



이축 압출공정을 이용한 Wood Polymer Composite의 제조 및 특성 분석

이종혁·이병갑·박기훈·방대석[†]·지광환*·신민철**

금오공과대학교 고분자공학전공

*금오공과대학교 응용화학과, **한국티알(주)

접수일(2011년 7월 22일), 수정일(2011년 8월 4일), 게재확정일(2011년 8월 10일)

Preparation and Characterization of Wood Polymer Composite by a Twin Screw Extrusion

Jonghyeok Lee, Byunggab Lee, Kihun Park, Daesuk Bang[†],
Kwang-Hwan Jhee*, and Mincheol Sin**

Department of Polymer Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
Yangho-dong, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea

*Department of Applied Chemistry, Kumoh National Institute of Technology,
Yangho-dong, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea

**Korea TR Co. Ltd., Jangan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 445-944, Korea
(Received July 22, 2011, Revised August 4, 2011, Accepted August 10, 2011)

요약 : Wood Polymer Composite(WPC)는 우수한 물성 및 가공성과 더불어 자원재활용 및 벌목규제 대응 등의 환경적인 측면에서 각광을 받고 있는 재료이다. 본 연구에서는 이축스크류식 치합형 압출기를 이용하여 상용화 WPC를 제조하였다. WPC의 물성에 영향을 미치는 세 가지 주요 실험 변수 즉 목분의 함량, coupling agent의 함량 그리고 목분의 전처리 영향을 자세히 관찰하였다. 목분의 함량에 따른 WPC의 물성변화는 목분함량이 증가함에 따라 인장강도와 열안정성이 감소하고, 수분흡수성이 증가하는 것이 관찰되었다. PP-g-MA 첨가 시 기계적 물성은 향상되고, 수분흡수성이 감소하는 것이 관찰되었다. 목분을 전처리하여 제조한 시편에서는 가장 높은 인장강도의 향상을 나타냈지만, 셀룰로스의 결정구조 변화로 수분흡수성이 증가하는 것이 확인되었다.

ABSTRACT : Wood Polymer Composite (WPC) has attracted a great deal of attention in environmental industries due to renewable resources, processability, excellent physical properties and logging regulations for application to housing units and engineering construction materials. In this study, commercial WPCs were prepared by using a modular intermeshing co-rotating twin screw extruder. The effect of three main factors such as wood flour contents, coupling agent concentrations and pre-treatment of wood flour on the properties of WPCs was extensively investigated. It was found that tensile strength and thermal stability were decreased with increasing wood flour contents whereas the water absorption was increased. Addition of maleic anhydride grafted polypropylene (PP-g-MA) into WPC exhibited better physical properties. On the contrary, the water absorption was slightly decreased with PP-g-MA. Finally the sample, which was prepared with pre-treated wood flour, represented the highest tensile strength. However, the water absorption of the sample was increased due to the transition of crystalline structure of cellulose.

Keywords : wood polymer composite, twin screw extrusion, natural fiber reinforced composite, coupling agent, surface treatment, water absorption

I. 서 론

최근 전 세계적으로 무분별한 목재 벌목에 의해 지구온난화 현상이 가속화 되고 있다. 한편 연간 약 300만 톤의 목재폐기물이 발생하고 2020년에는 약 400만 톤 이상이 발생될 우려가

[†] 대표저자 E-mail: dsbang@kumoh.ac.kr

있다는 보고가 있다.¹ 또한 부식이나 병충해에 의한 피해를 예방하고자 방부처리한 목재에서는 비소, 크롬 등의 중금속이 다량 검출되면서 사회적으로 큰 문제가 되고 있다. 이러한 현상들에 의해 환경오염이 날로 심화되고 있으며, 그에 따라 벌목규제 강화에 대한 대응, 폐목재 처리, 기존 방부목 소재 대체에 대한 연구개발의 필요성이 증대되고 있다.

Wood Polymer Composite(WPC)는 위와 같은 요구들에 완벽히 부합되는 재료로서 천연고분자 구조체인 목재와 합성고분자의 복합화를 통해 목재에 플라스틱의 성질을 부여한 재료이다. WPC는 기존 목재와 비교하여 우수한 기계적 강도와 치수 안정성 및 가공성뿐만 아니라 흡수에 의한 부식이나 병충해에 의한 피해가 없어 유지 및 보수 비용이 필요하지 않다는 점등을 장점으로 점차 시장을 확대해 나가고 있다. WPC에 관한 연구개발은 미국을 중심으로 1980년대부터 진행되어 그에 따라 해외 선진국의 경우 시장성숙단계인 반면 우리나라는 관련 기술의 미비함으로 인해 최근에서야 시장이 형성되고 있는 단계이며, 제품의 수입 및 기술이전 등에 의해 해마다 많은 양의 외화가 낭비되고 있어 제품 및 기술에 대한 연구개발이 시급한 실정이다.

