

열가소성 리그닌폴리에스터와 나노클레이를 이용한 천연섬유/폴리프로필렌복합체 연구

박인경* · 양준호** · 김영준* · 윤주호*** · 김수현**** · 서종환*** · 이영관* · 남재도****†

*성균관대학교 화학공학/고분자공학부, **성균관대학교 에너지과학과,
자동차부품연구원, *한국과학기술연구원

(2016년 4월 17일 접수, 2016년 5월 25일 수정, 2016년 5월 28일 채택)

A Study of PP/Natural Fiber Composites Using Thermoplastic Lignin-polyester and Nanoclay

In-Kyung Park*, Neo Chun Hau**, Young Jun Kim*, Ju-Ho Yun***, Soo Hyun Kim****, Jonghwan Suhr***, Young-Kwan Lee*, and Jae-Do Nam****†

*Department of Chemical/Polymer Sci. and Eng., Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

**Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

***Korea Automotive Technology Institute, Chonan, 31214, Korea

****Korea Institute of Science and Technology, Seoul 02792, Korea

(Received April 17, 2016; Revised May 25, 2016; Accepted May 28, 2016)

초록: 제지폐기물 등 목재에서 유래한 리그닌은 비식량계 바이오매스이나 열안정성이 부족하여 사용이 제한적이었지만, 리그닌 폴리에스터(lignin polyester, LigPS)는 고온가공이 가능하도록 합성되어 복합재료 기지재로서 활용이 가능해 졌다. 황마섬유(jute fiber, JF)/폴리프로필렌(polypropylene, PP) 복합재료에 LigPS와 몬모릴로나이트(montmorillonite, MMT) 함량을 변화시키며 첨가하여 특성변화를 연구했다. LigPS는 복합재료에 20 wt%까지 첨가가 가능하였고 5%만 첨가하여도 인장강도와 탄성률이 증가였고, JF와 계면에서는 상용성을 보였고 수분흡수 실험에서는 내수성도 향상되었다. 또한 여기에 MMT는 5 wt% 투입했을 때 탄성률이 50% 증가하는 등 기계적 물성이 크게 증가했다. 이로부터 JF/PP 복합재료에 LigPS와 MMT로 복합화하여 바이오매스 함량을 증가시키면서 성능도 변화시켜 친환경 나노복합소재로의 활용 가능성을 확인하였다.

Abstract: Lignin has derived from black liquor or wood, and it shows a lack of thermal stability, which restricts its direct use in industrial application. Synthesized lignin polyester (LigPS) from lignin can be melt-processable and matrix of composites. We investigated the jute-fiber/polypropylene (PP) composite system by incorporating LigPS and montmorillonite (MMT) nanoplatelets through extrusion and injection molding processes. The modulus of PP/jute/LigPS composite was increased due to its compatibilizing effect in the PP-jute interface. Also the water resistance was increased, when LigPS was incorporated into PP/jute composites in 5 wt%. While the montmorillonite nanoclay was added and exfoliated in the PP/jute composites by 5 wt%, the modulus was substantially increased by 50%. As a novel green composite system, the LigPS and MMT nanoplatelets demonstrated that the compatibility, the water resistance and the mechanical performance of PP/jute composites could be desirably tailored for various eco-friendly composite applications.

Keywords: nanocomposites, montmorillonite, lignin, jute fiber, mechanical properties, impact strength.

서 론

최근 파리에서 열린 기후총회 합의를 살펴보면, 대표적인 온실가스인 이산화탄소의 배출에 대한 규제가 강력해 지고 탄소배출권 거래제도도 확대된다.¹ 천연물 기반 소재는 폐기

시 이산화탄소 배출을 원천적으로 배제하므로 획기적으로 절감할 수 있다. 또한 천연물 소재는 토양 중 세균에 의해 분해되는 생분해성 특성도 갖고 있어 친환경적이다. 이러한 상황에서 천연물에서 유래된 소재는 특히 차량의 내외장재로 적용이 확대되고 있는데, 국내의 자동차 제조사는 30 종류 이상의 천연섬유 복합재료를 사용 중이다.^{2,4}

양파, 야자, 황마 등 비식량계 천연섬유는 재생가능한 소재로 저렴하며 가볍고 생분해가 가능하다.^{4,8} 예를 들면, 천연섬

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jdnam@skku.edu

©2016 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

유의 밀도는 1.15-1.50 g/cm³로 유리섬유(E-glass)의 2.4 g/cm³나 탄소섬유의 1.8-2.1 g/cm³에 비해 상당히 가볍고, 제조 시 에너지 소모도 9.55 MJ/kg으로 유리섬유의 54.7 MJ/kg의 17% 정도로 적다.⁸ 다만 천연섬유를 구성하는 셀룰로오스의 수산기가 계면에 존재하는 기공(void)이나 균열(crack)이 수분으로 인해 기계적 강도를 저하시킨다는 것이 보고되었고, 이러한 점을 해결하기 위해 천연섬유의 내수성 보완이 필요함이 제기되었다.⁹⁻¹²

