

[Research Paper]

## FDS를 이용한 실규모 공연장 무대 내 화재 시 연기 거동 분석: 방화막 및 자연배출구 면적의 영향

김재한 · 이치영<sup>†</sup> · 정이규<sup>\*\*</sup> · 김동균<sup>\*\*\*</sup>

부경대학교 소방공학과 대학원생, <sup>\*</sup>부경대학교 소방공학과 교수, <sup>\*\*</sup>한국해양수산연수원 교수,  
<sup>\*\*\*</sup>한국산업기술시험원 수석연구원

## Analysis of Smoke Behavior in Fire within Real-scale Theater Using FDS: Influences of Fire Curtain and Natural Smoke Vent Area

Jae Han Kim · Chi Young Lee<sup>†</sup> · Lee Gyu Jeong<sup>\*\*</sup> · Duncan Kim<sup>\*\*\*</sup>

Graduate Student, Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

<sup>\*</sup>Professor, Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

<sup>\*\*</sup>Professor, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology,

<sup>\*\*\*</sup>Chief Researcher, Korea Testing Laboratory

(Received October 1, 2018; Revised November 20, 2018; Accepted December 3, 2018)

### 요 약

본 연구에서는 방화막 및 자연배출구 면적이 공연장 무대 화재 시 연기 거동에 미치는 영향에 대해 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 이용하여 전산시뮬레이션(Numerical simulation)을 수행하였다. 공연장의 무대 크기는 폭 31 m, 깊이 34 m, 높이 32 m로 설정하였고, 자연배출구 면적은 무대 바닥면적의 약 10%, 약 8%, 약 5%, 약 1%로 하였다. 방화막은 프로시니엄(Proscenium) 벽과 0.5 m 이격하여 설치하였다. 방화막과 자연배출구 면적은 객석으로의 연기유출, 자연배출구 및 프로시니엄 개구부를 통한 유입 및 유출 질량 유량에 지대한 영향을 미치는 것으로 관찰되었고, 동일한 자연배출구 면적 조건에서 방화막이 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 무대 내 압력이 더 낮은 것으로 나타났다.

### ABSTRACT

This study investigated numerically the influences of fire curtain and natural smoke vent area on smoke movement in the stage fire of a theater using FDS (Fire Dynamics Simulator). The dimension of the theater stage was 31 m in width, 34 m in depth, and 32 m in height. The area ratios between the natural smoke vent and stage were approximately 10%, 8%, 5%, and 1%. The gap distance between the fire curtain and proscenium wall was 0.5 m. The fire curtain and natural smoke vent area were observed to affect significantly the behavior of smoke movement to the auditorium and the mass flow rates of inflow and outflow through the natural smoke vent and proscenium opening. In addition, under the same natural smoke vent area, the pressure in the stage with a fire curtain was lower than that without a fire curtain.

**Keywords** : Fire curtain, Natural smoke vent area, Smoke movement, Theater fire, Fire dynamics simulator (FDS)

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [cylee@pknu.ac.kr](mailto:cylee@pknu.ac.kr), TEL: +82-51-629-6493, FAX: +82-51-629-7078

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

## 1. 서 론

현재 우리나라의 많은 공연장은 프로시니엄(Proscenium) 구조로 되어 있는데, 이는 프로시니엄 벽을 통해 무대와 객석이 분리되고 관객들은 프로시니엄 개구부를 통해 공연을 관람하는 형태를 의미한다. 이러한 프로시니엄 공연장의 경우 무대에서 화재가 발생했을 때 대응을 위하여 다양한 화재안전설비가 설치되며 이 중 대표적인 것이 방화막(Fire curtain)과 연기배출구이다.

방화막은 프로시니엄 개구부 상부에 프로시니엄 벽을 따라 설치되며 평상시에는 상승되어 있다가 화재 발생 시 하강하여 프로시니엄 개구부를 차단, 화염이나 연기가 객석으로 확산하는 것을 저지하여 객석에 있는 관객들이 안전하게 대피할 수 있도록 하는 설비를 말한다. 화재 시 방화막의 유용성을 확인할 수 있는 사례 중 하나는 2007년 예술의전당 오페라극장에서 화재 사례이며, 이때 방화막의 작동으로 인명피해를 최소화할 수 있었다. 이처럼 방화막이 화재 시 중요한 역할을 할 수 있음에도 불구하고 공연장안전지원센터의 무대시설 분석결과 보고서<sup>(1)</sup>에 따르면 최근 5년간 안전진단을 수행한 329개 공연장 중 방화막을 설치한 곳은 78개로 방화막 설치 비율이 24% 정도 밖에 되지 않았다. 이렇듯 방화막 설치 비율이 낮은 이유는 기존 공연장에 방화막 설치 시 현실적인 문제, 방화막 설치에 따른 무대시설 사용의 제약, 경제적인 부담, 방화막 성능에 대한 의심 등으로 생각된다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 경제적이고 성능이 우수한 방화막 시스템이 개발될 필요가 있고, 이에 대한 활발한 연구가 수행되어야 한다.

한편, 공연장에는 무대 화재 시 발생하는 연기를 외부로 배출하기 위하여 연기배출구가 설치된다. 연기배출구의 형태는 일반적으로 강제배출구 및 자연배출구 형태로 나뉘며, 현재 국내 공연장 대부분에서는 강제배출구 형태를 설치하여 운용하고 있다. 그러나 자연배출구는 강제배출구에 비해 전체 시스템을 단순하고 경제적으로 구성할 수 있다는 장점 있을 수 있음에도 불구하고 현재까지는 실제 공연장에 채용되는 경우가 드물다. 자연배출구를 보다 다양한 공연장에 적용하기 위해서는 이에 대한 다양한 연구가 필요함에도 불구하고 이와 관련된 연구는 거의 찾아볼 수 없는 실정이다.

