[Research Paper]

구획실 크기가 백드래프트 강도에 미치는 영향에 대한 전산해석 연구

하수임* · 오창보**† · 백빛나***

*부경대학교 안전공학과 대학원 석사과정, **부경대학교 안전공학과 교수, ***안전보건공단 산업안전보건연구원 대리

Computational Study of Compartment Size Effects on Backdraft Intensity

Su-Im Ha* · Chang Bo Oh**† · Bit-Na Baek***

*Graduate Student, Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University,

**Professor, Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University,

***Assistant Manager, Occupational Safety and Health Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

(Received December 14, 2020; Revised January 08, 2021; Accepted January 11, 2021)

요 약

구획실 크기가 백드래프트의 강도의 미치는 영향을 검토하기 위해 기존 실험연구의 축소 구획실 크기를 기준으로 하여 각 방향을 2배, 2.5배, 2.625배, 3배 확장시킨 구획실에서 발생하는 백드래프트에 대한 전산해석을 수행하였다. 개구부의 길이도 구획실 크기 비율에 맞춰 확장시켰다. 전산해석에는 FDS가 이용되었으며 대와동모사 기법과 Mixing-controlled fast chemistry 연소모델을 이용한 시뮬레이션이 수행되었다. 얻어진 결과로서, 구획실 벽면 근처의 위치에 공기가 도달하는 시점에서는 구획실 크기에 상관없이 구획실 내 연료량과 유입 공기량으로 정의되는 총괄 당량비 값은 큰 차이를 보이지 않고 유사하였다. 그리고 총괄 당량비를 통해 구획실 내부의 전체적인 연료-공기 혼합은 구획실 크기가 작을수록 빨리 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 구획실 크기가 커질수록 구획실 내 최고압력 값과 최고 열발생률 값은 높아지는 것을 알 수 있었다. 그러나 개구부 크기까지 고려한 구획실 체적-개구부 면적 비율이 증가할수록 최고압력은 지수적으로 증가하며 이들의 상관관계는 매우 높다는 점을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

A computational study was performed to evaluate the effects of compartment size on backdraft intensity. The compartment sizes were selected such that each direction was enlarged by a factor of 2, 2.5, 2.625, and 3 based on the reduced-scale compartment of a previous experimental study. A fire dynamics simulator was used for the computation, and a large eddy simulation and a mixing-controlled fast chemistry combustion model were adopted. Results revealed that the overall equivalence ratio defined by the amounts of fuel inside the compartment and oxygen induced from the opening had similar values at the moment when the air reached the inside wall. The fuel-air mixing inside the compartment was found to be achieved more rapidly with a decreased compartment size. The peaks of pressure and heat release rate inside the compartment increased with an increase in compartment size. However, these peaks were found to increase exponentially with an increase in the ratio of the compartment volume and opening size, and the correlation showed a very high R-squared value.

Keywords : Backdraft, Fire dynamics simulator (FDS), Compartment size, Opening area, Fire simulation

1. 서 론

밀폐공간에서 화재가 발생한 후 공기 부족상태가 되면 화재는 더 이상 진행되지 못하고 소화되지만 내부의 고온에 의한 가연물의 열분해가 진행되어 미연 연료성분이 가

득 차게 된다. 이 환기족 상태의 구획실 창문이 깨지거나 개구부가 개방되면 중력흐름을 통해 외부 공기가 구획실 내부로 유입되고 공기와 미연연료가 혼합되면서 가연 혼합기가 형성된다. 이후 점화원에 의해 가연 혼합기가 점화하게 되면 순간적으로 화재가 발생하고 구획실 내부 열팽창

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

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

으로 인해 구획실 내부의 미연연료가 외부로 밀려나오고 이어서 폭발적인 화재구가 분출되는 데 이 현상을 백드래프트(Backdraft)라고 한다. 백드래프트는 발생 여부를 미리 알기 어렵고 순간적으로 발생하기 때문에 화재현장의 거주자나 소방관들에게 매우 위험한 현상으로 알려져 있다.

