

## 수소 첨가가 예혼합 메탄 화염의 NOx 생성에 미치는 영향

김한석<sup>†</sup>, 안국영\*, A. K. Gupta\*\*

\*한국기계연구원, \*\*University of Maryland

### Hydrogen Enrichment Effects on NOx Formation in Pre-mixed Methane Flame

H. S. Kim<sup>†</sup>, K. Y. Ahn\*, A. K. Gupta\*\*

\*Korea Institute of Machinery & Materials,  
171 Jangdong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea  
\*\*University of Maryland University College,  
3501 University Blvd. East, Adelphi, MD 20783, USA

#### ABSTRACT

The effects of hydrogen enrichment to methane on NOx formation have been investigated with swirl stabilized pre-mixed hydrogen enriched methane flame in a laboratory-scale pre-mixed combustor(nominally of 5,000 kcal/hr). The hydrogen enriched methane fuel and air were mixed in a pre-mixer and introduced to the combustor through different degrees of swirl vanes. The flame stability was examined for different amount of hydrogen addition to the methane fuel, different combustion air flow rates and swirl strengths by comparing equivalence ratio at the lean flame limit. The hydrogen addition effects and swirl intensity on the combustion characteristics of pre-mixed methane flames were examined using gas analyzers, and OH chemiluminescence techniques to provide information about species concentration of emission gases and flowfield. The results of NOx and CO emissions were compared with a diffusion flame type combustor. The results show that the lean stability limit depends on the amount of hydrogen addition and the swirl intensity. The lean stability limit is extended by hydrogen addition, and is reduced for higher swirl intensity at lower equivalence ratio. The addition of hydrogen increases the NOx emission, however, this effect can be reduced by increasing either the excess air or swirl intensity. The NOx emission of hydrogen enriched methane premixed flame was lower than the corresponding diffusion flame under the fuel lean condition.

**KEY WORDS** : pre-mixed combustor(예혼합 연소기), hydrogen enriched methane flames(메탄의 수소 혼소), flame stability(화염안정성), swirl(선회), equivalence ratio(당량비), diffusion flame(확산화염)

#### 1. 서 론

화석 연료는 과거로부터 인간의 에너지원으로 주로 사용되어 왔으며 20세기 중반까지는 배출가스에 대한 부담 없이 사용량이 증가되어 왔다. 그

<sup>†</sup>Corresponding author : haskim@kimm.re.kr

러나 삼림 면적이 감소되고 산업발달과 인구증가로 화석연료의 사용량이 급격히 증가됨에 따라 자연이 정화할 수 있는 한계를 벗어나고 있으며 최근에는 지구 환경 문제로 확대되고 있다. 원자력 등 대체에너지에 대한 연구가 진행되고 있지만 안전성과 폐기물 처리 등에 대한 문제가 발생하고 있어 화석연료를 완전히 대체하기에는 부족한 면이 있다. 이러한 이유로 화석 연료의 연소 시 발생하는 오염물질을 최소한으로 줄이기 위한 노력이 환경규제의 강화와 더불어 한층 가속화되고 있다.

연소가스 중의 오염물질로 대표적인 질소산화물(NOx)은 광화학스모그의 원인으로 인체에 해를 끼칠 뿐만 아니라, 산성비의 원인이 되어 식물에도 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

연소 시 NOx는 크게 세 가지 원인에 의하여 발생되는데, 첫째는 고온영역에서 공기 중의 산소와 질소가 반응하여 발생하는 Thermal NOx가 있으며, 둘째로는 탄화수소계 연료의 연소 시 화염 영역에서 공기 중의 질소 성분과 탄화수소와의 반응에 의하여 발생하는 Prompt NOx, 그리고 연료 중의 질소성분과 공기 중의 산소와 반응하여 발생하는 Fuel NOx가 있다<sup>1)</sup>. 탈질화된 연료를 사용하는 경우에는 Thermal NOx가 NOx발생의 주원인이 된다.

중래의 저 NOx 연소방법으로는 고온에서 발생하는 Thermal NOx의 저감을 위하여 화염대의 온도를 낮추는 방법이 주로 이용되고 있다. 산업용 보일러 연소기에서는 공기 다단 연소, 연소가스 재순환, 수분사 방식이 그리고 가스터빈 연소기에서는 예혼합 희박연소<sup>2)</sup>, 수분사 그리고 촉매 연소 방식 등이 이용되고 있다. 그러나 이러한 방법으로는 화염온도 저하에 의한 연소의 불안정화로 인한 Soot의 발생과 효율의 감소로 NOx를 줄이는 데는 한계가 있다. 따라서 환경규제가 더욱 강화될 경우 NOx를 현저히 줄일 수 있는 후처리 방법에 의존할 수밖에 없지만 설치비용 및 운용비용 등이 과다하게 소요되는 단점이 있어 적극적으로 이용되고 있지 않다. 따라서 열효율 및 연소효율 감소 없이 연소기술만으로 NOx를 저감하는 것이 가장 바

람직한 방법이다.

