

아민 개질 상용화제가 폴리아마이드 6/셀룰로오스 나노섬유 복합소재의 기계적 물성과 분산성에 미치는 영향

김주원*** · 이재현* · 이지원* · 정정설*[†] · 허필호**[†]

*한국화학융합시험연구원 첨단화학소재센터, **부산대학교 응용화학공학부
(2024년 7월 22일 접수, 2024년 12월 9일 수정, 2024년 12월 9일 채택)

Effect of Amine-modified Compatibilizer on Mechanical Properties and Dispersibility of Polyamide 6/CNF Composites

Ju-won Kim***, Jaehyun Lee*, Jiwon Lee*, Jung Sul Jung*[†], and Pilho Huh**[†]

*Advanced Chemical Material R&D Center, Korea Testing & Research Institute,
89 Sepungsandan 1-ro, Gwangyang-eup, Gwangyang-si, Jeollanam-do, Korea

**School of Polymer Science & Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received July 22, 2024; Revised December 9, 2024; Accepted December 9, 2024)

초록: 셀룰로오스 나노섬유(CNF)는 친환경 및 경량화 보강재로 플라스틱에 사용될 수 있지만 다량의 수산기(-OH)에 의한 친수성으로 인해 엔지니어링 플라스틱(EP) 소재와 복합소재 제조 시 상용성이 낮아 물성의 저하를 가져오므로 이를 개선할 수 있는 상용화제의 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 상용화제로 폴리프로필렌 그래프트 무수 말레인산(PP-g-MAH)을 4종의 아민 그룹으로 개질하여 각 아민의 구조에 따른 물성의 변화를 분석하였다. 그 결과 4,4'-diaminodiphenylmethane을 이용한 상용화제는 상용화제를 미사용했을 때보다 인장강도와 굴곡강도가 각각 68%, 32% 증가하였고 분산성 또한 개선되었다. 이를 통해 개발된 상용화제는 폴리아마이드 6(PA 6)와 CNF간의 계면 결합성을 증가시켜 PA 6/CNF 복합소재 물성 향상에 효과적임을 확인할 수 있었다.

Abstract: Cellulose nanofibers (CNFs) can be used in plastics as an eco-friendly and lightweight reinforcement material. However, due to their hydrophilicity from numerous hydroxyl groups (-OH), CNFs were incompatible with engineering plastics (EP), resulting in a decrease of properties. Therefore, the development of effective compatibilizers is essential to improve properties. In this study, four different amines were introduced into polypropylene grafted maleic anhydride (PP-g-MAH) to serve as compatibilizers, and the changes in properties according to each amine structures were analyzed. As a result, the compatibilizer modified with 4,4'-diaminodiphenylmethane increased the tensile strength and flexural strength by 68% and 32%, respectively, compared to when it was not used compatibilizer, and also improved dispersibility. This study confirmed that the developed compatibilizer effectively improves the properties of the polyamide 6(PA 6)/CNF composite material by increasing the interfacial interaction between PA 6 and CNF.

Keywords: cellulose nanofiber, reaction extrusion, engineering plastic compatibilizer, engineering plastic composite.

서 론

탄소 중립이 사회적 이슈로 대두되며 플라스틱 산업에서도 경량화와 함께 저탄소 및 친환경 소재에 대한 필요성이 높아지고 있다.¹ 특히 셀룰로오스 나노섬유(cellulose nanofiber, CNF)는 천연 고분자로,² 셀룰로오스 추출 시 결정 영역 뿐만 아니라 비결정 영역까지 추출하여 기계적 처리를 하는데, 결정

부분에 의해 우수한 강도를 가지며 낮은 팽창계수 및 1.6 g/cm³의 밀도로 가벼워 자동차 경량화에 적합한 플라스틱 보강재로 사용될 수 있다.^{3,5} CNF의 비결정 영역에는 반복단위 당 3개의 수산기(-OH)가 있어 강한 친수성과 극성을 나타내는데 이를 이용하면 다양한 반응을 유도하여 화학적 결합을 형성할 수 있다. 그러나 CNF와 엔지니어링 플라스틱(engineering plastic, EP) 소재만으로 복합소재를 제조하는 경우 대부분 플라스틱은 소수성이면서 무극성이거나 약한 극성이므로 CNF와의 상용성이 좋지 않아 최종 복합소재 물성 저하의 원인이 된다.^{6,8}

높은 기계적 물성 및 균일한 분산성을 얻기 위해서는 균일한 모폴로지(morphology)를 얻는 것이 중요하므로 EP 소재와

[†]To whom correspondence should be addressed.
jsyk38317@ktr.or.kr, ORCID[®] 0009-0007-4925-4502
pilho.huh@pusan.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-9484-8798
©2025 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

CNF 간 상용성을 높여 분산성을 향상시키는 것이 필수적이다.⁶ 따라서 EP/CNF 복합소재를 제조할 때 물성의 저하 없이 보강효과를 얻기 위하여 EP 소재와 CNF 간의 상용성을 높이기 위한 연구들이 진행되고 있다.

