

# 화재모델링을 위한 광전식 연기감지기의 장치물성 측정

조재호 · 문선여 · 황철홍<sup>†</sup> · 남동군\*

대전대학교 소방방재학과, \*한국소방산업기술원

## Measurement of the Device Properties of Photoelectric Smoke Detector for the Fire Modeling

Jae-Ho Cho · Sun-Yeo Mun · Cheol-Hong Hwang<sup>†</sup> · Dong-Gun Nam\*

Department of Fire & Disaster Prevention, Daejeon University

\*Korea Institute of Fire Industry & Technology

(Received November 27, 2014; Revised December 8, 2014; Accepted December 12, 2014)

### 요 약

화재모델링 결과를 이용한 신뢰성이 확보된 피난안전설계를 위해서는 화재감지기 모델들의 높은 예측성능이 필수적으로 요구된다. 본 연구의 목적은 대표적인 화재모델인 FDS에 적용된 광전식 연기감지기의 정확한 작동 개시시간을 예측하기 위한 입력정보를 측정하는 것이다. 이를 위해 화재감지기의 장치특성을 측정할 수 있는 fire detector evaluator (FDE)가 사용되었으며, 스포트형 광전식 연기감지기에 대한 Heskestad 및 Cleary 모델의 입력정보가 얻어졌다. 또한 일반적으로 사용되는 FDS의 기본 값과 측정된 값이 적용된 연기감지기의 작동 개시시간을 정량적으로 비교하였다. 주요 결과로써, Heskestad 모델은 Cleary 모델에 비해 광전식 연기감지기의 작동 개시시간 예측에 부정확한 결과를 초래할 수 있다. 또한 본 연구에서 검토된 광전식 연기감지기의 장치물성은 FDS에 적용된 기본 값과 매우 명확한 차이를 가지며, 장치물성의 변화에 따라 연기감지기 작동 개시시간 또한 매우 큰 차이가 보였다.

### ABSTRACT

The high predictive performance of fire detector models is essentially required for the reliable design of evacuation safety using the fire modeling. The main objective of the present study is to measure input information in order to predict the accurate activation time of photoelectric smoke detector adopted in fire dynamics simulator (FDS) recognized a representative fire model. To end this, the fire detector evaluator (FDE) which could be measured the device properties of detector was used, and the input information of Heskestad and Cleary's models was obtained for a spot-type photoelectric smoke detector. In addition, the activation times of smoke detector predicted using default values into FDS and measured values in the present study were quantitatively compared. As a result, the Heskestad model could result in an inaccurate the activation time of photoelectric smoke detector compared to the Cleary model. In addition, there was a distinct difference between the default values used into FDS and the measured values in terms of device properties of smoke detector, and thus the activation time also showed a significant difference.

**Keywords :** Photoelectric smoke detector, Fire modeling, Fire Dynamics Simulator (FDS), Performance Based Design (PBD)

## 1. 서 론

건축물의 화재안전성 평가는 플래시오버의 발생 시기를 기준으로 플래시오버 이전의 거주자 안전과 이후의 구조물 안전으로 분류될 수 있다. 피난 안전성의 평가는 화재로 인하여 거주자가 위험상태에 도달하는 허용피난시간(available safe egress time, ASET)과 거주자가 안전한 곳으로 피난하는데 소요되는 요구피난시간(required safe

egress time, RSET)의 비교를 통해 이루어질 수 있다. 예를 들어 ASET이 RSET에 비해 클수록 화재로부터 보다 안전한 건축물로 평가될 수 있다<sup>(1)</sup>. 그러나 이러한 방법에만 의한 피난안전성 평가의 신뢰성을 확보하기 위해서는 우선적으로 정량적인 ASET과 RSET의 산정이 이루어져야 한다. ASET의 정확한 예측을 위해서는 화재로부터 발생되는 열 및 독성 화학종의 농도뿐만 아니라, 다양한 화재진압설비의 성능에 대한 정확한 평가가 우선되어야 한다.

<sup>†</sup>Corresponding Author, E-Mail: chehwang@dju.ac.kr  
TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596

ISSN: 1738-7167  
DOI: http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.6.062

RSET의 산정을 위해서는 피난자에 대한 정보뿐만 아니라, 화재감지 및 경보시간에 대한 정확한 정보가 포함되어야 한다<sup>(2)</sup>.

이와 같이 복잡한 화재안정성 평가는 최근 들어 성능위주 소방설계의 일환으로 화재 및 피난시뮬레이션을 통해 이루어지고 있다. 이들 시뮬레이션 결과는 본질적으로 수치 및 물리적 입력변수의 부정확성으로 인하여 예측의 불확실성을 갖게 된다<sup>(3)</sup>. 특히 다양한 화재감지기를 이용한 화재 발생정보의 정확성은 ASET과 RSET의 결정에 직접적인 영향을 주며, 합리적인 소방안전설계를 통한 인명안전 및 효율적인 화재진압을 위하여 매우 중요하다. 화재감지기를 포함한 화재시뮬레이션의 신뢰도를 확보하기 위해서는 화재 발생지역 및 피난 경로에서 연기, 열 및 농도에 대한 정확한 예측뿐만 아니라 적용된 화재 감지기의 작동기준 및 작동시간과 같은 장치물성이 제공되어야 한다<sup>(4,5)</sup>.

