

산소부화공기가 동축 비예혼합 제트의 연소특성에 미치는 영향 (II) - 화염의 구조와 온도분포 -

곽지현*·전충환**·장영준†
(2003년 8월 29일 접수, 2003년 12월 12일 심사완료)

Effect of Oxygen Enriched Air on the Combustion Characteristics in a Coaxial Non-Premixed Jet (II) - Flame Structure and Temperature Distribution -

Ji-Hyun Kwark, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang

Key Words: Oxygen Enriched Concentration(산소부화농도), Coaxial Non-Premixed Jet(동축 비예혼합 제트), Turbulent Diffusion(난류확산)

Abstract

Combustion using oxygen enriched air is known as a technology which can increase thermal efficiency due to increase of the flame temperature. Flame shapes, schlieren photos, OH radical chemiluminescence and local flame temperature were examined as a function of OEC(Oxygen Enriched Concentration) in a coaxial non-premixed jet. With increase of OEC, flame length and width decreased, but its brightness increased significantly, and the size of vortices in the flame also increased. Especially, the reaction around the flame surface became active. The strong OH intensity appeared to be made and moved from middle stream to upper one with increase of OEC, which shows combustion reaction in the upper stream becomes more dominant. In addition, the temperature distributions of the flames showed similar tendency with OH radical intensities. A flame with high temperature and strong stability was obtained with increasing OEC of the coflow.

기호설명

- OEC : 산소부화농도[%]
- R : 화염의 반경방향 거리[mm]
- Re : 레이놀즈 수
- T : 화염의 순간온도[K]
- \bar{T} : 화염의 평균온도[K]
- T' : 화염의 변동온도[K]
- T_{R1} : 화염온도의 상대강도
- t : 시간[sec]
- X : 화염의 축방향 거리[mm]

1. 서론

연소공기에 산소를 첨가하여 산화제의 산소농도를 높여서 연소시키는 산소부화연소는 연소속도의 향상과 화염온도의 상승으로 열전달이 증대하여 열효율을 높여줄 수 있는 에너지 절약형 연소기술로, 높은 화염온도를 얻을 수 있어 최근 산업현장에서 주물용 회전용해로에 이용되는 등 최근 각광 받고 있다.⁽¹⁾

공업로에 사용되는 연소기는 대부분 비예혼합 화염으로, 연료와 산화제가 초기에 분리된 상태에서부터 확산과 대류에 의하여 화염지역으로 전달되고 분자적 혼합이 일어나 화학반응이 발생하고, 생성된 열과 물질은 전달 현상에 의하여 화염 바깥쪽으로 이동된다.⁽²⁾ 이러한 비예혼합 난류 화염의 가장 기본적인 형태는 동축 제트화염이며, 동축류인 산화제로는 공기가 주로 사용되어

† 책임저자, 회원, 부산대학교 공과대학 기계공학부
E-mail : changyj@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2332 FAX : (051)582-9818

