



# 실증실험 검증을 통한 FDS 화재모델의 신뢰성 연구

## Study of the Reliability of the FDS Fire Model by Verification Experiments

김재범\* · 이재문\*\* · 민세홍\*\*\*

Kim, Jaebum\*, Lee, Jaemoon\*\*, and Min, Sehong\*\*\*

### Abstract

Currently, fire dynamics simulation (FDS) is used as a means to evaluate the risk of fire in a building. It is necessary to input the correct factor values and set the proper mesh for combustible materials to obtain highly reliable fire simulation results. In this study, American pine, which is often used as furniture material, was compared and analyzed via lumber fire source experiments and FDS to extract a highly reliable factor value. According to the comparative analysis of the simulation values and the lumber fire source experiment values after inputting the ignition temperature and heat release rate per unit area (HRRPUA) into the FDS, the heat release rate (HRR) and the correlation analysis values for CO and CO<sub>2</sub> were found to be 95%, 88%, and 65%, respectively, at maximum. Unlike the HRR interpretation method, CO and CO<sub>2</sub> measurements use a device to output the information at one point so that the difference from the output value of the room corner test is generated. As a result, the correlation was calculated to be comparatively low. However, the maximum values of CO and CO<sub>2</sub> are very small in comparison with the allowed limits for human life safety standards, so they do not affect the risk. Hence, in the future, the factor value of the lumber fire source can be used as highly reliable data for FDS to perform lumber fire simulations of high-rise buildings.

**Key words** : Wood Fire Experiments, FDS, Combustion Product

### 요 지

현대 사회는 건축물의 화재위험성을 평가하기 위한 수단으로 FDS를 사용하고 있으며, 신뢰도 높은 화재시뮬레이션의 결과를 얻기 위해서는 가연물의 정확한 인자 값 입력 및 적절한 Mesh 설정이 필요하다. 이에 본 연구를 통하여 가구 재료로 많이 쓰이는 미송을 목재화원실험 및 FDS로 비교분석하여 신뢰도 높은 인자 값을 추출하였다. 미송의 발화온도 및 HRRPUA를 FDS에 입력하여 시뮬레이션 값을 목재화원실험값과 비교분석해본 결과 HRR, CO 및 CO<sub>2</sub>의 상관분석값은 최대 95%, 88%, 65%로 분석되었다. HRR의 해석 방법과는 달리 CO 및 CO<sub>2</sub>는 Device를 사용하여 한 지점에 대한 정보를 출력하기 때문에 룸코너테스터의 출력 값과 차이가 발생하여 상관도가 비교적 낮게 계산되었다. 하지만 CO 및 CO<sub>2</sub>의 최대값이 인명안전기준의 허용한계에 비하여 매우 작아 위험도에 영향을 미치지 않으므로, 이 목재화원 인자값은 추후 고층 건물의 목재 화재시뮬레이션을 수행하기 위한 FDS의 신뢰도 높은 기본 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 목재화원실험, FDS, 연소생성물

## 1. 서 론

현대 사회는 인구의 밀집화로 인해 지속적인 건물의 고층화

가 이루어지고 있다. 건물의 고층화로 재난 및 재해 발생 시 인적·물적 피해를 크게 증가시키고 있다. 이에 재난 및 재해의 피해를 줄이고자 다양한 예방활동이 이루어지고 있다.

\*정회원, 가천대학교 설비·소방공학과 석사과정(E-mail: maltize2007@naver.com)

Member, Master Course, Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University

\*\*정회원, 가천대학교 설비·소방공학과 석사(E-mail: dddcom@daum.net)

Member, Master Degree, Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University

\*\*\*교신저자, 정회원, 가천대학교 설비·소방공학과 교수(Tel: +82-31-750-5714, Fax: +82-31-750-8746, E-mail: shmin@gachon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University

그중 하나로 화재의 성상을 예측하여 안전성을 평가하는 수단으로 Fire Dynamic Simulator (FDS)가 사용되고 있다. FDS는 미국 NIST 부설 건축화재연구소 Building and Fire Research Laboratory (BFRL)에서 만든 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)과 Navier-Stokes 방정식(저속 열유동장) 이론을 기본으로 하는 화재시뮬레이션 프로그램이다.

