Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 449~457
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.449

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

그린암모니아 기반 수소생산공정 개발을 통한 3E 분석: 에너지, 경제성 및 환경성

김영훈[1] · 김기찬[1] · 윤정보[1] · 박성태[2] · 권휘웅[1†]

[1]순천향대학교, [2]한국수력원자력

3E Analysis for Hydrogen Production Process Development Based on Green Ammonia: Energy, Economics and Environment

YOUNGHUN KIM[1], GICHAN KIM[1], JEONGBO YUN[1], SUNGTAE PARK[2], HWEEUNG KWON[1†]

[1]Department of Nano Chemical Engineering, Soonchunhyang University, Asan 31538, Korea
[2]Hydrogen R&D Section, Department of H2 & Smart Business, Korea Hydro & Nuclear Power Co. LTD., Daejeon 34101, Korea

†Corresponding author :
khu3603@sch.ac.kr

Received 1 April, 2025
Revised 16 September, 2025
Accepted 18 September, 2025

Abstract >> One of the representative methods to produce green hydrogen is hydrogen production from green ammonia. The process of producing hydrogen from green ammonia is well known as a representative eco-friendly process because it does not generate direct CO_2. This research proposes a new process system for hydrogen production from green ammonia and analyzes in terms of energy efficiency, economic feasibility, and environmental impact. The energy efficiency of the proposed process is improved by 18.7% compared to the base process through heat integration and process improvement. In addition, the Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) of the proposed process is reduced by 21.5% compared to the base process while CO_2 emissions are also reduced by 28.9%, simultaneously.

Key words : Ammonia cracking process(암모니아 분해공정), Green ammonia cracking (그린암모니아), Energy efficiency(에너지효율), 3E analysis(3E 분석), Economic anlaysis(경제성분석), Environmental anlaysis(환경성분석)

1. 서 론

전 세계적으로 산업활동이 지속적으로 증가함에 따라 에너지 수요를 충족시키기 위해 화석연료를 사용해서 에너지를 생산 및 공급하고 있다. 그 결과, 온실가스 배출이 급격하게 증가하여 지구온난화가 가속화되고 있다. 온실가스 배출을 줄이기 위해, 파리 기후협약 및 기후변화협약 당사국 총회를 통하여 탄소중립을 실현하고자 각 국가별로 CO_2 감축 목표를 세우고 지속적으로 노력하고 있다. 탄소중립 달성의 일환으로 신재생에너지가 주목받고 있으며 신재생에너지 비율은 꾸준히 증가하는 추세이다[1). 하

지만 신재생에너지는 간헐적이고 예측이 불가능하고 지리적 불균형으로 인하여 글로벌 에너지 수요를 충족하기 어려운 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 새로운 공급 및 수요 시스템을 설계하는 것이 필수적이며 청정에너지로서의 그린 암모니아를 고려할 수 있다[2).

그린 암모니아 생산을 위한 수소는 신재생에너지와 수전해를 이용하여 생산하고 질소는 공기를 공기 분리장치로부터 분리 후 Haber-Bosch법을 사용하여 생산된다[3]. 또한, 암모니아는 지속 가능한 수소에너지 저장 및 운반체로 인정받고 있으며, 수소에 비해 저장된 에너지 단위당 더 낮은 비용 및 더 높은 체적 에너지 밀도(2.9~7.1 MJ/L) 등 장점을 가지고 있다[4]. 특히, 암모니아의 저장 비용은 수소에 비해 약 1/30 정도로 훨씬 저렴하며, 암모니아 분해 공정을 통해 생산되는 수소는 상대적으로 경제성이 뛰어나고, NO_x와 CO_2 배출량이 적다[5]. 또한, 대기압에서 비등점이 –33.3°C로 낮기 때문에 수소 또는 메탄보다 액체 상태를 더 쉽게 유지할 수 있으며, 상온에서 1.0 MPa 정도의 압력으로도 압축할 수 있다. 하지만, 생성된 가스에 잔류 암모니아가 존재하기 때문에 추가적인 수소정제기술이 필요하다. 암모니아를 에너지 케리어로 사용하는 데 있어 주요 기술적 한계는 암모니아 분해 기술이 대규모 상용화 단계가 아니며, 대규모 암모니아 분해를 달성하기 위해 고효율 촉매, 최적 공정설계 및 수소 정제 기술과 같은 주요 영역에 대한 집중적인 연구가 요구된다[2]. 더 나아가, 암모니아는 분해를 통해 수소로 전환될 수 있으며 수소에너지를 저장하고 운송할 수 있는 하나의 Carrier로서의 역할을 하고 암모니아와 관련 인프라는 이미 잘 구축되어 있다[4]. 이는 암모니아를 원재료로 하여 대규모 수소 활용 가능성을 시사한다[6]. 결론적으로, 암모니아 분해공정은 수소 생산을 최적화하고 반응기를 통과 후 배출되는 가스를 효과적으로 관리하는 것이 중요하며 암모니아를 연료로 한 수소 생산 기술의 효율성과 확장성을 개선하는 데 매우 중요한 고려 대상이 된다[5].

