

마스터배치로부터 제조된 자원 순환형 탄소필러기반 탄소복합소재의 열적 및 기계적 물성 개선

이종인¹, 이승원¹, 손태준¹, 김수연¹, 배진우², 남병욱^{1*}

¹한국기술교육대학교 응용화학공학과

²한국기술교육대학교 미래융합공학전공

Improvement of Thermal and Mechanical Properties of Resource-recycling Carbon Filler-based Carbon Composites Prepared from Masterbatch

Jong In Lee¹, Seung Won Lee¹, Tae June Son¹,
Su Yeon Kim¹, Jin Woo Bae², Byeong Uk Nam^{1*}

¹Department of Applied Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education

²Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 자동차 산업의 발달은 자동차 부품의 소형화 및 고성능화를 촉진하며 이에 따라, 전자 소자에서는 많은 열이 방출된다. 이러한 열의 방출은 자동차 부품의 기능을 저하시키고, 오작동을 초래한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 열을 외부로 방출하거나 제어할 수 있는 방열소재에 대한 관심이 커지고 있다. 본 연구에서는, PA6에 자원 순환형 탄소필러(Resource-recycling carbon filler, RCF)와 유리섬유(Glass fiber, GF)를 첨가한 탄소복합소재를 이축압출기를 이용하여 제조하였다. 이들의 제조는 마스터배치 제조를 통한 2step 공정과 마스터배치 제조 없이 1step 공정으로 각각 제조하였다. 제조된 탄소복합소재에 대해 PA6와 RCF의 상호작용, 열적 및 기계적 물성, 분산성을 평가하였다. 결과적으로, 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재가 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재보다 열전도도와 기계적 물성이 우수하였는데, 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM) 이미지를 통해 PA6 matrix에 대한 RCF의 분산성에 영향을 받은 것으로 확인되었다. 특히, 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재 중에서 GF가 100 phr 첨가되었을 때, 열전도도, 인장강도, 굴곡탄성율이 각각 4.2 W/mK, 48 MPa, 11800 MPa로 증가하였다.

Abstract Currently, a lot of heat is generated from automobiles' electronic devices as the growing automobile industry promotes automobile components' miniaturization and high performance. Subsequently, this heat deteriorates the automobile components' performance and causes their malfunction. Hence, heat-dissipating materials, releasing this generated heat outside or controlling it, have received considerable attention. Consequently, this study prepared heat-dissipating carbon composites for automobiles by adding resource-recycling carbon filler (RCF) and glass fiber (GF) with polyamide6 (PA6) and using a twin-screw extruder. In particular, these carbon composites were prepared under two processes: the 2step process prepared them from a masterbatch, whereas the 1step process prepared them at once without a masterbatch. Subsequently, these prepared carbon composites were measured for their PA6-RCF interaction, thermal and mechanical properties, and constituents' dispersion. This measurement showed that the heat-absorbing carbon composites for automobiles prepared by the 2step process exhibited superior thermal conductivity and mechanical properties compared to those prepared by the 1step process. Further, the scanning electron microscopy (SEM) studies on these composites indicated that their RCF dispersion in the PA6 matrix significantly positively influenced their improved properties. In addition, a GF of 100 phr in the said carbon composites prepared by the 2step process increased their thermal conductivity, tensile strength, and flexural modulus to 4.2 W/mK, 48 MPa, and 11800 MPa, respectively.

Keywords : Resource-recycling Carbon Filler, Polyamide6, Carbon Composites, Masterbatch, Thermal and Mechanical Properties

본 연구는 중소벤처기업부의 기술개발사업(S2963952), 한국연구재단의 BK21 FOUR 사업, 한국기술교육대학교의 2021년도 교육연구진흥비 및 공용장비센터의 지원에 의한 연구임.

*Corresponding Author : Byeong Uk Nam(Korea University of Technology and Education)

email: bunam@koreatech.ac.kr

Received February 7, 2022

Revised March 25, 2022

Accepted May 6, 2022

Published May 31, 2022

1. 서론

자동차 산업이 발달함에 따라 자동차 부품의 소형화 및 고성능화가 추진되고 있다[1]. 이로 인해, 전자 소자가 고집적화되면서 많은 열이 방출하게 되는데, 이러한 열의 방출은 자동차 부품의 기능을 저하시키고, 오작동을 초래하는 등의 문제를 발생시킨다[1-3]. 이를 해결하기 위한 방안으로, 열을 제어할 수 있는 방열소재에 대한 관심이 커지고 있다[4]. 방열소재는 높은 열전도 특성으로 자동차 부품에서 발생하는 열을 외부로 방출시키거나 제어할 수 있으며, 이러한 특성으로 자동차의 엔진 방열판, LED 헤드라이트 등의 부품에 적용할 수 있다.

