



## BS6853을 활용한 연소독성지수와 가스유해성시험의 비교연구

조남욱·이종천·이봉재·최재범·이동호\*

한국건설기술연구원 · 인천대학교 소방방재센터\*

### A comparative study on toxic gas index by BS6853 and gas hazardous test

Nam-Wook Cho · Jong-Cheon Lee · Bong-Jae Lee · Jae-Bum Choi · Dong-Ho Rie\*

Korea Institute of Construction Technology · Fire Disaster Prevention  
Research Center-University of Incheon\*

#### 요 약

건축법에서 건축 마감재료의 연소독성은 설치류(마우스)를 사용한 가스유해성시험으로 평가되고 있다. 최근 동물시험에 대한 최소화 및 대체시험개발의 필요성으로 인해 연소가스의 정량분석을 통한 독성지수연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 이미 철도차량에서 적용되고 있는 BS6853의 연소독성평가를 통해 기존 가스유해성시험결과의 상대적인 비교분석을 수행하여, 건축재료의 연소독성평가에 대한 다양한 가능성을 제시하고자 하였다.

#### 1. 서 론

화재로 인한 연기독성의 피해는 화염에 의한 직접적 피해보다 광범위하고 치명적이다. 1999년, 인천시 인현동 호프집 화재사고에서 내부 장식재였던 우레탄폼이 타면서 57명이 유독가스로 사망했으며 2007년 2월 10명이 사망하고 17명이 부상을 입은 여수 화재 참사 역시 피해를 키운 원인으로 내부 마감재료 및 우레탄 단열재의 연소로 발생한 유독가스였다. 2008년 인천냉동창고화재에서도 40명이 유독가스에 의해 사망하는 사고가 발생했다. 미국에서는 독성 연기생성물의 노출로 인한 사망자가 발생한 수많은 대형 화재로 인해 독성 문제에 대해 관심이 집중된 바 있다.<sup>1)</sup> 영국에서 수행된 화재통계자료에 따르면, 화재사고 희생자 중 상당 비율이 ‘열 및 화상’보다는 ‘연기 및 독성가스’로 인한 피해를 입었을 뿐 아니라, 1955년부터 1971년 사이에 ‘연기 및 독성가스’ 피해는 4배로 증가했다. 이러한 증가 추세는 1980년대에도 계속 이어져 현재는 주택화재의 경우, 모든 사망자 중 1/2 정도와 부상자 중 1/3 정도가 ‘연기 및 독성가스’ 피해를 입은 것으로 보고된 바 있다.<sup>2)</sup>

1990년대에 영국에서는 연간 화재 사망자 수가 다소 감소한 반면, 연기 사망자는 여전히 1950년대의 4배 수준을 유지하고 있다. 연기 및 독성가스로 인한 부상은 1990년대 말에 연간 약 1,000 건에서 6,000여건으로 지속적으로 증가했다.<sup>3)</sup>

본 연구에서는 가연성 재료 중 우레탄과 고무판 바닥재를 대상으로 연기독성을 측정하였다. 건축물 화재에서 발생하는 연기독성을 정량화하기 위하여 국내 건축법에서 채택하고 있는 가스유해성 시험 및 철도차량안전기준에 관한 규칙에서 정하는 독성지수 'R'을 측정하여 연기독성평가에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

## 2. 연소독성평가방법

### 2.1 가스유해성시험

난연성능 평가방법은 건축물의 피난·방화등의 기준에 관한 규칙 제5조 내지 7조 규정에 따라 제정된 '건축물 마감재료의 난연성능기준'(국토해양부 고시 제2011-39호)에서 정하고 있으며 국제규격으로서 채택된 콘칼로리미터방법(KS F ISO 5660-1)과 불연시험방법(KS F ISO 1182) 및 개정된 가스유해성시험방법(KS F 2271)을 채택하여 그 성능기준을 정하고 있다.<sup>4)</sup> 불연재료, 준불연재료 및 난연재료에서 공통적으로 가스유해성시험을 통한 성능기준을 요구하고 있다. 가스유해성시험의 시험체 크기는 가로, 세로 각각 220mm로 하며 시험체의 표면에서 뒷면으로 관통하는 지름 25mm인 구멍을 3개 뚫은 것으로 한다. 시험은 2회 실시하며, 시험체의 가열은 부열원으로 3분간 가열한 후, 다시 주열원으로 3분간 가열하여 총15분간 시험한다. 시험용 흰쥐(ICR계, 암컷 5주령, 18~22g)를 1마리씩 넣은 회전 바구니 8개를 피검 상자 내에 넣고 15분간 시험용 흰쥐가 행동을 정지할 때까지의 시간을 측정한다. 건축법에서는 흰 쥐의 평균행동정지시간을 측정하여 9분 이상을 적합한 것으로 하고 있다.<sup>5)</sup>

