



## Review

# 천연수소의 잠재적 근원암인 초고철질(사문암) 암체의 국내 분포와 특징 고찰

채용운<sup>1,2</sup>, 임현수<sup>3</sup>, 주영지<sup>1,4,\*</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 랩프사업단

<sup>2</sup>부경대학교 지질환경연구소

<sup>3</sup>부산대학교 지질환경과학과

<sup>4</sup>부경대학교 환경지질과학전공

## Distribution and characteristics of (serpentinized) ultramafic rocks in South Korea as potential source rocks of natural hydrogen

Yong-Un Chae<sup>1,2</sup>, Hyoun Soo Lim<sup>3</sup>, Young Ji Joo<sup>1,4,\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Sustainable Earth and Environmental Dynamics (SEED), Pukyong National University, Busan 48547, Republic of Korea

<sup>2</sup>Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

<sup>4</sup>Major of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Received: July 24, 2024 / Revised: September 19, 2024 / Accepted: October 2, 2024

\*Corresponding author: +82-51-629-6628 / E-mail: yjoo@pknu.ac.kr

**요약:** 인류 문명의 발전과 함께 가중된 자연재해와 환경위기를 극복하고자 국제사회는 청정 신재생에너지 사용을 확대하고 있다. 신재생에너지들 중 수소는 친환경 에너지로 여겨지며, 특히 천연수소는 환경과 경제적 측면에서 많은 장점을 가져 미래 화석연료 대체에너지로서 역할이 기대된다. 본 연구에서는 최근 각광받고 있는 수소자원에 대한 현황을 살펴보고, 지질학 분야에서 관심을 기울일 필요가 있는 천연수소에 대한 연구의 필요성에 대해 알아보았다. 그 첫걸음으로 사문암화를 통해 상당량의 천연수소를 생성하는 근원암으로서 역할을 할 수 있는 초고철질암의 국내 분포와 특징들을 고찰하였다. 천연수소는 다양한 기작에 의해 형성되지만 다량의 천연수소는 대체로 초고철질암의 사문암화 작용에서 발생하는 것으로 여겨지고 있다. 잠재적 천연수소 근원암의 관점에서 일정 정도 규모를 가지는 국내의 초고철질암체들은 주로 홍성 일대, 안동, 울산, 가평 지역 등에 분포한다. 그러나 이 암체들을 대상으로 대부분 암석 성인, 지구조 환경, 사문암화 및 석면과 관련된 광물 및 암석학적 연구만 수행되어왔다. 그러나 천연수소 자원 확보의 관점에서 광물학, 암석학, 지화학, 지구물리학, 구조지질학, 탐사 및 모니터링에 관한 추가 연구가 필요하다.

**주요어:** 자연재해, 환경위기, 천연수소, 초고철질암, 사문암화

**ABSTRACT:** In order to overcome natural disasters and environmental crises that have been aggravated with the development of civilization, the international community is making efforts to reduce greenhouse gas emissions. As part of this, the use of fossil fuels is being reduced and the use of new and renewable energy is being facilitated. Among new and renewable energy sources, hydrogen is considered to be an eco-friendly energy source, and natural hydrogen in particular has many advantages in terms of environment and economy, and is expected to play a role as a future alternative energy source to fossil fuels. In this study, we will review the current status of hydrogen resources that have recently been in the spotlight, and examine the necessity and possibility of research on white hydrogen, which is drawing attention in the field of geology. As a first step, we examine the domestic distribution and characteristics of ultramafic rocks that can serve as potential source rocks for the production of significant amounts of natural hydrogen through serpentinization. Natural hydrogen is formed through various mechanisms, but it is generally believed that large amounts of natural hydrogen are generated from the serpentinization of ultramafic rocks. In Korea, potential source rocks for natural hydrogen, represented by ultramafic rock bodies, are primarily distributed in the Hongseong, Andong, Ulsan, and Gapyeong areas. However, researches on these rock bodies have mainly focused on petrogenesis, tectonics, mineralogical and petrological studies related to asbestos and serpentinization. In contrast, additional researches are required from the perspective of securing natural hydrogen resources, including studies on mineralogy, petrology, geochemistry, geophysics, structural geology, exploration, and monitoring.

**Key words:** natural disaster, environmental crisis, natural hydrogen, ultramafic rock, serpentinization

## 1. 서론

국제사회는 기후 위기에 대응하기 위해 2015년 파리협정(the 21<sup>st</sup> Conference of the Parties: COP21)을 채택하고, 지구 평균온도 상승을 2°C 이내로 나아가 1.5°C 이하로 제한하기 위해 회원국들이 2020년까지 장기 저탄소 발전 전략과 국가 온실가스 감축 목표를 제출하기로 합의했다(United Nations, 2015). 이에 따라 대한민국 정부는 2030년까지 온실가스를 2018년 대비 40% 감축하는 목표를 세우고, COP26에서 발표했다. 특히 석탄발전 비중을 줄이고 신재생에너지 비중을 확대해 2030년 온실가스 배출량을 44.4% 감축하는 것을 목표로 하고 있다. 신재생에너지는 ‘기존의 화석연료를 변환해 이용하는 에너지, 수소·산소 등의 화학 반응을 통하여 전기 또는 열을 이용하는 에너지, 그리고 햇빛, 물, 지열, 강수, 생물유기체 등을 포함하는 재생 가능한 에너지를 변환해 이용하는 에너지’를 말한다(KEPCO, 2024). 그 중 신에너지에는 수소, 연료전지, 석탄액화·가스화 및 중질잔사유(vacuum residue) 가스화, 재생에너지에는 태양광, 태양열, 풍력, 수력, 해양에너지, 지열, 바이오에너지, 폐기물에너지 등이 포함된다.

신재생에너지 중 수소는 그 사용량이 지속적으로 증가하고 있고, 미래에는 청정에너지로서 사용량의 보다 가파른 증가가 예상된다(그림 1a). 수소 중 천연수소(natural hydrogen)는 인간의 개입 없이 자연계에서 발생한 분자 형태의 수소를 말하며, 친환경 및 경제적 특성으로 인해 최근 국외뿐만 아니라 국내에서도 천연수소에 대한 관심이 증가하고 있다(그림 1b, 1c) (Prinzhofer *et al.*, 2018; Boreham *et al.*, 2021; Frery *et al.*, 2021; Lefeuvre *et al.*, 2021;

Jeong *et al.*, 2022; Kim, 2022; Mainson *et al.*, 2022; Cha and Lee, 2023).

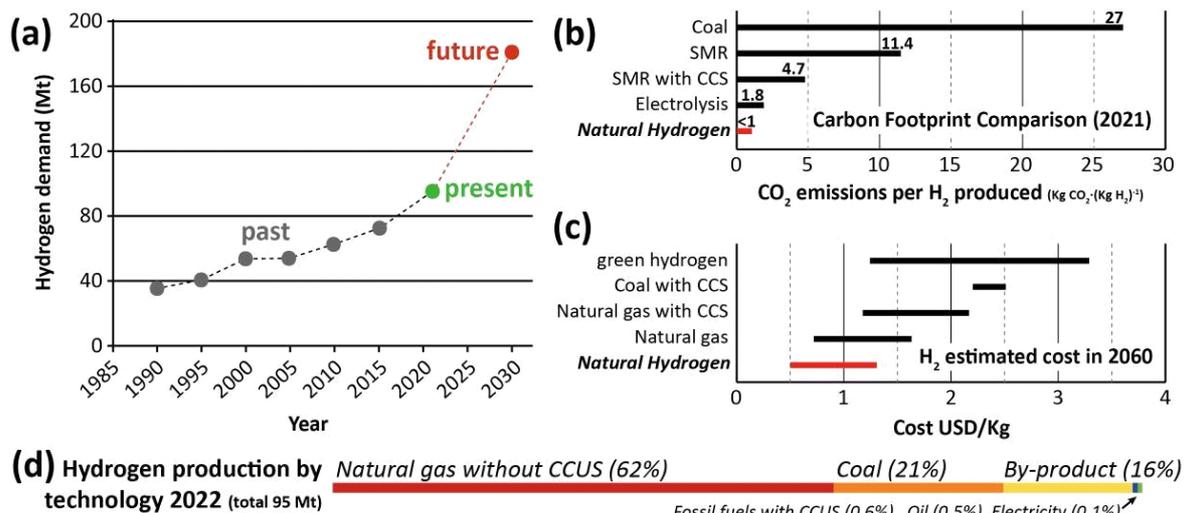
국내 천연수소 연구는 이제 학계에서 관심을 가지고 자료를 수집하는 등 초기 단계에 있다. 선행 연구를 몇 가지 소개하면, Kim (2022)은 천연수소의 주요 근원암과 발생 기작 및 지질학적 특징에 대해서 정리하고, 국내 천연수소 생성 및 부존 가능성에 대해 간략히 토의하면서 지하의 물-암석 반응에 대한 연구의 필요성을 강조하였다. 또한, Jeong *et al.* (2022)은 비생물기원 천연수소의 발생 기작을 밝히기 위한 물-암석 반응 실험의 해외 사례를 소개하고, 국내에서 다방면의 실내의 연구의 필요성을 언급하였다. Cha and Lee (2023)는 천연수소의 발생 및 기작, 분포를 검토하면서 지하 환경에서 천연수소의 형성 및 저장에 관여하는 지질 및 지화학적 과정 이해의 중요성을 강조하였다.

그러나 아직 국외 연구에서조차 천연수소의 발생 및 배태 과정에 대한 명확한 이해가 부족하며, 국내에서는 관련 연구가 전무한 실정이다. 본 논문에서는 국내 천연수소 부존 가능성 평가를 위한 첫 단계로 천연수소의 개요와 더불어 무기 천연수소 생산의 근원암 역할을 할 수 있는 초고철질암(사문암 포함)의 한반도 내 분포와 성인에 대해 고찰하는 예비연구를 수행하였다. 이는 향후 천연수소 부존 지역 탐색을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 수소 자원(천연수소) 개관

### 2.1. 수소의 신에너지로서의 의미와 생산 방법에 따른 분류

수소는 생산 방식에 따라 그레이(grey), 브라운(brown), 블랙(black), 블루(blue), 그린(green), 핑크(pink), 레드(red),



**Fig. 1.** (a) Evolution of hydrogen demand from 1990 to 2030, (b) comparison of carbon footprint for H<sub>2</sub> production processes, (c) comparison of global projected hydrogen production cost in 2060, and (d) hydrogen production by technology (2022) (modified from IEA, 2023; Blay-Roger *et al.*, 2024).

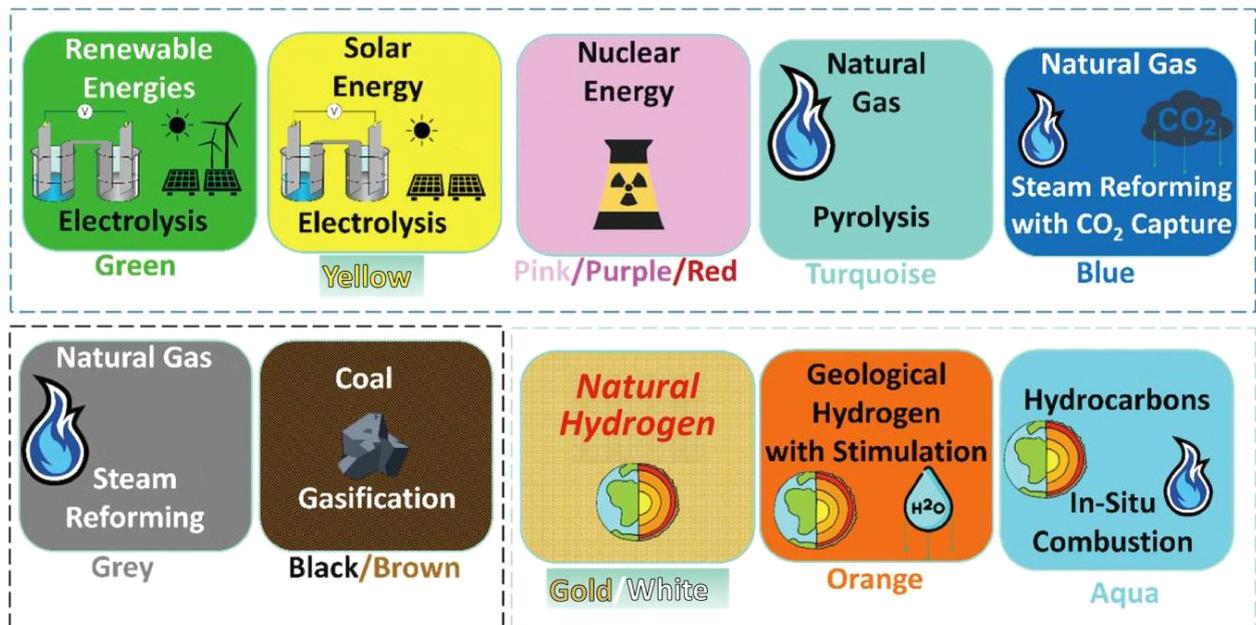
터콰이즈(청록색: turquoise), 화이트(white 또는 골드(gold)) 등의 색으로 세분한다(그림 2). 그레이, 브라운, 블랙 수소는 각각 천연가스(또는 메탄), 갈탄(lignite or brown coal), 역청탄(bituminous coal or black coal)을 이용해 생산되며 모두 그 과정에서 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 배출된다. 블루 수소는 그레이 수소와 같이 주로 천연가스를 이용하여 생산되지만, 이때 발생하는 이산화탄소를 포집 및 저장(carbon capture and storage; CCS)하는 과정을 포함한다. 그린 수소는 태양광 또는 풍력 등의 재생에너지원 그리고 핑크 수소는 원자력으로 얻은 전기를 이용한 수전해(electrolysis) 방법을 활용한다. 레드 수소는 바이오매스의 가스화를 통해 생성된 수소를 말하는데, 사용되는 바이오매스의 종류와 CCS 기술의 사용 유무에 따라서 이산화탄소 배출량이 조절되며 이산화탄소가 완전 포집되는 경우 그린 수소에 해당한다. 터콰이즈 수소는 메탄 열분해 공정을 이용해 수소 분자와 고체 탄소를 생성하는 것을 말하며, 아직 대량 생산 가능 여부가 입증되지 않았다. 국제에너지기구(International Energy Agency; IEA)의 Global Hydrogen Review 2023에 의하면 2022년 글로벌 수소 생산량은 약 9,500만 톤에 달했고, 아직 화석 연료를 사용한 수소 생산이 압도적으로 많은 양을 차지한다는 사실이 눈에 띈다(그림 1d).

