

7/17
45-24
3
=2

공 학 석 사 학 위 논 문

난류에 혼합 플랫버너의 화염구조와
유동해석에 관한 연구

이 논문을 공 학 석 사 학 위 로 제출함



2003년 2월

부경대학교 대학원

자동차공학과

윤 봉 석

윤봉석의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월 27일

주 심 공학박사 임 우 조



위 원 공학박사 배 대 석



위 원 공학박사 이 도 형



목 차

Abstract

Nomenclature

1. 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
2. 유동수치해석	4
2.1 지배방정식	4
2.2 난류모델	5
2.3 격자생성과 계산방법	7
2.4 계산영역과 경계조건	8
2.5 유동해석영역 및 Mesh	9
3. 실험 장치 및 방법	14
3.1 실험장치	14
3.2 실험방법	15
3.2.1 공기의 유량 계측	15
3.2.2 연료의 유량 계측	15
3.2.3 화염사진촬영	15
3.2.4 온도측정	16
3.2.5 CO, HC, CO ₂ 및 O ₂ 농도측정	16

3.3 PIV 유동실험	18
3.4 실험조건	19
4. 결과 및 고찰	24
4.1 유동해석결과와 실험결과의 비교	24
4.2 화염안정화 범위	31
4.3 공기비 변화에 따른 화염구조	39
4.3.1 온도분포	39
4.3.2 CO, HC, CO ₂ 및 O ₂ 농도분포	44
4.4 연료유량 변화에 따른 화염구조	50
4.4.1 온도분포	50
4.4.2 CO, HC, CO ₂ , 및 O ₂ 농도분포	54
5. 결 론	59

참고문헌

Abstract

The air pollutant restrictions by increasing fossil fuel use became an international interest. Therefore the effective control methods like new devices and combustion technology are necessary to decrease these pollutants.

The purpose of this study is to obtain the basic data for design high-efficient and low-air pollutant compact combustor. For this purpose, porous flat burner using metal fiber was designed and made and there flame stability ranges, flame structure and emission gases were investigated.

Numerical Simulation method on the combusting flow field has many advantages to design combustor efficiently. In this study, numerical calculation on the flow field was also accomplished with various calculation conditions and various mesh conditions. And internal flow field and turbulent flow characteristics in combustion chamber were investigated by PIV(Particle Image Velocimetry) experiments and those experimental results were compared with numerical analysis to get confidence of present numerical calculation method. Those results will be some basic database for calculating turbulent premixed combustion.

Changing fuel flow rate and excess air rate, the flame stability ranges were selected by direct photography of flames. Results showed that the excess air ratio of flame stability range $\alpha=0.71\sim$

2.28 at fuel flow 1 l/min, $\alpha=0.91\sim2.21$ at fuel flow 2 l/min, $\alpha=1.01\sim2.14$ at fuel flow 3 l/min, and $\alpha=0.91\sim2.21$ at fuel flow 4 l/min.

In order to consider the effect of fuel flow, fuel flows were changed from 1 l/min to 4 l/min at constant condition of $\alpha=1.5$. And then mean temperature and distributions of CO, CO₂, HC and O₂ concentrations were measured. And to consider the effect of excess air ratio, excess air ratio $\alpha=1.1, 1.5$ and 2.0 were taken at constant fuel flow. Results showed that the appropriate excess air ratio should be selected to each fuel flow rate for efficient combustion even the same combustor.

Almost of premixed porous media combustor, it is very difficult to control the combustion noise. In this experiment, the excess air ratio range of combustion noise was found. But for detailed analysis of intensity and frequency it is needed to study consequently.

Nomenclature

- MF : 메탈화이버
 Φ : 일반 종속변수(U, h, k, ε)
 Γ_{Φ} : 확산계수
 S_{Φ} : 생성항
 k : 난류 운동에너지
 ε : 난류 운동에너지 소산율
 ρ : 밀도(kg/m^3)
 G : 난류 운동에너지의 생성률
 X : 중심 축에서 X방향거리(mm)
 Y : 중심 축에서 Y방향거리(mm)
 Z : 중심 축에서 Z방향거리(mm)
 R : 연소실 반경방향거리(mm)
 T : 온도(K)

서 론

1.1 연구배경

화석연료를 사용하는 장치가 대부분인 가정용·산업용보일러 및 산업용 로(爐)에서는 에너지의 체계적이고 효율적인 사용과 관리가 절실히 필요하며, 화석연료의 무절제한 사용으로 인해 환경적·생물학적인 문제가 발생되고 있다. 이를 보완하고 규제하는 것이 세계적인 관심사이다.

1997년 12월 11일 일본 교토 시에서 거행된 지구 온난화 방지 대책 회의에서 채택된 의정서에 의하면 각국의 2008년부터 2012년까지 온실 효과가스(CO₂) 배출량을 1990년도 기준으로 일본 -6%, 미국 -7%, 호주+8% 등으로 정하였으며, 각 나라에서는 여러 가지 방안을 강구하던 중 화석연료를 주로 사용하는 산업용 보일러의 가스배출량을 최대한으로 줄이는 것에 초점을 맞추었다. 지금 우리나라는 개발도상국으로 분류되어 규제되고 있지 않지만 머지않아 대상국가에 포함될 것이며, 그 규제에 따르기 위해 여러 방면에서 개선방법과 대책을 모색하여야 할 것이다. 화석에너지의 사용에 있어 보다 효율적이고 효과적인 관리와 사용이 세계적인 흐름으로 국가 기반산업의 경쟁력 형성에 중요한 위치를 차지할 것이며, 이에 초점을 맞추어 화석에너지를 사용하는 에너지변환장치에 응용 가능한 새로운 장치 및 신기술 개발이 필요하다.

화석연료는 대부분이 연소시켜서 에너지를 변환하는 방식을 취하고 있으며, 가정의 직접난방이나 산업공정 등 여러 분야에서 에너지 변환 목적으로 사용되고 있다. 각종 산업용 로(爐)는 균일 가열과 균일한 노

내(爐內) 분위기 형성이 에너지 사용의 효율과 피가열물에 대한 품질도를 결정하는데 있어 중요한 인자이다. 그럼에도 불구하고 지금의 요로(窯爐), 소성로 및 열처리 로에 사용되는 각종 버너들은 여러 가지 문제로 화석연료의 사용에 따른 불완전연소와 비효율적인 구조를 가지고 있으며, 이를 개선하고 보완하기 위한 여러 가지 방법들이 모색되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 피가열물에 대한 균일한 가열 및 시스템의 소형화가 가능하고, 고효율 연소가 가능한 다공성 재료를 이용한 여러 가지 버너가 연구, 개발되고 있다.

다공성 재료를 이용한 버너는 다공성 재료를 통하여 유입되는 예혼합 연료/공기가 반응영역을 통과하면서 연소되고 연소열의 일부는 높은 축열률을 갖는 다공체에 축적되어 고 에너지환경에서 연속연소가 가능하여 완전연소가 이루어질 수 있다.^{11~11)} 이러한 개념을 바탕으로 1980년 일본의 ECHIGO 교수가 세라믹 다공성 매질을 이용하여 연구,¹²⁾ 1991년 Kuwabara, S.에 의해 메탈화이버 버너의 발전에 관해 발표,¹³⁾ 1992년 Tada, A., Akiyama, S., Nakamura, S.에 의해 부생가스를 이용한 메탈화이버 버너의 연소특성에 관해 발표¹⁴⁾, 도쿄가스(주)에서 표면연소기에 관해 연구를 하였으며, 세계 여러 나라들 미국, 프랑스, 벨기에, 네덜란드, 덴마크 등에서 다공성 물질(기공률 80~90%, 세라믹 Foam, 세라믹섬유 또는 금속섬유의 소결체등)을 이용한 표면연소 기술개발을 시작하였다. 국내에서는 1993년 한국에너지 기술연구원에서 산업용 공해, 고부하 표면연소시스템 기술개발에 관한 연구¹⁵⁾, 충남대학교와 한국에너지기술연구원의 공동연구로 소결형 메탈화이버를 이용한 고부하 연소기술 연구 등 고효율 연소를 이루려는 노력을 하고 있다.

1.2 연구목적

본 연구는 난류예혼합 플랫버너의 화염안정화 범위와 화염구조, 그리고 오염물질의 배출특성을 밝혀, 공업적으로 널리 응용되는 예혼합 연소 방식의 연소장치 설계에 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다. 이러한 목적을 위하여 니트형 메탈화이버를 사용하여 플랫버너를 제작하였으며, 여기서 연료유량 및 공기비 변화에 따라 온도분포 및 CO, HC, CO₂ 및 O₂ 등 각종 화학종의 농도분포를 측정하여 안정화 범위와 화염구조에 대하여 고찰한다.

한편, 연소장치의 설계에 수치 시뮬레이션을 활용하는 것은 실험의 시간적, 경제적 및 시행착오를 줄이는 등의 이점이 많다. 그러나 각종 화학종 농도를 포함한 고온유체의 시뮬레이션을 취급하는 문제는 난류 유체유동을 기초로 하여 연소장치에 적합한 연소모델을 확립하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 연소수치해석의 기본을 확립하고자 한다. 이를 위하여 PIV 실험에 의해 연소기 내부의 유동 및 난류특성을 조사하고, 이 결과를 수치해석 결과와 비교·검토하였다.

2. 유동수치해석

2.1 지배방정식

연소류의 수치해석을 위해서는 유체유동의 지배방정식과 더불어 에너지방정식 및 각종 화학종의 보존방정식을 풀어야 한다. 이 중에서 유체의 거동은 연소류의 거동에 영향을 미치고, 특히 난류연소인 경우에는 난류유동에 대한 해석이 난류연소의 취급에 중요한 영향을 미친다. 그러므로 연구 목적에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 우선 연소장의 유체유동에 대한 해석결과와 PIV결과의 비교를 통해 수치해석의 신뢰도를 검증한 후 수치해석을 통한 연소기 전체의 유동특성을 고찰하고자 한다.

우선 본 장에서는 난류유동의 지배방정식과 난류모델을 간략히 서술하고, 본 연구에서의 수치해석법을 언급한다.

본 계산에 사용된 비압축성 비점성 유동의 지배방정식의 일반화 형태는 아래와 같다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{div}(\rho v \phi) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \phi) + S \quad (2.1)$$

여기서, 운동량, 에너지 방정식, 난류운동에너지 및 난류소산율에 대한 종속변수와 확산계수 및 생성항은 다음의 Table 2.1 과 같이 정의된다.

Table 2.1 Define of dependent, diffusion coefficient and production term

	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Momentum	u_i	μ_{eff}	$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left(P + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{eff} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} \right)$
Energy	h	$\frac{k}{c}$	S_h
Turbulence kinetic	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G - \rho \varepsilon$
Turbulence dissipation	ε	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon}$	$C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \frac{\varepsilon}{k} \varepsilon$

2.2 난류 모델

난류 모델은 난류유동을 난류강도를 나타내는 속도스케일(Velocity scale)과 난류의 크기를 나타내는 길이 스케일(Length scale)의 두 가지 특징으로 표현된다. 속도와 길이 스케일을 주는 방법은 대수 식으로부터 수송방정식에 이르기까지 여러 가지가 있으며, 난류 모델을 분류할 때의 지표가 되고 있다.

일반적으로 Reynolds 응력의 수송방정식을 만족시키는 난류모형은 Boussinesq의 가정을 적용하였는가 여부에 따라 두 가지 모델 형태로 분류할 수 있다. 먼저 Boussinesq의 가정을 적용한 난류 모델을 난류 점성 모델(turbulent viscosity model)이라고 하며, 현재 공학적으로 사용되는 대부분의 모형은 이 유형에 속한다. 난류점성 모델은 혼합거리 모델, 1방정식 모델, 2방정식 모델로 분류된다. 반면, 난류점성에 대한 가정 없이 Reynolds 응력방정식을 성립시키는 유형의 모델을 Reynolds 응력방정식 모델(Reynolds stress equation model)이라고 한다.

2.2.1 혼합거리 모델

1920년대에 Prandtl은 기체분자 운동론의 평균 자유경로와의 유추에서 난류의 특성길이로서 혼합거리 l 을 가설적으로 도입하여 난류점성의 혼합거리 가설을 내었는데, 이 Prandtl의 혼합거리 모델은 이제까지 단순히 물성치적으로 생각하고 있던 ν_T 의 값을 난류의 운동론에 입각하여 고찰하였다. 이 방법은 난류량의 수송방정식을 쓰고 있지 않으므로 제로(zero)방정식 모델 혹은 대수식 모델이라 부른다.

2.2.2 1-방정식 모델

1-방정식 모델은 난류의 운동에너지 k 와 수송방정식을 시간평균 Navier-Stokes 방정식으로부터 구하고 경험적인 함수형태로 구한 길이 스케일 l 과 조합시켜 난류점성계수를 주는 것이다. 1-방정식 모델은 제로방정식 모델과 같이 l 을 대수식으로 주기 때문에 복잡한 유동이나 계단유동과 같이 벽으로부터의 거리가 확실히 정의되지 않는 유동은 잘 계산되지 않는다는 단점이 있다.

2.2.3 2-방정식 모델

2-방정식 모델은 난류점성계수를 결정함에 있어서, 속도 스케일과 길이 스케일 모두를 수송방정식으로 주도록 하는 것이다. 여기서 난류 운동에너지 k 는 난류운동에 대한 강도를 나타내므로, 속도 스케일은 $\sqrt{k}$ 로 공통적으로 사용하고 있다. 2-방정식 모델은 속도와 길이 모두 난류량으로 취하므로, 그 네 개의 기본적 효과 즉 생성, 소멸, 대류, 확산을 동시에 고려할 수 있다. l 대신에 ϵ 을 이용한 $k-\epsilon$ 모델은 2방

정식 모델의 대표적인 것이다.

2.2.4 저Reynolds수 $k-\epsilon$ 모델

저Reynolds수 $k-\epsilon$ 모델은 벽법칙이 불충분한 경우, 벽면 가까이의 점성저층을 포함하는 모든 영역에 격자 점을 배치하여 난류를 보다 엄밀하게 풀려는 시도로 제안되었다. 이때, 벽 가까이에서는 난류 점성모델이나 k, ϵ 의 수송방정식을 벽면구속조건을 고려하면서 수정할 필요가 있다.

2.2.5 Reynolds 응력방정식 모델

Reynolds 응력방정식 모델은 비등방성 난류 즉, 선회류, 곡률이 강한 유동, 회전장에서의 유동, 부력이 있는 유동에서 위력을 발휘한다. Reynolds 응력의 수송방정식은 Navier-Stokes 방정식에 약간의 대수적 조작을 실시하여 구할 수 있다.

2.3 격자생성과 계산방법

표면연소기의 유동해석을 위한 가정은 다음과 같다.

- 1) 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용한다.
- 2) 중력 및 부력의 영향은 무시한다.

지배방정식의 차분화는 이차의 선형 상류차분법이 사용되었으며,

압력과 속도의 연결은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였다. 또한, 반복계산은 아래의 판정조건이 만족되어지면 수렴되었다고 판정하였다.

$$R_{\phi}^k = \frac{\sum |r_{\phi}^k|}{M_{\phi}} < 10^{-3} \quad (2-13)$$

여기서, R_{ϕ}^k 는 절대전차의 합, M_{ϕ} 는 정규화 계수, k는 이트레이션수이다.

즉, 해의 수렴판정 조건은 각 격자 점의 변수들의 잔류량의 합을 입구면의 유속으로 나눈 값이 10^{-3} 보다 작은 값으로 하였다. 이는 10^{-3} 보다 더 낮은 조건까지 수렴한 값과 비교하여 결정하였다.

본 연구에서는 상용 열유체 프로그램인 STAR-CD (Simulation of Turbulent Flow in Arbitrary Regions Computation Dynamics)를 사용하였으며,¹⁶⁾ 이는 차후 진행될 연구에서의 연소반응 해석에서 해석능력이 뛰어나기 때문에 선정하게 되었다. 연소기를 해석하기 위한 모델은 Fig. 2-1에 나타내었다. 수치해석에서는 단지 공기만을 공급했을 때의 유동에 관해서만 해석을 하였다.

격자생성에 있어서는 연소기의 3차원 형상이 복잡하기 때문에 계산격자는 격자생성 전용프로그램인 ICEM-CFD를 사용하여 HEXA형 육면체 정렬격자를 생성하였다.¹⁷⁾ 이는 차후 연구에서 화학반응에 대하여 연소해석을 하기 위함이다.

2.4 계산영역과 경계조건

공기 유입 부의 입구에서는 전 유입단면에 걸쳐 균일한 속도분포

(Plug-flow)를 경계조건으로 주었으며, 입구 Reynolds수는 38,533이다. 입구에서의 난류 운동에너지는 평균 입구 유속의 3%로 가정하여 식(2-14)과 같이 계산하였으며, 난류 소산율은 식(2-15)의 관계식으로 부터 계산하였다.

$$k_{in} = \frac{3}{2} (0.03 V_{in})^2 \quad (2-14)$$

$$\varepsilon_{in} = \frac{c_{\mu} k_{in}^2}{0.03 D_{in}} \quad (2-15)$$

출구에서의 경계조건은 아래 식과 같이 모든 종속변수의 확산항들을 0으로 처리하였다

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (2-16)$$

여기서 ϕ 는 u, k, ε 이다.

