

## FT-IR과 FED를 이용한 건축 재료의 연소독성평가에 관한 연구 A Research for Assessment Fire Toxic Gas of Construction Material Using FT-IR and FED

김성수 · 조남욱\* · 이동호\*\*†

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

인천대학교 대학원, \*건설기술연구원, \*\*인천대학교 소방방재연구원  
(2011. 5. 27. 접수/2011. 10. 26. 수정/2011. 12. 9. 채택)

### 요 약

본 연구에서는 건축물 내장 재료에 대한 연소독성평가와 독성지수연구로써 FT-IR을 이용한 연소가스분석실험을 하였다. 독성지수를 산정하기 위한 실험의 화재모델로 콘 칼로리미터 화재모델(KS F ISO/TR 9122-4)을 사용하였으며 ISO 19702의 절차에 따라 FT-IR을 이용하여 건축 재료의 연소로부터 발생하는 가스의 분석을 수행하였다. 국제규격에서 제시하고 있는 몇 가지 독성지수 산정법 중 ISO 13344에서 규정하는 방법에 따라 FED 값을 산정하였으며, 30분간 시험동물에 노출 시 대상의 50%가 사망하는 농도인 LC<sub>50</sub>을 기준으로 하여 3가지 재료의 독성지수화를 통해 상대적인 독성 위험도를 평가하였다. 그 결과로 0.025~0.285의 FED가 산출되었으며 우레탄에서는 HCN이 검출되었다.

### ABSTRACT

In this study, combustion toxicity evaluation for building interior materials and study for toxicity as using FT-IR analysis. this experiment for the calculation of toxicity index, it using a cone calorimeter model in KS F ISO/TR 9122-4 as a fire model. It is following ISO 19702 procedure for assessing fire toxic gas using FT-IR. This experiment used calculation method for toxicity index (FED) among the international standards. LC<sub>50</sub> is a concentration that it can cause death to 50 % of experimental animal in 30 minutes - exposure gas test. comparison with the three kinds of toxicity fire gas of construction materials using toxicity index.

**Key words** : Toxicity, FT-IR, Assessment, Fire gas, FED

### 1. 서 론

최근 건축물은 고층화, 대형화되고 있어 화재시 제실자의 피난에 더 많은 시간이 소요된다. 화재 발생시 초동에 대피가 불가능한 대피자는 고온의 연소가스에 노출된 상태로 대피하게 되는데, 가시도 저하로 인하여 이동속도가 감소하고 대피시간이 연장됨에 따라 독성가스에 의한 피해를 받기 쉽다. 따라서 건축자재는 불연성시험, 연기밀도시험, 독성시험등 각종 화재시험이 요구되며, 연소가스의 독성을 평가하기위한 연기독성시험도 실시된다. 본 연구에서는 KS F ISO/TR 9122-4에 제시된 화재모델 중 콘 칼로리미터 법을 선택하여

연소실험을 하고 연소가스분석은 ISO 19702에서 제시된 적외선분광분석(FT-IR)을 이용하여 연소가스를 분석하였다. 적외선 분광분석이란 적외선에 노출된 각각의 화학종이 고유의 진동을 일으켜 적외선 흡수로 나타나며 흡광도 또한 화학종의 양에 따라 달라지는 특성을 이용하여 정량분석도 가능한 분석기법이다.

