

개질 그래핀나노플레이트(GNP)가 적용된 폴리아미드 6/탄소필러 복합체의 GNP 분산성 연구

강 산 · 김연철[†]

공주대학교 신소재공학부 고분자공학전공

(2025년 3월 4일 접수, 2025년 5월 9일 수정, 2025년 5월 16일 채택)

Study on the Graphene Nano Plate (GNP) Dispersibility of Polyamide 6/carbon Filler Composites with Modified GNP

San Kang and Youn Cheol Kim[†]

Major in Polymer Science and Engineering, Kongju National University, 1223-34 Cheonan way, Cheonan 31080, Korea

(Received March 4, 2025; Revised May 9, 2025; Accepted May 16, 2025)

초록: 개질된 그래핀나노플레이트(graphene nano plate, GNP)가 사용된 폴리아미드 6/탄소필러 복합체를 제조하여 GNP의 분산성 및 복합체의 열전도도를 고찰하였다. 탄소필러로는 카본블랙(CB), 탄소나노튜브(CNT) 그리고 개질된 GNP가 적용되었다. GNP 개질에는 멜라민, (3-aminopropyl)triethoxysilane(APTES), 그리고 폴리에틸렌 옥사이드계 계면활성제가 사용되었다. 개질 GNP의 화학구조와 개질여부는 적외선 분광기(FTIR)을 이용하여 확인하였다. 개질에 따른 GNP 분산성을 확인하기 위해 열분해 진량 편차, 최대 상대결정화도 도달시간 및 저장탄성을 vs. 손실탄성을 그레프의 기울기를 이용하였으며 멜라민으로 개질된 GNP의 분산성이 가장 우수함을 확인하였다. 열전도도 분석 결과 순수 GNP 대비 개질된 GNP가 적용된 복합체가 높은 값을 보여주었다.

Abstract: Polyamide 6/carbon filler composites using modified graphene nanoplate (GNP) were fabricated, and the dispersibility of GNP and thermal conductivity of the composites were investigated. Carbon black (CB), carbon nanotube (CNT), and modified GNP were applied as carbon fillers. Melamine, (3-aminopropyl)triethoxysilane (APTES), and polyethylene oxide type surfactants were used for GNP modification. The chemical structure of the modified GNP was determined using FTIR spectroscopy, and the modification was confirmed. In order to determine the GNP dispersibility according to the modification, the deviation of the thermal decomposition residue, the time to reach the maximum relative crystallinity, and the slope of the storage modulus vs. loss modulus plots were used, and it was confirmed that the GNP modified with melamine had the best dispersibility. The results of thermal conductivity analysis showed that the composite applied with the modified GNP showed a higher value than that of pure GNP.

Keywords: polyamide 6, graphene nanoplate, modification, dispersity, thermal conductivity.

서 론

탄소 필러가 첨가된 폴리아미드 6(polyamide 6, PA 6)의 경우 자동차 부품 소재용으로 그 응용 분야가 증가하고 있다. 특히, 자동차 경량화 측면에서 금속 소재를 고분자/탄소필러 복합체로 대체하는 연구에 관심이 집중되고 있는데,¹⁻⁴ 이들 중 하이브리드 자동차는 저전압 배터리와 전장 장치의 증가로 인해 무게와 전력 소비가 늘어나면서 열관리의 중요성이

더욱 강조되고 있다. 배터리 충전 및 방전 과정과 전장 장치에서 발생하는 열은 적절히 관리되지 않으면 성능 저하와 안전성 문제로 이어질 수 있다. 열관리 시스템에서 소재의 핵심은 열전도도를 고려한 설계로 알려져 있다. 열전도도가 높은 소재와 구조를 활용해 배터리와 전장 장치에서 발생하는 열을 효과적으로 분산하고 방출함으로써 과열을 방지하고 성능을 유지할 수 있으며, 현재는 방열 특성이 우수한 금속 소재가 사용 중인데 경량화를 위해 고분자 소재로 변경할 필요가 있다.^{5,6}

고분자의 방열성(열전도도)을 개선하는 한 방법으로 탄소 필러를 사용한다. 탄소필러에는 전도성 카본블랙(carbon black, CB), 탄소나노튜브(carbon nano tube, CNT), 그리고 그래핀

[†]To whom correspondence should be addressed.

younkim@kongju.ac.kr, ORCID 0000-0003-1094-7460
©2025 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

및 그래핀 나노플레이트(graphene nano plate, GNP) 등이 있다. 탄소필러 대부분은 단가가 높아 적용에 제한을 받고 있는 반면, 상대적으로 가격이 저렴한 GNP를 고분자에 탄소필러로 적용하려는 연구가 진행되고 있다.⁷⁻⁹ 미립화된 GNP는 반데르발스 힘 등에 의해 고분자 매트릭스 내의 분산에 어려움이 있으며, GNP의 분산성 개선은 고분자/GNP 복합소재 연구에서 중요한 주제로 연구되고 있다. GNP에 기능화기를 부여하는 화학적 개질 방법이 최근 연구 주제 중 하나이다.

