

가스유해성 평가방법에 따른 유기단열재의 연소특성에 관한 연구

심지훈*** · 이재걸**** · 한경호*** · 김주완**** · 송석훈**** · 조형원* · 윤도영*†

*광운대학교 화학공학과
01897 서울특별시 노원구 광운로 20
**한국화학융합시험연구원 건설재료센터
22829 인천광역시 서구 가재울로 68
*** (주)광운기술
18255 경기도 화성시 남양읍 주석로 276
****한국전력공사
58322 전라남도 나주시 전력로 55

(2022년 6월 20일 접수, 2022년 7월 21일 수정본 접수, 2022년 7월 22일 채택)

A Study on the Combustion Characteristics of Organic Insulation Materials According to the Gas Toxicity Evaluation Method

Ji-Hun Shim***, Jae-Geol Lee****, Kyoung-Ho Han***, Ju-Wan Kim****, Seok-Hun Song****,
Hyung-Won Jo* and Do-Young Yoon*,†

*Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897, Korea
**Construction Materials Center, Korea Testing & Research Institute, Incheon, 22829, Korea
***Gwangwoon Technology Co. Ltd., Gyeonggi-do 18255, Korea
****Korea Electric Power Corporation, Jeollanam-do 58332, Korea

(Received 20 June 2022; Received in revised form 21 July 2022; Accepted 22 July 2022)

요 약

국내 건축물 마감재는 국토교통부 고시에 따라 KS F 2271 기준에 의해 평가되어지고 있으며, 이 실험은 실험동물을 사용하여 평가하고 있다. 본 연구에서는 가연성이 높은 유기물 단열재 EPS, 우레탄, 페놀폼에 대해 실험을 진행하였다. 이 3종의 단열재가 연소 시 발생하는 유해성 가스에 의한 실험용 쥐의 평균행동정지시간을 측정하여, 실험용 쥐의 행동정지에 대한 원인을 분석하고자 하였다. 실험용 쥐의 행동정지에 대한 원인분석방법으로는 FTIR 분석과 연기밀도실험을 진행하였고, 마우스의 행동정지 원인을 입자상물질에 의한 질식과 가스상물질에 의한 독성흡입으로 구분하여 실험결과를 분석하였다. 실험결과 우레탄이 가장 유해한 단열재로 평가되었으며, 가스유해성 실험결과에 대한 원인분석으로 FTIR분석과 연기밀도 실험을 진행한 결과, 독성흡입에 의한 영향보다 질식에 의한 실험용 쥐의 행동정지가 높은 것으로 나타났다. 본 연구는 유해성가스의 원인분석에 대한 기초연구로서, 독성의 근거를 마련하고 나아가 다양한 재료와 가스에 대한 분석을 통하여 보다 구체적인 독성평가의 기준이 마련될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – Domestic building finishing materials are being evaluated according to KS F 2271 standards according to the notification of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and this test is evaluated using laboratory animals. In this study, experiments were conducted on highly combustible organic insulation materials such as EPS, urethane, and phenolic foam. The purpose of this study was to analyze the cause of the behavioral suspension of the experimental mice by measuring the average behavioral suspension time of the mice caused by the harmful gas generated when these three types of insulation materials were burned. FTIR analysis and smoke density experiment were performed as a cause analysis method for the behavioral suspension of mice, and the experimental results were analyzed by dividing the causes of behavioral suspension into suffocation by particulate matter and toxic inhalation by gaseous substances. As a

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yoondy@kw.ac.kr

‡이 논문은 광운대학교 교재교육 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

result of the test, urethane was evaluated as the most harmful insulation material, and as a result of FTIR analysis and smoke density test as a cause analysis for the gas toxicity test results, it is judged that the behavioral stop of the rats by suffocation is higher than the effect of toxic inhalation. This study is a basic study on the cause analysis of harmful gases, and it will be necessary to prepare the toxicity basis and analyze various materials and gases.

