

## CFAST를 이용한 다중이용업소 화재특성 분석연구

하지수<sup>1</sup> · 유상열<sup>2</sup> · 한돈희<sup>3</sup> · 김태권<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2010년 2월 5일, 원고수정일 : 2010년 3월 16일, 심사완료일 : 2010년 3월 18일)

### Fire Characteristic Analysis of Multi-Use Hostels by Using CFAST

Ji-Soo Ha<sup>1</sup> · Sang-Yeol Yu<sup>2</sup> · Don-Hee Han<sup>3</sup> · Tae-Kwon Kim<sup>†</sup>

**요 약 :** 본 연구에서는 급격히 증가하고 있는 다중이용업소의 화재사고에 대한 화재특성을 분석함으로써 화재로 인한 피해를 최소화하는데 목적이 있다. 이를 위해서 화재사고에 대한 검증된 분석 프로그램인 CFAST를 이용하여 공동주택에 대한 화재 시뮬레이션을 수행하여 기존의 연구결과와 비교하여 본 연구의 분석에 대한 타당성을 입증하였다. 이를 토대로 다중이용업소의 대표적인 노래방과 고시원에 대한 화재 특성을 분석하여 화재사고 시 대처방안을 수립하여 화재에 대한 안전도를 높이는 데 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

**주제어 :** CFAST, 존 모델, 화재특성, 다중이용업소

**Abstract:** This study has purpose of minimizing damage from fire incident as analyzing the fire characteristic about fire incident of multi-use hostels, which is increasing recently. For this, CFAST, a verified analysis program for the fire incident was employed to prove the logicity of the study by comparing with a established result of the research work and working the fire simulation for an apartment house. On the basis of this, the study will help to improve safety of fire by analyzing the fire characteristic of Karaoke and Gosiwon which are typical model of multi-use hostels and by establishing how to deal with the fire incident.

**Key words:** CFAST, Zone model, Fire Characteristics, Multi-use hostels

### 1. 서 론

화재위험이 높은 것으로 지적되고 있는 고시원과 찜질방, 산후조리원, pc방 등의 다중이용업소의 수가 짧은 기간 동안에 급격하게 증가하고 있다. 소방방재청 집계에 의하면 노래방, 찜질방 등 다중이용업소로 신고등록 또는 허가된 업소는 2009년 기준으로 약 177,000여개 소이다.[1] 이들 업종의 특성상 지하층 영업과 실내 구조물의 다양화와 복잡함으로 인해 화재 시 많은 인명피해가 우려되고, 화재의 발생 및 확산형태도 예측하기 어려워졌다.

특히 최근에 발생한 부산 실내사격장(2009년)과 부산 영도구 노래주점(2009년) 및 용인 고시원(2008년) 등의 화재사고는 다중이용업소의 화재위험성 및 피해크기를 보여주는 대표적인 예이다. 이러한 실제 사례를 바탕으로 발생 가능한 화재를 예측하여 피해의 크기와 종류를 예측할 수 있다면 그에 대한 적절한 대처방법을 제시할 수 있게 될 것이다.

그러나 실제 화재실험은 그 위험성 때문에 현실적으로 어려운 사항이다. 이에 대한 대안으로 컴퓨터

<sup>†</sup> 교신저자(계명대학교 기계자동차공학부, E-mail:tkkim@kmu.ac.kr, Tel: 053-580-5551)

1 계명대학교 에너지환경과학과

2 계명대학교 기계공학과

3 인제대학교 보건안전공학과

터를 이용한 화재해석기법의 발달로 실제 화재사고와 같은 시나리오를 작성하고 이를 시뮬레이션을 통해 미리 위험여부를 예측해 볼 수 있게 되었다. 화재분석모델은 보존법칙 및 실험데이터를 기반으로 하여 화재로 인한 구조물, 계통 및 화재성장 등을 수학적으로 예측하는 방법이다. 화재분석모델의 사용은 검증 및 확인된 화재상황으로 제한된다. 따라서 화재분석모델의 적용 대상을 확대하기 위하여 다양한 화재상황에 대한 화재분석모델의 검증 및 확인과정이 필요하다.

