



工學碩士學位論文

# 구획실 내부 백드래프트 동역학에





釜慶大學校大學院

安全工學科

朴智雄

工學碩士學位論文

# 구획실 내부 백드래프트 동역학에 대한 전산해석 연구



釜慶大學校大學院

安全工學科

朴智雄

# 차智雄의 工學碩士 學位論文을 認准함



- 主 審 工學博士 李 彰 峻 (인)
- 委員 工學博士 李 義 周 (인)
- 委員 工學博士 吳昌 俌 (인)

요약문

백드래프트는 밀폐된 건물내부의 실내공간에서 발생하는 화재구를 동반 하는 폭발성 화재현상 중 하나로서, 거주자와 화재진압을 하는 소방관들의 생명을 위험해 왔다. 이러한 백드래프트는 반복적인 실험이 어렵고 잠재적 인 위험성 때문에 많은 연구가 진행되지 못했지만. 전산해석적인 접근을 통해 백드래프트 현상을 이해하는 데 많은 기여를 할 수 있다. 계산은 미 국국립표준기술연구소(NIST)에서 개발된 화재 해석 시뮬레이션 프로그램 (FDS)을 이용하였으며 메시지 전달 인터페이스(MPI) 병렬 계산 기법을 사용하여 계산시간에 필요한 시간을 줄였다. 복잡한 연소특성을 보이는 백 드래프트의 현상을 해상하기 위하여 FDS의 코드를 수정한 기존의 연구와 는 달리 직접수치모사(DNS)기법과 유한 화학반응율 연소모델을 적용하여 소스코드의 수정 없이 계산을 수행하는 Model-free 별도의 모델과 simulation(MFS)으로 계산을 수행하였다. 1단계(1-STEP) 및 3단계 총괄 화학반응기구(3-STEP)을 적용하여 계산을 수행하였으며, FDS에 기본으 로 내장되어 있는 간단한 복사모델(GRAY)과 복사모델이 적용되지 않은 단열모델(ADIA)을 고려하여 각각의 영향을 검토하였다. 계산에 사용된 구 획실의 크기 및 내부 경계조건은 기존의 실험연구를 참고하여 설정하였다. 백드래프트의 동역학적 거동 및 개시조건에 대한 전산해석 연구를 통해 얻 어진 결과들은 다음과 같다.

i

개구부의 개방과 함께 구획실 내부 고온의 연료는 개구부 상부측을 통해 외부로 흐르고, 외부의 상온의 공기는 하부 측을 통해 내부로 유입되는 중 력흐름의 흐름을 재현하였다. 점화된 화염의 열팽창에 기인하여 개구부를 통해 외부로 분출되는 연료공기의 혼합기와, 폭발하듯 분출되는 화재구의 거동을 모사하였으며, 이 결과들은 기존 연구자들의 실험과 정성적으로 유 사함을 확인하였다. 또한, 구획실 내부의 벽면에서 측정된 압력의 변화를 검토해본 결과, 기존의 실험과 동일하게 두 개의 피크를 가지는 거동을 보 임을 확인하였다.

ADIA 는 GRAY 보다 백드래프트의 전개는 더 빠르게 예측하였으며, 천 장에서의 온도는 과대 예측하였다. 그리고 ADIA 에서는 구획실 하부 측에 서의 복사에 의한 국소점화 현상이 발생하지 않음을 알았다. 또한, 1-STEP 은 3-STEP 보다 점화 이 후 화염의 전과속도를 빠르게 예측하 였으며, 화재구의 크기도 더 크게 예측하였다. 수치계산을 통해 백드래프트 의 발생을 지시하는 임계 연료농도를 기존의 실험연구와 함께 비교해본 결 과, 1-STEP 은 최대압력을 과대 예측하지만, 실험적 경향을 정성적으로 잘 추종하였으며, 3-STEP 의 경우 정석적 그리고 정량적으로도 합리적인 수준으로 실험의 결과를 잘 추종함을 알았다.

ii

#### Computational study of Backdraft dynamics in the compartment

Ji-Woong Park

Department of Safety Engineering, Graduate School,

Pukyong National University

#### Abstract

The backdraft is one of the hazardous fire phenomena occurring in a compartment, which has threatened the life of fire fighters and residents. Due to the difficulties of the repeated experiments and its potential hazard, computational approaches can be an important role to understand the initial condition and dynamics of backdraft. Fire dynamics simulator (FDS) developed by NIST was used with message passing interface parallel computation. Model-free simulation, which uses direct numerical simulation and a finite chemistry model, was considered to remove any uncertainty caused by turbulence modeling. Two finite chemistry combustion models, 1-step reaction mechanism (1-STEP) and 3-step global reaction (3-STEP), and two radiation models, a gray gas radiation model (GRAY) and adiabatic model (ADIA), were considered to figure out each effect on the dynamics of backdraft

simulation. The reduced-scale compartment was considered with horizontal opening window.

A gravity currents that fresh air entered into the compartment and hot fuel flowed out of the compartment were found after opening window opened. The explosive fuel vapor cloud and fire ball behaviors were reasonably simulated compared to previous experimental studies. In addition, two peak pressures near the window opening, which is very important factor during the process of the backdraft development, were validated compared qualitatively and quantitatively to the previous experimental studies.

ADIA predicted shorter deflagration travelling time and higher  $(t_{trav})$ temperature near ceiling in the compartment than GRAY. In addition, ADIA did not predict local ignition in the lower side of compartment. Also, 1-STEP predicted shorter t<sub>trav</sub> and larger flame ball size than 3-STEP. Computational results of critical fuel mass fraction, which indicate the occurrence of the backdraft. were found and 1-STEP quantitatively over-predicted but qualitatively predicted well. Quantitative and qualitative correlation between simulation and experimental results was found when using 3-STEP.



요약문		i
목차		V
기호설명		Viii
표 목록		ix
그림목록		Х
제 1 장 서 론	TIONAL	1
1.1 연구 배경		1
1.1.1 백드래프	프트의 정의	1
1.1.2 발생 메	커니즘	3
1.2 기존의 연구	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	7
1.2.1 중력 흐	름	9

1.2.2 동역학적 거동 및 개시조건	12
1.2.3 전산해석연구	13
1.3 연구목적	15

제 2 장 수치해석 방법	17
2.1 지배방정식	17
2.2 수치해석모델	19
2.2.1 연소모델	19
2.2.2 복사모델	22
2.3 계산방법 및 계산조건	24
2.4 백드래프트 발생 시나리오	30

제 3 장 백드래프트의 발생 및 경계조건 검토	32
3.1 연소모델이 백드래프트의 재현에 미치는 영향	32
3.1.1 원통형 튜브에서의 연소모델 검토	33
3.1.2 축소된 구획실을 대상으로 한 연소모델 검토	35
3.2 개구부 형상에 따른 정성적 경향 비교	38
3.3 경계조건의 결정	43
3.3.1 계산시간 절감을 위한 대칭면의 설정	43
3.3.2 격자크기의 결정	45
3.3.3 점화시간의 결정	49
Z Z	
제 4 장 중력흐름 및 동역학적 거동	56
4.1 중력흐름	56
4.1.1 중력흐름 및 혼합과정	56
4.1.2 구획실 내부 연료 질량분율 변화	60
4.2 동역학적 거동	62
4.2.1 백드래프트의 전개 과정	62
4.2.2 압력의 변화	67
4.2.3 화학반응기구 영향	68
4.2.4 동역학적 거동에 미치는 복사효과	73
4.3 백드래프트의 국소화염구조 비교	78
제 5 장 백드래프트의 개시조건	82
5.1 화학반응기구 영향	82
5.2 백드래프트 발생의 임계조건	86

제	6 장 결론	89
	6.1 백드래프트의 발생 및 재현성 검토	89
	6.2 중력흐름 및 동역학적 거동	89
	6.3 백드래프트 발생의 개시조건	90
	6.4 안전 및 소방관련 분야 기초 교육자료	92
	6.5 향후 연구방향	93

참고문헌	SATIONAL	94
감사의글	A CH OF IN	97

기 호 설 명

$Y_i$	: 화학종 i의 질량분율.
$T_U$	: 구획실 상부 측 온도 [K].
$T_L$	: 구획실 하부 측 온도 [K].
$H_L$	: 열적 경계층 높이(Thermal height) [m].
Η	: 계산영역의 높이 [m].
$t_{ig}$	: 점화개시 시간(Ignition time) [s].
$t_{grav}$	: 중력흐름 시간(Gravity current time) [s].
$t_{trav}$	: 백드래프트 전파시간(Travelling time) [s].
약어	S B
FDS	Fire Dynamics Simulator
NIST	: National Institute of Standards and Technology
MFS	: Model-free Simulation
DNS	: Direct Numerical Simulation
LES	: Large Eddy Simulation
MF	: Mixture Fraction combustion model
FC	: Finite Chemistry combustion model
GM	: Global reaction Model
1-STEP	: 1-step global reaction model
3-STEP	: 3-step global reaction model
TC	: Thermo Couple
GRAY	: GRAY gas radiation model
ADIA	: ADIAbatic model

viii

# 표설명

- Table 3.1Mixture composition and temperature in the compartment for<br/>backdraft simulation measured by Weng and Fan(2003)
- Table 3.2 Mixture composition and temperature in the compartment for preliminary backdraft simulation: Species mass fraction measured by Weng and Fan(2003), and flame temperature measured by Chen et al.(2011)
- Table 4.1
   Gravity current time, density, and density difference with the different fuel mass fraction in the compartment
- Table 4.2
   Traveling time and size of fire ball with different chemical reaction models



### 그림설명

- Fig. 1.1 Photos of the backdraft experiment (Gojkovic, 2000).
- Fig. 1.2 Development process of a backdraft (Gottuk et al., 1999).
- **Fig. 2.1** Sketch of the reduced-scale compartment with (a) full-geometry and (b) locations of thermocouple and pressure sensor.
- **Fig. 2.2** Sketch of the reduced-scale compartment with symmetric boundary condition.
- Fig. 3.1 Schematic diagram of cylindrical tube.
- Fig. 3.2 Temporal evolution of temperature distribution in the tube using different combustion models; (a) Mixture fraction (MF) and (b) Finite 1-step combustion model (FC).
- Fig. 3.3 Temporal evolution of temperature and species mass fraction with different combustion models, Mixture fraction (MF) and Finite Chemistry (FC); (a) MF<sub>temp</sub>. (b) FC<sub>temp</sub>, (c) FC<sub>YCH4</sub>, and (d) FC<sub>YO2</sub>.
- Fig. 3.4 Different opening geometries considered for preliminary backdraft simulation for qualitative comparison.
- Fig. 3.5 Temporal evolution of temperature with different opening geometries; (a) Door (b) Vertical Window, (c) Horizontal Window, and (d) Center Window.
- Fig. 3.6 Temporal evolution of velocity profile with different opening geometries; (a) Door (b) Vertical Window, (c) Horizontal Window, and (d) Center Window.
- **Fig. 3.7** Temporal evolution of temperature and pressure rise measured at the thermocouple (TC) and pressure rise sensor.
- Fig. 3.8 Numerical two-dimensional relative concentration field for different grid sizes. The white rectangle in the top right hand corner represents a solid obstruction. Black represents saltwater and white represents freshwater (McBryde, 2008).

- Fig. 3.9 Temporal evolution of pressure rise at the pressure rise sensor using 1-STEP for  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 3.10 Compartment pressure (solid line) and total mass inflow(dotted line) histories for the 70 kW fire source backdraft. Arrow 1 indicates ignition of backdraft and arrow 2 indicates flame out the opening (Fleischmann, 1994).
- Fig. 3.11 Temporal evolution of fuel mass fraction for  $Y_f = 0.1224$  in the compartment with horizontal window.
- Fig. 3.12 Effects of the ignition times on temporal evolution of pressure rise with differently imposed ignition source in the compartment with horizontal window using (a) 1-STEP and (b) 3-STEP for  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 3.13 Temporal evolution of temperature at selected ignition time( $t_{ig}$ ) after breaking (t = 0 s) opening window (a)  $t_{ig}$  = 3 s and (b)  $t_{ig}$  = 5 s using 1-STEP.
- Fig. 4.1 Temporal evolution of fuel mass fraction using 3-STEP for  $Y_f$ = 0.1224,
- Fig. 4.2 Photograph of the gravity current approximately 3L/into the compartment for a center horizontal slot opening (Fleischmann and McGrattan, 1999).
- Fig. 4.3 Temporal evolution of fuel mass fraction using 1-STEP for (a)  $Y_f = 0.0573$ , (b)  $Y_f = 0.1224$ , and (c)  $Y_f = 0.3000$ .
- Fig. 4.4 Temporal evolution of fuel mass fraction using 1-STEP and GRAY for  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 4.5 Temporal evolution of temperature using 1-STEP and GRAY for  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 4.6 Temporal evolution of pressure rise with the distribution of temperature and mass fraction using 1-STEP with GRAY for  $Y_f$  = 0.1224.

- Fig. 4.7 Temporal evolution of fuel mass fraction using 3-STEP and GRAY for  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 4.8 Temporal evolution of temperature using 3-STEP and GRAY for  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 4.9 Temporal evolution of temperature using 3-STEP and ADIA for  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 4.10 Temporal evolution of fuel mass fraction using 3-STEP and ADIA for  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 4.11 Temporal evolution of temperature using 3-STEP with GRAY and ADIA for  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 4.12 Distribution of fuel mass fraction and temperature using 1-STEP at (a) t = 3.9 s and (b) t = 4.12 s.
- Fig. 4.13 Local flame structure of inner compartment and outer compartment during the backdraft simulation at (a) t = 3.9 s and (b) t = 4.12 s.
- Fig. 5.1 Temporal evolution of temperature using 1-STEP and GRAY for (a)  $Y_f = 0.0573$ , (b)  $Y_f = 0.0729$ , and (c)  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 5.2 Temporal evolution of temperature using 3-STEP and GRAY for (a)  $Y_f = 0.0672$ , (b)  $Y_f = 0.0729$ , and (c)  $Y_f = 0.1224$ .
- Fig. 5.3 Peak pressure for occurrence conditions of backdraft with the different fuel mass fractions in the compartment using 1-STEP and 3-STEP with experimental results conducted by Weng and Fan(2003).

# 제1장서 론

#### 1.1 연구 배경

1.1.1 백드래프트의 정의

백드래프트(Backdraft)는 실내공간에 화재가 발생 하여 산소가 모두 소 진 된 이후에 연소되지 못한 연료가 가득 차있는 상황에서, 출입구 개방 등에 의해 갑자기 산소가 내부로 유입되어 폭발하듯이 불이 번지는 현상이 다. Fig. 1.1 과 같이 폭발성 화재구(Fire Ball)를 동반하는 특이한 화재현 상으로서, 건물 내 거주자나 화재진압을 하는 소방관들의 생명을 위협하기 때문에 미국에서는 "소방관 살인현상"이라고도 불린다. 이러한 백드래프트 에 의한 사고는 오래전부터 발생되어 왔는데, Croft (1980)등 연구에 따르 면 1970년 미국, 영국, 그리고 미국 내에서 발생한 127건의 폭발 사고 중 109건이 백드래프트와 연관되어 발생했다고 한다. 또한, 1994년 뉴욕, 맨하 탄에서 발생한 화재도 백드래프트에 기인하여 3명의 소방관의 목숨을 앗아 갔으며(Bukowski, 1995), 2009년에는 중국 Linyl의 화학공장에서는 무려 18명의 생명을 앗아갔다(Fire Department of the Ministry of Public Security, 2010). 국내에서 발생한 대표적인 화재사고로는 1986년 5월 경찰 관 7명이 숨지고 10명이 중화상을 입은 부산 동의대 사태와 1996년 9월 11

1



Fig. 1.1 Photos of the backdraft experiment (Gojkovic, 2000).

