

공동주택 실물화재 실험

김명배 · 한용식 · 최병일 · 도규형 · 이유환
한국기계연구원 에너지플랜트연구본부

A Full-scale Fire Test of an Apartment House

Myung Bae Kim, Yong Shik Han, Byung Il Choi, Kyu Hyung Do, Yu Whan Lee
Department of Energy Plant Research Division, KIMM

요 약

국내 저층 공동주택 화재시의 화재 전파 경로와 상층으로의 화재 전파를 살펴보기 위하여 4층 공동 주택을 대상으로 실물화재 실험을 수행하였다. 화재는 3층 주택에서 발화하는 것으로 하였고, 초기 화원은 주방에서 과열된 식용유에 발화되어 발생하는 것으로 하였다. 주택 내부 가연물은 일반 가정의 필수 가연물을 모두 포함 하였다. 내부 화재 성상을 확인 하기 위하여 가시화, 주요부의 온도측정, 산소농도 측정을 수행하였다. 실험 결과 초기 화원의 발화 시간, 화재 층 내부 각 구획으로의 전파시간, 전역화재 발생시간을 파악하였으며, 상층으로의 연소확대 경로를 파악하였다.

key words : Apartment house, Full-scale fire test, Fire spread, Flash over

1. 서 론

성장위주의 경제·산업정책에 따른 안전의식 미약, 사회구조 개편에 따른 소방대상물의 급격한 증가, 생활환경 변화와 에너지 사용 증가 등 화재유발인자의 다양화로 인해, 1998년 연간화재 3만 건 시대에 접어들었으며 2006년 31,778건, 2007년 47,882건으로 증가하였다. 최근 10년간 화재발생건수는 연평균 6.8%로 꾸준히 증가하는 추세에 있으며 인명피해 및 재산피해는 각각 14.3%, 170%로 크게 증가하였다 [1]. 또한 매년 주거지역에서 발생하는 화재가 평균적으로 전체 화재 건수의 23~24%를 차지하며, 2008년 10월까지 집계된 40,960건의 발생화재 중 주택·아파트 등의 주거지역에서 발생한 화재가 9,968(24.3%)건으로 집계되고 있어 이로 인한 인적·물적 피해가 증가하고 있는 실정이다 [2]. 따라서 주택의 실물화재 실험 등을 통하여 화재로 인한 위험성 분석과 효과적인 소방안전 대책을 강구하여 주택화재로 인한 피해와 주택화재 발생률을 획기적으로 저감할 필요가 있다.

외국에서의 실물화재실험은 건축공법 및 재료개발에 따른 연소성상의 변화를 확인하기 위한 기술개발의 측면과 인간의 생존한계 파악을 통한 공간구성의 검토, 주변 건물에 대한 영향 및 모델링을 통한 예측기법의 정확성 제고 등을 위하여 시행되어왔다. 그러나 외

국의 실물화재 실험결과는 문화의 차이에서 오는 거주생활 상황이나 서로 다른 건물구조 때문에 우리나라에 바로 적용하기에는 많은 어려움을 안고 있다. 국내에서는 5층 아파트를 대상으로 실물화재 실험 [3]이 수행된바 있으나, 소방설비가 제대로 갖추어지지 않은 4층 이하의 연립주택에 대한 실물화재 실험은 수행된 바가 없다.

따라서 본 연구는 국내의 거주상황을 대표하는 공동주택인 4층 이하의 연립주택을 대상으로 실물화재 실험을 실시하여 공간화재에서의 정확한 화재성상을 파악하고, 화재 예측프로그램 및 스프링클러 작동시간 예측 등에 필요한 자료들을 취득하고자 한다.

