

[Research Paper]

백드래프트 현상의 LES를 위한 EDC 모델의 연소 화학반응기구 적합성 연구

디네쉬 마일사미 · 오창보[†] · 한용식^{*} · 도규형^{*}

부경대학교 안전공학과, ^{*}한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실

A Study of the Suitability of Combustion Chemistry in the EDC Model for the LES of Backdraft

Dinesh Myilsamy · Chang Bo Oh[†] · Yong Shik Han^{*} · Kyu Hyung Do^{*}

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

^{*}Department of Energy Plant Safety Technology, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received June 15, 2017; Revised July 5, 2017; Accepted July 10, 2017)

요 약

구획실 내부의 고온 메탄연료에서 발생하는 백드래프트 현상에 대해 FDS v6를 이용한 LES를 수행하였다. EDC 연소모델을 적용하였고 여기 필요한 화학반응기구에 대해서는 5가지를 검토하여 백드래프트에 대한 예측성능을 검토하였다. 구획실 내, 외부의 온도, 연료, 속도 및 압력분포에 대한 수치계산 결과고찰과 실험에서 얻어진 압력변화와의 비교를 수행하였다. FDS v6에서 기본적으로 제공하는 EDC 연소모델을 적용하면 LES 기법을 이용하여 백드래프트에 대한 수치계산이 가능함을 확인하였다. 그러나, 결합되는 화학반응기구에 따라서 백드래프트에 대한 예측성능이 큰 차이를 보였다. FDS에서 EDC 연소모델을 적용하여 백드래프트에 대한 LES를 수행할 경우에는 연료특성에 맞는 화학반응기구의 적합성을 우선 검토하는 것이 필요함을 확인하였다.

ABSTRACT

Large Eddy Simulation (LES) was performed for the backdraft occurred in a compartment filled with high-temperature methane fuel using the Fire Dynamics Simulator (FDS) of version 6. The prediction performance of FDS, adopted the Eddy Dissipation Concept (EDC) combustion model with five different chemical reaction mechanisms, was evaluated. The temporal distributions of temperature, fuel mass fraction, velocity and pressure were discussed with numerical results and the pressure variation in time was compared with that of previous experiment. The FDS adopted the EDC model showed the possibility of LES for the backdraft phenomena. However, the prediction performance of the LES with EDC model strongly depended on the chemical reaction mechanism considered. It is necessary that the suitability of the chemical reaction mechanism should be validated in advance for LES with the FDS v6 to be applied to the simulation of backdraft.

Keywords : Backdraft, Fire Dynamics Simulator (FDS), Large Eddy Simulation (LES), Eddy Dissipation Concept (EDC) Model, Chemical Reaction Mechanism

1. 서 론

백드래프트(Backdraft)는 구획실내에서 공기가 부족한 상태에서 화재가 유지되지 못하다가 갑작스러운 외부 공기공급에 의해 폭발적으로 화염이 전파되는 매우 위험한 화재 현상이다. 현재까지 국내외적으로 백드래프트로 추정되는 사고에 의한 인명피해가 많이 보고되고 있다.⁽¹⁾ 또한 소방관이 화재진압을 위해 실내로 진입할 때에도 백드래프트에 의해 생명을 위협을 받기 때문에 매우 주의해야 하는 어려움이 많다.

이러한 백드래프트에 대한 연구는 Fleischman의 재현실험⁽²⁾ 이후 본격적으로 연구는 시작되었지만 아직까지 실험의 위험성과 재현의 어려움 등으로 많은 연구가 진행되지 못하는 상황이다. 이러한 상황에서 백드래프트에 대한 화재 시뮬레이션은 매우 중요하게 여겨지고 있지만 수치계산을 통해서 백드래프트를 접근하는 것도 쉽지 않다. 그 이유로는 첫째 백드래프트는 통상의 화재와 같은 확산화염과 점화된 후 전파되는 예혼합화염 혹은 부분예혼합화염의 특징을 동시에 갖고 있기 때문에 이들 화염의 특징을 모두 모사할 수 있는 연소모델의 적용이 쉽지 않은 점을 들 수

[†] Corresponding Author, E-Mail: cboh@pknu.ac.kr, TEL: +82-51-629-6472, FAX: +82-51-629-6463

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

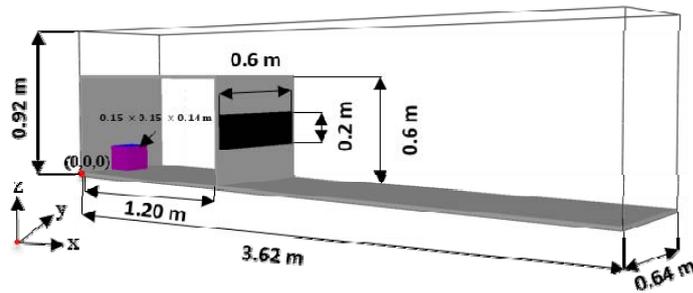


Figure 1. A schematic of the compartment geometry and 3-D computational domain, the red dot represents the origin of the coordinates.

있다. 둘째 이유로는 이러한 복잡한 특징을 갖는 비정상(Unsteady) 화재특성을 시간평균 개념을 이용한 난류모델 기법의 수치계산으로는 신뢰할만한 결과를 얻기 어려운 점을 들 수 있다. 결국 복잡한 화염성상을 포함하는 백드래프트의 비정상 거동을 적절히 모사할 수 있는 수치계산 기법이 필요하게 되는데 이는 직접수치모사법(Direct Numerical Simulation, DNS)나 대와동모사법(Large Eddy Simulation, LES)에 효과적인 연소모델을 결합하는 방법이 가장 합리적 예측방법이다.

