



工學碩士學位論文

# 제트확산화염에 대한 FDS 연소모델의 예측성능 비교 연구



釜慶大學校大學院

安全工學科

朴恩淨

工學碩士學位論文

# 제트확산화염에 대한 FDS 연소모델의 예측성능 비교 연구



釜慶大學校大學院

安全工學科

朴 恩 淨

# 朴恩淨의 工學碩士 學位論文을 認准함



- 主 審 工學博士 李 義 周 (인)
- 委員 工學博士 愼 晟 佑 (인)
- 委員 工學博士 吳昌 俌 (인)

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구 동향	4
1.3 연구 목적	5
NATIONAL	
제 2 장 배경 이론	7
2.1 층류 제트 확산화염	7
2.2 전산 유체역학모델	9
2	
제 3 장 수치계산 방법	13
3.1 수치해법	13
3.2 계산조건	16
3.3 격자크기	18

목 차

제	4장	실험	및	고찰		•••••	•••••	 	•••••	•••••	24
	4.1	유한회	화학	반응	연소모델의	성능	검토	 			24
	4.2	복사!	모델	성능	- 검토			 	•••••		29

4.3 수정된 유한화학반응 연소모델	33
4.4 층류제트확산화염 구조	43

제 5	5	장	결론		48
-----	---	---	----	--	----

참고문헌	 50
잠고둔헌	 50



## A Comparison Study of the Prediction Performance of FDS Combustion Model for the Jet Diffusion Flame Structure

Eunjung Park

Department of Safety Engineering, Graduate School,

Pukyong National University

# Abstract

A prediction performance of Fire Dynamics Simulator (FDS) developed by NIST for the diffusion flame structure was validated with experimental results of a laminar slot jet diffusion flame. Two mixture fraction combustion models and two finite chemistry combustion models were used in the FDS for the simulation of the jet diffusion flame structure. In order to enhance the prediction performance of flame structure, DNS and radiation model was applied to the simulation. The reaction rates of the finite chemistry combustion models were appropriately adjusted to the diffusion flame. The mixture fraction combustion model predicted the diffusion flame structure reasonably. A 1-step finite chemistry combustion model cannot predict the flame structure well, but the simulation results of a 2-step model were in good agreement with those of experiment except  $CO_2$  concentration. It was identified that the 2-step model can be used in the investigation of flame suppression limit with further adjustment of reaction rates.



# 제1장서 론

### 1.1 연구의 배경

화재는 제어되지 않은 연소현상으로서 매우 복잡한 물리, 화학적 특성을 가지고 있다. 화재는 그 규모나 복잡성 등으로 인해 실험적으로 구현할 때 제한을 받는 경우가 많기 때문에 화재현상에 접근하기 위한 다양한 방안 중에서 수치해석이 매우 중요한 역할을 하고 있다.

최근에는 컴퓨터와 모델링 기법의 발달로 인해 화재에 대한 수치계산 연 구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 화재해석 코드인 Fire Dynamics Simulator(FDS)<sup>1,2)</sup>가 무상으로 배포되면서 이를 활용한 화재 수치계산 연 구가 활발히 진행되고 있다.

FDS란 3차원 입체 시뮬레이션으로서 화재로부터의 열, 연기 농도, 가시 거리, 화염전파, 화재성장, 복사/대류 열전달, 열분해, 연기의 이동경로 등 을 예측하며 특정시간에서의 화재 형상에 대한 검토가 가능하다. 또한 화 재에 의해 유도된 유체 흐름에 대한 전산 유체역학(CFD) 모델로 BFRL(Building and Fire Research Laboratory)에서 대학, 연구소, 기업 등 과 함께 개발하고 있으며 코드로 화재로부터의 매연 및 열전달이 강조된 열적으로 유도되는 흐름에 적절한 Navior-Stokes 방정식 형태로 수치적으 로 해석된다.

FDS 화재 해석 코드는 2000년에 FDS 1.0이 발표되었고 현재에도 개발 중에 있으며, 실제로 화재 예방을 위한 화재 사건의 해석뿐 아니라 기본적 인 화재역학과 연소공학을 연구하기 위한 도구로 개발이 되고 있다. 또한 실물이나 모형 시뮬레이션의 경우 막대한 비용과 노력이 필요하고 위험성 이 크기 때문에 최근에는 전산 시뮬레이션이 활발하게 사용되고 있는 실정 이다.

FDS의 주된 목적으로는 화재 피해 예측, 설계도면 검토 그리고 발생된 화재의 재현 등이 있다. FDS는 화재 발생시 피해상황을 쉽게 예측할 수 있기 때문에 건물의 화재피난 시나리오 검토가 가능하고 이에 따라 건축물 설계시 도면을 수정하여 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한 화재 확인 및 화재성장 파악 등에 대한 객관적이고 시각적인 자료를 제공할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 결과에 따른 정성적/정량적 데이터 를 쉽게 확보할 수 있으며 모델링이 완료되고 나면 여러 경우에 대한 시뮬 레이션이 가능하므로 건축물 특성에 따른 효과적인 방재계획 수립 및 평가 가 가능하다.

현재 국내·외에서도 FDS를 활용한 화재 수치계산 연구가 활발히 진행 되고 있다. 그러나 이들 연구 중에는 혼합분율 연소모델을 적용한 FDS의

- 2 -

신뢰도를 충분히 검증하지 않고 화재의 수치계산에 적용하는 사례가 발생 하고 있는 실정이다. 따라서 FDS를 활용한 화재 수치계산에서는 좀 더 신 뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해 FDS 예측성능을 구체적으로 검토해볼 필 요가 있다.



### 1.2 연구 동향

현재 대부분의 산업분야에서는 개별적인 시뮬레이션을 활발하게 사용하 고 있다. 건축, 전기, 원자력, 기계, 음향, 재난재해, 해양, 조선, 군사, 항공, 교통, 도시 계획 분야 등 다방면으로 각 분야에 필요한 시뮬레이션을 사용 중이다. 이 중 재난재해분야를 들여다보면 컴퓨터 프로그램을 이용하여 지 진, 홍수, 해일 피해 등을 예측하여 국가적인 예산을 설정하고 있으며, 이 러한 프로그램을 이용한 합리적이고 공학적인 계산결과를 바탕으로 이에 대한 대책을 세우고 있다. 또한 여러 분야에서 각각이 필요한 프로그램을 사용하듯이 화재분야 역시 다양한 종류의 시뮬레이션을 사용하고 있으나 시뮬레이션에 따라 프로그램 사용료가 대부분 고가이기 때문에 NIST에서 무료로 배포한 FDS의 사용률이 급격히 늘어나고 있다.

