healing on CO₂ Leakage

Chan-Hee Jang^{1)*} and Byung-Dal So²⁾

이산화탄소 지중 저장(Carbon Capture and Storage; CCS)은 포집된 CO₂를 심부 대염수층이나 고갈 유가스전 등의 지질 구조에 주입하여 장기적으로 안전하게 격리하는 것을 목표로 한다. 성공적인 CCS 운영을 위해서는 주입된 CO₂가 저장층 내에 머물며 인근 지표나 지하수층으로 누출되지 않도록 방지하는 것이 필수적이며, 이를 위해 덮개암의 무결성(caprock integrity)과 저장 시스템 내 단층의 지질역학적 안정성이 결정적인 역할을 한다. 특히 단층은 지질학적 시간 규모에서 유체 흐름을 차단하는 장벽이 되기도 하고, 유체의 수직 이동을 돕는 통로가 되기도 하는 특성을 가진다.

지중 유체 주입 과정에서 발생하는 공극압의 증가는 유효 응력을 감소시킬 수 있으며, 이는 단층의 재활성화(reactivation) 또는 단층 미끌림을 유발할 수 있다. 단층이 재활성화될 경우, 손상대(damage zone)의 균열 확장이나 단층핵(fault core) 투과도의 일시적으로 증가로 인해 덮개암을 관통하는 누출 경로가 형성될 수 있다. 단층이 덮개암 상부에 위치하는 대염수층 등과 수력학적으로 연결된 경우, 상승한 CO₂는 상부 대염수층으로 유입되어 격리 효율을 저하시킬 뿐만 아니라, 지하수 자원 오염 등의 2차 환경 문제를 야기할 수 있다.

그러나 재활성화된 단층의 투수성은 postseismic 및 interseismic 기간 동안 광물 침전(mineral precipitation), 기계적 압밀(mechanical compaction), 압력 용해(pressure solution) 등 역학·수리·화학적 과정의 복잡한 상호작용에 의해 다시 감소할 수 있으며, 이러한 단층 회복(fault healing)은 CO₂ 플룸(plume)의 상승 속도와 도달 범위 등에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수리-역학적 결합(hydro-mechanical coupling) 수치 모사를 통해, 단층 투수성의 시간적 변화와 단층 회복 특성이 CO₂ 누출 거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 또한 단층 회복율(fault healing rate)은 단층의 깊이, 지배적인 회복 메커니즘, 단층대의 물성 등에 따라 달라질 수 있으므로, 다양한 회복 시나리오를 고려하여 수치 모사를 수행함으로써 CO₂ 누출률 및 plume 거동 예측의 정확도를 향상시키고자 한다.

사 사

This work was supported by the Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion(KIMST) (RS-2023-00254680) and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2025-02293161 and RS-2025-25434063).

References

- Yehya, A., and Rice, J.R., 2020. Influence of fluid-assisted healing on fault permeability structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(10), e2020JB020553.
- Mandolini, T., Zega, Z., Rivers, M., and Zhu, W., 2026. Permeability enhancement by slow faulting under high pore fluid pressure. *Geophysical Research Letters*, 53(2), e2025GL119145.

*Corresponding Author: jchee103@kangwon.ac.kr

1) 강원대학교 지구물리학과 박사과정

2) 강원대학교 지구물리학과 교수

응용지질 및 환경지구화학

K
S
R
E

니켈 광산 광미로부터 유용금속 회수를 위한 존재 형태 기반의 DES 선택

주원정¹⁾, 배상용²⁾, 정은혜^{3)*}

Speciation-based Selection of Deep Eutectic Solvents for Valuable Metal Recovery from Nickel Mine Tailings

Won Jung Ju¹⁾, Sangyong Bae²⁾ and Eunhyea Chung^{3)*}

최근 전기차 배터리 산업의 급성장에 따라 니켈(Ni) 수요가 급증하면서, 니켈 광산 개발 및 선광 과정에서 발생하는 폐기물의 효율적 처리와 자원화가 자원순환 측면에서 중요한 과제로 부상하고 있다. Ni 광석은 지질학적으로 구리(Cu), 코발트(Co) 등의 유용금속을 수반하는 경우가 많으며, 이들 금속은 국내 공급망 안정성과 산업적 활용 측면에서 중요성이 높다. 특히 Co는 전략 핵심광물, Cu는 핵심광물로 관리되어(산업통상자원부, 2023), Ni 회수 이후 잔존 광미로부터 Cu와 Co를 추가 회수하는 것은 자원 회수 효율과 경제성을 동시에 제고할 수 있는 유의미한 방안이다. 본 연구에서는 탄자니아산 저품위 Ni 원광을 대상으로 물리화학적·광물학적 특성을 평가하였다. XRF(WD-XRF-1800, Shimadzu) 분석 결과, 시료에는 NiO 11.31% 외에도 CuO 1.20%, Co₂O₃ 0.37%가 함유되어 있는 것으로 확인되었다. 또한 ISO 11466 기준에 따른 왕수 침출 후 ICP-OES(Agilent 5800) 분석 결과, Ni 13,305 mg/L, Cu 1,399 mg/L, Co 395 mg/L가 검출되었다. 아울러 XRD(Rigaku MiniFlex 600) 분석을 통해 Cu는 주로 Chalcopyrite 형태로 존재하는 것으로 나타나, 산 용출보다는 광물학적 존재 형태를 고려한 선택적 침출 전략의 필요성이 제기되었다. 이에 본 연구는 니켈 선광 후 발생한 광미로부터 유용금속을 선택적으로 회수하기 위한 방안으로, 기존의 비선택적 강산 침출 대신 존재 형태(Speciation) 분석에 기반 Deep Eutectic Solvent(DES) 침출 공정을 제안하고자 한다. 구체적으로, 향후 Tessier 연속추출법을 적용하여 Cu와 Co의 존재 형태를 Exchangeable, Bound to Carbonate, Bound to Iron and Manganese Oxides, Bound to Organic Matter, 및 Residual 분획으로 구분하고(Tessier et al., 1979), 각 분획의 화학적 결합 특성과 DES의 proton activity 및 배위 특성을 반영한 조성(HBA:HBD)을 설계함으로써 목적 금속의 선택적 침출 가능성을 평가할 예정이다. 이러한 접근은 Cu와 Co의 선택적 회수를 향상시키고 Fe와 같은 불순물의 동시 침출을 억제하여 후속 정제 공정의 부하를 저감할 수 있을 것으로 기대된다. 결과적으로 본 연구는 니켈 광산 부산물의 물리화학적·광물학적 특성 평가를 바탕으로, 선택적이고 친환경적인 유용금속 회수 공정 개발을 위한 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2025-02634555).

References

Tessier, A.P.G.C., Campbell, P.G. and Bisson, M.J.A.C., 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51(7), 844-851.

산업통상자원부, 2023, *첨단산업 글로벌 강국 도약을 위한 핵심광물 확보전략*, 세종.

*Corresponding Author: echung@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지자원신기술연구소 박사후연구원

2) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정

3) 서울대학교 에너지시스템공학부 교수

제강슬래그-석회석 반응계에서 CO₂ 주입을 이용한 광산배수 망가니즈 제거 특성

이기림¹⁾, 김덕민^{2)*}, 김영민³⁾, 박재현³⁾, 김준경³⁾, 박진혁⁴⁾, 임대규⁵⁾, 김다솜⁶⁾

Characteristics of Manganese Removal from Mine Drainage Using a CO₂-Saturated Steel Slag-Limestone Reactive System

Ki-Rim Lee¹⁾, Duk-Min Kim^{2)*}, Young-Min Kim³⁾, Jae-Hyun Park³⁾, Jun-Kyeong Kim³⁾,
Jin-Hyeok Park⁴⁾, Dae-Gyu Im⁵⁾ and Da-Som Kim⁶⁾

강원 지역 폐광산에서 발생하는 갱내수는 낮은 pH와 높은 독성 금속 농도로 인해 지속적인 수질 관리가 요구된다. 특히 망가니즈(Mn)는 산성 및 약알칼리 조건에서도 제거가 어려워 약품 처리 등 추가적인 처리 공정이 필요하다. 기존의 화학적 처리 방식은 약품 사용과 슬러지 발생량 증가 등의 단점을 가진다. 한편, 제강슬래그 기반 처리 공정은 배출허용기준을 만족시키기 위해 후단에서 pH 재조정을 위한 소택지와 같은 추가적인 처리 공정이 요구된다. 본 연구에서는 이산화탄소(CO₂)를 반응 매개체로 활용하여 탄산계 완충능을 강화하고, 제강슬래그-석회석 반응계를 이용한 망가니즈 제거 공정의 적용 가능성을 평가하였다. 실험에는 (석봉)성봉 SAPS 유출수를 사용하였으며 초기 수질은 pH 2.9, Mn 14.8 mg/L, Al 40.5 mg/L 그리고 Fe 1.4 mg/L로 나타났다. 컬럼 반응기는 제강슬래그와 석회석을 4:6 (v/v) 비율로 충전하여 구성하였고, 체류 시간 및 CO₂ 포화 여부에 따른 처리 특성을 비교하였다. CO₂를 포화시키지 않은 조건에서는 체류시간 13시간에서 pH 7.0, 망가니즈 5.7 mg/L를 나타냈으며, CO₂ 포화 조건에서는 pH가 7.9로 상승하고 망가니즈 농도는 2.0 mg/L까지 감소하여 더 높은 제거 효율을 보였다. 또한 CO₂ 포화 조건에서는 반응 초기 단계에서 알칼리도가 최대 220 mg/L as CaCO₃까지 증가하여 탄산계 완충능이 강화되는 것이 확인되었다. 침전물의 TGA 분석에서는 약 650 °C 부근에서 CaCO₃ 분해에 따른 질량 감소가 확인되어 탄산염 광물 형성이 이루어졌음을 확인하였다. SEM-EDS 분석 결과 슬래그 표면에서 Ca, Mn, C, O 성분이 함께 분포하는 것이 관찰되어 MnCO₃ 및 CaCO₃ 형태의 탄산염 침전이 형성된 것으로 판단된다. 또한 회분식 실험에서도 CO₂ 포화 조건에서 탄산염 형성에 의해 Mn 제거 반응이 촉진되는 경향이 확인되었다. 종합적으로 CO₂ 포화는 슬래그-석회석 반응계에서 탄산계 완충을 강화하여 pH 안정화와 망가니즈 제거 효율을 향상시키는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 제강슬래그-석회석-CO₂ 결합 공정은 폐탄광 수질 개선과 동시에 제철 부산물 재활용 및 이산화탄소 활용을 달성할 수 있는 기술로, 화학약품 사용을 최소화하면서 안정적인 망가니즈 저감이 가능한 폐탄광 맞춤형 처리 공정으로 활용될 가능성을 제시한다.

사 사

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받았으며(No. RS-2025-02310648), 2026년 한국광해광업공단으로부터 연구비를 지원받아 수행된 사업임

References

Kim, D.-M., Oh, Y.-S., Park, H.-S., Kim, D.-K., & Lee, J.-H. (2022). Steel slag-limestone reactor for Mn removal with tolerance to Fe: Experiments and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 107468. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107468>

*Corresponding Author: kdukmin8@sangji.ac.kr

- 1) 상지대학교 에너지자원환경공학과 박사과정
- 2) 상지대학교 건설환경공학과 부교수
- 3) 상지대학교 에너지자원환경공학과 석사과정
- 4) 상지대학교 건설환경공학과 학사과정
- 5) 고려대학교 지구환경과학과 박사과정
- 6) 상지대학교 환경과학기술연구소 간사

단가 양이온 교환막 기반 전기화학적 LMO/AC 시스템의 리튬 선택적 회수 성능 향상

이용우¹⁾, 정은혜^{2)*}

Enhanced Selective Lithium Recovery in an Electrochemical LMO/AC System Using a Monovalent Cation-Exchange Membrane

Yongwoo Lee¹⁾ and Eunhyea Chung^{2)*}

전 세계적 리튬 수요 증가에 따라 사용 후 리튬이온전지 침출수는 높은 리튬 농도를 지닌 유망한 2차 자원으로 주목받고 있다. 그러나 니켈, 코발트, 망간과 같은 다가 양이온의 공존은 전기화학적 회수 과정에서 리튬 선택성을 저해하는 주요 요인이다(Jang et al., 2021). 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 리튬망간산화물(LMO) 전극과 활성탄(AC) 전극으로 구성된 전기화학적 흡착 시스템에 단가 양이온 교환막을 도입하여 리튬 선택적 회수 성능을 향상시키고자 하였다.

실험 결과, 막이 적용된 향상된 시스템은 기존 LMO/AC 시스템 대비 리튬 회수량이 약 3.6배 증가하였고, Li/Ni 선택도는 약 117배 향상되었으며, 에너지 소비는 약 87% 감소하였다. 탈착 전해질 조성에 따른 실험에서는 Ca^{2+} 이온이 Li^+ 이동을 저해하는 반면 탈이온수 조건에서 가장 높은 회수 성능이 나타났다. 작동 전압 증가에 따라 리튬 회수량과 선택성은 향상되었으나 에너지 소비가 증가하였으며, 작동 시간을 연장할 경우 리튬 회수량은 증가하지만 일정 시간 이후 선택성 감소와 에너지 소비 증가가 나타났다. 또한 공급 용액 농도 증가에 따라 리튬 회수량과 에너지 효율이 증가하고 선택도가 감소하는 경향이 확인되었다.

실제 리튬이온전지 침출수를 대상으로 한 실험에서도 향상된 시스템은 기존 시스템 대비 더 높은 리튬 회수량, 선택성 및 리튬 순도를 나타내어 실제 공정 적용 가능성을 확인하였다. 본 연구는 막 기반 전기화학 시스템을 활용한 지속 가능한 리튬 회수 기술 개발에 기여할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2025-02634555).

References

Jang, Y., Hou, C. H., Park, S., Kwon, K., & Chung, E. (2021). Direct electrochemical lithium recovery from acidic lithium-ion battery leachate using intercalation electrodes. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105837.

*Corresponding Author: echung@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지시스템공학부 석박통합과정

2) 서울대학교 에너지시스템공학부 교수

석탄재 침출액에서 희토류 회수를 위한 불순물 금속 제거 및 분리 가능성 평가

이준범¹⁾, 장건희²⁾, 김경민²⁾, 정은혜^{3)*}

Assessment of Impurity Metal Removal and Rare Earth Element Separation from Coal Ash Leachates

Junbeum Lee¹⁾, Geonhee Jang²⁾, Kyeongmin Kim²⁾ and Eunhyea Chung^{3)*}

화력발전소에서 배출되는 석탄재는 다양한 석탄 유래 광물과 미량 금속을 포함하고 있으며, 그 중 희토류 원소(REE)는 전기차, 풍력발전, 전자제품 등 첨단 산업에 필수적인 핵심 원료로서 높은 경제적 가치를 지닌다. 석탄재는 이러한 희토류를 포함하고 있다는 점에서 잠재적인 2차 자원으로 주목받고 있다. 석탄재로부터 희토류를 회수하기 위한 다양한 농축 및 분리 기술이 연구되고 있으며, 물리적 선별 공정은 희토류가 미량으로 분산되어 존재하는 특성으로 인해 적용에 한계가 있는 반면 산을 이용한 습식 침출 공정은 비교적 높은 회수 효율을 나타내는 것으로 보고되고 있다(Fu et al., 2022). 그러나 석탄재에는 Fe, Al, Ca 등 다양한 공존 금속이 함께 침출되기 때문에 침출액 내 불순물 농도가 증가하며, 이는 이후 희토류의 분리 및 정제 공정에서 선택성을 저하시킬 수 있다.

희토류의 효율적인 회수를 위해서는 침출 단계뿐만 아니라 침출액 내 불순물 금속을 효과적으로 제거하고 희토류의 선택적 분리를 가능하게 하는 공정 설계가 중요하다. 본 연구에서는 대한민국 강원도 강릉시의 순환유동층보일러(CFBC)형 화력발전소에서 발생한 두 종류의 석탄재(바닥재 및 비산재)를 대상으로 희토류 및 주요 금속의 거동을 평가하고, 산 침출 과정에서 함께 침출되는 Fe 등 주요 공존 금속을 선택적으로 제거하여 희토류 회수 및 분리 효율을 향상시키는 방법을 검토하였다. 또한 침출액 내 불순물 제거 이후 희토류 원소 간 분리 가능성을 평가하여 석탄재 기반 희토류 회수 공정의 적용 가능성을 분석하고 공정 설계의 기초자료로 활용하고자 한다.

사 사

이 논문은 2023 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00218913).

References

Fu, B., Hower, J. C., Zhang, W., Luo, G., Hu, H., & Yao, H. (2022). A review of rare earth elements and yttrium in coal ash: Content, modes of occurrences, combustion behavior, and extraction methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 88, 100954.

*Corresponding Author: echung@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지자원공학과 객원조교수
2) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정
3) 서울대학교 에너지시스템공학부 교수

광산배수 자연정화시설 유동특성 평가를 위한 방사성동위원소 추적자 이용 연구

정성희^{1)*}, 문진호¹⁾, 박장근¹⁾, 박제현²⁾, 지승은²⁾

Radiotracer Application for Investigation of Flow in a Passive Treatment System of AMD

Sung-Hee Jung^{1)*}, Jinho Moon¹⁾, Janguen Park¹⁾, Jayhyun Park²⁾ and Seung-Eun Ji²⁾

본 연구는 방사성추적자를 이용하여 산성광산배수 처리용 SAPS(Successive Alkalinity Producing System) 자연정화시설 내부의 유동 특성을 규명하였다. 유입부에서 방사성 동위원소를 순간 주입하고, overflow 및 wetland 출구를 포함한 다수 지점에서 방사선 강도를 연속 측정하였다. 방사성추적자 유동분포에 따른 계측변화 데이터를 분석하여 유동경로, 단락 유동, 혼합 특성 및 체재시간분포(RTD)를 평가하였다. 전체 유동은 하부층을 따라 하향 이동하는 지배적 경로와 장기 체류/재순환 성분이 결합된 형태로 해석되었으며, overflow 출구 방향의 빠른 우회 경로가 조기 breakthrough를 유발하는 것으로 나타났다. 또한 구획모델 기반 RTD 해석을 통해 평균체류시간을 정량 산정하고 진단 결과를 뒷받침하였다. 본 방법은 폐광산 자연정화시설의 성능평가 및 공정 최적화를 위한 현장 기초자료를 제공한다. 본 연구는 특정 수질정화시설에 국한한 기술적 결론 자체뿐 아니라, 방사성추적자 기법이 공정 내부에서 유동 경로와 분기 구조, 단락/우회 여부, 체류시간 분포(RTD), 재순환·저류(dead-volume)의 존재 및 규모, 그리고 출구별 분배율을 현장 실측으로 정량화할 수 있음을 보여준 사례이다. 이는 방사성추적자 이용기술이 SAPS와 같은 자연정화시설을 넘어 다양한 산업·환경 공정에서 공정 문제 해결, 처리 효율 진단, 설계 검증 및 개선, 운영 조건 최적화, 공정 규모 확대 및 기존 시설 개보수(성능개선) 타당성 평가 등 폭넓은 목적에 활용될 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구를 계기로 다양한 공정에 대한 맞춤형 방사성추적자 진단 적용이 확대되어, 공정개선 / 효율향상 / 문제원인규명 등에 실질적으로 기여하는 후속 연구개발 논의가 이어지기를 기대한다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단(RS-2024-00458628)의 지원으로 수행되었으며, 국제원자력기구(IAEA) 국제공동연구사업(CRP F22088)과 연계하여 추진되었습니다.

References

- IAEA, 1990. Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry, Technical Report Series No. 316, International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 39-68.
- Kim, H.S., Shin, M.S., Jang, D.S., and Jung, S.H., 2006. In-depth diagnosis of a secondary clarifier by the application of radiotracer technique and numerical modeling, *Water Science & Technology*, 54(8), 83-92.
- Levenspiel, O., Lai, B.W., and Chatlynne, C.Y., 1970. Tracer curves and the residence time distribution, *Chemical Engineering Science*, 25, 1611-1613.

*Corresponding Author: shjung3@kaeri.re.kr

1) 한국원자력연구원 동위원소연구부

2) 한국광해광업공단 기술개발팀

지구물리 및 물리탐사

K
S
R
E

AI 에이전트 기반 GPR 데이터 통합 처리 플랫폼 개발

오종찬¹⁾, 김완준¹⁾, Mrinal Kanti Layek¹⁾, 윤대웅^{1)*}, 이보현²⁾

Development of an AI Agent-Based Integrated Platform for GPR Data Processing

Jongchan Oh¹⁾, Wanjoon Kim¹⁾, Mrinal Kanti Layek¹⁾, Daeung Yoon^{1)*} and Bohyun Lee²⁾

지표투과레이더(GPR)는 비파괴 지반조사에서 핵심적인 역할을 하지만, 취득된 원시 데이터로부터 유의미한 결과를 도출하기까지 신호처리, 3D 볼륨 구축, 이상체 탐지, 보고서 작성 등 다수의 전문적 단계를 거쳐야 한다. 각 단계는 상이한 소프트웨어와 숙련된 해석 경험을 요구하며, 처리 파라미터의 선정은 대부분 작업자의 주관적 판단에 의존하고 있어 결과의 재현성 및 일관성 확보에 한계가 있다. 본 연구에서는 GPR 데이터의 취득 후 전 과정을 단일 환경에서 수행할 수 있는 통합 플랫폼을 개발하였다.

제안된 플랫폼은 네 가지 핵심 모듈로 구성된다. 첫째, 22종 이상의 신호처리 알고리즘(Dewow, 대역통과 필터, AGC, 배경 제거 등)과 Optuna TPE 기반 베이지안 최적화를 결합하여, 원시 데이터의 주파수 특성과 노이즈 수준을 자동 분석한 후 최적 처리 파라미터를 탐색한다. 둘째, 다중 채널·다중 스와스 데이터를 병렬 로딩하고 영점 시간 보정 및 균일 리샘플링을 거쳐 HDF5 기반 3D 볼륨으로 구축하며, 인터랙티브 단면 뷰어(XZ/XY/YZ)와 지리정보 연동 지도를 통해 실시간 시각화를 지원한다. 셋째, YOLO 기반 다중 모델 탐지 엔진을 통해 공동, 관로, 기타 지하 이상체를 자동 식별하고, 휴리스틱 분류 엔진과 결합하여 탐지 결과의 신뢰도를 향상시킨다. 넷째, 대규모 언어모델(LLM)과 RAG(Retrieval-Augmented Generation)를 활용한 AI 에이전트 시스템이 80종 이상의 내장 도구를 자율적으로 호출하며, 사용자와의 대화를 통해 처리 계획 수립, 단계별 실행, 결과 해석, 보고서 생성까지 전 워크플로우를 자연어 기반으로 수행한다. 특히 RAG 시스템은 GPR 관련 문헌과 프로젝트 이력을 벡터 데이터베이스에 색인하여, 에이전트가 도메인 전문 지식에 근거한 판단을 내릴 수 있도록 지원한다.

본 플랫폼은 PySide6 기반 데스크탑 애플리케이션으로 구현되었으며, 다중 축선 일괄 처리, 단계별 미니 보고서 자동 생성, 다중 LLM 제공자 간 장애 전환 등 현장 적용성을 고려한 기능을 포함한다. 향후 실측 데이터를 활용한 탐지 정확도 정량 평가 및 현장 운용 검증을 통해 GPR 기반 지반조사의 자동화 및 표준화에 기여할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국농어촌공사농어촌연구원에서 수행한 “딥러닝을 이용한 GPR 탐사자료 분석 용역”(2025-1436-01) 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author: duyoon@jnu.ac.kr

1) 전남대학교 에너지자원공학과 교수

2) 한국농어촌공사 농어촌공사연구원

연구자-AI 상호 강화학습 기반 자원공학 전문인력 양성 플랫폼 개발

오주원^{1)*}

Developing an Expert Training Platform for Resource Engineering Based on Researcher-AI Co-Reinforcement Learning

Ju-Won Oh^{1)*}

인공지능 기술의 급속한 발전과 함께 고등교육 및 연구 분야에서도 AI를 활용한 학습 지원 도구들이 활발히 도입되고 있다. 그러나 대부분의 시도는 범용 AI 도구를 교육 현장에 단순 적용하는 수준에 머물러 있으며, 특정 학문 분야의 연구 방법론과 전문 지식을 AI 모델 자체에 내재화하여 교육과 연구 역량 강화를 동시에 추구하는 통합적 접근은 아직 시도된 바가 드물다. 특히 지구물리탐사·자원공학과 같이 고도의 수치 시뮬레이션 능력과 방대한 도메인 지식을 동시에 요구하는 분야에서는, AI 도구가 실질적인 교육 효과를 내기 위해 해당 분야에 특화된 학습과 훈련이 필수적이다. 이 과정에서 분야 전문가의 경험과 판단을 AI 모델에 효과적으로 전달하는 방법론, 그리고 그렇게 훈련된 AI가 다시 후속 연구자의 성장을 지원하는 순환 구조를 어떻게 구현할 것인가가 핵심 과제로 부각된다.

본 발표에서는 지구물리탐사 분야 전문인력 양성을 위한 인간-AI 상호 강화학습 플랫폼의 설계 개념과 구현 현황을 소개한다. 본 플랫폼은 두 가지 상호 보완적 메커니즘을 결합한다. 첫째, 전문 연구자의 문제 해결 과정과 경험 지식을 체계적으로 수집하여 도메인 특화 AI 모델을 지속적으로 파인튜닝함으로써, AI의 지구물리탐사 전문성을 축적한다. 둘째, 이렇게 훈련된 AI 에이전트가 학습자와 상호작용하는 과정 자체를 강화학습의 피드백 루프로 활용하여, AI와 연구자가 함께 성장하는 공진화 구조를 지향한다. 전문가의 경험이 AI를 훈련하고, 훈련된 AI가 다시 다음 세대 연구자를 양성하는 이 순환 구조는 지구물리탐사 분야의 지식 전승과 인재 육성 방식을 근본적으로 변화시킬 수 있는 가능성을 가지고 있으며, 본 발표에서는 현재 구현 성과와 남은 도전 과제들을 공유하고자 한다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 디지털분야글로벌연구지원의 연구결과로 수행되었습니다 (Task No. RS-2024-00431580). 또한, 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었습니다(No. RS-2024-00410397).

*Corresponding Author: juwon24@jbnu.ac.kr

1) 전북대학교 토목/환경/자원·에너지공학부(자원·에너지공학) 부교수

2D/3D 점탄성 Q-보정 역시간 구조보정 기법을 이용한 소규모 은폐 땅굴 탐지 성능 향상

성하경¹⁾, 조용채^{2)*}

2D/3D Q-compensated Viscoacoustic Reverse Time Migration for Enhanced Detection of Small-scale Clandestine Tunnels

HaKyeong Seong¹⁾ and YongChae Cho^{2)*}

국가 접경지역의 보안 확보를 위한 지표 탄성과 탐사에서 소규모 은닉 땅굴의 탐지는 중요한 과제이다. 그러나 불균질한 상부 지층과 매질의 강한 감쇠 특성은 고주파 성분의 손실과 위상 왜곡을 유발하며, 이는 기존 역시간 구조보정(RTM) 영상에서 소규모 목표체의 해상도 저하와 신호 약화를 초래하는 주요 원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 물리적 한계를 극복하기 위하여 GSL(Generalized Standard Linear Solid) 감쇠 모델을 이용한 분산과 소산 효과 분리형 점탄성 파동방정식(decoupled viscoacoustic wave equation)에 기반한 Q-보정 역시간 구조보정(Q-compensated RTM) 기법을 제안하고 그 효용성을 분석하였다. 특히 지하의 정밀한 Q 분포를 획득하기 어려운 실제 탐사 환경을 고려하여, 상세한 지층 정보 없이 거시적인 배경 감쇠 경향성(background Q-trend)만을 반영한 경우에도 안정적인 Q-보정 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다. 2차원 및 3차원 수치 시뮬레이션 결과, 제안된 기법은 Q 모델의 국부적 정확도에 크게 의존하지 않고도 감쇠로 인해 약화된 고주파 성분을 효과적으로 복원하고 위상 왜곡을 보정함으로써 기존 비보정 RTM 대비 향상된 탐지 성능을 보였다. 특히 목표 이상체의 반사 신호 복원 및 강화로 인해 영상 대비가 개선되었으며, 그 결과 영상의 신호대잡음비(SNR) 또한 향상되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 매질 정보가 제한적인 접경지역의 광역 탐사 환경에서도 본 기법이 실용적인 땅굴 탐지 방법으로 활용될 수 있음을 시사한다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국지질자원연구원(KIGAM) 기본연구사업(GP2025-021)의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2022400000120).

References

Mao, Q., J. Huang, and Y. Shen, 2025, Efficient Q-compensated reverse time migration using a new decoupled viscoacoustic wave equation based on the generalized standard linear solid: *Geophysics*, 90, no. 5, S145, <https://doi.org/10.1190/geo-2024-0767.1>.

1) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정

2) 서울대학교 에너지시스템공학부 조교수

고온 퇴적 대수층의 지열 저류층 평가를 위한 유망성 지수 개발

김좌겸¹⁾, 이시규^{1,2)}, 이재욱³⁾, 변중무^{1)*}

Development of a Prospectivity Index for Geothermal Reservoir Assessment in Hot Sedimentary Aquifers

Jwagyum Kim¹⁾, Sigue Lee^{1,2)}, Jaewook Lee³⁾ and Joongmoo Byun^{1)*}

이 연구는 고온 퇴적 대수층(Hot Sedimentary Aquifers, HSA)에서 지열 발전을 수행하기 위한 종합적인 저류층 평가 공정을 구축하고, 핵심 평가 도구로서 새로운 정량적 지표인 '유망성 지수(Prospectivity Index)'를 제안한다. 심부 퇴적 분지에 광범위하게 분포하는 HSA가 상업적 타당성을 확보하기 위해서는 경제적인 열 추출을 뒷받침할 수 있는 충분한 온도와 높은 투과도가 필수적이다(Bearmore, 2024). 연구 지역인 남호주(South Australia)의 쿠퍼 분지(Cooper Basin)는 하부 화강암의 높은 방사성 발열량 덕분에 열적 조건은 우수하지만, 공극 내 점토 및 실리카 교결물 침전 등 복잡한 속성작용으로 인해 투과도의 공간적 불확실성이 매우 높다(IMER, 2014).