마지막으로 화이트 수소는 지질학적 과정을 통해 형성되어 자연에서 수소 기체(H<sub>2</sub>)의 형태로 산출하는 수소를

말하며 지질 수소(geological hydrogen)라고도 한다. 본 논문에서는 화이트 수소를 천연수소로 통일해 사용하도록 하겠다. 천연수소는 자연에서 자유기체(free gas)로 많은 양이 발생되는데, 다양한 지구조 환경 중 중앙해령에서 막대한 양의 수소가 만들어지고(Worman *et al.*, 2016), 오피올라이트(ophiolite) 지역에서 지표로 활발하게 유출되는 것으로 알려져 있다(Ellison *et al.*, 2021; Leong *et al.*, 2023). 상업적으로 개발 가능한 양의 천연수소가 발견된다면 궁극적으로 석유와 천연가스를 대체할 수 있는 주요 에너지원으로서 이용될 수 있다. 그러나 수소는 높은 반응성과 함께 지하에서의 이동성 또한 매우 높기 때문에 상업적으로 이용할 만큼 충분한 양이 축적되기 어렵다고 여겨진다(Gaucher, 2020; Zgonnik, 2020; Truche *et al.*, 2024). 그러므로 채산성이 있는 천연수소는 매우 드물게 발견되며, 현재 현실적으로 활발하게 사용할 수 있는 실행 전략은 없는 상태로 미래의 개발 및 상업적 사용 가능성을 높이기 위해 다방면의 연구가 요구된다. 특히 천연수소는 화석 연료 기반의 수소 생산과 비교해 이산화탄소의 배출량이 월등하게 낮으며, 미래에는 생산 단가 또한 매우 낮을 것으로 예상된다. 이는 큰 장점을 나타내기에 선제적 연구의 필요성이 있다(그림 1b, 1c).

## 2.2. 자연에서 수소의 형성

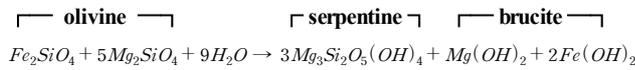
천연수소는 다양한 생물학적(유기물 분해 및 발효 등)



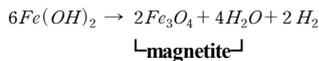
**Fig. 2.** Classification of Hydrogen Production Techniques. This figure provides a systematic overview of hydrogen production methodologies, each classified by color (s) based on source and process. The use of these colors designations reflects an evolving categorization of the sector, summarizing the technological and environmental implications associated with each production route (modified from Hassanpouryouzband *et al.*, 2024).

및 비생물학적(방사성 붕괴와 직접적인 물의 환원 등) 과정들(그림 3)을 통해 형성될 수 있지만, 그 중 사문암화 작용(serpentinization)이 가장 중요한 천연수소의 형성 기작으로 여겨진다(Milkov, 2022). 사문암화는 환원된 금속이 풍부한 초고철질 암석이 물과 반응할 때 발생(Frost and Beard, 2007)하는데, 초고철질 암석은 감람석과 휘석으로 주로 구성되고 상부 맨틀을 구성하는 주요 암석으로 물과의 반응은 주로 중앙해령, 변환단층, 그리고 섭입대와 같은 판 경계에서 흔히 일어난다. 이처럼 사문암화 과정에서 초고철질 암석 내 포함된 광물 중 특히 감람석의 수화와 산화 과정을 통해 수소가 생성되며, 반응식은 아래와 같다(Frost and Beard, 2007).

**Hydration Reaction**



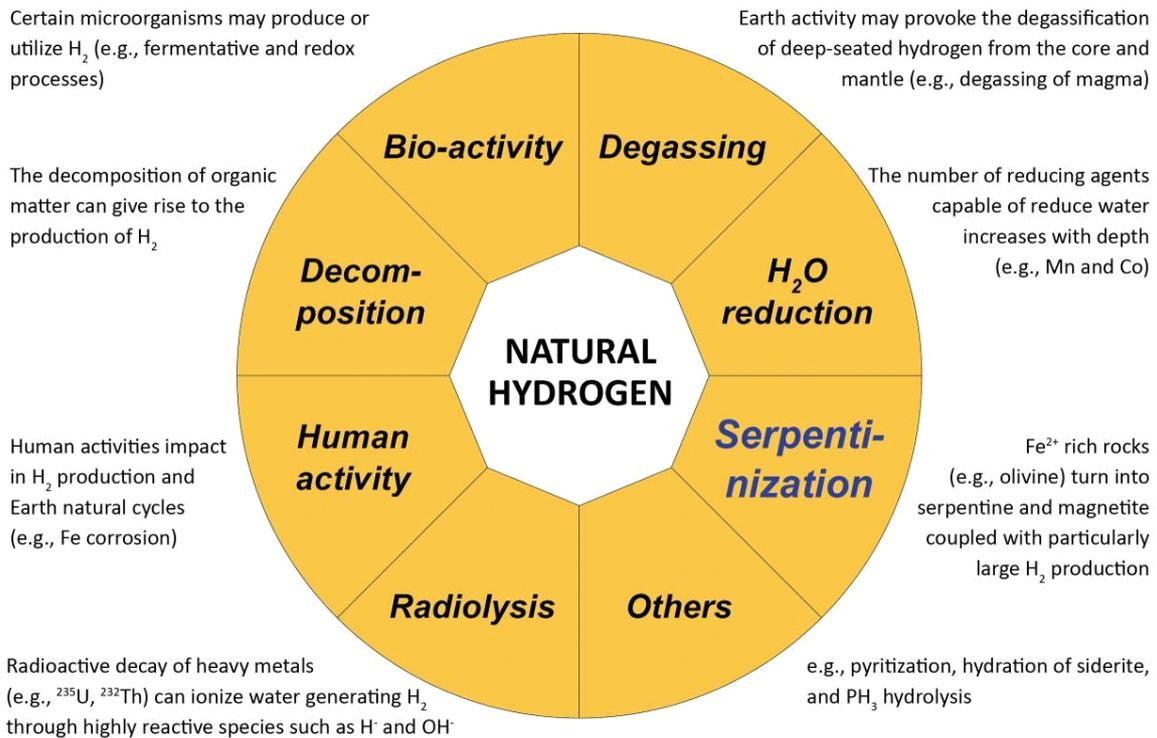
**Oxidation Reaction (Schikorr reaction)**



초고철질 암석에 풍부한 감람석은 철감람석(Fayalite, Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)과 고토감람석(Forsterite, Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)의 고용체로

이루어져 있으며, 감람석의 사문암화 과정에서 위 반응을 통해 물-광물 반응 결과 부수적으로 수소가 발생한다. 이 과정에서 철의 산화가 수소 발생에 매우 중요한 역할을 하기 때문에 마그네슘 함량보다는 철 함량이 풍부한 조성을 가질수록 수소 생성에 유리하다. 감람석과 함께 초고철질 암에 풍부한 휘석 역시 페로실라이트(Ferrosilite, FeSiO<sub>3</sub>)와 엔스타타이트(Enstatite, MgSiO<sub>3</sub>)의 고용체로 구성되지만, 감람석에 비해 대체로 소량의 철을 포함하고, 독립사면체가 아닌 사슬구조를 가져 구조적으로 더 안정적이기 때문에 물과 반응성이 낮아 적은 양의 수소를 생성한다. 따라서 사문암화 작용을 통한 수소의 생성에는 감람석의 철 함량이 매우 중요한 역할을 한다.

초고철질암의 사문암화에서 다량의 수소 형성이 가능한 암석의 주요 특징은 낮은 실리카(SiO<sub>2</sub>) 함량이며, 사문석 및 수할석(brucite)과 같이 내부구조에서 이가 철이온(Fe<sup>2+</sup>)을 배제하는 변질 광물을 형성하기 때문에 철의 산화를 통해 수소의 형성(Schikorr reaction)이 가능하다. 모암의 사문암화 속도는 온도, 압력, 물-암석의 질량비, 암석의 조성, 물의 불순물 등에 의해 제어된다. 사문암화가 일어나는 최적의 온도 범위는 약 200-300°C (Berndt *et al.*, 1996)로 알려져 있는데, 낮은 압력 조건(≤500 bar)의 경우 이보다 낮은 온도에서는 반응 속도가 매우 느리고, 320-350°C 보다



**Fig. 3.** Various hypotheses about the origin of natural hydrogen deposits (Zgonnik, 2020). The formation of natural hydrogen appears to be primarily abiotic in origin, but other theories on its origin are also being considered (modified from Blay-Roger *et al.*, 2024).

높은 온도에서는 감람석이 안정하게 유지되기에 사문암화가 잘 일어나지 않는다(McCollom and Bach, 2009; Malvoisin *et al.*, 2012; McCollom *et al.*, 2016). 그러나 고압 조건(3-20 kbar)에서는 사문암화의 최적 온도가 증가하고 사문암화 속도가 약 4배까지 증가할 수 있다(Huang *et al.*, 2020).

‘수소 시스템(hydrogen system)’은 석유의 생성과 이동을 이해하는 데에 이용되는 ‘석유 시스템’(petroleum system; Magoon and Dow, 1994)과 유사하지만 두 가지의 주요한 차이가 있다. 첫 번째는 ‘석유 시스템’에서는 근원암이 퇴적분지 내 퇴적암이지만, ‘수소 시스템’에서는 특정 조건하에서는 퇴적암에서도 일부 천연수소의 생성이 가능하지만 일반적으로 천연수소의 주요한 근원암은 퇴적암이 아닌 초고철질의 기반암이라는 점이고(그림 4), 두 번째는 ‘석유 시스템’의 탄화수소는 수백만 년에서 수천만 년에 걸쳐 근원암에서 생성되지만(Tissot and Welte, 2013), ‘수소 시스템’에서 근원암의 사문암화로 인한 수소 생성은 지질학적 시간 규모에서 즉각적으로, 수 천년 정도의 시간 규모에서 발생한다는 것이다(그림 4). 그리고 수소 저류 시스템을 기존의 석유 및 가스 저류 시스템과 비교하면, 수소 저류 시스템은 생산 시간 규모에서 점진적으로 수소가 풍부한 가스로 재충전되는 동적 시스템인 것으로 보고되었다(Maiga *et al.*, 2023).

### 2.3. 해외 천연수소 자원의 발견 및 탐사 현황

아프리카 말리의 부라케부구(Bourakebougou) 지역에서는 1987년에 수자원 이용을 위한 관정을 뚫는 과정 중 우연히 얇은 탄산염 저류암에서 최대 98%의 수소를 발견하

고, 그 이후 개발 가능한 천연수소 매장량을 찾는 데 박차를 가해왔다(Prinzhofer *et al.*, 2018; Gaucher, 2020; Maiga *et al.*, 2023, 2024). 또한 전세계적으로도 현재 아프리카, 남미, 호주, 미국, 프랑스, 스페인 등에서 천연수소의 탐사 및 발견이 활발하게 이루어지고 있다(Stalker *et al.*, 2022; Hand, 2023; Zhang *et al.*, 2024). 그러나 아직 실제 자연에서 발생하는 수소 자원의 상업성에 관한 논란은 여전하다(Jackson *et al.*, 2024). 천연수소의 탐사 및 생산에서 가장 중요한 점은 수소의 형성 과정과 새어 나오는 위치를 완벽하게 이해하는 것이 아니며, 수소가 어떻게 축적되고 보존될 수 있는지를 아는 것이다(Maiga *et al.*, 2024). 그럼에도 불구하고 미래에 상업성을 가지는 천연수소의 형성과 탐사, 발견 및 개발 등을 위해 천연수소에 대한 다방면의 연구가 지속적으로 필요하다. 특히, 천연수소의 형성에 있어 초고철질 암석의 존재가 근원암으로서 중요한 역할을 하므로 천연 자원으로서의 자연 수소 잠재 가능성을 타진하기에 앞서 국내 초고철질암의 분포 및 특성(형성 기작 등)을 파악하는 것이 중요하다.

