

[Research Paper]

## UL 268 목재 화원을 이용한 실화재실험 및 화재시뮬레이션 비교 연구

이가현 · 이성은\* · 김시국\* · 이승철\*\*†

강원대학교 일반대학원 대학원생, \*호서대학교 소방방재학과 교수, \*\*강원대학교 소방방재공학전공 교수

### Study on Smoke Detector Characteristics Using Fire Simulations

Ga-Hyeon Lee · Sung-Eun Lee\* · Si-Kuk Kim\* · Seung-Chul Lee\*\*†

Graduate Student, Kangwon National Univ.,

\*Professor, Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo Univ.,

\*\*Professor, Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National Univ.

(Received March 5, 2021; Revised July 19, 2021; Accepted August 3, 2021)

#### 요 약

화재감지기의 오작동으로 인한 피해를 줄이기 위해 국내의 감지기 관련 기준과 문헌을 조사하였다. 국내의 기준은 UL의 기술기준을 인용하였으나 화재실험장의 규격 및 가연물의 종류에 관한 설명만 제시되어 있으며, 실험과 관련된 시설 구축 및 실화재 실험이 진행되지 않아 이와 관련된 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 감지기의 성능 향상을 위해 국내의 기준과 유사하면서 실험조건 및 방법에 대해 상세하게 기재되어 있는 UL 268을 참고하였으며, UL 268에 명시되어 있는 화원 중 목재를 가연물로 이용하여 실화재 실험을 진행하였다. 실험은 광학농도계를 이용하여 감광율을 측정하였고, UL 268에서 제공하는 목재화원 연기프로파일 기준과 일치하도록 반복 실험을 진행하였다. 또한, 실화재 실험과 FDS를 이용한 화재시뮬레이션에서의 연기감지기가 감지하는 연기농도를 비교하여 경향성이 있음을 확인하였다. 이를 통해 본 연구는 UL 268을 이용한 감지기 성능시험에 대한 기본 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### ABSTRACT

To reduce the damage caused by fire detector malfunctions, we investigated the standards and literature pertaining to fire detectors in Korea. The domestic standards cite UL's technical specifications, which provide only the standards and types of combustible materials; however, additional research is needed because no facilities related to the experiments are investigated and no fire experiments have actually been conducted. In this study, we refer to UL 268, which is similar to the domestic standards, as well as detailed experimental conditions and methods to improve smoke detector performances; we also use wood as the combustion material from among the fire sources specified in UL 268. Experiments were conducted to measure the sensitization rates using an optical density meter and repeated to match the wood smoke profile standard provided in UL 268. Furthermore, we compared the smoke concentrations detected by the smoke detectors in the fire experiments with those from fire simulations using FDS software to confirm the detector characteristics. Through these comparisons, we show that this research could be used as preliminary data for performance testing of detectors using UL 268.

**Keywords** : FDS, Wood fire, UL 268, Smoke detector, Malfunction

### 1. 서 론

강원도 소방본부에서 제공한 자료에 따라 강원도 내 위치한 소방서에서 오인출동을 하게 된 원인과 그 횟수를 Table 1에 나타내었으며, 이를 통해 오인출동의 원인이 대

부분 수증기 또는 타는 냄새, 화재감지기의 오작동임을 알 수 있었다<sup>(1,2)</sup>. 화재감지기의 오작동은 오인출동으로 인한 소방력 저하와 더불어 잦은 오경보로 인해 소방설비의 신뢰성 저하를 초래한다. 이러한 화재감지기의 오작동으로 인해 경보기 작동 자체를 중지시키면, 실제 화재 시 초기

† Corresponding Author, TEL: +82-33-540-3122, FAX: +82-33-540-3129, E-Mail: [sclee@kangwon.ac.kr](mailto:sclee@kangwon.ac.kr)

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

**Table 1.** Yearly Status of Mistaken Dispatch Fire Stations Located in Gangwon-do<sup>(1)</sup>

| Year | Total | Fumigation | Smoke | Burning Smell | Arson Intention | Malfunction | Light Reflection | Etc. |
|------|-------|------------|-------|---------------|-----------------|-------------|------------------|------|
| 2015 | 1,428 | 12         | 778   | 126           | 0               | 65          | 52               | 395  |
| 2016 | 1,281 | 18         | 708   | 114           | 1               | 29          | 60               | 332  |
| 2017 | 1,392 | 21         | 780   | 137           | 4               | 47          | 52               | 319  |
| 2018 | 1,560 | 17         | 873   | 141           | 1               | 35          | 53               | 393  |
| 2019 | 1,298 | 11         | 790   | 109           | 1               | 20          | 60               | 289  |

대응이 어려워져 피해가 커질 수 있다. 특히, 광산란에 의해 화재를 감지하는 연기감지기의 경우 화재감지인자인 연기뿐만 아니라, 광산란을 발생할 수 있는 에어로졸 상태의 미립자인 수분 및 먼지 등에 의해서도 작동할 수 있기 때문에 환경적인 요인에 따라 오작동이 발생하게 된다.

