

수소혼소용 가스터빈의 요소기술 및 국내외 기술개발 동향

주용진 · 김미영[†] · 박정극 · 박세익 · 신주곤

한국전력공사 전력연구원

Hydrogen Enriched Gas Turbine: Core Technologies and R&D Trend

YONGJIN JOO, MIYEONG KIM[†], JUNGKEUK PARK, SEIK PARK, JUGON SHIN

KEPCO Research Institute, 105 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

[†]Corresponding author :

miyeong_kim@kepco.co.kr

Received 16 June, 2020

Revised 6 August, 2020

Accepted 30 August, 2020

Abstract >> Recently, renewable power is rapidly increasing globally due to extensive effort to mitigate climate change and conventional power generation industry faces new challenges. The gas turbine technology has potentials to expand its role in future power generation based on the intrinsic characteristics such as fuel diversity and fast load following ability. Hydrogen is one of the most promising fuel in terms of reducing emissions and storing variable renewable energy and replacing hydrocarbon fuel with hydrogen has become very popular. Therefore, this paper presents the core technologies to combust hydrogen added fuel efficiently in gas turbines and the analysis of domestic and international R&D trends.

Key words : Gas turbine(가스터빈), Hydrogen enriched combustion(수소혼소), Fuel flexibility(연료다변화), CO₂ reduction(온실가스 저감), DLN combustor (DLN 연소기)

1. 서론

“안정적 전력 공급”이 최우선 목표였던 국내 전력 산업은 글로벌 메가트렌드에 따라 큰 변화의 바람을 맞이하고 있다. 풍력·태양광 발전설비의 대규모 증설을 내세운 3020 재생에너지 정책에 따라 국내 신재생발전 비중은 2019년 1분기 7%를 돌파한 바 있고, 석탄 화력은 주기적으로 운영을 중단하거나 일부는 폐지 절차가 진행 중에 있다. 또한 2030년까지 국내 배출 온실가스 감축 비율을 business as usual (BAU)

대비 25.7%에서 35.2%로 대폭 확대하는 온실가스 감축 로드맵 수정안이 2018년 발표된 바 있다. 2019년에는 온실가스 저감과 관련하여 파리협약의 온실가스 감축 목표를 근간으로 하여 재생에너지의 확대 및 청정에너지로의 전환을 위한 제3차 에너지기본계획이 수립되었다. 제3차 에너지기본계획의 목표는 에너지 전환을 통한 지속 가능한 성장과 국민 삶의 질 제고이며, 이를 위해 깨끗하고 안전한 에너지믹스, 재생에너지, 수소, 효율연계 산업 등 미래에너지 산업 육성을 중점 추진 과제의 하나로 계획하고 있

으며, 이에 따라 제9차 전원수급 기본계획의 개편이 진행되고 있다¹⁾. 특히 3020 재생에너지 정책에 따라 풍력·태양광 등 간헐성 재생발전설비는 크게 증가할 전망이며 이에 따른 전력계통 안정성 확보 문제가 대두되고 있다. 청정발전과 재생에너지 확대 측면에서 세계 각국은 수소경제 활성화를 지향하고 있으며, 우리나라도 지난 2019년 1월 「수소경제 활성화 로드맵」을 발표한 바 있다. 「수소경제 활성화 로드맵」은 수소의 생산부터 이송/저장, 이용에 대한 전주기 산업 생태계를 구축하여 혁신성장의 새로운 성장동력을 창출하고, 친환경 에너지 원동력으로 확보하고자 한다²⁾. 따라서 재생에너지의 확대를 통해 수소 전환으로 이루어지는 산업이 급성장할 것으로 예측되며, 수소 생산·이용에 대한 value chain을 완성하기 위해서는 대용량의 수소 수요처 발굴 및 확보가 매우 중요하다. 2019년 발표된 ETN 보고서에 따르면 에너지 패러다임의 변화에 따른 가스터빈의 역할에 대해 기술하고 있다. 2030년까지 유럽은 Zero-CO₂를 실현하고자 하며, 이를 위해 가스터빈은 3단계에 걸쳐 연료를 전환하고 적용기술을 개발할 것으로 판단한다. Fig. 1과 같이 천연가스 가스터빈에서 과도기로 수소-바이오가스-천연가스의 혼소를 거쳐 최종적으로 수소-바이오 가스 터빈으로 귀결될 것으로 보고하고 있다³⁾.

한편, 장기간 국내 발전 부분에서 주요 발전원으로 큰 역할을 수행해 온 대형 발전용 가스터빈(100 MW 이상)은 글로벌 친환경 추세에 따라 중요성이 점차 커질 전망이다. 가스터빈은 천연가스 연료 특성상 석탄 대비 낮은 온실가스 배출 특성을 가지며, 대용량 터 발전원(석탄, 원자력) 대비 짧은 기동시간, 높은 출력과 증·감발 속도의 특성도 가지고 있다. 발전용 가스터빈의 기계적 수명은 30년 이상으로 길지만, 에너지가 부족한 우리나라와 일본에서는 20여 년 정도 운전된 노후 가스터빈의 경우, 상대적으로 낮은 발전 효율로 인해 급전 순위가 하락하고 결과적으로 설비 이용률이 낮아지고 있다. 이러한 영향으로 발전사는 운영 경제성이 낮은 가스터빈을 제작사와의 장기 서비스 계약(long term service agreement), 장기 부품 계약(long term parts management) 종료 시기에 맞춰 폐지하는 것을 검토하고 있다. 그러나 미국 등 다수의 국가에서 30년 이상 운전되는 사례를 바탕으로 볼 때, 기계적 잔존 수명이 20년 이상 남은 가스터빈을 폐지하고 고가의 신규 발전설비로 대체하는 것은 국가적으로 자산 가치와 전문 인력의 일자리가 매몰되는 부정적인 영향을 미치게 된다. 이와 같은 문제는 10년 이상 운전된 노후 발전용 가스터빈의 연소 방식을 천연가스와 수소의 혼소로 전환함으로써 해결할 수 있는데, 수소라는 청정연료를 사용하여 환경

