개구부에서의 수직화재 확산에 대한 실험적 연구

An Experimental Study of Vertical Fire Spread through Openings in Compartments

권오상* · 강 현**

Kweon, Ohsang*, and Kang, Hyun**

Abstract

In this study, a real scale fire experiment was conducted to analyze the characteristics of the flame that is ejected from an opening. The experiment was conducted by setting mattresses and wood cribs in compartments sized 2.4 (L) × 3.6 (W) × 2.4 (H) m and using heptane as an ignition source, and changes in external heat flux and temperature were measured during the experiment. In the experiment, openings of two sizes: small [2.2 (L) × 1.0 × 1.0 (H) m] and large [2.2 (L) × 2.0 × 2.0 (H) m], were used. The results showed that the maximum decrease of 40.7 kW/m² and 31.7 kW/m² was measured in small and large openings, respectively, at the distance of 0.5 m from the top of the opening. As a test result, securing the separation distance of the upper and lower openings can greatly affect the prevention of vertical spread of the flame, and if sufficient separation distance is not secured, it is considered that an additional fire diffusion prevention method is necessary.

Key words : Real Scale Fire Experiment, Vertical Fire Spread, Opening Size, Heat Flux, Temperature

요 지

본 연구에서는 개구부에서 출화되는 화염의 특성을 분석하기 위해 실규모 화재실험을 실시하였다. 실규모 화재실험은 2.4 (L) × 3.6 (W) × 2.4 (H) m 크기의 구획공간에 매트리스와 목재크립을 배치하고 헵탄을 착화원으로 사용하여 진행하였으며, 실험 동안에 외부의 열유속과 온도의 변화를 측정하였다. 화재실험에서는 Small (2.2 (L) × 1.0 (H) m)과 Large (2.2 (L) × 2.0 (H) m) 크기의 개구부를 이용하였으며, 실험 결과 개구부 상부로부터 0.5 m 이격된 거리에서 Small에서는 열유속의 최대 감소가 40.7 kW/m², Large에서는 최대 31.7 kW/m²의 차이가 측정되었다. 실험 결과, 상하부 개구부의 이격거리 확보가 화염의 수직확산 방지에 큰 영향을 줄 수 있으며, 충분한 이격거리가 확보되지 않은 경우에는 추가적인 화재확산 방지 방안이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 실규모 화재실험, 수직 화재확산, 개구부 크기, 열유속, 온도

1. 서 론

건축물에서 화재확산을 억제하기 위한 방법으로는 2차 점화원의 제거나 내부 가연물 또는 마감재료에 대한 연소성능 평가 및 제한이 있지만 구획공간에서 최성기로 화재가 확대되는 가장 큰 요인으로는 구획공간 내부의 환기 특성으로 나타난다.

Yun et al. (2017)은 실험적 연구에서 내부 체적에 대한

화재성장속도의 영향과 개구부 면적에 대한 화재 최성기의 열방출률 최대값 및 화재지속시간에 대한 영향을 제시하였다. Nam et al. (2010)은 개구부 분출화염성장 연구에서 개구부 크기의 변화에 따른 특성화 화원 크기의 변화에 따른 특성에 대하여 제시하였다.

구획공간에서 화염성상을 억제하는 방법으로는 개구부의 크기 제한이 효율적일 수 있으며, 발코니와 같은 경우는 이러한 개구부의 크기 제한과 유사한 효과를 가지고 있다. Shin

*정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원(E-mail: oskweon@kict.re.kr)

Member, Senior Researcher, Fire Research Institute, KICT

**교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 선임연구원(Tel: +82-31-369-0543, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: kanghty@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Research Specialist, Fire Research Institute, KICT

et al. (2008)은 발코니에서의 수직 화염확대 연구에서 발코니가 화재 시 화염 및 연기의 수직확산을 효과적으로 차단한다고 제시하였다. 하지만, 개구부의 크기를 제한하는 방법은 현실적으로 어려우며, 특히 아파트 등과 같은 경우에는 발코니가 확장 등을 통해 본 효과가 무력화되고 있는 실정이다.

