

우레탄 소재의 산업분야별 연소독성에 관한 실험적 연구

전준표¹ · 이인구² · 문도진³ · 김유택[†]

(Received June 14, 2017 ; Revised September 20, 2017 ; Accepted November 6, 2017)

Experimental study on combustion toxicity of urethane materials by industry classification

Jun-Pyo Jeon¹ · In-Ku Lee² · Do-Jin Moon³ · You-Taek Kim[†]

요약: 화재 구획의 위험성 중 연소가스는 재실자의 피난 시 기절 또는 사망요인으로 중요한 부분을 차지하고 있다. 이러한 화재사고를 최소화하기 위하여 화재안전기준에 따라 소재의 성능을 확인하고 있으나 분야별로 시험방법과 성능기준이 다르기 때문에 서로 다른 결과를 가져 오기도 한다. 따라서 본 논문에서는 선박, 건축, 철도 각 분야별로 제시하고 있는 시험방법 FTP Code Part2, KS F 2271, BS 6853 및 성능기준에 따라 유독성가스가 다량 방출되는 난연, 비난연 성능의 우레탄 소재를 대상으로 연소독성 결과를 비교 분석하여 보았다. 시험 결과 선박의 경우 CO 1450ppm으로 규정하고 있으나 난연 1633.7ppm, 비난연 264.0ppm 측정되어 서로 반대되는 결과가 도출 되었으며, 철도 분야는 두 가지 제품에서 독성지수[R]이 0.4 미만으로 성능기준 1.6보다 적게 측정되어 적합한 결과를 보였다. 반면에 건축 분야는 연소가스에 노출된 실험용 흰 쥐의 평균행동정지시간 9분 이상으로 규정하고 있으며 난연 13분, 비난연 5분이 측정되어 유일하게 제품의 성능에 부합함을 알 수 있었다. 이처럼 동일한 소재를 대상으로 연소독성을 측정한 결과 불일치하는 결과가 도출되었으며 원인으로서는 연소시 발생하는 soot의 영향이 있을 것으로 판단되어 독성가스와 soot의 추가연구가 필요함을 알 수 있었다.

주제어: 연소독성평가, 가스분석, 우레탄, 단열재, 화재안전

Abstract: Among all risks, combustion gas toxicity is the greatest reason for faints or deaths among occupants during evacuation. To minimize such fire accidents, performance of materials is checked according to fire safety standards used in different fields may lead to different results. Thus, in this study combustion toxicity results for flame-retardant and non-flammable polyurethane materials were compared and analyzed according to the test method FTP Code Part2, KS F 2271, BS 6853, and performance criteria.

The test showed that the performance standard of ships was specified as 1450ppm CO, but that for the flame-retardant and non-flammable materials was 1633.7 ppm and 264.0 ppm, respectively. In the railway sector, the toxicity index [R] was measured to be less than 0.4 for both products. The Performance criterion was measured to be less than 1.6, and the results were appropriate. The building sector defined an average downtime of 9 minutes or more for experimental white rats exposed to flue gas. The results 13 minutes for the flame retardant and 5 minutes for the non-flame retardant products. Thus, It has been found to match the performance of the product. It is considered that soot formed combustion may influence these results and therefore further studies on toxic gas and soot are required.

Keywords: Fire toxicity test, Gasometric analysis, Urethane, Insulation, Fire safety

1. 서론

산업기술이 발달함에 따라 다양한 소재가 개발되어 지고 산업혁명 이후 중화학 산업이 급속도로 성장하게 되었다. 따라서 각종 유기화합 제품이 다양한 형태로 제품화 되어 생산되고 있다. 이러한 소재는 선박 및 건축, 철도분야에

활용 되고 있으나 강도, 단열, 실내 인테리어 등의 이유로 크고 작은 화재가 발생하고 있다. 따라서 화재로부터 인명과 재산피해를 최소화 하고자 국내 및 해외에서는 구조별, 재료의 난연 성능을 제정하여 운영하고 있으며 또한 산업 분야별 화재안전기준을 제정하여 운영하고 있다.

