

# FDS를 이용한 구획실 백드래프트 현상의 수치적 재현성에 관한 연구

박지웅 · 오창보<sup>†</sup> · 최병일<sup>\*</sup> · 한용식<sup>\*</sup>

부경대학교 안전공학과 · <sup>\*</sup>한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실  
(2013. 6. 2. 접수 / 2013. 10. 17. 채택)

## A Study of Numerical Reproducibility for the Backdraft Phenomena in a Compartment using the FDS

Ji-Woong Park · Chang Bo Oh<sup>†</sup> · Byung Il Choi<sup>\*</sup> · Yong Shik Han<sup>\*</sup>

Department of Safety Engineering, Pukyong National University,

<sup>\*</sup>Department of Energy Plant Safety, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received June 2, 2013 / Accepted October 17, 2013)

**Abstract** : A numerical reproducibility of the backdraft phenomena in a compartment was investigated. The prediction performance of two combustion models, the mixture fraction and finite chemistry models, were tested for the backdraft phenomena using the FDS code developed by the NIST. The mixture fraction model could not predict the flame propagation in a fuel-air mixture as well as the backdraft phenomena. However, the finite chemistry model predicted the flame propagation in the mixture inside a tube reasonably. In addition, the finite chemistry model predicted well the backdraft phenomena in a compartment qualitatively. The flame propagation inside the compartment, fuel and oxygen distribution and explosive fire ball behavior were well simulated with the finite chemistry model. It showed that the FDS adopted with the finite chemistry model can be an effective simulation tool for the investigation of backdraft in a compartment.

**Key Words** : backdraft, fire dynamics simulator(FDS), finite chemistry model, combustion model, compartment, numerical simulation

### 1. 서론

백드래프트(Backdraft)는 플래시오버(Flashover)와 함께 구획실과 같은 건물내부의 밀폐공간에서 발생하는 화재에서 기 인하는 매우 위험한 현상이다. 특히 백드래프트 현상은 소화 활동을 하는 소방관의 생명을 위협하는 경우가 많기 때문에 미국에서는 소방관 살인현상이라고도 부른다. 백드래프트에 의한 사고는 국내외를 통틀어 많이 있지만, 1989년 동의대 사태와 1996년 있었던 서울 신촌 북카페 화재사고가 국내의 대표적인 백드래프트 사망사고로 알려지고 있다<sup>1)</sup>.

위험한 화재현상 중에서 플래시오버에 비해 백드래프트에 관한 연구는 상대적으로 현재까지 많은 연구가 진행되지 못하여서 아직도 백드래프트의 생성조건, 생성메카니즘, 성상 그리고 전개과정 등에 대해서는 공학적으로 충분히 규명되지 못한 상태이다.

현재까지 백드래프트는 다음의 (1)~(5)의 과정을 통해 생성된다고 알려져 있다. 우선, (1)밀폐된 구획실 내부에서 화재가 발생한 후 연료가 연소되다가 (2)공기가 부족한 상태가 되면 연료가 충분히 산화되지 못하고 고온 과농상태를 유지하게 된다. (3)이후 개구부가 개방되거나 창문이 파손되면 공기가 구획실 내부로 유입되고, (4)내부의 고온 과농 연료가 공기와 혼합되고 가연상태를 만들게 되며, (5)점화

조건이 만족된다면 가연 연료-공기 혼합기는 점화되어 개구부쪽으로 폭발적으로 밀려나가게 된다<sup>2)</sup>.

최근에 백드래프트에 관해 진행된 일부 연구들을 보면, 백드래프트의 생성조건과 전개성상에 관한 연구가 많다<sup>2-6)</sup>. 또한, 실험과 수치계산을 통해 백드래프트의 재현성을 검토한 연구들도 일부 진행된 바 있다<sup>7-10)</sup>. 이들 연구 중에서 백드래프트의 수치적 재현과 관련된 연구는 매우 소수가 진행된 바 있는데 아직까지도 만족할만한 수준에 올라와 있지 못하다. 이는 백드래프트 현상이 가지는 확산화염으로 분류되는 초기의 화재부터 화염전파 특성의 전개과정까지를 적절히 모사하기 위한 연소모델의 개발이 쉽지 않기 때문이다.

