

에너지전환기에서 회장암의 새로운 지질산업적 잠재성

김효임^{1,2*} · 이범한^{3,4}

¹경상국립대학교 지질학과

²경상국립대학교 분자제어연구소

³한국지질자원연구원 희소금속광상연구센터

⁴과학기술연합대학원대학교 지질과학전공

New Geological and Industrial Applications of Anorthosite in the Age of Energy Transition

Hyo-Im Kim^{1,2*} and Bum Han Lee^{3,4}

¹Department of Geology, Gyeongsang National University, Korea

²Research Institute of Molecular Alchemy, Gyeongsang National University, Korea

³Critical Minerals Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Republic of Korea

⁴Major of Geological Science, University of Science and Technology (UST), Daejeon, Republic of Korea

요약: 인류의 지속가능성과 국가적 자원 확보의 중요성이 시급해져 가는 현대 첨단 산업의 발전 동향에 비추어 볼 때, 회장암(anorthosite)은 새로운 알루미늄 공급원으로서의 자원 잠재성뿐만 아니라 다양한 응용광물학적 활용이 가능한 주요 자원으로 재조명되어야 할 필요성이 있다. 특히, 회장암은 높은 CaO 함량 및 Al_2O_3/SiO_2 비율을 갖는 비교적 단순한 화학조성을 지니고 있으며 상대적으로 불순물이 적기 때문에, 광물조성 및 화학적 특성 상 산업응용 측면에서 큰 이점이 있다. 이러한 특징에 따라, 회장암은 주요 원료물질의 공급원으로서 중요한 산업적 자원으로 평가받고 있으며, 전 세계적으로 다양한 응용암석학적 및 산업 측면에서의 높은 활용성을 갖는다. 본 논평에서는 회장암의 광물 안정성과 반응성을 결정하는 회장암의 광물학적 및 지화학적 특징에 대하여 검토하고, 응용암석학적 특성을 정리하였다. 이를 기반으로, 최근 자원 고갈 및 환경문제로 인해 한계에 직면한 베이어 법을 기반으로 하는 알루미늄 산업의 대안으로서의 회장암의 활용 가능성과, 친환경 건설재로서의 응용방안 및 새로운 이산화탄소 처분 대상으로서의 회장암의 활용 방안에 대해 제안한다. 에너지전환기에 이르러 알루미늄의 응용부문의 시장 확대가 가속화되는 상황에서, 회장암은 지질산업 및 청정에너지 분야에서 그 중요성이 증대되고 있으므로, 국내 하동-산청 지역에 분포하고 있는 회장암체에 대한 심도 있는 연구가 요구된다. 앞으로 국내의 회장암을 대상으로 한 실험적 연구가 진행된다면, 이는 국내 자원의 효율적 활용을 통해 경제적 이익을 극대화할 수 있는 기회일 뿐 아니라, 환경친화적이고 지속 가능한 발전을 이끌어낼 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어: 회장암, 하동-산청 회장암 복합체, 자원잠재성, 탄산염안정화, 알루미늄

Abstract: In light of the development of modern high-tech industries, where human sustainability is becoming increasingly important, anorthosite needs to be reevaluated not only for its potential as a new source of aluminum, but also as a primary resource with a wide range of industrial applications. In particular, a relatively simple chemical composition with a high CaO content and Al_2O_3/SiO_2 ratio, along with its relatively low impurity levels and chemically stable nature offers significant advantages in industrial processes. Thus, anorthosite is considered as an important industrial resource in the age of energy transition. In this review, we examine the mineralogical and geochemical characteristics of anorthosite that determines their stability and reactivity.

*Corresponding author
Tel: +82-55-772-1478
E-mail: hyoim@gnu.ac.kr

Based on their characteristics, we propose the potential use of utilizing the anorthosite as an alternative to the Bayer process which has the limitations. We also explore its application as the eco-friendly geo-synthetic materials, and as the new materials for carbon dioxide storage and utilization. As the demand for aluminum applications accelerates, anorthosite is gaining their importance in the geological industry and clean energy field. Therefore, advanced and extensive research on anorthosite complex occurring in the Hadong and Sancheong regions of Korea is critical to obtain opportunities to enhance economic advantages through efficient utilization of national resources and to lead to sustainable development.

Keywords: Anorthosite, Hadong-Sancheong anorthosite complex, Resource potentiality, Carbonate sequestration, Aluminum ore

서 론

화석연료 근간의 에너지 체계와 무분별한 자원 채굴이 중심을 이루는 현시점의 산업 사회는 급격한 기후 위기와 첨예한 국제 정세의 갈등 등 여러 측면에서 한계 상황을 맞이하고 있다. 이러한 위기를 타개하기 위하여 과학계 및 산업계 전반에서는, 탄소중립 산업사회를 구현할 수 있는 다양한 방안을 모색함과 동시에, 각국의 산업 발전에 동력이 되는 자원의 안정적 자체 수급을 위한 기술 개발에 주력하고 있다. 이렇게 전 세계적으로 도래한 에너지전환기의 시대적 요구에 따라 지질학 및 광물학 분야에도 보다 새로운 학문 및 응용적 측면의 실효적 연구과제 개발과 기존 수행된 연구를 기반으로 한 발상의 전환이 필수적이라 할 수 있다. 최근 국내에서도 시작된 지하 심부 기원의 천연 수소에 대한 연구(e.g., Kim, 2022), 그동안 주목받지 못했던 화산 함몰대 내에서의 점토형 리튬 탐사(e.g., Benson *et al.*, 2023), 및 전통적 시멘트 산업을 대체하기 위한 지오폐리머의 개발(e.g., Kim *et al.*, 2019) 등은 지속 가능한 미래를 실현시키는데 동참하기 위한 국내 지질학 및 광물학계 노력의 일환이라 할 수 있다. 이와 더불어 에너지 전환기와 우주시대를 맞이하여, 그간 전 세계적으로 많은 지질학자들의 자연과학적 연구 대상이 되어왔던 회장암질암(anorthositic rocks; 이하 회장암)에 대한 학술적 및 실용적 측면에서의 연구 개발 필요성도 새롭게 대두되고 있는 상황이다.

