

## 조합형 복합상영관에서의 화재조건에 따른 초기화재 거동해석 Primary Fire Behavior of Compounded Multiplex Theater with Various Fire Conditions

박 용 환<sup>†</sup>

Yong-Hwan Park<sup>†</sup>

호서대학교 소방방재학과  
(2006. 8. 11. 접수/2007. 1. 8. 채택)

### 요 약

본 연구는 최근 급격히 늘어나고 있는 복합상영관의 화재안전 성능을 확보하기 위한 차원에서 설계단계에 있는 조합형 복합상영관에 대하여 화재모델링에 의한 공간특성 및 화재조건에 따른 초기화재 거동 특성을 다양하게 분석함으로써 방재대책 개선의 방향을 제시하고자 하였다. 화재하중이 작더라도 연기유동 특성으로 인하여 개구부에서의 온도상승속도는 오히려 증가될 수 있으며, 과도한 방염제의 사용은 오히려 연기발생량을 증가시켜 피난을 어렵게 하고 조기 질식사의 원인을 제공할 수 있는 것으로 나타났다. 설치된 배기구가 미 작동 시 단지 연기의 배출이 정지될 뿐 아니라 헤드의 작동시간을 지연시킴으로 인해 화재 진압도 지연되는 것으로 나타났다.

### ABSTRACT

This paper investigated the fire and smoke behavior in the compounded multiplex theater using FDS with various spacial and boundary conditions to ensure the fire safety of the multiplex. The results showed that more rapid temperature increase and smoke can be induced near the exit door for the lower fire load due to the horizontal smoke movement. The overuse of fire resistants can generate more smoke while delaying combustion rate, which can give adverse effect to the evacuation. The mal-function of the exhaust fan would obstruct smoke exhaust but also retard the function of sprinkler head.

**Keywords :** Multiplex, Modeling, Fire behavior, Smoke, Exhaust fan

### 1. 서 론

최근 스크린쿼터와 함께 국내 영화산업 발달의 견인차가 된 복합상영관은 새로운 문화공간의 중심으로 자리 잡고 있다. 다수의 소규모 상영관으로 구성되는 복합상영관은 고객에게 윈스톱 기능의 편리성을 제공하기 위해 대부분 식당, 쇼핑몰 등 다른 상업시설이나 다양한 문화시설이 함께 자리 하고 있는 대형 또는 초고층 건물에 위치하고 있으며, 일시에 많은 유동인구를 갖는 대표적인 대중적 공간이어서 화재발생에 따른 위험도는 훨씬 증가되고 있다.

그러나 복합상영관이 자리 잡고 있는 대형, 초고층

건물들은 특수한 경우를 제외하고는 복합상영관의 상업성을 강조한 나머지 복합상영관으로서의 화재안전상의 특성을 간과하고 기능 위주의 단순한 구조설계가 된 경우가 대부분이며, 화재감지 및 소화시설과 피난 시설 또한 관련법을 준수하는 정도의 최소 기능만 갖추고 있는 실정이다. 국내에서도 복합상영관의 화재특성에 대한 연구가 일부 진행된 적은 있지만 특정 상황에 대한 단편적 모델링에 그치고 있어 다양한 측면에서 보다 심도 있는 연구가 필요한 실정이다.<sup>1-3)</sup>

본 연구에서는 설계 단계에 있는 대표적인 복합상영관 구조의 하나인 조합형 복합 상영관-A에 대하여 전산유동해석(CFD)에 기초한 FDS 화재모델링 기법을 이용하여 여러 가지 화재 및 경계조건에 따른 화재의 초기 거동을 분석하고 구조상의 문제점을 도출하는 한

<sup>†</sup>E-mail: yhpark@office.hoseo.ac.kr

편, 보다 나은 화재방재 대책의 방향을 제시함으로써 복합상영관의 화재안전 성능을 개선하고자 하였다.

## 2. 조합형 복합 상영관-A의 공간 특성

### 2.1 공간 구성 및 치수

일반적으로 복합상영관의 구성은 여러 층에 걸쳐 배치하고 계단, 엘리베이터, 에스컬레이터 등의 수직 동선을 이용하여 접근하는 수직형과, 같은 층에서 상영관의 크기와 배치를 다양하게 구성하는 수평형이 있으며, 이 두 가지를 조합하여 구성함으로써 중규모 건물에서 사용이 적합한 조합형 형태가 있다.

