

탄화 코르크 유래 수베린 공정 최적화 및 PLA 복합재의 가소화 특성

황민환* · 이은석* · 박유진** · 오태훈* · 서종환*,**†

Optimization of Extraction Process for Expanded Cork-derived Suberin and Plasticizing Performance in PLA Composites

Minhwan Hwang*, Eunseok Lee*, Yujin Park**, Taehoon Oh*, Jonghwan Suhr*,**†

ABSTRACT: Poly (lactic acid) (PLA) is a biodegradable, bio-based polymer proposed as an alternative material to reduce petroleum-based plastic pollution. However, its industrial application is limited by its high brittleness. Accordingly, studies on bio-based plasticizers to improve the brittleness of PLA have been conducted. Depolymerized Suberin Derivatives (DSDs) are natural materials derived from cork, and it has been reported that DSDs-based plasticizers can enhance the toughness of PLA. However, conventional DSDs extraction processes require long processing times and have low consistency, which limits industrial application. In this study, the DSDs extraction process was optimized using expanded cork through reflux hydrolysis with organic solvent washing and vacuum drying. As a result, DSDs with lower Mn and PDI were obtained, and the use of dichloromethane (DCM) as the organic solvent reduced the processing time by more than 90%. Furthermore, when the DSDs-based plasticizer extracted via the optimized process was applied to PLA, the toughness increased by 11 times at a plasticizer content of 7.5 wt% compared to neat PLA.

초 록: 폴리락트산(poly(lactic acid), PLA)은 바이오 기반 생분해성 고분자로, 석유계 플라스틱 환경오염 문제에 대한 대안 소재로 주목받고 있다. 하지만 PLA는 취성이 커 산업적 활용에 한계가 있으며, 이를 개선하기 위한 바이오 기반 가소제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Depolymerized Suberin Derivatives (DSDs)는 코르크로부터 유래한 천연 물질로, DSDs기반 가소제로 적용 시 PLA의 인성을 향상시킬 수 있음이 보고되었다. 하지만 기존 DSDs 추출 공정은 공정 시간이 길고 일관성이 낮아 산업적 적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 탄화 코르크(Expanded cork)를 원료로 하여 Reflux 기반 가수분해와 유기 용매 분별 세척 및 진공 건조 공정을 적용함으로써 DSDs 추출 공정을 최적화하였다. 그 결과, 기존 공정 대비 더 낮은 Mn 및 PDI를 갖는 DSDs를 얻었으며, DCM을 유기 용매로 사용함으로써 공정 시간을 기존 대비 약 90% 이상 감소시켰다. 또한 최적화된 공정으로 추출한 DSDs 기반 가소제를 PLA에 적용한 결과, 가소제 함량 7.5 wt%에서 PLA대비 인성이 11배 향상되었다.

Key Words: 탄화 코르크(Expanded cork), 수베린 추출(Suberin extraction), 공정 최적화(Process optimization), 바이오 가소제(Bio-based plasticizer), PLA 복합체(PLA composites)

1. 서 론

고분자 소재는 우수한 가공성과 물리적 특성을 바탕으

로 섬유, 전자 기기, 패키징 등 다양한 산업 분야에서 핵심 소재로 사용되고 있다. 하지만 대부분의 고분자 소재는 석유 자원을 기반으로 합성되어 자연 조건에서 분해가 어려

Received 1 March 2026, received in revised form 26 May 2026, accepted 23 June 2026

*Department of Polymer Science and Engineering, Sungkyunkwan University

**Department of Mechanical Engineering

†Corresponding author (E-mail: suhr@skku.edu)

우며, 매립 시 토양이 황폐화되고 소각 시 다이옥신, 다환방향족 화합물과 같은 환경 오염 물질을 방출한다[1]. 이에 따라 기존 석유계 고분자를 대체할 수 있는 Soybean oil, Starch, Cellulose와 같은 바이오 기반의 생분해성 고분자 개발이 환경 오염 해결을 위한 대안으로 주목받고 있다[2-5].

폴리락트산(poly(lactic acid), PLA)은 바이오매스 기반의 대표적인 생분해성 고분자로, LCA (Life Cycle Assessment) 관점에서 석유계 고분자 대비 생산 과정에서 요구되는 총 에너지 사용량이 최대 66%까지 낮은 것으로 보고되어 친환경 대체 소재로 주목받고 있다[6,7]. 그러나 PLA는 분자 내 카보닐기(C=O)간의 극성 결합으로 인해 높은 취성을 나타내며, 이는 연성 및 충격 저항성이 요구되는 다양한 산업 분야로의 응용을 제한하는 주요 원인이 된다[8]. 이러한 취성 문제를 개선하기 위해 공중합, 용융 블렌딩 등 다양한 방법이 적용되고 있으며, 그중 가소제 첨가는 소량으로도 물성 개선이 가능하다는 점에서 경제적이고 실용적인 방법으로 평가된다. 기존에는 DEHP, DBP 등 프탈레이트계 석유 기반 가소제가 주로 사용되어 왔으나, 환경 잔존성 및 내분비계 교란 문제로 인해 REACH 규제 등 국제적 관리가 강화되고 있으며, 화석자원 의존성으로 인해 지속가능성 측면에서 한계가 있다. 이에 따라 재생 가능한 바이오매스를 기반으로 하면서 낮은 독성과 생분해성을 갖는 친환경 가소제가 대안으로 제시되고 있다. 이러한 바이오 기반 가소제는 가소화 효율을 유지하면서 인체 안정성과 지속가능성을 확보할 수 있어, 물성 개선과 환경성 향상을 동시에 달성하기 위한 중요한 연구 방향으로 주목받고 있다[9-11].

