

백드래프트의 중력흐름에 미치는 구획실 내부 초기조건 및 개구부 형상의 영향

박지웅 · 오창보[†] · 한용식^{*} · 도규형^{*}

부경대학교 안전공학과 · ^{*}한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실
(2015. 7. 28. 접수 / 2015. 11. 10. 수정 / 2015. 12. 2. 채택)

Effects of Initial Condition and Opening Geometry of a Compartment on the Gravity Current in the Backdraft

Ji-Woong Park · Chang Bo Oh[†] · Yong Shik Han^{*} · Kyu Hyung Do^{*}

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

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

(Received July 28, 2015 / Revised November 10, 2015 / Accepted December 2, 2015)

Abstract : Computational study of a gravity current prior to the backdraft was conducted using fire dynamic simulator (FDS). Various initial conditions of mixture compositions and compartment temperature as well as four opening geometries (Horizontal, Door, Vertical, and Full opening) were considered to figure out their effects on the gravity current. The density difference ratio (β) between inside and outside of compartment, the gravity current time (t_{grav}) and velocity (v_{grav}), and non-dimensional velocity (v^*) were introduced to quantify the flow characteristics of the gravity current. Overall fluid structure of the gravity current at the fixed opening geometry showed similar development process for different β conditions. However, t_{grav} for entering air to reach the opposed wall to the opening geometry increased with β . Door, Vertical, and Horizontal openings where openings are attached on the ground showed similar development process of the gravity current except for Horizontal opening, which located on the middle of the opening wall. The magnitude of v_{grav} at fixed β was, from largest to smallest, Full > Vertical > Door > Horizontal, but it depended on both the size and location of the opening. On the other hand, v^* was found to be independent to β , and only depended on the geometry of the opening.

Key Words : backdraft, fire dynamics simulator(FDS), gravity current, non-dimensional velocity, compartment fire

1. 서론

건물 내부와 같이 사방이 벽으로 둘러싸인 실내공간 혹은 구획실에서 화재가 발생하게 되면 가연 연료량에 비해 산소의 양이 제한적인 환기부족 조건의 화재로 전개 될 가능성이 높다. 구획실 내부의 산소가 모두 고갈되고 나면 화재는 혼소 과정을 거치며 실내공간 내부를 고온의 연료 성분 및 연소생성물로 가득 채우게 된다. 이 후, 거주자나 소방관이 화재 진압을 위해 개구부를 개방하게 되면 고온으로 인해 밀도가 낮은 구획실 내부와 외부의 밀도차에 의해 외부의 공기가 내부로 유입되는 중력흐름 현상이 관찰된다. 구획실 내부로 유입된 상온의 공기는 구획실 내부 고온의 연료

성분과 혼합되며 개구부 반대벽면을 향해 흐르며 점차 가연범위에 도달하게 된다. 이 후, 임의의 점화원에 의해 점화가 개시되면 폭발하듯 구획실 외부로 전파하는 화재구 현상이 관찰되는데 이러한 현상을 백드래프트(backdraft)라고 부른다.

이러한 백드래프트 현상은 플래쉬오버와 같은 다른 화재현상과는 달리 많은 연구가 진행되지는 못하다가 1993년에서야 Fleischmann¹⁾에 의해 처음으로 재현되었다. 이후 일부 연구그룹에 의해 백드래프트 발생 이전의 중력흐름(gravity current)과 더불어 점화개시 및 화재구 형성 등의 전개과정에 대한 연구가 시도되었다²⁻⁹⁾. 백드래프트 개시 이전에 발생하는 중력흐름 현상은 가시적으로 눈에 보이지 않는 고온의 연료성분과 상온의

[†] Corresponding Author : Chang Bo Oh, Tel : +82-51-629-6472, E-mail : cboh@pknu.ac.kr
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

기체사이에 발생하기 때문에 혼합 및 유동특성을 고찰하기가 쉽지 않다. 이러한 어려움 때문에 일부 연구자들¹⁻³⁾은 소금물과 물의 밀도차이를 이용한 모형실험을 통해 중력흐름 현상을 모사한 연구를 시도하였다. 유동의 가시화를 위해서 염기성 용액에서 붉은색으로 반응하는 페놀프탈레인지시약을 이용하거나 디지털 입자화상 속도계를 이용하였으며, 개구부 형상(opening geometries)에 따른 중력흐름의 속도 및 혼합특성에 대하여 연구하였다. 또한, Froude 수와 무차원화 된 중력흐름 선단(head)의 길이가 밀도 차이에 영향을 받지 않음을 보고하였다. Weng and Fan⁶⁾은 미국 NIST에서 개발한 fire dynamics simulator(FDS)를 이용한 전산해석 연구를 통해 백드래프트 개시 이전의 점화시간 및 중력흐름 속도에 대한 연구를 수행하였다. 구획실 내부와 외부의 공기의 온도차(밀도차)에 따른 중력흐름 시간 및 점화시간을 검토하였으며, 개구부 형상에 따른 무차원화 된 유속을 또한 검토하였다. 그 결과, 동일한 개구부 형상에서 무차원화 된 유속이 밀도 차이 비에 상관없이 일정한 값을 보임을 보고하였으며, 다차원효과에 기인하여 개구부 형상에 따라서 중력흐름의 유동특성이 다르게 나타날 수 있음을 보고하였다. 참고로 이들의 연구에서는 구획실 내부의 혼합기가 실제 화재조건에서의 고온 연료 및 연소생성물이 아닌 단순 공기만을 고려되어 연구가 수행되었다.

