

[Research Paper]

복합영상관 단일 가연물의 디자인 화재곡선 평가

장효연 · 황철홍* · 오창보** · 남동군***†

대전대학교 석사후연구원, *대전대학교 소방방재학과 교수, **부경대학교 안전공학과 교수,

***한국소방산업기술원 기술연구소 책임연구원

Evaluation of Design Fire Curves for Single Combustibles in a Cinema Complex

Hyo-Yeon Jang · Cheol-Hong Hwang* · Chang Bo Oh** · Dong-Gun Nam***†

Postgraduate Researcher, Daejeon University,

*Professor, Dept. of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University,

**Professor, Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University,

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

(Received March 19, 2020; Revised April 13, 2020; Accepted April 14, 2020)

요 약

국내 복합영상관의 단일 가연물을 대상으로 실물 화재실험이 수행되었으며, 측정된 열발생률(HRR)에 대한 디자인 화재곡선 방법(General 및 2-stage methods)에 따른 최대 HRR 및 화재성장률에 대한 정량적 차이가 검토되었다. 가연물의 용도 및 화재하중의 관점에서 대기공간과 영화상영관으로 구분되어, 총 12개의 가연물이 선정되었다. 주요 결과로서, 2-stage method 통해 산출된 최대 HRR 및 화재성장률은 General method의 결과와 정량적으로 큰 차이가 있음을 확인하였다. 초기 화재단계의 보다 정확한 화재성장률을 고려할 수 있는 2-stage method의 활용은 정확한 ASET과 RSET 뿐만 아니라 화재감지기 및 소화설비의 작동시간을 보다 정확히 예측하는데 매우 유용할 것으로 기대된다.

ABSTRACT

An actual fire test was performed on single combustibles placed in a local cinema complex, and quantitative differences in the maximum heat release rate (HRR) and fire growth rate were investigated based on the design fire curve methods (i.e., the general and 2-stage methods). In terms of combustible use and fire load, a total of 12 combustibles were selected, classified into cinema lounge and movie theater. It was found that the maximum HRR and fire growth rate determined using the two-stage method were quantitatively different from those of the general method. The application of the two-stage method, which can be used to determine the fire growth rate of the initial fire stage more precisely, could be useful in accurately predicting the activation time of fire detectors and fire-extinguishing facilities, as well as the available safe egress time (ASET) and required safe egress time (RSET).

Keywords : Cinema complex, Performance based design (PBD), Design fire curve, Fire growth rate, Heat release rate (HRR)

1. 서 론

2011년부터 국내에서는 복합건축물의 화재 위험성을 합리적으로 평가하기 위해 공학기반의 시뮬레이션이 적용되는 성능위주설계(Performance-based design, PBD)⁽¹⁾가 시행

되고 있다. PBD 수행 시 건축물의 화재시뮬레이션을 통한 화재위험성 평가는 주로 Fire dynamics simulator (FDS)와 같은 Field 모델이 적용되고 있다. 이때 화재위험성 평가는 다양한 공간 용도별 화재시나리오에 대하여 허용피난시간 (Available safe egress time, ASET)과 요구피난시간(Required

† 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.

safe egress time, RSET)의 비교에 통해 이루어진다. 일반적으로 ASET이 RSET에 비해 클 때 화재안전성이 확보된 것으로 평가되며⁽²⁾, 이들은 화재 및 피난시물레이션에 의해 예측되고 있다.

화재시물레이션을 통한 ASET 산정을 위해서는 주요 입력인자인 열발생률(Heat release rate, HRR)의 정보가 요구되며, 이는 인명안전기준과 관련된 수치 해석에 가장 큰 영향을 미친다고 알려져 있다⁽³⁻⁵⁾. 시간에 따른 HRR의 변화를 의미하는 화재성장곡선(Fire growth curve)은 화원의 경계조건으로 적용되며, 연소열(Heat of combustion, kJ/kg)과 시간당 공급되는 연료 질량(kg/s)의 곱으로 표현될 수 있다. 즉, 설계화원(이후, 디자인 화재곡선, Design fire curve)의 HRR이 부적절한 경우에 화재공간 내의 열 및 화학적 특성의 큰 오차를 가져오며, 결과적으로 예측된 ASET은 신뢰성을 갖기 어렵다. 또한 화재시물레이션을 통해 예측되는 열 및 연기감지기의 작동시간 오차는 피난시물레이션을 통해 최종 산정되는 RSET의 정확성에도 큰 영향을 미치게 된다⁽⁶⁾. 따라서 화재시물레이션을 활용한 화재 위험성평가의 신뢰성을 확보하기 위해서는 다양한 화재공간에 대하여 HRR로 표현되는 화재성장곡선 또는 디자인 화재곡선이 필수적으로 도출되어야 한다.

디자인 화재곡선은 일반적으로 실물 화재실험을 통해 시간(t)에 따른 HRR(\dot{Q}) 변화를 단순화시켜 적용되고 있으며, 점화 이후 화재 성장이 주로 $\dot{Q} = at^2$ 의 함수 형태로 표현된다는 경험에 기반한 방법론이 적용되고 있다⁽⁷⁾. 이때 a 는 화재성장률(Fire growth rate)을 의미한다. 그러나 이 방법은 초기 화재성장이 급격한 경우에 점화개시 시점이 음의 값을 가질 수 있다는 문제점이 있다. 또한 HRR이 1 MW에 도달하는 시간을 기준으로 화재성장률이 산출되기 때문에, 상대적으로 낮은 HRR을 갖는 초기단계의 단일 가연물 화재에 적용하기에 어려움이 있다⁽⁸⁾. 그 결과 실물화재의 HRR을 통한 화재성장률 도출 과정에서 연구자에 따라 상당한 불확실성이 포함될 수 있다. 이에 최근 Baek 등⁽⁹⁾은 화재성장단계를 기존의 1단계(1-stage)에서 2단계(2-stage)로 세분화시켜, 화재성장단계의 온도 및 농도에 대한 시물레이션 예측능력이 상당히 개선될 수 있음을 확인하였다. 이와 같이 적절한 화재 초기단계 특성이 반영될 수 있는 디자인 화재곡선 도출은 화재감지기의 작동시간, 스프링클러 및 제연설비와 같은 소방설비의 성능평가를 위하여 매우 중요하며, PBD에서 수행되는 건축물의 화재 위험성 평가를 위한 핵심적인 과정이라 할 수 있다.

