Polym. Korea, Vol. 47, No. 2, pp. 206-211 (2023)
https://doi.org/10.7317/pk.2023.47.2.206

ISSN 0379-153X(Print)
ISSN 2234-8077(Online)

# 다공구조 내에 고분자 충진된 유연한 투명나무 복합제 패널 제조 연구

윤제문† · 김영훈 · 정찬영†

동의대학교 신소재공학부

(2022년 11월 22일 접수, 2023년 1월 3일 수정, 2023년 1월 17일 채택)

# Study on the Manufacture of Flexible Transparent Wood Composite Panels Filled with Polymer in a Multi-porous Structure

**Je Moon Yun†, Yunghun Kim, and Chanyoung Jeong†**

*Division of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busanjin-gu, Busan 47340, Korea*

(Received November 22, 2022; Revised January 3, 2023; Accepted January 17, 2023)

**초록**: 본 연구는 쉽게 깨지지 않고, 유연한 투명한 나무 패널 제조에 관한 것이다. 가시광 영역의 빛을 흡수하는 lignin을 제거(delignification)하고 그 공간에 투명성을 제공하는 polyvinyl alcohol(PVA)과 유연성을 제공하는 저분자 화합물을 혼합한 물질로 채워 유연하고 투명한 나무패널을 제조하였다. Delignification 공정, 혼합고분자 함침, 나무 패널의 내부구조, 광투과율, 그리고 유연성 등을 조사하였다. 분석결과로부터 PVA 물질만 함침된 투명나무는 550 nm wavelength에서 65.8%로 높은 광투과율을 보인 반면에, 저분자 화합물이 혼합된 투명나무는 그 양이 많을수록 광투과율은 10%대로 낮아졌지만, 유연성은 크게 향상되었다. 이러한 결과를 바탕으로 높은 유연성과 투명성을 지닌 목재가 향후 취약한 유리재료를 대체할 유용한 재료가 될 것으로 판단된다.

**Abstract:** In this study, wood, which is indestructible and has flexible, and transparent properties, was developed. A flexible and transparent wooden panel was fabricated by removing lignin (delignification) that absorbs light in the visible light region and filling the lignin-removed space with a mixture of polyvinyl alcohol (PVA), which provides transparency, and a low molecular weight compound, which provides flexibility. The delignification process, the infiltration of the polymer mixture, the internal structures, the optical transmittance, and the flexibility of the wood samples were measured and investigated. The analyzed results showed high optical transmittance of 65.8% at 550 nm wavelength when impregnated only with PVA, while the transmittance decreased to around 10% as the mixed amount of low-molecular compounds increased, but the flexibility was greatly improved. Based on these results, it is considered that higher flexible and transparent wood will be a useful material to replace fragile glass material in the future.

**Keywords:** transparent wood, flexibility, polyvinyl alcohol, lignin, cellulose.

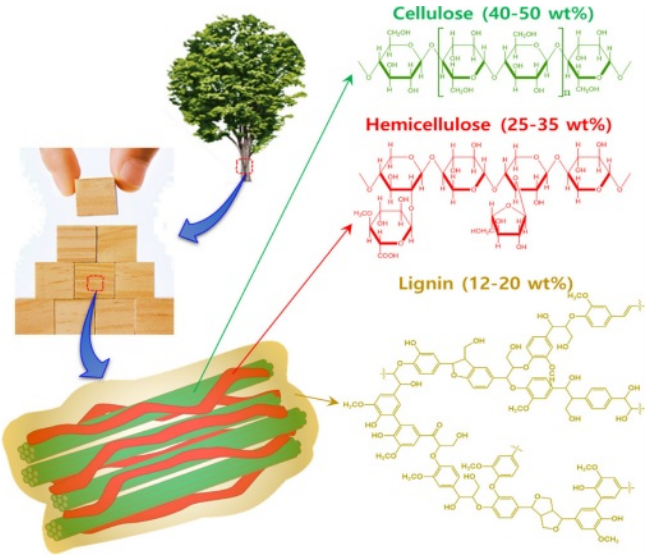
## 서 론

21세기에 접어들면서 글로벌 기후변화와 에너지 고갈 문제로 다양한 분야에서 새로운 친환경소재가 큰 주목을 받고 있다.[1-3] 인간이 사용한 최초 재료 중 하나인 나무는 수천년 동안 건축, 가구, 난방, 그리고 장식 등으로 널리 사용되어왔다.[4,5] 나무의 생분해, 높은 비탄성율, 저독성, 그리고 낮은 열전도율 특성으로 생체적 지능, 청정 에너지, 생명공학분야에 널리 활용되고 있는 소재이다.[2]