연기감지기의 오작동을 줄이기 위한 기존 연구들을 분석해 보면 다음과 같다. Hong 등<sup>(3)</sup>은 “감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준”에 제시된 화재감지기 성능시험을 설명하였다. 형식승인 기술기준은 화재감지기의 성능과 신뢰성을 검증할 수 있는 작동시험과 비화재보를 방지하기 위한 부작동 시험을 규정하고 있었다. 또한, 화재감지기의 내구성 및 부식과 관련된 시험 기준이 포함되어있는 것을 확인할 수 있었다. Hong 등<sup>(4)</sup>은 가속수명시험을 이용하여 연기감지기 챔버 내로 먼지 또는 분진이 유입되어 감지기가 고장 나는 것을 실험하였다. 분진을 이용한 가속수명시험은 분진의 양을 늘려가며 연기감지기가 고장 날 때까지 반복 실험하였고, 분진만을 고려할 때 화재감지기의 평균 수명이 22.5년으로 나타나는 것을 확인하였다. Lee 등<sup>(5)</sup>은 광전식 연기감지기 내 챔버의 응답특성을 확인하기 위해 분진시험을 진행하였다. 분진시험은 국내의 “감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준” 제31조 규정을 응용하여 3가지 실험 시료로 진행하였다. 실험을 통해 연기감지기 챔버 내부에 오염도가 증가하게 되면 화재가 발생하지 않은 상황에서도 오작동이 발생할 수 있음을 확인하였다.

국내에서 제조되는 연기감지기는 한국소방산업기술원(KFI)을 통해 “감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준”을 토대로 형식승인을 받아야 한다<sup>(6)</sup>. 이를 보완하기 위해 소방청은 “감지기의 우수품질인증 기술기준”을 제정하였다. 이 기준은 연기감지기에 대한 시험 기준을 우선 제정하였으며<sup>(7)</sup>, 국제적으로 통용되고 있는 underwriters laboratories (UL)의 기술기준을 참고하여 연기감지기에 대한 화재시험을 도입하였다. 도입된 화재시험은 UL의 기술기준 중 연기감지기에 대한 부분인 UL 268<sup>(8)</sup>을 참고하였으며, 실험장의 규격과 가연물의 종류 및 크기에 대해 설명되어 있다. 그러나, 이 기준의 화재시험에서는 성능시험을 위한 화재실험장의 규격과 가연물의 종류 및 크기에 관한 설명만 제시되었고, 실험 조건 및 방법 등 상세 부분의 설명이 부족하였다. 또한, UL 268이 국내 기준에서 실화재 실험의 기반이

되는 기준이지만, 기준만 마련되었을 뿐 실험과 관련된 시설 구축 및 실화재 실험이 진행되지 않아 이와 관련된 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 감지기 성능시험에 대한 데이터를 확보하기 위해 UL 268 목재화재를 참고하여 실화재 실험을 진행하였고, 실험과 동일한 조건으로 FDS를 이용한 화재시뮬레이션을 수행하여 실험과 결과를 비교·분석하였다.

## 2. UL 268 목재화재 실험

Figures 1(a)와 1(b)는 UL 268에서 제시된 실화재 시험장과 동일한 규모인 가로 11 m, 세로 6.7 m, 높이 3 m로 구축된 실험장의 구성도와 사진을 각각 나타낸 것이다. Figure 1(a)의 ① 지점은 화원의 위치로 측벽에서 2.13 m 떨어진 중앙에 목재 화원을 위치시키고, 화원으로부터 5.4 m 이격된 지점의 상부 천장에 성능확인을 위한 감지기를 위치시킨다. 본 실험에서 성능확인을 위해 사용한 화재감지기는 아날로그식 연기감지기로 각각 Detector A (D<sub>A</sub>), Detector B (D<sub>B</sub>)로 명칭하였다. D<sub>A</sub>의 경우 연기농도를 최대 20.3 %/m 까지, D<sub>B</sub>의 경우 연기농도를 최대 15 %/m까지 실시간 표시할 수 있는 특징이 있다. D<sub>A</sub> 및 D<sub>B</sub>가 설치된 바로 뒤 천장부의 ②와 ③ 지점은 광학농도계(optical density meter, ODM)가 설치된 위치로 ②는 발광부, ③는 수광부이다. 발광부와 수광부 사이의 거리는 1.5 m로 천장에서 0.102 m 이격시켜 설치되어 있다. 광학농도계는 실시간 연기감광율을 구하기 위해 설치하였으며, 국내 연기감지기 시험챔버의 내부에 장착되어 있는 광학농도계와 동일한 사양이다. 발광부는 자동차 램프를 사용하여 빛을 발산하고 수광부는 포토다이오드로 빛이 들어가면 전류가 생성되는 반도체를 사용하였다. 광학농도계의 경우 100 μA를 기준값으로 하여, 청정상태인 연기농도 0 %/m부터 암흑상태인 최대 100 %/m까지의 미터 당 퍼센트 감광(percent obscuration per meter)(이하; 감광율)을 측정할 수 있다. 즉, 광학농도계를 이용한 감광율 O<sub>u</sub> %/m는 식 (1)을 이용하여 측정된다<sup>(9)</sup>.

