



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

단일 수평 개구부 및 화원 조건이
구획실 화재 현상에 미치는 영향에
대한 실험 및 전산해석 연구



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

건 축 · 소 방 공 학 부 (소 방 공 학 전 공)

박 민 영

공학석사학위논문

단일 수평 개구부 및 화원 조건이
구획실 화재 현상에 미치는 영향에
대한 실험 및 전산해석 연구

지도교수 이 치 영

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

건 축 · 소 방 공 학 부 (소 방 공 학 전 공)

박 민 영

박민영의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



위원장 공학박사 최준호 (인)



위원 공학박사 전준호 (인)



위원 공학박사 이치영 (인)



목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	viii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 이론적 배경	3
1.3 기존 연구 동향	8
1.4 연구 내용 및 범위	12
제 2 장 실험 장치 및 방법	14
2.1 실험 장치	14
2.2 실험 조건	22
2.3 실험 방법	28
제 3 장 실험 결과 및 분석	29
3.1 온도 분포	29
3.1.1 수평 개구부 면적 영향	29
3.1.2 화원의 열방출률 영향	32
3.1.3 화원 위치 영향	34

3.2 수평 개구부를 통과하는 유동 속도	38
3.2.1 수평 개구부 면적 영향	38
3.2.2 화원의 열방출률 영향	41
3.2.3 화원 위치 영향	44
3.3 수평 개구부를 통과하는 유동 가시화	47
3.4 수평 개구부를 통과하는 유동의 질량 유량	53
3.4.1 수평 개구부 면적 영향	57
3.4.2 화원의 열방출률 영향	59
3.4.3 화원 위치 영향	61
제 4 장 전산해석 조건 및 방법	63
4.1 전산해석 조건	63
4.2 전산해석 방법	66
제 5 장 전산해석 결과 및 분석	69
5.1 온도 분포	69
5.2 수평 개구부를 통과하는 유동 속도	74
5.3 수평 개구부를 통과하는 유동의 질량 유량	90
제 6 장 결 론	95
References	97

List of Tables

Table 2.1 Summary of fire source conditions	24
Table 2.2 Summary of experimental conditions	27
Table 4.1 Summary of numerical simulation conditions	64



List of Figures

Figure 1.1 Flow patterns through horizontal opening.	6
Figure 1.2 Parameters affecting enclosure fire.	7
Figure 2.1 Experimental set up.	16
Figure 2.2 Horizontal opening.	17
Figure 2.3 Locations of temperature measurements.	19
Figure 2.4 Locations of velocity measurements in horizontal opening (top-view).	20
Figure 2.5 Locations of velocity measurements in horizontal opening (side-view).	21
Figure 2.6 Fire source.	25
Figure 3.1 Effect of horizontal opening area on temperature distribution.	31
Figure 3.2 Effect of heat release rate on temperature distribution.	33
Figure 3.3 Effect of fire source location on temperature distribution (HO_01) ·	35
Figure 3.4 Effect of fire source location on temperature distribution (HO_05) ·	36
Figure 3.5 Effect of fire source location on temperature distribution (HO_10) ·	37
Figure 3.6 Effect of horizontal opening area on average velocity through horizontal opening.	39
Figure 3.7 Effect of horizontal opening area on average outflow velocity through horizontal opening.	40

Figure 3.8 Effect of heat release rate on average velocity through horizontal opening.	42
Figure 3.9 Effect of heat release rate on average outflow velocity through horizontal opening.	43
Figure 3.10 Effect of fire source location on average velocity through horizontal opening.	45
Figure 3.11. Effect of fire source location on average outflow velocity through horizontal opening	46
Figure 3.12. Visualization of smoke movement through horizontal opening (FS_CENTER).	49
Figure 3.13 Visualization of smoke movement through horizontal opening (FS_SIDE).	50
Figure 3.14 Effect of horizontal opening area on A_s/A_v	51
Figure 3.15 Effect of heat release rate on A_s/A_v	52
Figure 3.16 Comparison of A_s/A_v variation with A_v/A_f between Chen (2015) and present experiments.	54
Figure 3.17 Effect of horizontal opening area on estimated mass flow rate through horizontal opening.	58
Figure 3.18 Effect of heat release rate on estimated mass flow rate through horizontal opening.	60
Figure 3.19 Effect of fire source location on estimated mass flow rate through	

horizontal opening.	62
Figure 4.1 Schematic of numerical simulation.	65
Figure 4.2 Locations of W-velocity measurements in horizontal opening for numerical simulation.	68
Figure 5.1 Visualization of horizontal opening area effect on temperature in enclosure under different fire source conditions.	70
Figure 5.2 Comparison of temperature distribution between numerical simulation and experiment.	72
Figure 5.3 Difference of temperature distribution between experiment and numerical simulation.	73
Figure 5.4 Effect of horizontal opening area on W-velocity distribution through horizontal opening.	76
Figure 5.5 Effect of measuring point on W-velocity through horizontal opening under HO_10&FS_CENTER&HRR_1.5.	77
Figure 5.6 Effect of fire source location on W-velocity distribution through horizontal opening.	79
Figure 5.7 Effect of fire source location on W-velocity through horizontal opening under HO_10&HRR_1.5.	80
Figure 5.8 Visualization of horizontal opening area effect on flow movement (W-velocity) under different fire source conditions.	82
Figure 5.9 Comparison of horizontal opening area effect on average velocity	

through horizontal opening between numerical simulation and experiment.	85
Figure 5.10 Comparison of fire source location effect on average velocity through horizontal opening between numerical simulation and experiment.	86
Figure 5.11 Comparison of horizontal opening area effect on average outflow velocity through horizontal opening between numerical simulation and experiment.	87
Figure 5.12 Comparison of fire source location effect on average outflow velocity through horizontal opening between numerical simulation and experiment.	88
Figure 5.13 Difference of velocity between experiment and numerical simulation.	89
Figure 5.14 Comparison of horizontal opening area effect on mass flow rate through horizontal opening between numerical simulation and experiment.	92
Figure 5.15 Comparison of fire source location effects on mass flow rate through horizontal opening between numerical simulation and experiment.	93
Figure 5.16 Difference of mass flow rate between experiment and numerical simulation.	94

Experimental and Numerical Investigation on Effects of Single Horizontal
Opening and Fire Source Conditions on Fire Phenomena in Enclosure

Min Yeong Park

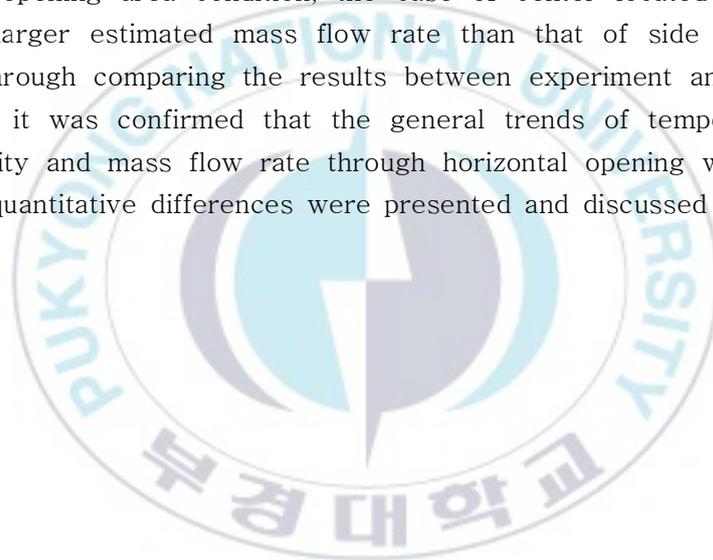
Division of Architectural and Fire Protection Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

In this study, the effects of single horizontal opening and fire source conditions (i.e., horizontal opening area, heat release rate, and fire source location) on fire phenomena in enclosure were experimentally and numerically investigated. Through a series of experiments, the temperature distribution in enclosure and the velocity through the horizontal opening were measured. In addition, the flows through the horizontal opening were visualized and their mass flow rates were estimated. Then, the numerical simulation using fire dynamics simulator (FDS) was performed considering the experimental conditions. Through comparing the numerical simulation results with the experimental ones, the accuracy of the numerical simulation using FDS was examined.

The temperatures in the enclosure decreased with increasing the horizontal opening area and decreasing the heat release rate. Under the smaller horizontal opening area condition, the effect of fire source location on the temperature in the enclosure seemed to be insignificant. However, under the larger horizontal opening area condition, the case of center located fire source showed lower temperatures in the enclosure than that of side located fire source. Under the center located fire source condition, when the horizontal opening area increased from 1% to 5% of the floor area, both of average velocity and average outflow velocity through the horizontal opening increased. However, when the horizontal opening area increased from 5% to 10% of the floor area, the variation in velocity

seemed to be minor. In addition, the case of center located fire source showed higher average velocity and average outflow velocity than that of side located fire source. Through the visualization of flows through the horizontal opening, it was found that the bidirectional flow patterns were observed under all conditions. Based on the flow visualization results, the correlation to predict the smoke outflow area was proposed. Using the measurement results of average outflow velocity and smoke outflow area, the mass flow rate was estimated. Under the same fire source location condition, larger horizontal opening area and heat release rate resulted in increasing the estimated mass flow rate. Additionally, under the same horizontal opening area condition, the case of center located fire source exhibited larger estimated mass flow rate than that of side located fire source. Through comparing the results between experiment and numerical simulation, it was confirmed that the general trends of temperature, and flow velocity and mass flow rate through horizontal opening were similar, and their quantitative differences were presented and discussed in detail.



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

‘화재’란 사람의 의도에 반하거나 고의에 의해 발생하는 연소 현상으로서 소화설비 등을 사용하여 소화할 필요가 있는 것 또는 화학적인 폭발 현상을 의미⁽¹⁾한다. 2020년도 화재통계연감⁽²⁾에 따르면, 지난 10년간 도시에 인구가 모이는 도시화가 가속화되고 전기, 유류 등 에너지를 사용하는 시설 등이 계속 늘어남에 따라 화재로 인한 인명 및 재산 피해가 증가하는 양상을 보인다고 보고하였다. 화재로 인한 연기는 건물 내 재실자의 가시도를 저하시키고 연기에 의한 공포로 패닉(Panic) 현상을 유발할 수 있다. 또한, 질식, 일산화탄소 중독, 산소 결핍 등 인체에 치명적인 피해를 줄 수 있어 피난 시 어려움을 겪는다. 따라서 화재 안전 설계 측면에서 화재로 인한 피해를 최소화하기 위한 장치로 배연 설비를 고려할 수 있다.

배연 설비는 발생한 연기를 희석, 배기, 차단하여 화재실의 연기와 열기를 직접 배출시킨다. 배연 방법으로는 배출기를 사용하여 강제적으로 연기를 외부로 배출하고 환기하기 위한 강제배연과 공간의 상부에 배연구를 만들어 축적된 연기를 배연하는 자연배연⁽³⁾으로 구분된다. 한편, 자연배연 방식은 별도의 동력원이 설치되지 않고 정상시의 환기에도 겸용할 수 있으므로 건물의 활용도가 높아진다는 장점이 있다. 따라서 아트리움과 같은 대규모 공간, 공연장, 선박 등에서는 공간의 크기 및 구조를 유용하게 활용하기 위해 자연배연 방식을 채택하여 이용한다. 예를 들면, 공연장 무대부에는 천장에 수평 개구부(Horizontal opening)를 설치하여 자연 환기를 통해

연기와 열기를 직접 배출시킨다. 이를 통해, 객석부로의 연기 확산을 막고 건물 내 재실자의 피난 시간을 증가시킬 수 있다.

수평 개구부의 설치는 화재 안전 관점에서 긍정적인 효과를 불러올 것으로 예상된다. 그러나 수평 개구부의 배연 성능을 파악하고 실제 건물에 효과적으로 적용하기 위해서는 다양한 조건에서의 화재 현상 이해 및 분석이 필수적이다. 구획실 화재 시 수평 개구부 및 화원(Fire source) 조건은 화재의 성장 및 확산, 구획실 내 온도, 수평 개구부를 통과하는 유출 및 유입 유동, 연기층의 하강 등에 지대한 영향을 미치므로, 해당 조건이 구획실 내 열유동 현상에 미치는 영향에 대한 연구가 반드시 수행되어야 한다.



1.2 이론적 배경

구획실 내 화재가 발생하면, 생성되는 화재 플룸(Fire plume) 및 연소 가스(Gas)는 온도 차이로 인한 밀도 차이에 의해 상승 기류를 형성한다. 이를 통해 연기는 천장에 도달한 후 측면으로 확산되고, 화재가 계속 진행되면 뜨거운 가스는 구획실 측면의 벽에 도달한다. 이때, 천장에 축적되는 가스층을 연기층이라고 한다.

수평 개구부가 설치된 구획실 화재 시, 뜨거운 가스로 인한 열적 팽창에 의해 구획실 내부와 외부 간 압력 차이가 발생하여 수평 개구부를 통과하는 유출 유동이 발생한다. 또한, 수평 개구부 근처에서는 가벼운 유체(뜨거운 가스) 위에 무거운 유체(차가운 공기)가 위치하는데, 이러한 불안정성에 의해 수평 개구부를 통과하는 유입 유동이 발생하고 연속 방정식에 의해 유출 유동이 발생한다. 따라서 압력 차이 및 밀도 차이(부력 영향)에 의해 수평 개구부를 통과하는 유동이 크게 영향을 받을 수 있다.

Tan and Jaluria⁽⁴⁾는 압력 차이 및 밀도 차이가 수평 개구부를 통과하는 유동에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험 연구를 수행하였다. 두 영향의 비(Ratio)를 무차원수로 나타낸 부력 수(Buoyancy number; B)를 도입하였으며, 아래 식에 나타내었다.

$$B = \frac{g\Delta\rho D}{\Delta P} \quad (1)$$

여기서, B는 부력 수, g는 중력가속도, D는 수평 개구부의 지름, $\Delta\rho$ 와 ΔP 는 각각 수평 개구부를 기준으로 구획실 내부와 외부의 밀도 차이와 압력 차이를 의미한다. 압력 차이가 0일 경우, 부력의 영향으로 양방향 유동

(Bidirectional flow)이 발생하였고, 압력 차이가 증가할수록 단방향 유동(Unidirectional flow)으로 전환된다고 보고하였다. 여기서 양방향 유동은 수평 개구부를 통과하는 유체의 유출 및 유입 유동이 동시에 일어나는 유동 양식(Flow pattern)을 의미하고, 단방향 유동은 수평 개구부를 통과하는 유체의 유동이 한 방향(유출 또는 유입 유동)이며 지배적으로 나타나는 유동 양식을 의미한다. 해당 유동 양식을 Figure 1.1에 정리하였으며, Figure 1.1(a)는 양방향 유동, Figure 1.1(b)는 단방향 유동으로 나타내었다.

Chow and Gao⁽⁵⁾는 수평 개구부를 통과하는 유동의 진동(Oscillation)에 대해 연구하였다. 부력 수를 기준으로, $B < 0.1$ 인 경우 압력에 의해 유도된 유동(Pressure-driven flow)이, $B > 10$ 인 경우 부력에 의해 유도된 유동(Buoyancy-driven flow)이 지배적으로 나타났다.

Chen and Lu⁽⁶⁾는 수평 개구부를 통과하는 유동 양식의 천이 점(Transition points)을 결정하기 위해 소규모 화재 실험을 수행하였고, 부력 수와 총괄 당량비(Global equivalence ratio; GER, 연료 유량과 공기 유입량의 비)에 따른 유동 양식을 구분하였다. 연구 결과, (1) $GER \geq 3.94$, $B < 1$ 인 경우, 단방향 유동 (2) $GER \leq 0.76$, $B > 1$ 인 경우, 양방향 유동 (3) $0.76 < GER < 3.94$, B 가 1에 가까운 경우, 혼합 유동(Compound flow)이 나타난다고 보고하였다. 여기서, 혼합 유동은 단방향 유동과 양방향 유동이 불규칙적으로 번갈아 나타나는 경우를 의미한다.

수직 개구부가 설치된 구획실 화재 시, 부력에 의해 천장으로 상승된 고온의 연기는 수직 개구부의 상단에서 유출되고 신선한 공기는 수직 개구부의 하단에서 유입되는데, 수직 개구부의 상단에서는 구획실 내부 압력이 구획실 외부 압력보다 높고, 수직 개구부 하단에서는 구획실 외부 압력이 구획실 내부 압력보다 높기 때문이다. 따라서 유체의 유입 및 유출 유동은 수직 개구부 주위 압력 차이에 의해 결정된다.

구획실 화재 현상은 구획실 내 설치된 수평 및 수직 개구부에 의해 지대한 영향을 받음을 확인하였다. 특히, 수평 개구부를 통과하는 유동은 수직 개구부를 통과하는 유동을 이해하는 것보다 더 복잡한 현상으로 이루어져 있으므로, 다양한 조건에 따른 구획실 화재 현상 및 수평 개구부를 통과하는 유동에 대한 정확한 이해가 요구된다.

구획실 화재 현상에 영향을 미치는 인자⁽⁷⁾에 대해 아래와 같이 정리하고 Figure 1.2에 나타내었다.

- (1) 구획실 크기
- (2) 수평 개구부 조건 (면적, 위치, 개수 등)
- (3) 화원 조건 (종류, 열방출률, 위치 등)
- (4) 외부 공기 조건 (온도 등)
- (5) 구획실 구성 물질의 열적 특성 등

이러한 조건은 구획실 내 온도, 수평 개구부의 유동 양식, 수평 개구부를 통과하는 유동 속도 및 질량 유량 등에 지대한 영향을 미친다. 특히, 수평 개구부를 통과하는 유량은 배연 성능과 밀접한 연관이 있으므로 수평 개구부의 설계, 관련 기준 개선 및 보완을 위해서는 구획실 화재 현상에 영향을 미치는 인자들에 대한 영향을 고려할 필요가 있다.

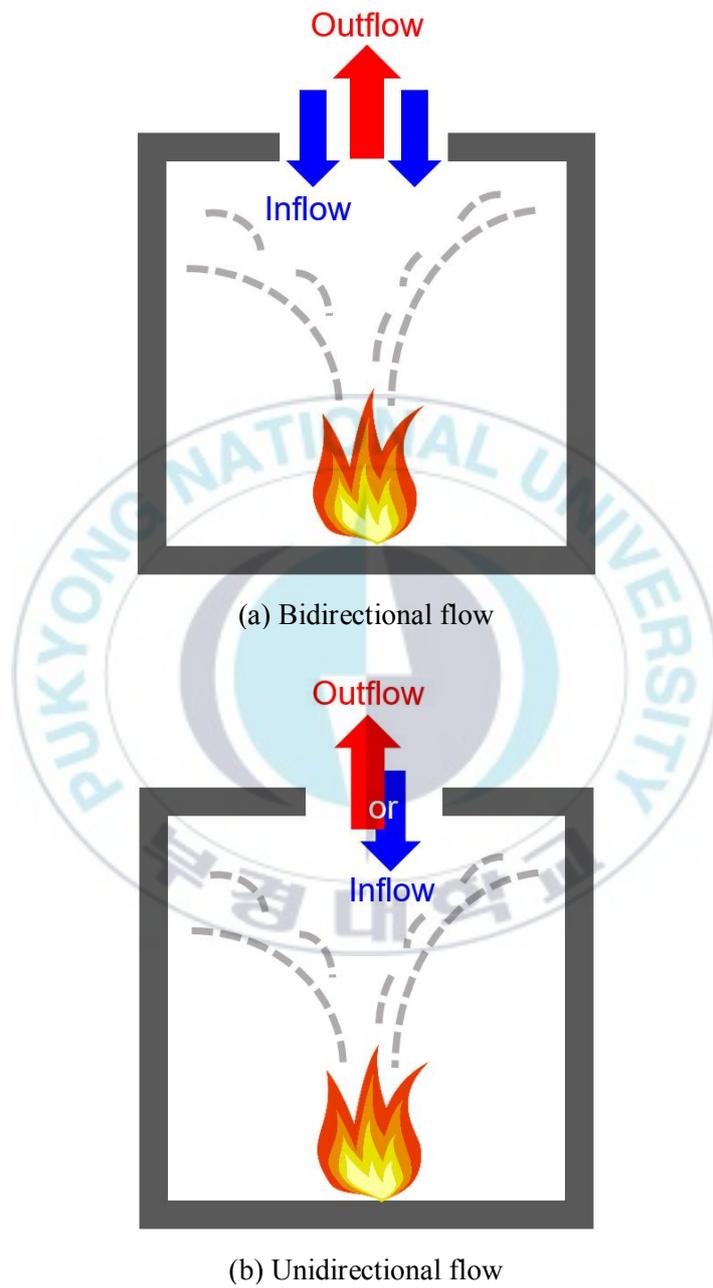


Figure 1.1 Flow patterns through horizontal opening.

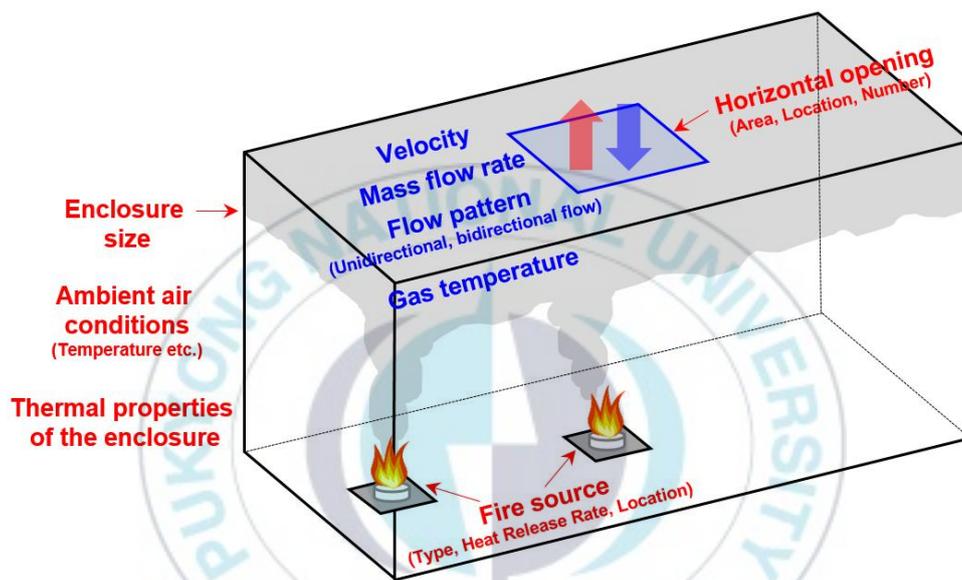


Figure 1.2 Parameters affecting enclosure fire.

1.3 기존 연구 동향

구획실 내 단일 수평 개구부가 설치된 경우, 구획실 화재 현상 및 수평 개구부를 통과하는 유동에 관한 연구는 다음과 같다.

Brown⁽⁸⁾은 공기를 매체(Media)로 이용하여 밀도 차이에 의한 수평 개구부를 통과하는 유체 유동을 연구하였다. 이때, 수평 개구부 두께(L)와 수평 개구부 한 변의 길이(S)의 비(L/S) 범위는 0.0825–0.66이다. 연구 결과, L/S가 증가할수록 수평 개구부를 통과하는 교환 유량(Exchange flow rate)이 증가함을 확인하였다. 한편, Mercer and Thompson⁽⁹⁾은 염수와 담수를 이용하여 밀도 차이에 의한 수평 개구부를 통과하는 유체 유동을 연구하였다. 이때, 수평 개구부의 두께(L)와 수평 개구부의 지름(D)의 비(L/D) 범위는 3.5–18이다. 연구 결과, L/D가 증가함에 따라 수평 개구부를 통과하는 교환 유량이 감소하였다고 보고하였다. 이후 Epstein⁽¹⁰⁾은 염수와 담수를 이용하여 L/D에 관한 교환 유동을 연구하였다. L/D의 범위는 0.01–10이고, L/D에 대해 4가지 유동 영역(Flow regime)으로 구분하였다. 해당 유동 영역은 다음과 같다. 1) Oscillatory exchange flow regime, 2) Bernoulli flow, 3) Turbulent diffusion, 4) Combined turbulent diffusion and bernoulli flow. 수평 개구부를 통과하는 교환 유량에 대해 Epstein⁽¹⁰⁾의 연구와 Brown⁽⁸⁾ 및 Mercer and Thompson⁽⁹⁾의 연구 결과 간 비교 시 동일한 경향이 나타남을 확인하였다.

수평 개구부 및 화원 조건에 따른 연구가 다수 수행되었다. Li et al.⁽¹¹⁾은 수평 개구부가 화원의 바로 위에 위치할 경우, 구획실 화재 현상에 대해 연구하였다. 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 구획실 내 온도가 감소하였으나, 수평 개구부 면적이 일정 크기 이상으로 클 경우, 빠른 연소를 위해 화재가 확대되며 구획실 내 온도 또한 증가하였다고 보고하였다. 한

편, Li et al.⁽¹²⁾은 수평 개구부가 화원과 멀리 떨어진 곳에 위치할 경우, 구획실 화재 현상에 대해 연구하였다. 수평 개구부 면적이 구획실 내 온도에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났으며, 화원 면적에 따라 구획실 내 온도가 선형적으로 증가하였다고 보고하였다. Chen et. al.⁽¹³⁾은 1 m × 1 m × 1 m 크기의 구획실에서 0.0025–0.25 m²의 수평 개구부 면적, 7–25 cm의 연료팬 지름 조건을 변화하여 화재 실험을 수행하였고, 총괄 당량비를 이용하여 구획실 화재 현상 및 특성을 분석하였다. 연구 결과, 총괄 당량비가 증가하고 수평 개구부 면적이 감소할수록 구획실 상단과 하단의 압력 차이가 증가하였다. 또한, 수평 개구부 면적 조건이 연기층 높이에 큰 영향을 미친다고 보고하였다. 한편, Chen⁽¹⁴⁾은 수평 개구부의 유동 양식을 구분하기 위해 소규모 화재 실험을 수행하였으며, 유동 가시화(Flow visualization) 및 이미지 프로세스(Image process)를 통해 수평 개구부의 연기 유출 면적(Smoke gas area)을 파악하였다. 연구 결과, 수평 개구부 면적이 증가할수록 수평 개구부의 연기 유출 면적이 감소함을 확인하였다.

