

공학석사 학위논문

메탈화이버를 이용한 플랫폼 버너의
유동해석과 연소특성에 관한 연구

지도교수 이도형

이 논문을  제출함.

2002年 2月

부경대학교 대학원

기계공학과

이진석

이진석의 공학석사 학위논문을 인준함.

2001年 12月 26日

주 심 공학박사 임 우 조



위 원 공학박사 권 오 봉



위 원 공학박사 이 도 형



목 차

Abstract

Nomenclature

제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	8
제 2 장 수치해석	9
2.1 지배방정식	9
2.2 난류모델	11
2.3 격자생성과 계산방법	16
2.4 계산영역과 경계조건	17
제 3 장 실험 방법 및 조건	24
3.1 실험장치	24
3.2 실험방법	25
3.2.1 유동실험	25
3.2.2 온도측정	26
3.2.3 NO _x 및 O ₂ 측정	27
3.3 실험조건	27

제 4 장 결과 및 고찰	34
4.1 유동해석결과와 실험결과와의 비교	34
4.2 다공판에 의한 정류효과	35
4.3 공기비 변화에 따른 화염안정화	37
4.4 청염영역과 표면연소영역에서 평균온도분포	38
4.5 청염영역과 표면연소영역에서 NO _x 및 O ₂ 분포	40
제 5 장 결 론	73

참고문헌

A Study on the Flow Analysis and the Combustion
Characteristics of Flat Burner using Metal Fiber

Jin-Seok Lee

Department of Mechanical Engineering, Graduate School

Pukyong National University

Abstract

The purpose of this study is to investigate the combustion characteristics of the flat burner using metal fiber. At first, the numerical analysis for flows were compared with the experimental results in order to get a basic database for establishing the numerical method of combusting flows. By the results, we knew the current numerical calculation method had confidence with error range under 6% in compare with the experiments.

By changing the excess air ratio which affects strongly to the combustion characteristics, the flame stability range in the metal fiber burner were found and the range of the blue flame mode and radiant mode were distinguished by direct photography. And the temperature distributions and NO_x and O₂ distributions in combustor were measured in two conditions which represents the blue flame and radiant mode.

The results in our experiments for the flame stability zone were from $\alpha=1.4(354 \text{ KW/m}^2)$ to $\alpha=2.06(240 \text{ KW/m}^2)$, and then the blue flame mode zone was form $\alpha=1.87(266 \text{ KW/m}^2)$ to $\alpha=2.06(240 \text{ KW/m}^2)$ and the radiant mode one was form $\alpha=1.4(354 \text{ KW/m}^2)$ to $\alpha=1.78(278 \text{ KW/m}^2)$. And the flame was not fired when α is less than the lean condition $\alpha=2.45(202 \text{ KW/m}^2)$.

The results of observing the combustion characteristics of temperature and concentration of NO_x and O₂ in blue flame mode and radiant mode were as follows; in case of blue flame mode, the temperature boundary by bouyancy effect was started near 20mm away in direction of Z-axis from metal fiber due to higher convection energy rather than radiant one, and it was

expanded as going to the Y direction. And in case of radiant mode, the temperature boundary was started near 80mm and the thickness was larger than the blue flame mode. Other phenomena were very similar to each other in qualitatively.

On the other hand, the NO_x concentration was very little in our experiment comparing to the other premixed burner. But O₂ concentration was a little high, so we need to study more in this point of view.

Nomenclature

- MF : 메탈화이버
- U, V, W : x, y, z 방향의 시간평균 속도(m/s)
- x, y, z : 직교 좌표계의 성분
- k : 난류 운동 에너지
- ϵ : 난류 운동 에너지 소산
- κ : Von Karmans 상수
- δ : 경계층 두께
- ϕ : 일반 종속변수(U, h, k , ϵ)
- μ : 점성계수(kg/ms)
- μ_t : 난류 와점성 계수(m^2/s)
- ρ : 밀도(kg/m^3)
- G : 난류 운동 에너지의 생성률
- X : 중심축에서 X방향 거리(mm)
- Y : 중심축에서 수직방향 거리(mm)
- Z : 중심축에서 수평방향 거리(mm)
- T : 평균온도(K)
- α : 공기비

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

1.1.1 표면연소기술의 배경

연료로부터 에너지를 얻는 장치 중 가장 보편적인 장치는 연료와 공기를 혼합하여 연소시키는 연소방법으로, 현재 사용되는 대부분의 연소기는 연료와 공기의 혼합을 촉진 시키는 관점에서만 연소효율을 높이고 고부하 연소를 꾀하고 있다. 그러나 이러한 연소기들은 넓은 영역을 균일하게 가열하는 데에 부적합하며 불완전연소로 인하여 다량의 유해가스를 생성시키는 등의 문제를 가지고 있으므로, 주거환경에서의 직접난방이나 산업공정에서의 직접가열 등에 응용하는 데에 어려움이 있다.

최근들어 이러한 어려움을 극복하기 위해 완전연소와 균일가열 특성을 효과적으로 얻기 위한 연소기로서 다공성 재료를 이용한 장치가 제안되고 있다.¹⁾ 이 연소기는 다공성 재료를 통하여 유입되는 예혼합 연료-공기가 반응영역을 통과하면서 연소되고, 연소열의 일부는 높은 열축열률을 갖는 다공체에 축적되어 고에너지 환경에서 연속연소가 가능하게 되어 완전연소를 이룰 수 있다.

이러한 개념을 바탕으로 1980년 동경공업대학의 ECHIGO 교수는 연소가스의 엔탈피를 세라믹 다공성 매질을 이용하여 고체복사에너지 형태로 회수하고, 상류층에 유입되는 가연성 연료회박 혼합기를 직접 예열할 수 있는 연소시스템에 대한 체계적 연구를 행한 결과, 이러한 연소시스템은 저칼로리의 연료의 안정연소에 커다란 효과가 있음을 확인한 바 있다. 이와 같은 연구결과를 토대로 미국, 일본, 프랑스, 벨기에,

네덜란드, 덴마크 등에서는 다공성 물질(기공률 80-90%, 세라믹 Foam, 세라믹섬유 또는 금속섬유의 소결체등)의 하류측 내부에서 일반의 가연성 혼합가스를 연소시켜 하류측 표면을 가열하고, 그 표면으로부터 열전달 효율이 높은 고체복사에너지를 획득하기 위한 일련의 표면연소 기술개발에 착수하게 되었다. 특히 표면연소기술은 기존 연소기에 비하여 연소가스 중 NO_x의 생성을 현저히 저감시킬 수 있는 효과가 있음을 인식하게 되었다. 인근 나라인 일본의 경우 도쿄가스(주)에서 표면연소기에 관한 연구가 지금까지 4년 동안 계속 진행 중이며 앞으로도 더욱더 많은 연구가 진행될 것으로 보인다.

최근에는 일정한 압력으로 적층한 고온내열 메탈화이버(Metal Fiber)를 이용하여 그 표면으로부터 발생하는 강력하고 균일한 고체복사에너지와 고온연소가스의 대류가열효과를 동시에 이용하고자 하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이것은 일반 피가역물의 가열시간 단축 등 에너지 이용효율이 높고, 화염온도의 불균일성에 따른 피가역물의 국부과열현상을 근본적으로 해결할 수 있다. 뿐만 아니라, 고온 내식성 메탈화이버를 모재로 사용하기 때문에 세라믹 재질과는 달리 기계적 강도 및 사용 내식성에 있어서 기존의 연소기기과 동등한 신뢰도를 유지할 수 있고 기계가공성이 있으므로 다양한 형태로의 시스템 소형화 및 표준화가 가능하다. 특히 저 NO_x의 연소특성은 작업성 및 대기환경 보전성에 있어서 기존의 연소시스템에 비하여 상당히 유리하다. 이러한 다공재료를 이용한 연소기를 여러 산업분야에 활용하기 위해서는 다공체의 기공률 및 물성에 따른 기체의 유동, 연소 및 열적특성을 보다 면밀히 연구할 필요가 있다.^{2)~3)}

1.1.2 표면연소기술의 특징

다공성 매질의 표층에서 가연성 가스-공기 예혼합기의 연소는 일반

적인 예혼합 연소와는 다소의 차이가 있다. 즉 일반적인 예혼합 화염면(발열화학반응 영역)의 최근방에서 발생하는 열손실은 화염면으로 유입되는 예혼합기의 온도상승(전도 열전달) 및 주위로의 대류 열손실로 소모되며, 예혼합기의 온도가 혼합기 조건(압력 및 공기비)에서 점화온도에 달하면 이른바 화염면으로 정의되는 일정한 영역 내에서만 연소반응이 진행되는 열이론에 근거한다.

한편 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 다공성 매질 표층 내에서의 연소는 부정형의 고체와 고온가스(연소반응 영역 및 연소가스)간의 전도, 대류 및 복사 열전달을 포함하는 유체-열-화학반응의 상호 간섭 및 열평형에 의하여 화염면의 위치가 결정된다. 따라서 다공성 매질 표층 내에서 안정적인 연소화염을 유지시키기 위해서는 가연성 혼합가스의 물리화학적 특성(열전도도, 발열량 및 연소속도)외에 다공성 매질의 물리화학적 특성(매질의 조성, 비열, 열전도도 및 복사 등) 및 구조적 형상(기공률, 기공의 크기, 화이버의 직경 및 매질의 두께 등)을 고려한 열유체화학반응의 정확한 메커니즘을 이해할 필요가 있다.^{4~6)}

각종 표면연소기의 표면재질은 주로 비 다공성의 세라믹재질이 사용되어 왔으며, 비교적 최근에 와서 다공성으로 활용화되기 시작하였다. 다공성 세라믹 제조 기술은 크게 2가지로 분류할 수 있다.

하나는 세라믹 화이버를 이용한 Mat 상태로 제조하는 방법과 나머지는 세라믹 분말을 특수 응집제와 함께 스펀지형태의 폴리에테르에 충전한 후 소결시킴으로써, 폴리에테르 성분이 연소, 기화에 의하여 외부로 방출되는 과정에서 소결체 내부에 부정형 기공을 형성시키는 방법이다. 2가지 방법 모두 현재 국내외적으로 상기의 방법은 이미 기술이 보편화되어 있어서 제조기술의 편중은 없다고 볼 수 있다.

세라믹 재질의 표면연소기는 일반적으로 평판 형이 대부분으로 이는 다양한 형태로의 성형 가공에 제약을 받는다는 사실을 입증하는 것이

며, 아울러 고온 반복운전에 따른 기기의 내구성 및 고부하에서의 역화 등의 문제가 우려되어 운전조건이 열악한 산업용 공정에 십분 적용하기에 불충분한 이유가 되고 있다. 따라서 세라믹 재질의 표면연소기는 대부분 저부하 가열시스템에 적용되어 왔다.

이에 관한 이론적 해석은 이미 여러 연구자에 의해 수행한 바가 있으며, 그 결과 다공성 매질의 표층(내)에서의 각 형태의 열수지 및 화염안정 메커니즘에 대한 기본적인 개념은 규명될 수 있었고 그로부터 연소성능 향상에 미치는 주요한 인자들을 Fig. 2와 같이 도출해 낼 수 있었다.

1.1.3 메탈화이버연소기의 연소특성과 국내외 기술개발 현황

세라믹 다공성 재질이 가지는 문제점들을 해결하기 위하여 최근에는 내열합금섬유를 이용한 다공성 재질을 표면연소기에 활용하는 기술이 개발되었다. 현재 국내에서는 1993년 한국에너지기술연구원에서 산업용 공해, 고부하 표면연소시스템 기술개발에 관한 연구가 진행된 바 있으며,⁷⁾ 충남대학교와 한국에너지기술연구원과의 공동연구로 소결형 메탈화이버를 이용한 고부하 연소기술 연구가 진행 중에 있다.⁸⁾ 국외의 경우 일본에서는 1991년 Kuwabara, S.에 의해 메탈화이버 버너의 발전에 관해 발표된바 있으며,⁹⁾ 1992년 Tada, A., Akiyama, S., Nakamura, S.에 의해 부생가스를 이용한 메탈화이버 버너의 연소특성에 관해 발표가 되었다.¹⁰⁾ 이처럼 일본에서는 우리나라보다 10년이나 앞서 메탈화이버를 이용한 연구가 시작되어 현재까지도 그 연구가 활발히 진행되고 있는데, 지금은 산업현장은 물론 가정용 보일러 등 그 활용범위가 증가하는 추세이다.^{11~17)}

본 연구에 사용된 표면연소용 편직 금속섬유(Knitted Metal Fiber)는 100%의 고 내열성 금속섬유사로 만들어진 편직물로서 MF라고 약칭하

기도 한다. 메탈화이버는 유연하고 장착이 용이하여 제지, 섬유, 세라믹, 인쇄, 도장, 코팅 라인의 건조 공정용 IR버너(Infrared burner)용도는 물론 가정용·업무용·산업용 보일러에서 고효율/저공해 버너로 전 세계적으로 널리 그 사용이 확대되고 있다. 또한, 메탈화이버는 제강, 유리, 식품, 자동차 산업 등 전반에서 다양한 용도로 사용되고 있음은 물론, 농업용에서 폐가스 연소 용도에 이르기까지 꾸준히 그 용도가 확대되고 있다.

일반적으로 편직 금속섬유 버너(Knitted Metal Fiber Burner: NIT MFB)는 연소의 강도에 따라 다음과 같이 2가지 형식의 연소로 구분할 수 있다.

- 방사모드(Radiant Mode)

연소는 다공성 구조 내에서 이루어지며, 이로 인해 빛을 내도록 가열되어 에너지의 대부분이 복사에너지 형태로 발산된다.

- 청염모드(Blue Flame Mode)

고부하 연소 시에는 청염이 버너 연소면 전방으로 떠오르며 에너지의 대부분이 대류 에너지형태로 발산된다.

본 연구에서 사용한 NIT 금속섬유(Metal Fiber)의 특성에 대해 알아보면, 이전의 소결 성형된 다공성 메탈화이버의 탁월한 연소특성에 더하여 편직물 제품의 특유한 특성을 잘 겸비한 금속섬유이다. 100% 금속섬유실로 편직된 NIT 메탈화이버는 투과성이 좋고 유연하며 장착하기 용이하다. NIT 메탈화이버는 유연하여 강직성이 없기 때문에 금속판 팽창 철망과 같은 것이 지지되어야 하며, 일반 섬유 직물과 유사한 유연함을 가지고 있어서 어떠한 모양의 버너라도 쉽게 만들 수 있다. 또한 100%의 금속재질이기에 때문에 금속버너 하우징에 직접 용접할 수

있어 다양한 용도로 사용할 수 있다.

메탈화이버 버너용 금속섬유의 기본 소재는 1050℃까지의 고온에서도 탁월한 내 산화성을 갖는 견고한 강철인 Fecralloy이다. 이 합금의 성분들 중 가장 중요한 점은 이트륨(Yttrium)의 존재인데, 이 이트륨은 표면 보호층인 알루미나 층을 금속 본체에 단단히 결속시키는 기능을 한다. 메탈화이버의 표면온도가 1200℃까지 가열되는 경우 매우 열악하게 조성된 작동 여건일지라도, 메탈화이버 버너 매트와 단열 특성 및 화염 포착 능력으로 인하여 착화 온도가 낮은 프로판, 부탄 또는 수소 가스를 포함하는 가스를 연소시킬 경우에도 역화의 발생이 없도록 한다.

상기에서 기술한 Fig. 2의 표면연소기의 연소성능에 미치는 제반인자 중에서 NIT 메탈화이버가 가지는 중요한 인자는 소재의 높은 공극률, 낮은 비열, 얇은 연소 영역 등이다. 이로 인하여 극도로 짧은 시간 내에 예열 및 냉각이 가능토록 한다. 버너는 점화 후 10초내에 900℃ 온도에 도달하며, 반대로 소화 후에는 수초이내에 손으로 직접 만질 수 있을 정도로 냉각된다. 이러한 메탈화이버의 즉각 반응성은 비례제어 및 정밀한 가열온도 조절이 필요한 경우 중요한 장점이다. 또한 신속한 냉각은 화재방지를 위해 중요한 요소가 될 수 있다.¹⁸⁾

이렇듯 메탈화이버를 이용한 연소는 원리적으로 여러 가지 유리한 조건을 가질 수 있는데 반하여, 메탈화이버 연소기 전후의 유동, 연소기 내부에서의 온도 및 NO_x, O₂ 농도, 특히 NO_x 등에 대하여 공간분해능을 갖도록 상세하게 측정하고 고찰한 연구는 지금까지 거의 이루어지지 못했다.

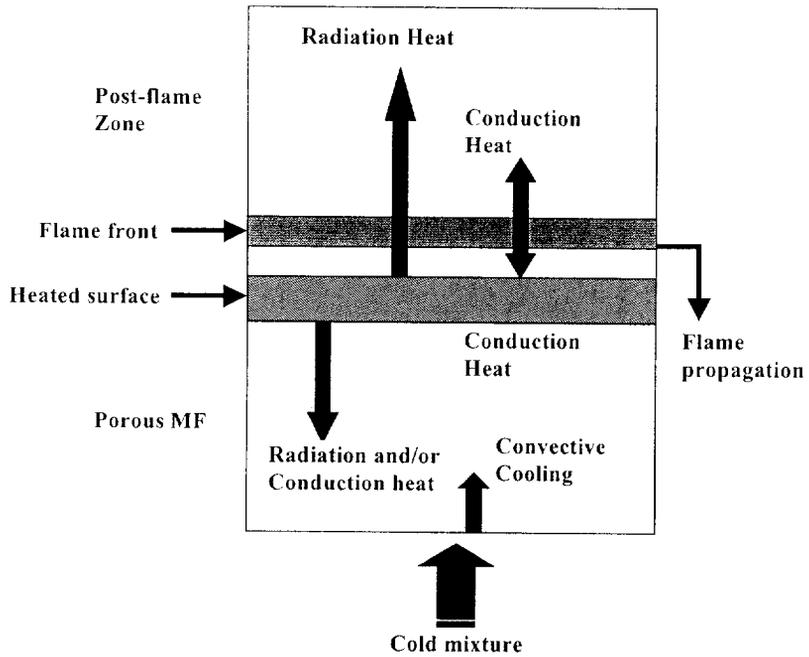


Fig. 1 Combustion theory of porous media

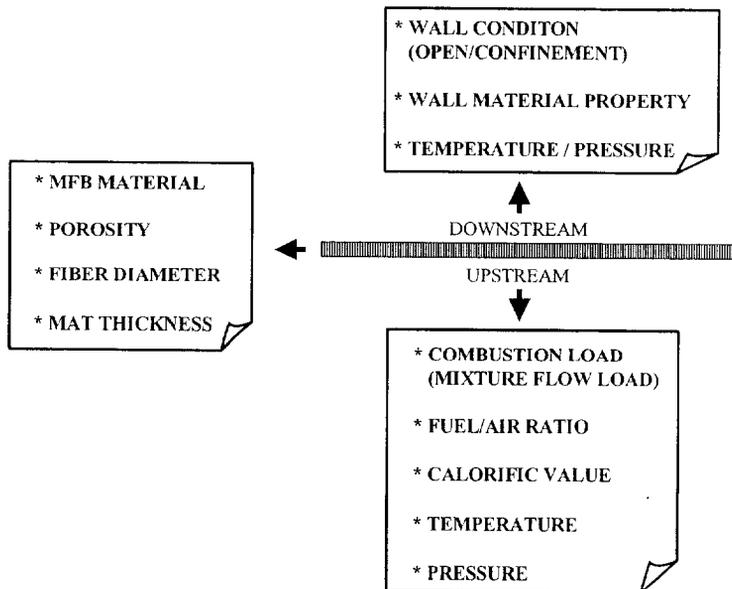


Fig. 2 The factor of combustion efficiency at the flat burner

1.2 연구 목적

가열용으로 사용되는 이상적인 연소장치란 필요한 적소에 골고루 열플럭스가 분포되게 하는 것인데, 이를 위하여 메탈화이버 연소기에 관한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 그러나 연소기 내부에서의 상세한 정보를 얻는 연구는 지금까지 거의 없었다.

본 연구는 메탈화이버를 이용하여 고부하연소기의 소형화 및 연소 제어기술을 확립하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 시험연소기를 제작하여 메탈화이버 전후의 유동 조사와 온도 및 NO_x 농도 그리고 O₂ 농도 등을 측정하여 고찰한다. 특히, 메탈화이버 이전의 연료와 공기의 혼합에 필수적인 역할을 하는 유동에 관하여는 수치해석과 실험을 병행하여 그 결과를 고찰한다.

제 2 장 수치해석

2.1 지배방정식

연소류의 수치해석을 위해서는 유체유동의 지배방정식과 더불어 에너지방정식 및 각종 화학종의 보존방정식을 풀어야 한다. 이 중에서 유체의 거동은 연소류의 거동에 영향을 끼치고, 특히 난류연소인 경우에는 난류유동에 대한 해석이 난류연소의 취급에 중요한 영향을 끼친다. 그러므로 연구 목적에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 우선 연소기 내부의 유동에 대한 실험결과와 해석결과를 비교하고자 한다.

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

Navier-Stokes 방정식은 연속체 유동 중 어느 한 점을 중심으로 질량보존 및 운동량을 표현하는 편미분형태의 지배방정식이다.

Navier-Stokes 방정식은

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (2.1)$$

으로 표현된다. 윗식의 첨자 $i(i=1, 2, 3)$ 은 (x, y, z) 좌표에 대응하고, (U_1, U_2, U_3) 는 속도의 3차원 직교좌표에 따른 표시인 (U, V, W) 를, 또한 (x_1, x_2, x_3) 는 (x, y, z) 를 나타낸다. 첨자가 하나의 항에서 중복된 경우는 합을 의미한다. 예를 들면,

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = \frac{\partial(\rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_3)}{\partial x_3}$$

와 같이 표현된다.

식(2.1)에서 난류가 시간적으로 변동하는 속도인 U_i 를 시간평균(time average) 속도 \overline{U}_i 와 변동분(fluctuating component)의 속도합 즉,

$$U_i = \overline{U}_i + u_i \text{로 도입하면}$$

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (2.2)$$

결과적으로 식(2.1)의 형태에 $-\overline{\rho u_i u_j}$ 가 생긴다. 이 새로운 항은 Reynolds 응력(Reynolds stress)이라 불리며, 원래는 좌변 속도대류항의 비선형성에 의해 생기나 물리적인 난류에 의해 발생하는 응력이므로 일반적으로 윗식과 같이 우변에 분자점성에 의해 발생하는 전단응력과 함께 나타난다. 이 Reynolds 응력에 관한 $\overline{u_i u_j}$ 의 수송방정식은 기초방정식(2.1)로부터 만들어 낼 수 있다. 또한 수송방정식은 기초 방정식에서 변형시켜 만든다.

또한, 식(2.2)에서 $-\overline{\rho u_i u_j}$ 를 Reynolds 응력이 분자점성에 의해 발생하는 전단응력과 같이 그 응력의 크기를 평균속도의 변형률량(속도구배)에 비례한다고 가정한 Boussinesq의 모델이 이용되고 있다.

2.2 난류 모델

난류 모델의 기본 개념은 난류운동을 난류의 강도를 나타내는 속도 스케일(velocity scale)과 난류의 크기를 나타내는 길이 스케일(length scale)의 두 가지 특징으로 표현한다. 특히 다음과 같이 Reynolds 응력이 분자점성에 의해 발생하는 전단응력과 같이 그 응력의 크기를 평균 속도의 변형률량(속도구배)에 비례한다고 가정한 Boussinesq의 모델이 널리 이용되고 있다.

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.3)$$

여기서, 우변 1항의 ()내는 평균속도의 변형률량 즉, 속도구배 μ_t 는 난류점성계수(turbulent eddy viscosity) 혹은 와점성계수(渦黏性係數)라고 하고 $\frac{\mu_t}{\rho}$ 는 난류확산계수(와확산계수)라고 한다. 우변 2항의 k 는 난류운동에너지이고, 이는

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2}) \quad (2.4)$$

과 같이 정의된다.