Scheme 1에 나타낸 바와 같이, 나무의 주요 성분으로 섬유조직인 셀룰로오스 계열과 매트릭스 역할을 하는 lignin 화합물, 그리고 기타 저분자 방향족화합물이 혼합된 천연복합재이다.[6] 나무의 주요 성분인 셀룰로오스 섬유는 조밀하고 견고하게 골격구조를 이루고 광학적으로 투명하다. 그리고 lignin은 그러한 골격구조를 지지하는 매트릭스 역할로 나무의 우수한 기계적 물성을 갖게 한다. 그러나, 나무에 lignin, lignin derivatives, tannic acid, pigment 및 기타 빛을 흡수하는 물질 때문에 일반적으로 나무가 갈색으로 보이며 불투명하다.[2,7] 최근에 나무를 화학적으로 처리하여 lignin과 lignin chromophore group의 화학물질을 제거하면 빛의 흡수가 효과적으로 감소하여 투명성을 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다.[2,7-10]

고투명성을 갖는 나무를 제조하기 위하여 lignin 제거 후에 라디칼 중합 단량체인 methyl methacrylate(MMA), styrene 또는 고분자 용액을 나무내부에 함침시켜서 제조하였다. 투명나

†To whom correspondence should be addressed.
jmyun@deu.ac.kr, ORCID 0000-0001-6565-6375
cjeong@deu.ac.kr, ORCID 0000-0003-0190-6288
©2023 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.




**Scheme 1.** Pictorial representation of the hierarchical structure of wood constituents from wood-brick and tree photos, including the chemical structures of cellulose, hemicellulose, and lignin.

무를 제조하는데 사용된 고분자는 epoxy resin, poly(methyl methacrylate)(PMMA), polyvinyl pyrrolidone(PVP), polyvinyl alcohol(PVA) 등이 사용되었다. 최근엔, L. Hu와 공동 연구원들은 건축물 내의 에너지소비를 효율적으로 절약할 수 있는 thermoset epoxy resin을 사용한 투명나무 제조를 제조하였으며, 그 투명나무의 낮은 열전도율(0.24 W/mK)로 건물 내부 온도변화를 낮추는 효과가 있음을 보였다.[10,11] 단량체를 라디칼 중합하여 제조하거나, 고분자를 녹인 용액을 사용하여 나무 내부에 함침시키고 천천히 용매를 휘발/제거하여 고분자 물질만 남기는 방식의 투명나무, 또는 thermoset epoxy resin과 같이 가교결합하여 얻은 투명나무들은 매우 딱딱하므로 잘 휘어지지 않고 깨질 우려가 있다.[12]

본 연구에서는 투명성을 가지면서 유연성을 갖는 투명나무를 제조하고자 한다. 사용된 고분자에 가소제 역할을 하는 저분자 화합물을 혼합하여 투명나무에 유연성을 부여한다. PVA 고분자 용액에 PVA와 혼화성이 있으면서 수용성의 propylene glycol, glycerol 등의 저분자 화합물과 혼합하여 PVA 혼합용액을 제조한다. 화학처리로 lignin이 제거된 나무에 PVA 혼합용액으로 함침시켜서 투명나무를 제조하였고, 제조된 투명나무시료에 대한 표면구조와 광투과성 그리고 유연특성 등의 물성비교 및 평가를 수행한다.

## 실 험

**재료**. 투명나무 시편 원료로 1 mm 두께의 Balsa wood (*Ochroma pyramidale* purchased from Falcon shop company, Korea)가 사용되었다. 투명나무 제조에 사용된 시약은 sodium hydroxide (NaOH, >98%, USA), sodium acetate($CH_3COONa$, >99%, USA), sodium chlorite($NaClO_2$, 80%, USA), acetic acid($CH_3COOH$, >99%, USA), acetone (>99.5%, USA), ethyl alcohol($CH_3CH_2OH$, >99.5%, USA), hydrogen peroxide($H_2O_2$, 30% solution, EMD Millipore Corporation, Germany), double distilled water(DD water) 등으로 정제하지 않고 그대로 사용되었다. Polyvinyl alcohol(PVA, 15000 g/mol, Junsei chemical company, Japan), propylene glycol(PG, 98%, Daejung chemical company, Korea), 그리고 glycerol(GL, 99%, Thermo Fisher Scientific, USA)은 balsa wood의 기공구조에 함침시킬 수 용액으로 제조하여 사용되었다.

