

# 방화(放火)화재 특성에 관한 실험적 연구

최진\* · 권오승\*\* · 강경식\*\*\*

\*명지대학교 산업공학과 · \*\*한방유비스(주) · \*\*\*명지대학교 안전경영연구소

## A Experimental Study on the Arson Fire Characteristics

Jin Choi\* · Ohseung Kwon\*\* · Kyung Sik Kang\*\*\*

\*Department of Industrial Engineering, Myoungji University

\*\*KF UBIS Co., Ltd.

\*\*\*Safety Management Laboratory, Myoungji University

### Abstract

This Study is to analyze the characteristics of arson fire under fire dynamics to protect people and property from arson fire which has been radically increased with the development of the Korean economy. Assembly and merchandise purposes such as theater, retail, and exhibition has been performed as the arson fire study.

The experiment for this study is based on the analysis of the characteristic for its own combustion process and smoke spread when arson fire occurs. This study presents the analysis through comparing the condition of setting fire using liquid fuel such as thinner on purpose to the condition of setting fire naturally depending on each occupancy.

Keywords : Arson fire, life safety strategy, Arson fire characteristics, Arson fire test.

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 필요성

2008년 2월에 발생한 국보1호 숭례문 방화화재는 온 국민에게 큰 충격을 안겨 주었고, 2003년에 발생한 대구지하철 방화화재는 많은 사상자가 발생한 대형 참사로서 우리 사회에 엄청난 피해를 가져다 주었으며 방화화재에 대한 방재대책의 필요성을 재인식케 하였다.

국내의 산업발전과 함께 증가하고 있는 방화화재는 1980년대부터 급격하게 증가하기 시작하였으며, 방화화재의 발생 비율도 매년 증가하여 2003년부터는 전체 화재발생건수 중 10%를 상회하는 추세로서 경제성장

과 함께 방화화재가 급속하게 증가하는 것으로 나타나고 있다[1, 3, 6].

이와 같은 방화화재에 대하여 단순한 사회적인 관심만으로는 방화화재를 예방하기가 어려운 실정이며, 국내의 일부 학계 및 소방 관련기관에서 방화에 대한 연구를 수행하고 있으나 방화화재를 과학적으로 대처하기 위해서는 소방과학 및 선진기술을 이용한 방재대책 연구가 필요한 실정이다. 선진국의 경제성장 및 방화화재 발생특성을 감안할 때 국내의 경제성장 및 방화화재 발생비율은 지속적인 증가를 예측할 수 있으므로 방화화재로 인한 수많은 인명피해 및 재산손실을 사전에 방지하기 위해서는 과학기술을 이용한 방재대책에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다[4, 5].

본 논문은 명지대학교 안전경영연구소 협력에 의해 이루어진 논문임.

† 교신저자: 최진, 서울특별시 강남구 도곡동 418-4 한방빌딩 4층 한방유비스

M · P: 011-9717-4111, E-mail: choijin4111@naver.com

2008년4월 접수; 2008년 6월 수정본 접수; 2008년 6월 게재확정

## 1.2 연구목적

본 연구에서는 경제성장과 함께 급격하게 증가하고 있는 인위적인 방화(放火) 화재로부터 귀중한 생명과 재산을 보호하기 위하여 화재실험을 통한 화재공학적인 측면에서 방화화재에 대한 특성을 분석하였으며, 방화 화재 특성 및 화재역학에 관한 선진 기술자료를 조사하고 방화화재의 연소특성 및 연기거동특성을 정량적으로 파악하기 위해 방화화재와 관련된 화재시나리오에 따른 화재모형 실험을 실시하여 실험결과에 의한 방화화재 특성을 연구하였다[9, 11].

## 1.3 연구범위 및 방법

이제까지 우리나라의 대표적 방화화재 사례로 대구 지하철 방화사건 과 서울 송례문 방화사건 등과 같이 방화범은 일반적으로 휘발유(Gasoline)나 도료용 thinner(Thinner)와 같은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 액체가연물을 이용하여 방화(放火)하고자 하는 대상물에 살포하고 방화한 것으로 나타났다[3, 4, 12].

방화의 방법에는 범인의 의지에 따라 여러 가지 방법이 있을 것으로 보이나 전례로 보아 전술한 액체가연물을 이용하게 되는 경우가 대부분일 것으로 가정하여 방화화재의 원인 행위로 액체가연물을 살포하는 방법으로 제한하였고, 방화화재 시 사용되는 액체가연물을 살포하는 방화화재 조건과 액체가연물을 살포하지 않는 일반화재조건으로 분류하여 실험을 실시하였다.

대상 건축물은 불특정 다수인이 출입하는 다중이용 시설로서 방화의 표적이 되며 화재 시 많은 인명과 재산피해가 예상되는 공연장, 판매장, 전시장 용도를 대상으로 하였고 사찰이나 문화재 등의 전통 목조건축물 과 산림 방화화재 등은 제외하였다.

본 연구는 실험 자료의 신뢰도를 확보하기 위하여 기술표준원으로부터 국제공인시험기관으로 지정받은 「방재시험연구원」에 의뢰하여 실험을 실시하였다[2].

## 2. 방화화재 연소특성

경제성장과 함께 증가하고 있는 방화화재를 과학적으로 대처하기 위해서는 방화화재의 특성에 따른 소방 과학 및 선진기술을 이용한 방재대책의 정립이 필요한 실정이다[13, 16].

본 연구에서는 화재실험 수행을 위한 시나리오 구성을 위하여 방화화재에서 사용되는 액체가연물의 연소특성과 일반가연물의 연소특성 등을 조사하였으며, 화재

관련기준 및 선진기술자료를 이용하여 방화화재와 관련된 화재특성 및 화재역학 자료 등을 분석하였다.

## 2.1 구획실 화재 (Compartment Fire)

건축물 내의 밀폐된 공간에서 발생하는 화재를 의미하며, 이와 같은 실내 공간에서의 화재는 화재진행에 따른 온도변화에 따라 발화 및 성장단계, 플래시오버, 최성기, 쇠퇴기단계 등 일반적으로 5단계로 분류되어 연구되고 있다[10, 17, 18]

### 2.1.1 발화단계 (Ignition)

화재가 시작되는 단계로서 발화원에 따라 여러 가지 형태로 화재가 시작되며, 본 연구에서는 방화화재의 경우에 급속한 연소속도로 화재가 성장하는 액체가연물을 이용한 화재로 발화단계를 시작하여 화재특성을 분석하였다.

### 2.1.2 성장단계 (Developing Fire)

발화단계 이후 화재 초기에는 주로 가연물 자체의 함수로 성장하고, 구획실의 영향은 아주 적게 받거나 거의 받지 않는다. 이 때 화재는 에너지 및 연소 생성물의 발생으로 설명되고 있으며, 가연물 및 산소가 충분할 경우에 화재는 성장을 계속하면서 구획실 내의 온도를 상승시키게 된다.

### 2.1.3 플래시오버 (Flash Over)

플래시오버는 일반적으로 성장단계의 화재에서 최성기 화재로 전이되는 현상으로 정의되며, 이 때 구획실 내의 모든 가연성 품목이 화재에 접하는 순간이 된다.

관련 문헌에서는 구획실 내의 고온 가스에서 나오는 복사 에너지가 모든 가연성 물질을 발화시키는 온도를 기준으로 플래시오버가 발생하는 것으로 연구되어 왔으며, 실내의 가스온도가 500~600℃가 될 때 플래시오버가 일어나는 것으로 적용하고 있다.

### 2.1.4 최성기 화재 (Fully Developed Fire)

이 단계에서 화재의 열방출률은 최대에 이르며, 이 단계에서는 구획실 내의 가용 산소가 감당할 수 있는 양보다 더 많은 가연물이 열분해 되는 경우가 빈번하며, 최성기 단계에서 구획실 내의 환경은 연소 물질의 열분해율에 현저한 영향을 미친다.

### 2.1.5 쇠퇴기 단계 (Decay)

구획실 내의 연소가 가능한 가연물이 소모됨에 따라

연소가 쇠퇴하는 단계로서, 화재의 열방출률이 감소하면서 연소가 서서히 중단되는 단계이다.