한편, NIST에서 개발한 화재해석 수치계산 코드인 FDS (Fire Dynamic Simulator)<sup>11)</sup>는 국내외에서 다양한 화재현상의 수치적 연구에 많이 이용되고 있다. 현재 FDS에는 혼합분율(Mixture Fraction; MF) 연소모델이 탑재되어 있는데 이 모델은 화재와 같은 확산화염의 해석에는 적합하지만 개념적으로 예혼합화염처럼 전파되는 특성을 갖는 백드래프트의 해석에는 적합하지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유 때문에 기존 연구들 중에는 FDS의 연소모델을 대폭수정하여 백드래프트의 전개과정을 모사한 연구가 있지만 대부분의 연구자가 이러한 정교한 연소모델 수정작업을 수행하기는 쉽지 않다.

<sup>†</sup>Corresponding Author: Chang Bo Oh, Tel: +82-51-629-6472, E-mail: cboh@pknu.ac.kr  
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-Gu, Busan 608-739, Korea

따라서 본 연구에서는 화재현상 해석에 많이 사용되고 있는 FDS의 활용도를 높이기 위해 FDS 코드의 연소모델을 특별히 수정하지 않고 단지 유한화학반응(Finite Chemistry; FC) 연소모델만을 채택하고도 예혼합화염같이 전파되는 특성을 갖는 백드래프트의 전개과정을 합리적으로 재현할 수 있는지 검토하여 FDS의 유용성을 평가하였다.

## 2. 수치계산 및 방법

### 2.1. 계산대상 및 방법

본 연구에서 구획실의 백드래프트 수치계산에는 FDS v5.5.3이 사용되었다. FDS를 이용한 수치계산 대상은 Fig. 1과 같은 CH<sub>4</sub>-공기 혼합기가 포함된 원통형 튜브와 Fig. 2와 같은 고온 CH<sub>4</sub> 연료와 연소가스 성분이 포함되어 백드래프트가 생성되는 축소 구획실이다. 우선 튜브형상에서는 혼합분을 연소모델을 적용한 FDS가 예혼합화염의 특성을 갖는 백드래프트를 적절히 예측할 수 있는지 검토하였다.

FDS를 이용한 백드래프트의 예측성능 검토를 위해서는 2가지 연소모델이 검토되었다. 첫째는 혼합분을 연소모델이고 두 번째는 식 (1)과 (2)로 표현되는, 유한한 속도의 화학반응을 예측할 할 수 있는 Buipham의 1단계 유한화학반응 연소모델<sup>12)</sup>이다.



$$\text{RR}_1 = 5.2^{13} \exp\left(\frac{-123,980}{RT}\right) [\text{CH}_4]^{1.0} [\text{O}_2]^{1.0} \quad (2)$$

여기서, Pre-exponential factor의 단위는 [cm<sup>3</sup>/mol·s]이고 지수항수 내부에 들어있는 활성화에너지(-123,980)의 단위는 [kJ/kmol]이다. 또한 [ ]는 각 화학종의 몰농도로서 단위는 [kmol/m<sup>3</sup>]이다.

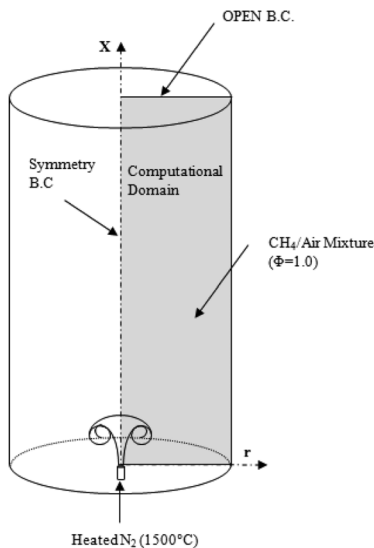


Fig. 1. Schematic diagram of cylindrical tube.