현재 WPC에 대한 연구개발은 주로 WPC의 물성을 개선시키기 위한 방법들이 주를 이루고 있으며, 특히 목분을 전처리하여 추출물을 제거한 후에 필러로 사용하는 방법,² 반응성을 도입하여 소수성 고분자와 친수성 목질재료간의 계면결합력을 향상시키는 방법,³ 보강재를 첨가하여 매트릭스 자체의 보강효과에 의해 WPC의 물성을 향상시키는 방법^{4,5} 등의 연구가 활발히 진행되고 있고, 최근에는 자원재활용적인 측면에서 접근하여 재생수지 및 폐목재를 적용한 연구^{6,7}들이 각광을 받고 있다.

그러나 현재 진행되고 있는 연구개발 결과의 경우 직접적으로 산업현장에 적용되어 제품에 응용되기까지는 아직 많은 시간이 소요되는 기술들이며, 실제 산업현장의 경우 이러한 기술 보다는 제품제조에 직접적으로 필요한 최적의 재료 준비 방법 및 함량 설정 등의 근본적인 제조 기술의 확립이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 이축스크류식 압출기를 이용하여 WPC를 제조할 경우 물성에 영향을 줄 수 있는 세가지 요건에 대한 실험을 진행하였으며, 실험 변수를 목분함량, coupling agent 함량 그리고 목분의 전처리 효과로 설정하여 각 제조 formulation별로 시편의 물성을 비교하였다.

II. 실험

1. 재 료

고분자 매트릭스는 삼성토탈 HY300 Grade Homo-Polypropylene (MI = 3.9 g/10 min, Density = 0.91 g/cm³)을 사용하였으며, 목분은 독일 Jeru-werk사의 JERUXYL[®] granule 타입을 구입하

여 분쇄한 후 100-150 mesh의 목분을 선별하여 사용하였다. Coupling agent는 호남석유화학의 CM-1120W PP-g-MA (maleic anhydride grafted polypropylene)를 사용하였으며, 목분의 전처리에는 NaOH 수용액을 사용하였다.

2. 샘플 제조

2.1 NaOH 처리

분쇄 후에 선별한 100-150 mesh의 목분을 전처리하기 위해 2 wt% NaOH 수용액에 목분을 12:1 중량비로 함침시켜 1시간 동안 mechanical stirrer로 교반하였으며, 교반 종료 후에 다시 적정 pH를 맞추기 위해 증류수로 세척하였다.

2.2 WPC 제조

Modular Intermeshing Co-rotating Twin Screw Extruder(LG Machinery, MT-30-S2-42C, Φ 30, L/D=42)를 이용하여 WPC를 제조하였다. 제조 Formulation(Table 1)에 따른 물성의 변화를 측정하기 위하여 목분의 함량을 30-60 wt%로 변화하였고, coupling agent의 함량에 따른 물성변화를 알아보기 위해 목분의 함량은 WPC의 제품 적용기준인 50 wt%로 고정하고 PP-g-MA의 함량을 2-4 wt%로 하여 제조하였다. 또한 목분의 전처리 효과를 알아보기 위해 NaOH 수용액으로 추출물을 제거한 전처리목분 50 wt% WPC와 전처리목분 50 wt%에 PP-g-MA를 3 wt% 첨가한 WPC를 제조하였다. 압출조건은 Table 2에 표기한 것과 같이, hopper에서 die까지 온도를 130-190 °C로 설정하였으며, screw rpm은 100 rpm, feed rate는 5.2 kg/h로 설정하였다. 압출되어 나온 WPC를 냉각수조에서 수냉시키지 않고, 공기 중에서 자연 냉각 후에 pelletizer를 이용해 WPC pellet을 제조하였다.

Table 1. WPC Formulations

	Polypropylene (wt%)	Woodflour (wt%)	PP-g-MA (wt%)
wood30	70	30	
wood40	60	40	
wood50	50	50	
wood60	40	60	
wood50/MA2	48	50	2
wood50/MA3	47	50	3
wood50/MA4	47	50	4
NaOHWood50	50	50(NaOH treated)	
NaOHWood50/MA3	47	50(NaOH treated)	3

Table 2. Conditions of Extrusion and Injection Molding Processes

Extrusion			
Temperature (°C)			
Cy1	130	Screw speed	100 rpm
Cy2	140		
Cy3	150	Feed rate	5.2 kg/h
Cy4	160		
Cy5	160		
Cy6	170	Screw configuration	3-Kneading block
Cy7	180		
Head	190		
Die	190		
Injection molding			
Temperature (°C)			
Cy1	130	Injection pressure	70 kg _f /cm ³
Cy2	140		
Cy3	150	Holding pressure	30 kg _f /cm ³
Cy4	160		
Cy5	160	Cooling time	30 second