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9662-2175>): Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: kimyt@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4258

1 Safety & Environment Test & Research Center, Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: junpj@komeri.re.kr, Tel: 051-400-5452

2 Safety & Environment Test & Research Center, Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: leeik@komeri.re.kr, Tel: 051-400-5454

3 Safety & Environment Test & Research Center, Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: gane@komeri.re.kr, Tel: 051-400-5455

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.

선박에서의 난연성기준 으로는 국제해사기구(IMO)에 의해 승인된 International Code for Application of Fire Test Procedures, 2010/Annex1 Fire test procedures/Part2 Smoke and toxicity, Part5 Test for surface flammability [1]를 통하여 선박용 내장 재료의 난연성능을 평가하고 격벽(Bulkhead), 벽(Wall), 천정(ceiling), 표면바닥재(Floor coverings), 1차 갑판 피복재(Primary deck coverings)의 적용부위별 기준을 정하여 운영하고 있다. 이 중 Part2 Smoke and toxicity 항목은 소재의 연소 시 발생하는 연기의 밀도와 연기에 침식되어 있는 유독성 가스를 측정하여 유독성을 평가하고 있다. 국내의 유독성 가스를 평가하는 분야는 선박 이외에 건축 및 철도 분야에서도 별도의 기준을 마련하여 독성 기준에 적합한 소재를 적용하고 있다. 건축 분야의 경우 국토교통부 고시 제2017-744호[건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준] [2]의 규정에 따라 한국산업규격 KS F 2271:건축물 마감재료의 가스유해성 시험 방법[3]으로 연소 가스의 유독성을 측정하도록 규정하고 있다.

철도 분야 역시 마찬가지로 동 고시 제2017-138호[철도차량기술기준] Part 51 도시철도차량(전동차)기술기준[4]에서 성능기준을 규정하고 있으며 시험방법은 BS 6853:Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains [5]를 통하여 측정하도록 규정하고 있다.

현재 지구상에 존재하는 모든 물질은 연소시 가스와 soot가 동시에 발생한다. 이 중 연소 가스의 경우 FT-IR을 활용하여 화재생성물의 독성을 측정할 수 있도록 국제표준규격 ISO 19702:2006 Toxicity testing of fire effluents-Guidance for analysis of gases and vapours in fire effluents using FTIR gas analysis. [6]에서 규정하고 있으나 soot의 경우 정량적인 측정방법이 마련되어 있지 않아 soot의 위험성에 대하여 예측이 어려운 상황이다.

연소가스의 독성분석과 soot등에 관한 선행연구결과에 따르면 연소생성물에는 화재조건 및 가연물에 따라 각기 다른 연소가스와 soot가 발생하고 이때 발생하는 soot는 금속증기, 다이옥신, HCL, HF 등 여러 종의 가스가 흡착되어 크기가 달라지며 흡입할 경우 평균 직경 2.5 μm 미만인 입자는 폐의 심부까지 침투할 수 있고 보다 큰 입자는 호흡기 및 기도도에 누적되어 질식을 유발 할 수 있다고 한다[7][8].

따라서 본 논문에서는 선박, 건축, 철도 분야에서 규정한 유독성 평가방법에 따라 유독가스와 soot를 동시에 다량으로 발생시키는 우레탄소재를 대상으로 일반 우레탄보드와 난연 우레탄보드에 대하여 연소독성을 측정 하여 시험 결과를 비교 분석 하였으며 선행 연구 결과를 바탕으로 soot가 시험결과에 영향을 줄 수 있는 여부에 대하여 예측하게 되었다.