최근에 수소 제조용 개질기(Reformer)가 소형으로 개발되어 실용화됨에 따라 연료의 일부를 넓은 가연범위와 우수한 연소특성을 갖는 수소를 조성, 기존의 탄화수소계 연료와 혼합하여 희박연소를 시킴으로써 NOx를 저감시키는 연구들이 시작되고 있다. 수소의 첨가는 화염온도를 상승시켜 NOx의 생성을 증가시킬 수 있지만 화염의 불안정 없이 희박연소가 가능하기 때문에 다량의 공기를 공급함으로써 화염온도가 저하되어 이러한 효과가 상쇄된다고 보고 되고 있다<sup>3-6)</sup>. 그러나 이러한 수소의 혼소는 연소 영역 및 재순환 유동에 영향을 주기 때문에 수소 혼소용 희박 연소기의 설계 시 재순환가스의 흐름에 주 영향을 주는 선회기는 기존의 설계방법을 적용할 수 없으며 수소 혼소용 희박 연소기의 적정 설계를 위해서는 이에 대한 정보가 필요하다.

본 연구는 수소의 넓은 가연범위를 이용, 수소 혼소기술을 가스터빈용 연소장치에 적용하여 NOx를 저감하는 기술의 확보에 목표를 두고 있다.

본 연구를 위하여 실험실 규모(5,000 kcal/hr)의 메탄/수소 혼소용 예혼합 연소기를 제작하여 선회기 강도, 연소용 공기량 그리고 수소 혼소가 예혼합 화염에 미치는 영향을 화염의 가시화, OH 라디칼 분석과 배기가스 분석 방법 등을 이용하여 예상하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

메탄/수소 혼소용 예혼합 연소 실험장치는 Fig. 1과 같이 연소기, 연료가스 공급장치 그리고 측정장치로 구성되어 있다. 연소기는 연소용 공기 공급용 압축기의 용량과 실험실의 여건 등을 고려하여 저위발열량을 기준으로 5,000 kcal의 열용량으로 설계하였다.

연소용 공기는 압축기로부터 보정된 유량계를 이용, 유량을 예상하여 공급하였으며 유량 조절은 니들밸브를 이용하였다. 연소기 출구 상류 10 cm 지점에서 2 mm 직경 5개의 수소/메탄 혼합 가스

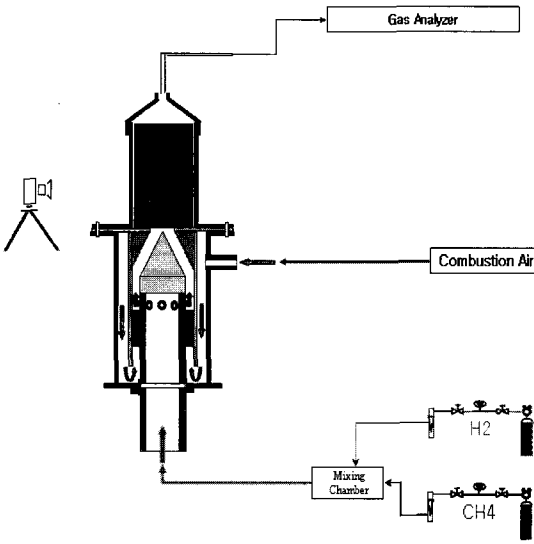


Fig. 1 Experimental apparatus of pre-mixed flame combustor

분출구를 통하여 보정된 오리피스 유량계를 이용하여 유량 측정된 수소/메탄연료가 연소용 공기와 연소기에서 예혼합하여 20 mm 직경의 연소실 입구로 공급되는 구조를 취하였다. 화염의 안정성을 위하여 제작된 선회기는 8개의 선회날( $t=1.5$  mm)로 구성되어 있고 선회각이 30°, 45° 그리고 60°인 3종류의 선회기를 이용하여 선회강도에 영향을 예상할 수 있게 하였다.

연소실은 화염가시화를 위하여 직경 60 mm의 고온 내열유리를 이용하였고, 배기가스 농도 측정을 위하여 포집관을 연소실 스택에 설치하였으며 포집된 가스는 수냉관에 의하여 급냉시킨 후 수분 제거기를 통하여 수분을 제거한 후 가스분석기에 공급하였다<sup>7)</sup>. 그리고 포집된 가스는 가스분석기를 이용하여 NO, NO<sub>2</sub> 그리고 CO 농도에 대한 예상을 하였다.

연료는 모든 수소/메탄 혼합연료조건에서 저위 발열량을 기준으로 5,000 kcal로 일정하게 하였으며 수소는 수소/메탄 혼합가스의 질량비로 공급하여 최고 9%의 수소 혼합 연료를 사용하였다.

화염 안정성실험은 각 수소 혼합비에 대하여 저위 발열량을 기준으로 5,000 kcal/hr로 일정하게 조

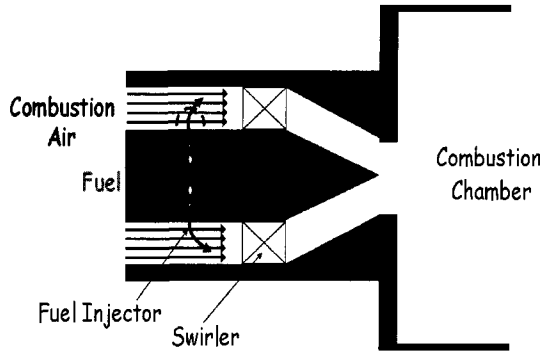


Fig. 2 Details of pre-mixed flame combustor

성된 혼합 연료를 이용하여 연소용 공기를 증가시키면서 화염이 소멸되는 지점을 희박연소의 한계로 가정하였으며 선회강도의 변화에 대하여 실험을 반복하였다.

