[Research Paper]

수평 자연 개구부 면적 및 열방출률이 소규모 구획실 내 온도 분포 및 개구부 유동에 미치는 영향에 대한 전산시뮬레이션

박민영 · 양지현* · 이치영**,*†

부경대학교 건축 · 소방공학부 대학원생, *(주)스탠더드시험연구소 연구원,

부경대학교 건축 · 소방공학부 교수, *부경대학교 소방공학과 교수

Numerical Simulation on Effects of Horizontal Natural Opening Area and Heat Release Rate on Temperature Distribution and Vent Flow in Small Compartment

Min Yeong Park · Ji Hyun Yang* · Chi Young Lee**,*†

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

*Researcher, STANDARD Testing & Engineering Inc.,

**Professor, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University,

***Professor, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University

(Received June 3, 2021; Revised June 16, 2021; Accepted June 17, 2021)

요 약

본 연구에서는 수평 자연 개구부 면적 및 열방출률 조건이 소규모 구획실 내 온도 분포와 개구부 유동에 미치는 영향을 파악하기 위해 fire dynamics simulator (FDS)를 이용하여 전산시뮬레이션을 수행하였다. 수평 자연 배연구가 설치된 실규모 공연장 무대부의 축소모형을 대상으로 하였고, 개구부 면적은 0.0196, 0.1024, 0.2025 m² (각각 바닥면적의 1, 5, 10%), 열방출률은 0.46, 1.35, 2.61 kW로 설정하였다. 개구부 면적이 감소하고 열방출률이 증가함에 따라 구획실 내부 온도는 증가하였고, 열방출률이 증가함에 따라 개구부 중앙 부근에서의 속도는 증가하였다. 개구부 면적이 0.0196 m²에서 0.1024 m²로 증가한 경우 속도는 증가하였으나 0.1024 m²에서 0.2025 m²로 증가한 경우에는 큰 변화가 없었다. 개구부 유동의 속도 및 온도 분포 분석 결과, 개구부 중앙에서는 유출, 개구부 주변에서는 유입이 일어나는 양방향 유동 양식이 관찰되었다. 개구부를 통한 질량 유량은 개구부 면적과 열방출률이 증가함에 따라 증가하였고, 기존의 질량 유량 예측 상관식은 본 전산시뮬레이션 결과를 낮게 예측하였다.

ABSTRACT

In this study, the numerical simulation to investigate the effects of horizontal natural opening areas and heat release rates on temperature distribution and vent flow in a small compartment was performed using a fire dynamics simulator. The reduced scale model of a stage in a real scale theater with horizontal natural opening was selected for this study. The horizontal opening areas were 0.0196, 0.1024, and 0.2025 m² (1, 5, and 10% of the floor area, respectively), and the heat release rates were 0.46, 1.35, and 2.61 kW. By decreasing the horizontal opening area and increasing the heat release rate, the temperature in the compartment increased. Additionally, by increasing the heat release rate, the average velocity near the center of the opening increased. For the increase in the horizontal opening area from 0.0196 to 0.1024 m², the velocity near the center of the opening increased. However, when the horizontal opening area increased from 0.1024 to 0.2025 m², the variation in velocity was not noticeable. Considering the analyses of temperature and velocity distributions of vent flow, the bidirectional flow pattern was observed, where the outflow and inflow occurred at the center and edge of the horizontal opening, respectively. The mass flow rate through the horizontal opening increased with the increase in the horizontal opening area and heat release rate. The previous correlation for mass flow rate under-predicted the present numerical simulation data.

Keywords : Numerical simulation, Horizontal natural opening, Vent flow, Small compartment fire, Fire dynamics simulator (FDS)

† Corresponding Author, TEL: +82-51-629-6493, FAX: +82-51-629-7078, E-Mail: cylee@pknu.ac.kr