명의 목숨을 앗아간 신촌 북카페 화재가 있다. 또한, 2009년 발생한 부산 사격장 화재사건의 원인도 초기에는 분진폭발이나 백드래프트의 의한 폭발 이라는 의견이 나올 정도로 백드래프트에 의한 사고는 큰 인명피해를 동반 할 수 있는 위험한 현상이다. 이러한 백드래프트는 주로 연구자들과 소방 관들 사이에서만 구전되어 오다가 1970년대에 들어서 비로소 문헌, 통계적 정리와 더불어 공학적인 규명이 시도되었다. 그리고 1991년 미국에서 개봉 된 "Backdraft(분노의 역류)"라는 영화의 출시 이후에 일반 대중들에게도 처음으로 알려지게 되었다.

현재까지 전 세계적으로 생성조건, 생성 메카니즘, 성상 그리고 전개과정 등에 대한 정량적이고 공학적인 기초자료가 마련되지 못한 상태이며 특히, 국내에서는 이러한 백드래프트 현상에 대한 연구가 거의 전무한 실정이다.

1.1.2 백드래프트의 생성 메커니즘

현재까지 수행된 연구들을 바탕으로(Fleischmann, 1994; Gottuk et al., 1999) 백드래프트의 생성메커니즘은 Fig. 1.2 에 도식화된 단계로 구분될 수 있으며, (1)~(6)의 과정으로 설명되어 질 수 있다.

(1) 건물 내부의 밀폐된 공간에서 화재가 발생하게 되면 연소가 될 수 있는 연료량에 비해 산소의 양이 부족한 환기부족(Under-ventilated) 상태 로 화재가 진행되게 된다. 이후, 화재가 진행되면서 산소가 소모되지만 추 가적인 공급이 없기 때문에 불꽃 없이 연기만 내면서 타들어가는 훈소 과



Fig. 1.2 Development process of a backdraft (Gottuk et al., 1999).

정(Smoldering)을 유지하며 구획실 내부는 고온의 연료성분으로 가득 차게 된다.

(2) 이 때, 실내 거주자나 소방 활동을 하는 소방관이 화재진압을 위해 개구부를 개방하거나, 혹은 열응력에 의해 창문이 파손되어 밀폐공간이 외 부에 개방되면 온도가 높은 내부와 비교적 온도가 낮은 외부의 온도차(밀 도차)에 기인하여 외부의 공기는 개구부 하층부를 통해 구획실 내부로 유 입이 되고, 내부의 연료성분은 부력의 영향을 받아 개구부 상층부를 통해 외부로 유출된다.

(3) 구획실 내부로 유입된 상온의 공기는 개구부 반대방향 벽면으로 흐르며 고온의 연료와의 접촉면에서 혼합(Mixing)과정이 이루어진다. 그리고 점차 가연범위(Flammable Range)에 도달하게 된다.

(4) 이 후, 불씨 혹은 전기누전 등 임의의 점화원과 가연혼합기가 접촉이 되면 점화(Ignition)가 개시된다.

(5) 점화 된 화염으로 인한 열팽창(Heat Expansion)에 기인하여 구획실
내부의 연료-과농 성분은 구획실 외부 밖으로 폭발하듯이 분출되며, 동시
에 구획실 내부의 연료 및 공기의 혼합은 촉진되게 된다.

(6) 점화된 화염은 개구부 방향으로 전파(Propagation)하며 급속한 연소 파(Deflagration)를 형성하며, 개구부를 통과한 화염은 화재구와 함께 폭발 파를 형성하며 전개 되는데, 이러한 과정을 통틀어서 백드래프트라고 부른

5

다.

현재까지, 백드래프트에 대한 공학적 접근이 체계적으로 진행되어지지 못한 주된 이유로는 백드래프트 현상을 실험적으로 접근할 경우 구현하는 것이 매우 위험하며, 생성조건에 대한 명확한 데이터가 없고, 또한 다른 화 재 현상들과 독립적으로 구별하는 것 또한 쉽지 않기 때문이다. 전산해석 적인 접근에 있어서도 마찬가지로 규모가 큰 화재에 대해 정밀한 수치계산 을 수행하는 어려움과 복잡한 화재현상에 대한 모델링의 어려움 등으로 인 해 많은 연구가 서도되어지지 못하였다.



#### 1.2 기존의 연구

이러한 백드래프트에 대한 연구는 U.C. Berkely의 Fleischmann(1994) 에 의해 처음으로 재현실험이 수행되어 졌다. 이 후, 여러 연구그룹(Gottuk, 1999; Weng, 2003; Yang, 2005; Horvat, 2007; Ferraris, 2008) 등의 연구그 룹에 의해 생성 조건과, 생성 메커니즘에 대한 이해의 폭을 넓히기 위한 실험 및 전산해석(Computational Fluids Dynamics: CFD) 연구가 시도되었 다.

1.2.1 백드래프트의 재현실험

Fleischmann(1992, 1993, 1994)등은 최초로 백드래프트의 재현실험에 성 공하였다. 이 실험에서는 백드래프트의 잠재적 위험성 때문에 1/2 규모의 구획실(2.4 m × 1.2 m × 1.2 m)을 대상으로 가로로 긴 개구부(1.1 m × 0.4 m)을 설치하여 수행되었으며, 1차적으로 예비실험(Fleischmann, 1992) 을 통해 백드래프트의 개시 가능성을 증명한 이 후, 정량적인 개시조건 검 토를 위한 연구(1993, 1994)가 진행되었다.

예비 실험(Fleischmann, 1992)에서는 150 kW의 발열량을 가지는 천연가 스 화원과 80 kW, 120 kW, 그리고 150 kW의 발열량을 가지는 프로판화 원을 대상으로 하여 23번의 실험 중 8번의 백드래프트를 관찰하였다. 이

7

때, 관찰된 8번의 백드래프트는 모두 천연가스를 대상으로 한 조건이었으 며, 프로판을 대상으로 한 조건에서는 백드래프트가 관찰되지 않았다. 구체 적인 특성을 검토하기 위하여 밀폐 공간 내부의 온도와 O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 및 미연탄화수소(Unburned Hydro Carbon : UHC)의 농도를 계측하였다. 백 드래프트 개시 직전의 구획실 내부에는 높은 농도의 UHC 가 존재하며, 내 부의 평균 온도는 약 450 K 정도임을 보고하였다. 그리고 개구부 개방이후 중력흐름이 개구부 반대 벽까지 토탈하는데 소요되는 시간(Gravity Current Time)과, 점화 원을 공급한 이후 점화되기까지의 점화지연시간 (Ignition Delay Time), 그리고 점화된 화염이 개구부를 통과하기 전까지의 연소파 전파시간(Deflagration Travel Time)을 측정하였다. 이때, 동일한 조건에서의 점화지연시간의 차이는 내부로 유입되는 중력흐름의 선단의 비 균일(Non-homogeneity)함에 가인한다고 보고하였다. 이 때, 중력흐름의 유 입시간과, 점화지연시간 그리고 전파시간은 구획실을 개방한 소방관이 화 재구로 인한 피해를 입는데 까지 소요되는 시간과 관련되기 때문에 중요한 인자라고 할 수 있다.

이 후, 정략적인 내부 개시조건을 위한 실험연구(Fleischmann et al., 1994) 또한 진행되었다. 동일한 1/2 규모의 구획실을 대상으로 개구부를 개 방하기 전 70 kW와 200 kW의 천연가스에 의한 화원을 형성한 후, 일정시 간 동안에 유지하며 구획실 내부를 미연의 연료성분으로 가득 차게 하였

8

다. 이 후, 출입구를 개방하여 중력흐름을 형성한 뒤, 버너 상단에 위치한 점화기를 이용하여 불꽃화염을 형성시켜 백드래프트의 재현에 성공하였다. 이 때, 70 kW의 경우는 백드래프트 현상에 대해 반복적인 실험이 가능했 으며, 200 kW의 조건에서는 춤추는 화염(Dancing flame)과 같은 구획실 내부의 복잡하며 특이한 거동이 관찰되었다. 주요한 결과로, 백드래프트가 생성되기 위해서는 내부의 미연 탄화수소 연료(UHC) 의 농도가 10%를 넘 어야 하며, 내부의 UHC 가 10%이상이 되면 백드래프트의 강도는 더욱 커 짐을 확인하였다.

또한, Gottuk(1997)등은 미 군함의 선실을 대상으로 백드래프트 실물 화 재실험 결과를 발표하였다. 이 연구에서는 백드래프트의 발생을 완화시키 는 기술이 점토하였으며, 백드래프트 생성에 중요한 인자는 연료의 질량분 율이며 디젤을 연료로 고려할 경우 0.16 을 백드래프트의 발생에 대한 임 계값으로 제시하였다. 또한, 실내공간에 미분무수(Water-mist)를 분사하는 것이 백드래프트의 발생가능성을 줄일 수 있는 방안이 될 수 있음을 보였 으며, 이때 백드래프트 발생의 주요한 완화(Mitigation) 메커니즘은 분사에 의한 열적 냉각효과(Thermal cooling) 보다는 증발에 기인한 연료 질량분 율의 감소가 더 크게 작용함을 보고하였다.

#### 1.2.2 중력흐름

백드래프트가 발생하기 전 화재가 충분히 진행이 된 구획실 내부는 고온 의 연료 및 연소생성물로 가득 찬 연료-과농 조건(Fuel-rich Condition)을 유지하게 된다. 이 후, 개구부가 개방이 되면 구획실 내부의 혼합기는 높은 온도로 인해 밀도가 낮기 때문에 부력의 영향을 받아 개구부 상단부분을 통해 외부로 흐르고, 상온의 공기는 내부 혼합기에 비해 상대적으로 밀도 가 높기 때문에 구획실 내부로 유입되는데, 이러한 현상을 중력흐름 (Gravity Current)이라고 한다. 이러한 중력흐름은 백드래프트가 발생되기 전, 내부로 유입되는 상온의 공기와 구획실 내부의 고온의 연료와의 혼합 과 가연혼합기를 형성하는 과정에서 중요한 역할을 하기 때문에 백드래프 트를 이해하기 위해서 필수적으로 검토해야하는 혁상이다.

Steckler(1986)등은 복잡한 화재현상 내부에서의 중력흐름을 연구하기 위 해, 두 액체 사이의 밀도차이를 이용 하였다. 이 연구에서는 큰 탱크 내부 에서의 상대적으로 밀도가 낮은 물과 밀도가 높은 소금물과의 밀도차이를 이용하여 중력흐름을 재현하는 방법을 이용하였는데, 소량의 페놀프탈레인 (Phenolphthalein) 용액을 이용하면 중력흐름에 의한 혼합(Mixing)과정에서 의 가시화(Visualization)가 가능하기 때문에 이후로도 많은 연구자들에 의 해 이용되었다.

Fleischmann and McGrattan(1999)은 백드래프트 발생 이전의 중력흐름 에서의 혼합을 연구하기 위해 소금물을 이용한 실험 및 수치해석을 수행하 였다. 두 개의 다른 개구부 형상(가로로 긴 개구부와 완전개방 된 개구부 조건)에서 가시화한 중력흐름의 밀도분포를 FDS(Fire Dynamics Simulator)을 이용한 전산해석 결과와 비교해본 결과, 시뮬레이션 결과가 백드래프트 개시전의 중력흐름을 정성적으로 잘 모사할 수 있음을 보고하 였다.

Weng(2002)등은 백드래프트 개시 이전의 중력흐름과정에서의 유속정보 와 혼합과정을 좀 더 면밀히 검토하기 위해 축소된 규모의 구획실 내부에 서 유동 가시화장치(Flow Visualization : FV)와 디지털 입자 영상 유속계 (Digital Particle Image Velocimetry : DPIV)를 이용하였다. 그 결과, 다양 한 개구부 형상(완전개방, 출입구 형태, 그리고 가로로 긴 창문 등)에서의 실험을 통해 측정된 중력흐름과정에서의 무차원화 된 속도와 유입 및 유출 시간(Entering and Existing Time)의 정량적인 결과들이 자연 발생하는 중 력흐름에서의 값과 유사함을 보고하였다.

또한, 후속 연구(Weng et al., 2003)은 축소된 규모의 구획실을 대상으로 실제 백드래프트 현상과 유사한 고온의 연료와 공기사이의 온도차에 기인 한 중력흐름에 대한 전산해석 연구를 수행하였다. 대와동모사법(Large Eddy Simulation : LES)을 이용하여 계산을 수행하였으며, 다양한 개구부 형상 조건에서의 밀도분포가 실험의 결과와 정성적으로 일치함을 확인하였 다. 또한, 무차원화 된 유속 값은 밀도차(온도차) 에는 관계가 없으며, 개구

11

부 형상이나 면적에 의존함을 보고하였다.

McBryde(2008)은 FDS를 이용한 시뮬레이션 결과와 소금물 모형을 이용 한 중력호름 실험을 비교 하여, 실험결과와 유사한 중력호름 구조를 얻기 위한 시뮬레이션의 경계조건에 대하여 검토하였다. H를 계산영역의 높이 (구획실의 높이)로 고려할 때, 다소 거친 격자크기(0.083H)에서는 난류의 구조를 잘 해상 할 수 없었지만, 0.04H크기부터 중력호름에서 큰 소용돌이 (Billows)가 해상되기 시작했으며, 명확한 해상도의 증가는 0.02H부터 0.013H에서 관찰되었다. 그리고 0.01H이하의 격자크기에서는 동일한 결과 를 얻었다. 결론적으로, 고려하는 구획실의 높이(H)의 0.01배에 해당하는 크기의 격자를 고려할 경우, 중력호름에서의 난류 구조를 잘 해상할 수 있 다고 보고하였다.

1.2.3 동역학적 거동과 개시조건

중국의 W.G. Weng 연구그룹은 2000년대 초반부터 매우 활발하게 백드 래프트에 대한 연구를 수행해왔다(2003a, 2003b). 이들 연구그룹은 1/4 규 모로 축소된 실내 공간(1.2 m × 0.6 m × 0.6 m)을 대상으로 기체연료인 메탄을 이용하여 실험을 수행하였다. 세로로 긴 개구부(0.2 m × 0.6m)가 설치된 실내공간의 경우 메탄 연료의 질량분율이 0.98 인 경우 백드래프트 가 발생됨을 보고하였고, 이 때 내부에 설치된 압력감지기를 통해 측정된 최대 압력 또한 임계값을 가짐을 보고하였다(Weng and Fan, 2003a). 또한, 백드래프트의 발생을 위한 가연한계 도표(Flammability Diagram)을 검토 하여 연료의 임계 질량분율 값은 초기 혼합기의 산소량이 증가 할수록 감 소한다고 발표하였다(Weng et al., 2003b).

개구부의 기하학적 형상이 백드래프트의 발생을 위한 연료의 임계질량분 율에 미치는 영향을 검토하기 위해서 벽면에 가로로 긴 개구부(0.6 m × 0.2 m)와 창문형태의 출입구(0.2 m × 0.4 m) 그리고 천장에 설치된 개구 부(0.6 m × 0.2 m) 등 8개의 다양한 기하학적 형상 조건에서의 연료의 임 계 질량분율 값을 검토하였다. 주요 결과로 천장에 설치된 가로로 긴 개구 부의 경우 임계질량분율 값이 7.0% 로 가장 낮게 예측되었으며, 세로로 긴 개구부와 중앙에 설치된 창문의 경우 9.8%로 가장 높게 확인되었다. 이 때, 초기 연료의 질량분율 값이 클수록 구획실의 최대압력은 높게 측정되 었으며, 또한 백드래프트의 강도 또한 더 격렬함을 보고하였다(Weng et al. 2003c).

1.2.4 전산해석연구

2005년 이후 발표된 대부분의 백드래프트 관련 연구들은 살펴보면 주로 전산해석연구에 초점을 맞추어져 있다(Weng et al., 2005, Yang et al., 2005, Ferraris et al., 2008, 2009, Horvat et al., 2007). 주된 이유로는 실험 연구에 있어서의 잠재적인 위험성과, 반복적인 실험이 어렵다는 점을 꼽을 수 있다. 하지만 이러한 어려움은 전산해석적인 접근을 통해 극복할 수 있 으며, 관찰하기 어려운 구획실 내부의 열 및 유체역학적 거동을 관찰할 수 있다. 또한, 백드래프트의 동역학적 거동에 영향을 미치는 다양한 파라메 타들 간의 유기적인 관계를 독립적으로 고찰할 수 있다는 장점을 대표적으 로 들 수 있다.

