

천연수소 지질 시스템과 국내 탐사 전략: 세계 주요 필드와 국내 후보 권역의 비교 리뷰

김재경[†]

에너지경제연구원 미래에너지연구소

Geological Hydrogen Systems and Exploration Strategy for Korea: A Comparative Review of Major Global Fields and Domestic Candidate Regions

JAE-KYUNG KIM[†]

Department of Future Energy Research, Korea Energy Economics Institute, 405-11 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44543, Korea

[†]Corresponding author :
fisherkjk@keei.re.kr

Received 7 April, 2026
Revised 7 April, 2026
Accepted 20 April, 2026

Abstract >> Natural hydrogen is attracting increasing attention as a potential low-carbon primary energy resource. However, the occurrence of hydrogen in the subsurface does not by itself demonstrate a recoverable accumulation. This review reassesses major global analogues and Korean candidate regions using a six-element framework comprising source, migration, reservoir, seal, preservation, and evidence maturity. The comparison indicates that Bourakébougou represents a rare example of an integrated and functioning hydrogen system, whereas the Korean candidates discussed to date remain insufficiently verified as complete systems. Current domestic efforts are still concentrated on reconnaissance-scale soil-gas surveys and geological screening. Accordingly, the immediate priority in Korea is not resource declaration, but system validation through repeatable measurements, co-gas interpretation, hydrogeologic integration, and pilot-scale subsurface testing.

Key words : Natural hydrogen(천연수소), Geological hydrogen(지질수소), Hydrogen system(수소 시스템), Exploration strategy(탐사 전략), Review(리뷰)

1. 서론

천연수소(natural hydrogen)는 지하에서 자연적으로 생성되고 이동하며 축적되는 분자 수소를 의미하

며, 최근에는 저탄소 1차 에너지원의 한 가능성으로 빠르게 부상하고 있다¹⁻³⁾. 그러나 관심의 확산과 달리, 지하 수소의 총생성 잠재량과 실제 회수 가능한 부존량 사이에는 여전히 큰 간극이 존재한다¹⁻³⁾. 전

지구적 수소 자원량 추정치가 $10^9 \sim 10^{16}$ 톤까지 폭넓게 제시된다는 사실 자체가 이 분야의 불확실성을 잘 보여준다¹⁻³. 더구나 동일한 지질 환경에서도 수소는 누출, 미생물 소비, 산화, 메탄화 때문에 쉽게 소산될 수 있다¹⁻³. 따라서 천연수소의 잠재성을 평가하려면 생성 메커니즘만을 논의할 것이 아니라, 생성된 수소가 실제로 이동·저장·밀봉·보존될 수 있는지를 포함하는 수소 시스템(hydrogen system) 전체를 검토해야 한다^{4,5}.

최근 국제 연구의 관심은 단순한 산출 보고나 지표 누출 관찰에서 벗어나, 플레이(play) 단위의 지질학적 비교와 탐사 작업흐름의 정립으로 빠르게 이동하고 있다^{4,6,7}. 말리 Bourakébougou처럼 실제 생산과 장기 재충전 가능성이 함께 논의되는 사례가 있는가 하면, 선캄브리아 순상지(shield)의 심부 균열수나 대형 퇴적분지의 용존가스처럼 생성 잠재성은 크지만 상업적 저류체로서의 성격은 아직 불분명한 사례도 적지 않다^{8,10,11}. 이 같은 대비는 수소가 어디에서 생성될 수 있는가와 어디에서 경제적 대상으로 남을 수 있는가가 서로 다른 질문임을 분명하게 보여준다^{8,10,11}.

국내에서도 선캄브리아 기반암, 중생대 화강암 관입체, 제한적인 초고철질암 분포, 주요 단층대, 제4기 화산암 분포 등 천연수소 논의의 출발점이 되는 개별 지질 요소는 확인된다¹²⁻¹⁴. 다만 이러한 요소들이 실제로 하나의 작동하는 수소 시스템으로 연결되는지는 아직 검증되지 않았으며, 탐사도 여전히 정찰(reconnaissance) 단계에 머물러 있다^{4,15}. 따라서 국내 후보 권역을 과도하게 해석하지 않으면서도 실질적인 탐사 방향을 제시하려면, 해외 대표 필드와의 비교를 통해 이미 확보된 요소와 결정적으로 부족한 요소를 구분해 볼 필요가 있다^{4,15}.

이러한 문제의식에 따라 본 리뷰는 대표적인 해외 천연수소 사례와 국내 후보 권역을 동일한 분석 틀로 비교하여 한국형 천연수소 탐사의 우선 검증 과제를 도출한다. 본 리뷰는 정책·제도보다는 지질·탐사 관점에 초점을 둔 구조화된 내러티브 리뷰(structured narrative review)이며, 분석 축은 ① 생성원(source),

② 이동 통로(migration pathway), ③ 저류 함정(reservoir and trap), ④ 밀봉(seal), ⑤ 보존(preservation), ⑥ 증거 성숙도(evidence maturity)다. 그래서 본 리뷰의 목적은 정량 점수화나 자원량 서열화가 아니라, 각 사례의 시스템 병목을 비교할 수 있는 언어로 식별하는데 있다.

2. 문헌 검토 범위와 분석 기준

앞서 언급한 바와 같이 본 리뷰는 천연수소와 관련된 모든 산출 보고를 망라하는 체계적 문헌 고찰을 지향하기보다는, 최근 국제 문헌에서 반복적으로 인용되는 대표 필드와 국내 적용성이 높은 지질·탐사 연구를 중심으로 구성된 구조화된 내러티브 리뷰다. 이때 사례 선정의 주요 기준은 ① 동일 사례가 복수의 문헌에서 재검토되었는지, ② 생성·이동·저장·밀봉·보존 가운데 둘 이상이 구체적으로 논의되었는지, ③ 한국형 탐사와 비교할 수 있는 지질 맥락을 제공하는지이다.

특히, 본 리뷰의 핵심은 유망성을 단순한 지역 소개가 아니라, 시스템 구성요소들이 얼마나 유기적으로 결합하여 있는가의 문제로 읽는 데 있다. 같은 초고철질암이 분포하더라도 어떤 지역은 심부 단층을 따라 수소가 상부 저류층으로 이동할 수 있지만, 다른 지역에서는 수소가 생성 직후 소산되거나 소비될 수 있다. 반대로 지표 누출이 관측되더라도 그것이 곧바로 심부 저류체의 존재를 의미하지는 않는다. 이는 얕고 국지적인 누출계의 신호일 수도 있으며, 심부에서 장기간 보존된 수소가 반드시 자유 가스상으로 존재하는 것도 아니다. 이러한 이유로 본 논문은 각 사례를 여섯 가지 구성요소로 나누어 비교한다(Fig. 1 참조).

첫째, 생성원은 수소를 지속적으로 공급할 수 있는 암석-유체 반응 환경을 의미한다^{3,17,18}. 대표적인 예로는 초고철질암의 사문암화, 방사성 원소가 풍부한 결정질 암석의 방사 분해, 철질 광물 또는 철 함유 탄산염과 물 사이의 산화 환원 반응, 그리고 일부 화산 단층 환경에서의 반응성 유체계가 있다^{3,17,18}.

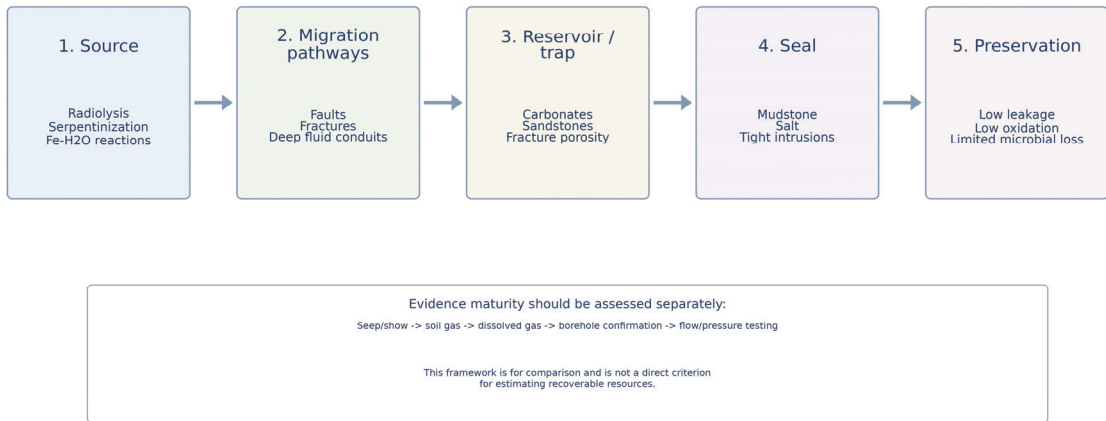


Fig. 1. Analytical framework used in this review for evaluating natural hydrogen systems
 * Source: Compiled from Liang et al. (2025)³⁾, Hasiuk & Conley (2025)⁵⁾, and Woo et al. (2025)⁴⁾.

둘째, 이동 통로는 심부 단층, 파쇄대, 균열계, 분지 경계부처럼 수소가 생성 장소에서 저장 장소로 이동할 수 있도록 하는 구조를 가리킨다^{3,6)}.

셋째, 저장공간과 함정은 수소가 집적될 수 있는 공극성 사암, 균열성 탄산염암, 카르스트 공간, 균열대, 또는 용존 가스가 유지되는 심부 유체계를 포함한다^{10,11)}.

넷째, 밀봉은 점토암, 암염, 치밀한 관입체, 불투성 탄산염, 수층과 같이 상향 누출을 지연시키는 장벽을 말한다^{3,10)}.

