

# 압출 공정온도와 스크류 조합에 따른 자원 순환형 탄소필러기반 폴리아마이드66 복합소재의 열전도도 및 기계적 물성

배진우<sup>1</sup>, 이종인<sup>2</sup>, 양세준<sup>2</sup>, 최인규<sup>2</sup>, 오승주<sup>1</sup>, 남병욱<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국기술교육대학교 미래융합공학전공, <sup>2</sup>한국기술교육대학교 응용화학공학과

## Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Resource-circulating Carbon Filler-based Polyamide66 Composites according to Extruder Operating Temperature and Screw Configuration

Jin Woo Bae<sup>1</sup>, Jong In Lee<sup>2</sup>, Se Jun Yang<sup>2</sup>, In Gyu Choi<sup>2</sup>, Seung-Ju Oh<sup>1</sup>, Byeong-Uk Nam<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education

<sup>2</sup>Department of Applied Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education

**요약** 전기차 산업의 발달로 고성능 전장부품의 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 하지만, 고성능의 전장부품들은 열을 쉽게 발생시키고, 부품의 성능 저하 및 오작동과 기판의 열화를 초래한다. 이를 해결하기 위해 자동차 부품에 고분자 기반의 방열 소재를 적용할 수 있다. 본 연구에서는, 폴리아마이드66(Polyamide66, PA66)에 자원 순환형 탄소필러(Resource-circulating carbon filler, RCF)와 유리섬유(Glass fiber, GF)를 도입한 탄소복합소재를 이축압출기에서 용융 블렌드하였다. 탄소복합소재는 두 가지 압출 공정온도 조건과 다른 스크류 조합으로 제조되었으며, 이들의 열적 및 기계적 물성, 그리고 모폴로지를 분석하였다. 높은 압출 공정온도에서 제조된 탄소복합소재는 낮은 압출 공정온도에서 제조된 탄소복합소재보다 더 높은 열적 및 기계적 물성 향상을 보였다. 또한, 이축압출기 스크류 조합에서 kneading block의 확대는 탄소복합소재의 물성을 더 향상시켰다. 이는 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 이용한 모폴로지 분석을 통해 RCF가 더 높은 압출공정 온도와 확대된 kneading block으로 인해서 PA66 모재에 대한 분산성이 우수하였기 때문으로 판단하였다. 특히, GF가 100 phr 첨가된 탄소복합소재는 높은 압출 공정온도와 강화된 kneading block에서 제조되었을 때, 우수한 열전도도와 굴곡탄성율을 보이면서도 Neat PA66만큼의 충격강도와 인장강도를 유지할 수 있었다.

**Abstract** The demand for high-performance electrical components has been steadily increasing with the development of the electric vehicle industry. However, these components generate heat easily, leading to performance degradation, malfunctioning, and substrate deterioration. To address this issue, polymer-based heat dissipation materials can be applied to automotive components. In this study, a carbon composite material incorporating resource-circulating carbon filler (RCF) and glass fibers (GF) was melt-blended with polyamide 66 (PA66) using a twin-screw extruder. The composites were manufactured under two different extrusion operating temperature conditions and with different screw configurations, and their thermal, mechanical, and morphological properties were analyzed. The RCF-reinforced composites prepared at a higher operating temperature exhibited higher improvements in thermal and mechanical properties compared to the composites prepared at a lower operating temperature. Furthermore, the increases in the kneading block in the screw configuration of the twin-screw extruder further enhanced the thermal and mechanical properties of the carbon composites. These results were also observed in the scanning electron microscopy (SEM) analysis of the superior dispersibility of the RCF within the PA66 matrix, which was attributed to the higher operating temperature in the twin-screw extruder and the increases of the kneading block in the screw configuration. Specifically, when the RCF-reinforced composites with 100 phr GF were prepared at higher extrusion process temperatures and with an enhanced kneading block, they exhibited excellent thermal conductivity and flexural modulus while maintaining impact strength and a tensile strength comparable to neat PA66.

**Keywords** : Resource-recycling Carbon Filler, Polyamide66, Carbon Composites, Thermal Conductivity, Mechanical Properties

본 과제는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0), 한국연구재단의 BK21 FOUR 사업, 한국기술교육대학교의 2022년도 교육연구진흥비 및 공용장비센터의 지원에 의한 연구임.