Key words: Fire, Organic insulation materials, Gas toxicity, FTIR, Smoke density

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 건축물은 점차 경량화, 대형화, 고층화 및 복합용도로 되어가는 추세에 놓여있다. 최근 단열재에 대한 건축물의 안전성은 계속해서 화두가 되어지고 있다. 그 중 단열재의 잠재 화재위험도는 점점 더 높아지고 있는 실정이다. 국내에서 사용되는 단열재는 그라스울, 미네랄울 등과 같은 무기단열재와 스티로폼, 우레탄, 페놀폼과 같은 유기단열재가 사용되고 있다. 국내 사용되는 단열재 구성비는 유기단열재가 65% 차지하고, 나머지 35%가 무기단열재가 차지하고 있다[1]. VIP, 에어로겔 같은 최신 단열재는 대형 건설사 위주로 일부 건축물에 활용되고 있으며, 아직 대중화되지 못한 상태이다. 유기단열재의 사용량이 무기단열재의 사용량에 비하여 약 80% 이상 차지하고 있다[2]. 유기단열재가 무기단열재에 비하여 단열성능이 좋고 성형성이 뛰어나며 공사비용이 저렴한 경제적인 장점이 있지만 무기 단열재에 비하여 화재에 취약한 단점을 가지고 있다. 최근 복합자재의 대형화재사고 사례는 주로 유기단열재를 이용한 건축물 마감재로 확인되고 있다[3]. 건축물을 구성하는 단열재의 화재는 착화 및 연소속도가 빠르고 연소 시 유독가스를 다량으로 발생시키므로 인명과 재산상의 피해를 초래하고 있다. 이들의 위험성은 화재조건에 노출되었을 때의 열방출률, 화재의 전파 및 연소의 유해성 등으로 평가할 수 있다.

국내에서는 연소에 따른 가스유해성 평가는 KS F 2271 기준에 따라 실험동물을 사용하여 평가하고 있다[4]. KS F 2271 기준에 따르면 2회에 걸쳐 평가를 하고 있으며 1회당 실험용 쥐가 8마리를 사용한다. 시험시간은 15분이며, 15분 동안 실험용 쥐의 평균행동정지시간을 측정하고 있다. 과거 FTIR분석을 통해 검출된 유해성가스가 가스유해성 실험(KS F 2271)에 영향을 줄 수 있다고 연구된 바가 있다[5]. 관련 연구로서 Kim 등은 ‘건축물 마감재료의 독성지수 적용을 통한 가스유해성평가 기초연구’를 통하여, PVC, 커튼, 목재를 대상으로 FTIR분석을 통해 BS 6853에서 규정하는 R-value 값으로 독성을 지수화한 연구가 있다[6]. 또한, Han 등은 ‘콘칼로리미터와 적외선분광계(FTIR)를 이용한 폼블럭의 연소특성에 대한 실험적 연구’에서 폼블럭을 콘칼로리미터 시험을 통해 가스를 채집하여 FTIR 분석을 다룬 내용을 보고하기도 하였다[7]. BS6853에서 규정하는 FTIR분석은 연기밀도 실험장치에서 가스를 수집하고 있으나, 본 연구에서는 실험용 쥐의 행동정지시간을 평가하는 KS F 2271 가스유

해성 실험에서 가스를 수집하여 FTIR분석을 시도하였다. 연기밀도 실험에서는 유기단열재에 대한 최대광학밀도만을 측정하였다. 현재 전세계적으로 실험동물 사용을 폐지하고 있는 실정이다. 실험동물의 최소화 및 대체 시험방법의 개발의 요구에 따라 연소가스의 정량 평가를 통한 기준마련 연구가 선행되었으며, 선행연구 되어진 내용을 토대로 본 연구에서는 유기단열재에 대한 연소특성을 분석하고자 하였다[8].

본 연구에서는 과거 연구를 토대로 건축물 마감재에서 사용빈도가 높은 EPS, 우레탄, 페놀폼과 같은 가연성이 높은 유기단열재에 대해 가스유해성 분석을 진행하였다. 이 3종의 단열재가 연소 시 발생하는 유해성 가스에 의한 실험용 쥐의 평균행동정지시간을 측정하여, 실험용 쥐의 행동정지에 대한 원인을 분석하고자 하였다. 실험용 쥐의 행동정지에 대한 원인분석방법으로는 FTIR 분석과 연기밀도실험을 진행하였고, 마우스의 행동정지 원인을 입자상물질에 의한 질식과 가스상물질에 의한 독성흡입으로 구분하여 실험결과를 분석하였다.