최근, 본 연구그룹에서는 별도의 난류모델이 필요하지 않은 직접수치모사법(direct numerical simulation, DNS)을 적용하면서도 난류의 Kolmogorov 스케일까지 해상하지 않고 백드래프트의 주요 특징인 임계 연료농도나 압력전개를 잘 해상할 수 있을 정도의 격자계를 이용한 Model-free Simulation(MFS) 기법으로 백드래프트를 합리적으로 재현한 바 있다. 또한 다양한 인자들에 대한 영향을 검토하여 유한화학반응(finite chemistry) 연소모델을 적용한 MFS 기법은 FDS에 추가적인 고급 연소모델을 탑재하지 않고서도 백드래프트를 매우 현실적으로 예측할 수 있음을 보였다¹⁰⁾.

백드래프트 현상을 이해하기 위한 인자들은 매우 다양하다. 따라서 공학적으로 백드래프트 현상에 대한 좀 더 타당한 결과를 얻기 위해서는 이들 인자들, 즉 개구부의 형상, 구획실의 크기, 연료의 종류, 및 구획실 내부의 연료조성 및 온도 등이 백드래프트에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 이러한 인자들이 백드래프트에 미치는 영향을 검토하는 연구의 일환으로서, 백드래프트 초기단계의 구획실 개구부를 통해 유입되는 공기에 의해 형성되는 중력흐름현상에 미치는 구획실 내부 농도

조건 및 개구부형상의 영향을 검토하였다.

2. 계산방법 및 조건

2.1 계산대상 및 방법

본 연구에서는 백드래프트 초기단계의 중력흐름에 미치는 구획실 내부 농도조건 및 개구부형상의 영향을 검토하기 위해 NIST에서 개발한 FDS v5.5.3을 사용하였다. 별도의 난류 모델을 필요로 하지 않은 MFS를 적용하였으며 자세한 지배방정식은 다른 문헌들¹⁰⁻¹⁶⁾을 참고하길 바란다.

계산은 Fig. 1과 같이 Weng and Fan³⁻⁶⁾에 의해 실험

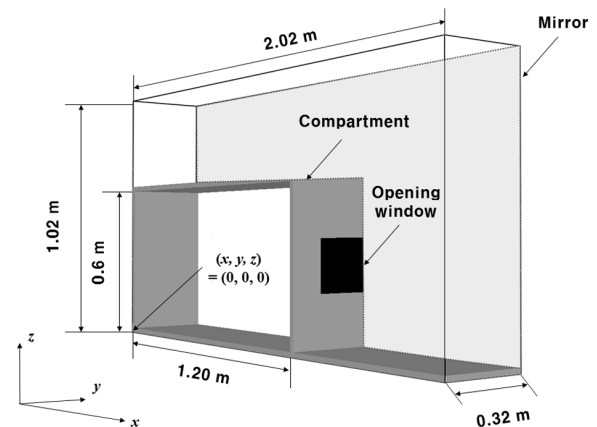


Fig. 1. A schematic of the compartment and computational domain.

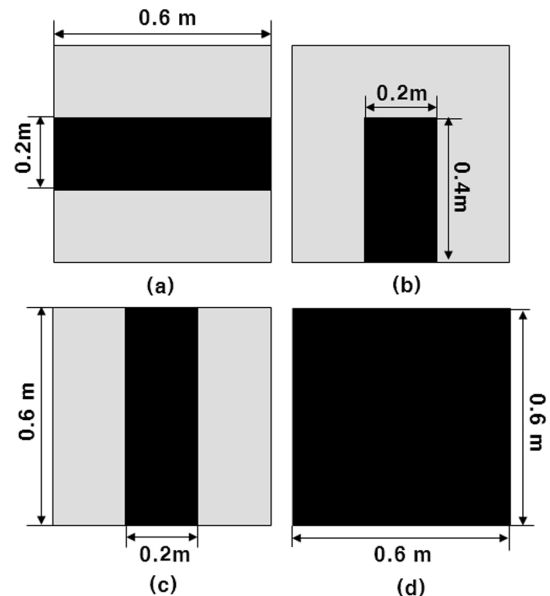


Fig. 2. Various opening geometries and dimensions; (a) Horizontal, (b) Door, (C) Vertical, and (D) Full.

