

한국의 해외 청정수소 수입국 선정을 위한 에너지 안보 기반 평가지표 체계 개발

김다원¹ · 김도형¹ · 김상민¹ · 염성찬² · 신종석^{3†}

¹국가녹색기술연구소 정책연구본부 제도혁신센터, ²국가녹색기술연구소 국가기후기술협력센터, ³국가녹색기술연구소 정책연구본부 글로벌전략센터

Development of an Energy Security-Based Evaluation Framework for Selecting Overseas Clean Hydrogen Import Partner Countries for Korea

DAWON KIM¹, DO-HYUNG KIM¹, SANGMIN KIM¹, SUNGCHAN YEOM², JONGSEOK SHIN^{3†}

¹Division of Policy Research-Center for Institutional Innovation, National Institute of Green Technology, 60 Yeouinaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07328, Korea

²Division of Policy Research-Seoul Climate Tech Industry Support Center, National Institute of Green Technology, 60 Yeouinaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07328, Korea

³Division of Policy Research-Center for Global Strategy, National Institute of Green Technology, 60 Yeouinaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07328, Korea

†Corresponding author :
jshin@nigt.re.kr

Received 30 June, 2026
Revised 27 July, 2026
Accepted 28 July, 2026

Abstract >> This study develops a 15-indicator framework across four energy security categories, identifying 22 green hydrogen and 10 blue hydrogen supply candidate countries for Korea based on the 2050 import target of 22.9 million tons. Three weighting scenarios weights (A), AHP weights (B), and energy-security indicators excluded (C) were applied to assess how expert judgment and indicator selection shape evaluation outcomes. When energy security indicators were excluded, Russia's blue hydrogen score rose from 33.26 to 39.44, while Indonesia and Vietnam fell from 31.33 to 17.64 and 32.40 to 19.68 in green hydrogen. These results confirm that energy security indicators function not as supplementary factors but as independent evaluation criteria that reflect Korea-specific import conditions — including geopolitical risk and trade accessibility — which production- and infrastructure-centered assessments alone cannot capture.

Key words : Green hydrogen(그린수소), Blue hydrogen(블루수소), Energy security(에너지 안보), Multi-criteria decision-making(다기준 의사결정), Import partner selection(수입국 선정)

1. 서론

2050 탄소중립 기조가 전 세계적으로 확산됨에 따

라, 산업, 운송, 발전 등 탈탄소화가 어려운 부문에서 화석연료를 대체할 수 있는 에너지원으로 청정수소(clean hydrogen)가 주목받고 있다¹⁾. IEA²⁾는 수소가

철강, 화학, 장거리 운송 등 직접 감축이 어려운 부분의 탈탄소화에 기여할 수 있다고 보고하고 있으며, IRENA³⁾ 역시 2050년 1.5°C 목표 달성을 위한 글로벌 수소 교역 확대 가능성을 제시하고 있다. 특히 2022년 러시아-우크라이나 전쟁은 특정 국가 또는 지역에 편중된 에너지 공급망이 공급 중단 위험으로 직결될 수 있음을 실증하였으며, 이후 주요국은 공급망 다변화와 안정성 확보를 에너지 전환 전략의 핵심 과제로 인식하고 있다⁴⁾.

한국은 국내 재생에너지 자원의 부존량 한계, 대규모 청정수소 생산 인프라의 구축 지연, 국토 면적 대비 높은 에너지 수요 밀도 등으로 인해 청정수소의 상당 부분을 해외에서 도입해야 하는 구조적 여건에 있다. 「제1차 수소경제 이행 기본계획(2021)」은 2050년까지 해외 청정수소 도입 목표를 약 2,290만 ton으로 설정하고, 공급망 안정성 확보를 위해 40개국 이상으로 해외 공급망을 다변화하는 전략을 제시하였다⁵⁾. 이에 따라 안정적인 청정수소 공급망을 구축하기 위해서는 해외 도입 대상국을 체계적으로 평가하고 선정할 수 있는 기준 마련이 필요하다.

에너지 안보는 일반적으로 적절한 가격에서 에너지원의 중단 없는 이용 가능성을 의미하는 다차원적 개념으로⁶⁾, APERC⁷⁾는 이를 가용성(Availability), 접근성(Accessibility), 경제성(Affordability), 수용성(Acceptability)의 4A 관점에서 체계화하였다. Krut 등⁸⁾은 장기 에너지 안보 지표를 가용성과 접근성 차원을 중심으로 검토하는 분석 틀을 제시하였으며, Sovacool과 Mukherjee⁹⁾는 공급, 가격, 기술, 지속가능성, 제도적 요인을 포함한 다차원 지표체계를 통해 국가 에너지 안보 수준을 평가하는 방법론을 제안하였다. 이러한 연구들은 에너지 안보가 에너지원의 물리적 확보뿐만 아니라 지정학적 접근성, 교역 안정성, 운송 위험성 등 복합적 조건을 함께 고려해야 하는 문제임을 보여준다.

청정수소의 해외 도입 대상국 선정에서도 이러한 에너지 안보 관점이 중요하게 고려될 필요가 있다. 그러나 기존 연구는 주로 LCOH, 재생에너지 부존량, 설비 용량 및 운송비 등 경제성·환경성·기술성

지표를 중심으로 수행되어 왔으며^{10,11)}, 교역 용이성·지정학적 위험·해상운송 안정성 등 에너지 안보 요인을 종합적으로 반영한 평가체계는 제시된 바 없다. 따라서 한국의 청정수소 도입 대상국 선정을 위해 에너지 안보 요인을 포함한 다차원 평가지표 체계를 구성할 필요가 있다.

본 연구에서는 에너지 안보 관점의 다차원 평가지표 체계를 개발하고, 그린수소와 블루수소 후보국에 적용하여 국가별 도입 적합성을 비교·분석하는 것을 목적으로 한다. 4개 평가 부문 아래 유형별 총 15개 세부지표를 구성하고 전문가 AHP를 통해 가중치를 산정하였으며, 동일 가중치(시나리오 A), AHP 가중치(시나리오 B), 에너지 안보 지표 제외(시나리오 C)의 세 가지 시나리오를 통해 에너지 안보 지표의 포함 여부가 공급 후보국 선정 결과에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 연구 방법론

본 연구는 해외 청정수소의 국내 안정적 도입을 위한 공급 후보국 평가체계를 구성하고, 그린수소와 블루수소의 생산 조건 차이를 반영하여 유형별로 독립적인 평가를 수행한다. 해외 청정수소 도입은 생산국의 자원 여건, 수소 생산 방식, 공급망 구축 가능성, 운송 안정성 등이 복합적으로 작용하는 과정이므로, 단일 지표가 아닌 에너지 안보 관점의 다차원 지표체계를 통해 국가별 도입 적합성을 종합적으로 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 수소 유형별 공급 후보국을 우선 도출한 후(2.1절), 다차원 평가지표 체계를 적용하여 국가별 종합점수를 산출하고(2.2절), 가중치 시나리오별 비교를 통해 에너지 안보 지표의 유효성을 검토하는(2.3절) 순서로 분석을 수행한다.