ISO 13344에서는 연소가스의 발생농도 데이터를 이용하여 FED(Fractional Effective Dose)를 산출하는 방법을 제시하고 있으므로, FT-IR을 이용하여 연소가스를 분석하고 그 데이터로 FED를 계산하고자 한다. FED란 독성물이 무력화를 유발하는데 필요한 노출량으로 유해가스 내에서 독성에 효과를 나타내는 여러 요소를 한 번에 계산하여 지수화하기 때문에 위험도를 예측하고 확인, 비교하는데 유리하다.<sup>4)</sup>

† E-mail: riedh@incheon.ac.kr

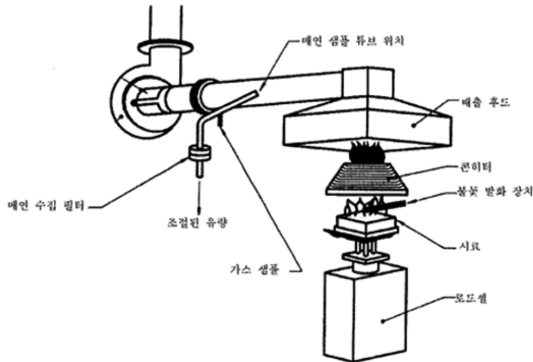


Figure 1. Cone calorimeter model.

## 2. 연소 가스의 독성 측정 실험

### 2.1 화재 모델 - 콘 칼로리미터

화재모델은 일반적인 화재 단계를 재현하기 위하여 정의된 조건에서 시험편을 연소시키는 방법으로 연소 실험의 중요 요소 중 하나이다. KS F ISO/TR 9122-4 “화재 생성물의 독성시험 - 화재모델”에서 화재생성물의 독성연구에 사용되는 여러가지의 화재 모델(시험실 연소 장치)을 제시하고 있는데 이 중에서 콘 칼로리미터 모델은 Figure 1과 같은 구조를 가진다.

Conical Heater로 시료를 가열한 후 전기스파크에 의하여 점화시키는 화재모델로 본 연구에서는 연소하는 시료가 공기에 노출되어있어 공기유량이 높다는 특징을 가지고 있는 콘 칼로리미터 모델을 채택하여 실험하였다.<sup>1)</sup>

### 2.2 FT-IR을 활용한 연소가스 분석

FT-IR을 사용한 연소가스 분석의 장점은 다양한 가스를 분석할 수 있으며 실시간 정량분석이 가능한 것이다. 그리고 시간함수로 표현되는 결과를 가지기 때문에 다양한 종류의 화재 생성물을 연속적으로 모니터링 할 수 있고 분석을 실시한 이후에도 저장된 스펙트럼데이터로부터 새로운 정량 Method를 설정함으로써 재분석이 가능하다.<sup>2)</sup>

본 실험에서의 실험장비는 ISO 19702에 따라 샘플링 라인과 가스셀의 온도를 150 °C로 설정하여 산성가스 및 기타 물질이 샘플링 시스템이나 가스셀에 흡착되는 것을 방지하였다. 가스셀은 필터로 보호하였는데 그을음과 산성기체를 걸러내는 것을 목적으로 5 μm 필터를 사용하였다. 샘플링 라인의 길이는 3 m, 흡입펌프 유량은 3.5 l/min로 하였다.

### 2.3 분석절차 및 FED 계산

가연물의 연소가스를 샘플링하여 FT-IR로 분석하는 방법은 Figure 2와 같다. 실험은 가로, 세로가 각각 100 mm로 제작된 시료를 준비하고 Conical Heater의 예열과 기기의 Calibration을 수행한 후 Igniter를 이용하여 점화시켜 실험을 진행함과 동시에 FT-IR로 발생 가스의 분석을 실시하고 실험시간인 30분간의 발생 가스 데이터를 수집하였다.

실험대상은 OSB 합판, 카페트, 우레탄으로 선택하였으며 OSB 합판은 기본이 되는 목재시료로 선택하였다. 카페트는 섬유재질이며 공기와의 접촉면적이 넓은 재료의 연소특성을 관찰하기 위하여 선택하였고, 우레탄은 고분자물질의 연소특성을 관찰하기 위하여 선택하였다.

