

NGCC 기반 천연가스, 암모니아, 수소 혼소 발전 비율에 따른 CO₂와 NO_x 배출량 및 전력 생산량 분석

김인혜 · 오정재 · 김태성 · 임민석 · 조성현[†]

전북대학교 반도체·화학공학부
54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
(2024년 1월 23일 접수, 2024년 5월 28일 수정본 접수, 2024년 6월 12일 채택)

Analysis of Gas Emissions and Power Generation for Co-firing Ratios of NG, NH₃, and H₂ Based on NGCC

Inhye Kim, Jeongjae Oh, Taesung Kim, Minsuk Im and Sunghyun Cho[†]

School of Chemical Engineering, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Clean Energy Research Center,
Jeonbuk National University, JeonJu, Jeonbuk, 54896, Korea

(Received 23 January 2024; Received in revised from 28 May 2024; Accepted 12 June 2024)

요 약

탄소 중립 사회로의 전환을 위해 전체 온실가스 배출량의 86.8%를 차지하는 에너지 생산 부문에서의 이산화탄소 배출량 감축이 필요하다. 현재 우리나라는 총 발전량의 60%를 석탄과 천연가스에 의존하고 있으며 이를 풍력, 태양광 등의 재생에너지로 대체하는 방법은 에너지 공급이 불안정하고 비용이 높다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 NGCC(Natural Gas Combined Cycle) 공정을 기반으로 천연가스, 암모니아, 수소를 혼합하여 연소한다는 해결책을 제시하였다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 이산화탄소 배출량을 효과적으로 줄일 수 있었으며 천연가스만을 연료로 이용해 얻은 전력량과 비교하였을 때 34%~238%의 전력을 얻었다. 천연가스, 암모니아, 수소의 질량분율에 대한 사례연구를 수행한 결과, 암모니아 비율이 증가할수록 발전량과 NO_x 배출량은 감소하였고 수소 비율이 증가할수록 발전량과 NO_x 배출량은 증가하였다. 본 연구는 추후 다양한 혼합 연료의 조합 및 경제성 평가 등 혼합 연료 발전 분야의 가이드라인이 될 수 있을 것이다.

Abstract – The reduction of CO₂ emissions in the energy production sector, which accounts for 86.8% of total greenhouse gas emissions, is important to achieve carbon-neutrality. At present, 60% of total power generation in South Korea is coal and natural gas. Replacing fossil fuel with renewable energy such as wind and solar has disadvantages of unstable energy supply and high costs. Therefore, this study was conducted through the co-firing of natural gas, ammonia and hydrogen utilizing the natural gas combined cycle process. The results demonstrated reduction in CO₂ emissions and 34%~238% of the power production compared to using only natural gas. Case studies on mass fractions of natural gas, ammonia and hydrogen indicated that power production and NO_x emissions were inversely proportional to the ammonia ratio and directly proportional to the hydrogen ratio. This study provides guidelines for the use of various fuel mixtures and economic analysis in co-firing power generation.

Key words: Carbon neutrality, Co-firing, Power generation, Gas emission, Process design

1. Introduction

지구 온난화로 인한 급격한 기후 변화에 대응하기 위해서는 이산화탄소 배출량을 줄여야 한다[1]. 이에 국제사회는 파리 협정 체결을

통해 2050년까지 탄소 배출량을 완전히 없애겠다고 선언하였다[2]. 탄소 중립 사회로의 전환을 위해 대부분의 국가들은 화석연료를 사용한 발전소 효율을 높이는 방법이나 화석연료 사용 비율을 낮추고 재생에너지 비율을 높이는 방법과 같은 이산화탄소의 배출을 줄이는 전략을 택하거나 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS)기술을[3-7] 사용하여 발생한 이산화탄소가 배출되지 않도록 하는 전략 등을 택하고 있다[8]. 한국 또한 탄소중립 목표 이행을 위해 이러한 전략에 대한 산업별 이산화탄소 배출량 모니터링을 통해 배출량 감축에 나서고 있다[9-11]. 환경부에서 제공하는

[†] To whom correspondence should be addressed.

E-mail: shcho5043@jbnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

‘국가 온실가스 배출현황’ 지표에 따르면 2020년 국가 온실가스 총 배출량은 656.2 백만톤 CO₂ eq에 달한다. 온실가스 배출원은 에너지, 산업공정, 농업, 폐기물 등으로 구분되며 주 배출원은 전체 배출의 86.8%를 차지하는 에너지 부문으로 추산되었다. 특히 에너지 분야에서도 공공전기 및 열 생산 부문이 32.7%로 가장 비율이 높으므로 에너지 생산 산업에서의 온실가스 감축이 더욱 요구되고 있다. 이를 해결하기 위해 노후화된 석탄 발전소를 폐지한 후 LNG 발전으로 대체하거나 재생에너지 발전 비중을 높이고 있다. 하지만 LNG 발전의 경우 열량 단위당 이산화탄소 배출량이 52.91 kg/MBtu로 95.92 kg/MBtu인 석탄에 비해 이산화탄소 배출량이 적지만 전혀 배출되지 않는 것은 아니므로 탄소중립 목표에는 도달할 수 없으며, 태양광 및 풍력과 같은 재생에너지 발전은 자연조건에 의존하기 때문에 전력 생산 예측이 어렵고 변동성이 높다는 점 때문에 재생에너지만으로 에너지 수급을 충당하기는 어렵다. 이러한 상황에서, 기존 화석 연료 발전 인프라를 충분히 활용하면서도 효과적인 이산화탄소 배출량을 감축하기 위해 본 연구에서는 화석연료를 암모니아, 수소와 같은 무탄소 연료와 혼합하여 연소하는 방법을 제안하였다. 혼합 연료 연소(혼소는 화석연료 일부를 무탄소 연료로 대체하여 연소하는 방법으로 무탄소 연료 비율에 비례해 이산화탄소 배출량을 줄일 수 있다[12]. 또한 기존의 화석연료 발전 설비를 사용할 수 있어 설비비용을 줄일 수 있어 재생에너지보다 안정적으로 전력수급이 가능하다. 뿐만 아니라 탄소 중립 달성을 위해서는 무탄소 연료만을 연소하는 전소 방법 또한 유력한 방안으로 제기되고 있으므로 혼소 발전은 전소 발전으로 이어지는 가교 역할을 할 수 있다는 점에서 의미가 있다. 현재 사용되는 천연가스 발전을 혼소 발전 방식으로 전환하기 위해서는 우선적으로 다양한 요소들을 고려해야만 한다. 먼저 암모니아, 수소, 메탄의 물성을 비교하였을 때 단위질량당 연소 열량은 각각 18.6 MJ/kg, 120 MJ/kg, 50 MJ/kg로[13], 암모니아는 단위 질량당 연소 열량이 수소와 메탄에 비해 낮다는 특성을 가지고 있다. 연소 시 낮은 화염온도로 인해 반응성이 낮으며 질소산화물(NO_x)의 생성이라는 한계점이 있다[14]. 특히 암모니아 연소로 생성되는 NO_x는 대부분이 NO로 구성되어 있으며 산성비, 스모그형성, 지구 온난화 등을 유발하는 환경 오염 물질이다[15]. 이에 NO_x는 배출허용 기준이 산업별로 규정되어 있고 규제 기준은 강화되고 있어[16] 선택적 촉매환원법(SCR) 또는 선택적 비촉매환원법(SNCR) 기술을 통해 저감할 수 있다[17].

