

말레산 무수물로 그래프트된 고분자량의 폴리락트산 상용화제가 폴리락트산 기반의 합성목재에 미치는 영향

한동헌, 이종인, 오승주, 남병욱, 배진우*
한국기술교육대학교 응용화학공학과

Effect of High-molecular-weight Maleic Anhydride-grafted Polylactic Acid Compatibilizer on the Properties of Polylactic acid-based Wood Polymer Composites

Dong-Heon Han, Jong In Lee, Seung-Ju Oh, Byeong Uk Nam, Jin Woo Bae*
Department of Applied Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약 Maleic anhydride (MA)와 divinylbenzene (DVB)을 개시제인 di(tert-butyl-peroxyisopropyl)benzene (PK-14)과 함께 이축 압출기에서 용융 그래프팅 반응을 통해 상용화제인 high-molecular-weight maleic anhydride-grafted polylactic acids (HMMA-*g*-PLA)를 제조하였다. 제조된 HMMA-*g*-PLA의 특성을 분석하기 위해 Fourier transform infrared (FTIR), Melt index (MI), 그리고 역적정을 실시하였다. HMMA-*g*-PLA는 DVB의 함량이 증가함에 따라 MA의 그래프팅율은 증가하나 MI는 감소하였는데, DVB의 도입으로 PLA의 β -scission 반응이 억제되어 분자량이 증가되었기 때문이다. HMMA-*g*-PLA를 사용한 PLA기반 합성목재(wood-plastic composites, WPCs)는 matrix인 PLA에 보강제인 목재와 무기 충전제인 talc를 첨가하여 일축 압출기로 용융 블렌드하였다. 상용화제인 HMMA-*g*-PLA가 도입된 WPCs는 도입되지 않은 WPCs와 비교하여 더 높은 굴곡강도 및 충격강도를 보였다. 이것은 Scanning electron microscope (SEM) 분석을 통해 HMMA-*g*-PLA의 첨가로 PLA와 목분과의 계면 결합력이 우수해졌기 때문인 것을 알 수 있었다. 하지만 HMMA-*g*-PLA의 함량이 높을 때는 WPCs의 기계적 물성을 악화시켰다. 이는 도입된 HMMA-*g*-PLA 상용화제의 분자량이 PLA 고분자 수치보다 더 낮아 기계적 물성을 감소시킨 것으로 판단하였다.

Abstract High-molecular-weight maleic anhydride-grafted polylactic acids (HMMA-*g*-PLA) compatibilizers were prepared by melt grafting in a twin screw extruder using di(tert-butyl-peroxyisopropyl)benzene (PK-14; as initiator), maleic anhydride (MA), and divinylbenzene (DVB). To determine the properties of the prepared HMMA-*g*-PLA compatibilizers, Fourier transform infrared (FTIR), Melt index (MI), and back-titration analyses were performed. On increasing DVB concentration, grafting yield of HMMA-*g*-PLA increased but MI decreased because β -scission of PLA was restrained by the DVB, and thus, the molecular weight of HMMA-*g*-PLA increased. PLA-based wood-plastic composites (WPCs) were prepared using HMMA-*g*-PLA by melt blending through a single screw extruder. The flexural and impact strengths of WPCs compatibilized with HMMA-*g*-PLA were greater than those of WPCs produced without HMMA-*g*-PLA. Scanning electron microscope (SEM) studies indicated that increased mechanical properties were caused by excellent interfacial adhesion between PLA and wood fibers due to the addition of HMMA-*g*-PLA. However, rather high contents of HMMA-*g*-PLA reduced the mechanical properties of WPCs. We believe that lower molecular-weight of HMMA-*g*-PLA added as an compatibilizer, compared with PLA polymer, caused the reduction of mechanical properties.

Keywords : Wood-Plastic Composites, Polylactic Acid, Wood Fiber, HMMA-*g*-PLA, Compatibilizer

"본 연구는 교육부의 산학공동기술개발과제[LINCPLUS-2019-19]와 대학혁신지원사업 및 한국기술교육대학교 교육연구진흥과제의 지원을 받아 연구되었음."