Table 1. Mixture composition and temperatures in the compartment for various cases

#	Species Mass Fraction					Compartment Temperature (K)	Density difference ratio, β
	Y_{CH_4}	Y_{CO}	Y_{CO_2}	Y_{O_2}	Y_{N_2}		
Case 1	0.0530	0.0018	0.0210	0.1350	0.7892	363.0	0.2636
Case 2	0.0806	0.0100	0.0190	0.1100	0.7804	356.5	0.2710
Case 3	0.1050	0.0075	0.0210	0.1200	0.7465	357.0	0.2928
Case 4	0.0710	0.0032	0.0020	0.1460	0.7778	368.0	0.3051
Case 5	0.1340	0.0013	0.0310	0.1300	0.7037	356.5	0.3116
Case 6	0.1267	0.0021	0.0310	0.1200	0.7202	359.5	0.3174
Case 7	0.0870	0.0090	0.0220	0.1100	0.7720	371.5	0.3292
Case 8	0.1900	0.0008	0.0210	0.1250	0.6632	356.5	0.3681

적으로 많이 재현하였던 축소된 규모의 구획실(1.2 m × 0.6 m × 0.6 m)을 대상으로 수행하였다. 또한 다양한 개구부 형상이 중력흐름 현상에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 기존 연구^{3,6)}에 많이 고려되었던 Fig. 2와 같이 4개의 서로 다른 개구부 형상이 고려되었다. 그림에서 검정색 부분이 개구부이다. 계산시간의 절감을 위해서 Y 축으로 0.3 m 인 면을 대칭조건(mirror)으로 설정하였으며, MPI 병렬계산을 수행하였다. 계산에 사용된 전산자원은 Intel(R) Core(TM)2 E8400 3.0GHz이며 10개의 Core를 이용하여 한 조건 당 약 10시간 정도 소요되었다.

2.2 격자 및 계산조건

기존의 연구¹⁷⁾에서 백드래프트 초기단계의 중력흐름 현상에서의 난류유동을 합리적으로 해상하기 위해 필요한 격자수가 보고된 바 있다. 또한 본 연구그룹의 선행연구¹⁴⁾에서 백드래프트가 형성되는 임계 연료농도와 백드래프트 생성과정에서 구획실 내부의 비정상 압력 전개를 합리적으로 예측할 수 있다고 보고한 바 있는 격자크기 5 mm의 균일 격자계를 사용하였다. 결과적으로 구획실 내부와 외부에 총 5,270,000개 정도의 격자가 사용되었다. 계산 초기에 구획실 내부에는 Weng and Fan⁶⁾의 실험에서 측정된 구획화재 이후의 혼소과정에서의 혼합기 조성 및 온도 값을 경계조건으로 설정하였으며 구체적인 수치는 Table 1에 표기하였다.

구획실의 초기 조건의 변화에 따른 내부와 외부의 밀도차이를 정량적으로 평가하기 위해 다음의 식 (1)으로 정의되는 밀도 차이 비(density difference ratio, β)를 도입하였다.

$$\beta = \frac{(\rho_{air} - \rho_{comp})}{\rho_{comp}} \quad (1)$$

여기서 ρ_{air} 는 구획실 외부의 상온공기 밀도(1.17 kg/m³ 25 °C)를 의미하고 ρ_{comp} 는 구획실 내부 고온 혼합기의 밀도를 의미한다. 개구부가 개방된 이후 구획실 내부로 유입되는 중력흐름의 속도(v_{grav})를 정량적으로 예측하기 위하여 다음의 식 (2)로 정의되는 변수를 도입하였으며, 초기조건 변화 및 개구부 형상의 변화에 따른 중력흐름의 속도 변화를 정량적으로 검토하기 위하여 식 (3)으로 정의되는 무차원화 된 유속(non-dimensional velocity, v^*)⁶⁾을 도입하였다.

$$v_{grav} = \frac{L}{t_{grav}} \quad (2)$$

$$v^* = \frac{v_{grav}}{\sqrt{\beta g H}} \quad (3)$$

여기서 L 은 개구부와 개구부 반대 벽면까지의 거리(1.2m), g 는 중력가속도(9.81m/s²), 그리고 H 는 구획실의 높이(0.6m)를 의미한다. 이 때, t_{grav} 는 구획실 내부로 유입된 중력흐름이 개구부 반대 벽면에 도달하는데 소요되는 시간을 의미하며, 본 연구에서는 바닥원점(0.0, 0.0, 0.0)지점에서 연료의 질량분율이 유입되는 공기로 인해 희석되어 초기 값의 90%가 되는 시점을 중력흐름이 구획실 내부벽면에 도달하는 시간으로 정의하였다. 계산의 시작과 동시에 개구부가 개방되어 구획실 내부 고온의 혼합기와 구획실 외부 상온의 공기간의 밀도차에 기인하여 중력흐름이 발생하는 시나리오로 계산을 진행하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 초기 농도조건이 중력흐름에 미치는 영향

