

[Research Paper]

공연장 무대부 화재 시 자연배출구 및 방화막 영향 검토를 위한 축소모형 실험

백선아 · 양지현 · 정찬석 · 이치영* · 김동균**

부경대학교 소방공학과 대학원생, *부경대학교 소방공학과 교수, **한국산업기술시험원 수석연구원

Reduced-scale Model Experiment for Examination of Natural Vent and Fire Curtain Effects in Fire of Theater Stage

Seon A Baek · Ji Hyun Yang · Chan Seok Jeong · Chi Young Lee* · Duncan Kim**

Graduate Student, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University,

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

**Chief Researcher, Korea Testing Laboratory

(Received July 26, 2019; Revised August 7, 2019; Accepted August 8, 2019)

요 약

본 연구에서는 실존하는 공연장을 대상으로 1/14 비율로 축소하여 제작한 모형을 이용하여 공연장 무대부 화재 시 자연배출구 및 방화막 영향을 검토하였다. 자연배출구가 개방되고 방화막이 미설치된 경우에 무대부 온도가 낮은 것으로 나타난 반면, 객석부 온도의 경우 자연배출구가 개방되고 방화막이 설치된 경우에 낮은 것으로 측정되었다. 한편, 객석부 프로시니엄 개구부에 근접한 위치에서의 온도 상승 시점 분석을 통해 자연배출구 개방이 무대부에서 객석부로의 연기 유출 시작 시점을 지연시키고 객석부 온도 상승을 억제할 가능성이 있음을 확인하였다. 본 실험 조건에서 방화막 설치 여부는 자연배출구를 통한 유출 유동의 속도 및 질량 유량에 큰 영향을 미치지 않았는데, 이는 무대부에 존재하는 개구부 때문으로 판단된다. 본 실험 결과는 실제 공연장 화재 시 자연배출구 및 방화막 영향 평가를 위한 기초 데이터로 활용 가능할 뿐 아니라 전산시뮬레이션의 신뢰성 검증을 위한 자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

In the present experimental study, based on a real-scale theater, a 1/14 reduced-scale model was constructed, and the effects of natural vent and fire curtain in fire of a theater stage were investigated. The case without fire curtain under the opened natural vent showed lower temperatures in the stage, whereas the case with fire curtain under the opened natural vent showed lower temperatures in the auditorium. On the other hand, through analyzing the starting time of the temperature rise at the point near the proscenium opening in the auditorium, it was found that the opened natural vent condition can delay the starting time of smoke spread from the stage to the auditorium and suppress the temperature rise in the auditorium. Under the present experimental conditions, the fire curtain installation did not affect significantly the velocity and mass flow rate of the outflow through the natural vent of the stage, which might be due to openings in the stage. The present results can be used to examine the effects of natural vent and fire curtain in a real-scale fire of a theater and to check the accuracy of the numerical simulation code.

Keywords : Theater fire, Reduced-scale model, Natural vent, Fire curtain

1. 서 론

오늘날 문화생활에 대한 사람들의 관심이 높아짐에 따

라 다양한 형태의 문화공간이 증가하는 추세에 있다. 예를 들면, 공연시설의 경우, 전체 1019개 공연시설 중 75.9%인 773개 시설이 2000년 이후 개관하였다는 조사 결과⁽¹⁾가 있

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

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

다. 공연장의 특성상 공연 중 무대에서 이루어지는 불을 이용한 특수 효과나 상부 조명시설에 의한 화재 사고의 위험이 항상 존재하고, 공연장에서 화재가 발생할 경우 불특정 다수의 관객들이 한정된 공간 내에 모여 있다는 상황을 고려할 때 막대한 인명 피해가 발생할 가능성이 존재한다. 따라서 공연장 내 화재 안전에 대한 다양한 연구가 이루어질 필요가 있다.

공연장에는 화재 발생 시 피해를 최소화하기 위해 연기 배출구, 스프링클러설비, 피난구유도등, 통로유도등 등 다양한 소방시설 뿐 아니라 방화막과 같은 시설이 설치되어야 한다^(2,3). 본 연구에서는 이 중 연기배출구와 방화막에 관심을 가지고 연구를 수행하였다.

공연장에는 화재 시 발생하는 연기를 외부로 배출시키기 위해 무대 상부에 연기배출구를 설치한다. 일반적으로 연기를 배출하는 배연 방식에는 배출기를 이용하여 기계적인 힘으로 연기를 배출하는 방식인 기계배연 방식과 공간의 상부에 설치한 배연구를 통해 부력에 의해 상승한 연기를 직접 외부로 배출하는 방식인 자연배연 방식이 존재하며⁽⁴⁾, 대부분의 공연장에서는 기계배연 방식을 채용하고 있다. 하지만 자연배연 방식의 경우, 전체 설비를 단순화하고 설치 비용을 낮출 수 있다는 장점이 존재하고, 다양한 형태의 공연장에 연기배출구 관련 설계 자유도를 극대화시킨다는 관점에서 자연배출구에 대한 연구가 수행될 필요가 있다. 공연장 무대시설분야 안전지침 및 기술기준⁽⁵⁾에 따르면, 자연배출구를 설치할 경우, 독일은 유효개구부 면적이 무대부 면적의 8%, 영국은 무대부 면적의 10%로 설치하도록 규정하고, 국내의 경우 무대부 면적의 10% 이상을 배출구 면적으로 확보하도록 권고하고 있다. 하지만 무대부 면적의 10% 이상이라는 자연배출구 면적은 실제 공연장에 적용 시 현실적으로 많은 제약이 존재할 수 있으므로 자연배출구를 실제 공연장에 적용하기 위해서는 자연배출구와 관련된 다양한 연구가 수행되어야 한다.