기존에 수행된 수치계산 연구 중에 Ferraris 등⁽³⁾과 Weng 등⁽⁴⁾은 각각 비예혼합화염과 화염전파를 각각 고려할 수 있는 복합 연소모델을 적용하여 백드래프트의 특성을 연구한 바 있다. Horvat 등⁽⁵⁾은 LES와 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 기법을 하이브리드로 적용한 모델을 이용하여 백드래프트에 대한 수치계산 연구를 진행한 바 있다. 또한 백드래프트의 화염까지는 고려하지 않고 초기현상인 중력흐름(Gravity current)에 관한 수치계산 연구는 일부 진행된 바 있다.⁽⁶⁾ 국내에서는 미국 NIST에서 개발한 Fire Dynamic Simulator (FDS)를 이용하여 백드래프트에 대한 일련의 수치계산 연구를 수행한 바 있다.⁽⁷⁻¹¹⁾ 국내의 백드래프트에 대한 수치계산 연구에서는 FDS를 이용한 연구가 대부분이다. FDS v5.x의 기본 연소모델인 혼합분율 연소모델은 백드래프트에서 발행하는 화염전파를 예측할 수 없다.⁽⁷⁾ 따라서 이 연구들에서는 이러한 연소모델의 한계를 극복하기 위하여 DNS와 유한화학반응기구를 적용한 수치계산이 진행된 바 있다. 그러나 DNS 기법은 많은 수의 격자를 필요로 하기 때문에 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 특히 연소모델로서 유한화학반응기구를 적용하게 되면 얇은 반응대를 합리적으로 해상(Resolve)하기 위해 더욱 작은 크기의 격자를 필요로 하여 격자수가 많이 증가하게 된다. 그리고 유한화학반응기구는 수치적 경직성(Stiffness)으로 인해 계산의 불안정성(Instability)이 발생하게 되어 계산을 원하는 시간까지 지속적으로 계산하기 힘든 점 등 많은 어려움이 있다.

최근 NIST에서는 FDS v6 이상의 버전에서 EDC 모델을 적용하였으며,⁽¹²⁾ 이 모델은 개념적으로 유한화학반응을 포

함하고 있기 때문에 백드래프트에 대한 수치계산에도 적합할 것으로 판단된다. 특히 FDS v6.x부터는 유한화학반응의 역할이 연소모델을 통해 LES에도 적합하게 구현되어 있어 백드래프트에 대한 수치계산에 적용해 보고 타당성을 검토해 보는 것은 매우 유익할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 백드래프트에 대한 LES에 FDS EDC 모델의 적용 가능성을 평가하고자 한다. 특히 EDC 모델에 사용되는 다양한 화학반응기구의 성능을 평가하여 백드래프트에 대한 LES에 적합한 반응기구를 제공하여 향후 백드래프트에 대한 LES 연구에 도움을 주고자 하였다.

2. 수치계산 방법

2.1 계산대상 및 수치계산 방법

백드래프트에 대한 수치계산 계산대상으로는 Weng과 Fan⁽¹³⁾의 실험을 참고하여 Figure 1과 같이 구성된 구획실을 선정하였다. Figure 1의 구획실은 축소된 규모의 구획실(1.2 m×0.6 m×0.6 m)로서 가로로 긴 형상(0.6 m×0.2 m)의 개구부를 가지고 있다. 수치계산에는 NIST에서 개발된 FDS v6.3.2⁽¹²⁾를 사용하였다. 난류화염에 대한 수치적 접근법으로, 유동과 연소계산에는 각각 LES 기법과 EDC 연소모델을 적용한다. 복사모델로는 Gray-gas 모델이 사용되었다. 전체 계산영역은 3.62 m×0.64 m×0.92 m로 하였다. 이 계산영역내에 266,432개($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 181 \times 32 \times 46$)의 균일 격자계를 구성하였다. 본 연구에서는 기존의 백드래프트에 대한 수치계산⁽⁶⁻¹¹⁾과는 달리 y방향의 중심축을 기준으로 반쪽만 해석한 것이 아니라 전체 영역을 모두 수치계산 영역으로 하였다.

지배방정식과 LES 기법 및 EDC 연소모델에 대한 내용은 자세한 내용은 이전 연구를^(12,14) 참조한다.

2.2 계산조건 및 화학반응기구

구획실에서 백드래프트를 형성시키기 위한 내부의 화학종 조성과 온도조건은 기존의 실험연구⁽¹³⁾를 참고하여 결정하였다. 구획실 내부의 주요 연료성분은 메탄(CH₄)이다. 또한 구획실 내부에는 고온층이 천장에서 0.32 m 아래까지

Table 1. Species Conditions and Temperature in the Compartment

Species Mass Fraction					Layer Temperature (°C)	
Y _{CH4}	Y _{O2}	Y _{CO}	Y _{CO2}	Y _{N2}	T _U	T _L
0.1224	0.1460	0.0012	0.0210	0.7094	103	67

Table 2. Combustion Chemistry in EDC Model for the LES of Backdraft and Their Abbreviation

Case No.	Combustion Chemistry in EDC Model	Abbreviation
1	EDC Simple Chemistry	EDC-simple
2	EDC 1-step Finite Chemistry	EDC-1-step-FC
3	EDC 3-step Finite Chemistry	EDC-3-step-FC
4	EDC Mixed Chemistry	EDC-mixed
5	EDC 2-step Mixed Chemistry	EDC-2-step-mixed

충진되어 있으며 저온층의 높이는 바닥부터 0.28 m로 하였다. 내부의 화학종 성분들과 두 개의 층의 온도는 Table 1에 기술되어 있다.