2.1 청정수소 국내 도입을 위한 공급 후보국 도출 방법

국내 도입에 필요한 최소한의 수소 생산 가능성을

충족하는 국가를 선별하는 방식으로 공급 후보국을 도출한다. 후보국 도출의 공통 전제는 「제1차 수소 경제 이행 기본계획」에서 제시한 2050년 해외 청정수소 수입 목표량 22.9백만 ton과 해외 공급망 40개 확보 목표를 기준으로 설정한다. 40개 공급망에서 동일한 규모의 청정수소를 도입한다고 가정하면, 국가당 평균 수입량은 식 (1)과 같이 산정된다.

$$Q_{avg} = \frac{22,900,000}{40} = 572,500 \quad (1)$$

본 연구에서는 단순 평균 수입량만을 기준으로 할 경우 실제 공급 여력을 갖춘 후보국을 충분히 선별하기 어렵다고 판단하여, 국가당 평균 수입량에 보정 계수를 적용한다. 현재 자국 정책 문서에서 수소 수입을 명시하고 있는 국가는 한국, 독일, 일본, 오스트리아, 네덜란드, 스위스, 벨기에, 싱가포르, 영국, 이탈리아, 케냐 등 11개국이다. 다만 발표된 수소 도입·공급 계획이 실제 투자와 계약으로 이어지는 비율은 낮은 수준으로, IEA¹²⁾에 따르면 발표된 청정수소 생산 프로젝트 중 최종투자결정(FID)에 도달한 비중은 약 9%, 수출 지향 프로젝트의 경우 약 5%에 그친다. 즉 수입 의사를 밝힌 11개국이 모두 실수입국으로 이어진다고 보기는 어려우나, 우리나라 외에도 복수의 국가에서 수소 수입이 실현될 것이므로 수출국의 생산 물량은 복수의 수입국에 분산 공급되는 것으로 가정하는 것이 타당하다. 이에 본 연구에서는 실제 수입이 이루어질 국가 수를 11개국의 20%인 약 2.2개국으로 가정한다. 이 비율을 30% 이상으로 상향할 경우 국가당 최소 수소 생산량 기준이 높아져 탐색 가능한 후보국이 크게 축소되므로, 주요 수출 잠재국을 포괄하면서 후보군의 선별력을 유지하는 수준에서 20%를 적용하였다. 이에 따라 국가당 최소 수소 생산량 기준은 식 (2)와 같이 산정된다.

$$Q_{min} = Q_{avg} \times 2.2 = 1,259,500 \quad (2)$$

그린수소 공급 후보국은 재생에너지 기반 알칼라인

수전해(Alkaline Electrolysis, AEL) 생산 경로를 기준으로 도출한다. AEL은 현재 기술성숙도가 가장 높은 수전해 방식으로 상업화 및 대규모 그린수소 생산에 널리 활용되고 있어, 대규모 생산 잠재력을 보수적으로 선별하기 위한 기준 경로로 적합하다¹³⁾. 수소 에너지 밀도(33.36 MWh/ton)와 수전해 효율(63%)을 적용하여 국가당 최소 수소 생산량을 충족하기 위한 최소 재생에너지 연간 발전량은 식 (3)과 같이 도출된다.

$$E_{RE,min} = \frac{Q_{min} \times 33.36}{0.63} = 66,693,524 \text{ MWh/yr} \quad (3)$$

블루수소 공급 후보국은 천연가스 기반 증기메탄 개질(Steam Methane Reforming, SMR) 공정과 탄소 포집·저장(Carbon Capture and Storage, CCS)을 결합한 생산 경로를 기준으로 도출한다. SMR 반응식의 몰비($\text{CH}_4:\text{H}_2 = 1:3$)와 각 물질의 몰 질량($\text{CH}_4: 16.04 \text{ g/mol}$, $\text{H}_2: 2.016 \text{ g/mol}$)을 적용하면, 최소 천연가스 추출량 기준은 식 (4)와 같이 산정된다.

$$M_{NG,min} = \frac{Q_{min} \times 16.04}{3 \times 2.016} = 13,344,703 \text{ ton/yr} \quad (4)$$

2.2 청정수소 국내 도입을 위한 공급 후보국 평가방법

연구에서는 공급 후보국 평가를 위해 에너지 안보 관점의 다차원 평가체계를 구성하고, 지표별 상대적 중요도를 반영하여 국가별 도입 적합성을 산출한다. 그린수소와 블루수소 공급 후보국은 생산 원료와 공급망 특성이 상이하므로 각각 독립적으로 평가하며, 수소 유형별 공통지표와 특화지표를 함께 적용하여 국가별 종합점수를 도출한다.

평가체계의 구성과 가중치 산정에는 청정수소 공급망 및 에너지 안보 분야 전문가 7인이 참여하였다. 자문단은 국책연구기관 3인(에너지경제), 대학 2인(에너지경제), 산업계 1인(수소 사업개발), 수소 유관 기관 1인(수소 국제협력)으로 구성하여, 연구·학계·산

업·정책의 관점이 균형 있게 반영되도록 하였다. 자문은 두 차례에 걸쳐 수행하였으며, 1차 자문에서는 평가지표의 타당성을 서면 검토 방식으로 확인하고(2.2.1절), 2차 자문에서는 확정된 지표에 대한 쌍대 비교를 통해 가중치를 산정하였다(2.2.2절).

2.2.1 국가 선정 지표 구성

평가지표는 수소 수출 인프라, 우리나라와의 교역 용이성, 해상운송 안정성, 수소 수출 가능 규모의 4개 부문, 총 15개 세부지표로 구성한다. 앞의 3개 부문과 수출 가능 규모의 공통지표 10개는 그린·블루 수소에 공통으로 적용하고, 수출 가능 규모의 나머지 5개는 수소 유형별 특화지표로 구분한다.