2. 시험장치 및 시험방법

2.1 시험계획

시험체는 유독성을 측정해야 하는 만큼 많은 양의 연기와 유독한 가스가 발생 할 수 있는 난연성능이 확보되지 않은 일반 우레탄보드와 난연성능이 확보된 난연 우레탄보드 두 가지의 소재를 시험체로 선정하였으며 시험방법으로는 선박, 건축, 철도분야에서 규정하는 유독성 측정 방법으로 시험을 진행 하였다.

Table 1은 각 분야별 시험 규격과 시험조건, 시험체 크기 및 성능기준을 보여주고 있다.

2.2 시험방법

2.2.1 시험체의 연소 방법

시험체를 연소하기 위하여 Table 1의 각 분야별 시험 규격을 따랐으며 선박과 철도 분야의 시험체를 연소하기 위한 시험 장비로는 연기밀도 시험기(Smoke density chamber)

Table 1: Test method comparison [1]-[5]

Division	Ship		Train		Building
Test method	International Code for Application of Fire Test Procedures, 2010/Annex1 Fire test procedures/Part2 Smoke and toxicity		BS 6853:1999 Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains/Annex B Determination of weighted summation of toxic fume, R		KS F 2271:2016 Method for Testing method for gas toxicity of finish materials of buildings
Test condition	25 kW/m ² flame mode 25 kW/m ² non-flame mode 50 kW/m ² non-flame mode		25 kW/m ² flame mode		LPG 3 min, Electric heater 3 min
Specimen size	75(W) × 75(H)		75(W) × 75(H)		220(W) × 220(H)
Toxicity criteria	CO 1450 ppm	NOx 350 ppm	Insulation		9 min or more
			Wall, Ceiling, inside duct		
	HCL 600 ppm	HBr 600 ppm	Risk class [1]	≤3.0	
	HF 600 ppm	HCN 140 ppm	Risk class [2]	≤2.7	
	SO2 120 ppm	SO2 200 ppm (floor covering)	Risk class [3]	≤2.0	
		Risk class [4]	≤1.6		

를 사용하였다. 선박과 철도분야의 시험 조건은 규정된 복사 열량을 시험체에 노출시켜 연소시키는 방식으로 **Figure 1**에서와 같이 가열 Heater를 사용하였으며, Heater의 하부로부터 25 mm 위치에 Heat Flux meter를 설치하고 Heater의 온도를 조절하여 25 kW/m², 50 kW/m²의 복사열량을 설정 후 동일한 위치에 시험체를 노출하여 연소 시험을 실시하였다.

건축분야는 **Figure 2**의 가스유해성 시험기의 가열로에서 시험체를 연소하였으며 연소 조건으로는 부열원 LPG연료를 통하여 3분 간 10 l/min의 유량으로 가열 후 주열원인 전열 Heater를 3분간 25 l/min의 공기유량을 동시에 공급하여 시험체를 연소 하였다.