탄소계 필러는 본질적으로 높은 표면 에너지로 인해 응집되기 쉬우며, 이를 해결하지 않으면 복합소재의 전기적, 열적 성능이 저하될 수 있다. 기능기화 기술은 이러한 필러의 분산을 효과적으로 개선하고, 고분자 매트릭스와의 상호작용을 강화하여 복합소재의 성능을 최적화한다. 탄소계 필러 표면에 멜라민을 도입하면, GNP와 에폭시 매트릭스 간의 결합력이 향상되고 분산성이 개선됨이 확인되었다.¹⁰ 또한 아민계 실란커플링제를 이용하여 탄소필러를 기능화하면 아미드계 고분자 매트릭스와의 상용성 및 분산성이 개선되며, 계면활성제는 필러 표면에 물리적으로 흡착되어 응집을 방지하고, 필러와 매트릭스 간의 상호작용을 강화하여 분산성을 개선하는 연구결과가 보고되었다.¹¹

PA 6와 같은 엔지니어링 플라스틱에 방열특성을 부여하는 방법에는 여러가지가 있지만, 적용 측면에서 GNP, 팽창흑연(expanded graphite, EG) 등의 2D계열 탄소 필러를 복합화 하는 것이 상대적으로 용이하기 때문에 많은 연구가 진행되었다.^{12,13} PA 6/탄소필러 복합체의 방열특성에 영향을 주는 요인 중 필러 분산성이 매우 중요하며, GNP가 적용될 경우 앞에서 언급한 화학적 개질 및 개질이 필러 분산성에 미치는 영향을 체계적으로 고찰할 필요가 있다. 일반적으로 무기필러 분산성 확인에는 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM) 등과 같은 형태학적인 분석을 이용하지만 시편 준비과정의 어려움 및 필러 분산의 미세한 차이를 구분하기 어렵다는 단점이 있다. 실제 본 실험실의 PA 6/CB/CNT/GNP 복합체의 기존 연구결과¹³ 탄소필러 분산성의 미세한 차이를 분석하는 것에 어려움이 있음을 확인하였다. 따라서, 분산성 차이를 용이하게 분석할 수 있는 형태학적 분석을 대체할 수 있는 방법이 요구된다.

동적유변학적특성의 저장탄성률(storage modulus, G') vs. 손실탄성률(loss modulus, G'') 그래프 분석에서 균일 고분자 용융상에서는 기울기가 2에 근접하지만 무기 필러가 도입되면 탄성 특성의 증가로 기울기가 감소하며, 필러 분산성이 증가하면 고분자 용융상에 탄성특성 증가 효과를 가져와 기울기가 감소하는 것으로 알려져 있다.¹² 분산성 평가에 대한 또 다른 방법으로는 Avrami 결정화거동 분석에서 무기필러 첨가되면 매트릭스 내 사슬운동을 억제하여 상대결정화도 도달 시간이 증가하게 된다.¹³ 또한 무기필러의 분산성이 개선되면 고분자 매트릭스 내에 필러가 고르게 분산되고 열중량분석에

서 무기 필러 잔량에 대한 편차가 줄어들게 될 것으로 예측된다. 본 연구에서는 위에 언급한 3가지 방법을 GNP 분산성에 대한 평가 방법으로 사용하고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 GNP를 멜라민, 실란커플링제 및 계면활성제를 이용하여 개질한 개질 GNP의 화학적 구조를 분석하고, 개질된 GNP를 이용하여 PA 6/탄소필러 복합체 제조하고, 동적유변학적 특성, Avrami 상대 결정화도 분석 및 열중량분석 잔량 편차 분석 등을 평가하여 GNP 개질에 따른 PA 6내 GNP 분산성의 상관관계를 고찰하였다.

실 험

재료. 본 연구에 사용된 PA 6는 코오롱 플라스틱사(Korea)의 KN111 grade를 사용하였고, GNP는 TIMESNANO사(China)의 밀도 0.6 g/cm³, 지름 2-16 μm, 순도>90%인 TNIGNP130622를 사용하였다. GNP 개질을 위해서 사용된 실란 커플링제는 Sigma-Aldrich(USA)의 (3-Aminopropyl)triethoxysilane(APTES), 순도99%인 아민계 실란커플링제를 사용하였고, 폴리에틸렌 옥사이드계 비이온 계면활성제(Triton X-100), 멜라민(melamine, 순도 99.0%)와 용매인 에탄올과 디메틸포름아미드(dimethylformamide, DMF)는 삼전순약공업(Korea)을 사용하였다.