하지만 제거를 위해 추가비용이 발생하므로 경제적 측면을 고려한다면 배출되는 NO_x의 양을 줄여야 한다. 수소의 경우 연소 시 화염이 역행하는 역화 현상이 발생할 수 있으며[18] 높은 연소 온도로 인해 NO_x를 발생시킨다[19]. 또한 자연계에 분자수소는 존재하지 않기 때문에 수소를 연료로 사용하기 위해서는 수소 생산이 우선되어야 한다. 이에 기인하는 수소 비용 문제와 생산한 수소를 운송하고 저장하는 과제가 남아있어 많은 양의 수소 혼소에는 어려움이 따른다[20]. 따라서 본 연구에서는 천연가스, 암모니아, 수소의 질량비율을 다르게 하여 기존의 천연가스복합발전(Natural Gas Combined Cycle, NGCC) 공정을 이용해 Aspen Plus V11로 시뮬레이션을 진행함으로써 각 연료의 질량분율이 달라짐에 따라 나타나는 (1) 연소 후의 Flue gas 온도(2) CO₂ 배출량(3) NO_x 배출량(4) 가스터빈과 스팀터빈의 발전량 결과를 제시하였다. 천연가스만을 연소할 경우와 비교하였을 때, 혼합되는 수소의 질량분율이 높아질수록 CO₂ 배출량은 감소하였으며 발전량, 연소 후 Flue gas의 온도, 배출되는 NO_x의 양이 증가하는 것을 확인하였다. 암모니아의 질량분율을 증가 시 CO₂ 배출량이 감소하지만 발전량, Flue gas의 온도, 배출되는 NO_x의 양 또한 감소하는 것을 확인하였다.

2. Methodology

2-1. 기본 공정 모델링

혼합 연소 공정은 기존에 사용되고 있는 NGCC 공정을 이용해 Aspen Plus V11 프로그램으로 시뮬레이션을 진행하였다. 모사에 필요한 공정의 상세 조건은 Lee 등[21]의 논문을 참고하였으며 이를 3. Simulation에 기술하였다. NGCC 공정은 가스터빈과 스팀터빈을 통해 에너지를 생산하는 복합발전 공정으로, Fig. 1에 공정 모델을 나타냈다. 천연가스, 암모니아, 수소를 혼합한 연료와 공기를 함께 연소 반응기에서 연소시켜 고온, 고압의 배기가스(Flue gas)를 얻는다. 생성된 Flue gas는 가스터빈을 통해 에너지를 생산한 후, 잉여 열 에너지는 열교환기를 이용해 물로 전달한다. 열 에너지를 받아 가열된 물은 수증기가 되며 이는 스팀터빈을 통해 한번 더 에너지를 생산하고 다시 액화되어 펌프에서 압축되는 과정을 거쳐 순환하게 된다. NGCC 공정은 가스터빈을 통한 에너지 생산 뿐만 아니라 배기가스의 잉여 열에너지를 활용해 스팀터빈을 통해 추가적인 에너지를 생산하므로 효율이 높다는 장점을 가진다[22,23].

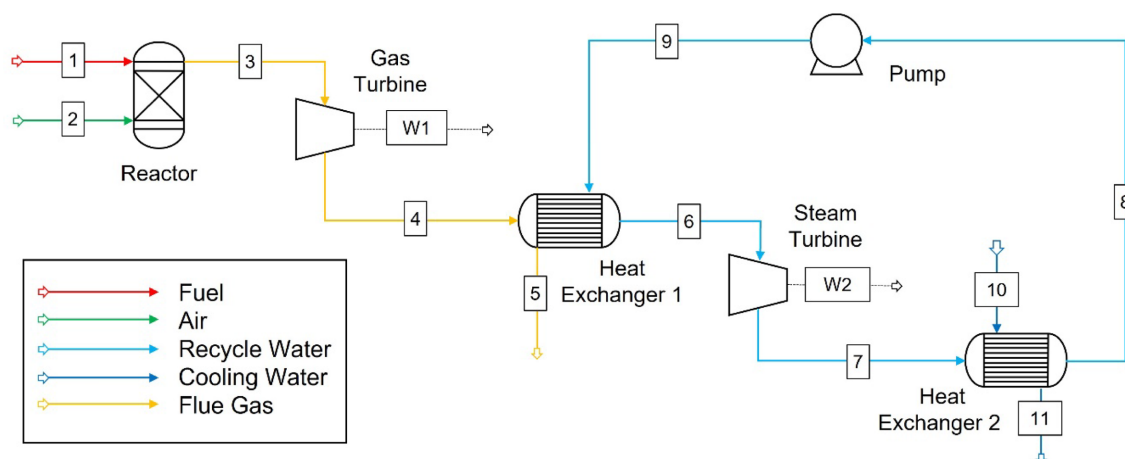


Fig. 1. NGCC process flow diagram.

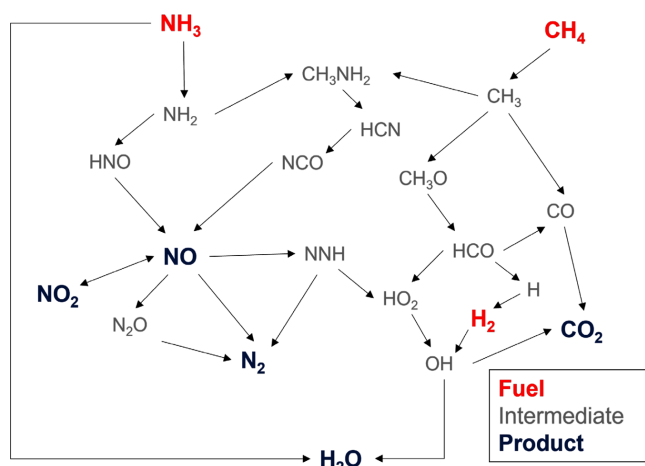


Fig. 2. Simplified combustion reaction mechanism of co-firing [24-29].