FED의 계산은 ISO TR - 13344에서 제시되었고 계산방법은 식(1)과 같다.

$$FED = \frac{[CO]}{LC_{50,CO}} + \frac{[HCN]}{LC_{50,HCN}} + \frac{[HCl]}{LC_{50,HCl}} + \frac{[C_i]}{LC_{50,i}} \quad (1)$$

- [CO] = CO의 분당 평균 농도(ppm-min)
- [HCN] = HCN의 분당 평균 농도(ppm-min)
- [HCl] = HCl의 분당 평균 농도(ppm-min)
- [C<sub>i</sub>] = 임의의 물질 i의 분당 평균 농도 (ppm-min)
- LC<sub>50,CO</sub> = CO의 LC<sub>50</sub>
- LC<sub>50,HCN</sub> = HCN의 LC<sub>50</sub>
- LC<sub>50,HCl</sub> = HCl의 LC<sub>50</sub>
- LC<sub>50,i</sub> = 임의의 물질 i의 LC<sub>50</sub>

식(1)은 LC<sub>50</sub>(반수치사농도: 30분간 시험동물에 노출 시 대상의 50%가 사망하는 농도)을 분모로, 실제 측

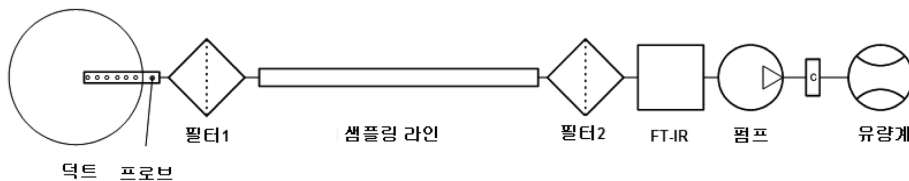


Figure 2. Schematic of experiment.

정값을 분자로 유효분율을 계산하므로 계산된 FED의 값이 1을 넘는 가연물은 그 연소가스에 노출된 재실자를 사망시킬 수 있는 것으로 간주한다. 식(1)을 살펴보면 기체별 위험도뿐만 아니라 각 위험도의 합이 1을 넘어도 위험한 것으로 간주하는데 이는 기체별 위험도와 전체 기체의 위험도를 함께 고려하기 위함이다. 또한 Ci는 임의의 물질을 추가하여 계산할 때 이용되는 항목으로 식(1)에 제시된 주요 가스 외에 다른 가스 검출시 대입하여 이용할 수 있다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 연소가스 분석결과

FT-IR을 이용하여 수집된 스펙트럼으로부터 정성·정량 분석을 수행하였다. 스펙트럼의 X축은 흡수가 일어나는 파장범위를 보여주며, Y축은 흡광도를 나타낸

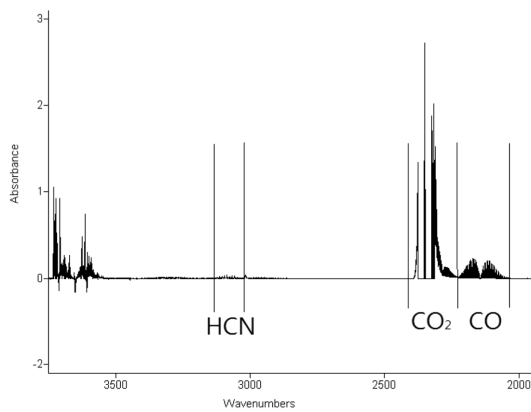


Figure 3. CO, CO<sub>2</sub>, HCN in spectrum.

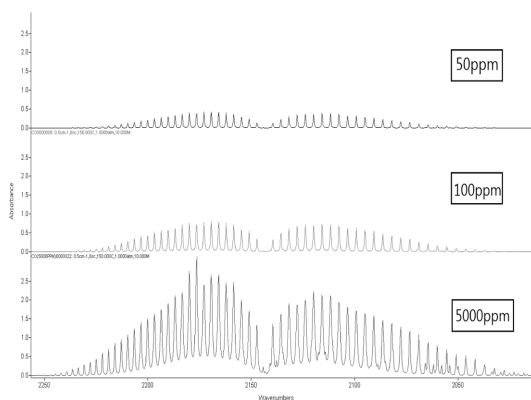


Figure 4. 3 different concentration CO spectrum.

