

[Research Paper]

## 건축용 합성 단열재의 연소특성에 관한 연구

권현석 · 이시영\* · 김종복\* · 윤명오†

서울시립대학교 대학원, \*강원대학교 방재전문대학원

### A Study on the Combustion Characteristics of Synthetic Insulation for Building

Hyun-Seok Kwon · Si-Young Lee\* · Jong-Buk Kim\* · Myoung-Oh Yoon†

Disaster Science, Graduate School, University of Seoul,

\*The Professional Graduate School of Disaster Prevention Technology, Kangwon National Univ.

(Received February 20, 2018; Revised March 20, 2018; Accepted March 27, 2018)

#### 요 약

본 연구는 주택이나 창고 등의 건축용 합성 단열재의 연소특성을 분석한 것으로 콘칼로리미터 및 SEM을 활용하여 난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우레탄, 석고보드 등 4종의 재료별 연소특성을 실험 및 분석하였다. 시험결과 각 재료별 착화특성으로는 상기 단열재에 대한 착화시간(TTI)은 27 s~43 s로 나타났으며, 이중 난연 스티로폼은 TTI이 가장 낮은 27 s에 착화되었다가 28 s에 소멸됨을 보였다. 또한 각 재료들의 최대열방출율(peak HRR)과 평균열방출율(mean HRR)의 크기는 우레탄>석고보드>난연 스티로폼>일반 스티로폼 순으로 나타났으며, 총열방출량(Total Heat Release Rate, THR)은 우레탄>난연 스티로폼>일반 스티로폼>석고보드 순으로 나타났다. 또한 총연기방출량(Total smoke release,  $m^2/m^2$ )은 난연 스티로폼에서 가장 많은  $30.798 m^2/m^2$ 을 보였다. 일반 스티로폼의 CO 방출농도는  $0.275 kg/kg$ , CO<sub>2</sub> 방출농도는  $12.807 kg/kg$ 이 나타났다. 잔유물은 위 4가지 재료 중 석고보드에서 가장 많은  $0.029 g$ 을 보였다.

#### ABSTRACT

This study is an analysis of combustion characteristics of synthetic insulation materials such as houses and warehouses. Using combustion cone calorimeter and SEM, the researching has experimented combustion characteristics of four kinds of materials such as flame retardant styrofoam, general styrofoam, urethane and gypsum board. And analyzed. As a result of the test, the ignition time (TTI) for the thermal insulation material was found at 27 s~43 s, and the flame retardant styrofoam was ignited at the lowest TTI at 27 s and disappears at 28 s. In addition, the maximum heat release rate (peak HRR) and average heat release rate (mean HRR) of each material were expressed in the following order: urethane> flame retardant styrofoam> styrofoam> gypsum board. Also, the total smoke release ( $m^2/m^2$ ) was the largest at  $30.798 m^2/m^2$  in flame-retardant styrofoam. The general CO concentration of styrofoam was  $0.275 kg/kg$  and the emission concentration was  $12.807 kg/kg$ . The residues showed the highest  $0.029 g$  in the gypsum board among the above materials.

**Keywords :** FT-IR, Cone calorimeter, Synthetic insulation materials, Combustion characteristics

#### 1. 서 론

건축물을 짓기 위한 다양한 건축 재료는 우리 인류 문명과 함께 발전되어 왔다. 최근 건축 자재업체에서 값이 저렴하고 우수한 단열효과, 빠른 시일 내에 생산할 수 있는 합성 단열재가 많이 사용되고 있다. 합성 단열재의 특성으로는 단열성능이 좋아야 하나 역학적인 강도는 약하기 때문

에 일반적으로 건축물의 내력벽 등 보조적인 복합체로 사용되고 있다. 단열재는 일반적으로 공기층이 형성되어 있어 흡습과 흡수를 하는데 수월한 특성을 갖고 있다. 공사현장에서 운반, 가공 및 설치가 용이한 반면에 화학적으로 약하고 쉽게 침식될 수 있는 단점이 있다. 단열재는 공기층에 물이 흡수되면 공기의 열전도율 값이 물의 열전도율 값으로 바뀌어 단열효과가 현저히 떨어지는 특성이 있다. 즉 구

† Corresponding Author, E-Mail: [yoonsoo@uos.ac.kr](mailto:yoonsoo@uos.ac.kr), TEL: +82-2-6490-5376, FAX: +82-2-6490-5380

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

**Table 1.** Thickness, Weight and Density of the Specimens

Samples	Retardants Styrofoam	Styrofoam	Urethane	Gypsum Board
Thickness [mm]	50	50	50	10
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	0.12	0.023	0.037	2.3
Weight [g]	60.20	63.86	97.01	55.04

