

유채박-기반 접착제로 제조한 중밀도섬유판의 물성 평가 및 상용화를 위한 최적 제조조건의 확립

양 인* · 오세창**,*

*서울대학교 그린바이오과학기술연구원
25354 강원특별자치도 평창군 대화면 평창대로 1447
**대구대학교 산림자원학과

38453 경상북도 경산시 진량읍 대구대로 201
(2024년 4월 30일 접수, 2024년 9월 2일 수정본 접수, 2024년 9월 4일 채택)

Evaluating the Properties of Medium-density Fiberboard Made with a Rapeseed Flour-based Adhesive Resin and Establish of the Optimal Fabricating Conditions for its Commercialization

In Yang* and Sei Chang Oh**,*

*Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, 1447 Pyeongchang-daero, Daewha-myeon,
Pyeongchang-gun, Gangwon-do, 25354, Korea

**Department of Forest Resources, Daegu University, 201 Daegudae-ro, Gyeongsan-si,
Gyeongsangbuk-do, 38453, Korea

(Received 30 April 2024; Received in revised form 2 September 2024; Accepted 4 September 2024)

요 약

본 연구는 착유 부산물인 유채박을 이용하여 조제한 접착제를 다양한 조건으로 중밀도섬유판(MDF) 제조에 적용한 후, 물성 및 포름알데히드 방출량의 평가를 통하여 최적 제조조건의 도출 및 이에 대한 상용화 가능성을 확인하기 위하여 수행하였다. 접착제는 선행연구 결과를 토대로 유채박의 알칼리/산 가수분해물과 phenol-formaldehyde(PF) prepolymer를 이용하여 조제하였다. PF prepolymer 함량(20, 30, 40 wt%)을 조절한 유채박-기반 접착제를 각 함지율(5, 7, 9%) 및 목표 밀도(0.5, 0.7 g/cm³)에 따라 MDF 제조에 적용하였다. 이 조건에서 제조한 MDF의 물성을 측정하고, 접착제 내의 PF prepolymer 함량이 미치는 영향이 가장 컸으며, 다음으로 밀도, 함지율 순으로 분석되었다. 이 측정치는 현재 MDF 생산에 사용되고 있는 요소수지 접착제를 적용하여 제조한 MDF의 휨강도, 박리강도, 흡수두께 팽창율, 포름알데히드 방출량보다 우수하였다. 실험인자별 MDF의 물성 및 포름알데히드 방출량 결과를 토대로 최적 제조조건은 0.7 g/cm³의 목표밀도, 5%의 함지율, 접착제 내의 40 wt% PF prepolymer 함량으로 조사되었으며, 흡수두께 팽창율을 제외하고 국립산림과학원의 중밀도섬유판 및 E₀급 포름알데히드 방출량 기준을 모두 만족하는 것으로 조사되었다. 결과를 종합하면, 유채박-기반 접착제를 이용한 MDF 생산의 상용화 가능성을 확인하였으나, 유채에 대한 바이오플라스틱 공정 적용을 통하여 접착제 제조용 주원료인 유채박을 저렴하게 안정적으로 확보하는 방안의 확립이 선행되어야 할 것으로 생각한다.

Abstract – This study was conducted to confirm the potential of adhesive resins formulated with rapeseed flour (RSF), which is a residue in the production of edible oil, for the manufacture of medium-density fiberboards (MDF). The RSF-based adhesive resins were formulated with the weight ratio of RSF hydrolyzates (80, 70, 60 wt%) to PF prepolymer(20, 30, 40 wt%), MDF was fabricated in accordance with its resin content and target density using the RSF-based adhesive resin, and then the physical properties(density, moisture content, bending strength, internal bonding strength and thickness swelling) and formaldehyde emission of the MDF were measured. The effect of the weight ratio of RSF hydrolyzate to PF prepolymer was the greatest, followed by that of target density and resin content. The values of MDF

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: osc@daegu.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.

fabricated with RSF-based adhesive resins exceeded those with urea-formaldehyde resins, which is mostly used as a resin in the manufacture of MDF. Based on the results of MDF per experimental factors, the optimal conditions were determined to target density of 0.7 g/cm^3 , resin content of 5% and PF-prepolymer weight ratio of 40 wt% in RSF-based adhesive resin, and physical properties and formaldehyde emission of the MDF fabricated with the conditions satisfied the requirements for MDF and E₀ grade, which was designated by National Institute of Forest Science, except for thickness swelling. In conclusion, the potential of RSF-based adhesive for the production of MDF could identify on the basis of the results of this study. However, the stable securement of RSF through the development of bio-refinery process for rape plant is required to commercialize RSF-based adhesive resins for MDF production.

Key words: Rapeseed flour, Medium-density fiberboard, Bending strength, Internal bonding strength, Thickness swelling, Formaldehyde emission

1. 서 론

목질계 판상재 제조에 주로 사용되고 있는 포름알데히드계 접착제는 화석연료를 주원료로 생산되는 관계로 재생가능성이 없으며, 환경 및 인체 유해성으로 인하여 이를 대체하기 위하여 바이오 원료를 기반한 친환경 접착제 조제 기술의 개발에 대하여 국내외에서 많은 연구가 수행되고 있다[1,2]. 예를 들면, 단백질[3-5], 탄수화물[6], 리그닌[7,8], 탄닌[9,10]을 접착제 원료로 이용하는 방안을 조사하였으나, 석유화학계 접착제와 비교하여 낮은 접착 강도, 내수성, 가격 경쟁력으로 인하여 리그닌, 탄닌과 같은 폐기물을 이용한 접착제만이 원료 공급이 용이한 일부 나라에서 상용화되었다. 국내에서도 바이오 원료-기반 접착제 생산에 있어 원료의 절감을 위하여 두부비지[11,12], 커피부산물[13,14], 인모[15], 도계부산물[16]과 같은 원료로 목질계 판상재 제조용 접착제를 조제하는 기술이 개발하였다. 그러나 상기 개발 기술에서 사용된 주원료에 대한 대량 확보의 어려움으로 국내에서 이를 대체할 수 있는 새로운 대체원료의 개발이 필요한 상황이다.

바이오 원료-기반 접착제는 주로 식품, 축산 및 생활 폐기물의 구성성분에 대한 가수분해 반응을 통하여 액화된 천연 고분자와 석유화학계 접착제인 phenol-formaldehyde(PF) prepolymer 간의 가교결합에 의하여 조제된 관계로 양호한 접착능, 낮은 포름알데히드 방출량 및 생산단가의 절감이 가능하다는 점을 선행연구를 통하여 확인하였다. 또한 원료 선정에 있어 PF prepolymer와 가교결합 정도의 향상을 위하여 탄수화물보다 다양한 관능기를 보유한 단백질이 유리한 것으로 확인되어 단백질 함량이 80% 내외인 인모와 도계부산물을 접착제 원료로 활용하는 기술을 개발하였다. 그러나 각 원료의 대량 확보에 소요되는 비용과 이를 이용하여 조제한 접착제에 대한 소비자들의 낮은 선호도 등으로 인하여 상용화를 위한 연구 수행은 중지되었다. 이 연구를 통하여 높은 단백질 함량과 함께 대량으로 확보가 가능한 원료를 접착제 원료로 선정하는 것 외에 접착제에 대한 소비자들의 선호도에 대한 고려가 필요하다는 사실을 확인할 수 있었다. 원료 공급과 소비자 선호도를 만족시키는 원료를 탐색하는 과정에서 대량 공급 가능성이 있으며, 단백질 함량이 40% 내외인 유채박을 활용하는 방안이 도출되었다. 따라서 유채박을 이용하여 합판, 단판적층재, 섬유판 생산이 가능한 접착제 제조 기술을 개발하였으며, 이를 통하여 유채박의 목질계 판상재 제조용 접착제 원료화 가능성 확인하였다[17-20]. 따라서 유채박을 저렴한 가격으로 안정적인 확보가 가능할 경우 목질계 판상재 대량 생산을 위한 상용화 공정에서 접착제 원료로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

