단위 주거공간 화재확대 해석을 위한 수치해석에 관한 연구

A Study on CFD Simulation for Fire Spread of Residential Compartment

안찬솔* · 김흥열** · 유용호*** · 조경숙****

Ahn, Chan Sol · Kim, Heung Youl · Yoo, Yong Ho · Cho, Kyung Suk

Abstract

A revised Korean Fire Code is operating based on performance design method and Korean Building Code has been also adopted to performance design method. A real fire scale test has some limitations of scale, environment and cost. For studying the variety of fire situations, we could use computer simulation method. In this study, computer simulation was performed for compartment fire based on data obtained real fire scale test of compartment. And we compared the real fire scale test data and simulation data for flame growth rate, heat release rate, total heat release and temperature. From the simulation results, the flame growth rate was over predicted of 12 percent, the heat release rate was over predicted of 11 percent, the total heat release was under predicted of 50 percent and the maximum temperature of compartment was under predicted of 7 percent than real fire scale tests.

Key words : Residential, Real Fire Scale Test, CFD, Compartment Fire

요 지

최근 개정된 소방법은 성능위주 설계법을 도입하여 운영되고 있으며, 건축법 또한 성능위주 설계로의 전환이 시작되고 있다. 실물 화재실험은 규모와 환경에 대한 제약이 있고 많은 비용이 소요되므로 다양한 형태의 화재상황을 구현하기 위하여 시뮬레이션 기법을 이용하게 된다. 본 연구에서는 선행연구의 결과로 얻어진 단위공간의 실물화재실험 데이터를 바탕으로 각각의 공간에 대한 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 공간별 화염성장속도, 열방출율(HRR), 총발열량(THR) 및 온도변화를 비교하였으며 비교 결과, 화염성장속도는 실물실험에 비해 수치해석이 약 12% 빠르게 성장하였고, 열방출율은 수치해석이 실물실험보다 평균 11% 정도 높게 나타났다. 총발열량은 다른 수치에 비해 실물실험과 열방출량의 차이가 크게 나타났으며, 실내 최고온도를 비교한 결과 수치해석이 실물실험에 비해 약 7% 가량 낮게 나타났다.

핵심용어 : 주거, 실물화재실험, 전산유체, 구획화재

1. 서 론

2011년 소방방재청의 통계자료(소방방재청, 2011)에 따르면 2010년 한해 화재발생건수는 41,863건, 인명피해는 1,892명, 재산피해는 2,667억원에 이르는 것으로 나타났다. 2008년 까지 꾸준히 증가하던 화재발생건수는 2009년 이래로 감소추세를 보이고 있다. 그러나 아직까지는 인명피해와 재산피해액은 높은 것이 현실이며 이를 예방하기 위한 노력은 계속되어야 한다. 이러한 인명과 재산피해를 줄이기 위한 노력의 일환으로 최근 개정된 소방법은 성능위주 설계법을 도입하였으며, 분리되어 운영되는 건축법 또한 성능기반의 화재공학설계를 위한 개정 노력을 하고 있다.

화재공학의 성능기반 설계를 위한 일련의 작업 중에서 구획내에서의 실물화재 실험은 정확한 데이터를 도출하기 위해

서는 아주 중요한 절차이다. 그러나 이러한 실물실험은 많은 비용이 소요되며 따라서 반복적인 수행이 거의 불가능하다. 이를 보완하기 위하여 전산유체를 이용하여 실제 화재를 시뮬레이션을 통해 재현하여 작은 비용으로 다양한 형태의 화재 시뮬레이션이 가능하게 되었다. 전산유체를 이용한 시뮬레이션은 실제 화재에서 발생하는 다양한 변수가 설계자에 의해 좌우되므로 신뢰성에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 신뢰성을 높이기 위해 실제실험 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하여 그 신뢰성을 높이고 있다.