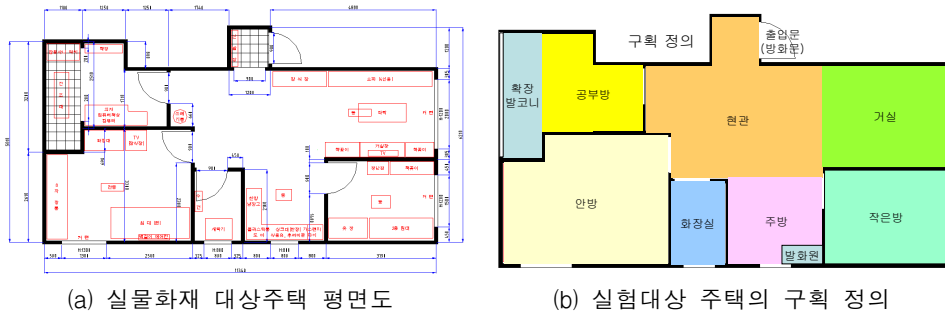
2. 실물화재 실험

내화건축물 화재의 경우 개구부의 형상, 크기, 위치, 가연물의 양과 질 배치, 화재 원의 종류에 있어서 특히 화재초기에 있어서 제반현상들이 차이가 있다. 따라서 실제 인명이 거주하는 공간을 정확히 모사하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 재개발을 위해 철거를 준비 중인 공동주택을 확보하여 실제 생활에 필요한 모든 생활용품을 구비한 상태에서 실물화재 실험을 수행하였다.

2.1 실험대상 주택



그림 1. 실물화재 실험 대상 주택



(a) 실물화재 대상주택 평면도

(b) 실험대상 주택의 구획 정의

그림 2. 실험대상 주택의 평면도 및 구획 정의

실험대상 건물은 경기도 성남시 중동3구역 재개발지구에 위치한 공동 주택으로 철근-콘크리트 구조의 4층 건물(반지하, 1층, 2층 3층, 4층)이며 그림 1과 같다. 실험 화재 실험은 주택의 3층에서 이루어졌다. 그림 2(a)와 그림 2(b)는 각각 실험대상 주택의 평면도와 구획의 정의를 나타내고 있다. 그림 2(a)에 나타난 실험대상 주택의 면적은 약 24평이며 천장높이는 2.3m이다. 실험대상 주택의 현관과 거실은 구획되어 있지 않으나, 온도측정의 편의를 위하여 개방된 큰 거실공간을 그림 2(b)와 같이 현관과 거실로 구분하였다. 이 정의는 이후 실험 결과의 분석에서 사용되었다.

2.2 실험 조건

표 2. 가연물 리스트

구획명	수납물 명	가연물중량
공동	바닥 장판	1.2 kg/m ²
	천장 합판	3.5 kg/m ²
거실	책상(목재)*2, 거실장식장, TV, TV장식장, 소파(4인용), 좌탁, 에어컨, 책, 플라스틱류, 의류 등(총22종)	460 kg
주방	싱크대, 찬장, 냉장고, 밥통, 전자레인지, 가스레인지 테이블(목재), 가스레인지, 플라스틱류, 식용유 등(총24종)	210.7 kg
현관	식탁(목재), 의자(목재), 쓰레기통(플라스틱), 수납함(플라스틱), 휴지류, 의류, 신발장(목재), 신발류 등(총13종)	120.7 kg
작은방	2층 침대, 옷장(목재), 책상(목재), 의자(목재), 책, 이불류, 의류, 플라스틱류 등(총19종)	208.6 kg
안방	침대(queen size), 서랍장(목재), 화장대(목재), 장롱(목재, 8자), 이불, 의류, 종이류, TV 등(총21종)	338.25 kg
공부방	책상, 책상, 의자(목재), 컴퓨터, 서랍장, 책, 의류 등(총12종)	188.8 kg
후면 발코니	의류, 나무, 고무류, 플라스틱류, 책, 종이류 등(총10종)	195.4 kg
화장실	세탁기, 플라스틱류, 수건류 등(총6종)	25.9 kg
합 계 (127종)		1748.35 kg