다섯째, 보존은 수소가 미생물의 에너지원으로 소비되거나 산화제와 반응해 제거되지 않고 남아 있을 수 있는 조건을 의미한다^{9,19,20)}. 예를 들어 선캄브리아 순상지의 고염 심부 균열수처럼 장기간 격리된 계에서는 수소와 헬륨이 오랜 시간 축적될 수 있지만, 미생물의 유입이나 메탄생성 반응이 개입하면 자유 수소는 빠르게 감소할 수 있다^{9,19,20)}.

여섯째, 증거 성숙도는 해당 사례가 지표 이상, 토양가스, 용존 가스, 시추 중 가스 검출, 반복 검증, 생산시험 가운데 어느 수준까지 도달했는지를 구분하는 지표다^{15,16)}.

또한, 본 리뷰는 산출(seep), 산출 징후(show), 이상(anomaly), 플레이(play), 저류체(accumulation), 필드(field)를 의도적으로 구분한다^{5,6,15)}. 천연수소 분야에서는 지표 분출이나 단회 토양가스 이상이 곧바로

‘발견’으로 과장되는 경우가 적지 않다^{5,6,15)}. 그러나 탐사 관점에서 의미 있는 판단 단위는 반복 가능성, 동반 가스 해석, 구조적 연속성, 저류체와 밀봉의 존재 여부까지 포함한 시스템 수준의 증거다^{5,6,15)}.

요컨대 이 분석 틀은 지역의 우열을 가리기 위한 도구가 아니라, 각 사례에서 가장 취약한 고리가 무엇인지 식별하기 위한 비교 도구다.

3. 세계 주요 천연수소 유망 필드의 공통 지질학적 조건

천연수소의 세계적 분포는 무작위적이지 않다^{8,9,21)}. 현재까지 보고된 산출 및 탐사 사례는 대체로 세 가지 지질 배경에 집중되는 경향을 보인다^{8,9,21)}.

첫째는 선캄브리아 순상지와 결정질 기반암 환경이다^{8,9,21)}. 남아프리카 카아프발 크라톤, 캐나다 실드, 동유럽 크라톤 등에서는 우리늄·토륨·갈륨을 함유한 오래된 암석과 장기간 격리된 심부 균열수가 결합하면서 방사 분해 기원의 수소와 헬륨이 축적될 수 있다^{8,9,21)}.

둘째는 초고철질암, 오피올라이트, 철질 현무암 등이 분포하는 물-암석 반응계다^{17,18)}. 이러한 환경에서는 감람석·휘석 등의 철 이온(Fe²⁺)이 물과 반응하면서 수소를 생성할 수 있고, 균열대와 변질대는 반응 전선을 확대한다^{17,18)}.

셋째는 퇴적분지 또는 화산-분지 복합계다^{11,22)}. 이 경우에는 수소 생성 자체보다 저장층, 밀봉층, 용존 가스 분포, 단층 연결성, 공극계의 연속성이 유망성의 차이를 좌우한다^{11,22)}.

생성 메커니즘의 측면에서 보면, 사문암화와 같은 물-암석 반응은 반응성이 높아서 가장 직관적인 근원으로 자주 언급된다^{7,18,23)}. 그러나 실제 탐사에서는 초고질질암의 분포 규모, 반응의 지속성, 유체 공급, 그리고 생성된 수소의 이동 가능성을 함께 검토해야 한다^{7,18,23)}. 반면 방사 분해형 메커니즘은 선암브리아 결정질 암석과 장수명 심부 염수 환경에서 장기적인 수소 공급 가능성을 시사하지만, 수소가 자유 가스상으로 분리·집적되지 않을 수 있다는 한계를 가진다^{7,18,23)}. 프랑스 Lorraine과 같은 분지형 사례는 철 함유 탄산염, 심부 유체, 분지 밀봉이 결합할 경우, 사문암화나 순상지형과는 다른 방식으로 의미 있는 수소 시스템이 형성될 수 있음을 보여준다^{7,18,23)}.

구조적 관점에서 볼 때 심부 단층대와 파쇄대는 거의 모든 유망 사례에서 반복적으로 등장한다^{3,6)}. 이는 수소가 생성되는 심부 암석과 실제로 관측되는 상부 이상 또는 저류체를 연결하는 핵심 경로이기 때문이다^{3,6)}. 크라톤(craton) 내부에서는 오래된 균열망과 심부 염수가 결합해 장기 보존을 돕고, 리프트대나 분지 경계부에서는 상향 이동과 구조적 포집 가능성을 함께 높인다²⁴⁾. 한편, 원형 함몰지, 숲 고리(forest ring), 요정의 고리(fairy circle)와 같은 지표 이상은 심부 유체 누출을 시사하는 선별 지표로 활용될 수 있지만, 이러한 형태 자체는 탐사의 출발점일 뿐 저류체 존재의 직접 증거는 아니다²⁵⁻²⁷⁾.

지구화학적 조건 역시 중요하다^{3,5)}. 수소는 생성된 뒤 다른 물질계로 빠르게 이동하거나 소비될 수 있으므로, 유망성은 어떤 암석에서 수소가 만들어질 수 있는가보다 생성된 수소가 얼마나 오래, 어떤 형태로 남아 있을 수 있는가에 더 크게 좌우된다^{3,5)}. 보고된 사례를 종합하면, 저장공간과 밀봉이 확보된 중간 심도 구간, 낮은 산화도, 제한된 미생물 활성, 반복적인 가스 공급은 상대적으로 유리한 조건으로 제시된다^{3,5)}. 반대로 미생물 활동이 강하거나 반응성 유기물이 풍

부한 환경에서는 수소가 메탄생성이나 산화 반응을 통해 빠르게 감소할 수 있다^{9,19)}. 따라서 고농도 수소가 검출되었다는 사실만으로 상업적 발견을 논할 수는 없으며, 수소의 상(자유 가스/용존 가스), 공급의 지속성, 저류체 압력, 연속성까지 함께 검토해야 한다^{9,19)}.

결국 ‘어디에서 수소가 생성되는가’와 ‘어디에서 수소가 검출되는가’ 사이의 간극을 메우는 것은 구조적 연결성이다^{4,6)}. 동일한 생성원을 갖더라도 심부 단층과 상부 저류층이 연결되지 않으면 이상(anomaly)은 산발적인 누출에 그칠 수 있고, 반대로 천부 이상(anomaly)이 있더라도 저류체가 없으면 회수 가능한 축적을 의미하지 않는다^{4,6)}. 이러한 이유로 최근 천연수소 탐사의 핵심은 생성 메커니즘의 존재를 확인하는 단계에서 나아가, 누출-용존-저류의 형태를 구분하고 이를 구조·수리 지질과 함께 해석하는 단계로 이동하고 있다^{4,6)}.

4. 해외 주요 유망 필드의 비교 검토

Table 1은 대표적인 해외 천연수소 필드를 동일한 기준으로 재배열한 것이다. 여기서 중요한 점은 각 사례의 성패를 단일 축으로 판단하지 않는다는 데 있다. 어떤 필드는 고순도 자유 수소가 확인되었지만, 지역적 특수성이 강하고, 또 다른 필드는 심부 유체와 장기 보존의 증거는 강하지만 전통적 의미의 자유 가스 저류층은 아직 확인되지 않았다^{8,10,23)}. 따라서 이 표의 목적은 ‘발견 사례’를 나열하는 데 있지 않고, 어떠한 조합이 실제 시스템으로 작동할 가능성을 높이는지를 비교할 수 있는 언어로 제시하는 데 있다^{5,6)}.

이러한 비교는 ‘가장 좋은 필드’를 고르기 위한 것이 아니라, 각 플레이가 어느 요소에서 강점을 보이고 어느 요소에서 취약한지를 드러내기 위한 것이다^{8-10,28,29)}. 말리 Bourakébougou는 생성원, 이동 경로, 저장공간, 재충전 가능성이 비교적 함께 제시된 드문 사례이며^{10,28)}, 순상지형 사례는 생성과 장기 보존의 근거는 강하지만 자유 가스 저류층의 전달성과 생산성은 별도의 문제로 남아 있다^{8,9,29)}. 프랑스 Lorraine 분지는 분지

Table 1. Representative global natural hydrogen plays reclassified by system characteristics

Play type	Representative field	Key system elements	Evidence status	Review implication
Recharging craton-basin system	Bourakébougou (Mali)	Fe-rich basement, deep-to-shallow migration pathways, karstified carbonate reservoirs, and dike-related/aquifer barriers	High-purity H ₂ , stacked reservoirs, and evidence of continued recharge	Benchmark case of an integrated system, but not a universal model transferable to every area
Radiolytic deep-brine shield system	Kaapvaal craton (South Africa) Canadian Shield (Canada)	Ancient crystalline rocks, radiolysis, deep fracture fluids, and He-N ₂ -CH ₄ association	Strong evidence for source and preservation, but mixed fluid phases and microbial effects coexist	A strong source alone does not ensure producible free-gas accumulations
Coal-basin / Fe-carbonate system	Lorraine Basin (France)	Siderite/ankerite-bearing coal measures, deep groundwater, and a basin-scale seal	Reported increase in dissolved H ₂ with depth; deeper high-concentration intervals remain under verification	Basin plays may first appear as dissolved-gas systems before free gas is confirmed
Frontier sedimentary basin	Songliao Basin (China)	Large basin, deep structures, non-hydrocarbon gases, and drilling-based H ₂ co-gas indications	H ₂ and co-gas reports exist, but reservoir continuity and deliverability remain unverified	Gas shows must be distinguished from verified accumulations
Carbonate-basement re-entry play	Ramsay-1 (Australia)	Basement-source hypothesis, faults/joints, and porous limestone above basement	Historic high-purity H ₂ reports and recent re-detection of H ₂ /He during drilling	Archived well data can revive the play, but pressure behavior, continuity, and scale remain unresolved

* Source: Geological and system-level interpretations in Table 1 are based primarily on peer-reviewed literature^{8-10,21,23,28,30-32}. Government, company, and specialist-media materials were cited only to indicate publicly available exploration status for frontier plays^{11,22,27}.

