J. Korean Soc. Combust. 27(2) (2022) 14-38

〈기술논문〉 DOI: https://doi.org/10.15231/jksc.2022.27.2.014 ISSN 1226-0959
eISSN 2466-2089

탄소중립 가스터빈 연소 기술 동향

김형우* · 진욱화* · 고영건** · 최민준* · 구인영* · 백민하* · 김규태* · 신동혁*†

*한국과학기술원 항공우주공학과
**두산중공업

A Review of Carbon Neutral Gas Turbine Combustion Technology

Hyoungwoo Kim*, Ukhwa Jin*, Younggun Go**, Minjun Choi*, Inyeong Gu*, Minha Baek*, Kyu Tae Kim* and Dong-hyuk Shin*†

*Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology
**Doosan Heavy Industry & Construction

(Received 12 March 2022, Received in revised form 28 March 2022, Accepted 14 April 2022)

ABSTRACT

This report surveys recent developments of carbon-neutral gas turbine combustion technology. Since the Paris Climate Agreement in 2019, each country committed a nationally determined contribution (NDC) which identifies key targets to reduce the temperature rise. In order to meet the NDC, each government is pushing hard to reduce greenhouse gas emissions, and using carbon-neutral fuel is a straightforward way to reduce to achieve the goals. As carbon-neutral fuels such as hydrogen or ammonia have different thermodynamic and transport properties, it needs paradigm changes in many related sectors. Gas turbine is one of the sectors, and this report reviews ongoing progress and challenges centered around developing carbon-neutral gas turbine combustion technology.

Key Words : Carbon Neutral, Gas Turbine, Hydrogen, Ammonia, Combustion Technology

기 호 설 명

AIST: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
CCUS: carbon capture, utilization and storage
DLE: dry low emission
DOE: Department of Energy
EPSRC: 영국과학공학연구위원회 (Engineering and Physical Sciences Research Council)
FREA: Fukushima Renewable Energy Institute, AIST
GT: gas turbine
IEA: International Energy Agency
IEEJ: Institute of Energy Economics
IGCC: 석탄가스화복합발전(integrated gasification combined cycle)
LNG: liquefied natural gas
LOHC: 액상유기수소화물(liquid organic hydrogen carrier)
MCH: 유기 하이드라이드 (Methylcyclohexane)
MGT: micro gas turbine
MNQC: multi-nozzle quiet combustion
MtCO2eq: million metric tons of carbon dioxide equivalent
NDC: nationally determined contribution
Nm3: normal cubic meter
NEDO: 일본 신에너지 산업 기술종합개발기구

†Corresponding Author, donghyuk.shin@kaist.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

NORR: 질소산화물환원반응(nitrogen oxide reduction reaction)
NRR: 질소환원반응(nitrogen reduction reaction)
NTAP: non-thermal arc plasma
PEM: 양성자교환막(proton exchange membrane)
PMR: plasma membrane reactor
PSA: pressure swing adsorption
RDC: rotating detonation combustion
SEV: sequential EV
SMR: steam methane reforming
SOEC: solid oxide electrolysis cell
UTSR: University Turbines Systems Research
WLE: wet low emission

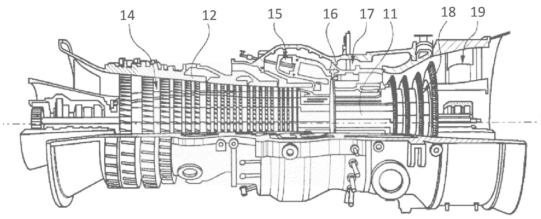
1. 서 론

가스터빈은 화학에너지를 동력이나 전기에너지로 변환하는 열기관 중 하나이다. 에너지와 추력을 요구하는 다양한 분야에서 활용되고 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 가스터빈의 구성은 크게 압축기(compressor), 연소기(combustor), 터빈(turbine)으로 구성되어 있다. 압축기와 터빈은 축으로 연결되어 있어, 터빈에서 생성된 축동력이 압축기로 전달된다. 가스터빈은 연료가 지속해서 연소하기 때문에, 대용량, 고출력이 가능하며, 전기생산을 위한 발전소뿐만 아니라, 대형 선박용 엔진, 비행기 엔진 등 다양하게 활용되고 있다. 비행기 엔진에서 사용하는 터보제트, 터보팬도 가스터빈의 한 종류이다. 현재 전 세계 에너지의 24%는 가스터빈 시스템에서 생산되고 있으며[1], 국내에서도 30% 이상의 전기가 가스터빈으로 생성되고 있다[2]. 또한, Fig. 2에서 보듯이 매년 4% 이상의 성장률이 예측된다[3].

가스터빈과 가장 근접한 최초의 개념설계는 1791년 영국의 John Barber가 Fig. 3처럼 고안하였다. 그 후, 최초의 상업적으로 성공적인 가스터빈은 1938년 BBC 사에서 개발한 GT Neuchatel이다[5]. 이 가스터빈은 스위스 Neuchatel 시의 지역 발전소에 설치가 되었으며, 50년 동안 운영이 되었다. 4 MW의 출력을 가지며, 17.4%의 효율, 3000 RPM의 회전속도, 550°C의 터빈입구온도를 사용하였다. 현대의 가스터빈은 40% 이상의 효율, 1650°C의 터빈입구온도로 발전해왔다. 현재 세계에서 대형급의 독자개발기술을 가지고 있는 나라는 미국, 프랑스, 독일, 이탈리아, 일본뿐이었으며, 2019년 두산중공업에서 최초로 국내 독자 기술로 300 MW급 가스터빈을 개발하였다[6].

지구온난화로 인하여 가스터빈 분야에도 큰 변화가 요구되고 있다. 기후변화에 대응하기 위하여 2015년 196개국이 프랑스 파리에서 온실가스 감축에 동참을 선언하였으며, 여기에서 생성된 파리협정문은 2016년에 한국을 포함한 174개국이 서명을 하였다. 파리협정문의 주된 내용은 평균 지구 온도를 산업화 이전 수준보다 2°C 낮은 상승을 유지하고, 바람직하게는 1.5°C 상승으로 제한하는 것이다. 이후 2021년 한국은 NDC(nationally determined contribution)를 상향 조정하였고, 그 핵심 내용은 국가 온실가스 배출량을 40% 감소시키는 것이다. 이를 위하여는 2030년까지 727.6 MtCO2eq를 줄여야 하며, 이 감축량 추세가 유지가 된다면, 대한민국은 2050년에는 탄소중립의 목표를 달성하게 될 것으로 보인다. 이 NDC 목표를 달성하기 위하여는 많은 분야에서 노력이 이루어져야 할 것이며, 발전 분야의 큰 비중을 차지하고 있는 가스터빈도 이에 맞춘 대응이 필요한 실정이다.

가스터빈에서 온실가스 배출량을 줄이는 방법은 효율을 높이거나, 연료를 전환하는 것이다. 효율을 높이는 기술개발이 지속되고 있지만, 극단적으로 높이기는 어려울 것으로 예상된다. 지난 20여 년간 효율은 8% 증가하였다



11: rotor, 12: casing, 14: compressor (22 stages), 15: EV combustor, 16: HP turbine, 17: SEV combustor, 18: LP turbine (4 stages), 19: exhaust gas outlet

Fig. 1. Schematic diagram of a gas turbine for power generation[4].

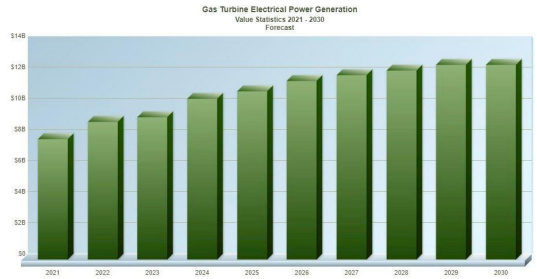


Fig. 2. Gas turbine electrical power generation value[3].

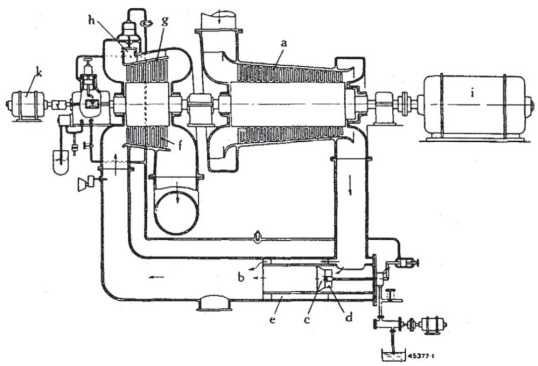


Fig. 3. The first commercially successful gas turbine design by BBC: Diagram of the simplest form of combustion turbine plant. With reaction type gas turbine and axial compressor for oil fuel, and with excess air cooling. (a. Axial compressor; b. Combustion chamber; c. Combustion nozzle; d. Burner; e. Cooling-air jacket; f. Gas-turbine blading; g. Gas turbine; h. Safety valve; i. Generator; j. Starting motor)

(1997년 56%에서 2019년 64%, 복합발전 기준)[7]. 따라서 현실적으로 기후변화에 기여할 수 있는 방법으로는 온실가스 배출이 없는 연료를 쓰는 방법이다. 현재 개발된 가스터빈 대부분은 천연가스 기반이다. 수소 혼소율이 30%까지 가능한 가스터빈들이 개발되어 있지만[8], 그 외의 무탄소(암모니아), 탄소중립(Biomass, E-Fuel) 연료의 사용 기술이 필요한 시점이다.

또한, 최근 탄소중립 목표와 맞물려 탄소감축이 어려운 산업 분야의 잠재적 탄소 제거 방법으로 탄소 포집 및 활용·저장 기술(CCUS, Carbon capture, utilization and storage)이 주목받는 중이다[9]. IEA에서는 CCUS 기술을 적용한 화력발전설비의 온실가스 배출량은 해당 기술을 적용하지 않은 설비 대비 85-95% 저감 될 것으로 평가하였다. 그러나, CCUS 설비의 활용을 위하여 화력발전설비를 개조할 경우 수소 및 암모니아 혼소 발전소보다 고려되어야 할 요소가 많아 설비비용 및 발전비용의 증가 가능성이 상존한다[10]. 따라서, 본 연구에서는 가스터빈의 탄소중립 연료로의 전환에 주안점을 두어서 기술할 것이다.

현재 많은 분야에서 온실가스 배출량을 줄이기 위하여, 다양한 범국가적인 노력이 투입되고 있다. 기본이 될 수 있는 가스터빈 기술개발의 측면에서는 새롭게 도입될 탄소중립 연료들을 사용할 수 있는 기술개발이 필요한 시점이다. 그 이외에도, 해외 가스터빈 제작사들의 기술개발 동향, 해외 국가들의 수소, 암모니아 생성의 방향성, 국내 가스터빈 활용 기업들의 계획, 국제적 정세 등의 다양한 정보들이 필요하다. 이러한 요소들이 앞으로 개발되어야 할 새로운 가스터빈의 기술개발의 방향성을 설정할 수 있기 때문이다.

2. 주요 국가의 탄소 배출 제한 정책 및 지원책

온실가스 배출 문제에 대응하기 위하여, 탄소 저감에 대한 논의가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 특히, 지구의 평균온도 상승을 저지하기 위하여, 2015년 파리기후협정이 채택되었으며[11], 195개국의 회원국들은 온실가스 배출 감축을 위한 장기적 저탄소 발전계획을 제출하였다. 2020년 12월까지 128개국이 탄소중립을 선언하였고, 대한민국 또한 2020년 10월 탄소중립 선언에 합류하여 2050년 탄소중립 목표 달성을 위한 전략 수립을 시작하였다. 본 장에서는 온실가스 배출의 주요 국가인 미국과 유럽연합 그리고 국내의 탄소중립 정책에 대하여 설명하고자 한다.

2.1 미국

미국은 2017년 기준, 세계 2위의 온실가스 배출국이다. 2021년 바이든 대통령 취임과 동시에 기후변화 대응을 주요 국정과제로 설정하였고, 트럼프 대통령 때 탈퇴하였던 파리기후협정에 다시 가입함으로써 탄소중립에 대한 재논의가 활발히 이루어지고 있다. 바이든 행정부는 2050년 탄소중립을 목표로 청정에너지 및 저탄소 관련 사업 및 인프라 구축에 2조 달러를 지원할 계획이라고 밝혔다. 이 중 3000억 달러를 투자하여 Table 1의 배터리, 원자로, 수소, 탄소 포집을 포함한 총 8개의 분야에 대한 연구를 집중하기로 하였다. 화석연료에 대해서는 캘리포니아주를 필두로 10개의 주에서 2030년 혹은 2035년부터 내연기관 자동차의 판매를 금지하기로 하였다. 늘어나는 친환경 자동차의 판매를 촉진하기 위하여 전기차에 대한 세금 공제 정책, 2030년까지 전기차 충전소 50만 개 확충 등의 인프라 구축 계획을 발표했다.

2.2 유럽연합(EU)

유럽연합은 2019년 12월, 기후변화 대응과 탄소중립 경제 실현을 위해 유럽연합 그린딜(European Green Deal)을 채택하였다[14]. 유럽연합에서는 그린딜 정책 이행을 위하여, 향후 10년 동안 1조 유로 이상의 투자계획을 수립하였고, 에너지, 교통, 주택 등의 8개 주축 분야에서 정책 방향과 실행 계획을 제시하였다. Table 2에 각 분야의 정책을 정리하였다. 또한, 유럽연합은 탄소배출 감축에 따른 자국 내 기업을 보호하기 위하여 상품의 탄소 배출량에 따

른 관세를 부과하는 탄소국경세 도입을 밝혔다. 마지막으로, 2021년 6월에는 각료이사회에서 유럽 기후법을 승인하였다[13]. 유럽 기후법은 2030년까지 유럽연합의 온실가스 배출량을 1990년 대비 55% 감축시킨다는 목표를 포함하여 2050년 탄소중립을 이룬다는 목표를 법제화하였다.