상용성 개선을 위한 화학적 방법으로 두가지 고분자 모두 (혹은 한쪽)가 반응할 수 있는 반응기를 첨가하여 압출기 내에서 고온 및 높은 전단력 하에서 반응시켜 두 고분자 간에 결합을 유도하는 반응압출(reactive extrusion)법이 있다.^{9,11} 반응압출 중 반응은 이축 압출기의 배럴과 스크류 사이의 전단력에 의해 발생하는데, 스크류의 회전으로 매트릭스와 반응물 간 계면이 연속적으로 재생성되어 반응 효율 및 분산성을 향상시킬 수 있고 모폴로지 제어가 가능하다.^{8,11} 물리적인 방법으로서 두 가지 고분자 물질과 화학적으로 유사한 구조를 갖는 블록 공중합체나 그래프트 공중합체를 첨가시키는 방법이 있다.^{13,14} 상기 내용과 같이 복합소재 제조 시 상용성 개선을 위해 첨가하는 제3의 성분을 상용화제라 하며, EP/CNF 복합소재에 상용화제를 적용하는 경우 CNF의 수산기 및 EP 소재의 말단기(hydroxyl, carboxyl groups)와 화학적 결합(수소결합, amide화 반응 등)을 형성하여 EP 소재와 CNF 간의 분산성을 향상시키는 역할을 할 수 있다.^{9,14}

상용화제에 대한 기존 연구들을 보면, Han 등은¹⁴ 나일론 6/폴리프로필렌(PP) 블렌드에 상용화제로서 폴리프로필렌 그래프트 무수말레인산(PP-g-MAH)을 첨가하였다. 그래프트 사슬 형성을 통해 계면 접착력을 증대시켰고, 기계적물성의 향상과 함께 보다 미세한 모폴로지를 갖게하여 블렌드에 유연성을 가미시켜주는 효과도 부여하였다. Ide와 Hasegawa는¹⁰ 용융 혼합을 통해 PP-g-MAH를 아민화하여 인장특성을 증가시켰으며, Lu 등은¹⁵ 아민으로 개질된 폴리프로필렌 그래프트 말레인산(PP-g-MA) 제조를 위해 이축 압출기를 통해 PP와 헥사메틸렌디아민을 포함한 아민을 용융 혼합하였고, 아미노 PP가 열가소성 폴리우레탄/PP 복합소재에 효과적인 접착 촉진제 및 상용화제임을 보여주었다.

본 연구에서는 화학적, 물리적인 방법을 함께 적용하고자 하였다. 상용화제로서 PP-g-MAH를 아민 그룹으로 개질했을 때, 아민의 구조가 최종 복합소재의 물성에 끼치는 영향을 알아보기 위해 지방족 및 방향족 계열 아민을 사용하여 상용화제를 개질하였다. 개질한 상용화제는 폴리아마이드 6(PA 6)를 기본 수지로 사용한 PA6/CNF 복합소재에 적용하였다. 상용화제의 개질과 복합소재 제조는 반응압출을 이용하였으며, EP소재와 CNF간의 상용성 개선을 확인하고자 상용화제의 구조에 따른 기계적 물성 및 분산성의 변화에 대한 연구를 수행하였다.

실 험

재료. 본 연구에서 사용된 CNF 마스터배치(M/B) (MA-

POE 15%, CNF 85%)와 PA6는 우성케미칼(대한민국), maleic anhydride grafted polypropylene(PP-g-MAH)는 라이온첨단소재(대한민국)에서 제공받았다. PP-g-MAH의 아민화를 위해 응용한 4종의 아민 중 1,12-diaminododecane(>98%)(N3)는 TCI(일본)사의 제품을 사용하였으며 p-phenylenediamine(≥99.0%)(N1), 4,4'-diaminodiphenylmethane(≥97.0%)(N2), tris(2-aminoethyl)amine(96%)(N4)은 Sigma Aldrich(독일)의 제품을 사용하였다.