한편 최근 국내 PBD에서 화재시나리오로 선정된 화재공간은 주차장, 오피스텔을 포함한 업무시설, 판매시설, 공동주택, 근린생활시설, 숙박시설 그리고 문화 및 집회시설로 분류된다⁽¹⁰⁾. 이에 이들 화재공간을 대상으로 화재시물레이션의 주요 입력인자인 HRR을 측정하기 위한 다양한 실물 화재실험 연구들이 수행되고 있다. 구체적으로 주차장 차량화재를 대상으로 일부 연구^(11,12)가 수행된 바 있으며, 대

부분의 연구들은 화재 발생빈도가 높은 오피스텔^(13,14)을 포함한 주방, 침실 및 거실 등의 주거공간⁽¹⁵⁻¹⁷⁾을 대상으로 수행되었다. 그러나 불특정 다수의 사람들이 군집하는 공간 특성을 갖고 있으며, 대표적인 문화시설로 분류될 수 있는 복합영상관과 같은 공간에 대한 실물화재 실험결과는 찾아보기 어렵다. 기존 복합영상관 화재에 관한 연구^(18,19)는 주로 피난안전 해석에 초점을 두고 있기에, 화재시물레이션에서 요구되는 디자인 화재곡선에 대한 정보는 부재한 실정이다.

이러한 배경 하에, 본 연구에서는 국내 복합영상관의 단일 가연물을 대상으로 실물 화재실험이 수행되었으며, PBD의 화재시물레이션에서 요구되는 시간에 따른 HRR이 측정되었다. 이 결과를 활용하여 기존에 적용된 General method⁽⁷⁾ 및 최근 제안된 2-stage method⁽⁹⁾의 화재성장이 고려된 디자인 화재곡선이 비교되었으며, 복합영상관 단일 가연물들의 화재성장률에 대한 정량적 차이가 검토되었다. 본 연구결과는 밀폐된 공간에 불특정 다수의 재실자로 인하여 높은 화재위험성을 갖는 복합영상관의 화재 위험성 평가를 위한 화재시물레이션 예측결과의 신뢰성 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 실험방법

복합영상관 단일 가연물의 HRR을 측정하기 위하여, Figure 1에서와 같이 4 MW 급의 실물 화재실험이 가능한 열량계가 적용되었다. 이는 룸코너 시험기(Room corner tester, RCT)⁽²⁰⁾에 설치된 것으로서, 바닥면으로부터 2.2 m의 높이에 설치된 3 m × 3 m의 후드와 배기 덕트, 가스 포집장치, 집진설비 등으로 구성된다. 이때 화재실험에서 발생하는 O₂, CO 및 CO₂는 덕트 내부의 샘플링 포트를 통해 측정되며, 양방향 유속계 및 열전대를 통한 유속 및 온도가 각각 측정되었다. 또한 불완전 연소생성물의 정보를 고려하기 위하여 Soot 농도가 측정되었다. 이들 측정치들은 산소소모법 원리(Oxygen consumption rate principle)⁽²¹⁾를 통해 최종 HRR의 산출에 활용되었다. 참고로 복합영상관의 주요 가연물들은 룸코너 시험기의 ISO 9705 구획실 내부가 아닌 후드 하부에 설치된 단열보드 바닥면 중앙에 배치되어, 개방된 조건에서 가연물의 HRR이 측정되었다.

2.2 실험대상 및 조건

복합영상관의 주요 가연물 선정을 위하여, 가연물의 용도 및 화재하중의 관점에서 상영관 외부의 대기공간(Cinema lounge)과 영화상영관(Movie theater) 내부로 구분되었다. 주요 가연물로서 Figure 2에 제시된 바와 같이 화재성장 및 높은 화재확산의 위험성을 갖는 각 공간에서의 좌석이 주요 가연물로 선정되었다. 대기공간의 가연물(Figures 2(a)~(e))로서 대기공간에서 쉽게 볼 수 있는 총 5

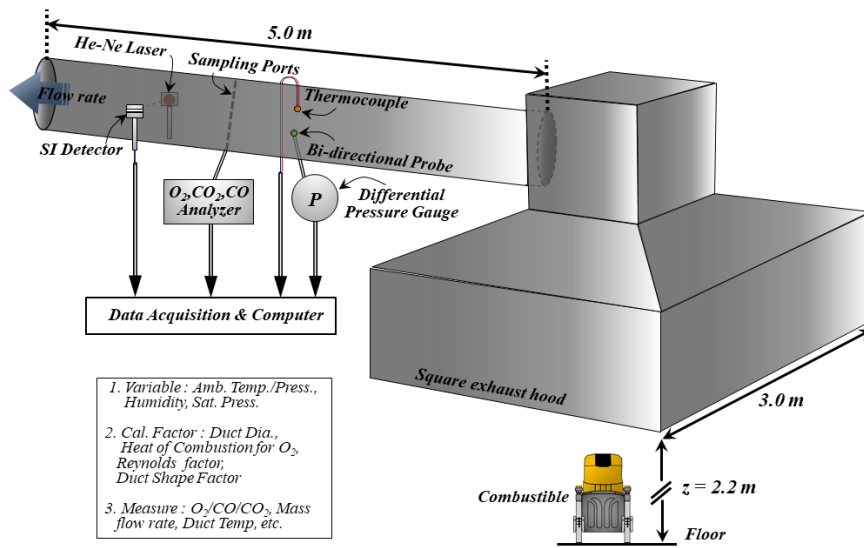


Figure 1. Schematics of a calorimeter based on the oxygen consumption principle.



Figure 2. Photographs of combustibles selected in cinema lounge and movie theater (the unit of scale shown in the photos is m).

개의 좌석이 선정되었으며, 등받이 유무에 따른 화재성상의 차이를 확인하기 위하여 동일 재질의 Chair L_A와 L_B 그리고 Chair L_C와 L_D가 동시에 고려되었다. 영화상영관 내부에서 쉽게 확인될 수 있는 좌석으로서 Figures 2(f)~(g), 등받이 및 발받침의 각도를 조절할 수 있는 리클라이너 형태의 좌석(Figure 2(h))이 선정되었으며, 좌석과 카펫을 동시에 배치한 경우(Figure 2(i)), 유아용 시트(Figure 2(j)) 및 스크린(Figure 2(k))이 추가로 고려되었다. 참고로 대기공간과 영화상영관의 좌석을 구분하기 위하여, 가연물 표기에 적용된 첫 영문 L과 T는 Lounge와 Theater의 약자이며, 대기공간과 영화상영관의 좌석을 각각 의미한다.

