

# 화재 시뮬레이션을 이용한 아파트 화재 위험성 분석

김태권<sup>†</sup> · 차우섭<sup>1</sup>

(원고접수일 : 2014년 1월 2일, 원고수정일 : 2014년 3월 16일, 심사완료일 : 2014년 5월 16일)

## Hazard analysis by fire simulation in an apartment fire

Tae Kwon Kim<sup>†</sup> · Woo Sub Cha<sup>1</sup>

**요약:** 본 연구는 CFAST를 이용하여 아파트 화재가 발생하였을 때 인체에 끼치는 위험요소를 예측한다. CFAST 소프트웨어는 National Institute of Standards Technology 산하기관인 Building and Fire Research Lab에서 개발되어진 모델이다. 본 해석 시나리오는 아파트 화재 재현 실험결과에 의해 검증되었다. 해석결과를 요약하면, 침실뿐만 아니라 거실과 작은방의 상황도 실험 데이터와 정성적으로 같은 경향을 보인다. 화재 당시 거실과 작은방에 사람이 있었다면 산소와 이산화탄소의 농도로 인하여 어지러움을 호소하거나 심하게는 구토, 마비 같은 증상이 발생되었을 것으로 예측되었다.

**주제어:** CFAST, 화재 시나리오, 아파트 화재, 감광계수

**Abstract:** This study predicts damaging risk factors in apartment fire situation by using CFAST. The software was developed by Building and Fire Research Lab, that is government affiliated organization of the National Institute of Standards Technology. This analysis scenarios were well verified by experimental results. Situation of the living room and the second room as well as the bedroom tends to be qualitatively the same with the experimental data. In case of apartment fire, it is predicted that they have been got into trouble with dizziness, badly vomiting and paralysis symptoms due to short oxygen and excessive carbon dioxide when persons were left out in the living room or second room.

**Keywords:** CFAST, Fire scenario, Apartment fire, Optical density

### 1. 서론

지난 10년 동안 우리나라의 화재발생 건수는 매년 증가하는 경향을 보이고 있다. 물론 대형 화재 사고가 번번이 발생하고 있다. 2012년 소방방재청의 통계자료에 따르면 2011년 총 화재건수가 43,875건, 인명피해 1862명, 재산피해 256,548 백만 원이고 화재장소별 발생순서는 비주거 16,388건, 주거 10,645건, 차량 5,591건등으로 나타났다. 장소별 인명피해 순서는 총 1,862명중 주거 883명, 비

주거 696명 차량 114명 등으로 나타났다. 2012년 총 화재 건수가 43,249건, 인명피해 2,223명, 재산피해 289,526 백만 원이고 화재장소별 발생순서는 비주거 15,966건, 주거 10,691건, 차량 5,506건으로 나타났다. 장소별 인명피해 발생순서는 총 2,223명중 주거 1,037명, 비주거 880명, 차량 130명으로 [1][2]에서 나타났다. 이와 같이 비주거지역이 많은 화재가 발생하지만 주거지역에 비해 인명피해는 적다. 따라서 화재 발생으로 인적, 물적 피해가 증가하고 있는 상황에서 화재사고에 대한 위험정도

<sup>†</sup> Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, 1095 Dalgubeol-daero, Daegu 704-701, Korea, E-mail: tkkim@kmu.ac.kr, Tel: 053-580-5551

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Keimyung University, E-mail: woossi86@naver.com, Tel: 053-580-5973

와 위험요소 등을 예측하는 것이 필수적이다. **Table 1**은 위치에 따른 화재 장소와 인명피해 수를 나타낸 것이다.

**Table 1:** Occur along the fire place and Casualties according to location (2011, 2012)

	2011년		2012년	
	Location of fire (Cases)	Location casualties (People)	Location of fire (Cases)	Location casualties (People)
Dwelling	10,645	883	10,691	1,037
non-Residential	16,388	696	15,966	880
Vehicle	5,591	114	5,506	130

이에 본 연구에서는 컴퓨터를 이용하여 화재사고에 대한 특성을 분석할 수 있는 NIST(National Institute of Standards Technology) 산하기관인 BFR(Building and Fire Research Lab.)에서 개발한 CFAST 모델을 이용하여 한국건설기술연구원과 삼성방재연구소에서 발표한 아파트 화재 재현 실험 시나리오에 대한 해석을 수행하고 실험결과와 비교하여 위험도와 위험요소를 예측하고자 한다[3].