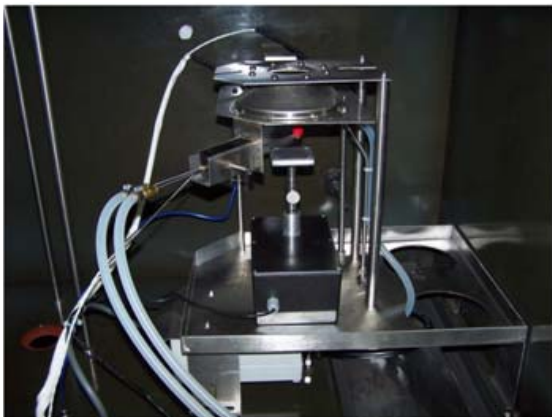


Figure 1: ISO 5659-2 Heater Assembly

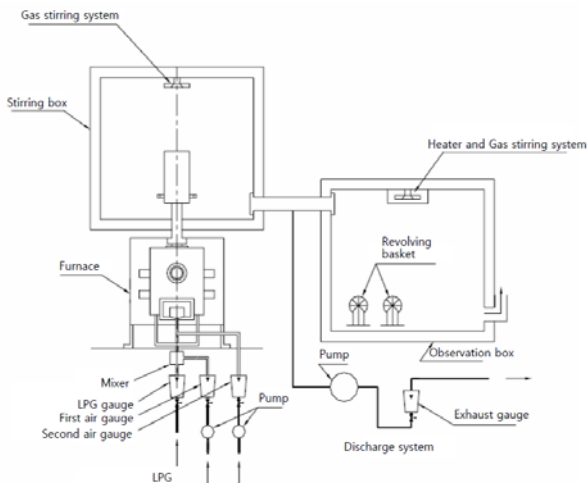


Figure 2: Apparatus of gas toxicity test [3]

2.2.2 연소가스분석

시험체 연소 후 생성된 가스를 정량분석 및 정성분석을 하기 위하여 적외선분광분석기 FT-IR[Fourier transform infrared spectroscopy]를 사용하였다. FT-IR은 **Figure 3**에서 보는 바와 같이 IR Source를 Beamsplitter를 통하여 Fixed mirror와 Moving mirror를 통한 여러 개의 파장(Interferogram)을 만들어 내며 연소가스의 여러 가지 분자를 통과함에 따라 흡수량의 변화를 감지하여 정량 및 정성분석을 할 수 있다.

정확한 정량분석을 위해 FT-IR 제조사의 Reference Library를 사용하지 않고 CO, CO₂, HCN, HCL, HBr, HF, SO₂, NO, NO₂ 9가지의 각 농도별 제조된 표준가스를 사용하여 **Figure 4**에서 보는바와 같이 검량곡선을 통한 method를 사용하여 Calibration 후 정량 분석을 하였다.

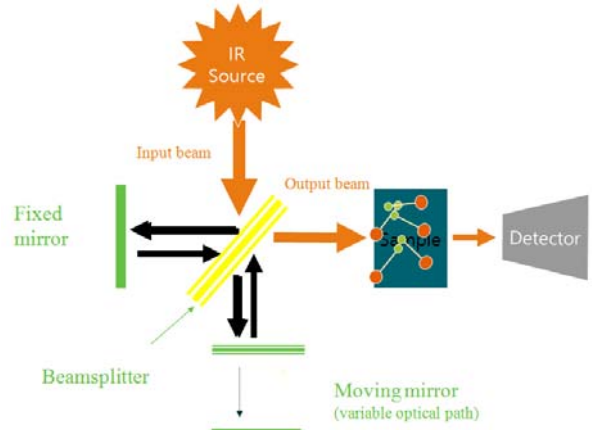


Figure 3: A fundamental concept of FT-IR

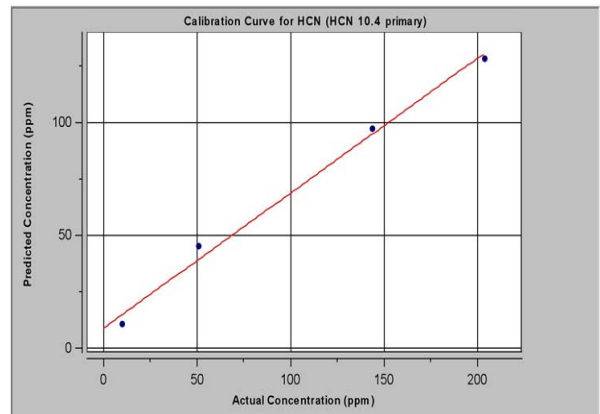


Figure 4: FT-IR Gas analysis Calibration Curve

2.2.3 연소가스의 독성 평가 기준

연소 가스의 독성 평가 기준은 **Table 1**의 시험방법에서 규정하고 있지만 측정하는 방법에서의 차이점이 있다. 선박과 철도 분야의 독성 측정 방법은 **Table 1**의 Test condition에서 보는바와 같이 선박 분야는 3개의 Test mode로 시험체를 연소 시켜 발생한 연기를 FT-IR을 통하여 연소가스를 분석하며, 철도 분야는 선박과 동일한 방법으로 시험체를 연소 시키지만 25 kW/m² flame mode 1개의 Test mode만으로 연소 후 가스를 분석하고 있다.

