

연소 독성 기반 우레탄 화재의 위험성 평가 연구

김성수 · 조남욱* · 이동호**†

인천대학교 대학원, *한국건설기술연구원 화재안전연구센터, **인천대학교 소방방재연구센터

A Research of Risk Assessment for Urethane Fire Based on Fire Toxicity

Sung-Soo Kim · Nam-Wook Cho* · Dong-Ho Rie**†

Graduate School of Incheon National University

*Fire Research Center, KICT

**Fire Disaster Protection Research Center, Incheon National University

(Received February 2, 2015; Revised April 25, 2015; Accepted April 27, 2015)

요 약

리스크 관리 대상 중 화재는 대형재해임과 동시에 물질·인적 손실을 동반하는 고위험군 항목에 속한다. 따라서 재난 안전관리에서는 실천적 측면에서의 화재예방활동과 발생 가능한 화재위험성 예측, 화재 피해 최소화를 위한 안전관리비용 투자가 요구되며 인적피해 최소화를 위해 가스 유해성 시험(KS F 2271)기반 연소 독성에 대한 위험성 평가를 요구한다. 본 연구에서는 정량적 화재위험성평가 기법의 기초 데이터 확보를 위한 연구로, 두께 5~25 mm의 우레탄 시료를 대상으로 가스 유해성 시험을 실시하였다. 또한 실험동물에 노출되는 연소생성물은 적외선 분광분석기(FT-IR)로 분석하여 ISO 13344의 연소독성지수 Lethal Fractional Effective Dose (L_{FED})를 산출하였다. 또한, L_{FED} 에 기초하여 시료의 Lethal Concentration 50% (LC_{50})을 산정한 결과, 일정치 이상의 화재하중을 가지는 우레탄 시료의 LC_{50} 은 118~129 g/m³임을 확인하였다. 본 연구를 통하여 해당 기법이 우레탄 화재 위험성 분석에 적용 가능함을 확인하였으며, 본 기법의 적용으로부터 유해가스에 의한 인적피해 예측을 기반으로한 건축물 안전 확보 차원의 전략적 투자확대의 자료로 활용 가능케 하였다.

ABSTRACT

Fire in the risk management subject belongs to high risk disaster which accompanies personnel and materiel loss. So, management of disaster and safety is required to include fire prevention activities, fire risk prediction and investment of safety management expense. Combustion toxicity is required by gas toxicity test (KS F 2271), to minimize human damage. In this study, gas toxicity test were experimented with regard to urethane sample (Depth 5~25 mm) to obtain basic data. Fire effluent exposing to experimental animal were analyzed by FT-IR (Fourier transform infrared spectroscopy). Combustion toxicity index Lethal Fractional Effective Dose (L_{FED}) of ISO 13344 was calculated. According to the result of calculating Lethal Concentration 50% (LC_{50}) based on L_{FED} , LC_{50} of urethane sample containing certain level of fire load is confirmed as 118~129 g/m³. Through this study, applicability of this method was confirmed for fire risk assessment. This method can provide information to predict human damage by toxicity combustion gas for securing safety.

Keywords : Fire effluent, Fire toxicity index, L_{FED} , LC_{50} , Bioassay

1. 서 론

위험성 평가는 기업 내외부 환경에 존재하는 취약요인을 정의 및 식별하고, 각 요인에 대한 재해 발생가능성과 영향도를 사전에 분석하여 그 대응방안을 수립하는 일련의 절차이다. 기업재난안전관리의 측면에서의 위험성 평가

도 업무 중단을 야기하는 다양한 위협의 영향에 초점을 맞추어 위협의 영향을 경감시키기 위한 조치가 필수적이다. 재난의 위험도 우선순위는 위협영향도(Threat Impact)와 발생가능성(Probability)을 통하여 계산되는데, 이때 화재는 발생가능성이 낮으나 위협영향도가 극도로 높은 재난으로 분류되어있다⁽¹⁾. 화재는 인적·물질 손실을 동반하