소재료로써 강도나 탄성계수가 적고 내화, 내열성이 약하며 또한 열에 의한 변형신축이 크다<sup>(1)</sup>. 일반적으로 단열재는 대부분 석유화학 제품으로 작은 불씨(불꽃)라도 접촉하면 빠른 시간에 쉽게 고열의 연소, 확산이 되어 소중한 인명과 막대한 재산피해가 발생하는 요인이 된다. 또한 연소가 끝날 때까지 매우 높은 연소에너지 값을 가지므로 이들 단열재에서 방출되는 연소에너지로 인한 화재를 진화하는데 어려움이 크다. 국민안전처 e-보고서 화재현황 통계(2017)의 발화 요인에 대한 최초 착화물별 화재건수를 살펴보면 인간의 부주의(종이, 목재, 건조) 1,064건, 쓰레기류 501건, 전기·전자 445건, 합성수지로 148건으로 보고되었다. 2017년 12월 21일 충북 제천 스포츠 센터에서 발생한 화재로 29명이 사망한 드라이비트공법인 스티로폼 등의 가연성 소재로 시공한 사례나 2017년 6월 14일 100여명이 사망한 영국 런던 그린펠타워 아파트 화재는 알루미늄 패널과 가연성 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 성분이 포함된 단열재 시공법으로 한 번의 화재로 많은 희생을 부추길 수는 합성 단열재로 지금도 계속해서 시공되고 있다. 본 실험에서 연구한 합성 단열재는 널리 건축현장에서 쓰이고 있는 일반 스티로폼으로 이는 일명 폴리스티렌(poly styrene, PS)이라는 수지로 PS를 발포제인 프레온으로 스펀지 입자화하고 가열 압축해 단단하게 만든 것으로 상자, 포장 재료, 단열재, 바닥재 등으로 이용된다<sup>(2)</sup>. 난연 스티로폼은 난연제와 흑연을 함침하여 위의 제조방법은 같은 방법으로 생산한다. 우레탄(Urethane)은 카르바민산에스테르(-酸) (英 Carbamic acid ester, 獨 Carbaminsäureester) 카르바민산 H<sub>2</sub>NCOOH와 알코올류 또는 페놀류에서 생기는 에스테르를 말한다. 카르바민산은 유리산으로는 실재하지 않으며 에스테르로서의 우레탄은 안정된 화합물로 존재한다. 좁은 의미에서는 특히 카르바민산의 에틸에스테르인 것을 우레탄이라고 한다. 백색의 결정체. 암모니아와 함께 가열하면 요소와 알코올로 분리되고 알칼리를 작용시키면 알코올, 이산화탄소 및 암모니아로 분해된다<sup>(3)</sup>. 석고보드는 소석고를 주원료로 하여 톱밥·섬유·필라이트 등을 혼합하고, 경우에 따라서는 발포제(發泡劑)를 첨가하고 물로 반죽하여 두 장의 시트 사이에 부어서 판상(板狀)으로 굳힌 것을 가리킨다<sup>(4,5)</sup>. 본 연구는 실제 화재 시 발생하는 연소열에 의한 건축용 합성 단열재인 난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우레탄 및 석고보드 4종의 연소실험을 통한 각 단열재의 연소특성을 고찰하여 주택이나 공장, 창고 건축재료 개발 시 화재에 강한 재료를 개발하는데 기초자료로 제시하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험대상 및 내용

이번 연구에 사용된 재료는 경기도 양주 택지지구 개발로 인해 철거된 주민의 주택과 창고의 재료로 연구의 실제적 현실성을 주고자 기온, 습도 등 조건들을 고려하지 않았다. 합성 단열재인 난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우레탄, 석고보드 자체만의 연소가스 분석을 고찰하기 위해 기타 가공 과정은 배제하였다. 콘칼로리미터를 활용해 각각의 주택이나 공장, 창고 등 실내 건축 재료인 합성 단열재인 난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우레탄, 석고보드 등 4종에 대하여 연소가스 분석을 실시하였다. 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM)은 상기 4종의 연소 후 물리적 특성을 고찰하였다. Table 1에 실험에 쓰인 재료를 제시하였다.

### 2.2 시편 제작 및 분석방법

단열재의 연소특성 실험은 국내 건축법 시행령에서 정의하고 있는 준불연재료, 난연재료를 평가<sup>(6)</sup>할 수 있는 콘칼로리미터(Cone Calorimeter) 시험기를 활용하여 발열량 특성, 착화 특성, 탄소 배출량 특성 등을 분석하였다. 합성 단열재류인 난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우레탄, 석고보드 등 4종을 선택하여 콘칼로리미터 시험방법 KS F ISO 5660-1 기준<sup>(7)</sup>으로 크기는 가로, 세로 각각 100±1 (mm) 정사각형으로 만들고 두께는 난연 스티로폼, 일반 스티로폼 및 우레탄은 동일하게 하고 석고보드만은 비 동일하게 시편을 제작하였다. 각 재료별 기초 사항인 두께와 무게는 Table 1에 나타내었다. 본 연구에 사용된 장비는 콘칼로리미터 Dual Cone 2000/Fire testing technology와 FTIR Midac, US/14001, SEM/HITACHI S-3500N로 상기 재료들을 물리·화학적으로 3반복 실험을 통해 정리하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 일반적인 연소특성

콘칼로리미터 복사열 50 kW/m<sup>2</sup>로 재료가 착화 후 완전히 꺼진 약 180 s가량을 연소시킨 결과를 관찰한 것으로서 먼저, Figure 1에서 보듯이 난연 스티로폼과 우레탄은 고열에 의한 연소로 외형이 거의 탄화가 되어 검은색의 결정과 푸석푸석한 결정으로 변했으며, 일반 스티로폼은 폴리스티렌 합성수지로 갈색의 결정이 마치 엷이 녹아 여러