Yang et al.(2005)은 화재해석에 많이 사용되는 미국 국립표준기술연구소 (National Institute of Standards and Technology : NIST)의 화재 해석 프 로그램인 FDS 를 이용하여 백드래프트의 전개과정에 대한 전산해석 연구 를 수행하였다. LES 기법을 적용하였으며, Subgrid에 대해서는 층류 화염 편 모델(Flamelet Model)과 Partially Premixed Combustion Model등의 고 급연소모델을 적용하기 위해서 FDS의 소스코드를 대폭 수정하여 계산이 수행되었다.

Ferraris et al.(2008, 2009)은 초기 비예혼합화염으로 분류되는 화재의 전 형적인 특징부터 예혼합화염 혹은 부분예혼합화염등 복잡한 연소특성을 보 이는 백드래프트의 거동을 고찰하기 위하여 Flame Index와 대와동 화염편 연소모델(Large Eddy Laminar Flamelet Combustion Model : LELFM)등 의 고급 연소모델의 적용을 위해 수정된 FDS를 이용하여 전산해석 연구 를 수행하였다. 이렇듯, 백드래프트를 위한 전산해석 연구는 이러한 고급 연소모델의 도 입을 필요로 하며, 대부분의 연구자들이 수행하기에는 어려움이 많았기 때 문에 현재까지 특정 연구그룹에 의해서만 일부 진행되었을 뿐, 많은 연구 가 진행되지 못하였다.

#### 1.3 연구 목적

앞서 살펴본 것처럼 근래 국외에서는 백드래프트의 생성조건 및 동역학
적 거동 그리고 개시조건한 다수의 실험 및 전산해석 연구가 시도되어지고
있다. 특히, 눈여겨 볼 부분은 잠재적인 위험성과 반복적인 실험의 어려움
으로 인하여 전산해석 연구가 급증하고 있다는 점이다. 하지만, 국내에서는
여전히 백드래프트에 대한 연구가 미미한 실정이다. 이러한 기존의 연구동
향을 고려하여 본 연구의 목적은 다음과 같이 요약할 수 있다.

ATIONA

(1) 국내 전무한 백드래프트에 대한 기초자료 마련을 통해 화재 폭발과 관련된 에너지 플랜트 안전 분야와 소방관들의 안전관련 교육에 참고자료 로 사용될 수 있는 기초자료를 제공한다.

(2) 복잡한 연소특성을 보이는 폭발성 화재 현상인 백드래프트의 해석을위해 FDS 코드의 대폭적인 수정을 필요로 했던 기존의 전산해석 연구와

는 달리, 소스코드의 수정 없이 백드래프트의 현상을 재현할 수 있는 방법 을 제안하여 화재현상에 많이 이용되는 FDS의 활용도를 높인다.

(3) 현재까지 계산시간 증가의 어려움으로 인해 실 규모크기의 실내공간을 대상으로 계산을 진행하기에는 어려움이 많기 때문에, 축소된 규모의 실내공간을 대상으로 실험을 통해 얻기 어려웠던 백드래프트 현상의 물리적인 현상과 동역학적 거동에 대한 정보를 얻는다.

(4) 초기연구임을 감안하여 다양한 개구부의 형상 중 가로로 긴 창문을 대표적으로 선정하여 계산을 수행하였다. 또한, 화학반응기구 및 복사효과 등 백드래프트의 발생 및 동역학적 거동에 영향을 미치는 대표적인 파라메 타에 대한 연구를 수행하여, 향후 수행 될 백드래프트 연구의 기초적인 자 료를 제공함과 동시에 파라메타들 간의 독립적인 영향을 검토한다.

(5) 현재까지, 전산해석 연구를 통해서 임계 질량분율을 검토한 연구는 이루어 진 바 없다. 이에 본 연구에서는 FDS를 이용하여 백드래프트 발생 개시조건 예측을 위한 임계 질량분율을 검토해보고자 한다.

# 제 2 장 수치해석 방법

#### 2.1 지배방정식

본 연구에서 백드래프트 현상의 재현 및 동역학적 거동의 해석을 위해 사용된 프로그램은 NIST에서 제공하는 FDS v5.5.3 를 이용하였다 (McGrattan, 2010a). FDS는 화원에서 발생하는 연기와 열의 거동에 중점 을 두면서 낮은 마하수 근사법(Low mach number approximation)을 적용 한 저속의 열유동에 대하여 다음의 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 계 산한다.

질량 보존 방정식(Conservation of mass equation):

(2.1)

좌측의 첫 번째 항은 시간에 대한 밀도의 변화를 나타내며, 두 번째 항 은 제어체적내의 질량의 유출입을 나타낸다. 그리고 우측의 항은 단위시 간 단위체적당 생성되는 질량을 의미한다.

 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \bullet \rho \boldsymbol{u} = \dot{\boldsymbol{m}}_{b}^{'''}$ 

화학종 i 의 화학종 보존 방정식(Conservation of species equation):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i u = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{\omega}_i$$
(2.2)

여기서, 변수  $\rho$ , u, T,  $Y_i$ ,  $\omega_i$ 를 각각 밀도, 속도벡터, 온도, 화학종 i의

질량분율 및 생성 항이라 한다.

모멘텀 보존 방정식(Conservation of momentum equation):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{u}) + \nabla \cdot \rho \boldsymbol{u} \boldsymbol{u} + \nabla p = \rho \boldsymbol{g} + \boldsymbol{f}_{\boldsymbol{b}} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij}$$
(2.3)

여기서, p는 압력,  $f_b$ 는 외력을 나타내고,  $\tau_{ij}$ 는 응력 텐서(stress tensor) 로 아래와 같이 나타내어진다.

$$\tau_{ij} = \mu (2S_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}(\nabla \cdot u)) \tag{2.4}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \qquad i, j = 1, 2, 3$$
(2.5)

에너지 보존 방정식(Conservation of energy equation):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon$$
(2.6)

여기서,  $h_s$ 는 온도의 함수인 엔탈피이고,  $\dot{q}'''$ 항은 단위체적당 열발생량, 벡터항인  $\dot{q}''$ 는 전도와 복사되는 열유속 벡터 이며 다음의 식으로 표현된다.

$$\dot{q}'' = -k\nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla T_{\alpha} + \dot{q}_{r}^{''}$$
(2.7)

이 때, k는 열전도도(Thermal conductivity)이다.

이상 기체 방정식(Ideal gas state equation):

$$p = \frac{\rho RT}{\overline{W}} \tag{2.8}$$

여기서 p는 압력, ρ는 밀도, R는 이상기체상수, W은 평균분자량이다. 좀 더 자세한 기술은 문헌내용을 참고하길 바란다(McGrattan et al., 2010b).

#### 2.2 수치해석모델

2.2.1 연소모델(Combustion model)

1) 혼합분율(Mixture Fraction) 연소모델

FDS에서는 기본적으로 연소과정을 해석하기 위해서 혼합분율 연소모 델을 사용한다. 이 혼합분율 모델은 매우 빠른 반응속도(Infinite reaction rates)를 가정하고 있기 때문에, 연료와 산화제가 혼합과 동시에 연소 (Mixed is burnt)된다. 즉, 화학 반응속도(Chemical reaction rate)가 확산 (Diffusion), 열전도(Heat conduction) 및 유동(Flow)에 비해 매우 빠르다 면, 반응시스템은 열역학적 평형상태관계만을 통해서도 설명되어질 수 있 다는 것이다. 이러한 가정은 대부분의 화재현상에 적용 가능한 합리적인 가정으로 보인다. 하지만 구획화재(Under-ventilated fire)의 경우 혼합과 동시에 연료와 산소가 반응하지 않기 때문에 주의가 필요하다 .

연료와 산소에 대해서 간단한 단일반응을 고려해보면 다음과 같다.

$$C_x H_y + \nu_{O_2} O_2 \rightarrow \nu_{CO_2} CO_2 + \nu_{H_2O} H_2 O + \nu_{CO} CO$$
(2.9)

$$\nu_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \tag{2.10}$$

여기서,  $\nu_i$ 는 *i* 화학종의 이론혼합계수를 나타내고, W는 분자량을 의 미한다. 그리고  $y_{CO}$ 는 실험으로부터 경험적으로 선정되는 CO의 생성율 (Yield rate)을 의미한다.

이 때, 보존 스칼라(Conserved scalar) Z는 다음과 같이 연료와 산소의 질량분율의 선형 결합으로 표현될 수 있다.

$$Z = \frac{s Y_F - (Y_{O_2} - Y_{O_2}^{\infty})}{s Y_F^1 + Y_{O_2}^{\infty}}; s = \frac{\nu_{O_2} W_{O_2}}{\nu_F W_F}; \nu_F = 1$$
(2.11)

여기서,  $Y_F^1$ 은 연료 기류에서의 연료의 질량분율이다. s는 연료와 산소의 이론혼합 계수비(Stoichiometry coefficient) 이고,  $Y_F$ 와  $Y_{O_2}$ 는 연료 및 산소의 질량분율이다.

2) 유한화학반응율(Finite Chemistry : FC) 연소모델

대부분의 연소 환경에서 화학반응이 일어나는 시간은 유동 및 물질 전 달과정들과 비슷한 시간크기(Time scale)에서 일어나기 때문에 보다 정확 하게 반응 시스템을 해석하기 위해서는 유한한 반응속도에 관한 정보가 필 요하다. 이러한 유한한 화학반응속도를 고려하기 위한 모델이 바로 유한화 학반응율 연소모델(Finite Chemistry combustion model : FC) 혹은 총괄화
학반응기구(Global reaction Mechanism: GM)이라고 한다.

예를 들어, 탄화수소 계열의 연료와 산소의 반응이 다음과 같이 이론 혼합비의 단일과정으로 반응한다고 고려한다면,

$$C_x H_y + v_{O_2} O_2 \rightarrow v_{CO_2} CO_2 + v_{H_2O} H_2 O$$
 (2.12)

이며, 이때의, 반응속도는 다음과 같다.

$$\frac{d[C_x H_y]}{dt} = -BOF[C_x H_y]^a [O_2]^b e^{-E/RT}$$
(2.13)

이 때, BOF 는 선지수 인자(Pre-exponential factor), 지수 a와 b, 그리 고 활성화 에너지 E(Activation energy)등은 관련 문헌상에서 찾을 수 있 다(Bui-pham, 1992; Dryer and Glassman, 1973). 대개 엔지니어들은 실용 적인 다차원 시스템의 거동을 알고 싶어 하기 때문에, 큰 규모의 CFD 에 서는 단일성분 연료들에 대해서는 주로 상세화학반응 기구(Detailed chemical reaction mechanism)가 아닌 총괄반응기구(GM)을 이용한다.

본 연구에서는 Bui-pham(1992)이 제안한 1 단계 총괄반응기구(이하 1-STEP이라고 언급한다.)와 Dryer 와 Glassman(1972)이 제안한 3 단계 총괄반응기구(이하 3-STEP이라고 언급한다.)를 이용하였다. 반응에 참여 하는 화학종은 CH4, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, 및 N<sub>2</sub>으로 총 6개의 화학종이 고 려되었다. 이용된 화학반응식과 반응속도(Reaction rate)는 아래와 같다.

1단계 총괄반응기구:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \tag{2.14}$$

$$RR_1 = 5.2^{13} \exp(\frac{-123,980}{RT}) [CH_4]^{1.0} [O_2]^{1.0}$$
(2.15)

3단계 총괄반응기구:

$$CH_4 + 1.5O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \tag{2.16}$$

$$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$$
 (2.17)

$$CO_2 \rightarrow CO + 0.5O_2$$
 (2.18)

$$RR_1 = 10^{13.2} \exp(\frac{-202,312}{RT}) [CH_4]^{0.7} [O_2]^{0.8}$$
(2.19)

$$RR_{2} = 10^{14.6} \exp(\frac{-167,200}{RT}) [CO]^{1.0} [H_{2}O]^{0.5} [O_{2}]^{0.25}$$
(2.20)

$$RR_{3} = 10^{14.75} \exp\left(\frac{-179,740}{RT}\right) [CO]^{1.0} [H_{2}O]^{0.5} [O_{2}]^{0.25}$$
(2.21)

~

여기서, Pre-exponential factor의 단위는 cm<sup>3</sup>/mol/s이고 지수함수 내 부에 들어있는 활성화에너지의 단위는 kJ/kmol, 농도를 표시하는 [ ]는 각 화학종의 몰농도로서 단위는 kmol/m<sup>3</sup>이다.

0

#### 2.2.2 복사모델(Radiation model)

에너지 전달은 전도(Conduction), 대류(Convection), 그리고 복사

(Radiation)로 구성된다. 그리고 이때, 대류열전달은 지배방정식을 계산하는 과정에서 구해지며, 전도와 복사를 통해 생성되거나 손실되는 열에너지는 에너지방정식의 열 유속 벡터(Heat flux vector)의 다이벌전스 (Divergence),▽•q<sup>''</sup>,로 기술된다. 이때, 열 유속 벡터 내의 복사항  $q_r^{''}$ 은 회색가스(Gray gas)에 대한 복사 수송 방정식(Radiative Transport Equation : RTE)을 푸는 과정을 통해 모델에 포함된다.

(2.22)

이때,  $I_{\lambda}(x,s)$ 은 파장(λ)에서의 복사강도이며, s는 강도(Intensity)의 방향 벡터이다.  $\kappa(x,\lambda)$ 와  $\sigma_s(x,\lambda)$ 은 각각 국소 흡수 및 산란계수이며,  $B(x,\lambda)$ 은 방출 소스 항(Source term)이다. 우변의 적분은 다른 방향으로 부터의 인-스캐터링(In-scattering)을 기술한다. 산란이 없는 가스에 대한 RTE는 다 음과 같다.

$$s \bullet \nabla I_{\lambda}(x,s) = \kappa(x,\lambda)[I_{b}(x) - I_{\lambda}(x,s)]$$
(2.23)

여기서  $I_b(x)$ 은 Plank 함수에 의해 주어지는 소스항을 나타낸다. 대부분 의 경우의 대규모 화재 시나리오에서 soot이 화재와 고온의 연기층으로부 터의 열복사에 가장 주요한 연소생성물로 간주된다. Soot 의 복사 스펙트 럼은 연속적이기 때문에, 가스가 회색 매질(Gray medium)과 같다고 가정 할 수 있다. 스펙트럼의 의존도는 하나의 흡수계수(N = 1)로 간주하면 흑 체 복사 강도에 의해 주어지는 소스항은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$I_b(x) = \sigma T(x)^4 / \pi \tag{2.24}$$

최종적으로, 복사에 의한 열 유속  $q_r$  은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{q}_{r}^{''}(x) = \int_{4\pi} s' I(x,s') ds'$$
 (2.24)

복사와 관련된 상세한 모델링이나 기술은 문헌내용을 참고하길 바란다 (McGrattan et al., 2000b)

2.3 계산방법 및 계산조건

백드래프트의 생성 및 동역학적 거동을 검토하기 위하여 비정상 (Unsteady) 3차원 전산해석을 위하여 연구를 수행하였다. 계산은 NIST에 서 제공하는 오픈소스코드인 FDS v5.5.3 를 이용하였다. FDS에서는 대와 동모사법인 LES기법을 기본 난류 모델로 채택하고 있는데, LES기법에서 는 큰 와(Eddy)에 대해서는 직접수치해석을 수행하고 아격자(Subgrid) 단 계에 대해서는 별도의 연소모델을 도입해야 한다. 백드래프트와 같이 화염 이 전파하는 특징을 가진 현상을 해석하기 위해서는 앞서 기술한 바와 같 이 FDS의 소스코드를 수정해야 하는 등 작업량이 방대해지는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 난류유동에 대해서 별도의 모델링 작업 없이 수치해석(Model-free Simulation : MFS)하는 3차원 직접수치모사(Direct Numerical Simulation : DNS) 기법을 적용하여 해상되는 난류모델의 선택 에서 생길 수 있는 불확실성(Uncertainty)을 제거하였다.

