

## 주거용 건축물의 화염전파 현상에 대한 수치해석적 검토 A Numerical Analysis for Fire Spread Mechanism of Residential Building Fire

안찬솔<sup>†</sup> · 김흥열 · 유용호 · 김형준

Chan-Sol Ahn<sup>†</sup> · Heung-Youl Kim · Yong-Ho You · Hyung-Jun Kim

한국건설기술연구원

(2011. 10. 21. 접수/2012. 1. 13. 수정/2012. 2. 10. 채택)

### 요 약

본 연구는 주거용 건축물의 열역학적 수치해석모델을 검토하는데 목적이 있다. 화재하중과 화재강도는 성능설계의 사용이 증가함에 따라 건축물 화재안전 설계에 중요한 요소로 대두되고 있으며, 컴퓨터 성능의 발전으로 수치해석을 통한 예측이 가능해 지고 있다. 주거 가연물의 연소특성을 예측하기 위해 각 가연물의 수치해석용 모델을 설계하였다. 해석된 결과를 검증하기 위해 수치해석의 결과를 실물 화재실험의 결과와 비교하였다. 수치해석을 위해 FDS를 사용하였으며, 난류해석을 위해 LES모델이 적용하였다. 검증결과 화염전파 현상 및 온도곡선은 실험결과와 정성적으로 잘 일치함을 확인하였다.

### ABSTRACT

This study is intended to present a computational thermal model for a residential building. As the Performance Based Design is more popular, fire-intensity and fire-load have turned out to be very important factors for building design and can be predicted through some computational work. To predict and estimate the fire properties of a residential fire, we made some numerical models of combustibles and residential building. In a bid to validate the estimate values, computational analysis results from numerical models were compared with real fire tests. For computational analysis, the Fire Dynamics Simulator (FDS) was used with Large Eddy Simulation (LES) model for turbulence. Consequently, fire-intensity was well predicted and flash-over of rooms were successfully estimated.

**Key words :** Residential building, Real scale fire test, Numerical modeling, Fluid dynamics simulator

## 1. 서 론

성능위주의 설계(PBD: Performance Based Design)가 일반화 되면서 건축물 설계에 필요한 정보를 얻기 위해 건축물 화재의 수치해석이 매우 중요한 부분으로 자리를 잡아가고 있다. 화재의 성장과 연기의 확산 현상을 예측하여 재실자의 안전한 피난을 유도할 수 있으며, 화염에서 발생하는 발열량과 복사열량 등을 분석하여 구조 부재가 화재 열에 의해 받게 되는 손상의 정도를 예측할 수도 있다. 또한 화재 시 발생하는 유독가스의 양을 계산함으로써, 재실자가 유독가스에 노출되는 정도를 예측할 수 있으며, 실내 마감재료의 안

전한 선정에 도움을 줄 수도 있다. 그리고 화재 공간의 유동현상을 분석하여 제연설비 및 방재시설의 적절한 위치와 성능을 선정하는데 유용한 정보를 제공하는 것도 가능하다.

현재 수치해석을 통해 화재현상을 예측하는 방법은 실물 화재실험을 대신할 만큼 정밀하거나 간편하지 못한 것이 사실이다. 그러나 많은 연구들에 의해 효과적인 기법이 제안되고 있으며 다양한 사례의 실물 화재 실험과 비교 검증을 통해 수치해석의 신뢰성이 증가하고 있다.

최근에는 컴퓨팅 성능의 개선으로 대형 건축물에서 발생한 화재현상에 대한 수치해석적 연구가 많이 발표되고 있다. 대표적인 예로 LaMalva와 Barnett<sup>1)</sup>가 연구한 World Trade Center 5 building의 붕괴에 대한 수치