2.3 시편 제조

시편제조에는 사출성형기(Pro-WD80, Dongshin Hydraulics Co., Ltd., Korea)를 사용하였다. 사출조건(Table 2)은 hopper에서 nozzle까지 160-190 °C로 설정하였으며, 금형은 상온으로 유지하였고, 냉각시간은 30초로 설정하였다. ASTM D638 및 D256 규격에 따른 금형을 이용하여 각각 인장강도와 충격강도 시험용 시편을 제조하였다.

3. 특성분석

3.1 기계적 특성

만능시험기(UTM, Instron 4467)를 이용하여 ASTM D638 규격에 따라 시편의 인장강도를 측정하였으며, load cell은 30 kN을 사용하였고, crosshead speed는 50 mm/min로 설정하였다. 충격시험기(Tinius Olsen, Model 892)를 이용하여 ASTM D256 규격에 따라 시편 중앙부위의 두께가 10.16 ± 5 mm가 되도록 notch를 제작한 후에 notched Izod impact test를 실시하였다.

3.2 TGA

열중량분석기(TGA, Q500, TA Instruments)를 이용하여 각 시편의 열안정성을 분석하였으며, 질소 분위기 하에서 20-600 °C까지 분당 20 °C의 승온속도로 열을 공급하여 온도변화에 따른 시편의 중량감소를 측정하였다.

3.3 모폴로지

주사전자현미경(SEM, JEOL, JSM 6380)을 이용하여 각 시편의 파단면을 관찰하였으며, 일반 목분과 전처리 목분의 표면을 비교 관찰하였다.

3.4 수분흡수성 시험

ASTM D570 규격에 따라 시편을 2 시간 및 24 시간 침지시킨 후에 중량 변화를 기록하여 각 시편의 수분흡수성을 측정하였으며, 흡수성 수치는 아래와 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Water Absorption (\%)} = \frac{\text{Wet Weight} - \text{Dry Weight}}{\text{Dry Weight}} \times 100$$

III. 결과 및 고찰

1. 기계적 특성

1.1 인장강도

목분함량에 따른 시편의 인장강도 변화를 Figure 1에 나타내었다. 목분이 첨가된 시편의 경우 Neat PP보다 더 낮은 인장강도를 나타냈으며, 목분의 함량이 증가할수록 인장강도가 감소하는 결과가 나타났다. 이러한 결과는 소수성 PP와 친수성 목분의 계면결합력이 좋지 않아 목분이 충분한 보강재 역할을 하지 못하고 WPC 내에서 불순물로 작용한 것으로 사료되며, 따라서 불순물로 작용한 목분의 함량이 증가할수록 시편의 인장강도가 감소하는 결과가 나타난 것이라고 볼 수 있다.⁸

반면 coupling agent, PP-g-MA의 함량별 시편의 인장강도 변화 그래프(Figure 2)에서는 PP-g-MA 첨가 시 neat PP보다 더

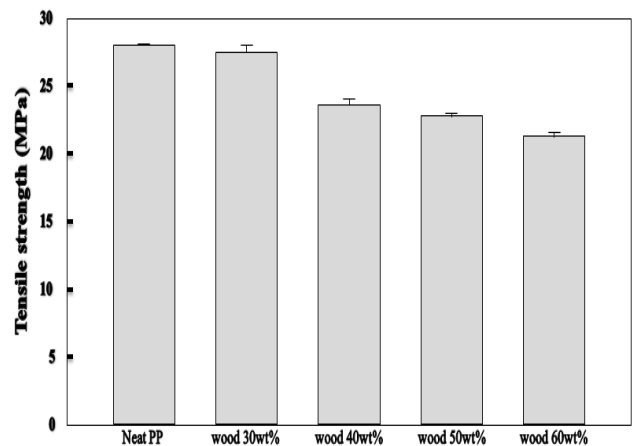


Figure 1. Tensile strength of WPCs with different wood flour loadings.

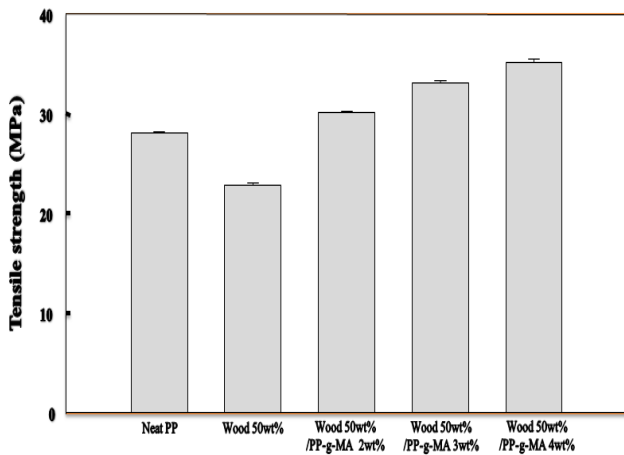


Figure 2. Tensile strength of WPCs with different PP-g-MA loadings.

