

[Research Paper]

섬유강화재 함유율에 따른 FRTP의 기계적 특성 및 연소특성에 관한 연구

김경진 · 엄상용^{*†} · 김기환^{**}

(주)정평이앤씨 대표이사, ^{*}LG사이언스파크 안전환경센터장, ^{**}한국소방안전원 정책연구소 연구원

A Study on the Mechanical and Combustion Characteristics According to Fiber Reinforcements Weight Fraction of FRTP

Kyoung-Jin Kim · Sang-Yong Eom^{*†} · Ki-Hwan Kim^{**}

CEO, Justice and Peace Engineering & Consulting

^{*}EHS Center Manager, LG Sciencepark

^{**}Researcher, Policy Research Institute, Korea Fire Safety Institute

(Received October 10, 2018; Revised March 13, 2019; Accepted May 21, 2019)

요 약

본 연구에서는 섬유강화 열가소성 플라스틱 복합재료(Fiber Reinforced thermo plastics, FRTP)의 기계적 특성 및 화재 위험성 예측을 위한 연소특성을 평가하였다. 폴리카보네이트와 나일론에 섬유강화재로 유리섬유와 탄소섬유를 각각 0~40 wt% 혼합하여 특성변화를 실험한 결과, 섬유강화재의 함유율이 증가할수록 비강도와 열변형 온도가 증가하였고 난연성은 유리섬유 함유율이 30 wt% 이상인 경우 V-0 등급을 보였다. 연소특성의 경우 섬유강화재의 함유율이 증가함에 따라 착화시간도 비례하여 증가하였으며, 최대 열방출율은 섬유강화재를 40 wt% 함유 시 함유하지 않았을 때보다 폴리카보네이트는 약 51%, 나일론은 약 24% 수준으로 낮아졌다. CO 발생율은 일정시간까지 감소하다가 증가하는 경향을 보이며, 이는 시간이 지남에 따라 불완전연소에 의한 것으로 판단된다. CO₂ 발생율은 열방출율과 매우 유사한 경향을 보이며, 최대 CO₂ 발생율은 섬유강화재를 40 wt% 함유 시 함유하지 않았을 때보다 폴리카보네이트는 약 50%, 나일론은 약 28% 수준으로 낮아졌다.

ABSTRACT

To examine the mechanical and combustion characteristics of FRTP, either polycarbonate or nylon were used as a matrix, and either glass fiber or carbon fiber were used as the fiber reinforcement. The fiber reinforcement content was differentiated at 0~40 wt%. The tensile strength and heat distortion temperature increased with increasing reinforcement content. When the fiber reinforcement content was above 30 wt%, the flammability rating showed V-0. As the fiber reinforcement content increased from 0 to 40 wt%, the peak heat release rate of polycarbonate decreased by approximately 51% and that of nylon decreased by approximately 24%. The rate of CO generation decreased for a period of time, and then increased. This appears to have resulted from incomplete combustion. The rate of CO₂ generation shows a similar tendency with the heat release rate. As fiber reinforcement content levels increased from 0 to 40 wt%, the CO₂ peak rate of polycarbonate generation decreased by approximately 50% and that of nylon decreased by 28%.

Keywords : Fiber reinforced thermo plastic (FRTP), Cone calorimeter, Heat release rate, Total heat release

1. 서 론

친환경 및 경량화 소재의 대표적인 예로 엔지니어링 플라스틱(Engineering plastics, EP)을 들 수 있는데, 이것은 공업재료 또는 구조재료로 사용되는 강도 높은 플라스틱을

의미한다⁽¹⁾. 엔지니어링 플라스틱에 섬유강화재(유리섬유 또는 탄소섬유 등)를 첨가시켜 더욱 우수한 특성을 나타내는 섬유강화 플라스틱(Fiber reinforced plastics, FRP) 복합재료의 개발 및 활용이 활발히 진행 중에 있다. 복합재료(Composite materials)란 서로 다른 두 가지 이상의 재료를

[†] Corresponding Author, E-Mail: eomsky73@naver.com. TEL: +82-2-6987-1322, FAX: +82-504-044-7375

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

상호 조합시켜 물리·화학적으로 다른 상(Phase)을 형성하여 보다 유효한 기능을 발현하는 재료이며⁽²⁾, 섬유강화 플라스틱은 플라스틱 복합재료의 한 종류로 플라스틱의 장점에 섬유의 장점을 더함으로써 각각의 특성을 더욱 향상시킨 우수한 재료이다^(2,4). 섬유강화 플라스틱의 비중은 알루미늄 및 철에 비해 약 1/5~1/2 수준으로 매우 작는데 비해 인장강도, 휨강도, 압축강도 등의 기계적 물성에 있어서는 대등하거나 오히려 더 우수한 값을 나타낸다^(1,2). 이처럼 섬유강화 플라스틱은 더욱 가벼우면서도 뛰어난 기계적 특성을 갖고 있기 때문에 금속재료뿐만 아니라 여타의 재료를 대체할 수 있는 재료로, 그 응용범위가 다양하고 이에 대한 연구 또한 꾸준히 진행 중에 있다.

이러한 플라스틱 복합재료의 가장 큰 단점은 화재에 취약하다는 것이다. 최근 난연성 플라스틱 복합재료의 개발이나 내열성 증가 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이기는 하나 플라스틱을 기본으로 하는 재료인 만큼 금속재료에 비해 근본적으로 화재발생 가능성이 높고, 연소 시 발생하는 독성물질 등으로 인한 피해가 매우 크다. 그러므로 섬유강화 플라스틱의 비약적인 사용량 증가와 더불어 화재 취약성 개선과 연소 시 유독가스에 의한 질식사망 등의 문제 해결이 시급하다.