2. 실험

본 연구는 유기단열재가 연소 시 발생하는 가스의 유독성을 확인하기 위해서 우선 유기단열재의 가스유해성을 확인하였다. 가스유해성 실험은 KS F 2271 규격에 준하여 진행하였으며, 조건은 Table 1에 나타내었다. 가스유해성 실험은 실험용 쥐 8마리를 KS F 2271 규격에 따라 연소 시 발생하는 가스를 노출시켰을 때 실험용 쥐의 평균 행동정지시간을 관찰하는 실험이다. 본 연구에서는 가스유해성 실험에서 도출된 평균행동정지시간이 연소 시 발생하는 가스에서 어떠한 영향으로 행동정지를 발생시키는지에 대하여 원인분석하였다.

첫째로 연소 시 발생하는 독성가스를 분석하였다. 분석방법은 FTIR (Fourier Transform Infrared spectroscopy) 적외선 분광분석법으로, 이 방법은 적외선을 흡수한 분자가 특정 파장에서 흡수되고 이를 스펙트럼으로 나타낸다는 성질을 이용하는 것이 원리이다. 특정 파장의 스펙트럼은 Beer-Lambert 법칙에 의해서 흡수 스펙트럼을 나타내며, 흡수 스펙트럼의 계산식은 아래와 같다.

$$AU = \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

Table 1. Method of testing the combustion gas toxicity

Test Method		Test Condition					
Heating Method		Halogen Heater, LP Gas (6 minutes)					
Heating Condition	Time (min)	1	2	3	4	5	6
	Exhaust Temperature	70	85	100	140	170	195
Size		220(W) × 220(L) × 50(H) (mm ³)					
Emission Rate		10 L/min					
Mouse		ICR, 8 weeks, Female Mouse (18~22 g)					
Test Time		15 minutes					

Table 2. Method of testing the smoke density

Test Method	Test Condition
Radiant Heat	50 kW/m ²
Size	75(W) × 75(L) × 50(H) (mm ³)
Light source	6.5V, Incandescent lamp
Transmittance	1 ~ 100 (%)

여기서 기준 스펙트럼(I_0)과 흡수되는 분자 스펙트럼(I)의 로그 계산 값은 흡수 스펙트럼 또는 AU라고 표기한다. 이 적외선 분광기의 전체 주파수 대역은 7,000~400 cm⁻¹에서 측정할 수 있다. 이를 기초 자료로 이용하여 연소가스의 정성정량 분석을 실시하였고, FTIR 분석을 통해 연소 시 발생하는 9종의 유해가스에 대해 정성분석하고 9종 유해가스의 정량분석을 시도하였다.

두 번째로 연소 시 발생하는 유해가스의 발생량을 측정하기 위해 연기밀도 실험을 진행하였다. 이 실험은 ASTM E662 기준에 준하여 진행하였으며, 밀폐된 공간에서 50 kW/m²의 복사열을 가해서 나오는 연기를 광도계에 의해 수집된 최대 광도를 측정하였다. 연기밀도의 시험 조건은 Table 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

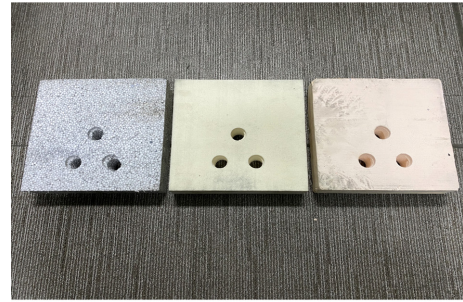
3-1. 가스유해성 실험

실험용 쥐를 이용한 유기단열재 3종의 가스유해성 시험 결과는 Table 3에 나타내었고 시험 전후 사진은 Fig. 1에 나타내었다. 실험용 쥐의 평균행동정지시간으로 평가되는 가스유해성 시험 결과는 “우레탄 > 페놀폼 > EPS” 순으로 유해성이 평가되었고, 질량감소율도 동일한 순으로 높은 것을 확인 할 수 있었다. 우레탄과 페놀폼의 경우, 가열 시 발생하는 유해성가스가 실험용 쥐의 행동정지시간에 영향을 미쳤다고 판단된다. 또한 질량감소율이 높을수록 실험용 쥐의 행동정지에 영향을 있는 것을 확인할 수 있었다.

