

투명나무 제조를 위해 리그닌 제거된 나무 패널에 다양한 고분자 함침에 관한 연구

김영훈^{1,2}, 오원태¹, 윤제문^{1,2,*}

¹동의대학교 신소재공학부, ²동의대학교 미래자동차 소재부품사업단

A study on impregnating polymers into delignified wood panels for the transparent wood fabrication

Yung-Hun Kim^{1,2}, Won-Tae Oh¹, Je-Moon Yun^{1,2,*}

¹Division of Advanced Materials Engineering, Deong-Eui University

²Center for Brain Busan 21 Plus Program, Dong-Eui University

요약 본 연구는 리그닌을 제거한 나무 패널에 다양한 고분자를 함침시킴으로써 투명성을 가진 나무 패널 제조에 관한 것이다. 가시광 영역의 빛을 흡수하는 발색단인 리그닌을 제거(delignification) 하고, 그 공간에 고분자 물질로 채워 빛의 산란을 줄여서 투명한 나무 패널을 제조한다. 나무 패널의 리그닌 제거 공정 전후를 FE-SEM, FT-IR, UV-Vis 분광기 등의 분석장비를 활용하여 관찰하였다. 그리고, 리그닌이 제거된 나무 패널에 PVA(Polyvinyl alcohol), PVP(Polyvinyl pyrrolidone), PVAc(Polyvinyl acetate), PDMS(Polydimethylsiloxane) 고분자 용액을 각각 함침시켜서 광투과 특성들을 비교하였다. 550nm 파장의 스펙트럼에서 PVA와 PVP가 함침된 투명 나무 패널의 광투과율은 각각 62.6%와 62.5%로 높은 반면에, PDMS와 PVAc를 적용한 시료는 각각 6.7%와 0.6%로 광투과율이 낮았다. 리그닌이 제거되어 셀룰로오스 물질로만 구성된 나무 패널 내부에 고분자 물질을 함침시킨 결과, 고분자와 셀룰로오스 간의 물성 차이가 작을수록 우수한 함침성과 높은 광투과율을 보였지만, 물성 차이가 클수록 함침성이 좋지 않아서 광투과율이 낮아짐을 확인하였다.

Abstract This study was performed to fabricate transparent wood panels by impregnating various polymers into delignified wood panels. Lignin is a chromophore that absorbs light in the visible region and can be removed by delignification. Transparent wood panels can then be produced by filling the resulting voids with polymeric materials to reduce light scattering. Wood panels were characterized before and after delignification by FE-SEM, FT-IR, and UV-Vis spectrophotometry and then impregnated with PVA (polyvinyl alcohol), PVP (polyvinyl pyrrolidone), PVAc (polyvinyl acetate), or PDMS (polydimethylsiloxane). The light transmittances of transparent wood panels impregnated with PVA or PVP were 62.6% and 62.5%, respectively, at 550nm, while panels impregnated with PDMS or PVAc had markedly lower transmittances of 6.7% and 0.6%, respectively. Impregnation quality and light transmittance improved when the physical properties of the polymer and the cellulose remaining after lignin removal were similar, and conversely, larger differences in physical properties resulted in poorer impregnation and light transmittance.

Keywords : Cellulose, Delignification, Lignin, Polymer-Wood Composite Panel, Transparent Wood

본 논문은 과학기술정보통신부 기본연구(202101440003)와 동의대학교 교내연구(2023013000001) 과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Je-Moon Yun(Dong-Eui Univ.)