이러한 한계를 극복하기 위해, 이 연구에서는 3차원 탄성과 역산 및 지구통계학적 암석물리 모델링을 활용하여 유망성 지수를 산출하였다. 이 지수는 도출된 공극률과 셰일 부피의 함수로 정의되며, 높은 공극률과 낮은 셰일 함량 조건에서 높은 값을 가지도록 설계되어 투과도 잠재력을 간접적이고 효과적으로 대변한다. 최종적으로, 이 유망성 지수를 저류층의 온도 지도 및 지질구조 해석 자료와 통합 분석하는 종합적인 저류층 평가 공정을 수립하였다. 쿠퍼 분지의 3차원 탄성과 자료에 이 평가 공정을 적용한 결과, 높은 투과도가 예상되는 구간을 3차원적으로 식별하고 최적의 지열 발전 유망 지역을 공간적으로 명확하게 도출할 수 있었다.

사 사

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2025-16063339). 본 연구에 사용된 2D/3D 탄성과 데이터는 호주 남호주 주 정부(Government of South Australia)에서 제공한 Cooper Basin 2Dcubed Reprocessing 데이터셋을 활용하였습니다. 그리고 HampsonRussell (HRS) 소프트웨어와 Petrel 소프트웨어의 학술용 버전 라이선스를 제공해주신 GeoSoftware와 SLB에 감사의 인사를 전합니다.

References

- Bearmore, G. R., 2024 A review of hot sedimentary aquifer geothermal resources in Australia, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 68(3), 378-398
- Institute for Mineral and Energy Resources (IMER), Program 3 - reservoir quality in sedimentary geothermal resources. Technical report, South Australian Centre for Geothermal Energy Research, University of Adelaide, 2014, Australian Renewable Energy Agency (ARENA).

*Corresponding Author: jbyun@hanyang.ac.kr

1) 한양대학교 자원환경공학과

2) SLB

3) The University of Texas Permian Basin

회전 스테거드 격자 선형 슬립 모델을 이용한 탄성 RTM 기반 균열대 4D 모니터링

김동호¹⁾, 최승훈²⁾, 조용채^{3)*}

4D Monitoring of Fracture Networks using Elastic RTM with a Rotated Staggered-Grid Linear Slip Model

Dongho Kim¹⁾, Seunghun Choi²⁾ and Yongchae Cho^{3)*}

균열(fracture)은 유체 이동과 투과도 변화를 지배하는 주요 지질 구조로, 셰일층 수압파쇄, 이산화탄소 지중 저장, 고준위 방사성폐기물 처분과 같은 지하 공학 환경에서 생산 효율과 저장 안정성을 결정하는 핵심 요소이다. 기존 연구에서는 균열이 격자에서 차지하는 비율인 L parameter로 유도한 linear slip 이론 기반 stiffness matrix로 경사진 균열을 구현하였으나, 균열의 경사를 명시적으로 반영하지 못하며, 특히 수직 균열에 적용할 수 없는 한계점이 존재한다.

본 연구에서는 균열의 기하적 경사 θ parameter로 유도한 stiffness matrix를 제안한다. Elastic wave equation matrix, θ 기반 linear slip matrix 및 좌표 변환 matrix로 행렬 연산하고 rotated staggered-grid를 사용하여 탄성과 전파를 보다 정확하게 모델링하였다. 제안한 matrix를 이용해 forward/backward propagation으로 얻은 파동장을 divergence와 curl로 P파와 S파로 분리한 뒤 cross-correlation을 수행하여 P-P, P-S, S-P, S-S 총 4개의 elastic RTM 이미지를 획득하였다.

테스트를 위해 2차원 Marmousi model을 사용하여 균열이 없는 baseline과 특정 2개의 layer에 경사진 균열대가 존재하는 monitor를 설정하였다. 각 case에서 elastic RTM을 수행하고 9개의 multishot 이미지를 stack하여 뺀 결과, 4가지 이미지에서 모두 뚜렷한 균열대 이미지를 얻을 수 있었다. 본 연구는 경사진 균열 영상화 연구를 위한 개선된 matrix를 제시하며, 이를 기반으로 elastic RTM을 이용한 균열 모니터링이 가능함을 보여준다. 나아가 향후 3차원 θ parameter 기반 stiffness matrix로의 확장 가능성도 기대된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국지질자원연구원(KIGAM) 기본연구사업(GP2025-021)의 일환으로 수행되었습니다.

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20224000000120).

References

- Coates, R.T. and Schoenberg, M., 1995. Finite-difference modeling of faults and fractures. *Geophysics*, 60, 1514–1526.
- Wang, K., Peng, S., Lu, Y. and Cui, X., 2022b. Wavefield simulation of fractured porous media and propagation characteristics analysis. *Geophysical Prospecting*, 70, 886–903.
- Wang, K., Lu, R., Xu, Z. and Yang, J., 2025. Reverse time migration and least squares reverse time migration imaging of linear slip fault media. *Acta Geophysica*, 73(5), 3889–3907.

*Corresponding Author: yc.cho@snu.ac.kr

- 1) 서울대학교 에너지자원공학과 학사과정
- 2) 서울대학교 에너지자원신기술연구소 연구원
- 3) 서울대학교 에너지시스템공학부 조교수

전파형 역산 영상화를 통한 캐나다 보퍼트해 탄성파 자료 해석

한승훈¹⁾, 강승구²⁾, 전형구³⁾, 조용채^{4)*}

Full Waveform Inversion Imaging and Interpretation of Seismic Data from the Beaufort Sea, Canada

Seunghoon Han¹⁾, Seung-Goo Kang²⁾, Hyunggu Jun³⁾ and Yongchae Cho^{4)*}

전파형 역산 영상화(Full-waveform inversion imaging; FWI-imaging)은 전파형 역산을 기반으로 하는 영상화 기법 중 하나이다. 전파형 역산 결과를 활용하여, 역산 과정 중 직접적으로 지하 구조 영상이나 반사 계수를 나타냄으로써 효과적인 구조 정보를 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 전처리-속도 모델 구축-구조보정으로 이어지는 시간 소모적인 영상화 과정을 생략할 수 있어 역산 알고리즘의 발전과 함께 각광받고 있는 기법이다. 특히 전파형 역산을 통해 다중반사파의 영향을 효과적으로 억제할 수 있다는 점에서 다중반사파 제거 전처리가 필요한 자료에 전처리 없이 영상화가 가능하다는 점은 기존 해수면 기인 다중반사파 제거(Surface-related multiples elimination; SRME) 등의 기법 대비 큰 장점을 가진다.

본 연구에서는 캐나다 보퍼트해 대륙붕 지역에서 취득한 2차원 해양 인공지진파 탐사 자료에 전파형 역산 영상화를 적용하여 대륙붕 하부에 존재하는 영구동토층의 분포를 파악하고자 하였다. 해당 자료는 얇은 수심으로 인해 강한 다중반사파가 반복되어 기록되며, 영구동토층으로 인해 내부 다중반사파(Internal multiples) 역시 강하게 나타난다. 이러한 점에서, 전파형 역산을 통해 다중반사파의 영향을 억제하고 대륙붕 하부의 속도분포 추정을 통한 영상화를 통해 영구동토층 해석에 필요한 초석을 제공하고자 하였다.

분석 결과 다중반사파에 의한 반복되는 해저면이 전파형 역산을 진행함에 따라 점진적으로 감쇠되는 것을 확인하였으며, 영상화 결과를 통해 영구동토층의 하부로 추정되는 강한 반사면이 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 관측 자료와 모델링 자료의 비교, 역시간 구조보정을 통한 교차검증을 통해 전파형 역산 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

사 사

이 연구는 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 : KIMST RS-2021-KS211512). 본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국지질자원연구원(KIGAM) 기본연구사업(GP2025-021)의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20224000000120).

References

- Verschuur, D. J., Berkhout, A. J., & Wapenaar, C. P. A., 1992. Adaptive surface-related multiple elimination. *Geophysics*, 57(9), 1166-1177.
- Kang, S. G., Jin, Y. K., Jang, U., Duchesne, M. J., Shin, C., Kim, S., ... & Hong, J. K., 2021. Imaging the P-wave velocity structure of arctic subsea permafrost using laplace-domain full-waveform inversion. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(3), e2020JF005941.
- Kim, S., Kang, S. G., Choi, Y., Hong, J. K., & Kwak, J., 2024. Seismic imaging of the arctic subsea permafrost using a least-squares reverse time migration method. *Remote Sensing*, 16(18), 3425.
- Zhang, Z., Wu, Z., Wei, Z., Mei, J., Huang, R. and Wang, P., 2020, October. FWI Imaging: Full-wavefield imaging through full-waveform inversion. In SEG International Exposition and Annual Meeting (p. D031S027R004). SEG.

*Corresponding Author: yc.cho@snu.ac.kr

- 1) 서울대학교 에너지시스템공학부
- 2) 극지연구소 빙하지권연구본부
- 3) 경북대학교 지구시스템과학부
- 4) 서울대학교 에너지자원공학과 교수

탄성과 단층 해석의 불확실성 정량화를 위한 몬테 카를로 드롭아웃과 확산 모델 기반 방법의 비교

고재혁¹⁾, 최병훈^{2,3)}, 조상인²⁾, 편석준^{4)*}

Comparison of Monte Carlo Dropout and Diffusion-based Approaches for Uncertainty Quantification in Seismic Fault Detection

Jaehyeok Ko¹⁾, Byunghoon Choi^{2,3)}, Sangin Cho²⁾ and Sukjoon Pyun^{4)*}

탄성과 자료에서 단층 해석은 지하 구조를 이해하기 위한 핵심 과정이며 최근 기존의 한계를 극복하기 위해 해석 과정을 자동화하고 객관성을 확보할 수 있는 딥러닝 기반 단층 해석 기법이 널리 활용되고 있다. 일반적인 딥러닝 기반 단층 분할 모델에서는 sigmoid 활성화 함수를 이용하여 각 위치에서 단층 존재 확률을 산출하지만, 이러한 값은 분류 결과에 대한 모델의 confidence를 나타낼 뿐 동일한 자료로부터 해석 가능한 다양한 결과의 변동성이나 예측 결과 분포에서 나타나는 불확실성을 직접적으로 표현하지는 못한다.

딥러닝 기반 단층 해석에서 예측 결과의 불확실성을 정량화하기 위한 방법으로 Monte Carlo (MC) dropout 기반 접근이 제안된 바 있다(Feng et al., 2021). MC dropout은 추론 단계에서도 dropout을 유지한 상태로 모델을 반복 실행하여 다수의 예측 결과를 생성하고, 그 분산을 계산하여 예측 결과의 변동성을 추정하는 방법이다. 한편, Diffusion model (Ho et al., 2020)은 데이터 분포를 학습하는 확률적 생성 모델로서 동일한 입력 자료에 대해 다양한 결과를 생성할 수 있다. 이를 활용하면 탄성과 자료로부터 여러 단층 해석 시나리오를 생성할 수 있으며, 생성된 결과들의 평균과 분산을 통해 대표 해석 결과와 예측 결과의 변동성을 분석할 수 있다.

본 연구에서는 MC dropout 기반 접근과 Diffusion 기반 방법을 적용하여 두 방법에서 나타나는 예측 결과의 변동성과 불확실성의 공간적 특성을 비교한다. MC dropout이 모델 파라미터의 확률적 변동을 근사하여 예측 결과의 분산을 추정하는 방식이라면, Diffusion 접근은 학습된 데이터 분포로부터 여러 해석 결과를 직접 생성함으로써 가능한 해석 결과의 분포를 표현할 수 있다. 이러한 비교를 통해 딥러닝 기반 탄성과 단층 해석에서 나타나는 예측 결과의 변동성과 해석 불확실성의 특성을 분석하고, 자동 단층 해석 결과의 신뢰도 평가에 활용 가능한 불확실성 분석 방법의 특성을 논의하고자 한다.

사 사

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 사용후핵연료 관리핵심기술개발사업단 및 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구사업이다(No. RS-2021-KP002658).

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-24523155).

References

- Feng, R., Grana, D. and Balling, N., 2021. Uncertainty quantification in fault detection using convolutional neural networks. *Geophysics*, 86(3), M41-M48.
- Ho, J., Jain, A. and Abbeel, P., 2020. Denoising diffusion probabilistic models. *34th Conference on Neural Information Processing Systems*, 33, 6840-6851.

*Corresponding Author: pyunsj@inha.ac.kr

- 1) 인하대학교 에너지자원공학과 석사과정
- 2) 인하대학교 에너지자원공학과 박사과정
- 3) ㈜지오메카이엔지
- 4) 인하대학교 에너지자원공학과 교수

헬름홀츠 분해 기반 하향 연속된 탄성과 파동장의 P/S파 분리

홍희주¹⁾, 최승훈²⁾, 조용채^{3)*}

P/S-wave Separation from Downward-Continued Elastic Wavefields Using Helmholtz Decomposition

Heeju Hong¹⁾, Seunghun Choi²⁾ and Yongchae Cho^{3)*}

탄성과 탐사에서 P파와 S파의 정밀한 분리는 지하 구조의 특성 파악 및 유체 부존 여부 해석의 정확도를 결정짓는 핵심적인 공정이다. 본 연구에서는 하향 연속(Downward continuation)된 탄성과 파동장에 헬름홀츠 분해(Helmholtz decomposition)를 적용하여, 지표면에서의 탄성과 기록으로부터 P파와 S파 성분을 효과적으로 분리하는 수치적 방법론을 제안한다. 이를 위해 CFS-PML(Complex Frequency-Shifted Perfectly Matched Layer) 경계 조건을 적용한 2차원 유한차분 기반 탄성과 모델링을 수행하여 정밀한 변위 데이터를 취득하였으며, 수신기에서 기록된 지표 변위 기록을 역시간 방향으로 하향 연속시켜 매질 내부의 파동장을 복원하였다.

복원된 파동장에 대해 벡터 미분 연산인 발산(Divergence)과 회전(Curl)을 적용하여 각각의 P파와 S파 성분을 추출한 결과, 제안된 기법은 파동 간섭이 심한 영역에서도 두 성분을 명확히 분리해내는 성능을 보였다. 특히 하향 연속 과정에서의 수치적 불안정성을 제어하여 분리된 파동의 해상도를 확보하였으며, 이렇게 분리된 개별 파동 데이터를 탄성과 이미징 공정에 활용함으로써 기존 기법 대비 현저히 높은 해상도의 지하 구조 이미지를 취득할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국지질자원연구원(KIGAM) 기본연구사업(GP2025-021)의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2022400000120).

References

- Hendrick, N. and Brand, E., 2004. Practical evaluation of P- and S-wave separation via elastic wavefield decomposition. *Geophysics*, 69(5), 1191-1201.
- Li, Z., Gu, B., Ma, X. and Liang, G., 2015. Separating P- and S-waves in prestack elastic seismograms using the equivalent form of elastic wave equation. *Journal of Applied Geophysics*, 112, 70-78.
- Sun, R., 1999. Separating P- and S-waves in a prestack 2-dimensional elastic seismogram. Expanded Abstracts, 61st EAGE Conference and Technical Exhibition.

*Corresponding Author: yc.cho@snu.ac.kr

- 1) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정
- 2) 서울대학교 에너지자원신기술연구소 연구원
- 3) 서울대학교 에너지시스템공학부 조교수

자원활용소재

K
S
RME

황산염 배소 NCM 양극재 침출에 미치는 탄소 첨가의 영향

임동연¹⁾, 유경근^{1)*}

Effects of Carbon Addition on the Leaching of Sulfate-Roasted NCM Cathodes

Dongyeon Lim¹⁾ and Kyoungkeun Yoo^{1)*}

리튬이온전지 재활용 공정에서 리튬의 선택적 회수는 공정 효율 및 경제성 확보를 위해 매우 중요하다. 기존 공정에서는 황산(H_2SO_4)과 과산화수소(H_2O_2)를 이용한 침출이 주로 활용되고 있으나 환원제 대체 및 공정 내 부산물의 재활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 배터리 재활용 과정에서 다량 발생하는 황산소듐(Na_2SO_4)을 황산염 배소 공정에 재활용하여 리튬을 선택적으로 회수하는 기술이 주목받고 있다. 이에 본 연구에서는 사용 전 NCM 811 양극재에 Na_2SO_4 와 탄소(흑연)를 첨가하여 황산염 배소를 수행하고 수침출 과정에서 리튬 침출 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

배소 실험은 Muffle Furnace에서 수행되었으며 Na_2SO_4 당량, 배소 온도, 흑연 투입량을 변수로 설정하였다. 배소 후 수침출을 진행하여 ICP-OES로 금속 침출률을 분석하였고 배소 산물 및 침출 잔사는 XRD를 통해 상 분석을 수행하였다.

연구 결과 Na_2SO_4 와 흑연을 동시에 첨가한 조건에서 리튬 침출률이 가장 높게 나타났다. 특히 Na_2SO_4 6당량, 흑연 1g, 800°C 배소 조건에서 최대 96.04%의 리튬 침출률을 달성하였다. 대부분의 리튬은 침출 15분 이내에 침출되었으며 니켈, 코발트, 망간은 침출되지 않아 리튬의 선택적 회수가 가능함을 확인하였다. XRD 분석 결과 배소 과정에서 리튬은 수용성 화합물인 $LiNaSO_4$ 및 Li_2CO_3 형태로 전환되었으며 흑연은 배소 중 환원제로 작용하여 이러한 상 전환을 촉진하는 것으로 판단된다. 그러나 흑연을 1g 이상 투입할 경우 리튬 침출률이 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 과도한 탄소가 Na_2SO_4 와 리튬의 접촉을 방해하고 용해도가 낮은 Li_2CO_3 의 생성 비율을 증가시켰기 때문으로 판단된다. 또한 수침출 후 잔사를 $Ca(OH)_2$ 용액으로 재침출한 결과 흑연 투입량이 증가할수록 리튬 침출률이 증가하는 경향을 보였다. 이는 배소 단계에서 생성되어 수침출에 용해되지 않고 잔류한 Li_2CO_3 가 $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 추가적으로 용출되었기 때문으로 판단된다. 이는 리튬 침출률 저하의 원인 중 하나로 판단되나 주된 메커니즘 규명을 위해서는 추가적인 분석이 필요하다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요 사업의 지원으로 수행되었습니다. 지원해주신 관계자분 들게 감사드립니다.

*Corresponding Author: kyoo@kmou.ac.kr

1) 국립한국해양대학교 에너지자원공학과

메탄설폰산(MSA)를 이용한 폐촉매로부터 백금족 원소의 선택적 회수 연구

김승현¹⁾, Trinh Bich Ha²⁾, 송준근³⁾, 구윤호⁴⁾, 이재령^{4)*}

Selective Recovery of Platinum Group Metals from Spent Catalysts Using Methanesulfonic Acid

Seunghyun Kim¹⁾, Trinh Bich Ha²⁾, Junkun Song³⁾, Yunho Ku⁴⁾ and Jaeryeong Lee^{4)*}

폐촉매(spent catalysts)는 백금족 금속(Platinum Group Metals, PGM; Pt, Pd, Rh 등)을 함유한 대표적인 2차 자원으로, 자원 고갈 문제와 귀금속 가격 상승에 따라 효율적인 회수 기술의 중요성이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 자동차 배기가스 정화 촉매와 같은 폐촉매에는 높은 경제적 가치를 지닌 백금족 금속이 포함되어 있어 이를 안정적이고 효율적으로 회수하기 위한 습식제련 공정 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 비교적 환경친화적이며 안정성이 높은 메탄설폰산(methanesulfonic acid, MSA)을 침출제로 사용하여 폐촉매로부터 백금족 금속의 선택적 회수 가능성을 평가하고자 하였다.

실험에서는 MSA 농도, 염화이온 농도 및 산화제 농도가 백금족 금속의 침출 거동에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다. 이를 위해 MSA 농도는 1-5 M 범위로 설정하였으며, 염화이온 공급을 위해 NaCl을 첨가하여 농도를 0.5-2.5 M 범위에서 조절하였다. 염화이온은 백금족 금속이 안정한 염화 착이온 형태로 용액 내 존재하도록 유도하여 침출 반응을 촉진하는 역할을 한다. 또한 백금족 금속의 산화를 촉진하기 위해 산화제로 H₂O₂와 NaClO₃를 사용하였으며, 산화제 농도는 0-5% 범위에서 변화시켜 그 영향을 비교하였다. 모든 침출 실험은 고액비 1%(1 g/100 mL) 조건에서 수행되었으며, 각 실험 조건에서 침출 용액을 분석하여 백금족 금속의 침출율을 평가하였다.

실험 결과, MSA 농도와 염화이온 농도, 그리고 산화제 농도가 백금족 금속의 침출율에 중요한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 특히 MSA 농도 3 M, NaCl 농도 1.5 M, 산화제 농도 5% 조건에서 약 97%의 백금 침출율을 확인하였다. 이러한 결과는 적절한 염화이온 공급과 산화 환경 조성이 백금의 용해 및 안정한 착이온 형성에 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다.

따라서 본 연구에서 제시된 MSA 기반 침출 공정은 폐촉매로부터 백금족 금속을 효율적으로 회수할 수 있는 유망한 습식제련 기술로 활용될 수 있으며, 향후 백금족 금속의 선택적 분리 및 정제 공정과 연계된 공정 개발을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20229A10100070).

*Corresponding Author: jr-lee@kangwon.ac.kr

- 1) 강원대학교 에너지·인프라융합학과 박사과정 대학원생
- 2) 강원대학교 지구자원연구소
- 3) 강원대학교 에너지인프라융합협동과정 석사과정
- 4) 강원대학교 에너지자원공학과

알칼리 용융된 이리듐 스크랩으로부터 메탄술폰산을 이용한 이리듐 침출 연구

김혜인¹⁾, 안준모^{1)*}

Leaching of Iridium from Alkali-fused Iridium Scrap Using Methanesulfonic Acid

Hyein Kim¹⁾ and Jumno Ahn^{1)*}

이리듐(Iridium, Ir)은 백금족 원소 중 하나로 우수한 내식성, 내열성의 특성이 있어 첨단 산업에서 주로 이용되고 있다. 특히 이리듐은 PEM 수전해 장치의 핵심 촉매 소재로, 그린수소 생산 확대와 함께 수요 증가가 예상된다. 그러나 이리듐은 전 세계 매장량이 매우 제한적이며, 생산의 약 91%가 남아프리카공화국에 편중되어 있어 공급망 리스크가 존재한다. 따라서, 안정적인 자원 확보를 위해 2차 자원으로부터 이리듐을 회수하는 재활용 기술의 개발이 필수적이다. 한편, 이리듐을 포함한 백금족 원소의 습식제련 공정에서는 일반적으로 강한 무기산이 사용되며, 이로 인해 설비 부식 및 염소 가스 발생 등의 문제가 있다.

본 연구에서는 유기산인 메탄술폰산(Methanesulfonic acid, MSA)을 대체 침출제로 사용하여 유가금속 침출거동 및 속도론 연구를 수행하였다. Ir이 코팅된 폐치수안정성전극(Dimensionally Stable Anode, DSA) 스크랩을 Na₂O₂를 알칼리 용제로 사용하여 Ir 알칼리 용융을 수행하였다. 알칼리 용융된 Ir scrap 대상으로 MSA 농도(1-10 M), 과산화수소 농도(1-3 M), 침출 온도(25-90°C), pulp density(5-15%)를 변수로 설정하여 침출실험을 수행하였다. 수집된 침출률 데이터를 바탕으로 수축핵 모델(Shrinking Core Model, SCM)을 적용하여 알칼리 용융된 Ir scrap의 Ir 침출 반응 속도론을 분석하였다.

실험 결과, MSA 농도가 1 M에서 10 M로 증가함에 따라 Ir 침출률이 45%에서 99%로 증가하였으며, 10 M MSA, 80°C, pulp density 5% 조건에서 이리듐 침출률은 99%에 도달하였다. 한편, 침출 과정에서 과산화수소의 영향은 미미하게 나타났다. 이는 높은 온도에서 과산화수소가 분해되어 산화제로서의 효과가 감소했기 때문이다. 침출 속도론 분석 결과, 침출 과정 중 TiO₂ 침전에 의해 생성물층이 형성되며, 이를 통한 확산 지배 메커니즘(Diffusion through the product layer)을 따르는 것으로 나타났다. 침출 온도가 25°C에서 90°C로 증가함에 따라 Ir의 침출률이 7%에서 97%로 증가하였으며, 활성화 에너지(Ea)는 106 kJ/mol 였다. 따라서, 본 Ir 침출 반응은 화학반응속도론(Chemical reaction controlled mechanism)임을 확인하였다.

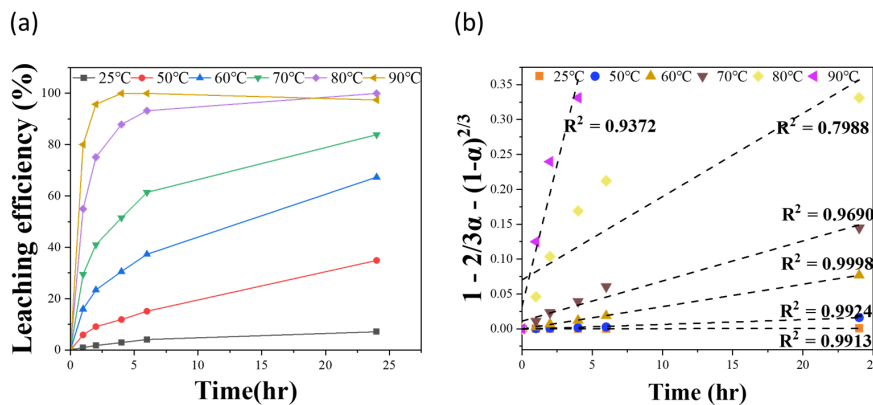


Fig. (a) Effect of temperature on Ir leaching efficiency, (b) plot of $1 - 2/3\alpha - (1 - \alpha)^{2/3}$ versus time at various temperature ([MSA] = 10 M, pulp density 5%, 24h, stirring speed 250 rpm]

사 사

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00435506).

*Corresponding Author: jahn@jbnu.ac.kr

1) 전북대학교 자원·에너지공학과

D2EHPA 추출제를 이용한 NCM 블랙매스 대상 MSA 침출 모사액 내 니켈, 코발트, 망간 공추출 연구

정현수¹⁾, 안준모^{2)*}

Co-extraction of Ni, Co, and Mn from Synthetic-Methanesulfonate Leachate of NCM Black mass Using D2EHPA

Hyunsu Jung¹⁾ and Junmo Ahn^{2)*}

메탄술폰산(MSA)는 생분해성, 낮은 부식성, 낮은 증기압 등의 특성을 나타내며 친환경 침출제로 평가된다. 따라서, 페리튬이온배터리 재활용을 위한 대체 침출제로 적용이 가능하다. 폐배터리 재활용을 위한 블랙매스 침출 공정 이후, Ni, Co, Mn, Li, Cu, Al 등이 침출되며, 이 금속들을 단일 성분으로 분리하기 위해서는 용매추출 공정이 필요하다. 그러나 용매추출 공정 시, Ni, Co, Mn을 개별적으로 회수하는 공정은 비교적 복잡하다. 따라서, 이를 단순화하기 위해, 본 연구에서는 친환경 대체 침출제인 MSA 침출 모사액 내 Ni, Co, Mn을 D2EHPA 추출제로 공추출 가능성을 검토하였다.

bis-(2-ethylhexyl) phosphoric acid(D2EHPA), Bis(2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid(Cyanex 272), 2-ethylhexyl phosphonic acid mono-2-ethylhexyl ester(PC88A), Versatic acid 10을 추출제로 하여 Ni, Co 공추출제 선정 실험을 진행하였다. 실험 결과, D2EHPA 추출제가 타 추출제 대비 Ni, Co의 추출 pH₅₀ 차이가 약 0.48로 각 성분 금속의 선택적 분리보다는 공추출에 적합하며, 상대적으로 낮은 pH에서 추출이 가능하여 공추출이 유리하였다(그림. 1a). 이후 Ni, Co, Mn, Li 혼합 MSA 모사액 대상 1.0 M D2EHPA를 이용하여 pH 5.0 조건에서 공추출 실험 결과, Ni 95%, Co 97%, Mn 99%, Li 38%의 추출률을 달성하였다(그림. 1b).

유기상에 공추출된 Li를 세정하기 위해, 0.1-0.2 M MSA를 이용한 3단 세정 실험 결과, Li 세정률은 83%였으나 Ni 73%, Co 48%의 동시 세정이 발생하여 유가금속 손실이 발생하였다. 이에 따라 이온 교환법을 적용한 3단 세정 실험 결과, Li 98%의 높은 세정률을 확보하였으며, Mn 2% 세정률과 세정액 내 유기상으로 추출되지 않은 Ni와 Co의 누적 잔류율은 각각 24%, 11%로 나타났다(그림. 1c). 즉, 0.1-0.2 M MSA 세정 공정 대신 이온 교환 세정법을 적용할 경우, 높은 Li 세정률과 함께 Ni 59%, Co 30%의 손실을 방지할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 MSA 금속 수용액 대상 Ni, Co, Mn 공추출 기반의 공정 단순화 가능성을 확인하였으며, 후속 NCM 전구체 제조 공정으로의 활용 가능성을 제시한다.