Depolymerized Suberin Derivatives (DSDs)는 수목의 피층 및 코르크로부터 유래한 천연 물질로, C16-C20 범위의 장쇄 알킬 사슬과 말단 카복실기(-COOH) 및 알코올기(-OH)를 포함한다[12-14]. 이러한 구조적 특성으로 인해 DSDs는 필름[15], 비트리머[16], 에스터 폼[17], 보강제[18] 등 다양한 분야에서 연구되고 있다. 또한 코르크 참나무(*Quercus suber*)는 성장 과정에서 평균적으로 약 446 kg의 CO₂를 흡수하는 것으로 보고되어 지속가능한 원료로써 이점을 지닌다[19].

선행 연구에서는 PLA의 취성 개선을 위해 DSDs를 Diethylene glycol (DEG)과 반응시켜 Polymerized DSDs (pDSDs) 가소제를 합성하고, 이를 PLA에 적용하여 인성 향상을 보고하였다[20]. 하지만 해당 추출 공정에서 적용된 Grinding 기반 가수분해 방식은 장비 발열로 인해 가수분해 온도 제어가 어렵다. 이로 인해 DSDs의 분자량 분포가 불균일하며, 가소제로 적용시 물성 편차가 발생한다. 또한 증류수 기반 세척 및 동결 건조 공정은 다량의 폐수를 발생시키고 20시간 이상의 공정 시간을 요구한다. 이러한 공정 한계는 스케일업 과정에서 에너지 및 비용 부담을 증가시켜 산업 적용 가능성을 감소시킨다.

본 연구에서는 탄화 코르크(Expanded cork)를 원료로 하여 Reflux 기반 알칼리 가수분해 공정을 적용하고, 유기 용매 분별 세척 및 건조 공정을 설계함으로써 DSDs 추출 공정을 최적화하였다. 또한 용매의 끓는점 차이에 따른 건조 시간 분석을 통해 공정 시간 단축이 가능한 최적의 용매 조건을 도출하였다. 나아가, 최적화된 공정으로 추출한 DSDs를 가소제로 합성하여 PLA에 적용하고, 물성 평가를 통해 공정 최적화의 효과를 검증하였다.

2. 재료 및 시험

2.1 재료

탄화 코르크(Expanded Cork)는 국내 업체 Hankyeol Cork로부터 구매하였다. Sodium hydroxide ($\geq 97.0\%$), Sulfuric acid ($\geq 98\%$), Methyl tert-butyl ether (MTBE), Diethylene glycol(99%)는 Sigma Aldrich (Merck)에서 구매하였다. Ethyl alcohol ($\geq 99.5\%$), Dichloromethane(DCM) ($\geq 98\%$), Toluene ($\geq 98\%$)은 Daejung Chemicals에서 구매하였다. 본 연구에 사용된 PLA는 LUMINY® LX175로, Total Energies Corbion (Netherlands)에서 구매하였다. 여과 공정에는 filter paper f1005 (90 mm, Retention Range 1-2 μm , Cacheby)를 사용하였다.

2.2 Alkaline 가수분해 & DSDs 추출

질소 퍼징된 플라스크에 코르크 분말(<1 mm, 40 g)과 에탄올:물 혼합 용매(1 L, 8:2, v/v), Sodium hydroxide (8 g)를 투입하였다. 이후 500 rpm의 교반 조건에서 80°C로 유지하며 3시간 동안 알칼리 가수분해를 진행하였다. 반응 종료 후 감압 여과 장치와 필터지(기공 크기 1-2 μm)를 사용하여 고형 잔류물을 제거하였으며, 잔류물이 관찰되지 않을 때까지 여과를 반복하였다. 여과를 통해 얻은 DSDs 수용액은 Rotary Evaporator (45°C, 150 mbar)을 이용하여 에탄올을 제거하였다. 이후 확보된 수용액을 70°C에서 10 wt% 황산(H₂SO₄)을 사용하여 pH가 2 이하가 될 때까지 천천히 적정하고 침전된 고형 DSDs는 수득하였다.

2.3 증류수 세척 & 동결건조

캐스팅된 DSDs가 담긴 유리 비커에 증류수 300 ml를 첨가한 후 70°C까지 가열하였다. DSDs가 완전히 용융된 상태에서 500 rpm으로 10분간 교반하였으며, 세척 공정은 폐용액의 pH가 중성(pH 7 $\pm$ 0.2)이 될 때까지 반복하였다. 각 세척 단계에서 배출된 폐용액의 pH는 pH 미터(Starter3100, OHAUS)를 사용하여 측정하였다. 세척이 완료된 시료는 액체질소를 이용해 급속 냉동한 후 동결건조를 통해 수분을 제거하였다. 또한 동결건조 시간(1-30시간)에 따른 시료의 질량 변화를 측정하여 건조 속도를 분석하였다.