GNP 개질. GNP와 멜라민을 질량비 1:1로 DMF 용액 내에서 2시간 동안 초음파공정처리를 거친 후 진공 여과하여 80 °C 오븐에서 24시간 건조하였으며 MG로 명명하였다. 다음으로 GNP를 APTES와 1:1.5의 비율로 에탄올-물 혼합물(비율 3:2)에 첨가하고 1시간 초음파 처리 후 75 °C의 온도로 12시간 동안 교반하여 실란화 과정을 거치고 80 °C 오븐에서 24시간 건조하였으며 AG로 명명하였다. 마지막으로 GNP와 Triton X-100을 1:1 질량비로 물에 첨가하여, 1시간 초음파 처리 후 65 °C에서 12시간 동안 교반하여 Triton X-100이 GNP 표면에 충분히 흡착되도록 하였으며, 80 °C의 진공 오븐에서 12시간 건조시켜 TG로 명명하였고, GNP 개질에 대한 모식도를 Figure 1에 나타내었다.

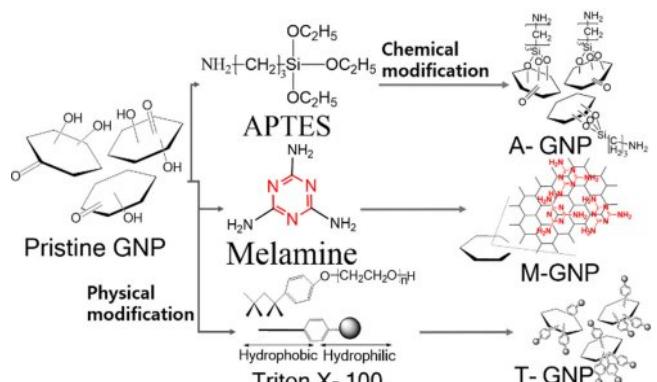


Figure 1. Schematic diagram of GNP modification.

Table 1. Formulation and Surface Resistance of PA 6/Carbon Filler Composites

Sample	Carbon Filler (wt%)		Surface Resistance (ohms/SQ ^a)
	CB/CNT	GNP	
PA 6	-	-	-
PG 3			176
AG 3		3	107
MG 3		3	90
TG 3	2/2		91
PG 5			59
AG 5		5	48
MG 5		5	47
TG 5			49

^aSquare meter

복합체 제조. PA 6와 탄소필러는 80 °C 오븐에서 12 시간 이상 건조한 후, 필러 함량 및 종류에 따라 이축압출기(Twin extruder, 바우테크사 A-19, L=760 mm, D=19 mm, L/D=40, Korea)를 이용하여 250/260/280/280/270 °C, 70 rpm 조건에서 복합체를 제조하였다. 본 연구실의 기계적/전기적 특성연구에서 진행한 연구결과를 참조하여¹² CB와 CNT를 각각 2 wt%로 고정하고 GNP의 종류별로 3과 5 wt%로 하여 PA 6/탄소필러 복합체를 제조하였다. 시료명에 순수 GNP 적용 복합체는 PG, APTES 개질 GNP 적용 복합체는 AG, 멜라민 개질 GNP 적용 복합체는 MG, Triton 개질 GNP 적용 복합체는 TG로 표시하였으며. 뒤에 숫자는 GNP의 함량을 의미한다. Table 1에 위에 언급한 시편의 조성 및 표면저항값을 나타내었다.

분석 및 측정. PA 6/탄소필러 복합체의 결정화 거동과 열분해 잔량 편자는 시차주사열량계(TA Instrument DSC Q20, differential scanning calorimetry, DSC, USA)와 TGA(Perkin Elmer, TGA 1, USA)를 이용하였으며, TGA는 상온에서부터 800 °C까지 10 °C/min의 조건으로 분석하였다. DSC는 승온/냉각속도 10 °C/min으로 0-300 °C의 온도범위로 1st 승온 및 냉각을 진행한 후 2nd 승온/냉각을 진행하였으며, 2nd 결과 값을 사용하였다. 동적유변특성을 측정하기 위해 두께 1.2 mm, 직경 약 25 mm의 시편을 유변학 측정기기(Anton paar MCR301, Austria)를 이용하여 280 °C의 온도로 1.0 mm gap, parallel plate 방법으로, 주파수 범위를 1-100 Hz에서 측정하였고, 변형(strain)값은 strain sweep을 측정하여 선형 점탄성이 유지되는 변형 값인 2.5%로 고정하여 측정하였다. 열전도도 분석기는 ASTM E1530 규격을 갖는 평균열류계법을 이용한 열전도도 분석기(Thermal conductivity meter, Anter사 NITHERM2022, USA)를 이용하였으며 시험편 제작은 직경 50.8 mm, 두께 3 mm인 원형 시편을 사용하였고, 상온 조건에서 측정하였다.

