

지방산으로 처리한 목재의 실외용 소재로서 적용 가능성 평가

최시연 · 이경언 · 권오경* · 최원실* · 이영규* · 조상만** · 최준원*** · 양 인†

서울대학교 그린바이오과학기술연구원
25354 강원도 평창군 대화면 평창대로 1447
*서울대학교 농생명과학공동기기원
08826 서울특별시 관악구 관악로 1
**군산대학교 해양생명융합과학부
54150 전라북도 군산시 대학로 558
***서울대학교 국제농업기술대학원
25354 강원도 평창군 대화면 평창대로 1447

(2024년 8월 29일 접수, 2024년 10월 25일 수정본 접수, 2024년 10월 26일 채택)

Evaluating the Applicability of Wood Treated with Fatty Acid as a Raw Material for Exterior Uses

Siyeun Choi, Kyung Uhn Lee, Ohkyung Kwon*, Wonsil Choi*, Young-kyu Lee, Sang-Man Cho**, Joon weon Choi*** and In Yang†

Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Gangwon-do, 25354, Korea

**National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea*

***Department of Marine Biotechnology, Gunsan National University, Gunsan, 54150, Korea*

****Graduate College of International Agricultural Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Gangwon-do, 25354, Korea*

(Received 29 August 2024; Received in revised from 25 October 2024; Accepted 26 October 2024)

요 약

본 연구는 낙엽송, 단풍나무, 신갈나무, 삼나무(JAC) 시편에 지방산으로 피마자유(CAO), 피마자왁스(HCO), 대두유(SBO), 폐식용유(WCO)를 도포, 침지, 감압, 감가압법으로 주입한 후, 이 시편에 대한 염수 침수처리 과정을 통하여 측정된 지방산의 주입량, 용탈성, 치수안정성 및 야외 폭로에 의한 수분흡착률(MA)과 부피팽윤율(TVS) 결과를 토대로 지방산-주입 목재의 실외용 소재화 가능성을 평가하기 위하여 수행하였다. 주입량은 JAC 및 감가압법으로 처리한 시편에서 가장 많았다. 지방산-주입 시편의 염수 침수처리 과정에서 용탈에 의한 중량 감소는 주입량과 비례하였다. 그러나 지방산 처리 이후 양생과정에서 고체상으로 다시 변환하는 HCO를 주입한 시편에서 용탈량은 모든 처리 조건 중에 가장 적었다. 지방산-주입 시편은 대부분 팽윤되었으나, 감압 처리한 시편은 모두 수축하였다. 특히 HCO를 감압 주입한 시편은 타 지방산 주입 시편과 비교하여 수축률이 높았다. 지방산-주입 시편의 침수처리 이후 TVS는 지방산 주입에 의한 팽윤 또는 수축 정도가 클수록 낮았다. 한편 감압 처리를 통하여 수축한 시편은 침수처리를 통하여 지방산-주입 이전 치수로 근접하게 복원되었다. 야외 폭로한 지방산-주입 시편의 MA와 TVS는 수종 및 지방산의 종류와 상관없이 대조구보다 크게 낮았으며, HCO-주입 및 감가압 처리한 시편에서 가장 낮았다. 연구 결과를 종합하면, 목재에 지방산 주입은 가혹한 외부 환경에서 치수안정성 및 내습성 등을 제공함으로써 실외용 소재로서 적용이 가능할 것으로 생각된다. 특히 국내에서 원활한 확보와 낮은 구매가 등과 같은 경제성을 보유한 JAC에 HCO를 감압 처리하는 것이 최적 조건이라 판단된다.

Abstract – Fatty acids (FA), such as CAO, HCO, SBO and WCO, was treated into Japanese larch, soft maple, Mongolian oak and Japanese cedar (JAC) blocks using spreading, immersion, vacuum and vacuum-pressure methods. The FA-impregnated wood blocks were submerged in saline water. Uptake and leaching resistance of FA, total volumetric swellings (TVS) of FA-impregnated blocks after treating it and leaching of the FA-treated blocks, and

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dahadad@snu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

moisture absorption (MA) and TVS of FA-impregnated blocks after outdoor exposure were used to evaluate the applicability of FA-impregnated wood as a material for exterior uses. JAC blocks and using a vacuum-pressure method showed higher FA uptakes than other species and treating methods. Weight loss by leaching of FA during a saline water-immersion was proportional to the weight gain by the uptake of FA. However, most HCO-impregnated specimens were lower leachability than specimens treated with other FAs regardless of treating methods, due to the phase transformation of HCO into solid state during the curing process. Most specimens were swelled with the impregnation of FA. However, regardless of wood species, all specimens treated by a vacuum method were shrunk and the shrinkage rate of the HCO-impregnated specimens was higher than that of FA-impregnated specimens treated by other methods. TVS of FA-impregnated specimens after leaching reduced as the degree of the swelling and shrinkage of the FA-impregnated specimens increased. Interestingly, the dimension of specimens treated by a vacuum method was restored closely to its original dimension. MA and TVS of the FA-impregnated specimens after outdoor exposure were much lower than those of control specimens regardless of the types of species and fatty acid. The values of HCO-impregnated specimens treated by a vacuum-pressure method were the lowest. Overall, the impregnation of FA into wood provides the dimensional stability and moisture-tolerance property against severe external environments, and thus the FA-impregnated wood can be used as a material for exterior uses. Among the conditions examined in this study, the vacuum treatment of HCO into JAC is the optimal one based on the results of this study and the economic feasibility of JAC.

Key words: Fatty acid, Impregnation, Dimensional stability, Total volumetric swelling, Moisture absorption, Exterior uses

1. 서 론

목재는 재생가능한 자원으로 중량대비 높은 강도, 단열성, 가공성 및 작업성이 우수한 공학재료이다[1]. 그러나 목재의 구성 성분에 존재하는 수산기에 수분이 흡착됨에 따라 치수 변화가 발생하며, 이로 인하여 목재의 사용은 제한적으로 적용되고 있다. 따라서 목재를 친수성에서 소수성으로 개질하여 치수 안정화를 부여하는 다양한 물리화학적 처리기술에 대한 연구가 수행되었다[2-6]. 예를 들면, 가혹한 외부 환경에서 목재의 치수 안정화를 위하여 소수성 물질을 목재 표면에 처리하여 수분의 흡착을 방지하는 도포[7-9], 목재 성분에 acetylation, furfurylation 등과 같은 화학적 반응을 통한 개질[10-14], 열처리[15]와 같은 방법이 적용되고 있다. 이와 함께 세포 공극 및 세포벽 내에 불용성 물질을 침투시켜 수분의 흡착을 억제하여 세포벽의 팽윤을 최소화하는 함침 처리가 개발되었는데 urea-formaldehyde, phenol-formaldehyde, melamine-formaldehyde 등과 같은 열경화성 수지를 주로 주입하였다[16-19]. 이 외에 paraffin 또는 montan wax 등과 같은 왁스류를 이용하여 목재의 치수 안정화에 미치는 영향을 조사하였다[20-22]. 그러나 목재의 치수 안정화를 위하여 현재 연구 및 사용되고 있는 도포제, 개질 및 함침용 화합물은 상기에서 언급한 바와 같이 대부분 화석연료를 기반으로 제조되고 있어 기후변화, 지구온난화, 환경오염 및 인체 유해성에 대한 논란의 중심에 있다. 이와 같은 문제점 해결을 위한 대안으로 천연물-유래 발수제를 목재에 적용한 후, 이에 대한 효능을 확인하는 연구가 필요할 것으로 생각한다.

목재의 외부 환경 노출에 따른 부후 및 치수 변화의 억제를 위하여 사용되고 있는 천연물에는 유채유, 대두유, 아마유, 피마자유, 해바라기씨유, 홍화씨유 등과 같은 식물성 오일 및 레진, 식물성 또는 동물성 왁스 등과 같은 소수성 물질을 활용하는 방안에 대한 연구가 수행되었다[23-28]. 이 연구에서 식물성 오일을 가압, 침지, 감압 등과 같은 방법으로 목재에 주입한 후, 중량증가를 평가를 통하여 효과적인 처리법을 제시하였다[29,30]. 한편 Passialis와 Vougaridis (1999)는 aleppo pine(*Pinus halepensis* M.)의 잎과 수피에서 추출한 천연왁스가 소나무 및 너도밤나무에 소수성 성질을 제공함에 따라 발수제 조제에 있어 paraffin wax의 50%를 대체할 수 있다고 보고하였다[31]. 또한 목재에 왁스 주입이 치수 안정화 외에 주입량,

수종, 왁스의 종류 및 특성에 따라 강도, 경도, 휨강도, 충격강도 등을 향상시킨다고 보고하였다[32-34]. 이와 같이 왁스 처리에 따른 물성 향상은 목재 내에서 주요 성분과 왁스 간의 화학적 반응이 아닌 밀도 증가, 함수율 감소, 연성의 왁스 주입에서 기인한 결과이다[35]. 따라서 다양한 주입법을 이용하여 식물성 오일 및 왁스와 같은 지방산을 목재에 주입한 후, 이에 대한 주입량, 용탈성 및 치수 안정성 등에 대한 연구가 요구된다. 그러나 목재의 치수 안정성 향상을 위한 처리제로서 소수성의 지방산에 대한 적용 가능성을 상세하게 조사한 연구가 거의 수행되지 않았다.

본 연구에서는 화장품, 식품, 의약, 플라스틱, 윤활유 등과 같이 다양한 산업 분야에 널리 사용되는 원료인 피마자유(castor oil, 이하 CAO)와 이의 수소화반응을 통하여 제조한 피마자 왁스(hydrogenated castor oil, 이하 HCO), 국내에서 유통되고 있는 지방산 중에서 확보가 가장 용이한 대두유(soybean oil, 이하 SBO) 및 폐식용유(waste cooking oil, 이하 WCO)를 선정하여 국내 주요 수종인 낙엽송, 삼나무, 신갈나무와 함께 수입 수종인 단풍나무에 도포, 침지, 감압, 감가압법으로 주입하였다. 다음으로 지방산이 주입된 시편을 염수에 침수한 후, 각 지방산의 용탈량과 부피팽윤율을 조사하였다. 또한 용탈 실험이 사용된 시편을 야외에 장기간 노출시킨 후, 수분흡착율과 부피팽윤율을 측정하였다. 이 결과를 토대로 지방산으로 처리한 목재에 대한 실외용 소재로서 적용 가능성을 제시하고자 본 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 공시재료

국내 침엽수종인 낙엽송(*Larix kaempferi*, Japanese larch, 이하 LAR)과 삼나무(*Cryptomeria japonica* D., Japanese cedar, 이하 JAC), 국내 활엽수종인 신갈나무(*Quercus mongolica*, Mongolian oak, 이하 OAK), 수입 활엽수종인 단풍나무(*Acer saccharinum*, soft maple, 이하 MAP)를 (주) 행복홈우드테크(전남, 무안)에서 공급받아 공시목으로 사용하였다. 공시목의 치수안정성 향상을 위하여 적용된 지방산 중에 액상의 CAO는 비정제유로 (주) 에스엠그린(서울, 영등포), 플레이크 형태의 HCO는 Hebei Guanlang Biotechnology Co. Ltd.(Shijiazhuang, People's Republic of China), SBO는 시중 마트

에서 시판되고 있는 것을 구매하여 사용하였다. WCO는 서울대학교 평창캠퍼스 내의 구내식당에서 확보한 것을 일정 시간에 걸쳐 방치하여 침전된 이물질 제거 후, 20 mesh 표준망체를 통과한 것을 사용하였다.

