공동주택 화재시 화염 및 연기 확산 분석을 위한 실험적 연구

An Experimental Study for the Flame and Smoke Spread Analysis in Apartment House

유용호* · 최영화** · 권오상***

Yoo, Yong Ho · Choi, Young Hwa · Kweon, Oh Sang

Abstract

Domestic fire accidents in the residence area caused 177 fatalities only in 2011 and are recognised as a serious social risk factor. This study performed full scale fire reappearance experiments for actual apartments to analyze behavior characteristics of fume and harmful gas, major causes of casualties at the fire of apartment building. The outcomes found that carbon monoxide, major cause of suffocation casualty, was measured up to 7,600 ppm, and its measurement was up to 3,400 ppm on just above floor of fire floor as well. Also, it was confirmed that fast fume diffusion through stairs at the time of front door open might make occupants get in serious trouble in securing visibility.

Key words : Fire, Apartment house, Real scale fire test, Smoke, Toxic gas

요 지

국내의 주거지역화재사고는 2011년도에만 177명 사망자를 발생시켜 큰 사회적 위험 요인으로 인식되고 있다. 본 연구에서는 공동주택에서 화재시 인명피해의 주 원인이 되는 연기 및 유독가스에 대한 거동 특성을 파악하기 위한 실제 아파트를 대상으로 실규모 화재 재현 실험을 실시 하였다. 그 결과 질식사의 주범인 일산화탄소는 최대 7,600 ppm이 측정되었으며, 화재가 발생한 바로 위층에서도 최대 3,400 ppm이 측정되었다. 또한 현관문 개방시과 함께 급격하게 계단을 통한 연기 확산이 이루어져 재실자들의 가시도 확보에 큰 어려움을 줄 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 화재, 공동주택, 실규모 화재실험, 연기, 독성가스

1. 서 론

화재는 국가 7대 재해 중 교통사고 다음으로 그 발생빈도가 높아 전체 재해발생의 약 13%를 차지하고 있으며, 그림 1에서 보는 바와 같이 국내 화재발생 건수와 피해는 계속적인 증가 추세를 나타내고 있다. 소방방재청의 화재 통계에 따르면 2011년의 국내 화재건수는 43,875건에 이르며, 인명피해 1,862명(사망 263명, 부상 1599명), 재산 피해액 2,565억에 달하는 것으로 보고 되었다. 이중 주거지역의 화재건수는 10,645건으로 전체의 24.3%를 차지하며 177명의 사망과 706명의 부상자를 발생시켜 매우 큰 사회적 피해를 야기하고 있다(소방방재청, 2011). 특히 성남시 다가구 주택 화재사고의 경우처럼 공동주택에서 화재가 발생할 경우 직접적인 화염의 확산보다 연기의 확산에 의한 유독가스 질식사가 매우 큰 위해요소로 작용하고 있다. 본 연구에서는 비주거지역에

비하여 발생건수는 작으나 더 큰 인명피해를 발생시키는 주거지역의 화재사고 특성에 기인하여, 화재시 발생하는 연기 및 유독가스의 거동 특성을 파악하기 위한 실험화재실험을 실시하여 이를 분석하였다.

2. 공동주택의 화재성장 특성

일반적인 공동주택의 화재 진행단계는 그림 2에 보이는 바와 같이 “화재초기(발화)→성장기→플래쉬오버→최성기→쇠퇴기”의 단계로 구분된다. 이중 플래쉬오버(Flash over)는 다양한 형태로 정의되고 있지만, 공간 내의 모든 가연성 물질이 동시적 발화를 일으키는 구획실 내의 온도라고 정의하는데 기초를 두고 있다. 이러한 현상이 발생하는 것과 관련된 정확한 온도는 없지만, 일반적으로 483°C~649°C(900°F~1200°F)까지 범위가 폭 넓게 사용된다. 이러한 범위는 열분해

*교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 수석연구원(Tel: +82-31-369-0516, Fax: +82-31-369-0540, E-mail:yhyoo@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Senior Researcher, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