NIST에서 제공하는 FDS 목재데이터를 사용하여 화재시뮬레이션을 진행할 경우 목재화원실험의 목재 연소속도에 비하여 약 4.76배 빠르게 연소되어 데이터의 사용이 불가능하다고 판단하였다. 따라서 다양한 시나리오에 따른 룸코너테스터를 통한 목재의 연소 실험과 동일 조건에서의 화재시뮬레이션 해석 결과를 비교 분석하여 신뢰도가 높은 목재화원 데이터의 기반을 잡기 위하여 본 연구를 진행하였다.

Table 1에서 확인할 수 있듯이 소방청 국가화재정보시스템의 2017년 사상원인별 인명피해 현황 통계에 따르면 연기 및 유독가스흡입에 대한 인명피해는 60명(30.30%)으로 분석되었으며, 연기 및 유독가스 흡입과 함께 소소한 경우는 24명(12.12%)으로 분석되었다. 연기 및 유독가스를 흡입한 경우는 총 84명으로 사망인원의 42.42%에 해당하는 큰 비중을 차지하고 있다(NFA, 2017). 이와 같이 연소생성물이 화재의 위험요소 중 큰 부분을 차지하고 있기 때문에 CO와 CO<sub>2</sub>에 대한 화재시뮬레이션도 함께 진행하였다.

## 2. 목재화원실험

### 2.1 목재화원실험 시나리오

목재화원실험은 우리나라에서 가구 재료로 많이 사용되고 있는 미송의 화재크기를 정량적으로 구분하기 위하여 목재의 중량에 따라 5 kg, 7 kg, 10 kg 3개의 시나리오로 구분하여 진행하였다. 각각의 실험은 중량이 약 0.106 kg인 우드스틱을 47개, 66개, 88개를 Fig. 1과 같이 높이 0.19 m의 받침대 위에 쌓아올려 진행하였으며, 우드스틱의 정보는 Table 2와 같다. 원활한 초기 연소를 위하여 물 1 ℓ, 헵탄 1 ℓ를 0.24 m × 0.24 m × 0.06 m (길이 × 너비 × 높이)의 트레이에 담아 사용하였다.

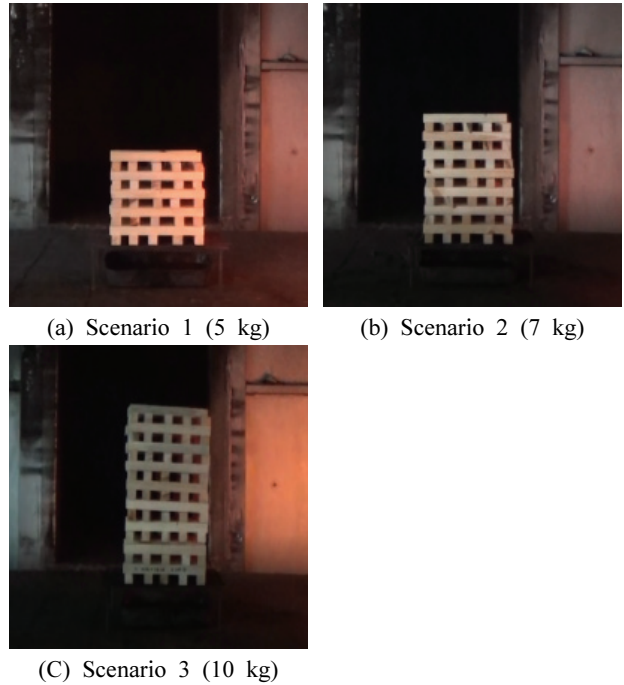


Fig. 1. Scenario-Specific Wood (Test)

Table 2. Wood Stick Status

| Wood    | Pine Tree                     |
|---------|-------------------------------|
| Size    | W 0.03 m × D 0.03 m × L 0.3 m |
| Weight  | 0.106 kg                      |
| Density | 392.6 kg/m <sup>3</sup>       |

목재화원실험은 KS F ISO 9705 (2009)의 시험방법과 같이 룸코너테스터를 통하여 진행하였으며, 실험을 진행한 실의 크기는 3.6 m × 2.4 m × 2.4 m (길이 × 너비 × 높이)이며, 문 크기는 0.8 m × 2.0 m (너비 × 높이)이다. 이 실험을 통하여 목재가 연소하는 동안 발생한 Heat Release Rate (HRR), CO 및 CO<sub>2</sub> 값을 측정하였다.

