

탄소재료의 적용 방법에 따른 파티클 보드의 연소 특성

서현정* · 조정민* · 황욱* · 이민철****

*인천대학교 안전공학과 · **인천대학교 소방방재연구소

Evaluation of Fire Characteristics for Particle-board with Exfoliated Graphite Nanoplatelets Added

Hyun Jeong Seo*, Jeong Min Jo*, Wuk Hwang* and Min Chul Lee****

*Dept. of Safety Engineering, College of Engineering, Incheon National Univ.

**Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National Univ.

(Received 2 March 2017, Received in revised form 3 June 2017, Accepted 8 September 2017)

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the fire retardant performance of exfoliated graphite nanoplatelets (xGnP) applied for particleboard. This work measured heat release rate(HRR), total heat release(THR) and smoke production rate(SPR) of xGnP added particleboard, using cone calorimeter to assess its fire characteristics according to the KS F ISO 5660-1 standard code. Heat release rates of all specimens treated by xGnP were less than the 200 kW/m² for a total experiment period of five minutes. Heat release rates of the specimens coated with xGnP were lower than those of the specimens made by mixing wood particles with xGnP directly. Meanwhile, the total heat release rates of xGnP coated specimen maintained quite lower level than the uncoated so the xGnP coating were effective in improving the fire retardant performance of particleboard. However, the smoke emission peaking problem at the initial combustion period, which was caused by adding base coating materials, should be resolved for further satisfaction as a fire retardant materials.

Key Words : Fire safety, Wood-based materials, Cone calorimeter, Carbon materials

1. 서론

탄소재료는 넓은 의미로 자연계에 존재하는 탄소 원자로 구성된 재료를 의미하며, 높은 강성 및 탄성, 그리고 넓은 비표면적을 가진 물질을 말한다. 해당 재료가 복합재료로 이용될 경우, 적용되는 재료의 강성 및 열전도율을 높이기 위한 충전재(filler)로 많이 사용되고 있다[1]. 이러한 탄소재료의 종류는 크기 및 형상에 따라 다양하며 크게 구형, 판형 및 관형으로 나뉜다. 이 중 탄소섬유와 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 관형임과 동시에 다중 벽 구조를 가질 수 있도록 구조를 개질시킬 수 있어 플라스틱, 코팅

물질 등 각종 고분자 재료에 충전재로서 이용되어 기계적 성질 및 난연 성능을 향상시키는 데 기여할 수 있다[2,3].

판형을 가진 탄소재료로는 대표적으로 그래핀(graphene)이 있으며, 그래핀과 그래핀 기반의 탄소재료는 전기 전도율 및 우수한 기계적 특성을 가지고 있다. 해당 재료들은 지구상에 널리 분포되어 있어 전 세계적으로 주목을 받고 있는 재료이다[4]. Stankovich 등[4]과 Virendra 등[5]은 흑연(graphite)을 박리하여 제작된 나노 판상물질인 GNP(graphite nanoplatelets)를 유용하면서도 저렴하며 탄소나노튜브와 유사한 기계적 강도 및 열전도율, 전기전도성을 나타낼 수 있는 고가의 탄소나노튜브를 대신할 충전제로 주목하였다[4-6].

이러한 흑연은 탄소원자로 이루어진 하나의 판상 재료가 겹겹이 쌓여 구성된 층상 구조로 형성되어 있으며, 육각형으로 형성된 탄소원자 판은 각각 약한

† Corresponding Author, LMC@inu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

반-데르-발스 힘(van-der-Waals Forces)에 의해서 서로 연결되어 있다. 흑연의 층상구조 내부로 원자, 입자 및 이온 등 다양한 물질을 첨가하여 흑연 층간 화합물(graphite intercalation compounds, GICs)을 형성시킬 수 있다[6-11]. 그래핀의 장점은 고분자 물질과 나노 화합물로 중합체를 형성하였을 때 더 부각된다. Lee 등[9], Kim 등[8], Ansari 등[12], 그리고 Fukushima와 Drzal[6]은 고분자/그래핀 화합물은 일반적인 고분자 물질에 비하여 높은 전기 전도성, 기계적 강도, 열적 안정성, 그리고 난연 성능을 나타내며, 다른 충전제를 적용했을 때에 비하여 해당 성능들이 더 뛰어나게 발현된다는 것을 확인하였다. 추가적인 사례로, Ramanathan 등[13]은 흑연의 열적 특성에 대하여 확인하였고, 흑연이 고유의 열적 안정성을 가지고 있으며, 이러한 성능을 바탕으로 충전제로 재료 내부에 적용하였을 때 해당 재료의 열 중량 손실 및 열 방출량을 감소시키는 것이 가능하다는 것을 검증하였다.

본 연구에서는 그동안 보고되었던 흑연 및 흑연 기반 재료의 다양한 장점들 중에서 난연 성능에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 본 연구를 진행하기에 앞서 흑연의 열적 안정성에 대해서 열중량 분석(thermogravimetric analysis, TGA)을 통해 확인하였고, 해당 재료가 난연성 충전재로써 매우 유용할 것으로 판단하였다. 선행 연구에서의 열중량 분석 결과에 의하면, 개질하지 않은 흑연의 경우 중량 감소율이 약 0.1% 진행되었으며, 이는 열적 안정성이 있는 결과로 사료된다[14]. 이러한 특성을 가진 흑연을 다공성으로 제조한 개질 흑연(exfoliated graphite nanoplatelets, xGnP)을 목질 재료 중 파티클보드에 코팅 방법과 내부 혼합 방법을 통해 적용하였다.

