Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2013) 27(5) : 89~94
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2013.27.5.089 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)
논문 27-5-13

# 화원에 따른 광전식 연기감지기 반응시간 분석

## (Analysis of the Response Time of a Photoelectric Spot-Type Smoke Detector Depending on the Type of Fires)

지승욱*
(Seung-Wook Jee)

## Abstract

The fire testing performed for smoke detector model approval in Korea tests only one kind of fire smoke. A photoelectric spot-type smoke detector using Mie scattering is affected by the wavelength of light beam and the particle diameter. According to UL (Underwriters Laboratories Inc.) 268 standard, this paper analyze the characteristic of the response for a photoelectric spot-type smoke detector on sale in Korea using various fire smokes. Probability that the response time is included in non-defective range is 100% in paper fire, 90% in wood fire and 75% in flammable liquid fire, 90% in wood fire and 75% in flammable liquid fire. According to the estimation for population mean of the response time choosing a confidence level of 99%, a maximum of 19% for wood fire and that of 38% for flammable liquid fire are defective. As the result of analysis of smoke particle, this paper is found that these results are caused by the smoke particles are wide variations in size or have very black.

Key Words : Smoke Detector, Photoelectric Spot-Type Smoke Detector, Scattering, Fire Test

## 1. 서 론

감지기는 화재 시 발생되는 열, 연기, 불꽃 등 연소생성물을 자동으로 감지하여 자동화재탐지설비의 수신기로 발신하는 장치이다. 특히 연기감지기는 화재를 조기에 발견할 수 있어 초기 피난유도가 유리하기 때문에 많이 사용되고 있다. 이온화식과 광전식이 주로 생산되고 있지만, 경제적인 이유와 방사능 문제로 광전식 연기감지기가 많이 사용된다. 우리나라에서 판매되고 있는 모든 연기감지기는 형식승인을 얻게 되는데, 2007년부터 2012년까지 형식승인을 얻은 연기감지기 중 약 95%가 광전식이다[1-4].

연기감지기의 형식승인은 “감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준”과 “감지기의 형식승인 및 제품검사 시험세칙”에 따라 진행되며, 특히 작동시험 및 부작동시험 등 화재시험에 사용되는 발연재는 종이 재질인 동양호지 No.2 뿐이다. 하지만 연기입자의 직경은 그 화원에 따라 다르고, 빛의 산란을 이용하는 광

* 주저자 : 영남대학교 공학대학원
* Main author : Yeungnam University, Graduate School of Engineering
Tel : 011-548-1150, Fax : 053-810-4689
E-mail : skraken@chol.com
접수일자 : 2013년 3월 4일
1차심사 : 2013년 3월 7일
심사완료 : 2013년 4월 14일


Copyright ⓒ 2013 KIIEE All right's reserved

전식 연기감지기는 광파장과 연기입자 직경에 영향을 받는 것으로 알려져 있다[3, 5-8].

최초착화물별로 화재현황을 조사한 2007년부터 2012년까지 화재통계료를 분석해 보면, 우리나라에서 발생된 전체 화재 중 7% 정도만 종이에서 착화되고 있었다[9].

따라서 현재 사용되고 있는 광전식 연기감지기에 대하여 다양한 연기를 대상으로 화재시험을 수행할 필요가 있다. 이에 본 연구는 UL(Underwriters Laboratories Inc.) 268에서 제시하고 있는 세 가지 화원으로부터 발생되는 연기에 대하여 광전식 연기감지기의 화재시험을 수행하고자 한다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 흡수와 산란

소광(Extinction)은 전송 중인 광선(Light beam)이 에어로솔(Aerosol)에 의해 빛이 방출되거나 감쇠되는 현상이다. 그림 1과 같이 광선이 에어로솔을 통과할 때 에어로솔 입자에 의해 일부는 흡수(Absorption)되고, 일부는 산란(Scattering)된다. 매우 검은 연기입자(검댕, Soot)는 흡수가, 그렇지 않은 연기입자는 산란이 소광의 주요 원인이 된다[7-8].