### 2.2 목재화원실험 결과

헵탄은 초기 연소를 돕기 위하여 사용되었으므로 실험 데이터에서 제외시켰다. 초기 점화를 위해 사용한 헵탄이

Table 1. Status of Casualties by Cause of Death (2017)

| Cause of Death                     | Sum     |            | Dead    |            | Injury  |            |
|------------------------------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|
|                                    | Persons | Percentage | Persons | Percentage | Persons | Percentage |
| Sum                                | 198     | 100.00%    | 37      | 100%       | 161     | 100%       |
| Smoke, Toxic Gas Inhalation        | 60      | 30.30%     | 11      | 29.73%     | 49      | 30.43%     |
| Smoke, Toxic Gas Inhalation & Burn | 24      | 12.12%     | 13      | 35.14%     | 11      | 6.83%      |
| Burn                               | 88      | 44.44%     | 2       | 5.41%      | 86      | 53.42%     |
| Other                              | 4       | 2.02%      | 1       | 2.70%      | 3       | 1.86%      |

목재와 함께 연소할 때는 최대 열방출율이 약 300 kW까지 올라갔으나, 헵탄이 전부 연소한 이후부터는 각각의 목재 더미는 열방출율이 급격히 감소하면서 평행을 유지하였다. Fig. 1의 HRR 그래프의 99~387초 구간은 헵탄이 연소한 구간으로 약 288초 동안 헵탄이 연소되었다. Figs. 2, 3, 4 and Table 3에서 확인할 수 있듯이 순수한 목재의 연소 시간동안 시나리오 1의 HRR값은 387~711초 구간인 324초 동안 약 100 kW, 시나리오 2는 438~819초 구간인 381초 동안 약 140 kW, 시나리오 3은 411~828초 구간인 417초 동안 약 180 kW를 유지하는 것으로 분석되었다. CO 측정 시간은 헵탄의 연소가 끝난 후 목재의 연소가 안정적으로 이루어지는 점화 후 600초로 설정하였으며, Table 4와 같이 목재의 연소가 지속되는 동안 시나리오 1, 2, 3의 CO 최댓값은 각각 30 ppm, 51 ppm, 77 ppm으로 거의 검출되지 않았으며, 연소가 끝나가는 시점에만 목재 1 kg 당 약 15 ppm 검출되었다. CO<sub>2</sub>도 CO와 마찬가지로 점화 후 600초간 측정하였다. CO<sub>2</sub>의 농도는 헵탄이 연소하는 동안 최대 0.72%까지 올라갔으며, 순수한 목재의 연소에 의하여 검출된 시나리오별 CO<sub>2</sub> 농도의 최댓값은 각각 0.26%, 0.34%, 0.49%로 거의 검출되지 않았다. 이는 목재 1 kg 당 0.05%로 CO의 값과 함께 Table 5 인명안전기준의 허용한계인 CO 1,400 ppm과 CO<sub>2</sub> 5%에 한참 미치지 못하는 수치이다.