이에 본 연구에서는 NIST(National Institute of Standards Technology)산하 기관인 BFRL (Building and Fire Research Lab.)에서 개발한 CFAST(Consolidated model of Fire growth And Smoke Transpot)[2]를 사용하였고, 2008년 한국기계연구원, 한국건설기술연구원, 한국소방산업기술원이 주관한 주택 실물 화재 실험, 즉, 국내의 거주상황을 대표하는 공동주택을 대상으로 한 실물화재 실험[3] 결과를 토대로 모델 검증 및 분석을 하였다. 이를 토대로 하여 CFAST에 기본적으로 입력되어 있는 물성치[4]를 이용하여 실제 화재사고인 부산 영도구 노래방과 용인 고시원의 화재사고를 대상으로 화재사고를 재구성하여 화재특성을 분석 하였다.

## 2. 모델 검증

### 2.1 수치해석모델

CFAST는 화재구역을 고온의 상층부와 비교적 저온이면서 산소가 풍부한 하층부로 나누어 질량보존법칙과 에너지 보존법칙을 적용하는 2-Zone모델을 사용하여 수치계산을 수행하기 때문에 다른 해석 툴보다 계산시간이 빠르다는 장점을 가지고 있다. CFAST의 출력은 화재가 발생하는 동안 각 구획실의 상부 및 하부 가스층의 온도, 두 층 내의 가시적 연기, 가스 종류의 농도 및 타깃 온도와 스프링클러 작동시간 등을 포함한다. CFAST에 사용되는 압력, 경계층 체적, 경계층 온도를 알기 위해서는 사용되는 방정식은 식 (1)에서 (4)와 같다[2].

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (h_L + h_U) \quad (1)$$

$$\frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{\gamma P} \left[ (\gamma - 1) h_U - V_U \frac{dP}{dT} \right] \quad (2)$$

$$\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_U V_U} \left[ (h_U - c_p m_L T_U) + V_U \frac{dP}{dT} \right] \quad (3)$$

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_L V_L} \left[ (h_L - c_p m_L T_L) + V_L \frac{dP}{dT} \right] \quad (4)$$

### 2.2 주택 실물화재 결과를 통한 검증

화재 예측기술의 정확도 및 신뢰도를 확보하기 위해서는 실험을 토대로 데이터를 확보하고 해석된 현상을 기초로 모델링을 수행하여야 하므로 2008년 한국기계연구원이 주관한 주택 실물화재 실험 [3] 결과를 토대로 CFAST를 이용하여 시나리오를 구성해 보았다.

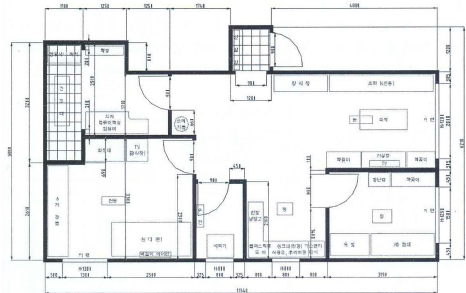


그림 1: 실물화재 대상주택 평면도[3]

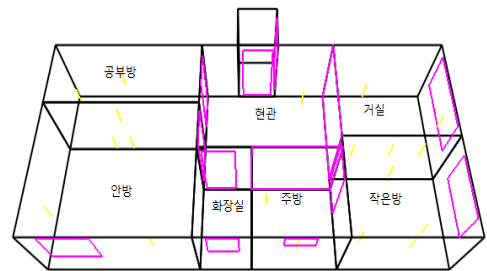


그림 2: CFAST를 위한 대상 주택의 모델

그림 1은 주택 실물화재 실험대상 주택의 평면도를 나타내었고, 이를 CFAST 사용을 위하여 그림 2와 같이 재구성 하였다. 시뮬레이션의 입력조건은 그림 1의 평면도를 토대로 CFAST의 입력과일을 설정하였다. CFAST모델 각 구획실의 가연

물은 실물화재에 대한 가연물의 중량을 제외한 나머지 물성치는 모르기 때문에 CFAST의 기본 물성치[4]데이터를 이용하여 최대한 비슷한 재질로 구성하였다. 또한 각 구역실의 가연물 총 중량과 배치, 개구부의 형상은 실물화재와 동일하게 설정하였다. 화재는 주방의 가스레인지에서부터 자연발화가 되어 화재가 성장하고, 6분후 소방관 진입 상황을 가정하여 방화문이 개방되고 차례로 전면 유리창 파괴(11분), 후면 발코니 유리창 파괴(16분)로 진행되었다.

