



난류예혼합 플랫버너의 화염 안정성 및 배출가스 특성

[†]이용후 · 이진석 · 이도형

부경대학교 기계공학부

(2006년 8월 23일 접수, 2007년 1월 8일 채택)

The Flame Stability and the Emission Characteristics of Turbulent Premixed Flat Burner

[†]Y. H. Lee · J. S. Lee · D. H. Lee

Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 23 August 2006, Accepted 8 January 2007)

요 약

본 논문에서는 메탈화이버를 이용한 난류예혼합 플랫버너를 제작하여 다양한 연소조건하에서 화염의 안정화범위를 확인하였으며, 연료유량과 공기유량의 변화에 따른 균일가열 능력과 배기가스 특성에 관한 실험을 실시하였다. 그리고 화염의 안정성 평가를 위한 실험을 통해 화염을 공기유량 변화에 따라 청녹염, 복사염, 청염 영역으로 나눌 수 있었고, 이들 영역은 청염>복사염>청녹염 영역 순으로 연소상태가 양호하였다. 공기비에 따른 영향을 살펴보면, 본 실험에서는 연료유량 1과 4 l/min에서는 공기비 $\alpha=1.5$ 가 적합하였으며 연료유량 2 l/min에서는 $\alpha=2.0$ 이 적합한 것으로 나타났다. 한편 연료유량과 관계없이 공기비 $\alpha=1.3\sim 2.1$ 범위에서는 연소소음이 발생했다.

Abstract – The purpose of this study is to conduct a survey of the flame stability range and the emission characteristics for the optimum design of turbulent premixed flat burner. For that, the flame stability range was selected by the direct photography of the flame. And the mean temperature and CO, HC, CO₂ and O₂ concentration distributions by changing the excess air ratio were measured. As results of this study, the flame stability range turned out to be getting narrower as fuel flow was increased. The blue flame mode was more excellent than any other flame modes in the emission characteristics by excess air ratio change. And the emission characteristics by fuel flow change were best at fuel flow 1 l/min. Also, we found combustion noise during experiment of flame stability range. It had nothing do with excess air ratio range.

Key words : MF, Turbulent Premixed Burner, Flame Structure.

I. 서 론

가정용 보일러 및 각종 산업용 로와 같이 화석연료를 사용하는 장치들은 국가 기반 산업의 경쟁력 형성에 중요한 위치를 차지하고 있어, 에너지의 체계적이고 효율적인 사용 및 관리가 절실히 필요하다. 특히, 각종 산업용 로는 균일 가열과 균일한 노내 분위기 형성이 에너지 사용의 효율과 피가열물에 대한 품질도를 결정하는 중요한 인자임에도 불구하고 요로, 소성로 및 열처리 로에 사용되는 각종 버너들은 비효율적인 구조로 균일가열이 어려우며, 화석연료의 사용에 따른 불완전

연소가 발생하는 등의 문제점을 가지고 있다. 이에 따라 화석에너지를 사용하는 에너지 변환장치에 응용할 수 있는 새로운 장치 및 기술 개발이 요구되며, 최근에는 새로운 소재를 이용한 연소기 개발이나 기존 연소기 개선의 노력들이 진행되고 있다.

특히, 다공성 물질을 이용한 플랫버너는 피가열물에 대한 균일한 가열 및 고효율 연소가 가능하며, 시스템의 소형화를 가져다 줄 수 있어 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 다공성 재료를 이용한 버너는 예혼합 연료/공기가 반응영역을 통과하면서 연소되고 연소열의 일부는 높은 축열률을 갖는 다공체에 축적되어 고에너지 환경에서 연속연소가 가능하며 완전연소가 이루어질 수 있다[1-3].

[†]주저자:wiztown@gmail.com

일반적으로 메탈화이버를 이용한 플랫폼버너와 같은 편직 금속 섬유 버너(Knitted Metal Fiber Burner: NIT MFB)는 화염강도에 따라 연소형식을 청염모드와 복사모드로 분류하며, 청염모드에서의 열전달은 대류에 의해 지배를 받고, 복사모드에서의 열전달은 복사에 의해 지배받는 것으로 알려져 있다[4]. 그리고 상대적으로 연료가 많이 들어간 경우에 C_2 라디칼로 인해 발생하는 청녹염(green flame)의 범위에서도 화염이 안정되게 유지되므로 화염 안정화 범위를 논할 때에는 이 영역도 포함시켜야 한다[5]. 그러므로 화염은 연료유량 및 공기유량 변화에 따라 청녹염영역(green flame range), 복사영역(radiation range), 청염영역(blue flame range)의 세 영역으로 분류할 수 있으며, 각 영역에서의 연소특성은 다소 차이가 있다.