구획실 내 온도 예측에 관한 연구가 수행된 바 있다. Li et al.⁽¹⁵⁾은 3 m × 3 m × 1.95 m 크기의 구획실에서 화원 및 수평 개구부 면적이 구획실 내 가스 온도 상승(Gas temperature rise)에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험 연구를 수행하였다. 연료로는 헵탄을 사용했으며 풀화재(Pool fire) 직경은 0.1–0.3 m이고 수평 개구부 면적은 0.01–0.25 m²이다. 연구 결과, 수평 개구부 면적이 가스 온도 상승에 미치는 영향은 미미했으나 화원 면적이 가스 온도 상승에 미치는 영향은 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 화재 초기에는 수평 개구부 면적이 증가할수록 화재 성장이 더뎠으나, 화재 규모가 상대적으로 큰 경우 수평 개구부 면적이 증가할수록 최고 온도(Peak temperature)가 증가하였다고 보고하였다. Yuan et al.⁽¹⁶⁾은 구획실 내 수평 개구부가 설치된 경우 구획실 내 온도를 예측하는 수학적 모델

(Mathematical model)을 제시하였다. 화원으로부터 발생된 연기로 인해 온도 측정 위치가 높아질수록 선형적으로 증가하는 온도 분포가 나타났으며, 이를 통해 One-zone model을 이용하여 구획실 내 온도 분포를 예측하였다. McCaffrey et al.⁽¹⁷⁾은 구획실 내 수직 개구부가 설치된 경우, 바닥 면적이 $0.09 - 8.3 \text{ m}^2$ 이고 높이가 $0.37 - 3.75 \text{ m}$ 인 구획실에서 화재 실험을 수행하였다. 또한, 연구 결과를 이용하여 구획실 내 상부층(즉, 연기층)의 온도 예측 상관식을 개발하였다. Zhang et al.⁽¹⁸⁾은 McCaffrey et al.의 연구⁽¹⁷⁾를 토대로 구획실 내 수평 개구부가 설치될 경우, 가스 온도 상승에 관한 연구를 수행하였다. 구획실 크기는 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 1.95 \text{ m}$, 수평 개구부 한 변의 길이는 $0.01 - 0.324 \text{ m}$, 화원의 지름은 $0.1 - 0.3 \text{ m}$ 이다. 연구 결과를 통해 구획실 내 가스 온도 상승은 열방출률(Heat Release Rate; HRR)의 2/3 제곱에 비례한다고 보고하였다.

구획실 내 수평 개구부가 설치된 경우, 전산시뮬레이션을 이용한 연구가 수행된 바 있다. Zhang et al.⁽¹⁹⁾은 수평 개구부의 위치가 구획실 화재 현상에 미치는 영향을 파악하였다. 이때, 수평 개구부는 천장의 중앙 또는 모서리에 위치한다. 연구 결과, 수평 개구부의 위치가 연기층 하강에 대해 미치는 영향은 미미하였다. 산소 농도는 수평 개구부가 천장의 중앙인 경우가 모서리인 경우에 비해 높은 것으로 나타났으며, 수평 개구부를 통과하는 질량 유량은 수평 개구부가 천장의 중앙인 경우가 모서리인 경우에 비해 많은 것으로 나타났다. Park et al.⁽²⁰⁾은 수평 개구부 면적 및 열방출률 조건이 구획실 화재 현상에 미치는 영향을 파악하였다. 구획실 내 온도의 경우, 수평 개구부 면적이 증가하고 열방출률이 감소함에 따라 감소하였다. 수평 개구부를 통과하는 질량 유량의 경우, 수평 개구부 면적 및 열방출률이 증가함에 따라 증가하였다고 보고하였다.

기존 연구들을 통해, 소규모 구획실 및 축소 모형을 이용한 연구가 다수

수행되었음을 확인하였다. 실규모 화재 실험은 정확도 및 신뢰성이 높다는 장점이 있지만, 시·공간적으로 현실적인 제약이 많아 실제로 수행하기 어렵다. 이러한 실규모 화재 실험의 대안으로 실제 대상을 축소시킨 모형을 이용한 실험 및 전산시뮬레이션 연구가 수행되어 온 것을 확인할 수 있다. 한편, 수평 개구부 면적 및 화원의 크기에 대한 연구가 다수 수행되었으나 화원 위치에 대한 연구는 비교적 미흡한 상황으로 판단되었다. 화재의 발생 위치에 따라 구획실 화재 현상이 변화할 수 있음에도 불구하고 이와 관련된 연구는 상대적으로 부족하였다. 따라서 화원 위치를 고려한 구획실 화재 현상 파악 및 예측 연구가 수행될 필요가 있다.



1.4 연구 내용 및 범위

본 연구에서는 단일 수평 개구부 및 화원 조건이 구획실 화재 현상에 미치는 영향에 대해 실험 및 전산해석을 이용하여 분석하였다. 특히, 전산해석은 다양한 측면에서 화재 현상을 파악하는데 시간, 공간, 비용적으로 효율성이 높으므로, 실제 화재 실험을 수행할 수 없을 경우에 유용하게 활용될 수 있다. 화재 및 소방 분야에서는 전산해석을 이용한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 그러나 전산해석에 대한 정확한 데이터를 얻기 위해서 실제 실험과 전산해석 간 비교 및 분석을 통해 정확도를 검증, 확보하는 것은 매우 중요하다. 본 논문의 세부 연구 내용을 아래와 같이 정리하였다.

2장에서는 실험 장치에 관해 기술하였다. 실험 장치의 크기는 2.04 m(폭) × 1.00 m(깊이) × 1.10 m(높이)이며, 실험 장치의 천장 중앙에 설치한 수평 개구부 면적은 0.0196 (0.14 m × 0.14 m), 0.1024 (0.32 m × 0.32 m), 0.2025 (0.45 m × 0.45 m)m²로 실험 장치 바닥 면적의 1, 5, 10%에 해당한다. 화원의 열방출률은 약 0.4, 0.9, 1.5 kW이고, 구획실 바닥의 중앙 또는 측면에 화원을 위치시킨 후 실험을 수행하였다.

3장에서는 실험 결과와 분석 내용을 기술하였다. 구획실 내 온도 분포, 수평 개구부를 통과하는 유동 속도를 측정하였고 모든 조건에 대해 수평 개구부를 통과하는 유동 가시화를 수행하였다. 또한, 실험 결과와 기존 방법론⁽¹⁴⁾을 이용하여 수평 개구부를 통과하는 유출 질량 유량을 예측하였다. 실험 결과를 수평 개구부 면적, 화원의 열방출률, 화원 위치에 따른 영향으로 구분하여 설명하였다.

4장에서는 전산해석 조건 및 방법에 대해 기술하였다. FDS(Fire Dynamics Simulator) 프로그램을 이용하여 실험 조건 중 일부 조건에 대해 전산해석을 수행하였으며, 실험에서 얻을 수 없었던 세부적인 데이터를

확보하였다. 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1, 10%인 경우, 화원이 바닥의 중앙 또는 측면에 위치할 경우, 총 4조건에서 전산해석을 수행하였으며 열방출률은 1.5 kW로 동일하다. 구획실 내 온도 분포, 수평 개구부를 통과하는 유동 속도 분포 및 유출 질량 유량을 측정하였다.

5장에서는 전산해석 결과 및 분석에 관해 기술하였다. 온도 분포, 수평 개구부를 통과하는 유동 속도, 수평 개구부를 통과하는 질량 유량으로 구분하였으며 해당 전산해석과 본 실험 결과 간 비교하였다.

본 연구에서는 단일 수평 개구부 및 화원 조건과 구획실 화재 현상(즉, 온도, 유동 속도, 질량 유량) 간 상관 관계를 파악하였다. 전산해석과 실험 결과 간 비교 및 검토하여 정성적 및 정량적 결과를 도출하여 제시하였고, 전산해석의 정확도를 확인하였다. 이러한 연구 결과는 자연 배연 설비의 성능 개선 및 설계 관련 기초 자료로 활용 가능하고 상사 법칙을 이용한 실규모 전산해석의 비교 자료로 사용 가능할 것으로 생각된다.

제 2 장 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

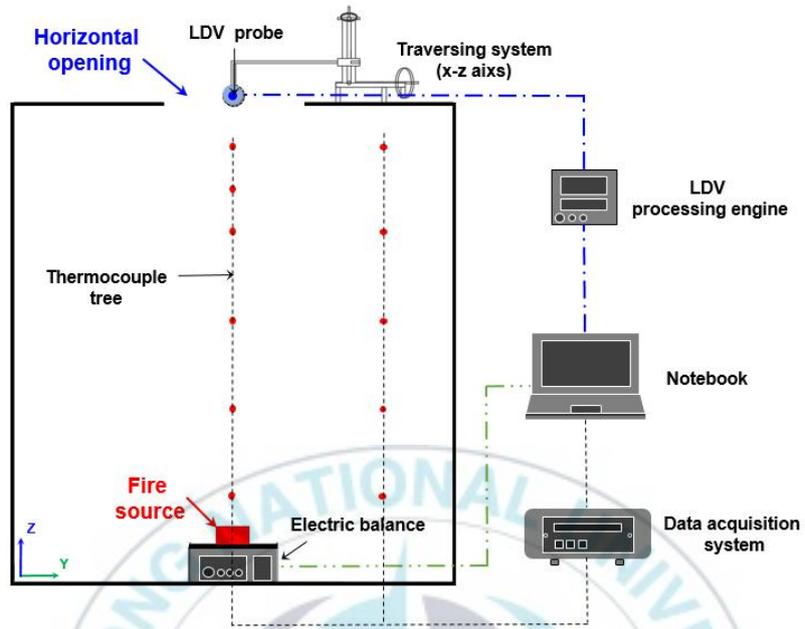
본 연구의 실험 장치는 실존하는 D공연장 무대부를 1/14 비율로 축소하여 구축하였다. 실험 장치의 개략도 및 사진을 Figure 2.1에 나타내었으며, Figure 2.1(a)는 개략도, Figure 2.1(b)는 사진이다. 실험 장치의 크기는 2040 mm(폭) × 1000 mm(깊이) × 1100 mm(높이)이고, 구획실의 천장, 바닥, 앞면은 5 mm 두께의 알루미늄(Aluminum) 판, 나머지 부분은 실험 가시화를 위해 5 mm 두께의 PC (Polycarbonate) 판으로 제작하였다. 실험 장치의 천장 중앙에는 단일 수평 개구부를 설치하였다.

수평 개구부 면적은 실험 장치 바닥 면적의 1, 5, 10%로 각각 0.0196 (0.14 m × 0.14 m), 0.1024 (0.32 m × 0.32 m), 0.2025 (0.45 m × 0.45 m)m²이고 Figure 2.2에 나타내었다. 수평 개구부 면적을 변경하기 위해 알루미늄 판으로 제작하여 각 실험마다 교체 가능하도록 하였다. 또한, 수평 개구부를 제외한 모든 부분에서 누출이 없도록 실리콘 시트(Silicone sheet)와 실리콘 우레탄(Silicone urethane)으로 밀폐시켰다.

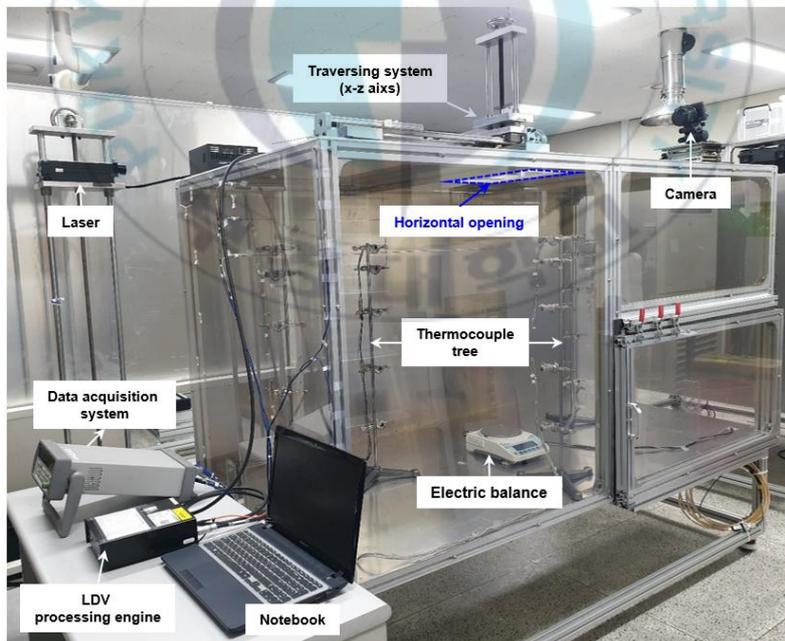
구획실 내 온도는 열전대(K-type, 1/16 inch of sheath)로 측정되며 데이터 수집 장치(KEYSIGHT, 34972A)와 연결하여 노트북에 데이터를 저장하였다. 수평 개구부를 통과하는 유체의 유동 속도 측정을 위해 LDV (Laser Doppler Velocimeter, MSE, MiniLDV-G5-100)를 이용하였으며, LDV는 processing engine과 probe로 구성된다. LDV probe를 측 방향 이동시키기 위해 수동 이송장치(Traversing system)를 활용하여 속도 측정 위치에 고

정시켰다. 한편, LDV에 의해 측정된 속도가 양수(+) 또는 음수(-)로 나타남에 따라 수평 개구부를 통과하는 유동이 유출 또는 유입인지 확인할 수 있다. 레이저(Laser)와 카메라(Canon, EOS M200)를 이용하여 수평 개구부를 통과하는 유동 가시화를 수행하였고, 수평 개구부를 통과하는 유동 양식을 파악하였다. 참고로, 수평 개구부를 통과하는 유동 양식은 Figure 1.2에 나타내었다.



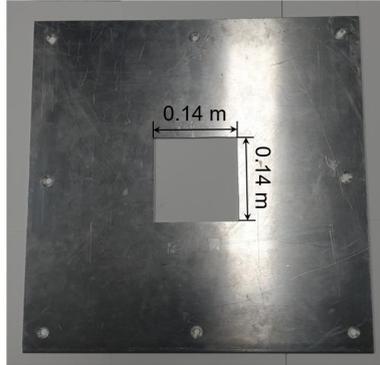


(a) Schematic diagram

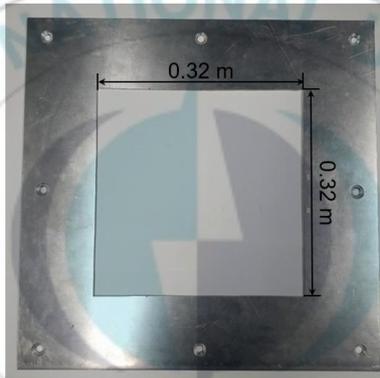


(b) Picture

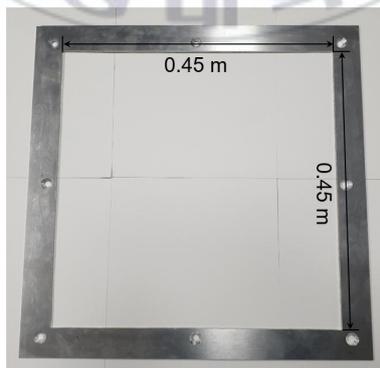
Figure 2.1 Experimental set up.



(a) Horizontal opening area = 0.0196 m^2 (1% of the floor area)



(b) Horizontal opening area = 0.1024 m^2 (5% of the floor area)



(c) Horizontal opening area = 0.2025 m^2 (10% of the floor area)

Figure 2.2 Horizontal opening.

구획실 내 온도 측정 위치를 Figure 2.3에 나타내었다. 설치된 열전대 트리(Thermocouple tree)를 TC로 명명하였으며, 수직 방향으로 총 5개의 열전대 트리를 설치하였다. 구획실 바닥 중앙으로부터 TC1은 860 mm, TC2와 TC4는 510 mm, TC3은 340 mm 떨어진 위치에 설치하였다. TC5는 구획실 바닥 중앙 및 수평 개구부 중앙의 수직 방향에 위치한다. 또한, TC1-TC4는 바닥으로부터 200 mm 마다 5지점, TC5는 바닥으로부터 800, 900, 1000 mm 위치에서 온도를 측정하였다. 즉, 총 23지점의 온도를 측정하였으며, 1 s 간격으로 데이터를 수집하였다. 한편, 화원은 Figure 2.3에 나타낸 것과 같이 구획실 바닥의 중앙(Center) 또는 측면(Side)에 위치하는데, 화원이 바닥의 측면에 위치할 경우 벽으로부터 200 mm 떨어진 위치에 설치하였다.

수평 개구부를 통과하는 유동의 속도 측정 위치를 Figure 2.4에 나타내었다. 수평 개구부가 바닥 면적의 1%인 경우 Figure 2.4(a), 5%인 경우 Figure 2.4(b), 10%인 경우 Figure 2.4(c)와 같다. 모든 조건에서 수평 개구부 중앙 위 15 mm 떨어진 위치에서 속도를 측정하였고 해당 위치를 Figure 2.5에 나타내었다.

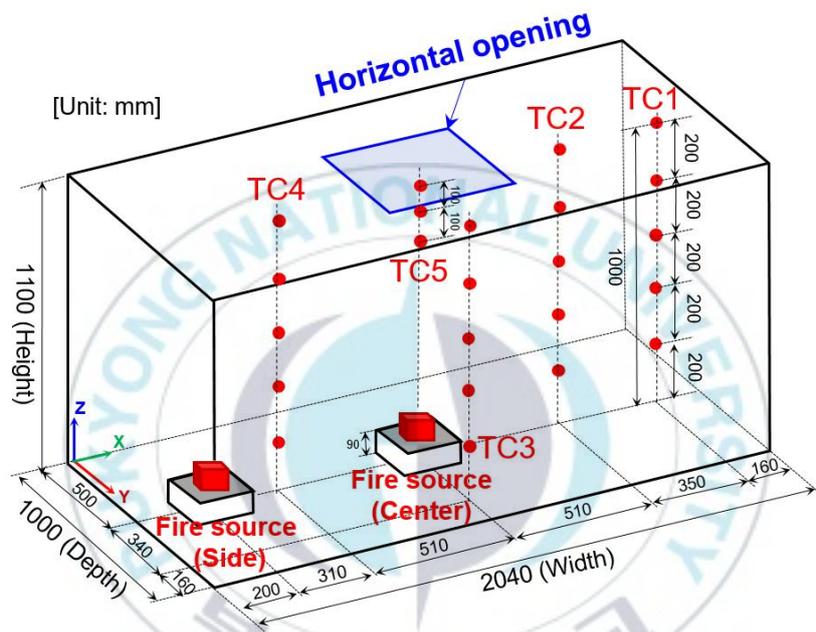
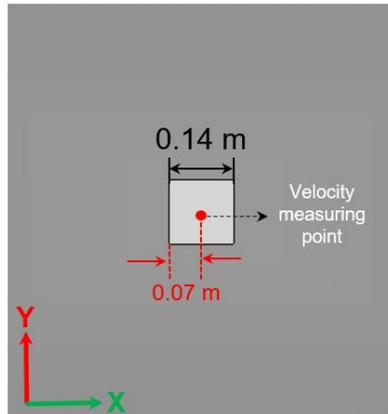
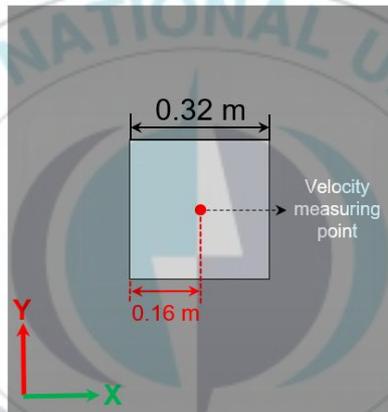


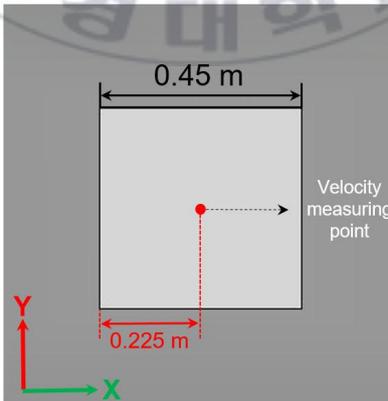
Figure 2.3 Locations of temperature measurements.



(a) Horizontal opening area = 0.0196 m^2 (1% of the floor area)



(b) Horizontal opening area = 0.1024 m^2 (5% of the floor area)



(c) Horizontal opening area = 0.2025 m^2 (10% of the floor area)

Figure 2.4 Locations of velocity measurements in horizontal opening (top-view).

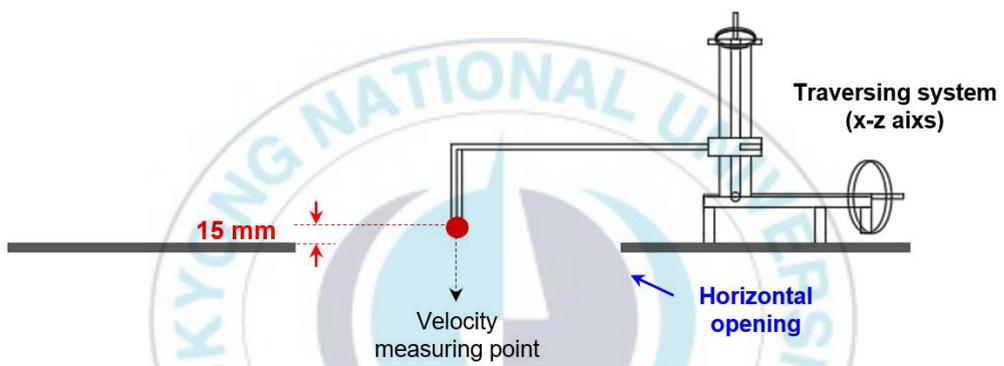


Figure 2.5 Locations of velocity measurements in horizontal opening (side-view).

2.2 실험 조건

화원의 열방출률 및 위치가 구획실 화재 현상에 미치는 영향을 파악하기 위해 다양한 지름의 연료팬을 사용하였고, 해당 연료팬을 구획실 바닥의 중앙 또는 측면에 위치시켰다. 본 연구에서 사용된 화원 조건을 Table 2.1에 요약하였다. 내경 36.6, 66.1, 90.9 mm의 유리 재질 원형 연료팬(Duran, crystallizing dish)을 이용하였고, Figure 2.6(a)에 나타내었다. 연료는 메탄올(Methanol)을 사용하였다. 주요 실험에 앞서 전자 저울(AND, FX-5000i, Resolution: 0.01 g)을 이용하여 아래 식 (2)와 같이 연료의 질량 손실률(Mass loss rate)을 측정하고 아래 식 (3)을 통해 열방출률을 도출하였다.

$$\dot{W} = W/t \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \dot{W} \times H_c \quad (3)$$

여기서 \dot{W} 는 질량 손실률, W 는 소모된 연료의 양, t 는 소모된 시간, \dot{Q} 은 열방출률, H_c 는 메탄올의 연소열(19.83 kJ/g)⁽²¹⁾을 의미한다.

실험 방법은 다음과 같다. 전자 저울위에 드립팬(Drip pan)과 연료팬을 위치시키고, 연료팬 조건에 해당하는 메탄올의 양을 계량한다. 이후 600 s 동안 연소된 연료의 양을 측정하였다. 본 연구에서는 하나의 연료팬 조건에 대해 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1, 10%인 경우, 화원이 바닥의 중앙 또는 측면에 위치한 경우, 총 4가지 조건에서 도출한 열방출률을 평균하여 평균 열방출률(Average HRR)로 나타내었다.

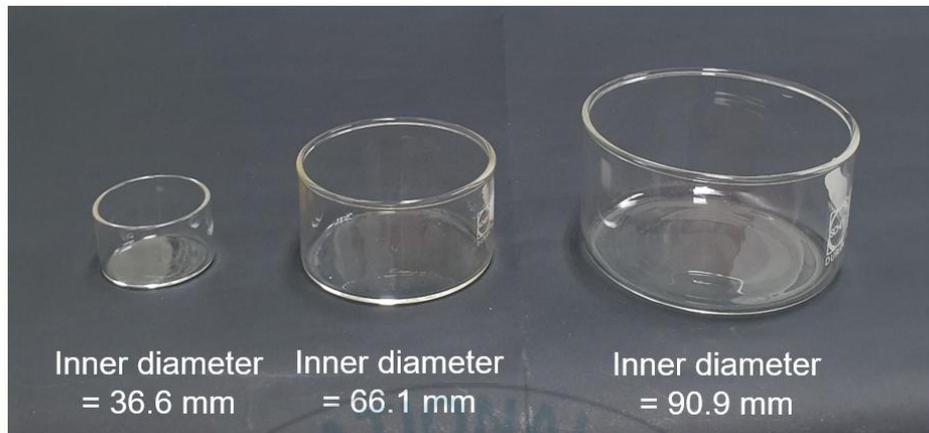
본 연구에서는 입자(Particle)를 이용한 유동 속도 측정 및 유동 가시화를 위해 쑥 연소체(Moxa)를 사용하였다. 쑥 연소체 2개의 열방출률은 0.135 kW⁽²²⁾이며, 실험 수행 시 쑥 연소체는 총 4개를 사용하여 연료팬 주

위에 위치시켰다. 이를 Figure 2.6(b)에 사진으로 나타내었다. 따라서 본 연구에서 최종적으로 이용한 총 열방출률(Total HRR)은 선행 실험을 통한 평균 열방출률과 축 연소체의 열방출률을 더하여 도출하였다. 그 결과, 연료팬 내경이 36.6, 66.1, 90.9 mm인 경우 열방출률은 각각 약 0.4, 0.9, 1.5 kW로 나타났다.