본 연구에서 선정된 가연물의 주요 재질 및 수량 그리고 점화방법은 Table 1에 구체적으로 제시되었다. 대기공간의 Chair L_A~L_D는 사진에서 확인될 수 있듯이 강(Steel) 구조물을 제외한 가죽(Leather)과 폼(Foam)으로 구성되어 있

며, Chair L_E는 플라스틱 재질만으로 구성되었다. 영화상영관의 Chair T_A와 T_B는 직물(Fabric)에 의해 마감되었으며 서로 유사한 형상을 갖지만, 생산연도가 각각 2016년과 2003년으로 큰 차이를 갖는다. 구체적으로 2016년과 2003년식의 경우 플라스틱의 질량비는 각각 27%와 18%이며, 폼 재질의 질량비는 10%와 7%의 차이를 갖는다. 즉, 이 2가지 가연물의 비교를 통해 생산연도에 따른 영화상영관 좌석의 대략적인 화재위험성 차이가 평가될 것으로 예상된다. 영화상영관의 Chair T_C에 도시된 리클라이너(Recliner) 형태의 좌석은 가죽과 폼으로 구성되었다. 바닥면에 설치된 나일론 재질의 카펫이 갖는 화재성장률을 포함한 화재성상을 확인하기 위하여, 영화상영관 Chair T_B + Carpet에 대한 복합 가연물이 고려되었다. 키높이 조절을 위해 사용되며 인조가죽과 폼으로 구성된 유아용 시트는 단일 또는 수직방향으로 적재된 상태의 화재성상을 확인하기 위하여, 수량

Table 1. List of Combustibles Selected in Cinema Lounge and Movie Theater

No.	Space	Specimen	Materials (Except steel frame)	Quantity (ea)	Ignition method	
					Burner type	Fuel
1	Cinema Lounge	Chair L _A	Leather + Foam	1	Gas burner (CSB 113)	Propane (C ₃ H ₈), 13 L/min, 90 s
2		Chair L _B				
3		Chair L _C				
4		Chair L _D				
5		Chair L _E	Plastic			
6	Movie Theater	Chair T _A	Fabric + Foam + Plastic	1	Steel pan (0.1 m × 0.1 m)	Heptane (C ₇ H ₁₆), 50 mL
7		Chair T _B				
8		Chair T _C	Leather + Foam			
9		Chair T _B + Carpet	(Fabric + Foam + Plastic) + (Nylon)	1+1		
10		Baby seat	Leather + Foam	1		
11				10		
12	Screen	Polyvinyl chloride (PVC)	1		Heptane 50 + 100 mL	

이 1개와 10개에 대한 2가지 경우가 적용되었다. 마지막으로 PVC 재질의 영화상영관 스크린은 실험의 편의를 위하여 1.6 m × 1.8 m의 크기로 절단되었으며, 수직으로 설치된 상태에서 실험이 수행되었다.

Table 1에 제시된 바와 같이 가연물들의 초기 점화를 위하여, 대기공간과 영화상영관 좌석에 다른 점화 방식이 적용되었다. 즉, 대기공간의 좌석들은 하단에서 점화시키기 어려운 구조를 갖고 있기 때문에, 좌석의 상부면을 프로판 연료의 California state bulletin (CSB) 113 가스버너로 점화시켰다. 공급된 기체연료의 유량은 13 L/min이며, 완전연소를 가정했을 때 최대 열발생률은 약 20 kW에 해당된다. 참고로 CSB 113 버너는 미국 캘리포니아주에서 가구 시험을 위한 점화용 버너로 적용되었다. 영화상영관 가연물들의 점화는 헵탄 50 mL가 적용된 0.01 m² 단면의 Pan이 적용되었으며, 최대 열발생률은 약 15 kW에 해당된다. 단 스크린 점화의 경우 화재확산이 발생되지 않아 헵탄 100 mL가 추가되었다. 실물 화재실험에서 초기 점화방법은 화재성장률 및 최대 열발생률에 상당한 변화를 야기할 수 있다. 그러나 적용된 점화원의 열에너지가 화재로 인해 발생하는 열에너지에 비해 매우 작기 때문에, 가연물의 구조적 차이로 인하여 고려된 점화방법의 변화는 각 가연물의 본질적인 화재 성장에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단된다.

3. 결과 및 검토

3.1 복합영상관 가연물의 화재성장

복합영상관의 단일 가연물을 대상으로 Table에 제시된 바와 같이 대기공간과 영화상영관에 배치되어 있는 좌석, 카페트, 유아용 시트 및 스크린에 대한 실물화재 실험이 수행되었다. 점화 이후의 화염크기 및 확산 등을 포함한 가시

적인 화재거동을 확인하기 위하여, Figure 3은 대표적인 3개 가연물에 대한 실험사진을 화재성장단계에 따라 제시한 것이다. Figure 3(a)는 대기공간의 Chair L_C의 화재성장 단계별 사진이다. 가스버너에 의해 초기 점화된 후, 등받이를 통한 수직방향의 화재확산 및 성장이 확인된다. 이후에 수평확산 및 좌석 하부로 낙하된 가연물에 의해 최성기에 도달하게 된다. Figure 3(b)는 영화상영관 좌석 T_B의 사진으로서, 바닥면에 설치된 헵탄 풀화재에 의해 점화된 이후에 수직방향으로의 급격한 화재확산으로 성장 및 최성기에 도달하고 있음을 볼 수 있다. Figure 3(c)는 영화상영관 좌석 T_B의 하부에 카페트가 설치된 경우로서, Figure 3(b)와의 비교를 통해 화재성장단계에서는 최대 화염높이 등의 큰 차이는 확인되지 않는다. 그러나 최성기 단계에 도달하는 과정에 좌석 바닥면 주위의 카페트를 통해 화염의 수평 확산을 볼 수 있다. 이를 통해 바닥면의 카페트를 통해 영화상영관 좌석의 추가적인 화재확산이 충분히 가능함을 예상할 수 있으며, 추가로 카페트의 화재 시 발생하는 다량의 연기 및 유독가스의 발생이 ASET의 상당한 감소를 가져올 것으로 예상된다.

Figure 4는 복합영상관 단일 가연물에 대하여 산소소모법 원리를 통해 측정된 시간에 따른 HRR을 도시한 결과이다. 우선 대기공간의 가연물을 살펴보면(Figure 4(a)), Chair L_A와 L_C의 HRR이 가장 높으며, 최대 HRR은 약 540 kW와 440 kW로 각각 측정되었다. 반면에 Chair L_B와 L_D의 최대 HRR은 약 180 kW로 유사함을 볼 수 있다. 비록 최대 HRR은 좌석을 구성하는 가죽과 폼의 양, 종류 및 비율 등에 영향을 받지만, 수직 화재확산이 발생할 수 있는 좌석의 등받이 유무도 큰 영향을 주고 있음을 명확하게 확인할 수 있다. 또한 등받이가 존재할 때 화염면과 접촉이 가능한 가연물의 노출 표면적 증가 역시 높은 최대 HRR에 영향을

