

블록 공중합체로 표면처리된 탄소섬유가 폴리프로필렌 복합재료의 인장 특성에 미치는 영향 연구

이동욱** · 서현영* · 이성현** · 이재영* · 윤호규****,†

*고려대학교 신소재공학과, **현대자동차 플라스틱재료개발팀, ***고려대학교 기술경영대학원
(2017년 9월 19일 접수, 2017년 10월 18일 수정, 2017년 10월 25일 채택)

Effects of the Reinforcement of Block Copolymer-treated Carbon Fibers on Tensile Properties of Polypropylene Composites

Dong Uk Lee**, Heun Young Seo*, Sung Hyun Lee**, Jae Young Lee*, and Ho Gyu Yoon****,†

*Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

**Plastic Materials Development Team, Hyundai Motor Group,

150, Hyundaiyeonguso-ro, Jangdeok-ri, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 18280, Korea

***Graduate School Management of Technology, Korea University, Seoul 02841, Korea

(Received September 19, 2017; Revised October 18, 2017; Accepted October 25, 2017)

초록: 본 연구에서는 표면에 비스페놀계 에폭시가 사이징된 탄소섬유(CF, carbon fiber)와 폴리프로필렌(PP, polypropylene)과의 계면 접착력을 향상시키기 위하여 양친매성 상용화제로 poly(dimethylaminoethyl methacrylate)-block-poly(methyl methacrylate) (PDMAEMA-*b*-PMMA) 공중합체를 reversible-addition fragmentation chain transfer 방법으로 합성하였으며, 이를 CF 표면의 에폭시와 반응시킨 뒤 PP와 용융 혼합을 통하여 복합재료를 제조, 인장 특성을 분석하였다. DMAEMA 단량체의 3급 아민이 에폭시 그룹과 반응하여 탄소섬유 표면이 관능화되는 것을 XPS, TGA 그리고 FE-SEM으로 확인하였으며, 상용화제 처리 CF/PP 복합재료의 인장강도 및 탄성률이 표면처리를 하지 않은 복합재료에 비하여 각각 37.8% 그리고 18.7%가 향상되었다. 이것은 CF와 PP간의 계면 접착력이 증가하고 궁극적으로 하중전달 능력이 향상된 것으로 판단할 수 있다. 또한 상용화제로 처리한 CF와 PP 매트릭스와의 계면 접착력 및 상용성이 향상됨을 모폴로지 분석을 통해 확인하였다.

Abstract: Poly(dimethylaminoethyl methacrylate)-block-poly(methyl methacrylate) (PDMAEMA-*b*-PMMA) copolymer (BCP) was synthesized as a amphiphilic compatibilizer via reversible-addition fragmentation chain transfer polymerization to improve the interfacial adhesion and compatibility between epoxy sizing of carbon fiber (CF) surface and polypropylene (PP) matrix. The pristine CF (p-CF)/PP and compatibilizer-treated CF (BCP-CF)/PP composites were fabricated using melt mixing and their tensile properties were analyzed. It was confirmed that the CF surface was functionalized with BCP by reaction of tertiary amine in BCP with epoxide group on CF surface through XPS, TGA and FE-SEM. The tensile strength and modulus of BCP-CF/PP composites were improved by 37.8% and 18.7%, compared to p-CF/PP composites, which could be attributed to the higher interfacial adhesion between CF and PP and thus improved load transfer capability. The enhanced interface adhesion and compatibility of BCP-CF and PP was also examined by morphology observation.

Keywords: carbon fiber, polypropylene, amphiphilic compatibilizer, surface treatment, interfacial adhesion, tensile properties.

서 론

최근 들어 항공 우주분야로부터 광범위한 산업분야 그리고 자동차 분야까지 더 가볍고 강한 재료가 요구되고 있으며 이

에 대한 요구를 충족시키기 위하여 새로운 재료를 개발하려는 노력이 끊임없이 지속되어 지고있다. 특히 자동차 산업 분야에서는 금속 재료에 비하여 상대적으로 밀도가 낮고, 가벼운 고분자재료에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 전체 부품 중 고분자재료가 차지하는 비중이 꾸준히 증가하고 있는 추세이다.^{1,2} 고분자 단독으로 사용되는 부분 이외에, 금속 부품을 대체하고 고분자 자체의 기계적, 열적 특성 등을 향상

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hgyoon@korea.ac.kr

©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

시킴을 위하여 무기 필러(carbon nanotube,^{3,5} carbon black,^{6,7} graphite,⁸ graphene,^{9,10} carbon fiber¹¹⁻¹⁵ 등)를 첨가한 고분자 복합재료의 물성 향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 고분자 복합재료는 합금과는 달리 성분 혹은 화학 조성이 다른 두 종류 이상의 재료가 혼합되어 유용한 물질이 되는 것으로 대표적으로 사용되는 필러로는 탄소섬유(CF, carbon fiber)가 있으며, 이러한 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP, carbon fiber reinforced plastics)은 다양한 특성(전기적, 열적 혹은 기계적 특성 등)에서 매우 뛰어난 성능을 보이기 때문에 자동차 산업은 물론 우주, 항공분야에 이르기까지 다양한 분야의 응용을 위해 연구되고 있다.