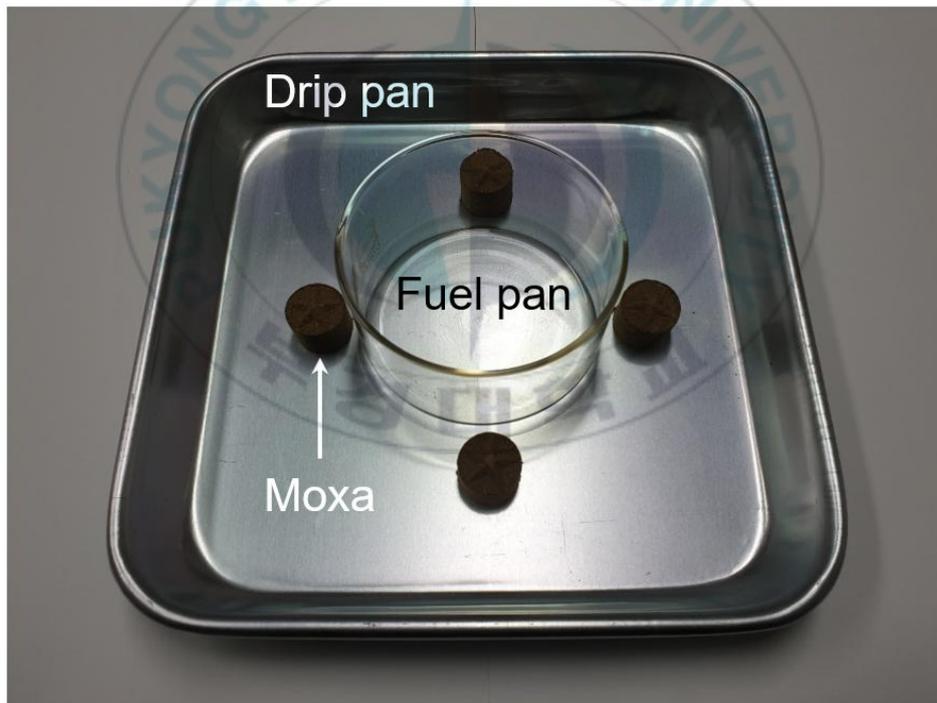


Table 2.1 Summary of fire source conditions

Fuel pan	Inner diameter (mm)	36.6	66.1	90.9
	Outer diameter (mm)	40.0	70.0	95.0
	Inner height (mm)	22.5	37.0	52.5
	Outer height (mm)	25.0	40.0	55.0
Fuel	Fuel type	Methanol		
	Amount of fuel (ml)	10	35	65
HRR	Average HRR (kW)	0.14 (± 0.015)	0.60 (± 0.029)	1.26 (± 0.067)
	Total HRR (kW) (Average HRR+4 moxa)	0.4	0.9	1.5



(a) Fuel pan



(b) Fuel pan and moxa location

Figure 2.6 Fire source.

본 연구에서 사용한 명명법을 아래와 같이 정리하였다. 수평 개구부 면적(Horizontal opening area)을 HO로 표기하였고 수평 개구부 면적이 구획실 바닥 면적의 1, 5, 10%일 경우, 각각 HO_01, HO_05, HO_10으로 명명하였다. 화원의 열방출률(Heat Release Rate)을 HRR으로 표기하였고 열방출률이 0.4, 0.9, 1.5 kW일 경우, 각각 HRR_0.4, HRR_0.9, HRR_1.5로 명명하였다. 화원 위치(Fire source location)를 FS로 표기하였고 화원 위치가 바닥의 중앙, 측면인 경우, 각각 FS_CENTER, FS_SIDE로 명명하였다. 명명법을 토대로 수평 개구부 면적이 구획실 바닥 면적의 1%, 화원의 열방출률이 0.4 kW, 화원 위치가 바닥의 중앙인 경우 HO_01&HRR_0.4&FS_CENTER으로 표현할 수 있다. 본 연구의 실험 조건을 Table 2.2에 요약하였으며 총 18 cases에 대해 정리하였다.

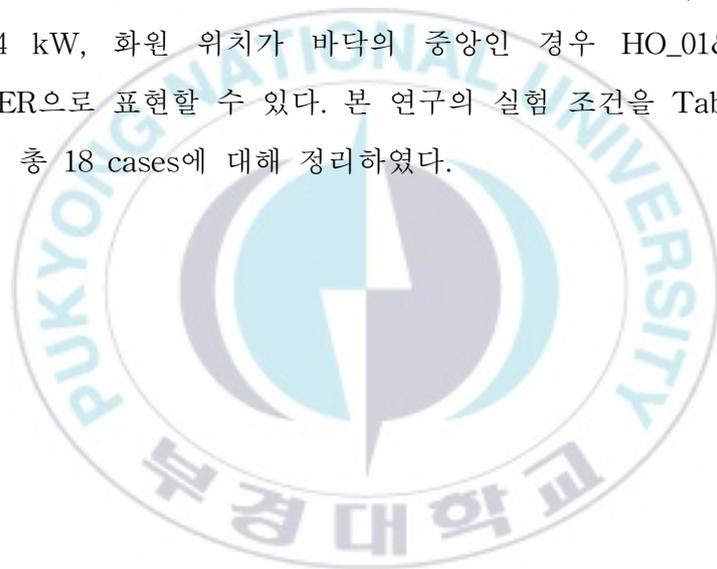


Table 2.2 Summary of experimental conditions

No.	Cases	Horizontal opening area (m ²)	Total HRR (kW)	Fire source location
1	HO_01&HRR_0.4&FS_CENTER	0.0196 (1% of the floor)	0.4	CENTER
2	HO_01&HRR_0.9&FS_CENTER		0.9	
3	HO_01&HRR_1.5&FS_CENTER		1.5	
4	HO_01&HRR_0.4&FS_SIDE		0.4	SIDE
5	HO_01&HRR_0.9&FS_SIDE		0.9	
6	HO_01&HRR_1.5&FS_SIDE		1.5	
7	HO_05&HRR_0.4&FS_CENTER	0.1024 (5% of the floor)	0.4	CENTER
8	HO_05&HRR_0.9&FS_CENTER		0.9	
9	HO_05&HRR_1.5&FS_CENTER		1.5	
10	HO_05&HRR_0.4&FS_SIDE		0.4	SIDE
11	HO_05&HRR_0.9&FS_SIDE		0.9	
12	HO_05&HRR_1.5&FS_SIDE		1.5	
13	HO_10&HRR_0.4&FS_CENTER	0.2025 (10% of the floor)	0.4	CENTER
14	HO_10&HRR_0.9&FS_CENTER		0.9	
15	HO_10&HRR_1.5&FS_CENTER		1.5	
16	HO_10&HRR_0.4&FS_SIDE		0.4	SIDE
17	HO_10&HRR_0.9&FS_SIDE		0.9	
18	HO_10&HRR_1.5&FS_SIDE		1.5	

2.3 실험 방법

본 실험 전, 열전대가 연결되어 있는 데이터 수집 장치를 선행적으로 작동 시켜 구획실 내 온도가 초기 온도(약 20°C)인지 확인한다. 초기 온도 확인 후 드립팬 위에 연료팬과 쑥 연소체 4개를 위치시키고 실험 조건에 해당하는 연료의 양을 계량한다. 이후, 데이터 수집 장치를 작동시켜 실험을 시작하며, 쑥 연소체를 먼저 연소시킨 후에 연료팬에 담긴 메탄올을 점화한다. 실험 시작 후 30 s 내에 실험 장치의 문을 닫고 총 600 s 간 실험을 수행한다. 실험 수행 중 300 s가 되면, LDV를 작동시켜 수평 개구부를 통과하는 유동 속도를 측정한다. 실험이 끝난 후에는 실험 장치 내부를 30분 이상 환기시키며, 사용한 열전대 및 LDV가 다시 초기 조건으로 돌아오는지 확인한다. 한편, 수평 개구부를 통과하는 유동 가시화의 경우, 연료 점화 전에 레이저 및 카메라를 실행시키고 기존 실험 방법과 동일하게 600 s 간 수행한다. 온도 분포는 4회, 유동 속도 측정은 3회 반복 실험을 수행하였으며, 측정 데이터(예를 들면, 온도 및 유동 속도)는 500–600 s 구간에 대한 평균값을 사용하였다.

제 3 장 실험 결과 및 분석

3.1 온도 분포

본 실험을 통해 구획실 내 온도 분포를 측정하였으며, 해당 결과를 수평 개구부 면적, 화원의 열방출률, 화원 위치 영향으로 구분하여 분석하였다. 총 4회 반복 실험 후 500–600 s 간 측정된 데이터를 평균하여 나타내었으며 오차 막대는 표준 편차를 의미한다. 참고로, 각 그래프의 심볼(Symbol)에 나타낸 열전대 트리의 번호를 Figure 2.3에 나타내었다.

3.1.1 수평 개구부 면적 영향

Figure 3.1에 수평 개구부 면적이 구획실 내 온도 분포에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.1(a)는 열방출률이 0.4 kW, Figure 3.1(b)는 0.9 kW, Figure 3.1(c)는 1.5 kW인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 바닥으로부터의 측정 위치 높이, y축은 온도로 나타내었다. 온도 분포 측정 결과는 아래와 같다.

화원의 열방출률 및 위치와 관계없이 모든 조건에서 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 구획실 내 온도는 감소하였고, 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 조건(HO_01)에서 구획실 내 온도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 수평 개구부 면적이 증가할수록 수평 개구부를 통해 유출되는 고온의 연기 및 유입되는 차가운 외부 공기의 환기량이 증가하기 때문으로 판단된다.

화원이 바닥의 중앙인 경우, 수평 개구부 면적이 증가할수록 구획실 내

온도는 감소하는데, 화원의 열방출률이 증가할수록 이와 같은 경향이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 화원이 바닥의 측면인 경우, 수평 개구부 면적에 대한 영향은 화원이 바닥의 중앙인 경우에 비해 상대적으로 미미한 것으로 나타났으며, 화원의 열방출률이 작아질수록 수평 개구부 면적에 대한 영향이 적은 것으로 관찰되었다.



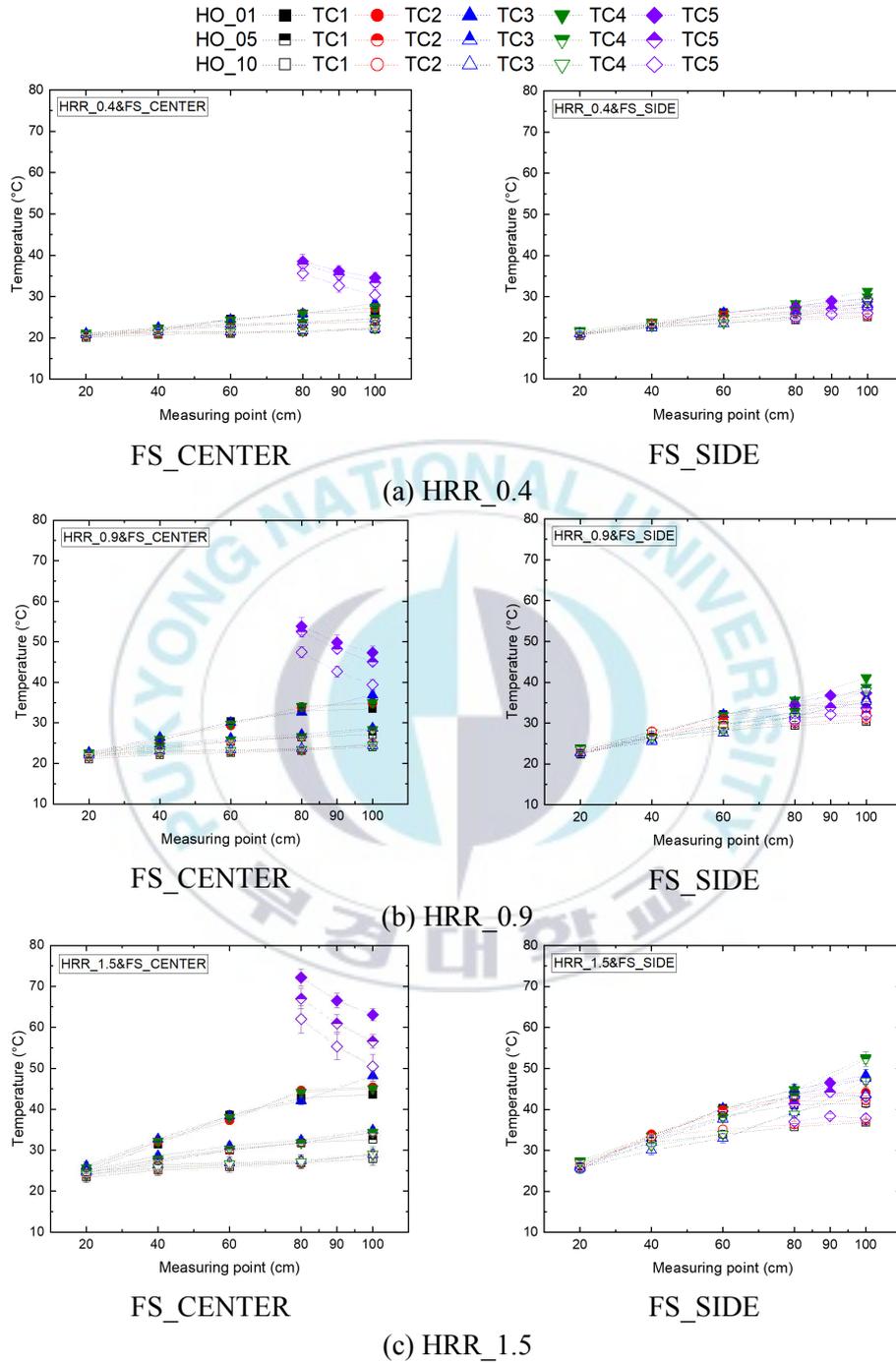


Figure 3.1 Effect of horizontal opening area on temperature distribution.

3.1.2 화원의 열방출률 영향

Figure 3.2에 화원의 열방출률이 구획실 내 온도 분포에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.2(a)는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%, Figure 3.2(b)는 바닥 면적의 5%, Figure 3.2(c)는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 바닥으로부터의 측정 위치 높이, y축은 온도로 나타내었다. 온도 분포 측정 결과는 아래와 같다.

수평 개구부 면적 및 화원 위치와 관계없이 모든 조건에서 열방출률이 증가함에 따라 구획실 내 온도가 증가하였고, 열방출률이 1.5 kW인 조건 (HRR_1.5)에서 구획실 내 온도가 가장 높은 것으로 나타났다. 화원이 바닥의 중앙인 경우, 열방출률이 증가할수록 구획실 내 온도가 증가하는데, 수평 개구부 면적이 작아질수록 이와 같은 영향이 뚜렷하게 관찰된다. 이는 열방출률이 증가할수록 화원으로부터 발생한 높은 온도의 열기가 부력에 의해 상승하는데, 수평 개구부 면적이 작을수록 열이 배출되지 못하고 구획실 상부에 고온의 연기층이 지속적으로 축적되어 온도가 높아지기 때문으로 생각된다. 한편, 화원이 바닥의 측면인 경우, 열방출률이 증가할수록 구획실 내 온도가 증가하는 경향은 화원이 바닥의 중앙인 경우와 동일하게 나타났다. 그러나 수평 개구부 면적이 구획실 내 온도에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

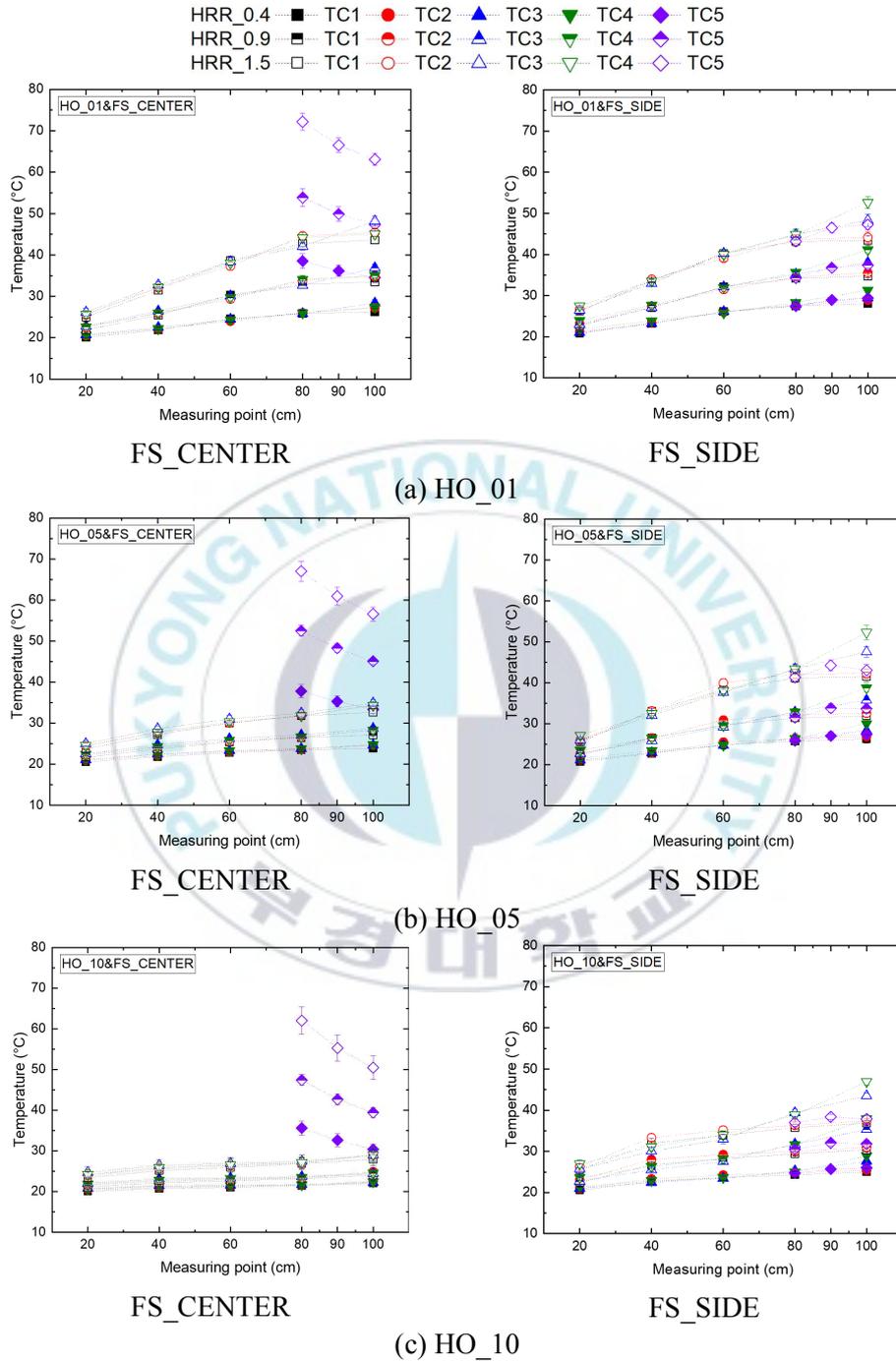


Figure 3.2 Effect of heat release rate on temperature distribution.

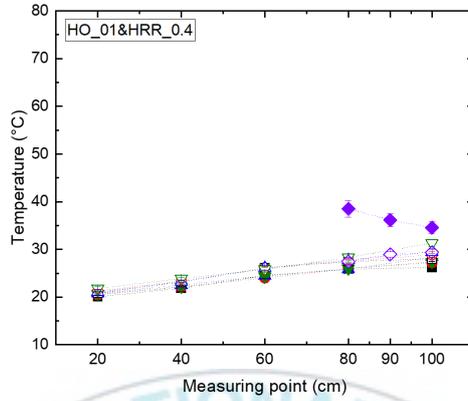
3.1.3 화원 위치 영향

Figures 3.3–3.5에 화원 위치가 구획실 내 온도 분포에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.3은 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우, Figure 3.4는 바닥 면적의 5%인 경우, Figure 3.5는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 바닥으로부터의 측정 위치 높이, y축은 온도로 나타내었다. 온도 분포 측정 결과는 아래와 같다.

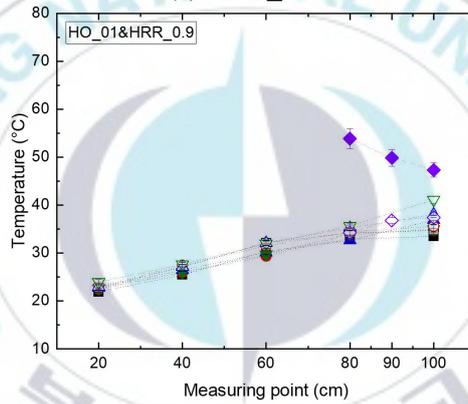
수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우(HO_01), 열방출률 조건에 관계없이 화원 위치가 구획실 내 온도(TC5 제외)에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다. 그러나 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 5, 10%인 경우(HO_05, HO_10), 화원이 바닥의 중앙인 경우에 비해 측면인 경우 구획실 내 온도(TC5 제외)가 높게 측정되었고, 이러한 경향은 열방출률이 증가할수록 뚜렷하게 나타났다. 이는 화원이 바닥의 중앙인 경우, 화원과 수평 개구부가 동일한 수직 선상에 위치하여 연기의 유출이 용이하기 때문에 구획실 내 온도가 상대적으로 낮은 것으로 생각된다. 따라서 화원과 수평 개구부의 상대적인 위치에 따라 연기의 유출이 영향 받을 수 있다.

화원이 바닥의 중앙인 경우, 화원 주변에 위치하는 TC1–TC4는 측정 위치가 높아짐에 따라 온도가 증가하였는데, 이는 고온의 연기층이 구획실 상부에 축적되기 때문으로 생각된다. 그러나 화원 중심축에 위치하는 TC5는 측정 위치가 높아짐에 따라 온도가 감소하였다. 이는 화원으로부터의 거리가 멀어지고, 화재 플룸으로 차가운 공기가 혼입되기 때문이다. 한편, 화원이 바닥의 측면인 경우, TC1–TC4는 측정 위치가 높아짐에 따라 온도가 증가하는 경향이 나타났으나 TC5는 측정 위치에 따른 온도 변화가 미미한 것으로 나타났다.

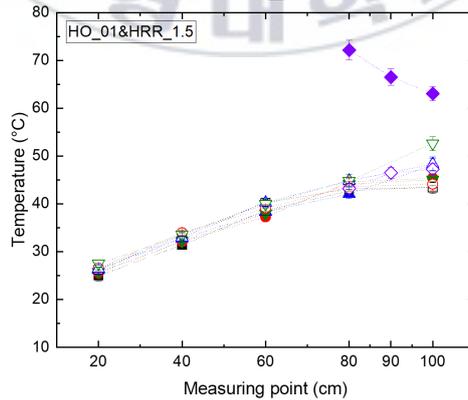
FS_CENTER ■ TC1 ● TC2 ▲ TC3 ▼ TC4 ◆ TC5
 FS_SIDE □ TC1 ○ TC2 △ TC3 ▽ TC4 ◇ TC5



(a) HRR_0.4



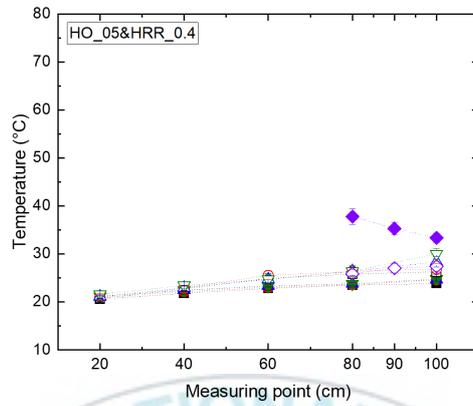
(b) HRR_0.9



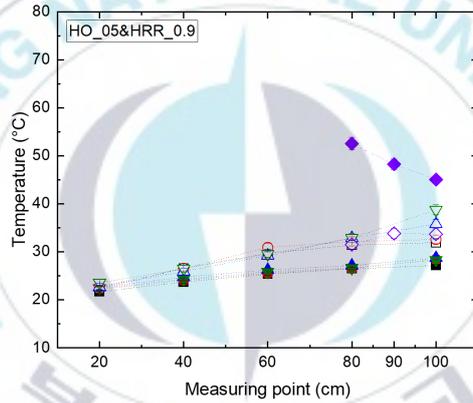
(c) HRR_1.5

Figure 3.3 Effect of fire source location on temperature distribution (HO_01).