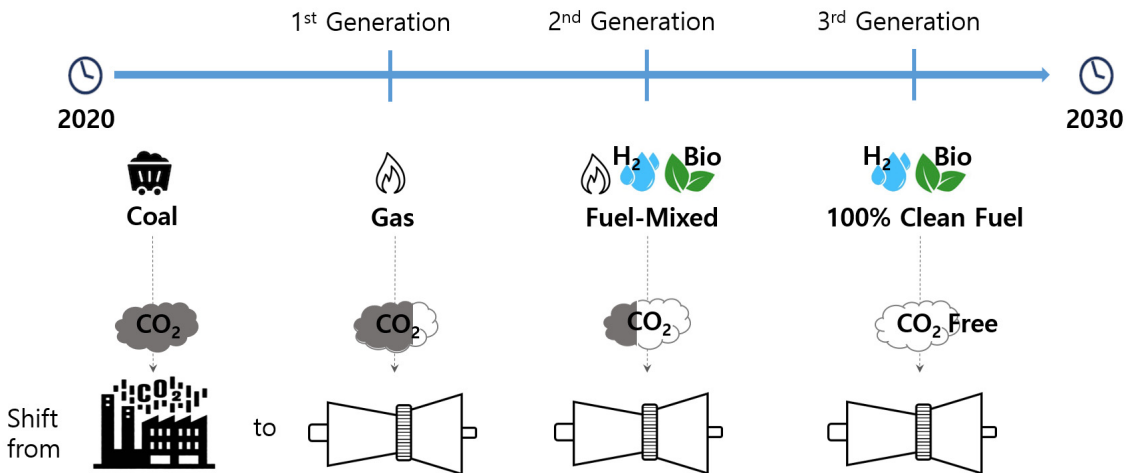


Fig. 1. The role of gas turbines in the global energy transition

급전을 통한 급전순위를 상향시키고, 이용률을 증가시킬 수 있다. 환경급전이란 기존의 경제급전 방식이 아닌 대기오염물질 배출이 적은 발전원을 우선 가동하는 방식으로 가스발전 > 석탄발전 > 유류발전 순서로 급전 순위를 정의하고 있다. 이와 관련하여 국회 예산정책처는 현행 전기사업법 제45조에 대해 “전력 시장에서 결정된 우선순위(경제급전)를 따르되, 지속 가능한 발전법에 따른 환경의 보전 등을 함께 고려해야 한다”로 개정 제시하였다^{4,5)}. 수소혼소 가스터빈을 통한 환경급전 강화는 자연스럽게 가스터빈의 이용률 증가와 발전설비의 수명연장으로 이어질 수 있다. 이로써 신규 발전설비로의 교체 시기를 상당 기간 뒤로 연기함으로써 투자비와 운영비를 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 수소혼소용 가스터빈 기술

발전용 대용량 가스터빈을 대상으로 하는 수소혼소 기술은 기존 운전 중인 가스터빈의 연소방식 교체를 목표로 하므로 연소기 개조 및 운영기술 그리고 기존 발전시스템에 영향을 주는지를 분석·평가하는 기술이 핵심이다. 연소기 개조를 위해서는 수소 연소특성 분석을 위한 전산해석과 단일노즐시험, 혼소용 연료노즐 및 라이너 설계를 수행해야 하며, 혼소용 연소기에 대한 수소 혼소화염 안정화를 위한 연소조정과 같은 운영기술이 필요하다. 또한 혼소용 연소기 적용에 따른 터보기기, 연소기 출력 및 효율에 대한 영향성 분석과 발전시스템(배열회수보일러, 증기터빈)의 성능에 대한 영향성 분석·평가가 필요하다. 연소기 전산해석은 열 음향과 연소해석, 구조해석으로, 시험은 단일노즐, 캔에 대해 상·고압시험으로 세분화할 수 있다.

2.1 수소연료 및 연소특성

수소는 발전용 연료로 공급 중인 도시가스의 주성분인 메탄과 비교하여 Table 1과 같은 물성값을 갖는다⁵⁾. Table 1에서 알 수 있듯이 수소는 천연가스보다

부피발열량은 1/3 수준이며, 질량발열량은 2.4배 크다. 가스터빈의 연료로 수소-천연가스를 혼입하는 경우 후단 터보 기기에 대한 영향을 최소화하기 위해 연소기로 인입되는 총 입열량을 기존 천연가스만으로 사용할 때와 동일하게 유지해야 한다.

따라서 수소를 혼소할 경우, 기존 연료의 부피 유량은 증가하고, 질량 유량은 감소하게 되며, 총 수소 혼소율에 따른 연료 입열량 내 메탄이 차지하는 비율은 Fig. 2와 같다⁶⁾. 동일 연료 노즐에 수소 혼소를 적용할 경우, 부피 유량의 증가로 연료 또는 연료-산화제 혼합기의 노즐 출구 속도가 변화하게 되므로, Wobbe 지수와의 종합적인 비교를 통해 적용성을 평가하는 것이 필요하다.

가스터빈의 도시가스 연료를 메탄 기준 100%로 가정하고, 부피 기준 50% 수소를 혼합하여 적용한다면, Table 2에서 보듯이 2종 연료의 열량은 동일한 반면, 100% 메탄 연료 대비 인입 질량유량은 약 14% 감소하고, 인입 부피유량은 약 54%로 증가한다. 이로 인해 수소-메탄 혼합연료의 입열량 내 메탄과 수소가 차지하는 비율은 각각 77%와 23%가 된다.

Table 1. Comparison of fuel properties

Properties	Unit	Methane	Hydrogen
Formula	-	CH ₄	H ₂
Molecular weight	g/mol	16	2
Density	kg/nm ³	0.716	0.090
Heating value (LHV)	Weight	MJ/kg	50
	Volume	MJ/nm ³	35.8

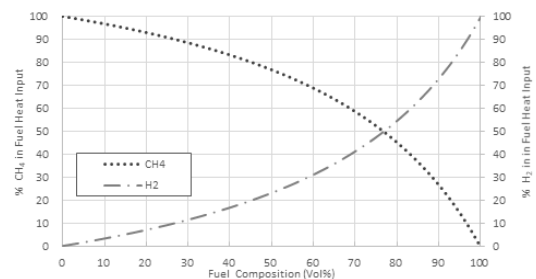


Fig. 2. Relations between heating value (by mass) and composition of CH₄-H₂ fuel mixture (by volume)

수소의 층류화염속도는 탄화수소계열 연료보다 Table 3과 같이 매우 빠르다⁶⁾. 국부적인 화염전파속도의 예측에 있어 중요한 지표인 층류화염속도의 변화는 수소 이용 연소기의 설계·운영에 있어 필수적으로 고려되어야 한다. 수소 혼합 비율이 증가할 경우, 화염 안정화 위치가 상류쪽으로 이동하는 경향이 있으며, 연소환경에 따라서 종종 역화(flashback) 현상이 발생되기도 한다.

수소혼소율에 따른 화염특성은 Fig. 3에서 알 수 있는데, Fig. 3은 화염의 위치를 대표적인 지시자인 OH⁻의 분포와 온도장을 보여주고 있다⁷⁾. 수소의 혼소율이 높을수록 연소 영역이 노즐방향으로 이동하며, 수소 80% 혼소 시에는 화염이 노즐 안에서 형성되는 것을 알 수 있다.

수소-메탄의 혼합연료의 가연한계 범위는 Table 4와 같다⁸⁾. CH₄ 연료 대비 수소 혼합 연료의 상한 가연한계(upper flame limit)는 큰 폭으로 증가하는 것에 비해 하한 가연한계(lower flame limit)의 변화도 제한적이지만 확대된다. 또한 수소 첨가 화염의 안정성을 나타내는 희박연소한계(lean blowout limit)와 화염스

트레치 증가에 따른 소멸(extinction) 한계도 증가한다⁹⁾. 화염 안정성의 강화는 화염 온도의 잠재적인 상승분을 상쇄하여 희박연소 가스터빈 연소기에서 NO_x 배출량의 제어와 저부하 운전영역 확대를 구현하는 요소로 활용 가능하다.