**Balsa wood의 delignification**. Balsa wood의 밀도는 0.16 g/cm$^3$로 경량의 다공성 구조로 되어 있다. Balsa wood의 구성 성분 중 하나인 발색단을 가지고 있는 lignin 매트릭스를 제거하기 전에 발사나무에 있는 수분과 저분자의 휘발성 물질을 제거하기 위하여 105 ± 3 ℃에서 24시간 건조시켰다. Lignin extraction 용액을 acetate buffer 용액(pH 4.6)에 $NaClO_2$의 1 wt%를 녹여 제조하였다. 그리고 건조된 시료들을 그 용액에 6시간 동안 담가 lignin을 추출하여 제거시켰다. 사용된 balsa wood 시료는 30 mm × 30 mm × 1 mm 크기로 여러 개를 준비하여 delignification 공정을 수행하였다. 추출된 시료들은 DD water로 두세 번 세척한 다음, ethyl alcohol에서 세척하면서 함유된 수분양을 줄이고, 그리고 ethyl alcohol : acetone(1:1) 혼합용액으로 세척하였다. 그리고 마지막으로 acetone으로 두 번 더 세척하였다.

**고분자 용액 함침 공정**. 초순수 증류수에 무게 대비 PVA 분말 10 wt%를 80 ℃ 온도에서 교반하면서 녹였다. PVA 분말이 다 녹았는지를 육안으로 확인한 다음에 상온까지 PVA 용액을 서냉시켰다. 투명나무에 유연 특성을 부여하기 위하여 PVA와 저분자 화합물인 propylene glycol과 glycerol을 첨가하여 여로 종류의 PVA 혼합용액을 제조하였다. PVA 10 wt% 용액에 PVA 무게 대비 10%, 20%의 비율로 저분자 화합물을 첨가하였다(Table 1 참조). Delignified wood 시료들은 Petri dish에 넣고 시료두께 대비 약 4배의 높이로 10 wt% PVA 용액(PVA/0)을 부었다. PVA 용액이 시료내부 기공으로 침윤되도록 650 torr 진공압을 약 1시간 정도 유지한 후, 진공펌프를 끄고 약 1시간 동안 정치시켰다. 시료내부로 PVA 용액이 가능한 많이 침윤되게 하려고 위 공정을 3번 반복하였다. Table 1과 같이 다른 조성의 PVA 혼합용액(PVA/PG1, PVA/PG2, PVA/GL1, PVA/GL2)에 대한 침윤공정은 상기 실험방법과 같은 방법으로 진행되었다.

**측정**. Balsa wood의 delignification 전과 후, 그리고 PVA infiltration 전과 후의 시료표면과 단면에 대한 모폴로지 분석은 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM, Quanta 200 FEG, FEI, USA)을 이용하여 관찰하였다. 투명나무의 광투과 스펙트럼 분석은 UV-Vis 분광기(Cary-5, Varian, USA)을

**Table 1. Composition of PVA Solutions**

| Components \ ID No. | PVA/0 | PVA/PG1 | PVA/PG2 | PVA/GL1 | PVA/GL2 |
|---|---|---|---|---|---|
| Water | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| PVA | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| PG | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| GL | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |

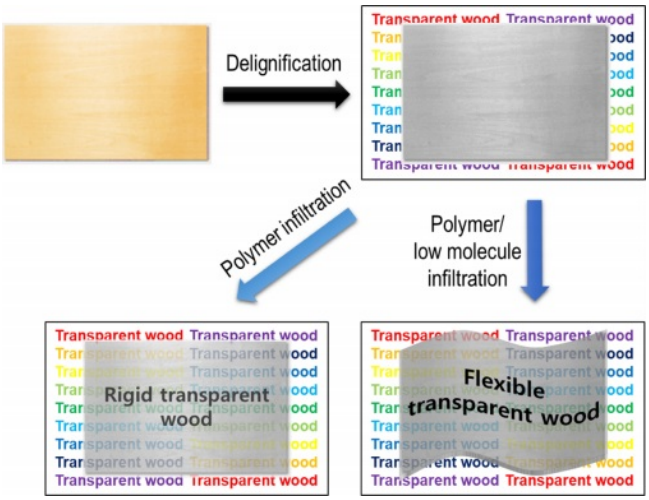
*The figures mean the weight ratio of the components.

이용하여 관찰하였다. SEM과 UV-Vis 분광기는 동의대학교 융합부품소재핵심연구지원센터 장비를 활용하였다. 시료제작 과정과 만들어진 시료의 형태에 대하여 디지털사진기를 이용하여 사진을 얻었다.