여기서, CFRP의 핵심인 탄소섬유는 적어도 92% 이상의 탄소로 이루어진 섬유를 지칭하는 것으로,¹⁶ 제조방법과 원료에 따라 팬(PAN)계, 피치(pitch)계 그리고 레이온(rayon)계 탄소 섬유로 나눌 수 있다. 특히, 팬계 탄소섬유는 우수한 인장강도 및 전단 강도로 인하여 다양한 산업분야에서 각광받고 있으나, 제조 공정에서의 마찰에 의한 섬유의 손상 방지 및 매트릭스와의 젖음성(wetting) 향상, 그리고 공극 감소 등을 위하여 최종 공정에서 표면처리(사이징) 과정을 거치게 된다. 일반적으로 사용되는 사이징제는 에폭시, 불포화 폴리에스터, 우레탄, 폴리아마이드 등이 있는데 이러한 사이징제는 열경화성 수지와 같은 친수성 수지와는 어느 정도 상용성을 갖지만 소수성을 갖는 열가소성 수지와는 계면 접착력이 좋지 않기 때문에 이를 극복하기 위한 새로운 방안이 필요한 실정이다. 또한 PP 등의 열가소성 수지 복합재료의 인장 강도 등을 향상시키기 위하여 탄소섬유의 표면처리 혹은 첨가제 적용에 의한 계면 강도 제어에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으나,¹⁷⁻²⁰ 실질적인 응용을 위해서는 더욱 높은 기계적 특성이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 표면에 비스페놀계 에폭시가 사이징되어있는 팬계 탄소섬유와 폴리프로필렌(PP)과의 계면 접착력을 향상시키기 위하여 3급 아민을 포함하는 PDMAEMA-*b*-PMMA(poly(dimethyl aminoethyl methacrylate)-*b*-poly(methyl methacrylate)) 공중합체(BCP)를 상용화제로써 합성하였고, 합성된 BCP를 탄소섬유에 표면처리 후 PP 매트릭스와 용융 혼합하였으며, CF의 BCP 표면처리에 따른 CF/PP 복합재료의 계면 특성 및 인장강도를 분석하고, 자동차 부품으로의 적용가능성을 검토하였다.

실 험

재료. 탄소섬유의 표면처리에 사용된 BCP를 합성하기 위해 methyl methacrylate(MMA)와 2-(dimethylamino) ethyl methacrylate(DMAEMA)의 단량체, 2,2'-azobis(2-methylpropionitrile(AIBN)의 개시제, 그리고 톨루엔을 반응 용매로 각각 사용하였으며, 이들은 모두 시그마 알드리치(Sigma Aldrich Chem. Co., Ltd., USA)사의 제품을 사용하였다. 또한 합성에 필요한 사슬이동제(chain transfer agent, CTA)는 참고 문헌을 토대로 합성하여 사용하였다.²¹ 매트릭스로 사용된 PP는 GS 칼텍스(GS Caltex Co., Korea)사의 H550제품을 사용하였다. 또한 강화제로 사용된 CF는 도레이(Toray Carbon Fibers America Co., Japan)사의 T700S제품을 6 mm 길이로 chopping한 것을 사용하였다.

PDMAEMA-*b*-PMMA 공중합체의 합성. 500 mL의 둥근바닥 플라스크에 사슬이동제와 개시제인 AIBN을 각각 4, 0.2 g을 넣고 진공상태에서 약 30분간 교반, 수분을 충분히 제거한 후, 톨루엔을 넣고 CTA와 AIBN이 충분히 용해될 때까지 상온에서 300 rpm으로 교반하였다. 정제된 DMAEMA 단량체 0.2 mol을 아르곤 가스로 퍼징(purging)시킨 후, CTA와 AIBN이 있는 솔루션에 넣고 80 °C oil bath에서 약 16시간 반응시킨다. 중합 시작 16시간 후 합성된 PDMAEMA의 반응전환율은 약 95% 이상이었으며, 분자량은 약 3100 g/mol인 것을 ¹H NMR(300 MHz Varian Unity INOVA)과 GPC(PU-2080 plus SEC, Jasco International, Japan)를 통해 확인하였다. 두번째 단량체인 MMA를 역시 아르곤 가스 퍼징 후 1 mol의 양을 *in-situ* addition시킨다. 최종 중합은 80 °C oil bath에서 300 rpm의 교반속도로 24 시간 동안 진행하였다. 최종적으로 합성된 BCP를 tetrahydro-furan(THF) 용매로 희석시킨 후 *n*-hexane 용매에 소량씩 침전시켰다. 0.2 μm 사이즈의 테프론 필터를 사용하여 침전물을 여과시킨 다음 미반응 단량체를 제거하기 위하여 다시 THF 용매에 용해시킨 후 위의 여과과정을 총 3회 반복 실시하였고, 최종 여과과정을 거친 BCP는 50 °C 진공오븐에서 약 하루 정도 건조시켰다. 각 단량체의 구조 및 대략적인 합성 과정을 Figure 1에 나타내었다.