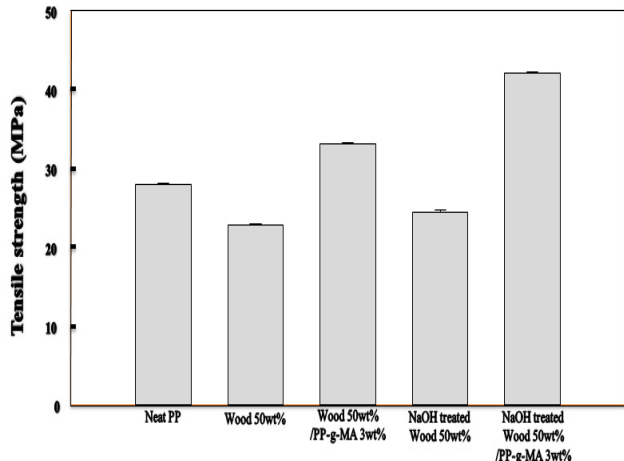


Figure 3. Tensile strength of WPCs with NaOH treated wood flour.

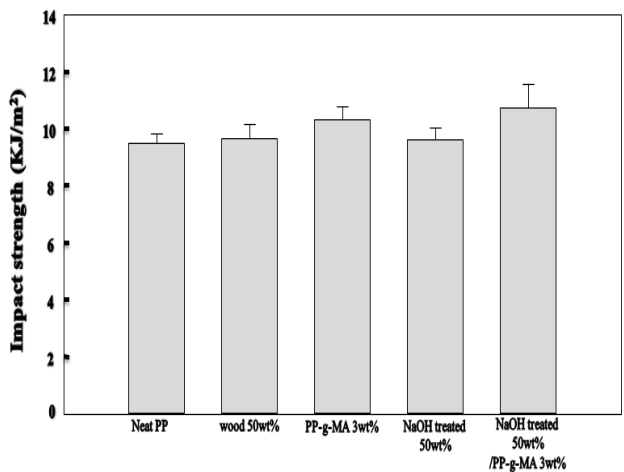


Figure 4. Impact strength of WPCs with NaOH treated wood flour.

높은 인장강도를 나타냈으며, PP-g-MA의 함량이 증가할수록 인장강도가 향상되는 것이 관찰되었다. 이러한 결과는 PP-g-MA의 anhydride group과 목분 표면에 존재하는 친수성 hydroxyl group이 esterification 반응을 진행하여 목분에 존재하는 친수성기가 감소하였으며, 그에 따라 PP와 목분의 계면결합력이 향상되어 목분이 충분한 보강재 역할을 하였기 때문으로 사료된다.⁹

Figure 3에서는 목분의 전처리 효과에 의한 인장강도의 변화를 보여주며 전처리 목분 50 wt%의 시편의 경우 전처리를 하지 않은 동일함량 시편에 비해 더 높은 인장강도를 나타냈다. 이러한 결과는 NaOH 수용액에 의해 목분에서 셀룰로스를 제외한 물질들이 추출되었으며, 그에 따라 압출 및 사출가공 온도인 190 °C 이전에서 분해되어 휘발성 기체를 발생시킬 수 있는 물질들이 감소하였기 때문이다. 목분에서 휘발성 기체를 발생시키는 물질의 추출은 최종제품의 공극을 감소시켜 기계적 물성 향상에 긍정적인 영향을 미친다. 또한 전처리 목분을 사용하고 PP-g-MA를 3 wt% 첨가한 시편에서 가장 우수한 인장강도의 향상을 나타내었다. 그 이유는 추출물 제거에 의해 상대적으로 셀룰로스나 PP의 계면접촉면적이 증가하였으며, 새로운 반응기가 도입됨에 따라 계면결합력 향상에 복합적으로 긍정적인 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.¹⁰

1.2 충격강도

시편의 충격강도 시험결과를 Figure 4에 나타냈다. 인장강도 시험 결과와 달리 목분 함량에 따른 시편의 충격강도는 큰 차이가 없이 거의 유사하게 나타나는 것으로 확인되었으며, 목분 함량이 증가할수록 시편의 취성(brittleness) 감소에 의해 충격강도가 약간 향상되는 것이 관찰되었다. PP-g-MA 첨가와 목분 전처리 효과에 따른 시편의 충격강도의 변화는 PP-g-MA 첨가에 의해 충격강도가 약간 향상되는 것이 관찰되었으며, 전처리 목분을 사용한 경우에도 일반 목분을 사용한 경우와 비교하여 충격강도가 약간 향상되었다. 이러한 결과는 앞서 기술한 바와 같이, 시편내부의 PP와 목분의 계면결합력 향상에 기인한 것이라 볼 수 있다.