천연섬유 복합재료의 기지재로 많이 사용되는 폴리프로필렌(PP)은 무극성 고분자로 대부분의 물질과 상용성이 낮아서 PP 기지재와 천연섬유의 계면접착을 높이거나 상용성을 증진시켜 원하는 물성을 얻는 과정이 필요하다.^{2,13} 상용화제는 천연섬유의 개질과 함께 복합재료의 물성향상을 위하여 사용되고 있고, 인공섬유 등을 고분자 기지재에 분산시키는 기존 설비를 이용하여 천연섬유와 함께 분산시킬 수 있다. 특히 케나프/PP 복합재료의 경우 무수말레이산으로 개질된 PP를 블렌드했을 경우 인장강도와 인장탄성률 모두 크게 향상된 바 있다.^{13,14}

리그닌은 식물자원의 30% 정도를 차지하는 셀룰로오스 다음으로 풍부한 바이오 매스인데, 세 종류의 페닐프로판이 서로 연결되어 있는 3차원 망상구조를 가진다.¹⁵ 나무에서 분리된 리그닌은 가열하면 용융되지 않고 80 °C에서 연기가 나면서 열분해가 시작된다.^{15,16} 이러한 특성 때문에 리그닌은 첨가제나 산화방지제로 제한적으로 사용될 뿐 그 자체로 복합체 제조는 한계가 있었다.¹⁷ 리그닌과 고분자와의 상용성을 높이는 연구가 진행되고 있고, 한편 리그닌의 분자량을 증가시켜 복합재료에 적용하는 연구가 진행된 바 있다.¹⁸⁻²⁰ 특히 리그닌 폴리에스터(LigPS)는 리그닌에 비해 열안정성이 상승해 고온가공이 가능해져 PP나 폴리에틸렌(PE) 등 열가소성 수지와 혼합하여 다양한 분야로 활용이 가능하다고 보고된 바 있다.²¹

한편, 층상구조를 갖는 무기나노입자를 이용한 나노복합재료의 개발은 지금까지 활발히 진행되고 있으며, 컴파운딩 방법으로 PP에 몬모릴로나이트(MMT)를 직접 박리하여 나노복합재료를 제조하면 인장강도와 충격강도가 크게 증가하는 등 기계적 물성 향상을 얻을 수 있다.²³⁻²⁵ MMT는 LigPS/PP 복합재료의 기계적 물성을 보완하여 새롭고 우수한 복합소재의 개선이 기대된다.

본 연구에서는 바이오매스 함량을 높이는 방안으로 리그닌 고분자와 나노클레이를 활용한 연구를 수행했다. 비식량계 천연소재인 리그닌을 고온가공이 가능하도록 LigPS를 합성하고 PP와 블렌드하여 기지재로 사용하여 천연섬유 복합재료를 제조하였다. LigPS가 천연섬유/PP 복합재료에 미치는 내수성과 상용성을 관찰했다. 또한 천연섬유 복합재료에 MMT도 적용하여 열적 특성, 기계적 특성, 모폴로지를 관찰하여 나노복합체의 물성의 변화를 고찰하였다.

실 험

재료. 리그닌은 무림P&P에서 공급받은 흑액에서 본 연구실 방법에 의해 추출하여 사용하였다.²⁵ LigPS 합성에 사용한 sebacyl chloride(SC), triethylamine(TEA), dimethylacetamide(DMAC)는 Sigma-Aldrich 사에서 구매하였다.

PP는 GS Caltex 제품인 H550(용융 흐름지수=11 g/10 min)이다. 황마섬유(jute fiber, JF)는 덕양산업에서 공급한 것으로 장섬유 열가소성 펠렛 형태인데, 한 펠렛의 두께는 2 mm 이고 길이는 10 mm이다. 유기화한 MMT는 뉴트리노에서 구매한 Closite 20A를 PP와 컴파운딩하여 5 wt% 마스터배치를 제조한 형태로 사용하였다.²²

리그닌 폴리에스터 합성. 소량의 리그닌(Kraft-lignin)을 60 °C의 DMAc에 녹여 준비했다. [COCl]/[OH]_{lig}의 비율은 2로 설정하였고, 두 용액은 상온에서 혼합하였다. 촉매 TEA는 혼합액 위에 천천히 떨어뜨린 후 반응 혼합액은 120 °C에서 10시간 동안 가열하면서 교반했다. 반응 완료 후 혼합물을 차가운 증류수에 회수 후 분리하고 세척한 후 건조하였다.¹⁷

시편 제작. PP, LigPS, JF, MMT는 70 °C 오븐에서 6시간 이상 건조하여 준비하였다. Tabel 1과 같이 순수한 PP(HPP)와 비교하기 위해 각 재료의 함량을 달리하여 복합재료를 제조하였고, 공정은 이축압출기(Bautek BA-19, L/D=40)를 사용하여 컴파운딩하였다. 이 때 배럴의 온도는 200-220 °C이고 속도는 200 rpm으로 실험하였다. 압출기를 통해 제조한 펠렛은 80 °C의 진공오븐에서 12시간 이상 건조시킨 후, 사출기(Sumitomo Promat 40/SG25A)를 이용하고 220 °C에서 시편을 제작하였다.