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계기술연구소

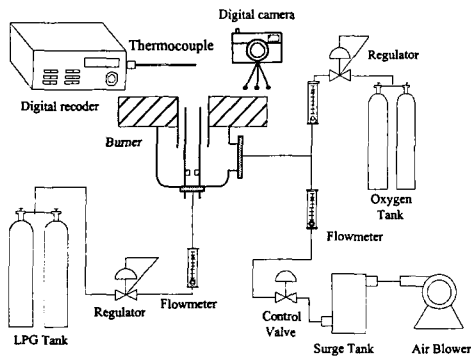


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

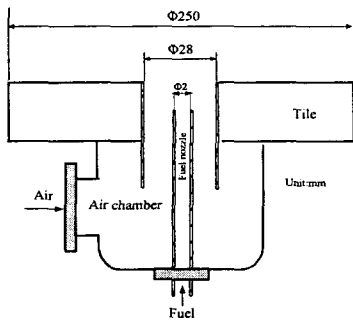


Fig. 2 Specification of the burner

진다. 그런데 이러한 동축류에 산소를 첨가하여 산소농도를 증가시키면 연소반응 메커니즘에 영향을 주어 화염의 구조와 온도특성이 크게 달라지게 된다. Sautel⁽³⁾는 비예혼합 화염에서 산소부화공기를 이용하여 난류구조를 연구하였고, Lambert 등⁽⁴⁾은 증기 메탄 개량을 위한 산소부화연소를 연구하였으며, Bae와 Lee⁽⁵⁾는 산소부화공기가 비예혼합 화염의 연소안정성에 미치는 영향을 조사하였다. 그러나 산소부화공기를 이용한 제트화염의 구조와 온도특성에 관한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구는 동축 비예혼합 제트에서 동축류의 산소부화농도의 변화가 화염의 구조와 온도특성에 어떠한 영향을 미치는지 화염의 형상, Schlieren 사진, 라디칼 농도, 국소 화염온도 분포 등을 통해 조사하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 크게 연소기, 연료 공급장치, 공기 및 산소 공급

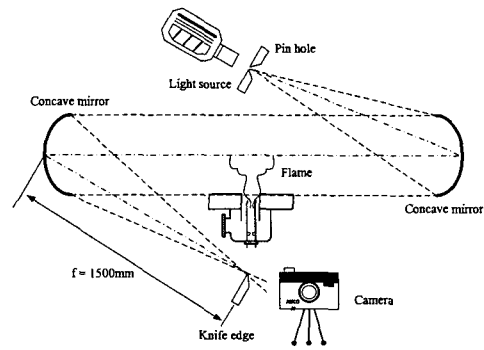


Fig. 3 Schematic of schlieren measurement system

장치, 화염온도 측정장치로 구성되어 있다. 연소기는 Fig. 2와 같이 동축 비예혼합 버너로 가운데에 내경 2 mm의 연료노즐이 있고, 공기 노즐의 직경은 28 mm이다. 연료는 저위발열량 93.6 MJ/Nm³, 이론공기량 23.8 Nm³/Nm³의 프로판이며, 공기는 출력 0.75 kW의 송풍기로부터 서지탱크를 거쳐 연소기로 공급되는데, 산소부화를 위해 관 중간에 산소 탱크와 연결한 뒤 10 m 가량 진행하게 하여 충분히 혼합되도록 하였다. 화염의 형상은 디지털 카메라를 이용하여 순간화염을 촬영하였으며, 화염의 온도는 선경 0.1 mm의 Pt/Pt-Rh 13%의 R형 열전대와 디지털 온도기록장치를 이용하여 각 측정 지점에서 2초에 1회씩 100회 측정하여 평균온도와 상대강도를 구하였다. 이 때 복사와 전도에 의한 열손실은 고려하지 않았다.

Fig. 3은 화염의 내부 구조를 살펴보기 위한 Schlieren 사진의 장치도를 나타낸다. 두 오목거울의 초점거리는 1500 mm, 유효경은 200 mm이고, 핀홀의 직경은 2 mm이다. 상의 명암은 나이프 에지를 이용하여 초점위치 근처의 상을 적절히 자름으로써 조절하였다. 한편 화염의 주요 중간생성물인 OH 라디칼의 상대강도를 살펴보기 위한 광계측장치는 화상강화 기능의 CCD(Charge Coupled Device) 카메라에, 투과중심파장 310.2 nm, 반치폭 14.9 nm의 간섭필터를 장착하여 각 조건의 화염에 대해 100회 촬영한 뒤 평균값을 구하여 같은 범위에서 비교하였다. 실험조건은 Table 1과 같다.