회장암(灰長岩, anorthosite)은 Ca가 풍부한 사장석(칼슘 사장석; calcic plagioclase, An₅₀₋₉₀)의 비율의 함량이 90% 이상이고, 석영의 함량이 5% 이하인 암석으로 정의되며, 전 지구적으로 크게 시생대(3.7-2.5 Ga)와 중기 원생대(1.6-1.0 Ga) 두 시기에 형성된 암체들이 보고되고 있다(Ashwal and Bybee, 2017). 그 중 후자의 경우, 대규모의 매시프 형으로 나타나며, 대개 차모카이트(charnockite), 망거라이트(mangerite) 및 화강암

(granite)과 함께 이른바 “AMCG 슈트(suite)”의 형태로 산출된다(e.g., Emslie 1978a). 이들은 광역적인 조산운동과 밀접한 관련성을 보이며 다양한 규모의 관입암 복합체의 형태로 나타나고, 이 과정에서 수반되는 고온변성작용에 따라 백립암상(granulite)의 변성상, 유색광물의 분결(segregation)에 의한 엽리의 발달 및 철-티탄 광체의 형성 등의 특징을 보인다(Chubb *et al.*, 1995; Lee and Cho, 2022; Kim *et al.*, 2011). 특히, 전 세계에서 비교적 제한된 시기에 대규모로 산출되는 원생대 회장암체의 경우, 해당 시기의 지각-맨틀 진화에 따른 로디니아 및 콜롬비아 초대륙의 탄생과 분열에 밀접한 관련이 있을 것으로 여겨지고 있어서 학술적으로 시생대-원생대 지구 진화 과정을 규명하기 위한 매우 중요한 연구 대상이다(Charlier *et al.*, 2010). 또한, 회장암은 현무암과 더불어 지구의 위성인 달의 표면을 구성하는 주요 암석으로, 주로 고원(highland)에 분포하고 있다. 이러한 달 전역에 걸친 광역적 분포는 달 탄생 초기의 마그마 바다(Lunar magma ocean)의 존재를 이해하는데 근본적인 단서가 된다(Elkins-Tanton *et al.*, 2011; Russell *et al.*, 2014; Pernet-Fisher *et al.*, 2019).

회장암 고유의 높은 학술적 중요성과 더불어, Ca-사장석 위주의 단순 광물조성으로부터 기인하는 회장암 화학조성상의 특징, 즉 삼성분계 위주의 비교적 간단한 화학조성(대개 CaO ~15 wt%, Al₂O₃ ~30 wt%, SiO₂ ~48 wt%), 상대적으로 높은 CaO 함량 및 높은 Al₂O₃/SiO₂ 비율 등은 응용광물학적인 관점에서 새로운 광물 자원으로서의 활용 가능성을 탐구하기에 충분하다고 여겨진다. 이에 따라, 본 논평에서는 회장암의 광물 안정성과 반응성을 결정하는 회장암의 광물학적 및 지화학적 특징에 대하여 정리하고, 이를 기반으로 한 응용 암석학적 특성을 알아보고자 한다. 이어서 회장암의 산업적 활용 현황과 미래 사회에서 활용할 수 있는 회장암의 새로운 산업적 응용 방안에 대하여 논의하고자 한다. 특히, 기존 알루미늄 산업이 직면한 자원 고갈 및

환경오염 측면에서의 지속가능한 발전에의 한계와 이에 대한 대안으로써 회장암의 활용 가능성을 타진하고자 한다.

회장암의 광물학적 및 지화학적 특성

회장암은 주로 칼슘이 풍부한 사장석(칼슘 사장석; calcic plagioclase, An)의 비율이 90%에 달하며, 형성 시기 및 산출 지역에 따라 칼슘 사장석의 비율이 약 An₃₀₋₉₅로 다양하다(Fig. 1). 지구 상에서 산출되는 회장암은 크게 시생대 거반정 회장암(Archeon megacrystic anorthosite)와 원생대 매시프형 회장암(Proterozoic massif-type anorthosite)로 구분된다(Fig. 2). 전자의 경우 An₆₁₋₉₄(평균 An₈₀)의 높은 칼슘의 비율을, 후자의 경우는 그보다 다소 낮은 An₃₀₋₇₀(평균 An₅₃)의 값을 갖는 것이 특징이다(e.g., Ashwal and Bybee, 2017 and references therein). 이에 비해 달에서 산출되는 회장암(Lunar primordial anorthosite) 내 사장석의 경우 An의 비율은 약 93-97으로 지구상의 회장암에 비하여 월등히 높은 값을 갖는다(Kenson and Ringwood, 1976; Snyder *et al.*, 2000; Elkins-Tanton *et al.*, 2011). 회장암 중에서도 상대적으로 높은 An 비율을 갖는 달 회장암 및 시생대 회장암의 경우, 고철질 내지는 초고철질 마그마의 냉각과정 초기에 정출되는 Ca-사장석이 잔류

마그마에 비하여 낮은 밀도(약 2.6-2.8 g/cm³)를 가짐에 따라 달 표면 근처로 떠오르며 회장암질 마그마를 형성한다고 알려져 있다. 매시프형 회장암 역시 현무암질 및 맨틀 기원의 마그마로부터 기원하지만, 고철질 마그마의 상승과정 중 대륙지각 물질의 혼입, 열수 시스템의 관여 등으로 인하여 달 및 시생대 회장암에 비하여 다소 낮은 칼슘 사장석 함량을 갖는 것이 특징이다(Lee and Cho, 2022; Lee *et al.*, 2014).

회장암의 성인적 특성으로부터 알 수 있듯이, 회장암을 주로 구성하고 있는 Ca-사장석의 경우, 고온 환경에서 정출되는 생성기작 상 지표 조건(near-surface condition)에서 상대적으로 불안정하고 쉽게 풍화되는 특성을 보인다. 대부분의 사장석질 암석은 지표 조건에서 캐올리나이트[Al₂Si₂O₅(OH)₄] 위주의 광석인 고평토(kaolin)로 전이되고, 풍화 정도가 심화됨에 따라 궁극적으로 수산화알루미늄 광물(예, 깁사이트 및 비마이트)로 구성된 알루미늄 광석인 보크사이트(bauxite)로 변질되는데, 이 때 고용체인 Na-사장석 및 알칼리장석 계열 광물에 비하여 Ca-사장석의 풍화 및 변질도가 심하게 이루어진다. 또한, 사장석의 경우 pH 조건에 따라 용해속도(dissolution rate)에 차이를 보이는데, 일반적으로 pH=6 부근을 저점으로 갖는 U자 형 용해도 곡선의 특성을 보인다(Blum and Lasaga, 1988; Ganor *et al.*, 2009; Gudbrandsson *et al.*, 2014). 산성 조건