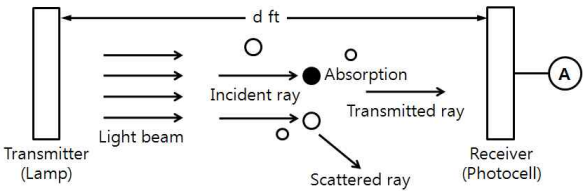



그림 1. 미립자에 의한 산란과 흡수
Fig. 1. Light scattering and absorption by a particle

산란은 에어로솔 입자 직경과 광파장의 관계에 따라 세 가지 영역으로 나뉘어 해석된다. 에어로솔 입자의 직경이 광파장보다 훨씬 작은 영역은 Rayleigh 이론으로 해석되고, 에어로솔 입자의 직경이 광파장보다 훨씬 큰 영역은 기하광학을 이용한 굴절된 광선의 궤적을 추적하는 방법으로 해석된다. 에어로솔 입자의 직경과 광파장이 서로 유사하여 산란이 복잡한 중간 영역은 Mie 이론으로 해석된다[7-8].

파장 0.5㎛ 광원으로 산란을 이용하여 연기 입자를 측정할 때 그 직경에 따라 표 1과 같이 세 영역으로 나누어 서로 다른 이론을 적용하게 된다. 에어로솔 입자의 직경이 0.05㎛ 보다 작을 때 Rayleigh 이론, 2㎛ 보다 클 때 흡수와 굴절, 중간 영역은 Mie 이론이 사용된다[8].

표 1. 광을 이용한 연기입자 측정 이론[8]
Table 1. Theory of optical smoke measurements[8]

| For visible light (λ=0.5㎛) | |
|---|---|
| Particle diameter | Applicable theory |
| d<0.05㎛ | Rayleigh |
| 0.05㎛ < d < 2㎛ | Mie |
| d > 2㎛ | Diffraction |

### 2.2 Percent Obscuration per Foot

그림 1의 장치를 청정공기에 대하여 측정한 전류값을 $T_c$, 연기 에어로솔 입자가 분포하는 곳에서 측정한 전류값을 $T_s$라고 하고, 출광부와 수광부 간 거리를 d ft라고 할 때 피트 당 퍼센트 감쇄(Percent obscuration per foot, POF)는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[10].

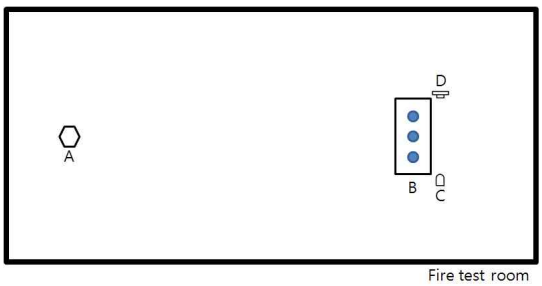
$$O_u = \left(1 - \left(\frac{T_s}{T_c}\right)^{\frac{1}{d}}\right) \times 100 \quad (1)$$

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 화재시험장

실험은 그림 2와 같이 가로 7.0m, 세로 3.4m, 높이 2.4m의 화재시험장(Fire test room)에서 진행되었다. A는 시험화원(Test fire)이고, 이로부터 5.4m 떨어진 곳에 광전식 연기감지기 3개를 부착한 시험 패널

(Test panel) B를 설치하였다. 연기감지기는 형식승인을 거쳐, 현재 우리나라에서 판매되고 있는 것으로 3개 제조사의 제품을 각각 24개씩, 전체 72개를 무작위로 골라 시험에 사용하였다. B 바로 뒤에 램프(Lamp assembly) C와 포토셀(Photocell assembly) D를 설치하여 POF를 측정하였다.




A : Test fire
B : Test panel
C : Lamp Assembly
D : Photocell assembly

**그림 2. 실험 배치도**
**Fig. 2. Experiment setup diagram**

### 3.2 시험화원

UL 268에 따라 본 실험에서 사용된 시험화원은 모두 세 가지이다.

먼저 10×102㎜ 크기로 자른 흑백 신문 42.6g을 0.8㎜ 두께의 박판으로 만든 직경 102㎜, 높이 300㎜의 리셉터클에 넣는다. 이를 종이화원(Paper fire)라고 한다. 종이화원은 그림 3 (a)와 같이, 지지대를 이용하여 화재시험장 바닥으로부터 300㎜ 띄워 설치되었다.

두 번째 시험화원은 목재화원(Wood fire)이다. 19.1×19.1×152㎜ 크기의 목재 6개를 일정한 간격으로 배치하여 한 층을 이루게 하고, 이를 그림 3 (b)와 같이 서로 직각이 되게 3층으로 쌓아 만들었다. 목재화원은 4㎖의 촉진제(5%의 메탄올+95%의 에탄올)를 담고 있는 직경 38㎜, 깊이 25.4㎜의 금속용기 바닥으로부터 89㎜ 위에, 화재시험장 바닥으로부터는 300㎜ 띄워 설치되었다.