실험에서 적용한 산소부화농도의 산출방법은 다음과 같다. 산화제의 산소농도를 높여주기 위

해 공기의 일부를 덜어내고 순산소(99.9%)를 첨가해 준다. 이 때 유속의 변동이 연소반응에 미치는 영향을 배제하기 위해 공기량과 첨가되는 순산소의 유량의 합은 항상 일정하도록 하였다. 연료유량 1 l/min에 해당하는 이론공기량 23.8 l/min를 기준으로 할 때, 공기유량을 A, 첨가시키는 순산소의 유량을 $O_{2,add}$ 으로 표기하면, 산소부화농도(OEC)에 따른 순산소의 첨가량과 공기량은

$$A + O_{2,add} = 23.8 \quad (1)$$

$$OEC(\%) = \frac{0.21A + O_{2,add}}{23.8} \times 100 \quad (2)$$

식으로 결정된다. 동축류 유속 증가에 의한 blow-off

Table 1 Experimental condition

Item	Photo, Schlieren, Radical, Temperature	
Fuel jet velocity(m/s)	10	
Coflow velocity(m/s)	0.66	
Re	Fuel	4494
	Coflow	1022
OEC(%)	21~50	

Table 2 Example of flow rates with OEC

OEC(%)	A(l/min)	$O_{2,add}$ (l/min)
21	23.8	0
25	22.6	1.2
30	21.1	2.7
35	19.6	4.2

의 영향을 배제하기 위하여 공급된 총 산소량에 비해 다소 과농한 상태에서 수행되었다. 위 식들로부터 결정된 공기와 산소의 유량은 Table 2와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 화염의 형상

동축류의 산소부화농도에 따른 제트화염의 형상은 Fig. 4와 같이 나타난다. 산소농도 증가 시 화염은 강한 휘도를 가지는 밝은 화염이 되고, 연소반응 촉진에 의해 화염의 길이나 폭이 다소 감소하게 된다.

3.2 슬리렌 사진에 의한 화염의 구조

Fig. 5는 화염 내부의 구조를 관찰하기 위해 촬영한 Schlieren 사진이다. 각각 동축류의 산소부화농도에 따라 (a)부터 (g)까지는 화염 상류, (h)부터 (n)까지는 화염 하류의 사진을 나타내고 있다. 그림 (a)에서 산소농도 21%의 화염은 부상 화염으로 화염의 밑면이 둥글고 단면적이 큰 것이 특징인데, 화염의 중심축을 따라 작은 와들이 관찰된다. 이것은 연료제트의 분출에 의해서 생기는 것으로, 연소반응속도가 낮아 연료의 유동효과가 확산에 의한 연소반응보다 더 우세하기 때문으로 생각된다. 그러나 산소농도가 높아질수록 이러한 중심축상의 작은 와들은 점점 사라지는데, 산소량의 증가와 함께 화염 상류에서의 연소반응이 촉진되면서 난류강도가 작은 화염을 형성하게 되기 때문이다. 따라서 산소농도 증가 시 화염의 온도편차는 더 작아질 것으로 예상된다.