*Corresponding Author : Jin Woo Bae(Korea University of Technology and Education)

email: jwbae@koreatech.ac.kr

Received February 15, 2021

Revised March 15, 2021

Accepted June 4, 2021

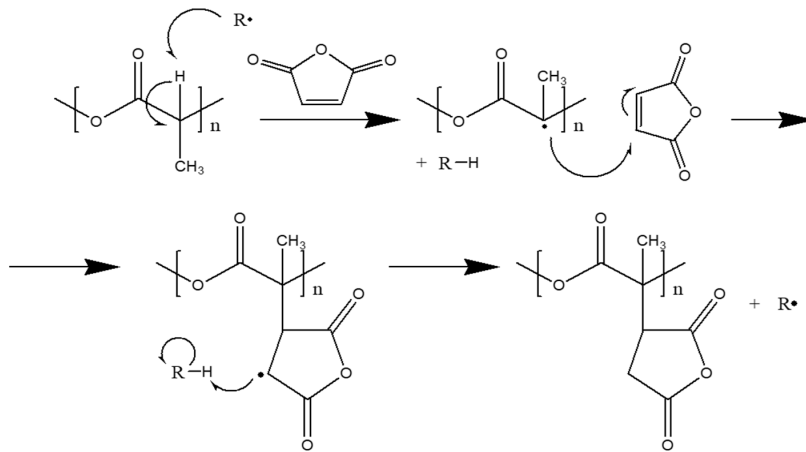
Published June 30, 2021

1. 서론

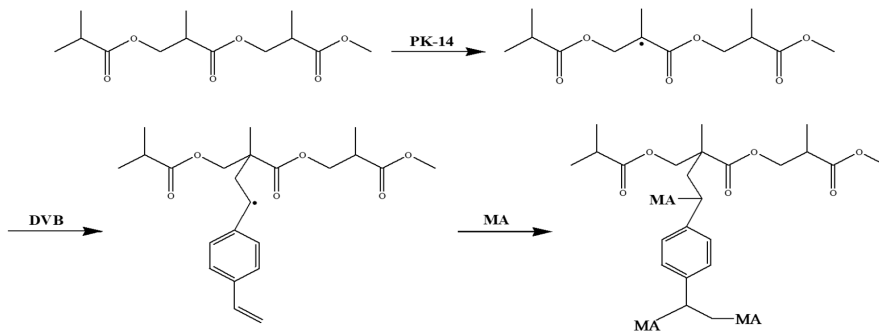
목재-플라스틱 복합재 (wood-plastic composites, WPCs)는 지속가능한 천연소재와 자연적인 외관 등을 가진 목분과 내구성, 내수성, 치수안정성 등을 가지는 석유계 플라스틱을 혼련하여 압출, 사출 등의 가공방법을 통해 건축재료, 가구, 자동차 패널 등의 다양한 분야에서 적용되고 있다[1-3]. 그러나 석유계 플라스틱은 소각과 매립으로 인해 발생하는 환경 호르몬, 맹독성의 다이옥신, 폐기물의 불완전 연소 등 심각한 환경오염을 유발한다. 이러한 석유계 플라스틱의 문제를 해결하기 위하여 바이오 플라스틱에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 생분해성이 있는 바이오 플라스틱의 실용화 및 의무화의 압력이 거세지고 있다[4]. 대표적으로 사용되는 바이오 플라스틱인 polylactic acid (PLA)는 자연에서 생분해가 가능한 친환경 소재이기 때문에 WPCs의 원료로

써 주목받고 있다[5,6]. 그러나, PLA는 소수성을 가지고 있기 때문에 친수성의 목분과 제조를 하게 되면 WPCs의 상용성이 떨어지게 되어 기계적 물성이 크게 감소할 수 있다[7,8]. 이러한 목분과 PLA 사이의 상용성을 개선시키기 위하여 Scheme 1에 나타난 바와 같이 PLA 주사슬에 maleic anhydride (MA)를 그래프트시켜 친수성과 소수성의 특성을 모두 갖는 상용화제 (compatibilizer)인 MA-*g*-PLA를 합성하고 이를 직접 WPCs에 첨가한 연구사례가 있다[5,9,10]. 그러나 기존에 사용된 MA-*g*-PLA는 PLA와 목분과의 상용성 개선에는 효과를 보았지만, 합성과정에서 PLA가 라디칼 개시제에 의한 β -scission 반응으로 분자량이 감소하기 때문에 WPCs의 기계적 물성을 향상시키는 데에는 한계가 있었다.