탄소섬유의 표면처리 및 복합재료 제조. 탄소섬유 표면에 존재하는 에폭시 사이징제가 용해되지 않도록 자일렌(xylene) 용매에 분산시킨 후, TGA 분석을 통하여 얻어진 탄소섬유

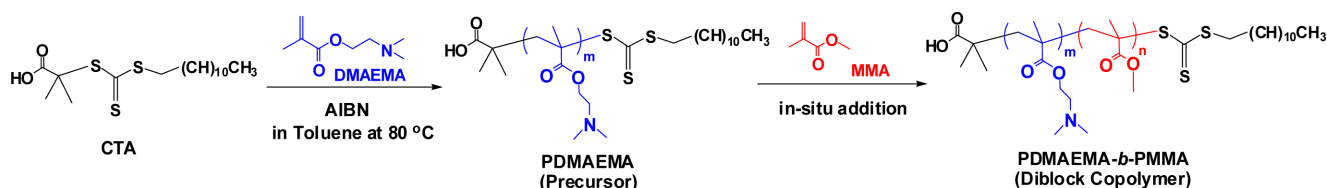


Figure 1. Synthesis of poly(dimethyl aminoethyl methacrylate)-*b*-poly(methyl methacrylate) (PDMAEMA-*b*-PMMA) diblock copolymer via RAFT.

표면의 사이징 무게(전체 섬유무게 대비 약 1.4%) 대비 3배의 BCP를 첨가하여 80 °C의 온도에서 3시간 정도 교반시킨다. 반응이 완료된 탄소섬유(BCP-CF)를 필터링(filtering)한 후 자일렌 용매로 3회 세척하였다. 이 BCP-CF를 진공오븐에서 24시간 건조시킨 후 매트릭스인 PP와 kneader(PBV-03, Fuzi electric Co., Japan)를 사용하여 200 °C에서 40분간 용융 혼합하였다. 여기서, CF의 함량은 전체 조성 중 20 wt%로 동일하게 첨가하였다. 혼합된 복합재료는 다시 압출기(BA-19, 바우테크(주), Korea)를 사용하여 200 °C에서 50 rpm의 속도로 용융 혼합 후 펠렛타이징(pelletizing)을 실시하였으며, 제작된 펠렛은 사출기(mini-max molder, 바우테크(주), Korea)를 통해 210 °C, 50 rpm의 속도로 인장시험용시편을 제작하였다.

측정. 합성된 BCP는 GPC를 통해 분자량을 산출하였다. 용리제 THF를 1 mL/min의 조건으로 사용하였으며, Shodex-GPC KF-802, KF-802, KF-804 그리고 KF-805의 4개의 컬럼을 사용하였다. 반응 완료된 BCP는 ^1H NMR을 통해 구조를 분석하였다. 탄소섬유의 표면 분석을 위하여 X-ray photoelectron spectroscopy(XPS, X-TOOL, ULVAC-PHI, Japan)를 측정하였으며, TGA(TGA 2950, TA Instruments, USA) 분석으로 탄소섬유 표면에 존재하는 BCP의 함량을 분석하였다. 여기서, TGA 분석은 질소 가스 분위기에서 상온에서 600 °C까지 10 °C/min의 승온 속도로 측정하였다.

FE-SEM(FEG-250, FEI Company, U.S.)을 이용하여 200 V~30 KV의 범위에서 탄소섬유 표면 및 복합재료 파단면의 모폴로지를 확인하였으며, 시편 표면은 ion sputter를 이용하여 백금으로 코팅하였다. ASTM D 638에 의거한 CF/PP 복합재료의 기계적 물성을 측정하기 위하여 50 mm/min 인장 속도, 상온에서 만능재료시험기(UTM, 3380, INSTRON Co., USA)를 사용하였다.

결과 및 토론

Figure 2(a)에 합성된 BCP의 ^1H NMR 결과를 나타내었다. PDMAEMA의 dimethyl proton(e)과 methylene protons(c와 d)의 흡수 피크를 2.28, 4.06 그리고 2.56 ppm에서 각각 확인하였다. PMMA의 methyl proton(f)의 피크를 3.5 ppm에서 그리고 PMMA의 backbone의 proton을 0.7에서 2 ppm 범위에서 확인하였으며, BCP 합성 후에는 단량체의 특성 피크가 사라지면서 미반응 단량체들이 잘 제거된 것으로 보여진다. ^1H NMR 결과를 토대로 합성된 BCP의 DMAEMA와 MMA 단량체의 비율(m:n)이 38:51로 확인되었다. Figure 2(b)에 나타난 GPC 결과에서는 합성된 BCP는 분자량이 약 11500 g/mol로 측정되었으며, polydispersity index(PDI) 1.3으로, RAFT 중합법에 의해 합성된 BCP의 분자량 분포가 매우 좁은 것으로 측정되었다.