본 연구에 앞선 선행연구로서, 백드래프트의 수치적 재현성에 대한 검토 를 수행하였다. Fig. 2.1 의 기하학적 형상을 갖는 구획실을 대상으로 하였 으며, 선행연구 이후의 본 연구에서는 Fig. 2.2에서 보는 것과 같이 계산시 간의 절감을 위하여 Y축 0.32 m 에서의 x-z 면을 대상으로 대칭면 (Symmetry plane)을 적용하여 절반의 계산영역만을 고려하였다. 또한, 외 부로 분출되는 백드래프트를 충분히 모사함과 동시에 불필요한 계산영역의 크기를 최소화하기 위하여 가로축방향 길이를 2.42 m에서 3.62 m 로 확장 시켰고, 전체 영역의 높이는 1.22 m에서 0.92 m 축소시켜 계산을 수행하였 다.

대칭면을 적용하여 계산영역을 반으로 감소했음 불구하고 여전히 방대한 계산시간으로 인한 어려움은 대규모 병렬 계산기법인 메시지 전달 인터페 이스(Message Passing Interface : MPI)와 슈퍼컴퓨팅(Supercomputing) 기술을 결합한 첨단 계산공학 기법을 이용하여 해결하였다. 계산에 사용된 전산해석 자원은 Intel(R) Core(TM)2 Q8400 3.0GHz이며, 한 조건 당 15개 의 Cores를 사용하여 약 24~48 시간이 소요되었다. 이러한 계산 조건은



(b) Sketch of the inner compartment

Fig. 2.1 Sketch of the reduced-scale compartment with (a) full-geometry and (b) locations of thermocouple and pressure sensor.



엄청난 양의 저장 공간과 메모리를 요구하기 때문에 개인 컴퓨터로는 계산 할 수 없으며, 만약 단순히 이론적인 계산시간을 비교해본다면 4개의 코어 를 가지는 개인용 컴퓨터를 이용하여 약 96~192시간(4~8일)이 소요된다. 계산에 사용된 격자의 최소 크기는 5 mm를 최종 격자크기로 선정하여 전 체 계산영역에 균일하게 분포시켰으며, 본 계산에서는 약 8,500,000개의 격 자가 사용되었다.

통상적인 DNS 기법을 적용한 연구에서 총괄 반응기구를 적용하였을 경 우에는 격자 크기에 민감한 화염대에서의 두께와 열발생율 그리고 화학종 들의 생성율을 합리적으로 예측하기 위해서, 0.1 mm 미만의 격자크기를 필요로 한다. 이러한 관점에서, 본 연구에서 고려하는 5 mm 의 격자크기 는 다소 크다고 생각될 수 있으나, (1) 별도의 난류 연소모델을 추가적으로 고려하였던 기존의 연구와는 달리 DNS기법을 적용하고 유한화학반응율 모델을 적용하여 개별 격자에 대하여 직접수치모사를 수행한다는 점과 (2) 선행연구를 통해, 5 mm 의 격자를 사용하더라도 기존의 백드래프트 현상 의 동역학적 특성을 잘 예측할 수 있음을 확인하였기 때문에, 최종 격자크 기로 선정함에 무리가 없을 것으로 판단된다. 이에 대한 자세한 기술은 3.3.4절을 참고하길 바란다.

본 계산에 이용된 실내공간은 Fig. 2.2 에 나타난 바와 같이 Weng and Fan(2003a, 2003b)의 실험과 동일한 1/4로 축소된 규모의 구획실을 대상

	Species M	assfraction	Compartment temperature[K] and layer height [m]			
<b>Y</b> <sub>CH4</sub>	Y <sub>02</sub>	Y <sub>CO2</sub>	Y <sub>co</sub>	TH	TL	HL
0.0573	0.1460	0.0050	0.0032	375	326	0.28
0.0672	0.1350	0.0020	0.00040	388	344	0.27
0.0729	0.1360	0.0100	0.0038	378	352	0.27
0.0886	0.1430	0.0070	0.0023	389	349	0.30
0.1224	0.1460	0.0210	0.0012	376	340	0.28
		0		-		

Table 3.1Mixture composition and temperature in the compartment for<br/>backdraft simulation measured by Weng and Fan (2003a)

으로 하였으며 가로로 긴 개구부(0.6 m × 0.2 m)를 설치하였다. 이 개구 부는 초기에는 닫힌 상태로 존재하지만, 계산의 시작과 동시에 개방시켜 중력흐름을 모사하였다. 연료는 대표적인 탄화수소계 연료인 기체상태의 메탄연료를 사용하였으며, 계산 초기에 구획실 내부의 혼합기의 온도는 열 경계층을 경계로 하여 상부 측(Upper layer)과 하부 측(Lower layer)을 분 리하여 설정하였다. 또한, 화학종의 농도는 기존의 실험에서 측정된 값을 참고로 하여 구획실 내부에 코일하게 분포하였다(Weng et al., 2003a). 자 세한 내용은 Table 3.1 을 참고하길 바란다. 이 때, 실험에서 제시된 구획 실 내부 연료의 최대 질량분율은 0.1224 였으며, 더 높은 연료의 질량분율 은 기존의 실험값을 외삽법(Extrapolation)을 통해 계산하여 이용하였다.

#### 2.4 백드래프트 발생 시나리오

구획실 내부는 Table 3.2 중 연료의 질량분율이 0.1224 인 혼합기가 균질 하게 분포되어 있다고 설정하였다. 훈소 과정 이후의 구획실 내부온도를 보다 현실적으로 모사하기 위해서 온도는 열경계층을 기준으로 상부측(T<sub>U</sub>) 과 하부측(T<sub>L</sub>)으로 나누어 모사하였다. 구획실 외부는 상온의 공기가 정지 된 상태로 존재하게 하였으며, 계산이 시작되면(t = 0 s) 설치된 개구부가 개방(Break)되면서 개구부 하부 측을 통해 상온의 공기가 유입되고 고온의

HOIN

연료성분은 개구부 상부 측을 통해 흐르는 중력흐름을 모사하였다. 이때, 구획실 내부로 유입된 상온의 공기는 주변의 고온 연료성분들과 혼합과정 을 거치며 개구부 반대벽면으로 흐르게 되며, 약 3초가 지나 유입된 중력 흐름이 개구부 반대 벽면에 설치된 보라색 점화기(Igniter)에 도달하게 되 면, 고온의 질소(1770 K)를 점화기 상단 면을 통해 일시적(t = 0.5 s)으로 분사함으로서 점화원을 공급하는 방식으로 백드래프트의 발생을 모사하였 다.



# 제 3 장 백드래프트의 발생 및 경계조건 설정

### 3.1 연소모델이 백드래프트의 재현에 미치는 영향

백드래프트와 같이 화염이 전파하는 특징을 가진 폭발성 화재현상의 수치적 재현성을 검토하기 위한 선행연구로서, FDS에서 기본 연소모델로 이용되고 있는 혼합분율 연소모델(MF)과 유한 화학반응율 연소모델(FC)의 예측성능검토를 수행하였다.

이 MF 모델은 개념적으로 무한히 빠른 반응속도를 가정하기 때문에 백드래프트와 같이 전파하는 특성을 가진 화재현상의 해석에는 적합하지 않다. 이러한 이유로, 기존 연구자들 중에는 FDS의 연소모델을 대폭 수정 하여 수행된 연구가 있지만 이런 정교한 연소모델을 수정하는 것은 대부분 의 연구자들에게 쉽지 않다. 반면에, FC 모델은 개별 격자에서 유한한 속 도를 가지는 반응속도를 예측하기 때문에, 전파하는 특성을 가진 화재현상 에 대해서도 적용가능하다.

따라서, FDS 코드의 연소모델을 특별히 수정하지 않고 유한 화학반응 율 모델을 적용하여 백드래프트 현상을 재현할 수 있다면 FDS의 활용도 를 더 높일 수 있을 것이다. 3.1.1 원통형 튜브를 이용한 연소모델의 검토

연소모델의 검증을 위해 Fig. 3.1과 같은 원통형 튜브를 이용하였다. 내 경이 20 mm, 길이는 50 mm 이며, 최소 격자 0.1 mm의 크기로 전체 계산 영역에 균일하게 분포시켰다. 원통 내부에는 상온의 메탄연료와 공기의 혼 합기가 충분히 연소 가능한 이론 혼합비(당량비 1.0)의 상태로 혼합되어 있 다. 계산의 시작과 동시에 혼합기의 점화를 위해서 튜브 아래의 면 중심에 서 1770 K의 고온 질소가 짧은 순간동안 분출 되도록 하였다.

Fig. 3.2(a)는 MF 모델을 이용한 원통형내부의 시간경과에 따른 온도분 포를 나타낸 것이고, (b)는 FC 모델을 적용한 조건에서의 온도분포를 나타 낸 것이다. 앞서 언급한 바와 마찬가지로, Fig. 3.2(a)의 MF 모델은 예혼합 화염과 같이 전과하는 특징의 화염을 모사할 수 없기 때문에 연소가 가능 한 이론혼합비의 연료-공기 혼합기에 고온의 점화원을 주더라도 화염이 형성되어 전파되는 과정을 관찰 할 수 없다. 반면에, Fig. 3.2(b)의 FC 모 델을 적용한 조건에서는 점화원에 의해 점화되어 상부쪽으로 전파되는 예 혼합화염의 특성을 관찰 할 수 있다. 이 결과로부터, 예혼합화염과 같이 전 파하는 특성을 가진 백드래프트의 수치계산에는 MF 모델이 적합하지 않



Fig. 3.2 Temporal evolution of temperature distribution in the tube using different combustion models; (a) Mixture fraction (MF) and (b) Finite 1-step combustion model (FC).

3.1.2 축소된 구획실을 대상으로 한 연소모델 검토

백드래프트의 수치적 재현 대상인 축소 구획실의 치수는 1.2 m × 0.6 m × 0.6 m이고, 수치계산 영역은 Fig. 2.2 에서 보는 바와 같다. 구획실의 개 구부는 0.6 m × 0.2 m의 가로로 길게 된 직사각형 모양을 갖고 있다. 사 용된 격자수는 1,890,000개 정도가 되며, 격자크기는 10 mm로 균일하게 분 포하였다. 현재의 선행연구는 정량적으로 정밀한 물리량을 도출하는 것에 목적을 둔 것은 아니며 본 연구에 앞서 고려하는 연소모델의 수치적 재현 성에 검토를 목적으로 하였다.

최초 구획실 내에는 기존의 실험연구에서 백드래프트가 생성될 수 있다 는 조건으로 알려져 있는 Table 3.2 와 같은 농도를 가진 혼합기가 균질하 게 분포되어 있으며, 내부의 온도는 기존 문헌(Chen et al, 2011)에서 보고 된 바와 같이 훈소 과정의 구확 내부 온도인 573 K으로 설정하였다.

Fig. 3.3는 구획실에 대한 수치계산 결과로서 Y축 방향으로 구획실의 중 심면에서의 온도분포를 도시한 것이다. 그림에 표시된 시간은 구획실의 개 구부가 개방되는 순간을 0 s로 기준삼고 이후 1.0 s까지 시간이 경과되는 동안의 결과를 나타내고 있다. Fig. 3.3(a)의 MF 연소모델을 적용한 경우 에는 구획실 내부의 혼합기 조성이 백드래프트가 생성될 수 있는 조건임에 도 불구하고 구획실 내부에서 점화가 이루어지고 있지 않으며, 이로 인해 화염도 관찰할 수 없음을 알 수 있다. 이에 반해 FC 연소모델을 적용

Table 3.2Mixture composition and temperature in the compartment for<br/>preliminary backdraft simulation: Species mass fraction<br/>measured by Weng and Fan (2003), and flame temperature<br/>measured by Chen et al. (2011).

		Smaailag m	Compartment			
		species in	assiraction	temperature[K]		
-	Y <sub>CH4</sub>	Y <sub>02</sub>	Y <sub>CO2</sub>	Y <sub>co</sub>	Т	
_	0.0994	0.1450	0.0020	0.0030	573	
	Temp [°C]	00 1500 0 3	Temp [°C]	Vc+4	V <sub>02</sub>	25
t=0.30 s						
t=0.45 s			1			
t=0.60 s						
t=0.75 s						
t=1.00 s					)	
	(a)		(b)	(c)	(d)	

Fig. 3.3 Temporal evolution of temperature and species mass fraction with different combustion models, Mixture fraction (MF) and 1-step Finite Chemistry (FC); (a)  $MF_{temp}$ . (b)  $FC_{temp}$ , (c)  $FC_{YCH4}$ , and (d)  $FC_{YO2}$ .

한 결과인 Fig. 3.3(b)는 개구부 개방순간부터 공기가 개구부의 하부를 통 해 구획실 내부로 유입되고 동시에 구획실 내부의 가연 혼합기는 개구부의 상부를 통해 밖으로 유출되면서 점화가 시작되는 것을 잘 보여주고 있다. 일단 점화가 되면 가연가스와 유입공기의 혼합경계면을 따라서 화염이 형 성되고 구획실 내부에 넓은 공간에 걸쳐 고온 화염대가 형성되고 있음을 알 수 있다. 구획실 내부에 고온 화염이 가득 차게 되면 열팽창으로 인해 내부압력이 상승하게 되고 이로 인해 화재구(Fire Ball)가 개구부를 통해 구획실 밖으로 급격히 밀려나가는 백드래프트 현상이 발생하게 된다. Fig. 3.3(a)와 (b)의 결과를 볼 때 MF 연소모델은 백드래프트 현상을 모사할 수 없지만 FC 연소모델은 정성적으로는 기존 실험에서 얻어진 백드래프트 현 상(Fleischmann, 1994)을 잘 모사하는 것을 알 수 있다.

Figs. 3.3(c)와 (d)은 FC 연소모델을 적용하여 얻은 CH4 연료분포와 O<sub>2</sub> 의 공간분포를 보여주고 있다. Fig. 3.3(c)를 보면 초기에 연료는 구획실 내 부에만 분포하다가 개구부가 개방되면 개구부의 상부를 통해 밖으로 유출 되는 것을 알 수 있다. 이때 연료는 고온상태이기 때문에 부력에 영향을 받아 개구부의 상부측을 통해 외부로 흐르게 된다. 이후 0.75 s가 경과되면 연료는 백드래프트에 의해 개구부 밖으로 급속히 밀려나오는 것을 알 수 있다. Fig. 3.3(d)의 O<sub>2</sub> 분포에서는 개구부가 개방된 후 개구부 하부를 통 해 O<sub>2</sub>가 유입되며 고온 연료보다 무겁기 때문에 구획실 바닥을 따라 더

안쪽으로 흘러들어오는 중력흐름을 잘 확인할 수 있다. O<sub>2</sub>가 구획실 안으 로 적당히 유입된 후에는 점화가 되어 고온 영역이 구획실 내부에 넓게 분 포하게 된다. 0.75 s나 1.0 s 순간의 연료와 O<sub>2</sub> 분포를 Fig. 3.3(b)의 화염 온도와 비교해보면 온도가 높은 영역에서는 O<sub>2</sub>는 소모되어 거의 존재하지 않지만 연료의 농도는 원래의 농도보다는 낮지만 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 잘 알려진 바와 같이 백드래프트가 부분예혼합화염의 특 성을 갖는 다는 것을 잘 보여주는 결과이다.

## 3.2 개구부 형상에 따른 정성적 경향 비교

본 연구에 앞서 개구부 형상에 따른 백드래프트 발생의 정성적인 경향을 비교하기 위해서 Fig. 3.4 와 같이 4개의 서로 다른 개구부형상을 대상으로 백드래프트의 발생과정을 검토하였다. 구획실 내부의 연료의 조성과 온도 는 Table 3.2 와 같이 설정하였다.