결과 및 토론

개질된 GNP의 개질 여부를 확인하기 위해 순수 GNP(PG), 개질된 GNP(AG MG TG), 그리고 기능화 원료 물질과 GNP를 단순히 혼합한 시료를 비교 분석하였다. 세 가지 시료를 속슬레트 반응을 통해 미반응 물질을 제거하고 개질된 GNP의 기능화 여부를 평가하였다. Figure 2(a)는 AG의 FTIR 스펙트럼을 나타낸 것으로, GNP의 기능화에 의해 GNP의 O-H 피크와 새로이 도입된 N-H 피크의 중첩으로 3300-3500 cm⁻¹ 범위의 피크가 넓어진 것을 확인할 수 있었다. 또한, 단순 혼

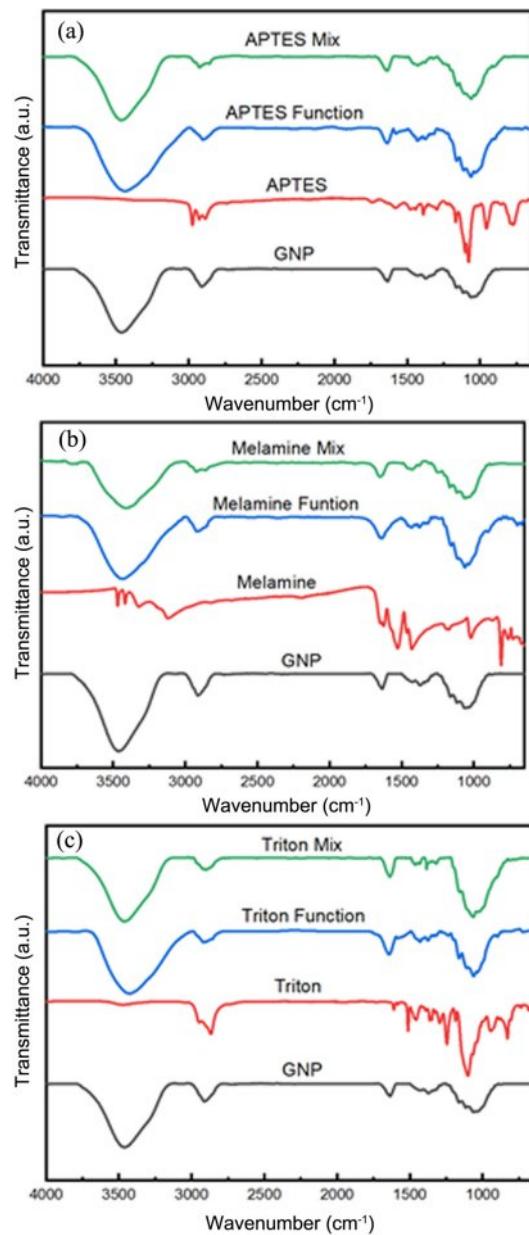


Figure 2. FTIR spectra of modified GNPs: (a) APTES; (b) MG; (c) TG

합물 및 순수 GNP에서는 나타나지 않은 아민기의 N-H 및 C-N 결합에 의해 1560 cm^{-1} 부근에서 피크가 관찰되어 AG 기능화가 이루어졌음을 확인할 수 있었다.^{14,15} Figure 2(b)는 MG의 FTIR 스펙트럼을 나타낸 것이다. AG와 마찬가지로 N-H 결합에 의해 $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ 범위의 피크가 넓어졌으며, C-N 결합 피크는 비공유 상호작용으로 인해 피크 폭이 넓게 나타남을 확인하였다. 또한, 900 cm^{-1} 부근에서 나타난 멜라민의 트리아진 특성 피크로부터 MG의 개질을 확인하였다.^{16,17} Figure 2(c)는 TG의 FTIR 스펙트럼을 나타내는 것으로 에테르신축 진동에 의한 1245 cm^{-1} 피크, C-O 신축 진동에 의한 1180 cm^{-1} 피크 세기가 증가하였고, Triton X-100의 벤젠 고리에서 기인한 C-C 이중결합 피크가 1570 cm^{-1} 부근에서 나타나는 결과로 TG의 기능화를 확인할 수 있었다.¹⁸

개질된 GNP의 기능화 여부를 추가 확인하기 위해 용매 분산 안정성 평가를 진행하였으며 극성 용매인 중류수에 1시간 초음파 처리 후 방치 시간에 따른 상태 변화 사진을 Figure 3에 나타내었다. PG의 경우 1시간 이후 GNP간 응집에 의해 침강이 나타난 반면 3종류의 기능화 GNP는 분산상을 유지하고 있음을 알 수 있다. 10시간 후에는 AG와 MG필러가 침강하는 것을 알 수 있었고 TG의 경우 10시간까지도 안정된 분산상을 유지함을 알 수 있었다.