본 연구에서 사용된 목질재료는 파티클보드(particle board)로 국내에서 건축물의 내장재 및 가구재로 주로 사용되는 재료로써, 재활용이 가능한 재료로 수요가 꾸준한 제품이다. 또한 국내의 경우 신축 건축물의 내부 재료가 90% 목질 기반으로 제작되었다는 것[15,16]을 감안하였을 때 목질 건축 재료의 단점으로 판단되는 가연성을 개선할 필요성이 있다고 판단된다. 현재까지 진행된 선행연구에서는 목질재료의 난연 성능을 향상하기 위해 목질재료 내부에 난연성 충전제를 가압 주입하는 방법과 재료 표면에 난연성 코팅 물질을 도포하는 방법들이 있으며, 적용된 난연성 충전제는 주로 수용성을 가진 재료였다[17-20]. 본 연구에서는 이러한 방법들 중에서 흑연을 폭발 및 분쇄 작업을 통해 제조한 개질 흑연을 혼합한 코팅 물질을 목질 건축재료 표면에 적용하는 방법과 목질 판상재 제작 시 원재료인 목분과의

물리적 혼합하여 적용하는 방법을 선택하였다. 개질 흑연의 경우, 다른 수용성 난연제와는 다르게 물에 녹지 않는 성질을 가졌기 때문에 가압 주입법이나 함침법을 통해 목질 재료 내부에 적용하기 곤란하였기 때문이다.

본 연구에서는 개질 흑연이 적용된 목질 재료의 난연 성능을 확인하기 위하여 ISO 규정에 따른 콘 칼로리미터 실험을 진행하였고, 열 방출률(Heat release rate, HRR), 총 방출열량(Total heat rate, THR), 그리고 연기 방출량(Smoke production rate, SPR)을 측정하였다. 또한, CO 및 CO₂의 방출 수율을 측정하여 해당 데이터를 분석하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 공시재료

2.1.1. 목질재료

본 실험에서 사용된 파티클보드는 D사에서 제공 받은 재활용 목질 파티클로 제작되었고, 침엽수와 활엽수가 혼합된 재료이다. 해당 파티클들은 미이용재, 임지 폐잔재 및 공장 폐잔재 등의 재활용 재료들을 분쇄하여 오염되지 않은 부분으로 분류하여 선정되었다. 표층 및 바닥층의 파티클은 2~3 mm, 심층 파티클은 30~40 mm 크기로 분쇄된 것을 사용하였고, 파티클보드 제작 시 사용된 접착제는 요소 수지로 고형분 65%의 에멀전 상태의 것을 적용하였다. Fig. 1에 파티클보드의 기본적인 구조 및 크기에 대해 나타내었다.

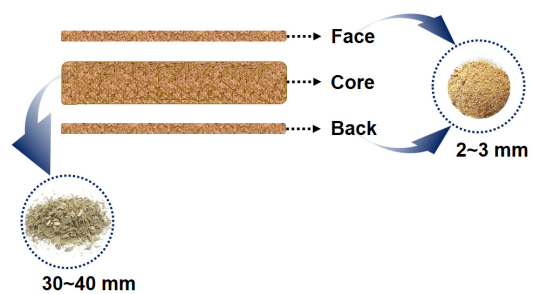


Fig. 1. The structure and particle size of particle board.

파티클보드는 일반 목질 파티클로 구성된 시험편과 개질흑연을 혼합하여 적용한 시험편 두 종류로 제작하였으며, 개질흑연을 혼합하여 제작한 시험편의 경우 개질흑연을 전체 파티클 중량 대비 1, 3, 5%로 각각 첨가하였다. 제작된 시험편은 KS F ISO 5660-1 (콘 칼로리미터 시험법) 규정에 의거하여 가로 100 mm, 세로 100 mm로 절단하였다. 공시재료의 제작 조건에 대하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Preparation of particle boards by mixing with xGnP

Distribution	Mixed condition	Particle weight		Moisture content of particles	Ratio of EGnP	Hot pressing conditions
		Face	Core			
Particle board	Untreated	290 g	434 g	2%	0	Temperature 170 °C, Pressure 34 kg/cm ²
	Wood particle + xGnP	287 g	429 g		1	
		281 g	421 g		3	
		275 g	412 g		5	

Table 2. Preparation of particle boards by coating with xGnP

Distribution	Mixed condition	Ratio of EGnP	Base coatings composition	Additives	Mixing times
Coating materials	Base coatings	0%	Acrylic Emulsion	-	-
	EGnP + coating materials	1%		Surfactants + Hardener	10 min
		3%			
		5%			

2.1.2. 코팅 재료

본 실험에서는 기본 도료에 개질 흑연을 비율별로 혼합하여 난연성 코팅 물질을 제조하였으며, 교반기를 활용하여 회전속도 1,000 rpm의 조건으로 물리적으로 혼합하였다. 실험에 사용된 도료는 S사의 제품으로 현재 건축물 내부에 적용되고 있으며, 해당 도료는 아크릴 에멀전 수지(Acrylic emulsion resin)를 기반으로 한다. 난연성 코팅 재료는 기본 도료에 xGnP, 계면활성제, 경화제를 첨가하여 각각의 비율 당 10분씩 혼합하여 제조하였다. 해당 도료의 성분 및 비율에 대해서 Table 2에 나타내었다.

