

[Research Paper]

복합영상관의 성능위주설계를 위한 가연물의 연소발열특성 연구: 객석의자의 열발생률 및 연소확산속도를 중심으로

남동군[†] · 장효연* · 황철홍** · 임옥근***

한국소방산업기술원 기술연구소 책임연구원, *대전대학교 소방방재학과 연구원,
대전대학교 소방방재학과 교수, *한국소방산업기술원 기술연구소 선임연구원

A Study on the Heat Release Characteristics of Fire Load for Performance Based Design of Multiplexes: A Focus on the Heat Release Rate and Fire Spread Rate of Cinema Seats

Dong-Gun Nam[†] · Hyo-Yeon Jang* · Cheol-Hong Hwang** · Ohk-Kun Lim***

Chief Researcher, R&D Laboratory, Korea Fire Institute,

*Researcher, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University,

**Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University,

***Senior Researcher, R&D Laboratory, Korea Fire Institute

(Received November 12, 2019; Revised December 16, 2019; Accepted December 16, 2019)

요 약

성능위주설계의 설계화원 정보는 피난안전성 평가에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 실물화재 실험에 근거한 설계화원의 설정이 매우 중요하다. 복합영상관에 대한 성능위주설계의 신뢰성을 개선시키기 위하여, 상영관 의자에 대한 화재실험을 통해 열발생률과 화재확산속도 등의 화재거동에 관한 정보를 제공한다. 이를 위하여 실제 상영관과 유사하게 배열된 다수의 객석 의자가 적용되었다. 주요 결과로서, 객석의자 1개에 대하여 최대 열발생률과 단위 질량당 발열량은 각각 415~988 kW와 15.2~23.8 MJ/kg의 범위를 갖는다. 신형과 구형 객석의자의 평균 단위 질량당 발열량은 각각 23.6 MJ/kg과 16.7 MJ/kg으로 측정되었다. 즉, 신형의자의 증가된 플라스틱 및 쿠션재의 함량으로 인하여, 신형이 구형에 비해 화재위험성이 높은 것으로 확인되었다. 추가로 객석의자가 일렬로 배치될 때, 접화위치와 상관없이 0.39~0.42 m/min의 화재확산속도가 관찰되었다. 마지막으로 복합영상관의 성능위주설계를 위하여 객석의자의 최대 열발생률과 화재성장률로 구성된 화재성장곡선이 제안되었다.

ABSTRACT

As performance-based design (PBD) has a direct impact on evacuation safety assessments, designing fire scenarios based on real fire tests is essential. To improve the reliability of the PBD for fire safety in multiplexes, information on fire behavior, such as heat release rate (HRR) and fire spread rate, are provided in this study by conducting a standard fabric flammability test. To this end, several chairs were arranged in a pattern that resembled a theater-style seating. The peak HRR and heating value per unit mass for each chair ranged from 415 kW to 988 kW and 15.2 MJ/kg to 23.8 MJ/kg, respectively. The heating values per unit mass of the new and old chairs were 23.6 MJ/kg and 16.7 MJ/kg, respectively. As the quantity of plastic and cushioning materials in the new chairs was more than that of the old ones, the new chairs were more vulnerable to fire hazards. Furthermore, when the chairs were arranged in a line, the fire spread rate was observed to be 0.39-0.42 m/min, regardless of the ignition location. Finally, a fire growth curve showing the peak HRR and fire spread rate was also demonstrated.

Keywords : Performance based design (PBD), Heat release rate (HRR), Fire spread rate, Design fire

[†] Corresponding Author, E-Mail: nam@kfi.or.kr. TEL: +82-31-289-2958, FAX: +82-31-287-1067

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서론

건축물의 성능위주설계는 적재가연물의 열발생률에 근거한 설계화원으로 연기의 하강시간 및 온도 등을 예측한다. 이 설계화원은 성능위주설계의 평가결과에 매우 영향을 줄 수 있으므로 가연물의 연소실험에서 측정된 연소 발열량 등에 근거하여 합리적으로 설정할 필요가 있다. 그러나 국내의 경우에 판매시설 등 일부 건축용도에 대해 가연물의 연소물성정보가 제공되고 있지만⁽¹⁻⁹⁾, 가연물의 연소물성이 파악되지 않은 건축용도가 있다. 예를 들면 다중이용시설인 복합영상관은 화재 위험성이 큰 시설로 분류되어 있으며, 영상관이 10개 이상인 경우에 성능위주설계의 시행이 의무화되어 있다. 그러나 복합영상관의 성능위주설계에서는 가연물의 연소물성정보의 부족으로 외국 문헌이나 유사한 가연물의 연소물성을 근거로 실행하고 있다. 복합영상관의 성능위주설계의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 가연물의 연소실험을 통해 열발생률 등의 연소물성정보를 구축해야 한다.