### 3. 국내 초고철질암의 분포와 특징

지표에서 쉽게 관찰하기 어려운 초고철질암은 주로 대부분 맨틀에서 형성되어 화산 또는 지구조 과정을 통해 지표 혹은 지각의 얇은 깊이로 정치되거나, 일부 지각 내 마그마에서 분별 정출에 의한 결정의 누적으로 형성된 집적암(cumulate rock)의 형태로 소량 산출된다. 또한 과거 시생누대 동안 초고철질 마그마 화산활동에 의해 지표로 분출되어 코마티아이트(komatiite)라 불리는 독특한 화산암체

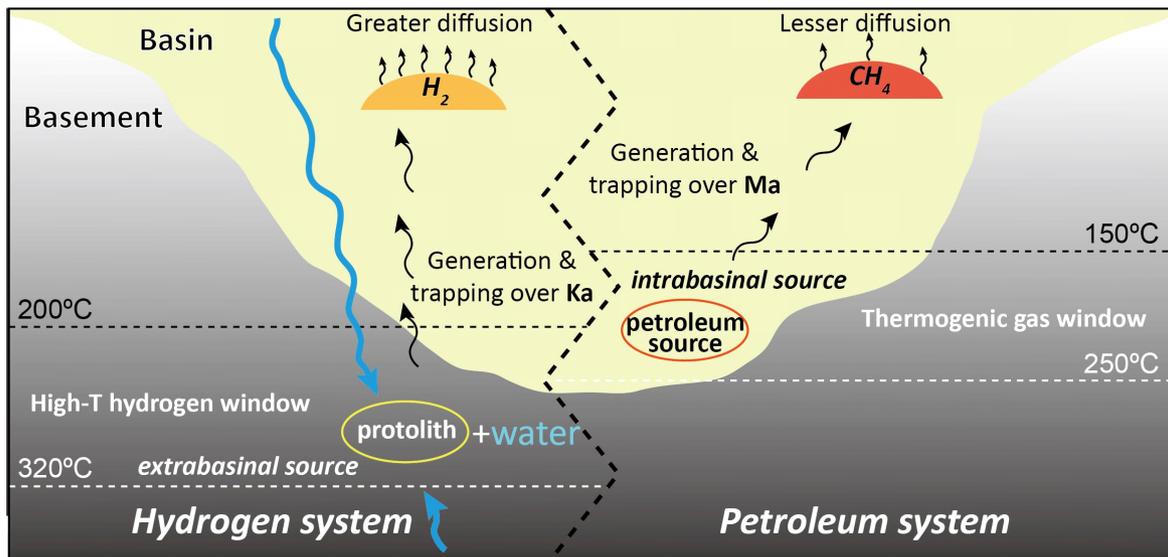


Fig. 4. ‘Hydrogen system’ versus ‘petroleum system’. A comparison of fluid systems with differences in the nature and location of the sources (modified from Jackson *et al.*, 2024).

를 형성하였다(Downes, 2021). 이들은 천연수소의 근원암으로서 중요한 역할을 할 뿐만 아니라 직접적 접근에 제약이 있는 지각 아래 맨틀의 물리·화학적 특징을 대변할 수 있어 지구 내부의 과정을 이해하기 위한 필수적인 정보를 제공한다. 따라서 잠재적 천연수소 부존 가능성을 파악하는 것과 더불어 한반도의 대륙암권맨틀의 진화사를 밝히기 위해서는 국내 초고철질 암석의 분포와 연구 현황에 대한 고찰이 필요하다.

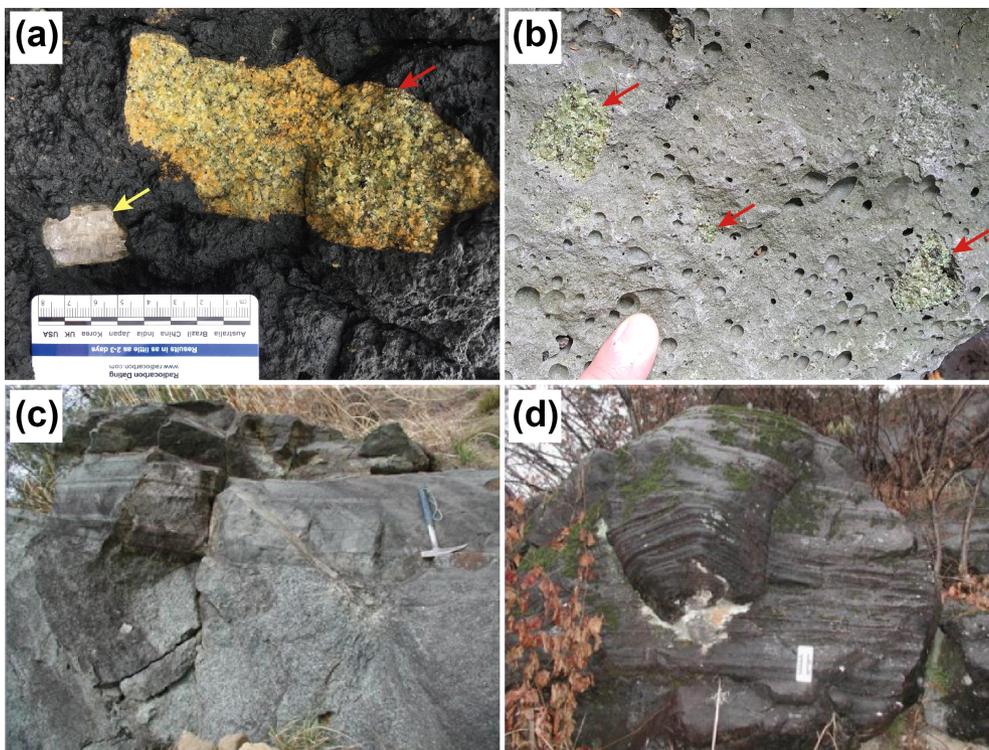
### 3.1. 소규모 초고철질암

소규모 초고철질암은 주로 현무암 내 포획암(xenolith)으로 산출된다(그림 5a, 5b). 국내 초고철질 포획암은 제주도, 백령도, 경기도 평택시, 강원도 고성군, 충북 보은군, 충남 아산시 등에서 발견되어 하부 지각 및 상부 맨틀의 특성과 지구조 환경에 대한 유용한 정보를 제공하고 있다(e.g., Lee, 1984; Kim, Y.K. *et al.*, 1988b; Lee, 1995; Yun *et al.*, 1998; Choi, 2000, 2012; Arai *et al.*, 2001; Choi *et al.*, 2001, 2002; Yang, 2004; Choi and Kwon, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2005; Kil and Lee, 2005; Shin *et al.*, 2006; Kil, 2006, 2007; Yang *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2010, 2012; Yang, 2016; Seo *et al.*, 2016; Kim, E. *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2018; Kil *et al.*, 2022; Kil, 2023). 그리고 춘천시 북산

면 추곡리 일대에는 쥐라기 고철질 화성암에서 국부적으로 초고철질암이 산출되며, 암석 내 감람석과 휘석이 사문석으로 흔히 변질되어 있는 것으로 보고되었다(Moon *et al.*, 2021). 본 암체의 기원은 섭입하는 해양판에서 유입된 많은 양의 유체에 의해 대륙 아래 상부 맨틀이 부분 용융된 마그마로 추정되었다(Moon *et al.*, 2021, 2022). 또한 경남 함양군 마천면 일대에 선캄브리아시대 편마암 복합체를 트라이아스기(약 223 Ma; Kim and Turek, 1996)에 관입한 마천 층상관입암체(반려암)는 소위 ‘마천반려암’으로 불리며 내부에 분별 정출과정과 결정 누적 및 제자리 결정화에 의한 층상구조가 관찰된다(그림 5c, 5d) (Song *et al.*, 2007). 마천반려암 내부에 초고철질암은 우흑질층 또는 암석 내 포함된 암괴 혹은 포획암으로 드물게 보고된 바 있다(Song *et al.*, 2007). 그러나 앞서 나열된 초고철질암들은 규모가 매우 작고 암체 내 국부적으로 산출되는 한계를 지니기에 대규모의 수소 산출이 어려울 것으로 짐작된다.

### 3.2. 대규모 초고철질암체

국내에서 비교적 큰 규모의 암체로 산출되는 초고철질암은 홍성 일원, 안동, 울산, 가평 등이 대표적 분포지로 알려져 있다(그림 6a). 이들 분포지의 초고철질암에 대한 연구 현황을 살펴보고, 전암 혹은 광물의 마그네슘 비(magnesium



**Fig. 5.** Photographs of the mantle xenoliths (red arrows) and feldspar megacryst (yellow arrow) (a) Jinchon Basalt in the Baengnyeong Island and (b) Gyoraeri Basalt in the Jeju Island. (c and d) Photographs of the layered olivine gabbros in the Macheon region (From Heo, 2008).

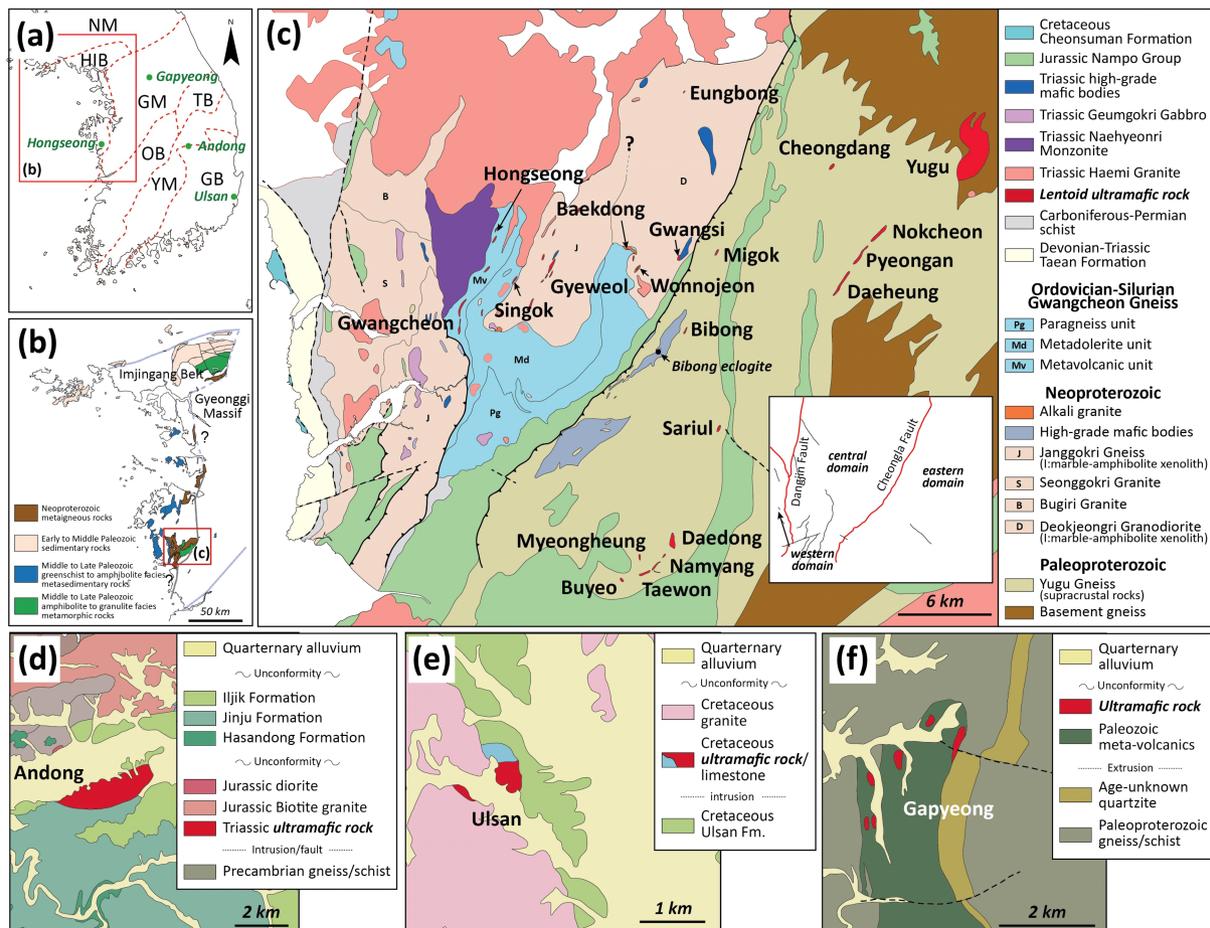
number: Mg#)를 토대로 천연수소 생성 잠재력을 비교해 보았다(표 1).

### 3.2.1. 홍성 일대 암체들

경기육괴 남서부 홍성 일대의 경우 초고철질암과 관련된 사문암체 기원의 석면 및 활석광상에 대한 다양한 암석 및 광물학적 연구들이 수행되었다(그림 6b, 6c)(e.g., Chi and Kim, 1977; Woo *et al.*, 1991; Lee, 1994; Wee *et al.*, 1994; Kim and Kim, 1997; Woo and Kang, 1999; Woo and Suh, 2000; Woo and Lee, 2001; Song and Song, 2001; Song *et al.*, 2004; Kim and Woo, 2005a, 2005b; Park *et al.*, 2012). 또한 임진강 봉합대(Imjingang Suture; Kwon *et al.*, 2009)로 대표되는 지역으로 고압 에클로자이트가 보고(Oh *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006)된 이후 남-북중국지괴들의 충돌 조산대의 연장으로 제안되어 주목받고 있다.