2.2. 실험 방법

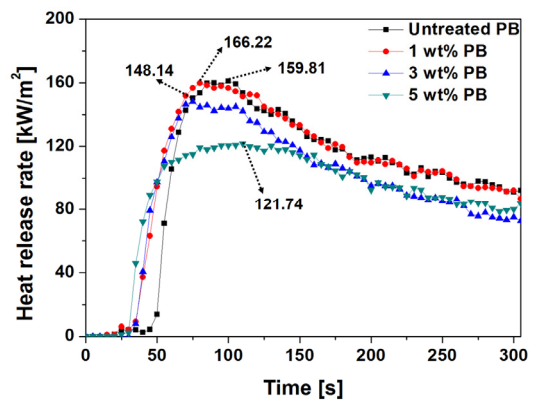
개질 흑연을 적용한 파티클보드의 연소 특성 및 난연 성능을 확인하기 위해서 KS F ISO 5660-1 기준에 따른 콘 칼로리미터(Cone calorimeter, Fire Testing Technology Ltd., UK)를 사용하였다. 건축물 마감 재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준에 따른 콘 칼로리미터 실험을 통하여 착화 후 열방출률, 총 방출열량 및 연기발생 정도를 측정하여 난연 성능을 평가하였다. 또한 질량감소율과 CO 발생 수율을 통해서 연소특성의 변화에 대하여 확인하였다. 콘 칼로리미터 실험은 상대습도 50%, 가열강도(Heat flux)를 50 kW/m²로 하여 KS F ISO 5660-1 기준에 의거하여 각 샘플 별로 5분 동안 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

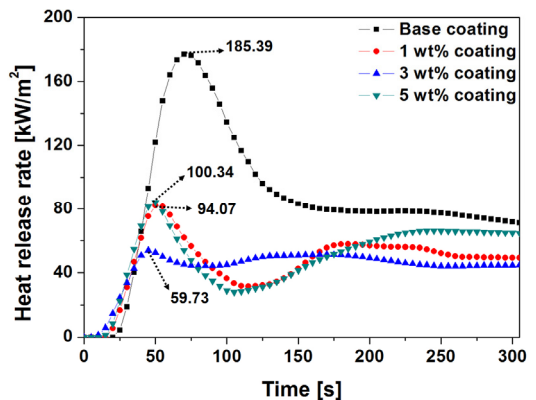
3.1. 열방출률

열방출률(Heat release rate, HRR)이란 시험편의 표면적당 발생하는 순간적인 열량의 크기를 나타내는 값으로, 시험편 표면에서의 화염 확산 가능성을 잘

표현할 수 있는 요소라 할 수 있다[14,24]. Fig. 2에서 개질 흑연을 0, 1, 3, 5%의 중량 비율 별로 적용한 시험편의 열방출률 곡선을 나타내었다. 개질 흑연을 적



(a) xGnP mixed test specimen



(b) xGnP coated test specimen

Fig. 2. Heat release rate values of specimens with different xGnP mass ratio.

용한 시험편 모두 200 kW/m^2 를 초과하지 않아 ISO 기준을 만족시키는 난연 성능을 가지고 있다는 것을 확인하였다. 그러나 개질 흑연을 적용하지 않은 시험편의 경우, 무처리 시험편의 최대 열방출률 또한 200 kW/m^2 를 초과하지 않았다. 이는 두꺼운 파티클로 형성된 코어 층의 내부 공극 및 파티클 자체로의 흡열로 인하여 표면에서의 열방출률이 높지 않게 측정된 것으로 판단된다. 이러한 열방출률 값은 선행 연구에서 발표되었던 목질재료에서의 결과 값과는 다소 차이가 있었다[21-23]. 선행 연구의 경우, 무처리 목재 가연물에서의 발열량이 200 kW/m^2 이상의 값으로 측정되었으나 본 연구에서 진행한 실험에서의 결과 값은 200 kW/m^2 미만으로 확인된 것이 특이 사항이라 할 수 있다.

또한, 개질 흑연을 적용하는 방법에 따라 난연 성능이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 전체적인 열방출률 값이 낮게 나타나는 것은 개질 흑연을 도료와 혼합하여 코팅 처리한 방법으로 제작된 시험편들이었다. 이러한 결과는 기존의 연구 결과와는 다른 결론을 나타내었다. 선행 연구들에 의하면, 난연성 충전재 처리 시 목재 표면보다는 목재 내부에 함침하거나 고정하는 것이 더 성능 향상에 효과적이었다[24-26]. 그러나 본 연구에서 수행한 개질 흑연의 처리 방법 중 표면처리 방법의 난연 성능 향상이 더 효과적으로 확인되었고, 이는 개질 흑연이 난연성 발현 시 흡열 반응으로 인해 열방출률을 낮추기 때문에 흡열 시 목질재료 내부에서의 개질 흑연 온도 상승으로 char 형성과 함께 혼소가 진행되어 재방출되는 열의 양이 증가한 것으로 사료된다.