<sup>†</sup>E-mail: chansole@kict.re.kr

해석적 연구가 있으며, Bystrom 등<sup>2)</sup>에 의해 대형 건축 모형에서 발생한 화재현상을 수치해석으로 분석한 사례도 있다. 이 밖에 대형 건축물의 실물 사이즈의 수치해석을 통해 연기의 거동 및 재실자의 피난시간 등을 검증하는 연구들<sup>3-5)</sup>이 활발히 수행되고 있지만 이와 같이 실물크기의 화재현상을 수치해석한 연구들에서는 내부 가연물의 화재하중을 미리 계산하여 이에 상응하는 단일연료(등유 또는 나무)를 연소한 실험 및 수치해석이 수행되었기 때문에 화재발생에 의한 구조적·설비적 영향성을 분석하기에는 적합하나 건축물 내부에서 발생하는 화염의 전파현상을 분석하는데는 한계가 있어 성능설계시 필요한 건축물의 잠재된 화재 위험성을 예측하는 데에는 한계가 있었다. 건축물 내부에 들여놓은 가구 및 생활용품들에 대해 형상 및 물리적, 화학적인 화재특성을 모델링하고, 특정 위치에서 화재가 발생하였을 경우 화염이 어떤 경로로 전파되며 어떤 화재특성을 나타내는지 분석한 연구는 아직 미비한 수준에 있다.

이에 대해 본 연구에서는 건축물 내부에 적재된 가연물에 의해 건축물 화재의 특성이 정성적으로 어떻게 나타나며 화재가 진행되는 과정을 분석함으로써 성능설계에 필요한 건축물의 화재위험성 및 기타 정보를 얻기 위한 방법을 제시하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 화재 시 발생하는 유독가스의 종류 및 농도에 대한 분석 부분은 생략하였으며, 온도와 열방출율에 대한 정량적인 정확성을 논하는 부분도 생략하였다.

연구를 위해 유용호, 권오상, 김홍열<sup>6,7)</sup>에 의해 연구된바 있는 공동주택의 단위공간 실물화재실험과 공동주택의 화재안전성 연구의 내용을 참조하였으며, 선행연구<sup>8)</sup>로 주거공간의 단위가연물에 대한 모델링을 수행하여 그 결과를 본 연구에서 활용하였다.

## 2. 주거용 건축물 수치해석 모델링

### 2.1 주거용 건물의 화재 수치해석 모델

화염확산의 수치해석을 위해 사용한 Fire Dynamics Simulator(FDS)<sup>9)</sup>는 미국 NIST의 BFRL그룹에서 개발한 공개용 프로그램으로써 3차원 Field Model의 대표적인 화재해석 소프트웨어이다. 화재에 의해 유도된 유동현상, 유체 및 고체 내부의 열전달현상, 가연물의 연소현상을 해석하는데 주로 사용된다. FDS는 유체역학적 관성모델로 저속의 Navier-Stokes 방정식을 사용하고 난류해석을 위하여 Large Eddy simulation(LES)을 사용하며, 연소모델로 혼합분율 연소모델을 사용하고 있다. 또한 화재의 주요 열전달 현상인 복사 열전달을

해석하기 위하여 비분산 회색가스 복사전달 모델을 사용하고 있다.

이번 연구에서 수치해석 모델링은 실제의 건물과 동일하게 4개의 층으로 구성되었으며, 화재가 발생한 3층에는 거실, 부엌, 큰방, 작은방, 공부방, 화장실, 계단실, 발코니가 구성되었으며, 총 면적은 약 80 m<sup>2</sup>이다. Figure 1에 구획별 이름을 표시하였으며 Table 1에 구획별 개구부의 크기와 적재된 화재하중을 표시하였다.

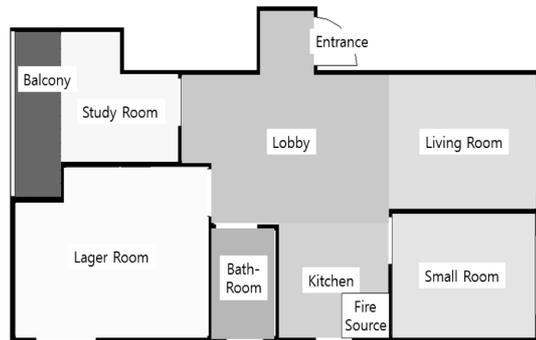


Figure 1. View of fire test.

