[Research Paper]

공연장 화재 축소모형을 이용한 전산시뮬레이션 검토: 방화막 및 무대부 자연배출구 영향

양지현 · 백선아 · 이치영[†] · 김동균^{**}

부경대학교 소방공학과 대학원생, [†]부경대학교 소방공학과 교수, ^{**}한국산업기술시험원 수석연구원

Examination on Numerical Simulation Using Reduced-scale Model of Theater Fire: Influences of Fire Curtain and Stage Natural Vent

Ji Hyun Yang · Seon A Baek · 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 October 10, 2019; Revised October 15, 2019; Accepted October 15, 2019)

요 약

본 연구에서는 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 이용한 공연장 화재 축소모형 전산시뮬레이션(Numerical simulation)을 통해 공연장 화재 시 방화막 설치 여부 및 무대부 자연배출구 개폐 영향을 검토하였다. 기존의 축소모형 실험 연구를 바탕으로, 실존하는 공연장에 대해 상사법칙을 적용하여 1/14 비율로 축소하여 설정한 축소모형 및 조건을 대상으로 하였다. 축소모형 전산시뮬레이션을 통해 연기 유동을 가시화하고, 무대부 및 객석부 온도, 자연배출구를 통한 유출 질량 유량, 객석부로의 연기 유출 시작 시점을 측정하고 분석하였다. 전반적으로, 본 전산시뮬레이션에서 예측된 방화막 설치 여부 및 무대부 자연배출구 개폐 영향에 대한 일반적인 경향은 기존 축소모형 실험에서와 유사한 것으로 나타났다. 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험 결과 간 정량적인 비교를 위해 무대부 및 객석부 온도, 자연배출구를 통한 유출 질량 유량에 대해 평균 백분율 오차를 계산하였고, 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험 결과가 비교적 일치함을 확인하였다.

ABSTRACT

In the present study, the influences of the fire curtain and natural vent in a theater fire were investigated through the numerical simulation of a reduced-scale model of a theater fire using the Fire Dynamics Simulator (FDS). Based on a previous experimental study using the reduced-scale model, the 1/14 reduced-scale model and its conditions were constructed according to the law of similarity with a real-scale theater. Through a series of numerical simulations, the smoke movements were visualized, and the temperatures in the stage and auditorium, mass flow rate of the outflow through natural vent, and time at which smoke started moving toward the auditorium were measured and analyzed. The general trends on the effects of the fire curtain and natural vent during the theater fire predicted by the present numerical simulation were similar to the previous experimental results. For quantitative comparison of the present numerical simulation and previous experimental results, the mean percentage errors of temperatures in the stage and auditorium, and the mass flow rate of outflow through the natural vent were calculated. The present numerical simulation results showed good agreement with previous experimental results with reasonable accuracy.

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

[†] 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.

1. 서론

최근 문화 생활에 대한 사람들의 관심이 증가되고 있으며, 음악, 발레, 오페라, 연극 등과 같은 다양한 예술 행위를 관람하기 위해 많은 사람들이 문화 공간을 찾고 있다. 이로 인해, 공연장과 같은 공연시설이 문화 공간의 중심으로 자리잡고 있으며 최근 들어 공연시설의 수가 증가⁽¹⁾하는 경향을 보이고 있다. 하지만, 공연장은 건물 내 구조에 익숙하지 않은 불특정 다수를 동시에 수용하고 내부 구조가 비교적 복잡하기 때문에 화재 발생 시 많은 인명 피해와 재산 피해가 발생할 가능성이 농후하다. 공연장의 특성상 발열량이 큰 조명이 설치되어있고 공연을 위한 소품, 무대막 등 다양한 가연물이 존재하는 무대부에서 화재가 발생⁽²⁾하는 빈도가 높은 것으로 알려져 있다. 이에 따라, 이러한 공연장 내 화재 시 피해를 예방하기 위해서는 공연장 내 화재 현상 및 화재 안전 관련 시설에 대한 연구가 수행되어야 한다.

공연장에는 화재 위험에 대비하기 위한 다양한 설비가 설치되며, 이 중 대표적인 것이 방화막과 연기배출구이다. 방화막의 경우 평상 시에는 프로시니엄(Proscenium) 개구부 위에 설치되어 있다가 무대부 화재 발생 시 무대부 바닥까지 하강하여 프로시니엄 개구부를 차단, 객석부로의 화염 및 연기의 유출을 지연시켜주는 장치^(3,4)이다. 2007년에 발생한 예술의전당 오페라하우스 화재 사례⁽⁵⁾를 토대로 볼 때, 방화막이 공연장 무대부 화재 시 인명 피해를 최소화하는데 중요한 역할을 한다는 것을 확인할 수 있었다. 최근 국내에서도 방화막의 중요성을 인지하고 설치를 권고하고 있지만 현실적으로는 매우 제한적으로 설치되어 있는 실정이다. 공연장안전지원센터의 무대시설 분석결과 보고서⁽⁶⁾에 의하면, 최근 5년 간 안전진단을 수행한 전체 329개의 공연장 중 방화막이 설치된 곳의 비율은 24% 정도 밖에 되지 않는 수준이며, 이는 방화막 설치 시 공간 및 비용 등과 같은 현실적인 제약 때문으로 판단된다. 이에 따라, 방화막 설치 비율을 높이기 위해서는 경제적이면서 고성능인 방화막 시스템 개발이 필요하고, 방화막과 관련된 기준을 보다 구체적이고 상세하게 보완해야 한다. 한편, 연기배출구는 공연장 무대 상부에 설치되어 화재로 인해 발생하는 연기를 외부로 배출시키는 설비이다. 공연장은 통상적으로 기계적인 힘을 통해 강제로 연기를 배출시키는 기계배연 방식을 채택하고 있지만, 기계배연 방식은 배출기를 설치할 공간이 확보되어야 하며 장치의 신뢰성을 높이기 위해서는 적절한 유지 및 관리가 필요하다는 단점⁽⁷⁾이 있다. 반면, 자연배연 방식은 기계배연 방식에 비해 동력원이 불필요하기 때문에 비용 절감의 효과가 있고 전체 시스템을 단순화하여 구성할 수 있다는 장점⁽⁷⁾이 존재한다. 공연장 내 자연배연 방식 적용 시 자연배출구 면적에 대해, 국내의 경우 무대부 면적의 10% 이상으로 설정하도록 권고⁽⁸⁾하고 있고, 해외의 경우 독일은 자연배출구의 유효개구부 면적이 무대