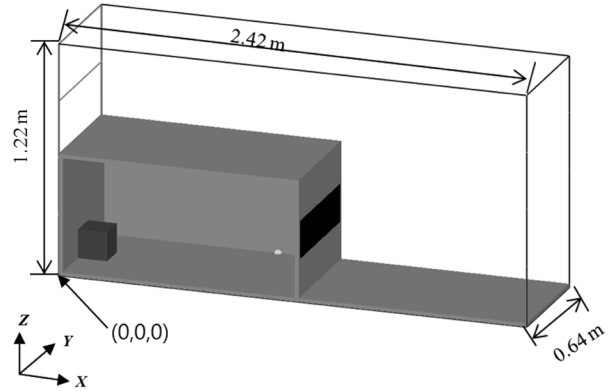


Fig. 2. Sketch of the reduced-scale compartment for computational domain.

FDS에서는 대와동모사법(Large Eddy Simulation; LES) 기법을 적용하게 되면 혼합분을 연소모델을 기본으로 채택하도록 되어 있다. 만약 유한화학반응 연소모델을 LES 기법과 연동시키기 위해서는 아격자(Subgrid) 단계에 대해서 별도의 연소모델을 도입해야 하고, 이를 위해서는 FDS 소스코드를 수정해야 하는 등 작업량이 방대해지는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 난류유동에 대해서는 별도의 난류모델 없이 수치해석하는 3차원 직접수치모사(Direct Numerical Simulation; DNS) 기법을 적용하여 해상되는 격자에서 직접적으로 유한화학반응을 수치적으로 풀 수 있도록 하였다.

### 2.2. 격자 및 계산조건

화염전파특성 검토에 사용된 Fig. 1의 원통형 튜브의 내경은 20 mm이며, 길이는 50 mm이다. 사용된 격자는 50,000개이며 최소격자는 크기는 0.1 mm이다. 튜브내에는 상온의 CH<sub>4</sub> 연료와 공기가 당량비 1.0의 상태로 혼합되어 있다. 혼합기의 점화를 위해서 튜브 아래의 면 중심에서 1500°C의 고온 N<sub>2</sub>가 짧은 순간동안 분출되도록 하였다.

백드래프트의 수치적 재현 대상인 축소 구획실의 치수는 1.2 m × 0.6 m × 0.6 m이고, 수치계산 영역은 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 구획실의 개구부는 0.6 m × 0.2 m의 가로로 길게 된 직사각형 모양을 갖고 있다. 사용된 격자수는 1,890,000개 정도가 되며, 격자크기는 10 mm로 균일하다. 본 연구는 정량적으로 정밀한 물리량을 도출하는 것에 목적을 둔 것은 아니다. 따라서 현재의 격자가 DNS 계산에 충분한 격자는 아니지만 엔지니어링 측면에서 본 연구의 계산방법이 백드래프트의 정성적인 전개과정을 합리적으로 예측할 수 있는지 검토하기에는 충분한 것으로 보인다.

경계조건으로서 튜브벽면이나 구획실 벽면에서는 No-slip 유속조건을 주었으며, 벽면온도는 상온(25°C)으로 고정하였다. 계산영역 경계 중에서 벽면이 아닌 곳에 대해서는 Open 경계조건을 부여하였다.

구획실에 대한 백드래프트 수치계산을 위해 기존의 실험연구를 참조하여 구획실 내부에는 Table 1과 같은 조성

의 혼합기가 균질하게 분포하도록 하였으며, 이 혼합기의

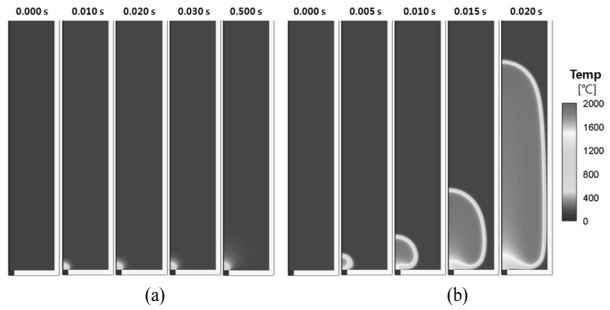


Fig. 3. Temporal evolution of temperature distribution in the tube using different combustion models; (a) mixture fraction and (b) finite 1-step combustion model.