또한 선박분야 에서는 검출된 가스의 농도를 반영하여 **Table 1**의 성능기준에 따라 합부를 결정하며, 철도분야 에서는 선박분야와는 다르게 검출된 가스의 농도를 각각의 가스별로 식 (1)의 계산식에 따라 산출하며 식 (2)에 따라 계산된 수치를 합하여 독성지수(Toxicity index R) [5]로 표현하고 있다.

Table 1의 철도분야의 성능기준은 철도차량기술기준[4]에 따른 단열재의 유독성 성능기준이다.

$$r_x = c_x / f_x \quad (1)$$

$$R = \sum r \quad (2)$$

여기서, c_x 는 검출된 가스의 농도이며 f_x 는 Table 2에 제시된 가스의 기준값이다. 따라서 독성지수 “R”이 산출된다.

건축 분야의 유독성 평가는 Figure 2에서 보는 바와 같이 가열로에서 시험체를 연소 시키며 발생된 연기는 교반상자를 통하여 8마리의 실험용 흰 쥐가 있는 피검 상자로 이동되어 실험용 쥐들에게 노출된다. 이때 회전바구니 안에 있는 실험용 흰 쥐의 행동정지시간을 측정하며 식 (3)의 계산에 따라 평균행동 정지시간을 측정한다. 성능기준은 8마리 실험용 흰 쥐의 평균행동 정지시간이 9분 이상일 경우 합격기준으로 하고 있다.

Table 3은 KS F 2271에서 규정한 실험용 흰 쥐의 계열과 무게 등을 표현하고 있다.

$$x = \bar{X} - \sigma \quad (3)$$

여기서, \bar{X} 는 8마리 실험용 흰 쥐의 행동정지시간의 평균값이며, σ 는 8마리 실험용 흰 쥐의 행동정지시간의 표준편차이다.

Table 2: Reference values for gases [5]

Gas	Reference value, f mg·g ⁻¹ or g·m ⁻²
Carbon dioxide	14000
Carbon monoxide	280
Hydrogen fluoride	4.9
Hydrogen chloride	15
Hydrogen bromide	20
Hydrogen cyanide	11
Nitrogen dioxide	7.6
Sulfur dioxide	53

Table 3: White rat [3]

Line	Age	Weight
ICR (female)	5 week	(18 ~ 22) g

3. 시험 결과 및 고찰

선박과 철도 분야는 FT-IR을 활용하여 연소 시 발생하는 연소가스를 분석한 결과, 가스의 성분으로는 CO, CO₂, HCN이 검출되었다. Figure 5는 CO, CO₂, HCN의 표준가스의 스펙트럼으로 각 가스의 Finger-print영역을 나타내고 있다.

Figure 6 ~ Figure 8은 각각 25 kW/m² flame, 25 kW/m² non-flame, 50 kW/m² non-flame의 연소가스에서 분석된 스펙트럼을 나타내고 있다. Figure 5 표준가스의 스펙트럼과 Figure 6 ~ Figure 8의 CO, CO₂, HCN의 Finger-print영역이 일치함으로써 3종의 가스가 검출되었음을 알 수 있다.

Table 4는 25 kW/m² flame, 25 kW/m² non-flame, 50 kW/m² non-flame에서 정량적으로 분석된 가스의 농도를 보여주고 있다.