부 면적의 8%, 영국은 무대부 면적의 10%로 규정⁽⁸⁾되어 있다. 이러한 자연배연 방식을 공연장에 널리 적용하기 위해서는 자연배출구와 관련된 다양한 연구가 수행되어야 할 필요가 있다.

공연장 내 화재 시 방화막 및 연기배출구 관련 연구가 일부 진행된 바 있다. Kwon⁽⁹⁾은 전산시뮬레이션(Numerical simulation)을 이용하여 스프링클러설비, 방화막, 강제배출구(즉, 기계배연 방식의 연기배출구)가 공연장 화재 현상에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 방화막이 설치되고 강제배출구가 작동하는 조건이 객석부로의 연기 유출을 억제하는데 효과적임을 확인하였다. Kim 등⁽¹⁰⁾은 공연장 무대부 화재 발생 시, 방화막과 강제배출구가 객석부로의 연기 확산에 미치는 영향을 확인하기 위하여 전산시뮬레이션을 수행하였고, 방화막 유무 조건 하에서 강제배출구 설치 조건이 미설치 조건에 비해 프로시니엄 개구부를 통해 유출되는 질량 유량이 적다는 것을 확인하였다. Kim 등⁽¹¹⁾은 방화막 및 자연배출구 면적이 공연장 무대부 화재 발생에 의한 연기 거동에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 방화막과 자연배출구 면적이 객석부로의 연기 유출 및 자연배출구와 프로시니엄 개구부를 통한 질량 유량에 지대한 영향을 미치는 것을 확인하였다. Kim 등⁽¹²⁾은 기존 Yeo⁽¹³⁾의 축소모형 연구를 대상으로 전산시뮬레이션을 수행하여 기존 실험 결과⁽¹³⁾와 비교를 수행하였다. 또한, 공연장 화재 시 자연배출구 크기와 방화막 설치 여부에 따른 축소모형 내 연기층 온도, 개구부를 통한 질량 유량, 무대부에서 객석부로의 연기 유출 시점 등을 측정 및 분석하였고, 축소모형 전산시뮬레이션 결과와 상사법칙을 활용하여 실규모 공연장 화재 시 자연배출구 크기 조건 및 방화막 설치 여부 영향을 예측 및 검토하였다. 최근, Baek 등⁽¹⁴⁾은 실존하는 공연장을 대상으로 1/14 크기의 축소모형을 구축하고, 공연장 내 무대부 화재 시 자연배출구 및 방화막 영향 검토를 위한 실험을 진행하였다. 이를 통해, 자연배출구가 개방되고 방화막이 미설치된 조건에서 무대부 온도가 낮고, 자연배출구가 개방되고 방화막이 설치된 경우에 객석부의 온도가 낮게 나타나는 것을 실험적으로 확인하였다. 기존 연구 동향을 토대로 볼 때, 공연장 화재 시 방화막 및 연기배출구 관련한 기존 연구의 대부분⁽⁹⁻¹²⁾은 전산시뮬레이션을 통해 이루어졌고, 실험을 통한 연구의 경우 일부^(13,14) 수행된 바 있으나 매우 제한적이고 미흡한 실정인 것으로 판단된다.

한편, 화재 현상과 관련한 연구는 통상적으로 실험이나 전산시뮬레이션을 통해 이루어진다. 실규모 화재 실험의 경우, 실제 공간 내 화재 조건을 반영하여 진행되기 때문에 현실과 매우 유사한 화재 상황을 구현 할 수 있고, 따라서, 정확한 실험이 이루어질 경우 화재 현상을 가장 잘 예측할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 실험 시 화재로 인한 위험과 비용, 시간, 공간 등의 측면에서 볼 때 실규모 화재 실험의 경우 현실적인 제약이 따른다. 이러한 실규모 화재 실험에 대한 대안으로 전산시뮬레이션을 고려해 볼 수 있다. 전

Figure 1. Schematic diagram of numerical simulation (e.g., under opened natural vent condition with fire curtain).

산시뮬레이션은 실규모 화재 실험에 비해 비용, 시간, 공간적인 측면에서 장점을 가지고 있으며, 다양한 관점에서 화재 현상의 특성을 파악할 수 있고, 이와 관련된 다양한 결과를 자유롭게 도출할 수 있다. 하지만 화재 상황 예측에 전산시뮬레이션을 적용하기 위해서는 전산시뮬레이션에 대한 신뢰성 검증이 우선되어야 한다. 즉, 실제 공연장 화재 시 방화막 및 자연배출구의 영향 예측을 위해서 전산시뮬레이션의 신뢰성 검토가 수행되어야 하며, 이러한 관점에서 볼 때, 공연장 화재 관련 축소모형 실험 결과와 전산시뮬레이션 결과 간 비교 및 검토는 매우 의미있는 연구 주제 중 하나라고 판단된다.

