[Research Paper]

UL 268 목재 유염화재 및 훈소화재시험 시 발생하는 연소생성물을 통한 화재감지 경향성 측정실험

최수길 · 최유정* · 남영재 · 김시국**†

호서대학교 소방방재학과 대학원생, *호서대학교 안전공학과 대학원생, **호서대학교 소방방재학과 교수

Fire Detection Tendency through Combustion Products Generated during UL 268 Wood Flame Fire and Smoldering Fire Test

Su-Gil Choi · Yoo-Jeong Choi* · Yeong-Jae Nam · Si-Kuk Kim**†

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

*Graduate Student, Dept. Safety Engineering, Hoseo Univ.,

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

(Received November 27, 2020; Revised December 14, 2020; Accepted December 14, 2020)

요 약

본 논문은 UL 268 목재 유염화재 및 훈소화재시험 시 발생하는 연소생성물을 통한 화재감지 경향성을 분석한 실험적 연구이다. 화재감지 경향성을 측정하기 위해 미세먼지센서(PMS), 연소가스분석기(CGA), 가스분석기(GA)를 사용하여 실험을 진행하였다. 연기감지기에서 측정되는 연기 감광율 5 %/m(부작동), 10 %/m, 15 %/m에서 연소생성물을 매칭하여 분석한 결과 목재 유염화재의 경우 PMS PM 10, CGA CO, SO₂, GA HCHO, TVOC가 연기발생에 따른 측정값의 지속적인 상승에 의해 경향성을 관찰할 수 있었다. 훈소화재의 경우 PM 10, CO, HCHO가 적응성이 나타나 최종적으로 유염 및 무염화재를 동반한 목재화재의 경우 PM 10, CO, HCHO가 모두 적응성을 보이면서 화재감지 인자로 활용 가능한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

This experiment analyzes the tendency of fire detection through combustion products generated during UL 268 wood flame fires and smoldering tests. Fire detection tendency was measured using a particle matter sensor (PMS), combustion gas analyzer (CGA), and gas analyzer (GA). The combustion products were matched and analyzed at 5 %/m (non-operation), 10 %/m, and 15 %/m of the smoke sensitivity measured by the smoke detector. In the case of wood flaming fire, PMS PM 10, CGA CO, SO₂, GA HCHO, and TVOC, the trend was observed because of the continuous increase in the measured value according to the smoke generation. In the case of smoldering, PM 10, CO, and HCHO were adaptable to the tendency to be observed. Finally, in the case of wood fire accompanied by flame fire and smoldering to PM 10, CO and HCHO were considered to be the optimal fire detection factors.

Keywords : Fire detection, UL 268, Wood flame fire, Smoldering test, Fire detection factor

1. 서 론

목재는 쉽게 구할 수 있는 재료적인 특성과 가공이 용이하고 자연친화적인 특징을 가지고 있어, 주거용 건축물 등에서 가구, 바닥재, 마감재 등 내외장재로 가장 많이 사용되고 있는 재료이지만, 화재 시 화재하중을 높이는 가연물

로 작용하기 때문에 화재위험성이 높게 나타난다^(1,2). 소방청 국가화재정보센터의 화재통계에 따르면 2019년 총 40,103건의 화재가 발생되었고, 최초 착화물 조사결과 목재, 종이, 건초 등이 9,484(23.7%)건으로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 그다음 순으로 전기, 전자 8,231(20.5%)건, 쓰레기류 4,522(11.3%)건, 합성수지 4,472(11.2%)건, 식품

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

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

(a) Flaming fire test profile

(b) Smoldering fire test profile

Figure 1. Wood fire and smoldering fire profile graph⁽⁶⁾.

3,176(7.9%)건, 미상 2,969(7.4%)건 등으로 나타났다⁽³⁾. 화재 시 최초 착화물로 많이 차지하고 있는 목재는 셀룰로오스($C_6H_{10}O_5$)_n가 40~50% 정도 함유되어 있는 가연성 물질로, 대기 중 산소농도가 16% 이하가 되더라도 질식소화가 되지 않는 특징이 있다. 즉, 셀룰로오스의 물분자량은 총 162 g으로 이중 산소가 80 g (49.4%)을 차지하고 있기 때문에 C와 H의 연소를 도와 활발하지는 않지만, 지속적인 연소가 일어나는 훈소화재로 이어지는 위험성을 가지고 있다. 또한, 목재구조 화재 시 연소속도는 내화구조에 비해 약 5배 이상 빠르게 확산되는 특징을 가지고 있기 때문에 화재의 조기감지를 통한 화재피해 저감이 필요하다^(4,5).

