

연소 생성물 내 입자상 물질의 입도에 관한 연구

김성수 · 최서연* · 이동호*†

인천대학교 대학원, *인천대학교 소방방재연구소

A Research of Grain Size Analysis of Particulate Matter in Fire Effluent

Sung-Soo Kim · Seo-Yeon Choi* · Dong-Ho Rie*†

Graduate School of Incheon National University

*Fire Disaster Protection Research Center, Incheon National University

(Received September 22, 2014; Revised November 3, 2014; Accepted December 2, 2014)

요 약

현행 건축법은 건축물의 규모, 용도에 따라 화재확산방지와 재실자의 보호를 위하여 실내 마감 재료를 불연, 준불연, 난연재료로 시공하도록 규정하고 있으며, 가스 유해성 시험(KS F 2271)에 따라 해당 시료의 연소 생성물에 노출된 실험용 쥐의 평균행동정지시간을 측정하여 연소 생성물의 유해성을 평가하고 있다. 실험용 쥐를 대상으로 가스상, 입자상 물질의 복합적 유해효과를 분석한 결과인 평균행동정지시간이 15분의 노출 시험 중 9분 이내로 측정된 경우, 연소 유해성 평가 결과가 부적합한 것으로 판정한다. 이에 본 연구에서는 연소 생성물에 포함된 가스상, 입자상 물질 중에서 실험용 쥐의 행동정지에 미치는 영향이 큰 요소를 규명하기 위하여 연소 생성물에 포함된 입자상 물질의 입도 분석을 실시하여 위험도의 상관관계를 밝혔다.

ABSTRACT

Interior finishing materials using noncombustible were regulated by the building codes to prevent the spread of fire and protect occupants. The average deed of stopping time of experimental mouse exposing combustion gas were measured by KS F 2271 gas toxicity test. At that time, The average deed of stopping time under 9 minutes were judged a inconsistency. This experiment method has limit to find out a cause of toxicity effect factor. In this study, particle size analysis were performed for investigate a major factor.

Keywords : Fire effluent, Bioassay, Soot, Toxic hazard, Grain size analysis

1. 서 론

건축물의 실내 마감 및 단열을 목적으로 시공되는 내부 마감 재료는 화재시 직접 화원과 접촉하여 연소하기 때문에 화재 확산 방지를 위한 난연 성능 확보와 연소 유해성 평가가 필수적이다. 연소 유해성을 분석하는 가스 유해성 시험(KS F 2271)은 combustion chamber에서 대상 시료를 점화시켜 발생한 연소 생성물의 유해성을 평가하는 시험 방법이다. 이 시험은 실험용 쥐가 연소 생성물에 노출되어 사망 또는 의식 상실에 의해 행동이 정지될 때까지의 시간을 평균행동정지시간으로 측정한다^(1,2).

가스 유해성 시험기법은 혼합 상태인 연소 생성물을 실험용 쥐에 직접 노출시키기 때문에 연소 생성물이 생체에 미치는 영향을 측정할 수 있으나, 가스상 물질에 의한 중

독, 입자상 물질에 의한 질식 및 기타 원인 중 주요 무력화 유발 요인의 확인이 불가능한 단점을 가진다.

연소 생성물은 입자상 물질, 가스상 물질 및 라디칼 등 다양한 요소가 혼합되어 복합 유해성을 가지는 물질이다. 화재에 의하여 발생한 가스상, 입자상 물질 및 열에 대한 노출의 생리적 영향은 다양한 작용을 통하여 대피자의 무력화를 유발할 수 있다. 유해성 가스 흡입은 재실자에게 질식, 착란, 의식상실을 유발할 수 있으며, 고온에 노출된 피부 및 상부 기도에 대한 통증이나 이에 의한 탈진 등도 보고된 바 있다⁽³⁾. 따라서 연소 생성물이 생체에 미치는 영향을 정확히 예측하기 위해서는 유해성 분석 또는 실험 동물을 이용한 위험도 평가 기법이 필요하다. 그러나 연소 독성지수 산정, 연기발생량 평가 등의 유해성 평가 기법은 평가 대상이 각각 가스상 물질과 입자상 물질 중 한쪽에

†Corresponding Author, E-Mail: riedh@incheon.ac.kr
TEL: +82-32-835-4794, FAX: +82-32-835-4749