유채는 대두, 팜과 함께 세계 3대 유지작물로서 국내의 경우

2022년 재배 면적은 5,000 ha로 대부분 경관용으로 재배되고 있다[21]. 최근 수입 식용유 대체용으로 친환경 국내 유채 기름에 대한 관심이 높아지면서 식용유 생산을 위한 유채 재배 면적이 꾸준히 확대될 것으로 예상된다. 유채박은 유채씨의 착유 부산물로 1톤의 유채씨에서 650~700 kg이 남는다. 전 세계적으로 연간 약 6천만 톤 이상의 유채씨가 수확되므로 유채박은 약 4천만 톤 이상이 생산된다고 가정할 수 있다[22]. 탈지한 유채박은 40~45%의 단백질 외에 아미노산, 조섬유, 무기질, 비타민 등을 함유하고 있으며, 단백질 함량이 34~36%인 유채박은 거래 시장에서 \$ 0.39/kg로 가축 사료로 주로 활용되고 있다. 현재 유채박은 식품 원료, 유기질 비료, 바이오소재, 바이오가스 등 산업적으로 이용할 수 있는 기술들이 개발되고 있어 국내에서도 유채재배 및 유채부산물의 자원순환적 재활용 가치를 높이는 연구 수행이 필요할 것으로 생각한다.

이와 관련한 연구로 유채씨가 바이오디젤 생산용 원료로 적합한 것으로 2010년경 보고되면서 새만금 간척지에 대규모로 재배되었으나, 수송용 바이오연료 생산에 대한 관심 부족 및 낮은 경제성으로 현재 재배 면적의 확대가 미진하였다. 또한 유채의 구성분에서 유채유 외에 있는 식용으로 그리고 유채박은 토양 개량, 사료용으로 제한적으로 사용되고 있는 실정이다. 따라서 유채박을 고부가가치 제품의 원료로 활용하는 기술의 개발이 필요한 실정이다. 본 연구는 선행연구에서 유채박의 목질계 판상재 제조용 접착제 원료화를 확인한 결과를 토대로 국내에서 가장 생산량이 많은 중밀도섬유판 생산용 접착제를 유채박으로 제조한 후, 섬유판 제조공정에서 접착제의 조성, 함지율, 목표밀도가 섬유판의 물성 및 포름알데히드 방출량에 미치는 영향을 조사하였다. 이 결과를 토대로 유채박의 목질계 판상재 생산용 접착제 원료화 여부 및 상용화 가능성을 확인하였으며, 이를 통하여 섬유판 대량 생산을 위한 최적 제조 조건의 제공과 함께 유채의 자원순환적 재활용 가치를 함양하는 방안을 제안하고자 본 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 유채박-기반 접착제의 조제

접착제의 주원료로 사용된 유채박은 인도 및 중국에서 생산된 것을 유기질 비료의 대량 생산을 위한 원료로 사용하기 위하여 (주) 대영 TMS(경기, 평택)에서 수입한 것이다(Fig. 1). 사용된 유채박은 탄수화물(41%)과 단백질(30%)로 주로 구성되었으며, 지방(9%), 회분(8%) 등을 소량 함유하였다[17]. 유채박을 접착제 원료로 사용하기 위하여 가수분해 반응을 통한 액화가 필요한데 이를 위하여 가정용 믹서로 분쇄한 후, 60 mesh(0.25 mm) 표준망체를 통과한 분말을 사용하였다. 유채박의 가수분해제로서 수산화나트륨(이하



Fig. 1. Images of rapeseed flour (top – left), rapeseed flour hydrolyzates (top – right), phenol-formaldehyde prepolymer (bottom – left) and wood fiber (bottom – right) used for formulating rapeseed flour-based adhesive resins.

NaOH, 98.0%)과 황산(이하 H_2SO_4 , 70%)을 사용하였다. 접착제의 경화 과정에서 유채박 가수분해물 간의 결합력 향상을 위하여 가교제로 phenol-formaldehyde(이하 PF) prepolymer를 첨가하였는데 이를 위한 페놀(99.0%)과 포르말린(37%)은 화학실험용 시약을 구입하여 사용하였다.

선행연구 결과를 통하여 선정된 5% 농도의 NaOH 수용액(500 mL)에 200 g의 유채박 분말을 천천히 투입하였으며, 95 ± 2.5 °C에서 240분간 반응시켜 Fig. 1과 같이 유채박 알칼리 가수분해물(이하 RSF-AK)을 얻었다[19,20]. RSF-AK의 고형분 함량은 $38 \pm 1\%$, pH는 12.8, 점도는 25 °C에서 500 m·Pa·s로 측정되었다. 한편 RSF-AK의 pH가 12 이상인 관계로 경화시간 단축을 위하여 경화제로 사용된 유채박 산 가수분해물(이하 RSF-AC)은 5% 농도의 H_2SO_4 수용액(500 mL)에 유채박(150 g)을 천천히 투입한 후, 95 ± 2.5 °C에서 약 30분간 반응시켜 조제하였다(Fig. 1). RSF-AC의 고형분 함량은 $20 \pm 2\%$, pH는 2.0으로 측정되었으며, 반응 종료 시점에 가수분해물이 진흙과 같은 형태로 변하여 점도 측정은 불가능하였다.

유채박-기반 접착제에서 가교제로 사용된 PF prepolymer는 선행연구 결과를 토대로 포르말데히드와 페놀 몰비를 1.8/1 그리고 페

놀과 NaOH 몰비를 0.1/1로 고정하여 조제하였다[19,20]. PF prepolymer의 고형분 함량은 50%, pH는 9.0, 점도는 25 °C에서 120 m·Pa·s로 측정되었다. PF prepolymer의 조제는 반응기에 페놀, 포르말데히드 및 일정량의 NaOH를 넣고, 75 °C에서 90분간 교반하면서 일차적으로 반응시켰다. 이 반응물에 나머지 양의 NaOH를 첨가한 후, 95 °C에서 60분간 추가로 교반하여 조제하였다(Fig. 1).

중밀도섬유판(이하 MDF) 제조용 접착제는 RSF-AK/RSF-AC를 고형분 함량을 기준으로 각각 40 wt%/40 wt%, 35 wt%/35 wt%, 30 wt%/30 wt%를 혼합하여 상온에서 5분간 교반하였으며, 각 교반물에 20 wt%, 30 wt%, 40 wt%의 PF prepolymer를 각각 첨가한 후, 70 °C에서 5분간 다시 교반하여 조제하였다. 이렇게 조제된 유채박-기반 접착제의 특징은 Table 1과 같다.