본 연구는 액체 암모니아를 원재료로 한 저장 및 냉동 시스템, 암모니아 분해 반응기, 수소 분리 및 정제 시스템을 포함한 새로운 수소 생산 공정을 제안하였다. 제안된 수소 생산 공정을 대상으로 공정 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였으며 공정 시뮬레이션 결과와 참고문헌을 기반으로 자본지출인 CAPEX (Capital Expenditure) 및 운영비용인 OPEX (Operational Expenditure)를 산정하였으며 이를 기준으로 균등화 수비용인 LCOH (Levelized Cost of Hydrogen)를 도출하여 경제성을 분석하였다. 더 나아가, 환경성 분석을 수행하였으며 제안된 수소 생산 공정을 전체적인 관점에서 타당성을 검토하였다.

2. 공정 요약

본 연구에서는 PACP (Proposed Ammonia Cracking Process)공정 모델링 및 시뮬레이션을 통하여 BACP (Base Ammonia Cracking Process)공정과 비교분석 하였다.

2.1 암모니아 분해 공정

암모니아 분해(Ammonia Cracking) 반응은 흡열 반응으로 외부로부터의 열원이 공급되고 반응기 내에서 암모니아가 열분해되어 수소가 생산된다. 암모니아 열분해 반응 온도는 800°C～1200°C이며 고온의 반응 조건을 유지하기 위하여 외부전원으로부터 열에너지가 공급되어야 한다[4].

2.1.1 BACP 공정

Fig. 1은 BACP 공정으로써 암모니아 분해공정을 보여준다. Feed로 액체 암모니아가 들어가고 높은 전환율을 달성과 운전조건을 만족시켜주기 위하여 반응기로 추가적인 열을 외부전원을 통하여 공급한다. 암모니아 분해 반응기 내에서 일어나는 화학반응은 수식 (1)과 같다.

$$NH_3 \rightarrow 1.5H_2 + 0.5N_2 \; \Delta H_R^\circ = +30.6 KJ/mol H_2 \quad (1)$$

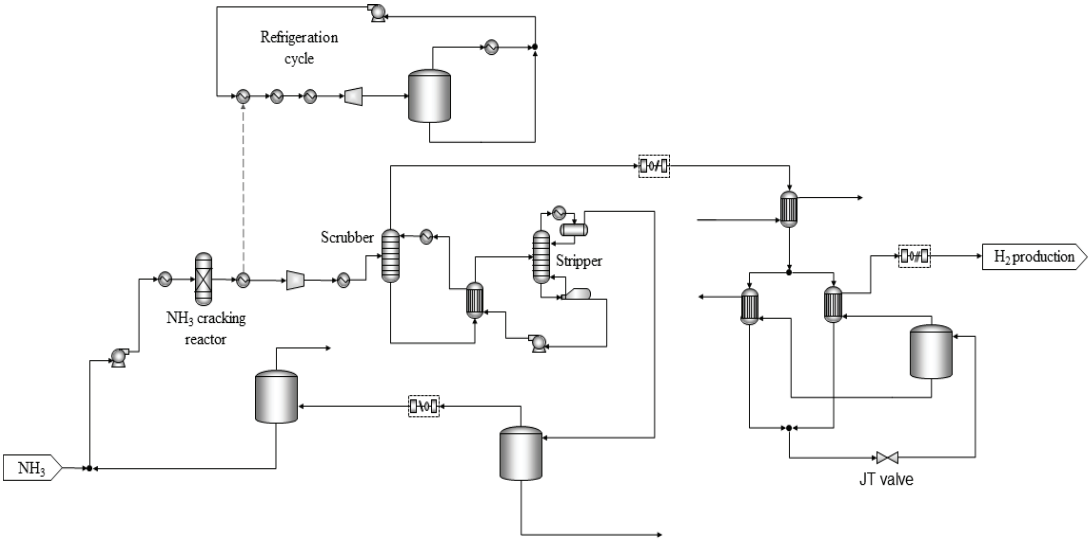

Fig. 1. PFD of BACP[8)]

암모니아 분해공정 반응기로부터 나오는 기체 혼합물은 압축된 후 암모니아 회수 장치로 공급된다.