본 연구에서는 반응성이 우수한 가교제인 divinylbenzene (DVB)을 MA와 함께 PLA 주사슬에 그래프트시켰다. 이를 통해 가교반응이 일어나 라디칼 개시제로 인한 PLA



Scheme 1. The mechanism of PLA grafted with MA



Scheme 2. The mechanism of PLA grafted with MA and DVB

의 β -scission 반응이 억제된 고분자량의 상용화제 (high-molecular-weight maleic anhydride-grafted polylactic acids, HMMA-*g*-PLA)를 제조할 수 있었다 (Scheme 2)[11,12]. 조성에 따라 제조된 상용화제의 그래프팅율 (grafting yield)과 성형 가공성을 확인하기 위해 각각 역적정법과 Melt index (MI) 분석을 하였다. 또한, 제조된 HMMA-*g*-PLA의 반응 여부를 확인하기 위해 Fourier transform infrared (FTIR) 분석을 진행하였다. 그리고 HMMA-*g*-PLA를 목분, PLA, talc, UV 안정제와 함께 압출성형하여 WPCs를 제조하였다. 이렇게 제조된 WPCs의 기계적 물성인 굴곡강도와 충격강도를 측정하기 위해 각각 굴곡시험과 Charpy 충격시험을 실시하였다. 추가적으로 충격시험 후에 얻어진 WPCs의 파단면에 대해서 Scanning electron microscope (SEM)을 통한 모폴로지 분석을 통해 HMMA-*g*-PLA 상용화제의 도입에 따른 WPCs의 기계적 물성과의 상관관계를 알아보았다.

Table 1. The formulation of MA-*g*-PLA samples

Sample	PLA (wt%)	PK-14 (phr)	MA (phr)	DVB (phr)
I03M1	100	0.3	1	0
I03M2	100	0.3	2	0
I03M3	100	0.3	3	0

2. 본론

2.1 재료

본 연구에 사용된 목분은 원목 또는 목재 칩을 분쇄하여 얻은 것으로 입자의 크기가 평균 40 mesh인 것을 사용하였고, PLA는 Nature Works사의 4032D (MI=7 g/10 min at 210 °C, 2.16 kg)를 사용하였다. MA와 DVB는 각각 Aldrich사와 Samchun사에서 구입하였으며, 라디칼 개시제는 156 °C에서 반감기가 0.1 hr인 AkzoNobel사의 Perkadox 14 (di(tert-butylperoxyisopropyl)benzene) (PK-14)를 사용하였다. 또한, 무기 충전제로 talc를, UV에 의한 변색을 방지하기 위해 UV 안정제를 첨가하였다.

2.2 상용화제의 합성

PLA와 라디칼 개시제 및 MA를 Table 1의 조성대로 균일하게 혼합하였다. MA-*g*-PLA의 합성은 co-rotating

type의 이축 압출기 (Bautek, BA19, L/D=40, 19 Φ)를 사용하여 반응 압출 (용융 그래프팅 반응)하였다. 공정 스크루 속도는 150 rpm으로 설정하였으며, feeder부터 die까지의 온도는 165~190 °C로 설정하였다[13]. HMMA-*g*-PLA의 합성은 최적의 MA-*g*-PLA 조성에 DVB를 추가로 첨가하여 MA-*g*-PLA와 동일한 조건으로 반응 압출을 하였다.

2.3 PLA기반 WPCs의 제조

PLA기반 WPCs는 제조된 HMMA-*g*-PLA를 목분, PLA, talc, 그리고 UV 안정제와 함께 첨가하여 일축 압출기 (L/D=40, 30 Φ)에서 용융 블렌드하였다. 압출성형은 205~210 °C 공정 온도에서 50 rpm의 스크루 속도로 진행하여 펠렛 형태로 제조하였다. 이렇게 제조된 PLA기반 WPCs 펠렛을 195~270 °C의 온도와 100 kg/cm²의 압력으로 압출성형하여 최종적으로 WPCs를 제조하였다.