FDS가 배포되기 이전에는 화재시뮬레이션을 이용한 화재 원인을 분석할 때에 CFAST<sup>3-12)</sup>를 사용한 연구들이 많았으며 FDS가 개발된 후에는 병행 <sup>13)</sup>하여 많이 사용하였다. FDS<sup>14-19)</sup>가 보다 상대적으로 간편하고 실무현장 에서 간단하게 사용할 수 있다는 이점을 가지고 있기 때문에 국내에서도 학부 및 대학원, 산업계의 단기교육과정에서 이들 모델링 프로그램에 대한 비교위주 교육의 필요성이 증가되고 있는 추세이다.

### 1.3 연구 목적

FDS는 기본적으로 유동에 대해서는 대와동모사법(Large Eddv Simulation: LES)을 채택하고 있어 화재에서 발생하는 화염이나 연기의 비 정상적 전파과정에 대해서는 비교적 우수한 예측성능을 보이고 있다. 그러 나 LES를 작동하더라도 화염에 대한 예측성능은 전적으로 연소모델 성능 에 의존하게 된다. 따라서 화재형상 중에서 화염과 관련된 특성이나 소화 현상에 대해 신뢰할만한 LES 수치계산 결과를 얻기 위해서는 고급연소모 델을 적용할 필요가 있다. 하지만 고급연소모델은 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있기 때문에 현재의 컴퓨터 능력을 고려할 때 대규모의 화재현상을 계산하기에는 적합하지 않다. 이러한 점을 고려하여 FDS에서는 기본 연소 모델로 계산시간이 적게 소요되는 혼합분율 연소모델(Mixture fraction combustion model)을 적용하고 있다. 그러나 이 혼합분율 연소모델은 화재 전파나 연기 거동에 대해서는 비교적 잘 예측을 하지만, 화염소화나 특정 화재현상에 대해서는 예측성능이 매우 낮은 한계를 가지고 있다. 이것은 혼합분율 연소모델이 근원적으로 화염구조를 적절히 모사하는데 많은 한계 를 보이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 난류와 같이 불명확성을 포함하지 않으면서 기하 하적 형상이 단조롭고, 화재와 비슷한 연소특성을 갖는 층류 제트 확산화

- 5 -

염을 대상으로 FDS에 채택되어 있는 혼합분율 연소모델과 유한화학반응 연소모델의 예측의 정확성을 비교, 검토하고자 한다.



## 제 2 장 배경 이론

### 2.1 층류 제트 확산화염

가스라이터의 화염과 같이 가연성기체가 공기 중에 분출하여 형성된 화 염은 화염의 내측으로부터 가연성기체, 그 외측으로부터 공기 중의 산소가 화염의 반응대로 확산해와서 연소반응을 한다. 이와 같은 경우에 형성되는 화염을 확산화염이라 한다. 확산화염 중에는 평행류 확산화염, 대향류 확산 화염, 경계층 내에 형성되는 확산화염 등 그 종류가 다양하다. 이러한 것은 각각의 외관도 상이하고 성질의 차이점도 많다.

확산화염의 성질은 그 구조와 밀접한 관계가 있다. 확산화염에서 반응대 는 가연성기체와 산화제의 경계에 존재하고 반응대를 향해 가연성기체 및 산화제가 확산되어 온다. 가연성기체와 산화제가 반응하는 속도는 가연성 기체와 산화제가 반응대를 향해 확산하는 속도에 의존한다. 또 분자의 확 산속도는 그 농도구배에 비례한다. 따라서 화염부근의 가연성기체 혹은 산 화제의 농도분포에 의해 화염의 양상은 달라진다.

이 확산화염 중 층류 제트 화염에 관한 연구를 Burke와 Schumann<sup>20)</sup>은 층류 제트화염에 관하여 최초로 연구하였다. 부력으로 화염이 좁아지는 효 과와 동시에 이로 인하여 확산율이 증가하는 효과가 서로 상쇄되었다는 가 정 등을 한 계산은 원형 포트 화염 길이에 대한 해석은 실험 결과와 비교 적 잘 일치하였다. 다른 과학자들은 그들의 이론을 좀 더 개량하여 연구하 였으나 속도는 모든 공간에서 일정하다는 가정은 계속 사용되었다. 1977년 Roper<sup>21-23)</sup>는 속도가 일정하다는 가정은 사용하지 않았지만, Burke-Schumann의 중요한 가정들은 대부분 유지한 채 새로운 이론을 발 표하였으며 이에 의하여 원형 또는 비원형 화염 길이에 대한 적절한 예측 이 가능하게 되었다. 또한 사각형 슬롯과 곡선 슬롯 버너에 대한 해석도 수행하였다. 따라서 여기서는 공학적인 계산에서도 매우 유용하게 사용되 었다.

본 연구에서는 사각형 슬롯버너의 층류 제트 확산화염에 관한 연구를 수 치계산 하였으며, 층류 제트 확산화염은 많은 기초적 실험의 연구 대상으 로 사용되고 있다. 최근까지도 확산화염에서 단순한 유동장에서 화염의 거 동이나 soot의 농도측정 등을 관찰하는 연구<sup>24-26)</sup>와 수치적 해석<sup>27-34)</sup>을 하 기위해 많이 사용되고 있다.

### 2.2 전산 유체역학모델

FDS에서 사용하는 전산유체역학모델은 수계산으로 하는 편미분방정식 또는 수계산이 불가능한 수치해석을 컴퓨터를 이용하여 시간을 단축시켜주 며 발생 가능한 오차를 줄여주기 때문에 현재 많은 분야에서 이러한 모델 을 이용하여 특정 현상을 파악하고 있으며 여러 분양에서 이를 이용하여 연구를 하고 있다.

열/유체 이동에 관한 연구는 실물모형실험과 전산유체역학모델을 이용한 컴퓨터 계산방식으로 크게 구분되며 최근 들어서 보편적으로 사용하고 있 다.

FDS는화재시에발생하는열,연기유동을해석하는CFD(Computational Fluid Dynamics)모델이며CFD는 컴퓨터를이용하여열/유체를지배하는방정식을풀어열/유체현상을이해하기위한것으로열 및 유동시뮬레이션의기본이다.이것은화재로부터열과연기유동에중점을두어열로인한유동과저속에서이러한현상을파악하는데수치해석을하고있다.

FDS에서 사용하는 지배방정식은 연속방정식과 화학종 방정식, 에너지 방정식, 운동량 방정식, 이상기체의 상태방정식으로 각각 다음과 같다.

- 9 -

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \tag{2.1}$$

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho \overrightarrow{V} \bullet \nabla Y_i + \nabla \bullet (\rho Y_i \overrightarrow{V_i}) = \dot{w}_i$$
(2.2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\partial_{t}) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_{i}\partial_{t}) = -\frac{\partial q_{i}}{\partial x_{i}} + \dot{Q} + \frac{\partial \sigma_{ji}u_{i}}{\partial x_{j}} + \rho\sum_{K=1}^{N} Y_{k}f_{k.i}(u_{i} + V_{k.i}) \quad (2.3)$$

$$\rho\left\{\frac{\partial u_{i}}{\partial t} + u_{j}\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}}\right\} = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_{j}} + B_{j} = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_{j}} + \rho\sum_{K=1}^{N} Y_{k}(f_{k})_{i} \quad (2.4)$$

$$p = \rho RT \quad (2.5)$$

ms W

CFD 모델 중에는 LES, RANS, DNS 모델이 있으며 FDS에서 사용하는 모델은 LES와 DNS모델이다. 이 중 본 연구에 적합한 직접수치 모사인 DNS(Direct Numerical Simulation)는 유한화학반응 연소모델을 사용하기 위한 모델로 다단계 화학반응 모델에 적합한 모델이다.

