성능기반 화재안전설계를 위한 침실 공간에서의 실화재 실험

김형준 · 권인규^{*†} · 권오상^{**} · 김흥열^{**} · 채승언^{**}

서울시립대학교 건축공학과, *강원대학교 소방방재학부, **한국건설기술연구원 화재안전연구센터

The Real Fire Test in Bedroom for the Performance Based Fire Design

Hyung-Jun Kim · In-Kyu Kwon^{*†} · Oh-Sang Kweon^{**} ·
Heung-Youl Kim^{**} · Seung-Un Chae^{**}

Department of Architectural Engineering, University of Seoul

*Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

**Fire Safety Research Center, KICT

(Received November 15, 2013; Revised December 6, 2013; Accepted December 6, 2013)

요 약

건축물에서의 성능기반 화재안전설계를 위해서는 구획 공간 내에서의 화재성장 및 화재크기와 같은 화재특성을 우선적으로 판단하여야 하지만, 건축물에서의 구획공간의 형태, 환기조건 등과 같은 상이한 조건과 실규모 화재실험의 어려움으로 인하여 관련 기초 자료가 부족한 현실이다. 따라서 본 연구에서는 건축물에서의 구획공간에 대한 실규모의 화재실험을 통해 공학적 화재 특성 데이터인 열방출률 등을 제시하고자 하였다. 실규모의 화재실험은 침실공간으로 설정하였으며, 화재실험은 2.4 (L) × 3.6 (W) × 2.4 (H) m의 구획 모델에서 실시하였다. 초기착화는 쓰레기통에서 발생하였으며, 화재실험은 총 30분에 동안 진행되었다. 화재실험결과, 실험 시작 7분 50초 이후부터 화염이 외부로 출화되었으며, 최대 열방출률은 실험 시작 9분 34초에 3810.6 kW로 측정되었다.

ABSTRACT

For The performance based fire design of the buildings, the fire characteristic such as proceeding and scale of the fire should be figured out but, there is lack of relevant information because of different conditions and difficulties of mock-up test like type of division space, ventilation condition, etc, in buildings. Therefore, in the study, a heat release rate etc, the engineering characteristic data value on the fire is proposed by mock-up fire test for division space in buildings. The mock-up fire test is carried out in a bedroom with 2.4 (L) × 3.6 (W) × 2.4 (H) m model. Initial ignition was started from trash box and the test was carried out for 30 min. As a result of the fire test, flame was broken to outside within 7 min and 50 s after starting the test and the maximum heat release rate was measured as 3,810.6 kW at 9 min and 34 s.

Keywords : Performance based design, Fire test, Compartment fire, Fire size, Fire Growth

1. 서 론

건축물에서의 화재사고에 의한 위험에는 인명과 재산행동에 관련된 위험, 건축물의 구조적 손해에 연유되는 위험, 허용수준을 넘는 연소 확대 등이 있다. 이에 따른 화재사고 시 피해를 최소화하기 위한 대책으로는 화재예방, 발생화재의 초기 진화, 초기 진화 불가능 시 화재성장 및 전파의 억제, 화재에 의한 연기의 전파 차단 및 신속한 배출과 화재 및 연기 전파를 고려한 피난대책 등 각 방면에서의 대응기술이 요구된다⁽¹⁾.

법규 중심의 화재안전기준은 최근의 신재료, 신공법의 사용 등을 활용한 대공간 · 초고층 건축물의 출현 등으로

인하여 적절히 화재안전 설계에 대응할 수 없을 뿐 아니라 현시대의 다양한 요구에 부응하기에는 많은 문제점이 지적되고 있다. 또한 미국 및 유럽뿐만 아니라 일본에서도 기존의 화재안전 규정에 성능개념(Performance Based Regulations)을 도입하여 화재시 건물의 형태, 제실자의 수, 공간의 규모 및 가연물의 형태 등을 고려한 화재안전규정으로 변모하는 등 새로운 개념의 화재안전규정 제정이 이루어지고 있다⁽²⁾. 법규위주의 설계에서는 법규를 만족시키는 디자인은 적절한 안전도를 보장하고 있다고 간주되지만 성능위주 설계에서 그러한 실질적인 기준이 없으므로 제안된 디자인을 평가하고 그것이 사회적인 안전 기대치와 부합하는지를 검토해야 한다⁽³⁾.

