

전자선 조사를 이용한 볏짚의 친환경 전처리 공정

이병민¹, 이진영¹, 김두영¹, 홍성권², 강필현¹, 전준표^{1*}

Environmentally-Friendly Pretreatment of Rice Straw by an Electron Beam Irradiation

Byoung-Min Lee¹, Jin-Young Lee¹, Du-Yeong Kim¹, Sung-Kwon Hong², Phil-Hyun Kang¹, and Joon-Pyo Jeun^{1*}

접수: 2014년 4월 3일 / 게재승인: 2014년 8월 18일
© 2014 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

Abstract: The autoclaving assisted by an irradiation pretreatment method was developed without toxic chemicals to produce fermentable sugars for their conversion to bioethanol. In the first step, electron beam irradiation (EBI) of rice straw was performed at various doses. The electron beam-irradiated rice straw was then autoclaved with DI water at 120°C for 1 h. A total sugar yield of 81% was obtained from 300 kGy electron beam-irradiated rice straw after 72 h of enzymatic hydrolysis by Cellulase 1.5L (70 FPU/mL) and Novozyme-188 (40 CbU/mL). Also, the removal of hemicellulose and lignin was 32.0% and 32.5%, respectively. This result indicates that the environmentally-friendly pretreatment method of rice straw by an electron beam irradiation could be applied for bioethanol production in plant.

Keywords: Rice straw, Biomass, Pretreatment, Bioethanol, Electron beam

1. INTRODUCTION

바이오매스 (biomass)는 원재료를 직접 사용하거나 전환공정

¹한국원자력연구원 공업환경연구부
¹Research Division for Industry & Environment, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongseup 580-185, Korea
Tel: +82-63-570-3063, Fax: +82-63-570-3098
e-mail: jpjeun@kaeri.re.kr

²충남대학교 공과대학 고분자공학과
²Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

을 거쳐 에너지원으로 사용할 수 있는 모든 생물자원으로 정의된다 [1]. 바이오매스 중 지구상에서 가장 풍부한 목질계 바이오매스로부터 연료와 화학물질이 생산되어 왔으며 현재는 옥수수 등 전분질계 바이오매스가 에탄올 생산의 주가 되고 있다. 바이오매스는 재료별 1세대, 2세대, 3세대 바이오매스로 구분되며 이 중 1세대 바이오매스는 식량자원문제와 직결되어 있는 만큼 원료 확보의 어려움과 원료비의 상승을 이유로 세계적으로 바이오에탄올 수요량을 충족시킬 수 없다. 1세대 바이오매스의 대체라고 할 수 있는 2세대 바이오매스 중 섬유소계 리그노셀룰로오스 (lignocellulose) 바이오매스는 볏짚 (rice straw), 보릿짚 (wheat straw), 옥수수짚 (corn straw), 사탕수수 찌꺼기 (sugarcane bagasse) 등이 있으며 양이 풍부하고 가격이 낮은 장점을 지니고 있다.

리그노셀룰로오스 (lignocellulose)의 주요성분은 셀룰로오스 (cellulose), 헤미셀룰로오스 (hemi-cellulose), 리그닌 (lignin) 세 가지의 고분자이다. 셀룰로오스는 글루코스 (glucose)가 β -1,4-글루코시딕 결합 (β -1,4-glucosidic bond)으로 반복되어 이루어져있으며 결정성 (semi-crystallinity)을 띤다[2]. 그리고 헤미셀룰로오스는 펜토오스 (pentoses), 헥소오스 (hexoses), 아세틸화 당 (acetylated sugar)으로 이루어져 있는 무정형 고분자 (amorphous polymer)이며 [3] 리그닌은 페닐 프로펜 단위들 (phenyl propane units: *p*-coumaryl, coniferyl and sinapyl alcohol)이 C-C, C-O-C 결합으로 이루어진 무정형 고분자이다. 이러한 세 가지 고분자가 주요성분인 리그노셀룰로오스는 구조상 글루코스, 자일로스 등의 당으로 전환될 수 있는 탄수화물 고분자 (셀룰로오스와 헤미셀룰로오스)가 물리화학적 결합에 의하여 리그닌에 둘러싸여 있으며 이는 당전환 시 효소와 미생물의 접근성을 저해한다. 그러므로 이들의 효율적인 당전환을 위하여 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스를 리

그닌과의 분리를 위한 전처리가 필수적이다 [4].