이 모델은 혼합분율을 기초로 하는 연소모델, 다단계 반응을 의미하지 않는다. 다음의 형태로 유한비율 모델을 가정한다면

$$\nu_{C_x H_y} C_x H_y + \nu_{O_2} O_2 \to \nu_{CO_2} CO_2 + \nu_{H_2 O} H_2 O \tag{2.6}$$

화학반응 시간 스케일은 대류 또는 확산이동 시간 스케일보다 훨씬 단축 되는 것을 가정하므로 다른 모든 화학반응 과정이 시간단계의 초기 시점과 관련되는 상태에서 멈추어지는 것을 가정하는 반응의 걸과를 계산하는 데 에 매우 설득력을 가진다.

개별적인 격자 셀은 🥏

$$t = t^n \text{ and } Y^n_{C_x H_y, ijk} / \rho_{ijk} W_F \equiv X_F(t^n) \text{ and } Y^n_{O_2, ijk} / \rho_{ijk} W_{O_2} \equiv X_{O_2} t^n (2.7)$$

로서 표시하면 시간단계의 초기에서 다음에 오는 상미분 방정식의 관련 식은 second-order Runge-Kutta scheme로서 수치 해석적으로 해결을 하 고 있다.

$$\frac{dX_F}{dt} = -BX_F(t)^a X_{O_2}(t)^b e^{-E/RT_{ijk}}$$
(2.8)

$$\frac{dX_{O_2}}{dt} = -\frac{\nu_{O_2}}{\nu_F} \frac{dX_F}{dt}$$
(2.9)

온도  $T_{ijk}$ , 밀도  $ho_{ijk}$ 는 시간  $t^n$ 에서 그들의 수치로서 고정이 되고 상미분 방정식은 대략 20시간 단계에서  $t^n$ 에서  $t^{n+1}$ 까지 반복해서 적용이 되어 진 다. B는 선행지수, E는 활성화 에너지, 지수 a와 b는  $V_F$ 와  $V_{O_2}$ 의 수치가 전형적으로 쓰이는 입력변수에 관계되어지고  $X_F$ 와  $X_{O_2}$ 의 수치는 개별적인 sub-time step의 종결시점에서 변화되어진다.

다음은 시간 단계에 전체적으로 관여하는 평균 열방출 비율이다.

만일 다단계 화학반응이 명시되어졌다면 식 (2.8)과 (2.9)는 개별적으로 100시간 단계 동안 개별반응을 위해서 사용할 수 있다. 반응은 입력파일에 들어가는 순서대로 일어난다.

## 제 3 장 수치계산 방법

### 3.1 수치해법

본 연구에서 층류 제트 확산화염구조의 예측에는 FDS 5.0이 이용되었다. 검토된 FDS의 연소모델로는 FDS의 기본 연소모델인 혼합분율 연소모델 중 CO를 고려할 수 없는 1단계 혼합분율 연소모델(MF), CO까지 고려할 수 있는 2단계 혼합분율 연소모델(MF-CO)과 연료의 산화과정을 유한한 화학반응으로 모사할 수 있는 1단계(1-step) 및 2단계(2-step) 유한화학반 응(Finite chemistry) 연소모델 등 총 4종류이다. LES 기법은 기본적으로 난류화염에 적용하는 기법이므로 본 연구의 층 류 제트 확산화염에 대한 수치계산에는 직접수치모사(Direct Numerical Simulation; DNS) 기법을 적용하였고, FDS 명령어인 Gray Gas Model을 사용하여 복사모델을 고려하였다.

본 연구에서 사용된 연소모델 중 MF와 MF-CO에 대해서는 FDS 매뉴 얼에 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 생략한다. 또한 본 연구에 이용 된 1단계 및 2단계 유한화학반응 연소모델의 반응식과 반응률은 아래의 식 (3.1)~(3.6)과 같다. 기존의 1단계 유한화학반응 연소모델은 Bui-Pham.이 제시한 반응률<sup>35)</sup>을 사용하였으며, 2단계 유한화학반응 연소모델은 Dupont 이 제시한 반응률<sup>36)</sup>을 사용하였다. 이 기존 1단계 및 2단계 유한화학반응 연소모델은 예혼합화염에 최적화된 반응기구이므로 본 연구에서는 확산화 염의 구조를 좀 더 정확히 예측할 수 있도록 (3.7)~(3.9)와 같이 반응률을 적절히 수정하였다.



$$\mathrm{CO} + 0.5\mathrm{O}_2 \to \mathrm{CO}_2 \tag{3.4}$$

$$RR_{1} = 10^{13} \exp\left(\frac{-99,314}{RT}\right) [CH_{4}]^{1.0} [O_{2}]^{1.0}$$
(3.5)

$$RR_{2} = 10^{13} \exp\left(\frac{-99,314}{RT}\right) [CO]^{1.0} [O_{2}]^{1.0}$$
(3.6)

# <u>수정된 1단계 유한화학반응 연소모델</u> $RR_1 = 5.5^{13} \exp\left(\frac{-140,000}{RT}\right) [CH_4]^{1.0} [O_2]^{1.0}$ (3.7)

#### 수정된 2단계 유한화학반응 연소모델

$$RR_{1} = 4.2^{12} \exp\left(\frac{-99,314}{RT}\right) [CH_{4}]^{1.0} [O_{2}]^{1.0}$$
(3.8)

$$RR_{2} = 4.2^{12} \exp\left(\frac{-99,314}{RT}\right) [CO]^{1.0} [O_{2}]^{1.0}$$
(3.9)

여기서, Pre-exponential factor의 단위는 cm<sup>3</sup>/mol/s이고 지수함수 내부 에 들어있는 활성화에너지의 단위는 kJ/kmol, 농도를 표시하는 [ ]는 각 화학종의 몰농도로서 단위는 kmol/m<sup>3</sup>이다. 식 (3.3)은 CH4의 산화반응으로 서 완전한 연소반응이 아니기 때문에 통상 알려진 CH4의 연소열을 사용할 수 없으며, 그 반응을 통해서만 출입되는 반응열에 대한 정보가 필요하다. 따라서 식 (3.3)의 반응열은 반응물과 생성물의 엔탈피 균형을 고려하여 계 산<sup>37)</sup>하였으며 얻어진 값은 32,300kJ/kg이다. 나머지 반응들에 대해서는 알 려진 CH4과 CO의 연소열을 사용하였다.