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

1. 서 론

건물 내 화재 시 발생하는 연기는 인명 피해의 주요 원인이 된다. 지난 5년 간 전국에서 발생한 화재에 의한 사상자의 원인 중 연기·유독가스 흡입에 의한 원인은 전체의 약 29.1%⁽¹⁾에 해당한다. 또한, 화재 시 발생한 연기는 가시거리를 감소시켜 재실자의 피난 및 원활한 소화활동을 방해한다. 따라서 화재로 인한 인명 및 재산 피해를 최소화하기 위해서는 화재 시 발생하는 연기를 적절히 외부로 배출하는 것이 중요하다. 제연 설비는 자연 또는 기계적인 방법을 이용하여 연기의 이동 및 확산을 제한하기 위해 사용되는 설비로, 방연(smoke defense) 설비와 배연(smoke ventilation) 설비로 구분된다. 이 중 배연 방법은 건물의 상부에 배연구를 설치하여 연기를 배출하는 자연 배연(natural ventilation) 방법과 배출기를 사용하여 강제적으로 연기를 외부로 배출 및 환기하는 강제 배연(forced ventilation) 방법으로 구분된다⁽²⁾. 자연 배연 방법은 강제 배연 방법에 비해 전체 설비 설계가 단순화되고, 설치 비용이 적으며, 평상 시 환기에도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 자연 배연에 대한 예로, 일부 공연장에서는 공연장 무대부에서 화재 발생 시 무대부에서 발생한 열과 연기를 외부로 배출시키기 위해 공연장 천장에 수평 자연 개구부를 설치한다. 이를 통해 화재 시 공연장 내부 온도를 낮추고 시야 확보를 통해 화재로 인한 피해를 최소화할 수 있다. 수평 자연 개구부를 통한 유체 유동은 구획실 내 화재 현상과 밀접한 연관이 있고, 개구부를 통한 유체의 거동을 예측하는 것은 자연 배연 설비의 설계 및 성능 개선에 적용 가능하므로 이와 관련된 연구가 수행될 필요가 있다.

수평 자연 개구부를 통한 유체 유동과 관련된 연구가 일부 수행된 바 있다. 구획실 내 화재 시 열적 팽창으로 인한 수평 개구부 근처에서의 압력차로 인해 수평 개구부를 통한 유출이 발생한다. 한편, 수평 개구부 유동에 영향을 미

치는 인자로 부력의 영향이 있는데 수평 개구부 근처에서는 가벼운 유체 위에 무거운 유체가 위치하는 불안정한 성층화가 발생하게 되고 이는 수평 개구부를 통한 유입 유동의 발생 원인이 된다. 따라서 열적 팽창에 의한 압력차와 부력 영향에 의해 수평 개구부에서의 유동 거동이 결정된다. Tan과 Jaluria⁽³⁾는 부력 영향과 압력차 중 어떠한 영향이 수평 개구부 유동에 지대한 영향을 미치는지 검토하기 위해 두 영향의 비(ratio)를 무차원수로 나타낸 부력 수(Buoyancy number, B)를 도입하였으며, 해당 무차원수를 식(1)에 나타내었다.

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

여기서, g 는 중력가속도, D 는 수평 개구부의 지름, $\Delta\rho$ 와 ΔP 는 각각 수평 개구부를 기준으로 구획실 외부와 내부의 밀도차와 압력차를 의미한다. Chow와 Gao⁽⁴⁾는 부력 수를 기준으로 $B > 10$ 인 경우 부력에 의해 구동되는 유동(buoyancy-driven flow), $B < 0.1$ 인 경우 압력에 의해 구동되는 유동(pressure-driven flow)이 지배적으로 나타난다고 보고하였다. Chen⁽⁵⁾은 5개의 연료 팬 지름과 6개의 수평 개구부 면적을 이용하여 개구부의 유동 양식(flow pattern)을 구분하기 위한 소규모 화재 실험을 수행하였다. Figure 1에 수평 개구부에서 관찰되는 전형적인 유동 양식을 나타내었다. Chen⁽⁵⁾에 따르면 Figure 1(a)에 나타난 단방향 유동(unidirectional flow) 양식에서는 개구부에서 유체의 유동이 한 방향으로 지배적으로 나타난다. 즉, 지속적인 유출(적색 화살표) 또는 유입(청색 화살표)이 일어나는 유동 양식으로, 유출과 유입은 동시에 일어나지 않는다. Figure 1(b)의 양방향 유동(bidirectional flow) 양식에서는 개구부를 통해 유체의 유출 및 유입이 동시에 발생한다. 그리고 혼합 유동(compound flow) 양식에서는 단방향 유동과 양방향 유동이 불규칙적으로 번갈아 나

Figure 1. Schematic diagrams of typical flow patterns through horizontal natural opening in compartment.

Figure 2. Schematic diagram of numerical simulation (e.g., horizontal opening area = 0.2025 m², HRR = 2.61 kW).

타난다. 한편, Cooper⁽⁶⁾는 수평 개구부에서 양방향 및 단방향 유동을 구분하는 임계 압력 차이에 대해 보고하였다.