이와 같이 목재의 경우 유염화재와 훈소화재를 동시에 가지고 있기 때문에 각 화재의 연소특성 분석을 통해 조기 화재감지 인자를 도출하는 것이 필요하다. 하지만 국내에서 진행되고 있는 연기감지기의 형식승인 시험의 경우 동양호지 No.2 (Filter paper)를 단일 연기시료로 하여 감도시험기 내에서 감지기의 감도 종별에 따른 작동 및 부작동 시험만 진행하고 있기 때문에 실화재에서 화재감지기의 조기감지 능력 및 비화재보의 적응성 등이 저하될 수 있는 문제점을 가지고 있다. 반면, 국외기준인 UL 268에서는 다양한 화원을 대상으로 연기 프로파일(Profile) 제시를 통한 실화재 시험기준을 마련하고 있으며, 본 연구테마인 목재화원에 대해서도 유염화재와 훈소(무염)화재로 구분하여 실화재 시험을 통해 화재감지기의 적응성을 확인하고 있다.

따라서 본 연구에서는 목재화재 시 발생하는 다양한 연소생성물들의 측정을 통해 화재감지로 활용 가능한 인자(Factor)를 도출하기 위해 UL 268에서 규정한 목재화원을 대상으로 유염화재 및 훈소화재 실험을 진행하고, 화재유형별 화재감지기의 응답특성 측정 및 실내공기질 측정인자로 활용되고 있는 미세먼지(PM 1.0, PM 2.5, PM 10), 일산화탄소(CO), 포름알데히드(HCHO), 총유기화합물(TVOC), 이산화황(SO₂), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO₂)의 응답 특성 측정을 통해 화재감지 인자로 활용 가능한지 여부를 분석하고자 한다.

2. UL 268 목재화재 연기 프로파일^(6,7)

UL 268 기준에서 시험의 적정성 판단은 광학농도계(Optical density meter; ODM)를 사용하여 시험 시 측정된 감광율(O_u)이 제시된 연기 프로파일의 감광율과 적합 여부로 판단하고 있으며, 감광율 O_u (%/m)는 식(1)을 이용하여 계산한다.

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

여기서, T_s 는 실험 시(연기발생) 광학농도계 측정값(μA), T_c 는 실험 전(청정상태) 광학농도계 측정값 100 μA , d 는 광학농도계의 광원(광축)거리 1.5 m이다.

Figure 1은 UL 268에서 규정하고 있는 목재 화재시험 시 유염화재 및 훈소화재의 연기 프로파일을 나타낸 것이다. Figure 1(a)의 목재 유염화재의 경우 1차 연기의 감광은 시험 시작 후 80~120 s 사이에 시작되고, 그 후 최소 60 s 동안 12.56 %/m 이상 감광이 유지되어야 하며, 시험시간인 4 min 동안 ODM에서 측정되는 최대 감광율은 45.8 %/m를 초과하지 않아야 한다. 또한 화염의 누출은 150~190 s 사이에 발생하도록 되어 있으며, 4 min 이내에 연기감지기가 응답해야 한다고 규정하고 있다. Figure 1(b)의 목재 훈소화재의 경우 최소 감광율과 최대 감광율 범위 내에서 감광율이 나타나야 하며, 연기감지기는 ODM에서 측정되는 감광율이 29.6 %/m의 값을 초과하기 전에 응답해야 한다고 규정하고 있다. 하지만, UL 268 시험기준의 경우 UL 자체에서 다양한 실험을 통해 독자적으로 개발한 기준으로 실험장비에 대한 명확한 규격과 자세한 실험방법 등이 보안 및 영리의 목적 등으로 인해 국내 형식승인 기준과 같이 세부적인 세칙 등이 자세히 나와 있지 않아 UL 268에서 제시된 프로파일을 기준을 만족하기 위해서는 각 화재유형별 최소 50회 이상의 사전실험을 진행하고 나서야 규정에 적합한 프로파일을 지속적으로 도출할 수 있었다.

Figure 2. Experimental equipment.

Figure 3. Schematic diagram of experiment.

3. 실험

모든 실험은 UL 268 기준을 준용하였고, 실험 시 환경조건은 온도 23 ± 2 °C, 습도 $50 \pm 5\%$ 로 미리 조정 후 실험을 진행하였다. 또한, 실험결과 분석은 UL 268 목재화재 시 연기 프로파일에 적합한 3개의 프로파일 데이터의 평균값을 바탕으로 국내 연기감지기 형식승인 시 감도시험 기준 농도와 매칭하여 진행하였다.

