

합성목재의 연소특성에 관한 연구 A Study on Combustion Characteristics of Wood-Plastic Composites

신백우 · 송영호* · 이동호** · 정국삼***†

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

한국항공우주연구원, *해천대학 소방안전관리과,
인천대학교 안전공학과, *충북대학교 안전공학과
(2010. 10. 1 접수/2010. 12. 10. 채택)

요 약

주거 건축 및 가구산업의 자재로써 합성목재(Wood-Plastic Composites)는 점차 각광받고 있다. 본 연구에서는 합성목재의 연소특성을 살펴보기 위하여 한계산소지수 측정(ASTM D 2863) 및 콘칼로리미터 시험(ISO 5660-1)을 실시하였으며 또한 일반목재인 적송과 방부 처리를 한 방부목에 대하여도 동일한 시험을 통하여 합성목재와의 연소특성을 비교·검토하였다. 한계산소지수 측정결과 합성목재가 적송 및 방부목에 비해 낮게 측정되었다. 콘칼로리미터 시험결과 합성목재의 열방출률이 가장 높았고 또한, 최대 열방출률 및 평균 열방출률, 총 방출열량도 적송 및 방부목에 비해 높게 나타났다.

ABSTRACT

Wood-Plastic Composites (WPCs) are one of spotlighting materials for the residential construction and the industry for furniture. At this study, the limiting oxygen index (LOI) was measured by ASTM D 2863 and the cone calorimeter test was done by ISO 5660-1 to find the combustion characteristics of WPCs. In addition, the identical test was implemented to compare the combustion characteristics between the red pine and the antiseptic wood. The result of LOI measurement showed that the LOI of WPCs was lower than that of red pine or antiseptic wood. The cone calorimeter test showed that the heat release rate (HRR) of WPCs was the highest and the Peak HRR as well as the average HRR and total heat release of WPCs was higher than those of red pine or antiseptized wood

Key words : Wood-plastic composites, Combustion, Limiting oxygen index, Cone calorimeter, Heat release rate

1. 서 론

최근 플라스틱의 사용량이 증가함에 따라 폐플라스틱의 발생량이 급증하고 있으며 목재 자원의 무분별한 사용으로 인해 자원의 고갈 및 목재수급에 큰 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 일반 목재를 대체하며 조경 및 건축자재로써 목분과 합성수지 및 첨가제를 혼합, 압출 성형하여 제조한 합성목재(Wood-Plastic Composites: WPC)를 사용하는 경우가 많아지고 있다. 일반적으로 친환경 목재라고 생각하는 야외 목재시설물들은 부식 및 부패 방지를 위해 화학약품처리를 한다.

주요 화학약품인 CCA(Cromated Copper Arsenate)는 인체 유해성 문제를 일으켰으며 미국 등의 선진국에서는 어린이용 놀이터, 데크, 조경용 목재, 주거용 펜스 등과 같이 사람이 직접 접촉할 수 있는 시설물에 사용하는 것을 금지하고 있다.

이에 국내 정부에서도 2007년부터 어린이 놀이시설, 가구 등의 목재에 방부제로 사용되는 유독성 물질인 CCA의 대표성분인 오산화비소 사용의 전면 금지조치로 천연 대체제품인 합성목재 시장이 각광을 받고 있으며, 또한 정부가 친환경을 추구하는 시대흐름에 따라 천연목재를 대신해 4대강 살리기 사업 생태공원 조성에 이용하는 등 최근 시장규모가 급격히 증가하고 있다.¹⁾

합성목재는 인체에 무해하고 재활용이 가능한 친환경 제품으로 우수한 내구성(내수성, 내마모성, 내변색성,

† E-mail: kschung@chungbuk.ac.kr

내충격) 및 간편한 유지관리 등의 다양한 장점을 지닌다. 또한 압출을 통한 형상구현이 자유로워 마감재 및 장식용을 위한 몰딩류 등 가구산업 시장에서 그 장점을 인정받고 있는 추세이다.