한편, 자동차의 경량화가 진행됨에 따라 자동차 부품소재로 기존의 금속이 아닌 가벼운 플라스틱의 수요가 급증하고 있다[5-10]. 특히, polyamide6(PA6)는 기계적 물성 및 내열성이 우수한 엔지니어링플라스틱으로써 자동차 부품 소재로 많은 인기를 얻고 있다. 하지만, PA6 단독으로는 열전도도가 매우 낮아 방열소재로 사용하기에 적합하지 않기 때문에 PA6에 금속 또는 세라믹 소재를 활용한 복합소재에 대한 연구가 진행되었으나, 무게가 무겁고 성형성이 좋지 않았다[4]. 또한, PA6에 열전도도가 우수한 탄소나노튜브(Carbon nanotube, CNT), 그래핀(Graphene)을 첨가한 탄소복합소재는 가격 경쟁력이 떨어지며, 고분자 matrix 내로의 낮은 분산성, 그리고 많은 양을 첨가할 수 없는 단점이 있었다[11]. 이렇게 PA6의 열전도도를 개선하기 위해 다양한 소재들이 사용되었으나, 방열소재로 활용되기에는 한계가 있었다. 이에 따라, PA6의 열전도도를 개선하기 위한 새로운 방법으로 나노다이아몬드 합성과정에서 부산물로 생성되는 탄소필러를 첨가한 탄소복합소재를 제조하고자 하였다. 이는 자원 순환형 탄소필러(Resource-recycling carbon filler, RCF)를 활용한다는 점에서 기존의 소재들보다 경제적인 이점이 있다.

본 연구에서는, RCF를 활용한 탄소복합소재를 제조 후 열적 및 기계적 물성을 평가하여 방열소재로 활용할 수 있는지에 대해 알아보고자 하였다. 탄소복합소재를 제조하기 위해서 PA6에 RCF와 함께 기계적 물성을 개선하기 위한 무기필러인 유리섬유(Glass fiber, GF)를 첨가하여 이축압출기를 통해 용융 블렌드하였다. 추가로 다른 탄소필러와 마찬가지로 제조공정에 따른 RCF의 분산성이 탄소복합소재의 열적 및 기계적 물성에 영향을 미치는지 확인하고자 하였다. 탄소복합소재는 마스터배치 제조를 통한 2step 공정과 마스터배치 제조 없이

1step 공정으로 각각 제조하였으며, 이때 최종적으로 첨가된 RCF와 GF의 함량은 동일하다. 이렇게 두 가지 방법으로 제조한 탄소복합소재의 열적 및 기계적 물성을 비교하였다.

2. 본론

2.1 재료

본 연구에 사용된 PA6는 Hyosung TNC사의 1027BRT(MI=30 g/10 min, 235 °C, 2.16 kg)를 사용하였다. 탄소필러인 RCF는 구형의 구조이며, 파우더(Powder) 형태로 밀도는 1.5 g/cm³이다. 무기필러로 사용한 GF는 Taishan Fiberglass 사의 T435N 제품을 사용하였다.

2.2 탄소복합소재의 조성 및 제조

Table 1은 마스터배치 제조 후 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 조성을, Table 2는 마스터배치 제조 없이 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 조성을 나타낸다. 샘플의 제조는 이축압출기(Bautek, BA19, L/D=40, 19 Φ)를 사용하여 제조하였으며, 각 샘플에 대한 공정 조건을 Table 3에 나타내었다. 이축압출기로부터 제조된 샘플은 펠렛타이저(Bautek, BA-PLT)를 사용하여 펠렛 형태의 샘플로 만들고, 이를 80 °C 진공 건조기에서 24시간 건조하였다. 건조된 펠렛은 수직형 사출기(HVM-25VS)를 통해 260~280 °C의 온도에서 ASTM 표준 규격에 맞는 시편으로 제조하였다.