일반적으로 섬유강화 플라스틱의 위험성평가는 열원에 노출되었을 때의 착화시간, 연소 시의 열방출율, 화재전파 속도, 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다. 특히 외부 열원(복사열)에 의한 섬유강화 플라스틱의 착화시간 및 연소 시의 열방출율은 화재의 성장 및 전파에 직접적인 영향을 주므로 정확한 측정과 분석은 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소이다. 이근원 등은 콘칼로리미터를 이용하여 섬유강화 플라스틱의 연소특성을 평가하고 플래쉬오버 가능성에 대한 연구를 수행하였는데, 외부 열원(복사열)과 난연제의 함유율에 따라 착화시간과 연소 시의 열방출율이 달랐으며, 열방출율은 복사열의 증가에 따라 증가하였다고 발표하였다⁽⁵⁻⁷⁾.

그러나 아쉽게도 섬유강화 플라스틱의 강도, 내구성 등 물리적 특성에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 화재 시의 거동을 예측하기 위한 연소특성에 대한 체계적인 연구는 부족하다. 특히 열가소성 수지를 매트릭스로 사용한 섬유강화 플라스틱(Fiber reinforced thermo plastics, FRTP)은 열경화성 수지를 매트릭스로 사용한 섬유강화 플라스틱(Fiber reinforced plastics, FRP) 보다 연구가 매우 부족한 상

황이다. 고강성을 제외하면 열가소성 플라스틱의 기능적 장점이 더 다양함에도 불구하고, 섬유강화 플라스틱의 고강도 특성이 중요시 여겨지고 있어 섬유강화 열가소성 플라스틱에 대한 연구가 등한시되어 왔다. 그러나 최근 전자차폐 등 섬유강화 복합재료를 특수목적에 맞게 활용하려는 시도가 점차 증가하고 있어 섬유강화 열가소성 플라스틱의 활용도도 증가되고 있다.

본 논문에서는 섬유강화 열가소성 플라스틱의 연소특성 연구를 위하여, 매트릭스 수지로 많이 사용되고 있는 폴리 카보네이트 및 나일론을 선정하였고, 섬유강화제는 범용의 유리섬유와 다양한 강점을 갖고 있는 탄소섬유(PAN계)를 선정하였다. 섬유강화제의 함유율은 0, 10, 20, 30, 40 wt%로 달리하여 각 실험에 필요한 섬유강화 열가소성 플라스틱 시편을 제조하였다.

각각의 제조 조건에 따른 섬유강화 열가소성 플라스틱의 기본적인 기계적 강도 특성과 열적 특성 평가실험을 수행하였다. 또한 소재의 난연성 평가와 콘칼로리미터를 이용하여 착화시간 및 연소 시 열방출 특성을 분석하였으며, 소화활동 및 피난의 저해요인이자 화재시 직접적인 사망원인인 CO, CO₂ 가스의 발생 특성 등을 분석하여 섬유강화 열가소성 플라스틱의 화재위험성을 종합적으로 평가하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 섬유강화제는 유리섬유(Glass fiber, GF)와 탄소섬유(Carbon fiber, CF) 두 종류로, 섬유강화 플라스틱에 사용되는 대표적인 섬유강화재료이다. 매트릭스 수지는 폴리 카보네이트(Polycarbonate, PC)와 나일론(Nylon) 두 종류로, 모두 국내 L사의 제품을 사용하였으며 각각의 물성을 Table 1에 제시하였다.

2.2 실험장치 및 방법

섬유강화제인 유리섬유와 탄소섬유는 Chop 형태로 분쇄하여 매트릭스 수지와 혼합 후 압출공정을 통해 배합하였다. 압출 시 매트릭스 수지의 종류, 섬유강화제의 종류와 함유율을 변경하며 제조하였다. 이때 섬유강화제의 함유율을 증가시키면 매트릭스 수지는 감소시켜 전체 무게는 동일하게 하였다. 이후 실험에 필요한 시편을 만들기 위해 사출기를 이용하여 사출하였다. 이때 인장강도, 연신율 및 탄성을

Table 1. Properties of Experimental Materials

Physical Property	Unit	Fiber		Matrix	
		GF	CF	PC	Nylon
Density	g/cm ³	2.6	1.75	1.2	1.19
Tensile Strength	MPa	3,400	4,300	63	81
Specific Strength	kN·m/kg	1,307	2,457	53	68

은 American society testing materials (ASTM, 미국 재료시험 협회) D638에 따라, 굴곡강도 및 굴곡탄성율은 ASTM D790에 따라 시편을 제작하여 기계적 물성측정기기(INSTRON, England)를 사용하여 측정하였다.

열변형 온도는 ASTM D648의 표준화 시험절차에 따라 시편을 제작한 후, 열변형 시험기기(TOYOSEIKI, Japan)를 이용하여 온도를 측정하였으며, 난연성 평가는 Underwriter's laboratory (UL) 94(플라스틱에 대한 난연성 평가 규격) 시험기기((주)페스텍, 한국)를 이용하여 시편을 수직으로 고정시킨 후 시편의 하단부에 불꽃을 접촉시켜 착화시간 및 잔염, 잔진시간 등을 확인하여 수직화염의 전파를 측정하였다.

콘칼로리미터 시험장치(FTT, UK)로 KS F International organization for standardization (ISO) 5660의 Part 1(연소성능 시험-열방출, 연기발생)에 따라 플라스틱 연소시 열발생 특성과 소화활동 및 피난의 저해요인인 유독성 가스발생 특성 등을 종합적으로 분석하여 섬유강화 플라스틱의 화재 위험성을 평가하였다.