공연장 내 방화막, 강제배출구 및 자연배출구에 대한 연구<sup>(2-5)</sup>가 일부 수행된 바 있다. Kwon<sup>(2)</sup>은 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 이용하여 공연장 화재 시 방화막, 강제배출구, 스프링클러설비 등의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 해당 연구를 통해 방화막과 강제배출구가 동시에 설치되는 것이 무대 화재 시 객석으로의 연기 유출을 억제하는데 효과적임을 보고하였으나, 세부적인 연구가 이루어지지 않았다. Ye<sup>(3)</sup>는 공연장 화재 시 무대에서 발생한 연기의 배연성능에 영향을 미치는 다양한 설계 인자에 대한 연구를 수행한 바 있다. 공연장 상부에 설치된 강제배출구 및 자연배출구

가 화재 시 연기 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 FDS를 이용한 전산시뮬레이션과 축소모형 실험을 수행하였다. 하지만 해당 연구에서는 방화막에 대한 연구는 수행되지 않았다. 본 연구 그룹에서도 FDS를 이용하여 공연장 내 방화막, 강제배출구 및 자연배출구에 대한 연구를 수행한 바 있다. Kim et al.<sup>(4)</sup>은 방화막과 강제배출구가 공연장 무대 내 화재 시 객석으로의 연기 유출에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 Kim et al.<sup>(5)</sup>은 자연배출구가 설치된 공연장 화재에 대해 방화막의 영향을 파악하였다. 이를 위해 Kim et al.<sup>(5)</sup>은 기존 Ye<sup>(3)</sup>의 공연장 화재 축소모형 실험을 대상으로 전산시뮬레이션(Numerical simulation)을 수행하였고, 전산시뮬레이션 결과의 정확도를 파악하기 위해 기존 Ye<sup>(3)</sup>의 축소모형 실험결과와 비교하였다. 이후 축소모형 전산시뮬레이션에 방화막을 설정하여 계산을 수행하였으며, 해당 결과와 상사법칙(Law of similarity)을 적용하여 실규모 공연장 화재에서 방화막의 영향을 예측하였다. 그러나 해당 연구<sup>(5)</sup>에서는 축소모형에 대한 전산시뮬레이션을 수행했을 뿐, 실규모 공연장 화재를 대상으로는 계산을 수행하지 않았고, 자연배출구를 중형비가 크고 무대 상부의 편심된 위치에 설정하였다. 자연배출구의 위치 및 형상에 따라 연기 배출 성능이 영향 받을 수 있으므로 이에 대한 다양한 연구가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 방화막과 자연배출구 면적이 공연장 무대 화재 시 발생하는 연기 거동에 미치는 영향을 파악하였다. 실규모 공연장을 대상으로, 무대 상부 중앙에 정사각형 형태로 설정한 다양한 자연배출구 면적 및 방화막 설치 조건에 대해 FDS를 활용하여 전산시뮬레이션을 수행하였다. 연기 거동을 가시화하고, 객석으로의 연기 유출 시점을 측정하였다. 또한 자연배출구 및 프로시니엄 개구부를 통한 유입 및 유출 질량 유량을 측정하였고, 무대 내부 및 외부에서의 압력 분포를 측정하였다. 이를 통해 자연배출구의 면적과 방화막의 설치 여부가 무대에서 발생한 연기 거동에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 전산시뮬레이션 방법 및 조건

본 연구에서는 Ye<sup>(3)</sup>와 본 연구 그룹의 기존 연구<sup>(4)</sup>를 토대로 전산시뮬레이션 방법 및 조건을 정하였다. 전산시뮬레이션 형상의 경우, 방화막과 자연배출구 면적이 연기 거동에 미치는 영향을 비교 및 검토하기 위하여 실규모 공연장 무대부를 단순화하였으며, 본 연구 그룹의 기존 연구<sup>(4)</sup>와 유사하게 설정하였다. 다만, 무대 상부에 설치된 배출구의 종류는 다르게 설정하였는데 본 연구에서는 자연배출구를 적용한 반면, 기존 연구<sup>(4)</sup>에서는 강제배출구를 적용하였다.

Figure 1은 본 연구에서 수행한 전산시뮬레이션의 형상 중 한 예(자연배출구의 면적이 공연장 무대 바닥면적의 약 10%로 설정된 경우)이다. 전산시뮬레이션 공간의 전체 크기는 31 m (폭) × 40 m (깊이) × 40 m (높이)이며, 공연장