2.3 탄소복합소재의 분석

PA6와 RCF 간의 상호작용을 확인하기 위해 Fourier transform infrared(FTIR, PerkinElmer, spectrum 100)을 사용하여 4000~650 cm⁻¹ 영역에 대해 ATR 모드로 32회 스캔하였다. 탄소복합소재의 열안정성을 측정하기 위해 열중량분석기(Thermogravimetric analyzer, TGA, PerkinElmer, TGA4000)를 사용하여 상온에서 600 °C까지 10 °C/min의 속도로 질소분위기에서 측정하였다. 탄소복합소재의 열전도도를 측정하기 위해 펠렛 형태의 샘플을 히팅프레스(Salt, ST-100)를 사용하여 270 °C의 온도에서 두께 0.1 mm인 필름 형태의 시편으로 제조하였다. 이후 열전도도 측정기(Netsch, LFA447)를 사용하여 상온에서 In-plane 방식으로 측정

하였다. 탄소복합소재의 인장강도와 굴곡탄성율은 만능 재료시험기(Universal testing machine, UTM, Tinius Olsen, H5KT)를 사용하여 측정하였다. 인장강도는 ASTM D638 규격에 따라 50 mm/min의 속도로 측정하였으며, 굴곡탄성율은 ASTM D790 규격에 따라 5 mm/min의 속도로 측정하였다. 모든 샘플의 분석은 7회 측정 후 최댓값 및 최솟값을 제외한 5개의 데이터로 평균을 구하였다. 그리고 2step 및 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 분산성을 확인하기 위해 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM, Emcrafts, GENESIS-2000) 이미지를 촬영하였다. 탄소복합소재의 모폴로지는 액체질소에 급냉하여 얻은 파단면을 Au 코팅 후 1000배의 배율로 관찰하였다.

Table 1. Formulation of the masterbatch and carbon composites prepared by 2step process

Sample	PA6 (wt%)	RCF (wt%)	MB1 (wt%)	GF (phr)
MB1	50	50	-	-
d-P1	20	-	80	-
d-P2	20	-	80	20
d-P3	20	-	80	60
d-P4	20	-	80	100

Table 2. Formulation of the carbon composites prepared by 1step process

Sample	PA6 (wt%)	RCF (wt%)	GF (phr)
P1	60	40	-
P2	60	40	20
P3	60	40	60
P4	60	40	100

Table 3. Process condition for carbon composites

Sample	Temperature (°C)	Screw (rpm)
MB1	220~250	200
d-P1		100
d-P2		100
d-P3		100
d-P4		100
P1		200
P2		200
P3		200
P4		200

3. 결과 및 고찰

3.1 탄소복합소재의 FTIR 분석

Fig. 1은 PA6, RCF와 이들을 원료로 제조한 탄소복합소재의 일부 조성에 대한 FTIR 측정결과를 나타낸다. PA6의 1634, 1541 cm^{-1} 에 위치한 피크는 각각 C=O 신축 진동과 N-H 굽힘 진동을 나타내며, RCF의 1739 cm^{-1} 에 위치한 피크는 C=O 신축 진동을 나타낸다. 제조된 탄소복합소재(d-P1, P1 조성)를 보면, PA6에 존재하였던 C=O, N-H 피크와 RCF에 존재하였던 C=O 피크가 모두 확인되었다. 반면, PA6에서 1634 cm^{-1} 와 1541 cm^{-1} 에서 관측되었던 피크가 탄소복합소재에서는 더 낮은 파수에서 관측되었다. 이는 PA6의 N-H, C=O 작용기와 RCF의 C=O 작용기 사이의 상호작용에 의한 영향으로 판단된다[12]. 또한, 2step 공정으로 제조한 d-P1 조성이 1step 공정으로 제조한 P1 조성보다 PA6의 C=O 피크와 N-H 피크가 더 많이 이동한 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해, PA6와 RCF 사이의 상호작용이 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재가 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재보다 더 우수함을 알 수 있었다.