형 시스템에서 깊이 효과와 밀봉 구조가 어떻게 작동할 수 있는지를 보여 주지만^{11,23}), 호주 Ramsay-1 과 같은 재탐사 사례는 역사 기록의 재현성과 저류체 연속성 검증이 핵심이다^{22,30}).

4.1 말리 Bourakébougou: 천연수소 시스템이 실제로 작동하는 대표 사례

말리 Bourakébougou는 현재까지 가장 자주 인용되는 천연수소 필드다^{10,33}). 이 사례의 의의는 단순히 고순도 수소가 검출되었다는 사실에 있지 않다^{10,33}). 서아프리카 순상지 기반암, 철이 풍부한 기저암, 신원생대 퇴적층, 카르스트화된 탄산염 저류층, 그리고 상부 암맥성 차폐가 하나의 연속적인 시스템으로 연결된다는 점이 핵심이다^{10,33}). Bourakébougou에서는 앞

은 탄산염 저류층뿐 아니라 심부 사암과 균열 기반암에서도 수소가 보고되었고, 최소 다섯 개의 저류체로서 다른 심도에서 중첩될 수 있다는 해석이 제시되었다^{10,28}). 이는 단일 주머니형 포집이라기보다 광역적인 공급-이동-포집 체계의 존재를 시사한다^{10,28}).

이 사례에서 또 하나 주목할 점은 재충전 개념이다¹⁰). Bourakébougou에서는 생산에 따라 고갈되는 정적 매장량 개념보다, 심부에서 지속적으로 생성된 수소가 상부 구조에 재공급되는 동적 시스템이라는 해석이 제시됐다¹⁰). 물론 이러한 재충전 개념은 장기 생산 자료를 통해 추가로 검증될 필요가 있다¹⁰). 그럼에도 Bourakébougou 사례가 보여주는 핵심은 천연수소 탐사에서 생성원과 저장층을 분리해 볼 수 없다는 점이다. 국내 후보지와 비교할 때 그 의미는 고순도 수소가 있었다는 결과 자체보다, 생성원-이동

경로·저류층·밀봉·수리학적 차폐가 동시에 관찰된 기준 사례라는데 있다.

또한, 이 사례가 자주 인용되는 이유는 고순도 수소 때문만이 아니라, ‘재충전할 수 있는 시스템’이라는 개념을 탐사 언어로 제시했기 때문이다^{5,10)}. 다만, 이 사례를 한국에 곧바로 투영하는 것은 적절하지 않을 수 있다. 말리는 서아프리카 순상지, 탄산염 저류층, 암맥성 밀봉, 장기간 재공급이라는 특수한 조합을 갖는다^{5,10)}. 따라서 한국 후보지는 오히려 일부 순상지형 심부 유체계, 분자-기반암 전이형, 또는 개척 단계 플레이에 더 가깝게 해석하는 편이 보수적일 수 있다.

4.2 남아공 카아프발 크라톤(Kaapvaal craton)과 캐나다 실드(Canadian Shield): 강한 생성 잠재성과 장기 보존 가능성이 제시된 사례

남아프리카공화국의 카아프발 크라톤(Kaapvaal craton)과 캐나다 실드(Canadian Shield)는 천연수소가 반드시 전통적인 자유 가스전 형태로만 존재하지는 않음을 보여준다^{19,29,34)}. 이들 지역에서는 우리나라이 풍부한 오래된 암석, 수억 년에서 수십억 년 규모로 고립된 염수, 헬륨·질소·메탄과 동반되는 수소, 그리고 방사 분해 및 물-암석 반응으로 장기간 공급된 환원성 유체가 반복적으로 보고되었다^{19,29,34)}. 특히 캐나다 실드(Canadian Shield)의 Abitibi Greenstone Belt와 Kidd Creek 사례, 남아프리카공화국 Mponeng 및 Moab Khotsong 사례는 고농도 용존 수소와 극도로 오래된 심부 유체가 공존할 수 있음을 잘 보여준다^{8,21)}.

그러나 이러한 순상지형 사례가 다음과 같은 이유로 곧바로 대규모 상업적 자유 수소전으로 이어지는 것은 아니다^{9,20)}. 첫째, 수소가 물에 용존된 상태이거나 균열수 내부의 가스 조합으로 존재하는 경우가 많아, 전통적 가스전과 동일한 생산 개념을 적용하기 어렵다^{9,20)}. 둘째, 같은 심부 환경에서도 미생물 반응이 개입하면 생성된 수소의 상당 부분이 메탄으로 전환될 수 있다^{9,20)}. 셋째, 오래된 결정질 기반암은 생성 원과 보존 조건 측면에서는 매력적이지만, 경제적 생산을 좌우하는 전달성과 연속 저류체의 존재는 전혀

다른 차원의 문제다^{9,20)}. 이 점은 한국의 기반암-화강암 권역을 해석할 때 특히 중요하다. 국내에서 방사 분해형 가능성이 논의된다고 해서 Bourakébougou와 같은 얕은 고순도 자유 가스 저류층을 곧바로 기대하기보다는, 우선 순상지형 심부 유체계와 유사한 생성 및 장기 보존 가능성이 있는지부터 따져보아야 한다.

4.3 프랑스 Lorraine 분지: 분지형 천연수소 부존 가능성과 심도 효과

프랑스 Lorraine 분지는 천연수소 논의가 초고철 질암이나 순상지에만 한정되지 않음을 보여주는 사례로 자주 언급된다^{11,23)}. 이 지역은 후기 석탄기 퇴적층과 석탄층, 철 함유 탄산염(예: siderite, ankerite), 상부 피복층, 기존 광산 및 시추 인프라가 결합한 분지형 후보지로 이해될 수 있다. 다만 수소 관련 해석의 일부는 진행 중인 자료 공개와 회의 발표에 의존하므로, 본 리뷰에서는 Lorraine을 ‘분지형 수소 시스템 가설을 시험하는 사례’로 한정해 활용한다.

Lorraine 분지의 학술적 의미는 두 가지로 정리된다. 첫째, 수소는 반드시 자유 가스상으로만 발견될 필요가 없으며, 심부 유체와 분지 밀봉 구조 속에서 용존 가스 분포로 먼저 포착될 수 있다는 점이다. 둘째, 철 함유 탄산염과 분지형 밀봉이 결합할 경우, 수소의 생성과 보존이 퇴적분지 맥락에서도 함께 논의될 수 있다는 점이다. 그러나 심도 증가에 따른 고농도 구간과 회수 가능성은 아직 검증 단계에 있으므로, Lorraine은 확정적 성공 사례라기보다 분지형 수소 시스템 가설을 시험하는 선행 사례로 이해하는 편이 타당하다.

4.4 중국의 분지형 프런티어 플레이와 호주 Ramsay-1: 지질학적 유망성과 현장 검증 사이의 간극

중국의 분지형 프런티어 플레이와 호주 Ramsay-1은 지질학적 개연성만으로는 천연수소 플레이를 확정할 수 없음을 잘 보여준다^{31,32)}. 중국의 경우 Dou 등³²⁾의 지적처럼 Tarim 등 대형 분지의 잠재성이 폭넓게

논의되고 있지만, 실제 현장 근거가 상대적으로 구체화된 사례는 Songliao 분지의 시추 기반 수소-동반 가스 보고³¹⁾에 한정된다. 더욱이 이도 역시 독립적인 저류체 연속성, 압력 거동, 생산성 검증으로 이어지지 않았으므로, 분지형 플레이에서는 ‘검출’과 ‘축적 검증’을 구분해 해석할 필요가 있다. 이 사례는 향후 국내에서 헬륨, 질소, 비탄화수소 이상이 관찰되더라도 이를 곧바로 수소전의 증거로 확대 해석하는 안 된다는 점을 시사한다.

반면 호주 Ramsay-1은 역사적 시추 기록과 현대적 재탐사가 결합한 사례다^{22,27)}. 요크 반도 남부에서는 1930년대 시추 기록에서 고순도 수소 산출이 언급되었고, 2020년대 재평가 과정에서 탄산염암-기반 암-단층 조합이 다시 주목받았다^{22,27)}. 최근 시추에서는 단층 파쇄대와 다공성 석회암 구간에서 수소와 헬륨 검출이 보고되며, 지질학적 가설이 현대 자료로 재시험 되는 단계에 들어섰다^{22,30)}. 그러나 이 역시 장기 압력 거동, 저류체 연속성, 경제성은 아직 남은 과제다^{22,30)}. 결국 중국의 분지형 프런티어 플레이와 Ramsay-1이 공통으로 보여주는 것은, 천연수소 탐사에서 유망한 조건과 검증된 시스템 사이에 상당한 간극이 존재한다는 사실이다^{22,30,32)}.

