

팝핑 전처리를 이용한 폐목재의 효소당화*¹

김 현 주*^{2,3} · 조 은 진*² · 이 광 호*^{2,3} · 김 수 배*³ · 배 현 중*^{2,3,4†}

Popping Pretreatment for Enzymatic Hydrolysis of Waste Wood

Hyun Joo Kim*^{2,3} · Eun Jin Cho*² · Kwang ho Lee*^{2,3} · Su-Bae Kim*³ ·
Hyeun-Jong Bae*^{2,3,4†}

요 약

본 연구는 새로운 전처리 방법인 팝핑법을 이용하여 폐목재에 처리하였고, 전처리 된 시료에 효소를 처리하여 당화 수율을 비교 분석하였다. 폐목재의 팝핑 전처리 전후의 화학적 조성 분석 결과 홀로셀룰로오스의 경우 각각 65.9%, 58.8%였으며, 리그닌과 알코올-벤젠을 이용한 유기용매 추출물, 회분의 함량은 전처리 전보다 각각 3.1%, 3.9%, 0.7% 정도 증가하였다. 그리고 폐목재의 팝핑 전처리 전과 후의 시료에 각각 효소 처리 후 환원당을 측정된 결과 팝핑 전처리를 한 경우 전처리 전보다 1.0~1.5 mg/ml 증가하였다. 시료 50 mg (1%, w/v)에 대한 효소 가수분해율은 셀룰레이즈와 자일란네이즈를 50 U씩 1 : 1로 섞어 처리하였을 때 가장 효과적이었다. 또한 팝핑 된 시료에 효소를 처리하여 가수분해되어 나온 상등액을 HPLC 분석법을 이용하여 분석한 결과 팝핑 전처리 후 셀룰레이즈와 자일란네이즈를 처리하였을 때 피크가 증가하였으며, 주된 피크는 글루코스와 자일로스였다. 또한 GC 분석법을 이용하여 팝핑 후 효소가수분해 한 잔여물의 중성당 분석 결과 잔류 글루코스와 자일로스가 각각 팝핑 전보다 57.5%, 64.2% 감소하였다. 글루코스와 자일로스 당전환율은 각각 약 45.9%, 38.7%였다.

*¹ 접수 2010년 10월 18일, 채택 2010년 12월 16일

*² 전남대학교 바이오에너지 연구소, Bio-Energy Reserch institute, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

*³ 전남대학교 임산공학과, Department of Forest Products and Technology (BK21 Program), Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

*⁴ 전남대학교 바이오에너지 공학과, Department of Bioenergy Science and Technology, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 배현중(e-mail: baehj@chonnam.ac.kr)

ABSTRACT

We have investigated pretreatment of waste wood using milling refinery combined with popping method, which can save energy for pretreatment and enzyme loading for enzymatic hydrolysis. The chemical analysis of holocellulose of non and popping treated waste wood showed 65.9% and 58.8%, and the lignin, organic extracts and ash were increased by 3%, 4% and 0.7% after pretreatment, respectively. The reducing sugar yields of pretreated waste wood were increased four times more than non-pretreated one and the synergistic effect of cellulase and xylanase were evaluated compare with individual enzyme treatment. Especially, enzyme cocktail (cellulase 50 U and xylanase 50 U) treatment was very efficient in 1% substrate (50 mg). Also, glucose and xylose conversion rate of pretreated waste wood by GC analysis were 45.9% and 38.7%, respectively.

Keywords: waste wood, popping pretreatment, bioethanol

1. 서 론

화석연료 자원의 부존 자원의 감소와 가격상승, 화석연료의 사용에 따른 환경문제의 대두로 인해 대체 에너지의 필요성이 부각되고 있다. 특히 바이오에탄올은 자원순환형 재생자원을 이용하여 지속적인 생산이 가능하고, 친환경 에너지이며, 기술개발에 따라 생산단가를 절감할 수 있다는 점에서 대체에너지로 주목을 받고 있다. 미국과 브라질에서 이미 상용화되어 시판되고 있는 바이오에탄올은 옥수수과 사탕수수와 같은 곡물자원을 이용한 바이오에탄올 생산이 주를 이루어 곡물 및 사료 가격의 상승 등과 같은 문제가 발생하고 있다. 이러한 문제점을 극복하고 지속적인 친환경 에너지를 생산하기 위한 차세대 대체에너지의 하나로 목질계 바이오매스를 이용한 바이오에탄올이 주목받고 있다.