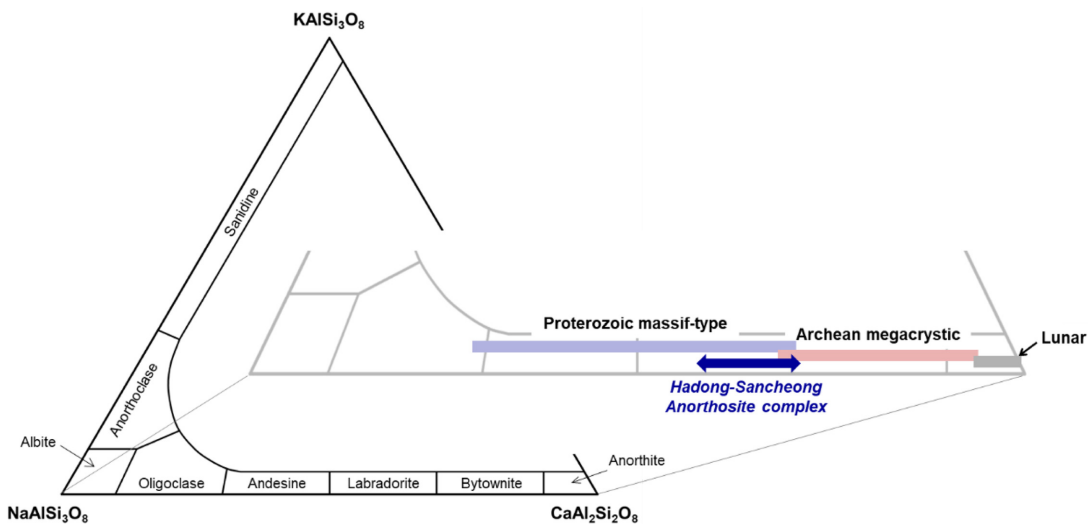


Fig. 1. The ranges of An contents for Lunar (gray), Archean megacrystic (red), and Proterozoic massif-type (blue) anorthosite (Data from Ashwal, 2017). A range of An content of Hadong-Sancheong anorthositic complex is shown with blue arrow (Jeon, 2014; Jeong *et al.*, 1989).

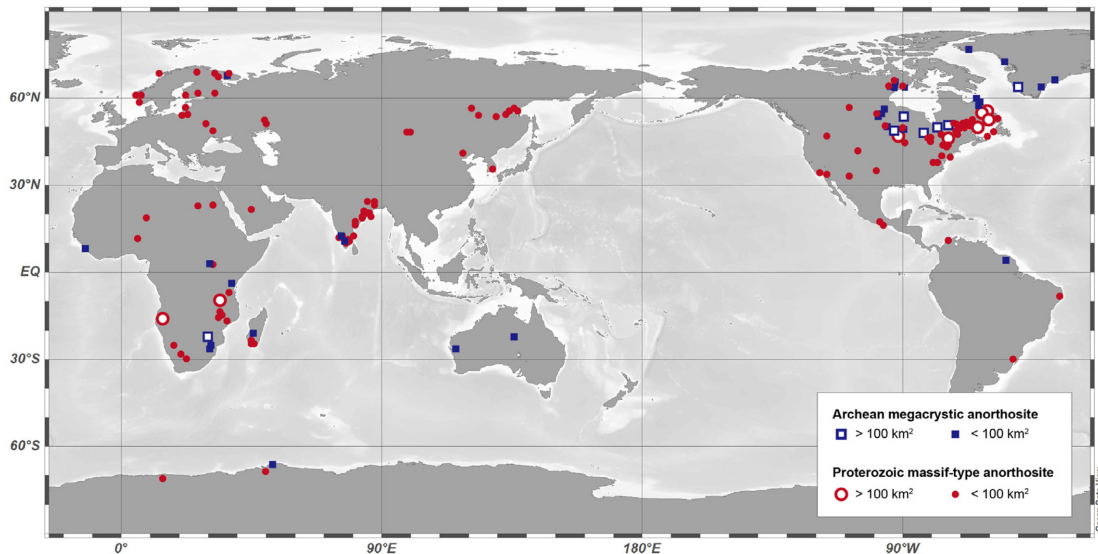


Fig. 2. Global distribution of anorthosites. Blue squares refer to Archean megacrystic anorthosites and Red circles represent Proterozoic massif-type anorthosites [data from Ashwal and Bybee (2017)].

($\text{pH} < 6$)에서의 용해 속도는 알칼리 조건의 용해 속도에 비하여 보다 급격한 증가도를 보이는 것이 특징이다. 최근의 실험적 연구에 따르면 $\text{pH} 6$ 이하의 산성 조건에서 칼슘 사장석의 조성이 증가함에 따라 용해 속도가 유의하게 증가하며, $\text{pH} \sim 2$ 조건에서 회장석의 용해 속도는 조장석(albite)의 용해 속도에 비하여 약 $10^{2.5}$ 배 정도 빠르다는 것이 확인되었다(Gudbrandsson *et al.*, 2014). 이처럼 회장암은 지표 환경에서의 광물 및 지화학적 불안정 측면에서 다소 불안정하고 화학적 반응성이 매우 큰 암석으로써, 특히 산성 조건 하에서의 회장석의 높은 용해속도는 이후 기술할 이산화탄소 지중저장 물질로서의 응용성, 약산 수용액과의 반응을 통한 무기 교결재 개발 및 새로운 알루미늄 원료로서의 가능성 등 다양한 응용분야로 활용의 이론적 기반이 된다.

회장암의 응용암석학적 특성을 기반으로 한 새로운 응용방안

회장암은 규산염계 암석 중에서 상대적으로 높은 Al_2O_3 및 CaO 함량을 보이고, 상대적으로 높은 화학적 반응성을 보이는 Ca-사장석 위주의 광물조성을 이루기 때문에, 광물조성 및 화학적 특성 상, 산업 측면에서의 응용성이 높다. 이러한 특성은 회장암이 산업원료 물질로서의 가치와 활용성을 높이는 요인으로 작용한다.

회장암은 그 동안 암면(mineral wool) 등과 같은 요업 원료 물질로서 일부 사용되어 왔으며, 최근에는 전 세계적으로 다양한 응용암석학적 및 산업 측면에서의 활용성이 모색되고 있는 상황이다. Table 1에서 확인할 수 있는 것과 같이, 회장암은 다양한 처리 공정을 통하여, 토목산업 분야, 세라믹 분야 및 화공 분야 등에서도 응용되고 있다.

회장암은 일반적으로 유리 및 세라믹 공정에서 필수적인 알루미늄 및 산화칼슘의 공급원으로써 재료의 내구성과 강도를 향상시키는 역할을 하고, 고백색도의 특성을 기반으로 페인트 및 각종 도포재(coatings) 산업에서 충전제, 색상 개선재로도 널리 활용되고 있다. 특히, 국내에서도 일부 세라믹 제조 전문 대기업체에서 실용화되고 있는 것처럼 유리섬유(glass fiber)나 암면(mineral wool) 생산 분야에서 각광받고 있다.