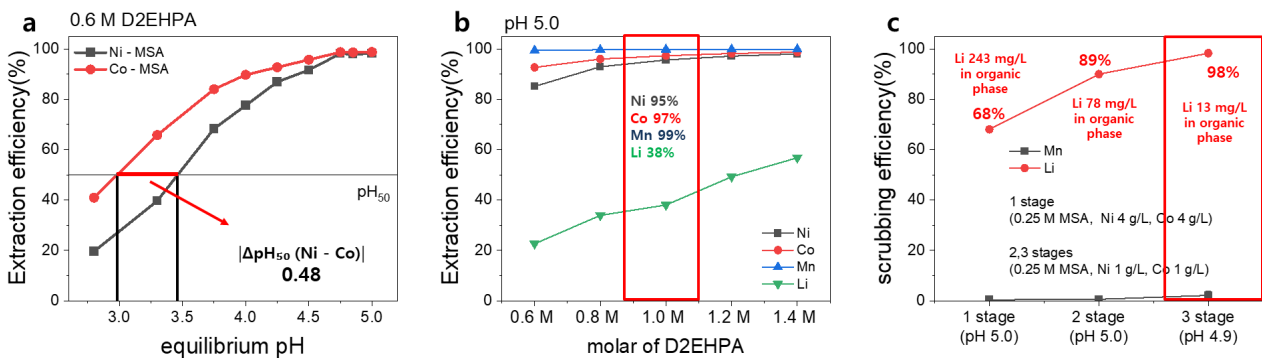


그림 1. (a) D2EHPA를 이용한 Ni, Co의 pH isotherm, (b) D2EHPA 농도에 따른 Ni, Co, Mn, Li 추출 거동, (c) 유기상 (D2EHPA)에 추출된 Mn, Li의 세정 거동

사 사

본 연구는 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발 특구진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2025-25444020).

*Corresponding Author: jahn@jbnu.ac.kr

1) 전북대학교 자원에너지공학과 석사과정

2) 전북대학교 자원에너지공학과 교수

폐 LFP의 직접재활용 시 carbon 함량의 최적화

유준상¹⁾, 권경중^{1)*}

Optimization of Carbon Content for the Direct Recycling of Spent LFP

Junsang Yoo¹⁾ and Kyungjung Kwon^{1)*}

전 세계적으로 환경오염 문제를 해결하기 위한 전기차 시장의 성장에 따라 리튬이온배터리(Li-ion battery, LIB)의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 경제성과 안정성이 뛰어난 리튬인산철(LiFePO₄, LFP) 양극재의 사용 또한 빠르게 확대되고 있다. 이에 따라 향후 수년 내 폐 LFP 배터리의 발생량이 급격히 증가할 것으로 예상된다. 기존의 삼원계 양극재는 Li, Ni, Co와 같은 유가금속을 회수하기 위해 다양한 제련 공정이 적용되고 있으나, LFP의 경우 Li를 제외한 Fe와 P의 경제적 가치가 낮아 금속 회수 기반 재활용 공정의 효율성이 제한적이다. 따라서 양극재의 결정 구조를 유지한 채 재활용하는 직접재활용(direct recycling) 공정이 효과적인 대안으로 주목받고 있다.

LFP의 경우 olivine 구조를 가지며 낮은 이온 및 전기 전도성을 가지기 때문에 carbon coating이 필수적으로 요구된다. 그러나 반복적인 충·방전 과정에서 carbon coating 층은 부분적으로 손상되며 불균일한 코팅층을 형성하게 되고, 직접재활용 과정에서는 이러한 잔여 carbon이 불순물로 작용할 수 있다. 반면 일부 잔여 carbon은 열처리 과정에서 환원 분위기 형성 및 재코팅층 형성에 기여할 수 있어 그 역할에 대한 명확한 정량적 분석이 필요하다. 문헌에서는 추가 carbon source를 0-20 wt% 범위에서 도입하는 것으로 보고되고 있으나, 최적 carbon 함량에 대해서는 연구마다 상이한 결과를 보이고 있다.

본 연구에서는 직접재활용 과정에서 잔여 carbon coating 및 carbon 불순물이 전기화학적 특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 carbon coating 층이 존재하는 시료와 coating 층 및 기타 carbon 불순물을 제거한 시료를 비교하여 실험을 수행하였다. 그 결과, 소성 온도 700 °C 및 추가 carbon 함량 10 wt% 조건에서 159.4 mAh g⁻¹의 높은 초기 용량을 나타내었으며, 20 C-rate에서도 97.8 mAh g⁻¹의 우수한 율속 특성을 확인하였다. 또한 carbon 함량과 율속 특성 간의 상관관계를 정량적으로 분석함으로써 직접재활용 공정에서 요구되는 최적 carbon 함량을 제시하였다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2026-RS-2024-00437494).

*Corresponding Author: kjkwon@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과

리튬이온배터리 직접재활용 공정에서 잔존 불순물(Al, C, F)이 양극 활물질에 미치는 영향

안수연¹⁾, 배지현¹⁾, 권경중^{1)*}

Influence of Residual Impurities (Al, C, and F) on Cathode Active Materials in Direct Recycling of Lithium-Ion Batteries

Suyeon An¹⁾, Jihyeon Bae¹⁾ and Kyungjung Kwon^{1)*}

리튬이온배터리 시장의 급격한 확대에 따라 폐배터리 발생량이 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 효율적, 저탄소 재활용 기술의 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 직접재활용(direct recycling)은 기존의 습식 및 건식 제련 공정 대비 에너지 소비, 시약 사용량 및 탄소 배출을 크게 저감할 수 있는 공정으로 주목받고 있다. 그러나 실제 공정에서는 불순물의 완전한 제거가 어렵기 때문에 재생 활물질의 전기화학적 성능 저하가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 직접재활용 과정에서 잔존할 수 있는 주요 불순물 원소인 Al과 F 및 전극 제조 과정에서 활물질 표면에 인접해있는 도전재 탄소(C)가 재생되는 LiNi_{0.65}Co_{0.16}Mn_{0.19}O₂(NCM)에 미치는 각각의 영향을 파악하기 위해, 각 불순물이 포함된 NCM 양극 활물질의 구조 및 전기화학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 각 불순물 소스(Al 집전체, 바인더, 도전재)의 영향을 분리하여 분석하기 위해 열화되지 않은 양극 활물질에 각 불순물 소스를 도입하여 다음 3 종류의 불순물 원소 포함 NCM 양극 활물질을 제조하였다: NCM65-Al, NCM65-F, NCM65-C. 먼저 직접재활용 공정에서의 알칼리 용출 과정에 따른 리튬 손실을 모사하기 위해 모든 시료를 2 M NaOH 용액에서 30분간 전처리하였다. NCM65-Al 시료의 경우 NaOH 처리 과정에서 Al 집전체를 활물질과 함께 투입하여 집전체 제거 과정에서 잔존할 수 있는 Al 불순물을 모사하였다. 이후 carbon black 및 PVDF/NMP를 각각 도입하고 500 °C 열처리를 수행하여 도전재 및 바인더 오염 조건을 모사하였으며, 이후 리튬 보충과 열처리를 통해 재생 활물질을 제조하였다. 전기화학적 평가 결과, NCM65-Al과 NCM65-C 시료는 약간의 성능 저하를 나타낸 반면, 바인더에서 유래된 NCM65-F 시료는 초기 용량, 사이클 수명 및 율속 특성에서 가장 큰 성능 저하를 보였다. 이는 열처리 과정에서 PVDF 바인더가 분해되면서 형성된 LiF가 입자 표면에 두껍게 형성되어, 낮은 전자전도도를 갖는 절연성 층으로 작용함에 따라 전자 전달 및 Li⁺ 확산을 저해했기 때문으로 판단된다.

본 연구 결과는 직접재활용 공정에서 잔존하는 불순물 중 바인더 유래 F 성분이 재생 양극 활물질의 전기화학적 성능에 가장 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 따라서 고성능 재생 양극 활물질 확보를 위해서는 직접재활용 공정에서 Al 집전체나 도전재 제거 보다 바인더 제거와 이에 유래한 F 불순물의 제어가 중요함을 시사한다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2026-RS-2024-00437494).

*Corresponding Author: kjkwon@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과

리튬 이온 배터리 재활용을 위한 다목적 중간체로서의 인공 혼합 수산화물 침전물

한예림¹⁾, 주현철¹⁾, 김유리¹⁾, 최정욱¹⁾, 김병선¹⁾, 권경중^{1)*}

Artificial Mixed Hydroxide Precipitate as a Versatile Intermediate for Li-ion Battery Recycling

Yerim Han¹⁾, Hyeoncheol Joo¹⁾, Yuri Kim¹⁾, Jungwook Choi¹⁾, Byungseon Kim¹⁾ and Kyungjung Kwon^{1)*}

전기차 시장의 성장과 함께 리튬이온배터리(Li-ion Battery, LIB)의 사용량이 증가하면서 폐 LIB의 재활용 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 습식 공정에서 얻어진 침출수를 이용하여 $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z]\text{O}_2$ (NCM)을 재합성하는 방법이 연구되고 있으나, 침출수에는 Al, Cu, Fe 등 다양한 불순물이 존재하여 재합성된 양극 활물질의 성능에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 침출수의 pH를 조절하여 인공 혼합수산화침전물(Mixed Hydroxide Precipitate, MHP)을 제조하고 이를 재침출하여 양극 활물질 재합성에 활용하였다. 또한 MHP 공정을 거치지 않은 경우와 비교하여 불순물 정제 효과와 전기화학적 특성을 평가했다.

폐 LIB 침출수에 4 M NaOH 용액을 첨가하여 pH 6-9 조건에서 반응시켜 인공 MHP를 제조하였으며, 생성된 침전물을 여과 및 건조하여 MHP 시료(MHP6-MHP9)를 얻었다. 이후, $\text{Li}[\text{Ni}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}]\text{O}_2$ 재합성을 위해 Ni, Co, Mn이 완전히 침전된 MHP9를 선택하여 2 M H_2SO_4 와 5 vol% H_2O_2 를 이용해 재침출을 수행하였다. MHP 형성 및 재침출 과정에서 Fe는 약 50% 이상의 제거율을 보였으며 이는 MHP 형성 과정에서 Fe이 hematite 구조로 침전되어 결정 재배열과 치밀화로 인해 용해도가 감소했기 때문으로 판단된다. 이러한 정제 효과로 인해 MHP 재침출수로 합성한 NCM9는 폐 LIB 침출수를 직접 이용하여 합성한 시료보다 향상된 전기화학적 성능을 나타냈다. 이후 가성소다를 이용해 재침출수를 추가적으로 정제하여 Al, Fe, Cu 등의 불순물 함량을 약 0.1 mol% 수준까지 낮출 수 있었으며, 정제 침출수로 합성한 NCM9P는 상용 시약으로 합성한 NCM과 유사한 전기화학적 성능을 나타냄을 확인했다.

폐 LIB 침출수의 pH를 조절하여 합성한 MHP를 재침출하여 얻은 NCM을 폐 LIB 침출수로부터 합성한 NCM과 비교했을 때, 불순물 정제의 효과가 있음을 확인하였다. 또한, MHP 침출수를 정제하여 얻은 정제 침출수로부터 합성한 NCM은 상용 시약으로부터 합성한 NCM과 유사한 전기화학 성능을 나타냈다. 따라서 MHP는 폐 LIB 재활용을 위한 효과적인 중간체로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2026-RS-2024-00437494).

*Corresponding Author: kjkwon@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과

자원경제 · 정책

K
S
R
E

수소 전해 프로젝트의 최종투자결정 및 운영 단계 진전에 대한 결정요인

Zainab Sheikh¹⁾, 김지효^{2)*}

Determinants of Hydrogen Electrolysis Project Progression to Final Investment Decision and Operation

Zainab Sheikh¹⁾ and Jihyo Kim^{2)*}

Green hydrogen is widely seen as an important option for industrial decarbonization, yet very few announced projects move beyond the planning stage. According to the IEA, only around 4% of announced low-emission hydrogen projects have reached final investment decision (FID) or construction, while existing research has paid more attention to future demand, policy roadmaps, technology pathways, and infrastructure needs than to the empirical drivers of project-level advancement. This study examines dedicated renewable-based hydrogen electrolysis projects and asks which project and country characteristics increase the probability of reaching FID or operation. Using the IEA Hydrogen Production Projects Database, released in September 2025, I construct a global sample of 1,371 dedicated-renewable projects across 106 countries, drawn from a broader universe of 2,618 hydrogen production projects, and combine it with country-level indicators of governance, water stress, FDI restrictiveness, hydrogen policy intensity, renewable energy availability, and hydrogen-related infrastructure. Project success is defined as a binary outcome equal to one if a project has reached FID or operation and zero if it is in concept, feasibility study, or demo stages, and the baseline analysis estimates a logit model using approximately 1,195 observations. The results show that technology is a strong predictor of project advancement: compared with the reference category, alkaline electrolysis projects have about 9.5 times the odds of reaching FID or operation, while PEM projects have about 5.4 times the odds. Renewable energy availability is also positively associated with success, whereas larger project scale is negatively associated with observed advancement in the baseline model, likely reflecting maturity effects because many very large projects remain at early stages. Overall, the findings suggest that both technology maturity and country-level energy readiness matter for whether announced green hydrogen projects move toward implementation, contributing early global project-level evidence on the determinants of hydrogen project progression.

References

- Chun, D., Lee, K., Hwang, Y. and Kim, Y., 2016. Influencing factors on hydrogen energy R&D projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1252-1258.
- McGregor, C., Young, B.D. and Hildebrandt, D., 2025. Risk assessment framework for green hydrogen megaprojects: Balancing climate goals with project viability. *Applied Thermal Engineering*, 262, 125197.
- Odenweller, A. and Ueckerdt, F., 2025. The green hydrogen ambition and implementation gap. *Nature Energy*, 10, 110-123.
- Delpisheh, M., Moradpoor, I., Souhankar, A., Koutsandreas, D. and Shah, N., 2026. Advancing the hydrogen economy: Economic, technological, and policy perspectives for a sustainable energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226(B), 116238.

*Corresponding Author: jihyokim@kaist.ac.kr

1) 한국과학기술원(KAIST) 녹색성장지속가능대학원 석사과정

2) 한국과학기술원(KAIST) 녹색성장지속가능대학원 부교수

광해방지사업별 전과정 탄소발자국 산정을 위한 tool 개발 및 적용

심민아¹⁾, 객인호^{1)*}, 위대형¹⁾, 김수로²⁾

Development and Application of a Tool for Life Cycle Carbon Footprint Assessment of Mine Reclamation Projects

Mina Sim¹⁾, Inho Kwak^{1)*}, Daehyung Wie¹⁾ and Soolo Kim²⁾

최근 기후위기가 심화되면서 온실가스 감축은 주요 국가적 과제로 인식되고 있으며, 각국은 산업 전반에서 탄소중립 실현을 위한 다양한 대응 전략을 추진하고 있다. 이러한 기후위기에 대응하기 위하여 전 세계적으로 온실가스 감축을 위한 노력이 확대되고 있으며, 2015년 파리협정 이후 지구 평균기온 상승을 1.5°C 이내로 제한하기 위한 2050년 탄소중립 실현이 글로벌 의제로 자리 잡고 있다.

한국광해광업공단은 「한국광해광업공단법」에 따라 광산피해 복구 및 광물자원 산업 육성을 위해 다양한 광해방지사업을 수행하고 있다. 이러한 사업은 한국광해광업공단과 전문광해방지사업자를 통하여 추진되며 사업과정 중 필요한 자재 생산 등으로 인해 내재탄소(embodied carbon)의 배출이 높다.

한국광해광업공단은 이러한 사업 특성을 반영한 탄소배출량 산정 방법을 2021년부터 2023년에 걸쳐 마련하였으며, 후속 연구로 사업별 특성을 고려한 탄소배출량 산정 및 검증 체계 구축을 위하여 “광해방지사업별 전과정 온실가스 및 저감 관리기법 개발”을 추진하고 있다. 또한 광해방지사업의 공종별 특성을 반영하여 표준품셈을 기반으로 장비 및 자재 사용에 대한 기초 데이터베이스(DB)와 원단위를 구축함으로써 온실가스 배출량 산정의 기반을 마련하였다.

본 연구에서는 이러한 선행 연구와 현재 추진 중인 연구를 지원하기 위하여 광해방지사업의 전과정 탄소발자국 산정을 지원하기 위한 Tool을 개발하고 적용하였다. 개발된 Tool은 사업 내역서를 기반으로 공종별 장비 및 자재 사용량을 자동으로 연계하여 온실가스 배출량을 산정할 수 있도록 구성하였으며, 구축된 DB 및 원단위를 활용하여 사업 단계별 탄소배출량을 체계적으로 분석할 수 있도록 하였다. 또한 향후 광해방지사업 수행 과정에서 적용 가능한 저감 기법을 검토하여 탄소배출 저감 방향을 제시하고, 본 Tool을 활용할 경우 향후 사업별 온실가스 감축량 산정 및 관리에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문(또는 저서)은(는) 2026년 한국광해광업공단으로부터 연구비를 지원받아 수행된 사업임.

References

- Kwak, I.H., Kim, S.L., Park, J.H., Wie, D.H., and Sim, M.A., 2025. A Study on the Establishment of Carbon Emission Factor Standards Applicable to Mine Rehabilitation Projects MRV, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 62(6), p.630-640.
- Kim, S.L., Kwak, I.H., Wie, D.H., Bak, G.I., and Lee, H.S., 2023. A study on the application of carbon emissions DB based on standard quantity per unit in mine rehabilitation projects, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 60(6), p.480-489.

*Corresponding Author: inho@endi.kr

1) ㈜엔디렉션

2) 한국광해광업공단 기술연구원

제주지역 일반·산업용 전력수요에 대한 계시별 요금제 부하시간대 변경 효과 분석

오규빈¹⁾, 김지효^{2)*}

Analysis of the Effects of Time-of-Use Period Redefinition on Commercial and Industrial Electricity Demand in Jeju

Kyubin Oh¹⁾ and Jihyo Kim^{2)*}

우리나라에서는 1990년 이후 대규모 전력 소비자의 수요 관리를 위해 전국에 동일한 계절 및 부하시간대 구분을 적용하는 계시별 요금제(Time-of-Use, TOU)를 시행하였다. 그러나 제주에서는 태양광 보급 확대에 따라 일몰 이후 저녁 시간대에 순부하가 집중되면서, 2021년 9월 1일 제주 지역에 한해 계시별 요금제의 부하시간대(최대·중간·경부하)가 개편되었다. 본 연구는 계시별 요금제 적용 대상인 일반용 및 산업용 전력소비자의 2020년 9월부터 2022년 8월까지의 1시간 단위 전력 소비량 패널자료를 활용하여, 다중 고정효과 회귀모형을 통해 부하시간대 변경 전후 전력수요 패턴이 요일·시간대별로 어떻게 달라졌는지 추정하였다. 연구 결과, 부하시간대 개편 이후 전력요금에 상대적으로 인화된 8~16시에는 전력수요가 증가한 반면, 전력요금에 상대적으로 인상된 16~22시에는 전력수요 증가가 제한되는 것으로 나타났다. 이러한 효과는 업종 및 요일에 따라 차이를 보였으며, 전력소비량과 전력소비비중을 이용한 추정에서 모두 전반적으로 일관된 결과가 확인되었다. 이는 부하시간대 개편이 전력수요를 상대적으로 저렴해진 시간대로 이동시키는 방향으로 작동했음을 보여주며, 지역별 순부하 특성을 반영한 계시별 요금제 설계가 수요 측 유연성 확보를 위한 유효한 수단으로 기능할 수 있음을 시사한다.

References

- Choo, D., Jang, H. and Kim, J., 2025. Strategic and price-dependent responses to opt-in time-of-use tariffs: Evidence from Jeju Island, Korea. *Energy Policy*, 206, 114724.
- Kim, J., Lee, S. and Jang, H., 2022. Lessons from residential electricity demand analysis on the time of use pricing experiment in South Korea. *Energy Economics*, 113, 106224.
- Qiu, Y., Kirkeide, L. and Wang, Y.D., 2018. Effects of voluntary time-of-use pricing on summer electricity usage of business customers. *Environmental and Resource Economics*, 69(2), 417-440.

*Corresponding Author: jihyokim@kaist.ac.kr

1) 한국과학기술원(KAIST) 녹색성장지속가능대학원 석사과정

2) 한국과학기술원(KAIST) 녹색성장지속가능대학원 부교수

From Courtrooms to Capital Markets: The Financial Impact of the ICJ Advisory Opinion on Climate Change

Juan Diego Amaya-Gómez¹⁾ and Ji-hyo Kim^{2)*}

Do non-binding international legal pronouncements influence financial markets? This paper investigates whether the International Court of Justice's (ICJ) Advisory Opinion on climate change affects investor expectations about future climate policy and the valuation of carbon-intensive assets. Although advisory opinions lack binding force, they carry significant interpretative authority and may strengthen domestic climate litigation by clarifying states' obligations under international law, including duties related to emissions reductions, due diligence, and human rights protection. As such, the ICJ Opinion may signal a higher probability of more stringent climate policies, increasing stranded asset risk for fossil fuel firms while improving the expected profitability of renewable energy companies.

To test this proposition, we implement an event study examining abnormal returns and changes in systematic risk for low-carbon and carbon-intensive equity indices across the European Union, the United States, and global markets. The empirical design exploits eighteen major announcements related to the ICJ Advisory Opinion between 2019 and 2025 as exogenous information shocks that update investor beliefs about the credibility and future enforcement of climate policy commitments.

We expect these announcements to generate positive abnormal returns for renewable energy firms and negative returns for fossil fuel companies, particularly coal-intensive and reserve-heavy firms exposed to stranded asset risk. By analyzing market responses to these legal signals, this study contributes to the emerging literature on climate finance and international law by evaluating whether non-binding international adjudication can shape investor expectations and influence capital allocation in the global energy transition.

References

- Monasterolo, I., & de Angelis, L. (2020). Blind to carbon risk? An analysis of stock market reaction to the Paris Agreement. *Ecological Economics*, 170, Article 106571. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106571>
- Pham, H., Nguyen, V., Ramiah, V., Saleem, K., & Moosa, N. (2019). The effects of the Paris climate agreement on stock markets: evidence from the German stock market. *Applied Economics*, 51(57), 6068–6075.
- Sato, M., Gostlow, G., Higham, C., Setzer, J., & Venmans, F. (2024). Impacts of climate litigation on firm value. *Nature Sustainability*, 7(11), 1461–1468.
- Schuetze, F., Aleksovski, D., & Mozetic, I. (2020). *Stock Market Reactions to International Climate Negotiations*. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3718277> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3718277>
- Voeten, Erik. (2025). Do Domestic Climate Rulings Make Climate Commitments More Credible? Evidence from Stock Market Returns. *The Journal of Politics*, 87(4).

*Corresponding Author: juandiego@kaist.ac.kr

1) Master Student, Graduate School of Green Growth and Sustainability, KAIST

2) Associate Professor, Graduate School of Green Growth and Sustainability, KAIST

시장 및 정책 불확실성 하에서의 가치 평가: 자발적 탄소시장 내 바이오차 프로젝트 투자의 실물옵션 분석

강신재¹⁾, 김지효^{2)*}

Valuation under Market and Policy Uncertainty: A Real Options Analysis of Biochar Project Investment in the Voluntary Carbon Market

Shinaje Kang¹⁾ and Jihyo Kim^{2)*}

탄소중립 목표 달성을 위한 핵심 기제로 이산화탄소 제거(CDR) 기술의 중요성이 증대되는 가운데, 자발적 탄소시장(VCM)은 ICVCM의 CCP(Core Carbon Principle) 라벨 도입 등 이른바 ‘품질을 향한 비상(Flight to Quality)’ 현상을 겪으며 과학적으로 검증 가능한 고품질 제거 크레딧 중심으로 재편되고 있다(ICVCM, 2024). 이러한 시장 변화 속에서 바이오차는 탄소 격리 영구성을 바탕으로 네거티브 배출 기술(NETs)의 유력한 대안으로 부상하였으나, 고기술(High-Tech) 모듈러 설비에 수반되는 높은 초기 자본비용(CAPEX)의 비가역성과 탄소 크레딧 가격의 극심한 변동성은 여전히 높은 투자 진입 장벽으로 작용하고 있다(Campbell et al., 2018). 특히 이러한 불확실성과 비가역성이 결합된 투자 환경에서는 투자 시점의 조정·확장·축소·중단 등 경영진의 의사결정 유연성이 프로젝트 가치에 핵심적으로 반영된다. 그럼에도 전통적 현금흐름 할인법(DCF)은 미래를 단일 경로로 가정하는 경향이 있어, 불확실성 하에서 발현되는 전략적 선택권(옵션) 가치를 충분히 포착하지 못한다. 본 연구는 Verra의 VM0044 방법론을 준수하는 고기술 저속 열분해 바이오차 생산 시설을 대상으로, 선행문헌에 기반한 기술경제성 파라미터를 바탕으로 프로젝트의 내재가치를 정밀하게 산정하고 경영진의 전략적 유연성(Strategic Flexibility)을 정량화할 수 있는 다변량 실물옵션 프레임워크를 제시한다. 더하여 프로젝트 현금흐름에 지배적 영향을 미치는 탄소크레딧 가격, 전력가격, 원료비용을 핵심 불확실성 요인(Stochastic Variables)으로 선정하고, 각각의 동적 특성을 반영한 확률 과정을 구축하였다. 구체적으로 탄소크레딧 가격과 전력가격은 기하학적 평균회귀(Geometric Ornstein-Uhlenbeck) 모형으로, 원료비용은 삼각분포(Triangular Distribution)로 모형화하였다. 가치평가 방법론으로는 경로 의존적(Path-dependent) 옵션가치 산정에 특화된 최소자승 몬테카를로(Least Squares Monte Carlo, LSMC) 시뮬레이션을 채택하였으며, 기초 자산의 가치 산정에는 가중평균자본비용(WACC)을, 옵션 가치 평가에는 위험중립 관점의 이자율을 적용하는 이원화된 할인율 체계를 통해 금융공학적 정합성을 확보하였다. 이를 통해 전통적 DCF 기반 평가가 포착하지 못하는 투자 유연성(투자보류, 이행)의 가치를 옵션 프리미엄 형태로 정량화하고, 나아가 VCM 바이오차 프로젝트에 실물 옵션 평가를 최초로 적용함으로써 시장 및 정책 불확실성 하에서의 투자 가치 분석을 정량적·체계적으로 제안한다.

References

Campbell, R. M., Anderson, N. M., Daugaard, D. E., & Naughton, H. T. (2018). Financial viability of biofuel and biochar production from forest biomass in the face of market price volatility and uncertainty. *Applied energy*, 230, 330-343.

*Corresponding Author: jihyokim@kaist.ac.kr

1) 한국과학기술원 녹색성장지속가능대학원 석사과정

2) 한국과학기술원 녹색성장지속가능대학원 부교수

확률기반 주제모형과 문맥기반 언어모형 기반 지질자원 분야 인공지능 연구 · 산업 생태계의 연구 주제 분석

안은영^{1)*}

AI Research Themes in Geoscience and Mineral Resources Research Institutions and Industrial Organizations using Probabilistic Topic Modeling and Contextual Language Modeling

Eun-Young Ahn^{1)*}

본 연구는 지질자원 분야 인공지능 연구 주제 분석을 위해 확률적 주제 분석 모형인 Latent Dirichlet Allocation (LDA) 주제 분석과 함께 Transformer 기반 문맥을 고려하는 언어모형인 BERT 모형으로 키워드 및 주제 분석을 하였다. 미국지질조사소(USGS)의 2025년, 2026년 예산 설명서 및 성과보고 자료에서 지질자원 분야 인공지능 검색 키워드를 도출하여 Web of Science 논문 자료 28,367건을 수집하였다. 대학과 정부 행정 기관, 종합연구기관이 많은 비중을 차지하였으며, 지질자원 분야 상위 공공연구기관은 중국지질조사소(CGS) 315건, 미국지질조사소(USGS) 198건, KIGAM 173건으로 나타났다. 중국국유석유기업(CNPC)은 총 348건으로 BERT 모형으로 중요 단어 도출 결과 learning seismic, geological modeling 등이며 주제분석 결과는 reservoir parameter로 분화되지 않은 주제와 cnn fault 키워드의 한 개 주제로 나타난 반면, LDA 주제 분석 결과는 석유가스, 셰일가스 관련 방법론 등 9개 주제로 나타났다. 163건 실적인 중국석유화학기업(SINOPEC)은 BERT 결과 키워드 reservoir seismic으로 비슷한 4개 주제가 도출되었으나 LDA 주제 분석 결과는 셰일가스, 석탄, 석유가스 관련 여러 주제로 나타났다. CGS의 경우 광물자원, 지진, 산사태 키워드가 도출되었으며 BERT 주제는 산사태, 지하수, 토양이며 LDA 주제는 광물자원, 석유가스, 가스하이드레이트, 산사태, 지하수이다. USGS의 BERT 주제는 지진, 화산이며 LDA 주제 분석 결과는 수자원 관련 여러 주제와 지진 주제가 도출되었다. KIGAM의 키워드는 산사태로 BERT와 LDA 주제 분석 결과 모두 산사태 주제와 해당 방법론 관련 주제와 함께 지하수, 가스하이드레이트 주제가 도출되었다. 종합 연구소인 CSIRO의 BERT 키워드와 두 모형의 주제는 지하수와 광물자원이다. 역시 종합연구소인 헬름홀츠의 BERT 주제는 산사태, 지진, 화산, 광물 탐사, 토양 등이며 LDA 주제는 수자원 관련 여러 주제와 산사태이다. BERT 모형의 지진 관련 주제에서 building damage가 첫 번째 키워드로 나온 특징이 있다. 프랑스 종합연구소인 CNRS에서는 2001-2003년 aquatic ecosystem, 2019-2024년 지진 키워드이며 LDA 주제는 산사태, 수자원 관련 여러 주제로, 수자원 관련 sea ice가 가장 중요한 단어로 나온 특징이 있다. BERT 결과는 sea ice 주제의 구체적인 키워드로 sea surface, sar image, ice thickness가 나왔으며 수산자원, 음용수, 산사태 관련 주제가 나왔다. CNRS의 산사태 주제 키워드도 landslide susceptibility, building damage, damage detection, flash flood로 상세하게 나온 것이 특징이다. 본 연구결과는 BERT와 LDA의 방법론적 특성에 따라 주제 구조가 상이하게 도출됨을 보여주었다. BERT 모형 결과는 재난 영향(building damage 등)과 같이 맥락 기반으로 상세한 지질자원 분야 연구 주제 세부 키워드를 식별하였다. 본 연구결과는 지질자원 분야 인공지능 연구 주제의 다층적 해석을 위해 확률기반 주제모형과 문맥기반 언어모형 결과를 비교한 의의를 가진다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 글로벌 대전환을 대비한 2030년 지질자원 기술/산업 정책연구(GP2025-002)의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: eyahn@kigam.re.kr

1) 한국지질자원연구원 미래전략연구센터

중국의 희토류 공급망 차단이 국내 핵심 산업에 미치는 영향 분석

정민기^{1)*}, 양하연²⁾, 한성웅³⁾

Dynamic Impacts of Rare Earth Element Supply Chain Disruptions by China on Critical Industries

Mingi Jung^{1)*}, Hayeon Yang²⁾ and Sungwoong Han³⁾

본 연구는 희토류(Rare Earth Elements, REEs)의 공급망 불확실성이 국내 주요 핵심 산업(전기차, 반도체, 석유화학)의 수익성과 생산에 미치는 동태적 영향을 시스템 다이내믹스(System Dynamics, SD)를 활용하여 분석하였다. 희토류는 탄소 중립 및 첨단 기술 산업의 필수 원자재이나, 생산 및 제련 시설의 지리적 편중으로 인해 지정학적 공급 리스크에 크게 노출되어 있다. 기존 연구들은 개별 원자재의 가격 변동성에 주목해 왔으나, 본 연구는 산업별 희토류 의존도의 구조적 차이와 경제성장(GDP)에 따른 비선형적 수요 증가 패턴(지연된 역 U자형 곡선)을 모델에 반영하여 장기적 관점의 파급 효과를 정량화하였다는 점에서 차별성을 갖는다.