백드래프트라는 용어는 1914년 Steward에 의해서 처음으로 문헌에서 사용되었다⁽¹⁾. 당시 백드래프트는 구획실 내부의 연기층에 있는 탄소입자들에 의한 분진폭발로 이해되었었다. 이후 백드래프트는 탄소입자들에 의한 분진폭발이 아니라 열분해된 미연연료 성분에서 기인하는 것이 알려졌지만 깊이 있는 연구는 진행되지 못하였다.

그러던 중 1990년 초에 Fleischmann^(2,3)이 축소 구획실을 대상으로 가스연료에서 기인한 백드래프트를 실험적으로 재현하면서 본격적인 연구가 수행되고 있다. 이후 메탄⁽⁴⁾, LPG⁽⁵⁾ 등 가스연료에서 발생하는 백드래프트에 대한 연구가 진행되었고 실규모 공간에서 디젤연료에 기인한 백드래프트에 대한 연구도 진행되었다⁽⁶⁾. 근래에 이르러 나무나 가구 등의 고체연료에서 발생하는 백드래프트에 대한 연구도 진행되었지만^(7,8) 아직까지 백드래프트의 발생조건, 전개양상에 대한 구체적인 데이터를 얻고 있지는 못한 실정이다.

백드래프트에 대한 실험연구는 위험성 등을 고려해서 축소규모의 구획실을 대상으로 한 연구가 많다^(2,4,9). 이러한 연구의 하나로서 Fleishmann 등은 축소 구획실에서 메탄 가스연료에서 발생하는 백드래프트가 발생하는 연료농도 한계값과 압력양상을 검토한 바 있다⁽³⁾. 또한, Weng과 Fan은 개구부 형상이 다른 축소 구획실을 대상으로 실험연구를 진행하여 백드래프트가 발생 가능한 임계 연료농도는 개구부 형상에 따라 달라진다는 것을 확인하였다⁽⁴⁾.

최근에는 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)을 적용하여 백드래프트 현상을 해석하고자 하는 연구도 일부 수행되어오고 있다. 이러한 백드래프트에 대한 CFD 연구들은 주로 백드래프트를 수치적으로 재현하는 데 주로 관심이 모아졌다^(10,11). 백드래프트는 전파되는 예혼합(또는 부분예혼합)화염의 특성과 통상의 화재와 같은 확산화염의 특성을 모두 보인다. 일반적인 연소모델은 예혼합화염과 확산화염에 대해 각각 다른 모델링 개념을 적용하는 경우가 많기 때문에 CFD를 적용하여 백드래프트를 해석할 경우에는 예혼합화염과 확산화염을 동시에 해석할 수 있는 연소모델을 채용하는 것이 매우 중요하다. 이러한 복합적인 연소모델들은 전문적인 연구자들만이 접근하기 용이한 경우가 많기 때문에 많은 화재 엔지니어들이 적용하기에는 쉽지가 않다.

최근에는 화재해석에 많이 사용하고 있는 Fire dynamics simulator (FDS) 코드를 이용한 백드래프트 해석에 대한 연구가 진행된 바 있다. Park 등⁽¹²⁾은 FDS version 5에 직접 수치모사(Direct numerical simulation, DNS)기법을 적용하여 유한화학반응(Finite chemistry reaction)과 혼합분율(Mixture

fraction) 연소모델의 예측성능을 평가한 바 있다. 이 연구를 통해 확산화염에 대해 특화된 혼합분율 연소모델은 백드래프트의 전개과정을 전혀 예측할 수 없으며 유한화학반응 연소모델은 성공적으로 백드래프트를 재현할 수 있음을 확인하였다. 그러나 이 DNS 연구는 계산시간이 과도하게 소요되기 때문에 실용적 측면에서 백드래프트 해석에 활용되는 데에는 한계가 있었다. 이후 FDS version 6을 이용하여 대와동모사(Large eddy simulation, LES)기법과 Mixing-controlled fast chemistry (MCFC) 및 Eddy dissipation concept (EDC) 연소모델을 적용하여 백드래프트에 대한 예측성능을 평가한 연구가 진행되었다⁽¹³⁾. 이러한 연구를 통해서 FDS를 이용하여 MCFC 모델과 결합된 LES를 수행한다면 계산시간 측면에서도 합리적인 수준으로 백드래프트에 대한 CFD 해석이 가능함을 확인하였다. 이후 백드래프트에 대한 CFD 연구에서는 개구부 형상, 위치 등에 따라 달라지는 백드래프트 거동에 대한 연구가 진행되었다⁽¹⁴⁾. 이렇듯 백드래프트에 대한 CFD 해석은 실험적으로 수행하기 어려운 조건들에 대한 연구를 가능하게 하거나 실험적으로 해석하기 어려운 현상을 보완적으로 해석하는데 매우 유용한 결과들을 제공하고 있다.