이 지역과 관련해 Kim *et al.* (2014)의 1:10만 ‘홍성지역

지구조층서도’에서 제시된 지질 개관을 소개하면 아래와 같다. 홍성을 포함한 일대는 트라이아스기 이전의 지구조적 진화 특성을 달리하는 동부, 중부, 서부 세 영역으로 세분되며, 이 영역들은 크게 당진, 궁리, 청라 단층 등에 의해 경계 지어진다(그림 6c). 먼저 동부 영역은 고원생대 기반암이 주로 분포하고, 이후 신원생대 및 고생대의 염기성 화성활동에 의해 영향을 받았는데, 특히 신원생대의 일부 변성 염기성암에서는 에클로자이트상의 변성 작용이 인지되었다. 중부 영역은 초대륙 로디니아와 관련된 호화산 활동 그리고 판게아와 관련된 고생대 호화산 활동과 전후 퇴적작용을 포함한 대륙 연변부에서의 열-퇴적사를 간직한 것으로 판단되었다. 그리고 서부에는 판게아 초대륙 형성 과정의 후기에 퇴적된 것으로 해석되는 후기 고생대 플리시(조산운동 과정에서 형성된 퇴적층)가 분포한다. 이후 이들 모두는 대륙 충돌 후 트라이아스기 화성활동 및 쥐라기에 서 백악기에 이르는 화산 및 퇴적작용에 의해 광범위하게



**Fig. 6.** Geologic map showing the distribution of the ultramafic rocks in South Korea. (a) Tectonic map of Korean Peninsula showing locations of major ultramafic rocks, (b) enlarged map of the Hongseong-Imjingang Belt, (c-f) geological map of the (c) Hongseong, (d) Andong, (e) Ulsan, and (f) Gapyeong areas (modified from Park and Yoon, 1968; Kim, B.G. *et al.*, 1974a; Kim, O.J. *et al.*, 1974b; Kim, B.K. *et al.*, 1988a; Kim, S.W. *et al.*, 2014).

**Table 1.** Magnesium numbers (Mg#) for whole rock, olivine, and pyroxene from the ultramafic rocks in the study areas.

Areas	Whole rock	Olivine	Pyroxene	References	
Hongseong	87	90-91	91-96	Woo and Suh, 2000; Seo <i>et al.</i> , 2013	
Gwangcheon	86-87	90-92	91-95	Wee <i>et al.</i> , 1994; Woo and Suh, 2000; Seo <i>et al.</i> , 2013	
Baekdong	91	89-91	91-98	Seo <i>et al.</i> , 2005; Oh <i>et al.</i> , 2012	
Hongseong area	Bibong	89-93	90-92	Wee <i>et al.</i> , 1994; Song <i>et al.</i> , 1997; Woo and Suh, 2000; Seo <i>et al.</i> , 2005; Oh <i>et al.</i> , 2010	
	Gwangsi	89-90	89-91	89-93	Wee <i>et al.</i> , 1994; Song <i>et al.</i> , 1997; Woo and Suh, 2000
	Singok	90-93	90-93	92-98	Song and Song, 2001; Seo <i>et al.</i> , 2013
	Gyeweol	90-93	88-94	94-96	Song and Song, 2001
	Yugu	90	88-92	89-96	Woo and Suh, 2000; Woo and Lee, 2001; Arai <i>et al.</i> , 2008; Kim <i>et al.</i> , 2023
Andong	84-91	81-88	60-95	Jeong <i>et al.</i> , 2012; Kim and Choi, 2016; Song, 2019; Davaasuren <i>et al.</i> , 2024	
Ulsan	89-94	90-92	89-93	Kim <i>et al.</i> , 1993; Seo <i>et al.</i> , 2019	
Gapyeong	-	90-96	-	Song and Kang, 2016; Oh <i>et al.</i> , 2018	

영향을 받은 것으로 제시되었다. 동부와 중부 영역의 기반암에 대한 K-Ar 연대측정 결과 청라단층(쓰러스트성 전단대)에 의해 구획되는 동부 영역에서는 쥐라기(182-154 Ma), 중부 영역에서는 트라이아스기(227-198 Ma) 연대가 도출되었고, 이는 동부와 중부 영역이 각각의 독립적인 용기상, 혹은 열사(화강암류의 정치에 의한 동위원소계의 재평형)를 반영하는 것으로 판단되었다(Park *et al.*, 2012).

중부인 월현리 복합체(Wolhyeonri complex)에서 산출되는 변성화산암류는 초기 연구에서 신원생대 섭입대의 배호분지 환경과 열개 환경에서 형성된 것으로 해석되었으나(Oh *et al.*, 2009), 이후 연구에서 고생대 전기에서 중기인 약 440 Ma 이전에 섭입대의 칼크-알칼리 계열 마그마 화산 활동으로 형성되고 약 420-370 Ma 동안 고압 변성 작용을 받았으며, 친링-다비-술루대와 유사하다고 보고되었다(Kim and Kee, 2010).

위 영역들 중 초고철질암체(사문암체)는 동부의 고원생대 암체와 중부의 월현리 복합체 내 비교적 소규모로 분리되어 독립적으로 분포하고 있다(e.g., Song *et al.*, 1997, 2004; Woo and Suh, 2000; Seo *et al.*, 2005; Arai *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2009; Kee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011a, 2011b; Kwon *et al.*, 2013; Kim and Park, 2016). 예를 들면, 고원생대 암체에는 비봉, 미곡, 청당, 녹천, 평안, 대흥, 유구, 싸리울, 명흥, 대동, 태원, 부여 등이, 월현리 복합체에는 홍성, 광천, 백동, 원노전, 광시, 계월, 신곡, 웅봉 등이 분포한다(그림 6c). 초고철질암체들은 대체로 북북동 방향으로 배열된 단속적 렌즈상 암체들로서 사문암체는 규모가 수십 cm~1 km의 폭과 수 m~5 km의 길이로 지점에 따라 다양하게 나타난다. 기원암인 초고철질암은 듀나이트(dunite)

혹은 하즈버자이트(harzburgite)로 구성되고, 깊이 약 30-40 km의 약간 결핍된 상부 맨틀에서 형성된 알파인형으로 판단되는데, 사문암화는 인근 암체들에서 관찰되는 녹색편암상 혹은 각섬암상 광역변성작용(약 600°C)과 함께 발생하였고 단층작용에 의해 지표로 상승한 것으로 해석되었다(Song *et al.*, 1997; Woo and Suh, 2000; Song and Song, 2001).

홍성일대의 변성염기성암체들에서는 약 887-764 Ma의 연령이 도출되었는데 이와 밀접하게 분포하여 유사한 기원을 가진 것으로 해석되는 초고철질암체들 또한 신원생대 섭입대 상부(supra-subduction zone)에서 형성된 것으로, 이는 로디니아 초대륙의 붕합 전 섭입대 상부 지구조 환경(약 890-860 Ma)과 분열 과정의 대륙 열개 지구조 환경(약 760 Ma)을 반영하는 것이며, 궁극적으로는 남중국지괴(양쯔강괴)의 북쪽 연변부와 대비된다고 제안된 바 있다(Oh *et al.*, 2009, 2012; Seo *et al.*, 2013). 또한 이후의 변성 및 사문암화에 대해서는 비봉 사문암체 내 침정석(spinel) 조성을 이용해 각섬암상의 변성과 사문암화 작용이 트라이아스기 남·북중국지괴의 충돌 후 용기 과정에서 발생한 것으로 해석하였다(Oh *et al.*, 2010). 반면에 홍성 일대의 암체들에 대한 연대측정을 통해 고생대 화성 및 퇴적 작용을 확인하면서 이는 고생대의 섭입대와 관련이 있고 이후에 트라이아스기의 충돌을 기록하고 있음을 제안하면서 판게아의 형성과 관련지어 초고철질암체의 지표 노출 및 사문암화도 이와 관련이 있을 것으로 해석하기도 하였다(그림 7)(Kwon *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a, 2014, 2015; Park *et al.*, 2014). 또한 홍성지역의 렌즈상(변성)염기성암들의 생성시기가 신원생대(약 815-770 Ma), 고생대(약 310 Ma),

중기 트라이아스기(약 240 Ma)에 이르는 다양한 연대를 나타낸다는 사실을 근거로 초고철질암체들의 사문암체들도 마찬가지로 다양한 시기(로디니아 및 곤드와나 초대륙의 형성 및 분열과 관련)에 형성되었을 가능성을 제시한 바 있다(Kwon *et al.*, 2013). 홍성지역의 염기성암체들을 이용한 초고철질암의 형성시기 유추는 지금까지도 이 지역 초고철질암체들의 형성 시기 및 지구조적 해석을 어렵게 하며, 이를 극복하기 위해 초고철질암체에 대한 직접적인 쇄설성 저어콘 연대측정을 수행한 결과 백동암체에서는 고생대 연대가, 원노전, 비봉, 유구암체(Kee *et al.*, 2011)에서는 백악기 저어콘이 보고되며 일부 초고철질암체들이 백악기에 사문암화 되었을 가능성 또는 재동되었을 가능성을 제시하였다(Kim and Park, 2016). 그리고 변성 온도-압력 조건과 관련해서는 비봉 염기성암체의 에클로자이트에서 에클로자이트상(16.5-20 kbar와 775-850°C), 고압 백립암상(11.0-15.6 kbar와 760-850°C), 각섬암상(7.7-9.2 kbar와 550-735°C) 변성을 차례로 경험한 것으로 보고되었다(Oh *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006; Kwon *et al.*, 2013). 백동 사문암체 내 석류석 백립암 또한 고압 백립암상에서 각섬암

상 변성을 차례로 나타낸다(Oh *et al.*, 2004; Kwon *et al.*, 2013). 중생대 트라이아스기 동안 신리, 대판, 형산, 능금 지역의 암석들에서도 고압 백립암상에서 각섬암상을 거쳐 녹염석-각섬암상까지의 변성을 기록하고 있으며, 약 240-230 Ma에 정점 변성을 겪고 이후 후퇴 변성을 받아 중국의 술루 지역과 유사한 것으로 대비하였다(Kim and Koh, 2010; Kwon *et al.*, 2013).

홍성지역에 분포하는 초고철질암들의 마그네슘 비는 대체로 86-93 범위를 나타내고, 그리고 감람석과 휘석에서는 대체로 각각 88-94와 89-99 범위를 가지는 비교적 높은 값을 보여준다(표 1). 아래는 홍성 일대의 초고철질암체들의 개별 연구결과들을 요약하였다.

3.2.1.1. 홍성 초고철질암체

홍성 초고철질암체(그림 6c)는 폭 60-90 m, 길이 약 700 m의 규모로 북북동(N18-35°E)방향으로 신장되어 인접한 고생대 변성퇴적암류와 단층으로 접하고 있는 듀나이트 혹은 하즈버자이트로 신선한 부분은 대체로 등립질의 모자이크 조직과 원생입상조직이 나타나지만 부분적으로는 잔쇄

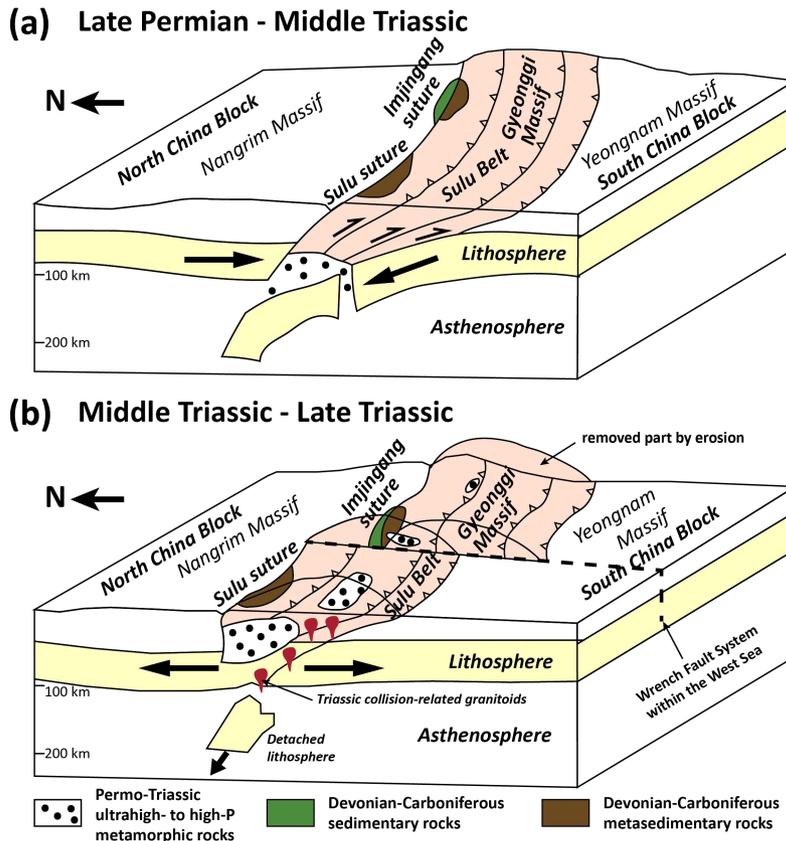


Fig. 7. A detailed 3D sketches illustrating the geological processes involved in the formation and exhumation of the ultrahigh- to high-pressure metamorphic rocks, associated with the exposure of the ultramafic rocks along the Sulu and the Korean collision belt. (modified from Kwon *et al.*, 2009).