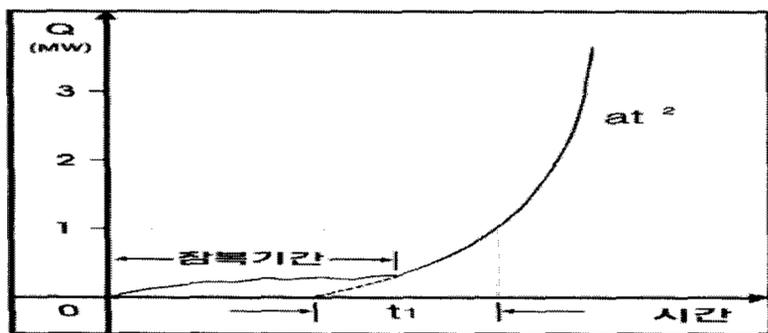
## 2.2 가연물의 연소특성

### 2.2.1 화재성장속도

가연물의 화재성장속도는 연소과정 또는 화염확산과 관계되는 전체 연소면적에 노출되는 가연물의 종류와 질량, 노출상태 등에 따라 달라질 수 있으며, 고체 가연물 보다 액체 가연물의 화재성장속도가 빠르다는 것을 예측할 수는 있으나 정량적으로 모든 가연물의 화재성장속도를 일정하게 규정하는 것은 매우 어려운 것으로 판단된다[19, 20].

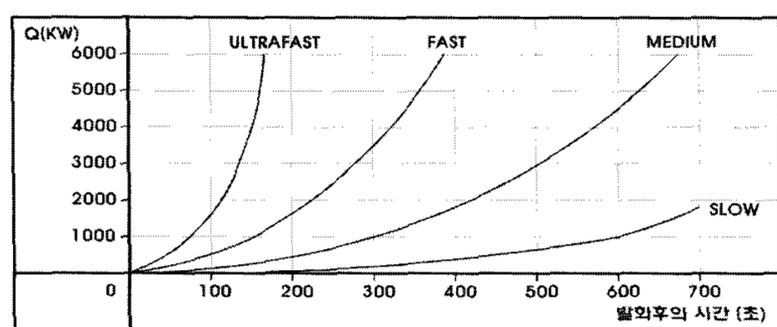
이와같은 가연물의 화재성장속도를 표준화하여 화재역학 분야에 적용할 수 있도록 많은 가연물의 종류와 질량, 노출상태 등에 따른 실험과 연구가 진행되었다.

상기 <그림 1>과 같이 일반 가연물의 화재 시 열방출을 1MW 크기로 화재가 성장하는 시간( $t_1$ )은 실험적으로 시간( $t$ )의 제곱에 비례하는 것으로 나타났다.



<그림 1> 화재의 성장곡선 예시

미국 NFPA 기준에서는 화재 시 열방출을 1MW 크기로의 성장시간을 기준으로 화재크기를 Slow((600초), Medium (300초), Fast(150초), Ultrafast(75초)의 네가지로 분류하고 있으며, 여기서 「a」는 가연물의 종류에 따른 상수로서 가연물의 종류 및 노출상태 등에 따라 가연물이 연소하는 속도가 크게 달라지게 되므로 화재성장속도를 <그림 2>와 같이 분류하여 화재역학 분야 연구에 적용하고 있다[13, 16].



<그림 2> 화재성장속도

### 2.2.2 일반 가연물

일반적으로 방호구역에 설치된 가연물의 종류와 질량, 노출상태 등에 따라 연소특성이 달라질 수 있으며, 액체 가연물과의 연소특성을 비교하기 위하여 미국 NIST (National Institute of Standards and Technology) 에서 팔걸이 의자 (Armchair)를 이용한 일반 가연물의 연소 실험자료를 분석한 결과 액체 가연물과는 달리 실험용 의자가 발화된 이후 약 300초 정도의 잠복기간을 거쳐 연소되는 특성을 나타냈으며, 실험용 의자의 종류 및 설치수량, 설치조건 등에 따라 연소조건은 달라질 수 있는 것으로 나타났다[8, 14].

### 2.2.3 액체 가연물

대기압 상태에서의 액체 가연물 화재는 발화원에 의하여 연소가 시작되는 단계에서의 노출형태에 따라 Pool Fire 및 Spill Fire로 구분할 수 있으며, 이러한 액체 가연물은 가연성 액체를 사용하는 공장으로부터 인화성 가연물을 이용한 고의적 방화에 이르기까지 여러 가지 형태로 잠재적 화재위험요소가 되고 있다.

NIST에서 Methanol을 이용한 액체 가연물의 연소 실험자료에 의하면 일반 가연물과는 달리 실험용 액체 연료의 발화와 함께 잠복기간이 없이 급속한 화재성장속도로 연소되는 특성을 나타내고 있으므로 액체 가연물이 일반 가연물에 뿌려지는 일반적인 방화화재의 경우에 액체 가연물의 유출면적은 화재의 크기와 직결되어 있으며, 액체 가연물의 연소 시 발생하는 열에 의하여 일반 가연물도 급속하게 연소가 되는 것을 예측할 수 있다[7, 15].

## 3. 화재모형 실험

### 3.1 실험 개요

불특정 다수인이 출입하는 다중이용시설로서 공연장 및 판매장, 전시장 등에 사용되는 실내가연물의 화재모형을 실험체로 선정하여 실험을 실시하였으며, 방화화재 시 일반적으로 사용되는 액체가연물을 살포하는 방화화재 조건과 액체가연물을 살포하지 않는 일반화재조건으로 실험을 실시하여 실험체의 연소특성 및 연기거동특성을 정량적으로 파악하였다.

실험 중 실험체의 무게감소율을 측정하기 위하여 실험실 중앙부분 바닥에 설치된 저울(바닥으로부터 높이 400mm) 상부에 실험체를 설치하여 실험을 실시하였다. 일반화재의 경우에는 실험체에 액체가연물을 살포하지 않은 상태로 점화용 이그나이터(Igniter)를 사용

하여 점화하였고, 방화화재의 경우에는 실험체 상부에 걸쳐 도료용 thinner(Thinner) 1리터(1,000cc)를 살포한 상태로 실험체에 점화하였다.

목재류의 경우에는 초기연소의 지속성을 유지하기 위하여 실험용 헵탄(Normal Heptane) 100 cc를 넣은 내경 80mm의 점화용 연료통을 실험용 목재크립 하단부에 설치한 후 점화용 연료통에 점화하여 실험을 실시하였다[2].

## 3.2 실험체 및 실험장치

### 3.2.1 실험체

#### 1) 소파 실험체

공연장 용도의 실험체는 의자류로 선정하였으며, 가죽커버 또는 인조가죽커버 보다 초기 연소가 잘 되는 천 커버용 소파를 선정하여 일반화재 와 방화화재로 구분하여 실험을 실시하였다. 실험용 소파는 크기가 700(W) × 760(L) × 850(H)mm 이고 무게 21±0.5Kg의 천 커버용 소파를 2개씩 사용하였고, <그림 5>와 같이 실험실 중앙부분에 설치하여 실험을 실시하였다.

일반화재의 실험체는 무게 20.5 Kg 및 21.4 Kg으로 총 41.9Kg, 방화화재는 무게 20.8Kg 및 21.0Kg으로 총 41.8Kg의 실험용 소파를 사용하여 실험을 실시하였다.

#### 2) 의류 실험체

판매장 용도의 실험체는 의류로 선정하였으며, 연소가 잘 되는 의류를 선정하여 일반화재 와 방화화재로 구분하여 실험을 실시하였다.

일반화재와 방화화재를 유사한 조건으로 실험하기 위하여 겨울잠바 및 청바지, 운동복, 양복, 내의 등 유사한 종류의 의류를 2벌씩 준비하여 일반화재 와 방화화재에 사용하였고, 무게 11~12Kg의 의류를 <그림 8>과 같이 동일한 방법으로 설치하여 실험을 실시하였다.

일반화재는 무게 11.80Kg, 방화화재는 무게 11.85 Kg의 실험용 의류를 철사로 된 옷걸이에 걸고 실험실 중앙부에 설치한 상태에서 실험을 실시하였다.

#### 3) 목재류 실험체

전시장 용도의 실험체는 목재류로 선정하였으며, 전시용으로 많이 설치되는 칸막이(파티션) 및 실험용 목재를 선정하여 일반화재 와 방화화재로 구분하여 실험을 실시하였다.

일반화재 와 방화화재를 유사한 조건으로 실험하기 위하여 유사한 종류의 파티션 및 목재를 2조씩 준비하여 일반화재와 방화화재에 사용하였고, 무게 37~38Kg

의 목재류를 <그림 13>과 같이 동일한 방법으로 설치하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 칸막이는 3mm 하드보드 위에 1mm 천으로 양면 마감한 제품으로서 폭 1,200mm, 높이 1,200mm 이고 두께가 45mm 인 통판 파티션(호칭)을 2개씩 사용하였다.

일반화재는 무게 9.31Kg 및 9.45Kg으로 총 18.76Kg, 방화화재는 무게 8.80Kg 및 10.10Kg으로 총 18.90Kg의 제품을 사용하여 실험을 실시하였다.