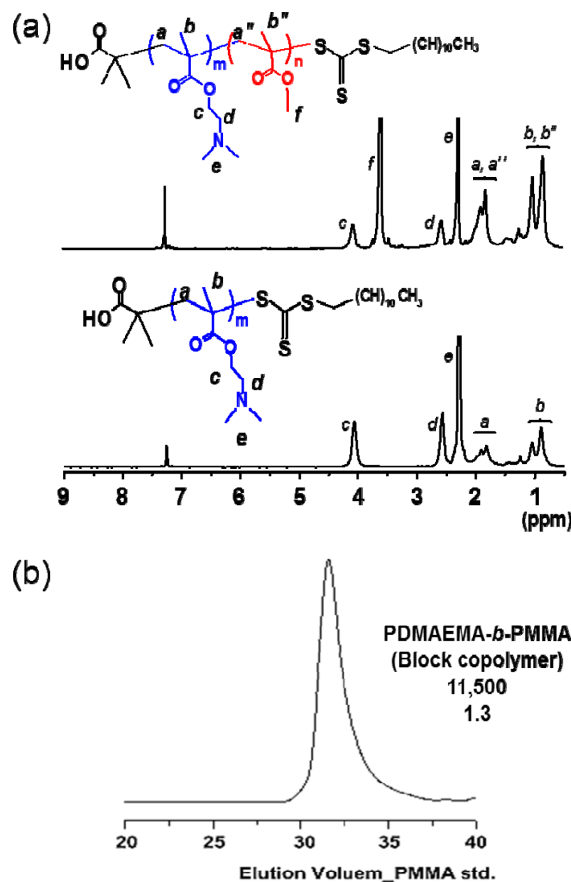


Figure 2. (a) ^1H NMR spectra; (b) GPC analysis of PDMAEMA-*b*-PMMA copolymer.

합성된 BCP가 탄소섬유 표면에 존재하는지를 분석하기 위하여 표면처리를 하지 않은 탄소섬유(pristine CF, p-CF)와 BCP-CF의 XPS 측정 결과를 Figure 3에 비교하였으며, 탄소 피크의 narrow scan 결과를 Gaussian-Lorentzian function fitting법으로 분석 후 각 결합에너지에 해당하는 화학 결합 구조를 표기하였다. 또한 각 피크의 percent contribution을 계산하여 Table 1에 나타내었다. 분석 결과 286.6 eV에서 나타나는 에폭시기는 사이징되어 있는 탄소섬유에서 18.3%로 상당히 높은 것을 볼 수 있다. 그러나 BCP로 표면처리를 실시한 후 6.8%까지 면적이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이는 사이징 탄소섬유 표면에 존재하는 에폭시 그룹이 BCP와 반응하여 피크의 면적이 감소한 것이라 사료된다. 그리고 peak 3(286.1 eV)에서 나타나는 C-O-C기와 peak 5(287.7 eV)에서의 C=O결합의 특성 피크는 22.9%와 13.7%로 상당히 증가하는 것을 확인하였다.

Figure 4에는 탄소섬유 표면에 존재하는 에폭시 사이징과 BCP의 구조내 3급 아민과의 반응 메커니즘을 나타내었다. BCP의 3급 아민의 비공유 전자가 탄소섬유 표면의 에폭시 ring을 공격하면서 반응이 진행되고, 결과적으로 protonated

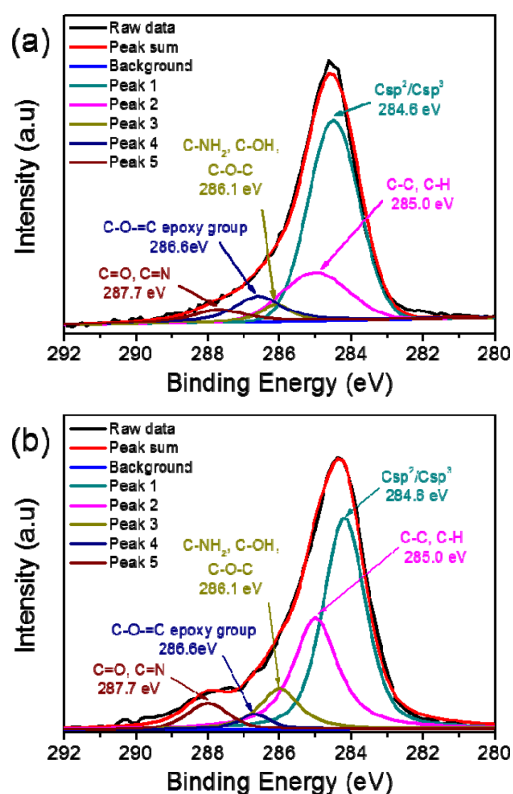


Figure 3. XPS detail spectra of C1s peak of (a) p-CF; (b) BCP-CF surface.

