

해조류 바이오매스로부터 Lactic acid를 제조하는 방법에 관한 연구

이학래¹ · 고의석^{1,2} · 심원철¹ · 김종서² · 김재능^{2*}

¹뉴로팩

²연세대학교 패키징학과

A Study on the Method of Manufacturing Lactic Acid from Seaweed Biomass

Hakrae Lee¹, Euisuk Ko^{1,2}, Woncheol Shim¹, Jongseo Kim², and Jaineung Kim^{2*}

¹NeuroPack, Yongin, 448-502, Korea

²Department of Packaging, Yonsei University, Wonju, 220-710, Korea

Abstract With the spread of COVID-19 worldwide, non-face-to-face services have grown rapidly, but at the same time, the problem of plastic waste is getting worse. Accordingly, eco-friendly policies such as carbon neutrality and sustainable circular economy are being promoted worldwide. Due to the high demand for eco-friendly products, the packaging industry is trying to develop eco-friendly packaging materials using PLA and PBAT and create new business models. On the other hand, *Ulva australis* occurs in large quantities in the southern seas of Korea and off the coast of Jeju Island, causing marine environmental problems. In this study, lactic acid was produced through dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification, and fermentation processes to utilize *Ulva australis* as a new alternative energy raw material. In general, seaweeds vary in carbohydrate content and sugar composition depending on the species, harvest location, and time. Seaweed is mainly composed of polysaccharides such as cellulose, alginate, mannan, and xylan, but does not contain lignin. It is difficult to expect high extraction yield of the complex polysaccharide constituting *Ulva australis* with only one process. However, the fusion process of dilute acid and enzymatic saccharification presented in this study can extract most of the sugars contained in *Ulva australis*. Therefore, the fusion process is considered to be able to expect high lactic acid production yield when a commercial-scale production process is established.

Keywords Lactic acid, Biodegradable material, *Ulva australis*, Seaweed biomass, Eco-friendly

서 론

최근 전 세계적으로 코로나바이러스감염증-19(COVID-19)의 확산됨에 따라 의료, 금융 등 산업 전체로 ‘비대면 서비스(Untact)’를 실시하고 있다. 대표적인 비대면 소비인 온라인 쇼핑 거래액은 2021년 기준 13조 7,628억 원으로 전년 동월 대비 15.2% 증가하였는데, 음식서비스(64.6%), 음료(29.1%), 농축수산물(40.2%) 등에서 1조 8,169억 원 증가하였으며 택배 물동량의 경우도 전년대비 20.9% 이상, 매출도 7조 4,925억 원으로 전년대비 18.4% 증가하였다^{1,2}. 비대면 서비스의 성장은 일회용 플라스틱 폐기물 문제를 더

욱 심화시키고 있는데 환경부에 따르면 전년 동월 대비 플라스틱 폐기물 배출량이 25% 이상 증가하였다³. 이러한 지속적인 환경문제로 인해 전 세계적으로 대표적인 친환경 정책인 온실가스 배출을 최대한 줄이고 남은 온실가스를 흡수, 제거하여 실질적인 탄소 배출량 Zero를 달성하는 ‘탄소 중립(Net-Zero)’과 자원을 최대한 활용하고 쓰레기를 줄이며 이를 재활용하여 자원을 선순환시키는 ‘지속가능한 순환경제’가 각광받고 있다⁴. 또한 일반 소비자들도 친환경 제품에 대한 관심이 크게 증가하였는데, 환경부 친환경 제품 인지도 조사(20.11)에 따르면 녹색 제품에 대한 일반 소비자들의 관심도는 16년 78.1%에서 19년 91.5%로, 녹색 제품 구매경험은 16년 60.1%에서 19년 87.8%로 상승한 것으로 나타났다⁵. 특히 전 세계적으로 친환경적인 제품을 구매하는 소비자를 일컫는 용어로 환경을 뜻하는 ‘그린(Green)’과 소비자를 뜻하는 ‘컨슈머(Consumer)’가 만나 ‘그린슈머(Greensumer)’가 생겨나며, 지구온난화나 플라스틱 폐

*Corresponding Author: Jai Neung Kim
Department of Packaging, Yonsei University, 1 Yonseidaegil, Wonju, Kangwon-do, 220-710, Korea
Tel: +82-33-760-2379, Fax: +82-33-760-2760
E-mail: kimjn@yonsei.ac.kr

기물 문제 등 환경문제에 경각심을 갖고 제품 구매 시 ‘친환경’ 여부를 소비의 기준으로 삼고 있다. 이러한 소비 트렌드에 따라 많은 기업들이 기업의 친환경 활동을 통해 친환경 이미지 개선을 넘어 매출확대와 새로운 비즈니스 창출을 위해 노력하고 있다⁶⁾.

