

메탄/수소 혼합 가스의 예혼합 선회 연소특성

김한석[†], 이영덕*, 최원석*, 안국영*

*한국기계연구원

Combustion Characteristics of Hydrogen/Methane gas in Pre-mixed Swirl Flame

HANSEOK KIM[†], YOUNGDUK LEE*, WONSEOK CHOI*, KOOKYOUNG AHN*

**Korea Institute of Machinery & Materials,
171 Jangdong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea*

ABSTRACT

The effects of hydrogen enrichment to methane have been investigated with swirl-stabilized premixed hydrogen-enriched methane flame in a laboratory-scale pre-mixed combustor. 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 characteristics were examined for different amount of hydrogen addition to the methane fuel and different swirl strengths. The hydrogen addition effects and swirl intensity on the combustion characteristics of pre-mixed methane flames were examined using micro-thermocouple, particle image velocity meter (PIV) and chemiluminescence techniques to provide information about flow field. The results show that the flame area increases at upstream of reaction zone because of increase in ignition energy from recirculation flow for increase in swirl intensity. The flame area is also increased at the downstream zone by recirculation flow because of increase in swirl intensity which results in higher centrifugal force. The higher combustibility of hydrogen makes reaction faster, raises the temperature of reaction zone and expands the reaction zone, consequently recirculation flow to reaction zone is reduced. The temperature of reaction zone increases with hydrogen addition even though the adiabatic flame temperature of the mixture gas decreases with increase in the amount of hydrogen addition in this experiment condition because the higher combustibility of hydrogen reduces the cooler recirculation flow to the reaction zone.

KEY WORDS : pre-mixed combustor(예혼합 연소기), hydrogen enriched methane flames(메탄의 수소 혼소), chemiluminescence(자발광), swirl(선회), adiabatic flame temperature(단열 화염온도)

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

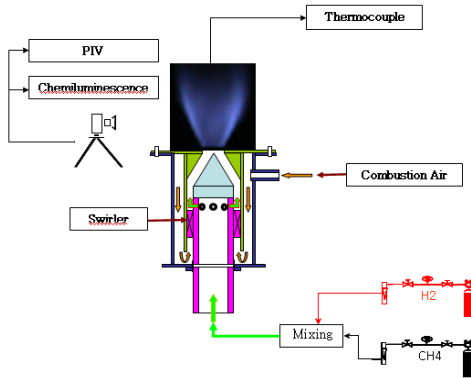


Fig. 1 Experimental apparatus of pre-mixed flame combustor

1. 서 론

최근 석유 자원의 부족으로 고유가 시대가 오고 있으며, 이에 따라 석유에너지를 대체할 수 있는 에너지 자원 개발에 많은 연구가 이루어지고 있다. 석유를 대체할 에너지원으로는 바이오 연료화, 폐기물 연료화 그리고 석탄 복합발전 등이 대두되고 있다. 저질연료의 경우 연료를 직접 연소시켜 사용하지 않고 개질(reforming)을 통하여 연료를 고급화하고 있다. 개질된 연료는 청정할 뿐만 아니라 우월한 연소특성을 지닌 수소를 포함하고 있다.

일반 탄화 수소가스에 비하여 연소영역 온도가 높기 때문에 환경오염의 원인이 될 수 있는 NO_x 생성의 증가가 우려된다. 이렇게 연료 중 수소농도의 증가는 화염온도를 상승시켜 NO_x의 생성을 증가시킬 수 있다. 그러나 수소의 우월한 연소특성으로 인하여 희박연소가 가능하기 때문에 희박연소 방식을 이용하는 경우 화염온도를 낮출 수 있어 NO_x 생성 증가를 상쇄시킬 수 있다고 보고되고 있다¹⁻⁴⁾.

연료 중의 수소 농도는 연소 영역 및 재순환 유동에 영향을 주기 때문에 합성연료용 희박 연소기의 설계 시 기존의 일반 탄화 석유가스 설계방법을 보완 없이 적용할 수 없어 합성연료용 희박 연소기의 적정 설계를 위해서는 이에 대한 정보가 필요하다.