한편, Epstein⁽⁷⁾은 염수(seawater)와 담수(freshwater)가 수평 칸막이(partition)로 분리되어 있는 조건에서 수평 개구부를 통해 밀도 차이에 의해 발생하는 유체 유동을 연구하였다. 해당 유체 유동에 대해 개구부의 두께(L)와 개구부의 직경(D)의 비(L/D)를 사용하여 4개의 유동 영역으로 구분했으며, 개구부에서의 교환 유량(exchange flow rate)을 예측하는 상관식을 제안하였다. Heiselberg와 Li⁽⁸⁾는 추적 가스 시스템(tracer gas system)을 이용하여 실규모 구획실에서 L/D 에 따른 수평 개구부를 통한 교환 유동을 연구하였다. 해당 연구 결과를 토대로 Epstein⁽⁷⁾의 상관식을 검토하였고, 수정된 상관식을 제안하였다. Zhang 등⁽⁹⁾은 수평 개구부의 설치 위치가 구획실 화재에 미치는 영향에 대해 전산시뮬레이션(numerical simulation)을 이용하여 분석하였다. 해석 결과, 연기층 온도는 수평 개구부가 천장의 모서리에 설치된 경우에 비해 중앙에 설치된 경우가 더 낮게 나타났으며, 연기층의 하강은 개구부의 위치에 따라 큰 차이가 없음을 확인하였다. 수평 개구부 면적 및 화원의 열방출률 조건은 구획실 내 온도 분포 및 개구부를 통한 유체 거동과 같은 구획실 내 화재 현상에 지대한 영향을 미치는 인자(factor)이고, 개구부를 통한 유량은 배연 설비의 성능과 밀접한 연관이 있다. 기존에 수평 개구부 영향에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔으나 수평 개구부의 면적 및 화원의 열방출률의 변화에 따른 구획실 내 온도 분포 및 개구부를 통한 유체의 거동에 대한 체계적인 연구는 제한적으로 수행된 것으로 판단된다.

본 연구에서는 fire dynamics simulator (FDS)를 이용하여 수평 개구부 면적 및 열방출률이 소규모 구획실 화재에 미치는 영향에 대해 전산시뮬레이션을 수행하였다. 수평 개구부가 존재하는 실규모 공연장 무대부의 축소모형을 대상으로 하였고, 구획실 내 온도 분포, 개구부를 통한 유동 속도 및 질량 유량을 측정 및 분석하였다. 또한, 개구부를 통한 질량 유량에 대해 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 연구⁽⁷⁾에서 제안한 상관식에 의한 예측 결과를 비교 및 검토하였다.

2. 전산시뮬레이션 방법 및 조건

2.1 전산시뮬레이션 방법

본 연구에서는 수평 개구부가 설치된 경우에서 개구부의 면적 및 열방출률 조건에 따라 구획실 내부 온도 분포, 수평 개구부를 통과하는 유체의 속도, 유출 및 유입 질량 유량에 대해 전산시뮬레이션을 이용하여 검토하였다. 한편, Baek⁽¹⁰⁾은 수평 및 수직 개구부가 설치된 소규모 구획실에서 개구부 및 화원 조건이 구획실 내 화재 상황에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다. 해당 소규모 구획실은 실규모 공연장의 무대부를 1/14 비율로 축소하여 제작되었으며, 본 연구에서는 기존 연구⁽¹⁰⁾의 소규모 구획실에서 수직 개구부는 폐쇄되고 수평 개구부만이 존재하는 구획실을 대상으로 연구를 수행하였다. 이는 공연장 무대부 화재 시 무대부와 객석부 사이에 설치된 방화막(fire curtain)⁽¹¹⁾이 작동된 상황과 유사하다.

Figure 2에 본 연구에서 구축된 전산시뮬레이션 형상에 대해 나타내었다. 구획실의 크기는 2.04 m (폭) × 1.00 m (깊이) × 1.10 m (높이)이고, 수평 자연 개구부의 위치는 구획실의 천장 중앙이다. 수평 개구부의 면적은 바닥면적의 1, 5, 10%로 설정하였고, 각각 0.0196, 0.1024, 0.2025 m²이다.