2-2. 공정 설계

NGCC 공정을 통해 천연가스, 수소, 암모니아의 총 질량은 유지하고 비율을 바꿔가며 혼합해 연료를 만들어 Reactor에서 연소하여 고온, 고압의 배기가스를 형성하도록 하였다. 이때 Reactor에서 일어나는 주된 연소반응을 Fig. 2에 제시하였다.

암모니아(NH₃)는 주로 OH 또는 O와 반응해 중간체인 HNO를 생성하며 곧바로 N₂로 전환된다. 그 중 일부는 NO_x를 생성하거나 NO와 NH₃가 반응하여 생성된 중간체 NNH가 N₂ 또는 H₂O로 환원된다. 천연가스의 대부분을 구성하는 CH₄는 주로 CO 연소반응을 통해 CO₂를 생성하거나 OH와 반응해 H₂O를 생성한다. 일부는 NH₃와의 반응을 통해 CH₃NH₂ 중간체가 생성되며 HCN, NCO 등의 중간체로 전환 후 최종적으로 NO_x를 생성한다. 수소(H₂)는 H의 형태로 여러 반응에 관여하며, 산소와 반응해 H₂O 또는 OH를 생성하고 OH가 서로 반응하거나 H와 반응하여 최종적으로 H₂O를 생성한다. 연소 반응을 통해 만들어진 고에너지의 Flue gas는 가스 터빈을 지나 전기를 생산하고, 이후 남아있는 열 에너지 등을 사용하기 위해 Heat Exchanger를 통해 고온의 수증기를 형성한 후 CCS, SCR 등의 여러 과정을 거쳐 배출 처리되고, 형성된 고온의 증기는 스팀터빈을 이용해 에너지를 생산한다. 이후 증기는 해수 등으로 냉각해 증기를 응축시키고, 펌프를 이용해 고압의 응축수로 만든 후 Heat Exchanger를 통과하는 방식으로 순환시켜 공정에 이용할 수 있도록 하였다.

3. Simulation

공정의 연료는 NG(Natural Gas), NH₃, H₂의 총 질량이 같도록 설정 후 NG 질량분율 1에서 시작해 NG의 분율을 줄이고, 암모니아, 수소의 분율을 높이는 방식으로 시뮬레이션을 진행하였다. NG는 CH₄ 100%로 가정하였다. 공정에서는 Redlich-Kwong 상태 방정식을 활용하여 시뮬레이션을 진행하였고, Stream 10의 냉각수와 Stream 2의 공기의 온도와 압력은 293 K, 1 bar로 설정하였다. Stream 1의 연료는 고압의 상태로 가정하여 283.15 K, 60 bar로 설정하였고, 연료의 유량은 31.718 kg/sec로 설정하였다. 또한 당량비의 경우 천연가스 연소 시 최적 연소 비율은 1.05~1.1이며[30,31] 당량비가 이보다 더 증가하면 열 효율과 CO₂ 포집 효율이 낮아진

Table 1. Stream design parameters of NGCC process [21]

Stream No.	1	2	9	10
Temperature (K)	283.15	293	382.73	285.15
Pressure (bar)	60	1	75	1.06
Mass Flow (kg/s)	31.718	Eq** 1.1		
Mass Fraction				
CH ₄	X*			
NH ₃	Y*			
H ₂	Z*			
O ₂		0.233		
N ₂		0.767		
H ₂ O			1	1

*X+Y+Z=1 **Eq (Equivalent)

다[32,33]. 따라서 본 연구에서는 화석연료와 암모니아 혼소에 쓰이는 당량비 1.1로 유량을 설정하였으며[34,35] 공기의 조성은 N₂ 76.7 wt%, O₂ 23.3 wt%이다. 연소 반응 후 배출되는 Flue gas는 NO₂, NO, H₂O, CO₂, NH₃, H₂, CH₄로 이루어져 있으며 조성, 온도, 압력은 연료의 질량분율에 따라 달라진다. 연료의 질량분율 변화에 따른 Flue gas의 온도, CO₂ 및 NO_x 배출량에 대한 결과는 4.1, 4.2 및 4.3에 각각 나타났다. 스팀 터빈 사이클에서 펌프를 통해 압축된 Stream 9의 Recycle water는 액체 상태이며 75 bar로 열교환기에 들어가도록 설정하였다[21]. Reactor는 연소 반응의 반응기로 주로 사용되는[36-39] RGibbs를 사용하였으며 Gibbs 자유에너지를 최소화하여 열역학적 평형을 이룬다. 열교환기는 Stream의 전체 열 전달 계수 자체를 이용해 열교환 계산을 진행하는 HeatX 열교환기를 사용하였다. 공정의 Stream와 Block의 세부정보를 각각 Table 1과 Table 2에 나타냈다.

4. Results and Discussion

본 장에서는 혼합 연소발전 공정에 공급되는 연료인 천연가스, 수소, 암모니아의 질량 분율을 변경하였을 때 연소반응이 일어나는 Reactor의 출구온도, 생성되는 CO₂ 배출량, NO_x 배출량과 가스터빈, 스팀터빈에서 생산되는 전력을 비교하였다. 배출량 비교를 위해 가스터빈을 거쳐 수증기와 열 교환 후 빠져나가는 Stream 5의 정보를 사용하였다.

4-1. 온도

Fig. 3은 NG, 수소, 암모니아의 질량분율을 다르게 했을 때, Reactor에서 연소 후 배출되는 Stream 3의 온도를 나타낸다. 혼합 가스는 Stream 1로 공급되며 입구온도와 압력은 각각 283.15 K, 60 bar로 설정하였다. 수소의 질량분율을 고정하고 암모니아의 질량분율을 늘리면(NG의 질량비가 감소) Flue gas의 온도가 감소한다. 반면 암모니아의 질량분율을 고정하고 수소의 질량분율을 늘리면 Stream 3에 해당하는 Flue gas의 온도가 증가하는 결과를 보인다. NG 100%일 때 Flue gas 온도는 2171.38 K이고 암모니아 100%일 때는 1887.22 K으로 가장 낮았다. 반면에 수소 100%일 때는 2361.22 K으로 Flue gas 온도가 가장 높았다.