일반적으로 Reynolds 응력의 수송방정식을 만족시키는 난류모형은 Boussinesq의 가정을 적용하였는가의 여부에 따라 두 가지 모델 형태로 분류할 수 있다. 먼저 Boussinesq의 가정을 적용한 난류 모델을 난류점성 모델(turbulent viscosity model)이라고 하며, 현재 공학적으로 사용되는 대부분의 모형은 이 유형에 속한다. 반면, 난류점성에 대한

가정 없이 Reynolds 응력방정식을 성립시키는 유형의 모델을 Reynolds 응력방정식 모델(Reynolds stress equation model)이라고 한다.

난류점성 모델은 혼합거리 모델, 1방정식 모델, 2방정식 모델로 분류된다.

2.2.1 혼합거리 모델

와운동에 의한 운동량의 교환이 활발하게 행해지는 길이 스케일을 혼합거리 l_m 으로 할 경우, 속도 스케일 V 를 평균속도구배와 관련시킨다.

$$\hat{V} = l_m \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \quad (2.5)$$

따라서 와확산계수는

$$\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \quad (2.6)$$

로 되고, 여기서 l_m 은 경험수이다. 즉, 벽근처에서는 벽으로부터의 거리에 비례하고, 어느 거리 이상 떨어졌다면 벽의 영향이 없다고 가정하고 일정한 값을 취한다. 식으로 표현하면

$$l_m = \kappa y \quad \left(\frac{y}{\delta} \leq \frac{\lambda}{\kappa} \right) \text{인 경우,} \quad l_m = \lambda \delta \quad \left(\frac{y}{\delta} > \frac{\lambda}{\kappa} \right) \text{인 경우} \quad (2.7)$$

여기서, κ 는 Karman 상수, y 는 벽으로부터의 거리, δ : 경계층 두께,

λ : 후술하는 거리를 나타낸다.

실제 계산에서는 벽면에 매우 가까운 영역에서는 감쇄함수(damping function)를 수정하여 혼합거리를 수정한다.

혼합거리 모델은 난류점성계수가 벽면으로부터의 거리에 대한 대수적으로 주어지므로, 이른바 새로운 수송방정식을 풀 필요가 없다. 따라서 제로 방정식 모델(zero-equation model)로 불린다. 이 모델은 계산 시간이 필요 없고 모델의 이해가 쉬운 장점이 있는 반면, 국소적인 평형상태에서 경험상수를 정하고 있기 때문에 대류, 확산 및 이력(history effect)이 중요한 역할을 하는 복잡한 유동에는 부적합하다.

2.2.2 1-방정식 모델

1-방정식 모델은 난류의 운동에너지 k 의 수송방정식을 시간평균 Navier-Stokes 방정식으로부터 구하고 경험적인 함수형태로 구한 길이 스케일 l 과 조합시켜 난류점성계수를 주는 것이다.

$$\nu_t = C_u' \sqrt{kl} \quad (2.8)$$

수송방정식을 푸는 만큼 시간이 걸리며, 특수한 문제를 제외하고는 잘 쓰이지 않는다.

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. 실제 계산에서는 길이 스케일은 직접종속변수로 취급하지 않고, 다음과 같이 속도 스케일과 길이 스케일

의 결합인 변수 z 에 대한 수송방정식을 산출하여 이용한다.

$$z = k^m l^n \quad (2.9)$$

변수 z 로서 가장 대표적인 것이 난류운동에너지의 소산율 ϵ 이다. 즉,

$$\epsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (2.10)$$

$k-\epsilon$ 모델은 난류운동에너지 k 에서 특성속도를 점성소산의 크기 ϵ 을 이용하여 간접적인 특성길이를 구하는 모델이다. 난류점성계수는

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (2.11)$$

이며, C_μ 는 실험결과로부터 산출한다.

2.2.4 저Reynolds수 $k-\epsilon$ 모델

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

한편 최근에는 직접수치계산(DNS: Direct Numerical Simulation)의 데이터를 바탕으로 벽면 가까이의 소산율 분포를 상세하게 표현하는 모델이 제안되고 있다. 종래에는 실험데이터에 의거해서 계수 등을 결

정해왔으나, 직접수치계산의 결과와 다르기 때문에 직접계산의 신뢰성을 평가하여 난류 모델을 구축하고자 하는 새로운 흐름으로 가고 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 있으며, 결과식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{D\overline{u_i u_j}}{Dt} = & - \left(\overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right) + \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} - \overline{u_i u_j u_k} - \frac{p}{\rho} (\delta_{jk} u_i + \delta_{ik} u_j) \right] \\ & - 2\nu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (2.12)$$

각 항의 의미는 좌변이 시간변화와 대류, 우변이 차례대로 응력생산, 압력-변형을 상관 또는 재분재, 확산 및 점성소산이다.

2.2.6 LES(Large Eddy Simulation)

기초방정식에 공간적인 평균화 조작을 하고 유동장을 격자로 해상할 수 있는 성분과 그 이하의 작은 성분으로 분리하여, 전자는 직접계산하고 후자는 모델화하는 해석법이다.

LES는 시간평균을 이용하지 않기 때문에 시간변동이 빠른 점성유동에 응용이 가능하다. 격자로 해상되지 않는 스케일의 와동에 의해서 Sub-Grid Scale 모델 기법을 도입한다. 구체적으로는 기초방정식에

Gaussian filter 등의 공간적인 평균화조작을 하면, SGS항으로 Reynolds stress term, cross-term 및 Leonard term이 나타나서 각각에 대한 모델화가 필요하다. Reynolds stress term에는 Reynolds 응력과 같이 확산구배형의 난류점성표현(Smagorinsky model)이 이용된다.^{19 ~ 20)}

2.3 격자생성과 계산방법

표면연소기의 유동해석을 위한 가정은 다음과 같다.

- 난류모델은 표준 k-ε모델을 사용한다.
- 중력 및 부력의 영향을 무시한다.
- 유동은 축대칭 3차원 정상상태의 난류로 가정을 하였다.

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.

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

즉, 해의 수렴판정 조건은 각 격자점의 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)를 사용하였으며, 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 계산 격자는 격자생성 전용프로그램인 ICEM-CFD를 사용하여 HEXA형 육면체 정렬격자를 생성하였다.²¹⁾ 이는 차후 연구에서 화학반응을 고려한 연소해석을 위함이다.

2.4 계산영역과 경계조건

공기 유입부의 입구에서는 전 유입단면에 걸쳐 균일한 속도분포 (Plug-flow)를 경계조건으로 주었으며, 입구 Reynolds 수는 6,386이다. 이는 본 연구에서 실제크기의 모형 연소기를 제작하여 측정한 유속으로부터 얻어진 값으로 3장에서 설명될 것이다. 입구에서의 난류 운동에너지는 평균 입구 유속의 3%로 가정하여 식(2-14)과 같이 계산하였으며, 난류 소산율은 식(2-15)의 관계식으로부터 계산하였다.

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

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

출구에서의 경계조건은 아래식과 같이 모든 종속변수의 확산항들을 0

으로 처리하였다

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

여기서 ϕ 는 u, k, ε 이다.

모든 벽조건은 점착조건을 적용하였고, 벽면에서의 난류계산은 벽함수(wall function)를 사용하였다. 벽에서의 난류 운동에너지의 확산은 영이며 난류에너지의 생성율과 소산율은 아래 식들로부터 계산되어진다.

$$G = \frac{\tau_w^2}{k\mu y_p^+} \quad (2-17)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k_p^{1.5}}{ky_p} \quad (2-18)$$

여기서 하첨자 p 는 벽으로부터 첫 번째 검사체적을 의미한다. 따라서 y_p 는 벽으로부터의 수직거리이다.^{22 ~ 23)}

Fig. 2-1은 해석을 위한 연소기의 상세도이며, 유동해석을 위한 해석영역은 Fig. 2-2에서 나타내고 있는 것과 같이 축대칭의 1/4영역으로 정하였다. 표면연소 플랫 버너의 해석을 위하여 첫 단계로 해석 대상의 CATIA 데이터를 STL파일로 변환하고 이를 이용하여 계산격자를 생성하였다. Fig. 2-3은 해석대상의 형상이다. 계산격자는 격자 생성 전용프로그램인 ICEM-CFD를 사용하여 만들었으며, Fig. 2-4는 표면

연소 플랫폼 버너의 완성된 3차원 계산 격자를 나타낸 것이다. Fig. 2-5 ~2-6은 각 부분별 계산격자를 나타내었으며, Fig. 2-6의 (a)는 배플 주위의 격자를 (b)는 다공판의 격자를 보여주고 있다. 각각의 구멍은 18개의 격자로 만들었으며, 해석 영역의 전체 계산 격자는 589,526개의 셀로 이루어져 있다. 완성된 격자를 STAR-CD에서 경계조건 및 수치적 제어를 입력한 후 계산을 수행하였다. 계산 수행의 수렴조건을 만족하는 계산시간은 17시간이 소요되었다. Fig. 2-7에 수치해석을 위한 전체적인 작업 흐름도를 나타내었다.

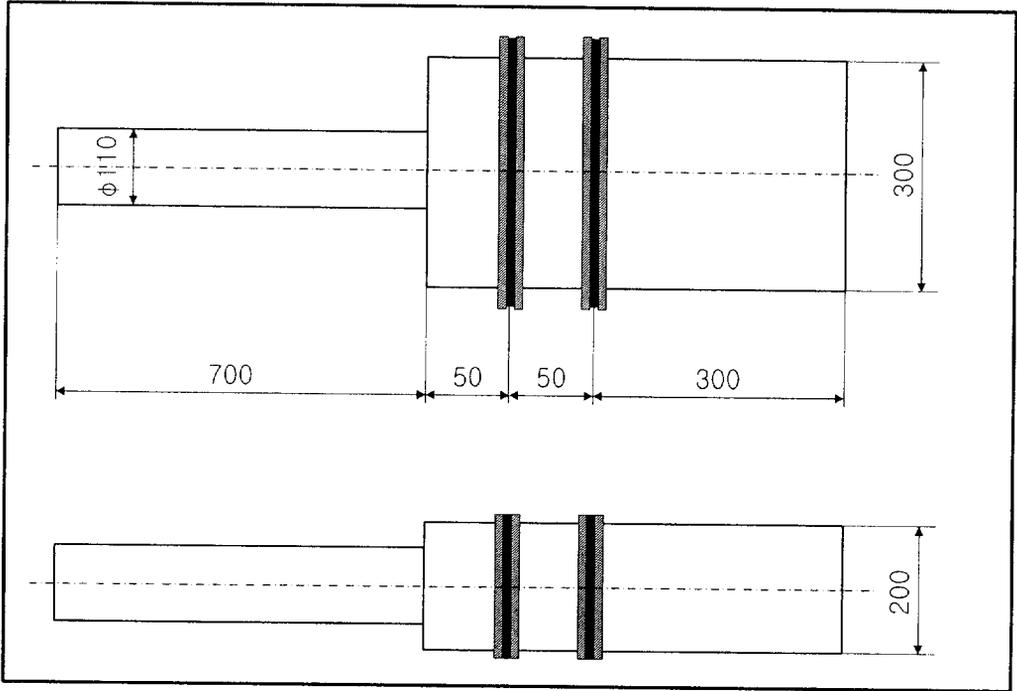


Fig. 2-1 Dimensions of Flat Burner

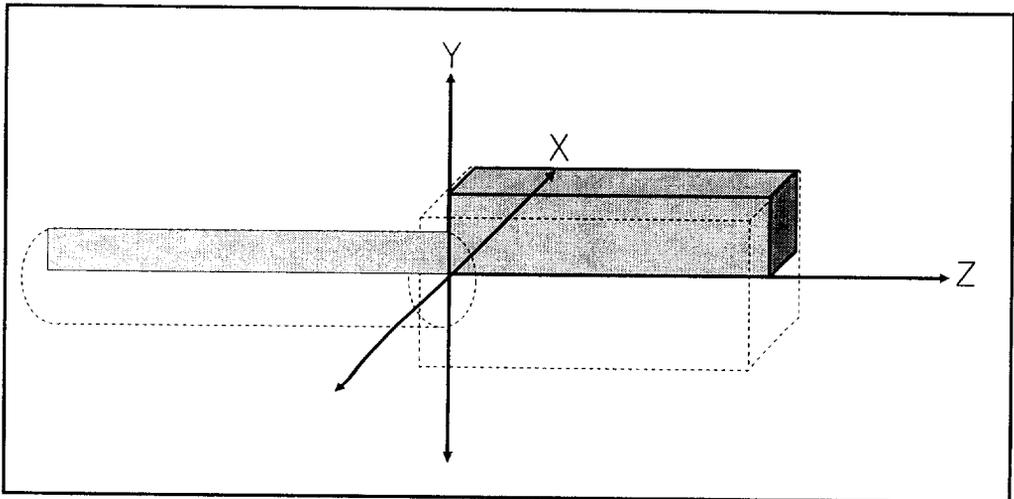


Fig. 2-2 Analysis dimensions of Flat burner

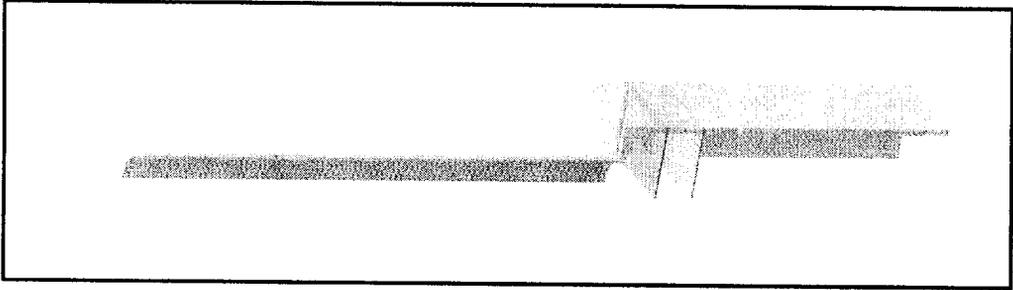


Fig. 2-3 A shape of CATIA

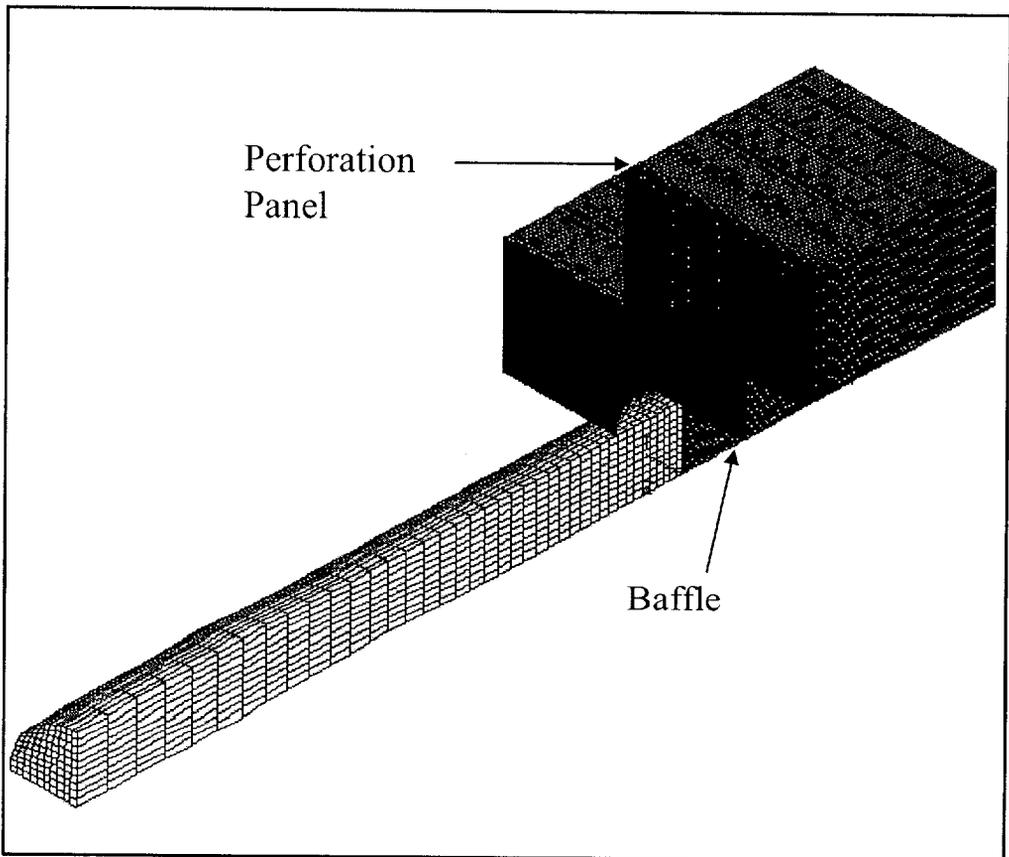


Fig. 2-4 Computational grid of Flat Burner

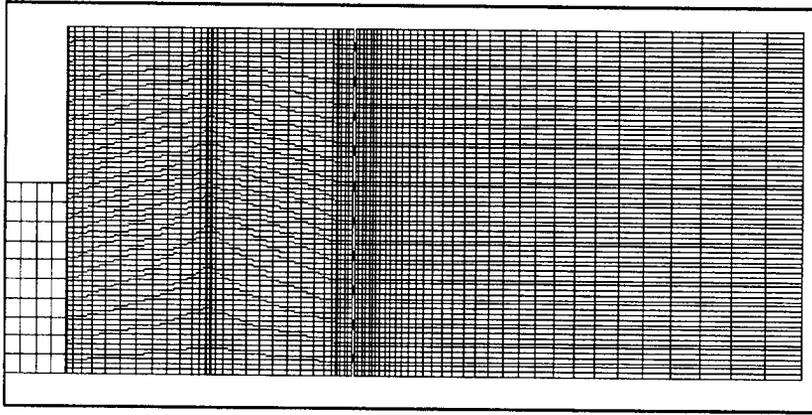
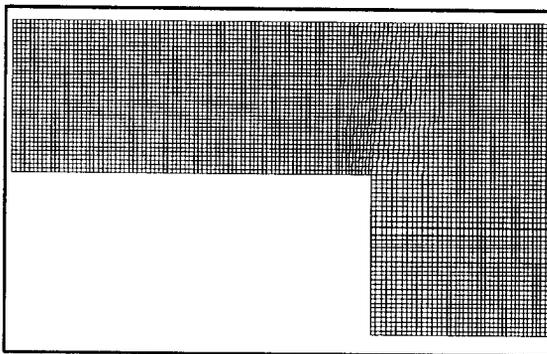
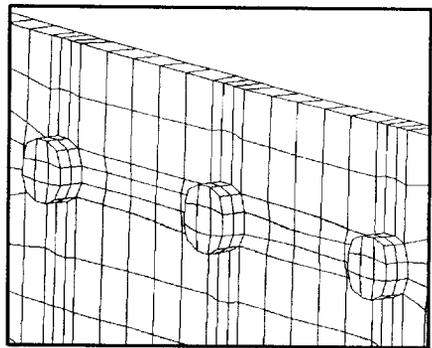


Fig. 2-5 Computation grid of side



(a) Baffle



(b) Perforation plate

Fig. 2-6 Computation grids of various parts

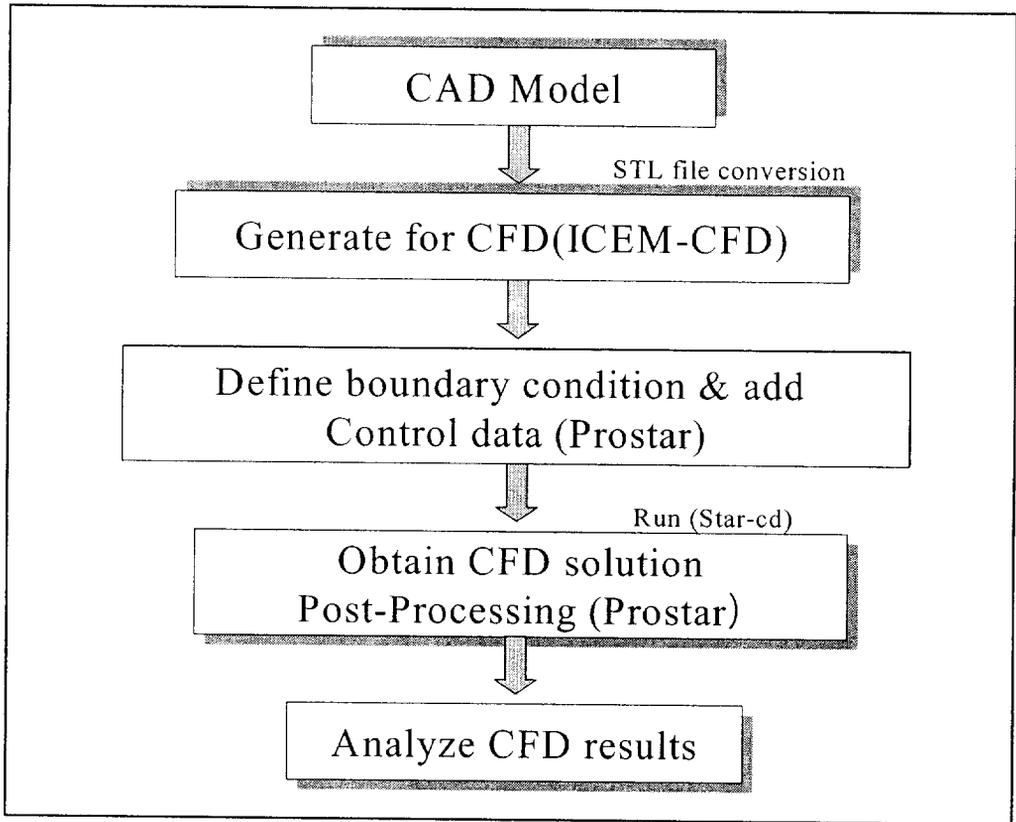


Fig. 2-7 CFD analysis process in the plat burner design

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치

Fig. 3-1은 본 연구에서 사용된 메탈화이버 표면연소 플랫폼 버너의 전체적인 실험장치도를 나타낸 것이다. 축방향 연소용 공기는 송풍기(3HP)에서 공급되며 압력 맥동을 최소화하기 위하여 서지탱크(Surge tank)를 거친 후, 열선풍속계에 의해 검증된 오리피스(Orifice)의 수두를 조절밸브로 조절하여 필요 유량을 공급한다.

본 실험에 사용된 연료는 상용 프로판가스(C_3H_8)를 사용하였으며, 연료분사압력은 $0.5kg/cm^2$ 이다. 연료 탱크에서 공급된 연료는 압력조정기와 가스유량계(DC-2, SINAGAWA)를 지나 연료와 연소용 공기의 혼합율을 높이기 위해 연소기의 공기유입관 500mm에서 분사 노즐을 통해 대향류로 분사된다.

Fig. 3-2는 기본설계 결과에 따라 본 연구에 사용된 표면연소 플랫폼 버너의 상세도를 나타낸 것이다. 전체 연소기는 크게 공기유입관부(Air inflow part), 정류부(Rectification part), 연소부(Combustion part)의 3부분으로 나눌 수 있다. 공기유입관의 길이는 700mm, 직경은 110mm이다. 정류부에는 배플, 다공판, 메탈화이버전단부로 나누어지고, 각각의 길이는 50mm이다. 이 정류부는 길이의 변화에 따른 특성을 조사하기 위해 그 길이를 100mm, 150mm로 제작하였으나, 본 연구에서는 50mm길이만을 사용하였다. 연소부는 내부면적이 $300 \times 200 \times 300mm$ 이며 모든 강판의 두께는 10mm이다. 즉, 공기유입관부를 제외한 전체길이는 450mm인 직사각형 연소기이다. 연료는 노즐내경 7mm(외경 22mm)의 노즐 선단에 직경 1.0mm인 분공 8개를 60° 로 뚫어서 연소기의 공기유

입관부 500mm 전에서 연소용 공기유입 방향의 대향류로 분사되도록 제작하였다. Fig. 3-3은 연소기의 3차원 형상을 나타내고 있다.