한편 지속성장을 위해 패키징 업계에서는 PLA, PBAT 등의 친환경 재질이 각광받고 있다. 이와 더불어 전 세계적으로 인구증가로 인한 식량난, 화석연료 사용으로 인한 온실가스 및 환경오염, 석유자원의 유가상승 등 다양한 문제로 인해 대체 에너지 개발에 대한 관심도 함께 증가하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 곡물·목질계 자원보다 성장속도가 빠르고 리그닌 성분을 적게 함유하고 있는 해조류 바이오매스가 새로운 에너지 자원으로서 각광받고 있다. 해조류 중 거대조류는 크게 녹조류(green algae), 갈조류(brown algae), 홍조류(red algae)로 분류되는데, 얇은 바다에서 빠르게 성장하고 단위면적당 생산성이 육지 생물보다 우수하다. 일반적으로 종, 수확장소, 시기 등에 따라 탄수화물의 함량과 당의 구성이 다양하며, cellulose, alginate, mannan, xylan 등의 다당류로 구성되어 있다⁷⁻⁹⁾.

구멍갈파래(*Ulva australis*)는 갈파래목 갈파래과에 속하는 녹조류 중 하나이며, 단독 혹은 2~3가닥씩 뭉쳐서 나고 높이가 10~30 cm 또는 그 이상에 달하며 우리나라 남해와 제주도 연안에 큰 군락을 이루고 계속 자라는데, 매년 대량으로 발생하여 여러 형태의 문제를 야기하고 있다¹⁰⁾. 대량으로 발생한 구멍갈파래가 해수욕장 등으로 떠내려와 해안 경관을 해치고 미끌미끌한 표면 질감으로 물놀이를 즐기는 관광객의 실족을 유발하는 등 안전을 위협한다. 또한 간조 시 해안에서 부패가 발생하고 이 과정에서 악취와 벌레가 심하게 발생하여 해수욕장을 찾는 관광객들에게 큰 불편함을 주고 있다. 이러한 문제는 매년 제기되지만 뾰족한 해결책은 없으며 비식용인 탓에 현재 퇴비자원으로 농가에 무상 제공 되고 있지만 퇴비로 선호되지 않는다¹¹⁾.

본 연구에서는 친환경 패키징 개발을 위해 구멍갈파래를 새로운 대체 에너지 원료로서 활용하고자 묽은 산 전처리, 효소 당화, 발효 공정을 거쳐 해조류 바이오매스 유래 lactic acid를 생산하고자 한다. 일반적으로 발효공정에 사용

되는 젖산균(Lactic acid bacteria, LAB)은 혐기 환경에서 포도당을 발효하여 최종 생산물인 젖산(Lactic acid)을 만들며 일반적으로 *Aerococcus*, *Carnobacterium*, *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Oenococcus*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Tetragenococcus*, *Weissella*, *Vagococcus* 등이 주로 사용되나, 본 연구에서는 *Lactobacillus brevis*를 발효균주로 사용하였다(Fig. 1)¹²⁻¹³⁾. 우리나라는 다시마, 김, 미역, 톳, 파래, 청각 등 다양한 해조류를 생산하고 있으며 국내 해조류 생산량은 2020년 기준으로 177만 톤으로 연평균 6.1%의 성장률을 보이고 있어 본 연구에서 개발한 기술을 향후 다른 해조류에도 적용하여 활용한다면 국내에서 원활히 바이오매스 원료를 수급할 수 있을 것으로 판단된다¹⁴⁾.

본 론

1. 실험재료

본 연구에서 해조류 바이오매스 원료로 사용한 구멍갈파래는 제주도 구좌읍에 위치한 김녕해수욕장에서 직접 샘플을 채취하였으며, 해수면 아래 현무암에서 서식하고 있는 샘플을 채취하고 인근에 위치한 수면 위 현무암 위에서 4시간 이상 일광 건조 시킨 후 실험실에서 모래와 이물질을 충분히 제거한 후 사용하였다(Fig. 2).



Fig. 2. Washing a collected seaweed in Jeju Island.

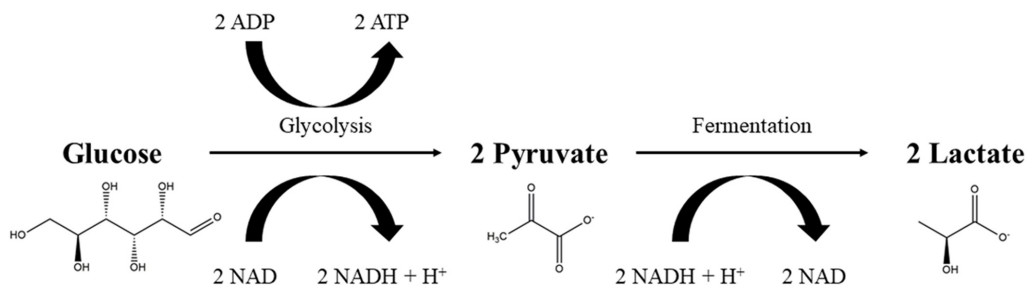


Fig. 1. Schematic representation of lactic acid fermentation¹³⁾.