2. 열적 특성

TGA를 이용한 시편의 열안정성 분석결과를 Figure 5, 6 그리고 7에 나타내었다. Figure 5에서 neat PP와 전처리 전-후의 목분의 중량감소를 비교해 보면, neat PP는 약 450 °C 부근부터 급격한 중량감소를 나타냈으며, 목분은 약 300 °C 부근부터 중량감소를 나타냈고, Neat PP보다 높은 약 20%의 최종 잔류량을 나타냈다. Figure 6에서 보는 바와 같이, 전처리를 하지 않은 목분 함량별 WPC의 중량감소를 보면 두 물질의 개별적인 분해에 의해 중량감소가 두 단계에 걸쳐 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 상대적으로 열에 약한 목분의 함량이 증가

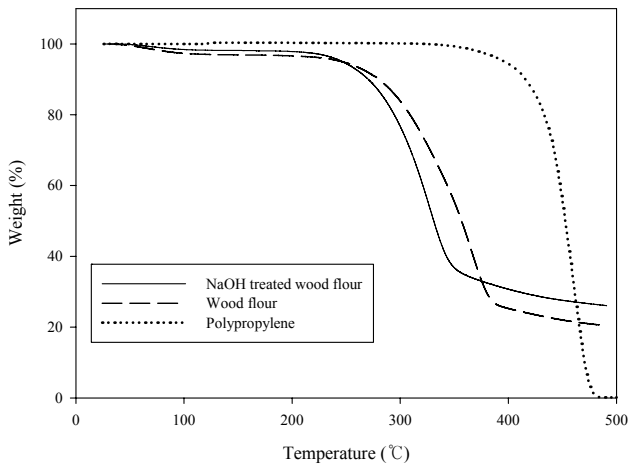


Figure 5. TGA curves of neat polypropylene and wood flours with and without NaOH treatment.

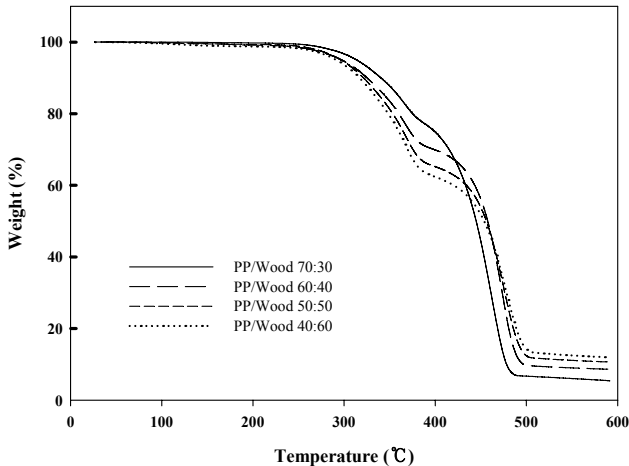


Figure 6. TGA curves of WPCs with increasing wood flour loading.

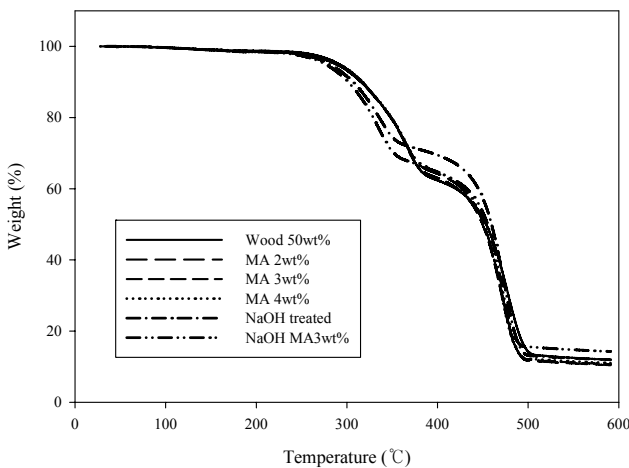


Figure 7. TGA curves for WPCs with 2, 3 and 4wt% PP-g-MA and NaOH treated wood flour.