†Corresponding Author, E-Mail: riedh@incheon.ac.kr
TEL: +82-32-835-8293, FAX: +82-32-835-4749

ISSN: 1738-7167
DOI: http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2015.29.2.073

로 일단 발생한 경우, 기업의 비즈니스 연속성(Business Continuity) 회복 문제를 넘어 복구가능성에 대한 검토를 요구할 정도로 피해의 규모가 크기 때문이다. 사업장의 영업연속성 계획수립의 측면에서도 화재는 규모에 따라 “리스크에 대한 허용 불가능의 영역”에 속할 수 있으므로 증축시 고려되어야함은 물론 정기적 점검이 요구되는 항목이다. 건축물의 실내 마감 및 단열을 목적으로 시공되는 내부 마감 재료는 화재시 직접 열과 접촉하여 연소하기 때문에 화재 확산 방지를 위한 난연 성능 확보가 필수적이다. 난연 성능 평가방법으로는 화염전파, 연기발생량과 같은 인자들을 시험하는 기법과 실제 독성을 분석하는 기법이 있으며, 전자는 연소반응에서 생성되는 독성 가스의 구성물은 대부분의 시료에서 동일하다는 이론에 기초한다. 그러나 현대의 건축자재의 특성상 화재성장률과 연소생성물의 발생량 증가로 위험도는 비례적으로 증가되고 있다. 이와 대비되는 독성분석 기법의 가설은 고분자재료에 새로운 연소 생성물이 포함되어 있으며, 경우에 따라서는 이 생성물이 매우 높은 독성을 가질 수 있다는 이론에 기초한다. 이러한 견해는 인(P)계통 난연재료를 함유하고 있는 폴리우레탄폼과 PTFE 등의 물질에서 매우 높은 독성을 갖는 연소생성물이 발생한다는 사실로 뒷받침된다^(2,3). 새로운 연소생성물의 분석은 설치류의 LC₅₀에 기초하여 물질의 독성을 평가하는 연소독성 시험으로 수행된다^(4,5).

화재에서 발생하는 연소생성물중 질식성 가스는 중추신경계에 작용하여 뇌조직 저산소증, 의식상실을 유발한다. 주요 질식성 가스인 일산화탄소(CO)와 시안화수소(HCN)는 산소보다 헤모글로빈과 결합하는 능력이 높은 것이 특징이다. 일산화탄소는 헤모글로빈과 결합하여 카르복시헤모글로빈을 형성하여 신체조직에 공급되는 산소의 양을 감소시킴으로써 질식을 유발시키며, 시안화수소는 일산화탄소보다 헤모글로빈과 더 빠르게 결합하기 때문에 빠른 무력화가 발생된다^(5,6).

본 연구에서는 재난안전관리에 적용 가능한 정량적 화재 위험성 평가 기법의 기초데이터 확보를 위하여, KS F 2271 가스 유해성 시험을 화재모델로 설정하고, 두께별로 차단된 우레탄 시료의 연소생성물을 실험동물에 노출시키는 실험을 실시함과 동시에 ISO 19702에 따른 연소가스의 정량·정성분석을 실시하였다. 연소가스의 정량·정성 분석 결과 데이터를 ISO 13344의 기준에 부합되는 연소독성지수 L_{FED}와 시료의 LC₅₀의 계산에 적용하였다. 본래 Lethal Concentration 50% (LC₅₀)은 대상 물질에 노출된 실험동물의 50%를 사망시키는 농도이나, ISO 13344에 따라 연소 독성지수로부터 도출되는 LC₅₀은 실험동물의 50%를 사망시킬 수 있는 연소생성물이 발생 가능한 연소 이전의 시료 분량을 의미한다. LC₅₀으로 도출된 분량을 초과하여 시공된 경우, 화재발생시 연소생성물에 의한 인적피해 발생 예측의 정량적 지표로 지속적 안전관리평가제도 구축이 가능하다.

