

합성목재의 연기밀도특성 분석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Smoke Density Characteristics for Wood-Plastic Composites

신백우 · 송영호* · 이동호** · 정국삼***†

Baeg-Woo Shin · Young-Ho Song* · Dong-Ho Rie** · Kook-Sam Chung***†

한국항공우주연구원, *해천대학 소방안전관리과, **인천대학교 소방방재연구센터,
***충북대학교 안전공학과
(2011. 4. 25 접수/2011. 6. 10. 채택)

요 약

본 연구에서는 최근 조경 및 건축자재로서 각광받고 있는 합성목재의 화재위험성을 알아보기 위하여 콘 칼로리미터 실험과 연기밀도 실험 장치를 이용하여 연기밀도 특성을 살펴보았다. 일반목재인 적송과 방부 처리를 한 방부목에 대하여도 동일한 실험을 통하여 합성목재와의 연기밀도 특성을 비교하였다. 콘칼로리 미터 실험결과 CO 및 CO₂ 발생량과 총 연기 발생량 값은 적송 및 방부목에 비해 합성목재가 높게 나타났다. 또한 연기밀도 실험 장치를 통한 최대연기밀도(Dm) 결과에서도 합성목재가 적송 및 방부목에 비해 높게 나타났다.

ABSTRACT

In this study, we measured the smoke density characteristics to find the fire risk of Wood-Plastic composites (WPCs) which are one of spotlighting materials for landscape architecture and residential construction material with the cone calorimeter tester (by ISO 5660-2) and the smoke density tester (by ASTM E 662). In addition, the identical test was implemented to compare the smoke density characteristics between the red pine and the antiseptic wood. The result of cone calorimeter test showed that emissions of carbon monoxide, carbon dioxide and total smoke production rate of WPCs were higher than those of red pine and antiseptic wood. And the result of smoke density test showed that maximum specific optical smoke density(Dm) of WPCs was higher than that of red pine and antiseptic wood as well.

Key words : Wood-plastic composites, Smoke density, Cone calorimeter, Total smoke release, Smoke factor

1. 서 론

인류의 문명이 발달하고 삶의 질이 향상될수록 천연 소재에 대한 수요는 증대한다. 목재를 가구재나 건축물 내부의 마감재로 채택하면 천연의 질감을 느낄 수 있기 때문에 우리 주변에 수많은 시설물들 중 목재가 차지하는 비중은 대단히 크다.

하지만 전 세계적으로 무분별한 목재의 사용으로 인하여 목재자원의 고갈과 수급 불균형의 문제, 폐목의 처리 비용 문제 등 목재를 대체할 만한 새로운 소재의

탄생을 갈망하게 되었다.

석유공업의 발달에 힘입어 가공이 쉽고 내구성이 양호한 플라스틱의 진화를 거듭하고 있으며 생활의 편리성 추구로 인해 사용량이 꾸준히 증가하는 추세에 있다. 그러나 이러한 플라스틱은 자연적으로 분해되지 않고 매립해도 오랫동안 땅속에 그대로 남아있게 되어 환경을 오염시키고 있다. 따라서 폐플라스틱의 처리는 재활용하는 방법이 가장 효과적이라고 할 수 있다.

이런 문제를 해결하기 위해 목재의 장점을 최대한 살리고 단점을 보완하며 고분자 재료의 장점을 잘 조화시킨 합성목재(WPC)의 개발이 급속히 발전하고 있다. 합성목재는 건축 외장재, 조경 시설물 자재로서의 데

† E-mail: kschung@chungbuk.ac.kr

크재, 사이딩, 난간재 등 주요 사용 분야 외에도 소재의 특성을 활용하여 전 세계적으로 다양하게 확대되어 가는 추세에 있다. 미국의 경우 데크재와 난간재가 가장 많이 사용되고 있으며, 창문과 문틀, 울타리, 산책로, 토목 교량용재와 운반용재로서 적합성도 계속 연구하여 점차 그 용도를 확장하고 있다. 유럽에서는 외장재보다는 내장재에서 용도를 발견하고 가구산업에서 장식용을 위한 물딩류에서 인정받고 있다.¹⁾