2-2. 중밀도섬유판 제조

섬유판 제조에 있어 ㈜한솔홈데코(전북, 익산)에서 공급받은 목섬유(육송, 함수율: $10 \pm 1\%$)와 왁스 emulsion(고형분 함량: $40 \pm 2\%$)을 사용하였다. 섬유판의 목표 밀도(0.5 & 0.7 g/cm³) 및 치수(300 mm × 300 mm × 12 mm)에 따라 정해진 양의 목섬유를 원통형 교반기(blender)에 넣은 후, 회전과 함께 고압 분사기를 사용하여 목

Table 1. Characteristics of adhesive resins formulated with rapeseed flour hydrolyzates and PF prepolymer

Resin type			Viscosity (m·Pa·s)	pH	Solid content (%)
RSF-AK ^a	RSF-AC ^b	PF ^c			
40 wt%	40 wt%	20 wt%	3,690	7.3	38.66
35 wt%	35 wt%	30 wt%	1,600	7.5	40.82
30 wt%	30 wt%	40 wt%	1,450	7.7	41.10
	UF ^d		250	8.1	66.12

^aRSF-AK: rapeseed flour alkaline hydrolyzates. ^bRSF-AC: rapeseed flour acidic hydrolyzates. ^cPF: phenol-formaldehyde prepolymer. ^dUF: commercial urea formaldehyde resin.

섬유의 전건중량 대비 2 wt%의 왁스 emulsion을 분사하였다. 순차적으로 정해진 함지율(5, 7, 9%)과 RSF-AK와 RSF-AC/PF prepolymer 중량비(80 wt%/20 wt%, 70 wt%/30 wt%, 60 wt%/40 wt%)로 계산된 양의 접착제를 분사하였다. 접착제가 분사된 목섬유를 caul plate 위의 성형틀에 일정하게 분산시키면서 성형하였으며, 성형된 매트 두께는 약 150 mm 정도로 측정되었다. 이 매트를 30 kg/cm²의 압력, 180 °C에서 6분간 hot press로 열압하여 MDF를 제조하였다. 한편 현재 MDF 생산에 이용되고 있는 요소수지(이하 UF)를 (주) 한솔홈데코(전북, 익산)에서 제공받아 분사한 후, 30 kg/cm²의 압력, 140 °C에서 4분간 열압하여 0.7 g/cm³ 목표밀도의 대조구 MDF를 제조하였다. 제조 MDF는 열압공정이 완료된 즉시 밀봉처리 가능한 지퍼백에 넣어 24시간 이상 실온에서 보관한 후, 물성 평가에 이용하였다.

2-3. 중밀도섬유판의 물성 평가

본 연구를 위하여 제조한 중밀도섬유판은 KS F 3200에 의거하여 밀도, 함수율, 휨강도, 박리강도, 흡수두께 팽창율을 측정하였다[23]. 예를 들면, 휨강도 시험은 시험편의 표면에 평균 10 mm/min의 속도로 하중을 가하여 탄성계수와 휨강도를 구하였으며, 시험이 끝난 시험편에서 파괴의 직접적인 영향을 받지 않은 부분을 절삭하여 밀도 및 함수율 시험편으로 사용하였다. 박리강도 시험은 알루미늄 재질의 블록에 에폭시 접착제로 시험편을 접착한 후, 시험편의 표면에 수직으로 인장 하중을 가하여 최대하중으로 박리강도를 측정하였다. 흡수두께 팽창률 시험은 수조에 넣은 시험편이 완전히 잠기도록 냉수를 넣고 24시간동안 방치하였으며, 표층에 존재하는 수분을 페이퍼 타올로 제거한 후, 두께 팽창률을 측정하였다. 포름알데히드 방출량은 KS M 1998의 데시케이터법에 따라 측정하였다[24]. 이와 같은 방법으로 얻은 각 측정치를 국립산림과학원에서 고시한 목재제품의 규격과 품질기준과 비교하여 상용화가 가능한 최적 제조 조건을 도출하였다[25].

2-4. 실험설계 및 통계학적 분석

섬유판 제조에 있어 사용된 인자(factor)는 섬유판의 밀도(0.5, 0.7 g/cm³), 함지율(5, 7, 9%), 접착제 구성물의 조성비(RSF-AK/RSF-AC/PF prepolymer=40 wt%/40 wt%/20 wt%, 35 wt%/35 wt%/30 wt%, 30 wt%/30 wt%/40 wt%)로 구성하였다. 따라서 2×3×3 다원변량 분석(factorial design)에 따른 실험설계 방법을 도입하여 데이터를 분석하였다. 제조한 MDF의 물성 및 포름알데히드 방출량에 대한 상기 인자의 영향은 분산분석을 통하여 Minitab 프로그램(Minitab LLC, Anyang Gyednggi-do)의 ANOVA 명령어를 이용하여 95% 신뢰 범위에서 통계학적 분석을 수행하였다. 통계학적으로 p<0.05 수준에서 영향을 받았을 경우, 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. 섬유판 밀도

유채박-기반 접착제를 이용하여 0.5 및 0.7 g/cm³의 목표 밀도로 제조한 중밀도섬유판(이하 MDF)의 밀도는 Table 2와 같으며, MDF의 국내 기준인 0.35~0.85 g/cm³ 기준을 만족하였다. 한편 MDF의 측정 밀도와 목표 밀도 간에 차이가 있었는데 이는 실험실-규모의 제조 및 성형 과정에서 접착제가 적용된 목섬유의 소실 또는 수작업에 의한 분산으로 밀도 차이가 발생하여 나타난 결과라 생각한다. 그러나 이와 같은 문제점은 자동화 설비에 의하여 원료가 공급되는 대량 생산 공정에서 적절한 분산이 가능하여 상용화 공정의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

3-2. 섬유판 함수율

Table 3은 유채박-기반 접착제 및 UF를 적용하여 제조한 MDF의 물성 측정 결과이다. 제조한 MDF의 함수율은 3.55~5.14%로 국립산림과학원 기준인 5~13%보다 전반적으로 낮았는데 이는 빠르게 경화되는 기존 석유화학계 접착제보다 열압시간을 길게 적용(6분)함에 따라 섬유판 매트 내에 존재하는 수분이 상대적으로 많이 증발하여 나타난 결과라 판단된다[25]. 그러나 유채박-기반 접착제의 상용화 공정 적용을 통하여 제조될 MDF는 기존 생산공정과 동일하게 제조한 이후 양생과정에서 수분을 흡착함으로써 함수율 기준을 만족할 것으로 생각한다. 한편, 본 연구에서 제조한 대부분의 MDF 함수율은 낮은 밀도(0.5 g/cm³)에서 낮았는데 이는 열압과정 중에 발생하는 수증기가 고밀도보다 저밀도 매트에서 빠르게 증발하여 나타난 결과라 생각한다(p<0.01). 또한 접착제에서 RSF-AK와 RSF-AC 함량이 감소함에 따라 MDF 함수율이 감소하였는데 이는 Table 1에서 보는 바와 같이 적용된 접착제의 높은 고형분 함량과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다(80/20-70/30: p<0.01; 80/20-60/40: p<0.01; 70/30-60/40: p=0.03). 즉 섬유판 제조에 적용된 접착제의 고형분 함량이 높을수록 경화시간이 단축되고, 결과적으로 열압이 완료된 섬유판 내의 수분이 적어 함수율이 낮았던 것으로 생각한다[26]. 한편 목섬유에 적용된 전체 접착제의 양을 의미하는 함지율은 MDF의 함수율에 영향을 미치지 않아 6분의 열압시간은 접착제의 완전 경화를 위한 충분한 조건임을 확인할 수 있었다.