2.5 유동해석영역 및 Mesh

- 1) 유동해석을 위한 해석 영역은 실제 연소기와 동일한 형상의 3차원 Full-grid Meshing을 하였다(Fig. 2-1 참조).
- 2) 계산격자는 격자생성 전용프로그램인 ICEM-CFD를 사용하여 만들었다.
- 3) 유동계산에 쓰여진 격자는 메탈화이버 및 Swirl 부분을 제외한 격자이다.
- 4) Mesh 개수 : Non-Refine (221957개)(Fig. 2-2 참조)

Refine 2 (313974개)(Fig. 2-3 참조)

Refine 4 (427518개)(Fig. 2-4 참조)

- 5) 다공판의 직경내의 Mesh수는 이전의 연구¹⁸⁾에서 검증된 9개를 사용하였다.
- 6) 다공판은 연소기 상, 하부와 Arbitrary Matching으로 연결되어 있다.
- 7) 계산시간은 CPU-TIME으로 Non-refine grid는 28721초(7.97시간), Refine factor 2에서 51503초(14.3시간) 그리고 마지막으로 Refine factor 4에서 55278초(15.35시간)로 계산되었다.

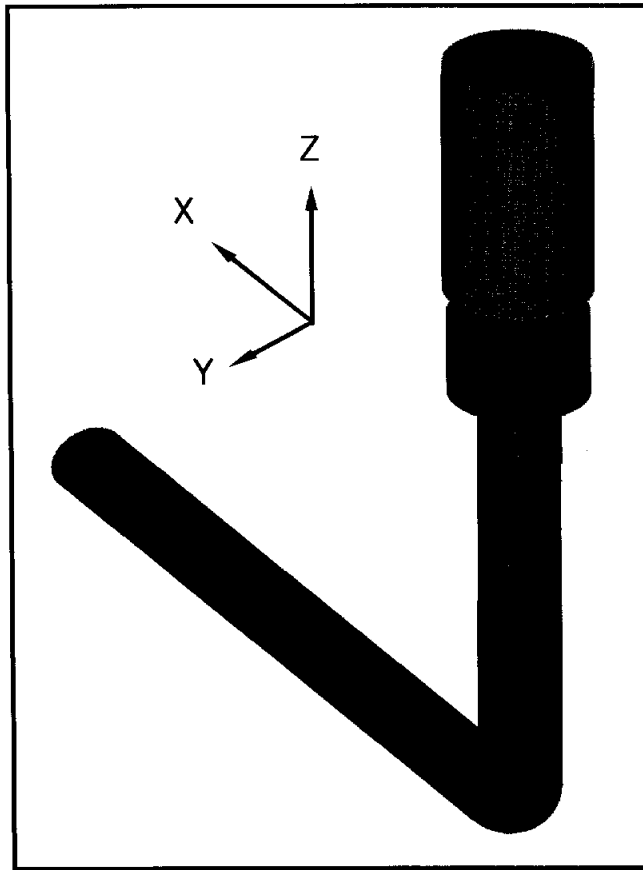


Fig. 2-1 Grid for flow analysis

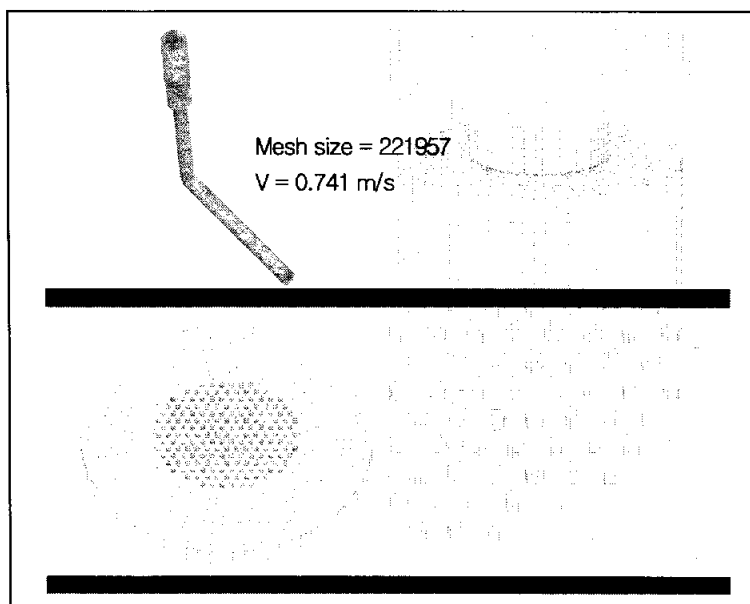


Fig. 2-2 Non-Refine Grid

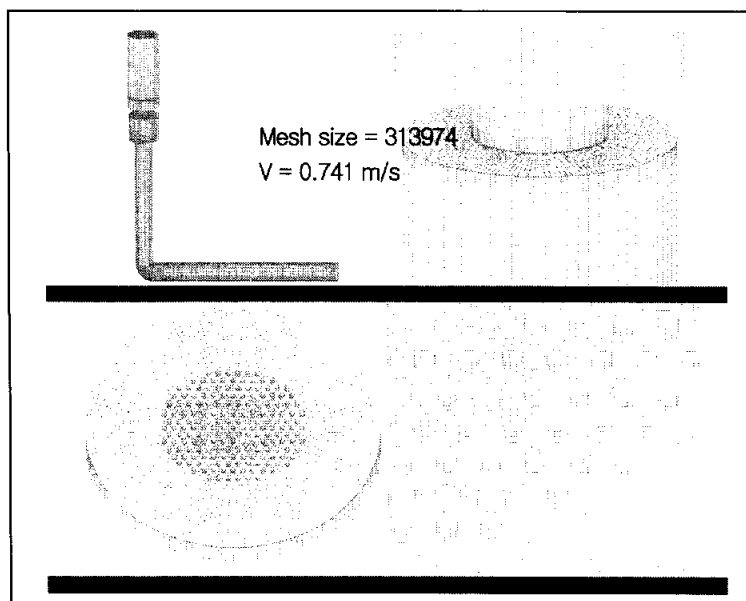


Fig. 2-3 Refine grid factor 2

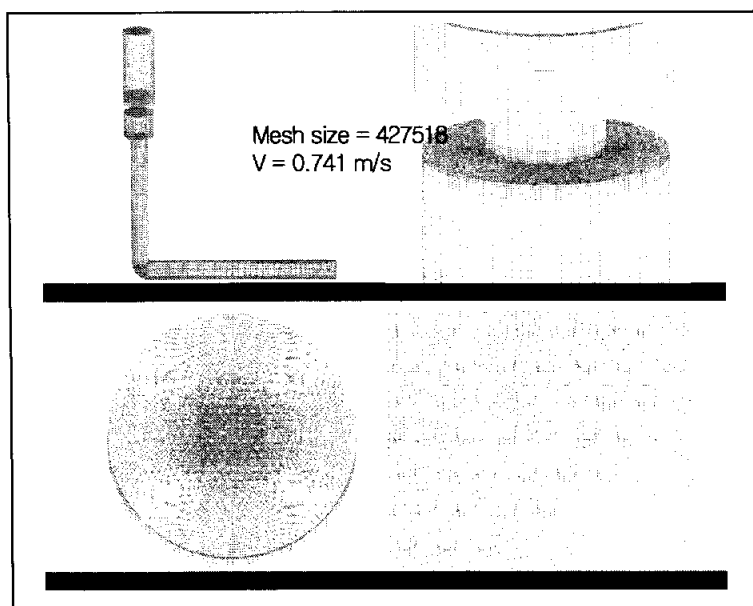


Fig. 2-4 Refine grid factor 4

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 3-2는 본 실험에 사용된 장치의 전체 계통도로 니트형 메탈화이버를 이용한 난류예혼합 플랫버너의 상세도와 연소면에 공급되는 공기 및 연료의 공급계를 나타낸 것이다. 연소에 사용되는 공기는 PWM(Pulse Width Modulation)제어 방식의 송풍기로 직경 52.5mm의 유로를 통해 공급된다. 연료는 상용 프로판(C_3H_8)을 사용압력 0.5kg/cm^2 으로 공기 유로에 설치된 분사각 45° 직경 1mm의 분공 8개를 가진 노즐을 통하여 예혼합 형태로 연소면에 공급하였다. 플랫버너의 연소면은 직경 45mm이며, Acotech사의 MF(metal fiber) model NIT 100 S (Fig. 3-1)를 사용하였고¹⁹⁾, 연소면 바로 전단에는 연소면에 일정한 유속분포를 유도하기 위한 다공판(perforation plate)과 blower에서 발생하는 맥동을 저감하기 위해 막힘판(baffle)이 설치되어 있고, 화염의 안정화 범위 및 균일한 온도분포를 얻기 위해 swirl을 다공판 이후에 설치하였으며²⁰⁾, 연소실은 내경 95mm, 길이 200mm의 석영 관으로 구성하여 화염의 형태를 관찰 할 수 있도록 하였다. 연소실 내 화염에서 여러 가지 데이터를 획득하기 위한 장치로 3축 공간분해가 가능한 이송대와 가스를 포집하기 위해 제작한 3중 수냉관을 사용하였다. 평균온도 측정을 위해 Pt/Pt-Rh 합금을 이용한 R-type 열전대를 3중 수냉식으로 제작하여 측정하였으며, 배기가스 중의 각종 화학성분을 분석하기 위한 장치는 HORIBA사의 MEXA-554JK model을 사용하여 분석하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 공기의 유량 측정

연소실로 공급되는 공기는 PWM제어방식의 송풍기에 의하여 공급되므로, 공기의 유량계측을 위하여 공급전압에 대한 공급유량으로 환산하기 위하여 송풍기로부터 1000mm 떨어진 곳에 유속측정용 구멍을 내어 NIHON KAGAKU사의 열선풍속계를 사용하여 공급전압에 대한 평균유속을 측정하고 유량에 따른 DC전압을 유량데이터로 작성하였다.

3.2.2 연료의 유량 측정

연소용 연료는 상용 프로판(C_3H_8)을 $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 압력으로 공급하였으며, 폴로우테크사의 디지털 연료 유량계(MFC-2900)와 controller (DFC-4000)을 이용하여 값을 측정하고 실험하였다.

3.2.3 화염사진촬영

연료유량을 $1\sim 4\text{ l}/\text{min}$ 으로 변화시키면서 각각의 연료유량에서 공기비에 따른 화염 사진을 FUJIFILM FinePix S602Z 모델로 촬영하고 화염 안정화 범위 선정하는데 이용하였다. 그리고 실험조건으로 사용하기 위한 연료유량별 대표조건(공기비)을 선정하였다.

3.2.4 온도 측정

일반적으로, 화염 내에서의 온도 측정에는 레이저산란법, 라만산란법, CARS 등과 같이 레이저를 이용한 측정방법 등도 있으나, 이들은 감도가 낮고 고가이기 때문에 실제 산업현장에서 사용하기는 아직 문제가 많다. 따라서 본 연구에서는 열전대에 의한 측정의 신뢰도를 인정한 연구결과와 본 연구실에서의 간단한 오차범위를 실험을 통한 결론을 바탕으로 그동안의 선행연구에 의해 사용되어진 저가이고 간편하게 사용할 수 있으며 공간 분해능이 좋은 열전대를 사용하기로 했다²⁰⁾. 본 연구에서 사용한 열전대는 직경 0.5mm Pt/Pt-Rh 합금의 R-type 열전대를 사용하였으며, 측정부의 정보를 A/D converter(YOKOGAWA MV-100)의 1개(ch1) 채널을 통해 20초 동안 샘플링하여 평균값을 기록하였다. 측정용 프로브의 표면반응을 방지하기 위하여 석영 유리관 및 자기관을 넣고 화염부의 고온에 의한 변형을 방지하기 위하여, 3중 수냉식으로 제작하였으며 복사과 전도에 의한 손실은 무시한다. 프로브를 연소실의 3차원 공간분해가 가능한 3차원 이송대에 연소기의 축방향으로 삽입하여 MF상단 10mm에서부터 시작하여 R(반경방향)방향으로 5mm, Z(축방향)방향으로 5mm 등간격으로 각각 40mm, 150mm까지 측정을 실시하였다.

3.2.5 CO, HC, CO₂ 및 O₂의 농도측정

대기오염물질 CO, HC, CO₂ 및 O₂의 측정은 HORIBA사의 배기가스 분석장치로 배기가스 성분중의 각각의 화학종에 따른 농도값을

A/D converter(YOKOGAWA MV-100)의 4개(ch2, ch3, ch4, ch5) 채널을 통해 20초 동안 샘플링하여 평균값을 기록하였다. 샘플가스 채취용 프로브의 흡입부 내경은 1mm이며, 흡입도중 흡입가스의 재반응을 막기 위하여 3중 수냉식 프로브를 사용하였다. 샘플가스 채취용 프로브를 연소실의 3차원 공간분해가 가능한 3차원 이송대에 연소기의 축방향으로 설치하여 MF 상단 10mm에서부터 시작하여 R(반경방향)방향으로 5mm, Z(축방향)방향으로 5mm 등간격으로 각각 40mm, 150mm 까지 측정을 실시하였다.

배기가스 측정장치의 계측범위는 HC : 0.00~10,000ppm, CO : 0.00~10.00%vol, CO₂ : 0.00~20.00%vol, O₂ : 0.00~25.00%vol이며, 측정 데이터는 배기가스분석기의 Analog Output 단자에서 출력되는 아날로그 신호를 A/D converter(YOKOGAWA MV-100)를 통해 20초 동안의 평균을 기록하였다. 각각의 농도값에 따른 전압의 선형성은 장비회사(한국호리바사)로부터 검증을 받았으며, 농도값의 환산은 계측범위를 기준으로 환산하고 기록하였다.

3.3 PIV 유동실험

계측하고자 하는 유동문제를 정량적으로 파악하기 위해서는 전체 유동의 속도장에 대한 정확한 유동정보가 있어야 한다. 유동정보를 얻기 위한 실험방법으로는 LDV나 열선풍속계(Hot-Wire)에 의한 점계측법들이 있지만^{22)~25)}, 이러한 계측법은 시간에 따른 변화하는 전체유동장의 공간정보를 얻는 것에는 한계를 가지고 있다.

본 연구실에서는 열선풍속계에 의한 기초적인 유동실험을 행하였지만 앞에서 말한 한계 때문에 유동장의 유동정보를 정확히 획득하는데 많은 어려움을 경험하였다. 이를 보완하기 위해서 PIV를 통한 플랫폼 내 연소부의 유동정보를 얻고자 실험을 실시하였다.

PIV실험에 사용한 실험장치는 연소실험과 동일한 장치를 사용하였다. 조명으로는 5W출력 연속광 아르곤 이온 레이저에서 발생하는 빛을 Cylindrical 렌즈를 통해 2차원의 단면광을 생성하여 유동장에 조사하였다. 추적입자는 송화가루를 사용하였으며 1회에 200ml 정도를 주입하였다. 입력장치는 PCI 방식의 Digital Hight-Speed CCD Camera (1024×1280 pixel, Photron사)를 통해 영상을 1/1000 Shutter speed로 500frame의 영상을 획득하였고, 획득한 영상은 이미지 그래버를 통해 하드디스크에 저장된다. 저장된 영상은 PIV 전용 소프트웨어(Flow inside 3.0)를 이용하여 처리하였다.

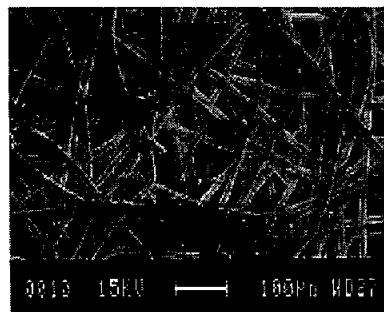
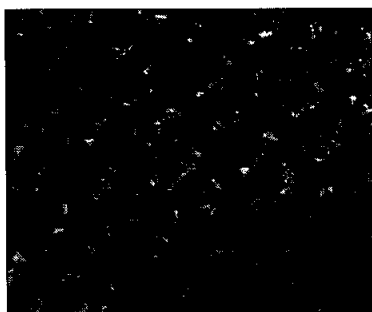
Fig. 3-5는 획득한 영상중 실제 실험의 처리에 사용된 영역을 표시하고 있다. 실험조건은 후술하는 Table 3-1에서 실험조건 B3의 공기 유속인 입구속도 0.741m/s로 실험을 하고, 획득한 영상은 후처리 과정에서 합성과정을 거쳐서 95mm×100mm의 계측영역이 만들어진다. 평균유속의 결과는 500frame을 평균하여 출력하였다.