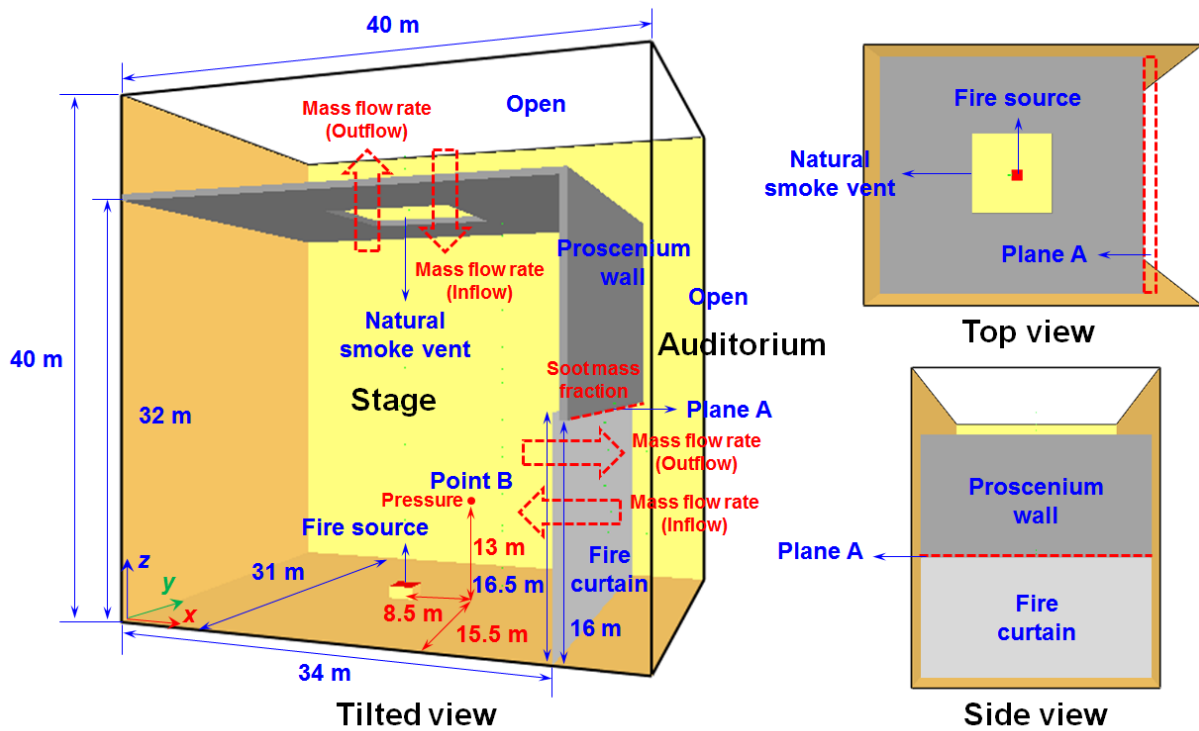


Figure 1. Simulation geometry with fire curtain and natural smoke vent.

내 무대 크기는 31 m (폭) × 34 m (깊이) × 32 m (높이)이다. 프로시니엄 개구부의 높이는 바닥에서 부터 16 m이며, 프로시니엄 벽으로부터 상부 벽으로 이어지는 구조물의 두께는 0.5 m로 정하였다. 화원의 경우, 본 연구그룹의 기존 연구<sup>(4)</sup>와 동일하게 설정하였다. 크기는 2 m (폭) × 2 m (깊이) × 1 m (높이)로 하였고, 무대 바닥 중심에 위치시켰다. 열방출률(Heat Release Rate, HRR)은 10 MW, 화재 성장 속도는 빠른(fast) t-squared fire model<sup>(6)</sup>을 적용하였다. 연료로는 폴리우레탄(Polyurethane)을 설정하였다.

자연배출구의 경우, 문화체육관광부의 공연장 무대시설 분야 안전지침 및 기술기준<sup>(7)</sup>에 따르면 무대 바닥면적의 10% 이상을 자연배출구 면적으로 확보하도록 되어있다. 본 연구에서는 자연배출구 면적에 따른 연기 거동 분석을 위하여 무대 바닥면적의 약 10% 경우 뿐 아니라 약 8%, 약 5%, 약 1%의 경우에 대해서도 전산시뮬레이션을 수행하였다. 자연배출구 조건에 대해 Table 1에 정리하여 나타내었고, 해당 표에서 AR (Area Ratio)은 무대 바닥면적에 대한 자연배출구 면적의 비(=Natural smoke vent area / Stage area × 100%)를 나타낸다. 본 논문에서는 설명의 편의를 위해 자연배출구 면적이 무대 바닥면적의 약 10%, 약 8%, 약 5%, 약 1%의 경우를 각각 AR10, AR08, AR05, AR01로 명명하였다. 그리고 자연배출구의 위치는 중앙, 형태는 정사각형으로 설정하였다.

방화막의 경우 프로시니엄 벽을 기준으로 무대쪽으로 설치하였다. 방화막의 폭은 무대 폭과 동일하게 31 m로 하

Table 1. Simulation Case for Natural Smoke Vent Area

| Case | AR  | Natural Smoke Vent Area                     | Stage Area                            |
|------|-----|---|---------------------------------------|
| AR10 | 10% | 10.5 m × 10.5 m<br>(110.25 m <sup>2</sup> ) | 31 m × 34 m<br>(1054 m <sup>2</sup> ) |
| AR08 | 8%  | 9 m × 9 m<br>(81 m <sup>2</sup> )           |                                       |
| AR05 | 5%  | 7 m × 7 m<br>(49 m <sup>2</sup> )           |                                       |
| AR01 | 1%  | 3 m × 3 m<br>(9 m <sup>2</sup> )            |                                       |

였고, 높이는 16.5 m로 프로시니엄 개구부의 높이 16 m보다 0.5 m 높게 설정하였으며, 방화막과 프로시니엄 벽 사이의 간격은 0.5 m 이격하였다. 정량적인 데이터 분석을 위해 자연배출구 및 프로시니엄 개구부를 통해 유입 및 유출되는 질량 유량을 측정하였다. 또한 무대에서 발생한 연기가 프로시니엄 개구부를 통해 객석으로 유출되는 연기 유출 여부 및 개시 시간 분석을 위해 무대부 방향 프로시니엄 벽 하단 (즉, 바닥으로부터 16 m 떨어진 높이)에 깊이 0.5 m, 폭 31 m의 Plane A를 설정하였고, 해당 위치에서 시간에 따른 soot 질량 분율(Soot mass fraction) 변화를 측정하였다. 그리고 화원으로부터 8.5 m, 바닥으로부터 13 m 떨어진 위치에 Point B를 설정하였고, 해당 위치에서 시간에 따른 압력 변화를 측정하였다. 전산시뮬레이션 시간은 600 s로 하였으며, FDS