3-2. FTIR 분석

유기단열재 3종의 가스유해성 시험에서 발생한 가스를 수집하여 연소 시 발생하는 가스 9종에 대해 FTIR 분석을 시도하였다. 분석결과는 Table 4에 나타내었다. 분석 시 발생하는 스펙트럼은 Fig. 2, 3, 4와 같고, 9종 가스에 대한 표준 스펙트럼은 Fig. 5와 같다.

FTIR분석은 정량분석을 위해 가스유해성에 실험에서 발생하는 가스 채집 시 CO의 농도가 최대일 때를 분석하였다. 분석결과 CO는



(a) Before



(b) After

Fig. 1. Specimen before and after a combustion gas toxicity.

우레탄이 가장 높게 나왔으며, CO₂는 EPS가 가장 높게 나왔다. NO는 페놀폼이 가장 높았으며, HCl의 경우 EPS가 가장 높게 나왔다. FTIR 결과값을 확인했을 때 가스유해성 실험에 영향을 줄 수 있는 인자로는 CO, NO 정도로 예측할 수 있다.

9종 가스의 ppm 농도별 측정은 반수치농도(LC50, lethal concentration 50%)에 기인하여 설정하였으며, 반수치사농도(LC50, lethal concentration 50%)는 한 무리의 실험동물의 50%를 죽이게 하는 독성물질의 농도로 균일하다고 생각되는 모집단 동물의 반수를 사망하게 하는 공기 중의 가스농도 및 액체 중의 물질농도이다. 대부분 한 무리의 실험동물은 mouse나 rat으로 실험하여 LC50 수치를 산출하고 있지만, 노출시간에 대해서는 1hr부터 4hr까지 다양하게 산출되고 있다. 본 연구에서는 화재 시 발생하는 9종 가스에 대해 독성을 가질 수 있는 농도를 임의로 산출하여 화재 시 발생하는 9종 가스에 대한 독성을 확인하기 위해 FTIR 분석장비를 ppm 농도별로 확인하여 실험용 쥐에 노출시켜 가스유해성 실험장비로 측정하였다. 결과

Table 3. Test result of the combustion gas toxicity

Test result (between 0 and 15 min)	EPS	Urethane	Phenol
Average value of the deed stopping time (min : s)	14 : 34	08 : 04	11 : 08
Standard deviation (min : s)	00 : 27	00 : 23	01 : 00
Average deed stopping time (min : s)	14 : 07	07 : 40	10 : 08
Mass loss (%)	29.1	66.7	40.2

Table 4. Test result of the combustion gas toxicity

Test result (between 0 and 15 min)	EPS	Urethane	Phenol
Average value of the deed stopping time (min : s)	14 : 34	08 : 04	11 : 08
Standard deviation (min : s)	00 : 27	00 : 23	01 : 00
Average deed stopping time (min : s)	14 : 07	07 : 40	10 : 08
Mass loss (%)	29.1	66.7	40.2