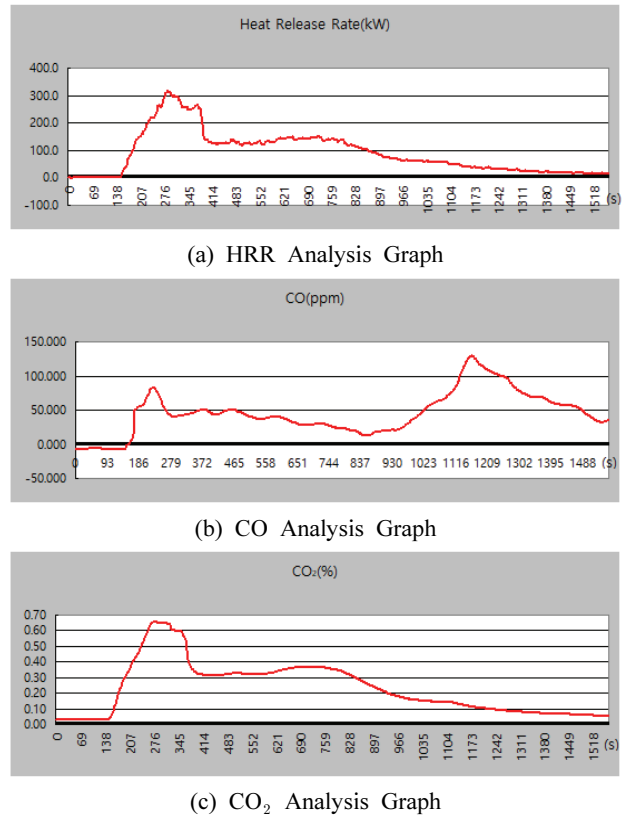


Fig. 3. Scenario 2 Analysis Graph

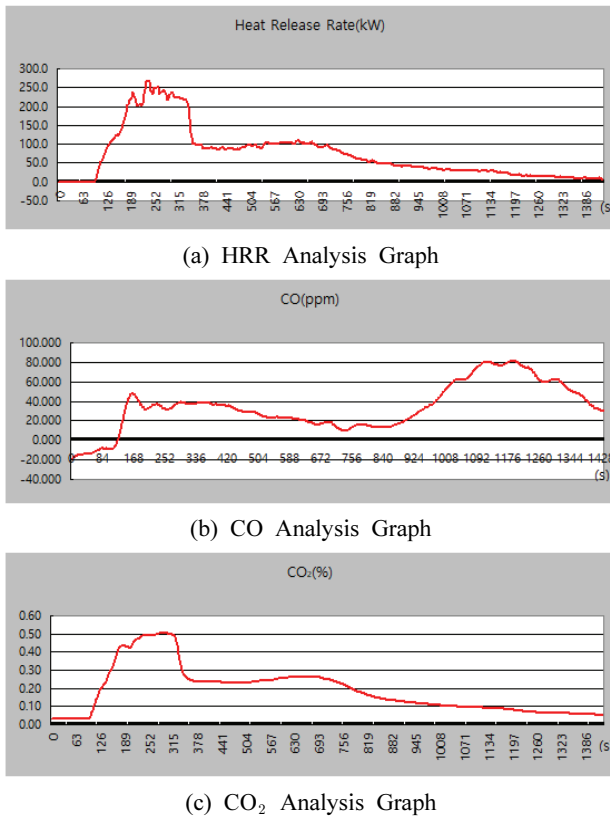


Fig. 2. Scenario 1 Analysis Graph

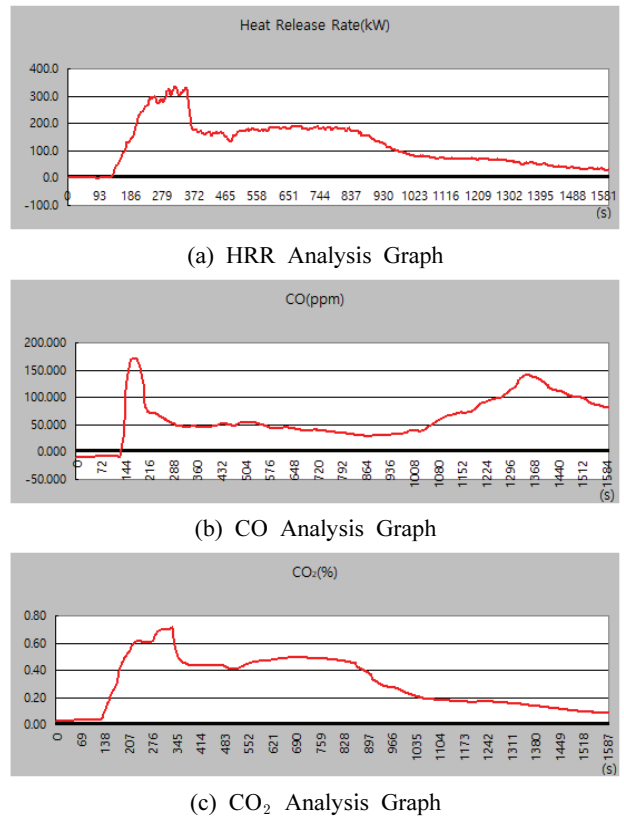


Fig. 4. Scenario 3 Analysis Graph

**Table 3.** Burning Time and Average HRR of Wood per Scenario

| Scenario   | Test Preparation Time | Burning Time of Heptane and Wood | Burning Time of Wood | Average HRR of Wood |
|------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------|
| Scenario 1 | 0 ~ 99 sec.           | 99 ~ 387 sec.                    | 387 ~ 711 sec.       | 100 kW              |
| Scenario 2 | 0 ~ 150 sec.          | 150 ~ 438 sec.                   | 438 ~ 819 sec.       | 140 kW              |
| Scenario 3 | 0 ~ 123 sec.          | 123 ~ 411 sec.                   | 411 ~ 828 sec.       | 180 kW              |

**Table 4.** Maximum CO and CO<sub>2</sub> per Scenario

| Division       | Scenario 1 |                     | Scenario 2 |                     | Scenario 3 |                     |