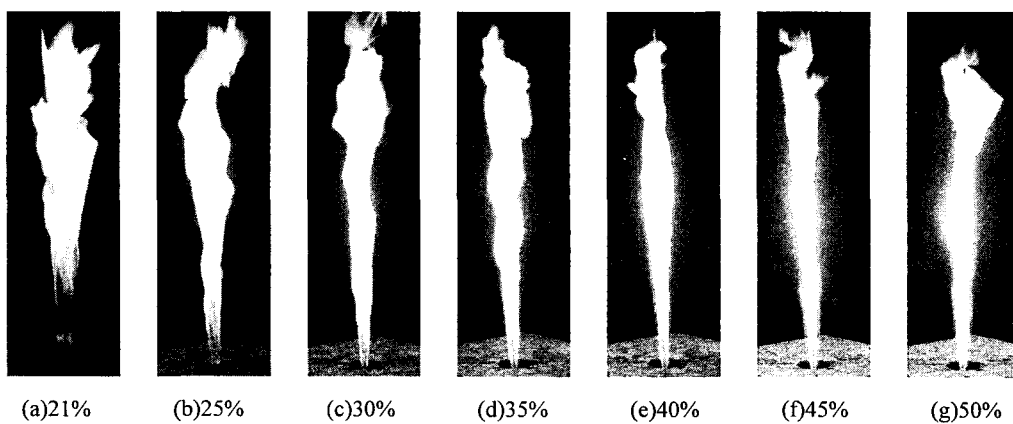


Fig. 4 Flame shapes for various OECs

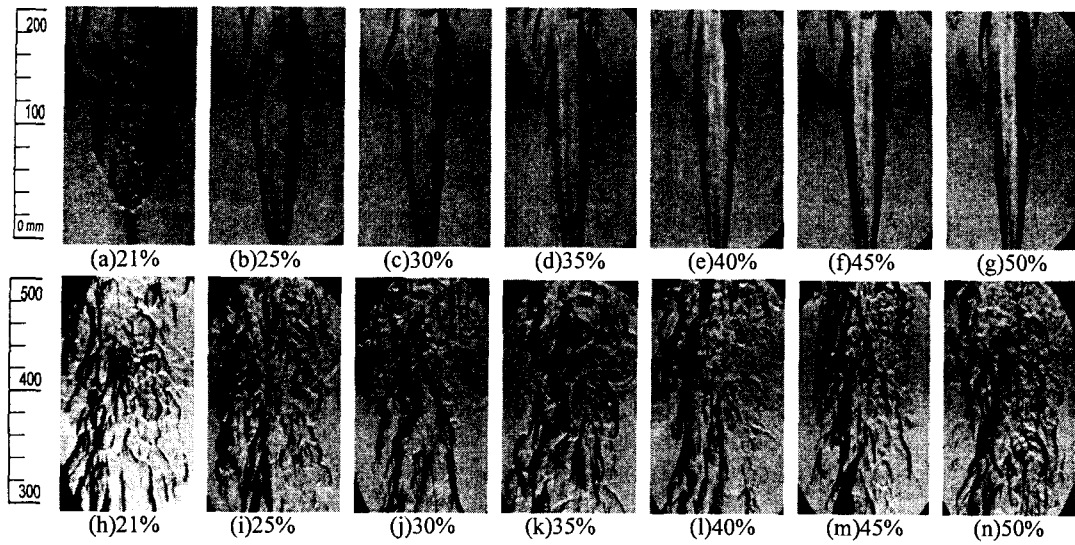


Fig. 5 Schlieren photos of the flames for various OECs

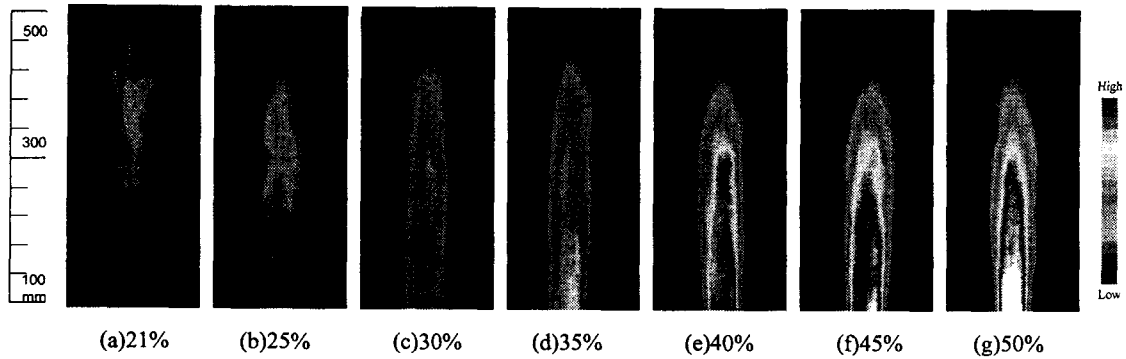


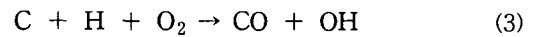
Fig. 6 OH radical chemiluminescence for various OECs