한편, 방화막은 공연장 내 무대부와 객석부 사이의 프로시니엄(Proscenium) 벽에 설치되어 있다가 화재 발생 시 하강하여 무대부와 객석부 사이(즉, 프로시니엄 개구부)를 차단, 객석부로의 화염과 연기 확산을 저지하여 관객의 피난 시간을 확보하기 위한 설비이다. 방화막 착상 시간의 경우, 홍콩, 미국 등 해외에서는 30 s^(6,7)를 넘지 않아야 하고, 국내에서는 1 min 이내⁽⁵⁾로 권고하고 있다. 국내에서는 공연장 내 화재 시 방화막의 역할 및 중요성에 대해서는 공감하고 있으나 현재 방화막이 설치되어 있는 공연장이 매우 제한적인 상황이다. 공연장안전지원센터의 무대시설 분석 결과 보고서⁽⁸⁾에 따르면 최근 5년 안전 진단 대상의 전체 공연장 329개 중 방화막이 설치된 공연장은 78개로 설치 비율이 24%에 그친다. 공연장 내 방화막의 보급을 확대하기 위해서는 경제적이고 고성능의 방화막 시스템 개발이 필요하고, 방화막 관련 규정이 구체화되어야 한다. 이를 위해서는 활발하고 다양한 방화막 관련 연구가 수행될 필요

가 있다.

공연장 내 연기배출구 및 방화막 관련한 연구가 일부 수행된 바 있다. Yeo⁽⁹⁾는 공연장 화재 시 배연성능에 미치는 요인을 분석하기 위해 다양한 배출구 면적에 대해 Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (CFAST) 및 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 이용하여 전산시뮬레이션(Numerical simulation)을 수행하였으며, 이와 함께 축소모형을 구축하여 화재 시 연기 거동 분석을 위한 실험을 수행하였다. Kim 등⁽¹⁰⁾은 공연장 화재 시 방화막과 강제 배출구가 무대에서 객석으로의 연기 확산에 미치는 영향에 대해 FDS를 이용하여 연구를 수행한 바 있다. Kim 등⁽¹¹⁾은 방화막과 자연배출구가 설치된 공연장 축소모형에 대해 FDS를 이용하여 전산시뮬레이션을 수행하였으며, 방화막과 자연배출 방식의 연기배출구가 객석으로의 연기 확산을 억제시키는데 효과적인 설비임을 선행적으로 확인하였다. Kim 등⁽¹²⁾은 FDS를 이용하여 방화막 및 자연배출구 면적이 공연장 무대부 화재 시 연기 거동에 미치는 영향에 대해 전산시뮬레이션을 수행하였고, 이를 통해 방화막 및 자연배출구 면적이 객석으로의 연기 확산이나 자연배출구를 통한 유입 및 유출 질량 유량에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 기존 연구⁽⁹⁻¹²⁾를 바탕으로 볼 때, 공연장 화재에 대한 연구는 대부분 전산시뮬레이션을 이용하여 수행되었는데, 이는 현실적으로 실규모 공연장 화재 실험을 수행하는데 매우 많은 제약이 따르기 때문에 판단된다.

일반적으로 화재 현상에 대한 연구 방법으로 실제 대상에 대한 실규모 화재 실험이 가장 현실적이고 정확할 수 있다는 장점이 있는 반면, 시간, 공간, 비용적인 측면에서는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 대안 중 하나로 축소모형을 이용한 화재 실험을 고려하여 볼 수 있으며 축소모형을 활용한 다양한 화재 연구가 기존⁽¹³⁻¹⁸⁾에 수행된 바 있다. 공연장 화재 시 연기배출구와 방화막 영향을 분석하기 위해서도 실규모 화재 실험이 실제 일어나는 현상을 가장 정확히 이해할 수 있을 것으로 판단되지만 앞서 언급한 바와 같이 시간, 공간, 비용적 측면에서 많은 제약이 따르므로 축소모형을 활용한 접근이 좋은 대안이 될 수 있다. 또한 축소모형을 활용해 확보한 실험 데이터는 실제 화재 현상을 예측하기 위해 현재 보편적으로 사용되는 전산시뮬레이션의 신뢰성을 평가하고 검증하는데도 활용될 수 있으므로 축소모형을 이용한 화재 실험 연구는 여러 가지로 매우 가치 있다고 판단된다.

본 연구에서는 실존하는 극장을 대상으로 일정 비율(1/14)로 축소된 실험 장치를 구축하여 자연배출구 및 방화막이 공연장 무대부 화재 시 연기 거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 축소모형 실험을 통해 자연배출구 및 방화막 조건에 따라 무대부 화재 시 무대부 및 객석부 공간 내 온도 분포와 객석으로의 연기 유출 시점, 무대부 자연배출구를 통해 유출되는 유동의 속도 및 질량 유량을 측정 및 검토하였다.