수중, 지방산 및 처리법에 따른 주입능, 용탈성, 치수안정성 및 내습성의 차이를 조사하기 위하여 각 수중별 각재(25 mm × 25 mm × 500 mm)를 둥근톱을 이용하여 심변재 구분없이 정육면체(25 mm × 25 mm × 25 mm) 및 strip(70 mm × 25 mm × 5 mm, L × W × T) 형태로 절삭한 후, 시편으로 사용하였다.

2-2. 지방산의 물성 분석

액상 CAO, SBO, WCO의 점도는 점탄성측정기(Advanced Rheometric Expansion System, Rheometric Scientific Inc., Philadelphia, USA)를 이용하여 측정하였다. 측정 조건을 보면, 등온상태에서 1.0 mm gap을 유지하면서 25 mm parallel plate의 회전과 함께 발생하는 torque의 회전속도 변화를 이용하여 점도를 구하였다. 고체상인 HCO의 점도 분석은 105 °C 오븐에서 12시간 동안 보관하여 액상으로 변환시킨 후, 80 °C와 85 °C 온도로 액상의 지방산 점도 측정 방법과 동일하게 수행하였다.

CAO와 고체상인 HCO의 열안정성은 DTA/TGA 동시분석기(Simultaneous DTA/TGA analyzer, SDT 650, TA Instruments, New Castle, USA)를 이용하여 분석하였다. 분석 조건을 보면, purge gas로 N₂를 공급한 상태에서 승온온도를 10 °C/min로 유지하면서 상온에서 500 °C까지 온도차(DTA)와 열흐름 차이를 측정하였으며, 이를 통하여 CAO와 HCO의 흡열/발열, 열용량의 변화에 의한 전이점, 온도 상승에 따른 중량변화량(TGA)을 측정하여 열적 안정성을 분석하였다. 이 결과를 토대로 HCO의 녹는점이 88.3 °C로 조사되어 80 °C와 85 °C에서 점도를 측정하였다.

2-3. 지방산의 주입

액상의 CAO, SBO, WCO는 확보한 상태로 목재시편에 주입한 반면 고체상의 HCO는 105 °C 오븐에서 12시간 이상 보관하여 액상으로 변환시킨 이후 주입하였다.

목재시편에 대한 지방산의 주입은 도포, 침지, 감압, 감가압법을 적용하여 처리하였다. 도포법은 목재 시편을 액상의 지방산에 5초간 침지하여 처리하였으며, 침지법은 24시간 동안 처리하였는데 침지과정에서 목재 시편의 부유를 방지하기 위하여 중량추를 시편 위에 올려 놓았다. 또한 침지과정에서 목재시편의 밀착에 의하여 발생할 수 있는 주입량 차이를 최소화하기 위하여 플라스틱망으로 각각 분리한 후, 액상의 지방산을 목재시편이 충분히 담길 수 있도록 처리 용기에 부었다. 즉 처리군의 종류당 12개의 목재시편을 2리터 polypropylene통 내에 3층으로 배치하였는데 각 층마다 플라스틱 망을 삽입하여 목재시편간 밀착되어 지방산의 주입에 방해되는 요소를 최소화하였다. 이 과정에서 액상 지방산인 CAO, SBO, WCO는 상온에서 침지하였으나, HCO는 상온에서 고체상으로 변환되는 관계로 유리 비이커에 액상의 지방산 처리 방법과 동일한 방법으로 적재한 후, 105 °C 오븐에서 24시간 침지하였다. 감압법은 모든 목재시편이 완전히 침지되도록 충분한 양의 액상 지방산을 투입한 후, 본 연구를 위하여 제작된 주입관에 넣어 밀폐시키고 진공펌프로 15분간 550 mmHg로 감압하여 처리하였다. 감가압법은 감압법과 동일한 조건으로 감압한 후, 순차적으로 콤프레샤를 이용하여 15분간

4 kgf/cm²으로 가압하여 처리하였다. 다음으로 주입처리가 완료된 목재시편의 표면에 존재하는 지방산을 종이 핸드타올로 가볍게 문질러 제거하였으며, 이를 5일간 기건한 후, 70 °C 오븐에서 48시간 건조하였다. 최초 목재시편의 중량 대비 건조가 완료된 지방산-처리 목재시편 중량의 백분율로 계산하여 수중 및 처리법에 따른 지방산의 주입량(uptake)을 구하였다.

2-4. 지방산 주입목적 용탈성

용탈성 평가를 위하여 지방산의 주입량 측정이 완료된 목재시편을 플라스틱 박스에 놓은 후, 목재시편이 떠오르지 않도록 플라스틱 망에 teflon 관을 올려 놓았다. 다음으로 천일염을 이용하여 35 ppt 염도로 조제된 염수를 목재시편이 완전히 침지될 수 있도록 충분히 부은 후, 48시간 동안 용탈을 실시하였다. 용탈이 완료된 목재시편의 표면과 표층에 잔류할 수 있는 염의 제거를 위하여 냉수로 5회 이상 세척하였다. 세척된 시편을 최소 5일간 실험실 내에서 기건한 후, 70 °C 오븐에서 48시간 동안 건조하여 중량을 측정하였다. 목재시편에서 용탈되는 지방산의 양은 지방산-주입 목재시편과 용탈시킨 목재시편의 중량 차이로 구하였으며, 목재시편에 주입된 지방산의 양에 대한 용탈된 양을 백분율로 용탈성(leachability)을 계산하였다.

2-5. 치수안정성 평가

지방산-주입 목재시편의 염수 침수에 따른 치수 변화를 측정하기 위하여 strip 형태의 목재시편을 사용하였다. 먼저 strip 시편을 105 °C 오븐에서 12시간 이상 건조한 후, 데시케이터 내에서 충분히 방랭한 후, 시편의 길이, 너비, 두께를 측정하였다. 다음으로 2.3에서 서술한 방법과 동일하게 지방산을 주입한 strip 시편을 5일간 기건한 후, 70 °C 오븐에서 48시간에 걸쳐 건조한 strip 시편의 치수를 측정하여 지방산 주입에 따른 길이 변화를 조사하였다. 다음으로 지방산-주입 시편을 2.4에서 설명한 방법과 동일하게 염수에 2주간 침지하였다. 침지가 완료된 시편을 5일간 기건 그리고 순차적으로 70 °C 오븐에서 48시간 동안 건조한 후, 방향별 치수를 측정하여 수중, 지방산 및 처리법의 차이에 따른 지방산-주입 시편의 치수안정성을 비교하였다.

2-6. 수분흡착성 및 부피팽윤율

목재에 소수성의 지방산 주입에 따른 내습성 향상을 확인하기 위하여 지방산-주입 시편을 서울대학교 평창캠퍼스 내의 야외 실험실에 무처리재와 함께 2023년 6월 말에 2주간 노출시켰다. 지방산-주입 시편은 염수에 48시간 침수한 후, 5일간 기건 그리고 48시간 동안 70 °C 오븐에서 건조한 것으로 야외노출 이전 및 이후 목재시편의 중량 그리고 길이, 너비, 두께의 합인 부피 차이를 백분율로 계산하여 수분흡착성(moisture absorption, 이하 MA)과 부피팽윤율(total volumetric swelling, 이하 TVS)을 각각 구하였다.

2-7. 통계 분석

본 연구에서 조사된 실험인자는 수중(LAR, MAP, OAK, JAC), 지방산의 종류(CAO, HCO, SBO, WCO)와 처리법(도포, 침지, 감압, 감가압법)으로 각 인자별 지방산-처리목적 주입량, 용탈성, 치수안정성, MA, TVS에 미치는 영향을 조사하였다. 따라서 4 × 4 × 4 다원변량 분석법(factorial design)에 따라 실험을 설계하여 데이터를 분석하였다. 각각 12개의 정육면체 또는 strip 시편의 측정치에

대한 상기 인자의 영향은 Minitab 프로그램(Minitab LLC, Anyang, South Korea)의 ANOVA 명령어를 이용하여 95% 신뢰 범위에서 분산분석을 수행하였다. 통계학적으로 $p < 0.05$ 수준에서 유의성이 있다고 분석된 결과에 대하여 Fisher's LSD(least significant different: 최소유의차) 검정을 위한 다중비교 방법 중에 가장 많이 사용되는 Student t-test에 의하여 각 평균값 간의 차이에 대한 유의성을 추가로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 지방산의 점도 및 열안정성

Fig. 1은 본 연구에서 지방산으로 사용된 CAO, HCO, SBO, WCO의 점도를 나타낸 것이다. 측정 초기 구간에서 80 °C의 HCO 점도가 가장 높았는데 이는 열안정성 측정치를 확인한 결과, HCO의 녹는 온도가 88.3 °C인 관계로 충분히 액화되지 않아 나타난 결과라 생각한다. 그러나 85 °C에서 측정된 HCO의 점도는 본 연구에서 사용된 지방산 중에서 가장 낮았으며, 따라서 충분한 액화를 통한 HCO의 유동성 개선 효과를 확인할 수 있었다. 특히 이 점도 측정치는 85 °C에서 측정된 CAO의 점도보다 낮은 것으로 조사되어 HCO를 85 °C 이상에서 목재에 처리할 경우 용이하게 주입될 것으로 예상된다. 한편 상온에서 측정된 액상 지방산의 점도를 비교한 결과, WCO가 가장 높았으며, CAO와 SBO 간에는 큰 차이가 나타나지 않았다.