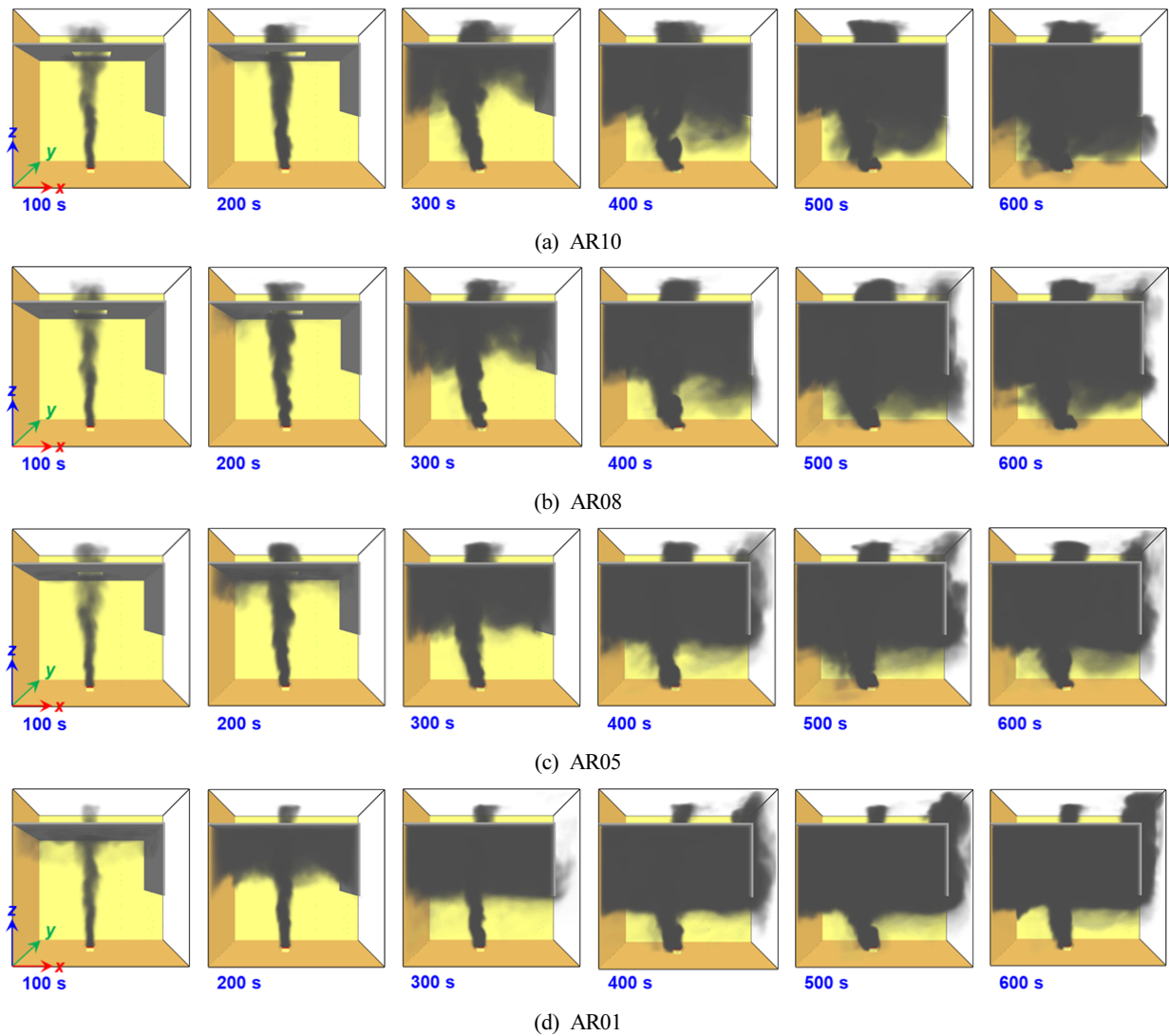


Figure 2. Visualization of smoke movement for all AR cases without fire curtain.

프로그램은 Ver. 6.5.3을 사용하였다. 격자 하나의 크기는 FDS User Guide<sup>(8)</sup> 내 characteristic fire diameter와 plume resolution index를 고려하여  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 로 설정하였고, 총 격자수는 396,800개이다.

### 3. 전산시뮬레이션 결과 및 분석

Figure 2에 방화막이 미설치된 조건에서 AR10, AR08, AR05, AR01 조건에 대한 연기 거동 가시화 결과를 나타내었다. AR10 조건의 경우, 본 연구에서 설정한 전산시뮬레이션 시간 동안에는 무대에서 객석으로 연기의 지속적인 유출이 관찰되지 않았다. 600 s에서 프로시니엄 개구부를 통하여 연기가 객석에서 무대로 넘어가는 것처럼 보이지만 프로시니엄 개구부를 통과한 일부 연기는 객석에서 무대로 유입되는 공기 유동에 의해 객석으로의 유출이 방해받는 것처럼 관찰되었다. 기존 Yeo<sup>(4)</sup>의 전산시뮬레이션 결과에

서 자연배출구의 면적이 본 연구와 유사한 경우에 객석으로의 연기 유출이 일어나지 않는다고 보고하였으며, 이러한 점에서 볼 때 본 연구 결과와 기존 Yeo<sup>(4)</sup> 연구의 결과가 일관성 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 AR08, AR05, AR01 조건의 경우, 무대에서 객석으로 다량의 지속적인 연기 유출이 관찰되었다. 한편, 자연배출구의 크기가 감소함에 따라 연기층의 하강속도가 빠른 것을 가시적으로 관찰할 수 있었다.