$$O_u = \left[ 1 - \left( \frac{T_s}{T_c} \right)^{\frac{1}{d}} \right] \cdot 100 \tag{1}$$

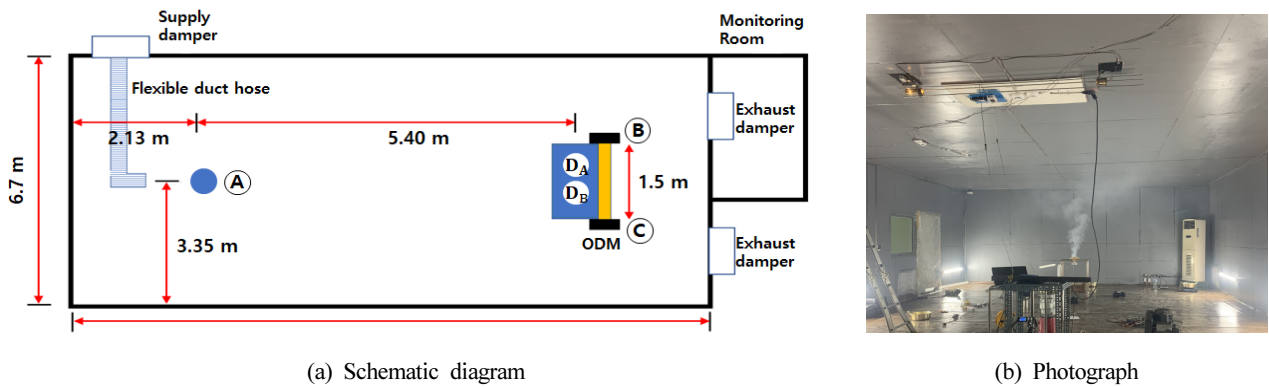


Figure 1. Schematic diagram and photograph of experiment.



Figure 2. Wood fire source.

여기서,  $T_s$ 는 연기 발생 시 광학농도계 측정값( $\mu A$ ),  $T_c$ 는 청정상태의 광학농도계 기준값( $100 \mu A$ ),  $d$ 는 발광부와 수광부 사이의 광원거리 1.5 m이다. 광학농도계의 광원거리는 UL 268 시험기준에 의거하였으며, 광학농도계의 전류는  $100 \Omega$ 에서  $T_c$ 값이  $100 \mu A$  ( $O_{rel} = 0 \% / m$ )이 되도록 설정하였고, 연기에 포함된 연기/에어로졸 광학농도계 측정값에 따른 감광율 및 광학밀도의 변화를 계산하였다.

측벽에 설치된 급기댐퍼와 배기댐퍼는 실험종료 후 내부의 연기를 외부로 배출시키기 위한 장치로 배기팬을 가동하여 연기를 강제로 배출시킬 수 있다. 실험시간 동안은 배기팬을 정지하여 공기 유동이 최소화된 상태에서 실험을 진행하였다. 실험은 온도  $20.0 \sim 27 \text{ }^\circ C$ , 습도  $50 \pm 10 \%$ 에서 수행해야 하므로 실험장의 환경은 온도  $24 \pm 3 \text{ }^\circ C$ , 습도  $50 \pm 5\%$  상태로 유지하였다.

Figure 2는 가연물인 목재 화원을 나타낸 것이다. UL 268에서 규정한 목재 시료는 Douglas fir이지만, 현재 보호수 지정으로 인해 수입이 불가하여, 유사한 특성을 가지고 있는 미송(미국 소나무)으로 대체하였다. 실험 전 목재 시료를 최소 48 h 동안  $23 \pm 2 \text{ }^\circ C$ 의 온도와  $50 \pm 5\%$ 의 상대습도에서 전처리하여 사용하였다. 목재 시료의 Crib 한 개의 무

게는 3.05 g이며, 한 층에 6개씩 3층 구조로 전체 크기는  $152 \text{ mm} \times 152 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$ 이다. 화원 위치에 거치대를 이용하여 바닥으로부터 0.9 m 높이에 설치된 직경 127 mm의 링 지지대 위에 목재 시료를 올려두었다. 점화원인 변성알코올은 메탄올 5%와 에탄올 95%로 이루어졌다. 변성알코올은 4 ml를 이용하였으며, 직경 38 mm, 깊이 25.4 mm인 금속 용기에 부어 목재의 하단으로부터 아래로 89 mm에 위치한 링 지지대에 올려두었다.