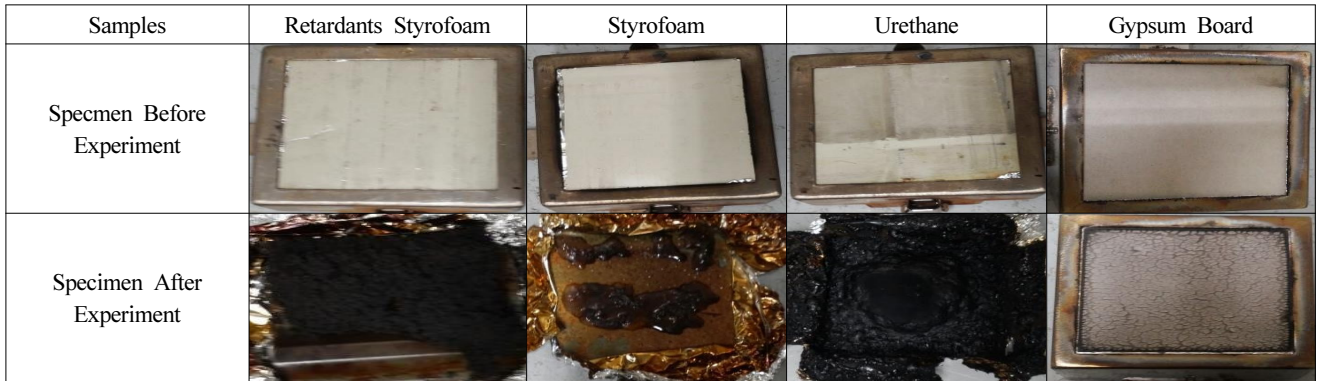


Figure 1. Experiment photograph of cone calorimeter experiment.

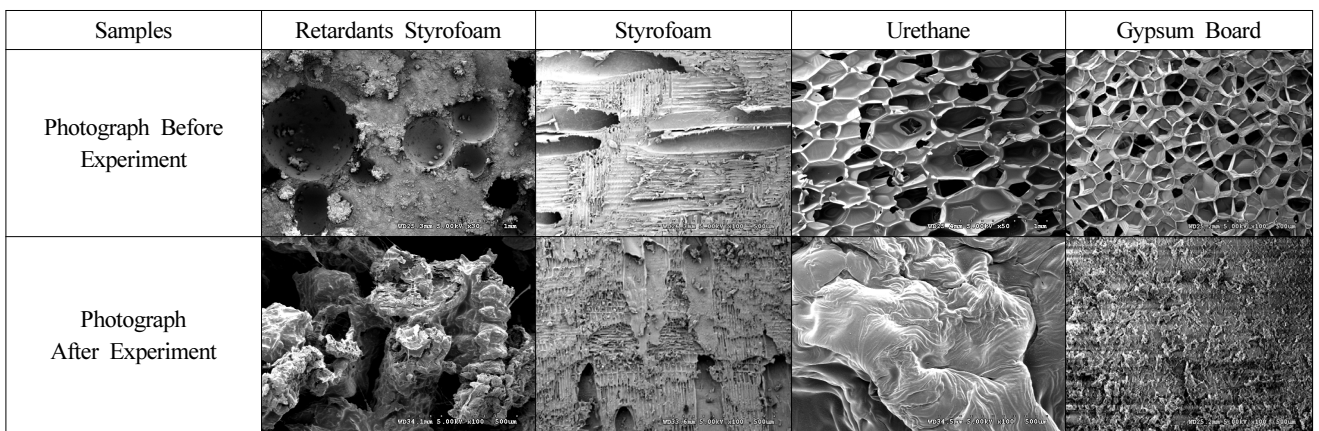


Figure 2. Structure photograph of retardants styrofoam, styrofoam, urethane and gypsum board.

개의 갈색의 결정체가 묻쳐있는 형태(갈색)로 변했는데, 이는 스타이렌의 중합체로서 무색투명한 열가소성 물질로, 100 °C 이상에서 부드러워지고 185 °C 정도가 되면 점성의 액체가 되며, 산·알칼리, 기름, 알코올 등에 강한 성질을 가지고 있다<sup>(8)</sup>고 할 수 있다. 갈색의 결정체는 태양에서 오는 복사에너지와 오랜 시간 오염된 환경의 물리·화학적 결과라고 사료된다. 석고보드는 외형상 형태를 유지하며 고열을 받은 표면은 잔주름이 고르게 생긴 형태를 띠었는데 본 연구에서 다량의 석고에 골고루 적은 양의 톱밥이 함침 되어 있던 중 연소로 인해 형성된 결과라고 사료된다 (Figure 1).

### 3.2 각 재료별 주사 전자 현미경(SEM)분석

본 연구의 재료인 난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우레탄 및 석고보드의 연소 후 물리적 내부 구조를 SEM을 이용해 방사단면 구조를 살펴 본 결과 난연 스티로폼과 우레탄은 공기층의 구조가 무너져서 여러 개의 다층구조가 묻쳐서 물리·화학적으로 물성이 변하여 탄화가 됨을 알 수 있었다. 난연 스티로폼은 발포성 난연 약제(규산소다, 안티몬)가 고열을 어느 정도 구조가 무너지는 것을 막아주고, 우레탄은 아이소시아네이트(-N=C=O)가 쉽게 수산기(-OH)와 결