Kim et al. (2007)은 창호와 발코니 형상에 의한 화염의 분출성상에 대한 연구를 축소모델 실험을 통해서 제시하였다. 연구결과에서는 수평으로 길게 창호를 개방한 화재일 때의 상부층 온도가 높게 측정되어 화재실 상부층의 연소위험성이 매우 크다고 제시하였다. 따라서 발코니가 확장된 거실을 가지고 있는 구획공간에서는 화재 발생 시의 상부층으로의 화재확산에 대한 위험성을 가지고 있다고 판단된다.

국토교통부의 ‘발코니 등의 구조변경절차 및 설치기준’ 제4조에서는 아파트 2층 이상의 층에서 스프링클러의 살수범위에 포함되지 않는 발코니를 구조 변경하는 경우에 방화판 또는 방화유리창을 설치하도록 하고 있다. 하지만 확장된 발코니에서의 창이 스프링클러의 살수범위에 포함되더라도 화재확산의 억제에 대한 정량적 평가가 없기 때문에 외부로의 화염출화가 발생되어 상층부의 화재확산의 가능성을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 실규모의 화재실험을 통해서 개구부로 출화되는 화염의 특성을 판단하고 이를 통해 외부로 출화되는 화염에 대한 방호 대책을 분석하고자 하였다.

2. 구획공간에서의 화재실험 방법

구획공간에서의 화재 특성은 다양한 요인에 의해 영향을 받으며, Choi and Kim (2003)은 건축물 외부로의 분출화염성상에 대한 연구에서 가연물의 연소속도를 좌우하는 것은 실내 환기지만, 개구부가 더욱 더 커지면 공기공급은 환기 여하에 관계없이 충분하게 되며 이때에 가연물의 연소속도는 연료특성에 의하여 지배되게 되고 일반적으로 전자를 환기지배형 화재, 후자를 연료지배형 화재라고 나타내었다. Kweon and Kwon (2019)에서는 화재실험에서 사용되는 칼로리미터(Calorimeter)대하여 제시하였으며, 본 연구에서는 실규모의 화재실험이 가능한 Large Scale Calorimeter (LSC)에서 구획화재 실험을 진행하였다.

본 연구에서는 구획공간에서 발생하는 화재사고 시에 창문 등과 같은 개구부를 통해 출화되는 화염의 수직 확산 특성을 판단하기 위해 실규모의 화재실험을 진행하였다. Table 1에서는 구획공간에서의 개구부 특성을 고려한 화재 실험에 대한 내용을 제시하고 있다.

실규모 화재실험은 2.4 (L) × 3.6 (W) × 2.4 (H) m 크기의 단일 구획공간에 Small (2.2 (L) × 1.0 (H) m)과 Large (2.2 (L) × 2.0 (H) m) 두 종류 크기의 개구부를 설정하여 진행하였다. 내부의 가연물은 함수율 10% 이내의 목재크립과 매트리스를 사용하였으며, 초기 착화는 가연물들 하부에 헵탄 풀버너를 설치하여 진행하였다. 실규모 화재실험을 통해서

개구부 상부에 열유속계를 사용하여 2지점에서의 열유속을 측정하였고 K-type 열전대선을 사용하여 3지점에서의 온도 변화를 측정하였다.

Table 1. Scenarios of Fire Experiment

Compartment Size	• 2.4 (L) × 3.6 (W) × 2.4 (H) m
Opening Size	• Small: 2.2 (L) × 1.0 (H) m • Large: 2.2 (L) × 2.0 (H) m
Combustibles	• Wood Crib: 62.5 kg • Mattress: Single size
Ignition source	• Heptane
Measurement	• Heat Flux_2 point - HF1: Top of the opening - HF2: 0.5 m above the opening • Temperature - TC1: Top of the opening - TC2: Center between 1 st & 2 nd opening - TC3: bottom of the 2 nd opening

Figs. 1과 2에서는 실규모 화재실험에 사용된 구획공간과 두 종류의 개구부 크기 및 열유속과 온도의 측정 지점을 나타내고 있다.