OH 자발광 측정을 위하여 305 nm의 필터(narrow band interference filter)와 ICCD 카메라를 사용하였으며 모든 조건에서 증폭을 500, 노출을 5 ms로 하여 25 프레임에 대하여 평균한 값을 이용하였다. 그리고 결과는 3점 Abel inversion technique을 이용하여 반경방향으로의 라디칼의 농도를 예상할 수 있게 하였다<sup>8)</sup>.

배기가스 분석실험은 화염 안정성실험과 동일하게 저위발열량을 기준으로 5,000 kcal/hr로 조성된 혼합 연료를 이용하여 수소 혼합비와 연소용 공기량의 변화가 배기가스 특성에 미치는 영향을 가스 분석기를 이용하여 예상하였다. 배기가스 분석결과는 배기가스 산소농도를 4%를 기준으로 환산하여 당량비 변화에 따른 각 가스의 발생량의 비교를 수월하게 하였다.

예혼합연소기의 저 NO<sub>x</sub> 특성을 보다 명확히 이해하기 위하여 동일 용량의 확산화염 연소기를 Fig. 3과 같이 제작하여 수소 혼합비 및 연소용 공기량에 대하여 배기가스 특성을 비교할 수 있게 하였다.

### 3. 실험결과

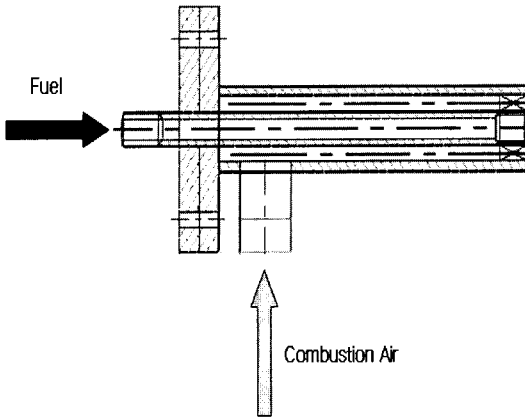


Fig. 3 Schematic of diffusion flame combustor

수소 혼소 시 화염 특성을 예상하기 위하여 수소/메탄 혼합 연료를 저위발열량기준으로 5,000 kcal/hr로 일정하게 하여 질량비로 메탄에 수소를 혼합한 연료에 대하여 선회각에 대한 화염 안정성 실험을 수행하였다. 각 수소 혼합율 및 선회각 조건에서 연소용 공기량을 증가시켜 소멸되는 경우 연소한계 조건으로 가정하였으며 이 경우 혼합가스의 당량비(equivalence ratio)를 Fig. 4에 나타내었다.

즉, Fig. 4의 그래프 곡선 위 부분이 화염이 존재하는 부분이다. Fig. 4의 결과로부터 수소의 혼합율을 높일수록 선회각의 선회각의 크기에 관계

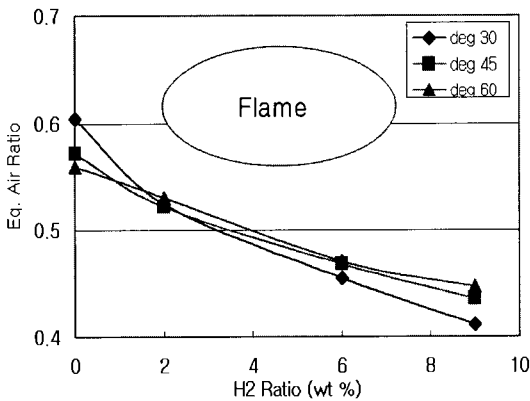
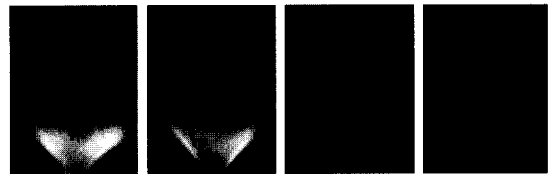


Fig. 4 Equivalence ratio of fuel/air mixture with various swirl vane angle at flame extinction

없이 낮은 당량비에서 연소가 가능함을 알 수 있다. 이것은 메탄에 비하여 수소의 우월한 연소성 때문으로 Fig. 4의 결과로 보면 메탄과 수소를 혼소하는 경우 연소용 공기량을 증가시켜 화염온도를 낮춤으로써 Thermal NOx의 생성을 억제할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 Fig. 4의 결과에서 수소 혼합율이 0%인 순수 메탄을 이용하는 경우 선회각이 클수록, 혼합가스의 당량비가 낮은 경우에도 화염이 존재하는데 이것은 선회각이 클수록 비교적 고온의 재순환가스가 화염선단으로 많이 공급되어<sup>9)</sup> 분출되는 연료에 많은 점화에너지를 공급함으로써 화염이 안정화 되는 것으로 생각된다. 그