목질계 바이오매스는 농업폐기물, 산림폐기물 등의 유기물로 환경부 자료에 의하면 2005년 전국 폐목재(임목부산물 제외) 발생량은 7,306톤/일이고, 이 중 재활용 비율이 약 60%로 나타났다. 나머지 매립 및 소각처리 되는 폐목재를 전량 재활용하는 시스템으로 전환할 경우 582,246천원/일의 경제적 부가이익이 발생할 것으로 평가하였다(환경부, 1996).

2020년에는 2005년에 대비하여 전체 발생량은 40% 가량 증가할 것으로 예측되었으며, 이 중 임목부산물이 가장 높은 3.5배의 증가를 나타낼 것으로 평가하였다(박 등, 2008). 하지만 에너지자원으로서 활용은 아직까지 미미한 수준이다. 정부는 2007년 『폐목재 재활용 활성화 대책』을 제시하여 약 8~10%의 산림부산물의 재활용률을 2012년까지 35%로, 약 3%인 생활 폐목재의 재활용률을 2012년까지 90%로 개선하는 정책목표를 제시하였다(국무조정실 등, 2007). 이에 폐목재의 에너지화 방법을 모색하는 것이 필요하다.

목질계 바이오매스의 주요성분은 일반적으로 셀룰로스(40~50%), 헤미셀룰로스(25~35%), 리그닌(15~20%)으로 구성되어 있다. 셀룰로스는 글루코스가 수소결합 및 반데르발스힘에 의해 규칙적으로 결합된 고분자화합물이며, 헤미셀룰로스는 아라비노스 등의 5 탄당이 β -1,4 형태로 결합되어 셀룰로스와 리그닌의 가교역할을 하고 있으며, 리그닌은 phenyl-propane unit를 갖는 방향족 물질이 불규칙으로 연결된 불용성 난분해성고분자화합물로 셀룰로스와 헤미셀룰로스에 결합하여 다당류 분해에 대한 방어막 역할을 한다. 바이오 에탄올 생산을 위해서는 바이오매스의 다당류를 단당류로 분해해야 하는데, 전

분계 바이오매스는 글루코스가 α -1,4 형태로 결합된 아미로스와 아미로펙틴이 주성분으로 특별한 전처리 필요 없이 제분한 후 아밀레이즈 효소처리만으로 단당으로 분해된다(나와 김, 2008). 그러나 목질계 바이오매스는 헤미셀룰로스와 리그닌의 결합을 끊어주는 전처리 과정이 필요하다. 지금까지 목질계 바이오매스의 전처리 방법으로 증기 폭쇄법(이 등, 1994), 알칼리 처리법(Silverstein *et al.*, 2007), 이산화황 처리법(von Sivers and Zacchi, 1995), Organosolv 처리법(Mabee *et al.*, 2006), 과산화수소 처리법(Azzam, 1989), 초임계 처리법(서 등, 2008), 약산처리법(Esteghlalian *et al.*, 1997), 그리고 암모니아 동결 폭쇄법(AFEX) (Murnen *et al.*, 2007) 등 수많은 방법들이 연구되어 왔다. 그러나 일반적으로 물리적 방법은 에너지 소비가 많아 경제성이 떨어지며(Cadoche and Lopez, 1989), 화학적 방법은 효율적으로 리그닌을 제거하고, 효소를 이용하여 약 90% 이상의 가수분해도를 얻을 수 있었으나, 강산이나 강알칼리성 화합물을 사용하여 비용이 높고, 대용량 공정에는 부적합하며, 독성이 높아 환경에 악영향을 미치며, 또한 효모성장애 해로운 부산물이 발생하는 것으로 알려져 있다(von Sivers and Zacchi, 1995). 특히 furfural, 5-hydroxy methylfurfural, levulinic acid 그리고 phenolic compounds 등의 발효저해 물질이 주로 헤미셀룰로스와 리그닌으로부터 만들어지는 것으로 알려져 있다(Larsson *et al.*, 1999). 따라서 환경 문제를 발생시키지 않고 저에너지로 당화 수율을 높일 수 있는 효과적인 전처리 방법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 폐목재를 리파이너를 이용하여 잘게 분쇄한 후 230°C, 23 kg/cm² 압력 하에서 팝핑기를 이용한 처리법을 사용하여 전처리하였다. 이 방법을 이용하여 전처리한 시료에 효소를 처리한 후 당화 수율을 비교 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시시료의 복합전처리

