

메탄-공기 예혼합 선회화염에서 수소첨가와 선회강도 영향에 관한 연구

김한석[†] · 조주형 · 김민국 · 황정재 · 이원준

한국기계연구원 청정연료발전연구실

A Study on the Effects of Hydrogen Addition and Swirl Intensity in CH₄-Air Premixed Swirling Flames

HAN SEOK KIM[†], JU HYEONG CHO, MIN KUK KIM, JEONGJAE HWANG, WON JUNE LEE

Department of Clean Fuel & Power Generation, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

[†]Corresponding author :
haskim@kimm.re.kr

Received 10 October, 2019
Revised 10 December, 2019
Accepted 30 December, 2019

Abstract >> The combustion characteristics of methane/hydrogen pre-mixed flame have been investigated with swirl stabilized flame in a laboratory-scale pre-mixed combustor with constant heat load of 5.81 kW. Hydrogen/methane fuel and air were mixed in a pre-mixer and introduced to the combustor through a burner nozzle with different degrees of swirl angle. The effects of hydrogen addition and swirl intensity on the combustion characteristics of pre-mixed methane flames were examined using particle image velocimetry (PIV), micro-thermocouples, various optical interference filters and gas analyzers to provide information about flow velocity, temperature distributions, and species concentrations of the reaction field. The results show that higher swirl intensity creates more recirculation flow, which reduces the temperature of the reaction zone and, consequently, reduces the thermal NO production. The distributions of flame radicals (OH, CH, C₂) are dependent more on the swirl intensity than the percentage of hydrogen added to methane fuel. The NO concentration at the upper part of the reaction zone is increased with an increase in hydrogen content in the fuel mixture because higher combustibility of hydrogen assists to promote faster chemical reaction, enabling more expansion of the gases at the upper part of the reaction zone, which reduces the recirculation flow. The CO concentration in the reaction zone is reduced with an increase in hydrogen content because the amount of C content is relatively decreased.

Key words : Hydrogen addition(수소 첨가), Recirculation flow suppression(재순환류 억제), Cool gases recirculation(냉각가스 재순환), Adiabatic flame temperature reduction(단열화염 온도 감소), Mixture content(혼합기 농도)

1. 서론

지구온난화에 큰 영향을 주는 이산화탄소의 배출 억제를 위하여 풍력, 태양에너지 등 재생에너지의 개발이 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 풍력, 태양 에너지 등은 계절과 시간 그리고 기상 조건에 따라 변동 폭이 크기 때문에 안정된 에너지를 확보하기 위해서 발생된 에너지를 수소로 변환시켜 생산된 수소를 에너지 저장 매체로 이용하는 방법이 제안되고 있다. 특히, 이러한 간헐성이 큰 재생에너지의 활용이 커져 수소의 생산량이 증가할 경우 생산된 수소를 LNG 발전에 혼소하는 방법이 제시될 수 있을 것으로 예상된다. 수소는 온난화가스인 이산화탄소를 배출하지 않는 청정연료이지만 연소 특성은 Table 1과 같이 LNG의 주성분인 CH₄ (메탄)에 비하여 많이 다르기 때문에 기존 LNG 가스터빈의 연소버너를 보완하지 않고 수소를 혼합하여 연소(수소 혼소)하게 되면 문제가 발생될 수 있을 것으로 판단된다. 즉 현재 운용되고 있는 LNG 발전용 가스터빈 연소기는 고온부에서 발생이 급증하는 NOx 배출 저감을 위하여 당량비가 희박한 예혼합 연소방법을 주로 이용하고 있지만 확산 화염에 비하여 연소 반응 영역이 고정되지 않고 넓으며 연료 특성 및 당량비에 따라 반응영역이 변하게 되어 연소진동의 원인이 되고 있다¹⁻⁴⁾. 더욱이 수