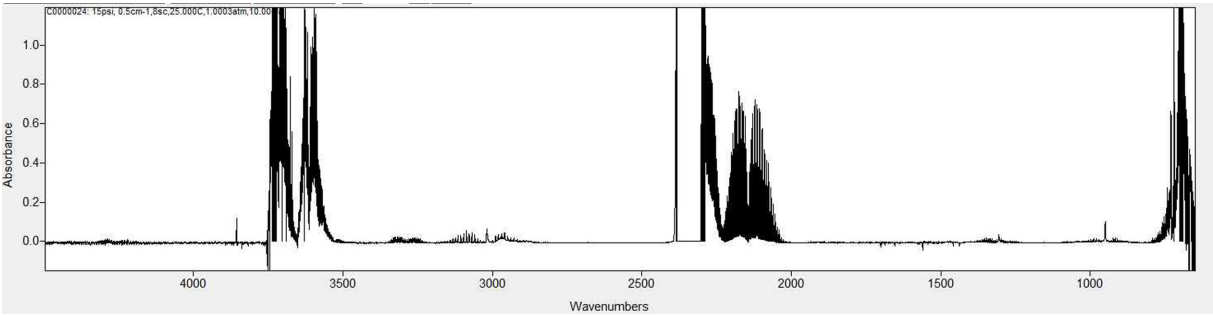


Fig. 2. FTIR analysis spectrum of EPS.

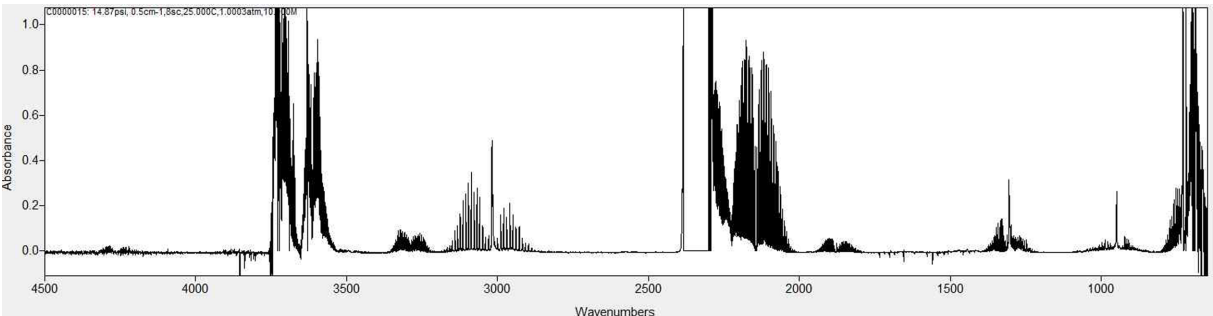


Fig. 3. FTIR analysis spectrum of Urethane.

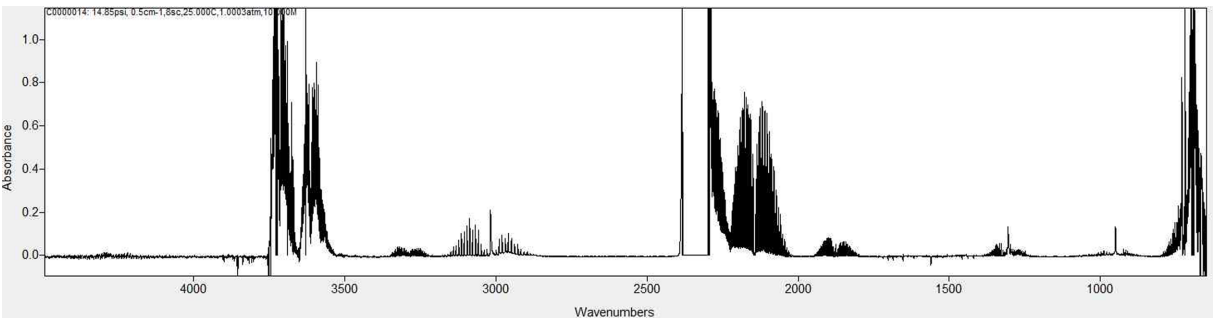


Fig. 4. FTIR analysis spectrum of Phenol.