객석으로 연기 유출 개시 시간을 정량적으로 파악하기 위하여 AR08, AR05, AR01 조건에 대해 Plane A에서 측정된 시간에 따른 soot 질량 분율 변화를 Figure 3에 나타내었다. Plane A를 기준으로 AR08, AR05, AR01 조건에서 객석으로의 연기 유출 개시 시간은 각각 약 376 s, 약 331 s, 약 266 s로 나타났다. 자연배출구의 면적이 감소함에 따라 객석으로의 연기 유출 개시 시간이 빠르고, 또한 측정된 soot 질량 분율이 증가하는 것으로 관찰되었다. 즉, 자연배출구

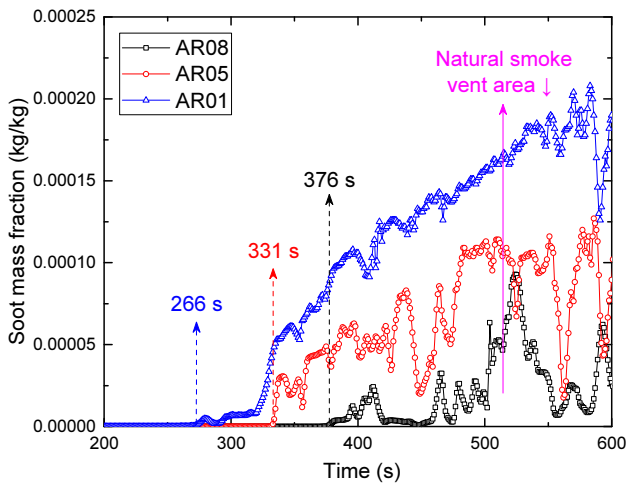


Figure 3. Soot mass fraction measured at Plane A for AR08, AR05, and AR01 without fire curtain.

의 면적이 증가함에 따라 객석으로의 연기 유출을 저지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Figure 4에 방화막이 설치된 조건에 대해 AR10, AR08, AR05, AR01 조건의 연기 거동 가시화 결과를 나타내었다. 방화막과 프로시니엄 벽 사이 간격은 0.5 m로 설정하였다. 본 조건 모두에서 무대에서 객석으로 지속적인 연기 유출 현상을 가시적으로는 확인하기 어려웠으며, 시간이 지남에 따라 무대 공간 내 연기가 무대 바닥까지 도달하는 결과가 관찰되었다. 방화막이 설치된 조건에서도 자연배출구의 면적이 작은 조건(예를 들면 AR01)이 큰 조건(예를 들면 AR10)에 비해 연기층 하강 속도가 빠른 것처럼 관찰되었다. 본 시뮬레이션 결과를 토대로 볼 때, 자연배출구가 설치된 조건에서 방화막이 프로시니엄 벽과 약간의 이격이 있도록 설치되어 있음에도 불구하고 방화막은 무대에서 발생된 연기가 객석으로 유출되는 것을 억제할 수 있는 유용한 시스템임을 확인할 수 있었다.

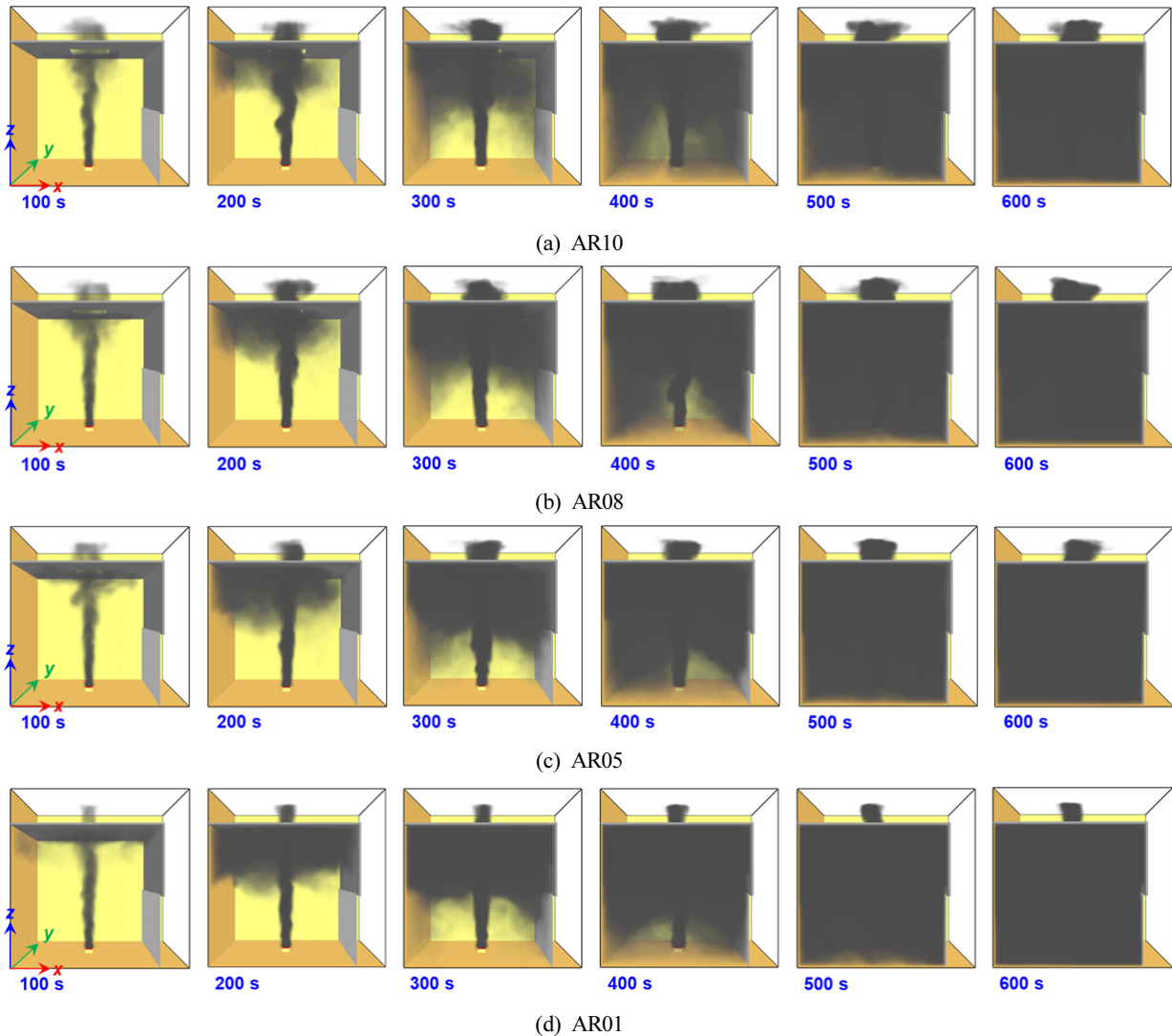


Figure 4. Visualization of smoke movement for all AR cases with fire curtain.

