개구부를 통한 동시다발적인 화재성상에 관한 연구 A Study on Concurrent Fire Appearance through Openings

민세홍 · 이재문^{*†}

Se-Hong Min · Jae-Moon Lee^{*†}

가천대학교 공과대학 소방방재공학과, *창우FE&C
(2012. 1. 26. 접수/2012. 4. 2. 수정/2012. 4. 13. 채택)

요 약

외장재에 의한 수직화재확산은 확산속도가 구획화재에 비해 매우 빨라 이에 대한 화재의 특성 분석이 요구된다. 본 연구에서는 건물 외부에서 발생한 화재가 연소 확대되면서 수직으로 상승하여 개구부를 통해 유입되는 화재의 성상에 대해서 외장재로 널리 사용되는 심재가 폴리에틸렌인 일반 알루미늄복합패널에 대해 화재시물레이션을 적용하여 연구하였다. 그 결과, 수직확산화염은 화재초기에 2층까지 상승하는 데는 약 135초가 걸렸지만 10층까지는 470초, 최고층인 30층까지 상승하는 데는 711초에 도달하는 것으로 분석되어 고층부로 갈수록 난류 및 외장재 설치공간의 연돌효과에 의해서 급격히 확대되는 것을 알 수 있었다. 이러한 연구 결과로 외장재가 설치된 건축물의 화재 시 개구부를 통한 화재는 동시다발적으로 그 건물의 내부에 확대되는 심각성을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

Since vertical flame spread speed on exterior materials is much faster than horizontal fire, analysis of its fire characteristic is required. For the study of vertical fire pattern created by penetrating windows or openings from the exterior wall of buildings, the research is based on the fire simulation for an aluminum-complex-panel with which is commonly used as exterior materials and consists of polyethylene core material. As a result, the flame reaches the 2nd floor after 135 seconds in the early stage of fire, the 10th floor after 470 seconds and the 30th floor, the highest floor, after 711 seconds. The result shows that fire spread abruptly expands on upper floor due to stack effect of a turbulent flow or exterior materials. In consequence, we can confirm a serious problem that a conflagration of a building through an opening that is equipped with the exterior-materials spreads into interior of building at that same time.

Key words : Concurrent fire, FDS, Modeling, Openings

1. 서 론

건물화재의 화재확산은 크게 실 내부의 구획화재와 외벽 등에 의한 외부화재에 의해 상층부로 확산하는 화재성상으로 구분할 수 있다.

외벽이 벽돌이나 콘크리트 등 불연재로 마감한 건물의 수직화재 성상은 아래층의 실 내부의 연소에 이어 개구부에 의해 상층의 개구부로 수직 확산하여 그 실 내부로 유입되는 반복적인 형태로 상층으로 수직 확대 되는 것이 일반적인 형태이다.

최근 결로현상이나 단열, 또는 건물 외관의 미려함 등의 이유로 외단열시스템(EIFS, Exterior Insulating and Finishing System)이나 외장재를 신축이나 리모델링 등 구분하지 않고 광범위하게 적용하는 추세로 수직화재 확산에 대한 관심이 높아지고 있다.

건축물 외벽에 의한 수직화재확산은 외장재 등의 사용이전에 비해 최초 발생 층에서 최고 층까지로의 확산속도가 급속히 빨라진다는 것을 2008년 5월에 발생한 서울 강남 화진빌딩화재와 2010년 10월에 부산에서 발생한 해운대 우신골든스위트 화재 등 화재사례와 이와 관련한 연구들에서 밝혀진 바 있다.

가연성 외장재가 설치된 건물에 만일 화재가 발생하

[†] E-mail: dddcom@hanmail.net

Figure 1. Comparison of fire appearance.

여 외장재 등을 연소하여 수직으로 화재가 확대되며 이 확대되는 수직부에 개구부가 있으면, 바람의 영향과 외장재의 종류 등 주변의 조건에 따라 약간의 시간적 차이는 있겠지만 외부로부터 개구부를 통해 거의 동시다발적으로 해당 건물에 각 층의 내부로 유입되는 구획화재로 돌변하여 건물 전체는 화재로부터 그 위험성이 심각할 수 있다고 판단된다.