### 3.2 계산조건

Fig. 1은 본 연구에서 FDS의 연소모델 검증을 위해 도입한 층류 슬롯제 트 확산화염에 대한 기하학적 형상과 버너 형상을 보여주고 있다. 이 버너 는 Norton 등의 실험<sup>38)</sup>에 이용된 것으로서, 본 연구에서 얻어진 FDS 결과 는 이 실험결과와 비교, 검토되었다. 실험과 계산에서 연료로는 CH4이 사 용되었으며 주위류인 공기가 연료류 양측에서 공급되는 형상을 가지고 있 다. FDS 계산에서는 기존 실험과 동일하게 연료 및 공기 분출구의 폭은 각각 8mm와 16mm로 하였으며, 연료 및 공기의 유속도 실험 조건과 동일 하게 각각 11cm/s 및 21.7cm/s으로 하였다. 초기 분출되는 연료와 공기의 온도도 실험과 동일한 328K으로 하였다. 혼합분율 연소모델의 경우에는 별 도의 착화과정이 필요없지만 유한화학반응 연소모델의 경우에는 화염을 형 성시키기 위해서 고온을 일시적으로 공급해주는 착화과정을 가져야 한다. 이를 위해서 0.3s까지 1787K을 주다가 그 후로는 328K으로 일정하게 하는 방식으로 확산화염을 형성하였다.

본 연구에서는 계산시간 절감을 위해 직교좌표계를 이용한 2차원 축대칭 계산을 수행하였다. 사용된 계산영역은 *x×z*=32mm×48mm로 하였다. x방 향 외측과 z방향 상부의 경계는 개방되도록 경계조건을 처리하였다.



### 3.3 격자크기

층류 제트 확산화염은 유동의 수직방향 즉, x축 방향으로 온도구배가 크 므로 그 방향으로의 격자크기에 따라 민감한 영향을 받게 된다. 혼합분율 연소모델의 경우 유한화학반응 연소모델보다 격자에 대한 민감도가 낮기 때문에 별도로 검토하지는 않았으며, 화염구조의 격자에 대한 민감성을 확 인하기 위해 Fig. 2.1과 Fig. 2.2는 2-step으로 계산한 결과를 도시하였다. Fig. 2.1은 격자 크기의 영향에 대한 열발생률과 온도 결과로 격자 크기의 영향은 주로 x축 방향에 대해 0.5mm부터 격자 크기를 변화시키면서 검토 를 했는데, 화염온도는 격자 크기에 그다지 큰 영향은 없지만 열발생률은 격자 크기에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 특히 x방향 격자의 크기 (Δx)가 0.5mm인 경우에는 열발생률을 정확히 예측하지 못하였으며 Δx가 0.25mm보다 작으면 큰 차이가 없음을 확인하였다. 또한 축방향 격자의 크 기(∆z)는 0.4mm보다 작으면 큰 영향이 없음을 확인하였다. Fig. 2.2는 2-step의 연료(CH4)농도, H2O 및 산화제 농도에 관한 격자 민감도의 결과 이다. Fig. 2.1과 마찬가지로 Δx가 0.5mm인 경우에는 H<sub>2</sub>O 농도와 산화제 농도 결과는 큰 차이가 없지만 연료농도에서는 약간 낮게 예측하였다. Fig. 2.3과 Fig. 2.4는 1-step에서의 격자 크기의 민감도에 대한 결과로, 2-step 결과와 마차가지로 계산한 격자 민감도에서 열발생률을 정확히 예측을 못

하는 유사한 경향을 보였다. 최종적으로 최적 격자 크기로 본 연구에서는 2-step에서는  $\Delta x$ =0.2mm,  $\Delta z$ =0.4mm로 하여 수치계산에 이용된 격자계는  $N_x x N_z$ =160x120으로 구성되었고, 1-step에서는  $\Delta x$ =0.25mm,  $\Delta z$ =0.4mm로 하여 수치계산에 이용된 격자계는  $N_x x N_z$ =128x120으로 구성되었다.





Fig. 2.1 Result values of laminar diffusion flame for the temperature and heat release rate by grid size using 2-step.



Fig. 2.2 Result values of laminar diffusion flame for  $CH_4$ ,  $O_2$  and  $H_2O$  mole fraction by grid size using 2-step.



Fig. 2.3 Result values of laminar diffusion flame for the temperature and heat release rate by grid size using 1-step.



Fig. 2.4 Result values of laminar diffusion flame for  $CH_4$ ,  $O_2$  and  $H_2O$  mole fraction by grid size using 1-step.

## 제 4 장 실험 및 고찰

### 4.1 유한화학반응 연소모델에 따른 결과

본 연구는 FDS를 이용하여 기존 연구의 반응률에 대한 결과 값을 알아 보기 위하여 비교하였으며, 또 추후 수정된 반응률에 대한 결과 값과 비교 하기 위하여 예측해보았다. 혼합분율 모델에 대한 CO 농도를 알아보기 위 해서 2가지로 구분 지었다. 먼저 CO를 고려한 연소모델로 명령어는 CO\_PRODUCTION=.TRUE.를 사용하였고 CO를 고려하지 않은 연소모델 의 명령어로는 CO\_PRODUCTION=.FALSE.를 사용하여 이 명령어에 따른 농도에 대한 결과 값을 알아보았다. 최종까지 잘 예측하는 1-step 및 2-step 유한화학에 대한 모델의 반응률인 Pre-exponential factor 명령어인 BOF와 활성화 에너지 명령어인 E에 각각 반응률을 입력하였다. 유한화학 반응은 실제 실험처럼 일시적으로 공급하는 착화과정을 위해 명령어인 Ramp를 사용하여 온도를 조절하였다. 본 연구를 위해 이용된 실제 실험에 대한 결과 값이 z축으로부터 7mm, 9mm, 11mm이 나와 있으므로, FDS도 마찬가지로 7mm, 9mm, 11mm에 따른 결과 값을 ascii코드를 사용하여 도 출해 내었다.

Fig. 3.1~Fig. 3.3은 혼합분율 연소모델(MF, MF-CO)과 반응률 수정을

하지 않은 유한화학반응 연소모델(1-step, 2-step)로 계산한 화염온도 및 유속분포의 결과를 보여주고 있다.

먼저 Fig. 3.1은 z=7mm 단면에서 결과 값으로 MF와 MF-CO로 계산한 화염온도와 유속은 실험값과 잘 일치하고 있지만 1-step으로 계산한 화염 온도는 실험값보다 높게 예측하고 있으며 특히 산화제 측에서 높게 예측하 고 있다. 또한 화염온도를 높게 예측하여 열팽창 효과를 크게 계산하고 있 기 때문에 화염 최고점보다 산화제측에서 유속분포를 실험값보다 높게 예 측을 하고 있음을 알 수 있다. 2-step의 원래 반응률로 계산을 수행했을 때에는 화염이 형성되지 않았으므로 그림에 도시할 수 없었다. 1-step은 화염온도를 높게 예측하고 있으며, 2-step은 화염을 형성시키지 못하였기 때문에 이 1-step 및 2-step 유한화학반응 연소모델에 대해서는 확산화염 예측에 적합하도록 수정할 필요가 있음을 확인하였다.

