

수소첨가 천연가스 희박예혼합 연소에 대한 수치해석 연구

신영준* · 조은성*†

*두산중공업 GT연소기개발팀

Numerical Study on H₂ Enriched NG Lean Premixed Combustion

Youngjun Shin* and Eun-Seong Cho*†

*Doosan Heavy Industries and Constructions, GT Combustor Development Team

(Received 6 January 2021, Received in revised form 2 February 2021, Accepted 17 March 2021)

ABSTRACT

Hydrogen enriched LNG flame is tested to understand hydrogen effect on the flame such as temperature, flame speed, emissions (NO_x, CO), and extinction at lean premixed ($\phi=0.4\sim 0.6$) various pressure ($p=1\sim 25$ bar) conditions using CHEMKIN-Pro with GRI 3.0 detailed chemistry. Hydrogen flame temperature is much higher than that of LNG, which may affect high NO_x emission production. The flame speed increases with the addition of H₂, so a design speed change should be considered to prevent flashback at the nozzle. The addition of H₂ reduces CO emissions and increases NO_x emissions, but can be overcome with a lower equivalent ratio due to the increased flame stabilization due to the addition of H₂. Extinction stretch rate gradually increases with hydrogen addition which shows that enriched hydrogen LNG premixed flame could be sustainable in high turbulent condition which means more stable than LNG itself flame. Even though in 100% H₂ operating condition, gas turbine operating condition shows similar combustion air and exit flue gas flow rate with LNG which means the compressor and turbine may not need major modification.

Key Words : Hydrogen, Gas turbine, Lean premixed combustion, Flame speed, NO_x, Extinction stretch rate

기 호 설 명

LHV : Lower Heating Value (MJ/kg)

MW : Molecular Weight (g/mol)

TIT : Turbine Inlet Temperature (°C)

 Φ : Equivalence Ratio (-)

AFT : Adiabatic Flame Temp. (°C)

1. 서 론

지구온난화가 최근 눈에 띄게 진행되면서 환경오염물질 배출 개선을 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 이에 따라, 기존의 화석연료 대신 태양광, 풍력 등 신재생에너지 사용에 대해 전 세계적으로 주목받고 있다. 화석연료 사용량의 대다수를 차지하는 발전시장에서는, 기존 석탄

연료를 대신하는 가스 복합화력의 요구가 지속적으로 늘어나고 있다. 이러한 복합화력의 경우, 석탄 화력에 비하여 CO₂ 배출량을 줄일 수 있으나, 국내외적으로 요청되는 Net Zero를 위해서는 CO₂ free 연료인 수소가스의 사용이 필요하다고 할 수 있다. 국가 수소 경제 Roadmap에 따라 수소의 생산, 이동, 저장, 활용 등 전주기의 수소가스 사용 증대를 국가사업으로 진행하고 있으며, 활용 부분에서 현재까지는 모바일용 수소자동차, 드론 등과 더불어 발전용으로 연료전지가 주로 언급되고 있다. 그러나 수소 활용을 기존의 부생가스뿐만 아니라 한정하지 않고 연료 개질, 신재생에너지를 이용한 P2G(Power to Gas) 방식으로서의 Green 수소 생산 등 대량의 수소 생산을 통해서 수소 가격의 저감을

†Corresponding Author, eunseong.cho@doosan.com

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.

얼어야만 경제성이 확보되기 때문에, 대규모 활용처로서 수소 가스터빈의 필요성이 점차 주목을 받고 있다. 기존 가스터빈 OEM사인 GE, SIEMENS, MHPS[1,2] 등의 해외 선진사들도 자체 가스터빈 모델을 발전시켜 수소 혼소를 통한 가스터빈 실증에 대해 하나둘씩 실적을 보유하고 있으며, 2030년을 기준으로 수소 전소 가스터빈의 개발을 목표로 진행하고 있다. 국내의 경우 2020년 산업부 지원을 통해 “수소 혼소/전소 가스터빈 연소기 개발”에 대한 에너지기술평가원 과제가 착수되었으며, 이를 계기로 수소 가스터빈의 개발을 시작하여 해외 선진사와 대등한 기술을 얻기 위해 노력하고 있다.