Table 1. Opening Size and Fire Loads

Space	Opening Size	Fire Load
Kitchen	0.32 m <sup>2</sup>	210.7 kg
Lobby	1.8 m <sup>2</sup>	123.0 kg
Living Room	2.4 m <sup>2</sup>	460.0 kg
Small Room	1.8 m <sup>2</sup>	208.6 kg
Study Room	5.4 m <sup>2</sup>	188.8 kg
Large Room	1.6 m <sup>2</sup>	338.2 kg

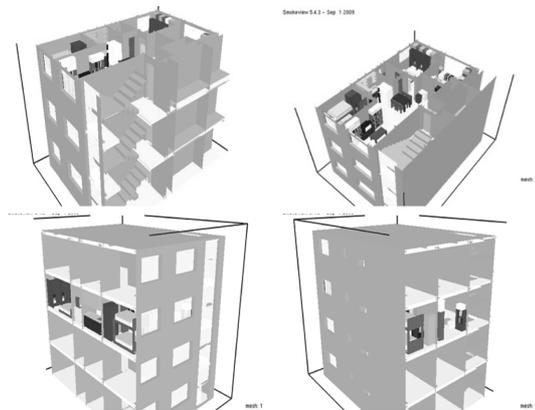


Figure 2. Model sections of building.

**Table 2.** Combustibles for Each Area

구획	수납물	추가연물성	중량(kg)
공통	바닥 장판	플라스틱	1.2/m <sup>2</sup>
공통	천장 합판	나무	3.5/m <sup>2</sup>
거실	책장*2	나무	63.6
	거실장식장	나무	30.0
	TV	플라스틱	30.2
	TV 장식장	나무	12.0
	소파(4인용)	우레탄폼	53.7
	좌탁	나무	8.0
	에어컨	플라스틱	8.5
	책	종이	180.0
	플라스틱류	플라스틱	10.0
	의류	나일론	12.0
	기타	플라스틱	52.0
소계(22종)			460.0
주방	싱크대	나무	28.0
	찬장	나무	27.0
	냉장고	플라스틱	60.1
	밥통	플라스틱	5.0
	전자레인지	플라스틱	7.0
	테이블	나무	30.0
	가스레인지	플라스틱	12.0
	플라스틱류	플라스틱	15.0
	식용유	등유	3.6
	기타	플라스틱	23.0
소계(22종)			210.7
후면 발코니	옷	나일론	5.5
	나무	나무	4.7
	고무류	플라스틱	10.7
	플라스틱류	플라스틱	11.5
	책	종이	88.0
	종이류	종이	75.0
소계(10종)			195.4
안방	침대(퀵)	우레탄폼	33.4
	서랍장	나무	15.0
	화장대	나무	30.2
	장롱(8자)	나무	130.2
	이불	나일론	22.1
	의류	나일론	32.3
	종이류	종이	43.5
	TV	플라스틱	25.2
	기타	플라스틱	6.3
	소계(21종)		

또한 실물 화재실험과 동일한 위치에서 온도를 측정하였으며 발화의 위치는 부엌으로 설정하였다.

계산영역의 총 격자계는 272 × 208 × 224로 구성된 50 mm 간격의 uniform-rectangle 격자계를 사용하였다.

**Table 2.** Continued

구획	수납물	추가연물성	중량(kg)
공부방	책장	나무	31.8
	책상	나무	30.0
	의자	플라스틱	5.0
	컴퓨터	플라스틱	6.1
	서랍장	나무	15.0
	책	종이	90.0
	의류	나일론	6.6
	기타	플라스틱	4.3
	소계(12종)		
작은방	2층 침대	나무	50.0
	옷장	나무	43.4
	책상	나무	30.0
	의자	플라스틱	5.0
	책	종이	43.7
	이불류	나일론	5.6
	의류	아닐론	9.8
	플라스틱류	플라스틱	6.4
기타	플라스틱	14.7	
소계(19종)			208.6
현관	식탁	나무	27.0
	의자	나무	24.0
	쓰레기통	플라스틱	2.2
	수납함	플라스틱	2.3
	휴지류	종이	3.6
	의류	나일론	3.6
	기타	플라스틱	5.3
	신발장	나무	44.0
	신발류	나일론	11.0
	소계(13종)		
화장실	세탁기	플라스틱	20.0
	플라스틱류	플라스틱	1.4
	수건류	나일론	1.3
	기타	플라스틱	3.2
소계(6종)			25.9
합 계(127종)			1750.6