화재시뮬레이션의 예측 불확실도에 대한 평가는 주로 열발생율, 온도, 열유속 그리고 CO와 같은 연소생성물의 농도 등에 초점을 두고 있으며<sup>(6)</sup>, 화재 감지기의 작동조건 및 시간에 대한 불확실도 연구는 거의 수행되지 않는 실정이다. 최근 본 연구진은 NIST(미국표준기술연구원)에서 개발된 fire dynamics simulator (FDS)의 활용을 위해 요구되는 각종 감지기의 장치물성을 측정할 바 있다. 구체적으로 다양한 정온식 열감지기(씨미스터 및 바이메탄 방식)와 이온화식 연기감지기에 대한 장치물성을 측정하여, 열 및 연기감지기의 모델링을 위해 요구되는 입력정보를 제시하였다. 측정된 입력정보가 적용된 결과와 FDS의 초기 설정값(default value)이 적용된 결과의 비교를 통해 동일 화재조건에서 적용된 화재감지기의 작동시간에 매우 큰 차이가 발생할 수 있음을 정량적으로 확인하였다<sup>(7,8)</sup>.

선행된 연구들과 동일한 실험방법을 이용하여, 본 연구에서는 화재경보를 알려주기 위해 일반적으로 사용되고 있는 국내 광전식 연기감지기의 장치물성이 측정되었다. 구체적으로 FDS에 적용되고 있는 Heskestad 및 Cleary 연기감지기 모델의 입력정보를 측정하였다. 또한 측정값과 기존 FDS의 초기 설정값과의 정량적 차이가 검토되었다. 이를 통해 국내에 적용되는 다양한 화재감지기의 장치물성 측정 및 DB를 구축하고, 현재 국내에서 진행되고 있는 성능위주 소방설계의 신뢰도 개선이 본 연구의 궁극적인 목표라 하겠다.

## 2. FDS에 적용된 연기감지기 모델의 고찰

FDS에는 연기감지기의 작동시간 예측을 위하여 Heskestad 모델과 Cleary 모델이 적용되고 있다. 위 두 가지 모델은 시간지연법(time lag method)으로 분류되며, 감지기 입구의 형상에 의한 연기 유입저항(smoke entry resistance)을 고려하여, 감지기 외부와 감지기 내부(housing과 sensing chamber로 구성)의 연기농도가 특정 시간차이를 갖는다는

아래의 개념이 적용된 것이다<sup>(9,10)</sup>.

$$\Delta t_{lag} = t_{th, sen} - t_{th, ext} \tag{1}$$

여기서,  $\Delta t_{lag}$ 는 시간지연을 의미하며,  $t_{th, sen}$ 는 연기가 감지기 내부의 센서에 도달하는 시간,  $t_{th, ext}$ 는 감지기 외부에 도달하는 시간을 나타낸다.

### 2.1 Heskestad 연기감지기 모델<sup>(11)</sup>

Heskestad는 연기가 감지기를 통과하여 이동하는 유효 거리인 특성길이(L)를 자유흐름속도(free stream velocity) U로 나눈 특성시간(L/U)을 통해 다음 식과 같은 일차 정확도의 시간 반응 감지기 모델을 제안하였다.

$$\frac{dY_c}{dt} = \frac{Y_e(t) - Y_c(t)}{L/U} \tag{2}$$

여기서 감지기 내부의 연기농도  $Y_c$ 와 연기층의 연기농도  $Y_e$  사이에  $\delta t = L/U$  만큼의 시간지연이 존재하게 된다. 따라서  $Y_e$ 가 지정된 임계값을 초과하게 되면 감지기는 작동하게 된다. FDS에서 Heskestad 모델의 적용을 위해서는 위의 특성길이와 더불어 실제 감지기의 작동이 개시되는 단위 길이당 광소멸 퍼센트(%)가 요구된다. Activation obscuration으로 표현되는 단위 길이당 광소멸율(%/m)는 다음 식<sup>(12)</sup>에 의해 계산될 수 있다.

$$O_u = [(1 - (I/I_0)^{1/L_p})] \times 100 \text{ (%) } \tag{3}$$

위 식에서  $I/I_0$ 는 연기입자에 의해 소멸되는 입사광의 강도 비를 의미하며,  $L_p$ 은 광원의 경로거리(path length)를 각각 의미한다. 비교적 간단한 Heskestad 모델은 연기류의 유속이 충분히 높은 조건에서는 비교적 정확하지만, 낮은 천장 제트류(ceiling jet flow)를 갖는 연기 유속 범위에서는 단일 특성길이의 변수만을 통해 정확한 감지기 작동여부를 판단하는 데는 한계가 있다고 알려져 있다<sup>(13)</sup>.