PP-g-MAH의 개질. 상용화제의 구조에 따른 최종 복합소재의 분산성과 기계적 물성 변화를 확인하기 위하여 다양한 지방족 및 방향족 아민을 각각 PP-g-MAH에 반응시켰다. 상용화제로 사용한 아민 개질 PP-g-MAH의 배합과 약어를 Table 1에 나타내었다. 사용된 아민들은 두 개 이상의 아민기를 가지고 있어 과량의 아민을 첨가하는 경우 하나 이상의 PP-g-MAH와 결합하거나 가교될 가능성을 증가시키는 경향이 있으므로^{16,17} 적정 배합을 찾아 아민화하였다(Figure 1). 상용화제는 마이크로 컴파운더(micro compounder, Xplore Instruments BV, Netherlands)를 이용한 반응압출을 통해 PP-g-MAH를 아민화시켜 제조하였다. Table 1에 나와있는 배합비로 투입 후 마이크로 컴파운더 내 상단부, 중단부, 하단부의 온도를 각각 125, 125, 145 °C로 설정하여, 50 rpm의 속도에서 1분 30초 동안 co-rotating을 통해 용융 혼합 후 압출된 strand 형태의 상용화제를 액체 질소 내에서 급냉 후 볼 밀로 분쇄하여 분석에 이용하였다.

반응압출 및 시편 제조. 마이크로 컴파운더를 이용하여 PA6, CNF M/B, 아민화시킨 PP-g-MAH를 각 배합비에 따라 상단부는 225 °C, 중단부, 하단부 및 배럴은 240 °C로 설정 후 2분 동안 co-rotating하며 컴파운더 내에서 반응압출을 통한 복합화 진행 후 인장강도 및 굴곡강도 시편을 시출하였다. 각 시료의 배합비는 Table 2에 나타내었다. 굴곡특성을 보기 위한 굴곡시편은 KS M ISO 178 표준에 따라 시편을 제작하였고, 인장특성 확인을 위한 인장시편은 ASTM D 638(Type 5) 표준에 맞는 시편을 제작하여 이용하였다.

분석 및 측정. 복합소재의 인장 시험은 만능재료시험기(Simadzu, AGX-1kNVD, Japan)로 수행하였다. 20 kN의 로드셀을 사용하였으며 crosshead speed는 10 mm/min의 속도로 설정하였다. 굴곡시험은 인장시험과 같은 만능재료시험기를 이용해 20 kN의 로드셀과 crosshead speed는 50 mm/min으로 측정하였다. PP-g-MAH와 아민 간 반응은 적외선분광기(FTIR, Hyperion 2000 microscope, Bruker, USA)를 이용해 400-4000 cm⁻¹ 범위에서 스캔 수 16으로 분석하였다. X-ray 3D CT(Bruker, SkyScan 2214, USA)를 통해 복합소재 내 CNF의 분산성을 확인하였다. 굴곡강도 시편의 중간부분 10 mm를 절단하여 stage에 시료를 로딩한 후 4 μm × 4 μm의 픽셀 크기로 이미지를 측정하였다.