하지만 목분은 친수성으로 대표적인 열가소성인 폴리프로필렌의 경우 소수성이기 때문에 두 재료 간 강한 계면결합력을 갖지 못하는 문제점이 발생되고 있다.²⁾

따라서 두 재료의 계면에서의 낮은 결합력을 향상시키기 위해 실란으로 목분을 전처리 하거나 coupling agent 등을 첨가하여 용융 혼합시 목분의 분산성을 높이고 고분자 수지와와의 계면결합력을 향상시키기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다.³⁾ 또한 WPC를 제조함에 있어 산화방지제(Anti-oxidant) 및 자외선 안정제(UV-stabilizer)등 첨가제에 관한 연구도 수행되어 왔다.⁴⁾

이러한 연구들의 결과로 인해 합성목재의 용도는 옥외용 데크재 및 조경용 가구등 외장 조경자재 시장에서 발코니 바닥이나 욕실 및 부엌용 자재등 내장재 시장으로 확장되고 있다.

그러나 합성목재의 원료로 쓰이는 목분과 합성수지는 모두 재료의 특성상 화재에 매우 취약하다는 문제점을 갖고 있는데 이와 같은 문제점으로 인하여 최근 Borysiak 등⁵⁾은 콘칼로리미터를 사용하여 합성목재에 관한 연소특성을 연구하였고, Stark 등⁶⁾과 Garcia 등⁷⁾은 난연제를 포함한 합성목재의 연소특성 및 기계적 특성에 관한 연구들이 주목을 받고 있다.

따라서 본 연구에서는 합성목재의 화재성능을 평가하는데 기초자료로써 이용하고자 ASTM 2863⁸⁾ 규격에 의거한 한계산소지수(limiting oxygen index; LOI) 측정 및 콘칼로리미터 시험(ISO 5660-1)⁹⁾을 통한 열적 특성의 측정을 통해 합성목재의 연소특성을 살펴보았다. 또한 마루 등 바닥재로 많이 사용되는 일반 목재인 적송과 방부 처리를 한 방부목에 대하여도 동일한 시험을 통하여 합성목재와의 연소특성을 비교·검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

합성목재는 데크재, 단독 및 공동주택의 발코니 바닥과 난간, 조경용 가구, 구조용이나 장식용을 위한 몰딩류등의 용도로 사용되고 있으며 국내에서 생산되는 제품들은 주로 데크재, 사이딩, 펜스(Fence) 및 루버(Louver)시스템 등이 있다.

본 실험에서 사용된 합성목재들은 국내 합성목재 산업체(4개)에서 시판되고 있는 제품들 중 주로 많이 사용되는 데크재를 그대로 사용하였으며 합성목재 자

체의 연소특성을 알아보기 위하여 별도의 가공 처리는 전혀 하지 않았다.

다만 실험 규격의 시편 크기에 맞게 제품의 일부를 절단하여 실험하였다. 또한 일반목재 및 방부목과의 연소특성을 비교·분석하기 위하여 적송(red pine: RP) 및 방부목(antiseptic wood: AW)도 함께 실험하였다.

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1 한계산소지수

한계산소지수 실험은 ASTM D 2863의 규격에 의거하여 합성목재로 시판되고 있는 제품의 일부를 시편의 크기(10mm × 140mm × 3mm)에 맞도록 절단하였으며 시험편의 표면 상태는 연소 거동에 영향을 줄 수 있으므로 흠집이 없도록 하였다. 산소지수 시험기는 Suga Test Instrument에서 제작한 시험기를(Model: ON-1, JP) 이용하였으며 Figure 1에 실험장치의 사진을 나타내었다.

실험방법은 직경 75mm의 유리관 내에 산소 및 질소의 혼합가스의 유량을 40mm/sec의 속도로 흐르게 설정하여 기체 흐름이 각 시험편의 점화 전 최소 30초간 유리관을 흘러가도록 하고 각 시험편의 점화 및 연소시 속도 변화가 없도록 흐름을 유지했다. 시험편은 지지대(sample holder)에 위치하며 시험편 점화시에는 점화기가 시험편의 위쪽 끝부분에 매 5초 마다 불꽃을 주기적으로 제거하면서 최대 30초 동안 시험편 상부면에 닿게 하는데 이 방법은 시험편의 온도 상승에 따라 산소지수가 낮춰지는 것을 막기 위한 절차이다. 점화기를 제거하였을 때 시험편의 상부면 전체에서 불꽃이 붙은 것이 확인되면 연소 시간 및 연소된 길이를 측정하고 연소거동을 관찰하였다. 연소시간 3분 이상 또는 연소 길이가 상부면으로 부터 5cm 이상 연소할 때의 산소 및 질소의 유량을 측정하여 식(1)을 이용하여 산소지수를 계산 한 후 가장 낮은 산소지수를 LOI로 결