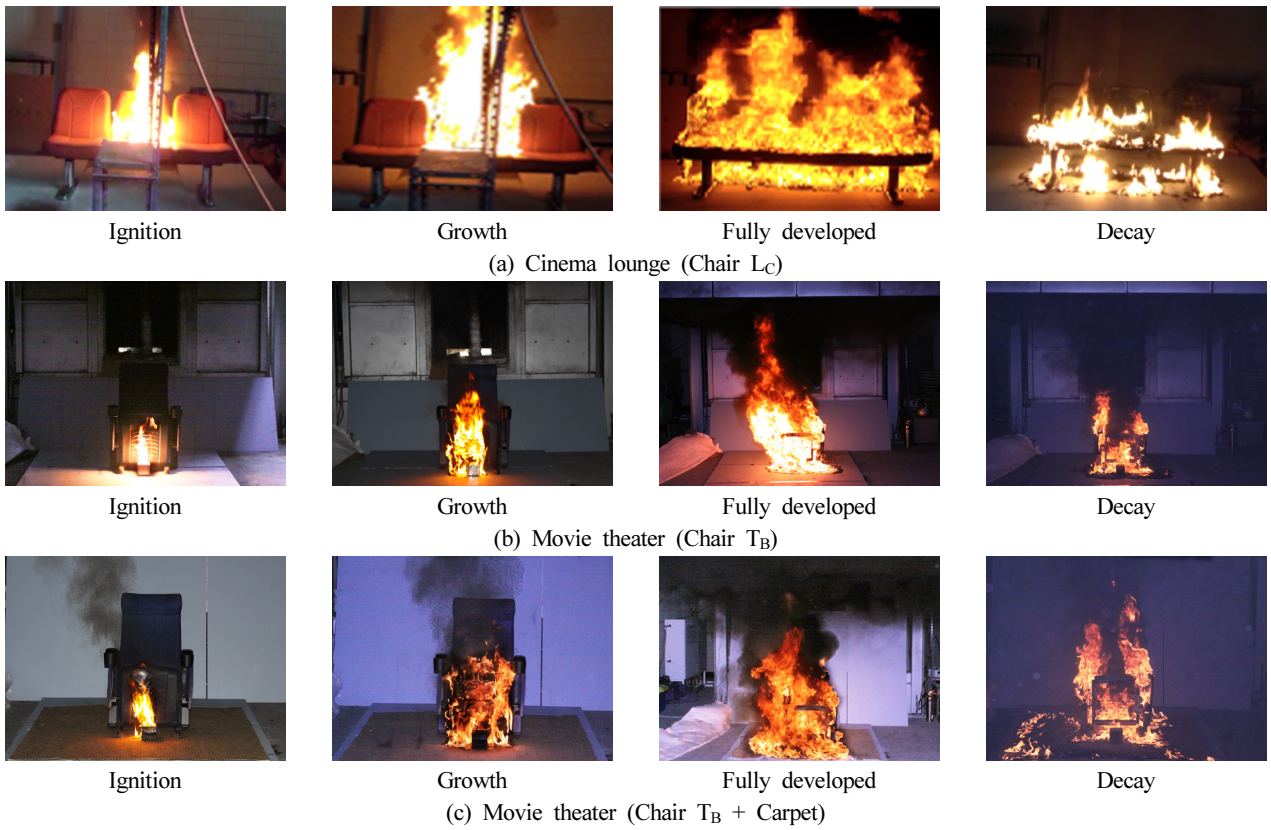


Figure 3. Photographies according to fire growth stages for representative combustibles placed in cinema complex.

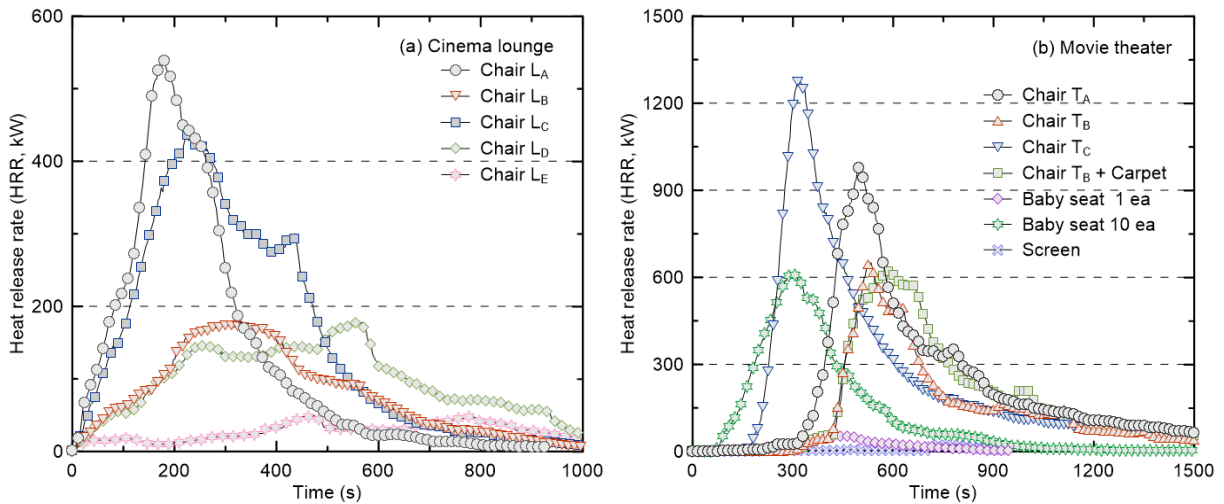


Figure 4. Time histories of heat release rates for single combustibles placed in (a) cinema lounge and (b) movie theater.

준 것으로 판단된다. 마지막으로 플라스틱 재질로 구성된 Chair L_E는 가장 낮은 HRR 및 화재성장률을 가지며, 다른 좌석과는 크게 다른 화재성상을 보여주고 있다. 가연물의 용융을 통해 풀화재 거동을 보이는 열가소성 폴리머(Polymer) 계열의 플라스틱의 경우에는 노출된 고체 표면적보다는 오히려 질량에 의해 화재성상이 결정될 수 있다는 문헌결과⁽²²⁾를 고려할 때, 향후 추가적인 실험을 통해 복합영상관 가연물들의 화재성상 차이가 규명되어야 할 것이다. Figure 4(b)

에 도시된 영화상영관의 가연물을 살펴보면, 노출 표면적이 가장 큰 리클라이너 형태의 Chair T_C가 가장 높은 최대 HRR (약 1,300 kW)을 보이고 있다. 유사한 형상을 갖는 Chair T_A와 T_B의 최대 HRR을 살펴보면, 각각 약 1,000 kW와 650 kW에 해당된다. 위의 2.2절에서 설명된 바와 같이 이들 두 좌석은 생산연도 차이로 인한 폼과 플라스틱의 질량비의 차이가 최대 HRR을 포함한 화재성상에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. Chair T_B의 하부에 카페트가 설치

