

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 2, 2025, pp. 99~108 DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.2.99

그린 암모니아 연료 기반 고체산화물 연료전지의 3E 분석: 에너지, 경제성 및 환경성

김기찬¹ · 김수진¹ · 박성태² · 권휘웅^{1†}

1순천향대학교 나노화학공학과, 2 한국수력원자력 수소융복합처

3E Analysis of Direct-ammonia Solid Oxide Fuel Cell Based on Green Ammonia: Energy, Economic, and Environment

GICHAN KIM¹, SOOJIN KIM¹, SUNGTAE PARK², HWEEUNG KWON^{1†}

¹Department of Nano Chemical Engineering, Soonchunhyang University, 22 Soonchunhyang-ro, Sinchang-myeon, Asan 31538, Korea

²Department of H₂ & Smart Business, Korea Hydro & Nuclear Power, 70 Yuseong-daero 1312beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34101, Korea

[†]Corresponding author : khu3603@sch.ac.kr

Received24 January, 2025Revised9 February, 2025Accepted7 April, 2025

Abstract >> Solid oxide fuel cell (SOFC) generates electricity through electrochemically converting chemical energy using ammonia as fuel at high temperature. SOFC using ammonia as a fuels can be largely divided into autothermal reforming SOFC (ATR-SOFC) and direct ammonia SOFC (DA-SOFC) systems. The ATR-SOFC system reforms ammonia externally before supplying it to the fuel cell, whereas, DA-SOFC system directly uses ammonia in the fuel cell. This study proposed a new DA-SOFC system and analyzed its energy efficiency, economic feasibility, and environmental impact. The energy efficiency of the DA-SOFC system was improved by approximately 7.27% compared to the ATR-SOFC. In addition, the DA-SOFC system reduced investment costs and CO₂ emissions by 35.5% and 96.9% respectively, compared to ATR-SOFC system. This study can provide valuable insights for stakeholders considering distributed power generation using ammonia as fuel and can serve as foundational data for future research.

Key words : DA-SOFC(직접 암모니아 연료전지), Economic and environmental (경제성 및 환경성 평가), Fuel cell generation(연료전지 발전), Ammonia(암모니아), Hydrogen carrier(수소 캐리어)

1. 서 론

따라 에너지 수요를 충족시키기 위하여 화석연료를 사용해서 에너지를 생산 및 공급하고 있다. 이에 온 실가스 배출이 급격하게 증가하여 지구온난화가 가

전 세계적으로 산업 활동이 지속적으로 증가함에

속화되고 있다. 따라서 파리 기후협약 및 기후변화 협약 당사국 총회를 통하여 탄소중립을 실현하고자 각 국가별로 이산화탄소 감축 목표를 세우고 지속적 으로 노력하고 있다. 탄소중립 실현의 일환으로 신 재생에너지가 주목받고 있으며 전 세계적으로 신재 생에너지 비율을 증가시키는 추세이다¹⁾. 하지만 신 재생에너지는 외부 환경에 크게 의존하는 간헐적인 발전이라는 한계가 있다²⁾. 이에 상시 발전이 가능하 며 온실가스 배출이 작은 연료전지 발전 기술이 주 목받고 있다. 연료전지는 화학에너지를 직접 전기에 너지로 변환하는 전기화학 장치로 내연기관과 비교 하여 에너지 효율이 높고 온실가스 배출이 적은 장 점이 있다. 연료전지는 신재생에너지에 비해 생산하 는 에너지 밀도가 높아 특히 도심 지역의 분산 전원 으로써의 활용성이 높이 평가되고 있다¹⁻³⁾. 연료전지 에는 크게 세 가지의 종류가 있으며 운전 조건과 전 해질의 종류에 따라 proton-exchanging membrane fuel cell (PEMFC), alkaline fuel cell (AFC), phosphoric acid fuel cell (PAFC), molten carbonate fuel cell (MCFC) 및 solid oxide fuel cell (SOFC) 등으로 구분된다. 이 중 SOFC는 전해질로 인해 전도성을 갖는 세라믹을 사용하고 운전 온도는 600-800℃로 고온에서 작동하기 때문에 전기 변환 효율이 약 45-60%로 연료전지 중 가장 높으며 수소뿐만 아니라 암모니아나 탄화수소 등 다양한 연료를 별도의 개질 없이 연료전지 내 직접 내부 개질을 통해 활용할 수 있다. 현재 국내에서 운전하는 대부분의 연료전지들 은 도시가스를 연료로 하여 운전되기 때문에 CO₂가 필연적으로 발생한다. 따라서 탄소중립을 위해서 carbon capture storage (CCS) The carbon capture utilization and sequestration (CCUS) 기술과 연계하거나 CO2 배출이 없는 연료의 사용이 요구된다⁴⁾. 수소를 연료 로 사용하는 SOFC는 열과 전기를 생산하며 반응으 로 물을 생성하기 때문에 온실가스 배출이 없고 재 생에너지와 연료전지 연계 시 탄소중립 발전을 실현 할 수 있다⁵⁻⁷⁾. 그러나 SOFC를 이용하기 위해서는 중, 대용량의 수소 저장 및 운송의 한계를 극복하여 야 한다⁸⁾. 대표적인 수소의 저장 방법으로는 고압 압