본 연구에서는 구획실 내 온도 분포 측정을 위해 기존의 축소모형 실험 연구⁽¹⁰⁾와 유사하게 총 5개의 열전대 트리(thermocouple tree)를 모사하여 설정하였다. Figure 3에 전산시뮬레이션에서 설정한 열전대 트리의 위치에 대한 개략도를 나타내었다. 열전대 트리의 개수는 총 5개이며 TC1–TC4는 구획실 바닥으로부터 200 mm 마다 각각 5개의 열전대를 설치하였고 TC5의 경우 구획실 중앙에서 바닥으로부터 800, 900, 1000 mm 위치에 각각 1개의 열전대를 설치하였다. TC5는 화원으로부터 수직 상단에 설치된 열전대 트리이다. 따라서 구획실 내 설정된 온도 측정 위치는 총 23지점이다.

본 연구에서는 기존의 축소모형 실험 연구⁽¹⁰⁾와 본 전산시뮬레이션의 격자 크기를 고려하여 화원 및 열방출률 조건을 설정하였다. 화원은 구획실 바닥의 중앙에 위치하고

Table 1. Summary of Numerical Simulation Conditions

Cases	Horizontal opening area (m ²)	HRR (kW)	Plume resolution index
HO_01&HRR_0.46	0.0196 m ² (1% of floor area)	0.46	4.4
HO_01&HRR_1.35		1.35	6.8
HO_01&HRR_2.61		2.61	8.9
HO_05&HRR_1.35	0.1024 m ² (5% of floor area)	1.35	6.8
HO_10&HRR_1.35	0.2025 m ² (10% of floor area)	1.35	6.8

Figure 5. Effect of heat release rate on temperature distribution under horizontal opening area = 0.0196 m² (1% of floor area).

resolution index⁽¹³⁾와 기존 연구 결과⁽¹⁶⁾를 토대로 본 연구에서는 정육면체 격자 한 변의 길이를 0.01 m로 설정하였고, 이때 총 격자 개수는 4,076,800개이다. 전산시뮬레이션 시간은 600 s로 설정하였고, message passing interface (MPI) 병렬 계산을 통해 전산시뮬레이션을 구동하였다.

2.2 전산시뮬레이션 조건

본 연구에서는 총 5가지 조건에 대해 전산시뮬레이션을 수행하였고, 해당 조건을 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 수평 개구부는 horizontal opening (HO), 열방출률은 heat release rate (HRR)으로 나타내었다. 동일한 열방출률(1.35 kW)일 때, 수평 개구부 면적(바닥면적의 1, 5, 10%)의 영향과 동일한 수평 개구부 면적(0.0196 m², 바닥면적의 1%)일 때, 화원의 열방출률(0.46, 1.35, 2.61 kW)의 영향을 확인하였다. HO와 HRR 뒤에 숫자는 수평 개구부의 면적(구획실 바닥면적에 대한 비율)과 열방출률을 의미한다. 예를 들면, 수평 개구부 면적이 구획실 바닥면적의 1%이고 열방출률이 0.46 kW인 경우는 HO_01&HRR_0.46로 표현하였다.

3. 전산시뮬레이션 결과 및 분석

3.1 온도 분포

Figure 5에 동일한 수평 개구부 면적 조건(0.0196 m², 바

닥면적의 1%)에 대해 열방출률에 따른 열전대 위치별 온도 측정 결과를 나타내었다. Figure 5(a)에는 화원 근처에 있는 TC1–TC4에서의 온도 측정 결과를, Figure 5(b)에는 화원 수직 상단에 있는 TC5에서의 온도 측정 결과를 나타내었다. 500–600 s 구간에서의 평균값을 이용하였고, 오차막대(error bar)는 표준편차를 의미한다. Figure 5(a)에 나타난 바와 같이, 화원 근처에 위치한 TC1–TC4에서 측정한 온도의 경우 모든 열방출률 조건에서 유사한 경향이 나타났다. 즉, 바닥으로부터 높이가 높아짐에 따라 온도가 증가하는 경향이 관찰되었고, 이는 열원으로부터 발생한 고온의 기체층이 상부에 축적되기 때문이다. 한편, 상부에 위치한 열전대의 경우(예를 들면, 열방출률이 2.61 kW인 조건에서 측정 높이가 1000 mm인 경우) TC2와 TC3에서 측정한 온도가 TC1과 TC4에서 측정한 온도보다 약간 높게 측정되었는데 이는 TC2와 TC3의 위치가 TC1과 TC4의 위치에 비해 화원 중심으로부터 가깝기 때문으로 판단된다. 반면, 화원의 수직 상단에 설치된 TC5에서의 온도 분포의 경우(Figure 5(b)), TC1–TC4의 온도 분포와는 달리 측정 높이가 높아짐에 따라 온도가 감소하는 경향이 나타났다. 이는 화원으로부터 거리가 멀어지고, 비교적 온도가 낮은 주변의 공기가 화재 플룸(fire plume)으로 혼입(entrainment)되기 때문으로 판단된다. 한편, TC1–TC5 모두에서 열방출률이 증가함에 따라 온도가 증가하는 경향이 나타났다.