온도 상승에 따른 HCO의 열량변화(녹색선)를 측정된 결과, 상기에서 언급한 바와 같이 88.3 °C에서 녹는점이 나타났으며, 이 온도에서 발생하는 흡열량은 86.5 J/g로 측정되었다(Fig. 2-top). 이 결과를 토대로 고체상의 HCO는 85 °C 이상에서 액화시킨 후, 목재에 주입 처리하는 것으로 결정하였다. 온도 상승에 따른 중량감소율을 측정된 결과, HCO는 270 °C부터 중량감소가 일어났으며, 결과적으로 270 °C까지 열적으로 안정성을 보유했던 것을 알 수 있었다(Fig. 2-bottom). 이 과정에서 1개의 주 peak가 관찰되어 한 종류의 지방

산(stearic acid)이 차지하는 비중이 매우 크다는 것을 확인할 수 있었다[36]. 반면 CAO는 220 °C부터 중량감소가 발생하였으며, 3개의 주 peak가 나타나 3개의 지방산(ricinoleic acid, nervonic acid, linoleic acid)이 차지하는 비중이 클 것으로 예상된다[37]. 따라서 CAO는 HCO와 비교하여 이질적인 구성을 가지고 있어 열 안정성이 낮은 것으로 생각한다. 한편 TGA graph의 미분값으로 중량감소에 따른 기울기의 변화를 확인한 결과(적색선), HCO의 최대 중량감소율은 399.4 °C에서 나타났다.

3-2. 지방산 주입량

대조구인 무처리 시편을 포함하여 지방산을 주입한 각 수종별 목재시편의 외형은 Fig. 3과 같다. 지방산의 종류 및 주입법에 따른 목재 시편의 변형이나 결함은 발생하지 않았으나, 지방산의 종류에 따라 색상에 차이를 관찰할 수 있었다. 즉 CAO-, SBO-, WCO-주입 시편의 표면은 어두워졌으며, HCO를 주입한 시편은 밝아졌다. 그러나 지방산 주입시편과 대조구의 밝기 차이가 크지 않아 지방산 주입목의 적용에 있어 문제가 없을 것으로 생각한다.

지방산 및 처리법의 종류와 상관없이 목재시편 내로 주입된 지방산 양은 JAC(97.74%)에서 가장 많았으며, 다음으로 LAR(31.60%), MAP(20.60%), OAK(17.53%) 순으로 측정되었으며, 주입량은 침엽수 및 활엽수 여부와 상관없이 목재시편으로 사용된 수종의 밀도와 반비례하는 것으로 분석되었다. 즉 JAC(430 kg/m³)는 낮은 밀도를 보유한 수종인 반면 OAK(750 kg/m³), MAP(690 kg/m³), LAR(560 kg/m³)는 JAC와 비교하여 상대적으로 높은 밀도를 가지고 있어 목재 내로 지방산 침투가 제한됨에 따라 주입량에 차이가 발생한 것으로 생각한다[38-40].

Fig. 4은 각 수종에서 처리방법별 지방산 주입량을 비교한 결과이다. 감가압법으로 처리한 모든 수종에서 주입량이 가장 많았으며, 다음으로 감압, 침지, 도포 순으로 조사되었다. 한편 감가압 처리한 JAC와 LAR에서 지방산 종류에 따른 주입량의 차이는 없었으나, MAP와 OAK 시편에 대한 주입량은 일정한 경향을 보이지 않았다.

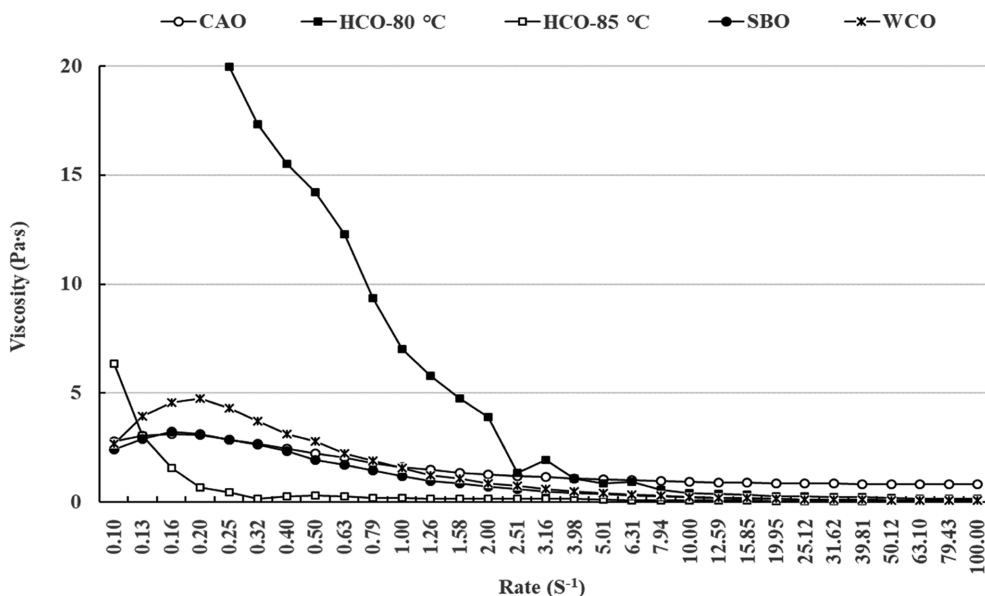


Fig. 1. Viscosity of fatty acids (CAO: castor oil; HCO-80 °C: hydrogenated castor oil measured at 80 °C; HCO-85 °C: hydrogenated castor oil measured at 85 °C; SBO: soybean oil; WCO: waste cooking oil) used in this study.

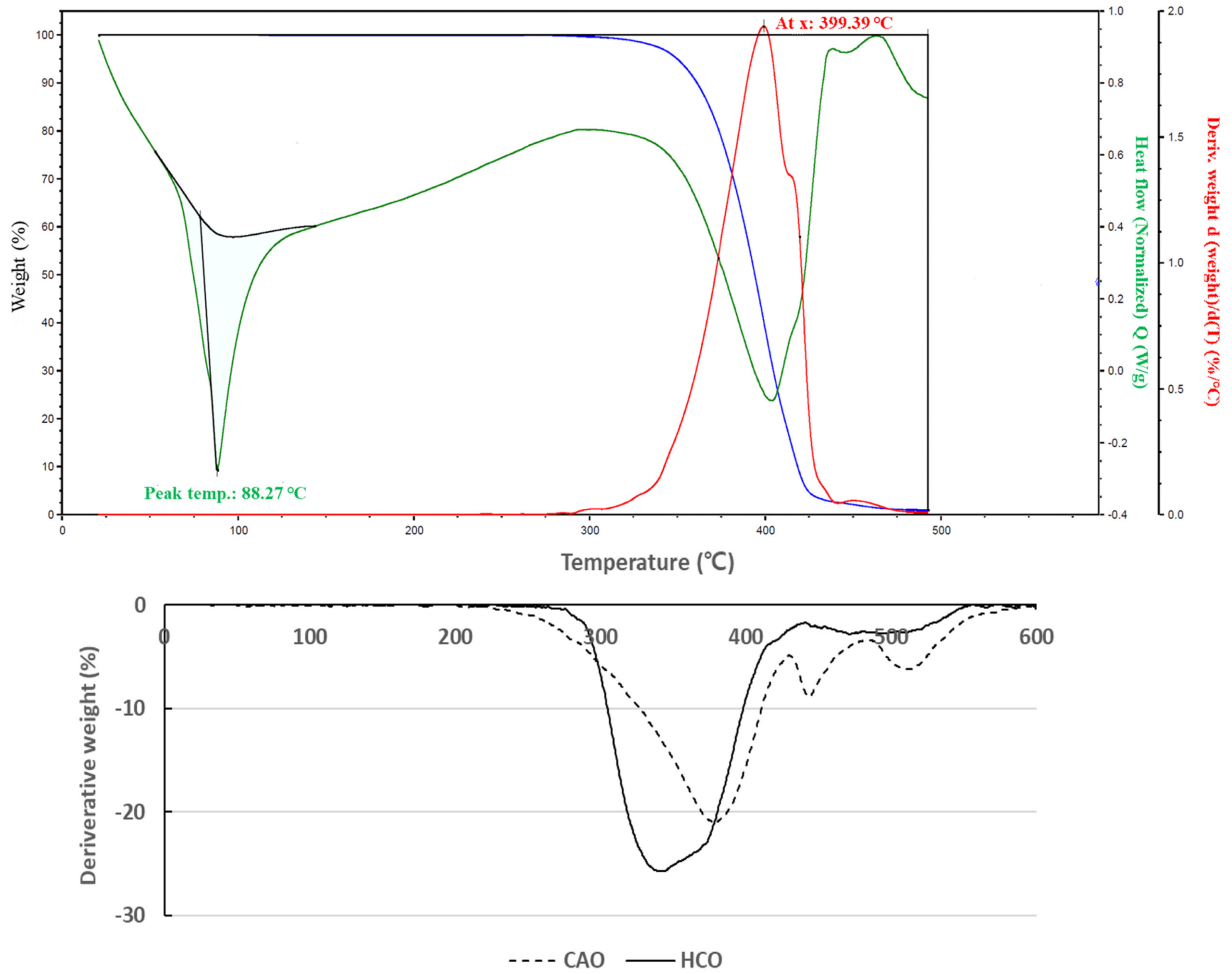


Fig. 2. Differential thermal (top) and thermogravimetric analyses (bottom) of hydrogenated castor oil and castor oil.

	LAR	MAP	OAK	JAC
Control				
Castor oil				
Hydrogenated castor oil				
Soybean oil				
Waste cooking oil				

Fig. 3. Images of wood blocks (LAR: Japanese larch; MAP: soft maple; OAK: Mongolian oak; JAC: Japanese cedar) treated with castor oil, hydrogenated castor oil, soybean oil and waste cooking oil.