본 연구에 앞서 단위공간 실물화재 선행연구(유용호 등, 2009)에서는 주거공간을 4개의 대표공간으로 정의하고 각각의 공간에 대한 실물크기의 연소모형을 제작하여 연소특성을 측정하였으며 단위 가연물 수치해석 선행연구(안찬솔 등, 2011)에서는 개별 가연물의 연소현상에 대한 수치해석적 검

*정회원 · 한국건설기술연구원 전임연구원(E-mail : chansole@kict.re.kr)

**정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원

***정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원

****정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원

증이 수행되었다. 이번 연구에서는 선행된 실험 단위공간 모형의 데이터를 바탕으로 수치해석용 모델을 구성하여 화재 시뮬레이션을 수행하였고 이를 실험화재실험 데이터와 비교 분석하여 향후 성능위주 설계를 위해 주거 공간내에 발생하는 화재에 대한 데이터 베이스를 구축하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

2.1 연구의 범위

이번 연구에서도 선행연구(유용호 등, 2009)와 동일하게 건축물의 다양한 용도 중 가장 기본이 되는 주거 공간을 설정하였으며, 현장조사를 통한 공간별 표준 모델을 설정하여 각각의 가연물을 배치하여 실험실험을 진행하였다. 본 연구에서는 실험실험의 열역학 및 유체역학적 화재특성을 비교 분석하기 위하여 실험실험과 동일한 형태 및 조건으로 시뮬레이션을 실행하였으며 화학적 연소반응에 의한 유해가스의 종류 및 발생량을 검증하기 위한 연구는 배제하였다.

2.2 연구의 방법

2.2.1 실험실험

선행연구(유용호 등, 2009)에서 설정된 단위공간에 배치된 표준 가연물에 대해서는 ISO 9705(ISO, 1993)의 Room Corner Tester 및 FT-IR을 통해 가연물의 단위 발열량을 측정하였다. 또한 표준 모델의 가연물을 조합한 단위공간에 대해서는 산소소모율법을 이용한 라지 스케일 칼로리미터(Large Scale Calorimeter)를 이용한 실험 규모 화재실험을 통해 단위공간의 발열량 및 온도 분포를 측정 분석하였다.

2.2.2 FDS를 이용한 수치해석

FDS(NIST, 2005)를 이용한 수치해석은 실험실험 대상 가연물과 동일한 조건으로 구현하였으며 수치해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 Room Corner Tester, ISO 9705에 의한 실험 화재 실험의 결과를 비교 검증하였다. 연구과정에서 사용한 Fire Dynamics Simulator(FDS)는 미국 NIST의 BFRG 그룹에서 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 비분사 회색 가스 복사 전달 모델을 사용하고 있다.

3. 주거공간의 화재확대 예측을 위한 실험실험 및 수치해석

3.1 단위 공간 표준 모델 선정

3.1.1 표준 단위 공간

다세대주택 및 연립주택의 현장조사 및 현재 가장 일반적

그림 1. 표준 단위 공간

표 1. 전체 가연물량 설정

설치장소	가연물명	치수	주요 재료
주방	싱크대(찬장포함)	1.74 m (기본높이)	나무+금속
	가스레인지	2구	금속
	가스레인지용 테이블	싱크대 높이	나무
	냉장고	400~500L	합성수지+금속
	부엌 조명등	0.5-2set	합성수지
	기타	밥솥, 찜통, 전자레인지 외	합성수지
	부엌용품	플라스틱 찬기	합성수지
안방	침대	Queen 사이즈	섬유+나무
	화장대	표준	나무
	TV+TV장	20"	나무
	장롱	3자 기준	나무
	벽걸이 에어컨	7평형	합성수지
	조명등	0.5 m-2 set	합성수지
	커튼	1.3 m × 1.3m	섬유
	장롱 내용물	이불, 옷가지	섬유
거실	좌탁	600 × 100 × 45(cm)	나무
	조명등	1m-2set	합성수지
	소파	3인용+1인용	가죽+나무
	장식장	1.2 m × 1.8 m	나무
	TV장	1 m × 0.5 m	나무
	TV	29"	합성수지+유리
	커튼	2 m × 1.2 m	섬유
	책장	3자	나무
	쓰레기통	특대	합성수지
	책상	어린이용	나무
공부방	의자	어린이용	섬유+합성수지
	책장	3자	나무
	장난감 바구니		합성수지
	장난감		합성수지
	커튼	2.5 m × 2 m	섬유