3.4 실험조건

화염 촬영사진으로부터 각각의 연료유량에 따른 화염안정화 영역을 선정하였다. 그리고 각각의 연료유량 1, 2, 3 및 4 ℓ/min 일 때 선정된 대표조건 공기비 1.5와 연료유량 2일 때 공기비 1.1, 1.5, 2.0에서의 온도와 CO, HC, CO₂, 및 O₂의 농도를 측정하였다. Table 3-1에는 이들 실험 조건을 정리하여 나타내었다.

Table 3-1 Experimental conditions

조 건		연 료 유 량(ℓ/min)	공 기 비(α)
A		1	1.5
B	B1	2	1.1
	B2		1.5
	B3		2.0
C		3	1.5
D		4	1.5



(a) Surface photograph of MF (b) Metaloscope photograph of MF

Fig. 3-1 Direct photograph of Metal Fiber

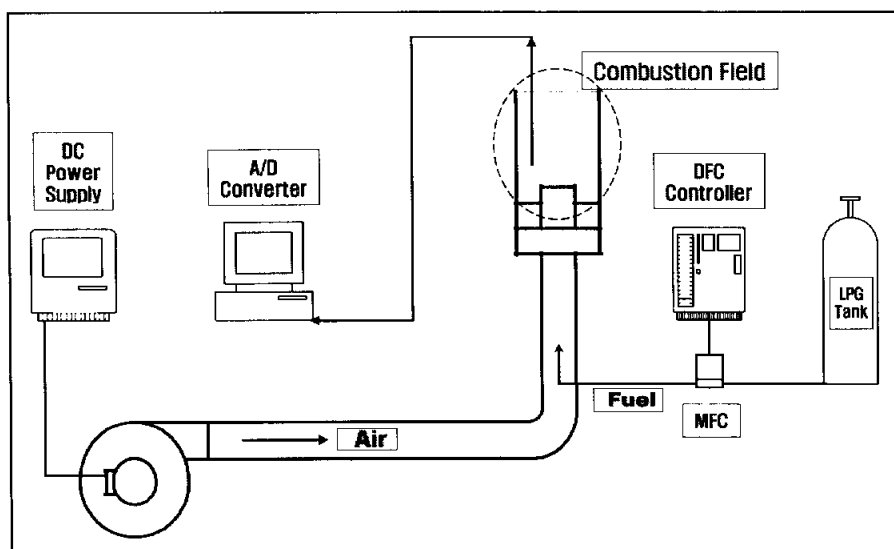


Fig. 3-2 Schematic diagram of combustion system

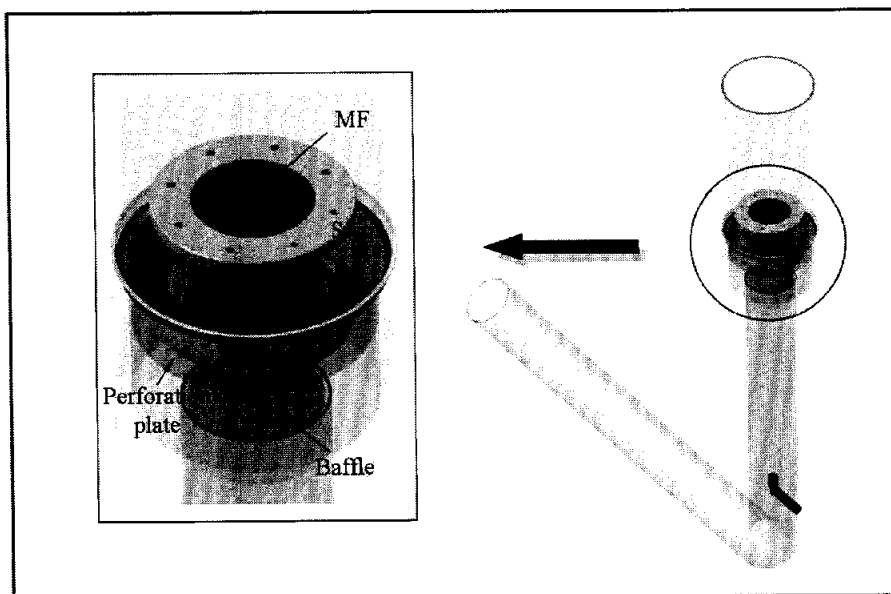


Fig. 3-3 3D-model of combustor

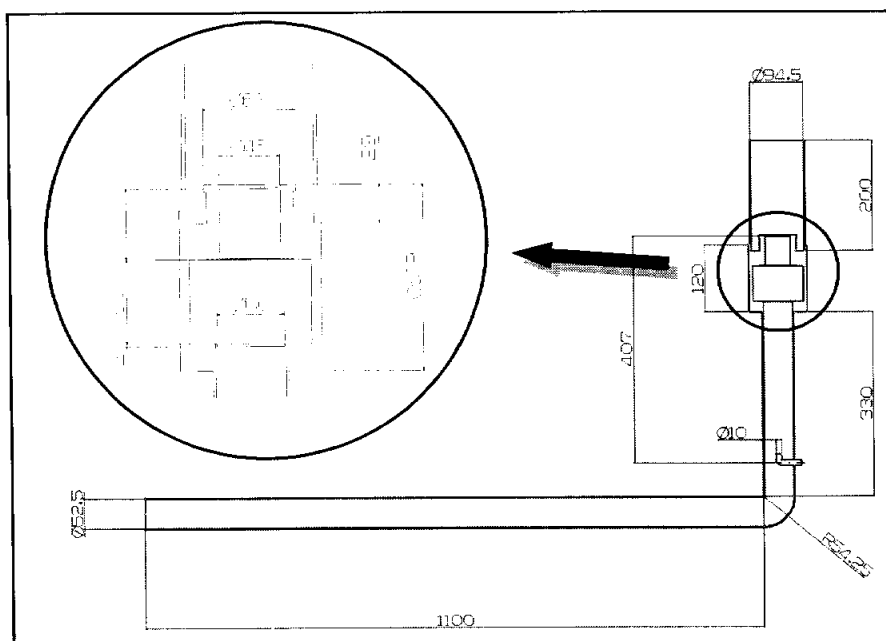


Fig. 3-4 detail dimensions of combustor

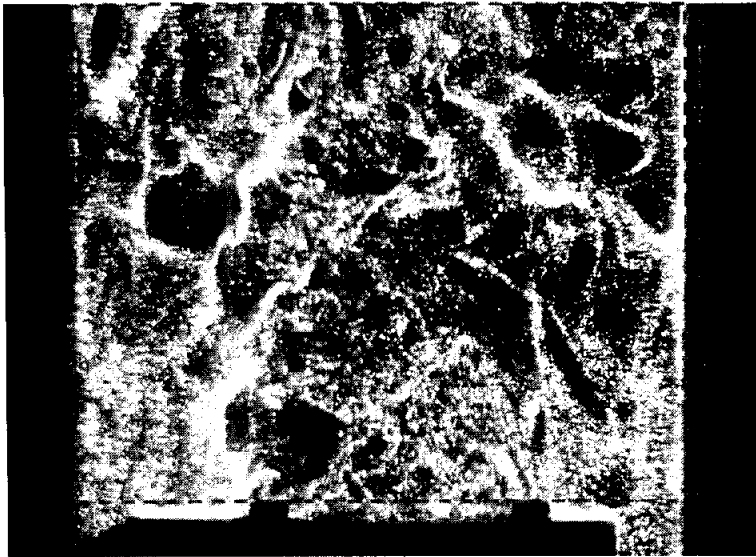


Fig. 3-5 Illustration of PIV analysis

4. 결과 및 고찰

4.1 유동해석결과와 실험결과의 비교

Fig. 4-1과 4-2는 전체해석영역의 해석결과를 등속도 분포와 등속도 벡터로 나타낸 것이다. Y-Z 평면에서는 전체적인 속도 분포가 축 중심을 기준으로 좌우 대칭성을 이루는 속도분포를 나타내지만 X-Z평면에서는 Blower에서 발생하는 맥동을 저감하기 위해 설치된 막힘판에 의해서 예혼합실에서의 속도분포가 좌우 불균일하게 나타나고 있다. 이러한 예혼합실에서 유입속도분포의 불균일성에 대하여 예혼합실의 유동형태를 자세히 알기 위해 Fig. 4-3과 4-4에서는 예혼합실을 확대하여 등속도 벡터로 나타내었다. Fig. 4-3은 X-Z평면의 등속도 벡터로서, 유입부의 곡관형상으로 인해 막힘판으로 유입되는 속도의 크기가 좌우 불균일하고 예혼합실의 유동형태가 아주 복잡해지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4-4는 Y-Z평면의 등속도 벡터로서 Fig. 4-3에 나타난 현상과는 달리 축을 중심으로 좌우 대칭적인 유동형태를 보여주고 있다. 이와 같은 예혼합실의 복잡한 유동형태는 연료와 연소용 공기의 혼합을 더욱 촉진시키므로 연소효율을 높이는 관점에서는 좋은 유동형태라고 할 수 있다. 하지만 이러한 복잡한 유동형태가 연소부인 메탈화이버에 직접적으로 유입이 될 경우 화염불안정과 균일가열에 악영향을 발생시키므로 주의하여야 한다.

Fig. 4-5와 4-6은 연소부의 등속도 벡터를 나타내고 있다. 예혼합실을 통과한 공기가 연소면에 균일한 속도분포를 유도하기 위해 설치된 다공판의 정류효과로 인해 메탈화이버가 설치될 위치(연소면)에서의 속도분포가 비교적 균일함을 볼 수 있다. 즉 막힘판의 설치로 인한

예혼합실내의 복잡한 유동형태가 다공판 설치로 인해 균일한 속도분포를 얻으므로 다공판의 정류효과는 충분하다고 사료된다.

지금까지 유동해석의 결과를 통해 연소기에서의 전체적인 유동정보를 충분히 알 수 있었다. 하지만 유동해석의 신뢰성확보와 함께 차후 진행될 연소해석 그리고 연소가시화를 위해 Fig. 4-7과 4-8에서는 정확한 유동정보를 얻고자 연소부의 메탈화이버가 설치될 위치에서부터 Z축 방향으로 10mm, 30mm, 60mm지점에서 PIV실험결과와 격자형태별 유동해석결과를 X-Z평면과 Y-Z평면에 나타내어 보았다.

Fig. 4-7은 X-Z평면에서 Z=10, 30, 60mm 지점에서의 Z방향(축방향) 속도값을 비교하여 나타낸 것이다. 연소기 벽면부에서의 선회효과가 잘 표현되고 있으며, PIV실험을 기준으로 하였을 경우 격자형태중 Refine Factor 4에서 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 Non-Refine의 결과를 제외하곤 모든 결과들이 반경방향 $R=-10\sim-20\text{mm}$ 지점이 속도 값이 다소 높게 나타나는 것이 특징이다.

Fig. 4-8은 Y-Z평면에서 Fig. 4-7과 동일한 조건이며, PIV결과와 함께 Refine Factor 4가 가장 잘 일치한다. 하지만 PIV결과를 제외한 모든 유동해석의 결과가 축을 중심으로 좌우대칭성을 보여주고 있다. 이는 PIV실험과정에서의 2차원 단면광 주사위치의 정확성에 관한 문제로 판단된다. 그리고 Fig. 4-7과 4-8의 결과에서 PIV실험의 속도값에 비해 유동해석의 속도값이 다소 높게 나타나는 것은 유동해석이 중력항을 무시한 점과 PIV실험과 유동해석에서의 출구조건의 차이점으로 판단된다.

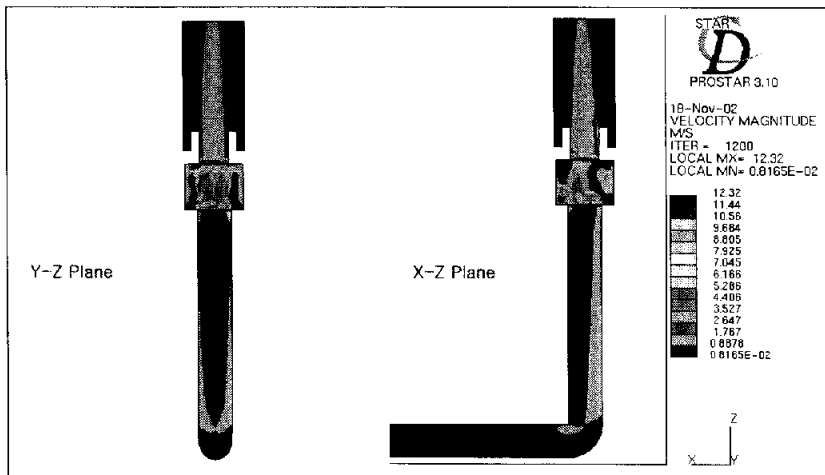


Fig. 4-1 Distribution of velocity contour

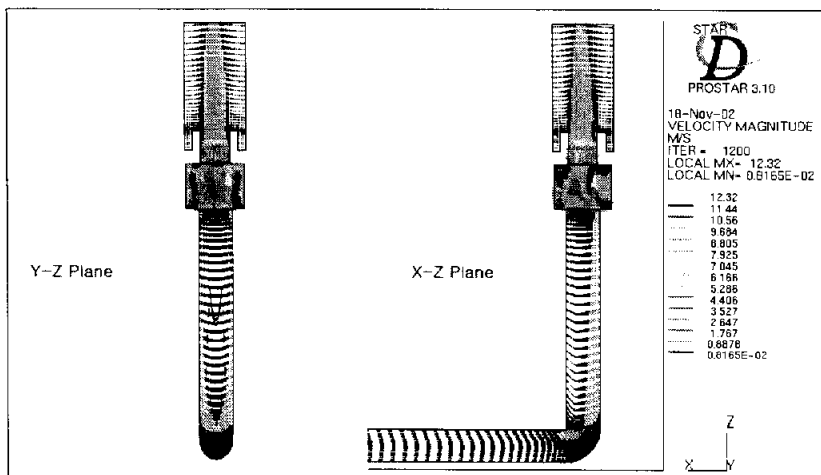


Fig. 4-2 Distribution of velocity vector

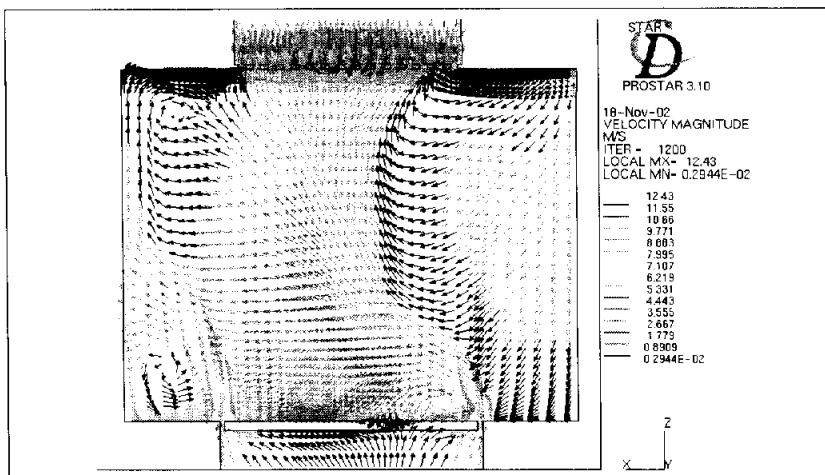


Fig. 4-3 Z-direction velocity vector at premixed field (X-Z plane)

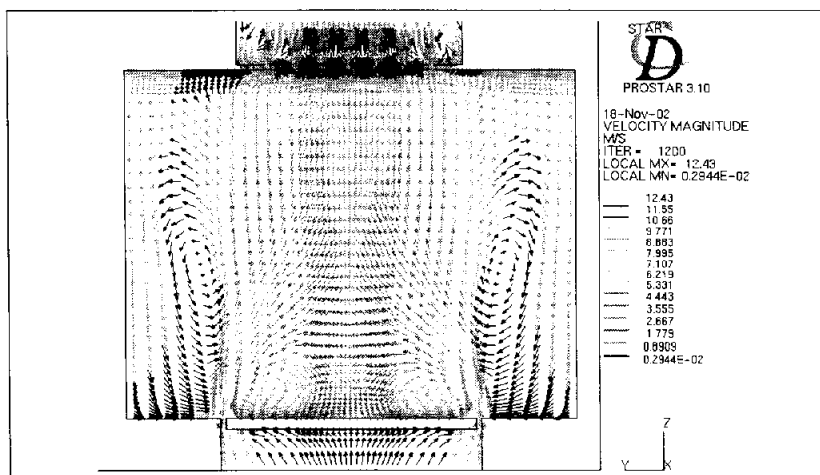


Fig. 4-4 Z-direction velocity vector at premixed field (Y-Z plane)