표 3. 개구부 조건

위치	명칭	치수	개구부 조건
건물 1층 출입구		1.4m*2.0m	0.7m*1.0m Open
화재시험 주택 (3층) 총 개구부 면적 실험시작: 1.44m ² 실험 후 6분 경과 : 3.24m ²	출입문	0.9m*2.0m	close, 화재시험 후 5분 55초 후 개방 (소방대 진입 상황 가정)
	거실창	2.0m*1.2m	양쪽 각 10cm 개방 개구 면적 = 0.1m*2*1.2m=0.24m ²
	작은방 창	1.5m*1.2m	양쪽 각 10cm 개방 개구 면적 = 0.1m*2*1.2m=0.24m ²
	주방 창	0.8m*0.4m	반절 개방 개구 면적 = 0.4m*0.4m = 0.16m ²
	화장실 창	0.8m*0.8m	양쪽 각 10cm 개방 개구 면적 = 0.1m*2*0.8m=0.16m ²
	안방 창	1.3m*1.2m	양쪽 각 10cm 개방 개구 면적 = 0.1m*2*1.2m=0.24m ²
	후면 발코니 창	3.4m*2.0m	양쪽 각 10cm 개방 개구 면적 = 0.1m*2*2.0m=0.4m ²
건물 옥상 출입구		0.9m*2.0m	open

가연물은 고정 가연물과 수납 가연물로 나누어진다. 고정 가연물은 건물에 부착된 가연물이며, 수납 가연물은 건물 거주자의 생활 형태에 따라 달라지는데, 국내의 화재하중을 조사·분석하여 그 결과를 토대로 표 2와 같은 가연물을 실내에 배치하였다. 실물화재 실험에서 화재가 빠른 시간 안에 전역화재(flash-over fire)로 전이하기 쉽도록 상대적으로 초기 화재 발달량이 큰 주방 실화를 대상으로 삼았다. 주방 좌측 하단의 가스레인지에서 대두유 800cc를 채운 직경 35cm의 프라이팬이 가열된 후 방치되고 이로부터 대두유가 발화하는 시나리오로 설정하였다. 건물에서 외부와 연결되는 출입문 및 창문 현황은 그림 2(a)에 나타나 있다. 내부 출입문(안방 문 등)의 치수는 0.9m×2.0m 이며, 화재 전파를 고려하기 위하여 모든 문은 15도 open하였다. 또한 가연물 중 옷장과 장식장, 그리고 냉장고의 경우도 내부 출입문과 마찬가지로 15도 open하였다. 치수와 개구부 조건을 정리하면 표 3과 같다.

2.3 실험 장치

화재실인 3층의 경우, 상세한 화재 상황을 계측하기 위하여 각 공간별로 공기온도와 벽면온도, 창문 온도를 계측하였다. 또한 주요 화재실인 거실과 안방에서 유해가스 농도를 계측하였다. 화재실 상층인 4층의 경우, 후면 발코니를 통한 화재 전파 가능성을 보기 위하여 발코니 부근에 계측기를 설치하였다. 그림 3은 화재실 및 화재실 상층의 계측기 설치 현황을 나타내고 있다. 0.6mm K-type 열전대를 이용하여 각 공간의 중앙에 바닥으로부터 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m인 지점의 온도, 방화문으로 제작된 현관문의 표면온도 및 거실창과 후면 발코니 창의 내외부에 표면 온도를 측정하였다. 농도는 연속식 농도측정기를 사용하여 현관과 안방, 그리고 계단실에서의 산소, 이산화탄소, 일산화탄소 농도를 측정하였으며, 계단실에서의 연기에 의한 소방 활동 장애요인을 분석하기 위하여 계단실 각 부위에서의 온도와 방화문 앞쪽에서의 연기농도를 측정하였다. 농도 계측을 위한 Sampling probe는 사람의 호흡선인 1.5m 높이에 설치하였다. 화재실 내부의 압력을 측정하기 위하여 마이크로 마노미터를 현관 중앙에 설치하였다. 또한 내부 화재상황을 살펴보기 위하여 CCD 카메라를 현관 출입문에서 발화지점인 주방을 바라보도록 설치하였으며, 외부에서는 각 개구부의 화재상황을 살펴보기 위하여 카메라를 설치하여 화재상황을 녹화하였다.