합성목재의 주원료로 쓰이는 목분은 가격이 저렴하고 재생 가능하며, 유연성 및 거친 표면, 가공장비에 마모성이 적은 점 등의 장점을 지니고 있어 WPC의 원료로 널리 이용되고 있다. 목분의 수종은 포플러, 대나무, 삼나무 등 다양하며 목분의 종류는 최종 제품의 외관과 질감을 결정짓는 중요한 요소이다. 또한 목분의 입자크기가 작을수록 함량이 증가할수록 인장강도와 탄성계수는 증가하는 경향을 나타내었으며, 신장률은 감소한다.²⁾

합성목재 제조 공정에서 쓰이는 각종 첨가제는 제품의 성능과 가공성에 영향을 미치는 중요한 재료이다. 가장 널리 쓰이는 첨가제로는 착색제(colorants), 결합제(Coupling agents), 윤활제(lubricants), 자외선 안정제(UV stabilizers), 열안정제(Heat stabilizers) 등이 있다. 합성목재의 고분자 재료로는 주로 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC) 등이 활용된다. 그 중 폴리프로필렌은 상온에서 이용될 때 우수한 기계적, 물리적 및 열적특성을 지니고 있어 WPC시장의 큰 비중을 차지하고 있다.³⁾

이러한 합성목재에 대한 연구가 진행되면서 가장 큰 문제점은 목재와 고분자의 재료 특성상 화재에 매우 취약하다는 것이다. 특히 고분자 재료는 대부분 탄소, 수소, 산소로 구성된 유기물질로 불에 쉽게 연소되기 쉬운 성질을 가지고 있다.

소규모 화재에서도 많은 인명피해를 발생하는 가장 큰 원인은 가연물 연소 시 발생하는 연기와 유독성 가스의 질식에 의한 것이다.

또한 화재발생에 따른 연기의 농도가 높으면 연기입자에 의한 빛의 차폐효과 때문에 투과거리가 저하되어 피난 및 소화활동에 커다란 장애요인이 되고 있으며 연기로 인한 피해가 화재로 인한 피해를 초과할 만큼 심각하다.

따라서 본 연구에서는 합성목재에 의한 연소 시 연기의 발생 정도를 콘칼로리미터 및 연기밀도 측정장치를 이용하여 연기밀도 특성 분석을 통하여 합성목재의 화재 위험성을 파악하고 발연량 허용기준 설정을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에서 실험재료로 사용한 합성목재는 합성목재 품질기준(KS F 3200)에 따른 시험항목들의 기준 값을 모두 통과한 제품들을 대상으로 하였고 합성목재의 여러 종류들 중 공원, 산책로, 공공시설 등 일반적으로 많이 쓰이는 데크재를 선정하였다.

또한 합성목재와 일반목재 및 방부목들과 비교 분석하기 위하여 적송(red pine: RP) 및 방부목(antiseptic wood: AW)도 함께 실험하였다.

본 연구에 사용된 실험재료들은 시편 자체의 연기밀도 특성을 살펴보기 위하여 별도의 가공처리는 전혀 하지 않았으며 시험 규격의 시편 크기에 맞게 제품의 일부를 절단하여 실험하였다.

2.2 실험방법 및 분석장비

연기밀도 특성을 평가하는 방법으로는 강제 또는 자율배기 상태에서 연기밀도를 평가하는 동적(Dynamic) 측정방법과 챔버 내에 연소가스를 평가하는 정적(Static) 측정방법으로 구분할 수 있다. 동적 측정방법은 공기의 흐름이 있는 상태로써 대부분 시편을 실제 외기에 노출시킨 상태에서 연소를 실시하므로 실제 화재와 유사한 특성을 조사할 수 있다는 장점이 있으며 정적 측정방법은 공기의 흐름이 없는 일정한 부피의 공간에서 발생하는 측정방법으로 주로 소형시편에 적용되며 시험의 재현성 등에 유리한 장점이 있다.⁴⁾

2.2.1 동적 연기측정

동적 연기측정 장치는 환기가 양호한 조건에서 조절 가능한 복사열에 노출된 편평한 시험체의 동적 연기 발생률을 평가하는 실험방법으로 분석장비는 국내 FESTEC사에서 제작한 콘칼로리미터(Cone Calorimeter 2006)를 사용하였으며 ISO 5660-2⁵⁾ 기준으로 실시하였다.