점화원의 크기는 가로×세로×높이=0.15 m×0.15 m×0.14 m이다. 계산에 사용된 점화원은 y방향의 중심선 상에서 구획실 내부의 벽면과 부착되어 위치하고 있다. 수치계산에서 압력을 추출하는 위치의 좌표는 (0.92 m, 0.62 m, 0.02 m)로서 아래 면과 측면이 만나는 곳에 위치한다.

구획실 내부에서 백드래프트의 개시를 위하여 점화원의 0.15 m×0.15 m 출구면에서 1500 °C의 고온 질소가 0.05 m/s의 유속을 가지고 0.5 s간 분사되어 혼합기를 점화시키도록 하였다. 점화는 개구부를 통해 유입되는 공기가 점화원에 도달하는 순간에 이루어지도록 하였다. 고온 질소를 이용하여 점화시킨 이유는 연료나 공기를 사용하는 것보다 반응에 영향을 덜 주기 때문이다.

백드래프트에 대한 LES에 적합한 연소모델을 검토하기 위하여 5개의 EDC 모델과 화학반응기구 조합에 대한 검토를 수행하였다. 검토된 화학반응기구에 대한 간단한 기술과 각 반응기구에 대한 약어는 Table 2에 보이는 바와 같다.

본 연구에서 검토된 화학반응기구는 아래와 같이 5종류이다.

1) EDC simple chemistry (EDC-simple): 총괄반응식(R1)에 혼합시간(0.018 s), 점화온도(537 °C) 적용



2) EDC 1-step finite chemistry (EDC-1-step-FC): Buipham의 1-step 반응기구⁽¹⁵⁾ 적용



$$k_1 = 5.5^{13} \exp\left(-\frac{140,000}{RT}\right) [CH_4]^{1.0} [O_2]^{1.0} \quad (1)$$

3) EDC 3-step finite chemistry (EDC-3-step-FC): Dryer와 Glassman의 3-step 반응기구⁽¹⁶⁾ 적용



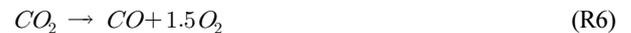
$$k_3 = 10^{13.2} \exp\left(-\frac{202,312}{RT}\right) [CH_4]^{0.7} [O_2]^{0.8} \quad (2)$$

$$k_4 = 10^{14.6} \exp\left(-\frac{167,200}{RT}\right) [CO]^{1.0} [H_2O]^{0.5} [O_2]^{0.25} \quad (3)$$

$$k_5 = 10^{14.75} \exp\left(-\frac{179,740}{RT}\right) [CO]^{1.0} [H_2O]^{0.5} [O_2]^{0.25} \quad (4)$$

4) EDC mixed chemistry (EDC-mixed): Buipham의 1-step 반응기구(위 (2)번 반응기구와 동일)와 혼합시간(0.03 s) 적용.

5) EDC 2-step mixed chemistry (EDC-2-step-mixed): Buipham의 1-step 반응기구(위 (2)번 반응기구와 동일)와 총괄 CO 반응기구(R6)에 혼합시간(0.03 s) 적용



여기서 finite chemistry를 제외한 각 화학반응기구에서 주어진 혼합시간은 백드래프트가 형성될 수 있으면서 동시에 실험에서 얻어진 압력값과 최대한 유사하도록 맞춘 값이다.

계산에 이용된 격자수가 통상의 화재해석에서보다 매우 많기 때문에 계산시간을 고려하여 병렬계산을 수행하였다. 계산에는 Intel (R) Core (TM) i7_4770K CPU 3.5 GHz의 스펙을 갖는 15개의 Core에서 Message Passing Interface (MPI) 계산을 수행하였다. 계산시간은 점화시간에 따라 달라지는데 한 조건 당 대략 2시간 정도 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

Figure 2는 구획실에서 발생하는 백드래프트의 예측을 위해 앞에서 설명한 5가지 화학반응기구를 EDC 모델과 결합하여 계산한 결과로서 $y=0.32$ m의 단면에서 얻어진 구획실 내부 온도의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 초기에 구획실 내부에 고온의 연료성분들이 가득 차 있다가 개구부가 개방되면서 외부 공기가 중력흐름에 의해서 구획실 바닥면 위를 따라 내부로 유입된다. 이후 대략 3.5 s 정도에

서 구획실 내부 벽면근처에서 점화가 되면 화염이 형성되어 구획실 개구부 밖으로 화염이 전파된다. 구획실 내부의 온도분포는 압력 등과 더불어 백드래프트 전개특성을 보여주는 중요한 인자 중의 하나이다. 계산한 조건은 Weng과 Fang의 실험⁽¹³⁾에서 백드래프트가 발생하는 경우이지만 계산결과에서 EDC-1-step-FC와 EDC-3-step-FC을 이용한 경우에는 점화과정, 화염의 전파 및 구획실 밖으로 급격히 밀려나가는 화염을 관찰할 수 없다. 따라서 이들 두 개의 화학반응기구는 EDC 모델에 적용되더라도 LES를 통해 백드래