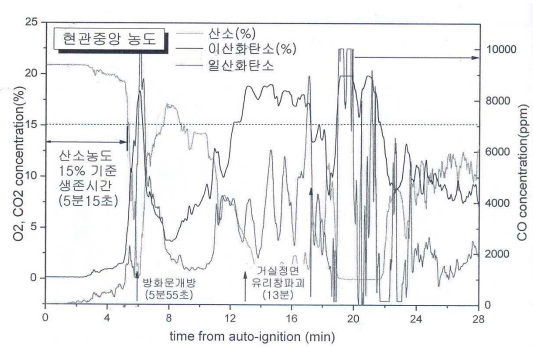


그림 5: 실물화재에 대한 현관 중앙의 농도 분포[3]

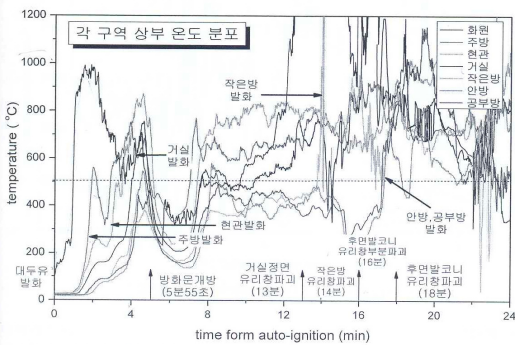


그림 3: 실물화재 주요구역 상층부 온도 분포[3]

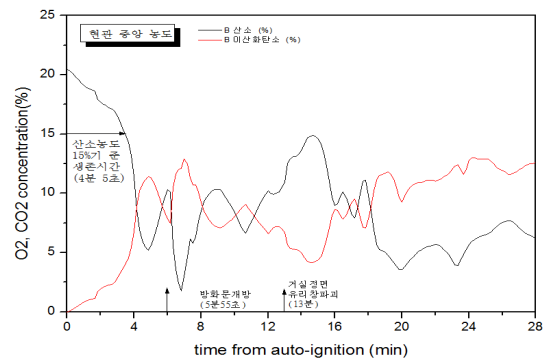


그림 6: CFAST의 현관 중앙 농도 분포

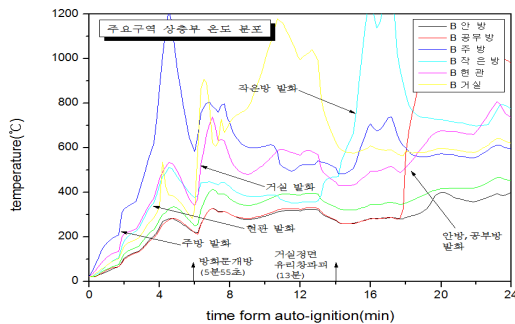


그림 4: CFAST의 주요구역 상층부 온도 분포

그림 3은 실물화재의 주요 구역의 상층부 온도를 도시하였다. 자연발화 후 약 2분경과 시점에서 주방에서 시작하여 현관, 거실 상부의 온도가 급격히 상승한다. 화재는 약 5분 정도까지 급격히 성장하다가 성장이 멈추어 온도가 하강하기 시작한다. 이는 급격한 화재 성장에 의한 산소 소모 때문으로 이 결과는 그림 6의 현관에서의 산소와 이산화탄