|----------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|
|                | CO (ppm)   | CO <sub>2</sub> (%) | CO (ppm)   | CO <sub>2</sub> (%) | CO (ppm)   | CO <sub>2</sub> (%) |
| Heptane + Wood | 48         | 0.51                | 83         | 0.66                | 172        | 0.72                |
| Wood           | 30         | 0.26                | 51         | 0.34                | 77         | 0.49                |

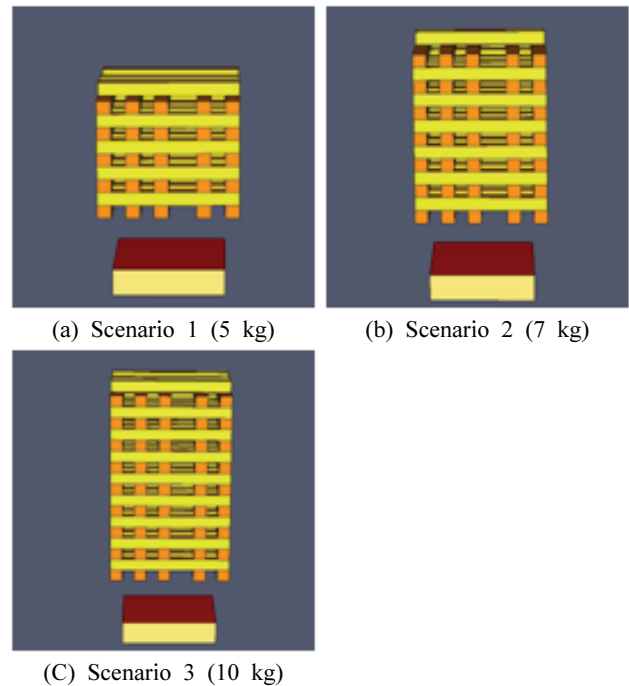
**Table 5.** Life Safety Standard

| Properties                   | Risk Conditions      |
|------------------------------|----------------------|
| Temperature                  | T > 60°C             |
| Visible Distance             | V < 5 m              |
| O <sub>2</sub> Concentraion  | O <sub>2</sub> < 15% |
| CO Concentraion              | CO > 1,400 ppm       |
| CO <sub>2</sub> Concentraion | CO <sub>2</sub> > 5% |