해석 대상으로 선정된 복합상영관-A는 크기와 구조가 동일한 8개의 상영관이 2개 층에 걸쳐 4개씩 배치되는 조합형이며 수평 공간상에서는 경계벽을 중심으로 각각 대칭으로 배치되는 형태로 설계되어 있다. 1개 상영관은 상영실, 영사실, 그리고 복도로 구성되어 있으며, 크기는 상영실의 경우 25.5 m(W)×16.3 m(D)×11.6 m(H), 영사실의 경우 5 m(W)×19.5 m(D)×5.6 m(H), 그리고 복도는 25.5 m(W)×2.85 m(D)×3 m(H) 크기로 구획되어 있다.

또한, 상영실의 스크린을 기준으로 하여 우측면에 크기 0.9 m×2.1 m의 비상구가 있고 입구 및 출구는 1.8 m×2.1 m의 동일 크기로서 스크린 기준 좌측면 앞·뒤에 각각 하나씩 있다. 입구는 영사실 쪽에, 출구는 스크린 쪽에 위치하고 있으며, 계단으로 인하여 입구의 높이는 출구보다 3 m 높은 곳에 위치하고 있다. 상영실과 영사실 사이에는 0.5 m×0.5 m 크기의 개구부 2개가 중앙부 약 10 m 높이에 위치하고 있다.

복합상영관-A에는 화재에 대비하여 피난이 용이하도록

록 제연설비가 갖추어져 있으며, 제연방식은 배기 댐퍼의 동작에 의해 배출기를 통해 연기가 외부로 배출되는 기계제연 방식이다. 배기구는 평상시에는 여름과 겨울에 냉난방용으로 사용되는 공조 설비 겸용이며, 별도의 급기구는 없다. 배출구의 크기는 0.5 m×0.5 m로서 화재 시의 최대 배출 풍량은 1400 C MH, 배출풍속은 약 1.77 m/s이며, 위치는 천정에 모두 12개가 설치되어 있다. Fig. 1은 본 복합상영관 공간의 크기 및 구성을 나타내고 있다.

### 2.2 내장재의 특성

화재 시 실내 내장재는 가연물로서 화재의 크기, 연기 및 유독 물질 발생에 많은 영향을 준다. 화재 시 재실자가 사망하는 가장 큰 원인은 연기에 의한 질식사나 가연물에서 발생하는 유독성 가스이므로 다중시설에서의 내장재 선정 시에는 내장재의 불연 또는 난연 특성이나 방염 처리 등에 특별한 주의를 기울일 필요가 있다. 본 복합 상영관 내장재의 경우 의자와 카펫은 방염 처리된 폴리프로필렌 또는 폴리스티렌 재질을 사용하게 되어 있으며 벽 및 천정은 콘크리트 시공 후 흡음재로 덮는 것으로 되어 있다.

화재 모델링 시에는 이러한 내장재의 연소 특성을 정확히 반영하는 것이 무엇보다 중요하데, 본 해석의 경우 해당 내장재에 대한 특성 데이터를 확보하기 어려운 경우에는 해석 프로그램의 데이터베이스 내에서 동일 용도의 가장 가까운 특성을 가진 물질을 선정하여, 중요 부분의 물성을 변화시켜가며 해석을 시도하였다. Table 1은 본 해석에 사용된 벽·천정에 덮여 있는 흡음재 재질 및 의자·카펫의 연소 특성 물성을 요약한 것이다.