소의 농도에서 확인할 수 있다. 방화문 개방과 함께 산소농도는 다시 증가하면서 화재가 재성장하고, 각 구역의 상부 온도를 기준으로 화재 전과 상황을 살펴보면 주방, 현관, 거실, 작은방, 안방 공부방 순으로 전파되었음을 알 수 있다. 그림 4의 CFAST의 결과에서 보는 바와 같이 상층부 온도 그래프도 같은 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6은 현관 중앙의 농도 분포를 나타내고 있다. 실물화재에서는 산소 농도가 15%이하로 떨어지는 시간이 5분 15초인 반면에 CFAST의 결과 데이터를 보면 4분 5초에서 15%이하로 떨어지는 것을 볼 수가 있다. 이 부분은 CFAST에서 주어지는 기본 물성치[4] 데이터를 사용하여 입력 데이터의 물성치 입력이 실물화재와 약간의 차이가 있으나 O<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 농도의 경우 실물화재 실험과 비교하여 보면 그래프의 peak point가 매우 흡사한 것을 볼 수가 있다. 실물화재에 비하여 예측된 온도가 측정된 값보다 20~30% 정도 더 높게 나

오지만, 각 구획실의 온도 경향은 정성적으로 일치하였다. 가스 농도 역시 실험적으로 측정된 값보다 평균적으로 5%정도 낮지만 경향은 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이렇게 실물화재와 어느정도 오차가 생기는 이유는 실물화재의 가연물과 CFAST에서 사용된 가연물의 기본적인 물성치[4] 값이 정확하게 일치하지 않았으며, CFAST에서는 문의 틈새 등의 경계조건의 입력에서 다소 오차를 유발할 수 있다. 또한 실물화재에서 측정된 센서의 위치와 CFAST에서 계산되어지는 값의 위치가 정확히 일치하지 않아서 나타난 현상으로 보인다.

### 3. 화재 사고 분석 수행

#### 3.1 화재 시나리오

실물화재를 통한 검증으로 각 구획실의 온도 및 산소, 이산화탄소 등의 경향이 거의 일치하는 것을 확인하였다. 본 절에서는 검증된 CFAST를 이용하여 다중이용업소의 화재사고 시나리오를 재구성하여 분석을 하였다.

##### 3.1.1 부산 영도구 노래방 화재사고 분석

CFAST를 이용하여 최근에 인명피해가 컸던 부산 영도구 노래방 화재사고를 시뮬레이션 해보았다.

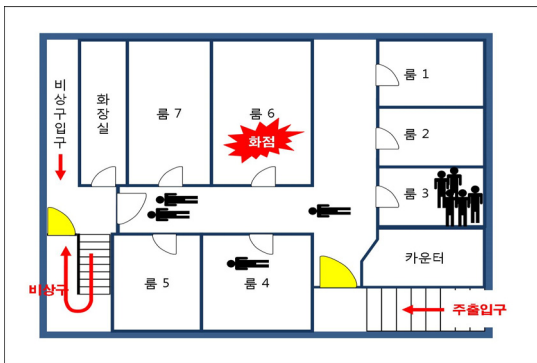


그림 7: 영도구 노래방 사고상황도

이 노래방은 영업장 면적이 116.5m<sup>2</sup>으로 그림 7의 사고 상황도를 참조하여 그림 8과 같이 각 구획실을 정의하고, 출입구와 3번, 7번방의 개구부만 열어놓고 나머지 개구부는 닫힌 상태로 입력하였다.

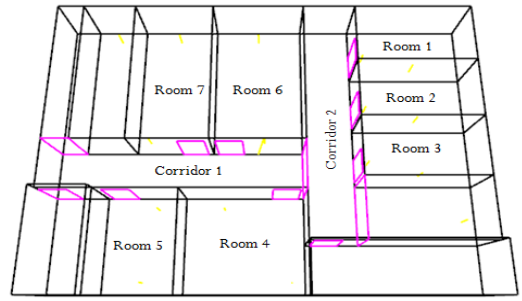


그림 8: 노래방의 각 구획실 정의

각 개구부는 1m×2m의 크기로 동일하게 적용하였다. 초기 점화는 6번방의 소파에서 시작되며 급격히 번지는 시나리오로 설정하였다. 가연물의 물성치는 CFAST의 기본 물성치[4]로 입력하였다.