특히 복합영상관은 불특정다수의 고객이 이용하고 영화상영 중에는 어두운 환경에 처해 있으므로 화재 시 고객들의 초기 인지가 늦어질 가능성이 있으므로 화재 위험성이 높을 것으로 우려되고 있다. 또한 영상관 내부에는 고분자 화합물과 우레탄 소재의 객석의자가 다수 배치되어 있으므로 화재 발생시 화재규모 및 화염전파의 위험성이 클 것으로 예상되고 있다. 그러나 객석의자는 연소실험으로 연소 특성을 검증한 사례가 없으므로 복합영상관의 화재위험성을 평가함에 있어 어려움이 있다.

따라서 본 연구는 복합영상관의 성능위주설계의 신뢰성을 확보하기 위해 객석의자의 연소실험으로 열발생률 등을 측정하여 연소물성정보를 구축하였다. 또한 재실자의 피난 안전평가의 측면에서는 가연물의 화염전파속도 등도 중요한 위험인자이므로 실제 영상관 내부와 유사하게 다수 객석 의자를 나열한 채로 연소실험을 실행하여 화염전파속도 등을 제시하였다.

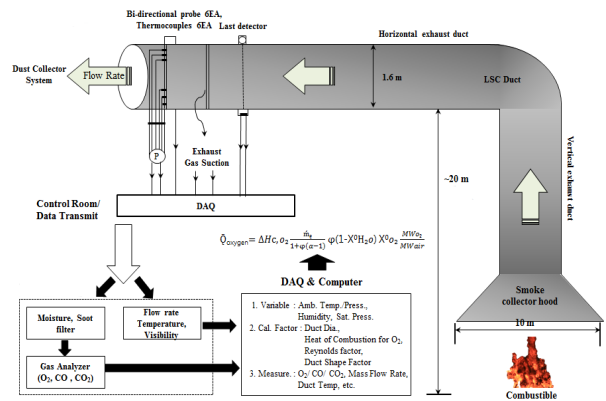


Figure 1. Schematics of experimental facility.

2. 연소실험

2.1 개요

실험은 제연덕트의 아래에 가연물을 설치하여 소규모 화원으로 점화하였다(Figure 1 참조). 실험에서 발생하는 연소 가스는 덕트 내부에서 포집하여 가스농도를 측정하고 산소소모법에 의해 열발생률 및 총발열량 등을 계산하였다. 이때 가연물의 연소 중에 발생하는 화염은 카메라 및 캠코더로 촬영하여 기록하였다.

2.2 실험조건

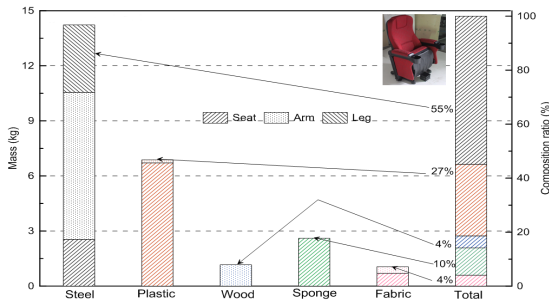
2.2.1 시험체

실험은 실제 상영관에서 사용하는 객석의자를 시험체로 선정하여 실행하였다(Table 1 참조). 시대의 요구에 따라 객석의자는 종류 및 형태 등의 특성이 다를 수 있으므로 2003년형 디자인과 2016년형 디자인으로 구분하여 제작하였다. 객석의자는 불연성인 철재 프레임을 가연성인 플라스틱 등으로 크게 구분되며, 실제 화재에는 의자의 가연성 재질이 영향을 미치므로 의자를 분해한 후에 가연성 재질의 비율을 Figure 2에 나타내었다.