email: jmyun@deu.ac.kr

Received December 8, 2023

Revised January 10, 2024

Accepted February 6, 2024

Published February 29, 2024

1. 서론

나무는 세계적으로 널리 사용되면서, 자연에서 구할 수 있는 친환경적이고 가벼우면서 단단한 물성을 가진 전통적인 재료로 건축, 장식품, 생활용품 등 다양한 분야에서 사용되고 있다[1,2]. 나무는 비교적 값싼 재료이지만, 단열, 태양열 담수화, 폐수 정화 등 특수 분야에서도 사용될 정도로 다양한 잠재력을 가지고 있다[3,4]. 나무는 대부분 셀룰로오스(cellulose), 헤미셀룰로오스(hemicellulose), 리그닌(lignin)과 같은 고분자 물질과 함께 일부 물, 미네랄, 발색단 등 저분자 화합물들로 구성된다. 셀룰로오스 섬유들은 벌집 모양으로 얽혀있는 다공구조를 형성하며, 리그닌이 그 벌집 모양의 셀룰로오스 섬유 사이에 채워져 나무의 골격구조를 지탱하여 목재의 내충격성, 압축강도 및 굽힘 강도를 증가시키는 역할을 한다[5]. 또한, 나무는 리그닌과 그 유도체들, 그리고, 저분자 물질인 탄닌산(tannic acid), 색소(pigment) 성분들이 빛을 흡수하는 물질로써 광학적으로 불투명하며 갈색을 띤다. 그러므로 리그닌과 함께 저분자 물질들이 제거된 나무는 셀룰로오스($n=1.56$)의 투명성이 나타나야 하나, 공기($n=1.0$)층과 셀룰로오스 세포벽 사이의 굴절률이 일치하지 않기 때문에 광산란이 일어나 하얀색으로 보인다. 그러므로 투명한 나무를 제조하기 위해서는 나무 내부의 공기층에 공기 굴절률보다 큰 물질로 채워 셀룰로오스의 굴절률과 비슷하게 조성하여야 한다. 투명나무를 제조하는 방법으로 methyl methacrylate, styrene과 같은 모노머를 함침시킨 후 고분자 중합하거나, 가교결합형 에폭시 용액을 함침시킨 후 가교시켜서 만든 사례들이 소개되었다[6-9]. 수용성 고분자인 PVA를 적용하여 투명나무를 제조하는 연구도 발표되었다[10].

본 연구에서는 친수특성이 높은 셀룰로오스 나무 패널에, 수용성 고분자(PVA, PVP), 비수용성의 유기용매-용해성 고분자(PVAc), 그리고 비수용성의 유기용매에 희석된 저점도 가교결합형 폴리머(PDMS)를 적용하였을 경우, 각 고분자 용액의 함침성을 비교해 보고, 함침 정도에 따라 제조된 복합재 패널의 광학적 특성을 관찰하고자 한다. 여러 종류의 고분자-나무 복합재 패널들에 대하여 투명성에 대한 시각적 관찰, 주사전자현미경(SEM)을 통한 복합재의 표면과 단면에서의 세부 형태와 함침상태 분석, UV-Vis 분광기와 Haze 측정기를 통한 광학산성 및 광산란성, 그리고 퓨리에변환적외선분광기(FT-IR)를 통한 적용된 고분자 물질의 결합화합물 및 화학구조 등을 조사한다.

2. 연구방법

2.1 실험재료

발사나무 패널(Balsa wood panel)(두께 1mm, Ochroma pyramidale purchased from Falcon shop company, Korea)는 고분자-우드 복합재용 시료로 사용되었다. 투명나무 제조에 사용된 시약은 sodium hydroxide (NaOH, >98%, Sigma Aldrich, USA), sodium sulphite(Na_2SO_3 , anhydrous 98%, Alfa Aesar, USA), hydrogen peroxide (H_2O_2 , 30% solution, EMD Millipore Corporation, Germany), polyvinyl alcohol(PVA, 15000g/mol, Junsei chemical company, Japan), polyvinyl acetate(PVAc, Mw 100,000 g/mol Sigma Aldrich, USA), polydimethylsiloxane(PDMS, Sylgard 184 silicone elastomer kit, Dow Chemical, USA), methyl alcohol (CH_3OH , 99.8%, Duksan Pure Chemicals, Korea), ethyl alcohol($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 99.9%, Duksan Pure Chemicals, Korea), hexane($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$, 99.5%, Duksan Pure Chemicals, Korea) 등으로 정제하지 않고 그대로 사용되었다. 물은 수돗물을 두 번 재증류하여 얻은 double distilled water (DD water)를 사용하였다.

2.2 탈리그닌화(Delignification)

발사나무 패널에서 발색단 성분인 리그닌과 그 유도체를 제거하는 공정은 다음과 같다. 온도 $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 24시간 동안 발사나무 패널에 함유된 수분과 휘발성 저분자 화합물을 제거하였다. 리그닌 성분 제거 용액은 NaOH 0.25 mol과 Na_2SO_3 0.04 mol을 DD water 100 ml에 녹여 제조하였다. 발사나무 패널 조각(2 cm x 2 cm)을 그 용액에 담가 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 12시간 동안 가열한 후, 순수 DD water로 3회 세척하여 잔류 물질을 제거하였다. 그 다음에 발사나무 패널 조각 내부에 있는 잔유물을 녹여내기 위하여 H_2O_2 2.5 mol/L 농도 용액에 넣어서 제거한다. 그리고, DD water로 3회 세척한 후, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 에 보관하였다[11].