수소가스터빈연소기 개발을 위한 주요 고려해야 할 사항은 대표적으로 다음과 같다. 기존의 메탄(CH₄)을 주성분으로 하는 LNG 연료와 비교하면 수소(H₂)는 단위 부피당 발열량이 낮아 대용량의 가스 운송 및 연소실 부하가 커지는 특징이 있다. 특히, 현재 대부분의 가스터빈 연소기는 낮은 NO_x 발생량을 목표로 하므로 예혼합(Premix) 형식의 연소를 적용하고 있는데, 수소의 경우 예혼합화염의 특징인 화염전파속도가 LNG 연료보다 대략 8배 가까이 높기 때문에 화염전파에 의한 역화발생 위험성이 높아 이에 따른 flash back 방지를 위한 연소기 설계 최적화가 필요하다. 또한, 동일 당량비에서 단일 화염 온도가 높아 가스연료의 주 NO_x 발생원인 Thermal NO_x의 과다 발생 가능성이 있다[3,4]. 추가적으로, 빠른 화염속도에 따라 고주파 진동이 증가하여 연소 진동이 발생하기 때문에, 수소가스터빈 운전 시에 진동을 회피하는 운전조건을 optimization 하는 기술이 필요하다.

본 연구에서는, 수소가스터빈 개발을 위한 기초 연구로서 기존의 LNG에 수소 첨가량이 증가할수록 나타나는 특성을 수치 해석적 연구를 통하여 비교하여 수소 가스터빈 개발의 기초자료로 제시하려고 한다.

2. 사용 연료 특성 및 수치해석 기법

2.1 사용 연료 특성

본 연구에 사용된 LNG 성분은 Table 1과 같이 주성분인 메탄(CH₄)이 89.5%의 부피를, 에탄(C₂H₆), 프로판(C₃H₈)이 각각 8.8%, 1.7% 차지하고 있다.

Table 2는 수소 및 각 연료 성분의 발열량, 밀도 등의 연료특성을 나타내었다. LNG의 저위발열량(LHV, Lower Heating Value)은 단위 질량당 49.3 MJ/kg, 단위 부피당 39.08 MJ/Nm³의 값을 가지고 있으며, 수소는 상대적으로 낮은 밀도로 단위 질량당 발열량은 2.43배 높지만, 단위 부피당의 발열량은 0.276 배의 값을 가지고 있다. 이에, 동일

Table 1. LNG composition of test fuel

LNG	Fuel composition		
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
Gas			
Vol. (%)	89.5	8.8	1.7

Table 2. Gas characteristics of test fuels

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	LNG	Unit
LHV	120.1	49.9	47.2	46.1	49.30	MJ/kg
	10.8	35.7	63.4	90.8	39.08	MJ/Nm ³
MW	2.02	16.04	30.07	44.09	17.75	g/mol
Density	0.090	0.716	1.342	1.968	0.793	kg/Nm ³

Table 3. Gas composition of test fuels for hydrogen addition

	Fuel composition (Vol. %)		
	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
0	89.50	8.80	1.70
10	80.55	7.92	1.53
20	71.60	7.04	1.36
30	62.65	6.16	1.19
40	53.70	5.28	1.02
50	44.75	4.40	0.85
60	35.80	3.52	0.68
70	26.85	2.64	0.51
80	17.90	1.76	0.34
90	8.95	0.88	0.17
100	0.00	0.00	0.00

발열량을 내기 위해서는 LNG에 비해 3.6배 이상의 부피 연료가 필요하다는 점을 연소기 설계 시 고려하여야 한다.

Table 3의 수소 부피분율 증가에 따른 연료의 성분표를 수치해석의 Boundary Condition으로 사용하였다. 여기서 제시하는 수소 첨가량(혼소량)은 부피비(Vol. %)로서, 질량비로 나타낼 경우 50% 부피비의 혼소의 경우 10% 정도 질량비율이 된다.

2.2 수치해석 기법

본 연구에 사용된 계산 프로그램은 ANSYS 계열의 CHEMKIN-Prof[5]를 사용하였으며, 사용 Chemistry는 C3 계열까지 계산이 가능한 GRI-3.0 Mechanism[6]을 사용하였다. 단일 화염 온도(Adiabatic Flame Temperature)를

계산하기 위해서, CHEMKIN-Pro 내의 Equilibrium 코드를 사용하였으며, 다양한 압력, 당량비 조건에서의 단열 화염 온도를 비교하였다. 예혼합화염의 주요 특성인 Flame speed를 계산하기 위한 PREMIX 코드를 사용하여 Laminar Burning Velocity를 계산하였다. 또한, 화염의 소염 계산을 위하여 대향류(Opposed Flow)를 모사한 OPPDIF 코드를 이용하여 소염 신장률을 계산하여 수소 첨가에 따른 화염특성을 예측하였다.

계산조건은 가스터빈 운전 온도조건인(470°C)에서 상압에서 고압까지(1~25 bar) 압력에 따른 특성을 확인하였으며, Lean Premix 조건의 당량비(ϕ , Equivalence ratio)를 0.4~0.6까지 변화시켜 가면서 각각의 영향들을 확인하여 보았다.

3. 계산 결과

3.1 화염 온도(Adiabatic Flame Temp.)