즉, 국내 연기감지기(중별 2종) 감도시험 시 부작동(비화재보) 기준 5 %/m와 작동시험농도인 15 %/m를 기준으로 분석하였다. 또한 부작동과 작동농도 사이인 10 %/m를 추가적으로 분석하였다.

3.1 실험 장비 및 구성

Figure 2는 UL 268 목재화재 시 화재감지 인자측정을 위한 실험장비를 나타낸 것이다. Figure 2(a)는 형식승인을 취득한 T사의 아날로그 연기감지기(Analog smoke detector, ASD)를 나타낸 것으로 연기농도는 최대 20.3 %/m까지 측

정되며, 모니터링 프로그램 연동을 통해 연기농도를 측정하는데 사용하였다. Figure 2(b)는 미세먼지센서(Particulate matter sensor, PMS)를 나타낸 것으로 현재 S사 등의 공기측정기에 사용되고 있는 미세먼지센서(Plantower PMS7003M)로 PM 1.0, PM 2.5, PM 10을 측정하는데 사용하였고, 최대 $12,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 측정이 가능한 특징이 있다. Figure 2(c)는 연소가스분석기(Combustion gas analyzer, CGA) Wohler A550를 나타낸 것으로 CO, SO₂, NO, NO₂의 농도를 측정하는데 사용하였다. Figure 2(d)는 가스분석기(Gas analyzer, GA) Tiger 2000을 나타낸 것으로 HCHO, TVOC를 측정하는데 사용하였다. 실험에 사용되는 모든 측정 장치는 실시간으로 Sampling 되며 모든 분석은 시간대별 나타나는 농도값을 제시하여 분석하였다.

Figure 3은 실험의 구성도를 나타낸 것이다. 실험은 UL 268 규정한 실화재 실험장과 동일한 규모 및 유사 환경으로 구축한 11.0 m × 6.7 m × 3.0 m의 화재실험장에서 실험을 진행하였다. 목재화원은 측벽에서 2.13 m 떨어진 중앙에 위치시키고, 화원으로부터 5.4 m 떨어진 천장 중앙에 아

Figure 4. Experiment of wood flaming fire.

Figure 5. Experiment of smoldering fire.

날로그 연기감지기(ASD)를 설치하였으며, 바로 뒤 천장부에 목재화재실험 시 연기 프로파일을 측정하기 위한 광학농도계(ODM)를 설치하였다. 또한, ASD를 기준으로 동일 위치에 미세먼지센서(PMS), 가스분석기(GA), 연소가스분석기(CGA)를 동일지점에 설치하여 실내공기질 측정인자로 활용되고 있는 PM 1.0, PM 2.5, PM 10, CO, HCHO, TVOC, SO₂, NO, NO₂의 응답특성을 병행 측정하였다.

3.2 UL 268 목재 유염화재의 화재감지 인자측정 실험⁶⁾

Figure 4는 목재 유염화재 실험을 나타낸 것으로 목재화원은 더글라스 퍼로 규정되어 있지만, 현재 보호수 지정으로 인해 종류가 유사한 미국소나무(미송)를 대체 화원으로 사용하였다. Figure 4(a)와 같이 152 mm × 19.1 mm × 19.1 mm 크기로 재단 한 후 층마다 6개씩 3층 구조로 연결하여 전체 152 mm × 152 mm × 64 mm 크기가 되도록 스테이플러로 고정하였고, 실험 전 최소 48 h 동안 23 ± 2 °C, 상대습도 50 ± 5%에서 전처리 한 후 사용하였다. Figure 4(b)의 거치대를 이용하여 바닥에서부터 0.9 m의 높이에 목재화원이 위치하도록 하였다. Figure 4(c)와 같이 목재화원로부터 89 mm 아래에 직경 38 mm, 깊이 25.4 mm의 점화용기를 두어 5% 메탄올과 95% 에탄올로 이루어진 변성알코올 5 ml를 연소시켜 점화하였다. 점화 후 240 s 동안 ASD, PMS, GA, CGA에서 측정되는 연소생성물의 화재감지 인자특성을 측정하였다. Figure 4(d)는 유염화재로 전이되는 과정에서 생

성된 연기의 확산과정을 나타낸 것으로 기 선행된 종이화재 실험⁶⁾과 동일하게 점화 후 연기가 발생하고 생성된 연기는 화원 직상부에 천천히 쌓이며 체류되다가 화염누출이 발생하게 되면서 화원 직상부에 체류하고 있던 연기가 화염에 의한 열 부력으로 천장을 타고 ODM이 설치된 곳으로 급격히 이동하면서 UL 268에서 규정한 연기 프로파일 그래프와 유사하게 급격히 증가하는 경향이 나타나게 된다. 이후 화염누출과 함께 목재 전체가 유염연소로 전이되면서 연기 발생량은 급격히 감소하게 된다.