3.2 탄소복합소재의 열적 및 기계적 물성 분석

3.2.1 탄소복합소재의 열안정성

Fig. 2는 2step 및 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 TGA 측정결과를 나타낸다. PA6는 380 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 열분해가 시작되었고 열분해 후 잔류물이 거의 없는 것으로 확인되었다. 반면, PA6에 RCF가 첨가된 d-P1과 P1 조성은 neat PA6보다 더 높은 400 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 열분해가 시작되었다. 또한, 이들의 열분해 후 잔류물은 약 40 % 정도로 확인할 수 있었는데, 첨가된 RCF의 함량과 거의 일치하였으며 탄소복합소재가 단일성분계가 아닌 이성분계임을 알 수 있었다. PA6에 RCF와 GF가 함께 첨가된 d-P4와 P4 조성은 420 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 열분해가 시작되었으며, d-P1과 P1 조성 대비 더 높은 열안정성을 보였다. 이들의 열분해 후 잔류물은 약 70 % 정도로 확인할 수 있었는데, 첨가된 RCF 및 GF의 함량과 거의 일치하였다. 이를 통해, PA6에 RCF와 GF가 정해진 함량대로 배합이 잘 일어난 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 2step 및 1step 제조공정에 따른 탄소복합소재의 열안정성은 큰 변화가 없는 것으로 확인되었다.

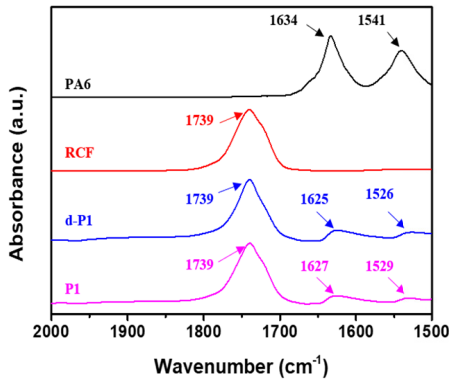


Fig. 1. FTIR spectra of PA6, RCF, and carbon composites

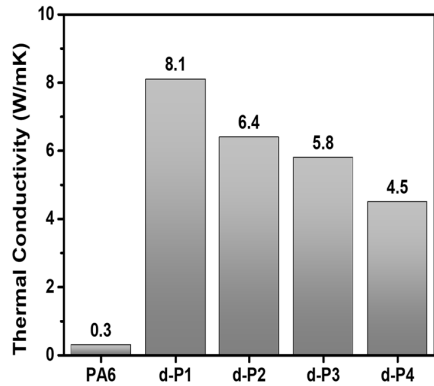


Fig. 3. Thermal conductivity results of the carbon composites prepared by 2step process

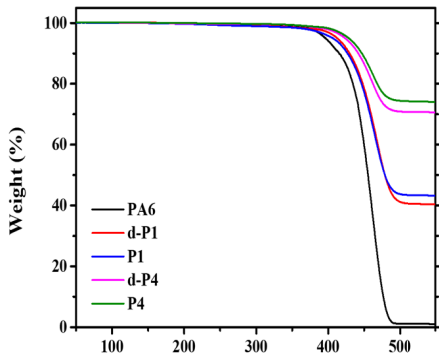


Fig. 2. Thermal stability of carbon composites

3.2.2 탄소복합소재의 열전도도

Fig. 3은 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 열전도도 측정결과를 나타낸다. RCF만 첨가된 d-P1 조성의 열전도도는 8.1 W/mK으로 neat PA6보다 크게 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이는 RCF의 첨가로 열전도 네트워크를 형성하여 탄소복합소재의 열전달 능력을 개선하였기 때문이다[13,14]. 이후 탄소복합소재 내 GF의 함량이 증가함에 따라 탄소복합소재의 열전도도는 지속적으로 감소하는 경향을 보였으며 특히, GF가 100 phr 첨가된 d-P4 조성의 열전도도는 4.5 W/mK을 보였다. 이러한 열전도도의 감소는 GF의 함량이 증가함에 따라 탄소복합소재를 구성하고 있는 RCF의 함량이 줄어들면서 열전도 능력이 감소되었기 때문이다.