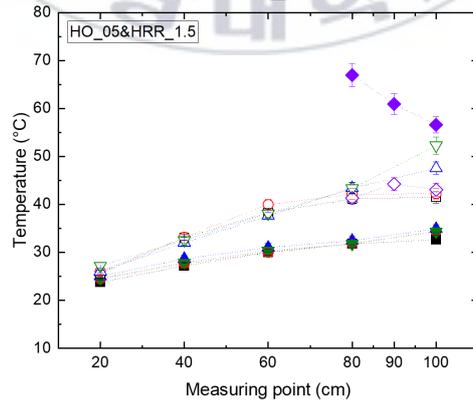
FS_CENTER ■ TC1 ● TC2 ▲ TC3 ▼ TC4 ◆ TC5
 FS_SIDE □ TC1 ○ TC2 △ TC3 ▽ TC4 ◇ TC5



(a) HRR_0.4



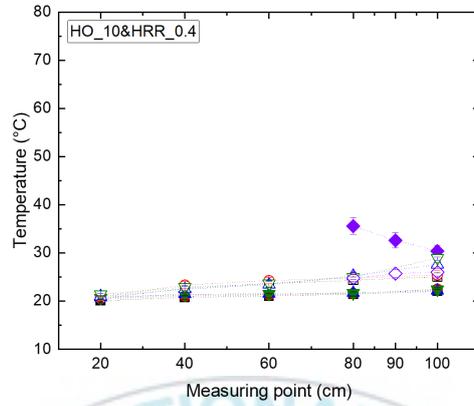
(b) HRR_0.9



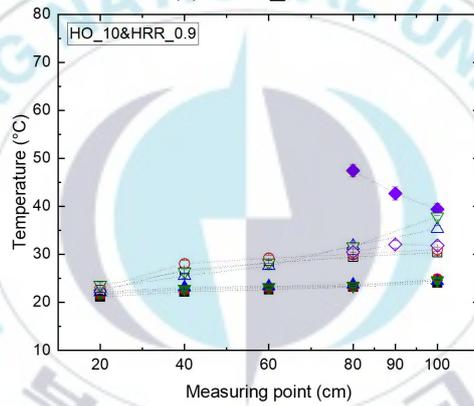
(c) HRR_1.5

Figure 3.4 Effect of fire source location on temperature distribution (HO_05).

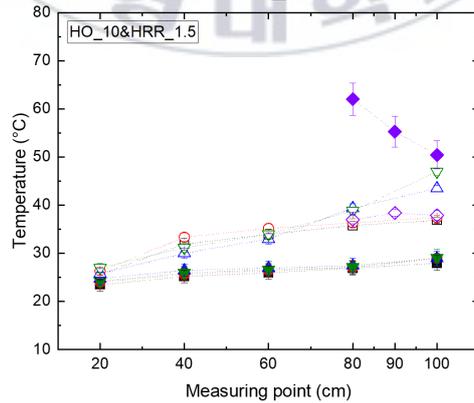
FS_CENTER ■ TC1 ● TC2 ▲ TC3 ▼ TC4 ◆ TC5
 FS_SIDE □ TC1 ○ TC2 △ TC3 ▽ TC4 ◇ TC5



(a) HRR_0.4



(b) HRR_0.9



(c) HRR_1.5

Figure 3.5 Effect of fire source location on temperature distribution (HO_10).

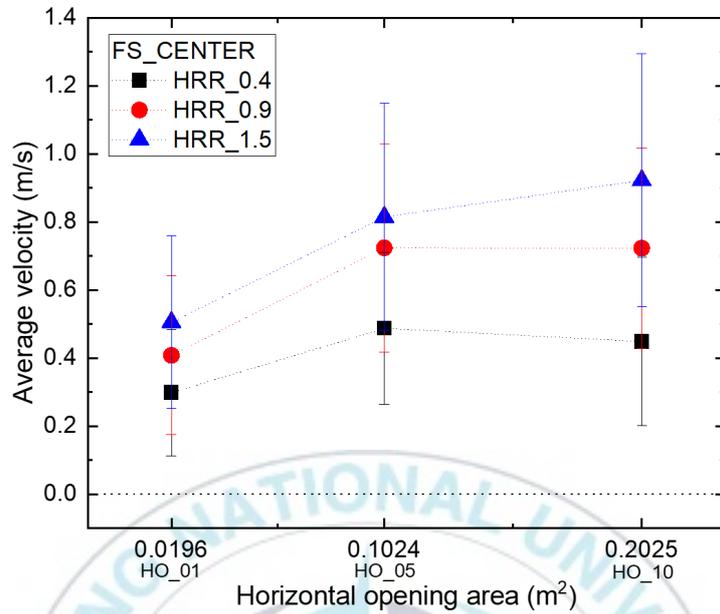
3.2 수평 개구부를 통과하는 유동 속도

본 실험을 통해 수평 개구부를 통과하는 유체의 유동 속도를 측정하였다. 유동 속도 측정 위치는 수평 개구부 중앙 위 15 mm 떨어진 위치이고, 세부 측정 위치는 Figure 2.4와 Figure 2.5에 나타내었다. 총 3회 반복 실험을 수행하였으며 500–600 s 구간에서 측정된 모든 데이터를 평균한 경우 ‘평균 속도(Average velocity)’로, 500–600 s 구간에서 측정된 양수(+) 값의 데이터를 평균한 경우 ‘평균 유출 속도(Average outflow velocity)’로 명명하였다. 해당 결과를 수평 개구부 면적, 화원의 열방출률, 화원 위치 영향으로 구분하여 분석하였다.

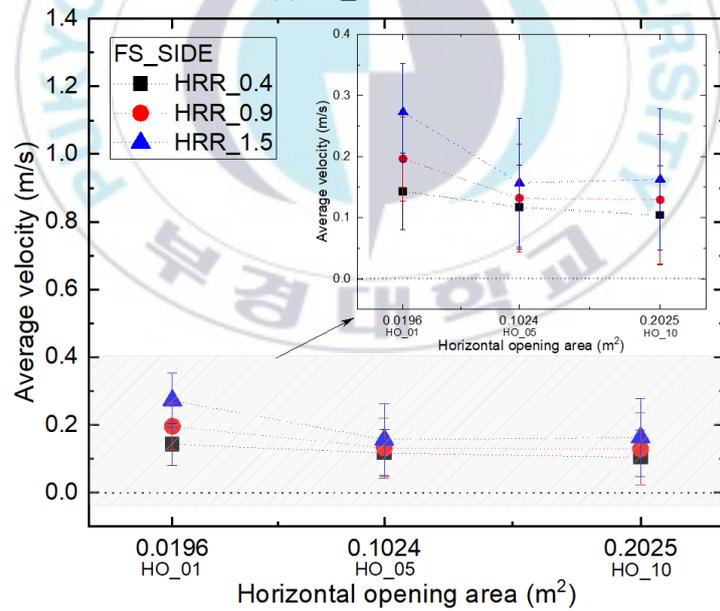
3.2.1 수평 개구부 면적 영향

Figure 3.6에 수평 개구부 면적이 수평 개구부를 통과하는 평균 속도에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.6(a)는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 3.6(b)는 측면인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 수평 개구부 면적, y축은 평균 속도로 나타내었다. 평균 속도 측정 결과는 다음과 같다. 화원이 바닥의 중앙인 경우, 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%에서 5%로 증가함에 따라 평균 속도가 확연히 증가하였다. 그러나 바닥 면적의 5%에서 10%로 증가할 경우 수평 개구부 면적이 평균 속도에 미치는 영향은 미미하였다. 한편, 화원이 바닥의 측면인 경우, 수평 개구부 면적이 평균 속도에 미치는 영향은 화원이 바닥의 중앙인 경우에 비해 상대적으로 미미한 것으로 나타났다.

Figure 3.7에 수평 개구부 면적이 수평 개구부를 통과하는 평균 유출 속도에 미치는 영향에 대해 나타내었다. 평균 속도에 비해 평균 유출 속도가 다소 높게 측정되었고 전반적인 경향은 Figure 3.6과 동일하였다.

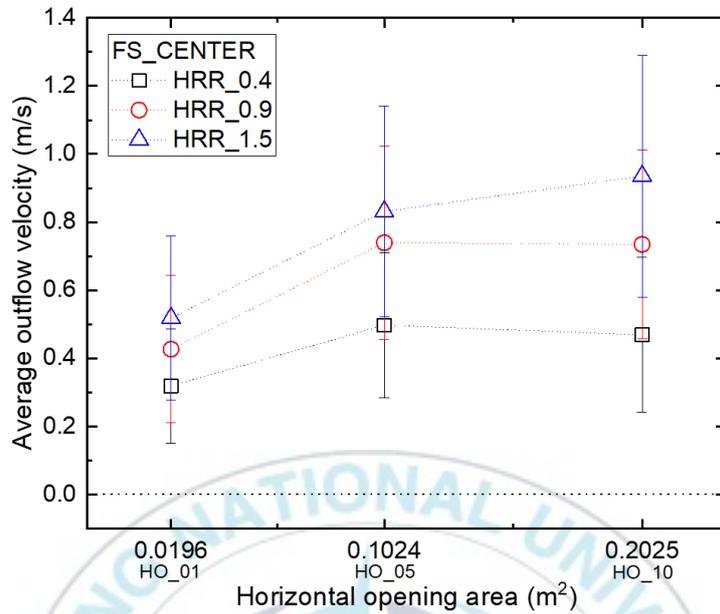


(a) FS_CENTER

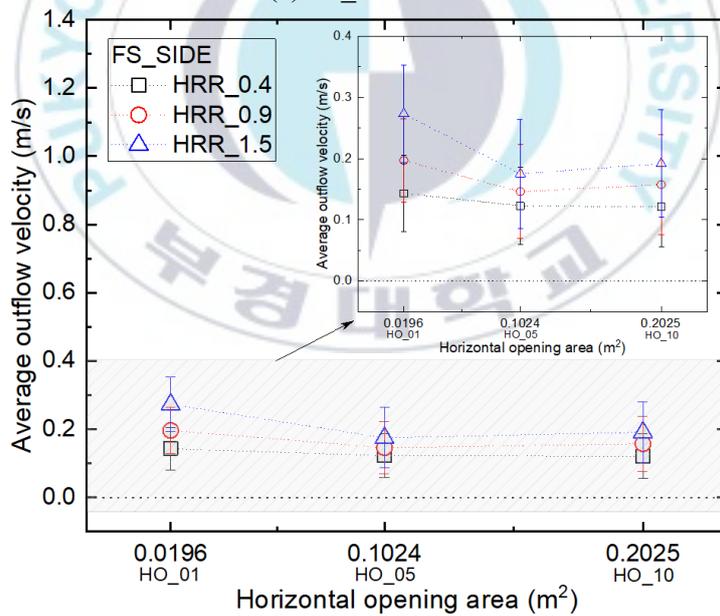


(b) FS_SIDE

Figure 3.6. Effect of horizontal opening area on average velocity through horizontal opening.



(a) FS_CENTER



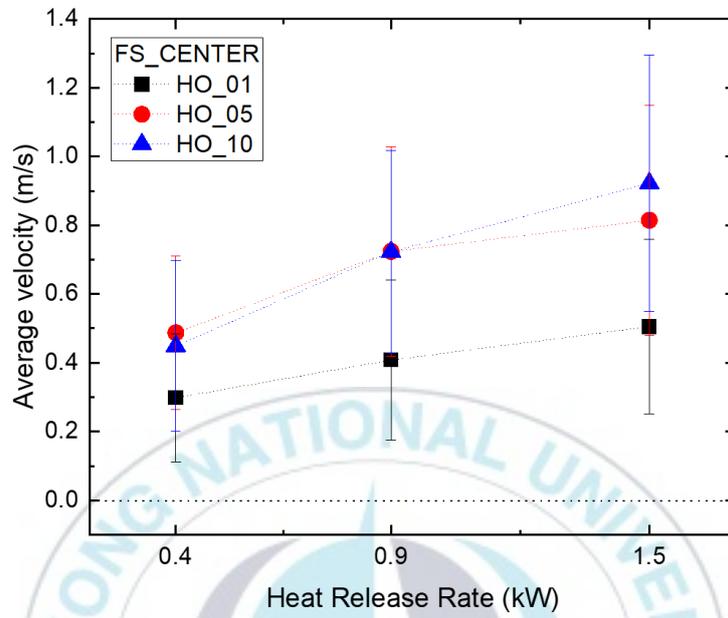
(b) FS_SIDE

Figure 3.7. Effect of horizontal opening area on average outflow velocity through horizontal opening.

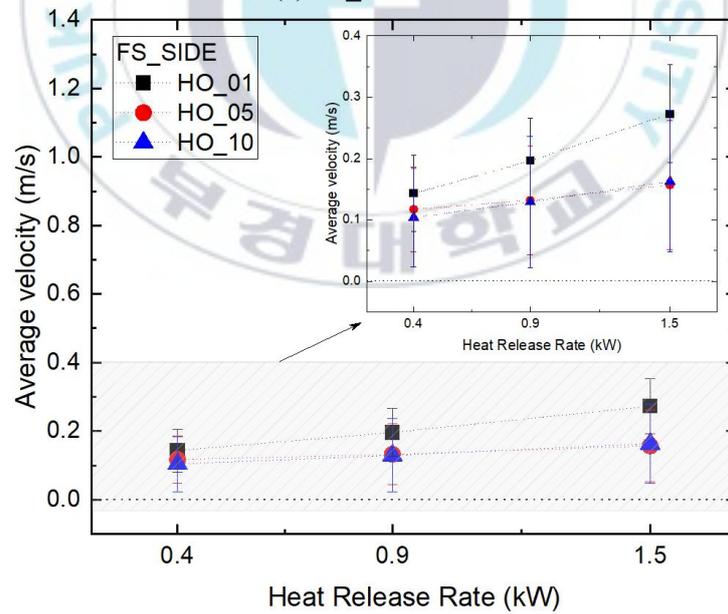
3.2.2 화원의 열방출률 영향

Figure 3.8에 화원의 열방출률이 수평 개구부를 통과하는 평균 속도에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.8(a)는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 3.8(b)는 측면인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 열방출률, y축은 평균 속도로 나타내었다. 평균 속도 측정 결과는 다음과 같다. 화원이 바닥의 중앙인 경우, 열방출률이 증가할수록 평균 속도가 증가하였다. 이는 화원으로부터 발생한 연기가 부력에 의해 상승하게 되는데, 열방출률이 증가할수록 화재 플룸으로부터 발생하는 부력이 강해지므로 유속이 증가한다고 판단된다. 한편, 화원이 바닥의 측면인 경우, 열방출률이 평균 속도에 미치는 영향은 화원이 바닥의 중앙인 경우에 비해 상대적으로 미미한 것으로 나타났다. Figure 3.6(b), Figure 3.8(b)를 통해 화원이 바닥의 측면인 경우, 수평 개구부 면적 및 화원의 열방출률이 유동 속도에 미치는 영향은 미미한 것으로 관찰되었다.

Figure 3.9에 열방출률이 수평 개구부를 통과하는 평균 유출 속도에 미치는 영향에 대해 나타내었다. 평균 속도에 비해 평균 유출 속도가 다소 높게 측정되었으며 전반적인 경향은 Figure 3.8과 동일하였다.

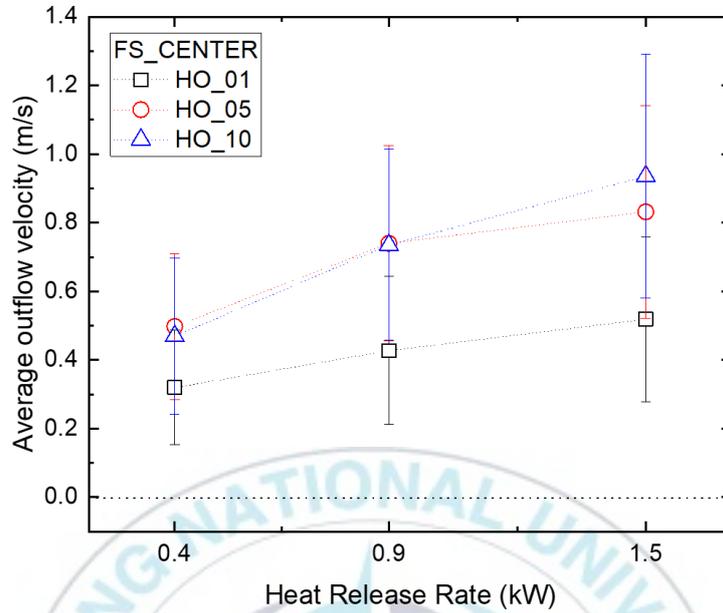


(a) FS_CENTER

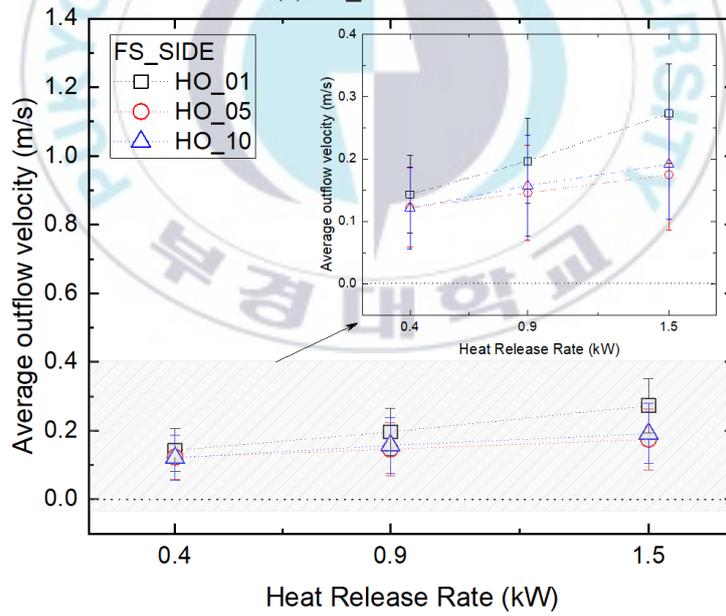


(b) FS_SIDE

Figure 3.8 Effect of heat release rate on average velocity through horizontal opening.



(a) FS_CENTER



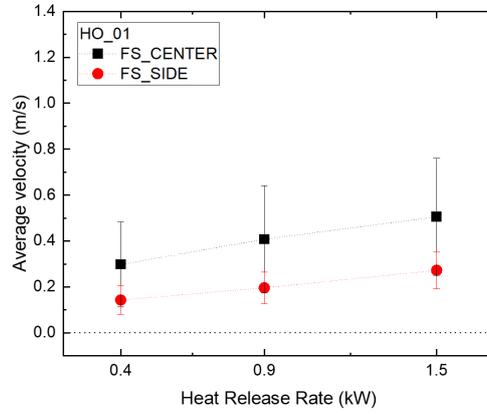
(b) FS_SIDE

Figure 3.9 Effect of heat release rate on average outflow velocity through horizontal opening.

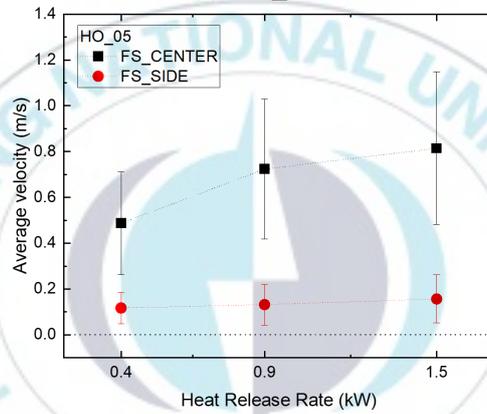
3.2.3 화원 위치 영향

Figure 3.10에 화원 위치가 수평 개구부를 통과하는 평균 속도에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.10(a)는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%, Figure 3.10(b)는 바닥 면적의 5%, Figure 3.10(c)는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 열방출률, y축은 평균 속도로 나타내었다. 평균 속도 측정 결과는 다음과 같다. 수평 개구부 면적 및 열방출률 조건에 관계없이 모든 조건에서 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 유동 속도가 높게 측정되었다. 이는 화원이 바닥의 중앙인 경우, 수평 개구부가 화원 바로 위에 위치하므로 화원으로부터 발생하는 고온의 연기가 원활하게 유출되기 때문으로 생각된다. 한편, 화원이 바닥의 측면인 경우, 수평 개구부 면적 및 열방출률의 영향이 화원이 바닥의 중앙인 경우에 비해 미미한 것으로 나타났는데, 이는 화재로 인한 연기가 천장에 부딪히고 수평 개구부를 향해 느린 속도로 이동하기 때문으로 판단된다.

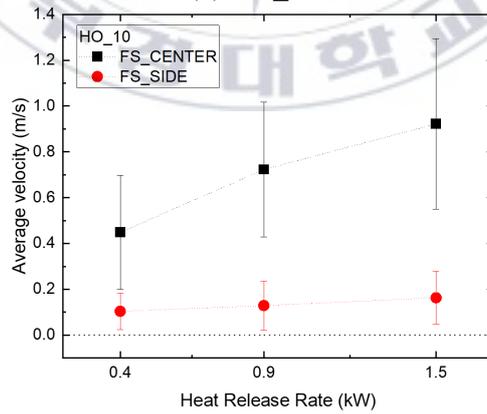
Figure 3.11에 화원 위치가 수평 개구부를 통과하는 평균 유출 속도에 미치는 영향에 대해 나타내었다. 평균 속도에 비해 평균 유출 속도가 다소 높게 측정되었으며 전반적인 경향은 Figure 3.10과 동일하게 나타났다



(a) HO_01

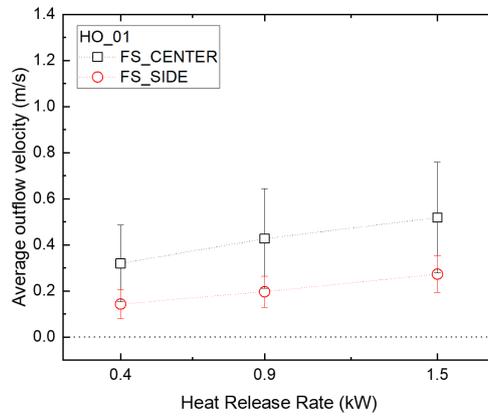


(b) HO_05

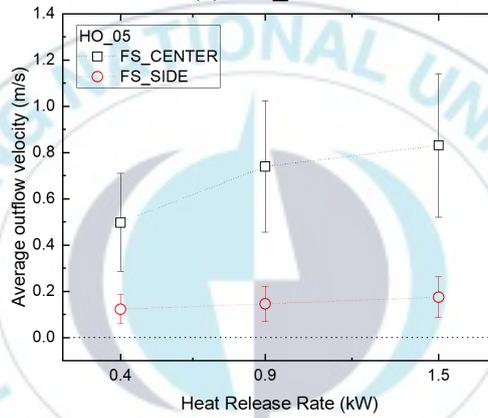


(c) HO_10

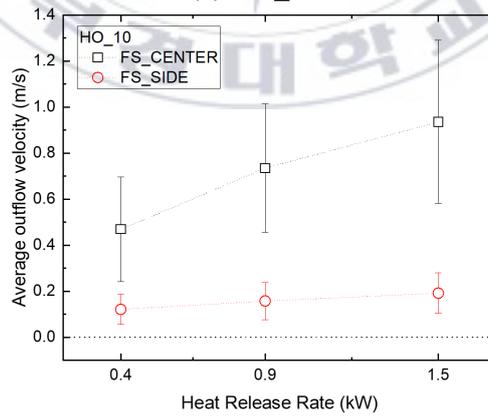
Figure 3.10 Effect of fire source location on average velocity through horizontal opening.



(a) HO_01



(b) HO_05



(c) HO_10

Figure 3.11 Effect of fire source location on average outflow velocity through horizontal opening.

3.3 수평 개구부를 통과하는 유동 가시화

본 연구에서는 레이저와 축 연소체를 이용하여 수평 개구부를 통과하는 유동 가시화를 수행하였고 해당 결과를 통해 유동 양식을 파악하였다. 이전에 언급한 바와 같이, 수평 개구부를 통과하는 유동 양식은 크게 양방향 유동과 단방향 유동으로 구분할 수 있다(Figure 1.1).

Chen⁽¹⁴⁾은 소규모 화재 실험을 통해 레이저 시트(Laser sheet)를 수평 개구부 바로 위에 위치시켜 수평 개구부를 통과하는 유동 가시화를 수행한 바 있다. 해당 연구에서 수평 개구부 안의 녹색 부분은 구획실 외부로 유출되는 연기의 유동, 검정색 부분은 구획실 내부로 유입되는 공기의 유동을 의미한다. 본 연구에서는 Chen⁽¹⁴⁾이 제안한 유동 방향 판별법을 이용하여 유입 및 유출 유동을 파악하였다.

본 유동 가시화 결과를 Figure 3.12와 3.13에 나타내었으며, Figure 3.12는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 3.13은 측면인 경우이다. 또한, 모든 그림에 흰색 점선으로 수평 개구부를 표시하였다. 화원이 바닥의 중앙인 경우(Figure 3.12), 연기가 수평 개구부 중앙에서 유출되고 신선한 공기가 수평 개구부 주변 부분으로 유입되는 것으로 관찰되었다. 그러나 유출 또는 유입 유동이 지배적으로 나타나는 경우는 없었으며, 해당 조건에서는 수평 개구부를 통과하는 유동 양식이 모두 양방향 유동으로 관찰되었다. 화원이 바닥의 측면인 경우(Figure 3.13)에서도 유출 또는 유입 유동이 지배적으로 나타나는 경우는 없었으며, 유출과 유입 유동이 수평 개구부를 통해 동시에 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구의 모든 조건에서 양방향 유동 양식이 관찰됨을 확인하였다.

유동 가시화 결과를 토대로, 공기가 유입되는 영역과 연기가 유출되는 영역을 이용하여 수평 개구부 면적(A_v)에 대한 연기 유출 면적(A_s)의 비를

도출하였다. 이때, 실험 시간 300–400 s 구간에서 실험 조건 당 총 3장의 유동 가시화 결과 사진을 이용하였다. A_s/A_v (즉, A_s 와 A_v 의 비)를 수평 개구부 면적과 화원의 열방출률 조건으로 구분하여 Figure 3.14와 Figure 3.15에 각각 나타내었다.