소의 연소특성은 LNG의 주연료인 메탄에 비하여 가연범위가 매우 넓은 뿐만 아니라 연소속도가 빠르기 때문에 수소 혼소 시 연소실 배출 가스 온도를 기존 LNG 발전용 가스터빈의 연소 조건에 맞춰 운전하더라도 수소연료의 특성으로 인해 발생하는 화염 안정화에 영향을 미치는 주요인자(화염역화, 날림, 진동 등)들의 변화가 생겨 버너 노즐 손상과 NOx의 배출 증가 혹은 연소불안정 발생이 우려된다⁵⁻¹⁰⁾. 따라서 수소 혼소용 희박 연소기의 적정 설계 혹은 운용기술을 개발하기 위해서는 메탄의 수소 혼소특성을 파악하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 기존 발전용 가스터빈의 NOx 저감에 주로 적용되는 선회형 예혼합 가스터빈 연소기를 이용하여 LNG의 주성분인 메탄에 수소를 혼소하는 경우 화염 안정화 역할을 하는 선회기의 선회 강도와 질량기준의 수소 혼소율에 대한 연소특성의 변화를 실험적으로 분석하여 수소혼소용 가스터빈 연소기 설계에 대한 기본 자료를 확보하는 데 목표를 두고 있다.

본 연구를 위하여 실험실 규모(5.81 kW)의 메탄/수소 혼소용 예혼합 연소기를 제작하여 선회 강도와 수소 혼소율 변화에 대한 PIV 시스템을 이용한 재순환유동 특성, 열전대를 이용한 온도 분포, 화염대로부터 주요 라디칼 분석 및 연소가스 포집을 통한 연소영역의 주유가스 농도 변화를 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 선회형 예혼합 연소기는 Fig. 1(a)와 같이 연료 공급장치와 연소실로 구성되어 있다^{3,4,11)}. 압축기로부터 공급되는 연소용 공기는 니들밸브를 통하여 유량제어 되어 상온, 상압으로 공급되는데 유량은 보정된 오리피스 유량계를 이용하였으며 수소와 메탄은 연소기 상류의 별도 혼합실에서 충분히 혼합된 후 연소기에 공급되게 구성하였다. 혼합 연료와 연소용 공기의 예혼합을 위하여 Fig. 1(b)와 같이 선회기 직후에 5개의 연료홀을 이용하여 유동에 수직으로 분사하게 하여 공기/연료의 혼합가스가 연소

Table 1. Comparison of the physical and combustion properties of hydrogen and methane¹³⁾

	H ₂ (Hydrogen)	CH ₄ (Methane)
LHV (MJ/m ³)	9.883	32.87
Density (kg/m ³)	0.089	0.709
Wobbe index (WI)	44.31	48.98
Laminar burning velocity (cm/s)	291	37
Ignition Temperature (°C)	571	632
Ignition Energy (mJ)	0.02	0.2
Flammability Limits (%)	4.0-75.0	5.0-15.0
Stoichiometric composition (m ³ /m ³)	2.38	9.52

실로 공급되게 구성하였다. 화염 안정화를 위한 선회각은 30°, 45°, 60°의 선회각도를 사용하여 선회각도에 대한 연소특성 변화를 예상할 수 있게 하였다. 반응영역의 유동 측정은 평균 직경 40 microns의 glass micro-balloons 입자를 PIV 측정 시 사용하였다. 연소실 중심축 방향 온도는 R-Type 노출형 열전대를 연소실 윗면 출구면에서 수직으로 삽입하여 축 방향으로 이동하면서 중심축의 온도를 측정하였으며 비교적 작은 비드직경(50 microns)을 사용하여 응답시간, 복사열손실에 의한 측정오차 그리고 유동교란을 최소화하였다. 연소영역의 반응 특성을 예상하기 위한 OH*, CH* 및 C₂* 자발광은 광간섭필터(305 nm, 431.5 nm, 516.5 nm)와 ICCD 카메라(f/8, gain=500, exposure time=5 ms)를 사용하여 25개의 이미지를

평균하였으며 Abel inversion technique을 이용하여 라디칼의 강도를 예상하였다¹²⁾. 연소실 내부 조성은 수냉식 스테인레스 포집관을 이용하여 온도측정방법과 같이 연소실 출구인 윗면에서 수직으로 삽입하여 연소실 내에서 반경 방향과 축 방향으로 이동하면서 측정하였으며 포집된 가스는 가스분석기 입구에서 수분을 제거하였다^{3,4)}. 포집된 가스는 가스분석기(HORIBA and thermo environmental)를 이용하여 CO, NO, O₂를 분석하였고 계측기의 최대 CO 측정 범위인 5,000 ppm 이내에서 측정을 수행하였다. 그리고 포집관이 설치된 연소실 출구로부터 역류되는 외부 공기량은 선회각에 따라 영향을 받으므로 외부 공기 유입 유량의 영향에 대한 농도 오차를 최소화하기 위하여 CO, NO 농도는 O₂ 4% 기준으로 환산 후 상대 비교를 하였다. PIV와 온도 측정용 연소실은 사각 단면(80×80 mm)의 길이 290 mm를 이용하였으며, 연소영역의 라디칼과 내부 가스 조성 측정은 원형 내열유리관(직경 65 mm, 길이 210 mm)을 이용하였다.