Fig. 1은 다양한 당량비($\phi=0.4\sim0.6$), 압력($p=1\sim25$ bar) 조건에서의 LNG와 수소 연소 시의 단열 화염 온도를 나타낸 것으로, 상대적으로 화염 온도가 낮은 lean premixed 조건에서도 수소 화염과 LNG 화염은 서로 다른 특징을 나타내고 있다.

화염 온도는 모든 연료에서 당량비 증가에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 보이고, 압력변동에 대한 화염 온도 변동은 LNG 화염의 경우 거의 영향을 보이지 않고 있으며, 수소 화염의 경우 조금의 변동(variation)이 보인다.

수소 화염의 경우 LNG 화염에 비해 동일 당량비에서 100°C 이상 높은 화염 온도를 보이며, 따라서 수소 첨가에 따라 화염 온도가 상승할 것으로 보여 Thermal NOx 발생에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

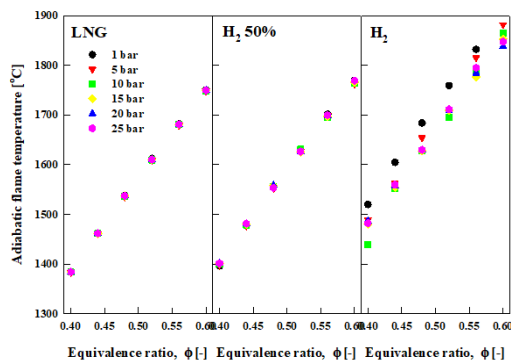


Fig. 1. Adiabatic flame temperature for various pressure with equivalence ratio.

3.2 화염 전파 속도(Flame Speed)

Fig. 2는 동일 조건에서 화염전파속도를 나타낸 것으로 lean premix 조건에서 당량비 증가에 따라 화염속도는 선형적으로 증가하고, 화염 확산 식과 실험에서 검증되었다 시피 압력이 증가할수록 화염속도는 낮아지며 당량비에 따른 상승 기울기는 작아지는 것을 볼 수 있다.

수소 화염의 경우 LNG 화염보다 낮은 압력조건인 경우 8배 이상의 높은 화염전파 속도를 보이고, 고압으로 갈수록 비율은 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 화염전파속도의 큰 차이에 따라, 수소 첨가에 따른 연소기 개발을 위해서는 flash back 방지가 제일 중요한 조건으로 설계 시 주의가 필요하다.

Fig. 3은 수소 첨가량 증가에 따른 화염전파속도 trends를 LNG를 기준 1로 하여 상대적인 비율로 나타낸 것이다. 수소 비율이 증가할수록 화염전파속도는 점차 증가하는 경향을 보이고 70~80% 이상부터 그 증가율이 exponential 하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 그 증가율은 저압에서 높은 증가율이 보이고 고압으로 갈수록 그 증가율은 낮

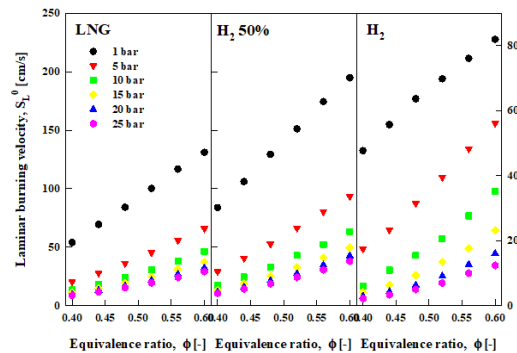


Fig. 2. Laminar burning velocity for various pressure with equivalence ratio.

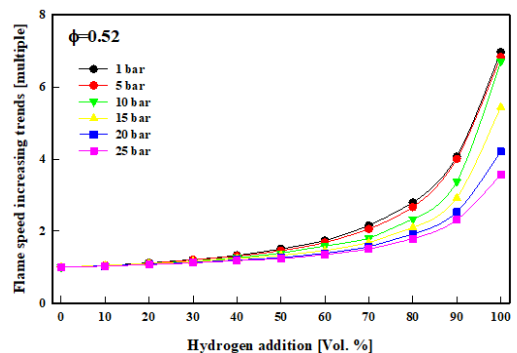


Fig. 3. Flame speed trends with hydrogen addition for various pressure conditions.

아지는 것을 보여주고 있어 가스터빈 연소기와 같은 고압 설비에서 수소 연료전환에 따른 flash back 효과가 상대적으로 낮아질 것이라는 예상을 할 수 있다.

3.3 배기가스(Emissions)

가스터빈 연소기에서는 환경 유해 물질 저감을 위하여 화염 온도가 높은 확산(Diffusion) 연소보다는 예혼합(Premixed) 연소를 선호하며, 최대한 Emission을 줄이기 위해서 연소 안정성을 유지하면서 최대한 연공비를 낮춘 Ultra Lean Premixed 방법을 사용한다. 본 연구에서는 Lean Premixed 조건에서 수소 혼소율 증가에 따른 배기배출물(CO, NO_x) 특성을 15 bar 조건에서 살펴보았다. 운전 압력이 증가함에 따라 NO_x 발생은 증가하는 경향을 보인다[7,8].