본 실험에서 사용된 공시시료는 전남대학교 목공

소에서 사용하고 남은 폐목재 칩을 이용하였다. 폐목재 칩은 리파이너를 이용하여 잘게 분쇄한 후 하룻동안 충분히 물에 적신 후 팝핑기를 사용하여 230°C, 23 kg/cm² 압력 하에서 파쇄 처리하였다. 이 전처리 방법은 본 연구실에서 개발한 팝핑 기계를 사용하여 처리하는 방법으로서 화학약품을 사용하지 않고 시료의 당화율을 높일 수 있었다(특허출원번호 10-2007-0102493, Jung *et al.*, 2010). 공시시료는 40~60 mesh 분말로 만들어 화학실험에 사용하였다. 모든 분석법은 표준분석법에 따라 분석하였다(임산화학시험서, 향문사).

2.2. 공시시료의 화학분석

공시시료의 전처리 전과 후의 화학적 성분을 알아보기 위해 회분분석, 유기용매 추출물 분석, 리그닌 분석, 홀로셀룰로스 분석을 실시하였다. 회분 함량은 회화로(575 ± 25°C)에서 완전히 회화시켜 구하였고, 알코올-벤젠혼합액(1 : 2, v/v)으로 유기물을 추출하여 유기용매 추출물 함량을 구하였으며, 유기용매로 추출한 후 탈지된 시료로 황산법을 이용하여 클라손 리그닌 함량을 구하고, Wise법을 사용하여 홀로셀룰로스 함량을 구하였다. 모든 분석법은 표준분석법에 따라 분석하였다(임산화학시험서, 향문사).

2.3. 효소 특성분석

본 실험에서 사용된 효소는 산업용 효소인 cellulase (Sigma C8564)와 xylanase (Fluka 95595)를 사용하였다. 이 효소의 특성을 알아보기 위해 Bradford법을 사용하여 단백질질을 정량하였다. 각각 효소의 활성을 측정하기 위해서 1% 기질을 포함한 10 mM citrate buffer (pH 5.0) 500 μ l와 조효소액 500 μ l를 혼합하여 37°C에서 60분간 반응시킨 후 생성된 환원당은 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) 방법(Ghose, 1987)에 따라 550 nm에서 흡광도를 측정하였다. 이 때 셀룰레이즈와 자일란네이즈의 기질로는 CMC (Sigma C5678)와 Xylan (Sigma X4252)을 각각 사용하였다. 효소 1 Unit는 ml당 분당, 1 μ mol의 환원당을 생성하

Table 1. Chemical composition of waste wood

Components	Contents (%)	
	Non-pretreatment	Popping pretreatment
Organic solvent Extractives	10	4.9
holocellulose	65.9	58.8
Klason lignin	31.5	34.6
Ash	0.5	1.2
Total	98.9	99.5

는 효소량으로 정의하였다. 그리고 이 단백질의 크기 및 순도를 알아보기 위해 단백질 전기영동 (SDS-PAGE)을 수행하였다.

2.4. 효소 가수분해

시료의 효소 가수분해율을 측정하기 위하여 10 mM citrate buffer (pH 5.0) 5 ml에 전처리 전과 후의 시료를 1% 농도로 넣고 효소를 처리하여 37°C, 진탕배양기에서 반응시켰으며 24, 48, 72 및 96시간 후에 각각 시료를 채취하였다. 또한 최적 투여량을 알아보기 위하여 셀룰레이즈와 자일란네이즈 효소를 단독 또는 혼합 처리하여 72시간 후 시료를 채취하여 당분석을 실시하였다.