본 연구에서는 합성가스에 포함된 수소가 예혼

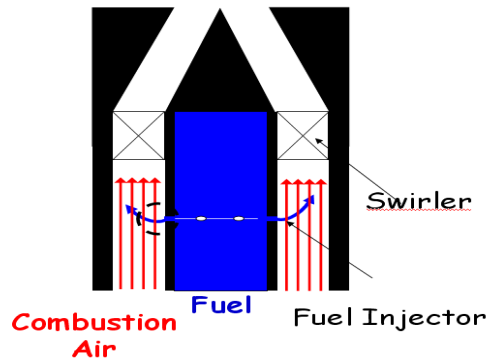


Fig. 2 Details of pre-mixed flame combustor

합화염에 미치는 영향을 예상하기 위하여 수소가 혼합된 메탄을 이용, 실험실 규모(5,000 kcal/hr)의 예혼합 희박 연소기를 제작하여 연소 실험을 수행하였다. 화염대의 OH, CH 라디칼 분포는 OH, CH 필터를 사용하였으며 유동가시화는 PIV를 사용하였다. 그리고 화염대 내부의 온도 분포는 열전대를 사용하여 예상을 하였으며, 3종류 선회각을 가진 선회기를 사용하여 선회강도에 대한 영향을 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 5.81 kW의 열용량으로 설계하였다^{5,6)}.

연소용 공기는 압축기로부터 보정된 유량계를 이용, 유량을 예상하여 공급하였으며, Fig. 2와 같이 연소기 출구 상류 10 cm 지점에서 2 mm 직경 5개의 수소/메탄 혼합 가스 분출구를 통하여 연소용 공기와 연소기에서 예혼합하여 20 mm 직경의 연소실 입구로 공급되는 구조를 취하였다. 화염의 안정성을 위하여 제작된 선회기는 선회각이 30° (S.N.=0.471), 45° (S.N.=0.816), 그리고 60° (S.N.=1.41)인 3종류의 선회기를 이용 하였다⁵⁾. 메

Table 1 Experimental conditions (Air: 142 SLPM, heat load: 5.81 kW)

Hydrogen / Methane Concentration (wt %)		Flow rate (SLPM)	Equivalent Ratio (Φ)	Adiabatic Flame Temp. ($^{\circ}$ C)	Injection Velocity of Pre-mixed gas (m/sec)
Case 1	H ₂ (0%)	0.000	0.655	1487.19	8.051
	CH ₄ (100%)	9.766			
Case 2	H ₂ (4%)	2.935	0.640	1474.86	8.156
	CH ₄ (96%)	8.806			
Case 3	H ₂ (9%)	6.138	0.623	1461.42	8.271
	CH ₄ (91%)	7.758			

탄/수소 합성가스는 Table 1과 같이 질량기준으로 수소를 최고 9% 농도로 동일한 저위발열량을 기준으로 조성된 수소/메탄 혼합 연료들을 이용하였다. 이 경우 단일화염온도는 동일한 공기 공급량에 대하여 수소혼합비가 증가할수록 계산된 단일화염온도가 낮아지게 된다. 연소영역의 온도 측정을 위하여 bead 직경이 50micro meter인 R-type 열전대를 사용하였으며 신호는 AD 시스템을 통하여 PC에 저장하도록 하였다. 측정시간은 3분으로 하여 평균값을 그 지점의 온도로 예상하였으며 열전대의 복사에 의한 오차는 무시하였다⁷⁾.

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 하였다⁸⁾.

각 선회기에 대한 연소영역의 내부 유동을 측정하기 위하여 2차원 PIV(particle image velocimetry)를 사용하였으며 가시화용 입자는 평균 직경 40 micro meter의 hollow glass micro-balloons을 이용하였다.

3. 실험결과

Fig. 3은 수소 혼소특성을 예상하기 위하여 45°의 선회각을 가진 선회기를 이용 순수 메탄 연료와 9% 질량의 수소를 혼합한 화염에 대하여 (a)화염사진, (b) PIV측정 결과, (c) OH 그리고 (d)는

CH 자발광을 나타낸 결과이다. Fig. 3 (a)의 화염 사진결과로부터 수소혼소를 하는 경우 화염의 형상 변화는 크지 않으며 광도는 증가됨을 알 수 있다. Fig. 3 (b)의 PIV 결과로부터 수소를 혼합하는 경우 중심부의 재순환가스의 유동이 억제됨을 알 수 있다. 이것은 수소의 높은 연소성이 연소가스의 온도를 급격히 상승시켜 팽창시킴으로서 연소중심부의 재순환가스의 유동을 억제하는 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 3 (c)의 OH 자발광 결과로부터 수소를 혼합하는 경우 단일화염 온도는 낮지만 수소의 높은 연소성 때문에 급격한 연소 반응이 일어나 높은