분석. 나노복합체에서 MMT 나노클레이의 삽입 정도 및 박리 정도의 측정을 위해 엑스선회절분석기(XRD, Bruker D8 Advance)를 사용하였으며, 실온에서 1°/min의 속도로 2θ 범위를 0.5° 부터 10°까지 측정하였다. 열중량분석은 열중량분

Table 1. Composition of the Composites with Various Reinforcement Contents

Specimen	Composition (wt%)			
	PP	Jute fiber	MMT	LigPS
HPP	100	0	0	0
PL5	95	0	0	5
PM5	95	0	5	0
PJ20	80	20	0	0
PJ20M5	75	20	0	0
PJ20L5	75	20	0	5
PL20M5	75	0	5	20
PJ20M5L5	70	20	5	5

석기(TA instruments Q50)를 이용하여 질소기체분위기 아래에서 30 °C부터 600 °C까지 분당 10 °C씩 승온하면서 측정하였다. 열시차분석(TA instruments DSC)은 질소기체 분위기 아래에서 30 °C부터 300 °C까지 분당 10 °C씩 승온하며 측정하였다. 만능시험기(Lloyd Instruments LR30K)를 사용하여 복합체의 인장특성을 측정하였다. 인장시험속도는 50 mm/min, 지간거리는 115 mm였고 ASTM D638 규정에 의거하여 수행하였다. 충격실험은 ASTM D256 규정에 맞추어 IZOD 충격시험기(Qmesys, QM700A)로 상온에서 수행하였고 노치부 깊이는 2.54 mm, 시료두께는 약 6.4 mm였다. 내수성 시험은 ASTM D570에 의해 한 번이 6 cm인 정사각형이며 두께는 2 mm인 사출한 시험편을 사용하여 23 °C의 증류수에 24시간 침지시킨 후 수분흡수율을 측정하였다. 각 실험은 총 5개의 시편에 대한 평균값을 사용하였다. 복합체 미세구조의 형태적 특성을 확인하기 위해서 주사전자현미경(Hitachi S-2400)을 이용하여 파단면을 관찰하였다.

결과 및 토론

LigPS/JF/PP복합재료 제조와 특성. LigPS는 Figure 1과 같은 과정으로 합성하는데, 리그닌의 수산화기는 아민촉매하

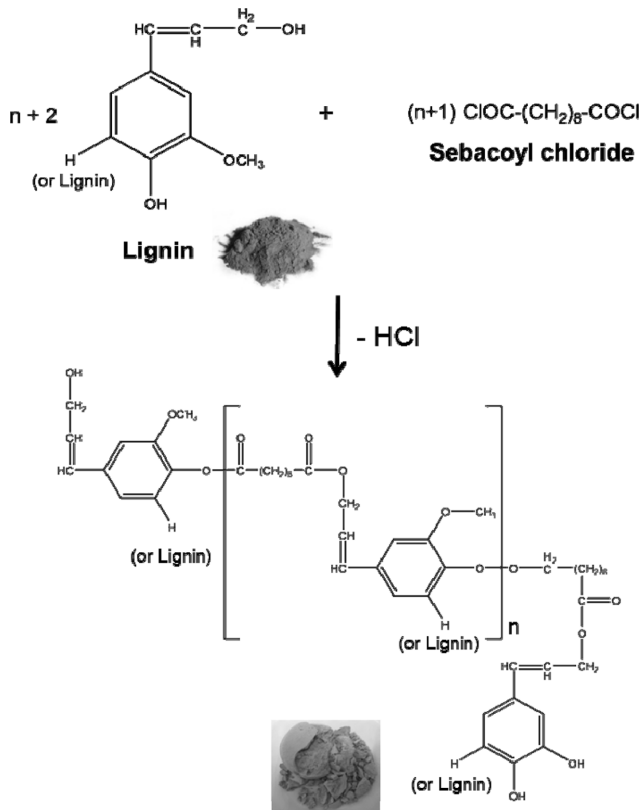


Figure 1. Synthesis pathway of lignin-based polyester through coesterification.

에서 염화세바코일 클로라이드와 반응하여 에스테르 결합으로 리그닌 분자가 연결된다. 이러한 반응으로 얻어진 LigPS는 분자량이 증가하면서 리그닌보다 열안정성이 상승하였다.¹⁶ 따라서 PP의 가공온도인 200 °C 부근에서 LigPS가 가공이 가능하여 PP 복합재료에 기지재로 활용이 가능했다.

LigPS를 기지재로 활용하였을 때 인장성능의 변화를 고찰하기 위하여 LigPS/PP 블렌드에서 LigPS의 함량에 따른 인장강도와 인장탄성률의 변화를 Figure 2에 나타내었다. LigPS는 PP와 5, 10, 15, 20 wt% 블렌드하였는데, 인장강도는 PP보다 증가하다가 10 wt% 함량부터 차츰 감소하는 경향을 보였다. LigPS를 20 wt%까지 첨가해도 PP 고유의 인장강도와 인장탄성률 이상을 유지했다. 이러한 결과는 LigPS는 PP 복합재료의 물성감소 없이 5-20 wt% 추가가 가능한 것으로 설명할 수 있다. PP는 무극성이기 때문에 거의 모든 고분자와의 상용성이 부족하다.²⁰⁻²² LigPS가 특유의 분자구조에서 극성과 무극성 작용기를 모두 갖고 있어 PP와 상용성을 증진시키는 것으로 사료된다.