## 결과 및 토론

**탈리그닌(delignification) 공정**. 나무는 목본 식물의 줄기와 뿌리에서 발견되는 다공성의 섬유질 구조의 조직으로 이루어져 있다. 나무는 자연환경에서 성장하는 식물로서 친환경적이고, 살아있는 동안에는 크고 곧게 자라는 특성 때문에 건축물 자재와 가구 목재로 많이 사용되고 있다. 또한, 나무의 주요 구성 성분인 다량의 셀룰로오스 섬유와 헤미셀룰로오스 그리고 lignin들은 불에 잘 타는 물질이어서 연료로 사용되거나, 불활성 기체 분위기 하에 탄화시켜 활성탄소로 활용하기도 하며, 셀룰로오스만 추출/가공하여 종이와 의류 제품으로 쓰이기도 한다. 나무의 주요 색상은 갈색 계열로 phenol group을 많이 포함하는 lignin의 화학구조 특성으로 가시광선의 약 90%를 흡수하므로 불투명한 원인이 된다.[13,14] 이에 투명나무를 제조하기 위해서 빛을 흡수하는 lignin을 먼저 제거해야 한다.

투명나무와 유연한 투명나무를 제조하는 과정을 Scheme 2에 개략적으로 나타냈다. Lignin이 제거된 후, 나무에는 셀룰로오스 계열(holocellulose)만 남게 되어 흰색을 띠며, 그 형태는 무너지지 않고 그대로 유지된다. 그리고 고분자 용액에 delignified wood를 담근 후, 샘플을 desiccator 안에 넣어 진공펌프를 이용하여 기포 제거와 함께 고분자 용액이 충진되도록 한다. 그리고 상온/상압에서 서서히 용매를 휘발 건조하면 고체고분자가 충진된 투명나무가 제조된다. 유연한 투명나무 제조는 비휘발성 저분자 화합물이 포함된 고분자 용액을 사용하여 제조한다. Balsa wood에 있는 lignin을 분해시키는 용액은 125 mL 증류수에 sodium acetate($CH_3COONa$) 1.67 g, sodium chlorite($NaClO_2$) 1.3 g, acetic acid 1.15 mL를 혼합하여 만들었다. 그리고 그 수용액을 80 ℃까지 가열한 후, 30 mm × 30 mm × 1 mm 크기의 balsa wood 시료 5개를 넣고 7시간 동안 반응시켜서 lignin을 제거하였다. Figure 1에 나타낸




**Scheme 2.** Schematic illustration of the fabricating processes of a rigid transparent wood and a flexible transparent wood *via* delignification and infiltration processes.

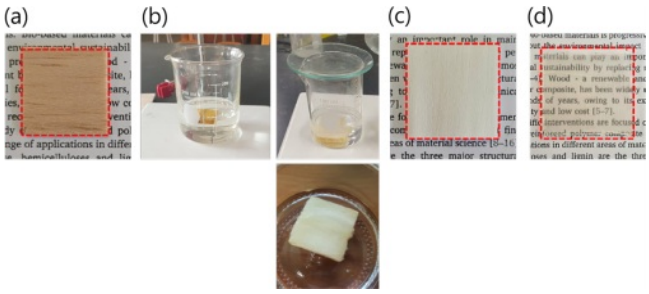



**Figure 1.** Digital photos of (a) a balsa wood; (b) the delignification process (including soaking, delignifying, and washing); (c) a dried delignified wood; (d) a polymer-infiltrated transparent wood.

바와 같이 balsa wood에서 lignin 제거되면 holocellulose만이 남게 되어 연한 갈색에서 흰색으로 탈색되지만, holocellulose 섬유 조직의 다공성 구조로 인하여 입사광이 산란되어 투과하지 못하므로 불투명하게 보인다(Figure 1c).

Balsa wood plate에 있는 lignin을 녹여낸 후, 에탄올, 에탄올/아세톤(1:1), 아세톤의 순서대로 세척하여 미량의 불순물을 제거하고 건조시켰다(Figure 1(b) & 1(c)). 그 다음 Petri dish에 PVA 수용액을 붓고 delignified wood 샘플들을 넣어 놓고, PVA 수용액이 샘플 기공 내로 스며들도록 진공펌프를 사용하여 세 번 정도 gassing/degassing 과정을 반복하여 기포들을 제거하고 고분자 용액이 채워지도록 한 후, 건조시켜서 transparent wood를 제조하였다(Figure 1(d)). Flexible transparent wood plate 샘플은 저분자 화합물이 첨가된 PVA 혼합용액을 사용하여 위와 같은 방법으로 제조하였다. PVA-저분자 화합물의 혼합비는 Table 1에 나타냈다.