### 2.3 스프링클러의 특성

본 복합상영관은 다중시설이므로 화재 시 초기 진화 및 확산 방지를 위한 스프링클러 설비가 천정에 설치되도록 되어 있다. 스프링클러 설비는 반응시간지수(RTI) 값에 따라 일반형( $80\sim350\sqrt{\text{m/sec}}$ )과 속도형( $50\sqrt{\text{m/sec}}$ )

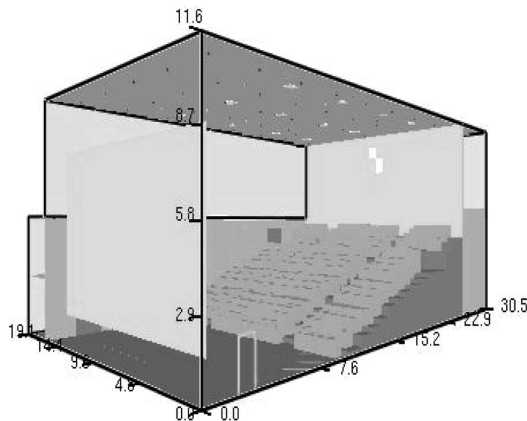


Fig. 1. The structure and dimension of multiplex-A (unit: m).

Table 1. Combustion characteristics of interior materials

특성	의자	카펫	흡음재
내장재			
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	749	749	1440
최대 연소속도	0.05	0.05	0.024
착화온도(°C)	250	250	510
증발열(J/g)	2000	2000	1000
연소열(J/g)	22300	22300	11200

m/sec 이하)이 있는데, 본 공간에는 RTI가 150, 작동온도 72°C의 폐쇄형 헤드를 가진 일반형 스프링클러가 천정부에 정사각형 배치로 40개가 설치되어 있다.

### 3. 화재시나리오 및 모델링

본 연구에서 사용된 화재모델링 프로그램은 미국 NIST/BFRL에서 개발된 FDS v4.05와 이미지 처리 프로그램인 Smokeview v4로, 주어진 공간에 대한 총 격자수는 390608개로 하였다.

본 해석에서 화재 시나리오는 비상구 쪽 의자 가까운 바닥 카펫에서 발생하는 것으로 하였으며, 화재성장특성은 화재하중이 비교적 크고 화재성장속도가 빠른 fast 화재로 가정하였다. 화재의 중심은 (7.9 m, 1.5 m) 지점의 카펫 바닥으로 하였고 발생 면적은 약 1 m×1 m으로 설정하였다. 주어진 가연물에 대해 본 복합상영관의 화재하중 값은 약 978 KW/m<sup>2</sup>로 산출되었다. 이에 따라 멀티플렉스의 화재하중 크기를 1 MW/m<sup>2</sup>인 경우와 이보다 2배 큰 2 MW/m<sup>2</sup>인 두 가지 경우로 가정하여 서로 크기가 다른 화재강도일 때의 실내 온도변화 및 연기 발생량에 대하여 비교하였다.

또한 스프링클러의 특성이 화재 거동에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위하여, 실제 설계된 작동온도 72°C인 일반형 스프링클러와 비교 목적의 작동온도 68°C인 속도형 스프링클러의 두 가지 경우에 대하여 화재진압속도 및 연기하강속도에 대한 영향을 비교하였다.

의자 및 카펫 등 내장재의 물성 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여 방염(A)와 방염(B)의 두 가지 조건을 가정하였다. 방염(B)는 방염(A)에 비해 착화온도는 동일한 반면 연소속도는 1/2의 지연 특성을 갖고, 이로 인해 매연(soot)과 CO의 발생량은 2배로 증가하는 것으로 하였다. 또, 영화관과 같은 다중시설에서는 제연설비가 미 동작 시에 큰 인명 피해를 야기하는 경우가 있으므로, 본 해석에서는 일정한 화재하중에 대하여 배출구가 작동될 경우와 미 작동될 경우의 2가지 경우에 대하여서도 조사하였다.

### 4. 결과 및 분석

#### 4.1 화재하중에 따른 화재 특성

피난 도중에 입·출구에서 온도가 급격히 상승하거나 유해물질이 포함된 연기가 급속히 하강할 경우 호흡곤란, 시야장애 등으로 인하여 피난이 곤란하다. 가연물의 특성에 따른 화재하중의 크기 변화에 따라 피난구로 사용될 수 있는 상영관 입·출구에서의 온도