Figure 2를 통해 계단실과 실내가 연결되는 구조를 볼 수 있으며 모델의 측면단면 및 전면 단면을 통해 건물의 전체 구성을 확인할 수 있다. 또한 실내에 적재된 가연물의 모델링은 실제의 형상을 최대한 반영하여 외형을 디자인 하였으며 선행연구<sup>8)</sup>에서 사용된 가연물성 값을 적용하여 연소특성을 부여하였다. Table 2를 통해 각 공간마다 배치된 가연물의 종류와 특성을 확인할 수 있으며 Figure 3을 통해 배치된 모양을 확인할 수 있다.

수치해석은 64개 CPU를 병렬로 연결하여 연산하였

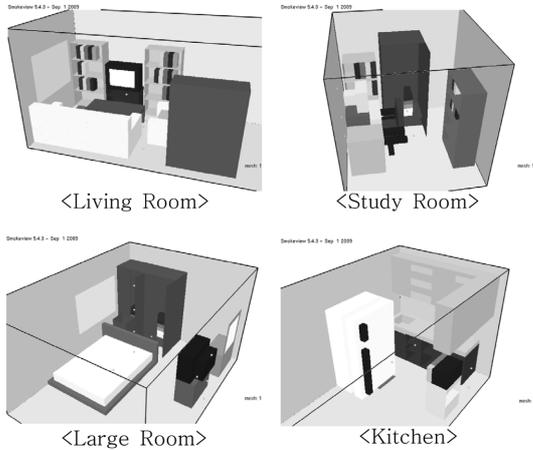


Figure 3. Disposition of combustibles.

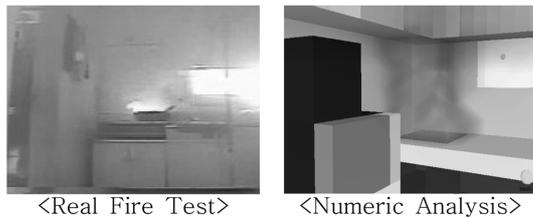


Figure 4. Soybean oil igniting.

으며 실제 화재실험시간인 30분(1800초)을 재현하기 위하여 79시간 동안 수치해석을 수행하였다.

2.2 화재시나리오 설정

실물화재실험과 동일하게 수치해석에서도 화재가 빠른시간 안에 전역화재(flash-over fire)로 확대되기 쉽도록 초기 화재 방열량이 큰 주방 화재를 대상으로 삼았다. 가스레인지 위에 직경 35 cm의 프라이팬에 채워진 800 cc의 대두유가 가열되어 발화하는 것으로 설정하였으며, 화재 초기에는 각 공간의 창문 및 현관문이 닫혀있는 상태로 발화가 시작되도록 하였고 발화 후 6분 후 소방관이 실내 진입을 위해 현관출입문을 개방하는 상황을 설정하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 시간변화에 따른 주요변화

수치해석에 의한 시뮬레이션 결과는 정량적으로 약간의 시간차이는 있었으나 정성적으로 실물화재실험과 동일한 과정을 거치며 화재가 성장·발달하였다. 대두

유가 발화하면서 가스레인지의 불꽃과 대두유 불꽃의 영향으로 화재는 급격히 성장하였고, 발화가 시작된 후 약 1분 후 발코니 및 거실 창으로 연기가 방출되기 시작하였다. 화재의 초기에는 실내의 산소가 충분히 확보되어 있으므로 연료지배형 화재의 성향을 보이며 화염이 성장한 것으로 추정된다. 발화 후 4분을 기점으로 6분까지 화염의 성장이 둔화되고 감소하였는데 이는 실내의 산소가 모두 소모된 후 창문 틈으로 공급되는 공기만으로 연소가 진행되어 환기지배형 화재로 전환되었기 때문으로 추정된다. 발화 6분 후 현관문이 개방되었고 건물 내부의 화염은 다시 급격히 상승한다. 이것은 현관문을 통해 대량의 공기가 유입되었기 때문으로 추정된다. 9분에 거실의 전면 유리창을 파괴되고, 작은방 및 발코니로 확장된 화염에 의해 25분후 발코니의 유리창이 파괴되었다. 화재 발생 28분에 내부 화염이 감소하기 시작하며 화재 소강기로 접어든다. Table 3에 수치해석에서 발생한 화재현상과 실물실험에서 발생한 현상을 비교하여 정리하였고, Figure 5는 각 실물