Fig. 3-4는 배플과 다공판의 상세도이다. 배플의 경우 공기 유입관에서 유입되는 중심부에 집중되는 연소용 공기를 분산시키는 역할을 한다. Fig. 3-5에서 나타냈듯이 배플 부분은 그 형상의 변화를 용이하게 하기 위해 십자선 모양의 틀에 간단히 부착할 수 있도록 제작을 하였다. 다공판은 내경 3mm의 원형을 10mm 등간격으로 $29 \times 19 = 551$ 개를 만들었으며, 이는 배플에서의 흐트러진 공기의 유동을 안정화하기 위함이다. 본 실험장치는 예혼합의 연소방식이므로 안전사고를 예방하기 위해 각 요소들의 연결부위를 고온에서 잘 견디는 고온 내열실리콘과 두께 2mm의 세라믹 단열재를 사용하여 기밀을 충분히 유지하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 유동 실험

본 연구의 수치해석 결과의 타당성을 검토하기 위하여 유입관의 끝단에서부터 다공판이후까지 유속을 측정한 데이터를 해석결과와 비교하였다. 유속을 측정하기 위해 열선풍속계(NIHON KAGAKU)를 사용하였으며, 열선풍속계의 데이터는 사전에 열선풍속계의 기초 자료 획득을 위해 임의의 실험장치를 제작하고, 이 장치에서의 Pitot tube(Dywer model 167-12")에 의한 실험을 기초로 검증하여 작성하였다.

본 연구의 개략적인 실험 장치는 Fig. 3-1의 표면연소실험 장치와 동일하며 유속측정을 위해 실제 연소기의 형상과 동일하게 아크릴로 제작하였다. 단 메탈화이버는 설치하지 않았다. 그 외에 송풍기 및 모든 장치는 동일하다. 연소기로 공급되는 연소용 공기의 유량 및 유속은 유로에 오리피스를 설치하여 이를 지나는 유량의 압력차에 의해 마

이크로 마노미터(model FC012) 의 수두차를 통해 읽고, 이 때 공기 유입관 중심부에 설치한 열선풍속계를 통해 반경반향의 변화에 따른 평균유속 및 평균유량을 측정하였다. 공기유입부에서는 오리피스에 의해 흐트러진 공기의 유동을 안정화하고 수치해석에서 입구 경계조건에서의 백터값을 보다 실험값과 동일하게 부여하기 위해 공기유입관의 입구부 200mm 지점에 wire mesh을 설치하였다.

3.2.2 온도 측정

일반적으로, 화염 내에서의 온도 측정에는 레이저산란법, 라만산란법, CARS 등과 같이 레이저를 이용한 측정방법 등이 있으나, 이들은 감도가 낮고 고가이기 때문에 실제 산업현장에서 사용하기에는 아직 문제가 많다. 따라서 본 연구에서는 열전대에 의한 측정의 신뢰도를 인정한 연구결과와 본 연구실에서의 간단한 오차범위를 실험을 통한 결론을 바탕으로, 그동안의 선행연구들에 의해 사용되어 온 저가이면서 간편하게 사용할 수 있고 공간 분해능이 좋은 열전대를 사용하기로 했다.²⁴⁾ 본 연구에서 사용한 열전대는 직경 0.5mm, Pt/Pt-Rh13%의 R-type을 사용하였으며, 측정부의 정보를 디지털 데이터기록계(YOKOGAYA LR4210)를 통해 기록하였다. 표면반응을 방지하기 위하여 석영 유리관 및 자기관을 넣고 화염부의 고온에 의해 변형을 방지하기 위하여, 3중 수냉식으로 제작하였으며 복사와 전도에 의한 손실은 무시한다. 이를 연소실을 3차원적으로 측정할 수 있는 3차원 이송대에 설치하여 연소실의 공간상의 그 평균치를 기록하였다.

3.2.3 NO_x 및 O₂ 측정

질소산화물(NO_x)에는 아산화질소(N_2O), 이산화질소(NO_2), 일산화질소(NO), 사산화이질소(N_2O_4), 무수아질소(N_2O_3), 무수질산(N_2O_5)의 6종이 있으나, 이 중에서 NO 와 NO_2 는 연소의 주된 생성물이므로 통상 NO 와 NO_2 합을 NO_x라고 부른다. 본 연구에서는 이들 질소산화물(NO_x)을 측정하기 위해 화학발광식으로 NO_2 가 NO 에서 변화되면 분석기로 측정하고, 그때 NO_x로서 표현되는 NO_x분석기(SHIMADZU, NOA-7000)를 사용하여 온도와 같은 조건에서 연소기의 공간상의 농도를 측정하였다. 산소농도 또한 NO_x측정과 동시에 Zironia Method로 측정이 이루어진다. NO_x분석용 프로브는 흡입부의 직경을 1mm로 하였으며 흡입도중 재반응을 막기 위해 3중 수냉식 프로브를 사용하였다. NO_x분석기 입구에는 프로브를 통한 이물질 흡입을 방지하기 위해 필터를 설치하였다.²⁵⁾

3.3 실험조건

Table 1은 본 실험에서 사용한 메탈화이버의 제원을 나타내고 있다. 메탈화이버는 아직까지 전 세계적으로 기술적인 독점권을 가지고 있는 Acotech사의 제품을 사용하였다. Table 2는 본 실험에서 사용한 MF model NIT 100 S의 화학적 조성을 나타내었다. 각각의 화학적 조성에 대한 설명은 앞의 연구배경에서 기술한 바와 같다. Fig. 3-6은 MF NIT 100 S의 실제 사진을 나타내고 있다.

유동해석결과와의 비교를 위한 유동실험에서는 유속을 0.876 m/s로 하여 유동해석을 위한 입구속도와 동일시하였으며, 연소실험에서도 동일한 유속으로 실험을 수행하였다.

연소실험에서의 실험조건은 공기유량을 일정하게 공급하고 연료의 변화를 통한 공기비 변화에 따른 화염 안정화 범위를 찾고 표면연소화염의 연소특성을 살펴보는 것이 목적이므로, 화염안정화 범위를 찾기 위해 일정한 공기유량에 대해 단계적인 연료유량을 증가시키며 공기비 $\alpha = 1.3 \sim 2.45$

범위에서 직접사진을 통해 화염의 안정화범위를 관찰하였다. 또한 안정화범위내에서는 1장에서 언급한 청염모드 및 복사모드로 연소되는 각각의 대표되는 영역에서 청염영역과 복사영역의 대표영역에 대해서는 온도 및 농도 측정을 통해 연소특성을 고찰하였다.

Table 3은 전술한 청염영역(CASE 1)과 복사영역(CASE 2)의 실험조건이다. 참고로 본 측정에서는 메탈화이버의 손상을 막기 위해 메탈화이버로부터 $Z=10\text{mm}$ 를 기준으로 실험하였다.

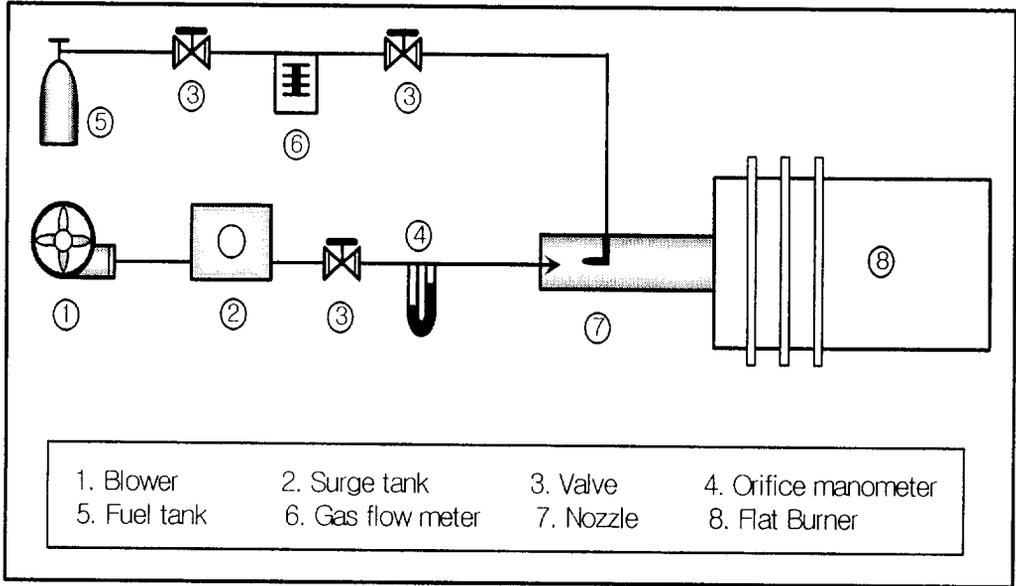


Fig. 3-1 Schematic diagram of experimental apparatus

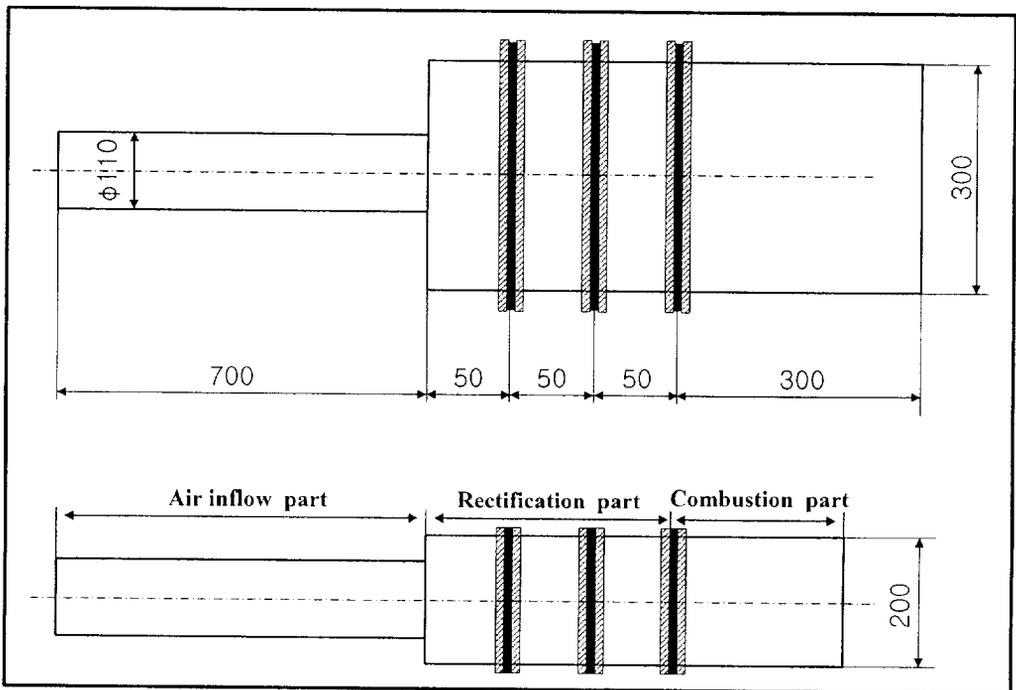


Fig. 3-2 Detail of flat burner

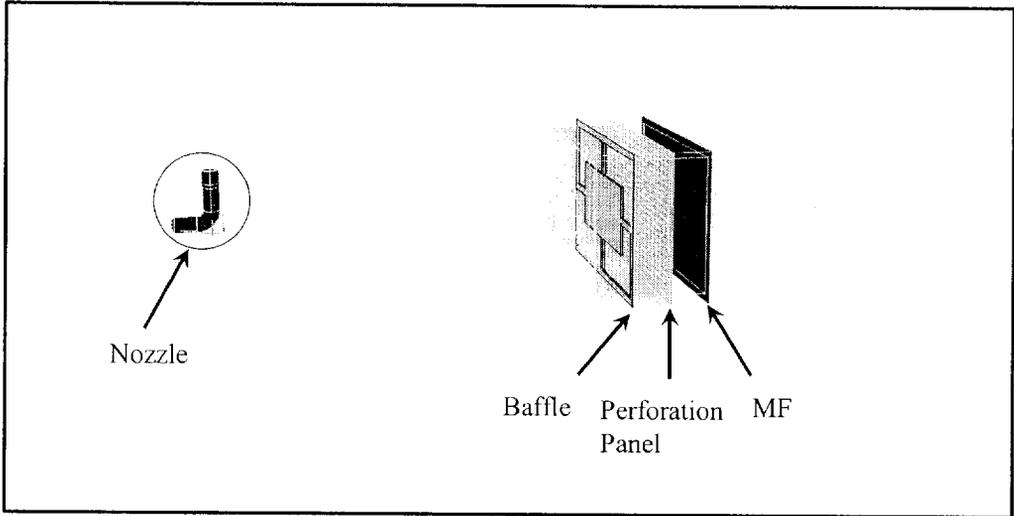


Fig. 3-3 3D-Detail of flat burner

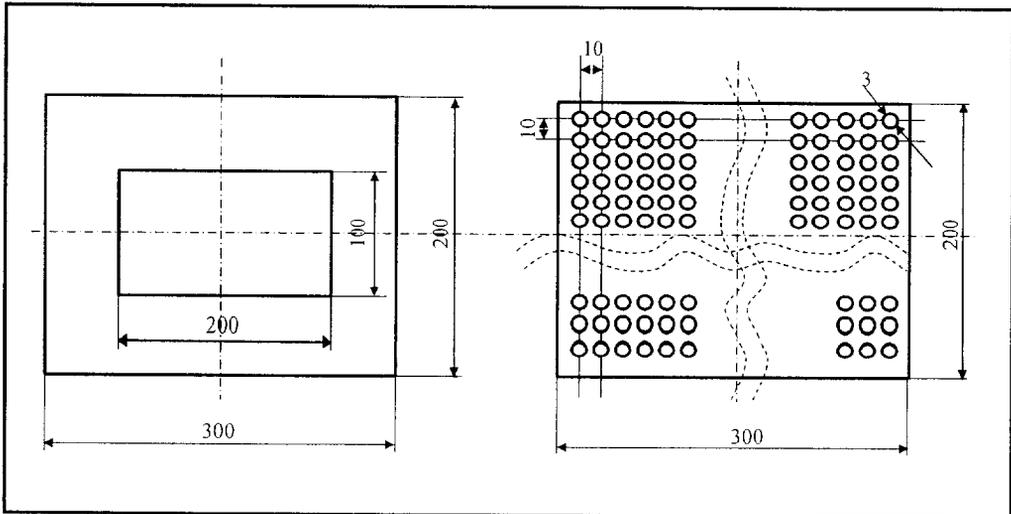


Fig. 3-4 Detail of baffle and perforation panel

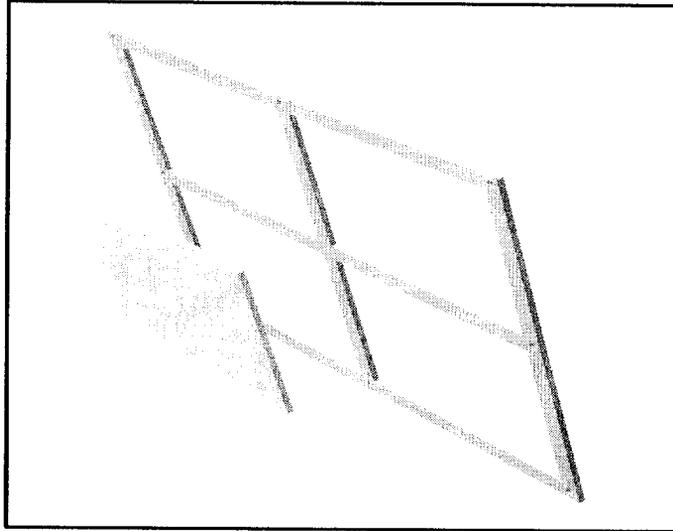


Fig. 3-5 A shape of perforation panel

Table 1 Metal Fiber standard

Type		Alloy	Nominal thickness (mm)	Nominal weight (g/ m ²)
MFB	NIT 100 S	Fecralloy	1.60~1.80	1300~1500

Table 2 Chemical analysis of Fecralloy

Elements	Fecralloy
Chromium(Cr)	16.00%
Aluminium(Al)	5.00%
Yttrium(Y)	0.30%
Silicon(Si)	0.30%
Manganese(Mn)	0.08%
Copper(Cu)	0.03%
Carbon(C)	0.03%
Iron(Fe)	Balance

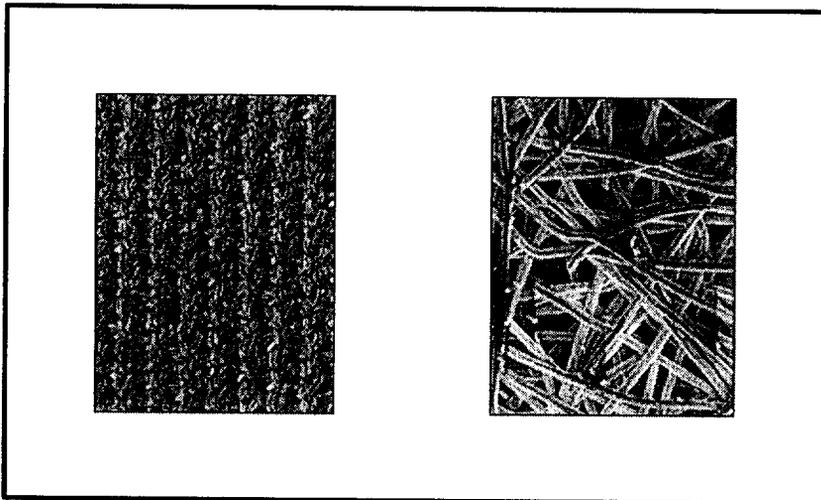


Fig 3-6 Picture of metal fiber

Table 3 Experimental condition

(단위: l/min)

	Q_{air}	Q_{fuel}	α
CASE 1	467	10.2	1.92
CASE 2		14	1.4

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 유동해석결과와 실험결과와의 비교

표면연소 플랫 버너의 개발에서 유속분포는 상당히 중요한 설계 인자이다. 그 이유는 일반 확산연소기와 달리 플랫 버너의 경우, 표면연소가 일어나는 배탈화이버에서의 연소기 전체의 속도분포와 사용연료와 공기의 혼합도에 의한 연소의 효율성에 상당한 영향을 미치기 때문이다. Fig. 4-1은 플랫 버너에 유입되는 속도분포를 축방향의 배플 이전의 $Z=20, 30\text{mm}$, 배플과 다공판 사이의 $Z=70, 80\text{mm}$, 그리고 다공판 이후의 $Z=120, 130\text{mm}$ 의 대표단면에서의 X축방향의 변화에 따른 속도의 실험결과와 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 해석결과는 실험값과 근접한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

다만, $Z=30\text{mm}$ 인 경우 $X=80\sim 130\text{mm}$ 정도에서 최대 약 6%의 오차를 나타내었다. $Z=120\text{mm}$ 즉, 다공판 이후 20mm 위치에서는 해석결과가 X방향으로 균일함에 비해 실험결과는 그렇지 못하다. 이는 측정위치와 해석의 좌표점을 정확히 맞추기 못하였기 때문으로 생각된다. $Z=130\text{mm}$ 에서는 그러한 영향이 많이 줄어들어, 실험결과와 대체로 일치함을 알 수 있다.

Fig. 4-2는 각각 $Z=20, 30, 70, 80\text{mm}$ 에서 X-Y평면의 등속도 분포를 실험결과와 비교하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 연소기의 위쪽 부근에서의 속도분포의 편중을 제외한 나머지 실험결과와 해석결과가 유사함을 보여주고 있다. 그러나 다공판 후면에서의 X-Y평면상에서는 실험과 해석을 비교하지 못하였다. 이는 전체 평면에서 유속변화가 아주 크고 국부적인 속도변화에 대응하여 정확한 측정 위치에서는 본 실

험에 사용한 열선 풍속계로 측정이 곤란하였기 때문이다.

4.2 다공판에 의한 정류효과

이상과 같이 다공판 전후의 속도 분포의 실험결과가 해석결과와 비교적 잘 일치함을 보여주었다. 따라서 다공판에 의한 유체의 유속균일화(정류효과)가 어느 정도 인지를 해석결과만으로 고찰한다.

Fig. 4-3은 공기유입관 끝을 기점으로 $Z=30\text{mm}$ 에서 다공판 이후 $Z=130\text{mm}$ 지점까지의 대표단면 $Z=30, 40, 50, 60, 75, 90, 130\text{mm}$ 에서의 속도 벡터와 등속도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 $Z=30\text{mm}$ 에서는 배플의 Y방향의 끝단이 공기유입관의 반경보다 5mm가 작기 때문에 공기유입구를 통해 유입관 공기가 X축방향으로는 속도가 감소되었으나, Y방향의 속도 성분은 오히려 0.95m/s 의 높은 속도를 보이고 있다. 이러한 현상은 $Z=40\text{mm}$ 에서는 그 영역이 증가된다.

$Z=50\text{mm}$ 는 두께 5mm인 배플의 벽면부근에서의 속도벡터 및 등속도 분포를 나타낸다. 앞에서 설명한 것과 같이 유입관공기의 속도가 Y축방향으로 증가하는 영역이 최대를 보이고 있다. 또한 X축방향의 배플 끝부분에서도 높은 속도성분을 보이고 있다. Y축방향으로의 속도벡터는 연소기 윗부분을 따라 X축의 방향으로 흐르고 배플에서 X축방향을 흐른 속도성분은 연소기의 측면을 따라 그 유로가 나뉘어져 연소기의 벽면부를 따라 Y방향으로 흐르고 있다. 이러한 현상에 의해서 측면과 윗면이 만나는 부근에서 재순환영역을 볼 수 있다. 전체적으로 Y방향의 속도벡터가 다소 X축방향으로 치우치는 현상을 볼 수 있다. $Z=60\text{mm}$ 영역에서는 Y축방향의 속도벡터가 $20\sim 45$ 도정도 경사를 이루게 되고, X축방향의 속도벡터 또한 배플의 끝단면에서 양쪽을 속도 벡터들이 양분되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상을 통해 우측상단에서

는 재순환영역이 계속해서 발생되며 배플의 우측상단의 끝단부근에서도 재순환영역이 나타난다. 전체적인 속도벡터의 흐름이 시계방향의 방향성을 가지게 되는 것이다. 배플과 다공판의 중간부인 $Z=75\text{mm}$ 에서는 유동이 복잡함에 따라 재순환영역이 다소 많이 발생하고 중심부근의 재순환영역은 Z 축방향으로 갈수록 점차 중심을 향해 이동하고 있다. 다공판 근처인 $Z=90\text{mm}$ 부근에서는 다공판의 영향에 의해 더욱더 복잡한 속도벡터와 속도분포를 보이고 있다. 다공판 이후인 $Z=130\text{mm}$ 단면에서의 등속도분포를 보면 $X=20\sim 100\text{mm}$ $Y=50\sim 75\text{mm}$ 부근에서 속도분포가 다소 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유를 밝히기 위해 X 축방향의 단면을 등간격으로 나누어 각각의 단면에 대한 속도벡터를 Fig 4-4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 배플에 의해 증가된 배플 상부의 속도성분이 $Y=50\sim 75\text{mm}$ 지점에 집중되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 국부적으로 증가된 속도성분이 다공판의 저항에 의해 속도의 방향이 아래 방향으로 향하는 $-Y$ 의 속도 성분이 형성되고, 이러한 현상이 오히려 이 영역에서의 다공판을 흐르는 공기의 흐름을 방해하는 현상을 보이게 되는 것이다. 이로 인해 다공판의 정류효과가 좋지 않게 나타나는 것으로 사료된다. 즉 배플의 형상이 공기유입관보다 작기 때문에 형성된 국부적인 속도증가로 인해 다공판 이후에서의 다소 불균일한 속도분포를 보이게 되는 것이다.