[†]Corresponding Author, E-Mail: kwonik@kangwon.ac.kr
TEL: +82-33-570-6433, FAX: +82-33-570-6819

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.6.032>

건축물에서의 성능위주 화재안전 설계를 위해서는 대상 건축물에 대한 화재위험도를 평가하고 이러한 화재 위험도를 낮추기 위해서 내화설계, 연소 확대방지설계, 피난안전설계와 연기제어설계 등과 같은 공학적 화재안전 설계가 이뤄지며, 이러한 화재안전설계 기술들에 대한 검증 절차도 진행된다. 건축물에서의 화재위험도를 평가하기 위해서는 건축물에서의 화재 발생시 구획공간 내에서의 화재 성장과 화재 크기의 예측이 필수적이며, 이를 위해서는 문헌상에서 제시되고 있는 화재 크기 산정 기법, FDS와 같은 컴퓨터 시뮬레이션 기법과 실물화재 실험을 통한 화재 크기 산정 기법 등을 사용한다.

구획공간에서의 화재 크기를 예측하기 위해서는 설계 화재(Design Fires)를 통해서 예측하고 컴퓨터 화재 성장 모델링에서도 사용되는 입력 데이터 중에서 가장 중요한 데이터는 설계화재이다. 화재 성장 모델링 소프트웨어를 사용할 때에는 대부분 시간에 따른 특정 열방출률을 설계 화재로 입력해야 한다. 화재 성장률은 연소 물질 이외에도 발화원의 크기, 위치, 가연물량, 연소 물질 이외의 물체, 벽 또는 창문의 열린 부분까지의 거리 등과 같은 많은 인자들에 의해 결정된다⁽⁴⁾.

현재 사용되고 있는 화재 성장률은 문헌에서 제시되고 있는 건축물의 용도별 화재성장속도를 적용하고 있기 때문에 실제 구획 공간에서의 정확한 화재위험도를 예측하기 어렵고 이러한 데이터를 사용한 컴퓨터 시뮬레이션 기법에 대한 신뢰성을 평가하기 위해서는 필수적으로 실물 화재 실험 데이터를 통한 검증 작업이 진행되어야 한다. 실물화재 실험을 위해서는 화재연구 관련 인프라 등이 구축되어 있어야 하기 때문에 국내에서는 기존의 국외의 제한적인 자료에 의존해오고 있다. 따라서 본 연구에서는 구획 공간에서의 실규모 화재 실험을 통하여 구획 공간에서의 화재성장과 화재크기를 제시하고자 한다.

2. 구획공간에서의 화재실험

건축물에서의 용도 분류는 주거시설, 업무시설, 공장시설과 근린생활시설 등과 같이 사용용도에 따라 다양하게 분류된다. 건축물에서의 용도별 화재발생현황 분석⁽⁵⁾에 의하면, 단순 화재발생건수가 많은 것은 단독주택, 공동주택, 판매시설, 근린생활시설, 공장시설로 제시되고 있다. 인명

과 재산피해를 고려한 용도별 피해현황에서는 인명피해가 가장 많이 발생하는 용도는 단독주택, 공동주택, 공장시설, 근린생활시설, 숙박시설이며, 그 중 단독과 공동주택에서 가장 높은 인명 피해가 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 건축물에서의 용도별 분류 중에서 화재 발생과 인명의 피해가 가장 높은 주거시설을 대상으로 구획 실규모 화재실험을 진행하였다.

건축물에서의 화재 사고에 따른 화재위험도를 평가하기 위해서는 재료별 연소실험, 가연물별 연소실험, 실규모의 구획화재 실험을 통하여 예측할 수 있다. 하지만 재료별 연소실험은 콘칼로리미터 시험 등을 통해 구성재료에 대한 열방출률 등을 예측할 수 있지만 복합재료가 사용되는 가연물에 대한 정확한 연소특성을 판단하기는 어려우며, 가연물별 연소실험은 가연물에 구성되는 재료의 열특성, 크기 등의 서로 상이한 경우, 다른 측정결과가 나타날 수 있는 한계를 보이고 있다. 이러한 한계점을 보완하기 위해서 일정 규모 크기의 구획 화재실험을 통해 재료별 연소 특성 등과 같은 인자들에 영향보다는 구획에서의 전체적인 화재 성장 및 크기를 예측하고 있지만, 구획 화재 실험은 비용 및 관련 인프라 구축의 어려움으로 인하여 관련 자료가 국내·외적으로 미비한 현실이다.