Table 3. Comparison between the Fire Test and Numerical Analysis Results

시간	실물실험	수치해석	시간
0분	발화시작	발화시작	0분
1분	외부 연기관측	외부 연기관측	1분
8분	거실 창문출화	거실 창문출화	9분
17분	작은방 창문출화	작은방 창문출화	10분
18분	발코니 창문출화	발코니 창문출화	19분
18분	안방 창문출화	안방 창문출화	20분
30분	실험 종료	수치해석 종료	30분

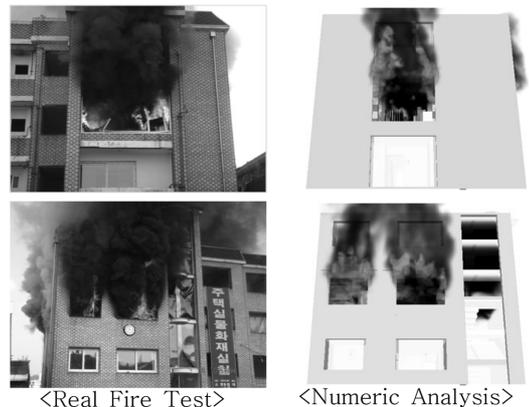


Figure 5. Comparison of outbreak of fire.

주택화재실험과 시뮬레이션의 창문 화염출화 모습을 비교하여 보여준다.

### 3.2 화재공간 주요구역의 온도 분포

초기 화재의 경우 출입문이 개방되기 까지 화재실험과 시뮬레이션의 화재성장 패턴은 유사하게 진행되었다. 발화 시작 후 약 2분 경과 시점에 싱크대 찬장으로 화염이 전파되면서 주방 상층부 온도가 급격히 상승하였다. 발화원과 싱크대 찬장으로부터 발생한 화염은 수직 상승하고, 천장 면에 닿게 되면서 천정제트유동(Ceiling Jet Flow)로 전환되어 발화원으로 부터 멀리 떨어진 현관과 거실의 천장면까지 화염을 확산하게 된다. 화재는 약 5분을 기점으로 온도가 하강하였고, 수분 후 출입문 개방과 함께 화재가 재 성장하여 주방, 현관, 거실, 작은방, 안방, 공부방 순으로 화염이 전파되었다.

주방은 화재의 발원지로서 수치해석 결과로 천장면 온도가 화재초기 600°C까지 상승하였고, 출입문 개방 후에는 최고 900°C까지 상승하였으나 전반적으로 500°C를 유지하였다. 출입문 개방과 동시에 공간의 온도가 500°C를 초과하며 전역화재(Flash-over Fire)에 도달하였으며, 시간은 7분 전후로 발생하였음을 Figure 6를 통해 확인할 수 있다.

거실은 수치해석 결과로 화재초기 천장면 온도가 약 300°C까지 상승하였고, 출입문 개방 후에는 점차 상승하는 경향을 보이며 최고 900°C까지 상승하였다. 발화 9분 전후로 공간의 온도가 500°C를 넘으며 전역화재(Flash-over Fire)에 도달하였고 창문 출화가 발생하였다. Figure 7을 통해서 이를 확인할 수 있으며, 실험 실험보다 약 1분 정도 느리게 예측하였다.

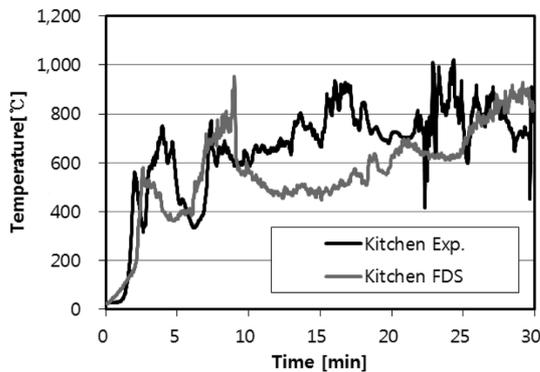


Figure 6. Comparison of temperature distribution at the kitchen.