### 2. CFAST수치해석모델

CFAST는 2-분할모델(two-zone model)로 검사적 체적(control volume)내에서 운동량방정식, 질량 및 에너지 보존법칙을 해석하여 화재진행을 예측할 수 있다. 따라서 CFAST모델은 화재 해석 문제의 거시적(macroscopic)인 접근 방법이다. 식(1)~(4)는 CFAST에 사용되는 방정식으로 식(1)은 압력을 알기 위한 식이고, 식(2)는 경계층 체적을 알기 위한 식이며, 식(3)과 식(4)는 경계층 온도를 알기 위한 식으로 [3][4]에서 응용하였다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U) \tag{1}$$

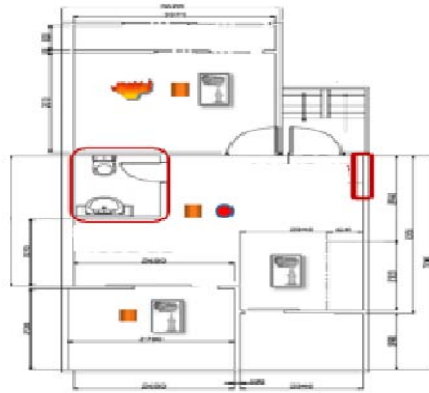
$$\frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{\gamma P} \left[ (\gamma - 1) \dot{h}_U - V_U \frac{dP}{dT} \right] \tag{2}$$

$$\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_U V_U} \left[ (\dot{h}_U - c_p \dot{m}_U T_U) + V_U \frac{dP}{dT} \right] \tag{3}$$

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_L V_L} \left[ (\dot{h}_L - c_p \dot{m}_L T_L) + V_L \frac{dP}{dT} \right] \tag{4}$$

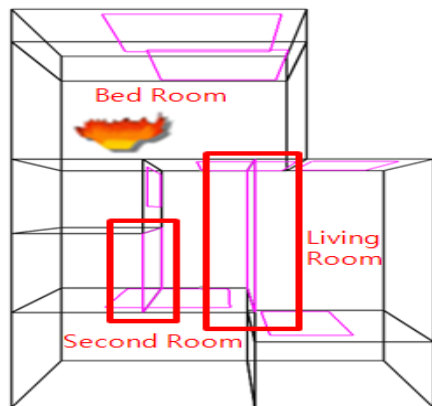
### 3. 화재 재현 실험결과와 CFAST해석결과 비교분석

인천소재에 아파트 화재 재현 실험을 위한 대상인 **Figure 1**는 화재대상의 평면도이다.



**Figure 1:** Drawing of fire target [5]

**Figure 1**을 CFAST를 사용하여 모델링하여 **Figure 2**와 같이 재구성 하였다. CFAST의 모델링의 단점은 사각형으로 밖에 구형 되지 않아 거실을 3개의 구역으로 나누어 표현을 하였다.



**Figure 2:** Simplified modeling of fire target

**Figure 2**는 모델링을 화재대상을 단순화 시킨 것이다. 실제화재 장소와 구획의 이름이 표기하였고, 실제와 동일한 조건을 위하여 **Figure 2**의 사각형안의 부분들을 완전 개폐하여 실제와 동일한 조건을 구현하였다. 또한 구역의 높이는 일반적인 아파트의 높이와 같이 2.4m로 설정하고, 화재시간은 1750초로 설정하고, 압력은 대기압, 상대습도는 50%로 설정하였다. 그리고 외기는 30°C에 내기는 25°C 설정하였다. 재현실험의 최초 화재는 침대 및 전기 콘센트 단락에 의한 발화로 쓰레기통에 최초 착화되었다. 또한 재현실험의 침실의 내부가연물은 침대, 화장대, 화장대의자, 장롱, 서랍장, 이불, 의류 등이고, 거실에는 TV, TV받침대, 소파, 찬장, 싱크대, 가스렌지, 냉장고, 식탁, 식탁의자 등이다. 작은 방에는 커튼, 장롱, 서랍장, 의류, 책, 책장, 책상, 의자, 컴퓨터모니터, 컴퓨터본체 등으로 가연물로 두었다. 본 모델에서는 침실의 쓰레기통의 발화가 힘들어 침대에서 발화된 것으로 설정하였고, 침실의 내부가연물은 커튼, 침대, 화장대, 화장대의자, 이불 등이고, 거실에는 TV, TV받침대, 찬장, 서랍장, 소파, 가스렌지, 식탁, 의자로 설정하였다. 작은방에는 커튼, 책장, 책상, 의자, 서랍장을 설정하였다.