본 연구는 기존 연소기의 불완전연소와 불균일 가열을 해결하고자 연소기의 연소면에 니트형 메탈파이버를 설치하였으며, 예혼합실에서의 충분한 혼합을 위하여 예혼합실의 선단과 후단에 막힘판과 다공판을 설치하였다. 그리고 연료유량과 공기유량 변화에 따른 화염 직접사진을 통해 난류예혼합 플랫폼버너의 화염 안정화 범위를 알아보고 안정화 범위 내에서의 연소형식 즉, 청염모드, 복사모드, 청녹염모드에서의 온도분포 및 배출가스 특성을 비교해 보았다. 또한, 연료유량변화에 따른 온도분포 및 CO, HC, CO_2 , O_2 등의 배출가스 특성에 대해서도 살펴보았다.

II. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 난류예혼합 플랫폼버너의 전체계통도로서 연소에 사용된 공기는 PWM(Pulse Width Modulation) 제어방식의 blower에서 직경 52.5 mm의 유로를 통해 공급된다. 연료는 상용 프로판(C_3H_8)을 사용하였으며, 사용압력 0.5 kg/cm^2 으로 공기유속에 설치된 분사가 45° 직경 1 mm의 분공 8개를 가진 노즐을 통하여 예혼합 형태로 연소면에 공급하였다. 플랫폼버너의 연소면은 직경 45 mm로 Acotech사의 MF(Metal Fiber) model NIT 100S를 사용하였다. 연소면 전단에는 연소면의 균일한 유속분포를 얻기 위한 다공판(Perforation Plate)과 blower에서 발생하는 맥동을 저감하기 위한 막힘판(Baffle)을 설치하였으며, 다공판 이후에는 화염 안정화 범위와 균일한 온도분포를 얻기 위해 Swirl을 설치하였다[6]. 또한, 연소실은 내경 95 mm, 길이 200 mm의 석영관으로 구성되어 화염 관찰이 가능하도록 설계하였다.

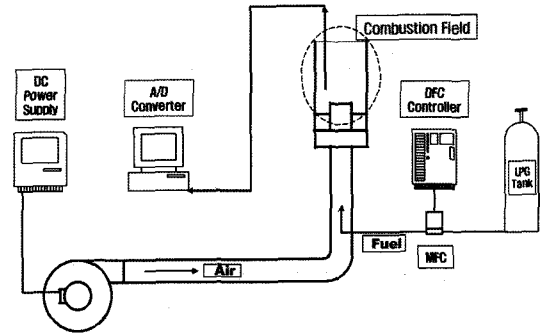


Fig. 1. Schematic diagram of combustion system.

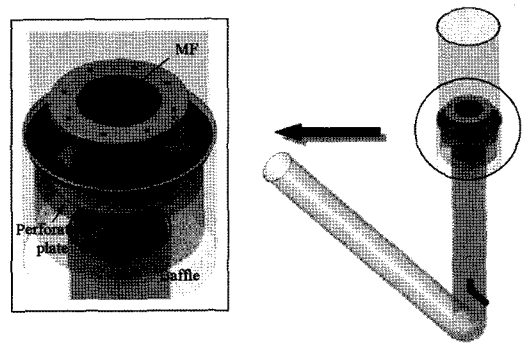


Fig. 2. 3D-model of combustor.

그리고 Fig. 2는 각 요소들의 위치를 도식적으로 표현한 것이다.

2.2. 실험 방법

전체 시스템의 온도 측정은 Pt/Pt-Rh 합금의 R-type 열전대를 이용하였고, 이 열전대는 포집한 연소가스의 반응 동결을 위해 3중 수냉식 프로브를 제작·사용하였다. 연소가스 중의 각종 화학농도 CO, HC, CO_2 및 O_2 의 측정은 연소가스 분석장치인 HORIBA사의 MEXA-554JK model을 사용하여 측정하였다. 그리고 이들 측정정보는 A/D converter를 통하여 20초 동안 샘플링하고 그 평균값을 기록하였다. 또한, 연소실 내 화염으로부터 여러 가지 데이터를 획득하기 위해 3축 공간분해가 가능한 이송대를 사용하여 연소면에 대하여 Z(축방향) 방향은 상단 10 mm에서부터 150 mm까지, R(반경방향) 방향은 중심부에서부터 40 mm까지, 각각 5 mm 등간격으로 측정하였다.