2. 실험기법

2.1 가스 유해성 시험 기법(KS F 2271)

한국은 건축법 제43조, 동 시행령 제61조 및 ‘건축물의 피난·방화 등의 기준에 관한 규칙’ 제24조에서 건축물의 내부 마감 재료에 대한 용도 및 규모별 적용 대상을 정하고 있으며, 이러한 분류기준에 따라 내부 마감 재료는 불연, 준불연 및 난연재료로 성능이 확보된 제품을 시공하도록 규정하고 있다.

난연 성능 평가방법은 건축물의 피난·방화 등 기준에 관한 규칙 제5조 및 7조 규정에 따라 제정된 ‘건축물 마감재료의 난연 성능기준’(국토해양부 고시 제 2012-624호)에서 정하고 있으며 국제규격으로서 채택된 콘 칼로리미터방법(KS F ISO 5660-1)과 불연시험방법(KS F ISO 1182) 및 가스 유해성 시험방법(KS F 2271)을 채택하여 그 성능기준을 정하고 있다⁽⁷⁻⁹⁾.

연소 독성 평가의 시험기법은 불연재료, 준불연재료 및 난연재료의 모든 등급시험에 필수 시험으로 적용되는 가스 유해성 시험을 2회 반복 시험으로 진행한다. 시험은 크기가 가로, 세로 각각 220 mm로 시험체의 전면에서 후면으로 관통하는 지름 25 mm의 구멍을 3개 뚫은 것으로, 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/min로 공급한다. 피검 상자의 배출장치에 의한 기체 배출은 가열 중에 한하여 실시되며, 그 배출량은 매분 10 L로 한다. 배기가스의 온도측정은 규정하는 열전대 및 온도계를 이용한다. 가열 시험을 시작할 때 피검 상자 내의 온도는 30°C로 하고, 시험용 마우스(DD계 또는 ICR계, 암컷 5주령, 18~22 g)가 회전 바구니에 들어가 있는 피검 상자 내에 연소가스를 유입시켜 8마리의 평균행동정지시간을 식(1), (2)와 같이 계산한다⁽⁸⁾.

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

x = 평균 행동 정지 시간(min)

\bar{X} = 행동 정지 시간의 평균값(min)

σ = 행동 정지 시간의 표준 편차(min)

이때, \bar{X} 는 8마리 실험용 마우스의 행동 정지시간 평균값(단위: 분)으로 아래의 식(2)와 같이 계산되며, 무력화가 발생하지 않은 경우에는 총 실험 시간과 동일한 15분으로 간주한다.

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8}{8} \quad (2)$$

x = 각 마우스의 행동 정지 시간(min)

식(1)에 따라 측정된 마우스의 평균행동정지시간(x)이 9분 이상인 시료에 대하여 난연성능기준에 적합한 것으로

한다⁽⁸⁾. 본 시험방법은 실험동물의 평균행동정지시간이라는 단순화된 결과를 도출하기 때문에 평가가 용이하나, 어떠한 연소생성물에 대해 행동정지사유를 확인할 수 없는 단점이 있으므로 제품의 난연 성능 보완에 구체적으로 적용될 수 없다. 또한, 행동정지의 원인으로 마취성 가스에 의한 행동불가상태와 유독 요인에 의한 사망 등이 있으며, 이에 대한 정량적 판별이 불가능한 단점이 있다. 그러나 기존의 동물 실험 연구결과를 이용하여 독성을 추정하는 독성 평가와 달리 연소가스가 실제로 동물에 미치는 영향을 확인할 수 있고, 단일 요인에 의한 독성뿐만 아니라 모든 연소생성물에 의한 피해를 종합적으로 확인할 수 있다는 장점을 갖는다.

본 실험에서는 실험대상 시료로 건축 복합 재료(샌드위치 패널)의 심재로 사용되는 일반 우레탄을 선택하였으며, 시료의 두께(화재하중)에 따른 경향성을 분석을 위하여 Table 1의 두께별로 제작, 3회 반복 실험을 실시하였으며, 실험과정은 Figure 1과 같다.