>> 한국수소및신에너지학회 논문집

축, 수소 액화 저장 방식이 있다. 이 두 방식은 초기 자본투자 비용이 매우 크며 액체로 저장하는 경우 상용화된 대용량 저장에 한계가 있다. 현재 튜브 트 레일러를 통해 대부분의 수소를 운송하고 있으며 대 용량 수소 운송 인프라를 구축하기 위해서는 상당한 초기 자본투자 비용이 요구된다^{9,10)}. 최근에는 수소 저장 및 운송의 한계를 극복하기 위하여 수소를 liquid organic hydrogen carrier 및 암모니아와 같은 다 른 화합물 형태로 변환하여 부피당 저장 용량을 증 가시켜 투자비를 절감하기 위한 연구가 진행되고 있 다^{4,7,10}. 그중 암모니아는 75%의 수소와 25%의 질소 로 분해되어 연료로 CO2 배출이 없는 수소를 생산할 수 있다. 암모니아는 대기압에서 비등점이 -33.34℃ 로 낮기 때문에 액체수소와 비교 시 단위 부피당 수 소 저장 밀도가 1.7배 큰 장점을 가지고 있다. 특히 암모니아는 석탄/암모니아 혼소 발전이나 가스터빈 같은 내연기관 및 연소로 사용되고 있고 연료전지의 연료로 사용되어 CO2 배출을 저감할 수 있는 잠재력 이 크게 주목받고 있다. 본 연구는 그린암모니아를 원료로 하는 SOFC 기술로 그린암모니아를 원료로 하는 autothermal reforming SOFC (ATR- SOFC)와 direct ammonia SOFC (DA-SOFC) 기본 공정을 제안하 고 모델링, 시뮬레이션, 경제성 및 환경성을 분석하 여 타당성을 검토하였다.

2. 공정 설명

본 연구에서는 베이스 공정인 ATR-SOFC와 제안 하는 공정인 DA-SOFC를 고려하여 비교 분석하였다.