Fig. 4-5는 다공판의 정류효과를 저해하는 원인이 되었던 다공판 이전의 Y 방향의 속도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 다공판 이전의 Y 방향의 속도성분은 -1.26 m/s 정도 그 크기와 분포영역을 알 수 있다.

Fig. 4-6~7은 앞에서 설명한 다공판 이후의 불균일한 속도분포를 보다 쉽게 이해하기 위해 Iso-Surface에서의 각각의 등속도분포를 3차원으로 나타내었다. Fig. 4-7에서는 배플의 상부에서 형성된 빠른 속도 분포가 나타나며, 다공판 이전에서의 $-Y$ 방향 속도 성분 때문에 다공판

이후의 불균일한 속도 영역과 그 위치가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

4.3 공기비 변화에 따른 화염안정화

Fig. 4-8~9는 메탈화이버를 이용한 표면연소에서 화염의 안정화범위를 찾기 위해 공기비변화에 따른 화염의 형상을 직접사진으로 나타내고 있다. $\alpha=2.45$ (연소강도 $202KW/m^2$)에서 착화는 되지만 아주 불안정한 상태가 된다. $\alpha=2.18$ 에서는 화염의 형성범위가 $\alpha=2.45$ 인 경우보다 아래로 확대된 것을 볼 수 있지만, 이 영역까지는 화염이 안정화되지 않아 쉽게 불이 꺼져버리는 불안정한 상태이다. $\alpha=2.1$ 에서 다소 화염이 안정되면서 지속적인 표면연소의 영역이 확대된다. $\alpha=2.06$ 에서는 연소기의 상층부에서 표면연소의 범위가 더욱 확대되었으며, 하층부에서는 안정된 청염이 발생되었다. 이와 같이 연소기의 상층부와 하층부에서 경계를 이루며 표면연소와 청염의 나누어지는 이유는, 연소용 공기와 연료가 충분한 혼합을 이루지 못하고 동시에 유속분포가 균일하지 않기 때문으로 사료된다. 이후 공기비를 계속 변화시켜, $\alpha=1.92$ 에서는 연소기의 표면연소 영역과 청염영역이 차지하는 면적비가 거의 동등한 비를 이루고 있음을 볼 수 있다. 공기비가 감소함에 따라 표면연소영역이 차츰 확대되고 $\alpha=1.5$ 에서는 메탈화이버의 벽면부를 제외한 거의 모든 영역에서 표면연소가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. $\alpha=1.4$ 에서는 메탈화이버의 모든 영역에서 표면연소가 일어났다. $\alpha=1.3$ (연소강도 $380KW/m^2$)이 되면, 직접 사진에서는 나타나지 않지만 연료의 양이 많아지면서 메탈화이버에서 표면연소가 일어나지 않은 과잉연료가 메탈화이버를 지나 연소기의 후류에서도 화염이 형성되는 것을 받

견할 수 있다. 위 결과에 의해 공기비변화에 따른 화염의 안정화범위는 $\alpha=2.06$ (연소강도 $240\text{KW}/\text{m}^2$)에서 $\alpha=1.4$ (연소강도 $354\text{KW}/\text{m}^2$)정도임을 알 수 있다. 공기비 변화에 따라 완전한 청염모드를 만들 수는 없었지만, 다소 부분적이거나 표면연소의 영역이 있는 안정화된 청염모드는 $\alpha=1.87\sim 2.06$ (연소강도 $266\text{KW}/\text{m}^2\sim 240\text{KW}/\text{m}^2$)에서 찾을 수 있었으며, 표면연소에 의한 복사모드는 $\alpha=1.78\sim 1.4$ (연소강도 $278\text{KW}/\text{m}^2\sim 354\text{KW}/\text{m}^2$)에서 찾을 수 있었다. 완전한 청염만이 존재하는 영역을 찾기 위해서는 연소기의 구조적 보강과 연료와 연소용 공기의 혼합율을 높일 수 있는 장치가 필요할 것으로 사료된다.

4.4 청염영역과 표면연소영역에서의 평균온도 분포

공기비변화에 따라 메탈화이버에서 화염의 안정화범위를 찾을 수 있었으며 이를 기초로 하여 두 가지의 실험조건을 선정하였다. 각각의 실험조건에서 표면연소에서 그 연소특성을 파악하기 위한 기초적인 단계로 평균등온분포를 조사하였다.

Fig. 4-10~11은 CASE 1조건에서 Z방향의 대표단면에서의 평균등온분포를 나타내고 있다. CASE 1은 Fig. 4-8~9에서 볼 수 있듯이 메탈화이버의 표면연소에 의한 복사 영역이 존재하나 전체적으로 고온 청염을 가지는 영역이다. 청염이 발생하는 영역이 존재함으로 인해 $Z=10\text{mm}$ 단면에서는 약간의 온도차이는 있지만 우측상단부를 제외한 대부분 영역에서 다소 고온 평균온도분포를 보이고 있다. 하지만 $Z=20\text{mm}$ 단면에서는 연소기의 아랫부분에서 평균온도가 낮은 영역이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 일반적인 표면연소의 경우 화염의 길이가 일반 확산연소와는 달리 아주 짧거나 전혀 발생되는 않는

특징 때문이다. 이와 같은 원인과 낮은 연소강도에 의해 메탈화이버로부터 짧은 거리에서 부력의 영향에 의한 온도경계층이 발생되며, $Z=20\text{mm}$ 단면에서 시작하여 $Z=40\text{mm}$ 단면 이후로는 부력에 의한 하층부의 저온 영역이 확대되는 것을 볼 수 있다. 즉 CASE 1 조건에서는 메탈화이버의 표면연소에 의한 고온의 영향범위는 $Z=20\text{mm}$ 정도임을 알 수 있다. 하지만 Fig. 4-10의 $Z=10\sim 20\text{mm}$ 단면에서와 같이 메탈화이버의 면적에 전체적인 연소범위가 넓게 나타나는 것은 표면연소의 특징을 아주 잘 나타내고 있다. 각 단면별로 연소기의 상층부 ($Y=200\text{mm}$)의 저온 영역이 나타나는 것은 연소기가 대기 중에 누출되어 있으므로 연소기 벽면의 냉각에 의한 현상으로 사료된다.

표면연소에 의한 고온부 영역범위를 알아보기 위해 Fig. 4-12는 CASE 1 조건에서 X방향의 대표단면에서의 평균등온분포를 나타내고 있으며, 부력에 의한 평균온도의 차이가 선명하게 나타나고 있다. X방향의 변화에 따라 $X=140\text{mm}$ 단면을 제외하고는 평균온도의 분포가 거의 일정하게 나타나며 연소기의 벽면부근인 $X=140\text{mm}$ 단면에서는 벽면의 냉각에 의한 낮은 온도분포를 나타내고 있다. 이와 같이 $Z=20\text{mm}$ 를 기준으로 부력에 의한 온도차이가 급격히 나타나는 것을 보아, $Z=20\text{mm}$ 부근까지는 메탈화이버에서의 표면연소에 의한 복사향과 대류향의 영향력이 미치지 않지만, $Z=20\text{mm}$ 단면 이후로는 복사향보다는 열적 대류향에 의해 고온과 저온의 온도경계층이 형성되는 것으로 사료된다.

Fig. 4-13~14는 CASE 2 조건에서의 평균등온도분포를 나타내고 있다. CASE 2는 최대 1400K 의 고온부가 형성되고 있으며 메탈화이버에 전체적으로 1100K 이상의 평균온도분포를 나타내고 있다. 연소기의 벽면부보다는 중심부의 온도가 높게 나타나며, $Z=40\text{mm}$ 이후에서는 $X=100\sim 140\text{mm}$ 지점에서 저온영역을 볼 수 있지만 온도는 CASE 1에 비해 높은 분포를 나타낸다. Fig. 4-15는 CASE 2의 X축대표단면의

평균등온분포로서 Fig. 4-12의 CASE 1에서 Z=20mm까지 고른 평균등온분포를 나타내는 것에 비해 CASE 2의 경우는 Z=80mm까지 그 영역이 길어지는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 청염영역인 CASE 1에서는 부력에 의한 온도층 형상의 시작점이 Z축방향에서 일찍 시작되고, 메탈화이버의 전체적인 면적에 복사영역인 CASE 2에서는 그 시작점이 길어지는 이유는 복사 에너지의 강도 때문으로 사료된다.

이와 같이 두 가지 실험조건을 통해 표면연소의 가장 큰 특징인 연소면에 고른 고온의 온도분포를 확인할 수 있었으며, 표면 연소에 의한 축방향의 영향범위를 알게 되었다. 이를 통해 피역물의 설치위치의 선정에 기준을 가지게 되었다.

4.5 청염영역과 표면연소영역에서의 NO_x 및 O₂분포

메탈화이버를 이용한 표면연소의 경우 국내외 연구 등에 의해 저 NO_x화를 이루고 있다는 연구보고가 있지만 이러한 연구는 연소기굴뚝에서 연소기에서의 발생하는 연소가스를 포집하여 측정된 결과들이다.

4) 본 연구에서는 메탈화이버에서 표면연소에 의한 NO_x 생성에 대한 세부적인 분석을 얻고자 Y방향(Y=0, 50, 100, 150, 200mm)과 Z방향(Z=10, 50, 100, 150mm)으로 대표단면을 선정하여 NO_x와 산소농도를 측정하였다.

Fig. 4-16~20은 CASE 1($\alpha=1.92$)에서 Y방향의 대표단면에 대한 Z축단면에서의 X방향변화에 따른 NO_x 및 산소농도를 나타내고 있다.

Fig. 4-16은 Y=0, 즉 연소기 아랫부분의 벽면부근에서의 NO_x 및 산소농도를 나타내고 있다. Fig. 4-10의 그림에서 나타나는 것과 같이 CASE 1의 경우 메탈화이버의 벽면부근 Z=20mm 지점에서 급격한 온

도 저하를 보이고 있는데, 이것은 Fig. 4-16 그림에서 $Z=50\text{mm}$ 의 단면 이후로 산소농도가 급격히 증가하는 것을 보아 표면연소에 의한 고온부의 영향이 이미 종결되었음을 알 수 있다. $Z=10\text{mm}$ 단면에서의 $X=140\text{mm}$ 의 벽면부근에서는 혼합가스의 속도 증가로 인해 안정된 표면반응을 일어나지 않으므로 산소농도가 다소 증가하고 이로 인한 온도의 감소로 NO_x 의 발생량이 낮아진다.

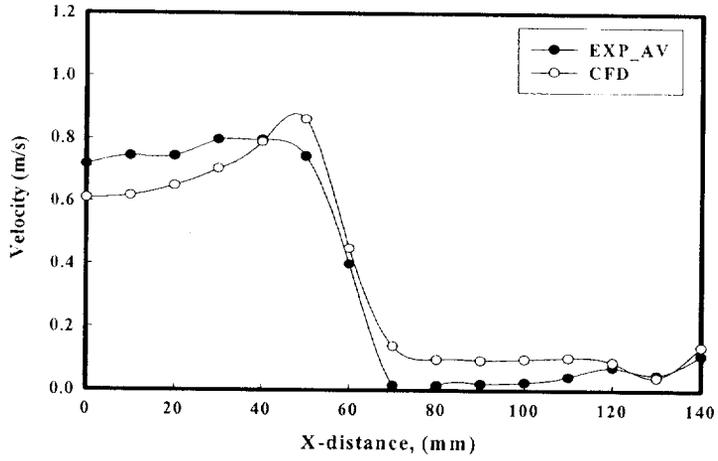
Fig. 4-17은 같은 조건에서의 $Y=50\text{mm}$ 지점의 NO_x 및 산소농도분포를 보여주고 있다. $Z=10\text{mm}$ 단면에서는 X 방향의 증가에 따라 산소농도가 일정하게 나타나는데 이것은 고온 연소특성을 나타내는 것이다. 그러나 NO_x 는 벽면부근의 냉각을 통해 그 양이 낮아지는데, 이것은 벽면 부근의 냉각에 의한 것으로 사료된다. $Z=50\text{mm}$ 에서는 NO_x 는 벽면부근으로 갈수록 그 양이 감소하며 산소의 농도는 반대로 증가하는 등 다소 불안정한 상태를 보이고 있다. 연소반응의 영향보다는 Fig. 4-12에서 볼 수 있듯이 이 지점은 부력의 영향으로 온도 경계층이 발생하는 지점으로, 부력에 의한 영향이 큰 것으로 사료되며 또한 중심부에서의 표면연소가 더욱 활발함을 보여주고 있다.

Fig. 4-18은 $Y=100\text{mm}$ 즉 연소기 중심부에서의 농도분포이다. $Z=10\text{mm}$ 와 $Z=50\text{mm}$ 에서는 일정한 산소농도를 통해 표면연소의 활발함과 면적에 균일함을 확인할 수 있으며, $Z=100\text{mm}$ 에서 나타나는 배출가스의 불안정성이 평균온도분포와 일치함을 알 수 있다. 이러한 현상에 따라 $Y=150\text{mm}$ 부근(Fig. 4-19)에서는 $Z=10\text{mm}$ 를 제외한 Z 방향의 모든 지점에서 균일한 농도가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 그만큼 넓은 영역에 고온부가 존재한다.

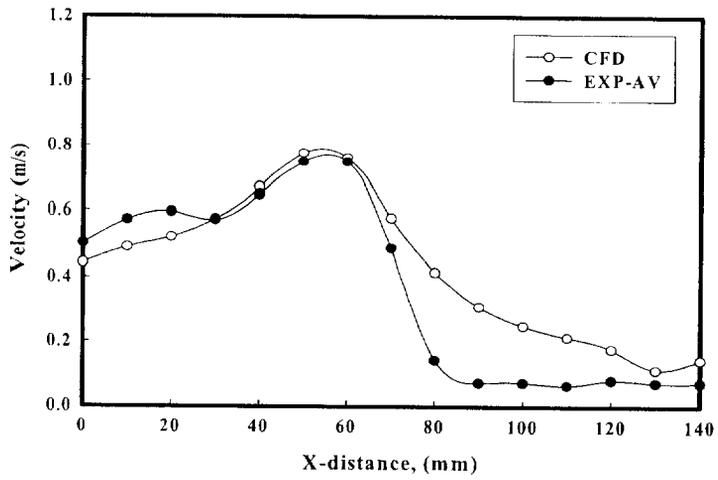
Fig. 4-20에서는 전체영역에 대해 고온 산소 분포를 보이며 $Z=100\text{mm}$ 이후에서는 이전에서보다 다소 높은 NO_x 분포를 나타낸다. 이것은 Y 방향의 아랫부분에서 생성된 NO_x 가 부력에 의해 생성된 온도경계층을 따라 상승하여 $Z=150\text{mm}$ 이후에서는 NO_x 가 높게 나타나

는 것으로 사료된다.

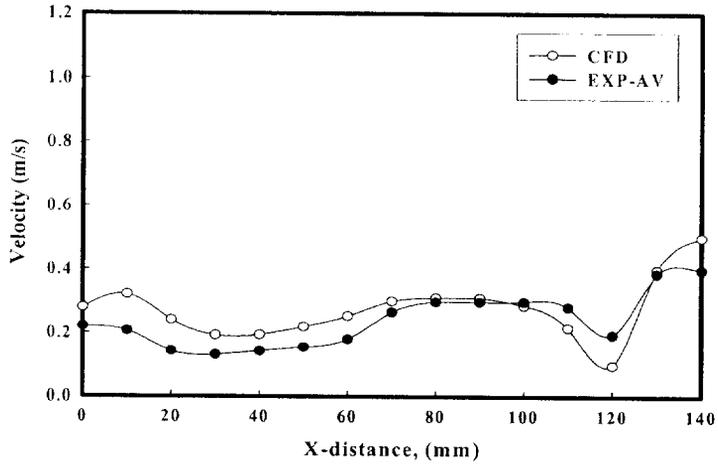
Fig. 4-21~24는 CASE 2($\alpha=1.4$)조건에서의 NO_x 및 산소농도를 나타내고 있다. 본 그림에서는 앞의 조건 CASE 1의 NO_x 및 산소농도 분포와 정성적인 경향이 다소 비슷하다는 것을 알 수 있다. 평균온도의 경우, Fig. 4-12와 Fig. 4-15에서 볼 수 있듯이 공기비의 감소에 의해 CASE 2의 평균온도가 높으며 고온영역이 CASE 1에 비해 넓어지는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 Fig. 4-21에서는 표면연소에 의한 고온의 영향으로 산소농도의 경우 2%이하의 영역이 넓게 확대되어 있는 것을 볼 수 있으며, 이것은 표면연소에 참여하는 산소가 많아지므로 그만큼 메탈화이버에서의 표면연소가 활발함을 의미한다. NO_x의 경우 농도가 약 10배 정도 높게 나타나는데 이것은 표면연소가 활발함에 의한 온도상승의 영향으로서, 메탈화이버의 표면연소에 의해 발생하는 NO_x는 Thermal NO_x임을 알 수 있다. 참고로 $\alpha=1.4$ 의 경우 평균온도가 1200K의 고온부에서의 대부분의 산소농도가 2%이하로 아주 낮게 나타내는 것을 볼 수 있다. $\alpha=1.4$ 이하로 공기비를 낮추게 되면 연료의 과잉을 초래하게 되는데, 이는 Fig. 4-8의 $\alpha=1.3$ 에서 연료과잉으로 인해 메탈화이버에서 표면연소에 참여하지 않은 과잉연료가 부력에 의한 온도 경계층 부근의 산소농도가 증가하는 영역에서 2차적인 연소를 통한 화염 형성 현상을 초래한것으로 사료된다.



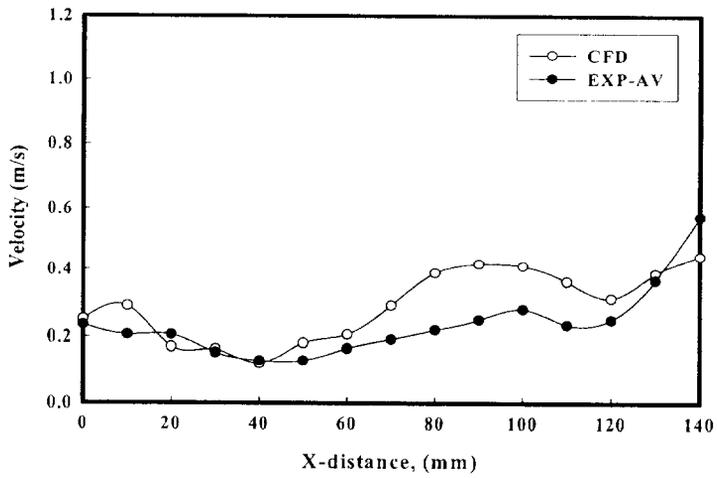
(a) $Z=20\text{mm}$



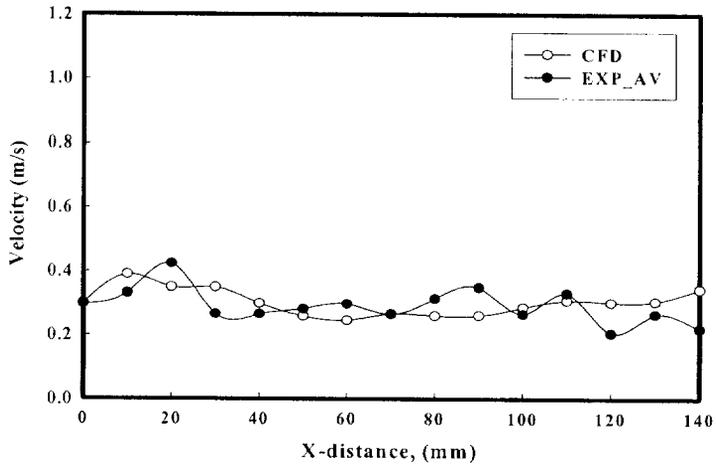
(b) $Z=30\text{mm}$



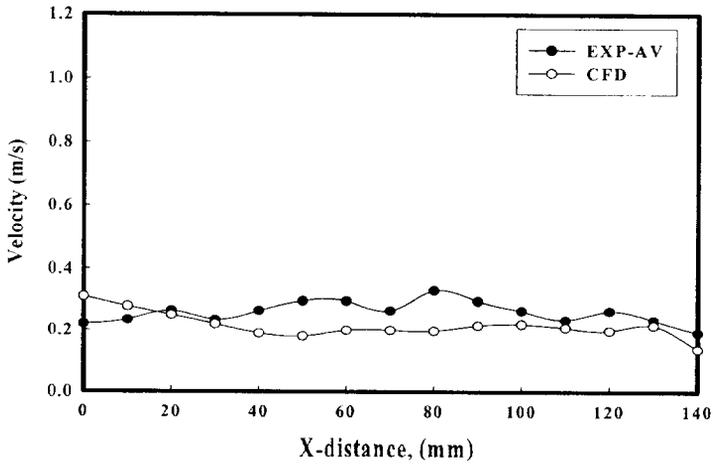
(c) Z=70mm



(d) Z=80mm

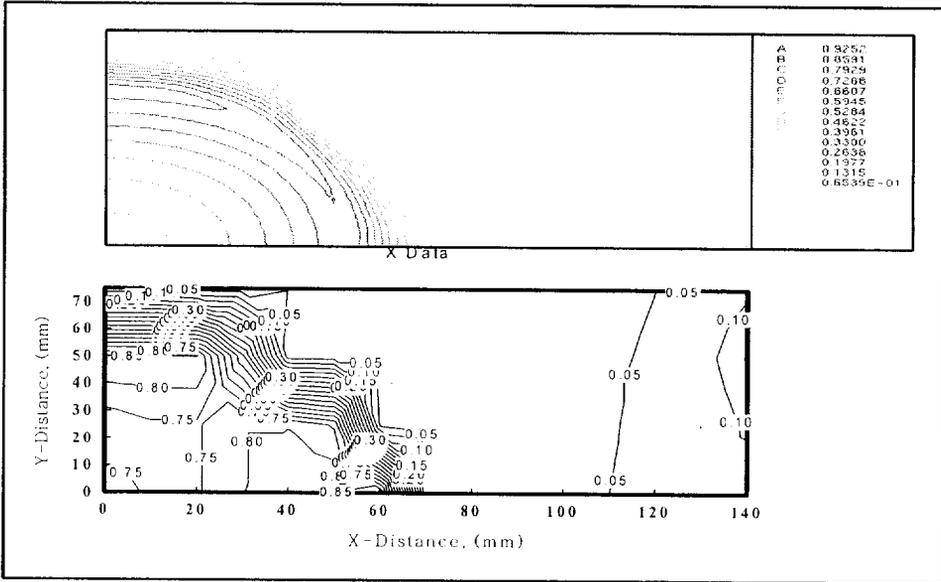


(e) Z=120mm

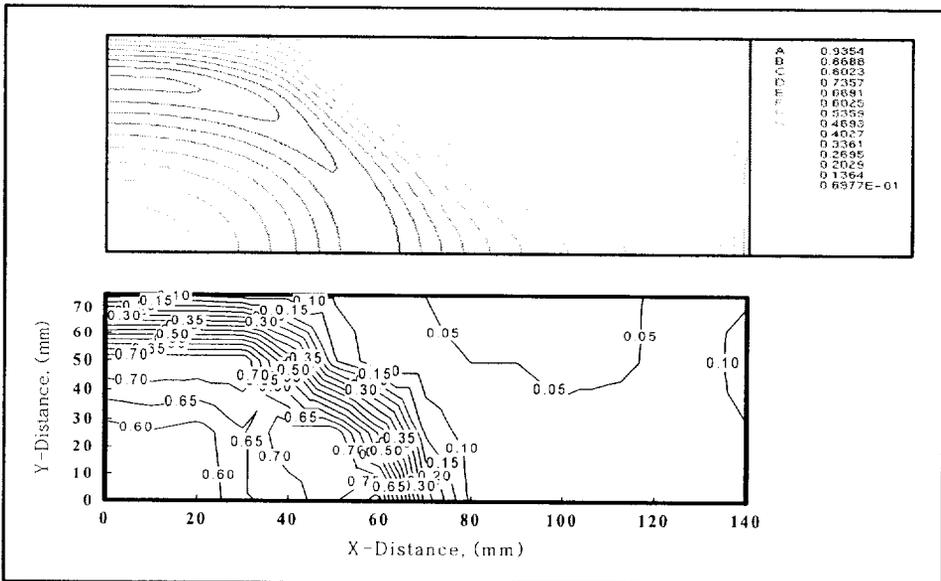


(f) Z=130mm

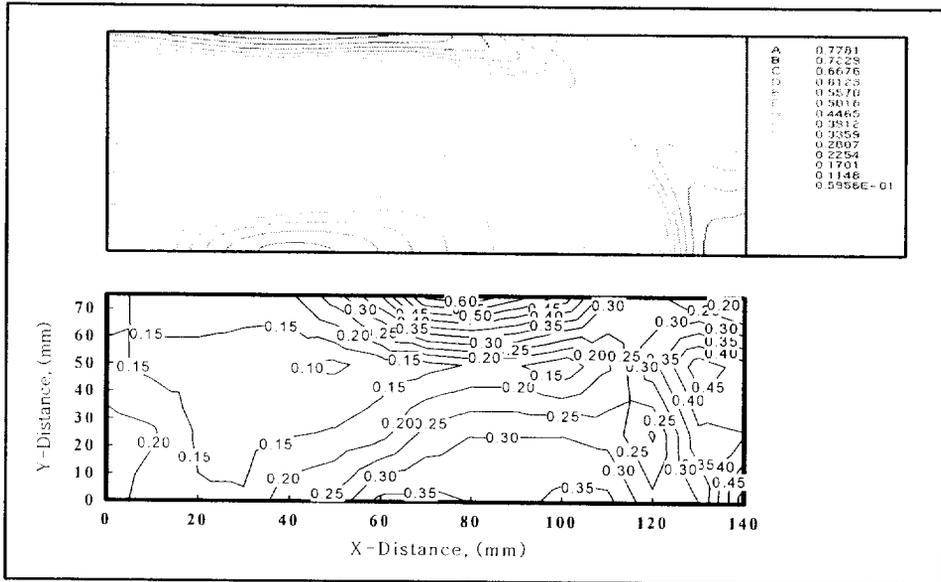
Fig 4-1 Comparison of computation and experimental results for X-distance variation (Z=20, 30, 70, 80, 120, 130mm)