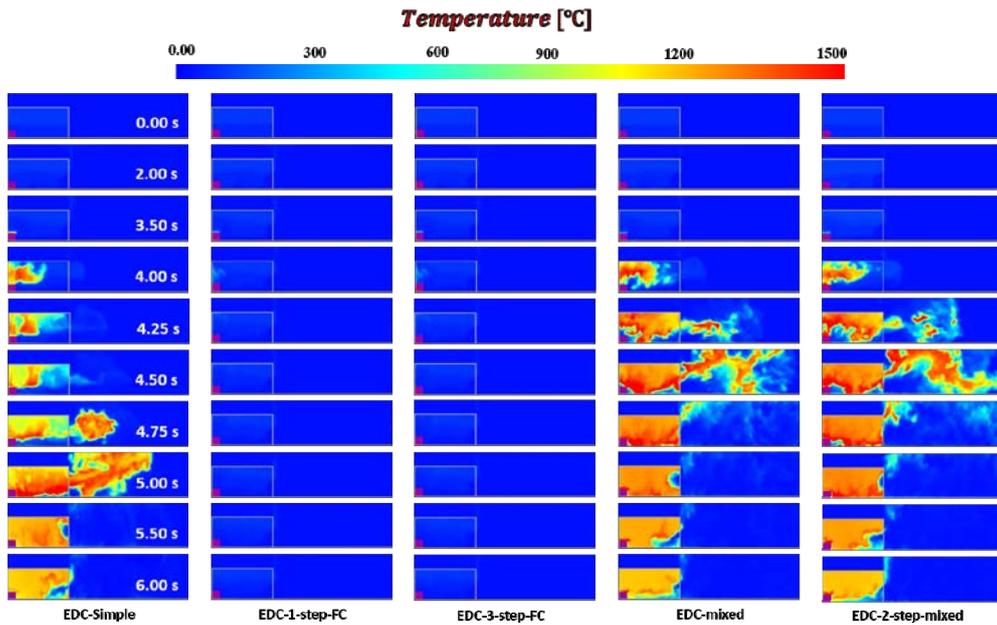


Figure 2. Temporal evolution of temperature distributions with different chemical reaction models.

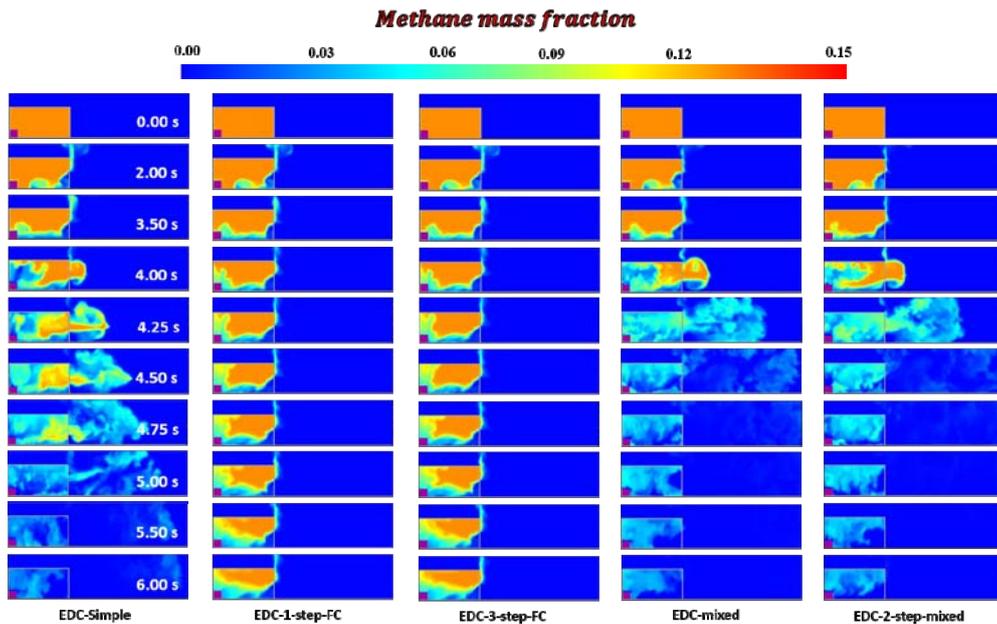


Figure 3. Temporal evolution of fuel mass fractions with different chemical reaction models.

프트의 전개특성을 합리적으로 예측할 수 없음을 알 수 있다. 나머지 세가지 화학반응기구를 이용한 결과에서 시간 차이는 약간씩 있지만 점화, 화염의 전파 및 구획실 밖으로 급격하게 화염이 밀려나가는 과정을 잘 보여주고 있다. 특히 EDC-mixed와 EDC-2-step-mixed로 계산한 결과는 백드래프트 전개시간이나 화염형상이 많이 유사한 것을 알 수 있다. Finite chemistry인 EDC-1-step-FC와 EDC-3-step-FC이 백드래프트를 예측하지 못하는 이유에 대해서는 아직까지 명확하지는 않기 때문에 추후 별도의 연구를 통해 검토해 볼 필요가 있다.