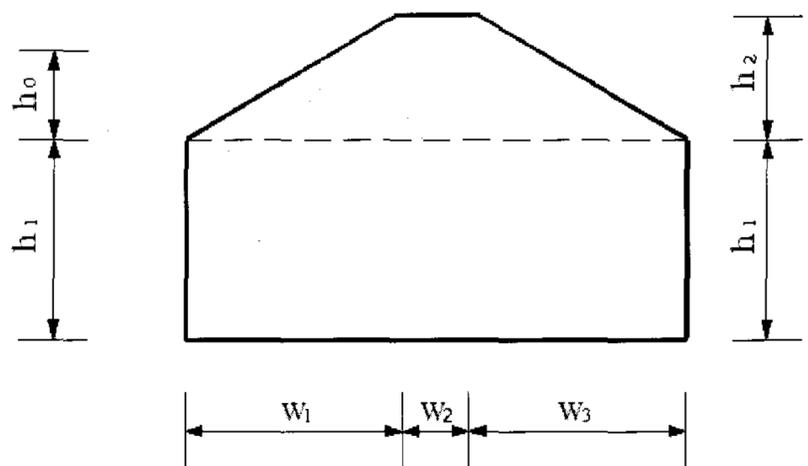
실험용 목재모형은 소화기의 성능을 검사하는 화재 실험용 목재크립을 사용하였고, 소나무로 가공된 크기 35(W) × 35(H) × 730(L)mm 의 실험용 목재크립 100개를 <그림 13>과 같이 설치하여 실험하였다.

목재크립의 연소를 용이하게 하기 위하여 목재의 함수율(목재수분 함유율)이 평균 함수율 10%이하가 되도록 실험 전의 목재크립의 함수율을 측정하여 목재모형을 설치하였고, 일반화재는 평균함수율 8.72% (8.2% ~ 10.2%)의 목재크립 37.2Kg, 방화화재는 평균함수율 8.80% (8.5% ~ 9.5%)의 목재크립 38.0Kg 을 90°(도)로 설치된 칸막이와 각각 100mm 이격 설치하여 실험을 실시하였다.

### 3.2.2 실험장치

#### 1) 실험실

실험모형의 연소특성 및 연기거동특성을 파악하기 위한 실험실은 집진설비가 설치된 폭(W) 18m, 길이(L) 30m, 높이(H) 17m 의 실험공간을 이용하였다.



<그림 3> 실험실 단면도

실험실의 단면이 <그림 3>과 같이 천정부분이 균일하지 않은 경우 (Nonuniform space)에 평평하지 않은 천정 (Nonflat Ceiling)부분의 시뮬레이션 모델 선정을 위한 실의 높이 산정을 위하여 NFPA 92B - E.3 에서 정하는 등가높이 산정방법에 의해 실험실의 등가높이를 산정하여 적용하였으며, 상기 <그림 3>에서 각 부분의 크기는 <표 1> 및 <표 2>와 같다[2].

<표 1> 실험실 폭 세부크기

구 분	폭 [m]			
	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	계 (W)
크 기	7.8	2.4	7.8	18.0

<표 2> 실험실 높이 세부크기

구 분	높 이 [m]		
	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	계 (H)
크 기	10.8	6.2	17.0

또한 실험실 상부의 평평하지 않은 천정부분의 단면적(A<sub>0</sub>) 및 등가상부높이(h<sub>0</sub>)는 NFPA 92B - E.3 계산방식에 의하여 <표 3>과 같이 산출하였다[13].

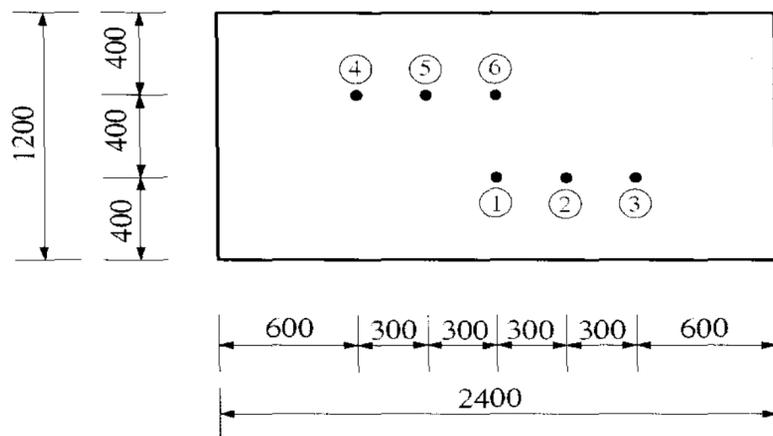
<표 3> 실험실 상부단면적 및 등가상부높이

구 분	계 산 식	크 기
단면적 (A <sub>0</sub> )	$(w_1 \times h_2) / 2 + (w_2 \times h_2) + (w_3 \times h_2) / 2$	63.24 m <sup>2</sup>
등가상부높이 (h <sub>0</sub> )	A <sub>0</sub> / W	3.51 m

그러므로, 실험실의 등가상부높이 h<sub>0</sub>는 10cm미만을 삭제하여 3.5m로 적용하였고, 유효실험공간의 등가체적은 폭 18.0m, 길이 30.0m, 높이 14.3m로 산정하여 실험실의 크기를 적용하였다.

2) 온도기록장치 및 열전대

실험 중의 실험체 상부 온도측정을 위하여 1,200°C까지 측정할 수 있는 휴대용 PC-Recorder를 사용하였고, 열전대는 K(CA) Type의 노출형 열전대를 PC-Recorder에 연결하여 온도를 측정하였다.



<그림 4> 열전대 배치도 [단위 : mm]

또한 각 실험체의 연소 중에 발생하는 열기류의 온도를 일정하게 측정하기 위하여 실험실 중앙부분에 <그림 4>와 같이 바닥으로부터 3m 높이에 크기 1,200(W) × 2,400(L)mm, 두께 15mm의 석고보드를 설치하고, 열전대 6개를 석고보드 하단부에 설치하여 실험 중 실험체 상부의 온도를 측정하였다[2].

3) 함수율 측정기

목재류 실험모형에 대한 함수율 측정을 위하여 최소 눈금단위 0.1 % 이고 측정범위 4 ~ 30% 용의 목재수분계를 사용하였다.

4) 저울

실험체의 실험 전 무게를 측정하기 위하여 최소표시단위 10 g 이고 측정범위 100 Kg 용의 디지털 저울을 사용하였으며, 실험 중 실험체의 무게 감소율을 측정하기 위하여 실험체 하단부에 최소표시단위 100 g 이고 측정범위 300 Kg 용의 로드셀 타입 저울을 설치하고 휴대용 PC-Recorder와 연결하여 실험중의 실험체 무게를 측정하였다.

3.3 실험결과

3.3.1 화재성장곡선

실내 구획된 공간에서의 화재는 화재진행에 따른 온도변화에 따라 일반적으로 5단계로 분류되고 있으므로, 각 실험체의 성장단계별 시간에 따른 일반화재와 방화화재의 연소특성을 비교하기 위하여 각 실험체의 상부에 설치된 6개소의 열전대를 통하여 0.5초 단위로 온도를 측정하였다.

화재가 시작되는 점화(발화)로부터 최성기 화재로 전이되는 플래시오버(Flash Over)까지의 성장단계시간을 비교하기 위하여 플래시오버(Flash Over)가 발생할 수 있는 500°C가 될 때까지의 시간을 기준으로 성장단계의 시간을 측정하였으며, 화재의 연소특성을 비교하기 위하여 500°C 이상이 유지되는 시간을 최성기 단계로 산정하여 비교하였다.