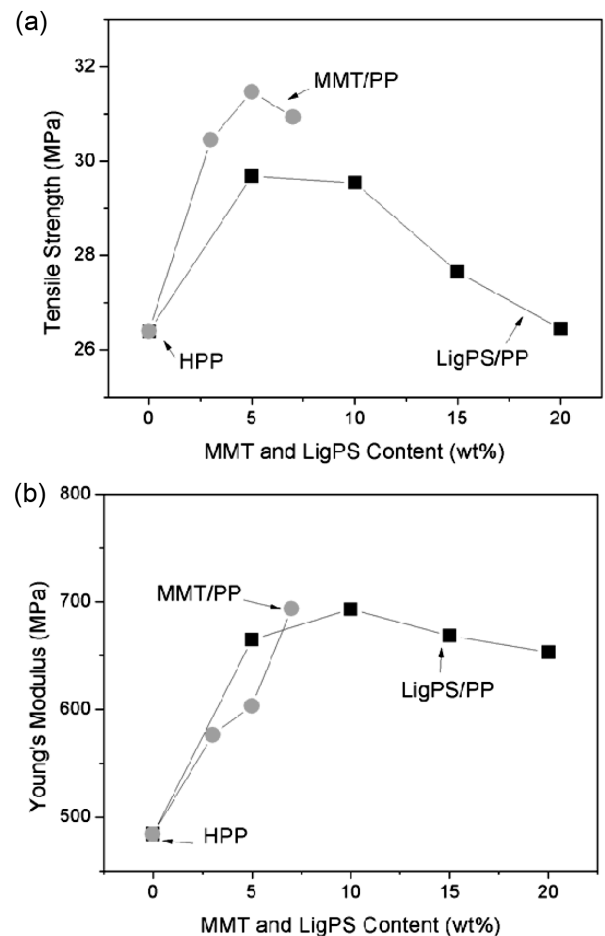


Figure 2. Comparison of the effect of MMT and LigPS on tensile strength (a); modulus (b); MMT(●) and LigPS(■).

천연섬유를 활용한 복합재료의 경우, 셀룰로오스가 친수성을 가지고 있어서 수분을 흡착할 수 있어 가공하거나 사용할 때에 영향을 줄 수 있다. LigPS가 천연섬유 복합재료의 내수성에 어떠한 영향을 주는지 관찰하기 위하여 제조한 복합재료의 수분흡수율을 측정하여 Figure 3(a)에 나타내었다. 순수한 PP의 수분흡수율은 0.026%이고, JF를 20 wt% 함유한 PJ20은 0.038%로 PP보다 수분흡수가 증가함을 나타내었다. LigPS를 5 wt% 함유한 PL5는 0.012%이고 나노복합체 PJ20L5M5의 경우 0.025%로 PP보다 약간 감소했다. 이것은 LigPS의 고유의 화학구조가 천연섬유의 수분흡수를 저해하는데 효과가 있다고 볼 수 있다. 또한 천연섬유는 수분흡수에 취약하므로 복합재료화할 때에 건조공정이 요구되며 LigPS 같은 수분흡수를 저해할 수 있는 대책 강구도 필요하다.

MMT/PP 복합재료의 제조와 특성. 나노클레이의 표면상태나 형태는 가공 시 분산에 영향을 주므로, 나노복합체 안에서 MMT의 분산 정도를 확인하기 위하여 XRD 측정결과를 Figure 3(b)에 나타내었다. Figure 3(b)에서는 컴파운딩 전의 MMT, 5 wt%의 MMT가 혼합된 MMT/PP 복합재료 (PM5), 순수한 PP의 XRD 특성을 보여주고 있다. MMT의

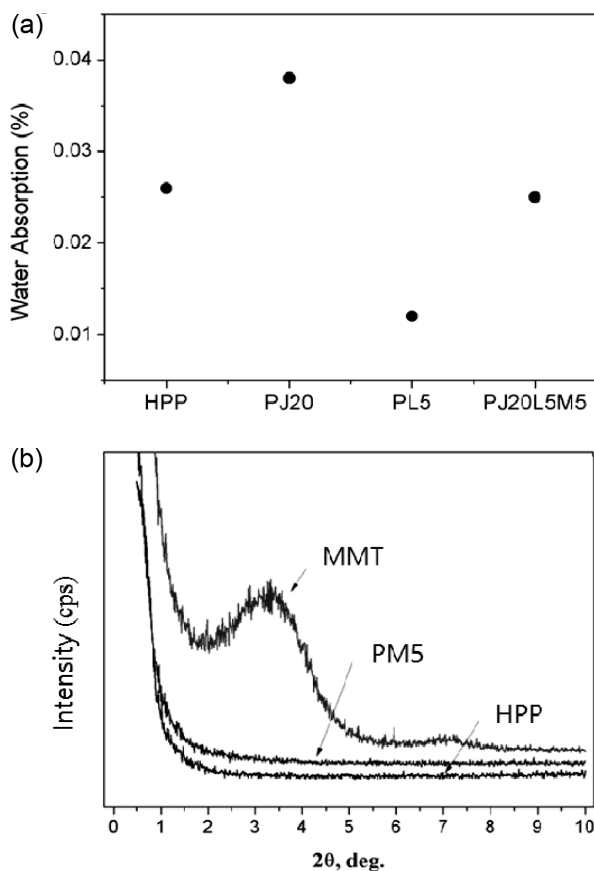


Figure 3. Water absorption of PJ20, PL5, and PJ20L5M5 (a); X-ray diffraction patterns of MMT nanocomposites (PM5) (b).