본 연구에서는 UL 268 목재 화재 실험에서 제시된 연기 프로파일에 적합한 프로파일을 도출하기 위해 최소 50회 이상의 예비 실험을 진행한 후에야 규정에 적합한 프로파일을 실험에서 도출할 수 있었다. 실화재 실험의 경우 연기 감지기의 성능을 정확히 확인할 수 있는 최선의 방안이지만, UL 268 기준의 경우 UL의 독자적인 노하우 및 반복적인 실험을 통해 습득한 내용을 바탕으로 기준으로 만들었기 때문에 기준만을 보고 동일하게 재현하는 것에는 다양한 변수로 인한 한계점을 가지고 있다. 즉, 반복적인 실험을 통해 문제점을 찾고 다양한 변수를 제거하고 개선하는 과정을 거쳐야지만 적합한 프로파일을 도출할 수 있다.

실험은 결과 데이터를 확보하기 위해 반복적으로 수행

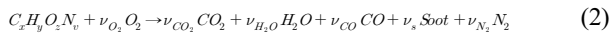
하는데 시간 및 비용적인 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 실화재실험과 동일한 조건의 화재시뮬레이션 수행을 통해 그 결과를 비교하였다.

### 3. UL 268 목재화재 화재시뮬레이션

UL 268 목재화재 실화재실험과 비교를 위해 화재시뮬레이션 프로그램은 fire dynamics simulator (FDS)를 기반으로 만들어진 Pyrosim 2018 버전을 이용하였다.

#### 3.1 화재해석 조건

FDS에서는 연소를 나타내기 위해 Mixing-Controlled 모델을 제공하며, 식 (2)와 같이 반응한다.



이 모델은 CO 및 Soot의 산출량과 함께 연료의 화학식에 관한 성분을 지정하면 FDS 내에서 식 (3)과 같이 화학량론적 계수를 자동으로 계산한다<sup>(10)</sup>. 이때 필요한 화학적 성분은 연소에 사용되는 목재인 Douglas Fir에 대한 것으로 Carbon : 1.0, Hydrogen : 1.7, Oxygen : 0.72, Nitrogen : 0.0002로 설정하였다. 연기와 CO의 수율인  $y_{CO}$ 와  $y_s$ 는 논문을 참고하여 각각 0.004, 0.015로 설정하였다<sup>(11)</sup>.

$$\begin{aligned} \nu_{O_2} &= \nu_{CO_2} + \frac{\nu_{CO}}{2} + \frac{\nu_{H_2O}}{2} - \frac{z}{2} \\ \nu_{CO_2} &= x - \nu_{CO} - (1 - X_H)\nu_s \\ \nu_{H_2O} &= \frac{y}{2} - \frac{X_H}{2}\nu_s \\ \nu_{CO} &= \frac{W_F}{W_{CO}}y_{CO} \\ \nu_s &= \frac{W_F}{W_s}y_s \\ \nu_{N_2} &= \frac{\nu}{2} \\ W_s &= X_H W_H + (1 - X_H)W \end{aligned} \quad (3)$$

해석 영역 내의 연기감지기가 작동하는 기준은 실험을 통해 얻은 수치적 모델에 의존한다. FDS에는 연기감지기 모델로 Cleary와 Heskestad 모델을 적용하며, 두 모델은 시간 지연법으로 분류된다. 또한, 감지기의 입구 형상에 의한 연기 유입 저항을 고려하여 감지기 외부와 내부의 연기농도가 식 (4)와 같이 특정 시간차이를 갖는 것을 나타내었다.

$$\Delta t_{tag} = t_{th, sen} - t_{th, ext} \quad (4)$$

여기서,  $\Delta t_{tag}$ 는 시간지연,  $t_{th, sen}$ 는 연기가 감지기 내부의 센서에 도달하는 시간,  $t_{th, ext}$ 는 감지기 외부에 도달하는 시간이다.

Heskestad 모델은 연기가 외부에서 감지기를 통과하여

이동하는 거리인 특성길이(characteristic length, L)와 자유흐름속도(free stream velocity, U)를 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$\frac{dY_c}{dt} = \frac{Y_e(t) - Y_c(t)}{L/U} \quad (5)$$

여기서,  $Y_c$ 는 감지기 내부의 연기농도,  $Y_e$ 는 연기층의 연기농도이다.

두 연기농도 사이에  $\delta t = L/U$  만큼의 시간 지연이 존재하게 되며, 감지기 내부의 연기농도( $Y_c$ )가 지정된 임계값을 초과하게 되면 감지기는 작동하게 된다.