2.4 샘플 분석

제조된 MA-*g*-PLA 또는 HMMA-*g*-PLA의 그래프팅율은 역적정법을 이용하여 다음과 같이 측정하였다. 미반응된 MA는 아세톤 500 mL에 용해시켜 제거한 후 60 °C 건조기에서 24시간 건조하였다. 1.5 g의 샘플을 chloroform 200 mL에 용해시키고 1 M의 HCl 1.5 mL를 첨가하여 교반하였다. 이를 과량의 methyl alcohol에 침전시킨 후 침전물을 60 °C에서 24시간 건조하였다. 건조된 샘플 1 g을 100 mL의 chloroform에 완전히 용해시킨 후 phenolphthalein 지시약을 1~2 mL 첨가하였다. 이를 0.03 N KOH로 적정하여 다음의 식에 따라 그래프팅율을 계산하였다[13-15].

$$\text{Acid number} \left(\frac{\text{mg KOH}}{\text{g}} \right) = \frac{V \times C \times M_w}{W} \quad (1)$$

$$\text{Grafting yield}(\%) = \frac{\text{Acid number} \times 98.06}{2 \times 56100} \times 100(\%) \quad (2)$$

Eq. (1)에서 V, C, M은 각각 KOH의 부피 (mL), 몰농도 (mol/L), 화학식량 (g/mol)을 나타내며, W는 MA-*g*-PLA의 질량 (g)을 나타낸다. Eq. (2)에서 98.06은 MA의 분자량 (g/mol), 56100은 KOH (mg/mol)의

분자량을 나타낸다. MI는 Melt indexer (Tinius Olsen, MP600) 장비를 이용하여 ASTM D 1238 규격에 따라 210 °C, 2.16 kg에서 측정하였다. FTIR (Bruker, Alpha II)은 4000~400 cm⁻¹ 범위에서 스캔 수 16으로 측정하였다. WPCs의 굴곡강도는 UTM (Tinius Olsen, H5KT)을 이용하여 ISO 178 규격에 따라 측정하였다. WPCs의 충격 강도는 Charpy 충격시험기 (Zwick/Roell, PSW 750)를 이용하여 ISO 179-1의 규격에 따라 노치(notch) 없는 시험편으로 측정하였다. 굴곡강도와 충격 강도는 5개의 샘플을 측정하여 평균값을 구하였다. WPCs의 모폴로지를 확인하기 위해 SEM (Emcrafts, GENESIS-2000)을 이용하여 충격강도 측정 후에 얻어진 WPCs의 파단면을 금 코팅 후 3000배의 배율로 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 상용화제의 합성 및 반응

Fig. 1은 MA 함량에 따른 MA-*g*-PLA의 그래프팅율과 MI 결과를 나타낸 그래프이다. MA-*g*-PLA는 라디칼 개시제의 함량이 동일할 때, MA의 함량이 증가함에 따라 그래프팅율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 MA의 함량이 증가함에 따라 PLA에서 생성된 라디칼과 반응할 수 있는 MA의 수가 증가하였기 때문으로 판단된다. 또한, MA의 함량이 증가함에 따라 MA-*g*-PLA의 MI 값도 증가되는 경향을 보였다. 이는 MA가 PLA의 β-scission 반응을 촉진시킴에 따라 PLA의 분자량이 감

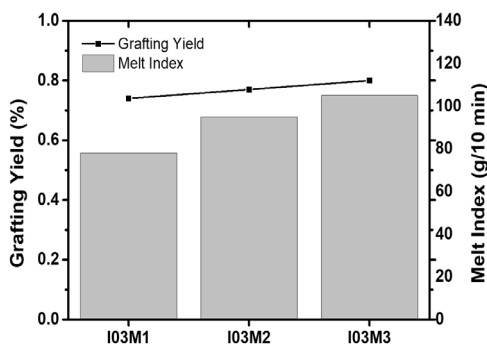


Fig. 1. Grafting yield and melt index of the MA-*g*-PLA with different addition amount of MA

소한 결과이다[16,17]. 이를 통해 MA함량이 증가할수록 MA-*g*-PLA의 그래프팅율은 약간 증가하지만, 분자량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 분자량이 가장 높아 기계적 물성이 우수할 것으로 예상되는 I03M1 조성에 DVB를 다양한 함량으로 첨가하여 고분자량의 HMMA-*g*-PLA를 제조하였다.