1) 소파 실험체

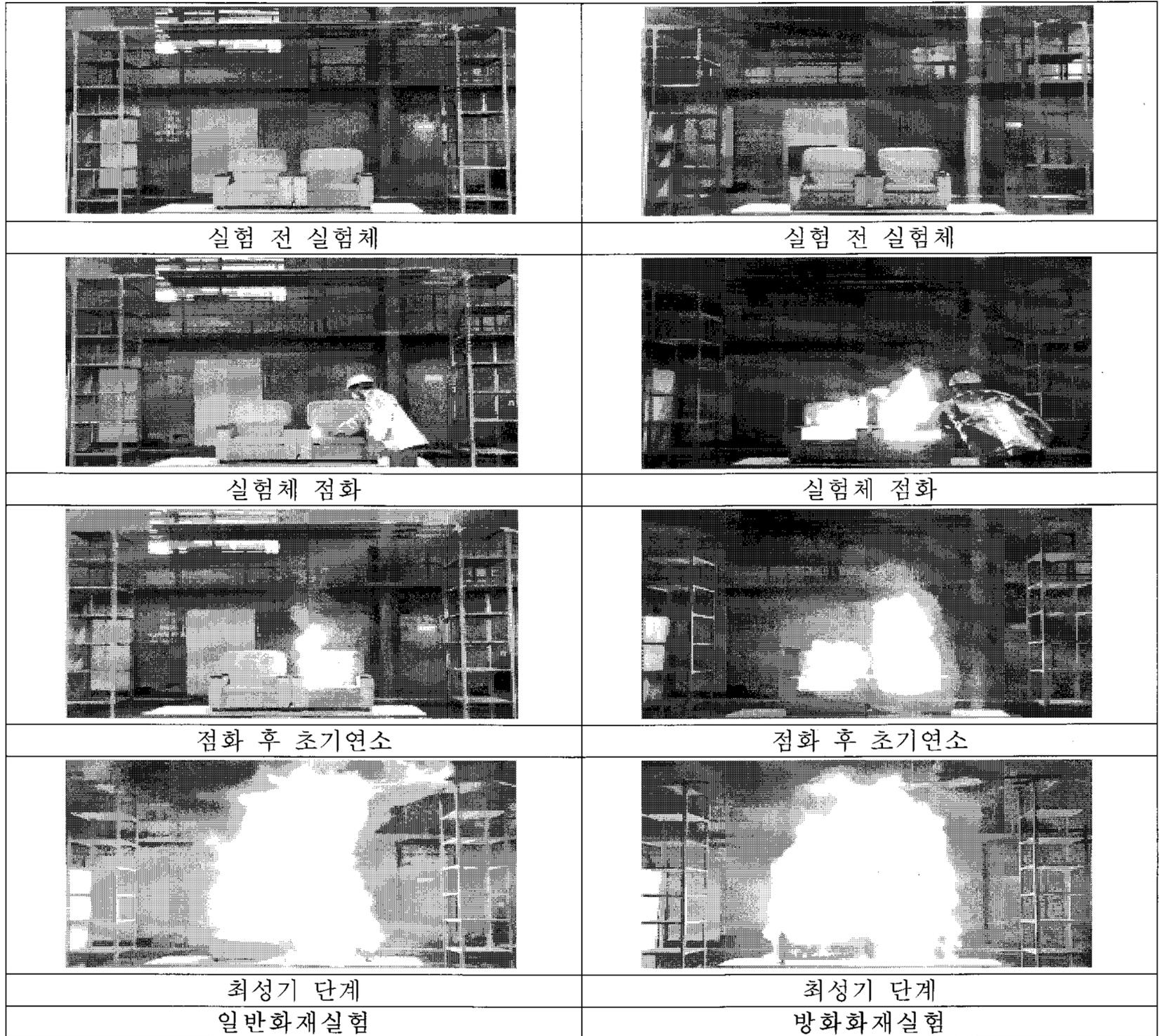
일반화재의 경우에 화재가 시작되는 점화로부터 500°C가 될 때까지의 성장단계 시간은 <그림 4>의 ③번 열전대가 212초로 나타났으며 화재의 열방출률이 최대에 이르는 최성기 단계는 2분 37초간 지속되는 것으로 나타났다.

또한 실험체 상부 최고온도는 ②번 열전대가 점화

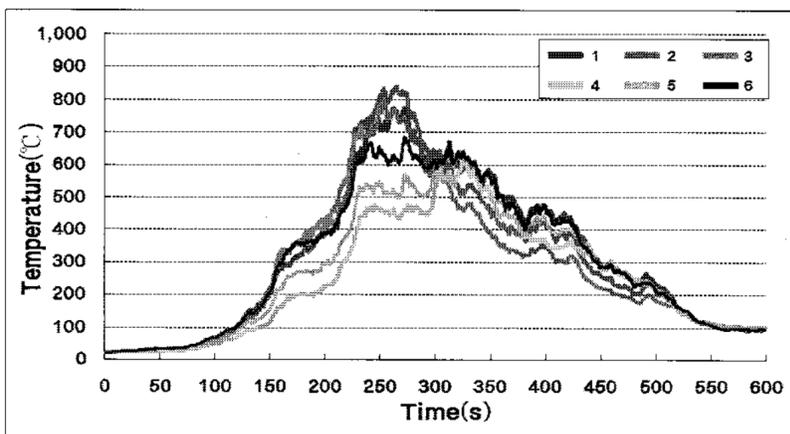
후 264초에 841℃ 까지 상승하였으며, 실험시간에 따른 온도를 그래프로 표시하면 <그림 6>과 같다.

소파 실험체에 대한 방화화재의 경우에는 실험체 상부의 ①번 열전대 최고온도가 점화 후 183초에 716℃

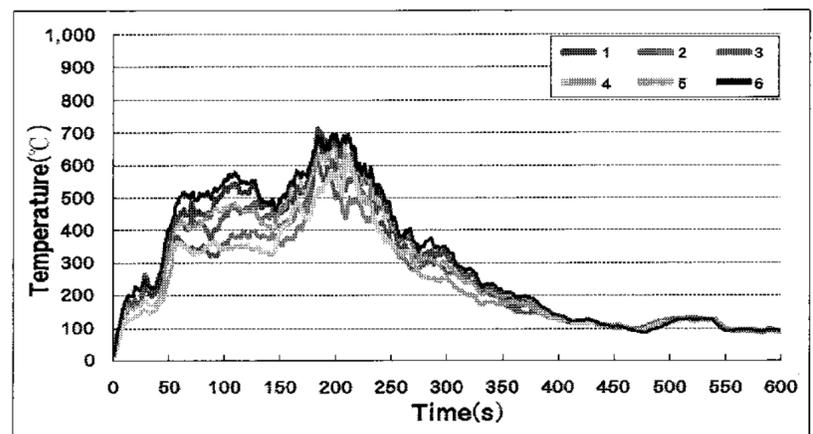
까지 상승하여 일반화재에 비해 연소가 급속하게 진행되는 특성을 나타냈으며, 실험시간에 따른 온도를 그래프로 표시하면 <그림 7>과 같다.



<그림 5> 소파 실험체 화재실험사진



<그림 6> 소파 실험체 일반화재 실험온도곡선

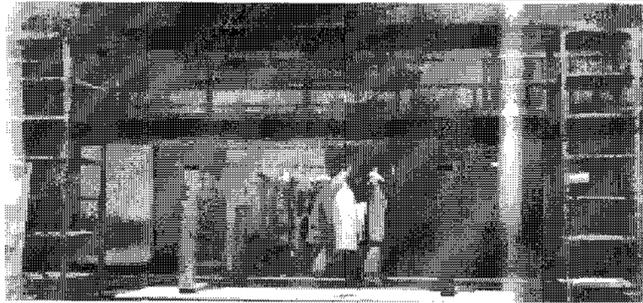
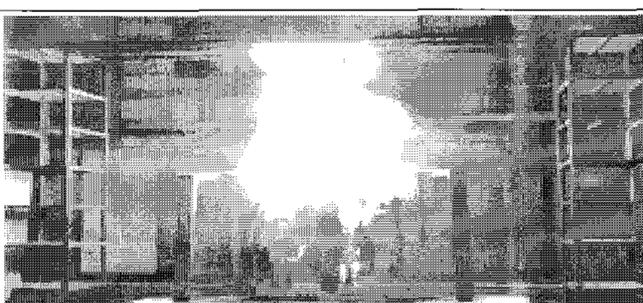


<그림 7> 소파 실험체 방화화재 실험온도곡선

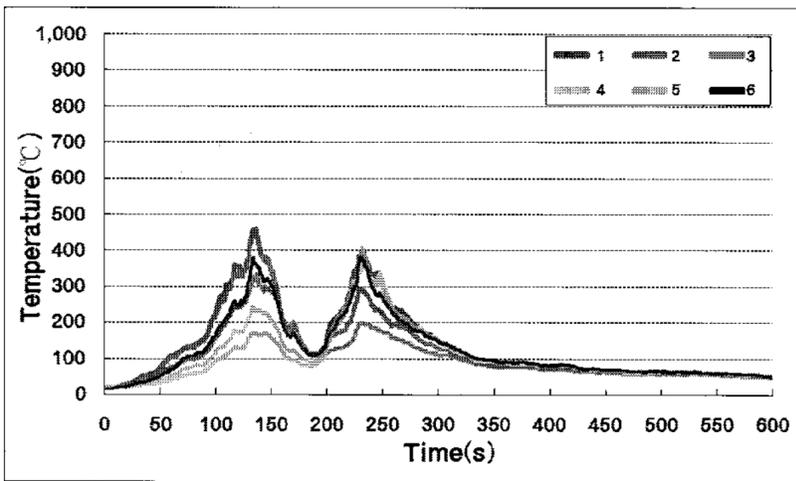
특히 <그림 7>과 같이 화재가 시작되는 초기 연소 단계부터 액체연료가 방사된 부분이 동시에 연소가 진행되는 관계로 일반화재에 비해 연소가 급속하게 진행되는 특성을 보였고, 실험 중 500℃가 될 때까지의 성장단계 시간은 ⑥번 열전대가 60초로 나타났으며 화재의 열방출률이 최대에 이르는 최성기 단계는 3분 2초간 지속되는 것으로 나타났다.