본 연구에서는 Fire dynamics simulator (FDS)를 활용하여, 공연장 축소모형 실험을 수행한 기존 연구⁽¹⁴⁾와 유사한 형태 및 조건을 설정하여 방화막 설치 여부 및 무대부 자연배출구 개폐가 공연장 내 무대부 화재 시 연기 거동 및 화재 상황에 미치는 영향에 대해 전산시뮬레이션을 수행하였다. 축소모형의 경우 상사법칙을 적용하여 실존하는 공연장을 1/14 비율로 축소시켜 설정하였다. 방화막 설치 여부 및 자연배출구 개폐에 따른 축소모형 공연장 내 연기 유동을 가시화하였고, 무대부 온도와 무대부 자연배출구를 통한 유출 유동의 질량 유량, 객석부 온도, 무대부에서 객석부로 연기 유출 시작 시점에 대해 측정하고 검토하였다. 또한, 본 연구에서 도출한 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾ 간 비교 및 분석을 통해 전산시뮬레이션의 정확도를 확인하였다.

2. 전산시뮬레이션 방법 및 조건

2.1 전산시뮬레이션 방법

본 연구에서는 기존의 축소모형 실험 연구⁽¹⁴⁾를 바탕으로, 실존하는 공연장에 대해 상사법칙을 적용하여 1/14 비율로 축소하여 설정한 축소모형에 대해 전산시뮬레이션을 수행하였다. Figure 1에 본 연구에서 설정한 공연장 축소모형 전산시뮬레이션 형상(방화막이 설치되고 무대부 자연배출구가 개방되어 있는 경우)에 대해 나타내었다. 전산시뮬레이션 형상은 기존 축소모형 실험 장치⁽¹⁴⁾와 유사하게 설정하였다. Figure 1(a)와 같이, 전산시뮬레이션을 위한 무대부(Stage)의 크기는 2.04 m (폭) × 1.00 m (깊이) × 1.10 m (높이), 객석부(Auditorium)의 크기는 1.36 m (폭) × 1.50 m (깊이) × 1.10 m (높이)이고, 무대부 및 객석부에 존재하는 출입문을 모사하기 위해 무대부 및 객석부 아래에 0.07 m (깊이) × 0.14 m (높이) 크기의 개구부를 각각 6개씩 설정하였다. 무대부와 객석부 사이 경계를 이루는 곳에는 프로시니엄 벽(Proscenium wall)이 존재한다. 프로시니엄 벽 하단의 프로시니엄 개구부의 크기는 0.86 m (폭) × 0.48 m (높이)로 설정하였다.

Figure 1(b)와 같이 방화막 설치 조건의 경우, 방화막은 객석부 측 프로시니엄 개구부에 설치되었다. 방화막 크기의 경우 방화막 측면부와 프로시니엄 벽은 457 mm 이상, 방화막 상단부와 프로시니엄 벽은 610 mm 이상 겹치도록 (Overlap)⁽¹⁵⁾되어 있다. 이러한 규정에 따라 식(1)을 사용하여 해당 수치를 1/14 비율로 상사한 결과를 토대로 방화막 크기를 설정하였다.

$$\frac{l_m}{l_p} = \frac{1}{14} \quad (1)$$

여기서 l 은 길이, 하첨자 p 와 m 은 실험규모와 축소모형을 나타낸다. 즉, 축소모형 전산시뮬레이션 방화막 크기는 0.92 m (폭) × 0.52 m (높이)로 설정하였고, 이 경우 크기가 0.86 m (폭) × 0.48 m (높이)인 프로시니엄 개구부에 비해 방화막 양쪽 측면부가 0.03 m, 방화막 상단부가 0.04 m 겹치도록 되어 있다. 한편, 방화막 설치 시 방화막을 이용하여 프로시니엄 개구부를 완전 밀폐하였는데 이렇게 설정한 이유는 방화막의 설치 목적이 객석부의 화염 및 연기 확산 방지라는 것을 반영한 것이며, 공연장 방화막 시스템 설계 가이드라인(Guideline)⁽¹⁶⁾에서 화재 발생으로 인한 연기 확산을 대비하기 위하여 방화막 패널(Panel)의 연결부, 가이드레일(Guide rail) 및 상·하단부의 밀폐에 대한 설계를 제시하고 있기 때문이다. 또한, 홍콩, 미국 등의 해외에서는 방화막 착상 시간(즉, 화재 발생 후 방화막이 작동하여 무대부 바닥까지 착상하는데 걸리는 시간)을 30 s^(15,17) 이내로 규정하고 있으므로, 본 연구에서는 이러한 해외 규정에 대해 식 (2)를 적용하여 도출한 시간인 8 s 이내를 기준으로 방화막 착상 시간을 설정하여 전산시뮬레이션을 수행하였다.

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

여기서 t 는 시간을 나타낸다. 방화막 재료의 경우, 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾에서 모의 방화막으로 종이판을 사용하였으므로, 본 연구에서도 방화막에 종이의 물성치를 적용하여 전산시뮬레이션을 수행하였다.