### 2.2 BS6853을 활용한 연소독성지수

철도차량의 객차등의 차체구조 및 외장재, 실내설비 등의 화재성능기준은 '철도차량안전기준에 관한 지침'에서 정의되고 별도의 세부기준으로 화재성능을 확보하도록 하고 있으며, 특히 연소독성을 평가하기 위하여 독성지수의 기준을 두고 있다. 독성지수(R)는 시료의 연소시 발생된 주요 가스(CO<sub>2</sub>, CO, HF, HCl, HBr, HCN, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>)의 농도를 기준값과 비교한 지수를 말하며 시험방법은 BS 6853 Annex B.1 또는 BS 6853 Annex B.2 방법에 의한다. 이번 연구는 우레탄등의 가연성 재료에 대한 독성지수 산출을 위해 화재모델로 ISO 5659-2에 규정하는 연기밀도시험기(Smoke density chamber)를 사용하였다. 가열강도는 25kW/m<sup>2</sup> 이며 화염모드(Flame Mode)로 시험하였고 3개의 시편을 사용하여 BS 6853 Annex B.2에 의한 독성지수를 도출하였다

where

$$r_x = c_x / f_x \quad \text{-----(1)} \quad c_x \text{ is the emission of the } x\text{th species, in the appropriate units;}$$

$$R = \sum r \quad \text{-----(2)} \quad f_x \text{ is the reference value for the } x\text{th species, as given in Table 1;}$$

$r_x$  is the individual index for the  $x$ th species.

(1)식에서  $c_x$ 는 대상 시험체의 연소로부터 발생된 각 화학종의 농도이며  $f_x$ 는 표1에 제시된 각 화학종에 대한 기준값이다. 따라서 (2)식의 연소독성지수 “R”은 분모에 기준값을 취하고 분자에 측정값을 대입하여 산출한다.<sup>6)</sup>

독성지수를 측정하기위해 반드시 연소가스의 정량분석이 선행되어야 한다. 연소가스는 분석대상이 연속적으로 발생하는 가열된 가스이기 때문에 특별한 샘플링, 측정, 분석 등의 절차를 거쳐야 한다. ISO TR 9122-3에서는 각 대상가스별 다양한 분석방법을 제시하고 있다. 일산화탄소, 이산화탄소 분석법으로 가스크로마토그래피, 비분산형 적외선분석, 산소분석법으로 가스크로마토그래피법, 시안화수소 분석법으로 이온 선택성 전극(Ion Selective Electrode, ISE)에 의한 분석법, 비색분석법, 시안화수소 이온 크로마토그래피법, 염화수소와 브롬화수소 분석 방법으로 적정 분석법 및 이온 크로마토그래피 등을 제시하고 있다.<sup>7)</sup> 그러나 화재시험의 특성상 연속적으로 발생하는 연소가스를 실시간으로 샘플링하여 개별적 분석장비를 동시에 운용하는 것은 현실적으로 어려우며 따라서 푸리에 변환 적외선분광기(FT-IR)를 사용한 연속적 온-라인 분석이 현재 보편적인 분석방법으로 이용되고 있다.<sup>8)</sup> 본 연구에서도 FT-IR을 사용하여 다중가스를 분석하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

표1은 우레탄 및 고무판 바닥재를 대상으로 연소가스정량분석을 통한 독성지수산출 및 가스유해성시험 결과이다. 우레탄은 평균 7,179ppm의 이산화탄소가 검출되어 14,539ppm이 발생된 고무판에 비하여 약 1/2정도 수준으로 측정되었다. 일산화탄소의 경우, 우레탄이 평균 164ppm, 고무판이 497ppm이 검출되어 우레탄보다 고무판에서 약3배의 일산화탄소가 발생되었다. 그러나 우레탄은 Hydroxyl group(alcohol)과 [-N=C=O-](Isocyanate group)의 반응으로 [-NH-(C=O)-O-]의 우레탄 연결기가 생성되므로 성분에서 [-C-N-]을 함유하여 연소시 HCN 가스가 발생한다. 본 실험에서도 평균 42ppm의 시안화수소가스가 측정되었다. 가능한 범위에서 실제로 사용되는 두께로 시험하여 우레탄시료와 고무판시료의 두께는 각각 25.3mm, 5.0mm로 약 5배차이가 있다.