Table 1. Species composition inside the compartment

Species <i>i</i>	Mass Fraction ( <i>Y<sub>i</sub></i> )
CH <sub>4</sub>	0.0994
O <sub>2</sub>	0.1450
CO	0.0030
CO <sub>2</sub>	0.0020
N <sub>2</sub>	0.7506

온도는 초기에는 300°C로 유지되도록 하였다. 이 혼합기의 조성은 기존 실험연구<sup>11)</sup>에서 백드래프트가 생성될 수 있는 조건으로 알려져 있어서 본 연구에서 채택하게 되었다. 구획실의 외부에는 통상의 공기가 25°C의 온도를 유지한 채 분포하도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 원통형 튜브내에 있는 이론혼합비 상태의 CH<sub>4</sub>-공기 예혼합기에서 1,500°C의 고온 질소를 짧은 시간동안(0.001 s) 분사한 이후의 화염온도 분포를 보여주고 있다. Fig. 3(a)은 혼합분을 연소모델을 적용하여 수치계산을 수행한 결과이고 Fig. 3(b)는 유한화학반응 연소모델을 적용한 결과이다. 예상했던 바와 같이 혼합분을 연소모델은 예혼합화염의 전파특성을 예측할 수 없기 때문에 이론혼합비의 연료-공기 혼합기에 고온 점화원을 주더라도 화염이 형성되어 전파되는 과정을 관찰할 수 없다. 반면에 Fig. 3(b)에서는 고온 점화원(질소)에 의해 점화되어 상부쪽으로 전파되는 예혼합화염의 특성을 잘 보여주고 있다. 이 결과로부터 예혼합화염처럼 전파하는 특성을 갖는 백드래프트의 수치계산에는 혼합분을 연소모델이 적합하지 않다는 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