2.5. 당화분석

효소 가수분해 후 당화액의 전체 환원당의 함량은 100 μ l 시료를 10배 희석하여 DNS 용액을 섞어 5분간 끓인 후 550 nm에서 측정을 하였다. 그리고 당화액의 단당류는 Refractive index detector가 부착된 HPLC (Rezex RPM Pb²⁺, phenomenox, USA)로 분석하였다. 용리 용매로는 0.6 ml/min의 속도로 물을 흘려 주면서 시료 용액 20 μ l를 주입하여 사용하였다. 표준시료로는 순수한 glucose (sigma G8270), xylose (sigma X1500)을 10 mM 인산 완충용액(pH 5.0)에 녹여 조제하였다. 또한 효소 가수분해 후 남아 있는 잔여물의 중성당 분석은 alditol acetate법 (Wi *et al.*, 2009)에 따라 처리한 후 inositol을 내부 표준시료로 하여, gas chromatography (shimazu

2010, Japan)를 이용하여 분석하였다. 이때 FID (flame ionization detector)를 이용하여 검출하였고, DB-225 capillary column (30 m \times 0.25 mm I. d., 0.25 μ m film thickness, J & W)을 사용하였으며, FID 온도는 250°C, injector 220°C, 컬럼온도는 110에서 220°C까지 10°C/min로 승온하였다. H₂를 carrier gas로 50 ml/min로 흘려주었으며, 시료 용액은 1 μ l를 주입하여 중성당 분석을 하였다.

2.6. 주사형 전자현미경(SEM) 관찰

팝핑 전처리 전과 후 시료를 효소처리 후 이들 시료에 2% glytaraldehyde + 2% paraformaldehyde (in 0.05 M cacodylate buffer, pH 7.2) 고정액으로 처리한 후 동일 buffer로 세척한 다음 에탄올 농도별 계열 탈수를 실시하였다. 탈수된 시료는 isoamyl acetate로 치환 후 임계점 건조를 실시한 다음 ion sputter로 gold coating하여 주사형 전자현미경(Hitachi S-4000 SEM)을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 폐목재의 화학적 조성

사용된 폐목재의 전처리 전후 성분을 알아보기 위해 화학분석한 결과 홀로셀룰로오스의 경우 65.9%에서 58.76%로 전처리 후 약간의 손실을 보이며, 리그닌은 전처리 전에는 31.5%에서 34.6%로 증가하였고, 알코올-벤젠을 이용한 유기용매 추출물 함량은 전처리 전 1% 보다 4.9%로 증가하였다. 그리고 회분

Table 2. Specific activities (U/mg protein) of cellulase and xylanase used in this experiment

Enzyme	Concentration (mg/ml)	Specific activity (U/mg)
Cellulase (Sigma C8564)	7.16	17.22
Xylanase (Fluka 95595)	4.62	5.20

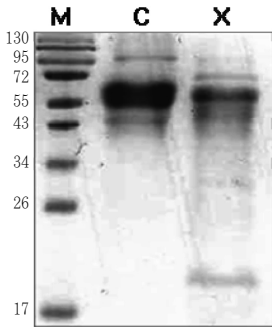


Fig. 1. SDS-PAGE of treated Commercial enzyme. C cellulase, X; xylanase, Standard molecular mass markers (kDa) are indicated on the left. Protein was stained with Coomassie Brilliant Blue R-250.

이 전처리 하기 전 0.5% 보다 전처리 한 후 1.2%로 증가하였다(Table 1). 이는 전처리를 하는 과정에서 홀로셀룰로오스 중의 일부가 떨어져 나간 걸로 보인다. 유기용매에 의해서 추출되는 유지, 색소, 수지, 정유 등은 전처리를 하게 되면 셀룰로오스처럼 탈락이 일어나는 것이 아니라 그대로 남아 있거나 응축되어 함량이 오히려 늘어나는 것으로 보인다. 또한 리그닌도 전처리에 오히려 함량이 늘어난 것은 전처리에 의한 제거는 되지 않은 것으로 보인다.

3.2. 전처리 효소 특성 분석

본 실험에서 사용된 상용화된 효소의 특성을 분석하기 위하여 활성을 알아 본 결과 셀룰레이즈는 17.22 U/mg이고, 자일란네이즈는 5.197 U/mg이었다(Table 2). 그리고 효소의 순도를 알아보기 위해서 SDS-PAGE를 실시한 결과 셀룰레이즈의 경우 비교

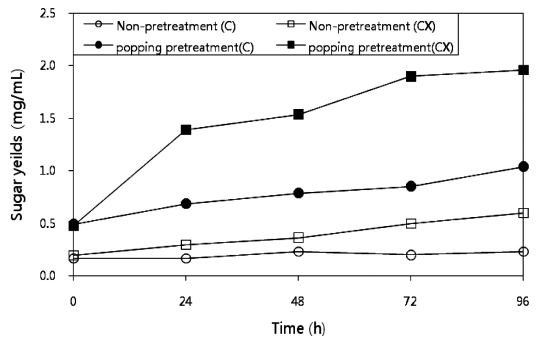


Fig. 2. Reducing sugar yields of non-pretreated and popping pretreated wood after enzyme mixture treatment. C; cellulase, X; xylanase.