Fig. 1. Compartment & Opening Size

Fig. 2. Measurement Point

실규모 화재실험을 통해서 측정되는 열유속은 1층의 개구부 상단과 0.5 m 상부지점에서 측정되고 온도변화는 1층의 개구부 상단, 1층과 2층 개구부의 중앙과 2층 개구부 하단에서 측정된다. Table 2에는 측정되는 열유속과 온도변화의 위치를 구획공간의 바닥면을 기준으로 나타내고 있다. 열유속은 개구부의 크기에 상관없이 모두 0.5 m의 이격 거리를 두고 있으며, 온도 변화는 개구부의 크기에 따라 0.7 m와 0.2 m의 이격거리를 두고 있다.

Table 2. Measurement Point Details

	Type	Height		△ Height
Heat Flux	Small	HF1	2.2 m	0.5 m
		HF2	2.7 m	
	Large	HF1	2.1 m	
		HF2	2.6 m	
Temp.	Small	TC1	2.2 m	0.7 m
		TC2	2.9 m	
		TC3	3.6 m	
	Large	TC1	2.1 m	0.2 m
		TC2	2.3 m	
		TC3	2.5 m	

구획공간 내부의 가연물은 Fig. 3에 나타내고 있다. 실규모 화재실험에서의 가연물은 목재 크립 62.5 kg을 3개의 단으로 등분포하고 매트리스를 배치하였다. 목재크립과 매트리스 하부에는 헵탄 풀버너를 설치하여 초기 착화원으로 사용하였다.

(a) Small

(b) Large

Fig. 3. Combustibles

3. 실규모 구획화재 실험 결과

실규모 화재실험을 통해서 화염의 수직전파 특성을 판단하기 위해 구획공간 내부에 가연물을 배치하고 헵탄 풀버너를 사용하여 화염을 착화한 이후 외부로 출화되는 화염에 의한 열유속과 온도의 변화를 측정하였다. Figs. 4와 5에서는 개구부의 크기에 따른 실험결과를 나타내고 있다. 모든 실험은 총 25분 동안 진행되었으며, 데이터는 실험 종료 이후에 추가된 시간을 포함하여 총 30분 동안 측정되었다. 화재실험은 풀버너 착화 → 가연물 화염전파 → 화재 성장 → 최성기 → 쇠퇴기 순서로 진행하였다.

헵탄 풀버너를 사용하여 가연물에 착화된 화염은 두 실험 모두 1분 이내에 전체 구획공간에 화염이 확대된 플래시오버 상태로 만들었다. 이후에 화염이 외부로 출화되어 수직으로 전파되고 가연물이 전소되면서 구획 공간 내의 연소반응은 소멸되었다. 구획 내부의 가연물 중에서 매트리스는 화재실험 시작 후 약 2분 안에 전소되었으며, 주된 연소 반응은 내부의 목재 크립에 의해서 진행되었다.

개구부의 크기 차이로 인해 Small 형태의 실규모 화재실험은 Large 형태의 실규모 화재실험에 비해 외부에서 유입되는 공기량이 적어 불완전 연소의 형태를 보이면서 출화되는 화염과 함께 다량의 연기가 발생되었다. 하지만 두 실험 모두 플래시오버가 발생된 이후에 최성기로 발전된 형태를 나타내었다.

Fig. 4. Photo of Fire Experiment_Small

Fig. 5. Photo of Fire Experiment_Large

구획 공간의 화재성상은 환기 특성과 가연물에 영향을 받게 된다. Quintiere (2017)는 Eqs. (1), (2)와 같이 구획 공간 내에서 예측될 수 있는 최대 열방출률을 개구부 크기에 의해 구하는 방법을 제시하였다.

$$\dot{m}_{a,max} = 0.52 \times A_0 \sqrt{H_0} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}_{a,max} \times 3,000 \quad (2)$$

Eq. (1)에서의 최대 공기유량 $\dot{m}_{a,max}$ (kg/s)는 개구부의 면적 A_0 (m²)과 개구부 높이 H_0 (m)로 구해지고 $A_0 \sqrt{H_0}$ 를 환기계수로 나타낸다. Eq. (2)에서의 최대 열방출률 $\dot{Q}_{max}$ (kW)는 Eq. (1)에서의 최대 공기유량과 상수(kJ/kg)를 사용하여 결정된다.