이러한 기존의 산업적 활용 분야들과 더불어, 광물 산업의 지속 가능성과 연구개발을 통한 경제성 제고가 더욱 고려되어야 하는 작금의 시대적 상황을 고려할 때, 회장암을 새롭게 응용할 수 있는 방안에 대해 실험적 연구의 중요성이 높아지고 있는 상황이다. 이 같은 취지와 맥락에서, 알루미늄 공급원으로서의 회장암의 가치에 대해 재조명하고, 친환경 건설재로서의 자원 잠재성 및 현재 국내에서 초미의 관심사가 되고 있는 CCUS 사업(carbon capture utilization and storage)에서

Table 1. 회장암의 다양한 산업적 응용(modified from Wanvik, 2000)

공정(Processing)	생산물(Products)	용도(Uses)	세부 활용(Specifics)
물리적 가공 (건식/습식처리 및 파쇄)	사장석 (plagioclase)	골재(aggregates)	고백색도 골재
		건축 자재	석재, 콘크리트 부재 등
		연마재	세정 분말, 치약, 모래분사재
		충진재, 코팅제 등	페인트 색상개선제 등
화학적 가공 (산 및 염기 처리)	알루미늄 염화물, 알루미늄 산화물, 알루미늄 황산염, 탄산 칼슘, 질산 칼슘, 규산 칼슘, 질산 암모늄, 실리카겔, 규산 나트륨, 탄산 나트륨 등	금속 알루미늄, 응집제(flocculent), 교결제(binder), 촉매 등	오수 및 폐수 처리, 종이 제작재료, 아스팔트 및 시멘트 재료, 유기반응물, 알루미나 특수 제품, 셀룰로오스 단열재, 화장품 및 의약품 재료, 식품 가공, 질소 비료, 특수 금속재료 등
		충진재 및 확장재	폴리에스터 및 에폭시 수지, 폴리우레탄 광택제 등
		코팅제	백색 에나멜
		흡수재	방사성 물질 흡착용
		규소 공급재	시멘트 첨가제 등
		세라믹	타일, 도자 제품, 바이오 세라믹, 유약 등
용융 처리	유리 및 세라믹	유리섬유	암면(mineral wool)
용접 재료			
직접 환원	Al-S 합금, Al- 및 Si-금속		

이산화탄소의 새로운 고정 물질(fixer)로서의 활용 방안에 대해 자세히 논하고자 한다.

기존 알루미늄 산업의 문제점과 알루미늄 공급원으로써의 회장암의 가치

알루미늄은 국내 주요 산업부문의 전자제품, 이차전지, 자동차 및 스마트폰 등 고효율과 경량성이 요구되는 분야에서 필수적인 자원으로 여겨지고 있으며, 특히 최근 우주항공산업 부문의 성장에 따라 그 중요성이 대두되고 있다. 2023년 2월, 산업자원통상부는 ‘핵심광물 확보전략’을 발표하며, 알루미늄을 33종 핵심광물로 포함시킨 바 있다(산업자원통상부, 2023). 대한민국뿐만 아니라, 미국 에너지부(Department of Energy)에서도 알루미늄을 핵심광물이자 청정 에너지 기술발전에 필수적인 18가지 자원인 ‘The electric eighteen’으로 선정하여 관리하고 있으며, 유럽 연합은 핵심원자재(Critical Raw Materials, CRM)로써 알루미늄을 포함시켰고 일본도 34종의 핵심광물에 알루미늄을 포함시키고 있다.

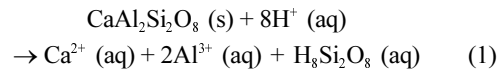
현대의 알루미늄 산업은 1880년대에 러시아 화학자인 바이어(K. Bayer)에 의해 개발된 바이어 공정(Bayer process)을 기반으로 알루미늄 대량생산의 시대를 맞이

하게 되었다. 바이어 공정은 보크사이트 광석을 수산화나트륨에 혼합하여 수산화 알루미늄산나트륨[NaAl(OH)₄] 형태로 용해시킨 후 냉각하여 결정화된 수산화알루미늄[Al(OH)₃]을 획득하고, 이를 소성시켜 알루미나(Al₂O₃)의 형태로 만들거나 홀-헤루트 공정(Hall-Heroult Process)을 통해 알루미늄 금속으로 환원시키는 일련의 과정이다. 바이어 공정의 원료가 되는 보크사이트는 깁사이트[gibbsite, γ-Al(OH)₃], 다이아스포어[diaspore, α-Al(OH)₃], 뵘마이트[boehmite, γ-AlOOH] 등의 수산화 알루미늄 광물의 집적체로, 고온다습한 지질학적 환경에서 풍화 잔적토의 상태로 부존함에 따라 그 산출 지역이 적도 근역으로 매우 제한적이다. 이러한 보크사이트의 국지적 산출은 국제 정세에 따라 알루미늄 수급에 심각한 영향을 미치는 주 원인이다. 주요 보크사이트 원료 공급 국가인 호주와 알루미늄 1차 정제산물인 산화알루미늄 및 알루미늄강(ingot)의 최대생산국인 중국과의 무역 마찰은 전 세계적인 알루미늄 생산성의 저하를 초래한 것이 대표적인 사례가 된다. 또한, 보크사이트 주요 수출국인 인도네시아가 2023년 6월부터 보크사이트 원광의 수출을 중단함으로써, 전 세계 알루미늄 산업의 원료 및 반제품 수급 체계에 변동이 일어나고 있다. 공급 부족으로 인한 수급 불균형과 더불어, 기존의

알루미늄 산업은 ‘저탄소 제조공정으로의 전환’이라는 시대적 요구에 직면하게 되었다. 바이어 공정의 경우, 알루미늄 제련 과정에서 다량의 폐기물을 생성하는데, 알루미늄 1톤 당 약 1.6-3.0톤의 폐기물을 발생시키는 것으로 알려져 있다. 특히, 보크사이트 제련공정의 대표적 잔류물인 레드머드(red mud)는 강한 알칼리성을 띠는 물질로 심각한 환경적 문제를 파생시키고 있으며, 공정 상 필수적인 알루미늄 나트륨 용매 처리에도 고비용이 소모되고 있다. 이에 따라, 에너지 전환기에 저탄소 산업공정을 모색하는 선진국 입장에서 바이어 공정 상의 탄소 배출 문제는 상당한 부담이 되고 있는 실정이다.

전통적인 바이어 공정을 기반으로 하는 기존의 알루미늄 산업은 높은 경제성 및 효율성에도 불구하고 전술한 여러 문제점으로 인하여 산업 지속성 측면에서 한계상황에 이르렀고, 이를 대체할 수 있는 대안으로써 회장암을 활용하여 관련 산업의 지속가능성 및 경제성을 확보하기 위한 학술적·산업적 연구개발을 모색하고 있는 실정이다. 이러한 연구의 일환으로 개발된 ‘Aranda-Mastin 공정(Fig. 3)’은 회장암을 원료로 사용하여 알루미늄(Al_2O_3), 실리카(SiO_2), 그리고 침전 탄산

칼슘(precipitated calcium carbonate, PCC)을 친환경적으로 생산하기 위한 방안이다(Aranda and Mastin, 2015). 이 공정은 고농도의 염산과 회장암을 반응시켜 알루미늄 및 칼슘의 용해(eq. 1)를 최적화한 것으로 10 bar 이하 저압 조건과 80-180도의 중온 환경에서 회장암으로부터 알루미늄 및 칼슘의 용출이 효과적으로 일어남을 제시하였다.