할수록 초기분해온도는 감소하였으나, 목분에서 형성되는 char에 의해 최종 잔류량은 증가하는 것이 관찰되었다.¹¹ Figure 7에 PP-g-MA를 첨가한 시편과 전처리 목분을 사용한 시편의 중량감소를 나타내었고 PP-g-MA를 첨가한 시편의 경우 열안정성에는 큰 변화가 나타나지 않았으나 전처리 목분을 사용한 시편의 경우 다른 시편들과 비교하여 초기분해온도가 감소하고 목분 분해단계가 종료되는 지점에서 더 높은 잔류량을 나타내는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 일반 목분과 전처리 목분의 중량감소 거동 차이에 의한 것이라고 볼 수 있다. 두 가지 목분의 중량감소를 보면 NaOH 수용액 전처리 목분의 경우 셀룰로스를 제외한 성분들이 추출되어 상대적으로 셀룰로스가 열을 받는 면적이 증가하였기 때문에 초기분해온도가 감소하는 결과가 나타난 것이며, 열에 의해 분해되어 휘발성 기체를 발생시킬 수 있는 물질이 감소하였기 때문에 최종 잔류량은 증가한 것이라고 볼 수 있다.

3. 모폴로지

Figure 8은 시편의 파단면을 SEM으로 관찰한 사진이다. (a) 사진의 경우 목분의 돌출이나 파단 시 목분의 분리에 의해 형성된 기공의 관찰 빈도가 높게 나타났지만 (b) 사진에서는 이러한 현상의 발생 빈도가 감소하였음을 확인할 수 있으며, 이를 통해 PP-g-MA 첨가 시 계면결합력의 향상을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 전처리 목분을 사용한 시편(c), (d)의 관찰에서도 동일한 경향성을 나타냈다. Figure 9는 SEM을 이용한 전처리 하지 않은 일반 목분과 NaOH 수용액으로 전처리한 목분의 표면 비교 사진이다. 일반 목분의 경우(a) 표면에 작은 이물질들이 붙어있는 형상을 확인할 수 있지만, NaOH로 전처리한 목분의 표면(b)에서는 이러한 이물질들이 세척되는 효과를 확인할 수 있다.¹⁰

4. 수분 흡수

각 시편의 수분 흡수성 수치를 Table 3에 나타냈다. 각 시편의 흡수성 수치는 2시간 함침시험과 24시간 함침시험에서 수치만 증가하였을 뿐 동일한 경향성을 나타냈다. 우선 친수성 목분의 함량이 증가할수록 흡수성 수치도 함께 증가하는 것이 관찰되었으며, PP-g-MA 첨가 시 계면결합력 향상에 의해 흡수성 수치가 감소하였다. 전처리 목분을 사용한 경우 다른 시편들에 비해 가장 높은 흡수성 수치를 나타내었다. 셀룰로스는 친수성을 가지고 있지만 결정성 구조로 인해 수분의 흡수가 일어나지 않으며, 리그닌은 비결정성 구조이지만 소수성이기 때문에 흡수가 일어나지 않는다. 반면 헤미셀룰로스는 친수성을 가지고 있으며, 비결정성 구조로 수분의 흡수가 일어난다.^{10,12} 목분을 NaOH로 전처리하면 셀룰로스를 제외한 헤미셀룰로스, 리그닌 등의 성분들이 추출되며, 따라서 흡수