이때, 미반응된 암모니아는 물을 흡수제로 사용하여 암모니아를 선택적으로 흡수하는 흡수장치(Absorption Unit)인 스크러버를 통해 회수되며, 남아있는 다른 기체들은 흡수되지 않고 상부로 배출된다. 이때, 용매인 물에서 암모니아를 증발시켜 분리하는 스트리퍼를 거쳐, 회수된 암모니아는 분리되어 냉각 및 가압 과정을 거친 후 분해 단계로 재활용시킨다. 또한 스트리퍼를 거쳐 암모니아가 분리된 용매는 다시 스크러버로 공급하여 재생된다. 최종제품으로 고순도 수소를 얻기 위해, 스크러버에서 분리된 기체들을 압축한 후 열교환기를 거쳐 온도를 낮추고, 극저온 Rankine Cycle을 통해 남아있는 질소 기체를 완전히 액화하여 제거한다. 이를 통해 99.97%의 순도에 도달한 수소는 압축되어 최종 제품으로 생산된다.

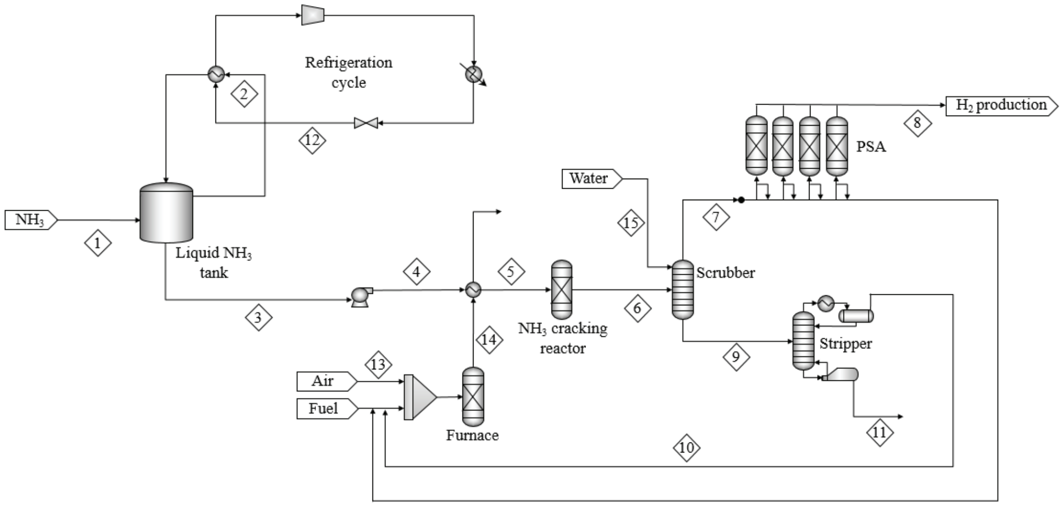

Fig. 2. PFD of PACP

Table 1. Stream information of PACP

		1	2	3	4	5	6	7	8
Temperature (°C)		-34.0	-33.0	-34.0	-33.7	602.1	602.1	64.2	25.0
Pressure (kPa)		101.3	101.3	101.3	1700.0	1700.0	1700.0	101.3	101.3
Molar flowrate (kmole/h)		978.9	1.0	978.9	978.9	978.9	1859.8	2421.7	1320.6
Composition	H_2	-	-	-	-	-	0.7105	0.5457	0.9997
	H_2O	-	-	-	-	-	-	0.2375	-
	NH_3	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0526	0.0349	-
	N_2	-	-	-	-	-	0.2368	0.1819	0.0003
		9	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	
Temperature (°C)		67.6	99.6	99.9	-34.5	25.0	853.6	32.0	
Pressure (kPa)		101.3	101.3	101.3	93.9	101.3	101.3	101.3	
Molar flowrate (kmole/h)		1791.0	912.7	878.3	2.1	606.6	1590.1	2352.9	
Composition	H_2	-	-	-	-	-	-	-	
	H_2O	0.9926	0.9855	0.9999	-	-	0.6388	1.0000	
	O_2	-	-	-	-	0.2100	0.0438	-	
	NH_3	0.0074	0.0145	0.0001	1.0000	-	-	-	
	N_2	-	-	-	-	0.7900	0.3174	-	

