

운영중 가스터빈 대상 수소혼소 특성 및 운영 안정성 시험 평가

박정극*[†] · 황인우* · 오소빈* · 장혁준* · 한가람* · 최낙정* · 김윤진**

*한국전력공사 전력연구원, **한국중부발전

Experimental Study of the Hydrogen Co-Firing Characteristics on the Gas Turbine Combustor and Operational Stability Assessment

Jungkeuk Park*, Inwoo Hwang*, Sobin Oh*, Hyuckjun Jang*, Karam Han*, Nakjeong Choi* and Yunjin Kim**

*KEPCO Research Institute

**KOMIPO

(Received 9 September 2025, Received in revised form 17 September 2025, Accepted 17 September 2025)

ABSTRACT

Hydrogen is a key fuel for reducing greenhouse gas emissions in the gas turbine sector, but its combustion characteristics differ from natural gas and may impair combustor stability. Power producers are considering its applicability, although assessing co-firing limits remains largely within OEMs. In this study, hydrogen co-firing tests were conducted under atmospheric conditions to evaluate combustion characteristics and stable operating limits. As the hydrogen ratio increased, nitrogen oxide concentrations rose while carbon monoxide decreased, and combustion dynamics exhibited pronounced low-frequency variations. The surface temperature of combustor hot-section components also showed location-dependent behavior.

Key Words : Gas turbine, Hydrogen co-firing, Combustion dynamics pressure, CO, NOx

기 호 설 명

FSR : Fuel split ratio [%]

ΔFSR : Change in FSR [%]

T : Temperature [°C]

\dot{M} : Mass flow rate [kg/s]

HR : Hydrogen ratio [%]

ϕ : Equivalence ratio [-]

TIT : Turbine inlet temperature [°C]

CDP : Combustor dynamic pressure

A : Exhaust gas concentration correction factor [-]

LFD : Low frequency domain [-]

IFD : Intermediate frequency domain [-]

HFD : High frequency domain [-]

1. 서 론

전 세계적인 기후변화 억제 노력에 따라 우리나라에서도 2030 NDC와 2050 탄소중립 시나리오가 발표되는 등 다양한 온실가스 저감 정책이 펼쳐지고 있다. 특히 발전분

야 온실가스 감축 목표가 2030년까지 2018년 대비 44.4%의 배출 저감으로 결정됨에 따라, 석탄화력과 가스복합 화력에 수소 및 암모니아와 같은 저탄소 연료를 적용하는 방안을 많은 발전사들이 추진 중이다. 최근 발표된 11차 전력수급 기본 계획에 따르면, 석탄발전은 17 GW 감축되고, 천연가스 발전 용량은 43.2 GW에서 67.0 GW로 확대될 전망이다. 청정 수소·암모니아 발전은 2030년 15.5 TWh(2.4%)에서 2038년 43.9 TWh(6.2%)로 증가할 것으로 전망된다[1].

두산에너지빌리티 등 가스터빈 제작사들은 수소 혼소용

[†]Corresponding Author, jk-park@kepco.co.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/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연소기를 개발하고 있으며, 발전사들은 운용 중인 가스터빈의 수소혼소율을 상향시키는데 관심을 가지고 있다 [2-6]. 현재 해외에서의 수소혼소 실증 사례는 매우 제한적인데, 미국에서는 제작사와 발전사가 공동으로 Mitsubishi, Siemens, GE 가스터빈에 대해 연소기 변경없는 실증을 수행한 바 있다. 기종별로 혼소율은 20~44% 수준이었으며, 연소 측면에서의 문제는 없는 것으로 홍보되었다 [7-9]. 수소혼소 가스터빈의 운영 안정성은 제작사와 운영사의 관심 항목별로 상이하게 판정될 수 있다. 가스터빈의 수소혼소에 대한 운영 안정성을 판정할 수 있는 특성에는 연소동압과 역화 등을 포함한 연소 안정성, 배기 배출물 성능, 고온부품 수명 특성 등이 포함된다. 다만, 배기 배출물 농도를 제외하면 수소혼소 가능영역을 평가하기 위한 항목별 허용조건을 설비 운영사가 명확하게 파악하기 어렵다.

따라서 가스터빈 수소혼소의 특성을 연소기 관점에서 시험하고, 이를 운영 안정성 측면에서 평가하는 것은 수소 가스터빈의 상용화 및 확대 보급에 매우 중요하다. 본 연구에서는 운영중인 F급 가스터빈의 캔 연소기를 대상으로 수소혼소 특성을 시험적으로 연구하고, 수소혼소 운영 안정성 기준에 대해 논의하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 장치 구성