2.3 대한민국

대한민국은 2021년 '2030 NDC 상향안'을 발표하여 2030년까지 온실가스 배출을 2018년 대비 35% 이상 감축하기로 하였고[15], 2050년 탄소중립을 위한 그린뉴딜 정책을 발표하여 2025년까지 42.7조 원의 예산을 편성하였다. 2020년 발간된 탄소중립 전략 보고서에서는 온실가스 감축량을 2017년 대비 24.4% 감축으로 상향 수정하였다[16]. 그린뉴딜 정책 내용은 Table 3으로 정리하였다. 정부에서는 그린뉴딜 정책의 일환으로 국내 온실가스 배출량의 36%를 차지하는(2017년 기준) 에너지 분야에서는 신규 석탄발전소의 건설을 금지하기로 하였고, 30년이 넘어 노후화된 석탄발전소를 폐지하고 LNG 연료(가스터빈)로 전환을 발표하였다. 그리고 9차 전력수급계획을 수립하여 2034년까지 원자력 발전소 축소 및 재생에너지 발전용량을 단계적으로 전체 발전량의 30.2% 수준으로 증가시킨다는 계획을 발표했으며 이를 Fig. 4에 나타내었다[2]. 2019년에는 '수소경제 활성화 로드맵'을 통해 수소 에

Table 1. The field of clean energy R&D in the United States [12]

구분	주요 내용
배터리	기존 리튬이온 대비 1/10 비용의 그리드 규모 배터리 저장기술
첨단 원자로	기존 대비 1/2 비용의 안전하고 효율적인 소형 모듈형 원자로 기술
냉장/냉동/냉방	지구온난화를 유발하지 않는 냉매를 사용하는 냉장/냉동/냉방 기술
건물	소재/가전/시스템관리 혁신을 통한 건물의 제로넷 에너지 달성 기술
수소	재생에너지 기반 그린수소 관련 기술
건축소재	건축자재(철, 시멘트, 화학 등)의 탈 탄소화 생산 기술
식품/농업	식품/농업 분야의 탈 탄소화 기술
탄소포집	이산화탄소 포획과 지층 영구격리 기술

Table 2. EU Green Deal Policy Overview [14]

구분	주요 내용
온실가스	온실가스 배출 감축 및 탄소중립 실현
에너지	깨끗하고 저렴한 안전한 에너지
산업	깨끗한 순환경제를 위한 산업 환경 구축
교통	지속 가능한 스마트 모빌리티 인프라 구축
건물	에너지 및 자원 효율적인 건물 개발
식품	농장에서 식탁까지의 친환경 유통/관리 체제 구축
오염	무공해(Zero pollution)/ 무독성(toxic free) 환경 조성
생태계	생물다양성 및 생태계 보호

Table 3. Green New Deal Policy Overview

구분	주요 내용
도시·공간·생활 인프라 녹색 전환	국민 생활과 밀접한 공공시설 제로 에너지화
	국토 ·해양 ·도시 생태계의 기후변화 대응 제고
	깨끗하고 안전한 물관리 체계 구축
저탄소·분산형 에너지 확산	에너지관리 효율화 지능형 스마트그리드 구축
	신재생에너지 확산 기반 구축 및 공정전환 지원
	전기차/수소차 등 그린 모빌리티 보급 확대
녹색산업 혁신 생태계 구축	녹색 선도 유망기업 육성 및 저탄소/녹색산단 조성
	R&D, 금융 등 녹색 혁신기반 조성

Table 4. Roadmap for vitalizing the hydrogen economy [17]

구분	주요 내용
수소차 부문 활성화 전략	수소차 620만 대 이상 생산, 수소충전소 1,200개소 확충
	2025년까지 연간 10만 대 정도 생산할 수 있는 상업적 양산체계 구축 및 내연기관차 수준으로 가격 인하
	운수 산업부문에 수소차 보급을 확대·지원함으로써 규모의 경제 형성
	충전소가 자립할 수 있도록 운영보조금 신설
에너지 부문 활성화 전략	발전용 연료전지 15 GW, 가정 및 건물용 연료전지 2.1 GW 보급
	공공기관이나 민간 신축 건물에 연료전지 의무화 추진
	2022년까지 국내 1 GW 규모의 연료전지를 보급함으로써 관련 산업 규모 확대
수소 생산 부문 활성화 전략	천연가스 공급망과 수요처 인근에 수소생산기지를 확대 구축
	수소 생산량을 2018년 13만 톤에서 2040년에는 526만 톤으로 확대
	수소 단가는 kg당 3,000원 선으로 하락 전망

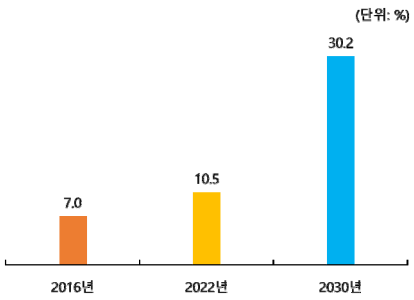


Fig. 4. Target proportion of renewable energy development of Korea [15-16].

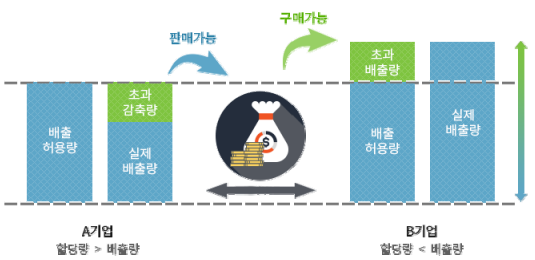


Fig. 5. The relationship between greenhouse gas emission [18].

너지 개발 및 인프라 구축 계획을 발표했다. 수소경제 활성화 로드맵의 구체적인 내용은 Table 4에 나타내었다. 정부는 수소경제 활성화 로드맵을 통해 2040년, 연간 1천만 톤의 탄소 배출량 감소 효과가 나타날 것으로 예상하였다.

1990년 대비 제조업의 성장을 바탕으로 4배 정도 증가한 경제 규모는 온실가스 배출을 지속해서 증가시켜 산업부문은 2017년 기준 국내 온실가스 배출량의 약 37%를 차지하고 있다[16].

산업부문의 온실가스 감축을 위해 정부는 핵심 정책 수단으로써 Fig. 5와 같은 배출권거래제를 도입하여 시행하고 있다. 배출권거래제는 온실가스 배출량이 많은 기업에 대하여, 온실가스 배출량을 할당하여 할당 범위 내에서 온실가스를 배출할 수 있고, 여분의 배출권은 기업 간 거래가 가능하도록 허용하는 제도이다. 각 기업은 배출권을 사용하여 온실가스 배출량을 줄이도록 하고 있다.

3. 탄소 중립 핵심 기술

3.1 탄소 중립 핵심 기술

정부의 2050 탄소중립 시나리오에 명시되어있는 무탄소 신전원 연료로는 수소와 암모니아가 제시되고 있다. 수소와 암모니아는 연소 시에 이산화탄소 배출이 없고, 재생에너지를 이용하여 얻을 수 있기에 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 '탄소중립 발전연료'로 주목받고 있다.

3.1.1 수소 생산 기술

수소 에너지는 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 에너지원으로, 수소를 생산하여 사용하는 수소 에너지 기술이 주목받고 있다. 현재 수소 에너지 기술은 다양한 분야로의 응용을 위해 생산 및 저장, 그리고 활용 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. 수소 에너지 개발을 위한 세부 분야는 생산, 저장, 활용으로 나눌 수 있다. 화석연료를 대신하는 청정 에너지원으로 수소를 사용하기 위해서는 수소를 경제적으로 생산하는 것이 가장 중요하다.

3.1.1.1 수소생산 방법

(1) 탄화수소를 이용한 수소생산: 개질 수소

탄화수소를 이용한 수소생산기술은 생산비용 측면에서 가장 경쟁력이 높다. 탄화수소와 스팀 혹은 산소와 반

응시키는 개질(reforming) 반응을 이용한다. 개질 반응은 습윤 개질(steam reforming), 부분 산화(partial oxidation) 등의 반응이 있으며, 습윤 개질 반응이 가장 보편적으로 활용된다.

습윤 개질 반응의 대표적인 반응은 methane steam reforming인데, 이는 매우 강한 흡열반응이다. 따라서 700-900°C, 20-35 atm에서 운전되며, 스팀-카본 비율(steam-to-carbon ratio)을 2.5-3.0으로 유지한다[20,21]. 습윤 개질 반응은 흡열반응으로 반응압력은 낮고 스팀-카본 비율은 높을수록 전환율이 높아진다. Methane steam reforming 반응에는 Ni계열 촉매가 주로 사용된다[22,23]. 또한, 저온 활성 증가를 위해 Pt, Rh, Ru 등을 사용하기도 한다[24-26]. 습윤 개질 반응은 저렴한 생산비용과 상대적으로 적은 CO_2 배출의 장점이 있다.

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + \left(n + \frac{1}{2}m\right)H_2 \quad (1)$$

부분산화반응은 디젤, 잔유(residual oil) 등의 무거운 탄화수소로부터 수소를 생산할 때 주로 사용되는 개질 반응이다. 개질기 내부에서 아화학양론(substoichiometric)의 산소를 공급할 때 반응이 진행되는데, 이는 발열반응이다. 촉매 여부와 관계없이 일어나는 반응으로, 일반적으로 무촉매반응기는 1150-1500°C, 25-80 atm에서 운전되며, 촉매를 사용할 경우 780-900°C, 25-35 atm에서 운전된다[27]. 부분산화반응에는 Ni, Ru, Rh, Pt 등의 촉매가 사용된다[28,29].

$$C_nH_m + \frac{1}{2}nO_2 \leftrightarrow nCO + \frac{1}{2}mH_2 \quad (2)$$

(2) 바이오매스를 이용한 수소생산

바이오매스는 자연계에서 계속 합성되고 있으며, 따라서 바이오매스를 이용한 수소생산 기술은 화석연료의 대체 효과뿐만 아니라 폐기물과 폐수의 처리, 온실효과 완화 등의 지구 환경보호에도 큰 역할을 할 것으로 기대된다. 바이오매스를 이용한 수소생산 방법은 열화학적 방법과 생물학적 방법으로 구분된다[19,32].

바이오매스의 열화학적 수소생산 방법은 공기 혹은 스팀을 이용한 가스화 반응을 주로 이용하며, 가스화 반응을 통해 발생하는 일산화탄소 및 메탄 등으로 Methane steam reforming 및 water gas shift 반응을 통해 수소의 생산성을 높일 수 있다.

$$Biomass + Air \rightarrow H_2 + CO + N_2 + CH_4 + tar + H_2O + Char \quad (3)$$

$$Biomass + Steam \rightarrow H_2 + CO + N_2 + CH_4 + tar + Char \quad (4)$$

생물학적 방법은 상온 및 상압에서 운전하며, 낮은 에너지 집약도에도 지속 가능한 개발 및 폐기물 최소화 측면에서 가치 있는 방법이다. 생물학적 방법은 광분해법과 발효법으로 구분되며, 광분해법은 박테리아와 조류가 참여하는 광합성 과정에서 물의 광분해 과정에서, 발효법은 탄화수소로 구성된 바이오매스가 미생물에 의해 발효되면서 유기산으로 전환되는 과정에서 생산되는 수소를 목적으로 한다[30,31].

$$H_2O + light \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (5)$$

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2 \quad (6)$$

(3) 가수분해를 이용한 수소생산

물은 지구상에서 가장 풍부한 자원으로, 전기분해, 열분해 등을 이용하여 수소를 생산할 수 있다.

전기분해법은 가수분해 중 가장 상용화된 기술이며, 강한 흡열반응으로 많은 에너지가 필요한데, 전기에너지를 공급하여 수소를 생산하는 방식이다[33]. 현재 상용화된 전기분해법은 알카라인, 양성자교환막(PEM), 고체산화물 전해질 등이 있다.

PEM

$$Anode: \quad 2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^- \quad (7)$$

$$Cathode: \quad 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2 \quad (8)$$

Alkaline and SOEC

$$Anode: 4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^- \quad (9)$$

$$Cathode: \quad 2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2 \quad (10)$$

열분해는 수소와 산소로 분해될 때까지 물을 고온으로 가열하는 방법으로, 공정이 간단하지만 2500°C 이상의 고온 환경이 필요하기에 반응온도를 낮추기 위한 연구가 진행 중이다. 열분해법은 물을 산소와 수소로 만드는 화학반응을 순환시켜 물을 분해하며 SnO_2/SnO 순환반응을 사용한다[34].

$$SnO_2(s) \rightarrow SnO(g) + 0.5O_2 \quad T \cong 1600^{\circ}C \quad (11)$$

$$SnO_2(s)+H_2O(g) \rightarrow SnO_2(s)+H_2(g) \quad T \cong 550^{\circ}C \tag{12}$$

3.1.1.2 수소정제기술

위의 수소생산기술을 통해 생산된 기술은 정제공정을 거쳐 공급된다. 현재 상용화된 정제기술은 흡착법과 막분리법이 있다[19].

(1) 흡착법

흡착법은 기체분리 방법으로, 분자들에 흡착제에 흡착되는 강도, 속도, 양 등의 차이를 이용한다. 흡착법을 이용할 경우, 다양한 종류의 흡착제를 동시에 사용하여 수소만을 통과시킴으로써 정제한다. 흡착법 중 가장 일반화된 기술은 PSA(pressure swing adsorption)이다. 일반적으로 흡착제에는 실리카, 알루미나, 활성탄, 제올라이트 등이 사용된다.

(2) 막분리법

막분리법은 분리막 투과 메커니즘을 이용한 정제기술이며, 분리막은 분자투과막, 원자투과막 등으로 나뉜다. 분자투과막은 다공성 세라믹으로 구성되며 분자체 효과, 표면확산, 뉴센확산에 의하여 분리가 일어난다[35,36]. 원자투과막은 금속박막으로 구성되며, 금속 표면에 수소분자가 흡착되고 원자로 해리되어 금속 격자 사이를 이동하여 반대편에서 분자로 재결합하는 방식을 사용한다[37,38].

3.1.2 암모니아

액화 암모니아는 액화 수소(LH2)와 액상유기수소화물(LOHC) 대비 단위 부피 당 약 1.5배의 수소 저장용량을 가지고 있으며, 상온에서 비교적 낮은 압력(0.8 MPa)으로도 액화가 가능하므로 운반과 유지 측면에서 유리한 점이 있다[39,40]. 또한, 암모니아는 농업에 필수적인 요소인 만큼, 세계적으로 이미 암모니아의 생성 및 유통 인프라가 존재하므로 이를 쉽게 이용할 수 있다. 암모니아 연소 시에 발생하는 질소산화물과 같은 문제를 해결하고, 탄소중립 발전연료로 사용하기 위하여, 여러 가지 기술 발전과 협력이 이루어지고 있다[41].