2.1 ATR-SOFC 공정

ATR-SOFC 공정은 그린암모니아의 열분해와 선 택적 공기 산화가 반응기 내에서 동시에 일어난다. ATR-SOFC의 반응기는 암모니아 산화로 인한 발열 반응과 암모니아 분해로 인한 흡열반응이 동시에 일 어나기 때문에 외부 열원으로부터 추가적인 열 공급 이 요구되지 않는다. 하지만 반응기 내 발열반응과 흡열반응에 의한 열적 불균형으로 심각한 온도 변동 을 초래할 수 있다. 이로 인하여 반응기 내 촉매의 과열과 코크스 형성을 유발할 수 있다. 따라서 반응 기 내 안정성을 위하여 발열반응과 흡열반응 사이에 적절한 균형을 위한 운전 설정이 무엇보다도 중요하 다. 더 나아가 본 연구에서의 ATR-SOFC 공정은 NH₃ 를 원료로 하고 공기 분리 장치(air separation unit, ASU)부터 O₂를 공급받아 중간 생성물로 NH₃, N₂, O₂ 및 H₂O를 생성한 후 SOFC로 들어가 열과 전기를 생산한다. ATR-SOFC는 외부 개질기에서 암모니아 를 개질하여 수소를 생산한 후 SOFC에서 전기를 생 산한다. Fig. 1과 Fig. 2는 각각 ATR-SOFC 공정의 블록 다이아그램과 공정흐름도(process flow diagram, PFD)를 보여준다.

ATR-SOFC 공정에서 반응기는 연료 개질 장치로 사용되었으며 암모니아를 화학적 변환 과정을 통하





여 수소가 다량 포함된 가스 형태로 연료전지에 공 급하는 역할을 한다. 특히 공정 내로 들어가는 기체 연료와 공기는 유량 및 압력 조건을 만족시켜 주기 위 하여 blower 또는 압축기를 사용한다. ATR 반응기 내에서 일어나는 화학반응은 식 (1), (2)와 같으며 발 열반응과 흡열반응은 열적 평형을 이루고 있다.

$$NH_3 + 0.75O_2 \rightarrow 0.5N_2 + 1.5H_2O$$
 (1)

$$NH_3 + 0.095O_2 \rightarrow 0.5N_2 + 1.31H_2 + 0.19H_2O$$
 (2)

ATR-SOFC 공정은 SOFC 운전에 요구되는 열과 연료의 공급이 동시에 가능하며 외부 열원을 최소화 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 여기에 CO-Ce-Zr 촉매를 적용하고 공기 대 연료비는 0.75를 적용하였 다¹¹⁾.

2.2 DA-SOFC 공정

DA-SOFC 공정은 그린암모니아를 직접적으로 SO FC의 주요 원료로 사용하는 공정이다. 본 연구에서 는 연료전지 내 촉매로 루테늄(Ru)을 사용하였다. 이는 Ru이 암모니아 분해반응에서 매우 높은 활성 을 보이는 금속이고 고온에서도 높은 안정성과 우수 한 활성을 보여주어 SOFC의 효율을 높이는 데 기여 할 수 있기 때문이다. Fig. 3은 DA-SOFC의 PFD를



Fig. 2. ATR-SOFC process flow diagram

보여준다. DA-SOFC의 경우 암모니아가 SOFC 내에서 전기화학적 반응을 통하여 열과 전기를 생산하고 내 부 개질 방식이며 별도의 개질기를 구성할 필요가 없고 스택에서 발생하는 열을 이용하기 때문에 시스 템 효율과 스택 냉각에 유리한 측면이 있다. DA-SOFC 는 암모니아를 연료로 하는 다른 공정들에 비하여 설치 면적이 작고 CO2를 배출하지 않기 때문에 환경 에 미치는 영향이 적다. 또한 SOFC는 내부 전기화 학적 반응을 사용하여 암모니아 연료를 직접 전기로 변화할 수 있으므로 터빈이나 기타 발전 장치가 요 구되지 않기 때문에 공정을 단순화시킬 수 있다. DA-SOFC는 천연가스를 연료로 사용하는 연료전지와 유사한 방식으로 수소를 생산하며 이러한 유형의 연 료전지는 산화를 위한 양극과 환원을 위한 음극으로 구성되어 있다. 또한 다공성이며 전기전도성이 있는 막으로 양극과 음극을 분리하는 전기 촉매가 있으며 중앙에는 전기적으로 전도되지 않는 이온막이 있다.