그러나 밀도의 경우 고무판과 우레탄이 각각 1.62kg/m<sup>3</sup>, 0.037kg/m<sup>3</sup>로 발포성단열재인 우레탄이 고무판보다 약43배 작다. FT-IR에 의한 정량분석결과에서와 같이 일산화탄소 및 이산화탄소는 두께가 두꺼운 우레탄이 얇은 고무판에 비해 적은 발생량으로 측정되어 이는 밀도차이에서 기인된 것으로 추측할 수 있다. 그러나 우레탄의 경우 시안화수소의 검출로 독성지수에 큰 영향을 준 것으로 확인되었다. 독성지수의 기준농도에서 시안화수소는 일산화탄소에 비해 농도대비 25배 독성이 크며, 이산화탄소보다 1,272배 유독한 것으로 상대 비교할 수 있다. 우레탄과 고무판의 독성지수는 각각 0.56과 0.38로 약1.5배가량 우레탄이 더 큰 것으로 계산되어 우레탄이 43배만큼 밀도가 작음에도 불구하고 더 큰 독성지수를 나타내었다. 가스유해성시험은 우레탄이 3분48초와 3분52초로 기준인 9분에 훨씬 못 미치는 평균행동정지시간이 측정되었고, 고무판바닥재의 경우 7분24초와 8분22초가 측정되어 독성지수가 클수록 더 작은 평균행동정지시간이 측정되는 상관관계를 확인하였다.

표 1. 시험결과

화학종	기준농도 mg/m <sup>2</sup>	측정농도(ppm)							
		우레탄				고무판 바닥재			
		1차	2차	3차	평균	1차	2차	3차	평균
CO <sub>2</sub>	14000	6,559	7,578	7,399	7,179	14,384	13,992	15,240	14,539
CO	280	157	171	164	164	420	450	619	497
HF	4.9	N.D	N.D	N.D	-	N.D	N.D	N.D	-
HCl	15	N.D	N.D	N.D	-	N.D	N.D	N.D	-
HBr	20	N.D	N.D	N.D	-	N.D	N.D	N.D	-
HCN	11	34	53	40	42	N.D	N.D	N.D	-
NO <sub>2</sub>	7.6	N.D	N.D	N.D	-	N.D	N.D	N.D	-
SO <sub>2</sub>	53	N.D	N.D	N.D	-	N.D	N.D	N.D	-
두께(mm)		25.3	25.3	25.3	25.3	5.0	5.1	5.0	5.0
밀도(kg/m <sup>3</sup> )		0.037				1.62			
"R" value (독성지수)		0.56				0.38			
가스유해성시험 (평균행동정지시간)		3분 52초		3분 48초		8분 22초		7분 24초	

#### 4. 결론

본 연구에서는 우레탄과 고무판바닥재의 독성평가를 위하여 가스유해성시험과 독성 지수“R”을 측정하여 비교하였다. 독성지수의 측정을 위한 연소가스의 정량분석에는 ISO 19702의 FT-IR을 사용하였으며 다중가스의 연속적인 분석에 효과적인 분석장비로서 활용되었다. 시험결과 우레탄은 고무판바닥재에 비해 43배 밀도가 작음에도 불구하고 1.5배 큰 독성지수로 측정되었으며, 가스유해성시험에서 마우스의 평균행동정지시간에 약4분 차이가 발생되었다. 특히 우레탄은 고무바닥재에 비해 일산화탄소 및 이산화탄소가 더 적게 검출되었음에도 불구하고 맹독성 시안화수소의 검출로 독성지수와 평균행동정지시간에 각각 1.5배와 2배의 산술적 차이가 발생되었으며, 실제 화재상황에서는 피난에 결정적 영향을 미칠 것으로 추측되었다.

내장재료의 연소가스는 매우 다양하여 실험용 마우스의 행동에 복합적인 상승작용을 일으킨다. 본 연구를 시작으로 질식효과를 포함하여 검출되는 화학종이 마우스의 행동정지시간에 어떤 영향을 미치는지에 대한 다양한 각도의 추가연구를 수행하고자 한다.

#### 참고문헌

1. NFPA (1978), The Reconstruction of a Tragedy, the Beverly Hills Supper Club Fire. National Fire Protection Association, Quincy, MA.
2. United Kingdom Fire Statistics (1983), Home Office, London

3. Fire Protection Engineering Handbook(2003), SFPE
4. 국토해양부 고시 제2011-39호, 건축물 마감재료의 난연성능기준
5. KS F 2271:2006, 건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험 방법
6. BS 6853:1999 Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains
7. ISO/TR 9122-3:1993 Toxicity testing of fire effluents-Part 3 : Methods for the analysis of gases and vapours in fire effluents
8. ISO 19702:2006 “Toxicity testing of fire effluents-Analysis of gases and vapours in fire effluents using FTIR technology“