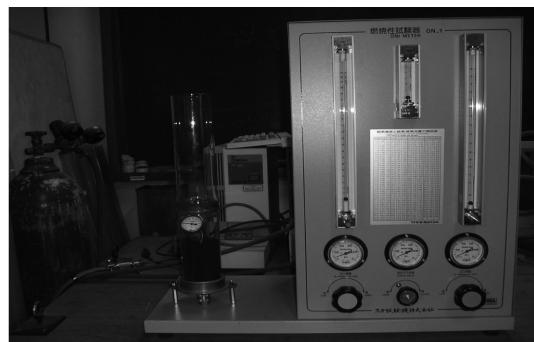


Figure 1. Photograph of oxygen index tester.

정하였다.

$$\text{O.I.}[\%] = \frac{\text{O}_2[\text{l/min}]}{\text{O}_2[\text{l/min}] + \text{N}_2[\text{l/min}]} \times 100 \quad (1)$$

2.2.2 콘칼로리미터

본 실험은 ISO 5660-1 시험방법을 기준으로 국내 FESTEC사에서 제작한 콘칼로리미터(Cone Calorimeter 2006)를 사용하여 실험재료의 착화시간(Time to ignition) 및 평균 열방출률(mean heat release rate), 최대 열방출률(peak heat release rate), 총 방출열량(total heat release) 등의 화재변수들을 측정하였으며 Figure 2에 실험장치의 사진을 나타내었다.

본 실험에 사용된 시편을 100mm × 100mm 크기로 콘 칼로리미터 실험 기준에 따라 준비하였고, 각각의 재료에 대한 세부사항은 Table 1에 제시하였다. 시편을 알루미늄 포일의 중앙에 놓고 바닥면과 측면들을 감싸고 콘히터(cone heater)와 시편 사이의 거리는 25mm로 유지하였다.

시험에 앞서 산소분석기의 산소농도가 20.95 ± 0.01% 가 되도록 교정하였고 배출 송풍기를 켜고 배출유량



Figure 2. Photograph of cone calorimeter.

Table 1. Descriptions of Material for Cone Calorimeter

Materials	Thickness [mm]	Weight [g]	Abbreviation
WPC-A	9.3	113.7	WA
WPC-B	11	121.1	WB
WPC-C	13	91.3	WC
WPC-D	10	122.8	WD
Antiseptic Wood	9.0	86.4	AW
Red Pine	11	59.7	RP

(exhaust flow)을 24 l/s로 설정하였으며 실험을 하는 동안 가스의 유량이나 농도를 계속 확인하여 초기 조건이 유지되도록 하였다. 또한 열유속(heat flux)은 50kW/m², 가열방향은 일반적인 수평방향을 사용하였으며 연소실험은 착화시부터 모든 연소가 종료될 때까지 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 한계산소지수

한계산소지수는 고분자 재료의 연소성 및 난연성을 평가하는 지수로서 재료가 연소를 지속하는데 필요한 최저의 산소의 양을 말하며 일반적으로 한계산소지수는 고분자 물질의 난연성을 평가하는데 반드시 측정해야 할 파라미터 중 하나로써 많이 사용되고 있다.¹⁰⁾

문헌에서는 고분자 재료의 LOI가 30 이상의 값을 가질 경우 그 재료는 난연성을 갖는다고 제시하고 있으며 LOI가 클수록 재료의 난연특성은 우수하다.^{11,12)}

LOI 측정 결과 값들을 아래 Figure 3과 같이 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 합성목재의 LOI 값은 모두 동일하게 20.5%로 산출되었다.

이러한 결과를 나타낸 이유는 일반적으로 합성목재의 원료 혼합비율은 목분(60%)과 합성수지(35%), 첨가제(5%)이고 목재의 LOI 값은 22.1~24.6%이며 폴리프로필렌(PP) 및 폴리에틸렌(PE) 등 합성수지의 LOI 값은 17.8~18.0%이기 때문에 이들을 혼합 성형하여 생산한 합성목재의 LOI 값의 경우 그 중간 값으로 나타난 것으로 사료되며¹¹⁾ 이러한 결과는 합성목재 또한 일반적인 합성수지와 마찬가지로 화재에 취약성을 갖고 있다고 판단할 수 있다.