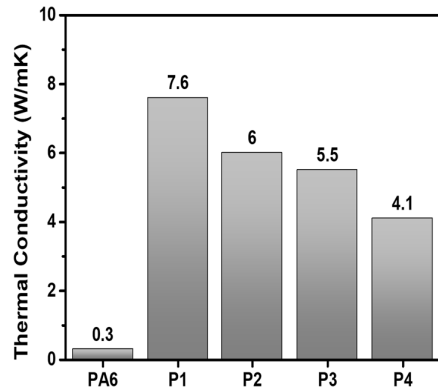


Fig. 4. Thermal conductivity results of the carbon composites prepared by 1step process

Fig. 4는 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 열전도도 측정결과를 나타낸다. 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재는 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재와 마찬가지로 GF의 함량이 증가함에 따라 열전도도가 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 하지만, 동일한 함량의 RCF에 대해 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재는 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재보다 열전도도가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이는 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재가 두 번의 용융 블렌드 과정을 통해 PA6 matrix에 대한 RCF의 분산성이 개선되었기 때문이다[15,16]. 이에 대한 설명은 Fig. 5의 2step 및 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 열전달 경로를

통해서도 확인할 수 있다. 2step 공정으로 제조한 d-P1 조성은 RCF가 PA6 matrix 내로 분산이 잘 이루어져 있고 RCF 간 열전도 네트워크가 잘 형성되어 있어 열전달이 원활하게 일어난다[17]. 반면, 1step 공정으로 제조한 P1 조성은 상대적으로 RCF가 PA6 matrix 내로 균일하게 분산되지 않고 응집된 부분이 있으며, RCF 간의 빈 공간으로 계면의 열손실이 존재한다[18]. 이에 따라 PA6 matrix 내 열전도 네트워크가 잘 형성되지 않아 열전달이 원활하게 일어나지 않은 것으로 판단된다.

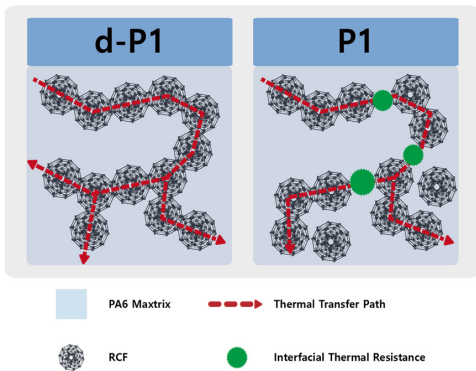


Fig. 5. Schematic diagram of thermal transfer paths for carbon composites

3.2.3 탄소복합소재의 기계적 물성

Fig. 6은 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 인장강도 및 굴곡탄성을 측정결과를 나타낸다. RCF만 첨가된 d-P1 조성의 인장강도는 큰 변화가 없었으나, 굴곡탄성은 약 2배로 증가하였다. 이는 RCF의 첨가로 탄소복합소재의 취성이 증가하였기 때문이다[19]. 이후 탄소복합소재 내 GF의 함량이 증가함에 따라 탄소복합소재의 인장강도 및 굴곡탄성이 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며 특히, d-P4 조성의 인장강도와 굴곡탄성은 각각 112 MPa, 14400 MPa로 neat PA6보다 크게 증가하였다. 이러한 기계적 물성의 개선은 GF와 PA6 간의 개선된 계면결합력과 GF의 높은 종횡비의 영향으로 판단된다[20].

Fig. 7은 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 인장강도 및 굴곡탄성을 측정결과를 나타낸다. 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재는 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재와 마찬가지로 GF의 함량이 증가함에 따라 인장강도 및 굴곡탄성이 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 동일한 함량의 RCF에 대해 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재는 2step 공정으로 제조한 탄

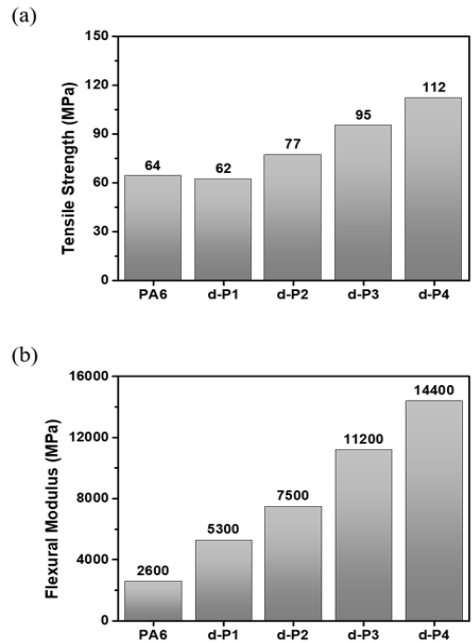


Fig. 6. Mechanical properties results of the carbon composites prepared by 2step process: (a) Tensile strength (b) Flexural modulus