가스터빈에 수소를 혼소하는 기대효과는 크게 두 가지로 설명할 수 있다. 첫 번째 기대효과는 청정에너지를 사용으로 온실가스의 배출을 저감하는 것으로, 수소의 혼소율에 따른 CO₂ 저감효과는 앞선 Fig. 2에서 알 수 있다. CO₂의 저감율(질량기준)은 상기 양론 조건하에서 수소-메탄 혼합연료 중 수소에 의해 차지하는 입열량의 변화와 동일하게 표현되므로 수소를 50% 혼소할 때 약 22% CO₂가 저감된다. 두 번째는 재생에너지의 출력 변동성을 보완해줄 수 있는 유연운전을 확보하는 것이다. 가스터빈은 기

Table 2. Comparison of fuel flows between 100% CH₄ and 50% H₂ mixtures

Properties		Unit	Case 1. CH ₄ 100%	Case 2. 50% H ₂ mixed		
				H ₂	CH ₄	Total
Fuel flow	Mass	kg/hr	100	9.7	76.8	86.5
	Volume	nm ³ /hr	140	107.3	107.3	214.6
Heat input		MJ/hr	5,000	1,159	3,841	5,000

Table 3. Laminar flow velocity under stoichiometric condition on each fuel

Fuel	Formular	Laminar flow velocity (cm/sec)
Hydrogen	H ₂	170
Methane	CH ₄	38.3
Ethane	C ₂ H ₆	40.6
Propane	C ₃ H ₈	42.3
Carbone mono oxide	CO	58.8

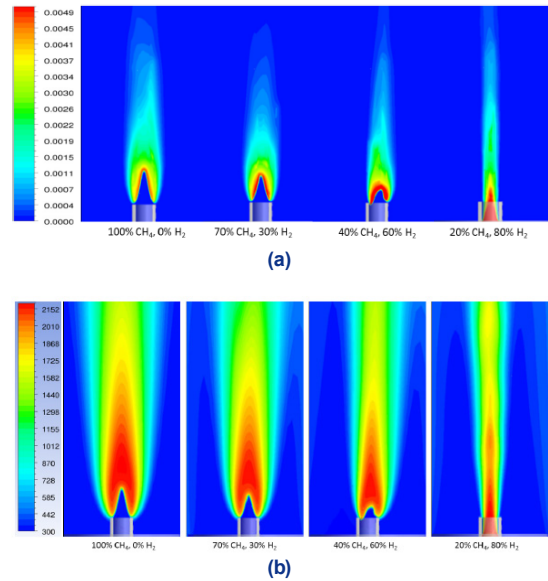


Fig. 3. Affect of Flame shapes by H₂ mix ratios (a) OH⁻ mass fraction (b) temperature distribution (K)⁷⁾

Table 4. Flammable limits of H₂ mixing ratios

H ₂ mixed ratio (%)	0	20	40	60	80	100
Lower flammable limit	5.0	4.6	4.4	4.4	4.6	5.0
Upper flammable limit	16.0	19.9	26.0	33.5	47.6	76.5

타 발전원(석탄, 원자력)에 비해 기동시간과 응답속도가 빠르기 때문에 현재에도 첨두부하를 담당하고 있지만, 향후 재생에너지가 점차 확대되면 그에 따른 출력변동성과 계통 불안정에 대한 문제가 심화될 수 있다. 이에 가스터빈의 유연운전 능력을 강화하기 위해서는 현재보다 더 낮은 최저부하율이 가능해야 하며, 수소를 혼소하면 그와 같은 효과를 얻을 수 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 수소혼소율이 높을수록 동일한 CO 발생량 대비(25 ppm) 높은 연소온도를 가지는데, 이는 같은 연소성능 하에서 혼소율이 높을수록 높은 출력을 얻을 수 있고, 상대적으로 낮은 부하에서 운전할 수 있는 조건을 가질 수 있다¹⁰⁾.

2.2 수소 공급 및 안전계통 설계

기존 천연가스 기반 복합화력발전소에 수소를 공급하기 위해서는 수소의 폭발성을 고려하여 공급 및 안전계통에 대한 변경 및 보완이 필수적이다. 「수소경제 활성화 로드맵」 발표에 따라 현행되고 있는 고압 가스안전법과 차별화된 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」(이하 약칭 “수소법”)이 2020년 1월 국회를 통과하여 시행 준비를 하고 있다. 따라서 수소를 연료로 사용하기 위해서는 수소법에 근거하여 수소취성 등을 고려한 배관설계, 수소가스 누출방지 피팅, stop/ratio valve와 gas control valve이며, inlet piping 및 strainer, control servo valves, pressure gauges, fuel vent valve, fuel nozzle로 이송하는 배관

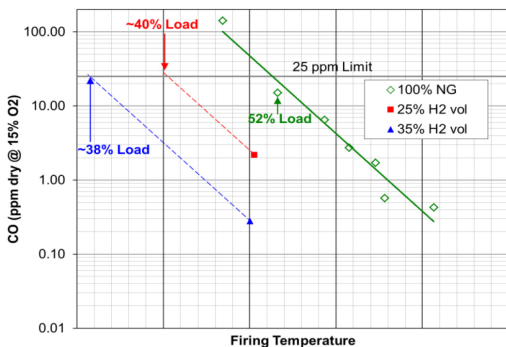


Fig. 4. Extended low loading operating limit with H₂ mix ratio¹⁰⁾

설계를 포함한 공급시스템, 배관 내 잔여수소에 대한 purge와 수소가스 누출감지, 경보시스템, 고압가스용 안전밸브, 역화방지장치, 정전기 제거 설비, 물분무장치, 소방시스템 등과 같은 안전계통의 추가 설계가 필요하다¹¹⁾.

수소 가스터빈 운영에 대한 수소안전의 국제적인 기준은 아직 없으나, International Standards Organization Technical Report (ISOTR) “수소시스템 안전의 기본 고려사항”, 미국 에너지성(DOE) 리포트(INEEL/EXT-99-00522) “safety issues with hydrogen as vehicle fuel”, National Fire Protection Association (NFPA) standard 50A “gaseous hydrogen systems at consumer site” 등을 통해 수소 가스터빈 운영에 대한 안전사항을 참고할 수 있다³⁾.