4.5 해외 사례의 공통 시사점

해외 대표 사례를 종합하면, 상업적 관점에서 의미 있는 천연수소 시스템은 몇 가지 공통 특징을 지닌다^{5,6,10)}. 첫째, 생성원은 일회성 반응이 아니라 지속적 충전 가능성을 가져야 한다^{8,10)}. 둘째, 심부 생성 영역과 상부 저류체를 연결하는 구조가 실제로 작동해야 한다^{3,6)}. 셋째, 저장공간과 밀봉 능력은 누출 및 소비 속도를 상회할 만큼 충분해야 하며, 동시에 지표 이상과 심부 시스템이 연결되는 방식이 재현할 수 있어야 한다^{23,30)}. 이 요소 가운데 하나라도 약하면 수소는 지표 누출이나 심부 미량 이상에 머물 가능성이 크다^{10,16)}.

또한, 사례마다 핵심 불확실성의 성격은 서로 다르다^{9,10,23,30)}. 말리에서는 저류체 압력과 장기 재충전

율이 핵심 쟁점이며^{10,28)}, 순상지형 사례에서는 전달성과 자유 가스상 존재 여부가 핵심이다^{8,9,29)}. 프랑스 Lorraine은 분지형 시스템의 심도 효과와 분지 연속성이, 호주 Ramsay-1과 같은 재탐사 사례는 역사 기록의 재현성과 저류체 지속성이 각각 핵심 쟁점이다^{11,23,30)}. 따라서 한국의 탐사 전략 역시 특정 해외 사례를 기계적으로 모방하기보다, 국내 권역이 어느 플레이 유형과 가장 유사한지 먼저 판정한 뒤 그 유형에 맞는 검증 절차를 설계하는 방식이어야 한다^{4,6)}.

5. 국내 잠재 유망 권역의 비교 검토

국내 잠재 권역에 대한 논의는 대체로 수소가 생성될 수 있는 지질 요소의 존재 여부에 집중됐다. 그러나 해외 사례와 견주어 보면, 국내의 핵심 과제는 생성 잠재성 자체보다 개별 요소들이 실제로 하나의 수소 시스템으로 결합하는지를 검증하는 데 있다. Table 2는 국내에서 반복적으로 언급되는 네 개 권역을 동일한 분석 틀로 비교한 것이다. 이때 비교의 초점은 자원량의 순위를 매기는 데 있지 않고, 각 권역에서 무엇이 상대적으로 강하게 제시되며 무엇이 가장 덜 검증되었는지를 밝히는 데 있다.

국내 네 권역을 한 표에 놓았다고 해서 이들이 동일한 유형의 플레이인 것은 아니다. 포천-가평은 기반암-단층-철 광화작용-초고철질암의 조합을 시험하는 복합형 후보지이고, 강원권은 방사 분해형-화산암형-광화대형 가설이 병존하는 다중 권역이다. 안동-영양은 생성원과 분지형 저장 잠재를 함께 논의할 수 있는 전이형 시스템에 가깝고, 제주 및 남동부는 생성 메커니즘 연구와 기준선 구축에 강점이 있는 화산-분지형 후보지다. 따라서 비교의 핵심은 유망성의 절댓값이 아니라, 각 권역에서 무엇을 먼저 검증해야 하는가에 있다.

5.1 경기 북부(포천)-가평 권역: 복합 생성 가설이 공존하는 후보지

경기 북부 포천-가평 권역은 국내 후보지 가운데

Table 2. Comparative assessment matrix for the major candidate regions discussed in Korea

Region	Geological premise	Main system bottleneck	Current evidence status	Review implication
Pocheon-Gapyeong	Precambrian basement, granite intrusions, Fe mineralization, possible ultramafics, and fault zones	Storage and seal constraints appear more limiting than source and migration	Regional geology, ore-deposit studies, spring/geochemical data, and structural interpretations are available	Good candidate for an integrated pilot combining gas, groundwater, and structural data
Gangwon region	U-bearing groundwater near granites, volcanic strata of lava plateaus, and regional fault zones	Strong heterogeneity; multiple hypotheses coexist and resist reduction to a single play	Partial evidence from radiological/hydrogeologic anomalies, volcanic stratigraphy, and tectonic data	Sub-plays should be separated rather than evaluating the region as a single unit
Andong-Yeongyang	Ultramafic rocks near the basement-basin transition, fault structures, and sedimentary-basin evolution	Conceptually well balanced, but direct gas evidence is still limited	Ultramafic distribution, basin evolution, and structural data are relatively well constrained	High-priority candidate for an integrated pilot
Jeju and southeastern volcanic-bas in domain	Basaltic rocks, recurrent volcanism, and volcanoclastic-sedimentary interbeds	Charge persistence and seal continuity remain more uncertain than generation potential	Volcanic stratigraphy and petrophysical studies exist, but direct H ₂ indicators are very limited	Better suited to process studies and baseline surveys than to discovery-oriented exploration

* Source: Reconstructed from Kee et al. (2019)¹², Kim et al. (2021)¹³, Hwang (2018)³⁵, Lee et al. (2021)³⁶, Hwang & Woo (2009)³⁷, Chae et al. (2024)¹⁴, Seo et al. (2015)³⁸, Brenna et al. (2012)³⁹, You et al. (2024)⁴⁰, Seo et al. (2021)⁴¹, Lee et al. (2020)⁴², Kim (2022)⁴³, and Woo et al. (2025)⁴.

가장 복합적인 지질 배경을 지닌 지역 중 하나다^{12,41}. 포천 일대에는 선캄브리아 결정질 기반암과 화강암 관입체가 분포하고, 일부 지역에서는 철 광화작용과 단층대의 연관성이 논의되어 왔다^{12,41}. 또한 국내 광천·온천수에 대한 전국 규모 지화학 분석에서는 쥐라기 화강암과 단층대 주변에 CO₂가 풍부한 열수 산출이 집중되는 경향이 보고되었는데, 이는 구조선이 심부 유체의 이동 통로로 기능할 가능성을 시사한다³⁶. 여기에 가평 일대의 사문암화 된 초고철질암체는 방사 분해형 가능성과 더불어 사문암화 기반 생성 가능성까지 함께 검토할 수 있게 한다^{14,43}.

이 권역의 장점은 생성 가설이 단일하지 않다는 점이다. 기반암-화강암에 의한 방사 분해 가능성, 철 광화대에서의 산화 환원 반응 가능성, 초고철질암의 사문암화 가능성이 비교적 좁은 공간 안에서 중첩될 수 있다. 그러나 동시에 가장 큰 약점도 분명하다. 현재까지 제시된 근거는 대부분 생성과 구조 경로에 관한 간접 자료이며, 저장공간과 밀봉의 실체를 직접 보여주는 자료는 부족하다. 즉 포천-가평 권역은 반응할

수 있는 물질과 유체 이동 통로 측면에서는 비교적 설득력이 크지만, 생성된 수소가 어느 층서 또는 구조에 포집되어 유지될 수 있는지에 대해서는 자료 공백이 크다. 따라서 이 지역은 단순 토양가스 조사보다는 구조선 인접 용존 가스·지하수·천부 시추를 결합한 통합 검증이 필요한 후보지로 해석하는 편이 타당하다.

5.2 강원권: 복수의 생성 메커니즘이 제안되는 권역

강원권은 영서의 철원 용암대지, 영동의 양양 철광상, 그리고 그 사이의 변성암대와 화강암대를 포괄하는 넓은 개념적 권역이다^{13,18,35,42}. 이 지역의 특징은 하나의 명확한 수소 플레이라기보다 서로 다른 생성 가능성이 병렬적으로 공존한다는 데 있다^{13,18,35,42}. 옥천대 인접 변성암-화강암 권역에서는 우리나라 이상 지하수와 방사성 광물 지시가 보고되어 방사 분해형 수소 생성 가능성을 논의할 수 있고^{13,35}, 철원-연천의 용암대지는 현무암질 광물과 물-암석 반응이라는

별도의 가설을 제시한다^{18,42}). 여기에 양양 지역의 철산화물-인회석 광상은 철질 광물과 전단대 구조가 결합한 또 다른 유형의 후보 조건을 제공한다³⁸).

이처럼 강원권의 강점은 잠재 메커니즘의 다양성에 있지만, 탐사 관점에서는 바로 그 점이 약점이 되기도 한다. 같은 권역 안에 방사 분해형, 화산암형, 철 광화대형 가설이 동시에 존재하면 단일한 탐사 기준으로 지역 전체를 평가하기 어렵기 때문이다. 따라서 강원권을 하나의 유망 필드로 묶어 해석하는 접근은 피할 필요가 있다. 오히려 우리나라 이상 지하수와 기반암-화강암 경계부, 철원 용암대지의 현무암-퇴적층 조합, 양양 전단대 및 철광화대처럼 하위 플레이로 세분한 뒤, 동일한 측정 프로토콜로 가스-수질-구조 자료를 비교하는 전략이 더 타당하다. 결국 강원권은 자원성 평가에 앞서, 서로 다른 생성 메커니즘 가운데 무엇이 실제 현장 신호와 연결되는지를 판별해야 하는 시험장에 가깝다.

5.3 경상북도 중·북부(안동-영양) 권역: 생성원과 저장 잠재가 함께 논의되는 권역

경상북도 중·북부, 특히 안동-영양 소분지 권역은 국내 후보지 가운데 생성원과 저장 잠재가 상대적으로 함께 논의되는 지역이다^{14,37,43}). 안동 일대에는 초고철질암체가 분포해 사문암화 기반 수소 생성 잠재성이 제기되어 왔고^{14,43}), 영양 소분지는 신장, 침강, 화성활동, 퇴적이 결합한 분지 진화사가 정리되어 있어 구조선과 분지 퇴적체가 공간적으로 결합할 수 있는 배경을 제공한다³⁷). 즉 이 지역은 근원암-이동 경로-저장층이라는 세 요소를 동시에 검토할 수 있다는 점에서, 단순한 기반암 후보지보다 탐사 설계상 이점이 크다⁴⁾.