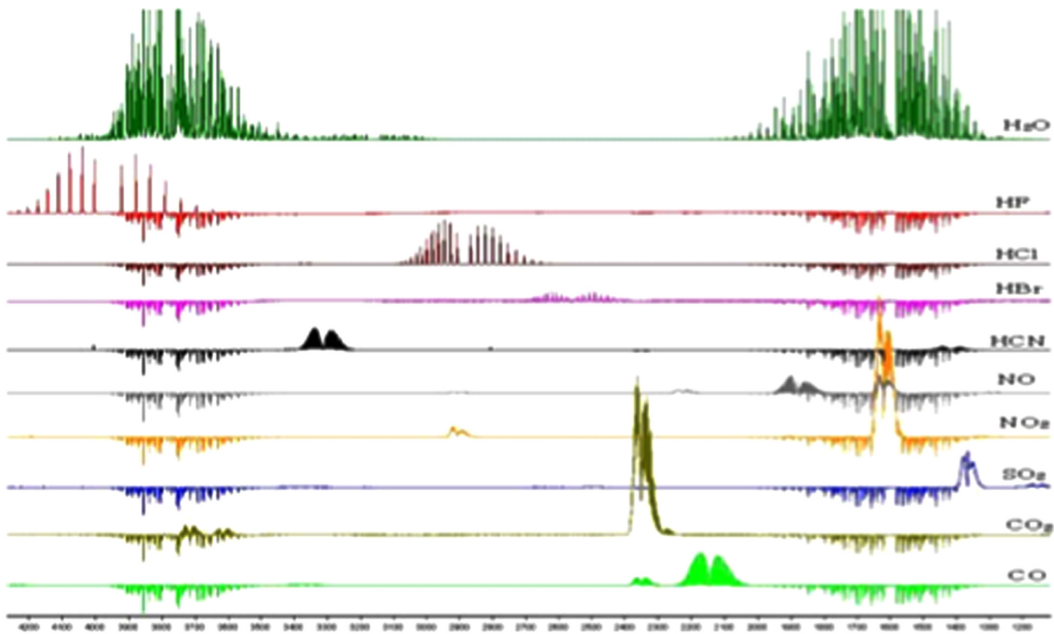


Fig. 5. FTIR standard spectrum for 9 gases.

Table 5. Test result of the FTIR analysis

Compound	EPS	Urethane	Phenol
CO	620.90	820.52	636.99
CO ₂	375.75	154.2	202.46
SO ₂	0.38	1.5	0.6
HBr	-	0.04	0.07
NO	0.39	10.1	14.4
NO ₂	-	0.08	0.09
HCN	-	-	-
HF	-	-	0.44
HCl	0.35	0.1	0.05

값은 Table 5와 같다.

실험결과 HCN 경우, 10.8 ppm에서 실험용 쥐의 평균행동정지시간이 7분 16초인 것을 확인할 수 있었으며, 가장 독성이 높은 것으로 확인되었다. SO₂, HBr, HCl의 독성가스의 경우, 실험 진행 시 실험용 쥐가 극도로 흥분한 모습을 보이긴 하였으나, 평균행동정지시간에 영향을 주진 않았다. 유기단열재에서 발생된 독성가스 중 영향을 줄 수 있는 독성가스로 CO, NO를 예측할 수 있었으나, ppm 농도별 측정결과와 비교확인 하였을 때 실험용 쥐의 행동정지시간에 영향을 주는 수치는 아닌 것으로 판단되어 진다.

3-3. 연기밀도 실험

연기밀도 실험결과 최대광학밀도를 측정하였다. 연기밀도 실험은 연소 시 발생된 연기에 광학계에 의한 투과 된 빛의 양을 측정하는 실험이다. 이때 빛의 최소 투과율은 최대 비광학 밀도를 계산하는데 이용된다. 연기밀도 측정을 위해 밀폐된 공간에서 50 kW/m²의 복사열을 75 mm × 75 mm × 50 mm 시편에 가해 이때 발생하는 연기를 빛 투과율 감소율로 연기밀도를 측정하였다. 측정된 수식은 다음과 같다[9,10].