그림 9는 노래방 상층부의 온도분포를 보여주고 있다. 6번방에서 시작한 화염은 약 4분정도까지 플래시오버로 급격히 성장하다가 성장이 멈추어 온도가 하강하기 시작한다. 이는 급격한 화재 성장에 따른 산소 부족 때문으로써, 이 결과는 그림 10의 산소 농도 그래프에서 확인할 수 있다. 온도는 화재 발생 구역인 6번방이 가장 높았으며, 사건 당시 화재가 발생한 6번방을 제외한 구역은 화재가 발생한 방에 비해 온도가 화재발생 직후와 화재발생 이후의 온도가 비슷하므로 화재가 발생하지 않은 것으로 추정된다. 이는 실제 사고에서 화재가 일어난 방을 제외하고는 다른 방과, 복도에서는 약간의 그을림만 발생하였다는 결과와 상통한다.

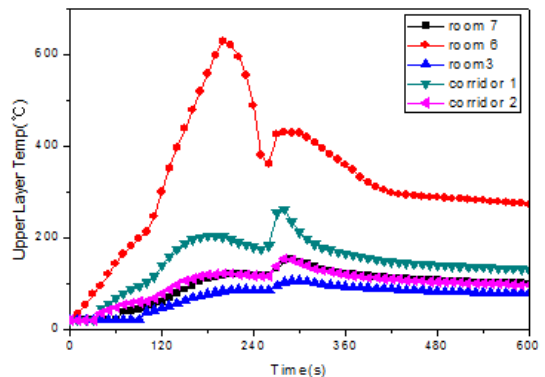


그림 9: 노래방 상층부 온도 분포

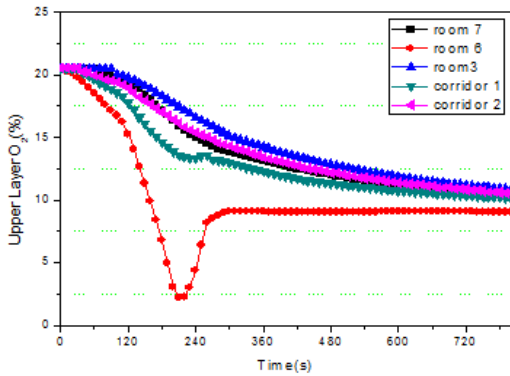


그림 10: 노래방 상층부 산소 농도 분포

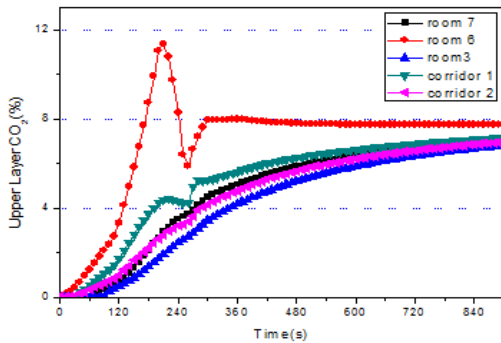


그림 11: 노래방 상층부 이산화탄소 농도 분포

그림 10과 그림 11에서 화재가 발생한 6번방의 산소 및 이산화탄소의 농도를 보면, 약 2분 후 산소 농도가 15%이하로, 이산화탄소 농도는 5%이상 나오는 것을 알 수 있다. 이 수치는 인체에 직접적인 영향을 주는 수치이며[5], 복도 1 역시 약 3분이 지나는 시점에서 이와 같은 수치가 나오므로 7번방에 있던 인원들이 최소한 3분 이내에 복도구역을 지나서 출입구로 빠져나가야 가스로 인한 피해를 줄일 수 있었을 것으로 판단된다.

그림 12는 주요 구획실의 감광계수(optical density)를 나타내었다. 감광계수란 연기의 농도에 따른 투과량으로부터 계산한 농도를 기준으로 하여 시야상태를 나타낸 가장 적절한 농도표현이다. 감광계수가 10이 되면 화재 최성기 때의 연기 농도로 유도등이 보이지 않을 정도의 연기량이다.[5] 화재발생 후 약 3분이 지나면 복도 전 구역이 감광계수가 10 이상이 되는 것을 알 수 있다.