세 번째 시험화원은 인화성 액체화원(Flammable liquid fire)이다. 25%의 톨루엔과 75%의 헵탄을 혼합하고, 그림 3 (c)와 같이, 이를 0.635㎜ 스테인리스 강판으로 만든 리셉터클(직경 158㎜, 바닥 직경 25.4㎜, 깊이 32㎜의 둥근형태)에 담겨져 화재시험장 바닥으로부터 300㎜ 띄워 설치되었다.

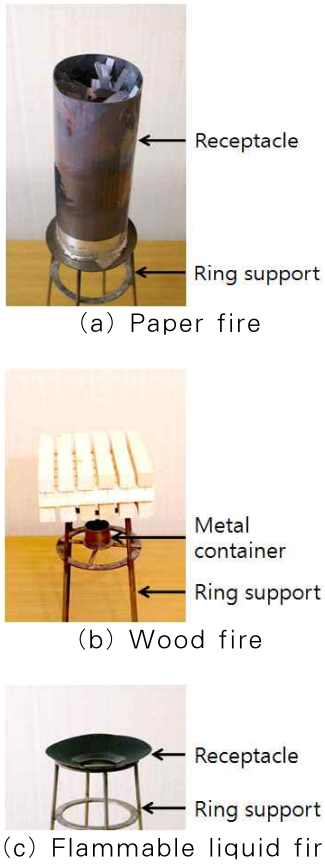



**그림 3. 시험화원**
**Fig. 3. Test fires**

### 3.3 실험방법

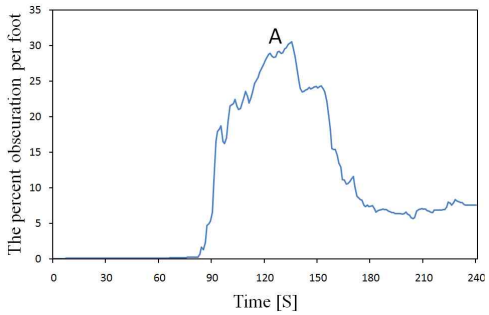
화재시험(Fire test)은 17~23℃에서, 세 가지 시험화원 중 하나와 시험 패널, 램프, 포토셀을 그림 2와 같이 설치하고, 시험화원을 점화하면서 시작된다. 시험시간은 시험화원에 관계없이 240s이며, UL 268에 따르면 시험시간 내에 감지기가 반응하여야 한다.

시험화원에 점화가 이루어지면서 발생되는 연기의 농도는 램프와 포토셀을 이용하여 측정되며, 이 값을 식 (1)을 이용하여 POF로 변환하게 된다. POF가 시험화원별로 각각 UL 268의 39항(Fire tests)을 만족할

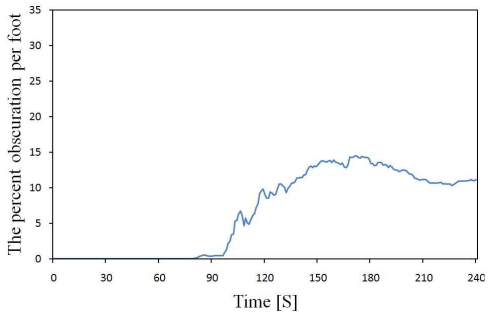
때의 결과만을 본 연구의 실험 결과로 채택하여 분석하였다.

## 4. 실험 결과

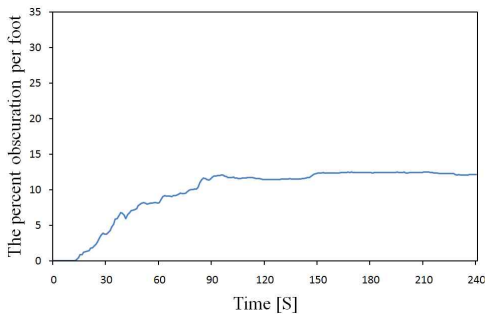
### 4.1 화재시험장의 POF




(a) Paper fire




(b) Wood fire




(c) Flammable liquid fire

**그림 4. 시험화원별 POF**
**Fig. 4. POFs by each test fires**

그림 4는 화재시험에서 각 시험화원별로 화재시험장의 POF를 측정한 결과이다.