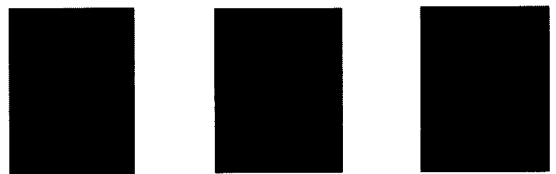
(a) [1, 92] (b) [0.73, 124] (c) [0.6, 151] (d) [0.53, 171]

Fig. 5 Combustion air flow effect on flame shape with 45° swirl vane angle and 4% hydrogen enriched methane gas equivalence ratio, airflow(Slpm)]



(a) [0, 0.613] (b) [3, 0.602] (c) [6, 0.593] (d) [9, 0.581]

Fig. 6 Hydrogen enrichment effect on flame shape of methane with 45° swirl vane angle and 151 Slpm air flow [hydrogen enriched ratio(%), equivalence ratio]



(a) swirl angle:30° (b) swirl angle:45° (c) swirl angle:60°

Fig. 7 Swirl intensity effect on flame shape with 9% hydrogen enriched methane gas and 151 Slpm air flow

러나 수소 혼합율이 높은 경우 선회각이 클수록 높은 당량비에서 화염이 불안정해지는데 이것은 수소 혼소율이 높은 경우 Fig. 4의 결과에서와 같이 소염온도가 낮기 때문에 선회각이 증가함에 따라 상대적으로 차가운 재순환가스의 유량이 연소 영역으로 공급되어 화염이 불안정하게 되는 것으로 예상된다.

Fig. 5는 연소용 공기량의 변화에 대한 영향을 예상하기 위하여 메탄에 대한 수소 혼합율이 4%인 혼합가스를 45°의 선회각을 가진 선회기를 사용하는 경우 당량비 변화에 대한 화염 형상을 직접 촬영한 결과이다.

Fig. 5의 결과로부터 당량비가 1인 Fig. 5 (a)의 경우 연료로의 원활한 산소 공급이 부족하여 연소기 선단에서 완전 연소가 이루어지지 않아 화염이 하류까지 확대되는 것을 알 수 있다. 연소용 공기를 증가시킨 Fig. 5 (b)와 Fig. 5 (c)의 결과로부터 연료로의 충분한 공기 공급으로 연소영역이 짧아지지만 더욱 공기량을 증가시키면 Fig. 5의 (d)와 같이 연소영역이 냉각, 연소반응이 지연되어 연소영역이 확대되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 수소혼합비의 변화에 대한 화염 형상 변화를 예상하기 위하여 연소용 공기량을 일정 (151 Slpm)하게 하고 선회각이 45°인 선회기를 설치한 연소기를 이용, 메탄에 대한 수소혼합비의 변화에 대한 화염 형상변화를 가시화한 결과이다. 이 경우 당량비는 Fig. 6 (a), (b), (c), (d)에 대하여 각각 0.613, 0.602, 0.593, 0.581이다.

Fig. 6 (a)의 순수 메탄을 연료로 사용하는 경우 연소반응이 지연됨으로써 화염 영역이 연소실에 비교적 넓게 분포됨을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5 (b), (c), (d)와 같이 수소 혼합율을 증가시킬수록 연소가 원활히 되고 연소영역이 상류로 이동되는 것을 알 수 있다. 본 실험 조건에서 수소 혼합율을 증가시킬수록 혼합가스의 단열화염 온도는 저하되지만 메탄에 비하여 수소의 우월한 연소성이 화염의 반응속도를 증가시키는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 선회각도의 변화에 대한 화염 형상변화를 예상하기 위하여 연소용 공기량을 Fig. 6과

같이 151 Slpm으로 일정하게 하고 메탄에 대한 수소 혼합비를 9%로 하는 경우 선회각의 변화에 대한 화염 형상변화를 가시화한 결과이다. Fig. 7의 결과로부터 선회각이 클수록 원심력 등으로 재순환가스의 유동이 증가되어<sup>9)</sup> 화염 폭이 증가되고 축방향 화염길이도 감소되는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 8은 45° 선회각의 선회기를 이용하여 Fig. 6과 동일한 연소조건인 연소용 공기량을 151 Slpm인 경우 수소 혼합비에 대한 OH자발광 영향을 3점 Abel inversion technique<sup>8)</sup>을 이용하여 반경방향으로의 라디칼의 농도에 대하여 화염의 1/2을 나타낸 결과이다.