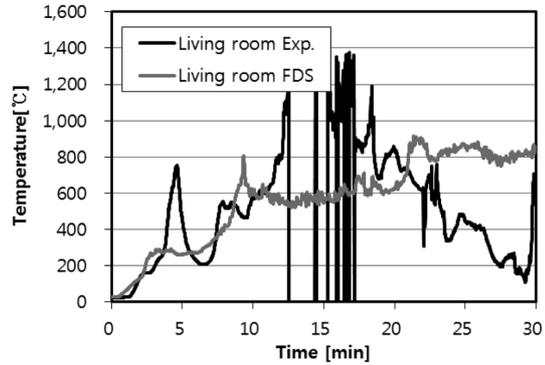


Figure 7. Comparison of temperature distribution at the living room.

작은방의 수치해석 결과로 화재초기 천장면의 온도가 약 200°C까지 상승하였고, 출입문의 개방 후 점차 상승하는 경향을 보이며 최고 600°C까지 상승하였다. 작은방은 수치해석에서 출입문의 개방 즉시 공간의 온도가 500°C를 초과하며 전역화재(Flash-over Fire)에 도달한 것과는 달리 실험에서는 발화 후 약 17분 전후에 발생하였다.

공부방은 수치해석 결과로 화재초기 천장면의 온도가 약 200°C까지 상승하였으며, 출입문의 개방 후 400°C 전후를 유지하다가 19분 전후로 공간온도가 500°C를 넘으며 전역화재(Flash-over Fire)에 도달하며 창문출화를 시작하였고 이후 최고 900°C까지 상승한 후 감소하였다. 특히 공부방은 발코니와 한 공간으로 구획되어 있어서 다른 공간에 비해 가장 넓은 개구부 면적을 갖고있으며 동시에 가장 많은 가연물을 적재하고 있으므로, 천장면의 온도가 다른 공간 보다 높게 상

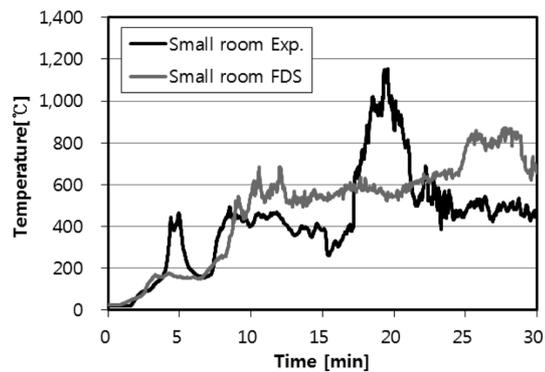


Figure 8. Comparison of temperature distribution at the small room.

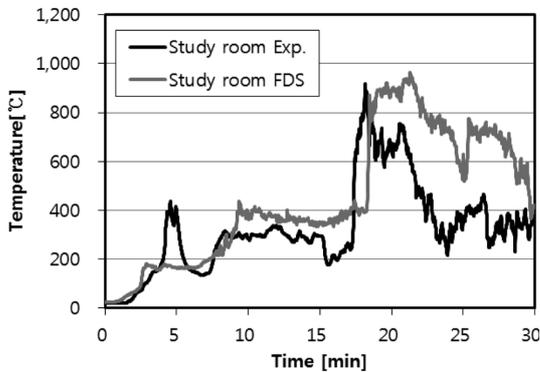


Figure 9. Comparison of temperature distribution at the study room.