바이오매스 전처리의 목적은 여러 가지 전처리 방법에 따라 다음과 같이 서술하였다. 전처리의 방법으로는 대표적으로 물리적 방법, 화학적 방법, 생물학적 방법 등이 있다. 물리적 방법으로는 바이오매스의 입자크기를 줄이고 셀룰로오스의 결정화도를 낮추기 위한 분쇄법 (comminution: ball, colloid, hammer, compression) [5], 바이오매스 입자의 기공크기와 표면적 증가, 결정화도의 감소를 목적으로 하는 조사법 (irradiation: electron beam, gamma-ray, microwave) [6], 헤미셀룰로오스의 선택적인 가수분해를 목적으로 하는 증기폭쇄법 (steam explosion) [7] 등이 있다. 화학적 방법으로는 헤미셀룰로오스의 선택적인 제거를 목적으로 하는 산에 의한 가수분해법 (acid hydrolysis) [8], 리그닌의 선택적인 제거를 목적으로 하는 염기에 의한 가수분해법 (alkaline hydrolysis) [9], 암모니아 섬유 폭쇄법 (ammonia fiber explosion) [10] 등이 있다. 또한, 생물학적 방법으로는 리그닌의 제거를 위한 미생물법 (microbe) [11]이 있다. 더불어, 최근에는 각각의 전처리법의 단점을 보완하기 위하여 여러 가지 방법을 결합시킨 복합 전처리 방법이 많이 발표되고 있다 [12]. 여러 가지 전처리 방법 중에서 가장 널리 쓰이는 방법은 산과 염기를 이용한 가수분해법이다. 산가수분해법은 바이오매스를 주로 황산을 이용하여 산의 농도에 따라 고온 또는 저온에서 처리하는 방법으로 헤미셀룰로오스의 선택적인 제거로 인한 셀룰로오스의 표면적 증가에는 효과적이거나 헤미셀룰로오스의 손실로 인하여 자일로스의 수율이 현저히 감소함과 동시에 반응중간생성물이 당화억제제로 작용하여 결과적으로 전처리 효율을 저해시키는 단점을 갖고 있다 [13]. 또한, 염기처리는 주로 고농도의 수산화나트륨을 이용하여 고온고압으로 처리하는 방법으로 리그닌의 제거에는 효과적이거나 고농도의 염기를 사용함으로써 전처리 후 슬러리의 중화 등이 요구된다 [14]. 볏짚은 세계적으로 연간 생산량이 약 7~8억 톤으로 밀짚 (wheat straw), 옥수수짚과 함께 가장 많은 농업폐기물이고 목질계 바이오매스보다 상대적으로 리그닌의 함량이 낮고 결합구조가 약하여 바이오에탄올 생산을 위한 원재료로서 잠재력이 높은 후보군이라 할 수 있다 [15-17].

본 연구에서는 볏짚을 전자선 조사 (electron beam irradiation)와 물찜 (autoclaving)의 두 단계로 친환경적인 전처리를 하였으며 전자선 조사량에 따른 볏짚의 구성성분 변화, 당수율, 그리고 물리화학적 특성 변화를 분석하여 글루코스, 자일로스 등의 추출과 산업현장에서의 적용가능성을 검토하였다.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. 재료

본 연구에 사용된 바이오매스는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소 시험농장에서 2013년에 재배한 볏짚을 사용하였다. 효소당화를 위한 기질로서 볏짚을 그라인더 (grinder)를 이용하여 분쇄한 후 35 mesh 체를 이용하여 500 μm 이하의 볏짚

을 얻어낸 후 40°C의 진공오븐에서 24시간 건조하였다. 건조된 볏짚은 전자선 조사를 위하여 알루미늄 팩에 5 mm 두께로 밀봉하였다. 효소당화에 사용된 Celluclast 1.5 L (Cellulase 1.5 L, Novo Co., Denmark)와 Novozyme-188 (β -glucosidase, Novo Co., Denmark)은 Sigma-Aldrich사에서 구입하였다. 구연산나트륨 (sodium citrate buffer, 0.1 M, pH 4.8)을 제조하여 효소당화 시 완충용액으로 사용하였다. 또한, high performance liquid chromatography (HPLC)분석 시 초순수 증류수 (B&J HPLC certified solvent, SK Chemical)를 이동상 (mobile phase)으로 사용하였다.