기존 연구에 따르면 PA 6/CB/CNT 복합체에서 CB와 CNT의 함량이 각각 2 wt%일 때 표면저항이 최적의 결과를 나타내었다.¹² 따라서 본 연구에서는 CB와 CNT의 함량을 각각 2 wt%로 고정하고, GNP의 종류에 따른 복합체의 표면저항을 측정하여 Figure 4에 나타내었다. GNP의 함량은 3 wt%와 5 wt%로 고정하였다. 표면저항 분석 결과, GNP의 개질에 따라 표면저항이 감소하였으며, Table 1에 표면저항 값을 정리하였다. 이러한 결과는 개질 처리로 인해 필러 간의 상호작용이 강화되고 분산성이 개선된 결과로 유추된다. 개질 GNP가

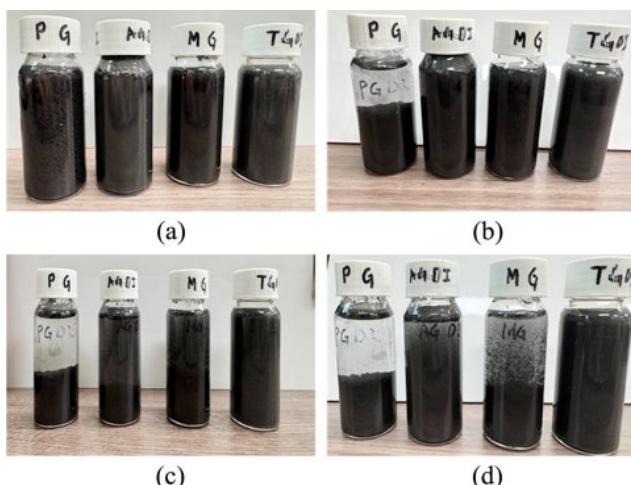


Figure 3. Water dispersion of GNPs after 1-Hour ultrasonication as a function of time: (a) 0 h; (b) 1 h; (c) 5 h; (d) 10 h.

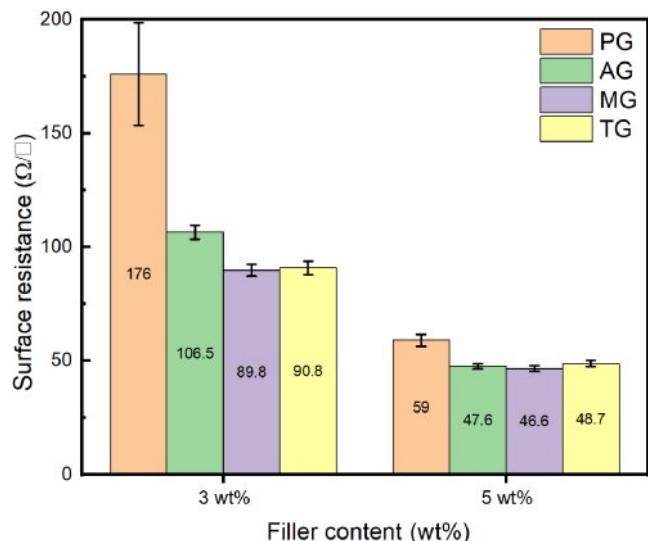


Figure 4. Surface resistance of PA 6/carbon filler composites with different GNP types.

적용된 PA 6/CB/CNT/GNP 복합체의 표면저항 감소와 GNP 분산성과의 상관관계 분석을 위해 서론에서 언급한 필러 분산성의 3가지 방법으로 분석하였다.

Figure 5는 복합체 5개의 TGA 열분해 잔량 및 오차 범위를 나타낸 것이다. 평균 값을 기준으로 편차가 작을수록 GNP의 분산이 우수한 것으로 해석할 수 있다. 순수 GNP가 적용된 복합체의 편차는 크게 나타나는 반면 개질된 GNP가 적용된 복합체의 편차는 감소하는 것을 알 수 있으며 MG 개질된 복합체의 편차가 제일 적어서 분산성이 가장 우수함을 유추할 수 있었다.

개질 GNP를 적용한 PA 6/탄소필러 복합체의 Avrami 수식에 의한 상대 결정화도에 대한 결과를 Figure 6에 나타내었다.