Fig. 3(a)-(d)에는 개구부 조건에서 구획실 내부 초기

농도조건에 따른 중력흐름의 영향을 검토하기 위해 동일한 Door 형태에서 시간의 경과에 따른 중력흐름을 도시하였다. 모든 조건에서 계산의 시작($t=0$ s)과 함께 개구부가 개방이 되면 구획실 내부와 외부의 밀도차이에 기인하여 발생하는 중력흐름이 관찰된다. 최초 중력흐름은 지상으로부터 개구부높이의 약 2/3 지점을 기점으로 두 기류가 반대방향으로 흐르고 있는데, 상온의 공기는 개구부 하단을 통해 구획실 내부로 유입되며 내부의 고온의 연료성분은 개구부 상단을 통해 외부로 분출되는 것을 알 수 있다. $t=0.5$ s까지 초기 중력흐름의 거동은 모든 Case에서 비슷한 양상을 보이며 전개되고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 바닥면을 통해 내부로 유입된 상온 공기는 구획실 내부 혼합기와 접촉면에서 작은 와(eddy)들의 연속적인 구조를 보이며 개구부 반대 벽면으로 진행하면서 점차 내부 연료와 혼합된다. $t=1.0$ s에서의 중력흐름을 살펴보면 앞서 관찰된 와들이 더 큰 크기의 와로 합쳐지며 혼합되고 있음을 알 수 있다. 이 때, 두 기류는 Door형태의 개구부 높이의 중심(0.2 m)을 기준으로 서로 반대 방향으로 흐르게 된다. $t=2.0$ s에서는 Case 8이 다른 조건에 비해 개구부를 통해 외부로 유출되는 연료의 양이 가장 많으며, 개구부 내부로 유입된 공기의 중력흐름은 가장 빠른 속도로 개구부 반대 벽면을 향해 흐르는 것을 알 수 있다. 또한, $t=2.5$ s에서 Case 1의 중력흐름시간(t_{grav})은 2.67 s로서 Case 8의 $t_{grav}=2.30$ s보다 0.37 s 더 크게 예측되었으며, Case 2와 Case 5가 동일한 구획실 내부온도(356.5 K)조건임에도 불구하고, 구획실 내부 혼합기의 조성의 차이에 기인하여 Case 5가 $t_{grav}=2.34$ s로 Case 2의 $t_{grav}=2.72$ s보다 약 0.38 s 짧게 예

측되는 것을 알 수 있다.

위의 Case 1, 2, 5, 그리고 8의 결과를 함께 고찰해 보면, 전체적으로 구획실 내부의 밀도차이 비율인 β 값이 클수록 t_{grav} 이 낮게 예측되는 것을 알 수 있다(Fig. 5 참조). 특히, Case 2, 5, 그리고 8의 경우 동일한 구획실 내부 온도조건임에도 불구하고 t_{grav} 이 다르게 예측됨을 알 수 있다. 그 이유로는 초기에 구획실 내부를 구성하고 있는 혼합기(연료와 연소생성물) 중에 상대적으로 분자량이 작은 연료의 질량분율이 증가 할수록 전체 혼합기의 평균분자량이 작아지게 되고, 그로인해 구획실 내부 혼합기의 밀도가 작아지기 때문에 구획실 내부와 외부의 밀도차이가 커져 더 큰 부력의 효과를 받기 때문으로 판단된다. 이러한 결과는 백드래프트 발생 이전의 중력흐름의 경우 단순히 구획실 내부와 외부의 온도차이에 기인하여 그 유동특성이 결정되는 것이 아니라, 내부의 혼합기 구성에 따라서 중력흐름의 속도가 달라질 수 있음을 보여주는 결과이다. 즉, 구획실 내부의 혼합기의 분자량이 커지게 되면 구획실 외부와의 밀도차이가 작아지기 때문에 상대적으로 느린 중력흐름이 발생할 수 있음을 의미한다.

