[Research Paper]

실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정을 통한 화재감지 활용 가능성에 관한 기초 연구

최수길 · 진세영 · 박상민 · 남영재 · 김시국^{†*}

호서대학교 소방방재학과 대학원생, *호서대학교 소방방재학과 교수

Basic Research on Potential Application of Fire Detection by Measuring Fire Detection Tendency of Indoor Air Quality Measurement Factors

Su-Gil Choi · Jin-Se Young · Sang-Min Park · Yeong-Jae Nam · Si-Kuk Kim^{†*}

Graduate Student, Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo Univ.,

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

(Received December 23, 2019; Revised January 21, 2020; Accepted January 21, 2020)

요 약

본 논문은 실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정을 통한 화재감지 활용 가능성에 관한 기초 연구이다. 공기질 측정인자들의 화재감지 경향성을 측정하기 위해 연기감지기 감도시험기를 이용한 작동실험과 UL 268에서 규정하고 있는 종이화재실험을 진행하였다. 연기감지기 감도시험기를 이용한 작동실험 및 UL 268 종이화재실험에 측정된 각각의 측정값을 교차 대입한 결과 공기질 측정기(IAQ) S1의 경우 PM 10(평균값 제외), HCHO(평균값 및 최대값 제외), IAQ S2의 경우 PM 1.0, PM 2.5, PM 10, 연소가스분석기(CGA)의 경우 CO(평균값 및 최대값 제외)가 모든 실험 조건에서 연기발생에 따른 측정값의 변화를 통해 경향성을 관찰할 수 있었다. 특히, 본 실험 조건에서 측정되는 인자들 중 적응성이 가장 우수한 PM 10 및 CO는 화재감지 인자로 활용 가능할 것으로 생각된다.

ABSTRACT

This is a basic research on potential application of fire detection by measuring fire detection tendency of indoor air quality measurement factors. In this study, operation experiment using smoke detector sensitivity tester and paper fire experiment specified in UL 268 standards were conducted to evaluate the fire detection tendency of indoor air quality measurement factors. Based on the cross-substitution of values measured in the paper fire experiment, PM10 (excluding average) and HCHO (excluding average and maximum) for the indoor air quality meter (IAQ); PM1.0, PM2.5, and PM10 for IAQ S2; and CO (excluding the average and maximum) for combustion gas analyzers showed consistent tendency despite changes in the measured values for smoke generation under all experimental conditions. In particular, PM10 and CO are considered the most applicable fire detection factors among the factors measured in the experiment.

Keywords : Fire detection, IAQ measure factors, UL 268 paper fire, Fire detection tendency, Fire detection factor

1. 서 론

소방청 국가화재정보센터⁽¹⁾의 화재통계에 따르면 2018년도 총 42,338건의 화재가 발생하였고, 화재로 인한 사상자는 총 3,406명으로 사상자의 주요사상원인은 화상 1,371

건(40.3%), 연기, 유독가스흡입 984건(28.9%), 연기, 유독가스흡입 및 화상 406건(11.9%) 등의 순으로 나타났다. 화재로 인한 사망자는 총 675명으로 주요사망원인은 연기, 유독가스흡입 226건(33.5%), 화상 177건(26.2%), 연기, 유독가스흡입 및 화상 153건(22.7%) 등의 순으로 나타났고, 이 중

[†] Corresponding Author, E-Mail: kimsikuk@hoseo.edu. TEL: +82-41-540-5732, FAX: +82-41-540-5738

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

화상을 제외한 화재 시 사망자 대부분은 연기 및 유독가스 흡입(56.2%)으로 인해 발생하고 있다. 이와 같이 화재 시 발생하는 연기 및 유독가스 흡입으로 인한 사망자를 최소화하기 위해서는 연소 시 발생하는 다양한 인자들의 감지를 통해 화재를 조기에 감지하여 경보하는 역할이 중요하지만, 국내의 실내에 설치되는 감지기는 열 또는 연기를 감지하는 방식으로 국한되어 있어 조기감지의 한계성이 나타나고 있다. 즉, 현대 건축물들은 내부의 미를 추구하다보니 다양한 재료의 내장재를 사용하여 화재발생시 발열량 증가와 함께 다양한 연소생성물(연기, 에어로졸, 가스 등)을 발생하기 때문에 기존 열감지기 또는 연기감지기만으로는 화재의 적응성이 낮을 수 있다. 국내에서는 화재의 조기감지를 위해 2015년도 화재안전기준의 개정을 통해 특정소방대상물 중 취침, 숙박, 입원 등 이와 유사한 용도로 사용되는 거실에 연기감지기를 설치하고 있다^(2,4). 하지만 기존 광산란을 이용한 연기감지기의 경우 연기의 입자 특성(색상, 수분함량, 입자 크기 및 분포 등)에 따라 반응시간의 차이가 발생하고 있다. 기존 연구 자료에 의하면 백색연기(White smoke)의 경우 90%의 산란 특성이 있어 조기감지가 가능하지만, 흑색연기(Black smoke)의 경우 30%의 산란 특성으로 화재감지의 지연이 발생하게 된다^(4,5). 이에 따라 기존 연기감지기의 한계성을 극복하고 실내 화재를 조기에 감지하여 활용할 수 있는 새로운 화재감지인자에 대한 연구가 필요하지만, 기존 연구들은 연기감지기의 문제점 분석 및 무선통신 적용을 한 IT 감지기 개발에 중점을 두고 있다.