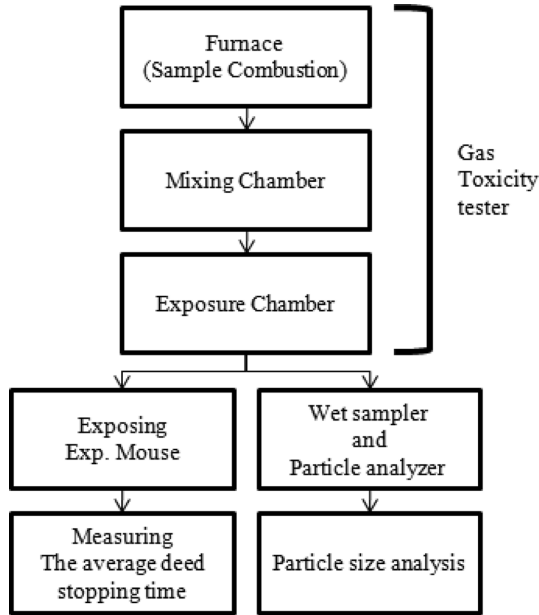


Figure 1. Process of experiment.

한정되므로 종합적 위험도 평가 기법으로 활용되기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 연소 유해성 평가 시험기법인 KS F 2271 가스유해성 시험 화재모델에서 6종의 건축 마감 재료의 연소 생성물에 포함된 입자상물질의 입도분석을 실시하여, 입자상 물질의 분석 결과와 행동정지시간의 상관 관계를 규명하고자 한다.

Table 1. Samples

No.	Samples
1	MDF
2	EPS
3	Curtain
4	Non-combustible curtain
5	PVC
6	Urethane

2. 실험 구성 및 대상 물질 선정

가스 유해성 시험과 입자상 물질 분석은 Figure 1의 순서로 실험을 진행하였으며, 건축물의 바닥재, 벽체의 마감 재료로 사용되는 재료 중 Table 1과 같이 시료 6종을 선택하였다. 화재 모델인 가스유해성 시험기에서 실험용 쥐를 이용한 평균행동정지시간의 측정과 동시에, 연소 생성물의 입도분석을 실시하였다. Buchner flask를 통하여 습식 포집되어 용매에 분산된 입자상 물질은 입도 분석기에서 원심 분리와 동시에 입자의 크기에 따른 레이저의 산란각을 측정하여 입자의 크기와 분포도를 분석하였다.