Cleary 모델은 Heskestad 모델에 감지기 챔버 내부의 혼합시간을 추가한 모델로서, 감지기 내부를 플러그류(plug flow)와 센서 내의 완전 혼합류(perfectly stirred flow)로 구분하여 총 지연시간을 dwell time ( $\delta t$ )과 mixing time ( $\tau$ )의 합으로 나타낸 것이다. 이 모델의  $\delta t$ 는 특성 시간의 단일 변수를 통해 감지기의 작동을 판단하는 Heskestad model의 시간지연 값과 동일한 의미를 갖는다고 볼 수 있으며, 식 (6)을 바탕으로 감지기의 형상 또는 내부 유동에 의해 발생할 수 있는 반응지연시간을 고려한다.

$$\delta t = \alpha_e U^{\beta}, \tau = \alpha_c U^{\beta}, \Delta t = \delta t + \tau \quad (6)$$

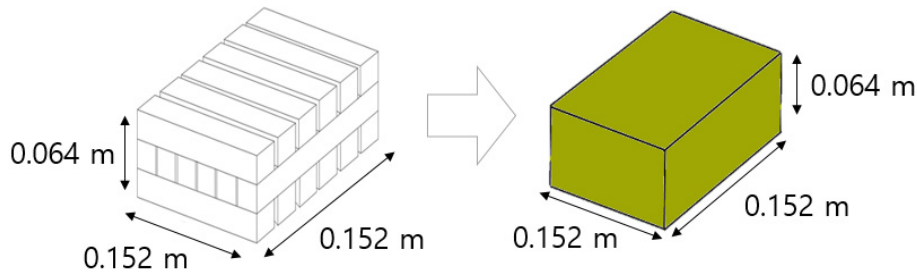
여기서,  $\delta t$ 는 연기가 하우징을 채우는데 소요되는 특성 시간,  $\tau$ 는 연기입자가 감지기 챔버 내부를 채우는데 요구되는 특성시간,  $\Delta t$ 는 dwell time과 mixing time의 합으로서 총 반응 지연시간, U는 연기입자의 이동속도,  $\alpha, \beta$ 는 감지기 내부로의 연기 유입 및 혼합을 고려하기 위해 경험적으로 결정되는 실험 상수를 의미한다<sup>(12)</sup>.

#### 3.2 화재모델링 조건 및 방법

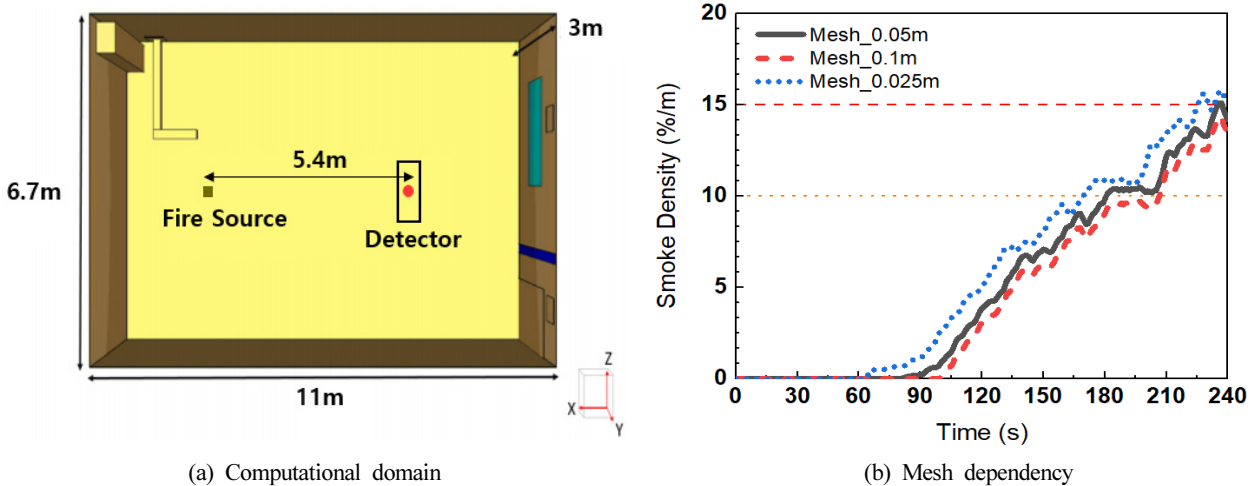
해석 영역 내 실험장의 규격과 가연물, 점화원, 연기감지기의 설치 위치는 UL 268 실화재 실험과 동일하게 적용하였다. 다음으로 연소 반응을 나타내기 위한 물리적 입력 인자는 SFPE Handbook을 참고하였으며, 목재의 열적 특성과 함께 Table 2와 같이 설정하였다. 목재의 열적 특성 중 방사율(emissivity)과 흡수계수(absorption coefficient)는 열 피드백을 고려하기 위한 주요 변수이지만, 제공되는 정보가 없어 FDS에서 제공되는 기본값을 이용하였다. 목재의 열 방출량(heat release rate, HRR)은 Fabian and Gandhi<sup>(14)</sup>의 연구에서 UL 268 목재화재와 동일한 시료 및 방법으로 목재의 1 Crib에 대한 열방출량을 12 kW로 제공하고 있어 참고하였고, 제공된 열방출량은 해석 영역 내 위치한 목재와 크기가 다르기 때문에 샘플 크기에서의 열방출량을 전체 크기에 대한 값으로 변환하는 식을 이용하였다<sup>(15)</sup>. 또한, 목재는 화재가 성장하면서 화재 확산에 참여하는 면적이 많아 지기에 화재성장율을 나타내기 위해 hyperbolic tangent를 이용하였다. 목재의 열방출량에 대한 정확성을 해결하기 위해