수소 수출 인프라 부문은 청정수소 도입이 생산량만으로 결정되지 않고 운반체 변환·저장·운송·수출을 위한 물리적·제도적 기반을 함께 요구한다는 점에서 설정하며, 수소 생산·저장·운송 인프라 현황, 운반체 변환 및 수출 인프라, 공급 및 수출 정책 수립 여부를 반영한다^{14,16)}. 전문가 자문에서 생산·저장·운송 인프라 현황은 수출국의 공급 능력을 가장 직접적으로 반영하는 핵심 지표로 평가되었다. 운반체 변환 및 수출 인프라에 대해서는 현재의 기술 수준과 국제 거래 규모를 고려할 때 암모니아가 가장 현실적인 수소 운반체이며 관련 생산·전환 설비의 보유 여부가 수출 가능성을 결정짓는 요소라는 점에서, 암모니아·톨루엔(LOHC)·액화수소의 3개 운반체 인프라를 반영하는 것이 타당한 것으로 확인되었다. 공급 및 수출 정책 수립 여부에 대해서는 재생에너지 자원이거나 천연가스 매장량이 풍부한 국가라도 생산 보조금 등 제도적 인센티브가 부재하면 경쟁력 있는 청정수소 생산이 현실적으로 어렵다는 점에서, 수출국의 공급 의지와 제도적 기반을 반영하는 지표로서 타당성이 확인되었다.

교역 용이성 부문은 청정수소 도입이 장기 공급계약과 인프라 투자, 정책 및 기업 간 협력을 수반한다는 점을 고려하여, 우리나라와의 외교관계(2020년 이후), 교역량, 국내 기업의 수소공급사업 진출 현황을 반영한다^{17,18)}. 전문가 자문에서 외교관계는 우호

적 협력 기반이 무역 절차·관세·인허가의 간소화로 이어져 정치적·법적 리스크를 낮추는 요인으로, 교역량은 물류·통관·금융결제 등 양국 간 교역 인프라의 성숙도를 간접적으로 반영하는 지표로 평가되었다. 특히 국내 기업의 진출 현황은 현지 파트너십 기반과 수소 시장 형성 수준을 보여줌으로써 실제 사업 실행 가능성을 가장 직접적으로 반영하는 지표로 평가되어, 높은 중요도가 부여될 필요가 있다는 의견이 제시되었다.

해상운송 안정성 부문은 장거리 해상운송을 전제로 하는 도입 과정의 리스크를 평가하기 위해 해상운송 거리, 해적위험지수, 지정학적 위험지수를 반영한다. 전문가 자문에서 해상 운송 거리는 운송 비용과 탄소배출, 적기 공급 가능성에 직접 영향을 미치는 요인으로, 해적위험지수는 보험료 상승과 항로 우회에 따른 추가 비용을 통해 사업의 실현 가능성을 저해할 수 있는 물리적 위험 요인으로 평가되었다. 지정학적 위험지수에 대해서는 정치·외교적 갈등, 제재, 내전 등으로 인한 공급 차단 가능성을 체계적으로 반영해야 하며, 최근의 전쟁 등 국제 정세를 고려할 때 공급망 안정성을 결정하는 핵심 지표로 다루어야 한다는 의견이 다수 제시되었다.

수소 수출 가능 규모 부문은 한국의 장기 도입 수요를 충족할 생산·수출 여력을 평가하기 위해 설정한다^{19,20)}. 공통지표인 수출국의 수소 수요 전망(2050)²¹⁾은 수출국의 내수 수요가 클수록 수출 가능한 잉여 수소가 감소한다는 전문가 의견을 반영한 것으로, 반방향 지표로 설정한다. 그린수소 특화지표로는 재생에너지 발전량 전망²²⁾, 재생에너지 전력 활용 가능성, 설비 이용률(Capacity Factor)²³⁾, 물 활용 가능성, 재생에너지 가격을 반영한다. 전문가 자문에서 재생에너지 발전량은 그린수소 생산 가능성을 결정하는 핵심 지표로, 전력 활용 가능성은 수출국의 전력 수요를 고려한 잉여 재생전력 확보 가능성을 반영하는 지표로 타당성이 확인되었다. 설비이용률은 그 값이 높을수록 재생전력의 품질과 가격 경쟁력이 우수함을 의미한다는 의견에 따라 반영하였으며, 재생에너지 가격은 그린수소 생산단가에 가장 큰 영향을 미치는 인자로, 물 활용 가

능성은 수전해 원료 확보의 전제 조건으로 평가되었다. 블루수소 특화지표로는 천연가스 추출량, CO₂ 저장 가능량, 천연가스 수출량, 추출 지속성, 천연가스 가격을 반영한다^{24,25)}. 전문가 자문에서 천연가스 추출량과 가격은 블루수소 생산단가 경쟁력을 좌우하는 직접 요인으로, CO₂ 저장 가능량은 탄소 포집·저장이 수반되지 않는 블루수소가 성립할 수 없다는 점에서 생산의 필수 전제로 평가되었다. 천연가스 수출량은 기

존 에너지 수출 역량과 인프라의 수소 전용 가능성을, 추출 지속성은 원료 공급의 장기 지속가능성을 반영하는 지표로 타당성이 확인되었다.

이 중 해상운송 안정성의 3개 지표와 수소 수요 전망, 재생에너지 가격, 천연가스 가격은 값이 클수록 도입 적합성이 낮아지는 반방향 지표로 설정한다. 각 지표의 세부 측정 내용과 자료원은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. List of indicators for the evaluation of candidate countries

Category	Indicator	Sub-indicator	Source
Hydrogen Export Infrastructure of the Exporting Country	Status of Hydrogen Production, Storage, and Transport Infrastructure	Hydrogen Production Infrastructure	IEA, '25
		Hydrogen Storage Infrastructure	
		Hydrogen Transport Infrastructure	
	Hydrogen Carrier Conversion and Transport Infrastructure	Ammonia Infrastructure	IEA, '25 ARGUS, '24 UNDATA, '25
		Toluene Infrastructure	
		Liquid Hydrogen Infrastructure	
	Establishment of Hydrogen Supply and Export Policies	Hydrogen Supply Policy	IEA Policy
		Hydrogen Export Policy	
Ease of Trade with South Korea	Diplomatic Relations with South Korea (Since 2020)	Bilateral Agreements	Economic Diplomacy Portal
		Joint Statements	
		Economic Events	
	Trade Volume with South Korea		KOSIS
	Status of Domestic (Korean) Companies Entering Hydrogen Supply Projects		Individually collected sources
Maritime Transport Stability	Maritime Transport Distance		Maritime optima
	Piracy Risk Index		GICOMS
	Geopolitical Risk Index		IEP Global Peace Index
Hydrogen Export Potential (Scale)	General	Hydrogen Demand Forecast in the Exporting Country	Nat Comm 14, 5532
	Green Hydrogen	Annual Renewable Energy Generation Forecast	IEA, '25
		Renewable Energy Power Utilization Feasibility	IEA, '25 EMBER, '23
		Renewable Energy Capacity Factor	IEA, '25 IRENA, '23 EMBER, '23
		Water Resource Availability / Feasibility	Nat Comm 14, 5532
		Renewable Energy Pricing	Individually collected sources
	Blue Hydrogen	Annual Renewable Energy Generation Forecast	OPEC, '25
		CO ₂ storage capacity	Global CCS Institute
		Annual Natural Gas Export Volume	OPEC, '25
		Sustainability of Natural Gas Extraction	OPEC, '25
		Natural gas price	Individually collected sources