3. 가스 유해성 시험

3.1 가스 유해성 시험 기법

건축법 제43조, 동 시행령 제61조 및 ‘건축물의 피난·방

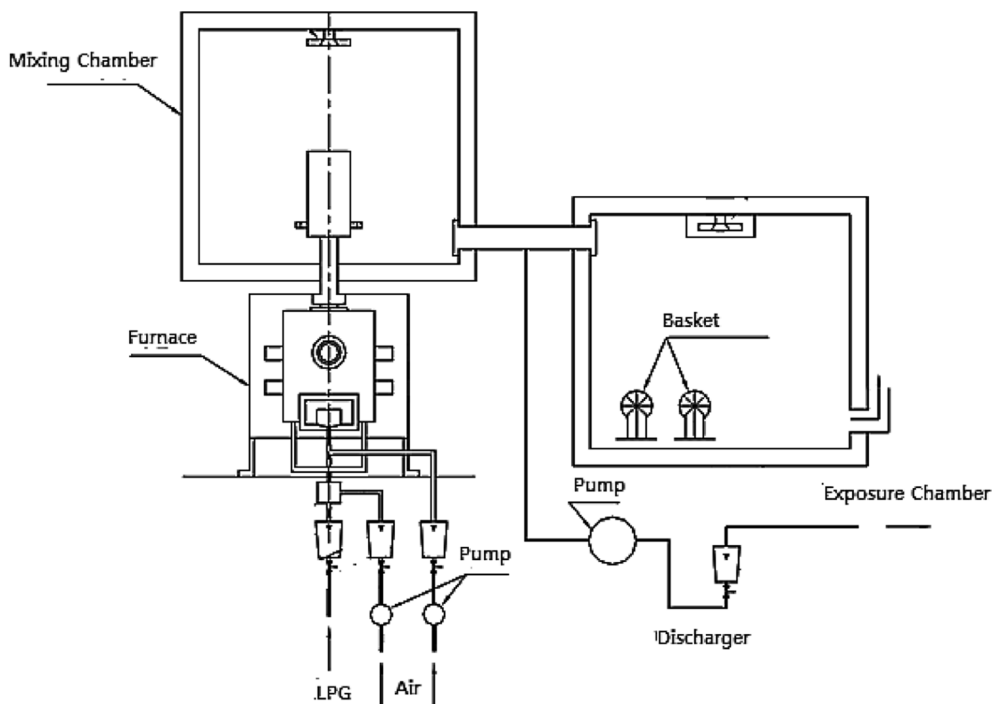


Figure 2. Gas toxicity tester model.

화 등의 기준에 관한 규칙' 제24조에서 건축물의 내부 마감 재료에 대한 용도 및 규모별 적용 대상을 정하며, 내부 마감 재료는 불연, 준불연 및 난연재료로 성능이 확보된 제품을 시공하도록 규정하고 있다. 가스 유해성 시험은 건축물의 피난·방화 등 기준에 관한 규칙 제5조 및 제7조에 따라 제정된 '건축물 마감 재료의 난연 성능기준'에서 정하고 있으며, Figure 2는 가스 유해성 시험 장치를 나타낸다^(4,5).

연소 독성을 평가 시험은 2회 반복 시험으로 진행되며, 시편은 시험체의 전면에서 후면으로 관통하는 지름 25 mm의 구멍을 3개 뚫은 것으로 가로, 세로 각각 220 × 220 mm이다. 시험체의 가열은 부열원으로 3분간 가열한 후, 다시 주열원으로 3분간 가열한다. 공기는 가열 중에 한하여 공급하며, 그 공급량은 가열로의 1차 공급 장치에 의해 3 L/min, 2차 공급 장치에 의해 25.0 L/min를 공급한다. 피검상자의 배출장치에 의한 기체 배출은 가열 중에 한하여 실시하며, 그 배출량은 매분 10 L이다. 배기가스의 온도측정은 규정하는 열전대로 계측한다. 가열 시험을 시작할 때 피검 상자 내의 온도를 30 °C로 일정하게 유지하며, 시험용 마우스(DD계 또는 ICR계, 암컷 5주령, 18~22 g)가 회전 바구니에 들어가 있는 피검 상자 내에 연소 생성물을 유입시켜 8마리의 평균행동정지시간을 식 (1)을 이용하여 계산한다.

가스유해성시험은 가열을 시작해서 시험용 마우스가 행동을 정지할 때까지의 시간을 측정하며, 식 (1)에 따라 계산된 평균행동정지시간(x)이 15분의 시험기간 중 9분 이내로 측정된 경우에 대해서는 연소 생성물의 유해성이 기준치 이상인 것으로 판정한다.

$$x = \bar{X} - \sigma \quad (1)$$

x = 평균 행동 정지 시간(분)

\bar{X} = 행동 정지 시간의 평균값(분)

σ = 행동 정지 시간의 표준 편차(분)

본 시험 기법은 연소 생성물의 종합적 유해성을 실험동물의 평균행동정지시간이라는 단순화된 결과로 도출하기 때문에 평가가 용이한 반면, 행동 정지의 원인을 확인할 수 없는 단점이 있다.

3.2 가스 유해성 시험 결과

6종 시료의 연소 생성물에 노출된 실험동물의 평균행동정지시간 측정 결과는 Table 2와 같다. EPS와 일반 커튼은 15분의 평균행동정지시간을 보여 해당 시료의 연소 생성물은 실험용 쥐의 행동정지를 유발할 수 없음을 확인하였다. 그러나 MDF와 방염커튼은 각각 5분 37초와 8분 30초의 평균행동정지시간을 보여 앞의 두 시료보다 높은 연소 독성을 보였다. 가장 높은 연소 독성을 보인 우레탄은 5분 30초의 평균행동정지시간을 보였으며, PVC는 두 번

Table 2. Measuring Result of The Average Stopping Time

Samples	The average deed stopping time (min : s)
MDF	5 : 37
EPS	15 : 00
Curtain	15 : 00
Non-combustible curtain	8 : 30
PVC	6 : 45
Urethane	5 : 30

째로 짧은 6분 45초의 평균행동정지시간을 보였다.