3.2 개구부 형상이 중력흐름에 미치는 영향

Fig. 4(a)~(d)는 Case 8로 고정된 조건에서 개구부 형상에 따른 중력흐름의 거동을 고찰하기 위해 연료의 질량분율을 시간의 경과에 따라 도시한 것이다. 전체적으로 개구부의 형상에 따라 구획실 내부로 유입되는 공기의 흐름과 외부로 유출되는 고온의 연료성분의 중력흐름 거동이 서로 다르게 예측됨을 알 수 있다. 먼저, Vertical 및 Full의 경우 앞서 살펴 본 Door와 비슷하게

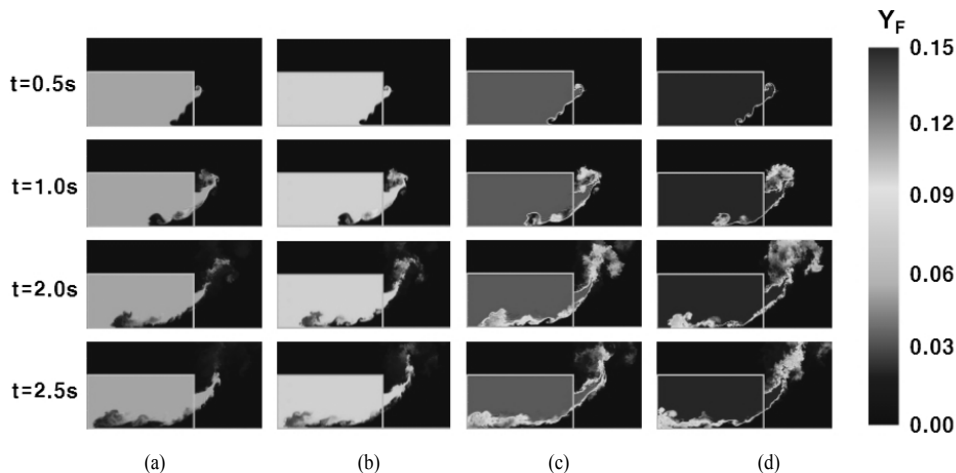


Fig. 3. Temporal evolution of fuel mass fraction (Y_{CH_4}) with different density difference ratio (β) for Door opening at the Y plane of 0.3 m; (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 5, and Case 8.

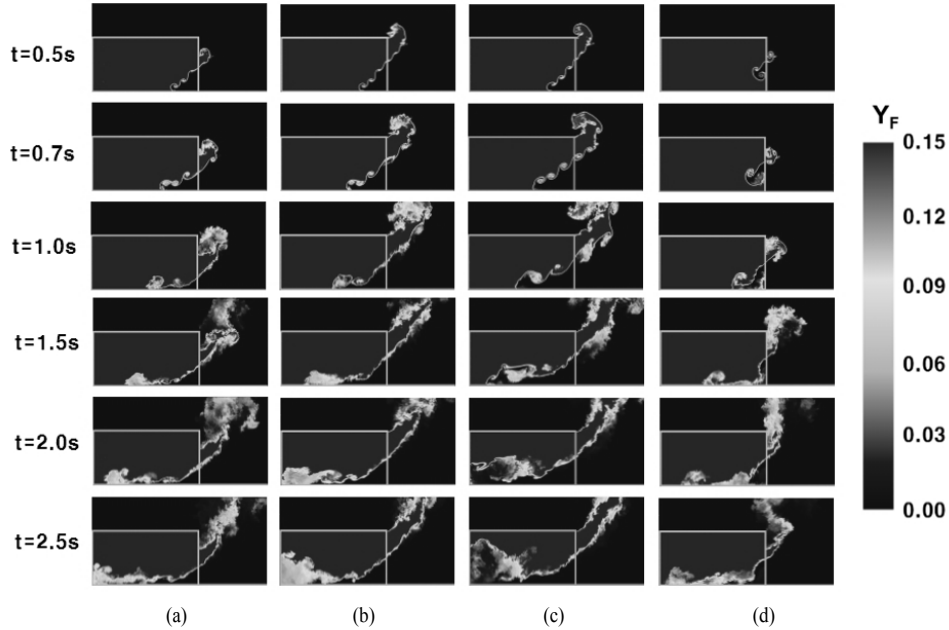


Fig. 4. Temporal evolution of fuel mass fraction (Y_{CH_4}) with different opening geometries for Case 8 at the Y plane of 0.3 m, (a) Door, (b) Vertical, (c) Full, and (d) Horizontal opening.

개구부 개방 이후 약 $t=0.5$ s까지는 구획실 내부로 유입된 상온 공기와 내부의 연료 혼합기 사이에 와들이 형성되며 혼합되고 있음을 알 수 있다. 하지만 이 때 개구부를 통해 외부로 유출되는 연료의 양은 $Full > Vertical > Door$ 의 순으로 더 많음을 알 수 있으며, Door에 비해 Full 조건에서 내부로 유입되는 상온공기와 고온연료의 경계면에서 더욱 크고 뚜렷한 형태의 와동이 관찰된다. 반면에 다른 조건에 비해 구획실 외부로 분출되는 연료의 양이 상대적으로 적은 Horizontal의 경우 다른 조건과는 달리 내부로 유입되는 중력흐름의 선단쪽에 두개의 와를 가지는 버섯형태를 보이며 구획실 바닥으로 흐르게 되는 거동이 관찰된다. 이러한 버섯형태의 중력흐름은 $t=1.0$ s가 되면 개구부 바닥에 부딪힌 이후에는 다른 조건과 비슷한 양상으로 개구부 반대 벽면으로 이동하게 된다. $t=1.0$ s가 지난 뒤 Door와 Vertical의 경우, 개구부를 통해 유입된 공기가 구획실 내부의 연료성분과 희석되어 중력흐름의 선단에서 $Y_f \sim 0.06$ 의 초기값에 비해 상대적으로 많이 낮아진 수준을 보이며 전개되는 반면에 Full 조건에서의 중력흐름은 Door나 Vertical에 비해 상대적으로 길이가 길고 내부로 유입된 공기와 연료의 혼합으로 인해 연료의 농도가 거의 모두 희석되어 중력흐름의 선단에서 매우 낮은 수준의 연료농도의 값 ($Y_f \sim 0.0$)이 예측되고 있음을 알 수 있다. Horizontal의 경우 $t=1.5$ s를 살펴보면 다른 조건에 비해 상대적으로 중력흐름 선단에서의 연료농도가 다른 조건에 비해 높게