국가 간 비교를 위해 모든 지표에 식 (5)와 같이 Min-Max 정규화를 적용한다. 여기서 x_i 는 국가 i 의 지표 원시값, $x_{\min}$ 과 $x_{\max}$ 는 해당 지표의 후보국 전체에서의 최솟값과 최댓값이다. 정규화된 지표값 x'_i 는 0~100 범위로 표준화된다.

$$x'_i = \begin{cases} \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100 \\ \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100 \end{cases} \quad (5)$$

2.2.2 AHP 기반 지표 가중치 산정

본 연구에서는 세부지표 간 상대적 중요도를 반영하기 위해 계층분석법(Antalytic Hierarchy Process, AHP)을 적용한다. AHP는 평가항목 간 쌍대비교를 통해 각 항목의 상대적 중요도를 정량화하는 방법으로, 다수의 평가 기준을 포함하는 지표체계의 가중치 산정에 적합하다²⁶⁾. 본 연구에서는 청정수소 국내 도입을 위한 공급 후보국 평가를 최상위 목표로 설정하고, 하위 단계에는 4개 평가 부문과 각 부문별 세부지표를 배치하는 2단계 계층구조를 구성한다. 그린수소와 블루수소는 생산 원료, 필요 인프라, 비용 구조가 상이하므로 각각 별도의 AHP 계층구조를 구성하여 가중치를 산정한다.

2차 자문에서는 1차 자문을 통해 확정된 지표를 대상으로, 동일 계층에 속한 항목 간 상대적 중요도를 1~9점 척도의 쌍대비교 방식으로 평가하였다. 그린수소와 블루수소 계층구조에 대해 응답을 각각 수집하고, 응답자별 쌍대비교 판단을 기하평균으로 통합하여 평가 부문별 가중치와 세부지표별 가중치를 산정하였다. 응답 결과의 일관성은 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)을 통해 검토한다. CR은 식 (6)과 같이 산정되며, CR이 0.1 미만인 경우 일관성을 확보한 것으로 판단한다.

$$CR = CI/RI, CI = (\lambda_{\max} - n)/(n-1) \quad (6)$$

여기서 $\lambda_{\max}$ 는 쌍대비교 행렬의 최대 고유값, n 은

비교항목 수, RI는 동일 크기의 무작위 행렬에 대한 평균 일관성 지수이다. 최종적으로 도출된 지표별 가중치와 정규화된 지표 값을 결합하여 각 국가의 종합점수를 산출한다.

2.3 가중치 시나리오별 공급 후보국 선정 결과 비교

본 연구에서는 에너지 안보 관련 지표의 포함 여부와 지표 가중치 설정 방식이 공급 후보국 선정 결과에 미치는 영향을 검토하기 위해 세 가지 가중치 시나리오를 구성한다.

시나리오 A는 그린수소와 블루수소 각각의 15개 세부지표에 동일한 가중치(6.67%)를 부여하는 동일 가중치 시나리오이다. 이는 전문가 판단이 개입하지 않은 중립적 기준선으로, 시나리오 B와 비교하여 전문가가 에너지 안보 지표를 비롯한 각 지표에 부여하는 상대적 중요도를 파악하는 기준으로 활용한다.

시나리오 B는 2.2.2절의 전문가 AHP 결과를 반영한 기준 시나리오로, 산정된 지표별 가중치를 그대로 적용한다. 에너지 안보 관련 지표를 포함한 상태에서 전문가 판단에 기반한 종합점수와 국가별 순위를 제시하는 본 연구의 핵심 평가 결과에 해당한다.

시나리오 C는 에너지 안보 관련 지표 제외 시나리오이다. 본 연구에서는 우리나라와의 외교관계, 우리나라와의 교역량, 국내 기업의 수소공급사업 진출 현황, 해상 운송 거리, 해적위험지수, 지정학적 위험지수의 6개 지표를 에너지 안보 관련 지표로 정의한다. 시나리오 C는 시나리오 B를 기준으로 해당 6개 지표를 제외하고, 제외된 가중치를 나머지 9개 지표의 AHP 가중치 비율에 따라 비례 재배분하여 전체 합이 100%가 되도록 조정한다. 이를 통해 에너지 안보 지표의 제외가 후보국 선정 결과에 미치는 영향을 직접적으로 확인한다.

시나리오별 결과 비교는 국가별 종합점수와 순위 변화를 중심으로 수행하며, 특히 시나리오 B 대비 시나리오 C에서 순위 변동이 두드러지는 국가를 중심으로 에너지 안보 지표의 기여도를 분석한다.

3. 연구 결과

3.1 청정수소 국내 도입을 위한 공급 후보국 도출 결과

2.1절에서 제시한 기준을 적용하여 그린수소와 블루수소 공급 후보국을 각각 도출하였다. 「제1차 수소경제 이행 기본계획(2021)」에 따라 국가당 평균 해외 청정수소 수입량을 572,500 ton/yr로 산정하고, 보정계수 2.2를 적용하여 국가당 최소 수소 생산량 기준을 1,259,500 ton/yr로 결정하였다.

그린수소의 경우 AEL 기반 생산 경로를 기준으로 최소 재생에너지 연간 발전량 기준값(66,693,524 MWh/yr)을 산정하였으며, 해당 기준을 충족하는 22개국을 그린수소 공급 후보국으로 도출하였다(Table 2). 아시아 태평양, 유럽, 아메리카 대륙에 걸쳐 비교적 광범위하게 분포하고 있다. 블루수소의 경우 SMR-CCS 생산 경로를 기준으로 최소 천연가스 추출량 기준값(13,344,703 ton/yr)을 산정하였으며, 해당 기준을 충족하는 10개국을 블루수소 공급 후보국으로 도출하

Table 2. Potential supplier countries for green hydrogen and blue hydrogen

Type	Country	
Green Hydrogen	Argentina	Mexico
	Australia	Norway
	Brazil	Pakistan
	Canada	Poland
	Chile	Russia
	China	Saudi Arabia
	Colombia	Spain
	Finland	Sweden
	France	Türkiye
	India	The United States
	Indonesia	Vietnam
Blue Hydrogen	Algeria	Malaysia
	Australia	Nigeria
	Brazil	Qatar
	Canada	Russia
	Indonesia	The United States

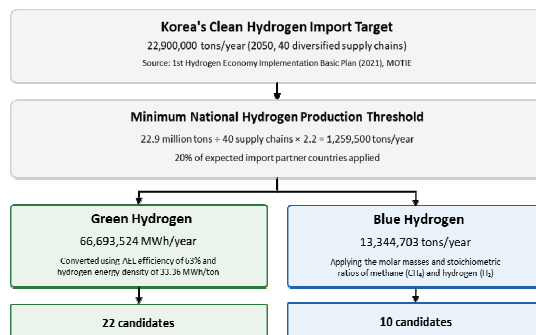


Fig. 1. Screening process for clean hydrogen supply candidate countries for domestic introduction

였다. 중동·중앙아시아 산유국과 북미·오세아니아 자원 부국을 중심으로 구성되어 그린수소 후보국에 비해 지역적 집중도가 높게 나타났다(Table 3, Fig. 1).