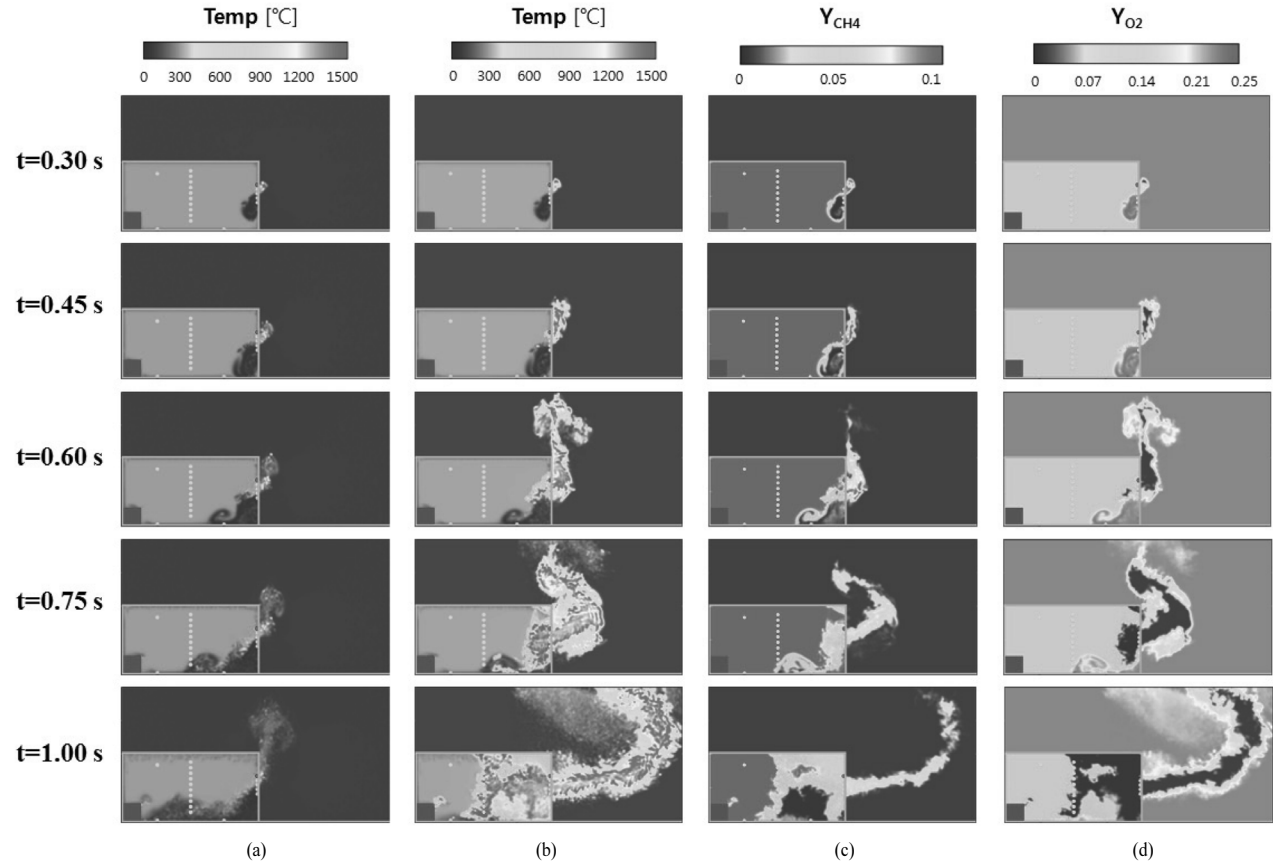


Fig. 4 Temporal evolution of temperature and species mass fraction with different combustion models, Mixture fraction(MF) and Finite Chemistry(FC); (a) MF\_temperature, (b) FC\_temperature, (c) FC\_Y<sub>CH<sub>4</sub></sub>, and (d) FC\_Y<sub>O<sub>2</sub></sub>.

Figs. 4(a-b)는 구획실에 대한 수치계산 결과로서 구획실의 중심면에서의 온도분포를 보여주고 있다. 그림에 표시된 시간은 구획실의 개구부가 개방되는 순간을 0 s로 기준삼고 이후 1.0 s까지 시간이 경과되는 동안의 결과를 나타내고 있다. 먼저 Fig. 4(a)의 혼합분을 연소모델을 적용한 경우에는 구획실 내부의 혼합기 조성이 백드래프트가 생성될 수 있는 조건임에도 불구하고 구획실 내외부에서 점화가 이루어지고 있지 않으며, 이로 인해 화염도 관찰할 수 없음을 알 수 있다. 이에 반해 유한화학반응 연소모델을 적용한 결과인 Fig. 4(b)는 개구부 개방순간부터 공기가 개구부의 하부를 통해 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 형성되고 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. 4(a)와 (b)의 결과를 볼 때 혼합분을 연소모델은 백드래프트 현상을 모사할 수 없지만 유한화학반응 연소모델은 정성적으로는 기존 실험에서 얻어진 백드래프트 현상<sup>2,11)</sup>을 잘 모사하는 것을 알 수 있다.

Figs. 4(c)과 (d)은 유한화학반응 연소모델을 적용하여 얻은 CH<sub>4</sub> 연료분포와 O<sub>2</sub>의 공간분포를 보여주고 있다. Fig. 4(c)를 보면 초기에 연료는 구획실 내부에만 분포하다가 개구부가 개방되면 개구부의 상부를 통해 밖으로 유출되는 것을 알 수 있다. 이때 연료는 고온상태이기 때문에 부력에 영향을 받아 개구부의 상부에서 바닥 반대방향으로 상승하게 된다. 이후 0.75 s가 경과되면 연료는 백드래프트에 의해 개구부 밖으로 급속히 밀려나오는 것을 알 수 있다. Fig. 4(d)의 O<sub>2</sub> 분포에서는 개구부가 개방된 후 개구부 하부를 통해 O<sub>2</sub>가 유입된 후 고온 연료보다 무겁기 때문에 구획실 바닥을 따라 더 안쪽으로 흘러들어오는 중력흐름(Gravity current)을 잘 확인할 수 있다. O<sub>2</sub>가 구획실 안으로 적당히 유입된 후에는 점화가 되어 고온 영역이 구획실 내부에 넓게 분포하게 된다. 0.75 s나 1.0 s 순간의 연료와 O<sub>2</sub> 분포를 Fig. 4(b)의 화염온도와 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 부분혼합화염의 특성을 갖는다는 것을 잘 보여주는 결과이다. 이러한 특징은 그림으로 도시하지는 않았지만 구획실 내부의 열발생률 분포로부터 잘 확인할 수 있었다.