3-3. 휨강도

유채박-기반 접착제로 제조한 MDF의 휨강도를 실험인자별로 비교한 결과는 Table 3과 같다. MDF의 휨강도는 예상대로 밀도 증가와

Table 2. Actual density of medium-density fiberboard fabricated with rapeseed flour-based adhesive resins (unit: g/cm³)

Weight ratio of RSF-AK ^a /RSF-AC ^b /PF ^c prepolymer	0.5 g/cm ³			0.7 g/cm ³		
	5%	7%	9%	5%	7%	9%
40 wt%/40 wt%/20 wt%	0.49	0.48	0.48	0.65	0.67	0.71
35 wt%/35 wt%/30 wt%	0.50	0.50	0.49	0.67	0.67	0.68
30 wt%/30 wt%/40 wt%	0.46	0.49	0.49	0.70	0.67	0.69

^aAlkali hydrolyzate of rapeseed flour. ^bAcidic hydrolyzate of rapeseed flour. ^cPhenol-formaldehyde.

Table 3. Physical properties of medium-density fiberboard fabricated with rapeseed flour-based adhesive resins

	Board density (g/cm ³)	Moisture content (%)	Bending strength (MPa)	Internal bonding strength (MPa)	Thickness swelling (%)
Target density (g/cm ³)					
0.5	0.49 (B)	4.38 (A)	8.91 (B)	0.39 (A)	17.53 (A)
0.7	0.68 (A)	4.63 (B)	10.89 (A)	0.39 (A)	22.68 (B)
Resin content (%)					
5	0.58 (A)	4.46 (A)	9.33 (A)	0.41 (A)	16.50 (A)
7	0.58 (A)	4.51 (A)	10.89 (A)	0.45 (A)	18.00 (A)
9	0.59 (A)	4.54 (A)	9.48 (A)	0.30 (B)	25.81 (B)
Weight ratio of RSF-AK ^a /RSF-AC ^b /PF ^c prepolymer (wt%/wt%/wt%)					
40/40/20	0.58 (A)	4.70 (C)	8.56 (B)	0.29 (C)	26.51 (C)
35/35/30	0.59 (A)	4.49 (B)	9.12 (B)	0.37 (B)	18.86 (B)
30/30/40	0.58 (A)	4.32 (A)	12.02 (A)	0.50 (A)	14.94 (A)
Control					
UF ^d	0.59	4.67	8.09	0.27	45.89
Standard and specification of wood products					
NIFOS ^e	0.35~0.85	5.00~13.00	> 15.00	> 0.30	< 12.00

^aAlkali hydrolyzate of rapeseed flour. ^bAcidic hydrolyzate of rapeseed flour. ^cPhenol-formaldehyde. ^dCommercial urea-formaldehyde resin. ^eNational Institute of Forest Science.

*Each set of different letters per columns of each factor indicates significant difference at $p = 0.05$ (least significance difference test).

함께 증가하였다($p=0.04$). 반면 접착제 내에서 PF prepolymer 함량을 20 wt%에서 30 wt%까지 증가시켰을 때 휨강도는 차이가 없었으나($p=0.07$), 40 wt%에서 크게 증가하였다($p>0.01$). 이와 같은 휨강도의 증가는 가교제로 사용된 PF prepolymer의 함량이 40 wt% 수준에서 유채박 가수분해물 간의 가교결합을 크게 증가시켜 휨강도 향상에 영향을 미친 것으로 생각한다[20]. 한편 함지율에 따른 MDF의 휨강도 간에는 차이가 없었다(5%/7%: $p=0.25$; 5%/9%: $p=0.81$; 7%/9%: $p=0.22$).

유채박-기반 접착제로 제조한 MDF의 휨강도는 UF로 제조한 MDF보다 높아 MDF 생산용 UF의 대체 접착제로 적용이 가능할 것으로 생각된다(Table 3). 그러나 0.5 g/cm³의 목표밀도, 7% 함지율 그리고 0.7 g/cm³의 목표밀도, 5% 함지율에 40 wt%의 PF prepolymer로 조제된 접착제를 적용하여 제조한 MDF를 제외하고 나머지 제조 조건에서는 국립산림과학원 기준(>15 MPa)을 만족하지 못하였다(Fig. 2). 따라서 상기 2 조건을 적용할 경우 MDF 제조용 유채박-기반 접착제의 상용화가 가능할 것으로 판단된다. 이 외에 9% 함지율에 밀도를 0.7 g/cm³보다 높이는 것도 MDF의 휨강도를 15 MPa 이상으로 올리는 방안이 될 것으로 사료된다.

3-4. 박리강도

유채박-기반 접착제로 제조한 MDF의 박리강도를 실험인자별로 비교한 결과는 Table 3과 같다. 목표 밀도에 따른 차이는 없었는데 이는 밀도와 상관없이 열압과정에서 매트 내의 심층까지 충분히 열이 전달되어 접착제가 완전히 경화됨에 따라 나타난 결과라 생각한다($p=0.96$). 함지율에 따른 박리강도를 비교하였을 때, 5%와 7% 간에는 차이가 없었으나($p=0.30$), 9% 함지율에서 박리강도는 감소하였는데 이는 매트 내에 과도한 접착제로 인하여 심층의 접착제가 완전히 경화되지 않아 나타난 결과라 판단된다. 한편 접착제에서 PF prepolymer 함량의 증가는 MDF 내에서 접착제의 가교결합 정도를 증가시켜 박리강도가 증가한 것으로 생각한다($p<0.01$).

Fig. 3은 유채박-기반 접착제로 제조한 MDF의 박리강도에 대하여 각 목표밀도에서 함지율과 접착제 내의 PF prepolymer 함량의 상호영향을 나타낸 것이다. 목표밀도와 상관없이 MDF의 박리강도는 모든 함지율의 접착제에서 PF prepolymer 함량의 증가와 함께 증가하였다. 특히 0.5 g/cm³ 밀도에서 7% 함지율 및 40 wt% PF prepolymer로 조제된 접착제를 적용하여 제조한 MDF의 박리강도는 크게 증가하였다. 반면 9% 함지율로 제조한 MDF의 박리강도는 0.7 g/cm³ 밀

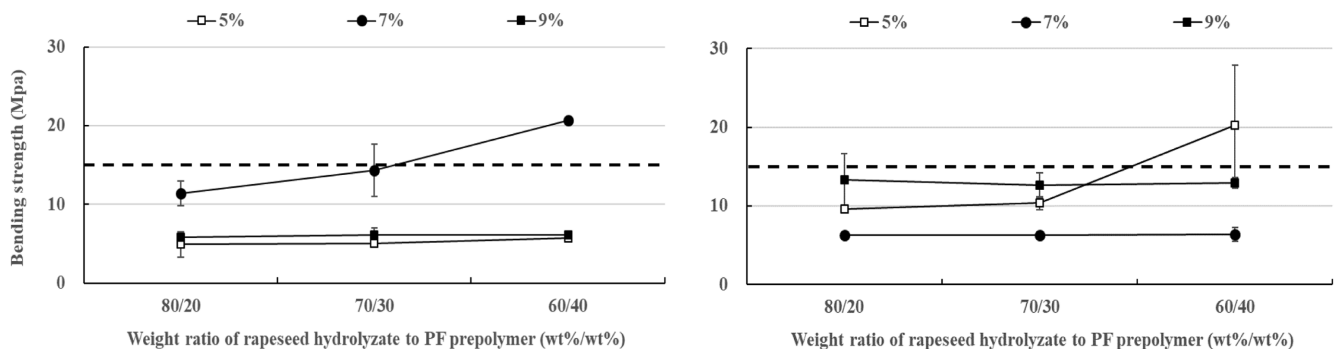


Fig. 2. Interaction effect of resin content and weight ratio of rapeseed hydrolyzate to phenol-formaldehyde prepolymer in adhesive resins on the bending strength of medium-density fiberboard fabricated with the target density of 0.5 g/cm³ (left) and 0.7 g/cm³ (right). Dotted line means the minimum requirement (> 15 MPa) of the bending strength designated by National Institute of Forest Science.

