

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.5.343

메탄/순산소 예혼합 화염의 선회특성

김한석[†] · 최원석* · 조주형** · 안국영**

(2008년 12월 26일 접수, 2009년 4월 2일 수정, 2009년 4월 2일 심사완료)

Combustion Characteristics of Methane/Oxygen in Pre-Mixed Swirl Flame

Hanseok Kim, Wonseok Choi, Juhyeong Cho and Kookyong Ahn

Key Words: Pre-Mixed Combustor(예혼합 연소기), Swirl-Stabilized(선회기로 안정화된), Chemiluminescence(자발광), Recirculation Flow(재순환 유동)

Abstract

The present study has experimentally investigated the effects of CO₂ diluted oxygen on the structure of swirl-stabilized flame in a lab-scale combustor. The methane fuel and oxidant mixture gas (CO₂ and O₂) were mixed in a pre-mixer and introduced to the combustor through different degrees of swirl vanes. The flame characteristics were examined for various amount of carbon dioxide addition to the methane fuel and various swirl strengths. The effects of carbon dioxide addition and swirl intensity on the combustion characteristics of pre-mixed methane flames were examined using chemiluminescence techniques to provide information about flow field. The results show that the hot combustion zone increases at the upstream reaction zone because of an increase in the recirculation flow for an increase in swirl intensity. The hot combustion zone is also increased at the downstream zone by recirculation flow because of an increase in swirl intensity which results in higher centrifugal force. The OH and CH radical intensities of reaction zone decrease with carbon dioxide addition because the carbon dioxide plays a role of diluted gas in the reaction zone.

———— 기호설명 ————

- Φ : 당량비(Equivalence ratio)
- S : 선회수(Swirl number)
- d : 선회기 내경(Swirler root diameter)
- d_h : 선회기 외경(Swirler tip diameter)
- Θ : 선회각(Swirler vane angle)

1. 서론

연소기에 공기 대신 순산소를 공급하는 순산소 연소의 생성 가스는 대부분이 물과 이산화탄소로 이 생성가스를 상온으로 응축하는 경우 기상인 이산화탄소와 액상인 물로 되어 분리가 수월하기 때문에 지구온난화 가스인 이산화탄소를 고농도로 회수할 수 있다. 이러한 순산소 연소 방법은 지구온난화를 억제할 수 있는 획기적인 연소 방법으로 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾

2005년 2월 교토의정서에 따른 기후변화협약이 발효됨으로서 국제적으로 본격적인 이산화탄소 배출규제가 시작되었으며 우리나라의 경우 2013년부터 본 규제가 적용될 예정이므로 이산화탄소

[이 논문은 대한기계학회 2008년도 추계학술대회 (2008. 11. 5.-7. 용평리조트) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 한국기계연구원

E-mail : haskim@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7368 FAX : (042)868-7284

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한국기계연구원

배출저감기술 개발은 국내에서도 시급한 당면과제이다.⁽²⁾

순산소 연소를 하는 경우 당량비 1 조건에서 단열화염 온도가 3000K 이상으로 높게 되어 연소기 내부의 열 손상이 우려된다.⁽³⁾ 따라서 이러한 열 손상 문제를 해결하기 위해서 배출가스인 CO₂와 H₂O의 혼합가스 중 CO₂ 혹은 H₂O의 일부를 연소기로 재순환하여 산소와 혼합하여 연소시킴으로써 화염의 온도를 낮추는 방법 등에 관한 연구가 진행되고 있다.^(4,5)

그러나 CO₂ 혹은 H₂O를 산소에 혼합하여 산화제로 이용하는 경우에는 N₂가 포함된 공기와는 열적 물성치가 다르기 때문에 연소 시 화염특성이 변하게 되어 일반 공기 연소기를 보완 없이 사용하면 문제가 발생할 가능성이 있다. 그리고 일반 연소기와 달리 배가스의 CO₂를 고농도로 응축하여 이용하여야 하기 때문에 최소한의 과잉 O₂ 조건에서 완전연소가 이루어져 CO와 Soot의 배출이 최소화 되어야 한다.