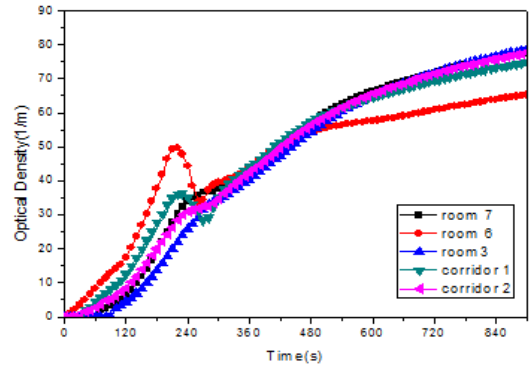


그림 12: 노래방 주요 구역의 연기량

### 3.1.2 용인 고시원 화재사고 분석

2008년 7월에 발생한 용인 고시원 화재사고에 대해서도 앞의 영도구 노래방과 같은 방법으로 CFAST를 이용하여 분석을 수행하였다. 고시원 총 면적은 559.9㎡의 별집형 구조로 총 66개의 방이 있으며 방 한 개당 면적은 6㎡이다. 고시원은 구조가 복잡하고, 방이 많아서 그림 13에서 보듯이 화재가 발생한 남6번방을 중심으로 고시원 내부의 일부분만을 재구성 하였다.

초기 점화는 6번방에서부터 시작하여 6번방은 전소되며, 화염이 송풍구를 따라 확산되면서 8번방의 침대가 불에 타는 시나리오로, 6번방을 제외한 다른 방들의 개구부는 막힌 상황이다. 화재가 발생한 두 방을 중심으로 온도 및 복도로 확산되는 가스 농도를 계산하였다.



그림 13: 고시원 내부 구획실 정의

그림 14는 고시원 상층부의 온도를 나타낸 것으로

로, 전소가 된 6번방의 온도는 약 2분 전후로 가장 높았으며 이때 화재가 최대로 성장하며, 침대의 일부분만 탄 8번방보다 복도의 온도가 더 높은 것을 알 수가 있다. 이는 8번방의 개구부가 막혀 외부의 다른 유동의 영향이 미치지 않은 것으로 보인다.

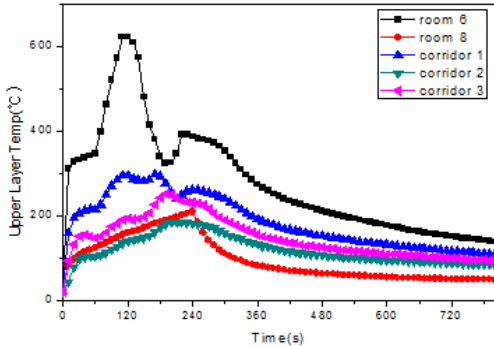


그림 14: 고시원 상층부 온도 분포

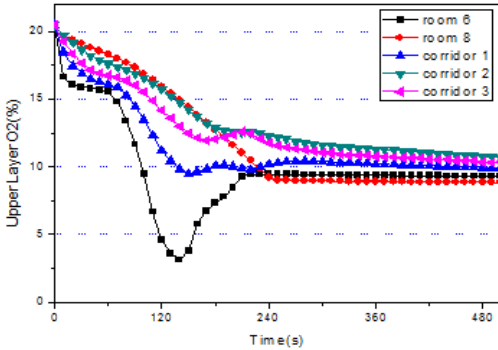


그림 15: 고시원 상층부 산소 농도 분포

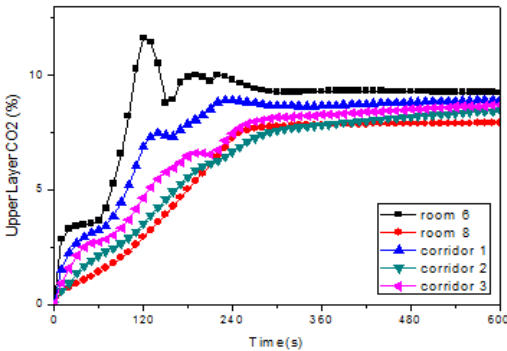


그림 16: 고시원 상층부 이산화탄소 농도 분포

그림 15와 그림 16은 구획실의 산소 농도와 이산화탄소 농도를 나타낸 그래프이다. 복도 전 구역의 산소 농도가 15%이하로 떨어지는 시간은 화재 발생 후, 약 2분 30초정도이며, 이산화탄소 역시 5%이상으로 올라가는 시간은 2분 40초 정도이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 CFAST를 이용하여 실물화재 실험결과를 토대로 시나리오를 구성하고, 모델검증을 하였으며, 최근에 인명피해가 컸던 다중이용업소의 화재사고인 부산 영도구 노래방과 용인 고시원의 화재사고를 재구성하여, 화재특성을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공동주택을 대상으로 한 실물화재 실험결과를 CFAST로 모사하였고, 이 결과를 통해서 각 구획실의 온도 및 산소, 이산화탄소 등의 결과와 실물화재 실험의 데이터의 경향이 거의 일치하는 것을 확인하였다.