Figure 3는 Figure 2와 동일한 조건에 대해 구획실 내부의 시간변화에 따른 연료농도(질량분율)의 분포를 보여주고 있다. 우선 구획실 내부의 온도분포에서 확인한 바와 같이 EDC-1-step-FC와 EDC-3-step-FC을 적용한 경우에는 백드래프트가 발생하지 않기 때문에 연료성분이 구획실 밖으로 밀려나가는 현상을 관찰할 수 없다. 나머지 세 가지 화학반응기구로 계산한 경우에는 화염과 같이 구획실 밖으로 급격히 밀려나가는 것을 알 수 있다. Figure 2의 온도와 비교해 볼 때 연료성분은 화염보다 약간 일찍 밀려나가는 것을 알 수 있다. 화염이 구획실 밖으로 처음 밀려나오는 순간이 화학반응기구에 따라 약간씩 다른 것과는 달리 연료성분이 구획실 밖으로 밀려나오는 순간은 대략 유사한 것을 알 수 있다. 연료성분이 화염보다 먼저 구획실 밖으로 밀려나오는 것은 구획실 안쪽 벽면근처에서 점화가 되면서 화염이 형성될 때 점화원보다 구획실 출구근처에 분포하고 있던 연료성분들이 구획실 내부의 점화와 연소에 의한 열팽창에 의해서 화염보다 먼저 밖으로 밀려 나오기 때문이다. 참고로 연료농도가 낮은 부분은 외부의 공기가 유입된 영역으로 볼 수 있다. 초기 0 s에 개구부가 열리면 구획실

내부의 고온 연료성분과 외부의 저온 공기의 밀도차에 의해 무거운 외부공기가 구획실 바닥을 따라 내부로 유입되는 현상(중력흐름)을 잘 보여주고 있다.

Figure 4는 구획실 중간 단면에서 백드래프트 전개 순간의 시간에 따른 속도분포를 보여주고 있다. 백드래프트가 발생하지 않는 두 유한화학 반응모델의 경우에는 점화가 되지 않았기 때문에 연소에 의한 열팽창 효과도 없어 특별한 유속증가는 관찰되지 않는다. 유속증가는 백드래프트의 전개과정과 매우 연관이 크기 때문에 앞에서 설명한 화염 전파와 구획실 밖으로의 화염과 연료의 분출과정과 연계하여 설명할 필요가 있다. EDC-mixed와 EDC-2-step-mixed으로 계산한 경우에는 EDC-simple로 계산한 경우보다 백드래프트가 일찍 형성되기 때문에 고온 유속영역도 일찍 만들어지고 있다. 최고유속의 크기는 12-16 m/s 정도로서 각 화학반응기구마다 최고유속을 갖는 순간이 약간씩 다르게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 우선 EDC-simple을 적용한 경우에는 연료가 분출되는 순간(4.0-4.25 s) 구획실 출구 근처에서의 최고유속은 화염이 분출되는 순간(4.5-4.75 s)의 최고유속보다는 낮게 나타나고 있으며, 백드래프트 형성과정에서의 최고유속 위치는 화염이 크게 분출한 순간(5.0 s)에 구획실 외부의 화염구 끝 근처에 있음을 알 수 있다. 이에 반해 EDC-mixed나 EDC-2-step-mixed의 경우에는 연료가 분출되는 순간(4.0 s) 구획실 출구 근처에서 최고유속을 보이고 있으며, 화염이 충분히 분출되지 않은 4.25 s 경에 분출된 화염의 일부영역에서 유속값이 높게 나타나고 있다. 백드래프트가 폭굉(Detonation) 현상은 아니기 때문에 결과에서 분출속도가 매우 높게 나타나지는 않고 있다. 백드래프트에서 분출속도는 구획실 내부의 압력에 크게 영향을 받게 되는데 여기에 대한 자세한 설명은 구획실 내, 외

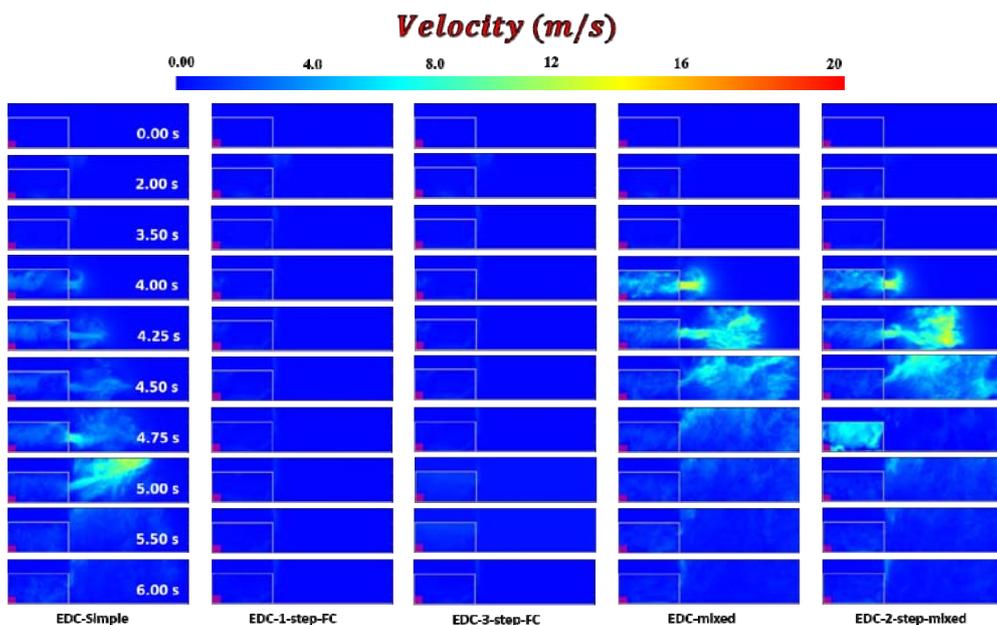


Figure 4. Temporal evolution of velocity magnitudes with different chemical reaction models.