2.2. 전자선 조사 및 물찜 전처리

건조된 볏짚의 전자선 조사는 2.5 MeV의 빔에너지를 갖는 ELV-8 type 선형 전자빔 가속기 (EB Tech. Co., Korea)를 사용하여 25 kGy/scan의 조사강도로 조사하였으며 이 때, 전류세기는 25 mA, 카트속도는 10 m/min이었다. 전자선 조사량은 각각 50, 100, 200, 300, 500 kGy이었으며 각각의 조사량에 따라 볏짚은 이하 E50, E100, E200, E300, E500으로 명명하였다. 조사된 볏짚 15 g을 증류수 285 g에 첨가하고 오토클레이브에서 120도에서 1시간 동안 물찜을 하였으며 물찜이 끝난 후 냉각된 증류수로 반응을 종료시킨 후 종이필터 (Whatman No.1)를 이용하여 증류수로 수차례에 걸쳐 세척한 뒤 효소당화에 앞서 40°C의 진공건조오븐에서 24시간 건조하였다.

2.3. 효소 당화

효소당화의 기질로서 건조된 볏짚은 기존 리그노셀룰로오스 바이오매스의 최적 당화조건을 적용하여 효소당화를 수행하였다 [18]. 볏짚농도 5% (w/v)로 구연산나트륨 (0.1 M, pH 4.8) 완충용액에 첨가한 후 70 filter paper units (FPU)/mL, 40 cellobiase units (CbU)/mL의 평균활성도를 갖는 Celluclast 1.5 L과 Novozyme-188 효소를 각각 첨가하였다. 그리고 50°C의 진탕배양기 (shaking incubator)에서 150 rpm으로 교반하면서 24, 48, 72시간 동안 수행하였다.

2.4. 볏짚의 당수율 분석

전처리 조건에 따른 당수율 분석은 효소당화액의 상층을 채취하여 0.2 μm 주사기필터로 여과된 당화액을 HPLC (Shimadzu Co., Japan)에서 수행하였다. HPLC 분석은 column에 이동상으로 초순수 증류수를 0.6 mL/min의 유속으로 흘려주며 Aminex HPX-87P column (Bio-Rad, USA)을 이용하여 분리하고 RI detector (410 refractive index detector, Waters, USA)로 검출하는 절차로 수행하였다. 이 때, column과 detector의 온도는 모두 65°C이었다.

2.5. 볏짚의 성분 분석

전처리 조건에 따른 볏짚의 구성성분의 변화는 미국신재생에너지연구소 (National Renewable Energy Laboratory, NREL)의 보고서 [19,20]와 미국펄프제지학회 (Technical association of the pulp and paper industry)의 TAPPI standard and suggested

methods [21]에 따라 수행하였다. 성분분석의 방법은 리그노셀룰로오스의 펄핑 (pulping)과정과 유사하며 성분분석을 마친 후 건조된 무게로 구성성분의 함량비를 나타내었다. 리그닌의 함량은 볏짚과 72% (w/w)의 황산을 30°C에서 1시간 동안 교반한 볏짚/황산 혼탁액에 냉각된 증류수를 첨가하여 황산의 농도가 4%에 도달할 때까지 희석하고 120°C에서 1시간 동안 찜 (autoclaving)을 한 후 세척, 건조된 무게를 측정함으로써 얻을 수 있다. 셀룰로오스의 함량은 볏짚을 NaClO/glacial acetic acid/DI water 용액과 75°C에서 1시간의 교반과정을 5회 반복하고 역시 이를 세척, 건조된 무게를 측정하였다.

2.6. 적외선 분광 분석

전처리 전후의 볏짚의 화학구조 변화는 ATR-FTIR (Bruker Vertex 70 spectrometer, Germany)을 이용하여 4,000~500 cm⁻¹의 파장범위에서 4 cm⁻¹의 해상도로 64번 스캔하여 흡광도를 분석하였다.

2.7. X-선 회절 분석

전처리 전후의 볏짚의 결정지수 (crystallinity index, CrI)를 X-선 회절기 (X'pert Powder, PANalytical, Netherlands)를 이용하여 40 kV, 30 mA, Cu K α ($\lambda=1.54 \text{ \AA}$)조건에서 5~50°의 2 θ 범위에서 분석하였다.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. 볏짚의 성분과 무게변화