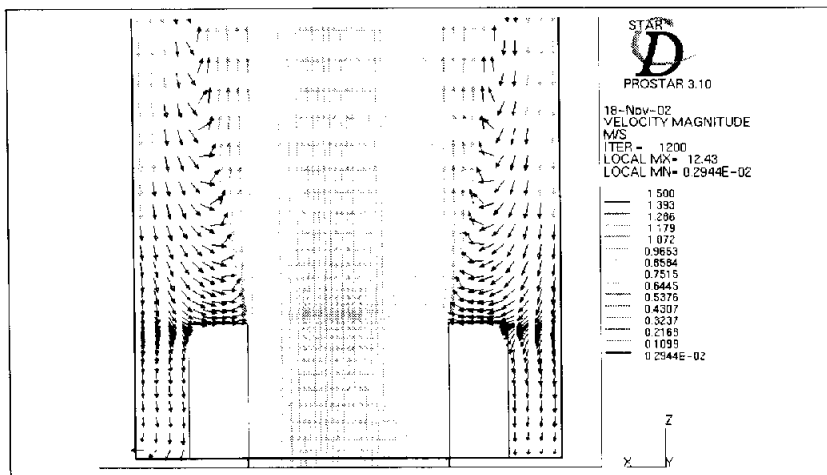


Fig. 4-5 Z-direction velocity vector at combustion field (X-Z plane)

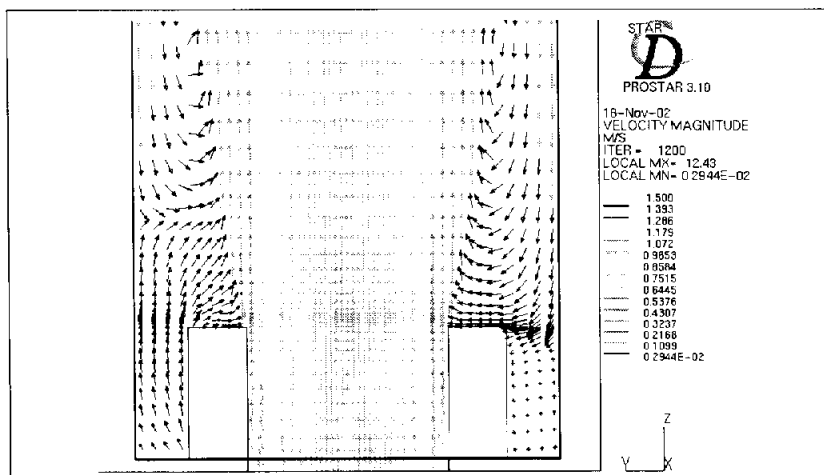
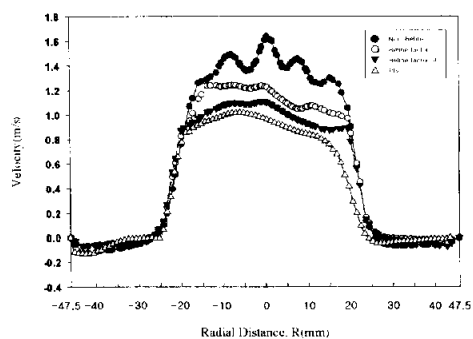
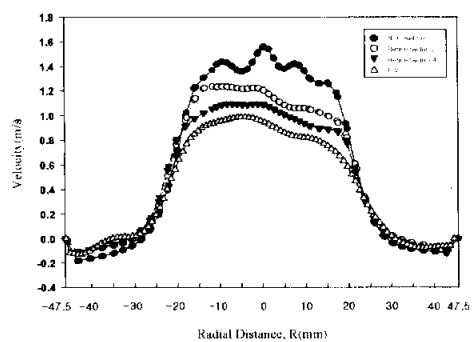


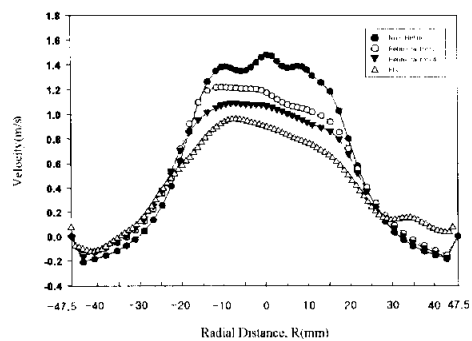
Fig. 4-6 Z-direction velocity vector at combustion field (Y-Z plane)



(a) $Z=10\text{mm}$

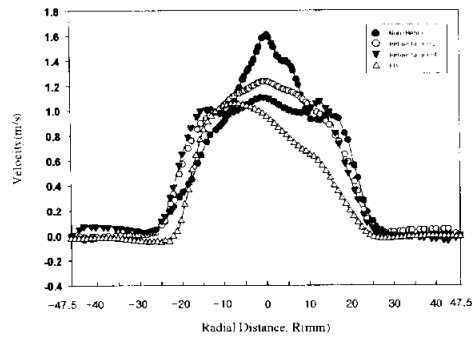


(b) $Z=30\text{mm}$

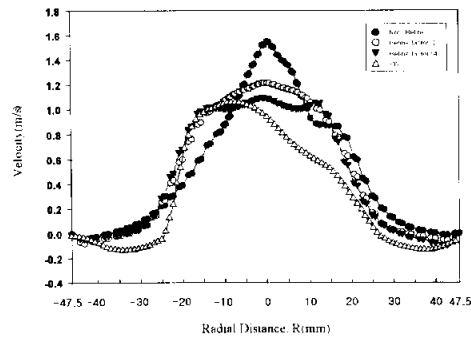


(c) $Z=60\text{mm}$

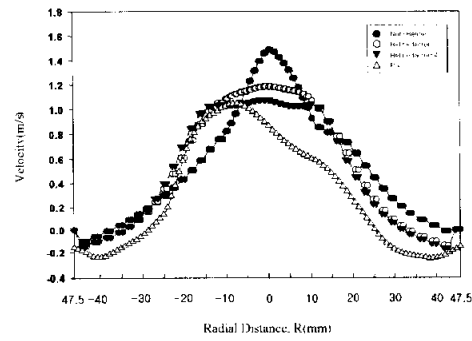
Fig. 4-7 Z-direction velocity distribution at combustion field (X-Z plane)



(a) $Z=10\text{mm}$



(b) $Z=30\text{mm}$



(c) $Z=60\text{mm}$

Fig. 4-8 Z-direction velocity distribution at
combustion field (Y-Z plane)

4.2 화염안정화 범위

모든 연소장치는 연소부하에 대응하는 안정된 화염을 유지하기 위하여 적절한 연료·공기의 주입이 이루어져야 하며, 이 연소부하의 가변범위 즉 턴다운비(turn down ratio)가 클수록 연소부하변동에 대응하여 안정되게 연소하는 범위가 넓다는 뜻이다. 따라서 모든 연소장치의 운전조건으로써 화염안정화 범위를 찾는 것은 중요하다.

Fig. 4-9에서 4-12는 각각 연료유량 1, 2, 3 및 4 ℓ/min에서 공기유량 변화에 따른 화염의 직접사진(좌측 사진은 축방향의 45°, 우측사진은 축방향에 90°)이다. 지면 관계상 본 논문에 사진을 전부 게재하지 않았지만, 실제 연료유량(1, 2, 3, 4 ℓ/min)에서 각각 공기유량의 변화에 따라 총 226장을 촬영하였다.

Fig. 4-9는 연료유량 1 ℓ/min에서 공기유량 변화에 따른 화염의 직접사진이다. 연료유량 1 ℓ/min인 경우, $\alpha=0.6$ 에서는 $\alpha=0.71$ 과 비교하면 연소면 전체에 화염이 존재하지 않았고 불안정하였다. 또한 $\alpha=2.45$ 인 경우에는 $\alpha=0.97\sim 2.14$ 에 비하여 상당히 맥동이 심하며 평면 화염의 형태를 유지 못하고 있다. 물론 이보다 공기비가 커지면 blow off된다. 따라서 본 실험에서 연료유량 1 ℓ/min 경우의 화염안정화 범위는 $\alpha=0.71\sim 2.28$ 정도라고 할 수 있다.

Fig. 4-10은 연료유량 2 ℓ/min에서 공기유량 변화에 따른 화염의 직접사진이다. $\alpha=0.91$ 을 넘어야 화염이 안정하게 되고, 또한 $\alpha=2.48$ 이 되면 공기과잉으로 화염은 불안정하게 되며, 따라서 이경우의 화염의 안정화범위는 $\alpha=0.91\sim 2.21$ 로 된다. 앞의 그림 즉, 연료유량 1 ℓ/min에 비하여 화염안정화 범위는 좁아 졌다. 이는 동일한 연소장치에 주입되는 연료 및 공기의 양이 많아지기 때문이며, 이런 현상은 이후

의 연료유량 3 ℓ/min 및 4 ℓ/min에서는 더욱 확실해 진다.

Fig. 4-11은 연료유량 3 ℓ/min에서 공기유량 변화에 따른 화염의 직접사진이다. 이전의 결과와 유사한 형태를 볼 수 있었으며, 여기서의 화염안정화 범위는 $\alpha=1.01\sim2.12$ 이다.

Fig. 4-12는 연료유량 4 ℓ/min에서 공기유량 변화에 따른 화염의 직접사진이다. 여기서의 안정화 범위는 $\alpha=1.08\sim1.97$ 로, 이전의 경우보다 가장 좁은 안정화 범위를 나타내었다.

Fig. 4-13은 연료유량 및 공기유량 변화에 대한 이전의 안정화범위를 정리하여 나타내었다. 연료유량 증가에 따라 화염안정화 범위가 좁아짐을 확인할 수 있으며, 여기서 유량변화에 대한 안정범위를 계통적인 식으로 표현하고자 하였으나, 본 실험장치에서 현재까지의 실험에서는 나타낼 수가 없었다. 한편, 본 장치는 평면화염을 만들기 위하여 니트형 메탈화이버를 이용하였고, 이러한 메탈화이버의 형상적 특성상 반드시 연소소음을 동반한다. 따라서 그림의 각 연료유량에 대하여 소음영역을 조사해 두었다.

일반적으로 메탈화이버를 이용한 공업적 응용에는 화염을 청염영역(예를 들어, Fig. 4-9의 (d))과 복사영역(예를 들어, Fig. 4-9의 (c))으로 분류하며, 청염영역에서의 열전달은 대류에 의해 지배를 받고, 복사영역에서는 복사열전달에 의해 지배받는 것으로 알려져 있다. 그러나 화염안정화 범위를 논할 때에는, 상대적으로 연료가 많이 들어간 경우에 C_2 라디칼 때문에 발생하는 청녹염(green flame)이 발생하는 범위에서도 화염이 안정되게 유지되므로 이를 포함시켜야 한다. 따라서, 화염은 공기유량 변화에 대하여 화염형태에 따라 청녹염(green flame range)과 복사영역(radiation range), 그리고 청염영역(blue flame range)세 영역으로

분류할 수 있다. Fig. 4-13의 각 연료유량에 대하여 복사영역으로 표시된 윗부분 안정범위 상한까지(예를 들어, 연료유량 1 ℓ/min에서는 $\alpha=1.88\sim2.28$ 의 범위)가 청염영역이고, 복사영역의 아래 부분에서 안정범위 하한까지(예를 들어, 연료유량 1 ℓ/min에서는 $\alpha=0.71\sim1.18$ 의 범위)가 청녹염영역이 된다.

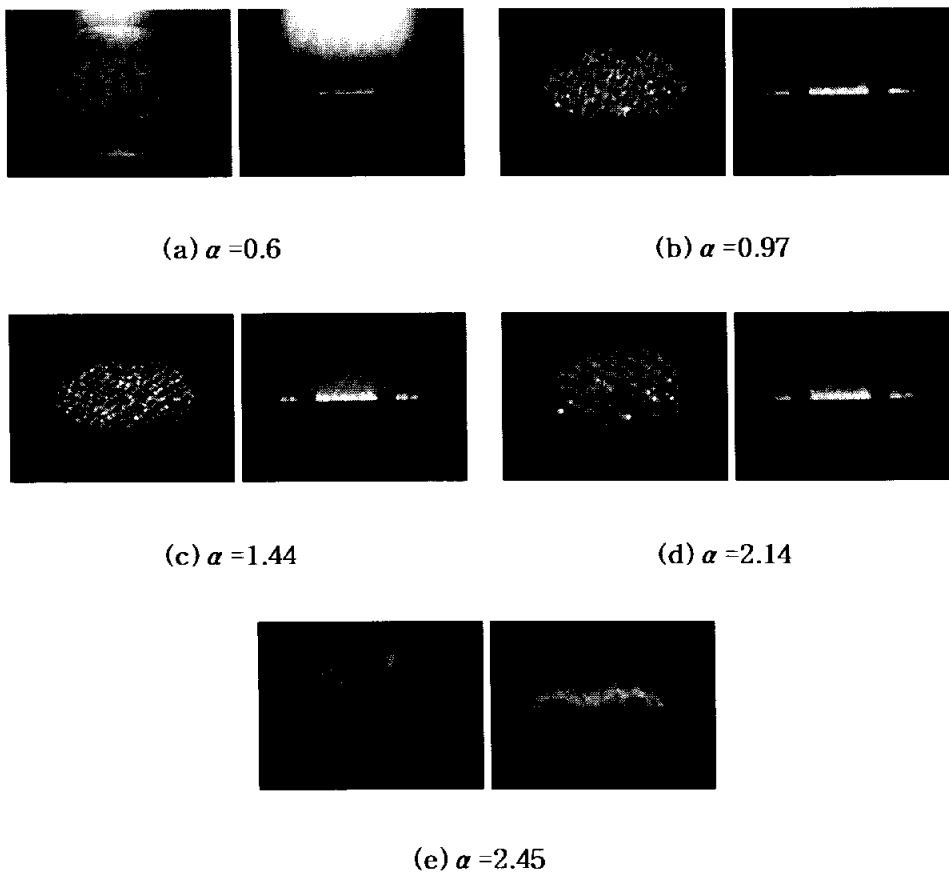


Fig. 4-9 Direct photography of flames by change of excess air ratio (Fuel=1 l/min)

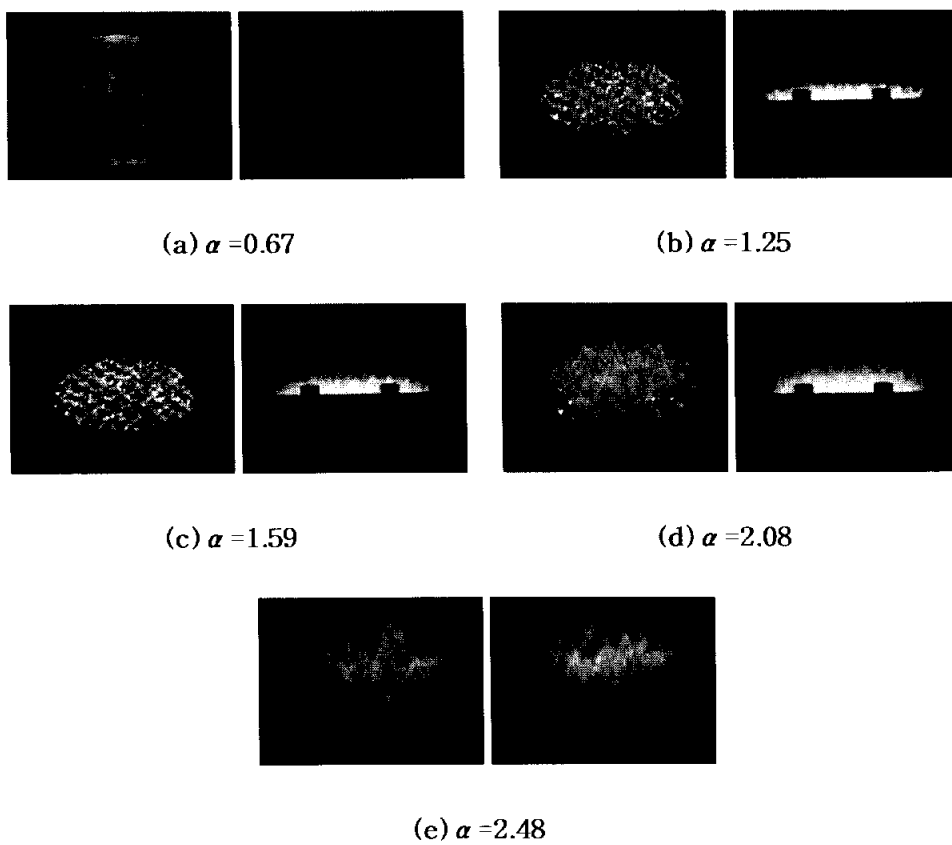


Fig. 4-10 Direct photography of flames by change of excess air ratio (Fuel=2 l/min)