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

email: bunam@koreatech.ac.kr

Received May 24, 2023

Revised June 28, 2023

Accepted July 7, 2023

Published July 31, 2023

## 1. 서론

최근 전기차의 개발이 활발하게 진행됨에 따라 자동차의 전장부품들은 갈수록 작아지고, 가벼워졌으며, 다양한 기능을 가지게 되었다. 하지만 이로 인해 전장부품을 구성하는 소재들을 더욱 촘촘하게 배치하게 되었고, 이런 한정된 공간 안에서 전장부품의 고집적화는 열을 쉽게 발생시키고, 부품의 성능 저하 및 오작동과 기판의 열화를 일으키게 된다.[1,2] 이처럼 전장부품에서 발생하는 열을 효율적으로 제어하기 위해서 방열소재를 사용하는 기술이 주목받고 있다.[3] 방열 소재는 열전도도가 우수하여, 전장부품에서 발생한 열을 외부로 빠르게 방출함으로써 과열에 의한 문제를 해결할 수 있다.

한편 배터리와 같은 전기차용 부품들로 인해 기존 내연기관차보다 전기차의 중량이 커지는 원인이 되고 있다. 전기차가 무거워질수록 에너지 효율성이 떨어지기 때문에 차량 경량화 기술은 미래 자동차 시장에서도 매우 중요한 과제로 떠오르고 있어 무거운 금속을 대신하여 자동차용 플라스틱을 사용해 전기차를 경량화시키는 방법이 해결책으로 제시되고 있다. 특히, 고분자 소재로 우수한 내열성 및 기계적 물성을 보유한 폴리아미드(Polyamide, PA66)가 활용되고 있다. 하지만 PA66은 금속 대비 매우 낮은 열전도도를 보이기 때문에 방열 소재로써 활용되기에는 한계가 있다. PA66의 열전도도를 개선하기 위해 다양한 탄소필러가 도입된 PA66기반 탄소복합소재에 관한 연구가 진행되었다. 대표적으로 그래핀(graphene)과 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 열전도도가 우수하지만, 가격경쟁력과 고분자 모재로의 낮은 분산성 문제가 있었으며[4,5], 그래파이트(graphite)는 상대적으로 저렴한 장점이 있지만 낮은 열전도도를 보였다.

이렇게 기존의 PA66기반 탄소복합소재의 한계를 극복하기 위해서는 가격경쟁력이 우수하면서도 열전도도가 우수한 탄소필러의 도입이 필요하다. Fig. 1은 탄소필러 중에서도 자원순환형 탄소필러(Resource-circulating carbon filler, RCF)를 나타낸다. 이는 나노 다이아몬드 합성과정에서 부산물로 생성되는 것으로, 이들 부산물을 정제하여 탄소필러로 사용하기 위해 개발되었으며 기존의 소재들보다 경제적이고 환경적으로도 자원순환되기에 고분자와 복합소재화를 통한 용도 개발 의미는 더 크다고 하겠다. 특히, 자동차 전장부품의 베이스 수지에 주로 사용되는 PA66[6]에 RCF와 함께 높은 기계적 물성을 지닌 유리섬유(Glass fiber, GF)를 첨가하여 열전도도를

보완하면서도 기계적 물성이 크게 개선될 것으로 예상되어 차세대 전기차의 방열 소재로써 활용이 기대된다.

본 연구에서는 RCF 및 GF가 첨가된 PA66 기반 탄소복합소재가 차세대 전기차 산업에서 전장부품의 방열 소재로써 활용될 수 있는지를 알아보고자 하였다. 탄소복합소재를 제조하기 위해 PA66에 RCF 및 GF를 첨가하여 이축 압출기를 이용하여 용융 블렌드하였다. 용융 블렌드는 RCF의 분산성을 개선하기 위해 마스터 배치 제조(LA-MB, HA-MB, LB-MB, HB-MB) 후 이를 희석하는 2 step 공정으로 진행하였으며, 압출 공정 온도 변화와 압출 스크류 조합에 따른 열적 및 기계적 물성의 변화를 확인하였다. 특히, 제조된 탄소복합소재에 대해 열적 및 기계적 물성을 평가하고, 이들의 모폴로지 분석을 수행하여 복합소재의 물성과 분산성의 관계를 고찰하고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 재료

본 연구에서 사용된 PA66는 Solvay 사의 27AE1K Grade (relative viscosity=2.7)를 사용하였다. 탄소필러인 RCF는 네오몬드 사의 NPC-F grade (겉보기 밀도=0.30 g/cm<sup>3</sup>, 탄소순도 99.5% 이상, 입자크기 5~100 nm, 비표면적 550 m<sup>2</sup>/g 이상)로 Fig. 1과 같이 구형의 구조이며, 파우더(Powder) 형태이다. 보강재로 사용한 GF는 TaishanFiberglass 사의 T435N(chopped length=3 mm, diameter=10 μm) 제품을 사용하였다.