4. 입자상 물질 분석 실험

4.1 입자상 물질 분석 실험 기법

본 연구의 입자상 물질 입도 분석에는 Mie 산란 이론 (mie scattering theory)을 적용하였으며, 각 입도에 따른 입자들이 전체 시료에서 차지하는 비율을 측정하였다. Mie 이론은 고른 매질 속에 있는 임의 크기의 고른 재질로 된 표면에 들어오는 단색 평면 전자기파의 산란에 대해 해석 광과장보다 크고 구 형태를 갖는 입자의 산란은 파장 의존성이 감소하여 Raleigh 산란법칙을 따르지 않으므로 콜로이드나 고분자 중합체 등과 같은 응집체는 Mie산란을 이용하면 분자량을 효과적으로 파악 가능하므로 본 연구에 적용하였다^(6,7).

본 연구에서는 CPS社의 centrifuge type 입도 분석기 (DC 24000 UHR)를 Table 3의 측정조건으로 설정하고 표준용액으로 calibration한 이후, 포집된 입자의 입도분석을 실시하였다.

4.2 입자상 물질 입도 분포 분석 결과

Table 4는 6종의 시료에 대하여 연소 생성물에 포함된 입자상물질을 습식 포집하여 발생량을 분석한 결과와 입도 분포 분석결과를 나타낸다. MDF는 0.63 μg 으로 가장 높은 입자상 물질 발생량을 보였으며, urethane은 0.52 μg 으로 측정되었다. MDF와 Urethane은 1.4792~0.8297 μm 에서 가장 입도분포가 높은 것으로 분석되었으며, EPS는 0.8297~0.4783 μm 에서 가장 높은 입도분포를 보였다.

본 연구의 분석대상인 평균 직경이 2.5 μm 미만인 입자는 폐의 심부까지 침투할 수 있는 반면, 입도가 이보다 큰 입자는 호흡기 및 상부 기도에 누적되어 질식을 유발할 수

Table 3. Measure Condition of Particle Size Analyzer

Item	Set value
Material	Carbon black
Measurement range	0.0~2.5 μm

Table 4. Analyzing Result of Particle Size Distribution

Result of particle size analysis		Wt. Fraction (%)					
		MDF	Urethane	Curtain	Non-combustible curtain	EPS	PVC
Range (μm)	2.4965~1.4792	22.05	25.96	40.36	27	23.07	3.61
	1.4792~0.8297	40.51	35.02	29.83	30.65	10.13	19.98
	0.8297~0.4783	20.65	14.8	17.6	25.26	24.54	30.42
	0.4783~0.2757	7.14	3.88	5.37	6.31	18.74	17.55
	0.2757~0.1589	0.89	1	1.88	2.38	8.61	7
	0.1589~0.0916	0.26	0.51	0.63	1.16	1.72	4.31
	0.0916~0.0528	0.01	0	0.01	0.46	0	4.31
	0.0528~0.0305	0	0	0	0.35	0.71	2.41
	0.0305~0.0176	0	7.21	0	0.8	11.1	0.15
	0.0176~0.0101	3.87	7.88	0.28	1.21	0	0.16
Soot production rate (μg)		0.63	0.52	1.28	7.43	0.04	0.05

있다. 또한, 입자상 물질의 발생량이 5 mg/L를 초과할 경우, 생물학적 반응성이 없는 입자로도 질식을 유발할 수 있다⁽⁸⁾.

5. 결 론

MDF, urethane, EPS, PVC 및 일반 · 방염커튼의 6종 시료에 대하여 연소실험을 통하여 실험용 쥐의 행동정지 시간을 측정하고, 발생한 연소 생성물에 포함된 입자상 물질의 입도 분석을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

1. 6종의 건축마감재료를 대상으로 가스유해성 시험을 실시한 결과, 우레탄의 평균행동정지시간이 5분 30초로 나타남으로써 가장 연소 유해성이 높은 시료임을 확인하였다. 그 뒤를 이어 MDF가 5분 37초, PVC 바닥재가 6분 45초, 방염커튼이 8분 30초로 나타났으며, 일반 커튼과 EPS의 평균행동정지시간은 15분으로 나타나 연소 유해성이 적은 시료임을 확인하였다.