**구조특성 분석**. Balsa wood의 단면 구조를 SEM 분석을

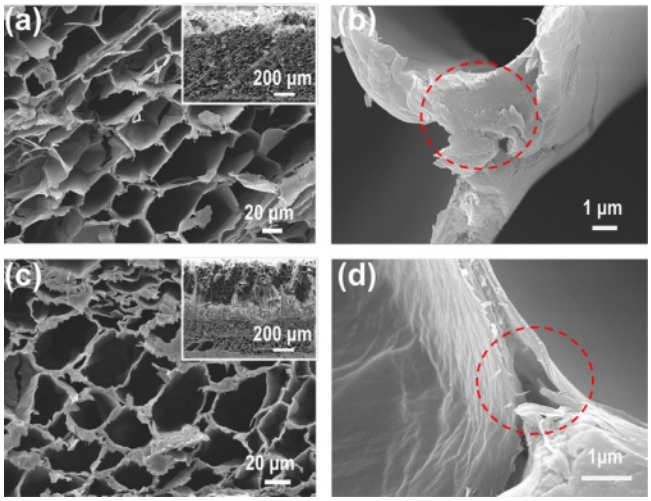



**Figure 2.** Low- and high-magnification SEM images of balsa wood cross-sections with lignin-filled and delignified cellulose interconnections (indicated by red dashed circles in b, d): (a, b) before; (c, d) after a delignification process.

통하여 확인을 하였다. Figure 2는 balsa wood 단면구조를 보여준다. Balsa wood는 다공성의 microstructure를 이루고 있으며, lignin은 interconnected cellulose framework 내부(Figure 2(b))에 있음을 확인하였다. Delignification 공정을 통하여 같은 위치의 framework 내부가 비어 있어서 lignin이 제거되었음을 확인할 수 있었다(Figure 2(d)). 그리고 lignin이 제거되더라도 holocellulose의 골격구조가 그대로 유지되어 있어서 balsa wood 본래 형태를 그대로 보여주었다.

Lignin이 제거된 샘플은 갈색에서 하얀색으로 바뀌었으나, 가시광 영역의 빛이 투과되지 않고 산란되어 투명하게 보이지 않는다. 그러나, 고분자 물질을 함침시킨 샘플들은 광투과로 투명해짐을 관찰하였다. Figure 3은 여러 가지 고분자 조성으로 함침시킨 투명나무의 투명상태를 보여준다. 위에서 언급한 대로 delignified wood는 holocellulose만 남아서 흰색으로 보이지만, 다양한 고분자 혼합용액을 wood 내부로 infiltration을 한 결과 모든 wood 샘플들은 양호한 투과성을 보여준다. 특히, PVA만 infiltrated wood가 가장 투명하게 보였다. 다른 샘플들은 PVA-wood composite 보다는 투명성이 다소 떨어져 보였다. 이는 고분자 혼합용액이 wood 내부로 함침되지 않은 영역이 존재하는 것으로 판단된다.

고분자 혼합 조성용액이 wood 내부로 함침된 상태를 관찰하기 위하여 전자현미경을 이용하여 샘플의 내부구조를 분석하였다. 그 분석 결과는 Figure 4에 나타냈다. Figure 4(a)는 transparent wood의 구조 모식도를 나타낸 것으로 lignin이 제거된 hollow cell 들이 견고하게 같은 방향으로 배열되어 있고 hole 내외부에 고분자 물질이 채워져 있으며, wood 겉면엔 고분자 물질이 코팅된 형태임을 나타낸다. 그리고 SEM

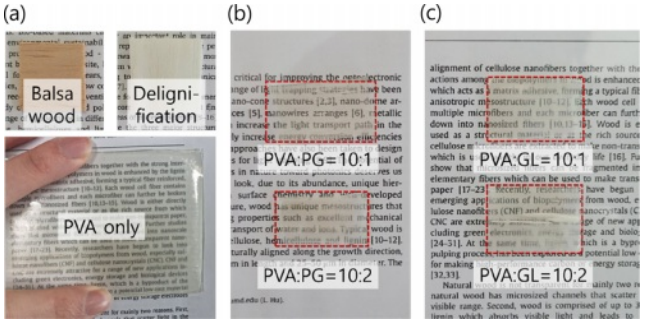



**Figure 3.** Digital photos of the transparent wood samples obtained by infiltrating various polymer solutions: (a) A bare and a delignified woods and a PVA-wood composite; (b) PVA/PG-wood composites; (c) PVA/GL-wood composites.