2. 실험 방법

2.1. 구멍갈파래 성분 분석

구멍갈파래 성분분석은 미국신재생에너지연구소(NREL, national renewable energy laboratory)의 technical report (extractives NREL/TP-510-42619; carbohydrate 및 lignin NREL/TP-510-42618)에 따라 진행하였다¹⁵⁻¹⁶⁾. 분석 전 convection oven을 이용하여 $45 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 48시간 동안 건조 시킨 후 분쇄하여 0.2 mm–0.8 mm의 크기인 것만 선별하였다. 시험관에 시료 300 ± 3 mg과 72.0% H_2SO_4 3.0 mL를 첨가하여, $30 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 항온수조에서 60 min 동안 반응시켰다(1차 가수분해). 반응 후 시료를 항온수조에서 꺼내 100 mL 유리병에 옮겨 담고, 84.0 mL의 deionized-water(DW)를 첨가하여 최종 산 농도가 4.0%가 되도록 희석하였다. 희석된 sample을 고압멸균기(Thermo Scientific Co. - Napco 8000-DSE Autoclave, Frederick, MD, USA)를 이용하여 121°C 에서 1 시간 동안 반응시켰다(2차 가수분해). 반응이 끝난 후 액체 샘플을 취해 탄수화물 분석을 실시하였다. 탄수화물 분석은 high performance liquid chromatography system (HPLC), (LC-10A, Shimadzu Inc., Kyoto, Japan)을 이용하였으며, 사용된 컬럼은 Aminex HPX-87P column (Bio-rad, USA, 300×7.8 mm)을 사용하였고, 검출기는 refractive index detector(RID-10A, Shimadzu Inc., Kyoto, Japan)을 이용하였다. 이동상은 DW를 사용하였으며, 유속은 0.6 mL/min, 컬럼과 검출기의 온도는 각각 85°C , 50°C 로 설정하였다.

2.2. 구멍갈파래 전처리

전처리 반응 조건 설정을 위해 선행 실험 결과를 참조하여 예비 테스트를 진행하였으며, 이를 기반으로 반응 조건을 설정하였다(Table 1). 준비된 시료 5 g을 250 mL media bottle에 넣고, 75 mL의 묽은 황산을 농도별로 첨가하였다. 시료와 묽은 황산이 담긴 media bottle을 121°C 까지 운전이 가능한 고압멸균기에 넣어 15 min, 30 min 동안 반응시켰다. 반응이 종료된 후 고체와 액체를 분리하여 고체는 $45 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 48시간동안 건조 시킨 후 탄수화물 분석에 사용하였으며, 액체는 황산 농도를 4%로 조절한 후 2차 가수분해를 진행하여 단당 및 byproducts를 분석을 실시하였다. 액체에 포함된 단당 및 byproducts 농도 분석을 위해 HPLC (LC-10A, Shimadzu Inc., Kyoto, Japan)를 이용하였다. HPLC에 컬럼은 Aminex HPX-87H column(Bio-rad, USA, 300×7.8 mm)을 사용하였고, 검출기는 refractive index detector

(RID-10A, Shimadzu Inc., Kyoto, Japan)을 이용하였다. 이동상은 5 mM 황산을 사용하였으며, 유속은 0.5 mL/min, 컬럼과 검출기의 온도는 각각 65°C , 50°C 로 설정하였다. 다양한 반응 조건에서 얻어진 최적 조건을 이용하여 30 L 회분식 반응기(SUS 316L(SUS; Steel Use Stainless))를 이용한 발효당 생산을 진행하였다.

2.3. 전처리된 해조류 바이오매스 효소 당화

처리된 잔여고체의 효소당화 시험은 NREL Technical Report(NREL/TP-510-42629)를 따라 진행하였다¹⁷⁾. 효소당화 시험은 100 mL 삼각플라스크에 1 g-glucan을 기준으로 하는 양만큼의 기질과 50 mM 시트르산 나트륨 완충용액(sodium citrate buffer) (pH = 4.8) 50 mL, 2.0% 아지드화 나트륨(sodium azide) 1 mL, 효소를 넣은 후 DW를 넣어 부피가 100 mL가 되도록 하였다. 효소는 cellulase 상업 효소인 Cellic CTec2(Novozymes, A/S Bagsvaerd, Denmark)의 양을 30 FPU/g-glucan으로 하여 첨가한 후, 진탕 배양기(model VS-8480SFN, Vision Scientific Co., Bucheon, Korea)를 이용하여 50°C 에서 96시간 동안 150 rpm으로 반응시켰다.

시간에 따른 당화율 경향을 확인하기 위해 당화액을 일정시간 간격 (3, 6, 12, 24, 48, 72, 96 시간)으로 채취한 후, 13,000 rpm에서 10 분간 원심 분리하여 100°C 에서 5분간 효소를 불활성 시킨 후 syringe filter로 여과하여 HPX-87H 컬럼(cat. No. 125-0098, Bio-Rad Laboratories Inc., Hercules, CA, USA)이 장착된 HPLC로 분석하였다. 당화가 종료된 후 당화액 분석을 위해 HPLC를 이용하여 농도를 분석하였다.