한편, 자연배출구 위치 및 크기도 기존 연구⁽¹⁴⁾의 축소모형 실험과 유사하게 설정하였다. 자연배출구 개방 조건의 경우, Figure 1(c)와 같이 정사각형 형태의 자연배출구를 무대부 상부 중앙에 위치시켰으며, 자연배출구의 크기는 무대부 바닥 면적의 약 1%인 0.14 m (폭) × 0.14 m (깊이)로 설정하였다. 화원 조건도 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾에서 사용한 알코올 램프(Alcohol lamp)의 배치 및 열방출률과 유사하게 설정하였다. 본 전산시뮬레이션에서 적용한 화원의 형상을 Figure 1(d)에 나타내었다. 0.08 m (폭) × 0.07 m (높이) 크기인 알코올 램프 총 6개를 무대부 바닥 중심에 설치하였으며, 알코올 램프 1개 당 화원의 크기는 0.02 m (폭) × 0.02 m (깊이)로 하였다. 연료는 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾에서 사용한 메탄올(Methanol)을 적용하였다. 본 연구에서 설정한 시간에 따른 열방출률 변화를 Figure 2에 나타내었다. 화원의 열방출률은 t-squared fire model ($\dot{Q} = \alpha \times t^2$)⁽¹⁸⁾을 이용하였다. 여기서, $\dot{Q}$ 은 열방출률(kW), α 는 화재성장계수(kW/s²), t 는 시간(s)을 나타내고, 화재 성장 속도는 fast growth로 설정하였다. 본 연구에서는 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾을 토대로, 알코올 램프 1개당 열방출률을 0.208 kW

Figure 2. Heat release rate with time.

Figure 3. Details of measurement for numerical simulation.

로 설정하였고, 이 경우 최대 열방출률은 알코올 램프 6개의 열방출률인 1.248 kW로 나타났다. 한편, 전산시뮬레이션 시 초기 온도 조건은 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾을 토대로 조건에 따라 19.54-20.09 °C로 설정하였다.

축소모형을 이용한 기존 실험 연구⁽¹⁴⁾에서는 무대부 및 객석부 온도, 무대부 자연배출구를 통한 유출 유동의 속도 및 질량 유량을 측정하였고, 본 연구에서도 이와 같은 측정 결과를 도출하기 위해 다음과 같이 설정하였다. Figure 3에 본 연구에서 설정한 측정 관련 개략도를 나타내었다. 기존 연구⁽¹⁴⁾에서는 온도 측정을 위해 K-type 열전대를 이용하였고, 본 연구에서도 이와 유사하게 온도 측정을 위해 K-type 열전대의 물성치를 반영하여 설정하였다. 열전대는 무대부에 4개, 객석부에 6개를 설치하였는데 무대부의 경우, 자연배출구 하단(ST01), 프로시니엄 벽과 인접한 천장(ST02), 프로시니엄 개구부 상단(ST03) 및 하단(ST04)에 설정하였다. 한편, 객석부의 경우, 프로시니엄 개구부 상단(AT05), 프로시니엄 벽과 인접한 천장(AT06), 객석부 중심 천장

Table 1. Summary of Simulation Cases

Case	Fire Curtain	Natural Vent
With_FC&Opened_NV	With	Opened
Without_FC&Opened_NV	Without	Opened
With_FC&Closed_NV	With	Closed
Without_FC&Closed_NV	Without	Closed

(AT07), 객석부 3층(AT08), 2층(AT09), 1층(AT10)을 고려한 위치에 설정하였다. 각 측정 위치간 거리를 Figure 3에 함께 표시하였고, Figure 1과 Figure 3에는 나타내지 않았으나 열 전대 설치 형상도 구조물로 반영하여 설정하였다. 또한 무대부 화재 시 무대부 자연배출구를 통한 유출 유동의 질량 유량을 측정하였고, 이와 함께 무대부에서 객석부로의 연기 유출 시작 시점을 확인하기 위해 AT05 위치에서 시간에 따른 Soot 질량 분율을 측정하였다.

한편, 전산시뮬레이션을 위해 FDS (Ver. 6.6.0)를 사용하였다. 전산시뮬레이션 시 격자 크기는 $D^*/\delta x$ (Plume resolution index) 범위⁽¹⁹⁾를 고려하여 설정하였다. 여기서 D^* 와 δx 는 화재 특성 직경(Characteristic fire diameter)과 격자의 길이를 각각 나타낸다. 설정한 격자 크기에 대한 민감도를 판단하기 위하여 0.01 m (폭) × 0.01 m (깊이) × 0.01 m (높이)인 경우와 0.02 m (폭) × 0.02 m (깊이) × 0.02 m (높이)인 경우로 각각 설정하여 선행 전산시뮬레이션을 수행하였으며, 전산시뮬레이션 결과 간 차이가 미미한 것을 확인하였다. 전산시뮬레이션 시간 및 컴퓨터의 성능 등을 고려하여 격자 크기를 0.02 m (폭) × 0.02 m (깊이) × 0.02 m (높이)로 설정하였고, 이 경우 총 격자의 개수는 1,059,800개로 확인되었다. 효율적인 전산시뮬레이션을 위해 Message Passing Interface (MPI) 병렬 계산(Parallel processing)을 수행하였으며, 전산시뮬레이션 시간은 600 s로 설정하였다.

2.2 전산시뮬레이션 조건

공연장 무대부 화재 시 방화막 및 무대부 자연배출구 영향을 파악하기 위하여 방화막 설치 여부 및 자연배출구 개폐에 따른 총 4가지 조건에 대해 전산시뮬레이션을 수행하였고, 해당 조건을 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 방화막은 FC (Fire Curtain), 자연배출구는 NV (Natural Vent)로 나타내었다. 즉, 방화막이 설치되고 자연배출구가 개방된 경우(With_FC&Opened_NV), 방화막이 미설치되고 자연배출구가 개방된 경우(Without_FC&Opened_NV), 방화막이 설치되고 자연배출구가 폐쇄된 경우(With_FC&Closed_NV), 방화막이 미설치되고 자연배출구가 폐쇄된 경우(Without_FC&Closed_NV)에 대해 전산시뮬레이션을 수행하였다.