인 다세대주택 연립주택으로서 56 m²(17평)대가 사용되고 있는 점을 고려하여 표준 모델에 사용될 평면을 설정하였다. 설정된 표준모델에는 거실(8.3 m²), 공부방(7.4 m²), 안방(13 m²), 주방(5 m²), 화장실(2.8 m²)로 구성되는 것으로 하였으며, 거실과 접해있는 공부방은 확장성을 고려한 발코니가 설치되어 있는 것으로 설정하였다[그림 1].

또한 설정된 표준 모델의 가연물량 배치와 단위공간의 연소특성 데이터베이스 구축을 위해 대표적인 화재 공간인 거실, 주방, 안방, 공부방 등 총 4개소를 대상으로 하였으며 화장실과 발코니 부분은 화재 발생 확률이 적어 배제하였고, 공부방 중 1 개소는 중복성으로 배제하였다.

그림 2. 단위 공간별 가연물 배치 및 열전대 설치 위치

3.1.2 단위 공간별 가연물 선정

4개의 표준 단위 공간에 분포된 가연물량은 다음 표 1과 같이 적용하였다. 단위 공간 실물 화재실험에 분포된 단위 가연물들은 단위 가연물 실험에서 사용된 동일한 물품이었으며, 수치해석에서 사용된 가연물 종류 및 데이터 또한 선행 연구된 단위 가연물 수치해석(안찬술 등, 2011)에서 검증된 가연물 데이터를 사용하였다.

3.2 단위 공간 모델링

3.2.1 단위공간 구성

단위 공간은 실물 화재실험과 동일하게 거실, 안방, 공부방, 주방의 4가지 경우에 대하여 모델링 하였다. 실물 화재실험의 경우 벽체를 모두 내화용 석고보드로 구성한 것과 동일하게 수치해석 모델링에서도 벽체를 단일 처리하였으며, 선행연구(유용호 등, 2009)의 화재실험과 동일하게 공간에 가구위치, 측정센서의 위치 등을 설정하였다[그림2].

거실 공간의 크기는 4.8×2.4×2.4 m, 안방은 4.3×3.2×2.4 m, 공부방은 2.4×2.4×2.4 m, 주방은 2.4×2.1×2.4 m로 구성하여 표준 가연물을 배치하였다. 그림 3은 단위 공간별로 실물실험에서 단위 가연물이 배치된 모습이고 그림 4는 단위 공간별 수치해석용 모델링의 모습이다.

그림 3. 단위 공간별 가연물 배치

그림 4. 단위 공간별 완성된 수치해석용 모델링

3.2.2 단위공간별 개구부설정

모든 단위 공간별 개구부는 6면중 1개 측면만 개방되고 나머지 5개면은 단열처리하여 폐쇄하였으며, 그 크기는 거실이 2.4×2.4 m, 안방은 3.2×2.4 m, 공부방은 2.4×2.4 m, 주방은 2.4×2.4 m로 하였다.

3.2.3 단위공간별 화재시간설정

실물화재실험에서 단위 공간별 화재진행시간은 발화하여 최성기 후 쇠퇴기에 접어들 때 까지 진행하였으며 이에 따라 거실과 주방은 38분간 실험 후 진화하였으며 안방과 공부방은 32분간 실험 후 진화하였다. 수치해석의 경우 4개 공간에 대해 동일하게 40분의 연소시간을 계산하였다.

3.2.4 단위공간별 발화설정

단위 공간별 발화는 등유 100cc를 사용하였으며 시뮬레이션에서도 동일한 발열량을 사용하였다. 발화지점은 안방은 침대, 주방은 싱크대, 거실은 소파, 공부방은 옷장에서 초기발화가 시작되도록 설정하였다.