Fig. 3.2와 Fig. 3.3은 z=9mm, 11mm 단면에서의 결과 값으로 MF와 MF-CO로 계산한 화염 온도는 하류로 갈수록 실험값에서 화염의 연료측 으로 약간 이동하였으며 유속분포도는 실험값과 잘 일치되었다. 1-step으 로 계산한 화염 온도도 마찬가지로 산화제측에서 높게 예측되었고 유속분 포도 실험값보다 높게 예측되었음을 알 수 있다.



Fig. 3.1 Comparison of the simulation and experimental results for the temperature and axial velocity at z=7mm.



Fig. 3.2 Comparison of the simulation and experimental results for the temperature and axial velocity at z=9mm.



Fig. 3.3 Comparison of the simulation and experimental results for the temperature and axial velocity at z=11mm.

### 4.2 복사모델 성능 검토

최근 연구 결과에 따르면 화염 불안정성이나 공기의 유량, 매연의 생성 량, 버너의 종류에 따라 복사 열 손실이 증가하는 것에 대한 현상을 규명 하고 있다. 이 복사 열손실은 화염의 온도를 결정짓는데 중요한 역할을 하 므로 수치해석을 할 때 복사모델은 필수적으로 포함이 되어야 더욱더 신뢰 를 할 수 있는 결과 값을 얻을 수 있다. FDS의 신뢰성을 검증하기 위해서 는 반드시 연구해 보아야할 부분이기도 하다.

대부분의 실제규모의 화재 시나리오에서 soot는 화재와 고온의 연기로부 터 열복사를 조절하는 가장 중요한 연소 생성물로서 soot의 복사 스펙트럼 이 지속적으로 되므로 기체가 회색 매개물로서 행동하는 것을 가정하는 것 은 가능하다. 스펙트럼 의존성은 그리하나 하나의 흡수계수(N=1)내로 들어 오게 되고 흑체의 복사강도에 의하여 소스항 (source term)이 주어진다.

$$I_{b}(x) = \sigma T(x)^{4} / \pi$$

이것이 FDS의 초기조건이고 화재공학의 대부분 문제를 풀기 위해서는 적절하다. Soot의 발생량이 이산화탄소와 수분의 양과 소규모적으로 비교 되는 장소에서 시각적으로 얇은 두께의 화염에서 회색 가스의 가정은 방출 되는 열복사의 중요한 전체적인 예측에 사용될 수 있고 일련의 수치적인 실험에서 6개의 영역대(N=6)가 이러한 경우에 정확도를 충분히 높인다는 것을 발견하였다. 영역대의 한계는 가장 중요한 CO<sub>2</sub>와 수분의 복사 영역의 정확한 표현을 주는 선택되어진다. 만일 가연물의 흡수가 중요한 것으로서 알려져 있다면 분리된 영역대는 가연물을 보존할 수 있고 영역대의 총 개 수는 9까지 증가한다(N=9).

단순화시키기 위해서 가연물은 CH4로 가정한 것이고 영역대의 한계는 Table 1에서 보여주고 있다. 평균화된 영역대 또는 회색 기체 흡수계수 κ<sub>n</sub> 의 계산을 위해서 narrow-band 모델, 라디칼은 FDS에서 도구화되어져 있 고 시뮬레이션화 하는 초기시점에서 흡수계수는 혼합분율과 온도의 기능으 로 도표로 만들어져 있다. 시뮬레이션하는 동안에 국소적인 흡수계수는 도 표에서 찾을 수 있다.

제한된 공간 계산의 RTE에서 4로 불리는 소스항 (source term)은 온 도가 격자셀에서 전체적으로 명백하지 않기 때문에 화염면의 인접구역에서 특별한 처리가 요구되고 사용자가 확산 화염에서 기대하는 것보다 온도가 낮아진다. 열복사량은 온도의 4승에 의존하기 때문에 소스항은 화염면에 의해서 전달된 그들 격자 셀을 모델화하므로 계선된 온도에 보다 큰 신뢰 성을 주고 직접적으로 계산할 수 있다.

본 연구에서는 복사효과가 화염온도 분포에 미치는 영향을 검토하였다.

이를 위해서 복사모델을 포함하지 않은 계산을 하는 초기 복사모델인 Gray-gas 모델과 매연을 발생시키지 않고 가연물의 연소 시에 복사 계산 을 하는 경우 사용하는 Wide-band 모델을 이용한 3가지 조건으로 계산을 수행하여 화염온도 분포에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 4는 복사모델들을 이용한 화염구조 결과들을 도시하였다. 그림의 결 과는 2-step으로 계산한 결과로서 복사효과를 고려한 경우가 화염온도를 좀 더 낮게 예측하여 실험값과 유사함을 알 수 있다. 또한 복사모델 중에 서는 Gray-gas 모델이 가장 실험값을 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 그림 에 도시하지는 않았지만 1-step으로 계산한 결과도 2-step과 유사한 경향 을 보였다. 그러나 혼합분을 연소모델로 계산한 경우에는 두 가지 복사모 델을 포함한 계산결과와 복사를 고려하지 않은 계산결과들 사이에 차이가 거의 없음을 확인하였다. 이후 FDS 연소모델의 검토에는 모두 Gray-gas 복사모델을 포함하여 계산하였다.

	1		2	0	4	F	G	7	0	0
9 Band Model	1		2	3	4	3	0	1	0	9
	Soot		$CO_2$	$CH_4$		$CO_2$	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Soot	Soot
Major Specces					Soot					
Major opecces			H <sub>2</sub> O, Soot	Soot		Soot	Soot	CH4, Soot		
v(1/cm)	10000	3800	34	00 28	00 24	400	2174 14	129 116	0 100	00 50
$\lambda(\mu m)$	1.00	2.63	2.9	94 3.5	57 4	.17	4.70 7.	.00 8.65	2 10.	0 200
6 Dand Madal	1		2	3	}	4		5		6
0 Dand Model			$CO_2$	C	H <sub>4</sub>	$CO_2$				
Major Species	aior Species Soot							H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , Soot		Soot
			H <sub>2</sub> O, Soot	Se	oot	Soot				

Table 1 Limits of the spectral bands.



Fig. 4 Effects of radiation on the diffusion flame structure.