본 연구의 실험 조건을 Table 1과 2에 나타낸다. 실험 조건을 선정하기에 앞서, 먼저 화염 안정화 범위를 알아보기 위해 연료유량 1, 2, 3, 4 l/min에서의 공기유량 변화에 따른 화염직접사진을 촬영하고 그 사진을 통

Table 1. Experimental condition I

Condition	Rate of fuel (l/min)	Excess air ratio(α)
A	2	1.1
B		1.5
C		2.0

Table 2. Experimental condition II

Condition	Rate of fuel (l/min)	Excess air ratio(α)
B1	1	1.5
B2		2
B3		3
B4		4

해 화염 안정화 범위를 선정하였다. 그리고 이 결과를 토대로 Table 1과 같이 연료유량이 2 l/min으로 일정할 때 청녹염영역으로 대표되는 공기비 $\alpha=1.1$, 복사염영역으로 대표되는 공기비 $\alpha=1.5$, 청염영역으로 대표되는 공기비 $\alpha=2.0$ 에서의 평균온도와 CO, HC, CO₂ 및 O₂의 평균농도를 측정하였다. 또한, Table 2와 같이 공기비를 $\alpha=1.5$ 로 일정하게 두고 연료유량을 1, 2, 3, 4 l/min으로 변화시켜 평균온도와 CO, HC, CO₂ 및 O₂의 평균농도를 측정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

3.1. 화염 안정화 범위

화염 안정화 범위를 선정하기 위해 각각의 연료유량 1, 2, 3, 4 l/min에서 공기유량 변화에 따른 화염의 직접사진(총 226장)을 촬영하였다. 그리고 그 중 공기유량 변화에 따라 청녹염, 복사, 청염 및 그 전후 영역에서의 사진을 선별하여 Fig. 3에 나타내어 보았다.

Fig. 3(a)는 연료유량 1 l/min에서 공기유량 변화에 따른 화염의 직접사진으로, $\alpha=0.6$ 에서는 $\alpha=0.71$ 과 비교하면 연소면 전체에 화염이 존재하지 않았으며 불안정하였다. 또한 $\alpha=2.45$ 인 경우는 $\alpha=0.71\sim 2.28$ 에 비해 맥동이 상당히 심하며 평면화염의 형태를 유지하지 못하고 있다. 그리고 공기비가 이보다 커지면 blow off 된다. 따라서 연료유량 1 l/min 경우의 화염 안정화 범위는 $\alpha=0.71\sim 2.28$ 정도라고 할 수 있다.

Fig. 3(b)의 연료유량 2 l/min에서는 $\alpha=0.91$ 이상이 되어야 화염이 안정하게 되었고, $\alpha=2.48$ 이 되면 공기과잉으로 인해 화염은 불안정하게 되었다. 따라서 이 경우, 화염 안정화 범위는 $\alpha=0.91\sim 2.21$ 이 된다. 연료유량 2 l/min에서의 화염 안정화 범위는 Fig. 3(a) 즉, 연

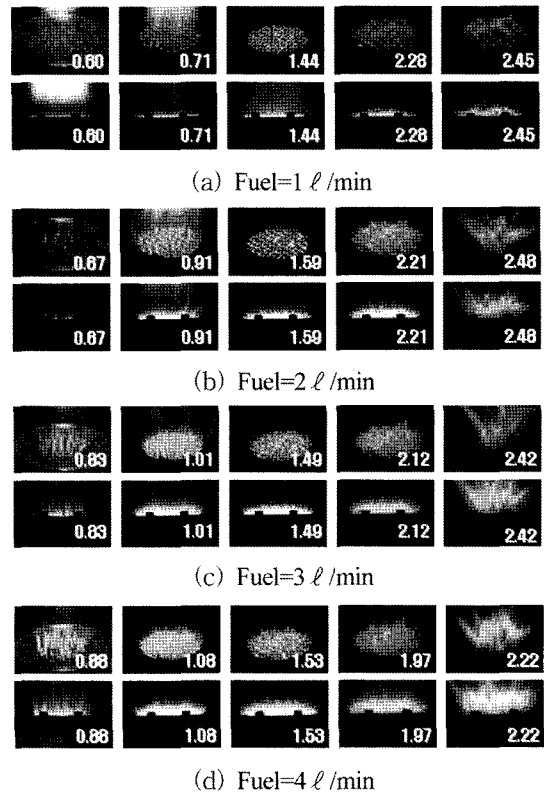


Fig. 3. Direct photography of flames by the change of excess air ratio and fuel flow.

료유량 1 l/min에 비해 그 범위는 좁아졌다. 이는 동일한 연소장치에 주입되는 연료 및 공기의 양이 많아졌기 때문이라 사료된다. 이런 현상은 이후의 연료유량 3 l/min과 4 l/min에서 더욱 확실해진다.

연료유량 3, 4 l/min에서 공기유량 변화에 따른 화염의 직접사진을 Fig. 3(c)와 (d)에 나타낸다. 역시 이전의 결과와 유사한 형태를 볼 수 있으며, 여기서의 화염 안정화 범위는 각각 $\alpha=1.01\sim 2.12$ 와 $\alpha=1.08\sim 1.97$ 로, 이전의 경우보다 좁은 안정화 범위를 나타내었다.