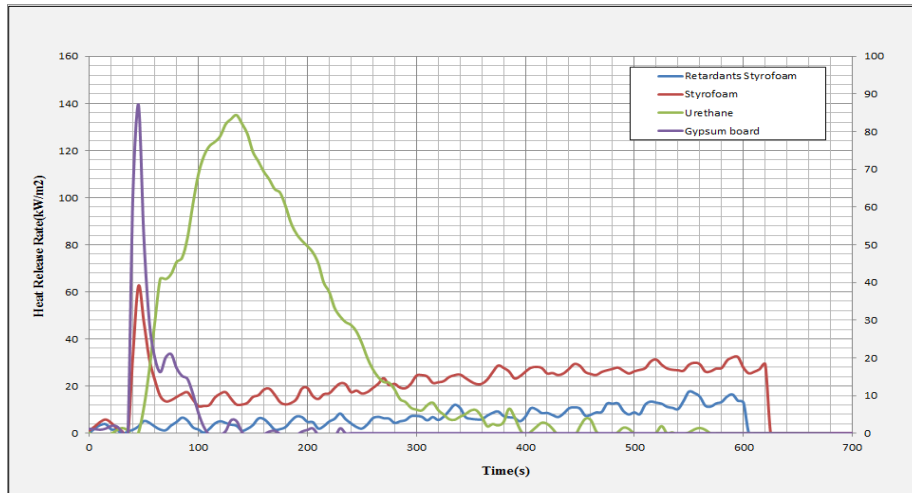
합한다(우레탄 결합). 또한 폴리올로서 수산기를 셋 이상 가진 분자를 사용하여 만들어진 폴리우레탄은 3차원적으로 결합한 것이 된다고 하였다<sup>(5,9)</sup>. 일반 스티로폼과 석고보드는 고열에도 일정부분 형태를 유지 하였으나 다층구조인 기공은 어느 정도 무너져 내렸음을 알 수 있었다. 스티로폼은 폴리스티렌이 주원료로 프레온가스를 발포제로 사용해 제조되기 때문에 프레온가스가 고열로 인해서 휘발하며 폴리스티렌의 화학적인 성질로는 큰 변화가 있었으나 SEM을 통해 관찰해 보니 물리적인 물성으로는 작은 변화가 있었음을 알 수 있었다. 석고는 기공이 비교적 일정하게 형성되었던 것이 고열에 노출된 후에는 거의 표면의 기공이 무너져 기공이 막힘을 볼 수 있었다. 이는 톱밥·섬유·필라이트 등을 혼합해 제조한 것으로 광물질인 무기계 필라이트가 화염에 강하게 견디어 낸 결과라고 사료된다. 석고는 열에 강한 광물질인 섬유, 필라이트 및 일부 톱밥 등으로 제조되었기에 겉으로는 형태를 갖추고는 있으나 고열에 노출되어 소량의 수분이 증발<sup>(5,10)</sup>하였는데 반해 어느 정도 온전한 형태를 보였다(Figure 2).

### 3.3 착화특성

각 실내 건축 재료인 난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우

**Table 2.** Ignition Characteristics of the Synthetic Insulation

Samples	Retardants Styrofoam	Styrofoam	Urethane	Gypsum Board
Time to Ignition (s)	27	43	41	31
Time to Flameout (s)	28	103	390	52
Fire Duration (s)	1.0	60	349	21



**Figure 3.** Heat release rate characteristics of the composite wood.

**Table 3.** Results of Cone Calorimeter Test

Samples	Retardants Styrofoam	Styrofoam	Urethane	Gypsum Board
mean HRR (kW/m <sup>2</sup> )	6.912	0.693	37.163	9.330
peak HRR (kW/m <sup>2</sup> )	17.671	12.061	135.087	87.151
t peak HRR (s)	5.0	60	135	45
THR (MJ/m <sup>2</sup> )	4.147	0.307	19.423	1.931
Total Smoke Release (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	30.798	21.146	769.898	1.523

레탄 및 석고보드 4종류의 합성 단열재에 대한 착화시간 (ignition time, TTI)에 대하여 Table 2에 나타내었다. 모든 재료에서 약간의 차이가 있는 TTI범위는 27 s~43 s인 것으로 확인되었다. TTI이 27 s인 가장 낮은 난연 스티로폼은 복사열에 노출된 다른 재료들보다 가장 빠른 27 s에 착화되어 1s동안 유지되다가 바로 28 s에 소멸되는 것으로 나타났다. 다음으로 석고보드는 TTI가 31 s 소멸시간이 52 s, 우레탄이 41 s 소멸시간이 390 s로 가장 긴 화염지속시간을 보였으며, 일반 스티로폼은 TTI이 43 s 소멸시간이 103 s로 나타났으며, 이중에 우레탄의 TTI는 41 s로 복사열에 노출된 후로 다른 재료들보다 화염지속시간이 긴 349 s동안 화염이 지속되다가 390 s에 소멸됨을 확인하였다. 난연 스티로폼이나 일반 스티로폼은 제조과정에서 폴리스티렌 수지 2%에 가스나 공기를 넣어넣고 난연제를 넣어 발포시켜 제조한다. 석고보드 또한 불연재인 석고에 약간의 톱밥을 함침시켜 만든다. 우레탄은 일반적으로 알코올 또는 페놀에

클로로시안을 작용( $2ROH + ClCN \rightarrow H_2NCOOR + HCl$ ) 하거나 알코올에 염화카르바밀을 반응( $ROH + H_2NCOCl \rightarrow H_2NCOOR + HCl$ )시켜 얻거나 알코올을 요소와 함께 가열( $ROH + H_2NCONH_2 \rightarrow H_2NCOOR + NH_3$ )하여 만드는데<sup>(3)</sup> 분해되며 끓는 온도가 184 °C로 일반 스티로폼의 145 °C보다 높다. 끓는다는 것은 운동에너지가 상대적으로 큰 분자들이 모여 외부 압력을 이기고 기포로 성장하는 것이다. 우레탄은 연소가 지속될 수 있는 성분인 보통 달고 끈기가 있는 무색 액체인 글리콜과 아이소사이안산염화합물의 반응으로 알코올 성질을 대체로 가지고 있으며 끓는점이 높다. 본 연구에서 착화 지속시간이 길게 유지됨을 확인하였다.