**Table 2.** Input Parameter for Fire Simulation (Wood)<sup>(13)</sup>

| Item                   | Feature                     | Item               | Feature      |
|------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------|
| Formula                | $CH_{1.7}O_{0.72}N_{0.002}$ | Heat of Combustion | 16,400 kJ/kg |
| CO Yield               | 0.004                       | Soot Yield         | 0.015        |
| Density                | 465 kg/m <sup>3</sup>       | Specific Heat      | 1.2 kJ/kg·K  |
| Conductivity           | 0.14 W/m·K                  | Emissivity         | 0.9          |
| Absorption Coefficient | 5.0000 1/m                  |                    |              |



**Figure 3.** Modification of computational conditions.



**Figure 4.** Computational domain and mesh.

실험에 사용한 목재의 크기에 대한 열방출량을 실험을 통해 확보해야 한다고 판단되어 추후 진행할 예정이다.

연기감지기는 FDS에서 설정하는 감지기 모델인 Cleary 모델과 Heskestad 모델 중 Cleary 모델을 사용하였으며, 입력값인 실험상수  $\alpha, \beta$ 는 실험을 통해 얻어야 했으나 어려움이 있어 물성치를 제공하고 있는 fire technology solution DB의 값을 이용하였다. 본 실험에 사용한 목재를 이용하여 얻어낸 물성치가 없기 때문에 목재와 유사한 백색 연기인 종이화원의 여러 회사에 대한 평균인자를 사용하였다<sup>(16)</sup>. 이는 추후 정량적인 예측을 위해 Cleary model의 입력값에 대해 데이터를 얻어낼 예정이다. 또한, 목재는 해석 영역에

비해 매우 작은 크기를 가지고 있기 때문에 Crib 형태로 구현하면 목재 부근에서 필요한 격자의 수가 매우 늘어나게 된다. 따라서, 해석 영역을 계산하는 데 효율성을 높이기 위해 Crib 형태로 이루어진 목재를 Figure 3과 같이 하나의 직육면체로 구현하였다.

해석 영역은 Figure 4(a)와 같이 구성하였고, 해석 영역 내의 격자(Mesh)는 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m의 크기로 설정하였다. 가연물인 목재 부근에서는 연소 반응을 상세히 보기 위하여 격자의 크기를 절반으로 축소하여 0.05 m × 0.05 m × 0.05 m로 총 231,420개를 사용하였다. 해석에 사용된 격자의 격자의존성을 확인하기 위해 해석 영역 내의 격자 크