Table 2. The formulation of HMMA-*g*-PLA samples

Sample	PLA (wt%)	PK-14 (phr)	MA (phr)	DVB (phr)
I03M1D1	100	0.3	1	1
I03M1D2	100	0.3	1	2
I03M1D3	100	0.3	1	3

Fig. 2는 I03M1에 대해 DVB를 다양한 함량으로 첨가한 HMMA-*g*-PLA의 그래프팅율과 MI 결과를 나타낸 그래프이다. 이에 대한 조성은 Table 2에 나타났다. I03M1에 대해 DVB가 첨가된 모든 조성은 DVB가 첨가되지 않은 I03M1보다 높은 그래프팅율을 보였다. 또한, DVB 함량이 증가함에 따라 그래프팅율도 증가하는 경향을 보였는데, 이것은 DVB의 높은 반응성이 PLA와 MA 사이의 결합에 영향을 주었기 때문이다[9]. 반면, HMMA-*g*-PLA의 그래프팅율이 증가할 때, MI는 감소하는 경향을 보였다. 이는 DVB를 첨가함으로써, 가교 반응이 일어나 라디칼 개시제로 인한 β-scission 반응이 억제되었기 때문이다[18]. 제조된 HMMA-*g*-PLA 중에서 I03M1D3은 분자량이 가장 높아 기계적 물성이 가장 우수한 상용화제로 판단된다. 일반적으로 상용화제의 분자량이 높을수록 기계적 물성 증가에는 효과적이지만,

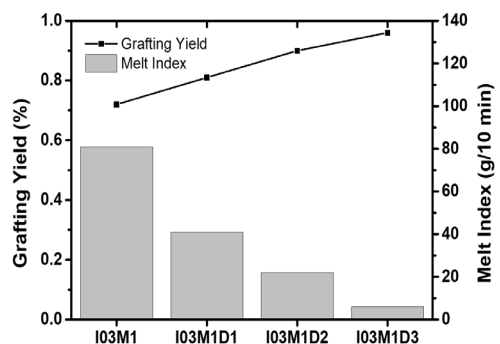


Fig. 2. Grafting yield and melt index of the HMMA-*g*-PLA with different addition amount of DVB

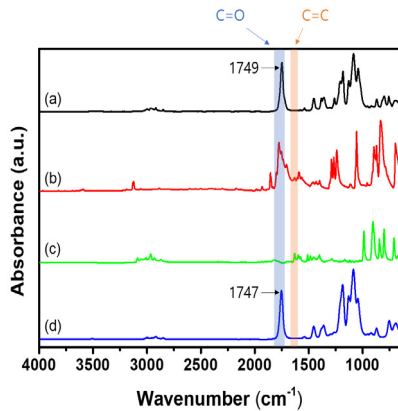


Fig. 3. FTIR spectra of (a) PLA (b) MA (c) DVB (d) HMMA-*g*-PLA

분자량이 매우 높을 경우 성형 가공성이 낮아져 압출 성형에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서, I03M1D2를 최적의 HMMA-*g*-PLA로 선정하였고, 이를 WPCs의 원료로 사용하였다.

HMMA-*g*-PLA의 PLA, MA, DVB의 반응여부를 확인하기 위해 FTIR 분석을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타냈다. PLA 수지는 1749 cm⁻¹에서 강한 C=O stretching peak를 보였다. 또한, MA는 1777 cm⁻¹에서 강한 C=O stretching peak를 보였고, 1631 cm⁻¹은 C=C stretching peak를 나타냈다[5]. 그리고 DVB의 1630 cm⁻¹은 C=C stretching peak를 나타냈다 [19,20]. 제조된 HMMA-*g*-PLA에서는 MA와 DVB에 존재하였던 C=C stretching peak가 관측되지 않았다. 이는 PLA, MA, DVB가 반응하는 과정에서 이중결합이 사라졌기 때문이다. 또한, HMMA-*g*-PLA는 1747 cm⁻¹에서 강한 peak가 나타났다. 이는 HMMA-*g*-PLA에서 PLA의 강한 C=O stretching peak가 그래프트된 MA의 영향으로 red shift 되었기 때문이다. 그러나, MA의 C=O stretching peak는 대부분을 차지하는 PLA의 강한 C=O stretching peak에 가려져서 관측되지 않은 것으로 보였다. 이러한 FTIR 결과를 통해 PLA에 MA와

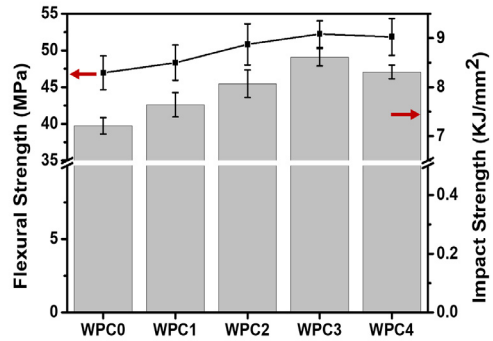


Fig. 4. Flexural strength and impact strength of WPCs

DVB가 성공적으로 그래프트되었음을 알 수 있었다.