또한 화염 체적이 감소하면서 화염폭도 줄어들어 매끄러운 화염면을 형성하게 되지만, 화염면 부근에서 주위 공기와의 온도차 증가로 생기는 밀도차의 증가에 따라 화염면 주위의 공기 유동이 활발해짐을 본 Schlieren 사진을 통해 잘 살펴볼 수 있다. 한편 (h)에서 (n)까지의 화염 하류의 사진에서 낮은 산소농도의 화염이 전체적으로 좀 더 작은 와의 구조를 가지는 분포를 하고 있다. 그러나 산소농도가 증가할수록 화염 내부의 와의 크기는 증가하며, 주름층류화염 형태가 된다.

3.3 OH 라디칼 강도분포

탄화수소 연료의 산화과정에서 탄소결합이 쪼개지며 수소원자추출⁽⁶⁾이 일어나는데 이 때 생긴

수소원자가 산소와 반응하여 아래와 같이 OH 라디칼을 만들어낸다.⁽⁷⁾



이 때 여기된 OH 라디칼은 $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ 로 천이하며 발광하게 되는데 연소반응 영역대의 지표가 되는 주요한 화학종으로 이의 강도를 통해 연소상태와 온도분포 등을 예측할 수 있다. Fig. 6은 화염 내 OH 라디칼의 자발광 강도를 색깔 처리하여 상대적으로 비교해놓은 것이다. 단면 정보가 아니라 중첩된 화상이므로 정량적인 비교는 곤란하지만 정성적인 비교와 위치에 따른 강도분포는 파악이 가능하다. 산소농도 25% 이하의 화

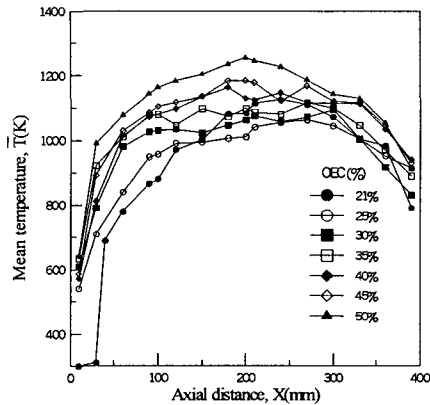


Fig. 7 Axial temperature distribution(R=0)

염은 화염종류에서 강한 OH 강도를 나타내고 있는데, Schlieren 사진에서 보듯이 연료제트의 유동이 연소반응보다 우세하여 화염 종류에 이르러 연소가 활발히 이루어지기 때문이다. 그러나 산소농도가 증가할수록 화염상류 쪽에서 더욱 강한 강도가 나타나 핵심 연소반응이 상류 쪽에서 더욱 활발해짐을 가늠케 해준다. 또한 산소농도 증가에 따라 OH 라디칼의 강도도 상대적으로 크게 증가하여 연소반응이 활발해지고 이 영역을 따라 높은 온도분포가 형성될 것을 예상하게 해준다.

3.4 화염의 온도분포

$$T(t) = \bar{T} + T'(t) \tag{4}$$

측정된 화염의 순간온도는 Reynolds 분해⁽⁸⁾를 이용하여 식 (4)와 같이 평균온도와 변동온도로 나눌 수 있으며, 이를 이용하여 화염의 평균온도와 상대강도를 구하였다. Fig. 7은 제트유속 10 m/s, 동축류 유속 0.66 m/s일 때 화염 내 중심축상의 축방향 평균온도분포를 나타낸 그림이다. 동축류가 일반공기인 산소농도 21%일 때 축방향 거리 약 40 mm까지는 부상영역으로 온도가 급격히 상승한다. 동축류의 산소부화농도가 높아질수록 전체적인 화염온도도 상승하고 있음이 관찰된다. 특히 산소부화농도 40% 까지의 화염에서는 화염 하류보다 축방향 거리 100 mm 부근의 상류에서 온도 상승효과가 더 크게 나타난다. 즉 산소농도 증가에 따른 연소반응속도의 증가로 인해 연소반응 영역이, 라디칼 분포도에서 보여지