Figure 3.14는 수평 개구부 면적이 A_s/A_v 에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.14(a)는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 3.14(b)는 측면인 경우이다. 화원 위치에 관계없이 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 A_s/A_v 가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 수평 개구부 면적이 증가할수록 수평 개구부 면적 대비 공기 유입 면적(즉, 검정색 부분)이 증가한다는 의미이다. Figure 3.15는 화원의 열방출률이 A_s/A_v 에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.15(a)는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 3.15(b)는 측면인 경우이다. 화원 위치와 관계없이 열방출률이 A_s/A_v 에 미치는 영향은 미미한 것으로 관찰되었다.

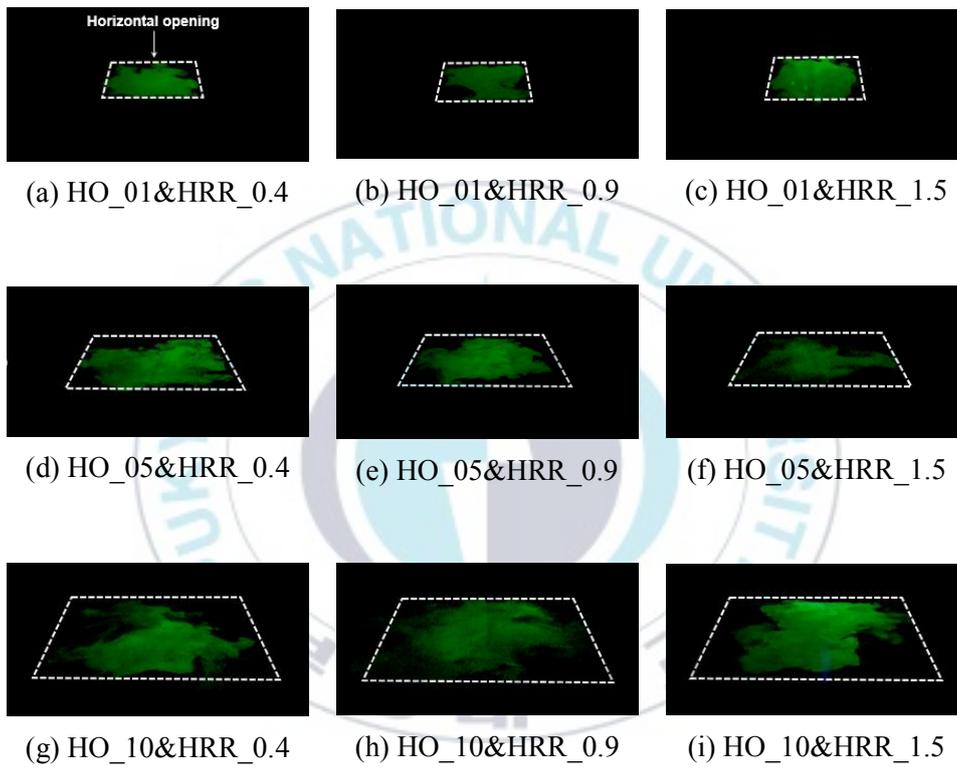


Figure 3.12 Visualization of smoke movement through horizontal opening (FS_CENTER).

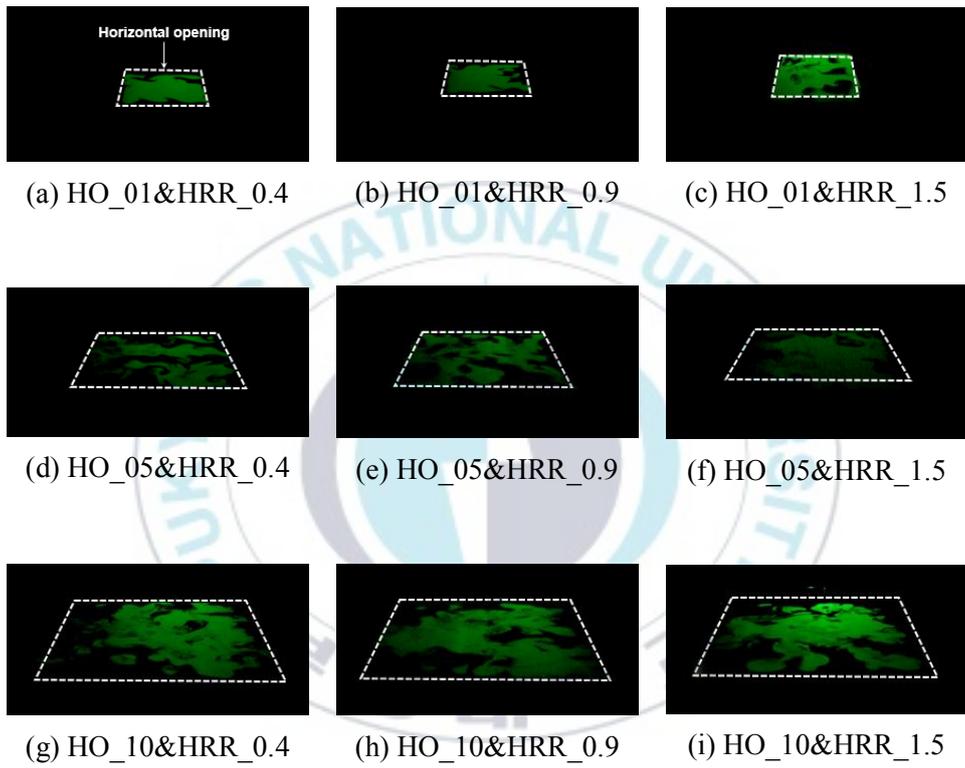
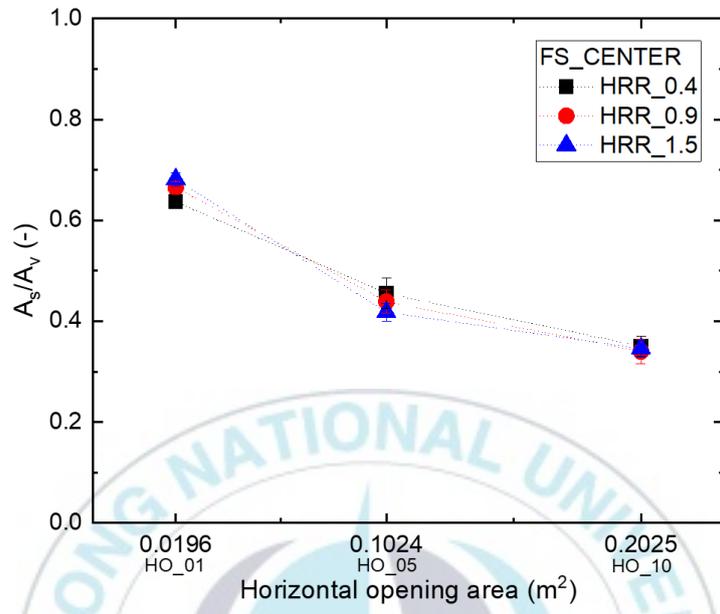
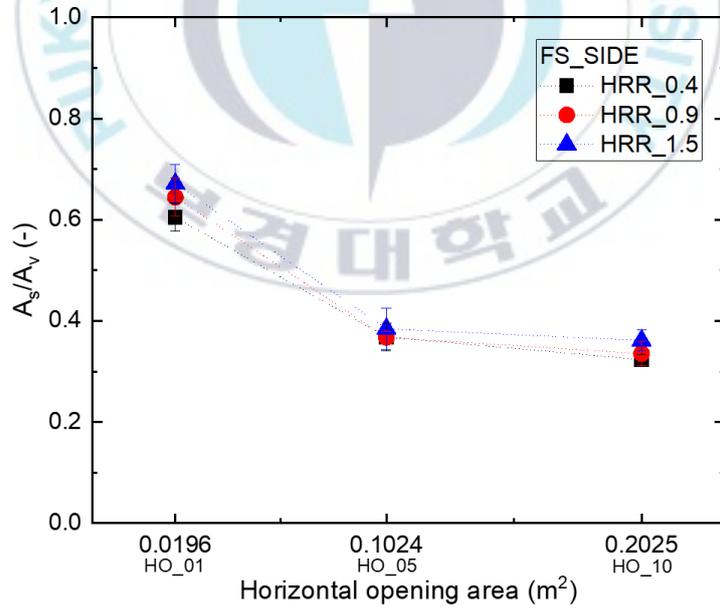


Figure 3.13 Visualization of smoke movement through horizontal opening (FS_SIDE).

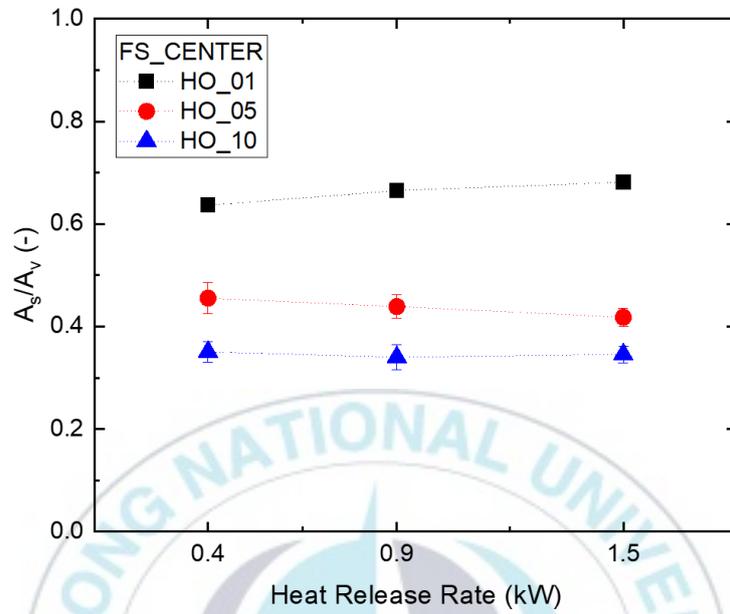


(a) FS_CENTER

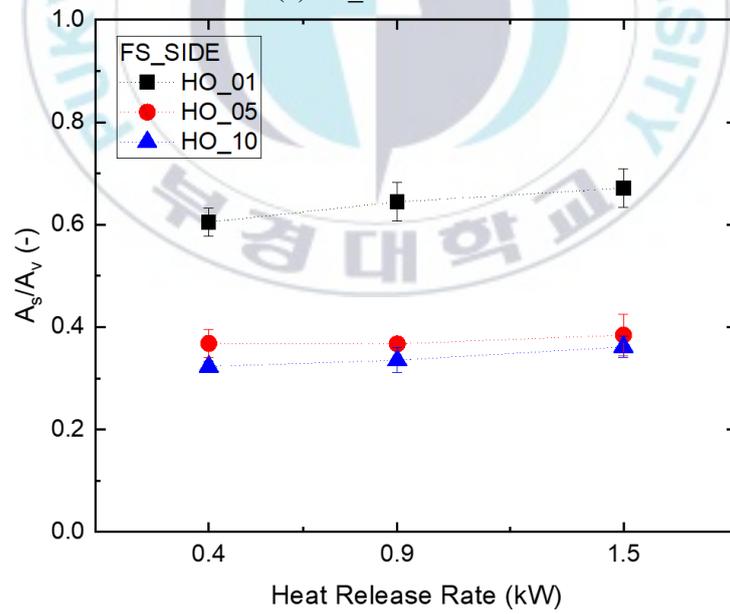


(b) FS_SIDE

Figure 3.14 Effect of horizontal opening area on A_s/A_v .



(a) FS_CENTER



(b) FS_SIDE

Figure 3.15 Effect of heat release rate on A_s/A_v .

3.4 수평 개구부를 통과하는 유동의 질량 유량

Chen⁽¹⁴⁾은 소규모 화재 실험 및 유동 가시화를 통해 수평 개구부의 연기 유출 면적 상관식을 제시한 바 있으며, 해당 상관식을 식 (4)에 나타내었다.

$$A_s = \left[0.4 \times \exp\left(-\frac{A_v/A_f}{12.25}\right) + 0.39 \right] \times A_v \quad (4)$$

여기서, A_s 는 수평 개구부의 연기 유출 면적, A_v 는 수평 개구부 면적, A_f 은 화원 면적을 의미한다. 한편, 본 연구에서는 ‘3.3 수평 개구부를 통과하는 유동 가시화’를 통해 모든 실험 조건에서 양방향 유동이 관찰됨을 확인하였고 A_s/A_v 를 도출하였다(Figures 3.12–3.15). 따라서 본 유동 가시화 결과와 Chen⁽¹⁴⁾의 상관식 형태를 이용하여 연기 유출 면적 상관식을 도출하고 식 (5)에 나타내었다.

$$A_s = \left[0.48 \times \exp\left(-\frac{A_v/A_f}{10.86}\right) + 0.33 \right] \times A_v \quad (5)$$

여기서, A_f 는 1개의 연료팬 면적과 4개의 축 연소체 면적을 모두 더하여 이용하였다. 본 연구에서 도출한 상관식(식 (5))과 Chen⁽¹⁴⁾의 상관식(식 (4)) 결과 간 비교를 위해 Figure 3.16에 A_v/A_f 에 대한 A_s/A_v 를 나타내었다. 비교 결과, A_v/A_f 가 증가함에 따라 A_s/A_v 가 감소하는 경향이 동일하였으며, 각 상관식에 의한 예측 결과가 유사함을 확인하였다.

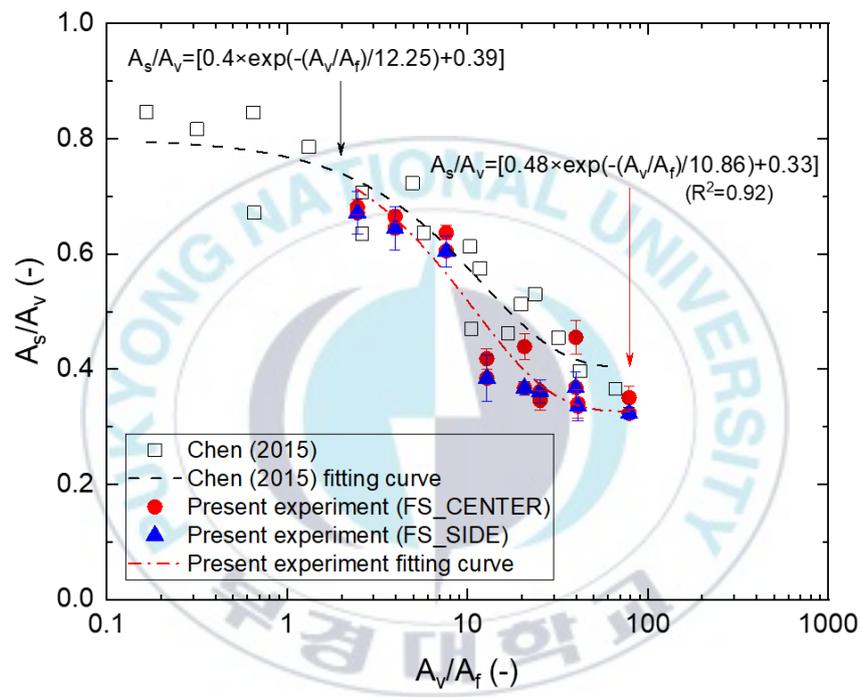


Figure 3.16 Comparison of A_s/A_v variation with A_v/A_f between Chen (2015) and present experiments.

연기 유출 면적을 고려한 질량 유량 계산식을 식 (6)에 나타내었다.

$$\dot{m} = C_d V \rho A_s \quad (6)$$

$$\rho = 353/T \quad (7)$$

여기서, \dot{m} 은 유출 질량 유량, C_d 은 유량 계수, v 와 ρ 는 각각 수평 개구부를 통과하는 유체의 유동 속도와 밀도를 의미한다. 수평 개구부를 통과하는 유체의 유동 속도와 밀도는 본 실험 결과를 이용하였다. 유동 속도의 경우, Figure 2.4와 Figure 2.5에 나타낸 유동 속도 측정 위치에서 측정된 ‘평균 유출 속도’(즉, 양수(+) 값의 평균 데이터)를 이용하였다(Figure 3.7). 해당 속도는 수평 개구부의 모든 연기 유출 면적에서 균일하게 나타난다고 가정하였다. 밀도의 경우, 온도와 밀도 간 관계식인 식 (7)⁽²³⁾을 이용하였다. 여기서, T 는 절대온도(Kelvin)를 의미한다. 따라서 수평 개구부와 가장 가까운 온도 측정 위치(TC5의 바닥으로부터 100 cm)의 온도 측정 결과(Figure 3.1)를 이용하여 유체의 밀도를 도출하였다. 연기 유출 면적은 식 (5)를 이용하여 나타내었다.

본 연구에서 유량 계수는 0.6⁽²⁴⁾으로 가정하였다. 오리피스(Orifice)와 같은 형상에서 압력에 의해 유동이 결정될 경우 유량 계수는 일반적으로 0.6의 값을 사용할 수 있다⁽²⁴⁾. 그러나 수평 개구부가 설치된 구획실 화재 조건은 압력 및 부력 효과를 모두 고려해야한다. 해당 조건을 고려하여 Tan and Jaluria⁽⁴⁾는 수평 개구부를 통과하는 유동에 대해 유량 계수를 추정하는 연구를 수행한 바 있다. 연구 결과, 유량 계수는 부력 수 및 L/D의 함수로 0.6보다 작은 값으로 결정되었다. 따라서 본 연구에서 사용된 유량 계수 0.6의 값은 현재 실험 조건의 상한치로 생각되고 실제로는 0.6 보다 작은 값으로 판단된다. 추후, 수평 개구부를 통과하는 정확한 질량 유량 예측

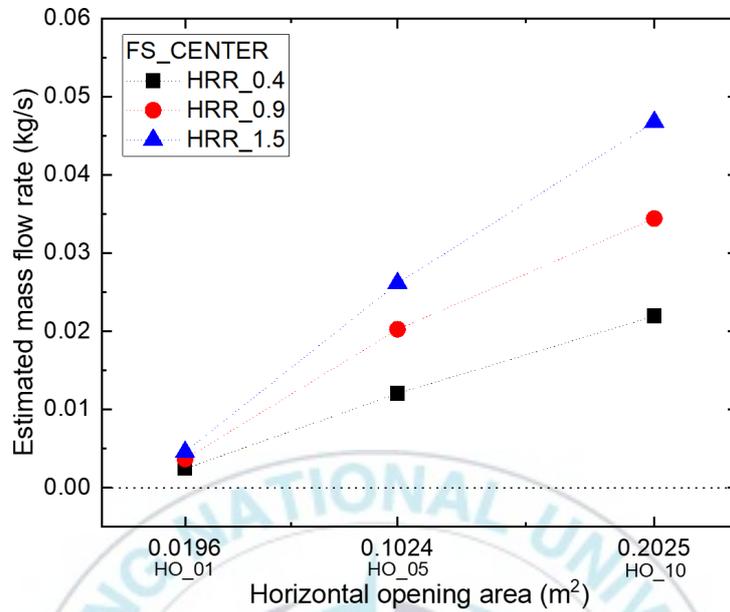
을 위해 적절한 유량 계수를 도출하기 위한 연구가 필요하다고 생각된다. 식 (6)으로 계산된 예측 질량 유량을 수평 개구부 면적, 화원의 열방출률, 화원 위치 영향으로 구분하여 Figures 3.17–3.19에 나타내었다.



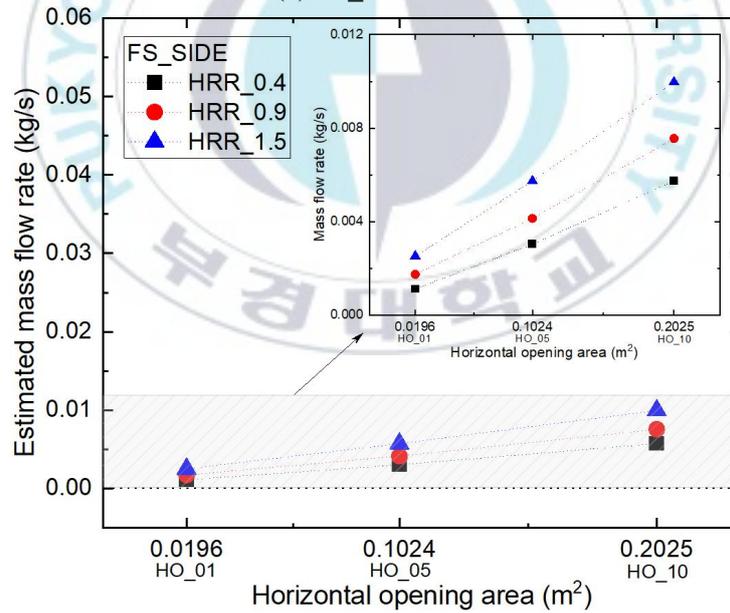
3.4.1 수평 개구부 면적 영향

Figure 3.17에 수평 개구부 면적이 수평 개구부를 통과하는 예측 질량 유량에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.17(a)는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 3.17(b)는 측면인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 수평 개구부 면적, y축은 예측 질량 유량으로 나타내었다. 질량 유량 예측 결과는 아래와 같다.

화원의 열방출률 및 위치 조건에 관계없이 모든 조건에서 수평 개구부 면적이 증가할수록 예측 질량 유량이 증가하였고, 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 10%인 조건(HO_10)에서 예측 질량 유량이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 Figure 3.1에서 언급한 바와 같이, 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 고온의 연기 유출 질량 유량 및 저온의 신선한 공기 유입 질량 유량이 증가하기 때문으로 생각된다. 또한, 수평 개구부 면적이 증가할수록 예측 질량 유량은 증가하는데, 화원의 열방출률이 증가할수록 이와 같은 경향이 뚜렷하게 나타났다. 전반적으로 수평 개구부 면적이 예측 질량 유량에 미치는 영향은 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 상대적으로 큰 것으로 관찰되었다..



(a) FS_CENTER



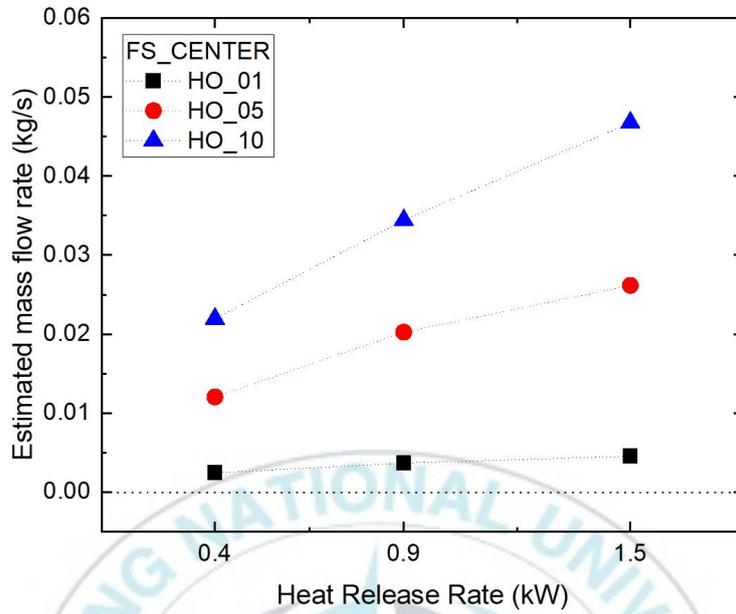
(b) FS_SIDE

Figure 3.17 Effect of horizontal opening area on estimated mass flow rate through horizontal opening.

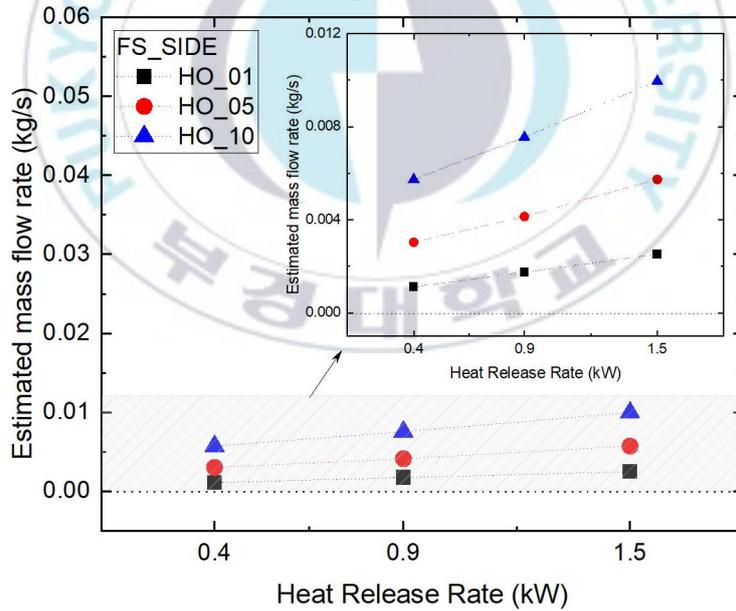
3.4.2 화원의 열방출률 영향

Figure 3.18에 화원의 열방출률이 수평 개구부를 통과하는 예측 질량 유량에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.18(a)는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 3.18(b)는 측면인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 열방출률, y축은 예측 질량 유량으로 나타내었다. 질량 유량 예측 결과는 아래와 같다.

수평 개구부 면적 및 화원 위치와 관계없이 모든 조건에서 열방출률이 증가함에 따라 수평 개구부를 통과하는 예측 질량 유량이 증가하였고, 열방출률이 1.5 kW인 조건(HRR_1.5)에서 예측 질량 유량이 가장 높은 것으로 나타났다. 한편, 화원이 바닥의 측면인 경우, 열방출률이 예측 질량 유량에 미치는 영향은 화원이 바닥의 중앙인 경우에 비해 상대적으로 미미한 것으로 나타났다.