종이화원에 의한 연기농도 (a)를 보면, 1~3min 사이에 연기증가가 시작되었고, 1차 피크(그림 4 (a)의 'A')도 발생하였으며, 그 크기는 27~37% 사이의 값을 가지고 있다. 4% 이상의 POF가 40s 이상 지속하고 있다. 연기색은 흰색이었다. (b)는 목재화원에 의한 연기농도를 보여준다. 농도 증가는 80~120s 사이에 시작하였다. 4% 이상의 POF가 60s 이상 지속되고 있고, 최대 감쇄는 17%를 넘지 않고 있다. 화염누출도 150~190s 사이에 발생하였다. 연기색은 흰색이었다. (c)는 유류화원에 의한 연기농도를 보여준다. 최대 POF가 13%를 초과하지 않고 있다. 연기색은 매우 짙은 검은색이었다.

이상의 내용은 UL 268의 39항에서 정하고 있는 종이화원, 목재화원, 유류화원에 대한 연기의 요구조건을 모두 만족하는 것이다. 4.2절의 화재시험 결과들은 모두 이 조건을 만족할 때 얻는 값들이다.

### 4.2 화재시험 결과

광전식 연기감지기 72개에 대하여 시험화원을 각각 종이, 목재, 유류로 하였을 때 반응시간을 측정하였다. 반응시간의 평균은 종이화원일 때 138.10s, 목재화원일 때 166.12s, 유류화원일 때 102.16s로 나타났다. 표 2는 감지기 반응시간을, 각 화원별로 60s부터 30s 간격으로 구간을 나누고, 해당 구간별로 확률분포로 나타낸 것이다.

반응시간이 240s 이내에 속할 확률 $\bar{p}(x \leq 240)$는 종이화원일 때 100%(1-0.00), 목재화원일 때 90%(1-0.10), 유류화원일 때 75%(1-0.25)로 나타났다. 실험에 사용된 감지기 수 72개를 표본의 크기로 두면, 모집단인 우리나라 전체 연기감지기의 반응시간이 240s 이내에 속할 확률 $p(x \leq 240)$을 추정할 수 있다. 신뢰도 99%로 전체 연기감지기의 반응시간이 240s 이내에 속할 확률을 추정하면, 종이화원일 때 100% ($\bar{p} \pm 2.58 \times \sqrt{(\bar{p} \cdot (1-\bar{p})/n}$), 목재화원일 때 81~99%, 유류화원일 때 62~88%이다. 이는 종이화원에서 정상적으로 동작하는 광전식 연기감지기라도 목재화원에 대해서는 최대 19%, 유류화원에 대해서는 최

대 38%가 반응시간 내에 반응하지 못할 가능성이 있다는 것을 의미한다.

표 2. 각 화원별 연기감지기 반응시간의 확률분포
Table 2. Probability distribution of response time of photoelectric spot-type smoke detector by each test fires

| Test Fire / Interval | Paper fire | Wood fire | Flammable liquid fire |
|---|---|---|---|
| 60- 90s | 0.06 | 0.01 | 0.42 |
| 90-120s | 0.36 | 0.18 | 0.20 |
| 120-150s | 0.26 | 0.25 | 0.08 |
| 150-180s | 0.15 | 0.24 | 0.03 |
| 180-210s | 0.13 | 0.15 | 0.01 |
| 210-240s | 0.04 | 0.07 | 0.01 |
| > 240s | 0.00 | 0.10 | 0.25 |
| Average | 138.10s | 166.12s | 102.16s |
| Standard deviation | 39.16s | 58.76s | 51.45s |

그림 5는 각각 종이화원, 목재화원, 유류화원에서 발생되는 연기를 포집하여 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)으로 촬영한 영상을 보여준다.

그림 5에서 (a)는 종이화원에 의한 연기 입자들을 보여준다. 입자의 크기가 0.05~0.08㎛ 사이에 분포하기 때문에 Mie 이론에 따라 산란각이 일정하다. 따라서 산란식인 광전식 연기감지기가 정확하게 연기를 감지한 것이다. (b)는 목재화원에 의한 연기이다. 0.05~0.08㎛ 크기의 연기입자 외에 불완전연소로 발생한 1㎛ 이상의 큰 입자도 함께 보인다. 입자크기에 편차가 큰 만큼 산란각의 편차도 크기 때문에 광전식 연기감지기의 정상동작 확률이 종이화원보다 낮은 것으로 생각된다. (c)는 유류화원에 의한 연기이다. 입자의 크기가 0.05~0.09㎛로 일정하기 때문에 산란이 잘 일어날 것으로 생각되지만, 연기색이 매우 검다. 따라서 산란뿐만 아니라 광흡수도 활발하여 광전식 연기감지기의 정상동작 확률이 종이보다 매우 낮은 것으로 판단된다.