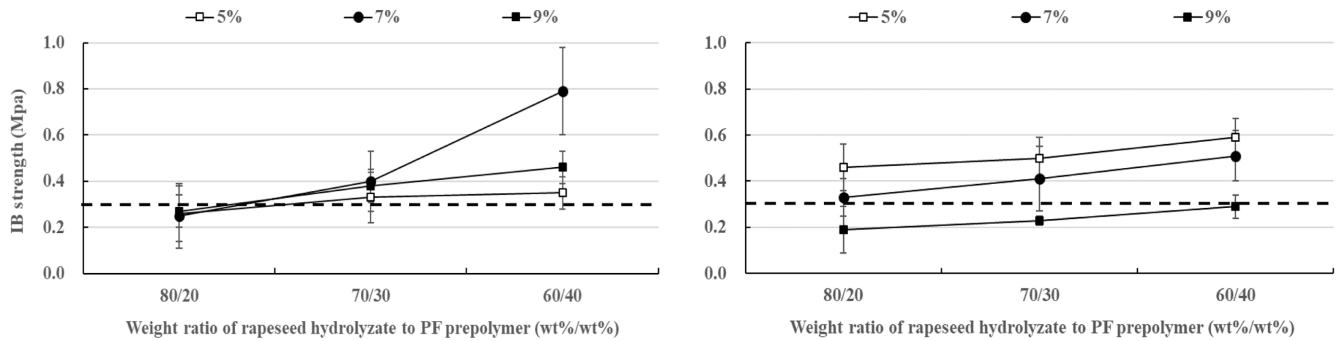


Fig. 3. Interaction effect of resin content and weight ratio of rapeseed hydrolyzate to phenol-formaldehyde prepolymer in adhesive resins on the internal bonding strength of medium-density fiberboard fabricated with the target density of 0.5 g/cm³ (left) and 0.7 g/cm³ (right). Dotted line means the minimum requirement (> 0.3 MPa) of the internal bonding strength designated by National Institute of Forest Science.

도에서 접착제 내의 PF prepolymer 함량과 상관없이 타 조건에서 제조한 MDF보다 낮았는데 이는 높은 함지율에 따른 매트 내의 많은 수분과 함께 높은 밀도로 인하여 열압 과정을 통하여 제거되는 수증기 양이 제한됨에 따라 심층에 존재하는 접착제가 완전히 경화되지 않아 나타난 결과라 추정된다[26-28].

유채박-기반 접착제로 제조한 MDF의 박리강도는 제조 조건과 상관없이 대조구인 UF를 이용하여 제조한 MDF의 박리강도(0.27 MPa)보다 높았으며, 대부분의 조건에서 국립산림과학원의 기준(0.30 MPa 이상)을 만족하였다. 결과를 종합하면, UF를 대신하여 유채박-기반 접착제의 MDF 생산용 접착제로서 대체 가능성으로 확인할 수 있었으며, 특히 0.5 g/cm³의 목표밀도, 7% 함지율 그리고 0.7 g/cm³의 목표밀도, 5% 함지율에 40 wt%의 PF prepolymer로 접착제를 조제하는 것이 최적 조건이라는 결론을 얻었다.

3-5. 흡수두께 팽창율

유채박-기반 접착제로 제조된 MDF의 흡수두께 팽창율은 Table 3에서 보는 바와 같이 저밀도(0.5 g/cm³)보다 고밀도(0.7 g/cm³)에서 높았으며($p=0.03$), 5% 및 7% 함지율보다 9% 함지율에서 높았다(5%/7%: $p=0.34$; 5%/9%: $p<0.01$; 7%/9%: $p=0.03$). 고밀도 MDF의 높은 흡수두께 팽창율은 구성물인 목섬유 양이 저밀도 조건보다 많음에 따라 침지에 의하여 목섬유가 팽윤되어 발생한 결과라 생각한다. 또한 9% 함지율에서 높은 흡수두께 팽창율은 MDF 심층에 있는 목섬유의 접착제가 충분히 경화되지 않아 침지과정 중에 수분이 심층에 침투되어 나타난 결과라 추정된다. 한편 MDF 제조에 사용된 접

착제에서 PF prepolymer 함량이 증가함에 따라 흡수두께 팽창율은 감소하였다($p<0.01$). 이는 PF prepolymer 함량이 증가함에 따라 가교결합 정도가 증가하여 MDF의 내수성이 향상된 것으로 판단된다.

대조구로 사용된 UF를 적용하여 제조한 MDF의 흡수두께 팽창율은 약 46%로 유채박 접착제로 제조한 대부분의 MDF보다 높아 치수안정성 측면에서 대체 가능성을 확인하였다. 그러나 0.5 g/cm³ 밀도에 40 wt%의 PF prepolymer로 조제한 접착제를 5% 및 9%의 함지율 그리고 0.7 g/cm³ 밀도에 30 및 40 wt%의 PF prepolymer로 조제한 접착제를 7%의 함지율로 제조한 MDF를 제외하고 대부분의 측정치는 국립산림과학원의 기준(<12%)보다 높았다(Fig. 4). 이는 유채박-기반 접착제에서 가수분해 반응으로 유채박의 주요 구성성분인 단백질과 탄수화물의 분자량이 저하되며 내수성이 저하되어 발생한 결과라 사료된다[17,29-30]. 따라서 MDF 제조공정에 사용할 유채박-기반 접착제의 조제 및 적용에 있어 상기에서 제안한 접착제 내의 PF prepolymer 함량 외에 함지율 및 MDF 밀도에 대한 세심한 고려가 필요할 것으로 생각한다.

3-6. 포름알데히드 방출량

유채박 접착제로 제조한 MDF에서 방출되는 포름알데히드 양을 실험일자별로 조사한 결과를 보면(Table 3), 0.5 g/cm³ 및 0.7 g/cm³의 밀도에서 각각 0.46 및 0.51 mg/L로 차이가 없었다($p=0.31$). 함지율에 따른 포름알데히드 방출량은 5%, 7%, 9%에서 각각 0.42, 0.41, 0.61 mg/L로 5%와 7% 간에는 차이가 없었으나($p=0.28$), 9% 함지율에서 5%와 7%보다 많았다($p<0.01$). 이는 과다한 양의 접착제