### 3.3 수정된 유한화학반응 연소모델

다음은 정확한 예측을 위해 수정한 반응률의 결과를 보여주고 있다. 면 저 기존 1-step 반응률을 이용하였을 때 산화제측이 높게 예측이 되어 반 응률을 수정하였다. 1-step은 예측 결과를 비교하여 보았을 때 Pre-exponential factor보다 활성화 에너지의 영향을 더 받았으며, 활성화 에너지를 높게 수정 할수록 화염의 부상화염(lift-off)현상으로 인해 온도가 연료측으로 이동하였다. 본 실험을 위해서 1-step 반응률은 기존 반응률보 다 조금 더 높게 수정하여 예측하였다. 2-step의 경우에는 기존 반응률을 이용한 연소모델의 결과는 화염이 형성되지 않았다. 이는 Pre-exponential factor나 활성화 에너지의 값이 큰 것으로 예상되어 적정한 변화를 주었다. 수정 결과 Pre-exponential factor가 높을수록 화염 온도가 산화제측으로 이동하였으며 활성화 에너저의 영향을 크게 받지 않았다. Pre-exponential factor가 낮을수록 실험값과 일치하였으므로 낮게 수정하여 예측하였다.

먼저 Fig. 6.1~Fig. 6.3은 z=7mm 단면에서의 MF와 MF-CO 및 반응률 이 수정된 1-step 및 2-step으로 계산한 결과를 보여주고 있다. 혼합분율 연소모델 결과는 Fig. 3.1~3.3에서의 결과와 동일하다.

먼저 Fig. 6.1에서 온도와 유속에 대해서 1-step은 기존의 반응률 계산결 과보다 온도를 약간 낮게 예측하였지만 여전히 산화제 측에서 온도가 높았 으며 유속에서도 차이를 보였다. 반면에 2-step은 전체 온도분포를 잘 예 측하는 것을 알 수 있었다. 1-step과 2-step은 이보다 반응률을 낮게 수정 할 경우에는 화염이 소화되기 때문에 추가적인 반응률 수정은 불가능하였 다.

Fig. 6.2에서의 산화제 및 H<sub>2</sub>O 농도에 대해 MF와 MF-CO로 계산한 결 과는 실험값을 잘 예측하고 있지만 연료(CH<sub>4</sub>) 농도는 높게 예측하고 있음 을 알 수 있다. 수정된 1-step은 실험값보다 전체 화염구조를 우측으로 예 측하는 것을 알 수 있다. 2-step은 연료와 산화제는 잘 예측하는데 반해 H<sub>2</sub>O는 다소 낮게 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6.3에서의 CO<sub>2</sub> 및 CO 농도에 대한 각 연소모델의 예측성능의 결과 값은 MF와 MF-CO는 약간의 차이는 있지만 CO<sub>2</sub> 농도에 대해서는 비교 적 잘 예측하고 있으며, MF-CO는 CO 농도에 대해서도 약간 낮게 예측하 고 있음을 알 수 있다. 이에 반해 1-step에는 화학종 CO가 포함되어 있지 않기 때문에 CO 농도를 예측할 수 없었으며 CO<sub>2</sub> 농도에 대해서는 매우 높게 예측하는 것을 알 수 있다. 2-step은 CO 농도에 대해서는 합리적으 로 예측하고 있지만 CO<sub>2</sub> 농도에 대해서는 1-step 보다 낮지만 여전히 실 험값보다 높게 예측하고 있음을 알 수 있다. 이것은 화염온도의 과대 예측 과도 연관된 것으로 사료된다. 그림에는 도시하지 않았지만 z=9mm 단면에

- 34 -

측하는 것으로 확인되었다.





Fig. 6.1 Comparison of the simulation and experimental results for temperature, *z*-directional velocity at *z*=7mm.



Fig. 6.2 Comparison of the simulation and experimental results for  $CH_4$ ,  $O_2$  and  $H_2O$  mole fraction at z=7mm.



Fig. 6.3 Comparison of the simulation and experimental results for  $CO_2$  and CO mole fraction at z=7mm.

Fig. 7.1~Fig. 7.3은 z=11mm 단면에서의 MF와 MF-CO, 수정된 1-step 및 2-step으로 계산한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 7.1은 화염온도, 유속분포에 대한 1-step과 2-step 모두 대략적으로 결과 값과 유사하게 보이고 있다. 다만 1-step이 하류로 흘러 갈수록 연료 측에서 측정 온도가 높게 예측이 되었다.

Fig. 7.2는 연료와 산화제 및 H<sub>2</sub>O 농도분포에 대한 각 연소모델의 결과 값으로, H<sub>2</sub>O 농도에 대해서는 실험값보다 약간 낮게 예측하고 있음을 알 수 있다. 다면 연료와 산화제의 농도분포의 결과 값은 하류로 갈수록 앞의 결과보다 잘 예측하고 있음을 확인하였다.

Fig. 7.3은 CO<sub>2</sub> 및 CO 농도분포에 대한 각 연소모델의 결과 값으로 MF-CO는 결과 값과 일치하여 잘 예측하였으며, MF는 약간의 차이는 있 지만 CO<sub>2</sub> 농도에 대해 비교적 잘 예측하였으며, MF-CO는 CO 농도에 대 해서도 여전히 약간 낮게 예측하고 있음을 알 수 있다. 1-step에는 CO<sub>2</sub> 농 도에 대해서 매우 높게 예측하고 있었으며, 2-step에서 CO 농도는 비슷하 게 잘 예측하고 있지만 CO<sub>2</sub> 농도 예측은 앞 결과와 같게 1-step보다 낮지 만 여전히 높게 예측하고 있는 것을 알 수 있다.



Fig. 7.1 Comparison of the simulation and experimental results for temperature, z-directional velocity at z=11mm.



Fig. 7.2 Comparison of the simulation and experimental results for  $CH_4$ ,  $O_2$  and  $H_2O$  mole fraction at z=11mm.



Fig. 7.3 Comparison of the simulation and experimental results for  $CO_2$  and CO mole fraction at z=11mm.

### 4.4 층류제트확산화염 구조

본 연구는 화염이 안정화가 되었을 때의 결과로 화염의 단면을 보여준 다. 또한 화염에서 상류의 열발생률이 높은 영역을 선단화염이라고 한다. 이 부분은 화염의 소화와 직접 관련이 되는 중요한 부분으로서 추후 연구 를 통해 보다 구체적으로 검토할 때도 필요한 결과이다. 따라서 FDS 계 산 결과 정리 및 분석 계산 결과를 도출하기 위한 가시화 프로그램인 Tecplot을 이용하여 결과를 산출하였다.

Fig. 8.1은 FDS로 계산한 층류 슬롯 제트 확산화염의 화염온도 분포와 열발생률 분포를 보여주고 있다. 화염온도는 대략 당량비가 1인 화염면 부 분에서 고온으로 예측되고 있으며 1-step은 화염의 폭이 가장 넓고 온도분 포가 높게 예측하고 있다. 모든 결과에서 열발생률은 연료노즐 근처의 상 류부분에서 가장 높지만 화염 온도는 하류에서 높게 예측되고 있다. 일반 적인 확산화염에서는 열발생률이 높은 영역은 화염신장률이 큰 곳으로서 화염온도는 낮게 되며 열발생률이 낮은 영역은 화염신장률이 작은 곳으로 서 화염온도는 높아지게 된다. 그림의 결과는 일반적인 확산화염의 구조와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8.2는 층류 슬롯 제트 확산화염의 연료(CH4) 및 산화제(O2) 분포를 도시하였다. 제트 확산화염에서는 고온 화염대를 경계로 내부는 연료가 분

- 43 -

포하고 외부는 산화제가 분포하게 된다. 각 그림의 좌측 연료분포에서 흰 색은 공기가 분포하는 영역이고 우측 산화제 분포에서 흰색은 연료가 분포 하는 영역에 해당된다. 연료와 산화제가 거의 존재하지 않는 영역이 화염 대로 볼 수 있기 때문에 연료농도가 대략 0.14 이하의 낮은 영역이 Fig.. 8.1의 고온 화염대와 유사한 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 제트 확 산화염의 연료와 산화제 분포를 잘 확인할 수 있었다.