한편, 백드래프트의 강도는 구획실 내부의 연료량에 영향을 받을 수 있기 때문에 구획실 크기와 매우 밀접한 관계가 있다. 현재까지 백드래프트에 대한 실험은 축소 구획실을 대상으로 한 연구가 대부분을 차지하고 있기 때문에 구획실 크기가 백드래프트의 강도에 미치는 영향에 대해서는 거의 검토가 이루어지지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 구획실 크기 변화가 백드래프트 강도에 미치는 영향을 검토하기 위해 최근 백드래프트 해석에 검증된 FDS를 활용한 CFD 해석을 수행하였다. CFD 해석에는 FDS version 6의 LES기법과 MCFC 모델을 적용하였으며 축소 규모의 구획실 체적을 2배~3배까지 변화시킨 후 해석을 수행하였고, 결과를 통해 구획실의 체적에 따라 달라지는 구획실 내 혼합특성과 백드래프트 거동 및 강도에 대하여 검토하였다.

2. 수치계산 방법

본 연구에서는 구획실 크기(체적)가 백드래프트에 미치는 영향을 CFD 해석을 통해 검토하기 위해 FDS v6.3.2(15)를 사용하였다. 기존의 연구에서 백드래프트의 해석에 적합한 것으로 알려진 대와동모사(Large eddy simulation, LES) 난류 해석기법과 1 단계 Mixing-controlled fast chemistry (MCFC 1-step)을 적용하였으며, 복사모델로는 Gray-gas 모델을 적용하였다^(4,5). 수치계산에 적용된 지배방정식과 수치계산법에 대한 사항은 참고문헌⁽¹⁵⁾에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

계산에 사용된 계산영역과 구획실 및 개구부의 형상은 Figure 1과 같다. 구획실 크기 영향을 보기 위해서 구획실

Table 1. Length of Computational Domain, Compartment and Opening and Number of Grids for Each Compartment Size

	Domain			Compartment			Opening		Number of Grids
	LDomain [m]	WDomain [m]	HDomain [m]	L [m]	W [m]	H [m]	WOpen [m]	HOpen [m]	
Size 1	3.125	0.65	1.3	1.2	0.6	0.6	0.2	0.6	169,000
Size 2	6.125	1.25	2.5	2.4	1.2	1.2	0.4	1.2	1,225,000
Size 2.5	7.625	1.55	3.1	3.0	1.5	1.5	0.5	1.5	2,344,840
Size 2.625	8.0	1.625	3.25	3.15	1.575	1.575	0.525	1.575	2,704,000
Size 3	9.25	1.85	3.7	3.6	1.8	1.8	0.6	1.8	4,052,240

Figure 1. Schematics for the geometry of 3-D simulation domain including the compartment.

크기를 변화시켰으며 구획실 크기에 따라 개구부 크기도 동시에 변화시켰다. 각 크기에 따른 구획실과 개구부의 정확한 크기는 Table 1에 정리되어 있다. 여기서 구획실의 크기는 Weng과 Fan⁽⁴⁾이 실험연구에서 사용한 축소 구획실의 크기인 가로 × 세로 × 높이 = $1.2 \times 0.6 \times 0.6 \text{ m}^3$ 를 기준 크기(Size 1)로 하여 가로, 세로 및 높이 방향의 길이를 각각 2배(Size 2), 2.5배(Size 2.5), 2.625배(Size 2.625), 3배(Size 3)로 연장한 크기의 구획실을 대상으로 계산을 수행하였다. 여기서 개구부도 동일한 비율로 가로, 세로 방향의 길이를 연장되도록 설정하였다.