2) 의류 실험체

일반화재의 경우에 <그림 8>과 같이 실험실에 실험체를 설치하고 실험을 실시하였으며, 화재가 시작되는 점화로부터 500℃가 될 때까지의 성장단계시간을 측정 한 결과 의류의 연소전파속도가 느린 관계로 500℃를 초과하는 상태는 발생하지 않았고, <그림 9>와 같이 ①번 열전대가 최고온도 463℃에 도달하는 시간을 기준으로 성장단계시간을 산정한 결과 135초로 산정되었으며 화재의 열방출률이 최대에 이르는 최성기 단계는 1분 40초간 지속되는 것으로 나타났다.

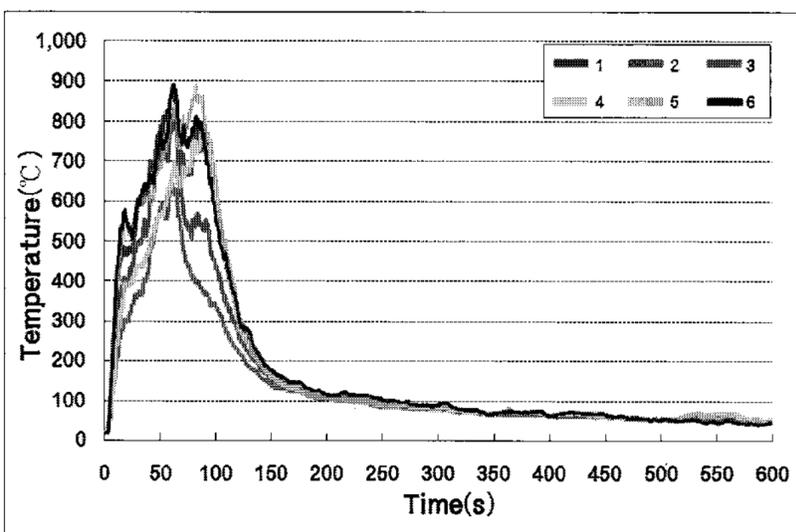
	
실험 전 실험체	실험 전 실험체
	
실험체 점화	실험체 점화
	
점화 후 초기연소	점화 후 초기연소
	
최성기 단계	최성기 단계
일반화재실험	방화화재실험

<그림 8> 의류 실험체 화재실험사진



<그림 9> 의류 실험체 일반화재 실험온도곡선

의류 실험체에 대한 방화화재의 경우에는 실험체 상부의 ①번 열전대 최고온도가 점화 후 61초에 892°C 까지 상승하여 일반화재에 비해 연소가 급속하게 진행되는 특성을 나타냈으며, 실험시간에 따른 온도를 그래프로 표시하면 <그림 10>과 같다.

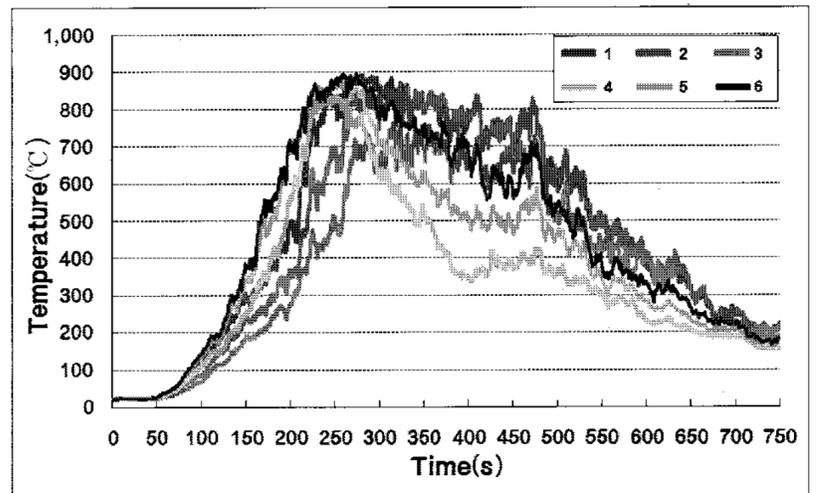


<그림 10> 의류 실험체 방화화재 실험온도곡선

특히 <그림 10>과 같이 화재가 시작되는 초기연소단계 부터 액체연료가 방사된 부분이 동시에 연소가 진행되는 관계로 일반화재에 비해 연소가 급속하게 진행되는 특성을 보였고, 실험 중 500°C가 될 때까지의 성장단계시간을 측정된 결과 ⑥번 열전대에 온도가 14초에 500°C를 초과하는 것으로 나타나 일반화재에 비하여 매우 빠른 속도로 초기연소가 진행되는 것으로 나타났으며, 500°C를 초과하여 화재의 열방출률이 최대에 이르는 최성기 단계는 1분 32초간 지속되는 것으로 나타났다.

3) 목재류 실험체

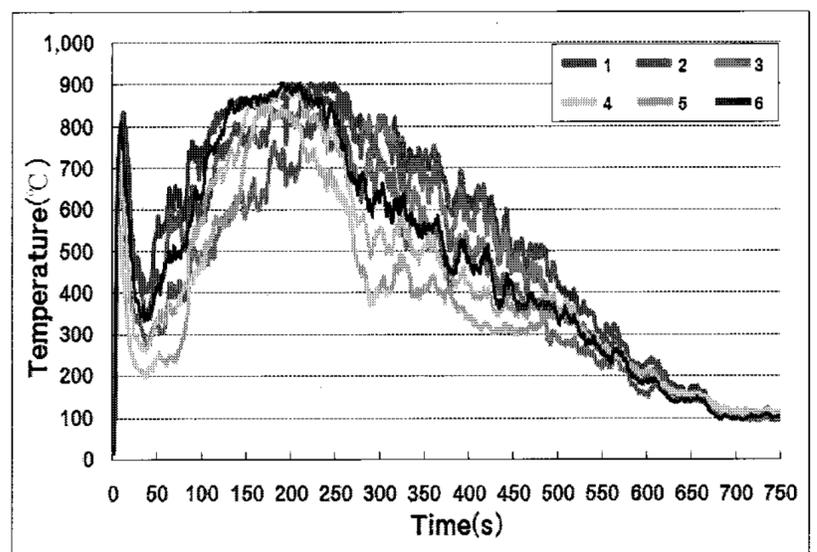
목재류에 대한 일반화재의 경우에 <그림 13>과 같이 실험실에 실험체를 설치하고 실험을 실시한 결과, 화재가 시작되는 점화로부터 500°C가 될 때까지의 성장단계시간은 168초로 나타났으며 화재의 열방출률이 최대에 이르는 최성기 단계는 6분 26초간 지속되는 것으로 나타났다.



<그림 11> 목재류 실험체 일반화재 실험온도곡선

또한 실험체 상부 최고온도는 ⑥번 열전대가 점화 후 274초에 893°C 까지 상승하였으며, 실험시간에 따른 온도를 그래프로 표시하면 <그림 11>과 같다.