Table 3의 메탄, 암모니아, 수소의 저위발열량(Lower Heating Value, LHV) 자료를 통해 알 수 있듯이 암모니아의 경우 발열량이 18.6 MJ/kg으로 세 물질 중 가장 낮기 때문에 수소의 질량분율을

Table 2. Block design parameters of NGCC process [21]

Blocks	Types	Parameters	Values
Reactor	RGibbs	Pressure	40 bar
		Heat duty	0
Gas Turbine	Compressor	Model and type	Turbine and Isentropic
		Discharge pressure	1.06 bar
		Mechanical Efficiencies	0.72
		Valid phases	Vapor-Only (Perform VL check)
Heat Exchanger 1	HeatX	Model fidelity	Shortcut
		Hot fluid	Tube
		Shortcut flow direction	Countercurrent
		Specification	Hot steam outlet temperature
		Value	456.15 K
Steam Turbine	Compressor	Minimum temperature approach	1 K
		Model and type	Turbine and Isentropic
		Discharge pressure	1.06 bar
		Mechanical Efficiencies	0.72
Heat Exchanger 2	HeatX	Valid phases	Vapor-Only (Perform VL check)
		Model fidelity	Shortcut
		Hot fluid	Tube
		Shortcut flow direction	Countercurrent
		Specification	Hot steam outlet temperature
Pump	Pump	Value	340 K
		Minimum temperature approach	1 K
		Discharge pressure	75 bar

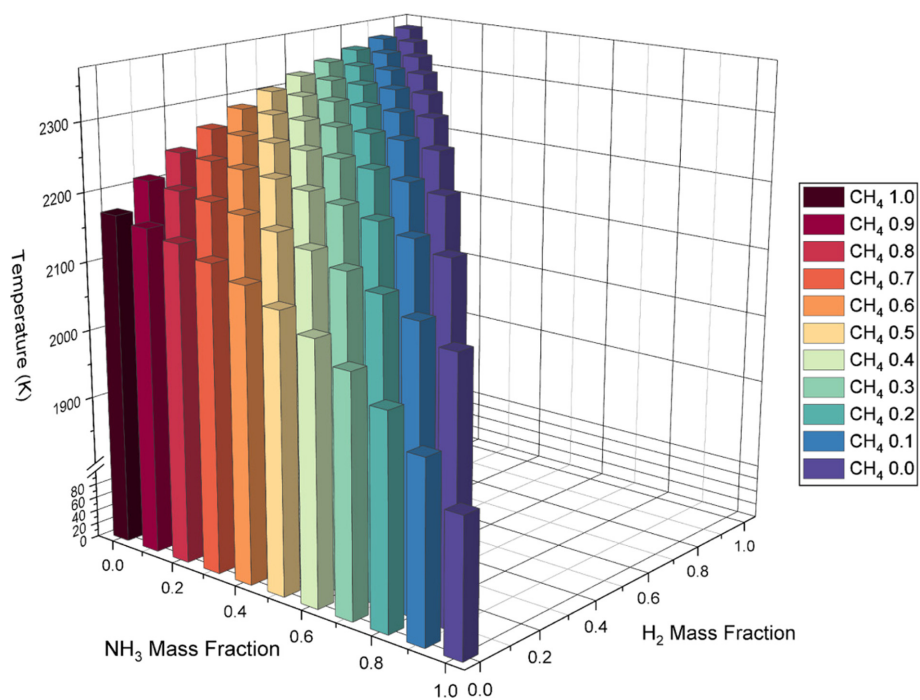


Fig. 3. Reactor exhaust temperature (K) based on mass fraction of H₂ and NH₃.

고정하고 암모니아의 질량분율을 높이면 총 발열량이 감소한다. 따라서 온도도 함께 감소하는 결과를 나타낸다. 수소의 LHV는 120 MJ/kg으로 세 물질 중 가장 높기 때문에 암모니아의 질량분율을 고정하고 수소의 질량분율을 높이면 발열량이 증가해 온도 또한 함께 증가한다. 연소 온도의 증가는 질소산화물(NO_x)의 생성을 야기하

게 되며 이는 4.3장에 결과를 제시하였다.

4-2. CO₂ 방출량

Fig. 4는 NG, 수소, 암모니아의 질량분율에 따른 CO₂ 방출량을 나타낸 그림이다. 수소, 암모니아의 질량분율과 관계없이 공급 연

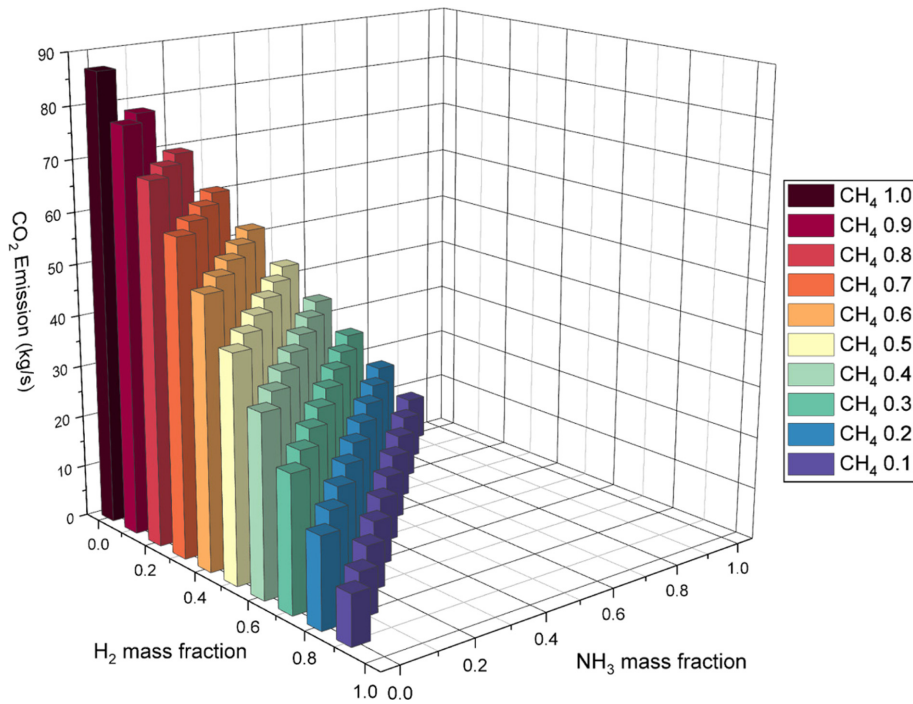


Fig. 4. CO₂ emissions (kg/s) based on mass fraction of H₂ and NH₃.