본 실험에 사용된 시편을 실험 규격에 적합한 크기인 100 mm × 100 mm로 준비하여 콘히터에 놓고 수평 방향으로 일정한 열유속(50 kW/m²)을 공급하는 등 ISO 5660-1 규격에 따라 연소시켜 감광, 배기가스 유량등을 측정하였다. 감광은 배기 덕트에 있는 연기를 통해 투과되는 빛 세기의 비율로서 측정한다. 이를 감쇠계수(Extinction Coefficient)라 하고 다음 식에 의해 계산된다.

$$k = \ln(I_0/I)L^{-1} \quad (1)$$

여기에서 I: 감쇠된 빛 세기

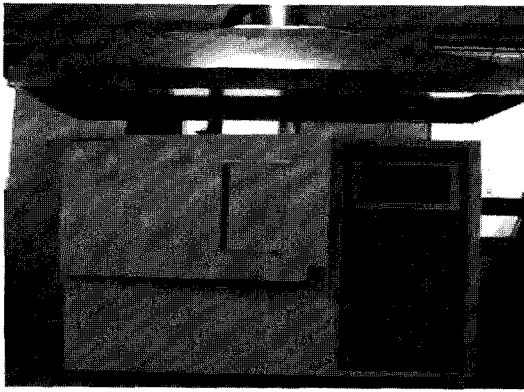


Figure 1. Photograph of smoke density chamber.

- I₀: 연기가 없을때의 빛 세기
- L: 배기 덕트를 횡단하는 광로의 길이

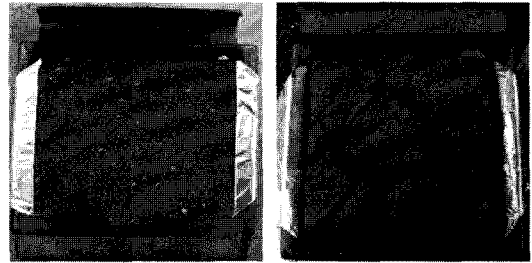
2.2.2 정적 연기측정

정적 연기측정은 열유속 가열 방향에 따라 수직시험 방법인 ASTM E 662⁶⁾ 시험과 수평시험 방법인 ISO 5659-2의 시험으로 구분할 수 있다.

본 실험에서는 국내 FESTECS사에서 제작한 연기밀도 실험장비(SmokeBox 2005)를 이용하여 수직시험 방법을 선택하였으며 Figure 1에 실험장비 사진을 나타내었다.

연기밀도 실험은 광원과 광량감지기 사이에 연기가 통과하는 공간을 두어 연기에 의해서 차단되는 광 투과율을 측정하는 것으로써 Figure 2에서 나타난 바와 같이 75 mm × 75 mm 크기로 ASTM 662 규격에 의해 수행하였다.

실험방식은 Flaming 방식과 Non-flaming 방식 모두



<before> <after>

Figure 2. Photographs of the sample.

수행하였으며 밀봉된 챔버안에 시편을 수직으로 세워 가열로를 점화하여 25 kW/m²의 복사열이 되도록 조정 한 후, 수직으로 설치된 광학장치에 통과된 빛의 강도를 측정하여 연기농도로 환산된다.⁷⁾

연기밀도(D_s, density of smoke) 평가방법은 연기상자의 형상으로부터 결정되는 상수 G값과 PM(photo multiplier) 튜브에서 감지되는 투과율 T 및 필터 조건에 의해서 결정되며 계산식은 다음과 같다.

$$D_s = G [\log_{10}(100/T) + F] \quad (2)$$

여기에서 D_s: 연기밀도

G: 연소챔버의 형상(V/AL)

V: 연소챔버의 체적[m³]

A: 시편의 노출면적[m²]

L: 광선투과 길이[m]

T: 광선투과율[%]