($Y_f \sim 0.13$) 예측되고 있음을 알 수 있다. $t=2.0$ s이후의 중력흐름 거동을 살펴보면 Full과 Vertical의 경우 개구부 상단을 통해 많은 양의 구획실 내부 연료가 외부로 유출되고 있음을 알 수 있으며, 내부로 유입된 중력흐름의 선단이 개구부 반대 벽면에 도달한 것을 알 수 있다. 반면에, Door와 Horizontal은 Vertical 및 Full에 비해 상대적으로 작은 중력흐름 선단의 크기와 길이를 가지며 개구부 반대 벽면으로 이동하고 있다. 특히 Horizontal의 경우 $t=2.5$ s의 중력흐름 선단을 살펴보면 다른 조건에 비해 매우 높은 연료의 농도를 예측하고 있으며, 이러한 결과는 상대적으로 상온의 공기가 덜 유입되었음을 의미한다. 이러한 결과는 개구부의 형상에 따라서 구획실 내부로 유입되는 중력흐름의 속도(공기류의 유속)의 크기가 더 크거나 작아질 수 있음을 의미하며, 개구부 면적의 크기뿐만 아니라 개구부의 위치도 중력흐름의 유동특성에 큰 영향을 줄 수 있음을 보여주는 결과이다.

3.3 중력흐름 시간(t_{grav}) 및 중력흐름 속도(v_{grav})

개구부 형상에 따른 중력흐름의 거동을 좀 더 정량적으로 검토하기 위해서 각각의 개구부 형상 및 밀도비(β)의 변화에 따른 중력흐름 시간(t_{grav})과 중력흐름 속도(v_{grav})을 Fig. 5(a) 및 (b)에 각각 도시하였다. 여기서 β 값이 커지는 것은 구획실 내부와 외부의 밀도차가 커짐을 의미하는데, 동일한 개구부 조건에서 β 값이 커

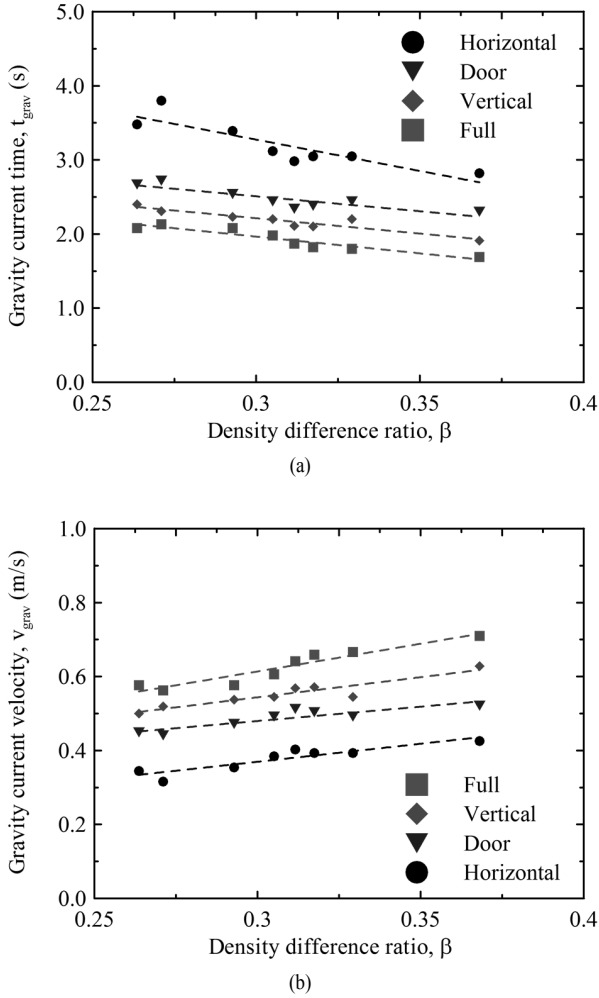


Fig. 5. Gravity current time (t_{grav}) and velocity (v_{grav}) with density difference ratio (β) for various opening geometries.