**3.4 발열량 특성**

합성 단열재류인 난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우레탄 및 석고보드 등 4종의 열방출을 실험 결과는 Figure 3과 Table 3에 나타내었다.

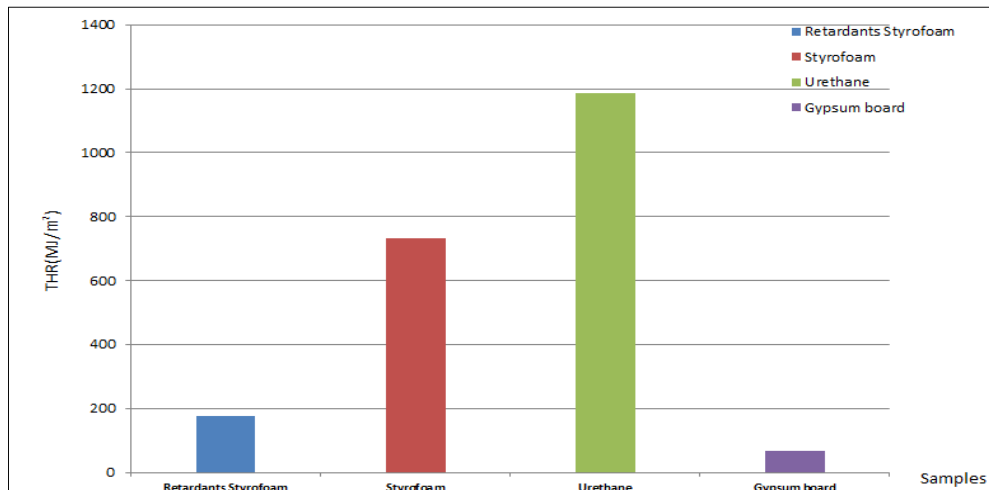


Figure 4. Total heat release rate characteristics of the composite wood.

Figure 3은 각 재료(난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우레탄 및 석고보드)의 복사열 크기 변화에 따른 최대열방출율(Heat Release Rate, peak HRR)을 나타냈다. 각 재료의 최대열방출율 peak HRR ( $\text{kW/m}^2$ )를 비교해보면 난연 스티로폼이  $17.671 \text{ kW/m}^2$ , 일반 스티로폼이  $12.061 \text{ kW/m}^2$ , 우레탄에서  $135.087 \text{ kW/m}^2$  그리고 석고보드에서  $87.151 \text{ kW/m}^2$ 의 값을 나타내었다. 이들 재료들의 최대열방출율 peak HRR ( $\text{kW/m}^2$ ) 크기는 우레탄>석고보드>난연 스티로폼>일반 스티로폼 순으로 나타났다. 이처럼 최대열방출율 peak HRR ( $\text{kW/m}^2$ )이 높을수록 화재 초기에 더 위험하다는 것을 나타낸다. 시험 재료의 초기 무게는 난연 스티로폼 60.2 g, 일반 스티로폼 63.86 g, 우레탄 97.01 g, 석고보드 55.04 g으로 측정되었고 밀도는 각각  $0.12 \text{ g/cm}^3$ ,  $0.028 \text{ g/cm}^3$ ,  $0.037 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.3 \text{ g/cm}^3$ 으로 나타났다. 일반적으로 최대열방출율 peak HRR ( $\text{kW/m}^2$ )값은 재료의 밀도가 클수록 큰 값을 보이나 본 연구에서는 합성단열재 재료들의 생산과정에서 여러 종류의 성분비(조성비)가 상이함으로 오는 결과라고 사료된다. 열방출율은 재료의 표면적당 발생하는 열량을 의미하며 발생 열량의 크기에 따라 화재위험성을 평가할 수 있다<sup>(11-13)</sup>.

평균열방출율 mean HRR ( $\text{kW/m}^2$ )은 복사열  $50 \text{ kW/m}^2$  일 때 난연 스티로폼  $6.912 \text{ kW/m}^2$ , 일반 스티로폼  $0.693 \text{ kW/m}^2$ , 우레탄에서  $37.163 \text{ kW/m}^2$ , 석고보드에서  $9.330 \text{ kW/m}^2$ 로 나타났다. 일반 스티로폼의 평균열방출율 mean HRR ( $\text{kW/m}^2$ )이 가장 낮은 것은 일반 스티로폼으로 체적밀도가 상대적으로 낮기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 평균열방출율 mean HRR ( $\text{kW/m}^2$ ) 값의 크기는 우레탄>석고보드>난연 스티로폼>일반 스티로폼 순으로 관찰되었다. 최대열방출율 t peak HRR (s)를 보면 난연 스티로폼이 5 s, 일반 스티로폼 60 s, 우레탄이 135 s, 석고보드가 45 s를 보였다.

Figure 4는 복사열 크기 변화에 따른 각각의 재료인 난연 스티로폼, 일반 스티로폼, 우레탄 및 석고보드의 총열방출량(Total Heat Release Rate, THR)을 그래프로 정리하였다. 총열

방출량(THR)은 연소가 진행되는 동안 시험편의 표면에서 발생하는 열량의 총 합으로 다른 재료의 표면으로부터 화염 확산 가능성을 파악할 수 있게 해주는 값이다<sup>(14)</sup>.

난연 스티로폼은  $4.147 \text{ MJ/m}^2$ , 일반 스티로폼은  $0.307 \text{ MJ/m}^2$ , 우레탄은  $19.423 \text{ MJ/m}^2$ , 석고보드는  $1.931 \text{ MJ/m}^2$ 를 보였다. 각 재료별 총열방출량(THR)은 우레탄>난연 스티로폼>일반 스티로폼>석고보드 순으로 나타났다. 이 값은 각 재료의 최대열방출율 peak HRR ( $\text{kW/m}^2$ ) 값보다 평균열방출율 mean HRR ( $\text{kW/m}^2$ ) 값과 더 관련성이 있다고 판단된다.