이러한 동시다발적인 화재의 성상에 대해 고층건물에 적용하여 화재시나리오를 설정하여 FDS 버전 5.5.3을 이용하여 화재모델링으로 그 위험성을 증명하고자 한다.

그동안 동시다발적인 화재 성상에 대한 연구는 지진에 의한 화재와 산불화재에서만 다루어졌으며, 건축물에서는 테러에 의한 화재를 제외하고는 거의 연구가 없는 상태이다. 최근에 수직화재확산에 대해 연구가 활발히 진행되고 있다. 민세홍과 윤정은은 강남 화진빌딩에서 발생한 외장재의 수직 확산 화재에 대해 FDS 모델링프로그램을 이용하여 모사하는 연구를 진행하였으며, 민세홍과 윤정은, 김미숙 등은 알루미늄복합패널과 외단열시스템에 대해 실험대형 실험실¹⁾ 중소형실험을²⁾ 진행하여 연소특성에 관한 연구로 외장재 수직화재의 화재위험성 평가 연구를 진행하였다.

Figure 1에 외장재와 관련된 수직화재에 있어 일반 화재와 알루미늄복합패널 외장재 화재사례를 나타내었다.

2. 모델링 입력데이터 추출 실험

2.1 입력데이터 선정

알루미늄복합패널은 단일 소재가 아니라 여러 재료가 복합적으로 구성된 복합재이기는 하나, 본 연구에서는 중소형실험을 진행하여 이 복합재를 단일재로 단순화하여 모델링의 입력값을 단순화한다.

모델링을 위한 입력데이터는 Table 1과 같다.

Table 1. Kinds of Data for Modeling

Items	Units
Specific Heat	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
Conductivity	$\text{W/m} \cdot \text{K}$
Density	kg/m^3
Heat of Combustion	kJ/kg
Thickness	mm
Heat Release Rate Per Area	kW/m^2

2.2 실험

모델링의 입력데이터 값을 추출하기 위해 콘칼로리미터와 열물성 실험을 진행하였다.

2.2.1 콘칼로리미터 실험³⁾

콘칼로리미터 실험은 재료의 기본적인 연소특성을 측정하는 실험으로 측정 내용으로는 열방출율(Heat Release Rate), 질량감소율(Mass Loss Rate), 재료의 착화시간 및 연소가스 중 CO_2 와 CO 배출량을 측정하여 연기 특성을 파악할 수 있다.

2.2.2 열물성 실험

열물성 평가인 LFA(Laser Flash Apparatus)와 DSC(Differential Scanning Calorimetry)를 통하여 열확산율(Thermal Diffusivity, α), 열전도율(Conductivity, k) 및 비열(Heat Capacity, cp)을 측정한다. 측정에서 중요한 부분은 시험체가 복합재료로 구성되어있기 때문에 재질별로 각각 실험을 진행하는 것이 원칙이며 서로 분리가 어려울 경우 측정 결과값을 근사치의 개념으로

Figure 2. Heat release rate experiment.

Figure 3. Thermal property experiment.

Figure 4. Heat release rate(heating 75 kW/m²).

Table 2. Experiment Data of Aluminum Composite Panel

Items	Data
Specific Heat	1.201 kJ/kg · K
Conductivity	0.165 W/m · K
Density	1,363 kg/m ³
Heat of Combustion	31,600 kJ/kg
Thickness	4 mm
Average MLR	0.029 g/s
Time to Ignition	162 sec.
Aver. Generation of CO	0.029 kg/kg
Aver. Generation of CO ₂	2.337 kg/kg

접근한다.

2.3 추출 데이터

이상의 실험으로 Figure 4와 Table 2와 같이 모델링에 필요한 데이터를 추출하였다.