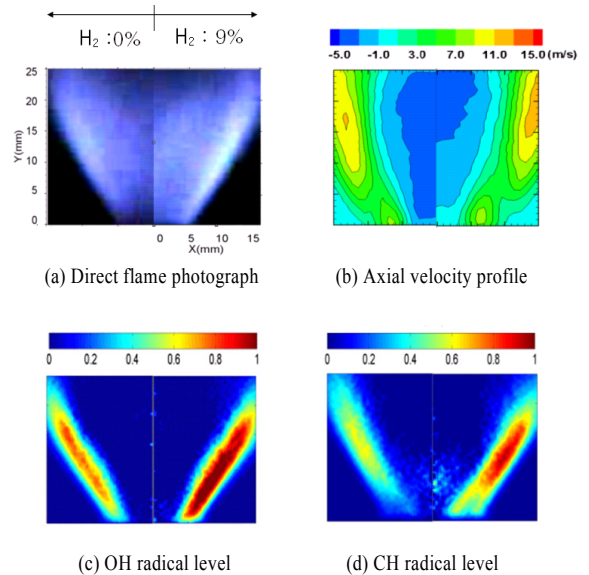


Fig. 3 Effects of hydrogen enrichment to methane (swirl angle : 45°)

메탄/수소 혼합 가스의 예혼합 선회 연소특성

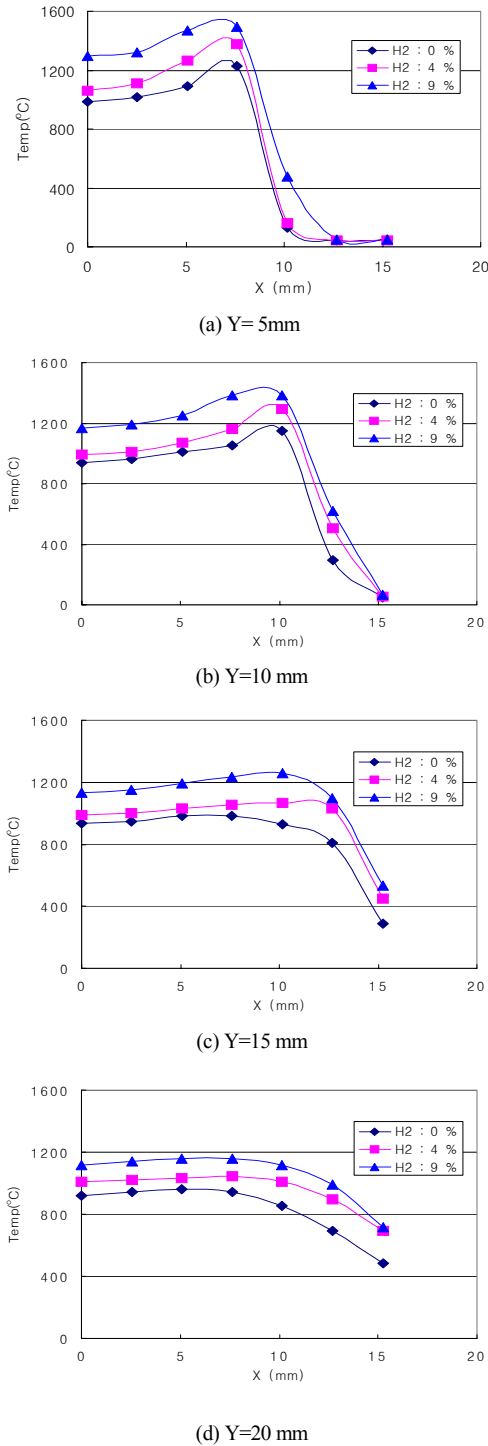


Fig. 4 Temperature profiles of various hydrogen enriched methane flame

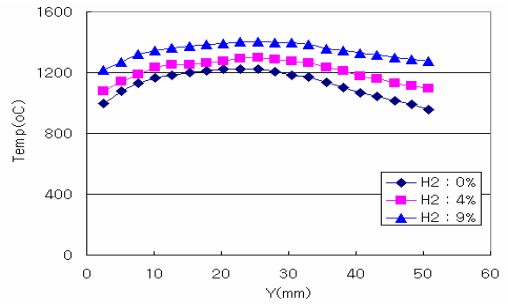


Fig. 5 Axial temperature ($r=0$) profiles of hydrogen enriched methane flame

OH 자발광을 보임을 알 수 있다. Fig. 3 (d)의 연소영역 중 연료 과농부에 국부적으로 발생되는 CH 자발광 결과로부터 수소를 혼합하는 경우 연료중의 C 성분이 감소되지만 수소의 높은 연소성 때문에 급격한 연소 반응이 일어나 높은 CH 자발광을 보임을 알 수 있다.