이 용해 과정에서 고체 부산물로서 실리카가 침전되고, 이후 용액의 가스 플러싱 및 소성 공정을 통해 고순도의 알루미늄(Al_2O_3)가 생산된다. 또한, 잔류 용액에 CO_2 를 주입함으로써 탄산칼슘을 생산하는 높은 탄소 활용(carbon capture and utilization, CCU) 방법이 수반되어 보다 환경친화적인 생산공정으로 평가되고 있다. 지구환경 보호를 위한 환경친화적 산업 육성정책 마련에 선도적 역할을 하고 있는 유럽 연합(EU)의 ‘호라이즌 2020 프로그램(Horizon 2020)’의 일환으로, 9개국 16개 업체의 협력 체제하에서 수행된 ‘AlSiCal 프로젝트’는 기존에 개발된 Aranda-Martin 공정을 더욱 혁신적으로 발전시킴으로써 실제 상업적 알루미늄 생산을 목표로 하였다. 이 프로젝트를 통하여 연구된 지구화학적 평형 시뮬레이션과 입자 반응 모델은 노르웨이에서 산출되는 세계 최대 규모의 구드반겐 회장암(Gudvangen anorthosite, An_{65})을 원료로 하여 순도 높은 알루미늄 및 실리카 생산이 효과적임을 제시하였다(Neron *et al.*, 2022). 다만, 회장암을 원료로 하는 알루미늄 생산 공정이 보크사이트를 원료로 하는 바이어 공정에 비하여 경제성을 확보하기 위해서는 부산물 수반되는 합성실리카와 침전 탄산칼슘의 시장성 제고 및 판로 개척 등의 효율적 방안이 도출되어야 할 것으로 전망된다. 그렇지만 기존의 보크사이트 기반의 알루미늄 산업에서 문제가 되었던 강알칼리성 폐기물이 파생되지 않고, 연료 사용이 적어 탄소발자국을 최소화 혹은 탄소 제로를 달성할 수 있을 뿐만 아니라, 오히려 이산화탄소를 탄산염 안정화로 고정시키는 역할을 할 수 있는 친환경적 알루미늄 생산공정이라는 측면에서 현재까지의 성과는 획기적이라 할 수 있을 것이다. 따라서, 앞으로 전술한 친환경적 알루미늄 생산 방식이 가져다줄 관련 산업계의 반향과 환경친화적 신 광물 산업의 경제성에 주목해야 할 것으로 여겨진다.

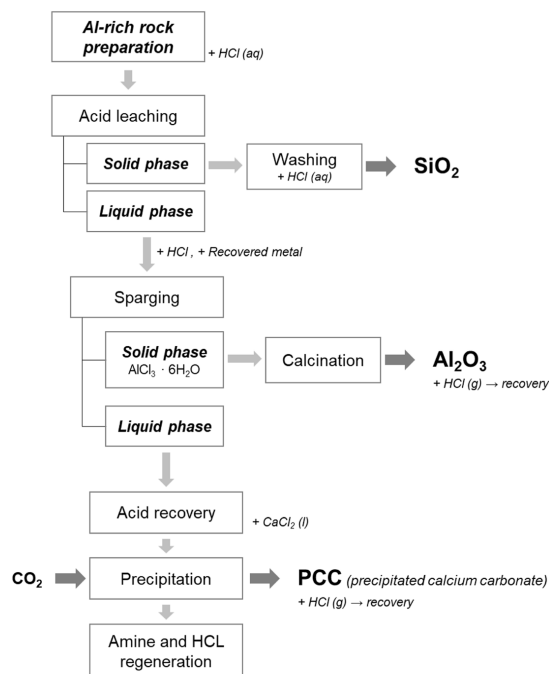


Fig. 3. Flow chart of ‘Aranda-Mastin process’ (modified from Aranda and Mastin, 2015).

친환경 건설재 원료로서의 활용 가능성

산업 발전에 따라 막대하게 요구되는 건자재인 시멘트 산업의 팽창은 화석연료 외에도 이산화탄소의 배출을 가속화하는 또 하나의 주요 원인이라 할 수 있다. 이에 시멘트 산업의 비중을 점차 줄여나갈 수 있도록 각국에서는 친환경 시멘트 및 건자재의 개발 연구를 수행하고 있다. 이러한 동향의 일환으로, 기존의 포틀랜드 시멘트(Portland cements)를 대체할 수 있는 물질의 원료로써 회장암을 사용하고자 하는 시도가 이어져 왔다. 전통적으로 회장암은 콘크리트 및 시멘트의 첨가제로 활용되어 왔는데, 최근의 연구를 통하여 회장암 그 자체를 재료로써 온전히 활용할 수 있도록 하는 산업적 개발이 활발히 이루어지고 있다. 대표적으로, 그린랜드의 화이트 마운틴(White Mountain)에서 채굴된 회장암을 원료로 인산(phosphoric acid)과 반응시켜 획득된 높은 내구성과 백색도를 가지는 고결재가 개발 및 상업화되었다. 이렇게 개발된 재료는 고온처리를 거치지 않고 생산되어 이산화탄소의 배출을 크게 감소시킬 수 있다는 이점이 있다.

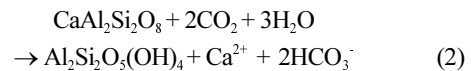
이산화탄소의 새로운 고정처분 재료로의 활용 방안

인류의 활동으로 인해 배출된 이산화탄소를 최소화하고, 나아가 이를 기권(atmosphere)으로부터 격리하고 포집하여 지권 내 염대수층 및 고갈 저류층 등에 저장하는 이산화탄소 지중저장(carbon capture and storage; CCS) 기술이 온실가스 감축을 위한 핵심 기술로 주목 받고 있다. 이러한 지중처분 기술개발과 더불어, 탄소를 다량 배출하는 제조업 비중이 높은 국내의 여건상, 포집된 이산화탄소의 직접적인 활용이 상대적으로 용이한 ‘광물탄산화’ 기술의 확립은 필수적으로 요구되는 사안이다. 이러한 처분 기술은 자연계 지각구성 물질에서 발생하는 탄산염 안정화(carbonate sequestration) 반응을 기반으로 고려되어야 한다.