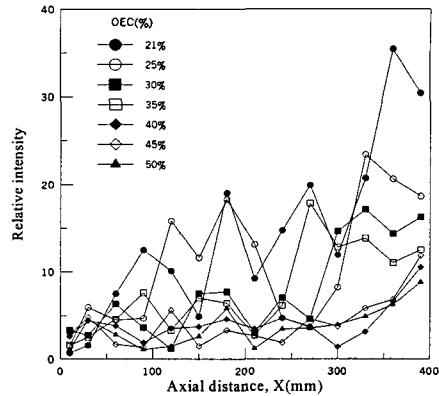


Fig. 8 Relative intensity of flame temperature(R=0)

는 것처럼 화염 상류 쪽으로 이동하기 때문이다.

난류화염의 불안정성과 관련 깊은 화염온도의 편차정도를 살펴보기 위하여 식 (5)와 같이 변동온도의 제곱평균제곱근을 평균온도로 나눈 무차원수인 상대강도를 구해 Fig. 8에 나타내었다.

$$T_{RI} = \sqrt{T'^2} / \bar{T} \times 1000 \tag{5}$$

산소부화농도 25% 이하의 화염은 축방향으로 온도편차가 커졌다 작아졌다하는 특징을 보인다. 난류화염 제트화염의 내부를 이루는 여러 개의 단(cascade)을 따라 연소가 진행되는 본 화염에서 뜨거운 연소생성물과 미연 연료의 혼합물로 되어있는 단 사이로 주위 공기가 유입되어 접촉하게 되고 화학반응이 수반되는데,⁽⁹⁾ 이러한 메커니즘을 따라 화염 내부에서 주기적으로 변동온도가 크고 작은 지점이 있는 것으로 사료된다. 그러나 산소농도가 30% 이상이 되면 연소반응물의 급격한 상승으로 이러한 효과가 감소되어 편차의 차이는 줄어들게 되며, 산소농도 40% 이상의 화염은 화염 전체에 걸쳐 작은 편차를 가지는 안정된 화염이 된다.

확산화염에서 가장 반응이 활발한 부분은 화염면 부근이므로 반경방향으로의 단면상의 온도분포를 살펴보기 위해 Fig. 9와 같이 화염의 상,중,하류에 해당하는 축방향거리 100, 200, 300 mm에서의 반경방향 온도분포를 나타내었다. 그림 (a)에서 동축류의 산소농도 21%인 경우 화염은 부상해 있으며 화염의 형상도 밀면이 둥글고 넓은 형태여서 반경방향으로 온도구배가 크지 않다. 그러나 동축류의 산소농도가 증가하면서 화