3.3.1 CO Emission

Fig. 4는 다양한 수소 혼소율에서 당량비 변화에 따른 CO 발생을 나타내고 있다. 당량비 증가에 따라 모든 수소 혼소율 조건에서 CO emission이 점차 증가하는 특성을 나타내고, 순 H₂ 연소의 경우 연료 중 Carbon(C) 성분이 없어 CO는 발생하지 않는다.

수소 혼소율 증가에 따른 CO 발생량은, 일정 비율까지는 큰 변화를 보이지 않으나 60% 이상부터는 급격하게 줄어들며, 높은 당량비 조건에서 더욱 두드러지게 나타난다.

CO 발생량은 residence time 15ms 조건의 값을 사용하였으나 연소영역이 화염 초기에서 대부분 끝나므로 빠른 production 및 CO₂로의 전환이 발생하여 residence time에 대한 영향은 크게 나타나지 않는다.

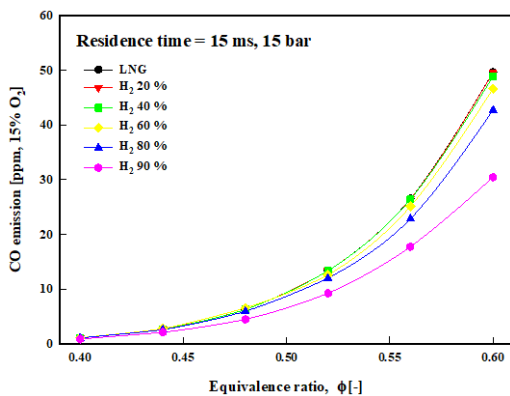


Fig. 4. CO emission trends with equivalence ratio for various hydrogen addition.

3.3.2 NO_x Emission

Fig. 5는 다양한 수소 혼소율에서 당량비 변화에 따른 NO_x 발생 특성을 나타내고 있다. 당량비 증가에 따라 모든 수소 혼소율 조건에서 NO_x emission이 점차 증가하며 특히 60% 이상부터는 증가율이 상대적으로 높게 나타나고 있다. 특히, 높은 당량비 조건에서 그 차이가 크게 보인다. 100% 수소 전소 연소를 목적으로 할 경우 NO_x 발생에 관해서 많은 연구가 필요하리라 생각된다.

NO_x 발생량은 Thermal NO_x의 경우 residence time의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 보이기 때문에, 본 연구에서는 동일 residence time 15ms 조건에서의 NO_x 값을 비교하였다. 실제 연소기 설계에서 liner/transition piece 설계 시의 residence time 설정을 통해 NO_x 발생량을 조절할 수 있으며, 수소 화염의 경우 상대적으로 LNG 화염보다는 화염이 짧으므로 신규 liner 설계 시 CO 발생 특성을 고려하여 residence time을 조절한다면 NO_x 저감효과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

수소 첨가량의 증가에 따른 NO_x 발생이 증가하는 특성을 보이고 있다. 이는 수소 첨가에 따라 화염 온도가 증가함에 따른 Thermal NO_x의 생성이 크다는 것을 예상할 수 있다.

수소 첨가에 따른 주요 NO_x 발생 mechanism을 확인하기 위하여 GRI-3.0 mechanism에 포함된 NO_x 발생 reaction을 살펴보았다. GRI-3.0에 존재하는 40여 개의 NO_x 발생 reaction step에서 주요한 발생/저감 반응식을 Fig. 6에 나타내었으며 각각의 상세 반응식은 아래와 같다[9].

NO_x 생성에 주도적인 Reaction은 thermal NO_x mechanism (R178, R179), N₂O mechanism(R182)이다. 해당 조건에서의 화염 온도는 Thermal NO_x가 크게 활성화되는 조건인 1800 K 이하이므로, N₂O, NO₂, NNH 등의 Mechanism

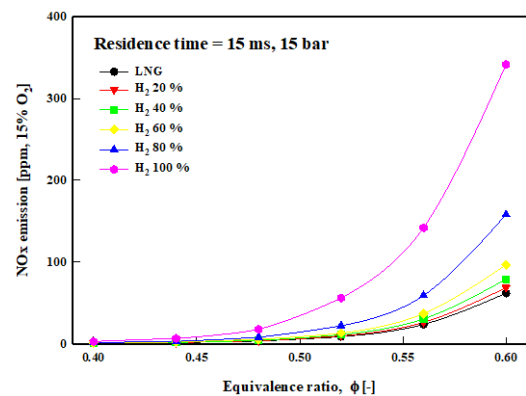


Fig. 5. NO_x emission trends with equivalence ratio for various hydrogen addition.