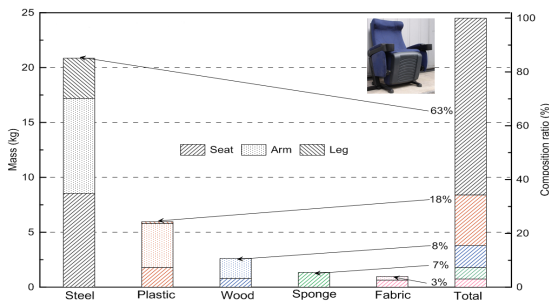
두 종류 객석의자의 재료 구성비는 모두 철재가 가장 크

Table 1. Test Condition used in the Present Study

No.	Specimen	Number of Seat	Total Mass (kg)	Mass of Combustible (kg)	Specimen Size (mm)	Ignition Burner		
						Burner Location	Burner Size (mm)	Fuel
1	Cinema Seat A	1	33	14.8	2865*530*1040	Bottom Center	100 × 100 × 100	Heptane 50 mL
2		5	165	74		Bottom at Right Seat		
3		5	165	74		Bottom at Middle Seat		
4	Cinema Seat B	1	33	12.2	2790*600*1060	Bottom Center	100 × 100 × 100	Heptane 50 mL
5		5	165	60.8		Bottom at Right Seat		
6		5	165	60.8		Bottom at Middle Seat		
7		10	330	121.5		Bottom at Middle Seat		



(a) Cinema seat A (2016 Model)



(b) Cinema seat B (2003 Model)

Figure 2. Mass and material composition of cinema seat.

고 플라스틱이 의자 A(2016년형)가 27%, 의자 B(2003년형)가 18%를 차지하는 것을 확인할 수 있다. 특히 빠른 화재 확산을 일으키는 쿠션재의 비중은 전체에 대해 의자 A가 10%, 의자 B가 7%이었다.

2.2.2 화원

실험은 영상관에서 부주의에 의한 실화를 가정하고 실험의 재현성을 고려하여 작은 사각버너(10 cm × 10 cm)에 소량의 헵탄을 넣어 점화하였다(Table 1 참조). 이때 점화원의 규모는 화원이 크면 시험체의 연소성상에 영향을 미칠 수 있으므로 예비실험을 통해 시험체가 자연 진화하지 않고 자력으로 연소할 수 있는 헵탄의 최소량을 파악하여 설정하였다.

2.2.3 실험 방법

실험 1과 4는 의자 A, B의 연소 발열량을 각각 측정하고, 그 외의 실험은 5개 이상의 의자를 배치하여 연소 발열량과 화염전파속도 등을 측정하였다(Figure 3 참조). 실험은 출화 위치에 따른 연소전과특성을 파악하기 위해 화원 위치를 변경하여 실행하였다. 즉, 실험 2와 5는 5개의 의자 중에 제일 우측의 의자 하부에 버너를 설치하고 실험 3과 6은 5개의 의자 중에 중앙 의자 하부에 버너를 설치하였다. 실험 7은 실제 영상관과 유사하게 재현하기 위해 실제 영상관의 바닥 및 단의 높이를 고려하여 의자 B를 1, 2단에 5개씩 배치하여 실행하였다.



(a) Specimen of test 2 (Seat A, Unit : cm)



(b) Specimen of test 7 (Seat B, Unit : cm)

Figure 3. Arrangement of specimens.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 객석의 연소거동 특성

3.1.1 실험 2 (의자 A: 5개, 화원 위치 : 우측, 배치 : 1열)

점화 4 min 후에 점화한 의자의 하단에 있는 플라스틱이 녹으면서 천천히 연소하였으며, 점화 8분 후에 의자 전체에 화염이 확산하였다(Figure 4 참조). 점화 9 min 후에 점화한 의자의 옆에 있던 의자에 화재확산이 이루어지고, 점화 14 min 후에 5개의 의자에 전체적으로 화염이 확산하였다. 실험 관찰에 따르면 시험체의 연소 중에 최대간헐화염의 높이가 바닥에서 3.5 m까지 도달하였다. Figure 5를 보면 실험 2와 3의 최대 열발생률은 각각 3.6 MW와 3.8 MW로 점화원의 위치와 상관없이 거의 유사한 값을 나타내었다.