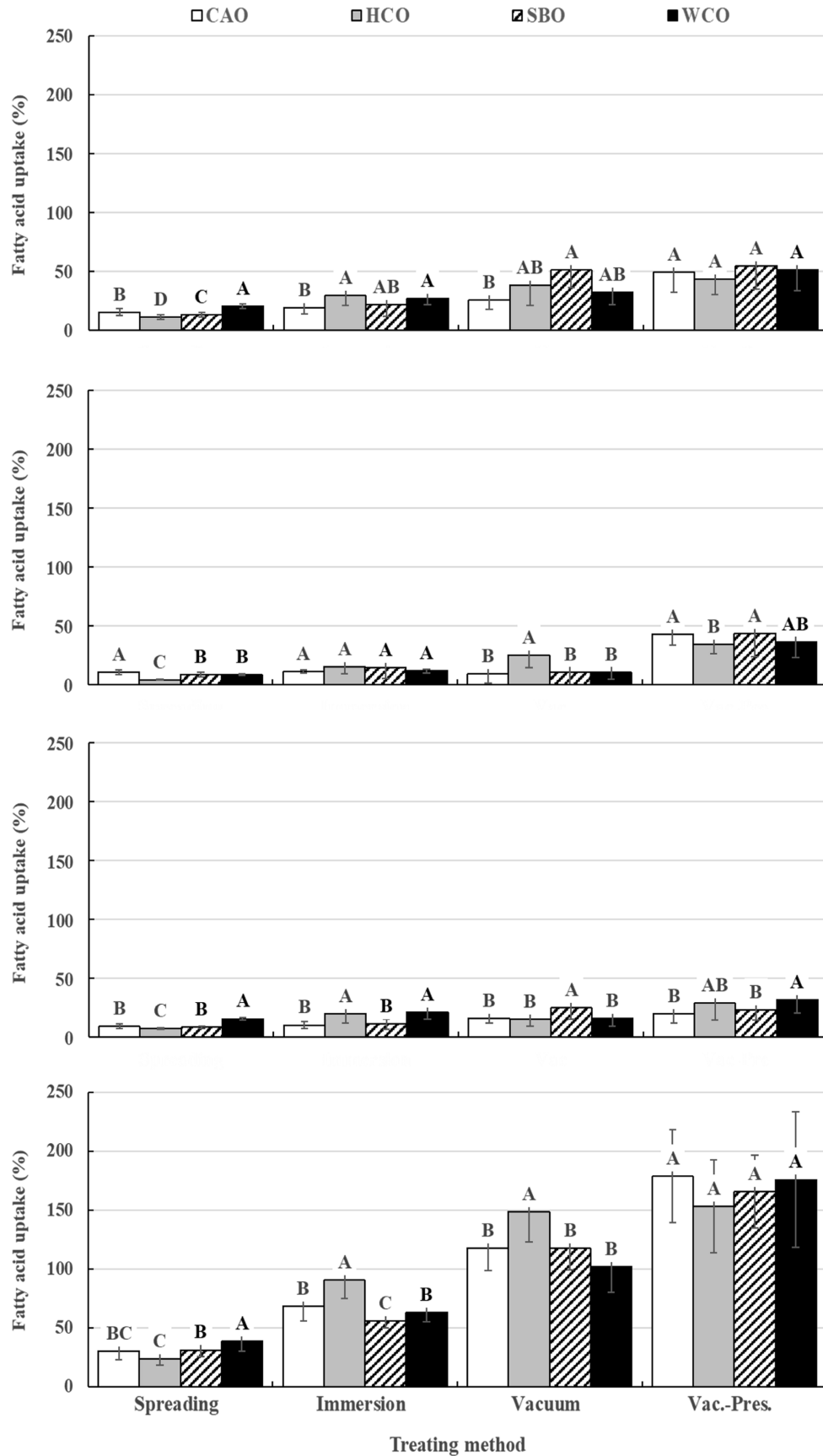


Fig. 4. Effect of the types of fatty acid and treating method on the fatty acid uptake of Japanese larch (top), soft maple (2nd row), Mongolian oak (3rd row) and Japanese cedar (bottom). Different capital letters over columns indicate significant difference at $p = 0.05$ (least significance difference test).

이는 밀도가 낮은 JAC 및 LAR에서 감가압 처리에 의하여 지방산이 종류와 상관없이 충분히 침투한 반면 밀도가 JAC 및 LAR과 비교하여 상대적으로 높은 MAP 및 OAK에서는 해부학적 구조의 차이로 인하여 지방산의 침투성에 차이가 발생하여 나타난 결과라 생각한다. 감압 및 침지 처리한 시편의 경우, 대부분 수중에서 HCO 주입량이 많았다. 이는 HCO가 일정 온도 이하에서 고체로 변환되는 왁스인 관계로 침투성 저하를 방지하기 위하여 고온(85 °C 이상)에서 처리함에 따라 점도가 낮고, 목재가 팽윤되며 세포벽의 미세공극 크기가 증가하여 HCO의 침투성이 개선되어 상온에서 처리한 SBO, CAO, WCO보다 주입량이 증가하여 나타난 결과라 생각한다. 반면 LAR, MAP, OAK에서 낮은 점도에도 불구하고 CAO 주입량이 SBO 또는 HCO보다 적었는데 이는 CAO를 구성하는 ricinoleic acid에 존재하는 수산기가 침투 과정에서 세포내강 또는 세포벽 내의 미세공극 표면에 존재하는 극성성분과 수소결합에 의한 마찰저항(frictional drag)이 발생하며 주입 속도가 지연되어 나타난 결과라 생각한다[41]. 도포 처리한 시편의 경우, WCO 주입량이 많았는데 이는 고온의 조리과정을 통하여 분자량이 감소함에 따라 목재 내로 용이하게 침투하여 나타난 결과라 생각한다. 한편 도포 처리한 대부분 수중의 시편에서 HCO 주입량이 가장 적었는데 이는 액상의 HCO를 도포하는 과정에서 저온의 목재 시편과 접촉하면서 빠르게 점도가 증가함에 따라 표면에만 적용되고 표층까지 침투하지 못하여 나타난 결과라 생각한다.

상기 결과를 종합하면, 감가압 및 감압 처리는 JAC 및 LAR 내부의 일정 깊이까지 지방산을 침투시켜 지방산별 주입량에 차이가 크지 않아 처리법으로 적합할 것으로 생각한다. 반면 침지 처리는 상온에서 처리한 CAO, SBO, WCO보다 고온에서 처리한 HCO의 주입량이 많았으나, 고온에서 24시간에 걸친 침지로 인하여 목재 조직의 열화에 대한 강도적인 측면에서 부정적인 영향을 확인할 필요가 있을 것으로 생각한다. 따라서 지방산별 처리법이 목재 시편의 용탈성, 치수안정성, 내습성 등에 미치는 영향의 비교와 함께 경제성을 고려하여 용도별 최적 지방산 및 처리법의 결정이 필요할 것으로 생각한다.

3-3. 용탈성

대조구인 무처리 LAR, MAP, OAK, JAC 시편을 염수에 침수 처리한 이후 측정된 중량은 각각 0.69%, 0.98%, 0.35%, 2.25% 증가하였다. 이는 염수 내에 존재하는 NaCl이 침수 과정 중에 목재의 공극 및 세포벽 내에 침투한 후, 양생과정에서 목재 조직 내에 잔류하여 나타난 결과라 추정된다, 특히 저밀도 수종인 JAC의 중량이 가장 많이 증가하였는데 이는 염수의 용이한 침투로 인하여 많은 NaCl이 조직 내에 잔류하여 나타난 결과로 판단된다.

수종별 용탈량은 MAP(0.03%)에서 가장 많았으며, 다음으로 JAC(-0.11%), LAR(-0.57%), OAK(-0.94%) 순으로 조사되었다. 주입량이 가장 적었던 OAK의 중량감소율이 가장 낮았던 이유는 침수 과정에서 염수 내에 함유된 NaCl이 방사조직을 통하여 표층 내부까지 침투한 후, 충분한 냉수 세척에도 불구하고 조직 내에 잔류하여 나타난 결과라 생각한다. 반면 JAC는 지방산의 용이한 침투로 심층의 세포벽까지 포화된 상태에서 표면을 포함하여 표층의 공극과 세포 간극에 존재하는 지방산이 침출되어 용탈량이 많았던 것으로 생각한다. LAR의 경우, JAC와 비교하여 높은 밀도로 인하여 지방산이 세포벽 표층에 분포한 관계로 염수가 세포벽 내부까지 침

투하지 못함에 따라 중량감소율이 낮았던 것으로 판단된다. 한편 MAP는 높은 밀도로 인하여 지방산 침투가 제한되어 대부분 표면에 잔류함에 따라 침수 처리를 통하여 많은 지방산이 용탈된 것으로 추정된다.

지방산의 용탈량을 처리법에 따라 비교한 결과, 감가압 처리 시편(0.45%)에서 가장 많았으며, 감압(-0.30%), 침지(-0.77%), 도포(-0.92%) 처리 시편 순으로 측정되었다. 이 결과로부터 주입된 지방산 양이 많을수록 용탈량이 많다는 것을 확인할 수 있었다. 한편 도포 및 침지 처리한 WCO-주입 시편의 용탈량이 모든 수중에서 SBO-주입 시편보다 많았는데 이는 WCO의 전구물질인 SBO를 구성하는 지방산이 조리 과정의 열처리로 인하여 분자량이 저하됨에 따라 침수 과정에서 쉽게 용탈되어 나타난 결과라 생각한다(Fig. 5). 한편 감압 처리로 지방산을 주입한 시편의 경우, HCO를 제외하고 모든 수중의 시편에서 지방산별 용탈량의 차이가 크지 않고 일정한 경향을 나타내었다. 이는 지방산 종류와 상관없이 감압 처리에 의하여 지방산이 세포벽 내로 충분히 주입됨에 따라 침수 과정에서 용탈이 제한적으로 발생하여 나타난 결과라 판단된다. 특히 감압 처리한 HCO-주입 시편의 경우, 양생과정을 통하여 HCO가 고상으로 변환된 관계로 침수 처리에 의한 용탈이 극히 제한적으로 일어난 것으로 추정된다. 감가압 처리한 CAO-주입 시편의 많은 용탈량은 SBO 또는 HCO와 상이하게 수산기를 가진 ricinoleic acid로 주로 구성된 관계로 침수 과정에서 수분과 반응하며 용탈되어 나타난 결과라 추정된다[37]. 반면 SBO는 대부분 소수성의 지방산으로 구성되었고, HCO는 상온에서 다시 내수성을 가진 고상의 왁스 형태로 변환됨에 따라 낮은 용탈량을 보인 것으로 사려된다.

결과를 종합하면, 용탈량은 지방산별로 WCO, CAO, SBO, HCO 순으로 그리고 처리법별로 도포, 침지, 감가압, 감압 순으로 적었다. 따라서 고습한 실내 및 실외 환경에서 장기간 노출된 목재의 내습성, 방수성 제공을 통한 치수안정성 향상을 위한 지방산 및 처리법으로 HCO와 감압 처리가 적합할 것으로 생각한다. 이를 위한 수종으로 국내 가용성, 가공성, 경제성 등을 고려하여 JAC가 가장 적합할 것으로 판단된다[42-44].