계산영역으로는 개구부 밖으로 화염이 분출되기 때문에 가로 방향은 구획실 가로 길이의 1.5배가 되도록 하였으며 높이 방향으로는 구획실 높이만큼 더 연장되도록 설정하였다. 전체 계산영역에는 구획실 크기에 관계없이 동일하게 0.025 m 크기의 균일 격자로 구성하였다. 각 구획실의 체적에 따른 총 격자수는 Table 1에 정리하였다. 참고로 격자 크기 0.025 m는 기존의 연구를 통해 본 연구에서 사용하는 매탄연료에 대한 백드래프트를 대상으로 FDS 해석을 수행하는데 적합한 격자임을 확인한 바 있다⁽¹³⁾.

백드래프트 생성을 위해 Weng과 Fan⁽⁴⁾이 실험연구를 통해 측정된 화학종 농도와 온도분포를 모든 크기의 구획실 내부의 초기조건으로 설정하였다. 구획실 내 농도와 온도 등에 대한 초기조건은 Table 2와 같다. 여기서 상층부 온도 (T_U)와 하층부 온도 (T_L)의 경계 높이(H_{Layer})는 구획실 높이

와 동일한 비율로 증가시켜 지정하였다.

계산에서 구획실 내부에서 백드래프트를 생성시키기 위한 점화원은 구획실의 크기에 관계없이 동일하게 구획실 안쪽벽과 바닥면이 만나는 모서리 측 중간에 가로 × 세로 × 높이 = $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$ 의 크기로 위치시켰다.

Figure 2에는 구획실 내부에서 특정 물리량을 수치적으로 측정하기 위한 위치(S1~S3)를 보여주고 있다. 이들 위치 중에서 S1은 밀도를 감지하기 위한 위치이며 나머지 2개의 위치들, 즉 S2 및 S3은 압력을 측정하기 위한 위치들이다. S1은 기존의 백드래프트에 대한 실험연구에서 밀도를 측정하여 바깥 공기가 들어오는 것을 확인한 후 점화에 이용되었다는 위치이다⁽⁴⁾. S2는 구획실 정 중앙위치를 나타내며 S3는 기존 연구에서 백드래프트 발생 시 구획실의 압력을 대표적으로 나타내는데 적합하다고 알려진 위치이다⁽¹⁶⁾.

FDS를 이용한 계산에서 구획실 내부에 백드래프트를 개시시키기 위해서 Figure 2에 표시된 박스형 점화원 상부면의 S1에서 측정된 밀도가 10% 변화하는 순간에 1500 °C의 고온 질소를 0.05 m/s의 유속으로 0.5 s간 순간적으로 분사하여 연료와 공기의 혼합기를 점화하였다.

수치계산에서는 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v3 @ 2.40 GHz의 성능을 가진 PC 클러스터를 이용하였고 계산 시간 절감을 위해서 총 10개의 Core를 이용한 Message passing interface (MPI) 병렬계산을 수행하였다. 계산시간은

Table 2. Initial Species Mass Fraction, Temperature of Mixture and Height of Upper Hot Layer in the Compartment for Each Case

	Y_{CH_4}	Y_{O_2}	Y_{CO_2}	Y_{CO}	Y_{N_2}	T_U [°C]	T_L [°C]	H_{Layer} [m]
Size 1	0.1224	0.1460	0.0030	0.0012	0.7094	103	67	0.280
Size 2								0.560
Size 2.5								0.700
Size 2.625								0.735
Size 3								0.840

Figure 2. Numerical sensor locations for the measurement of density (S1) and pressure (S2 and S3) in the compartment.