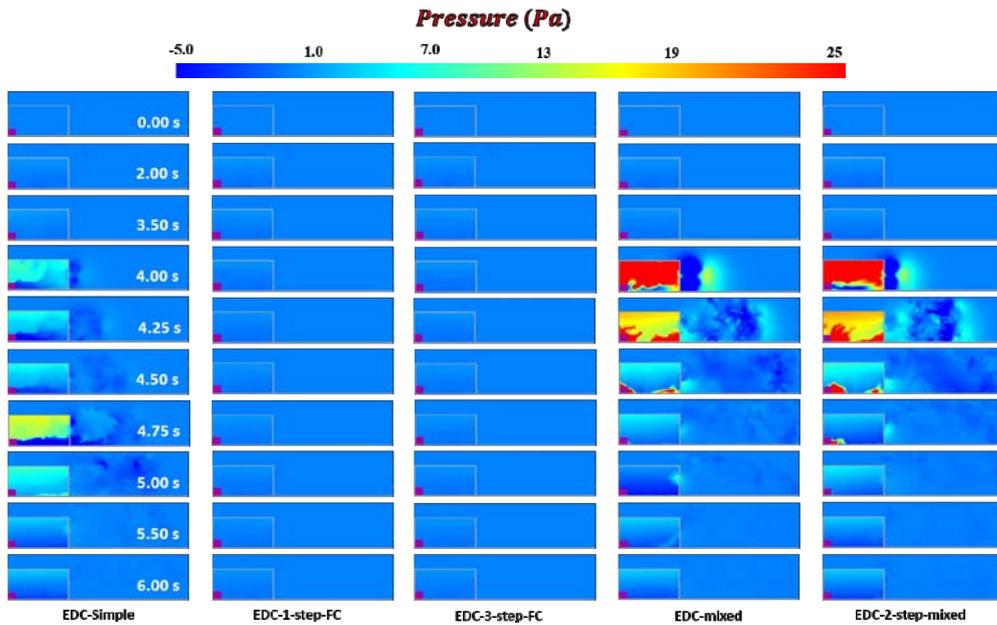


Figure 5. Temporal evolution of pressure magnitudes with different chemical reaction models.

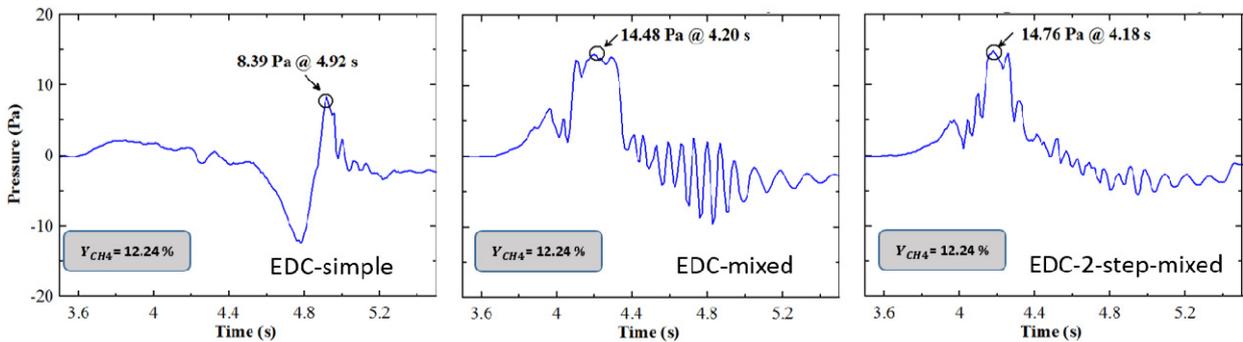


Figure 6. Temporal evolution of pressure at $(x, y, z)=(0.92 \text{ m}, 0.02 \text{ m}, 0.02 \text{ m})$ with EDC-simple, EDC-mixed and EDC-2-step-mixed reaction models.

부의 압력분포를 이용하여 하겠다.

Figure 5는 백드래프트 전개 순간의 시간에 따른 구획실 중간 단면에서 따른 압력크기의 분포를 보여주고 있다. 그림의 크기는 계기압력(Gauge pressure)을 의미한다. Figure 4의 유속크기 분포와 마찬가지로 백드래프트 전개과정 동안의 압력분포도 화학반응기구에 따라 차이가 나타나고 있다. 점화되지 않는 조건은 연소에 의한 열팽창이 없기 때문에 구획실 내부의 압력증가도 거의 없게 나타나게 그림에는 포함시키지 않았다. 구획실 내부의 압력증가는 EDC-mixed와 EDC-2-step-mixed으로 계산한 경우가 대략 유사하게 나타나고 있으며 최고 압력값은 EDC-simple로 계산한 경우보다 더 크게 나타나고 있다. 또한 EDC-mixed와 EDC-2-step-mixed으로 계산한 경우는 연료가 분출되는 순간(4.0 s 근처)에 구획실 내부의 압력이 가장 높게 나타나고 있지만 EDC-simple을 이용한 경우에는 화염이 분출되는 순간(4.75 s 근처)에 가장 높게 나타나고 있다. 연료나 화염이

구획실 외부로 분출될 때 연료나 화염의 선단(Head)에 비교적 높은 압력대가 형성되고 있으며 바로 선단 이후 영역에 낮은 압력대가 형성되고 있다. 이것은 대기 중에 제트가 분출되는 경우와 매우 유사한 것으로서 통상 알려진 제트 유동의 와류와 압력분포와의 관계로 잘 설명이 된다.