따라서 본 연구에서는 KS F ISO 9705 시험방법⁽⁶⁾에서 제시하고 있는 2.4 (L)×3.6 (W)×2.4 (H) m의 크기의 화재실을 구획 모델로 선정하여, 침대, 이불장, 화장대와 장롱 등과 같은 가연물들을 내부에 배치한 실규모의 구획 화재실험을 진행하였다. 구획 내부에서의 가연물 배치에 따른 화재 성상 변화는 화재 성장 속도 등에 많은 영향을 끼치지만 현실적으로 가연물 배치에 따른 화재 위험도를 예측 및 평가하기에는 어려움을 나타내고 있다. 이에 화재실험에서는 내부의 가연물에 배치에 대한 영향력은 고려하지 않고 구획 내의 가연물량에 대한 문헌 조사 값만을 사용하여 실험을 진행하였다.

건축물에서의 화재하중(J)은 재료의 모든 표면적 및 부피가 완전 연소될 때 발생될 수 있는 열량을 나타내고 화재하중 밀도는 단위 면적당 화재하중(J/m^2)으로 정의된다⁽⁷⁾. 본 구획 화재 실험에서는 건축물의 용도별 가연물량 조사 문헌⁽⁸⁾에서 제시하고 있는 서울, 경기도 일대의 공동주택 15개소에서의 거실, 안방, 작은방에 대한 가연물량 조사 결과를 사용하였다. 조사 결과, 공동주택의 가연물량은 평균 $22.67 kg/m^2$ 으로 나타났다. 실규모 화재 실험시나리오

Table 1. Real Scale Fire Test Scenario

Combustible material mass	22.67 kg/m ²
Furniture	single mattress, blanket cabinet, wardrobe, clothing, paper, trash box
Measurement	HRR, Temperature
Ignition	trash box
Fire Test	Large Scale Calorimeter
Mock-up Size	2.4 (L) × 3.6 (W) × 2.4 (H) m

Figure 1. Position of thermocouples.

는 Table 1에 제시하고 있으며, 화재실험은 라지스케일칼로리미터(Large Scale Calorimeter)⁽⁹⁾에서 실시하고 쓰레기통에서의 초기 발화에 의한 전체 구획으로 화재가 확산되는 것으로 시나리오를 결정하였다. 구획 화재실험은 라지스케일칼로리미터에서 열방출률이 측정되고 내부에서의 온도 변화를 측정하기 위해서 구획 모델 중심부에 열전대선을 설치하여 온도변화를 측정하였다. Figure 1에서는 구획모델 내부에 설치되어 있는 열전대선의 위치를 나타내고 있다. 열전대선은 구획 중심에 설치되었으며, 바닥면에서부터 300, 500, 700, 900, 1100, 1300, 1500, 1700, 1900, 2100 mm에 위치에 총 10개가 위치한다.

Table 2에서는 실규모 화재실험을 위해 사용된 가연물 무게를 나타내고 있으며, 해당 가연물들의 총 무게는 195.95 kg이다. 공동주택의 문헌상에서의 제시되고 있는 단위면적당 가연물량을 구획 모델의 바닥면적을 적용하면 총 무게는 195.86 kg으로 실제 가연물들의 총 무게와 비교할 경우, 0.09 kg의 오차가 발생된다. Figure 2에서는 구획 모델 내부에 배치되어 있는 싱글침대, 이불장, 화장대와 장롱 등과 같은 가연물을 보여주고 있다. 싱글침대와 장롱 사이에

Table 2. Size & Weight of Furniture

	Size [(L) × (W) × (H) mm]	Weight (kg)
Single mattress	980 × 1950 × 110	59.45
Blanket cabinet	900 × 490 × 1270	46.35
Dressing table	800 × 405 × 1470	30.1
Wardrobe	810 × 590 × 1870	42.85
Clothing	-	13.1
Paper	-	2.5
Trash box	277 × 277 × 550	1.6
Total		195.95

는 쓰레기통을 설치하여 초기 착화 시 옆으로 화염이 확산되도록 하였다.

3. 구획공간에서의 화재실험 결과

구획 공간에서의 실규모 화재실험은 쓰레기통에서 초기 착화가 발생하여 구획 전체로 화염이 확산되었으며, 화재실험은 총 30분에 걸쳐 진행되었다. Figure 3에서는 화재실험을 나타내고 있으며, 화재실험 결과, 쓰레기통에서 초기 착화가 발생되어 약 3분 후에 인접한 침대로 화염이 전파되었으며, 실험 시작 약 5분 이후에는 인접한 장롱으로 화염이 전파되었다. 실험 시작 7분 이후에 출입구로 출화되는 연기의 양이 급속히 증가하면서 실험 시작 후 약 7분 50초부터 화염이 외부로 출화되었다. 실험 시작 후 약 20분에 내부의 가연물이 전소되면서 외부로 출화하던 화염은 쇠퇴하였으며, 이후 30분에 실험을 종료하였다.