3-4. 치수안정성

지방산 주입 전후의 방향별 길이 측정을 통하여 얻은 LAR, MAP, OAK, JAC의 부피팽윤율(total volumetric swelling, 이하 TVS)은 각각 0.13%, 0.21%, 0.50%, -0.07%로 OAK가 가장 높았는데 이는 높은 밀도로 지방산 주입과 함께 세포벽이 가장 많이 팽윤되어 나타난 결과라 생각한다[45]. 처리법에 따라 측정된 TVS는 감가압 처리한 시편에서 전반적으로 높았는데 이는 타 처리법과 비교하여 상대적으로 많은 지방산이 주입되어 나타난 결과로 판단된다(Fig. 6). 이와 반대로 수종 및 지방산의 종류와 상관없이 감압-처리 시편의 TVS는 가장 낮았는데 이는 처리 과정에서 목재 조직 내에 존재하는 수분 또는 공기가 제거됨에 따라 수축되어 치수가 감소한 것으로 생각한다. 각 수종의 처리법별 지방산 종류에 따라 조사한 TVS는 감압 처리를 제외하고 WCO-처리 시편에서 가장 높았는데 이는 많은 주입량에서 기인한 결과이다(Fig. 4). 한편 HCO-도포 처리 시편의 TVS는 CAO- 및 SBO-도포 처리 시편보다 높았는데 이는 85 °C 이하에서 빠르게 고상으로 변환되는 HCO가 목재 조직 내로 침투하지 못하고 시편 표면에 남아 길이가 증가하여 나타난 결과라 생각한다. 반면 CAO를 침지 처리한 LAR, MAP,

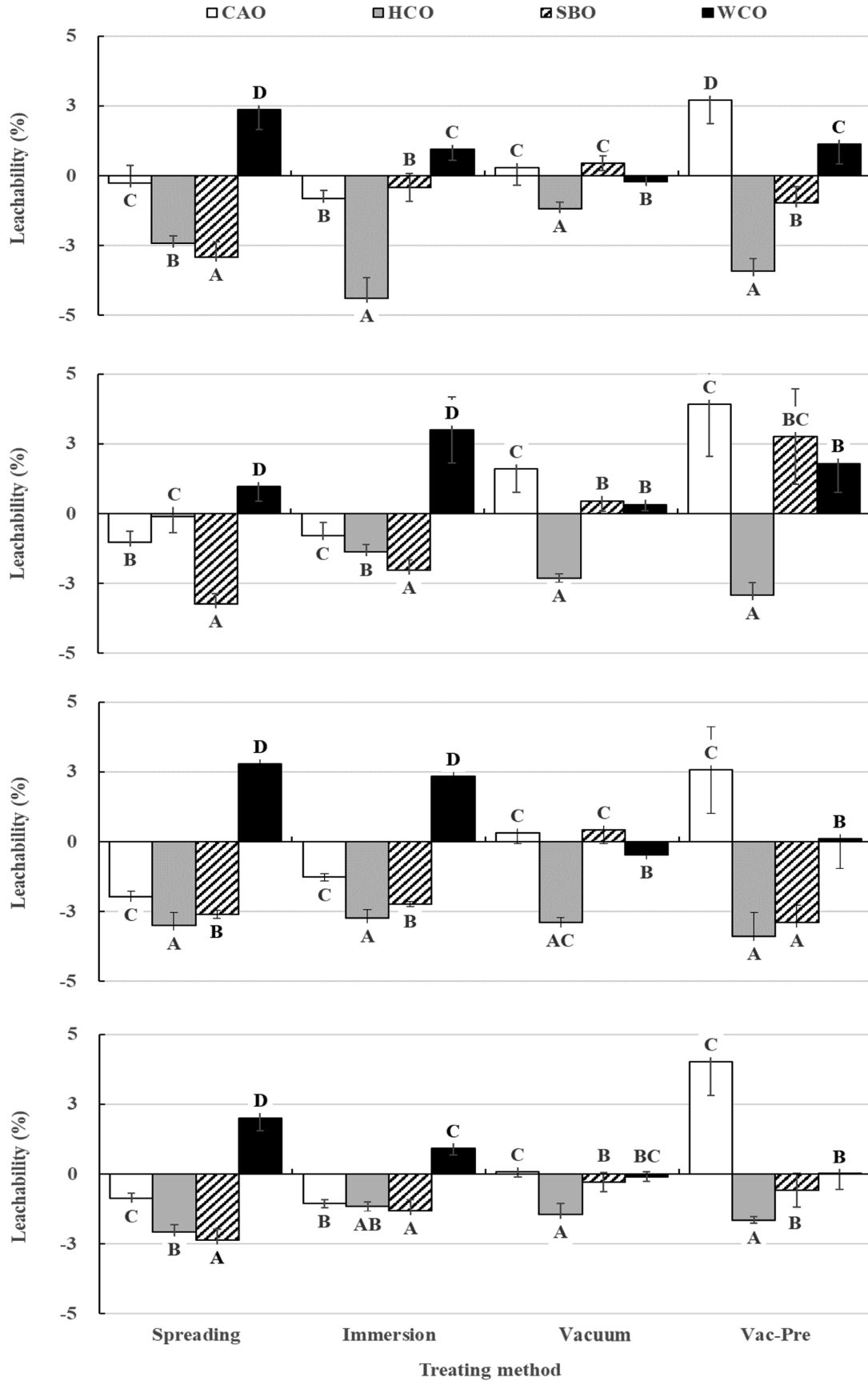


Fig. 5. Effect of the types of fatty acid and treating method on the leachability of fatty acid-impregnated Japanese larch (top), soft maple (2nd row), Mongolian oak (3rd row) and Japanese cedar (bottom) blocks immersed in saline water. Different capital letters over columns indicate significant difference at $p = 0.05$ (least significance difference test).

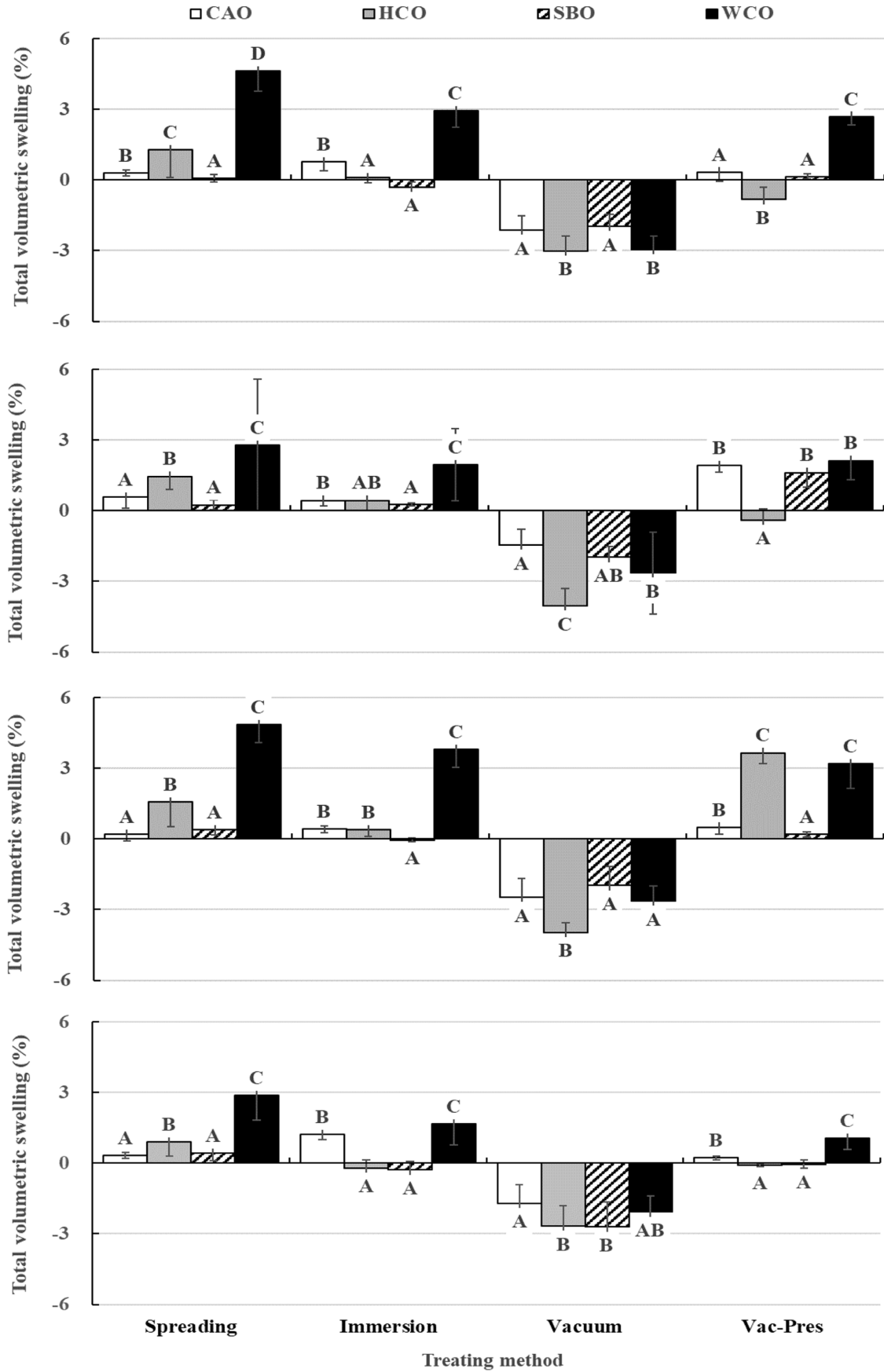


Fig. 6. Total volumetric swelling of Japanese larch (top), soft maple (2nd row), Mongolian oak (3rd row) and Japanese cedar (bottom) blocks after treating fatty acid. Different capital letters over columns indicate significant difference at p = 0.05 (least significance difference test).