(a) FS_CENTER



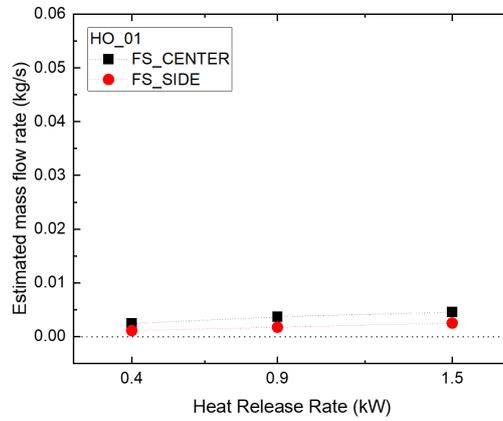
(b) FS_SIDE

Figure 3.18 Effect of heat release rate on estimated mass flow rate through horizontal opening.

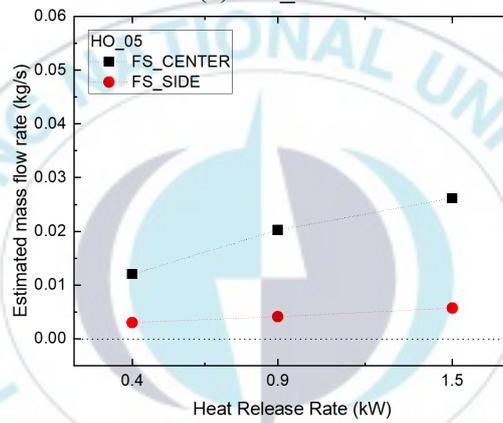
3.4.3 화원 위치 영향

Figure 3.19에 화원 위치가 수평 개구부를 통과하는 예측 질량 유량에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 3.19(a)는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%, Figure 3.19(b)는 바닥 면적의 5%, Figure 3.19(c)는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. 질량 유량 예측 결과는 아래와 같다.

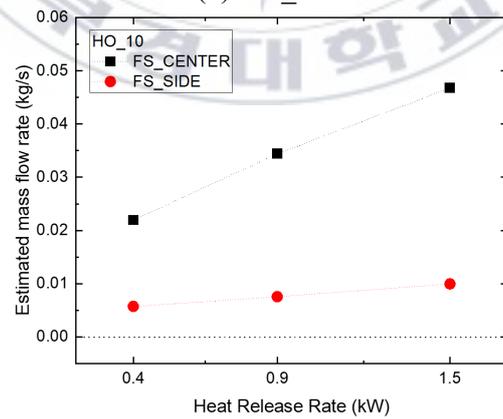
수평 개구부 면적 및 화원의 열방출률과 관계없이 모든 조건에서 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 수평 개구부를 통과하는 예측 질량 유량이 많은 것으로 나타났다. 이는 화원이 바닥의 중앙인 경우, 화원과 수평 개구부가 동일한 수직 선상에 위치하므로 연기의 유출이 용이하기 때문으로 생각된다. 수평 개구부를 통과하는 질량 유량 예측 결과를 통해 수평 개구부 면적 및 열방출률에 대한 영향은 화원이 바닥의 측면인 경우가 중앙인 경우에 비해 미미한 것으로 나타났다.



(a) HO_01



(b) HO_05



(c) HO_10

Figure 3.19 Effect of fire source location on estimated mass flow rate through horizontal opening.

제 4 장 전산해석 조건 및 방법

4.1 전산해석 조건

전산해석을 위해 FDS 프로그램(ver. 6.7.3)을 이용하였다. 본 연구에서는 실험 조건 중 일부 조건에 대해 전산해석을 수행하였고, 해당 전산해석 조건을 Table 4.1에 간략하게 나타내었다. 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1, 10%인 경우, 화원 위치가 바닥의 중앙, 측면인 경우, 총 4 cases에 대해 전산해석을 수행하였으며 화원의 열방출률은 1.5 kW로 동일하다. 전산해석 개략도를 Figure 4.1에 나타내었고 실험 장치와 유사한 조건으로 구축하였다.

사용한 연료의 종류는 메탄올이고 t-square fire model⁽⁷⁾을 이용하여 화재 성장률(Fire growth rate)은 ultrafast, 화재 성장 계수는 0.1876 kW/s^2 을 적용하였다. 전산해석 결과를 통해 수평 개구부 면적 및 화원 위치에 따른 구획실 화재 현상을 확인하고 본 실험 결과와 비교하였다.

Table 4.1 Summary of numerical simulation conditions

No.	Cases	Horizontal opening area (m ²)	Fire source location	Total HRR (kW)
1	HO_01&FS_CENTER&HRR_1.5	0.0196 (1% of the floor)	CENTER	1.5
2	HO_01&FS_SIDE&HRR_1.5		SIDE	
3	HO_10&FS_CENTER&HRR_1.5	0.2025 (10% of the floor)	CENTER	
4	HO_10&FS_SIDE&HRR_1.5		SIDE	

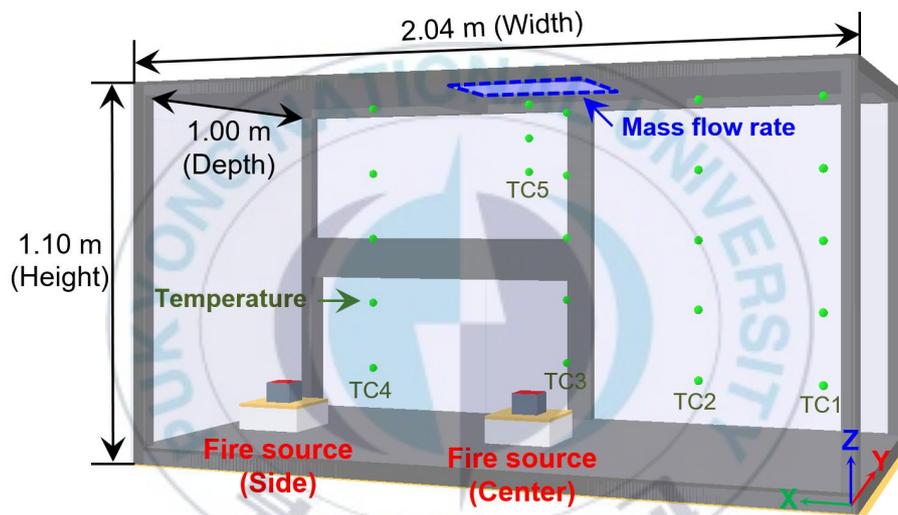


Figure 4.1 Schematic of numerical simulation.

4.2 전산해석 방법

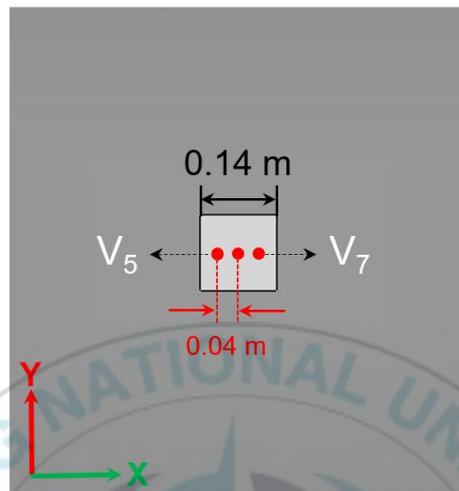
본 전산해석과 실험 결과 간 비교를 위해 실험 조건과 동일한 위치에서 구획실 내 온도 및 수평 개구부를 통과하는 유동 속도를 측정하였다. 온도의 경우, 본 실험에서 사용된 열전대의 특성을 고려하였고 구획실 내 총 23 지점의 측정 위치를 설정하였다(Figure 2.3). 유동 속도의 경우, 수직 방향의 속도를 나타내는 W-velocity를 측정하였다(Figure 2.4, Figure 2.5). 추가적으로 유동 속도 분포를 측정하였으며, 세부적인 측정 위치를 Figure 4.2에 나타내었다. 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우 Figure 4.2(a)에 나타내었으며, 수평 개구부 중앙으로부터 4 cm 간격으로 총 3지점 설정하였다. 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 10%인 경우 Figure 4.2(b)에 나타내었고 수평 개구부 중앙으로부터 4 cm 간격으로 총 11 지점 설정하였다. 모든 조건에서 V_6 은 수평 개구부의 중앙이며 실험과 동일한 측정 위치이다. 화원이 바닥의 측면인 경우 Figure 4.2(a)에서 V_7 , Figure 4.2(b)에서 V_{11} 로 갈수록 화원과 가까운 측정 위치에 해당한다. 질량 유량의 경우, 수평 개구부를 통과하는 유출 질량 유량을 측정하였다.

격자 크기 설정을 위해 Plume resolution index($D^*/\delta x$)⁽²⁵⁾를 고려하였다. 여기서 D^* 는 특성 화재 직경(Characteristic fire diameter), δx 는 격자 한 변의 길이를 의미한다. 특성 화재 직경을 아래 식 (8)로 정의하여 나타내었다.

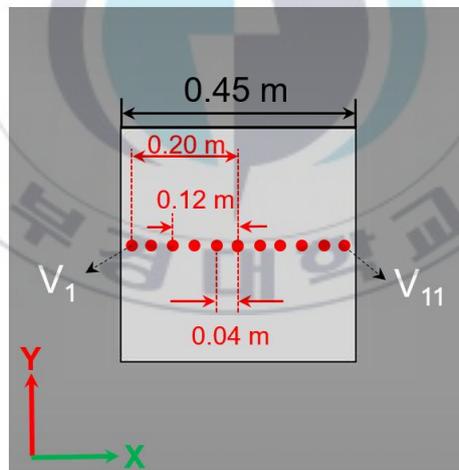
$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (8)$$

여기서, \dot{Q} 은 열방출률, g 는 중력가속도를 의미하며, ρ_{∞} , c_p , T_{∞} 는 각각 주

위 공기(Ambient air)의 밀도, 비열, 온도를 나타낸다. 한편, NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서는 전산해석을 위한 적절한 $D^*/\delta x$ 범위를 4–16으로 제안^(26,27)하고 있다. 따라서 본 전산해석의 $D^*/\delta x$ 는 7.1, 격자 길이는 0.01 m으로 해당 전산해석 조건이 적합하다고 판단된다. 또한, 기존 연구^(28,29)에서는 본 논문의 실험 장치와 유사한 축소 모형을 대상으로 공연장 내 방화막 및 자연배출구의 영향을 파악하기 위한 실험⁽²⁸⁾ 및 전산시물레이션⁽²⁹⁾ 비교 연구를 수행한 바 있다. 해당 전산시물레이션⁽²⁹⁾에서는 격자 크기에 대한 민감도를 판단하기 위하여 격자 크기 0.01 m와 0.02 m의 전산시물레이션을 수행하였다. 그 결과, 전산시물레이션 결과 간 차이는 미미하였다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 보수적으로 0.01 m의 격자 크기를 설정하였고, 본 전산해석의 총 격자 개수는 3,144,960개 이다. 전산해석 구동 시간은 총 600 s이며, 500–600 s 구간에 대한 평균값을 사용하였다.



(a) Horizontal opening area = 0.0196 m^2 (1% of the floor area, HO_01)



(b) Horizontal opening area = 0.0225 m^2 (10% of the floor area, HO_10)

Figure 4.2 Locations of W-velocity measurements in horizontal opening for numerical simulation.

제 5 장 전산해석 결과 및 분석

본 전산해석은 총 600 s 간 수행되었으며, 구획실 내 온도 분포, 수평 개구부를 통과하는 유동 속도 분포 및 유출 질량 유량을 측정하고 가시화하였다. 또한, 해당 결과(전산해석 결과)와 실험 결과 간 비교하였으며, 수평 개구부 면적 및 화원 위치에 따른 영향을 각각 나타내었다.

5.1 온도 분포

전산해석을 통해 구획실 내 온도를 가시화하여 Figure 5.1에 나타내었으며, Figure 5.1(a)는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우, Figure 5.1(b)는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. 온도 가시화 결과는 아래와 같다.

화원 위치와 관계없이 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 구획실 내 온도가 감소하였다. 한편, 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 10%인 조건(HO_10)에서 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 구획실 내 온도가 확연히 낮은 것으로 나타났다. 화원이 바닥의 중앙인 경우, 화원으로부터 생성된 연기가 수직 방향으로 바로 유출되기 때문에 온도가 낮은 것으로 판단된다. 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 조건(HO_01)에서는 화원 위치가 구획실 내 온도에 미치는 영향이 미미한 것으로 관찰되었다.

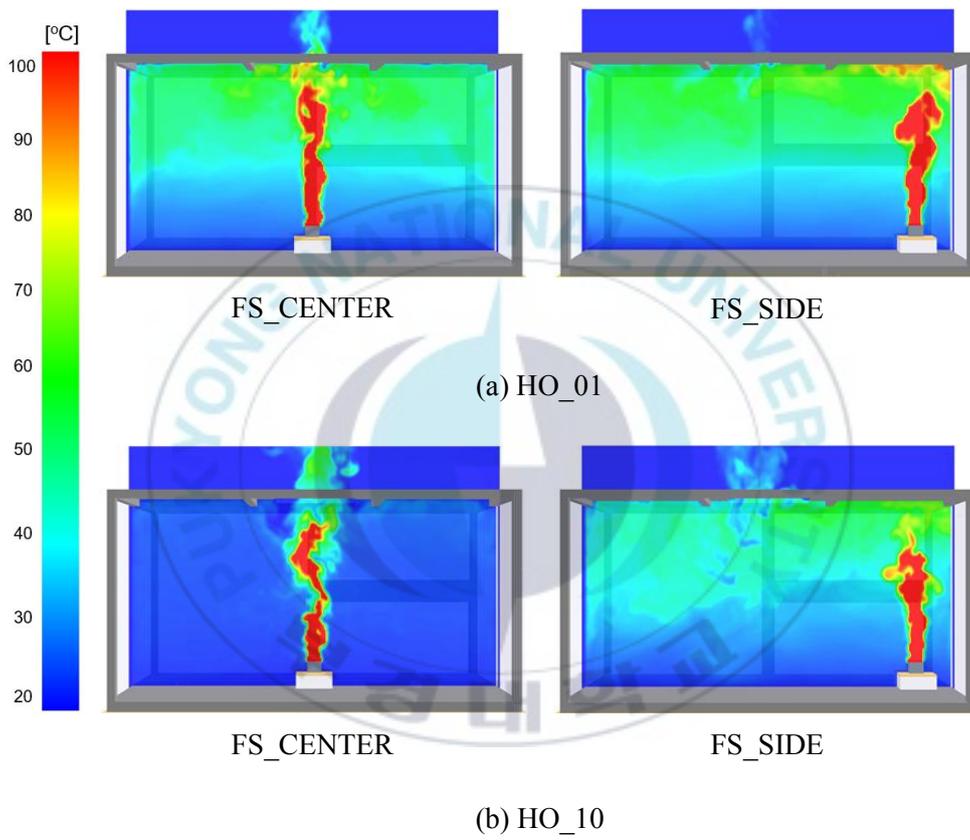


Figure 5.1 Visualization of horizontal opening area effect on temperature in enclosure under different fire source conditions.

구획실 내 온도에 대해 본 전산해석 및 실험 결과를 비교하여 Figure 5.2에 나타내었으며, Figure 5.2(a)는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우, Figure 5.2(b)는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 바닥으로부터의 측정 위치 높이, y축은 온도로 나타내었다. 온도 비교 결과는 아래와 같다.

화원 위치와 관계없이 수평 개구부 면적이 증가할수록 구획실 내 온도가 감소하였다. 한편, 수평 개구부 면적이 상대적으로 작을 경우(즉, HO_01) 화원 위치가 구획실 내 온도에 미치는 영향은 미미하였으나, 수평 개구부 면적이 상대적으로 클 경우(즉, HO_10)는 화원이 바닥의 중앙인 경우에 비해 측면인 경우가 더 높은 온도(TC5 제외)로 측정되었다. 화원이 바닥의 중앙인 경우, TC5에서는 측정 위치가 높아짐에 따라 온도가 감소하였으나 화원이 바닥의 측면인 경우 측정 위치에 따른 영향은 미미하였다. 화원 위치와 관계없이 TC1-TC4에서는 측정 위치가 높아질수록 온도가 증가하였다. 이를 통해 본 전산해석과 실험 결과가 동일한 경향이 나타나는 것을 확인하였다.

구획실 내 온도 분포에 관해 본 전산해석과 실험 결과 간 차이를 Figure 5.3에 나타내었으며, 그래프의 x축은 실험 결과, y축은 전산해석 결과이다. 한편, 전산해석과 실험 결과 간 정량적인 분석을 위해 아래의 식 (9)로 차이(Difference)를 계산하였다.

$$Difference = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Exp - Num}{Exp} \right)_i \times 100 [\%] \quad (9)$$

여기서, N은 데이터 개수, Exp는 실험 결과, Num은 전산해석 결과를 의미한다. 전산해석과 실험 결과 간 차이는 -7.0%로 나타났다.

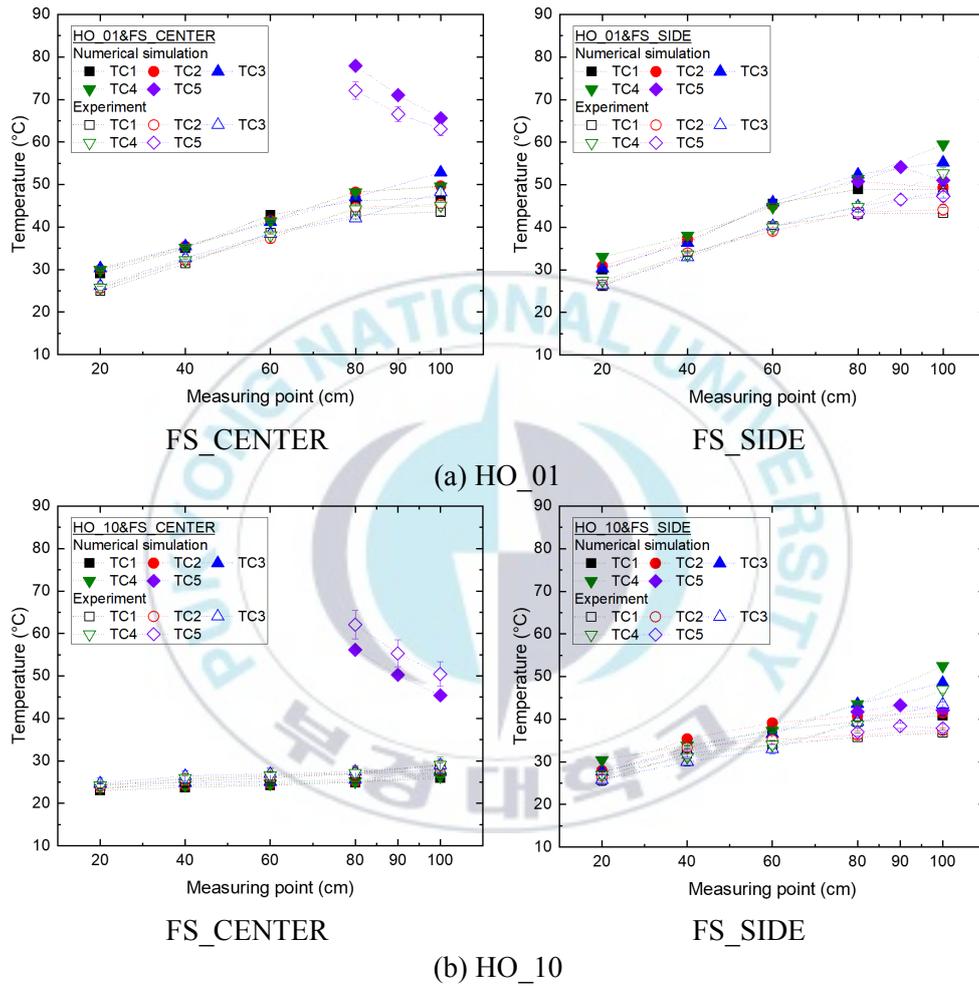


Figure 5.2 Comparison of temperature distribution between numerical simulation and experiment.

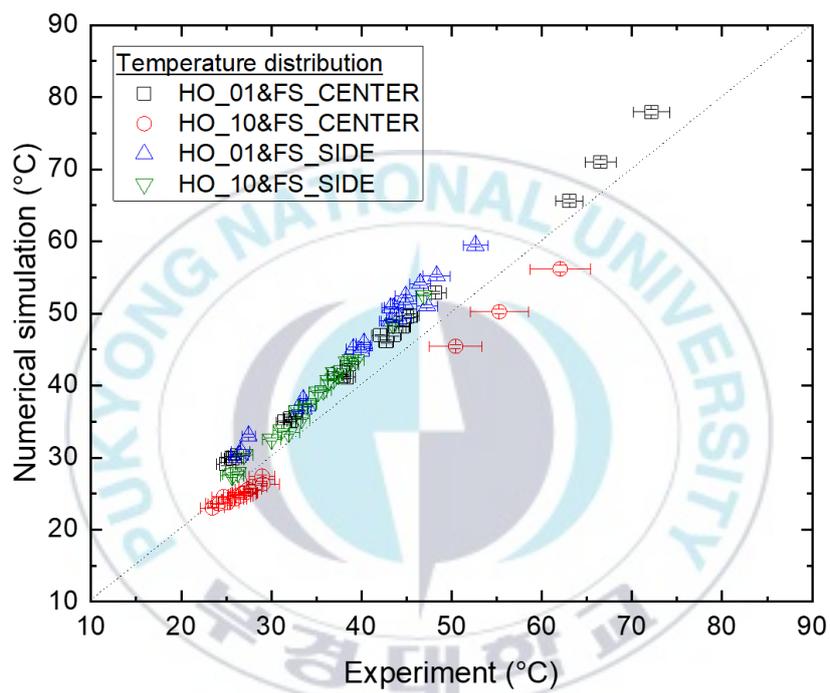


Figure 5.3 Difference of temperature distribution between experiment and numerical simulation.

5.2 수평 개구부를 통과하는 유동 속도

전산해석을 이용하여 수평 개구부를 통과하는 유동 속도 분포를 측정하고, 수평 개구부 면적과 화원 위치 영향으로 구분하여 각각 Figure 5.4와 Figure 5.6에 나타내었다. 참고로, 유동 속도 분포 측정 위치를 Figure 4.2에 나타내었으며, 수직 방향 속도인 W-velocity를 측정하였다. 또한, 구획실 내 W-velocity 유동을 가시화하여 Figure 5.8에 나타내었다.

수평 개구부 중앙을 통과하는 유동 속도(즉, V_6)에 대한 전산해석과 실험간 비교 결과를 Figures 5.9–5.12에 나타내었다. 이전에 언급한 바와 같이 500–600 s 구간에서 측정된 모든 데이터를 평균한 경우 ‘평균 속도’로, 500–600 s 구간에서 측정된 양수(+) 값의 데이터를 평균한 경우 ‘평균 유출 속도’로 명명하였다. 평균 속도 비교 결과를 수평 개구부 면적과 화원 위치 영향으로 구분하여 각각 Figure 5.9와 Figure 5.10에, 평균 유출 속도 비교 결과를 수평 개구부 면적과 화원 위치 영향으로 구분하여 각각 Figure 5.11과 Figure 5.12에 나타내었다.

Figure 5.4에 수평 개구부 면적이 수평 개구부를 통과하는 유동 속도 분포에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 5.4(a)는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 5.4(b)는 측면인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 수평 개구부의 측정 위치, y축은 유동 속도로 나타내었다. 유동 속도 분포 측정 결과는 아래와 같다.

화원이 바닥의 중앙인 경우(Figure 5.4(a)), 수평 개구부 면적이 증가할수록 유동 속도가 증가하였다. 또한, 수평 개구부 중앙(즉, V_6)에서 가장 빠른 속도로 나타났으며, 수평 개구부 주변으로 갈수록 속도가 감소하였다. 'HO_10&FS_CENTER&HRR_1.5' 조건에서 측정 위치 V_1 , V_6 , V_{11} 의 시간에 따른 유동 속도 그래프를 Figure 5.5에 나타내었다. 그래프의 x축은 시간, y축은 W-velocity로 나타내었다. 본 연구에서 W-velocity는 0 m/s을 기준으로 양의 값(+)이 나타나면 유출 유동, 음의 값(-)이 나타나면 유입 유동으로 판단할 수 있는데, Figure 5.5를 통해 수평 개구부 중앙(V_6)에서는 주로 유출 유동이, 수평 개구부 주변(V_1 및 V_{11})에서는 주로 유입 유동이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

화원이 바닥의 측면인 경우(Figure 5.4(b)), 수평 개구부 면적이 유동 속도에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우, 화원과 멀어질수록 속도가 다소 증가하는 것이 관찰되었으나, 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 10%인 경우 측정 위치에 따른 영향은 미미한 것으로 나타났다. 참고로, 화원이 바닥의 측면인 경우, 화원과 가장 가까운 유동 속도 측정 위치는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%일 때 V_7 이고 바닥 면적의 10%일 때 V_{11} 이다.