2.2 PACP 공정

Fig. 2와 Table 1은 PACP공정과 스트림 정보를 보여준다. BACP 공정과 비교분석을 위하여 100 mol% 액체 암모니아를 Feed로 공급하였다. Feed는 저장탱크로 공급되며 저장탱크로부터 Boil-off Gas (BOG) 발생하기 때문에 이를 다시 액화시켜 공급하기 위해 암모니아를 냉매로 하는 냉동사이클을 이용하였다. 냉동사이클은 증발기, 컴프레서, 응축기, 팽창 밸브로 구성되며, 이때 증발기를 통해 열 교환되어 냉각된 암모니아 BOG는 액체 상태가 되어 저장탱크로 다시 회수된다. 이 액체 암모니아는 분해 반응기로 공급되기 전에, 반응 조건을 만족시켜주기 위해 펌프를 통해 1700 kPa까지 압축되고, 퍼니스로부터 추가적인 열을 공급받아 약 600°C까지 가열된다. 퍼니스에 사용되는 연료는 회수된 암모니아와 수소를 사용하였으며 완전연소가 일어난다고 가정하였다. 암모니아 분해 반응기 내에서 암모니아를 분해하기 위해 사용된 촉매는 Ru 기반의 Ru/Al_2O_3 촉매이며, 분해된 생성물은 미반응된 암모니아를 제거하기 위하여 스크러버로 공급된다. 생성물 중 암모니아를 포함한 물은 스크러버 하부로 배출된 후 스트리퍼로 공급되고 남은 기체 생성물들은 스크러버 상부로 배출된 후 Pressure Swing Adsorption (PSA)를 통하여 고순도 수소가 생산된다. 스트리퍼는 용해되어있는 암모니아를 증발시킨 후 상부로 배출되어 퍼니스로 리사이클되며, 하부로는 폐수가 배출된다. 본 연구에서 제안된 공정 모델링 및 시뮬레이션에 사용된 정보들은 아래 Table 2와 같다.

Table 2. Information of PACP

Parameter	Value
Feed	-34°C, 101.3 kPa
BOG generation	0.1 wt% of Feed
Ammonia cracking reactor	600°C, 1700 kPa
Ratio of conversion	99%
Ammonia concentration in wastewater	50 ppmwt
Hydrogen purity	99.97 mol%
Catalyst	Ru/Al_2O_3

3. 공정 분석 방법론

3.1 공정효율 분석

본 연구에서 PACP 공정은 공정에 공급되는 암모니아와 생산되는 수소의 저위발열량(Lower Heating Value, LHV)을 기준으로 에너지 효율을 도출하고 BACP 공정과 PACP 공정을 상호 비교 분석하였다. 전체 시스템의 에너지 효율은 수식 (2)와 같다.

$$\eta(\%) = \frac{\dot{m}_{H_2 output} \times LHV_{H_2}}{(\dot{m}_{NH_3 input} \times LHV_{NH_3}) + E_{fuel} + E_{electricity}} \quad (2)$$

본 식에서 $\dot{m}_{H_2,output}$과 $\dot{m}_{NH_3,input}$은 각각 최종으로 생산되는 수소의 질량유량(kg/hr)과 공정으로 들어가는 암모니아의 질량유량(kg/hr)을 의미한다. 또한, LHV_{H_2}와 LHV_{NH_3}는 각각 수소와 암모니아의 저위발열량을 나타낸다. E_{fuel}와 $E_{electricity}$는 각각 공정에서 요구되는 연료와 전력을 나타낸다.

3.2 경제성 분석

BACP 및 PACP 공정에 대한 경제성 평가는 공정에 기반한 CAPEX와 OPEX를 산출하여 LCOH를 도출하였다. CAPEX는 직접 비용(예: 구매 장비 비용, 설치 비용, 파이핑 비용, 운영 서비스 시설 비용 등)과 간접 비용(예: 엔지니어링 및 감독 비용, 건설 비용, 예비 비용 등)으로 구성되며 수식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$CAPEX_{total} = CAPEX_{DI} + CAPEX_{ID} + CAPEX_{WCI} \quad (3)$$

또한, 구매 장비 비용을 추정하기 위하여 6/10 인자 규칙(Six-tenth Rule)이 적용하였으며 수식 (4)에 나타내었다. 일반적으로, Six-tenth Rule을 이용한 장치 구매 비용 추정은 운영기간 동안 경제성을 추정하는데 필수이며, Six-tenth Rule은 ±20% 내에서 대략적인 비용이 필요할 때 매우 만족스러운 결과를 제공해주는 것으로 알려져 있다[7].

$$C_2 = C_1\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{\alpha} \quad (4)$$

C_1과 C_2는 각각 주요 장비에 대한 추정 및 기준 비용을 나타내며 S_1와 S_2 는 각각 장비의 목표 및 기준 용량을 의미한다. α는 스케일링 인자로써 0.6을 적용한다.