3.3 UL 268 목재 훈소화재의 화재감지 인자측정 실험⁶⁾

Figure 5는 목재 훈소화재 실험을 나타낸 것으로 목재화원은 폰테로사 소나무를 사용하였다. Figure 5(a)와 같이 76.2 mm × 19.1 mm × 25.5 mm 크기로 재단 한 후, 실험 전 최소 48 h 동안 52 °C의 온도에서 전처리 한 후 사용하였다. 전처리된 목재시료를 제작된 훈소화재 실험장치의 열판(φ 216 mm, 6.4 T)위에 면이 닿도록 2개씩 나란히 배열된 5행으로 총 10개가 배치되도록 한 후 열원을 인가하였다. 훈소화재 시험장치의 온도 프로파일은 초기온도 23 ± 2 °C를 유지하고, 실험 시작 후 분당 60.7 °C씩 증가하여 205 °C까지 3 min 이내로 도달하고, 3 min 이후부터는 분당 3.2 °C씩 증가하여 시험이 종료될 때까지 지속적으로 상승하도록 설정하였다. 이때, 열판의 최상부 면의 높이는 바닥에서부터 0.2 m의 높이에 위치하도록 하였다. 실험은 열원인가

Table 1. Flaming Fire Test Results

Item		Value at ASD 5 %/m (147 s)	Value at ASD 10 %/m (153 s)	Value at ASD 15 %/m (159 s)	Max. Value (for 240 s)
PMS	PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	172	165	151	530 (119 s)
	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3,772	3,569	3,360	4,204 (130 s)
	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	10,371	10,770	11,208	11,380 (164 s)
CGA	CO (ppm)	14	24	32	126 (232 s)
	SO ₂ (ppm)	3	4	5	16 (220 s)
	NO (ppm)	0	0	0	0
	NO ₂ (ppm)	0	0	0	0
GA	HCHO (ppm)	40	50	50	50 (153 s)
	TVOC (ppm)	3.4	6.4	7.7	7.7 (157 s)

Figure 6. Results graph of UL 268 flaming fire experiment.

후 ODM에서 측정되는 감광율이 29.26%에 도달하거나, 감지기가 그전에 작동할 경우 실험을 종료하였고, 실험시간 동안 ASD, PMS, GA, CGA에서 측정되는 연소생성물의 화재감지 인자특성을 측정하였다. 목재 훈소화재의 경우 감광율에 도달하기 전에 목재에서 화염이 발생하게 되면, 실패로 간주하게 된다. 따라서 느린 연소를 통해 장시간 서서히 연기가 확산되어 가는 과정을 거치게 되는 특징이 있다.

4. 실험결과

모든 실험의 결과분석은 UL 268 목재화재 시 연기 프로파일에 적합한 3개의 프로파일 데이터를 기준으로 평균값

을 제시하여 분석하였다. 또한, 세부적인 분석을 진행하기 위해 아날로그 연기감지기(ASD)를 기준으로 연기농도 5 %/m, 10 %/m, 15 %/m의 농도에 매칭된 PMS, GA, CGA의 각각의 값을 병행 분석하였다.

4.1 UL 268 목재 유염화재의 화재감지 인자측정 실험 결과

Table 1 및 Figure 6은 UL 268 목재 유염화재시험 시 발생하는 연소생성물에 따른 화재감지 경향성 측정 실험결과를 나타낸 것이다. Figure 6(a)의 ODM 그래프를 분석해보면 1차 피크는 100 s에 발생되었고 이후 연기량이 시간에 따라 점차 상승하면서 12.56 %/m의 감광 이상 발생되었고

알코올램프 점화 이후 화염누출(Flame breakthrough)은 약 156~165 s에 발생되었다. 화염누출 발생 이후 화원부와 ODM 사이 공간에 천천히 채류되어 유동되고 있는 연기들이 화염 열부력에 의해 급격히 ODM에 도달 되고 이때 최대 감광율(44.24 %/m, 173 s)이 나타나게 된다. 이후 화염 누출에 의한 연기 발생이 줄어들면서 감광율이 감소되어 UL 268 기준을 충족하고 있는 것을 확인할 수 있다. ODM의 감광율 15 %/m 도달시간과 ASD의 연기농도 15 %/m 도달시간의 차이가 발생되는데 ODM의 경우 수광부와 발광부가 분리형으로 연기에 의해 빛 가림이 발생하는 순간 감광이 발생되지만 연기감지기의 경우 미로구조의 챔버를 지나 산란에 필요한 입자들이 챔버내부에 충족되어야 광 산란특성에 의해 연기농도가 측정되는 구조를 가지고 있어 이러한 차이점이 나타난 것으로 판단된다.