2.4. 해조류 바이오매스 당화액 발효

Lactic acid 발효를 위한 당화액은 121°C 에서 15분간 멸균하였다. Lactic acid 발효를 위해 *Lactobacillus brevis*를 발효균주로 사용하였으며, working volume 4 L(7 L scale)의 발효조에서 10% inoculation, 30°C , 150 rpm, pH 6.2의 조건에서 72 시간 동안 진행하였다. 발효가 진행되는 동안 일정한 간격(0, 24, 48, 72 시간)으로 샘플을 취하여 glucose, galactose, lactate 농도를 HPLC를 이용하여 분석하였다. HPLC에 컬럼은 Aminex HPX-87H column(Bio-rad, USA, 300×7.8 mm)을 사용하였고, 검출기는 refractive index detector(RID-10A, Shimadzu Inc., Kyoto, Japan)을 이용하였다. 이동상은 5 mM 황산을 사용하였으며, 유속은

Table 1. Pretreatment conditions for fermentation sugar production

Contents	Independent variable	Dependent variable
Reaction time (min)	15, 30	Residual solid content, fermented sugar extraction yield, and byproduct amount
H_2SO_4 conc.(wt.%)	0.5, 1.0, 2.0, 3.0	

0.5 mL/min, 컬럼과 검출기의 온도는 각각 65°C, 50°C로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 구멍갈파래 성분 분석

발효성 당이란 미생물의 작용으로 분해되어 alcohol, organic acid, amino acid와 같은 물질로 전환되는 당을 의미하며, 6탄당류(glucose, galactose, mannose), 이당류(fructose, lactose, sucrose, maltose) 등을 포함한다. 본 연구에서는 lactic acid를 생산하기 전 구멍갈파래(*Ulva australis*)의 성분분석을 실시하여 발효성 당 함량을 확인하고자 하였다 (Table 2). 측정 결과 구멍갈파래의 glucan 함량은 16.7 wt. % 이고 총 6탄당 함량(glucan, galactan, mannan)은 29.3 wt. %로 나타났다. 일반적으로 녹조류의 탄수화물은 종류와 수확시기에 따라 25~50% 함유되어 있는데, 대부분 세포벽 골격을 이루고 있는 Cellulose가 차지하는 비율이다⁷⁾. 선행 연구에서는 phenol-sulfuric acid 법을 사용하여 구멍갈파래에 포함되어 있는 탄수화물의 양을 측정된 결과 39.6 wt%가 포함되어 있음을 확인하였다¹⁷⁾. 따라서 제주도에서 수급

Table 2. Results of *Ulva australis* component analysis

Carbohydrates	Composition(wt.%)
	<i>Ulva australis</i>
Glucan	16.7 ± 0.0
Galactan	12.4 ± 0.2
Mannan	0.2 ± 0.0
Arabinan	0.2 ± 0.0
Xylan	4.7 ± 0.1
Subtotal	34.2

한 구멍갈파래의 경우 상대적으로 적은 양의 탄수화물을 함유하고 있으며, 이에 따라 적합한 전처리 과정과 효소 당화 및 발효 공정이 요구되어진다.

3.2. 구멍갈파래 전처리

3.2.1. 전처리 반응 조건 설정을 위한 예비 실험

전처리 반응 조건 설정을 위해 예비 테스트를 진행하였으며, 전처리 반응 조건에 따라 구멍갈파래로부터 액체 가수분해물로 추출된 6탄당(glucan, galactan) 추출 수율 및 과분해물(formic acid, acetic acid) 농도(Fig. 3)와 묽은 산 전처리 후 잔여고체에 남아있는 glucan, galactan 수율(Fig. 4)을 확인하였다.

액체 가수분해물에서 황산 농도에 따른 추출 수율 변화는 반응 시간 30 min 보다 15 min에서 두드러지게 나타났으며, 반응 시간 15 min 조건의 황산 농도 3.0 wt. %에서 glucan, galactan 추출 수율은 각각 67.2%, 78.2%로 나타났다(Fig. 3). 반면 반응 시간 30 min 조건에서는 황산 농도가 0.5 wt. %에서 2.0 wt. %까지 증가함에 따라 glucan, galactan 추출 수율이 상승하는 경향을 보였으나, 3.0 wt. %에서 감소하였다. 따라서 반응 시간 30 min, 황산 농도 3.0 wt. % 이상의 조건은 발효당의 과분해를 초래하는 가혹한 조건임을 확인하였다. 과분해물(formic acid, acetic acid)의 농도는 황산 농도가 증가할수록 증가하였다. 이는 반응 조건의 가혹성을 나타내며, 탄수화물의 loss를 의미하며 높은 농도의 과분해물은 효소당화, 발효와 같은 후 공정의 수율 하락을 초래한다. 따라서 탄수화물 loss 최소화 및 공정의 효율성 향상을 위해 낮은 과분해물 생성과 높은 당 추출 수율을 고려하여 반응 조건을 설정할 필요가 있다.