Fig. 4는 메탄과 수소 혼합율이 4%, 9%인 경우 연소실 각 높이에서 반경방향의 온도분포를 나타낸 결과이다. 본 실험 조건에서 수소를 혼소하는 경우 단일화염온도가 낮아지지만 Fig. 3의 PIV결과에서 언급하였듯이 수소의 높은 연소성 때문에 수소를 혼소하는 경우 연소영역을 급격히 팽창시킴으로서 냉각된 재순환 가스의 공급이 억제되고 이에 따라 온도가 높게 되는 것을 예상할 수 있다. 그리고 연소기 출구 5mm 지점에서 측정된 Fig. 4 (a)의 결과로부터 중심부는 외곽부에 비하여 온도가 낮는데 이것은 중심부의 냉각된 재순환가스의 공급에 의한 것이며, 연소실 출구로부터 멀어짐에 따라 이러한 영향은 작아지는데 이것은 Fig. 3의 PIV결과에서와 확인되듯이 재순환가스의 유동이 감소되기 때문이다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 연소 조건에서 연소실 중심부의 화염온도를 측정한 결과이다. 본 실험조건에서 수소를 9% 혼소하는 경우 순수 메탄연료에 비하여 계산된 단일화염 온도는 26°C 낮지만 실험 결과는 수소를 혼소하는 경우 높은 온도분포를 보임을 알 수 있다. 이 결과는 수소의 높은 연

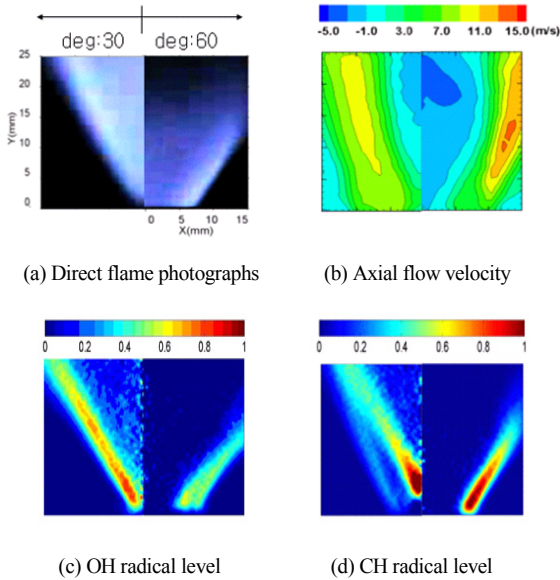


Fig. 6 Effects of swirl intensity to hydrogen enriched methane

소성 때문에 수소를 혼소하는 경우 연소영역을 급격히 팽창시킴으로서 냉각된 재순환 가스의 공급이 억제되고 이에 따라 온도가 높게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 순수메탄과 수소혼소농도가 4%, 9%인 경우 연소실 중심부의 화염온도를 측정된 결과이다. 본 실험조건에서 수소를 혼소하는 경우 순수메탄연료에 비하여 Table 1에서 제시한 바와 같이 계산된 단일화염 온도는 낮게 되지만 실험 결과는 수소를 혼소하는 경우 높은 온도분포를 보임을 알 수 있다. 이 결과는 수소의 높은 연소성 때문에 수소를 혼소하는 경우 연소영역을 급격히 팽창시킴으로서 냉각된 재순환 가스의 공급이 억제되고 이에 따라 온도가 높게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 선회각도에 대한 예혼합 화염의 영향을 예상하기 위하여 메탄에 수소를 4% 혼합한 연료를 사용, 30°와 60°의 선회각을 가진 선회기에 대하여 Fig. 3과 같이 (a)화염사진, (b)PIV측정 결과, (c) OH 그리고 (d) CH 자발광을 나타낸 결과이다. Fig. 6 (a)의 화염 사진결과로부터 선회기의 선회각이 큰 경우 재순환 유동이 증가하여⁹⁾ 연소