이를 위해 한국의 대(對)중국 수입 의존도 데이터를 기반으로 공급망 충격(수출 통제 및 쿼터 축소) 시나리오를 설계하고, 내생적 가격 결정 메커니즘을 통해 수급 불균형이 가격 폭등으로 이어지는 피드백 루프를 구축하였다. 특히 전기차 산업 모델에서는 리튬, 니켈 등 2차 전지 핵심 광물의 가격 변동을 통제 변수로 삽입하여 ‘복합 자원 제약(Multi-resource constraint)’ 상황 하에서의 산업 취약성을 테스트하였다.

본 연구는 단기적인 재고 비축(Strategic Stockpiling) 외에도 기술 대체를 위한 R&D 투자 지연 최소화 및 공급처 다변화가 공급망 회복 탄력성(Resilience) 확보에 미치는 임계 시간(Critical Time)을 산출하여, 정부와 기업의 선제적 자원 안보 전략 수립에 실증적인 정책 시사점을 제공한다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2025-04442986).

References

Keilhacker, M. L., & Minner, S. (2017). Supply chain risk management for critical commodities: A system dynamics model for the case of the rare earth elements. *Resources, Conservation and Recycling*, 125, 349-362.

*Corresponding Author: mg322@snu.ac.kr

- 1) 한국생산성본부 ESG컨설팅센터 연구원
- 2) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정
- 3) 서울대학교 협동과정 기술경영경제정책전공 석사과정

포스터 |
POSTER

K
S
R
E

GPR을 이용한 교량 바닥판 상태평가에서의 조건부 생성 모델 적용

최병훈^{1,2)}, 채휘영²⁾, 편석준^{1)*}

Application of a Conditional Generative Model to Bridge Deck Condition Assessment Using GPR

Byunghoon Choi^{1,2)}, Hwi-young Chae²⁾ and Sukjoon Pyun^{1)*}

교량 바닥판은 교통하중, 수분 및 염화물 침투 등 다양한 유해환경에 지속적으로 노출되어 손상과 노후화가 진행되므로, 효율적이고 신뢰성 있는 상태평가가 중요하다. 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR)는 비파괴적으로 교량 바닥판 내부 정보를 연속적으로 획득할 수 있어 유지관리 분야에서 널리 활용되고 있으나, 대용량 현장자료의 해석에는 많은 시간과 인력이 소요되며 분석가의 숙련도와 주관에 따라 결과가 달라질 수 있다는 한계가 있다. 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위해 딥러닝(Deep Learning) 기반 자동 해석 기법이 활발히 연구되고 있으나, 다양한 현장 조건에 따른 GPR 신호 특성을 충분히 반영하고 해석 결과의 신뢰성을 함께 평가하는 데에는 여전히 어려움이 있다.

이 연구에서는 GPR을 이용한 교량 바닥판 상태평가에 조건부 생성 모델을 적용하였다. 사용한 생성 모델은 Diffusion 모델로, 자료에 점진적으로 추가된 잡음을 반대로 제거해 가며 원래의 자료를 복원하는 방식의 생성모델이다(Ho et al., 2020). 여기에 조건 정보를 함께 부여하면 특정 구조적 특성이나 탐사 자료에 대응하는 결과를 생성할 수 있다. 조건부 Diffusion 모델은 두 가지 방식으로 활용하였다. 먼저 철근 위치와 아스팔트-콘크리트 층 경계와 같은 구조적 정보를 조건으로 부여하여 이에 대응하는 GPR 자료를 생성함으로써, 교량 바닥판의 다양한 구조 조건에 따른 GPR 탐사 결과를 재현하고자 하였다. 이러한 접근은 특정 피복두께, 포장두께 및 철근 위치 조건을 반영하는 GPR 응답을 모사하고, 다양한 조건의 학습자료 분포를 보완하는 데 활용될 수 있다. 또한 반대로 GPR 자료를 조건으로 하여 2차원 구조 정보를 생성하는 해석을 수행함으로써, GPR 자료로부터 아스팔트-콘크리트 층 경계와 철근 위치를 확률적으로 추정할 수 있는 가능성을 검토하였다.

사 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-24523155).

References

Ho, J., Jain, A., and Abbeel, P., 2020. Denoising diffusion probabilistic models. *Advances in neural information processing systems*, 33, 6840-6851.

*Corresponding Author: pyunsj@inha.ac.kr

1) 인하대학교 에너지자원공학과

2) (주)지오메카이엔지

물적 특성 보존형 딥러닝 기반 Micro-CT 시추 코어 단면 보간

백승원¹⁾, 정현수²⁾, 이주원³⁾, 조용채^{4)*}

Physics-Aware Deep Learning-Based Interpolation of Micro-CT Core Slices

Seung Won Baek¹⁾, Hyeonsu Jeong²⁾, Juan Lee³⁾ and Yongchae Cho^{4)*}

시추 코어 단면은 지층의 미세 구조 및 조직을 파악하고 공극률(Porosity), 비표면적(Specific surface area), 연결성(Connectivity) 등 저류층 물성 산정을 하는 데 있어 중요한 역할을 하는 자료이다. 시추 코어는 주로 비파괴 측정 방법인 X-ray CT, Micro-CT, Nano-CT를 활용하여 단면에 대한 관측이 이루어진다. 그러나 이러한 CT 기반 시추 코어 촬영은 고해상도의 3차원 자료를 얻기 위하여 매우 조밀한 간격의 촬영을 요구하므로 시간적, 비용적 부담이 존재한다. 본 연구는 시추 코어의 3차원 디지털 암석(Digital Rock) 자료를 대상으로 하여 단면 간 보간(Interpolation)을 딥러닝으로 수행함으로써 스캔 간격을 확대하면서도 코어의 구조적 특징과 물성 정보를 보존하는 방법을 제안한다.

연구에 사용된 데이터는 오픈 소스로 공개된 Berea sandstone을 포함한 다수의 사암 시추 코어에 대한 Micro-CT 단면 자료를 대상으로 한다. 일정한 인덱스 간격이 주어졌을 때 그 사이의 단면을 예측하기 위한 방식으로서 U-Net 기반의 생성기(Generator)와 PatchGAN 기반의 판별기(Discriminator)를 기본 모델로 하는 조건부 생성적 적대 신경망(conditional Generative Adversarial Network, cGAN) 구조를 도입함으로써 단일 축 보간을 넘어 다축 지도학습(Multi-axis supervised learning)과 삼축 일관성 미세조정(Tri-axis consistency fine-tuning)을 적용하여 데이터 증강 효과와 3차원 일관성을 동시에 확보하도록 설계하였다. 또한 단순 화질 복원뿐 아니라 공극률(ϕ) 및 비표면적(SA) 오차를 최소화하는 물성 보존 손실(Physics-aware loss)을 함께 반영하였다. 실험 결과, 제안 기법은 선형 보간(Linear interpolation), 3차 스플라인 보간(Cubic spline interpolation) 및 기존 CNN 기반 방법 대비 구조 유사도 지수(Structural Similarity Index Measure, SSIM) 등 화질 지표에서 일관적인 우위를 보였으며, 공극률과 비표면적 추정 오차를 감소시키고 성능과 일관성을 향상시켰다. 추가로 3차원 기반 모델과 비교하여 유사한 복원 성능을 유지하면서도 추론 시간 및 계산 비용을 크게 절감할 수 있음을 확인하였다. 외부 데이터에 대해서는 필요한 경우 소량의 데이터와 짧은 시간의 보정 학습(Calibration fine-tuning)을 통해 성능을 안정적으로 확보할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 Digital Rock 기반 물성 해석과 CT 촬영 시간 단축을 동시에 달성할 수 있는 실용적인 보간 프레임워크를 제시하며, 향후 X-ray CT, Micro-CT, Nano-CT 환경에서 시간-해상도 절충(Time-resolution trade-off)을 최적화하는 데 활용될 수 있음을 시사한다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국지질자원연구원(KIGAM) 기본연구사업(GP2025-021)의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2022400000120).

References

- Kagawa, R., Okamoto, A., & Omori, T. (2025). Data-driven depth direction super-resolution framework for X-ray CT images of rock samples by deep learning. *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, 16(3), 390-400.
- Zhang, T., & Zhang, W. (2025). 3D reconstruction of digital rocks based on StyleGAN and transformer. *International Journal of Coal Science & Technology*, 12, 40.

1) 서울대학교 에너지시스템공학부 석박통합과정
2) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정
3) 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정
4) 서울대학교 에너지시스템공학부 조교수

인공신경망 기반 2차원 탄성과 자료로부터의 3차원 탄성과 체적 확장 기법 개발

이주완¹⁾, 한승훈²⁾, 박수환³⁾, 조용채^{4)*}

Development of 3-D seismic data transformation method from 2-D seismic data based on an artificial neural network

Juan Lee¹⁾, Seunghoon Han²⁾, Soohwan Park³⁾ and Yongchae Cho^{4)*}

2차원 탄성과 탐사는 3차원 탄성과 탐사에 비해 경제적이지만, 취득 가능한 자료의 양과 질이 한정적이다. 본 연구는 불규칙하게 분포된 2차원 탄성과 자료로부터 3차원 체적을 생성하는 생성형 인공신경망 기반의 기법을 제시한다. 선행 연구의 결정론적 기법은 2차원 탄성과 자료의 간격이 좁은 경우 높은 성능을 보였으나, 넓은 간격의 경우 무의미한 구조만을 생성하는 경향을 보인다. 이를 극복하기 위해 본 연구는 VQ-VAE 내부의 잠재공간에서 StyleGAN 기반 확률적 합성과 적대적 학습을 결합한 3단계 학습 전략을 제시한다.

이때 생성 신경망 모듈과 판별 신경망 모듈은 다양한 3차원 구조를 생성하는 데에 기여한다. 판별 신경망 모듈은 생성 신경망 모듈에서 생성된 잠재공간과 실제 3차원 탄성과 자료로 학습된 VQ-VAE의 잠재공간을 판별하여, 생성 신경망 모듈로 하여금 실제와 유사한 잠재공간을 생성하도록 유도한다. 이러한 적대적인 학습 과정을 거치는 과정에서, 본 기법은 실제와 유사한 범위의 주파수 대역을 반영한 다양한 지질학적 구조를 생성한다.

본 기법의 결과에 대한 분석 진폭 스펙트럼 분석을 통해 생성 체적이 원본의 대역제한 특성을 보존함을 확인하였고, 코히런스 및 경사 속성 비교를 통해 반사면의 횡방향 연속성이 유지됨을 검증하였다. 선행 연구와의 정량적 비교를 통해, 넓은 간격으로 분포한 2차원 자료를 입력하였을 때에도 확장 성능이 개선됨을 확인했다. 또한 본 기법이 생성한 다양한 3차원 체적 간의 통계적 분석을 수행하였고, 실제 현장에서 취득한 2차원 탄성과 자료에의 적용을 통해 추후 의사결정 과정에서의 활용 가능성을 확인하였다.

사 사

This work was also supported by Korea National Oil Corporation(KNOC) as part of the geological and geophysical evaluation of the South Sea of Korea. This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Climate, Energy & Environment (MCEE) of the Republic of Korea (No. 2022400000120).

References

- Lee, J. W., Lee, M. J., Min, D. J., & Cho, Y. (2024). Reviving legacy seismic data via machine learning technique?Part 1: Expanding 3-D seismic survey coverage with gated convolution GAN. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63, 1-18.
- Lee, J. W., Lee, M. J., Min, D. J., & Cho, Y. (2025). Reviving Legacy Seismic Data via Machine Learning Technique Part 2: Estimating 3D Seismic Volumes from 2D Seismic Lines with VQ-VAE. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Karras, T., Laine, S., & Aila, T. (2019). A style-based generator architecture for generative adversarial networks. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4401-4410).
- Van Den Oord, A., & Vinyals, O. (2017). Neural discrete representation learning. *Advances in neural information processing systems*, 30.

1) 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정
 2) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정
 3) 서울대학교 에너지시스템공학부 석박통합과정
 4) 서울대학교 에너지시스템공학부 조교수

비소 및 중금속 오염 토양 복구지역의 장기 모니터링을 통한 안정화 효율 및 토양의 질 평가

노영동¹⁾, 김정욱¹⁾, 전순원¹⁾, 박승호¹⁾, 박형민¹⁾, 채정원¹⁾, 이상민¹⁾, 정명재^{1)*}

Long-term Monitoring of Arsenic and Heavy Metal-Contaminated Soil Remediation Sites: Evaluation of Stabilization Efficiency and Soil Quality

Young Dong Noh¹⁾, Jeong Wook Kim¹⁾, Soon Won Jeon¹⁾, Seung Ho Park¹⁾, Hyeong Min Park¹⁾,
Jeong Won Chae¹⁾, Sang Min Lee¹⁾ and Myung Chae Jung^{1)*}

토양은 인간의 주거와 식량 생산을 지탱하는 중요한 자원이지만, 산업화와 광산 개발 등 인위적 활동으로 인한 유해금속 오염이 전국적으로 확산되며 인체와 생태계에 잠재적 위해를 미치고 있다. 이에 정부는 2007년부터 오염토양의 복원 정밀 조사와 설계를 실시하고, 2008년부터 본격적인 복원사업을 추진하였다. 지난 10여 년간 전국 광산 지역을 중심으로 생석회와 제강슬래그 등의 안정화제를 활용한 복원이 이루어졌으나, 복원 이후의 장기적 안정화와 토양 기능 회복 여부는 아직 충분히 검증되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 복원사업이 완료된 지역을 대상으로 장기 모니터링을 수행하여 안정화 효율과 토양 질 변화를 종합적으로 평가하고자 하였다.

모니터링 대상지는 광종(금속·석탄), 오염원소 농도 수준, 적용 안정화제 종류 및 토지 이용 유형(전·답)을 복합적으로 고려하여 전국 총 14개 지역을 선정하였다. 농경지 내 복토층과 안정화층에서 토양을 채취하였으며, 전함량 분석, SBRC 및 SPLP를 수행하여 오염물질의 이동성 및 생체 노출 가능성을 평가하였다. 아울러 토양 질 평가를 위해 pH, EC(전기전도도), CEC(양이온교환용량), 유효인산 등 주요 이화학적 항목을 분석하였다(Poggio et al., 2008).

토양 질 분석 결과, 대부분의 지역에서 pH, EC, CEC 항목은 기준 범위 내를 유지하나 유효인산은 14개 지역 중 9개 지역에서 기준치에 미달한 것으로 확인되어, 작물 생육에 필요한 양분 공급 능력이 일부 취약한 상태로 나타났다. 안정화 효율 평가를 위한 SBRC 실험에서는 1개 지역을 제외한 13개 지역이 기준 이내로 나타났으며, SPLP 실험에서는 모든 대상 지역이 기준치 이하로 확인되어 외부 강수에 의한 오염물질 용출 위험은 낮은 수준으로 평가되었다(Juhasz et al., 2009). 전함량 분석 결과에서는 복원사업 시행 이전과 비교하여 대부분의 지역에서 유해금속 농도가 전반적으로 감소하였으며, 이 중 4개 지역은 토양오염우려기준 미만으로 검출되었다.

종합적으로, 모니터링 결과 대부분의 복원 지역에서는 안정화가 양호하게 유지되고 있으나, 일부 지역에서는 안정화 효율 저하와 토양 질 회복 미흡이 확인되었다. 또한 이번 조사에 포함되지 않은 지역에 대한 실태 파악이 아직 부족하다. 따라서 향후에는 모니터링 범위를 확대하고, 토지 이용 특성을 반영한 장기 평가 체계를 구축할 필요가 있다. 이를 통해 복원사업의 효과를 객관적으로 검증하고 효율적인 사후관리 방안 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국광해광업공단의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Juhasz, A.L., Weber, J., Smith, E., Naidu, R., Ress, M., Rofe, A., Kuchel, T., and Sansom, L., 2009, "Assessment of four commonly employed in vitro arsenic bioaccessibility assays for prediction in vivo relative arsenic bioavailability in contaminated Soil", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 43, No. 24, pp. 9487-9494.
- Poggio L, B., Vrscaj, E., Hepperle, R., Schulin, and F.A. Marsan., 2008, "Introducing a method of human health risk evaluation for planning and soil quality management of heavy metal-polluted soils-An example from Grugliasco(Italy)", *Landsc. Urban Plan.* Vol. 88, pp. 64-72.

*Corresponding Author: jmc65@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과

슈미트해머 반발 경도를 이용한 단층손상대 특성 분석

노정두^{1)*}, 강성승²⁾

Analysis of fault damage zone characteristics using Schmidt hammer rebound hardness

Jeongdu Noh^{1)*}, Seung-Seong Kang²⁾

단층대는 크게 단층핵과 단층손상대로 구분된다. 단층핵은 단층대 내 가장 변형이 집중된 부분으로 단층의 미끄러짐이 발생한 구간이며 단층손상대는 변형이 수반된 단층핵 주변부로 모암의 형태를 관찰할 수 있는 부분이다(Choi et al., 2016). 단층대는 균열 형태, 균열 빈도 등을 이용하여 분류되지만, 전문가 숙련도에 따라 다르게 정의될 수도 있다. 본 연구는 단층대의 물리역학적 특성을 이용하여 모암-단층손상대-단층핵 분류를 위한 기초연구로 슈미트해머 반발 경도를 이용하였다. 연장 약 30 m의 비탈면에 노출된 단층대를 HS-1과 HS-2의 2개 지역으로 구분하여 슈미트해머를 타격하였다. 그 결과 모암과 손상대의 경우 슈미트해머 반발 경도가 측정되었고, 단층핵에서는 반발 경도가 나타나지 않았다. 반발 경도는 모암-단층손상대 경계부에서 가장 높게 나타났고, 단층손상대 구간으로 진입한 이후 급격히 감소하였다. 분석 결과 슈미트해머 반발 정도 측정 유무와 그 결과를 이용하여 특정 범위를 분류할 수 있을 것으로 판단되나 더 많은 샘플 결과 그리고 정성적 분류 결과와 비교 분석도 필요하다.

사 사

본 연구성과는 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 25411851).

References

Choi, J.H., Edwards, P., Ko, J., Kim, Y.S., 2016, Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach, *Earth-Science Reviews*, 152, 70-87.

*Corresponding Author: wjden1655@chosun.ac.kr

1) 조선대학교 공학기술연구원 연구원

2) 조선대학교 첨단에너지공학과 교수

LFP 배터리에서 침출제에 따른 리튬 회수 연구

권효정¹⁾, 김민혁¹⁾, 차종문^{2)*}

Study on Lithium Recovery according to Leaching Agents in LFP battery

Hyojung Kwon¹⁾, Minhyeok Kim¹⁾ and Jongmun Cha^{2)*}

탄소중립 실현과 친환경 에너지 전환이 강조됨에 따라 전기자동차(Electric Vehicle, EV) 및 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS) 분야에서 리튬이온 배터리의 수요가 증가하고 있다. 특히 LFP(LiFePO₄) 배터리는 가격 경쟁력과 높은 안전성을 바탕으로 시장 점유율이 확대되고 있으며, 이에 따라 사용 후 LFP 배터리의 발생량 또한 증가하고 있다. 사용 후 LFP 배터리에는 주요 유가금속인 리튬이 포함되어 있어 효율적인 리튬 회수 기술의 필요성이 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 사용 후 LFP 배터리를 대상으로 다양한 침출제를 적용하여 리튬 회수 공정을 비교하였다. 기존 강산 기반 침출 공정은 산성 폐수 발생 등 환경적 부담이 크고, 리튬뿐 아니라 Fe, Al 등의 금속을 동시에 용출시키는 비선택적 특성을 가지므로 추가적인 정제 공정이 요구된다. 이를 고려하여 황산(H₂SO₄), 아황산암모늄((NH₄)₂SO₃), 옥살산(C₂H₂O₄)을 침출제로 적용하고 농도, 열처리 온도, 침출 시간, 침출 온도 및 교반 속도를 변수로 설정하여 침출 효율을 비교하였다. 황산 침출에서는 Li 87.65%의 높은 회수율을 보였으나 Fe(74.74%), Al(84.84%)의 동시 침출이 크게 나타났다. 반면 아황산암모늄은 Li 65.69%의 침출 효율을 나타냈지만 Fe(0.97%), Al(2.75%)의 침출이 매우 낮아 리튬 선택적 침출에 유리한 특성을 보였다. 옥살산을 이용한 침출에서는 최대 Li 97.52%의 높은 침출 효율을 나타냈으며 황산 대비 불순물 금속의 침출이 감소하는 경향을 확인하였다. 본 연구 결과는 유기산 및 알칼리 기반 침출제가 기존 강산 기반 공정을 대체할 수 있는 친환경 리튬 회수 공정으로 활용될 가능성을 제시하였다.

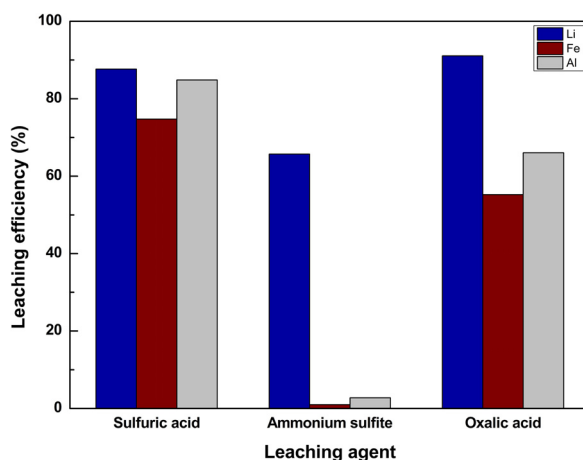


Fig. 1. Effect of different leaching agents (sulfuric acid, ammonium sulfite, and oxalic acid) on the leaching efficiency of Li, Fe, and Al

사 사

본 연구는 자원공학회의 주요사업(16-330)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Kim, H.S., Kim, B., and Kim, D.W., 2024. Pre-leaching of lithium and individual separation/recovery of phosphorus and iron from waste lithium iron phosphate cathode materials. *Clean Technology*, 30(1), 28–36.

*Corresponding Author: jmcha@dau.ac.kr

1) 동아대학교 에너지·자원공학과 석사과정

2) 동아대학교 환경·에너지공학부 미래에너지공학전공 교수

미복구 농경지에서 안정화제 적용에 따른 안정화 효율 비교

서지호^{1,2}, 김규진¹, 김정욱², 전순원², 박형민², 박제현³, 오연수³, 정명채^{2)*}

Evaluation of Stabilization Efficiency of Stabilizers Applied in Non-Remediated Agricultural Experimental Plots

Ji Ho Seo^{1,2}, Gyu Jin Kim¹, Jeong Wook Kim², Soon Won Jeon², Hyeong Min Park², Jay Hyun Park³, Youn Soo Oh³ and Myung Chae Jung^{2)*}

광산 활동으로 인한 농경지 토양오염은 농업 생산성과 환경 안전성 측면에서 지속적인 관리가 요구되는 환경 문제이다. 국내에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 토양개량·복원사업을 통해 안정화제를 적용하는 정화기술이 널리 활용되고 있으며, 사업 수행 과정에서 적용하는 안정화제의 적정성을 평가하기 위해 현장시험구 설치 및 모니터링이 수행되고 있다.

그러나 사업 수행 시 마다 실내시험과 현장시험이 수행됨에도 불구하고 실제 적용되는 안정화제의 종류가 제한적으로 적용되는 등 사업 효율성 측면에서 해당 절차에 대한 재검토 필요성이 제기되고 있다. 이에 본 연구에서는 토양개량·복원 사업이 수행되지 않은 폐광산 인근 농경지를 대상으로 현장시험구를 설치하고 안정화제 적용에 따른 토양 특성 변화 및 비소의 거동 특성을 비교·평가하였다.

연구 대상지는 기존 정밀조사 자료를 기반으로 오염 특성을 고려하여 선정하였으며, 실내시험 결과를 바탕으로 석회석, 제강슬래그 및 석회석·제강슬래그 혼합 안정화제를 적용한 시험구와 대조구를 설치하였다. 시험구는 복토층과 안정화층으로 구분하여 조성하였으며, 시험구 설치 이후 토양의 질(pH), 전기전도도(EC), 유효인산, 양이온교환능력(CEC), 비소 및 중금속 농도를 분석하였다. 또한 안정화 효율 평가를 위하여 SBRC(Solubility/Bioavailability Research Consortium) 기반 생물학적 이용 가능성과 연속추출(Wenzel et al., 2001) 분석을 수행하였으며, 식물체 분석을 통해 안정화제 적용에 따른 중금속 흡수 특성을 비교하였다.

토양 질 평가 결과 pH는 모든 시험구에서 중성 범위를 유지하였으며, EC 및 CEC 또한 시험구 간 큰 차이를 보이지 않아 안정화제 적용에 따른 토양의 물리·화학적 기능 저하는 확인되지 않았다. SBRC 분석 결과 비소의 생물학적 접근성은 시험구별로 상이한 경향을 보였으며, 특히 논으로 이용되는 시험구에서 밭 시험구 대비 높은 값을 나타냈다. 연속추출 결과에서는 대부분의 시료에서 이동도가 낮은 F4 및 F5 분획이 약 55~77%로 우세하게 나타나 비소가 주로 철산화물 결합 및 잔류상 형태로 존재하는 것으로 확인되었다. 식물체 분석 결과 동진철광 시험구에서는 카드뮴, 구리 및 아연의 흡수량 감소 경향이 일부 확인되었으며, 옥동광산 1009 시험구에서는 안정화제 적용에 따라 식물체 비소 농도가 대조구 대비 감소하는 경향이 나타났다.