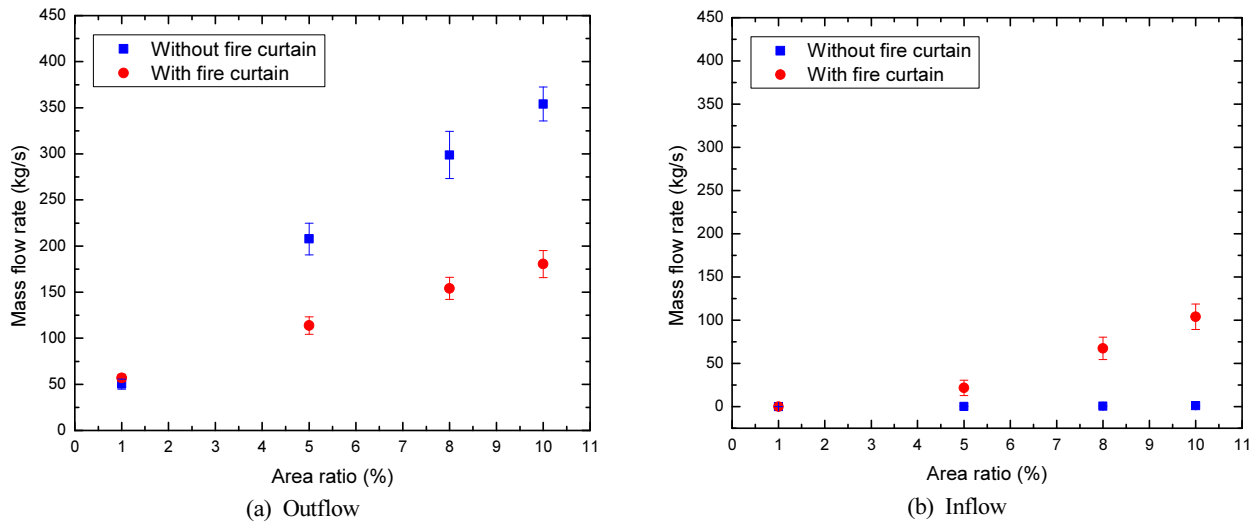


Figure 5. Mass flow rate of outflow and inflow through natural smoke vent.

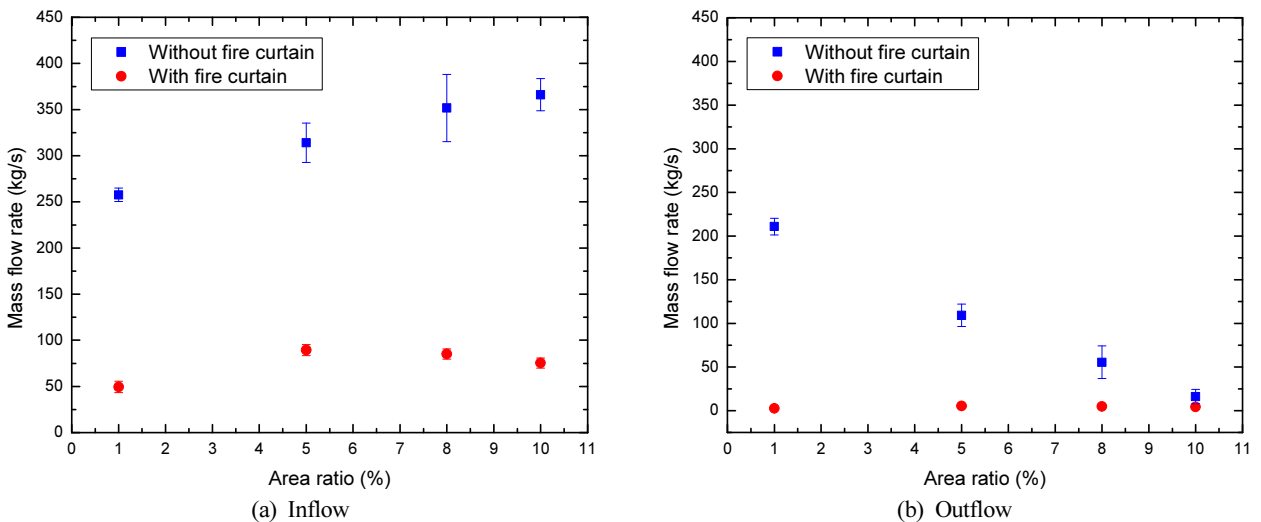


Figure 6. Mass flow rate of inflow and outflow through proscenium opening.

한편, 방화막 설치 여부가 자연배출구 및 프로시니엄 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량에 영향을 미칠 수 있다. Figure 5와 Figure 6에 방화막 설치 여부가 자연배출구를 통해 유출 및 유입되는 질량 유량과 프로시니엄 개구부를 통해 유입 및 유출되는 질량 유량에 미치는 영향을 자연배출구 면적 조건에 따라 비교하여 각각 나타내었다. 각 질량 유량의 경우 열방출률이 10 MW에 도달하는 시간인 약 461 s에서 600 s까지의 수치를 평균하여 나타내었으며, 오차 막대(Error bar)는 표준편차를 의미한다.