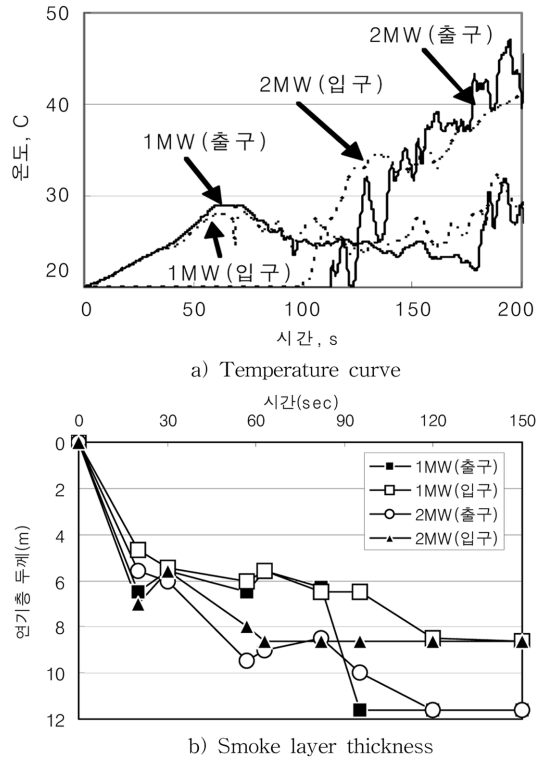


Fig. 2. Temperature and smoke layer thickness with different fire loads.

상승속도 및 연기하강속도를 비교하여 보았다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 화재 시 피난 출구로 사용되는 입·출구 1.5 m 지점에서의 온도상승속도는 화재하중의 크기에 따라 매우 다른 양상을 나타내었다. 내장재의 방염처리에 따라 화염성장은 활발하지 못하고 전체적으로 억제되는 모습이었으나, 연기는 상당량 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 화재하중에 따른 연기유동 특성을 나타낸 것으로 화재하중 1 MW/m<sup>2</sup>일 경우 연기가 주변으로 폭 넓게 확산되어 입·출구 쪽의 온도가 바로 서서히 상승하였지만, 화재하중 2 MW/m<sup>2</sup>일 경우 열부력이 커져 연기가 수직 상승하고, 연기가 천정을 따라 이동한 후 입·출구 부근에서 다시 내려오는 것으로 관찰되었으며, 입·출구 온도는 90~100 sec가 지나서야 급격히 올라가는 것으로 나타났다. 이는 입·출구 쪽 온도상승의 원인이 화염으로부터의 복사열보다는 대류에 의한 연기유동의 영향이 훨씬 크기 때문으로 판단된다. 화재하중이 작을 경우 약 60 sec 이내에 피난이 이루어지지 않으면 오히려 저온 연기 흡입의 가능성이 크며, 화재하중이 클 경우 약 90 sec 이내에 피난이 이루어

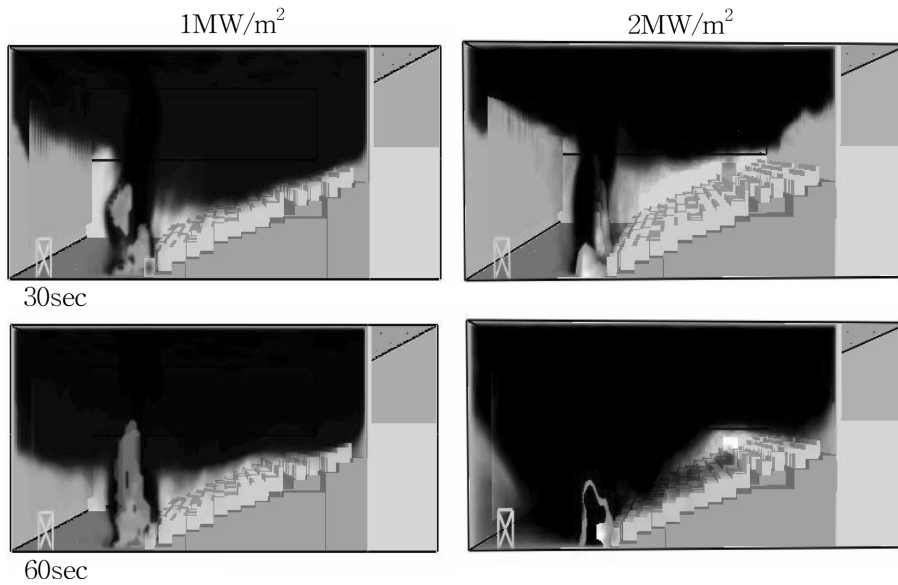


Fig. 3. Flame growth and smoke movement with different fire loads.