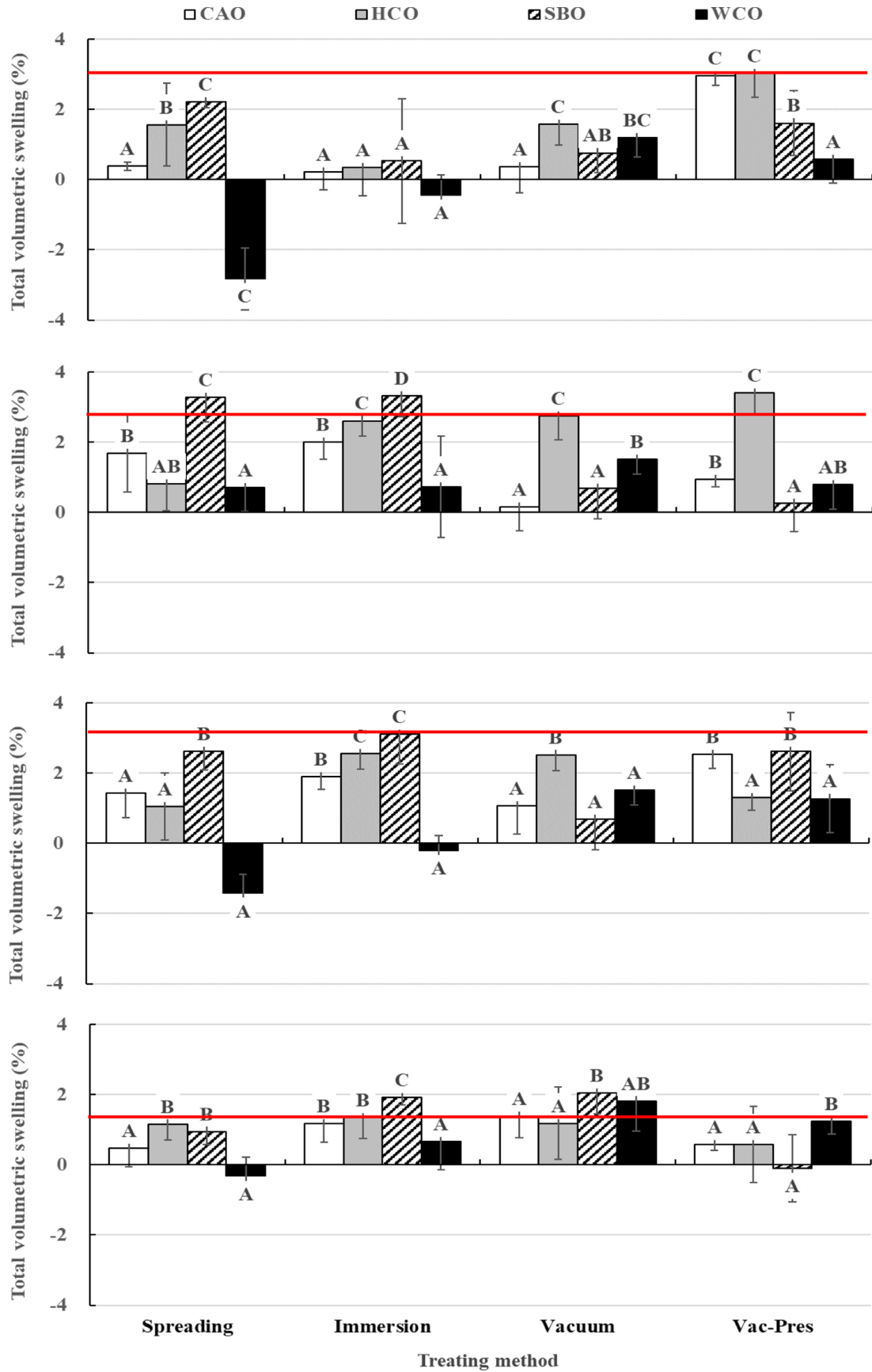


Fig. 7. Total volumetric swelling of fatty acid-treated Japanese larch (top), soft maple (2nd row), Mongolian oak (3rd row) and Japanese cedar (bottom) blocks after leaching in saline water for 48h. Different capital letters over columns indicate significant difference at $p = 0.05$ (least significance difference test). Red line means the TVS of control blocks of each species.

OAK 시편의 TVS는 주입량에서 차이가 없음에도 불구하고 SBO-침지 처리 시편보다 높았는데 이는 3.2에서 언급한 바와 같이 CAO의 주입시 발생하는 마찰 저항으로 SBO와 비교하여 내부 침투가 제한됨에 따라 표층에 대부분 분포한 CAO에 의한 국부적 부피 팽윤에서 기인한 결과라 추정된다. 감압 처리한 시편의 방사 및 접선 방향 길이는 대부분 감소하였으며, 특히 HCO-처리 시편의 TVS가 가장 낮았는데 이는 감압 처리에 의하여 목재 조직 내의 수분 및 공기의 제거 외에 HCO가 액상에서 고상으로 변환되며 수축 정도가 증가한 것으로 판단된다.

지방산-주입 시편을 48시간에 걸쳐 염수에 침수 처리한 이후 측정된 LAR, MAP, OAJ, JAC의 TVS는 각각 1.13%, 1.60%, 1.53%, 1.00%로 JAC에서 가장 낮았고, MAP에서 가장 높았다. 그러나 MAP와 OAK(p=0.49), LAR와 JAC(p=0.35) 간에 차이가 없었다. 처리법에 따라 측정된 LAR, MAP, OAK, JAC의 TVS는 각각 감가압(2.05%), 침지(2.17%), 침지/감가압(1.84%/1.93%), 감압(1.61%) 처리 시편에서 높았다. 이 결과는 TVS가 처리법보다 지방산의 종류 및 시편의 해부학적 구조에 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다. 따라서 무처리 시편을 포함하여 각 수종의 지방산-주입 시편의 TVS를 처리법별로 지방산의 종류에 따라 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다.

수종과 상관없이 본 연구에서 사용된 지방산 가운데 WCO를 도포 및 침지 처리한 시편의 TVS가 가장 낮았는데 이는 WCO 처리로 가장 많이 팽윤된 시편이 침수 처리와 함께 WCO가 용탈되면서 처리 이전 치수로 수축한 것으로 판단된다(Fig. 6). HCO를 도포 및 침지 처리한 LAR, MAP, OAK 시편의 침수 처리 이후 TVS는 SBO-도포 및 침지 처리 시편보다 전반적으로 낮았는데 이는 밀도가 높은 수종에 처리한 HCO가 빠르게 고화되며 주로 시편 표면에 잔류하여 수분의 침투를 억제한 반면 저점도의 SBO는 공극을 통하여 표층까지 침투하여 표면의 연속적인 방수막이 형성되지 않음에 따라 세포벽에 수분이 침투하여 발생한 결과라 추정된다. HCO와 SBO를 도포 처리한 JAC 시편의 TVS는 차이가 없었는데 이는 JAC가 저밀도 수종인 관계로 SBO뿐만 아니라 도포 처리한 HCO도 표층의 세포벽에 침투하여 나타난 결과로 판단된다. 유사하게 HCO-침지 처리 JAC 시편의 TVS가 SBO-침지 처리 시편의 TVS보다 낮았는데 이는 고온에서 24시간에 걸친 HCO의 침지 처리에 따른 세포벽 내에 침투 깊이의 증가에서 기인한 결과로 사려된다. 한편 CAO-도포/침지 처리 시편의 TVS는 대부분 수종의 시편에서 SBO-도포/침지 처리 시편보다 낮았는데 이는 상기에서 언급한 바와 같이 수산기를 가진 지방산(ricinoleic acid)으로 대부분 구성된 CAO가 세포벽에 침투하면서 발생하는 마찰 저항으로 SBO보다 표층에 많이

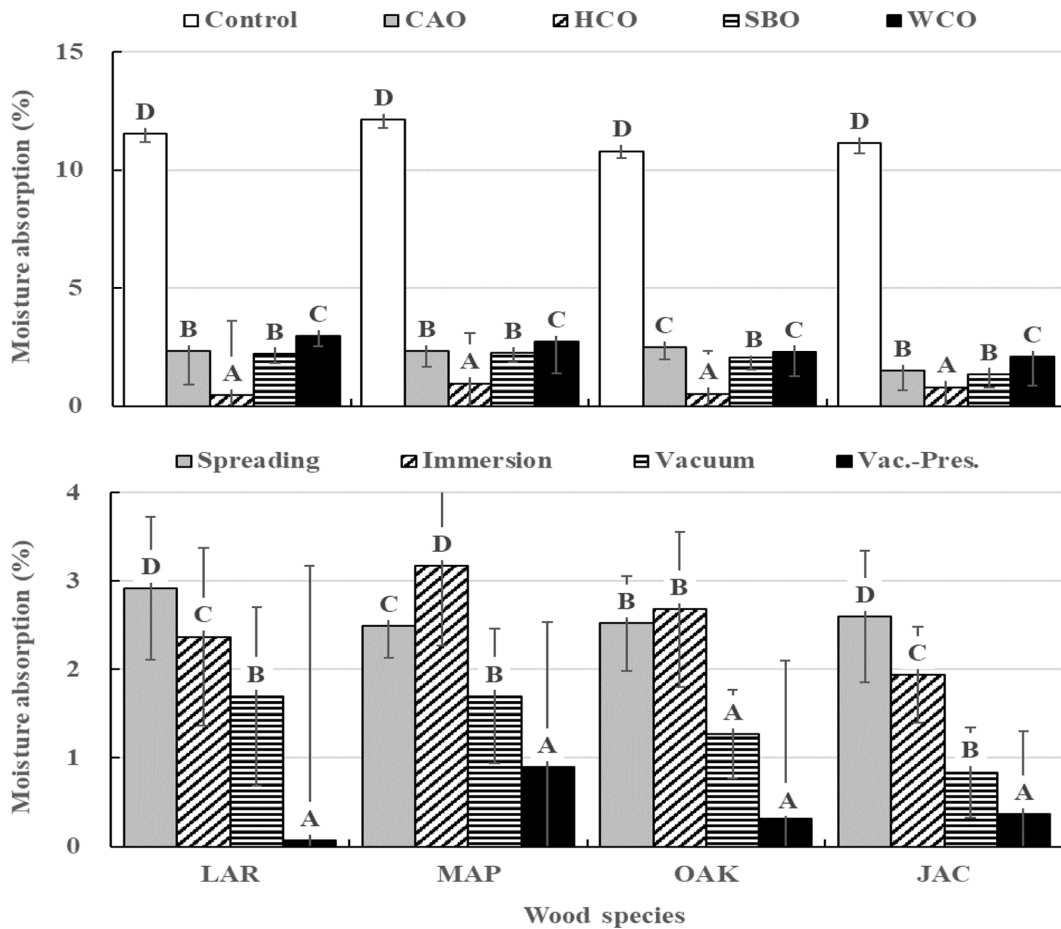


Fig. 8. Effect of the type of fatty acid (top) and treating method (bottom) on the moisture absorption of Japanese larch (LAR), soft maple (MAP), Mongolian oak (OAK) and Japanese cedar (JAC) blocks, which were treated with fatty acid and then immersed in saline water for 48h, after outdoor exposure for 2 weeks. Different capital letters over columns indicate significant difference at p = 0.05 (least significance difference test).

남아 침수 처리시 수분의 접근을 제한함에 따라 부피 팽윤이 억제된 것으로 생각한다.

감압 처리한 시편의 침수 처리 이후 TVS는 지방산별 주입 이후 수축에 따른 치수 변화가 클수록 낮았는데 이는 감압 처리에 의하여 조직 내의 공기 및 수분이 제거됨으로써 수축한 시편에 침수 처리로 수분이 침투하면서 형태가 복원되어 나타나 결과라 생각한다 (Fig. 6). 반면 감가압 처리한 시편의 경우, 감압 처리로 수축한 조직에 가압 처리로 인한 지방산 주입으로 팽윤된 상태에서 수축 및 지방산의 종류에 따라 과도하게 지방산이 주입되어 팽윤 정도가 큰 시편은 침수 과정에서 수분의 침투가 제한되어 TVS가 낮은 것으로 판단된다.

TVS 측정 결과를 종합하면, 각 수종별 시편의 주입 이전 치수와 각 처리법에 의하여 지방산이 주입한 시편의 침수 처리 이후 치수의 차이를 분석한 결과, 감압법이 지방산 처리로 인하여 시편이 수축한 이후 침수 처리를 통하여 원래 치수로 복원된 것으로 나타나 치수 안정화 측면에서 가장 적합한 처리법으로 판단된다. 그러나 상기 추론의 확인을 위하여 시편의 지방산 침투 정도에 지방산 및 처리법의 종류가 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되어 X-ray를 이용한 지방산 침투 정도를 비교하는 연구를 수행하였으며, 그 결과는 추후 관련 논문 게재를 통하여 소명할 예정이다.