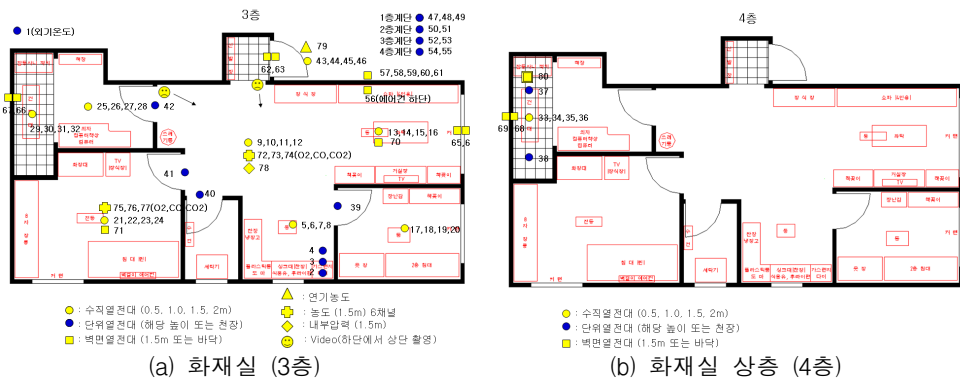


그림 3. 계측장비 설치도

3. 결과 및 토의

3.1 전체 화재 상황

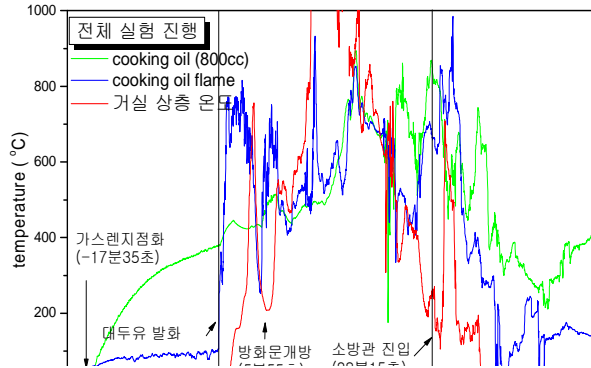


그림 4. 전체 화재상황 계측 결과

그림 4는 본 식물화재실험의 전체 과정을 보여주는 온도 그래프다. 화재는 -17분 35초에 가스레인을 점화하여 대두유 800cc가 들어있는 프라이팬을 가열하면서 시작되었다. 가스레인지 불꽃에 의해 대두유의 온도가 서서히 상승하여 시간 0초에 대두유가 자연발화되었다. 자연발화까지 걸린 시간은 17분 35초이고 이때의 대두유 온도는 약 380도 였다. 대두유가 발화하면서 가스레인지의 불꽃과 대두유 불꽃의 영향으로 화재는 급격히 성장한다. 자연발화 후 약 4분 경과 시점에서 주방 상층부 온도가 급격히 상승하다가 약 5분을 넘기면서 온도가 급격히 하강한다. 이는 화재가 커지면서 건물 내부의 산소를 급격히 소모하였기 때문이다. 자연발화 화재발생 5분 55초 후 소방관 도착상황을 가정하여 방화문을 개방하였다. 방화문 개방 후 산소의 유입에 의하여 건물 내부의 온도는 다시 급격히 상승한다. 화재 발생 28분 15초 시점에 내부 온도가 하강하기 시작하여, 더 이상의 화재 실험은 의미가 없다는 판단아래 소방관을 투입하여 강제 진화하였다.

3.2 화재공간 주요 구역 상층부 온도 분포

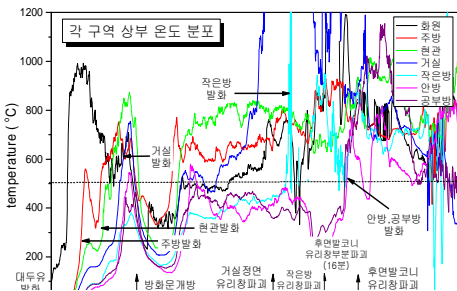


그림 5. 각 구역 상층부 온도 분포

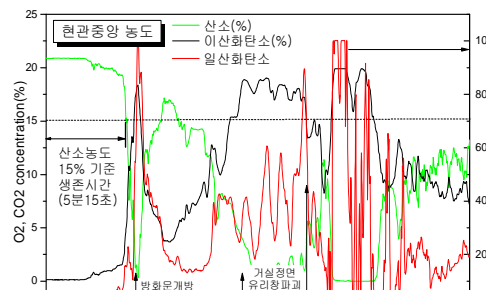


그림 6. 현관 중앙 농도 분포(높이: 1.5m)