3. 화재모델링

3.1 모델 제안

건물은 (가로 10 m) × (세로 10 m) × (높이 90 m)로 한 층을 3 m로 하여 30층으로 설정하였으며, 개구부는 (가로 1 m) × (세로 1 m)로 한 층 당 3개를 Figure 5와 같이 설치하였다. 이와 관련하여 건물 정면은 10 m, 좌, 우, 후면에는 각각 5 m, 상부에는 6 m의 여유 공간을 확보하였고, 구획화재가 아닌 실외화재이므로 바닥을 제외한 정면과 후면, 좌우면의 외부공간을 Open하였다.

점화원은 건물 정면 외벽에 쓰레기 컨테이너를 (1 m) × (1 m)로 설정하여 건물 정면 중간부에 위치시켜 수직 상승하는 화재정상이 각 개구부에 미치는 영향 등을 확인하였다. Figure 5에 본 연구와 관련된 모델을 나타내었다.

Grid 개수는 (125) × (100) × (480)로 하여 총 개수는

Figure 5. Fire model.

Figure 6. Multi-mesh.

Figure 7. Measuring point of temperature and visibility.

6,000,000개이며 하나의 격자 당 0.2 m로 설정하여 Figure 6과 같이 나타내었다.

또한, 데이터를 측정할 Device는 한 층의 높이인 3 m 당 설치하되 각 개구부에 별도로 좌측부터 번호를 부여하여 설치하였다. Device의 측정 내용은 외장재 화재의 수직 확산속도를 측정하기 위하여 외벽에 Wall Temperature를 설치하였으며, 건물 내부로의 화재확대 및 위험성을 측정하기 위하여 ‘소방시설의 성능위주 설계 방법 및 기준’에 근거한 각 층의 바닥으로부터 1.8 m 높이에 가시거리에 의한 영향을⁴⁾ 측정할 수 있도록 측정점을 추가로 설치하였다.

평면상에서 측정점의 설치 위치를 보면 각 층마다 2 개소의 특별피난계단 입구 및 비상용승강기 승강장 입구에 설치하였다.

3.2 조건 설정

화재의 수직 확산이 개구부로 유입되는 화재성상을 확인하기 위하여 건축물 외부에 알루미늄 복합패널이 설치된 외장재에 대해 모델링을 진행하여 화재성상을 분석한다.

점화원의 열방출량은 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 데이터인 쓰레기 컨테이너의 최대 열방출량인 300 kW를 적용⁵⁾하였다.

또한, 환경적 조건 중 바람의 영향은 고려하지 않았으며, 외기온도는 20 °C로 설정하였다.

3.3 화재 시나리오

설정된 점화원에서 화재가 발생하여 인접한 알루미늄 복합패널 외장재에 착화되어 수직으로 화재가 확산하며, 수직으로 확산한 화재는 상부에 설치된 개구부를 통해 해당 층으로 유입된다.

유입된 화재는 해당 층에 대해 구획화재로 확대되며 외부의 수직화재와는 별도로 건물 내부를 통해 인접한 층으로 확대된다.^{6,7)} 하지만 그 내부로 유입된 화재가 내부를 연소시키고 인접한 층으로의 확대되는 연소속도에 비해, 해당 층의 개구부로 유입됨과 동시에 그 상층부의 외장재를 연소시키고 개구부를 통해 그 이상의 층으로 연속 유입되어 확산된 화재속도에 미치지 못한다.

선행 연구와⁸⁾ 화재사례에 의하면 1개 층 당 약 1분 만에 수직 상승한다는 결과에 대해 데이터를 객관화하고자 한다.

또한, 알루미늄 복합패널 외장재의 화재에 의해 건축물 내부로의 화재위험성을 정량적으로 비교 분석하여 고층건축물의 피난대책에 대한 문제점을 인식하고자 한다.

Figure 8. HRR of aluminum composite panel.

4. 결과 및 고찰

본 연구 결과에 대해 알루미늄 복합패널의 화재성상 및 위험성에 대하여 다음과 같이 분석하였다.