### 3. FDS 화재모델의 신뢰성 검증

#### 3.1 FDS 화재모델의 해석조건

FDS 분석에 사용된 목재의 크기, 질량 및 개수 등은 목재화원 실험과 동일한 조건으로 설정하여 Fig. 5와 같이 모델링하였다. Min and Lee (2012) 및 Min and Lee (2013)을 참고하여 인자 값을 설정하였으며, Min and Yun (2009)를 참고하여 시뮬레이션의 연산 범위를 설정하였다. FDS의 Mesh Cell Size는 0.01 m × 0.01 m × 0.01 m (길이 × 너비 × 높이), 0.03 m × 0.03 m × 0.03 m 및 0.05 m × 0.05 m × 0.05 m로 시뮬레이션을 진행한 결과, Cell 하나의 크기가 0.01인 경우와 0.03인 경우에는 결과 값의 차이가 거의 없었으며, 0.05인 경우에는 앞의 두 경우와 열방출을 평균이 약 16% 이상 차이가 발생하여 시뮬레이션의 연산시간 등을 고려하여 Cell 한 개의 크기를 0.03 m로 설정하여 모든 시뮬레이션을 진행하였다. 또한, Cell의 총 개수는 2, 3, 5의 배수일 경우, 원활하게 화재시뮬레이션 연산이 이루어지는 것을 감안하여 x축 120개, y축 80개, z축 80개인 총 768,000개로 설정하였다. 해석공간은 룸코너테스터와 동일한 크기로 가로 3.6 m, 세로 2.4 m, 높이 2.4 m로 하였으며, 하나의 Cell 크기를 0.01로 적용했을 때 Cell의 총 개수는 20,736,000개로 증가했으며, 원활한 시뮬레이션을 수행하기 위해서 Multi Mesh를 사용하였다.



**Fig. 5.** Scenario-Specific Wood (FDS)

헵탄이 연소하는 시간은 목재화원 실험데이터를 분석하여 0초에서 288초로 설정하였다. 분석 시간은 화재시뮬레이션 연산 소요시간과 목재의 연소가 끝나는 시간을 고려하여 1,000초로 설정하였다. 발화온도는 Li and Drysdale (1992)의 연구에 의하면 미송은 약 380 °C에 발화하는 것으로 기록되어 이와 같이 설정하였다. Heat Release Rate Per Area (HRRPUA)는 100~200 kW/m<sup>2</sup>를 20 kW/m<sup>2</sup>씩 나누어 시뮬레이션을 실행한 결과, 100 kW/m<sup>2</sup> 이하의 값에서는 목재의 열분해만 이루어질 뿐 발화가 되지 않았으며, 120 kW/m<sup>2</sup>일 때 작열연소와 함께 목재화원실험과 가장 유사한 데이터가 출력되었다. HRRPUA의 값이 120 kW/m<sup>2</sup>에서 커질수록 출력되는 HRR, CO 및 CO<sub>2</sub>의 값이 커지는 것을 확인하였다.



### 3.2 FDS 화재모델 분석 결과

화재시뮬레이션과 목재화원실험의 화재 크기 및 형태를 비교하기 위하여 시간대별 시뮬레이션 분석결과와 목재화원실험을 비교해본 결과, Fig. 6과 같이 시간대별 화재의 크기 및 형태가 상당히 유사하게 나타났다.

화재시뮬레이션과 목재화원실험을 통하여 출력된 HRR, CO, CO<sub>2</sub> 값들의 상관관계를 분석하기 위하여 Fig. 7과

같이 엑셀의 상관분석을 사용하였다. 상관분석을 통하여 출력된 상관계수(R)의 값이 1에 가까울수록 비교분석한 두 집단의 관련 정도가 높은 것을 의미하며, 서로 다른 수단을 통하여 출력된 동일한 인자 값의 상관관계는 유사도를 의미한다. 즉, 화재시뮬레이션에 의한 HRR 값과 목재화원실험에 의한 HRR 값의 상관관계는 유사도를 의미한다.

























| Time               | 50 sec.                                                                             | 300 sec.                                                                            | 600 sec.                                                                              | 1000 sec.                                                                             |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Test (5 kg)        |    |    |     |    |
| Simulation (5 kg)  |    |    |    |    |
| Test (7 kg)        |   |   |    |   |
| Simulation (7 kg)  |  |  |  |  |
| Test (10 kg)       |  |  |   |  |
| Simulation (10 kg) |  |  |  |  |