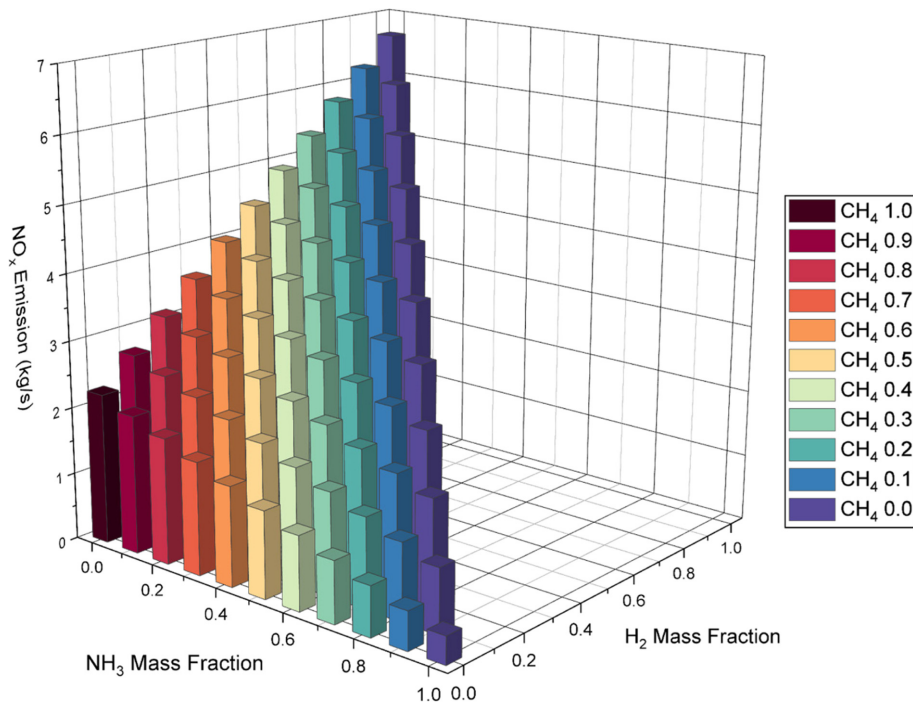


Fig. 5. NO_x emissions (kg/s) based on mass fractions of H₂ and NH₃.

료에서 NG의 질량분율이 동일하다면 CO₂도 동일한 양이 방출되며 NG의 질량분율이 증가할수록 CO₂ 방출량 또한 선형적으로 증가하였다. 메탄 100%인 NG를 연료로 사용하기 때문에 탄화수소인 메탄이 연소되는 양이 증가할수록 CO₂도 비례하여 생성되었다. CO₂ 방출량을 줄이기 위해서는 무탄소 연료인 암모니아와 수소의 비율을 높이고 NG의 비율을 낮추는 것이 가장 효과적이다.

4-3. NO_x 방출

Fig. 5는 공급 연료인 수소와 암모니아의 질량분율 변화에 따라 NO_x 방출량을 나타낸 그래프이다. NG 100%인 경우 NO_x는 2.25 kg/s 방출되며 암모니아 100%인 경우는 0.41 kg/s로 가장 낮았다. 수소 100%인 경우 6.67 kg/s로 가장 방출량이 높았다. 결과 분석을 위해 NO_x를 생성 메커니즘에 따라 Fuel NO_x, Thermal NO_x, Prompt NO_x로 구분하였다[40]. Fuel NO_x는 연료에 포함된 질소의 산화에

Table 3. Thermal properties of NH_3 , H_2 , CH_4 [13]

Thermal properties	Fuel	Values
Lower heating value	NH_3	18.6 MJ/kg
	H_2	120 MJ/kg
	CH_4	50.0 MJ/kg
Adiabatic flame temperature	NH_3	1800 °C
	H_2	2110 °C
	CH_4	1950 °C

의해 발생하며 산소 농도와 연료의 질소 함량에 영향을 받지만 연소 온도와는 무관하다. Thermal NO_x 는 약 1480 K 이상의 고온 환경에서 연소 공기에 포함된 질소의 산화에 의해 발생하며 산소 농도와 연소 온도에 영향을 받지만 연료의 질소 함량에는 영향을 받지 않는다. Prompt NO_x 는 연료에 포함된 탄화수소가 공기 중 질소와 빠르게 반응해 CN, HCN 형태로 변환되면서 발생하며 Fuel NO_x 와 Thermal NO_x 에 비해 극소량 생성되므로 양을 무시하였다[41]. 암모니아의 질량분율을 고정하고 수소의 질량분율을 증가시켰을 때, 고정된 당량비와 암모니아 양으로 Fuel NO_x 는 일정하지만 수소 질량분율 증가로 Fig. 3과 같이 높아진 연소 온도로 인해 Thermal NO_x 가 증가하여 총 NO_x 배출량이 증가하였다[42]. 반면에 수소의 질량분율을 고정하고 암모니아의 질량분율을 늘린 경우는 NO_x 방출량이 감소하였다. 암모니아 질량분율의 증가로 Fuel NO_x 양이 증가하지만 낮아진 연소 온도로 인해 Thermal NO_x 는 감소하였는데, Fuel NO_x 의 증가보다 Thermal NO_x 감소가 더 우세하여 총 배출되는 NO_x 의 양은 감소한 것으로 분석할 수 있다[43].

