

신재생 에너지를 이용한 해외 그린 암모니아 프로젝트에 대한 경제성 비교

Economic Feasibility Comparison of Overseas Green Ammonia Project Using Renewable Energy

신현창^{1*}, 목학수²

Hyun-Chang Shin^{1*}, Hak-Soo Mok²

〈Abstract〉

Hydrogen is considered a key energy source to achieve carbon neutrality through the global goal of 'Net Zero'. Due to limitations in domestic green hydrogen production, Korean companies are interested in importing green hydrogen produced overseas. Because Australia and the Middle East possess high-quality renewable energy resources, they are attracting attention as suitable regions for producing green hydrogen using renewable energy. The cost of constructing and operating a green ammonia plant varies depending on the region. In this study, an economic feasibility comparison of green ammonia plant construction in Australia and the Middle East is conducted. Through this, it is expected to contribute to the economic analysis and feasibility analysis of the project to import hydrogen in the form of green ammonia into Korea.

Keywords : Renewable Energy, Solar Power, Wind Power, Green Hydrogen, Green Ammonia Production, Economic Feasibility Comparison

1* 교신저자, DNV Korea Energy Systems, 수석 검사관
E-mail: juba402@naver.com

2 부산대학교 산업공학과 명예교수
E-mail: hsmok@pusan.ac.kr

1* Corresponding Author, DNV Korea Energy Systems,
Principal Engineer
E-mail: juba402@naver.com

2 Dept. of Industrial Engineering, Pusan National University,
Professor Emeritus Dr. -Ing.
E-mail: hsmok@pusan.ac.kr

1. 서론

전 세계적으로 에너지 전환에 대한 예측은 최근 지정학적 리스크 증가의 영향을 받고 있지만, 주요 에너지의 수요와 공급에 대한 상세 예측 인사이트를 제공하는 DNV의 Energy Transition Outlook (ETO) 2023 보고서[1]에 따르면 2050년까지 Net Zero와 탄소중립을 달성하기 위해 에너지 전환은 지속적으로 진행될 것이라고 예상된다.

2021년, 대한민국 정부는 수소경제의 첫 법정 기본계획인 제1차 수소경제 이행 기본계획 발표를 통하여 탄소중립 이행을 위한 핵심 수단으로 수소를 선정하고 수소경제 이행을 통한 국내 산업 경쟁력 제고 및 에너지 안보 강화를 위해 수소 생산, 인프라 구축, 제도개선 등에 대한 마일스톤으로 제시하였다. 이에 따라 정부는 2020년에 22만 톤에서 2030년 390만 톤, 2050년에는 2,790만 톤을 공급하는 계획을 발표하였다. 그중 해외에서 수입되는 수소는 2030년 196만 톤, 2050년 2,290만 톤으로 수소 수입 의존도는 2030년 50.3%에서 2050년 82.1%로 지속적으로 증가할 것으로 예상된다[2].

이에 따라 국내 주요 기업들은 해외 녹색 수소 생산 플랜트 건설 투자에 많은 관심을 보이고 있다. 본 연구에서는 서호주와 중동의 UAE에서 신재생 에너지로 생산된 전력으로 녹색 수소(green hydrogen)를 생산하는 플랜트 개발에 대한 투자 타당성 검토와 두 후보 지역 간의 경제성 비교를 수행하였다.

2. 글로벌 수소 생산 동향과 운송 방법

대부분의 수소는 천연가스 등의 화석연료를 개질하여 생산하고 있으며 이 과정에서 다량의 CO₂

배출되기 때문에 “회색 수소 (grey hydrogen)”라고 부른다. 탄소중립 목표 달성하기 위해 2025년 이후에는 CCS (Carbon Capture and Storage)를 통한 블루 수소와 신재생 에너지로 생산되는 녹색 수소가 증가될 것으로 예측된다[1].

녹색 수소는 재생에너지로 생산된 전력으로 수전해 방식으로 생산된 것을 의미하며, 경제적으로 생산할 수 있는 지역과 소비하는 지역의 지정학적 위치의 차이로 인해 수소의 운송은 경제성을 평가하는 요소 중 하나가 된다.