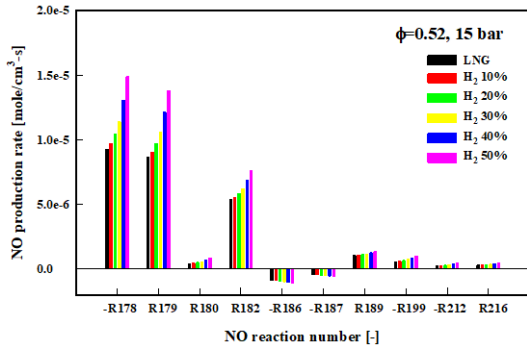


Fig. 6. Dominant reaction mechanism for hydrogen addition combustion.

에 대한 추가적인 분석이 필요하지만, 본 연구에서는 추가 Mechanism에 대한 고려는 하지 않았다.

- R178. $N+NO \rightleftharpoons N_2+O$
- R179. $N+O_2 \rightleftharpoons NO+O$
- R180. $N+OH \rightleftharpoons NO+H$
- R182. $N_2+O \rightleftharpoons 2NO$
- R186. $HO_2+NO \rightleftharpoons NO_2+OH$
- R187. $NO+O+M \rightleftharpoons NO_2+M$
- R189. $NO_2+H \rightleftharpoons NO+OH$
- R199. $NH+NO \rightleftharpoons N_2O+H$
- R212. $H+NO+M \rightleftharpoons HNO+M$
- R216. $HNO+O_2 \rightleftharpoons HO_2+NO$

3.4 소염(Extinction) 특성

수소 화염의 경우 다른 연료에 비해 가연한계(flammability limit)가 넓고 화염 강도가 높아, 강한 난류 강도에도 화염이 쉽게 소염 되지 않는 것으로 알려져 있다. 이전 연구[3]에서는 수소 혼소율을 4%까지 계산하였으나 본 연구에서는 수소 혼소율 50%까지의 혼합조건에서의 소염 특성을 확인하였다.

Fig. 7은 LNG 화염 및 수소 혼소율을 50%까지 늘렸을 때의 소염 특성을 나타낸 것이다. 신장률(stretch rate)이 증가함에 따라 화염의 최고온도는 낮아지며, 특정 stretch rate에 도달하면 소염이 발생한다. 이를 소염 신장률(extinction stretch rate)로 정의하며, 이러한 소염 신장률을 구하기 위해서는 near extinction 조건까지 반복적으로 stretch rate를 늘려가며 계산 후 역수치해법[10]을 통해 turning point의 extinction stretch rate를 구하였는데 최근의 CHEMKIN-Pro 버전에서는 Opposed Flame의 extinction를 구하는 모듈이 추가되어 extinction stretch rate를 직접

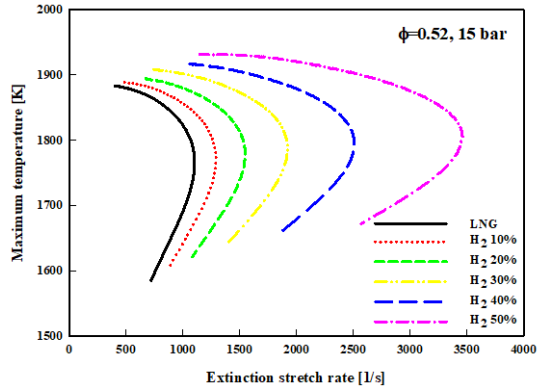


Fig. 7. Extinction S-curve for LNG flame with hydrogen addition.

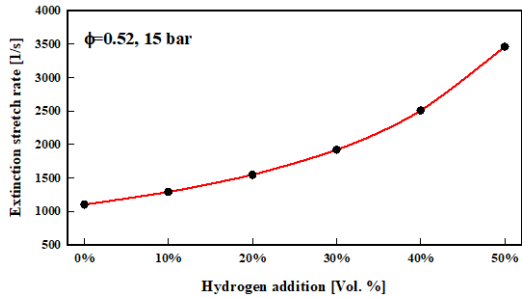


Fig. 8. Extinction stretch rate (κ_{ext}) with hydrogen addition.

구할 수 있게 되었다.

수소 첨가량이 증가할수록 화염의 소염 stretch rate는 증가하는 특성을 보이며 그 증가율은 Fig. 8에서 보는 것과 같이 수소첨가량에 따라 exponential 하게 증가하는 것을 알 수 있다.