적 하나의 밴드가 진하게 보였고, 자일란네이즈는 셀룰레이즈와 비슷한 곳에서 밴드가 보였고 비교적 작은 사이즈의 밴드가 보였다(Fig. 1). 이는 셀룰레이즈는 순도가 높아 활성이 높게 측정이 되었으며, 자일란네이즈는 다른 효소가 섞여 있어 활성이 낮게 나온 것으로 보인다.

3.3. 전처리 전·후 효소에 따른 가수분해 효과

팝핑 전처리에 의한 전처리 효과를 알아보기 위해 팝핑 전과 후의 시료를 각각 효소 처리 후 환원당을 측정하였다. 팝핑 전처리를 한 시료가 전처리하지 않은 시료보다 효소 처리 후 당화효율 약 4배 증가하였으며, 팝핑 전후 시료 모두에서 셀룰레이즈 단독으로 처리한 것보다 혼합하여 처리할 경우 당화율이 증가하였다(Fig. 2).

또한 효소를 혼합해서 처리할 경우 최적의 혼합량을 알아보기 위하여 혼합 농도별 환원당을 측정하는

Table 3. Chemical composition of non-pretreated and popping pretreated waste wood by GC analysis after enzyme treatment (N : without enzyme, CX with enzyme : C : cellulase, X : xylanase)

Weight (mg)	Non pretreatment		Popping treatment	
	N	CX	N	CX
Rhamnose	0.55	0.50	0.50	0.40
Arabinose	0.80	0.75	0.70	0.55
Xylose	5.85	5.55	5.30	3.40
Mannose	0.95	0.80	0.90	0.60
Galactose	0.75	0.75	0.70	0.50
Glucose	19.45	19.15	18.00	10.35
Total*	28.35	27.50	26.10	15.80

* Total waste wood weight : 50 mg.

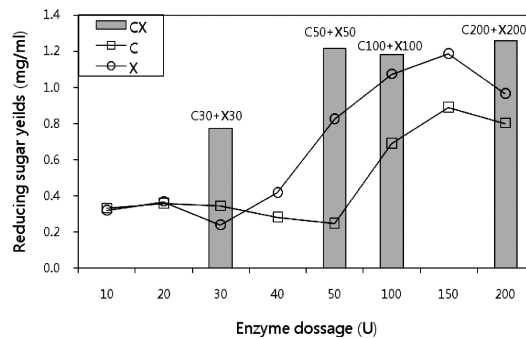


Fig. 3. Reducing sugar yields of pretreated wood after enzyme treatment. C; cellulase, X; xylanase, line; each enzyme treatment, bar; enzyme mixture treatment.

실험을 수행하였다. 그 결과 셀룰레이즈와 자일란네이즈를 각각 30 U씩 넣은 경우 가장 효율이 낮았으며 50 U, 100 U, 200 U씩 넣은 것은 비슷한 결과를 보였다(Fig. 3). 이는 효소를 많이 넣게 되면 반응하는 기질보다 효소의 수가 많으므로 투입되는 효소가 증가하는 만큼 증가되지 않고 50 U씩만 처리되어도 충분한 효과를 볼 수 있는 것으로 보인다. 그러므로 50 U씩만 처리하는 것이 가장 효율적으로 나타났다.

팝핑 처리 전후 50 mg으로 정칭한 시료에 효소 처리 후 상등액에 효소 가수분해되어 나온 단당류 조성분을 알아보기 위해 HPLC 분석을 하고, 남은 잔사는 증류수를 이용하여 시료에 수용성으로 남은 당을