선박 운송을 위해서는 수소 액화 과정이 요구되지만 -253° C 이하로 온도를 유지해야 하는 기술적 난이도와 고비용으로 인해 경제성 확보가 어렵다. 여러 대안 중 주목받는 기술은 액화온도가 -33.3° C인 암모니아 형태로 운송하는 방식이다. 암모니아를 다시 수소로 변환하는 크래킹(cracking) 공정으로 인해 약 15-20%의 에너지 손실이 발생하지만, 기존 구축된 암모니아 운반선 및 항만과 같은 인프라를 이용할 수 있으며 액화 수소보다 단위 부피당 1.7배 더 수소를 저장할 수 있는 장점 때문에 경제성을 갖춘 운송 대안으로 여겨진다. 따라서 본 연구에서는 수소를 암모니아로 변환하여 수송하는 방식을 가정하였다.

3. 신재생 에너지를 이용한 전력 생산 비교

서호주와 UAE 지역의 태양광 전력 생산량의 추정은 Global Solar Atlas[3]에서 제공하는 자료를 기반으로 분석되었다. 서호주 후보 지역의 태양광 전력생산량의 추정치는 5.53 kWh/kWp, 연평균 1,943 kWh/kWp로 분석되었고, UAE 후보 지역의 추정치는 일 평균 4.98 kWh/kWp, 연평균 1,815 kWh/kWp로 분석되었다(Fig. 1).

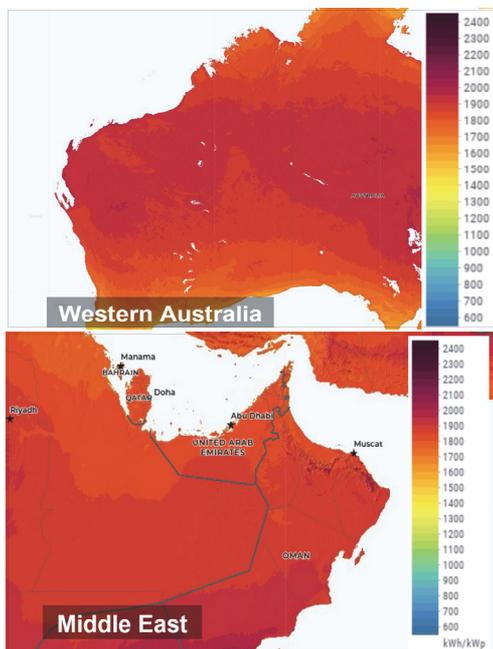


Fig. 1 Solar energy intensity in Western Australia and Middle East

두 지역의 풍력의 경제성 분석은 Global Wind Atlas[4]에서 제공하는 자료를 기반으로 수행되었다. 서호주 후보지역은 평균 풍속 7.8-8.0 m/s로 경제성이 있으며 평균 전력 밀도(mean power density)는 약 450W/m²으로 분석되었다. 반면 UAE 해안의 평균 풍속은 4-5m/s로 풍력터빈 운전 시 최소 풍속인 3-4m/s보다 높은 것으로 나타났다(Fig. 2). 그러나 유럽연합 공동연구센터(JRC)가 발표한 보고서에서 언급한 최소 수익성 평균 풍속인 5.5m/s보다 낮아 경제성이 부족한 것으로 분석됐다[5].

따라서 UAE 지역에서는 태양광으로만 전력을 생산하고, 서호주에서는 풍력과 태양광으로 발전하는 것이 합리적인 것으로 평가된다.

4. 녹색 수소 및 암모니아 생산 기술

수전해 방식으로 물을 수소와 산소로 분해하여 수소를 생산할 수 있는 대표 기술들을 Table 1과 같이 비교 분석하였다.