이상의 결과는 안정화제 적용 효과가 토양 특성, 오염 형태 및 토지 이용 조건에 따라 다르게 나타날 수 있음을 시사하며, 향후 지속적인 시험구 모니터링을 통해 안정화 기술의 적용성과 관리 방안을 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

References

- USEPA Region 8, 2012. Standard Operation Procedure, In Vitro Bioaccessibility(IVBA) Procedure for Arsenic.
 Wenzel, W.W., Kirchbaurner, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E. and Adriano, D.C., 2001. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure, *Analytica Chimica Acta*, 436(2), p.309-323
 USEPA Method 1312, 1994. Synthetic Precipitation Leaching Procedure. Test Methods for Evaluating Solid Waste:Physical/Chemical Methods(SW-846). P.30

*Corresponding Author: jmc65@sejong.ac.kr

1) (주)지오그린21

2) 세종대학교 에너지자원공학과

3) 한국광해광업공단 기술연구원

수성 철망간 각 내 전략 금속, 희토류, 백금족 원소 농축에 대한 버나다이트의 구조적 제어 및 미세 영역 분배

이승열^{1)*}, Huifang Xu²⁾

Structural Control and Micro-domain Partitioning of Vernadite on the Enrichment of Strategic Metals, REEs, and PGEs in Hydrogenetic Ferromanganese Crusts

Seungyeol Lee^{1)*} and Huifang Xu²⁾

서태평양 마젤란 해저산(수심 약 2,150 m)에서 산출되는 수성 철망간각(hydrogenetic ferromanganese crust)을 대상으로, 망간(Mn) 산화물인 버나다이트(vernadite)의 광물학적 구조와 미세 영역별 원소 분배 특성을 분석하여 핵심 전략 금속, 희토류 원소(REE), 백금족 원소(PGE)의 농축 메커니즘을 규명하였다. 방사광 가속기 기반의 PDF(Pair-distribution function) 총산란 분석과 고해상도 XRD, TEM, SEM-EDS, EPMA 등 첨단 분석 기법을 통합적으로 적용한 결과, 철망간 각의 주 구성 광물은 7 Å 및 10 Å 층간 간격을 갖는 버나다이트의 혼층(interstratified) 나노상으로 확인된다. 또한 철(Fe)은 독립적인 철(수)산화물 단일 상으로 존재하기보다는 버나다이트 구조 내부, 특히 망간 팔면체 층(Mn layer)에 치환되거나 결합한 형태(Fe-bearing vernadite)를 띠는 것으로 나타났다 [1,2]. 최대 약 421 m²/g에 달하는 높은 비표면적과 10 nm 이하의 나노 공극이 발달한 이 나노 미세 구조는 해수 내 다양한 금속 이온의 흡착과 응축 반응을 극대화하는 반응 플랫폼으로 작용한다. 원소 상관관계 및 미세 구조 분석에 따르면, 버나다이트 내부에는 Fe 풍부(Fe-rich) 영역과 Mn 풍부(Mn-rich) 영역이 뚜렷하게 공존하며, 각 화학적 환경에 따라 서로 다른 자원 원소를 선택적으로 농집하는 ‘미세 영역 분배’ 현상이 일어난다. Fe 풍부 영역에서는 인(P)과 REE가 뚜렷한 동반 농집 경향을 보이는데, 이는 구조 내에 도입된 Fe를 바탕으로 형성된 인산염(phosphate) 계열 결합자가 경산(hard Lewis acid) 성향의 REE를 화학적으로 강하게 고정하기 때문이다. 반면 Mn 풍부 영역에는 니켈(Ni), 코발트(Co) 등 핵심 전략 금속과 더불어 백금(Pt)을 포함한 PGE가 집중적으로 분포한다. 이는 연산(soft Lewis acid) 성향의 PGE 및 전이금속이 Mn(IV) 산화물 층과 강한 공유 결합을 형성하는 기작에 기인하며, 특히 10 Å 버나다이트의 확장된 층간 공간이 백금족 복합체를 수용하고 선택적으로 포획하는 데 매우 유리한 구조적 이점을 제공하는 것으로 해석된다. 결론적으로 본 연구는 버나다이트의 층간 구조(7/10 Å), Fe의 구조적 도입, 그리고 인산염 매개 결합이 미세 척도에서 원소 분배를 제어한다는 통합적인 결정화학적 모델을 제시한다. 이는 향후 심해 철망간 각을 기반으로 한 핵심 광물 탐사 및 선별 추출 전략 수립은 물론, 전 지구적 산화환원 환경 변화를 추적하는 지화학적 기록체 해석에 중요한 학술적 기초 자료를 제공한다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 지원사업(과제번호: RS-2024-00342773), 그리고 한국연구재단 G-LAMP 사업(과제번호: RS-2024-00445180)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Lee, S., Xu, H., Xu, W., & Sun, X. (2019). The structure and crystal chemistry of vernadite in ferromanganese crusts. *Structural Science*, 75(4), 591-598.
- [2] Lee, S., & Xu, H. (2024). Millennial-scale paleoclimate changes recorded in Holocene ferromanganese crusts with oscillatory micro-bands: insights from mineralogical and chemical variations in hydrogenetic ferromanganese crusts of the Magellan Seamounts. *Clays and Clay Minerals*, 72, e21.

*Corresponding Author: slee2@cbnu.ac.kr

1) 충북대학교 지구환경과학과 교수

2) University of Wisconsin-Madison 지질학과 교수

왜 전기차 이용자는 요금제에 반응하지 않는가: 가격 전이 비대칭성과 가격 신호 희석에 관한 실증 연구

안지우¹⁾, 김지효^{2)*}

Muted Price Signals: Empirical Evidence of Price Transmission Asymmetry and Its Effect on EV Charging Behavior

Jiwoo An¹⁾ and Jihyo Kim^{2)*}

에너지 전환에 따른 전력 계통의 유연성 확보를 위해 전기차 충전 수요관리의 중요성이 증대되고 있다. 정부는 도매 시장의 자원 최적화를 유도하고 있으나, 소매 시장의 경직된 요금 구조로 인해 도매 시장의 가격 신호가 소비자에게 온전히 전달되지 못하는 비대칭성 문제가 제기된다. 본 연구는 실증 데이터를 바탕으로 이러한 가격 신호의 감쇄 현상을 규명하고, 이것이 이용자의 실제 충전 거동 및 유연성 자원 확보에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 계시별 요금제(Time-of-Use, TOU)가 도입된 한국전력공사의 아파트 단지 내 완속 충전 데이터와 고정 요금제 체계를 적용하는 기후에너지환경부의 충전 이력 데이터를 실증 자료로 활용한다. 먼저, 비지도 학습 기반의 클러스터링을 통해 도착 및 체류 시간 등 생활 패턴에 따른 사용자 이질성을 식별한다. 이를 바탕으로 운영 주체별 요금 체계 차이를 반영한 회귀 모델을 적용하여, 가격 차이의 크기가 실제 충전 시작 시점의 변화를 유도하는 유의미한 변수인지를 검증하고 충전 수요의 가격 탄력성을 추정한다. 분석을 통해 도매 시장의 가격 변동성이 소매 시장의 요금 구조에 의해 희석되는 기제를 실증함으로써 현행 충전 요금 정책의 실효성을 다각도로 검토한다. 특히 가격 신호에 반응하기 위해 이용자가 감수하는 불편 비용의 임계점을 도출하고자 한다. 이를 통해 가격 신호가 실제 수요 변화로 이어지는 메커니즘을 규명함으로써, 향후 실효성 있는 수요관리 정책 수립 및 자원 가치 산정의 기초 자료로 활용될 것을 기대된다.

References

- Li, X., & Jenn, A. (2022). Energy, Emissions, and Cost Impacts of Charging Price Strategies for Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 56(9), 5724-5733.
- Yang, S. Y. (2024). Assessing potential of optimized Time-of-Use pricing for Electric Vehicle charging in Deep Vehicle-Grid integration system. Master's Thesis, Korea University.
- Sadeghianpourhamami, N., et al. (2018). Quantitative analysis of electric vehicle flexibility: A data-driven approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 95, 451-462.
- Sobhy, A. S. M., et al. (2025). When and where it counts: enhancing demand response in electric vehicle charging. *Applied Energy*, 401, 126739.

*Corresponding Author: jihyokim@kaist.ac.kr

1) 한국과학기술원(KAIST) 녹색성장지속가능대학원 석사과정

2) 한국과학기술원(KAIST) 부교수

냉방도일(CDD) 충격과 전력 수요 반응: 에너지 소비 구조 변화의 실증 분석

정수빈^{1)*}, 양하연¹⁾

Economic Effects of Oil Price Shocks: A Comparison between Korea and Taiwan

Subin Jung^{1)*} and Hayeon Yang¹⁾

본 연구는 기후변화 심화와 에너지 전환이 진행되는 가운데 여름철 전력 피크수요 증가의 원인을 분석하고 전력 소비 증가의 수요 원천을 정량적으로 파악하고자 한다. 최근 이상기후로 냉방 수요가 증가하는 한편, 전기차 확산 등 에너지 전환 과정에서 에너지 소비의 전력 집중도가 높아지고 있어 전력 수요 증가가 기후 요인에 의한 것인지 또는 에너지 소비 구조 변화에 따른 것인지에 대한 구분이 중요해지고 있다. 이를 위해 본 연구는 미국 에너지정보청(EIA)이 제공하는 냉방도일(Cooling Degree Days, CDD)과 석유제품 소비, 천연가스 소비, 전력 소비의 월별 데이터를 사용하였으며, 분석 기간은 2010년부터 2025년까지이다. 분석 방법으로는 VAR(Vector Autoregression) 모형과 충격반응함수(Impulse Response Function, IRF)를 적용하여 CDD 충격이 에너지 소비에 미치는 영향을 추정하였다.

분석 결과, 석유제품 및 천연가스 소비에 비해 전력 소비가 CDD 충격에 가장 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 최근 시기로 갈수록 전력 소비의 기후 민감성이 확대되는 경향이 확인되었다. 또한 전력 소비를 가정용, 상업용, 산업용으로 구분한 분석에서는 가정용과 상업용 전력 소비가 CDD 충격에 상대적으로 높은 민감도를 보인 반면, 산업용 전력 소비의 반응은 비교적 제한적인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 전력 소비 증가의 수요 원천을 기후 요인과 에너지 소비 구조 변화로 구분하여 정량적으로 파악할 필요성을 제기한다. 나아가 전력 수요 증가를 유발하는 수요 부문의 변화 추이와 구조적 특성에 따라 차별화된 전력 수요 관리 전략을 마련할 필요가 있음을 시사한다.

*Corresponding Author: subin.jung@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정

유가 충격의 경제적 파급효과: 한국과 대만의 비교

양하연^{1)*}, 정수빈¹⁾

Economic Effects of Oil Price Shocks: A Comparison between Korea and Taiwan

Hayeon Yang^{1)*} and Subin Jung¹⁾

본 연구는 글로벌 유가 충격에 대한 한국과 대만의 거시경제 반응 차이를 비교하여 제조업 중심 경제에서 원자재 가격 충격의 전달 양상을 분석하고자 한다. 두 국가는 에너지 수입 의존도가 높고 제조업 및 수출 비중이 큰 경제 구조를 가지고 있으나, 산업 구조와 글로벌 가치사슬(Global Value Chain) 내 위치에서는 차이를 보인다. 분석에는 한국과 대만의 생산자물가지수(PPI)와 수출액의 월별 데이터를 사용하였으며, 기간은 2003년부터 2025년까지를 대상으로 하였다. 유가 충격이 각 변수에 미치는 영향을 파악하기 위해 VAR(Vector Autoregression) 모델을 구축하고 충격반응함수(Impulse Response Function, IRF)를 통해 변수 간 반응을 추정하였다.

분석 결과, 유가 충격에 대한 PPI와 수출의 반응은 두 국가에서 서로 다른 양상으로 나타나는 것으로 관찰되었다. 유가 충격에 대해 대만의 PPI와 CPI는 한국보다 더 크게 반응하는 반면, 수출액은 한국에서 더 지속적인 반응이 나타났다. 이러한 차이는 원자재 가격 충격이 각 국가 경제에 전달되는 경로가 동일하지 않을 가능성을 시사한다. 특히 제조업 중심 경제에서 산업 구조와 글로벌 가치사슬 내 역할의 차이가 유가 충격의 파급 양상에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 본 연구는 한국과 대만의 비교를 통해 유가 충격이 거시 변수에 전달되는 과정을 살펴보고, 산업 구조 차이가 원자재 가격 충격의 경제적 파급에 어떠한 의미를 가지는지를 탐색한다는 점에서 의의를 가진다.

*Corresponding Author: hayeon0513@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정

용도별 전력수요를 이용한 냉방도일 기준온도 추정 및 비교

한성웅^{1)*}

Estimation and Comparison of Cooling Degree-Day Base Temperatures Using Sectoral Electricity Demand

Sungwoong Han^{1)*}

본 연구는 냉방도일(Cooling Degree Days, CDD)의 기준온도(Base Temperature)가 전력수요 설명력에 미치는 영향을 분석하고, 용도별 전력사용량 데이터를 이용하여 전력 용도에 따른 적정 기준온도를 추정하였다. 냉방도일은 전력수요에 즉, 에너지경제학, 농업경제학, 기후변화 등 다양한 분야에서 사용되어왔으나, CDD 산정 기준온도는 관행적으로 24℃로 사용되어왔다. 기존 연구들은 해외 기준온도를 그대로 차용하거나, 도시별 또는 지역별 데이터를 통해 독립적인 냉난방도일을 추정하였으나, 본 연구는 용도마다 발생하는 전력소비패턴의 변화에 따른 용도별 적정 CDD 기준온도를 추정하였다는 점에서 차별성을 갖는다.

본 연구는 전국 일별 평균기온 자료를 이용하여 서로 다른 기준온도(0~36℃)에 따라 CDD를 산정하고, 이를 월별 용도별 전력소비량 자료와 결합하여 선형 회귀모형(Linear Regression Model)을 추정하였다. 분석은 여름철(5~9월)을 대상으로 수행하였으며, 로그 변환한 전력수요를 종속변수로 설정하고, 전력수요의 장기 추세를 통제하기 위해 추세 변수를 포함하였다. 각 기준온도별 회귀모형의 설명력을 비교함으로써 전력 용도별 적정 기준온도를 식별하였다.

분석 결과, 전력수요를 가장 잘 설명하는 CDD 기준온도는 용도에 따라 상이한 것으로 나타났다. 이는 단일 기준온도를 일률적으로 적용하는 방식이 용도별 전력소비의 기온 민감도를 충분히 반영하지 못할 수 있음을 시사하며, 향후 기온 기반 전력수요 분석과 관련 정책 수립에서는 용도별 특성을 반영한 보다 세분화된 기준온도 설정이 필요할 수 있음을 의미한다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2025-04442986).

*Corresponding Author: sungwoong0129@snu.ac.kr

1) 서울대학교 협동과정 기술경영경제정책전공 석사과정

암반 불연속면의 공학적 평가를 위한 AI 기반 절리 추출 자동화 프레임워크에 관한 연구

박휘훈¹⁾, 김상섭¹⁾, 이경원¹⁾, 김태현¹⁾, 김광염^{3)*}

AI-Based Automated Joint Extraction Framework for the Engineering Assessment of Rock Discontinuities

Hwhihun Park¹⁾, SangSeob Kim²⁾, GyoungWon Lee²⁾, TaeHyun Kim²⁾ and Kwangyeom Kim^{3)*}

암반 불연속면은 암석 내 연속성이 물리적으로 단절된 면으로서, 터널 굴착 시 암반 거동 예측과 안정성 확보를 위해 정확한 평가가 요구되는 핵심 요소이다. 그러나 기존의 불연속면 평가는 현장 기술자의 경험과 주관적 판단에 크게 의존하고 있어, 평가의 객관성과 일관성 확보에 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 최근에는 인공지능(AI)을 활용한 불연속면의 자동 추출 및 특성화 연구가 활발히 수행되고 있다. 다만, 기존 연구의 대부분은 국소 영역을 중심으로 수행되어 터널 막장면 전체의 구조적 특성을 충분히 반영하지 못하고, 추출 결과의 단절성과 연결성 부족으로 인해 공학적 평가에 직접 활용하는 데 제약이 있다.

본 연구에서는 암반 불연속면의 공학적 평가를 위한 AI 기반 절리 추출 자동화 프레임워크를 제안하였다. 이를 위해 현장에서 취득한 터널 막장면 이미지를 입력 자료로 활용하고, 합성곱신경망 기반 인코더와 다중 레이어 특징 통합 기법을 적용한 딥러닝 모델을 구축하였다. 또한 비대칭 손실함수와 전이학습 기법을 도입하여 국소 영역의 추출 정밀도를 향상시키는 동시에, 막장면 전체의 불연속면을 반영하고자 하였다. 아울러 추출된 불연속면의 단절성을 보완하기 위해 스켈레톤 기반 구조 복원, 곡률 기반 선분 분리, 반복적 연결 과정을 수행하였다. 이후 방향 기반 절리군 분류를 바탕으로 절리군별 재연장, 중복 제거 및 과도한 연결 억제를 적용함으로써 공학적 평가가 가능한 절리 구조를 구축하였다. 최종적으로, AI 기반 추출 결과와 프레임워크 적용 후 결과를 정량적으로 비교·분석하여, 공학적 평가를 위한 보정 과정의 필요성을 확인하고 제안한 프레임워크의 적용 타당성을 검토하였다.

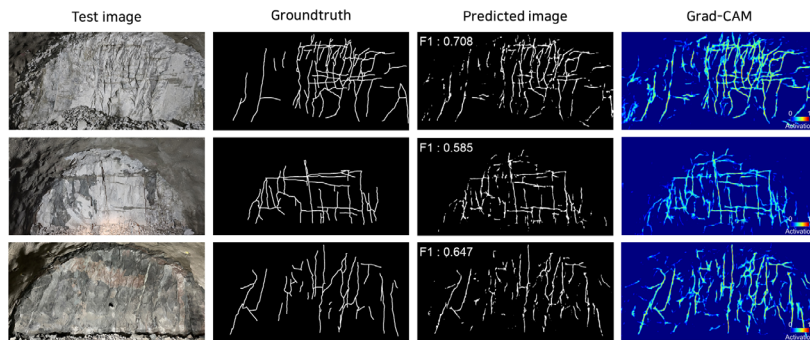


그림 1. AI 기반 터널 막장면 불연속면 추출 결과

사 사

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 부산광역시의 지원을 받아 수행된 연구이다(지역산업연계 대학 Open-Lab 육성지원사업).

References

Chen, J., Zhou, M., Huang, H., Zhang, D., & Peng, Z. (2021). Automated extraction and evaluation of fracture trace maps from rock tunnel face images via deep learning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 142, 104745.system in diesel-free isolated communities. *Applied Energy*, 170(1), 101-115.

1) 국립한국해양대학교 해양과학기술융합학과 석사과정
2) 국립한국해양대학교 해양에너지자원공학과 박사과정
3) 국립한국해양대학교 에너지자원공학과 교수

증기압 파쇄제 파암공법에서 모음공 천공 패턴을 적용한 발파 설계식 개선에 관한 수치해석적 연구

최기환¹⁾, 박승환²⁾, 이동현³⁾, 민경조⁴⁾, Daisuke Fukuda⁴⁾, 조상호^{1)*}

A Numerical Study on the Improvement of Blasting Coefficients by Applying a Hole Cluster Drilling Pattern in a Steam-Pressure Rock Fracturing Method

Gihwan Choi¹⁾, Donghyun Lee²⁾, Seunghwan Park³⁾, Gyeongjo Min⁴⁾, Daisuke Fukuda⁴⁾ and Sangho Cho^{1)*}

도심지 인구 과밀화에 따른 재개발 사업의 확대에 인하여 도심지 내 발파 시공 수요가 급증하고 있다. 그러나 발파 진동 및 소음으로 인한 민원 제기와 공사 중단 사례가 빈번해짐에 따라, 환경 규제에 대응하기 위한 미진동 공법 등이 널리 활용되고 있다. 하지만 기존 미진동 공법은 암반 특성에 따라 기술적 한계가 존재하여, 이에 대한 대안으로 증기압 파쇄제 파암 공법이 대두되고 있다.

기존 증기압 파쇄제 파암공법은 일반 발파 패턴 적용 시 단일공 기준 2방향 균열 형성에 그쳐 파쇄 효율이 제한적이라는 단점이 있다. 또한, 발파 계수가 파단면적당 장약량(kg/m^2)으로 산정되어 체적당 장약량(kg/m^3)을 기반으로 하는 표준 발파 설계식과의 호환성이 미비하다는 문제점이 있다. 본 기법은 일반적인 최소저항선과 공간격을 고려한 가상의 천공 지점을 설정하고, 그 주변에 여러 개의 공을 밀집시키는 모음공 천공 패턴을 적용하였다. 이를 통해 근접한 공을 통해 자유면 확보와 다수의 균열 형성을 유도하여 파쇄 효율을 높였으며, 기존의 면적당 장약량(kg/m^2) 기준 발파계수를 체적당 장약량(kg/m^3) 단위로 개선함으로써 일반 발파 설계 메커니즘과의 호환성을 확보하였다.

이를 위해 본 연구에서는 동적 하중에 의한 균열 전파 해석에 특화된 3D-FDEM(Finite Discrete Element Method)을 활용하여 모음공 패턴의 파괴 메커니즘을 규명하였다. 특히 가스압에 의한 균열 전파가 지배적인 증기압 파쇄제 파암공법의 특성을 고려하여, 가스 팽창 및 침투 효과를 모사할 수 있는 가스존(Gas zone) 모델을 개발하고 이를 해석에 적용하였다.

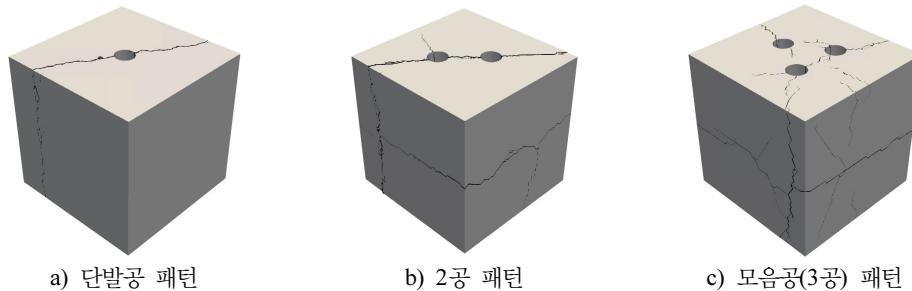


그림 1. 균열 가스압력 조건 3D-FDEM 해석 결과

References

- A. Munjiza, 2004, The Combined Finite-Discrete Element Method, John Wiley & Sons, Chichester
 W. I. Duvall, 1953, Strain-wave shapes in rock near explosions, Geophysics, Vol.18, No. 2, pp.310-323
 M. S. Kim, H. M. Kang, S. S. Jeong, Y. Y. Jeong, H. Park, S. H. Cho, 2015, Determination of Combustion Propagation Velocity of Thermite Reaction Mixture Using Continuous VOD Measurement System, Explosives and Blasting, Vol.33, No. 3, pp.21-28

*Corresponding Author: chosh@jbnu.ac.kr

- 1) 전북대학교 자원에너지공학과
 2) 원하건설(주)
 3) ㈜은우
 4) Faculty of Engineering, Hokkaido University

고준위방사성폐기물 심층처분시설 안정성 평가를 위한 국내 결정질암의 취성파괴 특성 연구

천대성^{1)*}, 최준형²⁾, 정용복¹⁾

Brittle Failure Characteristics of Korean Crystalline Rocks: Implications for the Safety of High-Level Waste Deep Geological Disposal

Dae-Sung Cheon^{1)*}, Junhyung Choi²⁾ and Yong-Bok Jung¹⁾

본 연구는 고준위방사성폐기물 심층처분시설의 역학적 안정성을 확보하기 위해, 국내 처분장 건설 예정 부지의 주요 암종 중 하나로 고려되는 결정질암의 취성파괴 특성을 규명하는 것을 목적으로 한다. 심층처분시설은 심부 500 m 전후 또는 그 이하에 건설될 가능성이 있어 높은 현지응력 환경에 위치하여 굴착 시 공동 주변에 응력 집중으로 인한 스폴링(Spalling) 및 슬래빙(Slabbing) 등 점진적인 취성파괴가 발생할 가능성이 높다.

이에 본 연구에서는 국내 대표 결정질암인 화강암과 편마암을 대상으로 취성파괴 특성을 평가할 수 있다고 알려진 손상 제어시험을 통한 취성파괴 손상파라미터를 산정하였으며, 손상파라미터에 따른 파괴 특성의 형태를 검토하였다. 또한 국내에서 수집된 현지응력 자료와 일축압축강도 자료를 토대로 취성파괴 가능성에 관해 평가하였다. 본 연구의 결과는 취성파괴 거동 특성은 처분장의 역학적 건전성을 평가하는 핵심 지표로 활용될 수 있다. 향후 국내 처분부지가 결정되거나 결정되기 전에 결정질암에서 발생할 수 있는 취성파괴에 관해 평가함으로써 처분시설의 단기적 안정성뿐 아니라 장기 안정성에 관한 설계 및 부지 선정의 기술적 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업(26-3112)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Martin, C.D. and Christiansson, R., 2009. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 46(2), 219-228.

*Corresponding Author: cds@ksmer.or.kr

1) 한국지질자원연구원 국토안전연구본부 책임연구원

2) 한국지질자원연구원 국토안전연구본부 선임기술원

열개분지 내 다중퇴적기원지 시스템의 저류층 이질성 분석: 시후(Xihu)분지 사례를 활용한 3차원 수조실험

정소정¹⁾, 김원석^{1)*}

Reservoir Heterogeneity of a Multi-Source Sediment Routing System in a Rift Basin: Insights from 3D tank Experiments with Application to the Xihu Basin

Sojung Jung¹⁾ and Wonsuck Kim^{1)*}

열개 분지에서는 다중 퇴적 기원지가 공존하며 상호작용하는 경우가 흔하지만, 기존 연구는 대부분 상류에 위치한 단일 기원지를 중심으로 퇴적체 발달을 해석하여 다중 퇴적 기원지 시스템의 지형 변화와 층서 발달을 충분히 설명하지 못하였다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 두 개의 퇴적 기원지를 모사한 3차원 수조 실험을 수행하고, 세 가지 속도의 상대적 해수면 변동 조건에서 선상지-삼각주 시스템의 발달을 분석하였다.

실험 결과, 경계 이동의 규모와 주기는 상호작용 구간 내 저류층의 두께와 측방 연속성을 결정하는 중요한 요인으로 작용하였다. 경계 이동 규모가 클수록 저류암과 덮개암이 광범위하게 교호하며 중첩될 가능성이 증가하고, 경계 이동 주기가 길수록 개별 퇴적 단계에서 두꺼운 퇴적층이 형성되는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 동중국해 대륙붕분지의 Xihu Depression에서 보고된 다중 퇴적 기원지 상호작용 구간의 복잡한 층서 구조와 대규모 저류층 발달 양상을 설명할 수 있는 과정적 근거를 제공한다. 따라서 본 연구는 다중 퇴적 기원지 팬-델타 시스템에서 해수면 변동과 자생적 채널 이동이 결합하여 층서 발달과 저류층 분포를 조절하는 과정을 실험적으로 제시하며, 열개 분지에서의 석유·가스 탐사 및 저류층 해석에 활용될 수 있는 퇴적 모델을 제안한다.

사 사

본 연구는 한국석유공사 “남해대륙붕 종합기술평가” 사업과 산업통상부 유전개발사업출자의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Jung, S.J., Kim, W.S. and Paik, S.I., 2026. Effects of sea-level variations on fan-delta stratigraphy under multiple sediment sources: 3D tank experiments. *Journal of the Geological Society of Korea*, 62(1), 41-52.

*Corresponding Author: delta@yonsei.ac.kr

1) 연세대학교 지구시스템과학과

원유 · NGL 혼합을 통한 원유 생산광구 수익 개선 방안 연구

정예석^{1)*}, 임종필¹⁾

Study for Sales Increase and Process Efficiency through Crude Oil and NGL(Natural Gas Liquid) Blending

Yeaseok Jung^{1)*} and Jongpil Lim¹⁾

본 연구에서는 중양아시아 육상 원유 생산광구에서 가스 부산물로 생산되는 Natural Gas Liquid(C3~C5 조성, 이하 “NGL”)을 활용한 매출액 증대 방안에 대한 내용을 검토하였다. 생산물 Processing 중 분리된 수반가스의 일부는 액화 공정을 거쳐 NGL 제품으로 회수되며, 해당 지역에서는 NGL이 원유 대비 상대적으로 낮은 단가로 판매되고 있다. 이에 본 연구에서는 NGL의 원유 혼합(이하 “Blending”)시 판매 조건 만족 여부에 대하여 검토하고, 혼합에 따른 매출 증대 효과를 정량적으로 평가하였다.

AspenHYSYS 공정 시뮬레이션을 통해 원유 증기압(RVP, Reid Vapor Pressure)을 초과하지 않는 최대 NGL Blending Ratio(이하 “혼합율”)를 산출하고, 최종 혼합물을 일정 온도, 압력 조건의 탱크에 저장할 경우 부피 증감량을 확인하였다. 시뮬레이션 산출값들의 적정성 검증을 위해 가동 중인 시설에서 원유, NGL 샘플링 후 실험실에서 혼합율 별 부피 증가량을 분석하였으며, 결과값 간의 유사성을 확인하였다.

상기와 같이 NGL과 원유의 최적 혼합 기술 적용 시 추가 매출 발생이 예상되며, 이에 NGL의 부가가치 향상을 통한 광구 수익성 개선에 기여할 것으로 기대된다.

*Corresponding Author: yeaseok.jung@knoc.co.kr

1) 한국석유공사 E&P/에너지사업본부 글로벌기술센터

중질유 저류층에서 CSS 적용 성과 편차 분석

김주형^{1)*}, 이종용¹⁾

Analysis of CSS Performance Variation of in a Heavy-Oil Reservoir

Joohyung Kim^{1)*} and Jongyong Lee¹⁾

중질유 저류층은 높은 원유 점도로 인해 자연 생산만으로 충분한 생산성을 확보하기 어려워 열공법의 적용이 요구된다. 본 연구에서는 해외 중질유 유전을 대상으로 Cyclic Steam Stimulation(CSS) 공법을 적용하여 증산 효과를 평가하고, 적용 성과의 편차가 나타나는 원인을 핵심 인자 중심으로 분석하였다.

현장 적용 결과 CSS 적용 이후 전반적으로 생산성이 개선되며 증산 효과가 확인되었다. 그러나 저류층별로 증산효과를 비교한 결과, 동일한 공법을 적용하였음에도 증산량이 큰 저류층과 증산량이 상대적으로 작은 저류층으로 구분되는 경향이 나타났다. 본 연구에서는 저류층 간 성과 차이에 영향을 미치는 요인을 대수층의 세기(aquifer strength)와 저류층 압력(reservoir pressure) 두 가지 관점에서 분석하였다. 분석 결과, 상대적으로 저류층 압력이 낮은 저류층에서 CSS 적용 후 증산 효과가 제한적으로 나타나는 경향이 확인되었다. 이는 저압 조건에서 열에 의한 점도 감소 효과가 발생하더라도, 생산 단계에서의 구동력 및 압력 거동이 증산 성과를 제약할 수 있음을 시사한다. 또한 대수층의 세기 차이가 압력 유지 및 생산 반응에 영향을 미칠 가능성을 확인하였다.