제거한 후 GC를 사용하여 증성당 분석을 하였다. 그 결과 전처리를 하지 않은 시료의 효소 처리 전과 후 남은 잔사의 글루코스 함량은 19.45와 19.15 mg으로 함량 변화가 거의 없었다. 이는 전처리를 하지 않은 시료는 효소를 이용한 당화가 되지 않음을 보여주었다. 이에 비해 팝핑 전처리를 한 시료의 효소 처리 전과 후 글루코스 함량은 18.00과 10.35 mg으로 약 57.5% 감소하였고, 자일로스 함량도 5.30에서 3.40 mg으로 약 64.2% 감소하였다(Table 3). 또한 팝핑된 시료에 효소를 처리한 후 글루코스와 자일로스의 당전환율은 각각 약 45.9%와 약 38.7%였다. 이러한 결과는 폐목재에 팝핑 처리를 함으로써 효소 당화율을 높일 수 있음을 보여주었다. 그리고 상등액 분석 결과, 팝핑 전처리하지 않은 시료에 효소를 처리한 경우 글루코스 피크와 자일로스 피크가 낮게 나왔으나, 팝핑 전처리된 시료에 효소를 처리한 경우 그 두 피크 모두 증가됨으로 보아 팝핑 전처리 함으로써 당화율이 증가함을 알 수 있었다(Fig. 4). 그리고 글루코스와 자일로스 피크가 주된 피크이므로 이 당화된 수용액으로 발효 실험을 하기에 적합함을 알 수 있었다.

3.4. 주사현미경(SEM) 관찰

팝핑 전처리 전과 후 시료를 효소처리 후 이들 시료의 형태학적 변화와 효소가수분해 정도를 알아보

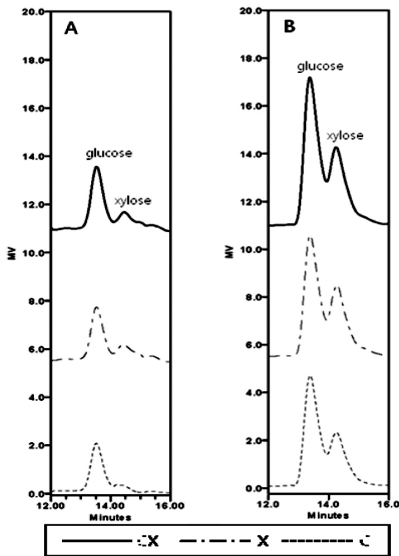


Fig. 4. HPLC spectra of waste wood hydrolysate after enzyme mixture treatment. A : non-pretreatment, B : popping pretreatment, C : cellulase, X : xylanase.

기 위해 주사형 전자현미경을 관찰하였다(Fig 6). 그 결과 전처리 후 섬유소의 결정도가 떨어져서 부피가 팽창하였으며, 섬유소가 표면에 노출되었음을 알 수 있었다. 그리고 전처리 전 시료에 효소를 처리하였을 때 효소가 표면에만 작용하여 표면이 매끄러워졌으며 균대균데에서만 효소 가수분해 양상을 볼 수 있었다. 그에 비해 전처리 후 효소 처리한 시료에서는 섬유소 사이가 벌어져 있으므로 내부에도 효소가 작용할 수 있었다. 그래서 전처리 전 시료보다 더 효율적으로 분해되어 다공성의 스폰지처럼 많이 분해된 모습을 관찰할 수 있었다. 이로써 앞서 실험한 환원당 분석결과 팝핑 전처리 후 효과가 있음을 다시 한번 가시적으로 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 폐목재를 리파이너를 이용하여 잘게 분쇄한 후 230°C, 23 kg/cm² 압력 하에서 팝핑기를 이용하여 파쇄 처리 하였다. 이 방법은 기존 논문에서

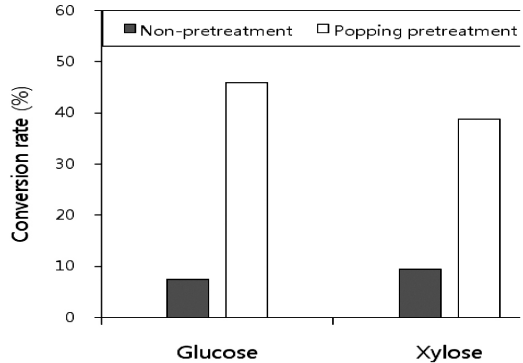


Fig. 5. Conversion rate of non-pretreated and popping pretreated waste wood.