ASD 5 %/m 도달시간인 147 s 기준으로 PMS, CGA, GA의 측정값을 분석해보면 PMS의 경우 PM 1.0 172 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 3,772 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 10,371 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CGA의 경우 CO 14 ppm, SO₂ 3 ppm, GA의 경우 HCHO 40 ppm, TVOC 3.4 ppm 측정되었다. ASD 10 %/m 도달시간인 153 s 기준으로 PMS, CGA, GA의 측정값을 분석해보면 PMS의 경우 PM 1.0 165 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 3,569 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 10,770 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CGA의 경우 CO 24 ppm, SO₂ 4 ppm, GA의 경우 HCHO 50 ppm, TVOC 6.4 ppm 측정되었다. ASD 15 %/m 도달시간인 159 s 기준으로 PMS, CGA, GA의 측정값을 분석해보면 PMS의 경우 PM 1.0 151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 3,360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 11,280 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CGA의 경우 CO 32 ppm, SO₂ 5 ppm, GA의 경우 HCHO 50 ppm, TVOC 7.7 ppm 측정되었다. 실험시간 동안 최대값을 분석한 결과 PMS의 경우 PM 1.0 530 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (119 s), PM 2.5 4,204 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (130 s), PM 10 11,380 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (164 s), CGA의 경우 CO 126 ppm (232 s), SO₂ 16 ppm (220 s), GA의 경우 HCHO 50 ppm (153 s), TVOC 7.7 ppm (157 s) 측정되었다.

전체적인 실험결과 목재 유염화재실험의 경우 NO, NO₂는 발생되지 않아 화재감지 인자로 활용하기 어려울 것으로 판단된다. PM 1.0, PM 2.5의 경우 ASD의 연기농도가 상승하기 전 미세먼지의 농도값은 이미 최대값을 도달하고, 이후 시간에 따라 농도값이 줄어드는 경향이 나타난다. 이러한 특성을 보일 경우 조기감지의 가능성이 있지만 연기감지기 2종 부작동 시험기준 연기농도인 5 %/m에 이미 미세먼지의 농도값은 하락되어 나타나고 또한 10 %/m, 15 %/m에서 PM 1.0, 2.5의 지속적인 감소 경향이 나타나 부적합한 것으로 판단된다. 이러한 상태에서 연기감지기의 농도값과 매칭하여 화재를 감지하였을 경우 부작동 농도보다 작동농도가 더욱 낮은 값으로 제시되는 문제점이 있어 최종 PM 1.0, PM 2.5의 경우 부적합할 것으로 생각된다. PM 10의 경우 화재감지기 보다 조기감지특성을 보이며 연기감지기과 동일한 지속적인 상승세가 나타나고 최대 농도값 또한 화재감지기의 최대 감지농도 도달 시 달성되는 점을

보아 화재감지 인자로 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다. CO의 경우 감지기 부작동 농도인 5 %/m 일 때 14 ppm 측정되고 10 %/m일 때 24 ppm, 15 %/m 일 때 32 ppm으로 점진적 농도 상승을 보이고 최대값이 126 ppm 측정되어 화재감지에 적응성이 나타날 것으로 보인다. 또한 CO 농도값 상승과 동일한 특성을 보인 SO₂, HCHO, TVOC 또한 화재감지에 화재감지인자로 활용 가능할 것으로 판단된다. 최종 유염화재실험에서 화재감지 활용인자는 지속적인 상승세를 보이며 아날로그 연기감지기과 매칭하여도 부작동 농도에서부터 작동농도까지 연소생성물의 상승세가 나타나는 PM 10, CO, SO₂, HCHO, TVOC를 화재감지 활용인자로 가능할 것으로 판단된다.