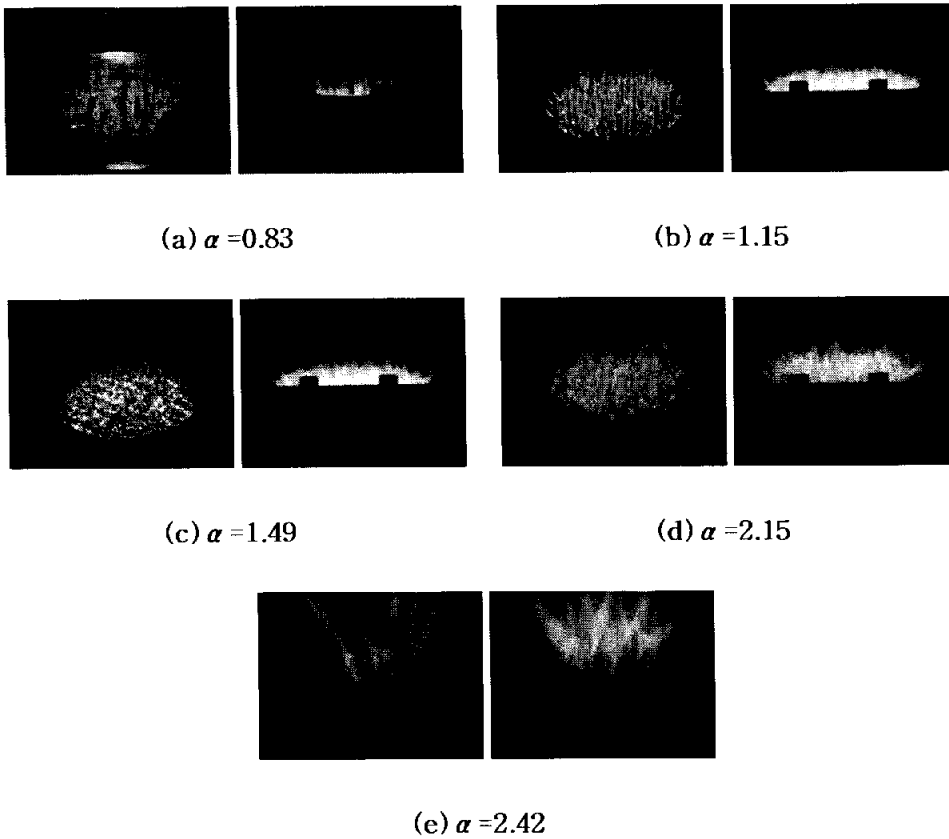


Fig. 4-11 Direct photography of flames by change of excess air ratio (Fuel=3 ℓ /min)

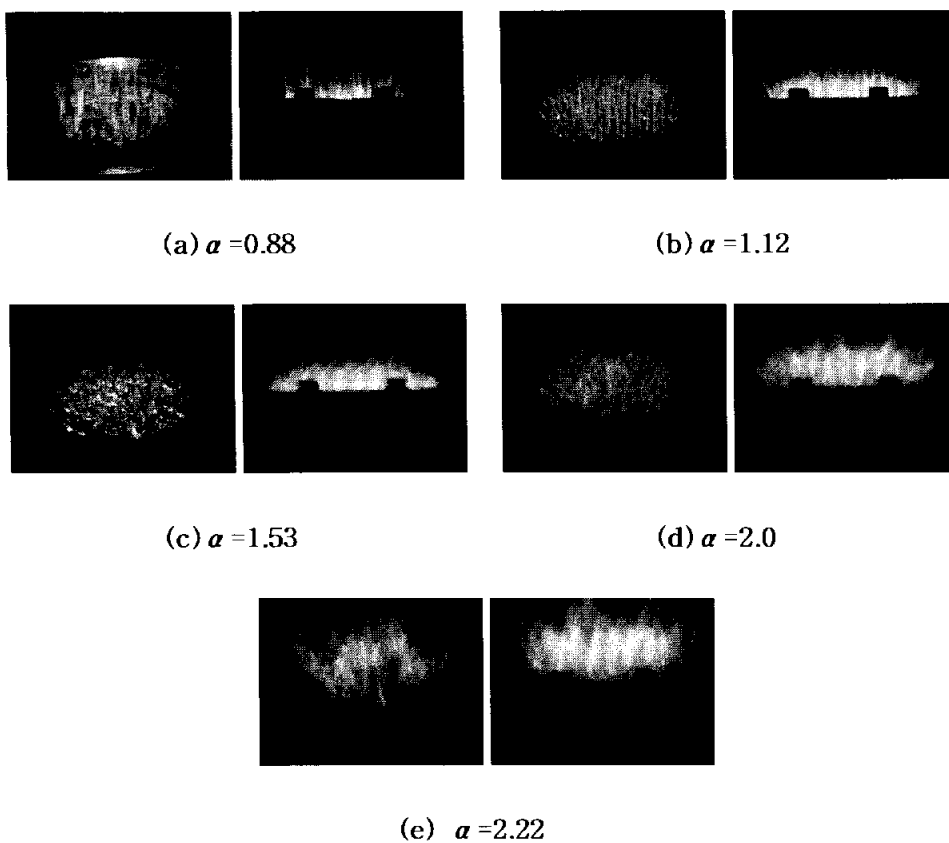


Fig. 4-12 Direct photography of flames by change of excess air ratio (Fuel=4 ℓ /min)

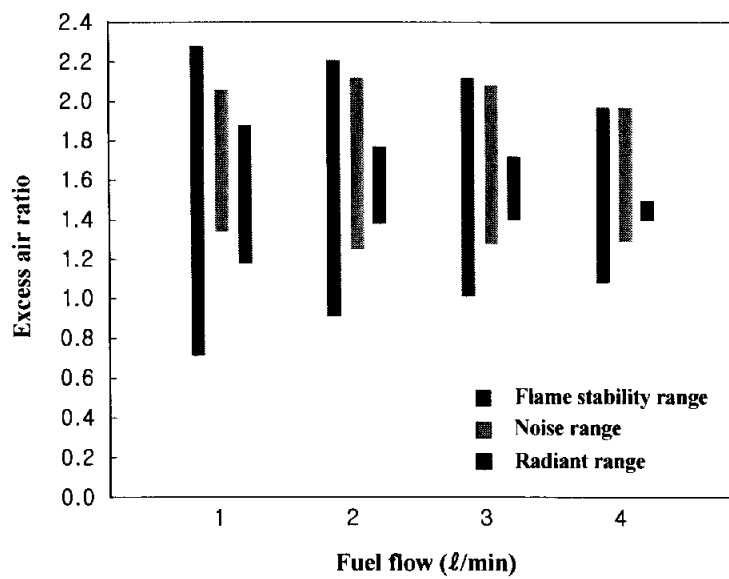


Fig. 4-13 Ranges of flame stability, noise and radiant

4.3 공기비 변화에 따른 화염구조

전술한 바와 같이, 화염은 안정범위 내에서 청녹염영역과 복사영역, 그리고 청염영역으로 구분되며 이들은 각각 다른 연소특성을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 각 연료유량에 따라 이들 세 영역을 대표할 수 있으면서도 연료유량별로 고찰이 가능한 α 를 선정하고 실험조건을 결정하였다. 이 절에서는 연료유량을 $2\ell/\text{min}$ 으로 고정하고 공기비를 $\alpha=1.1$, $\alpha=1.5$ 그리고 $\alpha=2.0$ 의 세 조건에서 실험하여 각각의 화염구조 및 특성을 고찰하기로 한다.

4.3.1 온도분포

Fig. 4-14는 연료유량 $2\ell/\text{min}$ 일 때의 세 가지 공기비(실험조건 B1, B2 및 B3)에서의 온도분포를, 연소면에서 10mm 떨어진 위치부터 축방향으로 150mm까지에 대하여, 연소기 중심에서 반경방향으로 40mm까지 나타낸 것이다. 먼저 그림(a)는 청녹염영역의 대표되는 공기비 $\alpha=1.1$ (실험조건, B1)에서의 온도분포로써, 대체로 최고온도는 연소기의 끝부분까지 1200K 정도이다. 또한, 온도분포는 $Z=70\text{mm}$ 정도까지 반경방향으로 $R=20\text{mm}$ 근방까지 1200K의 거의 일정한 온도를 유지하다가, 그 이후에는 온도경사가 심해진다. 이는 연소실내 연소면의 반경이 22.5mm임을 감안하면, 축방향 70mm정도까지는 평면화염을 유지하고 있기 때문이라고 생각된다.

그림(b)는 복사영역의 대표되는 공기비 $\alpha=1.5$ (실험조건, B2)에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림(a)와 거의 유사한 형상을 나타내고 있

다. 다만, 동일한 연료유량 주입에 공기유량만 증가시켰는데도 불구하고 연소실 최고온도가 약 200K정도 상승한 것으로 나타났다. 이와 동일한 현상은 다음 그림에서도 나타나는데, 공기유량이 이론혼합비 보다 상당히 많이 주입됨에도 불구하고 온도가 상승한 것은, 본 실험장치와 같은 예혼합 연소장치에서는 이론혼합비 정도의 공기 주입으로는 물리적으로 연료·공기의 혼합을 충분하게 촉진시키지 못하기 때문이라고 생각된다. 추후에 설명하겠지만, 이 사실은 불완전연소에 의하여 생성되는 CO 및 HC등 화학종의 농도도 $\alpha=1.1$ 인 경우보다 지금의 경우가 훨씬 적게 배출된 것으로도 확인할 수 있다.

그림(c)는 청염영역의 대표되는 공기비 $\alpha=2.0$ (실험조건, B3)에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 앞에서 설명했듯이, 이 공기비에서도 연소실 최고온도는 약 100K 이상 상승하였다. 한편, 앞의 실험조건에서는 공기비가 클수록 즉, 연소용 유입공기가 이론혼합비보다 많아질수록 연소실 내의 온도분포가 높아진 것으로 나타났다. 물론 연소장치의 형상에 따라 연료/공기의 물리적인 혼합 등을 이유로 연소에 필요한 공기유량이 다르겠지만, 공기비가 큼에도 불구하고 최고온도가 상승하는 것은 이론혼합비보다 많은 공기를 공급했음에도 공급된 공기가 연소에 사용되지 못하고 있음을 의미한다. 본 실험장치에서 공급공기 유량의 적정성 여부를 고찰하기 위하여, 공기유량을 상승시켜가며 온도를 측정한 결과, $\alpha=2.0\sim 2.3$ 정도에서 최고온도를 나타내고 그 이후부터는 연소실 온도는 감소하고 있었다. 따라서 본 실험장치의 경우, 공기비 2.0이상으로 공급하면 공급된 공기는 연소에 사용되지 않고 배출되며, 이때는 배기가스의 온도를 낮추는 것을 알 수 있다. Fig. 4-15는 $\alpha=2.48$ 에서의 연소실내 반경방향 온도분포를 축방향으로 나열한 것으로, $\alpha=2.0$ 인 경우보다 전체적으로 온도가 낮아졌음을 보이고 있다.

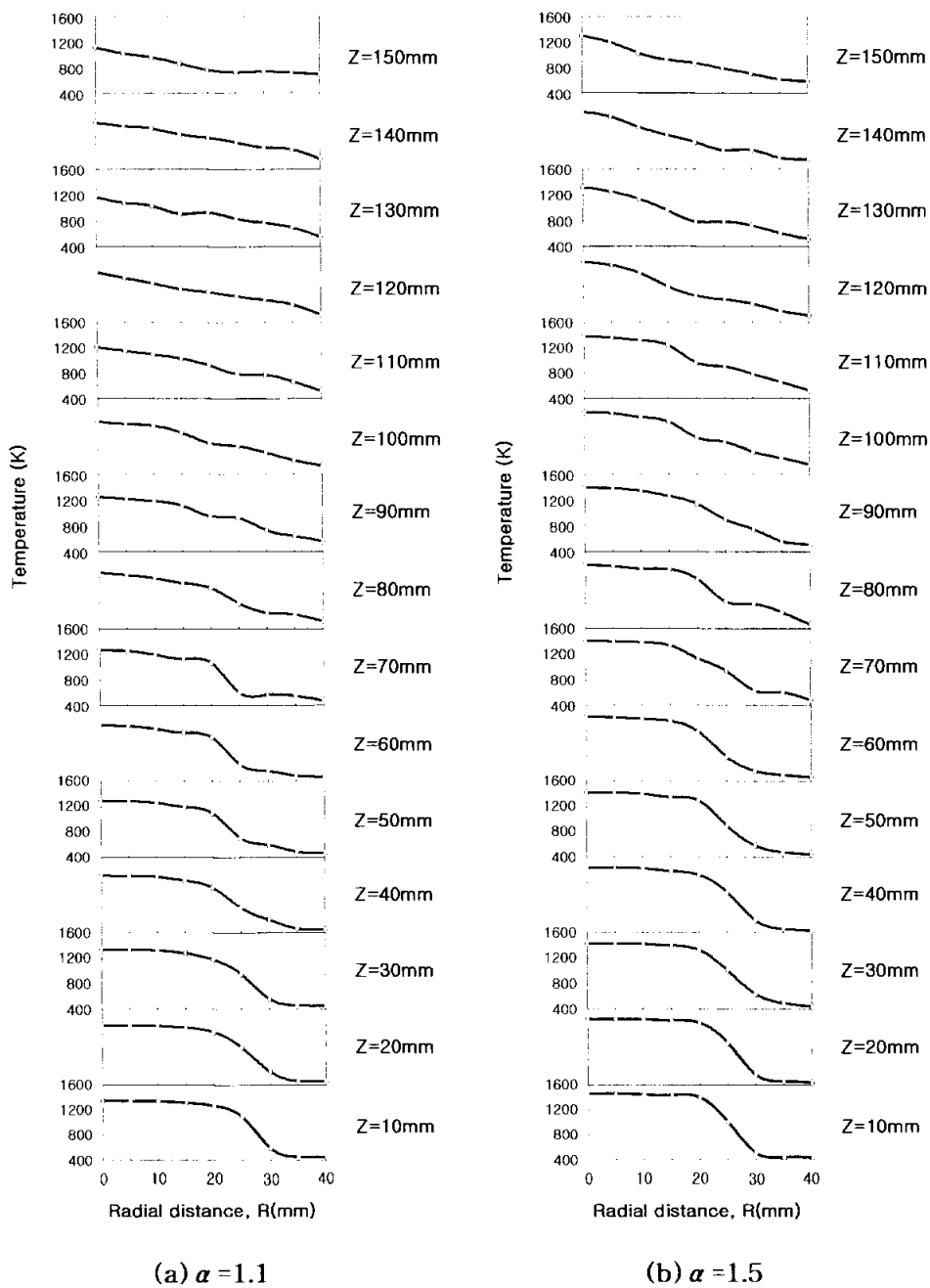
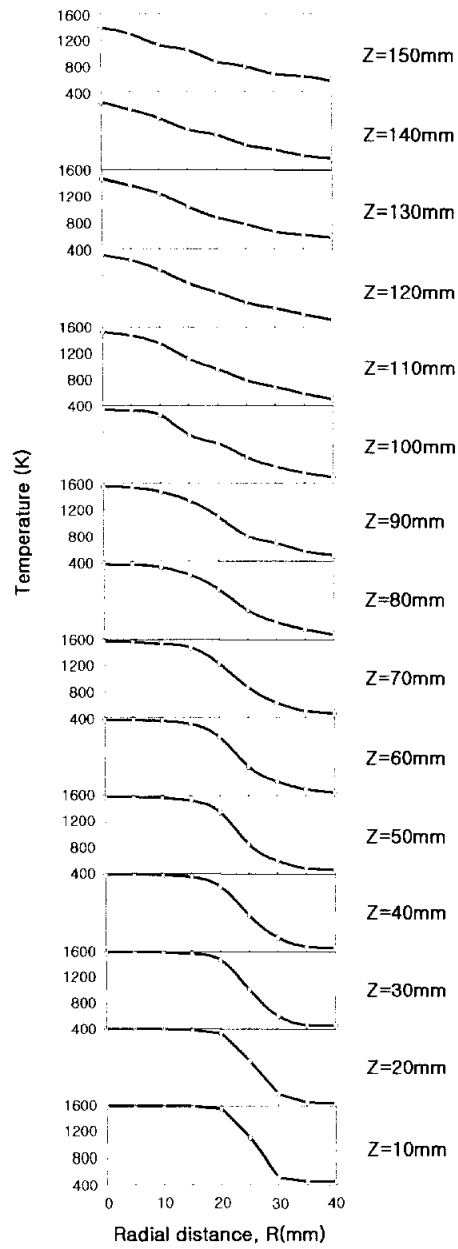


Fig. 4-14 Temperature distributions by change of excess air ratio
(Fuel=2 l /min) (to be continued)



(c) $\alpha = 2.0$

Fig. 4-14 Temperature distributions by change of excess air ratio
(Fuel=2/min)

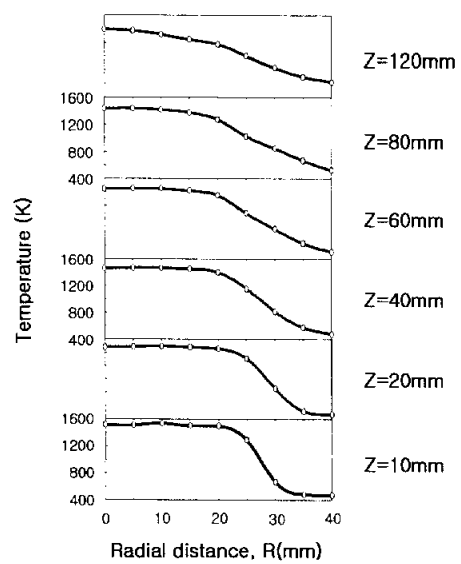


Fig. 4-15 Temperature distributions at $\alpha = 2.48$ (Fuel=2 l/min)

4.3.2 CO, HC, CO₂ 및 O₂ 농도분포

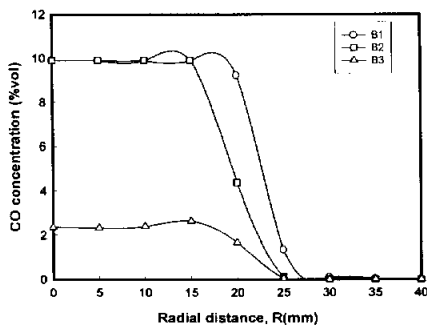
Fig. 4-16에서 4-19는 연료유량 2 ℓ/min의 일정한 조건에서, 공기 유량 변화에 따른 실험조건 B1, B2 및 B3에서의 CO, HC, CO₂ 및 O₂의 반경방향 농도분포 측정결과를 연소실내 연소면으로부터 하류 (a) Z=10mm, (b) Z=20mm, (c) Z=40mm, (d) Z=60mm, (e) Z=80mm, (f) Z=120mm 로 각각 나타낸 것이다.