4.4. 전력 생산량

Fig. 6는 수소와 암모니아의 질량분율에 따른 가스 터빈(Gas turbine, GT)과 스팀터빈(Steam turbine, ST)에서의 발전량을 각각 나타낸 그래프이다. GT와 ST의 발전량 모두 수소 100%일 때 각각 1279.32 MW, 634.35 MW로 가장 높았으며 암모니아 100%일 때

각각 197.41 MW, 74.68 MW로 가장 낮았다. NG 100%일 때의 발전량은 각각 541.73 MW, 260.62 MW였다. 따라서 GT와 ST의 발전량의 총 합은 수소 100%일 때 1913.67 MW로 최대이고, 암모니아 100%일 때 272.09 MW로 최소값을 가진다. NG 100%일 때 GT와 ST의 발전량을 합친 총 발전량은 802.36 MW이다. 또한 터빈으로 들어가는 유체의 입구 압력과 온도가 ST이 GT보다 높지만 유체의 부피유량이 GT이 ST의 약 6배이므로 스팀터빈의 발전량보다 가스터빈의 발전량이 더 높았다. 암모니아의 질량분율을 고정하고 수소의 질량분율을 높였을 때 GT와 ST에서의 발전량이 모두 증가하였다. 질량분율에 관계없이 GT에서 유체의 압력은 40 bar, ST에서 유체의 압력은 75 bar이지만 수소 질량분율 증가에 따라 Fig. 3에서와 같이 온도가 증가하기 때문에 GT의 출력이 증가하였다[44]. ST의 경우도 물이 GT 출구 유체와 열교환기를 통해 열을 전달받아 고온의 증기가 되는데 이 때 유체의 온도가 높을수록 전달되는 열이 많아져 증기 온도도 상승한다. 이로 인해 ST의 출력도 증가하게 된다. 수소의 질량분율을 고정하고 암모니아의 질량분율을 높였을 경우는 GT와 ST에서의 발전량 모두 감소하였다. 이 결과 또한 Fig. 3에서와 같이 유체의 온도 감소로 인해 GT 출력이 감소하였으며 물로 전달되는 열이 감소하여 ST의 출력도 감소하였다. 수소의 질량분율 증가 시 전력 생산량과 NO_x 방출량 또한 증가하므로 생산량 증가와 동시에 배출량 감축을 만족시키기 위한 기술이 필요하다.

5. Conclusion

본 연구에서는 온실가스 주 배출원인 에너지 생산 분야의 효과적인 이산화탄소 감축과 안정적인 에너지 수급을 위해 NG, 암모니아, 수소를 혼소하여 연소 온도, CO_2 와 NO_x 방출량, 가스터빈과 스팀터빈의 전력 생산량을 비교하며 혼소 발전의 타당성을 평가하였다. 이를 위해 가스터빈과 스팀터빈 사이클을 결합한 천연가스복합화력발전(NGCC) 공정 모델로 선정하였고 ASPEN Plus를 이용해 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 전력 생산량의 경우 수소의 질량분율

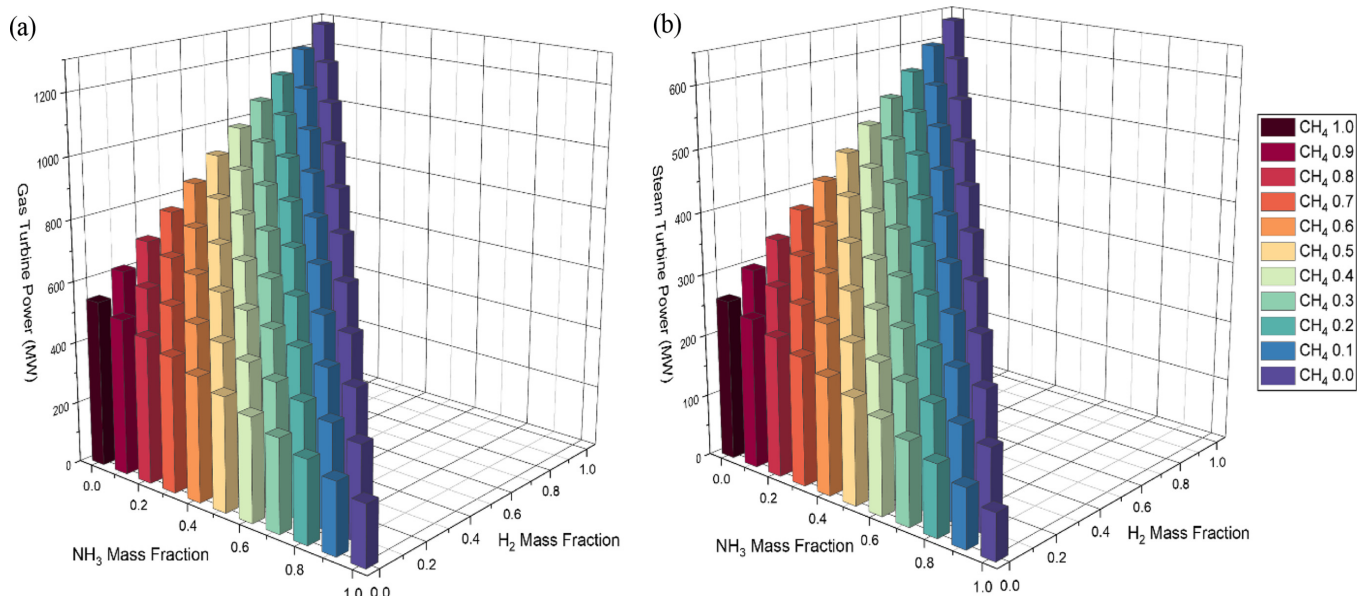


Fig. 6. (a) Gas turbine power generation (MW) and (b) Steam turbine power generation (MW) based on mass fraction of H_2 and NH_3 .

증가로 연소 후 배출되는 Flue gas의 온도와 물로 전달되는 열량이 높아져 생산량이 증가하였고 암모니아의 질량분율 증가는 반대로 온도와 생산량이 감소하였다. NO_x 배출량의 경우 수소의 질량분율 증가로 연소기 온도가 상승하여 Thermal NO_x 방출량이 크게 증가하였고 암모니아의 질량분율 증가 시, Fuel NO_x는 증가하나 낮은 연소기 온도로 인해 Thermal NO_x의 양이 크게 감소해 총 NO_x 방출량이 감소하는 결과를 얻었다. CO₂ 방출량은 다른 연료와 무관하게 NG의 질량분율이 감소할수록 CO₂ 방출량이 감소하는 결과를 얻었다. 환경오염을 유발하는 NO_x는 허용 배출량이 정해져 있기 때문에 초과할 경우 SCR이나 SNCR과 같은 공정을 통해 처리해야 한다. 처리를 위해 추가적인 설비 비용이 들기 때문에 발전 단계에서 NO_x 배출량을 줄이는 것이 중요하다. CO₂ 배출량 또한 탄소 중립 목표 이행뿐만 아니라 해마다 높아지는 탄소배출권 가격과 CO₂ 포집을 위해 추가되는 CCS 공정 비용 등을 고려한다면 NO_x와 같이 발전 단계에서 배출량을 줄여야 한다. 추후 연료 가격, NO_x 처리 비용과 이산화탄소 포집 또는 탄소배출권 가격을 고려한 경제성 평가를 통해 기술 경제성 평가(Techno-economic Analysis, TEA)를 수행하고 최적화를 수행하는 연구를 진행하고자 한다. 또한 NG, 암모니아, 수소의 상세한 연소 반응 메커니즘을 이용하여 연소 반응기를 설계하고 온실가스 배출량에 여러 매개변수의 영향에 대한 민감도 분석을 수행할 예정이다. 본 연구 결과는 화석연료 발전 시스템에 혼소 방식의 도입을 통해 이산화탄소 배출량을 줄이는 데에 기여할 수 있다. 뿐만 아니라 무탄소 연료인 암모니아와 수소의 비율 조정을 통해 질소산화물의 배출량과 전력 생산량 또한 조절할 수 있다. 본 연구에서 제시하는 혼소연료의 질량분율을 달리 하여 얻은 발전량, 온도, NO_x와 CO₂ 배출량 결과는 천연가스 발전, 천연가스와 암모니아 혼소 발전 혹은 천연가스와 수소 혼소 발전 데이터와 비교 가능한 지표로 활용할 수 있으며 NG, 암모니아, 수소의 혼소 메커니즘 연구의 데이터로도 이용할 수 있을 것이라 기대한다.