최근 미세먼지의 급격한 증가로 실내의 쾌적한 환경을 유지하기 위해 가정에 실내공기질 측정기의 설치가 급격히 증가하고 있는 추세이다. 또한, 「실내공기질 관리법」 제1조⁽⁶⁾에 따라 다중이용시설, 신축되는 공동주택 및 대중교통 차량의 실내공기질을 알맞게 유지하기 위해 실내공기질을 측정하고 그 결과를 기록 보존하도록 하고 있다. 이러한 실내공기질 측정기의 경우 미세먼지, 포름알데히드, TVOC, CO 등 공기 중에 부유하고 있는 에어로졸(Aerosol) 상태의 다양한 인자 측정이 가능한 특징이 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 실내공기질 측정을 위해 사용되는 공기질 측정기를 이용하여 측정인자들의 화재감지 경향성 분석을 통해 화재감지 인자로 활용 가능성을 판단하고자 연기감지기 감도시험기를 이용한 실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정 실험과 UL 268 종이화재 시험을 이용한 실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정 실험을 진행하여 측정결과를 비교·분석하였다.

2. 감광 계산(Obscuration calculation)⁽⁷⁾

일반적으로 연소과정 중 다량의 고체와 액체입자가 대기 중에 방출되는데, 이 입자의 크기는 $5 \times 10^{-4} \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 로 다양한 크기로 발생한다. 공기 중에 부유하는 입자를 에어로졸(Aerosol)이라 하며, 에어로졸 입자가 화재로 인해

발생하였을 때 연기(Smoke)라 말한다. 즉, 연기란 불완전 연소과정의 결과로 발생하는 낮은 증기압 상태의 입자로 가스 상태로 분산되어 공기 중에 부유하는 것을 말한다. 이러한 연기에 포함된 연기/에어로졸을 감지하는 방법^(8,9)인 광학농도계(Optical density meter, ODM)를 이용한 미터 당 퍼센트 감광(Percent obscuration per meter)(이하, 감광율) O_u (%/m)는 식(1)을 사용하여 구한다^(5,7,10-11).

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

여기서, O_u 는 감광율(%/m), T_s 는 연기에 포함된 연기/에어로졸 광학농도계 측정값(μA), T_c 는 청정공기에 포함된 연기/에어로졸 광학농도계 측정값(μA), d 는 광학농도계의 발광부와 수광부 사이의 거리(m)(이하, 광원거리)를 나타낸다.

감광율을 알 경우, 총 감광(Total obscuration) O_d (%)는 식(2)와 같다.

$$O_d = \left[1 - \left(1 - \frac{O_u}{100} \right)^d \right] \cdot 100 \quad \text{식(2)}$$

또한, 미터 당 광학밀도(Optical density per meter)(이하, 광밀도) OD (OD/m)는 식(3)과 같다.

$$OD = \frac{\text{Log}_{10} \frac{T_c}{T_s}}{d} \quad \text{식(3)}$$

총 광밀도(Total optical density) OD_t (OD)는 식(4)와 같다.

$$OD_t = \text{Log}_{10} \left(\frac{T_c}{T_s} \right) \quad \text{식(4)}$$

Figure 1은 본 연구에 사용된 광학농도계(ODM)를 이용한 감광율 O_u (%/m) 및 추가적으로 광밀도 OD (OD/m)의 감광 계산 그래프 나타낸 것이다. UL 268 시험기준에 의거하여 광학농도계의 광원거리(d)는 1.5 m, 광학농도계의 전류는 100 Ω 에서 T_c 값이 100 μA ($O_u = 0$ %/m)이 되도록 고정세팅(청정상태)하고, 연기에 포함된 연기/에어로졸 광학농도계 측정값에 따른 감광율 및 광학밀도의 변화를 계산하였다.

3. 실험

화재 시 발생하는 다양한 연소생성물 중 연기와 에어로졸 상태의 미립자 등 다양한 인자(Factor) 검출을 통해 화재 감지센서로 적용 가능한 인자들을 판단하기 위해 실내공기질 측정기를 이용하여 실험을 진행하였다. 먼저, 국내 연기

Figure 1. Graph of obscuration calculation.