3.3 단위 공간 화재특성 분석

3.3.1 단위 공간별 화염 성장 속도

단위 공간별 실물 화재실험은 “성장기→최성기→쇠퇴기”의 과정으로 진행되었다. 각 공간별 화원은 실물 화재실험과 수치해석 모두 가장 안쪽에 배치된 가구의 하부에서 화염이 상향전파 될 수 있도록 점화되었다.

실물 화재실험의 경우 주방을 제외한 거실, 안방, 공부방이 초기에 급속히 화재가 성장하여 단시간에 쇠퇴기에 접어든 반면 주방은 화염이 서서히 성장하였다가 서서히 쇠퇴하는 경향을 보였다. 반면 수치해석의 경우 네가지 공간 모두 초기에 급속히 화재가 성장하여 단시간에 쇠퇴기로 접어들었다. 단위 가연물에서와 같이 실물 화재실험의 경우 쇠퇴기에 접어든 후에도 잔열이 100~200 kW 정도 장시간 유지가 되었으나 수치해석의 경우 쇠퇴기 이후에 잔열이 거의 나타나지 않는 것으로 측정 되었다. 표 2에 단위 공간에 대한 실물 화재실험과 수치해석의 최성기 도달시간을 비교하였으며, 그림 5에 최성기 도달 시점의 모습을 비교하였다.

수치해석의 결과 거실은 약 4분 48초, 안방은 약 4분 5초, 공부방은 약 4분 10초, 주방은 약 5분 48초에 최성기에 이르렀으나, 실물 화재실험의 경우 거실은 약 7분 21초, 안방은 약 6분 37초, 공부방은 약 5분 43초, 주방은 약 18분 57초에 최성기에 이르렀다. 정량적으로 결과를 비교하였을 때 수치해석이 약 12% 빠르게 최성기를 예측하고 있음을 알 수 있다.

표 2. 단위 공간별 최성기 도달시간 비교

구분	실물실험 [sec]	수치해석 [sec]
거실	441	288
안방	397	245
공부방	343	250
주방	1137	348

그림 5. 단위 공간의 최성기 도달 시점 비교

3.3.2 단위 공간별 열방출량

단위 공간의 열방출량은 가연물의 주요 구성성분이 대기와 접촉하고 있는 면적과 상관관계를 갖고 있다. 거실은 총 9종의 가연물이 적재되어있고 이중 주 재료가 나무인 것이 4종, 가죽과 나무가 주재료인 것이 1종, 합성수지가 주재료인 것이 3종, 섬유가 주재료인 것이 1종이었다. 안방도 총 9종의 가연물이 적재되었는데 이중 주재료가 나무인 것이 4종, 섬유와 나무가 주재료인 것이 1종, 합성수지가 주재료인 것이 2종, 섬유가 주재료인 것이 2종이었다. 공부방은 총 6종의 가연물이 적재되었는데 이중 주재료가 나무인 것이 2종, 섬유와 합성수지가 주재료인 것이 1종, 합성수지가 주재료인 것이 2종, 섬유가 주재료인 것이 1종이었다. 주방은 총 8종의 가연물이 적재되었는데 이중 주재료가 나무인 것이 1종, 나무와 금속이 주재료인 것이 1종, 합성수지와 금속이 주재료인 것이 3종, 금속이 주재료인 것이 1종, 합성수지가 주재료인 것이 2종이었다.

그림 6은 각 구성 공간의 실물 화재실험과 수치해석의 열방출량의 변화를 시간에 따라 비교하고 있으며 표 3은 최고 열방출량을 정량적으로 비교하였다.

정량적인 측면에서 볼 때, 표 3에 나타난 것과 같이 실물 실험에서 거실은 5903.1 kW, 안방은 7433.3 kW, 공부방은 5971.5 kW, 주방은 5131.5 kW의 최고 열방출량을 기록했으며, 수치해석에서 거실은 6341.0 kW, 안방은 8302.1 kW, 공부방은 5590.9 kW, 주방은 6201.3 kW의 최고 열방출량을 기록하였다. 이것으로 수치해석이 화재실험보다 평균 11%의 표준 편차에서 Over prediction을 하고 있음을 알 수 있다.