먼저, Fig. 4-16의 CO 농도분포를 보면, 대체로 공기비가 증가할수록 CO의 농도는 감소하고 있으며, 이러한 현상은 Z=40mm 이후 단면에서 더욱 확연하게 나타난다. 또한 Fig. 4-17의 HC 농도도 이와 비슷한 현상으로 나타나며, 여기서는 특히 $\alpha=1.1$ (실험조건, B1)에서의 농도가 다른 공기비 조건보다 확실히 많이 나타났다. 이들 현상과 이전의 온도분포에 대한 고찰을 연관지으면, 본 실험에서 $\alpha=1.1$ 정도의 공기과잉으로는 연소반응에 활발한 물리적 혼합을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

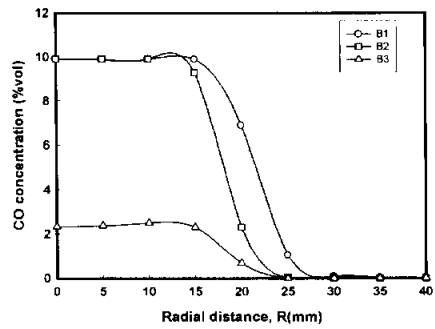
Fig. 4-18의 CO₂ 농도분포에서는 연소가내 연소면 반경방향의 끝 부근(R=22.5mm)이내에서는 연소용 공기의 증가 즉, 공기비의 증가에 따라 CO₂ 농도가 점차로 증가하여, 앞에 설명한 바와 같이 공기비 증가에 따라 연소가 활발히 이루어지고 있음을 뒷받침하고 있다. 한편, 실험조건 B1 및 B2인 경우에 Z=10~40mm 단면의 반경방향 CO₂ 농도분포를 보면, 연소면의 반경방향 끝 부근(R=22.5mm)에서 농도의 최대점을 보이며 그 이후도 연소면보다 벽면 쪽에서 많은 농도분포를 나타내고 있다. 이런 현상은 연소가 하류로 갈수록 넓게 퍼져가지만, 여전히 실험조건 B1에서는 벽면쪽에서 농도가 높게 나타났다. 이것은 공기비가 상대적으로 작은 경우(공기의 유속이 상대적으로 느린 경우)에는,

연소면의 끝 위치에서 연소가 많이 진행되며 이후에는 벽면 쪽으로 확산이 많이 되기 때문이라고 생각된다. (Fig. 4-10 연료유량 2 l/min에서의 화염사진 참조)

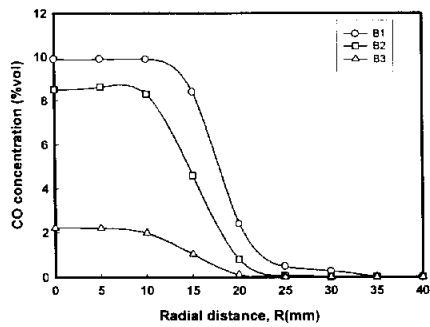
Fig. 4-19의 O_2 농도분포에서는, 대체로 연소면의 끝을 기준으로 상당한 농도차이를 보이고 있어, 연소면 내에서는 공급된 공기 중의 O_2 가 연소에 소비되고 있음을 보여준다.



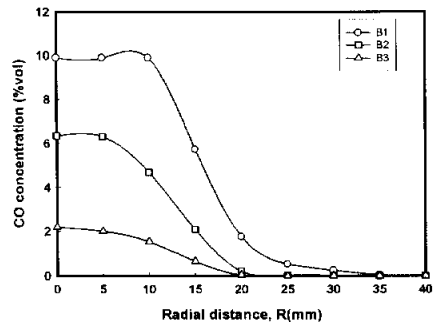
(a) Z=10mm



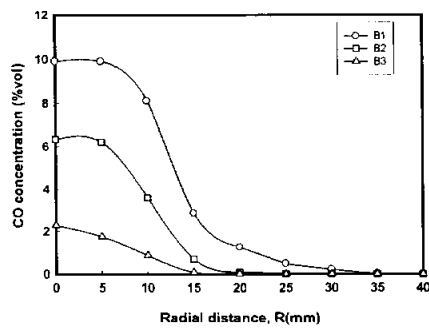
(b) Z=20mm



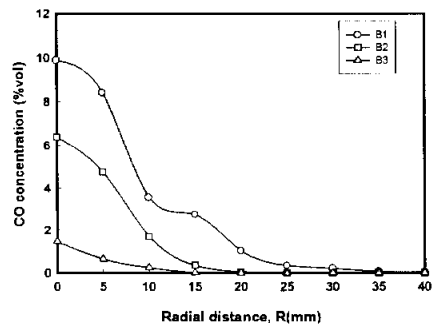
(c) Z=40mm



(d) Z=60mm

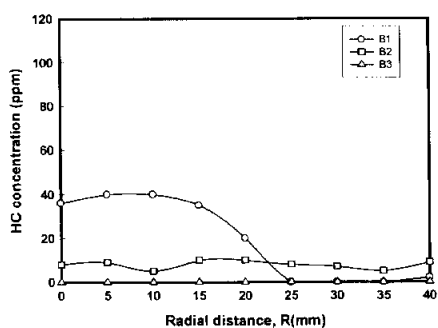


(e) Z=80mm

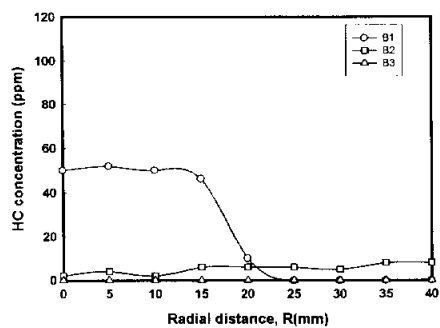


(f) Z=120mm

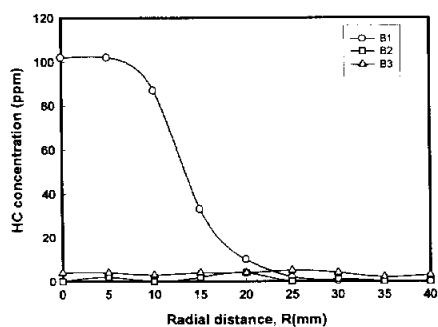
Fig. 4-16 CO concentration distributions by change of excess air ratio (Fuel=2 l /min)



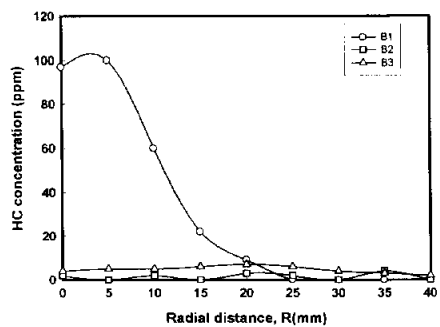
(a) Z=10mm



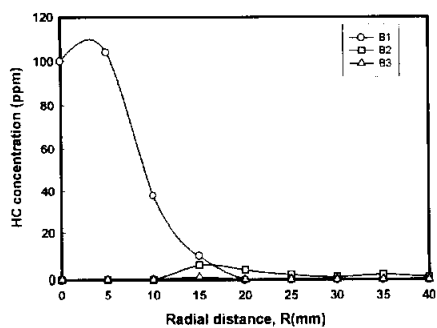
(b) Z=20mm



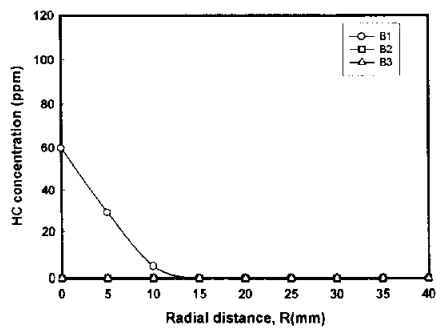
(c) Z=40mm



(d) Z=60mm

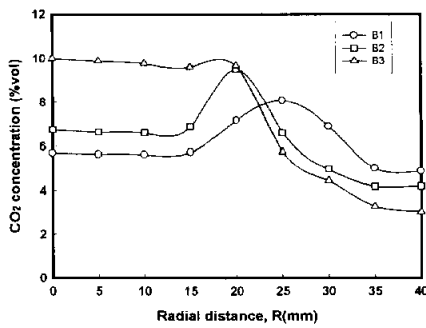


(e) Z=80mm

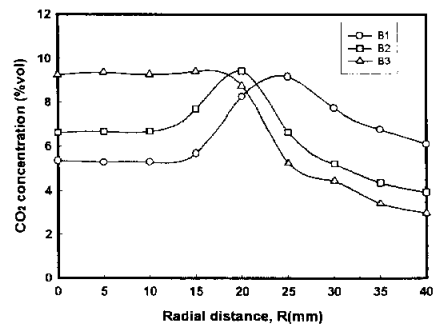


(f) Z=120mm

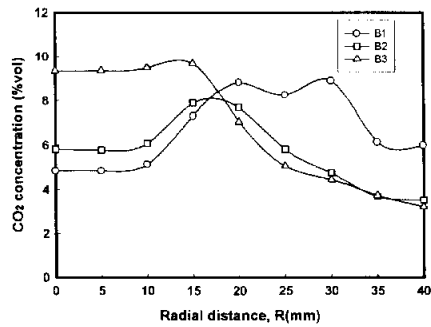
Fig. 4-17 HC concentration distributions by change of excess air ratio (Fuel=2 l /min)



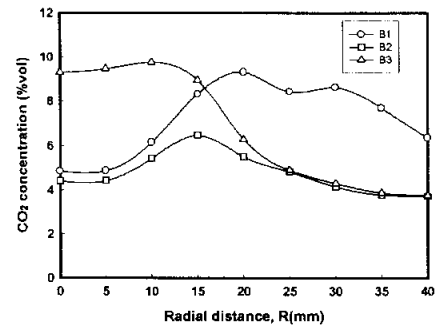
(a) Z=10mm



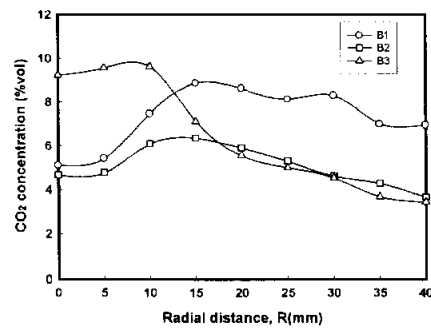
(b) Z=20mm



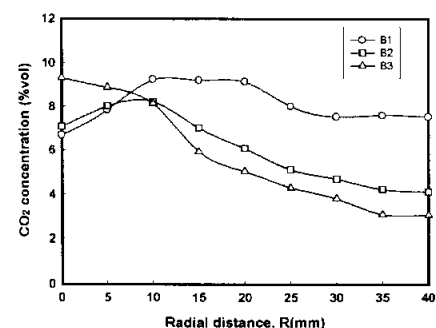
(c) Z=40mm



(d) Z=60mm

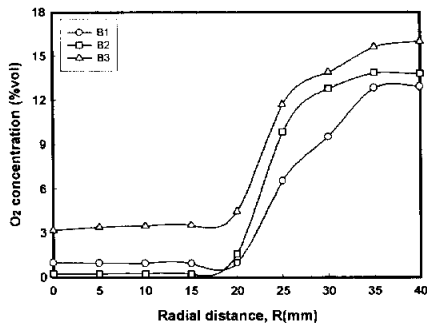


(e) Z=80mm

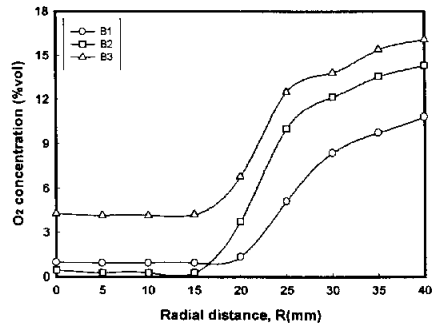


(f) Z=120mm

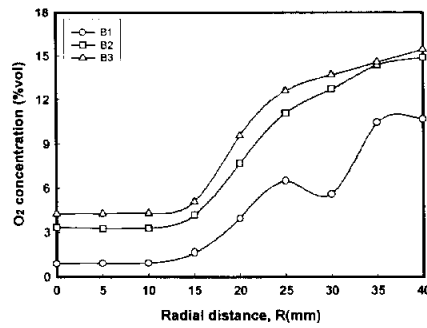
Fig. 4-18 CO₂ concentration distributions by change of excess air ratio (Fuel=2 ℓ /min)



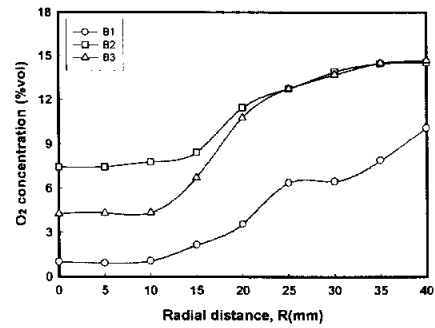
(a) Z=10mm



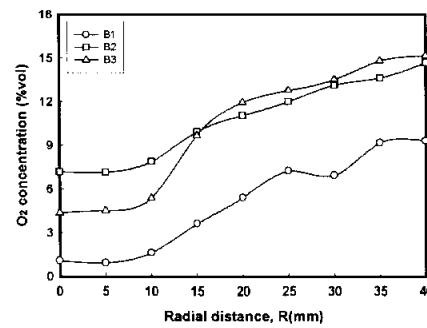
(b) Z=20mm



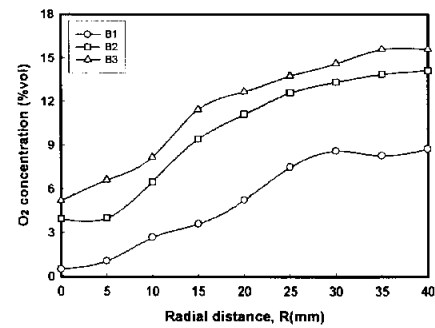
(c) Z=40mm



(d) Z=60mm



(e) Z=80mm



(f) Z=120mm

Fig. 4-19 O₂ concentration distributions by change of excess air ratio (Fuel=2 l/min)