지지 못하면 고온 연기에 의한 질식으로 인한 사상자가 크게 늘어날 것으로 예측되었다. 다만 화재 하중이 클 경우 화염원에서 떨어진 입·출구 쪽에서의 온도 상승은 화재하중이 작을 경우에 비해 오히려 지연되는 현상이 나타났다. 이와 같이 상영관 내 연기유동 특성은 화재 하중의 크기 및 출입문 개구부 위치에 따라 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

화재 발생 후 출입문이 개방된 후에는 복도 쪽에서 신선하고 상온의 외부 공기가 유입되면서 온도가 일시적으로 하강하는 것으로 나타났다. 외부 공기의 유입은 배기구 작동에 따른 압력차이로 인하여 발생하는 것으로 추정된다.

연기하강속도는 초기 약 30 sec 정도까지는 화재하중 크기에 별 영향을 받지 않으나 시간이 경과할수록 화재하중의 크기가 클수록 연기하강속도도 큰 것으로 나타났다. 약 60 sec쯤에는 연기가 계단 상부의 입구를 모두 가릴 정도로 하강하였으며 약 90 sec경에는 입·출구 바닥까지 거의 다 내려오는 것으로 나타났다.

4.2 내장재 특성 영향

통상 의자 및 카펫의 경우 방염처리가 되기 때문에 방염 처리가 보통인 경우와 방염제 사용량을 증가시켜 방염처리를 강화하였을 때의 두 경우에 대하여 발생하는 연기하강속도 및 유독물질의 농도에 대하여 비교 분석하였다.

Fig. 4는 보통 처리의 방염(A)와 방염처리를 더욱 강

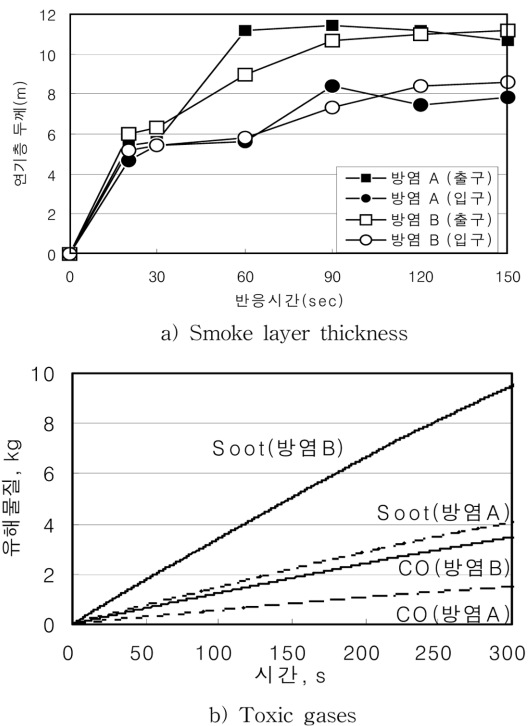


Fig. 4. The smoke layer thickness and toxic gases with fire retardants A, B.

화한 방염(B) 경우의 입·출구 쪽(높이 1.5 m)에서 연기하강속도와 유해물질 발생량에 대한 결과를 나타낸

그림으로 방염(B)의 경우 방염(A)에 비해 연소속도가 1/2로 줄어든 탓에 화염의 전파속도는 지연되는 반면, 동일 시간대의 연기하강속도가 빠르고 질식사의 주요 원인이 되는 매연(soot)과 CO의 발생량은 약 2.3배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 내장재의 방염처리를 두 배로 강화한 경우 화재성장이 지연되에도 불구하고 연기 발생량이 크게 증가하여 탈출구 쪽에서의 연기하강속도가 빨라졌고 유독성 물질 또한 증가하여 조기에 대피하지 못한 경우 질식사 유발이나 피난에 큰 어려움을 줄 가능성이 큰 것으로 나타났다. 이에 따라 건축물의 내장재의 방염 처리 시 연소 지연을 위한 방염제의 과다 사용은 오히려 위험할 수 있으며 적정량이 사용되어야 할 것으로 판단된다.