### 2.2 Cleary 연기감지기 모델<sup>(14)</sup>

Cleary 모델은 Heskestad 모델에 감지기 내부의 혼합시간을 추가한 것으로서, 감지기 내부를 플러그류(plug flow)와 센서 내의 완전혼합류(perfectly stirred flow)로 구분하여 총 지연시간을 dwell time ( $\delta t$ )과 mixing time ( $\tau$ )의 합으로 표현한 것이다. Cleary 모델에서  $\delta t$ 는 특성시간의 단일변수를 통해 감지기의 작동여부를 판단하는 Heskestad 모델의 시간지연 값과 개념적으로 동일한 의미를 갖는다. Cleary는 식 (4)를 적용하여 감지기의 형상이나 내부유동에 의해 발생할 수 있는 지연시간을 고려하였다.

$$\delta t = \alpha_c U^\beta, \tau = \alpha_c U^\beta, \Delta t = \delta t + \tau \tag{4}$$

위 식에서  $\delta t$ 는 연기가 감지기의 housing을 채우는데 걸리는 특성시간(즉, 유입시간),  $\tau$ 는 연기입자의 감지기 내부 혼합시간(sensing chamber를 채우는데 요구되는 특성시간)

그리고  $\Delta t$ 는 감지기의 총 반응 지연시간을 의미한다. 또한  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 연기감지기의 형상과 관련된 실험상수로서 연기 입자의 유입 및 혼합을 고려하기 위해 경험적으로 결정되는 상수이다. Sensing chamber 내의 질량분율의 변화는 다음과 같이 계산된다<sup>(13)</sup>.

$$\frac{dY_c}{dt} = \frac{Y_e(t - \delta t) - Y_c(t)}{\tau} \quad (5)$$

즉, 시간  $t$ 에서 sensing chamber로 유입되는 연기의 농도는 연층에서  $t - \delta t$  시간에서의 값과 같음을 의미한다. 만약 유속이 일정하고 sensing chamber 내의 초기 연기 농도가 0이라면, 시간지연 후의 연기농도는 다음의 적분식으로 표현될 수 있다.

$$X(t) = e^{(-t/\tau)} \int_0^{t/\tau} e^{t'/\tau} X_e(t' - \frac{\delta t}{\tau}) dt' \quad (6)$$

여기서  $t' = t/\tau$ 이며,  $dt' = dt/\tau$ 를 의미한다.

Cleary 모델의 식 (4)에 포함된 4가지의 상수인  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ ,  $\alpha_e$ ,  $\beta_e$ 의 변수는 Figure 1에 제시된 바와 같이 다음의 2단계 과정을 거쳐 직접 구하게 된다<sup>(8,13)</sup>. 첫째 Heskestad 모델에서와 같이 레이저를 통해 얻어진 광학밀도(original OD)를 시간에 따른 단순이동을 통해 감지기 신호(detector signal)의 초기 상승률과 유사한 dwell time ( $\delta t$ )을 얻게 된다. 참고로 광학밀도는 다음 식에 의해 측정되었다.

$$OD = -\log_{10}(I/I_0) \quad (7)$$

단면의 평균유속에 따른  $\delta t$ 를 얻은 후에 최종  $y = \alpha_c u^{-\beta_c}$ 와 같은 형태의 회귀선을 통해  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ 를 얻게 된다. 두 번째 mixing time ( $\tau$ )과 관련된  $\alpha_e$ ,  $\beta_e$ 의 변수는 다소 복잡한 과정을 통해 얻게 된다<sup>(13)</sup>. 첫 번째 과정을 통해 얻어진 결과에 임의의  $\tau$ 를 결정한 후, 식 (6)을 통해 적분 및 반복계산을 하게 되며, 최종 변환된 광학밀도와 변환된 감지기 신호가 가장 잘 일치하는  $\tau$ 를 결정한다. 동일한 방법으로 유속에 따른  $\tau$ 를  $y = \alpha_e u^{-\beta_e}$ 의 형태로 표현, 회귀선을 통해 최종  $\alpha_e$ 와  $\beta_e$ 를 구하게 된다.