XRD특성 피크는 회절각 $2\theta=3.58^\circ$ ($d=24.66 \text{ \AA}$)에서 나타나고 있다. PM5와 PP는 같은 회절각 구간에서 특성피크를 나타내지 않았고, PM5는 MMT의 고유의 특성피크가 사라져 PP와 비슷한 특성피크를 보이게 되었다. PM5 제조 시에, PP 기지재에 MMT가 나노미터 크기로 완전히 박리되면 피크가 전혀 나타나지 않는다고 보고된 바 있으며, 이것은 판상구조를 가진 MMT가 가공 후에 초기의 판상거리가 넓어지며 박리상태가 되고 각각의 판이 완전히 분리되어 분산된 것으로 사료된다.^{23,24} 이것으로 본 연구의 제조 방법으로 MMT가 박리 후 고르게 분산되어 나노복합체가 성공적으로 제조되었음을 확인할 수 있었다.

Figure 2는 MMT/PP 복합재료를 제조하고 MMT의 함량에 따른 인장강도와 인장탄성률의 변화를 나타낸 것이다. MMT가 3 wt%에서 5 wt%로 증가하더라도 인장강도는 8%에서 12% 증가하고, 탄성률은 18%에서 43%로 각각 증가하였다. 본 연구에서 PP 복합화에 사용한 나노클레이는 PP에 고르게 분산되어 인장특성을 크게 증가시키는 효과를 보였다.

JF/PP 복합재료의 열적 특성. 나노복합체의 열적 특성을 고찰하기 위해 DSC, TGA 실험을 진행하였다. 각 시편의 DSC thermogram을 Figure 4에 나타내었고, 용융온도를 Table 2에 요약하였다. HPP는 173 °C에서 최고점을 갖는 흡열피크를 나타내고 있고, PJ20, PJ20L5, PJ20M5, PJ20M5L5 모두 HPP와 비슷하게 171 °C와 173 °C 사이에서 최고점을 갖는 단일 흡열피크를 보여주었다. 이러한 나노복합체의 용융온도는 순수 PP와 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 강화재나 LigPS가 첨가되어도 용융과정에는 큰 영향을 미치지 않으며 압출 성형과 사출성형의 가공에도 부가반응 없이 JF, MMT, LigPS의 혼합이 잘 이루어졌다고 사료된다.

Figure 5는 질소기체 분위기 아래에서 각 복합체의 열분해 거동을 나타내었다. 각 시편의 열안정성을 비교하기 위하여

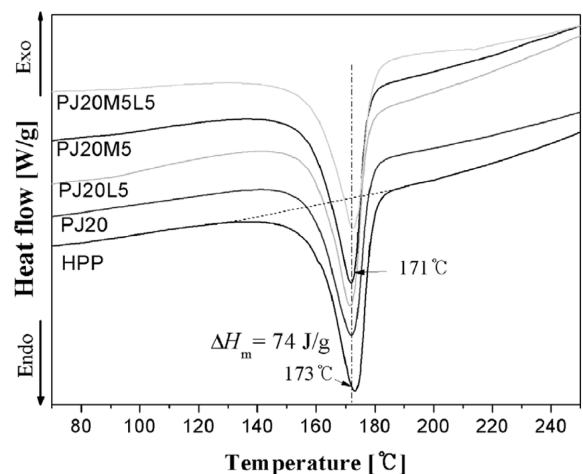


Figure 4. DSC thermograms of the green nanocomposite specimens.

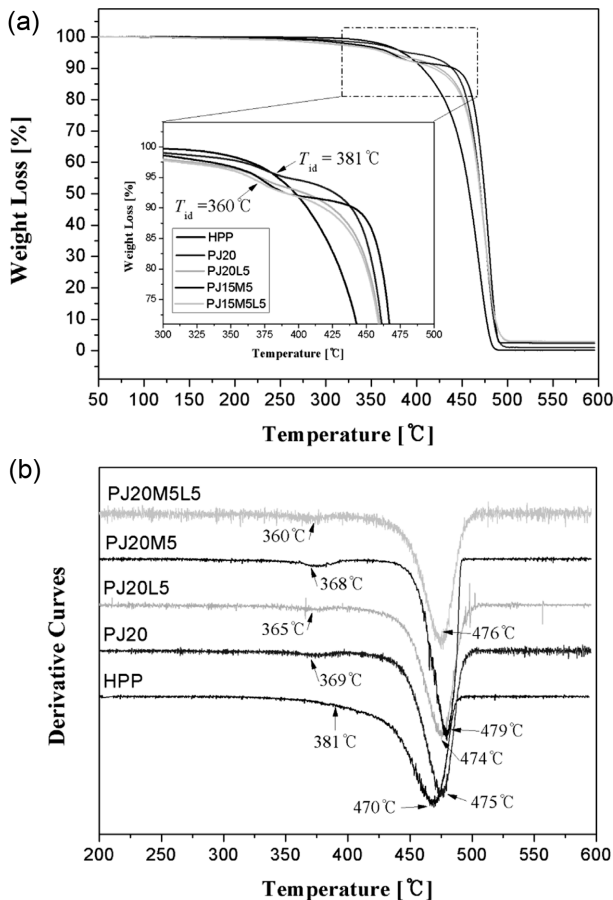


Figure 5. TGA thermograms of (a) weight loss; (b) its derivatives of the composites.