3.2 평가지표 확정 및 AHP 기반 가중치 산정 결과

청정수소 국내 도입을 위한 공급 후보국 평가를 위해 4개 평가 부문과 15개 세부지표로 구성된 평가 지표 체계를 확정하였다. 수소 수출 인프라, 우리나라와의 교역 용이성, 해상운송 안정성은 그린수소와 블루수소에 공통적으로 적용되는 지표이며, 수소 수출 가능 규모 부문은 공통지표와 수소 유형별 특화 지표로 구분하였다. 확정된 평가지표에 대해 전문가 AHP 분석을 수행하여 지표별 가중치를 산정하였다. AHP 분석은 그린수소와 블루수소의 생산 조건 및 공급망 특성이 상이하다는 점을 고려하여 유형별로 별도 수행하였다. 평가 부문별로는 그린수소에서 수소 수출 인프라(37.1%)와 수소 수출 가능 규모(35.9%) 부문이, 블루수소에서 수소 수출 인프라(37.9%)와 수소 수출 가능 규모(33.6%) 부문이 높은 비중을 차지하였다. 반면 우리나라와의 교역 용이성은 그린수소 15.6%, 블루수소 15.3%로, 해상운송 안정성은 그린수소 11.4%, 블루수소 13.2%로 상대적으로 낮게 산정되었다. 이는 전문가 집단이 청정수소 도입 대상국 선정에서 물리적 생산 기반과 장기 공급 여력을 교역·운송 안정성보다 더 중요한 판단 요소로 인식하고 있음을 의미한다. 세부지표별로는 그린수소 평가

Table 3. Indicator weights by scenario for green hydrogen

Indicator (Green)		Scenario A	Scenario B	Scenario C
Hydrogen Export Infrastructure of the Exporting Country	Status of Hydrogen Production, Storage, and Transport Infrastructure	6.67	22.4	25.4
	Hydrogen Carrier Conversion and Transport Infrastructure	6.67	5.16	8.17
	Whether the Exporting Country has Established Hydrogen Supply and Export Policies	6.67	9.5	12.5
Ease of Trade with South Korea	Diplomatic Relations with South Korea (Since 2020)	6.67	5.45	—
	Trade Volume with South Korea	6.67	3.39	—
	Status of Domestic (Korean) Companies Entering Hydrogen Supply Projects	6.67	6.79	—
Maritime Transport Stability	Maritime Transport Distance	6.67	4.55	—
	Piracy Risk Index	6.67	1.6	—
	Geopolitical Risk Index	6.67	5.21	—
Hydrogen Export Potential (Scale)	Hydrogen Demand Forecast of the Exporting Country	6.67	3.67	6.68
	Annual Renewable Energy Generation Forecast	6.67	4.19	7.2
	Renewable Energy Power Utilization Feasibility	6.67	7.25	10.3
	Renewable Energy Capacity Factor	6.67	3.78	6.79
	Water Resource Availability / Feasibility	6.67	2.85	5.86
	Renewable Energy Pricing	6.67	14.2	17.2

에서 수소 생산·저장·운송 인프라 현황(22.4%)과 재생에너지 가격(14.19%)의 가중치가 상대적으로 높게 나타났으며, 블루수소 평가에서는 수소 생산·저장·운송 인프라 현황(21.07%)과 천연가스 가격(13.42%)의 가중치가 높게 나타났다. AHP 응답의 일관성 검토 결과, 모든 쌍대비교 행렬의 CR이 0.1 미만으로 나타나 가중치 산정 결과의 일관성이 확보된 것으로 판단된다.

시나리오별 가중치는 Table 3(그린수소), Table 4(블루수소)에 제시하였다. 시나리오 A는 15개 세부 지표에 동일한 가중치(6.67%)를 부여한 기준선이며, 시나리오 B는 전문가 AHP 결과를 그대로 적용한 기준 가중치이다. 시나리오 C는 시나리오 B를 기준으로 에너지 안보 관련 6개 지표를 제외하고, 해당 가중치를 나머지 9개 지표의 AHP 가중치 비율에 따라 비례 재배분하여 전체 합이 100%가 되도록 조정한 가중치이다. 시나리오 B에서 교역 용이성과 해상운송 안정성의 합산 가중치는 그린수소 27.0%, 블루수소 28.5%로, 전문가들이 이미 상대적으로 낮게 평가한 부분에 해당한다. 시나리오 C에서 이들 지표가 제외됨에 따라 수소 수출 인프라 및 수출 가능 규모

부문의 세부지표 가중치가 상대적으로 높아지며, 시나리오 B와 C 간 순위 변화는 순수하게 에너지 안보 관련 지표의 기여에 의한 것으로 해석할 수 있다.

3.3 가중치 시나리오별 공급 후보국 선정 결과 비교

3.2절에서 확정한 평가지표와 시나리오별 가중치를 적용하여 그린수소 및 블루수소 공급 후보국의 종합점수와 순위를 산출하고, 시나리오 간 결과 차이를 비교하였다.

3.3.1 그린수소 공급 후보국 선정 결과

그린수소 공급 후보국 선정 결과는 Fig. 2와 같다. 시나리오 B(AHP 가중치)에서는 중국(72.02점), 호주(69.78점), 미국(57.87점), 캐나다(49.05점), 스페인(42.86점)이 상위 5개국으로 도출되었다. 시나리오 A(동일 가중치)와 비교하면 인도네시아(A 5위→B 12위)와 베트남(A 6위→B 10위)의 순위가 크게 하락하였는데, 이는 시나리오 A에서 교역 용이성과 해상운송 안정성 지표가 다른 지표와 동등한 비중(6.67%)을 가지는 반면 시나리오 B에서는 해당 지표의 가중치가