3. 공정 분석 방법론

3.1 시스템 에너지 효율 분석

본 연구에서 제안한 ATR-SOFC 및 DA-SOFC 공 정들은 Table 1의 운전 조건을 만족시키면서 발전 출력이 300 kW가 되도록 모델링하고 시뮬레이션을 수행하였다¹². 시스템에 공급되는 암모니아의 저위 발열량을 기준으로 효율을 도출하여 비교하였으며 두 공정에 대한 전체 시스템 전기 효율 수식은 다음 과 같다.

$$\eta(\%) = \frac{Power}{(\dot{m}LHV)_{input}} \tag{3}$$



Fig. 3. DA-SOFC process flow diagram

Table 1. Assumptions of proposed process¹²⁾

Equipment	Description	Value
SOFC	Number of cells	variable
	Fuel utilization factor (%)	85
	Anode inlet temperature (°C)	600
	Cathode inlet temperature (°C)	600
	Anode outlet temperature (°C)	650
	Cathode outlet temperature (°C)	650
	Operating temperature (°C)	600-650
	Operating pressure (bar)	1.35
	Inverter efficiency (%)	95
Blowers	Isentropic efficiency (%)	50
	Mechanical efficiency (%)	90
Heat exchangers	Heat loss (%)	3
	Maximum possible effectiveness (%)	90
Surrounding environment	Temperature (°C)	25
	Pressure (bar)	1

식 (3)에서 Power와 (*mLHV*)_{input}은 각각 전체 시스 템의 순 전력 출력과 시스템에 공급된 에너지를 의 미한다.

3.2 경제성 분석

균등화 발전 비용(levelized cost of energy, LCOE) 은 균일하게 등가화한 발전 비용이다. 이는 발전 설 비의 전 수명 주기에 걸친 비용을 고려한 것으로 발 전 단가의 기초가 되며 발전원의 경제성 분석에 가 장 널리 사용되는 지표이다. LCOE을 사용하는 이유 는 발전에 투입되는 원재료가 매우 다양하고 시점에 따라 발생하는 비용이 불규칙적이기 때문이다. 일반 적으로 LCOE는 경제 수명 기간 동안 연도별로 불규 칙하게 발생하는 발전 전략과 건설비, 연료비, 운전 유지비 등의 발전 비용 등을 연도별로 균등화하여 산출하거나 발전기의 수명 기간 동안 등가화한 총 발전 비용을 등가화한 총 발전량으로 나누어 계산할 수 있으며 이는 식 (4)와 같다.

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}}$$
(4)

I_o, A_t, M_{t,el}, i, n 및 t는 각각 투자 비용, 연간비
용, 생산되는 전기량, 이자율, 경제 수명, 전체 수명
을 나타낸다.

ATR-SOFC 및 DA-SOFC 공정에 대한 경제성 평 가는 공정 모델링 및 시뮬레이션을 기반으로 자본 지출(capital expenditure, CAPEX) 및 운영 비용(operating expenditure, OPEX)을 포함하여 분석하였다. CAPEX는 직접 비용과 간접 비용으로 구성되며 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$CAPEX_{total} = CAPEX_{ATR} + CAPEX_{SOFC}$$
 (5)

특히 구매 장비 비용을 추정하기 위하여 6/10 인 자 규칙(six-tenth rule)이 사용되었으며 이는 수식 (6) 에서 보여준다¹³⁾. 일반적으로 six-tenth rule을 이용한 비용 추정은 운영 기간 동안의 경제성을 보장하는 데 필수적이며 six-tenth rule은 ±20% 내에서 대략 적인 비용이 필요할 때 매우 만족스러운 결과를 제 공한다.

$$C_2 = C_1 \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{\alpha} \left(\frac{CEPCI_t}{CEPCI_{ref}}\right)$$
(6)