Figure 6. Effect of horizontal opening area on temperature distribution under HRR = 1.35 kW.

Figure 6에 동일한 열방출률 조건(1.35 kW)에서 수평 개구부 면적에 따른 열전대 위치별 온도 측정 결과를 나타내었다. Figures 6(a)와 6(b)는 각각 화원 근처에 설치된 TC1 - TC4와 화원의 수직 상단에 설치된 TC5에서의 온도 측정 결과를 나타낸다. 측정 위치별 온도는 바닥으로부터 거리가 멀어짐에 따라 각각 온도가 증가 및 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 Figures 5(a) 및 5(b)에서의 온도 분포 경향과 동일하다. 또한, 각 수평 개구부 면적 조건에서 높이가 높은 위치에서의 온도 측정 결과, Figure 5(a)에서와 유사하게 TC2와 TC3에서 측정한 온도가 TC1과 TC4에서 측정한 온도보다 약간 높은 것으로 관찰되었다. 한편, Figure 6(a)에서 나타낸 바와 같이, 수평 개구부의 면적이 감소함에 따라 온도가 증가하는 경향이 관찰되었고, 높이에 따른 온도 변화가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 수평 개구부 면적이 감소함에 따라 수평 개구부를 통한 열손실이 감소하기 때문으로 판단된다. Figure 6(b)에 나타낸 TC5에서 측정한 온도 분포에서도 수평 개구부 면적이 감소함에 따라 온도가 증가하는 경향이 관찰되었다. 한편, TC5에서 모든 수평 개구부 면적 조건에서 열전대 높이에 따른 온도 감소율이 거의 동일한 것으로 나타났다.

3.2 수평 개구부를 통한 유동 속도

본 연구에서는 수평 개구부를 통한 유동 속도를 검토하기 위해 수평 개구부에 수직인 속도 성분(즉, z축 속도)에 대해 분석하였다. 수평 개구부를 기준으로 속도가 양(+)인 경우 구획실 내부에서 외부로 유출되는 유동의 속도, 속도가 음(-)인 경우 구획실 외부에서 내부로 유입되는 유동의 속도이다. Figure 7에 수평 개구부의 면적이 동일한 경우 (0.0196 m², 바닥면적의 1%) 500 - 600 s 구간에서 열방출률에 따른 수평 개구부를 통한 유동 속도 측정 결과를 나타내었다. Figures 7(a), 7(b), 7(c)는 열방출률이 각각 0.46,

1.35, 2.61 kW인 조건에서 수평 개구부 중앙(V_{01_1})과 중앙으로부터 0.04 m 떨어진 위치(V_{01_2})에서의 속도 측정 결과이다. Figure 7(d)에는 해당 시간 구간에서의 평균 속도를 열방출률에 따라 나타내었다. Figures 7(a) - 7(c)에 나타낸 바와 같이, 각 열방출률 조건에서 모든 측정 위치에서 속도는 양과 음의 값이 나타났고 큰 변동(fluctuation)이 관찰되었다. 하지만 주로 속도가 양의 값을 나타내는 것으로 보아 해당 위치에서는 유출 유동 경향이 지배적인 것으로 판단된다. 한편, Figure 7(d)에 나타낸 바와 같이, 두 측정 지점에서 모두 열방출률이 증가함에 따라 수평 개구부를 통한 평균 속도가 증가하고 표준편차(변동)가 증가하는 것으로 관찰되었다.