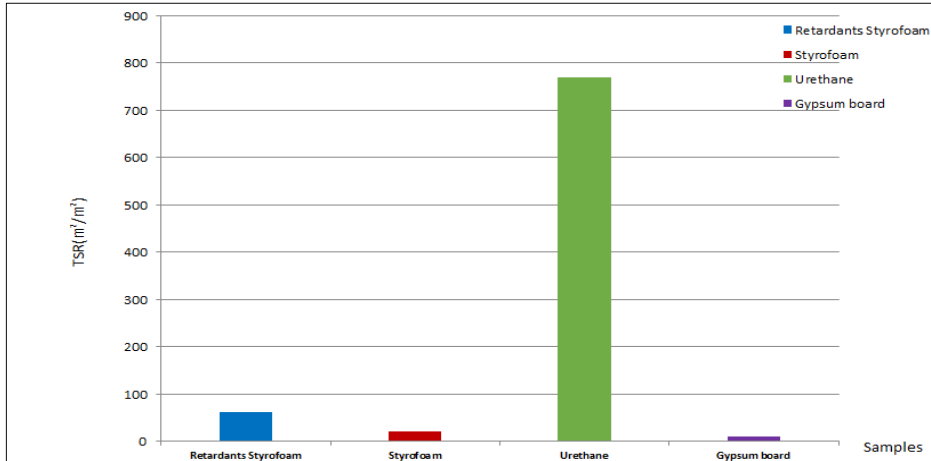
### 3.5 동적 연기(발연량)측정

연기 인자(smoke factor,  $\text{MW/m}^2$ )는 5분 이내의 KS F ISO 5660-1의 열방출 특성 실험에서 얻어진 최대 열방출율(PHPP)과 KS F ISO 5660-2 시험에서 얻어진 총 연기 발생율(TRS)의 곱으로 실물 화재 시험에서 발생할 수 있는 연기의 성향을 예측할 수 있는 데이터로서 그 결과를 나타내었다<sup>(15)</sup>.

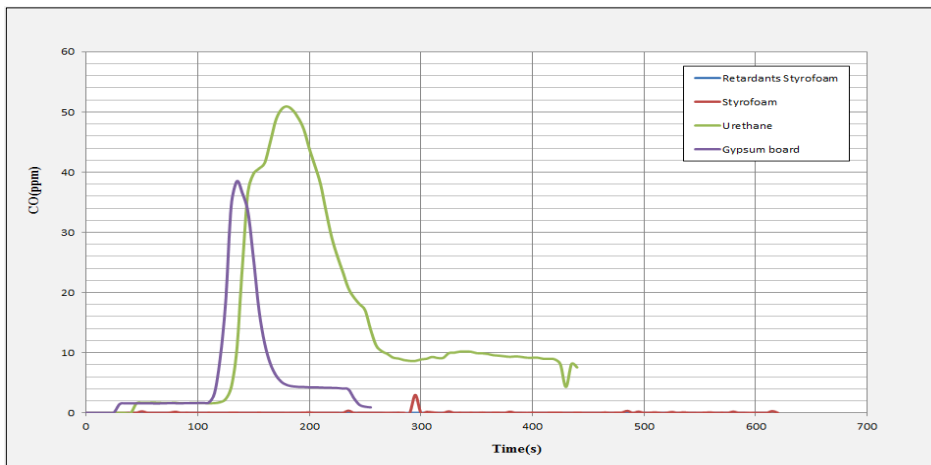
Figure 5는 각각의 합성 단열재 재료들의 동적 연기 발연량(Total smoke release : TSR,  $\text{m}^2/\text{m}^2$ )을 나타냈다. 이들의 총 연기방출량을 보면 난연 스티로폼이  $30.798 \text{ m}^2/\text{m}^2$  일반 스티로폼이  $21.146 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , 우레탄이  $769.898 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , 석고보드가  $1.523 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 로 나타났다. 각 합성 단열재 재료별 크기를 살펴보면 우레탄>난연 스티로폼>일반 스티로폼>석고보드 순으로 나타났다. 발연량은 재료의 단위 중량 연소에 의해 발생하는 연기의 발생량으로 통상 면적의 차원을 갖는데 발연량은 발연계수라고도 한다. 이 값이 클수록 다량의 연기가 발생함을 의미한다. 재료가 완전히 연소할 때 발생하는 열량을 발연량이라 하는데 발연량 값은 발열량 값은 비례한다. 연소에너지가 큰 합성화학 제품인 우레탄, 난연 스티로폼, 일반 스티로폼보다 연소에너지가 상대적으로 적은 소석고(광물질)가 주성분인 석고보드에서 연기방출량이

**Table 4.** Characteristics of Average Carbon Emissions and Residue

Samples	Retardants Styrofoam	Styrofoam	Urethane	Gypsum Board
Mean CO (kg/kg)	0.043	0.275	0.0121	0.0172
Mean CO <sub>2</sub> (kg/kg)	6.068	12.807	2.407	1.471
Residues (g)	0.003	0.001	0.022	0.029



**Figure 5.** Total smoke release characteristics of the composite wood.



**Figure 6.** Concentration of CO emission for the composite wood.

적음을 알 수 있었다. 이는 일정한 구조와 물리 화학적 특성을 가진 천연 무기물질로 구성되어 있어 난연 스티로폼, 일반 스티로폼 및 우레탄 등과 같은 잘 연소하는 고분자 화합물질과는 다르기 때문으로 사료된다. Table 4는 이들 재료들의 동적 연기 발연량을 나타내는데 TSR은 단위면적당 총 연기발생량으로서 연기 발생은 면적에 비례하기 때문에 면적에 대해서 표준화시킨 값을 사용하고 있으며 각각의 시험에서 각 시료 표면적당 시간의 함수로서 표현되는 연기방출을 값들의 적분치이다<sup>(12,13,16)</sup>.