**삼성화재해상보험 방재연구소 수석연구원

Member, Senior Professional, Samsung Loss Control Center

***서울시립대학교 대학원 재난과학과 박사과정

Ph.D Candidate, University of Seoul Graduate School

Fig. 1. The status of fire damage per year

Fig. 2. Building fire in progress

작용에 의해 발산되는 가장 보편적인 가스 중의 하나인 일산화탄소(CO)의 발화온도(609°C 또는 1,128°F)와 상관관계를 가진다. 연소하는 구획실 내에서 플래쉬오버가 발생하기 직전에는 몇 가지 현상들이 발생하는 것으로 알려져 있다. 즉 온도가 급격히 상승하고, 추가적인 가연물들이 화재확산 현상과 연관되어 구획실 내의 가연물들이 열분해현상으로 인해 가연성 가스를 발산하게 된다. 플래쉬오버가 발생하면 구획실 내의 가연성 물질들과 열분해현상에 의해 발산된 가스들은 발화되고 이로 인해 방 전체는 화염에 휩싸이게 된다(National Emergency Management Agency, 2008).

따라서 플래쉬오버 이전의 화재성장기를 최대한 지연시킴으로써 화재가 최성기로 발전하는 것을 억제하고, 연소로 인한 화재 확산 피해를 최소화하도록 해야 한다. 아울러, 연기유동을 제어하기 위한 제세연 설비를 가동함과 동시에 재실자의 피난 계획을 수립하여 원활한 피난을 유도하는 화재대응 기술 개발이 필요하며, 이는 화재로부터 소중한 인명과 재산을 보호하기 위한 핵심기술로 인식되고 있다.

3. 아파트 실물화재실험

실물화재실험은 인천 재개발 예정 지역에서 실시하였으며,

주) ■ : TC Tree ● : Gas 📹 : CCTV

Fig. 3. Measuring instrument in fire room

계단식으로 된 철근 콘크리트조 5층 아파트이다. 실물화재실험에 이용된 계측 장비의 설치도면은 그림 3에 도시하였다. 화재실의 온도 상승을 측정하기 위하여 큰방, 거실, 작은방에 K-타입 열전대 트리(Thermocouple Tree)를 설치하였으며, 각각 하부에서부터 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m, 천정 높이에 열전대를 설치하여 계측 하였다. 또한 그림 4와 표 1에 제시된 바와 같이 각 구획실에는 침대, 옷장등 총 33종에 약 1,200 kg의 가연물을 배치하였다.

화재시 발생하는 연소가스 분석을 위하여 화재실 및 옆방

Table 1. Combustibles list in Fire Room

구획명	수납물 명	가연물 중량 (kg)	면적(m ²)
공동	바닥 장판		
	천장 합판		
큰방	침대 (queen size)	33.4	11.69
	서랍장 (목재)	15.0	
	화장대 (목재)	30.2	
	장롱 (목재, 8자)	130.2	
	이불	22.1	
	의류	32.3	
	종이류	43.5	
	TV	25.2	
	소파(1인용)	13.4	
	에어컨(스탠드형)	62.0	
	기타	6.3	
	소계 (10종)	413.6	
작은방	침대	25.0	7.59
	옷장 (목재)	43.4	
	책장 (목재)×3	95.4	
	책	43.7	
	이불류	5.6	
	의류	9.8	
	플라스틱류	6.4	
	기타	14.7	
	소계 (7종)	244.0	
발코니	옷	5.5	2.88
	세탁기	47.0	
	소계(2종)	52.5	

Table 1. Continued

구획명	수납물 명	가연물 중량 (kg)	면적(m ²)
거실	거실장식장	30.0	6.54
	TV	30.2	
	TV 장식장	12.0	
	소파(3인용)	40.3	
	좌탁	8.0	
	책	180.0	
	플라스틱류	10.0	
	기타	52.0	
	소계(7종)	362.5	
현관	수납함(플라스틱)	2.3	6.98
	신발장 (목재)	44.0	
	기타	5.3	
	소계(2종)	51.6	
주방	싱크대	28.0	6.34
	찬장	27.0	
	냉장고	60.1	
	밥통	5.0	
	플라스틱류	15.0	
	기타	23.0	
	소계(5종)	158.1	
화장실	-	-	3.17
	소계(0종)	-	
다용도실	-	-	3.85
	소계(0종)	-	
합 계 (33종)		1282.3	50.89