3.1.2.1 암모니아의 생산 방법

(1) 하버-보슈(Harber Bosch) 공정

암모니아는 고온 고압의 환경에서 촉매를 이용해 질소와 수소를 반응시켜 생성한 합성 암모니아와 석탄에서 부산물로 생산하는 부산물 암모니아가 있다. 합성 암모니아는 전 세계 암모니아 생산량의 77%를 차지하며, 대부분 촉매를 이용한 하버-보슈(Harber Bosch) 공정으로 생산되며 이 공정을 Fig. 6에 나타내었다[42].

현대 암모니아 생산 공장은 증기 메탄 개질(SMR; Steam Methane Reforming)에 의해 생성된 고순도(99.99%)의 수소가 고압 및 온도 조건(20 MPa 및 350-550°C)의 촉매를 통해 질소와 반응하여 암모니아를 합성한다[40,43,44].

$$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3 \tag{13}$$

생성된 암모니아는 약 -25°C의 온도로 냉각되고 미반응한 가스와 분리된다. 그 후 암모니아의 운송을 위해 2 MPa의 압력으로 압축되어 액화 암모니아의 형태로 저장된다. 공정 과정의 암모니아 합성 효율은 약 70%이며, 합성된 암모니아의 생산량의 약 1.5배의 이산화탄소를 발생시킨다[45].

(2) 전기화학적 암모니아 합성(Electrochemical ammonia synthesis)

기존의 하버-보슈 공정은 주로 석탄과 메탄에서 얻은 탄

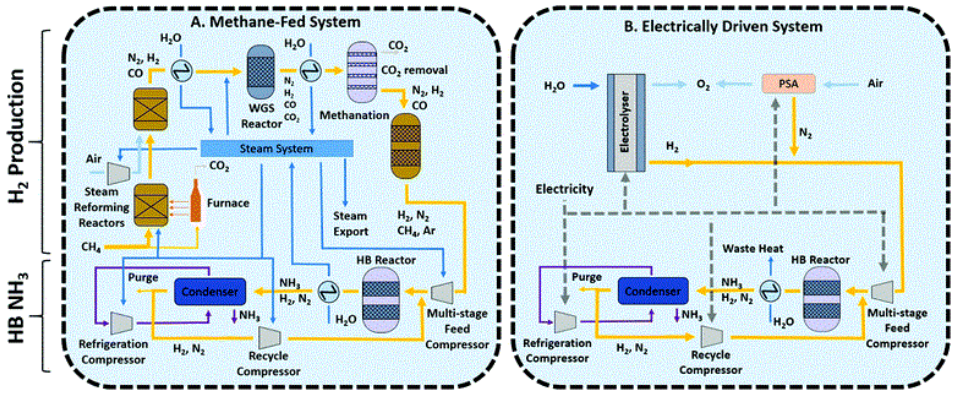


Fig. 6. The Harber Bosch process using methane and the Harber Bosch process replaced by water electrolysis.

화수소를 분리하여 수소를 얻기 때문에 많은 이산화탄소를 배출한다. 그러므로 수소 대신 물을 직접 이용하여 암모니아를 합성하는 방법으로 이산화탄소의 배출량을 줄일 수 있다. 공기 중의 질소와 질소산화물과 물에 직접 전기화학적 반응을 일으켜 암모니아를 합성하는 질소환원반응(NRR)과 질소산화물환원반응(NORR) 기술로도 암모니아를 합성할 수 있다. 전기화학적 암모니아 합성은 재생에너지를 통해 생성된 전기로 수산화-전해질 수용액에 들어있는 전이 금속 촉매에 전기를 통하게 하여 암모니아를 합성하는 방법이다[46,47]. 그러나 수소 대신 물을 사용하는 방법은 연료 효율이 약 23% 정도로 현저하게 낮고 실험실에서의 소규모 생산만이 가능하여 실제 사용을 위한 연구가 진행 중이다[41,48,49].

(3) 그린 암모니아 기술

생산공정에서 탄소의 발생을 최소화하기 위해, 지속 가능한 재생에너지를 이용하여 수전해 방법으로 분리한 수소로 암모니아를 생산할 수 있다. 기존의 메탄을 이용한 하버-보슈 공정 시스템에서 공급 원료를 수소로 바꾸는 간단한 과정을 통해 암모니아를 생성할 수 있다[45].

재생에너지로 생산한 전기를 수소의 수전해 공정에 사용하여 그린 수소를 생산하고, 이를 다시 하버-보슈 반응로에서 합성한 암모니아를 그린 암모니아라고 부른다. 그린 암모니아는 탄소중립 연료이자 수소 에너지 캐리어로 가장 효율적이라는 평가를 받고 있다. 아직 수전해 수소 생산은 전체 암모니아 생산의 0.5%를 차지하고 있지만, 그 비율을 높이기 위한 추가적인 연구도 활발히 진행되고 있다[50].

3.1.2.2 고순도 수소 추출 생산

액화 암모니아에 대한 유용성과 효율 등이 주목받음에 따라 암모니아 생산과 에너지 캐리어로서의 연구가 활발히 진행되고 있다[46-50]. 또한, 수소 수출 상황과 선박 산업 등의 다양한 요소들은 액화 암모니아를 수입하여 수소를 추출한 후 국내에 공급한다는 가능성을 키우고 있다. 암모니아가 수소 에너지 캐리어 역할로 사용되기 위해서는 다시 암모니아에서 고순도의 수소를 추출하는 방법이 필요하다[51].

암모니아 분해를 통한 수소 생성 방법은 대표적으로 촉매를 이용한 방법, 플라즈마를 이용하는 방법 등이 있다. 촉매에 의한 암모니아 분해는 흡열 과정을 통한 열분해 방법으로 반응식은 다음과 같다[52].

$$2NH_3 \rightarrow 3H_2 + N_2 \tag{14}$$

촉매를 이용한 암모니아 분해는 400°C 이상의 일정 온도를 유지하기 위해 열을 공급해줘야 한다는 특징이 있다. 또한, 촉매에 따라 약 40-70%의 효율을 나타낸다[52]. 이를 낮추기 위해서 그리고 수소 생성 효율을 높이기 위해서 백금, 아연, 니켈 등의 다양한 촉매를 이용한 암모니아 분해에 관한 연구가 진행되고 있다. 이외에도, 알칼리 금속 아마이드(amide)법과 알칼리 수전해법 등의 암모니아 전기분해 기술도 활발히 연구되고 있다[52-54].

암모니아를 분해하는 방식은 물을 분해하는 전압에 비해 암모니아 전기분해에는 0.077 V의 전압만이 필요하므로 경제적이다[51].

촉매를 이용하여 추출한 수소를 연료전지용으로 사용하기 위해서는 암모니아를 분해한 가스에서 질소와 반응하지 않은 암모니아를 제거하는 과정이 더 필요하다. 그리고 이와 동시에 더 낮은 온도조건에서 단시간 안에 고순도의 수소를 생산하는 방법으로 플라즈마를 이용하는 방법이 있다. 플라즈마 멤브레인 리액터(PMR), 저온 아크 플라즈마(NTAP; Non-thermal Arc Plasma) 등을 이용한 암모니아 분해 방식은 플라즈마를 통해 얻은 높은 전자 에너지를 이용하여 마이크로 초에 해당하는 단시간에 암모니아를 분리하는 방법이며, 반응식은 다음과 같다[55,56].

$$2NH_3 \xrightarrow{plasma} N_2 + 3H_2 \tag{15}$$

$$H_2 + e^- \rightarrow H + H + e^- \tag{16}$$

암모니아를 플라즈마를 이용한 순간적인 고압으로 질소원자와 수소원자로 분리한 후, 수소 분리막을 이용하여 순수한 수소만 포집할 수 있는 기술은 연료전지에 사용할 수 있는 고순도의 수소를 생산할 수 있다. 또한, 수전해에 비해 약 1/2배에서 1/6배까지 적은 전력으로도 생산할 수 있다. 그러나 전압이 일정 적용치 이상이 되면 질소와 수소가 다시 암모니아를 생성하기 때문에 수소전환율이 낮아지고, 이는 생성 속도들 다시 늦춘다는 단점이 있다[57].

4. 탄소중립 가스터빈 엔진 시장의 동향 및 규모 변화

4.1 수소터빈 기반 수소복합발전

4.1.1 세계시장 규모 및 현황

2020년 야노 경제연구소 보고서에 따르면 2050년 사업용 수소터빈 전 세계 시장규모는 800억 USD(96조원)으로 성장할 것이며, 이는 2025년 대비 약 14배이며 다른 분야와 함께 Table 5에 나타내었다. 2030년까지 전 세계 가스

Table 5. The outlook for hydrogen market (Unit: 1 million yen.) [60]

분야	2025년	2030년	2035년	2040년	2045년	2050년
수소터빈(사업용)	651,750	2,844,000	4,266,000	6,825,600	8,532,000	9,243,000
수소터빈(자가용)	385,000	1,120,000	2,625,000	4,200,000	6,300,000	9,100,000
FC(승용차)	6,360	76,320	296,800	686,880	1,060,000	1,272,000
FC(버스)	3,120	11,700	45,500	140,400	312,000	390,000
FC(고정식)	271,200	1,017,000	2,373,000	2,745,900	2,712,000	2,373,000
합 계	653,775	2,846,030	4,268,035	6,827,640	8,534,045	9,245,050

발전 설비 용량은 378 GW가 증가할 것으로 전망되며, 낮은 가스 가격과 연료 전환 등에 따라 중국(119 GW↑)과 북미(47 GW↑)의 증가가 두드러질 전망이다[58]. 미쯔비시 중공업은 미국 Intermountain Power 사의 석탄에서 그린수소 전환을 위한 첫 번째 수소터빈(30% 혼소)을 수주하였다[59].

4.1.2 주요 선진국 및 제작사 기술개발 현황

해외 가스터빈 제작사들은 대형혼소 및 소형전소 연소기술 보유 또는 개발 진행 중이며 '30년 이후 수소 시장을 대비하여 대형전소 연소기술 개발 진행하고 있다.

미국의 수소 가스터빈 연구 인프라 및 기술 수준이 가장 앞서고 있으며, 2004년부터 DOE(Department of Energy) 주관으로 연구를 시작하였으며 최근 화석연료 중심 수소에너지 분야 net-zero 달성을 위해 1.6억 달러 프로그램을 발표하였다. 이 프로그램 중 Advanced turbine 개발 분야에는 ① F급 가스터빈 수소전환, ② Aero-derivative 가스터빈 수소화, ③ 산업용 가스터빈 수소화 ④ 암모니아 가스터빈 개발 4개 주제로 구성하였다. 특히 상용화 전 실증테스트 항목도 포함하고 있다[61]. 미국 GE는 궁극적으로 모든 대형 가스터빈에서 100% 수소전소 목표로 기술개발 중으로, Fig. 7에서 보듯이 현재 15-20% 수소혼소가 가능하며(B/E class 서는 100% 수소전소 가능) 50-60%의 혼소가 가능한 연소기 개발 중이다.

2004년 DOE 주관 수소 가스터빈 개발이 미국 캘리포니아주와 연방정부 중심의 '민관 파트너쉽'을 통해 시작되었고 MNQC(multi-nozzle quiet combustion) 연소기를 토대로 수소 30% 함유 합성가스를 적용하였다[63]. 미국 Long Ridge Energy Terminal에 설치된 최근 대형 50%까지 혼소 가능한 High-H2 연소기 개발 완료[7HA.01, 290 MW], 수소혼소로 전환 운전 예정이다[64]. 미국 Baker Hughes사에서는 30%까지 수소혼소 가능한 모델 68대가 공급·운영 중이며, 100% 수소 전소가 가능한 5/12/16 MW NovaLT 모델을 개발 완료하여 판매 중이며, 추가로 NOx

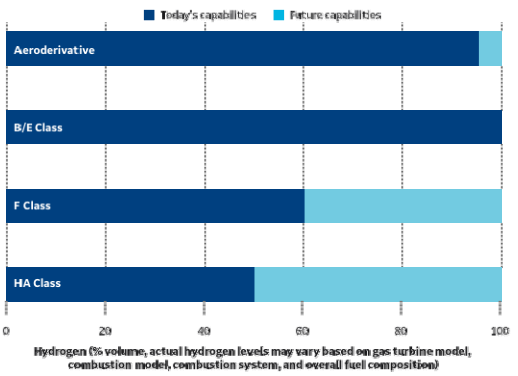


Fig. 7. Hydrogen turbine development status for each GT class of GE.

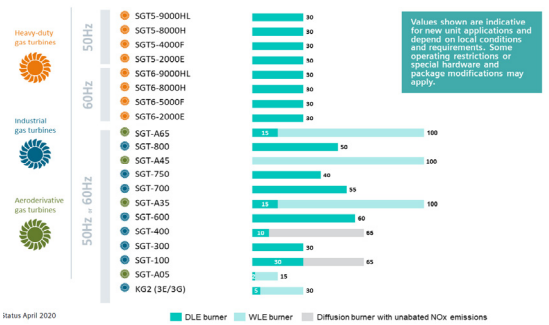


Fig. 8. Hydrogen capability of Siemens gas turbine, Wet Low Emission(WLE), Dry Low Emission (DLE) combustion [71].

배출량 감소가 가능한 모델 개발을 진행하고 있다[65]. Capstone 사는 기존 시스템의 HW나 SW 변경 없이 70% 수소혼소가 가능함을 확인하였고, 수소용 인젝터에 대한 특허를 취득, 이를 적용한 시험이 최종 100% 수소 전소 목표로 시행될 예정이다. 2020년 상반기에는 첫 수소 C65 가스터빈을 호주에 판매한 바 있으며, 2022년 후반기부터 수소 제품의 상용화를 추진할 예정이다[66]. 미국 Intermountain Power 사 석탄 화력을 천연가스 및 수소혼소로

단계적으로 전환하는 프로젝트에 M501JAC 기종 가스터빈 납품을 수주하였고, 2025년부터 재생에너지 기반 수소를 활용한 30% 수소혼소 전환 예정이다[59].

2019년 2월 '수소 로드맵 유럽'이 유럽에서 수립되었고, 국가별 수소 프로젝트에 재생에너지가 연계되어 진행 중이다[63,67]. Baker Hughes사의 소형급 가스터빈을 이용한 세계 최초 수소 가스터빈 발전소(10 MW)인 Fusina hydrogen power station을 이탈리아 ENEL 사에서 건설하고 실증하였다[63,68-69]. 네덜란드의 Vattenfall 사는 1.3 GW 복합발전소 일부 유닛을 2023년까지 재생에너지로 생산된 수소를 사용으로 전환하는 프로젝트를 시범적 추진하고 있다[70].