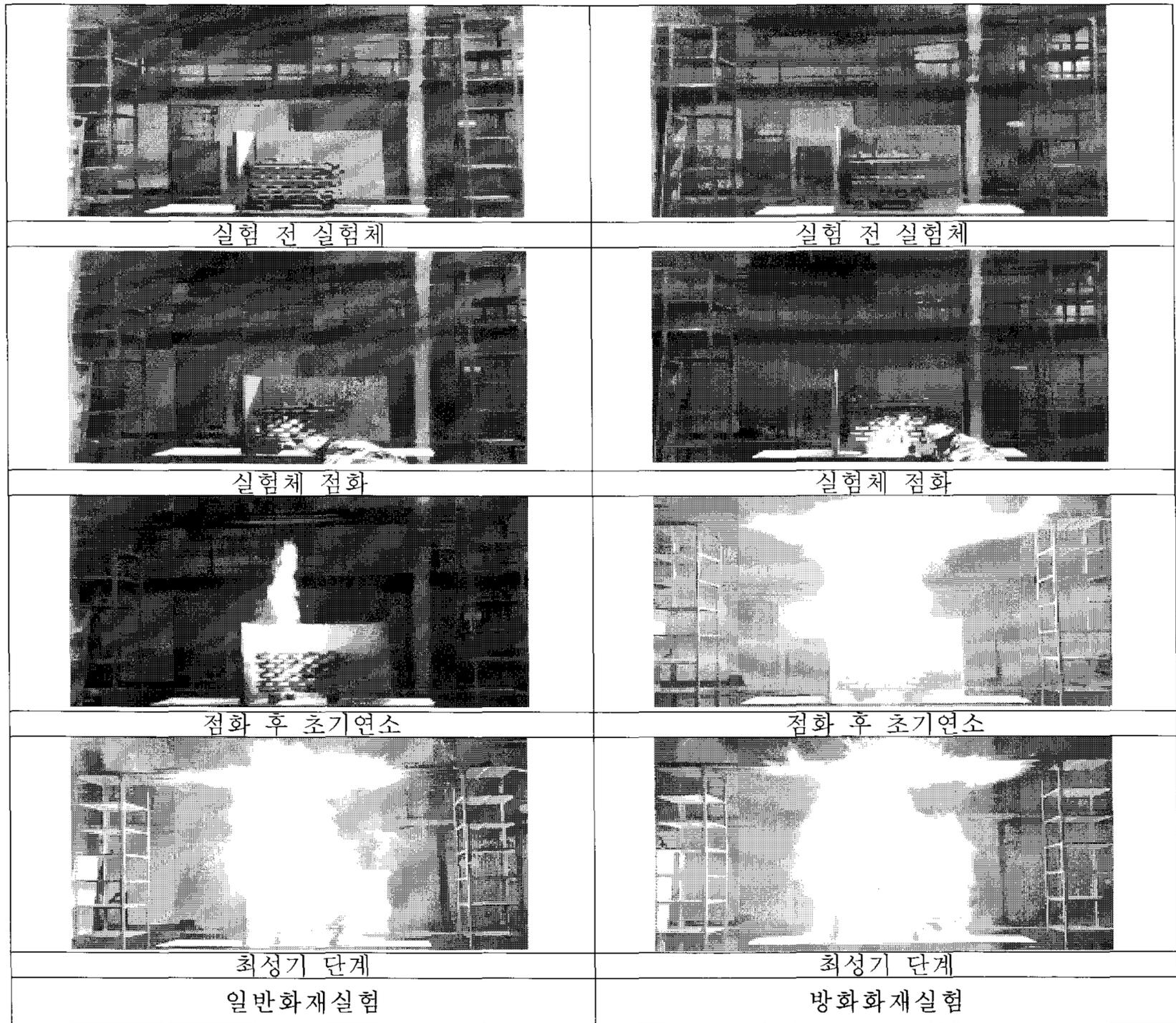
그러나 목재류 실험체에 대한 방화화재의 경우에는 ①번 열전대의 최고온도가 점화 후 201초에 903°C 까지 상승하였고, 특히 <그림 12>와 같이 초기연소 단계인 점화 후 12초 후에 실험체 상부 온도가 834°C 까지 급격히 상승하는 특성을 보였다.



<그림 12> 목재류 실험체 방화화재 실험온도곡선

이와같은 연소특성은 소파 및 의류 실험체와는 달리 목재류 상부에 살포된 액체가연물(신나)이 목재 실험체에 스며들지 못하고 목재류 표면에 묻은 상태로 남아 있다가 동시에 액체가연물의 연소가 먼저 진행되는 관계로 온도가 급격히 상승한 것으로 나타났다.

상기와 같이 화재가 시작되는 점화로부터 500°C가 될 때까지의 성장단계시간이 10초 이내(5초)로서 연소가 급격하게 진행되는 것을 예측할 수 있으며, 화재의 열방출률이 최대에 이르는 최성기 단계는 8분 1초간 지속되는 것으로 나타나 일반화재에 비하여 연소가 매우 급격하게 진행되는 것으로 나타났다.



<그림 13> 목재류 실험체 화재실험사진

3.3.2 연기하강속도

실험 중 일반화재와 방화화재 실험체의 연소에 따른 연기하강속도를 비교하기 위하여 <표 4>와 같이 실험실 중앙부분의 기준점까지 연기가 하강하는 시간(초)을 측정하여 연기발생량(m<sup>3</sup>/min) 및 연기하강속도(m/min)를 산정하였다. 연기하강시간은 실험실의 각 위치마다 조금씩 다르게 나타날 수 있으므로 실험의 기준값을 구하여 일반화재와 방화화재의 특성을 비교하기 위해 실험실 중앙 후면부분의 바닥으로부터 높이 5m 되는 지점을 기준점으로 정하여 각 실험 중 기준점까지의 연기도달시간을 측정하였으며, 각 실험체별 화재구분에 따른 연기하강시간 및 연기발생량은 <표 5>와 같이 나타났다.

<표 4> 실험체 별 연기하강시간

구 분	일반화재	방화화재
소파 실험체	405 ~ 411 초 (평균 408초)	232 ~ 236 초 (평균 234초)
의류 실험체	644 ~ 651 초 (평균 648초)	339 ~ 344 초 (평균 342초)
목재류 실험체	721 ~ 730 초 (평균 726초)	399 ~ 405 초 (평균 402초)

연기발생량(m<sup>3</sup>/min)은 실험실 바닥으로부터 높이 5m 상부의 실험실 등가체적 5,022m<sup>3</sup> (18 × 30 × 9.3m)을

연기하강시간(분)으로 나눈 값이며, 분당 연기발생량을 실험실 바닥면적 540m<sup>2</sup> (18 × 30m)으로 나누어 <표 5>와 같이 연기하강속도(m/min)를 산정하였다.

<표 5> 실험체별 연기발생량 및 연기하강속도

실험체	화재 구분	연기하강시간 (초)	연기발생량 (m <sup>3</sup> /min)	연기하강속도 (m/min)
소파	일반화재	408	738.52	1.36
	방화화재	234	1,287.69	2.38
의류	일반화재	648	465.00	0.86
	방화화재	342	881.05	1.63
목재류	일반화재	726	415.04	0.76
	방화화재	402	749.55	1.38

#### 4. 실험결과 분석

방화화재 조건과 일반화재조건의 연소특성 및 연기거동특성을 정량적으로 파악하기 위하여 공연장 및 판매장, 전시장 등의 용도에 사용되는 실내가연물의 화재모형 실험체에 대하여 화재실험을 실시하여 방화화재와 관련된 특성을 분석하였다.

##### 4.1 화재성장곡선

각 실험체의 화재성장곡선에 따른 일반화재와 방화화재의 연소특성을 비교하기 위하여 각 실험체 상부에 설치된 열전대를 통하여 온도를 측정하였으며, 점화로부터 최성기 화재로 전이되는 플래시오버까지의 성장단계 시간과 500℃ 이상이 유지되는 최성기 단계 유지시간을 비교하여 각 실험체의 연소특성을 비교하였다.

###### 1) 소파 실험체

화재가 시작되는 점화로부터 500℃가 될 때까지의 성장단계시간을 산정한 결과 일반화재의 경우에 212초, 방화화재의 경우에는 60초로 나타났다.

일반화재의 경우에는 점화 후 약 200초까지는 서서히 연소가 진행되었으며, 250초 이후부터 최성기 단계를 맞아 연소하는 특성을 보였다.

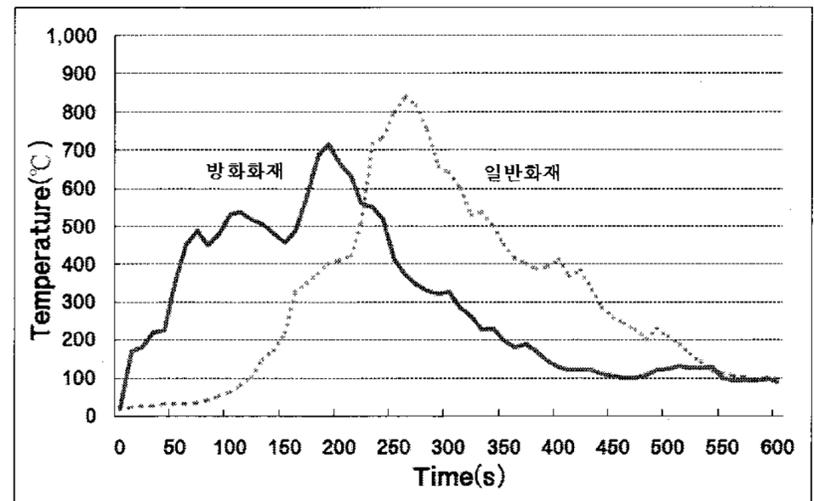
그러나 방화화재의 경우에는 일반화재 보다 화재초

기의 연소가 급격하게 이루어지는 것으로 나타났으며, 일반화재보다 약 3.5배의 속도로 화재초기 연소가 진행되어 점화 후 약 60초부터는 연소가 급격히 확대되어 최성기 단계로 연소하는 특성을 보였다.