Fig. 3.5는 시간의 경과에 따른 네 개의 기하학적 개구부 조건에서의 백 드래프트 발생과정을 나타낸 것이다. 전체적으로 계산시작과 함께(t = 0 s) 개구부가 개방되며 상온의 공기가 구획실 내부로 유입되며 고온의 연료와 혼합과정을 거치며 점화가 개시된다. 전체적으로 보았을 때 약 1초가 지난 시점에서는 네 조건 모두 구획실 외부에서 화재구를 동반한 백드래프트가





Fig. 3.5 Temporal evolution of temperature with different opening geometries (a) Door (b) Vertical Window, (c) Horizontal Window, and (d) Center Window.



Fig. 3.6 Temporal evolution of velocity profile with different opening geometries (a) Door (b) Vertical Window, (c) Horizontal Window, and (d) Center Window.

발생함을 알 수 있다. 반면에, Door와 Vertical window형태의 개구부에 서는 약 1초가 지난 시점에서 구획실 내부가 모두 고온의 영역임에 반해, Horizontal window조건과 Center window조건은 상대적으로 고온의 영역 이 좁게 예측되었다. 이러한 결과는 개구부의 형상과 크기에 기인한 상온 공기의 유입량이나 방향에 기인하는 것으로 판단되며 추가적인 연구가 필 요할 것으로 판단된다.

Fig. 3.6은 시간의 경과에 따른 유속의 크기만을 도시한 것이다. 전체적 으로 네 조건 모두 개구부 부근에서 상대적으로 큰 유속 값을 예측하는 것 을 알 수 있으며, Door형태에서 최대유속(약 35 m/s)가 예측되며, Horizontal Window조건에서 가장 작은 약 17 m/s을 예측 하고 있다. 이때 에 유속의 크기가 차이가 나는 것은 개구부의 형상과 관계가 깊은 것으로 판단되며 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

앞서 선행연구를 통해 고찰한 결과, 혼합분율 연소모델은 백드래프트와 같이 전파하는 특징을 가진 화재현상의 해석에 적합하지 않지만, 유한 화 학반응율 모델을 적용할 경우 백드래프트의 수치적 재현성에 대한 예측이 가능함을 보였다. 또한, 다양한 개구부 형상에 따라서 백드래프트의 발생 시의 최대 유속의 크기나 전개과정에서의 구획실 내부 온도분포가 다르게 예측됨을 확인하였다. 앞서 기술한 결과들을 바탕으로 하여 최종 계산에 필요한 경계조건들을 결정하기 위해 다음의 추가적인 계산을 수행하였다.

### 3.3 경계조건의 결정

3.3.1 계산시간 절감을 위한 대칭면의 설정

일반적으로 백드래프트와 같은 화재현상은 3차원의 구조를 가지며 난류 로 인한 비대칭적인 거동을 특징으로 한다. 그렇기 때문에 기본적으로 3차 원 화재현상인 백드래프트의 동역학적 거동을 정량적으로 검토하기 위해서 는 전체 영역을 대상으로 하여 계산을 수행하는 것이 필요하다. 하지만, 본 연구에서는 정량적인 물리량을 도출하는 것이 아니기 때문에, 대칭면을 적 용하여 합리적으로 현상의 특징을 재현할 수 있다면 계산시간의 감소를 통 해 효율성을 증가시키는 것이 더 효과적이라고 판단된다.

앞서 기술하였던 계산시간의 효율성을 검토하기 위해서, y축으로 0.32 m 인 x-z 면을 기준으로 대칭면을 설정하여 계산영역을 반으로 줄인 계산한 결과와 대칭면을 적용하지 않고 전체계산영역을 고려한 조건의 결과를 비 교하였다. 계산에 사용된 영역은 각각 Fig. 2.1 과 같으며 계산에 사용된 경계조건은 3장과 동일하게 공급하였다.

Fig. 3.7은 시간의 전개에 따른 구획실 내부 온도와 압력의 측정값을 도시한 것이다. 3D\_Full은 대칭면을 설정하지 않은 전체 구획실을 대상으로 한 결과 값을 나타내며 Symmetric은 대칭면을 설정하여 계산영역을 감소시킨 조건을 대상으로 시간의 경과에 따른 온도 및 압력의 변화를 도시한



**Fig. 3.7** Temporal evolution of temperature and pressure rise measured at the thermocouple(TC) and pressure rise sensor.

것이다. 전체적으로 두 조건 모두 시간에 경과에 따라서 유사한 경향을 보 이며, 온도와 압력의 상승 시점이나 최댓값을 잘 추종하는 것을 알 수 있 다. 이러한 결과로 미루어 봤을 때, 계산시간의 절감을 위해 대칭면을 설정 하여도 백드래프트 발생과정에서의 동역학적 거동 특성을 충분히 잘 해상 할 수 있을 것으로 판단하여, 이 후의 계산에서는 대칭면을 설정하여 계산 을 수행하였다.

3.3.2 격자크기의 결정

계산에 사용되는 최소 격자크기의 선정은 계산결과에 직접적인 영향을 미칠 뿐 아니라, 계산의 정확도에도 큰 영향을 줄 수 있다. 과도하게 거친 (Coarse)한 격자크기의 선정은 화염 대에서의 온도나 화학종의 농도를 불 확실하게 예측하여 결과 값에 대한 신뢰도를 떨어트리게 된다. 반면에, 과 도하게 조밀한(Fine)한 격자크기의 선정은 방대한 계산시간을 야기하기 때 문에 적절한 크기의 격자크기의 사용이 필연적이다.

본 연구에서는 앞서 기술한 바와 같이, 소스코드를 대폭 수정했던 기존 의 전산 연구와는 달리 별도의 모델링 작업이 필요하지 않은 DNS 기법을 적용하고 유한 화학반응율 모델을 이용한 계산을 통해 백드래프트의 동역 학적 거동 및 발생조건에 대해 연구하고자 한다. 엄밀히 말하자면 DNS와 같은 정밀한 수치해석 기법을 적용한 계산은 화염 대에서의 최소 난류 와 (Eddy)의 크기와 연소반응이 일어나는 영역에서의 최소 길이 스케일인 반 응대의 크기를 합리적으로 해상하기 위해서, 매우 조밀한 격자크기(0.05 mm)를 요구한다(Oh, 2003). 하지만, 앞서 기술한 바와 같이 본 연구의 목 적은 정량적인 물리량을 도출하는 것이 아니라, 백드래프트 현상에 대해서 엔지니어링 관점에서 받아들일 수 있는 수준에서의 합리적인 결과를 도출 하는 것이 목적이기 때문에, 선행연구와 실험에서의 측정값을 참고하여 최 종 격자크기를 결정하고자 한다.

앞서 선행연구를 통해 10 mm의 격자크기를 적용한 조건에서도 정석적 인 중력흐름의 거동을 예측할 수 있음을 알았다. 또한, 앞서 기술한 바와 같이 McBryde(2008)는 보다 정밀한 중력흐름결과를 위해서는 0.010H미만 의 격자크기를 사용할 것을 제안하였다.(여기서 H는 구획실의 높이를 나타 낸다.) Fig. 3.8에서 보는바와 같이, 0.040H에서도 정성적인 중력흐름을 모 사할 수 있지만, 실제 난류 구조와 소용돌이를 합리적으로 재현하기 위해 서는 0.010H이하에서 합리적으로 재현된다고 보고하였다.

백드래프트의 동역학적 거동에 미치는 격자크기 영향을 검토하고자 McBryde가 제안한 0.010H 의 크기(6 mm)보다 작은 5 mm와 다소 거친 10 mm 와 20 mm를 적용한 계산결과를 비교해보았다. Fig. 3.9 은 서로 다른 격자 크기를 적용한 조건에서의 시간의 경과에 따른 압력상승을 도시 한 것이다. 이 때, 압력 감지기는 구획실 내부 벽면 바닥에 설치(0.9 m,



Fig. 3.8 Numerical two-dimensional relative concentration field for different grid sizes. The white rectangle in the top right hand corner represents a solid obstruction. Black represents saltwater and white represents freshwater (J.D. McBryde, 2008)



Fig. 3.10 Compartment pressure(solid line) and total mass inflow(dotted line) histories for the 70 kW fire source backdraft. Arrow 1 indicates ignition of backdraft and arrow 2 indicates flame out the opening (Fleischmann, 1994).

0.02 m, 0.0 m) 하였으며, 5 mm 미만은 계산에 필요한 저장공간(Memory storage)과 계산시간이 막대하게 증가하는 문제로 고려하지 않았다. 전체적 으로 10 mm와 20 mm의 격자크기를 고려한 조건에서는 시간의 경과에 대 한 압력의 상승이 거의 없이 일정한 값을 유지하거나 미소하게 변동하는 것 을 알 수 있다. 반면에 5 mm의 격자크기를 고려한 조건에서는 두 개의 압력 피크를 가지는 경향을 관찰할 수 있는데, 이러한 거동은 Fig. 3.10 의 기존의 실험(Fleischmann, 1994)에서 측정된 백드래프트 발생 시 관찰된 압력결과와 동일한 경향임을 알 수 있다. 이 때, 두 개의 압력 피크값은 백 드래프트의 발생과정에 있어서 물리적인 혈상을 나타내는 중요한 지표로 서, 5 mm를 고려한 조건에서 이러한 두 개의 피크를 정성적으로 잘 모사 하는 것으로 비추어보아 최적 격자로 선정하기에 합리적으로 보인다. 이 때, 발생하는 두 개의 최대 압력 피크 값과 발생과 관련한 상세한 기술은 4.2.2절을 참고하길 바란다.

#### 3.3.3 점화시간의 결정

현재까지 알려진 바로는 실제 백드래프트 현상에서의 점화는 전기누전이 나 불씨 등의 예측할 수 없는 임의의 점화원에 의해 개시된다고 알려져 있 다. Fleischmann(1994)이나 Weng(2003)등이 수행한 실험 연구에서는 임의 의 점화원을 모사하기 위해서 불꽃화염(Pilot flame)을 생성시키기 위한



Fig. 3.11 Temporal evolution of fuel mass fraction for  $Y_f = 0.1224$  in the compartment with horizontal window.

전기히터를 설치하여 점화원을 공급하였다. 전산해석 연구에서 점화원을 공급하는 방법에 대하여 기술한 기존의 문헌에 따르면, 별도의 적화모델을 코드 내에 내장하여 버너 상단에 위치한 점화기를 통해 점화조건이 만족할 경우 점화에너지를 공급하는 으로 공급하였다(Yang et al., 2005, Domingo et al. 2002), 또한, Horvat et al.(2007)과 Ferraris et al. (2008, 2009)의 연 구에서는 구획실 후방에 원통형의 조그마한 영역에서 국소적인 연료와 산 소의 농도를 매 타임스텝(Time step)마다 확인하여, 구획실 내의 혼합기가 가연한계 범위 내에 들어오게 되면 점화원을 공급하는 방법으로 점화를 개 시하였다. 하지만, 현재까지 백드래프트 현상을 모사하기 위한 일치된 점화 원의 공급방법은 제시 되지 않은 상태이며, 추가적인 점화원을 공급하기 위한 코드를 내장하는 것은 대부분의 연구자들에게 쉽지 않은 작업이다. 이에 본 연구에서는 구획실 내부에 개구부의 반대 방향 벽면에 설치된 가로, 세로 15 cm 의 점화기의 상단면을 통해 특정시간에 고온의 질소 (1773 K)를 순간적으로 공급하여 간단하면서도 실험과 현상적으로 유사한 방법을 통해 강제점화를 시키는 방법을 사용하였다. 이 때. 추가적으로 고 려해야 할 사항이 바로 점화시기이다.

Fig. 3.11 에는 시간에 가로로 긴 창문이 설치된 구획실을 대상으로 개구 부 개방 이후 시간에 따른 연료의 질량분율을 도시하였다. 최초 개구부가 개방되면 중력흐름으로 인해 내부로 유입된 상온의 공기는 구획실 내부의



Fig. 3.12 Effects of the ignition times on temporal evolution of pressure rise with differently imposed ignition source in the compartment with horizontal window using (a) 1-STEP and (b) 3-STEP for  $Y_f = 0.1224$ .



Fig. 3.13 Temporal evolution of temperature at selected ignition time( $t_{ig}$ ) after breaking (t = 0 s) opening window (a)  $t_{ig}$  = 3 s and (b)  $t_{ig}$  = 5 s using 1-STEP.

고온의 연료성분 및 연소생성물과 희석이 되며, 개구부 반대 벽면으로 흐 르게 된다. 이 때, 개방 후 2초 이내에는 중력흐름이 점화기에 도달하지 않 은 상태이기 때문에 점화원을 공급하는 것이 무의미하다. 반면에, 개구부 개방 3초가 지난 이후의 시점은 모두 중력흐름에 의해 생성된 연료와 공기 의 혼합기가 점화기에 도달한 시점이기 때문에 적합한 점화시간의 대상이 될 수 있다.

구획실 내부 안쪽에 위치한 점화기의 상단면을 통해 점화원을 공급하는 방식으로, 1-STEP 을 이용하여 각각 3초, 4초, 5초에 점화원을 공급한 조 건에서의 시간에 대한 압력의 상승을 Fig. 3.12(a)에 도시하였으며, 이 때, t<sub>ig</sub> = 3 s, 4 s, 그리고 5s는 각 조건의 공급 시점을 나타낸다. 전체적으로 두 개의 압력 최댓값을 가지는 경향은 통상의 실험연구(Fleischmann, 1994)와 동일하게 재현되고 있다. 반면에, 점화원의 공급 시점에 따라서 압 력 최댓값을 정량적으로 다르게 예측하고 있는데, t<sub>ig</sub> = 3 s에 점화원을 공 급한 조건의 최댓값은 점화원을 t<sub>ig</sub> = 4 s에 공급한 조건에 비해 약 45% 과대 예측하고 있다. 점화원 공급시기에 따른 압력상승에 있어서 고려하는 총괄 반응기구의 한계로 인한 불확실성을 줄이기 위해서, 추가적으로 3-STEP 을 이용하여 서로 다른 점화시간을 공급한 조건에서의 압력경과 를 Fig. 3.12(b)에 도시하였다. 3-STEP 를 적용한 세 조건에서 또한 두 개 의 최대 압력값을 가지는 것이 관찰되었다. 이러한 최대 압력값의 차이는

압력이 측정되는 위치에서의 국소적인 연료/공기 혼합강도나 3차원 열/유 동효과에 기인하는 것으로 판단된다. 고려하는 화학반응기구에 따라서 정 량적인 값이 다르게 예측되는 것은 추가적인 연구를 통해 고찰해볼 필요성 이 있다. Fig. 3.13은 각각 3초, 그리고 5초에 점화가 된 이후의 시간에 따 른 온도경과를 도시한 것이다. 점화시간에 관계없이 약 1.5초 이후 백드래 프트가 종료되는 것을 알 수 있으며, 특정시간에서의 구획실 내부 국소화 염의 발생위치나 화염길이의 차이는 국소지점에서의 연료 및 공기의 혼합 차이로 판단된다.

점화시기에 상관없이 기존의 실험과 유사하게 두 개의 압력 최댓값을 가 지며, 세 점화시간 모두 백드래프트의 재현에 있어서 합리적으로 재현하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 대표적으로 3초에 점화를 시키는 방법을 채택하였다. 향후 추가 연구를 통해, 점화시기의 변화가 백드래프트에 미치 는 영향에 대하여 연구한다면 백드래프트 현상을 이해하기 위한 기초자료 로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

# 제 4 장 중력흐름 및 동역학적 거동

### 4.1 중력흐름

앞서 3장의 선행연구와 경계조건의 검토를 통해 얻어진 결과를 바탕으로 하여 본 연구에 사용될 최종 경계조건을 결정하였다. 계산은 앞서 Fig. 3.3 에서 도시한바와 같이, 가로 1.2m, 높이 0.62 m 의 구획실을 대상으로 Y축 0.32 m 지점의 x-z 면을 대칭조건으로 선택하여 계산에 필요한 시간영역 의 크기를 줄였다. 또한, 개구부 반대 벽면에 위치한 점화기의 상단면을 이 용하여 개구부 개방 3초 이후에 순간적으로 고온의 점화원을 공급하여 점 화시키고자 한다. 본 연구에서는 1단계 총괄 화학반응기구와 복사모델을 적용한 조건으로 계산을 수행하였으며, 화학반응기구의 영향을 비교를 위 하여 3단계 총괄화학반응기구와 복사모델의 영향검토를 위하여 단열모델을 각각 추가로 검토하였다.