Fig. 4는 앞의 연료유량 및 공기유량 변화에 따른 화염 안정화 범위와 안정화 범위 내에서의 복사염영역과 소음발생영역을 나타낸 것이다. Fig. 4의 각 연료유량에 대하여 복사염영역으로 표시된 윗부분에서 안정범위 상한까지가 청염영역이고, 복사염영역의 아랫부분에서 안정범위 하한까지가 청녹염영역이 된다.

메탈화이버와 같은 다공체를 사용한 예혼합 연소기는 형상적 특징상 특정 주파수에서 연소소음을 발생하기 쉽다[7]. 본 실험장치에서의 화염 안정화 범위는 연

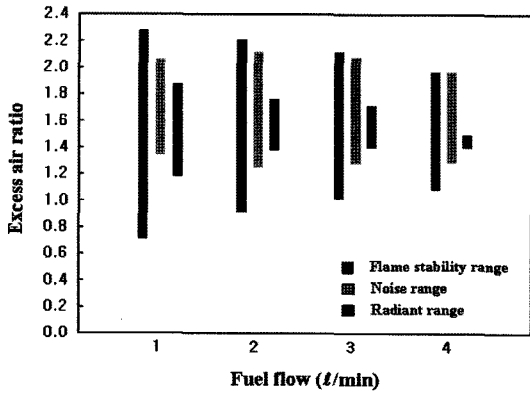


Fig. 4. Ranges of the flame stability, noise and radiant.

료유량이 증가함에 따라 공기비에 대한 안정화 범위가 좁아진 것에 반해, 소음영역은 연료유량변화에 관계없이 대체적으로 비슷한 공기비 영역인 $\alpha=1.3\sim 2.1$ 에서 소음을 발생하였다.

3.2. 공기비 변화에 따른 화염구조

3.2.1. 온도분포

Fig. 5는 연소면을 기준으로 축방향 $Z=10\sim 150$ mm까지의 영역에서 연료유량 2 l/min로 주입하였을 경우, 공기비 변화($\alpha=1.1, 1.5, 2.0$)에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 5의 (a)는 $\alpha=1.1$ 의 경우로서, 축방향으로 $Z=70$ mm, 반경방향으로 $R=20$ mm 근방까지는 대체적으로 최고온도가 1200 K 정도로 거의 일정하게 유지되다가 $R=20$ mm 이후로 온도가 급격히 감소하는 경향이 있었다. 이는 연소기 내의 연소면 반경이 22.5 mm임을 감안하면 축방향 70 mm, 반경방향 20 mm 부근까지 평면화염이 유지되기 때문으로 사료된다. (b)는 $\alpha=1.5$ 의 경우로서, (a)와 거의 유사한 형상을 가지고 있다. 단, 동일한 연료유량에 공기유량만 증가시켰음에도 불구하고 연소실의 온도분포가 약 200 K 정도 상승한 것으로 나타났다. 또한, (c)의 $\alpha=2.0$ 일 때 역시 연소실 최고온도는 (a)에 비해 약 300 K 이상 상승한 것을 알 수 있다.