3. 전산시뮬레이션 결과 및 분석

3.1 연기 유동 가시화

방화막 설치 여부 및 자연배출구 개폐에 따른 연기 유동 가시화 결과를 Figure 4에 나타내었다. 방화막이 설치되고 자연배출구가 개방된 경우(Figure 4(a)), 화재 초기에는 무대부 바닥 중앙에 위치한 화원에서 발생한 연기가 화재에 의한 부력으로 인해 상승하여 천장에 도달하였다. 천장에 도달한 연기는 개방된 자연배출구를 통해 일부 유출되고, 일부는 천장 벽면을 따라 반경 방향으로 이동하여 측벽에 도달하면 측벽을 따라 하강하였다. 시간이 지남에 따라 무대부 공간 내 전체적인 연기층은 하강하였고, 연기층이 프로시니엄 개구부에 도달하여도 설치된 방화막에 의해 객석부로의 유출이 일어나지 않기 때문에 지속적으로 하강하였다. 하지만 일정 시간 이후 무대부 공간 내 전체적인 연기층 높이는 거의 일정한 수준을 유지하였으며, 이는 자연배출구를 통한 연기 유출 때문으로 판단된다. 본 전산시뮬레이션 시간 동안 무대부 공간 내 전체적인 연기층은 무대부 아래에 설치되어 있는 개구부까지는 도달하지 않는 것으로 관찰되었다. 한편, 방화막이 미설치되고 자연배출구가 개방된 경우(Figure 4(b)), 방화막이 설치된 경우(Figure 4(a))와 화재 초기에는 대부분 유사한 경향이 관찰되었다. 그러나 방화막이 미설치되었으므로 일정 시간 이후 무대부 공간 내 전체적인 연기층 높이가 프로시니엄 개구부 근처에서 거의 유지되면서 객석부로의 지속적인 연기 유출이 일어났고, 이로 인해 객석부에 연기층이 형성되고 점차 하강하는 경향이 나타났다. 객석부로의 연기 유출이 일어난 이후 무대부 내 전체적인 연기층의 높이는 거의 일정하게 유지되었다. 방화막이 미설치된 경우(Figure 4(b))가 설치된 경우(Figure 4(a))에 비해 무대부 내 전체적인 연기층의 높이가 약간 높은 것처럼 관찰되었는데 이는 무대부에서 객석부로의 연기 유출 때문으로 판단된다. 방화막이 설치되고 자연배출구가 폐쇄된 경우(Figure 4(c)), 자연배출구를 통한 연기 유출을 제외하면 전체적인 연기 거동은 방화막이 설치되고 자연배출구가 개방된 경우(Figure 4(a))와 유사하였다. 하지만 방화막 설치 및 자연배출구 폐쇄에 의해 무대부로부터 객석부 및 외부로의 연기 유출이 일어나지 않기 때문에 무대부 공간 내 전체적인 연기층의 하강 속도가 비교적 빨랐고, 해당 연기층이 지속적으로 하강하여 무대부 아래에 있는 측면 개구부까지 도달하여 일부 유출되었다. 방

Figure 4. Visualized smoke movements.

화막이 미설치되고 자연배출구가 폐쇄된 경우(Figure 4(d)), 방화막이 설치되고 자연배출구가 개방된 경우(Figure 4(a))와 비교할 때 자연배출구를 통한 연기 유출이 없는 것을 제외하고 화재 초기 연기층의 거동은 유사하였다. 하지만 무대부 공간 내 전체적인 연기층이 프로시니엄 개구부 근처에 도달한 이후 해당 위치에서 객석부로의 지속적인 연

기 유출이 관찰되었고, 무대부에서 객석부로 유출된 연기에 의해 객석부에 연기층이 형성되고 해당 연기층이 하강하였다. 시간이 지남에 따라 무대부와 객석부 내 전체적인 연기층의 하강이 관찰되었고, 두 공간 내 연기층이 모두 해당 공간 아래의 개구부에 도달하여 해당 개구부를 통한 연기 유출이 일어났다.

연기 유동 가시화 결과를 통해, 방화막이 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 무대부에서 객석부로의 연기 유출을 막을 수 있는 반면, 무대부 내 연기층을 더 낮은 높이로 형성시키거나 연기층의 하강 속도를 가속시키는 결과를 초래하였다. 한편, 자연배출구가 개방된 경우는 폐쇄된 경우에 비해 무대부에서 객석부로의 연기 유출 시점을 지연시키고 무대부 및 객석부 내 연기층의 하강 속도를 늦추는 효과가 있는 것으로 관찰되었다. 공연장 내 무대부 화재 시 객석부 내 관객들의 피난 시간 확보를 위해 객석부 내 연기층 형성을 억제하기 위해서는 방화막을 설치하여 화재 시 프로시니엄 개구부를 방화막으로 폐쇄하거나 무대부 자연배출구를 개방하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

3.2 무대부 내 전산시뮬레이션 결과

방화막 설치 여부와 자연배출구 개폐에 따른 무대부 내 위치별 온도 차이를 Figure 5에 나타내었다. Figure 5에 나타난 온도 데이터는 전산시뮬레이션 결과 중 400 s에서 600 s 시간 구간 내 결과를 평균하여 나타내었고, 비교를 위해 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾를 함께 나타내었다. 한편, x축에 나타난 화원으로부터 떨어진 각 측정 위치까지의 거리는 Figure 3을 바탕으로 표시하였는데, 본 전산시뮬레이션의 격자 크기 설정 조건 등으로 인해 본 전산시뮬레이션과 기존 축소모형 실험 간 약 10 mm 정도의 측정 위치 차이가 존재하고 있음을 알 수 있다.