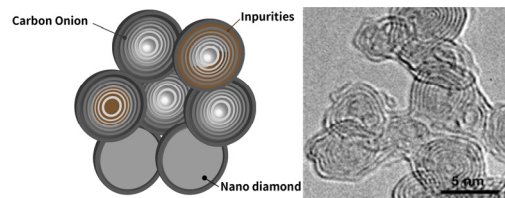


Fig. 1. Schematic Picture and TEM Image of RCF

### 2.2 탄소복합소재의 조성 및 제조

탄소복합소재를 제조하기 위해 샘플을 Table 1의 조성대로 배합하였다. 탄소복합소재의 제조는 이축압출기(TSE, Bautek, BA19, L/D=40, 19 Φ)를 사용하여 제조하였으며, 압출 공정 스크류의 속도는 마스터배치 제조 시와 탄소복합소재 제조 시 각각 200 rpm과 100 rpm

으로 진행하였다. 압출 공정온도에 따른 RCF의 분산성이 탄소복합소재의 열적 및 기계적 물성에 미치는 영향을 확인해보기 위해 두 가지 압출 공정온도를 각각 290~320℃와 330~350℃로 적용하였다. 또한 이축압출기 스크류 조합에서 kneading zone 차이에 따른 탄소복합소재의 특성 분석을 확인하고자 Fig. 2와 같이 kneading zone을 각각 1개와 4개로 적용하였다. 이축 압출기를 통해 제조된 샘플은 펠렛타이저(Bautek, BA-PLT)를 사용하여 펠렛 형태의 샘플로 만들고, 이를 80 ℃ 진공 건조기에서 24시간 건조하였다. 건조된 펠렛은 수직형 사출기(Heungwha Machinery, HVM-25VS)를 통해 330~350 ℃의 사출온도와 100 ℃의 금형온도에서 ASTM 표준 규격에 맞는 시편으로 제조하였다.

Table 1. Formulation of the masterbatch and carbon composites prepared by 2 step process at different operating temperature and screw configuration

Sample	PA66 (wt%)	RCF (wt%)	MB (wt%)	GF (phr)	TSE TEMP (℃)	TSE Configuration
LA-MB	50	50	-	-	290 ~ 320	Screw A
LA-P1	20	-	80	-		
LA-P2	20	-	80	20		
LA-P3	20	-	80	60		
LA-P4	20	-	80	100		
HA-MB	50	50	-	-	330 ~ 350	Screw A
HA-P1	20	-	80	-		
HA-P2	20	-	80	20		
HA-P3	20	-	80	60		
HA-P4	20	-	80	100		
LB-MB	50	50	-	-	290 ~ 320	Screw B
LB-P1	20	-	80	-		
LB-P2	20	-	80	20		
LB-P3	20	-	80	60		
LB-P4	20	-	80	100		
HB-MB	50	50	-	-	330 ~ 350	Screw B
HB-P1	20	-	80	-		
HB-P2	20	-	80	20		
HB-P3	20	-	80	60		
HB-P4	20	-	80	100		

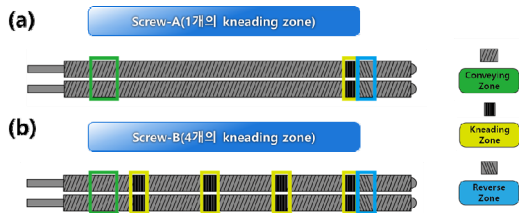


Fig. 2. Screw Configuration of Twin Screw Extruder (L/D=40, 19∅)

### 2.3 탄소복합소재의 분석

탄소복합소재의 열전도도는 열전도도 측정기(Netsch, LFA447)를 사용하여 Fig. 3과 같이 상온에서 In-plane 방식으로 측정하였다. 열전도도를 측정하기 위해 이축압출기로 제조된 펠렛 형태의 샘플을 가열프레스(Salt, ST-100)를 사용하여 330 ℃의 온도에서 두께 0.2 mm 인 필름 형태의 시편으로 제조하여 ASTM E1461 방법으로 측정하였다. 필름은 0.2mm 두께의 몰드를 이용하여 필름형태의 시편을 제조하였으며, 마이크로미터(Mitutoyo, 293-821)를 이용하여 시편의 두께가 균일한 것을 확인하였다. 탄소복합소재의 충격강도는 Izod 충격시험기(Qmesys, QM700A)를 사용하여 ASTM D256 규격에 따라 노치 시편을 제조하여 측정하였다. 탄소복합소재의 굴곡탄성율, 인장강도, 신율은 만능재료시험기(Universal testing machine, UTM, Tinius Olsen, H5KT)를 사용하여 측정하였다. 굴곡탄성율은 ASTM D790 규격에 따라 5 mm/min의 속도로, 인장강도와 신율은 ASTM D638 규격에 따라 50 mm/min의 속도로 측정하였다. 탄소복합소재의 모폴로지는 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM, Emcrafts, GENESIS-2000)을 이용하여 촬영하였다. 모폴로지를 분석하기 위해 사출기로 성형한 샘플을 액체질소에 급냉 후 파단하였고, 이를 Au 코팅하여 1,000배의 배율로 관찰하였다.