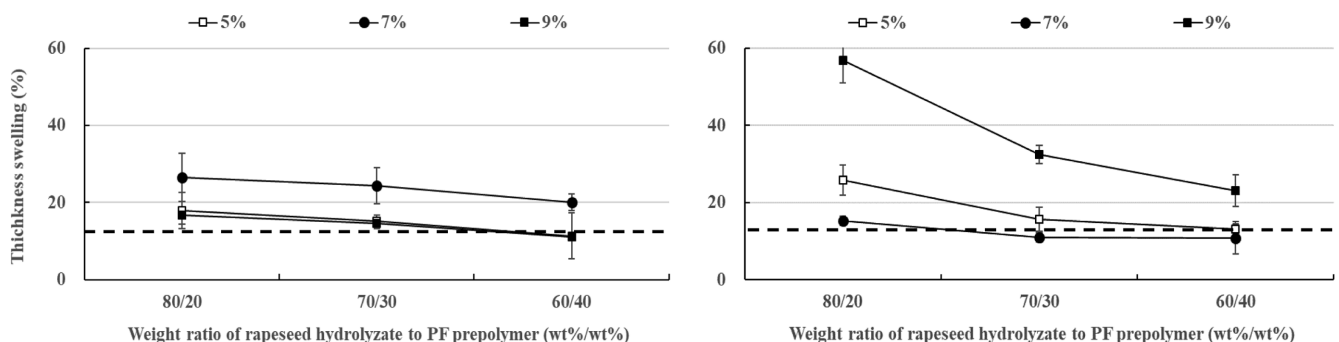


Fig. 4. Interaction effect of resin content and weight ratio of rapeseed hydrolyzate to phenol-formaldehyde prepolymer in adhesive resins on the thickness swelling of medium-density fiberboard fabricated with the target density of 0.5 g/cm³ (left) and 0.7 g/cm³ (right). Dotted line means the minimum requirement (< 12%) of the thickness swelling designated by National Institute of Forest Science.

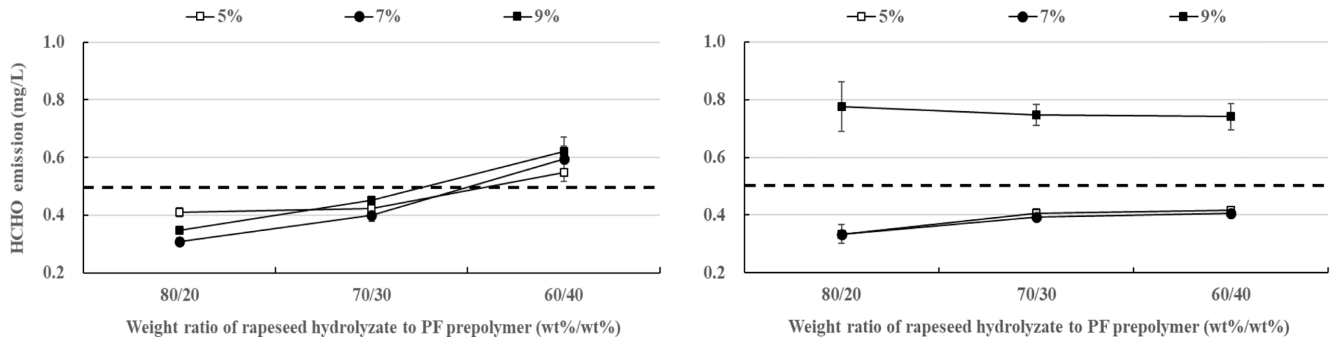


Fig. 5. Interaction effect of resin content and weight ratio of rapeseed hydrolyzate to phenol-formaldehyde prepolymer in adhesive resins on the amount of formaldehyde emitted from the medium-density fiberboard fabricated with the target density of 0.5 g/cm³ (left) and 0.7 g/cm³ (right). Dotted line means the minimum requirement (< 0.5 mg/L) of the formaldehyde emission for E₀-grade MDF designated by National Institute of Forest Science.

적용으로 열압과정에서 가교반응에 사용되지 않은 PF prepolymer에서 포름알데히드가 방출되어 나타난 결과라 생각한다. 한편 접착제 내의 PF prepolymer 함량이 20 wt%, 30 wt%, 40 wt%에서 포름알데히드 방출량은 각각 0.42, 0.47, 0.55 mg/L로 증가하였다(80/20-70/30: $p=0.02$; 80/20-60/40: $p<0.01$; 70/30-60/40: $p=0.01$). 이는 경화과정에서 가교반응에 사용되지 않은 유리 포름알데히드 양이 PF prepolymer 함량의 증가와 함께 증가하여 나타난 결과라 판단된다[20,31-32].

한편 UF를 이용하여 제조한 대조구용 MDF에서 방출된 포름알데히드 양은 1.27 ± 0.02 mg/L로 유채박-기반 접착제로 제조한 MDF와 비교하여 크게 높았다(Fig. 5). 유채박-기반 접착제로 제조한 MDF의 포름알데히드 방출량을 국립산림과학원의 기준과 비교한 결과, 0.5 g/cm³의 밀도에서는 함지율과 상관없이 접착제 내의 PF prepolymer 함량이 20 wt%와 30 wt%인 접착제를 적용하거나, 0.7 g/cm³의 밀도에서는 접착제 내의 PF prepolymer 함량과 상관없이 5% 및 7% 함지율에서 E₀ 수준(<0.5 mg/L)을 만족하였다.

결과를 종합하면, MDF 제조에 있어 유채박-기반 접착제의 사용은 포름알데히드 방출량을 크게 감소시켜 MDF 제조를 위한 친환경 접착제로서 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 SE₀ 수준(<0.3 mg/L)까지 향상시키기 위하여 유채박-기반 접착제의 경화반응 이후 유리 포름알데히드 양을 최소화하는 방안의 적용이 필요할 것으로 생각한다. 이를 위하여 PF prepolymer 조제시 물비와 반응 조건 또는 열압 온도 및 시간 등을 조절하는 연구가 상용화를 위하여 수행되어야 할 것으로 생각한다.

3-7. 상용화를 위한 유채박-기반 접착제의 기술경제성 평가

유채박-기반 접착제의 경제성 평가에 있어 주원료인 유채박의 안정적인 확보가 선행되어야 할 것으로 생각한다. 국내 유채 재배 면적은 2022년 기준 약 5,000 ha로 대부분 경관용이었으며, 이 가운데 약 800 ha 정도만 식용유 생산용으로 재배되었다[21]. 따라서 현재 상황에서 유채박의 대량 확보는 운송과 관련한 여건을 고려하여 중국 또는 인도에서 수입하는 방안이 적합할 것으로 생각한다. 이 외에 접착제 제조를 위하여 필요한 페놀, 포르말린, 황산, 수산화나트륨과 같은 품목은 기존 업체로부터 용이한 대량 확보가 가능한 것으로 확인되었다.