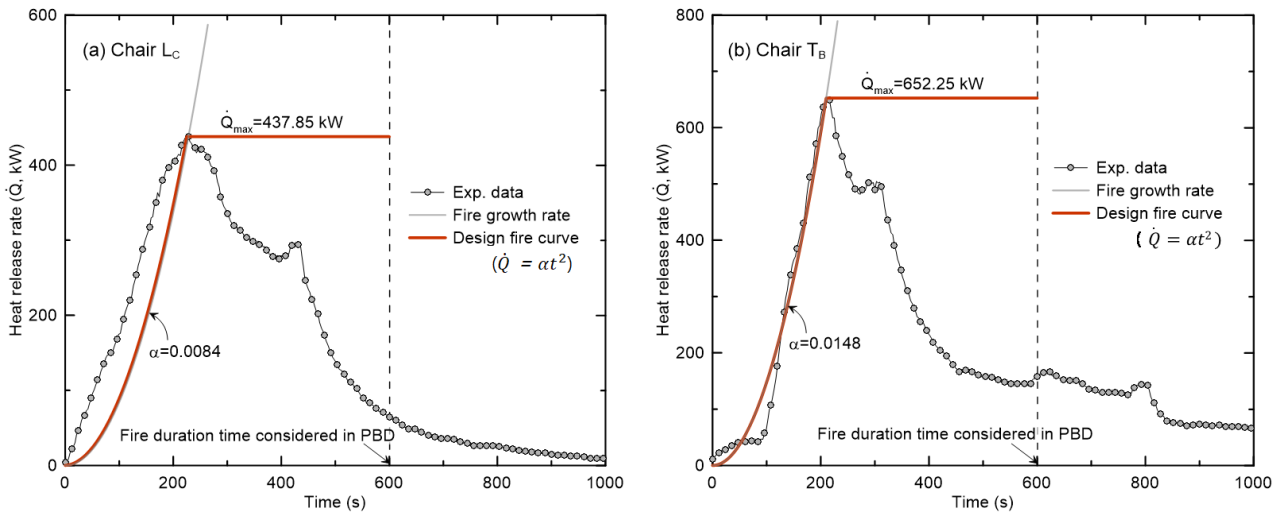


Figure 5. Design fire curves using the general method for Chairs L_C and T_B placed in (a) cinema lounge and (b) movie theater, respectively.

된 경우는 Figure 3에서 언급된 바와 같이 Chair T_B 의 단독 실험에 비해 최대 HRR은 유사하지만, 바닥면의 카페트로의 화재확산으로 최성기 이후에 오랜 시간동안 화염이 유지되고 있음을 재확인할 수 있다. 유아용시트의 경우에는 1개와 수직으로 배치된 10개의 실험결과를 비교해보면, 단일가연물의 최대 HRR은 약 50 kW이고, 복합가연물(10개)은 약 620 kW로서 12배의 차이를 보이고 있다. 이 두 가지 경우에 바닥면적을 제외한 화염과의 접촉이 가능한 노출 표면적의 비는 5.5에 해당되지만, 유아시트 10개의 실험에서 수직 화재확산의 영향으로 최대 HRR은 더욱 크게 증가됨을 예측할 수 있다. 동시에 최성기 이전의 화재성장률 역시 매우 큰 차이가 있음을 볼 수 있다. 마지막으로 스크린은 화염이 접촉하는 순간 용융이 발생되지만, 화재확산이 이루어지지 않아 거의 HRR이 거의 0에 가까움을 알 수 있다. 이는 스크린 원단의 주성분인 염화비닐(PVC)에 방염처리를 위한 유리섬유(Glass fiber)가 포함되었기 때문으로 판단된다.

3.2 복합영상관 가연물에 대한 디자인 화재곡선의 적용

실물화재 실험을 통해 측정된 복잡한 거동을 보이는 HRR을 단순화시키면서도 화재의 열 및 화학적 특성을 포함시키기 위한 디자인 화재곡선의 도출은 화재시뮬레이션 예측결과의 정확도에 가장 큰 영향을 미친다. Figure 5는 대기공간 및 영화상영관의 Chair L_C 와 T_B 를 대상으로 General method를 활용한 디자인 화재곡선을 도출한 것이다. 서론에서 언급된 바와 같이 General method는 $\dot{Q} = \alpha t^2$ 의 함수형태로 화재가 성장한다는 경험적 가정을 바탕으로, 1 MW에 도달하는 시간을 통해 화재성장률(α , kW/s²)를 산출한다. 그러나 본 연구에서 고려된 단일 가연물들은 대부분 1 MW 이하의 최대 HRR을 갖기 때문에, 측정된 최대 HRR을 기준으로 α 값이 산출되었다. 그 결과 대기공간의 Chair

L_C 와 같이 비교적 선형적으로 화재가 성장하는 경우에 디자인 화재곡선은 측정된 HRR과 상당한 차이를 가질 수 있다. 또한 영화상영관의 Chair T_B 는 2단계의 화재성장을 보임에도 불구하고 단순한 α 만이 고려될 수 있다. 물론 최대 HRR의 기준이 아닌 화재성장단계의 최대 구배를 갖는 순간을 기준으로 α 가 산출될 수도 있으나, 이에 대한 명확한 기준이 없기 때문에 연구자에 따라 상당한 불확실성을 가질 수 있다. 추가로 General method는 최성기 이후의 준정상상태 및 쇠퇴기에 대한 디자인 화재곡선 방법을 포함하고 있지 않다. 그 결과 최성기 이후 화재확산을 가정하여 최대 HRR이 지속된다는 부정확한 방법이 주로 적용되고 있는 실정이다.

Figure 6은 Figure 5와 동일한 가연물을 대상으로 최근에 제안된 2-stage method가 고려된 디자인 화재곡선⁽⁹⁾을 도출한 것이다. 우선 Figure 6(a)의 Chair L_C 를 통해 2-stage method를 이용한 디자인 화재곡선 도출방법을 단계적으로 살펴보자. 1) 측정된 HRR의 최대값(\dot{Q}_{max})을 기준으로 70%에 해당되는 $0.7 \times \dot{Q}_{max}$ 를 구하고, 이 값과 만나는 실험 HRR 값의 최초의 시간을 $t_{0.7,i}$, 최후의 시간을 $t_{0.7,d}$ 로 설정한다. 2) $t_{0.7,i}$ 와 $t_{0.7,d}$ 사이의 측정된 HRR을 적분하여 면적($A_{0.7}$)을 계산한다. 3) $\dot{Q}_{max,av} = A_{0.7}/(t_{0.7,d} - t_{0.7,i})$ 를 통해 $\dot{Q}_{max,av}$ 를 계산하고, 측정된 HRR과 만나는 최초 및 최후의 시간을 각각 t_i 와 t_d 로 설정한다. 4) $\dot{Q}_{max,av}$ 의 30%와 50%의 크기에 해당되는 HRR의 시간을 각각 $t_{0.3,i}$ 와 $t_{0.5,i}$ 로 설정하고, 이 두 지점을 t^2 곡선으로 피팅(Fitting)하여 1차 화재성장률 $\alpha_{g,1st}$ 를 산출한다. 이때 $t_{0.1st}$ 은 x 절편을 의미한다. 5) $t_{0.5,i}$ 와 t_i 의 두 지점을 t^2 곡선으로 피팅하여 2차 화재성장률 $\alpha_{g,2nd}$ 를 산출한다. 6) t_d 와 $t_{0.7,d}$ 의 두 지점을 t^2 곡선으로 피팅하여 쇠퇴기의 α_d 를 구하고, x 절편에 해당되는 화재중료시간(t_f)를 계산한다. 7) 측정된 HRR의 전체 면적(열방출량)과 디자인 화재곡선의 전체 면적 차이가 5% 이내가 되도록 t_f 를 미세