Fig. 8.3는 층류 슬롯 제트 확산화염에서 발생하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 일 산화탄소(CO)의 농도분포를 도시하였다. 1-step은 CO가 포함되어 있지 않 아서 그림에 도시할 수는 없었다. CO<sub>2</sub>는 연료 산화과정에서 발생하기 때문 에 고온 화염대에서 농도가 높게 된다. 따라서 CO<sub>2</sub> 농도분포는 Fig.. 8.1의 온도분포와 유사한 형태를 보인다. (a)와 (c) 그림에서 Fig.. 8.1의 온도분포 와 다르게 보이는 것은 그림 농도값의 스케일 차이에 기인한 것이며 각 그 림의 최고농도를 기준으로 다시 그림을 그린다면 화염온도 분포와 유사한 결과를 확인할 수 있다. CO 농도분포의 경우에는 (a)에서 명확하게 확인할 수 있는 바와 같이 Fig.. 8.1의 열발생률이 높은 부분에서 농도가 가장 높 게 예측 되고 있다. 이는 열발생률이 높은 영역이 화염신장률이 높기 때문 이다.



diffusion flame, (a) CO-MF, (b) 1-step and (c) 2-step,



and (c) 2-step.



- 47 -

# 제5장결론

본 연구에서는 슬롯버너에서 형성된 CH4 확산화염의 구조에 대한 실험 결과(Norton et al.[38])와 4가지 연소모델을 적용한 FDS 수치계산 결과를 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

혼합분율 연소모델들은 연료분포를 제외하면 온도 및 화학종 농도를
 잘 예측함을 알 수 있다.

2) 1단계 및 2단계 유한화학반응 연소모델은 반응률이 예혼합 화염에 최 적화 되어 있기 때문에 확산화염 구조를 예측을 위해서는 반응률을 적절히 수정할 필요가 있음을 알았다.

- 3) 1단계 및 2단계 유한화학 반응 연소모델의 반응률이 높으면 lift-off와 blow-off되었고 반응률이 낮은 경우에는 화염이 형성되지 않았으며, 수정한 반응률이 가장 적절하였다.
- 4) 수정된 1단계 유한화학반응 연소모델은 연료, 산화제 농도는 잘 예측
   하지만, 나머지 온도 및 화학종의 예측성능은 많이 떨어짐을 확인 할

수 있었다.

5) 수정된 2단계 유한화학반응 연소모델은 CO<sub>2</sub>를 약간 과대 예측하지만
 전체적으로 화염구조를 잘 예측함을 알 수 있었다.



### 참고문헌

- K. McGrattan, B. Kelvin, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator(Version 5) User Guide", NIST, Special Publication 1019–5, 2008.
- K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell and R. Mcdermott", Fire Dynamics Simulator(Version 5) Technical Reference Guide," NIST, Special Publication 1018–5, 2007.
- R. S. Levine, H. E. Nelson, "Full scale simulation of a fatal fire and comparison of results with two multiroom models", NIST, NISTIR 90-4268, p. 105, 1990.
- 4. J. Floyd, "Comparison of CFAST and FDS for Fire Simulation with the HDR T51 and T52 Tests", NIST, NISTIR 6866, 2002.
- R. W. Bukowski, "Analysis of the Happyland social club fire with HAZARD I", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 4, pp. 117-130, 1992.
- R. W. Bukowski, "Modeling a backdraft: the fire at 62 Watts Street", NFPA Journal, Vol. 89, pp. 85–89, 1995.
- 7. J. B. Hoover, P. A. Tatem, "Application of CFAST to Shipboard Fire

Modeling.Part 3. Guidelines for Users", Naval Research Laboratory ML 6180-01-8550, 2001.

- W. Chow, "Prelimirary studies of a large hong kong", Journal of Applied Fire Science, Vol. 6, pp. 243–268, 1997.
- R. Bukowski, "Modeling a Backdraft Incident: The 62 Watts Street (New York) Fire", Fire Engineers Journal, Vol. 56, pp. 14–17, 1996.
- M. Altinakar, A. Weatherill, and P. Nasch, "Use of a Zone model in Predicting Fire and Smoke Propagation in Tunnels", BHR Group Vehicle Tunnels, pp. 623–639, 1997.
- R. D. Peacock, J. D. Averill, D. Madrzykowski, "Fire Safety of Passenger Trains; Phase III: Evaluation of Fire Hazard Analysis Using Full-Scale Passenger Rail Car Tests", NIST, 2004.
- D. Madrzykowski, R. L. Vettori. "Simulation of the Dynamics of the Fire at 3146 Cherry Road NE Washington DC, May 30, 1999", Technical Report NISTIR 6510, 2000.
- G. Rein, A. Bar-Ilan, "A comparison of three models for the simulation of accidental fires", Journal of Fire Protecting Engineering, Vol. 16, pp. 183–209, 2006
- 14. D. Madrzykowski, G. P. Forney, W. D. Walton, "Simulation of the

Dynamics of a Fire in a Two-story Duplex-Iowa, December 22, 1999", Technical Report NISTIR 6854, Gaithersburg, Maryland, 2002. URL: <u>http://http://fire.nist.gov/bfrlpubs/duplex/duplex.htm</u>

- 15. R. L. Vettori, D. Madrzykowski, W. D. Walton, "Simulation of the dynamics of the fire in a one-story restaurant", Technical Report NISTIR 6854, Gaithersburg, Maryland, 2002.
- 16. R. G. Rehm, W. M. Pitts, H. R. Baum, D. D. Evans, "Initial model for fires in the World Trade Center Towers", Technical Report NISTIR 6879, Gaithersburg, Maryland, 2002.
- C. Chang, D. Banks, N. Robert, "Computational Fluid Dynamics Simulation of the Progress of Fire Smoke in Large Space, Building Atria", Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 6, pp. 151–157, 2003.
- 18. A. M. Christensen, D. J. Icove, "The application of NIST's Fire Dynamics Simulator to the investigation of carbon monoxide exposure in the deaths of three Pittsburgh fire fighters.", Journal of Forensic Sciences, Vol. 49, Paper ID JFS2003090 – 91, 2004.
- 19. N. Bryner, D. Madrzykowski, "RECONSTRUCTING THE STATION NIGHTCLUBFIRE - COMPUTER MODELING OF THE

FIREGROWTH AND SPREAD", International Interflam Conference, 11th Proceeding, Vol 2, pp. 1181–1192, 2007.