Figure 2. Experiment object.

감지기 형식승인 기준에 의거한 감도시험을 진행하여 광전식 연기감지기 화재정보농도에서 공기질 측정기로 측정되는 인자들의 변화량을 관측하여 화재정보농도를 측정하였다. 그 후 화재정보농도의 신뢰성 향상을 위해 UL 268 기준에서 규정하고 있는 종이화재 실험실실험을 진행하여 비교·분석을 통해 최종적으로 화재감지센서로 적용 가능한 인자들 도출하였다. 이와 같이 UL 268 종이화재실험을 추가로 진행한 것은 국내 연기감지기의 감도시험은 연기시료로 동양호지 No.2(거름종이)를 사용하여 감도시험기 내에서 종이훈소화재 형태로 연기를 발생하여 작동여부를 판단하는 것에 국한되어 있지만, 국외의 경우 실제 화재를 모사한 실험실실험을 병행하여 화재감지기의 적응성을 향상시키고 있기 때문에 본 연구에서도 동일 화원인 종이화재를 대상으로 국내 기준과 UL 268 기준을 적용하여 화재감지센서로 적용 가능한 인자들을 판단하였다.

3.1 실험대상

Figure 2는 본 실험에 사용된 실험대상을 나타낸 것이다. Figure 2(a)는 A사의 아날로그 연기감지를 나타낸 것으로, 최대 연기농도는 24 %/m까지 측정이 가능하며, 프로그램 연동을 통해 연기농도를 실시간 모니터링 할 수 있는 특징이 있다. Figure 2의 (b)와 (c)는 실내공기질(Indoor air quality, IAQ) 측정기를 나타낸 것으로 현재 실내공기질 측정을 위해 사용되는 측정기들 중 성능적인 측면과 사용도가 높은

2개사 제품을 선정하였다. 두 제품 모두 극초미세먼지 PM 1.0 (1 μm 이하), 초미세먼지 PM 2.5 (2.5 μm 이하), 미세먼지 PM 10 (10 μm 이하), 포름알데히드(HCHO) 농도 측정이 가능하고, 추가적으로 IAQ S2의 경우 총휘발성유기화합물(TVOC)의 농도 측정이 가능하다. IAQ S1의 PM 측정 최대범위는 9999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, IAQ S2의 PM 측정 최대범위는 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 측정이 가능하다. Figure 1의 (d)는 연소가스분석기(Wholer A550)를 나타낸 것으로 CO, NO_x, SO₂ 등의 농도를 측정할 수 있는 특징이 있다.

3.2 연기감지기 감도시험기를 이용한 실내공기질 측정 인자들의 화재감지 경향성 측정 실험

국내 연기감지기(감도 2종)의 화재정보농도인 감광율 15 %/m에서 연기감지기 감도시험기 내의 공기질 측정을 통해 변화되는 인자들의 변화량을 관측하기 위해서 감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준 제19조⁽¹²⁾에 의거한 광전식 연기감지기의 감도시험 중 작동시험을 기준으로 실험을 진행하였다. 실험은 Figure 3(a)의 연기감지기 감도시험기를 이용하고, 동양호지 No.2를 연기시료로 하여 감광율 15 %/m 농도의 연기를 발생시키고, 이때 풍속은 30 cm/s로 일정하게 유지시켰다. 그 후 Figure 2의 아날로그 연기감지기(ASD)와 공기질 측정기(IAQ S1, IAQ S2), 연소가스 분석기(CGA)를 동시에 투입하여 형식승인 시험기준 시간인 30 s 동안의 데이터 변화량을 측정하였다. 모든 실험은 10회 이

Figure 3. Photograph of sensitivity experiment.

Figure 4. Paper fire source and receptacle etc.

상 실시 후 평균값으로 30 s 동안의 결과를 나타내었고, 결과의 분석은 아날로그 연기감지기의 15% 도달시간, 감광율 15 %/m에서 30 s 동안의 평균값 및 최대값을 기준으로 IAQ S1, IAQ S2, CGA의 값을 분석하였다.