각 Case 당 25.67 Hrs~336.94 Hrs CPU 시간이 소요되었으며 구획실 크기가 클수록 격자수도 많고 화염 크기도 커지게 되므로 계산시간은 증가하는 것을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 산소농도(질량분율) 분포를 보여주는 그림으로서, 점화를 시키지 않았을 경우 구획실이 개방되어 외부 산소가 중력흐름을 따라 내부로 유입되고 있는 과정을 보여주고 있다. 각 구획실의 크기는 다르지는 비교를 위해서 동일한 스케일로 도시하였다. 그림에서 구획실 크기에 관계없이 산소는 개구부 하단의 공기흐름을 통해 구획실 내

Figure 3. Distribution of oxygen mass fraction for each different compartment size without ignition.

Table 3. Amount of Fuel and Oxygen and Global Equivalence Ratio in the Compartment at Ignition Instance for Each Compartment Size Condition

	Instance of ignition (IIG) [s]	Amount of CH ₄ inside the compartment at IIG [kg]	O ₂ at IIG [kg]	Global equivalence ratio (ϕ_g) at IIG
Size 1	2.21	0.0395	0.0672	2.3517
Size 2	3.18	0.3230	0.5523	2.3627
Size 2.5	3.49	0.6264	1.0444	2.3991
Size 2.625	3.73	0.7188	1.2164	2.3637
Size 3	3.75	1.1029	1.8239	2.4728

Figure 4. Temporal variation of the global equivalence ratio in the compartment for each different compartment size.

부로 유입되고 내부의 미연연료 성분은 개구부 상단을 통해 유출되는 것을 확인할 수 있다. 구획실의 크기에 따라 유입된 산소가 구획실 안쪽 벽면에 도달하는 시간이 달라지게 되는데 이는 구획실 크기가 커질수록 개구부에서 안쪽 벽면까지의 거리가 길어지게 되어 내부벽면까지의 산소 도달시간도 길어지기 때문이다. 따라서 동일한 시간대에 점화를 시키는 것은 개구부 내로 유입되는 산소량과 혼합 특성에 너무 명시적인 차이를 주게 된다. 따라서 본 연구와 같이 내부 점화원까지 산소가 도달하는 시간을 기준으로 점화시키는 것이 구획실 크기에 따른 백드래프트의 특성을 검토하기에 좀 더 타당해 보인다.

Figure 4에는 시간에 따라 달라지는 각 구획실 내부의 총괄 당량비(Global equivalence ratio, ϕ_g)의 변화를 도시하였다. 여기서 총괄 당량비는 연소의 상태를 나타내는 매우 중요한 인자로서 구획실 내부의 개략적인 연료와 산소 혼합 비율을 의미하며 아래의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\phi_g = \frac{(m_{CH_4}/m_{O_2})_{compt.}}{(m_{CH_4}/m_{O_2})_{stoi.}} \quad (1)$$

여기서, $(m_{CH_4}/m_{O_2})_{compt.}$ 는 구획실 내 메탄연료와 산소의

질량비를 의미하고 $(m_{CH_4}/m_{O_2})_{stoi.}$ 는 이론혼합비로 계산되는 메탄연료와 산소의 질량비이다.

그림에서 볼 수 있듯이 구획실 크기에 관계없이 구획실 내부 초기 화학종 농도조건은 동일하기 때문에 0.0 s에서 총괄 당량비는 모두 동일하다. 그러나 시간이 경과함에 따라 구획실 크기가 클수록 구획실 내 총괄 당량비가 완만하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 초기의 총괄 당량비가 3.3 정도로 높은 것은 내부에 연료량이 산소량에 비해 많이 존재하고 있음을 보여주고 있다. 구획실의 각 방향 길이와 개구부 크기 증가에 따라 구획실 내부의 메탄의 양은 구획실의 체적에 비례하여 증가하지만 유입되는 산소의 양은 개구부의 면적에 비례하여 증가하기 때문에 구획실 크기가 증가할수록 내부의 연료량은 산소 유입량보다 커지게 되어 동일 시간에서는 당량비가 더 큰 상태가 된다. 앞에서도 언급한 바와 같이 구획실 크기에 상관없이 동일한 순간에 점화시킨다면 구획실 내부의 연료와 산소의 비율이 달라지게 되어 순수한 구획실 크기의 효과를 고찰하기 어렵게 된다.