2.3 수소혼소용 연소기 설계

수소혼소용 가스터빈 연소기는 수소혼소 방식과 비율에 따라 형식을 달리한다. 기존 천연가스용 가스터빈은 예혼합 화염 기반의 dry low NOx (DLN) 노즐을 적용하며, 합성가스용 가스터빈은 확산화염 기반의 연소기가 적용되는 것이 일반적이다. 30% 수준의 낮은 수소혼소 비율의 경우 가스터빈 제작사별로 각기 다른 수소 혼소한계 범위에서 기존 확산화염 방식 노즐(diffusion)과 DLN 연료 노즐이 그대로 적

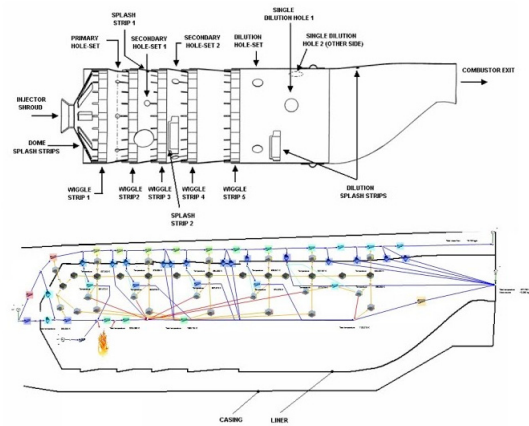


Fig. 5. Computer modeling in 1D flow network tool (FLOWNEX)¹²⁾

용될 수 있다. 반면 고농도 수소 혼소 가스터빈에는 빠른 연소속도에 대응하기 위한 multi-jet 방식의 노즐을 개발하고 적용하는 연구가 수행되고 있다. Multi-jet 형태의 노즐은 3.2절에서 자세히 언급하고자 한다.

수소혼소용 연소기의 설계는 연소기 내 열 음향 및 열전달 특성에 대한 실험·해석 연구를 통해 개념설계와 상세 설계단계로 진행된다. 1차원 전산 유동해석과 열 음향 해석을 통해 기본설계를 수행한다. 1차원 유동해석은 Fig. 5와 같이 flow network model을 기반으로 한다¹²⁾. Flow network model이란 연소기 공간을 온도와 압력, 유체성분이 유사한 조건에 대하여 같은 조건영역으로 지정하고, 각 영역에 대한 다수의 lumped plug flow reactor (PFR) 혹은 fluid node로 구분하여 1차원 기반 유동을 해석하는 방식이다. 즉 가스터빈 연소기의 공간을 다수로 구분하고 공간간의 입력/출력 공정정보(유체 유량, 온도, 압력, 조성)를 상호 주고받으면서, 전체 연소기의 경계조건에 수렴하는 방식이다. 대표적으로 가스터빈 분야에서는 Flownex, Chemkin 등과 같은 프로그램을 이용한다. 1차원 열 음향 해석은 1차원 유동해석 결과를 바탕으로 길이 방향으로 열 음향 방정식을 해석한다. 열 음향 해석은 연소기 내 화염 위치, 모양에 따라 발생하는 동압을 예측한다. 연소 동압은 연소기 라이너 설계에 직접적인 영향을 주는데, 연소 동압 발생 위치에 따라 라이너 냉각 홀의 위치와 동압 센서 설치 위치가 결정된다.

1차원 기본설계 후 3차원 전산해석을 통한 상세설계를 진행한다. 3차원 전산해석은 연소해석, 구조해

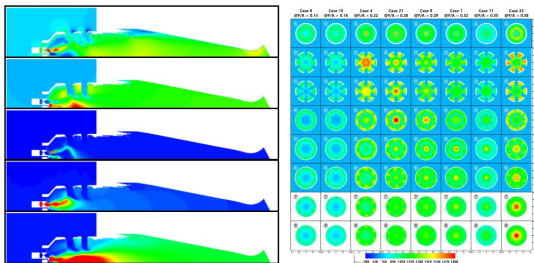


Fig. 6. 3D computational analysis under variable conditions¹³⁾

석, 열 음향해석이 필요하다. 연소해석은 기하학적인 연소기 형상을 수 만개의 격자로 구분하여, 각 격자 부피 위치에서 Fig. 6과 같이 연소반응에 의한 유량, 온도, 압력, 조성을 산출한다¹³⁾. 3차원 연소해석은 질량, 운동량, 에너지, 화학반응 등에 대한 지배방정식을 컴퓨터를 이용하여 예측하는 방법으로, 연소기의 공간 안에서의 온도, 유속, 화학종 분포를 비교적 상세하게 취득할 수 있다. 연소해석의 결과를 이용하여 구조해석과 열 음향 해석을 각각 진행한다. 구조해석은 연소기와 같은 고온에 노출된 부품에 대해 연료 노즐, 라이너를 대상으로 열-응력 분포를 해석한다. 수소가 혼소될 때 변경되는 화염의 위치에 따라 기존 재질에 대한 영향이 없는지에 대해 확인한다. 또한 1차원 열 음향 해석 결과를 바탕으로 3차원 열 음향해석을 진행하여 연소실 내 동압을 상세하게 예측할 수 있다.

2.4 수소혼소 시험기술

가스터빈의 연소시험은 상기 연소기 설계 및 연소기 운영기술 개발을 위해 필요한 과정이다. 연소시험

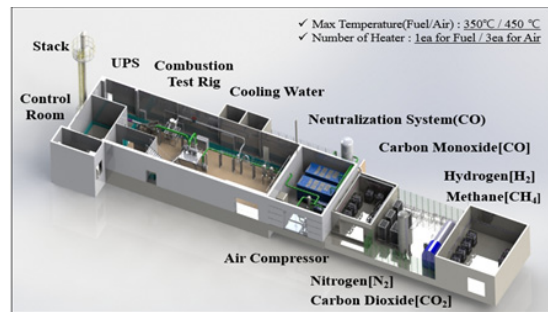


Fig. 7. Combustion test facility based on real scale¹³⁾

을 통해 수소 혼합연료에 대한 특성, 각 위치별 온도, 동압, 화염 거동 및 형태, 배기가스 조성 및 온도패턴 등을 확인하여 연소기 설계인자에 대한 정보를 제공하고 설계에 대한 평가를 수행할 수 있다. 특히 연소 동압과 같은 인자는 연소시험을 통한 확인이 필수적이다. 또한, 연소시험은 연소기 운전에 대해 설계한다. 연소를 위한 점화, 연료전환, 연료공급 스케줄, 부분 부하 연소특성과 같은 연소기 기동 시 필요한 운전설계와 정격부하 운전 시 발생하는 불안정요소를 회피하는 화염안정화 기술, 질소산화물 배출저감 기술과 같은 운영기술개발에 이용된다. 연소시험은 단일노즐, 캔을 대상으로 각각 수행하며, 압력에 따라 상압과 고압으로 수행한다. Fig. 7은 전력연구원이 보유한 수소혼소용 상압 연소시험설비이다¹³⁾.