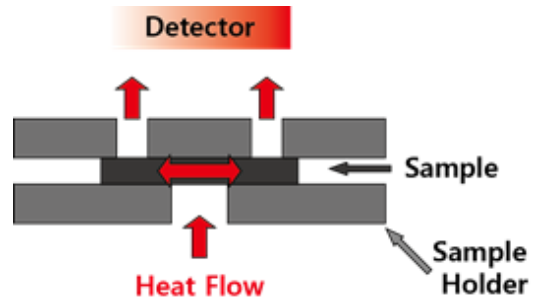


Fig. 3. Schematic Apparatus to Measure Thermal Conductivity with In-plane method

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Screw A 조합으로 공정온도에 따른 탄소복합소재의 열적 및 기계적 물성

Fig. 4은 Screw A 조합으로 각각 낮은 압출 공정온도와 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재의 열전도도 측정결과를 나타낸다. Neat PA66의 열전도도는

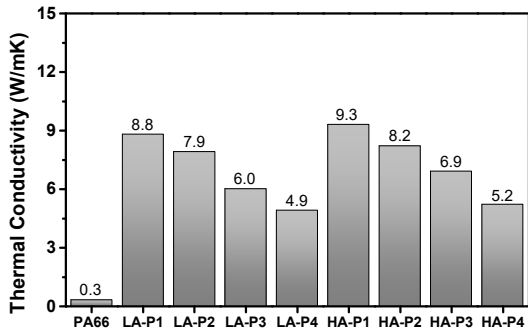


Fig. 4. Thermal conductivity of carbon composites prepared by 2 step process under screw-A configuration at different operating temperature

0.3 W/mK으로 매우 낮은 수준임을 보였다. RCF만 첨가된 LA-P1과 HA-P1 조성의 열전도도는 각각 8.8 W/mK와 9.3W/mK으로 neat PA66보다 더욱 증가하였다. 이는 RCF의 첨가로 탄소복합소재 내 열전도 네트워크를 형성하여 열전달 능력을 개선하였기 때문이다 [7,8]. 더욱이 높은 공정온도에서 제작된 HA-P1 탄소복합소재의 열전도도가 더 높게 확인되었는데, 이는 높은 온도에서 이축압출기의 전단력이 원활하게 전달되어 PA66내에서 열전도 네트워크 형상이 잘 분산되어 열전달 능력이 효과적으로 증대되었기 때문이다. 반면, GF의 함량이 증가할수록 탄소복합소재의 열전도도는 가공온도에 관계없이 지속적으로 감소하였다. 이는 일정이상의 무기필러가 첨가될 경우, 무기필러의 부피가 팽창함에 따라서 부피분율이 증가하게 되고, 그에 따른 전단응력이 증가하여 유동성이 감소하는 경향을 보인다[9]. 또한 GF의 함량이 증가함에 따라 탄소복합소재를 구성하고 있는 RCF의 함량이 감소하면서 열전달 능력이 감소하였기 때문이다. 그럼에도 GF가 100 Parts per Hundreds Resin(phr)이 첨가된 탄소복합소재(LA-P4와 HA-P4 조성)의 열전도도는 각각 4.9와 5.2 W/mK으로 neat PA66보다 높은 열전도도를 보였다.

Fig. 5는 Screw A 조합으로 각각 낮은 압출 공정온도와 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재의 충격강도 및 굴곡탄성률 측정결과를 나타낸다. Neat PA66의 충격강도와 굴곡탄성률은 각각 35 J/m와 2900 MPa의 값을 보였다. Neat PA66보다 RCF만 첨가되어 다른 공정 온도에서 제작된 LA-P1과 HA-P1 조성의 탄소복합소재 충격강도는 14 J/m와 17 J/m로 감소하였지만, 굴곡탄성률은 5860MPa과 6500MPa로 증가하였다. 이는 효과적으로 잘 분산되어 첨가된 RCF로 인하여 탄소

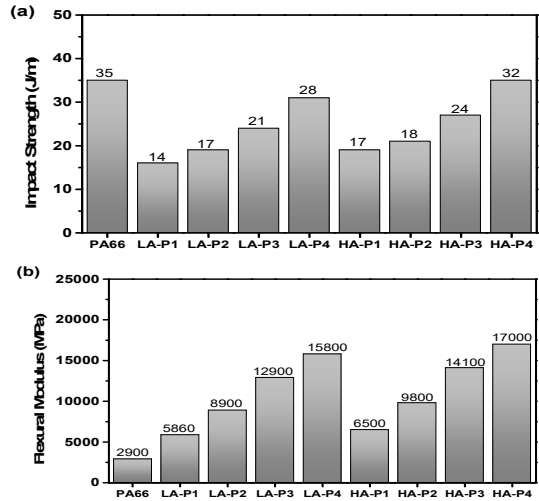


Fig. 5. Mechanical properties of carbon composites prepared by 2 step process under screw-A configuration at different operating temperature: (a) Impact strength; (b) Flexural modulus.