반상조직을 보이고 녹색편암상에서 각섬암상의 변성(638-780°C)기록을 나타낸다(Song *et al.*, 2004). 신선한 암체에 서부터 사문암까지 다양하게 산출하며, 결핍된 상부 맨틀이 지구조적 과정에 의해 지표로 상승한 알파인형으로 해석되었다(Song *et al.*, 2004). 또한 지구조 환경 연구를 통해 남중국지괴의 북쪽 연변부와 대비하였다(Oh *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2013).

### 3.2.1.2. 광천 초고철질암체

광천 초고철질암체(그림 6c)는 듀나이트 및 하즈버자이트에 속하며 폭 50-80 m, 길이 약 1 km로 N17-25°E의 북북동 방향으로 분포하고 고생대 변성퇴적암류와 단층으로 접하고 있다(Song *et al.*, 2004). 거의 대부분의 암체가 사문암 내지 활석으로 변질되어 있고, 대부분 등립질의 모자이크 조직과 원생입상조직이지만 잔쇄반상조직이 부분적으로 관찰되며 녹색편암상에서 각섬암상의 변성(638-780°C) 기록을 포함한다(Song *et al.*, 2004). 초고철질암체는 상부 맨틀이 지구조적 과정에 의해 지표로 상승한 알파인형으로 판단되었다(Song *et al.*, 2004). 또한 암체 내 크롬 침정석의 Cr#(Cr/Cr+Al)이 높은 값(0.59-0.74)을 나타내는 것은 주로 섭입대 상부의 전호 환경 아래에서 형성되었음을 반영한다고 해석하였다(Park *et al.*, 2014). 그리고 암체 내 포함된 화산암의 모암이 고생대(약 328 Ma)를 나타낸다는 사실을 토대로 본 초고철질암은 고생대에서부터 중생대 초에 이르는 판게아의 형성과 관련된 것으로 해석하였다(Kim *et al.*, 2011a). 그러나 다른 연구에서는 로디니아 초대륙 분열과정과, 이후 곤드와나 초대륙을 형성 전 지구조 환경을 경험한 것으로 해석하면서 남중국지괴의 북쪽 연변부와 대비된다고 하였다(Oh *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2013).

### 3.2.1.3. 백동 초고철질암체

백동 초고철질암체(그림 6c)는 대부분 북서-남동 방향으로 배열된 인근 초고철질암체들과는 달리 서북서 방향(다비-술루 충돌대와 유사 방향; Seo *et al.*, 2005)으로 폭 약 100 m, 길이 약 600 m 규모로 신원생대 알칼리화강암과 단층 경계를 이루며 렌즈상으로 노출되며, 암체 내 부딘 형태의 변성염기성암이 분포한다(Oh *et al.*, 2002). 암체 내 변성염기성암에서 3차에 걸친 변성작용이 인지(Oh *et al.*, 2002; Seo *et al.*, 2005)되고, 이는 1차 에클로자이트상-백립암상(1123-911°C, >16.3 kb), 2차 백립암상(825-740°C, 16.3-11.8 kb), 3차 각섬암상(782-718°C, 8.2-8.7 kb)의 변성을 차례로 경험한 것으로 남·북중국지괴의 다비-술루대 연장으로 해석되었다(Seo *et al.*, 2005). 해당 초고철질암의 기원에 대해서는 수동형 연변부(passive margin) 아래의 수화된 맨틀(Seo *et al.*, 2005), 신원생대 섭입대 상부의

오피올라이트의 수화된 맨틀(Oh *et al.*, 2010, 2012), 그리고 후기 고생대의 전호 멜란지(Kim *et al.*, 2011b)까지 다양한 해석이 제시되었다. 한편 Park *et al.* (2014)은 백동 사문암의 크롬 침정석의 조성을 이용해 이 지역들의 마그마 기원은 후기 고생대 동안 섭입대 상부 환경에서 잔류 맨틀과 용융물 간의 상호작용에 의한 전호 지역 아래 지각의 부분 용융에 의한 것으로 해석하였다.

이들 각각을 보다 자세히 서술하면, Seo *et al.* (2005)의 초기 연구에서 백동 초고철질암체가 남중국지괴의 수동형 연변부 지구조 환경에서 상부 맨틀 약간 깊은 부분의 약 5% 부분 용융에 의해 기원한 것으로 해석하였다. 그러나 후속 연구에서는 신원생대 로디니아 초대륙 형성 직전 남중국지괴의 북쪽 연변부에서 형성된 섭입대 상부 오피올라이트로 해석되며, 초기에는 약 10% 미만의 부분 용융, 후기는 약 15-35%의 부분 용융으로 보다 진화된 마그마에서 형성된 것으로 해석(Oh *et al.*, 2009, 2012)되었다. 또는 섭입판과 맨틀 썩기에서 변성교대작용된 전호 맨틀 기원으로 암체 내 분포하는 염기성 모암의 연령이 약 310 Ma를 나타낸다는 사실을 근거로 본 암체는 고생대에서부터 중생대 초에 이르는 판게아의 형성과 관련된 것으로 해석하기도 하였다(Kim *et al.*, 2011b). 반면에 백동 초고철질암체 내 크롬 침정석의 지화학 조성을 근거로 Cr#(Cr/Cr+Al)이 중간에서 높은 값(0.41-0.64)을 나타내는 것은 중앙해령에서 섭입대 상부 전호 아래 환경으로의 지구조 환경 전이를 반영하며 암체는 섭입판에서 방출된 유체에 의한 변성교대작용을 겪은 것으로 해석된 바 있다(Park *et al.*, 2014).

### 3.2.1.4. 비봉 초고철질암체

비봉 초고철질암체(그림 6c)는 북북동(N20-35°E)방향으로 연장 약 250 m의 규모로 노출되고 이를 둘러싼 고원생대 유구편마암과 주로 단층접촉을 보인다(Song *et al.*, 1997). 초고철질암은 대부분 듀나이트와 하즈버자이트로 주로 원생입상, 등립입상, 모자이크 조직 그리고 부분적으로 잔쇄반상조직을 나타내며 위치에 따라 부분적 혹은 전적으로 사문암화 되어있는데 이는 맨틀 슬랩이 단층작용으로 지각 상부에 정치된 알파인형 초고철질암으로 추정된다(Song *et al.*, 1997; Park, 2001; Park *et al.*, 2012). 본 암체에서는 상부 각섬암상에서 녹색편암상의 변성 기록이 보고되었다(Song *et al.*, 1997; Park, 2001). Oh *et al.* (2010)에 따르면은 비봉 초고철질암이 신원생대 섭입대 상부의 맨틀 부분으로, 두 번의 화성활동 단계와 이후 중첩된 변성작용을 경험한 것으로 해석하였다. 먼저, 첫 번째는 배호분지 발달 초기의 열개 확장축 아래 맨틀 썩기에서 소량의 부분용융에 의한 화성활동이며, 이후 성숙된 배호분지 확장축 아래 섭입하는 해양판에서 유래된 유체 혹은 용융체의 공급

증가에 따른 부분 용융의 증가로 더 진화된 마그마가 관입한 것으로 제시하였다(Oh *et al.*, 2009, 2010). 이러한 환경의 전이는 신원생대 동안(약 890-860 Ma)의 해구 퇴각(trench roll back)에 의한 것이며, 이후 남·북중국지괴의 트라이아스기 충돌 후 융기 과정에서 사문암화작용과 각섬암상의 변성을 겪은 것으로 해석되었다(Oh *et al.*, 2010). 또한 Seo *et al.* (2005)는 비봉 초고철질암이 상부 맨틀의 얇은 곳에서 약 17-24%의 부분 용융에서 기원해 섭입대에서 유래된 함수유체(hydrous fluids) 또는 열수에 의한 교대작용을 경험한 것으로 판단하였다.

### 3.2.1.5. 광시, 원노전, 신곡, 계월 초고철질암체

광시 초고철질암체(그림 6c)는 북북동(N20-40°E)방향으로 약 180 m 길이로 신장되어 나타나고 암종은 듀나이트와 하즈버자이트로 원생입상과 등립입상-모자이크조직을 보이며 이들의 기원은 상부 맨틀이 단층운동에 의해 상부 지각에 정치한 것으로 알파인형에 속하고, 곳에 따라 사문암화, 녹니석화, 활석화 변질을 나타낸다(Song *et al.*, 1997).

원노전 초고철질암체(그림 6c)의 경우 암체 내 크롬 침정석의 지화학 조성을 바탕으로 두 종류로 구분되며, 각각 중앙해령/열개 환경과 주로 섭입대 상부 전호 아래 환경을 지시하는 것으로 해석되었다(Park *et al.*, 2014).

신곡 및 계월 초고철질암체(그림 6c)는 북북동(N20-30°E)방향으로 각각 폭 60-80 m, 길이 약 600 m 그리고 폭 50-80 m, 길이 400 m의 규모로 지표에 노출되며 듀나이트 또는 하즈버자이트로 구성된다(Song and Song, 2001). 암석 내 조직으로는 잔쇄반상조직이 우세하고 일부 원생입상 및 등립입상-모자이크를 나타내고 부분적 혹은 전적으로 사문암화 및 활석화되어 있으며, 기원은 알파인형 초고철질암으로 감람석-침정석 온도계를 이용해 계산된 전반적인 변성온도는 상부녹색편암상에서 백립암상에 해당하는데, 신곡 암체가 약 650-820°C로 650°C 미만인 계월 암체보다 높게 나타났다(Song and Song, 2001). 신곡 암체는 로디니아 형성 이전의 섭입대 상부 지구조 환경에서 형성된 잔류 맨틀의 한 부분으로 해석된다(Seo *et al.*, 2013).

### 3.2.1.6. 유구 초고철질암체

유구 초고철질암체(그림 6c)는 편자형(horseshoe shape)으로 지표에 노출된 침정석 감람암으로 하즈버자이트와 러줄라이트에 해당하며 경계부를 따라 대체로 강하게 사문암화 되어있고 일부 이를 관입한 각섬암과 사문암에서 형성된 활석 광체가 자리한다(Woo and Lee, 2001; Kim *et al.*, 2023). 주 사문암화 작용은 암체가 융기하는 과정에 고원생대 유구편마암이 경험한 녹색편암상 및 각섬암상의 광역 변성작용과 함께 발생한 열수로 인한 것으로 해석되었다

(Woo and Lee, 2001; Kim *et al.*, 2023). 유구 초고철질암의 기원은 심해저 감람암으로 약 5-18%의 부분 용융을 경험한 맨틀 잔류체로서, 섭입 해양판으로부터 방출된 유체 혹은 용융물의 침투에 의해 2차적인 교대변성작용을 겪었으며, 그 형성 및 정치 과정이 남·북중국지괴의 충돌과 관련이 있는 것으로 해석하였다(Arai *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2023). 그러나 유구 초고철질암체는 다비-솔루 충돌대의 초고철질암체에 비해 저압 변성을 경험한 것으로 보이는데 이는 다비-솔루대의 초고철질암 형성 깊이에 비해 상대적으로 얇은 상부 맨틀에서 형성되었기 때문으로 추정하였다(Arai *et al.*, 2008).

### 3.2.2. 안동 암체

경상분지의 의성소분지 북서부 경계인 안동 풍천면 지역에는 안동단층계의 광덕단층이 가로지르고 이 단층을 경계로 렌즈상으로 노출된 사문암화된 초고철질암체(주로 감람암과 일부 휘석암 및 감람석 반력암)가 동북동 방향으로 신장되어 길이 약 3.5 km, 폭 약 1.2 km 규모로 자리하고 있다(그림 6d) (Kim, B.K. *et al.*, 1988a; Hwang *et al.*, 1993; Kang and Lee, 2008; Whattam *et al.*, 2011; Jeong *et al.*, 2012; Song, 2019). 기존에 반력암으로 기재(Kim, B.K. *et al.*, 1988a)되었던 안동 사문암체의 모암인 감람암은 섭입대 상부 맨틀 켜기 마그마 기원으로 후기 트라이아스기(약 222 Ma, SHRIMP 저어콘 우라늄-납 연령)의 확장 지구조환경에서 형성된 것으로 해석(Jeong *et al.*, 2014)되었고 이를 대륙지각 하부의 암석권 맨틀(sub-continental lithospheric mantle) 조성을 가지는 ‘안동 초고철질암 복합체(AUC: Andong Ultramafic Complex)’로 명명하였다(Whattam *et al.*, 2011).