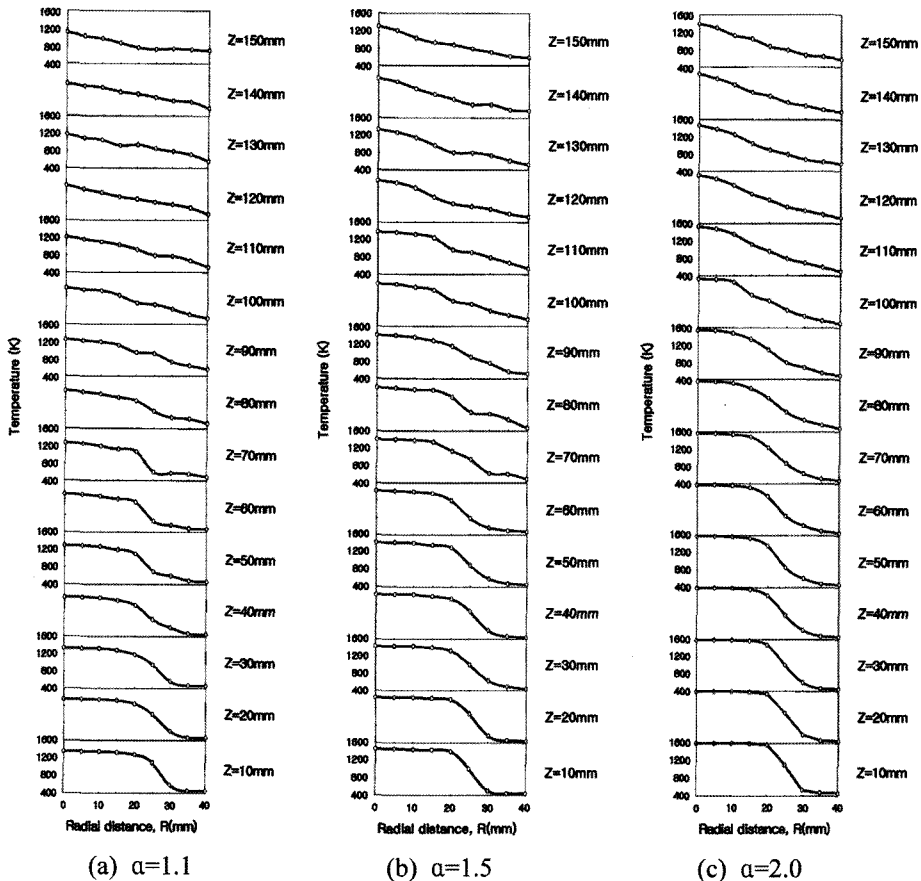


Fig. 5. Temperature distributions by excess air ratio change (Fuel = 2 l/min).

본 연구 장치에서 유로를 통해 공급된 공기가 이론 혼합비에 비해 상당히 많음에도 불구하고 연소실의 온도가 상승하는 것은 공급된 공기가 연소에 모두 사용되고 있지 못함을 의미한다. 다시 말해, 본 실험장치와 같은 예혼합 연소장치에서도 물리적으로 이론혼합비 정도의 공기주입으로는 연료/공기의 충분한 혼합이 어려움을 알 수 있다.

3.2.2. CO, HC, CO₂ 및 O₂의 농도분포

Fig. 6~9에 연료유량 2 l/min의 조건에서 공기비를 변화($\alpha=1.1, 1.5, 2.0$)시켰을 때의 CO, HC, CO₂ 및 O₂ 농도분포를 나타내었다. 우선, CO 농도분포를 살펴보면 대체로 공기비가 증가할수록 CO 농도는 감소하며, 이러한 현상은 Z = 40 mm 이후에 더욱 확연하게 나타

나는 것을 볼 수 있다. 또한, HC 농도도 이와 비슷한 현상이 나타나며, 특히, $\alpha=1.1$ 은 다른 공기비에 비해 매우 많이 나타남을 알 수 있다. 이들 현상을 앞 절의 온도분포와 연관지어 보면 $\alpha=1.1$ 정도로는 연소반응에 활발한 물리적 혼합을 얻을 수 없다는 결론이 나온다.

CO₂ 농도분포는 연소면의 끝 지점(R=22.5 mm) 부근에서 최대점을 보이며, R=22.5 mm 이내에서는 공기비가 증가함에 따라 CO₂ 농도도 점차 증가하며, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 공기의 충분한 공급에 의해 연소가 활발히 이루어짐을 나타낸다. 한편, R=22.5 mm 이후로는 $\alpha=1.1$ 이 다른 공기비에 비해 다소 높게 나왔으며, 전반적으로 하류로 갈수록 농도값은 높아지는 반면 반경방향으로는 균일한 분포를 가지는 것으로 나타났다. 이는 공기비가 상대적으로 적은 경우(공기의

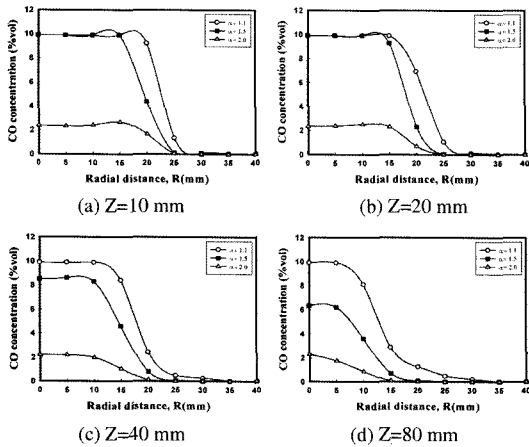


Fig. 6. CO concentration distributions by excess air ratio change (Fuel = 2 l/min).

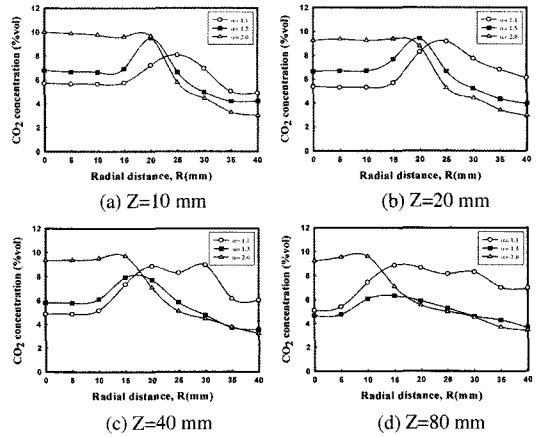


Fig. 8. CO₂ concentration distributions by excess air ratio change (Fuel = 2 l/min).