전처리 전 볏짚의 구성성분은 약 41.1%의 셀룰로오스, 약 25.3%의 헤미셀룰로오스, 약 19.8%의 리그닌 외 약 13.8%의 이물질이었으며 전처리 조건에 따라 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 상대적인 함량 변화를 Table 1에 나타내었다. 일반적인 리그노셀룰로오스의 구조는 Fig. 1과 같으며 서론에서 언급한 바와 같이 효소당화의 대상인 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스가 리그닌에 의하여 둘러싸여 있으므로 리그닌이 효소의 접근을 방해한다. 그러므로 리그닌을 효과적으로 제거하거나 리그닌과의 물리화학적 결합력을 약화시킴으로써 효소당화 대상의 표면적을 증가하는 것이 전처리의 목적이다. 전처리된 볏짚에서 셀룰로오스의 상대적인 함량은 전자선 조사량에 따라 증가하여 500 kGy를 조사하고 물찜과정을 거쳐 전처리 전의 41.1%에서 52.8%로 약 11.1% 증가하였고 헤미셀룰로오스와 리그닌의 제거율은 각각 약 32%, 32.5%

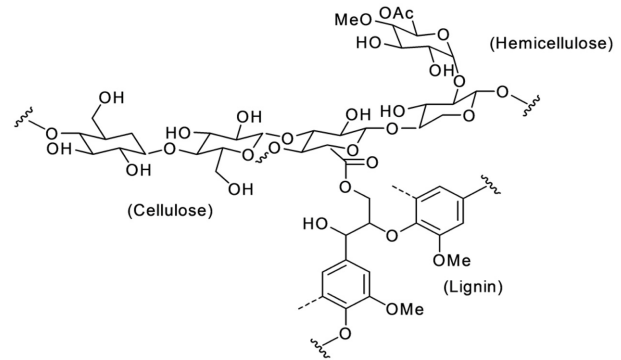


Fig. 1. Structure of cellulose-hemicellulose-lignin complex linkage.

이었다. 이러한 결과들은 서론에서 언급한 바와 같이 리그노셀룰로오스의 표면적 증가를 목적으로 하는 물리적 방법의 하나인 전자선 조사 전처리를 수행하고 물찜을 통하여 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌 간의 화학적 결합을 유연하게 하여 리그닌과 이물질이 제거된 결과이다. 볏짚의 경우 이물질의 함유량이 다른 바이오매스에 비하여 높으며 특히 증기폭쇄 전처리법에서 이물질의 제거율이 높다고 알려져 있으나 [22,23] 증기폭쇄법은 리그닌과 당으로 전환이 가능한 탄수화물 간의 분리에 효과적이지 못하다 [24]. 볏짚의 전자선 조사 후 증기폭쇄법과 유사한 물찜과정을 수행하여 이물질의 약 76.5%를 제거하였다.

3.2. 당수율 분석

당수율의 경우 기존의 연구들은 바이오매스의 이론적 당량 대비 실제 당화된 양으로 계산하였으나 본 연구에서는 당화 전 바이오매스의 총량 대비 실제 당화된 양으로 다음과 같은 공식으로 계산하였다.

$$\text{당수율 (\%)} = \frac{\text{추출된 당의 무게}}{\text{전처리된 볏짚의 무게}} \times 100$$

Fig. 2에서 알 수 있듯이 전처리 전의 볏짚의 당수율은 72시간 효소당화를 기준으로 약 49.4%를 보였다. 그러나 전처리 후 볏짚의 당수율은 전자선 조사량에 비례하여 증가하는 경향을 보였으며 전자선 조사량이 200, 300 kGy일 때 각각 약 72.5%, 81.0%이었다. 그러나 300 kGy 이상의 전자선 조사 시 당수율은 약 82% 정도에서 수렴하였고 결과적으로 당수율 80%를 얻기 위하여 필요한 전자선 조사량은 300 kGy이었다.

Table 1. Composition and Mass Balance of Rice Straw Samples

Samples (g)	Cellulose % (g)	Hemicellulose % (g)	Lignin % (g)	Ash % (g)
Raw (15.0)	41.1 (6.16)	25.3 (3.79)	19.8 (2.97)	13.8 (2.07)
E50 (13.6)	44.8 (6.09)	25.1 (3.43)	19.8 (2.71)	10.3 (1.41)
E100 (12.6)	47.9 (6.03)	24.6 (3.14)	19.7 (2.42)	7.8 (0.99)
E200 (12.3)	48.5 (5.96)	24.5 (3.11)	19.5 (2.27)	7.5 (0.95)
E300 (11.3)	50.7 (5.72)	24.3 (2.74)	19.0 (2.09)	6.0 (0.72)
E500 (10.7)	52.8 (5.64)	24.0 (2.58)	19.0 (2.00)	4.2 (0.48)