Fig. 6. Test and Simulation Video Comparison

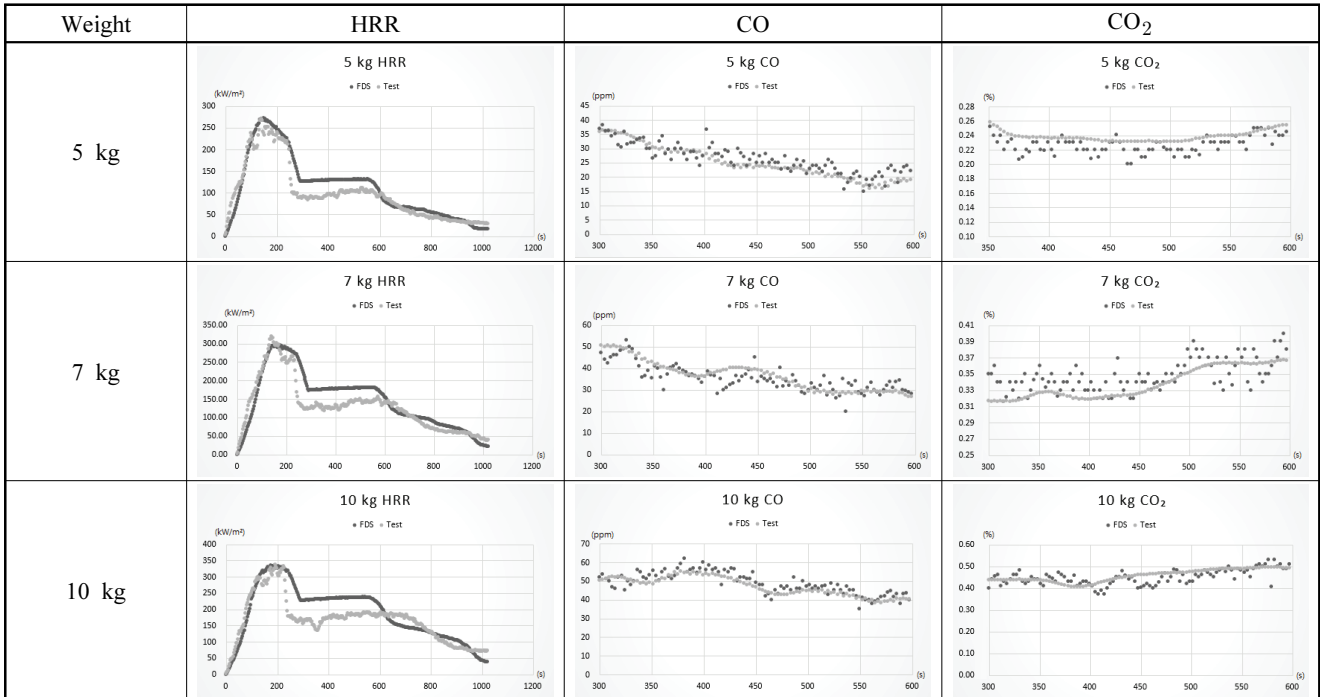


Fig. 7. Test and FDS Comparison Graph

HRR값은 연소 시작시간부터 연소가 거의 끝나가는 0~1,000초 동안 분석하였다. 분석 결과, 시나리오 1, 시나리오 2, 시나리오 3의 상관계수값은 각각 R=0.95, R=0.91, R=0.88로 약 95%, 91%, 88%의 높은 유사도를 나타냈다. 이를 통하여 목재 1 kg당 약 1.6%의 오차가 생기는 것을 알 수 있다.

CO 및 CO<sub>2</sub>의 측정 시간은 점화원을 제외한 순수 목재의 연소생성물을 측정하기 위하여 헵탄의 연소가 끝난 이후인 300초부터 목재의 연소 형태가 안정적으로 나타나고 있는 600초로 산정하였다. 상관분석 결과 시나리오 1의 CO 및 CO<sub>2</sub>의 상관계수값은 각각 R=0.88, R=0.65로 약 88%, 65%의 유사도를 나타내었다. 시나리오 2의 CO 및 CO<sub>2</sub>의 상관계수값은 각각 R=0.81, R=0.63로 약 81%, 63%의 유사도를 나타내었으며, 시나리오 3의 CO 및 CO<sub>2</sub>의 상관계수값은 각각 R=0.86, R=0.61로 약 86%, 61%의 유사도를 나타내었다. 시뮬레이션 상의 CO 및 CO<sub>2</sub> 측정 방법은 HRR 측정방법과 다르게 특정위치에 Device를 설치하여 값들을 분석하므로 룩코너테스터에서 측정하는 방법과 차이가 발생하기 때문에 HRR에 비하여 상관분석 값이 작게 출력되었다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 가장 많이 쓰이는 가구목재 중 하나인 미송의 목재화원실험과 화재시뮬레이션을 비교 분석하여 FDS에 입력 가능한 신뢰도 높은 미송의 열방출율, 발화온도 등의 인자값과 최적의 화재시뮬레이션을 위한 설정값 등을

도출하였다.