콘칼로리미터에 의한 열방출을 측정은 약 13.1 MJ의 열이 방출되기 위해서는 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg을 소비한다는 원리를 기본으로 하고 있다. 즉, 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 발생한다. 열방출율은 다음 식으로부터 계산되며, 관련 계산식은 KS F ISO 5660-1에서 규정하고 있다⁽⁸⁾.

$$q(t) = (\Delta h_c / r_0) (1.10) C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \cdot \frac{X_{O_2}^0}{1.105 - 1.5 X_{O_2}} \quad (1)$$

여기서, \dot{q} 는 열방출율(kW), Δh_c 는 순연소열(kJ/g), r_0 는 산소/연료 질량비, C 는 유량계(오리피스) 교정상수($m^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot k^{1/2}$), Δp 는 오리피스미터 압력차(Pa), T_e 는 오리피스미터 내에서 가스 절대온도(K), $X_{O_2}^0$ 는 산소분석기 눈금의 초기값, X_{O_2} 는 산소분석기 눈금값을 의미한다. 이때 시편에 대해 정확한 $\Delta h_c / r_0$ 값을 모른다면 $\Delta h_c / r_0$ 값은 $13.1 \times 103 \text{ kJ/kg}$ 으로 하고, 1분 동안의 기준 측정에서 얻어진 평균 산소 분석기 값을 $X_{O_2}^0$ 로 한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비강도 특성

비강도(Specific strength)는 인장강도를 밀도로 나눈 값으로 값이 클수록 우수한 경량화 소재로서의 장점이 있다. 각 매트릭스 수지(PC, Nylon) 및 섬유강화재(GF, CF)의 조합별 함유율 변화에 따른 비강도 변화를 Figure 1에 나타내었다. 이후 그래프에서 ‘매트릭스 수지 + 섬유강화재’로 표현하였다.

일반적으로 유리섬유의 밀도가 탄소섬유보다 큰데 비해, 인장강도는 탄소섬유가 유리섬유에 비해 크다. Table 1에서 보는 바와 같이 매트릭스 수지의 밀도는 거의 동일하나, 섬

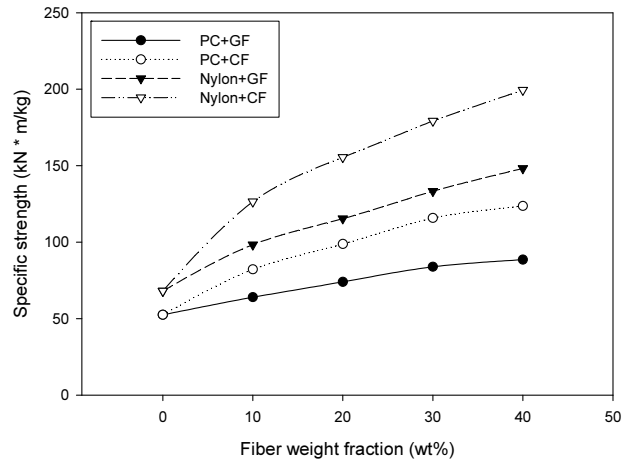


Figure 1. Specific strength according to fiber weight fraction.

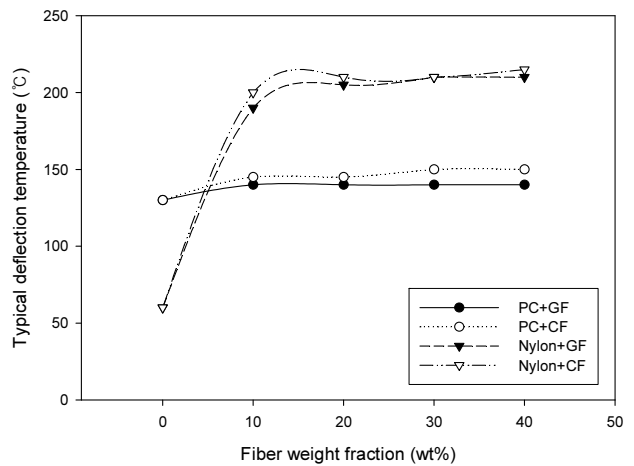


Figure 2. Typical deflection temperature according to fiber weight fraction.

유강화재의 경우 유리섬유의 밀도가 탄소섬유보다 약 1.5배 크고, 인장강도는 탄소섬유가 유리섬유보다 약 1.26배 크기 때문에 비강도에서 탄소섬유가 유리섬유에 비해 약 1.88배 큰 값을 알 수 있다.

또한 Figure 1에서 보는 바와 같이 섬유강화재의 함유율이 증가할수록 비강도는 증가함을 알 수 있으며, 이는 섬유강화재의 함유율이 증가할수록 인장강도가 커지기 때문이다. 특히 나일론 및 탄소섬유의 경우가 다른 조합에 비해 인장강도가 크기 때문에 비강도가 크게 증가함을 알 수 있다.