물론 이 권역에서도 직접적인 수소 발견 증거는 아직 부족하다. 그러나 해외 사례와의 상대 비교에서 보면, 안동-영양 권역은 말리나 Ramsay-1처럼 특정 저류층이 확인된 단계는 아니더라도, 단순한 생성 가능성을 넘어 구조·층서·근원암을 함께 묶어 검토할 수 있는 드문 국내 후보지이다. 다시 말해 이 지역의

강점은 ‘가장 유망하다’는 선언에 있는 것이 아니라, 파일럿 탐사를 설계할 때 수소 시스템 요소 간 연결성을 비교적 명확하게 시험할 수 있다는 데 있다. 따라서 국내 첫 통합형 파일럿 권역을 선정한다면, 안동-영양은 포천-가평과 함께 우선 검토할 가치가 큰 지역으로 평가된다.

5.4 제주도 및 남동부 화산-분지 권역: 생성 가설보다 보존과 포집 검증이 중요한 권역

제주도와 남동부 화산-분지 권역은 화산암 기반 수소 생성 가능성을 검토하기에 가장 직관적인 국내 지질 배경을 제공한다³⁹). 제주 화산체는 지속된 화산 활동으로 형성되었고, 현무암질-조면암질 조성과 풍부한 철질 광물을 포함한다³⁹). 또한 용암류 사이에 역암, 화산 쇄설성 퇴적물, 각력암 등이 반복적으로 협재되어 층상 대비가 발달하므로, 이론적으로는 저장-밀봉 조합을 검토할 수 있다⁴⁰). 남동부의 경상분지 역시 반복적인 화성활동, 일부 금속 부화대, 층간 현무암 분포 등을 고려할 때 화산-분지형 플레이의 개념적 출발점이 될 수 있다^{40,43}).

그러나 제주와 남동부 권역을 해석할 때는 생성 가능성과 자원성을 특히 엄격히 구분해야 한다. 화산암의 존재는 반응성 광물과 열수 변질 가능성을 시사하지만, 그것만으로 장기적인 수소 공급과 포집이 보장되지는 않는다. 오히려 이 권역에서 핵심은 저장 공간의 연속성, 층상 밀봉의 실질적 효과, 누출-산화 경로, 그리고 지하수 유동과의 관계를 검증하는 데 있다. 따라서 제주와 남동부는 당장 자원량을 기대하는 권역이라기보다, 화산암 기반 생성과 분지형 저장이 실제로 결합할 수 있는지를 시험하는 과정 중심 연구 및 기준선 조사에 더 적합한 후보지로 해석하는 편이 신중하다.

5.5 국내 후보지 비교의 종합 해석

Table 2에서 보듯 국내 네 권역은 모두 일정한 생성 가설이 있지만, 직접적인 현장 증거와 밀봉-저류

Table 3. Major exploration and research streams relevant to natural hydrogen in Korea

Category	Main example	Methods / data	Main implication	Current limitation
Public-enterprise reconnaissance	KNOC onshore soil-gas screening and probe development (2022-2023)	Prospect screening, probe design, and field-application reports	Shows that Korean natural hydrogen exploration has entered an operational reconnaissance stage	Public information alone cannot substantiate a discovery
Academic field measurements	Lee et al. (2025) ¹⁵⁾	Near-surface soil-gas surveys with a portable GA5000 and time-lapse monitoring after boring	Shows that artificial hydrogen may appear immediately after drilling and decay rapidly over time	Single measurements remain insufficient without repeatability, control sites, and co-gas data
Geological source screening	Kim (2022) ⁴³⁾ Chae et al. (2024) ¹⁴⁾	Integrated review of granite/radiolysis potential and ultramafic-serpentinization potential	Provides concrete source candidates and regional screening criteria	Does not yet demonstrate migration, trapping, or preservation
System-oriented review	Woo et al. (2025) ⁴⁾	Review of hydrogen-system concepts and exploration methodologies	Shifts the Korean discussion from source-centered thinking to system validation	Needs standardized datasets and field implementation

* Source: The geological interpretation in Table 3 is based on peer-reviewed literature, and news articles were cited only to confirm publicly reported KNOC activities^{4,14,15,43-46)}.

* Abbreviations: KNOC : Korea National Oil Corporation; GA5000 : portable gas analyzer

검증 수준은 전반적으로 낮다^{4,12,14,35)}. 다시 말해 한국의 천연수소 연구는 생성원에 대한 논의가 풍부했지만, 시스템 수준의 입증은 부족한 단계에 가깝다^{4,15)}. 이 평가는 비판적 결론이라기보다, 탐사의 우선순위를 명확하게 보여주는 진단이다^{5,6)}. 현재 국내 권역을 Bourakébougou 형의 얇은 고순도 자유 가스전 기대치에 맞추어 해석하는 것은 무리가 있으며, 오히려 순상지형 심부 유체계 또는 개척 단계 분지 플레이와의 유사성이 더 크다^{8,10,23)}.

또한 후보지 비교가 곧바로 서열화로 이어져서는 안 된다⁵⁾. 본 리뷰가 포천-가평과 안동-영양을 통합형 파일럿의 우선 검토 후보로 제안하는 근거는 네 가지다^{12,14,37)}. 첫째, 두 권역 모두 생성원 가설이 복수로 제시되거나, 생성원과 구조선이 같은 공간 틀 안에서 함께 논의될 수 있다^{12,14,37)}. 둘째, 단층대, 분지 경계, 광화대, 수리지구화학 등 생성원-이동 경로 결합(source-pathway coupling)을 시험할 보조 자료가 상대적으로 축적되어 있다^{36,38,41)}. 셋째, 남은 불확실성의 핵심이 ‘생성원이 있는가’보다 ‘어디에 저장-밀봉이 가능한가’에 있어, 파일럿 조사로 줄일 수 있는 유형의 불확실성에 가깝다⁴⁾. 반면 강원권은 하위 플

레이의 분리가 먼저 이루어져야 하고^{35,42)}, 제주·남동부는 기존선 자료와 과정 연구의 비중이 더 크다^{39,40,43)}. 결국 국내 후보지 비교의 핵심 성과는 어디가 가장 좋은가를 가리는 데 있지 않고, 각 지역에서 무엇을 먼저 입증해야 하는가를 선명하게 드러내는 데 있다^{4,6)}.

6. 국내 주요 탐사·연구 사례의 시사점

국내 탐사 및 연구 사례는 아직 많지 않지만, 한국형 천연수소 탐사가 어디까지 진전되었는지를 보여준다는 점에서 중요하다^{4,15)}. Table 3은 공기업의 현장 측정, 학술적 현장 측정, 지질 잠재성 정리, 수소 시스템 개념화라는 네 갈래의 흐름을 정리한 것이다^{4,15)}. 이 표가 전달하는 핵심 메시지는 분명하다^{4,15,16)}. 국내 연구는 더 이상 개념 검토에만 머물러 있지 않지만, 아직 발견 단계라기보다 정찰과 검증 설계 단계에 가깝다^{4,15,16)}.

국내 사례를 해석할 때 가장 경계해야 할 점은 탐사 활동의 존재 자체와 자원 발견을 동일시하는 것이다. 세계적으로도 천연수소 분야에서는 산출 보고, 정찰 탐사, 재탐사 시추, 생산성 평가가 빠르게 혼재

됐다. 따라서 한국의 현재 단계는 ‘없다/있다’의 이분법으로 접근하기보다, 어떤 증거가 어느 수준까지 축적되었는지를 계단식으로 읽는 편이 적절하다.

6.1 공기업 주도 정찰 탐사와 현장 측정의 의미

국내에서 가장 눈에 띄는 변화는 한국석유공사(KNOC)를 중심으로 한 현장 측정 시도다^{44,46)}. 공개 기사와 특히 관련 보도에 따르면, KNOC는 2022년 이후 국내 육상 후보지에서 토양가스 기반 수소 탐사를 추진했으며, 2023년에는 천연수소 탐침장치 관련 특허 출원 사실이 공개되었다. 이러한 움직임의 의의는 국내에서 천연수소가 정책 담론이나 해외 사례 소개의 수준을 넘어 실제 현장 탐사 대상으로 다루어지기 시작했다는 데 있다.

다만 공기업 주도 탐사의 초기 성과는 신중하게 해석할 필요가 있다^{44,46)}. 현재 공개된 정보만으로는 측정 지점의 지질 배경, 반복성, 기상 조건, 공시험(blank), 동반 가스 조성, 시간에 따른 농도 변화 등을 충분히 검토하기 어렵다. 따라서 이러한 성과는 발견이라기보다 탐사 가능성을 보여주는 운영적 진전으로 읽는 편이 타당하다^{5,16)}. 요컨대 KNOC 사례의 가장 큰 의미는 특정 지점의 농도 자체보다, 국내에서 현장 측정을 전제로 한 탐사 프로그램이 실제로 실행 가능하다는 점을 보여준 데 있다^{4,15)}.

6.2 Lee 등¹⁵⁾ 연구의 시사점: 단회 측정 해석의 한계

국내 천연수소 현장 측정 해석에서 가장 중요한 기여 가운데 하나는 Lee 등¹⁵⁾에 제시되어 있다. 이 연구는 휴대형 가스분석기(GA5000)를 이용해 지표 하부 약 1m의 토양가스를 측정하는 국내 현장 절차를 정리했고, 천공 직후의 마찰·열·압력에 의해 인공 수소(artificial hydrogen)가 일시적으로 생성될 수 있음을 보고하였다¹⁵⁾. 즉, 토양가스에서 수소가 검출되더라도 그것이 곧바로 자연 기원의 지속적 누출을 의미하지 않으며, 시간 지연 후 재측정과 배경적 비교가

필수적이라는 뜻이다.