가스터빈 연소기의 상압 수소-천연가스 시험설비는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 구성되었다. 연소용 공기는 수분 제거 유닛을 포함한 공기 압축 시스템을 통해 공급한다. 도시가스는 배관망으로 공급하며 99.9%의 고순도 수소는 실린더를 통해 공급한다. 시험용 연소기는 국내 S시에 위치한 열병합발전소에서 운전 중인 F급 가스터빈에 탑재된 연소기를 사용하였으며, 주요 부품에는 노즐, 바스켓 및 트랜지션 피스(transition piece, TP) 등이 포함된다. 시험용 연소기 세트를 거치하고, 연소용 공기 공급 경로를 조성하는 시험 리그(test rig)는 실제 가스터빈 운전 조건을 모사할 수 있도록 설계 및 제작되었다. 시험에 사용되는 유체는 크게 공기와 연료로 구분할 수 있으며, 공기 공급 라인 1개와 연료 공급 라인 4개로 구성된다. 연료 공급 라인은 가스터빈 노즐별로의 연료 공급 유량은 물론 노즐별로의 수소 혼소율을 개별적으로 제어할 수 있도록 구성되었다. 공기와 연료의 유량은 모두 코리올리스형 질량 유량계와 유량 제어 밸브의 조합으로 공급량을 제어하였으며, 각각의 온도는 실제 발전소 연소 조건과 동일하도록 전기히터를 이용하여 제어하였다.

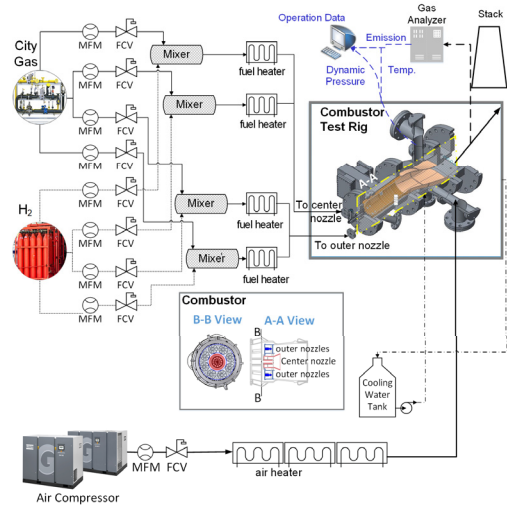


Fig. 1. Conceptual diagram of gas turbine atmosphere test facility[10].

시험 결과의 계측부는 배기가스, 각종 온도 및 연소동압 측정부로 구분된다. 배기가스 성분은 ABB사의 가스분석기를 이용하여 산소(O₂), 이산화탄소(CO₂), 총탄화수소(THC), 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO) 농도를 분석하였다. 고온부품의 건전성 평가를 위해 센터 노즐 팁과 연소기 구성품의 축방향다수 지점에 최소 2개 이상의 열전대(thermocouple)를 부착하여 표면 온도를 측정하였다. 배기가스의 온도 분포는 트랜지션 피스 출구에서 20개의 열전대가 설치된 레이크(rake)를 통해 측정하였다. 연소기 내부의 연소동압은 압전식 압력센서(Meggitt사의 CP103, 감도 200 pC/bar 이상)를 이용하여 측정하였다.

2.2 실험방법 및 조건

F급 가스터빈 연소기의 수소혼소 특성 평가는 연소기 부하와 수소혼소율을 변화시켜 가면서 수행하였다. Table 1에 요약한 바와 같이 가스터빈 정격부하 조건을 기준으로 공기유량(\dot{M}_{air} : 최대 1.9 kg/s)과 연료 유량(\dot{M}_{NG} : 최대 38.4 g/s, \dot{M}_{H_2} : 최대 1.82 g/s)을 산정하였다. 공기 온도와 연료 온도는 각각 420℃, 200℃로 설정하였다. 상압 시험설비의 공기와 연료 유량의 표준편차는 0.9% 이하였다. 혼합기의 연소실 체류 시간은 약 10 msec 수준으로 추산되었으며, 수소혼소에 따른 체류 시간 변화는 1.4% 수준으로 크지 않았다. 센터 노즐과 외곽 노즐 간의 연료 분배 비율(FSR)은 수소혼소율과 무관하게 9.3%를 기준으로 설정하고, 시험 조건에 따라 1% 단위(Δ FSR)로 조정하였다. TIT를 동일하게 유지하면서 메탄에 수소를 0~30%까

Table 1. Summary of test conditions

Parameter	Value
Load (MWth)	1.9
\dot{M}_{air} (kg/s)	max. 1.54
\dot{M}_{NG} (kg/s)	max. 0.0384
\dot{M}_{H_2} (kg/s)	max. 0.00182
FSR (%)	9.3 ± 2
T_{air} (°C)	420
T_{fuel} (°C)	200
HR (%)	0~31.90

Table 2. Approximate NG composition

Component	Concentration (vol.%)
Methane (CH ₄)	93.7059
Ethane (C ₂ H ₆)	4.1515
Propane (C ₃ H ₈)	1.5970
i-Butane (i-C ₄ H ₁₀)	0.2065
n-Butane (n-C ₄ H ₁₀)	0.2315
i-Pentane (i-C ₅ H ₁₂)	0.0078
n-Pentane (n-C ₅ H ₁₂)	0.0023
Nitrogen (N ₂)	0.0975
Carbon Dioxide (CO ₂)	0.0000
Sum	100

지 혼합하는 조건에 대해 계산된 유량값을 도시가스와 수소에 적용하였고, 데이터 분석은 계측된 유량값을 기준으로 수행하였다. 이에 따라 연료 중 수소의 부피비율을 의미하는 HR(Hydrogen Ratio)은 0~31.9%까지 변화되었다.