다. Figure 3은 연소가스 스펙트럼에서 CO, CO<sub>2</sub>, HCN의 스펙트럼이 나타나는 위치 중에서 대표적인 부분을 보여준다. 이와 같이 각 가스의 특정 스펙트럼이 나타나는 위치를 확인하고 동일위치에 Peak가 나타나는가를 확인함으로써 정성분석을 실시하였다. 그러나 Figure 3에 표시된 것과 같이 지정된 위치에서만 특정 Peak가 나타나는 것이 아니기 때문에 Figure 2에 표시된 범위 외에 위치한 특정 스펙트럼을 확인할 필요가 있다.

Figure 4는 50 ppm, 100 ppm, 5000 ppm의 CO 스펙트럼으로 동일기체도 농도에 따라 흡광도가 달라짐을 보여준다. 이 흡광도는 농도와 비례하는 성질이 있어 이를 이용하면 동일 기체는 스펙트럼의 흡광도를 비교하여 정량하는 것이 가능하다. 본 실험에서도 이 성질을 이용하여 정량분석을 수행하였다.

2장의 실험기준과 방법에 따라 3종의 시료를 이용한

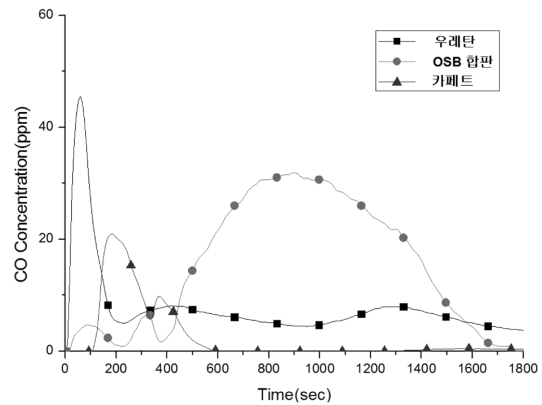


Figure 5. Time-CO graph.

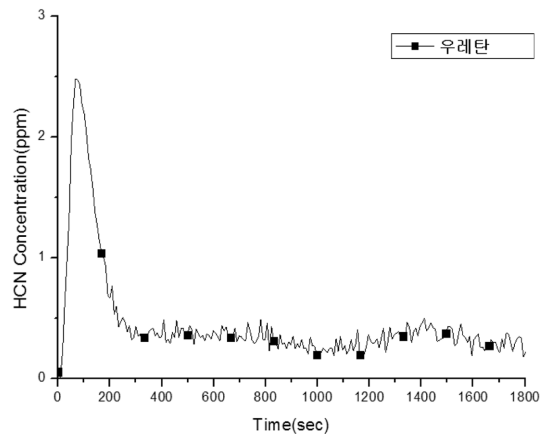


Figure 6. Time-HCN graph.

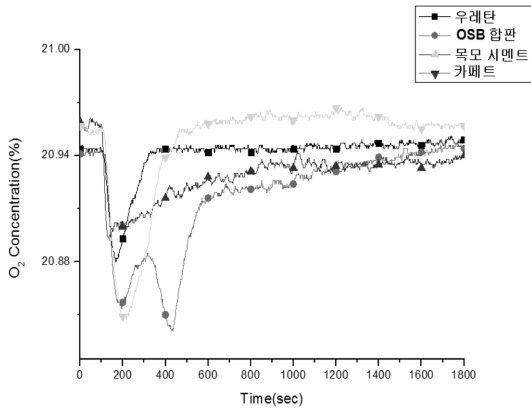


Figure 7. Time-O<sub>2</sub> graph.