본 연구에서는 산소에 CO₂를 혼합한 산화제를 이용한 연소 방식의 연소기 적정 설계를 위하여 메탄 연료용 연소기를 제작하였다. 메탄 연료의 완전 산화반응을 위하여 연소기 입구에 산화제/연료의 예혼합실을 설치한 예혼합형 연소기를 이용하였으며 산소에 혼합되는 CO₂의 혼합비와 선회각도가 화염에 미치는 영향을 검토하기 위하여 광간섭 필터와 ICCD 카메라를 사용하여 OH와 CH 라디칼의 분포를 측정하였으며 각 조건에서의 배가스를 측정하여 분석하였다.

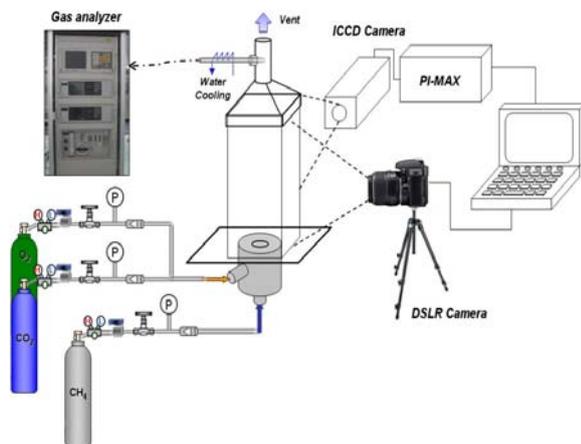


Fig. 1 Experimental apparatus of pre-mixed flame combustion system

2. 실험장치 및 실험조건

CO₂/O₂ 혼합가스를 산화제로 이용한 예혼합 연소 실험장치는 Fig. 1과 같이 연소기, 연료 및 산화제 가스 공급장치 그리고 배가스 및 라디칼 측정 장치로 구성되어 있다.

연료 및 산화제의 공급장치는 각각 보정된 오리피스를 이용하여 공급압력을 기준으로 니들밸브를 이용하여 유량을 조절하였다.

배가스의 농도 측정을 위하여 포집관을 연소실 출구에 설치하였으며 포집된 가스는 수냉관에 의하여 급냉시킨 후 수분제거기 (Water trap)를 통하여 수분을 제거한 후 가스 분석기 (Horiba VA/VS 3000)에 공급하여 측정하였으며, OH와 CH 자발광 측정을 위하여 307nm과 430nm의 필터 (narrow band interference filter)와 ICCD 카메라 (PI-MAX, Princeton Instruments)를 사용하였으며 모든 조건에서 증폭을 128, 노출은 100 ms로 하였다.

실험에 사용된 예혼합 연소기의 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

산화제인 산소와 CO₂는 예혼합된 상태에서 연소기에 공급되어 선회기를 통과하고, 연료는 연소기 출구 상류 5cm 지점에서 직경 2mm인 6개의 연료 가스 분출구를 통하여 반경방향으로 분사되어 연소기 내부의 예혼합실에서 선회기를 통과한 산소/CO₂의 혼합가스와 예혼합 되어 연소실 입구로 공급되는 구조를 취하였다.⁽⁶⁾

선회기의 선회각은 30도(S=0.471), 45도(S=0.816), 그리고 60도(S=1.41)의 3종류를 이용하여 실험을 수행하였다.⁽⁷⁾

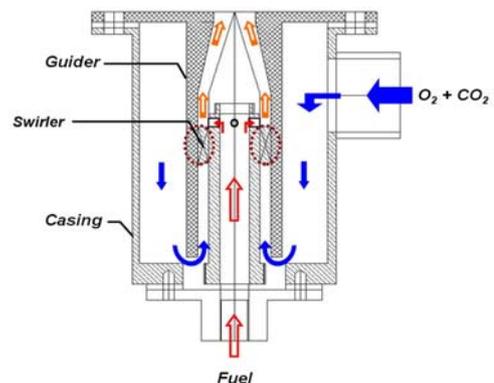


Fig. 2 Detailed view of a pre-mixed combustor

Table 1 Experimental conditions

Gas	flow rate (kg/hr)	Remarks
CH ₄	0.69	
O ₂	2.78	Excess 1%
CO ₂	8.37	2200K
	7.09	2300K
	5.87	2400K