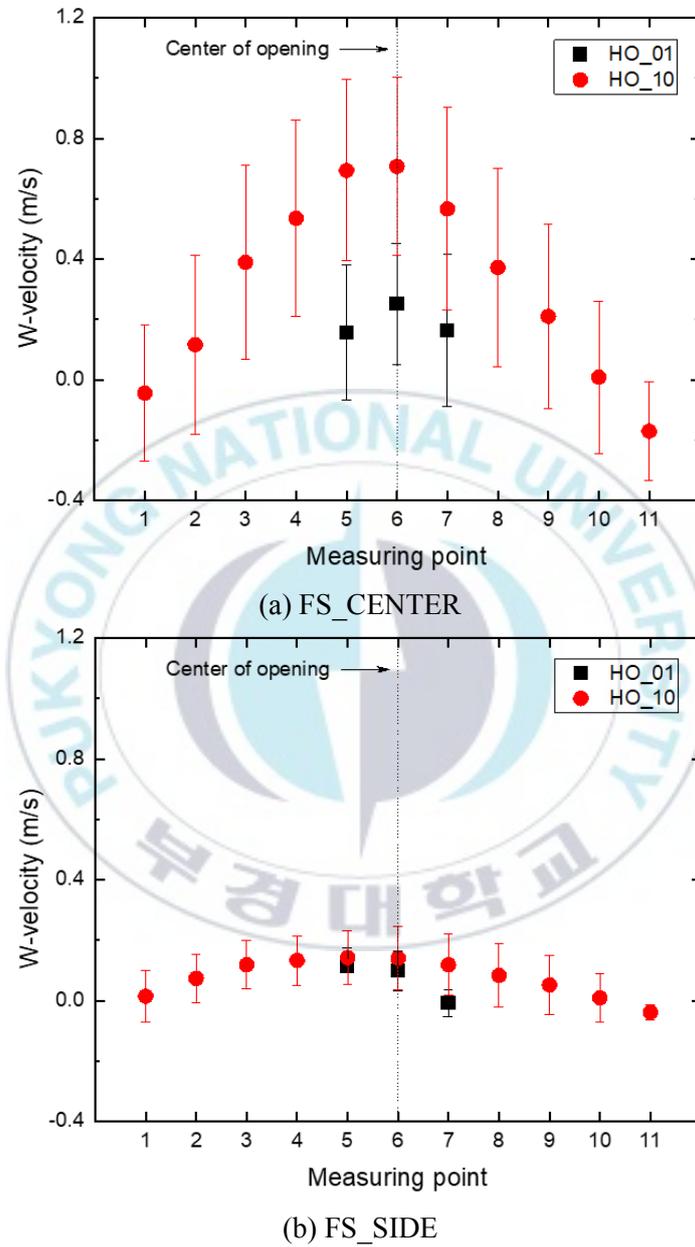


Figure 5.4 Effect of horizontal opening area on W-velocity distribution through horizontal opening.

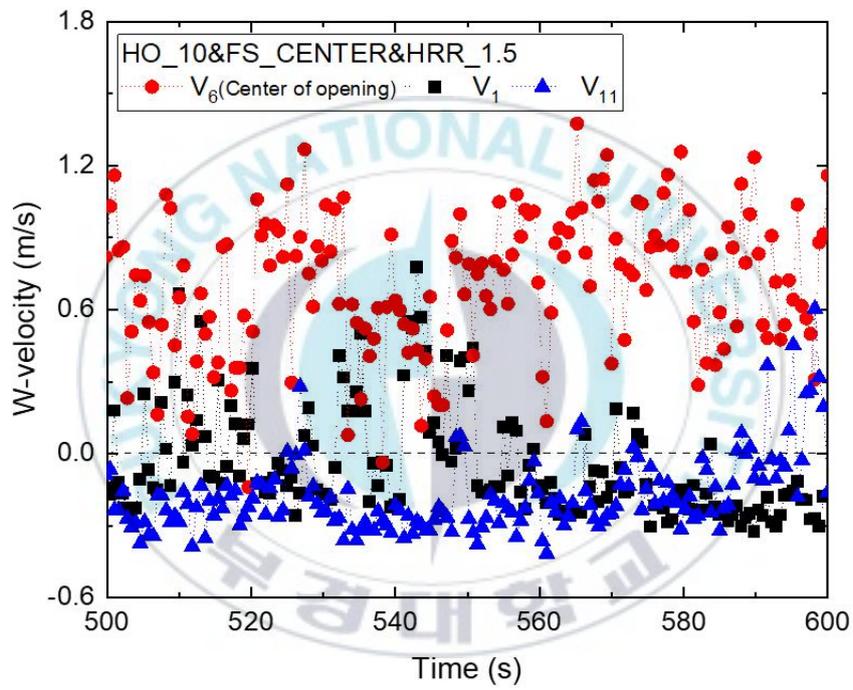
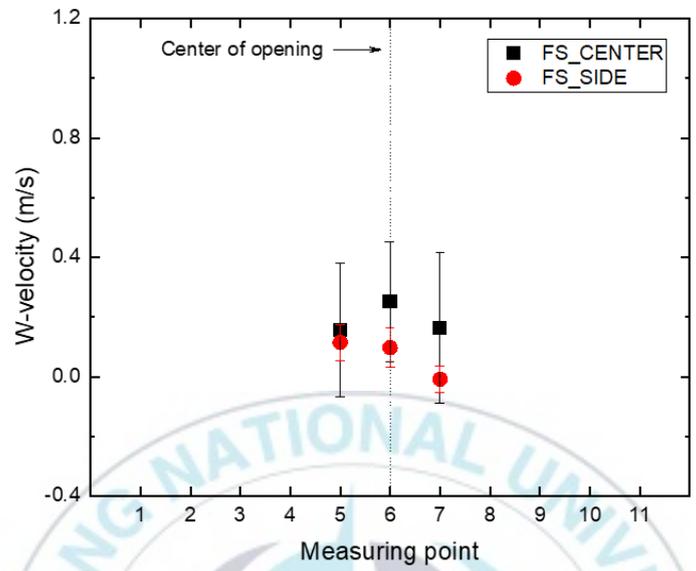


Figure 5.5 Effect of measuring point on W-velocity through horizontal opening under HO_10&FS_CENTER&HRR_1.5.

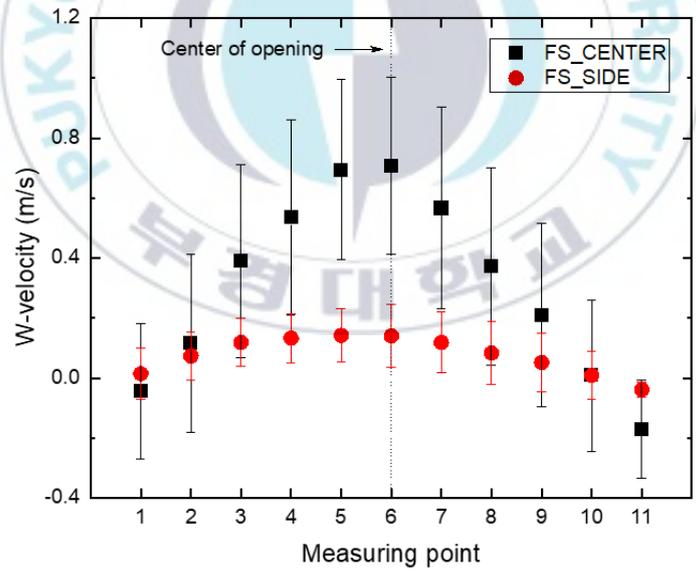
Figure 5.6에 화원 위치가 수평 개구부를 통과하는 유동 속도에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 5.6(a)는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우, Figure 5.6(b)는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 수평 개구부의 측정 위치, y축은 유동 속도로 나타내었다. 유동 속도 분포 측정 결과는 아래와 같다.

수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우, 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 빠른 속도로 나타났으나 표준 편차 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 한편, 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 10%인 경우, 수평 개구부 중앙(즉, V_6)에서 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 유동 속도가 빠른 것으로 나타났다. 그러나 수평 개구부 중앙에서 주변(즉, V_1 또는 V_{11})으로 갈수록 화원이 바닥의 측면인 경우가 중앙인 경우에 비해 빠른 것으로 나타났다.

'HO_10&HRR_1.5' 조건에서 측정 위치 V_1 , V_6 의 시간에 따른 유동 속도 그래프를 Figure 5.7에 나타내었고, 화원 위치에 따른 영향을 확인하였다. Figure 5.5에 나타난 바와 같이 0 m/s을 기준으로 유출 및 유입 유동을 확인한 결과, 화원이 바닥의 중앙인 경우, 수평 개구부의 중앙에서 주로 유출 유동, 수평 개구부 주변에서 주로 유입 유동이 발생하는 것이 확연하게 나타났다. 그러나 화원이 바닥의 측면인 경우, 전체적으로 낮은 속도로 수평 개구부를 통해 유출 및 유입 유동이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 수평 개구부 중앙의 유동 속도가 주변에 비해 다소 빠르게 나타나는 것으로 관찰되었다.



(a) HO_01



(b) HO_10

Figure 5.6 Effect of fire source location on W-velocity distribution through horizontal opening.

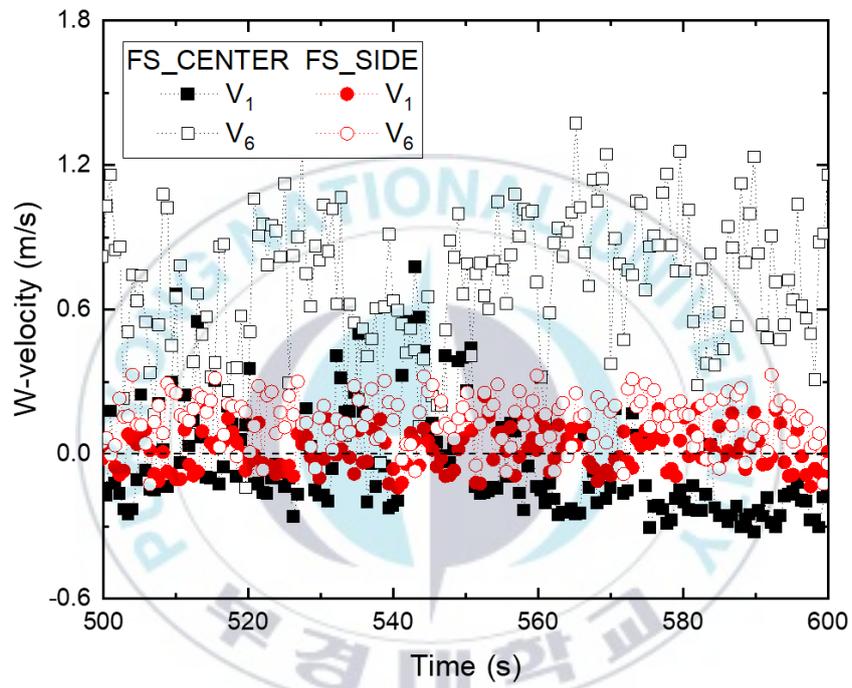
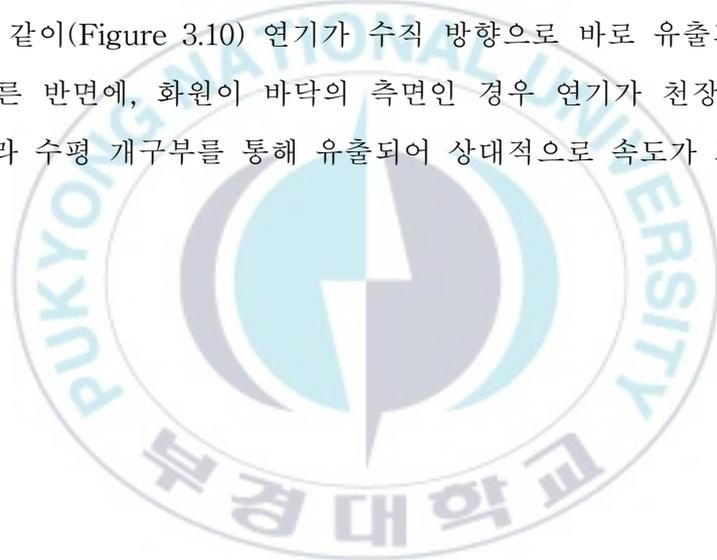


Figure 5.7 Effect of fire source location on W-velocity through horizontal opening under HO_10&HRR_1.5.

전산해석을 통해 구획실 내 W-velocity 유동을 가시화하여 Figure 5.8에 나타내었으며, Figure 5.8(a)는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우, Figure 5.8(b)는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. W-velocity 유동 가시화 결과는 아래와 같다.

수평 개구부 면적이 1%인 경우, 화원 위치가 수평 개구부를 통과하는 유동 속도에 미치는 영향은 미미하였다. 그러나 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 10%인 경우, 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 수평 개구부를 통과하는 유동 속도가 빠른 것으로 나타났다. 이는 이전에 언급한 바와 같이(Figure 3.10) 연기가 수직 방향으로 바로 유출되기 때문에 속도가 빠른 반면에, 화원이 바닥의 측면인 경우 연기가 천장에 닿은 후 천장을 따라 수평 개구부를 통해 유출되어 상대적으로 속도가 느린 것으로 생각된다.



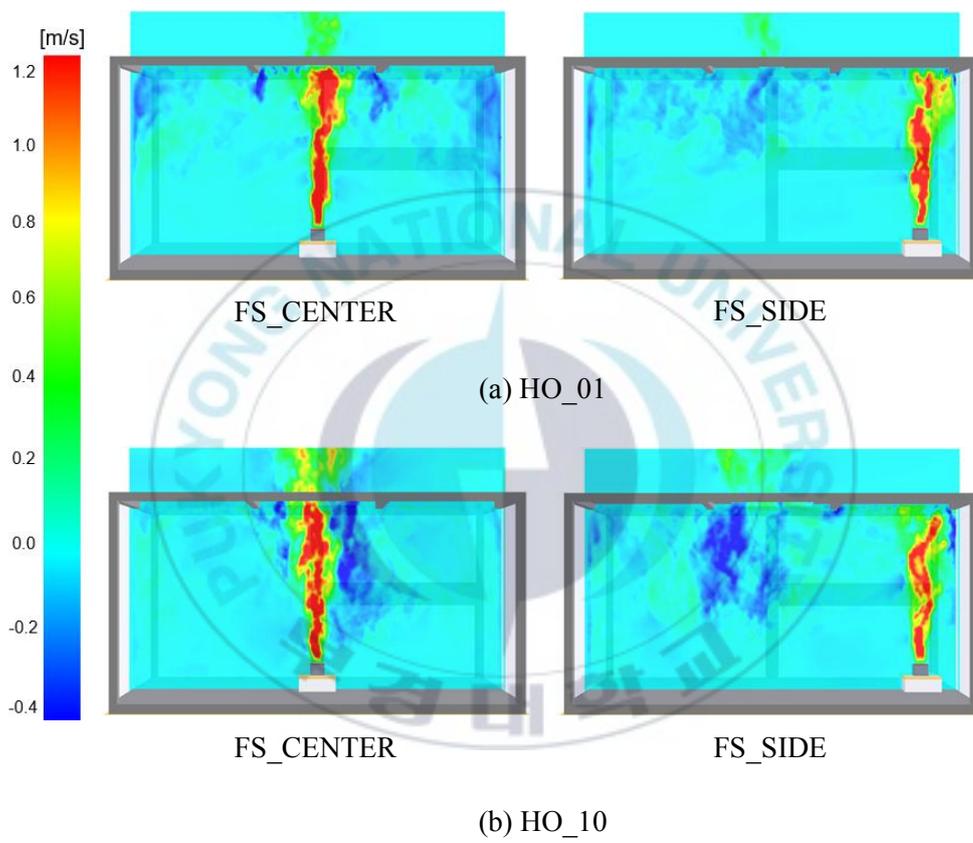


Figure 5.8 Visualization of horizontal opening area effect on flow movement (W-velocity) under different fire source conditions.

수평 개구부 중앙을 통과하는 유동 속도(즉, V_6)에 대한 전산해석과 실험 간 비교 결과를 Figures 5.9–5.12에 나타내었다. 평균 속도의 경우 수평 개구부 면적과 화원 위치 영향으로 구분하여 각각 Figure 5.9와 Figure 5.10에, 평균 유출 속도의 경우 수평 개구부 면적과 화원 위치 영향으로 구분하여 각각 Figure 5.11과 Figure 5.12에 나타내었다.

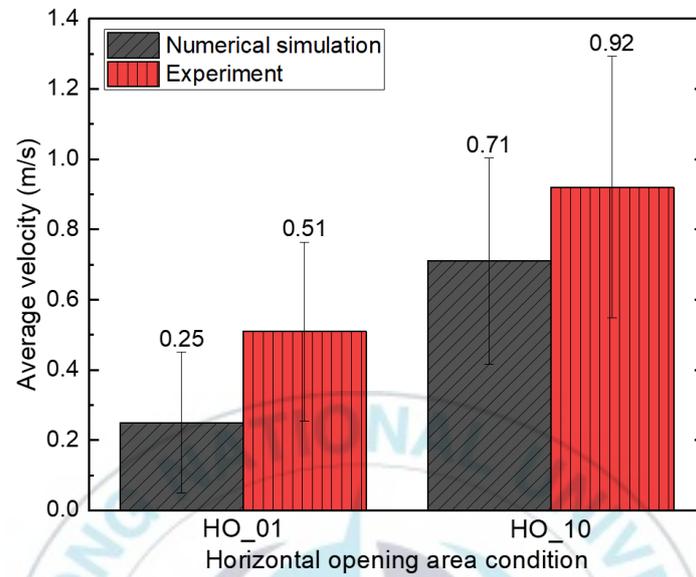
본 전산해석 및 실험 결과를 비교하여 수평 개구부 면적이 수평 개구부를 통과하는 평균 속도에 미치는 영향을 Figure 5.9에 나타내었고, Figure 5.9(a)는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 5.9(b)는 바닥의 측면인 경우에 대해 정리하였다. 평균 속도 측정 결과는 다음과 같다. 화원이 바닥의 중앙인 경우, 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 평균 속도가 증가하였다. 이러한 경향은 전산해석과 실험 결과가 동일하게 나타났다. 화원이 바닥의 측면인 경우, 전산해석에서는 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 평균 속도가 다소 증가했으나 실험에서는 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 유동 속도가 다소 감소하였다. 그러나 실험 및 전산해석의 표준 편차와 실험의 불확도를 고려할 때 실험 및 전산해석 간 결과 차이는 크지 않다고 판단된다.

본 전산해석 및 실험 결과를 비교하여 화원 위치가 수평 개구부를 통과하는 평균 속도에 미치는 영향을 Figure 5.10에 나타내었고, Figure 5.10(a)는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우, Figure 5.10(b)는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. 평균 속도 측정 결과는 다음과 같다, 수평 개구부 면적과 상관없이 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 유동 속도가 빠른 것으로 나타났으며 이러한 경향은 전산해석과 실험 결과가 모두 동일하게 나타났다. 한편, Figure 5.11과 Figure 5.12에 나타난 평균 유출 속도의 전반적인 경향은 각각 Figure 5.9와 Figure 5.11과 동일하였다.

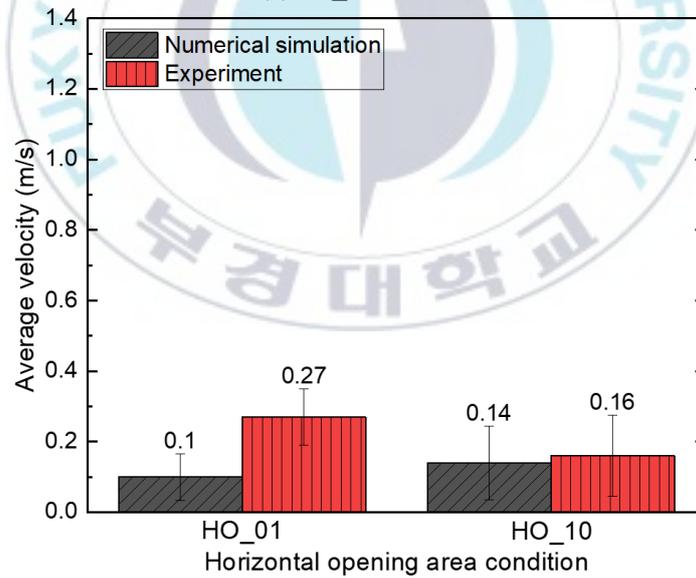
수평 개구부를 중앙을 통과하는 평균 속도 및 평균 유출 속도에 관해 본

전산해석과 실험 결과 간 차이를 Figure 5.13에 나타내었으며, Figure 5.13(a)는 평균 속도, Figure 5.13(b)는 평균 유출 속도에 대해 정리하였다. 각 그래프의 x축은 실험 결과, y축은 전산해석 결과이다. 본 전산해석과 실험 결과 간 차이를 식 (9)로 계산한 결과는 평균 속도의 경우 37.9%, 평균 유출 속도의 경우 34.9%로 확인되었다.



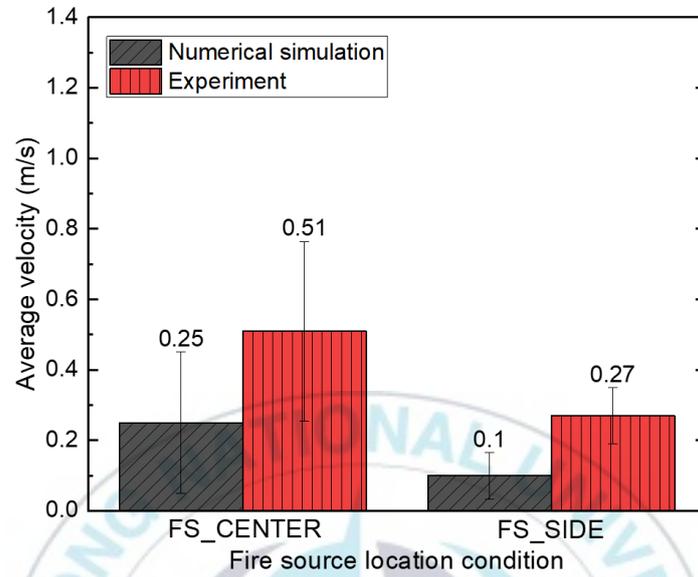


(a) FS_CENTER

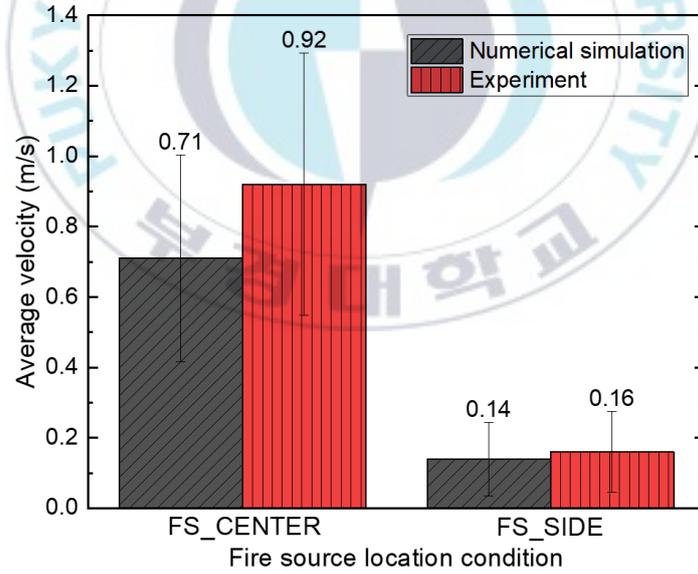


(b) FS_SIDE

Figure 5.9 Comparison of horizontal opening area effect on average velocity through horizontal opening between numerical simulation and experiment.

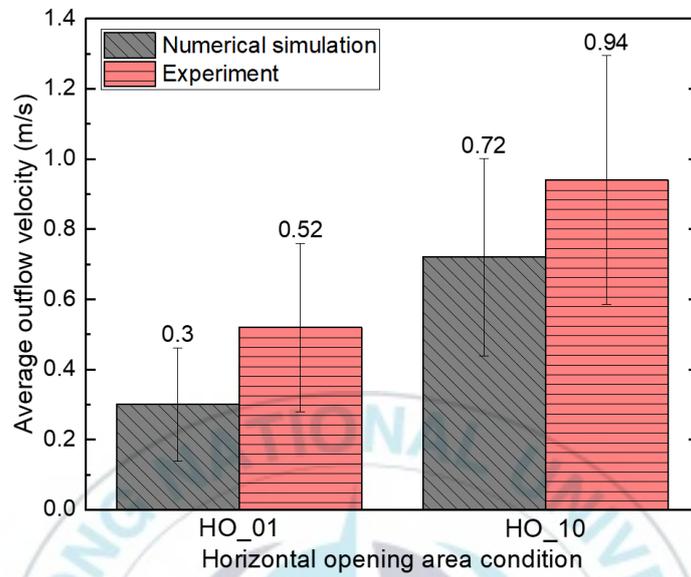


(a) HO_01

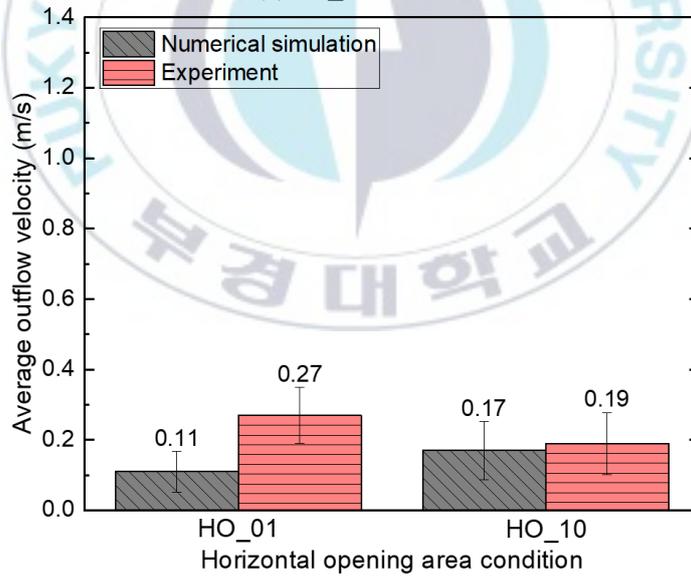


(b) HO_10

Figure 5.10 Comparison of fire source location effect on average velocity through horizontal opening between numerical simulation and experiment.