3.3 UL 268 종이화재시험을 이용한 실내공기질 측정 인자들의 화재감지 경향성 측정 실험

국내 연기감지기 감도시험기를 이용한 실험만으로 공기질 측정인자들의 화재감지 경향성을 분석하기에는 연구결과와 신뢰도가 낮기 때문에 UL 268 실험화재시험 중 국내 감도시험 시 사용되는 동양호지와 유사한 종이를 시험화원으로 사용하는 종이화재시험을 진행하여 경향성을 측정하고자 하였다. 실험은 UL 268 시험기준⁽⁷⁾을 준용하여 실시하였다. Figure 4는 실험에 사용된 종이화원 및 용기 등을 나타낸 것으로 기준에 의거하여 제작하였다. 종이화원은 신문지를 사용하여 폭 6 mm, 길이 100 mm로 재단하고, 총 무게 42.6 g을 가연물로 사용하였다. 용기는 두께 0.6 mm, 직경 100 mm, 길이 300 mm로 스테인리스 스틸 재질로 이음매에 에어 갭이 없도록 제작하였고, 추가적으로 용기의 중앙에 수직 홀(Hole)을 형성할 수 있도록 두께 1.0 mm, 직경 25.4 mm, 길이 400 mm의 수직 봉 및 용기에 종이를 채울 때 임시로 바닥을 막을 수 있는 두께 1.0 mm, 직경 150 mm 임시바닥판을 제작하였다.

기존 UL 268 관련 논문들의 경우 실험장의 규모 및 실험 조건들을 충족하지 못하였지만, 본 연구에서는 UL 268에서 규정한 요건들을 충족시키기 위해 온·습도 조건 및 공기유동 조건 등 실험에 영향을 줄 수 있는 다양한 변수들에 대한 지속적인 검증작업을 진행 후 실험을 실시하여

신뢰성을 높이하고자 하였다. Figure 5는 UL 268 실험의 구조도 및 실험 사진을 나타낸 것으로 UL 268에서 규정하고 있는 화재실험장과 동일한 규모인 11.0 m × 6.7 m × 3.0 m의 화재실험장을 구축하여 진행하였다. Figure 5의 (a)와 같이 종이화원은 측벽에서 2.13 m 떨어진 중앙에 위치시키고, 화원으로부터 5.40 m 떨어진 천장부에 Figure 5의 (b)와 같이 연소가스분석기(CGA), 아날로그 연기감지기(ASD), 실내공기질 측정기(IAQ S1, IAQ S2)를 설치하고, 광학농도계 ODM (광원거리 1.5 m)은 ODM의 광원 중심이 천장 아래 102 mm에 위치하도록 설치하여 실험을 진행하였다. 실험 전 재단된 종이 가연물은 최소 48시간 동안 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 로 전처리하여 사용하였고, 실험 시 화재실험장의 온도는 24 ± 3 °C, 상대습도는 $50 \pm 10\%$ 의 조건을 유지하였다. 실험은 UL 268에서 규정한 시험방법에 의거하여 Figure 5(c)와 같이 임시바닥판을 이용하여 용기 하단을 막고 수직 봉을 용기 정중앙에 위치시켜 25.4 mm의 수직 홀이 용기 상단에서 하단까지 중앙을 관통하게 형성시키고, 종이 가연물을 용기 상단 아래 102 mm가 될 때까지 다져서 넣은 후, 임시바닥판 및 수직 봉을 제거하고, 지지대를 이용하여 바닥에서 0.9 m 상부에 용기를 장착시켰다. 그 후 점화기를 이용하여 수직 홀이 형성된 바닥 중앙에 5 s 동안 아크(arc)를 인가하여 점화를 시키고 240 s 동안 CGA, ASD, IAQ S1 및 S2에서 측정되는 인자들의 변화량을 관측하였다. 점화 후 Figure 5의 (d)와 같이 급격한 연기가 발생하고, 발생한 연기는 화원 직상부 천장에 가득 채류하다가 Figure 5의 (e)와 같이 화염누출이 발생하게 되면 화원 직상부에 채류하고 있던 연기를 화염의 힘으로 밀게 되고 연기는 ODM이 설치된 곳으로 천장을 타고 이동

(a) Schematic diagram

(b) CGA, ASD, IAQ S1 & S2, ODM

(c) Fire source & holder

(d) Smoke generation

(e) Flame breakthrough

Figure 5. Schematic diagram and photograph of experiment.

하게 되어 1차 피크(1st peak) 구간을 형성하게 된다.

UL 268 시험에서 규정한 종이화원의 프로파일(Profile)은 점화 후 화염누출(Flame breakthrough)이 60 s에서 180 s 사이에 일어나고, 1차 피크(1st peak)가 발생하면서 천장에 설치된 ODM에서 측정되는 감광율은 64.4~78.1 %/m 범위의 최대 피크를 가져야 한다. 그 후 최소 20~40 s 동안 감광율 12.56 %/m 이상의 감광이 있어야 하며, 2차 피크(2nd peak)에서는 감광율 36.7 %/m를 초과하는 감광이 없어야 하고 연기감지기는 240 s 이내에 응답하도록 규정하고 있다. 이에 따라 본 연구에서도 실험결과 분석은 UL 268 시험에서 규정한 종이화원의 프로파일(Profile)과 유사한 프로파일을 나타낸 결과만을 대상으로 분석을 실시하였다. 참고적으로 국외규정인 UL 268 시험의 경우 경험을 바탕으로 한 축적된 노하우로 기준을 만들었기 때문에 기준 분석을 통해서만 명시된 동일 프로파일을 연기 위해서는 다