4.1.1 중력흐름과 혼합과정

Fig. 4.1은 시간의 경과에 따른 연료의 질량분율을 도시한 것이다. 계산 의 시작(t = 0 s)와 함께 개구부가 개방되고 구획실 내부의 고온의 연료성 분과 외부의 상온의 공기는 밀도차에 기인한 중력흐름을 보인다. 여기서


Fig. 4.1 Temporal evolution of fuel mass fraction using 3-STEP for  $Y_f$  = 0.1224,



Fig. 4.2 Photograph of the gravity current approximately 3L/into the compartment for a center horizontal slot opening (Fleischmann and McGrattan, 1999).

구획실 내부에 주로 위치한 옅은 색(주황색)은 0.1224의 질량분율을 갖는 연료를 나타내며 내부로 유입되는 짙은 색(푸른색)은 연료의 질량분율이 0.0인 부분, 즉 상온의 공기가 존재하는 영역이다.

먼저, 개구부 개방 0.7초 후를 살펴보면 구획실 내부의 고온 연료의 질량 분율은 구획실 외부로 흐르는 것을 볼 수 있다. 동시에 구획실 외부의 상 온의 공기는 구획실 내부로 유입되고 있으며 이때 공기흐름의 선단(Head) 은 버섯모양(Mushroom shape)의 구조를 가진다. 이후, 약 1.0초가 지나게 되면 공기흐름의 선단은 바닥에 부딪히며 구획실 내부의 고온의 연료와 회 석되며 개구부 반대 벽면을 향해 전진하게 된다. 개구부 방향 벽면 부근에 서 재순환(Recirculation)영역을 만들며 내부로 유입되는 공기의 혼합을 증 가시키고 있음을 알 수 있다. 이 후, 시간의 경과에 따라서 중력흐름의 선 단을 관찰해 보면 푸른색영역(Y<sub>f</sub> ~ 0.05)이 증가됨을 알 수 있는데, 이러 한 영역은 푸른색의 상은의 공기(Y<sub>f</sub> = 0.0)와 초기 연료의 질량분율(Y<sub>f</sub> = 0.12)의 중간 농도 값으로서, 유업된 공기가 내부의 연료 및 연소생성물과 혼합되며 내부 점화기 방향을 흐르고 있음을 보여주고 있다. 그리고 약 3 초가 지난 시점에서는 유입된 중력흐름이 점화기에 도달한 모습을 볼 수 있다.

이러한 전산해석 결과는 Fig. 4.2에 도시화된 기존의 실험(Fleischmann and McGratten, 1999)의 소금물 모형실험에서도 동일한 거동을 관찰할 수

있다. 최초 가로로 긴 창문이 설치된 개구부가 개방이 되게 되면 밀도차에 기인하여 내부로 유입된 중력흐름이 바닥과 부딪힌 이후에 개구부 반대 방 향으로 흐르며 주변의 유체와 혼합되어 색깔이 붉게 변하는 것을 확인할 수 있다.

4.1.2 구획실 내부 연료질량분율 변화

백드래프트의 발생 이전의 중력흐름은 앞서 관찰한 것과 같이 내부로 유 입된 이후에 공기와 연료가 혼합과정에 있어서 매우 중요한 요소이다. 이 러한 중력흐름은 두 기체흐름의 밀도차이에 기인하는 것으로서, 온도의 변 화를 통해 밀도변화를 야기할 수 있으며, 또한 내부 연료의 조성변화로도 외부 상온기체와의 밀도차이를 야기할 수 있다.

Fig. 4.3 은 시간에 따른 연료의 분포를 서로 다른 구획실 내부 연료조건 에서 관찰한 결과이며, (a), (b) 및 (c)은 각각 Y<sub>f</sub> = 0.0573, Y<sub>f</sub> = 0.1224, 그리고 Y<sub>f</sub> = 0.3000 조건에서의 결과값을 도시한 것이다. 이때, 각각의 조 건에서의 밀도값과 개구부 반대 벽에 위치한 점화기 까지 도달한 시간 (Gravity current time : t<sub>grav</sub>)과 구획실 내부 혼합기의 밀도 그리고 상온 공기와의 밀도차를 Table 4.1 에 나타내었다. 동일하게 1초가 지난 시점에 서 관찰해보면 내부의 연료농도가 Y<sub>f</sub> = 0.0573인 조건에서는 다른 조건들 과는 달리 상대적으로 전개가 덜 된 것으로 보인다. 또한, 2초가 지난 시점

Y <sub>CH4</sub>	Gravity current time, t <sub>grav</sub> [s]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Density Difference $\Delta \rho = \rho_{air} - \rho$
0.0573	3.549	0.8895	0.2819
0.1224	2.616	0.8513	0.3201
0.3000	2.407	0.7556	0.4159

Table 4.1Gravity current time, density, and density difference with the<br/>different fuel mass fraction in the compartment.



Fig. 4.3 Temporal evolution of fuel mass fraction using 1-STEP for (a)  $Y_f = 0.0573$ , (b)  $Y_f = 0.1224$ , and (c)  $Y_f = 0.3000$ .

에도 Y<sub>f</sub> = 0.1224, 및 3000 조건은 이미 구획실의 절반 이상을 통과하여 흐르고 있지만, Y<sub>f</sub> = 0.0573 조건은 여전이 중간정도 영역에 위치한 것을 알 수 있다. 약 3초가 지난시점을 살펴보면, Y<sub>f</sub> = 0.1224 는 막 점화기에 도달하였으며, Y<sub>f</sub> = 0.3000 조건은 이미 점화기에 도달하여 부딪힌 이후에 점화기를 감싸며 흐르는 모습을 관찰할 수 있다. 반면에 Y<sub>f</sub> = 0.0573 조건 은 여전히 점화기에 도달하지 못한 채 흐르고 있는 것 또한 관찰 할 수 있 다.

Table 4.1 를 보면 구획식 내부의 연료의 질량분율이 증가할수록 중력호 름 시간이 감소하는 것을 알 수 있다. 세 연료의 온도 조건이 약 380 K 으 로 유사하다는 것으로 비추어 볼 때, 연료의 질량분율 증가는 상대적으로 연료보다 분자량이 큰 나머지 화학종(Air 및 CO<sub>2</sub> 등)의 감소를 야기한다. 즉, Y<sub>f</sub> 가 증가할수록 혼합기의 밀도가 작아지게 되고 구획실 내부로 유입 되는 공기와의 밀도차이는 더 켜지기 때문에 중력흐름의 속도가 빨라져서 점화기까지 도달하는 시간이 감소하게 되는 것이다.

#### 4.2 동역학적 거동

4.2.1 백드래프트의 전개과정

Fig. 4.3 은 1-STEP 를 적용한 조건에서 시간의 경과에 따른 연료의 질



Fig. 4.4 Temporal evolution of fuel mass fraction using 1-STEP and GRAY for  $Y_f = 0.1224$ .



Fig. 4.5 Temporal evolution of temperature using 1-STEP and GRAY for  $Y_f = 0.1224$ .

량분율을 도시 한 것이다. 앞서 기술한바 와같이 계산의 시작(t = 0 s)과 함께 개구부가 개방이 되고 밀도차에 기인한 중력흐름을 관찰할 수 있다. 그리고 약 3초가 지나면, 내부로 유입되어 연료성분과 혼합 되며 가연범위 내의 혼합기를 형성한 중력흐름의 선단은 점화기에 도달하게 된다. 이후 점화기 상단면을 통해 고온의 질소(1770 K)을 순간적으로 공급하여 점화 를 개시하였다. Fig. 4.3의 t = 3.8 s ~ 4.2 s를 통해 알 수 있듯이 점화된 화염으로 인한 열팽창(Heat expansion)에 기인하여 구획실 내부의 연료성 분은 구형태를 보이며 구획실 외부로 분출된다. 그리고 t = 4.8 s 이후를 보면 구획실 내부에 연료성분이 거의 남지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.4 는 백드래프트의 동역학적 거동에 좀 더 자세한 정보를 제공해 줄 수 있는 온도의 경과를 도시 한 것이다. Fig. 4.4 의 t = 3.5 s ~ 3.8 s 를 보면 알 수 있듯이 점화기 상단부측에서 점화된 화염은 구획실 천장 벽 면을 타고 개구부 방향으로 전과(Propagation)한다. 그리고 t = 4.0 s가 지 나게 되면 점화된 화염이 개구부를 통과하여 t = 4.2 s 까지 화재구를 동 반하며 폭발하듯 분출하는 백드래프트 현상이 관찰된다. 그리고 t = 4.46 s 가 지나게 되면 백드래프트가 끝나고 구획실 내부는 고온의 영역(1200 K) 이상)의 연소생성물로 가득 차게 된다.



Fig. 4.6 Temporal evolution of pressure rise with the distribution of temperature and mass fraction using 1-STEP with GRAY for  $Y_f$  = 0.1224.

4.2.2 압력의 변화

앞서 3.3.2절에서 백드래프트 발생 시 시간에 대한 압력의 경과는 두 개 의 피크값을 갖는 것을 확인하였다. 이 때 압력은 측정된 위치는 기존의실 험(Weng and Fan, 2003)에서 측정한 위치를 참고하였으며, Fig. 2.1을 통 해 알 수 있듯이 구획실 내부 벽면에 설치된 압력감지기(0.9, 0.02, 0.0)를 통해 측정되었다. 참고로, 구획실 내부압력은 측정 지점에 따라 다르며 그 크기는 수십 pa에서 수백 pa까지도 상승하는 것을 확인하였다. 압력은 대 기압을 기준으로 측정되었으며, 압력 값이 0 인 것은 대기압과 동일함을 의미한다. 앞서 기술한바와 같이 전체적인 경향은 기존의 실험 연구 (Fleischmann, 1994)와 동일하게 2개의 피크를 갖는 등 시간에 따른 압력 의 경향이 정성적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4.6은 1단계 총괄 시간의 경과에 따른 압력의 경과와 함께 특정 시 간대에서의 연료와 온도의 공간분포를 도시한 것이다. 먼저 시간에 대한 압력경과를 살펴보면 최초 점화가 발생한 이후(t = 3.5 s ~ t = 3.8 s) 1 차 압력상승이 관찰되며, 화재구가 개구부를 통과하는 과정(t = 4.0 s ~ t = 4.3 s)에서 2차 압력상승이 관찰되었다. 그리고 2차 압력 상승 이후에 급 격한 압력 강하가 관찰되며 부압(Negative pressure) 또한 갖는 것을 알 수 있다. 여기서, t = 3.77 s에서의 1차 압력상승은 연료와 온도의 공간분 포를 통해 알 수 있듯이, 점화가 개시된 이후에 연소반응에 의한 열팽창으

로 인해 내부압력이 상승하게 되어 구획실 내부의 고온의 연료성분들이 개 구부를 통해 외부로 밀쳐내듯이 분출되면서 발생한다. t = 4.12 s에서의 2 차 압력상승은 천장을 통해 개구부로 전파하는 화재구가 구획실을 폭발적 으로 통과하는 순간이며, 동시에 구획실 내부에 국소적인 점화가 개시되는 순간이다. t = 4.46 s에서 화재구가 개구부를 통과한 이후 급격한 압력하강 이 발생하는데 이는 화재구의 영향(Repercussion)으로 인한 것으로 기존의 실험(Fleischman, 1994)을 통해서도 잘 알려져 있는 현상이다.

#### 4.2.3 화학반응기구 영향

Fig. 4.7 은 3단계 총괄 화학반응기구(3-STEP)을 적용한 조건의 시간에 대한 연료의 공간분포를 도시한 것이다. 연료의 질량분율을 통해서 관찰되 는 전체적인 백드래프트의 전개과정은 1단계 총괄 화학반응기구(1-STEP) 와 유사한 거동을 보인다. 1-STEP 을 이용한 조건에서는 약 4.45초에 백 드래프트가 종료 되는 것으로 보이지만, 3-STEP 을 적용한 조건에서는 조 금 더 늦은 약 5초가 지난 시점에 백드래프트 현상이 종료되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.8 는 3-STEP 을 적용한 조건에서의 온도의 공간분포를 도시 한 것이다. 전체적으로, 온도의 공간분포는 연료의 질량분포와는 달리 다소 차 이점을 관찰 할 수 있다. 먼저, Fig. 4.5 의 1-STEP 을 적용한 조건에서는



Fig. 4.7 Temporal evolution of fuel mass fraction using 3-STEP and GRAY for  $Y_f = 0.1224$ .



Fig. 4.8 Temporal evolution of temperature using 3-STEP and GRAY for  $Y_f = 0.1224$ .

t = 4.0 s인 시점에 이미 점화된 화염이 개구부를 통과하며, t = 4.0 ~ 4.1 s에 걸쳐 화재구(Fire ball)를 생성하는 것을 알 수 있다. 이때, 생성된 화 염이 개구부까지 전과하는데 소요되는 시간은 약 0.9초이다. 반면, 3단계 총괄 화학반응기구를 적용한 조건에서는 t = 4.1 s에서야 비로소 점화된 화염이 개구부를 통과하여 t = 4.2 ~ 4.80 s에 걸쳐 비교적 오랫동안 화재 구를 형성하고 있으며, 이 때 전과되는 시간(Traveling time)은 약 1.0초이 다. 화재구의 크기 또한 1-STEP 이 3-STEP 보다 더 큰 것을 관찰할 수 있는데, 이때, 1-STEP 의 경우는 폭발적으로 분출되는 화재구의 가로길이 가 2.4m를 넘어 계산영역 끝 까지 뻗고 있다. 반면에 3-STEP 의 경우의 화재구는 가로 길이는 약 1.8m 으로, 화재구의 강도가 1-STEP 보다는 약 한 것으로 보인다. 이때 측정된 두 화학반응기구의 구획실 내부의 전과시 간과 화재구의 가로 및 세로 걸이를 Table 4.2 에 정리하였다.

추가적으로 확인할 수 있는 차이점은 바로 구획실 하부측의 국소점화 (Local ignition)가 발생하는 시간이다. Fig. 4.5 의 1-STEP 조건에서는 t = 4.2 s이후부터 구획실 하부 측의 국소 점화를 관찰할 수 있지만, Fig. 4.8 의 3단계 총괄화학반응기구를 적용한 조건에서는 약 4.45초가 지난 시점에 서야 비로소 국소점화가 관찰된다. 이러한 국소점화는 점화기를 통해 공급 된 점화원에 의해 생성된 화염이 천장벽을 통해 전파하는 과정에서 구획실 상부와 하부의 온도차에 기인하여 하부의 가연범위내의 혼합기로 열이 전



 Table 4.2
 Traveling time and size of fire ball with different chemical reaction models

달되게 되고, 이때 전달되는 열로 인한 점화에너지의 공급으로 생성되는 것이다. 이러한 국소점화의 시기에 기인하여 1-STEP 의 조건은 t = 4.3 s 이후에는 구획실 내부가 고온이 연소생성물(약 1300 K)으로 가득 차게 되 지만, 3-STEP 조건에서는 t = 4.7 s이후에서야 비로소 구획실 내부가 고 온의 영역으로 가득 차게 되는 것 또한 알 수 있다.