AUC의 형성과 관련하여 암체 내 저어콘 하프늄(Hf) 동위원소 분석 결과 eHF값이 한반도 및 중국 동부의 신생대 맨틀 포획암의 초생값(primitive values)에 비해 상대적으로 부화된 특성을 보인다는 점을 근거로 고태평양판의 초기 섭입동안 발생한 암석권 맨틀의 교대작용(metasomatism)에 의한 것으로 해석하였다(Jeong *et al.*, 2014). 또한 알파인형 초고철질암 중 마그마 분화(Bodinier, 1988)에 의한 화성기원 암체와 유사한 특징을 보인다고 제시되기도 하였다(Song, 2019). 지화학적 연구에서는 AUC가 지각에 정치된 마그마 내 집적암(magmatic cumulates) 기원이며, 마그마는 주로 이차적 휘발성분이 풍부한 규질 용융물이 더해진 대륙지각 하부의 암석권 맨틀에서 유래한 것으로 추정하였다(Whattam *et al.*, 2011; Kim and Choi, 2016). 특히 남·북중국지괴의 충돌 과정에서 발생한 해양판의 분리(detachment)에 의해 형성된 슬랩 윈도우(slab window)를 통해 용승된 연약권의 열이 교대작용을 겪은 대륙지각 하부의 암석권 맨틀의 부분용융을 촉진했으며, 그 결과 트라

이아스기 충돌 후 마그마활동(post-collisional magmatism)을 야기한 것으로 해석하였다(Kim and Choi, 2016). 이후 모암의 사문암화를 일으킨 변질작용은 이를 관입한 화강암류의 연령인 약 214-187 Ma 동안 중첩되어 발생한 것으로서, 암체 내 Ni-Cr 광화작용은 사문암화 작용과는 무관하며 모암의 결정화 과정에서 발생한 것으로 해석되었다(Davassuren *et al.*, 2024).

천연수소의 형성과 관련한 근원암으로서 AUC 암체를 구성하는 암석의 전암 마그네슘 비는 84-91이며, 감람석과 휘석의 마그네슘 비는 각각 81-88과 60-95의 범위를 보인다(표 1). 위 범위는 홍성 및 타 지역의 마그네슘 비와 비교했을 때 눈에 띄게 낮은 값으로 수소 생성에 있어 유리한 근원암의 조건을 가진 것으로 판단된다.

### 3.2.3. 울산 암체

경상분지 동남부 울산지역에는 사문암화된 초고철질암체와 탄산염암체가 접하여 함께 산출된다(그림 6c). 이들의 성인에 관해 초기에는 마그네슘을 포함하는 석회암이 열수 변질을 받아 사문암체가 형성된 것으로 추정되었다(Huang, 1963). 그러나 추가 연구에서 사문암체는 주로 듀나이트와 하즈버자이트로 구성된 초고철질암(감람암)의 열수변질에 의한 것으로 해석되었다(Choi, 1983; Choi *et al.*, 1990; Kim *et al.*, 1990, 1993; Seo *et al.*, 2019). 또한 초고철질암체의 지표 노출에 관해서는 마그마의 관입으로 제안(e.g. Yang *et al.*, 2003; Seo *et al.*, 2019)하였으나, 이 초고철질암체와 주변 암체들 간의 관계에 있어서는 이견이 있다. 한 가지 의견은 초고철질암체가 경상누층군 백악기 퇴적층의 기반암으로 자리하고 있고 주변의 화강암에 의해 관입 당한다는 것(Seo *et al.*, 2019)인 반면 다른 의견은 초고철질암이 백악기 퇴적암 및 화강암을 관입하고 있다는 것(Yang *et al.*, 2003)이다. 이를 규명하기 위해서는 야외조사 및 연대측정과 관련된 추가 연구가 필요해 보인다. 반면에 탄산염암체는 초기 연구에서 고생대 석회암의 일부로 보고되었다(Park, and Park, 1980; Choi, 1983; Kim *et al.*, 1990). 이후 울산 탄산염암체의 지하구조가 깔대기 형태로 산출되고 지하 약 650 m까지도 연장된다는 것을 토대로 퇴적기원이 아닌 관입암상의 산출 상태로 제안되었으며, 맨틀에서 직접 상승한 것이 아닌 지각 내에서 형성된 2차적 마그마에 의해 형성된 카보나타이트일 가능성이 크다는 주장이 제시되었다(Yang *et al.*, 2001, 2003). 특히 이 과정은 초고철질 마그마의 정치 후 뒤이어 상승하는 마그마가 지각의 석회질 암석을 녹이는 동화작용을 통해 탄산염 마그마를 형성 후 관입한 것으로 해석하였다(Yang *et al.*, 2001, 2003). 그러나 탄산염암 대상의 동위원소 연구에서는 카보나타이트가 아닌 해양탄산염암을 지시하는 것으로 판단하였고, 광

화작용의 전진단계(prograde stage)에서는 마그마 기원의 열수에 의해 약 350-450°C 정도의 비교적 일정한 온도에서 철 광화대를 형성하였고 후퇴단계(retrograde stage)에서는 기상수(meteoric water)의 혼합으로 인해 약 340°C에서 135°C의 저온에서 Zn-Pb-Ag 결정화가 발생한 것으로 논의하였다(Choi and Youm, 2000; Choi *et al.*, 2003). 따라서 사문암화된 초고철질암 내 탄산염암체의 기원을 명확히 밝히기 위한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. 울산 지역의 지질 및 구성 광물의 공생관계를 이용한 해석에서는 탄산염암이 형성되고 백악기 화강암의 정치에 의해 사문암화 과정을 겪고 철광화 작용(스카른형)이 진행된 것으로 제시하였다(Koh *et al.*, 2006). 탄산염암체와 초고철질암체의 형성 시기는 미상이나 가대리화강암이 이들을 포함하는 것으로 보아 가대리 화강암보다는 오래된 것으로 판단하였고, 특히 석류석 스카른의 칼륨장석의 K-Ar 연령(약 50.3±1.7 Ma)과 가대리화강암의 흑운모 K-Ar 연령(약 50.8 Ma; Lee *et al.*, 1997)의 유사성과 지화학적 연관성을 바탕으로 탄산염암 내 스카른 광체는 가대리화강암에 의하여 생성된 것으로 해석하였다(Seo *et al.*, 2019).

울산 지역의 사문암의 기원암은 주로 감람암 혹은 하즈버자이트로 높은 마그네슘 비(89-94)를 보이며, 감람석과 휘석은 각각 90-92와 89-93의 범위를 나타낸다(표 1).

### 3.2.4. 가평 암체

경기육괴 중부에 위치하는 가평지역에는 결정질석회암, 각섬암, 일부 호상편마암으로 구성된 석회질 편암의 사문암화로 석회암 및 각섬암 내 사문암체가 산출한다(그림 6f) (Kim, B.G. *et al.*, 1974a; Kim, O.J. *et al.*, 1974b; Jeong *et al.*, 2016). 사문암에는 크리소타일, 안티고라이트, 리자르다이트 등이 산출되는 것으로 확인되었다(Jeong *et al.*, 2016). 가평 사문암체는 단층을 통해 지표면으로 노출된 알파인형 초고철질암(감람암) 기원으로 주구성 광물로는 감람석과 사방 휘석, 변질 광물로는 각섬석, 사문석, 녹니석 등을 함유하는 듀나이트와 하즈버자이트로 제시되었다(Song and Kang, 2016). 그리고 사문암체를 포함한 가평지역의 신원생대 화산암류와 퇴적암류를 가평층으로 명명하고, 가평층은 약 854 Ma에 대륙 열개 지구조환경에서 형성되었으며 북중국지괴의 남쪽 연변부와 대비해 로디니아 초대륙의 분열 시기와 일치함이 제안되었다(Oh *et al.*, 2018). 그리고 약 250 Ma에 북중국지괴와 남중국지괴가 충돌하는 동안 상부 백립암상(816-882°C, 9-10.9 kbar)의 변성 작용을 경험하고, 이후 지구조적으로 가평 지역으로 운반되어 전단대를 따라 용문사층군과 접촉한 것으로 판단하였다(Oh *et al.*, 2018). 또한 사문암화된 초고철질암은 섭입대 상부 기원으로 약 414 Ma에 하부 백립암상(725-767°C, 7.0-8.4

kbar)의 변성을 경험하고 트라이아스기 변성(약 250 Ma) 이후 구조운동에 의해 가평층에 포함된 것으로 해석하였다 (Oh *et al.*, 2018).

가평 암체는 광물학적으로 감람석의 마그네슘 비가 90-96의 범위를 보인다(표 1). 다른 암체들과 비교했을 때 높은 마그네슘비를 나타내어 조성적으로 수소 생성의 잠재력에 있어 다소 불리할 뿐 아니라 사문암화 된 이후 다양한 변성 및 구조 작용을 겪었기 때문에 천연수소의 발견 및 개발 가능성은 비교적 낮을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 제언

인류의 발전 및 활동으로 자연재해와 환경위기가 가중되고 있다. 이를 극복하기 위해 국제사회에서는 다양한 청정 신재생에너지 사용을 확대함으로써 온실가스를 감축하고자 노력하고 있다. 특히 자연에서 발생하는 천연수소는 미래에 환경 및 경제적 차원에서 상당한 경쟁력을 갖출 것으로 예상되어, 진정한 궁극의 화석연료 대체에너지로서 역할이 기대된다. 최근 전세계적으로 천연수소에 대한 관심이 증가해 연구가 활발하게 이루어지고 있지만, 국내에서는 관련된 연구가 첫발을 내딛는 단계이다. 천연수소는 초고철질 암석의 사문암화를 통해 상당량 생성되는데, 국내에는 홍성 일원, 안동, 울산, 가평 등이 초고철질암이 지표로 노출된 대표 산출지역이며, 이 암체들의 특징을 요약하면 아래와 같다.

홍성 일원에서 초고철질암체들의 산출 빈도가 가장 높으며 북서-남동 방향으로 신장된 백동 암체를 제외하면 대부분 북동-남서 방향으로 신장되어 배열된다. 암체들마다 사문암화 정도에서 차이를 보이고 비교적 신선한 암체들은 대체로 듀나이트와 하즈버자이트로 구성된다. 이들의 지각 상부로의 상승은 알파인형(단층과 관련)이며, 형성 시기에 대해서는 이견이 있어 이를 명확히 하기 위해서는 추가 연구의 필요성이 있다. AUC는 주로 감람암으로 구성되며, 일부 휘석암과 감람석 반려암을 포함한다. 모암은 섭입대 상부 맨틀 썩기 마그마 기원이며, 형성 시기는 약 222 Ma, 그리고 사문암화 시기는 약 214-187Ma에 걸쳐 중첩된 것으로 보고되었다. 상부 지각으로의 정치 기작은 단층과 관련된 것으로 알려져 있다. 울산 초고철질암체는 듀나이트와 하즈버자이트로 구성되며, 마그마 관입에 의해 지각에 정치되고 노출된 것으로 알려져 있다. 암체의 형성 시기는 미상일 뿐 아니라 주변 화강암 및 퇴적암과의 선후관계에 있어서도 이견이 있다. 그 중 비교적 최근 연구에서는 초고철질암을 가대리화강암(약 50 Ma)이 관입하며 사문암화가 일어난 것으로 추정하였다. 가평 초고철질암체는 주로 듀나이트와 하즈버자이트로 구성되며 섭입대 상부 기원의

암체가 약 250 Ma에 변성을 경험하고 이후 알파인형으로 상승한 것으로 해석되었다.

위와 같이 지금까지 초고철질암에 대한 연구는 대부분 암석성인론(지각 하부 맨틀의 정보)적, 지구조적, 그리고 사문화 및 석면과 관련된 광물 및 암석학적 관점에 집중되어 수행되었다. 그러나 추후 연구에서는 미래 천연수소 자원의 확보 측면에서 국내 초고철질암에 대한 천연 수소 생성 기작의 정밀 분석, 지화학적 특성과 수소 생성의 관계 규명, 지구물리 및 화학적 탐사 기법 개발, 천연수소의 실시간 모니터링 및 탐지 기술 개발 등이 추가적으로 수행될 필요가 있다. 특히 노출된 초고철질암체 연구를 통해 지하에 매장된 초고철질암체 및 그 사문암화 과정의 특성(정도 및 시기 등)을 추론할 뿐만 아니라 나아가 구조지질학적 측면에서 초고철질 암석 분포지역의 단층 및 절리 경향 분석과 그에 따른 천연 수소의 생성 촉진 유무 및 유동(이동 및 저장) 특성, 근원암 상부의 덮개암의 존재와 특성, 개발 가능성이 있을 때의 환경 영향 평가 등 다방면의 연구가 복합적으로 요구된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 G-램프(LAMP) 사업 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00301702). 논문을 세심하게 검토하시고, 유익한 의견을 주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다.