Table 1. C1s Peak of Carbon Fiber Surface and Relative Peak Areas

Percent contribution (PC%)	N-P-CF	BCP-CF
Peak 1 (Csp ² /Csp ³)	39.9	37.9
Peak 2 (C-C, C-H)	22.9	20.8
Peak 3 (C-OH, C-O-C)	14.4	22.9
Peak 4 (Epoxy group)	18.3	6.8
Peak 5 (C=O, C=N)	5.5	13.7

아민이 생성되며 다른 에폭시 그룹과 지속적으로 반응이 진행된다.^{22,23} 따라서 286.6 eV에서 나타나는 에폭시 결합의 특성 피크는 탄소섬유 표면에 존재하는 에폭시 사이징에 의해 나타나고, 이러한 에폭시 사이징은 BCP의 3급 아민과의 반응으로 인하여 표면처리 후에는 거의 존재하지 않게 된다. 또한 탄소섬유 표면에 BCP가 관능화됨에 따라 BCP 구조에 존재하는 C-O-C와 C=O 결합에 해당하는 특성 피크는 표면처리 후 확연하게 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 탄소섬유 표면의 에폭시기는 BCP와의 반응으로 점차 감소하고, BCP 구조의 특성 결합의 intensity는 증가하게 되는 것이다.

BCP의 표면처리 후 새로 생성된 N1s 피크의 XPS narrow scan을 분석하였으며, 그 결과를 Figure 5에 나타내었다. 401.5

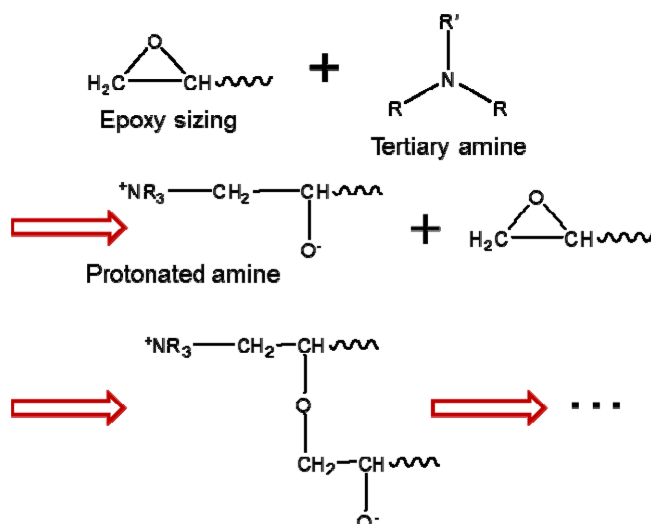


Figure 4. Reaction mechanism between epoxy group on CF surface and tertiary amine in BCP.^{22,23}

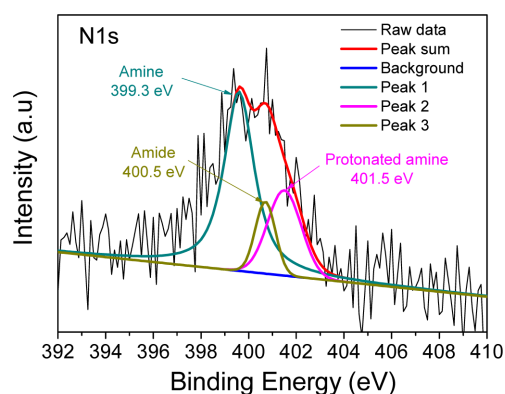


Figure 5. XPS result of N1s narrow scan of BCP-CF.

eV에서 나타나는 protonated amine 피크가 크게 존재하는 것으로 나타났으며, 이는 Figure 4에서 언급하였듯이 BCP의 3급 아민과 CF 표면에 존재하는 에폭시의 반응으로 protonated amine이 생성된 것으로 판단된다. 결과적으로 사이징 탄소섬유 표면의 에폭시 사이징이 BCP의 3급 아민과 충분히 반응하였으며, CF 표면이 관능화되는 것을 XPS 분석을 통하여 확인하였다. 탄소섬유 표면에 관능화된 BCP는 주시슬의 소수성인 PMMA 그룹이 있기 때문에, 사이징 탄소섬유 표면에 존재하는 친수성 에폭시 그룹보다 소수성을 띠는 PP 수지와 더 우수한 상용성을 갖는다. 즉, 표면개질에 사용된 BCP의 DMAEMA는 탄소섬유 표면의 에폭시그룹과 반응성을 부여하고, 소수성부분인 PMMA로 인하여 PP 수지와 상용성 및 계면접착력을 향상시킬 수 있을 것이다. PMMA와 PP는 상용성이 없지만, Song 등은 amine 그룹으로 그래프탄 폴릴렌과 PMMA와의 상용성이 증가한다고 보고하였다.²⁴