Figure 5에 자연배출구를 통해 유출 및 유입되는 질량 유량 측정 결과를 나타내었다. Figure 5(a)의 유출 질량 유량의 경우, 방화막 설치 여부와 관계없이 자연배출구의 면적이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 방화막이 설치된 경우에 비해 미설치된 경우에서 전체적으로 자연배출구를 통한 유출 질량 유량이 크게 측정되었다. Figure 5(b)

에 자연배출구를 통해 유입되는 질량 유량에 자연배출구의 면적 및 방화막의 설치 여부가 미치는 영향을 나타내었다. 방화막이 미설치된 경우, 자연배출구의 면적과는 상관없이 자연배출구를 통한 유입 질량 유량이 거의 측정되지 않았다. 그러나 방화막이 설치된 경우, 자연배출구의 면적이 증가함에 따라 자연배출구를 통해 유입되는 질량 유량이 증가하는 것으로 관찰되었다. 한편, Figure 5에 나타난 바와 같이, 자연배출구의 면적이 큰 조건에서 방화막의 설치 여부가 자연배출구를 통한 유출 및 유입 질량 유량에 더욱 지대한 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 즉, 본 계산 조건 중 가장 작은 자연배출구 면적 조건(AR01 조건)에서는 방화막이 설치된 조건과 미설치된 조건에서의 자연배출구를 통한 유출 및 유입 질량 유량이 유사하게 나타났으나, 자연배출구 면적이 큰 조건(AR10 조건)에서는 유출 및 유입 질량 유량 차이가 크게 나타났다.

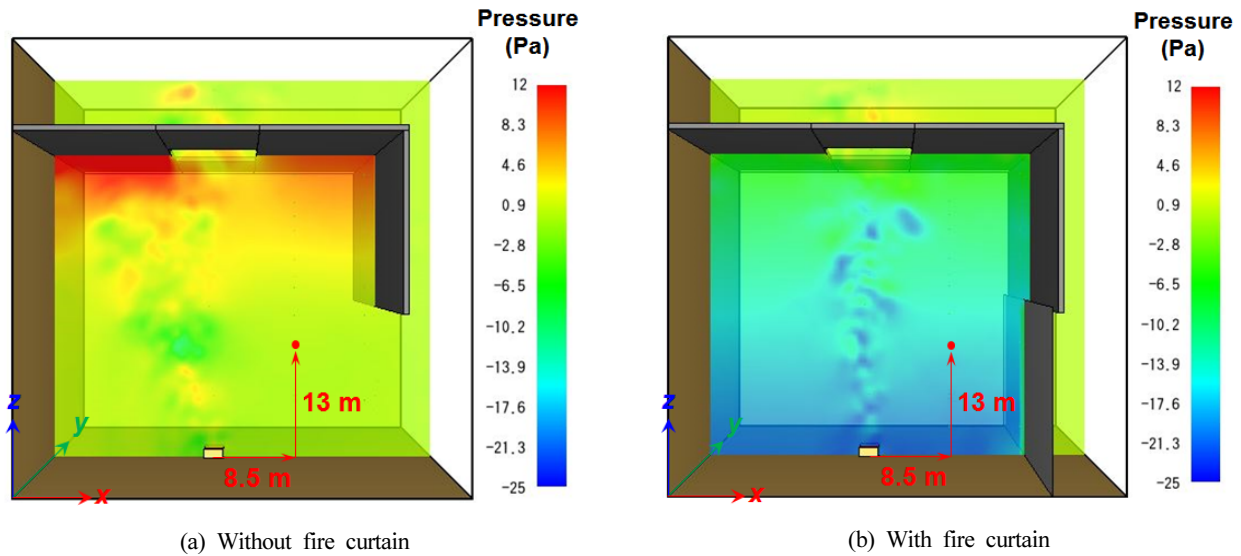


Figure 7. Visualization of pressure distribution for AR08 at 550 s.

Figure 6(a)와 Figure 6(b)에 프로시니엄 개구부를 통해 유입 및 유출되는 질량 유량 측정 결과를 각각 나타내었다. 방화막이 미설치된 경우, 자연배출구의 면적이 증가함에 따라 프로시니엄 개구부를 통한 유입 질량 유량(Figure 6(a))은 증가한 반면, 유출 질량 유량(Figure 6(b))은 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 Figure 5의 자연배출구를 통한 유출 및 유입 질량 유량 결과와 밀접한 관련이 있다. 방화막이 미설치된 경우, 자연배출구의 면적이 증가함에 따라 화재 시 발생한 연기가 자연배출구를 통해 많이 배출되고(Figure 5(a)), 자연배출구를 통한 질량 유입(Figure 5(b))은 거의 변화가 없다. 따라서 프로시니엄 개구부를 통한 유입 질량 유량(Figure 6(a))은 증가하고 프로시니엄 개구부를 통한 유출 질량 유량(Figure 6(b))은 감소하게 된다. 즉, 각 자연배출구 면적 조건에서 자연배출구를 통한 유출 질량 유량(Figure 5(a))과 프로시니엄 개구부를 통한 유입 질량 유량(Figure 6(a)) 간 차이가 프로시니엄 개구부를 통한 유출 질량 유량(Figure 6(b))을 결정하는 중요한 인자(Factor)임을 확인할 수 있다. 반면, 방화막이 설치된 경우, 미설치된 경우와는 달리 자연배출구 면적이 증가함에도 불구하고 프로시니엄 개구부를 통한 유입 질량 유량(Figure 6(a))이 지속적으로 증가하지 않았다. 또한 프로시니엄 개구부를 통한 유출 질량 유량(Figure 6(b))의 경우 자연배출구 면적 변화에도 불구하고 거의 측정되지 않았다. 이는 자연배출구 면적이 증가함에 따라 자연배출구를 통한 유출 질량 유량(Figure 5(a))은 지속적으로 증가하지만 자연배출구를 통한 유입 질량 유량(Figure 5(b)) 역시 함께 증가하는 반면 프로시니엄 개구부를 통한 유출 질량 유량(Figure 6(b))이 거의 없기 때문에 자연배출구 면적이 증가하여도 프로시니엄 개구부를 통한 유입 질량 유량(Figure 6(a))이 지속적으로 증가하지 않을 수 있다. 한편, Figure 6에 나타

낸 바와 같이, 방화막이 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 프로시니엄 개구부를 통한 유입 및 유출 질량 유량이 전체적으로 적은 것을 알 수 있다.