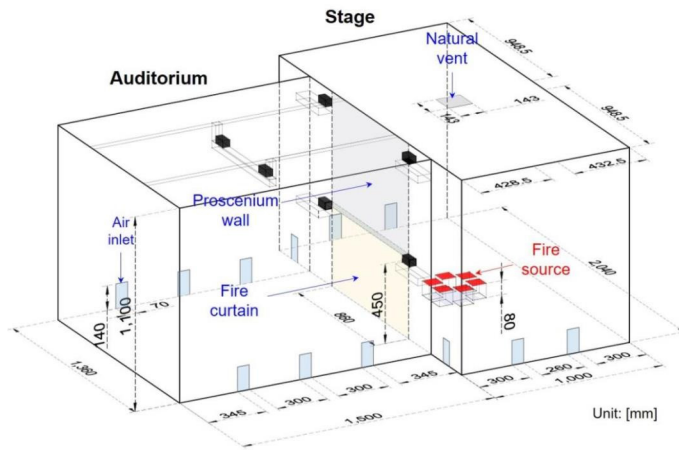


Figure 1. Experimental set-up (e.g., with fire curtain).

Table 1. Summary of Dimensions for Real-scale Theater and Its Reduced-scale Model

| Components | | Real-scale | Reduced-scale |
|--------------|--------|---------------------|----------------------|
| Stage | Width | 28.6 m | 2.04 m |
| | Depth | 14 m | 1 m |
| | Height | 15 m | 1.1 m |
| | Volume | 6006 m ³ | 2.244 m ³ |
| Auditorium | Width | 19 m | 1.36 m |
| | Depth | 21 m | 1.5 m |
| | Height | 15 m | 1.1 m |
| | Volume | 5985 m ³ | 2.244 m ³ |
| Natural Vent | Width | 2 m | 0.143 m |
| | Depth | 2 m | 0.143 m |
| Fire Curtain | Height | 6.75 m | 0.482 m |
| | Width | 12.32 m | 0.88 m |

2. 실험 장치 및 방법

축소모형 실험 장치는 실존하는 공연장을 1/14 비율로 축소하여 구축하였으며, 축소모형 실험 장치의 크기 및 실험 시 열방출률은 아래의 상사법칙⁽¹⁹⁾을 이용하여 설정하였다.

$$\frac{l_m}{l_p} = \frac{1}{14} \tag{1}$$

$$\frac{\dot{Q}_m}{\dot{Q}_p} = \left(\frac{l_m}{l_p}\right)^{5/2} \tag{2}$$

여기서 l 과 \dot{Q} 은 길이와 열방출률, 하첨자 p 와 m 은 실규모와 축소모형을 나타낸다.

Figure 1에 본 연구에서 구축한 실험 장치의 개략도를 나타내었고, Table 1에 본 연구에서 대상으로 한 공연장의 실

제 크기와 본 실험에서 구축한 축소모형 장치의 크기를 비교하여 정리하였다. 공연장 축소모형 실험 장치는 무대부와 객석부로 구성되어 있으며, 무대부의 크기는 2.04 m (폭) × 1 m (깊이) × 1.1 m (높이), 객석부의 크기는 1.36 m (폭) × 1.5 m (깊이) × 1.1 m (높이)이다. 무대부와 객석부에는 실제 공연장의 출입구 위치와 크기를 고려하여 0.07 m (폭) × 0.14 m (높이) 크기의 개구부가 각각 6개씩 존재하며, 실험 시 해당 개구부는 개방된 상태였다. 무대부 상부 중심에는 공연장 내 자연배출구 모사를 위하여 무대부 바닥 면적의 1% 크기로 설정한 0.143 m (폭) × 0.143 m (깊이)의 정사각형 개구부를 설정하였다. 국내의 경우 자연배출구 설치 시 무대부 바닥 면적의 10% 이상을 자연배출구 면적으로 확보하는 것을 권고⁽⁵⁾하고 있으나 앞서 언급한 바와 같이 해당 내용을 실제 공연장의 자연배출구에 적용 시 많은 제약이 따를 수 있고 본 연구의 주요 목적 중 하나는 자연배출구 개방 및 폐쇄 조건이 연기 거동에 미치는 영향에 대한 비교이므로 본 연구에서는 10%에 비해 보수적인 조

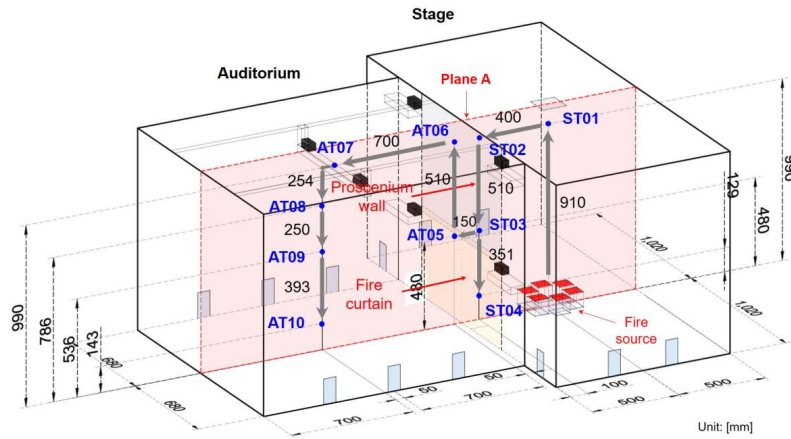


Figure 2. Temperature measurement locations (e.g., with fire curtain).