Fig. 8의 결과로부터 Fig. 8 (a)의 메탄 화염에 비하여 Fig. 8 (b), (c), (d)와 같이 수소 혼합율이 증가되는 경우 OH라디칼의 농도가 크게 되고 고농도의 OH 라디칼의 분포가 상류로 이동되는 것

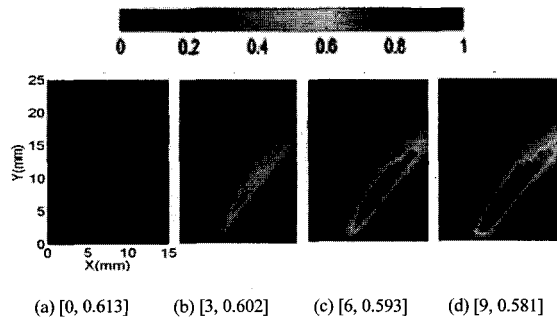


Fig. 8 Hydrogen enriched effect for methane gas on OH profile with 45° swirl vane angle and 151 Slpm air flow [hydrogen enriched ratio(%), equivalence ratio]

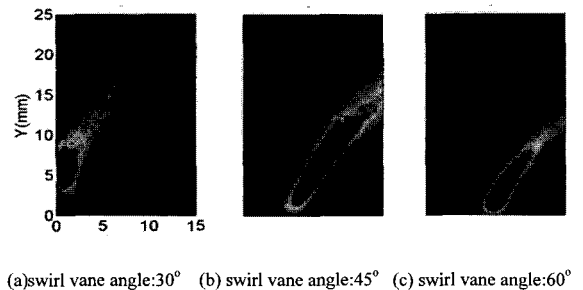


Fig. 9 Swirl intensity effect on OH profile with 9% hydrogen enriched methane gas and 151 Slpm air flow

을 알 수 있다. OH 라디칼은 화염의 안정성에 크게 관여하기 때문에<sup>10)</sup> Fig. 4의 수소 혼소 시 화염 안정성 증가는 OH 라디칼의 증가에 영향을 받는 것으로 예상할 수 있다.

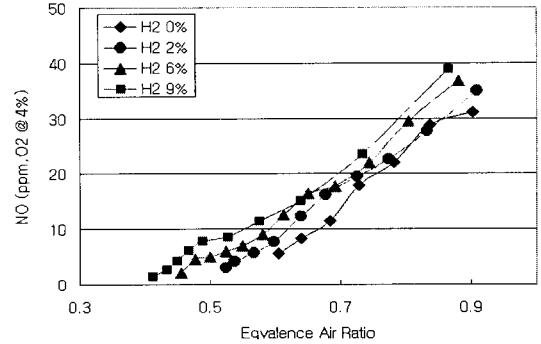
Fig. 9는 Fig. 7과 동일한 연소조건인 9% 수소를 메탄에 혼합한 연료를 이용하여 연소용 공기량을 15l Slpm로 한 경우 선회각의 변화에 대한 OH 자발광 영향을 나타낸 결과이다. Fig. 9의 결과로부터 선회각이 클수록 재순환가스에 의한 연소영역의 회색으로 OH라디칼의 발생분포 영역이 감소됨을 알 수 있다. 그리고 선회각이 클수록 높은 농도의 OH라디칼이 상류로 이동된다. 이것은 재순환가스가 연소영역을 회색시키는 역할을 하지만 또한 상류부분의 점화에 기여하기 때문에 선회각이 큰 선회기를 사용하는 경우 재순환 유동이 증가되어 연소기 출구에서 연료에 점화에너지를 보다 많이 공급하기 때문에 Fig. 7에서 예상한바와 같이 초기 점화가 빠르게 진행되어 연소영역은 상류로 이동하는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 10, Fig. 11 그리고 Fig. 12는 메탄에 대한 수소의 혼합비에 대하여 선회각이 30°, 45°, 60° 인 선회기를 사용, 연소용 공기량을 변화시켜 NO, NO<sub>2</sub>와 CO의 배출 농도를 당량비에 대하여 4% O<sub>2</sub>를 기준으로 나타낸 결과이다.

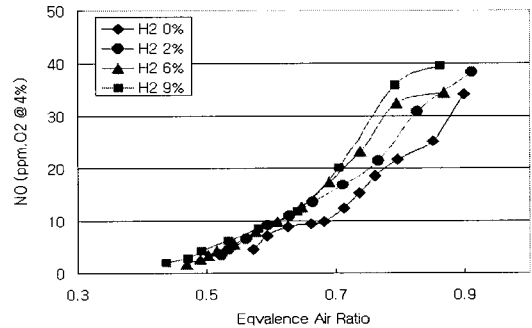
Fig. 10의 결과로부터 NO 배출농도는 연소용 공기량을 증가시켜 당량비를 작게 하는 경우 과잉공기의 영향으로 연소영역이 냉각되어 NO의 배출이 적게 되는 것을 예상할 수 있다. 그리고 선회각이 클수록 재순환가스의 공급량증가로 인한 불균일 고온 점(hot spot)의 발생 억제와 연소영역의 냉각으로 NO의 발생이 감소되는 결과를 예상할 수 있다

Fig. 10의 결과로부터 수소를 혼소하는 경우 NO의 배출이 증대되는 것을 알 수 있는데 동일한 저위발열량(5,000 kcal) 조건에서 실험이 수행되었기 때문에 동일한 당량비에서는 계산된 예혼합가스의 단열화염 온도 차이는 없지만 수소를 혼소하는 경우 NO의 배출이 증가되는 것은 Fig. 6에서 예상하였듯이 수소 혼소가 연소반응을 빠르게 증