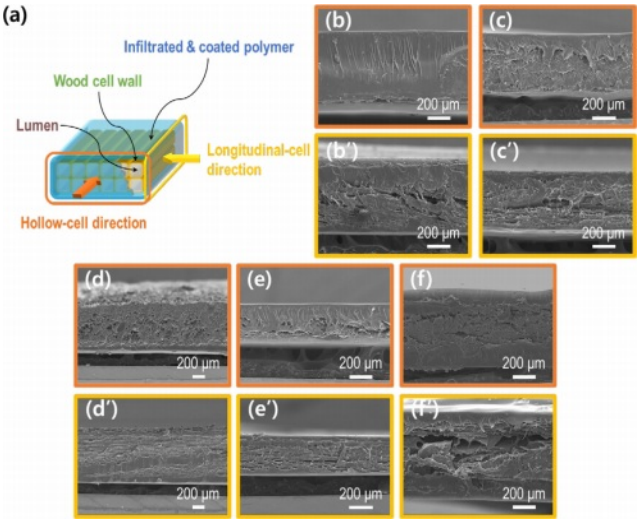



**Figure 4.** (a) Schematic illustration of transparent wood structure with the arrows indicating SEM-measuring directions; (b – f′) SEM images of wood cross-sections infiltrated with (b, b′) PVA; (c, c′) PVA/PG1; (d, d′) PVA/PG2; (e, e′) PVA/GL1; (f, f′) PVA/GL2. The orange and yellow lines indicate the positions of the samples observed using a SEM equipment.

분석 위치 표시를 transparent wood cross-section의 hollow-cell 정면(주황색 표시)와 cell 길이 방향으로 정렬된 측면(노란색 표시)를 관찰하였음을 나타낸다. SEM 이미지에서 주황색 테두리는 hollow-cell 정면(Figure 4(b)-4(f))을 나타내며, 노란색 테두리가 표시된 SEM 이미지(Figure 4(b')-4(f'))는 cell 길이 방향으로 정렬된 측면을 측정한 것이다. PVA-wood composite 샘플은 PVA 물질이 wood 내부의 빈 공간에 충분히 충진되어 있음을 관찰하였고, 다른 저분자 화합물이 혼합된 PVA 물질은 불충분하게 wood 내부에 충진되어 기공들이 관찰되었다. Figure 3에서 시각적으로 투명 차이를 비교한 사진들과 일치된 결과를 보여주고 있다. 특히, 저분자 화합물 함

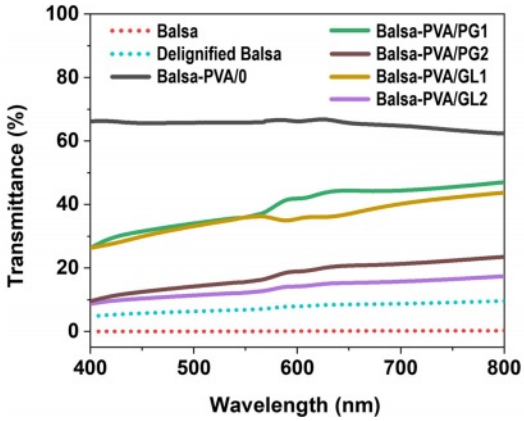



**Figure 5.** Optical transmittance of wood samples.

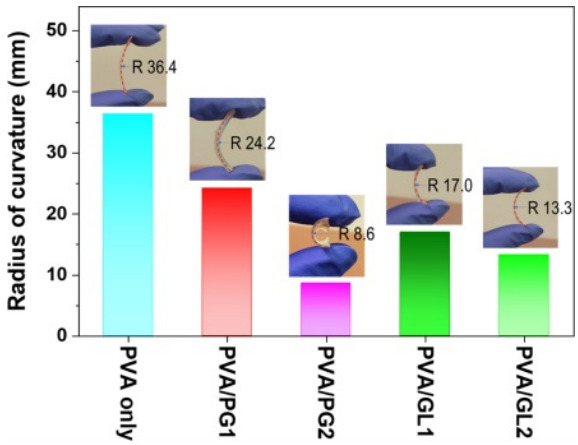



**Figure 6.** Bar graph of the radii of curvatures for each transparent wood composite with their digital photos.

량이 높을수록 많은 기공들이 관찰되어 PVA 물질의 충진율을 감소시키는 것으로 나타났다.