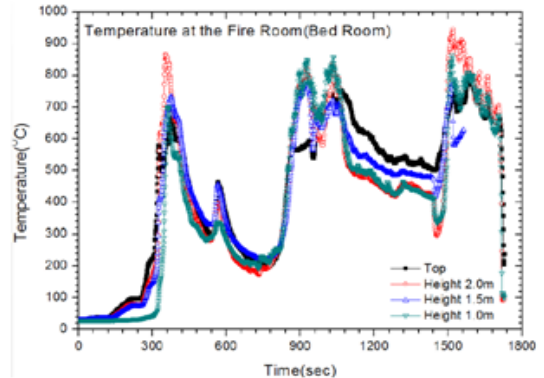
본 연구는 한국건설기술연구원과 삼성방재연구소에서 아파트 화재 재현 실험[5]한 자료를 토대로 CFAST해석에 의한 결과를 비교분석하고 이후 여러 가지 상황을 예측하였다.

**Figure 3**은 화재 재현 실험으로 도출된 침실의 온도이다. 화재발생 후 약 300초 이 후 온도가 상승하고 떨어지다가 약 900초 이 후에 온도가 급격히 상승하는 것을 알 수 있다.

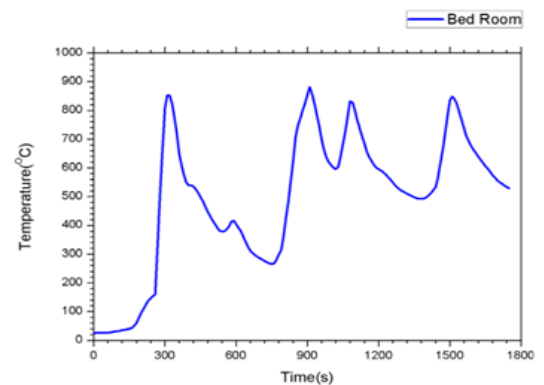
이 후 점차 떨어지다가 약 1500초 때 급격히 상승하여 약 960°C까지 도달 하게 된다. 약 360초, 약 900초, 약 1500초 3번에 서로 다른 가연물이 발화된 것으로 사료된다.

**Figure 4**은 CFAST해석에 따른 침실의 온도 분포이다. 약 260초 이 후 온도가 급격히 상승하고 약 320초 이후 급격히 온도가 떨어지고 난 후 약 850초 온도가 급격히 올라간 후 떨어지다가 다시 온도가 올라간다. 이후 약 1450초 온도가 급격히 상승하여 약 830°C까지 도달하게 된다. 이처럼 **Figure 3**

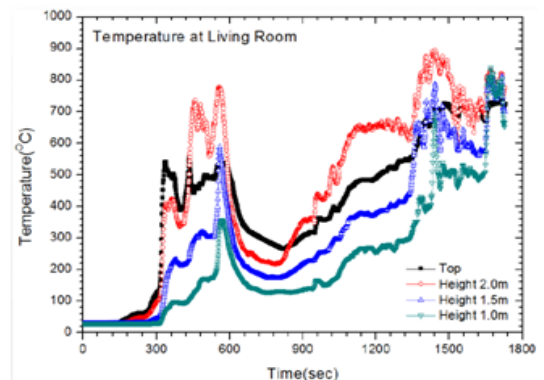
과 **Figure 4**를 비교해 보았을 때 발화된 시간과 온도의 차이는 있지만 정성적으로 경향이 같다.



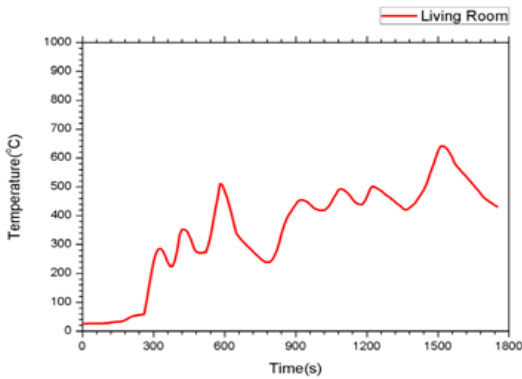
**Figure 3:** Temperature distribution in the bedroom through the fire reproduction experiment [5]