2.3 고분자 용액 제조 및 함침

제조된 모든 고분자 용액의 농도는 10 wt%이다. PVA 용액은 DD water 100 ml에 10 g의 PVA를 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 녹여서 제조하였고, PVP는 상온에서 DD water 100 ml에 동일 함량으로 교반하여 녹였다. 두 용액에 리그닌이 제거된 나무 패널을 각각 담근 후, 용액이 나무의 내부

기공으로 잘 유입되도록 약 600 torr 진공에서 5분간 유지시켰다. 고분자 용액이 잘 유입되도록 동일한 조건으로 진공 공정을 두세 번 반복하였다. 그리고 5일 동안 상온에서 자연 건조하여 투명나무 패널을 얻었다. PVAc 용액은 CH₃OH 50 ml에 PVAc를 약 5 g을 넣고 교반하여 녹였다. 그리고 리그닌 제거된 나무조각을 그 용액에 담근 후, 약 600 torr에서 1분 동안 유지시켰으며, 이를 두세 번 반복하였다. 그리고 상온에서 2일 동안 건조했다. PDMS의 주재와 경화제 그리고 Hexane을 10:1:2의 무게 비율로 혼합하여 저점도의 용액을 제조하였다. 그리고 같은 방식으로 약 1분간 진공을 유지시켜 용액 함침을 유도하였으며, 이를 두세 번 반복하였다. 그리고 Hexane을 완전히 제거하기 위하여 약 30분 동안 진공을 유지한 후, 상온에서 PDMS 경화를 시켜서 투명나무 패널을 제조하였다.

2.4 분석 장비

발사나무 패널의 탈리그닌화 전과 후 그리고 고분자 용액을 함침하기 전과 후의 시료 표면과 단면 분석은 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM:field-emission scanning electron microscope, Quanta 200 FEG, FEI, USA, 이하 FE-SEM)을 이용하여 관찰하였다. 탈리그닌화 전후 차이를 분석하기 위해 푸리에변환적외선분광기(FT-IR: Fourier transform infrared spectroscope, 이하 FT-IR)를 이용하여 분자결합 구조 및 화학조성을 확인하기 위해 피크를 분석하였다. 투명나무 패널의 광학특성은 UV-Vis 분광기(UV-Vis: UV/VIS/NIR Spectrometer, Cary-5, Varian, USA, 이하 UV-Vis)과 Haze meter (NDH7000SP, Nippon Denshoku, Japan)를 이용하여 측정하였다. 상기의 분석장비들은 동의대학교 융합부품소재핵심연구지원센터에서 보유한 장비를 활용하였다. 시료제작 과정과 만들어진 시료의 형태에 대하여 디지털 사진기를 이용하여 사진을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고분자-나무 복합재 패널 제조 공정

나무에 포함된 리그닌 성분이 빛의 80-95 %를 흡수하여 목재를 불투명하게 만든다. 그러므로 나무를 광학적으로 투명하게 만들기 위해서는 리그닌 성분을 제거하여야 한다[12]. Fig. 1에 투명나무 패널을 제조하는 과정

에 대한 삽화를 나타내었다. 나무의 성장하는 메커니즘과 나무의 구성성분과 구조형태를 모식적으로 표현하였고, 그리고 투명나무 패널을 제조하는 과정을 설명하였다 [13]. 나무 속에서 리그닌이 제거되면 나무의 색깔은 갈색에서 하얀색으로 바뀌며, 다공 구조의 셀룰로오스 섬유조직만 남게된다. 공기층으로 인한 빛의 산란으로 불투명의 하얀 색을 띠게 된다. 또한, 셀룰로오스의 세포벽 구조를 지지하는 리그닌 성분이 없어서 기계적 물성이 저하되고, 구조적 결합이 발생하게 된다. 이를 개선하기 위해서 발색단만 제거하고 최소한의 리그닌을 남기거나, 화학적 개질로 기계적으로 견고한 표백 목재를 제조하는

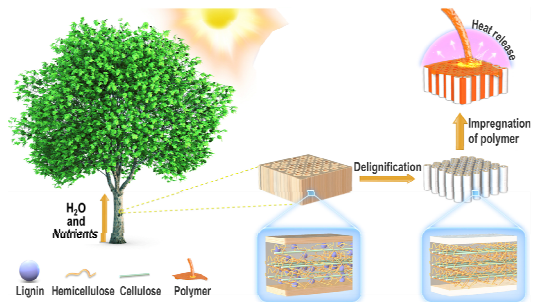


Fig. 1. Schematic illustration of the fabrication of wood-based 3D scaffold for transparent polymer-wood composite. From a wood block, the lignin is removed via a wet chemical process to obtain delignified one. The delignified space in it is instead filled with a polymer solution by a vacuum-assisted impregnation process[13].