연소실험은 Table 2와 같이 고정된 열부하(heat load) 5.81 kW의 Test 1, 2 조건에서 수소 혼합비의 변화가 연소 특성에 미치는 영향을 예상하였다. 메탄에 수소를 질량기준 9% 혼합하는 경우 순수 메탄화염보다 단열화염온도는 6°C 정도 감소하게 되며 Test 2의 연소용 공기량이 11.72 kg/s인 경우 연소기 출구 평균 유속은 8.5 m/s이며 수소 혼소 시 연료의 부피 변화에 의한 공기/연료 혼합가스의 분출 유속 증가는 5% 이내이다.

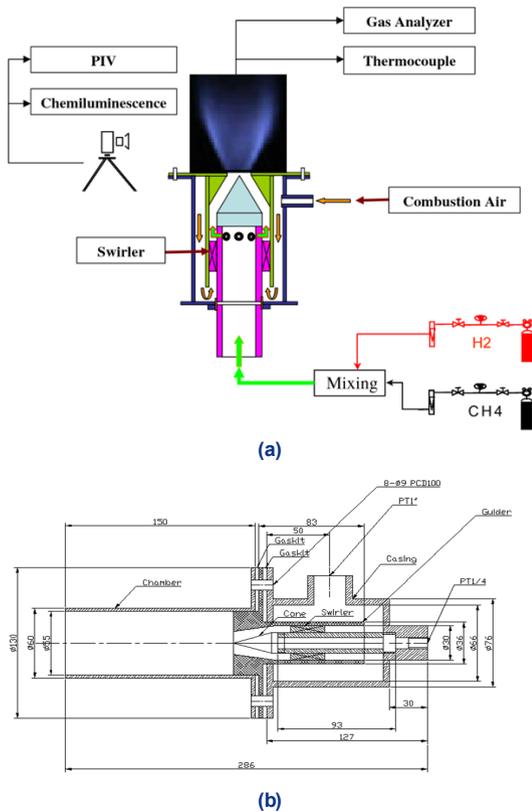


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus with a swirl stabilized pre-mixed combustor operated at 5.81 kW. (a) Schematic of the experimental apparatus. (b) Drawing of swirl stabilized pre-mixed combustor.

Table 2. Experimental conditions for confined condition (heat load=5.81 kW)en and methane¹³⁾

	Swirl vane angle, (Deg.)	H ₂ mass ratio (%)	Total air (kg/hr) (slpm)	Results
Test 1	30,45,60	0, 4, 9	8 115	Temperature concentration (CO, O ₂ , NO)
Test 2	30,45,60	0, 4, 9	11.72 168	Radicals (OH, CH, C ₂)

3. 결과 및 고찰

실험에 사용된 선화형 예혼합 화염의 선화강도에 대한 유동특성을 예상하기 위하여 선화각이 30°, 45°, 60° 선화기를 이용하여 메탄에 수소 4%를 혼합한 경우에 PIV로 측정된 유동의 축방향 속도를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 결과로부터 연소가스를 재순환시켜 화염을 안정화시키는 역할을 하는 선화기의 선화각이 클수록 중심부 재순환 영역이 증가하고 연소실 축 중심으로 후류에서 상류로 역류하는 재순환 가스의 유속이 증가되며 선화각 60°인 경우 버너노즐의 혼합가스 분출구 내부까지 재순환 유동이 침투함을 알 수 있다.

Fig. 3은 수소 혼소가 연소장에 미치는 영향을 예상하기 위하여 선화각 45°인 선화기를 이용한 메탄에 각각 0%, 4%, 9%의 수소를 혼합한 연료의 연소장에 대하여 축방향 유동을 나타낸 결과이다. Fig. 3의 결과로부터 수소 혼소율이 증가하는 경우 수소의 높은 연소능력(combustibility)으로 연소반응이 촉진되므로 혼소 시 노즐 근처에서 재순환유동이 형성되기

전에 고온의 연소생성물을 빠르게 후류로 밀어내어 재순환유동이 억제되는 것을 알 수 있다. 이것은 Table 1에 나타낸 바와 같이 수소는 연소 속도가 메탄에 비하여 커서 수소 혼소율이 증가하는 경우 연료/공기 예혼합가스의 반응이 보다 상류에서 진행되고 노즐 출구부의 제한된 영역에서 연소반응에 의하여 급팽창하여 재순환 유동이 억제되기 때문으로 예상할 수 있다.