4.2 UL 268 목재 훈소화재의 화재감지 인자측정 실험결과

Table 2 및 Figure 7은 UL 268 목재 훈소화재시험 시 발생하는 연소생성물에 따른 화재감지 경향성 측정 실험결과를 나타낸 것이다. Figure 7(a)의 ODM 그래프를 분석해보면 1차 피크는 2,500 s에 발생되었고 이후 연기량이 시간에 따라 점차 상승하면서 ODM 기준 30 %/m 까지 상승하였다. 이후 3,927 s에 ASD가 15 %/m 까지 상승하면서 연기감지기가 작동하여 UL 268 시험기준에 적합해 실험시간 약 4,000 s까지 지속 후 실험을 종료하였다. 본 목재 훈소화재 실험의 경우에도 NO와 NO₂의 농도 발생량이 없거나 매우 저조하여 화재감지 인자에 활용할 수 없어 분석에 제외하였다.

ASD 5 %/m 도달시간인 3,599 s 기준으로 PMS, CGA, GA의 측정값을 분석해보면 PMS의 경우 PM 1.0 116 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 2,556 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 7,515 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CGA의 경우 CO 57 ppm, SO₂ 3 ppm GA의 경우 HCHO 9.2 ppm 측정되었다. ASD 10 %/m 도달시간인 3,794 s 기준으로 PMS, CGA, GA의 측정값을 분석해보면 PMS의 경우 PM 1.0 108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 2,469 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 7,980 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CGA의 경우 CO 72 ppm, SO₂ 4 ppm GA의 경우 HCHO 11.9 ppm 측정되었다. ASD 15 %/m 도달시간인 3,893 s 기준으로 PMS, CGA, GA의 측정값을 분석해보면 PMS의 경우 PM 1.0 114 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 2,438 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 8,153 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CGA의 경우 CO 80 ppm, SO₂ 4 ppm GA의 경우 HCHO 13.4 ppm 측정되었다. 실험시간동안 최대값을 분석한 결과 PMS의 경우 PM 1.0 375 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 2,792 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 8,304 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CGA의 경우 CO 86 ppm, SO₂ 4 ppm GA의 경우 HCHO 14.1 ppm 측정되었다.

실험결과 목재 훈소화재실험 시 발생하는 연소생성물의 PM 1.0, PM 2.5에서는 목재 유염화재실험과 동일하게 연기감지기 초기 작동 시간보다 약 1,900 s 빠르게 반응하여 농도가 상승하였지만 부작동 감지 농도인 5 %/m 농도에서 가장 높은 농도값이 발생되었다. 이후 연기감지기의 연기농도가 증가하여도 연소생성물인 PM 1.0, PM 2.5 미세먼지

Table 2. Smoldering Fire Test Results

Item		Value at ASD 5 %/m (3,599 s)	Value at ASD 10 %/m (3,794 s)	Value at ASD 15 %/m (3,893 s)	Max. Value (for 4,000 s)
PMS	PM 1.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	116	108	114	375 (1,909 s)
	PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2,556	2,469	2,438	2,792 (3,409 s)
	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	7,515	7,980	8,153	8,304 (3,975 s)
CGA	CO (ppm)	57	72	80	86 (3,972 s)
	SO ₂ (ppm)	3	4	4	4 (3,776 s)
	NO (ppm)	3	3	3	4 (3,946 s)
	NO ₂ (ppm)	0	0	0	0
GA	HCHO (ppm)	9.2	11.9	13.4	14.1 (3,959s)
	TVOC (ppm)	0	0	0	0

(a) ODM profile and ASD

(b) Total PMS data

(c) Total CGA data

(d) Total GA data

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

농도는 감소되는 경향이 발생되어 이러한 특성을 보일 경우 조기반응에 의한 비화재보의 가능성이 내포되기 때문에 PM 1.0과 PM 2.5의 경우 화재감지인자로서는 부적합할 것으로 판단된다. 또한 추가적으로 SO₂, TVOC의 경우 목재 유염화재실험에선 연기감지 농도 상승에 따라 농도값 상승이 나타났지만 천천히 연기가 발생하는 훈소화재의 경우 화재로 판별할 수 있는 농도값이 나타나지 않거나 발생량이 저조하여 훈소화재의 경우 적용성이 저하되는 것으로 나타났다. 하지만 PM 10과 CGA에서 측정되는 CO, GA에서 측정

되는 HCHO가 목재 훈소화재실험 시 연소생성물의 반응이 나타나면서 화재감지기의 농도값 증가와 동일하게 발생량 또한 증가하여 최종 화재감지인자로 활용 가능할 것으로 판단된다. 여기서 HCHO의 생성과정은 탄소가 포함된 물질이 불완전 연소할 때 생성되며 이러한 물질은 목재의 연소에 의한 산불이나 담배 등에 많이 발생된다^(9,10). 이에 따라 불완전연소에 의한 CO가스 생성과 목재의 셀룰로오스의 열분해 등에 의한 HCHO 발생에 따라 목재 유염 및 훈소화재 시 해당 연소생성물은 충분히 화재감지에 적용하여

(b) Flaming fire PM rate (%)

(d) Smoldering fire PM rate (%)

Figure 8. PM ratio graph analysis.