복합소재의 취성이 증가하였기 때문이다[10]. 또한, GF의 함량이 증가할수록 탄소복합소재의 충격강도와 굴곡탄성률이 가공온도에 관계없이 지속적으로 증가하였다. 특히, GF가 100 phr 첨가된 HA-P4 탄소복합소재의 충격강도와 굴곡탄성률은 각각 32 J/m와 17000 MPa의 값을 보였다. 이러한 기계적 물성의 증가는 PA66와 높은 중량비의 GF간의 개선된 계면결합력으로 판단된다[13]. Screw A 조합으로 낮은 압출 공정온도보다 높은 압출 공정온도에서 제조한 RCF기반 탄소복합소재가 GF의 첨가로 굴곡탄성률이 획기적으로 개선되었을 뿐만 아니라, 충격강도도 neat PA66 수준으로 증가한 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 Screw A 조합으로 각각 낮은 압출 공정온도와 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재의 인장강도 및 파단신율 측정결과를 나타낸다. Neat PA66의 인장강도와 신율은 각각 74 MPa과 39.9%의 값을 보였다. RCF만 첨가된 LA-P1과 HA-P1 조성의 탄소복합소재 인장강도는 각각 36 MPa와 43 MPa이었고 파단신율은 각각 7.1%와 8.4%로 Neat PA66보다 전체적으로 감소하였다. 이는 RCF의 첨가로 탄소복합소재의 취성이 증가하였기 때문이다[11]. 하지만, GF의 함량이 증가할수록 탄소복합소재의 인장강도는 지속적으로 증가하였다. 특히, GF가 100 phr 첨가된 탄소복합소재(HA-P4 조성)의 인장강도는 73 MPa으로 PA66과 거의 유사하

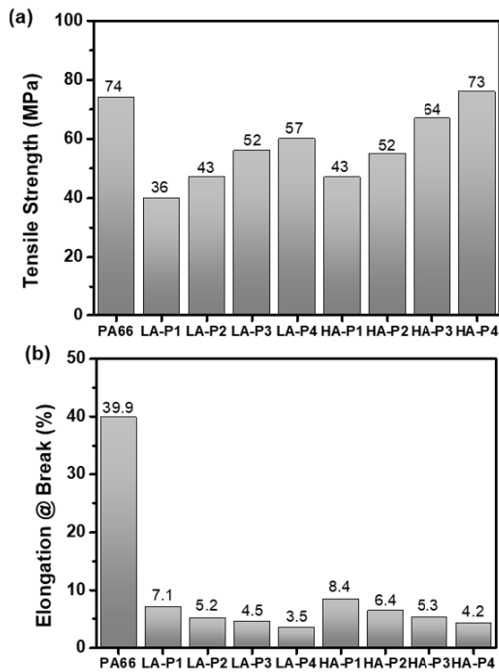


Fig. 6. Mechanical properties of carbon composites prepared by 2 step process under screw-A configuration at different operating temperature: (a) Tensile strength; (b) Elongation at break.

였다. 이는 PA66와 높은 중형비의 GF간의 개선된 계면 결합력으로 판단된다[9]. 반면, 탄소복합소재의 신율은 GF를 소량 도입하여도 급격하게 감소했고, 함량이 증가하여도 낮은 수준으로 좀 더 감소하는 경향을 보였다. 이는 무기필러의 첨가로 탄소복합소재의 취성이 증가하였기 때문이다[12].

### 3.2 Screw B 조합으로 공정온도에 따른 탄소복합소재의 열적 및 기계적 물성

Fig. 7은 Screw B 조합으로 각각 낮은 압출 공정온도와 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재의 열전도도 측정결과를 나타낸다. 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재는 RCF의 첨가 및 GF의 함량변화에 따른 열전도도의 변화 거동이 낮은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재 대비 우수한 거동을 보였다. 즉, 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재는 낮은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재 대비 더 높은 열전도도를 보였다. 특히, Screw B 조합으로 GF가 100 phr 첨가된 HB-04 조성의 탄소복합소재 열전도도는 Screw A 조합으로 동일하게 제작된 HA-04조성의 탄소복합소