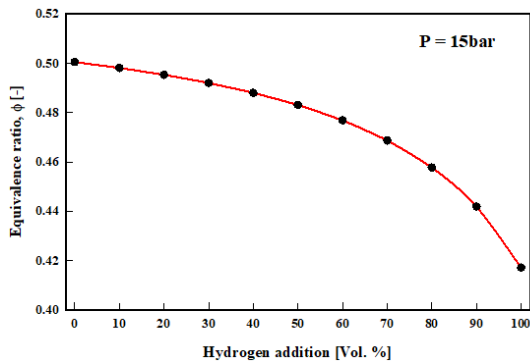
3.5 수소 연료전환에 따른 가스터빈 엔진 특성변화

수소 첨가량 증대에 따라, 동일 당량비에서 화염 온도는 Table 4와 같이 증가하는 특성이 있으며, 가스터빈 엔진에서의 주요 parameter인 동일 TIT를 유지하기 위해서는, 동일 화염 온도를 갖는 당량비로 설정해야 한다. 계산된 단열 화염 온도는 운전 온도, 압력에 다른 값을 가지며 이에 따른 동일온도의 당량비는 다를 수 있어, 실제 운전조건에 대한 정확한 계산이 필요하며, 본 연구에서는 15 bar 조건에서의 단열 화염 온도를 Lean Premixed 조건에서 당량비 0.2 간격으로 0.5~0.4 구간을 재계산하여 나타내었다.

수소 첨가량에 따라 동일 화염 온도를 갖는 당량비를 구

Table 4. Adiabatic flame temperature (°C) for hydrogen addition with equivalence ratio @ 15 bar

Φ	LNG	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	H ₂
0.50	1546	1550	1555	1562	1569	1579	1591	1607	1629	1661	1713
0.48	1509	1513	1518	1525	1532	1541	1553	1569	1591	1622	1674
0.46	1472	1476	1481	1487	1494	1503	1515	1530	1552	1583	1634
0.44	1434	1438	1443	1449	1456	1465	1476	1491	1512	1543	1592
0.42	1396	1399	1405	1410	1417	1426	1437	1452	1472	1502	1551
0.40	1357	1361	1365	1371	1378	1386	1397	1411	1431	1460	1508

**Fig. 9.** Equivalence ratio trends for hydrogen addition percentages.

하기 위하여, Table 4의 값을 보간하여 LNG 화염 당량비 0.5 조건(화염 온도 1546°C)과 동일한 화염 온도의 당량비를 구하였다.

Fig. 9는 수소 첨가에 따른 동일 화염 온도조건의 당량비를 나타낸다. 수소첨가량이 증가할수록 운전 당량비는 점점 낮아지는 특성이 있다. 즉 LNG 연료에서 1546°C 화염 온도를 갖는 당량비가 0.5일 경우, 수소 100% 조건의 동일 온도 당량비는 0.42까지 낮아지는 것을 알 수 있다.

수소 첨가량 증대에 따른 동일 TIT를 유지하는 당량비를 구하였으며, 이를 기준으로 각 조건의 연소계산을 통해 필요공기량, 연소기 공급량, 배기가스량을 구하여 압축기/터빈에 대한 영향을 계산하여 보았다.

각 수소 혼소량에 따른 가스터빈 특성은 Cycle 해석을 통하여 정밀한 계산이 요구되지만 본 연구에서는 각 혼소율에 따른 발열량을 기준으로 동일 Heat Input을 갖는 연료량을 계산하였으며, 각 연료 조성에 따른 연소계산을 통해 단위 부피당 필요공기량/연소량/배기가스량을 얻어 운전조건을 예측하였다.

Table 5는 LNG 및 수소 혼소 조건에서 연소계산을 통하여 얻은 단위 부피/질량당 저위발열량, 밀도, 이론공연비, 단위 부피당 발생 배기가스량을 나타내고 있다.

Table 5. Combustion calculation for hydrogen addition at same TIT condition @ 15 bar

H ₂ (%)	LHV		Density kg/Nm ³	(A/F) _{st}	Flue Gas Nm ³ /Nm ³
	kcal/Nm ³	kJ/kg			
0	9,406	49,832	0.790	10.40	21.83
10	8,722	50,710	0.720	9.59	20.26
20	8,039	51,778	0.650	8.79	18.70
30	7,356	53,103	0.580	7.99	17.13
40	6,673	54,793	0.510	7.19	15.57
50	5,989	57,021	0.440	6.39	14.00
60	5,306	60,094	0.370	5.59	12.44
70	4,623	64,606	0.300	4.79	10.88
80	3,940	71,873	0.229	3.98	9.32
90	3,256	85,532	0.159	3.18	7.76
100	2,573	120,634	0.089	2.38	6.21

기본 연소계산을 통한 값을 이용하여, 동일 Heat Input을 내기 위한 연료량을 계산하였으며, 이를 통해 Fig. 9에 나타난 동일 TIT를 갖는 당량비를 기준으로 필요공기량, 배기가스량 등을 계산하여 Table 6에 나타내었다.