2) 노래방과 고시원을 CFAST로 분석한 결과, 화재가 일어난 구획실은 플래쉬오버로 인해 화재가 성장하여 급격히 온도가 상승하다가, 산소부족으로 인해 더 이상 화재가 성장하지 않고, 온도가 떨어지는 것을 알 수 있었다.

3) 노래방과 고시원 모두 화재 발생 약 2분~3분 이후, 화재가 일어난 구획실 근처의 가스 농도를 보면 산소 농도 15% 이하, 이산화탄소 농도 5% 이상 나타나는 것을 알 수 있다.

4) 화재가 성장함과 동시에 연기량이 급격히 증가하여 약 3분이 지나면 유도등이 보이지 않을 정도의 연기가 발생한다.

5) 두 화재사고 모두 내부의 구조가 밖의 개구부와는 차단된 구조로 화재는 한번만 일어나고 2차 화재는 발생하지 않은 것으로 추정된다. 그러나 산소의 부족과 동시에 연기로 인한 대피로의 시야확보가 되지 않아 출구를 찾지 못하고, 이산화탄소 및 각종 유해가스의 증가로 인한 중추신경마비, 시각 및 운동장애 등으로 인명피해가 컸던 것으로 판단된다.

6) 개구부의 조건, 가연물, 제시된 변수들에 대한 고려를 시나리오에서 충분히 반영한다면 화재로



인한 피해 여부를 보다 정확하게 얻을 수 있을 것으로 생각되며, 다양한 시나리오를 설정하여 분석한 결과를 토대로 소화설비의 설치 필요 유무와 같은 개선방안을 수립하여 다중이용업소의 화재에 대한 안전도를 높이는 데 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부-한국산업기술평가원 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터와 소방방재청 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- [1] 소방방재청 소방제도과, "2009 소방행정통계자료," 소방방재청, pp. 84-96, 2009.
- [2] Richard D. Peacock, CFAST- Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, NIST, 2005.
- [3] 김명배 외, 주택 실물 화재 실험 위탁사업 연구, 한국기계연구원 연구보고서 BSG244-1434.M, 소방방재청, 2008.
- [4] Richard D. Peacock, Walter W. Jones and Richard W. Bukowski, "Verification of a model of fire and smoke transport," Fire Safety Journal, vol. 21, pp. 89-129, 1993.
- [5] 박영근, "화재시의 연기독성," 방재기술, 제36호, pp. 18-25, 2004.

## 저 자 소 개



### 하지수(河芝洙)

1960년 6월생. 1983년 서울대학교 항공공학과 졸업(학사). 1985년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(석사). 1991년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(박사). 1991년~2007년 현대중공업 엔진연구실 근무. 2007~현재 계명대학교 에너지환경공학과 재직 중.



### 유상열(柳相列)

1981년 3월생. 2008년 계명대학교 기계자동차공학부 (학사). 2008년~현재 계명대학교 대학원 기계공학과 석사과정.



### 한돈희(韓敦熙)

1957년 9월생. 1980년 공주사범대학 물리교육학과 졸업(학사). 1985년 서울대학교 환경보건학과 졸업(석사). 1992년 서울대학교 환경 및 산업보건학과 졸업(박사). 1989년~현재 인제대학교 보건안전공학과 재직 중.



### 김태권(金兌權)

1957년 8월생. 1979년 경북대학교 기계공학과 졸업(학사). 1981년 경북대학교 기계공학과 졸업(석사). 1992년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1981년~1995년 한국기계연구원 내연기관연구실장. 1995년~현재 계명대학교 기계자동차공학부 재직 중.