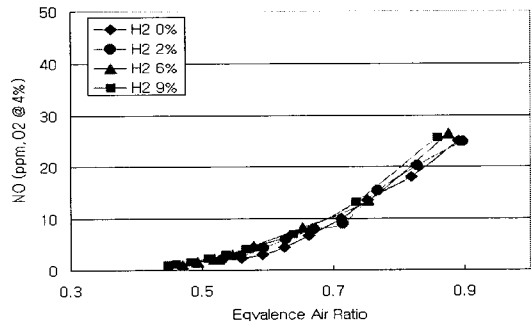
가시킴으로서 연소영역을 급팽창시켜 상대적으로 차가운 재순환가스의 유입을 억제함으로써 실제 화염온도가 증가되기 때문으로 예상할 수 있다. 그러나 이러한 수소 혼소에 의한 재순환가스의 유동 억제는 선회각도 증가에 의한 재순환 유동의 활성



(a) swirl vane angle. : 30°



(b) swirl vane angle. : 45°



(c) swirl vane angle : 60°

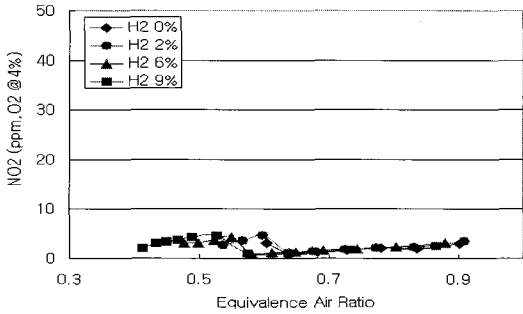
Fig. 10 Effect of swirl intensity on NO Emission for different amount of hydrogen enrichment

수소 첨가가 예혼합 메탄 화염의 NOx 생성에 미치는 영향

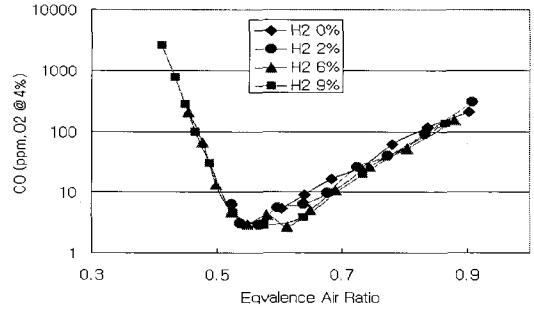
화에 비하여 상대적으로 작기 때문에 선회강도가 큰 선회기를 사용하는 경우 수소 혼소에 의한 NO 배출 증가 효과는 감소되는 것으로 예상되지만 이에 대한 세부적인 연구가 추후로 필요하다. Fig. 10의 결과로부터 수소를 혼소하는 경우 NO의 배출은 조금 증가하지만 낮은 당량비에서 연소가 가능하기 때문에 수소 혼소에 의한 NO의 상승효과

를 상쇄시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

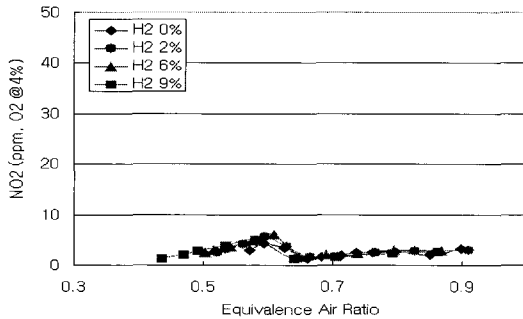
Fig. 11은 Fig. 10과 동일한 연소조건에서 NO<sub>2</sub> 배출농도 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10과 Fig. 11의 비교로부터 NO<sub>2</sub>배출농도는 NO에 비하여 상대적으로 아주 낮으며 연소용 공기량 및 선회강도에 대하여 일정한 경향을 갖지 않음을 알 수 있다. Fig. 11의 NO<sub>2</sub> 배출 농도로부터 모든 연소 조건에



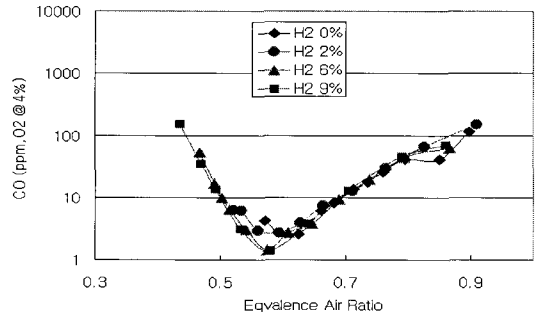
(a) swirl vane angle : 30°



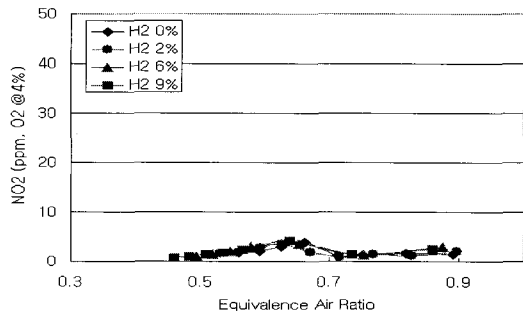
(a) swirl vane angle : 30°



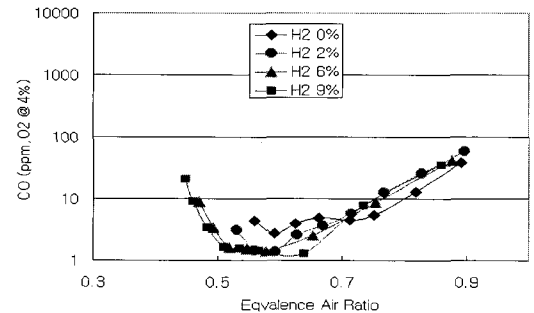
(b) swirl vane angle : 45°



(b) swirl vane angle : 45°



(c) swirl vane angle : 60°



(c) swirl vane angle : 60°

Fig. 11 Effect of swirl intensity on NO<sub>2</sub> Emission for different amount of hydrogen enrichment