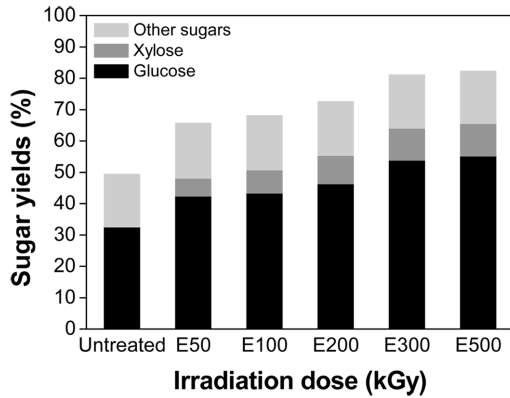


Fig. 2. Sugar yields obtained using different pretreatment conditions.

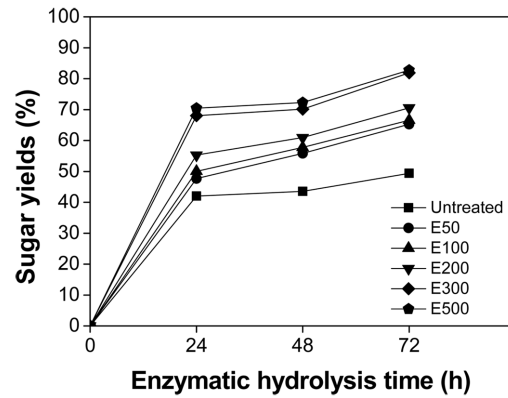


Fig. 3. Variations in the sugar yields based on the hydrolysis time (24, 48, and 72 h).

전처리의 효율적인 측면에서 판단해 볼 때 72시간 효소당화 수행을 기준으로 글루코스의 경우 전처리 전 벧짚 대비 70% 이상 향상된 당수율을 보였고 자일로스는 전처리 전 벧짚에서는 효소당화에 의하여 추출되지 않았으나 전처리를 한 시료에서 당화하기 시작하여 전자선 조사량에 비례하여 당수율이 증가하였다. 이는 전처리 공정 후 헤미셀룰로오스의 표면적 증가로 인하여 효소접근성이 증가된 결과로 판단된다. 더불어 72시간의 효소당화를 거쳐 추출된 당의 종류와 당수율을 전자선 조사량에 따라 Table 2에 자세히 표기하였다. 서론에서 언급된 대표적인 전처리 공정인 산처리법과 증기폭쇄법은 약 70~80% 정도의 높은 당수율을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 산 전처리 시 필연적으로 생성되는 반응중간생성물인 푸르푸랄 (furfural), 하이드록시메틸푸르푸랄 (HMF) 등이 발생하여 바이오매스의 다당류가 단당류로 전환될 때 당화억제제로 작용함과 동시에 이로 인한 환경오염을 초래하며 [25] 증기폭쇄 전처리는 약 160~200°C의 고온에서 진행되어 에너지 소비가 큰 것으로 알려져 있다 [26]. 그러나 전자선 조사를 이용한 전처리법은 부가생성물이 거의 생성되지 않는 것으로 알려져 있으므로 [27] 전자선 조사와 증기폭쇄법에 비하여 낮은 온도조건에서의 물질을 이용한 전처리 공정을 이용하여 유해한 화학물질을 사용하지 않고 에너지 소비의 절감을 통하여 친환경적이고 높은 당수율을 얻을 수 있었다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 당수율은 효소당화 시간과 전자선 조사량에 비례하여 증가하였다. 더불어, 500 kGy 조사 시 효소당화 24시간 만에 약 70%의 당수율을 얻을 수 있었다. 이는 전자선 조사로 인하여 효소에 의하여 당화되는 셀

룰로오스와 헤미셀룰로오스의 표면적이 증가하였고 물집과정을 거치면서 이물질의 제거와 동시에 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌의 세 가지 구성성분 간 결합력이 약화됨으로 인한 효소접근성의 향상에 이유가 있다. 이를 통하여 전자선 조사 [28]와 물집 [29] 단일공정과 비교 시 각각 50%, 45%에서 30~35% 증가된 약 80%의 당수율을 얻음으로써 전자선 조사와 물집의 시너지효과를 확인하였다.