지게 되면 그 만큼 부력의 효과 또한 커지게 된다. Fig. 5(a)에서 보는 것과 같이 각 개구부 형상 조건에서 t_{grav} 는 β 값의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이며, 이 때 고정된 β 조건에서는 Horizontal > Door > Vertical > Full 순으로 t_{grav} 를 크게 예측하고 있다. 또한, Door, Vertical, 및 Full의 세 조건은 β 값의 증가에 따라 비슷한 수준의 기울기를 보여주고 있지만, Horizontal의 경우 다른 조건에 비해 더 큰 음의 기울기 값을 보여주고 있다. Fig. 5(b)의 결과에서 동일한 β 조건에서 v_{grav} 를 살펴보면 Full의 개구부 조건에서의 중력흐름이 가장 큰 유속으로 전개됨을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5(a)의 중력흐름 시간을 고려하면 당연한 결과이다. Full의 경우에는 다른 개구부 형상에 비해서 상대적으로 개구부의 면적(0.36 m^2)이 넓기 때문에 많은 양의 공기가 내부로 유입되어 중력흐름 속도가 더 큰 것으로 판단된다. 그러나 Horizontal과 Vertical의 경우에는 두 조건 모

두 동일한 면적의 크기(0.12 m^2)를 가짐에도 불구하고 Horizontal의 v_{grav} 이 Vertical보다 작은 것을 알 수 있다. 심지어 Horizontal의 경우 Door보다도 면적이 크에도 불구하고 v_{grav} 이 작게 예측됨을 비추어 볼 때 v_{grav} 는 앞서 Fig. 4를 통해 고찰한 바와 같이 단순히 개구부 면적의 크기나 기하학적 형상의 영향만을 받는 것이 아니라 개구부의 가로/세로 비율이나 개구부의 위치 등에 따라서 복잡한 경향을 보이는 것으로 판단된다.

3.4 무차원화 된 유속(v^*)

Fig. 6에는 각 개구부 형상에서 β 값에 따른 v^* 과 그 평균값을 함께 도시하였다. 여기서 식 (3)으로 정의되는 v^* 는 유체의 부력에 대한 관성력의 비로 정의되며, 동일한 초기 농도조성에서(동일한 부력의 크기)에서 개구부 형상에 따라서 v^* 가 커진다는 것은 그 만큼 관성력(v_{grav})이 커진다는 것을 의미한다. 앞서 Fig. 5를 통해 동일한 개구부 형상에서 β 값의 증가에 따라 v_{grav} 이 증가하는 것을 알았다. 반면에, v^* 는 β 값의 증가에도 불구하고 비슷한 수준을 유지하는 것을 알 수 있다. 그리고 동일한 β 에서 v^* 의 크기는 Full > Vertical > Door > Horizontal의 순서로 크게 예측되었다. 이러한 결과는 구획실 내부의 온도 및 연료조성이 변화하여 β 값이 달라지더라도 개구부의 형상이 동일하다면 부력과 관성력의 비가 일정하게 유지된다는 것을 의미한다. 즉, 내부와 외부의 밀도차이가 커진 만큼 관성력이 커진다는 것을 의미한다. 반면에, 동일한 β 조건에서 개구부 형상에 따라서 v^* 이 달라진다는 것은 개구부 형상에 따라서 중력흐름에 미치는 관성력의 크기가 달라짐을 의미한다. 또한 이때 관성력의 크기는 단순히 개구부의 형상이나 면적에만 의존하는 것이 아니라 개구

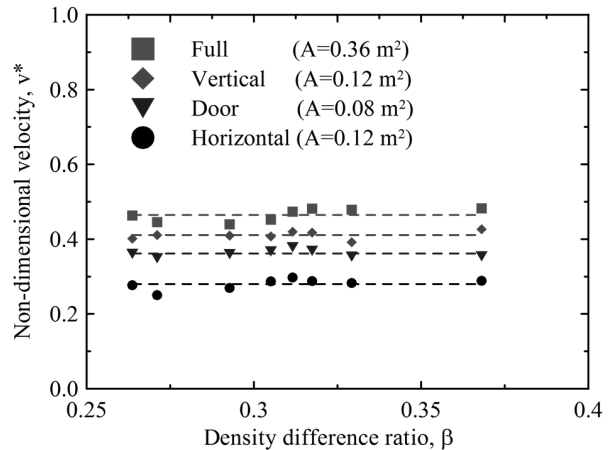


Fig. 6. Non-dimensional velocity (v^*) with density difference ratio (β) for various opening geometries.

부의 위치와 가로/세로 비율에도 큰 영향을 받을 수 있다.