실규모 화재실험에서는 개구부 상단과 0.5 m 이격 시킨 열유속을 측정하였고 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6. Results of Heat Flux Measurement

열유속의 변화는 Small과 Large에서 동일한 형태를 나타내었다. 초기에 착화과 동시에 구획공간이 플래시오버 상태로 확대되면서 외부로 출화되는 화염에 의해 열유속이 급속하게 성장하고 이후 화재실험 시작 후 약 300-800초 사이에

는 일정하게 유지되었다. 800초 이후부터는 화염 출화가 둔화되어 열유속이 감소하기 시작하였다. Table 3에서는 열유속의 최대값을 나타내었다.

Table 3. Max. Values of Heat Flux

	Location	Max. HF [kW/m ²]
Small	HF 1	61.9
	HF 2	42.4
Large	HF 1	54.7
	HF 2	17.5

열유속의 최대값은 Small에서 1층 개구부 상부 61.9 kW/m², 0.5 m 이격 42.4 kW/m²로 측정되었다. Large에서는 1층 개구부 상부 54.7 kW/m², 0.5 m 이격 17.5 kW/m²로 측정되었다.

개구부의 크기에 따라 구획 공간 내부의 화재성상이 다르기 때문에 실규모 화재실험 결과에서는 개구부의 크기에 따른 Small과 Large의 외부 열유속 특성을 분석은 어렵다. 하지만 측정 결과에서는 개구부 크기의 차이가 있어도 이격된 거리에서의 열유속의 차이가 있음을 보여준다. Fig. 7에서는 측정된 열유속의 차이를 보여주고 있다.

Fig. 7. Margin of Heat Flux Measurements

이격 거리 0.5 m에 따른 열유속의 차이는 열유속의 변화와 유사한 형태를 보이고 있으며, Small에서는 최대 40.7 kW/m², Large에서는 최대 31.7 kW/m²로 나타났다. 열유속이 최대로 측정된 시점에서 최대 차이가 나타났으며, 열유속이 일정하게 유지된 시점에서도 평균적으로 약 10 kW/m² 정도의 차이가 나타났다.

실규모 화재실험을 통해서 측정된 개구부 상단의 온도변화는 Figs. 8과 9에 나타내었다. Small에서는 초기에 화염이 출화되면서 온도의 변화가 안정적인 상태를 유지한 이후에 감소되었으며, Large에서는 초기의 화염 출화에 의해 급격히 상승된 온도변화가 감소되면서 일정 시간동안 안정적인

상태를 유지한 이후에 감소하였다.

실험 결과에서는 개구부 크기와 이격 거리의 차이가 있어 도 상승되는 온도의 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 8. Results of Temperature_Small

Fig. 9. Results of Temperature_Large

Table 4. Max. Values of Temperature

	Location	Max. Temp. [°C]
Small	TC 1	783.0
	TC 2	515.4
	TC 3	396.4
Large	TC 1	540.2
	TC 2	311.1
	TC 3	236.0

Table 4에서는 측정지점별 최대 온도값을 나타내고 있다. Small에서는 최대온도가 783.0 °C가 측정되었으며 Large에서는 540.2 °C가 측정되었다. 두 실험별 이격 거리의 차이가 일정하지는 않지만 이격거리에 따른 온도 저감의 효과는 실험결과에서 나타나고 있다. Fig. 10에서는 이러한 온도의 저감 효과를 나타내었다.

(a) Small

(b) Small

Fig. 10. Margin of Temperature Measurements

Small에서의 온도 저감효과는 0.7 m 이격에서 349.3 °C, 1.4 m에서는 453.5 °C로 나타났고 Large에서의 온도 저감효과는 0.2 m에서 369.1 °C, 0.4 m에서 393.4 °C로 나타났다. 온도 저감의 효과는 개구부의 크기와는 별도로 개구부 상단에서 일정 이격 거리가 확보되면 있는 것으로 실험을 통해서 확인하였다.

구획공간 내부에서 발생된 화재로 인해 외부로 출화되는 화염의 수직 확산 특성을 판단하기 위한실규모의 화재실험 결과에서는 개구부 크기의 차이로 인해 환기적 특성이 달라져 외부로 출화되는 화염의 열유속 및 온도의 변화는 상이하지만 일정 이격 거리에 따라 열유속 및 온도의 저감 효과를 나타내었다.