C₂와 C₁은 각각 주요 장비에 대한 추정 및 기준 비용을 의미하며 S₂와 S₁은 각각 장비의 목표 및 기 준 용량을 의미한다. α는 스케일링 팩터로 일반적인 화학 공정 비용 추산 시 0.6으로 설정하며 CEPCI_t와 CEPCI_{ref}는 각각 목표 및 기준 연도의 화학 공학 플 랜트 비용 지수(chemical engineering plant cost index, CEPCI)로 시간 변수에 의한 장비 비용 추정에 있어 정확도를 높이는 데 사용된다. OPEX의 경우는 고정 비용과 변동 비용으로 나눌 수 있으며 이는 식 (7)과 같다. 대표적인 고정 비용에는 유지보수, 보험, 감가상각 및 세금 비용이 포함되며 변동 비용에는

Table 2. Assumptions for economic analysis⁹⁾

Item	Value
Plant lifetime	20 years
Interest rate	7%
Depreciation	Straight line
Operation period	8,000 h/year
Ammonia cost	300\$/ton
Plant capacity	300 kWh
Electricity	0.06\$/kWh
Maintenance cost	3% of annualized capital cost
Operating charges	15% of operating labor cost
Plant overhead	25% of labor and maintenance cost

원자재, 유틸리티 및 인건비가 포함된다. Table 2는 경제성 분석을 위한 가정이다.

$$OPEX_{total} = OPEX_{Variable} + OPEX_{Fixed}$$
 (7)

3.3 환경성 분석

본 연구에서의 환경성 분석은 공정에서 발생하는 CO₂ 등가 배출을 기준으로 하였다. 제안된 공정의 환경 성능은 단위 CO₂ 배출량을 사용하여 산정하였 다¹⁰⁾. 본 연구에서는 직접 CO₂는 배출되지 않기 때 문에 간접 CO₂ 배출량만 산출하였다. 간접 CO₂ 배 출은 소비된 유틸리티(압축기, blower 및 SOFC 운 전을 위해 사용된 전기)에 의해 추정하였으며 grid 전기 비용을 고려하였고 heater의 경우 전기를 이용 한 가열로 가정하였다. 단위 CO₂ 배출량은 식 (8)에 정의되어 있다.

$$CO_2 \ emissions = \frac{Indirect \ CO_2 \ emissions}{Total \ electricity} (8)$$

4. 공정 분석

4.1 DA-SOFC 모델링 및 시뮬레이션

본 연구는 제안된 DA-SOFC 공정에 대한 모델링

및 시뮬레이션을 기반으로 CAPEX 및 OPEX를 포 함한 기술 경제적 타당성 그리고 CO₂ 배출량을 산정 하여 환경성 평가를 수행하였다. 본 연구는 300 kW 의 순 전력을 얻기 위한 시스템이며 제안된 공정에 대한 파라미터 및 가정은 Table 2와 같다. SOFC에 대한 운전 조건은 한국수력원자력에서 제공한 데이 터를 사용하였으며 그 외 데이터들은 선행 연구 데 이터를 이용하였다¹²⁾. 또한 SOFC 스택의 작동 온도 는 연료의 평형 조성에 일부 영향을 주지만 본 연구 에서는 암모니아가 H₂, N₂ 및 H₂O로 완전 분해되며 SOFC 스택은 완전히 단열된다고 가정하였다.