**투명나무 샘플들의 광투과율 분석**. SEM 분석을 통한 transparent wood 샘플들 간의 구조분석과 더불어 투명성 차이를 더 명확히 하기 위하여 UV-Vis 분광기로 광투과율을 측정하였다.

Figure 5에 나타낸 바와 같이 lignin이 제거되지 않은 샘플은 550 nm 파장에서 0.06%로 대부분의 파장대의 빛들은 투과되지 못하였으며, lignin이 제거된 샘플의 경우에는 6.84%로 매우 약한 광투과율을 나타냈다. 고분자 물질을 함침시킨 샘플들에 대하여 비교분석한 결과, PVA 물질만 함유된 transparent wood가 다른 샘플에 비해서 550 nm 파장 부근에서 65.8%의 높은 투과율을 나타냈다. 또한 400-800 nm 범위 전체에 60% 이상의 광투과율을 보였지만, 저분자 화합물이 포함된 PVA-wood composite 샘플들은 PVA 단독 샘플에 비해서 낮은 광투과율을 보였다. 저분자 화합물이 약 10% 함유된 PVA/PG1와 PVA/GL1의 광투과율은 550 nm 파장에서 각각 35.9%와 36.0%이나, 장파장에서는 PVA/GL1에 비해 PVA/PG1이 더 나은 광투과율을 보였다. 저분자 화합물의 함유량을 증가한 샘플은 광투과율이 더 낮아짐을 확인하였고, PG가 포함된 샘플이 GL 샘플보다 더 나은 광투과율을 나타냈다. PVA/PG2의 광투과율은 15.6%이며, PVA/GL2는 12.2%로 측정되었다. Figure 4에 나타낸 SEM 분석결과에서도 저분자 화합물 양이 증가할수록 기공이 발달되어 PVA 물질이 미충진된 곳이 관찰되었으며, 이 결과가 광투과율을 떨어뜨리는 요인으로 판단된다.

**투명나무 샘플들의 유연성 비교**. Figure 6은 transparent wood composites의 유연성을 비교한 그래프를 나타낸다. PVA 고분자는 유리전이온도($T_g$)가 150 ℃로 매우 딱딱한 고분자 물질이다. PVA 단독으로 함침된 샘플은 36.4 mm의 매우 큰 곡률반경을 가지며, 단단하였다. 이에 반해, 저분자 화합물이 첨가된 PVA 혼합물이 함유된 샘플은 곡률반경이 줄어듦을 확인할 수 있었다. 특히, PG 함량의 높아질수록 매우 유연한 특성을 가짐을 관찰하였다.

10% PG를 첨가한 샘플의 곡률반경은 24.2 mm에서 PG 함량을 약 2배 높인 경우에는 곡률반경이 8.6 mm로 약 70%로 곡률반경이 작아짐을 확인하였고, 사진에서 보듯이 매우 유연한 특성을 나타냈다. GL을 첨가한 경우에는 10%는 17.0 mm로 20%는 13.3 mm로 곡률반경이 작아졌지만, PG를 첨가하였을 때만큼의 유연성이 크게 나아지지 않았다. 이는 PVA 고분자가 PG 첨가물과의 혼화성(miscibility)이 GL 첨가물보다 더 우수한 것으로 판단된다. 이것을 뒷받침할 만한 자료로써 UV/Vis 광투과율 분석을 통하여 PVA/PG composite가 PVA/GL composite 보다 높은 광투과율을 보였으며, SEM 분석에서도 PVA/PG가 wood 내부에 양호하게 충진됨을 확인할 수 있었다.

## 결 론

Lignin이 제거된 balsa wood에 다양한 고분자 혼합물을 함침시켜서 transparent wood 샘플을 제조하였다. PVA-wood composite는 550 nm 파장에서 광투과율이 65.8%로 우수한 투명성을 가지나, flexibility에서는 banding 곡률반경이 36.4 mm로 단단한 특성을 보였다. PVA 물질에 저분자 화합물인 PG와 GL을 혼합한 composite는 투명성이 다소 떨어지더라도 flexibility는 크게 향상됨을 확인하였다. 저분자 화합물 10% 혼합된 PVA-wood composite 샘플들은 550 nm에서 광투과율이 약 36%였으며, 20%로 함량을 증가하였을 때 10% 대의 광투과율을 보였다. 그 원인으로 SEM 분석에서 나타나 있듯이 많은 기공이 발견되어 wood 내부에 고분자 물질이 충분히 충진되지 못함이 확인되었다. 그러나, 저분자 화합물이 들어있는 샘플들은 PVA 물질만 사용한 composite보다 매

우 양호한 flexibility를 보였다. 앞으로 balsa wood의 두께에 따라 투명성 비교분석과 고분자의 종류에 따라 투명성 변화를 분석하고, 높은 투명성을 가지면서 flexibility가 우수한 transparent wood composite 연구를 계속 진행할 계획이다.