3-5. 내습성

용탈성 실험에 사용된 시편을 2주간 야외에 노출시킨 후, 증가한 중량을 적용하여 얻은 수분흡착율(moisture absorption, 이하 MA)은 수종 및 지방산의 종류와 상관없이 대조구보다 지방산-주입 시편에서 크게 낮아 목재에 지방산 처리가 수분 흡착을 억제하는 것으로 조사되었다(Fig. 8). 또한 각 수종의 MA를 지방산별로 비교한 결과, HCO-주입 시편이 가장 낮았으며, WCO-주입 시편이 가장 높았는데 이는 지방산별 용탈 저항성의 차이에서 기인한 결과로 생각한다[46]. 처리법별 MA는 감가압, 감압, 침지 또는 도포 순이었는데 이는 주입량과 비례 관계가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 MA 측정에 사용된 시편의 TVS 측정치로서 대조구와 비교하여 지방산-주입 시편의 TVS가 낮았으며, 특히 HCO-주입 시편의 TVS가 모든 수종에서 가장 낮았다. 처리법에 따라 TVS를 비교한 결과, 감가압 처리한 시편에서 가장 낮았으며, 감압, 도포 또는 침지 순으로 조사되었다. 야외 노출한 시편의 MA 및 TVS 결과로부터 지방산 주입량이 많고, 지방산-주입 시편의 침수 처리 과정에서 용탈량이 적을수록 MA와 TVS가 낮은 것으로 나타났다. 따라서 가혹한 조건의 노출 환경에서 지방산-주입목의 실내외용 소재로서 적용 가능성을 확인할 수 있었으며, 특히 목재 원료에 대한 국내 가용성, 지방산 처리 비용 및 안전성 등을 고려하여 JAC에 HCO를 감압 처리하는 것이 최적 조건인 것으로 사려된다.

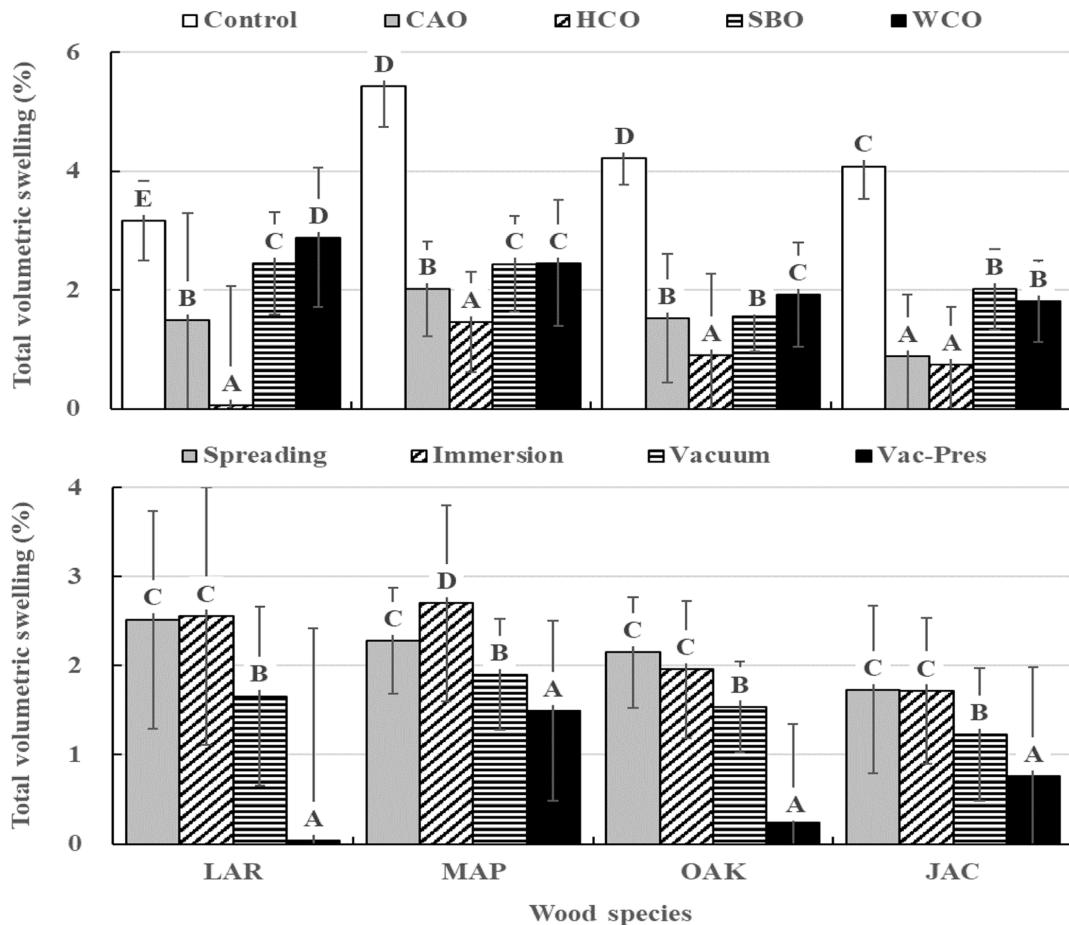


Fig. 9. Effect of the type of fatty acid (top) and treating method (bottom) on the total volumetric swelling of Japanese larch (LAR), soft maple (MAP), Mongolian oak (OAK) and Japanese cedar (JAC) blocks, which were treated with fatty acid and then immersed in saline water for 48h, after outdoor exposure for 2 weeks. Different capital letters over columns indicate significant difference at $p = 0.05$ (least significance difference test).

4. 결 론

본 연구는 수분의 흡탈착에 의하여 발생하는 목재의 치수 변화, 부후균 및 해충 등에 의한 생물학적 열화 등의 억제제를 위하여 소수성의 지방산을 다양한 처리법으로 목재에 주입 및 침수 처리하였다. 이 과정을 통하여 측정된 지방산의 주입량과 용탈성, 부피팽윤율 및 야외노출에 의한 수분흡착률과 부피팽윤율 측정 결과를 토대로 지방산-주입목의 실외용 소재로서 적용 가능성을 제시하고자 본 연구를 수행하였으며, 그 결과를 통하여 얻은 결론은 아래와 같다.

(1) 지방산 가운데 85 °C에서 측정된 HCO의 점도가 가장 낮았으며, 다음으로 상온에서 측정된 CAO, SBO, WCO, 80 °C에서 측정된 HCO 순으로 조사되었다.

(2) 수종별 지방산 주입량은 JAC에서 가장 많았으며, LAR, MAP, OAK 순이었다. 처리법별 지방산 주입량은 감가압, 감압, 침지 또는 도포 순으로 조사되었다.

(3) 대조구로 사용된 무처리 시편의 중량은 염수에 침수 처리 후에 증가하였는데 이는 침수액에 포함된 NaCl이 목재 조직 내에 침투한 후, 세척 이후 조직 내에 잔류하여 나타난 결과이다. 수종 및 처리법에 따른 용탈량은 각각 MAP, JAC, LAR, OAK 그리고 감가압, 감압, 침지, 도포 순으로 적었다.

(4) 지방산을 주입한 시편의 TVS는 수종별로 JAC, LAR, MAP, OAK 그리고 처리법별로 감압, 침지, 도포, 감가압 순으로 높았다. 특히 감압 처리한 모든 수종의 시편은 수축하였으며, 수축 정도는 HCO-주입목에서 가장 큰 것으로 조사되었다. 지방산-주입 시편의 침수 처리 이후 측정된 TVS는 JAC, LAR, OAK, MAP 순으로 높았으나, JAC와 LAR 그리고 MAP와 OAK 간에 차이가 없었다. 처리법에 따른 TVS는 수종에 따라 차이가 있었으나, 전반적으로 WCO를 도포 및 침지 처리한 시편에서 가장 낮았다.

(5) 야외 폭로한 지방산-주입 시편의 MA와 TVS는 수종 및 지방산의 종류와 상관없이 대조구보다 크게 낮았으며, 특히 HCO, CAO, SBO, WCO 주입 시편 순으로 높았다. 처리법별 MA와 TVS는 감가압, 감압, 침지 또는 도포 순으로 높았다.

본 연구에서 사용된 모든 지방산의 주입이 가혹한 외부 환경에서 목재에 치수안정성 및 내습성을 제공하였으며, 이 가운데 JAC에 HCO를 감압하여 주입하는 것이 최적의 수종, 지방산 및 처리법으로 확인되었다. 따라서 이 조건으로 생산된 처리목의 경우 실외용 소재로서 적용이 가능할 것으로 생각한다. 그러나 HCO-주입목의 상용화를 위하여 방염, 강도 등에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 생각하여 현재 이에 대한 연구를 수행하고 있다.

감 사

본 연구는 산림청의 “목재자원의 고부가가치 첨단화 소재개발 사업”의 지원에 의하여 수행되고 있습니다(2023490A00-2325-AA01). 본 연구를 위하여 여러 조인과 도움을 주신 ㈜ 행복복우 드테크의 문명철대표님과 김다연과장님, 주약관을 제작한 ㈜ 이지엠의 이재영대표님과 대운전기의 임기태대표님에게 감사드립니다.