### 3.6 탄소배출량 및 잔유물

Figure 6~Figure 7은 난연 스티로폼, 스티로폼 및 우레탄은 두께가 같고 석고보드만이 두께가 다른 복사열 크기에 따른 CO 및 CO<sub>2</sub> 방출농도 그래프를 나타내었다. CO 방출농도는 Figure 6에 나타났듯이 난연 스티로폼을 비롯한 각각의 합성 단열재의 평균 CO값은 0.0121 kg/kg~0.275 kg/kg의 분포 값을 나타냈으나 유독 일반 스티로폼만이 0.275 kg/kg의 큰 CO의 평균값을 나타냈다. 이는 불완전 연소의 결과<sup>(17)</sup>로 다량으로 흡입 시에 체내 산소 공급을 방해하여 두통, 현기증, 이명, 맥박 증가 등의 증상을 일으키고

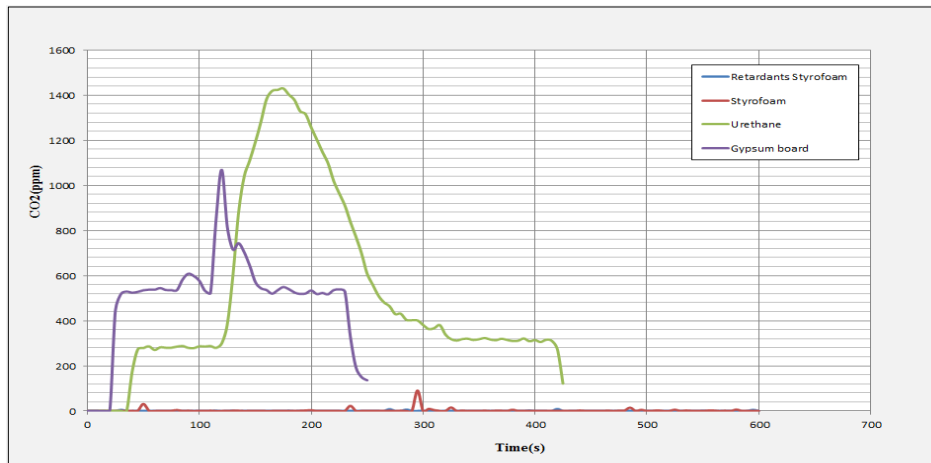


Figure 7. Concentration of CO<sub>2</sub> emission for the composite wood.

일정 시간 이후, 의식 불명의 상태를 나타내게 하는 유해가스<sup>(18,19)</sup>로 화재 발생 시 기체상의 분자가 공기 중에 부유하는 복합 혼합물인 연기와 독성가스가 혼합된 것으로 인체에 직접적인 피해뿐만 아니라 피난행동 및 화재진압 장해 등의 간접적인 피해에도 영향을 미친다.

Figure 7의 각각의 합성 단열재별 CO<sub>2</sub> 방출농도 그래프를 살펴보면 일반 스티로폼이 12.807 kg/kg으로 제일 큰 CO<sub>2</sub> 평균 방출농도를 보였으며, 난연 스티로폼, 우레탄 및 석고보드의 재료들이 1.471 kg/kg~6.068 kg/kg의 비교적 일반 스티로폼보다는 적은 CO<sub>2</sub> 평균값을 나타냈다. 또한 고온의 복사열에 노출되어 연소된 잔유물을 비교해 보았다. Table 4에서 보듯이 일반 스티로폼은 연소가 활발히 진행되어 잔유물이 0.0012 g으로 제일 적었으며, 다음으로 난연 스티로폼 0.003 g, 우레탄 0.022 g 및 석고보드가 0.029 g으로 비교적 적은 양이 남아 있었다. CO<sub>2</sub>는 완전 연소 생성물로 CO<sub>2</sub>의 생성량이 높을수록 재료의 중량 감소율이 증가한다<sup>(20,21)</sup>. 이처럼 폴리스티렌이 주성분인 일반 스티로폼은 연소가 활발히 진행되어 잔유물이 제일 적었고, 난연제·흑연이 함유된 난연 스티로폼이나 우레탄, 톱밥·섬유·펠라이트가 함유된 석고보드에서는 상대적으로 연소가 지연되어 재료의 잔유물이 많았다.

#### 4. 결 론

실내 건축 재료 중 합성 단열재로 쓰이고 있는 난연 스티로폼, 일반 스티로폼 및 우레탄, 석고보드 재료들 4종의 화재안전성의 기초자료로 중요한 연소특성 분석을 통해 제안하였다.

(1) 일반적인 합성 단열재 중 난연 스티로폼과 우레탄은 고열로 검은색의 푸석푸석한 결정으로 변했으며, 일반 스티로폼은 특유의 갈색의 작은 결정체로 뭉쳐져 있었고, 석고보드는 표면에 잔주름이 많이 생긴 외형은 거의 변함이 없는 것으로 식별되었다.