2.5 수소혼소 복합발전 영향성 평가기술

수소혼소용 연소기를 기존 천연가스 기반 복합화력발전소에 적용하기 위해서는 두 가지 영향성 평가가 필요하다. 첫 번째는 수소혼소용 연소기 후단의 터보기기에 대한 영향성 분석이다. 하나의 축으로 연결되어있는 터보기기는 공력해석을 기반으로 하는 turbine inlet temperature (TIT), turbine inlet pressure (TIP), 열용량, 회전속도 등에 따른 열-응력 변화를 평가한다.

두 번째는 복합화력발전소 시스템에 대한 성능평가이다. 천연가스용 DLN 연소기 기반 복합발전을 수소혼소로 retrofit 하는 경우 플랜트의 효율은 낮아지고 출력에는 영향이 없는 것으로 알려져 있는데, 가스터빈 후단 배기가스의 열용량과 조성이 달라지므로 배열회수 보일러 및 증기터빈에 영향을 미칠 수 있다³⁾. 따라서 기존 복합발전시스템의 공정해석과 수소혼소에 따른 민감도 분석, 사이클 분석 등을 통해 시스템의 효율과 출력 등에 대한 성능평가가 필요하다. 특히 배열회수 보일러의 경우 다단의 열교환기가 배치되어 있으므로 각각 열교환기의 pinch 특성도 분석해야 한다.

2.1절에서 비교하였던 메탄과 수소-메탄 연료 적

용에 대해 연소반응 중심으로 가스터빈의 열물질 수지를 산출하면, Fig. 8과 같은 간략적인 시스템 영향성을 예측할 수 있다. 가스터빈에 동일한 공기를 인입하고, 메탄(case 1)의 연공비를 0.04 기준으로 가정할 때, 수소-메탄 혼합연료(case 2)의 연공비는 0.035로 감소하나, 통상 예혼합 연소기의 연공비 범위인 0.02-0.04를 유지할 수 있다. 가스터빈의 연소가스 부피량은 0.5% 감소하며, 배기가스의 성분 변화는 Table 5와 같다. 연소가스의 부피량은 크게 변하지 않으므로 가스터빈에 대한 영향은 크지 않을 것으로 예측할 수 있다. 또한 배기가스 성분에 의해 변하는 배기가스의 단위 열량에 의해 배열회수보일러와 증기터빈에 대한 영향은 있을 수 있으나, Table 5와 같이 성분 변화도 크지 않으므로 그 영향도 적을 것으로 판단할 수 있다. 하지만 상기 언급한 정확한 영향성 평가를 통해 복합발전 시스템의 효율, 출력 등을 예측하여 실증 운전 시 고려해야 할 요소를 찾아 시스템 위험성을 줄여야 한다.

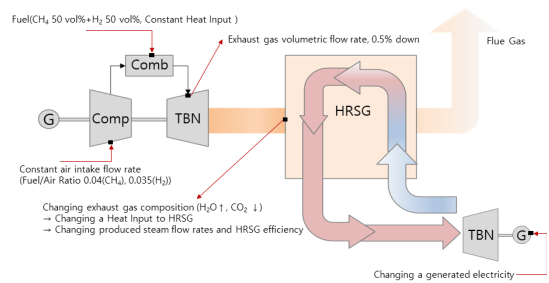


Fig. 8. Simplified impact assessment of combined cycle system

Table 5. Comparison of mol fraction in exhaust gas from GT

Fuel	Exhaust gast (mol fraction)				
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	Air	Total
Case 1. methane	6.7	13.5	50.6	29.2	100
Case 2. hydrogen-methane (50 vol%)	5.1	15.4	48.1	31.4	100

3. 수소혼소용 가스터빈 기술개발 동향

3.1 국내 기술개발 동향

국내 수소가스터빈 연소기술은 학계의 기초 단계 연구수행이며, 아직 실증연구 이력은 전무하다. 하지만 2006-2016년 국책사업으로 진행된 한국형 석탄가스화 복합발전(integrated gasification combined cycle, IGCC) 실증사업과 관련하여 대학 및 한전 전력연구원 등을 중심으로 수소를 30% 함유한 합성가스에 대한 연소기 성능향상 및 연소기술, 연소특성 개발 수행 이력이 있고, 현재 태안 IGCC의 합성가스 가스터빈 실증사례가 있다. 그리고 서울대학교와 한국과학기술원 등 학계에서 수소가스터빈용 연료노즐에 대한 연구를 수행하고 있다. 서울대학교에서는 수소와 이산화탄소를 주성분으로 하는 연료를 대상으로 기존 예혼합노즐 대상 연소 동특성 분석, 레이저계측을 통한 화염 구조분석, 수소용 멀티노즐 시험 등을 수행하고 있다. 또한, 한국과학기술원에서는 상압 하의 수소용 다중노즐 연소시험을 수행하고 있다. 한전 전력연구원에서는 단일노즐 시험용 상압 연소시험설비와 캔 규모 상압 연소시험설비를 갖추고 있으며, 본 설비들을 이용하여 수소를 포함한 합성가스 연소특성연구를 비롯하여 다양한 연료(SNG/PNG, 셰일가

스)에 대한 연소기술을 개발한 이력이 있다. 또한, 가스터빈 3대 제작사인 MHPS와의 공동 연구를 통해 합성가스 조성 변화에 따른 연소성능평가를 수행한 이력이 있다.

가스터빈은 열유체, 구조/동역학, 제어 및 계측, 소재 분야 등의 기계 공학 전 분야의 핵심기술이 종합적으로 활용이 되는 시스템 기술이며, 국내에서는 정부 및 민관 협동 과제를 통하여 전 세계 기술개발 동향을 따라잡고 있다. 최근 두산중공업의 대형 가스터빈 국산화 개발에 대한 단품 제작 및 조립이 완료되었고 향후 시운전과 수차례 기술보완 과정을 거치면서 점점 더 국내 기술이 세계 기술에 근접하는 데 속도를 내고 있다. F급 연소부품의 제작 기술은 국내에 가장 많이 설치된 GE 기종의 경우 조기에 국산화 개발이 이루어져 양산단계에 와있고, 상대적으로 수량이 적은 Siemens 기종과 도입 시기가 가장 늦어진 MHPS 기종의 경우 아직 제대로 국산화 개발이 이루어지지 않고 있는 실정이다. 그렇다고 해서 국내기업이 제작기술이 없는 것은 아니며, G급 가스터빈 일부 부품까지 개발이 이루어졌고 양산화 단계에 있기에 F급 가스터빈의 연소부품에 대한 요소기술 및 제조기술은 충분히 경쟁력 있는 수준을 확보하고 있다고 볼 수 있다. 사용자의 적극적인 국산화 개발의지는 기업에게 국내시장에서의 track record를 쌓을