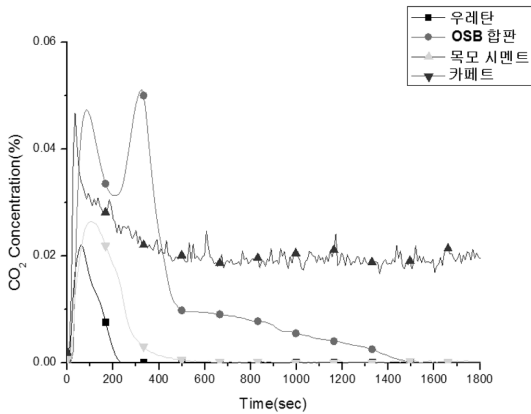


Figure 8. Time-CO<sub>2</sub> graph.

연소실험은 규정에 따라 실시하였고 FT-IR을 이용하여 분석된 결과는 수집하여 위의 방법으로 정성·정량 분석하여 발생량을 구하였다. 각 시료별 1회차 실험의 CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HCN 발생량을 시간-농도 그래프로 나타내면 Figure 5~8과 같다. Figure 5는 시간-CO 농도 그래프로 OSB합판의 경우 불완전 연소가 이루어지는 실험 중·후반에 그 농도가 높아짐을 보여준다. Figure 6는 시간 HCN의 농도 그래프로 HCN은 우레탄에서만 발생하였다. Figure 7은 시간-O<sub>2</sub> 농도 그래프로 20.9~21%를 유지하던 산소농도는 연소가 진행됨에 따라 감소하지만 산소유량이 높은 콘 칼로리미터 모델의 특징에 따라 곧 회복된다. 또한 Figure 8은 시간-CO<sub>2</sub> 농도 그래프를 보여준다.

3.2 FED 계산

FED를 계산하기 위해서는 실험결과 데이터와 LC<sub>50</sub> (Lethal Concentration 50)값이 필요하다. LC<sub>50</sub>은 특정가

Table 1. LC<sub>50</sub> of Fire Gas

| Fire Effluent Gas | 30 min LC <sub>50</sub> (ppm) |
|-------------------|-------------------------------|
| CO                | 5,700                         |
| HCN               | 165                           |
| HCl               | 3,800                         |
| HBr               | 3,800                         |
| HF                | 2,900                         |
| SO <sub>2</sub>   | 1,400                         |
| NO <sub>2</sub>   | 170                           |

Table 2. Calculated FED

| 시료명                    | 회차 | 시료두께 (mm) | 분당 평균 발생량 |      | 회차별 FED | FED 평균 |
|------------------------|----|-----------|-----------|------|---------|--------|
|                        |    |           | CO        | HCN  |         |        |
| 우레탄                    | 1  | 50        | 470.1     | 27.5 | 0.249   | 0.285  |
|                        | 2  |           | 237.8     | 18.3 | 0.152   |        |
|                        | 3  |           | 634.6     | 56.4 | 0.453   |        |
| OSB 합판                 | 1  | 25        | 915.1     | N.D  | 0.160   | 0.179  |
|                        | 2  |           | 1076.0    | N.D  | 0.188   |        |
|                        | 3  |           | 1080.7    | N.D  | 0.189   |        |
| 카펫                     | 1  | 7.5       | 151.0     | N.D  | 0.026   | 0.025  |
|                        | 2  |           | 138.7     | N.D  | 0.024   |        |
|                        | 3  |           | 145.7     | N.D  | 0.025   |        |
| LC <sub>50</sub> (ppm) |    |           | 5700      | 165  |         |        |

N.D. = NO DETECTION.

스에 노출시킨 한 무리의 실험동물중 50%가 사망하는 공기중의 가스농도를 의미한다. 이  $LC_{50}$ 의 값은 ISO 13344에 제시되어있으며 그 값은 Table 1과 같다.