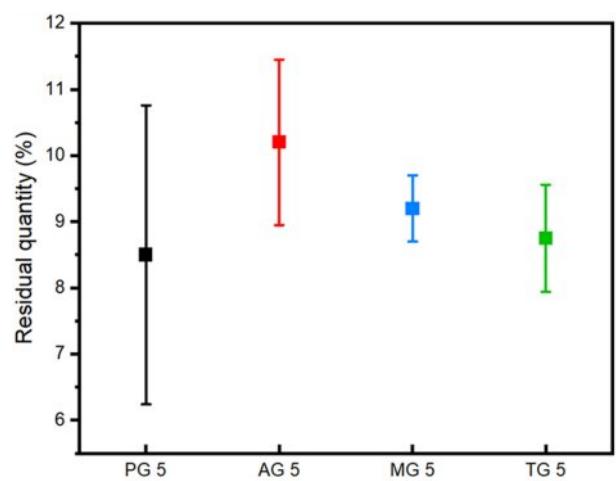


Figure 5. TGA residue's deviation of PA 6/carbon filler composites with different GNP types.

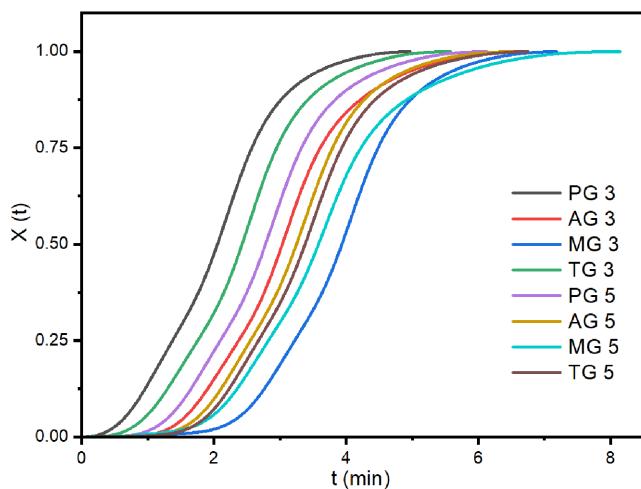


Figure 6. Relative crystallinities of PA 6/carbon filler composites.

상대결정화도는 결정화곡선의 시간 t 까지의 면적을 전체면적으로 나눈 값이며, 시간은 온도를 냉각속도로 나눈 값이다.¹⁹⁻²¹

개질 GNP가 적용된 복합체의 최대 결정화도 도달 시간이 증가하는 결과를 나타내었으며, 이는 기존의 연구결과와¹³ 같이 분산성이 증가하여 사슬의 운동을 억제하는 영역이 확대되기 때문으로 해석할 수 있다. 또한 개질 GNP 중에서도 MG 개질 된 복합체에서 상대적 결정화도 최대 값 도달시간이 크게 증가하였고, 이는 MG 개질 된 복합체의 분산성이 가장 우수하기 때문으로 판단되며 TGA 잔량 편차 결과와 경향이 유사함을 알 수 있다.

마지막으로 유변학적 특성에 따른 분산성 정도를 확인하기 위해 저장탄성률(G')-손실탄성률(G'') 그래프 기울기를 분석하였다. Figure 7은 복합체의 G' vs. G'' 그래프를 나타내는 것이다. TGA 잔량 편차와 상대 결정화도 도달시간 분석 결과와 마찬가지로 MG 개질 된 복합체의 기울기가 가장 적게 나타났으며, 이는 GNP의 분산성 개선으로 용융상태에서 탄성 특성이 증가함에 따른 것으로 해석할 수 있다. 복합체의 G' vs. G'' 그래프 기울기 값 및 최대 상대결정화도 도달시간을 Table 2에 정리하였다.

분산성에 대한 연구결과 MG 개질된 복합체의 분산성이 가장 우수하게 나타나 MG 개질 GNP의 함량 증가에 따른 열전도도를 측정하여 Figure 8에 나타내었다. MG 개질된 복합체의 열전도도가 순수 GNP에 비해 열전도도가 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있었고 이는 앞에서 고찰한 GNP의 분산성 향상에 기인하는 것으로 설명할 수 있다. 개질제의 종류에 따른 열전도도 비교를 위해 AG와 TG가 20 wt% 첨가된 복합체의 열전도도 측정 값이 각각 1.85 mK와 1.83 W/mK를 나타내 MG가 적용된 복합체의 열전도도가 가장 높은 값을 나타내었고, 이는 앞에서 언급한 분산성의 개선 정도와 연관성이 있는 것으로 확인되었다.