암모나아는 25℃, 100 kPa에서 6.528 kgmol/h의 유량으로 저장탱크로 나와 공정으로 들어간다(Stream 1). 100 kPa의 암모니아 기체를 조금 더 빠르게 이동 시키기 위하여 blower를 설치하였으며 blower 후단 에서는 135kPa의 압력으로 토출(Stream 2)되고 SOFC 출구로부터 나오는 13.99 kgmol/h의 유량을 가진 Stream 4 (650℃, 135 kPa)과 열교환을 통하여 SOFC의 인입 온도인 600℃ 맞춘 후 SOFC anode로 들어간다(Stream 3). SOFC anode 출구로부터 나오는 Stream 4는 Stream 2과 열교환되고 배출되는 Stream 5는 Stream 10과 합쳐지고 배가스의 형태로 배출된다(Stream 11). 공 기는 25℃, 100 kPa에서 31.06 kgmol/h의 유량으로 공정으로 들어간다(Stream 6). 공기도 암모니아와 동 일하게 파이프라인 내에서 조금 더 빠르게 이동시키 기 위하여 blower를 설치하였으며 blower 후단에서 는 135 kPa의 압력으로 토출(Stream 7)되고 SOFC의 운전조건을 만족시켜주기 위하여 SOFC cathode 출 구에서 나오는 Stream 9와 열교환되어 650°C까지 온도가 올라간다(Stream 8). SOFC cathode로부터 나 온 Stream 9는 Stream 7과 열교환 후 온도는 192°C 로 감소한다.

4.2 시스템 효율 분석

ATR-SOFC 및 DA-SOFC 공정의 시스템 효율은 암모니아가 분해되어 전기에너지를 변환하는 과정 에서 발생하는 에너지 손실을 종합적으로 고려하였



Fig. 4. Comparison of process efficiency

다. 두 공정의 시스템 효율은 전체 공정에서 암모니 아가 분해되어 전기에너지를 변환하는 과정에서 발 생하는 에너지 손실을 종합적으로 고려하였으며 SOFC 에서 발생하는 폐열을 활용함으로써 전체 공정 효율 을 향상시켰다. Fig. 4는 ATR-SOFC와 DA-SOFC의 전체 시스템 효율을 보여준다. 두 공정 시스템 효율을 분석한 결과 DA-SOFC와 ATR-SOFC는 각각 86.6% 와 80.3%로 나타났으며 DA-SOFC 공정은 ATR-SOFC 공정보다 약 7.32% 정도 높은 효율을 가졌다. DA-SOFC 공정보다 약 7.32% 정도 높은 효율을 가졌다. DA-SOFC 공정은 ATR-SOFC 공정 대비 blower, 반응기 및 히 터와 같은 추가 장치가 필요하지 않아 추가 장치에 서 요구되는 전력 소비를 줄일 수 있다. 더 나아가 DA-SOFC 공정이 더 적은 암모니아로 동일한 발전 량을 생산할 수 있다.

4.3 경제성 분석

Fig. 5는 두 공정의 LCOE 비교를 보여준다. LCOE 는 공정 전체 생애 동안 발생하는 총 비용을 전체 전 기 생산량으로 나눈 값이며 Fig. 5는 DA-SOFC와 ATR-SOFC의 LCOE를 비교한 것이다. DA-SOFC가 ATR-SOFC에 비해 LCOE가 약 19% 줄었는데 이는 DA-SOFC가 ATR-SOFC보다 CAPEX와 OPEX로 소 요되는 비용이 적기 때문이다. 게다가 ATR-SOFC와 DA-SOFC 공정들은 모두 발전량은 동일하다. 하지



Fig. 5. Comparison of LCOE

만 DA-SOFC 공정은 ATR-SOFC 공정보다 초기투 자 및 OPEX 비용이 낮다. 초기투자 비용 관점에서 는 DA-SOFC 공정은 ATR-SOFC 공정과 달리 반응 기, blower, 열교환기 및 히터가 없기 때문에 약 26.2% 를 절감할 수 있으며 OPEX 비용 관점에서는 원재료 인 암모니아와 전기 비용을 각각 27.5%와 96.9% 절 감할 수 있다.