양성자 교환막 수전해 기술인 PEM (Proton

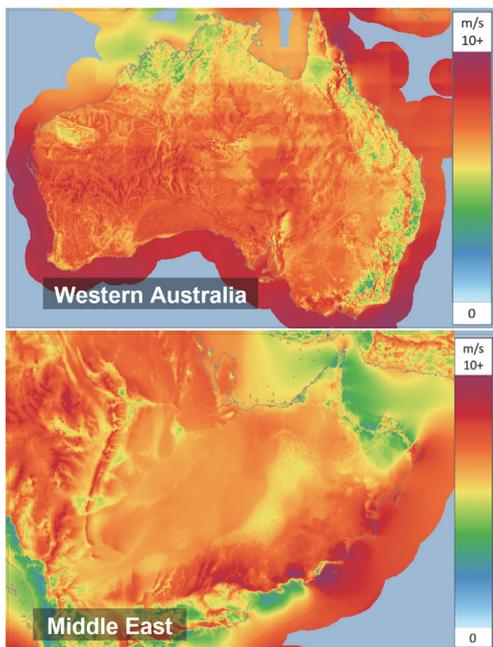


Fig. 2 Mean wind speeds across Australia and Middle East at 100 m elevation

Table 1. Comparison of main electrolyzer technologies

| | Alkaline | PEM | AEM | HTSE |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-------------------|---------------------|
| Operating temperature [°C] | 70-90 | 50-80 | 40-60 | 700-850 |
| Operating pressure [bar] | 1-30 | 30-70 | ~30 | 1 |
| Efficiency [kWh/Nm ³] | 4.7 | 4.8 | 4.8 (stack only) | 3.6 |
| Stack lifetime [h] | ~80,000 | ~50,000 | <5,000 | ~20,000 |
| Commercial status | Available | Available | Under development | Available 2022-2024 |

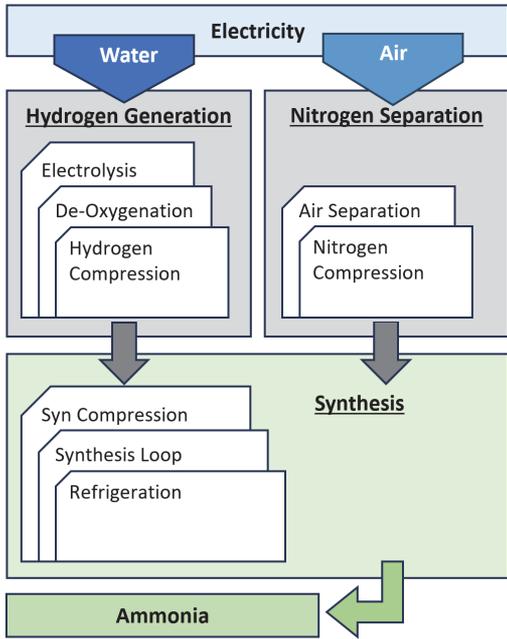


Fig. 3 Electricity-based ammonia production method with the Haber-Bosch process for ammonia synthesis

Exchange Membrane), 음이온 교환막 수전해 기술인 AEM (Anion Exchange Membrane), 고체산화물 수전해 기술인 HTSE (High-Temperature Steam Electrolysis)는 상대적으로 발전된 기술이지만 아직 대용량의 수전해에 사용된 사례가 부족한 반면, Alkaline 기술은 20세기 초부터 사용된 기술적 성숙도와 생산의 안정성이 높은 것으로 평가되었다. 따라서 수전해 기술로 Alkaline 방식이 선택되었다[6].

Haber-Bosch 공정은 현재 가장 많이 사용되는 성숙된 암모니아 생산 기술이다[7]. 녹색 암모니아 생산을 위해 Haber-Bosch 공정은 기존의 메탄 개질 대신 수전해 방식으로 생산된 수소와 공기분리장치(ASU)를 통해 생산된 질소를 합성하여 암모니아를 생산한다(Fig. 3)[8].

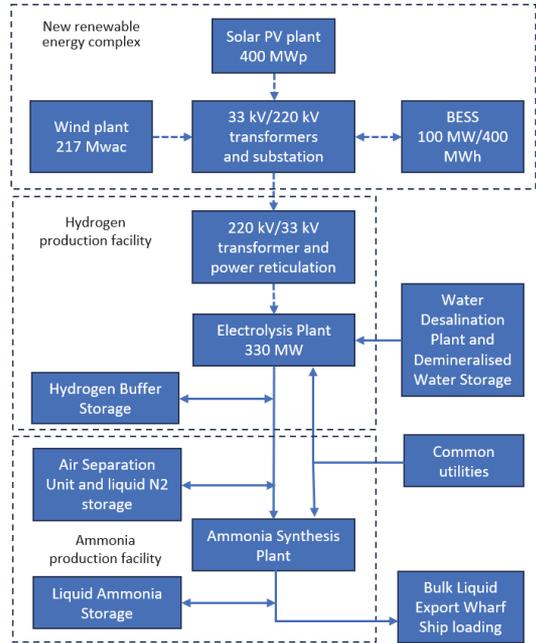


Fig. 4 Block Flow Diagram - Integrated Renewable Power-to-Ammonia Facility Concept