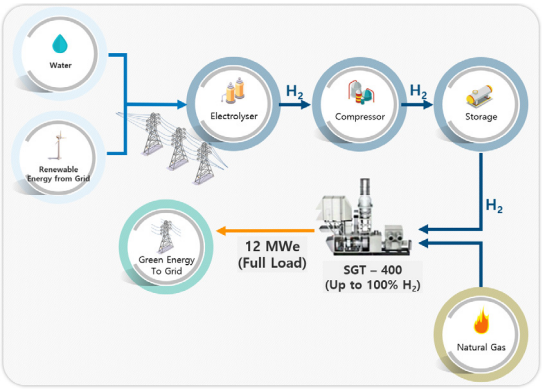


Fig. 9. HYFLEXPOWER project concept of Siemens [72].

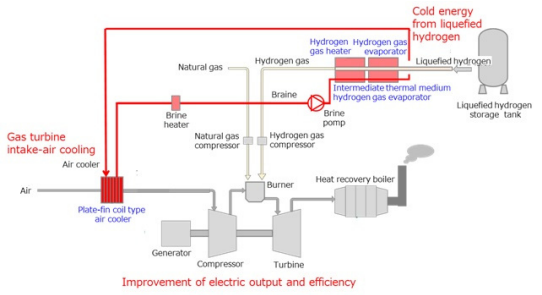


Fig. 10. Diagram of improving efficiency method through gas turbine inlet air cooling technology using liquefied hydrogen, NEDO project [78].

Siemens 사는 Fig. 8에서 보듯이 중소형 가스터빈 기종 50% 이상, 대형 가스터빈 기종에서 30% 이상 수소혼소 성능을 달성한 바 있으며, 중소형 기종 수소혼소 비율은 단기적으로 75%에 달할 것으로 전망된다[71]. 기존 제품들에 대한 연소기 변경 없이 15%까지 수소혼소가 가능함을 확인하였다. SGT-400 가스터빈(12 MW)을 이용한 HYFLEXPOWER 프로젝트(Fig. 9)를 2020년에 착수하여, 2023년까지 SGT-400 가스터빈을 100% 수소전소로 전환 목표 추진 중이다[72].

이탈리아 Ansaldo 사는 H급 가스터빈은 50% 수소혼소 및 F급 가스터빈은 30-45% 수소혼소 성능을 확보하였다. 단일노즐은 수소혼소 15-60 vol% 범위에 대해 시험을 완료하였다. EU 수소 가스터빈 목표인 45 vol% 달성을 위하여 15 vol% 수소혼소는 실증에 성공하였다. 또한, 노후화된 기존의 가스터빈을 SEV 연소기를 이용하여 수소전환 사업을 진행 중이다[63,73].

일본은 4차 에너지기본계획(2014.4)에서 수소를 주요 에너지원으로 반영하였으며, 2030년까지 수소 가스터빈 기술의 상용화를 목표로 고효율 수소 전용 연소기 개발 등을 추진 중이다. 이 계획에는 세계 최초 수소 사회 실현을 목표로 2030년까지 수소 공급비용을 30엔/Nm^3 수준으로 낮추기 위해, Blue 수소(화석연료+CCS) 및 Green 수소(재생에너지 활용 수소 생산) 구축을 목표 추진하고 있다. 또한, 500 MW급 수소혼소 연소기 기술개발 및 실증 완료하였고 수소 20% 혼소를 성공하였다[74]. 미쯔비시 중공업사는 100% 수소 전소를 목표로 하는 연소기를 개발하

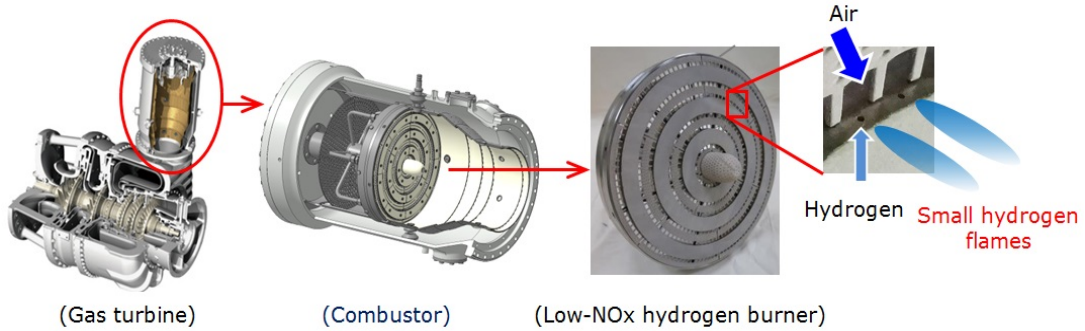


Fig. 11. Schematic diagram of Low-NOx Hydrogen-fueled Gas Turbine using micro-mix combustion technology of Kawasaki [77].

기 위해 G급/J급 가스터빈 수소혼소 30%를 실증하였다[63,74]. 이를 달성하기 위하여 신에너지 산업 기술종합개발기구(NEDO)가 주관한 EAGLE 프로젝트에서 개발된 IGCC용 합성가스 가스터빈 기술을 바탕으로 한 multiple injection dry low NOx 연소기를 이용하였다. 일본 가와사키 중공업은 NEDO 프로젝트(Fig. 10-11)를 통해 천연가스-수소혼소 발전 요소기술 개발 및 실증 추진 중이며, 2018년 4월 고베시 포트아일랜드에 1 MW 가스터빈 이용 수소연료 100% 투입 수소발전을 이용하여 도심 공공시설에 전기와 열 공급에 성공하였다[75].

4.1.3 해외 연구기관 진행 연구

전 세계적인 탄소 저감 논의 및 수소 시장의 전망이 좋아짐에 따라 해외 여러 연구기관에서도 정부 기관 등의 지원을 받아서 수소 및 암모니아의 가스터빈과 power-to-X-to-power 발전소의 연구가 진행되고 있다. 미국과 일본에서는 수소 및 암모니아 가스터빈 연구가 활발하고 유럽에서는 power-to-X-to-power 발전소의 연구가 활발하다.

- 미국 에너지부(DOE)에서는 2021년 R&D 프로젝트인 University Turbines Systems Research(UTSR)를 실행하여 미국 여러 대학에서 수소 및 암모니아 가스터빈 연구가 진행되고 있음.
- 영국 케임브리지 대학교는 영국과학공학연구위원회(EPSRC)의 지원을 받아 가스터빈의 통합 설계 방법론을 배우는 연구원 양성 프로젝트를 주관하고 있음.
- 유럽연합(EU)은 질소산화물 감소와 이를 위한 연소기 연구, 재생에너지로 만들어지는 초과 전력을 수소 또는 암모니아로 변환하고 이를 가스터빈 발전소에서 다시 전기로 바꾸는 power-to-X-to-power 발전소의 개발을 지원하고 있음.
- 일본 주식회사 IHI는 신에너지 산업 기술종합개발기구(NEDO)의 Fuel Ammonia Supply Chain Construction Project의 4가지 목표 중 하나인 100% 암모니아 연소로 전기 제작을 달성하기 위해 100% 암모니아 2 MW 가스터빈의 상용화를 진행하고 있음.

각 연구의 세부적인 내용은 Table 6과 Table 7에 정리하였다.

Fig. 12. Hydrogen combined heat and power plant in Kobe, Japan - KHI 1 MW GT [92].

Fig. 13. ENEL hydrogen power plant in Italy - GE 12 MW GT [68-69].

Table 6. DOE University Turbines Systems Research (UTSR) project [79-80]

주관 기관	주관 국가	기간 및 금액	참여 기관	지원 기관	연구주제	과제명
Goergia Tech	미국	2021-2024 $999,999	-	DOE	가스터빈의 수소연료의 핵심 동력, 화염 확산 및 방출 특성에 대한 기초적인 이해를 연구.	Ignition, Turbulent Flame Speeds, and Emissions, from High Hydrogen Blended Fuels
University of Central Florida	미국	2021-2024 $1,046,929	Embry-Riddle University, University of New Mexico, Purdue University	DOE	Shock tube, counter-flow flame 실험, LES를 통해 수소를 포함하는 연료의 실험 및 수치 해석을 수행.	Fundamental Experimental and Numerical Combustion Study of H2 Containing Fuels for Gas Turbines
San Diego State University	미국	2021-2024 $750,000	Solar Turbines	DOE	다중 인젝터의 영향과 인젝터 배열에 따른 연소기 구성의 복잡성 증가 및 표면 거칠기 연구.	Development of Design Practices for Additively Manufactured Micro-Mix Hydrogen Fueled Turbine Combustors with High-Fidelity Simulation Analysis, Reduced Models and Testing
Purdue University	미국	2021-2024 $1,000,696	-	DOE	수소와 암모니아 그리고 이 연료들과 천연가스 혼합물의 multi-stage, multi-tube-micro-mixing 인젝터의 화염 구조와 화염 역학 연구.	Investigation of Flame Structure for Hydrogen Gas Turbine Combustion
Ohio State University	미국	2021-2024 $1,024,939	University of Michigan, GE Power	DOE	첨단 레이저 진단 기법을 사용하여 수소 메탄 혼합물의 다중 화염을 동시에 측정하여 화염 유지, 역화, 연료 다단을 연구 및 포괄적인 계산 모델 개발.	Hydrogen Fuel Effects on Stability and Operation of Lean-Premixed and Staged Gas Turbine Combustors
University of California, Irvine	미국	2021-2024 $1,000,000	Solar Turbines, Collins Aerospace	DOE	안전성, 역화 그리고 반응 구조와 방출 성능을 검사하여 수소와 수소 천연가스 혼합물의 주입을 위한 액체 연료 인젝터의 설계를 연구.	Development and Application of Multipoint Array Injection Concepts for Operation of Gas Turbines on Hydrogen Containing Fuels
University of Alabama	미국	2021-2024 $1,001,341	Virginia Tech	DOE	수소, 수소 메탄 혼합 가스터빈의 RDC의 통합과 손실 메커니즘이 RDC의 폭발 성능에 미치는 영향을 확인하기 위한 방법론 개발.	A Robust Methodology to Integrate Rotating Detonation Combustion with Gas Turbine to maximize
Purdue University	미국	2021-2024 $1,050,003	Argonne National Laboratory	DOE	RDC 터빈의 다양한 손실 메커니즘의 영향을 특징 지어 높은 마하수의 unsteady RDC 출구를 터빈 로터로 효율적으로 전환하는 방법 개발.	Physics-based integration of H2-Air Rotating detonation into Gas Turbine Power Plant (HydrogenGT)

Table 7. Europe and Japan carbon neutrality research project [81-91]

주관 기관	주관 국가	기간 및 금액	참여 기관	지원 기관	연구주제	과제명
University of Cambridge	영국	2014-2022 $7,149,867 (£5,285,158)	Dyson Ltd and Dyson Technology Ltd, Mitsubishi, Rolls-Royce Plc (UK), Siemens	EPSRC	가스터빈의 통합 설계 방법론을 배우고 산업 협업을 통해 연구 프로젝트를 수행하는 연구원 양성.	EPSRC Centre for Doctoral Training in Gas Turbine Aerodynamics
City University of London	영국	2020-2023 $4,664,326 (€4,080,240)	University of Seville, UniGe, Aristotle University, PSI, University of Stavanger, UCLouvain	EU	MGT의 설계 및 운영의 기술 전문성과 과학 지식의 향상을 목표로 하는 훈련 및 연구 프로그램 개발.	**NextMGT** Next Generation of Micro Gas Turbines for High Efficiency, Low Emissions and Fuel Flexibility
Cerfacs	프랑스	2019-2021 $211,285 (€184,707)	-	EU	적은 연료를 사용하여 NOx의 배출량을 줄이기 위한 새로운 연소실 설계(액체 연료를 스프레이로 분사)에서 발생하는 연소 불안정 현상 연구.	**CLEANERFLAMES** CompLex thErmoAcoustic iNteraction mEchanisms in spray Flames in Low-nox Annular combustion chambErS
CNRS	프랑스	2019-2024 $2,851,743 (€2,495,335)	Cerfacs	EU	화석연료 혼합물 내 재생에너지의 초과 전력을 전환한 수소를 연소하여 배출량 저감 연구.	**SCIROCCO** Simulation and Control of Renewable COmbustion
DLR	독일	2016-2022 $2,283,358 (€1,996,135)	-	EU	고압 연소시험시설에 사용할 첨단 레이저 측정기법 개발 및 이를 통해 수소 농축 천연가스 연소기 기술의 예측 분석 도구 개발.	**HyBurn** Enabling Hydrogen-enriched burner technology for gas turbines through advanced measurement and simulation
Siemens Energy	독일	2020-2024 $17,442,898 (€15,252,168)	Engie Solutions, Centrax, DLR, Lund University, University College London, Uni-DUE, NTUA, ARTTIC	EU	Power-to-hydrogen-to-power 발전소 개발 및 수소 100% 가스터빈 개발.	**HYFLEXPOWER** Hydrogen as a FLEXible energy storage for a fully renewable European POWER system
RINA	이탈리아	2020-2024 $14,361,540 (€12,555,440)	EDP, Hydrogenics, CERTH, Baker Hughes, ETN, Proton Ventures, MAS, CIRCE, UniGe, Cardiff University, TUDA, UCLouvain, KTH, CEA, TUE, Tirreno Power, ENGIE Laborelec, University of Orleans, ICI Caldaie	EU	1MW 규모 power-to-H2-to-power를 포르투갈에 적용 및 Savona Smart Microgrid 연구실에 소규모 power-to-NH3-to-power를 적용.	**FLEXnCONFU** FLExibilize combined cycle power plant through power-to-X solutions using non-CONventional Fuels
University of Florence	이탈리아	2021-2024 $4,544,569 (€3,974,645)	Technische Universitat Berlin, Cerfacs, ENSMA, UniGe, Safran, KTH Royal Institute of Technology, Polytechnic University of Turin	EU	연료 소비와 배출물의 양을 줄이기 위해 연소과정이 진행됨에 따라 압력을 증가시키는 열역학적 사이클을 사용하는 기술을 개발.	**INSPIRE** INSpiring Pressure gain combustion Integration, Research, and Education
IHI	일본	2021-2028 $518,630,450 (598억엔)	University of Tohoku, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	NEDO	100% 암모니아 연소로 전기를 제작을 달성하기 위해 100% 암모니아 2MW 가스터빈 상용화하기로 함.	Fuel Ammonia Supply Chain Construction Project

4.1.4 해외 수소터빈 발전 운영 현황

전 세계적으로 수소혼소를 적용하는 가스터빈 복합발전이 2010년 이후 활발하게 운영(부생수소, 석유화학산업단지, IGCC 등) 중에 있으며, 최근에는 저 NOx 최첨단 연소기술 적용 소규모 수소전소 및 대형 수소혼소 플랜트가 일본(Fig. 12), 이탈리아(Fig. 13), 네덜란드(Fig. 14) 등에서 건설·운영되고 있다[67-69,92-94].