또한, 연간 투자 비용은 전체 투자 비용에 자본회수계수(Cost Recovery Factor, CRF)를 곱하고 OPEX를 더하여 계산되며 수식 (5)와 같다. 자본회수계수는 할인율 i와 설비 수명 n을 고려하여 계산되며 수식 (6)과 같다.

$$Annualized\ Cost = (CAPEX \times CRF) + OPEX \quad (5)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6)$$

OPEX는 크게 직접적인 생산비용(소모품, 유틸리티, 인건비, 유지관리비 등), 고정비용(지역세금, 보험 및 재정비용), 공정간접비 및 관리비를 포함하고 있다. 이를 기반으로 LCOH를 산출할 수 있으며 수식 (7)과 같다. Table 3은 경제성 분석을 위한 가정 및 경제성 파라미터들을 보여준다.

$$LCOH = \frac{(CAPEX \times CRF) + OPEX}{Annual\ amount\ of\ H_2} \quad (7)$$

Table 3. Assumption for Economic parameters

Parameter	Value	Reference
Ammonia cost, USD/kg	0.52	[8]
Electricity cost, USD/kWh	0.07	[10]
Cooling water at 298K, USD/kg	0.000051	[8]
Discount rate, %	0.06	[9]
Plant working days, days/year	330	[10]
Plant life, years	20	[9]
Number of Labor	6	-

3.3 환경성 분석

본 연구에서 PACP 공정에 대한 환경성은 단위 수소 질량당 CO_2 배출량으로 산정하여 분석하였다[7]. 일반적으로, 공정으로부터 발생하는 CO_2는 직접 CO_2와 간접 CO_2로 분류되며, 전체 CO_2 배출량은 직접 CO_2와 간접 CO_2의 합으로 표현된다. 본 연구에서는 암모니아 분해를 통해 수소를 생산하기 때문에 직접 CO_2는 배출되지 않으며, 간접 CO_2 배출량은 유틸리티 중 전기 소비량을 기반으로 계산되었으며, 이때 고려해 준 장치들은 펌프, 압축기, 스트리퍼의 리보일러 및 PSA를 포함한다. 단위 CO_2 배출량은 수식 (8)에서 보여준다.

$$Unit\ CO_2\ emissions = \frac{Indirect\ CO_2\ emissons}{Total\ amount\ of\ H_2} \tag{8}$$

4. PACP 공정 결과 분석

본 연구에서는 PACP 공정에 대한 모델링 및 시뮬레이션에 기반하여 CAPEX와 OPEX를 포함한 기술경제성을 분석하였으며 단위 수소 질량 당 단위 CO_2 배출량을 산정하여 환경성을 평가하였다.

4.1 암모니아 분해 공정 모델링 및 시뮬레이션

PACP 공정은 액체 암모니아를 연료로 하여 직접적인 CO_2 배출이 없는 청정 수소를 생산한다.

Stream 1과 같이 Feed (-34℃, 101.3 kPa, 16,670 kg/hr)로 액체 암모니아가 저장탱크로 공급된다. 저장탱크에서는 저장량의 약 0.1 wt%만큼 BOG가 발생하며 (Stream 2) 발생된 BOG는 냉동 사이클 내의 증발기에서 발생되는 냉열을 통해 열교환된 후 액화되어 저장탱크로 회수된다.

저장탱크로부터 배출되는 Stream (Stream 3)은 반응조건을 만족시키기 위하여 펌프를 통해 약 1700 kPa로 가압된다(Stream 4). 반응기로 들어가기 전 Furnace로부터 나오는 Stream과 열교환을 통하여 Stream의 온도는 602.1℃까지 올라간다(Stream 5). 암모니아 반응기 내에서 분해 반응에 대한 전환율은 99%이며 배출되는 Stream에는 수소, 질소, 미반응된 암모니아가 포함된다(Stream 6). Stream 6은 Scrubber로 들어가고 물이 암모니아의 흡수제로 공급되어(Stream 15) 미반응된 암모니아를 흡수시켜 하단으로 배출되고(Stream 9), 이때 다른 기체들은 흡수되지 않고 상단으로 배출된다(Stream 7). Scrubber 상부로 나오는 이 Stream (Stream 7)은 PSA로 들어가며 99.97% 순도의 수소를 제품으로 최종 생산된다(Stream 8). Scrubber 하부로 나오는 Stream (Stream 9)은 Stripper로 들어가며 Stripper 상부로 배출되는 Stream (Stream 10)은 미량의 암모니아 등이 포함되어 있어 Furnace의 연료로 사용하기 위해 회수된다(Stream 10). Stripper 하부 Stream (Stream 11)은 Waste water로써 암모니아 농도를 50 ppmwt로 낮춘 후 배출된다(Stream 11). 또한, Furnace로 공급되는 연료로는 air (Stream 13)와 공정에서 회수된 미량의 암모니아, 질소 및 수소이며 퍼니스에서는 완전연소 후 H_2O와 N_2가 생성된다(Stream 14).