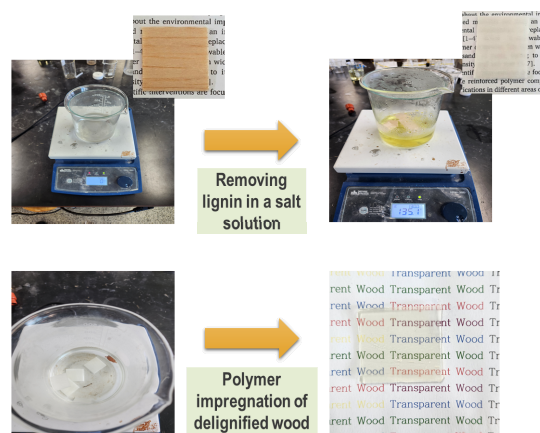


Fig. 2. Digital photos of the fabrication process of a transparent polymer-wood composite; Balsa wood panels are boiled in a salt solution to remove lignin. After cleaning the delignified woods, polymer solution was impregnated in ones to provide transparent property to the woods.

방식을 연구하기도 한다. Fig. 2는 갈색의 발사나무 패널이 투명한 나무 패널로 바뀌는 과정을 보여준다. 탈리그닌화한 나무 패널에 고분자를 함침시켜서 하얀색의 나무 패널을 투명한 나무 패널로 바뀌는 것을 확인하였다.

3.2 나무 패널의 탈리그닌화 전후 비교분석.

발사나무에 리그닌 성분이 제거되기 전과 후의 구조를 FE-SEM 분석(Fig. 3)으로 확인하였다. 셀룰로오스 세포벽 내부에 리그닌 성분(Fig. 3a)이 채워져 있고, 탈리그닌화 공정을 수행한 후에는 리그닌 성분이 제거되어 빈 상태(Fig. 3b)임을 보여준다. 추가로, FT-IR 분광분석을 통해 리그닌 제거 여부를 확인하였다. Fig. 4는 FT-IR 분광기 분석 결과 그래프를 보여준다. 그리고 고분자 용액이 함침된 발사나무가 투명해짐을 확인하였다. 발사나무의 리그닌 제거 전후 모두에 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 대표적 그룹인 O-H기, C-H기, C-O-C기의 stretching vibration 피크가 3340 cm^{-1} , 2921 cm^{-1} , 1033 cm^{-1} 에서 각각 확인이 되었다. 리그닌의 주요 성

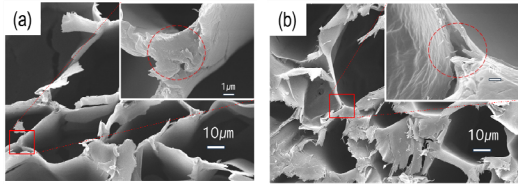


Fig. 3. Cross-section FE-SEM images of Balsa wood (a) before and (b) after removing lignin component in it. The insets are shown for the images magnifying the red solid-line squares. In the insets, red dashed circles are indicated as removed with and without a lignin component.

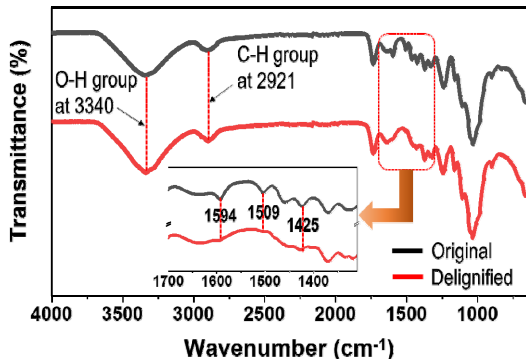


Fig. 4. a) FT-IR spectra of an original Balsa wood and a delignified Balsa wood. The inset is the magnification of red dashed rectangular line ranging from 1350 cm^{-1} to 1700 cm^{-1} .

분인 aromatic cycle (C=C)기에 대한 흡수파수는 1594 cm^{-1} , 1509 cm^{-1} 에서 그리고 aromatic ring에 결합된 CH_2 기와 CH_3 기의 scissoring vibration 피크가 1425 cm^{-1} 에서 관찰되는데, 리그닌을 제거한 나무 패널에서는 관련 피크가 거의 사라짐을 확인하였다 [14-19].

3.3 고분자 함침 특성 분석.

Fig. 5는 PVA, PVP, PVAc, 그리고 탄성특성의 PDMS 물질들이 각각 적용된 고분자-나무 복합재 패널을 보여준다. 수용성 고분자인 PVA와 PVP는 셀룰로오스 세포벽 구조 내부에 잘 함침되어 투명나무 패널 아래에 있는 문자들이 선명하게 관찰된 반면에, 유기용매성 PVAc와 가교결합형 올리고머인 PDMS는 투명나무 패널 아래의 글자가 잘 보이지 않음을 관찰하였다. PDMS-나무 복합재 패널은 글자가 선명하게 보이지 않으나, PVAc 적용 시료보다는 흐릿하게 글자윤곽이 관찰되었다. Fig. 6은 고분자-나무 복합재 패널의 단면 구조를 보여주는 FE-SEM 이미지이다. Fig. 6a와 6b는 PVA와 PVP 물질이 셀룰로오스 구조 내부에 잘 함침되었음을 보여주나, Fig. 6c와 6d는 PVAc와 PDMS 물질이 셀룰로오스 구조 내부에 잘 함침되지 않아서 부분적으로 셀룰로오스 세포벽 또는 섬유상이 관찰된다.