화재실험을 통해서 측정된 열방출률의 측정결과는 Table 3에 나타내고 있다. 화재실험 시작 5분에는 81.0 kW, 7분에는 368.7 kW, 10분에는 3458.2 kW, 15분에는 2947.4 kW, 20분에는 1422.5 kW로 측정되었으며, 화재실험을 종료한 30분에는 559.4 kW로 측정되었다. 또한 구획내에서의 열방출률이 1 MW가 넘는 시점은 화재실험 7분 49초로 열방출률이 1137.8 kW로 측정되었다.

Figure 2. Photo of the inside in fire Mock-up.

Figure 3. Photo of real scale fire test.

Table 3. Measurement Results of HRR

Time (min)	Heat Release Rate (kW)
2	0
5	81.0
7	368.7
10	3458.2
15	2947.4
20	1422.5
30	559.4

실규모의 화재실험을 통해 측정된 열방출률, 산소소모량과 내부 온도 측정 결과는 Figure 4에서 나타내고 있다. 최대 열방출률은 화재실험 시작 9분 34초에 3810.6 kW로 측정되었고 최소 산소량은 실험 시작 9분 2초에 20.32%로 측정되었다. 구획 공간에서의 내부 온도 변화는 플래시오버가 발생하는 시점을 예측하기 위해서 내부온도가 1,350 °C에 도달하는 시간까지 나타내었으며, Table 4에서는 구획 내부에서의 플래시오버 발생 온도인 600 °C⁽¹⁰⁾에 도달하는 시간을 나타내었다. 열전대선은 구획 모델 바닥면에서부터 천장부까지 총 10개 지점에서 측정되었으며, 구획 천장부에서는 화재실험 7분 59초에 600 °C에 도달하였고 바닥면에서는 8분 55초에 도달하였다. 구획화재는 초기 착화 이후에 약 4분 20초에 성장하기 시작하였으며, 이를 토대로 열방출률 1 MW 도달시간과 내부 평균온도 600 °C의 시점을 고려한 플래시오버 예측 시간은 약 5분으로 예측할 수 있다.

4. 구획공간에서의 화재 크기 예측

건축물에서의 화재안전 설계를 위해 설정되어야 하는

구획 내에서의 화재 크기를 예측하기 위해 국내·외에서는 다양한 재료실험을 통해 산정된 이론식을 사용하여 최대 열방출률, 화재성장 예측, 플래시오버 발생 시점 등을 결정하고 있다. 하지만 이러한 이론식의 배경에는 한정된 구획 벽, 바닥 등에 대한 재료 물성치, 구획 내부에서의 화재 하중 값의 미적용 등으로 인하여 실규모의 화재실험의 필요성이 나타나고 있다.

구획공간에서 화재 성장을 예측하기 위해서 사용되는 t^2 화재는 건축물의 용도별 화재성장인자를 예측하여 구획공간에서의 화재크기를 결정하게 된다. Table 5에서는 국외 문헌에서 제시하고 있는 건축물의 용도별 화재성장속도를 나타내고 있다. 하지만 문헌들에서 제시하고 있는 건축물의 용도별 화재성장 값이 다르게 제시되고 있기 때문에 화재안전 설계 시 구획 공간에서의 화재 성장 및 화재 크기를 예측하는데 어려움을 나타내고 있다. 주거시설의 경우 고속과 중속으로 상이하게 제시되고 있고 학교와 사무실은 중속과 고속으로 쇼핑센터와 문화시설은 고속과 초고속으로 제시되고 있다.

본 화재실험을 통해 측정된 열방출률 데이터를 사용하여 주거시설에 대한 화재성장 속도 분석한 결과를 Table 6에서 나타내고 있으며, Table 7에서는 실규모 화재실험 결과를 사용하여 t^2 화재에 적용하기 위한 데이터를 제시하고 있다. 화재실험 데이터를 사용하여 주거시설에서의 화재성장속도는 고속으로 나타났으며, 화재 성장 시간, τ_{grow} 은 화재가 성장하는 단계부터 성장하는 시간을 나타내고 있으며, 화재 성장 이후 최대 열방출률, Q_{peak} 는 화재실험을 통해 측정된 결과값을 적용하였다. 화재 성장이 감소되는 시간, t_{max} 는 527초, 감소가 끝나는 시간, t_{decay} 는 1,500초로 설정하였으며, 이에 따른 성장곡선을 Figure 5에 나타내었다.

Figure 4. Results of real scale fire test.