### 4.3 스프링클러의 특성 변화

복합상영관에 설치되는 스프링클러 헤드의 특성에 따른 스프링클러의 작동시간, 일정 시간 내 작동 개수를 비교하였다. 화재 성장에 의해 스프링클러가 최초로 작동한 시간을 비교한 결과 Fig. 5a)에서 보는 바와 같이 화재강도 1 MW/m<sup>2</sup>일 때는 약 40 sec, 2 MW/m<sup>2</sup>

일 때는 약 21 sec로 화재강도가 커짐에 따라 스프링클러가 조기에 작동함을 알 수 있다. 또 화재하중 1 MW/m<sup>2</sup>에 대해 속동형 스프링클러를 사용하였을 경우 최초 작동시간은 약 17 sec로서 일반형에 비해 속동형 스프링클러가 훨씬 빨리 작동됨을 알 수 있다. Fig. 5b)에서 보는 바와 같이 화재하중 1 MW/m<sup>2</sup>에 대하여 일반형 헤드의 경우 1 min 이내에 작동한 스프링클러 개수는 2개, 2 min 이내에 작동한 스프링클러는 12개이고, 화재하중 2 MW/m<sup>2</sup>일 때는 1 min 이내 작동한 스프링클러 개수는 11개, 2 min 이내 작동한 스프링클러는 37개로 크게 증가하였다.

이는 화재하중 증가에 따라 연기 확산속도가 크게 증가하였음을 말해 준다. 이에 비해 화재하중 1 MW/m<sup>2</sup>에 대하여 속동형 헤드를 사용하였을 경우 1 min 이내 작동한 스프링클러 개수는 10개, 2 min 이내에 작동한 스프링클러는 28개로서 일반형에 비해 헤드의 작동 시간이 빠르기 때문에 일정 시간 내 작동 개수는 많아짐을 알 수 있다.

또 Fig. 6에서 보는 바와 같이 입출구 쪽의 온도를 비교 해 본 결과 예상과는 달리 화염원과 가까운 쪽에 있는 출구 보다 오히려 멀리 떨어져 있는 입구 쪽의 온도가 헤드 반응 속도에 더 큰 영향을 받는 것으로

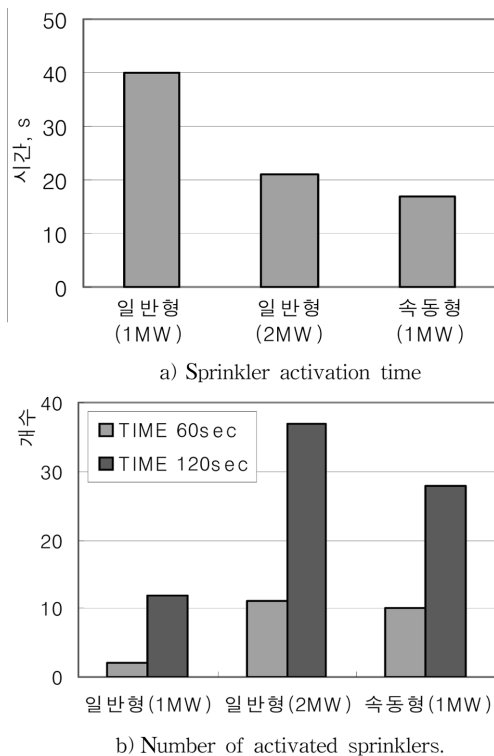


Fig. 5. Sprinkler activation time and number of activated sprinklers in 2 minutes with different fire loads.

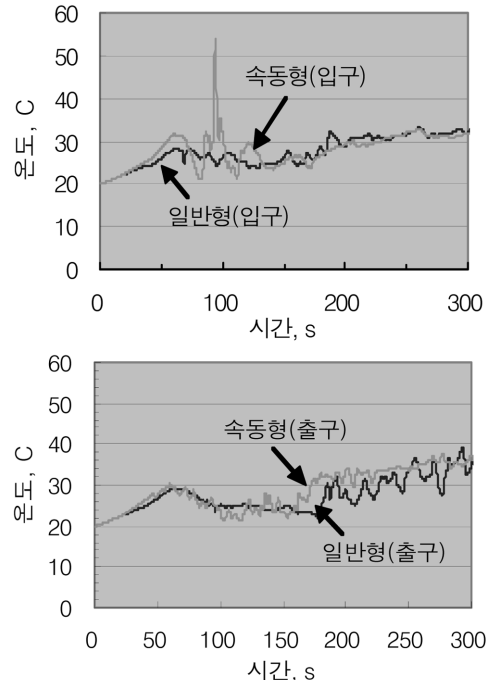


Fig. 6. Temperature variation with different sprinkler head types.