Fig. 4는 30°, 45°, 60°의 선화기를 이용하여 수소 혼소 변화율에 대한 연소실 중심부의 온도 분포를 비교한 결과이다. 수소 혼소율이 증가할수록 단열화염온도는 조금 감소되지만 Fig. 4의 결과로부터 수소

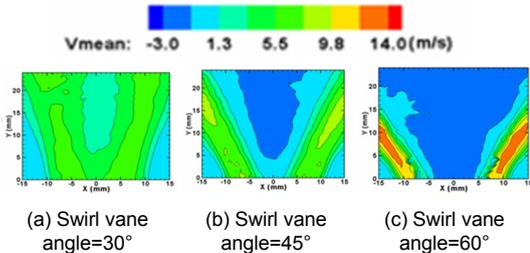


Fig. 2. Effect of the swirl intensity on the axial velocity at the burner exit

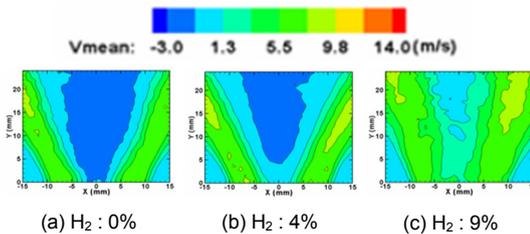
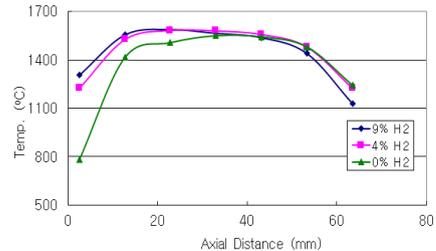
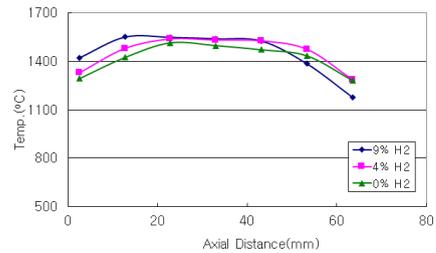


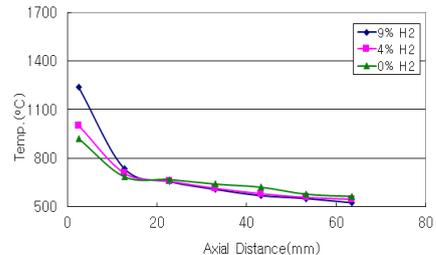
Fig. 3. Effect of the hydrogen percentage on the axial velocity at the burner exit (Swirl vane angle=45°)



(a) Swirl vane angle=30°



(b) Swirl vane angle=45°



(c) Swirl vane angle=60°

Fig. 4. Effect of the swirl intensity on temperature distribution along axial direction

혼소율이 증가할수록 동일 선회각에서 연소실 상류 선단 중심부의 온도가 높게 분포되는데, 이것은 수소 혼소율이 증가할수록 혼합가스의 점화가 빠르게 일어나며 연소반응 증가로 화염이 상류로 이동하여 상류에서 높은 온도 분포를 형성하지만 연소속도가 상대적으로 크기 때문에 주 연소 영역이 미리 종료되어 후류에서는 반대로 낮은 온도 분포를 형성하는 것으로 판단된다. 또한 상류 선단부의 동일 수소 혼소율 조건에서 선회각 45°인 경우, 선회각이 30°와 60° 화염에 비하여 높은 온도 분포를 형성하게 된다. 이것은 재순환가스 유동이 연소 반응을 촉진시키지만 한편으로는 열손실을 증가시키기 때문이다. 즉, 선회각이 30°인 경우 공기/연료 혼합가스의 점화 지연으로, 선회각이 60°인 경우 재순환유량 증가에 의해 냉각으로 선회각이 45°인 화염보다 상류부 중심부 온도가 낮게 분포되는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 선회각 30°, 45°, 60° 선회화염의 수소 혼합비 변화에 대한 화염의 OH 라디칼 분포를 Abel 변