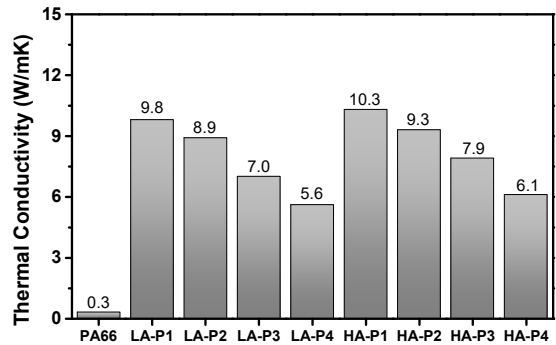


Fig. 7. Thermal conductivity of carbon composites prepared by 2 step process under screw-B configuration at different operating temperature

재 열전도도(Fig. 4)보다 명확하게 더 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이것은 이축압출기 내에서 kneading block의 증가로 인해서 좀 더 많은 전단 응력이 발생되어 PA66내에서 RCF의 분산성이 효과적으로 개선되어 열전도 네트워크 형상이 잘 형성되어 열전달 능력이 효과적으로 증대되었기 때문이다[14,15].

Fig. 8은 Screw B 조합으로 각각 낮은 압출 공정온도와 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재의 충격강도 및 굴곡탄성률 측정결과를 나타낸다. 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재는 RCF의 첨가 및 GF의 함량변화에 따른 충격강도 및 굴곡탄성률의 변화 거동이 낮은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재와 유사한 거동을 보였다. 그러나 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재는 낮은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재 대비 더 우수한 충격강도와 굴곡탄성률을 보였다. 특히, Screw B 조합으로 GF가 100 phr 첨가된 HB-P4 조성의 탄소복합소재는 Screw A 조합으로 동일하게 제작된 HA-04조성의 탄소복합소재 보다 우수한 것을 알 수 있으며, 결과적으로 neat PA66와 같은 수준의 충격강도를 보이면서도 굴곡탄성률이 크게 개선된 것을 확인하였다.

Screw B 조합으로 각각 낮은 압출 공정온도와 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재의 인장강도 및 파단신율 측정결과를 Fig. 9에서 나타낸다. 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재는 낮은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재 대비 더 우수한 인장강도 및 신율을 보였다. Screw B 조합으로 GF가 100 phr 첨가된 HB-P4 조성의 탄소복합소재는 Screw A 조합으로 동일하게 제작된 HA-04조성의 탄소복합소재 보다 인장강도가 우수하였고, 특히 neat PA66와 같은 수준의 인

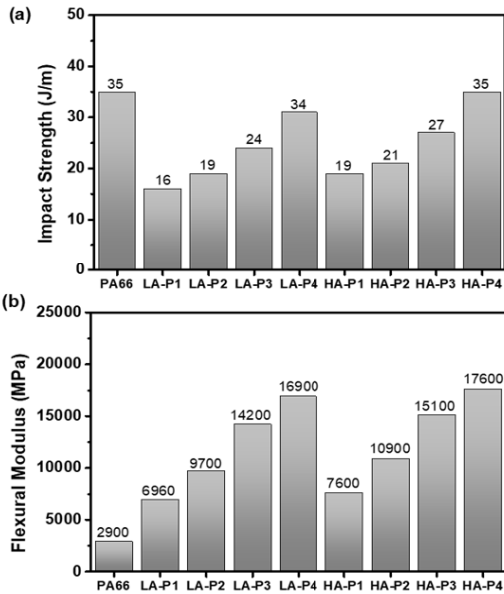


Fig. 8. Mechanical properties of carbon composites prepared by 2 step process under screw-B configuration at different operating temperature: (a) Impact strength; (b) Flexural modulus.

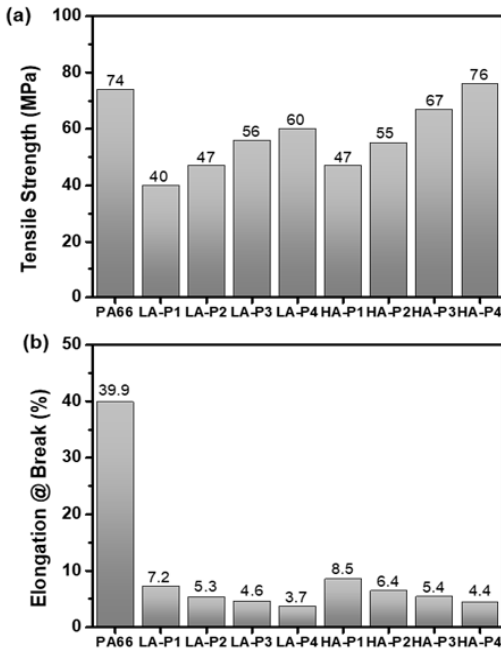


Fig. 9. Mechanical properties of carbon composites prepared by 2 step process under screw-B configuration at different operating temperature: (a) Tensile strength; (b) Elongation at break.