화염의 안정성을 위하여 제작된 선회기의 선회수(Swirl number, S)는 다음과 같이 정의하였다.⁽⁸⁾

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (d_h/d)^3}{1 - (d_h/d)^2} \right] \tan \theta$$

(θ : Swirler vane angle, d : Swirler root diameter, d_h : Swirler tip diameter)

연소실의 형상은 화염가시화를 위하여 한 변이 200mm인 정사각형 단면에 높이 700mm인 정사각기둥 형태로서 연소실 측면에 내열유리창을 설치하였다.

화염 안정성 및 가시화 실험에서 Table 1과 같이 O₂의 공급량은 CH₄ 공급 조건에서 화학적 당량비(Equivalence ratio, Φ)를 기준으로 과잉 산소 공급률(Excess O₂ ratio)을 1%로 하여 CO₂와 예혼합하여 산화제로 이용하였으며, 연료 및 산화제는 모두 상온으로 공급되었다. 산소를 과잉으로 공급할 경우 배가스에서 이산화탄소 회수시 분리가 어려운 점을 고려하여 0.1 ~ 1% 범위의 낮은 과잉 산소 공급조건에서 실험을 수행하였다.

3. 실험결과

3.1 선회각에 대한 화염의 소멸한계 영향

CO₂/O₂ 혼합가스를 산화제로 이용한 메탄 화염의 특성을 예상하기 위하여 CH₄ 공급량과 선회각 변화에 대한 화염 안정성 실험을 수행하였다. 선회기 및 CH₄ 공급량이 정해진 조건에서 CO₂의 공급을 증가시켜 소멸되는 경우를 연소한계 조건으로 가정하였으며 공급 연료량에 대해 연소가능한 CO₂ 최대공급량을 선회각도별로 측정하여 그

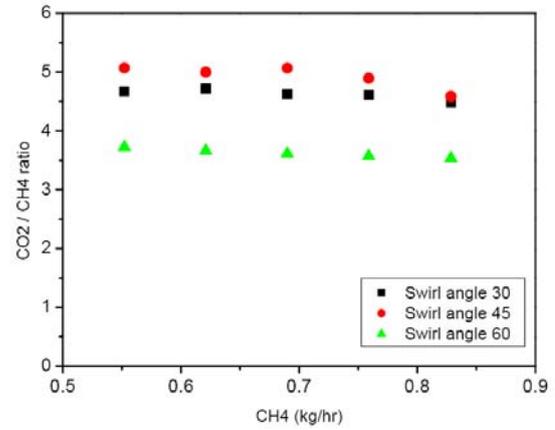
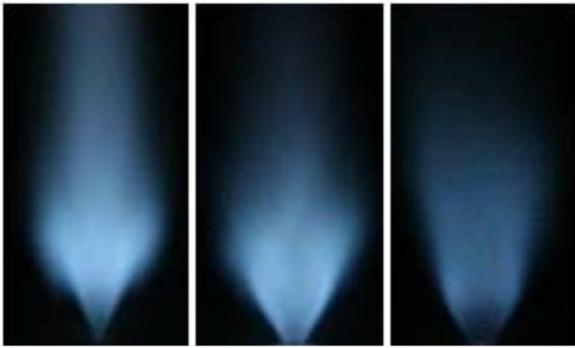


Fig. 3 Blowout characteristics of pre-mixed flame combustor for different swirl angles