총 중량의 5%가 분해되는 초기분해온도(T_{id})로 정의하였다. Figure 5(a)에서 PP의 열분해는 한 단계로 이루어지며 T_{id} 는 381 °C이다. 이에 반해 PJ20, PJ20L5, PJ20M5, PJ20L5M5의 열분해는 두 단계로 이루어지며 T_{id} 는 359-366 °C 사이로 나타났다.

이것은 JF와 LigPS의 열분해가 한 단계 추가된 것이다. LigPS가 첨가된 PJ20L5의 경우 PJ20이나 HPP보다 T_{id} 가 약

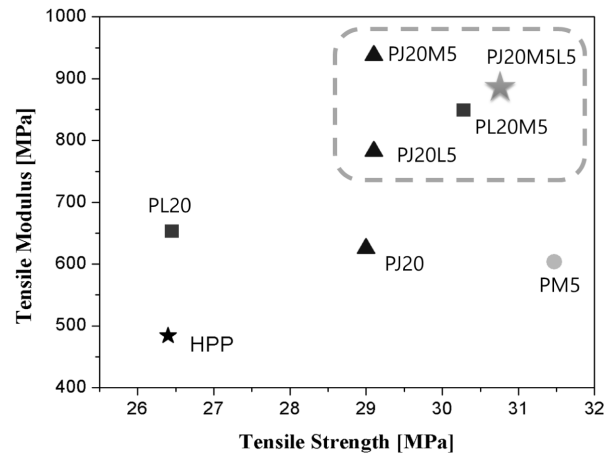


Figure 6. Strength-modulus map of the green nanocomposites.

간 낮아지지만 성형가공에는 영향을 끼치지 않는 정도이었다.

또한 Figure 5(b)에서는 각 시편의 온도에 따른 열분해의 변화를 비교하였는데 열분해속도가 최대인 온도를 T_{max} 로 정의하였다. PP 시편은 T_{max} 가 470 °C이었고, 제조한 나노복합재료의 경우는 T_{max} 가 474-479 °C 사이에 위치하였다. 특히 PJ20M5는 479 °C로 가장 높았는데, 이것은 MMT 나노클레이에 의해 열안정성이 증가된 것으로 보인다.

JF/PP 복합재료의 기계적 물성. Table 2에는 JF/PP 복합재료에 MMT와 LigPS의 함량을 달리한 인장시험 결과를 나타내었다. 순수한 PP보다 인장강도와 탄성률이 증가하였고 항복신장률은 약간 감소하였다. 각 시편의 인장강도와 탄성률 변화를 Figure 6에 표시하였다. PP는 인장강도와 탄성률이 26.4과 484 MPa인데, JF/PP 복합재료는 29.1과 626 MPa으로 증가했다. 여기에 MMT로 강화했을 경우는 29.5와 938 MPa로, LigPS/PP 블렌드 기지재를 사용한 PJ20L5는 29.1와 783 MPa로 탄성률만 약간 증가했다. MMT 나노클레이는 기지재에 고르게 분산되어서 효율적으로 인장강도와 탄성률을 고루 증가하는 효과를 가져온 것으로 사료된다. JF/PP 복합재료에 친환경성을 부가하면서 강도와 탄성률을 보완해주

Table 2. Mechanical Properties of Composite Systems Investigated in This Study

Specimen	Thermal properties		Mechanical properties			
	T_m (°C)	T_{id} (°C) ^a	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at yield (%)	Izod impact strength (kJ/m ²)
HPP	173	381	26.4	484	19	2.4
PJ20	173	382	29.1	626	13	2.8
PJ20M5	171	366	29.5	938	11	3.0
PJ20L5	172	365	29.1	783	13	2.5
PL20M5	171	364	30.3	840	15	1.9
PJ20M5L5	171	359	30.8	890	11	2.5

^aTemperature at 5 wt% loss.

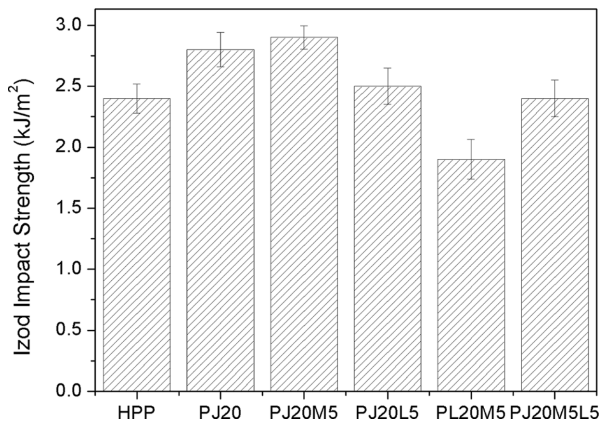


Figure 7. Izod impact strength of green nanocomposites in different composition.

는 효과를 LigPS와 MMT로 얻을 수 있었다.