4.4 연료 유량변화에 따른 화염구조

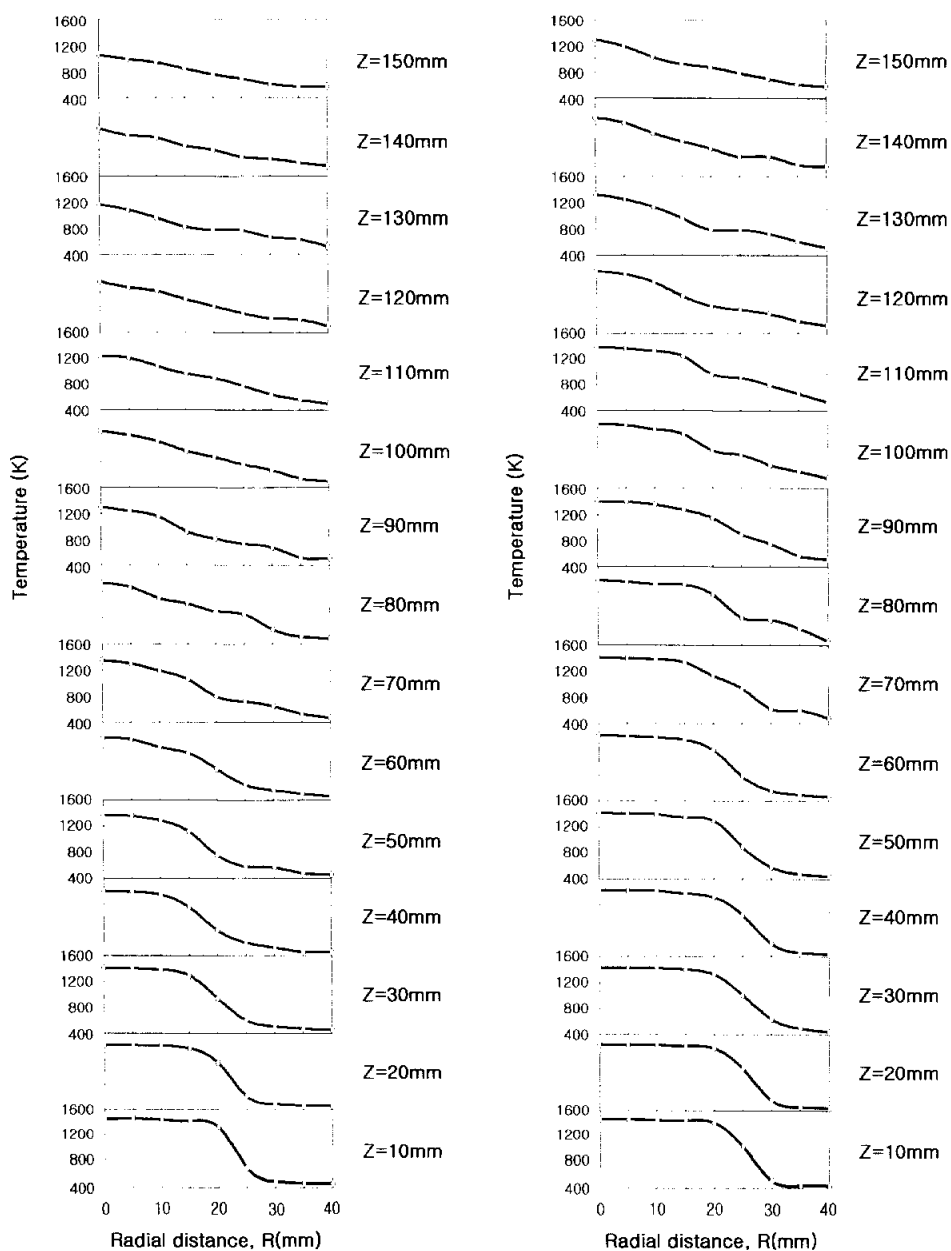
일반적으로 연소장치에서는 연소부하가 결정되면 필요로 하는 발열량에 해당하는 연료유량을 공급하고, 이에 상응하는 공기유량은 화염의 안정범위 내에서 일정한 공기비로 공급하여 연소시키게 된다. 이때, 연소부하가 증가 또는 감소되었을 때에는 당연히 연료유량은 변경되고, 따라서 공기유량도 적절히 증감되어야 한다. 본 절에서는 연소부하 변동에 대하여 연료유량이 변경되었을 때 각각의 연료유량에 대하여 공기비를 일정하게 하여, 이때 화염구조의 변화를 고찰한다.

4.4.1 온도분포

Fig. 4-20은 연료유량 1 ℓ/min(실험조건, A), 2 ℓ/min(실험조건, B2), 3 ℓ/min(실험조건, C) 및 4 ℓ/min(실험조건, D)에서 각각 공기비 $\alpha=1.5$ 로 공기공급을 하였을 때 연소실내 반경방향의 온도분포를, 연소기 하류 축방향 $Z=10\sim150\text{mm}$ 까지 나타내었다.

먼저, 각 연료유량에 대하여 연소기의 하부단면 즉, 연소면 부근인 $Z=10\sim30\text{mm}$ 에서의 온도분포를 비교해 보면, 연료유량이 많아질수록 온도는 약간 상승하는데 반해, 온도가 반경방향으로 일정하게 분포하는 폭이 넓어진 것을 알 수 있다. 이것은 연료유량의 증가와 더불어 공기유량이 증가함에 따라, 본 실험장치에 설치된 각종 정류장치에 의해 유체유동이 반경방향으로 더욱 평평해졌기 때문이라고 생각된다. 또한, 본 실험장치에서의 조건에 의하면 연료유량 1 ℓ/min에서는 연소면과 거의 일치하는 균일 온도장의 하류측 범위는 $Z=10\text{mm}$, 2 ℓ/min에서는 20mm, 3 ℓ/min에서는 30mm, 4 ℓ/min에서는 50mm 정도이다.

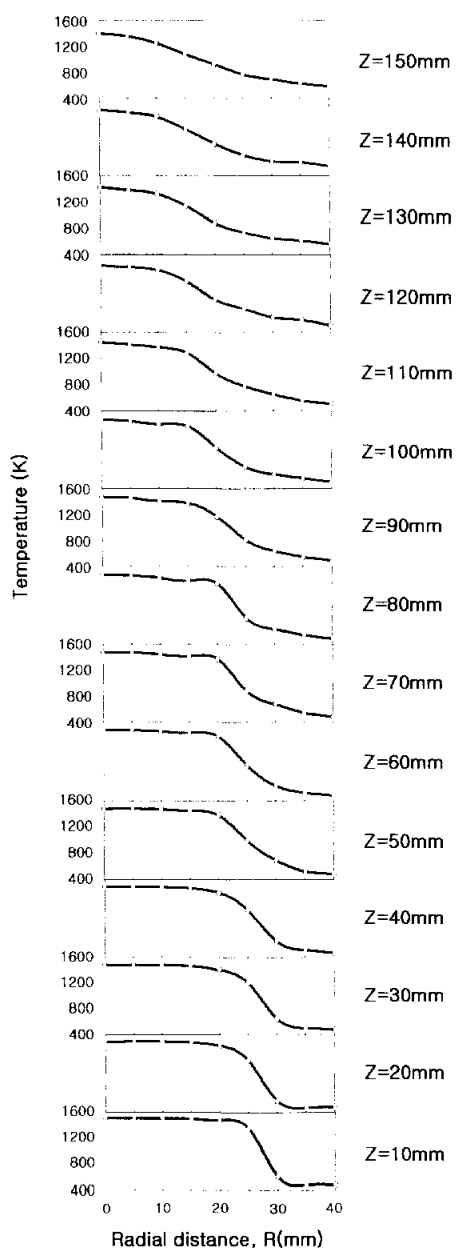
엄밀하게는 각 Z단면에 대하여 2차원적으로 온도분포를 조사해 보아야 하겠으나, 본 실험장치는 앞으로 금속, 요업등 각종 균일 온도를 요구하는 열처리의 기초연구를 위한 연소장치로 활용될 수 있음을 보여 준다.



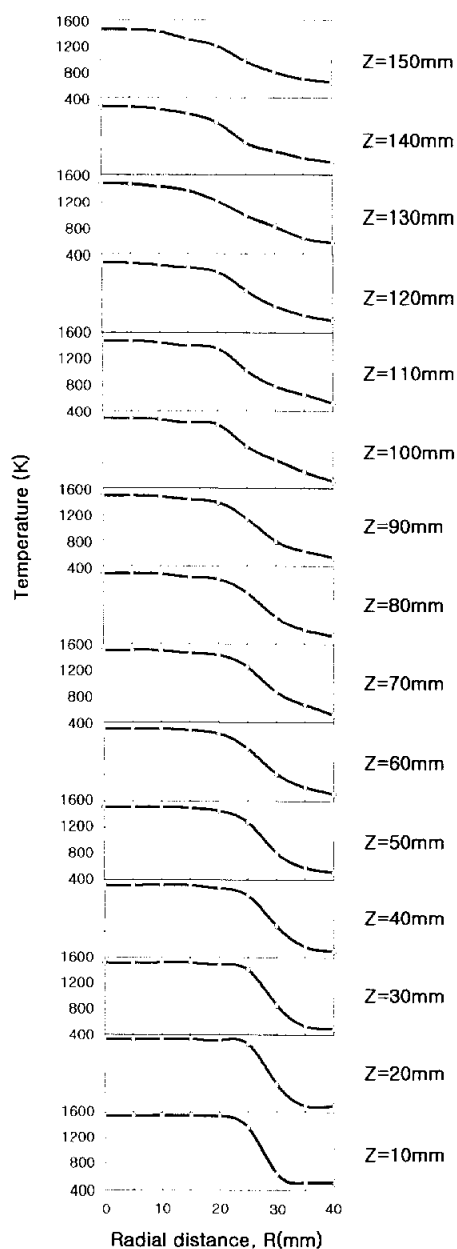
(a) Fuel flow rate 1 l/min

(b) Fuel flow rate 2 l/min

Fig. 4-20 Temperature distributions by change of fuel flow($\alpha=1.5$)
(to be continued)



(c) Fuel flow rate 3 l/min



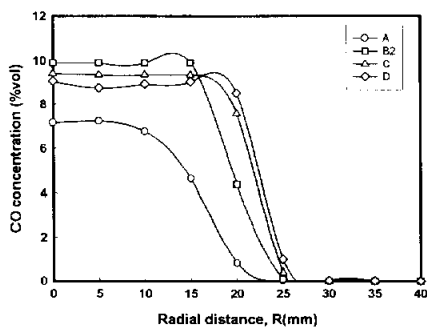
(d) Fuel flow rate 4 l/min

Fig. 4-20 Temperature distributions by change of fuel flow($\alpha=1.5$)

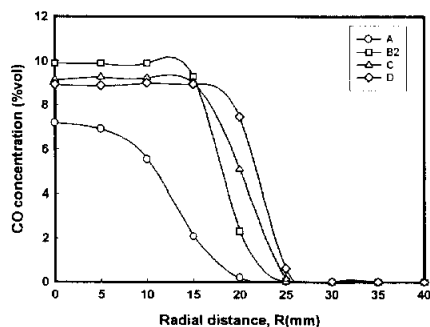
4.4.2 CO, HC, CO₂ 및 O₂ 농도분포

Fig. 4-21에서 4-24는 공기비 $\alpha=1.5$ 의 일정한 조건에서, 연료유량 1 l/min(실험조건, A), 2 l/min(실험조건, B2), 3 l/min(실험조건, C) 그리고 4 l/min(실험조건, D)에서 CO, HC, CO₂ 및 O₂ 농도의 연소실 내의 반경방향 농도분포를 축방향 대표단면으로써 (a) Z=10mm, (b) Z=20mm, (c) Z=40mm, (d) Z=60mm, (e) Z=80mm, (f) Z=120mm에서 각각 나타낸 것이다.

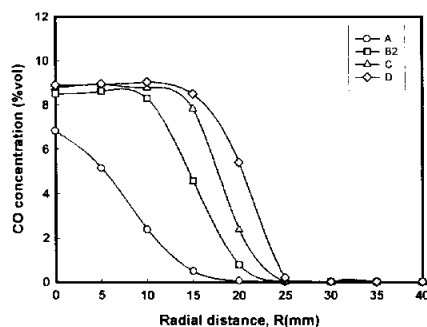
먼저 Fig. 4-21의 CO 농도분포를 보면, 실험조건 A를 제외하고는 축방향 40mm까지 반경방향으로 화염면 위치 부근인 20mm까지 균일한 농도분포를 나타내고 있으며, 이는 앞 절의 온도분포에서 언급한 바와 같이, 축방향으로 이 위치까지 평면화염의 형태를 유지하고 있는 것과 일치한다. 한편, 연료유량에 따른 CO 농도의 분포는 단순히 연료유량의 증가와 함께 증가 또는 감소하는 것이 아니고, 대체로 실험조건 A→D→C→B2의 순서로 증가하였다. 따라서 연소의 측면에서는 연료유량이 가장 적은 A조건 다음으로 D조건이 가장 양호하게 연소되었음을 나타낸다. 이 현상은 CO₂의 농도분포(Fig. 4-23 참조)에서도 대체로 유사하게 나타났다. 또한 HC의 농도분포(Fig. 4-22 참조)에서는 간단히 말할 수는 없지만, B2조건과 C조건에서 많은 양이 나타났다. 즉, 동일한 공기비에서 연료유량 2 l/min 및 3 l/min에서의 연소상태가 연료유량 1 l/min 및 4 l/min일 때보다 나쁘다는 것을 의미한다. 바꾸어 말하면, 연소부하에 따라 결정되는 연료유량에 대해, 연소효율을 좋게 하기 위한 공기비는 일방적으로 결정되는 것이 아니고, 적절하게 선정되어야 할 필요가 있음을 의미한다.



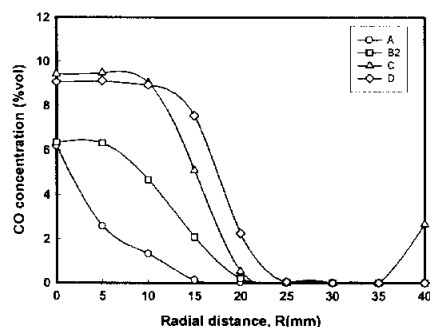
(a) Z=10mm



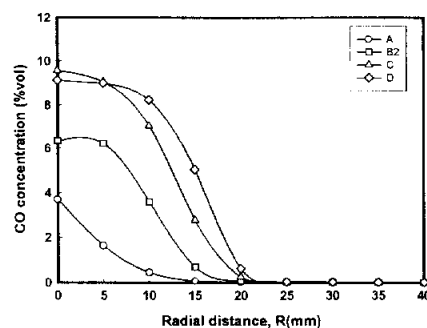
(b) Z=20mm



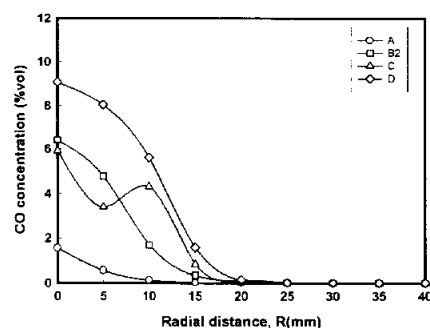
(c) Z=40mm



(d) Z=60mm

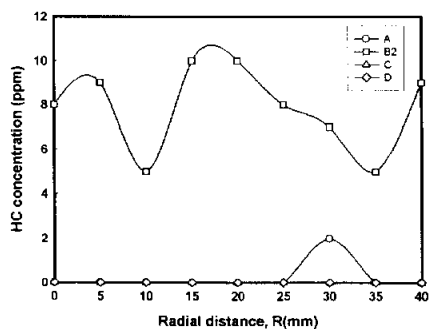


(e) Z=80mm

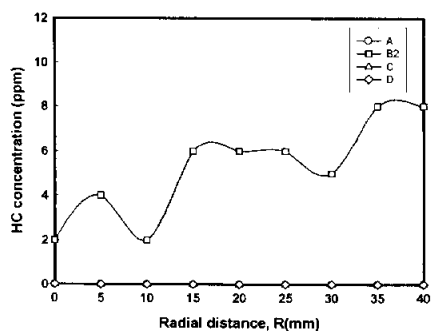


(f) Z=120mm

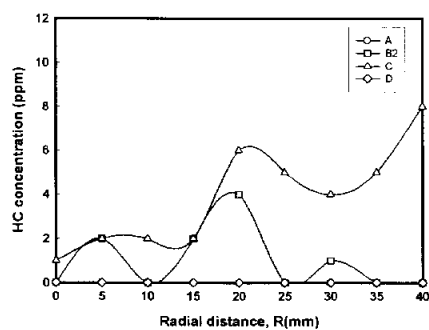
Fig. 4-21 CO concentration distributions by change of fuel flow
($\alpha = 1.5$)