자연발화 후 약 2분 경과 시점에서 주방에서 시작하여 현관, 거실 상층부의 온도가 급격히 상승한다. 이는 2분 동안은 주로 처음 발화원인 대두유에 의해 내부 온도가 천천히 상승하다가, 2분 후부터 발화원 상층의 후드와 싱크대 찬장으로 연소가 진행되었기 때문으로 보인다. 본 실험 대상 주택은 천장이 합판으로 이루어져 있어 일단 한번 가연물에 발화되면 천장을 통하여 화재가 급격히 성장한 것으로 보인다. 화재는 약 5분 정도까지 급격히 성장하다가 성장이 멈추어 온도가 하강하기 시작한다. 이는 급격한 화재 성장에 따른 산소 소모 때문으로 이 결과는 현관에서 측정한 산소와 이산화탄소의 농도에 잘 나타나 있다(그림 6 참조). 화재 성장과 더불어 산소농도가 급격히 떨어지며, 방화문이 개방되기 전까지 산소농도는 5% 미만으로 떨어진다. 산소 부족에 의해 연소가 중지된 후 방화문 개방과 함께 산소농도는 다시 증가하면서 화재가 재 성장한다. 상층부의 온도를 기준으로 화재 전과 상황을 살펴보면 화재는 주방, 현관, 거실, 작은방, 안방 공부방 순으로 전파되었음을 알 수 있다. 화재가 각 구역으로 전파되어 성장하면서 산소농도는 급격한 변화를 가진다. 화재가 성장하면서 산소가 부족하여 화재성장이 멈추다가, 각 구역의 창문이 파괴되면서 유입된 산소에 의해 재 성장하는 모습을 보인다.

3.3 유해가스 농도

표 4. 주택화재 시 유독가스에 의한 사망 시간

화재발생 후 경과시간 (min)	일산화탄소 농도 (ppm)	산소농도 (%)	이산화탄소 농도 (%)	Incapacitation time (min)
1	1.15	20.87	0.136	193.17
2	52	20.87	0.136	144.67
3	215	20.5	0.546	71.798
4	434	19.99	0.936	40.508
5	588	19.32	1.522	28.228
6	10000	0.3	18.32	0.0301
12	3884	7.5	13.62	0.3905
25	1972	10.91	9.342	1.757

그림 6은 현관 중앙에서의 유해가스 농도 분포 (높이 1.5m)를 보여 준다. 화재 시 발생하는 유해가스는 대표적으로 일산화탄소와 HCN 등이 있다. 그러나 HCN의 경우 그 측정이 어려워 본 실험에서는 측정하지 않았다. 화재가 성장하면서 산소 농도는 급격히 감소하게 되고 점점 방안의 산소가 소모되면서 화재성장이 느려진다. 산소농도 측정 결과에서 산소농도는 1% 정도까지 떨어졌으며, 방화문 개방과 함께 다시 증가하는 모습을 보인다. 이산화탄소의 농도는 산소 농도와 반대의 경향을 보인다. 일산화탄소는 일반적으로 산소가 부족한 상태에서의 불완전 연소에 의해 주로 발생되기 때문에 산소 농도와 반대의 경향을 보인다. 유해가스 농도 측정 결과를 토대로 화재 상황에서 인명이 의식 불명에 이르는 시간(Incapacitation time)을 조사하면 표 4와 같다. 이 결과는 HCN 농도가 0이라는 가정과 사람의 운동 상태의 함수인 사람의 분당 호흡량, RMV (l/min)는 약한 노동에 종사하는 경우의 값인 25 l/min (light working) 값을 사용한 결과이다 [4]. 온도에 의한 영향

과, HCN의 영향을 제외하면 화재발생 초기인 5분 정도까지는 약 28분 생존이 가능하다. 그러나 화재가 급격히 성장한 후(6분, 12분)에는 생존시간이 1분에도 미치지 못한다. 산소 농도가 10% 이상을 보이는 화재의 후기에 생존 가능 시간은 약 1.8분 정도이다. 위의 결과로부터 주택 화재 시 화재가 급격히 성장하기 시작하는 시간 이후에는 비록 열기로부터 안전한 곳에 피난하여 있더라도 유독 가스에 의해 인명 생존 가능성이 희박해진다는 것을 보여준다.