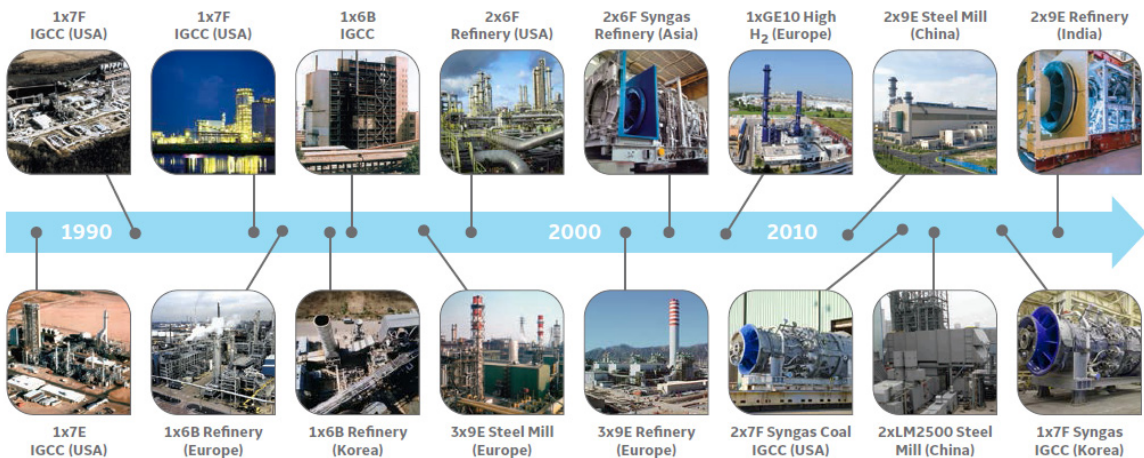


Fig. 9. Timeline of selected projects with hydrogen fuels⁶⁾

수 있는 기회를 제공하고, 이는 곧 수출로도 연계될 수 있는 발판의 역할을 하게 될 것이다. 가스터빈 연소부품 제작을 위한 공정기술은 선진국 대비 동등이상의 기술 수준을 보유하고 있다.

3.2 국외 기술개발 동향

수소혼소 가스터빈의 연소기술은 가스터빈 및 발전분야 선진국인 미국과 유럽을 중심으로 진행되고 있다.

3.2.1 미국

미국은 캘리포니아 주와 연방정부 중심으로 ‘민관 파트너십’을 통해 2004년 DOE 주관 하에 범정부적 수소 가스터빈 개발을 시작하였다. 상기 프로젝트는 미국의 대표적인 발전용 가스터빈 OEM 사인 General Electric (GE)은 연료다변화용으로 적용 중인 multi nozzle quiet combustion (MNQC) 연소기를 토대로 하여 수소가 30% 함유된 합성가스를 적용하였으며, 그 개발 및 실증이력은 Fig. 9와 같다. GE는 전 세계적으로 F급 가스터빈 약 70여 기에 실증하였다⁵⁾. 하지만 확산화염 방식의 MNQC 연소기는 연소 특성상 많은 양의 NOx를 배출하고, 이를 줄이기 위해 질소 및 증기 분사가 필요하며, 이로 인해 연소기의 효율이 낮은 편이다. 현재 발전용 가스터빈에 가장 많이 적용되는 예혼합화염 방식의 DLN 2.6e은 약 15%까지 수소혼소가 가능하며, 실제 운영상에는 5%까지로 수소 혼소를 제한하고 있다¹⁴⁾.

이에 GE는 발전용 가스터빈의 50% 이상의 고농도 수소 적용을 위해 high hydrogen 가스터빈 연소기를 개발 중이며, 본 개발은 DOE “Advanced IGCC/High



Fig. 10. Multi tube mixer of GE⁶⁾

Hydrogen Turbine Program”을 통해 100% 수소 전소까지 가능한 multi-tube mixer type으로 연구하고 있다. 개발 중인 연소기는 2018년 7HA, 9HA에 적용된 DLN 2.6e+기술을 기반으로 Fig. 10과 같이 매우 작은 연료노즐이 다발로 묶이는 형태를 하고 있다⁵⁾. 또한 GE는 노후 가스터빈의 업그레이드 및 수소 연료 전환을 위해 Alstom E급 가스터빈 모델인 GT13E2의 연소기를 기존 EV 노즐에서 advanced EV 노즐을 적용하여 수소 60 vol%까지 혼소시험에 성공하였다. Advanced EV 노즐은 FDS 연결부 및 mixing zone 형태 개조를 통해 연료적용 범위의 확장, 수명시간 및 NOx 배출량을 개선하였다¹⁵⁾.

3.2.2 유럽

유럽은 2019년 2월 ‘수소 로드맵 유럽’을 수립하고, 각 국가별 재생에너지 연계 수소 프로젝트를 진행 중에 있으며, 2010년 ENEL은 세계최초 수소 가스터빈 발전소를 건설하고, GE의 소형급 가스터빈을 이용하여 Fusina hydrogen power station을 실증하였다.

Table 6. Fuel flexible ranges of Siemens GTs

Fuel	Unit	SGT-800	SGT-750	SGT-700	SGT-600
Methane	mol%	100	100	100	100
Hydrogen	mol%	30	15	40	40

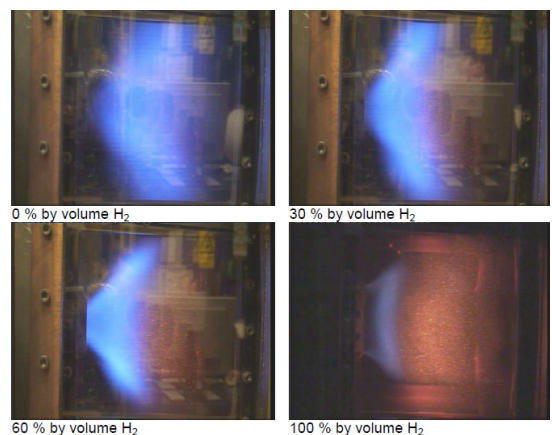


Fig. 11. Results of hydrogen-mixed combustion test for SGT-800¹⁶⁾

발전용 가스터빈의 제작사인 Siemens는 기존 자사 제품라인에 대해 연소기 변경 없이 15%까지 수소 혼소가 가능하나, 그 이상에 대해서는 변경이 필요할 것으로 판단하였다¹²⁾. 또한 수소혼소용 3세대, 4세대 DLE 연소기를 개발하고, 중소형급 가스터빈 모델 SGT-600/700/750/800에 대해 수소혼소 실증테스트를 완료하였으며, Table 6과 같이 연료 유연성을 보증하고 있다^{16,17)}. Fig. 11은 SGT-800을 대상으로 한

수소혼소 시험에 대한 이미지 결과이다.