<표 6> 소파 실험체 실험최고온도

구분	일반화재	방화화재	비고
실험 중 최고온도	841 ℃	716 ℃	-
최고온도 도달시간	264 초	183 초	-
시험체 무게감소량	31.4 Kg	36.1 Kg	10분 기준

또한 실험체 상부 최고온도는 <표 6>과 같이 나타났으며, 최고온도를 나타낸 열전대의 실험시간에 따른 온도를 그래프로 표시하면 <그림 14>와 같다.



<그림 14> 소파 실험체의 성장단계 비교곡선

또한 화재의 열방출률이 최대에 이르는 소파 실험체의 최성기 단계는 일반화재의 경우에 2분 37초간 지속하는 것으로 산정되었고, 방화화재의 경우에는 3분 2초간 지속하는 것으로 나타나 일반화재에 비하여 16% 더 지속되는 것으로 산정되었으나 일반화재와 방화화재의 최성기 상태에서의 연소지속시간은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

###### 2) 의류 실험체

의류 실험체에 대한 성장단계시간을 측정한 결과 방화화재의 경우에는 14초로 나타났으나, 일반화재의 경우에는 의류의 화연전파속도가 느린 관계로 점화로부터 500℃에 달하는 조건이 발생하지 않았다.

<그림 15>와 같이 일반화재의 경우에는 점화 후 약

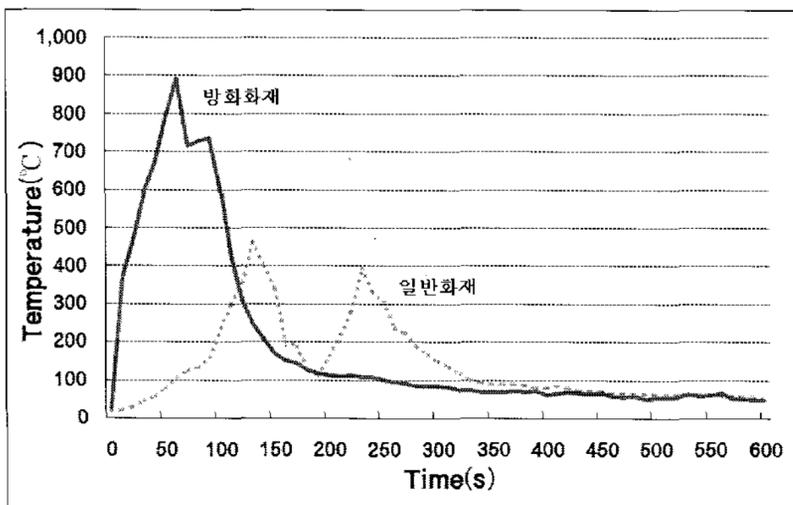
100초까지는 서서히 연소가 진행되었으며, 130초 이후부터 최성기 단계를 맞아 연소하는 특성을 보였다.

그러나 방화화재의 경우에는 일반화재 보다 화재초기의 연소가 급격하게 이루어지는 것으로 나타났으며, 일반화재보다 약 9.6배의 속도로 화재초기 연소가 진행되어 점화 후 약 15초부터는 연소가 급격히 확대되어 최성기 단계로 연소하는 특성을 보였다.

<표 7> 의류 실험체 실험최고온도[5]

구 분	일반화재	방화화재	비 고
시험 중 최고온도	463 °C	891 °C	-
최고온도 도달시간	135 초	61 초	-
시험체 무게감소량	4.87 Kg	8.23 Kg	10분 기준

또한 실험체 상부의 최고온도는 <표 7>과 같이 일반화재는 점화 후 ①번 열전대가 135초에 463°C, 방화화재는 ⑥번 열전대가 61초에 891°C에 달하는 것으로 나타났으며, 최고온도를 나타낸 열전대의 실험시간에 따른 온도를 그래프로 표시하면 <그림 15>와 같다.



<그림 15> 의류 실험체의 성장단계 비교곡선

3) 목재류 실험체

목재류의 경우에 화재가 시작되는 점화로부터 500°C가 될 때까지의 성장단계시간을 산정한 결과 일반화재의 경우에 168초, 방화화재의 경우에는 5초로 나타났다.

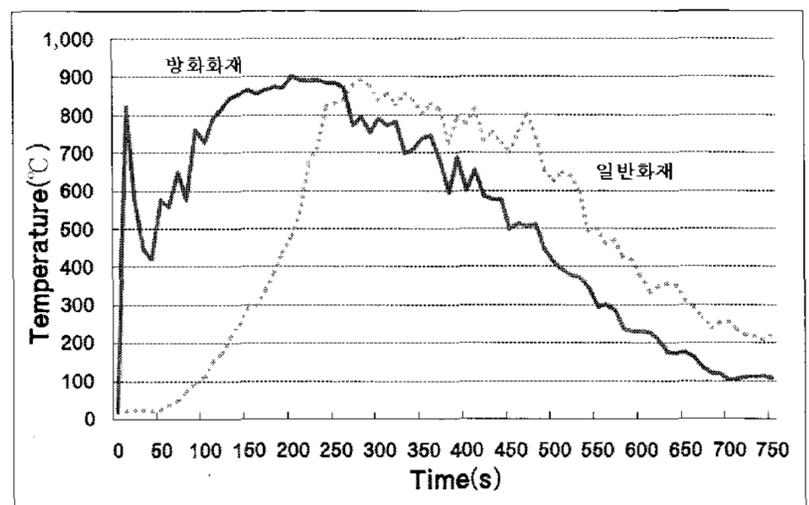
<그림 16>과 같이 일반화재의 경우에는 점화 후 약 250초까지는 서서히 연소가 진행되었으며, 250초 이후부터 가연물 전체가 연소하는 특성을 보였다.

그러나 방화화재의 경우에는 초기연소 단계에서 실험체 상부 온도가 834°C 까지 급격히 상승하는 것으로 나타났으며, 이와 같은 연소특성은 소파 및 의류 실험체와는 달리 목재류 상부에 방사된 액체가연물(신나)이 실험체에 스며들지 못하고 목재류 표면에 묻은 상태로 남아 있다가 동시에 연소가 진행되는 관계로 온도가 급격히 상승한 것으로 나타났다.

<표 8> 목재류 실험체 실험최고온도[5]

구 분	일반화재	방화화재	비 고
시험 중 최고온도	893 °C	903 °C	-
최고온도 도달시간	274 초	201 초	-
시험체 무게감소량	44.09 Kg	52.38 Kg	10분 기준

또한 실험체 상부의 최고온도는 <표 8>과 같이 일반화재는 점화 후 ⑥번 열전대가 274초에 893°C, 방화화재는 ①번 열전대가 201초에 903°C 까지 상승하는 것으로 나타났으며, 최고온도를 나타낸 열전대의 실험시간에 따른 온도를 그래프로 표시하면 <그림 16>과 같다.



<그림 16> 목재류 실험체의 성장단계 비교곡선

4.2 연기하강속도

<표 5>의 실험체 종류에 따른 일반화재와 방화화재의 연기하강시간에 의하여 산정된 연기하강속도를 비교한 결과 <표 9>와 같이 나타났으며, 각 실험체의 종류별 연기하강속도는 각기 다른 것으로 나타나고 있으나 이는 실험체의 재질 및 무게, 설치조건 등의 차이에 따른 연소특성이 다른 관계로 연기발생량이 달리 나타난 것으로 판단된다.

또한 연기하강속도 비율[C]은 일반화재[A]에 대한 방화화재[B]의 비율로서 방화화재 시 발생하는 연기가 일반화재에 비하여 평균 1.82배의 빠른 속도로 하강하는 것으로 나타났다.

<표 9> 실험체별 연기하강속도 비교

실험체	일반화재 (m/min) [A]	방화화재 (m/min) [B]	연기하강속도 비율 (%) [C]
소파	1.36	2.38	175.0
의류	0.86	1.63	189.5
목재류	0.76	1.38	181.5
평균	0.99	1.79	182.0

소파의 경우에는 무게  $21 \pm 0.5\text{Kg}$ 의 천 커버용 소파 실험체를 2개씩 설치하여 화재실험을 실시한 결과 일반화재의 연기하강속도는  $1.36\text{m/min}$ , 방화화재는  $2.38\text{m/min}$ 로서 일반화재에 비하여 방화화재의 연기하강속도가 1.75배 빠른 것으로 나타났다.