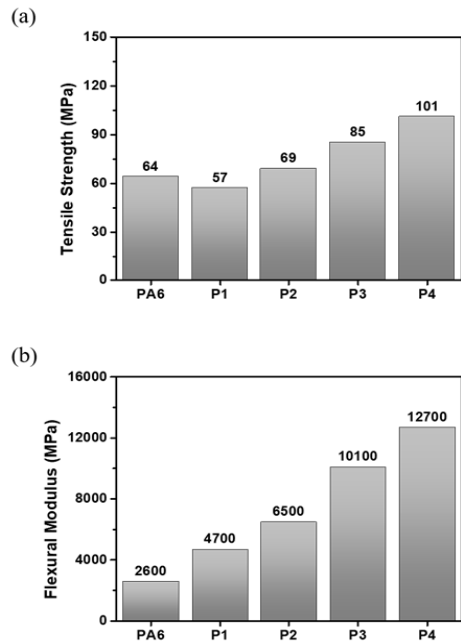


Fig. 7. Mechanical properties results of the carbon composites prepared by 1step process: (a) Tensile strength (b) Flexural modulus

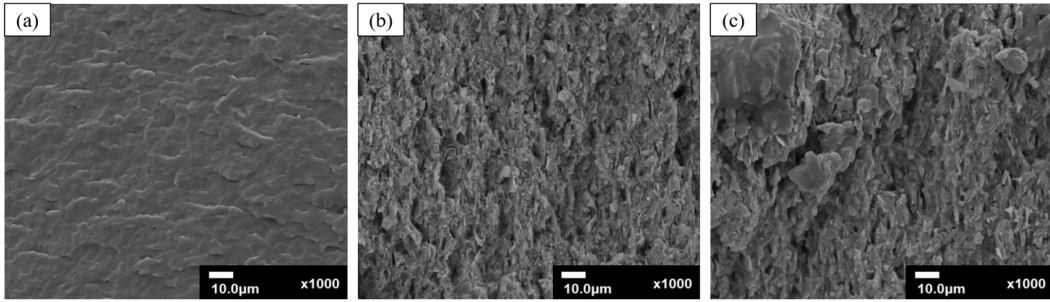


Fig. 8. SEM images for carbon composites: (a) PA6 (b) d-P1 (c) P1

소복합소재보다 더 낮은 기계적 물성을 보였다. 이는 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재가 두 번의 용융 블렌드 과정을 통해 PA6 matrix에 대한 RCF의 분산성이 개선되었기 때문이다[15,16].

3.2.4 탄소복합소재의 분산성

2step 공정으로 제조한 탄소복합소재(d-P1 조성)와 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재(P1 조성)의 분산성을 확인하고자 SEM 이미지를 촬영하였으며, 이에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. RCF가 첨가되지 않은 PA6는 하나의 매끄러운 표면을 확인할 수 있었다. 2step 공정으로 제조한 d-P1 조성은 전체적으로 균일한 표면이 보이며, PA6와 RCF 간의 상분리가 관측되지 않음을 확인할 수 있었다. 반면, 1step 공정으로 제조한 P1 조성은 d-P1 조성 대비 불균일한 표면이 보이고, 입자가 응집되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재의 분산성이 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재보다 떨어지기 때문이다. SEM 촬영결과를 통해 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재가 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재보다 더 우수한 열전도도, 기계적 물성을 보이는 경향과 일치하였으며, 이는 PA6 matrix에 대한 RCF의 분산성에 영향을 받은 것으로 확인되었다.

따라서, RCF를 활용한 탄소복합소재는 마스터배치 제조를 통한 2step 공정으로 제조하였을 때 방열소재로서 활용되기에 더 적합한 열전도도와 기계적 물성을 보이는 것으로 판단된다.