4.2.4 동역학적 거동에 미치는 복사효과

앞서 관찰된 하부측 국소점화가 복사열전달에 기인하는 효과임을 검토하 기 위해서 Fig. 4.9와 Fig. 4.10에는 3-STEP 을 적용한 조건에서 화염 대 에서의 복사열전달이 고려되지 않는 ADIA 모델을 고려한 조건으로 계산 한 온도와 질량분율의 시간에 따른 공간분포 결과를 도시하였다. Fig. 4.9 의 ADIA 조건에서는 GRAY에 비해 전체적으로 화염 대에서의 온도를 과 대 예측하는 것을 알 수 있다. 또한, GRAY에서 약 4.0초 즈음에 점화된 화염이 개구부를 통과하여 약 5초가 지난 시점에 끝이 나는 반면에 ADIA 에서는 3.91초 즈음에 개구부를 통과하여 약 4.5초에는 끝나게 된다. 여기 서 주목할 점은 ADIA 조건에서는 앞서 언급한대로 복사열전달이 고려되 지 않기 때문에 하부측 국소점화가 발생되지 않는다는 것이다. 이러한 경 향은 Fig. 4.10 의 연료의 질량분율의 경과를 통해서도 확인 할 수 있다.



Fig. 4.9 Temporal evolution of temperature using 3-STEP and ADIA for  $Y_f = 0.1224$ .



Fig. 4.10 Temporal evolution of fuel mass fraction using 3-STEP and ADIA for  $Y_f = 0.1224$ .



Fig. 4.11 Temporal evolution of temperature using 3-STEP with GRAY and ADIA for  $Y_f = 0.1224$ .

약 4.2초 까지는 복사모델을 적용한 조건과 유사하게 전개되나 백드래프트 의 발생이 끝이 난 약 5초 즈음에도 여전히 구획실 하부측에 연료가 충분 히 연소되지 못한 채 공급한양(Y<sub>f</sub> = 0.1224)이 상당부분 남아 있는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 4.11 에는 3-STEP 을 적용한 조건에서 구획실 가운데 위치한 열전 대를 통해 측정된 시간에 대한 온도의 경과를 도시한 것이다. 대표적으로 천장부근에 설치된 열전대(TCI)와 하부측 바닥에 위치한 열전대(TCI0)을 비교 도시하였으며, GRAY 와 ADIA 는 각각 복사모델과 단열모델을 나타 낸다. 천장 부근에 위치한 TCI의 경우 ADIA 가 GRAY 보다 조금 더 빠 르게 온도상승을 예측하는 것을 알 수 있는데, 이는 점화된 화염의 전과속 도에 있어서 ADIA 가 GRAY 보다 더 빠름을 의미한다. 또한, 백드래프트 전개과정동안에 전체적으로 ADIA 가 GRAY 에 비해 약 500 K 더 높게 예측하고 있다. 반면에, 바닥면 부근에 설치된 TCI0의 경우 ADIA 조건에 서는 온도의 상승을 관찰 할 주 없었으며 오직 GRAY 에서만 관찰되었다. 이러한 경향은 ADIA 조건의 경우 구획실 하부측은 복사열전달이 고려되 지 않기 때문에 국소점화가 개시되지 않았기 때문이다. 반면에, 복사열전달 이 고려되는 GRAY 조건의 경우 Fig. 4.8 에서 볼 수 있듯이 t = 4.7 s 즈 음 구획실 하부측에 국소점화가 개시되며 이에 기인하여 하부측에 설치된 TCI0에서 급격한 온도 상승이 관찰 된다.

#### 4.2 백드래프트의 국소화염구조 비교

Fig. 4.12 에는 (a) t = 3.9 s 및 (b) t = 4.12 s 인 순간의 연료의 질량분 율 및 온도를 도시한 것이다. 그리고 구획실 내/외부의 전파하는 화염과 화재구의 화염구조를 도시하기 위해 (a)와 (b)의 화살표로 표기된 구간을 1차원 구조로 Fig. 4.13 에 도시하였다.

Fig. 4.13의 (a)는 t = 3.9 s인 시점의 구획실 내부의 국소화영구조를 도 시한 것이다. 이때의 국소화영구조는 통상의 전과하는 특징을 가지는 부분 예혼합화염(Partially-premixed flame)의 구조와 동일함을 알 수 있다. 이 때, 구획실 내부 안쪽 벽면에서 개구부 방향으로의 거리(x-directional distance, X)가 X = 0.0 ~0.2 m 구간은 기연(Burned)영역으로서 주로 연 소생성물인 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 그리고 N<sub>2</sub>가 분포되며 일부 충분히 연소되지 못한 연료인 CH<sub>4</sub>가 분포함을 알 수 있다. 반면에, X = 0.2 ~0.8 m 구간은 미연 (Unburned)영역으로 연료와 공기의 예혼합기가 존재하며, 두 영역의 가운 데인 X~0.2 m 에서는 통상의 부분예혼합화염이 구조와 동일하게 연료와 공기가 혼합되어 있는 미연영역으로 타들어가는 화염구조와 함께 온도의 급격한 상승구간, 그리고 연료 및 공기의 급격한 농도구배(Gradient)가 관 찰된다. 또한, 구획실 외부를 도시한 Fig. 4.13(b)를 살펴보면. X = 1.2 m ~2.6 m 구간에서는 고온의 연소생성물이 연료와 혼합되어 있는 고온의 혼합기 가 관찰되며 X = 2.8 ~ 3.6 m은 상온의 순수한 공기만을 확인할 수 있다. 또한, 두 영역의 가운데인 X~2.8 m 에서는 연료와 산화제가 반대방향에 서 공급되며 급격한 온도 상승과 함께 연소생성물인 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O의 증가가 예측되고 있다. 이러한 국소화염 구조는 본연구팀의 선행연구인 Song(2012) 과 Kim(2013)등의 연구에서 관찰된 고온의 연소생성물이 희석 된 데탄 비예혼합화염(Non-premixed flame)의 국소 화염구조와도 일치함 을 알 수 있다.

앞서 기술한 바와 같이 백드래프트의 전개과정을 자세히 보면 통상의 화 재와 같은 비예혼합화염과 전파하는 특성을 보이는 부분예혼합화염의 구조 가 공존하는 것을 알 수 있다. 비록, 기존의 실험연구에서 백드래프트 발생 시의 국소화염구조가 측정된 자료가 없어 정량적인 비교는 불가하지만, 기 존의 실험과 정성적 및 정량적으로 검토된 백드래프트 동역학적 거동에서 관찰된 물리적인 현상들을 토대로 비추어 볼 때, 복잡한 연소특성을 가진 백드래프트 현상이 별도의 모델링 작업 없이도 Model-free simulation을 적용한다면 Fig. 4.13 과 같이 재현될 수 있음을 확인하였다.



Fig. 4.12 Distribution of fuel mass fraction and temperature using 1-STEP at (a) t = 3.9 s and (b) t = 4.12 s.



Fig. 4.13 Local flame structure of inner compartment and outer compartment during the backdraft simulation at (a) t = 3.9 s and (b) t = 4.12 s.

## 제 5 장 백드래프트의 초기 조건

앞서 1.2장에서 기술한 바와 같이 Gottuk(1999)은 구획실 내부의 연료의 질량분율(Fuel mass fraction)을 증가시키며 백드래프트의 발생확률 (Frequency)이 급격히 높아지는 조건을 임계값으로 결정하였다. 또한, Weng and Fan(2003)은 백드래프트가 발생되는 임계질량 분율 조건에서 구획실 내부의 최대 압력(Peak pressure)값이 급격히 증가된다고 보고하였 다. 이에 본 연구에서는 최대압력값을 기준으로 백드래프트의 발생여부를 판단하는 Weng and Fan(2003)의 방법을 채택하여 결과를 검토하고자 한 다.

## 5.1 화학반응기구 영향

Fig. 5.1 은 1단계 총괄 화학반응기구를 적용하여 세가지 연료 질량분율 조건 (a) Y<sub>f</sub> = 0.0573, (b) Y<sub>f</sub> = 0.0729, 그리고 (c) Y<sub>f</sub> = 0.1224을 대상으 로 시간의 경과에 대한 온도분포를 도시한 것이다. 이 때, (a) Y<sub>f</sub> = 0.0573 와 (b) Y<sub>f</sub> = 0.0729 의 조건은 Weng and Fan(2003)이 보고한 임계질량분 율 (Y<sub>f</sub> = 0.0850)보다 낮은 조건으로서 백드래프트의 발생되지 않는다고 보고된 조건이다. 그럼에도 불구하고, 1-STEP 를 적용하였을 경우 세 조

HOYN



Fig. 5.1 Temporal evolution of temperature using 1-STEP and GRAY for (a)  $Y_f = 0.0573$ , (b)  $Y_f = 0.0729$ , and (c)  $Y_f = 0.1224$ .



건 모두 화재구를 동반한 백드래프트의 발생을 모사하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 고려하는 화학반응메커니즘의 점화온도 및 가연한계 에 대한 예측성능에 기인하는 것으로서, 1-STEP 의 경우 백드래프트의 수 치적 재현성은 예측에는 적합하지만, 개시조건의 경우는 적합하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5.2 는 3-STEP 를 적용한 조건에서의 시간에 경과에 대한 온도분 포를 도시한 것이다. 1-STEP 를 적용한 Fig. 5.1 과는 달리 임계 질량분 율 조건 미만인 (a)와 (b)의 결과와 (c)의 결과가 다르게 예측되고 있음을 알 수 있다. 세 조건 모두 점화기를 통해 접화된 이후에 개구부 방향으로 전개되는 t = 3.8 ~ 4.2 s 까지의 거동은 유사하게 예측하고 있다. 반면에, 임계질량 분율조건 이상인 (c)는 화재구가 구획실 밖으로 분출되며 구획실 하부측에 국소점화가 개시되며 전체적으로 고온영역(1500K)으로 가득 차 있으나, 임계질량 보다 낮은 (a)와 (b)는 개구부 밖으로 전파되는 화염의 거동은 백드래프트의 발생이 아닌 단순한 점화된 화염의 분출 으로 보인 다. 또한, 복사모델을 적용했음에도 불구하고 구획실 하부측에서의 국소점 화는 관찰되지 않으며, 구획실 내부 천장부근에서의 온도 또한 약 1000 K 으로 (c)의 1500 K에 비해 500 K 정도 낮게 예측하고 있음을 알 수 있다. 위 Fig. 5.1 과 5.2 를 통해 관찰한바와 같이, 1-STEP 및 3-STEP 모두

백드래프트의 수치적 재현성에는 적합하지만, 백드래프트의 임계조건 근처

에서의 백드래프트의 발생예측에는 3-STEP 이 더 적합함을 알 수 있었다.

#### 5.2 백드래프트 발생의 임계조건

Fig. 5.3 에는 1-STEP 및 3-STEP 적용한 조건에서의 고려하는 연료의 질량분율 농도에 대한 최대 압력값을 도시한 것이다. 비교를 위해 Weng and Fan(2003)의 실험에서 측정된 최대 압력값과 함께 도시하였다. 이때, 1-STEP 을 이용한 조건의 결과값은 0.1배로 감소되었음을 참고하길 바란 다. 또한 3-STEP 의 경우, 앞서 5.1절에서 기술한바와 같이 화재구를 동반 한 백드래프트의 거동이 아닌 단순 점화만 발생한 조건의 최대 압력값은 0 으로 처리하였다.

전체적으로 기존의 실험에서 보고(Weng and Fan, 2003)한 바와 같이 구 획실 내부 연료의 질량분율이 커질수록 최대 압력값 또한 증가하는 거동을 보인다. 그리고 실험에서의 압력값을 보면 임계질량 분율값인 Y<sub>f</sub> = 0.085 를 기준으로 약 700% 커지는 것을 알 수 있다. 전체적으로 1-STEP 의 결 과는 실험값보다 다소 높게 예측하고 있는데, 이러한 결과는 1-STEP 의 경우 점화온도와 화염대에서의 열발생을 다소 과대 예측함에 기인하는 것 으로 판단된다. 하지만 전체적으로 고려하는 연료의 질량분율의 증가에 따 라 최대 압력값이 증가하는 거동은 정성적으로 일치하며, 임계농도 부근에



**Fig. 5.3** Peak pressure for occurrence conditions of backdraft with the different fuel mass fractions in the compartment using 1-STEP and 3-STEP with experimental results conducted by Weng and Fan(2003).

서 약 40% 급증하는 것 또한 관찰 할 수 있다.

반면에, 3-STEP 기구의 경우 임계 질량분율 근처에서 급격한 압력의 증 가를 관찰할 수 있으며, 발생하는 최대 압력의 크기 또한 실험과 유사한 크기(약 10 pa이내)임을 알 수 있다. 즉, 전체적으로 3-STEP의 경우 정성 적/정량적으로 실험에서의 임계질량 분율값을 잘 예측하는 것을 알 수 있 다.



## 제 6 장 결론

본 연구에서는 실내공간에서 발생하는 폭발성 화재현상인 백드래프트의 해석을 위해 FDS를 이용한 전산해석 연구를 수행하였다. 먼저, 계산에 사 용될 연소모델과, 경계 조건에 대한 검토를 수행하였다. 이 때 얻어진 결과 들을 이용하여 최종 계산영역과 경계조건을 이용하여 백드래프트의 수치적 재현성과 동역학적 거동 그리고 초기 개시조건에 대한 전산해석 연구를 수 행하였다. 이러한 과정에서 얻어진 구체적인 결과는 다음과 같이 요약된다.

٢

# 6.1 백드래프트의 발생 및 재현성 검토

FDS 에 기본적으로 내장되어 있는 혼합분율 연소모델(MF)와 유한화학 반응율 연소모델(FC)을 적용하여 백드래프트의 수치적 재현성을 검토해 본 결과, MF 는 백드래프트의 발생을 모사할 수 없지만 FC 는 백드래프 트의 발생을 재현할 수 있음을 알았다. 또한, 다양한 개구부 형상에 따른 백드래프트의 동역학적 거동을 고찰해본 결과, 유입되는 공기량의 차이에 기인하여 최대 유속이 크기가 다르게 예측되었으며, 개구부 형상에 따라서 구획실 내부의 온도분포가 다르게 예측됨을 알았다.

### 6.2 중력흐름 및 동역학적 거동

상온의 공기와 고온의 연료성분의 밀도차이에 기인한 중력흐름이 기존의 실험과 유사하게 모사되었다. 상온의 공기는 구획실 내부로 버섯모양의 구 조를 보이며 유입되었고, 유입된 이후 개구부 반대방향까지 도달하게 되는 중력흐름시간은 구획실 내부의 연료의 질량분율에 따라서 차이를 보였으 며, 혼합기의 밀도가 낮을수록 더 빠른 속도의 중력흐름이 예측되었다.

점화 된 화염은 개구부 방향으로 전파하는 특징을 보였으며, 화재구를 동반하며 구획실 외부로 폭발하듯 분출되는 백드래프트 현상이 재현되었 다. 이 때, 전파 과정동안에 구획실 내부의 벽면 바닥에서 측정된 압력은 기존의 실험과 동일하게 두 개의 피크를 보였다. 두 개의 피크 중 첫 번째 는 최초 점화된 화염의 열팽창에 기인하여 연료가 구획실 외부로 분출될 때 발생하며, 두 번째 피크는 개구부 방향으로 전파한 화염이 구획실을 빠 져 나갈 때 발생하였다.

점화된 화염의 전파속도는 1단계 총괄화학반응기구(1-STEP)가 3단계 총 괄반응기구(3-STEP) 보다 더 빠르게 예측 하였다. 또한, 구획실 외부로 분출되는 화재구의 크기도 1-STEP 가 3-STEP 보다 약 30% 더 크게 예 측하였다.

점화된 화염이 천장벽을 타고 개구부 방향으로 전파하는 과정에서 복사 열전달에 기인하여 구획실 하부측에서 국소점화가 발생함을 알았다. 또한, 단열모델(ADIA)의 경우 복사모델(GRAY)에 비해 백드래프트의 전개시간 은 더 짧게 예측하였으며, 구획실 내부 상부측의 온도는 GRAY보다 약 500 K 과대 예측함을 알았다.