연구되었던 화학적 처리를 병행하여 수증기 압력 하에서 적정 시간 폭쇄 처리(양과 김, 2001)를 하는 것과는 달리 본 연구실에서 발명한 팝핑기는 수증기 없이 고온, 고압상태에서 급격히 고압을 방출시키는 비교적 간단하게 처리할 수 있는 방법이다. 또한 기존에 사용되던 전처리 방법에 비해 투입되는 에너지 절감 효과와 화학적 처리를 하지 않고 효소 가수분해 효율을 높일 수 있는 방법이다. 본 연구 결과는 팝핑 후 효소 가수분해 효율이 전처리 전보다 4배 정도 증가하였다. 이는 팝핑 처리를 한 후 폐목재의 화학적 결합구조가 끊어져 효소가 셀룰로스에 접근하기 쉽게 변하였기 때문이다. 또한 효소를 단독으로 처리하였을 때보다 셀룰레이즈와 자일란네이즈를 함께 처리하였을 경우 효소 당화율이 증가하였는데 이는 자일란네이즈가 셀룰로스와 리그닌을 연결시켜주는 헤미셀룰로스의 자일란구조를 끊어 셀룰레이즈가 셀룰로스에 접근하기 쉬워졌기 때문으로 보인다. 이러한 견해는 이전의 연구(Duff and Murray, 1996)에서도 제시된 바 있다.

양 등(1997)의 보고서에 의하면 소나무를 폭쇄 처리 후 산가수분해 시 90% 이상의 환원당의 얻었으며, Nguyen (1999)은 침엽수를 2단 산가수분해 하여 70~98%의 환원당은 얻었으나 그 중 글루코스 수율은 50%로 여전히 낮았다고 보고하였다. 이처럼 폐목재의 화학적 결합구조는 매우 유기적이어서 물리적인 방법만으로는 분해하기 어려우며 화학적인 처리

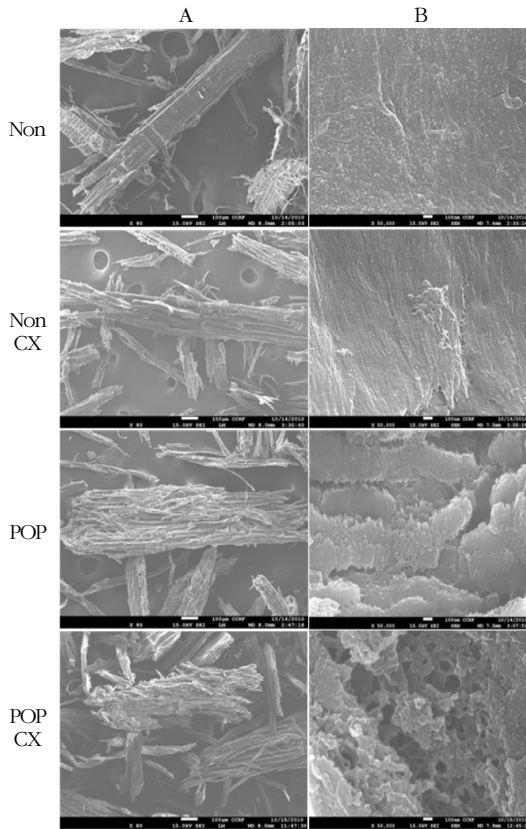


Figure 6. Micromorphological characteristics of wastes wood after enzymatic hydrolysis. SEM. A : X 80, B : X 50000, C : cellulase, X : xylanase.

를 하게 되면 목재의 분해는 쉬워지지만 환경오염을 일으키며 발효를 저해하기도 한다(Larsson *et al.*, 1999). 따라서 본 연구에서 사용된 팝핑법은 전처리 후 글루코스과 자일로스 등의 당 성분의 손실이 적으며, 화학적 처리를 병행하지 않고 열물리적인 처리를 하여 목재의 구조를 헐겁게 만들어 효소 가수분해 효율을 높일 수 있는 방법이다.

본 연구는 목질 자원 중에서도 당화하기 어려우며, 흔한 자원에 속하는 폐목재를 최소한의 공정으로 당화율을 높일 수 있는 방법을 찾기 위해 수행하였으며, 화학적 처리 없이 약 50%의 당전환율을 얻을 수 있었다. 이는 기존 화학적 전처리 방법만큼의 효율을

보여주는 결과이며, 다른 방법과 병행하여 팝핑법을 사용한다면 적은 효소 투입량으로도 당화율을 높일 수 있을 것이다. 이에 대한 경제성 분석도 앞으로 이루어져야 할 것이다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2010-0020141).