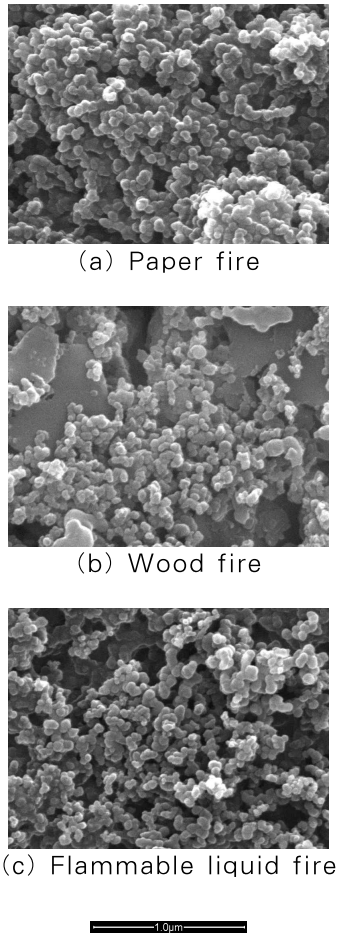



그림 5. 연기입자의 주사전자현미경 사진
Fig. 5. SEM images of smoke particles

## 5. 결 론

UL 268에서 정하고 있는 세 가지 화원을 이용하여 광전식 연기감지기를 대상으로 화재시험을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 반응시간이 240s 이내에 속하는 확률이 종이화원의 경우 100%, 목재화원의 경우 90%, 유류화원의 경우 75%로 나타났다. 이를 바탕으로 전체 연기감지기의 반응시간이 240s 이내에 속할 확률을 99% 신뢰도로 추정한 결과, 목재화원에 대해서는 최대 19%, 유류화원에 대해서는 최대 38%까지 반응시간 이내에 동작하지 못하는 것으로 나타났다.

둘째, 종이화원에 의한 연기는 그 크기가 비교적 고

르기 때문에 산란각도 일정하여 정확하게 연기를 감지할 수 있었다. 목재화원에 의한 연기는 불완전연소로 발생한 매우 큰 입자를 다수 포함하고 있어 산란각에 편차가 커서 광전식 연기감지기의 연기 감지 능력에 문제가 발생할 수 있었다. 유류화원에 의한 연기는 입자의 크기는 고르지만 색이 매우 검기 때문에 산란 이외에 흡수가 많아 부정확한 것으로 사료된다.

이상의 결과는 향후 광전식 연기감지기를 설계하는데 있어서 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

## References


[1] National Fire Safety Code, "Safety Guides for the Automatic Fire Alarm System (NFSC 203)", Notification No.2012-91, National Emergency Management Agency, 2012.

[2] Seung-Wook Jee et al., "Development of a Traceable Fire Alarm System Based on the Conventional Fire Alarm System", Fire Technology(DOI: 10.1007/s10694-012-0299-0), pp.1-18 2012.

[3] Dong-hyun Baek, "Electric Installation for Fire Fighting", Dongilbook, pp.25-191, 2007.

[4] Korea Institute of Fire Industry & Technology's Website, "http://www.kfi.or.kr/home/information/information08.do", 2013.

[5] Korea Fire Industry Technology Institue, "Model Approval & Inspection Technical Standards for Fire Detectors", Notification No.2012-17 by National Emergency Management Agency, 2012.

[6] Korea Fire Industry Technology Institue, "Detailed Regulations for Model Approval & Inspection Technical Standards for Fire Detectors", 2012.

[7] William C. Hinds, "Aerosol Technology", Translation of Korean Language, ShinKwang MunHwa Publishing Co., pp.379- 412, 1995.

[8] Richard W. Bukowski, "Smoke Measurements in Large- and Small-Scale Fire Testing - Part I", Fire Technology, Vol.15, Issue 3, pp. 173-179, 1979.

[9] National Fire Data System's Website, "http://125.60.28.52:5989/nfds2/rdPage.aspx", National Emergency Management Agency, 2012.

[10] UL 268-2006, "The Standard of Safety for Smoke Detect ors for Fire Alarm Signaling Systems", 2006.


## ◇ 저자소개 ◇

**지승욱** (池昇昱)

1971년 12월 27일생. 1995년 영남대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 졸업(박사). 현재 (주)태산전자 기술이사. 영남대학교 공학대학원 출강.