Table 2는 시험 지역에 공급된 도시가스의 평균 조성을 나타낸 것이다. 메탄은 약 93.7%로 대부분을 차지했으며, 에탄과 프로판이 각각 4.2%와 1.6%가 포함되었다. 불연성 성분인 질소의 농도는 0.1% 이하였고, 이산화탄소는 포함되지 않았다.

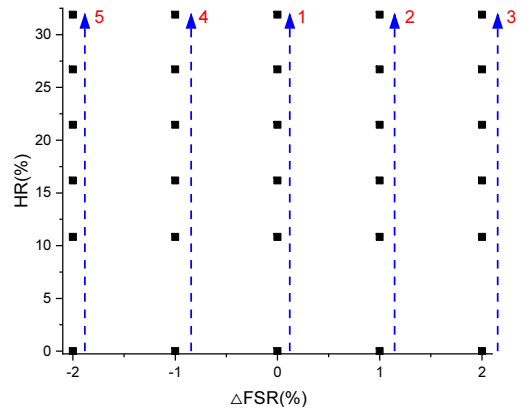
천연가스의 조성을 기반으로 HR 값에 따른 천연가스-수소 혼합 연료의 특성값 변화를 Table 3에 나타내었다. HR 값 증가에 따라 당량비는 감소하고 이때 계산된 TIT의 변화폭은 0.1% 이내로 유지되는 것을 확인하였다.

Fig. 2는 시험 수행 순서를 나타낸 것이다. 검정색 사각형으로 표시된 점들은 시험 조건을 의미하며, 상단의 숫자가 나타내는 순서에 따라 FSR을 설정한 뒤, HR을 0에서

Table 3. NG-H₂ mixture characteristics

HR [%, vol]	Fuel mass fraction[%]		ϕ	TIT ^(a) [%]
	NG	H ₂		
0	100	0	0.422	100.0
10.83	98.6	1.4	0.420	100.0
16.18	97.8	2.2	0.419	100.1
21.46	97.0	3.0	0.418	100.1
26.71	96	4.0	0.417	100.0
31.90	94.9	5.1	0.415	100.0

(a) : normalized value

**Fig. 2.** H₂ Co-firing test procedures.

31.90%까지 변화 시켜가면서 수소혼소 시험을 수행하였다. 시험 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 각 조건별 연료와 공기 공급량 설정값을 입력하고 안정화 된 이후부터, 300초 동안의 평균값을 획득하여 분석하였다.

2.3 수소혼소 운영 안정화 조건

가스터빈의 수소혼소 안정화 조건은 운영 안정성 기준에 따라 달라진다. 실제 가스터빈의 연소 최적화를 하는 튜닝 방법도 효율, 연소 불안정, 배기가스 측면 등 우선순위에 따라 달라지게 된다. 본 시험의 경우 TIT 온도를 유지하는 조건이므로, 효율 문제는 제외하기로 한다. 배기가스의 경우, 일산화탄소나 질소산화물은 국가나 지역에 따른 환경 규제에 따라 제한값이 변경될 수 있다[11,12]. 연소동압의 경우, 각 제작사별로 상이한 기준을 적용하고 있는데, 연소실로 공급되는 정압의 0.5~2%를 연소 불안정성 한계로 제안하는 경우도 있다[13,14].

Howie 등[13]은 단일 노즐 스왈 안정화 가스터빈 모델 연소기를 대상으로 연료-공기 예혼합 정도가 연소동압의

Table 4. Emission limits for gas turbine power plant in Korea[11]

Item	Installed year		
	~ 2014	~ 2019	2020 ~
NO _x ^(a)	40 ^(c) /25	20	10
SO _x ^(a)	20	15	10
Dust ^(b)	10		

(a) : unit : ppmv @ 15% O₂

(b) : unit : mg/Sm³ @ 15% O₂

(c) : 40 for gas turbines installed before July, 2001.

Table 5. Criteria for H₂ stability assessment in this study

Item	Criteria (relative to NG cases)
Emission	10%
CDP ^(a)	avg. 10%
Metal temperature	10%

(a) : varied upon frequency domain(5~20%)

크기에 미치는 영향을 연구하였는데, 연소 불안정의 판정 기준을 $P'_{rms} > 500 Pa$ 또는 $P'_{rms} > 0.5\% \times P_{mean}$ 으로 제시하였다. 또한 Joo 등[14]은 부분 에혼합 수소-메탄 모델 연소기에서 필터뱅크 기반의 연소 불안정 조기 진단 법을 제시하면서 연소 불안정 임계값으로 $2\% \times P_{mean}$ 으로 설정하였다.