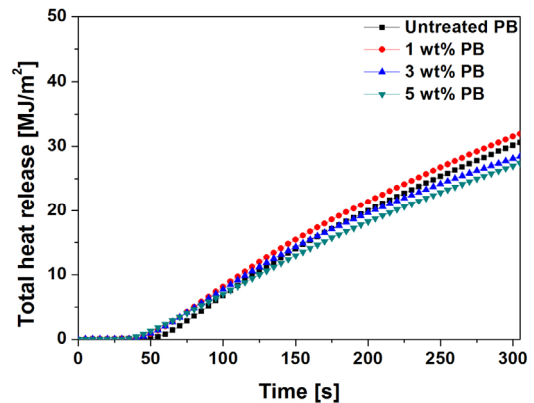
초기의 열방출률 최댓값을 나타내는 시간대의 경우, 개질 흑연을 혼합 처리한 시험편들이 재료의 표면에 개질 흑연을 적용한 시험편들의 최대 열방출률 시간보다 늦은 것이 확인되었다. 또한, 개질 흑연을 표면 처리한 시험편의 경우, 비율에 상관없이 50 초대 전후로 peak 점이 나타나는 것을 확인하였다. 그러나 실험이 진행되는 동안, 표면 처리 시험편은 100 kW/m^2 를 넘지 않았으며, peak 점을 나타낸 이후 열방출률 값이 다시 상승하는 것으로 나타났는데 이는 표면에 형성된 char가 탈착되면서 2차 탄화가 진행되었기 때문으로 사료된다.

Walter 등[27]은 탄소재료를 산 처리하여 코팅 물질로 제조하고, 해당 재료를 목질 재료 표면에 코팅 처리하였을 때, 재료의 표면에 열을 집중적으로 흡수하며 재료 내부로의 열의 이동을 거의 차단한다는 것을 확인하였다. 개질 흑연 또한 탄소를 기반으로 한 재료로서 열을 흡수하여 열의 이동을 지연시키는 성질을 가지고 있어, 목질 파티클과 혼합하여 파티클보드를 제작하는 것보다 코팅 물질로 활용하여

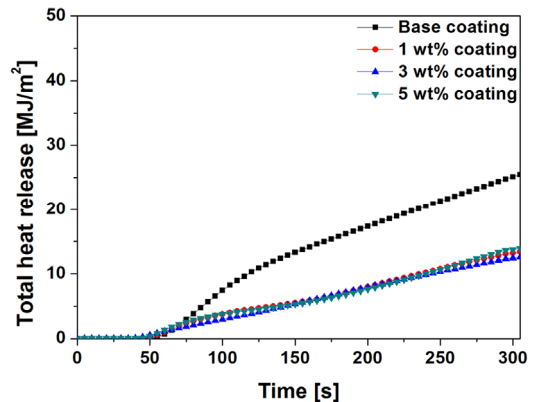
표면 처리를 하는 방법이 연소 후 화재 확산 가능성이 높지 않다는 것을 판단할 수 있었다. 또한, 적용 비율이 높을수록 오히려 열방출률이 높아지는 결과를 나타내었는데, 적용 중량 비가 높다고 해서 반드시 난연 성능이 향상되는 것이 아니므로 적정 적용 비율을 찾는 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

3.2. 총 방출열량

총 방출열량(Total heat release rate, THR)은 시험편의 표면에서 연소가 진행되는 동안 발생하는 열의 총량을 나타내는 값으로, 해당 값은 다른 재료의 표면으로의 화염 확산 가능성을 파악할 수 있어 화재 발생 후의 연소 확산 가능성을 예측할 때 용이한 결과 값이다[14,24]. 또한 열방출률이 산소 1 kg이 연소될 때 13.1 MJ/kg 의 열량을 방출하는 원리를 활용하여 계산된 시간의 흐름에 따른 순간적인 방출열량의 값이라면 총 방출열량은 열방출률 값을 적분하여 산출한 열량의 총 합이다[6,7]. Fig. 3에서 개질흑연을 0, 1, 3, 5%의 중량 비율로 목질 파티클과 혼합한 시험편과,



(a) xGnP mixed test specimen



(b) xGnP coated test specimen

Fig. 3. Heat release rate values of specimens with different xGnP mass ratio.

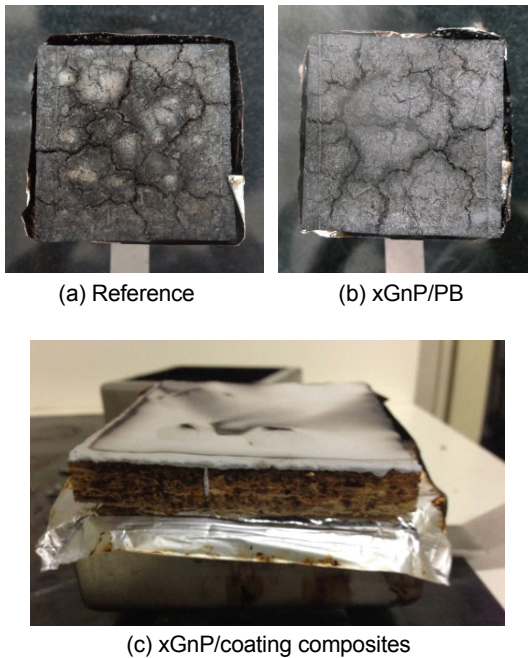


Fig. 4. Morphology of the board char residues after cone calorimeter test.