Table 4. Indicator weights by scenario for blue hydrogen

Indicator (Blue)		Scenario A	Scenario B	Scenario C
Hydrogen Export Infrastructure of the Exporting Country	Status of Hydrogen Production, Storage, and Transport Infrastructure	6.67	21.1	24.2
	Hydrogen Carrier Conversion and Transport Infrastructure	6.67	7.95	11.1
	Whether the Exporting Country has Established Hydrogen Supply and Export Policies	6.67	8.89	12.1
Ease of Trade with South Korea	Diplomatic Relations with South Korea (Since 2020)	6.67	4.67	—
	Trade Volume with South Korea	6.67	4.3	—
	Status of Domestic (Korean) Companies Entering Hydrogen Supply Projects	6.67	6.28	—
Maritime Transport Stability	Maritime Transport Distance	6.67	5.23	—
	Piracy Risk Index	6.67	2.65	—
	Geopolitical Risk Index	6.67	5.32	—
Hydrogen Export Potential (Scale)	Hydrogen Demand Forecast of the Exporting Country	6.67	2.94	6.06
	Annual Renewable Energy Generation Forecast	6.67	3.4	6.56
	CO ₂ storage capacity	6.67	4.7	7.86
	Annual Natural Gas Export Volume	6.67	3.88	7.04
	Sustainability of Natural Gas Extraction	6.67	5.32	8.48
	Natural gas price	6.67	13.4	16.6

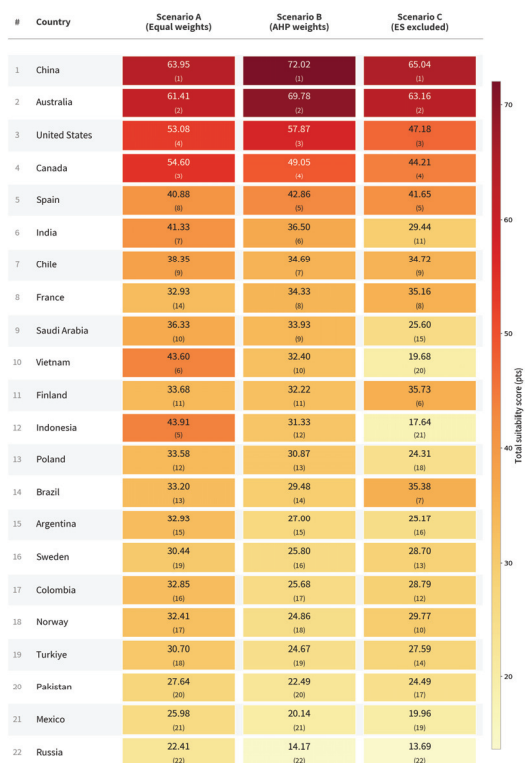


Fig. 2. Scenario-based total score changes of green hydrogen supply candidate countries (Scenario B ranking order)

상대적으로 낮게 산정되었기 때문이다. 이러한 A↔B 비교는 전문가들이 에너지 안보 관련 지표에 부여하는 상대적 중요도가 균등 배분보다 낮으며, 수소 수출 인프라와 수출 가능 규모 부문에 더 높은 가중치를 부여한 전문가 판단의 방향성을 확인할 수 있다. 반면 스페인(A 8위→B 5위)은 재생에너지 잠재량과 수출 인프라 측면의 강점이 AHP 가중치 하에서 더 잘 반영된 결과이다.

시나리오 B와 C의 비교에서 에너지 안보 관련 지표의 효과가 명확하게 드러난다. 시나리오 B에서 상위 5개국(중국, 호주, 미국, 캐나다, 스페인)은 시나리오 C에서도 동일하게 유지되어 최상위 후보국의 선정은 안정적임을 확인하였다. 반면 6위 이하 중·하위권에서는 순위가 크게 재편되었다. 상위 5개국을 제외한 17개국의 평균 순위 변동은 4.5단계였으며, 이 중 10개국이 5단계 이상 이동하였다. 그 결과 안보 지표 포함 여부에 따른 22개국 전체의 순위 상관(Spearman ρ)은 0.73에 그쳐, 에너지 안보 지표가 중·하위권 후보국의 우선순위를 실질적으로 재편함을 정량적으로 보여준다. 인도네시아는 시나리오 B의 12위(31.33점)에서 시나리오 C의 21위(17.64점)로, 베트남은 10위(32.40점)에서 20

위(19.68점)로 하락하였으며 점수 변화율이 각각 -43.7%, -39.3%에 달하였다(Fig. 2). 반면 브라질(B 14 위→C 7위)과 핀란드(B 11위→C 6위)는 에너지 안보 지표 제외 시 순위가 상승하였다. 이는 인도네시아 베트남이 재생에너지 생산 잠재력보다 한국과의 교역·외교관계 및 해상운송 안정성에서 강점을 가지며, 브라질·핀란드는 반대로 재생에너지 생산 여력에서 경쟁력을 갖춘 구조임을 보여준다.

3.3.2 블루수소 공급 후보국 선정 결과

블루수소 공급 후보국 선정 결과는 Fig. 3과 같다. 시나리오 B에서는 미국(72.06점), 호주(64.05점), 캐나다(50.14점)가 상위 3개국으로 도출되었으며, 이는 시나리오 A, C에서도 동일하게 유지되었다. 시나리오 A 대비 시나리오 B에서는 말레이시아(A 4위→B 6위)와 카타르(A 7위→B 9위)의 순위가 하락했지만, 러시아(A 6위→B 5위)와 알제리(A 9위→B 7위)는 상승하였다. 이는 AHP 가중치 적용 시 수소 수출 인프라와 수출 가능 규모 지표의 비중이 높아지면서 천연가스 생산 기반이 탄탄한 국가들의 경쟁력이 상대적으로 부각된 결과이다.

시나리오 B와 C의 비교에서는 러시아의 결과가 주목된다. 러시아는 시나리오 B에서 33.26점(5위)이었으나 시나리오 C에서 39.44점(4위)으로 오히려 상승하였다. 이는 러시아가 천연가스 생산·비용 측면의

물리적 경쟁력은 높으나 지정학적 위험지수와 교역 안정성 측면에서 불리한 구조를 가지고 있음을 의미하며, 에너지 안보 지표가 이러한 공급 안정성 리스크를 종합점수에 반영하는 역할을 함을 실증한다(Fig. 4). 나이지리아(B 8위→C 5위)와 알제리(B 7위→C 6위) 역시 시나리오 C에서 순위가 상승하였는데, 두 국가 모두 천연가스 생산 잠재력은 보유하고 있으나 교역 안정성 및 지정학적 위험 측면에서 불리한 구조를 가진다는 점에서 러시아와 유사한 패턴을 보인다. 즉 생산 경쟁력은 높으나 교역·안보 조건이 불리한 국가군은 에너지 안보 지표를 포함할 경우 더 보수적으로 평가된다. 반면 인도네시아(B 4위→C 7위)와 말레이시아(B 6위→C 8위)는 시나리오 C에서 점수가 각각 34.09점→19.51점, 30.97점→19.23점으로 크게 하락하였는데, 이는 한국과의 교역 관계와 해상운송 안정성이 두 국가의 경쟁력을 뒷받침하는 핵심 요인으로 에너지 안보 지표를 통해서만 평가에 반영됨을 보여준다.