환한 결과이다. Fig. 5의 결과로부터 수소 혼소율이 증가할수록 강한 OH 라디칼 분포를 갖게 되는데 이는 수소 혼소율이 증가함에 따라 화염의 반응물이 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 그리고 선회각이 증가할수록 재순환 유동의 증가로 연소 영역이 반경방향으로 이동되어 OH 라디칼분포의 각도가 커지게 된다. 또한 선회각이 45°인 경우 30°와 60°의 선회 화염에 비하여 OH 라디칼이 강도가 큰 영역이 상대적으로 넓게 존재하는데 이것은 Fig. 4에서 언급하였듯이 재순환 유동은 혼합가스의 점화를 돕지만 한편으로는 재순환 유량이 너무 크게 되면 연소영역을 희석시키기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 수소 혼합비 변화에 대한 CH 라디칼 분포를 나타낸 결과이다. Fig. 5의 OH 라디칼에 비하여 조금 후류에 강한 CH 라디칼이 존재하며 수소 혼소율이 증가할수록 혼합 연료의 C성분은 감소되지만 반응물이 증가되어 CH 라디칼 강도가 크게 나타나게 된다. 선회각이 45°인 경우 상대적으로 강한 CH

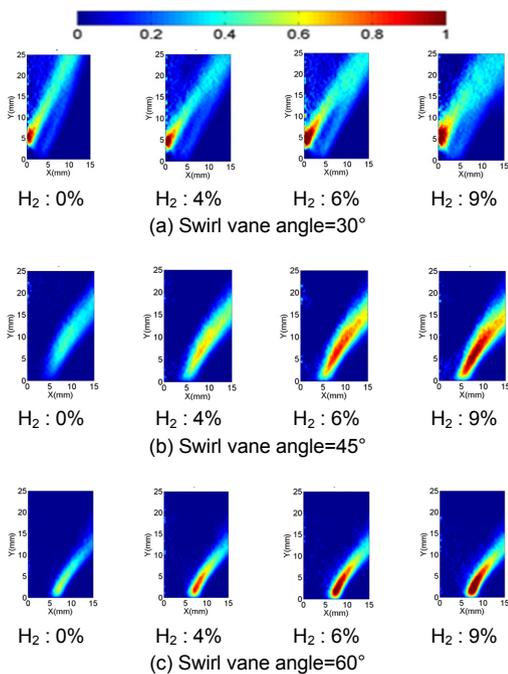


Fig. 5. Effect of the swirl intensity and the hydrogen percentage on OH radical

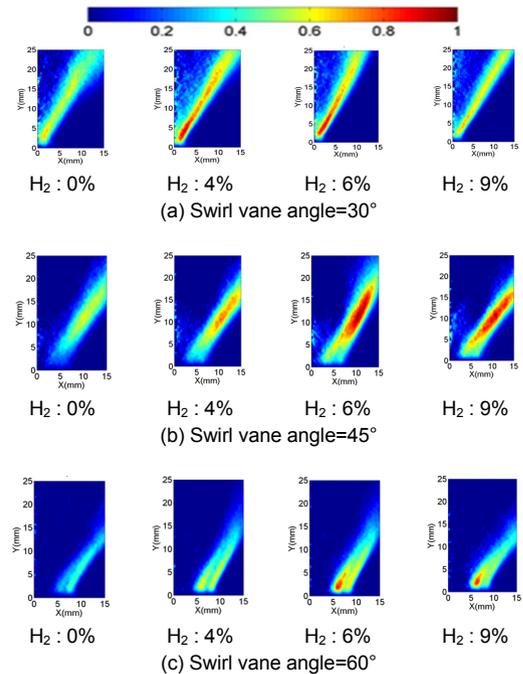


Fig. 6. Effect of the swirl intensity and the hydrogen percentage on CH radical

라디칼 분포를 나타내는데 고온의 재순환가스가 혼합가스 연료의 초기 반응뿐만 아니라 연소영역의 희석 역할을 하기 때문에 판단된다. Fig. 5와 6의 결과로부터 본 연구의 혼소범위 내에서 수소 혼소율 증가 시 연소 반응물은 증가하고 화염의 공간적 화학반응영역은 선화각에 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 매연의 발생의 주요 원인이 되는 C₂ 라디칼 분포를 나타낸 결과이다. 높은 강도의 C₂ 라디칼 영역은 Fig. 5의 OH, Fig. 6의 CH 라디칼 분포와 같이 수소 혼합비가 증가할수록 C₂ 라디칼 강도가 크게 나타난다. 선화각이 45°인 경우 30°와 60° 화염에 비하여 상대적으로 약한 C₂ 라디칼 분포를 나타낸다. 이는 재순환가스가 공기/연료 혼합가스의 연소 반응을 원활하게 해주지만 연소영역을 냉각시키는 역할을 하기 때문에 판단된다. 따라서 연소영역에서의 C₂ 농도를 줄이기 위해서는 적절한 선화각을 선정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 순수 메탄과 수소 혼소율 6% 혼합한 연