일반적으로, 비탄산염계 지층 물질 내 CaO의 공급원이 될 수 있는 것으로는 현무암류, 스카른, 이질암, 그리고 회장암이 고려될 수 있다. 이 중, 현무암류는 탄산염 안정화를 도모하는데 최적의 암석 특성을 가지는 것으로 알려져 있는데, 이는 암석 내 Ca를 비롯한 풍부한 2가 양이온의 함량으로부터 기인한다(e.g., Oelkers *et al.*, 2008; Assayag *et al.*, 2009). 아이슬란드 등지에서는 현무암류 내 이산화탄소의 주입을 통한 광물 탄산염화를 적극적으로 활용하려는 노력이 효과적으로 시도되는 등(e.g., Alfredsson *et al.*, 2013) 성공적인 응용 사례가

보고되고 있다. 다만, 현재 국내에서는 현무암류와 관련된 석재 채취 및 해당 지역에서의 산업적 활동이 제한되고 있어, 현무암류 암석을 CCS 관련 후보지로 적용하기에는 어려움이 있다. 스카른(skarn) 광상 역시 고온 칼슘 규산염의 집합체로써, 투회석 위주의 광물상을 이루는 경우 CaO의 주요 공급원이 될 수 있고, 화학적 반응성 또한 높으므로 탄산염 안정화에 활용될 가능성이 있다. 그러나 기본적으로 불균질한 광물상을 이루고 있으며, 석회암과 공간적으로 밀접하게 연계되어 있어 용도상 제한이 불가피하다.

이에 비하여, 회장암은 부존자원으로서의 동원 가능성과 화학적 반응성 측면에서 탄산염 안정화로의 응용에 긍정적으로 고려될 수 있다. 상기한 바와 같이, CaO가 풍부한 석회암 및 백운암 등의 탄산염계 암석들을 제외한 규산염계 암석 중에서 회장암은 CaO 함량이 상당히 높아 탄산염 안정화 반응에 요구되는 칼슘 원소의 공급원으로서 그 역할을 충분히 수행할 가능성이 있다. 특히, 회장암 내 칼슘 사장석(회장석)이 이산화탄소 혹은 황을 함유하는 산성 수계에 노출되며 풍화를 겪게 되면 다음과 같은 반응 경로를 통해 고령토로 변질된다.



위와 같은 반응 양상은 칼슘 사장석을 기반으로 하여 자연적 풍화 및 열수 변질 과정을 인위적으로 가속시킬 경우 수일 내지는 수년 내에 탄산염 안정화를 도모할 수 있게 된다. 다만, 이 반응이 자연계에서 이루어질 경우, 용해된 Ca^{2+} 와 중탄산이온(HCO_3^-)이 풍화 변질 과정에서 유실되어 실제 고령토 광상에서는 방해석 침전을 확인하기 어렵다. 이는 방해석 침전에 필요한 탄산이온(CO_3^{2-})의 형성을 위해서는 최소 8 이상의 pH 조건이 충족되어야 하기 때문이다. 따라서, 자연계의 풍화 변질 반응에서는 탄산염 안정화가 자발적으로 발생하기에는 한계가 있다. 그러나 최근 CCS 및 광물 안정화를 위한 적절한 pH 환경 조성을 위해 알칼리성 산업폐기물인 폐콘크리트 및 광업 폐기물, 제철 및 금속 제련 잔류물인 슬래그(slag), 보크사이트 제련 폐기물인 레드 머드(red mud)를 원료로 활용하는 방안이 성공적으로 연구되고 있다(e.g., Ghacham *et al.*, 2015; Liang *et al.*, 2022). 이러한 최근 연구들은 초임계 유체 상태의 이산화탄소와 폐콘크리트 등의 알칼리성 폐기물 혼합이 회장암 내에서 화학적 탄산염 반응을 촉진하는 것을 보여주었다. 이 결과들은 회장암의 활용이

독성 폐기물의 친환경적 처분과 더불어 탄산염 안정화를 동시에 달성할 수 있다는 가능성을 보여준다. 다만, 현재까지의 연구에 따르면, 사장석 구조 내 칼슘은 망상형 결정 구조 내에서 안정적으로 존재하는 특성상 페콘크리트에 비하여 용해가 느린 특성이 보고된다(Ghacham *et al.*, 2015). 이러한 기존 연구들은 향후 사장석으로부터 칼슘의 용해 속도의 증가를 위한 실험적 연구들이 요구됨을 제시한다. 더하여, 회장암을 원료로 하는 광물 탄산염화 과정은 유해 중금속 물질을 흡착할 수 있는 점토광물의 생성을 파생하기 때문에(Rahmanianzaki and Hemmati, 2022), 산업 폐기물에서 유발되는 강알칼리성의 유해성 침출수의 안정적 관리에도 효과적인 것으로 기대된다.

국내 회장암체의 자원잠재성과 미래 연구 방향

국내에서는 영남육괴 내 하동-산청 지역에서 회장암이 차노카이트 및 회강편마암과 함께 복합체의 형태로 산출된다. 본 암체에 대한 여러 연구 결과에서 하동-산청 회장암 복합체를 형성한 마그마 활동은 맨틀로부터 기원하며 원생대 콜롬비아 초대륙과 연관이 깊고, 고생대 말기 조산 활동에 영향을 받았다는 것을 보고하고 있다(e.g., Son and Cheong, 1972; Jeong *et al.*, 1989; Kho *et al.*, 2003; Kang and Lee, 2015). 이차이온질량 분석기(SHRIMP)로 측정된 하동-산청 회장암 내 저어콘의 U-Pb 연대는 약 1862 Ma로 현재까지 보고된 메시프 형 원생대 회장암 중 가장 오래된 것임을 제시한다(Lee *et al.*, 2014; 2017). 하동-산청 회장암 복합체는 백립암상(granulite) 수준의 고도의 변성작용을 겪었고, 국지적으로 심한 잔류용화작용을 받아 할로이사이트와 캐올리나이트를 주 구성광물로 하는 고평토 광상이 넓게 분포하고 있다(Kim *et al.*, 1989; Jeong, 1992; Jeong and Kim, 1992). 하동 지역에 분포한 회장암질암의 야외 조사 연구에 따르면, 하동 회장암체는 암상에 따라 4가지의 형태 - 괴상형, 층상형, 간극누적형, 엽상형 - 로 분류되며, 약 2-4 km 폭, 길이가 약 25 km의 암체로 산출됨이 보고되었다(Jeong *et al.*, 1989). 높은 변성 및 풍화작용으로 인해 해당 지역에서 순수한 회장암체 부존 규모는 타 메시프 형 회장암체에 비해 상대적으로 낮을 것으로 여겨진다. 그러나, 기존 광물화학 분석 결과들에 따르면, 하동-산청 회장암 내 사장석의 Ca 함유도가 대체로 조회장석(labradorite)-아회장석(bytownite) 범위의 An_{59-69} 조성을 보이며, 연구 및 시료 채취 위치에 따라 전암 분석 결과는 다소 차이가 있기는

하지만, 회장암체의 Al_2O_3 함유량은 대부분 28-32 wt% 정도로 보고되고 있다(e.g., Jeong *et al.*, 1989; Jeon, 2014). 이러한 화학분석 결과는 하동-산청 지역의 회장암이 광물조성 및 화학조성은 산성 용매를 통한 사장석 내 이온들의 침출(leaching) 및 용해가 용이할 것으로 예측 가능하게 하며, 최근에 'AlSiCal 프로젝트'에 의해 대두된 회장암의 친환경적 알루미늄 추출 공정에 적합한 원료로써 하동-산청 회장암이 활용될 수 있음을 지시한다.