5. 생산 설비 구성의 최적화

태양광과 풍력으로 생산된 전력의 양은 가변적이기 때문에 생산 설비 구성에서는 최적화가 상대적으로 어렵고 변동성을 줄이기 위한 완충 설비를 도입이 필요하며 전력 생산의 변동성의 영향력을 최소화하면서 설비의 최적 용량을 결정하는 것이 핵심이다.

태양광 발전은 주간에만 가능하며 시간대에 따라 생산량이 달라진다. 풍력은 24시간 가동이 가능하지만 풍속의 변화에 따라 전력 생산량이 달라진다. 전력 생산 예측은 평년을 기준으로 1년간 시간대별 태양광의 세기와 풍속을 기반으로 계산이 되었다.

Fig. 4와 같이 암모니아 생산 플랜트는 전력생산 모듈, 수소 생산 모듈과 암모니아 생산 모듈 및 유

틸리티 모듈로 구성된다. 전력 생산 모듈에서는 변동성을 줄이기 위해 BESS (Battery Energy Storage System)를 도입하고, 수소 생산 모듈에서는 변동성을 줄이기 위한 수소 임시 저장탱크와 암모니아 수출을 위한 암모니아 저장탱크를 도입하였다.

6. 해외 생산 녹색 암모니아의 경제성 비교

6.1 타당성 및 경제성 비교 기준

녹색 암모니아 생산 시설과 운송 시설 및 인프라에 대한 타당성 분석을 위해 본 연구에서는 다음의 기준으로 타당성 및 경제성 비교분석을 수행한다. 평가 기준은 기존 수행된 프로젝트에 영향을 미친 주요 요인들을 파악하여 상대평가가 가능하도록 선정되었다.

- 재생 가능 자원의 가용성: 태양광과 풍력의 강도와 품질을 분석
- 재생에너지를 통한 전력 생산 비용: 설비와 장비의 현지 도입 비용과 태양광과 풍력을 통해 생산되는 전력량을 통한 생산비용 분석
- 인프라 및 그리드 연결: 신재생 발전소와 암모니아 생산 플랜트 간의 전력 전송 및 기존 전력망 연결 가능성과 파이프라인 등의 운송 설비 검토 분석
- 수자원의 안정적인 확보: 수전해 방식을 위해 요구되는 담수 확보 방식으로 강물, 지하수, 해수 담수화 설비 필요성 분석
- 정부 정책 및 규제: 배출 감소 목표, 탄소 가격 책정, 재생 가능 에너지 개발 유인책과 관련된 정책 평가
- 운송 용이성: 국내 도입을 위한 암모니아 수출 항만 시설 가용성 분석

- 건설 및 운영을 위한 노동 및 기술 수준: 플랜트 건설을 위한 노동력 확보 용이성과 운영을 위한 인력 채용 용이성 분석
- 환경 영향 평가: 개발 지역에 대한 환경에 미치는 영향과 규제를 평가
- 지역사회 수용성: 프로젝트 및 산업 개발에 관한 지역사회의 수용성 및 참여성과 잠재적인 사회적 영향과 이해관계자 협의 및 지원의 필요성 분석
- 보안 및 안정성: 사업에 영향을 줄 수 있는 지정학적 리스크와 자연재해 발생 가능성 분석

후보 지역 간의 비교 결과는 Table 2에 요약되어 있다. 서호주는 기존 전력망과의 연결이 어려워 오프 그리드로 운영이 되어야 하지만 UAE는 풍력 발전의 경제성 부족과 중동의 지정학적 리스크가 약점으로 분석된다.