3.3. 물리화학적 특성변화

전처리 전과 후의 벧짚의 물리화학적 특성변화는 적외선 분광분석과 X-선 회절분석을 통하여 알아보았다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 전처리 전후의 주요 피크들은 1,000~1,200 cm⁻¹의 파장범위 내의 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스 피크들과 1,300~1,800 cm⁻¹의 파장범위내의 리그닌관련 피크들이다. 3,303 cm⁻¹ 부근의 피크는 셀룰로오스 내부의 수소결합에 의한 O-H 스트레칭으로 인하여 나타난다 [30]. 2,917 cm⁻¹ 부근의 피크는 셀룰로오스 내 메틸렌 그룹의 C-H 스트레칭으로 인하여 나타나며 전처리 후 피크의 강도가 약간 증가하는 것으로 알려져 있다 [31]. 1,733 cm⁻¹ 부근의 피크는 헤미셀룰로오스와 리그닌 간의 에스터 결합관련 피크 혹은 헤미셀룰로오스 내 아세틸 (acetyl)그룹의 피크로 알려져 있으며 이 피크강도의 감소는 리그닌과 헤미셀룰로오스의 결합력의 감소를 의미한다 [32]. 896, 1,155 cm⁻¹ 부근의 피크는 β-1,4-글루코시딕 결합 (β-1,4-glycosidic bond)으로 나타나며 전처리 후 피크강도가 증가하였으며 이는 셀룰로오스의 상대적 함량이 증가한 것을 의미한다. 전처리에 의한 벧짚의 구조분석을 위한

Table 2. Sugar Yields (%) of Untreated and Pretreated Rice Straw after 72 h of Enzymatic Hydrolysis

Samples	Glucose	Xylose	Mannose	Galactose	Arabinose	Total
Raw	32.57	-	15.64	0.35	0.83	49.40
E50	42.39	5.73	15.42	0.53	1.57	65.65
E100	43.37	7.33	15.22	0.58	1.55	68.07
E200	46.30	9.09	14.97	0.62	1.57	72.57
E300	53.87	10.21	14.78	0.65	1.55	81.07
E500	55.15	10.39	14.54	0.63	1.51	82.25

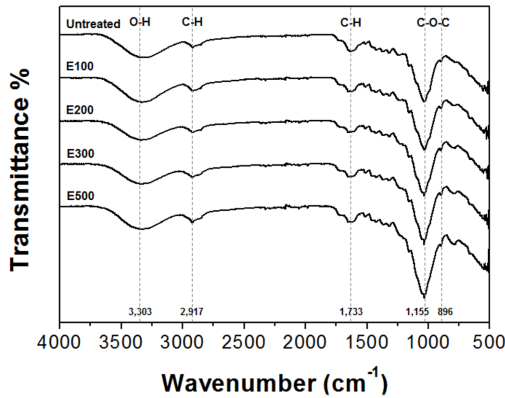


Fig. 4. FT-IR spectra indicating changes in the chemical structures of untreated and pretreated samples.

Table 3. Characteristics of Absorption Band in FTIR Spectra of Pretreated Rice Straw

Absorbance band (cm ⁻¹)	Assignment	Functional groups
3,303	Cellulose	O-H stretching (hydrogen bond)
2,917	Cellulose	C-H stretching (methylene group)
1,733	Hemicellulose	C=O ester linkage (acetyl group)
1,155	Cellulose	C-O-C stretching (glycosidic bond)
896	Cellulose	C-O-C (β -(1,4)-glycosidic bond)

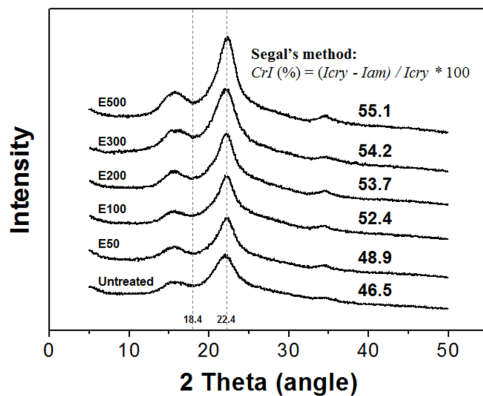


Fig. 5. Crystallinity index measured by XRD for the different pretreatment conditions.