묽은 산 전처리 후 반응 시간 15 min, 30 min 조건에서

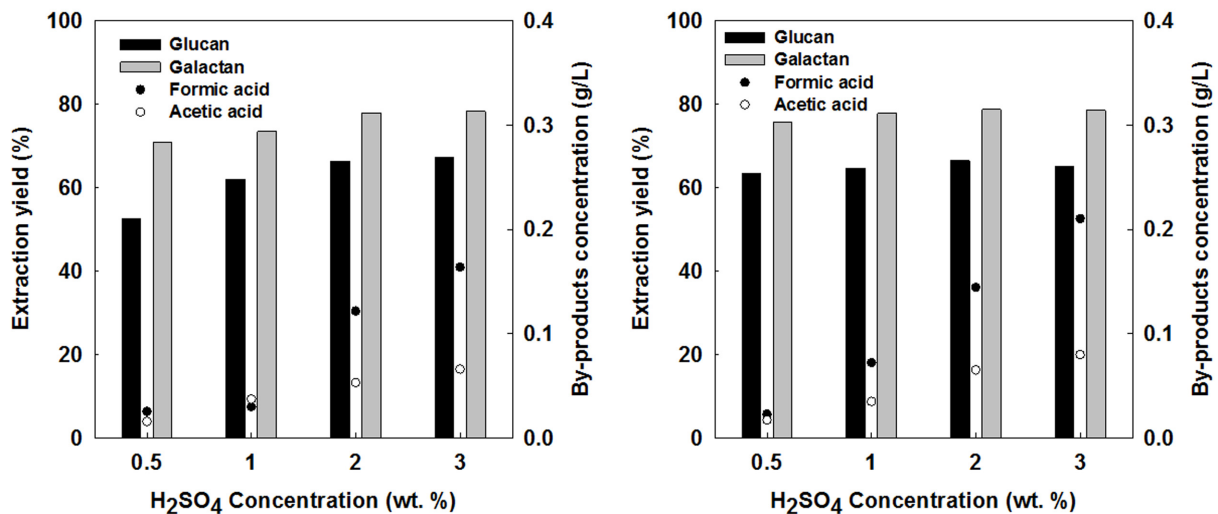


Fig. 3. Glucan, galactan extraction yield and byproducts concentration of liquid hydrolysate according to reaction time and H₂SO₄ concentration (Left: 15 min, Right: 30 min, reaction conditions: reaction temperature 121°C, solid:liquid = 1:15).

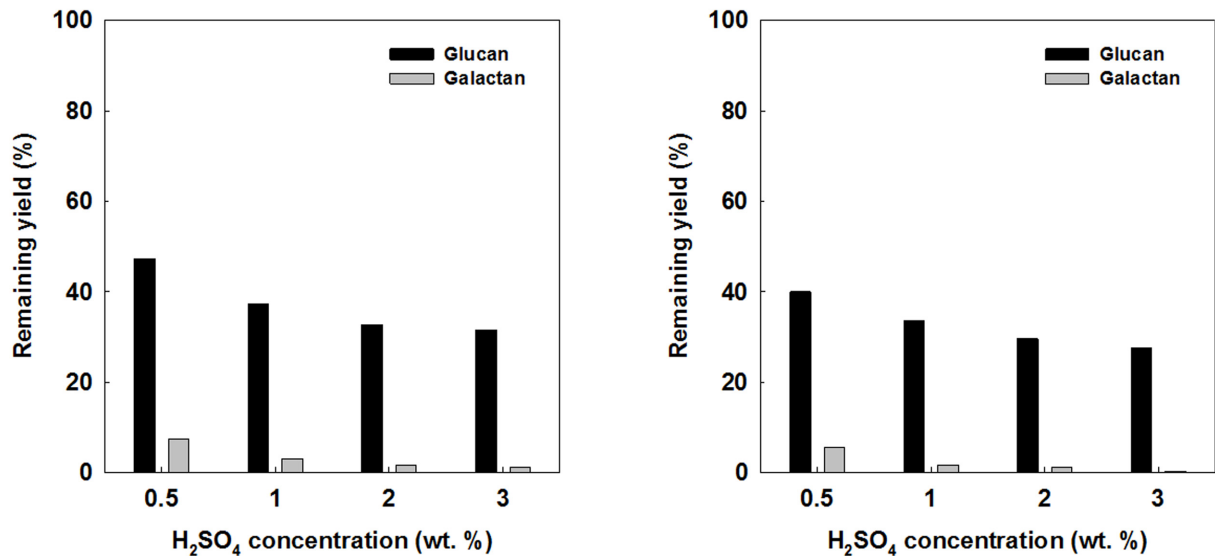


Fig. 4. Glucan and galactan contents of the remaining solid according to reaction time and H₂SO₄ concentration (Left: 15 min, Right: 30 min, reaction conditions: reaction temperature 121°C, solid: liquid = 1 : 15)

잔여고체의 glucan, galactan 함량은 황산 농도가 증가할수록 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 4). 특히 galactan 함량의 감소가 두드러지게 나타났으며, 황산 농도 3.0 wt. %의 15 min, 30 min 두 반응 시간에서 1.3%의 galactan 잔여 수율을 보였다.

따라서 액체 가수분해물은 15 min 조건의 황산농도 1.0 wt. %에서 6탄당(glucan, galactan) 추출 수율은 60% 이상, 과분해물(formic acid, acetic acid)은 낮은 농도로 유지되고(Fig. 3), 잔여고체는 동일 조건에서 glucan, galactan의 감소량이 두드러지게 나타나(Fig. 4) 위 결과를 토대로 최적 반응 조건을 반응 시간 15 min, 황산 농도 1.0 wt. %로 결정하였다.