Fig. 5에는 구획실 내부의 특정위치에서 압력의 시간에 따른 변화를 도시한 것이며, Fig. 6에는 Fig. 5의 특정 순간에 압력의 공간분포를 도시하였다. 계산에서 압력을 측정할 위치는 기존의 실험[6]에서 측정된 위치를 참고하여 Fig. 6에서 녹색점을 표기된 바와 같이 바닥면과 x-z 평면 중 뒤에 있는 평면과 만나는 모서리상에 있으며, 개구부 출구에서 0.3 m 구획실 내부로 이동한 지점 (0.90, 0.62, 0.00)

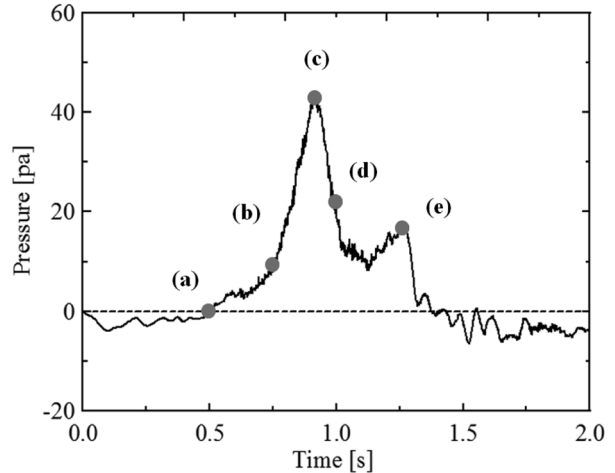


Fig. 5. Temporal evolution of pressure in the compartment using Finite 1-step chemistry (a)=0.50 s, (b)=0.75 s, (c)=0.90 s, (d)=1.00 s, and (e)=1.25 s.

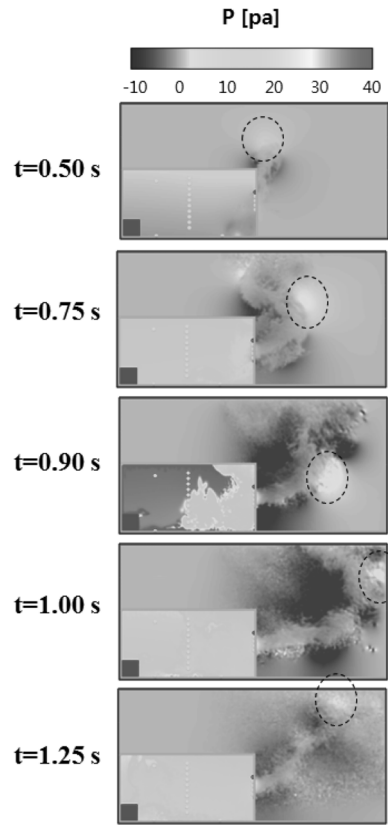


Fig. 6. Pressure distribution in the compartment using Finite 1-step chemistry with temporal evolution; (a)=0.50 s, (b)=0.75 s, (c)=0.90 s, (d)=1.00 s, and (e)=1.25 s.

이다. 참고로, 구획실 내부의 압력은 측정 위치에 따라 수십 Pa에서 수백 Pa까지 상승하는 것을 확인하였다. Fig. 6의 결과에서 압력값이 0인 것은 대기압과 동일한 것을 의미하며 (-)값은 진공 즉 대기압보다 낮은 부압을 나타낸

다. Fig. 5을 보면, 측정점의 압력은 개구부 개방순간부터 (a)점인 0.5 s까지는 부압을 갖다가 구획실 내부에서 점화가 되어 연소반응이 개시되면 열팽창에 의해서 (c)점까지 급격히 압력이 상승된다. 이후 압력은 (d)점을 거쳐 줄어 들다가 (e)점까지 다시 약간 상승한 후에 낮아지는 것을 알 수 있다. 결과에서 부압을 갖는 순간에는 외부의 공기가 내부로 대량으로 들어오게 된다. 현재까지 압력 최고점이 두 개의 피크를 갖는 이유는 개구부의 형상과 깊은 관련이 있는 것으로 파악되고 있는데 그에 관한 자세한 내용은 별도의 논문에서 논의하겠다.