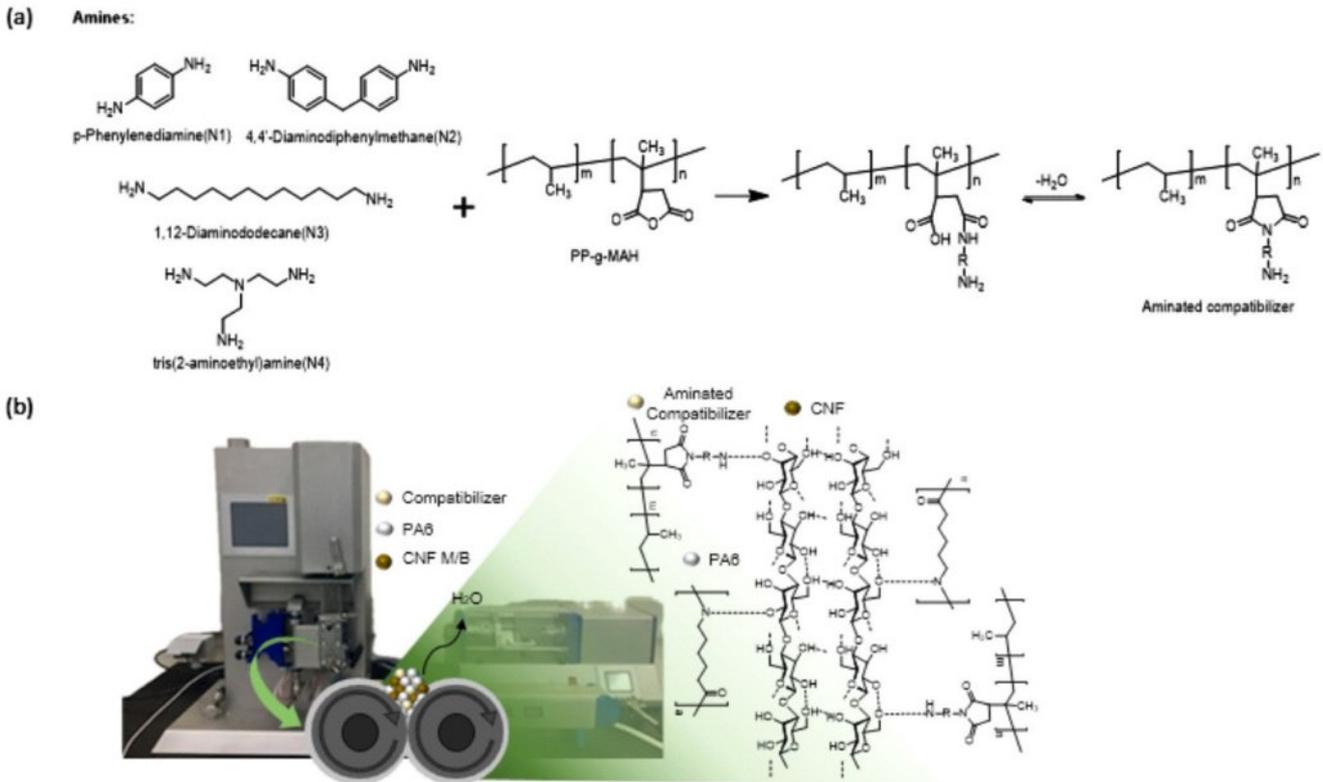


Figure 1. (a) Reaction mechanism of PP-g-MAH and amines; (b) reactive extrusion process of compatibilizers and PA6/CNF composites.

Table 1. Ratio of PP-g-MAH and Amine for Modification

| Sample | Formulation (wt%) | |
|---------------------------------------|-------------------|-------|
| | PP-g-MAH | Amine |
| PP-g-p-Phenylenediamine (N1) | | |
| PP-g-4,4'-Diaminodiphenylmethane (N2) | 95 | 5 |
| PP-g-1,12-Diaminododecane (N3) | | |
| PP-g-tris(2-aminoethyl)amine (N4) | | |

Table 2. Composition of PA6, CNF M/B, Compatibilizers, and CNF Content

| Sample | Formulation | | | CNF content (wt%) |
|-----------------|-------------|---------------|----------------------|-------------------|
| | PA6 (wt%) | CNF M/B (wt%) | Compatibilizer (phr) | |
| PP-g-MAH 1 | | | 1 | |
| PP-g-MAH 3 | | | 3 | |
| PP-g-MAH 5 | 64.7 | 35.3 | 5 | 30 |
| PP-g-Nn (n=1~4) | | | 3 | |

결과 및 토론

IR spectrum 분석. 마이크로 컴파운더에 PP-g-MAH 3.8 g과 아민 0.2 g(95:5 무게비)을 정량 투입하여 반응압출 후 파우

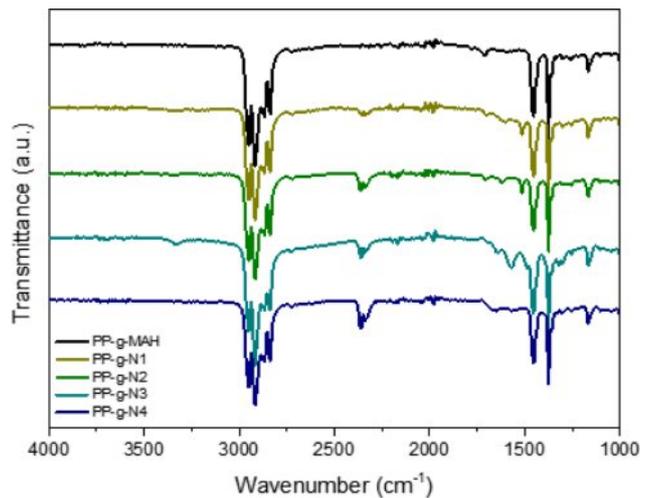


Figure 2. IR spectra of modified PP-g-MAHs.

더 형태로 FTIR 분석한 결과를 Figure 2에 나타내었다. FTIR 분석결과 PP-g-MAH의 무수말레인산(1712 cm^{-1} , 1780 cm^{-1}) peak들이 사라지고 amide 유래 peak 및 개환에 의한 secondary amide의 C=O stretch peak와 carboxylic acid peak가 생성된 것을 확인하였다. 관련 peak들의 spectrum은 Table 3에 나타내었다.