3.2.2. 최적 반응 조건 설정 후 묽은 산 전처리

확립된 최적 반응 조건을 적용하여 30 L 반응기를 이용한 묽은 산 전처리를 진행하였다(Fig. 5). 30 L 반응조에 구멍갈과래 13 kg과 1.0 wt. % 황산 19.5 L를 첨가하여 121°C에서 15 min 동안 반응시켰다. 반응이 종료된 후 고체와 액체를 분리하여 고체는 잔여고체 함량 측정 및 성분 분석을 위해 45±5°C에서 48시간동안 건조 시킨 후 탄수화물 분석에 사용하였으며, 액체는 황산 농도를 4%로 조절한 후 2차 가수분해를 진행하여 단당 및 byproducts 분석을 진행하였다 가수분해 액 분석 결과 glucose, galactose 추출 수율은 각각 63.3%, 98.1%로 확인되었으며, 잔여고체 성분분석 결과는 glucan 14.1%, xylan 2.4%, galactan 0.6%



Fig. 5. Fermentable sugar and Residual solid obtained after dilute acid pre-treatment using a 30 L reactor (Left: Fermentable sugar, Right: Residual solids, reaction conditions: reaction temperature 121°C, reaction time 15 min, H₂SO₄ concentration 1.0 wt. %, solid : liquid = 1 : 15).

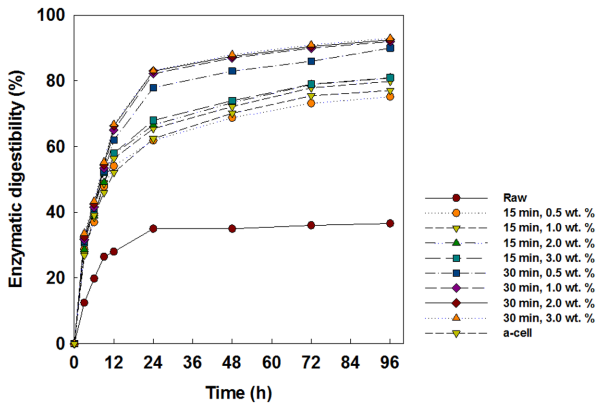


Fig. 6. Enzymatic glycation test of residual solid treated with dilute acid(reaction conditions: 50°C, 150 rpm, 30 FPU/g-glucan).

로 확인되었다. 본 연구와 비슷한 결과로 Jung 등(2012)에 따르면 10 g의 구멍갈파래를 121°C, 1.5 atm, 15 min 조건에서 1 M의 HCl 200 mL과 반응시켰을 때 환원당이 31 g/L 생성되었고, 0.1 M HCl을 기준으로 동일 조건에서 반응시킨 결과 51.6%의 가수분해율을 확인하였다¹⁹⁾.

3.3. 전처리된 해조류 바이오매스 효소 당화

3.3.1. 전처리 조건에 따른 효소 당화를 확인 예비 실험

앞서 묽은 산 전처리 최적 반응 조건에 따라 얻어진 잔여고체의 효소당화를 진행하기 전 효소당화율을 확인하기 위하여 예비 시험을 진행하였다. 시험 결과 처리하지 않은 raw 시료를 제외하고 모든 조건의 96 h 당화 시간 동안 70% 이상의 효소 당화율을 보였다(Fig. 6). 반응 시간 및 황산 농도가 증가함에 따라 효소 당화율도 함께 증가하였으며, 가장 가혹한 조건(반응시간 30 min, 황산 농도 3.0 wt.%)에서 93.0%로 나타났다.

3.3.2. 묽은 산 전처리 후 잔여 고체의 효소 당화 실시

최적 반응 조건(반응 시간 15 min, 황산 농도 1.0 wt. %)에 따라 묽은 산 전처리가 완료된 잔여 고체에 대한 효소 당화는 예비 실험 결과를 바탕으로 멸균된 반응조에 전처리 시료 470 g(건조중량 기준)을 넣고 총 액체 volume이 14.1 L가 되도록 DW를 첨가한 후, 30 FPU/g-glucan의 양만큼 효소를 첨가하여 96 h 동안 당화 공정을 실시하였다. 96 h 후 효소당화율은 86.0%로 예비 실험 결과와 유사한 결과를 얻었다.