전산시뮬레이션 결과, 화원에서 발생한 연기 유동이 가장 먼저 도달하는 ST01에서의 온도가 가장 높았고 이후 천장 벽을 따라 반경 방향으로 이동한 연기가 측면 벽을 따라 하강하므로 ST02, ST03, ST04 순서로 온도가 낮아지는 경향이 관찰되었다. 즉, 화원에서 거리가 멀어질수록 온도가 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 주변으로의 열손실 및 공기 유입 효과 때문으로 판단된다. 한편, 전산시뮬레이션에 의한 무대부 내 측정 지점에서의 온도 측정 결과, 방화막이 설치된 경우 자연배출구가 개방된 조건에서는 약 42.6-23.9 °C, 폐쇄된 조건에서는 약 55.5-33.5 °C로 나타났고, 방화막이 미설치된 경우 자연배출구가 개방된 조건에서는 약 43.7-23.3 °C, 폐쇄된 조건에서는 약 50.7-28.1 °C로 나타났다. 전체적으로 방화막이 설치되거나 자연배출구가 폐쇄된 경우가 방화막이 미설치되거나 자연배출구가 개방된 경우에 비해 무대부 내 온도가 높은 경향이 나타났다. 이러한 결과가 나타난 이유 중 하나는 비교적 온도가 높은 연기 유동이 방화막 설치나 자연배출구 폐쇄에 의해 객석 또는 외부로 유출되는 것이 억제되었기 때문으로 판단된다. 또한 각 지점에서 각 조건의 전산시뮬레이션 간 온도 차이를 고려할 때 방화막 설치 여부에 따른 온도 차이보다 자연배출구 개폐에 따른 온도 차이가 더 큰 것으로 관찰되었고, 이는 방화막 설치 여부보다 자연배출구 개폐가 무대부 온도에 더욱 지대한 영향을 미친다는 것을 의미한다. 한편, 방화막 설치 여부 및 자연배출구 개폐가 무대부

Figure 5. Temperatures with positions in stage.

Figure 6. Comparison of temperatures in stage between present numerical simulation and previous experimental data.

내 온도에 미치는 영향에 대한 본 연구의 전산시뮬레이션 결과는 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾와 비교적 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

무대부 온도에 대해 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾ 간 비교를 Figure 6에 나타내었고, 이와 함께 식(3)과 같이 정의되는 평균 백분율 오차(Mean percentage error; MPE)로 정량화하였다. 식(3)에서 Num 은 전산시뮬레이션 결과, Exp 는 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾, N 은 데이터 개수를 나타낸다. Figure 6에 나타난 바와 같이 일부 비교적 온도가 높은 위치(예를 들면 ST01)에서는 본 전산시뮬레이션이 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾를 과소 예측하고 있는 것으로 나타났으나, 전체적으로 볼 때 본 전산

시물레이션 결과와 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾ 간 온도 측정 결과가 유사함을 정성적으로 확인할 수 있었다. 식(3)을 통해 계산한 평균 백분율 오차를 세부적으로 살펴보면, 자연배출구가 개방된 경우, 방화막 설치 조건에서 약 11%, 미설치 조건에서 약 13%로 나타났고, 자연배출구가 폐쇄된 경우, 방화막 설치와 미설치 조건에서 모두 약 14%로 나타났다. 이를 토대로, 모든 조건에서의 무대부 온도에 대해 본 전산시물레이션 결과와 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾ 간 평균 백분율 오차는 약 13% 정도임을 확인하였다.

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Num_i - Exp_i}{Exp_i} \right| \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Figure 7에는 무대부 천장 중심에 설치된 자연배출구를 통해 유출되는 질량 유량에 방화막 설치 여부가 미치는 영향에 대한 전산시물레이션 결과를 나타내었고, 비교를 위해 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾를 함께 표시하였다. 전산시물레이션 결과, 초기를 제외하고 자연배출구를 통한 유출 질량 유량이 거의 일정하게 유지되는 것처럼 나타났다. 30 s 부터 600 s 시간 구간에 대해 평균한 결과 자연배출구를 통해 유출되는 평균 질량 유량은 방화막 설치 조건에서 약 0.023 kg/s, 방화막 미설치 조건에서 약 0.024 kg/s로 측정되었다. 본 전산시물레이션 결과를 토대로 볼 때, 방화막 설치 여부가 유출 질량 유량에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났고, 이는 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾와 유사한 경향이다. 이와 같이 방화막 설치 여부가 자연배출구를 통한 질량 유량에 미치는 영향이 크지 않은 이유는 방화막에 의해 프로시니엄 개구부가 폐쇄되어 객석부에서 무대부로 공기 유입이 제한된다 하더라도 무대부 아래에 있는 개구부로부터 비교적 충분한 공기가 유입될 수 있는 상황이기 때문으로 판단된다. 한편, 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾, 방화막 설치와 미설치 조건에서 자연배출구를 통해 유출되는 질량 유량은 각각 약 0.022 kg/s와 0.023 kg/s로 측정되었고, 식(3)을 이용하여 본 전산시물레이션과 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾ 간 비교 결과, 방화막 설치 및 미설치 조건에서의 평균 백분율 오차가 각각 약 4.5%와 4.3%로 나타났다.

3.3 객석부 내 전산시물레이션 결과

방화막 설치 여부 및 자연배출구 개폐는 무대부 내 온도 및 무대부 자연배출구를 통한 유출 유동의 질량 유량 뿐 아니라 객석부 내 온도 및 무대부에서 객석부로 연기 유출 거동에 지대한 영향을 미칠 수 있다.

방화막 설치 여부와 자연배출구 개폐에 따른 객석부 내 위치별 온도 차이를 Figure 8에 나타내었다. Figure 8 내 전산시물레이션 온도 데이터는 400 s에서 600 s 시간 구간 내 결과를 평균하여 나타내었고, 비교를 위해 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾를 함께 나타내었다. 한편, x축에 나타난 화원으로부터 떨어진 각 측정 위치까지의 거리는 Figure 3을 바탕

Figure 7. Effect of fire curtain conditions on mass flow rates of outflows through natural vent.