따라서 본 연구에서는 기존의 실험연구에서 점화시키는 방식을 참조하여 구획실 크기에 상관없이 개구부를 통해 유입되는 공기가 안쪽벽면 근처(S1 위치)에 도착하는 순간을 점화개시 시간으로 정하였다. 유입공기의 도달은 구획실 내부의 벽면근처에서의 밀도를 관찰함으로써 확인하였다.

점화개시 순간의 타당성을 확인하기 위하여 Table 3에는 크기가 다른 각 구획실에 대한 점화시간(Instance of ignition, IIG)과 점화 순간의 구획실 내 총괄 당량비를 정리하였다. Figure 3에서 확인한 바와 같이 구획실의 크기가 증가할수록 구획실 안쪽의 S1 위치까지의 거리가 증가하여 산소가 도달하는 시간이 느려지기 때문에 구획실의 크기 증가에 따라 점화시간도 지연되는 것을 확인할 수 있다. 구획실의 크기에 따라 점화순간이 지연되었지만 점화순간의 총괄 당량비는 대략 2.35~2.47로 큰 차이가 없기 때문에 구획실 크기에 따른 총괄적인 연료-산소의 양이 백드래프트의 특성에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

Figure 5는 구획실 크기에 따른 백드래프트의 거동을 고찰하기 위해 점화시점부터 백드래프트의 전개과정을 도시한 것이다. 그림의 결과는 반응이 활발하여 열발생이 높은 화염을 관찰하기 위해 임의로 200 kW/m^3 이상의 단위체적당

■ > 200 (kW/m³)

Figure 5. Distribution of heat release rate per unit volume (HRRPUV) greater than 200 kW/m³ during the backdraft development for each different compartment size.

열발생률(Heat release rate per unit volume, HRRPUV)을 시간에 대해 도시한 것이다. 앞에서와 마찬가지로 구획실 크기는 동일한 스케일로 맞춰서 도시한 결과이다. Figure 5를 통해 구획실 체적에 따라 점화시점은 다르지만 백드래프트 전개과정이 유사한 것을 확인할 수 있다. 점화 이후 화염은 부력에 의해 구획실 천장으로 이동하며 곧바로 혀 모양(Tongue shape)의 넓은 화염면이 형성되면서 개구부쪽으로 확장되면서 진행되는 것을 확인할 수 있다. 이 혀 모양의 화염은 백드래프트의 전형적인 특성으로 알려져 있다. 이후 구획실 상부의 혀모양 화염은 바닥 쪽으로 순간적으로 전파되면서 개구부 바깥으로 화재구가 분출되는 것을 확인할 수 있다. 구획실 크기에 따른 화재 분출시점을 확인하면

대략 점화시점이 빠른 경우가 먼저 분출되는 것을 알 수 있다. 하지만 Size 2.625의 경우 Size 2와 Size 2.5보다 점화시점은 늦지만 개구부를 통한 화재 분출시점은 Size 2와 Size 2.5보다 빠른 것을 알 수 있다. 이것은 백드래프트의 전개양상이 점화시점 뿐만 아니라 구획실 내부의 압력 등 다른 인자들과도 연관되기 때문인데 직접적인 영향 인자에 대해서는 향후 추가적인 연구를 통해 검토해 볼 필요가 있어 보인다.

Figure 6은 구획실의 크기에 따른 백드래프트의 강도를 정량적으로 비교하기 위해 S2와 S3 위치에서 측정한 압력과 계산영역 내의 열발생률(Heat release rate, HRR)의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. 구획실의 크기가 클수록 측

Figure 6. Temporal variations of pressure and heat release rate (HRR) for each different compartment size.