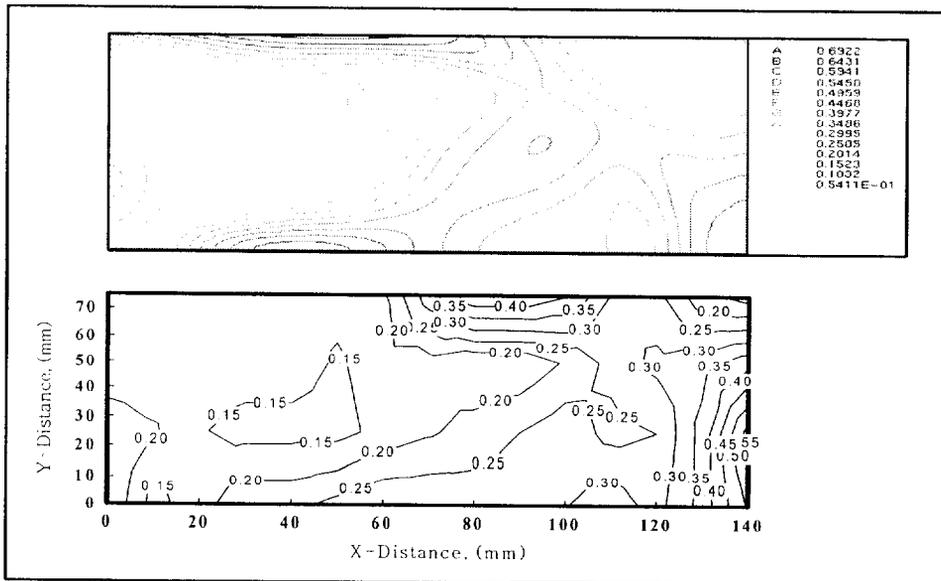
(a) Z=20mm



(b) Z=30mm

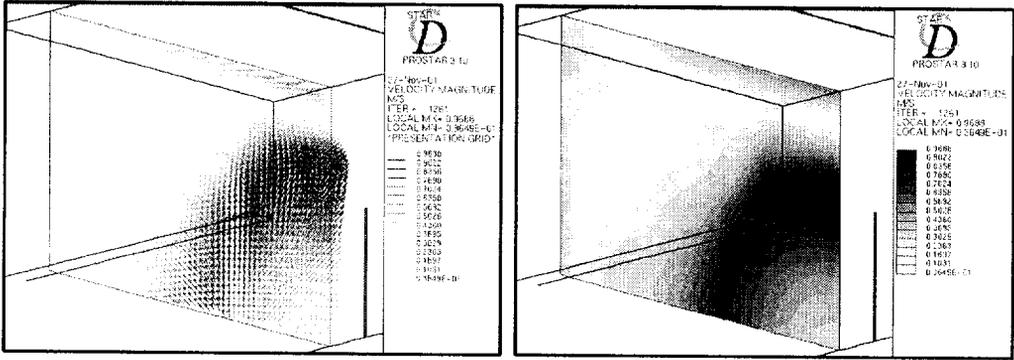


(c) Z=70mm

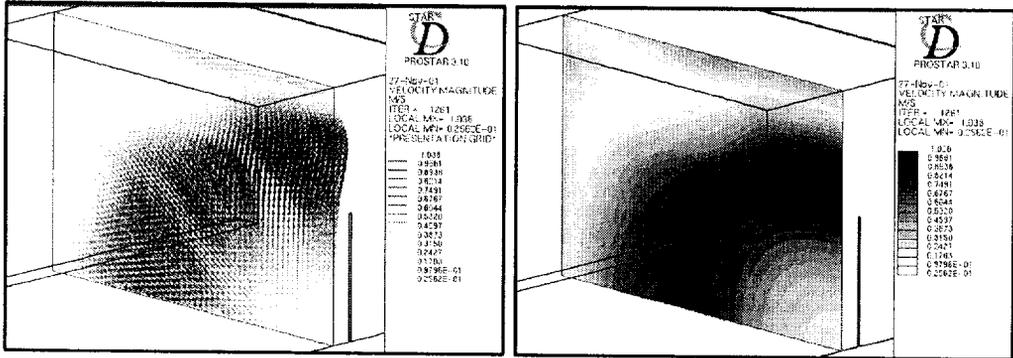


(d) Z=80mm

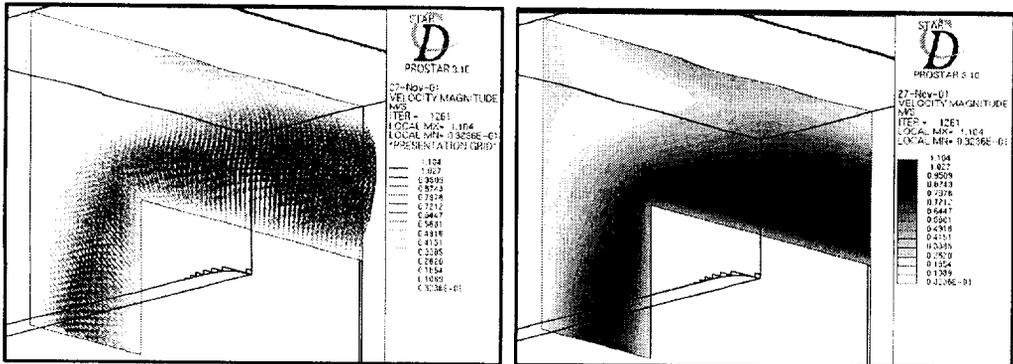
Fig. 4-2 Comparison of computation and experimental results for uniform velocity distribution (Z=20, 30, 70, 80mm)



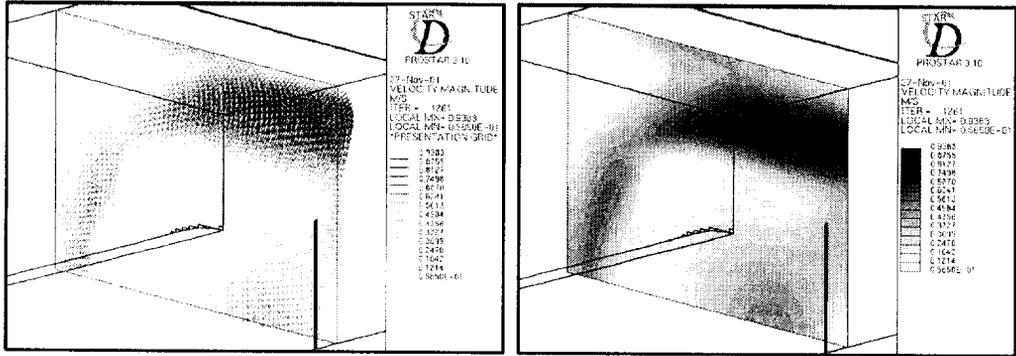
(a) Z=30mm



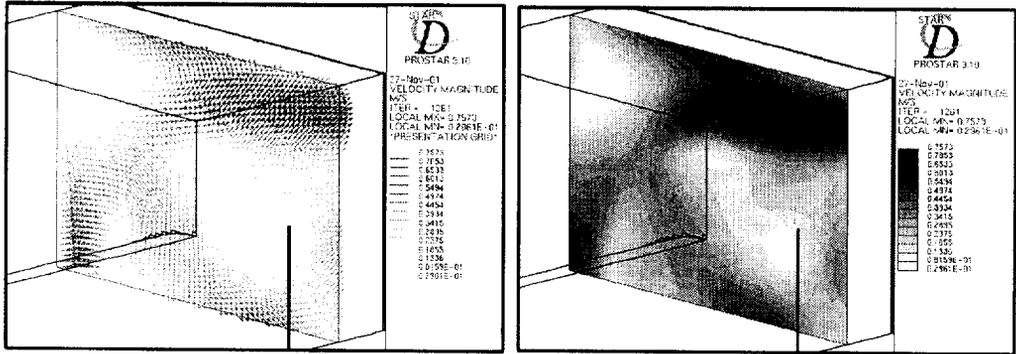
(b) Z=40mm



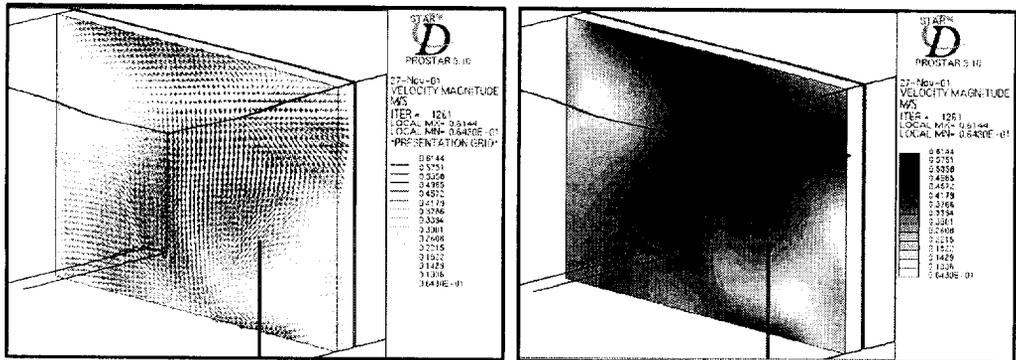
(c) Z=50mm

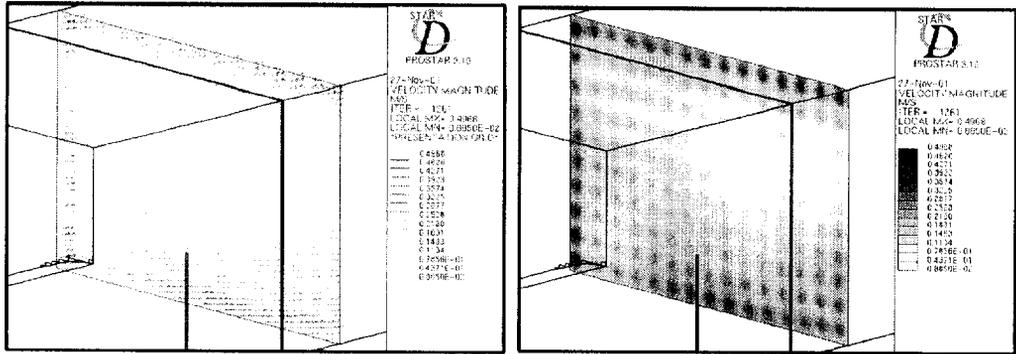


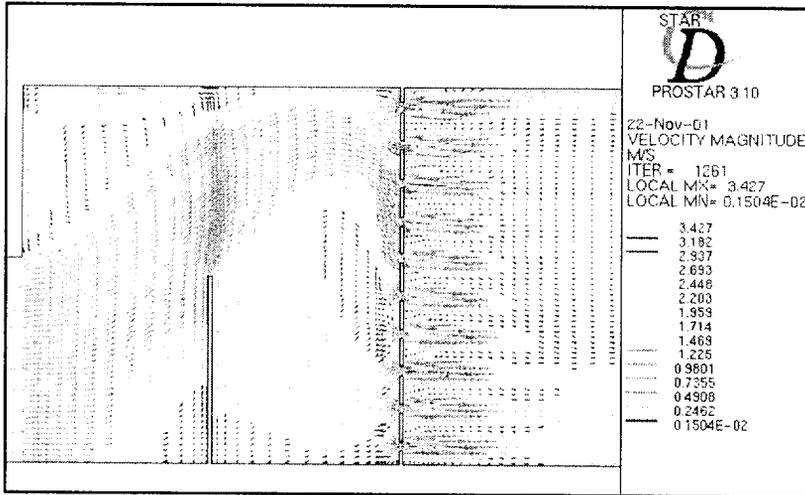
(d) Z=60mm



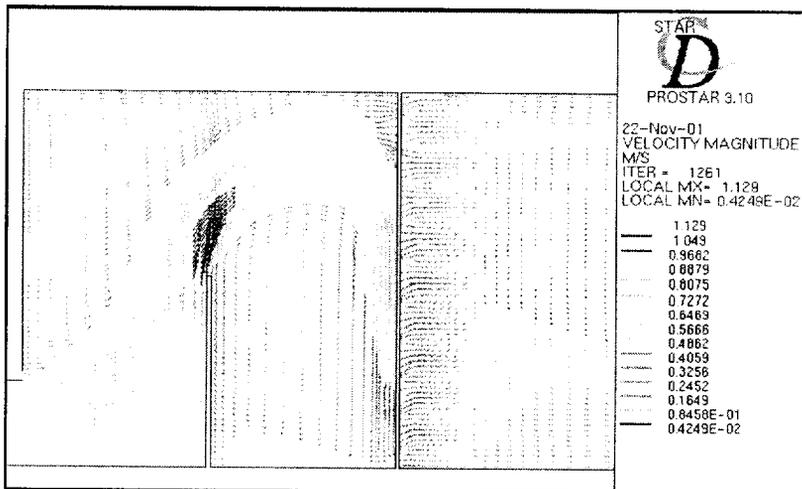
(e) Z=75mm



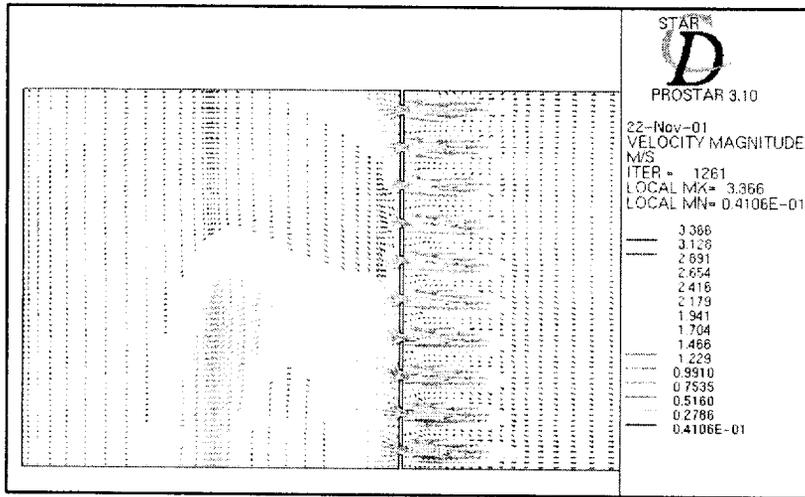




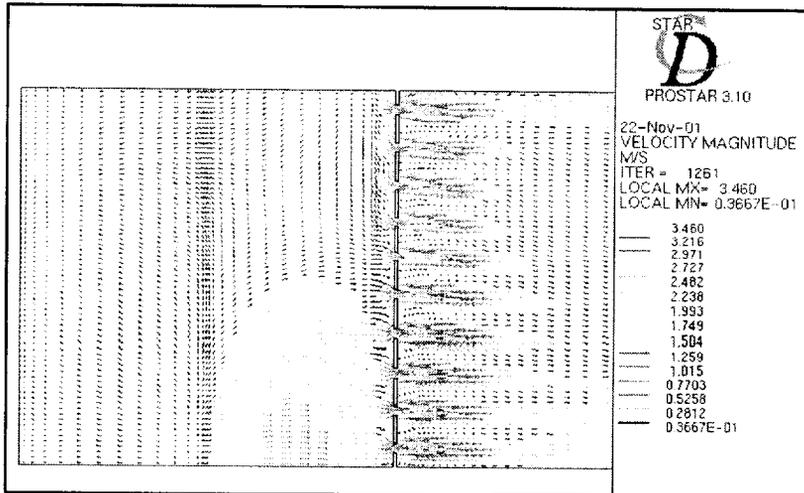
(a) X=5mm



(b) X=50mm

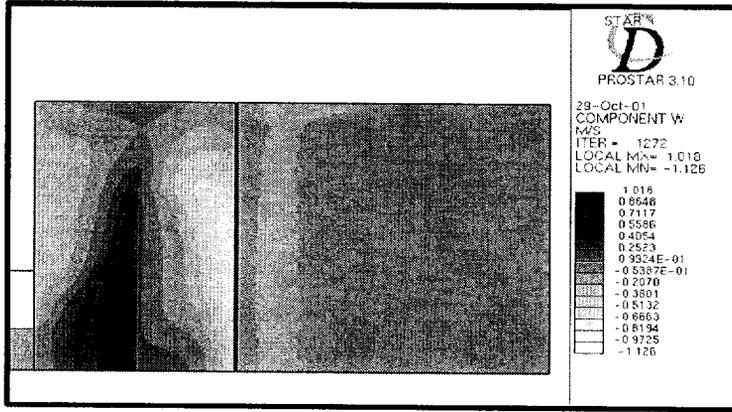


(c) X=125mm

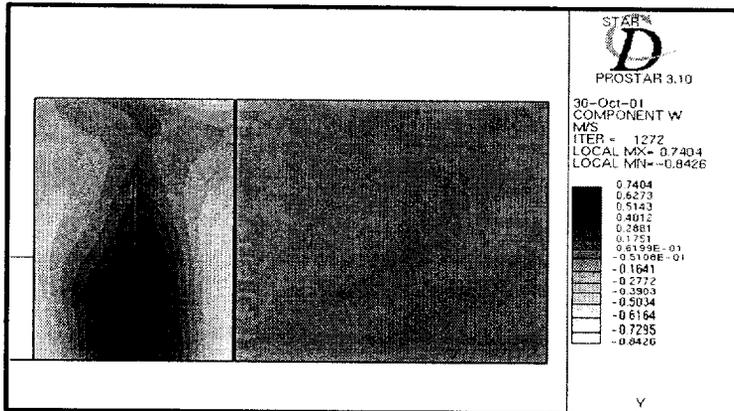


(d) X=145mm

Fig. 4-4 Distribution of velocity vectors (X=5, 50, 125, 145mm)



(a) Y=50mm



(b) Y=75mm

Fig. 4-5 Distribution velocity contour of Y-direction velocity
(Y=50, 75mm)

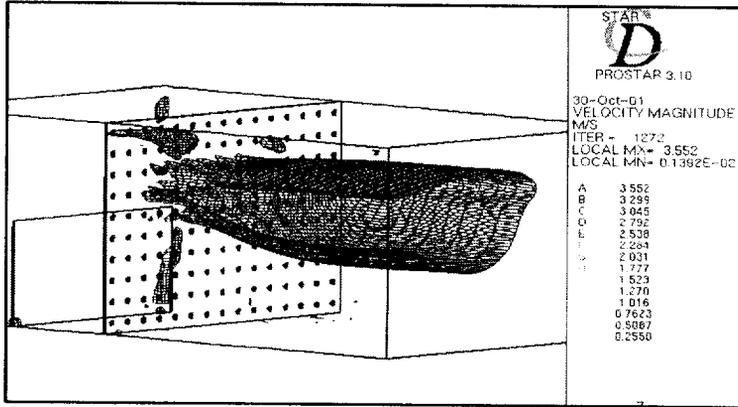


Fig. 4-6 Distribution velocity contour of $V=0.047(m/s)$
at Iso-surface

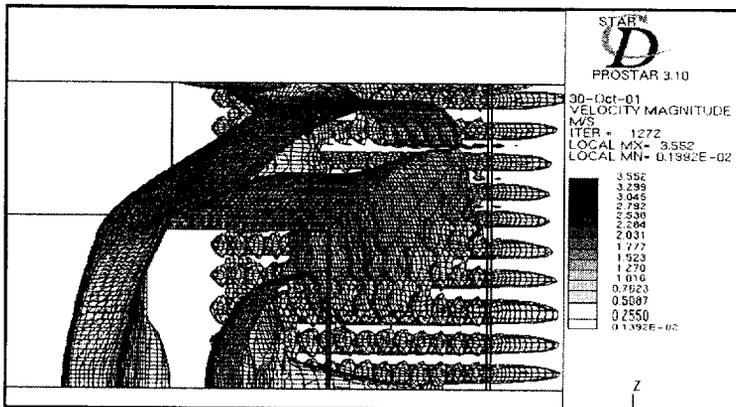


Fig. 4-7 Distribution velocity contour of $V=0.5(m/s)$
at Iso-surface

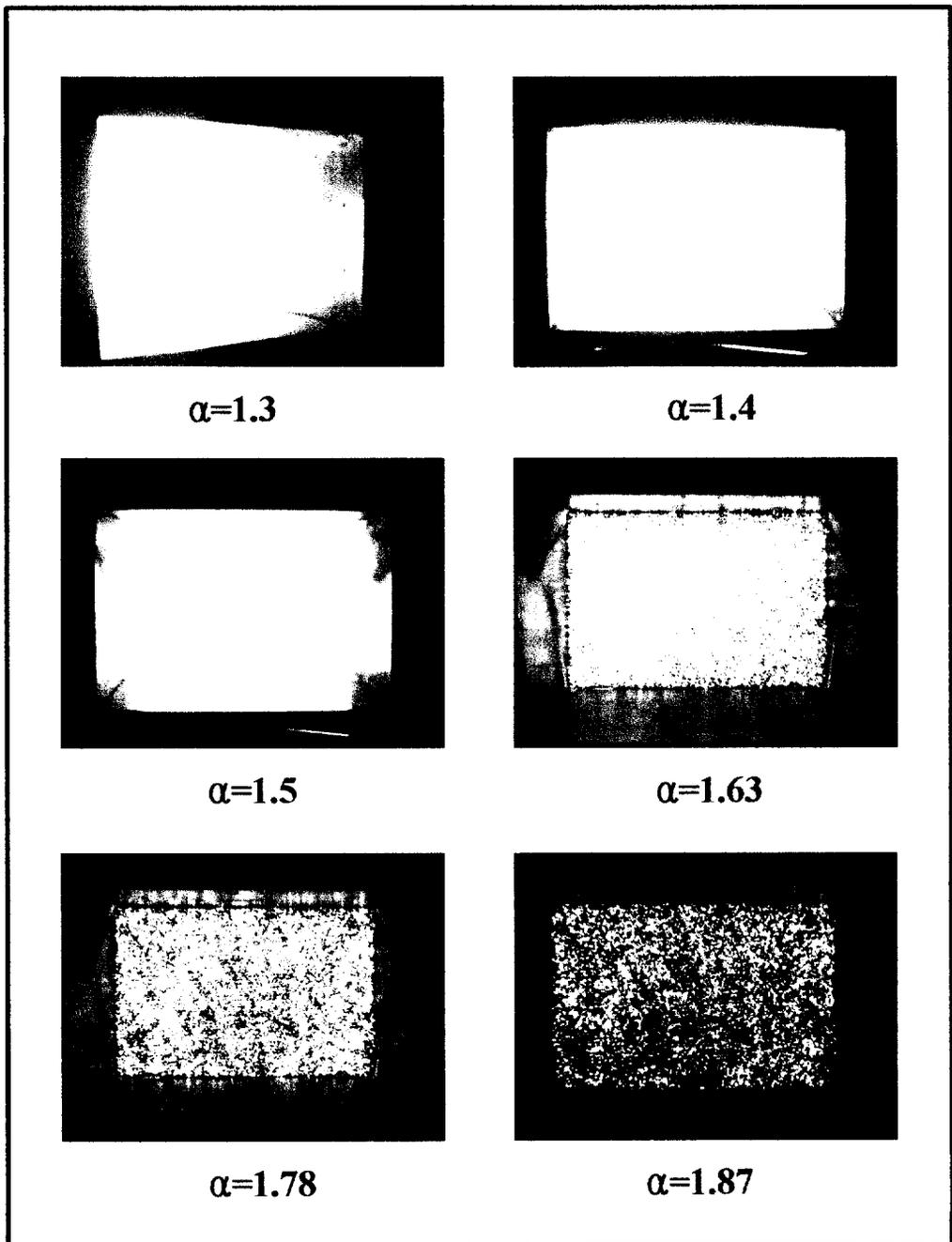


Fig. 4-8 Direct photographs at different air rate
($\alpha=1.3 \sim \alpha=1.87$)