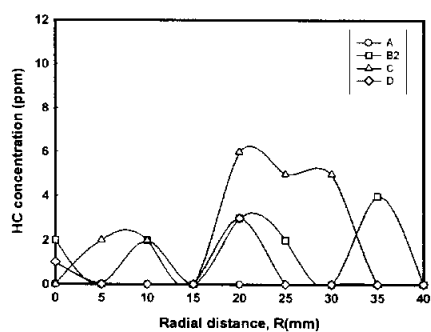
(a) Z=10mm



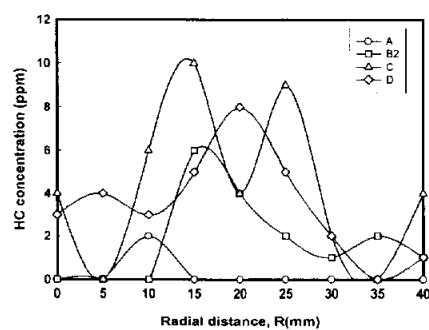
(b) Z=20mm



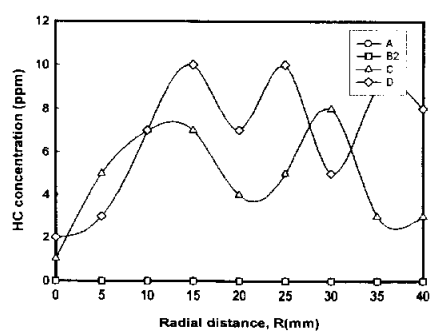
(c) Z=40mm



(d) Z=60mm

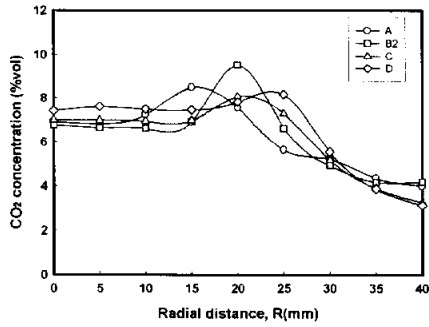


(e) Z=80mm

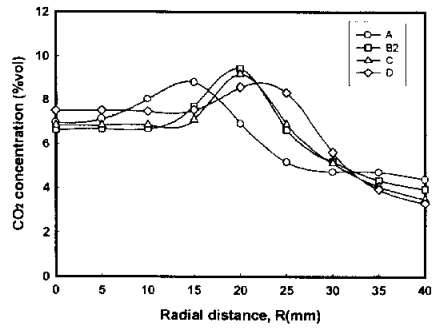


(f) Z=120mm

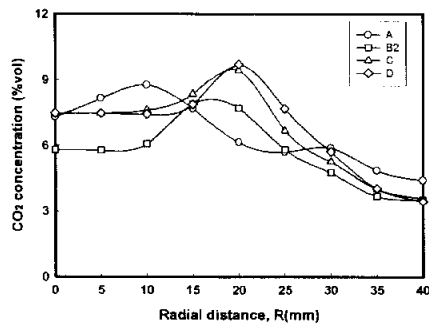
Fig. 4-22 HC concentration distributions by change of fuel flow
($\alpha=1.5$)



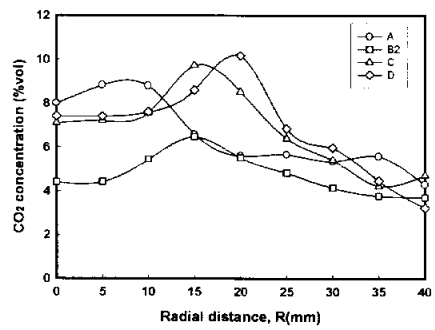
(a) Z=10mm



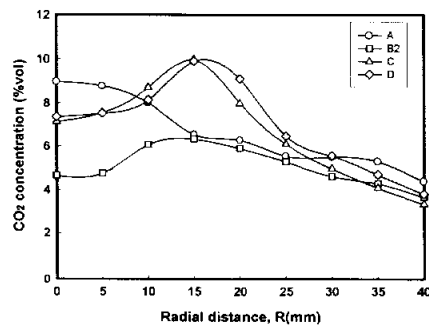
(b) Z=20mm



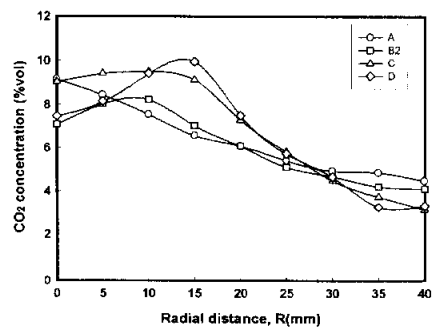
(c) Z=40mm



(d) Z=60mm

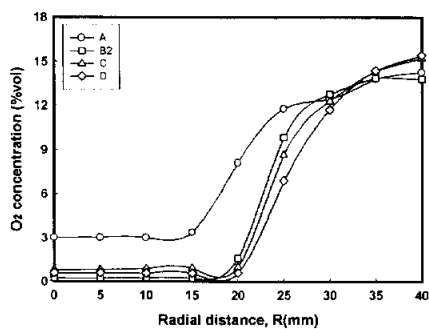


(e) Z=80mm

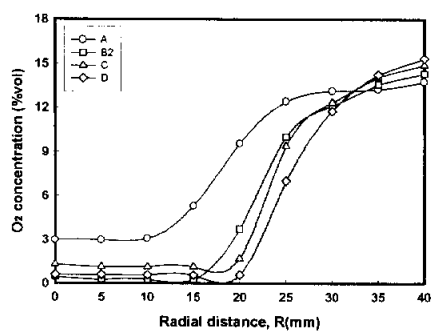


(f) Z=120mm

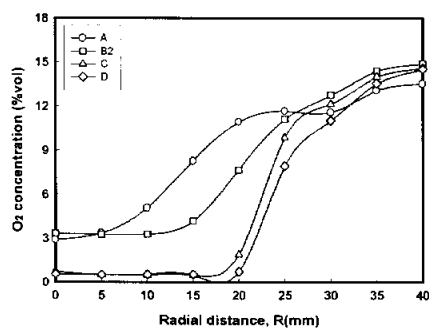
Fig. 4-23 CO₂ concentration distributions by change of fuel flow
($\alpha = 1.5$)



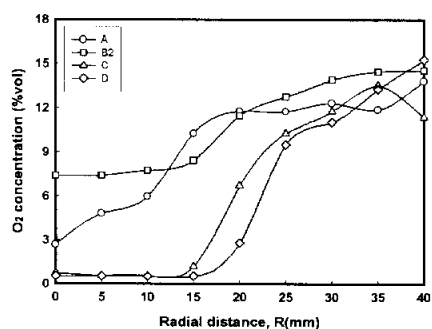
(a) Z=10mm



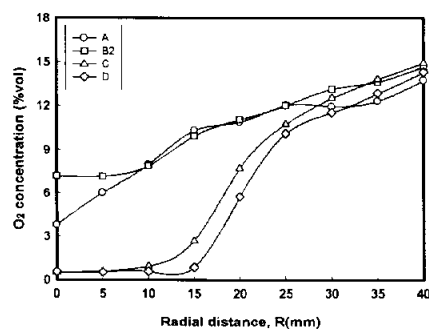
(b) Z=20mm



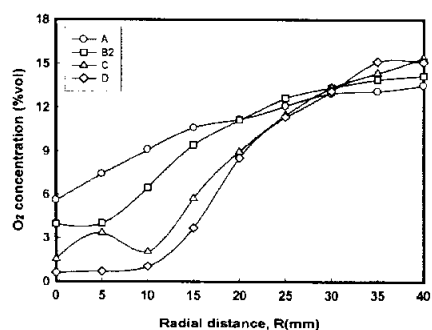
(c) Z=40mm



(d) Z=60mm



(e) Z=80mm



(f) Z=120mm

Fig. 4-24 O_2 concentration distributions by change of fuel flow
($\alpha=1.5$)

5. 결 론

공업적으로 널리 응용되고 있는 난류예혼합 방식의 플랫버너에 대해 니트형 메탈화이버를 사용하여 실험장치를 제작하여 실험하고, 유동해석 및 PIV결과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유동해석의 결과와 PIV실험 결과가 비교적 잘 일치함에 따라 유동해석의 신뢰성을 확보할 수 있었으며, Refine factor 4의 경우인 Mesh가 실험결과와 더욱 잘 일치함을 알 수 있었다. 이는 앞으로 연소수치해석에 있어서 Mesh작업의 기준을 세웠다고 할 수 있으며, 이를 토대로 기초연구의 진행 자료로 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 막힘판의 역할이 실험에서는 맥동 저감 대책으로 사용되었지만 유동해석 결과에서 볼 때 막힘판으로 인해 예혼합실내의 유동형태가 복잡해 졌고, 이는 연료/공기의 예혼합에 좋은 것으로 판단되며, 이후 다공판을 지난 속도분포도 연소면에 공급되기에 충분히 안정되었음을 알 수 있었다. 따라서 다공판의 설치가 예혼합실에서의 복잡한 유동을 연소면에 공급되기 적절한 유동분포로 만들어 준다고 판단된다.

3. 연소부하에 대응하여 안정된 연소범위를 얻기 위하여 연료유량 및 공기비를 변화시켜서 실험한 결과, 본 실험에서는 다음과 같은 화염안정화 범위를 얻었다.

(a) 연료유량 1 ℓ/min : 0.71~2.28

(b) 연료유량 2 ℓ/min : 0.91~2.21

(c) 연료유량 3 ℓ/min : 1.01~2.12

(d) 연료유량 4 ℓ/min : 1.08~1.97

4. 화염은 안정화 범위 내에서 공기유량 변화에 따라 청녹염영역, 복사 영역, 그리고 청염영역으로 구분할 수 있으며, 이들을 대표하는 실험조건에서는 청녹염<복사<청염영역 순으로 연소상태가 양호하였다.

5. 연소부하에 따라 결정되는 연료유량에 대해, 연소효율을 좋게 하기 위한 공기비는 적절하게 선정되어야 할 필요가 있으며, 본 실험에서는 연료유량 1 ℓ/min, 4 ℓ/min에서는 공기비 1.5가 적합한데 반해, 연료유량 2 ℓ/min에서는 공기비 2.0이 적합한 것으로 나타났다.

6. 연소소음은 오늘날 연소기의 소형화 및 고효율화를 지향하는 연소 장치의 개발을 저해하는 공해 중 하나로써 시급히 해결해야 할 문제이다. 특히, 난류예혼합 플랫버너에 메탈화이버를 이용했을 때는 연소소음이 많이 배출된다. 본 실험에서는 연료유량이 바뀌어도 공기비 α =1.3~2.1 범위에서 소음이 발생되었다. 본 연구의 목적이 난류예혼합 플랫버너의 화염구조에 관한 기초연구이므로 상세히 다루지는 않았으나, 추후 본 실험장치를 통하여 연소소음에 관한 기초연구를 할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Shin, H. D. and Min, D. K., "Laminar Premixed Flame Stabilized Inside a Honeycomb Ceramic", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 2, pp. 341-356, 1991.
- (2) Golombok, M. H. and Shirvill, L. C., Gas-Solid Heat Exchange in a Fibrous Metallic Material Measured by a Heat Regenerator Technique, Int J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 33, No. 2. pp. 243-252, 1990.
- (3) Yoshizawa, Y. et al., "Analytical Study of the Structure of Radiation Control Flame", Int J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No.2, pp. 311-319, 1988.
- (4) Sathe, S. B. et al., "An Experiment and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance", 23rd Symp. Combustion, pp. 1011-1018, 1990.
- (5) Tong, T. W. et al., "Improving the performance of Porous Radiant Burners through Use of sub-micro Size Fiber", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, No. 6, pp. 1339-1346, 1990.
- (6) Anderson, F., "Heat transport Model for fiber Burner, Progress in Energy and Combustion Science", Vol. 18, pp. 1-12, 1992.
- (7) Kawaguchi, O. et al., "Premixed Combustion at a Fiber Mat", 23rd Symp. on Combustion, pp. 1019-1024, 1990.
- (8) Strachan, D. C., "Metal Fiber Burners-A low NO_x Radiant Heater Technology", GASWARME International, Vol. 40, pp.

66-71, 1991.

- (9) “Radiant Burner Technology Base Burner and Development, Final Report(1986-1989)”, Gas Research, Institute, Chicago, USA.
- (10) “Basic Research on Radiant Burners”, Annual Report (1989-1990), Gas Research Institute, Chicago, USA.
- (11) Nakamura. S., “FIPS Mat Burner Technology, Industrial Heating(日)”, Vol. 29, No. 4, 1992.
- (12) Echigo, R. “Effective Energy Conversion Method Between Gas Enthalpy and Thermal Radiation and Application to Industrial Furnaces”, Proceeding of the 7th International Heat transfer Conference, Hemisphere Publishing Corporation, Vol. 6. pp. 361-366, 1980.
- (13) Kuwabara, S. and Ozawa, H., “Development of Metal Fiber Burner, Industrial Heating(日)”, Vol. 24, 1991.
- (14) Tada, A., Akiyama, S. and Nakamura, S., “부생가스를 이용한 메탈화이버 버너의 연소특성”, Industrial Heating(日), Vol. 29, No. 1, 1992.
- (15) 한국에너지기술연구소, “산업용 공해, 고부하 표면연소시스템 기술 개발에 관한 연구(Ⅰ)”, 1993.
- (16) STAR-CD Ver. 3.1 Manual, 2001, Computational Fluid Dynamics Ltd.
- (17) ICEM-CFD Ver. 4.1.3 Meshing and Tutorial Manual, 2000, CMSTECH Ltd.
- (18) 이진석, “메탈화이버를 이용한 플랫버너의 유동해석과 연소특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 부경대학교, 2002.

- (19) Metal Fiber Burner, ACOTECH Corporation.
- (20) 정용기, 김경천, 전충환, 장영준, “선회도가 평면화염버너의 유동과 연소 특성에 미치는 영향”, 대한기계학회, v.26, n.2, pp.336-344, 2002.
- (21) 한철호, 김수현, 장종훈, 송재복, 계측공학, 반도출판사, 1996.
- (22) 이영호, 최장운, PIV의 분류 및 원리, 대한기계학회지 v.36, n.12, pp.1146-1162, 1996.
- (23) 최장운, 조대환, 이영호, PIV에 있어서의 입자추적기법의 개선, 대한기계학회, 추계학술대회 논문집 v.2, pp.360-365, 1993.
- (24) 이현, 김미영, 최장운, 이영호, PIV에 의한 뭉툭물체 후류에서의 유동특성에 관한 연구, 한국유체공학학술대회 논문집, pp.403-406, 2000.
- (25) Riethmuller M. L., Particle Image Velocimetry and Associated Techniques, von Kraman Institute, 2000.
- (26) 정석호, 한재원, “화염에서의 속도, 온도 및 농도 계측”, 대한기계학회, v.33, n.9, pp.811-822, 1993.
- (27) 명현국, “전산열유체공학”, 문운당, 2000.
- (28) 김신, 전병진, “난류입문”, 대영사, 2000.
- (29) 정수진, “자동차용 촉매변환기의 활성화 성능 향상을 위한 화학반응을 고려한 3차원 열유동 해석”, 박사학위논문, 한양대학교, 2000.
- (30) 이도형, 최병륜, 공역, 연소공학(제2편), 동명사.
- (31) 이용일, 신현동, “다공질 내부의 연소현상에 대한 실험적 연구”, 대한기계학회, v.20, n.1, pp.321-327, 1996.
- (32) 길용석, 정석호, 이병준, 한재원, “연소진단 검정원으로써 평면화염 버너의 연소특성 연구”, 대한기계학회, v.20, n.10, pp.3355-3360,

1996.

- (33) 김성근, 한희갑, 권영필, “표면연소기의 연소진동음에 관한 연구 - I 음향모드”, 한국소음진동공학회, 춘계, pp.498-503, 1988.
- (34) 한희갑, 이근희, 권영필, “표면연소기의 연소진동음의 특성”, 한국소음진동공학회, v.10, n.6, pp.991-997, 2000.

감사의 글

부족함이 많은 저에게 따뜻한 배려와 학문적으로, 인생의 선배로써 많은 지도 및 조언을 아끼지 않으신 이도형 지도교수님께 먼저 감사의 말씀을 올립니다. 또한 논문을 세심하게 다듬어 주신 임우조 교수님, 배대석 교수님께도 감사의 말씀을 올립니다.

저의 논문을 위해 수고해주신 해양대학교 이영호 교수님과 유동정보 연구실식구들에게 감사의 말을 전합니다.

우리 작은 가족 연소시스템연구실의 강인구 선배님, 이우섭, 이진석, 이용후 선배님들이 보여주신 따뜻한 격려와 조언에 감사의 말씀을 올리고 언제나 웃음을 잃지 않는 후배들 세원, 준홍, 보영, 기진, 화신 정말로 고맙다는 말을 전합니다.

제가 힘들어 할 때 저에게 가야할 길을 안내해 주신 김용태 형님께 고개 숙여 감사드립니다.

혼자가 아니라 함께 한다는 것을 일깨워주시고 묵묵히 제가 가야할 길을 밝혀 주신 나의 사랑하는 부모님께 큰사랑의 마음을 바칩니다. 그리고 “나보다 우리를....“이라는 좌우명을 가지게 해주신 큰아버지 큰 어머니 및 형수님들, 형님들, 누님들, 조카들 및 이쁜 여동생 명희에게 사랑하는 마음을 전합니다.

끝으로, 언제나 아껴주고 저를 챙겨주는 친구들에게도 고마움을 전하며, “나에게는 엄하고 남들에게는 너그러운 사람“이 되도록 노력하며 살겠습니다.

2002년 연소시스템 연구실에서...