F: 광선투과때 필터를 사용하면 “0” 필터를 사용하지 않으면 “1”

Table 1. Results of Cone Calorimeter Test

| Material | Thickness [mm] | CO Yield [kg/kg] | CO ₂ Yield [kg/kg] | CO Yield/CO ₂ Yield | SPR ^a [m ² /S] | RSR ^b [(m ² /S)/m ²] | TSP ^c [m ²] | TSR ^d [m ² /m ²] | Smoke Factor [MW/m ²] | Abbreviation |
|-----------------|----------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|--|-----------------------------------|--------------|
| WPC-A | 9.3 | 0.0148 | 1.48 | 0.0100 | 0.022 | 2.52 | 6.5 | 732.6 | 109.4 | WA |
| WPC-B | 11 | 0.0163 | 1.56 | 0.0104 | 0.032 | 3.58 | 17.0 | 1926.6 | 196.4 | WB |
| WPC-C | 13 | 0.0130 | 1.20 | 0.0108 | 0.029 | 3.31 | 11.3 | 1287.2 | 149.6 | WC |
| WPC-D | 10 | 0.0105 | 1.07 | 0.0098 | 0.019 | 2.14 | 3.4 | 385.2 | 68.7 | WD |
| Antiseptic Wood | 9.0 | 0.0099 | 1.20 | 0.0082 | 0.016 | 1.81 | 5.5 | 337.1 | 8.4 | AW |
| Red Pine | 11 | 0.0094 | 1.21 | 0.0077 | 0.019 | 2.18 | 3.0 | 618.0 | 29.9 | RP |

^aSmoke Production Release ^bRate of Smoke Release ^cTotal Smoke Production ^dTotal Smoke Release

3. 실험결과 및 고찰

3.1 등적 연기밀도 특성

콘칼로리미터를 이용한 연기측정 시험방법은 일반적으로 연소생성물을 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 Bouguer의 법칙을 기본 원리로 하며 콘칼로리미터 연기측정 결과 값들을 Table 1에 제시하였다.

콘칼로리미터 실험시 CO 및 CO₂ 분석기에 의해서 실시간 농도를 측정하였으며 이 데이터들은 질량의 감소에 따른 산출량인 CO yield, CO₂ yield를 주요 중요한 데이터로 사용한다.⁸⁾ 하지만 이 데이터는 수치 미분식에 의해 얻어진 질량감소율을 이용하기 때문에 시간에 따른 변화율에는 큰 의미를 두지 않으며 평균값을 주로 사용한다.

Table 1에서 나타난 바와 같이 합성목재의 CO 발생량의 경우 0.0105~0.0163 kg/kg의 범위를 보였으며 방부목은 0.0099 kg/kg, 적송은 0.0094 kg/kg의 결과 값을 나타냈다. 합성목재의 CO₂ 발생량은 1.07~1.56 kg/kg의 범위를 보였으며 방부목은 1.20 kg/kg, 적송은 1.21 kg/kg으로 합성목재가 적송 및 방부목에 비해 다소 높게 나타났으나 CO₂ 발생량은 시편들 간에 큰 차이를 보이지 않았다.

CO₂ 발생량에 대한 CO 발생량의 비율은 시료의 완전연소 정도를 나타내며, 독성의 지수로 사용된다.⁹⁾

합성목재의 CO₂ 발생량에 대한 CO 발생량의 비율은 0.0098~0.0108 범위로써 적송 및 방부목에 비해 다소 높았으며 그 중 합성목재 WC제품이 가장 높은 값을 보였다.

동적 연기측정 결과 중 연기발생율(SPR)은 감쇠계수와 배기 덕트에서 연기의 체적유량의 곱으로 계산한다.

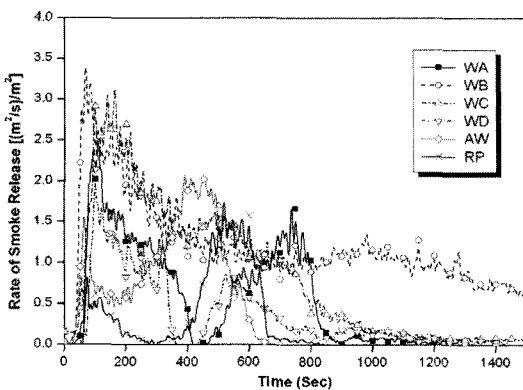


Figure 3. Results of rate of smoke release.