4.1 열방출률(HRR)

열방출률의 분석 결과, 알루미늄 복합패널은 Figure 8과 같은 결과를 얻었다. 화재성장속도는 초기 점화원인 300 kW를 제외하고 분석한 결과 76초에 1,056 kW를 나타내는 Fast급의 화재성장 속도를 나타냈으며, 연소 확대가 지상 20층 이상까지 도달하는 500초 전후부터는 급격히 확대되기 시작하면서 시뮬레이션 종료 시점인 900초에는 약 210 MW를 넘는 것으로 나타났다.

4.2 화재 성상 및 벽체온도

일반 알루미늄 복합패널 외장재의 화재시뮬레이션 결과, 시간별 화염 및 연기의 확대는 Figure 9에 나타난 바와 같다.

수직으로 상승하기 시작한 화염 면은 약 135초에 2층까지 올라갔으며, 10층까지 도달하는 데는 470초가 소요되었다. 또한, 고층부로 올라갈수록 난류가 확산하여 최고층인 지상 30층까지 화염 면이 전파되는 데까지 걸린 시간은 불과 711초에 도달하는 것으로 분석되었다. 이는 가연성 외장재의 수직화염전파의 위험성을 단적으로 보여주는 결과이다.

외장재 외벽면의 온도를 측정하기 위하여 Solid-Phase Device⁹⁾ 중 벽체온도를 측정한 결과는 Figure 10과 같이 측정점인 폴리에틸렌이 열분해 되는 온도(360 °C)와 알루미늄이 녹는 온도(660 °C)에 도달하는 시간을 층별로 분석한 그래프이다. 화재 초기에는 5층까지 서서히 벽체온도가 상승하다가 5층 이상부터 30층까지 급격히

Figure 9. Important event images of the progressing period of fire appearance.

Figure 10. Graph of wall temperature boundary.

온도가 상승함을 알 수 있다. 알루미늄이 녹기 시작하는 온도는 11층 이후부터 도달하여 급격히 최상층까지 도달하였다. 특히, 580초를 지나면서 넓어진 수직화염에 의해서 11층에서 15층까지 순간적으로 660°C 이상으로 도달하였다.

1층부터 10층까지의 벽체온도는 서서히 온도가 상승하다가 600°C를 넘으면서 알루미늄의 녹는점에 도달하지 않음에도 알루미늄복합패널이 Burn away 되면서

Figure 11. Boundary of wall temperature(711 sec.).

사라져서 벽체 온도를 측정하는 측정점 온도가 급격히 감소하는 현상이 나타났다. 이는 격자 크기에 의해서 오는 수치적 불확실성에서 발생하는 현상으로 보인다.

Figure 11은 벽체 표면의 온도를 나타내는 그림으로 외기조건이 무풍상태에서 시뮬레이션을 진행했으나 수직으로 연소 확대되면서 화염면이 넓게 퍼지면서 우측으로 더 확대되는 것을 알 수 있었다. 이는 외기의 바람에 영향을 받을 경우 2010년 발생한 부산 우신골든 스위트 화재처럼 건축물 전체를 감싸고 측면을 통해 뒤편으로 영향이 미칠 수 있음을 가늠할 수 있다.

4.4 동시다발적인 화재위험성 분석

개구부를 통해 건축물 내부로 유입되는 연기 및 열적 영향을 측정하기 위해 건축물 내부에 층별로 바닥에서 1.8 m 높이(호흡안전선)에서 가시거리 10 m 이하에 도달하는 시간을 측정한 결과 Figure 12와 같은 분포를 나타냈다. 최초 화재위험성에 도달하는 시간은 지상 1층에서 358초에 피난한계에 도달하였으며, 600초 이상이 지나면서는 고층부에서 동시다발적으로 피난허용한계에 도달하였으며, 30층 건물 전체는 683초에 피난한계에 도달하는 것으로 분석되었다.

층별로 피난허용시간에 도달하는 편차가 큰 것은 상층부로 올라갈수록 난류에 영향을 받은 연기의 흐름과

Figure 12. Visibility-time graph: 10 m.

Figure 13. Risk of visibility(X axis).