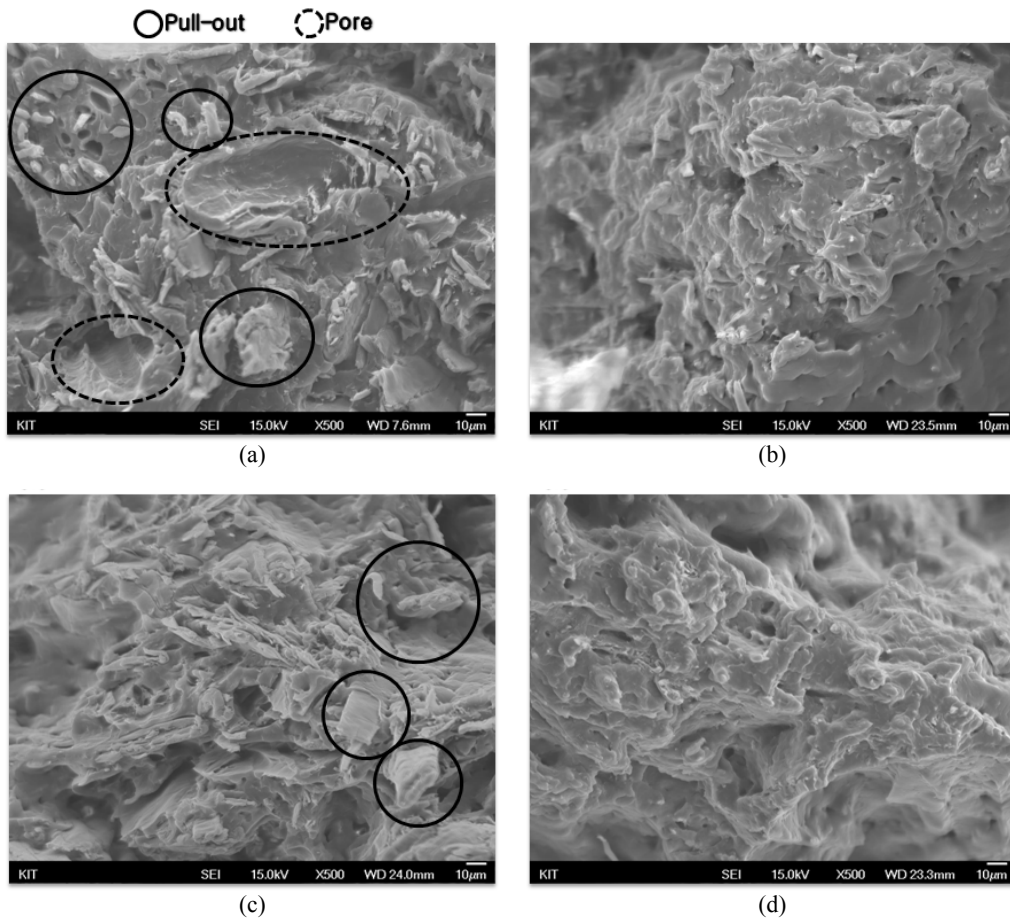


Figure 8. SEM micrographs of fracture surfaces of WPCs. (a) PP:wood flour = 50:50(wt%), (b) PP:wood flour:PP-g-MA = 47:50:3(wt%), (c) PP:NaOH treated wood flour = 50:50(wt%), and (d) PP:NaOH treated wood flour:PP-g-MA = 47:50:3(wt%).

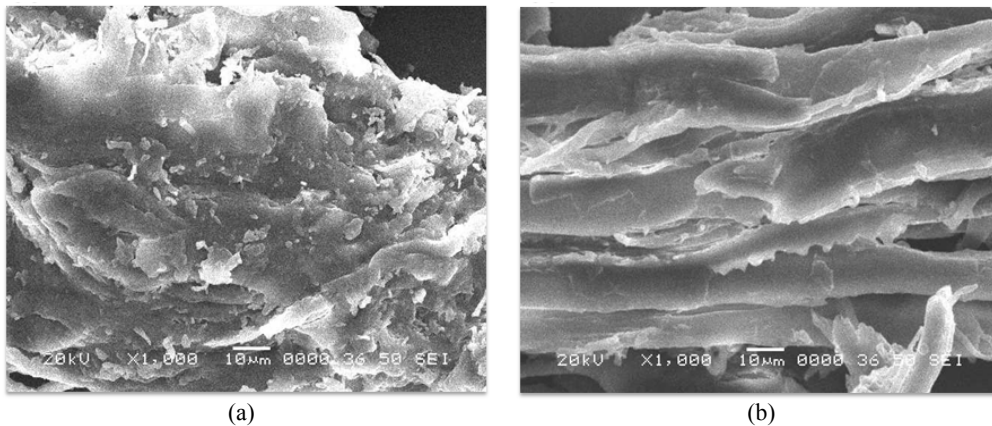


Figure 9. SEM micrographs of wood flour surfaces. (a) Untreated wood flour and (b) NaOH treated wood flour.

성에 관여하는 헤미셀룰로스의 감소로 인해 흡수성 수치가 감소하여야 하지만 본 연구에서는 전처리 목분을 사용한 시편에서 흡수성 수치가 증가하는 결과가 나타났다. 이러한 결과가 나타난 이유는 NaOH 전처리 시 swelling에 의해 셀룰로스의 결정구조가 변화되었기 때문이라고 볼 수 있다. 셀룰로스

는 완벽한 결정성 구조로 일반적인 상태에서는 물분자의 침투가 일어날 수 없지만 화학적 개질에 의해 결정구조가 변화될 경우 수분의 흡수가 일어날 수 있다.^{10,13}

Table 3. Water Absorption of WPCs

	2h immersed	2h immersed
Wood flour 30wt%	0.118	0.234
Wood flour 40wt%	0.146	0.387
Wood flour 50wt%	0.269	0.696
Wood flour 60wt%	0.398	0.951
Wood flour 50wt%/PP-g-MA 2wt%	0.265	0.654
Wood flour 50wt%/PP-g-MA 3wt%	0.240	0.598
Wood flour 50wt%/PP-g-MA 4wt%	0.229	0.585
NaOH treated Wood flour 50wt%	0.384	0.889
NaOH treated Wood flour 50wt%/PP-g-MA 3wt%	0.280	0.630