2.4 유기 용매 기반 증류 및 진공 건조

캐스팅된 DSDs가 담긴 유리 비커에 Dichloromethane (DCM), Methyl tert-butyl ether (MTBE), Toluene 용매를 각각 300 ml 첨가한 후 상온에서 15분간 교반하여 완전히 용해시켰다. 이후 용해된 DSDs 유기용액을 분별 깔때기로 옮기고 증류수(300 ml)를 첨가하여 3분간 혼합하였다. 이후 유기용매층을 회수하고, 배출되는 폐용액의 pH를 pH 미터 (Starter3100, OHAUS)로 측정하였다. 세척 공정은 폐용액의 pH가 중성($\text{pH } 7 \pm 0.2$)이 될 때까지 반복하였다. 최종적으로 분리된 DSDs 유기용매는 Rotary Evaporator (60°C , 150 mbar)를 사용하여 기포가 발생하지 않을 때까지 용매를 제거하였다. 농축된 DSDs는 유리 패트리 접시에 캐스팅한 후 진공 오븐(45°C)에서 건조하였으며, 건조시간(1-30시간)에 따른 시료의 질량 변화를 측정하여 건조 속도를 분석하였다.

2.5 pDSDs/PLA 제조

DSDs와 Diethylene glycol (6 wt%)을 PTFE 코팅된 유리 패트리 접시에 투입하고 70°C 에서 녹인 후 5분간 교반하였다. 이후 100°C 진공 오븐에서 48시간 반응을 진행한 후, 상온에서 12시간 냉각하였다[21]. 합성된 pDSDs를 2.5, 5, 7.5, 및 10 wt% 함량으로 PLA와 혼합하여 internal mixer (Mixer 300 g, Namyang Enterprise, Republic of Korea)를 이용해 180°C , 200 rpm 조건에서 20분간 교반되었다. pDSDs/PLA는 핫 프레스(KHP-50, Korea Mtec, Republic of Korea)를 사용하여 190°C 조건에서 5분간 압축 성형한 후, 상온에서 12시간 동안 냉각하여 필름형태의 시편을 제작하였다[21].

2.6 화학 평가

본 연구에서 추출한 DSDs의 분자량 분포 분석은 GPC (Gel Permeation Chromatography, Agilent 1260 Infinity2)를 사용하였으며, HPLC급 Tetrahydrofuran (THF)을 이동상으로 적용하였다. 시료를 완전히 용해시킨 후 $5 \mu\text{m}$ PTFE 멤브레인 필터로 여과하여 잔류물을 제거하였다. DSDs 화학 구조 분석은 FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Bruker Alpha II)을 이용하여 $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$ 범위에서 0.1 cm^{-1} 의 분해능으로 ATR 모드에서 분석하였다. 또한 $^1\text{H-NMR}$ (^1H Nuclear Magnetic Resonance, Varian Oxford 500)은 CDCl_3 를 용매로 사용하여 측정하였다. DSDs와 pDSDs, pDSDs/PLA 복합재의 열적 특성은 DSC (Differential Scanning Calorimetry, TA Instruments DSC 25)를 이용하여 질소(50 ml/min) 조건에서 10°C/min 의 승온 속도로 $0\text{--}200^\circ\text{C}$ 범위에서 분석하였다. 열분해 거동은 TGA (Thermogravimetric Analysis, TA Instruments TGA 55)를 사용하여 실온에서 600°C 까지 10°C/min 의 속도로 측정하였으며, 온도 변화에 따른 질량 변화를 분석하였다. 인장 강도 및 인성 평가는 UTM (Universal Testing Machine, Salt ST-1003)을 사용하였으며,

250 N Load cell을 장착하고 5 mm/min 의 크로스헤드 속도 조건에서 ASTM D882 표준에 따라 제작한 시편($100*5*0.5 \text{ mm}$)을 상온에서 5회 시험하였다. 토양 분해성 평가는 ISO 20200 표준에 따라 인공 토양을 제조하고, 측면에 공기 유입 구멍이 있는 아크릴 시험 케이스를 사용하여 진행하였다. 시편($25*25*1 \text{ mm}$)은 퇴비화 용기의 $3/2$ 높이에 매립하고 일정한 습도 조건을 유지하였다. 이후 2 mm 체(Sieve)로 분리하여 잔류물의 질량을 측정하였으며, 시험 전후 질량 감소분을 분해된 물질로 간주하여 붕괴율을 계산하였다. 모든 토양 분해성 실험은 $58 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 고온 호기성 조건에서 14주간 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 DSDs, pDSDs 화학적 특성

Table 1은 GPC 분석을 통해 얻은 DSDs의 분자량 분포를 나타낸 것이다. 기존 DSDs 추출 공정에서는 M_n 800-900 및 PDI 2-3의 값이 나타난 반면, Reflux 기반 탄화 코르크 공정에서는 M_n 596과 PDI 1.76으로 더 낮은 값이 확인되었다. 이는 Reflux 기반 가수분해 공정이 코르크 내 DSDs와 글리세롤 사이의 에스터 결합을 효율적으로 분해하여, 기존 공정 대비 낮은 M_n 과 PDI를 갖는 DSDs를 확보할 수 있음을 의미한다.