Table 4. R-square Values of Linear and Exponential Fitting for the Relationship between the Peak Pressure and the Sizes of Compartment and Opening Area at S2 and S3 Location

R-square (R^2)	Volume [m^3]		Volume / Area [m]	
	S2	S3	S2	S3
Linear	0.914	0.946	0.775	0.793
Exponential	0.807	0.842	0.948	0.975

정위치에 관계없이 HRR과 최고압력이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 구획실 크기에 관계없이 최고압력 발생시점은 최고 HRR 발생시점과 비슷하지만 최고압력 시점이 미소하게 빠른 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 이전 연구⁽¹⁴⁾에서도 확인된 바 있다. 또한 Figure 5에서도 설명한 바와 같이 개구부를 통한 화재의 분출시점 순서도 최고압력 또는 최고 HRR 시점 순서와 동일한 것을 알 수 있다. 결국 개구부를 통한 화재의 분출시점에 관한 정확한 고찰을 위해서는 최고압력 발생시점과 특히 HRR 발생시점이 달라지는 점에 대한 물리적 이해가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

백드래프트의 강도는 구획실 내부의 압력을 통해 확인할 수 있다. 따라서 Figure 7에는 백드래프트 강도에 대한 구획실 크기의 영향을 확인하기 위해 구획실 내부의 대표적인 S2와 S3 위치에서 측정된 최고압력 값과 구획실 크기와 관련된 인자들과의 관계를 도시하였다. 맨 위의 그림은 구획실 크기(체적)와 최고압력과의 관계를 나타낸 것으로 두 위치에서 최고압력은 대략 구획실 크기에 따라 지수적으로 증가하는 것보다는 선형적으로 증가하는 것처럼 보인다. 그러나 구획실 크기와 최고압력과의 관계를 선형적으로 보여주는 이 그림은 물리적으로 한계를 가지고 있다. 백드래프트는 동일한 구획실 크기를 갖더라도 개구부 크기가 작아지면 내부압력이 높아진다고 알려진 기존의 연구결과⁽¹⁷⁾를 전혀 반영하고 있지는 못하다. 따라서 이러한 관점을 반영하여 두 번째 그림들에는 최고압력과 구획실 크기를 구획실 개구

부 면적으로 나눈 값(Compartment volume-opening area ratio, VAR)과의 관계를 도시하였다. 이렇게 최고압력과 VAR로 도시했을 경우 구획실내 최고압력은 VAR 증가에 따라 지수적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. Table 4에서 보이는 바와 같이 최고압력과 VAR 비에 따른 지수함수의 관계는 결정계수(R-squared, R^2) 값이 S2와 S3 위치에 대해서 각각 0.948과 0.975로서 매우 상관관계가 높은 것으로 나타나고 있다. 즉 최고압력이 VAR 증가에 대해서 지수적으로 증가하는 관계는 물리적으로나 통계적으로 매우 의미가 있는 것으로 판단된다. 또한 구획실내 최고압력과 VAR의 상관관계는 S3 위치가 S2 위치와 유사한 수준에서 조금 더 높은 결정계수를 보여주고 있다.

기존에 축소 구획실을 대상으로 한 백드래프트에 대한 실험에서는 임의로 바닥면과 측면이 만나는 모서리 쪽에 압력센서를 설치한 경우가 많았지만 그 이유에 대해서는 특별한 제시된 바 없다. 본 연구의 결과를 보면 개구부 상단 끝면의 중간인 S3 위치도 구획실 중앙의 압력정보를 매우 유사하게 보여주고 있기 때문에 백드래프트의 특성을 검토하기 위한 압력센서의 설치위치로 매우 적합하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 구획실 백드래프트의 압력측정에 적합한 위치를 제시한 기존의 연구결과와도 잘 일치하고 있다.

Figure 7에 보이는 바와 같이 구획실 내부의 최고압력은 결과적으로 VAR에 지수적으로 증가하는 것으로 나타나고 있지만 구획실 개구부의 면적에 대해서는 크기가 줄어들면

Figure 7. Relationship between the peak pressure and the sizes of compartment and opening area at S2 and S3 locations.