또한 적송의 LOI 값은 21.5%로 측정되어 합성목재

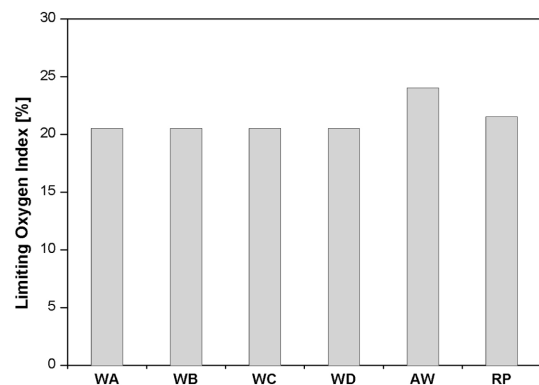


Figure 3. Results of limiting oxygen index test.

의 LOI 값과 큰 차이가 나지 않았으나 방부목의 LOI 값은 24%로 합성목재보다 높게 측정되었다. 이는 방부목이 주로 실외용으로 사용하기 위하여 생산된 제품으로써 제작시 목재에 가압 침투시킨 처리액이 목재 안에서 화학반응을 일으켜 착화 지연 효과를 발생한 것으로 사료된다.

본 실험결과 합성목재의 한계산소지수가 가장 낮음을 알 수 있었다.

3.2 콘칼로리미터

본 실험에서는 합성목재(4종)와 적송 및 방부목 재료를 대상으로 콘칼로리미터 실험을 실시하여 착화시간, 열방출률, 총 방출열량 등을 측정하였다. 그 실험 결과를 Table 2에 제시하였다.

3.2.1 착화시간

착화시간은 재료의 연소성능 및 특성을 나타내는 주요인자로 사용될 수 있다고 판단된다. 본 실험에서의 착화시간은 시편의 표면에서 지속적인 불꽃 연소가 시작되는 시간을 실험자가 육안으로 확인하여 기록하였으며 실험결과는 Figure 4에 나타내었다.

각각의 실험재료를 50kW/m²의 복사열에 노출시켜 대기조건에서 연소시킨 결과, 합성목재 WB 제품은 착화시간이 12초로써 가장 빨리 착화가 되었고 이를 제외한 합성목재의 착화시간은 32~39초로 나타났다. 이와 같이 합성목재 제품별로 착화시간의 차이가 있는 것은 제품별로 표면처리방식이 다르며 재료면 위에 복사열 노출시 제품마다 열분해 속도의 차이에 따라 착화시간의 차이도 발생한 것으로 사료된다.

적송의 착화시간은 20초로 나타났으며, 방부목은 50초로 나타나 실험재료들 중 가장 길었다. 이를 통해 합성목재의 착화시간은 적송에 비해 길었지만 방부목에 비해서는 짧은 것을 확인할 수 있었다.

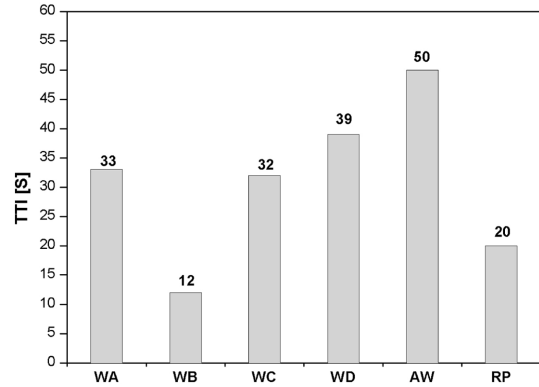


Figure 4. Time to ignition of test materials.

3.2.2 열방출률

재료의 화재위험성은 착화성과 함께 재료가 연소하면서 발생시키는 열방출률에 의해 좌우된다.

열방출률은 화재 위험성을 결정하는데 있어 가장 중요한 변수중의 하나이며 열방출률 시험의 주요 특성은 실험을 통하여 평균 열방출률 및 최대 열방출률등 화재 모델링을 위한 기본적인 변수들을 결정한다는 것이다.

열방출은 산소 소비원리를 이용한 측정으로부터 계산 할 수 있으며 이 원리는 대부분의 일반 가연물의 경우 연소에서 공기 흐름으로부터 소비된 산소 1kg은 13.1 × 10³kJ과 동일한 열을 방출한다는 것이다.¹³⁾

본 실험에서는 합성목재와 적송 및 방부목을 대상으로 실시한 열방출률 실험결과를 Figure 5에 나타내었다.

합성목재들은 착화 후 초기에 열방출률이 급격히 상승하여 착화 후 1~2분 이내에 최대값을 나타내고 적송 및 방부목은 착화 후 435~505초에 최대값을 나타내고 감소하였다.