이러한 분석 결과를 바탕으로, 저압 저류층에서의 생산성 개선 가능성을 검토하기 위해 Steam Flooding 적용을 포함한 추가 운전 전략을 현장 시험 단계에서 평가 중이다. 본 연구는 CSS 적용 시 성과 편차를 저류층 압력 및 대수층 영향으로 해석하고, 저압 구간의 생산성 개선을 위한 후속 운전 옵션을 실증 기반으로 검토한다는 점에서 의의가 있다. 본 결과는 중질유 열공법의 단계적 적용 및 운영 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

*Corresponding Author: jh.kim0121@knoc.co.kr

1) 한국석유공사 글로벌기술센터

광산현장 문서의 시각적 간섭을 고려한 VLM(Vision-Language Model) 기반 OCR 오류 탐지 개선

한지우¹⁾, 홍정화²⁾, 박준혁³⁾, 이희욱⁴⁾, 박세범⁵⁾, 문성현^{6)*}

VLM(Vision-Language Model)-based Optical Character Recognition Error Detection Considering Visual Noise of Mining Site Documents

Jiu Han¹⁾, Jeonghwa Hong²⁾, Junhyeok Park³⁾, Huiuk Yi⁴⁾, Sebeom Park⁵⁾ and Seonghyeon Moon^{6)*}

광산현장의 수기 문서는 핵심 정보를 담고 있어, 체계적 보관과 데이터화를 위해 OCR(Optical Character Recognition) 기술을 활용한다(Moon & Kim, 2023). 그러나 현장 특성상 기름 얼룩이나 스캔 노이즈 등 글자를 왜곡하는 시각적 간섭이 발생해 OCR 인식 오류를 유발한다(Magar et al., 2025). 이를 해결하기 위해 문서의 글자를 기반으로 교정을 시도하는 연구들이 진행되었지만, 글자 중심의 후처리 방식은 문서의 시각적 간섭을 고려하지 않아 정상 단어까지 수정하거나 문서 전체를 검사하여 불필요한 연산 비용을 발생시킨다. 본 연구는 위 한계를 보완하기 위해, 시각적 간섭과 글자의 문맥을 동시에 고려하여 OCR의 오류 발생 위치를 사전에 탐지하는 시각-언어 모델(Vision-Language Model, VLM) 기반의 프레임워크를 제안한다. 컴퓨터 비전 모델인 Vision Transformer(ViT)를 통해 수기 스캔 문서에서 훼손된 영역을 시각적으로 감지한다. 이와 동시에 언어 모델인 BERT(Bidirectional Encoder Representations from Transformers)를 활용하여 인식된 글자의 앞뒤 문맥적 흐름과 철자의 적절성을 파악한다. 이후, 문서 이미지 상의 시각적 훼손 위치와 인식된 글자의 위치를 한 공간 좌표에 겹친 후, 위치에 따른 글자의 오류 여부를 모델에 학습시킨다. 학습된 모델에 광산현장의 스캔 문서와 OCR 결과를 입력하면, 불필요한 전체 교정 없이 오류가 발생한 위치만을 탐지한다. 이를 통해 광산현장의 데이터 관리 효율성을 극대화하고, 문서 디지털화의 신뢰성을 높이는 데 기여한다.

사 사

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00241758). This study is supported by the Basic Research Project (GP2025-005) of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) funded by the Ministry of Science and ICT (MIST), South Korea.

References

- Moon, S. and Kim, J. (2023). "Deep Learning-based Automated Sentence Segmentation for Digitization of Offline Document from Industrial Jobsites.", *2023 Spring Conference of Korean Institute of Industrial Engineers*, 3090-3097.
- Magar, A., Desai, R., Deshmukh, S., Deshpande, S. and Dhamne, S. (2025). "Restoration and Text Extraction for Enhanced Analysis of Vintage and Damaged Documents Using Deep Learning", *In Proceedings of the 3rd International Conference on Futuristic Technology*, 708-714.

*Corresponding Author: moonsh@gnu.ac.kr

- 1) 경상국립대학교 산업시스템공학과 석사과정
- 2) 경상국립대학교 산업시스템공학과 박사과정
- 3) 한국지질자원연구원 선임연구원
- 4) 한국지질자원연구원 책임연구원
- 5) 한국지질자원연구원 박사후연수자
- 6) 경상국립대학교 산업시스템공학부 조교수

지하광산 장비의 운반경로를 고려한 수소연료전지 적용성 평가 연구

윤영상¹⁾, 이돈현¹⁾, 이승현¹⁾, 강윤재¹⁾, 이재빈²⁾, 김성민^{3)*}

Applicability of Hydrogen Fuel Cells for Underground Mining Equipment Considering Haulage Routes

Yeong-Sang Yoon¹⁾, Don-Hyeon Lee¹⁾, Seung-Hyun Lee¹⁾, Yun-Jae Kang¹⁾, Jae-Been Lee²⁾ and Sung-Min Kim^{3)*}

현재 온실가스 배출 증가는 전 지구적 온난화를 심화시키고 기후변화를 가속화하는 주요 원인으로 인식되고 있다. 이에 따라 탄소중립 실현의 필요성이 더욱 커지고 있으며, 국제사회는 파리협정의 장기 온도 목표를 달성하기 위해 배출을 실질적으로 줄일 수 있는 에너지 전환과 탄소중립 전략을 추진하고 있다. 그러나 현재의 공약과 이행 수준만으로는 목표 달성에 여전히 한계가 있는 것으로 평가되고 있어, 산업 현장에서의 직접 배출 저감과 사용 장비의 전환이 중요한 과제로 떠오르고 있다. 이러한 점에서 산업 현장의 직접 배출을 줄이기 위해서는 기존 화석연료 기반 장비를 저배출 또는 무배출 동력원으로 전환하기 위한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 지하광산 산업 현장에서 사용되는 장비를 대상으로, 디젤 내연기관을 수소연료전지 기반 동력원으로 전환할 경우의 적용성을 검토하고자 하였다. 장비 탈탄소화의 대안으로 배터리 전기장비도 고려할 수 있으나, 지하광산은 장비의 연속 운전과 대기 시간 최소화가 생산성에 직접적인 영향을 미치는 작업환경이므로, 충전 또는 배터리 교체에 소요되는 시간이 장비 가동률과 생산성 저하로 이어질 수 있다. 반면 수소연료전지 장비는 상대적으로 짧은 연료 보급 시간과 연속 운전의 유연성을 기대할 수 있어, 지하광산과 같이 작업 연속성이 중요한 환경에서 하나의 대안으로 검토될 수 있다. 이를 위해 실제 지하광산의 상세 갱도 도면과 장비 이동경로 자료가 보안상 제한되는 점을 고려하여, 연구 대상 광산과 유사한 운반환경을 GIS 기반의 3차원 참조 네트워크로 구축하였다. 또한 광산 현장에서 실제로 사용 중인 운반트럭, 로더, 천공기에 대한 장비 종류, 운용 대수 및 일일 운전 시간을 분석 조건에 반영하였다. 수소연료전지 적용 시나리오는 운반트럭, 로더, 천공기 모두에 고분자 전해질막 연료전지와 배터리 팩을 결합한 구동계를 적용하는 것으로 설정하였다. 이를 바탕으로 이동경로 분석 결과와 장비별 운전 조건을 반영하여 디젤 내연기관 시나리오와 수소연료전지 시나리오의 에너지 소비 및 연료 소모를 비교하였다. 또한 현 시점의 경우와 수소 단가를 적용하여 장비 운용 비용을 비교하고, 이를 바탕으로 지하광산 장비의 동력원 전환에 따른 운영성 및 경제성을 평가하고자 하였다.

사 사

본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00213956)과 2026년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원RISE센터가 지원하는 지역혁신중심 대학지원체계(RISE) 사업(2026-RISE-10-002)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author: smkim19@kangwon.ac.kr

- 1) 강원대학교 에너지자원융합공학과 석사과정
- 2) 강원대학교 에너지자원화학공학과 학사과정
- 3) 강원대학교 그린에너지공학과 부교수

니켈 광석 유형별 특성에 따른 선광 공정 기술 현황

최희경^{1,2)}, 정도현^{1,2)}, 김성민²⁾, 고병헌²⁾, 홍길상²⁾, 박은영^{2,3)}, 전호석^{1,2)*}

Current Status of Mineral Processing Technologies for Different Types of Nickel Ores

HeeKyoung Choi^{1,2)}, DoHyun Jeong^{1,2)}, SeongMin Kim²⁾, ByungHun Go²⁾, GilSang Hong²⁾, EunYoung Park^{2,3)} and HoSeok Jeon^{1,2)*}

니켈(Ni)은 우수한 내식성, 내열성 및 기계적 강도를 가지는 전이금속 원소로서 스테인리스강, 합금강 및 다양한 산업 소재의 핵심 원료로 분류된다. 최근에는 전기자동차 및 에너지저장장치의 산업의 팽창에 따라 리튬이온전지 양극재(NCM, NCA 등)의 필수 성분으로 주목받으며, 그 수요 또한 비약적으로 증가하는 추세이다. 이러한 흐름 속에서 니켈은 각국의 공급망 안정화를 위한 핵심 광물로 정의되며, 전략적 자원으로서의 가치가 과거 어느 때보다 강조되고 있다.

지각 내 평균 약 80ppm 수준으로 부존하는 니켈은 주로 초염기성암 및 관련 광상에서 산출되는 특성을 갖는다. 전 세계적으로는 인도네시아, 호주, 브라질, 러시아, 필리핀 등지에 광범위하게 분포하고 있으며, 최근에는 인도네시아와 필리핀을 필두로 한 동남아시아 지역이 핵심 생산 거점으로 급부상하였다. 현재 전 세계 니켈 매장량은 수천만 톤 규모에 달하는 것으로 추정되며, 연간 생산량 역시 견고한 증가세를 유지하고 있다. 이러한 니켈 자원은 생성 기작과 광상 유형에 따라 크게 황화광(sulfide ore)과 산화광(laterite ore)으로 구분된다.

니켈 황화광 광상은 일반적으로 심성 기원의 마그마 분화 과정과 관련하여 형성되며, 대표적인 니켈 광석 광물로는 펜틀란다이트(pentlandite) 등이 있다. 황화광 광상은 일반적으로 니켈 품위가 비교적 높고 선별 공정을 통한 품위 향상이 용이한 특징을 가지며, 전통적으로 부유선별을 기반으로 한 선광 공정이 적용되어 왔다. 반면 니켈 산화광 광상은 초염기성암의 풍화 및 라테라이트화 과정에서 형성되는 것으로, 가니어라이트(garnierite) 등 다양한 니켈 함유 광물이 존재한다. 산화광 광상은 일반적으로 니켈이 철 산화물 또는 점토 광물과 복합적으로 존재하여 광물학적 특성이 복잡하며, 이에 따라 선광보다는 습식 또는 건식 제련 공정이 주로 적용되는 특징을 가진다.

니켈 광석으로부터 유용 광물을 효과적으로 회수하기 위해 다양한 선별 기술이 연구되고 있다. 대표적인 물리적 선별 방법으로는 자력선별, 중력선별 등이 있으며, 물리·화학적 방법으로는 부유선별 공정이 널리 적용되고 있다. 특히 황화광 광상에서는 펜틀란다이트와 같은 니켈 황화광을 선택적으로 농축하기 위한 부유선별 기술이 핵심 공정으로 활용되고 있으며, 최근에는 미세입자 광물의 회수 효율 향상을 위한 시약 조합 및 공정 조건에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 일부 산화광 광석에 대해서도 자력선별이나 선택적 부유선별을 적용하여 니켈 함유 광물을 농축하려는 연구가 수행되고 있으며, 광물학적 특성에 따른 선별 효율 향상 방안이 지속적으로 제시되고 있다.

본 연구에서는 핵심 자원인 니켈의 특성과 주요 활용 분야를 정리하고, 전 세계 니켈 자원의 분포와 매장량 및 생산 현황을 파악하였다. 또한 니켈 광상의 주요 유형인 황화광과 산화광의 광물학적 특징을 비교하고, 니켈 광석 광물의 회수를 위한 물리·화학적 선별 기술의 연구 동향을 종합적으로 고찰하였다.

사 사

본 연구는 산업통상부(MOTIR)의 제원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. RS-2025-02314475, 저품위 니켈광 고도선광 및 사업화를 위한 현장 실증 선별공정 개발).

*Corresponding Author: hsjeon@kigam.re.kr

- 1) 과학기술연합대학원대학교 자원공학
- 2) 한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터
- 3) 단국대학교 일반대학원 몽골학과

Feasibility of Direct Atmospheric Acid Leaching for Coarse Nickel Laterite Ores

Jeongwoo Kim¹⁾, Heewon Kang¹⁾, Jaehoon Lee¹⁾ and Hyunjung Kim^{1)*}

Nickel demand has been steadily increasing with the recent expansion of electric vehicles and energy storage systems. In the hydrometallurgical processing of laterite ores—a primary source of nickel—sizing and classification are generally performed to screen for optimal particle sizes and enhance leaching efficiency. During this process, coarse particles are often further comminuted or excluded from processing. However, comminution is one of the most energy-intensive steps in mineral processing and can affect the overall process economics. In this study, Philippine saprock and limonite ores were classified into coarse, intermediate, and fine fractions, and atmospheric acid leaching (AAL) was conducted to evaluate the effect of particle size on nickel leaching behavior. This results showed that the coarse fractions achieved nickel leaching efficiencies of 70% for saprock and 60% for limonite, which is comparable to the fine fractions. This is attributed to the structural characteristics of the coarse particles, wherein micropores and microcracks facilitate lixiviant penetration and induce internal dissolution. In addition, to assess the efficacy of comminution, the leaching performance was directly compared with that of finely ground bulk ore. Comparison with finely ground bulk ore showed that nickel leaching efficiency after grinding was not significantly improved, reaching 76% for saprock and 59% for limonite. These results indicate that the direct use of coarse laterite ores in the AAL process without additional grinding can reduce energy requirements without a significant loss in nickel recovery. Therefore, this study proposes the feasibility of direct leaching for coarse laterite ores, providing a fundamental insight for optimization of cost-effective nickel recovery processes in the future.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00406500).

References

- Nosrati, A., Quast, K., Xu, D., Skinner, W., Robinson, D. J., & Addai-Mensah, J. (2014). Agglomeration and column leaching behaviour of nickel laterite ores: Effect of ore mineralogy and particle size distribution. *Hydrometallurgy*, 146, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.03.004>
- Quast, K., Connor, J. N., Skinner, W., Robinson, D. J., & Addai-Mensah, J. (2015). Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores Part 1: Literature review. *Minerals Engineering*, 79, 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.017>

*Corresponding Author: kshjkim@hanyang.ac.kr

1) Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Republic of Korea

Leaching behavior of nickel laterite agglomerates: Effects of ore type and binder content

Jaehoon Lee¹⁾, Heewon Kang¹⁾, Jeongwoo Kim¹⁾ and Hyunjung Kim^{1)*}

Recent growth in the electric vehicle (EV) battery industry has led to an increasing demand for nickel, thereby raising interest in technologies for recovering nickel from low-grade nickel laterite ores. Heap leaching has attracted attention as an economically viable alternative due to its low energy consumption and process simplicity. To ensure adequate permeability and mechanical stability during the process, the ores are agglomerated using a sulfuric acid binder prior to leaching. In this study, agglomerates were prepared using a sulfuric acid binder from nickel laterite ores with different mineralogical compositions. Leaching experiments were conducted under static and dynamic conditions to evaluate the effects of mineralogical characteristics and binder dosage on the leaching behavior of agglomerates. In particular, the unsaturated flow regions in the flow channels of the heap leaching system and the saturated flow regions inside the agglomerates were simulated to analyze how mineral reaction characteristics under different flow environments affect metal dissolution behavior. This study provides fundamental data for understanding the leaching characteristics of nickel laterite agglomerates under different flow systems and for designing an efficient heap leaching process.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00406500).

References

- Mudd, G.M., 2010. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. *Ore Geology Reviews*, 38, 9-26.
- McDonald, R.G. and Whittington, B.I., 2008. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review: Part I. Sulphuric acid technologies. *Hydrometallurgy*, 91, 35-55.
- Ghorbani, Y., Franzidis, J.P. and Petersen, J., 2016. Heap leaching technology—current state, innovations, and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37, 73-119.
- Li, J., McFarlane, A., Klauber, C. and Smith, P., 2017. Leaching and solution chemistry. In: Gräfe, M., Klauber, C., McFarlane, A.J. and Robinson, D.J. (Eds.), *Clays in the Minerals Processing Value Chain*. Cambridge University Press, 111-141.

*Corresponding Author: kshjkim@hanyang.ac.kr

1) Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Republic of Korea

광산 장비 자율화를 위한 로봇 러닝 기반 다관절 협동로봇 축소 모형 실험 시스템 구축

양호준¹⁾, 최요순^{2)*}

Development of a Scaled Collaborative Manipulator Experimental Platform for Robot Learning-based Autonomous Mining Equipment

Hojun Yang¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

최근 Physical AI 기반 지능형 로봇 기술이 발전함에 따라 광산 장비의 자율화가 중요한 연구 과제로 부상하고 있다. 그러나 광산 작업은 비정형 지형과 불규칙한 암석 형상, 장비 간 작업 간섭 등 복잡한 작업 환경을 포함하고 있어 기존 규칙 기반 제어만으로는 안정적인 자동화 구현에 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 접근으로 숙련 작업자의 시연 데이터를 활용하여 조작 작업을 학습하는 로봇 러닝(Robot Learning) 기술이 주목받고 있다. 본 연구에서는 광산 장비 자율화를 위한 로봇 러닝 기반 Physical AI 개발의 첫 단계로서, 다관절 협동로봇 기반 축소 모형 실험 시스템을 구축하였다. 상단 및 측면 RGB-D 카메라를 이용하여 다중 시점 영상을 획득하고, 로봇의 관절 상태와 그리퍼 동작을 포함한 7자유도(7-DoF) 행동 데이터를 기록하여 광산 조작 작업을 모사한 시연 데이터셋을 구축하였다. 또한 수집된 데이터를 활용하여 트랜스포머 기반 행동 청킹 알고리즘인 ACT(Action Chunking with Transformers)를 적용한 로봇 러닝 학습 파이프라인을 구성하였다. 구축된 시스템은 암석 파지 및 장애물 처리 작업을 대상으로 로봇 러닝 기반 자율 조작 제어 모델 개발을 위한 실험 및 데이터 수집 플랫폼으로 활용될 수 있으며, 향후 실제 광산 장비 적용을 위한 스케일업 연구로 확장될 수 있다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 석사과정

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

저품위 니켈 라테라이트의 환원 배소 및 자력 선별 공정 최적화를 위한 입도별 선광 특성 평가

노도현^{1)†}, 전관우^{1)†}, 김현중^{2)*}

Particle Size-Dependent Beneficiation Characteristics of Low-Grade Nickel Laterite Ore for Optimizing Reduction Roasting Followed by Magnetic Separation

Dohyeon Roh^{1)†}, Kwanwoo Jeon^{1)†} and Hyunjung Kim^{2)*}

Nickel (Ni) is a critical element for high-tech industries, such as Lithium-Ion Batteries (LIBs), aerospace engineering, and defense industry. The primary sources of nickel are nickel sulfide and nickel oxide (laterite) ores. While nickel sulfide is relatively straightforward to concentrate using froth flotation, laterite presents significant processing challenges due to its complex mineralogical characteristics. Consequently, laterite received less academic and industrial attention until recently. However, as nickel sulfide reserves deplete amidst surging global demand, the exploitation of laterite has become increasingly vital. In response to this trend, there is a growing global interest in advanced laterite enrichment processes. Previous studies reported that the reduction roasting followed by magnetic separation process is increasingly recognized for its ability to induce phase transformation and enable the selective magnetic recovery of Ni-Fe alloys. The formation of Fe-Ni alloys during reduction roasting was identified as a key component of the process. Therefore, in this presentation, (i) the effect of as-received laterite particle size on the concentrated Ni grade was investigated, and (ii) the Fe-Ni alloy formation mechanism was characterized using Scanning Electron Microscopy and X-Ray Diffractometry.

Keywords : laterite, reductive roasting, magnetic separation, Fe-Ni alloy

사 사

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20227A10100010).

References

Marzoughi, O., & Pickles, C. A. (2024). Solid state reduction and magnetic separation of nickeliferous laterite ores: Review and analysis. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 140, 65-87.

[†]These authors equally contributed to this work

*Corresponding Author: kshjkim@hanyang.ac.kr

1) 한양대학교 자원환경공학과 석박통합과정

2) 한양대학교 자원환경공학과 교수

로봇 동작 데이터 수집을 위한 UWB 기반 실내 위치 측위 시스템의 앵커 배치와 위치 정확도 분석

김연재¹⁾, 최요순^{2)*}

Analysis of Anchor Placement and Position Accuracy of a UWB-based Indoor Positioning System for Robot Motion Data Acquisition

Yeanjae Kim¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

글로벌 항법 위성 시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)의 사용이 어려운 실내 환경에서는 로봇 동작 데이터를 정밀하게 기록하기 위한 위치 추적 기술이 필요하다. Ultra-Wideband(UWB) 기반 실내 위치 측위 시스템(Indoor Positioning System, IPS)은 높은 위치 정밀도와 실시간 추적이 가능하여 로봇 동작 데이터 수집에 활용될 수 있다. 그러나 UWB 기반 IPS의 위치 정확도는 앵커(anchor)의 기하학적 배치에 크게 영향을 받으며, 이는 기하 정밀도 저하(Geometry Dilution of Precision, GDOP)에 의해 위치 오차로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 로봇 동작 데이터 수집을 목적으로 UWB 기반 IPS의 앵커 배치에 따른 위치 정확도 변화를 분석하였다. 실제 정육면체 프레임 내에 다수의 시험점을 설정하고 서로 다른 3차원 앵커 배치 조건에서 GDOP와 위치 오차를 비교하였다. 또한 산업용 로봇팔의 end-effector 또는 관절 위치를 추적하여 기준 궤적과 UWB 기반 IPS 추정 궤적 간의 일치성을 평가하였다. 본 연구는 로봇 러닝을 위한 동작 데이터 수집 환경에서 안정적인 앵커 배치 설계를 위한 기초 자료를 제공한다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 박사과정

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

레거시 로봇 시스템과 AI 에이전트 연결을 위한 피지컬 AI 인터페이스 개발 최산하¹⁾, 최요순^{2)*}

Development of a Physical AI Interface for Connecting AI Agents with Legacy Robotic Systems

Sanha Choi¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

최근 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기반 자율 제어 기술의 발전과 함께 AI 에이전트가 물리적 로봇 시스템을 직접 제어하는 피지컬 AI(Physical AI)에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나 많은 기존 산업용 로봇과 무인 장비는 제조사에서 제공하는 제어 인터페이스나 API(Application Programming Interface)가 제한적이기 때문에 AI 에이전트가 이러한 시스템을 직접 제어하기 어려운 문제가 있다. 특히 기존 자동화 시스템을 유지하면서 AI 기반 제어를 도입해야 하는 초기 단계에서는 이러한 인터페이스 문제가 중요한 기술적 장애 요인이 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 레거시 로봇 시스템과 AI 에이전트를 연결하기 위한 피지컬 AI 인터페이스를 제안한다. 제안된 인터페이스는 기존 원격 조종기의 내부 구조를 수정하지 않고 외부에 장착되는 형태로 설계되었으며, 서보모터를 이용하여 조종기의 조이스틱을 물리적으로 구동함으로써 컴퓨터 또는 AI 에이전트에서 생성된 제어 명령을 조종기의 입력 신호로 구현한다. 이를 통해 기존의 조종기-로봇 시스템 연결 구조를 유지하면서도 AI 에이전트가 조종기를 간접적으로 제어하여 로봇 시스템을 구동할 수 있다. 제안된 인터페이스는 로봇 시스템의 내부 제어 소프트웨어 수정 없이 AI 에이전트 기반 제어를 가능하게 하는 물리적 연결 계층(physical interface layer)을 제공한다. 개발된 인터페이스를 레거시 로봇 시스템에 적용하여 AI 기반 제어 실험을 수행한 결과, 서보모터를 통해 조종기를 자동으로 조작하여 로봇을 정상적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 제안된 방식은 레거시 로봇 시스템의 내부 제어 구조를 변경하지 않고도 AI 기반 제어를 적용할 수 있는 범용 인터페이스를 제공하며, 향후 다양한 로봇 및 산업 장비에 피지컬 AI 기반 자동화 기술을 적용하는 데 활용될 수 있는 가능성을 제시한다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 석사과정

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

대한민국 니켈 전략 비축을 위한 공급 중단 위험 기반 평가 프레임워크

Adelya Zhamasheva¹⁾, 최요순^{2)*}

A Disruption–Risk–Based Framework for Strategic Nickel Stockpiling in South Korea

Adelya Zhamasheva¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

Nickel is a critical mineral for stainless steel production, advanced manufacturing, and the rapidly expanding battery sector, making supply security a major concern for import-dependent economies. This study develops a mineral-specific strategic stockpile evaluation framework for South Korea by adapting the Disruption-Risk (Dis-Risk) model to reflect the distinctive characteristics of the nickel market. Using historical data on prices, import volumes, exchange rates, and macroeconomic indicators, the study identifies disruption patterns and estimates their frequency, duration, and severity. The proposed methodology integrates probabilistic risk modeling with simulation-based economic evaluation to analyze the trade-off between stockpiling costs and the mitigation of supply-shock losses. The analysis shows that nickel exhibits a tail-driven disruption structure, characterized by relatively infrequent but high-severity supply disruptions. As a result, the optimal stockpile strategy differs from those of other critical minerals even under a shared analytical framework. The results provide an estimated optimal stockpile range for South Korea's nickel supply system and highlight the importance of mineral-specific risk characteristics in designing strategic stockpile policies.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 국립부경대학교 에너지자원공학과 박사과정

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

광산현장 문서 디지털화를 위한 인간의 문서 탐색패턴과 멀티모달 Attention 비교 분석

홍정화¹⁾, 한지우²⁾, 박준혁³⁾, 이희욱⁴⁾, 박세범⁵⁾, 문성현^{6)*}

Comparing Human Document Exploration Patterns and Multimodal Attention for the Digitization of Mining Field Documents

Jeonghwa Hong¹⁾, Jiu Han²⁾, Junhyeok Park³⁾, Huiuk Yi⁴⁾, Sebeom Park⁵⁾ and Seonghyeon Moon^{6)*}

지질 탐사와 광물 조사는 자원 개발에 중요한 역할을 하며, 지질 보고서와 학술 논문 등 다양한 문서에는 광상 형성 환경, 지질 구조 등 지질·광물 탐사에 활용될 수 있는 중요한 정보가 포함되어 있다(Wang et al., 2022). 하지만 이러한 문서는 텍스트, 지도, 도표 등이 혼합된 비정형 형태로 구성되어 있어 사람이 직접 문서를 분석하여 핵심 정보를 추출하는 데 많은 시간과 노력이 요구된다. 최근 Multimodal Large Language Model(MLLM)을 활용하여 문서를 자동으로 이해하고 정보를 추출하려는 연구가 진행되고 있으나, 기존 연구는 인간의 문서 탐색 방식이나 중요 정보 영역을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다(Lin et al., 2023). 이에 본 연구에서는 지질 및 광물자원 관련 문서를 대상으로 eye-tracker를 활용하여 인간의 문서 탐색패턴을 분석한다. 이후 인간의 시선 분포와 MLLM의 Attention 분포를 비교하여 두 탐색패턴 간의 유사도를 분석한다. 이러한 비교는 Spearman's Rank Correlation과 Jensen-Shannon Divergence를 활용하여 인간과 모델의 탐색패턴 간 정렬 정도를 정량적으로 평가한다. 이를 통해 문서에서 인간과 모델이 중요하게 인식하는 정보 영역 간의 차이를 확인하고자 한다. 본 연구는 인간과 인공지능 모델 간의 문서 탐색패턴 차이를 실증적으로 분석함으로써 지질·광물 분야 도메인 문서 이해 모델 개발을 위한 기초 자료를 제공한다. 이를 기반으로 향후 광업 분야의 도메인 문서 정보 추출 및 구조화 성능 향상에 기여할 수 있다.

사 사

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00241758). This study is supported by the Basic Research Project (GP2025-005) of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) funded by the Ministry of Science and ICT (MIST), South Korea.

References

- Lin, Z., Deng, C., Zhou, L., Zhang, T., Xu, Y., Xu, Y., He, Z. Shi, Y. Dai, B. Song, Y. Zeng, B. Chen, Q. Miao, Y. Xue, B. Wang, S. Fu, L. Zhang, W. He, J. Zhu, Y. Wang, X. & Zhou, C. (2023). "Geogalactica: A scientific large language model in geoscience". *arXiv preprint arXiv:2401.00434*.
- Wang, B., Wu, L., Xie, Z., Qiu, Q., Zhou, Y., Ma, K., & Tao, L. (2022). "Understanding geological reports based on knowledge graphs using a deep learning approach." *Computers & Geosciences*, 168, 105229.

*Corresponding Author: moonsh@gnu.ac.kr

- 1) 경상국립대학교 산업시스템공학과 박사과정
- 2) 경상국립대학교 산업시스템공학과 석사과정
- 3) 한국지질자원연구원 선임연구원
- 4) 한국지질자원연구원 책임연구원
- 5) 한국지질자원연구원 박사후연수자
- 6) 경상국립대학교 산업시스템공학부 조교수

주석 정광 품위 향상을 위한 몽골 압달란트 주석광의 복합선별 기술 연구

박은영^{1,3)}, 정도현^{2,3)}, 김성민³⁾, 고병헌³⁾, 최희경^{2,3)}, 이지은⁴⁾, 전호석^{2,3)*}

Study on Combined Beneficiation Method for Grade Improvement of Tin Concentrates from Avdalant Mine, Mongolia

EunYeong Park^{1,3)}, DoHyun Jeong^{2,3)}, SeongMin Kim³⁾, ByungHun Go³⁾,
HeeKyung Choi^{2,3)}, Jieun Lee⁴⁾ and HoSeok Jeon^{2,3)*}

주석은 33종의 핵심광물 중 하나인 은백색의 연성과 전성이 우수한 금속으로, 독성이 없고 내식성이 우수하며 녹는점이 낮아 전자, 용기, 플라스틱 등 소비재 부문에서 많이 사용되고 있다. 특히, 주로 땀납(Solder)과 양철 등의 용도로 많이 사용되고 있다. 전기 전자 산업이 지속적으로 발달함에 따라 주석 기반의 무연 솔더 등의 수요가 증가하고 있으며, 최근에는 차세대 전지의 원료인 고체전해질과 음극활물질로도 많은 연구가 진행되고 있어, 주석의 응용 범위와 함께 그 수요가 점차 증가할 것으로 예상된다.