화재의 수직 확산속도에 의해서 피난한계 도달 시간이 차이를 보이는 것으로 판단된다.

Figure 13은 벽체온도의 분석에서도 알 수 있듯이 창을 통해 연기가 유입되어 들어오는 양도 좌측보다는 중앙과 우측에 설치된 창을 통해 들어오는 양이 많음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구의 수행 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 본 시뮬레이션에서 일반 알루미늄복합패널의 연소속도는 76초에 1 MW를 넘는 Fast급 화재성장속도를

나타냈다.

(2) 수직확산화염은 2층까지 상승하는데 약 135초가 걸렸지만 10층까지 상승하는데 470초, 최고층인 30층까지 상승하는 데는 711초에 도달하는 것으로 분석되어 고층부로 갈수록 난류 및 외장재 설치공간의 연돌 효과에 의해서 급격히 확대되는 심각성을 확인할 수 있었다.

(3) 벽체 온도를 분석한 결과, 폴리에틸렌의 인화점에 도달하는 시간은 5층에서 446초가 소요되었으며 그 후 가파르게 상승하였으며, 알루미늄의 용융점인 660 °C는 11층 이상의 층부터 도달하는 것으로 분석되었다.

(4) 건축물 중앙 부분에서 시작된 발화는 상부에 설치된 개방된 창문 또는 외기 Open 공간의 영향을 받은 외벽의 화재성상은 바람이 거의 없는 상태에서도 고층으로 올라가면서 연소확대 폭이 점점 넓어지면서 한쪽으로 치우치는 현상을 보였다.

(5) 건축물 내에서 발생하는 화재는 방화구획 등 다양한 방법으로 화재를 한정하지만, 구획화재와 달리 가연성 외장재 화재는 동시다발적인 심각한 화재위험성에 대비하여 체계적인 피난대책이 요구된다.

(6) 알루미늄복합패널의 경우 약 4 mm 정도의 두께를 가지고 있어서 고층건물을 전부 표현하기에는 격자에 대한 한계에서 오는 수치적 불확실성을 보여서 이에 대한 연구 보완이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 소방방재청 2010차세대핵심소방안전기술개발사업 지원에 의한 결과임(사업단; 한국소방산업기술원).

참고문헌

1. S.H. Min, J.E. Yun, M.S. Kim, and S.B. Choi, "A Study on the Fire Characteristics of Aluminum Composite Panel by Large Scale Calorimeter", J. of Korea Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.24, No.2, pp.89-96(2010).
2. S.H. Min and M.S. Kim, "A Study on the Fire Risk Assessment of EIFS by Cone Calorimeter Test & Single Burning Item Test", J. of the Korea Safety Management & Science, Vol.12, No.1, pp.1-9 (2010).
3. Y.M. Choi and S.C. Kim, etc., "Fire Performance Test for Residential Flooring Materials by Using a Cone Calorimeter and a Smoke Toxicity Tester", J. of Korea Institute of Fire Sci. & Eng., Proceeding

- of 2007 Spring Annual Conference, pp.325-331 (2007).
4. Notification No. 2011-68 of the National Emergency Management Agency, "Performance-based Methods and Standards of Fire Safety Design", NEMA (2011).
 5. Korea Fire Protection Association (KFPA), "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", SFPE(2005).
 6. Felix Nyuk Poh Bong, "Fire Spread on Exterior Walls, Fire Engineering Research Report 2000/1", ISSN 1173-5996(2000).
 7. C.A. Wade and J.C. Clampett, "Fire Performance of Exterior Claddings", Branz Report FCRI, Fire Code Reform Center Ltd.(2000).
 8. S.H. Min and J.E. Yun, "A Study on the Modeling Vertical Spread Fire of Exterior Panel by Fire Dynamic Simulation (FDS)", J. of the Korea Safety Management & Sci., Vol.11 No.2, pp.77-85(2009).
 9. S.C. Kim, "A Review of Temperature Measurement of Fire Driven Flow Using Thermocouple-Measurement Bias", J. of Korea Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.24, No.6, pp.98-103(2010).