현재의 연구에서는 β 와는 무관하게 개구부의 기하학적 형상에 따라 v^* 가 달라짐을 확인하였지만, 향후 연구를 통해 개구부 크기, 위치, 형상 및 가로/세로 비율 등에 대한 인자를 좀 더 다양하게 바꾸어 연구를 수행하고 이들 인자의 영향을 잘 고려할 수 있는 하나의 상관관계식을 도출할 수 있다면 백드래프트 현상을 이해하는 데 더욱 유용한 결과가 될 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

구획실 내부의 초기조건(연료 및 온도조성)에 따른 백드래프트 발생 이전의 중력흐름에 대한 전산해석 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

개구부가 개방이 되면 구획실 내부와 외부의 밀도차가 커짐에 따라 개구부 반대 벽면에 도달하는 중력흐름 시간은 감소함을 알았다. 동일한 구획실 내부와 외부의 밀도비 조건에서는 Horizontal > Door > Vertical > Full 순으로 중력흐름시간이 높게 예측됨을 알았다. 그리고 동일한 구획실 내부 혼합기의 온도조성에도 불구하고 구획실 내부 혼합기의 혼합분자량이 작을수록 구획실 내부 밀도가 감소하여 중력흐름시간이 작게 예측됨을 알았다.

개구부 형태에 따라서 중력흐름이 다른 메커니즘으로 전개됨을 알았다. 개구부가 바닥과 붙어있는 Door, Vertical, 그리고 Full의 경우 Horizontal에 비해 더 큰 속도의 중력흐름이 관찰되었으며, 파도모양의 형태로 중력흐름이 이동하는 반면에 개구부가 바닥과 떨어져 있는 Horizontal의 경우 버섯모양의 형태를 보이며 상대적으로 느린 중력흐름 속도를 가짐을 알았다.

동일한 개구부 조건에서는 구획실 내부와 외부의 밀도의 변화에도 불구하고 무차원화 된 유속이 비슷한 수준을 유지함을 알았다. 반면, 동일한 구획실 내부와 외부의 밀도차이 조건에서는 개구부 형상에 따라서 무차원화 된 유속은 Full > Vertical > Door > Horizontal의 순서로 높게 예측됨을 알았다.

감사의 글: 이 논문은 2013학년도 부경대학교 연구년 [II] 교수 지원사업에 의하여 연구되었음 (C-D-2013-0911)

References

1) C. M. Fleischmann, "Backdraft Phenomena," Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 1993.

- 2) C. M. Fleischmann and K.B. McGrattan, "Numerical and Experimental Gravity Currents Related to Backdrafts," Fire Safety Journal, Vol. 33, pp. 21-34., 1999.
- 3) W. G. Weng, W. C. Fan, J. Qin and L. Z. Yang, "Study on Salt Water Modeling of Gravity Currents Prior to Backdraft using Flow Visualization and Digital Particle Image Velocimetry," Experiments in Fluids, Vol. 33, pp. 398-404, 2002.
- 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, pp. 19-26, 2003.
- 5) W. G. Weng, Y. Hasemi and W. C. Fan, "Study on Effect of Opening Location on The Occurrence of Backdraft," Tenth Interflam Symposium on Fire Science & Engineering, Edinburgh Scotland, Inter-Science Communications, London, pp. 95-103, 2004.
- 6) 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.
- 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) 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.
- 9) S. A. Ferraris, I. Madga and J. X. Wen "Large Eddy Simulation of the Backdraft Phenomenon and its Mitigation in Compartment Fires with Different Opening Geometries," Combustion Science and Technology, Vol. 181, pp. 853-876, 2009.
- 10) 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.
- 11) J. -W. Park and C. B. Oh, "Investigation of Combustion Model for the Simulation of Backdraft in a Compartment", KIFSE Proceeding of Spring Annual Conference, pp. 60-61, 2013.
- 12) J. -W. Park, C. B. Oh, B. I. Choi and Y. S. Han, "The Effects of Radiation and Chemical Reaction Mechanism on the Development of Backdraft in a Compartment," KIFSE Proceeding of Fall Annual Conference, pp. 91-92, 2013.
- 13) J. -W. Park, C. B. Oh, B. I. Choi and Y. S. Han,

- “Computational Study of the Initial Condition and Development of Backdraft in a Compartment”, 47th KOSCO Symposium, pp. 29-32, 2013.
- 14) J. -W. Park, “Computational Study of Backdraft Dynamics in the Compartment”, Pukyong National University, 2014.
- 15) J. -W. Park and C. B. Oh, “Effect of Initial Fuel Concentration on the Occurrence of the Backdraft”, Spring Conference of the Korean Society of Safety, pp. 41, 2015.
- 16) 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, pp. 25-29, 2015.
- 17) J. D. McBryde, “Experimental and Numerical Modelling of Gravity Currents Preceding Backdrafts”, Master Dissertation, Canterbury University, Newzealand, 2008.