**Table 1.** Default Device Properties for Photoelectric Smoke Detectors into FDS

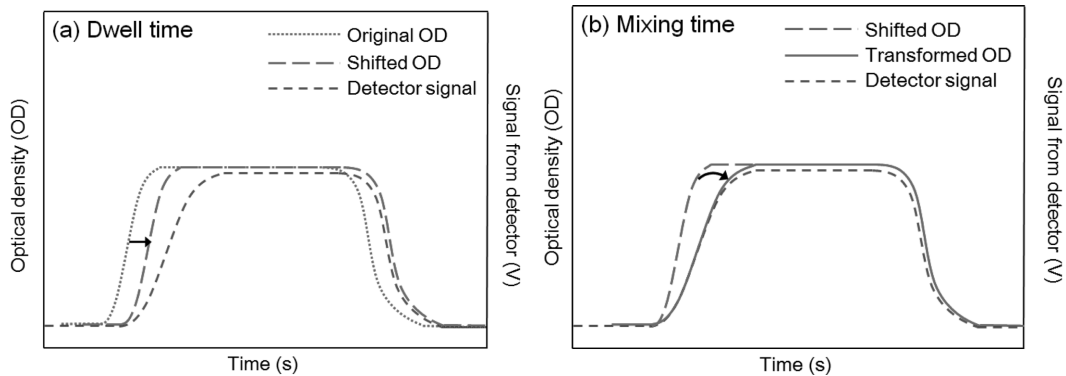
Photoelectric detector	$\alpha_c$	$\beta_c$	$\alpha_e, L$	$\beta_e$	OPM (%/m)
Heskestad model	-	-	1.8	-	3.28
Cleary model (P1)	1.8	-1.0	1.0	-0.8	3.28
Cleary model (P2)	1.8	-0.8	0.8	-0.8	3.28

2.3 FDS 내의 광전식 연기감지기의 입력정보<sup>(15)</sup>

FDS에서 감지기가 작동되는 단위 길이당 광소멸율(이후, OPM으로 표기)은 3.28 %/m로 설정되어 있으며, Heskestad 및 Cleary 모델에서 요구되는 광전식 감지기의 특성길이(L) 및  $\alpha_e$ ,  $\beta_e$ ,  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ 는 Table 1에 제시되어 있다. 그러나 이 값들은 특정 감지기의 측정값이며, 국내에 적용되고 있는 광전식 감지기의 실제 값과의 차이 및 이로 인한 감지기의 작동 개시시간에 대한 검토는 현재까지 이루어지지 않았다.

3. 실험방법 및 조건

화재모델링을 위한 광전식 연기감지기의 입력정보를 측정하기 위하여 Figure 2에서와 같이 선행연구에서 개발된 Fire Detector Evaluator (FDE)가 사용되었다<sup>(7,8)</sup>. FDE는 크게 공기 공급장치, 연기 발생장치, 유량 분배장치, 온도, 유속 및 soot 농도측정을 위한 장치로 구성되어 있다. FDE의 단면은 0.6 m × 0.3 m로 제작되었으며, 사각 덕트 내의 균일한 유속분포를 위하여 메쉬와 하니컴이 설치되었다. 공기 공급장치는 내부의 공기 공급을 위한 블로워(blower)와 유속 조절을 위한 댐퍼(damper) 및 인버너로 구성되었다. 연기의 생성은 공기 유입구, 다공판 및 변형된 알콜 램프 용기로 구성된 버너를 통해 이루어졌으며, 연료로는 헵탄이 사용되었다. 사각 덕트 단면의 유속 균일성을 확인하기 위하여 풍속 프로브와 차압센서( Testo 480)를 통해 넓은 유량범위에 대한 유속이 측정되었다. 그 결과 벽면 근처를 제외한 단면의 평균유속은 매우 균일한



**Figure 1.** Process of data transformation to obtain the input information of Heskestad and Cleary models.

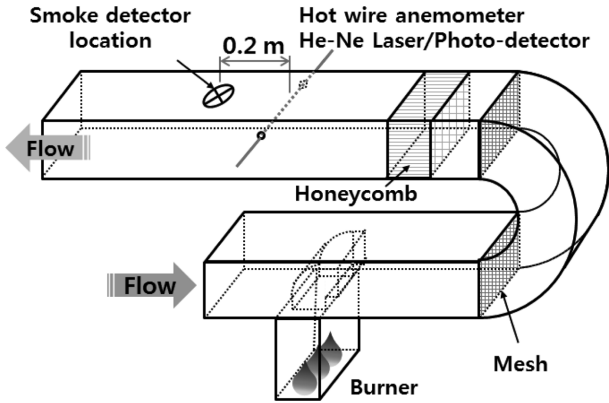


Figure 2. Schematic of Fire Detector Evaluator (FDE) used in the present study.

분포를 보이며, 이때 속도 변동치(rms)는 평균속도의 약 3%로서 충분한 정상상태의 유동장이 형성되었음을 확인하였다. 연기 밀도의 측정을 위하여 광소멸법(light extinction method)<sup>(16)</sup>이 적용되었다. 광원으로는 10 mW He-Ne 레이저가 사용되었으며, 광학장치 내로의 연기 유입을 방지하기 위하여 1 L/min의 N<sub>2</sub>가 공급되었다. 광소멸법의 광학배열 및 상세한 원리는 참고문헌<sup>(17)</sup>을 통해 확인할 수 있다.