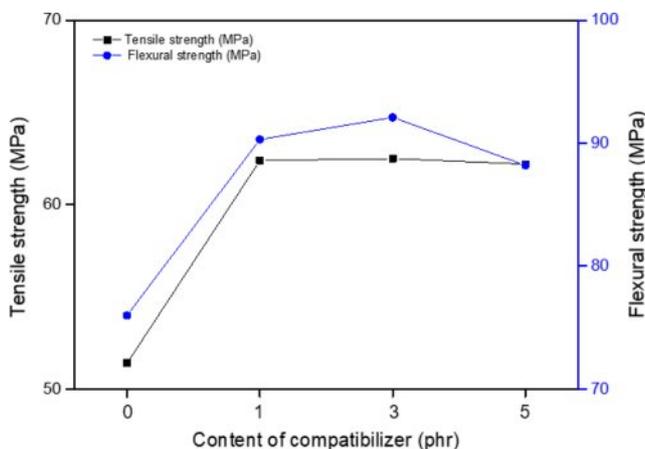
Table 3. IR Absorption of Functional Groups

| Peak wavenumber (cm ⁻¹) | Functional groups |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1500-1650 | Secondary amide group |
| 1690-1710 | Carboxylic acid carbonyl stretching |
| 1712 | Carboxylic stretching |
| 1780 | Anhydride carbonyl stretching |

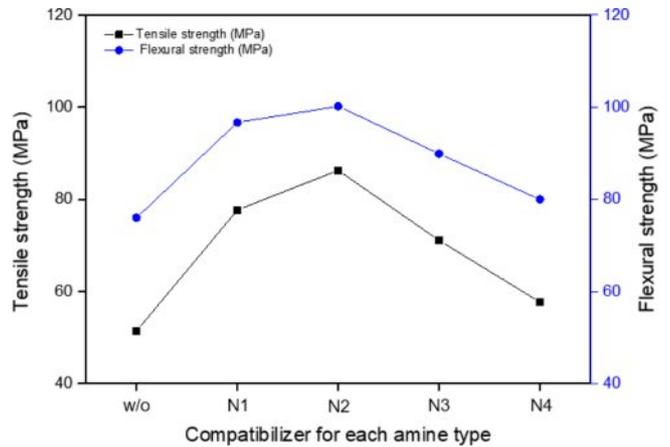
기계적 물성 및 분산성 분석. PA6/CNF 복합소재와 상용화제인 PP-g-MAH의 최적 배합 결정을 위해 인장 및 굴곡강도 시험을 이용하였다.¹⁸ 상용화제를 사용하지 않은 PA6/CNF 복합소재의 경우에는 51.4 MPa와 76.0 MPa의 인장강도와 굴곡강도를 보였다. 최적 함량을 결정하기 위해 상용화제로 사용된 PP-g-MAH의 함량을 1 phr에서 5 phr까지 증량하여 복합소재를 제조한 후 인장 및 굴곡강도를 확인하였다. 3 phr를 첨가한 경우 상용화제를 사용하지 않은 복합소재에 비해 인장강도와 굴곡강도가 약 20% 이상 증가하였으나 추가로 증량하는 경우에는 더 이상 물성이 증가하지 않고 오히려 감소하는 경향을 보였다(Table 4와 Figure 3). 이 결과를 통해 복합소재 내 상용화제의 함량을 3 phr로 결정하여 실험을 진행하였다.

Table 4. Mechanical Properties of PA6/CNF, and PP-g-MAH Composites

| Sample | Tensile strength (MPa) | Flexural strength (MPa) |
|-------------------|------------------------|-------------------------|
| Neat PA6/CNF only | 51.4 | 76.0 |
| PP-g-MAH 1 | 62.4 | 90.3 |
| PP-g-MAH 3 | 62.5 | 92.1 |
| PP-g-MAH 5 | 62.2 | 88.2 |

**Figure 3.** Tensile and flexural strength as function of PP-g-MAH content in PA6/CNF composites.**Table 5. Mechanical Properties of Composites According to Compatibilizers with Amine Groups**

| Sample (Added compatibilizer) | Tensile strength (MPa) | Flexural strength (MPa) |
|-------------------------------|------------------------|-------------------------|
| PP-g-N1 | 77.7 | 96.7 |
| PP-g-N2 | 86.3 | 100.2 |
| PP-g-N3 | 71.1 | 89.9 |
| PP-g-N4 | 57.7 | 80.0 |

**Figure 4.** Tensile strength and flexural strength of PA6/CNF composites without a compatibilizer and with aminated PP-g-MAHs.