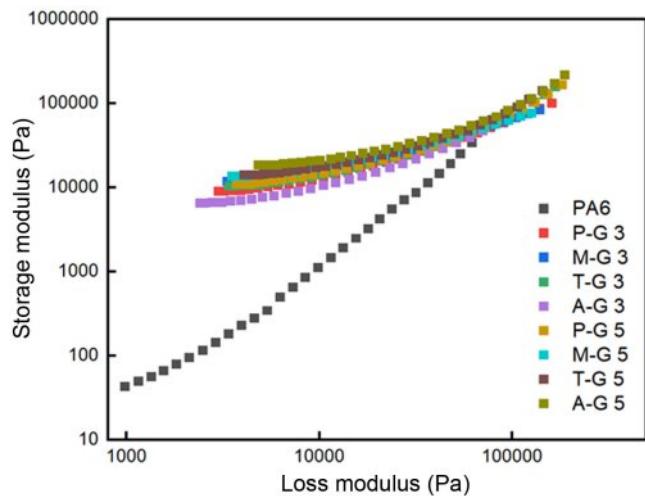


Figure 7. $G'-G''$ plots of PA 6/carbon filler composites.

Table 2. Slope for $G'-G''$ Plots and Time at Maximum Relative Crystallinity of PA 6/Carbon Filler Composites

Sample	Slope for $G'-G''$ plot	Time at Max. $X(t)$ (min)
PA 6	1.67	3.23
PG 3	0.60	4.96
AG 3	0.69	6.73
MG 3	0.52	7.18
TG 3	0.66	5.58
PG 5	0.65	6.12
AG 5	0.61	6.51
MG 5	0.47	8.14
TG 5	0.59	6.75

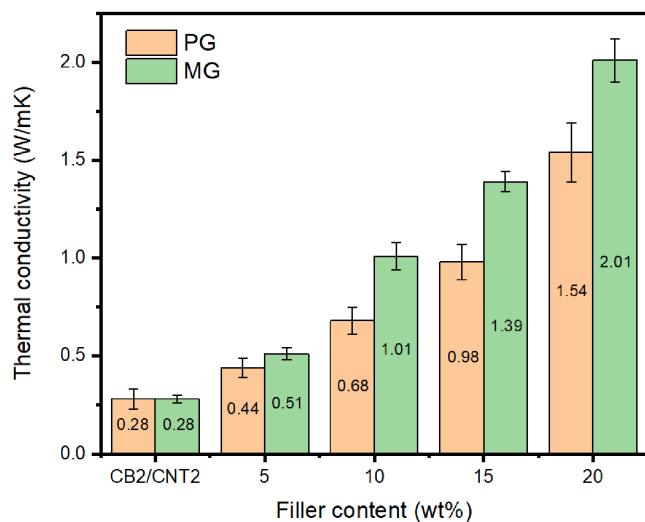


Figure 8. Thermal conductivities of PA 6/carbon filler composites as a function of MG modified GNP content.