실제 가스터빈에서의 연소불안정 판정 기준값은 제작사 별로 다르게 운영된다. 본 연구에서 시험 된 연소기가 탑재된 것과 유사한 기종의 가스터빈 현장 데이터를 분석해 보면, 주요 주파수 대역에서 연소동압 경고값은 정상 운전 대비 약 180~250%의 여유를 가지는 것으로 나타났다. 여러 주파수 대역에서 여유폭이 가장 큰 주파수 대역은 100~500Hz 대역이었다. 국내에서 가스터빈 복합화력의 오염물질의 배출 기준은 Table 4에 요약된 바와 같이 발전소가 건설된 시기에 따라 다르다[11]. 질소산화물의 경우 설치 시점이 2001년 7월 이전인 경우에는 40 ppm, 2019년까지는 20 ppm, 그 이후에는 10 ppm으로 배출기준이 강화되고 있다. 또한 수도권, 중부권, 남부권, 동남권의 대기관리권역 내 발전소는 배출 허용 기준이 달라질 수도 있다[12].

종합적으로 수소혼소의 운영 안정성을 평가함에 있어 가스터빈 기종, 시험 압력과 시험자의 의도에 따라 연소 불안정을 평가하는 기준이 크게 달라질 수 밖에 없다.

따라서 본 연구에서는 연소 안정화 조건을 Table 5와 같이 천연가스 대비 10%로 설정하되, 연소동압에 대해서 주

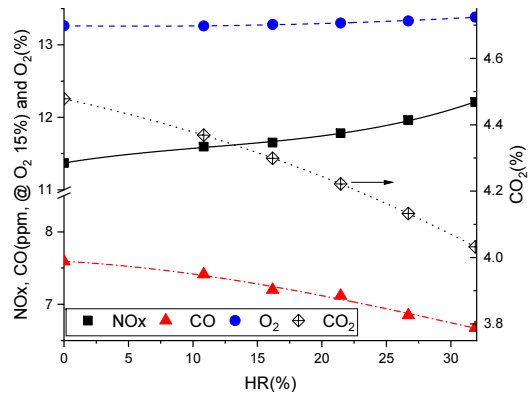


Fig. 3. NO_x, CO, O₂ and CO₂ emission changes with different HR values.

파수 대역별로는 운영 마진과 정상값 대비 여유율을 감안하여 5~20%의 범위를 두는 것으로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수소혼소 특성 시험

3.1.1 배기가스 특성

시험 대상 F급 가스터빈 연소기에 천연가스와 수소를 혼합한 연료를 적용하고, 배기가스 농도, 연소동압 및 고온부품의 온도변화 특성을 분석하였다. Fig. 3은 수소혼소율 변화에 따른 산소, 이산화탄소, 질소산화물, 일산화탄소의 배출 특성을 나타낸 것이다. 대상 연소기는 수소혼소에 따라 이산화탄소와 일산화탄소의 배출 농도는 감소하고, 질소산화물의 배출 농도는 증가하는 경향을 보였다. 수소혼소율 31.9% 조건에 대해 이산화탄소와 일산화탄소 농도는 각각 9.96%와 12.07%가 감소하였고, 질소산화물과 산소 농도는 각각 7.4%와 0.9%가 증가하였다.

Kim 등[15]은 가스터빈의 수소 혼소 비율을 증가시킬수록 배기가스 내의 수분과 산소의 농도가 증가하기 때문에, 현재 대기환경보전법 시행규칙[13]에 따른 배기가스 분석 기법을 적용할 경우, 질소산화물의 농도가 과대 평가되며, 그 정도는 식 (1)에서 표현된 인자 A에 의해 정량화될 수 있다고 보고하였다. 가스터빈 복합화력의 배기가스는 수분을 제거한 “건조(dry)” 상태에서 분석되고, 이를 15%의 표준산소농도를 기준으로 변환하므로, 배기가스 내 수분과 산소 농도가 증가하는만큼 농도 분석 결과가 달라지게 된다.

$$A = \frac{0.059}{[0.209(1 - X_{H_2O}) - X_{O_2}]} \quad (1)$$

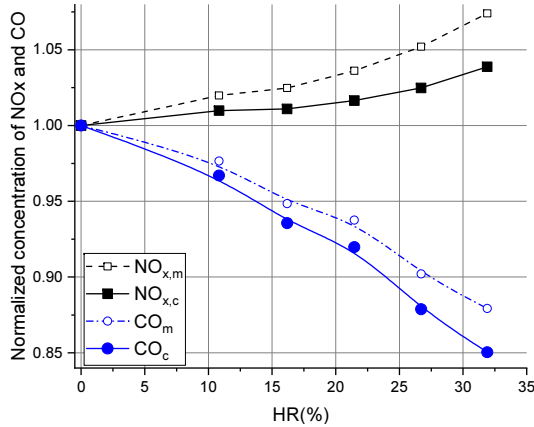


Fig. 4. Normalized NOx and CO concentration comparison.

$$X_{NO_{x,c}} = A \times X_{NO_{x,m}} \quad (2)$$

$$X_{CO_c} = A \times X_{CO_m} \quad (3)$$

$$X_{CO_{2,c}} = X_{CO_{2,m}} \times (1 - \Delta X_{H_2O} - \Delta X_{O_2}) \quad (4)$$

A는 질소산화물 농도뿐만 아니라 건조 상태에서 계측하고, O₂ 15%를 기준으로 보정하는 일산화탄소의 농도의 과대평가에도 동일하게 적용될 수 있다. 따라서 질소산화물과 일산화탄소의 보정 농도는 식 (2), (3)과 같이 표현할 수 있다.