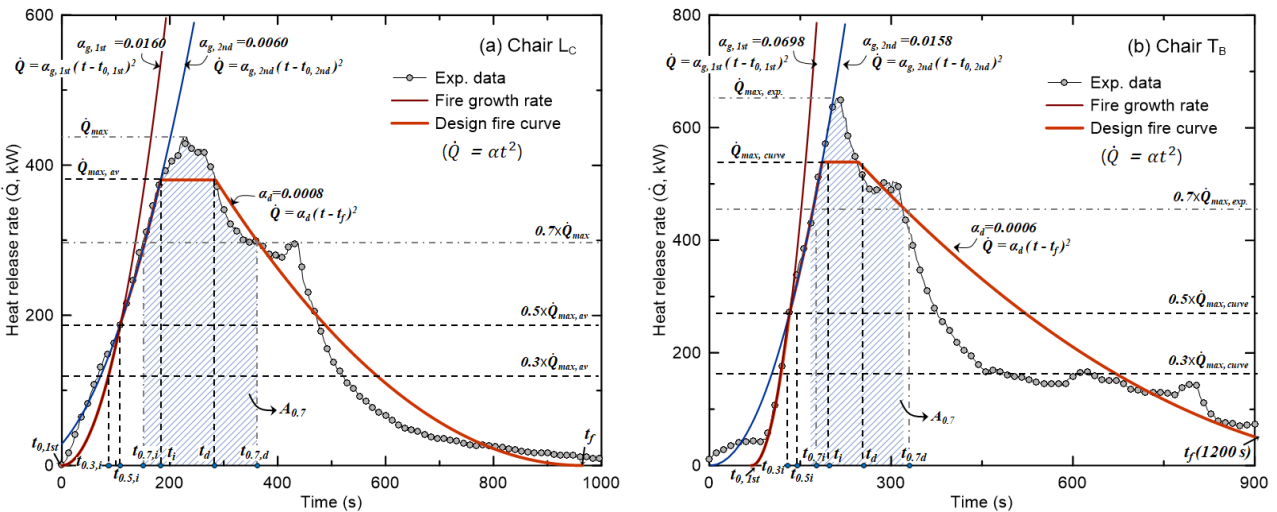


Figure 6. Design fire curves using the 2-stage method for Chairs Lc and Tb placed in (a) cinema lounge and (b) movie theater, respectively.

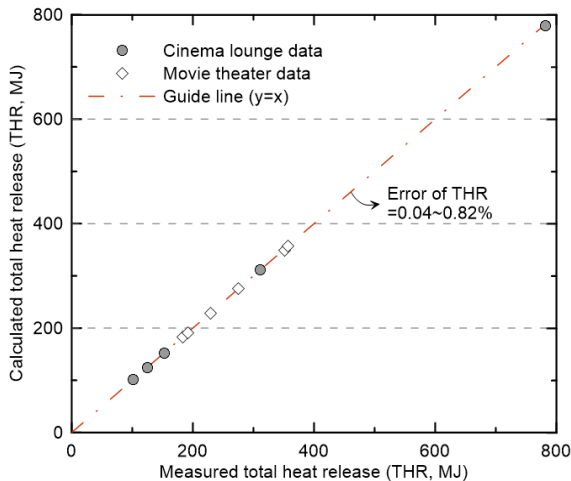


Figure 7. Comparison of total heat release (THR) between the experiments and 2-stage design fire curves.

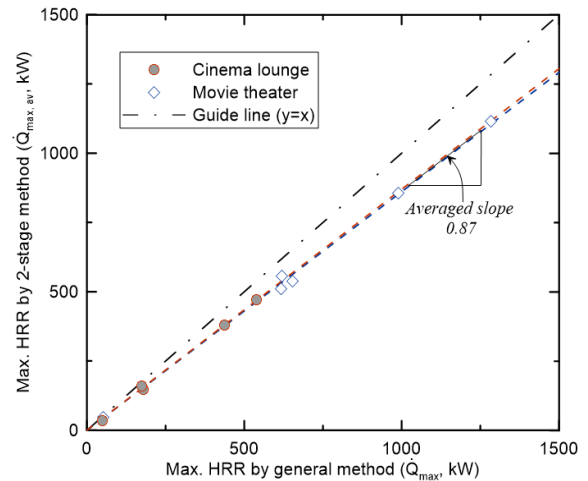


Figure 8. Comparison of \dot{Q}_{max} and $\dot{Q}_{max,av}$ between the general and 2-stage methods, respectively.

조정하고, 최종적으로 α_d 를 도출한다. 구체적인 방법 및 타당성 검토는 참고문헌⁹⁾에서 확인될 수 있다. 이와 같은 2-stage method가 적용되었을 때, Chair Lc의 화재성장률은 측정된 HRR을 상당히 유사하게 예측하고 있다. 또한 Figure 6(b)의 Chair Tb의 결과를 살펴보면, 초기 화재성장률에 영향을 미치지 않는 점화단계의 낮은 HRR은 반영되지 않지만, 이후 화재성장률은 매우 정확하게 반영되고 있다. 추가로 준정상상태 구간이 존재하지 않는 단일 가연물의 경우에, 디자인 화재곡선의 최대 $\dot{Q}_{max,av}$ 는 측정된 순간 최대치인 \dot{Q}_{max} 에 비해 다소 낮은 값을 갖지만, 2-stage method의 구획 상층부 온도 및 농도의 예측성능이 우수함을 고려할 때 충분히 합리적인 방법이라 평가된다. Table 1에 제시된 대기공간 및 영화상영관의 단일 가연물에 대한 2-stage method의 적용 타당성을 검토하기 위하여, Figure 7은 측정

된 HRR의 총 면적 적분값(즉, Total heat release, THR)과 2-stage 화재곡선에 의한 THR을 비교·도시한 것이다. 그림에서 2-stage method에 의한 THR은 측정된 THR을 최대 0.82% 범위 내에서 정확하게 예측함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 2-stage method의 7 단계에서 언급되었듯이, t_f 의 미세변경을 통한 반복계산이 적절히 수행되었음을 의미하며, 본 연구에서 고려된 모든 단일 가연물의 2-stage 디자인 화재곡선이 적절히 도출되었음을 재확인할 수 있다.