(a) PM 10 standard deviation

(b) CO standard deviation

Figure 9. PM 10 and CO fire detection area.

활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 목재 유염화재 및 훈소화재시험 시 발생하는 미세 먼지 특성 및 화재감지 영역결과

Figure 8은 목재 유염화재와 훈소화재의 미세먼지 총 발생량을 비율로 나타낸 것이다. PM의 경우 화재초기 연기 입자는 작은 특성을 가져 PM 1.0, PM 2.5의 농도가 상승하고 추후 연기농도가 짙어질수록 PM 10이 상승하는 곡선을 나타낸다. 이는 화재가 진행되어 열부력에 의한 연기농도가 높아질수록 상대적으로 입자가 큰 PM 10이 PMS에 도달되어 측정된다. 목재화재시험의 경우 화염분출이 발생되면서 PM 입자들이 서로충돌하면서 커지고 밀려나가 PMS에 측정되고 반대로 연기농도가 낮아질수록 상대적으로 입자가 작은 미세먼지가 부유되어 측정되는 특성이 나타났다. 이를 확인할 수 있는 목재화재시험 시 210~220 s의 연기농도 하락 구간에서 동시에 PM 10의 농도 또한 하락하고, 이때 가벼운 입자인 PM 2.5와 PM 1.0이 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 9는 연기농도 상승에 따라 변화량과 반응성이 뚜렷한 PM 10과 CO의 표준편차에 의한 화재감지영역대를 구성한 것으로 목재 유염화재 및 훈소화재의 ASD 15 %/m

기준 농도값과 최대 농도값을 기준으로 표준편차를 이용하여 나타냈다. 표준편차는 식(2)와 같이 구하였다. 여기서, $a \sim d$ 는 항목별 연소생성물 농도값, n 은 항목 개수, m 은 전체 평균값이다.

$$(\sigma) = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}{n} - m^2} \quad \text{식(2)}$$

PM 10 표준편차를 통해 설정한 화재감지농도 영역으로 PM 10의 경우 $8,224 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 영역대를 화재감지 구간으로 설정할 수 있고 CO의 경우 48 ppm 이상의 영역대를 목재화재에서 나타날 수 있는 유염, 훈소에 대한 화재감지 영역대로 설정할 수 있다. CO의 감지 영역대를 48 ppm으로 편성한다면 목재 훈소화재의 경우 연기감지기 부작동 농도인 5 %/m보다 빠른 응답특성이 보이기 때문에 비화재 보라 판단할 수 있는 문제점이 생긴다. 하지만 목재 훈소의 경우 연기가 실내 전체에 공기와 중성층을 이뤄 점차 실내 공간에 연기가 부유되기 때문에 연기감지기의 적응성이 저하된다. Figure 10(a)는 목재 유염화재시험 시 연기 진전 과정으로 고농도의 연기가 천정면을 타고 직접적으로 연기감지기에 도달되기 때문에 급격한 상승이 발생되지만 Figure 10(b)

Figure 10. Smoke diffusion picture.

와 같이 목재 훈소화재의 15 %/m 농도일 경우 이미 연기는 실전체에 연기가 퍼져 사실상 질식에 가까운 연기량이 발생되지만 연기감지기의 경우 공간 하부부터 점차 채워지는 훈소 연기는 조기 감지의 적응성이 떨어져 응답특성이 늦는 문제점이 생긴다. 이에 따라 목재 훈소화재실험 시 연기감지기 5 %/m에 병행 측정된 CO의 농도가 연기감지기 적응성 저하로 인해 유염화재 농도값보다 더욱 높게 나타난 것으로 판단된다. 최종적으로 목재 유염화재와 목재 훈소화재 실험을 통해 감지기와 연소생성물을 매칭한 농도값으로 화재판단을 했기 때문에 연소생성물 화재감지 농도가 높게 편성되는 문제점이 있을 수 있다. 이러한 농도값을 정확히 편성하기 위해선 UL 268에서 제시된 비화재보시험 (Cooking test)을 통해 음식물 조리 시 발생하는 연소생성물을 측정하고 연기감지기와 병행 측정하여 기준 농도값을 재구성한다면 화재보와 비화재보의 연소생성물 비교를 통한 편차를 좁힐 수 있는 화재감지 연소생성물 농도값이 제시될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 UL 268 목재 유염화재 및 훈소화재시험 시 발생하는 연소생성물을 통한 화재감지 경향성 측정 실험 연구로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) UL 268 목재 유염화재시험 시 발생하는 연소생성물의 화재감지 경향성 측정 실험결과 미세먼지센서의 PM 1.0, PM 2.5의 경우 ASD 연기농도가 상승하기 전 PM 1.0, PM 2.5의 농도값은 이미 최대값을 도달 하고, 이후 연기농도 증가에 따라 PM 1.0, PM 2.5의 농도값이 줄어드는 경향이 나타나 화재감지 인자로 활용하기엔 부적합한 것으로 나타났다. 최종적으로 실험시간 동안 연기 농도가 상승함에 따라 PM 10, CO, SO₂, HCHO, TVOC의 측정인자들의 농도가 증가하는 경향이 나타나 화재감지 인자에 활용 가능할 것으로 판단된다.