Fig. 1은 FT-IR 분석을 통한 DSDs와 pDSDs의 화학 구조 분석결과이다. DSDs에서는 1700 cm^{-1} 부근에서 카복실산

Table 1. GPC result of DSDs

Cork	Hydrolysis process	M _n	M _w	PDI
Expanded	Reflux	596	1051	1.76
	Grinding	955	2319	2.42 [18]
Raw		842	1693	2.01 [17]
		841	2577	3.03 [21]

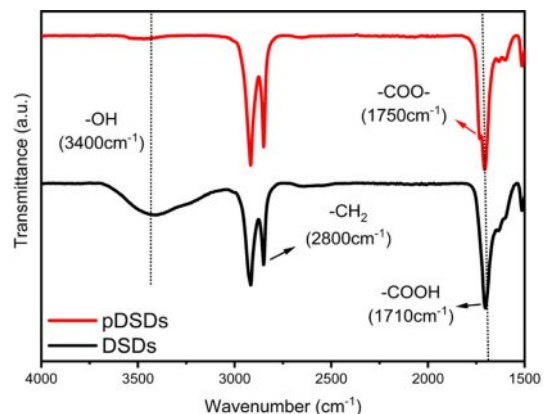


Fig. 1. FT-IR result of DSDs, pDSDs

(-COOH)의 C=O 신축 진동 피크가 관찰되었으며, 3300 cm^{-1} 영역의 넓은 피크를 통해 말단 알코올(-OH)의 존재가 확인되었다. 이는 추출된 DSDs가 중합에 참여 가능한 반응성 말단기를 보유하고 있음을 의미한다. 반면 DEG와 중합된 pDSDs에서는 1750 cm^{-1} 에서 에스테르 결합에 의한 C=O 피크가 나타났으며, DSDs에서 관찰되던 알코올 및 카복실산 관련 피크는 90% 감소하였다. 이러한 변화는 DSDs와 DEG 사이의 에스테르화 반응이 성공적으로 진행되었음을 의미한다. 또한 2849 cm^{-1} 의 메틸렌(-CH₂) 피크와 2916-2932 cm^{-1} 의 메틸(-CH₃) 피크를 통해 DSDs의 지방족 탄소 사슬 구조를 확인할 수 있다. Fig. 2는 ¹H-NMR 분석을 통한 DSDs 및 pDSDs의 화학 구조 분석결과이다. DSDs에서는 메틸렌(-CH₂, 1.25 ppm), 알코올(-OH, 3.61 ppm), 알릴(-C=C-C-, 2.01 ppm), 카복실산(-COOH, 2.30 ppm) 피크가 관찰되었다. 반면 pDSDs에서는 3.70 ppm에서 에스테르(-COOC-) 피크가 나타났으며, 알코올 및 카복실산 관련 피크가 감소하였다. 이는 DSDs의 카복실산기와 DEG의 알코올기 사이의 에스테르 결합 형성에 따른 구조 변화로 판단된다. Fig. 3은 DSC 분석을 통해 DSDs와 pDSDs의 열적 거동 분석 결과이다.

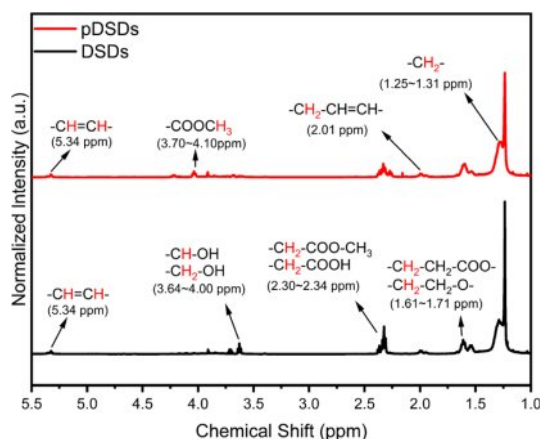


Fig. 2. ¹H-NMR result of DSDs, pDSDs

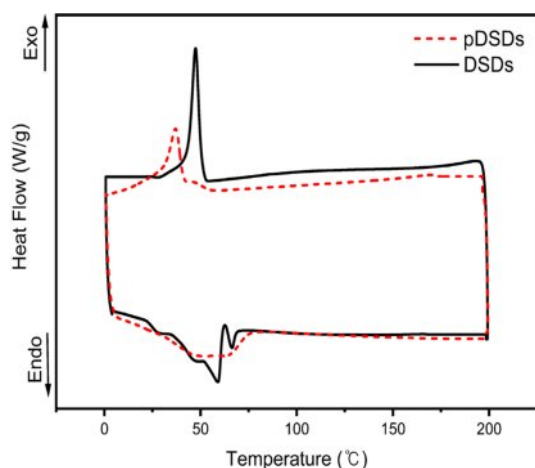


Fig. 3. DSC result of DSDs, pDSDs

DSDs와 pDSDs는 긴 지방족 사슬에 의해 사슬 간 규칙적인 패키징이 형성되어 결정화 온도(T_c) 피크가 나타났다. 한편 DSDs의 경우 3개의 용융 온도(T_m) 피크가 나타났으며, pDSDs는 중합에 따른 분자량 증가로 사슬 간 상호작용이 증가하면서 T_m 이 상승하고 범위가 넓어지는 경향을 나타내었다.