Table 2. Comparison of development environments between Australia and the Middle East

| | 서호주 | 중동 |
|--------------|--|---------------------------------|
| 재생가능자원 | 태양광, 풍력 | 태양광 |
| 인프라 및 그리드 연결 | 도로 접근성 양호 암모니아 수출항 인접 오프 그리드 | 도로접근성양호 암모니아 수출항 인접 온 그리드 |
| 수자원 | 담수화 필요 | 담수화 필요 |
| 정부정책 및 규제 | 우호적인 정부 정책 | 우호적인 정부 정책 |
| 한국으로 운송 | 상대적으로 짧은 운송거리 | 상대적으로 먼 운송 거리 |
| 건설 및 운영 | 인근 국가에서 건설 인력 수급이 가능하지만 정부의 외국인 정책 확인 필요 | 인도등 인근 국가에서 건설 인력 수급이 용이함 |
| 환경영향평가 | 거주지역이 아니라 환경 규제가 낮음 | 산업단지에 위치하여 환경 규제가 낮음 |
| 지역사회 수용성 | 거주민 적어서 개발 반대 가능성이 낮음 | 산업단지에 위치하여 개발 반대 가능성이 낮음 |
| 보안 및 안정성 | 분쟁지역이 아니고 사이클론의 이동경로에 위치하지않음 | 주변의 국가간의 분쟁 가능성이 있음 |

6.2 설비 용량 최적화 비교

설비별 최소 용량 결정을 위해 시뮬레이션 모델을 통해 목표량 생산을 보장할 수 있도록 아래 식을 만족하는 최소 가동률과 공급되는 전력량을 시간별로 계산하여 최적의 가동률을 분석하였다.

$$PS_{hr} = PS_H + PS_{des} + PS_{Hs} + PS_A + PS_{ASU} + PS_{As} + PS_{ESS,in} + PS_{grid,out} + PS_{util} + PW_{loss} \quad (1)$$

수소 생산과 암모니아 합성 가동률의 결정은 이동평균법을 통해 최소 가동률과 기존 생산량을 기반으로 다음 시간의 요구되는 생산량을 만족하는 조건으로 결정되고, 요구되는 전력이 분배된다. 시뮬레이션에서는 공급 전력 가변성을 줄이기 위한 완충 장치로 BESS (Battery Energy Storage System)와 암모니아 생산 변동성을 줄이기 위한 임시 수소 저장 탱크를 고려하였다.

시뮬레이션 모델을 통해 계산된 시간대별 전력, 수소와 암모니아 생산량 및 BESS, 수소와 암모니아 저장용량을 분석을 위한 프로파일을 생성하였다(Fig. 5).

시뮬레이션을 통해 생성된 프로파일로 파악된

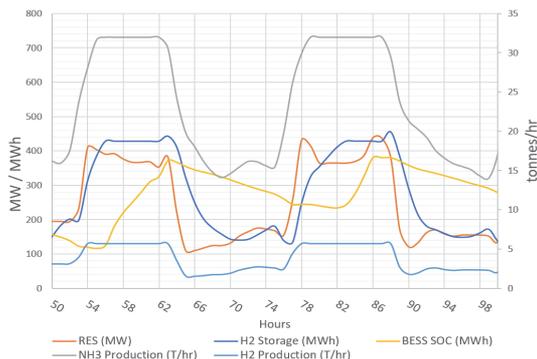


Fig. 5 Hourly time series of the green ammonia production profile

설비별로 요구되는 전력량과 시간대별 가동률을 기반으로 설비의 최적용량을 결정하였다.

Table 3과 같이 서호주의 경우 연간 15만톤의 암모니아 생산을 위해 400MW 용량의 태양광 발전단지와 217Mwac용량의 풍력발전 단지가 필요하며 35톤의 수소 임시 저장탱크가 필요한 것으로 분석되었다. UAE는 태양광 발전만 고려되어 상대적으로 큰 용량의 태양광 발전단지와 수소 임시 저장탱크 도입이 필요한 것으로 분석되었다.

건설비용 분석은 후보 지역의 유사 프로젝트 평균 비용을 바탕으로 최적화된 용량의 설비를 건설하는 비용을 산출하고 Table 4와 같이 단위 비용으로 비교 평가를 수행하였다.