의류의 경우에는 겨울잠바 및 청바지, 운동복, 양복, 내의 등 유사한 종류의 의류를 2벌씩 준비하여 무게  $12 \pm 0.5\text{Kg}$ 의 실험용 의류를 옷걸이에 걸고 실험실 중앙부에 설치한 상태에서 실험을 실시한 결과 일반화재의 연기하강속도는  $0.86\text{m/min}$ , 방화화재는  $1.63\text{m/min}$ 로서 일반화재에 비하여 방화화재의 연기하강속도가 1.89배 빠른 것으로 나타났다.

특히 의류의 연기하강속도가 목재류와 유사한 것으로 나타나고 있으나, 각 실험체의 무게를 감안할 때 연소질량에 따른 연기하강속도는 의류가 목재류에 비하여 매우 빠른 것으로 예측할 수 있다.

목재류의 경우에는 전시용으로 많이 설치되는 파티션 및 목재 등 목재 실험체  $56 \pm 1.0\text{Kg}$ 을 2조씩 준비하여 실험을 실시한 결과 일반화재의 연기하강속도는  $0.76\text{m/min}$ , 방화화재는  $1.38\text{m/min}$ 로서 일반화재에 비하여 방화화재의 연기하강속도가 1.81배 빠른 것으로 나타났다. 또한 실험체의 연소질량을 감안할 때 연기하강속도는 목재실험체가 소파 및 의류 실험체에 비하여 매우 느린 것으로 예측할 수 있다.

### 4.3 실험결과 종합분석

상기와 같이 실험체의 종류 및 무게(연소질량)에 따른 연기하강속도는 실험체별로 각각 다른 것으로 측정

되었으나, 방화화재의 경우에는 신너(thinner)와 같은 액체가연물을 통하여 화재가 급속하게 성장하는 연소 특성을 갖고 있었으며, 방화화재가 시작되는 발화 및 성장단계를 통하여 화재 초기부터 최성기 단계로 연소를 지속하는 관계로 방화화재 시 발생하는 연기는 일반화재에 비하여 1.8배 이상 많이 발생하는 것으로 나타났다.

## 5. 결론 및 향후 연구과제

신너(Thinner)와 같은 액체가연물이 살포되는 상태에서 화재가 시작되는 방화화재와 액체가연물이 살포되지 않는 일반화재의 연소특성 및 연기거동특성을 정량적으로 비교하기 위하여 공연장, 판매장 및 전시장 용도를 대상으로 화재모형 실험을 실시한 결과 다음과 같은 특성이 도출되었다.

(1) 구획실 화재 시 가연물의 화재성장속도는 가연물의 종류와 질량, 설치상태 등에 따라 크게 달라지며, 방화화재의 경우에는 액체 가연물의 연소 시 발생하는 열에 의하여 각 실험체가 일반화재에 비하여 급속하게 연소하는 것으로 나타났다.

(2) 목재류 실험체에 대한 방화화재 실험의 경우에는 천 커버용 소파 및 의류 실험체와는 달리 목재류 상부에 살포된 액체가연물(신너)이 목재 실험체에 스며들지 못하고 목재류 표면에 묻은 상태로 남아 있다가 동시에 연소가 진행되는 관계로 타 실험조건에 비하여 화재초기 온도가 급격히 상승하는 특성을 보였으며, 각 실험체의 최고온도 도달시간은 일반화재 보다 방화화재가 약 70~80초 빠른 것으로 나타났다.

(3) 액체가연물이 살포된 상태에서 화재가 시작되는 방화화재의 경우에는 화재 초기부터 최성기 상태로 연소를 지속하는 관계로 각 실험 중에 발생하는 연기량은 방화화재가 일반화재에 비하여 약 1.8배 많이 발생하는 것으로 나타났다.

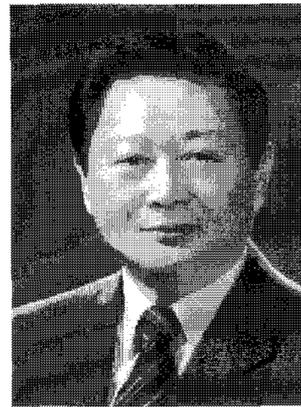
향후 연구과제로, 방화화재의 경우에는 일반화재에 비하여 많은 위험성을 내포하고 있으므로 본 연구를 통하여 도출된 방화화재의 실험적 특성을 기본으로 지속적인 실제 화재실험을 통해 건축물의 설계단계부터 성능위주의 건축 및 소방시설이 반영될 수 있도록 하여야 한다는 것을 제시하고자 한다.

6. 참 고 문 헌

[1] 내무부(1988~1995), 『화재통계연보』 .  
 [2] 방재시험연구원(2008), 「화재모형(3종) 화재시험, 시험성적서」, p1-14.  
 [3] 소방방재청(2007), 『소방행정자료 및 통계』 .  
 [4] 최 진(2006), 「화재발생 동향 및 통계분석 연구」, 대한안전경영과학회, 춘계학술대회.  
 [5] 최 진(2008), 「국내화재통계 및 컴퓨터시뮬레이션에 의한 방화화재 특성에 관한 연구」, 대한안전경영과학회지 2008년 제10권 1호.  
 [6] 행정자치부(1996~2003), 『화재통계연보』 .  
 [7] D.T. Gottuk / D.A. White(2005), Liquid Fuel Fires, SFPE HANDBOOK, CH. 2-15, p297-316.  
 [8] James G. Quintiere(2005), Surface Flame Spread, SFPE HANDBOOK, CH. 2-12, p246-257.  
 [9] James G. Quintiere(2005), Principles of Fire Behavior, CH. 6, pp. 101-127.  
 [10] Jone H. Klote(2005), THE SFPE HANDBOOK.  
 [11] Karter, M. J., Jr.,(1989), "Fire Loss in the United States in 1988", Fire Journal.  
 [12] NFPA(2004), Guide for Fire and Explosion Investigations, NFPA 921. Ch.3.  
 [13] NFPA(2006), Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, NFC 92B - E.3.  
 [14] NIST(1984), Armchair Fire Test Data, File-f261.  
 [15] NIST(1993), Methano l(Liquid) Fire Test Data, File-t6042.  
 [16] Richard W. Bukowski(2003), Fire Hazard Analysis, NFPA Handbook 9th, Section 3, CH7.  
 [17] Ronald L. Alpert(2005), Ceiling Jet Flows, SFPE HANDBOOK, CH. 2-2, p18-31.  
 [18] T.J. Ohlemiller.(2005), Smoldering Combustion, SFPE HANDBOOK, CH. 2-9, p200-210.  
 [19] Vytenis Babrauskas(2005), Heat Release Rates, THE SFPE HANDBOOK, CH. 3-1, p1-37.  
 [20] William D. Walton & Philip H. Thomas(2005), Estimating Temperatures in Compartment Fires, SFPE HANDBOOK, CH. 3-6, p171-188.

저 자 소 개

최 진



한양대학교 공학대학원에서 건축공학 석사를 취득하고, 현재 명지대학교 산업공학과 박사과정에 재학 중이다. 한국화재소방학회 회장 및 한국소방기술사회 회장을 역임하였고 현재 한방유비스(주) 대표이사로 재직 중이다.

주소: 서울시 강남구 도곡동 418-4

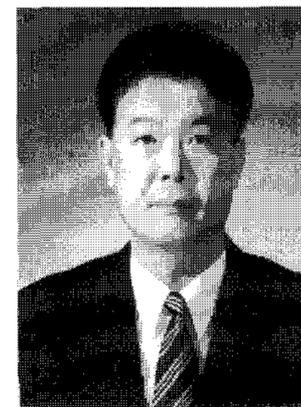
권 오 승



홍익대학교 기계공학과를 졸업하고, 연세대학교 산업대학원에서 기계공학 석사를 취득하였고, 한국소방기술사회 수계기술부문 위원장이며 현재 한방유비스(주) 연구소장으로 재직 중이다.

주소: 경기도 수원시 권선구 권선동 1235번지 신안아파트 305동 704호

강 경 식



현 명지대학교 산업공학과 교수, 명지대학교 안전경영연구소 소장, 명지대학교 산업대학원 원장, 대한안전경영과학회 회장, 경영학박사, 공학박사

주소: 경기도 성남시 분당구 정자1동 파크뷰 APT 611동 3103호