ANSALDO는 기존 GT26 버너를 토대로 수소혼소 적용을 위하여 2011년 Alstom의 재열 엔진을 업그레이드 한 sequential environmental (SEV) 버너를 Fig. 12와 같이 개발하였다. ANSALDO는 SEV 버너의 수소혼소 15-60 vol% 범위에 대해 단일노즐 시험을 완료하였으며, 2011년 SEV 버너를 적용한 업그레이드 GT26의 15 vol% 수소혼소 실증에 성공하였다. 또한, EU 수소 가스터빈의 목표인 45 vol% 수소혼소 달성을 목표로 하고 있다¹⁸⁾. 뿐만 아니라 ANSALDO는

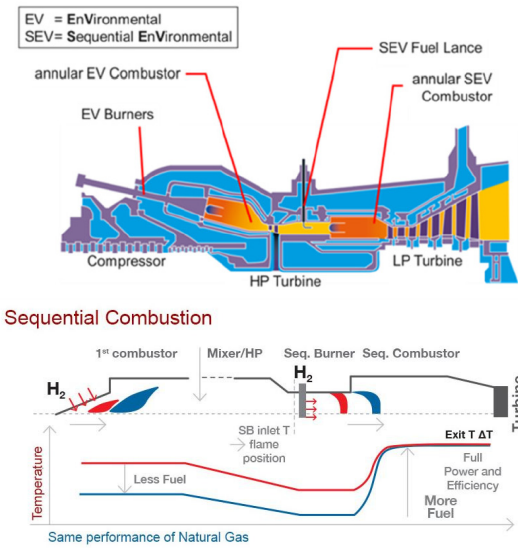


Fig. 12. Alstom GT24/GT26 sequential combustion systems

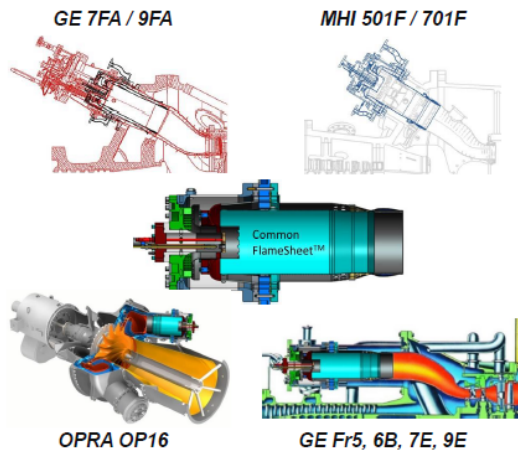


Fig. 13. Concept of FlameSheet™ of ANSALDO combustor¹⁰⁾

Table 7. Specification of ANSALDO GTs and FlameSheet™

Technology	Application	Max. H ₂	NO _x emissions	Load range
		vol%	ppm	%
Sequential combustion	New GT26	30	15	20-100
	New GT36	50	15	20-100
FlameSheet™	GE (6F, 7F, 9F) MHPS (501F/G, 701F/G) Siemens-WH (501F/G)	40	9	30-100

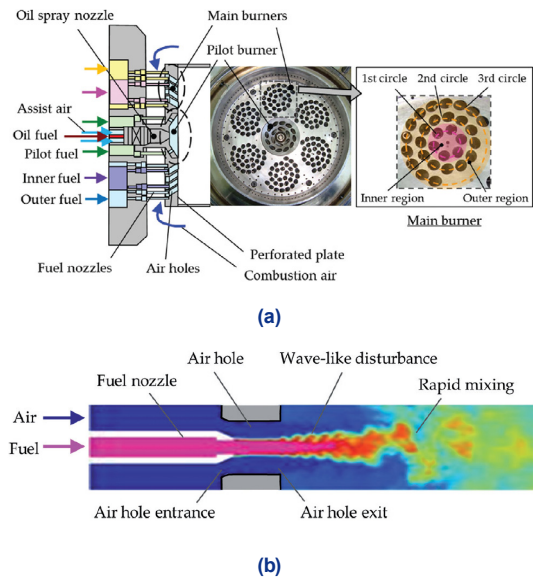


Fig. 14. Multi-cluster combustor of MHPS (a) detailed diagram (b) mixing process of a coaxial jet¹⁹⁾

상기 SEV 연소기를 이용해 기존 노후 가스터빈의 수소전환 연소기 교체 및 가스터빈 Retrofit 사업인 FlameSheet™을 추진하고 있다. FlameSheet™은 Fig. 13과 같이 초기 공급한 OEM 사의 E급/F급 발전용 가스터빈 전 기종을 대상으로 하며, 노후 가스터빈의 수명연장 및 친환경 발전원 전원시장을 확보하기 위한 전략기술을 바탕으로 하고 있다. ANSALDO의 sequential combustion과 FlameSheet™를 통해 제공하는 수소혼소 적용 범위와 기술 성능은 Table 7과 같다¹⁹⁾. 하지만 ANSALDO가 제시한 상기 서비스에 대한 실증이력은 아직 공식적으로 발표된 내용이 없다.

3.2.3 일본

일본은 후쿠시마 원전사고 이후 수소경제를 집중하여 육성하고 있다. 2017년 2월 ‘수소기본전략’을 채택하고, 2030년까지 연간 30만 톤 수소공급망 구축 및 수소 발전단가를 천연가스와 동등한 ¥17/kwh를 목표로 하고 있다²⁰⁾. MHPS 사는 신에너지 산업 기술종합개발기구(NEDO) 주관 EAGLE 프로젝트에서 개발된 IGCC용 합성가스 가스터빈 기술을 바탕으로 Fig. 14와 같은 multiple injection dry low NOx 연소기를 이용해 G급/J급 가스터빈 수소혼소 30% 실증을 진행하고 있으며, 기존 천연가스 가스터빈 대비 약 10%의 이산화탄소를 절감할 수 있다고 알려져 있다²¹⁾.

4. 결론

최근 급격한 기후변화에 따른 환경적 요인으로 신재생에너지 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 이 중 온실가스 배출이 없어 환경에 영향을 주지 않으면서 안정적인 전력을 공급할 수 있는 에너지원으로 수소가 대두되고 있다. 기존 탄소 기반 경제체제에서 수소 기반 경제체제로 전환된다는 것은 단순한 에너지 시스템의 변화뿐만 아니라 경제, 사회, 문화 전반에 걸친 패러다임의 변화를 동반하는 것을 의미하며 이를 인지하고 있는 선진국들은 이에 대응하기 위하여

수소에너지 기술 개발 및 보급에 집중하고 있다.

한국전력공사는 2019년 수소 생산 및 이용 기술 확보를 위해 2030년을 목표로 하는 중장기 기술 개발 전략 “KEPCO H₂ 비전 로드맵”을 수립하였다. 본 로드맵을 통해 한국전력공사는 수소 가스터빈으로 대용량 발전용 혼소기술과 분산전원용 전소기술을 확보하기 위한 기술 개발을 추진하고 있다.

수소혼소용 가스터빈 기술은 안정적 수소 수요처 창출을 통해 수소경제 활성화 로드맵 이행 및 수소 산업의 전주기 생태계 활성화에 이바지할 것으로 전망된다. 또한, 미래기술의 선제적 기술 확보를 통한 복합화력의 연료 다변화 및 청정발전 사회로의 전환을 가속화 할 수 있으며, 해외 의존적인 가스터빈 기술의 국산화를 통해 국내 발전기술의 자립도를 향상할 수 있다. 특히, 급전 순위가 낮은 노후 가스터빈에 적용함으로써 환경 급전 강화를 통해 수명연장을 꾀하여 신규 발전 설비로의 교체시기를 상당 기간 뒤로 연장함으로써 투자비와 운영비를 절감할 수 있는 기술로 주목받을 것이다.