본 연구에서는 검토했던 광전식 연기감지기는 T사에서 생산되는 2중/보통형/세방수형/새용형/비축척형(모델번호 P105-06000)이다. 독립적인 전원 공급장치를 이용하여 전원을 공급하고 내부의 회로에서 연기 농도에 따른 외부출력이 가능한 접점으로부터 실시간 전압을 측정하였다. 모든 실험은 동일한 단면 평균유속의 조건에서 3회의 반복실험을 통한 평균 광학밀도와 감지기 출력신호를 통해 분석되었다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 광전식 연기감지기의 장치물성 측정 및 분석

Figure 3은 FDE 덕트 단면의 평균유속 변화에 따라

Heskestad 모델의 개념을 통해 측정된 dwell time ( $\delta t$ )과 각 평균유속의 관계를 통해 산출된 특성길이를 도시한 것이다. 각 심볼에 표기된 error bar는 평균유속 및 측정값의 표준편차를 의미한다. 먼저  $\delta t$ 의 측정결과를 살펴보면, 평균유속 증가에 따라  $\delta t$ 는 급격히 감소되며, 낮은 평균유속의 조건에서는 상대적으로  $\delta t$ 의 표준편차가 매우 큼을 볼 수 있다. 최종 회귀선을 통해  $\delta t = 3.71U^{-1}$ 의 관계를 얻게 된다. 이 결과를 바탕으로 산출된 특성길이를 살펴보면, 고려된 평균유속의 범위에서 평균값 3.71 m를 기준으로 낮은 유속에서는 약 2배의 과대예측 결과를 보이며, 높은 유속조건에서는 과소예측 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 동일한 평균유속의 범위에서 비교적 균일한 특성길이는 갖는 이온화식 연기감지기의 결과<sup>(8)</sup>와는 매우 다른 경향을 보이고 있다. 평균 특성길이인 3.71 m가 FDS에서 고려된다면,  $U < 0.1$  m/s의 조건에서 시간 지연값( $\delta t = L/U$ )의 과소예측으로 FDS에서의 예측된 작동 개시시간은 실제 화재 시 작동 개시시간보다 빠르게 될 것이다. 반면에  $U \geq 0.3$  m/s의 조건에서 FDS의 작동 개시시간은 실제보다 상당히 느릴 것이다. 결과적으로 광전식 연기감지기의 경우에 전 평균속도 범위에 대하여 일정한 평균 특성길이를 고려하는 Heskestad 모델의 적용은 본질적인 한계가 있다는 결론을 얻을 수 있다. 더욱이 측정된 평균 특성길이는 Table 1에서 제시된 FDS 내의 기본 값 1.8 m와 약 2배 만큼의 차이를 갖기 때문에 FDS 기본 값의 적용 시 추가적인 작동 개시시간 오차가 발생할 것이다.

Figure 4는 Cleary 모델의 개념을 통해 측정된 dwell time ( $\delta t$ )과 mixing time ( $\tau$ )을 측정하기 위하여 고려된 평균유속의 범위에서 측정값 및 회귀선을 도시한 결과이다. 그림에서  $\delta t$ 는  $0.34U^{-1.90}$ 의 관계를 보이며,  $\tau$ 는  $0.16U^{-1.60}$ 으로 표현된다. 지수함수 형태로 표현된 회귀선은 전 평균속도 범위에서의 측정값을 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 평균 특성길이에 대한 큰 오차를 갖는 Heskestad 모델에 비해 Cleary 모델은 광전식 연기감지기의 적절한 작

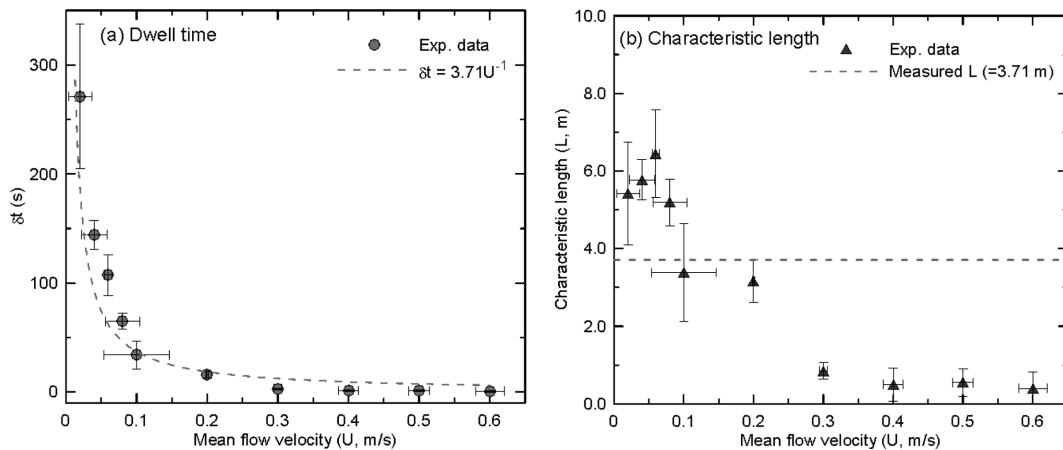


Figure 3. Measured dwell time and characteristic length for the Heskestad model.