지금까지 살펴본 바와 같이 화학반응기구에 따라서 백드래프트 전개과정의 온도, 유속, 압력 등 주요 특성값들의 분포가 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 중에서 압력은 특히 백드래프트에서 중요한 인자이기 때문에 좀 더 자세히 고찰해 볼 필요가 있다. 따라서 Figure 6에는 $(x, y, z)=(0.92 \text{ m}, 0.02 \text{ m}, 0.02 \text{ m})$ 위치에서 얻어진 시간에 따른 압력변화를 동일한 조건의 기존 실험⁽¹³⁾에서 얻어진 최고 압력값인 7.85 Pa과 비교하면 그 정확성을 확인할 수 있다. 참고로 압력감지 위치는 구획실 개구부에서 내측으로 0.3 m 위치에서 수직 측벽과 바닥이 만나는 구석이며 구획실 내부에서 가장 압력이 높은 위치를 의미하지는 않는다. 기존

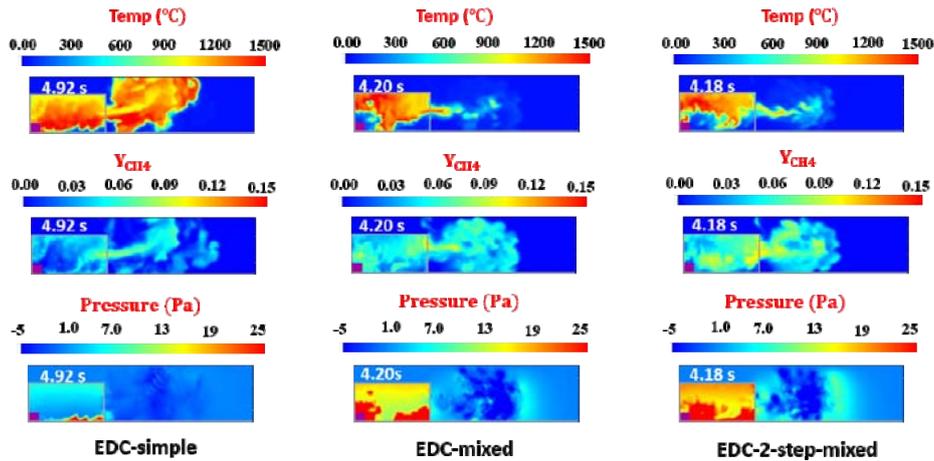


Figure 7. Temperature, fuel mass fraction and pressure distributions at the instant when the pressure reaches its peak with EDC-simple, EDC-mixed and EDC-2-step-mixed reaction models.

실험에서는 압력이 최고값이 되는 순간에 대해서는 측정하지 못하였기 때문에 본 연구에서는 이와 관련한 비교는 이루어지지 못하였다. 그러나 동일한 구획실 내부의 화학종 조성을 가질 경우 동일한 압력감지 위치에서의 최고 압력값에 대한 비교는 가능하였는데 실험에서는 최고 압력값이 대략 7.8 Pa 정도였는데 그림에서 EDC-mixed와 EDC-2-step-mixed으로 계산한 경우에는 14 Pa가 넘는 것으로 나타나고 있다. 그런데 EDC-simple을 이용한 경우에는 8.4 Pa로서 실험값과 유사하게 나타나고 있어 매우 타당한 결과를 얻은 것으로 유추할 수 있다. 특이한 점으로 EDC-mixed와 EDC-2-step-mixed로 계산한 경우에는 최고 압력점 이후 압력진동이 관찰되고 있으며 진폭은 EDC-mixed의 경우가 더 크게 나타나고 있다. 그러나 현재까지 이러한 상세한 압력 거동에 대해서 물리적 특성의 유의미를 언급하기에는 실험 결과나 수치계산의 정확성이 충분하게 확보되지 않고 있기 때문에 추후 관련연구가 많이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

Figure 7에는 Figure 6에서 백드래프트가 발생하는 세 가지 화학반응기구에 대해서 최고 압력값을 얻는 순간의 온도, 연료농도 및 압력분포를 도시한 것이다. 즉 EDC-simple 모델의 경우에는 4.92 s, EDC-mixed는 4.2 s, EDC-2-step-mixed는 4.18 s의 순간에 얻어진 결과이다. EDC-simple 모델을 적용한 경우의 4.92 s는 백드래프트의 화염구가 구획실 밖으로 강하게 분출되는 순간이다. 따라서 이 순간에 압력이 높게 예측되는 것은 매우 합리적으로 보인다. EDC-mixed나 EDC-2-step-mixed 모델을 적용한 경우 최고 압력값이 얻어진 4.2 s나 4.18 s의 순간들은 화염이 구획실 밖으로 충분히 많이 밀려나온 순간은 아니고 연료가 많이 분출된 후 미소한 시간이 경과된 시점이다. 또한 구획실 내부의 압력분포를 보면 천장근처보다 바닥근처가 높게 나타나고 있지만 EDC-mixed나 EDC-step-mixed 모델을 적용한 경우에는 바닥근처의 높은 압력의 영역이 넓고 구획실 내부의