Fig. 6의 압력 공간분포와 Fig. 4(b)의 온도분포를 비교해보면 구획실 내부에 화염이 생겨 고온영역이 넓어지기 시작하면 열팽창 효과에 의해 구획실 내부의 압력이 급격히 증가하게 된다. 이러한 구획실 내부의 압력 증가로 인해 내부의 연료혼합기가 개구부를 통해 밖으로 고속으로 분출되며 이후 구획실 내부 압력은 다시 낮아지게 된다. Fig. 4(c)에서 설명한 바와 같이 구획실 밖으로 고속 분출되는 화재구에는 연료혼합기 성분이 섞여 있으며, 매순간마다 분출되는 화재구의 머리 전방에는 국부적으로 주위보다 압력이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다(원형 점선 내부).

위에서 설명한 결과들을 볼 때 유한화학반응 연소모델은 실험결과와의 비교를 통해 좀 더 최적화된다면 백드래프트의 수치계산에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 FDS에 혼합분을 연소모델과 유한화학반응 연소모델을 적용한 수치계산에서 구획실의 백드래프트현상에 대한 예측성능을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 혼합분을 연소모델은 연료와 공기가 미리 혼합되어 있는 예혼합기의 연소특성을 합리적으로 예측할 수 없기 때문에 백드래프트의 수치계산을 위한 연소모델로는 적합하지 않음을 확인하였다.
- 2) 유한화학반응 연소모델은 연료-공기 예혼합기의 화염 전파특성을 예측할 수 있으며, 전파하는 화염특성을 갖는 백드래프트의 수치적 모사가 가능함을 알 수 있었다.
- 3) 유한화학반응 연소모델을 이용한 수치계산에서는 개구부를 통해 구획실 내부로 유입되는 공기의 중력흐름과 구획실 내부에서 전파하는 부분예혼합화염 특성과 개구부를 통해 구획실 밖으로 폭발적으로 밀려나가는 화재구 현상을 정성적으로 잘 예측할 수 있었다.
- 4) FDS에 유한화학반응 연소모델을 결합한 수치계산은 향후 백드래프트 현상의 수치적 검토에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

**감사의 글:** 이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2013년: C-D-2013-0476)에 의하여 연구되었음. 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) Compartment Fire Behavior Training , <http://cfbt-us.com>.
- 2) D. T. Gottuk, M. J. Peatross, J.P. Farley and F. W. Williams, "The Development and Mitigation of Backdraft: A Real-scale Shipboard Study", *Fire Safety Journal*, Vol. 33, pp. 261~282, 1999.
- 3) C. M. Fleischmann, P. J. Pagni and R. B. Williamson, "Quantitative Backdraft Experiments", *Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium*, pp. 337~348, 1994.
- 4) G. Guigay, J. -M. Most, F. Penot, A. Claverie, J. Eliasson and B. Karlsson, "The Influence of Thermal Instabilities on the Initial Conditions of the Backdraft Phenomenon", *Combustion Science and Technology*, Vol. 182, pp. 613-624, 2010.
- 5) W. G. Weng, W. C. Fan, J. Qin and L. Z. Yang, "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, 2002.
- 6) 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, pp. 19~26, 2003.
- 7) R. Yang, W. G. Weng, W. C. Fan and Y. S. Wang, "Subgrid Scale Laminar Flamelet Model for Partially Premixed Combustion and Its Application to Backdraft Simulation" *Fire Safety Journal*, Vol. 40, pp. 81~98, 2005.
- 8) A. Horvat, Y. Sinai, D. Gojkovic and B. Karlsson, "Numerical and Experimental Investigation of Backdraft", *Combustion Science and Technology*, Vol. 180, pp. 45~63, 2008.
- 9) S. A. Ferraris, J. X. Wen and S. Dembele, "Large Eddy Simulation of the Backdraft Phenomenon", *Fire Safety Journal*, Vol. 43, pp. 205~225, 2008.
- 10) W. G. Weng, W. C. Fan and Y. Hasemi, "Prediction of the Formation of Backdraft in a Compartment Based on Large Eddy Simulation", *International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, Vol. 22, pp. 376~392, 2005.
- 11) K. McGrattan, B. Klein, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST Special Publication 1019-5, 2008.
- 12) M. N. Bui-Pham, "Studies in Structures of Laminar Hydrocarbon Flames", Ph. D. Dissertation, University of California, San Diego, 1992.