USGS에 따르면 전 세계 주석 매장량은 약 430만 톤으로 추정되며, 이 중 약 67%가 중국, 미얀마, 호주, 러시아, 인도네시아에 집중되어 있다. 해당 국가들이 전 세계 생산량의 64% 이상을 점유하고 있어, 공급 구조상 특정국 의존도가 높은 전략 자원으로 분류된다. 몽골은 주석을 비롯하여 구리, 리튬, 텅스텐, 석탄 등 많은 자원을 보유하고 있으나, 선광 기술과 관련 인프라의 부족이 효율적인 자원 개발의 제약 요인으로 작용하고 있다.

본 연구에서는 몽골 주석광으로부터 주석 정광을 회수하기 위해, 토브 아이막 에르텐 솜에 위치한 압달란트(Avdalant) 주석 광산에서 채취된 광석을 연구 대상으로 선정하여 현장 연구를 진행하였다. 원광의 광물학적 분석 결과, 주요 광석광물은 석석(Cassiterite, SnO₂)으로 규명되었으며, 맥석광물은 석영, 사장석, 백운모 등으로 구성된 것을 확인할 수 있었다. 석석의 경우, 비중이 7 이상으로 규산염 맥석광물보다는 높으나 Fe-bearing 광물과는 비슷하여 비중선별과 자력선별을 결합한 복합 선별공정이 적용되었다. 파일럿 플랜트 규모의 현장 실증 실험 결과, 최종적으로 품위 60.86%, 회수율 71.33%의 주석 정광을 회수하였다.

이러한 결과는 저품위 주석광에 대해 비중선별 기반 복합 선별공정이 효과적으로 적용될 수 있음을 보여주며, 몽골 지역 저품위 주석광의 경제적 개발 가능성을 제시한다.

Table 1. Chemical composition of studied sample.

Chemical composition (%)											
SnO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃
2.06	52.7	12.14	1.66	1.19	1.03	3.88	0.87	0.29	0.05	0.86	0.18

사 사

본 연구는 산업통상부(MOTIR)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20227A 10100020).

*Corresponding Author: hsjeon@kigam.re.kr

- 1) 단국대학교 일반대학원 몽골학과
- 2) 과학기술연합대학원대학교 자원공학
- 3) 한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터
- 4) 고준위 방사성폐기물 관리위원회

AI 에이전트 기반 노천광산 광석 운반 운영 최적화 시스템 개발

장민경¹⁾, 최요순^{2)*}

Development of an AI Agent-based Decision Support System for Optimizing Ore Haulage Operations in Open-pit Mines

Mingyeong Jang¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

노천광산에서의 광석 운반 운영은 생산성 및 품위 관리에 직접적인 영향을 미치는 핵심 공정이다. 그러나 작업구역 선택, 품위 블렌딩, 장비 배치 등 다양한 의사결정을 동시에 고려해야 하므로 효율적인 작업 계획 수립이 어려운 문제가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 AI 에이전트 기반 노천광산 광석 운반 운영 최적화 시스템을 개발하였다. 제안된 시스템은 작업 계획 수립, 결과 해석, 피드백을 수행하는 다중 에이전트 구조로 구성된다. 작업 계획 수립 에이전트는 작업구역 정보, 품위 데이터, 발파석 잔량 등의 입력 데이터를 기반으로 작업구역 후보 생성, 품위 블렌딩 계산, 장비 배치 과정을 수행하여 작업 지시서를 생성한다. 생성된 작업 지시서에는 목표 품위와 작업구역별 목표 운반량 등이 포함되며, 이를 이용하여 광산 운영 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 결과 데이터는 결과 해석 에이전트의 입력으로 활용되며, 작업 효율 및 시간당 생산성 등 주요 운영 지표를 분석한다. 이후 피드백 에이전트는 시뮬레이션 결과와 작업 지시서를 비교하여 작업 계획 수립 에이전트에 반영할 개선 정보를 생성한다. 이러한 반복적인 피드백 과정을 통해 에이전트 간 협력 기반의 의사결정이 수행되며, 광산 운영 조건에 최적화된 작업 계획을 도출할 수 있다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 석사과정

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

GMG 표준 시간분류 기반 이벤트 로그 태깅을 활용한 노천광산 운반 시스템 성과평가 프레임워크

정다희¹⁾, 최요순^{2)*}

A Performance Evaluation Framework for Open-pit Mine Haulage Systems Using GMG Standard Time Classification and Event Log Tagging

Dahee Jung¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

본 연구는 노천광산 트럭-로더 운반 시스템의 운영 성과를 이산사건시뮬레이션(Discrete-Event Simulation, DES)으로 평가할 때 결과 해석의 일관성을 확보하기 위해 GMG(Global Mining Guidelines Group)의 Time Usage Model을 이벤트 로그와 직접 결합하는 성과평가 프레임워크를 제안한다. 제안된 프레임워크는 시뮬레이션 및 현장 데이터에서 발생하는 이벤트를 표준 이벤트 클래스로 정규화한 후 규칙 기반 매핑을 통해 GMG 시간 범주를 자동으로 태깅하고, 동일한 계산식으로 시간 계층 구조와 생산 효율성(Production Effectiveness, PE)을 산출한다. 사례 연구에서는 국내 노천 석회석 광산의 ICT 로그 데이터와 타임스터디 자료를 활용하여 입력 분포를 설정하고, 작업장 배치, 로더-트럭 비율, 운반 거리 변화 등 다양한 운영 시나리오를 비교하였다. 각 시나리오는 반복 실험을 통해 평균과 95% 신뢰구간을 산출하고 통계 검정을 통해 결과의 유의성을 평가하였다. 분석 결과 트럭 투입 증가 또는 장비 비율 변경은 처리량 증가와 동시에 로더 혼잡을 유발하여 생산 효율성 저하로 이어질 수 있는 상충관계를 확인하였다. 본 프레임워크는 GMG 표준 KPI 기반의 노천광산 운반 시스템 성과 분석과 데이터 기반 운영 의사결정을 지원할 수 있다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 선임연구원

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

세멘테이션과 자력선별을 이용한 LFP 블랙매스로부터 알루미늄 포일의 선택적 제거

조민정¹⁾, 유경근^{2)*}

Selective Removal of Aluminum Foil from LFP Black Mass Using Cementation followed by Magnetic Separation

Minjeong Jo¹⁾ and Kyoungkeun Yoo^{2)*}

저가 전기차 수요 증가에 따라 리튬인산철(LiFePO₄, LFP) 배터리 사용량이 증가하고 있으며, 폐 LFP 배터리 대량 발생에 대응하기 위한 재활용 기술 개발이 요구되고 있다. 일반적으로 폐 LFP 배터리는 파쇄 및 전처리 과정을 통해 LFP 양극재와 흑연 음극재로 구성된 블랙매스를 회수하며, 이 과정에서 양극 집전체에서 유래한 알루미늄 포일 조각이 함께 혼입될 수 있다. 이러한 알루미늄 포일은 후속 침출공정에서 불순물로 작용하여 공정 효율을 저하시킬 수 있으므로 이를 효과적으로 제거하는 전처리 기술이 필요하다. 본 연구에서는 폐 LFP 배터리 블랙매스 내 알루미늄 포일을 선택적으로 제거하기 위해 세멘테이션 반응과 자력선별을 결합한 공정을 적용하였다. 본 실험에서는 Fe²⁺ 이온이 알루미늄과의 산화-환원 반응을 통해 철 종으로 환원되어 알루미늄 포일 표면에 석출되도록 하였다. 인공 LFP 블랙매스를 제조하여 1 M FeCl₂ 용액 조건에서 60분 동안 반응을 수행하였으며, 용액의 pH를 2.5와 3.5로 조절하여 반응 특성을 비교하였다. 분석 결과, pH 2.5와 pH 3.5 조건에서 자력선별을 통해 회수된 자착물 내 알루미늄 회수율은 각각 88%와 100%로 나타났다. 이를 통해 세멘테이션 반응을 이용하여 LFP 블랙매스 내 알루미늄 포일을 선택적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

사 사

본 과제는 산업통상부(MOTIR)와 한국산업기술기획평가원(KEIT) 과제 ‘사용 후 배터리로부터 블랙매스의 고효율 회수 및 공정부산물 고부가가치화를 위한 재활용 전처리공정/장비 구축(00432727)’ 일환으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: kyoo@kmou.ac.kr

1) 국립한국해양대학교 에너지자원공학과 석사과정

2) 국립한국해양대학교 에너지자원공학과 교수

폐LIB의 양극재와 음극재의 분리를 위한 세멘테이션 이후 자력선별

김지영¹⁾, 유경근^{2)*}

Cementation Followed by Magnetic Separation for Separation of Cathode and Anode Materials from Spent LIB

Jiyeong Kim¹⁾ and Kyoungkeun Yoo^{2)*}

전기차 산업의 발전과 함께 리튬이온배터리의 수요가 증가하며, 향후 대량으로 발생이 예상되는 폐리튬이온배터리로부터 자원회수의 중요성이 대두되고 있다. 기존 재활용 공정에서는 리튬이온배터리를 해체하고 순차적으로 열처리 및 파분쇄 후 블랙매스로 제조하여 침출 및 후처리 공정을 통해 금속을 분리 회수한다. 그러나, 침출 공정 전 음극재를 분리할 경우, 반응기 용적을 줄이는 등 침출 효율 향상이 가능하다. 이에 본 연구는 각 전극에 부착된 집전체(Al foil, Cu foil)의 전기화학적 특성 차를 이용해, 세멘테이션 진행 후 자력선별에 의한 양극재와 음극재의 분리를 기대하였다. 1M FeCl₂ 용액으로 60분간 세멘테이션 후 Al foil과 Cu foil의 자력선별을 진행한 결과, 자작물로서 완전히 회수되었다. 따라서, 실제 폐리튬이온배터리에서 회수된 집전체를 대상으로 용액의 농도를 0.5M로 낮추어 세멘테이션 후 자력선별을 진행한 결과, pH 2.5~pH 5.0에서 자작물로서 완전히 회수되었다. 따라서, 세멘테이션에 의해 폐리튬이온배터리의 음극재와 양극재의 분리가 가능하다고 판단된다.

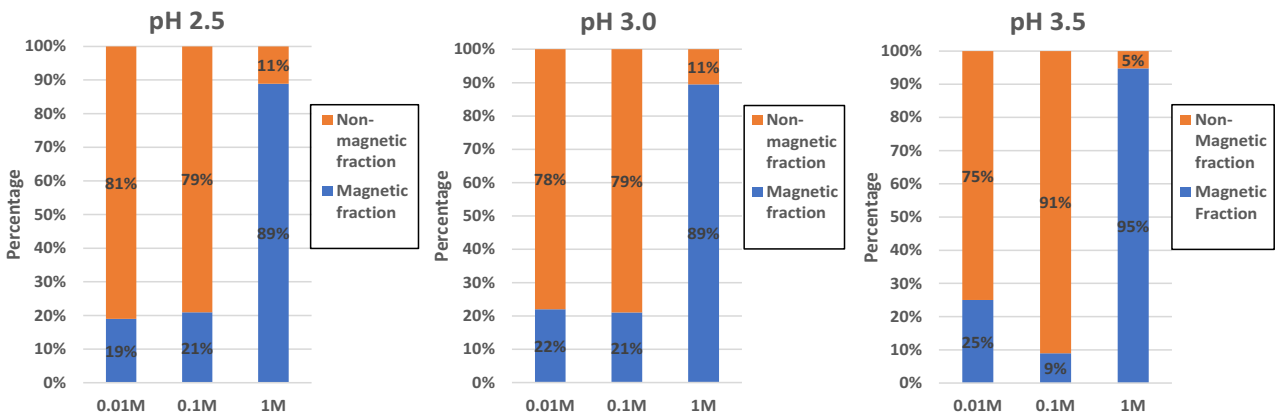


Fig. 1. FeCl₂ 용액 농도 변화에 따른 Al foils 자력선별 결과

주제어: 폐리튬이온배터리, 집전체, 세멘테이션, 자력선별

사 사

이 논문은 2026년 한국광해광업공단으로부터 연구비를 지원받아 수정된 사업입니다. 지원해주신 관계자 분들께 감사드립니다.

*Corresponding Author: kyoo@kmou.ac.kr

1) 국립한국해양대학교 에너지자원공학과 석사과정

2) 국립한국해양대학교 에너지자원공학과 교수

MSA 기반 DES 조성이 알칼리용융된 Ir 스크랩 침출 기작에 미치는 영향 정혜원¹⁾, 안준모^{1)*}

Effect on the metals leaching by chemical composition of methanesulfonic acid(MSA) based deep eutectic solvent(DES) from alkali-fused iridium scrap

Hyewon Jung¹⁾ and Junmo Ahn^{1)*}

이리듐(Ir)은 우수한 내식성과 전기화학적 안정성을 갖고 있어 수전해 촉매 같은 첨단 응용 분야에서 필수적인 금속이다. 그러나 전 세계 이리듐 공급망이 남아공, 러시아 등에 편중되어 있어 공급 안정성이 낮아 재활용의 중요성이 증가하고 있다. 기존 이리듐 재활용은 고농도 무기산 기반의 습식제련 공정을 사용하지만, NOx, Cl₂, T-N과 같은 유해물질들이 발생하여 환경적인 문제가 제기된다. 따라서, 본 연구에서는 dimensionally stable anode(DSA) 스크랩 대상으로 기존 고농도 무기산을 대체할 수 있는 methanesulfonic acid(MSA) 기반 deep eutectic solvent(DES)의 조성에 따른 침출 영향을 확인하였다.

본 연구에 사용된 스크랩은 ICP-OES를 통해 Ti 40.46%, Ir 0.31%, Ru 0.21%, Fe 2.15%, Cr 0.04%로 구성됨을 확인하였다. 실험에 사용된 DES 구성의 hydrogen bond acceptor(HBA)로는 ChCl을, hydrogen bond donor(HBD)로는 MSA를 사용하여 용매를 구성하였으며, 실험조건은 HBA 20~45 g, HBD 6~30 mL, H₂O 0~8 mL 반응시간 4~72시간, 온도 25~70℃, pulp density 5%로 설정하였다.

DES 합성조건과 조성에 따른 용매 안정성을 확인하기 위해 FT-IR 분석을 수행하였다. 분석결과, O-H 피크 세기 차이는 미세하게 나타났으나 조성 차이에 따른 결정화는 관찰되지 않았으며, 합성 시간이 증가할수록 결정화 현상이 나타났다. 온도 영향 실험결과, ChCl:MSA=1:2, 70℃ 조건에서 Ti 29.4%, Ir 33.5%로 가장 높은 침출률을 보였다. 침출률 개선을 위해 산화제(I₂) 투입 실험 및 조성비 실험을 수행하였다. 산화제 투입에 따른 침출률 증가는 확인되지 않았다. 조성비 실험에서는 MSA 증가 시 Ti 침출이 촉진되었으며, ChCl의 mol ratio가 MSA를 초과할 경우 침출률이 감소하였다. 또한 H₂O 첨가 시 물질전달이 향상되어 침출률이 증가하였다. 본 연구 결과, ChCl:MSA:H₂O=1:1:2 조건에서 4시간 기준 Ti 68.3%, Ir 99.9%로 가장 높은 침출률을 확인하였으며, DES 조성비 실험을 통해 MSA는 Ti의 침출률에 주요한 영향을, ChCl은 Ir 침출률에 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

사 사

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00435506).

*Corresponding Author: jahn@jbnu.ac.kr

1) 전북대학교 자원에너지공학과

하이니켈 NCM 블랙매스 대상 메탄술폰산 침출계에서 농업부산물의 대체환원제 적용 가능성 연구

원정환¹⁾, 안준모^{1)*}

Application of agricultural by-product as an alternative reductant in methanesulfonate leaching system for High-Nickel NCM black mass

Jeonghwan Won¹⁾ and Junmo Ahn^{1)*}

본 연구에서는 습식제련 공정을 통해 메탄술폰산(MSA) 침출 시스템에서 페리튬이온배터리 전처리물인 블랙매스 침출 시, 대체 환원제인 포도당의 성능과 바이오매스 자원을 환원제로써의 적용 가능성을 검토하였다.

우선, 포도당의 환원성 능력을 확인하기 위해 NCM 페리튬이온배터리 블랙매스 대상 침출을 수행하였다. 블랙매스 내 Li, Ni, Co, Mn 금속 조성은 5.8%, 36.6%, 5.7%, 2.1%이다. 본 블랙매스 침출은 MSA 1.3 M 조건에서 환원제인 포도당 농도는 0.01-0.8 M을 투입하여 진행하였다. 침출 시간, P/D(pulp density), 침출 온도는 4시간, 20 g/L, 80℃로 동일한 조건으로 설정하였다.

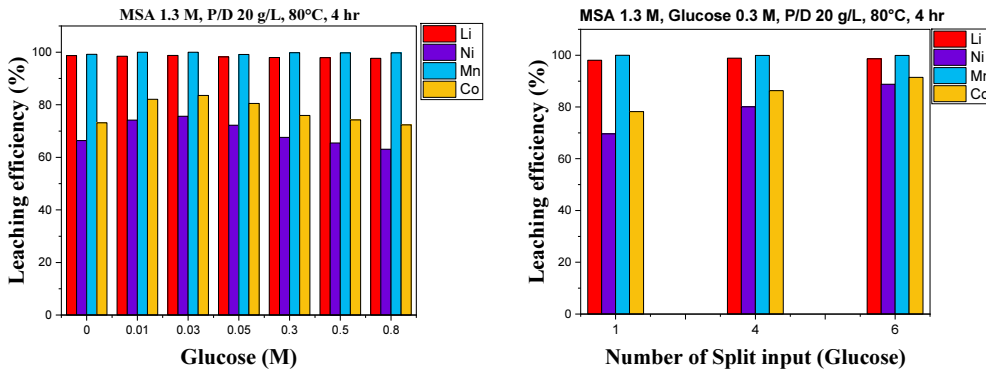


Fig. 1. (왼) 페 NCM 배터리 블랙매스 대상 Glucose 농도에 따른 금속 침출률, (오) 페 NCM 배터리 블랙매스 대상 Glucose 0.3 M 분할 투입 횟수에 따른 금속 침출률

실험 결과에 따르면, 포도당 과량 투입은 Ni, Co 금속의 침출률을 오히려 감소시키는 것으로 분석되었다. 그리고 포도당을 분할 투입 횟수를 1회에서 6회로 늘렸을 때, Ni와 Co의 금속 침출률이 각각 69%, 78%에서 89%, 92% 개선되었음을 확인하였다. 본 연구의 실험 결과를 통해 1회 과량 투입 시, 분해되지 못한 포도당의 중간체 5-Hydroxymethylfurfural, Humin 축적으로 인해, 금속 환원 성능을 저하시키는 것으로 추정한다. 따라서, 분할 투입을 통해 중간체 축적을 방지하고, 빠른 산화과정으로 금속 침출률을 개선할 수 있다는 것을 확인하였다.

포도당의 분할 투입할 경우 침출 효율이 향상되는 것을 확인하였다. 이러한 특성은 리그노셀룰로스 기반 바이오매스가 분해되면서 내부에 함유된 환원당을 지속적으로 방출하는 거동과 유사하다. 최근에는 피망 추출물, 차 찌꺼기, 코코넛 껍질, 아레카 열매 등의 바이오매스 자원이 환원제로 적용하여 NCM 배터리 블랙매스를 환원 침출한 사례가 보고되었다. 이 중, 전북특별자치도 지역의 농업잔재물인 보리짚은 리그노셀룰로스 바이오매스 자원으로 알려져 있으며, 주로 소각하여 처리하기 때문에 대기 오염의 문제가 있다. 따라서 농업부산물인 보리짚을 고부가가치화시켜 환원제로써의 적용 가능성을 검토할 예정이다.

사 사

본 연구는 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발 특구진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2025-25444020).

*Corresponding Author: jahn@jbnu.ac.kr

1) 전북대학교 자원·에너지공학과

부유선별 기포 로딩 정량화를 위한 AI 기반 인스턴스 수준 영상 분석

Elaheh Mohammadi Valikandi¹⁾, 최요순^{2)*}

AI-based Instance-level Image Analysis for Quantifying Bubble Loading in Froth Flotation

Elaheh Mohammadi Valikandi¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

부유선별 공정에서 기포 표면에 부착된 광물의 정도를 나타내는 기포 로딩(bubble loading)은 정광 품위와 회수율에 직접적인 영향을 미치는 중요한 공정 지표이다. 그러나 기존의 영상 기반 부유선별 모니터링 연구는 주로 거품층(froth)의 전반적인 특성이나 공간 평균 기반 특징을 이용하여 공정을 분석해 왔으며, 개별 기포 수준에서의 로딩 거동을 정량적으로 분석한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 부유선별 영상으로부터 기포 로딩을 정량적으로 분석하기 위한 AI 기반 인스턴스 수준 영상 분석 방법을 제안한다. 제안된 방법은 딥러닝 기반 인스턴스 분할 기법을 이용하여 밀집된 거품층 영상에서 개별 기포를 검출하고 분석한다. 또한 로딩 상태를 여러 단계로 분류하는 대신, 기포 표면에 창(window) 형태가 나타나고 강한 반사(specular reflection)가 관찰되는 특징을 이용하여 광물이 부착되지 않은 기포를 식별함으로써 기포 로딩 상태를 정의하였다. 이 정의를 바탕으로 두 가지 기포 로딩 비율 지표를 도출하였다. 첫 번째는 비적재 기포의 개수 비율을 나타내는 개수 기반(count-based) 지표이며, 두 번째는 거품층에서 큰 비적재 기포가 차지하는 면적 비율을 나타내는 면적 기반(area-based) 지표이다. 제안된 지표는 기포-입자 부착 거동을 물리적으로 해석할 수 있는 특징을 가지면서 실시간 부유선별 공정 모니터링에도 적용 가능하다. 제안된 방법은 실험실 규모의 흑연(graphite) 부유선별 실험에서 획득한 영상 데이터를 이용하여 평가하였다. 분석 결과 제안된 기포 로딩 지표와 정광 품위(concentrate grade) 사이에 양의 상관관계가 확인되었으며, 이를 통해 제안된 지표가 기포-입자 부착 거동의 변화를 효과적으로 반영할 수 있음을 확인하였다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 박사과정

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

입도 분급을 이용한 희토류 광물의 미립 영역 농집 특성 평가

김혜림^{1,2)}, 권슬기¹⁾, 이준섭¹⁾, 이정미^{1)*}

Evaluation of Fine Fraction Enrichment of Rare Earth Minerals Using Particle Size Classification

Hyerim Kim^{1,2)}, Seulgi Kwon¹⁾, Junseop Lee¹⁾ and Jungmi Lee^{1)*}

희토류 자원은 첨단 산업 및 에너지 기술의 핵심 원료로서 전략적 중요성이 지속적으로 증가하고 있으며, 효율적인 회수를 위한 선광 기술 개발이 중요한 과제로 인식되고 있다. 희토류 광석에서 희토류 광물은 종종 미립 입도로 산출되며 맥석 광물과 복잡한 공생 조직을 형성한다. 분쇄 및 분급 과정에서 희토류 광물은 해리 거동과 입도 분포 특성에 따라 특정 입도 영역에서 상대적으로 높은 분포를 나타낼 수 있다. 이와 같은 입도 의존적 분포 특성은 선광 공정 설계 이전 단계에서 입도 기반 선농축(Pre-concentration) 공정의 적용 가능성을 평가하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 베트남 동파오(Dong Pao) 희토류 광석을 대상으로, 바스트네사이트(Bastnaesite) 광물의 입도별 분포 특성을 분석하고, 입도 분급을 이용한 미립 영역 농집 가능성을 평가하였다. 원시료에 대한 화학조성 분석 및 광물학적 특성 분석을 수행하였으며, 습식 체가름 실험을 통해 입도별 질량 분율과 희토류 품위 분포를 조사하였다. 또한 미립 영역에서의 세부 입도 분포 특성을 파악하기 위해 사이클로사이저(Cyclosizer)를 이용한 분급 실험을 수행하고, 각 분급 산물의 질량 분포 및 희토류 품위를 정량적으로 비교하였다.

실험 결과, 체가름 분석에서는 입도 감소에 따라 희토류 품위가 증가하는 경향이 확인되었으며, 사이클로사이저 분급에서는 초미립 분획에서 뚜렷한 입도 의존적 농집 경향이 나타났다. 이는 바스트네사이트가 미립 및 초미립 영역에서 선택적으로 농집되는 특성을 정량적으로 보여주며, 입도 분급을 활용한 선농축 공정 도입의 가능성을 시사한다.

본 연구는 동파오 희토류 광석의 입도 의존적 희토류 분포 특성을 정량적으로 규명함으로써, 향후 희토류 선광 공정의 효율적 설계 및 미립분 처리 전략 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원의 에너지국제공동연구사업(RS-2023-00303655) 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author: Zenithlee@komir.or.kr

1) 한국광해광업공단 기술연구원

2) 한양대학교 자원환경공학과

리튬망간산화물계열 흡착제를 활용한 염수 내 리튬 흡착 동향분석 연구

이준섭^{1)*}, 김혜림¹⁾

Study on Lithium Adsorption Behavior Using Lithium–Manganese–Oxide Based Adsorbents

JUNSEOP LEE^{1)*} and HYERIM KIM¹⁾

본 연구에서는 리튬이온직접추출기술(DLE ; Direct Lithium Extraction)을 통해 함리튬 염수 합성액으로부터 리튬망간산화물계열(Lithium Manganese Oxide) 흡착제 성형체를 활용하여 흡착컬럼 모형별 리튬 흡착의 동향을 분석하여 최적의 모형을 찾고자 하였다. 실험에 사용할 염수는 해수(海水)에 (Lithium Chloride anhydrous, 98%)시약을 첨가하여 함리튬 염수합성액을 제조하였으며, 흡착제는 내경 3mm 성형체를 각 흡착컬럼 3종에 60g씩 장입하였다. 흡착컬럼은 3*19cm, 4*13cm, 5*11cm 총 3종을 제작하여 사용하였으며, 정량펌프를 활용하여 100ml/min의 속도로 원액을 순환시키면서 120 시간 동안 실험을 진행하였다. 실험 진행결과, 선속도가 가장 빠른 긴 3*19cm 흡착컬럼에서 최대 27.6mg의 리튬이온이 실험시간동안 흡착되었으며, 이때 흡착률은 25.2%였다. 선속도(V_s)= q (유량)/ a (단면적)으로 단면적이 작아질수록 커지는데 가장 단면적이 작았던 컬럼에서 흡착률이 가장 높은 것으로 확인되었다.

사 사

본 연구는 산업통상부(MOTIR)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2024-00420434).

*Corresponding Author: taengjum@komir.or.kr

1) 한국광해광업공단 기술연구원

강원 영동 연안의 파력자원 특성과 발전량 및 경제성 예비평가

강윤재¹⁾, 이돈현¹⁾, 이승현¹⁾, 윤영상¹⁾, 김성민^{2)*}

Preliminary Assessment of Wave Energy Resource Characteristics, Energy Production, and Economic Feasibility along the Yeongdong Coast of Gangwon

Yun-Jae Kang¹⁾, Don-Hyeon Lee¹⁾, Seung-Hyun Lee¹⁾, Yeong-Sang Yoon¹⁾ and Sung-Min Kim^{2)*}

지구 온난화로 인한 기후위기 대응과 탄소중립 달성을 위해 재생에너지 확대가 요구되지만, 태양광과 풍력 중심 전력 공급 체계는 기상 조건에 따른 출력 변동과 계통 운용 부담이라는 한계를 동시에 갖는다. 이에 본 연구는 우리나라 연안에서 상대적으로 연구와 실증이 제한적이었던 파력에너지를 지역 재생에너지 포트폴리오의 한 축으로 검토하기 위해, 강원 영동 연안의 연곡, 토성, 맹방 관측지점을 대상으로 파력 자원과 발전 가능성을 정량 평가하였다. 먼저 관측된 Hs(Significant Wave Height)와 Te(Wave Energy Period)로부터 파랑 에너지 플럭스를 산정하고, Hs와 Te 조합의 JPD(Joint Probability Distribution)를 구성하여 해역의 파랑 기후를 체계적으로 요약하였다. 다음으로 NREL의 System Advisor Model(SAM)에 Hs와 Te 발생빈도와 WEC power matrix(출력행렬)을 연계하고, RM3, RM5, RM6(WEC Model)을 각각 적용하여 AEP(Annual Energy Production) 및 CF(Capacity Factor)를 비교하였다. 분석 결과 영동 3지점은 전반적으로 저~중 파고 구간의 발생빈도가 높아 저파고 영역에서의 출력특성이 연간발전량을 좌우하는 구조를 보였으며, 그 영향으로 세 지점 모두에서 RM5가 RM3 및 RM6 대비 일관되게 높은 발전량을 나타냈다. 또한 발전량 결과를 기반으로 SAM을 이용해 CAPEX, O&M, 할인율을 반영한 LCOE(Levelized Cost of Energy)를 산정함으로써, 단순 자원량을 넘어 설치와 운영 관점의 적용 가능성까지 함께 검토하였다. 본 연구는 강원 영동 연안을 시작으로 향후 동해안 남부 등으로 대상 해역을 확장하여, 국내 해양재생에너지 자원 다변화와 실증 후보지 및 기기 선택을 위한 기초자료로 활용될 수 있음을 제시한다.