3.2 열변형 온도 특성

열변형 온도 실험값을 Figure 2에 나타내었다. 그래프에서 보는 바와 같이 섬유강화재를 함유하지 않은 경우 폴리 카보네이트의 열변형 온도가 나일론에 비해 약 2배 이상 큰 것을 알 수 있다. 그러나 폴리 카보네이트의 경우 섬유강화재의 함유 유무에 관계없이 약 130~150 °C의 일정한 값을 보이는 반면, 나일론의 경우 섬유강화재의 함유에 따라

Table 2. Results of Flame Retardancy Test

Classification			Retardancy Class (mm)	Classification			Retardancy Class (mm)
Matrix	Fiber	wt%		Matrix	Fiber	wt%	
PC	GF	0	V-2 (2)	Nylon	GF	0	V-2 (2)
		10	V-2 (2)			10	V-2 (2)
		20	V-2 (2)			20	V-2 (2)
		30	V-0 (2)			30	V-0 (2)
		40	V-0 (2)			40	V-0 (2)
	CF	0	V-2 (2)		CF	0	V-2 (2)
		10	V-2 (2)			10	V-2 (2)
		20	V-2 (2)			20	V-2 (2)
		30	V-2 (2)			30	V-2 (2)
		40	V-2 (2)			40	V-2 (2)

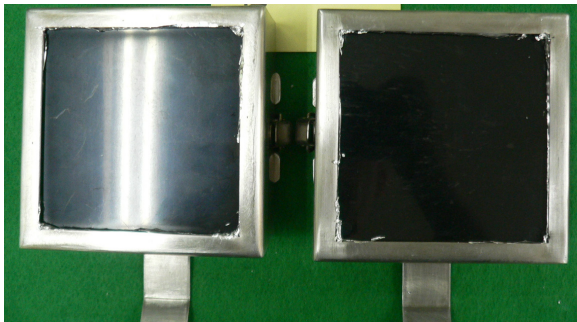


Figure 3. Samples of cone calorimeter test; before.



Figure 4. Samples of cone calorimeter test; after.

약 3배 이상 크게 향상되었다. 하지만 나일론의 경우에서도 섬유강화재의 종류에 따른 변화는 극히 작음을 알 수 있었으며, 10 wt% 이상에서는 약 190~210 °C의 일정한 값을 나타내었다.

3.3 수직연소시험에 의한 난연성능 특성

대부분의 엔지니어링 플라스틱 소재가 그러하듯이 본 연구의 모든 시편들이 UL 94H 시험은 통과하였으나, UL 94V 시험의 경우 대부분의 시편이 V-2 등급인데 반해 Table 2에서 보는 바와 같이 유리섬유의 함유율이 30 wt% 이상인 경우에만 매트릭스 수지의 종류에 구분 없이 V-0 등급의 난연성을 보였다.

이는 유리섬유의 구성성분이 SiO₂ 약 55%, Al₂O₃ 약 15%, CaO 약 15%로 이들 무기질 성분이 난연성에 효과적인 작용을 한 것으로 보이며 그 효과가 섬유강화재의 함량이 30 wt% 이상에서 나타남을 알 수 있었다.

3.4 콘칼로리미터시험에 의한 연소 특성

콘칼로리미터에 의한 KS F ISO 5660-1 실험전후의 시료는 Figure 3 및 Figure 4와 같다. 사진에서 보는 바와 같이 연소후에도 일정한 형태를 유지하고 있으며, 부피의 변화

도 없어 보이는데 이는 섬유강화재의 영향으로 보인다.

3.4.1 착화시간

착화시간은 재료의 연소특성을 나타내는 주요인자로, 인접화재에 의한 착화 및 연소확대 취약성을 평가하기 위하여 점화원인 복사열에 의한 착화시간을 측정하였다.

Figure 5에서 보는 바와 같이 섬유강화재를 포함하지 않은 폴리카보네이트는 약 20 s 이후에 착화가 되는 반면, 나일론은 폴리카보네이트보다 약 10 s 더 빨리 착화 되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 착화시간에 차이가 발생하는 것은 분자구조의 차이나 구성성분의 차이로 인해 복사열 노출시 제품마다 열분해 속도에 차이가 발생하기 때문이다. 섬유강화재를 포함할 경우 폴리카보네이트와 나일론 모두 착화시간이 증가하였는데, 이는 섬유강화재가 유리성분 또는 탄소성분으로 이루어진 섬유로 착화를 지연시키는 역할을 했기 때문으로 보인다. 또한 폴리카보네이트와 나일론 모두에서 섬유강화재의 함유율이 증가함에 따라 착화 시간도 비례하여 증가하였으나 30 wt% 이후에는 증가량이 둔화됨을 알 수 있었다. 유리섬유의 경우가 탄소섬유보다 약간 높았으며, 두 섬유강화재의 종류 차이보다는 함유율에 더 큰 영향을 받는 것으로 보인다.

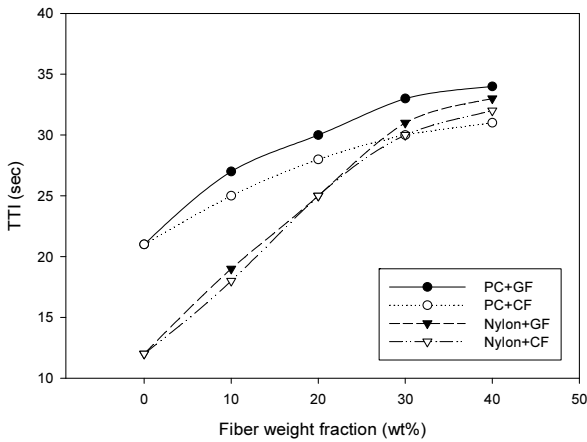


Figure 5. Time to ignition according to fiber weight fraction.