3.4. 해조류 바이오매스 당화액 발효

묽은 산 전처리로부터 얻은 가수분해 액과 효소 당화로부터 얻은 당화액을 혼합, 농축하여 lactic acid 발효에 사용한 결과 시간 경과에 따라 발효액 내의 glucose, galactose 농

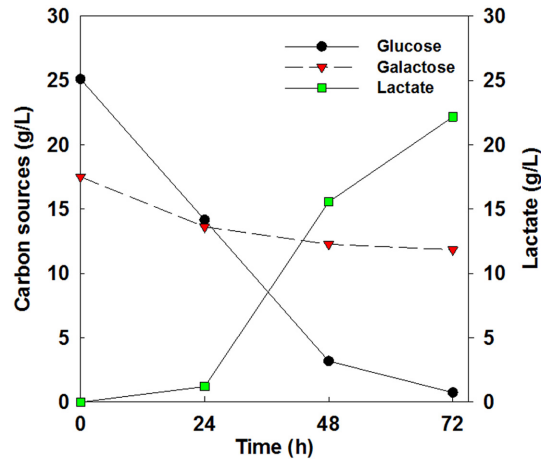


Fig. 7. Carbon sources (glucose, galactose) consumption and lactate production according to fermentation time(conditions: 30°C, 150 rpm, pH 6.2.).

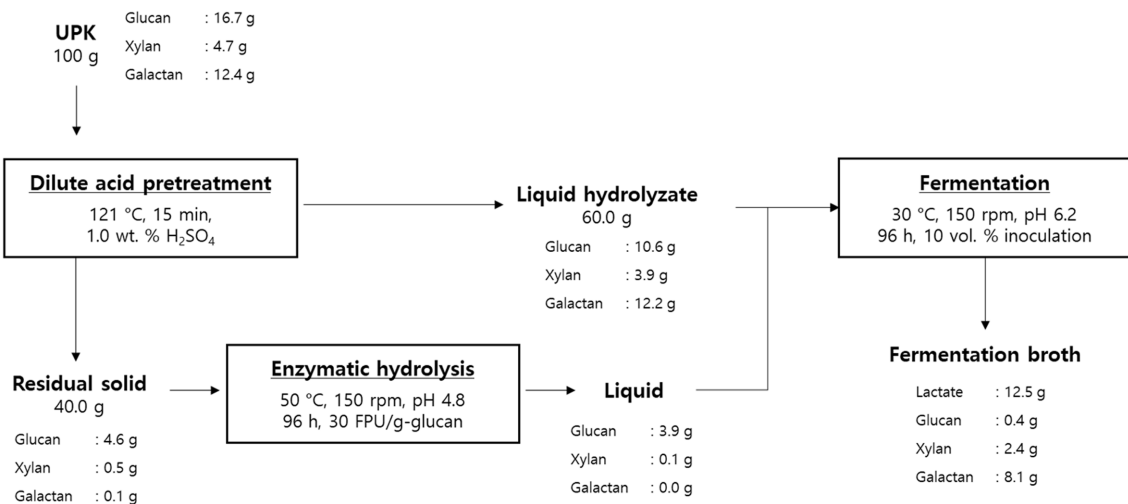


Fig. 8. Sugar mass balance of the process of manufacturing a lactic acid using *Ulva australis*.

도는 감소하고 lactate 함량은 증가하였다(Fig. 7). 72 h 후 발효액의 glucose, galactose 농도는 각각 0.7 g/L, 3.8 g/L로, glucose는 97.0% 소모되었지만 galactose는 26.6%만이 소모되어 여전히 높은 농도의 galactose(73.4%)가 발효액에 잔류하였다. 72 h 후 소모된 6탄당은 25.8 g/L 였으며, 이때 lactate 농도는 22.2 g/L로, 전환율 86.1%를 보였다. 선행 연구에서는 7종의 *Lactobacillus* 종을 이용하여 Corn, Corn stover, Aspen, *Ulva pertusa*, *Laminaria* sp., *Gelidium amansii*에 대하여 L-Lactic acid 발효를 수행하기 위해 각 바이오매스의 당 조성 분석에 따른 젖산 생산량 수율을 비교하였는데, 해조류 바이오매스가 육상식물에 비해 상대적으로 낮은 수준임을 확인하였고 특히 구멍갈파래의 경우 29.4~49.4% 수준의 수율임을 알 수 있다²⁰.

결 론

본 과제에서는 해조류 바이오매스 유래 lactic acid 생산을 위해 구멍갈파래 유래 glucose, galactose로부터 묽은 산 전처리, 효소 당화, 발효 공정을 거쳐 100 g 당 총 12.5 g의 lactate를 얻었다(Fig. 8). Lactate 생산 수율은 초기 6탄당 (glucan, galactan) 함량(29.1 g) 기준 42.9%지만, glucan 함량(16.7 g) 기준으로 고려 시 74.1%에 해당한다. 이를 통해 구멍갈파래를 구성하고 있는 복합 다당체는 한 가지 공정만으로는 높은 추출 수율을 기대하기 어렵다. 하지만 본 연구에서 제시된 묽은 산 및 효소 당화의 융합 공정은 구멍갈파래가 함유하고 있는 대부분의 당 추출이 가능하기 때문에 상업화 규모의 생산 공정 구축 시 높은 lactic acid 생산 수율을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