장강도를 보였다. 그러나 탄소복합소재의 신율은 압출 공정온도와 스크류 조합에 관계없이 GF를 소량 도입하여도 급격하게 떨어졌고, 함량이 증가할수록 오히려 더 감소하였다. 이는 GF 무기필러의 첨가로 탄소복합소재의 취성이 증가하였기 때문이다.

### 3.3 탄소복합소재의 분산성

앞선 실험 결과를 통해, 낮은 압출 공정온도 대비 높은 압출 공정온도에서 그리고 Screw A 대비 kneading block이 개선된 Screw B를 이용하여 제조한 탄소복합소재의 열적 및 기계적 물성이 더 우수한 것을 확인하였다. 이에 대한 원인을 분석하고자 탄소복합소재의 파단면을 SEM으로 촬영하였고, 이에 관한 결과를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10(a)에서 확인할 수 있듯이 neat PA66는 매끄러운 파단면이 관측되었다. Fig. 10(b), 10(c), 그리고 10(d)는 PA66와 RCF의 상용성이 있음을 보여준다. 이는 RCF만 첨가된 LA-P1, LB-P1, HB-P1의 탄소복합소재 파단면은 연속적이면서 거친형태의 분산성을 이루고 있으며, PA66와 RCF의 상 분리가 관측되지 않았다. Screw A로 낮은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재(LA-P1)의 파단면에서는 일부 응집된 영역이 관측되었지만, Screw A로 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재(LB-P1)의 파단면은 상대적으로 응집된 부분은 줄어들고 분산이 잘 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

더욱이, Screw B로 높은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재(HB-P1)의 파단면은 LA-P1과 LB-P1보다 균일한 표면과 입자가 잘 분산된 것을 확인할 수 있었다.

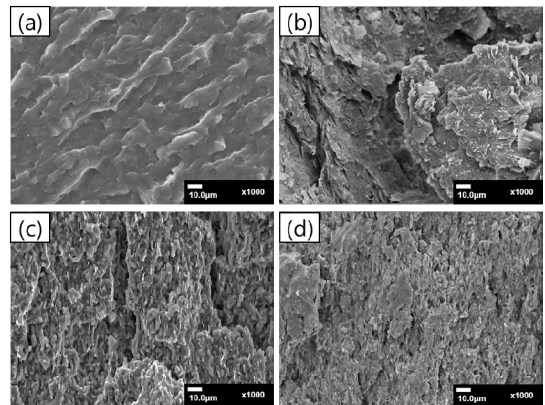


Fig. 10. SEM images of the fractured carbon composites for (a) neat PA66; (b) LA-P1; (c) LB-P1; (d) HB-P1

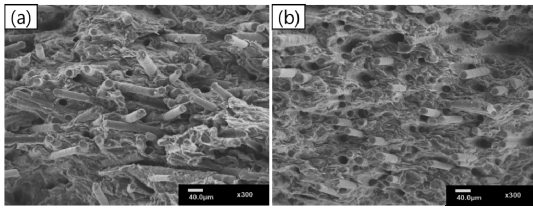


Fig. 11. SEM images of the fractured carbon composites for (a) LA-P4; (b) HB-P4

Fig. 11(a)에서 낮은 압출온도와 Screw A로 가공된 GF의 함량이 가장 많이 들어간 LA-P4 탄소복합재의 파단면은 GF 사이에 일부 응집된 영역이 관측되었다. 하지만, 높은 압출온도와 Screw B로 가공된 HB-P4는 균일하게 카본필러와 GF필러가 고르게 분산된 것을 확인하였다. 이러한 SEM 결과는 상대적으로 많은 kneading block과 높은 압출 공정온도를 통해 높은 전단응력이 탄소복합소재의 PA66 모재에 대한 RCF와 GF의 우수한 분산성으로 열적 및 기계적 물성에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

따라서, RCF와 GF를 활용한 탄소복합소재는 마스터 배치 제조를 통한 2step 공정으로 높은 공정온도에서 더 많은 kneading block의 Screw로 제조하였을 때 방열소재로서 활용되기에 더 적합한 열전도도와 기계적 물성을 보이는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

전기차 산업에서 방열 소재로서 활용할 수 있는 탄소복합소재를 제조하고자 PA66, RCF, GF를 두 가지 공정온도 조건과 Screw 조합에 따라 이축 압출기를 이용하여 용융 블렌드하였다. 낮은 압출 공정온도에서 kneading block이 적은 스크류로 제조한 탄소복합소재는 neat PA66 대비 열전도도와 굴곡탄성율은 개선되었지만, 충격강도, 인장강도, 신율은 감소하였다. 반면, 높은 압출 공정온도에서 kneading block이 많은 스크류로 제조한 탄소복합소재는 낮은 압출 공정온도에서 제조한 탄소복합소재보다 더 우수한 열전도도 및 기계적 물성을 보였다. 이는 SEM 결과를 통해 확인할 수 있듯이, 높은 압출 공정온도와 더불어 이축압출기 스크류 조합의 kneading block 확대를 통해서 전단응력이 탄소복합소재의 PA66 모재에 대한 RCF와 GF의 우수한 분산성으로 이어져 열전도도 및 기계적 물성이 효과적으로 증가되었기 때문이다. 특히, GF가 100 phr 첨가된 HB-P4 탄소복합소재는 neat PA66