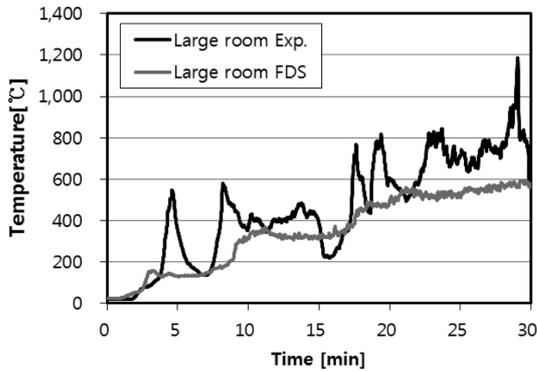


Figure 10. Comparison of temperature distribution at the large room.

승하였다.

안방의 수치해석 결과로 화재발생 초기에 천장면의 온도가 180°C까지 상승하였고, 출입문의 개방 후에 점차적으로 상승하는 경향을 보이며 최고 600°C까지 상승하였다. 발화후 22분경에 공간온도가 500°C를 넘으며 전역화재(Flash-over Fire)에 도달하였으나 공부방과 같이 급격한 온도상승은 보이지 않았다.

수치해석의 결과를 실험실결과와 비교하였을 때 대체적으로 전역화재(Flash-over Fire)의 발생시간이 약간 지연되고 있으나 대체적으로 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 실제 가연물보다 FDS의 수치해석에서 최고 열방출율에 도달하는 시간을 늦게 예측하는 경향에 기인한 것으로 추정되며 이러한 현상은 FDS5의 열전달모델의 한계성과 수치해석을 위해 가연물을 모델링 하는 과정에서 발생한 물성값의 부정확성에서 기인한 것으로 추정된다.

Table 4. Comparison of Flash-over Time

시간	실험실 F/O	수치해석 F/O	시간
7분	부엌	부엌	7분
8분	거실	거실	9분
17분	작은방	작은방	10분
18분	공부방	공부방	19분
18분	안방	안방	20분

본 연구에서는 실내 온도가 500°C를 초과할 경우 전역화재(Flash-over Fire)가 발생한 것으로 판단하였으며, Table 4에 화재실험과 시뮬레이션의 각 실별 전역화재(Flash-over Fire) 발생시간을 정리하였다.

### 3.3 시간에 따른 열방출율(HRR) 예측

수치해석에 의한 시뮬레이션의 결과를 검토해 볼 때, 정성적인 화염성장 과정과 다른 공간으로의 전과과정 이 실험 화재실험과 동일하게 예측되었다. 발화와 동시에 화염이 성장하여 열방출량은 약 4분간 지속적으로 증가하여 1 MW까지 성장하였다가 실내 산소의 부족으로 약 5분경에는 0.7 MW까지 감소하게 된다. 약 6분경에 현관 출입문의 개방으로 다량의 산소가 실내로 유입되고 이로 인해 화염이 재성장 하여 최대 열방출량이 10 MW까지 증가하였고 이 과정에서 거실의 외부 창문의 파괴와 함께 주방, 거실, 현관에서 전역화재(Flash-over Fire)를 발생시켰다. 이후 약 10분간 열방출량이 증가와 감소를 반복하며 7 MW 수준을 유지하였고 미연소 가연물이 적재되어 있는 구역으로 차츰 화염이 확장 되었다. 발화 24분 후 건물 후면의 발코니 창이 파괴되면서 창문 출화와 함께 대량의 공기가 개구부를 통해 유입 되어 공부방에서 전역화재(Flash-over

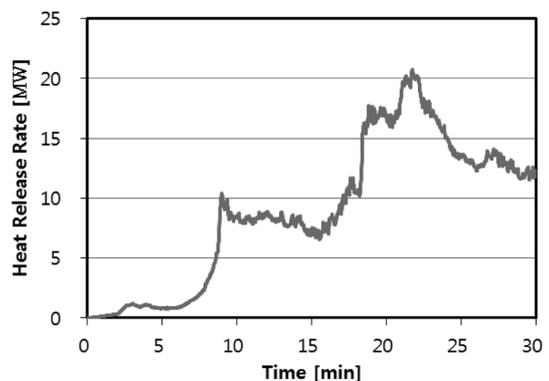


Figure 11. HRR of Residential building.