a. living Room

b. Bed Room

Fig. 4. Photo of fire room

에 연소가스 포집 프루브를 설치하였으며, 연소 분석에는 가스 분석기(servomax)를 이용하였다. 포집된 연소가스는 냉각기 및 필터링 시스템을 거쳐 가스 분석기로 인입되어 산소 농도 저감율, 일산화탄소 및 이산화탄소 농도등을 측정한다(유용호 외, 2008). 화재시 화염 확대 및 연기 하강등 영상 분석을 위하여 화재실 및 계단 4개소에 폐쇄회로 TV를 설치하여 연기의 확산을 분석하였다.

4. 실험결과

화재시나리오는 그림 5와 같이 침실의 침대옆 쓰레기통에서 발생되며, 5분 경과후 현관문을 개방되는 것으로 가정하

공동주택 화재시 화염 및 연기 확산 분석을 위한 실험적 연구

Fig. 5. Photo of ignition

였다. 개구부 조건은 화재실과 상부층 모두 닫혀 있는 조건에서 실험이 수행되었다.

4.1 화재실 내부 온도 결과

그림 6과 같이 화재는 발화후 약 3분이 경과되어 100°C가 넘어 화재가 급속하게 성장하였으며, 현관문의 개방과 함께 거실과 주방으로 빠른 속도로 화재가 성장하여 갔으며 실내 온도는 최고 945°C를 나타내었다. 특히 화재실의 경우 약 5분 경과되면 인간의 생존한계시간이 5분이하인 온도 143°C이상에 이르게 되어(황준호외, 2006) 재실자에게 치명적인 피해

Fig. 6. Temperature results in bed room

Fig. 7. Temperature results in living room

Fig. 8. Temperature results in second room

를 줄 수 있음이 확인 되었다. 성장하던 화재는 8분여가 지난 후 화재실내 산소의 감소로 쇠퇴하는 경향을 보이며 이후 창문의 소실로 인해 공급되는 공기에 의해 2차 성장기에 이르게 된다.

또한 그림 7과 같이 화재실 내부 온도의 상승과 감소 양상은 침실과 인접해 있는 거실에서 유사한 양상을 보이며 지속적으로 화재가 성장과 쇠퇴를 반복하며, 구조상 화재실에서 가장 멀리 떨어져 있는 작은방의 경우 그림 8에 나타난 바와 같이 거실을 거쳐 화재가 확산될 때까지의 지연으로 5분여가 지나고 난후부터 화재 전파가 일어났다.

4.2 화재실과 상부층의 유독가스 측정 결과

화재실의 산소 농도와 발생된 유독가스 측정결과는 그림 9와 그림 10과 같다. 화재실에서의 산소농도는 화재발생 후 약 6분이 경과한 후 15.36%까지 감소하는 것으로 계측되었다. 이는 인간의 호흡이 빨라지고 맥박수가 증가하여 어지러움증을 유발하여 피난행동에 위험을 줄 수 있다.

질식사의 위험이 있는 일산화탄소의 경우 화재실에서 약 6분 경과 후 7,600 ppm이 측정되었다. 이 또한 1~2분안에 어지러움증을 유발하고 15~30분 이상이면 사망에 이를 수 있는 매우 위험한 상황에 이를 수 있다(Richard et al., 1997).

Fig. 9. Results of CO concentration

Fig. 10. Results of oxygen concentration

특히 화재실 위층의 안방에서도 창문이 닫혀 있는 조건임에도 3,000 ppm 이상의 일산화탄소가 측정되어 다른 공간의 재실자들도 질식사 위험에 노출될 수 있을 것으로 평가되었다. 이는 창문이나 현관문을 통한 연기와 유독가스의 유입이 아닌 층간사이의 설비 관통부등을 통한 유입현상으로 판단되며, 이를 방지하기 위한 적극적인 대처가 필요하다. 현행 법규 “건축물의 피난·방화구조등의 기준에 관한 규칙” 제14조 2항 2호에서는 급수관, 배전반 그 밖의 관이 방화구획으로 되어 있는 부분을 관통하는 경우 그로 인하여 생기는 틈을 내화충전물로 메울 것을 권고하고 있다. 그러나 이는 2012년 1월에 개정된 내용으로 소급적용이 되지 않아 공동주택 화재의 취약점으로 많은 피해가 우려된다.