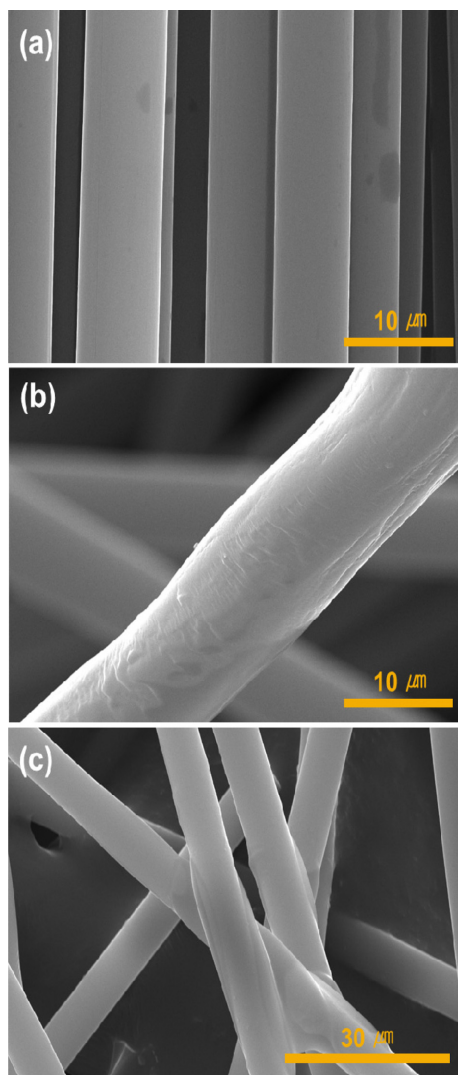


Figure 6. FE-SEM images of (a) p-CF; (b); (c) BCP-CF surface.

본 연구에서는 비록 amine(DMAEMA)이 PMMA와 공중합되었지만, 이 amine에 의해 BCP-CF와 PP의 상용성이 증가될 것으로 판단할 수 있다.

Figure 6에는 표면에 에폭시 사이징되어 있는 탄소섬유와 BCP로 표면처리된 탄소섬유의 FE-SEM 사진을 비교하여 나타내었다. 기존 사이징 탄소섬유의 경우 약 6.9~7.5 μm의 평균 직경을 갖으며, 에폭시 사이징으로 인하여 표면이 매우 매끄러운 것을 볼 수 있다. 반면에, 표면처리된 탄소섬유는 전반적인 직경이 증가하며, 두께가 불균일하지만 기존 탄소섬유에 비하여 작게는 약 1~2 μm, 많게는 3~4 μm 정도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 탄소섬유 표면의 에폭시와 BCP의 3급 아민과의 반응으로 탄소섬유 표면에 BCP가 관능화 되고, 이러한 모폴로지 분석을 통하여 실제 탄소섬유 표면에 BCP가 부분적으로 잘 감싸고 있는 것을 확인할 수 있었다.

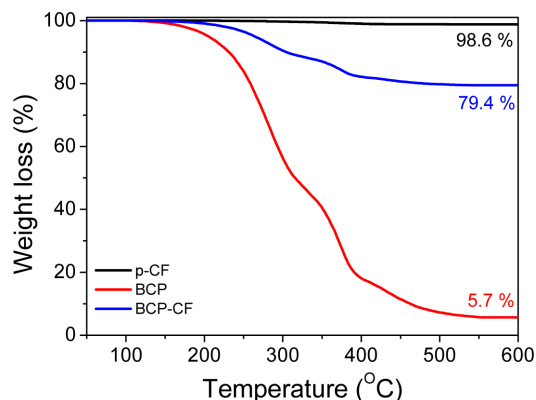


Figure 7. TGA thermograms of p-CF, BCP and BCP-CF.

탄소섬유 표면에 BCP가 어느정도 존재하는지 정량분석을 하기 위하여 TGA 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Figure 7에 나타내었다. BCP의 경우 약 170 °C 부근에서 분해가 시작되며, 약 5.7%의 잔류량을 보였다. 그러나 BCP로 표면처리된 탄소섬유의 결과에서는 분해 시작 온도가 약 20 °C 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 탄소섬유 표면에 BCP가 잘 결합되어 있으며, 사이징제 대비 분자량이 증가하였기 때문으로 볼 수 있다. 식 (1)에 의해 탄소섬유 표면에 존재하는 BCP의 함량을 계산하면 전체 탄소섬유 무게 대비 약 20.3% 정도가 탄소섬유 표면에 존재하는 것을 알 수 있다.²⁵ 따라서 탄소섬유 표면의 에폭시 사이징제와 BCP 내의 3급 아민의 반응으로 탄소섬유 표면에 BCP가 잘 관능화되어 있으며, 추후 표면에 존재하는 BCP가 PP 매트릭스와의 계면접착력 향상에 중요한 요소로 작용할 수 있다고 사료된다. 식 (1)에서 M_{CF} , M_f 및 M_p 는 각각 600 °C에서의 p-CF의 잔류 함량, BCP-CF의 잔류 함량 그리고 BCP의 잔류 함량을 나타낸다.

$$\text{Weight percentage of BCP} = (M_{CF} - M_f) + \frac{(M_{CF} - M_f) \times M_p}{100} \quad (1)$$