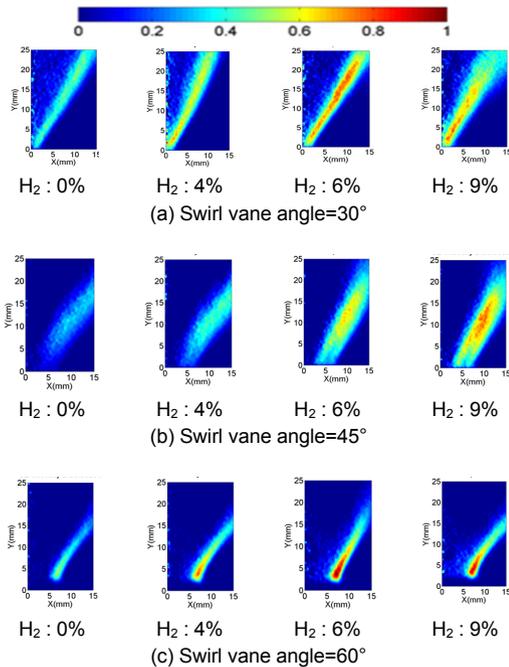


Fig. 7. Effect of the swirl intensity and the hydrogen percentage on C₂ radical

료에 대하여 선화각 30°, 45°, 60° 선화 화염의 연소실 내부 CO 농도를 O₂ 4%로 환산한 결과이다. Fig. 9의 결과로부터 선화각이 클수록 CO가 증가하는 위치가 중심축에서 반경방향으로 멀어지게 되는데 이는 Fig. 5의 OH 라디칼 분포와 같이 선화 유동이 커질수록 CO의 농도가 높은 연소영역이 연소실 중심에서 반경방향으로 이동되기 때문으로 판단된다. Fig. 8(a)에서 연소실 상류 선단의 연소실 중심 부분에서는 선화각이 30°인 경우 순수 메탄에 비하여 수소 혼소 시 CO 농도가 낮게 분포되는데 이는 수소 혼소를 하는 경우 OH 라디칼 강도가 강하지만 연료의 C 성분 감소로 인하여 CO 농도가 적게 되는 것으로 판단된다. Fig. 8(d) 연소실 후류에서 선화각이 30° 화염의 경우 다른 선화각 화염에 비하여 CO의 농도가 상대적으

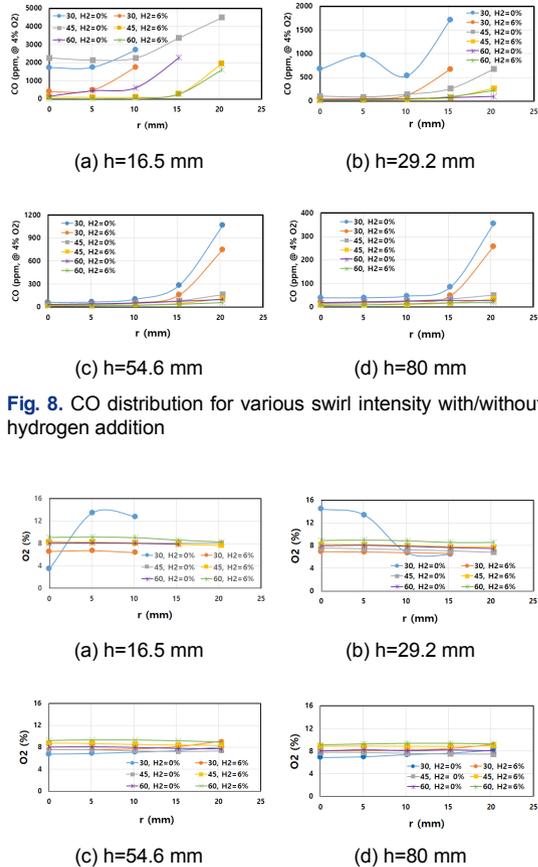


Fig. 8. CO distribution for various swirl intensity with/without hydrogen addition