Table 1. Samples

No.	Thickness of samples (mm)	Initial mass (g)	Density (g/m ³)
1	5	10.6	4380.2
2	10	21.4	4421.49
3	15	32.8	4517.9
4	20	43.5	4493.8
5	25	54.2	4479.3

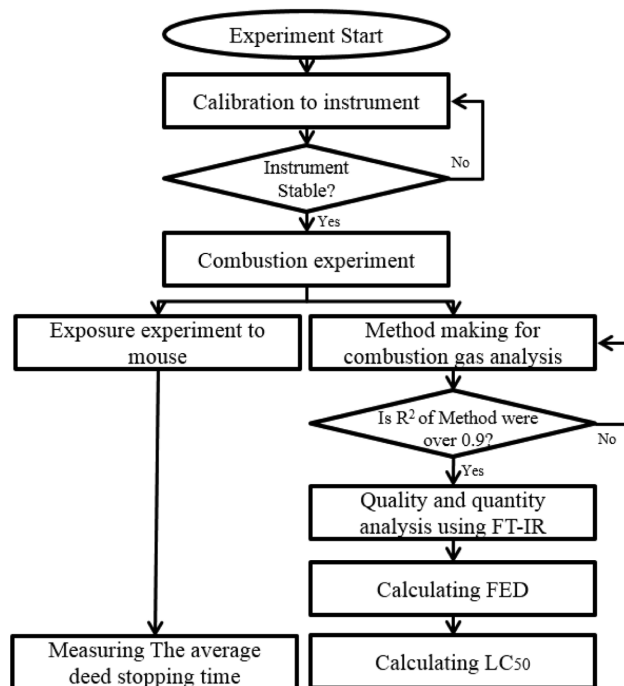


Figure 1. Process of experiment.

2.2 ISO 19702에 기초한 연소가스 분석기법

KS F 2271, 가스 유해성 시험은 실험동물을 대상으로 한 연소 독성 평가시험으로, 매 시험마다 실험동물이 이용되며, 연소 독성의 정량 및 정성분석을 포함하지 않는다. 따라서 실험용 마우스의 행동시간만으로 연소 독성 평가 실험과 병행하여 본 연구에서는 ISO 19702에서 규정하고 있는 FT-IR을 이용한 연소가스의 정성, 정량 분석 기법을 이용하여 가스 유해성 시험기에서 실험동물에 노출되는 연소가스의 분석을 실시간으로 실시하였다. ISO 19702에서는 적외선분광광도계(FT-IR)을 이용하여 일산화탄소, 이산화탄소, 시안화수소, 염화수소, 브롬화수소, 일산화질소, 이산화질소, 불화수소, 이산화황, 아크로레인 등 가스의 농도를 분석하는 방법에 대하여 규정하고 있다⁽¹¹⁻¹³⁾.

적외선 분광법은 적외선에 노출된 물질은 광학이성질체를 제외하고는 대부분의 경우 다른 화합물과 쉽게 구별할 수 있는 독특한 지문을 제공한다는 성질에 기초하는 분석 기법으로 물질의 정성 및 정량분석에 널리 응용되고 있다. FT-IR을 사용한 연소가스 분석은 다양한 가스를 분석할 수 있으며 실시간 정량분석이 가능하다는 장점을 갖는다. 또한 시간함수로 나타내므로 다양한 종류의 화재 생성물을 실시간으로 모니터링 할 수 있다⁽⁹⁾.

실험기기의 구성은 ISO 19702의 규정에 따라 샘플링 라인과 가스셀의 온도를 120°C 설정하여 산성가스 및 기타 물질이 샘플링 시스템이나 FT-IR 가스셀에 흡착되는 것을 방지하였다. 또한 가스셀의 보호를 위하여 5 μm 필터를 사용하였다. 가스 유해성 시험기의 피검 상자(Chamber) 상부에 별도의 샘플링 포트를 마련하였으며, FT-IR까지 샘플링 라인(직경 3 mm, 테프론 재질)의 길이는 3 m, 흡입펌프유량은 3.5 L/min으로 설정하였다.