사 사

본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00213956)과 2026년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원RISE센터가 지원 하는 지역혁신중심 대학지원체계(RISE) 사업(2026-RISE-10-002)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author: smkim19@kangwon.ac.kr

1) 강원대학교 에너지자원융합공학과 석사과정

2) 강원대학교 그린에너지공학과 부교수

강원특별자치도 재생에너지 실측 기반 그린수소 생산 예비 분석

이돈현¹⁾, 이승현¹⁾, 윤영상¹⁾, 강윤재¹⁾, 김성민^{2)*}

A Preliminary Analysis of Green Hydrogen Production Based on Measured Renewable Energy Data in Gangwon State

Don-Hyeon Lee¹⁾, Seung-Hyun Lee¹⁾, Yeong-Sang Yoon¹⁾, Yun-Jae Kang¹⁾ and Sung-Min Kim^{2)*}

탄소중립 실현을 위한 에너지 전환이 가속화됨에 따라 태양광 및 풍력과 같은 재생에너지의 보급이 확대되고 있다. 그러나 이러한 재생에너지는 기상 조건과 시간대에 따라 발전량의 변동성이 크게 나타나며, 전력 계통의 안정적인 운영을 위해서는 이에 대응할 수 있는 유연성 확보가 필요하다. 이러한 측면에서 수전해 기반 그린수소 생산은 재생에너지 전력을 저장 가능한 에너지로 전환할 수 있는 대안으로 주목 받고 있으며, 이산화탄소 배출 저감 측면에서도 활용 가능성이 크다. 재생에너지 확대와 안정적 에너지 공급을 동시에 달성하기 위해서는 변동성 전원의 효율적 활용 방안에 대한 검토가 중요하다. 본 연구에서는 강원특별자치도 영동권을 대상으로 MW급 재생에너지의 출력 특성과 그린수소 생산 가능성을 예비적으로 검토하였다. 실측 발전량 분석 결과, 태양광은 일출 이후 발전량이 증가하여 낮 시간대에 높은 출력을 보인 후 감소하는 전형적인 일변화 특성을 나타냈으며, 계절 및 기상 조건에 따라 무발전 또는 저발전 구간이 확인되었다. 풍력은 태양광과 달리 야간에도 발전이 가능하였으나, 계절별 바람 특성과 설비 운전 조건에 따라 출력 변동성이 크게 나타나는 특성을 보였다. 이러한 실측 자료를 바탕으로 재생에너지 발전 특성을 검토하고 HOMER Pro를 활용하여 태양광·풍력 발전원과 수전해 설비, 수소저장 요소를 포함한 시스템의 운영 특성과 연계 가능성을 분석하였다. HOMER Pro의 수소 모듈은 전해조와 수소저장탱크 등을 포함하여 수소의 생산·저장·활용이 연계된 시스템을 모델링할 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 재생에너지 출력의 시간적 특성을 반영하여 다양한 운전 조건을 적용하고, 각 조건에서의 시스템 운영 특성과 그린수소 생산 가능성을 비교·검토하였다. 이를 통해 강원특별자치도 재생에너지 실측 데이터 기반 그린수소 생산의 적용 가능성을 예비적으로 확인하고자 하였으며, 향후 강원특별자치도 재생에너지 기반 수소 생산의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00213956)과 2026년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원RISE센터가 지원하는 지역혁신중심 대학지원체계(RISE) 사업(2026-RISE-10-002)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author: smkim19@kangwon.ac.kr

1) 강원대학교 에너지자원융합공학과 석사과정

2) 강원대학교 그린에너지공학과 부교수

AI 데이터센터용 독립형 RE100 마이크로그리드에서 에너지 저장 시스템에 따른 기술경제성 비교 분석

홍지민¹⁾, 최요순^{2)*}

Comparative Techno-Economic Analysis of Energy Storage Systems in a Standalone RE100 Microgrid for AI Data Centers

Jimin Hong¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

최근 AI 기술의 발전으로 데이터센터의 전력 수요가 급격히 증가하면서 안정적이고 친환경적인 전력 공급 시스템 구축의 중요성이 커지고 있다. 특히 데이터센터 운영에서 재생에너지 기반 전력 사용과 24/7 무탄소 에너지 달성에 대한 요구가 증가하면서 재생에너지 기반 마이크로그리드 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 시스템에서 에너지 저장 장치는 재생에너지의 변동성을 보완하고 안정적인 전력 공급을 유지하기 위한 핵심 구성 요소이다. 본 연구에서는 AI 데이터센터용 독립형 RE100 마이크로그리드 시스템을 대상으로 에너지 저장 기술에 따른 기술경제성을 비교 분석하였다. HOMER Pro 시뮬레이션을 활용하여 재생에너지 발전과 에너지 저장 시스템이 결합된 독립형 전력 시스템을 모델링하고, 강원도 태백 지역의 실제 기상 데이터를 적용하여 시스템 성능을 평가하였다. 분석 대상 에너지 저장 기술로는 리튬이온 배터리, 바나듐 레독스 흐름 전지(VRFB), 플라이휠 에너지 저장 시스템을 적용하여 시스템 안정성과 경제성을 비교하였다. 분석 결과, 세 가지 에너지 저장 시스템 중 VRFB를 적용한 시스템이 가장 경제적인 구성을 나타냈다. VRFB 기반 시스템의 LCOE (Levelized Cost of Electricity)는 \$0.2549/kWh로 나타나 리튬이온 배터리(\$0.2894/kWh)와 플라이휠 시스템(\$0.4588/kWh)보다 낮은 전력 생산 비용을 보였다. 이러한 결과는 VRFB가 AI 데이터센터용 독립형 재생에너지 기반 마이크로그리드에서 경제적인 에너지 저장 기술로 활용될 가능성을 시사한다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 박사과정

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

대규모 언어 모델 기반 태양광 발전 시스템 분석 및 설계 자동화 프레임워크

김태현¹⁾, 최요순^{2)*}

An LLM-based Framework for Automated Analysis and Design of Photovoltaic Systems

Taeheon Kim¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

태양광 발전 시스템 설계 과정에서는 발전 용량, 패널 경사각, 방위각, 손실률 등 다양한 설계 변수에 대해 반복적인 시뮬레이션과 검토 작업이 필요하다. 그러나 기존의 태양광 시뮬레이션 도구에서는 사용자가 입력 변수를 직접 설정하고 반복적인 시뮬레이션을 수행해야 하므로 설계 조건 탐색 과정에서 많은 시간과 사용자 경험에 의존하는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 대규모 언어 모델(Large Language Model, LLM)을 활용한 태양광 발전 시스템 분석 및 설계 자동화 프레임워크를 제안한다. 제안된 프레임워크는 태양광 시뮬레이션 엔진과 Python 기반 계산 환경을 결합하여 자연어 기반 인터페이스를 통해 태양광 발전 시스템 분석을 수행할 수 있도록 설계되었다. 사용자가 자연어로 분석 요청을 입력하면 LLM이 이를 해석하여 시뮬레이션 전략을 수립하고, Python 기반 계산 모듈을 통해 시뮬레이션 실행과 설계 변수 탐색을 자동으로 수행한다. 또한 LLM 기반 추론 기능과 Python 기반 수치 계산을 결합하여 계산 정확성과 분석 해석 기능을 동시에 제공하도록 하였다. 사용자는 시뮬레이션을 통해 계산된 정량적 결과와 함께 AI가 생성한 분석 및 해석 결과를 동시에 확인할 수 있으며, 이를 통해 단순한 수치 결과뿐 아니라 설계 조건의 의미와 설계 시사점을 보다 쉽게 이해할 수 있다. 제안된 프레임워크는 태양광 발전 시스템 설계시 반복적인 시뮬레이션 수행과 최적화 과정을 자동화함으로써 태양광 발전 시스템 분석의 효율성과 접근성을 향상시킬 수 있다. 또한 향후 다양한 에너지 시스템 설계 문제에 적용 가능한 AI 기반 에너지 시뮬레이션 지원 기술로 확장될 수 있다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 지구자원시스템공학과 학사과정

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

달 표면 태양광 발전 잠재량 평가를 위한 태양 위치 기반 일사량 시뮬레이션 프로그램 개발

최민태¹⁾, 최요순^{2)*}

Development of a Solar Irradiance Simulation Program for Evaluating Solar Power Potential on the Lunar Surface

Mintae Choi¹⁾ and Yosoon Choi^{2)*}

최근 달 기지 구축과 우주 자원 활용 연구가 활발해지면서 달 표면에서의 태양광 발전 가능성에 대한 관심이 증가하고 있다. 달에서는 대기 영향이 거의 없기 때문에 태양 복사 에너지를 효과적으로 활용할 수 있으나, 위치와 시간에 따라 태양의 고도와 방위가 크게 변화하므로 태양광 패널에 입사하는 일사량을 정량적으로 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 달 표면 임의의 위치에서 태양 위치와 패널 설치 각도를 고려하여 일사량을 계산할 수 있는 엑셀 기반 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 제안된 프로그램은 사용자가 입력한 위도와 경도를 기반으로 날짜별 태양 고도와 태양 방위각을 계산하고, 이를 이용하여 패널 기울기에 따른 태양 입사 일사량(W/m^2)을 산정한다. 또한 패널은 수직축 추적(vertical-axis tracking)을 통해 항상 태양 방향을 향한다고 가정하여 패널 방위각에 따른 영향을 단순화하였다. 개발된 프로그램을 이용하면 달 표면의 다양한 위치에서 태양광 발전 잠재량을 비교 분석할 수 있으며, 패널 설치 각도에 따른 일사량 변화를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 기초적인 태양 복사량 계산 모델을 적용하였으며, 주변 지형에 의한 태양 차폐 효과는 고려하지 않았다. 향후 연구에서는 달 표면 지형 데이터를 활용한 음영 분석을 추가하여 보다 현실적인 태양광 발전 잠재량 평가가 가능할 것으로 기대된다.

*Corresponding Author: energy@sejong.ac.kr

1) 세종대학교 에너지자원공학과 학사과정

2) 세종대학교 에너지자원공학과 교수

차량통합형 전기차 솔라루프의 경제적 타당성과 구조적 요인에 대한 국가 간 비교 분석

서장원^{1)*}

Economic Viability and Structural Decomposition of Vehicle-Integrated Photovoltaic Roofs: A Cross-Country Comparative Analysis

Jangwon Suh^{1)*}

에너지 전환 정책의 일환으로 교통부문에서는 탈탄소화를 위해 전기차 보급이 확산되고 있다. 그러나 전력요금의 불확실성과 충전·인프라 비용의 구조적 부담은 소비자의 전기차 캐즘 현상을 유발하고 있는 실정이다. 이러한 가운데 분산전원으로서의 차량통합형 전기차 솔라루프(vehicle-integrated photovoltaic roofs)는 주행거리 증가뿐만 아니라 충전비용 절감, 계통 의존도 감소, 에너지 자립성 기여, 배터리 열화 완화 등의 다양한 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 차량통합형 전기차 솔라루프 이용시 기대할 수 있는 비용 및 수익으로부터 사용기간에 따른 경제적 타당성을 평가하고, 경제적 가치에 영향을 미치는 구조적 요인들을 분류 및 분석하였다. 이를 위해, 전세계 18개국을 대상으로 솔라루프의 사양, 설비비용률, 경사요인 보정값, 음영 손실, 열화율 등을 고려하여 20년간의 연간 발전량(충전량)을 분석하였다. 다음으로 국가별 연간 충전량과 급속 충전단가를 결합하여 연간 충전 절감액을 계산하였으며, 솔라루프의 사용기간에 따른 감가상각을 고려하여 잔존가치를 평가하였다. 솔라루프의 연간 수익 항목에 국가별 할인율을 적용하여 순현재가치, 회수기간, 내부수익률 등의 경제성 지표를 도출하였다. 18개국에 대한 솔라루프의 경제적 타당성과 그 원인을 다양한 관점에서 분석하기 위해 순현재가치 도출에 고려되는 인자들의 구조적 요인 분해를 통해 순현재가치 격차의 원인 기여도를 정량화하였다. 분석 결과 솔라루프의 경제적 타당성은 기술 및 설비비용률(지리·기후요인)보다는 충전단가(시장요인)와 할인율(금융요인)에 더 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 더불어 국가별 설비비용률과 충전단가를 기반으로 솔라루프의 경제성 지도(6분면)를 제시하고, 국가별 상황에 따른 정책 및 산업적 전략 방안을 제시하였다. 본 연구는 각 국가의 지리, 기후, 시장, 및 금융 환경을 기반으로 전기차 솔라루프의 활성화를 위한 대책 마련과 정책 방안 수립에 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00395878).

*Corresponding Author: jangwonsuh@kangwon.ac.kr

1) 강원대학교 그린에너지공학과 부교수

공극률 및 투수계수 갱신을 고려한 CO₂ 지중 주입 수치 모사

서정원¹⁾, 장찬희²⁾, 소병달^{3)*}

Numerical Simulation of CO₂ Injection Considering Porosity and Permeability Updates

Jeong-Won Seo¹⁾, Chan-Hee Jang²⁾ and Byung-Dal So^{3)*}

현재 기후 변화 대응과 탄소 저감 정책의 확대로 CO₂를 지중에 저장하는 기술이 주목받고 있다. CO₂ 주입 시 공극압 상승에 따라 지층의 다공탄성 변형이 발생하며, 이러한 변형은 공극체적과 유동경로의 변화를 통해 공극률 및 투수계수의 변화를 유발할 수 있다. 따라서 지중 유체 주입에 따른 지층의 수리역학적 거동을 해석하기 위해서는 다공탄성 변형에 수반되는 공극률과 투수계수의 시공간적 변화를 수치모사에 반영할 필요가 있다.

지중 유체 주입 수치 모사에서는 단상 유동(single-phase flow)을 기반으로 한 다공탄성(poroelasticity) 모델과 다상 유동(multi-phase flow) 모델이 널리 활용되고 있다. 다공탄성 모델은 공극압 증가에 따른 지층의 변위를 해석하는 데 유용하지만, 기존 상과 주입 상 사이(예, 물과 CO₂)에서 발생하는 모세관압과 상대투수도에 의해 나타나는 다상 유동 특성을 반영하기 어렵다. 다상 유동 모델은 공극압 변화와 함께 서로 다른 유체 상 사이의 상호작용을 고려하여, 주입 유체의 이동 경로와 분포를 분석할 수 있지만, 지층의 변위를 설명하는 데에는 한계가 있다. 각 모델의 한계를 보완하기 위해 다상 유동 모델과 다공탄성 모델을 결합한 연구가 제안되어 왔으나, 완전 결합(fully coupled) 방식은 계산 부담이 크다. 이에 반해 양방향 결합(two-way coupling)은 비교적 단순한 계산 구조를 가지지만, 공극률과 투수계수의 갱신 빈도가 해석 결과에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 오픈소스 유한요소 플랫폼 OpenGeoSys를 이용하여 공극률과 투수계수 갱신을 반영한 다상 유동-다공탄성 양방향 결합 해석을 수행하였다. 이를 통해 변위, 공극압, 그리고 주입상의 거동 분포를 동시에 분석하고, 공극률과 투수계수의 적절한 갱신 빈도를 평가하였다.

우리는 먼저 3개의 층으로 구성된 2차원 지층 모형을 설정하고, 공극률 및 투수계수의 갱신 빈도에 따른 공극압, 변위, 주입상 분포의 차이를 분석하였다. 또한 저류층의 형상 및 층서 구조를 변화시켜, 복잡한 지층 구조가 유체 주입 거동에 미치는 영향을 평가하였다.

사 사

본 연구는 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00254680).

References

Cappa, F. and Rutqvist, J., 2011. Modeling of coupled deformation and permeability evolution during fault reactivation induced by deep underground injection of CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(2), 336-346.

*Corresponding Author: bds@kangwon.ac.kr

1) 강원대학교 지오에코시스템융합학과 석사과정

2) 강원대학교 지구물리학과 박사과정

3) 강원대학교 지구물리학과 교수

대수층 CO₂ 저장을 위한 WAG 주입 최적화 및 주입량 민감도 분석

임수경¹⁾, 김건우²⁾, 양민서³⁾, 김재훈³⁾, 장일식^{4)*}

Optimization of WAG Injection Strategy and Sensitivity Analysis of Injection Rate for CO₂ Storage in Saline Aquifers

Sookyung Lim¹⁾, Gunwoo Kim²⁾, Minseo Yang³⁾, Jaehun Kim³⁾ and Ilsik Jang^{4)*}

본 연구에서는 울릉분지 대수층에서 이산화탄소(CO₂)의 안정적인 지중 저장을 위한 WAG(Water-Alternating Gas) 주입 시나리오 최적화와 주입량 민감도 분석을 수행하였다. 연구 대상 저장층은 두께와 세일 분포가 다양하고 경사가 발달한 지질 특성을 가지며, 이러한 지질 조건에서 주입 위치에 따른 주입양상의 차이를 확인하기 위해 서로 다른 특성을 나타내는 두 개의 단일 주입 위치 후보가 설정되었다. CO₂와 물의 주입 기간을 변수로 설정하고, 상부로 이동하는 CO₂의 양을 최소화하는 것을 목적으로 하여 주입 시나리오를 최적화하였다. 도출된 WAG 주입 시나리오를 기반으로 유체 주입량 변화에 대한 민감도 분석을 통해, 주입량 변화가 상부 CO₂ 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 대수층에서 안정적인 CO₂ 지중 저장을 위한 효율적인 WAG 주입 전략을 제시한다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20212010200010)을 받아 수행되었습니다. SLB와 CMG의 소프트웨어 제공에 감사드립니다.

References

Lim, S.K. and Jang, I., 2024. Analysis of Trapping Mechanisms of Carbon Dioxide Storage Based on Carbon Dioxide Injection Scenarios, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 61(2), p124-135.

*Corresponding Author: isjang77@chosun.ac.kr

- 1) 조선대학교 첨단에너지자원공학과 박사과정
- 2) 조선대학교 첨단에너지자원공학과 석사과정
- 3) 조선대학교 첨단에너지공학과 학사과정
- 4) 조선대학교 첨단에너지공학과 교수

염수층 이산화탄소 지중저장에서 염 침전이 주입성에 미치는 영향에 대한 시뮬레이션 연구

김민채¹⁾, 채민경¹⁾, 민배현^{1)*}

Simulation Study on the Effects of Salt Precipitation on Injectivity during Geological CO₂ Storage in a Saline Aquifer

Minchae Kim¹⁾, Minkyung Chae¹⁾ and Baehyun Min^{1)*}

본 연구에서는 염수층 이산화탄소 지중저장 시뮬레이션을 수행하여 주입정 인근에서 발생하는 염 침전이 주입성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 가로×세로×높이 3 km×3 km×0.1 km 규모의 균질 대수층 모델을 구축하고, 20년 동안 이산화탄소를 주입하는 다성분-다상유동 시뮬레이션을 수행하였다. 주입성은 주입정 인근에서 염수 증발로 유발된 염 침전에 따른 공극률 및 유체투과율 변화가 공저압 변화에 미치는 영향을 바탕으로 평가하였다. 저장층 물성 및 주입 조건이 염 침전에 미치는 영향을 분석하기 위해, 유체투과율이 각각 10 mD, 100 mD, 1000 mD인 저장층 모델들을 구축하였다. 각 모델에 대해 이산화탄소 주입 유량을 100,000 m³/day부터 300,000 m³/day 까지 50,000 m³/day 간격으로 증가시키며 총 15 개의 염 침전 모사 시뮬레이션 사례를 설정하였다. 또한 각 사례에서 염 침전 반응을 고려한 경우와 이를 고려하지 않은 경우를 비교함으로써 염 침전 모사의 중요성을 평가하였다. 아울러 선행 연구(Darkwah-Owusu et al., 2024; He et al., 2025)에서 제안된 염 침전 완화 전략인 저염수 주입, 포화 이산화탄소 주입, 주입 휴지기 도입을 시뮬레이션에 적용하여 주입성 개선 효과를 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 국내외 이산화탄소 지중저장 운영에서 보다 정확하고 안정적인 주입 전략을 수립하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

사 사

이 연구는 한국연구재단 중견연계 신진후속 연구(RS-2023-00208297) 및 기후에너지환경부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-16063236, CCS 통합 시스템 네트워크 최적화 및 안전성 확보 기술 개발).

References

- Darkwah-Owusu, V., Yusof, M.A.M., Sokama-Neuyam, Y.A., Turkson, J.N., and Fjelde, I., 2024. A Comprehensive Review of Remediation Strategies for Mitigating Salt Precipitation and Enhancing CO₂ Injectivity during CO₂ Injection into Saline Aquifers, *Science of the Total Environment*, 950, 175232.
- He, X., Zhang, Y., and Li, Q., 2025. Strategies for Preventing Salt Precipitation and Blockage Risks in CO₂ Injection Wells: Pore-Scale Experimental Insights, *Energy & Fuels*, 39(6), 3176–3187.

*Corresponding Author: bhmin01@ewha.ac.kr

1) 이화여자대학교 기후에너지시스템공학과

자연수소 탐사를 위한 수소 시스템 및 지구조 환경

우주환¹⁾, 이승열^{2)*}

Hydrogen systems and tectonic environments for natural hydrogen exploration

Juhwan Woo¹⁾ and Seungyeol Lee^{2)*}

전 세계적인 에너지 전환 기조에 따라 탄소중립 실현을 위한 지속 가능한 친환경 자원으로 지각 내 자연수소에 대한 관심이 급격히 증가하고 있다. 본 연구에서는 자연수소 탐사의 핵심 개념인 수소 시스템을 정의하고, 수소의 생성 기작과 보존 조건 및 주요 지구조 환경에 따른 탐사 모델을 종합적으로 고찰하였다. 수소 시스템은 물의 공급이 가능한 기반암 내에서 수소를 생성하는 ‘근원암-생성 시스템’과 생성된 수소의 이동, 트랩 및 집적 과정을 포함하는 ‘이동-보존 시스템’으로 구분된다. 수소의 주요 생성 기작으로는 초고철질 기반암 내 Fe 함유 광물의 산화 과정에서 발생하는 사문암화 작용, 자연 방사능에 의한 물의 방사성 분해, 그리고 유기물의 열적 분해 등의 과정이 포함되며, 이 중 사문암화 작용은 타 생성 과정에 비해 월등히 높은 수소 생성 효율을 보인다. 지금까지 알려진 자연수소 시스템은 비활성 대륙 주변부, 판 경계, 대륙 내부 등 다양한 지구조 환경에서 작동하며, 각 환경에 따른 특화된 탐사 모델 정립이 요구된다. 판 경계부에서는 섭입 및 압동 작용에 의해 부가된 코디에라형 및 테티스형 오피올라이트가 주요 탐사 대상이며, 대륙 내부에서는 선캠브리아기 기반암의 그린스톤 벨트와 열개 분지, 그리고 열개 역전 조산대가 유망한 지질 구조이다. 특히 열개 역전 조산대의 경우, 역전 과정에서 생성된 맨틀 썩기의 수소 생성량이 열개 시기보다 월등히 많을 수 있다는 점이 주목된다. 효율적인 자연수소 탐사를 위해서는 다학제적 탐사 기법의 통합적 적용이 필수적이다. 지표 유출 징후인 페어리 씨클(Fairy circles) 식별을 위한 원격 탐사와 토양 가스 모니터링, 잠재적 생성량 평가를 위한 방사능 탐사 등의 지구화학적 접근이 필요하다. 또한, 지하 구조와 단층대 및 저류층 규명을 위해 중력, 자력, 자기지전류(MT), 탄성과 탐사를 병행하여 수소 시스템 구성 요소를 지도화해야 하며, 최종적으로는 암석물리학적 변수를 고려한 수리지질학적 모델링이 수반되어야 한다. 본 연구를 통해 도출된 수소 시스템 및 탐사 모델에 대한 이해는 국내 초고철질암 노출 지역의 부존 가능성 평가 및 향후 체계적인 탐사 전략 수립에 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

주요어: 자연수소 탐사, 수소 시스템, 사문암화, 오피올라이트, 지구조 환경

사 사

이 연구는 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원(No. RS-2024-00342773)과 2024년도 정부(교육부) 재원으로 한국연구재단의 G-LAMP 사업 지원(No. RS-2024-00445180)을 받아 수행된 연구입니다. 아카데미 라이선스를 지원해주신 ffa(GeoTeric 2024), Geosoft, and Schlumberger(Petrel 2025)에 감사를 드립니다.

*Corresponding Author: slee2@chungbuk.ac.kr

1) 충북대학교 G-lamp 사업단 박사후 연구원

2) 충북대학교 지구환경과학과 교수

복합 지질·지구물리 자료 기반 딥러닝을 이용한 미국 천연 수소 유망도 근사 모델 구현 및 타당성 검토

강호진¹⁾, 편석준^{2)*}

Implementation and Feasibility Study of a Deep Learning-based Approximation Model for White Hydrogen Prospectivity in the U.S. Using Integrated Geological and Geophysical Data

Hojin Kang¹⁾ and Sukjoon Pyun^{2)*}

탄소중립 실현을 위한 청정 에너지원으로서 천연 수소(White Hydrogen)는 높은 경제성과 친환경적 잠재력을 보유하고 있으나, 수소의 높은 유동성과 복잡한 지질학적 거동으로 인해서 부존 지역을 특정하는데 기술적 어려움이 존재한다. 수소 유망도 추정은 탐사 초기 단계에서 산재한 지질정보를 바탕으로 수소 부존 가능성이 큰 구역을 우선 순위화하는 공정이다. 이 과정은 시추와 같이 고비용이 소요되는 작업의 리스크를 최소화하고 탐사 사업의 경제적 타당성을 검토하는 데 있어 의사결정 지표의 역할을 수행할 수 있다. 그러나 기존의 수소 유망도 추정은 전문가의 주관적 판단에 의존하는 경우가 많아 해석 결과의 일관성 유지와 대규모 데이터의 신속한 처리에 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 주관성을 완화하고 해석 프로세스의 효율성을 개선하기 위해, 전문가가 수행한 수소 유망도 해석 결과를 학습 라벨(Label)로 활용하는 딥러닝 기반의 유망도 추정 보조 알고리즘을 제안한다. 제안된 모델은 탄성과 및 중·자력 등 복합 지구물리 자료와 지질도 등의 지질 자료 간의 비선형적 상관관계를 학습하여 전문가의 해석 체계를 안정적으로 재현하며, 전 조사 구역에 대해 표준화된 정량적 기준을 적용함으로써 해석 업무의 객관성을 보완하는 데 중점을 두었다. 연구 결과, 제안된 알고리즘은 전문가의 최종 판단을 대체하기보다 1차적인 유망지 스크리닝을 위한 보조 도구로서 해석 업무의 효율화를 도모할 수 있음을 확인하였으며, 이는 향후 탐사 데이터 축적에 따른 의사결정 프로세스의 신뢰도를 점진적으로 제고하는 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-24523155).

References

Gelman, S.E., Hearon, J.S. and Ellis, G.S., 2025. Prospectivity mapping for geologic hydrogen. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1900, 43p.

*Corresponding Author: pyunsj@inha.ac.kr

1) 인하대학교 에너지자원공학과 석사과정

2) 인하대학교 에너지자원공학과 교수

호상철광상 수열 반응과 자연 수소 생성 메커니즘: 선행연구

문인경¹⁾, 이승열^{2)*}

Hydrothermal Reactions in Banded Iron Formations and Mechanisms of Natural Hydrogen Generation: A Preliminary Study

Inkyeong Moon¹⁾ and Seungyeol Lee^{2)*}

본 연구에서는 중국 우강지역에 분포하는 호상철광상을 대상으로, 철 함유 광물의 수열 환경에서의 산화 반응이 자연 수소 생성에 미치는 영향을 체계적으로 평가하였다. 특히 자철석과 철 규산염 광물이 공존하는 실제 호상철광상 시료와, 반응 메커니즘을 명확히 규명하기 위한 고순도 자철석을 비교 대상으로 설정하였다. 이를 위해 오토클레이브를 이용한 수열 반응 실험을 수행하였으며, 실험 조건은 150°C에서 30일, 230°C에서 22일로 설정하여 온도에 따른 반응 특성과 수소 생성량을 비교하였다.

모든 실험 조건에서 수소가 검출되었으며, 온도가 증가함에 따라 수소 생성량이 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다. 특히 고순도 자철석 시료는 230°C 조건에서 최대 약 335 ppm 수준의 수소를 생성하여 가장 높은 반응성을 나타냈다. 광물학적 변화를 확인하기 위한 XRD 분석 결과, 자철석이 적철석으로 전이되는 산화 반응이 진행되었으며, 이러한 과정이 수소 생성량과 밀접하게 연관되어 있음을 확인하였다. 한편, 자철석 함량이 상대적으로 낮고 철 규산염 광물이 포함된 시료에서도 유의미한 수준의 수소가 생성되어, 다양한 철 함유 광물이 수열 조건에서 수소 발생에 기여할 수 있음을 시사한다.

본 연구 결과는 호상철광상이 효과적인 자연 수소 생성원으로 작용할 수 있음을 실험적으로 입증하며, 특히 자철석의 함량과 반응 온도가 수소 생성 효율을 지배하는 주요 제어 인자임을 보여준다. 또한 이러한 결과는 철 함유 광물의 산화 반응을 기반으로 한 지질학적 수소 생성 메커니즘을 이해하는 데 중요한 기초 자료를 제공하며, 향후 자연 수소 자원의 탐사 및 활용 가능성을 평가하는 데에도 유용한 과학적 근거를 제시한다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원(KIOST) 연구사업(과제번호: PEA0313), 한국연구재단 지원사업(과제번호: RS-2024-00342773), 그리고 한국연구재단 G-LAMP 사업(과제번호: RS-2024-00445180)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Bekker, A., Slack, J.F., Planavsky, N., Krapež, B., Hofmann, A., Konhauser, K.O., and Rouxel, O.J., 2010. Iron formation: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes, *Economic Geology*, 105, p.467-508.
- Kim, H.-I., Moon, I., Kim, M., Lee, H.J., Choi, H., Uhm, Y.R., Liu, L., Kim, J., and Kim, W., 2025. Characterization and quantification of iron species in the banded iron formations (BIFs) in China Craton to explore the potential for H₂ production using XRD and Mössbauer spectroscopy, *PLOS ONE*, 20, e0316540.

*Corresponding Author: slee2@cbnu.ac.kr

1) 한국해양과학기술원 대양자원연구부 선임연구원

2) 충북대학교 지구환경과학과 교수