결 론

GNP가 PA 6에 복합화될 때 분산성 개선이 필수적이며, 이를 위해 멜라민, 실란커플링제 및 계면활성제를 이용하여 GNP를 개질하고, 개질이 성공적으로 진행됨을 적외선 분광기 및 중류수 분산안정성을 통해 확인하였다. PA 6 복합체에 대해 열중량 잔량 편차, Avrami 수식에 의한 상대결정화도 최대 값 도달시간 및 $G'-G''$ 그래프 기울기 결과 값에서 MG의 분산성이 가장 우수함을 확인할 수 있었다. 이는 MG에 존재하는 아민기와 PA 6의 아마이드기 사이의 화학적 친화성으로 상용성을 증대시키고 결과적으로 GNP의 분산성을 강화하는 것으로 해석할 수 있다. 분산성 평가 결과 최적화를 나타낸 멜라민 개질 GNP 복합체의 열전도도가 순수 GNP가 적용된 복합체의 열전도도 값 대비 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 열중량 잔량 편차, 최대 상대 결정화도 도달 시간 및 $G'-G''$ 그래프 기울기는 GNP 분산성의 간접적 근거로 활용이 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글: 이 논문은 2025년 국립공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원과 환경부의 폐자원에너지화 전문인력 양성사업의 지원에 의하여 연구되었음.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Xu, L.; Yilmaz, H. Ü.; Wang, Z.; Poganietz, W. R.; Jochem, P. Greenhouse Gas Emissions of Electric Vehicles in Europe Considering Different Charging Strategies. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2020**, 87, 102534.
- Tang, C.; Tukker, A.; Sprecher, B.; Mogollón, J. M. Assessing the European Electric-Mobility Transition: Emissions from Electric Vehicle Manufacturing and Use in Relation to the EU Greenhouse Gas Emission Targets. *Environ. Sci. Technol.* **2022**, 57, 44-52.
- Manzetti, S.; Mariasiu, F. Electric Vehicle Battery Technologies: From Present State to Future Systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, 51, 1004-1012.
- Rangarajan, S.; Sundararaj, S. P.; Sudhakar, A. V. V.; Shiva, C. K.; Subramaniam, U.; Collins, E. R.; Senju, T. Lithium-Ion Batteries—The Crux of Electric Vehicles with Opportunities and Challenges. *Clean Technol.* **2022**, 4, 908-930.
- Martinez, P. A.; Victoria, J.; Torres, J.; Suarez, A.; Alcarria, A.; Amaro, A.; Lopez-Rius, B. Analysis of EMI Shielding Effectiveness for Plastic Fiber Composites in the 5G Sub-6 GHz Band. *Proc. 2021 IEEE Int. Joint EMC/SI/PI EMC Eur. Symp.* **2021**, 278-283.
- Hu, S.; Wang, D.; Večerník, J.; Křemenáková, D.; Militký, J. Electromagnetic Interference (EMI) Shielding and Thermal Management of Sandwich-Structured Carbon Fiber-Reinforced Composite (CFRC) for Electric Vehicle Battery Casings. *Polymers* **2024**, 16, 2291(1-17).
- Ahmadi-Moghadam, B.; Sharafimasooleh, M.; Shadlou, S.; Taheri, F. Effect of Functionalization of Graphene Nanoplatelets on the Mechanical Response of Graphene/Epoxy Composites. *Mater. Des.* **2015**, 66, 142-149.
- Qin, W.; Vautard, F.; Drzal, L. T.; Yu, J. Mechanical and Electrical Properties of Carbon Fiber Composites with Incorporation of Graphene Nanoplatelets at the Fiber–Matrix Interphase. *Compos. Part B Eng.* **2015**, 69, 335-341.
- Yang, B.; Shi, Y.; Miao, J. B.; Xia, R.; Su, L. F.; Qian, J. S.; Liu, J. W. Evaluation of Rheological and Thermal Properties of Polyvinylidene Fluoride (PVDF)/Graphene Nanoplatelets (GNP) Composites. *Polym. Test.* **2018**, 67, 122-135.
- Kim, J.; Yoo, S. C.; Cha, J.; Ryu, H.; Hong, S. H. Separation of Non-Covalently Functionalized Graphene Nanoplatelets via Salting-Out Process. *Compos. Res.* **2019**, 32, 134-140.
- Zhang, G.; Wang, F.; Dai, J.; Huang, Z. Effect of Functionalization of Graphene Nanoplatelets on the Mechanical and Thermal Properties of Silicone Rubber Composites. *Materials* **2016**, 9, 92.
- Jang, E.-J.; Kim, Y.-C. Study on the Crystallization Behavior and Rheological Properties of Nylon 6/Expanded Graphite Composites. *Polym. Korea* **2023**, 47, 164-170.
- Kang, S.; Kim, Y. C. Effect of Carbon Filler Master Batch on the Crystallization Behavior of Polyamide 6/Carbon Filler Composites. *Polym. Korea* **2024**, 48, 649-655.
- Kong, X.; Liu, J.; Li, S.; Yu, M. APTES-Modified Graphene Oxide Loaded with Cerium Dibutylphosphate as Two-Dimensional Nanocomposites for Enhancing Corrosion Protection Properties. *Corros. Sci.* **2023**, 213, 110966.
- Kim, K. J.; Cho, K. Y.; Park, Y. C.; Chung, Y. J.; Lim, Y. S. The Effect of Coupling Treatment to Graphite on Injection Processing. *J. Kor. Ceram. Soc.* **2001**, 38, 608-614.
- Choi, E. Y.; Han, T. H.; Hong, J.; Kim, J. E.; Lee, S. H.; Kim, H. W.; Kim, S. O. Noncovalent Functionalization of Graphene with End-Functional Polymers. *J. Mater. Chem.* **2010**, 20, 1907-1912.
- Braml, N. E.; Stegbauer, L.; Lotsch, B. V.; Schnick, W. Synthesis of Triazine-Based Materials by Functionalization with Alkynes. *Chem.–Eur. J.* **2015**, 21, 7866-7873.
- Li, Q.; Church, J. S.; Kafi, A.; Naebe, M.; Fox, B. L. An Improved Understanding of the Dispersion of Multi-Walled Carbon Nanotubes in Non-Aqueous Solvents. *J. Nanopart. Res.* **2014**, 16, 1-12.
- Herrero, C. R.; Acosta, J. L. Effect of Poly(epichlorhydrin) on the Crystallization and Compatibility Behavior of Poly(ethylene oxide)/polyphosphazene Blends. *Polym. J.* **1994**, 26, 786-796.
- Cebe, P. Non-isothermal Crystallization of Poly(etheretherketone) Aromatic Polymer Composite. *Polym. Compos.* **1988**, 9, 271-279.
- Nujalee, D.; Srimoanon, P.; Supaphol, P.; Nithitanakul, M. Isothermal Melt-crystallization and Melting Behavior for Three Linear Aromatic Polyesters. *Thermochim Acta* **2004**, 409, 63-77.

출판자 공지사항: 한국고분자학회는 계재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.