Fig. 10은 수소 혼소율의 증가에 따른 필요공기량(Compressor), 연소실 공급 mixture양(Combustor), 배기가스 유량(Turbine)에 대한 특성을 나타내었다. 수소 혼소율 증가에 따른 필요공기량은 80%부터 조금씩 상승하지만, 그 비율은 0.5% 이내로 압축기의 특성변화는 거의 없을 것으로 생각된다.

연소기의 경우 수소의 단위 부피당 발열량이 낮아 LNG 대비 3.5 배 이상의 volume 유량을 공급해야 한다. 하지만, 연소기 전체 mixture에 차지하는 연료 비율이 낮으므로 수소 혼소율에 따른 연소실 공급 유량은 서서히 증가함에도 그 양이 많지 않으며, 수소 전소의 경우 8.5% 정도 상승하는 결과를 얻을 수 있다. 터빈에 영향을 줄 수 있는 배기가스량의 경우도 연소기와 같이 점차적으로 증가하는 특성

Table 6. Gas turbine operating condition for hydrogen addition at same TIT condition @ 15 bar

H ₂	Fuel Flow	Compressor		Combustor		Turbine	
	Nm ³	Nm ³ /Nm ³		Nm ³ /Nm ³		Nm ³ /Nm ³	
0%	1.000	20.77	100.0%	11.40	100.0%	21.83	100.0%
10%	1.078	20.77	100.0%	11.42	100.2%	21.85	100.1%
20%	1.170	20.77	100.0%	11.46	100.5%	21.88	100.2%
30%	1.279	20.77	100.0%	11.50	100.9%	21.91	100.4%
40%	1.410	20.77	100.0%	11.54	101.3%	21.95	100.5%
50%	1.570	20.77	100.0%	11.60	101.8%	21.99	100.7%
60%	1.773	20.77	100.0%	11.68	102.5%	22.05	101.0%
70%	2.035	20.77	100.0%	11.77	103.3%	22.13	101.4%
80%	2.388	20.78	100.1%	11.90	104.4%	22.24	101.9%
90%	2.889	20.80	100.2%	12.08	106.0%	22.41	102.6%
100%	3.656	20.87	100.5%	12.36	108.5%	22.69	104.0%

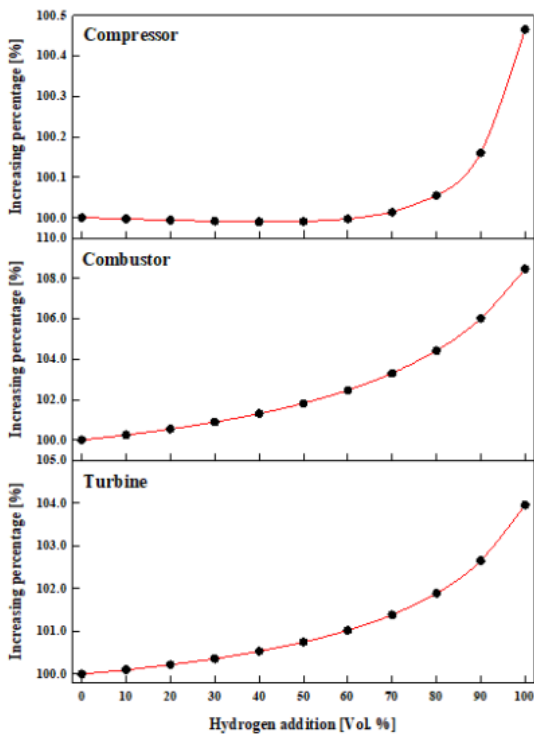


Fig. 10. Gas turbine operation conditions for hydrogen addition.

이 있지만, 최종적으로 수소 전소의 경우 4% 정도 상승하는 특성을 보인다.

이전 언급한 것과 같이 수소 혼소율에 따른 전반적인 유

량 변화는 Cycle 해석을 통해 정밀하게 구할 필요가 있으나 Reference 논문[11]을 보았을 때도 LNG에서 수소 전소로 연료전환 하였을 경우 필요공기량/배가스량의 차이가 거의 없는 것으로 보아 수소 가스터빈개발에서 터빈과 압축기의 경우는 minor 한 modification을 통해 개발이 가능할 것으로 생각된다. 터빈의 경우, 수소 혼소율에 따른 배기가스 성분 중 H₂O 비율이 증가하며, 수소 전소의 경우 CO₂ 발생이 없이 H₂O만 발생하므로 배기가스 조성에 따른 Cp 값 변경에 따른 열전달 특성, 과다 수분에 따른 블레이드 부식 여부 등에 대해 추후 확인이 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

LNG 연료와 수소 첨가량에 따른 연소특성을 GRI 3.0 상세반응 기구를 이용한 CHEMKIN-Pro 프로그램을 이용하여 가스터빈 운전조건인 고온 Lean Premixed 조건 ($\phi=0.4-0.6$)에서 압력 영향($p=1-25$ bar)에 대해서 계산하였다.