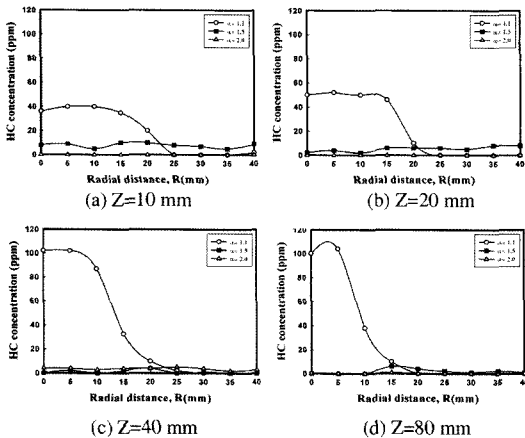


Fig. 7. HC concentration distributions by excess air ratio change (Fuel = 2 l/min).

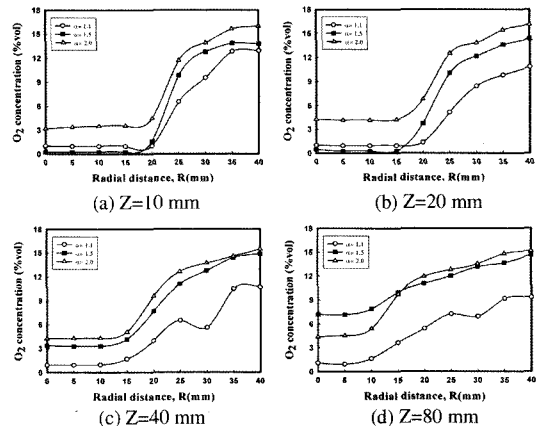


Fig. 9. O₂ concentration distributions by excess air ratio change (Fuel = 2 l/min).

유속이 상대적으로 느린 경우), 연소면의 끝 지점에서 연소가 많이 진행되며 그 이후에는 벽면 쪽으로 확산이 많이 되기 때문이라 생각된다.

그리고 O₂ 농도분포는 대체로 연소면 끝 지점을 기준으로 안팎의 농도차가 상당한 것으로 보아, 연소면 내에서는 공급공기에 포함되어 있는 O₂가 연소에 활발히 참여하고 있음을 알 수 있다.

3.3. 연료유량 변화에 따른 화염구조

3.3.1. 온도분포

Fig. 10의 (a), (b), (c), (d)는 연소면을 기준으로 축방향 Z=10~150 mm에서 공기비를 $\alpha=1.5$ 로 일정하게 두고, 연료유량을 1, 2, 3, 4 l/min으로 변화시켰을 때의 연소실 내 온도분포이다. 각 연료유량에 대하여 연소기 하부 즉, 연소면 부근 Z=10~30 mm에서의 온도분포를 비교해 보면 연료유량이 증가할수록 전체적인 온도는 상승하며, 반경방향으로 일정하게 분포하는 온도의 폭은 넓어지는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 연료유량의 증가와 더불어 공기유량이 증가함에 따라, 본 실험 장치에 설치된 각종 정류장치에 의해 유체 유동이 반경방향으로 더욱 평평해졌기 때문으로 판단된다. 또한, 본 실험의 결과를 통해 연소면과 거의 일치하는 균일온도장의 범위는 연료유량이 증가할수록 연소면과

상당히 떨어진 거리까지 균일한 온도가 유지됨을 알 수 있다. 특히, 연료유량 4 l/min에서는 축방향으로 Z=50 mm, 반경방향으로 R=20 mm 근방까지 아주 뚜렷한 균일 온도분포를 보여주고 있다.

3.3.2 CO, HC, CO₂ 및 O₂의 농도분포

Fig. 11~14는 $\alpha=1.5$ 의 조건에서 연료유량 변화 즉,

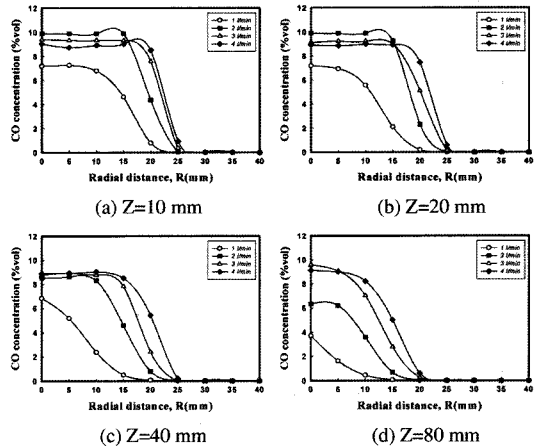


Fig. 11. CO concentration distributions by the change of fuel flow ($\alpha=1.5$).