Figure 5와 Figure 6을 토대로 볼 때 방화막의 설치 여부가 자연배출구 및 프로시니엄 개구부를 통한 유입 및 유출 질량 유량에 지대한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 방화막의 설치 여부는 무대에서 발생한 연기가 자연배출구를 통해 유출되는 것을 감소시키는 경향은 있으나 객석으로의 유출을 효과적으로 막을 수 있다는 점에서 긍정적인 효과가 있다고 판단된다.

자연배출구 및 프로시니엄 개구부를 통한 유입 및 유출 질량 유량은 무대와 객석 내 압력 분포와 밀접한 연관이 있을 수 있다. Figure 7에 AR08 조건에서 550 s일 때 방화막 설치 여부가 무대 및 객석 내 압력 분포에 미치는 영향을 나타내었다. 객석에서의 압력 분포의 경우, 방화막의 설치 여부와 상관없이 유사하게 나타났다. 그러나 무대에서의 압력 분포의 경우, 방화막이 미설치된 경우보다 설치된 경우가 낮음을 관찰할 수 있었다. AR08 조건에서 550 s일 때 Figure 1의 Point B에서 측정된 압력을 비교하여 보면, 방화막이 미설치된 경우에는 약 -2 Pa, 방화막이 설치된 경우에는 약 -20 Pa 정도로 나타났다. 방화막이 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 압력이 낮아지는 이유 중 하나는 방화막 설치 시 방화막과 프로시니엄 벽 사이의 좁은 공간에 의한 유동 저항 증가 때문일 수 있다. 본 연구를 통하여, 방화막 설치 여부에 따른 무대 내 압력 변화와 앞서 언급한 자연배출구 및 프로시니엄 개구부를 통한 유입 및 유출 질량 유량 거동이 밀접한 연관이 있을 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 실제 화재 상황을 고려하여 볼 때, 프로시니엄 벽과 방화막 사이의 간격에 의한 유동 저항 증가와 함께 방화막 설치 여부에 따른 온도 및 열방출률의 변화,

자연배출구 및 프로시니엄 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 변화 등이 압력 및 연기 거동과 밀접한 상호 관련이 있을 것으로 판단되므로 추후 다양한 조건에서의 연구를 통하여 이에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 FDS를 이용하여 실규모 공연장의 무대 내 화재 시 방화막과 자연배출구 면적이 연기 거동에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 자연배출구의 면적은 무대 바닥면적의 약 10%, 약 8%, 약 5%, 약 1%, 방화막은 무대부 쪽으로 프로시니엄 벽과 0.5 m 이격시켜 설정하였다. 본 연구에서 도출한 주요 결과를 아래에 정리하였다.

1) 방화막이 미설치된 경우, 자연배출구의 면적이 증가함에 따라 객석으로의 연기 유출 시작 시점이 지연되고 자연배출구를 통한 유출 질량 유량과 프로시니엄 개구부를 통한 유입 질량 유량은 증가하였다. 반면, 프로시니엄 개구부를 통한 유출 질량 유량은 감소하였다.

2) 방화막이 설치된 경우, 자연배출구의 면적이 증가함에 따라 자연배출구를 통한 유출 질량 유량은 증가하였으나 프로시니엄 개구부를 통한 유입 질량 유량이 지속적으로 증가하지는 않았다. 이는 자연배출구를 통한 유입 질량 유량이 자연배출구 면적이 증가함에 따라 증가하는 경향과 연관이 있는 것으로 판단된다.

3) 본 연구에서 고려한 자연배출구 조건에서 방화막이 설치된 경우 객석으로의 연기 유출을 효과적으로 막을 수 있음을 확인하였다. 방화막이 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 자연배출구를 통한 유출 질량 유량, 프로시니엄 개구부를 통한 유입 및 유출 질량 유량이 적은 것으로 나타났다. 또한 자연배출구를 통한 유입 질량 유량은 큰 것으로 측정되었다. 또한 동일한 자연배출구 조건에서 방화막이 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 공연장 무대 내 압력이 낮은 것으로 계산되었다.

#### 후 기

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2018년도 문화기술연구개발 지원사업으로 수행되었음(R2017030085). 본 논문은 2018년도 한국화재소방학회 춘계학술대회(2018년 4월 26~27일, 대구 EXCO)에서 발표한 내용(Paper No. D-11)을 수정, 보완 및 발전시켜 작성하였음.

#### References

1. D. G. Kim, "Stage Facility Analysis Report", Theater Safety Center in Korea Testing Laboratory.
2. J. W. Kwon, "Assessment of Fire Protection Systems in Proscenium Theaters", Case Studies in Fire Safety, Vol. 2, pp. 9-15 (2014).
3. Y. J. Yeo, "A Study on the Major Design Factors affecting Ventilation in the Performance Hall Fires", Ph.D. Thesis (Hoseo University) (2012).
4. J. H. Kim, D. Kim and C. Y. Lee "Effects of Fire Curtain and Forced Smoke Ventilation on Smoke Spread to Auditorium in Stage Fire of Theater", Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 5, pp. 28-36 (2017).
5. D. H. Kim, C. Y. Lee and D. Kim, "Prediction of the Fire Curtain Effect through a Numerical Simulation of a Reduced Scale Model for Fires in Theaters", Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 51-59 (2018).
6. B. Karlsson and J. Quintiere, "Enclosure Fire Dynamics", CRC Press (1999).
7. Theater Safety Center in Korea Testing Laboratory, "Safety Guidelines and Technical Standards for Stage Facilities in Theatre" (2011).
8. 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).