탄소섬유의 BCP관능화에 따른 복합재료의 인장 특성을 Figure 8에 나타내었으며, 측정된 인장강도, 연신율 그리고 탄성률 값을 Table 2에 정리하였다. 결과값은 총 7개의 시편을 제작 후 테스트 진행하였고, 최대 및 최소값을 제외한 5개의 측정값을 기준으로 평균값을 계산하여 나타내었다. Neat PP의 경우 약 41.3 MPa의 인장강도 값을 보이며, p-CF/PP 복합재료는 77.0 MPa의 인장강도 값을 보였다. 그러나 BCP-CF/PP 복합재료의 평균 인장강도 값은 106.1 MPa로 p-CF/PP 복합재료에 비해 37.8% 대폭 증가하였다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급하였듯이 CF 사이징제인 에폭시와 BCP의 3급 아민과의 반응으로 탄소섬유 표면에 BCP가 관능화되었고, 표면에 에폭시가 존재하는 p-CF보다 더 우수한 계면

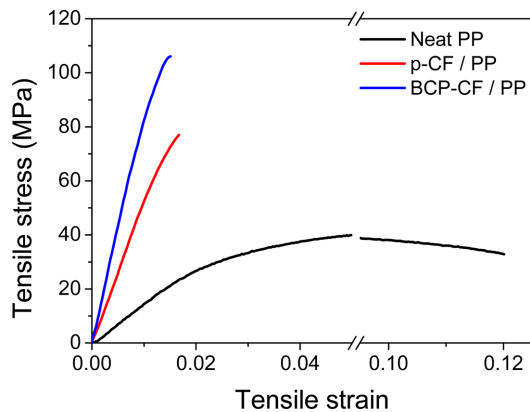


Figure 8. Stress-strain curves of p-CF/PP and BCP-CF/PP composites. CF content in all compositions is 20 wt%.

Table 2. Tensile Properties of Neat PP, p-CF and BCP-CF/PP Composites

	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (GPa)
Neat PP	41.3 (± 3.4)	12.0 (± 1.1)	1.4 (± 0.2)
p-CF/PP composites	77.0 (± 2.2)	1.7 (± 0.1)	7.5 (± 0.9)
BCP-CF/PP composites	106.1 (± 7.1)	1.5 (± 0.2)	8.9 (± 0.2)

접착력을 갖고, 결국 하중 전달 능력이 크게 향상된 것으로 판단된다. 탄성률 역시 BCP-CF/PP 복합재료가 p-CF/PP 복합재료에 비하여 18.7% 향상되었으나, 연신율은 거의 변화가 없었다.

p-CF/PP 복합재료와 BCP-CF/PP 복합재료의 인장 시험 파단면을 Figure 9에 나타내었다. Figure 9(a) 및 9(b)에 나타난 p-CF/PP 복합재료의 경우 전반적인 계면 상태가 매우 좋지

않아서 CF와 PP 수지가 매끄럽게 분리되어 있고 CF가 뽑힌 것(pull-out)을 볼 수 있다. 이는 p-CF 표면의 에폭시가 PP와의 낮은 상용성으로 인해 PP 수지와 CF 사이의 계면에 빈 공간을 형성하게 되고, 따라서 복합재료의 인장강도를 감소시키게 된다. 그러나 Figure 9(c) 및 9(d)에 나타난 BCP-CF/PP 복합재료 파단면에서는 전반적으로 CF와 PP 수지가 큰 빈 공간 없이 매우 잘 결합되어 있으며, 특히 인장 시험으로 파단이 일어난 CF 주위에 PP 수지가 잘 감싸고 있는 형상을 관찰할 수 있는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 BCP로 관능화된 CF 표면과 PP가 우수한 상용성 및 계면 접착력을 갖기 때문이라고 할 수 있다. 특히 Figure 9(d)에서는 CF 표면과 PP 매트릭스를 연결하는 fibril을 관찰할 수 있으며 BCP 처리에 의해 인장하중 전달이 효과적으로 일어났다는 것을 직접적으로 알 수 있다.

결론

본 연구는 표면에 에폭시가 사이징되어 있는 탄소섬유(CF)와 열가소성 수지인 PP와의 계면 접착력 및 상용성을 향상시키기 위하여 PDMAEMA-*b*-PMMA 공중합체를 합성하여 적용하였으며, 탄소섬유의 표면처리에 따른 인장 특성을 비교 분석하였다. 표면분석을 통하여 탄소섬유 표면의 에폭시 그룹과 BCP의 3차 아민이 반응하여 CF 표면이 공중합체로 관능화됨을 확인하였으며, CF의 표면 관능화에 따라 PP 복합재료의 인장강도는 36.3% 그리고 탄성률은 18.7%가 향상됨을 확인하였다. CF/PP 복합재료 파단면의 모폴로지 분석을 통해 CF와 PP의 상용성 및 계면 접착력이 향상되었음을 확인하였으며, 이러한 특성 향상에 기인하여 CF/PP 복합재료의 인장 특성이 큰 폭으로 증가되었음을 알 수 있었다.