식(1)에  $LC_{50}$ 과 연소가스 발생량을 대입하여 FED를 산출하였으며 이 과정은 3회 반복 실험으로 각각의 FED를 구하고 그 평균값을 계산하였다.<sup>3)</sup>

이 시료별 연소생성기체를 분석한 결과를 이용하여 FED를 계산하기 위해 그 발생량의 분당 평균을 계산할 필요가 있다. 3.1에서 제시된 시간-농도그래프를 적분하여 30 분간의 총 발생량을 구하고 30(분)으로 나누어 분당 평균 농도를 구하였다. 계산된 평균값을 식(1)에 대입하여 도출된 FED는 Table 2와 같다.

카페트와 OSB합판에서는 CO의 발생만이 확인되었으나 우레탄에서는 CO와 함께 HCN의 발생이 확인되었다. CO는 목재인 OSB 합판에서 가장 많이 발생하였고 카페트에서 적게 발생하였다. 이는 카페트가 다른 시료에 비해 두께가 얇기 때문에 화재하중이 작아 연소가스가 적게 발생한 것이 원인으로 분석되었다.

우레탄은 CO 발생량은 OSB합판의 50%에도 미치지 못하였으나 HCN이 발생하여 가장 높은 FED값을 나타냈다.

### 3.3 FED를 통한 위험도 판정 기준

NFPA의 Life Safety Code Handbook은 거의 모든 재실자를 생존시킬 수 있는 FED값을 “비치사 FED”라 하며 0.8로 제시하고 있다. 그러나 CO, HCN과 같은 마취성 가스는 치사농도의 1/3~1/2에서도 무능화를 발생시킬 수 있다는 연구결과가 제시되었다. 비치사 FED에 노출되면 즉시 사망하지는 않으나 의식상실로 인해 자력으로 대피하는 것이 불가능해져 사망할 가능성이 높아진다는 것이다. 재실자가 자력으로 대피할 수 있는 “무능화 발생 FED”가 0.3으로 제시되는데 이를 통하여 본 연구에서 계산된 FED를 분석하면 0.285인 우레탄의 경우 무능화 발생 FED에 근접함을 알 수 있다.

## 4. 결 론

KS F ISO/TR 9122-4에 따른 콘칼로리미터 화재모델, ISO 19702에 따른 FT-IR 연소가스 분석, ISO 13344에 따른 FED계산을 결합하여 3종의 시료를 연소실험하고 FED를 구한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

1. 우레탄, OSB합판, 카페트를 동일한 조건하에서 연소시켜 발생기체를 분석한 결과, 우레탄의 FED는 0.285, OSB합판은 0.179, 카페트는 0.025의 값을 나타냈다.

2. HCN은  $LC_{50}$ 이 165 ppm으로 5700 ppm인 CO에 비하여 1/35의 발생량으로도 동일한 위험도를 나타냈으며 우레탄의 CO발생량은 OSB합판의 50% 정도이나 HCN의 발생에 기인하여 FED는 1.6배 높은 값을 나타냈다.

3. 본 실험결과 FT-IR은 연소가스의 분석에 유효하게 활용될 수 있음이 확인됨으로써 독성지수 산정에 효과적으로 이용될 수 있으며, 다양한 소재의 FED Database 구축 및 ISO 13344, NES 713, BS 6853, NFPA 269 등 독성지수 산정방법에 대한 추가연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. KS F ISO/TR 9122 - 4 : 2004 “화재 생성물의 독성 시험 - 제4부 : 화재모델(소규모 시험에 사용되는 연소 시험 장치)”.
2. ISO 19702 : 2006 “Toxicity Testing of Fire Effluents - Guidance for Analysis of Gases and Vapours in Fire Effluents Using FT-IR Gas Analysis”.
3. ISO 13344 : 2004 “Estimation of the Lethal Toxic Potency of Fire Effluents”.
4. G.E. Hartzell, D.N. Priest, and W.G. Switzer, “The Fractional Effective Dose Model for Assessment of Toxic Hazards in Fires”, Journal of Fire Science, pp.356-362(1988).