**Figure 4:** Temperature distribution in the bedroom by CFAST analysis [6]



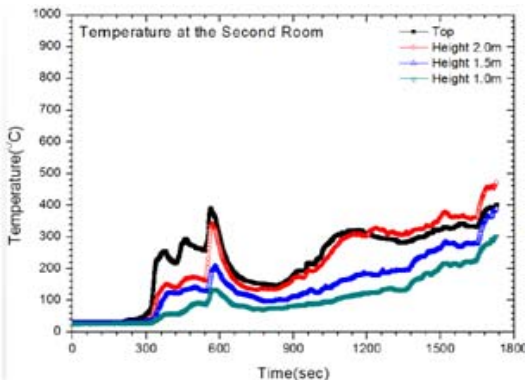
**Figure 5:** Temperature distribution in the Living Room through the fire reproduction experiment [5]



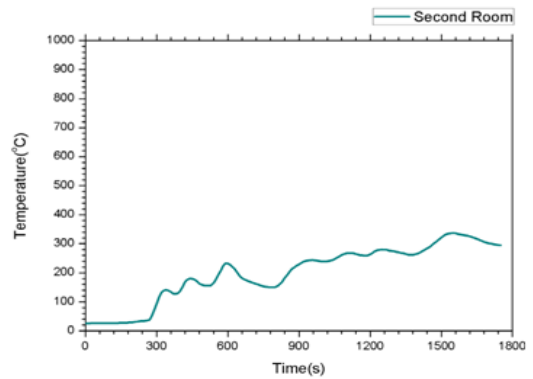
**Figure 6:** Temperature distribution in the Living Room by CFAST analysis

Figure 5는 화재 재현 실험으로 도출된 거실의 온도 분포이다. 화재 발생 후 약 300초 이 후 침실에서 화재의 영향으로 거실로 열전달되어 온도가 증가되는 것을 알 수 있다. Figure 6은 CFAST를 이용하여 거실의 온도 분포를 도출한 것이다. 화재 발생 후 약 300초에 약290°C가 되며 거실로 전이된 구간으로 보이는 약600초 구간에서는 약 540°C가 된다. 재현실험의 높이가 1.0m와 1.5m영역과는 비슷하지만 그 이상은 다른 것을 알 수 있다.

이는 CFAST는 2-분할모델로 상층과 하층으로 2개의 경계층으로 나누어 각층의 온도를 평균적으로 나타내게 된다. 본 모델은 높이를 2.4m으로 설정하였고, Figure 6의 결과는 1.2m 이상인 상층 평균온도를 나타내기 때문에 온도가 실험의 Top영역과 Height 2.0m 영역보다 온도가 낮은 것으로 사료된다.



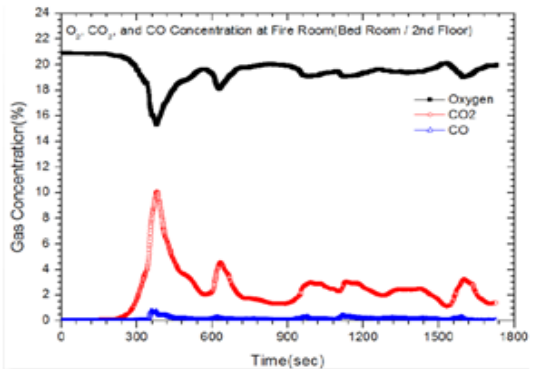
**Figure 7:** Temperature distribution in the Second Room through the fire reproduction experiment [5]



**Figure 8:** Temperature distribution in the Second Room by CFAST analysis

Figure 7은 화재 재현 실험으로 도출된 작은방의 온도 분포이다. 약 300초 이 후 침실에서 발생한 화재로 인하여 온도가 올라간다. 550초 때 거실로 전이 된 화재가 발화되어 접해 있는 작은방의 온도가 급격히 올라가다 떨어진다. 약 820초부터 침실의 제 2발화로 인하여 작은방의 온도가 증가하기 시작한다. Figure 8은 CFAST를 이용하여 작은방의 온도 분포를 도출한 것이다. 이 결과 또한 재현 실험의 Top영역과 Height 2.0m영역보다 낮지만 점성적으로 같음을 알 수 있다.