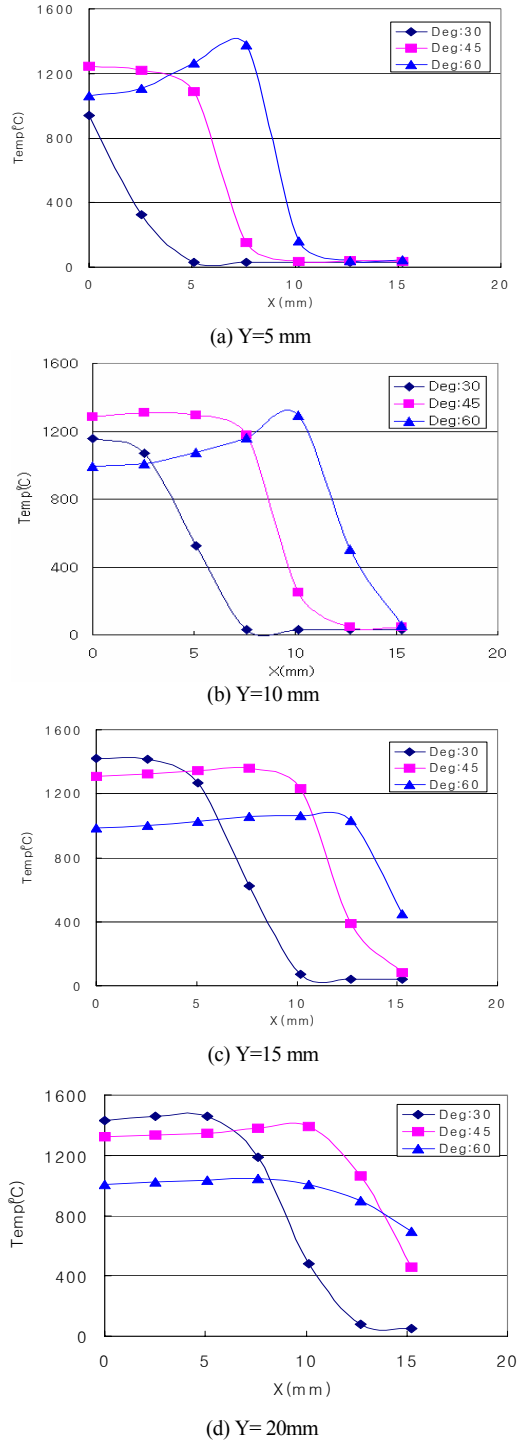


Fig. 7 Temperature profiles of hydrogen enriched methane flame with various swirler angles

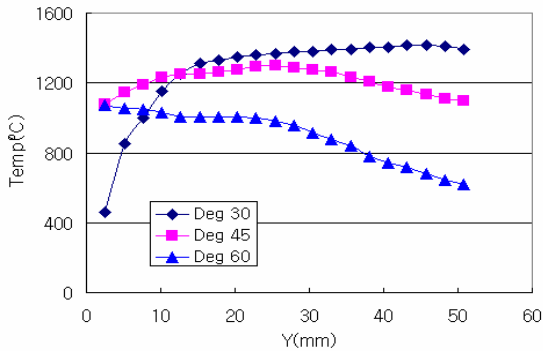


Fig. 8 Axial temperature($r=0$) profiles temperature profiles of hydrogen enriched methane flame with various swirler angles

기의 연료 분출구 전면에서 화염이 존재하며 하류로 진행할수록 화염의 폭은 증가하게 된다.

Fig. 6 (b)의 PIV 실험 결과로부터 선회각이 큰 경우 재순환 유동이 증가함을 확인할 수 있으며 Fig. 6 (c)의 OH 자발광 결과로부터 선회각이 크면 재순환가스의 공급이 증가하여 연소 영역의 회석이 증가하기 때문에 낮은 OH 자발광을 보이게 된다.

Fig. 6 (d)의 CH 자발광 결과로부터 선회각이 작으면 재순환유동이 감소하기 때문에 재순환에 의한 회석효과가 감소해 연소기 출구에서 국부적으로 강한 CH 자발광을 보이게 되지만 선회각이 큰 경우 재순환 유동이 증가하게 되어 회석효과가 증가하게 되어 OH 자발광의 경우와 같이 CH 자발광 영역이 넓어진다.