Fig. 12 Effect of swirl intensity on CO Emission for different amount of hydrogen enrichment

서 당량비 0.55-0.65 부근에서 NO<sub>2</sub>가 최고 농도를 나타내며 당량비가 0.55-0.65 이상이거나 이하인 경우 NO<sub>2</sub>의 발생이 감소된다. 이 결과는 반응영역에서 NO<sub>2</sub> 생성에 중요한 역할을 하는 중간 생성물인 O 및 OH 라디칼에 의한 것으로<sup>5)</sup> 당량비가 0.55이하인 경우 과잉의 공기량에 의하여 연소영역이 냉각되어 그리고 0.65이상인 경우 연소영역에서 산소 농도가 저하되어 O 및 OH 라디칼의 발생이 억제되기 때문으로 예상된다.

Fig. 12는 Fig. 10과 동일한 연소조건에서 CO 배출농도 결과를 나타낸 것이다. Fig. 12의 결과로부터 당량비가 0.55미만에서 당량비가 낮아질수록 연소영역의 냉각으로 연소가 불안정해져서 CO의 배출은 증가되며 수소의 혼합율을 증가시키는 경우 순수메탄에 비하여 낮은 단열화염 온도까지 화염은 존재하지만 연소영역의 냉각으로 당량비가

감소할수록 CO의 배출량은 증가하게 된다. 그리고 당량비가 0.65이상에서는 연소용 공기의 공급량 감소로 인한 연료로의 산소 공급 저하로 CO의 배출은 증가되는 것으로 생각된다.

Fig. 12의 결과로부터 선회각이 클수록 CO의 배출은 감소되는데 이것은 선회각이 클수록 재순환유동의 증대로 배출되는 CO가 재순환 유동에 의하여 연소영역으로 이동되어 다시 연소되어 재연소가 일어나거나 산소를 포함하는 배기가스가 연소영역으로 이동되어 연료로 원활한 산소공급이 이루어지기 때문으로 생각된다

Fig. 13은 45°의 선회각이 설치된 확산 연소기를 사용하여 예혼합 연소기의 연소조건과 동일한 용량(저위발열량 : 5,000 kcal)으로 수소를 메탄에 혼소하는 경우 NO<sub>x</sub>와 CO의 배출 특성을 비교한 결과이다.

Fig. 13 (a)의 확산 화염에서 NO<sub>x</sub> 배출 결과로부터 당량비에 크게 영향을 받는 예혼합 화염에 비하여 당량비가 낮은 일부 영역을 제외하고는 확산화염의 NO<sub>x</sub> 배출은 당량비에 크게 영향을 받지 않는데 이는 연료와 공기가 예혼합되어 연소기에 공급되는 예혼합 화염에 비하여 확산화염은 과잉의 연소용 공기가 국부적 고온부의 발생을 억제하지 못하기 때문으로 생각된다.

그러나 당량비가 더욱 낮아지면 확산 화염은 연소 한계에 도달하게 되어 연소가 불안정해져 연소영역의 온도가 급격히 저하되어 NO<sub>x</sub>의 배출은 급감하게 된다. 또한 예혼합 화염과 마찬가지로 수소를 혼소하는 경우 순수메탄에 비하여 높은 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 보이는데 이것은 확산화염의 경우 수소화염은 메탄화염에 비하여 화염온도가 높기 때문에 수소를 혼소하는 경우 화염 온도의 상승으로 NO<sub>x</sub>의 배출이 증가하게 되는 것으로 생각된다. Fig. 13 (b)의 결과로부터 확산화염에서 수소를 혼소하는 경우 오히려 연료중의 C성분이 감소함에도 CO의 배출이 예혼합 화염에 비하여 크게 되는데, 수소는 단위 부피당에 저위발열량이 메탄에 비하여 작기 때문에 수소를 혼소하는 경우 중심에서 분출되는 혼합 연료의 유량증가에 의한 속도 증가