결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 결과로부터 본 실험 조건에서 연료 유량이 증가하면 연소기 출구의 혼합가스의 유속이 증가하게 되어 상대적으로 적은 CO₂의 첨가 비에서 소멸됨을 알 수 있다. 선회각이 45도인 경우 소멸 없이 가장 많은 양의 CO₂ 첨가가 가능함을 알 수 있는데 이것은 선회강도에 영향을 받는 재순환가스의 가스 유동의 작용으로 생각된다. 즉 선회각이 큰 60도인 경우 연료 분출구로 공급되는 재순환가스의 유량이 증가하게 되어 연소영역을 희석시켜 화염을 불안정하게 하며 반대로 선회각이 가장 작은 30도인 경우에는 비교적 고온의 재순환가스가 연료 분출구로 적게 공급되어 예혼합가스의 점화가 억제되기 때문으로 생각된다.⁽⁹⁾

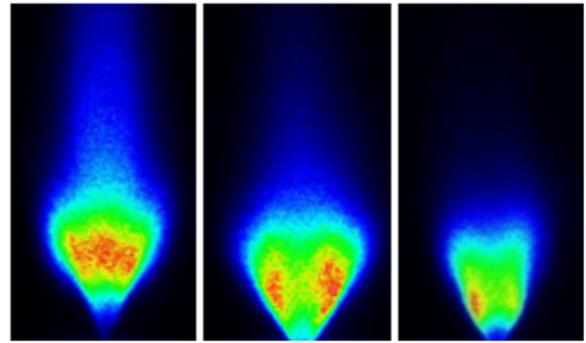
3.2 선회각 변화에 대한 화염특성

Fig. 4는 선회각에 대한 화염 형상의 영향을 예상하기 위하여 CH₄, O₂, CO₂를 각각 0.69, 2.78, 5.87 kg/hr로 공급한 조건에서 선회각 변화에 대한 화염의 형상을 직접 촬영한 결과이다. Fig. 4의 결과로부터 동일한 혼합가스 조건에서 선회각이 클수록 원심력 등으로 재순환가스의 유동이 증가되어 혼합가스의 분출부에서 화염 폭이 증가되고 화염길이도 감소되는 것을 예상할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 그리고 Fig. 3에서 언급하였듯이 선회각이 큰 60도인 경우 재순환가스의 유량이 증가하여 화염이 희석되지만 30도로 선회각이 작은 경우에는 혼합가스 분출구로 공급되는 비교적 고온의 재순환가스의 유량이 감소되어 예혼합가스의 점화가



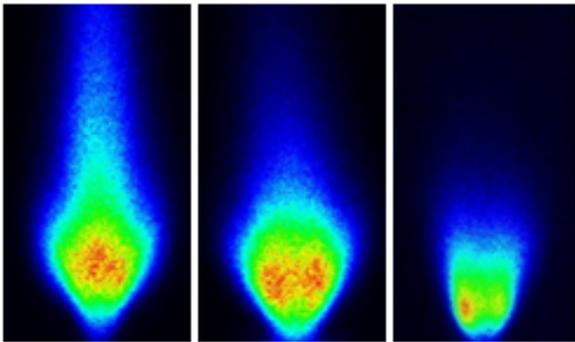
(a) (b) (c)

Fig. 4 Swirl intensity effects on flame shape for different swirl angles, ($CH_4=0.69$, $O_2=2.78$, $CO_2=5.87$ kg/hr), [(a)swirl angle : 30° , (b)swirl angle : 45° , (c)swirl angle : 60°]



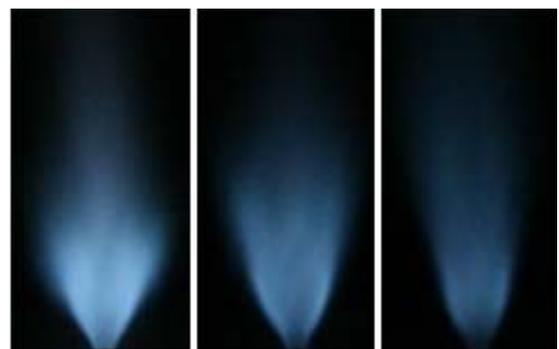
(a) (b) (c)