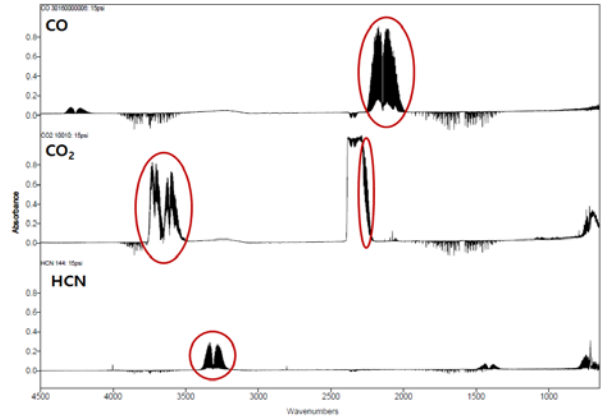


Figure 5: Standard gas spectrum of CO, CO₂, HCN

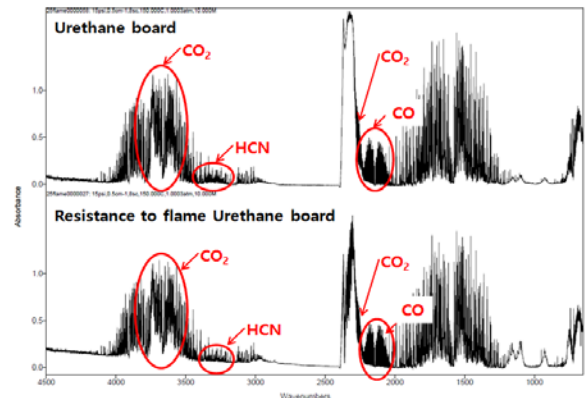


Figure 6: 25 kW/m² flame Spectrum

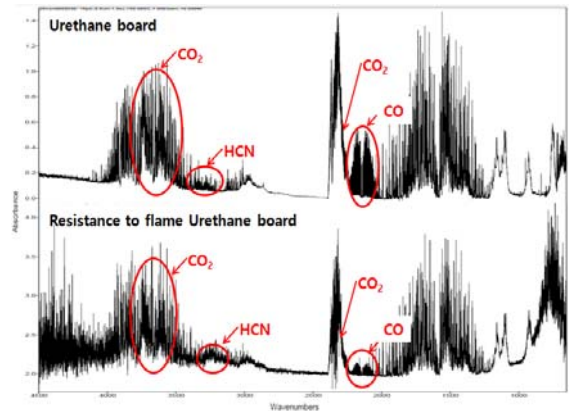


Figure 7: 25 kW/m² non flame Spectrum

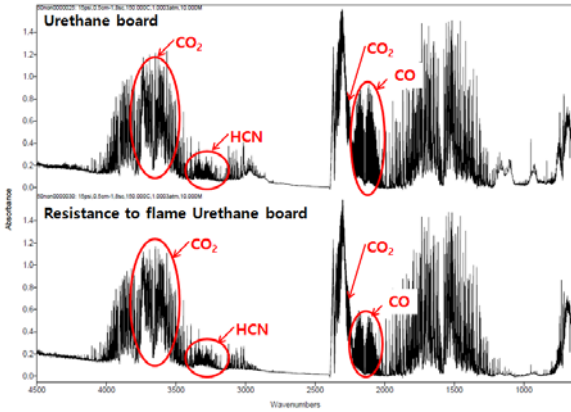


Figure 8: 50 kW/m² non flame Spectrum

3.1 선박 분야

선박에서의 유독성 가스의 성능기준은 Table 1에서 보는 바와 같이 CO₂에 대하여 규정하고 있지 않음으로 Table 4의 CO, HCN의 측정 농도만을 볼 때 난연 우레탄보드 50 kW/m² non-flame 에서의 CO량이 성능기준 1450 ppm을 초과함에 따라 유독성 성능이 확보 되지 않음을 알 수 있다. 원인으로서는 화학약품 처리를 통하여 난연 성능을 높인 대신 CO량이 대량 검출 된 것으로 사료된다. 또한 일반 우레탄 보드의 보다 적은 가스농도는 유기화합물의 연소 특성상 발생하는 soot가 필터를 거쳐 FT-IR내부로 유입이 되기 때문에 필터에 다량의 soot가 걸러짐에 따라 유입되는 유량에 문제가 있을 수 있다고 사료 된다.