양한 변수들로 인해 동일 프로파일 구현에 많은 어려움이 나타났다. 본 연구에서는 화재실험장 및 가연물의 온도 조건과 환기 조건의 조절 등 최소 100회 이상의 실험을 진행하여 10건의 유사한 프로파일을 취득하였고, 프로파일과 가장 유사한 3건의 데이터를 평균화하여 결과를 나타내었다.

4. 실험결과

4.1 연기감지기 감도시험기를 이용한 실내공기질 측정 인자들의 화재감지 경향성 측정 실험결과

Table 1 및 Figure 6은 연기감지기 감도시험기를 이용한 실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정 결과를 나타낸 것이다. 광전식 연기감지기 감도시험기의 감광율 15 %/m의 연기농도에 야날로그 연기감지기를 투입하였을 때 실험 시작 9 s에 화재경보 값인 15%에 도달하고 일정농도

Table 1. Results of Sensitivity Experiment

Item	Value at ASD 15% (9 s)			Avg. Value (for 30 s)			Max. Value (for 30 s)		
	IAQ S1	IAQ S2	CGA	IAQ S1	IAQ S2	CGA	IAQ S1	IAQ S2	CGA
PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	154	589	-	154 (1 s)	822 (10 s)	-	232 (1 s)	999 (13 s)	-
PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2544	776	-	2415 (2 s)	864 (10 s)	-	2675 (5 s)	999 (10 s)	-
PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9999	900	-	9708 (6 s)	890 (7 s)	-	9999 (6 s)	999 (10 s)	-
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1165	249	-	1585 (15 s)	322 (15 s)	-	2301 (30 s)	466 (30 s)	-
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	1088	-	-	1440 (14 s)	-	-	2092 (30 s)	-
CO (ppm)	-	-	5	-	-	10 (14 s)	-	-	16 (26 s)
NOx (ppm)	-	-	0	-	-	0	-	-	1 (28 s)
SO ₂ (ppm)	-	-	0	-	-	1 (13 s)	-	-	1 (13 s)

(a) ASD

(b) IAQ S1 (PM)

(c) IAQ S1 (HCHO)

(d) IAQ S2 (PM)

(e) IAQ S2 (HCHO & TVOC)

(f) CGA

Figure 6. Results graph of sensitivity experiment.

를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 아날로그 연기감지기 (ASD)의 15% 도달시간인 9 s를 기준으로 IAQ S1, IAQ S2, CGA 측정값을 분석해보면, IAQ S1의 경우 PM 1.0 154 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 2544 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 9999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대범위), HCHO 1165 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, IAQ S2의 경우 PM 1.0 589 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 776 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HCHO 249 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, TVOC 1088 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CGA의 경우 CO 5 ppm, NOx 및 SO2 0 ppm으로 측정되었다. 감광율 15 %/m의 연기농도에서 30 s 동안 평균값을 분석해보면 IAQ S1의 경우 PM 1.0 154 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 2415 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 9708 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HCHO 1585 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, IAQ S2의 경우 PM 1.0 822 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 864 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 890 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HCHO 322 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, TVOC 1440 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CGA의 경우 CO 10 ppm, NOx 0 ppm, SO2 1 ppm으로 측정되었다. 감광율 15 %/m의 연기농도에서 30 s 동안 최대범위를 분석해보면 IAQ S1의 경우 PM 1.0 232 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 2675 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 9999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대범위), HCHO 2301 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, IAQ S2의 경우 PM 1.0, PM 2.5, PM 10 모두 측정 최대범위인 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었고, HCHO 466 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, TVOC 2092 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CGA의 경우 CO 16 ppm, NOx 1 ppm, SO2 1 ppm으로 측정되었다.

실험결과 연기감지기 감도실험에서는 IAQ S1에서 측정되는 PM 10, HCHO, IAQ S2에서 측정되는 PM 1.0, PM 2.5, PM 10, HCHO, TVOC, CGA에서 측정되는 CO의 경우 감광율 15 %/m의 연기농도에 30 s 간 투입 시 변화량이 증가하는 경향성이 나타나 1차적으로 화재감지 인자로써의 활용가능성을 확인하였다. 반면, Table 1의 붉은색으로 표기한 IAQ S1에서 측정되는 PM 1.0 및 PM 2.5 그리고 CGA에서 측정되는 NOx 및 SO2의 경우 30 s 동안의 변화량이 매우 적거나, 조기반응으로 비화재보 시 오작동 우려가 있는 5 s 이내에 측정되는 값들도 화재감지 인자로 활용하기 어려울 것으로 판단된다.