주요 피크들의 자세한 정보를 Table 3에 나타내었다. 전처리 조건에 따른 결정지수의 변화는 다음과 같은 공식으로 계산하였다.

$$CrI(\%) = \frac{I_{cry} - I_{am}}{I_{cry}} \times 100$$

I_{cry} 는 20=22.4°에서 결정형 영역의 피크강도이고 I_{am} 는 20=18.4°에서 무정형 영역의 피크강도이다. 결정지수는 전처리로 인하여 리그노셀룰로오스의 주요 구성성분인 헤미셀룰로

오스와 리그닌과 같은 무정형 영역을 제거하여 결정성을 높이는 전처리의 효율성을 나타내는 인자이다. 결정지수의 증가는 볏짚의 결정영역인 셀룰로오스의 상대적인 함량의 증가가 원인이며 Fig. 5에서 알 수 있듯이 결정지수가 증가할수록 당수율 또한 증가한다. 전처리 전의 볏짚의 결정지수는 46.5%에서 500 kGy 조사 시 55.1%로 약 8% 이상 증가하여 전자선 조사량에 따라 결정지수가 비례하여 증가함으로써 결과적으로 당수율에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 셀룰로오스에 의한 볏짚의 결정성은 당수율에 큰 영향을 미치는 요인으로 볏짚의 결정지수 증가의 원인은 앞서 언급한 바와 같이 전처리 후 볏짚의 무정형 영역인 헤미셀룰로오스와 리그닌이 각각 약 32%, 32.5% 제거된 결과로 해석할 수 있다.

4. CONCLUSION

2세대 바이오매스 볏짚을 이용하여 전자선 조사 후 물찜 전처리 공정을 수행하고 이를 분석하였다. 볏짚은 전자선 300 kGy 이상 조사 후 물찜처리를 한 볏짚에서 효소당화율을 거쳐 약 65%의 글루코스와 자일로스를 포함하는 약 81% 정도의 당수율을 얻을 수 있었다. 이 전처리 공정은 유해한 화학물질을 사용하지 않아 친환경적이며 전자선 조사량에 따라 당수율의 조절이 용이한 장점들을 지니고 있다. 따라서 이 전처리법을 통하여 생산된 당들은 발효과정을 거쳐 바이오에탄올 생산 등의 산업현장에서의 적용 가능성이 높다는 것을 알 수 있었다.

Acknowledgements

본 연구는 한국원자력연구원 기본연구사업 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Standard Terminology Relating to Biotechnology, ASTM E1705-11.
- Li, M. F., Y. M. Fan, F. Xu, R. C. Sun, and X. L. Zhang (2010) Cold sodium hydroxide/urea based pretreatment of bamboo for bioethanol production: Characterization of the cellulose rich fraction. *Ind. Crop. Prod.* 32: 551-559.
- Girio, F. M., C. Fonseca, F. Carvalheiro, L. C. Duarte, S. Marques, and R. Bogel-Lukasik (2010) Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. *Bioresource Technol.* 101: 4775-4800.
- Demirbas, A. (2008) Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review. *J. Hazard. Mater.* 157: 220-229.
- Hideno, A., H. Inoue, T. Yanagida, K. Tsukahara, T. Endo, and S. Sawayama (2012) Combination of hot compressed water treatment and wet disk milling for high sugar recovery yield in enzymatic hydrolysis of rice straw. *Bioresource Technol.* 104: 743-748.