4. 결론

방열소재로서 활용되기 위한 탄소복합소재를 제조하

기 위해 PA6에 RCF와 GF를 첨가하여 이축압출기를 통해 용융 블렌드하였다. PA6에 RCF와 GF가 첨가되었을 때 탄소복합소재의 열안정성은 증가하였지만, 제조공정에 따라서는 큰 변화가 없는 것으로 확인되었다. 탄소복합소재 내 GF의 함량이 증가함에 따라 탄소복합소재의 열전도도는 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 탄소복합소재를 구성하고 있는 RCF의 함량이 감소함에 따라 열전도 능력이 감소되었기 때문이다. 탄소복합소재 내 GF의 함량이 증가함에 따라 탄소복합소재의 인장강도 및 굴곡탄성율은 모두 증가하는 경향을 보였다. 이는 GF와 PA6 간의 개선된 계면결합력과 GF의 높은 종횡비의 영향 때문이다. 또한, 동일한 함량의 RCF에 대해 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재는 1step 공정으로 제조한 탄소복합소재보다 열전도도, 인장강도, 굴곡탄성율이 모두 우수하였다. 이러한 결과는 SEM 이미지에서 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재가 두 번의 용융 블렌드 과정을 통해 PA6 matrix에 대한 RCF의 분산성이 개선되었기 때문으로 확인되었다. 결과적으로, 2step 공정으로 제조한 탄소복합소재 중, d-P4 조성의 열전도도, 인장강도, 굴곡탄성율은 각각 4.5 W/mK, 112 MPa, 14400 MPa로 neat PA6보다 모두 증가하였다.

References

- [1] J. Y. Chung, B. Lee, I. K. Park, H. H. Park, H. S. Jung, J. C. Park, H. C. Cho, J. D. Nam, "High Thermal Conductive Natural Rubber Composites Using Aluminum Nitride and Boron Nitride Hybrid Fillers", *Elastomers and composites*, Vol.55, No.1, pp.59-66, Mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.7473/EC.2020.55.1.59>
- [2] W. Kim, J. Hwang, "Fabrication of High Thermal Conducting Graphene-Aluminum Composites for Electronic Devices", *Polymer Science and Technology*,