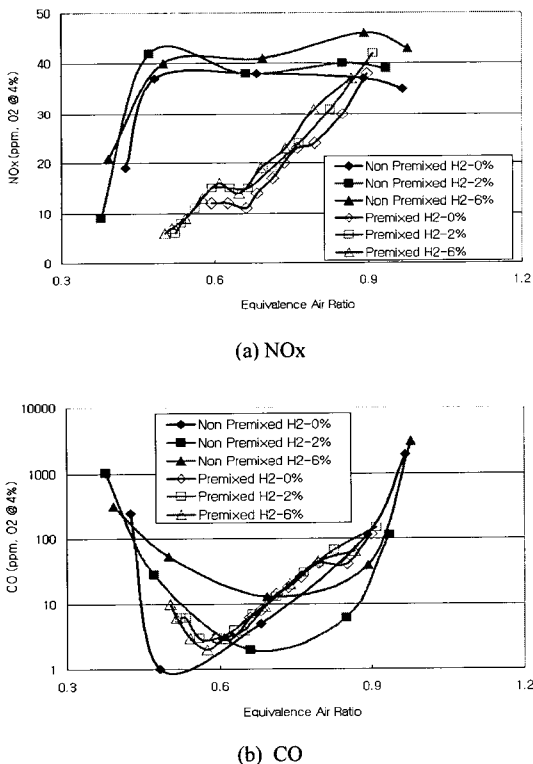


Fig. 13 NO<sub>x</sub> and CO emission under premixed and diffusion combustion conditions (swirl vane angle : 45°)



로 조건에 따라 수소 혼합 연료가 재순환영역을 관통하게 되어 CO의 배출이 증가되는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 메탄에 연소성이 우월한 수소를 일부 혼합하는 경우 발생하는 여러 연소특성과 NOx의 배출의 변화를 알아보는데 목표를 두고 있다. 본 연구를 위하여 실험실 규모(5,000 kcal/hr)의 메탄/수소 혼소용 예혼합 연소기를 제작 선회기 강도, 연소용 공기량 그리고 수소 혼소가 메탄 예혼합 화염에 미치는 영향을 화염의 가시화, 배기가스 분석과 OH 라디칼 분석 방법 등을 이용하여 예상하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 메탄에 대한 수소의 혼합율을 높일수록 화염이 안정되어 낮은 당량비에서 연소가 가능하며 수소 혼합율이 증가할수록 선회각이 큰 선회기를 사용하면 냉각된 재순환가스의 유량이 증가함으로써 화염이 불안정하게 된다.
- 2) 수소 혼합율을 증가시킬수록 화염의 반응속도가 증가되어 화염 길이가 감소된다.
- 3) 수소 혼합율이 증가되는 경우 OH라디칼의 농도가 크게 되고 고농도의 OH 라디칼의 분포가 상류로 이동된다.
- 4) 수소를 혼소하는 경우 NOx의 배출은 조금 증가하지만 낮은 당량비에서 연소가 가능하기 때문에 화염의 불안정 없이 NOx의 배출을 저감할 수 있다.
- 5) 예혼합 연소기는 확산 연소기에 비하여 희박 연소 영역에서 NOx의 배출이 적다.

#### 후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다(KRF-2005-214-D00238).

#### 참 고 문 헌

- 1) Fenimore, C. P. Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames, 13th Sym.(Int.) Comb., The combustion Institute, 1971, pp. 373-380.
- 2) H. S. Kim, A. H. Lim, and K. Y. Ahn : Study on the Combustion Characteristics of a Lean Premixed Combustor, J. Korean Soc., Combustion, Vol. 9, 2004, pp. 25-31.
- 3) E. R. Hawkes and J. H. Chen : Direct numerical Simulation of Hydrogen-Enriched Lean Premixed Methane-Air Flames, Combustion and Flame, Vol. 138, 2004, pp. 242-258.
- 4) A. R. Choundhuri and S. R. Gollahalli: Combustion Characteristics of Hydrogen-Hydrocarbon Hybrid fuels, Hydrogen Energy, Vol. 25, 2000, pp. 451-462.
- 5) A. R. Choundhuri and S. R. Gollahalli: Characteristics of Hydrogen-Hydrocarbon composite fuel Turbulent jet Flame, Hydrogen Energy, Vol. 28, 2003, pp. 445-454.
- 6) G. A. Karim, I. Wierzba and Y. Al-Alousi : Methane-Hydrogen Mixture as a Fuels, Hydrogen Energy, Vol. 21, 1996, pp. 625-631.
- 7) H. S. Kim, S. W. Baek, J. Yu : Formation of Nitric Oxide in a Staged Gas Flame, Combustion Science & Technology, Vol. 166, 2001, pp. 41-66.
- 8) C. J. Dasch: One-dimensional tomography : a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods, Applied Optics, Vol. 31, No. 8, 1992.
- 9) A. K. Gupta, D. G. Lilley, and N. Syred : Swirl Flows, Abacus, Tunbridge Wells, UK, 1984.
- 10) R. W. Schefer: Hydrogen Enrichment for Improved Lean Flame Stability, Hydrogen Energy, Vol. 28, 2003, pp. 1131-1141.
- 11) G. S. Jackson, R. Sail, J. M. Plaia C. M, Boggs

and K. T. Kiger : Influence of H<sub>2</sub> on the response of Lean Premixed CH<sub>4</sub> Flames to High Strained Flows, *Combustion and Flame*, Vol. 132, 2003, pp. 503-511.

12) R. W. Schefer, D. M. Wickall and A. K.

Agrawal: Combustion of Hydrogen-Enriched Methane in Lean Premixed Swirl-Stabilized Burner, *Proceeding of The Combustion Institute*, Vol. 29, 2002, pp. 843-851.