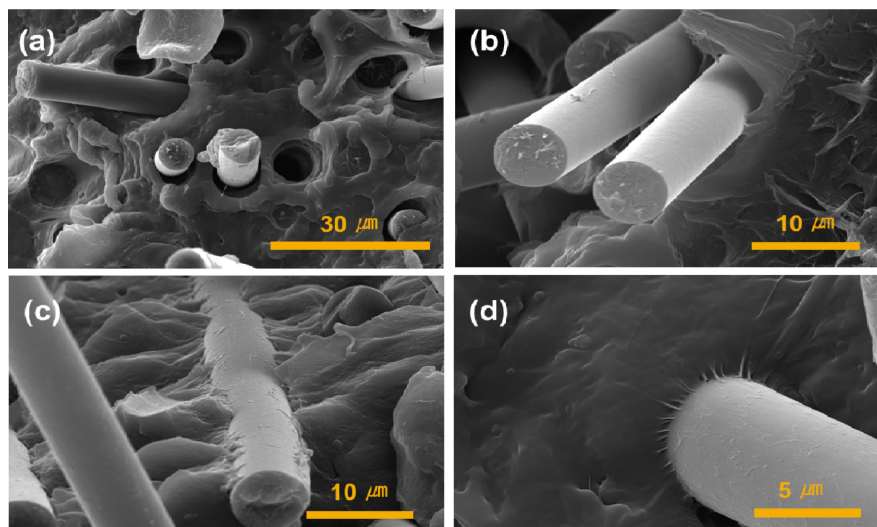


Figure 9. FE-SEM images of fractured surface of (a) and (b) p-CF/PP composites; (c) and (d) BCP-CF/PP composites.

References

1. S. Das, *The cost of automotive polymer composites*, U. S. Department of Energy, Oak Ridge, 2001.
2. E. R. H. Fuchs, F. R. Field, R. Roth, and R. E. Kirchain, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 1989 (2008).
3. M. A. L. Manchado, L. Valentini, J. Biagiotti, and J. M. Kenny, *Carbon*, **43**, 1499 (2005).
4. L. Valentini, J. Biagiotti, J. M. Kenny, and S. Santucci, *Compos. Sci. Technol.*, **63**, 1149 (2003).
5. B. X. Yang, J. H. Shi, K. P. Pramoda, and S. H. Goh, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 2490 (2008).
6. Q. H. Zhang and D. J. Chen, *J. Mater. Sci.*, **39**, 1751 (2004).
7. M. Wen, X. Sun, L. Su, J. Shen, J. Li, and S. Guo, *Polymer*, **53**, 1602 (2012).
8. K. Kalaizidou, H. Fukushima, and L. T. Drzal, *Compos. Part A-Appl. Sci. Manuf.*, **38**, 1675 (2007).
9. M. E. Achaby, F. E. Arrakhiz, S. Vaudreuil, A. E. K. Qaiss, M. Bousmina, and O. F. Fehri, *Polym. Compos.*, **33**, 733 (2012).
10. J. E. An, G. W. Jeon, and Y. G. Jeong, *Fibers and Polymers*, **13**, 507 (2012).
11. B. Xu, X. Wang, and Y. Lu, *Appl. Surf. Sci.*, **256**, 2695 (2006).
12. A. Ameli, P. U. Jung, and C. B. Park, *Carbon*, **60**, 379 (2013).
13. F. Rezaei, R. Yunus, and N. A. Ibrahim, *Mater. Design*, **30**, 260 (2009).
14. F. Rezaei, R. Yunus, N. A. Ibrahim, and E. S. Mahdi, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, **47**, 351 (2008).
15. S. Y. Fu, B. Lauke, E. Mader, C. Y. Yue, and X. Hu, *Compos. Part A-Appl. Sci. Manuf.*, **31**, 1117 (2000).
16. M. K. Seo, S. H. Park, S. J. Kang, and S. J. Park, *Carbon Lett.*, **10**, 43 (2009).
17. N. G. Karsli and A. Aytac, *Mater. Design*, **32**, 4069 (2011).
18. H. Yuan, C. Wang, S. Zhang, and X. Lin, *Appl. Surf. Sci.*, **259**, 288 (2012).
19. J. Li, *Appl. Surf. Sci.*, **255**, 8682 (2009).
20. M. H. Choi, B. H. Jeon, and I. J. Chung, *Polymer*, **41**, 3243 (2000).
21. J. T. Lai, D. Filla, and R. Shea, *Macromolecules*, **35**, 6754 (2002).
22. E. Duemichen, M. Javdanitehran, M. Erdmann, V. Trappe, H. Sturm, U. Braun, and G. Ziegmann, *Thermochim. Acta*, **616**, 49 (2015).
23. X. F. Francos, X. Ramis, and A. Serra, *J. Polym. Sci.*, **52**, 61 (2014).
24. J. Song, C. M. Thurber, S. Kobayashi, A. M. Baker, and C. W. Macosko, *Polymer*, **53**, 3636 (2012).
25. K. Y. Cho, Y. S. Yeom, H. Y. Seo, Y. H. Park, H. N. Jang, K. Y. Baek, and H. G. Yoon, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 9841 (2015).