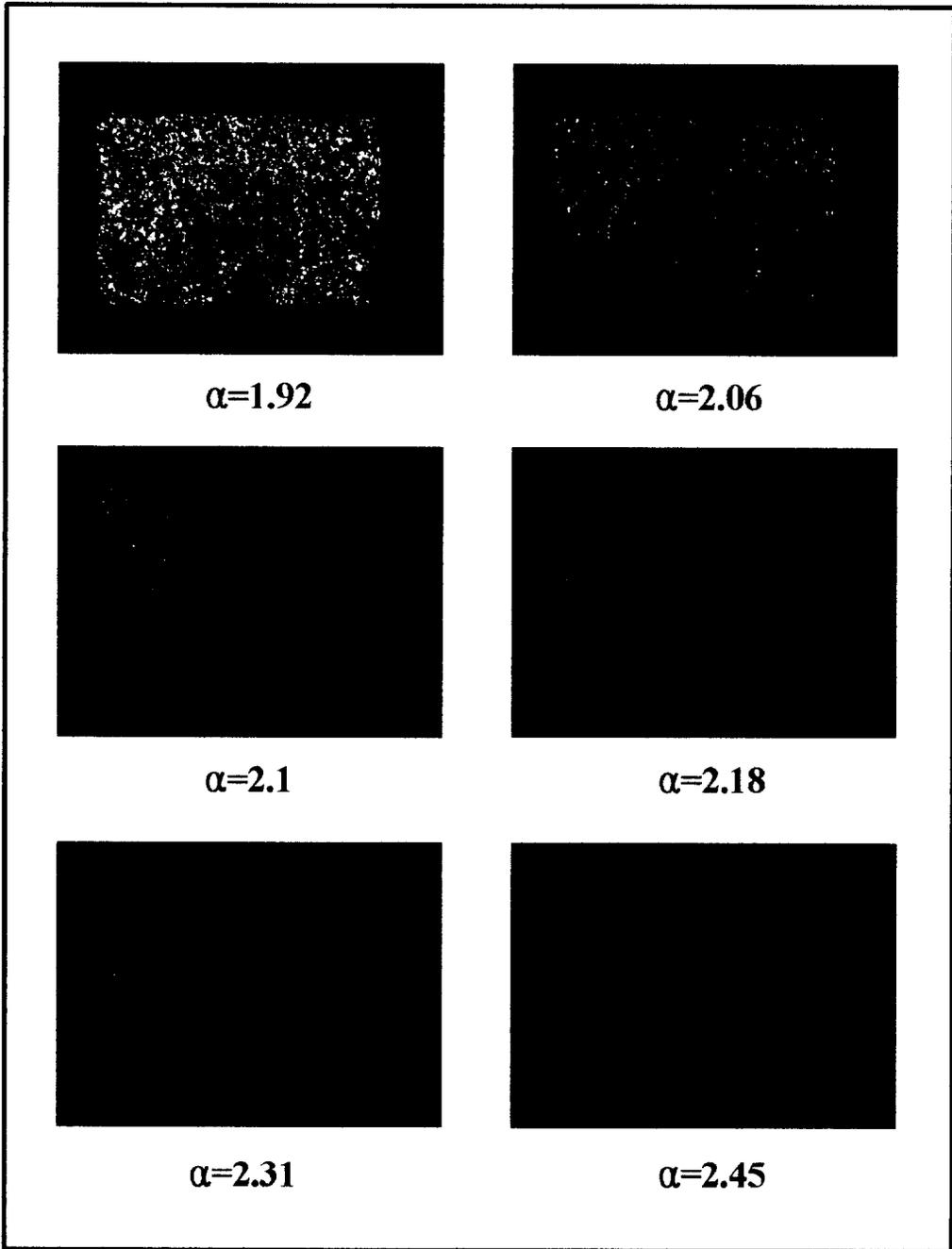
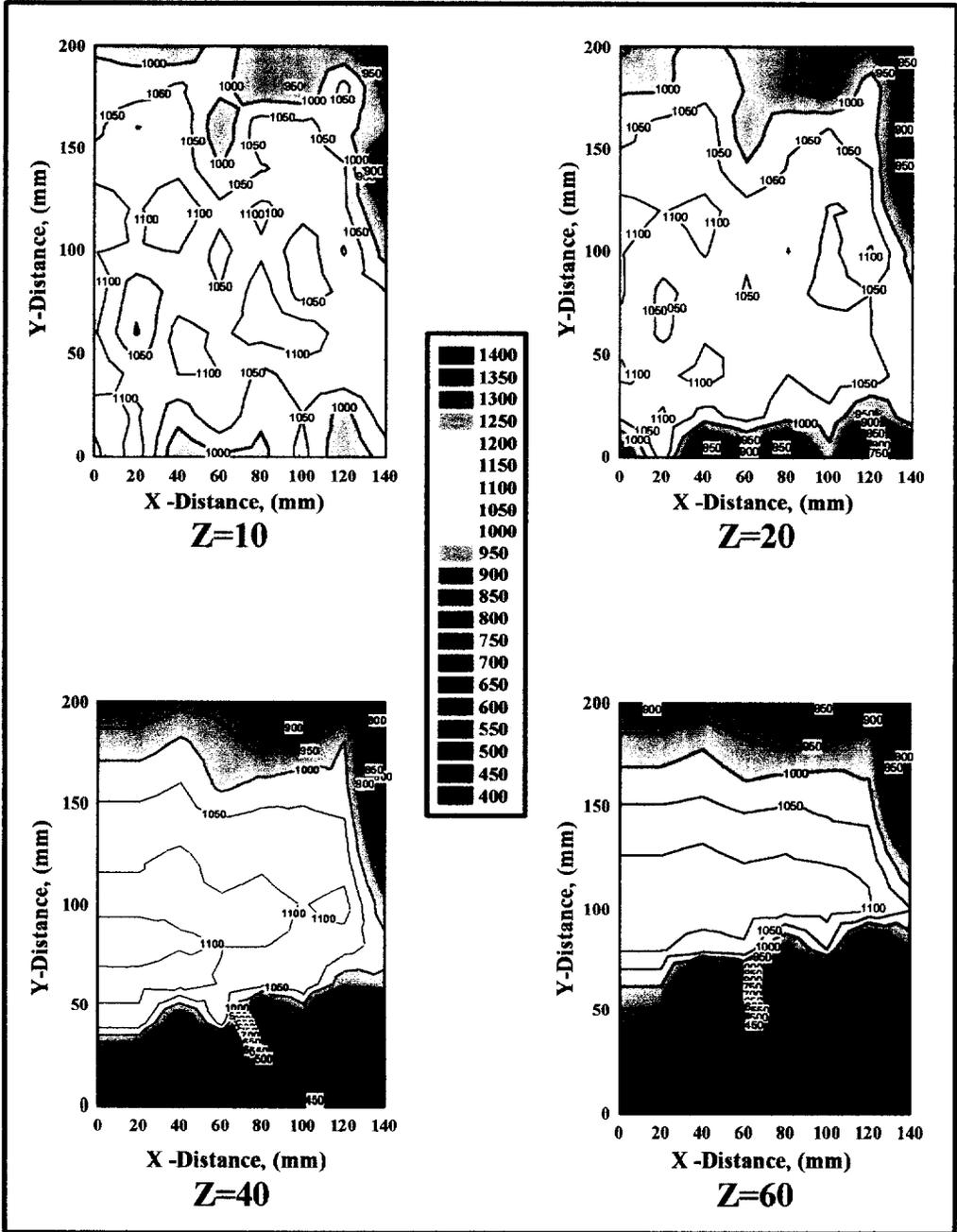
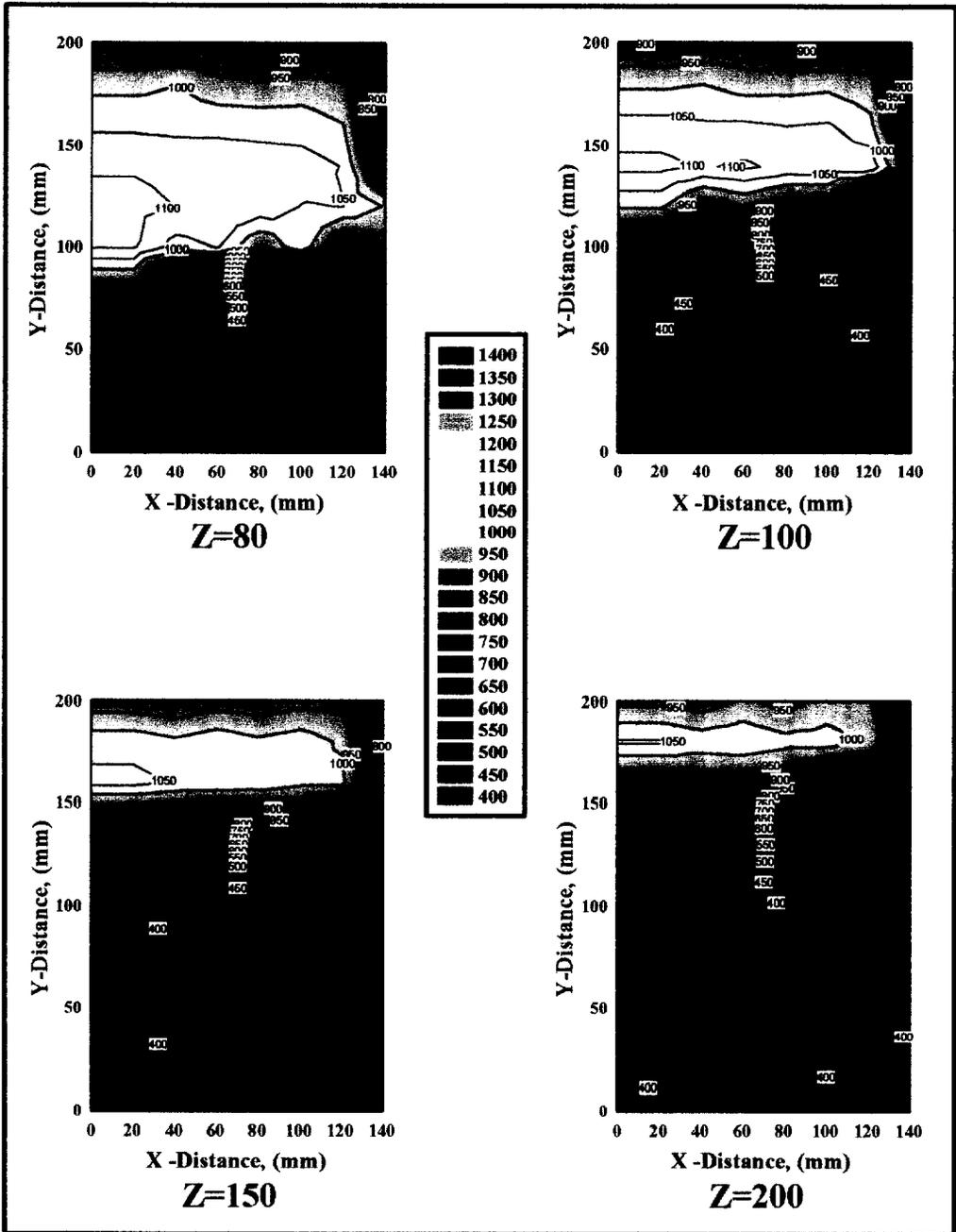


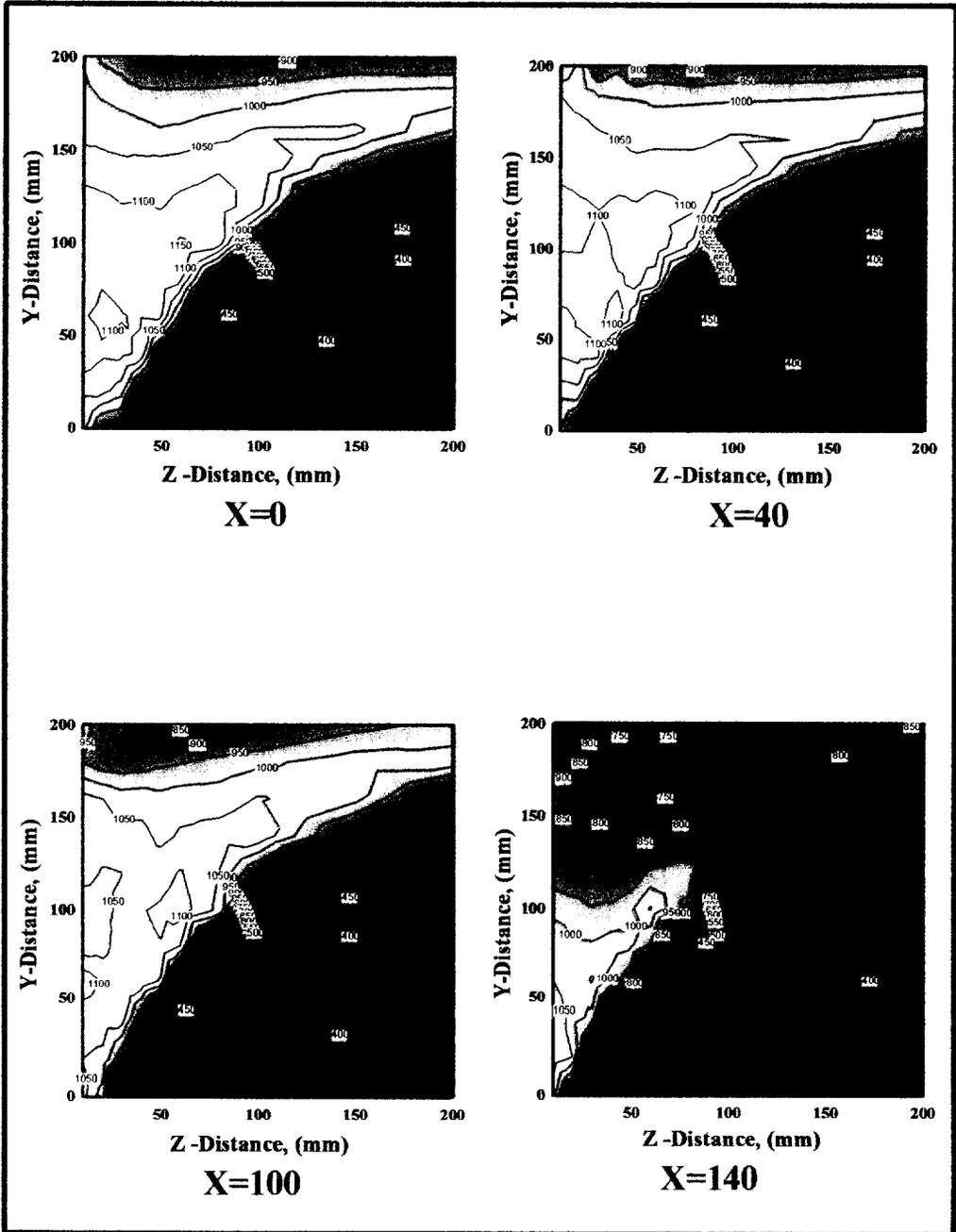
Fig. 4-9 Direct photographs at different air rate
($\alpha=1.92 \sim \alpha=2.45$)



**Fig. 4-10 Isothermal lines of X direction for the CASE 1
(Z=10~Z=60mm)**



**Fig. 4-11 Isothermal lines of X direction for the CASE 1
(Z=80 ~ Z=200mm)**



**Fig. 4-12 Isothermal lines of Z direction for th CASE 1
(X=0 ~ X=140mm)**

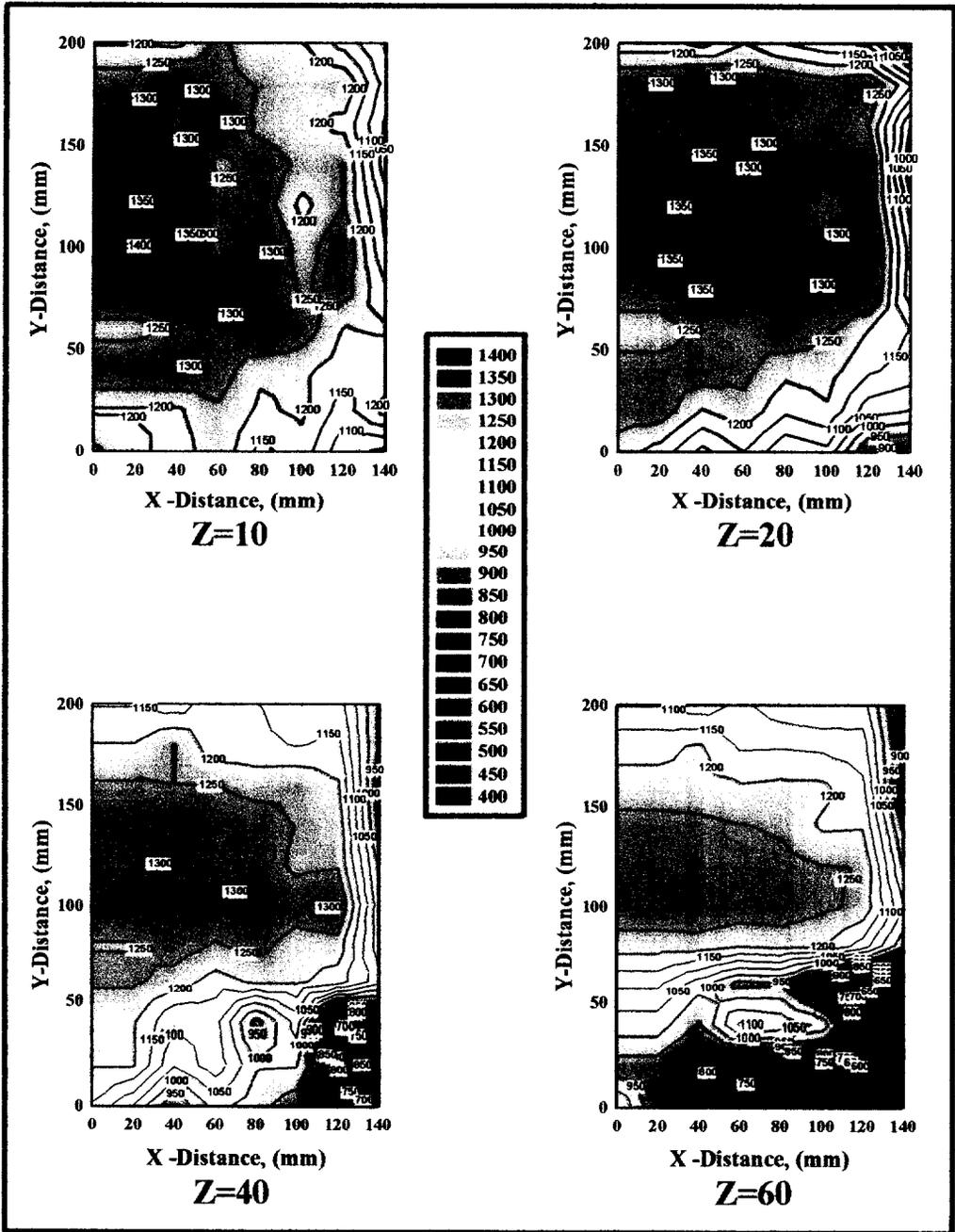
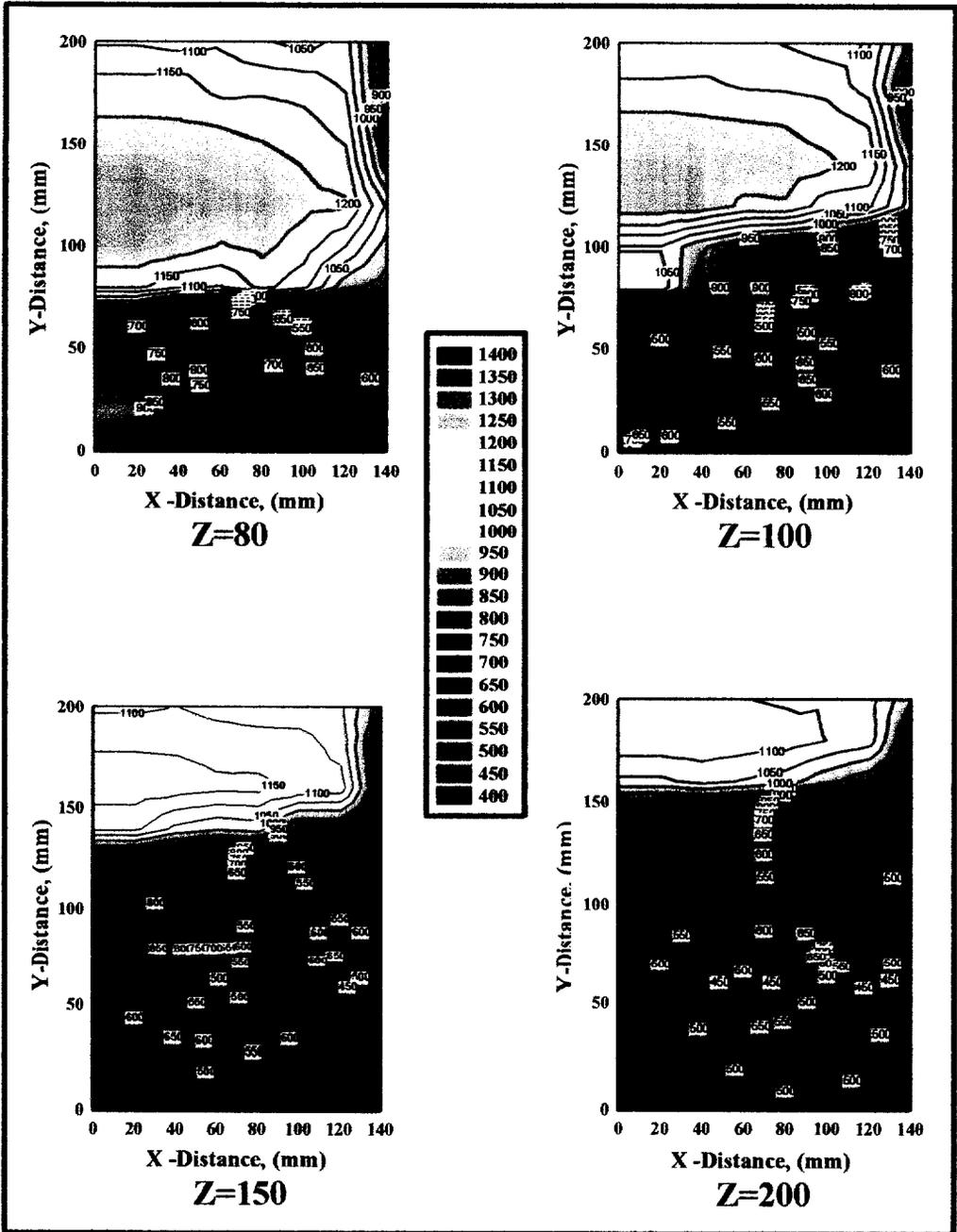
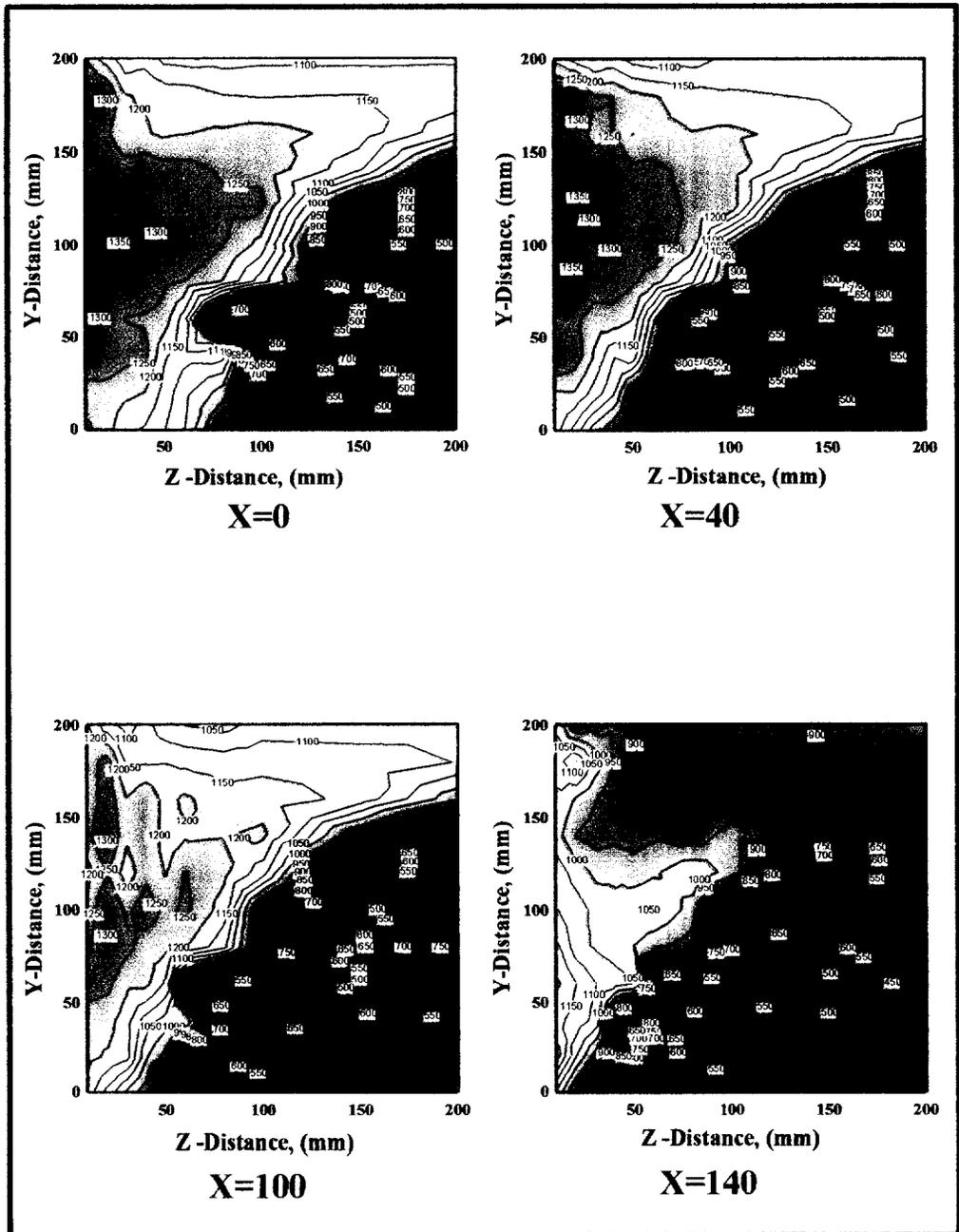