유입되는 공기의 양이 줄어들기 때문에 백드래프트 강도를 약화시키는 측면이 있지만 내부 연소과정 중의 열팽창에 영향을 주어 압력을 높하게 되고 백드래프트 강도를 높이는 효과가 있다. 향후 연구에서는 이러한 두 가지 효과에 대한 충분한 검토가 이루어 져야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 FDS를 활용한 CFD 해석을 수행하여 백드래프트 강도에 대한 구획실 크기의 영향을 검토하였다. 기존 연구에서 많이 검토된 축소 구획실을 기준으로 각 방향의 길이를 각각 2배, 2.5배, 2.625배, 3배로 확대한 구획실을 대상으로 백드래프트 거동을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구획실 내부로 유입되는 공기의 흐름의 형태는 구획실 크기에 상관없이 정성적으로 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다.
- 2) 구획실 벽면 근처의 위치에 공기가 도달하는 시점에서는 구획실 크기에 상관없이 구획실 내 연료량과 유입 공기량으로 정의되는 총괄 당량비는 큰 차이를 보이지 않고 유사함을 확인하였다.
- 3) 총괄 당량비를 통해 구획실 내부의 전체적인 연료-공

기 혼합은 구획실 크기가 작을수록 빨리 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이것은 구획실 크기가 클수록 백드래프트 발생에 필요한 조건형성에 그만큼 시간이 많이 소요됨을 의미한다.

- 4) 구획실 크기가 커질수록 구획실 내 최고압력 값과 최고 열발생을 값은 높아지는 것을 확인하였다. 그러나 최고 압력은 개구부의 크기에도 연관되기 때문에 이를 고려한 구획실 크기를 개구부 면적으로 나눈 VAR값 증가에 따라 지수적으로 증가하면 이들의 상관관계는 매우 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

References

1. P. D. C. Steward, "Dust and Smoke Explosions", NFPA Quarterly 7, pp. 424-428 (1914).
2. C. M. Fleischmann, P. J. Pagni and R. B. Williamson, "Exploratory Backdraft Experiments", Fire Technology, Fourth Quarter,

- pp. 298-316 (1993).
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. 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).
 5. J. X. Wu, Y. T. Zhang, X. Gou, M. J. Yan, E. Y. Wang and L. S. Liu LS, "Experimental Research on Gas Fire Backdraft Phenomenon", Procedia Environmental Sciences, Vol. 11, pp. 1542-1549 (2011).
 6. D. T. Gottuk, M. J. Peatross, J. P. Farley and F. W. Williams, "The Development and Mitigation of Backdrafts: a Real-scale Shipboard Study", Fire Safety Journal, Vol. 33, pp. 261-282 (1999).
 7. A. P. Chen, L. Zhou, B. Liu and W. H. Chen, "Theoretical Analysis and Experimental Study on Critical Conditions of Backdraft", Journal of Loss Prevention Process Industries, Vol. 24, pp. 632-637 (2011).
 8. L. C. Tsai and C. W. Chiu, "Full-scale Experimental Studies for Backdraft Using Solid Materials", Process Safety Environmental Protection, Vol. 91, pp. 202-212 (2013).
 9. C. L. Wu, S. Santamaria and R. Carvel, "Critical Factors Determining the Onset of Backdraft Using Solid Fuels", Fire Technology, Vol. 56, pp. 937-957 (2020).
 10. A. Horvat and Y. Sinai, "Numerical Simulation of Backdraft Phenomena", Fire Safety Journal, Vol. 42, pp. 200-209 (2007).
 11. 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).
 12. 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, pp. 985-993 (2017).
 13. D. Myilsamy, C. B. Oh and B. I. Choi, "Large Eddy Simulation of the Backdraft Dynamics in Compartments with Different Opening Geometries", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, No. 5, pp. 2189-2201 (2019).
 14. S. Ha and C. B. Oh, "Geometric Effects of Compartment Opening on Fuel-Air Mixing and Backdraft Behavior", Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 1, pp. 30-38 (2019).
 15. 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).
 16. 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).
 17. K. Lambert, "Backdraft: Fire Science and Firefighting, a Literature Review", International Master of Science in Fire Safety Engineering (2013).