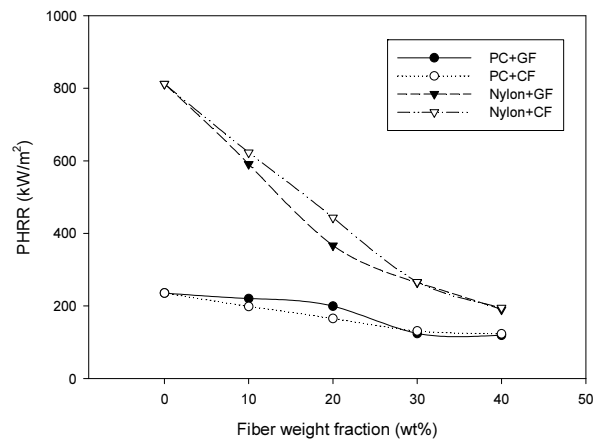


Figure 6. Peak HRR according to fiber weight fraction.

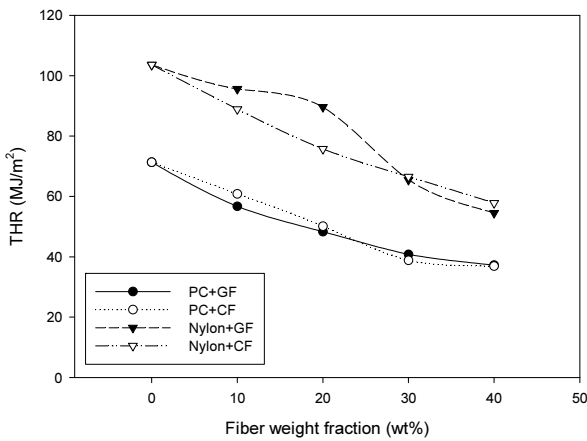


Figure 7. Total heat release according to fiber weight fraction.

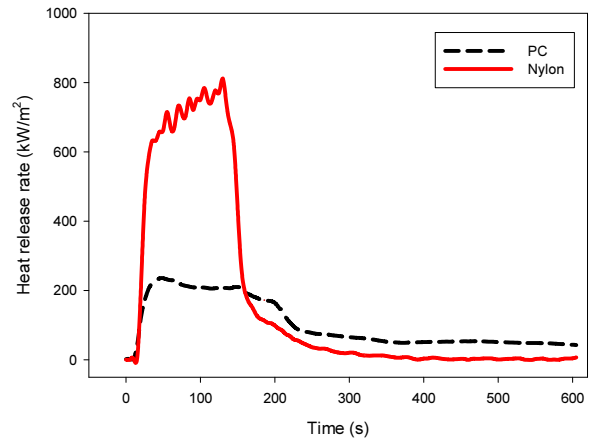


Figure 8. HRR according to time of PC and nylon.

따라서 플라스틱의 난연성을 증가시키기 위해 난연제 등을 첨가하는 방법 외에도 물성증가 등의 특정 목적을 위해 섬유강화재를 첨가함으로써 착화시간 지연 등의 화재 취약성 감소에도 도움이 되는 것으로 보인다.

3.4.2 열방출 특성

최대 열방출율(Peak heat release rate, PHRR)은 시료 표면 적당 발생한 가장 큰 순간적인 열량의 크기로, 폴리카보네이트에 유리섬유를 함유한 경우 함유율에 관계없이 최대 열방출율에 도달하는 시간이 약 50~55 s로 짧았으나 나일론에 섬유강화재를 함유하지 않은 경우 130 s로 가장 길었고 나일론에 섬유강화재를 함유하는 경우 함유율이 증가함에 따라 최대 열방출율에 도달하는 시간이 감소함을 알 수 있었다. 이는 섬유강화재의 종류에 관계없이 유리섬유와 탄소섬유 모두에서 함유율의 증가에 따라 감소하였다. 이상의 결과를 바탕으로 폴리카보네이트에 비해 나일론이 최대 열방출율에 도달하는 시간이 길다는 것은 서서히 열분해하여 많은 열량을 방출한다는 의미로 해석된다.

Figure 6에 각 시료의 최대 열방출율을 나타내었다. 섬유

강화재를 함유하지 않은 나일론의 최대 열방출율이 약 810 kW/m²으로 역시 섬유강화재를 함유하지 않은 폴리카보네이트의 최대 열방출율 약 230 kW/m²의 약 3.5배였다. 이는 연소시 화재의 확대위험이 더 큰 재료임을 나타내는 것이다. 또한 그래프에서 보는 바와 같이 섬유강화재의 함유율 증가에 따라 최대 열방출율은 감소함을 보였다. 이는 착화시간과 반대의 현상으로 섬유강화재를 함유함으로써 착화시간 지연 및 최대 열방출율의 감소 등 화재 취약성 개선에 도움이 되는 것으로 보인다.

최대 열방출율 이외에 총 방출열량(Total heat release, THR)도 연소시 화재의 확대위험에 큰 요인으로 이를 Figure 7과 같이 나타내었다.

그래프에서 보는 바와 같이, 나일론의 총방출열량이 폴리카보네이트의 경우보다 컸으며, 섬유강화재의 함유시에도 일정한 차이를 보였다. 또한 섬유강화재의 종류보다는 함유율에 따라 총방출열량에 차이를 보였으며, 함유율이 증가할수록 총방출열량은 감소하였다.

Figure 8의 폴리카보네이트와 나일론의 시간에 따른 열방출율을 직접 비교한 그래프로 나일론의 기본적인 열방출

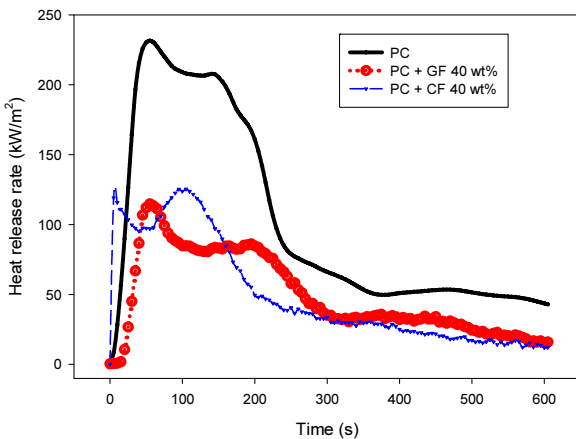


Figure 9. HRR according to time of PC samples.