$$D_s = 132 \log \left(\frac{100}{T} \right) \quad (2)$$

여기서 D_s 와 T 는 연기밀도(Smoke density)와 투과율(Transmission)을 각각 나타낸다. 위의 식에 의해 산출된 유기단열재 3종에 대한 연기밀도 측정값은 최대광학밀도($D_{s,max}$)를 측정하였고 최대광학밀도 일 때의 시간을 기록하였다. 그 결과값은 Table 6과 같다. 결과를 보면 우레탄이 가장 짧은 시간 내에 최대광학밀도가 가장 높게 나타난 것을 확인할 수 있었고, 그 다음으로 페놀과 EPS 순으로 측정된 것을 확인하였다. 화재 발생 시 호흡곤란 및 가시거리 저하에 기인하는 연기밀도는 유기단열재 중 우레탄이 가장 위험할 것으로 판단된다. 정리하면 “우레탄 > 페놀 > EPS” 순으로 높게 나왔으며, 결과값은 가스유해성 결과값과 반비례하는 것을 확인 할 수 있었다. 평균행동정지시간이 낮을수록 최대광학밀도는 높게 나타난 것을 확인할 수 있었고, 질량감소율이 높을수록 최대광학밀도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 입자상물질에 의한 질식이 연기밀도 실험이었고, 가스상물질에 의한 독성흡입이 FTIR 분석으로 구분하였다. 그 결과 화재 발생 시 기체상의 분자가 공기 중에 부유하는 복합 혼합물인 연기와 독성가스가 혼합된 것으로 가스상물질에 의한 독성흡입 시 피난행동에 있어 판단장애나 피부염증 등이 발생할 수 있으나 사망

Table 6. Gas toxicity results by ppm concentration of 9 types of gas

Gas	Concentration (ppm)	Average deed stopping time (min:s)
CO	100	13 : 52
	500	14 : 59
	1053	14 : 59
	1488	14 : 59
	3753	14 : 22
CO ₂	516	14 : 57
	1016	15 : 00
	4984	14 : 34
	10023	14 : 57
SO ₂	11	14 : 37
	25.5	15 : 00
	51.7	14 : 58
	120	14 : 57
	190	14 : 04
HBr	12.2	14 : 59
	56.8	15 : 00
	105	14 : 58
	200	14 : 53
	601	15 : 00
NO ₂	50.4	14 : 59
	70.5	15 : 00
	101	13 : 26
	199	14 : 39
	350	14 : 12
HCN	10.8	07 : 16
	49.4	07 : 00
	141	04 : 57
HF	19.3	15 : 00
	46.7	14 : 58
	193	15 : 00
	608	15 : 00
HCl	11.3	15 : 00
	52.6	14 : 45
	156	14 : 48
	206	13 : 13
	608	14 : 17

Table 7. Test result of the smoke density

Test result	EPS	Urethane	Phenol
$D_{s,max}$	94.5	374.5	257.6
Max Time (s)	1033	95	213

에 이르게 까지 영향을 주지 않을 것으로 판단되어 진다. 그에 반해 입자상물질에 의한 경우, 불완전 연소의 결과로 다량으로 흡입하게 되면 체내로 산소 공급이 차단되며, 이로 인해 호흡곤란, 두통, 이명 등의 증상을 일어나며 지속 시 의식불명상태, 즉 사망에 이르게 할 수 있다고 판단된다[11-13].

4. 결 론

본 연구에서는 유기단열재 3종에 대해 가스유해성 평가를 진행하였고, 그 결과값에 대한 원인분석으로 FTIR분석과 연기밀도 실험을

진행하였다. 본 연구에서의 결론은 다음과 같다.

첫째, 유기단열재 3종 중 화재발생 시 가장 유해한 영향을 줄 수 있는 단열재는 우레탄으로 평가되어 진다. 가스유해성 실험에서 실험용 쥐의 평균행동정지시간이 7분대이며, 연기밀도 실험에서는 95 초에 최대광학밀도가 374.5 D_s 에 도달하는 것을 확인할 수 있었다.

둘째, 화재 시 발생하는 9종 가스에 FTIR 분석을 통해 각 가스에 대해 정성정량 분석을 진행하였다. 영향을 줄 수 있는 독성가스로 CO, NO를 예측할 수 있었으나, 측정된 가스의 수치로만 실험용 쥐에 노출시킨다고 가정했을 때 실험용 쥐의 행동정지가 일어나기는 어려운 수치로 판단된다. 즉, 화재 시 발생하는 가스 중 독성가스가 포함되어 있긴하나 포함되어 있는 독성가스만으로 인명의 사망사고가 일어나는 것은 어렵다고 판단되어 진다.