Table 4. Time to Reach 600 °C

Position		Time [sec]
TC Position	TC name	
1	11	535
2	12	504
3	13	494
4	14	488
5	15	484
6	16	483
7	17	483
8	18	481
9	19	480
10	20	479

5. 결 론

건축물에서의 성능위주 화재안전 설계를 위해서는 구획 공간에서의 화재크기를 예측하는 것이 중요하지만 현재 관련 연구 및 자료 등이 국내에는 부족한 현실이다. 따라서 본 연구에서는 건축물에서의 용도별 분류 중에서 화재 발생과 인명의 피해가 많은 주거시설을 대상으로 하여 실규모의 화재실험을 실시하였다. 실규모의 화재실험 결과, 열방출률은 최대 3810.6 kW로 측정되었으며, 내부의 온도는 8분 55초안에 전체공간에서 600 °C를 초과하였으며, 화재가 성장한 이후 약 5분에 플래시오버가 발생하였다.

건축물에서 화재 크기를 예측하기 위해서 사용되는 t^2 화재는 문헌들에서 제시되고 있는 화재성장속도가 다르기 때문에 화재안전 설계자에 의해 구획 공간에서의 화재성

Table 5. Fire Growth of Building Uses

Building uses	Fire Growth		
	Boverket ⁽¹¹⁾	BS PD 7974 ⁽¹²⁾	B. Karlsson ⁽¹³⁾
Dwelling	Fast	Medium	Medium
School, Office	Medium	Medium	Fast
Hotel, welfare facilities	Fast	-	Fast
shopping center, cultural facilities	Fast	Fast	Ultra-fast

Table 6. Fire Growth from Experiment Data

1,055 kW reaching time (s)	α (kW/s ²)	Growth
208	0.024	Fast

Table 7. Event Time of Fire Growth from Experiment Data

τ_{grow} (s)	Q_{peak} (kW)	t_{max} (s)	t_{decay} (s)	α_{decay} (s)
208	3810.6	527	1,500	0.0039

Figure 5. HRR data from experiment and approximated curve with t^2 fire.

장이 다르게 예측될 수 있다. 본 실험규모의 화재실험 데이터를 사용한 결과 주거시설의 화재성장은 고속으로 제시되고 있으며, 이에 따른 화재성장별 열방출률 곡선을 제시하였다. 실험규모의 화재실험 결과는 구획공간에서의 화재 크기 예측뿐만 아니라 현재 국내에서 사용되고 있는 컴퓨터 해석 프로그램인 FDS의 결과값에 대한 검증 및 초기 기본 자료로도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원이 수행하고 있는 국가 R&D인 “(13주요)대공간 건축물 화재시 3시간 이상 견딜 수 있는 구조부재 및 연기피난 기술 개발” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Y. H. Yoo, E. K. Hwang, D. H. Kim, O. S. Kweon, H. S.

- Chae and S. B. Jang, “Development of Fire Spread Prevention and Escape Safety Design Technique According to Standard Fire Model”, KICT 2008-116, Korea Institute of Construction Technology, pp. 1-2 (2008).
2. 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).
3. Y. H. Yoo, H. J. Park, K. S. Cho, O. S. Kweon and H. Y. Kim, “A Case Study on Evaluation Criteria for Performance Based Design”, Proceedings of 2011 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 384-387 (2011).
4. A. H. Buchanan, “Fire Engineering Design Guide”, University of Canterbury, pp. 29-36 (2001).
5. J. D. Shin, S. H. Jeong, M. S. Kim and H. J. Kim, “Analysis of Fire Risk with Building Use Type Using Statistical Data”, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 4, pp. 107-114 (2012).
6. Korean Agency for Technology and Standards, “Fire Tests-full-scale Room Test for Surface Products”, KS F ISO 9705 (2009).
7. Korean Agency for Technology and Standards, “Fire safety-Vocabulary”, KS F ISO 13493 (2002).
8. D. H. kim, “A Study on the Establishment of the Fire Load by Building Occupancy”, Konkuk University, pp. 108-118 (2003).
9. E. J. Lee, “Design of Large Cone Calorimeter for the Fire Study”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 65-71 (2006).
10. O. S. Kweon, Y. H. Yoo, H. Y. Kim and S. H. Min, “An Experiment Study on Fire Safety Performance of Glass Wool Sandwich Panel”, Fire Science and Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 21-27 (2012).
11. Boverket, “Boverkets allmanna rad 2011:xx Vagledning I analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd-Remiss”, Kalskrona:Boverket (2010).
12. British Standard Institution, “PD 7974-1:2003, Application of fire safety engineering principles to the design of building-part1:Initiation and development of fire within the enclosure of origin”, London:BSI (2003).
13. B. Karlsson and J.G. Quintiere, “Enclosure Fire Dynamics”, Boca Raton, Florida: CRC Press (2000).