암모니아 운송 비용은 2020년 기준으로 중동에서 울산항까지 약 \$0.4/kgH₂, 호주에서 울산항까지

Table 3. Production facility capacity

| | Western Australia | Middle East |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Target ammonia production | 150,000 tonnes | 200,000 tonnes |
| Solar PV | 400 MW | 1.2 GW |
| Wind | 217 Mwac | N/A |
| Electrolysis plant | 330 MW | 600 MW |
| H ₂ storage | 35 tonnes | 100 tonnes |
| Ammonia plant | 840 tpd | 1200 tpd |
| Ammonia storage | 60,000 m ³ × 2 | 30,000 m ³ × 2 |

Table 4. Comparison of construction cost by production facility

| | Western Australia | Middle East |
|------------------------|----------------------|----------------------|
| Solar PV | \$720/kW | \$600/kW |
| Wind | \$1150/kW | N/A |
| Electrolysis | \$500/kW | \$900/kW |
| Ammonia plant | \$625/tpa | \$765/tpa |
| H ₂ storage | \$400/kg | \$500/kg |
| Ammonia storage | \$480/m ³ | \$920/m ³ |

지는 약 \$0.23/kgH₂로 추정된다[9]. 운송 비용의 차이는 호주 대비 중동에서 한국까지의 해상 운송 거리가 약 2배 더 멀기 때문에 연료비가 2배 더 소요되고 동일한 양의 암모니아를 운송하기 위해 2배의 선박이 투입되어야 하기 때문이다.

7. 결론

기후 변화 대응과 탄소중립을 달성하기 위한 노력으로 수소에 대한 관심이 증가되고 있다. 2050년 수소공급량 2,790만 톤 중 82.1%인 2,290만 톤의 수소를 해외에서 도입하기 위해서는 경제성과 환경성을 모두 고려한 해외 수소 공급망 구축이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 해외 수소 공급망 구축을 위한 첫 단계인 녹색 암모니아 플랜트 건설의 타당성 분석과 호주와 UAE를 사례로 생산 설비 최적화와 경제성 비교를 수행하였다.

서호주 후보지역은 태양광 및 풍력 에너지의 품질이 양호하지만 주거지와 거리 때문에 건설 및 운영 인원 확보에 어려움이 예상되고 기존 전력망과의 연결에 제한이 있는 것으로 파악되었다. UAE 후보지역은 태양광 발전의 비용이 상대적으로 낮은 반면 풍력 발전의 경제성이 부족하여 전력 변동성에 대한 완충 설비 및 생산 설비의 용량을 상대적으로 더 크게 해야 할 필요가 있다. 이를 위해서는 기존 전력망에 연결하여 부족한 전력을 공급받을 수 있지만 녹색 수소 인증을 받는 데 어려움이 예상된다.

향후 해외 녹색 암모니아 생산 플랜트의 경제적인 후보지 선정에 위한 타당성 검토를 수행할 때 본 연구에서 제시한 평가 기준을 통해 체계적 비교 검토를 수행과 평가 기간 단축을 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] DNV Energy Transition Outlook 2023, <<https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download.html>> released 28 November 2023.
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, “Basic plan for implementing the hydrogen economy of Korea”, MOTIE, 2021.
- [3] Global Solar Atlas <<https://globalsolaratlas.info/>>, 2024. 04.
- [4] Global Wind Atlas <<https://globalwindatlas.info/>>, 2024. 04.
- [5] European Commission – Joint Research Center (EU-JRC), 2014, JRC wind status report: Technology, markets and economic aspects of wind energy in Europe, pp. 62-65.
- [6] Chatenet, Marian. Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments, Chemical Society Reviews. 51, pp. 4583-4762 (2022).
- [7] Appl, M., The Haber-Bosch Process and the Development of Chemical Engineering, pp. 29-54, (1982).
- [8] Green ammonia synthesis. Nat. Synth 2, pp. 581-582 (2023).
- [9] Youngkyun Seo, Technical-Economic Analysis for Ammonia Ocean Transportation Using an Ammonia-Fueled Carrier, Sustainability, vol 16, 2, p.827 (2024).

(접수: 2024.04.21. 수정: 2024.05.14. 게재확장: 2024.05.20.)