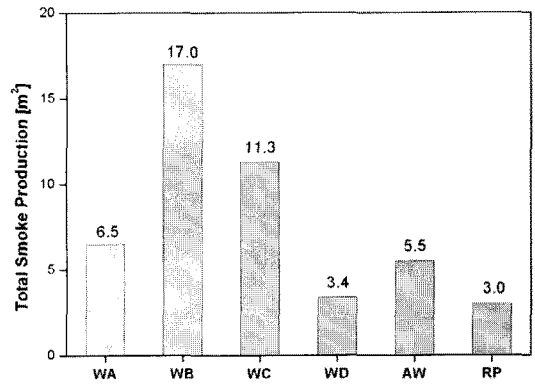


Figure 4. Results of total smoke production.

연기방출율(RSR)은 시간에 따른 연기의 발생량을 실험에 사용된 시편의 노출면적으로 나눈 값으로서 구획 화재의 경우 화재가 발생한 구역 내 물질의 면적에 따른 연기발생율을 예측할 수 있으며 실험 결과 값들을 Figure 3에 나타내었다.

합성목재들의 연기방출율 그래프를 살펴보면 3분 이내에 최대 연기방출율을 보이고 점차적으로 감소하다가 다시 500~800초 구간에서 상승하는 것을 확인할 수 있다. 적송과 방부목의 연기방출율 그래프를 살펴보면 시간의 흐름에 따라 연기방출율이 점차 증가하다가 각각 390초, 520초에 최대 연기방출율이 측정되고 점차적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

총 연기발생량(TSP)은 연기 발생율을 고려한 시간대에서의 누적분으로 얻는다.¹⁰⁾ Figure 4에서 나타낸 총 연기발생량을 살펴보면 합성목재의 총 연기발생량은 3.4~17.0 m³이므로써 적송 및 방부목의 총 연기발생량 3.0~5.5 m³보다 상당히 높게 나타났다.

연기인자(Smoke Factor, MW/m²)는 5분 이내의 ISO 5660-1의 열방출 특성 시험에서 얻어진 최대 열방출율(PHRR)과 ISO 5660-2시험에서 얻어진 총 연기 발생율(TSR)의 곱으로 계산된 요소로서, 실물 화재 시험에서 발생할 수 있는 연기의 성향을 예측할 수 있는 데이터로서 Figure 5에 그 결과를 나타내었다.^{11,12)}

연기인자 결과 값들을 살펴보면 합성목재의 연기요소 결과값은 68.7~196.4 MW/m²이므로써 적송 및 방부목의 연기요소 결과값인 8.4~29.9 MW/m²보다 상당히 높게 나타났다.

WB제품은 열방출 특성 시험 시¹³⁾ 착화시간이 가장 짧았고 최대 열방출률 값이 가장 높게 나타났으며 총 연기발생량 또한 가장 높게 나타났으므로 두 데이터의 곱으로 계산되는 요소인 연기인자 값 역시 196.4 MW/

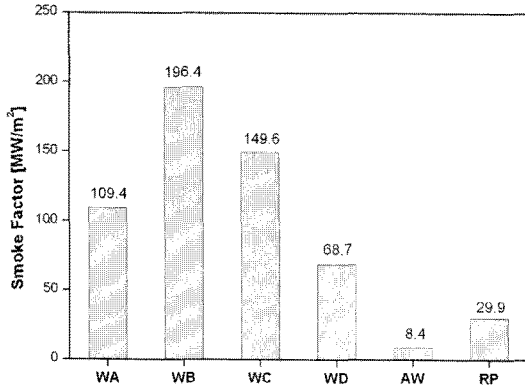


Figure 5. Results of smoke factor.