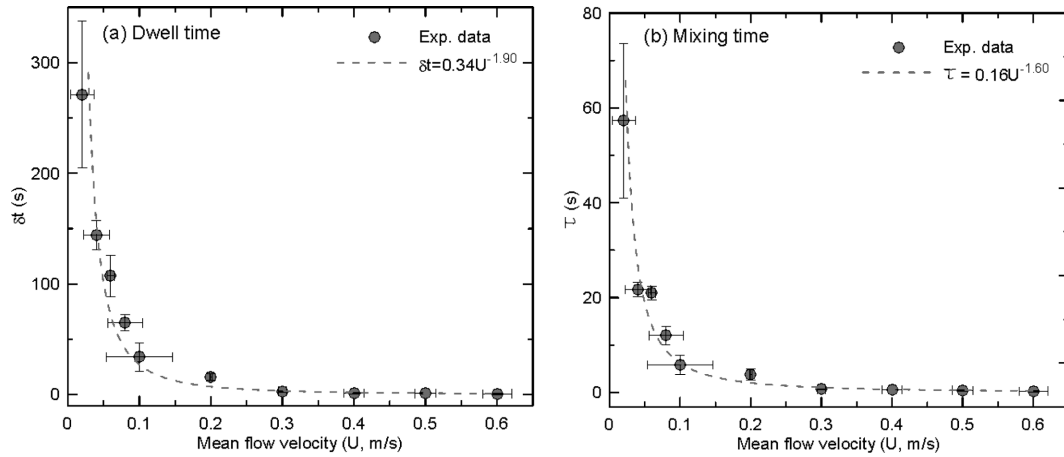


Figure 4. Measured dwell time and mixing time for the Cleary model.

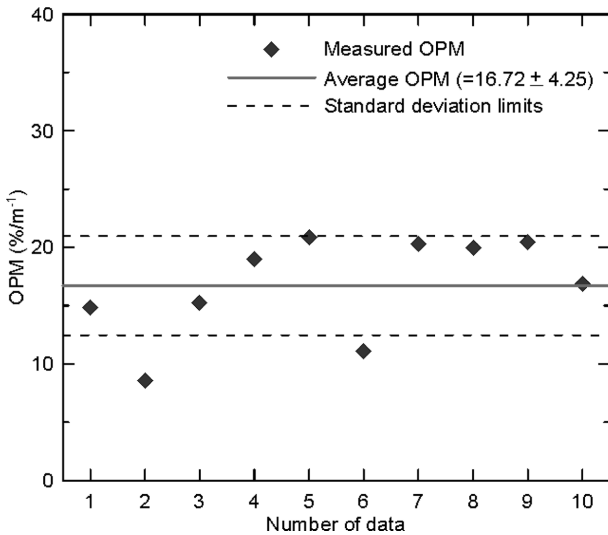


Figure 5. Averaged obscuration per meter (OPM) for detector activation.

동 개시시간 예측이 충분히 가능할 것으로 판단된다. 또한 Cleary 모델의 4가지 입력정보는  $\alpha_c = 0.34$ ,  $\beta_c = -1.90$ ,  $\alpha_c = 0.16$ ,  $\beta_c = -1.60$ 으로 Table 1에 제시된 기본값과는 상당한 차이를 보이고 있다.

감지기가 작동되는 단위 길이당 광소멸율(OPM)을 확인하기 위하여, 연기 농도를 점차적으로 증가시켜 감지기가 작동되는 순간의 광학신호(I)를 측정하였다. 이후 광학신호의 시간 지연값을 고려하여 감지기가 작동되는 순간의 광학밀도를 산출하였다. 이때의 광학밀도를 식 (3)의 단위 길이당 광소멸율로 변환하면, Figure 5에서와 같이 평균적으로 16.72 %/m의 값을 갖게 된다. 이때 실험은 동일 조건에 대하여 10개의 감지기에 대하여 반복적으로 수행되었다. 본 연구에 적용된 광전식 감지기는 2종 보통형 (15 %/m 기준)으로 분류되고 있음을 고려할 때, 측정된 OPM은 정량적으로 설정치와 유사한 값을 갖는다. 그러나 감지기별 OPM의 차이를 의미하는 표준편차가  $\pm 4.25$  %/m

Table 2. Measured Device Properties for a Photoelectric Smoke Detector

Ionization detector	$\alpha_c$	$\beta_c$	$\alpha_c L$	$\beta_c$	OPM (%/m)
Heskestad model	-	-	3.71	-	$16.72 \pm 4.25$
Cleary model	0.34	-1.90	0.16	-1.60	$16.72 \pm 4.25$

로서, 동일모델의 경우에도 감지기에 따른 작동 연기농도는 상당히 넓게 분포되어 있음을 확인할 수 있다.