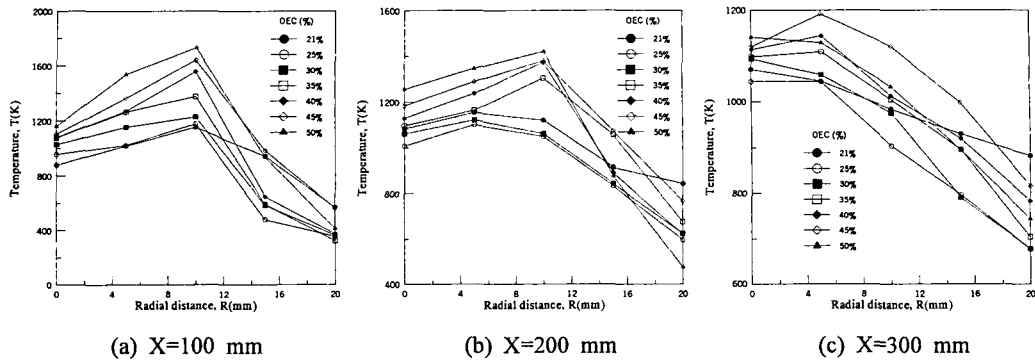


Fig. 9 Radial temperature distribution

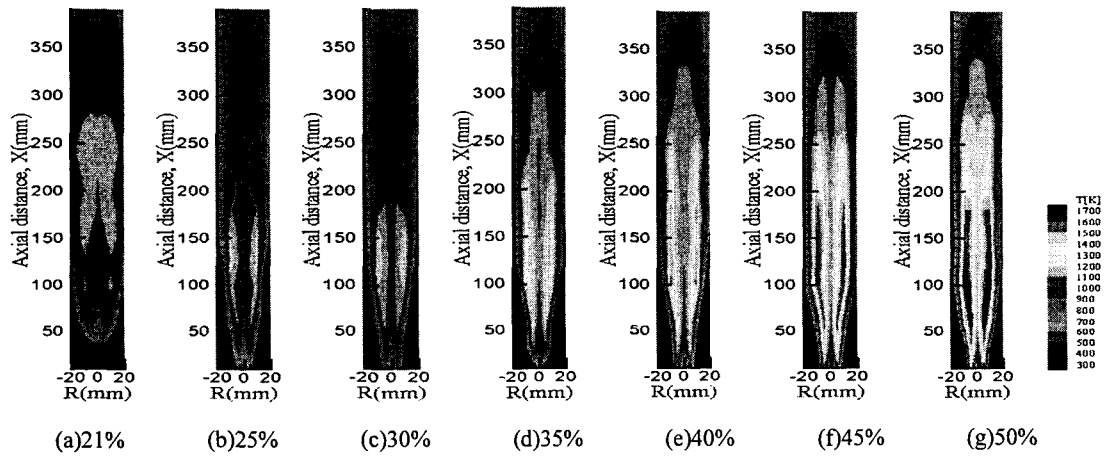


Fig. 10 2-D distribution of the flame temperature

염은 노즐림에 부착되며 Fig. 5의 화염의 형상과 같이 폭이 좁고 가늘어진다. 그래서 R=10에서 15 mm 사이의 화염면 부근에서 온도구배가 크게 나타나게 되고, 이 화염면 주위에서 최고온도가 나타나며, 산소부화농도 50%의 동축류 공급 시 화염온도는 일반공기에 비해 600K 이상 높게 나타난다. 산소농도 25% 이하의 화염의 최고온도는 화염상류보다 중류 지점에서 더 높게 나타나지만, 그 이상의 산소농도에서는 화염상류의 최고온도가 중류보다 더 높아지게 되며, 온도 차이는 산소농도가 높아질수록 더욱 커진다.

화염중류인 X=200 mm에서의 산소부화농도에 따른 화염의 온도분포는 그림 (b)에서처럼 산소부화농도의 증가에 따라 최고온도도 높아짐이 관찰된다. 그런데 산소농도 21%의 화염이 산소농도 25%와 30%의 화염보다 높은 온도분포를 가지는

데, 실험조건인 동축류 유속 0.66m/s에서 일반공기 화염은 노즐림에 부착되지 못하고 부상화염으로 존재한다. 따라서 화염 밑면이 노즐로부터 약 30mm 가량 떨어져 형성되므로 다른 화염에 비해 최고온도 지점이 화염하류 쪽으로 밀려난다. 또한 상대적으로 산소 부화된 화염은 연소속도의 증가로 최고온도 지점이 화염상류 쪽으로 당겨지게 되므로 이 지점에서의 온도는 일반공기 화염이 산소농도 30% 까지의 화염보다 높은 온도분포를 가지고 있다. 한편 산소농도 50%의 화염은 반경방향 거리 10 mm를 지나면서 이보다 낮은 산소농도의 화염에 비해 더 낮은 온도분포를 보이게 되는데, 이는 화염폭이 현저하게 감소하기 때문이다. 또한 화염길어도 감소함으로써 그림 (c)에서처럼 화염하류에서 산소농도 45%의 화염

보다 낮은 온도분포를 나타내게 된다.