3.2 DSDs 세척 효율 및 건조시간

Table 2는 DSDs의 세척 방식에 따른 폐용액의 pH 변화를 나타낸 것이다. 증류수를 이용한 세척에서는 1회 세척 후 pH가 약 5.1까지 상승하였으나, 중성(pH 7.0 $\pm$ 0.2)에 도달하기 위해서는 5회 이상의 반복 세척이 필요하였다. 이러한 낮은 세척 효율은 용융 상태의 DSDs가 소수성과 분자 간 인력으로 인해 증류수 내에서 미립화 되지 않고 방울 형태(Droplet)를 유지함으로써, 내부에 잔류한 황산이 증류수와 충분히 접촉하지 못하기 때문으로 판단된다. 반면, 유기용매를 이용한 세척에서는 DSDs가 용해되면서 분자 수준의 분산이 이루어짐으로써 잔류 황산이 효과적으로 제거되었다. 특히 DCM과 Toluene은 2회 세척만으로 중성(pH 7.0 $\pm$ 0.2) 상태를 확보한 반면, MTBE는 에테르 작용기와 황산 간의 극성 상호작용으로 인해 황산의 증류수로의 이동이 제한되었으며, 그 결과 3회의 세척 후 중성(pH 7.0 $\pm$ 0.2)에 도달하였다.

Table 3은 건조 공정에 따른 DSDs의 건조 시간을 비교한 결과이다. 증류수 세척 후 동결건조를 적용할 시, 총 건조 시간은 20시간 이상 소요되었다. 이는 동결건조 과정에서 시료 표면에 형성된 얼음은 승화되는 반면, 내부의 얼음은 소수성인 DSDs 구조내에 포획되어 외부로의 확산이 제한

Table 2. pH variation of DSDs solution as a function of washing solvent

Washing cycle	pH variation			
	Solvent extraction			DI water washing
	DCM	MTBE	Toluene	
0	2.1	2.3	2.4	2.4
1	6.9	4.4	5.1	5.1
2	6.9	5.5	6.2	6.2
3	6.8	6.8	6.4	6.4
4	7.1	6.8	6.5	6.5
5	6.9	7.0	6.8	6.8

Table 3. Effect of drying method on drying time

Vacuum Drying	Solvent	Time (h)
	DCM (39.6°C)	2.4
	MTBE (55.2°C)	8.1
	Toluene (110.6°C)	24.5
Conventional method		20.5

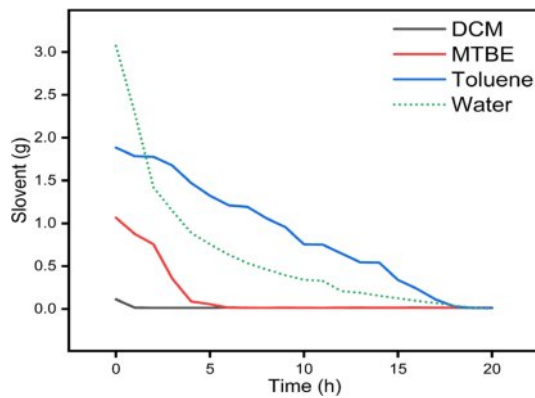


Fig. 4. Drying time of DSDs

되기 때문에 증발이 지연된 것으로 판단된다. 이에 따라 Fig. 4에 나타난 바와 같이 초기에는 건조가 빠르게 진행되나, 이후 전체 건조 속도는 감소하는 경향을 보였다. 반면 DSDs를 유기용매에 용해시켜 건조한 경우, 건조 속도는 용매의 끓는점이 낮을수록 증가하는 경향을 보였다. 실험 결과 DCM, MTBE, Toluene 순으로 건조가 빠르게 진행되었으며, 특히 DCM (39.6°C)을 용매로 사용할 경우 Toluene (110.6°C) 대비 건조시간이 약 90% 이상 감소하였다. 이러한 차이는 Rotary Evaporator 농축 과정에서 끓는점에 따라 초기 용매 제거량이 달랐고, 이후 진공 오븐 건조에서도 용매별 끓는점이 건조 효율에 복합적으로 작용했기 때문으로 판단된다.

3.3 PLA/pDSDs 열적 거동 분석

Fig. 5는 PLA/pDSDs의 DSC 분석 결과를 나타낸 것이다. PLA는 55.2°C의 유리전이온도(T_g)가 관찰되었으며, pDSDs 함량이 증가함에 따라 T_g 가 감소하는 경향을 보였다. 특히 pDSDs 10 wt%가 첨가된 시편에서는 T_g 가 49.1°C로 감소하였다. 이러한 T_g 의 감소는 pDSDs가 소수성 선형 탄소 골격과 말단의 극성 작용기를 동시에 지니고 있어 PLA 사슬 간 거리를 증가시키고, 비결정 영역을 확장하는 가소화 효과