전술한 바와 같이 알루미늄 응용부문의 시장 확대가 가속화되는 현대 첨단 산업의 발전 동향에 비추어 볼 때, 알루미늄의 새로운 공급원으로 회장암의 역할이 더욱 부각될 것으로 예측된다. 이러한 회장암의 지질산업적 중요성에 비추어, 국내 하동-산청 지역에 분포하고 있는 회장암체의 존재는 에너지 전환기를 맞이하여 친환경적 지질산업의 기반이 될 수 있을 것으로 여겨진다. 이에, 국내 회장암체의 자원으로서의 자원량 평가, 하동-산청 회장암체를 활용한 알루미늄 추출과 전자재료의 활용 연구, 친환경 탄소 활용을 겸한 회장암의 실험적 응용 방안 등에 대한 연구가 필수적으로 요구된다. 이와 아울러, 향후 회장암을 활용한 연구개발 및 산업발전 동향에 부응하기 위하여, 현재의 광업법 시행령 상 장석 광종으로서 분류되기 어려운 회장암이 산업광물로써 원활히 활용될 수 있도록 광물학계와 관련업계 및 공기업을 협조체제를 갖추어 행정적 범규 및 제도의 정비를 논의해야 하는 시점이다.

회장암은 지질학계의 불세출의 대가인 보웬(N. L. Bowen)의 주된 자연과학적 관심사였을 뿐만 아니라, 알루미늄의 공급원으로서 회장암을 원료로 활용하고자 하는 아이디어는 지구화학자 골드슈미츠(V. M. Goldschmidt)에 의해 제안되었다. 1910년대에 골드슈미츠는 노르웨이의 회장암 지대에 대한 체계적인 야외조사를 수행하여 실제 알루미늄 추출에 활용도가 높은 광체를 확인하는 등(Goldschmidt, 1917), 현대에 필수적으로 요구되는 연구를 수행한 바 있다. 급격한 산업 발전을 거치며 경제성과 효율성만이 최고의 가치가 되던 시대에는 이러한 선구적인 과학자들의 통찰이 크게 주목받지 못하였다. 그러나 에너지 전환기를 마주하고 있는 중대한 기점에서, 다시 지질학 및 광물학계가 주목하는 회장암을 활용한 연구 개발과제는 100여 년 전에 이미 선지자들에게 의해 제안된 것임을 상기할 필요가 있다. 이는 회장암이 단순히 과거의 관심사가 아니라, 현재와 미래의 자원 활용 및 환경의 지속 가능성 측면에서 근원

적인 중요성을 가지고 있음을 의미한다. 따라서 국내 산출 회장암을 대상으로 한 실효적 연구는 대한민국, 나아가 세계적으로 지질학 및 광물학 분야에서 선도적 위치를 확보하는데 필수적일 것이다. 이와 더불어, 새로운 혁신적 관점에서 국내 자원의 효율적 개발 및 활용을 통해 국가 경제적 이익을 극대화할 수 있는 기회일 뿐 아니라, 환경친화적이고 지속 가능한 지질산업의 발전을 이끌어낼 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 노진환 교수님의 지질학 및 광물학에 대한 헌신으로부터 출발하였습니다. 논문이 완성될 수 있도록 끝없는 격려와 아낌없는 조언을 해주신 노진환 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 본 논문이 개선될 수 있도록 사독해주신 익명의 두 심사위원 분들께도 감사드립니다. 본 논문은 과학기술정보통신부 재원의 신진연구자지원사업(NRF-2022R1C1C1003385)과 교육부 재원의 한국연구재단 램프(LAMP) 사업(RS-2023-00301974), 한국지질자원연구원 기본사업 “국내 바나듐(V) 등 에너지 저장광물 정밀탐사기술 개발 및 부존량 예측(24-3211-1)”의 지원을 받았습니다.

REFERENCES

- Alfredsson, H.A., Hardarson, B.S., Franzson, H., and Gislason, S.R., 2008, CO₂ sequestration in basaltic rock at the Hellisheidi site in SW Iceland: stratigraphy and chemical composition of the rocks at the injection site: *Mineralogical Magazine*, 72(1), 1-5.
- Aranda, A., Mastin, J., 2015. Alumina and carbonate production method from al-rich materials with integrated CO₂ utilization. WO2015137823A1.
- Ashwal, L.D., and Bybee, G.M., 2017, Crustal evolution and the temporality of anorthosites: *Earth-Science Reviews*, 173, 307-330.
- Assayag, N., Matter, J., Ader, M., Goldberg, D., and Agrinier, P., 2009, Water-rock interactions during a CO₂ injection field-test: implications on host rock dissolution and alteration effects: *Chemical geology*, 265(1-2), 227-235.
- Benson, T.R., Coble, M.A., and Dilles, J.H., 2023, Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones: *Science Advances*, 9(35), eadh8183.
- Blum, A., and Lasaga, A., 1988, Role of surface speciation in the low-temperature dissolution of minerals: *Nature*, 331(6155), 431-433.
- Charlier, B., Namur, O., Malpas, S., de Marneffe, C., Duchesne, J. C., Vander Auwera, J., and Bolle, O., 2010, Origin of the giant Allard Lake ilmenite ore deposit (Canada) by fractional crystallization, multiple magma pulses and mixing: *Lithos*, 117(1-4), 119-134.
- Chubb, P.T., Peck, D.C., James, R.S., and Ercit, T.S., 1995, Nature and origin of nodular textures in anorthositic cumulates from the East Bull Lake Intrusion, Ontario, Canada: *Mineralogy and Petrology*, 54(1-2), 93-103.
- Elkins-Tanton, L.T., Burgess, S., and Yin, Q.Z., 2011, The lunar magma ocean: Reconciling the solidification process with lunar petrology and geochronology: *Earth and Planetary Science Letters*, 304(3-4), 326-336.
- Emslie, R.F., 1978, Anorthosite massifs, rapakivi granites, and late Proterozoic rifting of North America: *Precambrian Research*, 7(1), 61-98.
- Ganor, J., Reznik, I.J., and Rosenberg, Y.O., 2009, Organics in water-rock interactions: Reviews in *Mineralogy and Geochemistry*, 70(1), 259-369.
- Ghacham, A.B., Pasquier, L.C., Cecchi, E., Blais, J.F., and Mercier, G., 2016, CO₂ sequestration by mineral carbonation of steel slags under ambient temperature: parameters influence, and optimization: *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 17635-17646.
- Goldschmidt, V.M., 1917, Beretning om labradorstensfelter i Sogn: Internal report Det NorskeAktieselskab for Elektrokemisk industri, Kristiania. 31 pp (Norsk).
- Gudbrandsson, S., Wolff-Boenisch, D., Gislason, S.R., and Oelkers, E.H., 2014, Experimental determination of plagioclase dissolution rates as a function of its composition and pH at 22 C: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 139, 154-172.
- Jeon, J.Y., 2014, Study on the Intrusive ages and Magma differentiation process in Hadong-Sancheong Anorthosite Complex (Doctoral dissertation, Pykyong National University).
- Jeong, G.Y., 1998, Formation of vermicular kaolinite from hallosite aggregates in the weathering of plagioclase: *Clays and Clay Minerals*, 46(3), 270-279.
- Jeong, G.Y., and Kim, S.J., 1992, Mineralogy of size fractions in Sancheong kaolin and its origin: *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 5(1), 22-31.
- Jeong, J.-G., Kim, W.-S., and Watkinson, D.H., 1989, Geologic structure of Hadong anorthositic rocks and associated titanium orebody: *Journal of the Geological Society of Korea*, 25(1), 98-111.
- Kang, J.H., and Lee, D.S., 2015, Formation process and its mechanism of the Sancheong anorthosite complex, Korea: *Economic and Environmental Geology*, 48(6), 431-449.
- Kesson, S.E., and Ringwood, A.E., 1976, Mare basalt petrogenesis in a dynamic moon: *Earth and Planetary Science Letters*, 30(2), 155-163.
- Kim, H.S., 2022, Origin and Reservoir Types of Abiotic Native Hydrogen in Continental Lithosphere: *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 35(3), 313-331.