특성이 폴리카보네이트보다 월등히 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 주위 화재로 인한 복사열 발생시 폴리카보네이트보다 나일론이 더 많은 열을 방출하게 되며, 화재의 확대를 돕게 된다. 결국, 연소확대의 측면에서 볼 때, 순수한 나일론이 폴리카보네이트보다 훨씬 더 위험함을 알 수 있다.

최대 열방출율은 섬유강화재를 함유하지 않은 나일론이 폴리카보네이트보다 약 3.5배 큰 값을 보이지만, 시간에 따른 열방출율의 형태는 두 매트릭스 수지에서 유사한 경향을 보였다.

Figure 9는 순수한 폴리카보네이트와 섬유강화재로 유리섬유 및 탄소섬유를 각각 40 wt% 함유했을 때를 직접 비교한 것이다. 그래프에서 보는 바와 같이 착화 후 열방출율이 급격히 상승하여 약 100 s 전후에서 최대값을 나타내고 다시 약 300 s까지 급격히 감소하여 이후 낮고 일정한 열방출율을 보인다.

Figure 10은 순수한 나일론과 섬유강화재로 유리섬유 및 탄소섬유를 각각 40 wt% 함유했을 때를 직접 비교한 것이다. 그래프에서 보는 바와 같이 섬유강화재를 함유하지 않은 나일론의 경우 최대 열방출율이 약 810 kW/m²까지 올라가나, 섬유강화재를 40 wt% 함유된 경우 약 200 kW/m² 미만으로 현저히 낮아진다. 즉, 나일론에 섬유강화재를 함유하였을 경우 연소특성은 상당히 우수해 진다고 볼 수 있으며 이러한 경우 화재전파의 위험도 상당히 감소시킬 수 있다.

이와 반대로 섬유강화재를 40 wt% 함유한 경우, 약 200 s 이후에 섬유강화재를 함유하지 않은 나일론보다 약간 높은 열방출율을 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 섬유강화재를 함유한 경우 더 높은 수준의 에너지를 계속적으로 방출하여 화재의 확대를 지속시킬 수 있다고 생각할 수 있으나, 총 방출열량에서는 섬유강화재를 함유한 경우 현저히 낮아지므로 화재의 확대에 크게 영향을 준다고 볼 수는 없다. 결국, 나일론의 경우 섬유강화재를 함유하는 것이 초기 화재의 급격한 전파를 막을 수 있으므로 화재위험 측면에서는 더 유리하다고 할 수 있다.

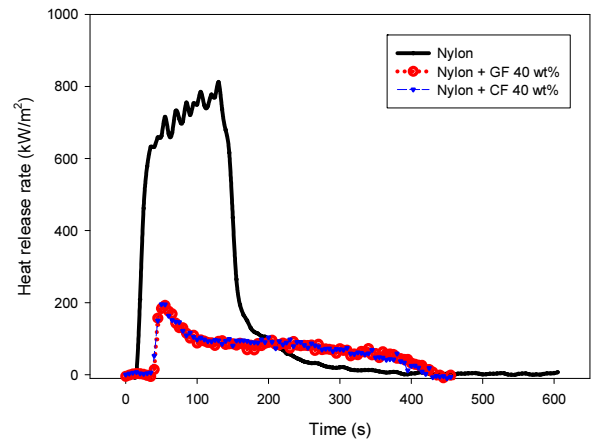


Figure 10. HRR according to time of nylon samples.

또한 섬유강화재를 40 wt% 함유 시 함유하지 않았을 때보다 폴리카보네이트는 약 51%, 나일론은 약 24% 수준으로 최대 열방출율이 낮아짐을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터, 섬유강화 열가소성 플라스틱 복합재료의 착화시간 및 열방출 특성과 같은 연소성은 매트릭스 수지와 섬유강화재의 종류 및 함유율에 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 특히 섬유강화재의 종류보다는 함유율과 매트릭스 수지의 차이에 의해 착화시간, 최대 열방출율, 총 방출열량 등이 영향을 받는 것으로 나타났다.

3.5 CO 및 CO₂ 농도 특성

화재 시 발생하는 연기와 유독가스는 소화활동 및 피난의 저해요인으로, 화재로 인한 복사열에 의한 사망보다 연기 및 유독가스 등에 질식하여 사망하는 비율이 약 80% 이상을 차지한다. 따라서 연소시간에 따른 연기발생 거동을 확인하고 이에 대한 적절한 대처가 필요하다.

Figure 11의 그래프에서 보는 바와 같이, 시간의 경과에 따른 CO의 발생율은 섬유강화재의 함유에 따라 영향을 받는다. 즉, 섬유강화재를 함유하지 않은 경우 연소 초기에 큰 값을 보이다가 서서히 감소하여 약 400 s 이후에는 일정한 값을 갖는 반면, 섬유강화재를 함유한 경우 약 300 s까지 감소하다가 다시 증가하여 오히려 섬유강화재를 함유하지 않은 경우보다 큰 값을 갖는다. 이는 섬유강화재의 함유에 따른 가연물의 양이 적기 때문으로 판단되며, 섬유강화재의 함유율이 클수록 CO의 발생율도 증가하였다. 또한, 시간에 대한 CO 발생율의 적분값(그래프의 아래 면적)인 총 CO 발생량은 폴리카보네이트의 경우 섬유강화재를 함유하지 않은 경우와 40 wt% 함유한 경우에서 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보인다.