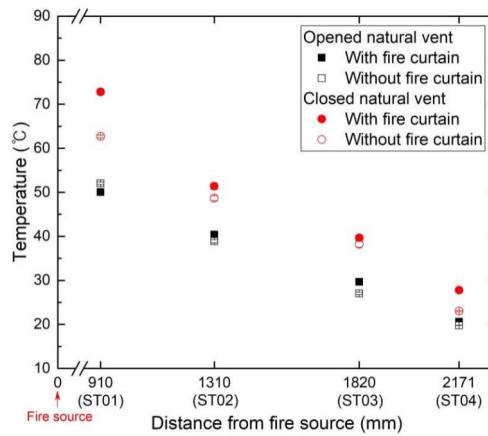


Figure 3. Effects of natural vent and fire curtain on temperatures of stage.

건인 1%로 설정하여 실험을 수행하였다. 한편, 무대부와 객석부 사이에는 모의 방화막을 설치하였으며, 모터(Motor)와 원형봉(Round rod)을 이용하여 해당 모의 방화막을 상하로 이동 가능할 수 있도록 구성하였다. 실험 시 편의를 위하여 모의 방화막 재질로 단단한 종이판을 이용하였고, 방화막과 프로시니엄 벽 간 겹치는 구간의 높이(Overlap height)는 약 0.03 m로 제작되었다. 화원은 기존 연구⁽⁹⁾를 참고하여 메틸 알코올(Methyl alcohol)이 들어있는 알코올 램프(Alcohol lamp) 6개를 이용하였고, 무대부 바닥의 정중앙에 위치시켰으며, 열방출률은 1.248 kW로 측정되었다. 참고로 이는 식(2)를 적용하여 실규모 화재로 변환하였을 때 약 915 kW에 해당하는 열방출률이다.

실험 시 온도 측정 위치에 대한 개략도를 Figure 2에 나타내었다. 무대부와 객석부의 정중앙 단면(Plane A)에 무대부 4개, 객석부 6개의 K-type 열전대를 설치하였다. 무대부의 경우, 자연배출구 중심의 바로 밑(ST01), 프로시니엄 벽 상부(ST02) 및 하부(ST03), 그리고 실규모 공연장에서의 호흡기계선을 고려한 위치(ST04)에 열전대를 설치하였다. 객

석부의 경우, 프로시니엄 벽 하부(AT05) 및 상부(AT06), 객석부 천장 중심(AT07)에 각각 열전대를 설치하였고, 객석부 3층(AT08), 2층(AT09), 1층(AT10)의 높이를 고려하여 열전대 위치를 설정하였다. 한편, Figure 2에 화원 위치로부터 유동 경로를 고려하여 회색 화살표로 나타내었고 각 측정 위치 사이의 거리를 표시하였다. 열전대에서 측정된 온도 결과인 Figures 3-5의 x축에는 Figure 2에서 화살표로 나타난 각 열전대의 위치(즉, 화원으로로부터 떨어진 거리)를 해당 위치의 열전대 명칭과 함께 나타내었다.

3. 실험 결과

자연배출구 개방 및 폐쇄, 방화막 설치 및 미설치 조건(총 4조건)에 대해 실험을 수행하였고, Figure 3에 무대부 온도 측정 결과를 나타내었다. 온도 측정 데이터는 600 s 간 수집하였으며, Figure 3에는 400 s에서 600 s 구간에 대한 실험 결과를 평균하여 나타내었다.

Figure 3에 나타난 바와 같이, 모든 조건에서 화원으로부터

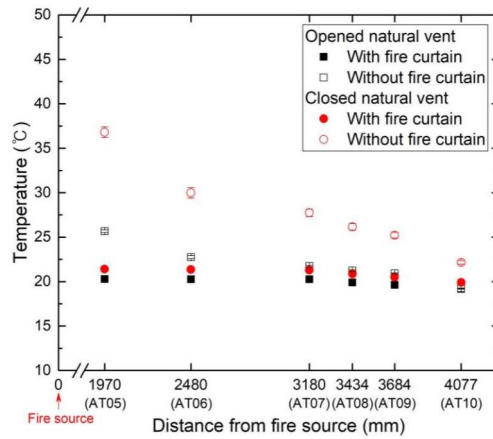


Figure 4. Effects of natural vent and fire curtain on temperatures of auditorium.

터 거리가 증가함에 따라 온도가 감소하는 경향이 관찰되었으며, 이는 주변으로의 열손실 및 공기의 유입 때문으로 판단된다. 또한, 전체적으로 자연배출구가 개방된 경우가 폐쇄된 경우에 비해 온도가 낮게 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 자연배출구가 개방된 경우가 폐쇄된 경우에 비해 방화막이 미설치된 조건에서 온도가 약 3.2 °C~11.1 °C, 방화막이 설치된 조건에서 약 7.2 °C~22.8 °C 정도 낮게 측정되었다. 이는 자연배출구가 개방된 경우 무대부의 고온 유체가 자연배출구를 통해 외부로 원활하게 배출될 수 있기 때문으로 판단된다.