3.3.3 그린수소·블루수소 종합 비교

세 가지 시나리오에서 부문별 가중치 구성이 어떻게 달라지는지를 Table 3, Table 4에 제시하였다. 시나리오 A에서는 15개 세부지표에 6.67%씩 균등한 가중치가 부여됨에 따라, 부문별 비중은 각 부문의 지표 수에 비례하여 수소 수출 인프라·교역 용이성·해상운송 안정성이 각각 20.0%, 수소 수출 가능 규모가 40.0%를 차지한다.

시나리오 B(AHP 가중치)에서는 전문가 판단이 반영됨에 따라 부문별 비중이 재편된다. 그린수소의 경우 수소 수출 인프라 비중이 20.0%에서 37.1%로, 블루수소의 경우 37.9%로 크게 상승한다. 반면 교역 용이성은 그린수소 15.6%, 블루수소 15.3%로, 해상운송 안정성은 그린수소 11.4%, 블루수소 13.2%로 낮아진다. 이는 전문가 집단이 물리적 생산 기반과 수출 인프라를 교역·안보 조건보다 더 중요하게 평가하고 있음을 보여준다. 수소 수출 가능 규모 부문은 그린수소 35.9%, 블루수소 33.6%로 시나리오 A 대비 소폭 하락하는데, 이는 수소 수출 인프라 부문

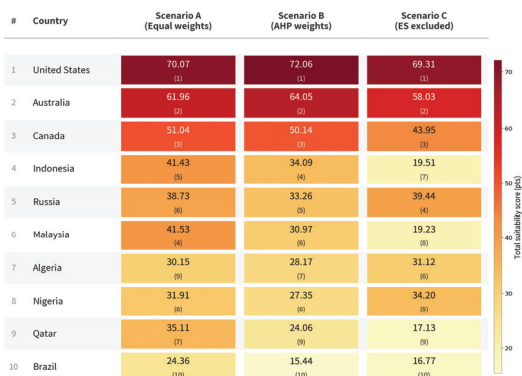


Fig. 3. Scenario-based total score changes of blue hydrogen supply candidate countries (Scenario B ranking order)

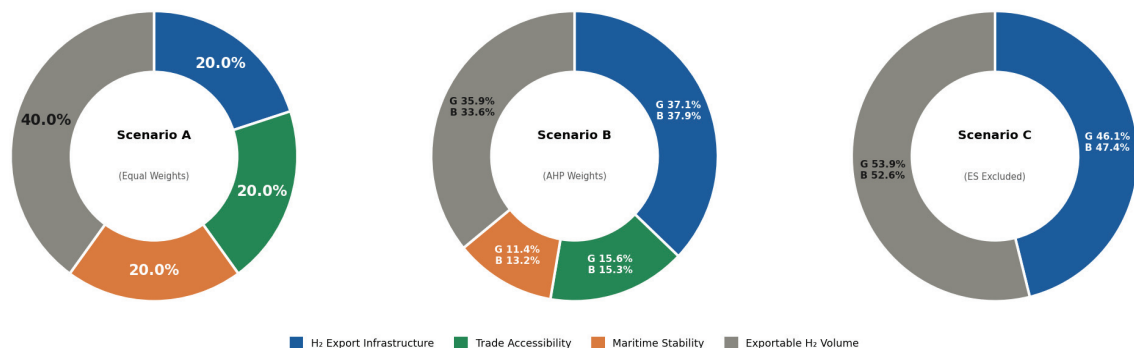


Fig. 4. Sector-based score composition of blue hydrogen supply candidate countries by scenario

의 가중치 상승 폭이 상대적으로 더 크기 때문이다.

시나리오 C에서는 교역 용이성과 해상운송 안정성에 해당하는 6개 지표가 완전히 제외됨에 따라 두 부문의 가중치가 소거되고, 수소 수출 인프라와 수소 수출 가능 규모 두 부문만으로 100%가 구성된다. 그린수소는 수소 수출 인프라 46.1%·수소 수출 가능 규모 53.9%, 블루수소는 각각 47.4%·52.6%로 재배분된다. 그린수소와 블루수소 모두에서 이러한 구조적 변화 방향이 일치하며, 이는 에너지 안보 관련 지표의 포함 여부가 두 수소 유형에 공통으로 부문 간 비중 분포에 영향을 미침을 보여준다. 따라서 시나리오 B와 C 간의 국가별 점수 차이는 순수하게 교역 용이성과 해상운송 안정성 지표의 기여에 의한 것으로 해석할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 에너지 안보 관점에서 해외 청정수소의 국내 안정적 도입을 위한 공급 후보국 평가체계를 개발하고, 이를 그린수소와 블루수소 후보국에 적용하여 국가별 도입 적합성을 비교·분석하는 것을 목적으로 하였다. 「제1차 수소경제 이행 기본계획(2021)」의 2050년 해외 청정수소 수입 목표(22.9백만 ton)와 해외 공급망 40개 확보 목표를 기준으로 국가당 최소 수소 생산량(1,259,500 ton/yr)을 산정하고, AEL 기반 수전해 경로를 적용한 그린수소 22개국, SMR-CCS

경로를 적용한 블루수소 10개국을 공급 후보국으로 도출하였다. 이어 수소 수출 인프라, 우리나라와의 교역 용이성, 해상운송 안정성, 수소 수출 가능 규모의 4개 평가 부문 아래 공통지표 10개와 수소 유형별 특화지표 5개씩을 포함한 총 15개 세부지표 체계를 구성하고, 전문가 AHP를 통해 지표별 가중치를 산정하여 국가별 도입 적합성 종합점수를 도출하였다.

전문가 AHP 가중치 산정 결과, 그린수소 평가에서는 수소 수출 인프라(37.1%)와 수소 수출 가능 규모(35.9%) 부문이, 블루수소 평가에서는 수소 수출 인프라(37.9%)와 수소 수출 가능 규모(33.6%) 부문이 높은 비중을 차지하였다. 이는 전문가 집단이 청정수소 도입 대상국 선정에서 물리적 생산 기반, 수출 인프라, 장기 공급 여력을 핵심 판단 요소로 인식하고 있음을 시사한다. 반면 우리나라와의 교역 용이성과 해상운송 안정성의 합산 가중치는 그린수소 27.0%, 블루수소 28.5%로 상대적으로 낮게 산정되었다.