Figure 7은 각 복합재료 시스템의 아이조드 충격강도를 측정한 결과이다. 기지재인 HPP의 충격강도는 2.45 kJ/m^2 인데, JF로 강화한 PJ20은 2.8 kJ/m^2 로 증가하였다. PJ20M5는 JF와 MMT 두 강화재가 복합적으로 사용되었을 때 충격강도의 성능도 증가한 것으로 나타났다. JF와 MMT는 충분히 기지재에 분산하며 충격강도를 효과적으로 보완하는 역할을 하고 있다고 보여진다.

다만, LigPS가 첨가된 시편은 인장강도와 인장탄성률과 달리 충격강도가 감소했는데, 리그닌의 함량이 증가할수록 충격강도가 낮아지는 경향을 보였다. LigPS가 증가하면 탄성률이 높아지므로 충격 시의 에너지가 효과적으로 분산되지 않아 충격성능의 저하를 나타낸 것으로 사료된다. LigPS와 MMT로 복합화한 PJ20L5M5의 경우, 충격강도가 순수한 PP보다 약간 상승하는 데에 그쳤다. 복합재료에 MMT를 단독으로 사용했을 경우는 충격강도가 증가했으나 기지재인 LigPS/PP를 사용했을 경우 충격강도의 감소가 일어나 이 효과가 큰 것으로 사료된다.

JF/PP 복합재료의 미세구조. JF/PP 복합재료에 LigPS와 MMT를 복합화했을 때, 수지와 섬유의 계면에서의 미세구조를 관찰하기 위하여 각 시편의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰하여 Figure 8에 나타내었다. Figure 8(a)는 PJ20의 대표적인 파면으로 PP와 섬유 두 가지 유형의 미세구조 영역으로 구분되는데, 섬유의 pull-out이 뚜렷하게 관찰되는 영역과 섬유가 존재하지 않는 기지재 영역이다. Figure 8(a)와 8(b)는 LigPS가 없이 JF가 20% 함유된 복합재료인데, 파단면의 섬유인출을 확인할 수 있었다. 이것은 PP와 JF 사이의 계면 접착이 비교적 강하게 되어있음을 의미한다. PJ20과 PJ20M5의 경우 인출된 섬유의 길이는 약 $100 \mu\text{m}$ 정도였다. Figure 8(c)에서는 LigPS가 첨가된 PP 복합재료(PL20M5)의 모습인데, 파단할 때에 복합재료의 연성효과로 변형이 일어났음을 추측

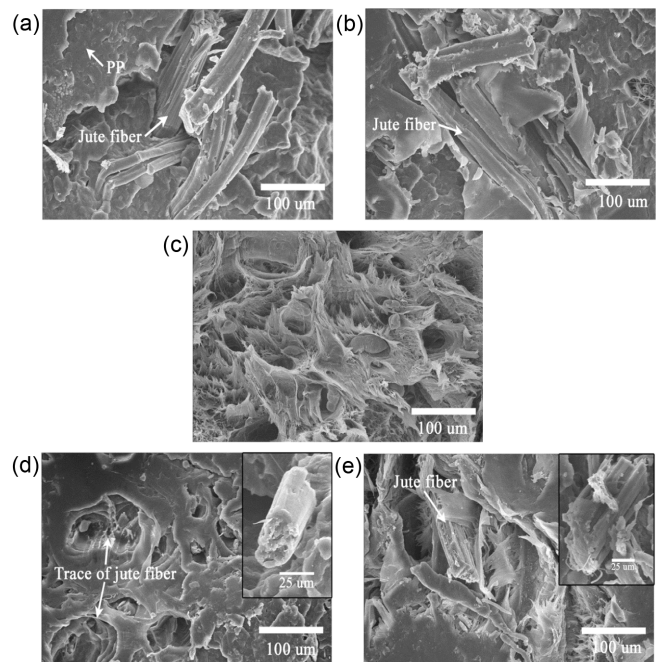


Figure 8. SEM images of the fracture surface of the tensile specimens: (a) PJ20; (b) PJ20M5; (c) PL20M5; (d) PJ20L5; (e) PJ20M5L5.

할 수 있었다.

LigPS의 효과는 Figure 8(d)의 PJ20L5 시편으로 확인하였는데, 섬유가 튀어나와 있지는 않았지만 기지재인 PP/LigPS 블렌드에서처럼 파단면에서 섬유가 잘린 것을 볼 수 있었다. 이것은 LigPS가 복합재료 시스템에서 연성특성을 부여하지만 섬유와 기지재 사이의 계면접착이 LigPS의 특유의 양친성 때문에 증가한 것으로 사료된다. Figure 8(e)에서는 PJ20L5에 MMT가 첨가된 PJ20M5L5인데, 섬유의 pull-out 거동으로 판단해 보면, 리그닌 고분자의 첨가가 기지상의 채움이 인성 증진을 위하여 유리하다고 생각되며, 이러한 기지상 채움은 복합재료의 기공 감소나 기공의 분포를 보완하여 강도나 열적 물성의 증진효과를 유도하여 공정의 복합화 효과를 극대화하는 것이 바람직하다.