4.2 암모니아 활용 발전

4.2.1 세계시장 규모 및 현황

전 세계 암모니아 시장은 2018년 기준 약 70조원 규모(시장의 90% 이상 비료)로 해외 여러 국가에서 암모니아 생산/저장/수송과 관련된 기초 기술개발이 진행 중이다[95]. Fig. 15의 암모니아 사용량 전망처럼 IEA는 일본, 영국 등 선진국에서 저탄소 수소 경제를 위해 그린 암모니아

Fig. 14. Magnum hydrogen power plant in Nuon, Netherlands - 3 MHPS 440 MW M701F [93-94].

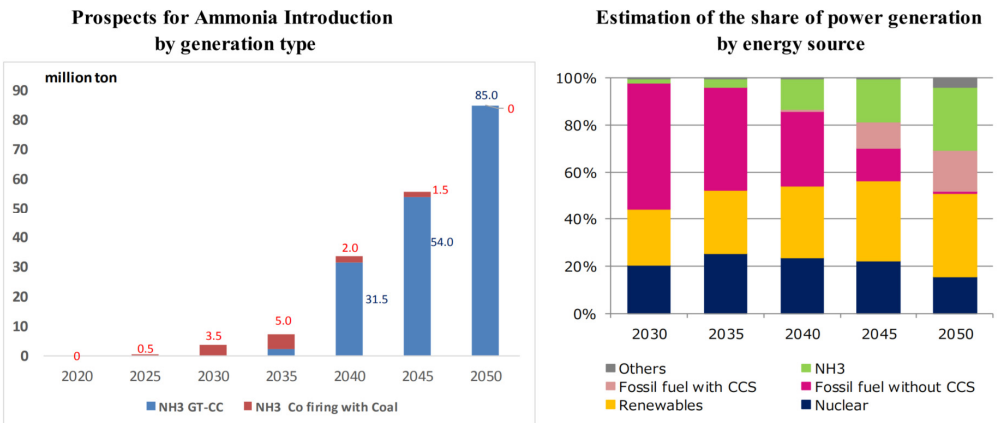


Fig. 15. Prospects on the usage of ammonia in power generation market of Japan (If reduce total CO_2 emissions 80% until 2050) [96].

Table 8. Supply goal of hydrogen and ammonia of Japan [97]

구 분	수소	암모니아
공급 목표 (단위 : 만ton)	('30) 300 → ('50) 2,000	('30) 300 → ('50) 3,000 (수소 환산 시 50) (500)
가격 목표 (단위 : 엔/Nm^3-H_2)	(현재) 100엔/Nm^3 ('30) 30엔 → ('50) 20엔	(현재) 20엔 후반/Nm^3-H_2 ('30) 10엔 후반 → ('50) 목표치 없음

*암모니아 300만 ton은 수소 환산 시 1/6인 약 50만 ton에 해당하며, 수소 공급목표는 암모니아, MCH(유기 하이드라이드), 압축 수소 등을 포함한 수치임

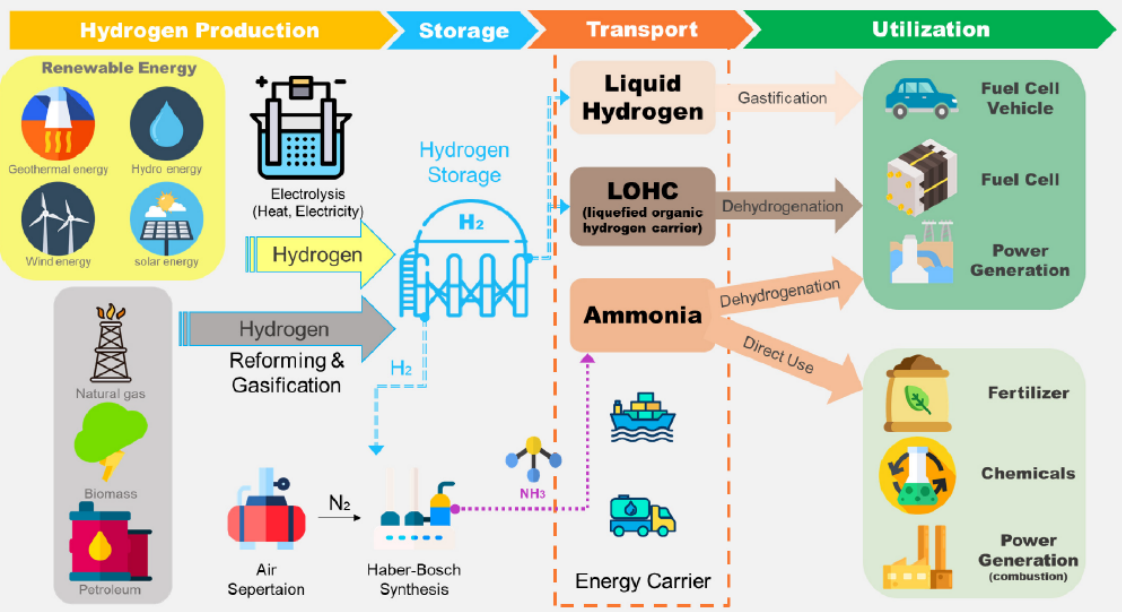


Fig. 16. Utilization and transportation of ammonia [51].

를 도입할 예정이고 2050년 연 400조 원 이상의 시장이 형성될 것으로 예상하고 있다[95]. 최근 YARA 등 암모니아 주요 기업들이 암모니아를 새로운 에너지(수소) 캐리어로서 역할 수행 가능성에 초점을 맞추고 그린 암모니아 기술개발과 신시장 창출을 위해 노력하고 있다[39]. Fig. 16은 암모니아의 활용과 운송을 설명한 그림이다.

일본은 발전 시장에서 암모니아 활용 기술개발에 가장 적극적이다. 수소는 운송·발전·연료전지 등 다양한 용도로, 암모니아는 발전·선박용 보급 용도로 활용할 계획이다. Table 8처럼 2050년 암모니아 3천만ton(수소 환산 시 5백만ton) 공급이 목표이며, 해외 투자를 통해 1억ton 규모의 통제 가능한 공급망 구축을 목표로 하고 있다[97].

IEEJ(The Institute of Energy Economics) 연구에 따르면 석탄발전에 그린 암모니아 20% 혼소 연소를 2030년부터 적용할 것이며, 암모니아 연료를 가스터빈 복합발전에 사용하는 것은 2040년 이후 수행 가능할 것으로 예측하였다[96]. IEEJ는 암모니아를 발전에 사용할 수 있다면 가장 저렴한 옵션이 될 것이라고 전망하였으며, 암모니아 연료는 2040년부터 발전 분야에서 사용이 증가할 것으로 예상되며, 2050년에 암모니아 사용량은 전체 연료 사용량의 20% 이상 증가 전망하였다. 일본의 Toyota Energy Solutions은 50 kW 및 300 kW급 100% 암모니아 연소 마이크로 가스터빈을 개발하였으며, AIST에서는 50 kW 마이크로 가스터빈을 사용하여 후쿠시마 재생에너지 연구소(FREA)에서 발전 테스트를 수행하였다[98].

5. 국내 수소터빈 현황

5.1 국내 수소터빈 시장 및 기술개발 현황

국내 LNG 발전 분야는 2019년 기준 총 39.7 GW 발전용량 규모로서, 2034년에는 59.1 GW까지 증가할 것으로 전망이 된다[2]. LNG 가스터빈으로부터 수소 터빈으로의 전환을 위한 기술개발이 성공적으로 이루어질 경우, 향후 대용량의 수소 인프라를 활용하면서 저탄소-대규모 발전원 구축이 가능하다. 국내에서도 부생 수소를 활용하기 위하여 Fig. 17처럼 연료 노즐을 개조한 가스터빈을 이용한 수소 플랜트를 운영 중이다[99-100].

국내 가스터빈 제작사 수소혼소·전소 기술 수준을 높이고 있다. 두산중공업은 기보유한 5 MW급, 270 MW 모델 수소혼소/전소 연소기를 국내 산학연 중심으로 자체 개발 중이며, 또한 80 MW급, 380 MW급 가스터빈 모델의 경우 개발 초기 단계부터 수소 연소 가능한 가스터빈(Hydrogen Ready Gas Turbine)으로 개발 중이다. 5 MW급 소형부터 380 MW급 대형 가스터빈 전 모델에 걸쳐 수소혼소·전소를 목표로 기술개발 중이다. 5 MW 소형 가스터빈을 개발하여 천연가스 및 바이오가스에 대해 발전소 실증 운전을 하였다(김포매립지 landfill gas 활용). 현재, 같은 엔진에 적용 가능한 수소전소 연소기를 개발 중이며 2024년까지 연소기 고압시험을 통한 수소전소 기술개발을 목표로 하고 있다. 270 MW 대형 가스터빈은 실증 단계(김포 열병합발전소)를 진행 중이며, 동 엔진을 최대 수소혼소율 50%

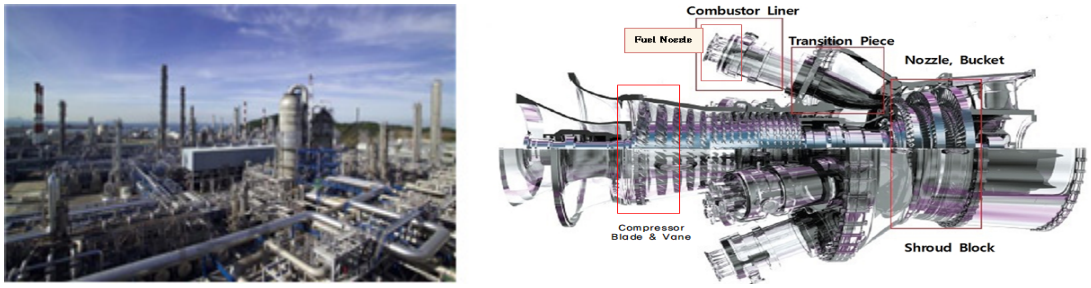


Fig. 17. NCC Cracker factory of Hanwha Total - modification of GE 6B GT [99-100].

로 전환하기 위한 개발을 진행 중이다. 2024년까지 수소 혼소 50% 성능과 천연가스와 동일 수준의 NOx 배출 성능을 가지는 연소기를 개발 목표로 표준가스복합에 적용할 380 MW급의 대형 GT를 개발 중이다[101-102]. 부하 추종 및 간헐성 대응을 위한 80 MW급 중형 가스터빈 개발을 추진 중이며, 천연가스 외 수소전소 성능을 확보할 수 있도록 추진계획 수립 중이다. 국내 운용 중인 GE 7F.02 (부산복합)에 대한 HGP(Hot Gas Path) Retrofit 개발 및 실증을 진행 중이며, 2022년부터 실증에 착수할 예정이다. 또한, 동일 기종에 대한 수소혼소 개발에 착수, 2022-2023년에 개발 완료를 목표로 추진 중이다.

한화에어로스페이스는 수백 kW ~ 5 MW까지 항공용 가스터빈 기술개발 완료 및 진행 중이며, 중대형 가스터빈 150-200 MW급(GE F급, MHPS G급) 연소기 부품 역설계/Upgrade 역량을 보유하고 있다. 수소 가스터빈 조기 기술 확보를 위해 항공용 가스터빈에 기반한 1 MW급 수소 전소용 마이크로 가스터빈 독자개발 외에도 수소 전소의 5-16 MW급 가스터빈과 40 MW급 가스터빈 개발 해외 기술 협력 추진 중이다. 국내 발전사들과 국내 운용 외산 가스터빈 대상 수소혼소용 연소기 Retrofit을 지속해서 협의 중이다.

한화 임팩트는 수소혼소 발전 기업인 미국 PSM과 네덜란드 Thomassen Energy를 인수하였으며, 30-200 MW급 혼소 50% 실증을 위해 한국서부발전과 업무협약을 맺었다[103-104].

한국서부발전의 태안 IGCC(석탄가스화복합발전) 가스터빈(GE 7FB)은 수소(24%) 함유 합성가스를 연소하는 수소혼소 가스터빈으로 최근 세계 최장 연속운전 5천시간(`21년)을 달성하여 수소터빈 기술을 입증하였다[105]. 전력연구원은 합성가스 적용 가스터빈 연소기와 발전용 가스터빈 연소기 시험 및 연소 튜닝 기술개발 실적을 보유하였고, 발전사가 운영 중인 가스터빈을 수소혼소 복합화력으로 전환하기 위한 운영·기반기술 개발을 추진 중이다[106].

6. 주요 기술적 난제

탄소중립 측면에서 무탄소 및 탄소중립 연료들의 활용 가치가 상당히 높음에도 불구하고, 이 연료들을 발전용 가스터빈 엔진의 연료로 직접 이용하기 위해 극복해야 할 난제들이 다수 존재한다. 이를 예혼합 연소기술로 한정해서 살펴보면, 해당 연료들이 기존 천연가스용 연소 시스템에 그대로 적용될 경우 엔진 운전성 문제와 질소산화물 배출량 증가 등의 부정적인 결과들을 초래할 수 있다. 여기서 운전성 문제는 희박 날림, 역화, 연소불안정 및 자연발화를 의미한다[107-108]. 앞서 언급한 부정적인 결과들은 천연가스와 현격히 다른 물리 화학적 성질에 기인한다. 이에 따라 본 절에서 대표적인 무탄소 연료인 수소와 암모니아를 구분하여 각 연료의 특성에 대해 살펴보고, 해당 연료에 적합한 가스터빈 연소 시스템의 설계 시 필수적으로 고려해야 하는 핵심 연소기술에 대해 고찰하고자 한다.