Figure 8에 동일한 열방출률 조건(1.35 kW)에서 수평 개구부 면적에 따른 유동 속도를 나타내었다. Figure 8(a)의 수평 개구부 면적이 0.0196 m²인 경우, V_{01_1}과 V_{01_2}가 양과 음의 값으로 변동하고 있으나 대부분의 값은 양인 것으로 나타났다. 수평 개구부의 면적이 증가한 Figure 8(b)의 경우, 모든 지점에서의 속도가 대부분 양의 값을 나타내고 있으나 V_{05_1}과 V_{05_2}에 비해 V_{05_3}이 음의 값을 나타내는 빈도가 증가한 것처럼 관찰되었다. 수평 개구부의 면적이 가장 큰 0.2025 m²의 경우, Figure 8(c)에 나타낸 바와 같이, 속도 측정 위치가 개구부 중앙으로부터 멀어짐에 따라(즉, V_{10_1} → V_{10_4}) 전체적인 속도 분포가 양에서 음으로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 즉, V_{10_1}은 대부분 양의 값을 나타내고 있으나 V_{10_4}는 음의 값을 나타내고 있다. Figure 8(d)에는 해당 시간 구간에서의 평균 속도를 개구부 면적 변화에 따라 나타내었다. 개구부 면적이 0.0196 m²에서 0.1024 m²로 증가하였을 때 개구부 중앙 근처에서의 속도(예를 들면, V₁과 V₂)가 현저하게 증가하였으나 0.1024 m²에서 0.2025 m²로 증가하였을 때에는 큰 변화가 없었다. 또한, 개구부 중앙에서 주변으로 이동함에 따라 속도가 작아지고 양에서 음

Figure 7. Effect of heat release rate on velocity through horizontal opening under horizontal opening area = 0.0196 m².

로 변화하는 경향이 관찰되었다. Figure 8을 토대로 볼 때, 수평 개구부 중앙에서는 주로 속도가 양의 값을 나타내고, 이는 구획실로부터 대부분 유출 유동이 일어나고 있음을 의미한다. 반면, 수평 개구부 중앙으로부터 멀어짐에 따라 (즉, 수평 개구부 주변) 속도가 음의 값을 나타내고, 이는 외부에서 구획실 내부로의 유입 유동이 일어나는 것을 의미한다.

Figure 9에 Figure 8과 동일한 수평 개구부 면적 및 열방출률 조건에서 시간에 따른 수평 개구부를 통한 유동의 온도 분포를 가시화하여 나타내었다. 모든 조건에서 수평 개구부 중앙에서는 비교적 온도가 높고, 수평 개구부 주변에서는 온도가 낮은 것으로 관찰되었다. Figures 8과 9를 토대로 볼 때, 본 전산시뮬레이션 조건에서는 수평 개구부 중앙에서는 주로 높은 온도의 유동이 유출되고, 개구부 주변에서는 주로 낮은 온도의 외부 공기가 유입되는 양방향 유동 양식이 발생하는 것으로 판단된다.

3.3 수평 개구부를 통한 질량 유량

Figure 10에 개구부 유동의 유출 및 유입 질량 유량 측정 결과를 나타내었다. 수평 개구부를 통과하는 유동의 질량 유량이 정상 상태(steady-state)에 도달하는 구간으로 판단되는 500–600 s의 시간 구간에 대한 평균값을 이용하였고, 오차막대(error bar)는 표준편차를 의미한다. Figure 10(a)에 나타낸 바와 같이, 수평 개구부의 면적이 0.0196 m²인 경우, 열방출률이 증가함에 따라 유출 및 유입 질량 유량은 증가하였고, 0.46 kW인 조건에 비해 2.61 kW인 조건에서의 유출 및 유입 질량 유량이 약 1.6배 큰 것으로 나타났다. Figure 10(b)에 열방출률이 1.35 kW인 조건에서 수평 개구부의 면적에 따른 개구부 유동의 유출 및 유입 질량 유량 측정 결과를 나타내었다. 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 유출 및 유입 질량 유량은 증가하였고 오차막대가 커지는 것으로 볼 때 변동이 증가하는 것으로 판단된다. 한편, Figure 10을 토대로 볼 때 수평 개구부를 통한 유출 및 유입 질량의 차이는 미미함을 확인할 수 있었다.

한편, 본 연구에서 측정한 수평 개구부를 통한 유출 및

(a) Horizontal opening area = 0.0196 m² (1% of floor area) (b) Horizontal opening area = 0.1024 m² (5% of floor area) (c) Horizontal opening area = 0.2025 m² (10% of floor area)

(d) Average velocity

Figure 8. Effect of horizontal opening area on velocity through horizontal opening under the HRR = 1.35 kW. **Figure 9.** Visualization of flow temperature distribution through horizontal opening under HRR = 1.35 kW (Top-view).

(a) Heat release rate effect (Horizontal opening area = 0.0196 m²) (b) Horizontal opening area effect (HRR = 1.35 kW)

Figure 10. Mass flow rates of outflow and inflow through horizontal opening.