코팅 처리한 시험편의 총 방출열량 값을 나타내었다. 총 방출열량은 실험이 진행되는 5분 동안 계속해서 증가하는 것이 확인되었다. 개질 흑연의 경우, 열분해가 거의 이루어지지 않는 특징[8]을 가지고 있으나, 적용되는 중량비가 높아질수록 오히려 방출되는 열량이 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Fukushima 등[8] 과 Zhao 등[13]의 연구결과에서처럼 폭발 및 분쇄의 과정에서 발생된 흑연의 그래핀 층간에 흡열된 열의 총 양이 측정된 것으로 판단된다. 연소 실험이 진행되기 전과 진행된 후의 시험편을 확인하였을 때, 개질 흑연을 처리한 시험편은 방법에 관계없이 재료 내부에서의 균열이 거의 발생하지 않은 것을 확인하였다.

개질 흑연을 처리 중량 비에 따라 열적 특성이 일관적으로 나타나는 것은 코팅 처리한 시험편으로, 개질 흑연을 처리하여 목질 재료에 난연 성능을 부여할 때 재료 내부에 적절히 혼합 및 분산이 되었는지에 따라 다른 결과가 나타나는 것으로 보인다. 이는 Dittrich 등[2]이 확인하였던 것처럼 탄소기반 재료의 안정적인 분포가 난연 성능에 영향을 미친 것으로 사료된다. 콘 칼로리미터 실험 후 잔여물의 사진을 Fig. 4에 나타내었다.

3.3. 연기 방출량

Li [32], Lee 등[33], 그리고 Mouritz 등[34]은 목재로 제작된 다양한 종류의 실내 건축재로나 가구재

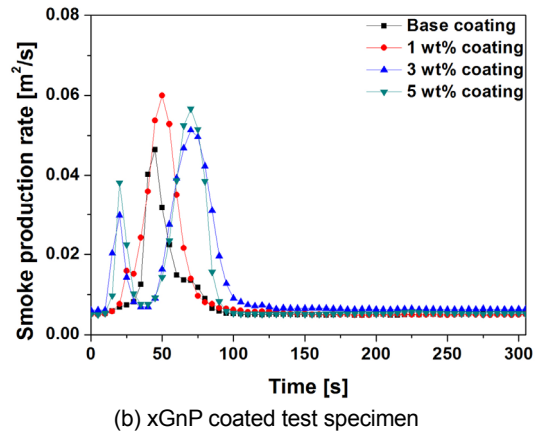
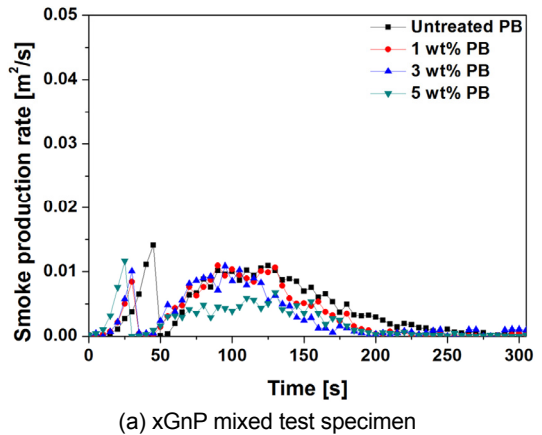


Fig. 5. Smoke production rate of specimens with different xGnP mass ratio.

의 경우, 연소 시에 시야를 확보하기 어려울 만큼의 연기를 방출하기도 하며, 이는 화재 발생 후 재실자의 실외로의 대피를 어렵게 하는 원인이 될 수 있다고 하였다. 이러한 연기 및 독성 가스의 발생은 열방출량의 값과 함께 화재 안정성에 영향을 미치는 중요한 요인으로 판단된다. Fig. 5에 연기 방출량의 값에 대하여 나타내었다.

열방출량의 결과와는 다르게 연기 방출량의 경우, 코팅 처리를 한 경우의 시험편의 값이 초기에 더 높게 나타나는 것이 확인되었다. 이는 코팅 물질의 베이스 도료의 주된 화학 성분인 폴리 아크릴 아마이드의 열분해가 진행됨에 따라 발생하는 연기 물질로써, 높은 열로 인해 연기가 발생되지만, 곧 탄소기반의 재료인 개질 흑연과 함께 char를 형성하며 50초 이후에는 연기 발생량이 더 이상 증가하지 않게 되는 것을 그래프를 통하여 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 하였을 때, 개질 흑연을 목질 재료 내부에 혼합하는 것보다 코팅 물질과 혼합하여 재료의 표면에 적용하는 방법이 열량에 관해서는 더 효