#### REFERENCES

- Arai, S., Kida, M., Abe, N. and Yurimoto, H., 2001, Petrology of peridotite xenoliths in alkali basalt (11 Ma) from Boun, Korea: an insight into the upper mantle beneath the East Asian continental margin. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 96, 89-99.
- Arai, S., Tamura, A., Ishimaru, S., Kadoshima, K., Lee, Y.I. and Hisada, K.-I., 2008, Petrology of the Yugu peridotites in the Gyeonggi Massif, South Korea: Implications for its origin and hydration process. *Island Arc*, 17, 485-501.
- Berndt, M.E., Allen, D.E. and Seyfried Jr, W.E., 1996, Reduction of CO<sub>2</sub> during serpentinization of olivine at 300°C and 500 bar. *Geology*, 24, 351-354.
- Blay-Roger, R., Bach, W., Bobadilla, L.F., Reina, T.R., Odriozola, J.A., Amils, R. and Blay, V., 2024, Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113888.
- Bodinier, J.L., 1988, Geochemistry and petrogenesis of the Lanzo peridotite body, western Alps. *Tectonophysics*, 149, 67-88.
- Boreham, C.J., Edwards, D.S., Czado, K., Rollet, N., Wang, L., van der Wielen, S., Champion, D., Blewett, R., Feitz, A. and Henson, P.A., 2021, Hydrogen in Australian natural gas: occurrences, sources and resources. *The APPEA Journal*, 61, 163-

- 191.
- Cha, J. and Lee, J.-Y., 2023, A review on occurrence, mechanism and distribution of natural hydrogen as a promising energy source. *Journal of the Geological Society of Korea*, 59, 513-526 (in Korean with English abstract).
- Chi, J.M. and Kim, K.B., 1977, A study on talc mineralization of serpentine. *Economic and Environmental Geology*, 10, 67-74 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.G., 1983, Skarn evolution and iron-tungsten mineralization and the associated polymetallic mineralization at the Ulsan mine, Republic of Korea. Ph.D. Thesis, Waseda University, 271 p.
- Choi, S.-G., Kim, S.-T. and Lee, J.G., 2003, Stable isotope systematics of Ulsan FeW skarn deposit, Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, 78-79, 601-606.
- Choi, S.-G. and Youm, S.-J., 2000, Compositional Variation of Arsenopyrite and Fluid Evolution at the Ulsan Deposit, southeastern Korea: A Low-Sulfidation Porphyry System. *The Canadian Mineralogist*, 38, 567-583.
- Choi, S.H., 2012, Lithospheric Mantle beneath the Korean Peninsula: Implications from Peridotite Xenoliths in Alkali Basalts. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 235-247 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.H., 2000, Oxidation state of mantle xenoliths from Jeju-do, South Korea. *Geosciences Journal*, 4, 211-220.
- Choi, S.H., Jwa, Y.J. and Lee, H.Y., 2001, Geothermal gradient of the upper mantle beneath Jeju Island, Korea: Evidence from mantle xenoliths. *The Island Arc*, 10, 175-193.
- Choi, S.H. and Kwon, S.T., 2005, Mineral chemistry of spinel peridotite xenoliths from Baengnyeong Island, South Korea, and its implications for the paleogeotherm of the uppermost mantle. *The Island Arc*, 14, 236-253.
- Choi, S.H., Lee, J.I., Park, C.H. and Moutte, J., 2002, Geochemistry of peridotite xenoliths in alkali basalts from Jeju Island, Korea. *The Island Arc*, 11, 221-235.
- Choi, S.Y., Hwang, J.Y., Kim, J.J. and Lee, Y.J., 1990, Studies on Mineralogy and Geochemistry of Ulsan Serpentinities in the Ulsan Mine Area, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 105-118 (in Korean with English abstract).
- Davaasuren, O.-E., Koh, S.-M., Lee, B.-H. and Heo, C.-H., 2024, Serpentinization and potential Ni-Cr mineralization of the Andong ultramafic block in South Korea. *Resource Geology*, 74, e12331.
- Downes, H., 2021, Ultramafic rocks. *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, 69-75.
- Ellison, E.T., Templeton, A.S., Zeigler, S.D., Mayhew, L.E., Kelemen, P.B. and Matter, J.M., 2021, Low-temperature hydrogen formation during aqueous alteration of serpentinized peridotite in the samail ophiolite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, <https://doi.org/10.1029/2021JB021981>.
- Frery, E., Langhi, L., Maison, M. and Moretti, I., 2021, Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 31158-31173.
- Frost, B.R. and Beard, J.S., 2007, On silica activity and serpentinization. *Journal of Petrology*, 48, 1351-1368.
- Gaucher, E.C., 2020, New perspectives in the industrial exploration for native hydrogen. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 16, 8-9.
- Hand, E., 2023, Hidden hydrogen. *Science*, 379, 630-636.
- Hassanpouryouzband, A., Wilkinson, M. and Haszeldine, R.S., 2024, Hydrogen energy futures-foraging or farming?. *Chemical Society Reviews*, 53, 2258-2263.
- Heo, D., 2008, Process of crystallization and geochemistry in Macheon mafic layered intrusion. MS thesis, Pukyong National University, 89 p (in Korean with English abstract).
- Huang, I.C., 1963, Report on the Ulsan Iron Mine. *Geological Survey of Korea, Bulletin No. 6* (in Korean with English abstract).
- Huang, R., Sun, W., Ding, X., Zhao, Y. and Song, M., 2020, Effect of pressure on the kinetics of peridotite serpentinization. *Physics and Chemistry of Minerals*, 47, 33.
- Hwang, J.Y., Kim, J.J. and Ock, S.S., 1993, Genesis and Mineralogy of the Serpentinite Deposits in the Andong Area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 26, 1-10 (in Korean with English abstract).
- International Energy Agency, 2023, Global Hydrogen Review 2023. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.
- Jackson, O., Lawrence, S.R., Hutchinson, I.P., Stocks, A.E., Barnicoat, A.C. and Powney, M., 2024, Natural hydrogen: sources, systems and exploration plays. *Geoenergy*, 2.
- Jeong, G.Y., Cheong, C.-S., Yi, K., Kim, J., Kim, N., Kwon, S.-K., Geong, J.-Z. and Li, H.-K., 2014, Mineral ages and zircon Hf isotopic composition of the Andong ultramafic complex: implications for the evolution of Mesozoic subduction system and subcontinental lithospheric mantle beneath SE Korea. *Geological Magazine*, 151, 765-776.
- Jeong, G.Y., Lee, S.R. and Kwon, S.-K., 2012, Phlogopite-Bearing Orthopyroxenite in Andong Ultramafic Complex. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 25, 249-261 (in Korean with English abstract).
- Jeong, H., Kang, S. and Roh, Y., 2016, Types and Characteristics of Fibrous Serpentine Minerals Occurred in Serpentinite in Hongseong and Gapyeong. *Economic and Environmental Geology*, 49, 1-11 (in Korean with English abstract).
- Jeong, S., Kim, T., Ko, K. and Yang, M., 2022, Research Trends of Foreign Countries on Geological Evaluation of Abiotic Hydrogen Productivity: A Review. *The Journal of Engineering Geology*, 32, 627-642 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H. and Lee, D.-S., 2008, Geological structure around Andong Fault System, Pungcheon-myeon, Andong, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 17, 83-94 (in Korean with English abstract).
- Kee, W.S. *et al.*, 2011, Tectonic evolution of the upper crustal units in the mid-western part of the Korean peninsula. *Basic Research Report of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*.
- KEPCO, 2024, <https://home.kepco.co.kr/kepco/SM/C/htmlView/SMCCHP001.do?menuCd=FN29030304> (July 1, 2024).
- Kil, Y.W., 2006, Characteristics of subcontinental lithospheric mantle beneath Baegryeong Island, Korea: Spinel peridotite xenoliths. *Island Arc*, 15, 269-282.
- Kil, Y.W., 2007, Geochemistry and petrogenesis of spinel lherzo-

- lite xenoliths from Boeun, Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, 29-40.
- Kil, Y., 2023, Petrological Study on the Mantle Xenolith from Songaksan, Jeju Island. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 36, 365-376 (in Korean with English abstract).
- Kil, Y., Hong, S.S., Lee, C.O. and Ahn, U.S., 2022, Petrological Study on the Mantle Xenolith from Dongsuak Crater, Jeju Island. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 35, 173-182 (in Korean with English abstract).
- Kil, Y. and Lee, S.H., 2005, Geochemical Characteristics of Clinopyroxenes in the Upper Mantle Rocks under the Baegryeong Island and the Boeun. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 18, 61-72 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.K., Lee, H.Y., Kim, S.J. and Jeong, J.G., 1988a, Geological report of the Andong sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, (in Korean with English abstract).
- Kim, B.G., Lee, S.M., So, C.S. and Sin, M.S., 1974a, Geological report of the Yongduri sheet (1:50,000). Geological and Mineral Institute of Korea (in Korean with English abstract).
- Kim, C.B. and Turek, A., 1996, Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 30, 323-338.
- Kim, E., Park, G., Kim, S., Kil, Y. and Yang, K., 2017, Petrology and Geochemistry of Peridotite Xenoliths from Miocene Alkaline Basalt Near the Mt. Baekdu Area. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 26, 311-325 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.-Y. and Kim, S.J., 1997, Serpentinization of the Ultramafic Rock in the Yesan-Gongju-Cheongyang Area, Korea. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 10, 126-138.
- Kim, H.S., 2022, Origin and Reservoir Types of Abiotic Native Hydrogen in Continental Lithosphere. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 35, 313-331 (in Korean with English abstract).
- Kim, I., Koh, S.-M., Davaasuren, O.-E., Ahn, G.M., Heo, C.-H. and Lee, B.H., 2023, Preliminary Study on the Genesis and Nickel Potential of Ultramafic Rocks in Chungnam Yugu area, South Korea. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 36, 323-336 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Nagao, K., Tanaka, T., Sumino, H., Nakamura, T., Okuno, M., Lock, J.B., Youn, J.S. and Song, J., 2005, He-Ar and Nd-Sr isotopic compositions of ultramafic xenoliths and host alkali basalts from the Korean peninsula. *Geochemical Journal*, 39, 341-356.
- Kim, K.H., Park, J.K., Yang, J.M. and Satake, H., 1993, A Study on Serpentinization of Serpentinites from the Ulsan Iron Mine. *Economic and Environmental Geology*, 26, 267-278 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Park, J.K., Yang, J.M. and Yoshida, N., 1990, Petrogenesis of the Carbonate and Serpentinite Rocks from the Ulsan Iron Mine. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 407-417 (in Korean with English abstract).
- Kim, N.K. and Choi, S.H., 2016, Petrogenesis of Late Triassic ultramafic rocks from the Andong Ultramafic Complex, South Korea. *Lithos*, 264, 28-40.
- Kim, O.J., Kim, S.U., Yoo, B.H. and Park, B.K., 1974b, Geological report of the Gapyeong sheet (1:50,000). Geological and Mineral Institute of Korea, (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W. and Kee, W.-S., 2010, Geochronology and Geochemical characteristics of metavolcanics from the Weolhyeonri tectonic complex in the Hongseong area, SW Gyeonggi Massif. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 453-471 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W. and Koh, H.J., 2010, Petrochemistry of Garnet-bearing Metabasite in Marble at Shinri area in Hongseong and its Tectonic Implication. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 209-225 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Kwon, S., Park, S.-I., Yi, K., Santosh, M. and Ryu, I.-C., 2015, Early to Middle Paleozoic arc magmatism in the Korean Peninsula: Constraints from zircon geochronology and geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113, 866-882.
- Kim, S.W., Kwon, S., Santosh, M., Williams, I.S. and Yi, K., 2011a, A Paleozoic subduction complex in Korea: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Gondwana Research*, 20, 890-903.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubbato, D., Ryu, I.-C., Rajesh, V.J., Kim, C.-B., Guo, J. and Zhai, M., 2006, Phanerozoic high-pressure eclogite and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi block, South Korea: implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithos*, 92, 357-377.
- Kim, S.W. and Park, S.-I., 2016, Geochronological and Geotectonic Implications of the Serpentinite Bodies in the Hongseong Area, Central-western Korean Peninsula. *Economic and Environmental Geology*, 49, 249-267 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Park, S.-I., Ko, K., Lee, H.-J., Koh, H.J., Kihm, Y.H. and Lee, S.R., 2014, Tectonostratigraphic map of the Hongseong area, map 1: Solid Geology Interpretation(1:100,000). Korea Institution of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, S.W., Santosh, M., Park, N. and Kwon, S., 2011b, Forearc serpentinite mélange from the Hongseong suture, South Korea. *Gondwana Research*, 20, 852-864.
- Kim, Y.K., Lee, D.S., Song, T.K. and Kim, S.E., 1988b, Petrology of Ultramafic Nodules in Jokok-ri Basalt, Boun Area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 57-66 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-T. and Woo, Y.-K., 2005a, Serpentinization of Olivine and Pyroxene in Chungnam Serpentinites, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 26, 297-304 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-T. and Woo, Y.-K., 2005b, Color Change of Chromian Spinels of Choongnam Serpentinites, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 26, 305-312 (in Korean with English abstract).
- Koh, S.-M., Park, C.-K. and Soh, W.-J., 2006, Preliminary Study on the Formation Environment of Serpentinite occurring in Ulsan Area. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 19, 325-336 (in Korean with English abstract).
- Kwon, S., Sajeev, K., Mitra, G., Park, Y., Kim, S.W. and Ryu, I.-C., 2009, Evidence for Permo-Triassic collision in far east Asia: the Korean collisional orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 340-349.