대비 충격강도와 인장강도를 동등한 수준으로 유지하면서도 우수한 열전도도와 굴곡탄성율을 보이기 때문에 향후 차세대 자동차의 방열 소재로서 활용이 기대된다.

#### 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] 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.
- [3] 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>
- [4] 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>
- [5] K. M. Shin, C. U. Sim, J. S. Lee, Y. C. Kim, "Study on The Melt Flow and Physical Properties of Nylon 66/Carbon Filler Composite with Processing Aid", *Polymer(Korea)*, Vol.42, No.3, pp 478-484, Mar. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.7317/pk.2018.42.3.478>
- [6] Y. S. Kim, K. M. Shin, C. U. Sim, J. S. Lee, Y. C. Kim, "Effect of Fabric Methods on the Physical Properties of Nylon 66/Carbon Filler Composite", *Polymer(Korea)*, Vol.42, No.5, pp.763-768, Mar. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.7317/pk.2018.42.5.763>
- [7] S. M. Ha, O. H. Kwon, Y. G. Oh, Y. S. Kim, S. G. Lee, J. C. Won, ... & 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>
- [8] 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/polymeng-2016-0092>
- [9] M. M. Rueda, M. C. Ausher, R. Fulchiron, T. Perie, G. Martin, P. Sonntag, P. Cassagnau, "Rheology and applications of highly filled polymers : A review of current understanding", *Progress in Polymer Science*, Vol 66, pp22-53, Mar. 2017  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007>

[10] 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>

[11] H. Luo, G. Xiong, C. Ma, D. Li, Y. Wan, "Preparation and performance of long carbon fiber reinforced polyamide6 composites injection-molded from core/shell structured pellets", *Materials and Design*, Vol.64, pp.294-300, Aug. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.054>

[12] O. Adekomaya, K. Adama, "Glass-fibre Reinforced Composites:The Effect of Fibre Loading and Orientation on Tensile and Impact Strength", *Nigerian Journal of Technology(NIJOTECH)*, Vol.36, No.3, pp.782-787, Jul. 2017. DOI: <https://doi.org/10.4314/njt.v36i3.17>

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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>

배진우(Jin Woo Bae)

[정회원]



- 1998년 3월 ~ 2004년 8월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2004년 9월 ~ 2012년 2월 : 서울대학교 화학생물공학부 (공학박사)
- 2012년 3월 ~ 2013년 9월 : 삼성디스플레이 책임연구원
- 2013년 10월 ~ 2016년 2월 : 경희대학교 연구교수
- 2016년 3월 ~ 2019년 8월 : University of California, Berkeley 박사후연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지신소재 화학공학부 교수

〈관심분야〉

기능성 고분자 제조 및 응용, 고분자 센서, 액츄에이터, 연료전지 및 에너지하베스팅

이종인(Jong In Lee)

[준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학석사)

〈관심분야〉

고분자 가공 및 합성, 친환경 소재

양세준(Se Jun Yang)

[준회원]



- 2018년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 학사과정

〈관심분야〉

고분자 복합재료, 친환경 고분자 소재

최인규(In Gyu Choi)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2011년 3월 ~ 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 석사
- 2013년 3월 ~ 2014년 12월 : ㈜큐엔탑 연구원
- 2015년 5월 ~ 2015년 12월 : ㈜네오엔비즈 선임연구원
- 2016년 1월 ~ 2023년 1월 : ㈜네오몬드 책임연구원
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지신소재 화학공학부 응용화학공학 전공 박사과정

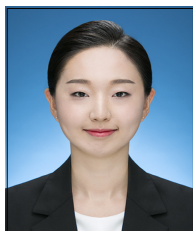
〈관심분야〉

고분자 복합재료, 친환경 고분자 소재



오 승 주(Seung Ju Oh)

[준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 2022년 2월 : 한국 기술교육대학교 에너지신소재화학 공학과 미래융합공학전공 석사
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지신소재화학공학과 미래융합공학전공 박사과정

<관심분야>

차세대 스트레처블 디스플레이소재, 고신축/고유연 에너지 하베스팅소재

---

남 병 옥(Byeong Uk Nam)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 공업화학 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 공업화학 (공학석사)
- 1993년 8월 : 서울대학교 공업화학 (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