나일론은 Figure 12의 그래프에서 보는 바와 같이 섬유강화재를 함유하지 않은 경우 연소 초기에 큰 값을 보이다가 급격히 감소하여 약 200 s 이후에는 일정한 값을 갖는 반면, 섬유강화재를 함유한 경우 약 400 s까지 일정한 값을

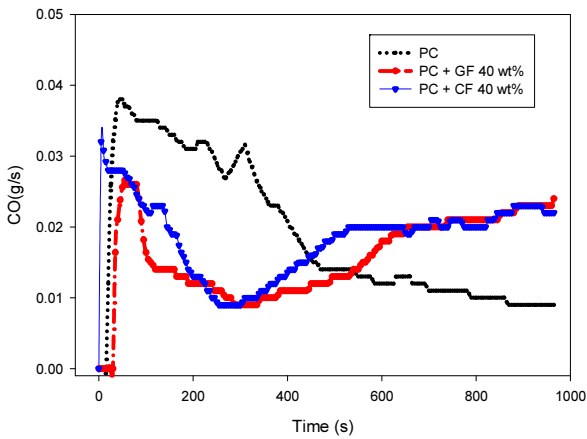


Figure 11. CO according to time of PC samples.

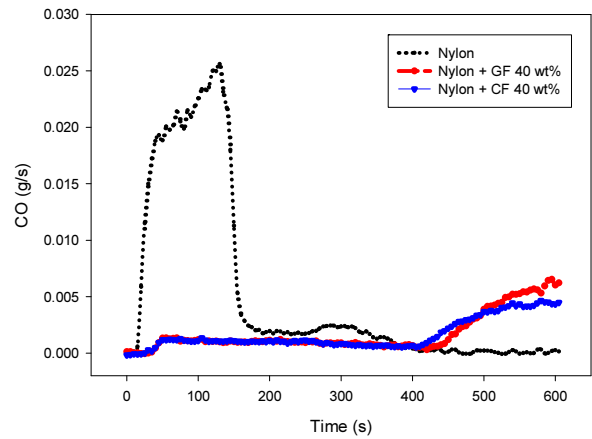


Figure 12. CO according to time of nylon samples.

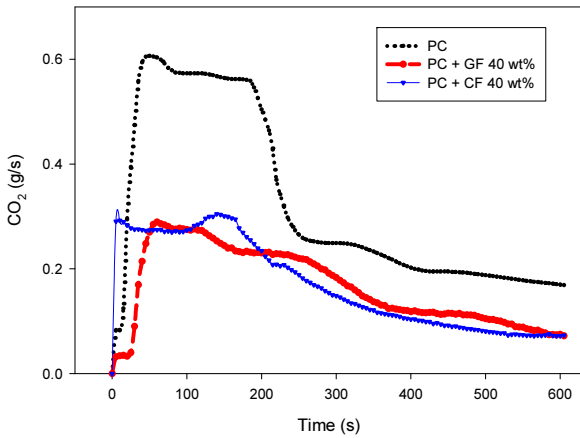


Figure 13. CO₂ according to time of PC samples.

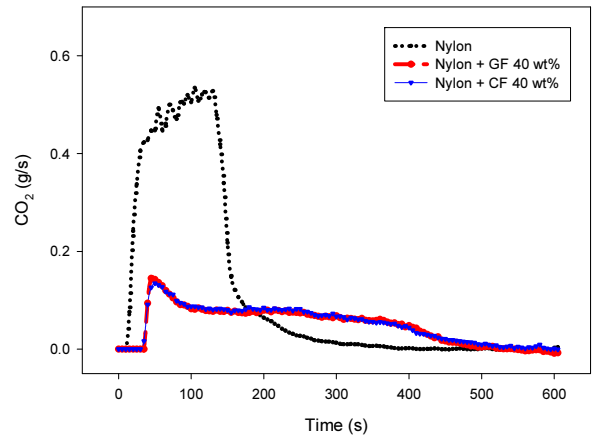


Figure 14. CO₂ according to time of nylon samples.

보이다가 증가하여 오히려 섬유강화재를 함유하지 않는 경우보다 큰 값을 갖는다.

또한, 시간에 대한 CO 발생율의 적분값(그래프의 아래 면적)인 총 CO 발생량은 폴리카보네이트의 경우와는 다르게 섬유강화재를 함유하지 않은 경우가 섬유강화재를 40 wt% 함유한 경우보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 섬유강화재의 불완전연소보다 연소초기 나일론의 불완전연소가 현저히 크다는 것을 의미한다.

Figure 13의 그래프에서 보는 바와 같이, 시간의 경과에 따른 CO₂의 발생율은 섬유강화재의 함유 유무에 관계없이 유사한 경향을 나타낸다. 즉, 착화 후 급격히 상승하여 약 200 s까지 최대값을 유지하다가 이후 급격히 감소하여 낮고 일정한 값을 보인다.

시간에 대한 CO₂ 발생율의 적분값(그래프의 아래 면적)인 총 CO₂ 발생량은 섬유강화재를 함유하지 않은 경우가 섬유강화재를 40 wt% 함유한 경우보다 다소 큰 것을 알 수 있다. 이는 매트릭스 수지인 폴리카보네이트 대신 섬유강화재가 완전연소의 저해물질로 작용한다는 것을 의미한다.