한편, 방화막 영향의 경우, 방화막이 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 전체적으로 온도가 높게 나타났다. 자연배출구가 폐쇄된 경우, 방화막이 설치된 조건이 미설치된 조건에 비해 약 1.4 °C~10.1 °C 정도 온도가 높게 나타났고, 자연배출구가 개방된 경우에서도 방화막이 설치된 조건이 미설치된 조건에 비해 대부분 측정 지점에서 온도가 약간 높은 것으로 나타났다. 방화막이 설치된 조건이 미설치된 조건에 비해 온도가 다소 높은 이유는 방화막에 의해 무대부와 객석부 간 유체 유동이 제한되고 무대부 공간 내 열축적이 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. Figure 3의 측정 결과를 토대로 볼 때, 본 실험 조건에서는 방화막 설치 여부보다 자연배출구 개폐 여부가 무대부 온도 분포에 비교적 더 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

Figure 4에 자연배출구와 방화막 조건이 객석부 온도 분포에 미치는 영향을 나타내었고, 해당 온도 측정 결과는 400 s에서 600 s 구간에 대한 온도 데이터를 평균하여 도출하였다.

방화막이 미설치된 경우, 화원으로부터 거리가 증가함에 따라 측정 온도가 감소하는 경향이 관찰되었고, 자연배출구가 개방된 조건이 폐쇄된 조건에 비해 객석부 온도가 약 2.9 °C~11.1 °C 낮은 것으로 나타났다. 반면, 방화막이 설치된 경우에는 거리에 따른 온도 변화가 거의 없는 것으로 나타났고, 자연배출구가 개방된 조건이 폐쇄된 조건에

비해 객석부 온도가 낮은 것으로 나타났으나 그 차이는 방화막이 미설치된 경우에 비해 작은 것으로 측정되었다. 한편, 자연배출구가 개방 및 폐쇄된 경우 모두에서, 방화막이 설치된 조건이 미설치된 조건에 비해 객석부 온도가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 방화막이 설치된 조건이 미설치된 조건에 비해 자연배출구가 개방된 경우에는 약 0.1 °C~5.4 °C, 자연배출구가 폐쇄된 경우에는 객석부 온도가 약 2.2 °C~15.4 °C 낮은 것으로 나타났다. 방화막이 설치된 조건이 미설치된 조건에 비해 객석부 온도가 낮게 나타난 것은 모의 방화막에 의해 무대부에서 객석부로의 열전달이 효과적으로 억제되었음을 의미한다. 무대부 온도 측정 결과와는 다르게, 자연배출구 개폐 여부 뿐 아니라 방화막 설치 여부가 객석부 온도 분포에 지대한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

공연장 화재 시 자연배출구와 방화막 효과를 명확하게 파악하기 위하여, 공연장 무대부 내 화재 시 자연배출구가 개방되고 방화막이 설치된 조건(즉, 화재 시 해당 설비가 모두 작동한 조건)과 자연배출구가 폐쇄되고 방화막이 미설치된 조건(즉, 화재 시 해당 설비가 모두 미작동한 조건) 간 비교가 의미 있을 수 있다. 해당 조건에 대한 무대부 및 객석부 온도 비교 결과를 Figure 5에 나타내었다. 무대부 온도의 경우 화원으로부터 거리가 증가함에 따라 온도가 지속적으로 감소하는 경향이 나타나는 반면, 객석부 온도는 다른 경향이 관찰되었다. 객석부 온도의 경우 자연배출구가 폐쇄되고 방화막이 미설치된 조건에서는 거리 증가에 따라 온도가 감소하였으나 자연배출구가 개방되고 방화막이 설치된 조건에서는 거리 증가에 따른 온도 변화가 거의 관찰되지 않고 낮은 온도로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 자연배출구가 개방되고 방화막이 설치된 조건이 자연배출구가 폐쇄되고 방화막이 미설치된 조건에 비해 무대부 온도의 경우 약 2.4 °C~12.7 °C, 객석부 온도의 경우 약 3.0 °C~16.5 °C 감소시키는 결과가 측정되었다. 해당 결과를 토대로 볼 때, 공연장 화재 시 자연배출구의 개방 및 방화

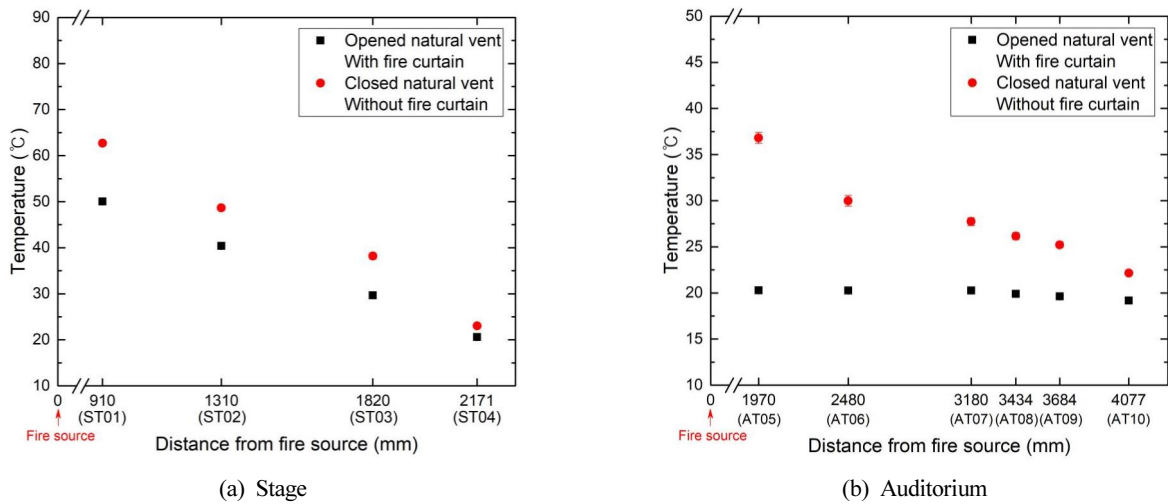


Figure 5. Comparison of temperatures under different natural vent and fire curtain conditions.