2) UL 268 목재 훈소화재시험 시 발생하는 연소생성물

의 화재감지 경향성 측정 실험결과 유염화재와 동일한 이유로 PM 1.0, PM 2.5의 경우 부적합하였고, 유염화재에서 측정 가능한 SO₂, TVOC 인자들이 훈소화재에선 발생량이 극히 적거나 발생되지 않아 화재감지 활용 인자엔 부적합하였다. 최종 훈소화재실험에선 PM 10, CO, HCHO의 측정인자들이 실험시간 4,000 s 동안 연기 발생에 따라 연소생성물의 변화량이 증가하는 경향성이 나타나 해당 인자들의 경우 화재감지 활용 인자에 적용 가능할 것으로 판단된다.

3) 최종 목재 유염화재 및 훈소화재를 통하여 적응성이 뚜렷하게 나타난 PM 10 과 CO의 화재감지 영역대를 도출할 수 있었고 PM 10의 경우 8,224 µg/m³ 이상, CO의 경우 48 ppm 이상의 농도값에서 목재화재에 적용할 수 있는 최종 화재감지 영역대로 설정할 수 있었다.

이상과 같은 결과 PM 10, CO, HCHO의 연소생성물 측정 센서와 연기농도를 동시에 측정이 가능한 새로운 메커니즘을 가진 감지기가 개발된다면 목재 훈소화재 시 감지 지연이 나타나는 문제를 개선할 수 있고 차세대 감지기로 발전할 수 있을 것으로 판단된다. 추후 UL 268에서 제시된 다양한 화재시험과 Cooking test를 통해 비화재보 시 발생하는 연소생성물 농도값을 도출하고 최종적으로 화재 시 검출할 수 있는 정확한 연소생성물을 비교분석하여 종합 화재에 대한 최종 감지 영역대를 도출하고자 한다.

후 기

본 연구는 국가과학기술연구회의 재원으로 2018년도 실용화형 융합연구단사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(과제번호 : QLT-CRC-18-02-KICT)

References

1. T. Y. Woo, "A Study on the Fire risk Assessment of Building Wood", Doctoral Thesis, The Graduate School of Kangwon National University, pp. 1-10 (2017).
2. T. Y. Woo, J. S. Yoo and Y. J. Chung, "Combustion

- Properties of Construction Lumber Used in Everyday Life”, Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 37-43 (2017).
3. National Fire Agency 119, “National Fire Information Center Fire Statistics” (2019).
 4. naver blog, <https://blog.naver.com/jolte0n/222068984180> (2018).
 5. W. C. Sim, “Reaction Characteristics of Fire Detector by Combustibles”, Master's Thesis, Chungbuk National University Graduate School of Industry, pp. 5-72 (2015).
 6. Underwriters Laboratories, “UL 268 Standard for Safety Smoke Detectors for Fire Alarm Systems” (2016).
 7. Y. G. Kang, “A Study on the Analysis of Fire Detection Response Characteristics According to Combustion Products Generated during UL 268 Fire Test”, Master's Thesis, The Graduate School of Hoseo University, pp. 2-50 (2020).
 8. S. G. Choi, S. Y. Jin, S. M. Park, Y. J. Nam and S. K. Kim, “Research on Potential Application of Fire Detection by Measuring Fire Detection Tendency of Indoor Air Quality Measurement Factors”, Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 37-46 (2020).
 9. Wikipedia, <https://ko.wikipedia.org/wiki/폼알테하이드> (2010).
 10. J. K. Kang and D. M. Choi, “Experimental Study on the Effects of Combustion Products on the Human Body and Suggestion of Law Revision”, Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 33, No.4, pp. 28-34 (2019).