이렇게 확보한 원료를 이용하여 생산될 접착제는 각 원료에 대한 공급 지역 및 구매량, 제품의 용도, 유가 및 수급 상황에 따라 원료가의 변동 폭이 크므로 정확한 생산단가를 구하는 것은 불가하나, 유채박을 톤당 \$ 300에 확보할 경우 톤당 \$ 350~450이 유채박-기반 접착제 생산에 소요될 것으로 예상된다(Table 4). 이 생산단가는 E₁ 등급의 UF 생산단가(톤당 \$ 350~400)와 차이가 없거나, E₀ 등급의 MDF 제조용 멜라민-요수 접착제(톤당 \$ 750~850)보다 저렴한 것으로 조사되었다[33]. 현재 기술개발 수준에서 유채박-기반 접착제의 생산단가를 절감할 수 있는 유일한 방안으로 유통비 및 운송비 절감 등을 통하여 대량의 유채박을 국내에서 저렴하게 확보하는 것으로 생각한다. 이를 위하여 유채의 종합적인 이용에 관한 연구 및 활용 방안의 확립이 필요할 것으로 판단된다. 예를 들면, 기존의 유채유 및 바이오디젤 생산을 위한 유채씨의 사용 외에 유채대 및 유채잎의 활용을 위한 방안 마련과 저부가가치 사료용 원료인 유채

Table 4. Assessment of economic feasibility on rapeseed-based adhesive resins

Raw materials			Manufacturing cost
Rapeseed flour (RSF)	\$ 300/ton	Composition	- RSF-AK/RSF-AC/Coupling agent (CA) = 35 wt%/35 wt%/30 wt% (solid content: 45%)
NaOH (AK) ^a - 99%	\$ 423/ton	Components ratio	- RSF (315 kg) + CA (135 kg) + IW (550 kg)
H ₂ SO ₄ (AC) ^a - 98%	\$ 413/ton	RSF-AK	- 5% conc, NaOH; 40% solid content
Industrial water (IW) ^b	\$ 0.56/ton	RSF-AC	- RSF (157.5 kg, \$ 47.25) + NaOH (8 kg, \$ 3.38) + IW (394 kg, \$ 0.22) = \$ 50.85
Phenol (Ph) ^a - 90%	\$ 1,100/ton	CA	- 5% conc, H ₂ SO ₄ ; 30% solid content
Formalin (HCHO) ^a - 37%	\$ 400/ton	Total	- RSF (157.5 kg, \$ 47.25) + H ₂ SO ₄ (8 kg, \$ 3.30) + IW (525 kg, \$ 0.29) = \$ 50.84
			- PF, 50% solid content
			- Ph (52 kg, \$ 57.20) + HCHO (82 kg, \$ 32.80) + NaOH (1 kg, \$ 0.42) = \$ 90.42
			- Raw material cost: RSF-AK + RSF-AC + CA = \$ 50.85 + \$ 50.84 + \$ 90.42 = \$ 192.11
			- Production cost: \$ 157.89 ~ 257.89
			- Total: \$ 350~450

^aThe price information of each chemical was obtained from Samchun Chemicals Co. Ltd. ^bThe price information was obtained from the website of K-water, and the price means the national average of water for industrial uses.

박을 고부가가치 제품의 원료로 이용할 수 있는 기술을 개발하는 것이다. 이와 같은 종합적인 이용을 통하여 관상용으로 국유지에서 재배되는 유채에서 유채박을 확보하는 방안 외에 유채 재배농에게 일정 수준 이상의 수익을 보장함으로써 유채 재배면적의 순차적인 확대가 필요할 것으로 생각한다. 이렇게 국내에서 저렴하게 대량 확보한 유채박을 접착제 원료로 사용할 경우 생산단가가 절감되어 상용화 단계까지 진행할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 유채박 가수분해물과 PF prepolymer를 이용하여 조제한 접착제를 다양한 실험인자별로 MDF 제조에 적용하였으며, MDF의 물성평가를 통하여 상용화를 위한 최적 조건을 확립하기 위하여 수행하였다. 실험인자로 접착제 내의 PF prepolymer 함량, MDF의 밀도, 함지율의 영향을 조사하였으며, 각 조건에서 제조한 MDF의 물성 및 포름알데히드 방출량 측정 결과를 토대로 얻은 결론은 아래와 같다.

(1) 0.5 및 0.7 g/cm³의 목표 밀도로 제조한 MDF의 측정 밀도는 차이가 없었다.

(2) MDF 함수율은 3.55~5.14%로 국립산림과학원 기준인 5-13%보다 전반적으로 낮았는데 상용화 공정에서 유채박-기반 접착제로 제조될 MDF는 시판에 앞서 적용되는 양생과정에서 수분을 흡착하는 관계로 함수율 기준을 용이하게 만족할 것으로 생각한다.

(3) MDF의 휨강도는 밀도와 접착제 내의 PF prepolymer 함량이 증가함에 따라 증가하였으나, 함지율의 영향을 받지 않았다.

(4) 밀도 그리고 5%와 7% 함지율의 차이에 따른 박리강도의 차이는 없었으나, 함지율 9%에서 전반적으로 감소하였다. 또한 접착제에서 PF prepolymer 함량의 증가는 MDF의 박리강도 증가를 수반하였다.

(5) 흡수두께 팽창율은 고밀도 및 9% 함지율에서 높았으나, 접착제에서 PF prepolymer 함량이 증가함에 따라 감소하였다.

(6) 포름알데히드 방출량은 밀도 그리고 5%와 7% 간에서 차이가 없었으나, 9% 함지율에서 5%와 7%보다 많았다. 또한 접착제 내의 PF prepolymer 함량이 증가함에 따라 증가하였다.

실험인자별 MDF의 물성 및 포름알데히드 방출량 결과를 종합한 결과, 최적 제조조건은 0.7 g/cm³의 목표밀도, 5%의 함지율, 접착제 내의 40 wt% PF prepolymer 함량으로 조사되었으며, 이 조건에서 제조한 MDF의 함수율은 4.34%, 휨강도는 20.25 MPa, 박리강도는 0.59 MPa, 흡수두께 팽창율은 13.10%, 포름알데히드 방출량은 0.42 mg/L로 흡수두께 팽창율을 제외하고 국립산림과학원의 중밀도섬유판 및 E₀급 포름알데히드 방출량 기준을 모두 만족하여 최적 조건인 것으로 조사되었다. 한편 상기 조건에서 제조한 MDF의 흡수두께 팽창율은 기준(<12%)을 상회하였는데 이는 함지율 또는 밀도의 조정 등에 대한 추가연구 수행을 통하여 확인할 필요가 있다고 생각한다. 결과를 종합하면, 유채박-기반 접착제를 이용한 MDF 생산의 상용화 가능성을 확인하였으나, 유채에 대한 바이오리파이너리 연구를 통하여 접착제 제조용 주원료인 유채박을 저렴하게 안정적으로 확보하는 방안의 확립이 선행되어야 할 것으로 생각한다.

감 사

본 논문은 2020년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행한 결과를 토대로 작성하였다. 한편 중밀도섬유판의 제조 및 물성평가를 위하여 긴 시간 수고한 대구대학교 산림자원학과 학생들에게도 감사드립니다.