(2) 난연 스티로폼과 우레탄은 일정하고 뚜렷한 다층구조가 고열로 다층구조(공기층)가 물리·화학적으로 무너져 변화가 컸으며, 일반 스티로폼은 상대적으로 작은 물리적인 변화가 있었으며 석고보드는 난연2급 재료로 톱밥 정도가 탄화가 일어나 표면이 고르게 무너져 내렸음을 확인하였다.

(3) 합성 단열재인 모든 재료들에서 착화시간(TTI)범위는 27 s~43 s인 것으로 확인 되었으며, TTI가 가장 낮은 난연 스티로폼이 27 s에 착화되어 바로 28 s에 소멸되었다.

(4) 최대열방출율 peak HRR (kW/m<sup>2</sup>)은 난연 스티로폼이 17.671 kW/m<sup>2</sup>, 일반 스티로폼은 12.061 kW/m<sup>2</sup>, 우레탄 135.087 kW/m<sup>2</sup>, 석고보드에서 87.151 kW/m<sup>2</sup>로 최대열방출율을 크기는 우레탄>석고보드>난연 스티로폼>일반 스티로폼 순으로 나타났다.

(5) 평균열방출율 mean HRR (kW/m<sup>2</sup>)은 각 재료인 난연 스티로폼 6.912 kW/m<sup>2</sup>, 일반 스티로폼 0.693 kW/m<sup>2</sup>, 우레탄 37.163 kW/m<sup>2</sup>, 석고보드에서 각각 9.330 kW/m<sup>2</sup>값을 보였으며, 최대열방출율 t peak HRR (s)은 우레탄에서 135 s를 보였다.

(6) 총열방출량(Total Heat Release Rate, THR) 값은 난연 스티로폼이 4.147 MJ/m<sup>2</sup>, 석고보드 1.931 MJ/m<sup>2</sup>로 우레탄>난연 스티로폼>일반 스티로폼>석고보드 순으로 나타났다.

(7) 동적 연기 발연량(Total smoke release, m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)은 우레탄에서 가장 큰 값인 769.898 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>을 보였고, 탄소배출량인 CO값은 일반 스티로폼이 0.275 kg/kg, CO<sub>2</sub>값은 일반 스티로폼이 12.807 kg/kg으로 가장 큰 값을 보였고, 잔유물은 석고보드 0.029 g, 우레탄 0.022 g, 난연 스티로폼 0.003 g, 일반 스티로폼에서 가장 작은 0.001 g값을 나타냈다.

#### References

1. Y. S. Moon, S. R. Park, "Interior Architecture", Kongiwon, pp. 476-477 (2016).

2. Environment Industry Trade Portal, Glossary of Terms (2001).
3. Urethan, Chemical Metabolism, Sehwa (2001).
4. Gypsum Doard, Doopedia (2017).
5. J. B. Kim and S. Y. Lee, "The Combustion Gas Hazard Assessment of Main Building Materials", J. Korean Wood Sci. Technol. Vol. 44, No. 5. pp. 641-644 (2016).
6. J. Kim, J. H. Lee and S. Kim, "Estimating the Fire Behavior of Wood Flooring using a Cone Calorimeter", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 110, pp. 677-683 (2012).
7. KS F ISO 5660-1, "Heat Dissipation" (2003).
8. Expanded Polystyrene, Doopedia (2017).
9. C. J. Yoon, Chemical Glossary, Polyurethane, Iljinsa (2011).
10. C. H. Kim, Gypsum board, Chemical Dictionary, Sehwa editorial (2001).
11. D. W. Son, "Combustion Characteristics of Fire Retardants Treated Wood(I)", Journal of the Wood Science and Technology, No. 1. Vol. 43, p. 190 (2015).
12. J. B. Kim and S. Y. Lee, "Study on Combustion Characteristics of Composite Wood Flow", J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 16, No. 5, pp. 4-5 (2016).
13. J. B. Kim, Y. J. Park and S. Y. Lee, 'Star Building Materials Study on Wood Structure and Combustion Characteristics', Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 5, p. 63 (2016).
14. B. H. Lee, H. S. Kim, S. Kim, H. J. Lee, B. W. Deng, Y. Feng and Q. Luo, "Evaluating the flammability of Wood-based Panels and Gypsum Particleboard using a Cone Calorimeter", Journal Construction and Building Materials Vol. 25, No. 7. pp. 3044-3050 (2011).
15. V. Babrauskas and S. J. Grayson, Heat Release in Fires. Elsevier Science Publisher, New York (1992).
16. Y. J. Park and H. P. Lee, "Thermal Characteristics of Living Leaves in *Pinus Densiflora* with Heat Flux", J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 10, No. 5, p. 79 (2010).
17. L. D. Stacy, "Products of Incomplete Combustion (Ox, COx, HOx, NOx, SOx, ROx, MOx, and POx)", Journal of Hazardous Materials, Vol. 22, No. 2. pp. 161-173 (1989).
18. L. Marynowski, R. Kubik, D. Uhi and B. R. T. Simoneit, "Molecular Composition of Fossil Charcoal and Relationship with Incomplete Combustion of Wood", Organic Geochemistry, Vol. 77, pp. 22-31 (2014).
19. H. J. Seo and D. W. Son, "Hazard Assessment of Combustion Gases from Interior Materials", Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 4, p. 53 (2015).
20. S. B. Choi, B. Y. Oh and D. M. Choi, "Fire Patterns According to the Blood Hb-CO Concentration of Charred Bodies", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 40-48 (2012).
21. Y. J. Chung and M. Spearpoint, "Combustion Properties of Native Korean Wood Species", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes No. 3, Vol. 9, pp. 118-125 (2007).