백드래프트의 전개과정 동안의 백드래프트 현상에서 두 가지의 복잡한 연소특성을 보이는 화염 구조가 관찰되었는데, 구획실 내부에서는 부분 예 혼합화염의 국소화염구조가, 구획실 외부에서는 비예혼합화염의 구조가 관 찰되었다. 그리고 FDS의 소스코드의 수정 없이 두 가지 연소특성을 보이 는 백드래프트 현상의 재현이 가능함을 알았다.

# 6.3 백드래프트 발생의 개시조건

1-STEP 및 3-STEP 을 적용하여 기존에 문헌상에 보고된 백드래프트 발생 개시조건을 검토해본 결과, 두 총괄화학반응기구 모두 백드래프트의 수치적 재현성에는 적합함을 알았다.

1-STEP 의 경우 점화온도 및 가연범위의 예측성능에 기인하여 임계질 량분율 미만의 조건에서도 백드래프트가 발생함을 알았다. 반면에 3-STEP 의 경우는 임계질량분율 미만에서는 단순 점화만 관찰되었으며, 임계질량 분율 이상의 조건에서는 백드래프트가 발생을 예측하였다.

실험에 측정된 임계 질량분율 조건을 참고하여 전산해석을 이용한 백드 래프트의 임계발생 조건을 검토해본 결과, 1-STEP 의 경우 정성적으로는 임계 질량분율을 예측할 수 있지만 정량적인 압력값은 과대 예측함을 알았 다. 반면에, 3-STEP 의 경우 정량적으로도 실험값과 유사한 스케일의 압 력값을 예측하였으며, 임계치를 기준으로 급격한 압력상승을 보이는 기존 의 실험결과를 잘 추종함을 알았다.

TIONA

### 6.4 안전 및 소방관련 분야 기초 교육 자료

이상의 결과들을 바탕으로 본 연구에서 얻어진 결과들은 국내 에너지 플 랜트 안전 분야 및 소방관들의 안전관련 교육에 참고자료로 사용될 수 있 을 것으로 판단된다. 개구부 개방 전 구획실 내부 온도가 높을 경우, 별도 의 점화장치 없이 백드래프트가 발생할 수 있다는 점, 개구부 형상에 따라 서 백드래프트의 발생장도 및 내부의 열역학적 특징이 다르게 예측되며, 백드래프트 발생 전의 중력 호를 및 화재전과시간이 다르다는 점 등은 화 재현장 진압 및 안전설계에 있어서 도움이 될 것으로 판단된다. 또한, 백드 대프트 현상의 발생 메커니즘을 시각적으로 고찰할 수 있다는 점과 원하는 경우 임의의 개구부 형상을 갖는 구획실을 대상으로 하여 백드래프트의 재 현성 검토가 가능하다는 점 등은 소방안전 설계 및 에너지 플랜트 현장에 서의 사고예방 설계 자료에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.
## 6.5 향후의 연구 방향

본 연구에서 다룬 백드래프트의 전산해석에는 다양한 파라메터 중 일부 조건에서만 수행되었다. 따라서 추가로 다양한 형태의 개구부 형상에서 연 구를 진행해 볼 필요가 있다. 또한, 단일 개구부가 아닌 다중 개구부 및 다 중 구획실을 대상으로도 백드래프트의 발생 및 전개과정에 대해서 검토하 는 것 또한 매우 유용할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 점화시간, 점화방 법, 구획실의 크기, 연료의 종류, 구획실 대부의 온도 등의 다양한 파라메 타들의 변화가 백드래프트의 동역학적 거동에 미치는 영향을 검토한다면 백드래프트 현상의 안전 지침이나 소방관련 매뉴얼의 제작에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 보인다.

그 외에, 본 연구에서 사용된 FDS 5.5의 경우 연소모델의 모델링에서의 한계 때문에 3-STEP 보다 더욱 정밀한 반응메커니즘을 적용할 수 없었다. 하지만 최근에 공개된 FDS 6.0의 경우 이 부분이 개선되었기에 향후 더욱 예측성능이 우수한 다단계(Multi-step) 혹은 확장된(Augmented) 반응메커 니즘을 고려한 백드래프트의 재현연구가 수행된다면 더욱 유용한 데이터를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 가용한 전산해석자원이 늘어나게 되 어, 고려하는 격자의 크기를 더욱 줄이거나 계산영역을 증가시켜 계산을 수행한다면 더욱 신뢰할만한 해석연구가 가능할 것으로 보인다.

93

참고문 헌

Bui-Pham, M.N., 1992, Studies in structures of laminar hydrocarbon flames, *University of California*, San Diego.

Bukowski, R.W., 1995, Modeling backdraft: the fire at 62 watts street, *National Fire Protection Association Journal*, Vol. 89, pp. 85-59.

Chen, A., Zhou, L., Liu, B, and Weihong, C, 2011, Theoretical analysis and experimental study on critical conditions of backdraft, *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 24, pp. 632 - 637.

Croft, W.M., 1980, Fires involving explosions-a literature review, *Fire Safety J.*, Vol. 3, pp. 3-24.

Dryer, F.L., and Glassman, I., 1973, High-temperature oxidation of CO and CH<sub>4</sub>, *Proc. Combust. Instit*, Vol. 14., pp. 987-1003.

Ferraris, S.A., Wen, J.X., and Dembele, S., 2008, Large eddy simulation of the backdraft phenomena, *Fire Safety J.*, Vol. 43, pp. 205-225.

Ferraris, S.A., Madga, I., and Wen, J.X., 2009, Large eddy simulation of the backdraft phenomenon and its mitigation in compartment fires with different opening geometries, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 181, pp. 853-876.

Fire Department of the Ministry of Public Security, 2010, China fire services year-book 2010, Beijing: International Culture Publishing Company.

Fleischmann, C.M., Pagni, P.J. and Williamson R.B., 1992, Preliminary backdraft experiments. In: *Proceedings of 12th Joint Panel Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety*, October 27 - November 2, pp. 208-215.

Fleischmann, C.M., Pagni, P.J. and Williamson, R.B., 1993, Exploratory backdraft Experiments, *Fire Technology*, Vol. 29, pp. 298-31

Fleischmann, C.M., 1994, Backdraft phenomenon, *National Institute of Standards and Technology, NIST-GCR-94-646*, Gaithersburg, MD.

Fleischmann, C.M., 1993, Backdraft phenomena, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.

Fleischmann, C.M., Pagni, P.J., Williamson, R.B., 1994. Quantitative

backdraft experiments, *Proceedings of the Fourth International Symposium of Fire Safety Science*, June 13 - 17, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 337 - 348.

Fleischmann, C.M., Pagni, P.J., Williamson, R.B., 1994. Salt water modeling of fire compartment gravity currents, In: *Fire Safety Science-Proceeding of the Fourth International Symposium*, June 13 - 17, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 253 - 264.

Fleischmann, C.M., McGrattan, K.B., 1999. Numerical and experimental gravity currents related to backdrafts, *Fire Safety*. J. Vol. 33, 21 - 34.

Horvat, A., Sinai, Y., Gojkovic, D., and Karlsson, B., 2007, Numerical and experimental investigation of backdraft, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 180, pp. 45-63.

Gojkovic, D., 2000, Initial backdraft Experiments, Report 3121, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden.

Gottuk, D.T., Peatross, M.J., Farley, J.P., Williams, F.W., 1999, The development and mitigation of backdraft: a real-scale shipboard study. *Fire Safety*. *J.*, Vol. 33, 261 - 282.

Kim, Y.J., Oh, C.B., Choi, B.I., and Han, Y.S., 2013, Radiation effects on the ignition and flame extinction of high-temperature fuel, *Fire Sci. Eng.*, Vol. 27, No. 6, pp 50-56.

McBryde, J.D., 2008, Experimental and numerical modelling of gravity currents preceding backdrafts, MAster dissertation, Canterbury University, Newzealand.

McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., and Floyd, 2010, Fire dynamics simulator (version 5) User's guide, *NIST Special Publication*, 1019-5, Nat. Inst. of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA.

McGrattan, K., Baum, H., Rehm, R., Mell, W., McDermott, R., Hostikka, S., & Floyd, J., 2010, Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide, *NIST Special Publication*, 1018-5, Nat. Inst. of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA.

Oh, C.B., 2003, Direct numerical simulation on the interaction of counterflow nonpremixed flame and a single vortex, Ph.D. dissertation, Inha

University, Korea.

Song, K.M., 2012, Dilution effects of the high-temperature combustion products on the ignition and combustion characteristics of methane, Master dissertation, Pukyong National University, Korea.

Steckler, K.D., Baum, H.R., Quintere, J.G., 1986, Salt water modeling of fire induced flows in multicompartment enclosures, *Proc. Combust. Instit*, Vol. 21, pp. 143-149.

Weng W.G., Fan. W.C., Qin, J., and Yang, L.Z., 2002, Study on salt water modeling of gravity currents prior to backdrafts using flow visualization and digital particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, Vol. 33, pp. 398-404.

Weng, W.G., Fan, W.C., 2003a. Critical condition of backdraft in compartment fires: a reduced scale experimental study, *J. Loss Prev. Process Ind*, Vol. 16, pp. 19-26.

Weng, W.G., Fan, W.C., Yang, L.Z., Song, H., Deng, Z.H., Qin, J., Liao, G.X., 2003b, Experimental study of backdraft in a compartment with openings of different geometries, *Combust. Flame*, Vol. 132, pp. 709-714.

Weng, W.G., Fan, W.C. and Hasemi. Y., 2005, Prediction of the formation of backdraft in a compartment based on large eddy simulation, *Engineering Computations*, Vol. 24, pp. 376-392.

Yang, R, Weng, W.G., Fan, W.C., and Wang Y.S., 2005, Subgrid scale laminar flamelet model for partially premixed combustion and its application to backdraft simulation, *Fire Safety J.*, Vol. 40, pp. 81-98.

## 감사의 글

2010년 학부 2학년 처음 연구실에 들어온 날부터, 지난 4년간의 기억들 이 주마등처럼 머릿속을 스쳐 지나갑니다. 돌이켜 보면 저는 너무나 과분 할 정도로 인복이 넘치는 행복한 20대를 보냈습니다. 지금 이 자리를 빌려 고마우신 분들에게 감사한 마음을 전하고자 합니다.

인생에 있어서 가장 중요한 20대의 순간에 배움의 길로 손 내밀어주시 며 학문적으로, 정신적으로 힘이 되어 주시고 이끌어주신 오창보 교수님, 대단히 감사드립니다. 지난 4년간 교수님께 배운 학문적 앎과, 삶의 자세, 그리고 훌륭한 제자를 키우고자 하신 교육자로서의 신념은 앞으로의 삶에 서도 가슴속 깊이 새기겠습니다. 부족한 논문을 세심한 조언과 아낌없는 격려로 복 돋아주신 이의주 교수님, 이창준 교수님께 감사드립니다. 그리고 안전공학도로서의 학문적 소양을 쌓을 수 있도록 가르쳐주시고, 아낌없는 관심으로 지켜봐주신 목연수 교수님, 이내우 교수님, 장성록 교수님, 이동 훈 교수님, 권오현 교수님, 그리고 신성우 교수님께 감사의 인사를 드립니 다. 그리고 학자로서의 좋은 말씀 전해주셨던 기계공학과 박정 교수님, 대 전대학교 황철홍 교수님께도 감사드립니다. 인자한 미소로 지켜봐주신 박 외철 교수님, 그리고 최재욱 교수님께도 감사의 인사를 드립니다. 형, 누나 처럼 옆에서 챙겨주신 고경찬 박사님, 이종빈 박사님, 오현수 박사님, 이유 정 박사님 그리고 조교 선생님들께도 감사의 인사드립니다.

4년간 동고동락했던 소중한 연구실원들, 항상 동생들을 배려해주던 안 아주고 호현이형, 연구실 분위기 메이커 비타민 유정이 에게도 깊은 감사 드립니다. 앞으로 일당백 역할을 다해야하는 듬직한 민욱이, 그리고 항상 웃으며 긍정적으로 하루하루를 보내는 경래에게도 감사의 마음을 표현합니 다. 룸메이트로 늦은 밤을 함께 수다로 지새웠던 영훈이, 새로운 환경에서 새로운 가정과 함께 학업을 준비하시는 태희행님, 일본에서 큰 꿈을 위해 열심히 학업에 증진하시는 정훈이형 앞으로의 더 큰 성장 응원합니다. 학 과 선배를 연구실 후배로 둔 힘든 연구실 방장을 보냈던 고마운 금미, 언 제나 듬직한 철진이, 항상 살가운 준영이, 미소천사 은정이 누나, 그리고 언제나 미소 짓던 스마일 정란이, 3공 아이돌 은철이에게도 고마움을 표현 합니다. 함께 실험실 생활은 하지 않았지만 학회장에서 그리고 SNS를 통 해 함께 소통하고 응원해주었던, 기계공학과 원준이형, 용호형, 상훈이형, 원식이, 진욱이, 승재 그리고 대전대학교 선여와 재호에게도 감사의 마음을 전하며 앞으로의 더 큰 성장 응원합니다. 그리고 많은 도움주셨던, 지금은 더 큰 꿈을 펼치기 위해 멀리 사우디의 KAUST와 일본의 Hokkaido 대학에 서 수학중이신 대근이행님, 성환이행님께도 감사드립니다.

20대 초반 방황의 시기에 길잡이가 되어주시고 이끌어주셨던 김정한 은 사님, 그리고 사회경험의 첫 시작점에서 많은 조언해주신 오준석 사장님께 도 감사의 인사드립니다. 또한, 영어에 대한 벽을 허물어주시고, 배움의 즐 거움과 항상 겸손 하라는 삶의 자세를 알게 해주신 김성봉 선생님께 이 자 리를 빌려 감사드립니다. 늘 곁에서 기쁨은 두 배로, 힘듦은 반으로 줄여주 었던 20년 지기 내 친구 퍼펙트 경래, 스마트 준우, 예능 완타, 완벽 종근, 조각 민도, 그리고 얼짱 은옥이에게 고마움을 전합니다. 전공이라는 울타리 내에서 함께 진로에 대해 고민하고, 아파하고, 그리고 즐거움을 나누며, 꿈 을 응원해주던 내 소중한 친구 승호, 승민이 그리고 광래, 너무나도 고맙 다. 힘이 들 때면, 단걸음에 날아와서 한잔 술로 괴로움을 잊게 해주는 신 재, 국이, 명훈이, 치현이, 지훈이, 하나, 은희, 주영이, 그리고 서현이에게도 감사함을 전합니다. 아침 8시, 새벽 늦은 취침으로 인한 피로를 말끔히 잊 도록 매일 아침 에너지와 활력 그리고 긍정적인 동기부여를 선물해주었던 우리 고마운 영어 스터디 MOTICHER 조상님들 승호, 승민이, 광래, 승희, 혜실이, 은화, 혜빈이, 재훈이형, 조은이, 정화, 혜빈이, 예지, 민주, 민수씨, 주승씨, 정음씨, 용훈이, 보영씨, 정미, 그리고 차기 회장으로 물심양면으로 힘이 되어주는 상현씨, 그리고 서울에서 새로움 배움을 첫걸음을 앞둔 채 은씨, 항상 부드러운 카리스마로 가족들은 챙겨주신 제민씨, 그리고 모든 모티처 가족들에게 감사의 인사드립니다.

마지막으로 언제나 '지웅이가 최고!'라며, 듬직한 지원군이 되어주신, 진 심어린 마음으로 감싸주고 보듬어 주신, 긍정적인 사고로 항상 인생의 롤 모델이 되어주신 사랑하는 아버지, 어머니, 형 그리고 형수님. 많이 부족하 고 못난 저였지만 가족들의 사랑으로 지금까지의 어려움과 힘듦을 버텨내 고, 이겨내어 왔다고 생각합니다.

이제, 제가 받은 많은 감사함과 고마움을 나누기 위한 큰 발걸음을 내 딛으려 합니다.

2014년 7월 박 지 웅