References

- Mohajan, H., "Greenhouse Gas Emissions Increase Global Warming," *International Journal of Economic and Political Integration*, **1**(2), 21-34(2011).
- Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S.C.B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D. J. and Allen, M. R., "Greenhouse-gas Emission Targets for Limiting Global Warming to 2 °C," *Nature*, **458**(7242), 1158-1162(2009).
- Jomekian, A., Bazooyar, B., "Activated Carbon from Municipal Waste for Enhanced CO₂/CH₄ Membrane Separation: Experimental, Modeling and Simulation," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(9), 2102-2118(2023).
- Rashidi, H., Azimi, H. and Rasouli, P., "Carbon Dioxide Absorption by Ammonia-promoted Aqueous Triethanolamine Solution in a Packed Bed," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(9), 2282-2292(2023).
- Azizi, N., Jahanmahin, O., Homayoon, R., Khajouei, M., "A New Ternary Mixed-matrix Membrane (PEBAX/PEG/MgO) to Enhance CO₂/CH₄ and CO₂/N₂ Separation Efficiency," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(6), 1457-1473(2023).
- Wang, J., Lv, X., Huang, L., Li, L., Li, X. and Zhang, J., "Construction of Amphiphilic Networks in Blend Membranes for CO₂ Separation," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(1), 175-184(2023).
- Verma, S., Bhagat, P., Gahlyan, S., Rani, M., Kumar, N., Malik, R. K., Lee, Y. and Maken, S., "Thermophysical Properties of N-isopropyl-2-propanamine+alkanol (C1-C3) Mixtures as Absorbents for Carbon Dioxide Capture," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(9), 2293-2302(2023).
- Lee, Z. H., Sethupathi, S., Lee, K. T., Bhatia, S. and Mohamed, A. R., "An Overview on Global Warming in Southeast Asia: CO₂ Emission Status, Efforts Done, and Barriers," *Renew. Sust. Energ.*, **28**, 71-81(2013).
- Cho, S., Kim, M., Lee, J., Han, A., Na, J. and Moon, I., "Multi-objective Optimization of Explosive Waste Treatment Process Considering Environment via Bayesian Active Learning," *Eng Appl Artif Intell*, **117**, 105463(2023).
- Cho, S., Lim, J., Cho, H., Yoo, Y., Kang, D. and Kim, J., "Novel Process Design of Desalination Wastewater Recovery for CO₂ and SOX Utilization," *Chem. Eng. J.*, **433**, 133602(2022).
- Cho, S., Kang, D., Kwon, J. S. II, Kim, M., Cho, H., Moon, I. and Kim, J., "A Framework for Economically Optimal Operation of Explosive Waste Incineration Process to Reduce NO_x Emission Concentration," *Mathematics*, **9**(17), 2174(2021).
- Park, S., Shin, Y., Jeong, E. and Han, M., "Techno-economic Analysis of Green and Blue Hybrid Processes for Ammonia Production," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(11), 2657-2670(2023).
- Kobayashi, H., Hayakawa, A., Somaratne, K. D. K. A. and Okafor, E. C., "Science and Technology of Ammonia Combustion," *Proc. Combust. Inst.*, **37**(1), 109-133(2019).
- Lee, H., Woo, Y. and Lee, M. J., "The Needs for R&D of Ammonia Combustion Technology for Carbon Neutrality - Part II R&D Trends and Technical Feasibility Analysis," *Journal of The Korean Society of Combustion*, **26**(1), 84-106(2021).
- Gómez-García, M. A., Pitchon, V. and Kiennemann, A., "Pollution by Nitrogen Oxides: An Approach to NO_x Abatement by Using Sorbing Catalytic Materials," *Environment International*, **31**(3), 445-467(2005).
- Lee, G., Lee, Y., Kim, Y.-J., Han, B., Kim, S. B., Park, I., Lee, G., Park, H., Hong, K.-J. and Kim, J., "Simultaneous Removal of NO_x and SO_x with Wet Scrubber using CaCO₃-based KI Absorbent," *Journal of Energy & Climate Change*, **18**(1), 50-60(2023).
- Jung, Y. J., Kim, B. S., Jeong, B., Kim, H. D., Won, J. M., Cha, K. and Cha, J. S., "Thermal Regeneration Characteristics of Titanium Isopropoxide-modified TiO₂ for the Removal of Environmentally Hazardous NO_x in Iron Ore Sintering Process," *Korean J. Chem. Eng.*, **40**(4), 714-721(2023).
- Kim, D., "Review on the Development Trend of Hydrogen Gas Turbine Combustion Technology," *Journal of The Korean Society of Combustion*, **24**(4), 1-10(2019).
- Shin, Y. and Cho, E.-S., "Numerical Study on H₂ Enriched NG Lean Premixed Combustion," *Journal of The Korean Society of Combustion*, **26**(1), 51-58(2021).
- Armaroli, N. and Balzani, V., "The Hydrogen Issue," *ChemSusChem*, **4**(1), 21-36(2011).
- Lee, H., Lim, J. and Kim, J., "Novel Lithium Production Process Using Desalination Wastewater and Waste Heat From Natural Gas Combined Cycle," *Energy Convers Manag.*, **292**, 117396(2023).
- Yan, J. Y., Handbook of Clean Energy System, Vol. 5, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, U.K.(2015).
- Darrow, K., Tidball, R., Wang, J. and Hampson, A., "Catalog of