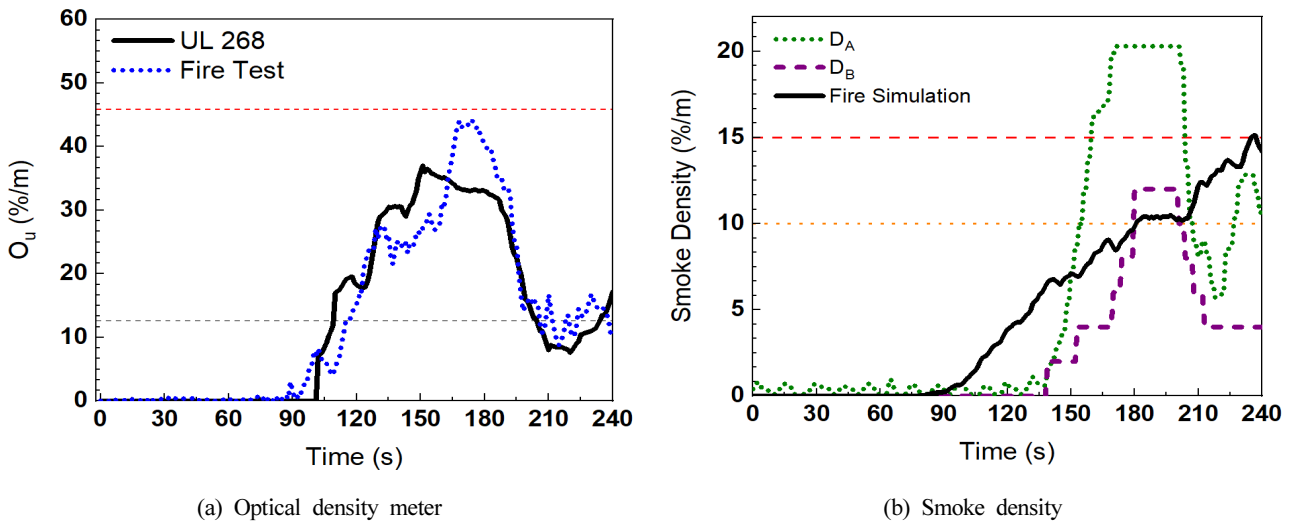


Figure 5. A comparison on optical density meter and smoke density.

기를 0.2 m와 0.05 m로 목재 부근에서는 0.1 m와 0.025 m로 설정하였다. 격자의존성은 Figure 4(b)와 같이 나타나 0.1 m (0.05 m)의 격자의존성을 확인하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

UL 268 목재화재 실화제실험과 그와 동일한 조건의 화재시뮬레이션을 수행하여 연기감지기의 성능시험을 진행하였으며, UL 268에서 제시하고 있는 목재화원 연기프로파일 기준과 맞추기 위해 광학농도계를 설치하여 연기농도를 확인하였다. 연기프로파일 기준에 대해 살펴보면 목재 화재의 경우 1차 감광은 시험 시작 후 80~120 s 사이에 발생하고, 그 후 최소 60 s 동안 12.56 %/m 이상의 감광이 유지되어야 하며, 최대 감광은 45.8 %/m를 초과하지 않아야 한다. 또한, 화염의 누출은 150~190 s 사이에 발생하며, 실험은 점화 후 240 s 동안 진행하여, 감지기의 응답시간은 240 s 이내여야 한다고 규정하고 있다. UL 268 시험기준의 경우 UL 자체에서 다양한 실험을 통해 독자적으로 개발한 기준으로 실험장비에 대한 명확한 규격과 자세한 실험 방법 등이 보안 및 영리의 목적 등으로 인해 제시되어 있지 않은 부분이 있어 실험을 진행할 때 수많은 시행착오가 발생하였다. 이는 실험장 내부와 외부의 온도차 등으로 인해 기준값과 오차가 발생하였으며, 이를 줄이기 위해 바닥면에 장판을 깔고 실험을 진행하기 전 히터를 작동하여 실험 시 내부 온도가  $24 \pm 3$  °C가 유지되도록 조절하였다. 사전 실험을 약 50회 정도 진행하여 Figure 5(a)와 같이 UL 268 기준에 적합한 프로파일을 지속적으로 도출할 수 있었다.

다음으로 연기감지기가 작동하는 기준에 대해서는 UL 268에 제시되어 있지 않아 국내 기준인 국내 기준인 “감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준”에서 연기감지기로 가장 많이 사용되는 감도 2종의 작동 농도 최대 기준인

15 %/m로 정하였다. 이는 연기감지기에서 얻은 값을 전기 신호로 변환하여 연기 농도로 나타낸 값이기 때문에 UL 268 연기프로파일과 값에서 차이가 있다. 또한, 세부적인 분석을 위해 감도 2종의 작동 농도인 15 %/m와 부작동 농도인 5 %/m의 중간값인 10 %/m에 도달하는지 알아보았다. Figure 5(b)는 연기감지기 작동 시간에 대해 실험값과 화재시뮬레이션의 결과값으로 비교한 그래프로 그림에서 알 수 있듯이 연기농도가 급상승하는 시간은 화재시뮬레이션이 105 s,  $D_A$ 가 140 s,  $D_B$ 는 170 s로 확인되었다. 급상승하는 시간에서 오차가 발생하는 이유는 화재시뮬레이션에서 설정한 화재성장율이 실제 실험과 달리 설정되었기 때문으로 판단된다. 실험에서 열방출량과 더불어 화재성장율에 대한 값을 얻어야 하나 이를 진행하기 어려웠기 때문에 앞서 설명한 것과 같이 목재 1 Crib에 대한 열방출량과 그에 따른 화재성장율을 나타낸 문헌을 참고하였다. 다음으로 작동과 부작동의 중간값인 10 %/m에 도달하는 시간은 화재시뮬레이션이 181 s,  $D_A$ 가 154 s,  $D_B$ 는 180 s인 것으로 확인되었다. 국내에서 가장 많이 사용되는 감도 2종의 작동 농도인 15 %/m에 도달하는 시간은 화재시뮬레이션이 235 s,  $D_A$ 가 160 s,  $D_B$ 는 도달하지 못하는 것으로 확인되었다. 실험에서  $D_A$ 는 20.3 %/m에 도달하면 더이상 상승하지 않고 일정한 모습을 보였다. 이는  $D_A$ 가 감지할 수 있는 최대 연기농도가 20.3 %/m이기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 실험과 FDS를 이용한 화재시뮬레이션에서의 연기농도를 비교하였을 때, 연기농도가 급상승하는 구간에서는 차이가 발생하였지만 10 %/m와 15 %/m에서는 유사한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 국내의 기준과 동일하면서 실험에 관해