Figure 8. Temperatures with positions in auditorium.

으로 표시하였는데, 본 전산시물레이션과 기존 축소모형 실험 간 약 16-23 mm 정도의 측정 위치 차이가 존재하였다.

객석부 내 측정 지점에서의 온도에 대한 전산시물레이션 결과, 방화막이 설치된 경우 자연배출구가 개방된 조건에서는 모든 지점에서 약 19.5 °C, 폐쇄된 조건에서는 모든 지점에서 약 20.1 °C로, 각 전산시물레이션에서의 초기 설정 온도와 거의 동일하게 나타났다. 한편, 방화막이 미설치된 경우 자연배출구가 개방된 조건에서는 약 24.6-20.6 °C, 폐쇄된 조건에서는 약 36.4-26.2 °C로 나타났다. 방화막 설치 여부가 객석부 내 온도에 미치는 영향을 살펴보면, 자연배출구 개폐와는 관계없이, 방화막 설치 조건이 미설치 조건에 비해 객석부 내 측정 위치에서의 온도가 확연히 낮은 것으로 나타났다. 한편, 자연배출구 개폐 영향의 경우, 방

화막 설치 조건에서는 자연배출구 개폐가 객석부 내 온도에 미치는 영향이 미미한 반면, 방화막 미설치 조건에서는 자연배출구가 개방된 경우가 폐쇄된 경우에 비해 객석부 내 측정 지점에서의 평균 온도가 확연히 낮은 것으로 관찰되었다. 전체적으로 방화막이 설치되거나 무대부 내 자연배출구가 개방된 경우가 객석부 내 측정 지점에서의 온도가 낮은 것으로 나타났는데 이는 방화막 설치에 의해 무대부에서 객석부로 연기 유출 및 열전달이 제한되고, 자연배출구 개방에 의해 무대부에서 객석부로 연기 유출 및 무대부의 온도 상승이 억제되기 때문으로 판단된다. 본 전산시뮬레이션을 통해 무대부 화재 시 객석부의 온도 상승을 억제하기 위해서는 방화막이 설치되고 자연배출구가 개방되어야 할 것으로 판단된다. 또한, Figure 8에 나타난 바와 같이 본 연구의 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾ 간 방화막 설치 여부 및 자연배출구 개폐가 객석부 내 온도에 미치는 영향에 대한 전체적인 경향이 유사한 것으로 나타났다.

Figure 9에 객석부 온도에 대한 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾ 간 비교를 나타내었고, 정성적으로 비교적 일치함을 확인할 수 있었다. 두 결과 간 차이를 식(3)의 평균 백분율 오차로 계산하여 정량화한 결과, 자연배출구가 개방된 경우, 방화막 설치 조건에서 약 2.5%, 미설치 조건에서 약 4.9%로 나타났고, 자연배출구가 폐쇄된 경우, 방화막 설치 조건에서 약 4.2%, 미설치 조건에서 약 9.2%로 나타났다. 비교 결과, 객석부 모든 측정 온도에 대해 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾ 간 평균 백분율 오차는 약 5.2% 정도임을 확인할 수 있었다.

객석부의 온도 뿐 아니라 무대부에서 객석부로 연기 유출 시작 시점은 객석부 내 관객의 피난 시간 확보와 밀접한 연관이 있을 수 있다. 무대부에서 객석부로 연기 유출 시작 시점을 파악하기 위하여 객석부 측 프로시니엄 개구부 근처에 위치해 있는 AT05에서 시간에 따른 Soot 질량 분율을 측정하였고, 해당 측정 결과를 Figure 10에 나타내었다. 자연배출구가 개방된 조건이 폐쇄된 조건에 비해 Soot 질량 분율이 증가하기 시작하는 시점이 더 늦은 것으로 관찰되었고, 이는 무대부 내 화재 시 자연배출구의 개방을 통해 무대부에서 객석부로 연기 유출을 지연시켜 관객의 피난 시간을 확보할 수 있는 가능성이 있음을 의미한다.

한편, Figure 10에 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾를 측정 데이터의 평균 및 표준편차를 고려하여 함께 나타내었다. 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾에서는 AT05 위치에서 시간에 따른 온도 상승 시작 시점을 분석하여 이를 무대부에서 객석부로 연기 유출 시작 시점과 연관있는 지표로 판단하였고, 해당 위치에서 온도 상승이 시작되는 평균 시간은 자연배출구 개방 시 약 41 s, 폐쇄 시 약 18 s라고 분석하였다. Figure 10에 나타난 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾에서의 온도 상승 시점과 본 전산시뮬레이션의 Soot 질량 분율 상승 시점은 측정 데이터의 표준편차 및 상승 시점 판단에 대한 오차 등을 고려할

Figure 9. Comparison of temperatures in auditorium between present numerical simulation and previous experimental data.

Figure 10. Effect of natural vent conditions on temporal soot mass fraction at AT05.

때 비교적 유사한 것으로 관찰되었다.