Fig. 6 Swirl intensity effects on CH radicals ($CH_4=0.69$, $O_2=2.78$, $CO_2=5.87$ kg/hr) for different swirl angles, [(a)swirl angle : 30° , (b)swirl angle : 45° , (c)swirl angle : 60°]



(a) (b) (c)

Fig. 5 Swirl intensity effects on OH radicals for different swirl angles, ($CH_4=0.69$, $O_2=2.78$, $CO_2=5.87$ kg/hr), [(a)swirl angle : 30° , (b)swirl angle : 45° , (c)swirl angle : 60°]



(a) (b) (c)

Fig. 7 CO_2 addition effects on flame shape ($CH_4=0.69$, $O_2=2.78$ kg/hr, swirl angle= 45°) for different amounts of CO_2 addition, [(a) CO_2 : 5.87 kg/hr, (b) CO_2 : 7.09 kg/hr, (c) CO_2 : 8.37kg/hr]

지연됨으로서 혼합가스 분출구의 화염부 폭이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 연소 조건에서 선회각에 대한 OH 자발광 분포를 가시화한 결과이다.

선회각이 큰 60도의 경우 중심부로 공급되는 재순환 가스의 유량이 증가하여 연소 영역 중심부가 희석되어 OH 라디칼이 감소됨을 알 수 있다.

선회각의 선회각이 45도인 경우 연소 영역에서 가장 넓은 OH 라디칼 분포를 보임을 알 수 있는데 이것은 Fig. 3의 화염 안정성 평가에서 언급하였듯이 선회각에 영향을 받는 재순환가스는 화염을 안정하게 하지만 너무 크게 되면 희석 영향으로 화염의 안정성을 저해시키는 것을 예상할 수 있다. 그리고 선회각이 클수록 중심부의 재순환

가스의 유동이 증가하여 중심부의 OH 라디칼 분포의 강도가 약해짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4 및 Fig. 5와 동일한 연소 조건에서 선회각의 선회각에 대한 CH 자발광 분포를 가시화한 결과이다. Fig. 5의 OH 자발광에 비하여 CH 자발광은 화염의 외곽부에 존재함을 알 수 있으며 선회각이 커질수록 중심부 재순환 유동이 강화되어 OH 라디칼 분포 특성과 같이 중심부의 CH 라디칼 강도가 약해지는 것을 확인할 수 있다.

3.3 CO_2 공급량 변화에 대한 화염특성

Fig. 7은 CO_2 의 유량이 화염에 미치는 영향을 예상하기 위하여 화염을 직접 촬영한 결과를 보여준다.

선회각의 선회각이 45도, CH₄ 및 O₂의 공급량을 각각 0.69, 2.78 kg/hr로 고정한 경우에 CO₂ 유량을 5.87, 7.09, 8.37 kg/hr로 증가시키면서 화염형상을 촬영하여 그 결과를 (a), (b), (c)에 나타내었다. Fig. 7의 결과로부터 CO₂의 유량을 증가시킬수록 CO₂의 희석에 의한 화염의 발광도가 약해짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 연소 조건에서 OH 자발광 분포를 가시화한 결과이다. Fig. 8의 결과로부터 CO₂의 유량이 증가할수록 연소 영역이 희석되어 전반적으로 OH 자발광이 약해지고 발생 영역도 감소됨을 알 수 있다. 따라서 Fig. 3에서 언급한 CO₂공급비의 한계는 연소 영역의 희석에 의한 소염 때문으로 예상된다.