2.3 LFED 및 LC50 계산

LFED의 계산기법은 ISO TR - 13344에서 제시된 식(3)을 적용하였다.

$$L_{FED} = \sum_{i=1}^n \int_0^t \frac{C_i}{(C \cdot t)_i} dt \tag{3}$$

Table 2. LC50 Values for Rats

Fire effluent gas	30 min LC ₅₀ (ppm)
CO	5,700
HCN	165
HCl	3,800
HBr	3,800
HF	2,900
SO ₂	1,400
NO ₂	175
Acrolein	150
Formaldehyde	750

C_i = 유독화학종*i*의 발생량
 $(C \cdot t)_i$ = 유독화학종*i*의 LC₅₀

ISO TR 13344에 제시된 Table 2의 LC₅₀(반수치사농도 : 30분간 실험동물에 노출 시 대상의 50%가 사망하는 농도)을 분모로, 실제 측정값을 분자로 유효 분율을 계산하므로 L_{FED}가 1을 넘는 연소가스에 노출된 재실자를 사망시킬 수 있는 판단기준이 된다⁽¹⁴⁾.

식(3)으로 도출된 L_{FED}는 식(4)에 대입하여 LC₅₀의 계산에 사용된다. 식(4)는 ISO 13344에 제시된 식으로, 입방미터당 시료의 질량으로 도출된다. 이는 화재가 발생하여 시료가 연소할 때 발생하는 연소생성물의 독성 예측 값으로, 계산된 LC₅₀에 기초하여 시공된 경우 연소생성물의 흡입 독성으로부터 안전을 확보할 수 있음을 의미한다. 본 연구에서는 가스 유해성 시험기의 공기유량 3 L/min과 실험시간 15분을 감안하여 45 L(0.045 m³)의 공기유량을 대입하였다.

$$LC_{50} = \frac{M}{L_{FED} \times V} \quad (4)$$

M = 시료의 연소전 질량(g)
 V = 총 공기 부피(m³)

3. 실험결과

3.1 가스 유해성 실험 결과

연소 챔버에서 연소하여 발생한 가스는 교반 챔버를 거쳐 노출 챔버로 유입된다. 노출 챔버 내부에서는 연소가스에 노출된 실험동물의 행동정지시간을 측정하고 식(1), (2)에 따라 평균행동정지시간을 측정한 실험 3회의 평균값은 Table 3과 같다. 두께가 가장 얇은 시료 1은 8분 23초의 평균행동정지시간을 나타냈으며, 시료의 두께와 평균행동정지시간은 반비례하는 경향을 나타내어, 두께가 가장 두꺼운 시료 5는 3분 22초의 평균행동정지시간을 나타냈다. 또한, 실험전후 시료의 질량 측정을 통하여 도출된 질량 감소는 Table 3에 나타내었다. 시료 2~4는 18~20 g으로 유사한 질량감소를 보였으며, 평균행동정지시간은 시료가

Table 3. Measuring Result of the Average Deed Stopping Time

Sample No.	Mass loss (g)	The average deed stopping time (min : sec)	Standard deviation of the average deed stopping time
1	7.8	8 : 23	0 : 16
2	18.3	6 : 30	0 : 39
3	18.7	5 : 11	0 : 22
4	19.9	3 : 55	0 : 07
5	20.1	3 : 22	0 : 09

Table 4. Calculating Result of L_{FED}

Sample No.	Average of gas concentration			L _{FED}	Standard deviation of LFED
	CO (ppm)	HCN (ppm)	HCl (ppm)		
1	10181	0.01	893	2.12	0.07
2	16427	10.05	1342	3.44	0.005
3	14721	0.02	1668	3.20	0.02
4	14100	0.40	3065	3.61	0.006
5	15917	0.05	1851	3.48	0

Table 5. LC₅₀ of Samples

Sample no.	Thickness of samples (mm)	L _{FED}	Mass loss (g)	LC ₅₀ (g/m ³)
1	5 mm	2.12	7.8	81.76
2	10 mm	3.44	18.3	118.21
3	15 mm	3.20	18.7	129.86
4	20 mm	3.61	19.9	122.50
5	25 mm	3.48	20.1	128.35

두꺼워짐에 따라 짧아지는 경향을 나타냈다.