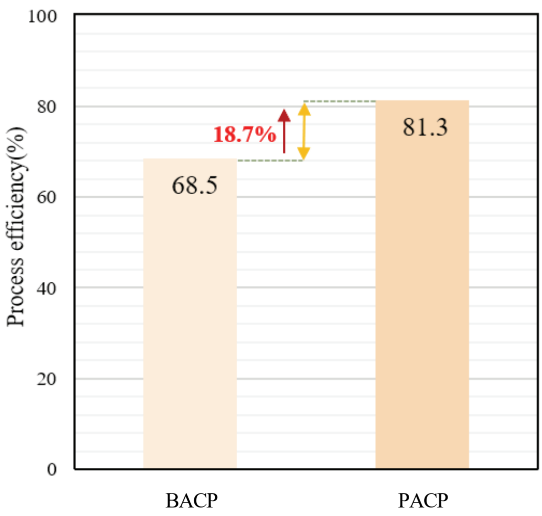

Fig. 3. Comparison of process efficiency for BACP and PACP

4.2 에너지 효율 결과 분석

Fig. 3은 BACP 공정과 PACP 공정의 효율을 비교한 것이다. 두 공정의 에너지 효율을 분석한 결과,

Table 4. Comparison of used power of BACP and PACP

	Power (kWh)
BACP	39,899
PACP	28,352

LHV를 기준으로 각각 68.5%와 81.3%로 나타났으며, BACP 공정과 비교 시 약 18.7%를 높일 수 있었다.

Table 4는 각 공정에 대한 총 소비전력량을 비교한 것이며, 에너지효율에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 공정 내에서 소비되는 전력이다. PACP 공정에서는 압축기, 히터, 리보일러 및 PSA에서 대부분의 전력을 소비하며 Base 공정 대비 장비수가 감소하여 상대적으로 전력 소비가 줄어든다. 또한, 본 PACP 공정에서는 Stripper 상부로 배출되는 미량의 암모니아를 리사이클시켜 Furnace의 연료로서 사용하기 때문에, Furnace로 들어가는 연료량이 감소하여 소비되는 에너지양이 줄어든다. 따라서, 리사이클을 통해 PACP 공정의 전력 소비량은 열통합 및 리사이클을 통하여 BACP 공정에 비하여 약 28.9% 줄일 수 있다.

4.3 경제성 결과

PACP 공정에 대한 시뮬레이션 결과 및 참고문헌을 기반으로 CAPEX와 OPEX를 추정하였으며 이를 바탕으로 LCOH를 도출 후, PACP 공정을 BACP 공정과 경제성을 비교 분석하였다.

Fig. 4는 BACP 공정과 PACP 공정의 전체 투자 비용을 비교한 것이다. 전체 투자 비용은 직접비용, 간접비용 및 운전자본 비용으로 구성되어 있다. PACP 공정의 전체 투자비는 BACP 공정 대비 약 40.6%를 줄일 수 있었다.

동일한 최종수소 생산량을 기준으로 PACP 공정은 열통합 및 공정구성 변경을 통하여 BACP 공정에 대비 공정 내 사용되는 장비구매 비용을 절감할 수 있으며 동시에 설치비용을 줄일 수 있다.

Fig. 5는 BACP 공정과 PACP 공정의 OPEX를 비교한 것이다. PACP 공정에 대한 전체 OPEX는 BACP 공정 대비 약 18.5%를 줄일 수 있었다. OPEX는 직접 생산 비용(Direct production cost, DPC), 재정 비용(Financing cost, FC), 플랜트 오버헤드 비용(Plant overhead cost, POC) 및 관리 비용(Administrative Cost, AC)으로 구성되며, 직접 생산 비용은 전체 OPEX의 89.4%를 차지한다. PACP 공정은 BACP 공정과 비교하여 열통합 및 공정개선을 통하여 원재료로 사용되는 암모니아를 15.3% 줄일 수 있다.