2. 연소 생성물에 포함된 PM 2.5 이하의 입자상 물질에 대하여 입도분석을 실시한 결과, MDF와 Urethane의 연소 가스내 입자상 물질은 1.4792~0.829 μm 의 영역에 각각 40.51%, 35.02% 분포하여 가장 높은 비율을 보이는 것으로 분석되었다. 총 발생량은 방염커튼이 7.43 μg 으로 나타남으로써 가장 높은 발생량을 보였으며, 일반 커튼이 1.28 μg 로 측정되어 섬유류 물질에서 입자상 물질의 발생량이 높음을 확인하였다.

3. 본 연구의 결과로, MDF와 urethane는 각각 0.63 μg , 0.52 μg 의 입자상 물질 발생량이 확인되었으며 평균행동정지시간도 5분 37초, 5분 30초로 측정되어 입자상 물질과 평균행동정지시간의 유사성을 확인하였다.

4. 연소가스에 포함된 입자상 물질은 노출시, 입도에 따라 호흡기에 누적되어 질식을 유발함과 동시에 공기중에서 대피자의 가시거리를 감소시키며, 연소가스의 열용량을

증대시켜 폐화상의 가능성을 증가시키기 때문에 이에 대한 독성 평가가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국교통과학기술진흥원 2013년 건설기술혁신사업 “연소가스 정량분석을 통한 건축물 마감재료 연소 유해가스 평가방법 및 기준개발”에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다.

References

1. Republic of Korea, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Act 2012-624, Fire Retardant Performance Standard of Interior Finishes (2011).
2. KS F 2271 : Testing method for incombustibility of internal finish material and element of buildings.
3. The SFPE handbook of Fire Protection Engineering 3rd edition, NFPA (2002).
4. KS F ISO 5660-1 : Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method).
5. KS F ISO 1182 : Reaction to fire tests for products -- Non-combustibility test.
6. H. J. Kim, “Theoretical Study on the Effects of Particle Size Distribution on the Optical Properties of Colloidal Gold”, Journal of the Korean Chemical Society, Vol. 51, No. 5, pp. 407-411 (2007).
7. Mie, Gustav, “Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen”, Annalen der Physik 33, pp. 377-445 (1908).
8. Inhaled Particle, Chiu-sen Wang, Academic Press (2005).
9. Jay Silkworth and Donald McMartin, “Acute Toxicity in Guinea Pigs and Rabbits of Soot from a Polychlorinated

- Biphenyl-containing Transformer Fire”, *Toxicology and Applied Pharmacology*, Vol. 65, Issue 3, pp. 425-439 (1982).
10. Vytenis Babrauskas, “Effective Measurement Techniques for Heat, Smoke, and Toxic Fire Gases”, *Fire Safety Journal*, Vol. 17, Issue 1, pp. 13-26 (1991).
 11. Pivi Ruokojavi, “Toxic Chlorinated and Polyaromatic Hydrocarbons in Simulated House Fires”, *Chemosphere*, Vol. 41, Issue 6, pp. 825-828 (2000).
 12. E. M. Fitzpatrick, “Emission of Oxygenated Species from the Combustion of Pine Wood and its Relation to Soot Formation”, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 85, Issue 5, pp. 430-440 (2007).
 13. Jennifer Rhodes, “Characterisation of Soot Particulates from Fire Retarded and Nanocomposite Materials, and their Toxicological Impact”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 96, issue 3, pp. 277-284 (2009).
 14. Y. J. Park and H. P. Lee. “A Study on Application of Combustion Products for Forest Fire Investigation”, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 26, No. 4, pp. 111-119 (2011).
 15. N. W. Cho, J. C. Lee and D. H. Rie, “A Comparative Study on Toxic Gas Index and Stop Time of Mouse Activity”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering* Vol. 25, No. 4, pp. 35-41 (2011).
 16. J. H. Goo, “Studies on the Morphology of Smoke Particles for Each Type of Fire by Using Steady State Tube Furnace”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 44-51 (2014).
 17. S. W. Jee and J. H. Lee, “Optical Properties for Smoke Particles of Fire Sources According to UL 268”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 28, No. 2, pp. 9-13 (2014).