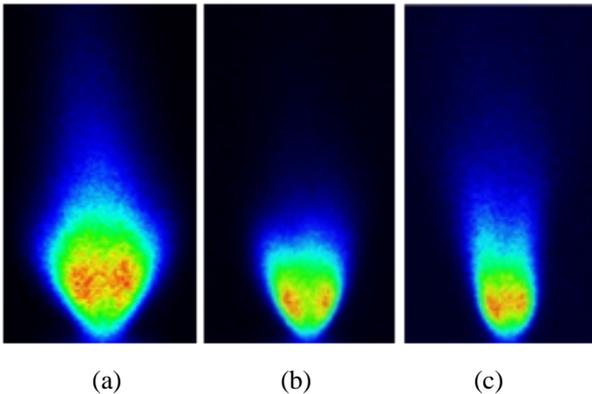


Fig. 8 CO₂ addition effects on OH radicals (CH₄=0.69, O₂=2.78 kg/hr with swirl angle=45) for different amounts of CO₂ addition, [(a)CO₂ : 5.87 kg/hr, (b)CO₂ : 7.09 kg/hr, (c)CO₂ : 8.37 kg/hr]

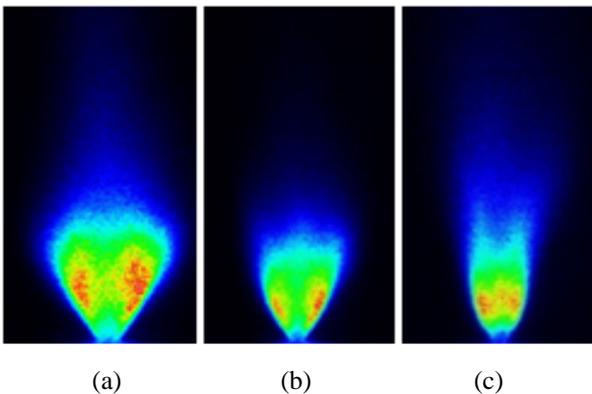


Fig. 9 CO₂ addition effects on CH radicals (CH₄=0.69, O₂=2.78 kg/hr with swirl angle=45) for different amounts of CO₂ addition, [(a)CO₂ : 5.87 kg/hr, (b)CO₂ : 7.09 kg/hr, (c)CO₂ : 8.37 kg/hr]

Fig. 9는 Fig. 7과 Fig. 8의 동일한 연소 조건에서 CH 자발광 분포를 가시화한 결과이다. Fig. 9의 결과로부터 Fig. 8의 OH 자발광 분포 특성과 같이 CO₂의 유량을 증가시킬수록 CH 라디칼의 자발광이 약해지며 발생 영역도 감소됨을 확인할 수 있다.

3.4 선회각 변화에 대한 배가스 특성

각 선회각에 대해 공급 O₂가 배가스 특성에 미치는 영향을 예상하기 위하여 CH₄와 CO₂를 각각 0.69, 5.87kg/hr로 공급하는 조건에서 O₂를 변화시켜 산소의 과잉 공급률에 대한 CO의 배출 특성을 Fig. 10에 나타내었다.

산소의 과잉 공급률은 화학적 당량비 1인 경우의 산소공급량에 대한 잉여산소공급량의 부피비로 정의되며, 배가스 측정 결과 과잉 산소 공급률 0.7%이상의 조건에서는 산화제인 산소가 충분히 공급이 되었기 때문에 CO의 발생이 10ppm 이하로 측정이 되었다.

Fig. 10의 결과로부터 선회각의 변화가 배가스 중의 CO배출에 미치는 영향은 크지 않지만 Fig. 4에서 예상된 가장 화염이 안정된 조건인 선회각이 45도인 경우 동일 배가스 O₂ 조건에서 가장 낮게 CO가 배출되는 것을 알 수 있다. 그러나 본 연구에 사용된 예혼합 순산소 연소기의 연소조건에서 과잉 산소 공급률 0.58% 이하에서는 연료와 산소의 원활한 혼합이 이루어지지 않아 과잉 산소의 감소에 따라 CO의 배출이 증가하게 됨을 알 수 있다.