3.2 WPCs의 기계적 물성

최적화된 HMMA-*g*-PLA가 도입된 WPCs의 굴곡강도와 충격강도에 대한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 이에 대한 WPCs의 조성은 Table 3에 나타냈다. HMMA-*g*-PLA가 첨가된 WPCs는 첨가되지 않은 WPC0과 비교하여 더 높은 굴곡강도와 충격강도를 보였다. 특히, WPC3은 굴곡강도와 충격강도가 각각 11%, 20% 상승하였다. 이는 HMMA-*g*-PLA의 도입으로 인한 PLA와 목분 사이의 계면 결합력이 강해져 상용성이 개선되었기 때문이다[21]. 하지만 HMMA-*g*-PLA가 4 phr 첨가된 WPC4는 3 phr 첨가된 WPC3보다 더 낮은 굴곡강도와 충격강도를 보였다. 이는 도입된 HMMA-*g*-PLA가 PLA 고분자 수지에 비해 상대적으로 분자량이 낮아 기계적 물성 개선에 한계가 있는 것으로 보인다.

3.3 WPCs의 모폴로지

HMMA-*g*-PLA가 첨가되지 않은 WPC0과 HMMA-*g*-PLA가 첨가된 WPCs 중, 기계적 물성이 가장

Table 3. The content of different raw materials in the WPCs

Sample	Wood fiber (wt%)	PLA (wt%)	HMMA- <i>g</i> -PLA (wt%)	Talc (wt%)	UV-stabilizer (phr)
WPC0	60	30	0	10	2
WPC1	60	29	1	10	2
WPC2	60	28	2	10	2
WPC3	60	27	3	10	2
WPC4	60	26	4	10	2

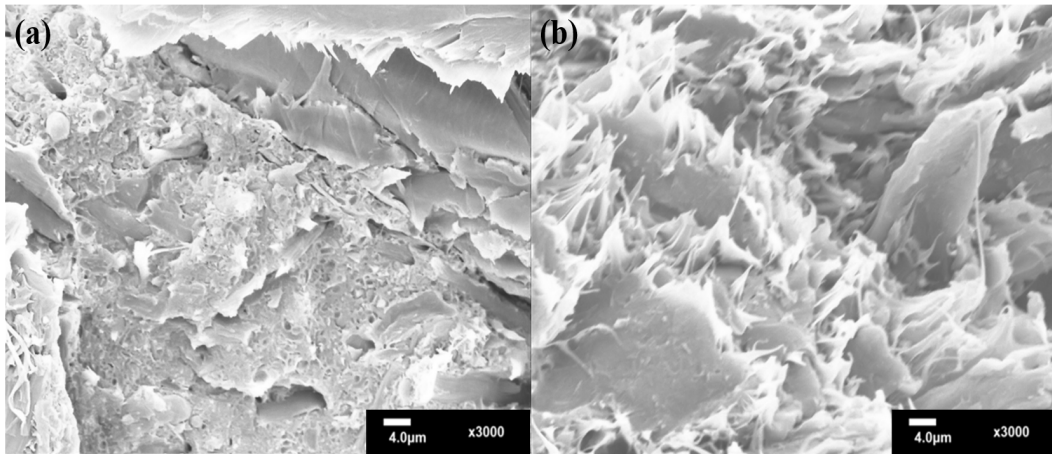


Fig. 5. SEM images of (a) WPC0 (b) WPC3

우수하였던 WPC3에 대해서 충격강도 측정 후 얻어진 파단면의 모폴로지를 SEM 분석을 통해 확인하였고, 이를 Fig. 5에 나타냈다.