3.2 연소가스 분석 결과

FT-IR을 이용한 연소가스 정성 · 정량분석의 결과, CO, HCN, HCl이 검출되었으며, 각 화학종의 농도는 Table 4와 같다. 대부분의 시료에서 고농도의 HCl이 검출되었으며, 가장 발생량이 많았던 시료 4는 3065 ppm으로 LC₅₀인 3600 ppm에 근접한 값을 나타냈다. 또한, 정성 · 정량분석 결과에 기초하여 계산된 연소 독성지수 L_{FED}는 10 mm 이상의 두께를 가지는 시료(Sample No. 2~5)에서 3.2~3.6 가량의 L_{FED}를 나타냈으며, Life Safety Code Handbook의 무능화 발생 FED인 0.3과 비치사 FED인 0.8을 초과하는 값으로 나타났다⁽¹⁵⁾.

3.3 시료의 LC₅₀ 측정 결과

L_{FED}와 질량 감소에 기초하여 식(4)에 따라 계산된 시료별 LC₅₀은 Table 5와 같다. LC₅₀이 가장 낮은 시료 1은 81.76 g/m³로 가장 화재 위험성이 높은 것으로 분석되었다. 시료 2~5의 LC₅₀이 118.21~128.35 g/m³로 산출되어, LC₅₀은 재료 자체의 연소특성에 기초함을 확인하였다. 그러나 본 연구를 통하여 도출된 LC₅₀은 실험에 사용된 우레탄 시료에 한정된 값으로 시료의 특성에 따라 달라질 수 있다.

4. 고 찰

ISO 기준에 부합되는 화재 위험성 예측 값인 LC₅₀은 단위체적당 질량으로 도출된다. 본 기법은 연소독성기반 위험성 정량적 평가가 가능함으로써, 사업장 화재 위험성 평

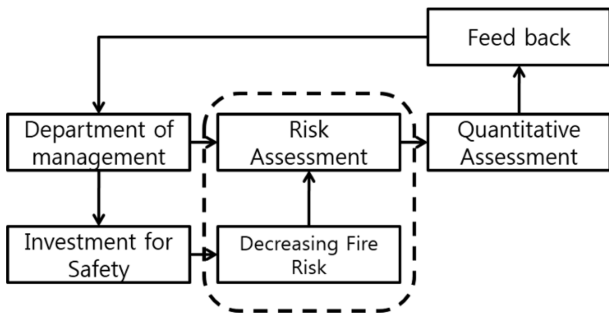


Figure 2. Process of qualitative fire risk assessment.

가시 분석 결과의 신뢰도 향상과 지속적 관리평가제도 구축에 유용하다. 또한, 가연물이 방염·난연 처리되어 화재 위험성이 감소한 경우, 본 연구에서 제시한 실험기법 및 LC_{50} 산출을 통하여 화재 위험성의 저감을 정량적으로 예측·분석할 수 있어 시설 및 건축물 안전관리에 소요되는 투자비용의 산출에 기여할 것으로 사료되며, 과정은 Figure 2와 같다.

본 연구의 성과로부터 화재시 건축주 및 시설물의 주체는 대피자의 안전 확보를 위한 선택적 투자가 가능하도록 건축 재료별 정량적 평가지표 database를 구축함으로써, 해당 database는 화재시 재실자의 대피 안전도 정량분석의 자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결 론