Table 3. Results of Cone calorimeter test

Parameter	Untreated PB	1 wt% PB	3 wt% PB	5 wt% PB	Base coating	1 wt% coating	3 wt% coating	5 wt% coating
PHRR [kW/m^2]	161.22	159.81	148.14	121.74	185.39	94.07	59.73	100.34
time to PHRR [s]	100	80	75	110	70	45	35	40
THR [MJ/m^2]	30.62	31.96	28.49	27.42	25.47	13.39	12.58	13.93
CO yield (kg/kg)	0.007	0.008	0.005	0.010	0.014	0.021	0.026	0.023
CO ₂ yield (kg/kg)	1.237	1.272	1.312	1.319	0.980	0.890	0.820	0.810
CO/CO ₂	0.005	0.006	0.004	0.007	0.014	0.023	0.032	0.028

과적일 수 있으나, Bettencourt 등[35]이 발표했던 내용에서처럼 코팅 물질의 베이스 도료의 주성분인 아크릴이 연소 시 다량의 연기를 방출하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 해당 실험결과를 바탕으로 코팅 물질 제조 시 베이스 도료가 가지고 있는 연기 발생량이나 독성 가스를 배출할 가능성을 고려하여 베이스 도료의 화재 안정성 및 친환경성 역시 고려해야 한다고 사료된다. 그래프에서 나타났듯이 개질 흑연을 코팅 처리한 시험편의 연기 방출량이 개질 흑연을 혼합하여 파티클보드로 제조한 시험편이나 무처리 시험편에 비하여 연기 방출량이 높은 것을 알 수 있었다. 또한, 개질 흑연을 표면 처리한 시험편 중 3 wt%와 5 wt% 시험편들의 경우, 초반에 연기 방출 이후 표면에 char가 형성되면서 재료의 연소 진행이 잠시 지연된 후, 2차적인 연기 방출이 진행되는 현상이 발생하였다. 1 wt%의 경우에는 무처리 시험편과 유사한 결과를 보였고 첨가된 개질 흑연의 중량이 너무 적어 성능이 보이지 않았기 때문에 사료된다. 이러한 결과를 바탕으로 난연 성능이 향상된다고 하더라도 개질 흑연을 혼합하여 제조한 도료에서 방출되는 연기 방출량이 상당하다는 것을 알 수 있었으며, 목질재료에 개질 흑연이 혼합되어 제조된 시험편의 경우에는 연기 방출량이 줄어든 것을 확인할 수 있었다. Lee 등[33]과 Seo 등[37]의 선행 연구에서처럼 개질 흑연이 목질 재료가 연소되면서 발생하는 연기를 어느 정도까지는 흡수할 수 있다는 것으로 판단하였다.

CO는 불완전 연소 생성물로서 연소로 인해 생성된 재료 표면의 char로 인하여 공기 중의 산소와 재료 표면의 접촉이 제한되면서 발생되며[27,36-38], CO₂는 재료가 완전 연소되었을 때 발생하는 것으로 일반적으로 CO₂의 발생량이 높을수록 재료의 연소율도 높아진다[40]. 목재 및 목질재료 연소 시 char의 생성은 표면에서의 화염 전파 속도를 늦추고, 이 때 생성되는 가스는 주로 CO로서 해당 연소 가스의 발생량이 증가할수록 재료의 연소 진행이 더디게 진행되는 것으로 판단된다.

표면에 도료를 적용했을 경우, 연소 초기에 도료 성분에서 기인된 연소 생성물로 인해 연기 방출량이 증가하지만 CO₂의 방출 수율을 보면 재료의 연소 진행이 억제되었음을 확인할 수 있다. 또한 해당 시험편들의 경우 CO의 방출 수율이 증가하였고, CO/CO₂ 값이 다른 시험편들에 비해 증가하였다. 앞서 제시된 열방출률 및 총 방출열량 결과 값이 높을수록 CO/CO₂ 값이 낮은 것으로 측정되었고, 이러한 결과를 바탕으로 선행 연구[40]에서 발표된 바와 유사하게 CO 및 CO₂의 발생이 재료의 연소 거동과 높은 상관관계를 가지고 있다고 판단되었다.

4. 결론

본 연구는 건축 내장재 및 가구재로 활용이 가능한 목질 재료의 난연 성능을 향상하기 위하여 탄소 기반의 난연성 첨가제로써 개질 흑연을 처리한 목질 재료의 난연 성능 평가를 위하여 진행되었고, 콘 칼로리미터를 이용하여 화재 안정성에 대하여 분석하였다. 개질 흑연을 적용한 모든 시험편의 열방출률 값은 총 5분간의 연소시간에서 200 kW/m^2 을 넘지 않아 ISO 규정의 난연 3급 기준을 만족시키는 결과를 나타내었다. 총 방출열량 값의 경우 해당 기준인 8 MJ/m^2 이하의 값을 만족시키지 못하였으나, 개질 흑연을 코팅 처리한 시험편이 전반적으로 $12\sim 3 \text{ MJ/m}^2$ 정도의 낮은 값으로 산출되어 무처리 및 혼합처리 시험편에 비해 약 50%의 열량 감소를 나타내었다. 이러한 열 방출 특성은 ISO 규정에서의 난연 성능 등급을 부분적으로 만족하였으나, 총 방출열량 값을 개선하기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다. 연기 방출량의 경우에는 개질 흑연/코팅 처리한 시험편의 방출량이 더 많은 것으로 나타났으며, 코팅 물질의 화학적 기반 역시 고려되어야 할 것으로 사료된다. 또한 향후 목질 재료 표면 처리에 활용될 난연성 코팅 물질 제조 시 화학 성분을 확인하여 건물 실내에 적용하였을 때 화재 안정성을 확인해야 한다고 판단된다. 본 연구를 통해 개질 흑연을 적용 방법에 따른 목질 재료의 난연 성능의 향상을 확인하