Figure 6에 실험재료 연소시 최대 열방출률 및 평균 열방출률, 총 방출열량을 나타내었다.

Table 2. Results of Cone Calorimeter Test

Material	Weight [g]	TTI ^a [s]	TTF ^b [s]	Mean HRR ^c [kW/m ²]	Peak HRR		THR ^d [MJ/m ²]
					Values [kW/m ²]	Times [s]	
WA	113.7	33	2131	112.68	300.60	85	238.9
WB	121.1	12	1938	141.94	339.43	60	273.9
WC	91.3	32	1614	108.00	272.01	120	171.7
WD	122.8	39	2239	98.13	270.03	95	224.2
AW	86.4	50	730	103.82	167.01	505	82.0
RP	59.7	20	694	101.14	165.66	435	69.3

^aTime to ignition [TTI] ^bTime to flameout [TTF] ^cHeat release rate [HRR] ^dTotal heat release [THR]

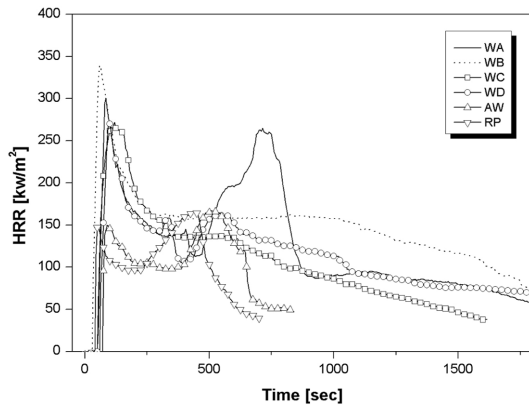


Figure 5. Heat release rates of test materials.

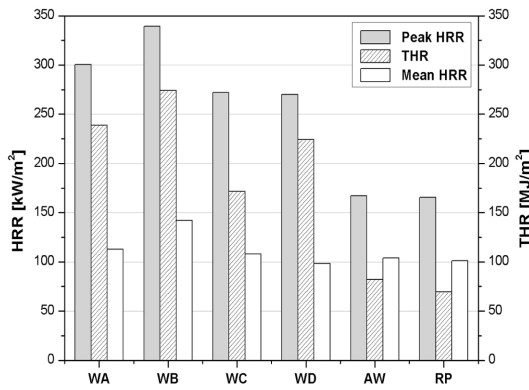


Figure 6. Results of peak and mean HRR, THR.

합성목재의 최대 열방출률 값은 270.03~339.43kW/m²으로써 적송 및 방부목의 최대 열방출률 값인 165.66~167.01kW/m² 보다 상당히 높게 나타났으며 이로써 합성목재의 화재위험성이 적송이나 방부목보다 상대적으로 높다는 것을 알 수 있었다. 특히 착화시간이 가장 짧았던 합성목재 WB제품의 최대 열방출률 값이 착화시간 60초일 때 339.43kW/m²로 가장 높게 나타났으며 평균 열방출률 및 총 방출열량 또한 다른 제품에 비해 가장 높게 나타났다.

적송과 방부목의 최대 열방출률 및 평균 열방출률 값은 거의 유사하였고 총 방출열량은 적송은 69.3MJ/m², 방부목은 82.0MJ/m²로써 방부목이 다소 높게 나타났다.

콘칼로리미터 실험에서 재료 착화 후 180초 및 300초에서의 평균 열방출률이 실제규모 화재에서의 최대 열방출률 값에 좋은 상관관계를 갖는다고 보고되고 있기 때문에¹⁴⁾ 본 실험에서의 평균 열방출량을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Mean HRR at 180s and 300s

Materials	Mean HRR [kW/m ²]	
	180 [sec]	300 [sec]
WA	173.91	163.10
WB	210.54	194.55
WC	194.88	182.17
WD	162.33	156.47
AW	104.15	102.98
RP	94.28	100.71

Table 4. The Class of Flame Spread Index

Class	Flame Spread Index	Test Materials
A	0~25	AW, RP
B	26~75	WPC
C	76~200	-

NFPA(National Fire Protection Association)에서 정하고 있는 NFC(National Fire Code)에서는 실내의 벽체 및 천장의 마감재에 관한 특성을 NFPA 255 ‘건축자재의 표면연소 특성 표준시험방법’에 의하여 Class A, B, C로 구분하여 적용하며 IBC(International Building Code)에서는 건축물의 용도에 따라 벽, 천장의 내부마감 재료에 요구되는 화염전파 및 발열등급을 ASTM E 84 규격시험을 근거로 한 화염전파지수(FSI; Flame Spread Index)를 기초로 하여 Table 4와 같이 Class A, B, C로 구분한다.