6.1 수소 연소

Table 9에 제시한 데이터에 의하면, 수소는 높은 단위 질량 당 발열량을 갖고 있음에도 불구하고 매우 낮은 밀도로 인하여 메탄보다 절반 이상 낮은 단위 체적당 발열량을 보이며, 비교적 높은 단열 화염 온도와 매우 높은 반응성을 갖는 것이 특징이다. 수소의 높은 반응성은 매우 빠른 화염전파속도 및 짧은 점화지연시간과 연결된다. 만일 수소가 기존 천연가스용 가스터빈 엔진의 연료로서 그대로 이용될 경우, 위와 같이 메탄과 상이한 수소의 연소 특성으로 인하여 역화 및 자연발화의 가능성이 급격하게 증가할 수 있으며, 더불어 연료 조성에 큰 영향을 받는 연소불안정 특성이 바뀜에 따라 기존 운전 조건에서 연소불안정이 발생하여 전체 엔진 시스템에 악영향을 미칠 수 있다. 천연가스 연소와 비교하면, 동일한 발열량 조건에서의 수소 연소는 상대적으로 높은 온도의 화염이 형성되므로 질소산화물 배출량 증가를 야기할 수 있다. 위에서 언급한 수소 연소 시 발생할 수 있는 문제들을 아래에서 세부적으로

기술한다.

6.1.1 역화

화염 역화는 예혼합연소 시 연소실에서 혼합기의 공급 속도보다 과도하게 빠른 화염 전파속도로 인하여 화염이 상류로 전파되는 현상으로 정의되며, 연소기 내부에서 역화가 발생하면 화염이 혼합부에 국부적으로 부착된 후 유지되어 연료 인젝터와 같은 고온에 취약한 부품의 과열 및 손상을 불러일으킬 수 있다[107,108,116]. 이에 따라 역화는 예혼합연소 시 반드시 피해야 하는 현상 중 하나이다. 하지만 Table 9에서 기술한 수소의 화염속도는 층류 조건에서 메탄의 약 8배이고, 난류 조건에서는 스월 유동 및 노즐 형상에 따른 유동 패턴에 큰 영향을 받아 최소 10배 이상이라고 알려져 있기에[117-118], 기존 천연가스용 연소기를 이용한 수소 연소는 역화 발생 가능성을 급격하게 증가시킨다. 이와 더불어 현재까지 다수의 연구[108,116,119]를 통해 밝혀진 역화 메커니즘들을 고려하면, 역화 발생은 화염의 속도뿐만 아니라 연소실 내부의 유동 장에도 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. 역화 발생 메커니즘의 예로는 (i) 중심 유동에서의 화염전파, (ii) 경계층 안에서의 화염전파, (iii) 연소진동에 의한 화염전파, 그리고 (iv) 연소로 유도된 와류 붕괴 등이 있다. 따라서 화염 역화는 수소 전소를 위한 예혼합연소 시스템 설계 시 최우선으로 고려해야 할 문제라고 해도 과언이 아니다[107,108,118,120].

6.1.2 자연발화

실제 발전용 가스터빈 엔진에서 압축기를 거쳐 연소기로 유입되는 고온 고압의 공기로 인하여, 일반적으로 연소기 입구 온도 및 압력은 각각 600-950 K와 4-30 atm의 범위에 놓여있다[121-122]. 만약 연료/공기 혼합부의 온도가 최소 자연발화온도보다 높음과 동시에 충분한 연소시간이 주어질 경우, 역화 현상과 비슷하게 혼합부에서 국부적으로 화염이 부착 및 유지되어 연소 시스템에 심각한 손상을 유발할 수 있다. 자연발화는 화염이 연소실에서 역행하지 않고 혼합부에서 화염이 발생하는 것이므로 역화와 다른 물리적 현상으로 구분되고, 점화원이 없는 상태에서 충분히 높은 온도로 인하여 혼합부에서 연료/공기 혼합기가 자발적으로 점화되는 현상으로 정의된다[115]. Table 9에서 알 수 있듯이 메탄보다 소폭 낮은 수소의 최저 자연발화온도뿐만 아니라 수소의 매우 짧은 점화지연시간으로 인하여, 메탄 연소와 비교하였을 때 수소 연소가 자연발화에 매우 취약하다는 것을 예상할 수 있다. 이 점화지연시간은 초기 상태 및 단열화염온도의 함수이며, 연료 조성에 상관없이 초기 상태가 고정된 경우 단열화염온도에 반비례하는 특성이 있다. 한 예로, 압력 및 온도가 각각 4.4 atm과 460 K인 초기 조건에서 단열화염온도가 1400 K일 때, 수소의 점화지연시간(약 10 μs)은 메탄(약 800 μs)의 1/80 수준으로 매우 짧다[107]. 따라서 연소기 입구 온도를 기존 천연가스 연소 조건보다 낮추거나, 만일 기존 입구온도가 동일할 경우 혼합부에서 연료와 공기의 혼합시간을 획기적으로 줄여 혼합부에서 혼합기 체류 시간을 감축하는 방법 등을 이용하여 자연발화를 피해야 할 필요성이 있다.

6.1.3 연소불안정

연소기의 고유 음향모드에 해당하는 압력 섭동과 난류 화염의 열방출률 섭동 간의 위상차가 90° 이내로 동위상

Table 9. Thermodynamic and chemical properties for hydrogen, ammonia and methane [109-113]

Properties	Hydrogen	Ammonia	Methane
Density [1,2] (kg/m^3)	0.084	0.708	0.667
Boiling temperature at 1 atm (°C)	-253	-33.4	-161
Condensation pressure at 20°C (atm)	-	8.5	-
Lower heating value by mass (MJ/kg)	119.93	18.6	50.02
Lower heating value by volume (MJ/m^3)	10.05	13.2	33.36
Maximum adiabatic flame temperature in air [1,2] (°C)	2100	1790	1950
Maximum laminar flame speed in air [1,2] (cm/s)	306	6.3	37.6
Flammability limits (ϕ)	0.1-7.1	0.63-1.4	0.5-1.7
Minimum autoignition temperature (°C)	560	650	630

[1]NTP = Normal Temperature and Pressure, i.e., 20°C and 1 atm (101.325 kPa).

[2]Computed using Cantera [114] with GRI 3.0 Mech. [115].

인 동시에 음향모드로 공급되는 에너지가 연소 시스템의 손실 에너지보다 클 경우에 연소기 내부에서 고진폭의 압력 섭동이 발생할 수 있으며, 이런 현상을 연소불안정이라고 부른다[123]. 가스터빈 연소 시스템에서 연소불안정 발생 시, 고진폭의 동압 및 속도 섭동으로 인하여 역화나 희박 날림을 유발할 수 있을 뿐만 아니라 주기적인 기계적 부하에 의한 연소기 부품의 파괴로도 이어질 수 있기에, 연료 조성에 상관없이 무조건으로 피해야 할 현상 중 하나이다. 수소 연소 시 메탄과 상이한 수소의 연소 특성으로 인하여 메탄 연소와 다른 연료불안정 특성이 나타난다. 특히, 수소 전소에 대한 역화 방지 목적으로 마이크로 믹서 방식의 연소기술을 적용하는 경우, 거대 화염 구조로 되어 있는 메탄 화염과 달리 수소 화염은 작은 화염의 군집 형태로 나타나고 이와 같은 화염 구조의 변화가 고진폭 및 고주파의 압력 섭동을 유발하는 등 수소 연소 시 메탄 연소 때와 대조적인 연소불안정 특성을 보인다[124-126]. 메탄 연소는 저주파 종방향 연소불안정 모드가 나타나지만, 수소 연소는 고주파 방사형 연소불안정 모드가 나타난다. 따라서 수소 연소에서의 연소불안정을 제어하거나 방지하는 기술개발이 필수적이다.

6.1.4 질소산화물 배출량 증가

수소는 대표적인 무탄소 연료로서 연소과정에서 이산화탄소를 배출하지 않는 큰 장점을 갖고 있지만, 수소를 연료로 사용할 시 메탄에 비해 더 많은 질소산화물 배출을 야기할 수 있다. 즉, 연소장의 온도에 따라 지수적으로 증가하는 열적 질소산화물의 생성 특성을 고려하면, 동일한 발열량 조건에서 메탄과 비교할 때 상대적으로 높은 수소의 화염 온도로 인하여 수소 연소 시 더 많은 질소산화물이 생성되어 배출될 수 있다. 반대로, 수소의 빠른 화염속도로 인한 낮은 희박 가연한계를 이용한다면, 부분부하 운전 조건에서는 비교적 낮은 온도에서 화염을 안정적으로 유지하면서 메탄에 비해 상대적으로 낮은 질소산화물 배출을 기대할 수 있다.

6.2 암모니아 연소

수소와 더불어 암모니아는 대표적인 무탄소 연료 중 하나이다. 이 암모니아는 연료로서 직접 이용될 수 있을 뿐만 아니라 수소 캐리어 역할도 할 수 있기에, 발전 부분에서 이 연료의 활용이 탄소중립 실현을 가속화 할 수 있을 것으로 기대된다. 더욱이, 암모니아는 수소와 메탄과 비교하였을 때, 높은 비등점과 낮은 응결기압을 갖고 있어서 수송 및 저장이 용이한 장점이 있다. 하지만 암모니아를 가스터빈 엔진의 연료로서 직접 이용하기 위해서 두 가지의 기술적 난제 해결이 선행되어야 한다. 첫 번째 난제로는 타 연료 대비 암모니아의 매우 느린 화염속도로 인하여 연소실 내부에서 화염을 안정적으로 유지하지 못하는 희박 날림과 관련된 정적 안정성 문제이며, 다른 하나는 연료에 질소가 포함되어 있어 낮은 화염 온도에서도 높은 질소산화물이 배출될 수 있다는 것이다. 따라서 본 6.2절에서는 앞서 언급한 암모니아 연소의 두 가지 단점에 대해 다루고자 한다.

6.2.1 희박 날림

희박 날림은 앞서 6.1.1절에서 언급한 역화 현상과는 반대로 연소실에서 화염의 전파속도보다 혼합기의 공급속도가 빨라서 화염이 연소실에 안정적으로 부착되지 못하고 하류로 떨어져 나가는 현상을 의미한다. 특히, 암모니아는 다른 탄화수소 계열의 연료에 비해 매우 낮은 화염전파속도를 갖고 있으며, 층류 화염속도는 유사 조건하의 메탄 화염 대비 약 17% 수준에 미친다. 또한, 암모니아의 최고 화염속도가 연료과농 조건에 치우쳐 있는 것을 고려하면, 희박 조건에서는 약 2 cm/s 수준까지 더욱 낮아진다[112]. 화염속도가 압력이 증가함에 따라 감소하는 경향이 있어, 실제 가스터빈 엔진의 고압 환경에서는 위 수치보다 더 낮아질 것으로 예상한다. 이에 따라 암모니아를 발전용 가스터빈 엔진의 연료로 사용할 시 희박 날림과 같은 정적 안정성 문제가 대두된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 상대적으로 화염속도가 높은 수소나 메탄을 암모니아에 도핑하여 연료-공기 혼합물의 평균 화염전파속도를 높이는 방법이 존재한다. 한편 혼소 조건에서 운전되는 경우에는, 반경 방향 연료 스테이징 기법을 적용하여 암모니아에는 과농 예혼합 모드로 공급하고 메탄 또는 수소는 희박 예혼합 조건으로 공급하여 전체적으로 하이브리드 모드로 운전하는 방법이 희박 날림 및 질소산화물 동시 제어에 효과적일 것으로 예상된다.

6.2.2 질소산화물 배출량 증가

암모니아는 수소와 다르게 질소 원자를 포함하고 있는 무탄소 연료이다. 암모니아에 포함된 질소 원자는 비교적 낮은 온도에서 해리될 수 있고, 연소과정에서 발생하는 중간 생성물에 의해 질소산화물로 쉽게 전환될 수 있다. 전반적인 암모니아의 질소산화물 배출 경향성을 파악하고 메탄과 비교하기 위해, Fig. 18에 암모니아/공기와 메탄/공기 연소에서의 당량비 변화에 따른 배기 특성을 도시하였다[112]. 희박 조건 암모니아/공기 연소에서는 다량의 NO가 생성되며 이론공연비 부근에서 급격히 감소하여 연료과농 조건에서는 희박 조건 대비 낮은 NO 발생량을

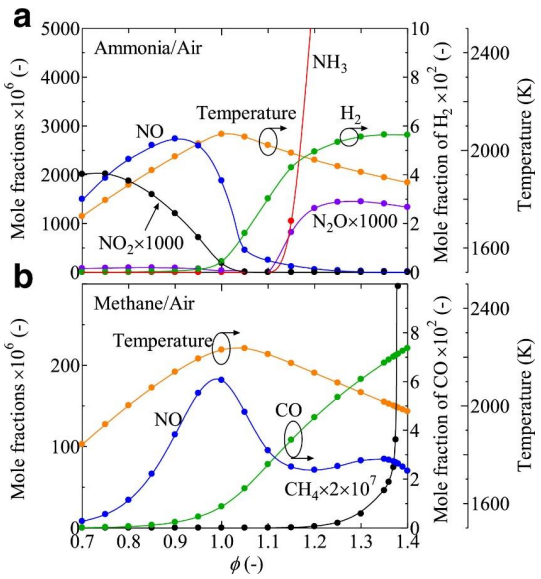


Fig. 18. Emission characteristics in terms of equivalence ratio at 0.1 MPa and 40 mm downstream of the position of maximum heat release rate: (a) NH3/air, (b) CH4/air [112].