- Kwon, S., Kim, S.W. and Santosh, M., 2013, Multiple generations of mafic-ultramafic rocks from the Hongseong suture zone, western South Korea: implications for the geodynamic evolution of NE Asia. *Lithos*, 160-161, 68-83.
- Lee, H.Y., 1995, Petrochemical Study on the Mantle Xenoliths in alkali basalts from S. Korea: P-T Regime of Upper Mantle. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 4, 104-123 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.I., Lee, M.J., Doo, K.T., Lee, M.S. and Keisuke, N., 1997, K-Ar Age Determination of the Granitic Plutions in Ulsan-Kyeongju Area, the Mid-Eastern Kyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Korea Earth Science Society*, 18, 379-386.
- Lee, M.W., 1984, Petrology of mafic inclusion in Jeju volcanic rocks. *Journal of the Geological Society of Korea*, 20, 306-313 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.H., 1994, Phase equilibria between coexisting minerals in the talc ores and process of talc formation in the Daehung Talc Deposits, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 3, 156-170 (in Korean with English abstract).
- Lefevre, N., Truche, L., Donzé, F.V., Ducoux, M., Barré, G., Fakoury, R.A., Calassou, S. and Gaucher, E.C., 2021, Native H<sub>2</sub> exploration in the Western Pyrenean Foothills. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2021GC009917.
- Leong, J.A., Nielsen, M., McQueen, N., Karolytè, R., Hillemonds, D.J., Ballentine, C., Darrah, T., McGillis, W. and Kelemen, P., 2023, H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> outgassing rates in the Samail ophiolite, Oman: implications for low-temperature, continental serpentinization rates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 347, 1-15.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G., 1994, *The Petroleum System-From Source to Trap* (Chapter 1: The Petroleum System). *American Association of Petroleum Geologists*, 60, <https://doi.org/10.1306/M60585C1>.
- Maiga, O., Deville, E., Laval, J., Prinzhofer, A. and Diallo, A.B., 2023, Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali. *Scientific Reports*, 13, 11876.
- Maiga, O., Deville, E., Laval, J., Prinzhofer, A. and Diallo, A.B., 2024, Trapping processes of large volumes of natural hydrogen in the subsurface: The emblematic case of the Bourakebougou H<sub>2</sub> field in Mali. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 640-647.
- Mainson, M., Heath, C., Pejčić, B. and Frery, E., 2022, Sensing hydrogen seeps in the subsurface for natural hydrogen exploration. *Applied Sciences*, 12, 6383.
- Malvoisin, B., Brunet, F., Carlut, J., Rouméjon, S. and Cannat, M., 2012, Serpentinization of oceanic peridotites: 2. Kinetics and processes of San Carlos olivine hydrothermal alteration: kinetics of Serpentinization. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4).
- McCullom, T.M. and Bach, W., 2009, Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 856-875.
- McCullom, T.M., Klein, F., Robbins, M., Moskowitz, B., Berquó, T.S., Jöns, N., Bach, W. and Templeton, A., 2016, Temperature trends for reaction rates, hydrogen generation, and partitioning of iron during experimental serpentinization of olivine. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 181, 175-200.
- Milkov, A.V., 2022, Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: abundance, origins and ideas for deliberate exploration. *Earth-Science Reviews*, 230, 104063.
- Moon, I.-H., Park, T.-Y. and Park, Y.-R., 2021, Petrography and Occurrence of Mafic/Ultramafic rocks and Lamprophyre in Chugok-ri, Buksan-myeon, Chuncheon-si. *Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts)*, Jeju, October 26-28, 500 p (in Korean).
- Moon, I.-H., Park, Y.-R. and Kwon, K., 2022, Geochemical characteristics and Petrography of Ultramafic/Mafic rocks and Biotite Granite in Chugokri, Buksanmyeon, Chuncheon. *Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts)*, Changwon, October 25-28, 350 p (in Korean).
- Oh, C.W., Choi, S.-G., Seo, J., Rajesh, V.J., Lee, J.H., Zhai, M. and Peng, P., 2009, Neoproterozoic tectonic evolution of the Hongseong area, the southwestern part of Gyeonggi Massif, South Korea; implication for the tectonic evolution of Northeast Asia. *Gondwana Research*, 16, 272-284.
- Oh, C.W., Choi, S.G. and Song, S.H., 2002, Metamorphic Evolution of Metabasites and Country Gneiss in Baekdong Area and Its Tectonic Implication. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 11, 103-120 (in Korean with English abstract).
- Oh, C.W., Choi, S.G., Song, S.W. and Kim, S.W., 2004, Metamorphic evolution of the Baekdong metabasite in the Hongseong area, South Korea and its relationship with the Sulu collision belt of China. *Gondwana Research*, 7, 809-816.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.G., Zhai, M., Guo, J. and Krishnan, S., 2005, First finding of eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu collision belt in China. *The Journal of Geology*, 113, 226-232.
- Oh, C.W., Lee, J.Y., Yengkhom, K.S., Lee, B.C. and Ryu, H.I., 2018, Neoproterozoic igneous activity and Permo-Triassic metamorphism in the Gapyeong area within the Gyeonggi Massif, South Korea, and their implication for the tectonics of northeastern Asia. *Lithos*, 322, 1-19.
- Oh, C.W., Rajesh, V.J., Seo, J., Choi, S.-G. and Lee, J.H., 2010, Spinel compositions and tectonic relevance of the Bibong ultramafic bodies in the Hongseong collision belt, South Korea. *Lithos*, 117, 198-208.
- Oh, C.W., Seo, J., Choi, S.G., Rajesh, V.J. and Lee, J.H., 2012, U-Pb SHRIMP zircon geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of the Neoproterozoic Baekdong ultramafic rocks in the Hongseong collision belt, South Korea. *Lithos*, 128-131, 100-112.
- Park, G., Hwang, J., Oh, J. and Lee, H., 2012, Occurrence and Mineralogy of Serpentinite from Bibong Mine in Chungyang Area, Korea. *Journal of the Mineralogical Society Korea*, 25, 9-21 (in Korean with English abstract).
- Park, G., Kim, E., Kim, S., Jeong, H.Y. and Yang, K., 2018, Petrology of peridotite xenoliths from the Neocene alkaline basalt from Baegryeong Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 75-92 (in Korean with English abstract).
- Park, K.H. and Park, H.I., 1980, On the genesis of Ulsan iron-tungsten deposits. *Economic and Environmental Geology*, 13,

- 104-116 (in Korean with English abstract).
- Park, S.D., 2001, Original rock and Serpentinization of Serpentinites on Beebong Serpentine Ore Deposits in Choongnam, Korea. MS thesis, Kongju National University, Kongju, 70 p (in Korean with English abstract).
- Park, S.-I., Kim, S.W. and Kwon, S., 2012, Biotite K-Ar ages from the Hongseong area, southwestern Gyeonggi Massif: Implications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 249-258 (in Korean with English abstract).
- Park, S.-I., Kim, S.W., Kwon, S., Thanh, N.X., Yi, K. and Santosh, M., 2014, Paleozoic tectonics of the southwestern Gyeonggi massif, South Korea: insight from geochemistry, chromian-spinel chemistry and SHRIMP U-Pb geochronology. *Gondwana Research*, 26, 684-698.
- Park, Y.D. and Yoon, H.D., 1968, Geological report of the Ulsan sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea (in Korean with English abstract).
- Prinzhofer, A., Cissé, C.S.T., and Diallo, A.B., 2018, Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 19315-19326, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>.
- Seo, J., Choi, S.-G., Kim, J.W. and Ryu, I.-C., 2019, Unique sodic-calcic skarn hosted by ultramafic rocks and albitite at the Ulsan skarn deposit, Gyeongsang Basin, South Korea. *Ore Geology Reviews*, 105, 537-550.
- Seo, J., Choi, S.-G., Oh, C.W., Kim, S.W. and Song, S.H., 2005, Genetic implications of two different ultramafic rocks from Hongseong area in the southwestern Gyeonggi Massif, South Korea. *Gondwana Research*, 8, 539-552.
- Seo, J., Oh, C.W., Choi, S.G. and Rajesh, V.J., 2013, Two ultramafic rock types in the Hongseong area, South Korea: tectonic significance for northeast Asia. *Lithos*, 175-176, 30-39.
- Seo, M., Woo, Y., Park, G., Kim, E., Lim, H.S. and Yang, K., 2016, Mantle-derived CO<sub>2</sub>-fluid Inclusions in Peridotite Xenoliths from the Alkali Basalt, Jeju Island, South Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 39-50 (in Korean with English abstract).
- Shin, H.-J., Kil, Y.-W., Jin, M.-S. and Lee, S.-H., 2006, Petrological study on upper mantle xenoliths from Asan and Pyeongtaek area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 95-113 (in Korean with English abstract).
- Song, S.H., Choi, S.G. and Woo, J.G., 1997, Genetic Implications of Ultramafic Rocks from the Bibong Area in the Kyeonggi Gneiss Complex. *Economic and Environmental Geology*, 30, 477-491.
- Song, S., 2019, Petrochemistry of the Peridotites within an Andong Ultramafic Complex and Characteristics of Asbestos Occurrences. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 32, 15-39 (in Korean with English abstract).
- Song, S., Choi, S.G., Oh, C.H., Seo, J.E. and Choi, S., 2004, Petrography and Geochemistry of the Ultramafic Rocks from the Hongseong and Kwangcheon areas, Chungcheongnam-Do. *Economic and Environmental Geology*, 37, 477-497 (in Korean with English abstract).
- Song, S. and Kang, J., 2016, Occurrences of Asbestos within Gapyeong Serpentine Mines and Characteristics of Host Rocks. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 26, 253-266 (in Korean with English abstract).
- Song, S. and Song, Y.S., 2001, Mineralogy and Geochemistry of Ultramafic Rocks from the Singok Area, Western Part of Chungnam. *Economic and Environmental Geology*, 34, 395-415 (in Korean with English abstract).
- Song, Y.S., Kim, D.Y. and Park, K.H., 2007, The overview of layered structures in mafic-ultramafic Macheon intrusion. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 16, 162-179 (in Korean with English abstract).
- Stalker, L., Talukder, A., Strand, J., Josh, M. and Faiz, M., 2022, Gold (hydrogen) rush: risks and uncertainties in exploring for naturally occurring hydrogen. *The APPEA Journal*, 62, 361-380.
- Tissot, B.P. and Welte, D.H., 2013, *Petroleum Formation and Occurrence* (ebook). Springer, Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8>.
- Truche, L., Donzé, F. V., Gskolli, E., Muceku, B., Loisy, C., Monnin, C., Dutoit, H. and Cerepi, A., 2024, A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite. *Science*, 383, 618-621.
- United Nations, 2015, Paris agreement . United Nations treaty collect, 1-27.
- Wee, S.M., Choi, S.G. and So, C.S., 1994, Preliminary study on the ultramafic rocks from the Chungnam province, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 27, 171-180 (in Korean with English abstract).
- Whattam, S.A., Cho, M. and Smith, I.E.M., 2011, Magmatic peridotites and pyroxenites, Andong Ultramafic Complex, Korea: Geochemical evidence for supra-subduction zone formation and extensive melt-rock interaction. *Lithos*, 127, 599-618.
- Woo, Y.-K., Choi, S.-W. and Park, K.-H., 1991, Genesis of talc ore deposits in the Yesan area of Chungnam, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 24, 363-378 (in Korean with English abstract).
- Woo, Y.-K. and Kang, H.J., 1999, Alteration of Serpentinites on Weolhyeon Serpentine Ore Deposits in Hongseong County, Choongnam, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 20, 189-198 (in Korean with English abstract).
- Woo, W.-K. and Lee, D.-W., 2001, Original Rocks of the Ore Deposits and their Steatitization in the Yesan Area, Choongnam, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 22, 548-557 (in Korean with English abstract).
- Woo, Y.-K. and Suh, M.-C., 2000, Petrological Study on the Ultramafic Rocks in Choongnam Area. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 21, 323-336 (in Korean with English abstract).
- Worman, S.L., Pratson, L.F., Karson, J.A. and Klein, E.M., 2016, Global rate and distribution of H<sub>2</sub> gas produced by serpentinization within oceanic lithosphere. *Geophysical Research Letters*, 43, 6435-6443.
- Yang, K., 2004, Fluid Inclusions Trapped in Xenoliths from the Lower Crust/upper Mantle Beneath Jeju Island (I): A Preliminary Study. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 13, 34-45 (in Korean with English abstract).
- Yang, K., 2016, Composition and Evolution of Lithosphere

- Beneath the Jeju Island Region (I): A Review. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 261-281 (in Korean with English abstract).
- Yang, K. and Hwang, J.-Y. and Ock, S., 2001, The genesis of Ulsan carbonate rocks: a possibility of carbonatite?. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 10, 1-12 (in Korean with English abstract).
- Yang, K. and Hwang, J.-Y. and Yun, S.-H., 2003, Petrogenesis of the Ulsan carbonate rocks from the south-eastern Kyongsang Basin, South Korea. *The Island Arc*, 12, 411-422.
- Yang, K., Nam, B., Kim, J. and Szabó, C., 2009, Textural Implications of Fine-Grained Peridotite Xenoliths in Basaltic Rocks from Jeju Island. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 22, 1-11 (in Korean with English abstract).
- Yu, J., Yang, K. and Kim, J., 2010, Textural and Geochemical Characteristics and their Relation of Spinel Peridotite Xenoliths from Jeju Island. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 227-244 (in Korean with English abstract).
- Yu, J., Yang, K., Jeong, H.Y. and Kil, Y., 2012, Petrology of pyroxenite xenoliths enclosed in basaltic rocks from Shinsari of Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 299-312 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H., Koh, J.S. and Anh, J.Y., 1998, A study on the spinel-lherzolite xenolith in the alkali basalt from eastern Cheju island, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 31, 447-458 (in Korean with English abstract).
- Zgonnik, V., 2020, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140.
- Zhang, K., He, L., Jiang, L., Jiang, S., Yu, R., Lau, H.C., Xie, C. and Chen, Z., 2024, The role of hydrogen in the energy transition of the oil and gas industry. *Energy Reviews*, 3, 100090.