References

1. Minster of Trade, Industry and Energy, “The third energy basic plan (2019~2040)”, Minster of Trade, Industry and Energy, 2019, pp. 24-33. Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/py/brf/motiebriefing/motiebriefing402.do?brf_code_v=402#header.
2. Minster of Trade, Industry and Energy, “Korea hydrogen economy policy 2040”, Minster of Trade, Industry and Energy, 2019, pp. 3-4. Retrieved from https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=161262&file_seq_n=2.
3. ETN Global, “Hydrogen gas turbines – the path towards a zero-carbon gas turbine”, ETN Global, 2020, pp. 2, 10-11. Retrieved from <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/02/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf>.
4. National Assembly Budget Office, “Fine dust control special measures status and improvement tasks”, National Assembly Budget Office, 2016, pp. 70-71. Retrieved from https://www.nabo.go.kr/Sub/04Etc/04_Search.jsp?query=%EB%AF%B8%EC%84%B8%EB%A8%BC%EC%A7%80.
5. N. Kim, “Study on operation method of the electrical power market considering the environmental merit order”, Korea

- Energy Economics Institute, 2017, pp. 3. Retrieved from [http://www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/3DD0BCA0D73E6619492582BB00800431/\\$file/17-01_%EC%88%98%EC%8B%9C_%ED%99%98%EA%B2%BD%EA%B8%89%EC%A0%84%EC%9D%84%20%EA%B3%A0%EB%A0%A4%ED%95%9C%20%EC%A0%84%EB%A0%A5%EC%8B%9C%EC%9E%A5%20%EC%9A%B4%EC%98%81%EB%B0%A9%EC%95%88%20%EC%97%B0%EA%B5%AC.pdf](http://www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/3DD0BCA0D73E6619492582BB00800431/$file/17-01_%EC%88%98%EC%8B%9C_%ED%99%98%EA%B2%BD%EA%B8%89%EC%A0%84%EC%9D%84%20%EA%B3%A0%EB%A0%A4%ED%95%9C%20%EC%A0%84%EB%A0%A5%EC%8B%9C%EC%9E%A5%20%EC%9A%B4%EC%98%81%EB%B0%A9%EC%95%88%20%EC%97%B0%EA%B5%AC.pdf).
6. J. Goldmeer, "Power to gas: hydrogen for power generation-fuel flexible gas turbines as enablers for a low or reduced carbon energy ecosystem(GEA33861)", GE power, 2019, pp. 7-9, 11. Retrieved from https://www.ge.com/content/dam/gepower/global/en_US/documents/fuel-flexibility/GEA33861%20Power%20to%20Gas%20-%20Hydrogen%20for%20Power%20Generation.pdf.
 7. Elna J. K. Nisson, C. Brackmann, A. Abou-Taouk, J. Larfeldt and D. Moell, "Hydrogen addition to flames at gas-turbine relevant conditions(Report2017:391)", Energiforsk, Sweden, 2017, pp. 34. Retrieved from <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/22508/hydrogen-addition-to-flames-energiforskrapport-2017-391.pdf>.
 8. H. Miao, L. Lu, and Z. Huang, "Flammability limits of hydrogen-enriched natural gas", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 11, 2011, pp. 6937-6947, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.126>.
 9. E. S. Cho and S. H. Chung, "Improvement of flame stability and NOx reduction in hydrogen-added ultra lean premixed combustion", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No. 3, 2009, pp. 650-658, doi: <https://dx.doi.org/10.1007/s12206-008-1223-x>.
 10. R. Lieve, "Flexibility upgrades for future energy", KicMPi Project 6-25 Seminar, 2019, pp. 10, 26. Retrieved from https://www.kicmpi.com/sites/default/files/2019-10/pitch_3_-_ansaldo_thomassen.pdf.
 11. "Gas turbine fuel system", Retrieved from <http://gasturbine.tutorial.blogspot.com/2013/06/gas-turbine-fuel-system.html>.
 12. S. Theron, "Major enhancements in FLOWNEX 2015: combustors, importers, and pipes", PADT, 2015. Retrieved from <https://www.padtinc.com/blog/major-enhancements-in-flownex-2015-combustors-importers-and-pipes/>.
 13. Seik Park, "The study for LH gas including syn-fuel compatibility on MHPS gas turbine(Final Report)", KEPCO Research Institute, Daejeon, 2019, pp. 9-10, 41-42.
 14. D. Kim, "Review on the development trend of hydrogen gas turbine combustion technology", J. Korean Soc. Combust., Vol. 24, No. 4, 2019, pp. 1-10, doi: <http://dx.doi.org/10.15231/jksc.2019.24.4.001>.
 15. M. Zajadatz, F. Güthe, E. Freitag, T. Ferreira-Providakis, T. Wind, F. Magni, and J. Goldmeer, "Extended range of fuel capability for GT13E2 AEV burner with liquid and gaseous fuels", Proceeding of ASME Turbo Expo, 2018, pp. GT2018-76374, doi: <https://doi.org/10.1115/GT2018-76374>.
 16. M. Andersson, J. Larfeldt, and A. Larsson, "Co-firing with hydrogen in industrial gas turbines", Swedish Gas Technology Centre, 2013, pp. 25-30. Retrieved from <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC256.pdf>.
 17. J. Larfeldt, "Hydrogen co-firing in Siemens low NOx industrial gas turbines", Proceeding of Power-Gen Europe, Germany, 2017, pp. 1-12. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Hydrogen-Co-Firing-in-Siemens-Low-NOX-Industrial-Larfeldt/37fd8e07212bf1e60f6db535d6e422b11880b816>.
 18. T. Wind, F. Güthe, and K. Syed, "Co-firing of hydrogen and natural gases in lean premixed conventional and reheat burners (Alstom GT26)", Proceeding of ASME Turbo Expo 2014, pp. GT2014-25813, doi: <https://doi.org/10.1115/GT2014-25813>.
 19. Ansaldo Energia, "Time to face our world's Biggest CH2allenge", Ansaldo Energia Product Brochure, 2020, pp. 3-4. Retrieved from <https://www.ansaldoenergia.com/PublishingImages/Idrogeno/Ansaldo-Energia-H2.pdf>.
 20. E. Yang and J. Yim, "Analysis on the background and key contents of Japanese hydrogen basic strategy", World Energy Market Insight, Vol. 18, No. 44, 2018, pp. 14-15. Retrieved from <http://www.keei.re.kr/keei/download/WEMI1844.pdf>.
 21. T. Asai, Y. Akiyama, and 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, pp. 7-17, doi: <https://dx.doi.org/10.5772/66742>.