마지막으로, 본 연구에서는 가스유해성 실험결과에 대한 원인분석으로 FTIR분석과 연기밀도 실험을 진행한 결과, 독성흡입에 의한 영향보다 질식에 의한 실험용 쥐의 행동정지가 높을 것으로 판단된다.

본 연구는 가스유해성 실험결과 원인분석에 대한 기초연구로 독성 근거를 마련할 수 있는 다양한 재료와 가스에 대한 분석이 필요로 하며, 행동정지에 영향을 위해도 평가 지표로 나타낼 수 있는 다양한 각도로 지속적으로 수행할 필요가 있을 것이다.

감 사

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술 사업화지원 사업(과제명: 폐 유기화합물 재활용을 이용하여 화재표시가 가능한 건축시설물 2시간급 내화채움구조 및 부속장치 개발, 과제번호: 21TBIP-C160605-02)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Environment and Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "Green Cities and Green Buildings Activation Plan," 3-1(2009).
2. Isermann, R., "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods," **20**, 387-404(1984).
3. Hong, K. D. and Kim, G. S., "Improvement Plan of the Korean Institute of Gas," *KIGAS*, **3**(1), 48-57(1999).
4. KS F 2271 : Testing method for gas toxicity of finish materials of buildings(2021).
5. Lee, D. H. and Kong, Y. K., "A Study on Combustion Gas Toxicity of Polymeric Materials," *Korean Society of Hazard Mitigation*, **5**(4), 79-84(2005).

6. Kim, D. H., Lee, J. C., Shim, J. H. and Cho, N. W., "A Research of Gas Hazard Assessment through The Toxicity Index Application of Vuilding Finishing Material," *Spring Conference on Korean Institute of Gas*, 96(2015).
7. Han, B. H., Seo, D. H., Kwon, Y. H. and Hong, S. H., "A Study on the Fire Charaterization of Foam block using Cone-calorimeter and FRIR," *Fire Sci. Eng.*, **31**(6), 23-32(2017).
8. Cho, N. W., Sim, J. U., Jeon, J. P. and Shim, J. H., "A Combustion Gas Toxicity Test Standard Study on Animal Replacement," *Fall Conference on Architectural Institute of Korea*, **37**(2), (2017).
9. KS M ISO 5659-2 : Plastics-Smoke generation-Part 2: Determination of optical density by a single-chamber(2017).
10. Kwon, T. S., Lee, D. H. and Park, W. H., "Influence Factor Analysis on the Measurement of Smoke Density from Floor Materials in Rolling Stock," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **17**(11), 629-634(2016).
11. Stacy, L. D., "Products of Incomplete Combustion (O_x , CO_x , HO_x , NO_x , SO_x , RO_x , MO_x , and PO_x)," *Journal of Hazardous Materials*, **22**(2), 161-173(1989).
12. Marynowski, L., Kubik, R., Uhi, D. and Simoneit, B. R. T., "Molecular Composition of Fossil Charcoal and Relationship with Incomplete Combustion of Wood," *Organic Geochemistry*, **77**, 22-31(2014).
13. Seo, H. J. and Son, D. W., "Hazard Assessment of Combustion Gases from Interior Materials," *Fire Science and Engineering*, **29**(4), 49-56(2015).

Authors

Ji-Hun Shim: PhD Candidate, Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, and also Senior Researcher, Korea Testing & Research Institute, Incheon 22829, Korea; jhshim@ktr.or.kr

Jae-Geol Lee: CEO, Gwangwoon Tech. CO., LTD, Gyeonggi-do 18255, Korea; essi92@hanmail.net

Kyoung-Ho Han: Senior Manager, Gwangwoon Tech. CO., LTD, Korea; hankh0509@naver.com

Ju-Wan Kim: Department Manager, Korea Electric Power Corporation, Jeollanam-do 58332, Korea; wans76@naver.com

Seok-Hun Song: Deputy General Manager, Korea Electric Power Corporation, Jeollanam-do 58332, Korea; sukuni95@gmail.com

Hyung-Won Jo: PhD Candidate, Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea; guddnjs95@kw.ac.kr

Do-Young Yoon: Professor, Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea; yoondy@kw.ac.kr