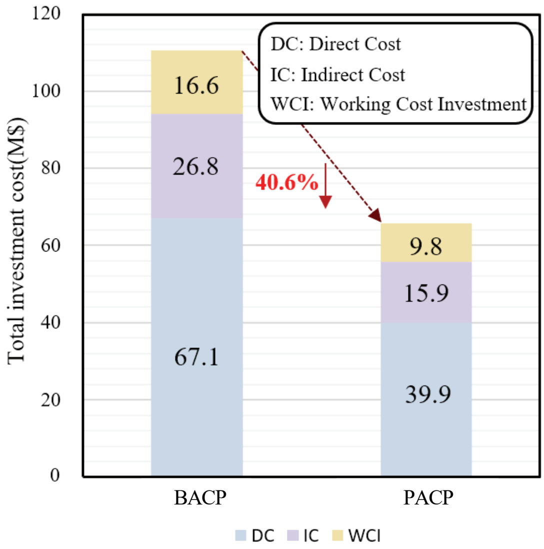

Fig. 4. Comparison of total investment cost for BACP and PACP

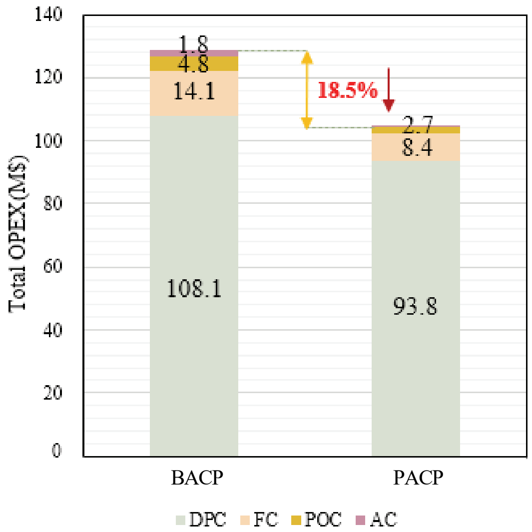

Fig. 5. Comparison of total OPEX for BACP and PACP

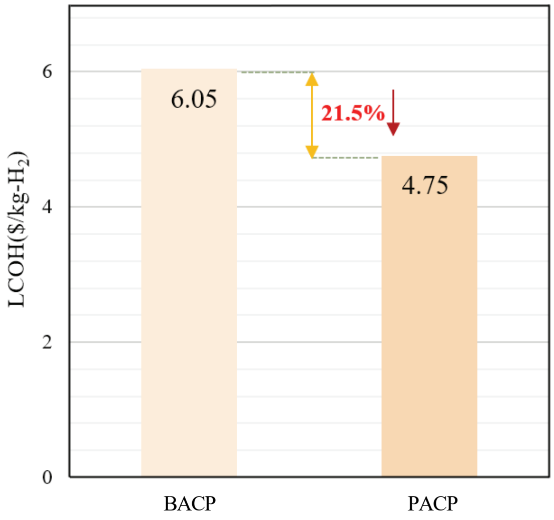

Fig. 6. Comparison of LCOH for BACP and PACP

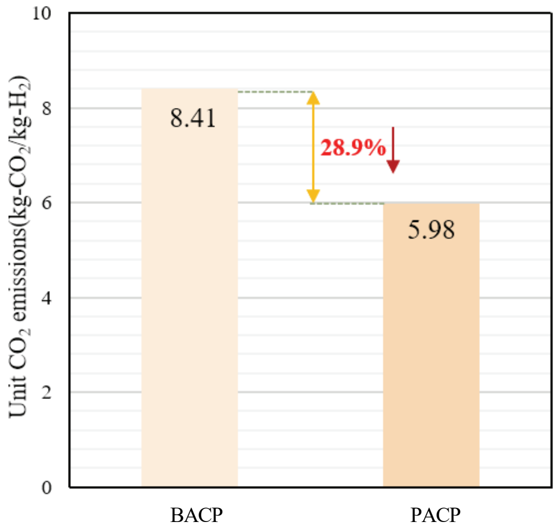

Fig. 7. Comparison of unit CO_2 emissions for BACP and PACP

Fig. 6은 BACP 공정과 PACP 공정의 LCOH를 비교한 것이다. PACP 공정의 CAPEX와 OPEX는 BACP 공정에 비해 각각 약 40.6%, 18.5%가 절감되므로 수식 (7)에 따라 PACP 공정의 LCOH는 BACP 공정에 비해 약 21.5%가 줄일 수 있다.