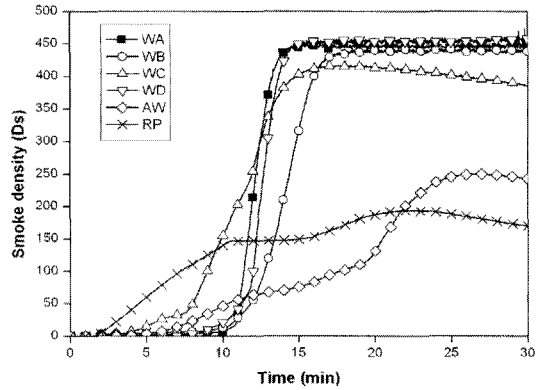


Figure 6. Optical Smoke density of samples.

m²으로 가장 높게 나타났다.

3.2 정적 연기밀도 특성

연기밀도라 함은 시료의 연소 시 발생하는 연기의 양을 빛의 투과율 변화를 이용하여 측정된 값¹⁴⁾으로 ASTM E 662 기준에 의하여 가염조건(Flaming mode)과 비 가염조건(Non-flaming mode)에서의 정적 연기밀도 실험을 실시하였다.

정적 연기밀도 측정 결과 값들은 실험 시작 후 1.5분, 4분, 10분 데이터와 실험동안 발생한 연기의 최대 값인 최대연기밀도(Dm) 데이터를 Table 2에 제시하였다.

Figure 6에서는 시간에 따른 연기밀도(flaming mode)에 대한 정량적인 분석결과를 제시하였다. Figure 6에서 볼 수 있듯이 합성목재들의 연기밀도는 실험 시작 후 10분~15분 사이에 급격한 증가를 보이며 417~472 값까지 연기밀도가 최대로 상승하다가 유지하는 것을 볼 수 있었으며 그에 비해 적송 및 방부목의 연기밀도는 실험시간 전반적으로 완만하게 상승하는 것을 확인

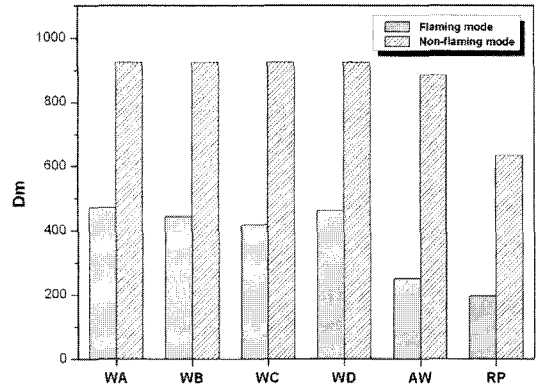


Figure 7. Results of maximum specific optical density.

할 수 있었다.

연기란 기본적으로 불완전한 연소에 의해 발생되며 연소에 있어서는 불꽃을 동반하는 경우와 그렇지 않은 경우가 있으며 두 경우 발생하는 연기는 서로 다른 형

Table 2. Results of Smoke Density Test

| Material | Thickness [mm] | Flaming Mode | | | | Non-flaming Mode | | | |
|----------|----------------|--------------|------------|-------------|--------|------------------|------------|-------------|-------|
| | | Ds (1.5 min) | Ds (4 min) | Ds (10 min) | Dm* | Ds (1.5 min) | Ds (4 min) | Ds (10 min) | Dm |
| WA | 10.5 | 0 | 1.05 | 6.96 | 472.39 | 1.73 | 71.78 | 529.8 | 924.0 |
| WB | 10.0 | 0.11 | 3.46 | 12.66 | 442.49 | 3.53 | 114.17 | 924.0 | 924.0 |
| WC | 10.0 | 0.02 | 6.26 | 154.70 | 417.10 | 6.88 | 220.46 | 924.0 | 924.0 |
| WD | 10.4 | 0 | 0 | 21.05 | 461.85 | 2.37 | 64.07 | 611.5 | 924.0 |
| AW | 10.0 | 0 | 0.68 | 46.23 | 250.23 | 0 | 27.49 | 271.8 | 884.3 |
| RP | 12.0 | 0.48 | 40.40 | 139.68 | 194.28 | 6.69 | 85.35 | 584.3 | 632.9 |

*Dm: maximum specific optical density

태를 갖는다. 일반적으로 목재가 연소할 경우에는 불꽃을 동반한 연소가 미 불꽃 연소보다 발생하는 연기의 양이 적다.¹⁵⁾

Figure 7에서는 최대연기밀도(Dm)을 나타냈으며 가염조건에 비해 비 가염 조건에서의 연기밀도 값들이 1.95배~3.5배 크게 발생한 것을 살펴볼 수 있었다.