**감사의 글**: 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(과제번호: NRF-2021R1F1A1045950). 또한, 이 논문은 2022년도 동의대학교 교내연구비 지원으로 연구되었음(과제번호 202201640001).

**이해상충**: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

## 참 고 문 헌

1. Habibi, Y.; Lucia, L. A.; Rojas, O. J. Cellulose Nanocrystals: Chemistry, Self-assembly, and Applications. *Chem. Rev.* **2010**, 110, 3479-3500.
2. Li, Y.; Fu, Q.; Yu, S.; Yan, M.; Berglund, L. Optically Transparent Wood from a Nanoporous Cellulosic Template: Combining Functional and Structural Performance. *Biomacromolecules* **2016**, 17, 1358-1364.
3. Zhu, H.; Fang, Z.; Preston, C.; Li, Y.; Hu, L. Transparent Paper: Fabrications, Properties, and Device Applications. *Energ. Environ. Sci.* **2014**, 7, 269-287.
4. Li, Y.; Yang, X.; Fu, Q.; Rojas, R.; Yan, M.; Berglund, L. Towards Centimeter Thick Transparent Wood Through Interface Manipulation. *J. Mater. Chem. A* **2017**, 6, 1094-1101.
5. Li, W.; Chen, Z.; Yu, H.; Li, J.; Liu, S. Wood-derived Carbon Materials and Light-emitting Materials. *Adv. Mater.* **2020**, 33, 2000596.
6. Moon, R. J.; Martini, A.; Nairn, J.; Simonsen, J.; Youngblood, J. Cellulose Nanomaterials Review: Structure, Properties and Nanocomposites. *Chem. Soc. Rev.* **2011**, 40, 3941-3994.
7. Zhu, M.; Li, T.; Davis, C. S.; Yao, Y.; Dai, J.; Wang, Y.; AlQatari, F.; Gilman, J. W.; Hu, L. Transparent and Haze Wood Composites for Highly Efficient Broadband Light Management in Solar Cells. *Nano Energy* **2016**, 26, 332-339.
8. Mi, R.; Li, T.; Dalgo, D.; Chen, C.; Kuang, Y.; He, S.; Zhao, X.; Xie, W.; Gan, W.; Zhu, J.; Srebric, J.; Yang, R.; Hu, L. A Clear, Strong, and Thermally Insulated Transparent Wood for Energy Efficient Windows. *Adv. Funct. Mater.* **2019**, 30, 1907511.
9. Rai, R.; Ranjan, R.; Dhar, P. Life Cycle Assessment of Transparent Wood Production Using Emerging Technologies and Strategic Scale-up Framework. *Sci. Total Environ*. **2022**, 846, 157301.
10. Xia, Q.; Chen, C.; Ki, T.; He, S.; Gao, J.; Wang, X.; Hu, L. Solar-assisted Fabrication of Large-scale Patternable Transparent Wood. *Sci. Adv.* **2021**, 7, eabd7342.
11. Mi, R.; Chen, C.; Keplinger, T.; Pei, Y.; He, S.; Liu, D.; Li, J.; Hitz, E.; Yang, B.; Burgert, I.; Hu, L. Scalable Aesthetic Transparent Wood for Energy Efficient Buildings. *Nat. Comm.* **2020**, 11, 3836.
12. Samanta, P.; Samanta, A.; Montanari, C.; Li, Y.; Maddalena, L.; Carosio, F.; Berglund, L. A.; Fire-retardant and Transparetn Wood Biocomposite Based on Commercial Thermoset. *Compos. Appl. Sci. Manuf.* **2022**, 156, 106863.
13. Müller, U.; Rätzsch, M.; Schwanninger, M.; Steiner, M.; Zöbl, H. Yellowing and IR-changes of Spruce Wood as Result of UV-irradiation. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* **2003**, 69, 97-105.
14. Wang, J.; Deng, Y.; Qian, Y.; Qiu, X.; Ren, Y.; Yang, D. Reduction of Lignin Color *via* One-step UV Irradiation. *Green Chem.* **2015**, 18, 695-699.

**출판자 공지사항:** 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.