Fig. 4-13 Isothermal lines of X direction for the CASE 2
(Z=10~Z=60mm)



**Fig. 4-14 Isothermal lines of X direction for the CASE 2
(Z=80~Z=200mm)**



**Fig. 4-15 Isothermal lines of Z direction for the CASE 2
(X=0 ~ X=140mm)**

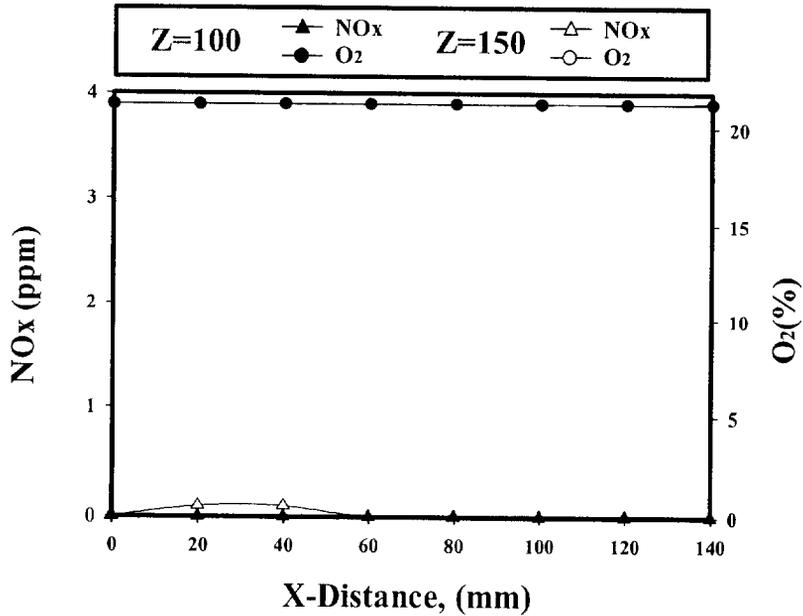
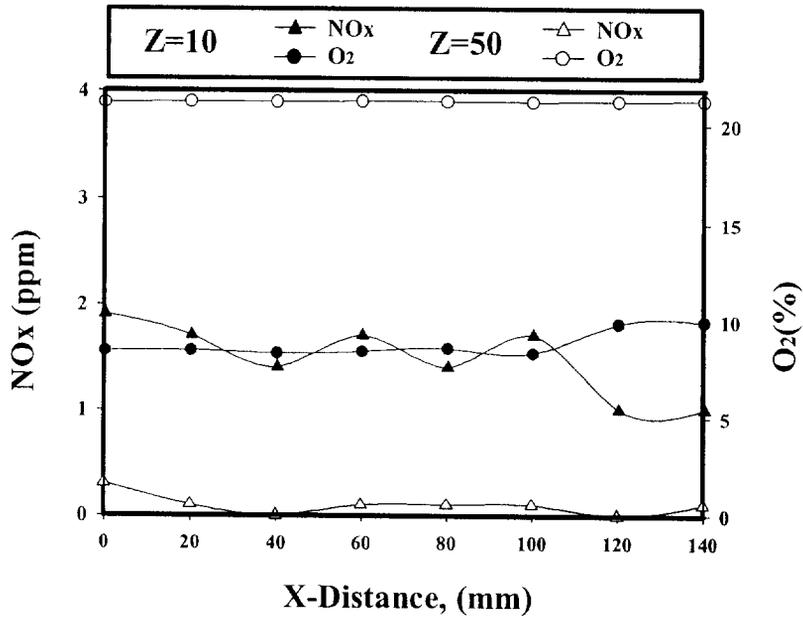


Fig. 4-16 Distribution of NO_x, O₂ for X-distance variation within Y=0 at CASE 1

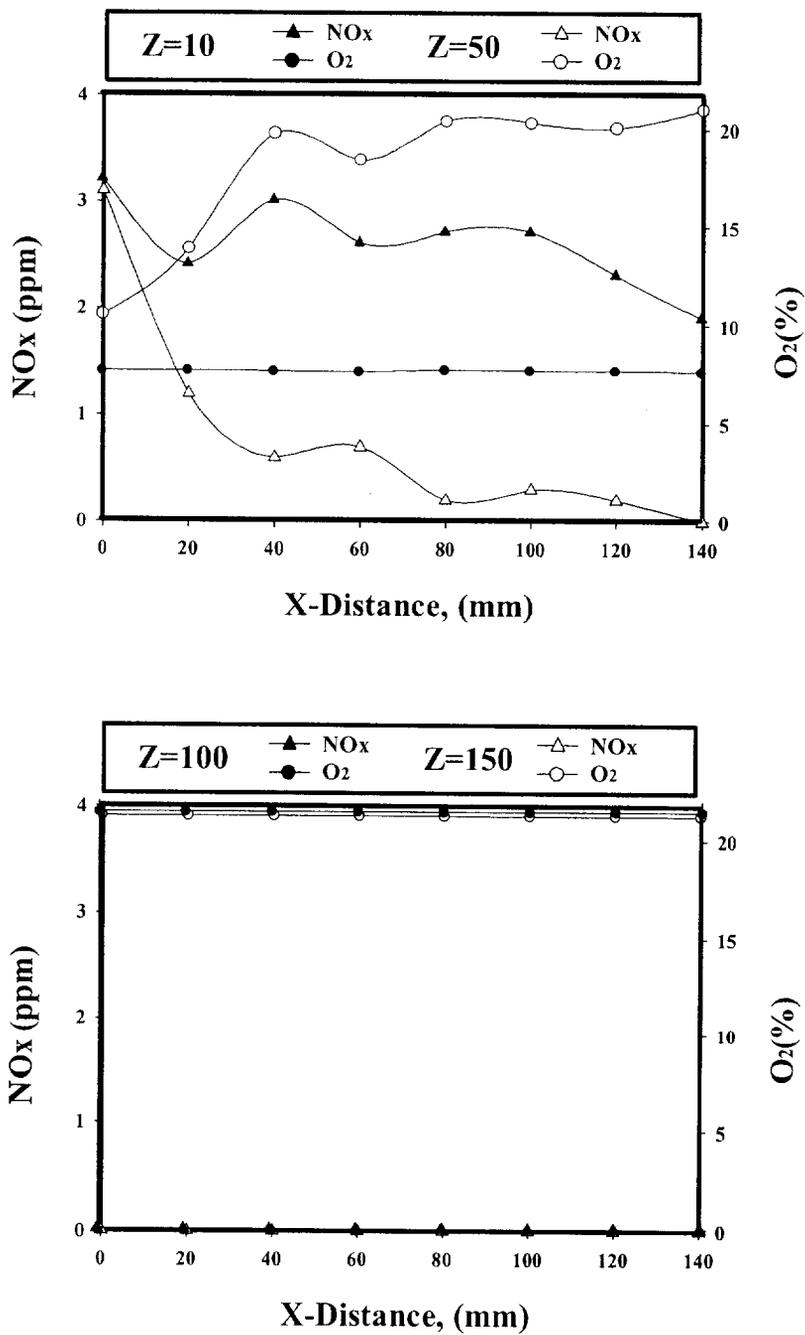


Fig. 4-17 Distribution of NOx, O₂ for X-distance variation within Y=50 at CASE 1

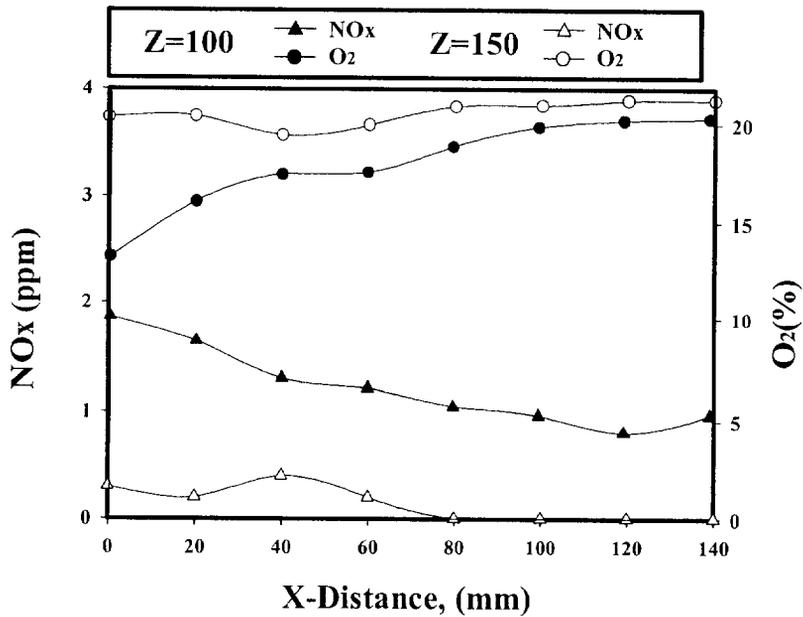
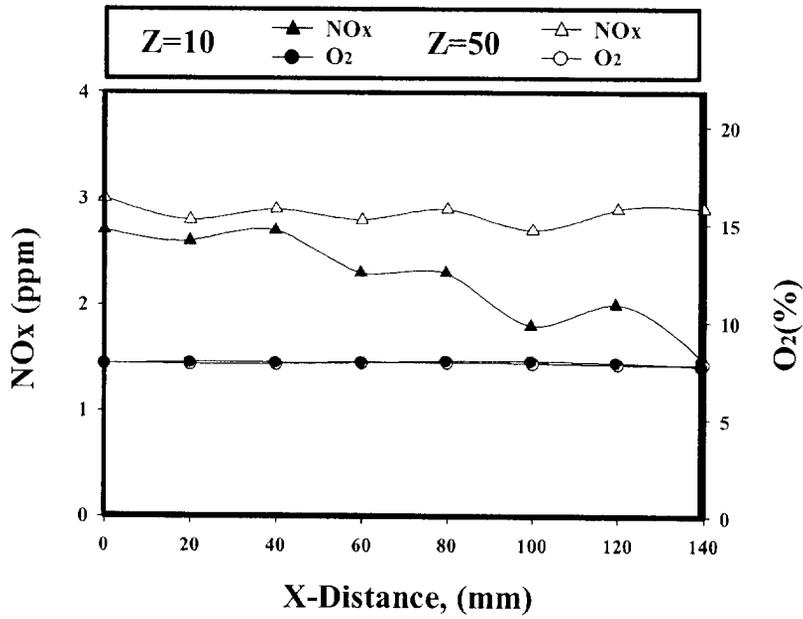


Fig. 4-18 Distribution of NO_x, O₂ for X-distance variation within Y=100 at CASE 1

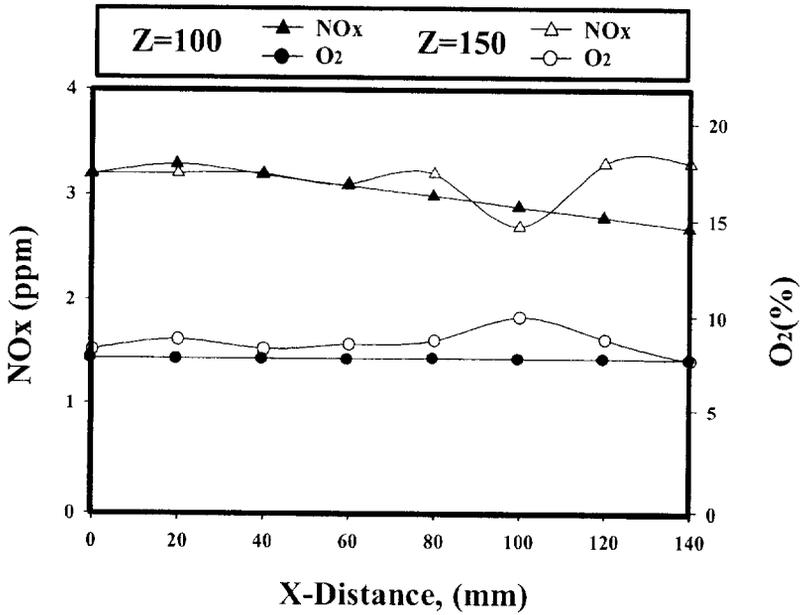
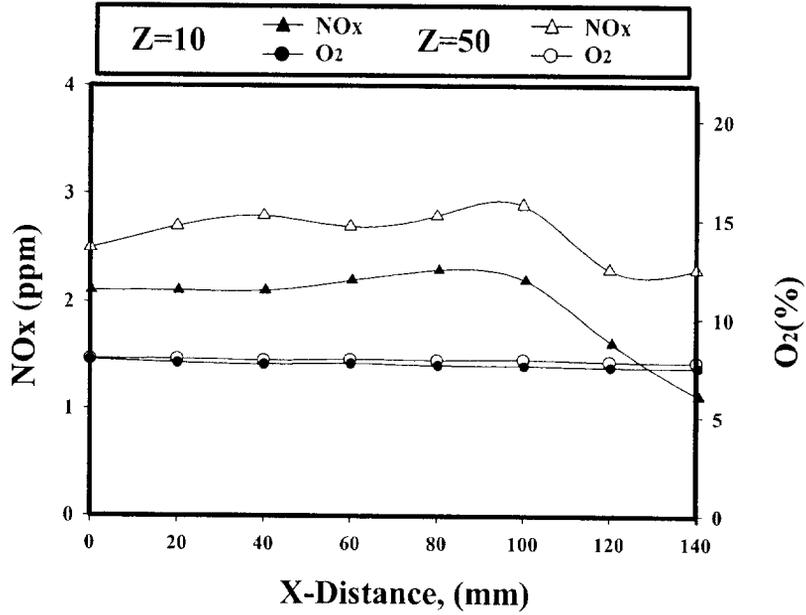


Fig. 4-19 Distribution of NOx, O₂ for X-distance variation within Y=150 at CASE 1

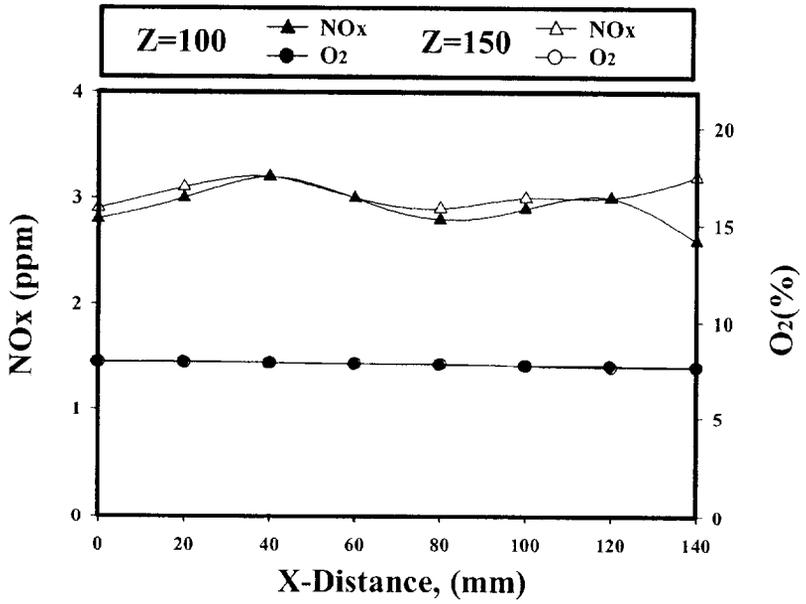
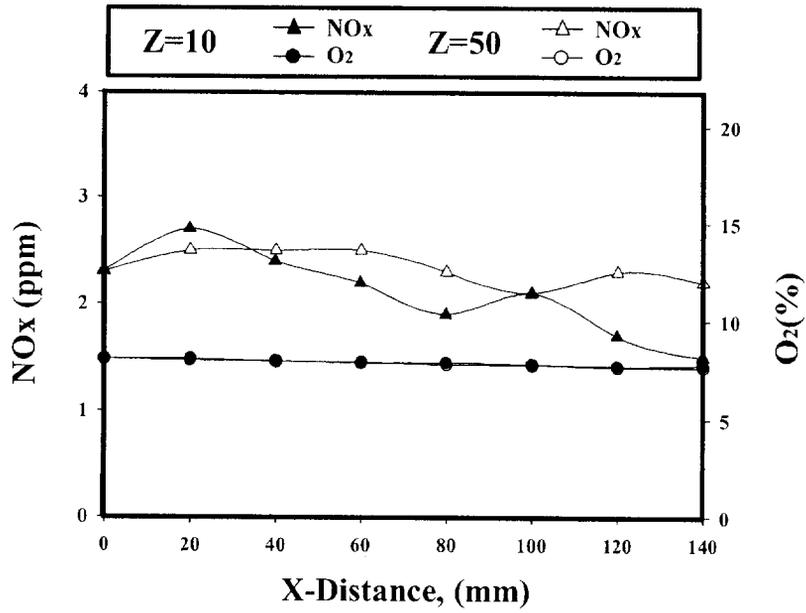


Fig. 4-20 Distribution of NOx, O₂ for X-distance variation within Y=200 at CASE 1