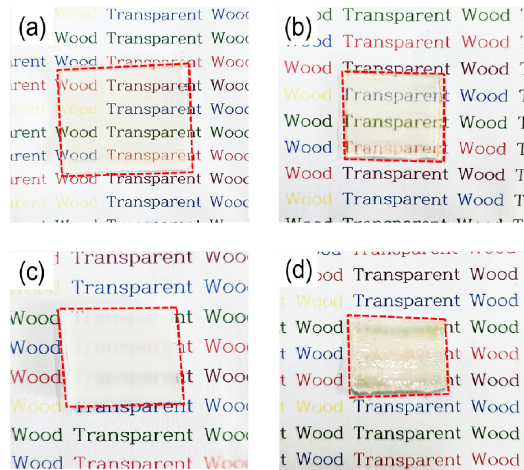


Fig. 5. Polymer-wood composites with different impregnated polymers to compare their light transmittance by means of reflecting the colored texts. The applied polymers are of: (a) PVA, (b) PVP, (c) PDMS, and (d) PVAc.

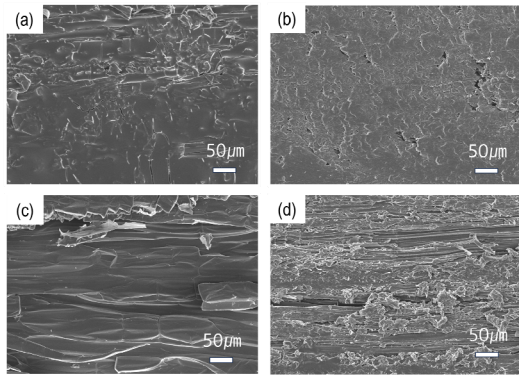


Fig. 6. Cross-section FE-SEM images of Polymer-wood composites. (a) PVA, (b) PVP, (c) PDMS, and (d) PVAc.

FE-SEM을 통해 내부구조를 관찰한 결과로 수용성 고분자인 PVA와 PVP가 셀룰로오스 세포벽에 잘 스며들음을 알 수 있으며, 유기용매성 PVAc와 유기용매에 희석된 PDMS를 셀룰로오스 세포벽 사이로 잘 함침시키기 위해서는 진공/함침 공정 개선이 필요해 보였다.

3.4 고분자-나무 복합재 패널의 광특성

Fig. 7은 탈리그닌화 나무에 고분자물질이 적용된 투명나무 패널들 간의 FT-IR 분석 결과를 보여준다. 리그닌 제거된 나무에서 관찰된 O-H기와 C-H기의 stretching vibration peak가 PVA-나무 복합재 패널에서는 3269 cm^{-1} 와 2916 cm^{-1} 파수에서 관찰되었으며, 그 세기가 높아졌다. PVP-나무 복합재 패널은 PVP 관련 피크인 2952 cm^{-1} , 1637 cm^{-1} , 1282 cm^{-1} 의 파수에서 C-H기, C=O기, C-N기가 관찰되었고, 셀룰로오스의 O-H기가 3340 cm^{-1} 에서 약간 높은 파수 3384 cm^{-1} 으로 변동됨을 관찰하였다. 그러나, PVAc-나무와 PDMS-나무 복합재 패널에서는 O-H기 피크가 관찰되지 않았고, 이는 cellulose cell 구조가 고분자에 완전히 덮여있어서 측정되지 않는 것으로 추정된다. PVAc의 carbonyl peak는 1721 cm^{-1} 에서 뚜렷하게 확인이 되었으며, PDMS는 CH_3 기, Si- CH_3 기, Si-O-Si기(two peaks)가 2959 cm^{-1} , 1249 cm^{-1} , 그리고 1005 cm^{-1} 와 784 cm^{-1} 에서 각각 관찰되었다[19].