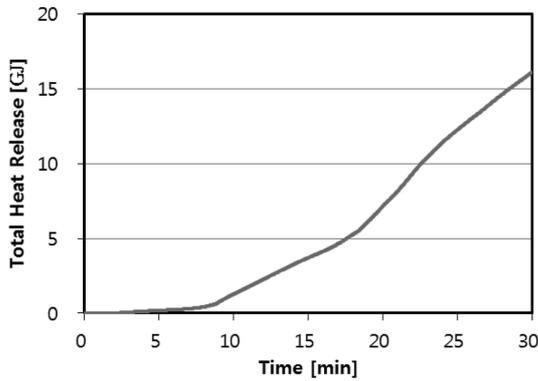


Figure 12. THR of Residential building.

Fire)가 발생하였고, 열방출량은 20 MW까지 급상승하였다가 이후 감쇄기로 접어들었다. Figure 11은 시간에 따른 열방출율의 변화를 나타낸 그래프이고 Figure 12는 시간에 따른 발열량의 변화를 나타낸 그림이다.

#### 4. 결 론

주거용 건축물의 화염전파 및 연소 특성을 예측하기 위하여 수치해석모델을 이용해 FDS 시뮬레이션을 수행하였다. 수치해석을 위해 각 공간별로 배치된 가연물의 형상적, 물리적, 화학적 특성을 반영한 수치해석 모델을 구성하였으며 실험실에서의 동일한 위치에 배치하였다. 주방에서 발생한 발화에 의해 인근 가연물이 자연스럽게 연소하도록 구성하였으며, 이 결과로서 실험화재실험과 동일한 화염전파 현상과 천정제트유동(Ceiling Jet Flow) 및 전역화재(Flash-over Fire) 현상이 발견되었다.

연구 결과 주거용 건축물의 화재 모델이 실험 화재 실험에서 주방, 거실, 안방, 공부방, 작은방 등으로의 화재확산 경향과 전역화재(Flash-over Fire) 현상을 정성적으로 잘 예측하고 있음을 확인하였다. 그러나 정량적인 비교를 하였을 때 온도예측과 시간예측 모두 만족할 정도의 신뢰성을 얻지 못하였다. 이는 FDS가 실제보다 온도를 하향 예측하는 특성에 의해 주거용 가연물의 모델이 실제보다 늦게 최대 열방출율에 도달한 것과 가연물의 모델링 과정에서 단순화된 형상적, 물

리적, 화학적 특성에 의해 발생된 오차 때문인 것으로 추정된다. 향후 이에 대한 보완연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 한국건설기술연구원 연구사업인 “(12주요) 성능기반 화재안전 선진화 연구” 과제와 관련한 연구에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. K.J. LaMalva and J.R. Barnett, “Failure Analysis of the World Trade Center 5 Building”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.19, pp.261-274(2009).
2. A. Bystrom, X. Cheng, U. Wickstom, and M. Veljkovic, “Full-scale Experimental and Numerical Studies on Compartment Fire Under Law Ambient Temperature”, *Building and Environment*, Accepted Manuscript(2011).
3. M.K. Cheong, M.J. Spearpoint, and C.M. Fleischmann, “Calibrating an FDS Simulation of Goods-vehicle Fire Growth in a Tunnel Using the Runehamar Experiment”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.19, pp.177-196(2009).
4. S. Kerber and J.A. Milke, “Using FDS to Simulate Smoke Layer Interface Height in a Simple Atrium”, *Fire Technology*, Vol.43, pp.45-75(2007).
5. S.M. Olenick and D.J. Carpenter, “An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.13, pp.87-110(2003).
6. 유용호, 권오상, 김홍열, “공동주택의 단위공간 실험 화재실험”, *한국화재소방학회, 춘계학술발표집*, pp.346-351(2009).
7. 유용호, 권오상, 김홍열, “실험화재실험을 통한 공동주택의 화재안전성 연구”, *한국화재소방학회 논문지*, Vol.23, No.5, pp.57-65(2009).
8. 안찬술, “주거용 단위가연물의 열역학적 수치해석 모델링에 관한 연구”, *한국화재소방학회 논문지*, Vol.25, No.6, pp.58-63(2011).
9. NIST, *FDS(Fire Dynamics Simulator) User’s Guide* (2010).