Fig. 7은 수소 혼합율 4%인 수소/메탄 혼합연료를 이용하여 연소실 각 높이에서 선회각의 선회각 변화에 대한 반경방향의 화염 온도분포를 나타낸 결과이다. 상류부인 연료 분출구 중심에서 5mm 위치에서의 온도분포를 나타내는 Fig. 7 (a)의 결과로부터 선회각에 대한 일정한 온도특성 경향이 없음을 알 수 있다. 중심부의 화염온도는 선회각이 가장 작은 30°의 경우가 가장 낮고 60° 그리고 45° 순임을 알 수 있는데 이것은 재순환가스가 연소영역을 안정화 시키거나 냉각 시키는 역할을 동시에 하고 있기 때문으로 생각된다. 즉 Fig.

6에서 언급 하였듯이 선회각이 가장 작은 30°의 경우 재순환가스의 공급이 적어 화염이 불안정화 되기 때문에 연소실 상류부의 온도가 낮지만 선회각이 45°인 경우에 비하여 60°인 경우 온도가 낮은 것은 증가된 재순환가스가 화염대를 냉각시키기 때문으로 생각된다. Fig. 7 (d)의 하류부인 연료 분출구 중심에서 20mm 위치에서의 온도 결과로부터 중심부는 선회각이 큰 선회각을 사용할수록 재순환가스의 유동 증가에 의한 화염대의 냉각으로 온도가 낮아지게 된다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 연소 조건에서 연소실 중심부의 화염온도를 측정된 결과이다. Fig. 7에서 언급하였듯이 선회각이 클수록 재순환가스 유동의 증가에 의한 화염의 안정화로 상류부의 온도가 높지만 하류로 갈수록 재순환가스의 연소영역 회석으로 연소영역이 냉각됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

합성 연료에 많이 포함되는 수소의 예혼합연소 특성을 규명하기 위하여 실험실 규모의 수소/메탄 혼소용 예혼합 연소기를 제작하여 메탄에 대한 수소 농도 및 선회각 변화에 대하여 화염가시화, PIV, OH 및 CH 자발광을 측정하여 특성을 비교하였다. 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 동일 발열량 기준으로 메탄에 수소를 혼소하는 경우 단열화염온도는 감소되지만 선회각을 이용하여 예혼합 연소하는 경우 실제 화염온도는 증가하는데 이는 수소의 높은 연소성으로 인하여 연소반응이 급격히 일어나기 때문에 이에 따라 발생하는 가스의 온도를 급격히 증가시켜 부피를 급팽창시킴으로서 재순환가스의 유동을 억제하며 이에 따라 연소영역의 온도가 높게 된다.
- 2) 수소를 혼소하는 경우 수소의 높은 연소성 때문에 OH 및 CH 자발광이 증가하게 된다.
- 3) 선회각을 증가시키면 재순환가스 유동이 증가

하게 되어 연소실 하류부에서 화염폭이 증가하지만 한편으로는 연소영역을 냉각시키는 역할도 한다.

참 고 문 헌

- 1) A. R. Choundhuri and S. R. Gollahalli, "Combustion Characteristics of Hydrogen-Hydrocarbon Hybrid fuels", *Hydrogen Energy*, Vol. 25, 2000, pp. 451-462.
- 2) A. R. Choundhuri and S. R. Gollahalli, "Characteristics of Hydrogen-Hydrocarbon composite fuel Turbulent jet Flame", *Hydrogen Energy*, Vol. 28, 2003, pp. 445-454.
- 3) G. A. Karim, I. Wierzba and Y. Al-Alousi, "Methane-Hydrogen Mixture as a Fuels", *Hydrogen Energy*, Vol. 21, 1996, pp. 625-631.
- 4) R. W. Schefer, "Hydrogen Enrichment for Improved Lean Flame Stability", *Hydrogen Energy*, Vol. 28, 2003, pp. 1131-1141.
- 5) H. S. Kim, Y. D. Lee, K. Y. Ahn, "Hydrogen Enrichment Effects on NO_x Formation in Pre-mixed Methane Flame", *Korea Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 18, 2007, pp. 75-84.
- 6) R. W. Schefer, D. M. Wickall, 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.
- 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.