보인다. 이때, 연료과농 조건에서 암모니아 연소 때문에 생성되는 NO는 메탄 연소와 비교하면 상대적으로 높은 수준을 유지하고 있고, 암모니아의 배출 특성은 메탄 연소와 달리 열적 질소산화물보다 연료 자체에 의한 질소산화물 발생과 연관되어 있음을 알 수 있다. 암모니아 연소의 질소산화물 배출 특성과 더불어, 연료과농 조건에서는 다량의 미연소된 암모니아가 급격하게 증가한다. 암모니아 연소 시 질소산화물과 미연소 암모니아의 배출량을 동시에 낮은 수준으로 유지하기 위해서는 당량비 1.1 부근의 좁은 운전조건을 선정하거나, 메탄 또는 수소연료와의 혼소 방식에 대한 기술적인 고려가 요구된다. 여기서 좁은 운전조건은 질소산화물 배출량을 감축하는 관점에서 기술한 것이므로, 해당 운전조건에서 암모니아 화염을 안정적으로 유지할 수 있다는 의미는 아니다. 정적 안정성과 동적 안정성에 대한 면밀한 고려가 동시에 요구된다. 앞서 기술한 바와 같이, 암모니아 전소 환경에서는 광범위한 운전조건에서 가스터빈 연소 성능을 만족하는 것은 매우 어려울 것으로 판단된다. 유연한 엔진 운전을 보장하기 위해서는 탄화수소 계열 연료와의 혼소가 필요할 것으로 보이며, 특히 다단연소를 이용하여 암모니아 슬립과 질소산화물 배출을 최소화할 수 있을 것으로 기대한다. 이러한 방법론의 실효성을 검증하기 위한 랩 규모 실험 및 계산이 필요하다.

7. 결 론

기후변화로 인하여, 가스터빈 개발은 크나큰 변곡점을 향해가고 있다. 2019년 파리 기후협약 이후 본격적으로 시행되고 있는 온실가스 배출 저감의 노력으로 인하여 가스터빈도 큰 변화가 필요한 시점이다. 기존의 가스터빈은 천연가스를 주 연료로 사용하고 있어서, 석탄발전보다는 발전량 당 절반의 가까운 온실가스 배출을 보여주고 있었다. 하지만, 온실가스 배출 저감을 위하여는 더 추가적인 변화가 필요하며, 이를 위하여 탄소중립 연료를 사용해야 할 것으로 예측된다.

해외 가스터빈 제작사에서는 이미 수소를 혼합할 수 있는 가스터빈이 개발되었고, 100% 수소를 사용할 수 있는 소형 가스터빈도 개발이 되어 있다. 국내 제작사들도 이에 발맞춰서 기술이전이나 기술개발 등을 통하여 혼합 수소와 100% 수소연료를 사용할 수 있는 가스터빈을 준비 중이다. 수소연료는 확산성과 반응성이 높아서, 화염의 역화, 자연발화 등의 기술적 문제가 예상되며, 또한 높은 화염 온도로 인하여, 질소산화물의 발생량이 높아질 수 있다. 화염의 동적인 특징이 달라서, 연소불안정성도 고려되어야 한다.

대한민국의 지리적 특징으로 인하여, 대량의 수소를 해외에서 운송해오기 어려운 특징이 있다. 따라서 무탄소 연료가 액화 암모니아의 형태로 운송될 여지도 크다. 도입된 암모니아를 크래킹을 통하여 수소를 추출할 수도 있겠지만, 암모니아의 직접 연소기술도 필요한 실정이다. 국내에서는 석탄발전에서 석탄-암모니아 혼소를 도입할 예정이며, 가스터빈도 암모니아 연소에 대한 기술력 확보가 시급한 실정이다. 암모니아는 수소와는 반대로 반응성이 낮아서, 희박 날림의 기술적 문제가 예상되며, 연료 자체에 질소가 포함되어 있기에, 다량의 질소산화물이 배출될 가능성이 있다.

수소, 암모니아 이외의 탄소중립 연료에 대한 사전 연구가 필요하다. Biomass나 E-Fuel들은 대기 중의 온실가스를 생물학적이나 다른 대체에너지를 활용하여 생성되어, 가스터빈에 활용될 수 있다. 이렇게 제조된 대체 탄소중립 연료들은 기존 화석연료와는 다른 화학적 조성을 가질 수 있기에 추가적인 연구가 필요하다.

전 세계적으로 탄소중립 연료를 중심으로, 국제 컨소시엄 구성, 국가 간 업무협정, 기업 간 업무협정 등 다각도의 노력이 진행되고 있다. 탄소중립 가스터빈 연소는 자체 기술개발도 중요하지만, 여러 국가 간, 기업 간의 설정에 따라, 환경변수가 달라질 것이며, 여러 가지 시나리오에 대응할 수 있는 기술개발이 필요하다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20214000000310, 탄소중립 고효율 가스터빈 연소기술 에너지혁신연구센터).

References

[1] IEA, Key World Energy Statistics 2021, Available at: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>, 2021

[2] Ministry of Trade, Industry and Energy, 9th Basic Plan for Electricity Supply and Demand (2020~2034), 2020.

[3] C. Palmer, Worldwide Gas Turbine Market Report 2022, Turbomachinery Magazine, Available at: <https://www.turbomachinerymag.com/view/worldwide-gas-turbine-market-report-2022>, 2021.

[4] S.C. Gulen, Gas turbines for electric power generation, Cambridge University Press, 2019.

[5] ALSTON, The World's First Industrial Gas Turbine Set - GT NEUCHÂTEL, 2007.

[6] DOOSAN, Doosan Heavy Industries & Construction set to complete development of large gas turbine for power generation ... Korea to become fifth country to own independent model, Available at: <https://www.doosan.com/en/media-center/press-release_view/?id=20172059&page=0&#:~:text=The%20DGT6%2D300H%20S1%20developed,of%20a%20mid%2Dsized%20car>, 2019.

[7] S. Patel, A Brief History of GE Gas Turbines, POWER Magazine, Available at: <https://www.powermag.com/a-brief-history-of-ge-gas-turbines-2/>, 2019.

[8] ETN Global, The path towards a zero-carbon gas turbine, European Turbine Network, 2020.

[9] Korea Institute of Energy Reserach, Climate Technology Strategy Office, CCUS Industry trends and pre-market 2030 - with '2021 CCUS Market Outlook, BNEF' at the center-, KIER CT Brief 41 (2021).

[10] J. Kim, Application of Carbon-Free New Source for Carbon Neutral Transition, World Energy Market Insight 22(1) (2022).

[11] P. Agreement, Paris agreement, Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (21st Session, 2015: Paris).

[12] G. Jeong, Carbon Neutral Policy and Implications in Major Countries: The landscape of manufacturing economy changes!, Korea International Trade Association, April 2021.

[13] E. Union, European Climate Law, Available at: <https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action/law_en>, 2021.

[14] European Green Deal Call: €1 billion investment to boost the green and digital transition, Available at: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1669>, 2020.

[15] Cooperation of related ministries, National Greenhouse Gas Reduction Goals Up for 2030, 2021.

[16] The Government of the Republic of Korea, 2050 Carbon Neutrality Strategy for Sustainable Green Society in Korea, 2020.

[17] A roadmap for revitalizaing the hydrogen economy, Available at: <https://www.etrans.or.kr/policy/05.php>

[18] Greenhouse Gas Emission Trading System, Available at: <https://me.go.kr/home/web/index.do?menuId=10292>, 2021.

[19] S.K. Ryi, J.Y. Han, C.H. Kim, H. Lim, H.Y. Jung, Technical trends of hydrogen production, Clean Technology 23(2) (2017) 121-132.

[20] A. Basile, L. DiPaola, F. Hai, V. Piemonte, Membrane reactors for energy applications and basic chemical production, Elsevier, 2015.

[21] K. Ahmed, K. Foger, Kinetics of internal steam reforming of methane on Ni/YSZ-based anodes for solid oxide fuel cells, Catal. Today 63(2-4) (2000) 479-487.

[22] J.R. Rostrup-Nielsen, Catalyst Steam Reforming, Springer Berlin Heidelberg, Berlin (1984) 30-73.

[23] A.C. Luna, A.M. Becerra, Kinetics of Methane Steam Reforming on a Ni on Alumina-Titania Catalyst, React. Kinet. Catal. Lett. 61(2) (1997) 369-374.

[24] J. Wei, E. Iglesia, Mechanism and site requirements for activation and chemical conversion of methane on supported Pt clusters and turnover rate comparisons among noble metals, J. Phys. Chem. B 108(13) (2004) 4094-4103.

[25] E.C. Luna, A.M. Becerra, M.I. Dimitrijewits, Methane steam reforming over rhodium promoted Ni/Al 2 O 3 catalysts, React. Kinet. Catal. Lett. 67(2) (1999) 247-252.

[26] J.H. Jeong, J.W. Lee, D.J. Seo, Y. Seo, W.L. Yoon,

D.K. Lee, D.H. Kim, Ru-doped Ni catalysts effective for the steam reforming of methane without the pre-reduction treatment with H2, Appl. Catal., A 302(2) (2006) 151-156.

[27] A.D. Ebner, J.A. Ritter, State-of-the-art adsorption and membrane separation processes for carbon dioxide production from carbon dioxide emitting industries, Sep. Sci. Technol. 44(6) (2009) 1273-1421.

[28] P.D. Vernon, M.L. Green, A.K. Cheetham, A.T. Ashcroft, Partial oxidation of methane to synthesis gas, Catal. Lett. 6(2) (1990) 181-186.

[29] K. Liu, C. Song, V. Subramani, Hydrogen and syngas production and purification technologies, John Wiley & Sons, 2010.

[30] E.A.F. Vasconcelos, R.C. Leitao, S.T. Santaella, Factors that affect bacterial ecology in hydrogen-producing anaerobic reactors, Bioenerg. Res. 9(4) (2016) 1260-1271.

[31] S.N.A. Rahman, M.S. Masdar, M.I. Rosli, E.H. Majlan, T. Husaini, S.K. Kamarudin, W.R.W. Daud, Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology, Renewable and sustainable energy reviews 66 (2016) 137-162.

[32] O.S. Joo, Hydrogen Production Technology, Korean Chem. Eng. Res. 49(6) (2011) 688-696.

[33] J. Rossmeisl, A. Logadottir, J.K. Nørskov, Electrolysis of water on (oxidized) metal surfaces, Chem. Phys. 319(1-3) (2005) 178-184.

[34] S. Abanades, P. Charvin, F. Lemont, G. Flamant, Novel two-step SnO_2/SnO water-splitting cycle for solar thermochemical production of hydrogen, Int. J. Hydrogen Energy 33(21) (2008) 6021-6030.

[35] S. Uemiya, M. Kajiwara, T. Kojima, Composite membranes of group VIII metal supported on porous alumina, AlChE J. 43(S11) (1997) 2715-2723.

[36] B.N. Nair, T. Yamaguchi, T. Okubo, H. Suematsu, K. Keizer, S.I. Nakao, Sol-gel synthesis of molecular sieving silica membranes, J. Membr. Sci. 135(2) (1997) 237-243.

[37] S.K. Ryi, Hydrogen Selective Membrane and Clean Energy, NICE 32(2) (2014) 188-194.

[38] T.L. Ward, T. Dao, Model of hydrogen permeation behavior in palladium membranes, J. Membr. Sci. 153(2) (1999) 211-231.

[39] International Energy Agency, The Future of Hydrogen, IEA, Paris, 2019.

[40] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W.I. David, P.J. Bowen, Ammonia for power, Prog. Energy Combust. Sci. 69 (2018) 63-102.

[41] J. Tallaksen, F. Bauer, C. Hulteberg, M. Reese, S. Ahlgren, Nitrogen fertilizers manufactured using wind power: greenhouse gas and energy balance of community-scale ammonia production, J. Clean. Prod. 107 (2015) 626-635.

[42] E. Morgan, J. Manwell, J. McGowan, Wind-powered ammonia fuel production for remote islands: A case study, Renew. Energ. 72 (2014) 51-61.

[43] J. Brightling, Ammonia and the Fertiliser Industry: The Development of Ammonia at Billingham, Johnson Matthey Tech. 62(1) (2018) 32-47.

[44] G.D. Rawlings, R.B. Reznik, Source Assessment: Synthetic Ammonia Production, EPA-600/2-77-107m, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 1977.

[45] C. Smith, A.K. Hill, L. Torrente-Murciano, Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape, Energ. Environ. Sci. 13(2) (2020) 331-344.

[46] J. Long, S. Chen, Y. Zhang, C. Guo, X. Fu, D. Deng, J. Xiao, Direct Electrochemical Ammonia Synthesis from Nitric Oxide, Angew. Chem. 132(24) (2020) 9798-9805.

[47] B. Cui, J. Zhang, S. Liu, W. Xiang, L. Liu, H. Xin, M.J. Lefler, S. Licht, Electrochemical synthesis of ammonia directly from N2 and water over iron-based catalysts supported on activated carbon, Green Chem. 19(1) (2017) 298-304.

[48] V. Kyriakou, I. Garagounis, E. Vasileiou, A. Vourros, M. Stoukides, Progress in the Electrochemical Synthesis of Ammonia, Catal. Today 286 (2017) 2-13.

[49] Y. Bicer, I. Dincer, C. Zamfirescu, G. Vezina, F. Raso, Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods, J. Clean. Prod. 135 (2016) 1379-1395.

[50] R. Lan, J.T. Irvine, S. Tao, Synthesis of ammonia directly from air and water at ambient temperature and pressure, Sci. Rep. 3(1) (2013) 1-7.

[51] S. Lee, H.J. Lee, Potential Applicabilities of Ammonia in Future Hydrogen Energy Supply Industries, Appl. Chem. Eng. 30(6) (2019) 667-672.

[52] X.Z. Xiao, Y.L. Cao, Y.Y. Cai, Decomposition of NH3 on Ir(110): A first-principle study, Surf. Sci. 605(7-8) (2011) 802-807.

[53] R. Atsumi, R. Noda, H. Takagi, L. Vecchione, A. Di Carlo, Z. Del Prete, K. Kuramoto, Ammonia decomposition activity over Ni/SiO_2 catalysts with different pore diameters, Int. J. Hydrogen Energy 39(26) (2014) 13954-13961.

[54] S.F. Zaman, L.A. Jolaoso, S. Podila, A.A. Ai-Zahrani, Y.A. Alhamed, H. Driss, M.M. Daous, L. Petrov, Ammonia decomposition over citric acid chelated gamma-Mo2N and Ni2Mo3N catalysts, Int. J. Hydrogen Energy 43(36) (2018) 17252-17258.

[55] Y. Hayakawa, S. Kambara, T. Miura, Hydrogen production from ammonia by the plasma membrane reactor, Int. J. Hydrogen Energy 45(56) (2020) 32082-32088.

[56] Q.F. Lin, Y.M. Jiang, C.Z. Liu, L.W. Chen, W.J. Zhang, J. Ding, J.G. Li, Instantaneous hydrogen production from ammonia by non-thermal arc plasma combining with catalyst, Energy Reports 7 (2021) 4064-4070.