4종의 아민들을 각각 PP-g-MAH에 반응시킨 후 PA6/CNF 복합소재에 적용하였을 때의 물성을 비교하여 Table 5와 Figure 4에 나타내었다. 대부분의 아민 개질 상용화제에서 아민으로 개질되지 않은 상용화제(PP-g-MAH)와 비교했을 때에 비해 높은 물성을 보였다. 이는 상용화제의 말단 아민 및 CNF 표면의 수산기의 상호작용이 미개질 상용화제에 비해 증가하여 계면간 접촉특성이 개선되었기 때문으로 보인다.¹⁹⁻²¹ 특히 아민들 중 방향족 구조의 N1과 N2로 아민화하였을 때 기계적 물성이 높았는데, 상용화제 미첨가 PA6/CNF 복합소재와 비교하면 두개의 벤젠고리를 가진 방향족 아민 개질 상용화제(PP-g-N2)를 첨가했을 때 인장강도는 68%, 굴곡강도는 32% 향상되었다. N3의 경우에 인장강도는 71.1 MPa로 미개질 상용화제를 사용했을 때에 비해 높았으나 굴곡강도는 89.9 MPa로 낮아졌다. PP-g-N1과 PP-g-N2의 높은 물성은 구조에 의한 강직도 향상으로 볼 수 있고, PP-g-N3의 경우 지방족 선형 탄화수소 사슬이 유연성을 증가시켜 낮은 기계적 물성을 나타낸 것으로 보인다.²¹⁻²³ PP-g-N4의 경우 인장강도 57.7 MPa와 굴곡강도 80.0 MPa로 아민으로 개질하지 않은 PP-g-MAH만을 상용화제로 적용했을 때 보다 낮은 값을 가지는 것을 확인하였다.

물성과 분산성의 상관관계를 파악하기 위하여 추가적으로 X-ray 3D CT 장비를 통해 PA 6/CNF 복합소재 내 CNF의 분

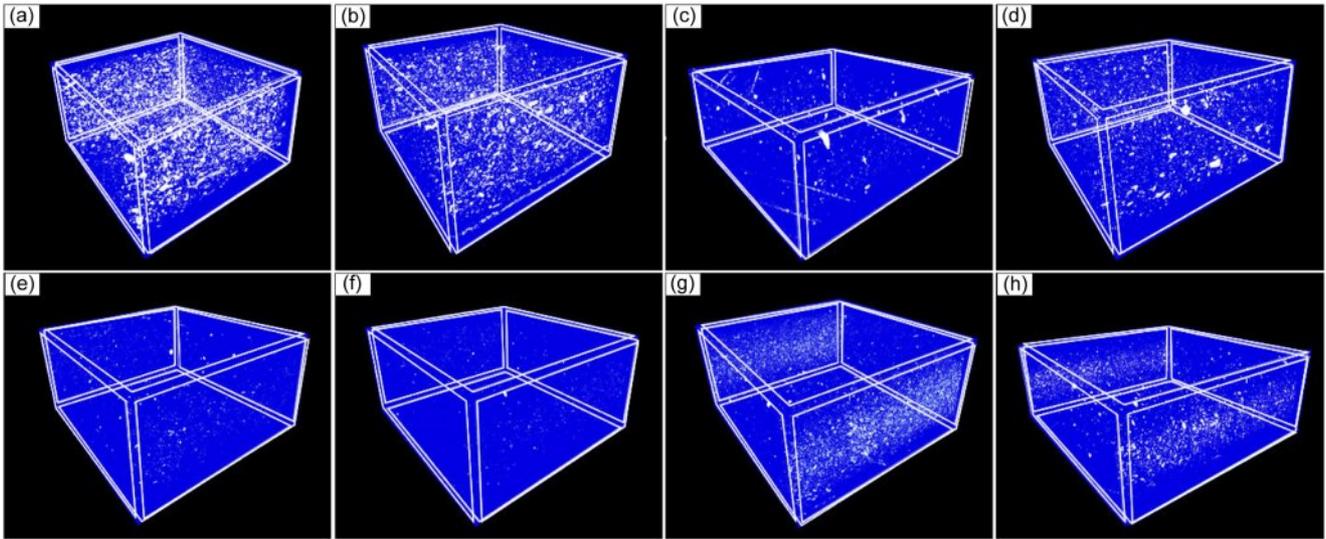


Figure 5. X-ray 3D CT image of (a) neat PA6/CNF; (b) PP-g-MAH 1 phr; (c) PP-g-MAH 3 phr; (d) PP-g-MAH 5 phr; (e) PP-g-N1 3 phr; (f) PP-g-N2 3 phr; (g) PP-g-N3 3 phr; (h) PP-g-N4 3 phr in PA6/CNF composite.

산을 확인하였다. Yano 등² 선행 연구 조사 결과, X-ray 3D CT 이미지로부터 CNF의 분산성을 평가하는 방법은 이미 연구된 바 있다. 상용화제의 구조에 따른 복합소재 내 CNF의 분산성을 확인하기 위해서 X-ray 3D CT 장비를 이용하여 이미지를 측정하였다. 검출된 응집체들의 크기가 작고, 검출량이 적을수록 분산이 잘되었다고 해석할 수 있다.^{3,24}