- S. P. Burke, T. E. W. Schumann, "Diffusion Flames", Industrial & Engineering Chemistry, Vol. 20, pp. 998 - 1004, 1928.
- F. G. Roper, "The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part I. Theoretical model", Combustion and Flame, Vol. 29, pp. 219–226, 1977.
- F. G. Roper, C. Smith, A. C. Cunningham, "The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part II. Experimental verification", Combustion and Flame, Vol. 29, pp 227–234, 1977.
- 23. F. G. Roper, "Laminar diffusion flame sizes for curved slot burners giving fan-shaped flames", Combustion and Flame, Vol. 31, pp. 251–258, 1978.
- 24. R. J. Santoro, H. G. Semerjian, "Soot formation in diffusion flames: Flow rate, fuel species and temperature effects", Twentieth Symposium (International) on Combustion, Vol. 20, pp. 997–1006, 1985.
- 25. R .J. Santoro, H. G. Semerjian, R. A. Dobbins, "Soot particle measurements in diffusion flames", Combustion and Flame, Vol. 51,

pp. 203-218, 1983.

- J. A. Fay, "The distributions of concentration and temperature in a laminar jet diffusion flame", Journal of Aeronautial Sciences, Vol. 21, pp. 681–689, 1954.
- R. E. Mitchell, A. F. Sarofim , L. A. Clomburg, "Experimental and numerical investigation of confined laminar diffusion flames", Combustion and Flame, Vol. 37, pp. 227–244, 1980.
- T. S. Norton, K. C. Smyth, J. H. Miller, "Comparison of experimental and computed species concentration and temperature profiles in laminar, two-dimensional methane/air diffusion flames", Combustion Science and Technology, Vol. 90, pp. 1–34, 1993.
- B. A. V. Bennett, C. S. McEnally, L. D. Pfefferle, "Computational and experimental study of axisymmetric coflow partially premixed methane/air flames", Combustion and Flame, Vol. 123, pp. 522–546, 2000.
- J. E. Floyda, K. B. McGrattanb, "Extending the mixture fraction concept to address under-ventilated fires", Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 291–300, 2009.
- 31. J. Vaari, J. Floyd, R. Mcdermott, "CFD simulations on extinction of

co-flow diffusion flames", Fire Safety Science, Vol. 44, pp. 291-300. 2009.

- 32. D. Yang, L. H. Hu, Y. Q. Jiang, R. Huo, S. Zhu, X. Y. Zhao, "Comparison of FDS predictions by different combustion models with measures data for enclosures fires", Fire Safety Journal, Vol. 45, pp. 298–313, 2010.
- 33. C. E. Lee, C. B. Oh, J. H. Kim, "Numerical and experimental investigations of the NOx emission characteritstics of CH<sub>4</sub>-air coflow jet flames.", Fuel, Vol. 83, pp. 2323–2334, 2004.
- 34. 오창보, 이의주, "부력 영향을 받는 제트 확산화염의 화염편 구조에
   관한 수치계산 연구", 한국안전학회, Vol. 24, pp. 14-20, 2009.
- M. Bui-Pham, "Incorporating Reduced Kinetic Mechanisms in Numerical Simulations of Non-premixed Flames", University of Colorado, 2002.
- V. DuPont, M. Pourkashanism and A. Williams, "Global Kinetic Mechanism Rate Expressions for Methane", J. Inst. Energy, Vol. 66, pp. 20–28, 1993.
- S. R. Turns, "An Introduction to Combustion- Second Edition", McGRAW-HILL, 2006.

38. T. Norton, K. Smyth, J. Miller and M., Smooke, "Comparison of Experimental and Computed Species Concentration and Temperature Profiles in Laminar, Two-Dimensional Methane/Air Diffusion Flames", Combust. Sci. Tech., Vol. 90, pp. 1–34, 1993.



### 감사의 글

제연 시스템 수업을 이해하기 쉽게 가르쳐 주시어 지금의 대학원까지 오게 해주신 오창보 교수님 진심으로 감사드립니다. 실험실 생활에 서툴러 서 교수님의 기대에 부응하지 못했던 부족한 저에게 늘 따끔한 충고와 따 뜻한 말을 아끼지 않으셨던 교수님께 더 이상 실망시켜드리지 않는 제자가 되겠습니다. 아울러 본 논문을 세심하게 검토해주시고 심사해주신 이의주 교수님과 신성우 교수님께 감사드립니다. 그리고 많은 가르침을 주신 목연 수 교수님, 이내우 교수님, 장성록 교수님, 이동훈 교수님, 권오헌 교수님, 최재욱 교수님께 감사드립니다.

일본에서 꿈을 이루어 가고 있는 정훈이 오빠, 야식 먹으며 우정을 쌓 은 사랑스러운 다현이, 지금은 멋진 소방공무원이 된 곱등이 인호, 실험실 에서 6개월 동안 같이 생활한 룸메이트 은비, 학부 때 실험실에 들어와서 이제는 어엿한 대학원생이 된 금미, 신들린 춤 솜씨의 분위기 메이커 호현, 긍정적이며 밝고 큰 꿈을 계획하고 있는 멋진 뿌잉뿌잉 지웅이, 이름을 바 꿔 불러서 미안한 착한 철진이, 우리 실험실 막내이자 꼼꼼하고 귀여운 유 정이 그리고 대학원 생활할 때 함께 했던 석사 동기인 광유오빠, 세정이언 니, 민우오빠 모두 챙겨주고 신경써줘서 고맙습니다.

- 57 -

우리 실험실 사람들이랑 같이 먹으라고 피자 시켜줬던 멋진 계모임 멤버 빙구오빠, 태한이오빠, 미혜 그리고 고 3때 추억을 함께 공유하는 간파괴 멤버 미현, 은경, 은진, 현우와 초등학교 선생님인 당근 다은, 발음 안 되는 송이, 말 그대로 엄친딸인 소혜, 결혼해서 품절녀가 된 아현이, 따뜻하게 챙겨주던 국딩 회창이오빠, 어린이 현권이오빠, 소셜 커머스에 푹 빠진 동 수, 누구보다 나를 이뻐해주는 준창이오빠, 말만 나쁜남자 영익이오빠, 영 원한 동안 지은이언니 모두들 응원하고 지켜봐줘서 고맙습니다.

학회에서 발표할 때나 논문이 완성될 때 같이 기뻐하고 좋아해줬던 내 20년 지기 친구 미혜야 옆에서 응원해줘서 정말 고맙다. 마지막으로 항상 미인이라고 말씀하시는 어머니와 항상 말없이 딸 생각 하고 응원해주시는 아버지 정말 죄송하고 진심으로 감사드립니다. 부모님 진심으로 사랑합니다.

2012년 1월

박 은 정