6. Bak, J. S., J. K. Ko, Y. H. Han, B. C. Lee, I. G. Choi, and K. H. Kim (2009) Improved enzymatic hydrolysis yield of rice straw using electron beam irradiation pretreatment. *Bioresource Technol.* 100: 1285-1290.
7. Reczey, V. K. and Z. Zacchi (2004) Optimization of steam pretreatment of corn stover to enhance enzymatic digestibility. *Appl. Biochem. Biotech.* 113: 509-523.
8. Hsu, T. and G. Gou (2010) Effect of dilute acid pretreatment of rice straw on structural properties and enzymatic hydrolysis. *Bioresource Technol.* 101: 4907-4913.
9. Wang, Z., D. R. Keshwani, A. P. Redding, J. J. Cheng, and Jay J. Cheng (2010) Sodium hydroxide pretreatment and enzymatic hydrolysis of coastal Bermuda grass. *Bioresource Technol.* 101: 3583-3585.
10. Kumar, P., D. M. Barrett, M. J. Delwiche, and P. Stroeve (2009) Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48: 3713-3729.
11. Wan, C. and Y. Li (2010) Microbial pretreatment of corn stover with *ceriporiopsis subvermispura* for enzymatic hydrolysis and ethanol production. *Bioresource Technol.* 101: 6398-6403.
12. Lee, B. M., J. Y. Lee, P. H. Kang, S. K. Hong, and J. P. Jeun (2014) Improved pretreatment process using an electron beam for optimization of glucose yield with high selectivity. *Appl. Biochem. Biotechnol.* DOI 10.1007/s12010-014-1138-1
13. Chen, W. H., B. L. Pen, C. T. Yu, and W. S. Hwang (2011) Pretreatment efficiency and structural characterization of rice straw by an integrated process of dilute-acid and steam explosion for bioethanol production. *Bioresource Technol.* 102: 2916-2924.
14. Chiamonti, D., M. Prussi, S. Ferrero, L. Oriani, P. Ottonello, P. Torre, and F. Cherchi (2012) Review of pretreatment processes for lignocellulosic ethanol production, and development of an innovative method. *Biomass Bioenerg.* 46: 25-35.
15. Kim, S. D. and B. E. Dale (2004) Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass Bioenerg.* 26: 361-375.
16. Ratnam, B. V., M. N. Rao, M. D. Rao, and C. Ayyanna (2003) Optimization of fermentation conditions for the production of ethanol from sago starch using response surface methodology. *World J. Microb. Biot.* 19: 523-526.
17. Zhao, H., M. H. Kwak, C. Zhang, H. M. Brown, B. W. Arey, and E. H. Johnathan (2007) Studying cellulose fiber structure by SEM, XRD, NMR and acid hydrolysis. *Carbohydr. Polym.* 68: 235-241.
18. Selig, M, N. Weiss, and Y. Ji (2008) Enzymatic saccharification of lignocellulosic biomass. *Technical Report NREL/TP-510-42629*, NREL, Colorado, USA.
19. Sluiter, A., B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlate, J. Sluiter, D. Templeton, and D. Crocker (2012) Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. *Technical Report NREL/TP-510-42618*, NREL, Colorado, USA.
20. Ruiz, R., Ehrman, T. (1996) *Determining of carbohydrates in biomass by high performance liquid chromatography*. Chemical Analysis and Testing Task Laboratory Analytical Procedure #002, NREL, Colorado, USA.
21. TAPPI T 222 om-02 (2002) *Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*.
22. Bin, Y. and C. Hongzhang (2010) Effect of the ash on enzymatic hydrolysis of steam-exploded rice straw. *Bioresource Technol.* 101: 9114-9119.
23. Binod, P., R. Sindhu, R. R. Singhanian, S. Vikram, L. Devi, S. Nagalakshmi, N. Kurien, R. K. Sukumaran, and A. Pandey (2010) Bioethanol production from rice straw: An overview. *Bioresource Technol.* 101: 4767-4774.
24. Limayem, A. and S. C. Ricke (2012) Lignocellulosic biomass for bioethanol production-current perspectives, potential issues and future prospects. *Prog. Energy Combust. Sci.* 38: 449-467.
25. Gumuskaya, E., M. Usta, and H. Krici (2003) The effects of various pulping conditions on crystalline structure of cellulose in cotton linters. *Polym. Degrad. Stabil.* 81: 559-564.
26. Chen, W. H., S. C. Ye, and H. K. Sheen (2012) Hydrolysis characteristics of sugarcane bagasse pretreated by dilute acid solution in a microwave irradiation environment. *Appl. Energ.* 93: 234-244.
27. Khan, A. W (1986) Effects of electron-beam irradiation pretreatment on the enzymatic hydrolysis of softwood. *Biotechnol. Bioeng.* 28: 1449-1453.
28. Karthika, K., A. B. Arun, and P. D. Rekha (2012) Enzymatic hydrolysis and characterization of lignocellulosic biomass exposed to electron beam irradiation. *Carbohydr. Polym.* 90: 1038-1045.
29. Saha, B. C., T. Yoshida, M. A. Cotta, and K. Sonomoto (2013) Hydrothermal pretreatment and enzymatic saccharification of corn stover for efficient ethanol production. *Ind. Crop. Prod.* 44: 367-372.
30. Oh, S. Y., D. I. Yoo, Y. Shin, H. C. Kim, H. Y. Kim, Y. S. Chung, W. H. Park, and J. H. Youk (2005) Crystalline structure analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide by means of X-ray diffraction and FTIR spectroscopy. *Carbohydr. Res.* 340: 2376-2391.
31. Kumar, R., G. Mago, V. Balan, and C. E. Wyman (2009) Physical and chemical characterizations of corn stover and poplar solids resulting from leading pretreatment technologies. *Biosour. Bioeng.* 100: 3948-3962.
32. Chundawat, P. S. S., B. Venkatesh, and B. E. Dale (2006) Effect of particle size based separation of milled corn stover on AFEX pretreatment and enzymatic digestibility. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 96: 219-231.