결과적으로 본 연구에서 검토된 광전식 연기감지기의 장치 물성은 Table 2에 제시되었다. 즉, 연기감지기의 대표적인 모델인 Heskestad 및 Cleary 모델의 입력변수로서, Table 1에 제시된 값과 비교할 때 정량적으로 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 그러나 이들의 차이가 FDS 화재모델링에서 연기감지기의 작동시간 측면에서 어느 정도의 차이를 발생시키지는 추가적인 검토가 요구된다.

#### 4.2 FDS에서 연기감지기의 입력정보에 따른 작동 개시시간 비교

광전식 연기감지기에 대한 실질적인 입력정보의 부재로 인하여 일반 사용자들이 주로 사용하는 FDS에서 제시된 기본 값을 적용하고 있다. 따라서 본 연구를 통해 측정된 값이 입력되었을 때 연기감지기의 작동 개시시간의 차이에 대한 확인은 성능위주 소방설계의 신뢰도 측면에서 매우 중요하다. 이에 동일한 화재시나리오 및 발열량의 조건에서 연기감지기의 입력정보에 따라 작동 개시시간의 차이에 대한 정량적 비교가 검토되었다.

Figure 6은 FDS 수행을 위한 형상 및 순간적인 연기입자 분포를 도시한 결과이다. 연기의 총 이동거리는 45 m이며, 단면은 1 m × 1 m인 구조물이 고려되었다. 연료로는 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>이 사용되었으며, 구조물의 왼쪽 벽면 근처에 설치된 화원을 통해 10 kW/m<sup>2</sup>의 단위면적당 발열량이 공급되었다. 연료의 단위 질량당 발생하는 soot yield는 0.01로 고정하였다<sup>(18)</sup>. 격자의 크기는 격자 민감도 분석을 통해 최종

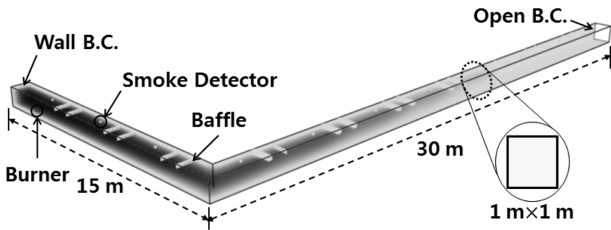


Figure 6. Schematic of computation domain for FDS implementations.

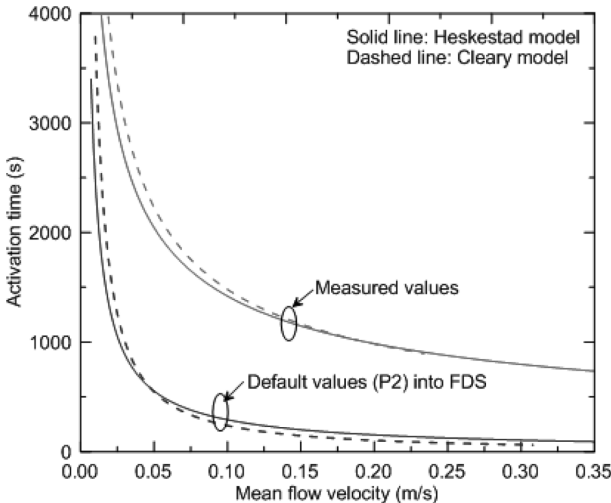


Figure 7. Comparisons of activation time between default and measured values for the Heskestad and Cleary models.

5 cm의 균일 격자계가 사용되었다. 감지기는 총 10개가 설치되었으며, 0.01~0.35 m/s의 낮은 유속에서의 작동 개시 시간의 비교를 위하여 감지기 전 후단에 배플(baffle)이 설치되었다.

Figure 7은 Heskestad와 Cleary model에 대하여 FDS의 기본 값과 본 연구에서 측정된 값에 따른 연기감지기의 작동시간을 비교·도시한 결과이다. 참고로 Cleary model에 대해서는 Table 1의 Cleary model (P2)의 값이 적용되었다. 먼저 FDS의 기본 값이 적용된 결과를 살펴보면, 연기의 유속이 감소함에 따라 감지기 작동시간이 급격하게 증가됨을 볼 수 있다. 또한 두 연기감지기 모델의 차이는 크게 발생되지 않으며, 이러한 결과는 측정된 값이 적용된 경우에도 유사함을 확인할 수 있다. FDS 기본 값과 측정된 값의 입력정보 차이로 인한 작동시간의 차이는 매우 낮은 유속(<0.01 m/s)을 제외하고 전 유속범위에 걸쳐 상당한 차이를 보이고 있다. 특히 유속범위 0.05 m/s < U < 0.10 m/s에서 최소 10 min 이상의 작동시간의 차이가 발생되고 있다. 물론 이러한 정량적 차이를 모든 화재조건에 적용하는 것은 많은 한계가 있다. 실제 화재에서 가연물의 종류, 환기조건 및 구획형상에 따라 연기의 농도 및 유속에 큰 차이가 존재하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 실제 적용된 연기감지기의 입력정보가 아닌 FDS의 기본 값을 적용

할 경우, 성능위주 소방설계의 피난 안전대책을 수립하는데 매우 큰 문제점이 노출될 수 있음을 본 연구를 통해 명확히 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

성능위주 소방설계의 신뢰성 확보 차원에서 화재 및 피난모델링의 예측성능 개선을 위한 스포트형 광전식 연기감지기의 장치물성 측정에 관한 실험 및 수치해석 연구가 수행되었으며, 주요 결론은 다음과 같다.