화염단면내의 온도분포를 더욱 정확히 파악하기 위하여 축방향으로 30 mm, 반경방향으로 5 mm 간격으로 온도분포를 측정된 뒤 각 격자 사이의 값들을 컴퓨터로 계산하여 등궤적선으로 처리해 Fig. 10처럼 2차원 온도분포로 나타내었다. 화염이 약간 부상된 그림 (a)의 화염은 종류에서 최고온도를 가지나, 산소농도가 증가할수록 화염 상류 쪽으로 고온영역이 이동하며 특히, 화염면을 따라 고온영역이 뚜렷이 형성되고 있다. 고온영역의 분포는 Fig. 7의 라디칼 농도분포와 거의 유사하게 나타나고 있어, 라디칼 계측만으로도 화염내부의 반응상태를 예측해볼 수 있음이 검증되었다.

4. 결 론

동축 비에혼합 제트화염에서 연소공기의 산소부화농도에 따른 화염의 구조와 온도특성을 조사해보고 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 동축류의 산소부화농도가 증가할수록 제트화염의 휘도는 크게 증가하고, 화염의 길이와 폭은 다소 감소한다.

(2) Schlieren 사진으로부터 관찰된 제트화염의 구조는 산소농도가 증가할수록 화염내부의 와의 크기가 증가하고, 화염면 부근의 반응이 활발해진다.

(3) 화염의 산소부화농도가 높아질수록 OH 라디칼의 생성농도는 화염 상류 쪽에서 강하게 증가하여 화염 상류에서의 연소반응이 우세해짐을 보여준다.

(4) 산소부화농도가 증가할수록 화염의 온도분포는 전반적으로 증가한다. 특히 화염 상류에서의 온도 증가가 두드러지며, 반경방향으로의 온도구배는 커지는 경향이 있다. 반면에 변동온도는 현저히 줄어들어 온도편차가 작은 안정된 화염이 된다.

참고문헌

- (1) Han, J. S. and Lee, Y. H., 1994, "New Melting Technology of Oxy-Combustion Rotary Furnace for Cast Iron," *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, Vol. 14, No. 6, pp. 489~494.
- (2) Turns, S. R., 2000, *An Introduction to Combustion : Concepts and Applications*, 2nd-ed., McGRAW-HILL, Singapore.
- (3) Sautet, J. C., 2001, "Large Scale Turbulent Structures in Non-Premixed, Oxygen Enriched Flames," *International Conference of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No. 2, pp. 277~287.
- (4) Lambert, J., Sorin, M. and Paris, J., 1997, "Analysis of Oxygen-Enriched Combustion for SMR," *Energy*, Vol. 22, No. 8, pp. 817~825.
- (5) Bae, J. R. and Lee, B. J., 2002, "Effect of Diluents and Oxygen-Enrichment on The Stability of Nonpremixed Flame," *Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 26, No. 10, pp. 1458~1464.
- (6) Glassman, I., 1987, *Combustion*, 2nd Ed., Academic Press, Orlando.
- (7) Gaydon, A. G., 1957, *The Spectroscopy of flames*, Chapman and Hall.
- (8) Reynolds, O., 1883, "An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels," *Phil. Trans. Royal Society of London*, VI/ 174, pp. 935~982.
- (9) Dahm, W. J. A. and Dibble, R. W., 1988, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, p. 801.
- (10) Jachimowski, C. J., 1984, "Chemical Kinetic Reaction Mechanism for The Combustion of Propane," *Combustion and flame*, Vol. 55, pp. 213~224.