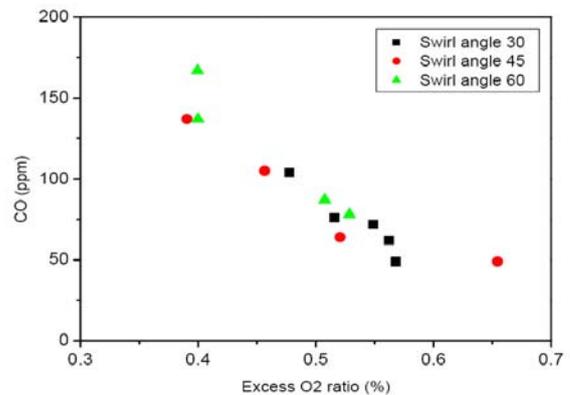


Fig. 10 CO emission characteristics of pre-mixed flame combustor for different swirl angles and excess O₂ ratios

4. 결 론

본 연구에서는 산소에 CO₂를 혼합한 산화제를 이용하는 연소기의 적정 설계를 위하여 메탄 연료용 예혼합 연소기를 제작하였다. 제작된 예혼합 연소기를 이용하여 산소에 혼합되는 CO₂의 혼합비와 선회각도가 화염대에 미치는 영향을 분석하기 위하여 공간섭 필터와 ICCD 카메라를 사용하여 선회각에 대한 소염한계 및 화염특성, CO₂ 공급량에 대한 화염특성 및 배가스 분석실험을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 예혼합 순산소 연소기에서 선회각의 선회각이 60도인 경우 재순환 가스 유량이 너무 증가하게 되어 회석에 의하여 화염영역이 작아지고 선회각이 30도인 경우에는 재순환가스의 유량이 너무 작게 되어 혼합가스의 점화가 지연되어 화염이 불안정해지며 선회각 45도인 경우에 가장 안정된 화염을 형성한다.

(2) 선회각이 클수록(선회각이 60도인 경우) 고온의 재순환가스의 유동이 증가하게 되어 연소기 출구 부인 예혼합가스의 분출부에서 화염 폭이 증가되지만 재순환가스의 회석으로 인해 연소 영역의 OH 라디칼과 CH 라디칼의 강도가 약해진다.

(3) CO₂의 유량을 증가시킬수록 CO₂의 회석에 의하여 OH 및 CH 영역 및 라디칼의 강도가 약해진다.

(4) 화염이 안정되는 조건인 45도 선회각을 사용하는 경우 가장 낮은 CO 배출량을 보이며 과잉 산소공급률 0.58% 이하에서는 연료로 산소의 원활한 공급이 이루어지지 않아 CO의 배출이 증가하게 된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사업단의 연구비 지원 (CH3-101)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) <http://www.ipcc.ch>
- (2) <http://www.cdrr.re.kr>
- (3) Baukal, C.E., 1998, *Oxygen-Enhanced Combustion*, CRC Press.
- (4) <http://www.ieagreen.org.uk>
- (5) Buhre, B.J.P., Elliott, L.K., Sheng, C.D., Gupta, R.P. and Wall, T.F., 2005, "Oxy-fuel Combustion Technology for Coal-fired Power Generation," *Prog. Energy Comb. Sci.*, Vol. 31, pp. 283~307.
- (6) Kim, H. S., Lee, Y. D. and Ahn, K. Y., 2007, "Hydrogen Enrichment Effects on NO Formation in Pre-mixed Methane Flame," *Korea Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 18, pp. 75~84.
- (7) Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., 1984, "Swirl Flows," Abacus, Tunbridge Wells, UK.
- (8) Claypole, T.C. and Syred, N., 1981, "The Effect of Swirl Burner Aerodynamics on NO_x Formation," *18th Symposium on Combustion*, pp. 81~89.
- (9) Kim, H. S., Baek, S. W. and Yu, J., 2001, "Formation of Nitric Oxide in a Staged Gas Flame," *Combustion Science & Technology*, Vol. 166, pp. 41~66.
- (10) Kim, H. S., Lim, A. H. and Ahn, K. Y. 2004, "Study on the Combustion Characteristics of a Lean Premixed Combustor," *J. Korean Soc. Combustion*, Vol. 9, pp. 25~31.