(a) Heat release rate effect (Horizontal opening area = 0.0196 m²) (b) Horizontal opening area effect (HRR = 1.35 kW)

Figure 11. Comparison of mass flow rate between present numerical simulation and previous correlation.

유입 질량 유량을 기존 상관식⁽⁷⁾의 예측값과 비교 및 검토하였다. Epstein⁽⁷⁾은 구획실 천장에 수평 개구부가 설치되고 유동 양식이 양방향 유동일 경우, 수평 개구부를 통해 부력(밀도차)에 의한 교환 유량을 예측하는 상관식을 제안하였으며, 해당 상관식을 식(2)–(6)에 나타내었다.

$$\frac{\dot{V}}{\sqrt{gD^5\Delta\rho/\bar{\rho}}} = \frac{0.055[1+400A^3]^{1/6}}{[1+0.00527(1+400A^3)^{1/2}(A^6+117A^2)^{3/4}]^{1/3}} \quad (2)$$

$$\Delta\rho = \rho_u - \rho_l \quad (3)$$

$$\bar{\rho} = (\rho_u + \rho_l)/2 \quad (4)$$

$$A = L/D \quad (5)$$

$$D = 1.128S \quad (6)$$

여기서 $\dot{V}$ 은 수평 개구부를 통해 부력에 의해 구동(buoyancy-driven)되는 교환 유량, ρ_u 은 구획실 외부 유체의 밀도, ρ_l 은 구획실 내부 유체의 밀도, g 는 중력가속도, L 은 개구부의 두께(높이), S 는 정사각 모양의 수평 개구부 한 변의 길이, D 는 개구부 면적을 원으로 환산했을 때의 지름을 의미한다. 한편, 기존 상관식⁽⁷⁾에서 계산된 교환 유량은 체적 유량 이므로 온도(T)와 밀도(ρ) 간 관계인 식(7)을 이용하여 밀도를 구한 후 체적 유량에 곱하여 질량 유량을 도출하였다.

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

Figure 11에 수평 개구부를 통한 질량 유량에 대해 전산시뮬레이션 결과와 기존 상관식⁽⁷⁾의 예측값을 비교하여 나타내었다. Figure 11(a)에 나타난 수평 개구부 면적이 0.0196 m²인 조건에서, 열방출률이 증가함에 따라 질량 유량이 증가하는 경향이 본 전산시뮬레이션과 기존 상관식⁽⁷⁾ 모두에서

동일하게 나타났다. Figure 11(b)에 나타난 열방출률이 1.35 kW로 일정한 조건에서도 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 질량 유량이 증가하는 경향이 두 경우 모두에서 관찰되었다. 하지만, 기존 상관식⁽⁷⁾은 본 전산시뮬레이션 결과를 낮게 예측하고 있는 것으로 나타났다. 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 상관식⁽⁷⁾ 결과 간 차이가 나타난 이유 중 하나는 기존 상관식⁽⁷⁾의 경우 염수와 담수를 이용하여 밀도차에 의해 발생하는 수평 개구부를 통한 교환 질량 유량 실험 결과를 토대로 개발된 상관식인 반면, 본 전산시뮬레이션은 유체의 밀도차 뿐 아니라 구획실 내 화원에 의한 열적 팽창에 의한 압력차도 개구부 유동에 영향을 미치는 조건이기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수평 자연 배연구가 설치된 실규모 공연장 무대부의 축소모형을 대상으로 수평 개구부 면적 및 열방출률이 구획실 내 온도 분포 및 개구부 유동에 미치는 영향에 대한 전산시뮬레이션을 수행하였다. 수평 개구부 면적은 0.0196, 0.1024, 0.2025 m² (각각 바닥면적의 1, 5, 10%), 열방출률은 0.46, 1.35, 2.61 kW로 설정하여 구획실 내 온도 분포, 수평 개구부를 통한 유동 속도 및 질량 유량을 측정하고 분석하였다. 주요 결과를 아래에 정리하였다.

1) 구획실 내 온도 측정 결과, 동일한 수평 개구부 면적 조건에 대해 열방출률이 증가함에 따라 온도가 증가하였다. 동일한 열방출률 조건에서 수평 개구부 면적이 증가함에 따라 온도가 감소하는 경향이 관찰되었다. 한편, 화원 근처에 있는 TC1-TC4에서의 온도는 바닥으로부터 높이가 높아짐에 따라 온도가 증가한 반면, 화원의 수직 상단에 설치된 TC5에서의 온도의 경우 높이가 높아짐에 따라 온도가 감소하였다.