었다. 해당 결과를 바탕으로 후속 연구에서는 연기 방출량을 절감하고, 유해가스 성분을 정량 및 정성적으로 분석하여 개질 흡연을 난연성 첨가제로 적용하고 해당 기술을 상용화하는 방안을 개발하고자 한다.

후 기

이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2016R1C1B1006636). 이 논문은 한국전력 공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 : R15XA03-13).

References

- [1] S.J. Kang, K.J. Kim, M.S. Kim, and B.J. Kim et al, Application Handbook of carbon materials (1st ed.), Publisher Daeyoung, Seoul, 2008, 715.
- [2] B. Dittrich, K.A. Wartig, D. Hofmann, R. Mülhaupt B. Schartel, Flame retardancy through carbon nanomaterials: Carbon black, multiwall nanotubes, expanded graphite, multi-layer graphene and graphene in polypropylene, *Polym. Degrad. Stabli.*, 98 (2013) 1-11.
- [3] T. Kamae, L.T. Drzal, Carbon fiber/epoxy composite property enhancement through incorporation of carbon nanotubes at the fiber-matrix interphase - Part I: The development of carbon nanotube coated carbon fibers and the evaluation of their adhesion, *Compos. A.*, 43(9) (2012) 1569-1577.
- [4] S. Stankovich, D.A. Dikin, G.H.B. Dommett, L. M. Kohlhaas, E.J. Zimney, E.A. Stach, Graphene-based composite materials, *Nature.*, 442 (2006) 282-286.
- [5] S. Virendra, J. Daeha, Z. Lei, D. Soumen, I.K. Saiful, S. Sudipta, Graphene based materials: Past, present and future, *Prog. Mater. Sci.*, 56 (2011) 1178-1271.
- [6] V. Babrauskas, Development of the Cone Calorimeter - A Bench-scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption, *Fire and Materials*. 8(2) (1983) 81-95.
- [7] J. Rychlý, M. Hudáková, L. Rychlá, K. Csomorová, The rate of oxygen consumption from a cone calorimeter as an original criterion of evaluation of the fire risk for the Resin Kit polymers, *Eur. j. environ. saf. sci.*, 2(2), (2014) 23-27.
- [8] H. Fukushima and L. T. Drzal, A carbon nanotube alternative: graphite nanoplatelets as reinforcements for polymers, ANTEC 2003 Conference Proceedings, 2003, 2230-2234.
- [9] S. Kim, L.T. Drzal, High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets, *Sol, Energy, Mater, Sol, C.*, 93 (2009) 136-142.
- [10] J.I. Kim, M.R. Kang, D.W. Son and S.B. Park, Evaluation of flame retardant performance of retardant-treated wood by inorganic flame retardant, *J, Kor, Wood, Sci, Technol.*, Spring Annual Conference, 2012, 56-57.
- [11] S. Lee, D. Cho, L.T. Drzal, Realtime observation of the expansion behavior of intercalated graphite flake, *J, Mater, Sci.*, 40 (2005) 231-234.
- [12] J.J. Mack, L.M. Viculis, A. Ali, R. Luoh, G. Yang, H.T. Hahn, F.K. Ko, R.B. Kaner, Graphite nanoplatelet reinforcement of electrospun polyacrylonitrile nanofibers, *Adv, Mater.*, 17 (2005) 77-80.
- [13] Y.F. Zhao, M. Xiao, S.J. Wang, X.C. Ge, Y.Z. Meng, Preparation and properties of electrically conductive PPS/expanded graphite nanocomposites, *Compos, Sci, Technol.*, 67 (2007) 2528-2534.
- [14] S. Ansari, E.P. Giannelis, Functionalized graphene sheetpoly(vinylidene fluoride) conductive nanocomposites, *J, Polym, Sci, B, Polym. Phys.*, 47 (2009) 888-897.
- [15] T. Ramanathan, A.A. Abdala, S. Stankovich, D.A. Dikin, M.H. Alonso, R.D. Piner, Functionalized graphene sheets for polymer nanocomposites, *Nat, Nanotechnol.*, 3 (2008) 327-331.
- [16] H.J. Seo, S. Kim, D.W. Son, The Evaluation of the Flame Retardant Performance of the Wood-based Building Materials Applied to Carbon Materials, *J, Kor, Soc, Living, Environ*, 21(5) (2014) 855-861.
- [17] H.J. Seo, S. Kim, D.W. Son, S.B. Park, Review on enhancing flame retardant performance of building Materials using carbon nanomaterials, *J, Kor, Soc, Living, Environ*, 20(4) (2013) 514-526.
- [18] Y. Park, B. Jun, J. Seo, S. Kim, The Improvement of Thermal Conductivity of wood-based Panel for Laminated Flooring Used the Exfoliated Graphite for Heating Energy Conservation, *J, Kor, Soc, Living, Environ*, 18(6), (2011) 650-655.
- [19] S.W. Moon, K.B. Lim, D.H. Rie, A Study on the fire prevention performance evaluation of the wood impregnated with flame retardant, *J. Kor. Institute of Fire Sci. & Eng.*, Spring Annual Conference,