3.1.2 실험 6 (의자 B 5개, 화원 위치 : 중앙, 배치 : 1열)

점화 6 min 후에 의자의 플라스틱이 연소하면서 화염이 성장하였고 점화 8 min 후에 의자 전체에 화염이 확산하였다. 점화 11 min 후에 착화한 중앙 의자에서 좌우 수평방향으로 화재확산이 이루어지고 점화 14 min 후에 5개의 의자에 전체적으로 화염이 확산하였다. 시험체의 최대간헐화염의 높이는 바닥에서 2.5 m까지 도달하였다. Figure 6을 보면 실험 5와 6의 최대 열발생률은 각각 2.1 MW와 3.3 MW로 약 1.2 MW의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 점화원의 위치가 중앙보다 제일 우측일 때 의자가 순차적으로 연소하기 때문에 순간적인 화염 규모가 작게 형성된



(a) Test 2 (11 min 9 s) (b) Test 3 (10 min 4 s) (c) Test 5 (7 min 26 s) (d) Test 7 (6 min 50 s)

Figure 4. Burning behaviour of cinema seat.

Table 2. Summary of the Burning Characteristics

No.	Specimen	Quantity (ea)	Total Mass (kg)	Mass of Combustible (kg)	Burning Surface (m ²)	Peak HRR (kW)	HRR per One Chair (kW)	HRR per Burning Surface (kW/m ²)	THR (MJ)	THR per Mass(MJ/kg)	Average of THR
1	Cinema Seat A	1	33	14.8	2.6	988	988	386	351	23.7	23.6
2		5	165	74	12.8	3,591	718	281	1,763	23.8	
3		5	165	74	12.8	3,757	751	294	1,731	23.4	
4	Cinema Seat B	1	33	12.2	2.4	652	652	273	229	18.8	16.7
5		5	164	60.8	12.0	2,077	415	174	922	15.2	
6		5	164	60.8	12.0	3,271	654	274	1,034	17.0	
7		10	329	121.5	23.9	6,507	651	272	1,916	15.8	

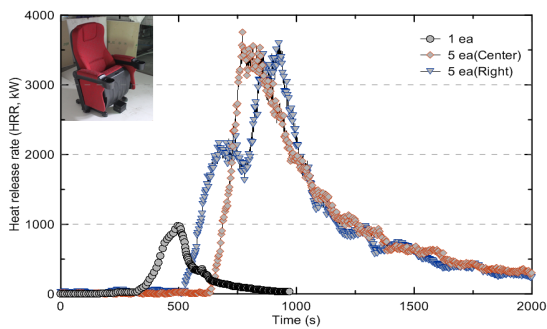


Figure 5. Heat release rate of Test 1~3 (Cinema seat A, 2016 model).

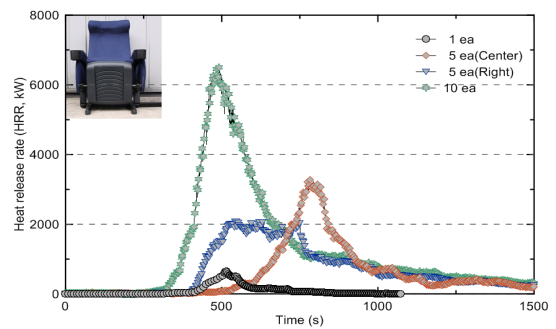


Figure 6. Heat release rate of Test 4~7 (Cinema seat B, 2003 model).

것으로 판단된다.

3.1.3 실험 7 (의자 B 10개, 화원 위치 : 중앙, 배치 : 2열)

점화 4 min 후에 점화한 의자 하단의 플라스틱이 녹으면서 연소하고 점화 7 min 후에 다량의 연기를 발생하며 전체적으로 화재 확산이 이루어졌다(Figure 4 참조). 점화 9 min 후에 연소 최성기에 이르게 되어 열발생율이 6.5 MW 까지 도달하였다. 시험체의 연소 중에 최대간헐화염의 높이가 바닥에서 4.5 m까지 도달하였는데, 만약 이러한 화재가 영상관에서 발생한다면 대형 화염 및 그 복사열로 인해

주위 가연물에 화염 확산하여 대형 화재가 발생할 가능성이 있다. Figure 6을 보면 연소 성장 시점이 다른 실험보다 빠른 것을 알 수 있는데, 이는 의자를 2열로 배열하면 화염의 방향이 수평 및 수직으로 동시에 확산하여 연소 속도가 가속되었기 때문이다.