HMMA-*g*-PLA가 첨가되지 않은 WPC0은 파단면이 매끄럽게 잘려 나간 것을 확인할 수 있었다. 반면, HMMA-*g*-PLA가 첨가된 WPC3의 파단면은 WPC0과 비교하였을 때, 거칠게 잘려 나간 것을 확인할 수 있었다. 이는 HMMA-*g*-PLA가 첨가되었을 때, PLA와 목분과의 계면 결합력이 증가하여 상용성이 개선되었기 때문이다 [5,9,10]. 이러한 결과는 Fig. 4에서 HMMA-*g*-PLA가 첨가된 WPCs의 굴곡강도와 충격강도가 WPC0보다 증가한 결과와 일치하였다. 따라서, HMMA-*g*-PLA의 도입은 PLA와 목분과의 상용성을 개선하였으며, 이로 인해 기계적 물성 개선에 큰 영향을 끼칠 수 있었음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 PLA와 목분과의 상용성 개선을 위해 바이오 플라스틱인 PLA에 MA를 극성기로, 그리고 DVB를 가교제로 도입하여 고분자량의 HMMA-*g*-PLA 상용화제를 제조하였고, 그래프팅을, MI, FTIR 분석으로 이의 특성을 확인하였다. 제조된 고분자량의 HMMA-*g*-PLA 상용화제를 이용하여 PLA기반 WPCs를 제조하였고, 이들의 굴곡강도와 충격강도가 상용화제를 도입하기 전보다 각각 최대 11%, 20% 증가한 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 SEM 분석을 통해 PLA와 목분과의 계면 결합

력의 증가로 상용성이 개선되었기 때문이었다. 하지만 일정 이상 과량으로 HMMA-*g*-PLA 상용화제가 도입된 경우에는 오히려 굴곡강도와 충격강도 물성이 감소하였다. 이는 상용화제가 PLA와 목분과의 상용성을 개선시켰으나, 도입된 HMMA-*g*-PLA의 분자량이 기본적으로 PLA에 비해 상대적으로 낮아 기계적 물성 개선에는 한계가 있었음을 알 수 있었다.

References

- [1] J. Hong, D. S. Kim, "Effects of Coupling Agents and Nanosilicas on the Physical Properties of PVC/Wood Flour Composites", *Polymer (Korea)*, Vol.39, No.4, pp.643-648, Jul. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.7317/pk.2015.39.4.643>
- [2] D. Lee, B. J. Kim, "A Study on the Mechanical, Thermal, Morphological, and Water Absorption Properties of Wood Plastic Composites (WPCs) Filled with Talc and Environmentally-Friendly Flame Retardants", *Journal of the Korea Furniture Society*, Vol.27, No.2, pp.137-144, Apr. 2016.
- [3] J. W. Han, S. W. Cha, B. J. Jeon, K. S. Lee, "Characteristics of woodpowder-composite polymer in microcellular foaming process", *KSAE 2009 Annual Conference and Exhibition*, Korea, pp.2597-2601, Nov. 2009.
- [4] Y. S. You, Y. S. Oh, S. H. Hong, S. W. Choi, "International trends in development, commercialization and market of bio-plastics", *Clean Technology*, Vol.21, No.3, pp.141-152, Sep. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.7464/ksct.2015.21.3.141>
- [5] L. Zhang, S. Lv, C. Sun, L. Wan, H. Tan, Y. Zhang,