이 결과는 국내 천연수소 탐사에서 방법론적 기준선을 제시한다. 지금까지 한국에서 가장 부족했던 것은 고농도 이상 자체가 아니라, 이상 신호를 자연 기원으로 판정하는 절차였다. Lee 등¹⁵⁾은 국내 토양가스 탐사에 반복 측정, 시간 경과 관찰, 공정 교란 변수의 통제, 동반 가스 분석이 반드시 포함되어야 함을 분명히 보여준다. 따라서 앞으로 국내 현장 자료는 단순 농도 그 자체보다, 반복성과 해석 가능성을 기준으로 평가되어야 한다.

특히 향후 국내 탐사에는 동반 가스와 불활성 기체 정보가 더 적극적으로 포함될 필요가 있다^{8,15,29)}. 수소 농도만으로는 자연 기원, 표층 교란, 미생물 반응, 인공 수소를 구분하기 어렵기 때문이다^{8,15,29)}. 헬륨, 질소, 메탄, 이산화탄소, 산소, 그리고 가능하다면 동위원소·희가스 조성은 근원 추정과 저장 환경 해석의 신뢰도를 크게 높여준다^{8,15,29)}. 이는 방사 분해형 심부 유체 사례와 분지형 사례를 해석할 때 특히 중요하다^{8,15,29)}.

6.3 지질 잠재성 검토와 시스템 개념화의 진전

국내 학술 연구는 크게 두 축으로 전개되어 왔다⁴⁾. 하나는 잠재적 근원암과 후보 권역을 정리하는 축이고, 다른 하나는 해외 사례를 포함한 수소 시스템 개념과 탐사 방법론을 정리하는 축이다⁴⁾. Chae 등¹⁴⁾은 국내 초고철질 사문암 암체의 분포와 특성을 체계적으로 정리하여 홍성, 안동, 울산, 가평 등 주요 노출 지역을 제시했고, Kim⁴³⁾은 대륙 암석권에서 무기 자연 수소의 성인과 부존 형태를 정리하며 국내 지질 요소를 국제적 생성 메커니즘과 연결했다⁴⁾. 이러한 작업은 국내 탐사의 출발점을 막연한 가능성에서 구체적인 지질 대상으로 좁혀 주었다는 점에서 의미가 크다⁴⁾.

한편, Woo 등⁴⁾은 수소 시스템과 탐사 방법론을 정리함으로써, 국내 논의를 생성 메커니즘 중심에서 시스템 중심으로 전환하는 데 중요한 역할을 했다. 이 연구의 의의는 새로운 산출 사례를 제시했다는 데

Table 4. Evidence ladder for interpreting natural hydrogen claims in Korea

Evidence stage	Minimum evidence	Allowed interpretation	Remaining uncertainty
1. Geological premise	Conceptual evidence for source, structure, and hydrogeology	A candidate play can be defined	Actual hydrogen occurrence and system functionality remain unverified
2. Near-surface anomaly	One-off H ₂ anomaly in soil gas or dissolved gas	May be interpreted as an anomaly requiring follow-up	Natural origin and repeatability remain unconfirmed
3. Repeated anomaly with context	Repeat measurements, control sites, co-gas data, and structural context	A repeatable seepage/exsolution signal may be discussed	Deep source, reservoir, and volume remain unconfirmed
4. Subsurface system indication	Borehole, groundwater, or deep-gas data with reservoir-seal interpretation	An active play may be considered to have entered the validation stage	Accumulation size, pressure behavior, and deliverability remain unconfirmed
5. Accumulation /field stage	Sustained concentrations, pressure behavior, reproducibility, and volumetric/flow tests	Accumulation- or field-level claims become defensible	Commerciality, environmental performance, and development feasibility remain separate questions

* Source: Reconstructed from Hasiuk & Conley (2025)⁵, Levy et al. (2023)⁶, Maiga et al. (2023)¹⁰, Lee et al. (2025)¹⁵, and Woo et al. (2025)⁴.

있기보다, 한국이 앞으로 어떤 자료를 우선하여 축적해야 하는지에 대한 판단 기준을 제공했다는 데 있다. 다시 말해 국내 학술 연구는 아직 발견 단계에 이르지 않았지만, 적어도 탐사의 언어와 분석 틀을 갖추기 시작한 단계라고 평가할 수 있다.

6.4 국내 사례에서 확인되는 공통 한계

Table 3을 종합하면 국내 탐사 및 연구의 공통 한계는 네 가지로 요약된다^{4,15}. 첫째, 전국 단위에서 공유할 수 있는 표준 측정 프로토콜이 아직 충분히 정립되어 있지 않다¹⁵. 둘째, 토양가스, 용존 가스, 구조지질, 수리 지질, 암석·광물 자료가 하나의 시스템으로 충분히 통합되어 있지 않다^{4,14}. 셋째, 반복 관측과 시계열 자료가 부족해 자연 기원 누출과 일시적 교란을 구분하기 어렵다¹⁵. 넷째, 시추공 또는 심도별 자료가 제한적이어서 저장공간과 밀봉을 직접 검증하기 어렵다^{5,16}.

따라서 한국의 천연수소 연구는 존재 여부를 단번에 판정하는 방식이 아니라, 불확실성을 단계적으로 줄여 가는 탐사 모델을 채택해야 한다^{5,6}. 물론 지금까지의 성과는 결코 작지 않다^{4,15}. 다만 그 의미는 자원 발견의 확정에 있다기보다, 앞으로 어떤 자료가

더 축적되어야 비로소 발견 주장이 가능해지는지를 분명하게 보여주었다는 데 있다^{15,16}.

6.5 국내에서 천연수소 발견을 주장하기 위한 최소 증거 수준

Table 4는 국제 사례와 국내 논의를 바탕으로, 한국에서 천연수소 관련 주장을 단계별로 해석하기 위한 최소 증거 틀이다^{4,6,15}. 이 기준으로 보면 국내 사례 대부분은 1~3단계에 분포하며, 특정 권역 일부만 4단계 진입 가능성을 시험할 수 있는 수준이다^{12,14,15,37}. 이는 한국 연구가 뒤처졌다는 의미가 아니라, 지금 필요한 투자의 성격이 무엇인지를 분명하게 보여준다^{5,6}. 즉 전국적 낙관론을 확대하기보다, 반복 측정과 통합 해석이 가능한 소수의 파일럿 지역을 설정해 증거 수준을 한 단계씩 끌어올리는 접근이 더 생산적이다^{4,15}.

7. 국내 천연수소 탐사 전략 수립을 위한 제언

해외 사례와 국내 현황을 함께 놓고 보면, 한국형 천연수소 탐사의 첫 번째 전환점은 생성 가능성의

지도화에서 시스템 검증으로 넘어가는데 있다^{4,6,10}. 국내에서는 그동안 기반암, 화강암, 초고철질암, 단층대, 화산암 분포를 중심으로 후보지를 제시해 왔지만, 이는 어디까지나 1차 스크리닝 결과에 가깝다^{12,14}. 다음 단계에서는 동일 후보지에서 토양가스, 용존 가스, 구조지질, 지하수 흐름, 열수 징후, 심도별 층서 정보를 연결해 해석해야 한다^{4,6}.

다시 말해 수소를 만들 수 있는 곳을 찾는 단계에서 벗어나, 수소가 실제로 남아 있을 수 있는 곳을 검증하는 단계로 이동해야 한다^{5,10}. 이러한 전환은 탐사 순서의 재배열을 요구한다^{6,10}. 국내에서는 종종 시추 여부가 탐사의 성패를 좌우하는 첫 질문처럼 제시되지만, 국제 사례를 보면 시추는 개념 검증의 마지막 단계에 가까운 의사결정이다^{6,10}. 그 이전에 필요한 것은 권역별 하위 플레이의 정의, 구조선과 암체 경계의 고해상도 지도 제작(mapping), 토양가스·지하수·용존 가스의 계절별 반복 자료, 동반 가스 패턴, 기존 시추 및 광화대 자료의 재해석이다^{4,15}. 이러한 단계가 누적될 때야 시추는 단순한 확인 행위가 아니라, 저류체와 밀봉을 판정하는 결정적 시험이 된다^{6,10,30}.

두 번째 전환점은 측정의 표준화와 반복성 확보다¹⁵. 이를 위해 앞으로 국내 현장 측정은 최소한 네 가지 원칙을 따라야 한다¹⁵. 첫째, 동일 지점의 반복 측정과 시간 지연 후 재측정을 통해 인공 수소 가능성을 배제해야 한다¹⁵. 둘째, 수소 단독이 아니라 헬륨, 질소, 메탄, 이산화탄소, 산소 등 동반 가스와 함께 해석해야 한다^{15,16}. 셋째, 배경점과 대조점을 포함하여 구조선, 암체 경계, 지형 이상을 비교해야 한다^{4,6}. 넷째, 측정 당시의 수분 조건, 기온, 시추 깊이, 장비 교정 상태를 함께 기록해야 한다¹⁵. 이러한 원칙이 지켜질 때만 토양가스 이상은 다음 단계 탐사로 이어질 수 있다⁵.