Figure 14는 순수한 나일론과 섬유강화재를 40 wt% 함유

한 경우를 직접 비교한 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 섬유강화재가 40 wt% 함유된 경우 CO₂ 발생율이 현저히 낮아진다. 이를 통해 나일론에 섬유강화재를 함유하였을 경우 화재 시의 독성가스로 인한 인체의 위험성은 상당히 낮아진다고 볼 수 있으나, 이는 단순 CO₂ 발생율만을 평가했을 때의 경우이며, 다른 연소 가스들은 고려되지 않았으므로 본 실험결과만으로 유해여부를 판단할 수는 없다. 다만 앞서 고찰한 CO 발생율과 CO₂ 발생율만을 비교하였을 때 섬유강화재를 함유한 경우가 화재 시의 독성물질 방출에 상당한 효과가 있다고 볼 수 있다.

또한 폴리카보네이트와 나일론의 CO₂ 발생율은 앞서 ‘3.4.2 열방출 특성’에서 고찰한 열방출율과 매우 유사한 경향을 보이며, 최대 CO₂ 발생율은 섬유강화재를 40 wt% 함유 시 함유하지 않았을 때보다 폴리카보네이트는 약 50%, 나일론은 약 28% 수준으로 낮아졌다.

그러나, 앞선 열방출율에서와는 다르게 섬유강화재를 함유하지 않은 경우 폴리카보네이트와 나일론의 CO₂ 발생율은 최대값이 약 0.6 g/s로 유사한 값을 나타내었다. 즉, 최대 열방출율은 나일론이 폴리카보네이트에 비해 약 3.5배 큰

반면 CO₂ 발생율은 유사한 값을 보는 것으로 보아 나일론의 연소 시 CO₂ 이외에 다른 유독가스 발생이 많은 것으로 판단된다. 이러한 원인은 플라스틱 소재의 구성성분 및 분자구조의 차이로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 유리섬유와 탄소섬유의 섬유강화재를 40 wt% 함유한 경우에도 열방출율의 경우와 마찬가지로 착화 후 급격히 상승하여 약 100~200 s 전후에서 최대값을 나타내고 이후 서서히 또는 급격히 감소하는 경향을 보인다. 폴리카보네이트의 경우 섬유강화재 종류에 관계없이 CO₂ 발생을 최대값은 약 0.3 g/s이었고, 나일론의 경우는 약 0.15 g/s이었다.

4. 결 론

운송기계기구 경량화 부품 및 전기전자기기 특성화 부품 등에 주로 사용되는 섬유강화 열가소성 플라스틱 복합재료의 기계적 특성 및 연소특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기계적 특성으로 섬유강화재의 함유율이 증가할수록 비강도는 증가함을 알 수 있으며, 이는 섬유강화재의 함유율이 증가할수록 인장강도가 커지기 때문이다.
- 2) 나일론의 경우 섬유강화재를 10 wt% 만 함유해도 열변형 온도가 크게 증가한다. 그러나 함유율에 따른 차이는 크지 않았다.
- 3) 두 가지 매트릭스 수지 모두 섬유강화재로 유리섬유를 사용한 경우에 함유율이 30 wt% 이상인 경우 V-0 등급을 가진다.
- 4) 섬유강화재의 함유율이 증가함에 따라 착화시간이 증가하였으며, 섬유강화재의 종류보다는 함유율에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 5) 섬유강화재를 함유하지 않은 나일론의 최대 열방출율이 약 810 kW/m²으로 역시 섬유강화재를 함유하지 않은 폴리카보네이트의 약 230 kW/m² 보다 약 3.5배 컸으며, 섬유강화재의 함유율이 증가함에 따라 최대 열방출율은 감소하였다.
- 6) CO₂ 발생율은 열방출율과 유사한 경향을 보이며, 섬유강화재를 함유하지 않은 두 가지 매트릭스 수지의 CO₂

발생을 최대값은 약 0.6 g/s로 유사하였다.

한편, 본 연구의 대상이었던 섬유강화 열가소성 플라스틱 소재(폴리카보네이트, 나일론)에 대한 평가 이외에도 향후 섬유강화재(유리섬유, 탄소섬유)의 물리적 형태 및 균일한 분포 등에 대한 연구와 이들의 연소특성 및 화재위험성에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

References

1. M. W. Hong, "Engineering Plastics Handbook", Gijeon Ltd., Seoul, Korea (2007).
2. U. Berardi and N. Dembsey, "Thermal and Fire Characteristics of FRP Composites for Architectural Applications", *Polymers*, Vol. 7, pp. 2276-2289 (2015).
3. RY. Chen, SX. Lu, CH. Li and SM. Lo, "Experimental Study on Ignition and Combustion Characteristics of Fiber-Reinforced Phenolic Composite", *Fire and Materials*, Vol. 38, pp. 409-417 (2016).
4. J. Czarnowski, "FRP Thermal Properties and Fire Performance for Building Exterior Applications", A Major Qualifying Project Report to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute (2013).
5. K. W. Lee, K. E. Kim and D. H. Lee, "Combustion Characteristics of Fiber Reinforced Plastic by Cone Calorimeter", *Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 68-72 (2004).
6. K. W. Lee and K. E. Kim, "Fire Characteristics of Plastic Insulation Materials from Cone Calorimeter Test", *Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 76-83 (2003).
7. K. W. Lee, K. E. Kim and G. N. Lee, "Combustion Characteristics of Thermoplastic by Cone Calorimeter", *Theories and Applications of Chem. Eng.*, Vol. 10, No. 1, p. 1083 (2004).
8. KS F ISO 5660-1, "Reaction to Fire Test - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1" (2018).