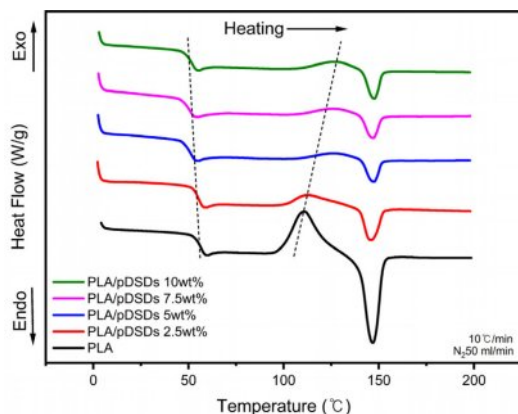


Fig. 5. DSC result of PLA/pDSDs

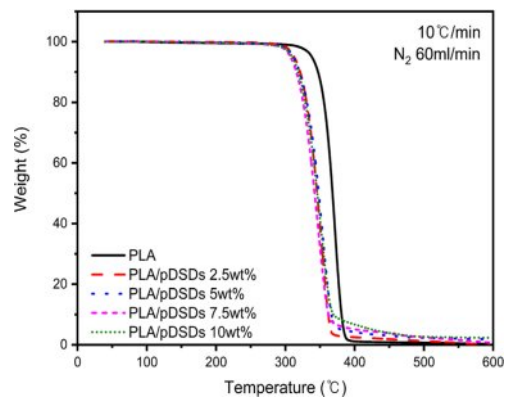


Fig. 6. TGA result of PLA/pDSDs

에 기인한 것으로 해석된다. 또한 냉결정화 거동에서도 유사한 경향이 관찰되었다. PLA의 경우 약 110°C에서 냉결정화 온도(T_c) 피크가 나타난 반면, pDSDs 10 wt% 첨가된 시편에서는 T_c 가 128°C로 이동하고 피크 분포가 넓어진다. 이는 가소화로 인해 PLA 사슬의 배열이 지연되었음을 의미한다. Fig. 6은 PLA/pDSDs의 TGA 분석 결과를 나타낸 것이다. PLA는 361°C의 분해 시작 온도(T_d)를 나타낸 반면, pDSDs가 첨가된 시편에서는 T_d 가 340°C로 감소하였다. 이는 가소화에 따른 사슬 간 상호작용 감소로 열 침투가 용이해져 열분해가 빠르게 진행된 것으로 판단되며, PLA 가공 온도 범위(180°C)를 고려할 때 고온 성형 안정성에 영향을 미치지 않는다.

3.4 PLA/pDSDs 기계적 특성

Fig. 7은 PLA/pDSDs의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. PLA에 pDSDs 가소제를 함량별로 첨가하여 기계적 거동을 평가한 결과, pDSDs의 함량이 증가함에 따라 항복 이후 소성 변형 구간이 나타났다. 이에 따라 Fig. 8에 나타난 바와 같이 pDSDs 7.5 wt%가 첨가된 시편의 인성은 5.844 MJ/m³로, PLA (0.530 MJ/m³) 대비 1,102%의 인성이 향상되었으

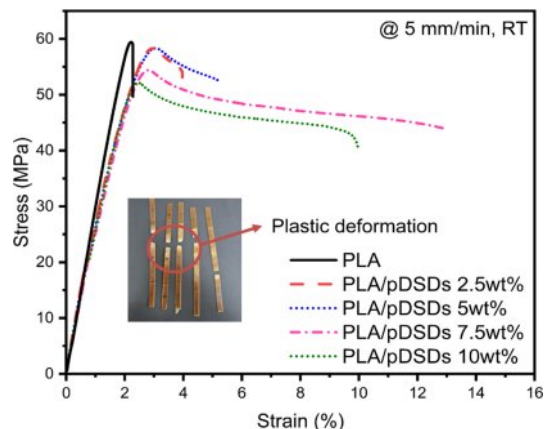


Fig. 7. Stress-strain curve of PLA/pDSDs

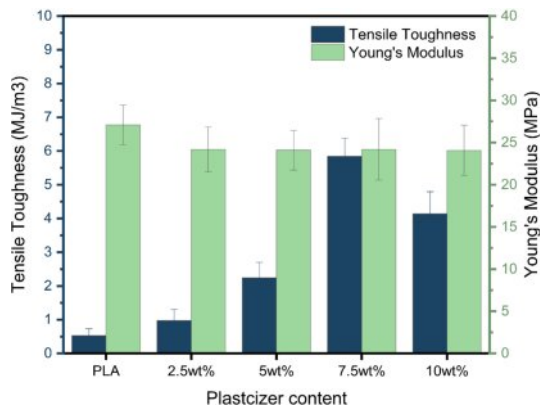


Fig. 8. Toughness & Young's modulus of PLA/pDSDs

Table 4. Compare the toughness of pDSDs/PLA composites vs PLA

Cork	Hydrolysis process	Toughness (MJ/m³)
Expanded	Reflux	1,102%
Raw	Grinding	1,148% [20]

며, Table 4에 제시된 선행연구 결과와 유사한 경향을 보였다. 반면, pDSDs가 7.5 wt%가 첨가된 시편에서는 인장강도가 PLA 대비 5-7 MPa 감소하였고, 영률(Young's modulus) 또한 2-3 MPa 낮아졌다. pDSDs 10 wt%가 첨가된 경우에는 과도한 가소화로 인해 매트릭스 내 상분리가 발생하여, 인장강도(50 MPa), 인성(4.15 MJ/m³), 영률(24 MPa) 모두 감소하였다.