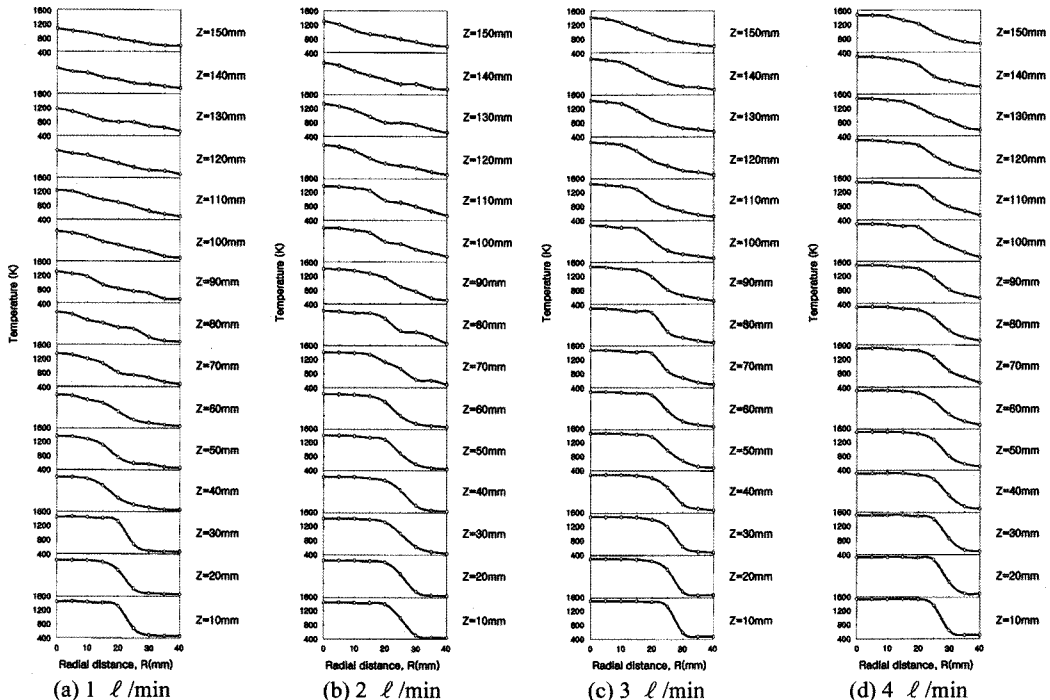


Fig. 10. Temperature distributions by the change of fuel flow ($\alpha=1.5$).

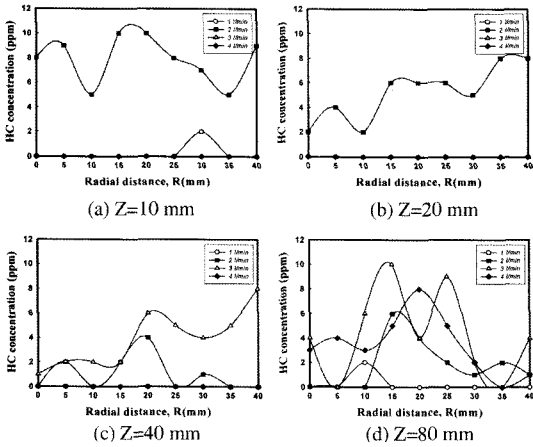


Fig. 12. HC concentration distributions by the change of fuel flow ($\alpha = 1.5$).

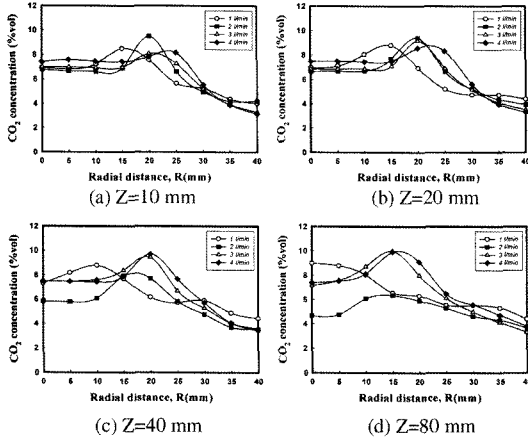


Fig. 13. CO₂ concentration distributions by the change of fuel flow ($\alpha = 1.5$).

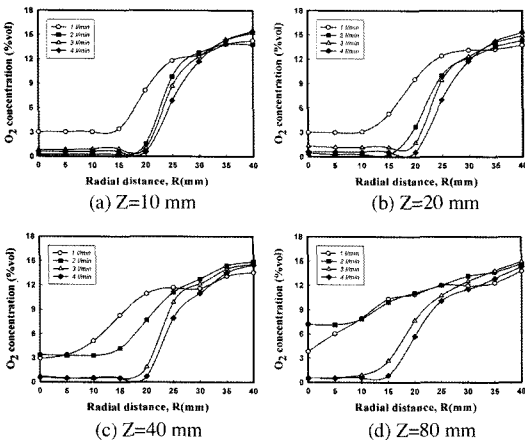


Fig. 14. O₂ concentration distributions by the change of fuel flow ($\alpha = 1.5$).