전체적인 압력도 EDC-simple로 계산한 경우보다는 높게 예측되고 있다. 화염분출 형상, 최고 압력값을 실험과 비교한 결과를 볼 때 EDC-simple 화학반응기구가 가장 합리적으로 예측하고 있음을 알 수 있다. 참고로, 현재의 압력도출 위치는 개구부에서 0.3 m 들어온 곳에서 구획실의 측벽과 바닥면이 만나는 구석에 위치하기 때문에 구획실 내부의 전체적인 압력변동을 대표적으로 잘 보여주고 있지 않을 수 있다. 기존 연구⁽¹⁰⁾에서는 구획실 개구부 상단의 중심축 근처가 백드래프트가 전개되는 동안 구획실 내부의 대표적인 압력을 측정하는 곳으로 적합함을 보인 바가 있다. 이런 점을 고려한다면 향후 백드래프트에 관한 실험에서는 구획실 내부의 압력센서의 위치 선정도 매우 중요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 구획실 내부의 메탄연료에서 발생하는 백드래프트 현상에 대해 FDS를 이용한 LES를 수행하였고 실험에서 얻어진 압력변화와의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

기존에 FDS에 별도의 난류 연소모델을 변경하지 않고 혼합분율 연소모델을 적용한 LES 기법으로는 백드래프트 현상에 대한 합리적인 수치계산이 불가능 하였지만 EDC 연소모델에 적절한 화학반응기구를 적용함으로써 백드래프트에 대한 합리적인 LES가 가능함을 확인하였다.

LES에 EDC 연소모델을 적용하더라도 결합되는 화학반응기구에 따라서 백드래프트에 대한 예측성능이 큰 차이를 보였다. EDC 모델에 1-step이나 3-step 유한화학반응기구를 적용한 경우에는 메탄연료에서 기인한 백드래프트 예측을 할 수 없었다.

EDC-simple, EDC-mixed 및 EDC-2-step-mixed 화학반응기구의 경우에는 모두 메탄연료에서 기인한 백드래프트를

정성적으로 모사할 수 있었다. 그러나 실험에서 얻어진 최고 압력값과 비교해 본 결과 EDC-simple 모델이 가장 합리적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

FDS에 EDC 연소모델을 적용하여 백드래프트에 대한 LES를 수행할 경우에는 연료특성에 맞는 화학반응기구의 적합성을 검토하여 계산을 수행하여야만 좀 더 합리적인 수치계산을 수행할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

1. R. F. Fahy, P. R. LeBlanc and J. L. Molis, "Firefighters Fatalities in the United States-2007", Fire Analysis and Research Division, National Fire Protection Association, July (2008).
2. C. M. Fleischmann, "Backdraft Phenomena", Ph. D. Thesis, University of California, Berkley (1993).
3. S. A. Ferraris, J. X. Wen and S. Dembele, "Large Eddy Simulation of the Backdraft Phenomenon", Fire Safety Journal, Vol. 43, No. 3, pp. 205-225 (2008).
4. W. G. Weng, W. C. Fan and Y. Hasemi, "Prediction of the Formation of Backdraft in a Compartment Based on Large Eddy Simulation", Engineering Computations, Vol. 22, No. 4, pp. 376-392 (2005).
5. A. Horvat and Y. Sinai, "Numerical Simulation of Backdraft Phenomena", Fire Safety Journal, Vol. 42, No. 3, pp. 200-209 (2007).
6. C. Pérez-Jiménez, G. J. Guigay, B. Karlsson, J. Eliasson, A. Horvat, Y. Sinai and J. M. Franssen, "Influence of Obstacles on the Development of Gravity Current Prior to Backdraft", Fire Technology, Vol. 45, No. 3, pp. 323-340 (2009).
7. J.-W. Park, C. B. Oh, B. I. Choi and Y. S. Han, "A Study of Numerical Reproducibility for the Backdraft Phenomena in a Compartment using the FDS", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 28, No. 6, pp. 6-10 (2013).
8. J. W. Park, C. B. Oh, B. I. Choi and Y. S. Han, "Computational Visualization of the Backdraft Development Process in a Compartment", Journal of Visualization, Vol. 18, No. 1, pp. 25-29 (2015).
9. J. W. Park, C. B. Oh, Y. S. Han and K. H. Do, "Effect of Initial Condition and Opening Geometry of a Compartment on the Gravity Current in the Backdraft", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 30, No. 6, pp. 18-25 (2015).
10. M. W. Ko, C. B. Oh, Y. S. Han and K. H. Do, "A Numerical Study of the Backdraft Behavior with the Variation of the Ignition Location and Time", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 31, No. 4, pp. 1-8 (2016).
11. J. W. Park, C. B. Oh, Y. S. Han and K. H. Do, "Computational Study of Backdraft Dynamics and the Effects of Initial Conditions in a Compartment", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 985-993 (2017).
12. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator User's Guide", NIST Special Publication 1019, 6th Edition (2015).
13. W. G. Weng and W. C. Fan, "Critical Condition of Backdraft in Compartment Fires: A Reduced-Scale Experimental Study", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 16, No. 1, pp. 19-26 (2003).
14. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018, 6th Edition (2015).
15. M. N. Bui-Pham, "Studies in Structures of Laminar Hydrocarbon Flames", Ph.D. Dissertation, University of California, San Diego, USA (1992).
16. F. L. Dryer and I. Glassman, "High-temperature Oxidation of CO and CH₄", Symposium (International) on combustion, Vol. 14, No. 1, pp. 987-1003 (1973).