가염조건에서의 합성목재들의 최대연기밀도 값은 417.10~472.39로서 적송 및 방부목의 최대연기밀도 값인 194.28, 250.23에 비해 높게 나타났으며 또한 비 가염 조건에서의 합성목재 최대연기밀도 결과값은 924로써 적송 632.9과 방부목 884.3보다 높게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 합성목재의 연소에 따른 연기밀도 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 콘칼로리미터 실험결과 CO의 발생량은 합성목재에서 가장 많이 나타났으며 CO₂ 발생량에 대한 CO 발생량의 비율 또한 합성목재가 가장 높은 값을 나타냈다.

2) ASTM E 662 규격에 의한 연기밀도 실험 결과 가염조건에 비해 비가염 조건에서의 최대연기밀도 값들이 1.95배~3.5배 크게 나타났다.

3) 연기밀도 실험결과 최대연기밀도 값들은 가염조건과 비가염 조건 모두 합성목재>방부목> 적송 순으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 충북대학교학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 한유수, "신 목질 복합재료인 합성목재의 전망", 한국복합재료학회지, Vol.19, No.6, pp.38-42(2006).
2. C.-H. Kim, K.-J. Kim, and T.-J. Eom, "Properties of WPC Prepared with Various Size and Amount of Wood Particle", J. of Korea TAPPI, Vol.40, No.3, pp.59-64(2008).

3. I.-A. Kang, S.-Y. Lee, G.-H. Doh, S.-J. Chun, and S.-L. Yoon, "Mechanical Properties of Wood Flour-Polypropylene Composites", Mokchae Konghak, Vol.37, pp.505-516(2009).
4. 이덕희, 정우성, 박덕신, 김선옥, "철도차량 내장재용 FRP 복합재의 연기밀도 특성", 한국화재소방학회 추계발표, pp.34-39(2002).
5. ISO 5660-2, "Reaction-to-fire tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-Part 2 : Smoke Production Rate(dynamic measurement)" (2002).
6. ASTM E 662, "Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials" (2009).
7. 이해평, 박영주, "카페트와 커튼의 방염처리 및 사용여부에 따른 화재특성에 관한 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.1, pp.74-81(2007).
8. Ondrej Grexa and Henrich Lubke, "Flammability Parameters of Wood Tested on a Cone Calorimeter", Polymer Degradation Stability, Vol.74, pp.427-432 (2001).
9. Kotresh, T.M, R. Indushekar, M.S. Subbulakshmi, S.N. Vija-yalakshmi, A. SI. Krishna Prasad, V.C. Padaki, and Ashwini K. Agrawal, "Effect of Heat Flux on the Burning Behaviour of Foam and Foam/Nomex III Fabric Combination in the Cone Calorimeter", Polymer Testing, Vol.25, pp.744-757 (2006).
10. KS F ISO 5660-2, "연소 성능시험-열방출, 연기발생 및 질량감소율-제2부: 연기발생률(동적측정)"(2006).
11. V. Babrauskas and S.J. Grayson, "Heat Release in Fires", Elsevier Science Publishers, New York(1992).
12. 김영탁, 김해림, 박영주, 이해평, "콘칼로리미터를 이용한 자동차 내장재의 열적 특성", 한국화재소방학회 추계발표, pp.557-563(2009).
13. 신백우, 송영호, 이동호, 정국삼, "합성목재의 연소특성", 한국화재소방학회 논문지, Vol.24, No.6, pp.120-125(2010).
14. 국토해양부 고시(제2010-637호), "철도차량 안전기준에 관한 지침"(2010).
15. KS M ISO 5659-1, "플라스틱-연기발생-제1부: 광학 밀도 시험에 대한 안내"(2002).