정성적인 측면에서 볼 때, 단위 가연물에서와 같이 실물

그림 6. 열 방출량의 시간에 따른 비교

그림 7. 단위공간별 총열량 비교

표 3. 단위 공간별 최고 열방출량 비교

구분	실험실험 [kW]	수치해석 [kW]
거실	5903.1	6341.0
안방	7433.3	8302.1
공부방	5971.5	5590.9
주방	5131.5	6201.3

화재실험의 경우 쇠퇴기에 접어들 후에도 잔열이 100~200 kW 정도 장시간 유지가 되었으나 수치해석의 경우 쇠퇴기 이후에 잔열이 거의 나타나지 않는 것으로 측정되었는데, 이는 목재의 숯화(Charing) 현상을 정확히 묘사하고 있지 못하기 때문인 것으로 추정된다. 또한 주방의 경우 화재실험의 최성

기 도달시간이 수치해석의 경우에 비해 현저히 늦게 발생하였다. 이는 가연물의 적재 형태에서 기인한 것으로 추정된다. 화재실험의 경우 실험모형의 벽체가 석고보드로 구성되었기 때문에 무거운 그릇장을 벽에 고정할 수 없어 중앙에 적재하였고 이로 인해 중앙부에 가연물 밀집에 의한 열축적 현상으로 화염전파가 느려진 반면, 수치해석은 그릇장을 실체와 같이 상부 벽면에 위치시켜 초기화재가 상부의 그릇장을 쉽게 가열하여 화재실험보다 빠르게 최성기로 발전할 수 있었던 것으로 추정된다.

3.3.3 단위 공간별 총열량

단위 공간의 총열량은 공간에 적재된 가연물의 주요 구성

표 4. 단위 공간별 총열량 비교

구분	실물실험 [MJ]	수치해석 [MJ]	가연물 총중량 [kg]
거실	3487.5	2346.1	460.0
안방	3208.8	3253.0	338.3
공부방	2717.1	1720.0	188.8
주방	3655.8	6532.2	210.7

재료와 중량에 의해 결정된다. 중량이 많을수록 총열량은 증가하고 최성기의 지속시간이 길어지며 경우에 따라 열방출량도 증가하는 경향이 있다. 표 4는 구성 공간에 적재된 가연물의 총 중량 및 실물 화재실험과 수치해석의 총열량을 정량적으로 비교하였고 그림 7에서는 가연물별 총열량을 시간에 따른 변화로 비교하였다.

표준 단위 가연물의 총열량 비교에서와는 달리 단위공간에 대한 총열량 비교에서는 실물 연소실험과 수치해석의 결과가 많은 차이를 보이고 있다. 정량적으로 표 4에서 보이듯이 수치해석에서 거실은 2346.1 MJ, 안방은 3253.0 MJ, 공부방은 1720.0 MJ, 주방은 6532.2 MJ의 열량을 방출한 것으로 측정되었으나, 실물 화재실험의 경우 거실은 3487.5 MJ, 안방은 3208.8 MJ, 공부방은 2717.1 MJ, 주방은 3655.8 MJ의 열량을 방출하여 평균 53%의 표준편차에서 Under prediction을 하고 있다.

단위 가연물의 연소실험 및 수치해석에서 사용했던 물품 및 데이터를 동일하게 사용했음에도 차이를 보인 이유는 실제 화재현상에서 발생하는 재료 내부의 열전달 및 열 축적에 의한 자연발화 현상을 수치해석에서 정확히 모사하고 있지 못하기 때문인 것으로 추정된다. 즉, 단위 가연물의 수치해석과 같이 밀폐되어 단열된 공간에서 화재가 발생하였을 때 화염으로 방출된 에너지가 재료 내부의 열전달 모사의 미숙한 부분을 보충하여 재료 내부에 열 축적현상을 촉진시킨 결과 실물 화재실험과 거의 동일한 총열량을 방출한 반면, 단위 공간에 대한 수치해석 예측에서는 재료 내부의 미숙한 열전달 모사에 개방된 공간에 의한 외부 대기의 산소공급을 위한 대류현상으로 재료의 냉각이 촉진되어 화염전파 및 발화현상이 억제된 것으로 추정된다.