Fig. 4는 인자 A에 의해 과대평가 되는 질소산화물과 일산화탄소 농도를 보정한 그래프이다. 나타난 바와 같이 보정된 질소산화물 농도(NO_{x,c})는 계측된 농도(NO_{x,m})에 비해 낮게 산정되어 천연가스 100%인 경우 대비 수소혼소에 따른 질소산화물 농도의 증가폭은 계측값 기준의 7.4%에서 3.9% 정도로 감소하는 것으로 평가된다. 반면 보정된 일산화탄소 농도(CO_c)는 천연가스 100% 대비 감소 효과는 최대 15.0%까지 확대되는 것으로 평가되었다. 일산화탄소 농도는 가스터빈의 최저부하를 결정하는 요소로서, 수소혼소에 따라 유연연전 특성이 강화될 수 있음을 전망할 수 있다. 수소혼소 가스터빈의 환경적 편익은 온실가스 감축 효과를 중심으로 평가되고 있지만, 일산화탄소 배출 저감에 대한 장점을 편익 항목에 포함시키는 것이 필요하다.

한편 이산화탄소 농도는 배기가스 중 수분과 산소 농도 증가에 따른 영향을 받기 때문에, 이산화탄소 농도의 보정(X_{CO_{2,c}})은 식 (4)와 같이 표현될 수 있다. Fig. 5는 수소혼

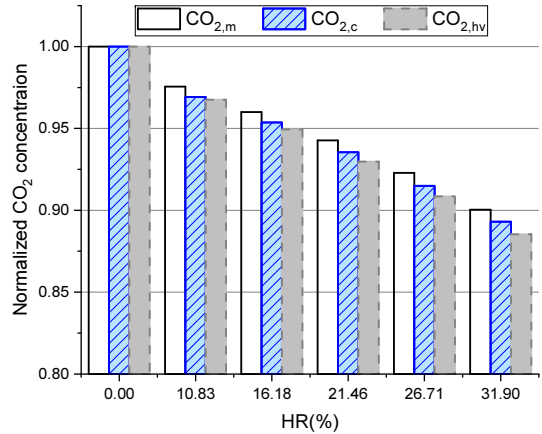


Fig. 5. Normalized CO₂ concentration comparison.

소에 따른 CO₂ 농도 감축 정도를 측정값(X_{CO_{2,m}}), 보정값(X_{CO_{2,c}}), 발열량 기준 계산값(X_{CO_{2,hv}}) 기준으로 나타낸 것이다. 측정값 대비 보정값과 발열량 기준 온실가스 감축 효과가 높게 나타났다. 수소혼소를 31.9%를 기준으로 이룬 감축률은 11.5%, 측정 감축률과 보정 감축률은 각각 10.0%와 10.7%로 나타났다. 천연가스 100% 대비 수소혼소 31.9%의 경우, 수분 함량 증가폭은 약 0.66% 수준으로 크지 않지만, 수소혼소율에 따른 온실가스 배출 감소 효과를 배기가스 측정방법으로만 분석하는 것은 오류가 있을 수 있음을 보여 준다.

3.1.2 연소동압

가스터빈 연소 시험 중 동압은 최대 4900 Hz까지 모니터링 하되, Table 6에 나타난 4개의 영역대로 구분하여 분석하였다.

Fig. 6은 천연가스 100% 연소 시험 시, FSR의 변경에 따른 연소동압의 변화율을 나타낸 것이다. IFD1 대역의 연소동압 크기는 센터 노즐로의 연료 비율에 따라 가장 크게 영향을 받으며, IFD2와 HFD 대역의 연소동압이 ΔFSR이 음수인 구간에서 각각 약 3%, 10% 수준으로 감소하는 것으로 나타났다. Li 등[16]은 센터 노즐의 파일럿 화염을 통해 연소 불안정성을 개선한 연구를 수행하였는데, 파일럿 화염의 당량비 조정에 따라 연소 불안정성이 영향을 받을 수 있음을 보고한 바 있다. 즉, 센터 노즐의 당량비 증가는 상대적으로 상류에 위치한 파일럿 화염과 하류에 위치한 화염간의 탈동조화를 유발할 수 있기 때문에 전반적으로 연소동압이 감소할 수 있다. 이는 Park 등[10]의 캔 연소기 시험 결과와도 유사하다. 다만 연소동압과 ΔFSR간의 민감도는 다소 차이를 보일 수 있는데, 이는 본 연구에