참 고 문 헌

1. 국무조정실, 재정경제부, 기획예산처, 산업자원부, 환경부, 건교부, 산림청. 2007. 폐목재 재활용 활성화 대책. 환경부. 과천.
2. 나중분, 김준석. 2008. 보문 : 공업화학, 촉매/반응공학 ; 전분질계 바이오매스의 동시당화발효 조건 최적화. 한국화학공학 46: 858~862
3. 박준석, 김정대, 홍수열, 도인환, 배재근. 2008. 원저(原著): 국내 폐목재 발생량 예측 및 재활용 가치 추정. 한국폐기물학 25: 363~370.
4. 서현범, 한재진, 최원석, 이오규, 이수민, 최석환, 이현용, 정경환. 2008. 초임계수 처리로 가수분해된 목질계 바이오매스를 이용한 바이오 에탄올 생산. 한국생물공학 23: 494~498.
5. 양계경, 장준복, 임부곡, 이종윤. 1997. 목질계 바이오매스의 이용(제3보). 한국펄프·종이공학 29: 18~27.
6. 양계경, 김철환. 2001. Cellulase에 의한 폭쇄체의 가수분해에 있어서 탄수화물 조성 및 효소흡착량 변화. 목재공학 29(4): 67~78.
7. 이영우, 홍종준, 이진석, 박순철, 조재경, 이준표. 1994. 목질계 바이오매스의 전처리 및 효소당화 연구. 한국화학공학 32: 36~41.
8. 환경부. 1996. 전국 지정폐기물 발생 및 처리현황('95). 환경부. 과천.
9. Azzam, A. 1989. Pretreatment of cane bagasse with alkaline hydrogen peroxide for enzymatic hydrolysis of cellulose and ethanol fermentation. Journal of Environmental Science and Health, Part B. 24: 421~433.
10. Cadoche, L. and G. Lopez. 1989. Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes.

- Biological Wastes 30: 153~157.
11. Duff, S. and W. Murray. 1996. Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: a review. *Bioresource Technology* 55: 1~33.
 12. Esteghlalian, A., A. Hashimoto, J. Fenske, and M. Penner. 1997. Modeling and optimization of the dilute-sulfuric-acid pretreatment of corn stover, poplar and switchgrass. *Bioresource Technology* 59: 129~136.
 13. Ghose, T. K. 1987. Measurement of cellulose activity. *Pure and Applied Chemistry* 59: 257~268.
 14. Jung, S., S. Kim, H. Bae, H. Lim, and H. Bae. 2010. Expression of thermostable bacterial [beta]-glucosidase (BglB) in transgenic tobacco plants. *Bioresource Technology* 101: 7144~7150.
 15. Larsson, S., E. Palmqvist, B. Hahn-Hagerdal, C. Tengborg, K. Stenberg, G. Zacchi, and N. Nilvebrant. 1999. The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood. *Enzyme and Microbial Technology* 24: 151~159.
 16. Mabee, W., D. Gregg, C. Arato, A. Berlin, R. Bura, N. Gilkes, O. Mirochnik, X. Pan, E. Kendall Pye, and J. Saddler. 2006. Updates on softwood-to-ethanol process development. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 129: 55~70.
 17. Murnen, H., V. Balan, S. Chundawat, B. Bals, L. Sousa, and B. Dale. 2007. Optimization of ammonia fiber expansion (AFEX) pretreatment and enzymatic hydrolysis of miscanthus x giganteus to fermentable sugars. *Biotechnology Progress* 23: 846~850.
 18. Nguyen, Q., M. Tucker, F. Keller, D. Beaty, K. Connors, and F. Eddy. 1999. Dilute acid hydrolysis of softwoods. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 77: 133~142.
 19. Silverstein, R., Y. Chen, R. Sharma-Shivappa, M. Boyette, and J. Osborne. 2007. A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks. *Bioresource Technology* 98: 3000~3011.
 20. von Sivers, M. and G. Zacchi. 1995. A techno-economical comparison of three processes for the production of ethanol from pine. *Bioresource Technology* 51: 43~52.
 21. Wi, S. G., H. J. Kim, S. A. Manadevan, D. J. Yang, and H. J. Bae. 2009. The potential value of the seaweed Ceylon moss (*Gelidium amansii*) as an alternative bioenergy resource. *Bioresource Technology* 100: 6658~6660.