

암모니아수 침지 전처리 공정을 이용한 볏짚의 저온 동시당화발효

장서윤 · 김준석[†]

경기대학교 화학공학과
443-760 경기도 수원시 영통구 광교산로 154-42
(2014년 1월 6일 접수, 2014년 2월 5일 수정본 접수, 2014년 2월 11일 채택)

Effect of SAA Pretreatment on SSF at Low Temperature to Bioethanol Production from Rice Straw

Suh Yoon Jang and Jun Seok Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, 154-42 Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi 443-760, Korea
(Received 6 January 2014; Received in revised form 5 February 2014; accepted 11 February 2014)

요 약

섬유소계 바이오매스의 주요 구성요소 간의 관계에 의한 물리적, 화학적 장벽은 셀룰로오스를 발효 가능한 당으로 전환시키는 효소당화를 방해한다. 전처리의 주 목적은 셀룰로오스의 효소당화율을 향상시키기 위하여 기질로의 효소 접근성을 높이는 것으로, 전처리 공정의 발전은 지속적으로 요구되고 있다. 본 연구에서는, 간단하고, 상대적으로 저비용인 암모니아수에 의한 침지공정을 전처리방법으로 채택하였다. 기질로는 국내 농업 잔류물 중 생산량이 높은 볏짚을 채택하였다. 암모니아수에 의한 침지 공정은 3, 12, 24 그리고 72시간 동안 수행되었다. 그리고 동시당화발효에 미치는 전처리의 효과를 조사하기 위해, 효소당화와 동시당화발효를 30, 40 그리고 50 °C에서 수행하였다. 연구 결과에 따르면, 볏짚이 암모니아수에 의한 침지 처리 되었을 때, 기존의 보편적인 동시당화발효와 비교하여 상대적으로 적은 효소사용량과 낮은 온도(30 °C) 조건에서도 당화와 동시당화발효가 수행될 수 있음을 확인하였다. 그리고 암모니아수에 의한 침지 처리는 초기 당화속도를 증가시킴으로써 24시간 이내에 발효를 종료시켰다.

Abstract – Physical and chemical barriers, caused by the close association of the main components of cellulosic biomass, hinder the hydrolysis of cellulose to fermentable sugars. Since the main goal of pretreatment is to increase the enzyme accessibility improving digestibility of cellulose, development of an effective pretreatment process has been considered to be important. In this study, SAA (Soaking in Aqueous Ammonia) was chosen as pretreatment because this is the simple and low-cost method. Rice straw of which the production is outstandingly high in domestic agriculture residues in Korea was chosen as raw material. SSA pretreatment with various reaction time of 3 h to 72 h was tested. The enzymatic hydrolysis and SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation) were performed at three different temperature (30, 40 and 50 °C) to investigate performance of SSF upon various pretreatment conditions. As a result, this SAA treated-rice straw was found to have great potential for effective enzymatic hydrolysis and SSF with lower enzyme dosage at lower temperature (30 °C) than its conventional SSF. In SAA addition, SAA reduced fermentation time to 24 h owing to increase the initial hydrolysis rate substantially.

Key words: SSF, SAA, Pretreatment, Enzymatic Hydrolysis

1. 서 론

섬유소계 바이오 매스의 에탄올 생산은 다양한 상호의존적인 단계를 포함하는 매우 복잡한 공정으로, 주요단계에는 원료의 전처리, 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 효소당화, 당을 에탄올로 전환시키

는 발효, 잔여 리그닌 성분의 분리와 에탄올의 회수 및 정제 등이 있다. 섬유소계 바이오매스에 있어 전처리는 목질섬유소를 발효 가능한 당당류로 당화하는 공정단계의 효율을 높이기 위한 중요한 수단임과 동시에 발전시켜야 할 기술적 문제점이다. 전처리의 목적은 효소당화의 주요한 저해요소인 견고한 리그닌 구조를 부수고, 셀룰로오스의 결정성 구조를 붕괴시켜 섬유소계 바이오 매스의 물리화학적 구조를 바꿔주어 당화가 수행되는 동안 셀룰로오스에 대한 효소의 접근성을 향상시키는 것에 있다. 전처리 공정은 섬유소계 바이오 매스로부터의 바이오 에탄올 생산 공정에서 원료 자체의 비용 다음으로 비싼 고비용의 공정으로 여겨지고 있지만 충분한 연구와 발전을

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jskim84@kyonggi.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.

통해 전체적인 에탄올 생산 공정의 비용(효소사용량, 혼합속도, 발효 독성물질, 생산물의 농도, 생산물의 정제 등)을 낮추고 효율성을 높일 수 있는 커다란 잠재력을 갖고 있다[1,4].