4.2 UL 268 종이화재시험을 이용한 실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정 실험결과

Table 2 및 Figure 7은 UL 268 종이화재시험을 이용한 실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정 결과를 나타낸 것으로 CGA에서 측정되는 NOx 및 SO2의 경우 연기감지기 감도실험과 마찬가지로 실험시간 240 s 동안 변화량이 거의 없어 분석에서 배제하였다. Figure 7(a)의 ODM 그래프를 분석해보면 점화 후 94 s에 화염누출(Flame breakthrough)이 일어나고 136 s에 감광율 67 %/m의 1차 피크가 발생하며, 178 s에 감광율 27 %/m의 2차 피크가 나타났으며, UL 268 기준을 충족하고 있는 것을 확인할 수 있으며, ODM의 감광율 15 %/m 도달시간과 ASD의 연기농도 15% 도달시간이 105 s로 동일하게 측정되었다. ASD의 15% 도달시간인 105 s를 기준으로 IAQ S1, IAQ S2, CGA 측정값을 분석해보면, IAQ S1의 경우 PM 1.0 133 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 2360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 9999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대범위), HCHO 1728 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, IAQ S2의 경우 PM 1.0, PM 2.5, PM 10 모두 측정 최대범위인 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었고, HCHO 636 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, TVOC 3201 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CGA의 경우 CO 5 ppm으로 측정되었다. 실험시간인 240 s 동안 평균값을 분석해보면 IAQ S1의 경우 PM 1.0 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 1469 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 6568 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HCHO 3140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, IAQ S2의 경우 PM 1.0 705 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 716 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 722 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HCHO 1089 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, TVOC 5851 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CGA의 경우 CO 27 ppm으로 측정되었다. 실험시간인 240 s 동안 최대범위를 분석해보면 IAQ S1의 경우 PM 1.0 179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 2561 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 9999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대범위), HCHO 7772 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, IAQ S2의 경우 PM 1.0, PM 2.5, PM 10 모두 측정 최대범위인 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었고, HCHO 1999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, TVOC 9999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대범위), CGA의 경우 CO 84 ppm으로 측정되었다.

실험결과 UL 268 종이화재실험에서는 변화량이 매우 적은 IAQ S1에서 측정되는 PM 1.0 및 도달시간이 매우 빠른 PM 2.5 평균값을 제외(Table 2에 붉은색으로 표기)한 모든

Table 2. Results of UL 268 Paper Fire Experiment

Item	Value at ASD 15% (105 s)			Avg. Value (for 240 s)			Max. Value (for 240 s)		
	IAQ S1	IAQ S2	CGA	IAQ S1	IAQ S2	CGA	IAQ S1	IAQ S2	CGA
PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	133	999	-	125 (58 s)	705 (79 s)	-	179 (75 s)	999 (79 s)	-
PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2360	999	-	1469 (1 s)	716 (75 s)	-	2561 (81 s)	999 (79 s)	-
PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9999	999	-	6568 (80 s)	722 (75 s)	-	9999 (82 s)	999 (77 s)	-
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1728	636	-	3140 (120 s)	1089 (101 s)	-	7772 (148 s)	1999 (119 s)	-
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	3201	-	-	5851 (101 s)	-	-	9999 (114 s)	-
CO (ppm)	-	-	11	-	-	27 (116 s)	-	-	84 (154 s)

Figure 7. Results graph of UL 268 paper fire experiment.

측정인자들이 연기 발생 증가에 따라 변화량이 감지되면서 화재감지 인자로써의 활용 가능성을 확인하였다. 특히, 공기질 측정기의 경우 UL 268 종이화재실험결과 기존 아날로그 연기감지기의 반응속도 더 빠른 응답특성이 나타나는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 공기질 측정기의 경우 공기 흡입형 감지기와 유사하게 공기를 흡입하여 분석하는 방식이기 때문에 응답특성이 빠르게 나타난 것으로 생각된다. 즉, 기존의 광전식 연기감지기의 경우 산란에 필요한 입자들이 충족되어야 응답하는 특성으로 연기입자의 수분함량 및 색상 및 분포 등에 의해 응답속도에 차이가 발생하지만, 공기질 측정기의 경우 공기흡입형 감지기와 유사하게 레이저에 의한 먼지의 입자계수(Particle Counting)로 감지하는 방식이기 때문에 기존 산란광 방식의 연기감지기보다 변수가

적기 때문에 응답특성이 빠르게 나타난 것으로 판단된다.