위의 결과에서 의자는 화염 확산까지 5 min 이상의 시간이 걸리지만 일단 의자가 연소하면 화염 규모가 크고 화염 확산이 빠른 것을 알 수 있다. 만약 실제 영상관에서 실험에 의해 화재가 발생할 때 초기 인지가 늦으면 대형 화재로 전개될 가능성이 크다.

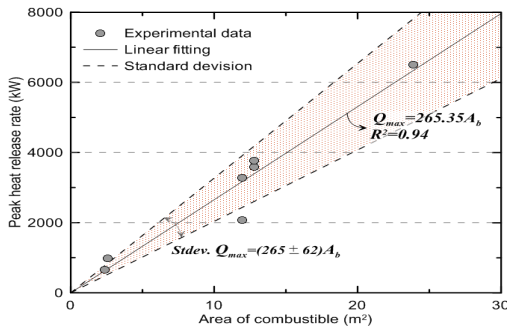


Figure 7. Relationship between the peak HRR and surface area of combustible.

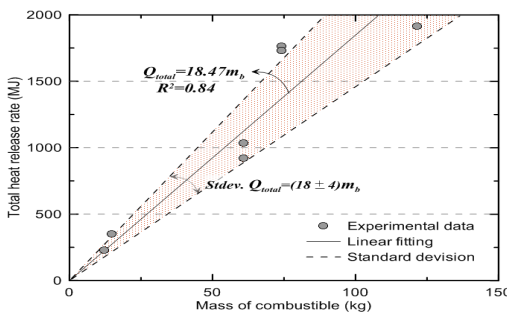


Figure 8. Relationship between the total heat released and mass of combustible.

3.2 가연물의 연소 발열량 특성

객석의자의 최대 열발생률 및 단위 질량당 총발열량을 Table 2에 제시하였다. 의자 A, B의 평균 단위질량당 총발열량은 각각 23.6 MJ/kg, 16.7 MJ/kg으로 6.9 MJ/kg의 차이를 보인다. 이것은 최신형 의자 A가 구형 의자 B보다 플라스틱과 쿠션재의 함유량이 많으므로 연소 발열량이 크게 발생하였기 때문이다.

의자의 표면적과 최대 열발생률의 상관관계와 의자의 질량과 총발열량의 상관관계를 각각 Figure 7, 8에 나타내었다. 단 의자의 질량은 철재 프레임을 제외한 순수 가연물의 중량을 의미한다. Figure 7, 8에는 모든 실험 데이터의 기울기에 대해 표준편차를 구하고 상관관계수식의 기울기에 표준편차를 반영한 직선을 나타내었다.

의자의 표면적과 최대 열발생률의 상관성이 94%로 아주 높고 의자의 중량과 총발열량의 상관성이 84%로 높은 것을 알 수 있으며, 회귀직선의 상관식을 통해 의자의 표면적과 중량에서 정량적으로 최대 열발생률과 총발열량을 예측할 수 있다.

3.3 의자의 연소시간 및 연소전파속도

피난안전 측면에서는 채실자의 피난시간의 확보를 위해 의자의 연소전파속도가 중요한 인자이므로 의자 1개당 연소시간과 다수 의자의 연소전파속도를 산출하여 제시한다.

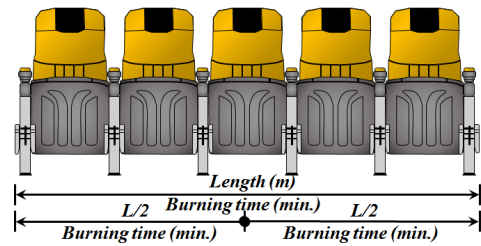


Figure 9. Concept of the flame spread rate calculation.

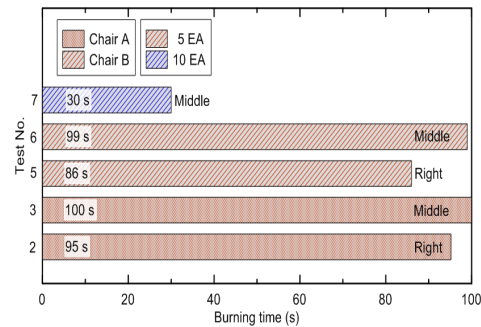


Figure 10. Average burning time of each cinema seat.