References

- Rowell, R. M., Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, CRC Press, Boca Raton, 447-457(2005).
- Ramsden, M. J., Blake, F. S. R. and Fey, N. J., “The Effect of Acetylation on the Mechanical Properties, Hydrophobicity, and Dimensional Stability of *Pinus Sylvestris*,” *Wood Sci. Technol.*, **31**(2), 97-104(1997).
- Devi, R. R., Ali, I. and Maji, T. K., “Chemical Modification of Rubber Wood with Styrene in Combination with a Crosslinker: Effect on Dimensional Stability and Strength Property,” *Biore-sour. Technol.*, **88**(3), 185-188(2003).
- Cai, X., Riedl, B., Zhang, S. Y. and Wan, H., “Effects of Nanofillers on Water Resistance and Dimensional Stability of Solid Wood Modified by Melamine-urea-formaldehyde Resin,” *Wood Fiber Sci.*, **39**(2), 307-318(2007).
- Rowell, R. M., Ibach, R. E., James, M. and Thomas, N., “Understanding Decay Resistance, Dimensional Stability and Strength Changes in Heat-treated and Acetylated Wood,” *Wood Mater. Sci. Eng.*, **4**(1-2), 14-22(2009).
- Gabrielli, C.P. and Kamke, F.A., “Phenol-formaldehyde Impregnation of Densified Wood for Improved Dimensional Stability,” *Wood Sci. Technol.*, **44**(1), 95-104(2010).
- Tshabalala, M.A., Kingshott, P., VanLandingham, M.R. and Plackett, D., “Surface Chemistry and Moisture Sorption Properties of Wood Coated with Multifunctional Alkoxysilanes by Sol-gel Process,” *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**(12), 2828-2841(2003).
- Hsieh, C.T., Chang, B.S. and Lin, J.Y., “Improvement of water and Oil Repellency on Wood Substrates by Using Fluorinated Silica Nanocoating,” *Appl. Surf. Sci.*, **257**(18), 7997-8002(2011).
- Wang, S., Shi, J., Liu, C., Xie, C. and Wang, C., “Fabrication of a Superhydrophobic Surface on a Wood Substrate,” *Appl. Surf. Sci.*, **257**(22), 9362-9365(2011).
- Epmeier, H., Westin, M. and Rapp, A., “Differently Modified Wood: Comparison of Some Selected Properties,” *Scand. J. For. Res. Suppl.*, **19**(5), 31-37(2004).
- Westin, M., Sterley, M., Rossi, F. and Hervé, J.J., “Compreg-type Products by Furfurylation during Hot-pressing,” *Wood Mater. Sci. Eng.*, **4**(1-2), 67-75(2009).
- Moheby, B. and Militz, H., “Microbial Attack of Acetylated Wood in Field Soil Trials,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, **64**(1), 41-50(2010).
- Ashori, A., Matini B.H. and Tarmian, A., “Effects of Chemical Preservative Treatments on Durability of Wood Flour/HDPE Composites,” *Compos. Part B.*, **47**, 308-313(2013).
- Xie, Y., Fu, Q., Wang, Q., Xiao, Z. and Militz, H., “Effects of Chemical Modification on the Mechanical Properties of Wood,” *Eur. J. Wood Prod.*, **71**(4), 401-416(2013).
- Kartal, S. N., “Combined Effect of Boron Compounds and Heat Treatments on Wood Properties: Boron Release and Decay and Termite Resistance,” *Holzforschung*, **60**(4), 455-458(2006).
- Deka, M. and Saikia, C. N., “Chemical Modification of Wood with Thermosetting Resin: Effect on Dimensional Stability and Strength Property,” *Bioresour. Technol.*, **73**(2), 179-181(2000).
- Gindl, W., Dessipri, E. and Wimmer, R., “Using UV-microscopy to Study Diffusion of Melamine-urea-formaldehyde Resin in Cell Walls of Spruce Wood,” *Holzforschung*, **56**(1), 103-

- 107(2002).
18. Furuno, T., Imamura, Y. and Kajita, H., "The Modification of Wood by Treatment with Low Molecular Weight Phenol-formaldehyde Resin: A Properties Enhancement with Neutralized Phenolic-resin and Resin Penetration into Wood Cell Walls," *Wood Sci. Technol.*, **37**(5), 349-261(2004).
 19. Hazarika, A. and Maji, T.K., "Properties of Softwood Polymer Composites Impregnated with Nanoparticles and Melamine Formaldehyde Furfuryl Alcohol Copolymer," *Polym. Eng. Sci.*, **54**(5), 1019-1029(2014).
 20. Colak, M. and Peker, H., "Effects of Some Impregnation Chemicals and Water Repellents on the Hygroscopicity of Beech Wood," *Wood Res.*, **52**(1), 87-98(2007).
 21. Lesar, B., Straže, A. and Humar, M., "Sorptions Properties of Wood Impregnated with Aqueous Solution of Boric Acid and Montan Wax Emulsion," *J. Appl. Polym. Sci.*, **120**(3), 337-345(2011).
 22. Huang, X., Kocaefe, D., Kocaefe, Y., Boluk, Y. and Pichette, A., "Study of the Degradation Behavior of Heat-treated Jack Pine (*Pinus banksiana*) under Artificial Sunlight Irradiation," *Polym. Degrad. Stab.*, **97**(7), 1,197-1,214(2012).
 23. Oyewole, O.I., Owoseni, A.A. and Faboro, E.O., "Studies on Medicinal and Toxicological Properties of *Cajanus cajan*, *Ricinus communis* and *Thymus vulgaris* Leaf Extracts," *Res. J. Med. Plant*, **4**, 2004-2006(2010).
 24. Terziev, N. and Panov, D., *Plant Oils as Green Substances for Wood Protection. Minimising the Environmental Impact of the Forest Products Industries*, Springer, Berlin/Heidelberg, 143-149(2011).
 25. Singh, T. and Singh, A.P., "A Review on Natural Products as Wood Protectant," *Wood Sci. Tech.*, **46**(5), 851-870(2012).
 26. Humar, M. and Lesar, B., "Efficacy of Linseed- and Tung-oi Treated Wood against Wood-decay Fungi and Water Uptake," *Int. Biodeter. Biodegr.*, **85**, 223-227(2013).
 27. Gonzalez-Laredo, R.F., Rosales-Castro, M., Rocha-Guzman, N.E., Gallegos-Infante, J.A., Moreno-Jimenez, M.R. and Karchesy, J.J., "Wood Preservation Using Natural Products," *Madera Bosques*, **21**, 63-76(2015).
 28. Patachia, S. and Croitoru, C. *Biopolymers for Wood Preservation. In Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Construction Materials*, Elsevier, Amsterdam, 305-332(2016).
 29. Ibach, R. E., "Wood Handbook-Wood as an Engineering Material," *Gen. Tech. Replications*. FPL-GTR-113. 463(1999).
 30. Archer, K. and Lebow, S., In: J.C.F. Walker (Ed.), *Primary Wood Processing: Principles and Practice: Wood Preservation*, Springer Dordrecht, New York, 297-338(2006).
 31. Passialis, C. N. and Voulgaridis, E. V., "Water Repellent Efficiency of Organic Solvent Extractives from Aleppo Pine leaves and Bark Applied to Wood," *Holzforschung*, **53**(2), 151-155(1999).
 32. Taman, A. R., Mohamed, S. Z. and Negieb, Z. R., "Effect of Addition of Petroleum Wax on Wood Pulp for Paper Making," *Res. Ind.*, **35**(1), 52-56(1999).
 33. Papadopoulos, A. N. and Hill, C. A. S., "The Sorption of Water Vapour by Anhydride Modified Softwood," *Wood Sci. Technol.*, **37**(3-4), 221-231(2003).
 34. Liu, C., Wang, S., Shi, J. and Wang, C., "Fabrication of Superhydrophobic Wood surfaces via a Solution-immersion Process," *Appl. Surf. Sci.*, **258**(2), 761-765(2011).
 35. Scholz, G., Krause, A. and Militz, H., "Full Impregnation of Modified Wood with Wax," *Eur. J. Wood Prod.*, **70**(1-3), 91-98(2012).
 36. Ahmed, S., Fatima, R., Nisar, M. S. and Hassan, B., "Evaluation of Castor Bean Oil on *Acacia Nilotica* as Wood Preservative against *Odontotermes obesus* (Ramb.) (Termitae: Isoptera)," *Int. Wood Prod. J.* **5**(1), 5-10(2014).
 37. Chauke, N. P., Mukaya, H. E. and Nkazi, D. B., "Chemical Modification of Castor Oil: A Review," *Sci. Prog.*, **10**, 199-217(2019).
 38. Hong, N., Won, K., Yoo, B., Jung, S. and Byeon, H., "Mechanical Properties of *Cryptomeria japonica* by the Differences of Stand Characteristics in Southern Region of Korea," *J. Kor. Wood Sci. Technol.*, **43**, 320-326(2015).
 39. Park, Y., Han, Y., Park, J., Chang, Y., Yang, S., Chung, H., Kim., K. and Yeo, H., "Evaluation of Physico-mechanical Properties and Durability of *Larix Kaempferi* Wood Heat-treated by Hot Air," *J. Kor. Wood Sci. Technol.*, **43**(3), 334-343(2015).
 40. Meier, E., "Difference Between Hard Maple and Soft Maple," (2022) <https://www.wood-database.com/wood-articles/differences-between-hard-maple-and-soft-maple/> [Assessed at August 12, 2022].
 41. Nicholas, D. D. and Siau, J. F., "Wood Deterioration and its Prevention by Preservatives Treatments: Factors Influencing the Treatability of Wood," Syracuse University Press, New York, **2**, 299-343(1973).
 42. Kim, K., Park, J., Park, B., Son, D., Park, J., Kim, W., Kim, B. and Shim, S., "Physical and Mechanical Properties of Heat-treated Domestic Cedar," *Mokchae Konghak*, **37**(4), 330-339(2009).
 43. Kim, C., Baek, G., Choi, B., Ha, J., Bae, E. J., Lee, K. and Son, Y. M., "Carbon Stocks of Tree, Forest Floor, and Mineral Soil in *Cryptomeria Japonica* and *Chamaecyparis Obtusa* Stands," *J. Kor. Soc. For. Sci.*, **109**(2), 169-178(2020).
 44. Itaka, S., "Economic Analysis of Cedar Plantation Management and Mega-Solar Replacement," *Forests*, **12**(3), 361(2021).
 45. Yang, I., Kim, S. and Han, G. "Effect of Moisture Content of Sawdust and Length to Diameter Ratio of a Hole in Flat-die Pelletizer on the Fuel Characteristics of Wood Pellets Produced with *Quercus mongolica*, *Pinus densiflora*, *Pinus rigida* and *Larix kaempferi*," *J. Kor. Wood Sci Technol.*, **45**(4), 382-398(2017).
 46. Kwon, O., Choi, Y. S., Kim, D., Choi, W., Lee, Y., Kim, K., Choi, J. W. and Yang, I., "Weatherproof-properties Evaluation of Castor Oil-impregnated Wood Using a Vacuum-pressure Method," *Kor. Chem. Eng. Res.*, **61**(2), 302-311(2023).

Authors

Siyeun Choi: Researcher, Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Gangwon-do, 25354, Korea; freety711@snu.ac.kr

Kyung Uhn Lee: Researcher, Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Gangwon-do, 25354, Korea; filmactor@snu.ac.kr

Ohkyung Kwon: Research Professor, National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea; zoom@snu.ac.kr

Wonsil Choi: Research Professor, National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea; choialla@snu.ac.kr

Young-kyu Lee: Research Professor, National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea; woodlee9@snu.ac.kr

Sang-Man Cho: Professor, Department of Marine Biotechnology, Kunsan National University, Gunsan, 54150, South Korea; gigas@kunsan.ac.kr

Joon weon Choi: Professor, Graduate College of International Agri-

cultural Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Gangwon-do, 25354, Korea; cjw@snu.ac.kr

In Yang: Research Professor, Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Gangwon-do, 25354, Korea; dahadad@snu.ac.kr