상세한 정보를 제공하는 UL 268의 목재화원을 참고하여 실 화재 실험과 FDS를 이용한 화재시뮬레이션을 구현하여 결과를 비교·분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실화재 실험에서 UL 268에서 제시한 연기프로파일 기준을 맞추기 위해 광학농도계를 이용하였다. UL 268에서 실내 온도 등 실험에 필요한 정보가 제시되지 않은 부분이 있어 이를 맞추기 위해 사전 실험을 약 50회 정도 진행하고 난 후 규정에 적합한 연기프로파일을 실험에서 지속적으로 도출할 수 있었다.

2) 실화재 실험과 화재시뮬레이션에서 사용한 연기감지기는 국내에서 가장 많이 사용되는 감도 2종의 작동 농도 기준인 15 %/m로 설정하였다. 연기감지기에서 감지되는 연기농도는 목재의 열방출량이 급상승하는 구간과 감도 2종의 작동·부작동 농도의 중간값인 10 %/m, 최대 기준인 15 %/m를 비교하였다. 급상승하는 구간은 화재시뮬레이션이 105 s,  $D_A$ 가 140 s,  $D_B$ 는 170 s로 확인되었으며, 10 %/m에 도달하는 시간은 화재시뮬레이션이 181 s,  $D_A$ 가 154 s,  $D_B$ 는 180 s인 것으로 확인되었다. 15 %/m에 도달하는 시간은 화재시뮬레이션이 235 s,  $D_A$ 가 160 s,  $D_B$ 는 도달하지 못하는 것으로 확인되었다. 따라서, 실험과 FDS를 이용한 화재시뮬레이션에서의 연기농도를 비교하였을 때, 연기농도가 급상승하는 구간에서는 차이가 발생하였지만, 감지기가 작동하는 시간에서는 유사한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 대한민국 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 재난안전플랫폼기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: NRF-2019M3D7A1095926).

## References

- Gangwon Fire Head Quarters, <https://www.fire.gwd.go.kr> (2021).
- S. Y. Eom, K. J. Kim and S. K. Lee, “Statistical Analysis and Countermeasure about Fire Mistaken Dispatch”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 89-96 (2013). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.2.089>
- S. H. Hong, M. S. Choi and S. T. Park, “A Study on the Reliability Test Method of Sensor for Fire Smoke Detection”, *Proceedings of 2011 Autumn Annual Conference, Electrical Engineering & Technology*, pp. 230-231 (2011).
- S. H. Hong, M. S. Choi, S. T. Park and B. Y. Lee, “A Study on the Reliability Assessment for Photo-electric Fire Smoke Detector”, *Proceedings of 2013 Autumn Annual Conference, Electrical Engineering & Technology*, pp. 194-194 (2013).
- C. H. Lee, H. S. Lee and S. K. Kim, “A Study on Response Characteristics of Photoelectric Type Smoke Detector Due to Dust and Wind Velocity”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 50-57, (2017). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.1.050>
- NFA, “Technical Standards for Type Approval and Product Inspection of Detectors” (2009).
- NFA, “Excellent Quality Certification Technical Standards for Detectors” (2017).
- Underwriters Laboratories Co., “Smoke Detectors for Fire Alarm Systems”, Standard 268, Edition 7, (2016).
- S. G. Choi, Y. J. Choi, Y. J. Nam and S. K. Kim, “Fire Detection Tendency through Combustion Products Generated during UL 268 Wood Flame Fire and Smoldering Fire Test”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 35, No.1, pp. 48-57 (2021). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.23b3731>
- NIST CO., “Fire Dynamics Simulator User’s Guide”, NIST Special Publication 1019, Edition 6, pp. 165-169 (2004).
- M. Kultz, “Handbook of Environmental Degradation of Materials”, Edition 3, pp. 30-40 (2005).
- H. Y. Jang and C. H. Hwang, “Revision of the Input Parameters for the Prediction Models of Smoke Detectors Based on the FDS”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 44-51 (2017). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.2.044>
- Society of Fire Protection Engineers Co., “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Fifth Edition” (2016).
- T. Z. Fabian, P. D. Gandhi, et al., “Smoke Characterization Project Final Report”, Underwriters Laboratories Inc., (2007).
- U.S. NRC, “EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities NUREG/CR-6850 (EPRI 1011989)”, p. 658 (2005).
- Fire Technology Solution DB, <http://www.kfiredb.com/content/sub050101.htm>, (2017)