ISO 13344에 따라 우레탄 시료의 LC_{50} 을 도출하기 위하여, KS F 2271에 따른 가스 유해성 시험을 통하여 연소가스에 노출된 실험동물의 평균행동정지시간을 측정함과 동시에 FT-IR을 이용하여 연소가스를 정성, 정량 분석으로 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 연소생성물의 유해성 판단 척도인 연소 독성지수 L_{FED} 는 시료 1에서 2.12, 시료 2~5는 3.20~3.61로 분석되어, 가스 유해성 시험에서 일정두께 이상인 우레탄 시료는 연소량에 큰 차이가 없기 때문에 L_{FED} 가 유사함을 확인하였다.
2. 우레탄 시료의 LC_{50} 은 10 mm 이상의 두께를 가지는 시료는 118.21~128.35 g/m^3 의 근사한 값을 보였다. 이는 재료의 연소특성에 기초한 LC_{50} 의 특성에서 기인하는 것으로 사료된다.
3. 우레탄 시료의 연소생성물 정성·정량분석 결과에 기초하여 ISO 13344에 부합되는 시료의 화재 위험성 예측 값인 LC_{50} 의 산정을 통하여, 해당 기법의 화재 위험성 평가에 적용 가능성을 확인하였다.
4. 생체 유해성의 지표인 평균행동정지시간은 시료의 두께와 반비례하여 짧아지는 것으로 나타나 연소독성지수와 의 상관관계를 완전히 설명할 수 없었다. 이에 본 실험기법에서 평가항목에 포함되지 않은 연소속도 및 FT-IR로 분석이 불가능한 요소에 대한 분석이 필요함을 확인하였다.

5. 연소독성지수 기반 화재 위험성 평가를 위하여, 다양한 가연물을 대상으로한 연소독성지수 데이터베이스의 구축이 요구되며, 해당 기법의 적용을 통하여 사업장 화재 위험성 평가의 분석 결과 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국민안전처 “2014년도 기업 재난관리 특성화 대학원 지원 사업”에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다.

References

1. Cauberghe Verolien, “Fear, Threat and Efficacy in Threat Appeals: Message Involvement as a Key Mediator to Message Acceptance”, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 41, No. 2, pp. 276-285 (2008).
2. J. H. Petajan and K. L. Voorhees, “Extreme Toxicity from Combustion Products of a Fire-retarded Polyurethane Foam”, *Science*, Vol. 187, No. 4178, pp. 742-744 (1975).
3. B. C. Levin and A. J. Fowell, “Further Development of a Test Method for the Assessment of the Acute Inhalation Toxicity of Combustion Products”, *Technical Report*, NBSIR 82-2532, National Bureau of Standards, Washington, DC (1982).
4. C. J. Hilado “Relative Toxicity of Pyrolysis Products from Upholstery Fabrics: Effects of Fabric Variables and Test Conditions”, *The Journal of Combustion Toxicology*, Vol. 4, No. 3, pp. 393-414 (1977).
5. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd edition*, NFPA (2002).
6. D. A. Purser, “The Incapacitating Effects of Exposure to the Thermal Decomposition Products of Polyurethane Foams”, *Fire and Materials*, Vol. 8, Issue 1, March, pp. 10-16 (1984).
7. Republic of Korea, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Act 2012-624, *Fire Retardant Performance Standard of Interior Finishes* (2011).
8. KS F 2271: Testing method for incombustibility of internal finish material and element of buildings.
9. 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).
10. KS F ISO 1182: Reaction to fire tests for products -- Non-combustibility test.
11. ISO 19702: 2006 “Toxicity testing of fire effluents - guidance for analysis of gases and vapours in fire effluents using FT-IR gas analysis”.
12. D. A. Purser, “Bioassay Model for Testing the Incapacitating Effects of Exposure to Combustion Product Atmo-

- spheres Using Cynomolgus Monkeys”, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 24, No. 1, pp. 20-36 (1984).
13. U. C. Luft, *Handbook of Physiology*, American Physiology Society, Washington, DC (1965).
 14. ISO 13344: 2004 “Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents”.
 15. Life Safety Code Handbook.
 16. R. Cote, “Life Safety Code Handbook”, NFPA.
 17. S. S. Kim “A Research of Grain Size Analysis of Particulate Matter in Fire Effluent”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 1-5 (2014).