3.4 내부압력

그림 7은 현관 중앙에서의 내부 압력 분포를 나타내고 있다. 화재 발생 시 화재 발생 구역 내부 압력은 약 0~15 pa 사이를 진동한다. 방화문 개방 후 압력 결과가 보이지 않는 데, 이는 계측기가 음의 압력을 계측하지 못하였기 때문이다. 그러나 화재가 급격히 성장한 5분에서도 내부 압력이 높지 않고 방화문이 개방되어 외부와 압력 평형이 이루어진 상태를 감안하면, 방화문 개방 후에도 내부 압력이 외부 압력과 15 pa 이하의 차이를 보였다고 판단된다. 즉, 주택화재에서 외부와의 압력연결 통로가 충분히 존재하면 화재로 인한 내부압력의 변동은 무시할만하다는 것을 보여준다. 일반적으로 방연구역의 내부압력이 40 pa 임에 비추어 보면 화재 시 방연구역의 기능이 정상적으로 작동된다면 화재구역으로부터의 연기 유입을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

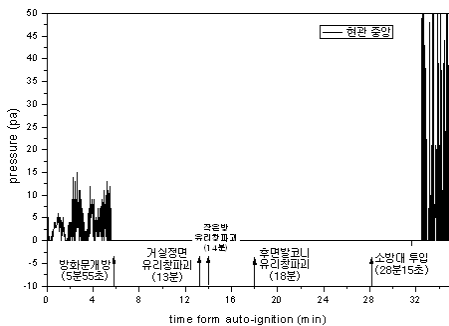


그림 7. 현관 중앙 내부 압력 분포

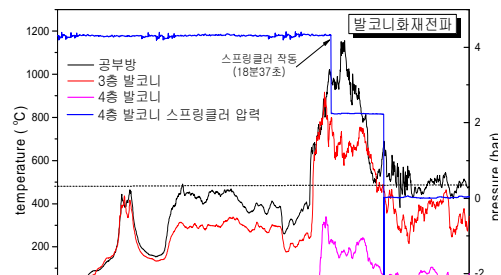


그림 8. 확장 발코니 온도분포

3.5 상층으로의 연소확대

그림 8은 화재층(3층), 확장 발코니의 온도와 화재 직상층(4층) 및 확장 발코니의 상부 온도 분포를 나타내고 있다. 화재층(3층)에서 후면 발코니창이 파손되기 전까지 4층 발코니의 온도는 거의 변화가 없다. 후면 발코니가 일부 파손되면서(16분) 4층 발코니의 온도가 서서히 상승한다. 화재층 발코니 창이 완전히 파괴되면서 화재층 발코니의 화재가 급격히 성장하게 되고 바깥으로 화염이 분출한다. 분출된 화염은 상층(4층) 발코니 상단의 온도를 상승시키게 된다. 본 실험에서 4층 발코니의 온도는 최대 350°C까지 상승하였다. 이 온도는 화염이 직접 닿지 않았을 때의 온도로 상층 발코니에 가연물이 존재하고 화염이 일부라도 가연물에 직접 닿는다면 화재가 충분히 상층으로 전파될 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 4층 공동 주택을 대상으로 실물화재 실험을 통하여 화재시의 화재 전파 경로와 상층으로의 화재 전파를 살펴보았다. Flash over은 구획별로 약간의 차이는 있으나 발화 후 약 12분경에 시작됨을 확인하였다. 또한 유해가스 농도분포 측정을 통하여 주택 화재시 화재가 급격히 성장하는 시간 이후에는 비록 열기로부터 안전한 곳에 피난하여 있더라도 유독가스에 의해 인명 생존 가능성이 희박해짐을 알 수 있었다. 마지막으로 주택화재시 상층부에 가연물이 존재하고 화염의 일부가 가연물에 직접 닿는다면, 상층으로 화재가 전파될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 소방방재청 연구용역사업인 “주택 실물화재 실험 위탁사업 연구” 결과의 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

1. 소방방재청, 2009, “2007년도 화재통계 연감”
2. 소방방재청, 2008, “2008년 1월 ~ 10월 전국화재발생현황분석”
3. 과학기술부, 1998, “공공건물 소화설비의 성능평가 기술 개발” 1단계 최종보고서, 한국기계연구원.
4. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Ed. Section 2 Chapter 8, NFPA, 1995.