선행연구를 통해 개발된 Fire Detector Evaluator (FDE)를 이용하여 FDS에 적용되고 있는 Heskestad 및 Cleary 연기감지기 모델들의 물리적 입력변수 측정이 이루어졌다. 평균유속 및 평균 특성길이에 의해 시간지연이 반영되는 Heskestad 모델은 감지기 내에 혼합시간을 추가적으로 고려한 Cleary 모델에 비해 광전식 연기감지기 작동 개시시간 예측에 상당한 큰 오차를 가져올 수 있다. 측정된 광전식 연기감지기의 장치물성은 FDS에서 제시된 기본 값과는 매우 큰 차이를 보이고 있으며, 특정 조건에서 감지기 작동개시시간은 10 min 이상의 큰 차이가 발생할 수 있음을 확인하였다. 향후 추가적인 연구를 통해 국내에 적용되고 있는 다양한 화재감지기의 장치물성에 관한 데이터베이스(DB) 구축과 연기감지기 모델의 예측성능 개선이 수행될 예정이다.

## 후 기

본 연구는 소방방재청 차세대핵심소방안전기술개발사업(NEMA-차세대-2014-49)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. J. H. McGuire and G. T. Tamura, "Simple Analysis of Smoke Flow Problems in High Rise Buildings", Fire Technology, Vol. 11, pp. 15-22 (1975).
2. R. Custer, "Selection and Specification of the 'Design Fire' for Performance-Based Fire Protection Design", in Proceedings, SFPE Engineering Seminar, Phoenix, AZ, Society of Fire Protection Engineers, Boston (1993).
3. K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2010).
4. M. Ahrens, "U.S. Experience with Smoke Alarms and Other Fire Detector/Alarm Equipment", NFPA (2004).
5. V. T. D'souza, J. A. Sutula, S. M. Olenick, W. Zhang and R. J. Roby, "Predicting Smoke Detector Activation using

- the Fire Dynamics Simulator”, Proceedings of the 7th International Symposium of Fire Safety Science (2002).
6. U.S. NRC and EPRI, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications”, NUREG-1824/EPRI 1011999, Final Report (2007).
  7. H. W. Park, J. H. Cho, S. Y. Mun, C. H. Park, C. H. Hwang, S. C. Kim and D. G. Nam, “Measurement of the Device Properties of Fixed Temperature Heat Detectors for the Fire Modeling”, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 37-43 (2014).
  8. K. H. Kim and C. H. Hwang, “Measurement of the Device Properties of a Ionization Smoke Detector to Improve Predictive Performance of the Fire Modeling”, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 27-34 (2013).
  9. F. W. Mowrer, “Lag Times Associated with Fire Detection and Suppression,” Fire Technology, Vol. 26, No. 3, pp. 244-265 (1990).
  10. C. E. Marrion, “Lag Time Modeling and Effects of Ceiling Jet Velocity on the Placement of Optical Smoke Detectors”, Master’s Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Center for Fire safety Studies, Worcester, MA (1989).
  11. G. Heskestad, “Generalized Characterization of Smoke Entry and Response for Products of Combustion Detectors”, Proceedings of the Fire Detection for Life Safety Symposium (1975).
  12. R. P. Schifiliti, B. J. Meacham and R. L. P. Custer, “Design of Detection Systems”, SFPE Handbook of Fire Protecting Engineering, Social Fire Protection Engineers (1995).
  13. T. Cleary and A. Chernovsky, “Particulate Entry Lag in Spot-Type Smoke Detectors”, Proceedings of 6th International Symposium, International Association for Fire Safety Science (IAFSS) (1999).
  14. T. Cleary, W. Grosshandler and A. Chernovsky, “Smoke Detector Response to Nuisance Aerosols”, International Conference on Automatic Fire Design “AUBE ‘99”, 11th, pp. 32-41 (1999).
  15. K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka and J. Floyd, “Fire Dynamic Simulator (Version 5): User’s Guide”, NIST SP 1019-5, NIST, Gaithersburg, MD (2010).
  16. G. W. Mulholland, E. L. Johnsson and M. G. Fernandez, “Design and Testing of New Smoke Concentration Meter”, Reprinted from the Fire and Materials, Vol. 24, No. 5, pp. 231-243 (2000).
  17. S. C. Kim, “Uncertainty Analysis of the Optical Smoke Density Measurement through the Doorway in a Compartment Fire”, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 27, No. 2, pp. 75-79 (2013).
  18. A. Tewarson, “Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires”, SFPE Handbook of Fire Protecting Engineering, Social Fire Protection Engineers (1995).