또한 파일럿 지역 선정 기준은 ‘수소가 많이 나올 것 같은 곳’이 아니라, 불확실성을 가장 효율적으로 줄일 수 있는 곳이어야 한다⁵. 이 기준에서 포천-가평은 기반암-화강암, 단층대, 철 광화작용, 초고철질암체가 한 권역 안에서 중첩되어 생성원-이동 경로

결합(source-pathway coupling)을 시험하기에 유리하다^{12,14,36,41}. 안동-영양은 초고철질암체와 분지 전이부가 함께 논의되어 생성원과 저장 잠재를 동시에 점검할 수 있다는 장점이 있다^{14,37,43}. 반면 강원권은 방사분해형, 화산암형, 광화대형 가설을 먼저 분리해야 하고^{35,38,42}, 제주 및 남동부는 자원량 주장보다 기준선 구축과 과정 연구에 더 적합하다^{39,40,43}. 이런 구분은 탐사비 배분, 관측 밀도, 시료 유형, 시추 우선 순위 설정에 직접 연결된다⁴.

세 번째 전환점은 권역을 넓게 묶는 방식에서 하위 플레이 기반 탐사로 옮겨 가는 것이다⁴. 예를 들어 강원권은 하나의 유망지라기보다 방사분해형, 화산암형, 철 광화대형 가설이 공존하는 복수의 하위 플레이로 나뉘어야 한다^{35,38,42}. 포천-가평과 안동-영양 역시 각각 기반암-단층형과 초고철질암-분지 결합형으로 구체화될 필요가 있다^{12,14,37}. 이렇게 하위 플레이를 명확히 정의하면, 각 지역에 맞는 검증 자료, 예컨대 용존 가스, 천부 코어링(shallow coring), 구조 해석, 지구 물리, 물-암석 반응 실험을 선택적으로 배치할 수 있다^{4,6}.

마지막으로 국내에서는 조기 시추보다 통합 해석이 더 중요하다^{4,5}. Bourakébougou나 Ramsay-1이 종종 ‘시추가 답’이라는 인상을 주지만, 실제로는 시추 이전에 지질, 구조, 가스 지표, 과거 시추 기록, 탐사 목표층 개념이 충분히 정리되어 있었기 때문에 의미 있는 결과가 도출될 수 있었다^{10,22,30}. 한국은 아직 심부 목표층과 저장 개념에 대한 합의가 충분하지 않으므로, 우선은 정밀한 하위 플레이 설정과 반복할 수 있는 지화학 자료 축적이 선행되어야 한다^{6,15}. 그 기반 위에서만 제한적 파일럿 시추가 비용 효율적으로 설계될 수 있다^{5,16}.

끝으로, 천연수소는 수소 공급 포트폴리오의 잠재적 구성요소일 뿐, 기존 저탄소 수소 생산 체계를 곧바로 대체할 수 있는 것으로 전제할 수는 없다^{5,16}. 따라서 국내 탐사 전략도 ‘새 자원’이라는 수사에 기대기보다, 지질학적 불확실성, 환경-안전성, 경제성 검토를 단계적으로 결합하는 보수적 포트폴리오 접근 속에서 설계될 필요가 있다^{5,16}.

8. 결론

본 리뷰의 결과를 종합하면 다음과 같다. 첫째, 해외 대표 사례가 공통으로 보여주는 것은 생성 잠재성만으로는 작동하는 수소 시스템을 설명할 수 없다는 점이다^{8,10,23,30}. 생성, 이동, 저장, 밀봉, 보존, 현장 검증이 함께 연결될 때만 비로소 ‘작동하는 수소 시스템’으로 해석될 수 있으며, Bourakébougou는 그 통합 사례에 가깝고 순상지형·분지형·프런티어 플레이는 서로 다른 병목을 드러낸다^{5,6,10}.

둘째, 해외 사례의 비교는 한국형 탐사의 기대 수준을 현실적으로 조정해 준다^{8,10,23}. 국내 후보지는 아직 말리형의 얇은 고순도 자유 가스전보다, 일부 순상지형 심부 유체계·분지 전이형·개척 단계 플레이에 더 가까운 개념적 단계에 있다^{4,15}. 따라서 국내 유망성은 ‘발견의 확정’이 아니라 ‘검증 과제’의 명료화라는 관점에서 이해하는 편이 적절하다^{5,6}.

셋째, 국내 후보 권역 가운데 포천·가평과 안동·영양은 생성원과 구조적 이동 경로를 함께 시험할 수 있어 통합형 파일럿의 우선 검토 후보로 해석될 수 있다^{12,14,37}. 반면 강원권은 하위 플레이 분리가 우선이며^{35,38,42}, 제주 및 남동부는 화산암형 과정 연구와 기준선 조사의 성격이 더 강하다^{39,40,43}.

넷째, 한국형 천연수소 탐사의 우선순위는 자원량 선언이 아니라 시스템 검증에 있다^{5,6}. 반복 측정, 인공 수소의 배제, 동반 가스 해석, 구조·수리 지질 통합, 제한적 파일럿 시추로 이어지는 단계적 탐사 체계를 구축할 때만 국내 논의는 발견의 수사보다 재현할 수 있는 지질·탐사 과학으로 성숙할 수 있다^{4,15}. 한편, 본 리뷰의 이 같은 결론은 공개 문헌 기반의 질적 비교라는 한계를 전제로 하며, 정량 부존량과 경제성 평가는 후속 연구 과제로 남는다.

후 기

이 논문은 2025년 에너지경제연구원 연구개발 적립금 연구사업 “천연수소(natural hydrogen)의 잠재성 분석과 정책적 시사점”의 일부 내용을 발췌하여

수정 보완한 연구입니다.

References

1. G. S. Ellis and S. E. Gelman, “Model predictions of global geologic hydrogen resources”, *Science Advances*, Vol. 10, No. 50, 2024, pp. eado0955, doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado0955>.
2. V. Zgonnik, “The occurrence and geoscience of natural hydrogen: a comprehensive review”, *Earth-Science Reviews*, Vol. 203, 2020, pp. 103140, doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>.
3. Y. Liang, Q. Meng, X. Huang, W. Lu, Y. Wei, J. Liu, Y. Zhou, L. Huang, Q. Li, J. Chen, and D. Zhou, “Global distribution, genesis, and enrichment characteristics of high-concentration natural hydrogen”, *Frontiers in Marine Science*, Vol. 12, 2025, pp. 1688404, doi: <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1688404>.
4. J. Woo, W. K. Kim, C. W. Rhee, and S. Lee, “A review of hydrogen systems and exploration methodologies for natural hydrogen exploration”, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 62, No. 3, 2025, pp. 312-326, doi: <https://doi.org/10.32390/ksmer.2025.62.3.312>.
5. F. J. Hasiuk and D. M. Conley, “Exploring geologic hydrogen: A new frontier for affordable, reliable energy security”, Sandia National Laboratories, United States, 2025, doi: <https://doi.org/10.2172/2562737>.
6. D. Lévy, V. Roche, G. Pasquet, V. Combaudon, U. Geymond, K. Loiseau, and I. Moretti, “Natural H₂ exploration: tools and workflows to characterize a play”, *Science and Technology for Energy Transition*, Vol. 78, 2023, pp. 27, doi: <https://doi.org/10.2516/stet/2023021>.
7. N. Mahlstedt, B. Horsfield, P. Weniger, D. Misch, X. Shi, M. Noah, and C. Boreham, “Molecular hydrogen from organic sources in geological systems”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 105, 2022, pp. 104704, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104704>.
8. B. Sherwood Lollar, T. C. Onstott, G. Lacrampe-Couloume, and C. J. Ballentine, “The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H₂ production”, *Nature*, Vol. 516, No. 7531, 2014, pp. 379-382, doi: <https://doi.org/10.1038/nature14017>.
9. R. Karolyte, O. Warr, E. van Heerden, S. Flude, F. de Lange, S. Webb, C. J. Ballentine, and B. Sherwood Lollar, “The role of porosity in H₂/He production ratios in fracture fluids from the Witwatersrand Basin, South Africa”, *Chemical Geology*, Vol. 595, 2022, pp. 120788, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120788>.