4.3 연기감지기 감도실험 및 UL 268 종이화재실험 측정값 비교

Table 3은 연기감지기 감도실험 측정값과 UL 268 종이화재실험 측정값을 각각 교차대입(Cross-substitution)한 결과를 나타낸 것으로 화재감지 인자로 적용 가능여부를 전체적으로 판단한 것이다. Table 3(a)은 연기감지기 감도실험 측정값을 UL 268 종이화재실험 측정값에 대입한 결과로 적용 가능여부의 판단은 Table 1의 연기감지기 감도실험 측정값이 Table 2의 UL 268 종이화재실험 측정값(ASD 15%에서 값, 평균값, 최댓값)의 최소 및 최대 범위 내에 해당하고, 측정시간(75~154 s) 내에 들어가 화재감지 인자로

Table 3. Compare Results (Cross-substitution)

Item	Value at ASD 15%			Avg. Value			Max. Value		
	IAQ S1	IAQ S2	CGA	IAQ S1	IAQ S2	CGA	IAQ S1	IAQ S2	CGA
	(a) Sensitivity Experiment → UL 268 Paper Fire Experiment								
PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	154 (64 s)	589 (77 s)	-	154 (64 s)	822 (79 s)	-	232 (-)	999 (79 s)	-
PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2544 (82 s)	776 (77 s)	-	2415 (106 s)	864 (77 s)	-	2675 (-)	999 (79 s)	-
PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9999 (82 s)	900 (77 s)	-	9708 (82 s)	890 (77 s)	-	9999 (82 s)	999 (77 s)	-
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1165 (92 s)	249 (78 s)	-	1585 (103 s)	322 (79 s)	-	2301 (116 s)	466 (84 s)	-
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	1088 (82 s)	-	-	1440 (79 s)	-	-	2092 (83 s)	-
CO (ppm)	-	-	5 (101 s)	-	-	10 (104 s)	-	-	16 (108 s)
Item	(b) UL 268 Paper Fire Experiment → Sensitivity Experiment								
PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	133 (-)	999 (13 s)	-	125 (-)	705 (10 s)	-	179 (-)	999 (13 s)	-
PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2360 (2 s)	999 (10 s)	-	1469 (-)	716 (7 s)	-	2561 (3 s)	999 (10 s)	-
PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9999 (6 s)	999 (10 s)	-	6568 (2 s)	722 (7 s)	-	9999 (6 s)	999 (10 s)	-
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1728 (18 s)	636 (-)	-	3140 (-)	1089 (-)	-	7772 (-)	1999 (-)	-
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	3201 (-)	-	-	5851 (-)	-	-	9999 (-)	-
CO (ppm)	-	-	11 (15 s)	-	-	27 (-)	-	-	84 (-)

적용 가능한 경우 무색, Table 2 측정값의 최소 및 최대 범위 내에 해당하지 않지만, 변화량 등을 고려하여 화재감지 값으로 활용가능하고 측정시간 내에 들어가 화재감지 인자로 적용 가능한 경우 파란색, Table 1에서 활용이 불가능했던 측정값 및 그 외 측정 범위 및 시간을 벗어나 화재감지 인자로 적용 불가능한 경우 붉은색으로 표시하였다. 교차대입결과 IAQ S1의 PM 10, HCHO, IAQ S2의 PM 1.0, PM 2.5, PM 10, HCHO, TVOC, CGA의 CO가 적용 가능한 것으로 나타났고, 그 외의 모든 측정값은 적용 불가능한 것으로 판단되었다. Table 3(b)은 UL 268 종이화재실험 측정값을 연기감지기 감도실험 측정값에 대입한 결과로 적용 가능여부의 판단은 Table 2의 UL 268 종이화재실험 측정값이 Table 1의 연기감지기 감도실험 측정값(ASD 15%에서 값, 평균값, 최댓값)의 최소 및 최대 범위 내에 해당하고, 작동시간(6~30 s) 내에 들어가 화재감지 인자로 적용 가능한 경우 무색, Table 1 측정값의 최소 및 최대 범위 내에 해당하지 않지만, 변화량 등을 고려하여 화재감지 값으로 활용가능하고 작동시간 내에 들어가 화재감지 인자로 적용 가

능한 경우 파란색, Table 2에서 활용이 불가능했던 측정값 및 그 외 측정 범위 및 작동 시간을 벗어나 화재감지 인자로 적용 불가능한 경우 붉은색으로 표시하였다. 교차대입결과 IAQ S1의 PM 10 (ASD 15%에서 값, 최댓값), HCHO (ASD 15%에서 값), IAQ S2의 PM 1.0, PM 2.5, PM 10, CGA의 CO(ASD 15%에서 값)가 적용 가능한 것으로 나타났다, 그 외의 모든 측정값은 적용 불가능한 것으로 판단되었다.