4.4 환경성 분석 결과

Fig. 7은 PACP 공정과 BACP 공정의 CO_2 배출량을 비교한 것이다. 환경성 분석 결과, PACP 공정은 BACP 공정 대비 약 28.9%의 CO_2 배출량을 줄일 수 있다. PACP 공정은 암모니아를 분해하여 수소를 생산하는 공정으로 직접적인 CO_2는 배출하지 않고 간접적인 CO_2만 배출한다. 간접 CO_2는 공정 내에서 소비되는 에너지와 밀접한 관련이 있다. 대부분의 간접 CO_2는 리보일러에서 약 85.0%가 발생한다. 본 연구에서 열통합과 암모니아를 회수 등 공정개선을 통하여, 간접 CO_2 배출을 저감하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 그린 암모니아를 원재료로 하여 수소를 생산하는 분해 공정을 모델링하고 시뮬레이션하였으며 이를 기반으로 공정 에너지 효율, 경제성 및 환경성을 분석하였다. PACP 공정의 에너지 효율은 BACP과 공정개선을 통하여 약 81.3%로 나타났으며, BACP 공정보다 약 18.7%가 높았다. 또한, PACP 공정의 전체 투자비 및 OPEX는 BACP 공정에 비해 추가적인 장비가 필요 없고 폐열 활용 및 미반응 암모니아를 리사이클시켜 Furnace의 연료로 사용하는 등과 같은 공정개선을 통하여 BACP 공정과 비교 시 각각 40.6%와 18.5%를 줄일 수 있다. 더 나아가, PACP 공정은 암모니아를 분해하여 수소를 생산하는 공정으로 직접적인 CO_2 배출량은 없고 간접 CO_2만 약 5.98 kg-CO_2/kg-H_2를 배출하며 BACP 공정 대비 약 28.9%를 줄일 수 있다. 본 연구는 그린 암모니아를 이용하여 수소를 생산하는 대표적인 방법 중 하나로 수소경제를 앞당기고 탄소중립 달성에 기여 할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00428270) 또한, 본 연구는 순천향대학교 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. A. Afif, N. Radenahmad, Q. Cheok, S. Shams, J. H. Kim, and A. K. Azad, "Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 60, 2016, pp. 822-835, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.120.
2. M. Asif, S. S. Bibi, S. Ahmed, M. Irshad, S. M. Hussain, H. Zeb, K. M. Khan, and J. H. Kim, "Recent advances in green hydrogen production, storage and commercial-scale use via catalytic ammonia cracking", Chemical Engineering Journal, Vol. 473, 2023, pp. 145381, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145381.
3. J. H. Na and H. S. Kim, "Green ammonia, key to energy independence and carbon neutrality", Jeonbuk Institute, Issue briefing, 308, 2024, pp. 1-16.
4. F. B. Juangsa, A. R. Irhamna, and M. Aziz, "Production of ammonia as potential hydrogen carrier: review on thermochemical and electrochemical processes", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 27, 2021, pp. 14455-14477, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.214.
5. A. Salehabadi, J. Zanganeh, and B. Moghtaderi, "Mixed metal oxides in catalytic ammonia cracking process for green hydrogen production: a review", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 63, 2024, pp. 828-843, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.189.
6. N. Yao, W. Pan, J. Zhang, and L. Wei, "The advancement on carbon-free ammonia fuels for gas turbine: a review", Energy Conversion and Management, Vol. 315, 2024, pp. 118745, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman. 2024.118745.
7. H. Kwon, T. N. Do, and J. Kim, "Energy-efficient liquid hydrogen production using cold energy in liquefied natural gas: Process intensification and techno-economic analysis", Journal of Cleaner Production, Vol. 380, Part 2, 2022, pp. 135034, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135034.
8. C. Makhloufi and N. Kezibri, "Large-scale decomposition of green ammonia for pure hydrogen production", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 70, 2021, pp. 34777-34787, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.188.
9. T. N. Do, H. Kwon, M. Park, C. Kim, Y. T. Kim, and J. Kim, "Carbon-neutral hydrogen production from natural gas via electrified steam reforming: Techno-economic-environmental perspective", Energy Conversion and Management, Vol. 279, 2023, pp. 116758, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116758.
10. S. Devkota, J. Y. Cha, B. J. Shin, J. H. Mun, H. C. Yoon, S. A. Mazari, and J. H. Moon, "Techno-economic and environmental assessment of hydrogen production through ammonia decomposition", Applied Energy, Vol. 358, 2024, pp. 122605, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122605.