요 약

최근 전 세계적으로 코로나바이러스감염증-19(COVID-19)의 확산됨에 따라 비대면 서비스가 성장하고 이와 동시에 플라스틱 폐기물 문제가 더욱 심화되고 있다. 동시에 탄소 중립과 지속가능한 순환경제와 같은 친환경 정책이 전 세계적으로 추진되고 있고 친환경 제품에 대한 높은 수요로 인해 패키징 업계에서도 PLA, PBAT 등을 사용한 친환경 포장재 개발과 새로운 비즈니스 모델 창출을 시도하고 있다. 본 연구에서는 이러한 환경적 이슈에 우리나라 남해와 제주도 연안에서 매년 대량으로 발생하여 여러 형태의 문제를 야기하고 있는 구멍갈파래(*Ulva australis*)를 새로운 대체 에너지 원료로서 활용하고자 묽은 산 전처리, 효소 당화, 발효 공정을 거쳐 해조류 바이오매스 유래 Lactic acid를 생산하고자 하였다. 일반적으로 해조류는 중, 수확장소, 시기 등에 따라 탄수화물의 함량과 당의 구성이 다양하며, Cellulose, Alginate, Mannan, Xylan 등의 다당류로 구성되

어 있고 리그닌 성분을 함유하고 있지 않아 곡물-목질계 자원보다 유용한 특징이 있다. 구멍갈파래를 구성하고 있는 복합 다당체는 한가지 공정만으로는 높은 추출 수율을 기대하기 어려우나 본 연구에서 제시된 묽은 산 및 효소 당화의 융합 공정은 구멍갈파래가 함유하고 있는 대부분의 당 추출이 가능하기 때문에 상업화 규모의 생산 공정 구축 시 높은 Lactic acid 생산 수율을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 농업기술실용화재단 농업실용화기술R&D지원사업(과제번호 : PJ016352)의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고문헌

- KOSTAT. 2021. Online shopping trend in February. Online shopping trend survey.
- National Logistics Information Center. 2020. The trend of volume and sales in the domestic parcel delivery market. <https://nlis.go.kr/nlic/parcelServiceSales.action>.
- Ministry of Environment. 2020. Changes in the amount of plastic waste generated nationwide.
- Korea Policy Briefing. 2021. 2050 Carbon neutrality. <https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148881562>
- Seok, S.W. 2021. Consumption status and revitalization plan of green product in the private sector. Consumer Policy Trend, 110.
- 윤영주. 2021. ESG 앞세운 기업 증가...가치소비 주목, 신 경영전략 모색 한창. <http://www.businessreport.kr/news/articleView.html?idxno=26478>
- Kloareg, B. and Quatrano, R. S. 1988. Structure of the Cell Walls of Marine Algae and Ecophysiological Functions of the Matrix Polysaccharides. Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev., 26 :259-315.
- Heo, S.J., Park, E.J., Lee, K.W. and Jeon, Y.J. 2005. Antioxidant Activities of Enzymatic Extracts from Brown Seaweeds. Bioresour. Technol., 96: 1613-1623.
- Ito, K. and Hori, K. 1989. Seaweed: Chemical Composition and Potential Food Uses. Food Rev. Int., 5: 101-144.
- National Institute of Fisheries Science. *Ulva australis*. https://www.nifs.go.kr/frcenter/species/?_p=species_view&mf_tax_id=MF0010566
- Kim, D.Y. 2020. Continuous war, Is "*Ulva australis*" okay? <http://www.ijunews.org/news/articleView.html?idxno=3155>
- Min, T.I. Practical meaning of lactic acid and pyruvate metabolism by lactic acid bacteria in food and beverage fermentation. www.reseat.re.kr.
- Monteiro, P., Lomartire, S., Cotas, J., Pacheco, D., Marques, J.C., Pereira, L. and Gonçalves, A.M.M. 2021. Seaweeds as a Fermentation Substrate: A Challenge for the Food Processing Industry. Processes 2021, 9, 1953. <https://doi.org/10.3390>

- pr9111953.
14. KOSTAT. 2020. Fishing Production Trend Survey. The trend of production by seaweed item in Korea.
 15. A. Sluiter, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, and D. Templeton. 2005. Determination of Extractives in Biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP), NREL/TP-510-42619.
 16. A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton, and D. Crocker. 2008. Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP), NREL/TP-510-42618.
 17. M. Selig, N. Weiss, and Y. Ji. 2008. Enzymatic Saccharification of Lignocellulosic Biomass. Laboratory Analytical Procedure, NREL/TP-510-42629.
 18. Kim, J.M. and Ha, S.H. 2015. Hydrothermal Pretreatment of *Ulva pertusa Kjellman* using microwave irradiation for enhanced enzymatic hydrolysis. Korea Chem. Eng. Res. 53(5): 570-575.
 19. Jung, S.R., Kim, S.J., Kim, G.Y. and Kim, Richard. 2012. Characteristics of Enzymatic Hydrolysis of *Ulva pertusa kjellman* by Various Pretreatments. J. Korean Society of Urban Environment, 12(1): 1-7.
 20. Hwang, M.J., Lee, S.Y., Kim, S.M. and Lee, S.B. 2011. Fermentation of Seaweed Sugars by *Lactobacillus* Species and the Potential of Seaweed as a Biomass Feedstock. J. Biotechnology and Bioprocess Engineering 16: 1231-1239.

투고: 2022.02.28 / 심사완료: 2022.03.22 / 게재확정: 2022.04.20