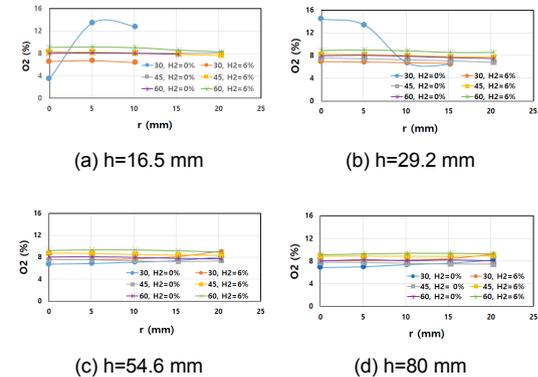


Fig. 9. O₂ distribution for various swirl intensity with/without hydrogen addition

로 높는데 이는 재순환 유동이 상대적으로 적어 연소 반응이 지연되기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 방법으로 연소실 내부의 O₂ 농도를 측정된 결과이다. 선회각이 30° 화염을 제외하면 연소실 각 단면에서 반경방향으로 안정된 O₂ 농도를 보임을 알 수 있으며 동일한 혼소 조건에서는 선회각이 클수록 연소실 출구부에서 유입되는 재순환 유동 증가로 인한 희석으로 높은 O₂ 농도를 갖게 되는 것으로 판단된다. 그리고 수소혼소를 하는 경우 당량비가 작아지게 되어 O₂의 농도가 증가하게 된다. 선회각이 30°인 경우 비교적 상류인 혼합가스 출구면으로부터 16.5, 29.2 mm 위치에서의 메탄 화염은 수소 혼소 화염에 비하여 높은 O₂ 농도를 보이는데 Table 1에서 보는 바와 같이 메탄은 수소보다 발화에너지가 크고 점화온도가 높기 때문에 분출구 선단에서 연소 반응이 지연되어 예혼합가스의 O₂의 소모가 적기 때문으로 판단된다.

Fig. 10은 연소실 내부의 NO의 농도를 산소 4% 기준으로 환산한 결과이다. Fig. 10(a)의 상류 선단부의 선회각이 30° 화염에서는 수소를 혼소하는 경우는 메탄 연소의 경우에 비하여 높은 NO 농도 분포를 보이는데 수소혼소를 하는 경우 연소속도가 증대되어 재순환유동 저하에 의한 연소영역의 희석억제로 NO의 발생이 증대되는 것으로 판단된다. 그리고 선회각이 45°, 60°인 화염의 경우 선회에 의한 재순환 유동의 영향이 상대적으로 증가하여 수소혼소에 의

한 NO의 농도 변화는 적은 것으로 판단된다. 비교적 후류인 혼합가스 출구면으로부터 80 mm 위치에서의 NO 결과로부터 선회각이 클수록 NO의 농도가 낮게 되는데 이는 재순환 유동의 증가로 인한 연소 영역의 냉각으로 Thermal NO가 감소 영향 때문으로 예상된다. 또한 수소를 혼소하는 경우 Fig. 4에서 언급하였듯이 메탄에 비하여 연소 영역이 짧아 연소실 후류에서 발생하는 NO 발생이 적어져 NO의 농도가 낮게 분포되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 재생에너지의 간헐성 문제 해결의 대안이 될 수 있는 수소를 LNG 가스터빈 발전에 혼소시 발생하는 연소 특성 변화를 예상하는 데 목표를 두고 있다. 본 연구를 위하여 실험실 규모의 메탄/수소 혼소연료용 예혼합 가스터빈 연소버너와 연소실을 이용하였다. 연소버너에 공급열량(5.81 kW)을 고정하여 메탄에 수소를 혼소하는 경우 선회각 강도, 메탄에 대한 수소 혼소율이 예혼합 화염에 미치는 영향을 예상하기 위하여 연소실 온도, 라디칼 분석, 연소실 내 가스 조성 등을 측정하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 선회각도가 상대적으로 약한 30° 각도의 선회 화염에서는 혼소인 경우 혼소하질 않은 메탄화염에 비해 버너 선단부의 재순환 유동이 억제된다.
- 2) 재순환 유동은 노즐로부터 분사되는 공기/연료 예혼합가스의 점화를 돕지만 연소영역을 희석하여 온도를 낮추는 역할을 한다.
- 3) 본 연구의 혼소범위 내에서 연소영역은 수소 혼소율 보다는 선회각의 선회유동에 크게 영향을 받는다.
- 4) 수소 혼소율이 증가되는 경우 연소 반응이 활성화 되어 OH와 CH, C₂ 라디칼의 강도는 증가된다.
- 5) 선회각도가 적은 화염의 수소 혼소시 연소 영역이 짧아져 연소실 후류에서 발생하는 NO 발생이 적어진다.