3.5 PLA/pDSDs 토양 분해성

Fig. 9은 PLA/pDSDs의 토양 분해실험에 대한 결과를 나타낸 것이다. 모든 시편은 약 30일 동안 흡습 단계를 거친 후, 45일을 기점으로 질량 감소가 가속되었으며, 90일을 기점으로 100% 분해가 확인되었다. pDSDs 함량이 증가할수록 초기 30-45일 구간에서 시편 표면의 균열 및 조각화 현

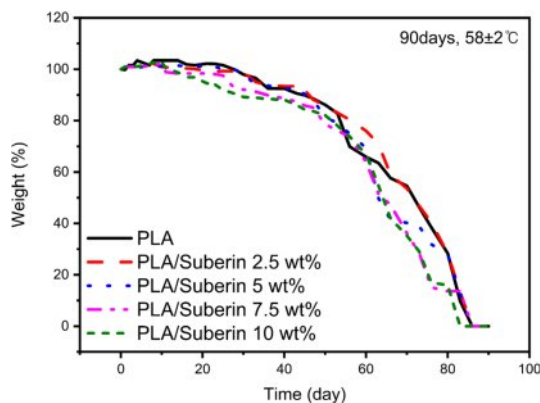


Fig. 9. Soil degradation test result of PLA/pDSDs

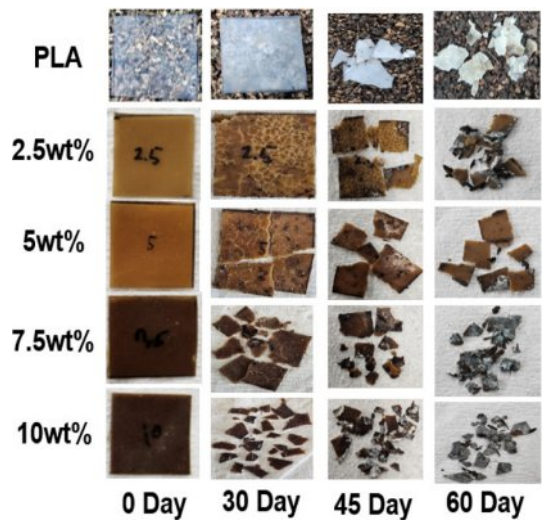


Fig. 10. Soil degradation test image of PLA/pDSDs

상이 가속화되었고, 60-75일 구간에서 분해 속도가 향상되는 경향을 보였다. 이러한 분해 거동은 pDSDs 첨가로 인해 PLA매트릭스 내 분자 간 간격이 확장되고 결정성이 감소함에 따라, 수분 및 미생물 효소의 침투가 빨라졌기 때문으로 해석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 DSDs 추출 공정의 시간 단축과 공정 일관성 향상을 목표로 공정을 최적화하고, 추출된 DSDs를 가소제로 합성하여 PLA에 적용함으로써 물성 변화를 평가하였다. 분별 세척 공정에서 유기용매로 DCM을 적용한 결과, 기존 증류수 세척 공정(5회) 대비 세척 횟수를 2회로 단축하였다. 또한 진공 조건에서 용매를 제거함으로써 기존 건조 공정(20.5시간) 대비 약 90% 절감한 2.4시간의 건조 시간을 달성하였다. 추출된 DSDs의 화학적 특성 분석 결과, 기존 공정 대비 낮은 M_n , PDI를 나타내어 분자량 분포의 일관성이 향상되었음을 확인하였다. 또한 DSDs를 기반으로 합성한 pDSDs를 PLA에 적용한 결과, 가소제 함량 증가에 따라 유리전이온도는 55.2°C에서 49.1°C로 감소하였으며, pDSDs 7.5 wt% 첨가 시 인성은 5.84 MJ/m³로 PLA 대비 약 1,102% 향상되는 가소화 거동을 보였다. 마지막으로 토양 분해성 평가에서는 90일 기점으로 시편의 완전 분해가 관찰되었다.

결론적으로, 본 연구에서 제시한 공정 최적화를 통해 추출된 DSDs는 선행 연구 대비 향상된 공정 효율성과 일관성을 확보하였으며, PLA 가소제로서 인성 향상 성능이 확인되어 블로우 몰딩과 같은 높은 인성을 요구하는 응용 분야뿐만 아니라 3D 프린팅 기반 의료용 소재 및 식품 패키징 분야 등 지속가능 산업 전반에 걸쳐 폭 넓은 응용 가능성을 보여주었다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (2022R1A2C3011968).