- Kim, J.S., Ahn, S.H., Cho, H.S., Song, C.W., Son, M., Ryoo, C.R., and Kim, I.S., 2011, Occurrences of Fe-Ti Ore Bodies and Mafic Granulite in the Sancheong Anorthosites, Korea: The Journal of the Petrological Society of Korea, 20(2), 115-135.
- Kim, S.J., Jeong, G.Y., Lee, S.J., and Kwon, S.K., 1989, Mineralogy of Kaolin from Hadong-Sancheong Area, Korea: Journal of the Mineralogical Society of Korea, 2(1), 11-17
- Kim, S.W., Kwon, S., Yi, K., and Santosh, M., 2014, Arc magmatism in the Yeongnam massif, Korean Peninsula: Imprints of Columbia and Rodinia supercontinents: Gondwana Research, 26(3-4), 1009-1027.
- Koh, S.M., Yoo, J.H., Kim, Y.U., Lee, H.Y., Kim, S.Y., and Song, M.S., 2003, Evaluation and exploration of titanium and feldspar deposits in Hadong-Sancheong-Hapcheon Area. Report KR-03 (c)-16, Korea Institute of Energy and Resources, Daejeon, 70p (in Korean with English abstract).
- Lee, B., Kim, G., Kim, R., Cho, B., Lee, S., and Chon, C.M., 2017, Strength development properties of geopolymer paste and mortar with respect to amorphous Si/Al ratio of fly ash: Construction and Building Materials, 151, 512-519.
- Lee, Y., Cho, M., and Yi, K., 2017, In situ U-Pb and Lu-Hf isotopic studies of zircons from the Sancheong-Hadong AMCG suite, Yeongnam Massif, Korea: Implications for the petrogenesis of ~1.86 Ga massif-type anorthosite: Journal of Asian Earth Sciences, 138, 629-646.
- Lee, Y. and Cho, M., 2022, Paleoproterozoic Hot Orogenesis Recorded in the Yeongnam Massif, Korea: Journal of the Mineralogical Society of Korea. 35(3), 199-214
- Lee, Y., Cho, M., Cheong, W., and Yi, K., 2014, A massif-type (~1.86 Ga) anorthosite complex in the Yeongnam Massif, Korea: late-orogenic emplacement associated with the mantle delamination in the North China Craton: Terra Nova, 26(5), 408-416.
- Liu, S., Shen, Y., Wang, Y., Shen, P., Xuan, D., Guan, X., and Shi, C., 2022, Upcycling sintering red mud waste for novel superfine composite mineral admixture and CO₂ sequestration: Cement and Concrete Composites, 129, 104497.
- Neron, T., Cassayre, L., Zhuo, X., Manero, M.H., Bourgeois, F., Billet, A.M., and Julcour, C., 2022, Thermo-kinetic modelling of the acidic leaching of anorthosite: Key learnings toward the conception of a sustainable industrial process: Minerals Engineering, 180, 107500.
- Noh, J. H., Koh, S. M., and Kang, B. K., 2005, 국내 광업법의 문제점과 개선방안, Journal of the Mineralogical Society of Korea (Mineral & Industry), 18(2), 1-10.
- Oelkers, E.H., Gislason, S.R., and Matter, J., 2008, Mineral carbonation of CO₂: Elements, 4(5), 333-337.
- Park, K.H., Kim, D.Y., and Song, Y.S., 2001, Sm-Nd mineral ages of charnockites and ilmenite-bearing anorthositic rocks of Jirisan area and their genetic relationship: Journal of the Petrological Society of Korea, 10, 27-35.
- Pernet-Fisher, J.F., Deloule, E., and Joy, K.H., 2019, Evidence of chemical heterogeneity within lunar anorthosite parental magmas: Geochimica et Cosmochimica Acta, 266, 109-130.
- Rahmanianzaki, M., and Hemmati, A., 2022, A review of mineral carbonation by alkaline solidwaste: International Journal of Greenhouse Gas Control, 121, 103798.
- Russell, S.S., Joy, K.H., Jeffries, T.E., Consolmagno, G.J., and Kearsley, A., 2014, Heterogeneity in lunar anorthosite meteorites: implications for the lunar magma ocean model. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences: 372(2024), 20130241.
- Son, C.M., and Cheong, J.G., 1972, On the Origin of Anorthosite in the Area of Hadong, Sancheong, Gyeongsangnamdo, Korea: Economic and Environmental Geology, 5(1), 1-20.
- Snyder, G.A., Borg, L.E., Nyquist, L.E., and Taylor, L.A., 2000, Chronology and isotopic constraints on lunar evolution: Origin of the Earth and Moon, 30, 361.
- Wanvik, J.E., 2000, Norwegian anorthosites and their industrial uses, with emphasis on the massifs of the Inner Sogn-Voss area in western Norway.

Received June 3, 2024

Review started June 19, 2024

Accepted June 28, 2024

[저자 정보]

- 김효임 : 경상국립대학교 지질학과; 경상국립대학교 분자제어연구소/조교수
- 이범한 : 한국지질자원연구원 희소금속광상연구센터/센터장; 과학기술연합대학원대학교 지질과학전공/교수