References

- Pizzi, A., Papadopoulos, A. N. and Policardi, F., "Wood Composites and Their Polymer Binders," *Polymers* **12**, 1115(2020).
- Hussin, M. H., Abd Latif, N. H., Hamidon, T. S., Idris, N. N., Hashim, R., Appaturi, J. N., Brosse, N., Ziegler-Devlin, I., Chrusiel, L. and Fatriasari, W., "Latest Advancements in High-performance Bio-based Wood Adhesives: A Critical Review," *J. Mater. Res. Technol.*, **21**, 3909-3946(2022).
- Kuo, M. L., Myers, D. J., Heemstra, H., Curry D., Adams, D. O. and Stokke, D. D., "Soybean-based Adhesive Resins and Composite Products Utilizing such Adhesives," U.S. Patent No. 6,306,997(2001).
- Yang, I., Kuo, M. L. and Myers, D. J., "Physical Properties of Hybrid Poplar Flakeboard Bonded with Alkaline Phenolic Soy Adhesives," *J. Korean Wood Sci. & Technol.*, **33**(5), 66-75(2005).
- Yang, I., Kuo, M. L., Myers, D. J. and Pu, A. B., "Comparison of Protein-based Adhesive Resins for Wood Composites," *J. Wood Sci.*, **52**(6), 503-508(2006).
- Christiansen, A. W. and Gillespie, R. H., "Potential of Carbohydrates for Exterior-type Adhesives," *Forest Prod. J.*, **36**(7/8), 20-28(1986).
- Oh, Y., Seller Jr., T., Kim, M. G. and Strickland, R. C., "Evaluation of Phenol-formaldehyde OSB Resins Modified with Lignin Residues from Acid-hydrolyzed Waste Newsprint," *Forest Prod. J.* **44**(2), 25-29(1994).
- Yang, K. K., Wang, X. L. and Wang, Y. Z., "Progress Nanocomposite of Biodegradable Polymer," *J. Ind. Eng. Chem.* **13**(4), 485-500(2007).
- Barbosa, A. P., Mano, E. B. and Andrade, C. T., "Tannin-based Resins Modified to Reduce Wood Adhesive Brittleness," *Forest Prod. J.*, **50**(9), 89-92(2000).
- Moubarik, A., Allal, A., Pizzi, A., Charrier, F. and Charrier, B., "Characterization of a Formaldehyde-free Cornstarch-tannin Wood Adhesive for Interior Plywood," *Eur. J. Wood & Wood Prod.*, **68**(4), 427-433(2010).
- Oh, S., Ahn, S., Choi, I., Jeong, H., Yoon, Y. and Yang, I., "Development and Application of Okara-based Adhesives for Plywood Panels," *Mokchae Konghak* **36**(3), 30-38(2008).
- Yang, I., Ahn, S., Choi, I., Kim, H., and Oh, S. C., "Adhesives Formulated with Chemically Modified Okara and Phenol-resorcinol-formaldehyde for Bonding Fancy Veneer onto High-Density Fiberboard," *J. Ind. & Eng. Chem.*, **15**(3), 398-402(2009).
- Yang, I., Lee, K. and Oh, S., "Manufacture and Performance Evaluation of Medium-density Fiberboard Made with Coffee Bean Residue-wood Fiber," *J. Korean Wood Sci. Technol.*, **41**(4), 293-301(2013).
- Ahn, S., "Effect of Heating Temperature and Time of Coffee Waste on the Adsorptivity of Formaldehyde," *J. Korean Wood*

- Sci. Technol.*, **43**(3), 390-399(2015).
15. Yang, I. and Ahn, S., "Investigating the Potential of Human Hair Produced from the Beauty Parlor and Barbershop as a Raw Material of Wood Adhesives," *J. Korean Wood Sci. Technol.*, **45**(5), 599-612(2017).
 16. Yang, I., Park, D., Choi, W., Oh, S. C., Ahn, D. and Han, G., "Reaction Mechanism and Curing Characteristics of Chicken Feather-based Adhesives and Adhesive Properties of Medium-density Fiberboard Bonded with the Adhesive Resins," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(3), 385-394(2017).
 17. Yang, I., Jeong, J., Han, G., Choi, I., Sagong, M., Ahn, S. and Oh, S. C., "Development of Adhesive Resins Formulated with Rapeseed Flour Akali Hydrolyzates for Plywood Panels," *Mokchae Konghak* **38**(4), 323-332(2010).
 18. Yang, I., Han, G., Choi, I., Kim, Y., Ahn, S. and Oh, S. C., "Development of Adhesive Resins Formulated with Rapeseed Flour Hydrolyzates for Laminated Veneer Lumber and Its Performance Evaluation," *Mokchae Konghak* **39**(3), 221-229(2011).
 19. Yang, I., Han, G., Choi, I., Kim, Y., Ahn, S. and Oh, S. C., "Development of Adhesive Resins Formulated with Rapeseed Flour Hydrolyzates for Medium-density Fiberboard (MDF)," *J. Korean Wood Sci. Technol.*, **40**(3), 177-185(2012).
 20. Yang, I., Han, G., Ahn, S., Choi, I., Kim, Y. and Oh, S. C., "Adhesive Properties of Medium-density Fiberboards Fabricated with Rapeseed Flour-based Adhesives," *J. of Adhesion* **90**(4), 279-295 (2014).
 21. Shin, S., "Production of Environmentally Friendly Edible Rapeseed Oil," (2022) <https://www.nics.go.kr/bbs/view.do?m=100000020&bbsId=news&bbsSn=625892> [Accessed 28 April 2024].
 22. Lee, Y. H., "Value of Rapeseed," (2014) <https://www.kyongbuk.co.kr/news/articleView.html?idxno=673887> [Accessed 28 April 2024].
 23. Korean Agency for Technology and Standards, "Fiberboards," KATS, KS F 3200, umseong, Chungbuk, Republic of Korea(2021).
 24. Korean Agency for Technology and Standards, "Determination of the Emission Rate of Formaldehyde and Volatile Organic Compounds in Building Interior Products," KATS, KS M 1998, Umseong, Chungbuk, Republic of Korea(2022).
 25. National Institute of Forest Science, "Standard and Specification of Wood Products," NIFOS, Seoul, Republic of Korea(2020).
 26. Tran, A., Konnerth, J., van Herwijnen, H. W. G., and Gindl-Altmutter, W., "Low Temperature and Moisture Dependent Curing Behavior of Selected Wood Adhesives," *Int. J. Adhes. Adhes.* **117**(Part A), 103178(2022).
 27. Frihart, C. R. and Hunt, C. G., Wood Adhesives Bond Formation and Performance: Wood Handbook – Wood as an Engineering Material, United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, 10-1-10-23(2021).
 28. Ferdosian, F., Pan, Z., Gao, G. and Zhao, B., "Bio-Based Adhesives and Evaluation for Wood Composites Application," *Polymer* **9**(2), 70(2017).
 29. Zhang, C., Wang, Z., Li, Y., Yang, Y., Ju, X. and He, R., "The Preparation and Physiochemical Characterization of Rapeseed Protein Hydrolysate-chitosan Composite Films," *Food Chem.*, **272**, 694-701(2019).
 30. Jeong, H., Kim, H., Ahn, S. H., Oh, S. C., Yang, I. and Choi, I., "Effects of Combination Processes on the Extraction of Pectins from Rapeseed Cake (*Brassica napus* L.)," *Food Chem.*, **139**, 9-15(2013).
 31. Selakjani, P. P., Dorieh, A., Pizzi, A., Shahavi, M. H., Hasankhah, A., Shekarsaraee, S., Ashouri, M., Movahed, S. G. and Abatari, M. N., "Reducing Free Formaldehyde Emission, Improvement of Thickness Swelling and Increasing Storage Stability of Novel Medium Density Fiberboard by Urea-formaldehyde Adhesive Modified by Phenol Derivatives," *Int. J. Adhes. Adhes.*, **111**, 102962 (2021).
 32. Chrobak, J., Howska, J., and Chrobok, A., "Formaldehyde-free Resins for the Wood-Based Panel Industry: Alternatives to Formaldehyde and Novel Hardeners," *Molecules* **27**(15), 4862(2022).
 33. Ahn, S. Y., "Status of Wood Adhesive Resin in the Domestic Market," Personnel Communication (2024) [Accessed 15 April 2024].

Authors

Sei Chang Oh: Professor, Department of Forest Resources, Daegu University, Gyeongsan, Gyeongsangbuk-do, 38453, Korea; osc@daegu.ac.kr
In Yang: Research Professor, Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Gangwon-do, 25354, Korea; dahadad@snu.ac.kr