5. 결 론

본 논문은 실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정을 통한 화재감지 활용 가능성에 관한 기초 연구로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 연기감지기 감도시험기를 이용한 실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정 실험결과 공기질 측정기 (IAQ) S1의 경우 PM 10, HCHO, S2의 경우 PM 1.0, PM 2.5, PM 10, HCHO, TVOC, 연소가스분석기(CGA)의 경우 CO에

서 감광율 15 %/m의 연기농도에 30 s 동안 투입 시 변화량이 증가하는 경향성이 나타났다.

2) UL 268 종이화재실험을 이용한 실내공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 측정 실험결과 변화량이 매우 작은 IAQ S1의 PM 1.0 및 도달시간이 매우 빠른 PM 2.5 평균값을 제외한 모든 측정인자들이 실험시간 240 s 동안 연기발생에 따라 변화량이 증가하는 경향성이 나타났다.

3) 연기감지기 감도실험 및 UL 268 종이화재실험에 측정된 각각의 측정값을 교차 대입한 결과 IAQ S1의 PM 10 (평균값제외), HCHO(평균값 및 최대값 제외), IAQ S2의 PM 1.0, PM 2.5, PM 10, CGA의 CO(평균값 및 최대값 제외)가 모든 실험에서 화재감지 인자로 적용 가능한 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과 현재 실내 화재감지 인자로 적용되는 열 또는 연기감지를 감지하는 방식 외에도 공기질 측정기로 측정되는 인자들의 병행측정(Cross checking)을 통해 화재를 감지할 경우 화재감지기의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 본 실험 조건에서 측정되는 인자들 중 적응성이 가장 우수한 PM 10 및 CO를 활용한 화재감지기를 개발할 경우 기존 산란광 방식의 연기감지기의 화재감지 시 적용되는 변수들로 인해 나타나는 조기 감지 지연의 문제점을 개선할 수 있을 것으로 생각된다.

끝으로 본 연구에 사용된 공기질 측정기의 경우 고가의 고정밀 계측기가 아닌 실내의 일상생활에 설치하여 사용하는 포터블 방식의 공기질 측정기를 이용하여 연구하였기 때문에 성능적인 부분의 정확도를 판단하기에는 어려움이 있다. 즉, IAQ S1 및 IAQ S2의 공기질 측정기의 감지능력 및 측정범위 등의 성능차이로 인해 동일 실험 조건임에도 불구하고 다른 값이 나타나 어떤 측정기가 정확성 및 신뢰성을 확보하고 있는지 여부 판단이 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 공기질 측정인자들을 대상으로 화재감지 경향성 측정하여 활용 가능성을 분석하는데 초점을 두었다. 향후 본 연구에 사용된 종이화재 이외에 UL 268에서 규정하고 있는 다양한 화원을 대상으로 실험화재실험을 진행하여 공기질 측정인자들의 화재감지 경향성 및 활용성을 추가적으로 분석하여 신뢰성을 확보할 예정이다.

후 기

본 연구는 국가과학기술연구회의 재원으로 2018년도 실

용화형 융합연구단사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호 : QLT-CRC-18-02-KICT).

References

1. National Fire Agency 119, "National Fire Information Center Fire Statistics" (2018).
2. NFSC 203, "Fire Safety Standards for Automatic Fire Alarm System and Visual Alarm Equipment" (2019).
3. C. H. Lee, H. S. Lee and S. K. Kim, "A Study on Response Characteristics of Photoelectric Type Smoke Detector Chamber Due to Dust and Wind Velocity", Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 1, pp. 50-57 (2017).
4. H. S. Lee and S. K. Kim, "A Study on Response Characteristics of Photoelectric Type Smoke Detector Chamber Due to Dust Color", Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 5, pp. 44-52 (2017).
5. 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).
6. Ministry of Environment, "Indoor Air Quality Management Act" (2018).
7. Underwriters Laboratories, "UL 268 Standard for Safety Smoke Detectors for Fire Alarm Systems" (2016).
8. <http://rm.samsungfire.com/pub/html/2002/2002wtr11.html>.
9. Y. G. Park, "An Experimental Study on the Combustion Risk Characteristics of Industry Using Insulating Materials", Academy Thesis, The Graduate School of Hoseo University, pp. 36-37 (2005).
10. J. H. Lee, "A Study on the Multi-optical Smoke Detector Chamber", Ph.D. Thesis, The Graduate School of Hoseo University, pp. 1-118 (2013).
11. K. H. Kim and C. H. Hawng, "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 & Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 27-34 (2013).
12. National Fire Agency 119 Notice (No. 2017-5), "Technical Standards for Formal Approval and Product Inspection of Fire Detector" (2019).