Figure 9는 화재 재현 실험으로 도출된 침실의 가스 농도 분포이다. 약 300초일 때 침실의 화재가 발화 되어 약 360초 일 때 산소의 농도는 가장 낮은 약 15% 이하로 떨어지고 이산화탄소의 농도는 가장 높은 약 10.5% 이상으로 증가하게 된다.



**Figure 9:** Gas concentration distribution in the bedroom through the fire reproduction experiment [5]

Table 2는 산소 농도에 따른 인간의 반응이다. 이 내용을 종합해 볼 때 사람이 있었을 경우 심장 박동이 빨라지고 어지러움을 호소할 것으로 사료된다.

Table 2: Human response by oxygen concentration [7]

Oxygen concentration (%)	effect
21-17	Tidal volume decreases, Lack of judgment
17-14	Rapid heartbeat, Dizziness
14-11	Vomiting, Paralysis
9	Unconsciousness
6	Dying

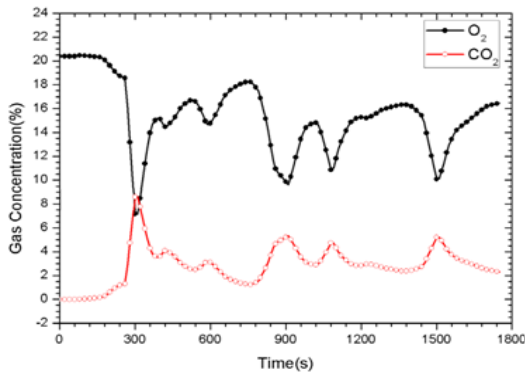


Figure 10: Gas concentration distribution in the bedroom by CFAST analysis[6]

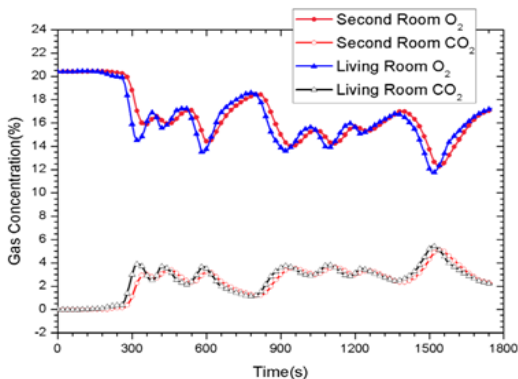


Figure 11: Gas concentration distribution in the room by CFAST analysis

Figure 10은 CFAST를 이용하여 침실의 농도분포를 도출한 것이다. 약 360초 일 때 산소의 농도는 가장 낮은 약 7% 이하로 떨어지고 이산화탄소의 농도는 약 8.5% 이상으로 나타난다. 이 오차는 화재실험의 가연물과 CFAST를 이용하여 설정한 가연물의 개수와 종류가 다르고, 재질이 다르지만 같은 종류의 가연물 등으로 인하여 농도차이가 발생한 것으로 사료된다. 실험장소의 환풍구 유무에 따라 이 같은 농도의 차이가 발생했을 것으로 사료된다.

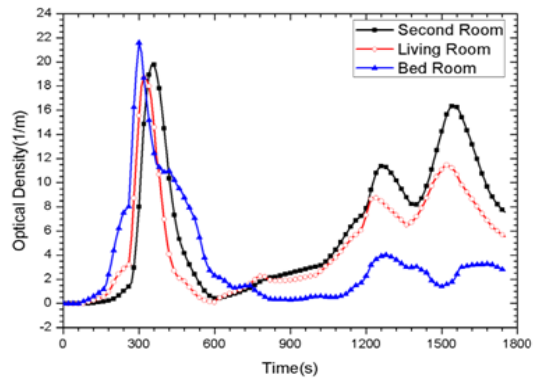


Figure 12: Optical Density in rooms

Table 3: Relationship between the optical density and the visibility [8]

Optical Density	Viewing distance(m)	Situation
0.1	20 - 30	Smoke detectors work
0.3	5	Hinder refuge
0.5	3	Dark feel
1.0	1 - 2	Front of the invisible
10	0.2 - 0.5	Guide light is invisible

위의 내용을 종합하여 각 방의 온도와 농도가 정성적으로 같으므로 CFAST로 다음과 같은 예측하였다. Figure 11은 CFAST를 이용하여 방들의 농도분포를 도출한 것이다. 약 1500초 이후 거실의 산소농도는 약 12%, 이산화탄소농도는 약 6%이다. 또한 작은방의 산소농도는 약 13%, 이산화탄소농도는 약 5%이다. 해석에서의 농도가 실제 농도와

정확히 일치 하지 않을 것이다. 하지만 **Figure 11**과 같은 경향의 농도 분포가 나타내어 질 것으로 예상된다.