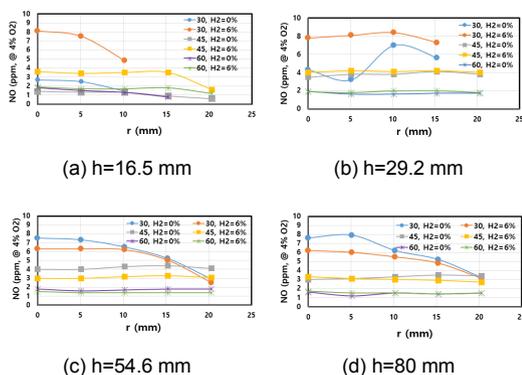


Fig. 10. NO distribution for various swirl intensity with/without hydrogen addition

후 기

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP, No. 2018-1110-100290)의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

1. C. P. Fenimore, "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames", Symposium (International) on Combustion, Vol. 13, No. 1, 1971, pp. 373-380, doi: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80040-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1).
2. H. S. Kim, V. K. Arghode, and A. K. Gupta, "Combustion characteristics of a lean premixed LPG-air combustor", I. J. Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 2, 2009, pp. 1045-1053, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.036>.
3. H. S. Kim, V. K. Arghode, and A. K. Gupta, "Flame characteristics of hydrogen enriched methane-air premixed swirling flames", I. J. Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 2, 2009, pp. 1063-1073, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.035>.
4. H. S. Kim, V. K. Arghode, and A. K. Gupta, "Hydrogen addition effects in a confined swirl-stabilized methane-air flame", I. J. Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 2, 2009, pp. 1054-1062, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.034>.
5. M. Karbasi and I. Weirzba, "The effect of hydrogen addition on the flame stability limits of methane jet diffusion flames", I. J. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 2, 1997, pp. 123-129, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00031-1).
6. G. S. Jackson, R. Sail, J. M. Plaia, C. M. Boggs, and K. T. Kiger, "Influence of H₂ on the response of lean premixed CH₄ flames to high strained flows", Combustion and Flame, Vol. 132, No. 3, 2003, pp. 503-511, doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00496-0](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00496-0).
7. Han S. Kim, Vaibhav K. Arghode and Ashwani K. Gupta, "Flame Characteristics of Hydrogen-Enriched Methane-Air Premixed Swirling Flames.", 45th American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007, pp. 1-15, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2007-602>.
8. A. R. Choundhuri and S. R. Gollahalli, "Combustion characteristics of hydrogen-hydrocarbon hybrid fuels", I. J. Hydrogen Energy, Vol. 25, No. 5, 2000, pp. 451-462, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(99\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(99)00027-0).
9. A. R. Choundhuri and S. R. Gollahalli, "Characteristics of hydrogen-hydrocarbon composite fuel turbulent jet flames", I. J. Hydrogen Energy, Vol. 28, No. 4, 2003, pp. 445-454, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00063-0](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00063-0).
10. G. A. Karim, I. Wierzba, and Y. Al-Alousi, "Methane-Hydrogen Mixture as a Fuels", I. J. Hydrogen Energy, Vol. 21, No. 7, 1996, pp. 625-631, doi: [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(95\)00134-4](https://doi.org/10.1016/0360-3199(95)00134-4).
11. H. S. Kim, Y. D. Lee, W. S. Choi, and K. Y. Ahn, "Combustion Characteristics of Hydrogen/Methane gas in Pre-mixed Swirl Flame", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 19, No. 4, 2008, pp. 276-282, doi: <https://doi.org/10.3795/ksme-b.2009.33.5.343>.
12. C. J. Dasch, "One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods", Appl. Opt., Vol. 31, No. 8, 1992, pp. 1146-1152, doi: <https://doi.org/10.1364/AO.31.001146>.
13. T. Yano, "Thermal properties of fluid" JSME 1983, pp. 404.