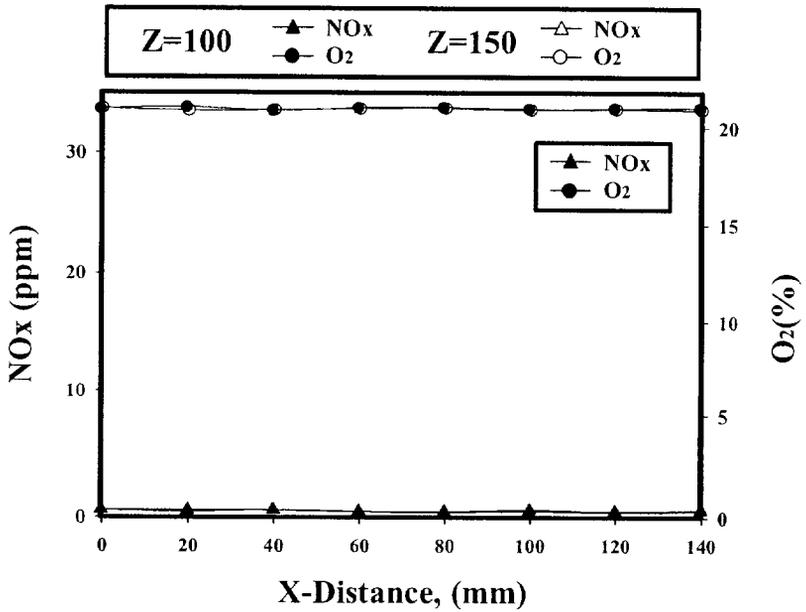
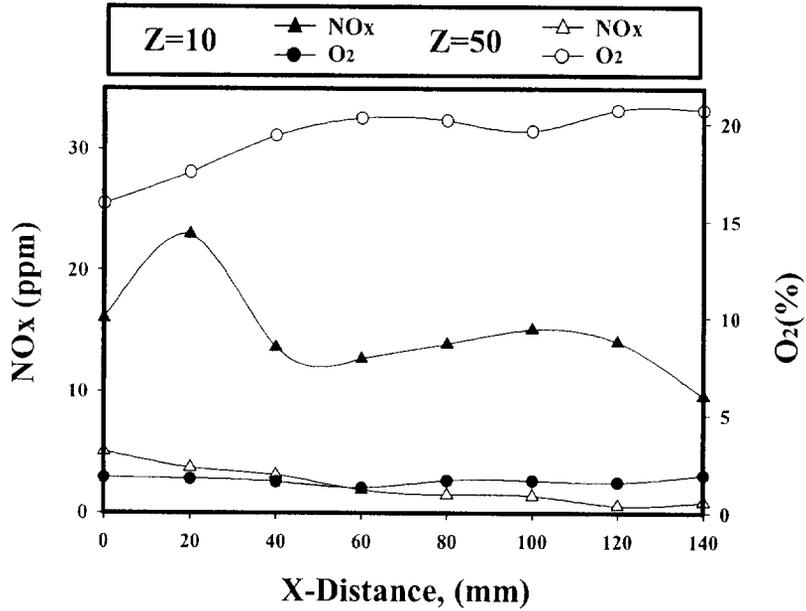


Fig. 4-21 Distribution of NO_x, O₂ for X-distance variation within Y=0 at CASE 2

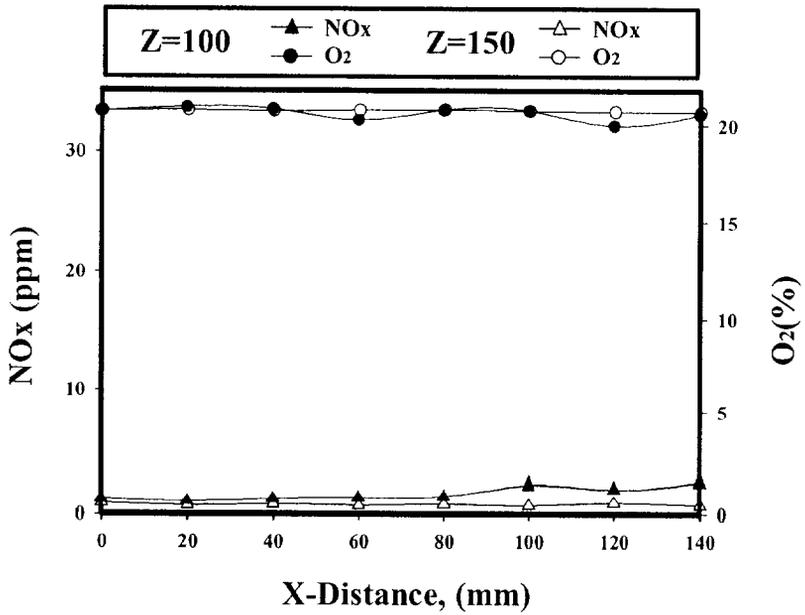
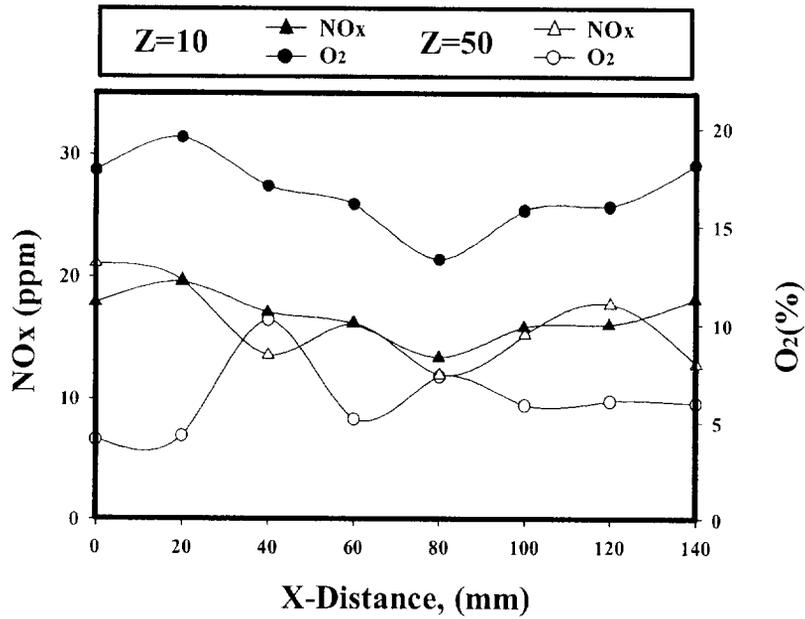


Fig. 4-22 Distribution of NOx, O₂ for X-distance variation within Y=50 at CASE 2

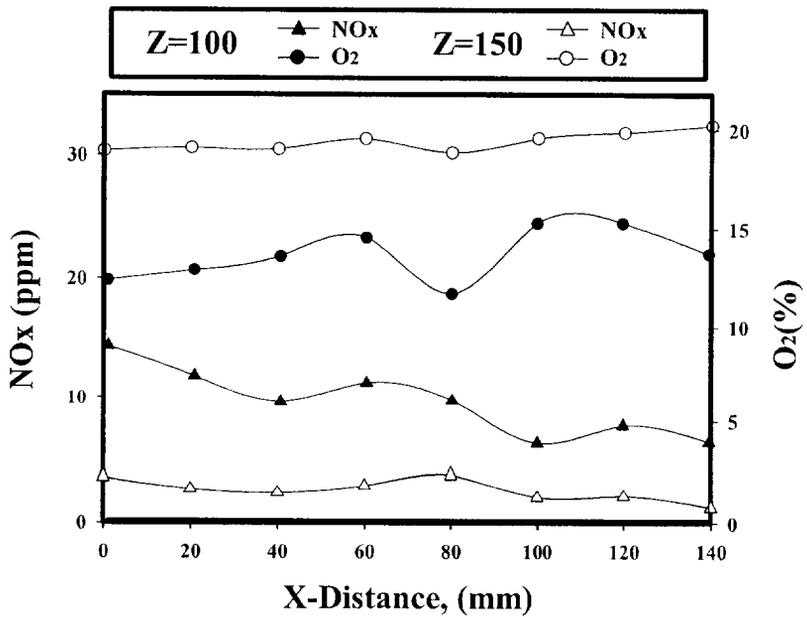
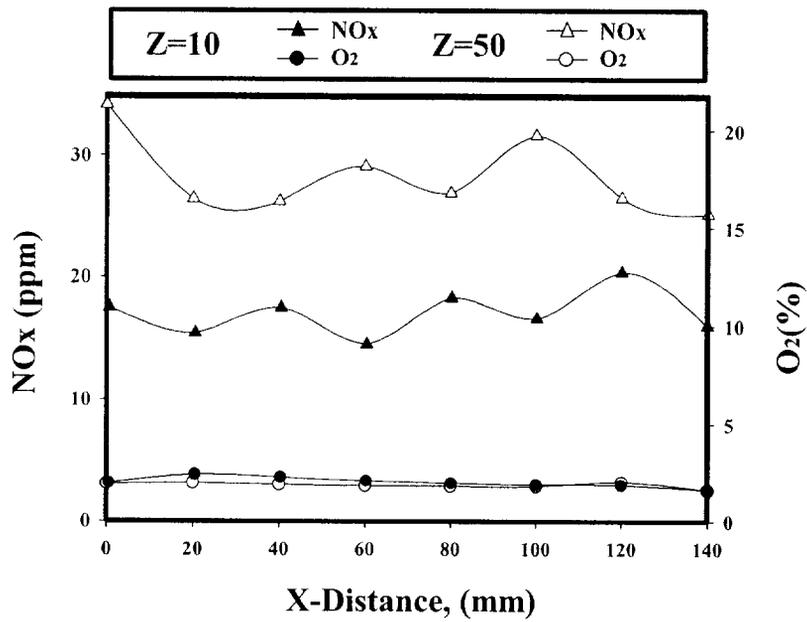


Fig. 4-23 Distribution of NO_x, O₂ for X-distance variation within Y=100 at CASE 2

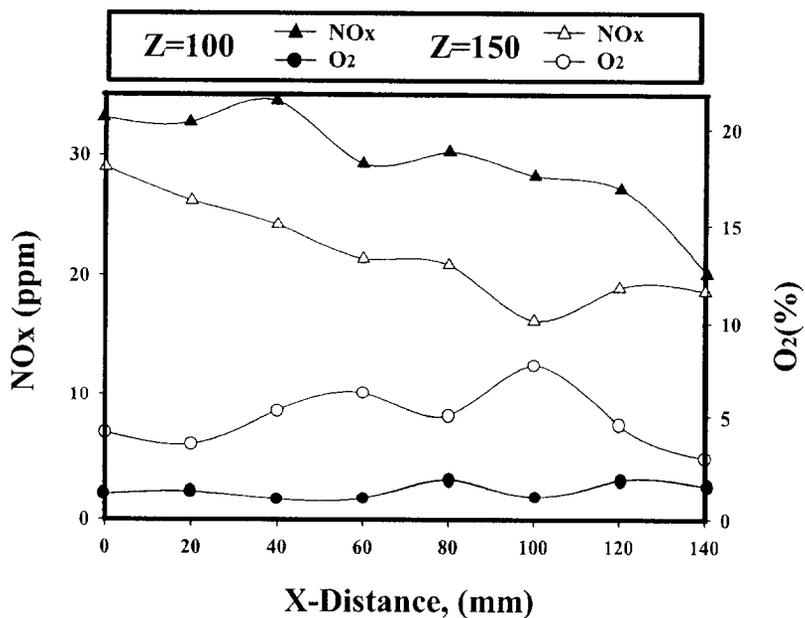
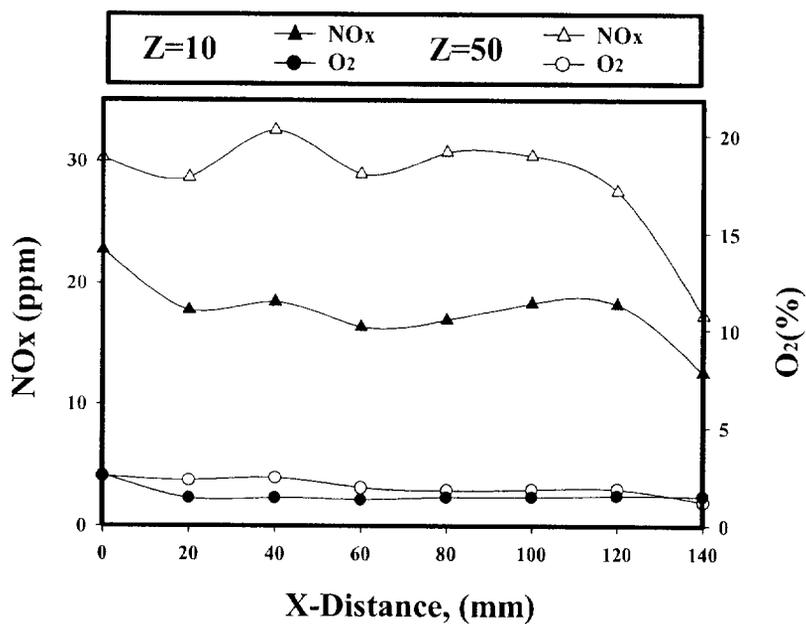


Fig. 4-24 Distribution of NOx, O₂ for X-distance variation within Y=150 at CASE 2

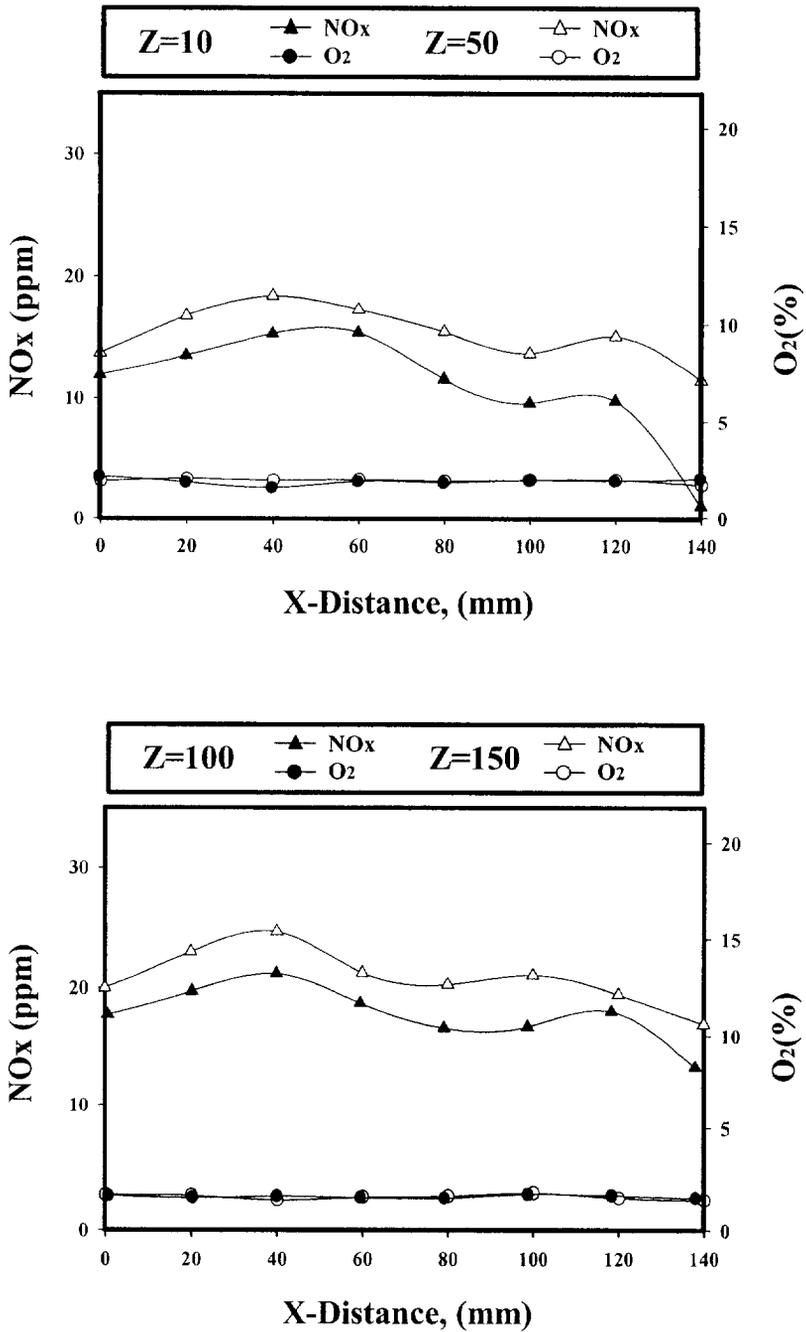


Fig. 4-25 Distribution of NOx, O2 for X-distance variation within Y=200 at CASE 2

제 5 장 결 론

가열용으로 사용되는 이상적인 연소장치란, 필요한 적소에 골고루 열플럭스가 분포되게 하는 것이며, 이를 위하여 메탈화이버 연소기에 관한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 메탈화이버를 이용하여 고부하연소기의 소형화 및 연소제어기술을 확립하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 시험연소기를 제작하여 메탈화이버 전후의 유동 조사 및 온도, NO_x 농도, O₂ 농도 등을 측정하여 고찰하였다. 특히, 메탈화이버 이전의 연료와 공기의 혼합에 필수적인 역할을 하는 유동에 관해서는 수치해석과 실험을 병행하여 그 결과를 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수치해석 결과의 타당성 검증을 위하여 메탈화이버를 제외한 표면 연소기 내부의 속도분포를 정상상태 실험을 통해 측정하여 해석결과와 비교한 결과, 최대오차 6% 이내의 정확한 예측을 할 수 있었다. 그러나 속도벡터의 변화가 큰 경우에는 계산과 실험의 좌표상의 불일치 문제와 열선 풍속계의 측정한계로 인하여 정확한 비교분석이 어려웠다.
2. 본 실험에서는 다공판에 의한 정류효과는 바람직한 정도가 아니었다. 이는 배플이 유입공기관보다 작기 때문에 Y방향의 속도성분이 강하게 생성되어, 다공판 전단부에서의 속도분포가 이미 불균일해졌기 때문이다.
3. 공기비 변화에 따른 화염의 안정화범위가 $\alpha=1.4$ (연소강도 354 KW/m²)에서 $\alpha=2.06$ (연소강도 240KW/m²) 사이임을 밝혀 낼 수 있었

다. 이러한 화염안정화 범위에서 공기변화에 따라 표면연소의 영역이 있는 안정화된 청염영역은 $\alpha=1.87\sim 2.06$ (연소강도 $266KW/m^2\sim 240KW/m^2$)로 나타났으며, 표면연소에 의한 복사영역은 $\alpha=1.4\sim 1.78$ (연소강도 $354KW/m^2\sim 278KW/m^2$)로 나타났다.

4. 청염 및 복사영역에서 평균온도에서는 안정범위에서의 표면연소에 의한 고온부가 메탈화이버 전역에서 고르게 분포함에 따라 넓은 열플럭스를 얻을 수 있었다. 그러나 메탈화이버에서 하류로 갈수록 부력에 의한 온도기울기가 현저하게 나타나서, 본 실험과 같은 형태의 연소기에서는 피가열물의 설치위치의 선정에 주의를 기울여야 할 것으로 생각된다.

5. NO_x의 경우, 청염영역은 메탈화이버 직후에서 3ppm이하로 아주 낮게 나타났으며, 저온부에서는 전혀 발생되지 않았고, 표면연소영역에서는 1400K 고온부에서는 30ppm이하로 발생하는 것을 보아 표면연소에 의해 발생하는 NO_x는 Thermal NO_x로 사료된다. 한편, O₂의 농도는 메탈화이버 직후의 고온부에서는 X-Y평면에 고르게 나타났다. 그러나 하류로 갈수록 온도가 높은 영역에서는 O₂의 농도는 작게, 낮은 영역에서는 높은 값으로 나타났다.

이상과 같이 연소기 유동에 관한 수치해석과 실험결과를 비교하여 본 연구의 해석방법에 대한 신뢰성을 얻었으며, 메탈화이버를 이용한 플랫폼너의 연소특성을 조사하였다. 추후에는 본 연구를 바탕으로 연소기 각부의 형상변화와 연소류의 수치해석모델을 확립함으로써, 기존의 메탈화이버를 이용한 플랫폼너를 개선하여 산업체가 요구하는 고효율 및 저공해 연소기 개발을 꾀할 수 있을 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Sathe, S. B. et al., “An Experiment and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance” , 23rd Symp. Combustion, pp. 1011-1018, 1990.
- (6) 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.
- (7) 김혁주, 박병식, 김종진, 정해승, “메탈화이버의 예혼합 연소 및 화염급냉에 따른 NO_x 배출 특성” KOSCO Symp 논문집 pp. 172-179. 2001.

- (8) 한국에너지기술연구소, “산업용 공해, 고부하 표면연소시스템 기술 개발에 관한 연구(I)”, 1993.
- (9) Kuwabara, S. and Ozawa, H., “Development of Metal Fiber Burner, Industrial Heating(日)”, Vol. 24, 1991.
- (10) Tada, A., Akiyama, S. and Nakamura, S., “부생가스를 이용한 메탈화이버 버너의 연소특성”, Industrial Heating(日), Vol. 29, No. 1, 1992.
- (11) Anderson, F., “Heat transport Model for fiber Burner, Progress in Energy and Combustion Science”, Vol. 18, pp. 1-12, 1992.
- (12) Kawaguchi, O. et al., “Premixed Combustion at a Fiber Mat”, 23rd Symp. on Combustion, pp. 1019-1024, 1990.
- (13) Strachan, D. C., “Metal Fiber Burners-A low NOx Radiant Heater Technology”, GASWARME International, Vol. 40, pp. 66-71, 1991.
- (14) Shib, 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.
- (15) “Radiant Burner Technology Base Burner and Development, Final Report(1986-1989)”, Gas Research, Institute, Chicago, USA.
- (16) “Basic Research on Radiant Burners”, Annual Report (1989-1990), Gas Research Institute, Chicago, USA.
- (17) Nakamura. S., “FIPS Mat Burner Technology, Industrial Heating(日)”, Vol. 29, No. 4, 1992.
- (18) Metal Fiber Burner, ACOTECH Corporation.
- (19) 명현국, “전산열유체공학”, 문운당, 2000.
- (20) 김신, 전병진, “난류입문”, 대영사, 2000.

- (21) ICEM-CFD Ver. 4.1.3 Meshing and Tutorial Manual, 2000, CMSTECH Ltd.
- (22) STAR-CD Ver. 3.1 Manual, 2001, Computational Fluid Dynamics Ltd.
- (23) 정수진, “자동차용 촉매변환기의 활성화 성능 향상을 위한 화학반응을 고려한 3차원 열유동 해석”, 박사학위논문, 한양대학교, 2000.
- (24) 한철호, 김수현, 장종훈, 송재복, 계측공학, 반도출판사, 1996.
- (25) 이도형, 최병륜, 공역, 연소공학(제2편), 동명사.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 조언을 아끼지 않으신 이도형 지도교수님께 머리 숙여 진심으로 감사를 드립니다. 또한 부족한 논문을 세심하게 다듬어 주신 임우조 교수님, 권오봉 교수님께도 감사를 드립니다. 아울러 학문적인 가르침과 깊이를 더해 주신 에너지시스템전공 배대석 교수님, 이연원 교수님, 김남식 교수님, 김민남 교수님, 그 외 많은 은사님들과 조교선생님 그리고 냉동공학과 윤정인 교수님과 문춘근 선배님, 동의공업대학 김태한 교수님, LG전선(주)의 기계연구소 냉동기그룹 열시스템실 연구원분들에게 깊은 감사를 드립니다.

이 작은 결실을 얻기 위해 힘들 때마다 격려와 응원을 해 주셨던 실험실의 강인구, 이우섭, 김규성, 문중권 선배님 그리고 2년 동안 같이 고생해 온 동기 용후와 후배 윤봉석, 박준홍, 오세원에게 감사하며 항상 실험실의 웃음을 선사해준 이보영 양에게도 감사합니다.

학부 때부터 많은 관심과 조언을 해주신 해양대학교의 김정환 선배님, 열유체실험실의 김명관 선배님, 전산유체실험실의 장동식, 김태식, 김영환, 박일규 선배님 그리고 김태훈 군에게도 감사하며, 부식공학실험실의 윤병두, 김성훈 선배님과 영원한 동기인 구자점, 윤대용 군에게도 감사합니다.

타지에서 노심초사 막내아들을 바라보시며 항상 무조건적인 사랑으로 믿어주시고 응원해주신 부모님의 은혜에 감사드리고, 서울에서 자신의 공부도 바쁘면서 막내동생의 논문까지 신경을 써주신 큰누님께 감사와 함께 박사학위취득을 축하드립니다. 그리고 부산에서 철부지 막내동생의 뒷바라지에 고생한 작은누님과 타지에서 동생의 공부 때문에 직업전선에서 열심히 일하시는 형의 은혜는 잠시라도 잊은 적이 없습니다. 그리고 항상 학교생활에 바쁘다는 이유로 잘 챙겨주지 못한

여자친구 현주에게도 이렇게나마 감사를 드립니다.

이 작은 결실을 시작으로 해서, 앞으로도 지도교수님과 가족들의 은혜에 조금이나마 보답할 수 있도록 열심히 노력하겠습니다.

2001년 12월 26일

이진석 올림