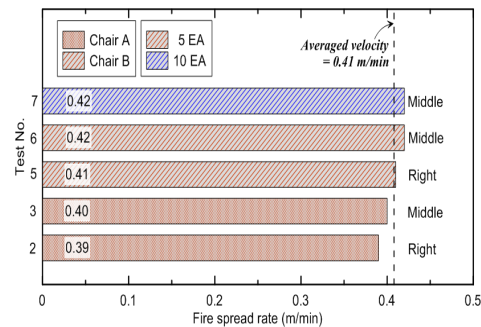


Figure 11. Flame spread rate of cinema seats.

의자 1개당 연소시간은 총 의자의 연소시간을 의자의 개수로 나누어 산출하였다. 또한 연소전파속도는 출화 위치에 따라 구분하여 산출하였다. 즉 화원의 위치가 제일 우측인 실험은 나열된 의자의 전체 길이를 최초 점화한 의자에서 최종 연소한 의자까지의 연소시간으로 나누어 연소전파속도를 구하였다. 화원의 위치가 중앙인 실험 3과 6의 연소전파속도는 중앙을 기점으로 좌우방향의 연소전파속도를 구한 후에 평균값으로 나타내었다(Figure 9 참조).

의자 1개당 평균 연소지속시간 및 연소전파속도를 Figure 10, 11에 나타내었다.

의자 1개당 평균 연소지속시간은 실험 7 (의자 10개)이 30 s로 가장 짧은 것을 알 수 있다. 이는 의자를 2단으로 배치하면 화염이 수평방향과 수직방향으로도 확산하기 때문에 연소속도가 가속된 것을 알 수 있다. 또한 연소전파속도

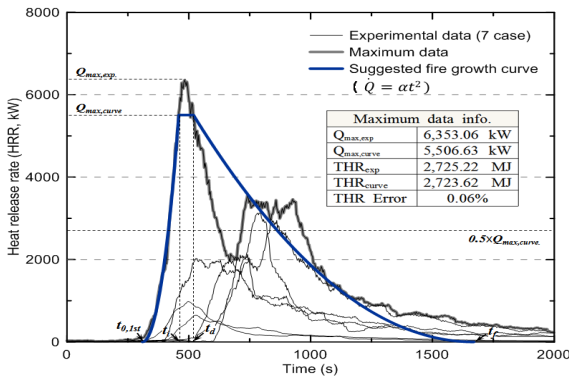
는 평균 0.41 m/min이며, 화원의 위치에 따라 거의 차이가 나지 않았다. 이 결과에서 출화위치에 따른 다수 의자의 연소전파속도가 다르지 않는 것을 확인할 수 있다.

4. 객석의자에 대한 설계화원 설정

성능위주설계에서는 건물 용도별 설계화원을 근거로 연기하강시간 등을 예측하므로, 복합 영상관의 성능위주설계에 활용할 목적으로 객석의자의 열발생률에 대해 설계화원을 설정한다.

본 연구는 설계화원의 설정 방법론을 제안하는 것이 주요 관심대상이 아니므로 설계화원의 설정방법은 Baek 등⁽¹⁰⁾이 제안한 디자인 화재곡선의 모델화 방법에 근거하였다. 단 이 연구는 하나의 열발생률을 설계화원으로 모델화하는 방법을 제안하였는데, 다수 가연물의 열발생률의 모델화를 수행함에 있어 어려움이 있다. 이에 본 연구는 성능위주설계에는 보수적 관점에서 설계화원을 적용할 필요가 있으므로, 다수 가연물의 열발생률의 시간당 최대값에 대해 Baek 등이 제안한 설계화원의 모델화 방법을 적용하였다.

본 실험에서 측정된 객석의자의 열발생률에 근거하여 설계화원을 설정하여 Figure 12에 나타내었다.



$t_{0,1st}$	$t_{0,2nd}$	t_i	t_d	t_f	$\alpha_{g,1st}$	$\alpha_{g,2nd}$	α_d
310	315	459	519	1,670	0.2429	0.2678	0.0042

Figure 12. Proposed design fire curve based on the HRR data of Test 1~7.