ATR-SOFC 및 DA-SOFC 공정에 대한 장비 비용과 OPEX를 비교하여 경제성을 분석하였다. OPEX는



Fig. 6. Comparison of OPEX for two processes

원재료비, 전기 비용, 유지보수비, 인건비 및 공정간 접비로 구성되며 Fig. 6은 DA-SOFC와 ATR- SOFC 의 OPEX를 비교한 것을 보여준다. DA-SOFC 공정 으로 들어가는 원재료로써 암모니아의 양을 ATR-SOFC보다 약 7.3% 줄일 수 있으며 다른 복합 적 요소들을 포함하여 DA-SOFC는 ATR-SOFC에 비하여 약 17.3%의 OPEX를 줄일 수 있다.

Fig. 7은 DA-SOFC와 ATR-SOFC의 전체 장치 비 용을 비교한 것이다. DA-SOFC는 반응기 및 압축기 가 요구되지 않아 ATR-SOFC의 장치 비용보다 약 26.2% 줄일 수 있다. ATR-SOFC 및 DA-SOFC 공정 모두 운전 조건을 만족시켜 주기 위하여 공정 내로 들어가는 암모니아, 산소 및 공기의 압력을 올려주 기 위하여 사용하는 blower와 SOFC의 스택 비용이 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 분석되었다.





(b) Total equipment cost (\$) 2,810,520

Fig. 7. Comparison of equipment cost for two processes. (a) ATR-SOFC, (b) DA-SOFC



Fig. 8. Sensitivity analysis for two processes. (a) ATR-SOFC, (b) DA-SOFC

4.4 민감도 분석

Fig. 8은 제안된 두 공정에 대한 민감도 분석 결과 이다. LCOE를 기준으로 분석한 결과 두 공정 모두 원재료 비용에 가장 민감하게 변동하였으며 유지보 수 비용에는 상대적으로 둔감하게 변동하였다.

4.5 환경성 분석

본 연구에서 제안된 반응기 또는 SOFC 내 암모니아 분해반응은 CO₂를 생성하지 않기 때문에 직접 CO₂ 는 발생하지 않지만 공정을 운전하기 위하여 에너지 를 사용하기 때문에 간접 CO₂가 발생한다. Fig. 9는 DA-SOFC와 ATR-SOFC의 전체 CO₂ 배출량을 비교 분석한 것이다. 분석 결과 DA-SOFC는 ATR-SOFC 대 비 약 96.9%의 CO₂ 배출량을 줄일 수 있었다. DA-SO FC 공정은 SOFC에서 발생하는 폐열 활용을 통하여 SOFC 전단에서 요구되는 열의 대부분을 공급하기 때문에 공정에서 사용되는 많은 에너지를 줄여 전체 CO₂ 배출량을 감소시킬 수 있다.



Fig. 9. Comparison of CO₂ emissions for two processes

5. 결 론

탄소 중립을 달성하기 위한 방법 중 하나로 청정 발전이 있으며 청정 발전을 하기 위한 대표적인 방 법으로 암모니아를 원재료로 한 SOFC 발전이 있다. 원재료로써의 암모니아는 직접적인 CO₂ 배출이 없고 수소와 비교하여 저장 및 운송이 편리하며 분리나 정 제 과정을 거치지 않고 SOFC 연료로 직접 사용하여 고효율 발전이 가능하다.