- "Effect of MAH-*g*-PLA on the properties of wood fiber/poly(lactic acid) composites.", *Polymers*, Vol.9, No.11, pp.591, Nov. 2017.
- [6] J. Moon, M. H. Kim, Y. T. Lee, H. H. Lee, Y. H. Rho, "Study on the Biodegradable ability of Biodegradable Plastics PLA(Poly(lactic acid)) by composting", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.4, pp.596-605, Apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.4.596>
- [7] H. S. Choi, Y. Lee, Y. H. Kim, "Characteristics of Cellulose Acetate-*g*-Poly(L-lactic Acid) (CA-*g*-PLA) and Its Application as a Compatibilizer for CA/PLA Blends", *Polymer (Korea)*, Vol.44, No.3, pp.309-317, May. 2020. DOI: <https://doi.org/10.7317/pk.2020.44.3.309>
- [8] D. Carlson, L. Nie, R. Narayan, P. Dubois, "Maleation of polylactide (PLA) by reactive extrusion", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.72, No.4, pp.477-485, Feb. 1999. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990425\)72:4<477::AID-APP3>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990425)72:4<477::AID-APP3>3.0.CO;2-Q)
- [9] S. Yi, S. Xu, Y. Fang, H. Wang, Q. Wang, "Effects of matrix modification on the mechanical properties of wood-polypropylene composites", *Polymers*, Vol.9, No.12, pp.712, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym9120712>
- [10] B. S. Park, D. S. Kim, "Effects of coupling agents and clay on the physical properties of wood flour/polyethylene composites", *Polymer (Korea)*, Vol.35, No.2, pp.124-129, Mar. 2011.
- [11] B. R. Sheng, B. H. Xie, W. Yang, Q. G. Li, M. B. Yang, "Structure and properties of reactive extruded ethylene-block-co-polypropylene: Influence of dicumyl peroxide and divinylbenzene", *Journal of Macromolecular Science, Part B*, Vol.47, No.6, pp.1236-1250, Oct. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/00222340802403479>
- [12] S. Al-Malaika, E. Eddiyanto, "Reactive processing of polymers: Effect of bifunctional and tri-functional comonomers on melt grafting of glycidyl methacrylate onto polypropylene", *Polymer degradation and stability*, Vol.95, No.3, pp.353-362, Mar. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.006>
- [13] J. E. Lee, H. E. Kim, B. U. Nam, "Preparation of MA-PLA Using Radical Initiator and Miscibility Improvement of PLA/PA11 Blends" *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol.20, No.4, pp.76-85, Apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.4.76>
- [14] J. M. García-Martínez, S. Areso, E. P. Collar, "The transient nature of maximum maleic anhydride grafting of polypropylene: A mechanistic approach based on a consecutive reaction model. II. A comparison of the batch solution and molten state processes" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.104, No.1, pp.345-351, Jan. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.24458>
- [15] J. Wootthikanokkhan, P. Kasemwananimit, N. Sombatsompop, A. Kositchaiyong, S. Isarankura na Ayuthaya, N. Kaabuuathong, "Preparation of modified starch-grafted poly (lactic acid) and a study on compatibilizing efficacy of the copolymers in poly (lactic acid)/thermoplastic starch blends", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.126, No.S1, pp.E389-E396, Apr. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.36896>
- [16] B. U. Nam, Y. G. Son, "Enhanced impact strength of compatibilized poly (lactic acid)/polyamide 11 blends by a crosslinking agent" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.137, No.35, pp.49011, Sep. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.49011>
- [17] F. Berzin, J. J. Flat, B. Vergnes, "Grafting of maleic anhydride on polypropylene by reactive extrusion: effect of maleic anhydride and peroxide concentrations on reaction yield and products characteristics" *Journal of Polymer Engineering*, Vol.33, No.8, pp.673-682, Oct. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1515/polvorg-2013-0130>
- [18] S. A. Mousavi-Saghandikolaei, M. Frounchi, S. Dadbin, S. Augier, E. Passaglia, F. Ciardelli, "Modification of isotactic polypropylene by the free-radical grafting of 1, 1, 1-trimethylolpropane trimethacrylate" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.104, No.2, pp.950-958, Jan. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.25796>
- [19] F. Xie, W. Hu, L. Ding, K. Tian, Z. Wu, L. Li, "Synthesis of microporous organic polymers via radical polymerization of fumaronitrile with divinylbenzene" *Polymer Chemistry*, Vol.8, No.39, pp. 6106-6111, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7PY01240C>
- [20] J. I. Lee, J. W. Bae, S. L. Kim, J. E. Hong, B. U. Nam, "Study on Impact Resistance, Wear Resistance and Crystallization Kinetics of Polypropylene Modified by Complex Crosslinkers", *Polymer (Korea)*, Vol.44, No.5, pp.603-609, Sep. 2020. DOI: <https://doi.org/10.7317/pk.2020.44.5.603>
- [21] N. S. Yatigala, D. S. Bajwa, S. G. Bajwa, "Compatibilization improves physico-mechanical properties of biodegradable biobased polymer composites" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.107, pp.315-325, Apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.01.011>

한 동 헌(Dong-Heon Han)

[준회원]



- 2020년 8월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 석박사 통합과정

<관심분야>

수소연료전지 고분자 전해질막

이 종 인(Jong In Lee)

[준회원]



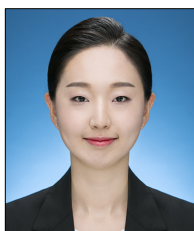
- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 석사과정

<관심분야>

고분자 가공 및 합성, 친환경 소재

오 승 주(Seung-Ju Oh)

[준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 석사과정

<관심분야>

차세대 스트레처블 디스플레이소재, 카메라 렌즈소재, 고신축/고유연 에너지하베스팅소재

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

배 진 우(Jin Woo Bae)

[정회원]



- 1998년 3월 ~ 2004년 8월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2004년 9월 ~ 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 교수

<관심분야>

고분자 센서, 액츄에이터, 연료전지 및 에너지하베스팅