**Figure 12**는 CFAST해석에 의한 방들의 감광계수(Optical Density)를 보여주고 있다. **Table 3**은 감광계수와 가지거리의 관계를 나타낸 것이다. 약 320초 때 침실의 감광계수가 약 22정도로 화재 최성기 때의 연기농도로 유도등이 보이지 않을 정도이다. 거실의 감광계수는 약 19이고, 작은방의 감광계수는 약 20이다. 이 후 1260초 후 침실의 감광계수는 약 3으로 거의 앞이 보이지 않을 정도이다. 거실의 감광계수는 약 9이고, 작은방의 감광계수는 약 17정도로 가장 높을 것이라고 예상 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 컴퓨터를 이용하여 화재사고에 대한 특성을 분석할 수 있는 CFAST모델을 사용하여 아파트 화재 재현 실험 시나리오에 대한 해석을 수행하고 참고문헌[5]의 실험결과와 비교하였다.

1) 화재 재현 실험에서 침실의 온도가 약 300초 이 후 온도가 상승하고 급격히 떨어지다가 약 900초 이 후 에 온도가 다시 급격히 상승한다. 이는 가연물에 의한 제 2발화가 발생하였을 것으로 사료된다. CFAST해석에 의한 결과는 약 260초 이 후 온도가 급격히 상승하고 약 320초 이후 급격히 온도가 떨어지다가 약 850초 이 후 온도가 급격히 올라간 후 떨어지다가 다시 급격히 상승한다. 이 또한 제2발화된 것이다. 제 2발화 시간이 약50초 정도 차이를 보이게 되는데 이는 가연물의 타는 속도가 실제와 달라 생긴 것으로 사료된다.

2) 화재 재현 실험에서 약 360초 일 때 침실의 산소 농도가 가장 낮은 약 15% 이하로 떨어지고 이산화탄소의 농도는 가장 높은 약 10.5% 이상으로 증가하게 된다. CFAST를 이용하여 도출한 침실의 농도분포는 약 360초 일 때 산소의 농도는 가장 낮은 약 7% 이하로 떨어진다. 실험과 해석이 산소와 농도차이가 나타나게 되는데 이는 가연물의 종류와 개수 그리고 재질이 다르지만 같은 종류의 가연물과 환풍기의 유무에 따른 영향으로 농도가 달라진 것으로 사료된다. 만약 화재 당시 거실과

작은방에 사람이 존재 했었다면 산소와 이산화탄소의 농도로 인하여 어지러움을 호소하거나 심하게는 구토, 마비 같은 증상이 발생되었을 것으로 예상된다.

3) 침실, 거실, 작은방의 온도를 비교해 보았을 때 발화 시간과 온도가 화재 재현 실험 결과와 차이는 있지만 정성적으로 같은 경향을 나타내고 있다. 이런 결과로 각방의 감광계수를 예상 할 수 있는데 약 360초 때 침실, 거실, 작은방의 감광계수가 10보다 높게 예측되어 화재 최성기 때의 연기농도로 가지거리가 0.5m이하로 유도등이 보이지 않을 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

- [1] National Emergency Management Agency, (2011) Fire Statistical Yearbook, 2012 (in Korean).
- [2] National Emergency Management Agency, (2012) Fire Statistical Yearbook, 2013 (in Korean).
- [3] R. D. Peacock, CFAST-Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, NIST, 2005.
- [4] S. K. Lee, Introduction of fire simulation, Seoul, Korea: A-Jin, 2008 (in Korean).
- [5] Y. H. Choi, Analysis Reports of Fire in Karaoke and Apartment Rooms, Samsung Disaster Prevention Research Institute, 2012.
- [6] T. K. Kim and W. S. Cha, "Analysis of apartment fire using a fire simulation tool", Bulletin of The Institute of Industrial Technology, vol. 36, no. 1, p. 121, 2013 (in Korean).
- [7] R. D. Peacock, W. W. Jones, and R. W. Bukowski, "Verification of a model of fire and smoke transport," Journal of Fire Safety, vol. 21, no. 2, pp. 89-129, 1993.
- [8] R. L. P. Custer and B. J. Meacham, Introduction to Performance Based Fire Safety, NFPA, pp. 177-178, 1997.