상용화제가 첨가되지 않은 PA6/CNF 복합소재 1종과 PP-g-MAH 1-5 phr를 각각 첨가한 복합소재 3종 및 N1-N4로 개질한 PP-g-MAH 4종(3 phr)을 상용화제로 PA6/CNF 복합소재에 적용했을 때의 X-ray 3D CT 이미지를 Figure 5에 나타내었다. 먼저 적정 함량을 결정하기 위해 상용화제가 첨가되지 않은 PA6/CNF 복합소재와 복합소재 내 PP-g-MAH의 함량에 따라 검출되는 응집체의 양을 비교하였다. 비교한 결과 특히 PP-g-MAH 3 phr가 첨가된 PA6/CNF 복합소재에서 응집체의 수가 가장 적었다. 그러나 PP-g-MAH를 5 phr로 증량하는 경우 응집체의 개수가 증가하였다. 그리고 이 결과는 Figure 3의 인장강도 및 굴곡강도 실험과 유사한 경향을 보인다. PA6/CNF 복합소재에 PP-g-MAH를 적정량 이상 투입하는 경우에는 반응하지 않은 과량의 PP-g-MAH가 복합소재의 분산성에 영향을 미쳐 물성이 감소하는 것으로 추정된다.⁸ 또한, 4종의 아민으로 각각 개질된 PP-g-MAH를 상용화제로 사용한 PA6/CNF 복합소재 중 PP-g-N2에서 응집체의 형성이 가장 적었고 PP-g-N4의 경우에는 응집체가 상대적으로 더 뭉쳐 있는 것을 확인하였다. PP-g-N2를 첨가한 복합소재의 기계적 물성이 PP-g-MAH를 첨가했을 때에 비해 증가한 이유는 첫번째로 복합소재 제조 시 반응압출 과정에서 PP-g-N2의 말단 아민기는 PP-g-MAH에 비해 복합소재 내 PA6의 아민기 및 CNF의 수산기와의 높은 상호작용으로 계면 접착력이 개

선되어 분산성이 향상되었기 때문이라고 볼 수 있고¹⁴ 두번째로는 phenyl기를 갖는 PP-g-N2를 상용화제로 복합소재에 적용함으로써 최종 복합소재 구조의 강직도가 향상되었기 때문으로 보인다.²²

결론

본 연구에서는 PA6와 CNF 간의 상용성을 높이고자 상용화제로서 PP-g-MAH를 이용하였으며 다양한 아민으로 개질하여 상용화제의 구조가 복합소재의 물성 및 분산성에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다.

마이크로 압출기를 이용한 반응압출을 통해 PA6/CNF 복합소재에 상용화제로서 아민으로 개질한 PP-g-MAH를 첨가하여 제조하였고, PA6와 CNF 조성 간 계면 결합력 및 상용성 향상을 확인하기 위해 인장 및 굴곡강도시험과 X-ray 3D CT를 이용하여 기계적 물성과 분산성을 확인하였다.

PA6/CNF 복합소재 제조 시 PP-g-MAH를 상용화제로 사용하였을 때 3 phr에서 인장 및 굴곡강도가 가장 높았다. 또한 상용화제로서 PP-g-MAH를 다양한 아민으로 개질하였고, 그 중에서 두개의 벤젠고리를 가진 방향족 아민으로 개질한 PP-g-N2를 상용화제로 첨가한 경우 상용화제를 미첨가한 복합소재에 비해 최대 인장강도는 68%, 굴곡강도는 약 32% 향상되었으며 분산성 또한 개선되는 것을 확인하였다. 이는 PP-g-N2를 상용화제로 PA6/CNF 복합소재에 적용을 했을 때 CNF와 PA6 사이의 계면 접착력 및 분산성이 다른 개질 상용화제에 비해 가장 증가되었기 때문으로 보인다.