가중치 시나리오 비교를 통해 에너지 안보 관련 지표의 포함 여부가 공급 후보국 선정 결과에 미치는 영향을 검토하였다. 시나리오 B(AHP 가중치) 기준으로 그린수소에서는 중국·호주·미국·캐나다·스페인 이, 블루수소에서는 미국·호주·캐나다가 최상위 후보국으로 도출되었으며, 이들은 가중치 조건 변화에도 안정적으로 유지되었다. 그러나 중위권 이하에서는 시나리오에 따른 순위 변화가 두드러졌다. 그린수소

의 경우 최상위 5개국은 시나리오 C에서도 순위가 유지됐지만, 상위 5개국을 제외한 17개국의 평균 순위 변동은 4.5단계(10개국이 5단계 이상 이동)에 달하였고, 인도네시아와 베트남의 점수는 각각 31.33→17.64점(-43.7%), 32.40→19.68점(-39.3%) 하락하였다. 블루수소의 경우 러시아는 시나리오 B의 33.26점(5위)에서 시나리오 C의 39.44점(4위)으로 상승하였으며, 나이지리아·알제리 역시 유사한 상승 패턴을 보여 이들 국가가 생산 경쟁력은 높으나 교역·안보 조건이 불리한 구조임을 확인하였다.

이러한 결과는 에너지 안보 지표가 전문가 AHP에서 상대적으로 낮은 가중치를 부여받았음에도 불구하고, 지정학적 위험과 교역 안정성 등 수소 수출 잠재량·인프라 중심 평가에서는 포착되지 않는 한국 특유의 수입 여건을 반영하는 실질적 평가요소로 기능함을 실증한다. 따라서 청정수소 공급망 설계 시 생산 경쟁력이 높더라도 에너지 안보 리스크가 큰 국가에 대해서는 수입 비중을 조정하는 방식의 포트폴리오 전략이 필요하며, 본 연구에서 개발한 평가체계는 에너지 안보 리스크를 고려한 청정수소 수입국 포트폴리오 설계의 정량적 근거를 제공한다.

다만 본 연구는 일부 지표가 정성적 평가·개별 수집 자료에 의존하고 생산단가(LCOH)·탄소집약도 등 경제성·환경성 지표를 포함하지 못해 지표 구성의 포괄성에 한계가 있다. 따라서 향후에는 지표체계를 정교화하고 경제성·환경성 요인을 통합한 다차원 평가로 확장하는 후속 연구가 필요하며, 본 연구는 그 출발점으로서 청정수소 수입국 선정과 공급망 다변화 전략 수립의 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 글로벌 TOP 전략연구단 지원사업(No. GTL24052-100)의 지원을 받아 수행되었다.

References

1. D. H. Kim, Y. Choi, J. H. Oh, and C. H. Park, "Analysis of carbon emission effects and hydrogen prices for overseas green hydrogen imports by development of green ship", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 1-13, doi:<https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.1>.
2. IEA, "Global hydrogen review 2024", IEA, Paris, 2024, Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
3. IRENA, "Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: part I – trade outlook for 2050 and way forward", IRENA, Abu Dhabi, 2022, Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Global-Hydrogen-Trade-Outlook>.
4. IEA, "World energy outlook 2022", IEA, Paris, 2022, Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
5. Ministry of Trade, Industry and Energy, "The 1st basic plan for implementation of the hydrogen economy", Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea, 2021, Retrieved from https://www.motie.go.kr/kor/article/ATC_Lc01b2801b/67130/view.
6. IEA, "World energy outlook 2024", IEA, Paris, 2024, Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.
7. APERC, "A quest for energy security in the 21st century: resources and constraints", Asia Pacific Energy Research Centre, Tokyo, 2007, Retrieved from https://aperc.or.jp/file/2010/9/26/APERC_2007_A_Quest_for_Energy_Security.pdf?utm.
8. B. Kruyt, D. P. van Vuuren, H. J. M. de Vries, and H. Groenenberg, "Indicators for energy security", *Energy Policy*, Vol. 37, No. 6, 2009, pp. 2166-2181, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.006>.
9. B. K. Sovacool and I. Mukherjee, "Conceptualizing and measuring energy security: a synthesized approach", *Energy*, Vol. 36, No. 8, 2011, pp. 5343-5355, doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.043>.
10. IRENA, "Geopolitics of the energy transformation: the hydrogen factor", IRENA, Abu Dhabi, 2022, Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>.
11. M. Noussan, P. P. Raimondi, R. Scita, and M. Hafner, "The role of green and blue hydrogen in the energy transition—a technological and geopolitical perspective", *Sustainability*, Vol. 13, No. 1, 2021, pp. 298, doi:<https://doi.org/10.3390/su13010298>.
12. IEA, "Global hydrogen review 2025", IEA, Paris, 2025, Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>.

13. J. W. Kim and T. E. Lee, "A study on technological and institutional improvement of electrolyser for the economics of clean hydrogen production (KEEI Issue Paper 23-02)", KEEI, Ulsan, 2023, Retrieved from https://www.keei.re.kr/pdfOpen.es?bid=0028&list_no=119403&seq=1.
14. IEA, "Hydrogen production and infrastructure projects database", IEA, Paris, 2025, Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database>.
15. ARGUS Media, "Argus hydrogen and future fuels", ARGUS, London, 2024, Retrieved from <https://www.argusmedia.com/en/solutions/products/argus-hydrogen-and-future-fuels>.
16. United Nations Statistics Division (UNdata), "Energy statistics database", United Nations, New York, 2025, Retrieved from <https://data.un.org/Explorer.aspx?d=EDATA>.
17. Ministry of Foreign Affairs of Korea (MOFA), "Economic diplomacy portal", 2025, Retrieved from <https://president.globalwindow.org/>.
18. Korean Statistical Information Service (KOSIS), "Korea trade statistics", Statistics Korea, Daejeon, 2025, Retrieved from <https://kosis.kr>.
19. Global Integrated Shipping Information System (GICOMS), "Piracy accident map", Korea Coast Guard, Sejong, 2024, Retrieved from <https://www.gicoms.go.kr/>.
20. Institute for Economics and Peace (IEP), "Global peace index 2024", IEP, Sydney, 2024, Retrieved from <https://www.visionofhumanity.org/maps>.
21. D. Tonelli, L. Rosa, P. Gabrielli, K. Caldeira, A. Parente, and F. Contino, "Global land and water limits to electrolytic hydrogen production using wind and solar resources", Nature Communications, Vol. 14, 2023, pp. 5532, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41107-x>.
22. EMBER, "Global electricity review 2023", EMBER, London, 2023, Retrieved from <https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2023>.
23. IRENA, "Renewable power generation costs in 2023", IRENA, Abu Dhabi, 2024, Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>.
24. OPEC, "Annual statistical bulletin 2025", OPEC, Vienna, 2025, Retrieved from <https://www.opec.org/assets/assetdb/asb-2025.pdf>.
25. Global CCS Institute, "Fasilitas Database", Global CCS Institute, Melbourne, 2024, Retrieved from <https://co2re.co/storagedata>.
26. T. L. Saaty, "The analytic hierarchy process", McGraw-Hill, USA, 1980, Retrieved from https://books.google.co.kr/books/about/The_Analytic_Hierarchy_Process.html?id=Xxi7AAAAIAAJ&redir_esc=y.