Table 6. Frequency domains for combustion dynamic pressure analysis

Domain	LFD	IFD1	IFD2	HFD
Freq.(Hz)	5~55	65~115	125~500	500~4900

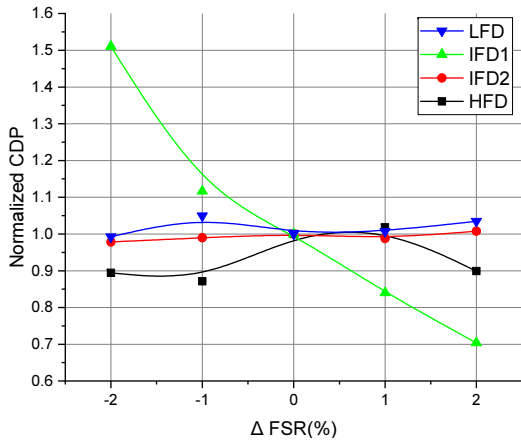


Fig. 6. Dynamic pressure variation with Δ FSR for 100% NG combustion.

서의 FSR 기준값이 기존 연구 대비 약 7% 낮기 때문으로 보인다.

Fig. 7은 대상 연소기에 대해 수소혼소율에 따른 IFD1과 IFD2 대역의 연소동압과 최대 연소동압을 나타낸 것이다. 앞서 FSR이 증가한 경우와 유사하게 수소혼소율의 증가에 따라 IFD1의 크기가 감소하였으며, 반대로 IFD2 대역의 연소동압의 크기는 증가하였다. 이에 따라 최대 연소동압은 HR 증가에 따라 감소하다가 혼소율 15% 이상부터는 소폭 증가하는 경향을 보였다. 선행연구[10]에서 논의된 바와 같이 최대 연소동압 측면에서 수소혼소 안정화 범위는 30% 이상이 될 수 있다. 반면 가스터빈 제작사들은 연소 불안정을 각 주파수 대역별 변화에 따라 정의하기 때문에, 대상 연소기의 수소 혼소율을 제한하는 항목은 IFD2 대역의 연소동압의 크기가 된다. IFD2 대역의 연소동압은 수소혼소율 31.9%에서 천연가스 대비 56%가 증가하는 값을 나타내었다. 연소기를 변경하지 않는 조건에서 이를 회피하는 방법에는 연소튜닝을 통해 혼소율에 따른 FSR을 최적화하는 것이 포함될 수 있다.

Fig. 8은 수소혼소율별로 FSR을 조절했을 때, IFD2 대역의 연소동압의 변화를 나타낸 것이다. FSR을 증가하는 경우 수소혼소율이 증가하는 경우에도 IFD2의 최적화가 가능함을 알 수 있다.

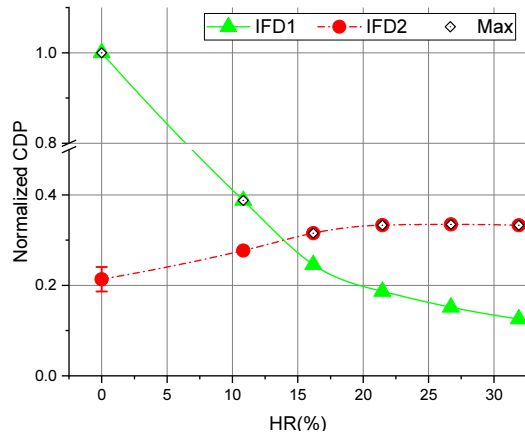


Fig. 7. Changes of dynamic pressure in IFD1/IFD2 band and maximum value with different HR values.

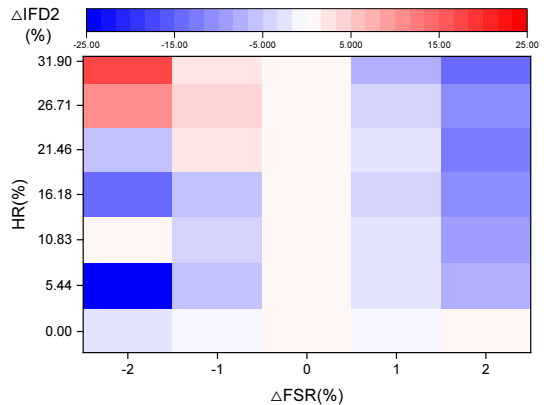


Fig. 8. Heatmap of Δ CDP in IFD2 with respect to change in FSR.

3.1.3 주요부 금속 표면 온도

연소기를 구성하는 고온부품의 건전성은 연소동압과 배기가스 항목만큼 중요한 지표이다. 본 연구에서는 연소기 노즐 팁(B)과 연소기 바스켓 주요 지점(C, D, E, F)의 표면에 온도 센서를 설치하여 측정하였다. 노즐 팁의 온도는 센터 노즐의 건전성을 판단하는 지표가 되는 동시에 화염의 역화가능성을 평가하는 데도 활용할 수 있다. Fig. 9에서 나타난 바와 같이 노즐 팁(B)에서의 온도 증가 비율은 약 2.5% 수준으로 높지 않게 나타났다. 바스켓 부분에서는 C, D, E 지점 대비 F 지점에서의 온도 증가폭이 15% 수준으로 두드러졌다. 고온부품의 건전성 관련으로 500°C 전후의 온도는 영향성이 크지 않지만, 안정성 평가 측면에서는 유의해야 할 부분에 해당한다. 연소기 내 화염의 구조 측면에서는 파일럿 화염보다 외곽 노즐에 형성되는 화