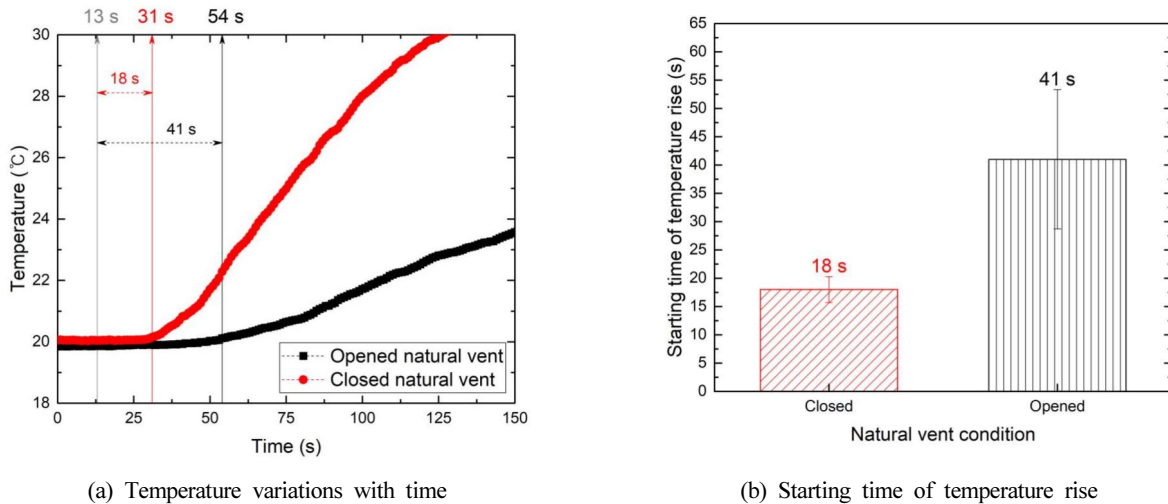


Figure 6. Effects of natural vent conditions on temperature variations with time for AT05.

막의 설치가 객석부 온도 감소에 큰 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

한편, 무대부 화재 시 방화막이 프로시니엄 벽과 완전히 밀착되어 유격이 전혀 없다면 무대부에서 객석부로의 연기 유출은 일어나지 않는다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 현재 많은 공연장에 방화막이 설치되어 있지 않으므로⁸⁾, 공연장 내 방화막이 설치되어 있지 않은 상황에서 자연배출구가 무대부에서 객석부로의 연기 유출 시작 시점에 미치는 영향에 대해 검토하는 것은 현재의 공연장 상황을 고려할 때 관객 대피 관점에서 중요한 정보로 활용될 수 있다. 또한, 이러한 정보는 방화막 설치 시 방화막 구동 관련 세부 내용을 수립할 때에도 유용하게 이용될 수 있다. 자연배출구 조건이 무대부에서 객석부로의 연기 유출 시작 시점에 미치는 영향을 간접적으로 확인하기 위하여 방화막이 미설치된 조건에서 자연배출구 개방 및 폐쇄에 따른 AT05

위치에서의 시간에 따른 온도 변화 및 온도 상승 시작 시점을 Figure 6(a)와 Figure 6(b)에 각각 나타내었다. Figure 6에 나타낸 실험 데이터는 3회 반복 실험하여 획득한 것을 평균한 결과이며, 오차 막대(Error bar)는 해당 실험 데이터들의 표준편차를 의미한다. 참고로 AT05 열전대는 Figure 2에 나타낸 바와 같이, 객석부의 프로시니엄 개구부에 근접한 위치에 설치되어 있다.

온도 수집 시작 이후 13 s에 점화하였고, 자연배출구가 폐쇄된 조건에서는 평균 18 s 이후(즉, 약 31 s 근방)에서부터 온도가 상승한 반면, 자연배출구가 개방된 조건에서는 평균 41 s 이후(즉, 약 54 s 근방)에서부터 온도가 상승하는 것이 관찰되었다. 그리고 자연배출구가 폐쇄된 조건이 개방된 조건에 비해 더욱 급격하게 온도가 상승하는 것으로 나타났다. 자연배출구 개방에 의해 축소모형 실험에서 나타난 온도 상승 시작 시점은 약 23 s 지연되는 것으로 확인