- Vol.31, No.2, pp.125-128, Apr. 2020.
- [3] H. L. Lee, S. M. Ha, Y. Yoo, S. G. Lee, "Current Trends in Thermally Conductive Polymer Composites", *Polymer Science and Technology*, Vol.24, No.1, pp.30-37, Feb. 2013.
- [4] D. Kim, I. S. Lim, "A Study on the Manufacturing Technique of Composite Heat Dissipation Filler by Sputtering Method", Vol.19, No.4, pp.404-412. Dec. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.33162/JAR.2019.12.19.4.404>
- [5] B. H. Lee, D. S. Jeong, C. W. Kim, S. H. Park, Y. C. Kim, "Influence of the Chemical Treatment of Bamboo Fiber (BF) on Physical Properties of BF and PP/BF Composites", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol.29, No.2, pp.168-175, Apr. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.14478/ace.2017.1118>
- [6] M. A. M. Ali, A. Abdullah, S. Dahaman, A. Amin, S. Mansor, "Review the mechanical properties of reinforcing agents in polypropylene matrix of car bumper", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.12, No.14, pp.4209-4213, Jul. 2017.
- [7] S. A. Pradeep, R. K. Iyer, H. Kazan, S. Pilla, "Automotive applications of plastics: past, present, and future", *In Applied Plastics Engineering Handbook*, pp.651-673, Sep. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00031-6>
- [8] Y. H. Lee, B. U. Nam, J. G. Lim, C. H. Choi, "A Study on Rheological Properties for Preparing Flow Mark Free PP Compounds", *Elastomers and Composites*, Vol.44, No.2, pp.156-163, Jun. 2009.
- [9] R. Stewart, V. Goodship, F. Guild, M. Green, J. Farrow, "Investigation and demonstration of the durability of air plasma pre-treatment on polypropylene automotive bumpers", *International journal of adhesion and adhesives*, Vol.25, No.2, pp.93-99, Apr. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2004.04.001>
- [10] G. T. Lim, M. H. Ju, D. H. Kim, K. C. Song, S. K. Kim, "Morphology and Properties of PP/PU Blends Prepared by Compositional Quenching", *Elastomers and Composites*, Vol.36, No.3, pp.177-187, Sep. 2001.
- [11] X. Huang, C. Zhi, Y. Lin, H. Bao, G. Wu, P. Jiang, Y. W. Mai, "Thermal conductivity of graphene-based polymer nanocomposites", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol.142, pp.100577, Oct. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100577>
- [12] M. A. Blatchford, P. Raveendran, S. L. Wallen, "Spectroscopic Studies of Model Carbonyl Compounds in CO₂: Evidence for Cooperative C-H...O Interactions", *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol.107, No.48, pp.10311-10323, Nov. 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1021/jp027208m>
- [13] S. M. Ha, O. H. Kwon, Y. G. Oh, Y. S. Kim, S. G. Lee, J. C. Won, K. S. Cho, B. G. Kim, Y. Yoo, "Thermally conductive polyamide 6/carbon filler composites based on a hybrid filler system", *Science and technology of advanced materials*, Nov. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/6/065001>
- [14] Y. Yang, D. Li, G. Si, Q. Liu, Y. Chen, "Improved thermal and mechanical properties of carbon fiber filled polyamide 46 composites", *Journal of Polymer Engineering*, Vol.37, No.4, pp.345-353, Sep. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1515/polyeng-2016-0092>
- [15] D. S. Jeong, B. U. Nam, "Properties of PP/MWCNT Nanocomposite Using Pellet-Shaped MWCNT", *Polymer Korea*, Vol.35, No.1, pp.17-22, Jan. 2011.
- [16] Y. C. Li, G. H. Chen, "HDPE/expanded graphite nanocomposites prepared via masterbatch process", *Polymer Engineering & Science*, Vol.47, No.6, pp.882-888, Apr. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.20772>
- [17] S. Zhou, L. Yu, X. Song, J. Chang, H. Zou, M. Liang, "Preparation of highly thermally conducting polyamide 6/graphite composites via low-temperature in situ expansion", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.131, No.1, Aug. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1002/app.39596>
- [18] Y. Wu, X. Zhang, A. Negi, J. He, G. Hu, S. Tian, J. Liu, "Synergistic effects of boron nitride (BN) nanosheets and silver (Ag) nanoparticles on thermal conductivity and electrical properties of epoxy nanocomposites", *Polymers*, Vol.12, No.2, pp.426-438, Feb. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12020426>
- [19] Y. Yoo, H. L. Lee, S. M. Ha, B. K. Jeon, J. C. Won, S. G. Lee, "Effect of graphite and carbon fiber contents on the morphology and properties of thermally conductive composites based on polyamide 6", *Polymer international*, Vol.63, No.1, pp.151-157, May. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1002/pi.4534>
- [20] B. J. Kim, "A Study on the Flexural Property of Glass Fiber Filled Coextruded Wood Plastic Composites", *Journal of the Korea Furniture Society*, Vol.24, No.4, pp.379-388, Oct. 2013.

이종인(Jong In Lee)

[준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학석사)

<관심분야>

고분자 가공 및 합성, 친환경 소재

이 승 원(Seung Won Lee)

[준회원]



- 2016년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 학사과정

<관심분야>

고분자, 플라스틱 복합소재 개발

배 진 우(Jin Woo Bae)

[정회원]



- 2004년 8월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 서울대학교 화학생물공학부 (공학박사)
- 2012년 3월 ~ 2013년 9월 : 삼성 디스플레이 책임연구원
- 2013년 10월 ~ 2016년 2월 : 경희대학교 연구교수
- 2016년 3월 ~ 2019년 8월 : University of California, Berkeley 박사후연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 조교수

<관심분야>

기능성 고분자 제조 및 응용

손 태 준(Tae June Son)

[준회원]



- 2019년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 학사과정

<관심분야>

친환경 소재, 유기전자소재, 고분자 가공 및 합성

남 병 옥(Byeong Uk Nam)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 공업화학 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 공업화학 (공학석사)
- 1993년 8월 : 서울대학교 공업화학 고분자재료 (공학박사)
- 1993년 9월 ~ 2002년 2월 : SK innovation 대덕 R&D 센터 고분자 연구소 수석연구원
- 2008년 8월 ~ 2009년 8월 : 미국 RPI공대 화학과 방문 교수
- 2002년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 교수

<관심분야>

고분자 복합재료, 친환경 고분자 소재

김 수 연(Su Yeon Kim)

[준회원]



- 2019년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 학사과정

<관심분야>

친환경 고분자 복합소재 개발, 석유 화학, 화학분석