- CHP Technologies; U.S. Environmental Protection Agency CHP Partnership (2014).
24. De Giorgi, M. G., Sciolti, A. and Ficarella, A., "Application and Comparison of Different Combustion Models of High Pressure LOX/CH₄ Jet Flames," *Energies*, **7**(1), 477-497(2014).
 25. Shin, K., Cho, H., Shim, S. and Jee, S., "Shock Tube and Modeling Study of the Formation and the Reduction of Nitrogen Oxides; Ammonia Oxidation," *Journal of the Korean Society of Combustion*, **4**(1), 59-65(1999).
 26. Berwal, P., Shawnam, Kumar, S., "Laminar Burning Velocity Measurement of CH₄/H₂/NH₃-air Premixed Flames at High Mixture Temperatures," *Fuel*, **331**, 125809(2023).
 27. Yasiry, A., Wang, J., Zhang, L., Abdulraheem, A. A. A., Cai, X. and Huang, Z., "An Experimental Study on H₂/NH₃/CH₄-air Laminar Propagating Spherical Flames at Elevated Pressure and Oxygen Enrichment," *Int J Hydrogen Energy*, **58**, 28-39(2024).
 28. Li, R., Konnov, A. A., He, G., Qin, F. and Zhang, D., "Chemical Mechanism Development and Reduction for Combustion of NH₃/H₂/CH₄ Mixtures," *Fuel*, **257**, 116059(2019).
 29. Wang, S., Wang, Z. and Roberts, W. L., "Measurements and Simulations on Effects of Elevated Pressure and Strain Rate on NO_x Emissions in Laminar Premixed NH₃/CH₄/air and NH₃/H₂/air Flames," *Fuel*, **357**, 130036(2024).
 30. The Engineering ToolBox, Optimal Combustion Processes - Fuel vs. Excess Air, Available at https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-combustion-efficiency-d_167.html, (2003).
 31. The Engineering ToolBox, Combustion Efficiency and Excess Air, Available at https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d_271.html, (2003).
 32. Li, B., Sun, S., Zhang, L., Feng, D., Zhao, Y., Wang, P., Wu, J., Qiu, P., Zhang, F. and Qin, Y., "System Modification and Thermal Efficiency Study on the Semi-closed Cycle of Supercritical Carbon Dioxide," *Energy Convers Manag*, **241**, 114272(2021).
 33. Habib, M., Esquino, A. M., Hughes, R., Soepyan, F. B., Nemetz, L. R., Zhang, Z., Haque, M. E., Luebke, D. R., Lipscomb, G. G., Matuszewski, M. S., Bhattacharyya, D. and Hornbostel, K. M., "Flexible Carbon Capture Using MOF Fixed Bed Adsorbers at an NGCC Plant," *Carbon Capture Science and Technology*, **10**, 100170(2024).
 34. Ishihara, S., Zhang, J. and Ito, T., "Numerical Calculation with Detailed Chemistry of Effect of Ammonia co-firing on NO Emissions in a Coal-fired Boiler," *Fuel*, **266**, 116924(2020).
 35. Ishihara, S., Zhang, J. and Ito, T., "Numerical Calculation with Detailed Chemistry on Ammonia co-firing in a Coal-fired Boiler: Effect of Ammonia co-firing Ratio on NO Emissions," *Fuel*, **274**, 117742(2020).
 36. Ahmad, A. H., Darmanto, P. S. and Juangsa, F. B., "Thermodynamic Analysis of Ammonia co-firing for Low-rank Coal-fired Power Plant," *International Journal of Sustainable Energy*, **42**, 527-544 (2023).
 37. Mutlu, Ö. Ç. and Zeng, T., "Challenges and Opportunities of Modeling Biomass Gasification in Aspen Plus: A Review," *Chem Eng Technol*, **43**, 1674-1689(2020).
 38. Ahmad, A. H., Darmanto, P. S. and Juangsa, F. B., "Thermodynamic Study on Decarbonization of Combined Cycle Power Plant," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, **55**, 613-626(2023).
 39. Lee, J., Jung, M., Kwon, Y., Lee, G. and Shon, B., "Simulation of the Flue Gas Treatment Processes of An Industrial-waste Incinerator Using Aspen Plus," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **10**, 3246-3252(2009).
 40. Lee, S., The hybrid SNCR/SCR optimization for NO_x removal of steam boiler in petrochemical process, (2023).
 41. Rao, A., Liu, Y. and Ma, F., "Numerical Simulation of Nitric Oxide (NO) Emission for HCNG Fueled SI Engine by Zeldovich', Prompt (HCN) and Nitrous Oxide (N₂O) Mechanisms Along with the Error Reduction Novel Sub-models and Their Classification Through Machine Learning Algorithms," *Fuel*, **333**, 126320(2023).
 42. Bayramoglu, K., Bahlekeh, A. and Masera, K., "Numerical Investigation of the Hydrogen, Ammonia and Methane Fuel Blends on the Combustion Emissions and Performance," *Int. J. Hydrogen Energy*, **48**, 39586-39598(2023).
 43. Li, J., Huang, H., Kobayashi, N., He, Z. and Nagai, Y., "Study on Using Hydrogen and Ammonia as Fuels: Combustion Characteristics and NO_x Formation," *Int. J. Energy Res.*, **38**, 1214-1223 (2014).
 44. Harper, J., Cloyd, S., Pigon, T., Thomas, B., Wilson, J., Johnson, E. and Noble, D. R., Hydrogen Co-Firing Demonstration at Georgia Power's Plant McDonough: M501G Gas Turbine, Turbomachinery Technical Conference and Exposition, June, USA(2023).

Authors

Sunghyun Cho: Assistant Professor, School of Chemical Engineering, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, JeonJu, Jeonbuk 54896, Korea, shcho5043@jbnu.ac.kr

Inhye Kim: Doctoral student, School of Chemical Engineering, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, JeonJu, Jeonbuk 54896, Korea, inhye913@gmail.com

Jeongjae Oh: Master's student, School of Chemical Engineering, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, JeonJu, Jeonbuk 54896, Korea; jeongjae00000@gmail.com

Taesung Kim: Undergraduate student, School of Chemical Engineering, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, JeonJu, Jeonbuk 54896, Korea, taesungkim6057@gmail.com

Minsuk Im: Undergraduate student, School of Chemical Engineering, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University, JeonJu, Jeonbuk 54896, Korea, iminsuk2018@gmail.com