- (1) 화재시뮬레이션에서 미송의 발화온도를 380 °C, HRRPUA를 120 kW/m<sup>2</sup>로 설정하였을 때 목재화원실험의 출력값과 가장 유사하게 열방출율과 연소생성물의 수치가 출력되는 것으로 나타났다. 미송의 밀도는 목재화원실험에 사용한 목재의 부피 및 질량을 측정하여 계산한 값을 동일하게 적용시켰으며, FDS 모델링 시 목재의 크기 및 형태는 실험에 사용한 목재의 크기 및 형태를 1:1 비율로 입력하였다. FDS의 연산 영역을 나타내는 Mesh의 각 Cell의 크기는 0.03 m × 0.03 m × 0.03 m (길이 × 너비 × 높이)로 설정할 경우 높은 정확도의 시뮬레이션 결과 값을 얻을 수 있다. 건축물에 목재를 열해리 모델로 사용할 경우 Multi Mesh를 사용하여 화원을 포함하는 부분은 0.03 이하의 Cell을 사용해야 하며, 이외의 부분은 화원에 사용한 Cell 크기의 배수가 되는 Cell의 크기를 사용하여 시뮬레이션을 진행하도록 해야 한다.
- (2) 목재화원실험과 화재시뮬레이션 상관분석 결과 HRR 값은 최대 95%로 분석되었으며, CO 및 CO<sub>2</sub>의 값은 각각 최대 88%, 65%로 분석되었다. FDS에 입력한 인자 값이 화원실험의 목재 특성과 완벽히 일치하지 않기 때문에 입력한 목재의 질량이 커질수록 신뢰도가 낮아지는 것으로 확인되었으며, 목재 HRR의 경우 1 kg당 약 1.6%의 오차가 생기는 것으로 분석되었다. 측정된 CO 및 CO<sub>2</sub>의 값은 매우 작은 값으로 목재화재

에서의 위험에 거의 영향을 주지 않아 연구결과에 고려하지 않았지만, 열분해 시 많은 CO 및 CO<sub>2</sub>를 방출하는 폴리우레탄 등의 화재시물레이션을 진행하는 경우에는 고려해야 한다.

- (3) 연구를 통하여 신뢰성을 높일 수 있는 FDS의 사용방법 및 입력 가능한 미송의 인자 값을 추출하였으며, 연구 결과는 고층 건물의 목재화재시물레이션을 수행하기 위한 FDS의 기본 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단 된다.

### 감사의 글

본 연구는 국민안전처 현장중심형 소방활동지원기술개발사업의 연구비 지원(MPSS-소방안전-2015-68)에 의해 수행되었습니다.

본 연구는 2018년 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임(GCU-2018-0360).

### References

KS F ISO 9705. (2009). *Fire Tests – Full-scale room test for surface products*.

Li, Y., and Drysdale, D.D. (1992). Measurement of the ignition temperature of wood. *Proceedings of the*

*Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology*, pp. 380-385.

Min, S.H., and Lee, J.M. (2012). A study on concurrent fire appearance through openings. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 90-96.

Min, S.H., and Lee, J.M. (2013). A study on the fire reconstruction of exterior on high-rise building: Focus on fire case including the Woosin Golden Suite in Haeundae. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 25-30.

Min, S.H., and Yun, J.E. (2009). A study on the modeling of vertical spread fire of exterior panel by fire dynamic simulation (FDS). *Journal of Korea Safety Management & Science*, Vol. 11, No. 2, pp. 77-85.

National Fire Agency (NFA). (2017). *Status of casualties by cause of death*. National Fire Data System (NFDS), Korea.

---

|                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| <b>Received</b> | November 20, 2018 |
| <b>Revised</b>  | November 23, 2018 |
| <b>Accepted</b> | December 3, 2018  |