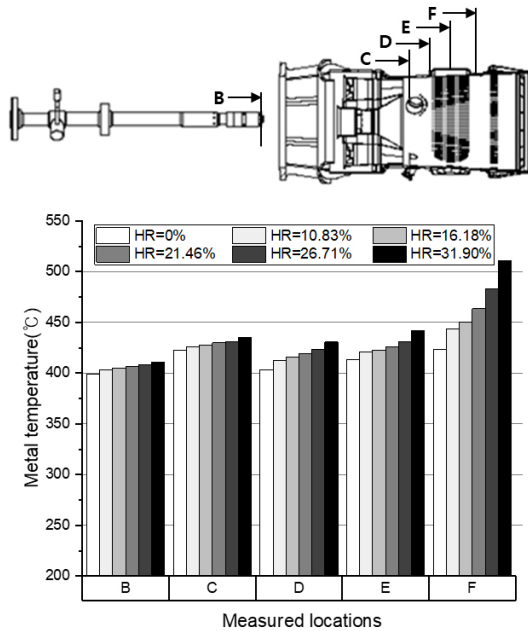


Fig. 9. Combustor metal temperature changes with different HR values.

염 하류 부분에 대한 수소혼소 영향성이 큰 것으로 판단된다.

4. 결론

국내에서 운영중인 F급 가스터빈의 연소기를 대상으로 천연가스-수소 혼합 연료에 대한 연소 특성을 실험적으로 분석하였다. 이미 보유하고 있는 가스터빈을 수소혼소로 활용하는 것은 신규 설비를 개발하는 것만큼 비용 경제성 측면에서 중요하다고 볼 수 있다. 이를 위해 실규모 연소기를 대상으로 상압 환경에서 수소혼소 특성 시험을 수행되었으며, 분석 항목으로는 배기가스 성분, 연소동압, 고온부품 온도 등이 있었다. 수소혼소에 따른 연소 안정성을 평가하는 부분은 지역에 따른 기준, 제작사의 기준 등에 따라 상이할 것이다. 본 연구에서는 천연가스 100%를 베이스라인으로 하고 주요 지표의 변동폭을 10%로 설정하고 수소혼소 안정성에 대해 논의하였다.

수소혼소에 따라 이산화탄소와 일산화탄소의 농도는 저감되었고, 질소산화물의 배출 농도는 증가하였다. 다만, 국내외에서 문제 제기가 되는 바와 같이 수소 연료 적용에 따라 기존의 배기가스 측정방식을 개선할 경우, 질소산화물의 증가는 상당히 상쇄되고, 일산화탄소 배출의 감소는 더욱 두드러지는 것으로 나타났다. 종합해 보면 수소 혼소율 31.9% 일 때, 질소산화물의 배출 농도는 천연가스

100% 시험과 비교하여 변화폭이 10% 미만으로 유지되었기 때문에, 대상 연소기의 배출가스 측면에서 수소혼소 허용범위는 31.9% 이상으로 판단할 수 있다.

수소혼소율 증가에 따라 연소동압의 최대값은 감소하였지만, 대역별로 분석해 보면 증가와 감소가 혼재하고 있었으며, 특히 IFD2 대역의 연소동압 증가가 두드러지고, 이로 인해 수소혼소 가능 범위가 제한되는 것으로 나타났다. 반면 FSR이 증가하는 경우, IFD2 대역의 연소동압이 일부 감소하는 경향이 있으므로, 연소튜닝 과정을 통해 수소혼소에 따른 IFD2 대역의 연소동압 증가를 일부 상쇄할 수 있는 것으로 예상된다.

고온부품의 온도 측면에서는 센터 노즐 영역에서 형성되는 파일럿 화염보다 하류쪽에서 외곽 노즐에 의해 형성되는 화염에 의한 영향성이 두드러지는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 실제 운영중인 가스터빈의 수소혼소 특성을 실규모 캔 연소기의 상압 연소 시험을 통해 분석하고 운영 안정성을 평가하였다. 운영중 가스터빈은 수소혼소 특성이 여러 평가항목에 대해 기대보다 안정적인 것으로 나타났으며, 연소튜닝을 통해 연소 안정성, 배기 배출물 성능, 고온부품 수명 등의 최적화가 가능한 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. RS-2023-00254668).