[57] S. Kambara, Y. Hayakawa, M. Masui, T. Miura, K. Kumabe, H. Moritomi, Relation between chemical composition of dissociated ammonia by atmospheric plasma and DeNOx characteristics, T. Jpn. Soc. Mech. Eng. Series B 78(789) (2012) 1038-1042.

[58] S. Daivanayagam, $3.40 Trillion to be Invested Globally in Renewable Energy by 2030, Finds Frost & Sullivan, Frost & Sullivan, Available at: <https://www.frost.com/news/press-releases/3-40-trillion-to-be-invested-globally-in-renewable-energy-by-2030-finds-frost-sullivan/> ,2020.

[59] Mitsubishi Power, Intermountain Power Agency Orders MHPS JAC Gas Turbine Technology for Renewable-Hydrogen Energy Hub, Available at: <https://power.mhi.com/regions/amer/news/200310.html>, 2020.

[60] Yano Research Institute Ltd., Hydrogen Energy Systems Market 2020, C62106400, Aug 2020.

[61] R. Dennis, DOE FECM's Advanced Turbines Program, 2021 University Turbines Systems Research and Advanced Turbines Program Review Workshop, 2021.

[62] P. Riley, Gas Turbines: Capacity & Context, ARPA-e Flexible Carbon Capture Workshop, Jul 2019.

[63] Y. Joo, M. Kim, J. Park, S. Park, J. Shin, Hydrogen Enriched Gas Turbine: Core Technologies and R&D Trend, KHNES 31(4) (2020) 351-362.

[64] Long Ridge Energy Terminal, Long Ridge Energy Terminal Partners with New Fortress Energy and GE to Transition Power Plant to Zero-Carbon Hydrogen, Available at: <https://www.longridgeenergy.com/news/2020-10-13-long-ridge-energy-terminal-partners-with-new-fortress-energy-and-ge-to-transition-power-plant-to-zero-carbon-hydrogen>, 2020.

[65] Baker Hughes, Gas turbine experience with hydrogen for energy transition, 2020.

[66] R. Pasquariello, Gas turbine innovation, with or without hydrogen, Turbomachinery Magazine, Available at: <https://www.turbomachinerymag.com/view/gas-turbine-innovation-with-or-without-hydrogen>, 2020.

[67] FCH JU, Hydrogen Roadmap Europe, 2019.

[68] Power Magazine, Enel's Fusina Hydrogen-Fueled Plant Goes Online, Available at: <https://www.powermag.com/enels-fusina-hydrogen-fueled-plant-goes-online/>, 2009

[69] ModernPowerSystems, Fusina combined cycle project: planning to run on pure hydrogen, Available at: <https://www.modernpowersystems.com/features/featurefusina-combined-cycle-project-planning-to-run-on-pure-hydrogen/>, 2008.

[70] NS ENERGY, Statoil, Vattenfall and Gasunie partner for conversion of 1.3GW Magnum facility into hydrogen-powered plant, Available at: <https://www.nsenergybusiness.com/news/newsstatoil-vattenfall-and-gasunie-partner-to-study-conversion-of-13gw-magnum-power-plant-into-hydrogen-5865441/#>, 2017.

[71] S. Patel, Siemens' Roadmap to 100% Hydrogen Gas Turbines, POWER Magazine, Available at: <https://www.powermag.com/siemens-roadmap-to-100-hydrogen-gas-turbines/>, 2020.

[72] SIEMENS, HYFLEXPOWER: The world's first integrated power-to-X-to-power hydrogen gas turbine demonstrator, Available at: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/hyflexpower-worlds-first-integrated-power-x-power-hydrogen-gas-turbine-demonstrator>, 2020.

[73] Gas Turbine World, Ansaldo Energia Hydrogen Gas Turbines, Available at: <https://gasturbineworld.com/ansaldo-hydrogen-gas-turbines/>, 2021.

[74] T. Asai, Y. Akiyama, S. Dodo, Recent Advances in Carbon Capture and Storage. Chapter 1. Development of a State-of-the-Art Dry Low NOx Gas Turbine Combustor for IGCC with CCS, INTECH (2017) 7-17.

[75] NEDO, World's First Heat and Electricity Supplied in an Urban Area Using 100% Hydrogen, Available at: <https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100382.html>, 2018.

[76] METI, 4th Strategic Energy Plan, 2014.

[77] Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kawasaki Develops

Low-NOx Hydrogen-fueled Gas Turbine Combustion Technology, Available at: <https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20151221_2830>, 2015.

[78] NEDO, World's First Successful Technology Verification of 100% Hydrogen-fueled Gas Turbine Operation with Dry Low NOx Combustion Technology, Availabe at: <https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100427.html>, 2020.

[79] DOE, Project Selections: University Turbines Systems Research (UTSR) - Focus on Hydrogen (H2) Fuels, Available at: <https://www.energy.gov/fecm/articles/project-selections-university-turbines-systems-research-utsr-focus-hydrogen-h2-fuels>, 2021.

[80] NETL, PROCEEDINGS – 2021 UNIVERSITY TURBINE SYSTEMS RESEARCH (UTSR) PROJECT REVIEW MEETING – VIRTUAL, Available at: <https://netl.doe.gov/21UTSR-proceedings>, 2021.

[81] EPSRC, EPSRC Centre for Doctoral Training in Gas Turbine Aerodynamics, Available at: <https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/L015943/1>, 2014.

[82] EU, Next Generation of Micro Gas Turbines for High Efficiency, Low Emissions and Fuel Flexibility, Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/861079>, 2020.

[83] EU, CompLex thErmoAcoustic iNteraction mEchanisms in spRay Flames in Low-nox Annular coMbustion chambErS, Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/843958>, 2019.

[84] EU, Simulation and Control of Renewable COmbustion (SCIROCCO), Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/832248>, 2019.

[85] EU, Enabling Hydrogen-enriched burner technology for gas turbines through advanced measurement and simulation, Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/682383>, 2016.

[86 EU, HYdrogen as a FLEXible energy storage for a fully renewable European POWER system, Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/884229>, 2020.

[87] EU, FLExibilize combined cycle power plant through power-to-X solutions using non-CONventional FUels, Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/884157>, 2020.

[88] EU, INSpiring Pressure gain combustion Integration, Research, and Education, Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/956803>, 2021.

[89] J. Atchison, JERA targets 50% ammonia-coal co-firing by 2030, Available at: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/jera-targets-50-ammonia-coal-co-firing-by-2030/>, 2022.

[90] IHI, IHI to Begin Developing Wholly Liquid Ammonia-Fueled Gas Turbine that Is Free of Carbon Dioxide Emissions, Available at: <https://www.ihi.co.jp/en/all_news/2021/resources_energy_environment/1197632_3360.html>, 2022.

[91] I. Hiroaki, Green Innovation Fund Project Launches 'Fuel Ammonia Supply Chain', Available at: <https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101502.html>, 2022.

[92] A. Horikawa, K. Okada, M. Ashikaga, M. Yamaguchi, Y. Douura, Y. Akebi, Hydrogen Utilization – Development of Hydrogen Fueled Power Generation Technologies, Kawasaki Technical Review (182) (2021) 41-46.

[93] NS ENERGY, Nuon Magnum Power Plant, Available at: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/nuon-magnum-power-plant/>

[94] MITSUBISHI POWER, M501J Series, Available at: <https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/m501j>

[95] J. Lee, Ammonia is rising ① Ammonia 'injured' as optimal hydrogen storage transport medium, Available at: <https://www.h2news.kr/news/article_print.html?no=8687>, 2020.

[96] Y. KAWAKAMI, S. ENDO, H. HIRAI, A Feasibility Study on the Supply Chain of CO_2-Free Ammonia with CCS and EOR, IEEJ, 2019.

[97] KEEi, World Energy Market Insight Vol. 21-24, 2021.

[98] J. Lee, Hydrogen·Ammonia Change the fuel paradigm for power generation, Available at: <https://www.h2news.kr/news/article.html?no=94

77>, 2022.
[99] Hanwha, Hanwha TotalEnergies Petrochemical, Available at: <https://www.hanwha.co.kr/business/manufacture/total.do>
[100] GE, 6F.03 Heavy Duty Gas Turbine Poster
[101] I. Choi, The heart of development, 'the gas turbine', evolves into a hydrogen turbine, Available at: <https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=80265>, 2022.
[102] DOOSAN, 2020 Integrated Report of Doosan Heavy Insdustries & Construction, 2020.
[103] C. Kim, Hanwha Impact Acquired 2 Hydrogen Mixed-Use Power Companies, Available at: <https://www.yna.co.kr/view/AKR20210706076700003?input=1195m>, 2021.
[104] J. Lee, Hanwha Impact Start of Hydrogen Mixing Power Generation Project, Available at: <https://www.h2news.kr/news/article.html?no=9162>, 2021.
[105] Korea Western Power, Development of Blue Hydrogen Production Technology Starts, Available at: <https://www.iwest.co.kr/iwest/432/subview.do?enc=Zm5jdDF8QEB8JTJGYmJzJTJGaXdlc3QlMkYxMjAlMkYxNzk3NSUyRmFydGNsVmlldy5kbyUzRg%3D%3D>, 2021.
[106] J. Lee, Development of Gas Turbine Hydrogen Mixing Technology to Eco-Friendly Power Plant by KEPCO KEPRI, Available at: <http://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=28436>, 2021.
[107] T. Lieuwen, V. McDonell, E. Petersen, D. Santavicca, Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability, J. Eng. Gas Turb. Power 130(1) (2008)
[108] T. Lieuwen, V. McDonell, D. Santavicca, T. Sattelmayer, Burner development and operability issues associated with steady flowing syngas fired combustors, Combust. Sci. Technol. 180(6) (2008) 1169-1192.
[109] J. Hord, Is hydrogen a safe fuel?, Int. J. Hydrogen Energy 3(2) (1978) 157-176.
[110] R.D. McCarty, J. Hord, H.M. Roder, Selected properties of hydrogen, US Government Printing Office, Washington DC, 1981.
[111] J. Beita, M. Talibi, S. Sadasivuni, R. Balachandran, Thermoacoustic instability considerations for high hydrogen combustion in lean premixed gas turbine combustors: a Review, Hydrogen 2(1) (2021) 33-57.
[112] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K.K.A. Somarathne, E.C. Okafor, Science and technology of ammonia combustion, Proc. Combust. Inst. 37(1) (2019) 109-133.
[113] NIST Chemistry WebBook, SRD 69, Thermophysical properties of fluid systems, National Institute of Standard and Technology, Available at: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
[114] D.G. Goodwin, R.L. Speth, H.K. Moffat, B.W. Weber, Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes, https://www.cantera.org, 2021, Version 2.5.1.
[115] G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R.K. Hanson, S. Song, W.C. Gardiner Jr., V.V. Lissianski, Z. Qin, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
[116] A.C. Benim, K.J. Syed, Flashback mechanisms in lean premixed gas turbine combustion, Academic Press, 2014.
[117] S. Daniele, P. Jansohn, J. Mantzaras, K. Boulouchos, Turbulent flame speed for syngas at gas turbine relevant conditions, Proc. Combust. Inst. 33(2) (2011) 2397-2944.
[118] D. Kim, Review on the development trend of hydrogen gas turbine combustion technology, J. Korean Soc. Combust. 24(4) (2019) 1-10.
[119] T. Sattelmayer, C. Mayer, J. Sangl, Interaction of flame flashback mechanisms in premixed hydrogen-air swirl flames, J. Eng. Gas Turb. Power 138(1) (2016).
[120] ETN Global, Hydrogen gas turbines - the path towards a zero-carbon gas turbine, ETN Global, Available at: <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/02/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf.>, 2020.
[121] P. Jansohn, Modern gas turbines systems: high efficiency, low emissions, fuel flexible power generation, WP, Woodhead Publishing, Oxford, Cambridge, Philadelphia, 2013.
[122] D.J. Beerer, V.G. McDonell, Autoignition of hydrogen and air inside a continuous flow reactor with application to lean premixed combustion, J. Eng. Gas Turb. Power 130 (2008).
[123] T.C. Lieuwen, V. Yang, Combustion instabilities in gas turbine engines, operational experience, fundamental mechanisms and modeling, Prog. Astronaut. Aero. 210, 2005.
[124] T. Lee, K.T. Kim, Direct comparison of self-excited

instabilities in mesoscale multinozzle flames and conventional large-scale swirl-stabilized flames, Proc. Combust. Inst. 38(4) (2021) 6005-6013.
[125] U. Jin, K.T. Kim, Experimental investigation of combustion dynamics and NOx/CO emissions from densely distributed lean-premixed multinozzle CH4/C3H8/H2/air flames, Combust. Flame 229 (2021).
[126] H. Kang, K.T. Kim, Combustion dynamics of multi-element lean-premixed hydrogen-air flame ensemble, Combust. Flame 233 (2021).

저자정보

김형우
카이스트 항공우주공학과 석사 과정이며, 관심분야는 난류 연소 해석과 DNS 및 다상유동이다.

진욱화
카이스트 항공우주공학과 박사 과정이며, 관심 연구 분야는 수소 혼소 가스터빈 연소불안정이다.

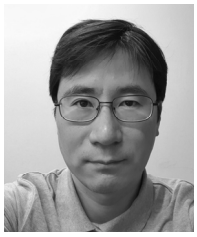
고영건
두산중공업 전략/혁신연구원 터보기계기술개발팀 책임연구원이며, 관심 연구 분야는 가스터빈연소, 석탄/오일연소, 무탄소 연료연소, 인공지능이다.

최민준
카이스트 항공우주공학과 박사 과정이며, 관심분야는 난류 연소 해석 및 연소불안정 분석이다.

구인영
카이스트 항공우주공학과 석사 과정이며, 관심분야는 CFD 층류 및 난류 화염 해석 및 질소산화물 분석이다.

백민하
카이스트 항공우주공학과 학부생이며, 관심분야는 가스터빈 엔진과 동적 경계 시뮬레이션이다.

김규태
카이스트 항공우주공학과 부교수로 재직 중이며, 캔-환형 가스터빈 다중 연소기 열음향 상호작용, 수소 전소/혼소 특성과 항공 엔진 연소불안정에 대한 실험 및 모델링 관련 연구를 진행하고 있다.



신동혁
카이스트 항공우주공학과 조교수로 재직 중이며, 전산 유체, 연소 불안정, 난류 연소, 가스터빈 관련 연구를 진행하고 있다.