본 축소모형 전산시뮬레이션을 통해 공연장 내 무대부 화재 시 방화막 설치 여부 및 자연배출구 개폐가 연기 거동 및 화재 상황에 지대한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 공연장 내 무대부 화재 시 객석부 내 관객들의 안전과 피난 시간을 확보하기 위해서는 객석부의 온도를 낮게 유지하고 무대부에서 객석부로 연기 유출을 억제하는 것이 필요하다. 본 전산시뮬레이션 결과를 토대로 볼 때, 이를 위해서는 방화막이 설치되어 프로시니엄 개구부를 폐쇄하거나 자연배출구가 개방되어 무대부 내 고온의 연기를 공연장 외부로 효과적으로 유출해야 함을 확인할 수 있었다. 즉, 방화막에 의해 프로시니엄 개구부가 폐쇄되고 자연배출구가 개

방되는 조건이 공연장 내 화재 시 관객의 안전 및 피난 시간 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서는 매우 제한적인 경우에 대해 전산시뮬레이션을 수행하였으므로, 보다 다양한 조건(다양한 열방출률, 공연장 크기 및 구조, 화원 및 자연배출구 크기 및 위치 등)에서의 연기 거동 및 화재 현상에 대한 전산시뮬레이션이 수행되어야 하고, 이에 따른 방화막 설치 여부 및 자연배출구 개폐의 영향에 대한 검토가 이루어질 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

연구에서는 공연장 축소모형 실험을 수행한 기존 연구⁽¹⁴⁾를 대상으로 공연장 내 무대부 화재 시 방화막 설치 여부 및 무대부 자연배출구 개폐가 연기 거동 및 화재 상황에 미치는 영향을 검토하기 위해 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 활용하여 전산시뮬레이션을 수행하였다. 축소모형 전산시뮬레이션을 통해 축소모형 공연장 내 연기 유동 가시화, 무대부 온도, 무대부 자연배출구를 통한 유출 질량 유량, 객석부 온도, 무대부에서 객석부로 연기 유출 시작 시점에 대해 측정하고 분석하였다. 그리고 본 연구의 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾ 간 비교를 통해 전산시뮬레이션의 정확도를 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결과를 아래에 정리하였다.

1) 연기 유동 가시화 결과, 방화막 설치에 의해 무대부에서 객석부로 연기 유출을 막을 수 있었으나 방화막이 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 무대부 내 연기층이 더 낮은 높이에 형성되거나 연기층 하강이 가속되는 결과가 관찰되었다. 한편, 무대부 자연배출구 개방에 의해 무대부에서 객석부로 연기 유출 시점이 지연되고 무대부 및 객석부 내 연기층의 하강 속도가 감소되는 효과가 있는 것으로 관찰되었다.

2) 무대부 내 온도 측정 결과, 방화막이 설치되거나 자연배연구가 폐쇄된 경우에서 높게 나타났고, 방화막 설치 여부보다 자연배연구 개폐가 무대부 온도에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾ 간 무대부 내 온도 측정 결과의 평균 백분율 오차는 약 13% 정도로 나타났다.

3) 본 전산시뮬레이션 조건에서 방화막 설치 여부가 무대부 자연배출구를 통한 유출 유동의 질량 유량에 미치는 영향이 미미하였으며, 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾과 비교한 결과, 방화막 설치 및 미설치 조건에서의 평균 백분율 오차가 각각 약 4.5%와 4.3%로 나타났다.

4) 객석부 내 온도 측정 결과, 방화막이 설치되거나 무대부 내 자연배출구가 개방된 경우에서 낮게 나타났고, 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험⁽¹⁴⁾ 간 객석부 내 온도 측정 결과의 평균 백분율 오차는 약 5.2% 정도임을 확인할 수 있었다.

5) 무대부에서 객석부로 연기 유출 시점을 검토하기

위해 객석부 측 프로시니엄 개구부 근처에서 시간에 따른 Soot 질량 분율 변화를 측정하였다. 본 전산시뮬레이션 결과, 자연배출구 개방에 의해 무대부에서 객석부로 연기 유출 시점을 지연시킬 가능성이 있는 것으로 나타났고, 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 축소모형 실험 결과⁽¹⁴⁾ 간 경향이 유사함을 확인하였다.

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. S. H. Kim, S. H. Park, D. Kim, J. K. Park and Y. K. Park, "Accidents in Theaters - Case Study", Theater Safety Center in Korea Testing Laboratory (2014).
3. Public Performance Act, § 12(7) (2015).
4. J. Y. Chung and Y. K. Park, "A Study on Stage Facilities and Spaces in the Incheon Culture-Art Complex", Architectural Institute of Korea, Vol. 16, No. 2, pp. 29-33 (1996).
5. H. H. Kim, "A Study on the Improvement of Fire Protection System for Performing Art Center", Master's Thesis, Kyonggi University (2009).
6. D. G. Kim, "Stage Facility Analysis Report", Theater Safety Center in Korea Testing Laboratory.
7. D. M. Lee, B. S. Son and H. K. Jeon, "Smoke Management Engineering", Donghwa Technology Publishing, Paju, Korea, pp. 70-75 (2013).
8. Theater Safety Center in Korea Testing Laboratory, "Safety Guidelines and Technical Standards for Stage Facilities in Theatre" (2011).
9. J. W. Kwon, "Assessment of Fire Protection Systems in Proscenium Theaters", Case Studies in Fire Safety, Vol. 2, pp. 9-15 (2014).
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. 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).
12. 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).
13. Y. J. Yeo, “A Study on the Major Design Factors affecting Ventilation in the Performance Hall Fires”, Ph.D. Thesis, Hoseo University (2012).
 14. 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).
 15. ANSI (American National Standards Institute), “ANSI E1.22, Entertainment Technology – Fire Safety Curtain System” (2016).
 16. Theater Safety Center in Korea Testing Laboratory, “Design Guidelines for Theatre Safety Curtain Systems” (2019).
 17. COP (Code of Practice), “Code of Practice for Minimum Fire Service Installations and Equipment” (2012).
 18. B. Karlsson and J. G. Quintiere, “Enclosure Fire Dynamics”, Boca Raton, CRC press (1999).
 19. 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).