Table 4: Gasometric analysis results [9][10]

Test condition		Test results (ppm)		
		CO	CO ₂	HCN
Urethane board	25 kW/m ² non-flame	60.9	786.3	11.3
	25 kW/m ² flame	225.3	2230.7	32.4
	50 kW/m ² non flame	264.0	1701.6	53.2
Resistance to flame Urethane board	25 kW/m ² non-flame	272.1	573.6	29.5
	25 kW/m ² flame	214.6	1472.6	19.1
	50 kW/m ² non-flame	1633.7	1293.6	68.4

3.2 철도 분야

철도 분야의 연소가스 분석 결과는 선박 분야와 동일하게 Table 4에 나타나 있으며 25 kW/m² flame 1개의 방법으로 평가를 함으로 CO, CO₂, HCN의 농도가 분석되었음을 알 수 있다. 이렇게 분석된 가스의 농도는 식 (1)에 따라 계산 후 산출된 지수의 함으로 독성지수(Toxicity index R)은

Table 5에서 보는 바와 같으며 일반 우레탄보드 에서 0.4, 난연 우레탄보드에서 0.3이 산출되어 Table 1의 철도차량기술기준에서 규정하고 있는 단열재의 독성지수 최고 등급[4]의 ≤1.6 보다 적은 수치를 보였다.

3.3 건축 분야

건축 분야는 선박과 철도 분야와는 다르게 실험용 동물에게 연소가스를 노출 시켜 측정을 하는 차이점이 있다. 시험 결과는 8마리 실험용 흰 쥐의 평균행동정지시간이 9분 이상 이어야 하지만 일반 우레탄보드의 실험용 흰 쥐의 평균행동정지시간 5분과 난연 우레탄보드 평균행동정지시간 13분의 시간이 측정되어 성능기준에 부합한 결과가 도출이 되었다.

일반 우레탄의 경우 선행 연구결과에 따르면 동일한 시험방법과 시험체를 대상으로 soot의 유입 유무에 따른 실험 결과 필터가 없을 경우 본 실험결과와 유사한 5분 25초가 측정 되었고 필터를 설치함에 따라 1~2분 길어진 7~9분으로 최대 67.4%증가된 부분이 도출 되었다[11].

따라서 선박과 철도 분야의 가스 분석 결과에서 보듯이 CO, CO₂, HCN의 연소 가스와 다량의 soot로 인하여 실험용 흰 쥐가 호흡시 여러 가지 화학종이 흡착된 soot를 실험용 흰 쥐가 흡입하여 기도가 막히는 등 호흡기관의 영향으로 질식사가 빠르게 진행되어 성능기준 9분 이하의 결과 도출된 것으로 사료되며 난연 우레탄보드는 보다 적은 soot의 발생으로 9분 이상 측정 된 것으로 사료된다.

Table 6은 실험용 흰 쥐의 평균행동 정지시간을 보여주고 있다.

Table 5: Toxicity test results in train sector (Toxicity index R) [9][10]

Division	Test results	Performance criteria
Urethane board	0.4	Risk class [4] 1.6 and less
Resistance to flame Urethane board	0.3	

Table 6: Average movement stop time [9][10]

Division	Test results	Performance criteria
Urethane board	5 min 03 s	9 min or more
	5 min 13 s	
Resistance to flame Urethane board	13 min 54 s	
	13 min 42 s	

4. 결 론

모든 분야에 내장 단열소재로 사용이 되고 있는 우레탄보드(일반 우레탄, 난연 우레탄) 2종에 대하여 선박, 철도, 건축 각 분야에서 규정하고 있는 연기 독성에 대하여 측정