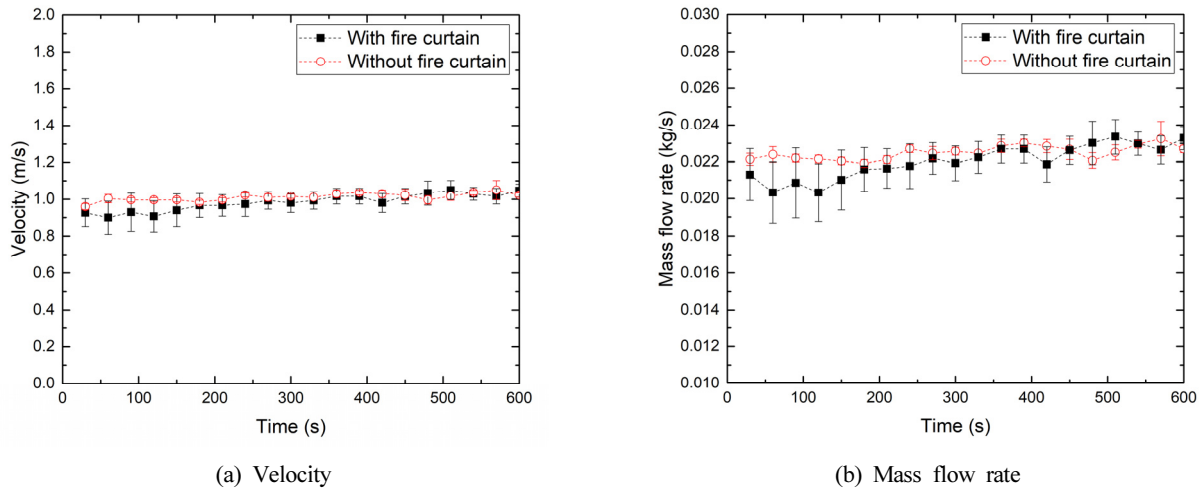


Figure 7. Effects of fire curtain conditions on outflow through natural vent of stage.

되었고, 실규모 화재 시 자연배출구를 개방하였을 때 지연되는 온도 상승 시작 시점은 식(3)⁽¹⁹⁾을 이용하여 계산한 결과 약 86 s 정도로 예측되었다.

$$t_m = t_p \left(\frac{l_m}{l_p} \right)^{1/2} \quad (3)$$

여기서 t 는 시간을 나타낸다. 본 실험 결과를 통해, 자연배출구 개방에 의해 무대부에서 객석부로의 연기 유출 시작 시점을 지연시킬 수 있고, 유출되는 유동의 온도 상승도 감소시킬 가능성이 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 방화막의 설치 여부가 자연배출구를 통한 유출 유동에 영향을 미칠 수 있다. Figure 7에 방화막 설치 및 미설치 조건에서 자연배출구를 통해 유출되는 유동의 속도 및 질량 유량 측정 결과를 나타내었다. 베인(Vane) 풍속계(BK PRECISION, Model 731A)를 이용하여 개방된 자연배출구의 중심에서 유속을 30 s 간격으로 측정하였다. 실험 데이터는 총 3회 반복 실험하여 획득한 것을 평균한 결과이며, 오차 막대는 해당 실험 데이터들의 표준편차를 의미한다. 측정된 유속을 토대로 식(4)를 이용하여 질량 유량을 도출하였으며, 질량 유량 계산 시 밀도의 계산은 식(5)⁽²⁰⁾를 이용하였다. 또한 실규모 화재 시 자연배출구를 통한 유출 유동의 속도 및 질량 유량은 식(6)⁽¹⁹⁾과 식(7)⁽¹⁹⁾을 이용하여 계산하였다.

$$\dot{m} = \rho VA \quad (4)$$

$$\rho = \frac{353}{T} \quad (5)$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{l_m}{l_p} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\frac{\dot{m}_m}{\dot{m}_p} = \left(\frac{l_m}{l_p} \right)^{5/2} \quad (7)$$

여기서 \dot{m} , ρ , V , T 는 각각 자연배출구를 통한 유체의 질량 유량, 밀도, 속도, 온도를 나타내고, 식(5)를 이용한 유체 밀도 산정 시 유체 온도는 자연배출구와 가장 근접한 곳인 ST01에서의 측정 결과를 이용하였다.

또한 A 는 자연배출구의 면적을 의미한다. 측정된 유속의 경우 시간에 따라서 거의 일정하게 나타났으며, 측정된 전체 구간에 대해 평균한 결과 방화막이 설치된 경우 약 0.98 m/s, 방화막이 미설치된 경우 약 1.01 m/s로 측정되었다. 유출 질량 유량 역시 속도 측정 결과와 유사한 경향이 관찰되었는데 방화막이 설치된 경우 약 0.022 kg/s, 방화막이 미설치된 경우 약 0.023 kg/s로 측정되었다. 한편, 축소모형 측정 결과를 바탕으로 식(6)을 이용하여 실규모 화재 시 자연배출구를 통한 유출 유동의 속도를 계산한 결과, 방화막이 설치된 경우 약 3.67 m/s, 방화막이 미설치된 경우 약 3.78 m/s로 계산되었다. 축소모형 유출 질량 유량 측정 결과와 식(7)을 이용하여 실규모 화재 시 자연배출구를 통한 유출 질량 유량을 계산한 결과, 방화막이 설치된 경우 약 16.13 kg/s, 방화막이 미설치된 경우 약 16.87 kg/s로 계산되었다. 이와 같이 본 축소모형 실험에서는 자연배출구를 통한 유출 유동의 속도 및 질량 유량이 방화막의 설치 여부에 큰 영향을 받지 않았는데 이는 축소모형 실험 장치의 무대부에 존재하는 개구부 때문으로 판단된다. 만약 무대부에 개구부가 없는 조건이라면 공기의 유입이 프로서니엄 개구부를 통해서 주로 이루어지므로 방화막의 설치 여부가 자연배출구를 통한 유출 유동의 속도 및 질량 유량에 영향을 미칠 수 있다. 하지만 본 축소모형 실험에서는 방화막이 설치되어 객석부에서 무대부로의 공기 유입이 제한된다 하더라도 무대부에 존재하는 6개의 개구부를 통해 외부로부터 충분한 공기가 유입될 수 있는 조건이므로 방화막

의 설치 여부가 자연배출구를 통한 유출 유동의 속도 및 질량 유량에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실존하는 공연장을 1/14 비율로 축소시켜 제작한 모형을 이용하여 공연장 무대부 화재 시 자연배출구 및 방화막 조건이 연기 거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결과를 아래에 요약하였다.