연료유량 1, 2, 3, 4 l/min에서의 CO, HC, CO₂ 및 O₂ 농도를 나타낸 것이다. 먼저, CO 농도분포를 보면 연료유량 1 l/min일 때를 제외하고는 Z=40 mm, R=20 mm까지 균일한 농도분포를 보이고 있다. 이는 온도분포에서 언급한 바와 같이, 축방향으로 이 위치까지는 평면화염의 형태를 유지하고 있기 때문이라 생각된다. 또한, 연료유량에 따른 CO 농도분포는 단순히 연료유량의 증가에 따른 CO 농도 변화가 아니라, 대체로 연료유량 1→4→3→2 l/min의 순으로 증가한다는 것을 발견할 수 있었다. 따라서 연소 측면에서 본다면 연료유량이 가장 적게 든 1 l/min의 조건 다음으로 4 l/min의 조건이 가장 양호함을 알 수 있다. 이 현상은 CO₂ 농도분포에서도 대체로 유사하게 나타난다.

HC 농도분포에서는 2와 3 l/min 조건에서 높은 HC 농도분포가 나타났다. 즉, 동일한 공기비에서 연료유량 2와 3 l/min에서의 연소상태가 연료유량 1과 4 l/min일 때보다 나쁘다는 것을 의미한다. 이는 연소효율을 좋게 하기 위한 공기비는 연소부하에 의해 결정되는 연료유량에 대하여 일방적으로 결정되는 것이 아니라 적절하게 선정되어야 함을 의미한다.

VI. 결 론

난류에혼합 방식의 플랫버너에 대한 화염 안정화 범위와 화염구조 및 오염물질의 배출특성을 알아보기 위한 연구의 일환으로, 니트형 메탈화이버를 사용하여 실험장치를 제작하고 온도와 각종 화학종 농도를 측정하여, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 안정된 연소범위를 얻기 위해 연료유량과 공기비를 변화시켜 실험한 결과, 다음과 같은 화염 안정화 범위를 얻을 수 있었다.

- (a) 연료유량 1 l/min : $\alpha = 0.71 \sim 2.28$
- (b) 연료유량 2 l/min : $\alpha = 0.91 \sim 2.21$
- (c) 연료유량 3 l/min : $\alpha = 1.01 \sim 2.12$
- (d) 연료유량 4 l/min : $\alpha = 1.08 \sim 1.97$

2) 화염은 안정화 범위 내에서 공기유량의 변화에 따라 청녹염영역, 복사영역, 청염영역으로 구분할 수 있으며, 청염>복사>청녹염영역 순으로 연소상태가 양호하였다.

3) 연소효율을 높이기 위한 공기비는 연료유량에 따라 적절하게 선정되어야 한다. 본 실험에서는 연료유량 1과 4 l/min에서는 공기비 $\alpha = 1.5$ 가 적합하며, 연료유량 2 l/min에서는 $\alpha = 2.0$ 이 적합한 것으로 나타났다.

4) 연소소음은 오늘날 연소기의 소형화 및 고효율화를 지향하는 연소장치의 개발을 저해하는 요소로서 시

급히 해결해야 할 문제 중 하나이다. 특히, 난류예혼합 플랫폼버너에 메탈화이버를 이용했을 때는 연소소음이 많이 배출된다. 본 실험에서는 연료유량이 바뀌어도 공기비 $\alpha=1.3\sim 2.1$ 범위에서 소음이 발생되었다.

참고문헌

- [1] Shin, H.D. and D.K. Min, "Laminar Premixed Flame Stabilized Inside a Honeycomb Ceramic", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **34**(2), 341-356, (1991)
- [2] Yoshizawa, Y. *et al.*, "Analytical Study of the Structure of Radiation Control Flame", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **31**(2), 311-319, (1988)
- [3] Tong, T.W. *et al.*, "Improving the performance of Porous Radiant Burners through Use of Sub-micro Size Fiber", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **33**(6), 1339-1346, (1990)
- [4] 이진석, "메탈화이버를 이용한 플랫폼버너의 유동해석과 연소특성에 관한 연구", 부경대학교, 석사학위논문, (2002)
- [5] 이도형, 최병륜 공역, "연소공학(제2편)", 동명사.
- [6] 정용기, 김경천, 전충환, 장영준, "선회도가 평면화염버너의 유동과 연소 특성에 미치는 영향", 대한기계학회, **26**(2), 336-344, (2002)
- [7] 김성근, 한희갑, 권영필, "표면연소기의 연소진동음에 관한 연구-(1) 음향모드", 한국소음진동공학회, 춘계 학술대회논문집, pp. 498-503, (1998)