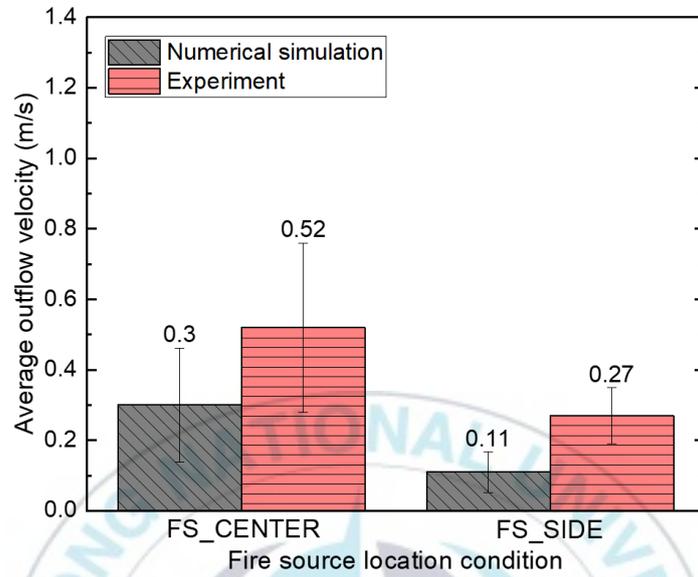


(a) FS_CENTER

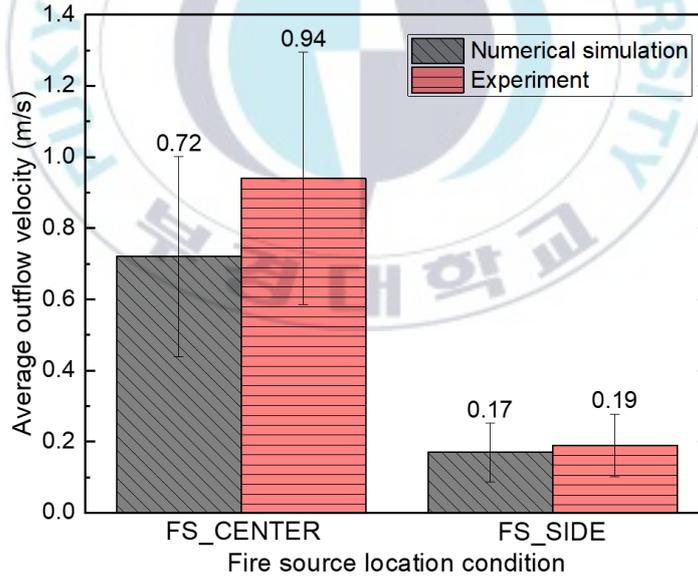


(b) FS_SIDE

Figure 5.11 Comparison of horizontal opening area effect on average outflow velocity through horizontal opening between numerical simulation and experiment.



(a) HO_01



(b) HO_10

Figure 5.12 Comparison of fire source location effect on average outflow velocity through horizontal opening between numerical simulation and experiment.

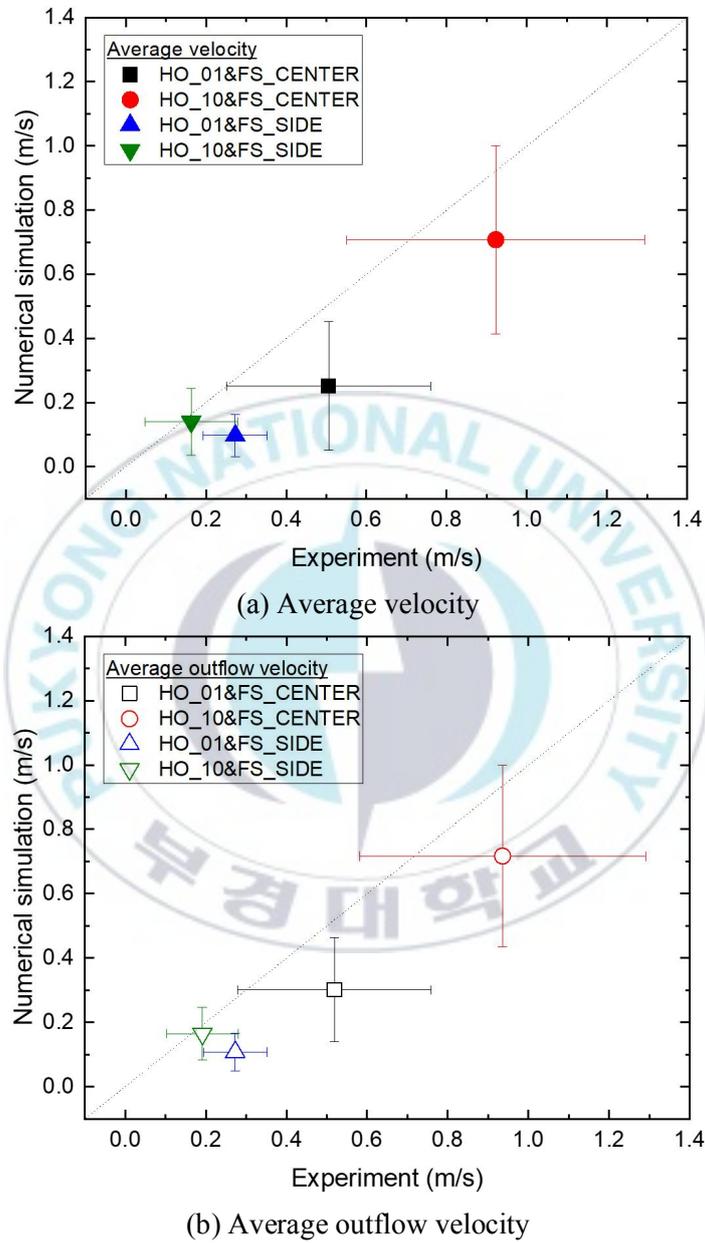


Figure 5.13 Difference of velocity between experiment and numerical simulation.

5.3 수평 개구부를 통과하는 질량 유량

수평 개구부를 통과하는 질량 유량을 비교하기 위해 전산해석의 경우 수평 개구부를 통과하는 유출 질량 유량을 측정하였고, 실험의 경우 수평 개구부를 통해 연기가 유출되는 면적을 고려한 상관식(식 (5))과 본 실험 결과(수평 개구부와 가장 가까운 측정 위치의 온도, 수평 개구부 중앙에서 측정한 평균 유출 속도)를 이용하여 유출 질량 유량을 예측하였다(Figure 3.17). 해당 결과를 비교하여 Figure 5.14와 Figure 5.15에 나타내었다.

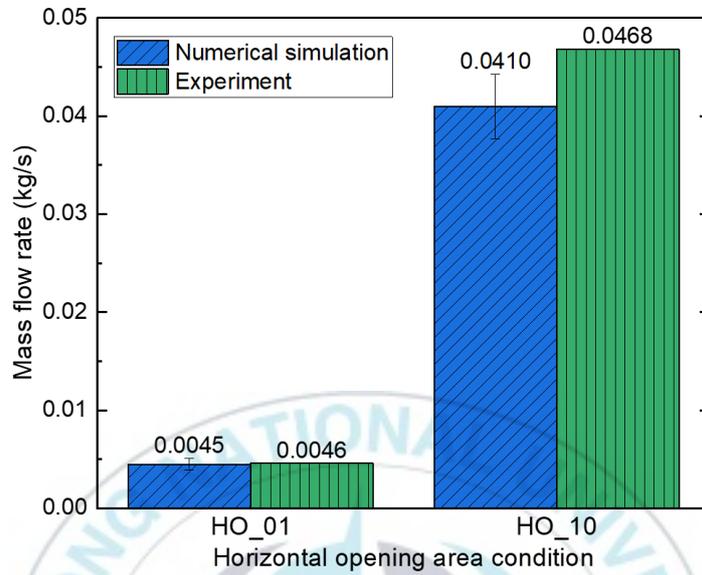
Figure 5.14에 수평 개구부 면적이 수평 개구부를 통과하는 질량 유량에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 5.14(a)는 화원이 바닥의 중앙인 경우, Figure 5.14(b)는 측면인 경우에 대해 정리하였다. 질량 유량 비교 결과는 다음과 같다. 화원 위치에 관계없이 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 질량 유량이 증가하는 경향은 전산해석과 실험의 경우 모두 동일하였다. 전산해석 결과에 따르면, 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우에 비해 10%인 경우가 화원이 바닥의 중앙일 때 9.0배, 측면일 때 13.9배 많은 것으로 나타났다. 한편, 실험 결과에 따르면, 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우에 비해 10%인 경우가 화원이 바닥의 중앙일 때 10.2배, 측면일 때 4.7배 많은 것으로 나타났다.

Figure 5.15에 화원 위치가 수평 개구부를 통과하는 질량 유량에 미치는 영향에 대해 나타내었으며, Figure 5.15(a)는 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%인 경우, Figure 5.15(b)는 바닥 면적의 10%인 경우에 대해 정리하였다. 질량 유량 비교 결과는 다음과 같다. 수평 개구부 면적과 관계없이 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 질량 유량이 많은 것으로 나타났으며 이러한 경향은 전산해석과 실험 결과가 동일하게 나타났다. 전산해석 결과에 따르면, 화원이 바닥의 중앙인 경우가 바닥의 측면인 경

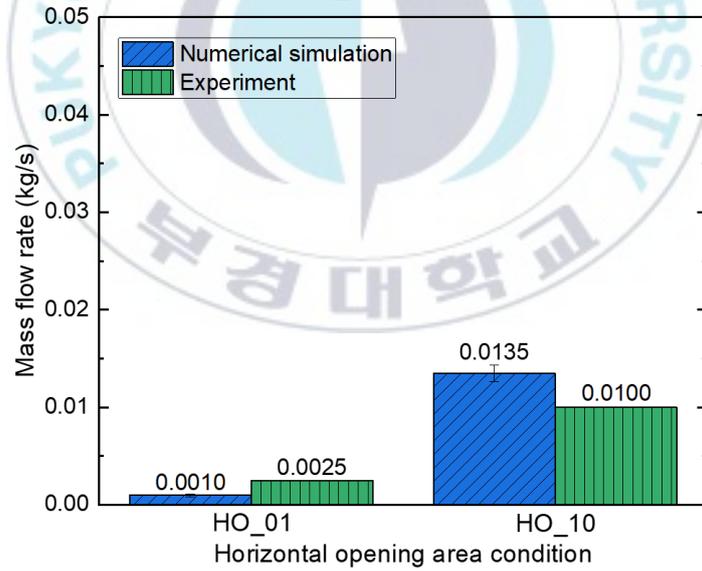
우에 비해 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%일 때 4.6배, 바닥 면적의 10%일 때 3.0배 많은 것으로 나타났다. 한편, 실험 결과에 따르면, 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%일 때 1.8배, 바닥 면적의 10%일 때 4.7배 많은 것으로 나타났다.

수평 개구부를 통과하는 질량 유량에 관해 본 전산해석과 실험 결과 간 차이를 Figure 5.16에 나타내었고, 그래프의 x축은 실험 결과, y축은 전산해석 결과이다. 본 전산해석과 실험 결과 간 차이를 식 (9)로 계산한 결과, 9.6%로 확인되었다.



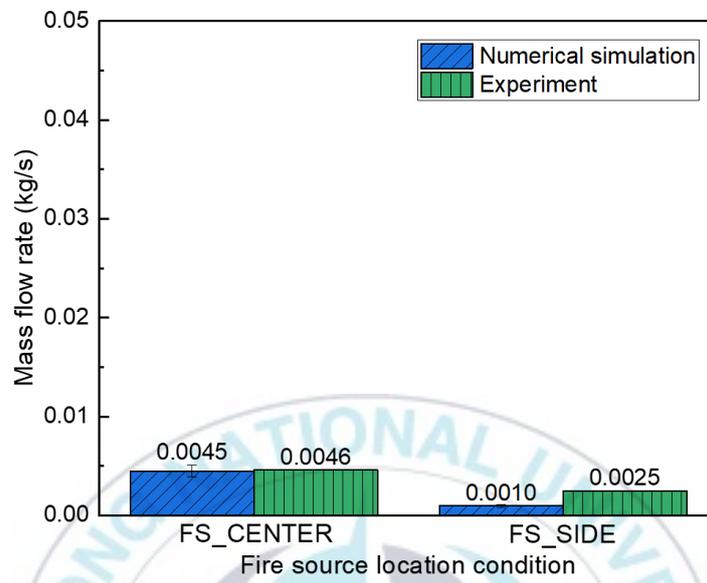


(a) FS_CENTER

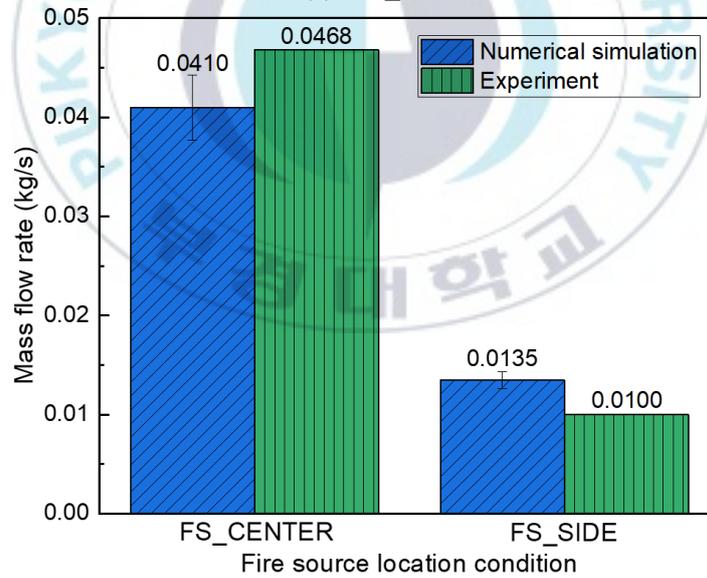


(b) FS_SIDE

Figure 5.14 Comparison of horizontal opening area effect on mass flow rate through horizontal opening between numerical simulation and experiment.



(a) HO_01



(b) HO_10

Figure 5.15 Comparison of fire source location effects on mass flow rate through horizontal opening between numerical simulation and experiment.

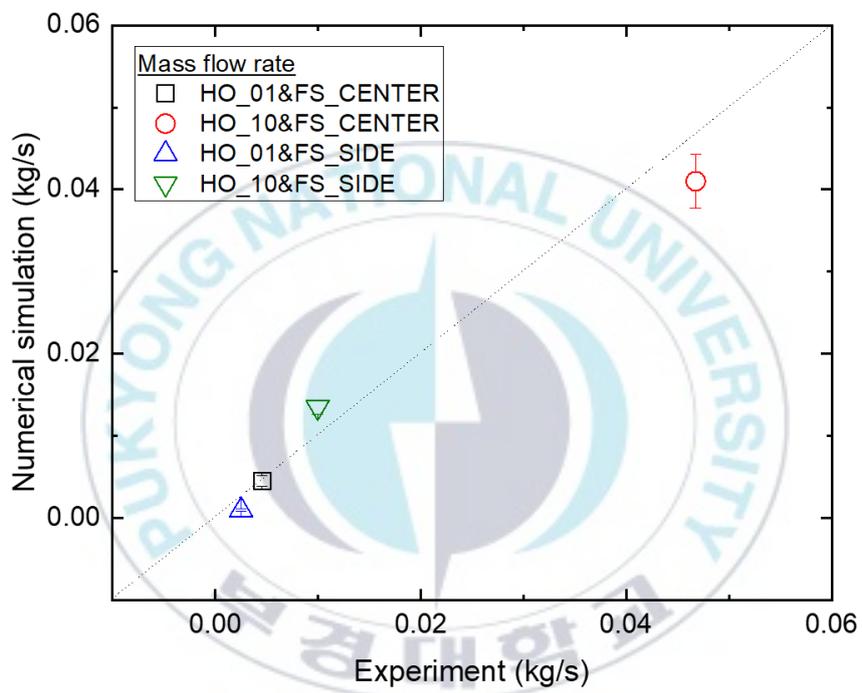


Figure 5.16 Difference of mass flow rate between experiment and numerical simulation.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 단일 수평 개구부 및 화원 조건이 구획실 화재 현상에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험 및 전산해석 연구를 수행하였다. 실험을 통해 구획실 내 온도 분포, 수평 개구부 중앙 위 15 mm 떨어진 위치에서 수평 개구부를 통과하는 유동 속도를 측정하였다. 또한, 유동 가시화를 통해 연기 유출 면적을 측정하였고, 이를 이용하여 수평 개구부를 통과하는 유출 질량 유량을 예측하였다. 한편, 실험 조건 중 일부 조건에 대해 전산해석을 수행하여 세부적인 데이터를 확보하였고, 전산해석과 실험 간 결과 비교 및 분석을 통해 전산해석의 정확도를 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 연구 결과를 아래에 요약하였다.

(1) 온도 분포의 경우, 모든 조건에서 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 구획실 내 온도가 감소하였다. 수평 개구부 면적이 작은 조건(HO_01)에서 화원 위치가 구획실 내 온도에 미치는 영향은 미미하였으나, 수평 개구부 면적이 큰 조건(HO_10)에서는 화원이 바닥의 중앙인 경우에 비해 측면인 경우에서 더 높은 온도가 측정되었다. 화원의 열방출률이 증가할수록 구획실 내 온도가 증가하였고, 수평 개구부 면적이 구획실 내 온도에 미치는 영향은 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 큰 것으로 관찰되었다. 온도 분포에 대한 전체적인 경향은 실험과 전산해석 결과가 유사하였고, 본 실험과 전산해석 결과 간 차이는 -7.0%로 나타났다.

(2) 수평 개구부를 통과하는 유동 속도의 경우, 화원이 바닥의 중앙에 위치할 때 수평 개구부 면적이 바닥 면적의 1%에서 5%로 증가함에 따라 평균 속도 및 평균 유출 속도가 확연히 증가하였으나, 바닥 면적의 5%에서 10%로 증가할 경

우 큰 변화가 없었다. 또한, 열방출률이 증가할수록 평균 속도 및 평균 유출 속도가 증가하였다. 한편, 화원이 바닥의 측면에 위치할 때 수평 개구부 면적 및 열방출률이 평균 속도 및 평균 유출 속도에 미치는 영향은 미미하였으며, 본 실험의 모든 조건에서 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 평균 속도 및 평균 유출 속도가 높게 측정되었다. 수평 개구부를 통과하는 유동 속도에 대한 전체적인 경향은 실험과 전산해석 결과가 유사하였고, 본 실험과 전산해석 결과 간 차이는 평균 속도의 경우 37.9%, 평균 유출 속도의 경우 34.9%로 나타났다.

(3) 수평 개구부를 통과하는 유동 가시화 결과, 본 연구의 모든 실험 조건에서 양방향 유동 양식이 관찰되었다. 또한, 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 A_s/A_v (수평 개구부 면적에 대한 연기 유출 면적의 비)는 감소했으나, 열방출률이 A_s/A_v 에 미치는 영향은 미미함을 확인하였다. 본 연구에서는 유동 가시화 결과를 토대로 연기 유출 면적 예측 상관식(식 (5))을 제안하였다. 한편, 전산해석을 통해 수평 개구부를 통과하는 유동 속도 분포를 측정한 결과, 화원이 바닥의 중앙인 경우 수평 개구부의 중앙에서 주로 유출 유동, 수평 개구부 주변에서 주로 유입 유동이 발생하였고 화원이 바닥의 측면인 경우 전체적으로 낮은 속도로 수평 개구부를 통해 유출 및 유입 유동이 발생하는 것을 확인하였다.

(4) 수평 개구부를 통과하는 질량 유량의 경우, 모든 화원 위치 조건에서 수평 개구부 면적 및 열방출률이 증가함에 따라 질량 유량이 증가하였다. 한편, 화원이 바닥의 중앙인 경우가 측면인 경우에 비해 질량 유량이 많았으며, 수평 개구부 면적 및 열방출률에 대한 영향은 화원이 바닥의 측면인 경우가 중앙인 경우에 비해 미미한 것으로 나타났다. 질량 유량에 대한 전체적인 경향은 실험과 전산해석 결과가 유사하였고, 본 실험과 전산해석 결과 간 차이는 9.6%로 나타났다.

References

1. Framework Act On Firefighting Services, Chapter 5 (2015).
2. National Fire Agency, “Fire Statistical Yearbook” (2020).
3. NFSC 501, “National Fire Safety Code for Smoke Control System” (2017).
4. Q. Tan and Y. Jaluria, “Mass Flow through a Horizontal Vent in an Enclosure due to Pressure and Density Differences”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 8, pp. 1543–1553 (2001).
5. W. K. Chow and Y. Gao, “Buoyancy and Inertial Force on Oscillations of Thermal-induced Convective Flow across a Vent”, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 2, pp. 315–323 (2011).
6. X. Chen and S. Lu, “Fire-Induced Horizontal Vent Flow Pattern in a Ceiling Vented Enclosure: Theoretical Analysis and Experimental Verification”, In *The Proceedings of 11th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*, pp. 167–179 (2018).
7. B. Karlsson and J. Quintiere, “Enclosure Fire Dynamics”, CRC Press, (1999).
8. W. G. Brown, “Natural convection through rectangular openings in partitions –2: Horizontal partitions”, *International journal of heat and Mass transfer*, Vol. 5, No. 9, pp. 869–881 (1962).
9. A. Mercer and H. Thompson, “An Experimental Investigation of Some Further Aspects of the Buoyancy-driven Exchange Flow between Carbon Dioxide and Air following a Depressurization Accident in a Magnox Reactor”, *Journal of the British Nuclear Energy Society*, Vol. 14, No. 4, pp. 327–334 (1975).
10. M. Epstein, “Buoyancy-driven Exchange Flow through Small Openings in Horizontal Partitions”, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, No. 4a, pp. 885–893 (1988).

11. J. M. Li, J. Q. Zhang, Q. Li, B. S. Zhang, and Y. Jiang, “Combustion Phenomena of Pool Fire in a Ceiling Vent Compartment: the Vent right above the Fire Source”, *Procedia Engineering*, Vol. 211, pp. 358–364 (2018).
12. Q. Li, J. Q. Zhang, J. M. Li, B. S. Zhang and Y. Jiang, “Combustion Phenomena of Pool Fire in a Ceiling Vent Compartment: the Vent far away from the Fire Source”, *Procedia Engineering*, Vol. 211, pp. 388–394 (2018).
13. X. Chen, S. Lu and K. M. Liew, “An Investigation of Horizontal Opening Effect on Pool Fire Behavior in a Confined Compartment: A Study based on Global Equivalence Ratio”, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 34, No. 1, pp. 13–29 (2016).
14. X. Chen, “Investigation of Horizontal Vent Flow Behavior Coupling with Fire Behavior in a Ceiling Vented Enclosure”, Ph.D. Thesis, Hong Kong University (2015).
15. Q. Li, J. Zhang and S. Lu, “Influence of Roof Opening on Gas Temperature Rise in an Enclosure”, *Procedia Engineering*, Vol. 62, pp. 194–201 (2013).
16. M. Yuan, S. Lu, Y. Zhou, and J. Zhang, “A Simplified Mathematical Model for Predicting the Vertical Temperature Profiles in Enclosure Fires without Vertical Opening”, *Fire Technology*, Vol. 50, No. 4, pp. 929–943 (2014).
17. B. J. McCaffrey, J. G. Quintiere, and M. F. Harkleroad, “Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover using Fire Test Data Correlations”, *Fire Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 98–119 (1981).
18. J. Zhang, S. Lu, C. Li, R. K. K. Yuen and Q. Li, “Fire-induced Temperature Correlations in Ceiling Vented Compartments”, *Fire Technology*, Vol. 51, No. 2, 369–379 (2015).
19. J. Zhang, S. Lu, C. Li and R. K. K. Yuen, “Vent Location Impacts on

- Building Compartment Fire under Natural Roof Ventilation”, APCBEE Procedia, Vol. 9, pp. 360–364 (2014).
20. M. Y. Park, J. H. Yang and C. Y. Lee, “Numerical Simulation on Effects of Horizontal Natural Opening Area and Heat Release Rate on Temperature Distribution and Vent Flow in Small Compartment”, Fire Science and Engineering, Vol. 35, No. 3, pp. 23–33 (2021).
 21. P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, L. P. Richard, J. R. Hall and J. M. Watts, “The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, 3th edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts (2008).
 22. Investigation on Effects of Fire Curtain and Natural Ventilation on Smoke Behavior in Fire of Theater, Master’s Thesis, Pukyong National University (2019).
 23. E. H. Yii, “Modelling the Effects of Fuel Types and Ventilation Openings on Post-flashover Compartment Fires” (2002).
 24. H. M. Emmons, The flow of Gases thru Vents. Home Fire Project Technical Report, No. 75 (1987).
 25. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, “Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation”, NIST Special Publication 1018-3, Sixth Edition, pp. 70–74, 2017.
 26. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, “Fire Dynamics Simulator User’s Guide”, NIST Special Publication, 1019, Sixth Edition, pp. 37 (2013).
 27. D. Stroup and A. Lindeman, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications”, NUREG-1824, Supplement 1, United States Nuclear Regulatory Commission, EPRI 1011999, Washington, DC, 2013.
 28. S. A. Baek, J. H. Yang, C. S. Jeong, C. Y. Lee and D. Kim,

“Reduced-scale Model Experiment for Examination of Natural Vent and Fire Curtain Effects in Fire of Theater Stage”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 41–49 (2019).

29. J. H. Yang, S. A. Baek, C. Y. Lee and D. Kim, “Examination on Numerical Simulation Using Reduced-scale Model of Theater Fire: Influences of Fire Curtain and Stage Natural Vent”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 5, pp. 37–47 (2019).