1) 무대부의 경우, 자연배출구가 개방된 경우가 폐쇄된 경우에 비해, 방화막이 미설치된 경우가 설치된 경우에 비해 온도가 낮은 것으로 측정되었다. 한편, 객석부의 경우, 자연배출구가 개방된 경우가 폐쇄된 경우에 비해, 방화막이 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 온도가 낮은 것으로 측정되었다.

2) 자연배출구가 개방되고 방화막이 설치된 조건에서는 객석부가 낮은 온도로 유지되는 것을 확인할 수 있었고, 자연배출구가 폐쇄되고 방화막이 미설치된 조건에 비해 객석부 온도가 약 3.0 °C ~ 16.5 °C 낮은 것으로 측정되었다. 이를 통해 공연장 화재 시 자연배출구 개방 및 방화막 설치가 객석부 온도 감소에 큰 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

3) 방화막 미설치 조건에서 자연배출구를 개방한 경우가 폐쇄한 경우보다 프로시니엄 개구부에 근접한 객석부 열전대의 온도 상승 시작 시점이 약 23 s 지연되고 온도 상승이 작은 것으로 나타났다. 이를 통해 실제 공연장 화재 시 자연배출구 개방에 의해 무대부에서 객석부로 연기 유출 시작 시점을 지연시키고 객석부의 온도 상승을 억제 시킬 가능성이 있음을 확인하였다.

4) 본 실험 조건에서 자연배출구를 통해 유출되는 유동의 속도 및 질량 유량은 방화막 설치 여부에 큰 영향을 받지 않았는데, 이는 무대부에 존재하는 개구부 때문으로 판단된다.

후 기

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2019년도 문화기술연구개발 지원사업으로 수행되었음(R2017030085).

References

1. Ministry of Culture, Sports and Tourism, "Survey on the Performing Art" (2018).
2. W. S. Lee, S. H. Park, D. Kim, J. K. Park, H. S. Jang, J. S. Ryu and M. S. Kang, "Manual for Theatre Safety", Theater Safety Center in Korea Testing Laboratory (2015).
3. National Fire Agency, "Act on Fire Prevention and Installation, Maintenance, and Safety Control of Fire-fighting Systems" (2018).
4. D. M. Lee, B. S. Son and H. K. Jeon, "Smoke Management Engineering", Donghwa Technology Publishing, Paju, Korea, pp. 70-75 (2013).
5. Theater Safety Center in Korea Testing Laboratory, "Safety Guidelines and Technical Standards for Stage Facilities in Theatre" (2011).
6. Code of Practice (COP), "Code of Practice for Minimum Fire Service Installations and Equipment" (2012).
7. American National Standards Institute (ANSI), "ANSI E1.22, Entertainment Technology - Fire Safety Curtain System" (2016).
8. D. G. Kim, "Stage Facility Analysis Report", Theater Safety Center in Korea Testing Laboratory.
9. Y. J. Yeo, "A Study on the Major Design Factors affecting Ventilation in the Performance Hall Fires", Ph.D. Dissertation, Hoseo University (2012).
10. 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).
11. D. H. Kim, C. Y. Lee and D. Kim, "Prediction of the Fire Curtain Effect through a Numerical Simulation a Reduced Scale Model for Fires in Theaters", Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 51-59 (2018).
12. J. H. Kim, C. Y. Lee, L. G. Jeong and D. Kim, "Analysis of Smoke Behavior in Fire within Real-scale Theater Using FDS: Influence of Fire Curtain and Natural Smoke Vent Area", Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 7-14 (2018).
13. C. H. Hwang, B. H. Yoo, C. E. Lee, S. M. Kum, J. Y. Kim and H. J. Shin, "An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fire with Natural and Forced Ventilations", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, Vol. 29, No. 6, pp. 711-721 (2005).
14. P. A. Croce and Y. Xin, "Scale Modeling of Quasi-steady Wood Crib Fires in Enclosures", Fire Safety Journal, Vol. 40, No. 3, pp. 245-266 (2005).
15. H. Ingason, "Model Scale Railcar Fire Tests", Fire Safety Journal, Vol. 42, No. 4, pp. 271-282 (2007).
16. D. Yang, R. Huo, X. L. Zhang and X. Y. Zhao, "Comparison of the Distribution of Carbon monoxide Concentration and Temperature Rise in Channel Fires: Reduced-scale Experiments", Applied Thermal Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 528-536 (2011).
17. Y. Z. Li and H. Ingason, "Model Scale Tunnel Fire Tests with Automatic Sprinkler", Fire Safety Journal, Vol. 61, pp. 298-313 (2013).

18. R. R. Leisted, M. X. Sørensen and G. Jomaas, “Experimental Study on the Influence of Different Thermal Insulation Materials on the Fire Dynamics in a Reduced-scale Enclosure”, *Fire Safety Journal*, Vol. 93, pp. 114-125 (2017).
19. J. H. Klote and J. A. Milke, “Principles of Smoke Management”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, pp. 217-224 (2002).
20. B. Karlsson and J. G. Quintiere, “Enclosure Fire Dynamics”, CRC press, Boca Raton, pp. 88-89 (1999).