REFERENCES

- Verma, R., Vinoda, K.S., Papireddy, M., and Gowda, A.N.S., "Toxic pollutants from plastic waste – a review," *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 35, 2016, pp. 701–708.
- Yang, K.K., Wang, X.L., and Wang, Y.-Z., "Progress in nano-composite of biodegradable polymer," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 13, No. 4, 2007, pp. 485–500.
- Hong, S.J., Lee, A.J., Ju, S.H., Shin, Y.E., and Park, T.H., "A Study on Increased Properties of Cellulose-Based Biodegradable Polymer Composites," *Composites Research*, Vol. 36, No. 2, 2023, pp. 126–131.
- Choi, D.H., and Hwang, H.Y., "Development of Eco-Friendly Filament for 3D Printing using Organic Soybean Hulls," *Composites Research*, Vol. 36, No. 6, 2023, pp. 448–453.
- Oh, E., Godoy Zuniga, M.M., and Suhr, J., "Trends and Perspective for Eco-friendly Composites for Next-generation Automobiles," *Composites Research*, Vol. 37, No. 2, 2024, pp. 115–125.
- Godoy, M., and Suhr, J., "Effect of Grafted Biobased Acrylics on the Mechanical Properties of Polylactic Acid (PLA)/Starch Eco-Friendly Composite," *Composites Research*, Vol. 35, No. 6, 2022, pp. 419–424.
- Ali, S.S., Abdelkarim, E.A., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Li, F., Kornaros, M., Zuorro, A., Zhu, D., and Sun, J., "Bioplastic Production in Terms of Life Cycle Assessment: A State-of-the-Art Review," *Environmental Science and Ecotechnology*, Vol. 15, 2023, 100254.
- Kobayashi, Y., Ishigami, A., and Ito, H., "Relating Amorphous Structure to the Tear Strength of Polylactic Acid Films," *Polymers*, Vol. 14, No. 10, 2022, pp.1965.
- Oh, E., Kim, B.-H., and Suhr, J., "A Trend and Market in Eco-friendly Plasticizers: Review and Prospective," *Composites Research*, Vol. 35, No. 4, 2022, pp. 232–241.
- Zhang, H., Yuan, W.Q., Weng, Y., Zeng, J.B., and Li, Y.D., "Morphological Control and Interfacial Compatibilization of Fully Biobased PLA/ENR Blends via Partial Crosslinking ENR with Sebacic Acid," *Industrial Crops and Products*, Vol. 180, 2022, Article No. 114707.
- Palai, B., Biswal, M., Mohanty, S., and Nayak, S.K., "In situ Reactive Compatibilization of Polylactic Acid (PLA) and Thermoplastic Starch (TPS) Blends; Synthesis and Evaluation of Extrusion Blown Films Thereof," *Industrial Crops and Products*, Vol. 141, 2019, Article No. 111748.
- Graça, J., and Santos, S., 2006. "Linear Aliphatic Dimeric Esters from Cork Suberin," *Biomacromolecules*, Vol. 7, No. 6, pp. 2003–2010.
- Gandini, A., Neto, C.P., and Silvestre, A.J.D., "Suberin: A Promising Renewable Resource for Novel Macromolecular Materials," *Progress in Polymer Science*, Vol. 31, No. 10, 2006, pp. 878–892.
- Yoon, B., Cho, S.H., Lee, S.K., Cho, K., Tabe, C.A., Giese, U., Nam, J.D., and Suhr, J., "Natural Cork/Potato Periderm Derivatives Enabled Interface Engineering of Elastomer Composites for Tunable Energy-Absorbing Capabilities," *Industrial Crops and Products*, Vol. 170, No. 1, 2021, pp. 113763.
- Perrotta, R., Kwan, I., Poliseti, V., Ek, M., Svagan, A.J., and Hedenqvist, M.S., "Birch-Bark Suberin-Reconstructed Polyester Film as Packaging Materials," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol. 13, No. 24, 2025, pp. 9206–9217.
- Gosecki, M., Urbaniak, M., Makarewicz, C., and Gosecka, M., "Converting Unrefined Birch Suberin Monomers into Vitri-mer," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol. 12, No. 9, 2024, pp. 3841–3850.
- Cho, S.H., Yoon, B., Lee, S.K., Nam, J.D., and Suhr, J., "Natural Cork Suberin-Originated Ecofriendly Biopolyester Syntactic Foam," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol. 10, No. 23, 2022, pp. 7508–7514.
- Oh, T., Cho, S.H., Yoon, B., Yoon, H., and Suhr, J., "Effect of Cork Extract on the Mechanical Property of Thermoplastic Polyurethane," *Composites Research*, Vol. 36, No. 2, 2023, pp. 86–91.
- Tárraro, A.S., Mata, T.M., Martins, A.A., and da Silva, J.C.G.E., "Carbon Footprint of the Insulation Cork Board," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 143, No. 1, 2017, pp. 925–932.
- Yoon, H., Yoon, B., Cho, S.-H., Oh, T., and Suhr, J., "Plasticizing Effect of Depolymerized Suberin Derivatives from Natural Cork and Potato Periderm in Poly(Lactic Acid) (PLA) for Improved Toughness and Processability," *Industrial Crops and Products*, Vol. 209, 2024, Article No. 117990.
- De Oliveira, H., Yoon, B., Michaud, V., Nam, J.D., and Suhr, J., "All Natural Cork Composites with Suberin-Based Polyester and Lignocellulosic Residue," *Industrial Crops and Products*, Vol. 109, No. 1, 2017, pp. 843–849.