2) 수평 개구부를 통한 유동 속도 측정 결과, 열방출률이 증가함에 따라 개구부 중앙 부근에서의 속도는 증가하였다. 반면, 개구부 면적이 0.0196 m²에서 0.1024 m²로 증가하였을 때 속도가 현저히 증가하였으나 0.1024 m²에서 0.2025 m²로 증가하였을 때에는 큰 변화가 없었다.

3) 개구부 중앙에서 주변으로 이동함에 따라 속도가 작아지고 양에서 음으로 변화하는 경향이 관찰되었다. 또한, 수평 개구부를 통한 유동의 온도 분포 측정 결과, 수평 개구부 중앙에서는 비교적 온도가 높고, 수평 개구부 주변에서는 온도가 낮은 것으로 관찰되었다. 이러한 결과를 토대로 볼 때, 화원에 의한 뜨거운 유동이 개구부 중앙을 통해 외부로 유출되고 개구부 주변을 통해 외부의 공기가 유입되는 양방향 유동 양식이 나타나는 것으로 판단된다.

4) 수평 개구부를 통한 질량 유량 측정 결과, 수평 개구부 면적과 열방출률이 증가함에 따라 유출 및 유입 질량 유량은 증가하였다. 본 전산시뮬레이션 결과를 기존 상관식⁽⁷⁾의 예측값과 비교한 결과, 전체적인 경향은 유사하였으

나 기존 상관식⁽⁷⁾은 본 전산시뮬레이션 결과를 낮게 예측하였다. 이는 기존 상관식⁽⁷⁾이 열적 팽창의 영향은 고려하지 않고 밀도차의 영향만을 고려하여 개발되었기 때문으로 판단된다.

추후 더욱 다양한 조건에서의 축소모형 실험 및 전산시뮬레이션, 실규모 전산시뮬레이션 등을 통해 자연 개구부 면적 및 열방출률과 구획실 내 온도 분포 및 개구부 유동 거동 간 상관관계를 이해하고 이에 대한 정량화 및 예측을 위한 연구가 수행될 필요가 있다. 한편, 공연장 무대부에서는 공연의 종류에 따라 매우 다양한 가연물의 조건(종류 및 위치 등)이 존재한다. 따라서 추후 세부적인 공연장 무대부 화재 사례 조사를 바탕으로 다양한 화원의 위치 및 열방출률 조건에서의 화재시뮬레이션이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 해당 연구 결과는 공연장 내 자연 배연 설비의 설계, 관련 기준 개선 및 보완에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

References

1. National Fire Data System, "Fire Trend Analysis (2016.01.01.~2020.12.31.)", <https://nfds.go.kr/stat/trend.do>.
2. NFSC 501, "National Fire Safety Code for Smoke Control System" (2017).
3. 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). [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00198-8](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00198-8).
4. 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). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.023>.
5. X. Chen, "Investigation of Horizontal Vent Flow Behavior Coupling with Fire Behavior in a Ceiling Vented Enclosure", Ph.D. Thesis, Hong Kong University (2015).
6. L. Y. Cooper, "Combined Buoyancy and Pressure-driven Flow through a Shallow, Horizontal, Circular Vent", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, No. 3, pp. 659-667 (1995). <https://doi.org/10.1115/1.2822627>.
7. M. Epstein, "Buoyancy-driven Exchange Flow through Small Openings in Horizontal Partitions", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, No. 4a, pp. 885-893 (1988). <https://doi.org/10.1115/1.3250589>.

8. P. Heiselberg and Z. Li, "Buoyancy Driven Natural Ventilation through Horizontal Openings", *International Journal of Ventilation*, Vol. 8, No. 3, pp. 219-231 (2009). <https://doi.org/10.1080/14733315.2009.11683847>.
9. 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). <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.01.063>.
10. S. A. Baek, "An Experimental Investigation on Effects of Fire Source and Opening Conditions on Temperature Distribution and Flow through Opening in Enclosure", Master's Thesis, Pukyong National University (2020).
11. Public Performance Act, § 12(7) (2015).
12. B. Karlsson and J. Quintiere, "Enclosure Fire Dynamics", CRC Press (1999).
13. 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).
14. 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).
15. 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).
16. 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). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2019.33.5.037>.
17. 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). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2019.33.4.041>.