4.3 계단실의 연기 측정 결과

일반적으로 연기 밀도를 측정할 경우 아래의 광밀도(Optical Density, OD)를 이용한다.

$$OD = I_o/I \quad (1)$$

여기서, I_o 는 광원의 세기이며, I 는 수광부 광원의 세기이다.

화재가 발생한 2층 앞 계단과 4층 계단에 광밀도를 측정하기 위한 발광장치와 수광부를 측정하여 빛의 강도를 측정하여 백분율로 나타낸 결과과 그림 11에 나타나고 있다. 2층 계단의 경우 화재실의 현관문이 열리는 5분여가 되면 연기밀도는 50%이하로 급격하게 하강하여 6분이 되면 10% 이하로 감소하게 된다.

4층 계단의 경우 5분 30초까지는 연기밀도 80% 이상을 보이나 현관문 개폐후 급격하게 감소하여 7분 이후에는 2층과 유사하게 10% 이하로 급감하게 된다.

또한, 화재시 피난로 역할을 담당해야할 계단실의 연기확산을 폐쇄회로 TV를 이용하여 분석하였다. 표 2에 보이는 바와 같이 화재실의 문이 개방됨과 동시에 부력에 의한 연돌효과로 매우 빠르게 상층부로 연기가 유입되며, 1분여가 지난 후에는 화면의 영상이 전혀 보이지 않을 정도로 가시도가 현저히 감소함으로써 피난활동에 큰 지장을 초래할 것으로 평가되었다.

Table 2. Picture of stairway(CCTV)

시간	2층계단	3층계단	4층계단	5층계단
5분 (현관개방)				
5분				
5분 30초				
6분				

Fig. 11. Results of smoke(OD)

4. 결 론

본 실험에서는 화재시 인명피해가 우려되는 공동주택에서의 실물 화재실험 결과를 분석하였으며 이를 정리하면 다음과 같다.

- 화재실에서의 화재는 발화후 약 3분이 경과되어 100°C가 넘어 급속하게 성장하였으며, 약 5분 경과되면 인간의 생존 한계시간이 5분이하인 온도 143°C 이상에 이른다.

공동주택 화재시 화염 및 연기 확산 분석을 위한 실험적 연구

- 화재실에서의 산소농도는 화재발생 후 약 6분이 경과한 후 15.36%까지 감소하며, 일산화탄소의 경우 7,600 ppm이 측정되었다.

- 또한 화재시 질식사의 주원인이 되는 일산화탄소는 화재실 뿐 아니라 공간이 다른 상층부의 재실자에게도 매우 큰 위험요소로 작용하는 것으로 평가 되었다.

- 계단을 통한 연기의 전파는 불과 1분 이내에 빠르게 확산이 이루어지므로 재실자의 피난로 확보를 위해서 계단실의 방화문의 역할이 매우 중요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 “초고층빌딩 시공 기술 연구단 · 화재안전 기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Hwang, J.H., Yoon, C.G., Kim, U.H., and Lee, S.C. (2006) A User's Guide for FAST : Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport, DongHwaTechnology Publishing, pp. 290.
- National Emergency Management Agency (2008) An Experiment Study of the Housing Real Scale Fire Test, Final Report.

National Emergency Management Agency (2011) Fire Statistical Yearbook

Richard L.P. Custer, Brian J. Meacham (1997) Introduction to Performance Based Fire Safety, *NFPA*, pp. 177-178.

Yoo, Y.H., Kim, H.Y., and Shin, H.J. (2008) The Study of Development and Calibration for the Real Scale Fire Test Facility, *Jour-*

nal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 37-44.

© Received February 26, 2013

© Revised March 6, 2013

© Accepted March 19, 2013