또한 재료의 열방출률은 화재의 성장과 전파에 직접 영향을 미치고 있으므로 화염전파지수를 예측하는데 사용될 수 있다.

스티븐 등¹⁵⁾은 heat flux 50kW/m²를 이용한 콘칼로리미터 실험의 최대 열방출률과 ASTM E 84 규격시험을 근거로 한 화염전파지수가 상관성을 지닌다고 하였고 목재 시편을 heat flux 50kW/m²를 이용한 콘칼로리미터 실험을 통하여 화염전파지수 값 75와 200이 최대열방출률 205와 350kW/m²값과 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

위 실험의 상관관계에 따르면 본 실험에서 사용된 적송 및 방부목의 화염전파지수는 A등급이며 합성목재의 화염전파지수는 B등급임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 합성목재의 화재성능을 평가하는데

기초자료로써 이용하고자 한계산소지수 측정 및 콘칼로리미터 시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 합성목재의 LOI는 20.5%로 측정되었으며 이는 일반적인 합성수지의 LOI가 17.8~18%인 것을 감안하면 합성목재 또한 화재에 대한 취약성을 갖고 있다고 판단할 수 있다.

2) 방부목의 대체 재료로 사용되는 합성목재는 시편의 착화시간이 방부목에 비해 약 0.64~0.78배 정도 짧은 것을 확인 할 수 있었으며 이로써 화재 발생시 쉽게 착화가 일어나는 것을 알게 되었다.

3) 합성목재의 열방출률 및 총 방출열량이 적층 및 방부목에 비해 2~3배 가량 높은 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 환경부 고시, “취급제한·금지물질에 관한 규정”, 제 2007-152호(2007).
2. S.K. Shin and T.S. Hwang, “A Study on the Effect of Coupling Agents on the Mechanical Properties of WPC”, Korean Journal of Materials Research, Vol.8, No.12(1998).
3. T.J. Keener, R.K. Stuart, and T.K. Brown, “Maleated Coupling Agents for Natural Fibre Composites”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.35, Issue3, pp.357-362(2004).
4. N.M. Stark and M. Matuana, “Ultraviolet Weathering of Photostabilized Wood-Flour Filled High-Density Polyethylene Composites”, Journal of Applied Polymer Science, Vol.90, pp.2609-2617(2003).
5. S. Borysiak, D. Paukszta, and M. Helwig, “Flammability of Wood-polypropylene Composites”, Polymer Degradation and Stability, Vol.91, pp.3339-3343(2006).
6. N.M. Stark, R.H. White, S.A. Mueller, and T.A. Osswald, “Evaluation of Various Fire Retardants for Use in Wood Flour-polyethylene”, Polym Degrad Stab 95 pp.1903-1910(2010).
7. M. Garcia, J. Hidalgo, I. Garmendia, and J. Garcia-Jaca, “Wood-plastics Composites with Better Fire Retardancy and Durability Performance”, Composites: Part A, Vol.40, pp.1772-1776(2009).
8. ASTM D 2863-77, “Standard Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-like Combustion of Plastics”(2000).
9. ISO 5660-1, “Reaction to Fire Tests-heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)”, ISO (2002).
10. 송영호, 정국삼, “Montmorillonite 첨가에 의한 Epoxy Resin의 난연성 개선”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.22, No.3, pp.300-304(2008).
11. C.J. Hilado, Flammability Handbook for Plastics, Technomic, pp.38-47(1982).
12. R. Friedman, Principles of Fire Protection Chemistry and Physics, 3rd ed, NFPA(1998).
13. KS F ISO 5660-1, “Reaction to Fire Test-heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-part 1: Heat Release Rate(Cone Calorimeter Method)” (2003).
14. 이근원, 김관용, “콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.17, No.1, pp.76-84(2003).
15. M.G. Stevens, V. Voruganti, and R. Rose, “Correlation of Small Scale Fire Tests to ASTM E 84 Tunnel Performance for Thermoset Resin System”, Proc Fire and Material, Int'l Conference, Interscience Communication Ltd, London, Vol.4, p.319(1995).