IV. 결 론

본 연구에서는 현장에서 이축 스크류식 압출기로 WPC 제조 시 WPC 물성에 영향을 줄 수 있는 세 가지 요인에 대한 실험을 진행하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 목분 함량에 따른 WPC의 물성변화는 목분의 함량이 증가할수록 목분이 불순물 역할을 하여 인장강도가 감소하는 결과가 나타났으며, 상대적으로 열에 약한 목분의 함량이 증가함에 따라 열안정성 역시 감소하는 결과가 관찰되었다. 또한 흡수성 시험에서는 친수성 목분의 함량이 증가함에 따라 흡수성도 함께 증가하는 결과가 나타났다. Coupling agent, PP-g-MA의 함량에 따른 WPC의 물성변화는 PP-g-MA의 함량이 증가할수록 계면결합력 향상에 의해 기계적 강도가 향상되고 흡수성이 감소하는 것이 관찰되었으며, SEM을 이용한 시편 파단면의 분석결과에서 계면결합력의 향상을 확인하였다. 목분의 전처리 효과를 확인한 실험에서는 목분 표면을 SEM으로 관찰하여 NaOH에 의한 표면세척효과를 확인하였으며, TGA 분석결과에서도 휘발성 기체의 감소로 인한 최종잔류량의 증가를 확인하였다. 전처리 목분을 사용한 시편의 경우 계면접촉면적의 증가와 가공 중 발생할 수 있는 휘발성 기체의 감소에 의해 더 우수한 기계적 물성을 나타냈지만 흡수성 시험 결과 NaOH 전처리 시 swelling에 의해 셀룰로스의 결정구조의 변화로 더 높은 흡수성 수치를 나타내었다.

본 실험들을 통하여 WPC 물성에 영향을 줄 수 있는 세 가지 요인에 대한 물성변화를 확인하였으며, coupling agent의 첨가 및 목분의 전처리를 통하여 현재 WPC의 상용제품 제조 기준인 목분 50 wt% 이상이 첨가된 시편에서의 물성향상 가능성을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 지원된 논문이므로 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 폐목재 관리체계 개선 및 재활용 활성화 방안 연구, 환경부, 2007. 11.
2. L. Danyadi, J. Moczo, and B. Pukanszky, "Effect of various surface modifications of wood flour on the properties of PP-wood composites", *Composites: Part A*, **41**, 199 (2008).
3. S.M.B. Nachtigall, G.S. Cerveira, and S.M.L. Rosa, "New polymeric-coupling agent for polypropylene/wood-flour composites", *Polym. Testing*, **26**, 619 (2007).
4. O. Faruk and L.M. Matuana, "Nanoclay reinforced HDPE as a matrix for wood-plastic composites", *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 2073 (2008).
5. Alireza Ashori and Amir Nourbakhsh, "Performance properties of microcrystalline cellulose as a reinforcing agent in wood plastic composites", *Composites: Part B*, **41**, 578 (2010).
6. K.B. Adhikary, S.Pang, and M.P. Staiger, "Dimensional stability and mechanical behaviour of wood plastic composites based on recycled and virgin high density polyethylene (HDPE)", *Composites: Part B*, **39**, 807 (2008).
7. A. Ashori and A. Nourbakhsh, "Characteristics of wood-fiber plastic composites made of recycled materials", *Waste Management*, **29**, 1291 (2009).
8. J.C. Caraschi and A.L. Leão, "Wood flour as reinforcement of polypropylene", *Mater. Res.*, **5**, 405 (2002).
9. L.M. Matuana, J.J. Balatinez, R.N.S. Sodhi, and C.B. Park, "Surface characterization of esterified cellulosic fibers by XPS and FTIR spectroscopy", *Wood Sci. Technol.*, **35**, 191 (2001).
10. J.G. Gwon, S.Y. Lee, S.J. Chun, G.H. Doh, and J.H. Kim, "Effects of chemical treatments of hybrid fillers on the physical and thermal properties of wood plastic composites", *Composites: Part A*, **41**, 1491 (2010).
11. A.N. Shebania, A.J. van Reenena, and M. Meinckenb, "The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood LLDPE composites", *Thermochimica Acta*, **481**, 52 (2009).
12. M.J. Johna and S. Thomas, "Biofibres and biocomposites", *Carbohydrate Polym.*, **7**, 343 (2008).
13. J.G. Gwon, S.Y. Lee, G.H. Doh, and J.H. Kim, "Characterization of chemically modified wood fibers using FTIR spectroscopy for biocomposites", *J. Polym. Sci.*, **116**, 3212 (2010).