References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Republic of Korea, The 11th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand (2024-2038), 2025.
- [2] D.S. Kim, Review on the Development Trend of Hydrogen Gas Turbine Combustion Technology, J. Korean Soc. Combust., 24(4) (2019) 1-10.
- [3] H. Kim, U. Jin, Y. Go, M. Choi, I. Gu, M. Baek, K.T. Kim, D. Shin, A Review of Carbon Neutral Gas Turbine Combustion Technology, J. Korean Soc. Combust., 27(2) (2022) 14-38.
- [4] J. Hwang, E.S. Cho, M.K. Kim, W.J. Lee, B. Shershnyov, Y. Shin, A Study on the Hydrogen Combustor with Swirl Nozzles, J. Korean Soc. Combust., 27(4) (2022) 11-19.
- [5] Y. Shin, C. Choi, H. Jeong, S. Jo, E.S. Cho, Study on

- Combustion Characteristics of Multi-tube H₂ Nozzles, *J. Korean Soc. Combust.*, 28(2) (2023) 57-66.
- [6] S. Kim, H. Lee, Trends in Research and Development of Combustor Applying the Principle of Micromix, *J. Korean Soc. Combust.*, 29(1) (2024) 17-32.
- [7] R.C. Steele, T.D. Martz, A. Ettlinger, T. Zandes, M.J. Alexander, B.K. Hockman, J. Goldmeer, Hydrogen Co-Firing Demonstration at New York Power Authority Brentwood Site: GE LM6000 Gas Turbine, *ASME Turbo Expo, 2023*, GT203-101283.
- [8] J. Harper, S. Cloyd, T. Pigon, B. Thomas, J. Wilson, E. Johnson, D.R. Noble, Hydrogen Co-Firing Demonstration at Georgia Power's Plant McDonough: M501G Gas Turbine, *ASME Turbo Expo, 2023*, GT2023-102660.
- [9] T. Pigon, S. Cloyd, C. Springer, J. Boggs, T. Shiraiwa, S. Yamazaki, Best Practices From Hydrogen Fuel System Retrofit, *ASME Turbo Expo, 2023*, GT2023-101368.
- [10] J. Park, J. Shin, S. Park, S. Lee, N. Choi, The Effect of Heterogeneous Natural Gas-Hydrogen Input Into F-Class Gas Turbine Combustor As a Combustion Optimization Method, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 147(3) (2014) 0310917.
- [11] Republic of Korea, Ministry of Environment, Enforcement Rule of the Clean Air Conservation Act [대기환경보전법 시행규칙, 기체연료 사용시설 중 그 밖의 발전시설 중 발전용 내연기관(가스터빈 포함) 기준], Attached Table 8: 'Permissible Emission Standards for Air Pollutants, Ordinance No. 1176, effective Sept. 1, 2025. National Law Information Center, accessed Sept. 6, 2025.
- [12] Republic of Korea, Special Act on the Improvement of Air Quality in Air Control Zones, Act No. 16305, Apr. 2, 2019 (in force Apr. 3, 2020), as amended by Act No. 19659, Aug. 16, 2023. National Law Information Center, accessed Sept. 6, 2025.
- [13] A. Howie, D. Doleiden, S. Peluso, J. O'Connor, The Effect of the Degree of Premixedness on Self-Excited Combustion Instability, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 143(3) (2021) 031011.
- [14] S. Joo, J. Choi, N. Kim, M.C. Lee, A Novel Diagnostic Method Based on Filter Bank Theory for Fast and Accurate Detection of Thermoacoustic Instability, *Sci. Rep.* 11 (2021) 3043.
- [15] D. Kim, M.K. Kim, Review on Reporting Method of NO_x for a Hydrogen Turbine, *J. Korean Soc. Combust.*, 28(3) (2023) 28-35.
- [16] J. Li, H. Kwon, D. Seksinsky, D. Doleiden, J. O'Connor, Y. Xuan, M. Akiki, J. Blust, Describing the Mechanism of Instability Suppression Using a Central Pilot Flame with Coupled Experiments and Simulations, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 144(1) (2022) 011015.

저자정보



박정극

박정극은 한국전력공사 전력연구원 청정수소발전시스템 팀장이며, 관심분야는 수소, 암모니아 가스터빈 연소 최적화와 실증기술이다.



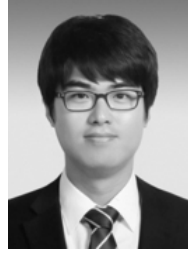
황인우

황인우는 한국전력공사 전력연구원 청정수소발전시스템 연구원이며, 관심분야는 수소, 암모니아 가스터빈 연소실험이다.



오소빈

오소빈은 한국전력공사 전력연구원 청정수소발전시스템 연구원이며, 관심분야는 수소, 암모니아 가스터빈 연소실험이다.



최낙정

최낙정은 한국전력공사 전력연구원 청정수소발전시스템 선임연구원이며, 관심분야는 난류 연소 해석, 연소 불안정이다.



장혁준

장혁준은 한국전력공사 전력연구원 청정수소발전시스템 선임연구원이며, 관심분야는 수소, 암모니아 가스터빈 연소실험이다.



한가람

한가람은 한국전력공사 전력연구원 청정수소발전시스템 선임연구원이며, 관심분야는 수소, 암모니아 가스터빈 연소실험 및 전산해석이다.



김윤진

김윤진은 한국중부발전 KOMIPO 기술연구원 차장이며, 관심분야는 수소, 암모니아 가스터빈 연소 최적화와 실증기술이다.