결론

본 연구는 고온가공이 가능하게 합성한 LigPS를 열가소성 수지인 PP와 블렌드하여 JF/LigPS/PP 복합재료를 제조하였다. LigPS는 수분흡수 실험으로 JF/PP 복합재료의 내수성 증진에 기여했음을 확인하였고, 인장강도와 탄성률이 모두 PP보다 증가하여 JF와 PP 계면의 상용화 효과도 있는 것으로 사료된다. 또한 MMT를 JF/PP에 복합화하여 특성을 실험하였다. MMT는 고분자 기지재 내에 모두 박리되어 잘 분산되었음을 확인하였고, 5 wt% 첨가하였을 때 탄성률이 50% 증

가하는 등 기계적 물성의 상승을 확인하였다. 이렇게 비식량계 천연소재인 리그닌폴리머와 MMT를 활용한 황마섬유 나노복합체는 바이오매스 합량상승과 함께 내수성과 기계적 물성 등 성능 향상을 동시에 얻을 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 미래창조과학부의 한국연구재단(NRF-2014M3C1B2048175)을 통한 연구 지원을 받았으며, 또한 산업통상자원부(MOTIE, 10041173)를 통한 연구 지원과 성균관대학교 내 경기도지역협력연구센터(GRRC)를 통한 연구 및 장비 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. <http://www.carbonbrief.org/paris-2015-tracking-country-climate-pledges>.
2. D. N. Saheb and J. P. Jog, *Adv. Polym. Technol.*, **18**, 351 (1999).
3. G. Marsh, *Mater. Today*, **6**, 36 (2003).
4. M. Jawaid and H. P. S. Abdul Khalil, *Carbohydr. Polym.*, **86**, 1 (2011).
5. L. Sobczak, R. W. Lang, and A. Haider, *Compos. Sci. Technol.*, **72**, 550 (2012).
6. M. Kazayawoko, J. J. Balatinecz, and L. M. Matuana, *J. Mater. Sci.*, **34**, 6189 (1999).
7. J. Gassan and A. K. Bledzki, *Compos. Part A*, **28**, 1001 (1997).
8. A. Bismarck, S. Mishra, and T. Lampke, "Plant fibers as reinforcement for green composites", in *Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites*, A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, Editors, Boca Raton, CRC Press, p. 37-108 (2005).
9. A. Espert, F. Vilaplana, and S. Karlsson, *Composites Part A*, **35**, 1267 (2004).
10. H. Chen, M. Miao, and X. Ding, *Composites Part A*, **40**, 1203 (2009).
11. H. N. Dhakal, Z. Y. Zhang, and M. Richardson, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 1674 (2007).
12. B. Wang, S. Panigrahi, L. Tabil, and W. Crerar, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **26**, 447 (2007).
13. M. V. Marques, R. P. Melo, R. S. Araujo, J. N. Lunz, and V. O. Aguiar, *J. Appl. Polym. Sci.*, **132**, 41710 (2015).
14. A. R. Sanadi, D. F. Caulfield, R. E. Jacobson, and R. M. Rowell, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **34**, 1889 (1995).
15. K. Othmer, *Encyclopedia of Chemical Technology* (New York), **5**, 1 (2005).
16. L. D. Duong, N. D. Luong, N. T. T. Binh, I.-K. Park, S. H. Lee, D. S. Kim, Y. S. Lee, Y. K. Lee, B. W. Kim, K. H. Kim, H. K. Yoon, J. H. Yun, and J.-D. Nam, *BioResources*, **8**, 4518 (2013).
17. V. Ambroggi, P. Cerruti, C. Carfagna, M. Malinconico, V. Marturano, M. Perrotti, and P. Persico, *Polym. Degrad. Stab.*, **96**, 2152 (2011).
18. M. Zhong, H. Dai, H. Yao, D. Dai, Y. Zhou, J. Yang, and F. Chen, *Polym. Compos.*, **32**, 1019 (2011).
19. O. Gordobil, R. Delucis, I. Egiés, and J. Labidi, *Ind. Crop. Prod.*, **72**, 46 (2015).
20. Á. T. Martínez, J. Rencoret, G. Marques, A. Gutiérrez, D. Ibarra, J. Jiménez-Barbero, and J. C. del Río, *Phytochemistry*, **69**, 2831 (2008).
21. N. T. T. Binh, N. D. Luong, D. O. Kim, S. H. Lee, B. J. Kim, Y. S. Lee, and J. -D. Nam, *Compos. Interfaces*, **16**, 923 (2009).
22. J. H. Lee, H. S. Park, I. G. An, Y. H. Lee, Y. S. Kim, Y. K. Lee, and J.-D. Nam, *Polym. Korea*, **27**, 576 (2003).
23. J. H. Lee, T. G. Park, H. S. Park, D. S. Lee, Y. K. Lee, S. C. Yoon, and J.-D. Nam, *Biomaterials*, **24**, 2773 (2003).
24. Y. H. Lee, J. H. Lee, I.-G. An, C. Kim, D. S. Lee, Y. K. Lee, and J.-D. Nam, *Biomaterials*, **26**, 3165 (2005).
25. N. D. Luong, N. T. T. Binh, L. D. Duong, D. O. Kim, D. S. Kim, S. H. Lee, B. J. Kim, Y. S. Lee, and J. D. Nam, *Polym. Bull.*, **68**, 870 (2011).