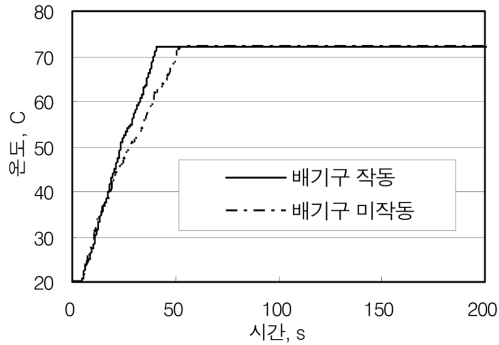


Fig. 7. Time delay of sprinkler head response with the exhaust fan mal-functioned.

나타났다. 이는 입출구에서의 온도 상승은 화염원의 복사열에 의한 온도 증가보다는 뜨거운 대류 연기에 의한 온도 증가가 훨씬 빨리 일어남을 말해 준다. Fig. 7은 배기구 작동 시와 미 작동 시의 공간 내 화재거동 차이를 나타낸 것으로 배기구 미작동 시 스프링클러의 작동이 약 10 sec 정도 지연되는 것으로 나타났다. 이는 고온의 화염 및 발생 연기가 배기구 미작동으로 인하여 천정으로의 상승속도가 둔화되기 때문으로 예측되었다.

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 설계 단계의 멀티플렉스 공간에 대한 화재 시의 화염 및 연기 유동 특성을 다양한 조건에서 예측, 평가할 수 있었으며, 그 결론은 다음과 같이 요약된다.

1) 화재하중이 클 경우 열부력에 의한 연기의 수직 상승효과 증대로 인해 멀리 떨어진 입출구에서의 온도 상승은 오히려 느려지고, 화재하중이 작을 경우 수직

및 수평적 연기 확산에 의해 온도상승이 빨라질 수 있다.

2) 탈출구에서의 연기하강속도는 화재하중의 크기보다는 개구부의 위치에 더 큰 영향을 받는다.

3) 화염에서 가까운 쪽에 있는 출구보다 멀리 떨어져 있는 입구 쪽의 온도가 헤드 반응 속도에 더 큰 영향을 받는데, 이는 입출구에서의 온도 상승은 화염원의 복사열에 의한 온도 증가보다는 뜨거운 대류 연기에 의한 온도 증가가 훨씬 큰 영향을 끼침을 말해 준다.

4) 화재하중이 커지면 헤드의 작동시간이 빨라지며, 일정시간 내 작동 개수도 훨씬 많아진다.

5) 방염이 과다할 경우 연소지연효과에 따라 화재성장 및 확산은 지연되나 연기 및 유해물질의 발생량이 증가하여 연기확산 및 연기하강속도도 빨라진다.

6) 배기구 작동 시 흡기에 의해 연기의 수직이동을 촉진하여 천정부 헤드 온도가 빨리 상승하는 반면, 미작동 시에는 연기유동이 느려져 헤드개방이 오히려 지연된다.

## 참고문헌

1. 허준호, “복합상영관 화재에 대한 화재모델링의 적용”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 18, No. 1, pp.42-48(2004).
2. 김종훈, “스프링클러 반응 시간 예측에 대한 화재 모델의 비교”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 15, No. 2, pp.46-52(2001).
3. 조성우, “개구부와 열원의 위치에 따른 연기 이동에 관한 연구”, 한국화재소방학회논문지, Vol. 16, No. 4, pp.7-14(2002).
4. BFRL, FDS(v4) Users Guide, NUST Special publication 1019(2005).
5. BFRL, User's Guide for Smokeview v4, NIST Special publication 1017(2004).