- 10.1016/j.chemgeo.2022.120788.
10. O. Maiga, E. Deville, J. Laval, A. Prinzhofer, and A. B. Diallo, "Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali", *Scientific Reports*, Vol. 13, 2023, pp. 11876, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38977-y>.
 11. J. Pironon, "Hydrogeology: The discovery of natural hydrogen in the Lorraine coal basin", H-Nat World Summit 2025 Conference Program, November 13, 2025.
 12. W. S. Kee, S. W. Kim, H. Kim, P. Hong, C. W. Kwon, H. J. Lee, D. L. Cho, H. J. Koh, K. Y. Song, U. H. Byun, Y. Jang, and B. C. Lee, "Geologic map of Korea 1:1,000,000", Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2019, doi: <https://doi.org/10.22747/data.20220816.4826>.
 13. S. W. Kim, W. S. Kee, S. Lee, B. C. Lee, and U. H. Byun, "Tracking and evaluating the concentrations of natural radioactivity according to chemical composition in the Precambrian and Mesozoic granitic rocks in the Jangsungun area, central southwestern South Korea", *Minerals*, Vol. 11, No. 7, 2021, pp. 684, doi: <https://doi.org/10.3390/min11070684>.
 14. Y. U. Chae, H. S. Lim, and Y. J. Joo, "Distribution and characteristics of serpentinized ultramafic rocks in South Korea as potential source rocks of natural hydrogen", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 60, No. 4, 2024, pp. 517-534, doi: <https://doi.org/10.14770/jgsk.2024.037>.
 15. T. G. Lee, L. Lee, and O. Kwon, "Natural hydrogen research in Korea: Field measurements", *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 62, No. 5, 2025, pp. 584-597, doi: <https://doi.org/10.32390/ksmer.2025.62.5.584>.
 16. A. Patonia and M. Lambert, "Natural (geologic) hydrogen and its potential role in a net-zero carbon future: Is all that glitters gold?", Oxford Institute for Energy Studies, OIES Paper ET38, 2024, Retrieved from <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2024/09/ET38-Natural-geologic-hydrogen-and-its-potential-role-in-a-net-zero-carbon-future.pdf>.
 17. J. Wang, N. Watanabe, A. Okamoto, K. Nakamura, and T. Komai, "Pyroxene control of H₂ production and carbon storage during water-peridotite-CO₂ hydrothermal reactions", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 49, 2019, pp. 26835-26847, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.161>.
 18. L. Wang, Z. Jin, X. Chen, Y. Su, and X. Huang, "The origin and occurrence of natural hydrogen", *Energies*, Vol. 16, No. 5, 2023, pp. 2400, doi: <https://doi.org/10.3390/en16052400>.
 19. L. H. Lin, P. L. Wang, D. Rumble, J. Lippmann-Pipke, E. Boice, L. M. Pratt, B. S. Lollar, E. L. Brodie, T. C. Hazen, G. L. Andersen, T. Z. DeSantis, D. P. Moser, D. Kershaw, and T. C. Onstott, "Long-term sustainability of a high-energy, low-diversity crustal biome", *Science*, Vol. 314, No. 5798, 2006, pp. 479-482, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1127376>.
 20. J. Telling, K. Voglesonger, C. N. Sutcliffe, G. Lacrampe-Couloume, E. Edwards, and B. Sherwood Lollar, "Bioenergetic constraints on microbial hydrogen utilization in Precambrian deep crustal fracture fluids", *Geomicrobiology Journal*, Vol. 35, No. 2, 2018, pp. 108-119, doi: <https://doi.org/10.1080/01490451.2017.1333176>.
 21. S. Sejourne, F. A. Comeau, M. L. Moreira dos Santos, G. Bordeleau, M. Claprod, P. Mouge, V. Mulliez, M. Malo, B. Giroux, E. Gloaguen, and J. Raymond, "Potential for natural hydrogen in Quebec Canada: A first review", *Frontiers in Geochemistry*, Vol. 2, 2024, pp. 1351631, doi: <https://doi.org/10.3389/fgeoc.2024.1351631>.
 22. Gold Hydrogen Ltd., "Ramsay project - investigating naturally occurring hydrogen", 2024, Retrieved from <https://www.goldhydrogen.com.au/ramsay-project/>.
 23. S. Allouti, R. Michels, M. Mombo Mouketo Metzger, F. Malartre, A. Izart, Y. Géraud, V. Privalov, F. Nassif, J. Pironon, and P. de Donato, "Total organic carbon evaluation using geophysical well-logs in Lorraine Coal Basin (NE France)", *BSGF - Earth Sciences Bulletin*, Vol. 196, 2025, pp. 24, doi: <https://doi.org/10.1051/bsgf/2025022>.
 24. L. C. Gerhard, "Review of the Nemaha Ridge: a new look at an old petroleum province", *Kansas Geological Survey, Current Research in Earth Sciences, Bulletin 250, Part 1*, 2004, Retrieved from https://www.kgs.ku.edu/CURRENT/2004/Gerhard/Gerhard_article.pdf.
 25. N. Larin, V. Zgonnik, S. Rodina, E. Deville, A. Prinzhofer, and V. N. Larin, "Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European craton in Russia", *Natural Resources Research*, Vol. 24, No. 3, 2015, pp. 369-383, doi: <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>.
 26. V. Zgonnik, V. Beaumont, E. Deville, N. Larin, D. Pillot, and A. Prinzhofer, "Evidence for natural hydrogen seepage associated with Carolina bays North America", *Proceedings of the VIII International Conference on Hydrogen NH8*, 2015, pp. 35-38.
 27. South Australia Department for Energy and Mining, "Natural hydrogen", 2023, Retrieved from <https://energymining.sa.gov.au/industry/energy-resources/geology-and-prospectivity/natural-hydrogen>.
 28. A. Prinzhofer, C. S. T. Cisse, and A. B. Diallo, "Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou Mali", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 42, 2018, pp. 19315-19326, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.111>.

- 16/j.ijhydene.2018.08.193.
29. O. Warr, C. J. Ballentine, T. C. Onstott, D. M. Nisson, T. L. Kieft, D. J. Hillegonds, and B. Sherwood Lollar, "86Kr excess and other noble gases identify a billion-year-old radiogenically-enriched groundwater system", *Nature Communications*, Vol. 13, No. 1, 2022, pp. 3768, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31412-2>.
 30. B. Vincent, J. Bourdet, F. Glass, and L. Hansen, "The early Cambrian carbonates of the Yorke Peninsula: a sedimentological and stratigraphic reappraisal for natural hydrogen exploration", *Australian Natural Hydrogen Conference*, October 2025, Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/399411752_The_Early_Cambrian_Carbonates_of_the_Yorke_Peninsula_a_sedimentological_and_stratigraphic_reappraisal_for_natural_hydrogen_exploration.
 31. S. Han, Z. Tang, C. Wang, B. Horsfield, T. Wang, and N. Mahlstedt, "Hydrogen-rich gas discovery in continental scientific drilling project of Songliao Basin, Northeast China: new insights into deep Earth exploration", *Science Bulletin*, Vol. 67, No. 10, 2022, pp. 1003-1006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.02.008>.
 32. L. Dou, H. Liu, B. Li, W. Qi, D. Sun, L. Yin, and S. Han, "Global natural hydrogen exploration and development situation and prospects in China", *Lithologic Reservoirs*, Vol. 36, No. 2, 2024, pp. 1-14, doi: <https://doi.org/10.12108/yxyqc.20240201>.
 33. P. J. Ball and K. Czado, "Natural hydrogen: the new frontier", *Geoscientist*, Vol. 32, No. 1, 2022, pp. 32-37, Retrieved from <https://geoscientist.online/sections/uneart/hed/natural-hydrogen-the-new-frontier/>.
 34. B. Sherwood Lollar, K. Voglesonger, L. H. Lin, G. Lacrampe-Couloume, J. Telling, T. A. Abrajano, T. C. Onstott, and L. M. Pratt, "Hydrogeologic controls on episodic H₂ release from Precambrian fractured rocks - energy for deep subsurface life on Earth and Mars", *Astrobiology*, Vol. 7, No. 6, 2007, pp. 971-986, doi: <https://doi.org/10.1089/ast.2006.0096>.
 35. J. Hwang, "Geological review on the distribution and source of uraniumiferous groundwater in South Korea", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 28, No. 4, 2018, pp. 593-603, doi: <https://doi.org/10.9720/kseg.2018.4.593>.
 36. J. M. Lee, D. C. Koh, G. T. Chae, W. S. Kee, and K. S. Ko, "Integrated assessment of major element geochemistry and geological setting of traditional natural mineral water sources in South Korea at the national scale", *Journal of Hydrology*, Vol. 598, 2021, pp. 126249, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126249>.
 37. S. K. Hwang and B. G. Woo, "Role of the Cheongryangsan conglomerate and the Osipbong basalt in classifying stratigraphy of the Hayang Group, Yeongyang Subbasin", *The Journal of the Petrological Society of Korea*, Vol. 18, No. 3, 2009, pp. 181-194, Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART001384310>.
 38. J. Seo, S. G. Choi, D. W. Kim, J. W. Park, and C. W. Oh, "A new genetic model for the Triassic Yangyang iron-oxide-apatite deposit, South Korea: constraints from in situ U-Pb and trace element analyses of accessory minerals", *Ore Geology Reviews*, Vol. 70, 2015, pp. 110-135, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.009>.
 39. M. Brenna, S. J. Cronin, I. E. M. Smith, R. Maas, and Y. K. Sohn, "How small-volume basaltic magmatic systems develop: a case study from the Jeju Island volcanic field, Korea", *Journal of Petrology*, Vol. 53, No. 5, 2012, pp. 985-1018, doi: <https://doi.org/10.1093/petrology/egs007>.
 40. B. W. You, C. S. Baek, and K. Y. Joo, "Physical properties of volcanic rocks in Jeju-Ulleung area as aggregates", *Economic and Environmental Geology*, Vol. 57, No. 2, 2024, pp. 205-217, doi: <https://doi.org/10.9719/EEG.2024.57.2.205>.
 41. J. Seo, S. G. Choi, Y. J. Lee, and E. Uchida, "Review of the Mesozoic iron mineralization in South Korea", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 57, No. 4, 2021, pp. 615-628, doi: <https://doi.org/10.14770/jgsk.2021.57.4.615>.
 42. M. B. Lee, Y. B. Seong, and G. R. Lee, "Formative age and process on basalt of lava plateau in the Cheolwon and Yeoncheon areas, central Korea", *Journal of the Korean Geomorphological Association*, Vol. 27, No. 4, 2020, pp. 41-51, doi: <https://doi.org/10.16968/JKGA.27.4.41>.
 43. H. S. Kim, "Origin and Reservoir Types of Abiotic Native Hydrogen in Continental Lithosphere", *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, Vol. 35, No. 3, 2022, pp. 313-331, doi: <https://doi.org/10.22807/KJMP.2022.35.3.313>.
 44. The Asia Business Daily, "Extracting hydrogen underground: Korea National Oil Corporation takes first step in subsurface energy challenge history", March 30, 2023, Retrieved from <https://cm.asiae.co.kr/en/article/2023033016522036133>.
 45. Newsis, "Korea National Oil Corporation reports subsurface hydrogen indications and files a related technology patent", March 30, 2023, Retrieved from https://www.newsis.com/view/NISX20230330_0002247946.
 46. Financial Newspaper, "KNOC develops a natural hydrogen probe system for subsurface exploration", March 30, 2023, Retrieved from <https://www.efnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=102550>.