현재 성능위주설계에서는 연소실험 사례의 부족으로 인해 단일 가연물의 열발생률을 그대로 적용하는 사례가 있는데, 위와 같이 다수 가연물의 열발생률에 근거한 설계화원을 적용하면 성능위주설계의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 논문에서는 영상관의 성능위주설계의 활용을 염두에 두고 객석의자를 대상으로 연소 발열량을 파악하기 위해

연소실험을 실행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 객석 의자는 실화에 의해 연소하면 화염 확산까지 5 min 이상의 시간이 소요되지만 일단 의자의 연소가 성장하기 시작하면 화염 규모가 크고 화염 확산이 빠른 것을 알 수 있다. 만약 실제 영상관에서 실화에 의해 화재가 발생할 때 초기 인지가 늦으면 주위 가연물로 화재 확산이 쉽게 되어 대형 화재로 전개될 가능성이 크다.

2) 의자 1개당 최대 열발생률은 415 kW~988 kW의 범위를 가지며, 의자의 단위 중량당 발열량은 15.2 MJ/kg~23.8 MJ/kg의 범위를 가진다. 특히 의자의 평균 발열량은 최신 형과 구형이 각각 23.6 MJ/kg, 16.7 MJ/kg이었는데, 이는 최근 보급된 의자가 과거보다 플라스틱과 쿠션재의 함유량이 증가하여 연소 위험성이 증가한 것으로 확인되었다.

3) 다수 의자의 연소전파속도는 0.39 m/min~0.42 m/min이며 출화위치에 따른 차이가 거의 없는 것을 알 수 있었다. 또한 의자 1개당 평균연소시간은 의자 5개를 1열로 배치한 실험에서 86~100 s이고 의자 10개를 2열로 배치한 실험에서 30 s로 가장 짧았다. 실제 영화관은 상하로 의자가 배열되어 있으므로 만약 영상관에서 화재가 발생하면 주위 연소확대가 빠르므로 화재 위험성이 클 것으로 판단된다.

4) 본 연구는 현재 성능위주설계에서 단일 가연물의 열발생률을 설계화원으로 활용하는 한계를 극복하기 위해, 다수 가연물의 열발생률의 최대값에 근거한 설계화원을 제시함으로써, 향후 성능위주설계의 평가결과에 대한 신뢰성이 개선될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2018년도 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

- B. I. Choi, Y. S. Han, C. B. Oh, M. B. Kim and J. S. Choi, "Heat Release Rate Measurements of Residential Combustibles Using Oxygen Consumption Method", Proceedings of 2007 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 123-127 (2007).
- Y. H. Yoo, O. S. Kweon and H. Y. Kim, "The Real Scale Fire Test for Unit Space in Apartment Housing", Proceedings of 2009 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 346-351 (2009).
- S. R. Lee and K. H. Youk "A Study on Fire Behavior of Combustibles in a Residential Building", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 25-31 (2009).
- D. G. Nam, "Heat Release Characteristics of Typical Live

- Fire Load in Large Bookstore”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 2, pp. 88-94 (2011).
5. D. G. Nam, “Experimental Study on Combustion Characteristics of Live Fire Load in a Bookstore”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 47-53 (2011).
 6. H. J. Kim, I. K. Kwon, O. S. Kweon, H. Y. Kim and S. U. Chae, “The Real Fire Test in Bedroom for the Performance Based Fire Design”, Fire Science and Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 32-37 (2013).
 7. S. Y. Choi, J. Y. Kim, D. G. Nam and S. C. Kim, “Comparative Study on the Estimation Method of Fire Load for Residential Combustibles”, Fire Science and Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 38-43 (2013).
 8. D. G. Nam and C. H. Hwang, “Measurements of the Heat Release Rate and Fire Growth Rate of Combustibles for the Performance-Based Design-Focusing on the Combustibles in Residential and Office Spaces”, Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 29-36 (2017).
 9. J. H. Jang and D. G. Nam, “Measurements of the Heat Release Rate and Fire Growth Rate of Combustibles for the Performance-Based Design-Focusing on the Plastic Fire of Commercial Building”, Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 55-62 (2018).
 10. B. N. Baek, C. B. Oh, E. J. Lee and D. G. Nam, “Application Study of Design Fire Curves for Liquid Pool Fires in a Compartment”, Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 43-51 (2017).
 11. A. Natori, K. Harada, Y. Ohmiya and T. Wakamatsu, “An Estimation Method of Heat Release Rate of Real Combustible Objects”, Journal Environment and Engineering, No. 616, pp. 1-8 (2007).
 12. S. C. Kim, D. G. Nam, C. H. Hwang and M. O. Yoon, et al., “Validation and Reliability Analysis of Guideline of Performance Based Fire Protection Design of a Super Tall Building”, National Emergency Management Agency (2014).