4. 결 론

건축물에서 발생되는 화재사고로 인해 인명과 재산피해가 지속적으로 발생되고 있으며, 최근에는 필로티 구조 등과 같은 건축물에서 외벽으로의 수직 화염 확산으로 인한 대형 화재사고의 피해도 증가되고 있다.

구획공간 내부에서 발생되는 화재사고는 내부의 화재감지기와 스프링클러 등과 같은 소방시스템에 의해서 억제가

가능하게 방호설계가 이루어지지만 외부로 출화되는 화염에 대해서는 별도의 방호설계가 어려운 실정이다. 이에 외부의 마감재료 설치기준과 같은 패시브적 설계가 제도적으로 구축되어 있지만 다양하고 복잡한 건축물에 특성을 모두 반영하기에는 힘들다.

따라서 본 연구에서는 외부로 출화되는 화염의 수직 특성을 실험 규모 화재실험을 통해서 분석해 보고 향후 방호대책 수립에 활용하고자 하였다. 실험 규모 화재실험은 Small (2.2 (L) × 1.0 (H) m)과 Large (2.2 (L) × 2.0 (H) m) 크기의 개구부를 가지고 있는 구획공간에서 동일 가연물량과 착화방식을 선택하여 2회 진행하였으며, 출화되는 화염의 이격 거리에 따른 특성을 판단하기 위해서 열유속과 온도의 변화를 측정하였다.

실험 규모 화재실험 결과는 개구부의 크기와 상관없이 일정 이격 거리가 확보되면 수직 화염전파의 억제가 가능하다고 나타났다. 열유속은 개구부 상부와 0.5 m 이격 지점에서 측정되었으며, Small에서는 최대 40.7 kW/m², Large에서는 최대 31.7 kW/m²의 차이가 측정되었다. 온도 변화는 Small에서는 0.7 m 이격에서 349.3 °C, 1.4 m에서는 453.5 °C로 나타났고 Large에서는 0.2 m 이격에서 369.1 °C, 0.4 m에서 393.4 °C로 나타났다.

연구결과에 따라 화재층과 일정 거리의 개구부 이격이 있는 건축물에 비해 이격 거리가 짧은 커튼월 공법을 사용한 건축물 등에서 화재위험이 더 크다고 할 수 있다. 국토교통부 고시 “건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준”의 제7조에는 화재 확산 방지구조에 대해 제시되고 있고 동 고시 별표1에는 화재 확산 방지구조의 예시가 나타나 있다.

하지만 화재 확산 방지구조가 적용받지 않는 건축물에서는 수직 화염확산 위험에 노출될 수 있다. 따라서 외벽의 개구부는 우선적으로 일정 수준의 이격 거리가 확보되어야 하고 이격 거리가 확보되지 않는 경우에는 외벽 마감재료의 화재안전 성능 확보나 화재 확산 방지구조와 동일 수준의 안전 대책이 필요할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원 (20AUDP-B100356-06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, I.C., and Kim, H.S. (2003). An experimental study of externally venting flames in building. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, Vol. 19, No. 2, pp. 203-210.
- Quintiere, J.G. (2017). *Principles of fire behavior* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Kim, H.C., Sohn, J.Y., and Park, H.J. (2007). Study on the temperature change according to flame spread behavior by the shapes of window and balcony. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, Vol. 23, No. 2, pp. 199-207.
- Kweon, O.S., and Kwon, K.S. (2019). Experimental study of flashover prediction for building. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 1, pp. 161-168.
- Nam, D.G., So, S.H., Lim, W.S., Lee, J.W., Kim, N.H., Shin, Y.S., et al. (2010). Characterization of fire plume ejected from an opening. *Proceedings of 2010 Autumn Conference*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 319-323.
- Shin, Y.C., Youn, Y.H., Lee, J.H., and Kwon, Y.J. (2008). An experimental study on the risk of vertical flame for an extended-balcony. *Proceedings of 2008 Autumn Conference*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 283-288.
- Yun, H.S., Kim, W.H., and Hwang, C.H. (2017). Effects of internal volume and opening area on compartment fire characterization. *Proceedings of 2017 Spring Conference*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 319-320.

Received	April 6, 2020
Revised	April 7, 2020
Accepted	April 20, 2020