3.3.4 단위 공간별 온도변화

연소현상에 의한 온도상승 현상은 가연물의 시간당 열방출율과 밀접한 관계가 있다. 시간당 열방출율이 높아지면 그에 따라 온도도 상승하는 현상을 보인다.

그림 8에서는 실내 내부온도 변화를 나타내고 있으며, 단위 공간 실내에서의 온도변화는 열방출율의 변화와 동일한 양상의 결과를 나타내고 있다. 다만 벽면부에서 단위품목의 종류와 설치 유·무에 따라 조금씩 다른 양상을 나타내고 있다. 표 5에서 보듯이 실물 화재실험의 경우 모델의 중앙에서 측정된 실내온도에서 거실에서는 최대 약 1260°C, 침실에서는 최대 약 1350°C, 주방에서는 최대 약 1330°C, 공부방에서는 최대 약 1340°C가 측정되어 모든 모델에서 1200°C 이상의 고온을 나타내었으나 수치해석의 경우 거실에서는 최대 약

그림 8. 실내 내부온도 변화 비교

표 5. 단위 공간별 실내 최고온도 비교

구분	실물실험 [°C]	수치해석 [°C]
거실	1260	1231
안방	1350	1086
공부방	1340	1147
주방	1330	1173

1231°C, 안방에서는 최대 약 1086°C, 공부방에서는 최대 약 1147°C, 주방에서는 최대 약 1173°C로 측정되어 평균 약 7%의 표준편차 범위 안에서 under prediction을 하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

주거공간 화재확대 해석을 위한 실험 실험 및 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 화염성장 속도는 수치해석이 실험실험에 비해 약 12% 빠르게 재현되었다.
- 2) 열방출량은 수치해석이 실험실험보다 평균 11%의 편차를 보이며 over prediction 하는 것으로 나타났다.
- 3) 총열량은 다른 요소들에 비해 많은 편차를 보여 수치해석에 약 53% Under Prediction 한 것으로 나타났다.
- 4) 온도변화는 수치해석이 실험실험에 비해 약 7% 수준에서 Under Prediction 한 것으로 나타났다.
- 5) 실험실험과 FDS를 이용한 화재시뮬레이션을 비교한 결과 적게는 7%에서 많게는 약 50% 이상의 편차를 보이는 것으로 나타났다. 이는 시뮬레이션을 수행하는데 사용한 재료들의 열특성을 FDS의 기본값을 사용함으로 인해 발생된 것으로 보인다. 질량감소율, 비열, 열전도율 등의 다양한 변수들의 실제값 적용을 통해 반복적인 시뮬레이션을 수행하여 실험화재에 가깝게 구현해 낸다면 많은 비용을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2011년도 첨단도시개발사업의 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 소방방재청 (2011) 소방방재 주요통계 및 자료.
- 안찬술, 김정엽, 유용호, 권오상, 주상현 (2011) 주거공간 단위가 연물의 열역학적 수치해석 모델링에 관한 연구, 한국화재소방학회, **한국화재소방학회 논문지**, 제25권, 제6호, pp. 58-63.
- 유용호, 권오상, 김홍열 (2009) 실험화재실험을 통한 공동주택의 화재안전성 연구, **한국화재소방학회 논문지**, 제23권, 제5호, pp. 57-65.
- Babrauskas V. and Grayson, S.J. (1992) Heat Release in Fires, Elsevier, pp. 31-48.
- ISO 9705, Fire Test- Full-scale Room Test for Surface Products, ISO(1993).
- NIST, FDS(Fire Dynamics Simulator) User's Guide, 2005.
- SFPE, SFPE Handbook of Fire Protection, 3rd Edition, 2002.

◎ 논문접수일 : 11년 12월 09일

◎ 심사의뢰일 : 11년 12월 13일

◎ 심사완료일 : 11년 12월 29일