본 연구에서는 암모니아를 원재료로 하여 직접 SOFC에 공급하는 DA-SOFC 공정을 모델링하고 시뮬 레이션하였으며 이를 기반으로 전체 공정 효율, 경 제성 및 환경성을 분석하였다. 또한 암모니아를 외 부에서 개질하여 SOFC에 공급하는 ATR-SOFC와 비교하여 제안된 공정에 대하여 타당성을 비교 분석 하였다. DA-SOFC의 전체 공정 효율은 SOFC에서 발생하는 폐열 활용을 통해 약 86.6%로 나타났으며 ATR-SOFC보다 약 7.27% 높았다. 또한 DA-SOFC 의 CAPEX 및 OPEX는 ATR-SOFC와는 달리 SOFC 내에서 직접 암모니아를 연료로 하여 분해하기 때문에 ATR 반응기와 히터 등이 필요하지 않아 ATR-SOFC와 비교 시 각각 35.5% 및 17.3%를 줄일 수 있었다. 더 나아가 환경성 분석 결과 제안된 공정들은 암모니아 를 연료로 사용하기 때문에 간접 CO₂를 배출하고 있으 며 DA-SOFC의 CO₂ 배출량은 ATR-SOFC보다 96.9% 줄일 수 있었다. 추가적으로 민감도 분석을 수행하 였으며 연료로 들어가는 원재료의 비용에 가장 민감 한 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 2024년 한 국에너지기술평가원의 암모니아 운송 배관(직경 200 mm 이상) 위험성 평가안전진단/안전기준 개발 사업 (과제 번호: RS-2024-00428270)의 지원을 받아 수행 된 연구 결과입니다. 또한 본 연구는 순천향대학교 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- 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.
- H. Lund, "Renewable energy strategies for sustainable development", Energy, Vol. 32, No. 6, 2007, pp. 912-919, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.017.
- O. Siddiqui and I. Dincer, "A review and comparative assessment of direct ammonia fuel cells", Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 5, 2018, pp. 568-578, doi: https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.02.011.
- I. Dincer, "Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 27, No. 3, 2002, pp. 265-285, doi: https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00119-7.
- I. Dincer, "Environmental and sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems", International Journal of Energy Research, Vol. 31, 2007, pp. 29-55, doi: https://doi.org/10. 1002/er.1226.
- O. Siddiqui and I. Dincer, "Development of a new ammonia-based energy storage option for grid balancing", Energy Storage, Vol. 2, No. 4, 2020, pp. e145, doi: https://doi.org/10.1002/est2.145.
- G. W. Crabtree and M. S. Dresselhaus, "The hydrogen fuel alternative", MRS Bulletin, Vol. 33, No. 4, 2008, pp. 421-428, doi: https://doi.org/10.1557/mrs2008.84.
- S. B. Walker, M. Fowler, and L. Ahmadi, "Comparative life cycle assessment of power-to-gas generation of hydrogen

with a dynamic emissions factor for fuel cell vehicles", Journal of Energy Storage, Vol. 4, 2015, pp. 62-73, doi: https://doi.org/10.1016/j.est.2015.09.006.

- T. N. Do and J. Kim, "Green C₂-C₄ hydrocarbon production through direct CO₂ hydrogenation with renewable hydrogen: process development and techno-economic analysis", Energy Conversion and Management, Vol. 214, 2020, pp. 112866, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112866.
- N. I. Beyazit, "Journey to a sustainable future: The importance of renewable hydrogen in industrial and domestic applications", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 99, 29, 2025, pp. 836-851, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024. 12.065.
- T. Okanishi, K. Okura, A. Srifa, H. Muroyama, T. Matsui, M. Kishimoto, M. Saito, H. Iwai, H. Yoshida, M. Saito, T.

Koide, H. Iwai, S. Suzuki, Y. Takahashi, T. Horiuchi, H. Yamasaki, S. Matsumoto, S. Yumoto, H. Kubo, J. Kawahara, A. Okabe, Y. Kikkawa, T. Isomura, and K. Eguchi, "Comparative study of ammonia-fueled solid oxide fuel cell systems", Fuel Cells, Vol. 17, No. 3, 2017, pp. 383-390, doi: https://doi.org/10.1002/fuce.201600165.

- T. Q. Quach, V. T. Giap, D. K. Lee, T. P. Israel, and K. Y. Ahn, "High-efficiency ammonia-fed solid oxide fuel cell systems for distributed power generation", Applied Energy, Vol. 324, 2022, pp. 119718, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy. 2022.119718.
- M. A. Tribe and R. L. W. Alpine, "Scale economies and the "0.6 rule", Engineering Costs and Production Economics, Vol. 10, No. 4, 1986, pp. 271-278, doi: https://doi.org/10.10 16/S0167-188X(86)80025-8.