리그닌 제거된 나무에서 관찰된 O-H기와 C-H기의 stretching vibration peak가 PVA-나무 복합재 패널에서는 3269 cm^{-1} 와 2916 cm^{-1} 파수에서 관찰되었으며, 그 세기가 높아졌다. PVP-나무 복합재 패널은 PVP 관련 피크인 2952 cm^{-1} , 1637 cm^{-1} , 1282 cm^{-1} 의 파

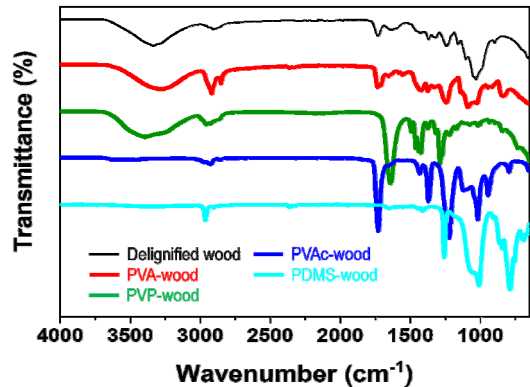


Fig. 7. FT-IR spectra of the delignified wood and polymer-wood composites with PVA, PVP, PVAc, and PDMS.

수에서 C-H기, C=O기, C-N기가 관찰되었고, 셀룰로오스의 O-H기가 3340 cm^{-1} 에서 약간 높은 파수 3384 cm^{-1} 으로 변동됨을 관찰하였다. 그러나, PVAc-나무와 PDMS-나무 복합재 패널에서는 O-H기 피크가 관찰되지 않았고, 이는 cellulose cell 구조가 고분자에 완전히 덮여있어서 측정되지 않는 것으로 추정된다. PVAc의 carbonyl peak는 1721 cm^{-1} 에서 뚜렷하게 확인이 되었으며, PDMS는 CH_3 기, Si- CH_3 기, Si-O-Si기(two peaks)가 2959 cm^{-1} , 1249 cm^{-1} , 그리고 1005 cm^{-1} 와 784 cm^{-1} 에서 각각 관찰되었다[19]. Fig. 8은 고분자-나무 복합재 패널의 광투과율 그래프를 보여준다. 550 nm 파장에서 PVA와 PVP를 적용한 복합재 패널의 광투과율은 각각 62.6 %, 62.5 %로 양호한 투명성을 보여준다. 그러나, PDMS와 PVAc를 적용한 경우 550 nm 파장에서 광투과율이 각각 6.7 %, 0.6 %로 낮게 측정되었다. 각 성분들의 굴절률을 비교할 때, 리그닌이 제거된 나무 세포벽 성분인 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 굴절률은 각각 1.53, 1.61이다. 그리고 적용된 고분자 물질의 굴절률 크기는 PVP(1.53), PVA(1.48), PVAc(1.47), PDMS(1.40) 순으로 나열된다.

만일 셀룰로오스 골격구조 내부 공간에 고분자물질이 충분히 충전되어 공기층이 없는 경우에는 PVP가 가장 높은 투명성을 가지며, PVA와 PVAc가 그 다음 투명성, 그리고 PDMS가 가장 낮은 투명성을 가질 것으로 예상된다. 그러나 본 연구에서는 PVP와 PVA 물질이 거의 같은 투명성을 가진 반면에, PVAc와 PDMS는 매우 낮은 투명성을 가졌다. 그러나 PVAc와 PDMS를 셀룰로오스 골격구조 내부 공간에 공기층 없이 잘 메운다면 투명도를 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.

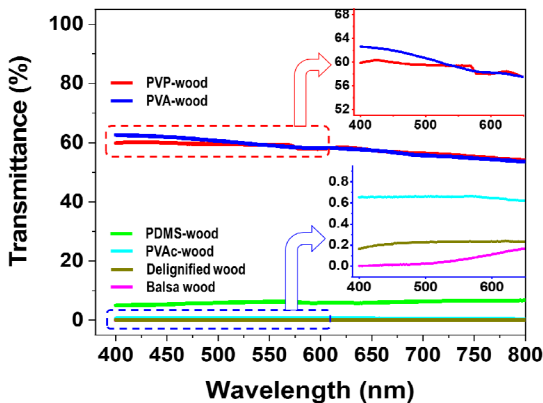


Fig. 8. UV-Vis spectra of a bare Balsa wood, delignified Balsa wood, and polymer-wood composites with different polymers impregnated in lignin-removed space. The insets are the graphs magnified at the rectangular dashed lines.