이 연구의 결과로 향후 개선된 상용화제를 통해 친환경 CNF를 자동차 산업에 필요한 플라스틱 경량화 소재 등의 플

라스틱 보강재로 확대 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글: 본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 산업 기술혁신사업(과제번호: 20017455)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다. 본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 산업기술혁신사업(과제번호: 20015119)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Subbotina, E.; Montanari, C.; Olsen, P. Fully Bio-based Cellulose Nanofiber/epoxy Composites with Both Sustainable Production and Selective Matrix Deconstruction Towards Infinite Fiber Recycling Systems. *J. Mater. Chem. A*, **2022**, 10, 570-576.
- Lee, J.-C.; Lee, J.-A.; Lim, D.-Y.; Kim, K.-Y. Fabrication of Cellulose Nanofiber Reinforced Thermoplastic Composites. *Fibers and Polymers*, **2018**, 19, 1753-1759.
- Yano, H.; Omura, H.; Honma, Y.; Okumura, H.; Sano, H. Designing Cellulose Nanofiber Surface for High Density Polyethylene Reinforcement. *Cellulose*, **2018**, 25, 3351-3362.
- Yoon, H.; Gill, B.; Lee, J.; Park, J.; Lim, J.; Jo, M.; Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene/Cellulose Nanofiber Composites. *Polym. Korea*, **2018**, 44, 255-263.
- D'Acerno, F.; Michal, C. A.; Mac-Lachlan, M. J. Thermal Stability of Cellulose Nanomaterials. *Chem. Rev.* **2023**, 123, 7295-7325.
- Pal, S. K.; Kale, D. D. Effect of Processing Conditions and Properties of PP/nylon 6 Blends. *J. Polym. Res.* **2000**, 7, 107-113.
- Solc, K. *Polymer Compatibility and Incompatibility*, MMI Press, New York, USA, 1982.
- Heiken, D.; Hoen, N.; Barentsen, W.; Piet, P.; Ladan, H. Mechanical Properties and Morphology of Copolymer Modified Polymer Blends. *J. Polym. Sci., Polym. Symp.* **1978**, 62, 309-341.
- Kim, S-U.: KR Patent 10-1996-0018912, 1998.
- Ide, F.; Hasegawa, A. Studies on Polymer Blend of Nylon 6 and Polypropylene or Nylon 6 and Polystyrene Using the Reaction of Polymer. *J. Appl. Polym. Sci.* **1974**, 18, 963-974.
- Guezout, Z.; Boubli, A.; Haddaoui, N. Enhancing Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene-nitrile Butadiene Rubber Nanocomposites Through Graphene Oxide Functionalization. *J. Polym. Res.* **2023**, 30, 207.
- Heikens, D.; Barentsen, W. M. Particle Dimensions in Polystyrene/polyethylene Blends as a Function of Their Melt Viscosity and of the Concentration of Added Graft Copolymer. *Polymer* **1977**, 18, 69-72.
- Paul, D. R.; Newman, S. Eds.; *Polymer Blends*; Academic Press: New York, 1978.
- Han, K.-Y.; Ahn, S.-H.; Chung, K.-B. Effect of Grafted Polypropylene on the Mechanical Properties of Polypropylene/Nylon 66 Blends. *J. Korean Oil. Chemists' Soc.* **2011**, 28, 402-409.
- Lu, Q.-W.; Macosko, C. W.; Horron, J. Melt Amination of Polypropylenes. *J. Polym. Sci., Polym. Chem.* **2005**, 43, 4217-4232.
- Sirviö, J. A.; Visanko, M. Y.; Laitinen, O.; Ämmälä, A.; Liimatainen, H. Amino-modified Cellulose Nanocrystals with Adjustable Hydrophobicity from Combined Regioselective Oxidation and Reductive Amination. *Carbohydrate Polym.* **2016**, 136, 581-587.
- Kim, J. S.; Kim, Y. C. Effect of Poly-propylene Branching and Maleic Anhydride Graft on CNF Dispersion of Polypropylene (PP)/Cellulose Nanofiber (CNF) Composite. *Polym. Korea*, **2020**, 44, 861-867.
- Moon, H. S.; Ryoo, B. K.; Park, J. K. Concurrent Crystallization in Polypropylene/Nylon-6 Blends Using Maleic Anhydride Grafted Poly-propylene as a Compatibilizing Agent. *J. Polym. Sci., Polym. Phys.* **1994**, 32, 1427-1435.
- Jeon, H.; Koo, J. M.; Park, S. A.; Kim, S. M.; Jegal, J.; Cha, H. G.; Park, J. Research Trend of Biomass - Derived Engineering Plastics. *Applied Chemistry for Engineering*, **2020**, 31, 115-124.
- Holsti-Miettinen, R.; Seppälä, J.; Ikkala, O. T. Effects of Compatibilizers on the Properties of Polyamide/Polypropylene Blends. *Polym. Eng. Sci.* **1992**, 32, 868-877.
- Rybnicek, J.; Lach, R.; Grellmann, W.; Lapcikova, M.; Slouf, M.; Krulis, Z.; Anisimov, E.; Hajek, J. Ternary PC/ABS/PMMA Blends - Morphology and Mechanical Properties under Quasi-Static Loading Conditions. *Polimery* **2012**, 57, 87-94.
- Deanin, R. D. *Polymer Structure, Properties and Applications*; Cahnners Books: Boston, 1972.
- Ravikumar, H. B.; Ranganathaiah, C.; Kumaraswamy, G. N. Influence of Free Volume on the Mechanical Properties of Epoxy/polymethylmethacrylate) Blends, *Elastomers Compos.*, **2019**, 54, 30-34.
- Nabarun, R.; Rajatendu, S.; Anil, K. B. Modifications of Carbon for Polymer Composites and Nanocomposites, *Polym. Sci.* **2012**, 37, 781-819.

출판자 공지사항: 한국고분자학회에 게재된 논문 및 기관 소속의 관찰권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.