- 321-324 (2011).
- [20] H.J. Park, S.M. Lee, Combustion characteristics of spruce wood by pressure impregnation with water glass and carbon dioxide, *J. Kor. Institute of Fire Sci. & Eng.*, 26(4), (2012) 18-23.
- [21] J.M. Choi, A study on combustion characteristics of fire retardant treated *pinus densiflora* and *pinus koraiensis*, *J. Kor. Wood, Sci, Technol.*, 39(3), (2011) 244-251.
- [22] D.W. Son, M.R. Kang, D.H. Lee, S.B. Park, Decay resistance and anti-mold efficacy of wood treated with fire retardants, *J. Kor. Wood, Sci, Technol.*, 41(6), (2013) 559-565.
- [23] S.C. Kim, D.G. Nam, Fire Characteristics of Flaming and Smoldering Combustion of Wood Combustibles Considering Thickness, *Fire Sci. Eng.*, 29(4), (2015) 67-72.
- [24] Y.J. Chung, Combustion Characteristics of Veneers Treated by Ammonium Salts, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, 18(2) (2007) 194-198.
- [25] J. Lindholm, A. Brink, M. Hupa, Influence of decreased sample size on cone calorimeter results, *Fire Mater*, 36, (2012) 63-73.
- [26] H.J. Seo, W. Hwang, M.C. Lee, Combustion Characteristics of Fire Retardants Treated Domestic Wood, *J. Korean Soc. Combust.* 22(2), (2017) 14-23.
- [27] L.A. Lowden, T.R. Hull, Flammability behavior of wood and a review of the methods for its reduction, *Fire. Sci. Rev.*, 2(4) (2013) 1-19.
- [28] C. Branca, C.D. Blasi, 2011. Semi-global mechanisms for the oxidation of diammonium phosphate impregnated wood, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.*, 91 (1) (2011) 97-104.
- [29] W.F. Walter, B. Heinrich, M. Washington, J.K. Hermanus, L. Dewan, Characterization of commercial expandable graphite fire retardants, *Thermochimica Acta*, 584, (2014) 8-16.
- [30] Z.X. Zhang, J. Zhang, B. Lu, Z.X. Xin, C.K. Kang, J.K. Kim, Effect of flame retardants on mechanical properties, flammability and foamability of PP/wood-fiber composites, *Compos. Part A. Appl. Sci. Manuf.*, 43, (2012) 150-158.
- [31] H. Fukushima, L.T. Drzal, B.P. Rook, M.J. Rich, Thermal conductivity of exfoliated graphite nanocomposites, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 85, (2006) 235-238.
- [32] B. Li, Influence of polymer additives on thermal decomposition and smoke emission of poly(vinyl chloride), *Polym. Degrad. Stabil.*, 82(3), (2003) 467-476.
- [33] B.H. Lee, H.S. Kim, S. Kim, H.J. Kim, B.W. Lee, Y. Deng, Q. Feng, J. Luo, Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particle-board using a cone calorimeter, *Constr. Build. Mater.*, 25(7), (2011) 3044-3050.
- [34] A.P. Mouritz, Z. Mathys, A.G. Gibson, Heat release of polymer composites in fire, *Compos. Part A. Appl. Sci. Manuf.*, 37(7), (2006) 1040-1054.
- [35] A.F. Bettencourta, C.B. Neves, M.S. de Almeida, L.M. Pinheiro, S.A. Oliveira, L.P. Lopes, M.F. Castro, Biodegradation of acrylic based resins: A review, *Dent. Mater.*, 26, (2010) 171-180.
- [36] J.H. Lee, J. Kim, S. Kim, J.T. Kim, Thermal Extractor Analysis of VOCs Emitted from Building Materials and Evaluation of the Reduction Performance of Exfoliated Graphite Nanoplatelets, *Indoor. Built. Environ.*, 22(1) (2014) 68-76.
- [37] H.J. Seo, S.G. Jeong, S. Kim, Development of thermally enhanced wood-based materials with high VOCs adsorption using exfoliated graphite nanoplatelets for use as building materials, *Bioresources*, 10(4) (2015) 7081-7091.
- [38] C.E. Byrne, D.C. Nagle, Carbonization of wood for advanced materials applications, *Carbon* 35(2) (1997) 259-266.
- [39] H.J. Seo, M.R. Kang, D.W. Son, Combustion Properties of Woods for Indoor Use (II). *J. Korean Wood Sci. Technol.*, 43(4) (2015) 478-485.
- [40] H.J. Seo, M.R. Kang, J.E. Park, D.W. Son, Combustion Characteristics of Useful Imported Woods, *J. Korean Wood Sci. Technol.*, 44(1), (2016) 19-29.