Haze 분석은 가시광선 영역의 파장을 입사광으로 하여 시료를 통과한 투과율을 분석하는 장치이다. 전광선 투과율(total transmittance, 이하 TT)은 확산투과율(diffuse transmittance, 이하 DT)과 평행투과율(parallel transmittance, 이하 PT)을 더한 값이다. Haze는 TT 대비 DT의 비율을 의미한다. PVP-나무 복합재 패널이 90.1로 높은 TT 값을 나타낸 반면에, PVA-나무는 81.0, PDMS-나무는 64.3, 그리고 PVAc-나무는 57.8 순으로 낮아짐을 확인하였다. 가시광선이 산란되지 않고, 직선으로 투과된 PT의 값은 PVP(74.0), PVA(69.3)으로 높은 광투과율을 보였고, PDMS(58.0), PVAc(52.1)로 광투과율이 가시광선의 반 정도 투과되고 나머지 반은

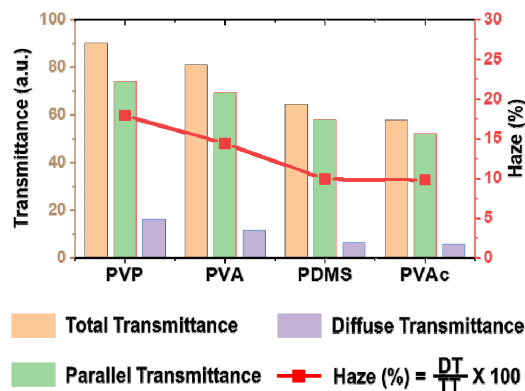


Fig. 9. Haze measurements of polymer-wood composites with respect to different polymers in the whole visible wavelength range.

산란되거나 확산되었음을 의미한다. Haze 값은 시료표면에서 빛의 산란성을 관찰하는 것으로 PVP와 PVA 적용 복합재는 각각 17.9 %와 14.4 %로 비교적 낮은 수치를 보였다.

이는 투명하면서도 Haze 값이 낮아서 빛의 난반사가 적게 일어남을 보여준다. PDMS와 PVAc 적용 복합재는 Haze 값이 9.9 %와 9.8 %로 빛의 난반사율이 매우 낮으므로 복합재의 투명성을 개선한다면, 빛의 산란이 적고 매우 투명한 투명나무 패널이 될 수 있다.

4. 결론

리그닌이 제거되어 셀룰로오스 계열(cellulose, hemicellulose)만 남은 나무 패널에, 물에 녹는 고분자들과 유기용매에 녹는 고분자를 적용하였을 경우, 제조된 고분자-나무 복합재 패널들의 함침 특성, 구조 특성, 광학 특성 등을 비교 평가하였다.

- 1) 탈리그닌화 공정 후, 갈색의 나무 패널이 흰색으로 바뀌었으며, FT-IR과 FE-SEM 분석으로 리그닌 성분이 잘 제거되었음을 확인하였다.
- 2) 광투과율 분석으로 수용성 고분자(PVA, PVP)는 기공 없이 잘 채워져 우수한 투명성을 보였으나, 비수용성 고분자(PVAc, PDMS)는 나무 패널에 충분히 함침되지 않아서 구조적 결함이 발견되었고, 낮은 투명성을 보였다.
- 3) Haze 분석으로 수용성 고분자(PVA, PVP)의 경우엔 PVA가 낮은 빛의 난반사율을 보였으며, PVAc와 PDMS의 경우엔 수용성 고분자 적용 패널보다 매우 낮은 빛의 난반사율을 보였다. 만일 PVAc와 PDMS의 함침율을 높인다면, 우수한 투명성과 낮은 난반사율 특성을 가진 투명나무 패널 개발이 가능할 것이다.

References

[1] D. Guo, N. Guo, F. Fu, S. Yang, G. Li, F. Chu, "Preparation and mechanical failure analysis of wood-epoxy polymer composites with excellent mechanical performances.", *Composites Part B: Engineering*, Vol.235, No. 15, 109748, Apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109748>

[2] Q. Fu, M. Yan, E. Jungstedt, X. Yang, Y. Li, "Transparent plywood as a load-bearing and luminescent