3.3 복합영상관 가연물의 디자인 화재곡선의 평가

복합영상관 가연물을 대상으로 시간에 따라 다양한 변곡점을 갖는 HRR을 단순화시키는 디자인 화재곡선의 적용 방법에 따른 최대 HRR과 화재성장률의 정량적 차이가 검토되었다. Figure 8은 측정된 최대 HRR(\dot{Q}_{max})을 그대로

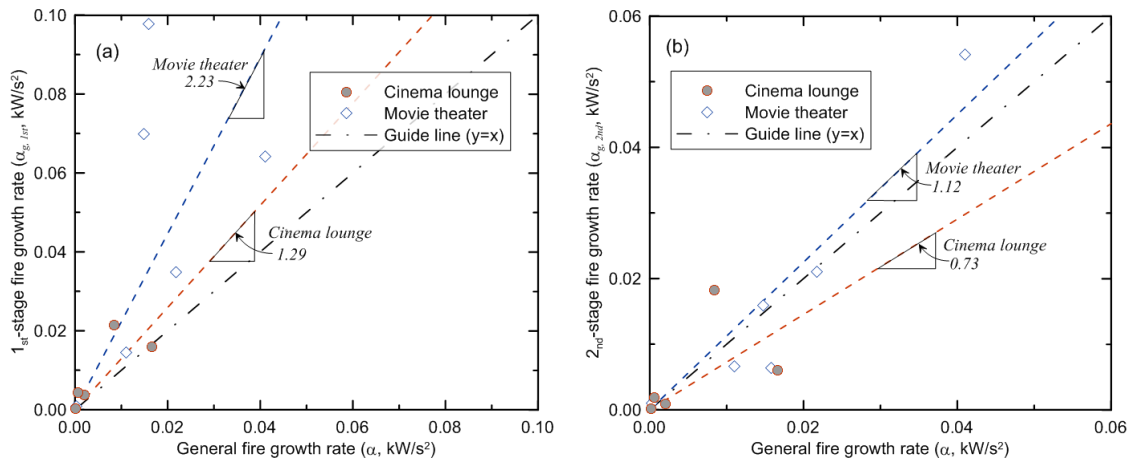


Figure 9. Comparison of fire growth rates between the general and 2-stage methods for combustibles placed in cinema lounge and movie theater.

적용하고 있는 General method와 $0.7 \times \dot{Q}_{max}$ 를 기준으로 준 정상상태를 가정한 최대 HRR ($\dot{Q}_{max,av}$)을 산출하고 있는 2-stage method 결과를 비교한 것이다. 기준선($y = x$)은 2 종류의 디자인 화재곡선을 통해 도출된 최대 열발생률이 동일함을 의미한다. 그림에서 대기공간 및 영화상영관 단일 가연물들의 디자인 화재곡선 방법에 따른 차이를 살펴보면, 가연물의 종류에 상관없이 General method에 비해 2-stage method에 의해 산출된 최대 HRR이 평균적으로 0.87배의 결과를 확인할 수 있다.

Figure 9는 디자인 화재곡선 방법에 따른 화재성장률을 비교한 것으로서, General method에 의해 산출된 화재성장률(α)을 기준으로 2-stage method에 의한 1차 및 2차 화재성장률을 각각 도시하였다. Figure 9(a)를 살펴보면, General method에 의한 α 에 비해 2-stage method에 의해 산출된 1차 화재성장률($\alpha_{g,1st}$)은 대기공간 및 영화상영관 가연물 모두 상당히 큼을 볼 수 있다. 구체적으로 영화상영관 단일 가연물들의 $\alpha_{g,1st}$ 는 α 에 비해 평균적으로 2.23배의 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 영화상영관 가연물의 재질을 고려할 때, Figures 2와 3에서 확인되듯이 플라스틱에 의한 급격한 초기 화재성장이 HRR에 영향을 미치기 때문으로 사료된다. 반면에 대기공간의 가연물들은 점화 이후 주로 수평방향의 화재확산이 이루어지기 때문에 상대적으로 낮은 화재성장률(α 의 1.29배)을 보이고 있다. 이 결과로부터 General method에 의한 디자인 화재곡선은 점화 이후 화재성장단계를 매우 낮게 예측할 수 있으며, 화재감지기 및 소화설비의 작동시간에도 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 2-stage method에 의한 2차 화재성장률($\alpha_{g,2nd}$)을 살펴보면 (Figure 9(b)), 영화상영관 가연물들의 평균 $\alpha_{g,2nd}$ 는 α 의 약 1.12배로서 약간 높은 값을 보이는 반면에, 대기공간 가연물들의 평균 $\alpha_{g,2nd}$ 는 오히려 낮은 α 의 약 0.73배의 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 대기공간 가연물은 비교적 선형적으로 화재가 성장하는 반면에 영화상영관 가연물은 급

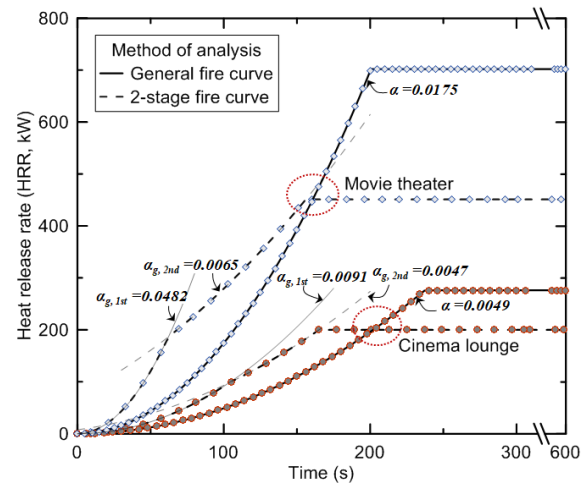


Figure 10. Proposal of the design fire curves for single combustibles placed in cinema lounge and movie theater of cinema complex.

격하게 성장하던 초기 화재에 비해 비교적 완만한 화재성장을 갖기 때문으로 판단된다. 위 결과로부터 2-stage method를 활용한 화재성장률의 구체화는 화재성장단계를 보다 정확히 구현할 수 있으며, 보다 정확한 ASET과 RSET의 예측 정확도 개선에 크게 유용할 것으로 기대된다.

Figure 10은 복합영상관의 대기공간 및 영화상영관에 배치된 단일 가연물들에 대한 평균적인 최대 HRR과 화재성장률을 적용하여 도출된 디자인 화재곡선을 도시한 것이다. 본 연구에서 검토된 2가지의 디자인 화재곡선 방법에 따른 차이를 검토하기 위하여, General 및 2-stage method의 결과가 동시에 도시되었다. PBD의 수행 시에 특정 가연물을 대상으로 하기보다는 공간적 특성을 고려한 디자인 화재곡선이 적용되기 때문에, 복합영상관 공간별 가연물들의 평균값은 실용적 측면에서 유용할 것으로 판단된다. General method의 결과를 기준으로 2-stage method의 결과를 살펴보

면, 대기공간의 화재성장률은 General method에 의한 α 에 비해 상당히 크며, 영화상영관에서는 2단계의 화재성장이 뚜렷하게 표현됨을 볼 수 있다. 최대 HRR을 살펴보면, Figure 8에서 설명되었듯이 2-stage method에 의한 최대 HRR은 General method 결과에 비해 상당히 낮은 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 화재안전의 보수적인 관점에서 2-stage의 문제점으로 인식될 수 있다. 그러나 화재로 인한 총 발생열량을 동일하게 하며 최성기의 준 정상상태 조건을 부여함으로써, 화재의 열 및 화학적 특성을 적절히 예측할 수 있다는 선행연구를 통해 충분히 설명될 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 본 연구에서 검토된 복합 영상관의 단일 가연물에 대한 2-stage 디자인 화재곡선 방법에 따른 분석 결과는 향후 실규모 실물화재실험의 디자인 화재곡선 제안에 유용한 정보로 활용될 것으로 기대된다.