LNG 화염과 수소 화염에 대해서 화염 온도와 전파속도에 대한 비교를 통해 수소 화염의 높은 온도와 특히 화염속도의 차이가 8배 이상 증가하는 특성을 확인하여 연소기 설계 시 flash back에 대한 고려가 필요함을 보여주었다.

당량비가 높을수록 CO, NO_x 발생은 높아짐을 알 수 있었으며, 수소 첨가량이 증대할수록 CO 발생량은 줄어드는 반면 NO_x 발생은 늘어나는 trade-off 특성을 보여줌을 알 수 있었다.

NO_x 발생에 대하여 주요 생성 Mechanism을 확인하여 보았는데 주 Reaction 반응식은 R178, 179의 Thermal NO_x 반응식과 N₂O 반응식으로 나타났으며, 수소 첨가에 따른 모든 반응이 선형적으로 증가/감소하는 형태임을 알 수 있었다.

수소 첨가량 증대에 따라 소염 신장률이 증가하는 것을 확인할 수 있어 높은 난류 강도에도 화염이 안정적으로 유지될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

기존 LNG 가스터빈 엔진을 수소로 연료 전환하였을 때 연소기 이외에 압축기, 터빈에 대한 영향을 확인하기 위하여 각 수소 혼소 조건에서의 연소계산을 통한 필요공기량(압축기), 연소가스량(연소기), 배기가스량(터빈)의 영향을 확인하여 보았는데, 연소기의 영향에 비해 압축기, 터빈의 경우 상대적으로 운전조건 유량 변화가 크지 않아 세부 Optimization은 필요하겠지만 major modification은 필요하지 않을 것으로 생각된다.

수소 연료전환에 따라 화염 온도 상승으로 NO_x 발생이

높을 수 있으나 동일 TIT 조건을 위해 운전 당량비를 낮추고 또한 강한 난류 조건으로 연료/산화제 혼합 특성 등을 높여 운전할 경우 기존 LNG 연소 결과에 동등한 NO_x 발생을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20206710100060, 분산발전 가스터빈용 수소 전소 저 NO_x 연소기 개발).

References

- [1] D. Kim, Review on the development trend of hydrogen gas turbine combustion technology, J. Korean Soc. Combust., 24(4) (2019) 1-10.
- [2] Y. Joo, M. Kim, J. Park, S. Park, J. Shin, Hydrogen enriched gas turbine: core technologies and R&D trend, Trans. Korean Hydro. New Energy Soc., 31(4) (2020) 351-362.
- [3] E.-S. Cho, S.H. Chung, K.Y. Ahn, Numerical analysis of the extinction and NO_x emission in methane/air premixed flame by hydrogen addition, Trans. Korean Hydro. New Energy Soc., 17(1) (2006) 75-81.
- [4] E.-S. Cho, S.H. Chung, Improvement of flame stability and NO_x reduction in hydrogen-added ultra lean premixed combustion, J. Mech. Sci. Technol., 23(3) (2009) 650-658.
- [5] The ANSYS, Inc., CHEMKIN-PRO, Available at: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-chemkin-pro>.
- [6] 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, GRI-mech 3.0, Available at: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/, 1999.
- [7] S. Park, Pressure effect on NO formation in H₂/CO premixed flames, J. Korean Soc. Combust., 24(3) (2019) 26-32.
- [8] S. Park, Pressure effect on NO formation in methane/air lean-premixed flames, J. Mech. Sci. Technol., 33(6) (2019) 3031-3038.
- [9] E.-S. Cho, S.H. Chung, Numerical evaluation of NO_x mechanisms in methane-air counterflow premixed flames, J. Mech. Sci. Technol., 23(3) (2009) 659-666.
- [10] E.-S. Cho, S.H. Chung, T.K. Oh, Local Karlovitz numbers at extinction for various fuels in counterflow

premixed flames, Combust. Sci. Technol., 178 (2006) 1559-1584.

- [11] P. Chiesa, G. Lozza, L. Mazzocchi, Using hydrogen as gas turbine fuel, J. Eng. Gas Turbines Power, 127(1) (2005) 73-80.

저자정보

신영준

두산중공업 GT연소기개발팀의 선임연구원이며, 관심분야는 연소모델링을 이용한 가스터빈 연소기 노즐 설계 및 분석이다.



조은성

두산중공업 GT연소기개발팀의 책임연구원이며, 관심분야는 보일러 버너, 가스터빈 연소기 등 산업/발전 분야의 공해물질 저감 연소법에 대한 연구이다.