- biocomposite.”, *Composites Science and Technology*, Vol.164, pp 296-303, Aug. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.001>
- [3] Y. Mao, L. Hu, Z. J. Ren, “Engineered wood for a sustainable future.”, *Matter*, Vol.5(5), pp. 1326-1329, May. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2022.04.013>
- [4] C. Montanari, Y. Li, H. Chen, , “Transparent Wood for Thermal Energy Storage and Reversible Optical Transmittance.” *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol.11(22), pp.20465-20472, May. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b05525>
- [5] I. Burgert, T. Keplinger, E. Cabane, V. Merk, M. Rugeberg, “Biomaterial Wood: wood-based and bioinspired materials.”, *Secondary Xylem Biology*, pp. 259-281, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802185-9.00013-9>
- [6] J. M. Yun, Y. H. Kim, C. Y. Jeong, “Study on the manufacture of flexible transparent polymer-wood composite panels filled with polymer in a multi-porous structure.”, *Polymer. Korea*, Vol.47, No.2, pp.206-211, Mar. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.7317/pk.2023.47.2.206>
- [7] P. Chen, Y. Li, Y. Nishiyama, S. V. Pingali, H. M. ÓNeill, Q. Zhang, L.A. Berglund, “Small angle neutron scattering shows nanoscale PMMA distribution in transparent wood biocomposites.”, *Nano Lett.*, Vol.21, No.7, pp.2883-2890, Apr. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c05038>
- [8] Y. Peng, Q. Fan, R. Ou, X. Hao, C. Guo, Z. Liu, T. Liu, L. Sun, Q. Wang, “Modification of poplar wood cells using 1,3-dihydroxymethyl-4,5-dihydroxyethylideneurea/alkaline lignin for enhanced mechanical properties and decay resistance.”, *Construction and Building Materials*, Vol.368, 130354, Mar. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130354>
- [9] S. Zhu, S. K. Biswas, Z. Qiu, Y. Yue, Q. Fu, F. Jiang, J. Han, “Transparent wood-based functional materials via a top-down approach.”, *Progress in Materials Science*, Vol.132, 101025, Feb. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101025>
- [10] A.N.S. Rao, G.B. Nagarajappa, S. Nair, A.M. Chathoth, K.K. Pandey, “Flexible transparent wood prepared from poplar veneer and polyvinyl alcohol”, *Composites Science and Technology*, Vol.182, pp.107719, Sep. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107719>
- [11] M. Zhu, T. Li, C. S. Davis, Y. Yao, J. Dai, Y. Wang, F. AlQatari, J. W. Gilman, L. Hu, “Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells.”, *Nano Energy*, Vol.26, pp.332-339, Aug. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.05.020>
- [12] A.L. Andradý, S.H. Hamid, X. Hu, A. Torikai, “Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials.”, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Vol.46, No.1-3, pp.96-103, Oct. 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(98\)00188-2](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(98)00188-2)
- [13] Y. Meng, J. Majoinen, B. Zhao, O. J. Rojas, “Form-stable phase change materials from mesoporous balsa after selective removal of lignin.”, *Composites Part B: Engineering*, Vol.199, pp.108296, Oct. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108296>
- [14] Y. Li, Q. Fu, R. Rojas, M. Yan, M. Lawoko, L. Berglund, “Lignin-Retaining Transparent Wood”, *ChemSusChem*, Vol.10, No.17, pp.3445-3451, Jul. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201701089>
- [15] Z. Wang, X. Wang, Y. Zhang, “Properties of transparent bamboo based on different positions of bamboo.”, *Industrial Crops and Products*, Vol.202, 117077, Oct. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117077>
- [16] X. Liu, H. Peng, T. Zhang, K. Wang, Y. Dong, K. Wang, X. Zhan, Y. Liu, Y. Li, J. Li, “One-step brush-coating strategy for low-haze and water-resistant transparent wood films.”, *Progress in Organic Coatings*, Vol.185, 107912, Dec. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107912>
- [17] K. Pandey, A. Pitman, “FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi.”, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol.52, pp.151-160, Jul. 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(03\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(03)00052-0)
- [18] A. N. Subba Rao, G. B. Nagarajappa, S. Nair, A. M. Chathoth, K. K. Pandey, “Flexible transparent wood prepared from poplar veneer and polyvinyl alcohol.”, *Composite Science and Technology*, Vol.182, 107719, Sep. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107719>
- [19] V. Emmanuel, B. Odile, R. Céline, “FTIR spectroscopy of woods: A new approach to study the weathering of the carving face of a sculpture.”, *Spectrochimica Acta Part A*, Vol.136, pp.1255-1259, Feb. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.10.011>

김 영 훈(Yung-Hum Kim)

[정회원]



- 2023년 2월 : 동의대학교 고분자 소재공학과 (학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 신소재공학과 대학원 석사과정

<관심분야>

바이오고분자, 기능성고분자, 나노재료

오 원 태(Won-Tae Oh)

[정회원]



- 1992년 2월 : KAIST 화학과 (학사)
- 1994년 2월 : KAIST 화학과
(무기화학 이학석사)
- 2003년 2월 : 포항공대 화학과
(고분자화학 이학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 동의대학교
신소재공학부 교수

〈관심분야〉

접착소재, 전도성고분자, 방열 소재

윤 제 문(Je-Moon Yun)

[정회원]



- 1992년 2월 : 인하대학교 화학공
학과 (학사)
- 1995년 2월 : KAIST 신소재공학과
(고분자화학 공학석사)
- 2010년 2월 : KAIST 화학과
(고분자화학 이학박사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 동의대학교
신소재공학부 교수

〈관심분야〉

광특성고분자, 기능성고분자, 그래핀, 유무기나노재료