4. 결 론

국내 복합영상관의 단일 가연물을 대상으로 실물 화재 실험이 수행되었으며, 측정된 HRR에 대한 디자인 화재곡선 방법(General 및 2-stage methods)에 따른 최대 HRR 및 화재성장률에 대한 정량적 차이가 검토되었다. 복합영상관 주요 가연물의 선정은 가연물의 용도 및 화재하중의 관점에서 대기공간(Cinema lounge)과 영화상영관(Movie theater) 내부로 구분되었으며, 총 12가지의 가연물이 고려되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 점화와 최성기의 t^2 의 곡선으로 표현되는 General method는 실물화재의 복잡한 화재성장단계를 표현하는데 한계가 있는 반면에, 화재성장을 2단계로 분류하는 2-stage method는 측정된 총 발생열량을 보존하면서 최성기의 준 정상상태 구간을 적용함에 따라 보다 구체적인 화재성장이 표현할 수 있다.

(2) 최대 HRR의 관점에서 대기공간 및 영화상영관 가연물에 상관없이 2-stage method는 General method에 비해 평균적으로 87% 낮은 값을 제시하고 있다. General method에 의한 화재성장률(α)을 기준으로, 2-stage method에 의한 1차 화재성장률($\alpha_{g,1st}$)은 대기공간 및 영화상영관 가연물에 대하여 각각 1.29배와 2.23배의 큰 차이를 보이고 있다. 또한 2차 화재성장률($\alpha_{g,2nd}$)은 대기공간 및 영화상영관 가연물에 대하여 각각 0.17배와 1.12배의 차이를 갖는다.

(3) 디자인 화재곡선 방법에 따른 화재성장률은 큰 차이는 화재감지기 및 소화설비의 작동시간에 직접적인 영향을 줄 수 있으며, ASET과 RSET의 예측 정확도에도 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서 검토된 2-stage method를 활용한 디자인 화재곡선 도출은 국내 PBD의 신뢰성 개선이 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2019년도 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 지원을 받아 수행되었으며, 관계제위께 감사드립니다.

References

1. K. H. Kim, S. H. Lee, H. Y. Kim, T. H. Song and B. K. Jin, "Establishment of Building Fire Safety System Improvement of Building Fire Safety Regulations", KICT 2000-082, Korea Institute of Construction Technology, pp. 31-37 (2000).
2. H. S. Han and C. H. Hwang, "Study on the Available Safe Egress Time (ASET) Considering the Input Parameters and Model Uncertainties in Fire Simulation", Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 3, pp. 112-120 (2019).
3. V. Babrauskas and R. D. Peacock, "Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard", Fire Safety Journal, Vol. 18, No. 3, pp. 255-272 (1992).
4. W. Jahn, G. Rein and J. Torero, "The Effect of Model Parameters on the Simulation on Fire Dynamics", Fire Safety Science-Proceedings of the Ninth International Symposium, pp. 1341-1352 (2008).
5. J. H. Cho, C. H. Hwang, J. Kim and S. Lee, "Sensitivity Analysis of FDS Results for the Input Uncertainty of Fire Heat Release Rate", Journal of the Korea Society of Safety, Vol. 31, No. 1, pp. 25-32 (2016).
6. H. Y. Jang and C. H. Hwang, "Revision of the Input Parameters for the Prediction Models of Smoke Detectors Based on the FDS", Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 44-51 (2017).
7. H. -J. Kim and D. G. Lilley, "Heat Release Rates of Burning Items in Fires", 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2000-0722, pp. 1-25 (2000).
8. 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).
9. B. N. Baek, C. B. Oh and C. Y. Lee, "Evaluation of Modified Design Fire Curve for Liquid Pool Fires Using the FDS and CFAST", Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 7-16 (2018).
10. S. H. An, S. Y. Mun, I. H. Ryu, J. H. Choi and C. H. Hwang, "Analysis on the Implementation Status of Domestic PBD (Performance Based Design) - Focusing on the Fire Scenario and Simulation", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 5, pp. 32-40 (2017).
11. Y. H. Yoo, H. R. Kim and H. J. Shin, "A Study on the

- Vehicle Fire Property using the Large Scale Calorimeter”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 9, No. 4, pp. 343-349 (2007).
12. S. G. Kang, D. E. Kim, D. G. Seo, D. J. Kim, J. H. Kim and Y. J. Kwon, “A Study on the Experimental to Establish Combustion Properties DB Accordance to Vehicle Model Categorizes at Parking Space”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 1, pp. 27-33 (2014).
 13. O. S. Kweon, Y. H. Yoo, H. Y. Kim and J. H. Kim, “Real Scale Experiment for Assessing Fire Model of Office Compartment”, *Journal of KOSHAM*, Vol. 12, No. 6, pp. 61-65 (2012).
 14. 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).
 15. B. I. Choi, Y. S. Han and M. B. Ki, “Heat Release Rate Measurements of Residential Combustibles Using Oxygen Consumption Method”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 104-107 (2008).
 16. S. R. Lee, “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).
 17. S. C. Kim, D. G. Nam, C. H. Hwang, M. O. Yoon, G. H. Ko, J. Y. Kim, S. Y. Choi, J. J. Jung, et al., “Validation and Reliability Analysis of Guideline of Performance Based Fire Protection Design of a Super Tall Building”, NEMA-2012- 35, National Emergency Management Agency (2014).
 18. J. H. Kim, S. Y. Joo and J. J. Lee, “An Evaluation on Evacuation Safety in Multiplex Cinema based on Fire & Evacuation Simulation”, *Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 7-13 (2007).
 19. Y. M. Shin, Y. R. Lim and Y. H. Ahn, “A Study on the Optimization Method for Evacuation Procedure on Fire in Public Facilities -Focusing on Multiplex-”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 113-120 (2019).
 20. ISO/TC 92, “Reaction to Fire Tests - Room Corner Test for Wall and Ceiling Lining Products - Part 1: Test Method for a Small Room Configuration”, ISO 9705-1:2016(en) (2016).
 21. C. Huggett, “Estimation of the Rate of Heat Release Rate by Means of Oxygen Consumption”, *Journal of Fire and Flammability*, Vol. 12, pp. 61-65 (1980).
 22. H. Y. 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).