결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 선박 분야의 유독성 측정 결과, 난연 우레탄보드에서 난연성능 향상을 위해 난연 처리를 함에 따라 CO량이 성능기준보다 높게 측정이 된 것으로 사료된다. 따라서 제품의 난연성능 만을 고려할 경우 가스의 기준을 초과할 수 있음을 알 수 있었으며 또한 FT-IR을 통한 연소 가스의 분석 시 시험체가 연소 할 때 발생하는 soot의 양이 결과에 영향을 미칠 수 있는 가능성과 이에 대한 개선점등의 따른 추가 연구가 필요함을 알 수 있었다.
- (2) 철도 분야는 조선과 마찬가지로 동일한 방법으로 유독성을 평가하고 있으나 가열조건은 한가지로서(25 kW/m² flame mood)해당 조건을 통하여 연소하고 검출된 가스의 농도를 주어진 식에 따라 독성지수 R을 산출 하였으나 철도차량기술기준에서 규정하고 있는 단열재의 독성지수 최고 등급[4] 보다 적은 수치가 산출 되었다. 연기 독성의 측정 결과는 가장 안정적인 결과가 도출 되었으나 철도차량의 단열재를 평가하는 방법 중 연소 독성이 아닌 다른 시험 항목(열방출률, 화염전파성 등)을 모두 만족해야 함으로 연소 독성의 결과만으로 소재를 평가하기에 어려움이 있다.
- (3) 건축 분야는 타 분야와 다르게 연소가스를 살아있는 동물에게 노출시킴으로서 독성을 평가하고 있다. 시험 결과로는 난연 우레탄 보드가 실험용 흰 쥐의 평균행동정지시간 13분과 일반 우레탄 보드 5분으로 규정에 부합하는 결과를 보였으며 원인으로서는 호흡기관을 가지고 있는 동물에게 유독성 가스와 soot를 노출시켜 측정된 결과로서 soot의 노출량에 따른 호흡기관의 영향성이 큰 것으로 사료되며 보다 다양한 소재의 시험결과 및 필터를 통한 soot량의 정량적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] International Code for Application of Fire Test Procedures, 2010 (Resolution MSC.307(88))Annex1 Fire test procedures Part2 Smoke & toxicity test, Part5 Test for surface flammability, 2010.
- [2] Minister of Land, Infrastructure and Transport NOTIFICATION NO.2015-744 [Flame retardant performance and fire protecting structure standards of Building finishing materials], 2015.
- [3] Korea Industrial Standard KS F 2271:2016 Method for Testing method for gas toxicity of finish materials of buildings, 2016.
- [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport NOTIFICATION NO.2017-138 [Technical standards of railway vehicles], 2017.
- [5] BS 6853:1999 Code of practice for fire precautions in

the design and construction of passenger carrying trains/Annex B/Determinationof weighted summation of toxic fume, 1999.

- [6] ISO 19702:2006 Toxicity testing of fire effluents-Guidance for analysis of gases and vapours in fire effluents using FTIR gas analysis, 2006.
- [7] S. S. Kim, S. T. Choi, and D. H. Rie, "A research of grain size analysis of particulate matter in fire effluent," Fire Science and Engineering, vol. 28, no. 6, pp. 8-12, 2014 (in Korean).
- [8] J. H. Goo, "Studies on the morphology of smoke particles for each type of fire by using stesdy state tube furnace," Fire Science and Engineering, vol. 28, no. 1, pp. 44-51, 2014 (in Korean).
- [9] J. P. Jeon, I. K. Lee, D. J. Moon, and Y. T. Kim, "Combustion gas of interior materials in ship and architecture comparative study," Proceedings of the 40th Korean Society of Marine Engineering Spring Conference, p. 131, 2016 (in Korean).
- [10] I. K. Lee, D. J. Moon, T. J. Choi, J. S. Kim, J. P. Jeon, "Comparative study on standard of toxicity evaluation," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers Conference, p. 13, 2017 (in Korean).
- [11] N. K. Kim, N. W. Cho, D. H. Rie, "A study on the risk of particulate materials included in the combustion products of building materials," Fire Science and Engineering, vol. 30, no. 1, pp. 43-48, 2016 (in Korean).