전처리 시약으로써 암모니아는 바이오매스를 팽윤시키고 효율적으로 탈리그닌 시키며 휘발성이 커 쉽게 회수될 수 있는 등 많은 이점을 가지고 있다. 암모니아수를 이용한 전처리는 에탄올 생산을 목적으로 많은 연구가 이루어져왔다[5,6]. 목탄산 전처리와 같은 다른 화학적 전처리와 비교하였을 때, 암모니아를 이용한 전처리의 효율은 탈리그닌의 정도에 크게 의존한다[5,7]. 그 중 저온에서의 암모니아수 침지 공정은 암모니아수와 헤미셀룰로오스 간의 상호작용을 최소화시킴으로써 바이오매스 내의 헤미셀룰로오스를 유지시켜주는 공정으로, 이는 반응기형태가 상당히 간단한 공정이며 발효 수율을 증가시키기 위한 효과적인 전처리방법이다[5,8].

본 연구에서는 암모니아수에 의한 침지 공정으로 전처리된 볏짚을 이용해 당화 및 동시당화발효를 수행하여 SAA 전처리의 효과를 조사하였다.

2. 실험방법

2-1. 재료

본 연구에서는 50~100 mesh의 크기로 분쇄된 볏짚을 주요 기질로 사용하였다. 사용된 볏짚의 주요 성분은 41.9%의 셀룰로오스(Cellulose), 23.1%의 헤미셀룰로오스(Hemi-cellulose) 그리고 18%의 클라슨 리그닌(Klason lignin)이다. 본 연구에서는 볏짚의 비교군으로 Whatman no.1(filter paper), 알파셀룰로오스(α -cellulose)와 20~100 μ m의 마이크로크리스탈린(microcrystalline)을 사용하였다. 이것들은 각각 시그마-알드리치(Sigma-Aldrich Co.)와 대정(Daejung chemicals & metals Co.)에서 구입하였다. 효소당화를 위하여 Celluclast 1.5L (Cellulase, Novo Co., Denmark)과 Novozyme-188(β -glucosidase, Novo Co., Denmark)을 사용하였다. 에탄올을 생산하기 위한 발효 균주로 계대배양 후 냉장 보관된 *Saccharomyces cerevisiae*(ATTC 4175)를 사용하였다.

2-2. 암모니아수에 의한 침지 공정(SAA; Soaking in Aqueous Ammonia)

15%(v/v) 암모니아수에 의한 침지공정으로 볏짚을 전처리 하였다. 배치반응기 내에서 볏짚과 암모니아수 용액을 1:10의 고-액 비율로 혼합하였고, 이 반응기를 60 °C의 shaking incubator에 넣어 일정한 시간 동안 침지공정을 수행하였다. 침지공정이 끝난 후에 전처리된 볏짚을 깨끗한 물로 충분히 세척 한 후 45 °C의 오븐에서 건조하여 잔류 수분을 제거하였다[9].

2-3. 효소당화(Enzymatic Hydrolysis)

전처리된 볏짚의 효소당화는 삼각플라스크에서 수행되었다. 당화는 반응온도조건 30, 40 그리고 50 °C에서 수행되었고, 효소사용량은 Celluclast 1.5L 60 FPU/ml, Novozyme-188 406 CBU/ml와 Celluclast 1.5L 20 FPU/ml, Novozyme-188 135 CBU/ml로 하였다. Buffer solution으로는 sodium citrate buffer solution(0.5 M, pH 4.8)을 사용하였고, 기질과 buffer solution을 기질농도 5%(w/v)로 혼합하여 shaking incubator에서 150 rpm으로 72시간 동안 효소당화를 수행하였다.

2-4. 동시당화발효(SSF; Simultaneous Saccharification and Fermentation)

전처리된 볏짚의 동시당화발효는 삼각플라스크에서 수행되었다. 동시당화발효는 반응온도조건 30, 40 그리고 50 °C에서 수행되었고, 효소사용량은 Celluclast 1.5L 20 FPU/ml, Novozyme-188 135 CBU/ml로 하였다. 에탄올을 생산하기 위한 발효 균주는 계대배양 후 냉장 보관된 *Saccharomyces cerevisiae*(ATTC 4175)를 사용하였다. 냉장 보관된 발효 균주는 YPD broth에서 37 °C, 38시간 동안 활성화되었다. 기질과 sodium citrate buffer solution(0.5 M, pH 4.8)을 기질농도 5%(w/v)로 혼합한 후 활성화된 균주 10%(v/v)를 접종하여 shaking incubator에서 150 rpm으로 72시간 동안 동시당화발효를 수행하였다.

2-5. 분석방법

2-5-1. 당과 리그닌 성분 분석

미국 신재생 에너지 연구소(NREL; National Renewable Energy Laboratory)에서 제시한 분석방법인 NREL procedures LAP-002에 따라 당 성분을 분석하였다. 분석할 샘플을 0.3000(\pm 0.0002) g으로 무게를 잰 후 72%(v/v)의 황산 3 ml와 충분히 혼합한 후, 30 °C에서 2시간 동안 1차 산 가수분해를 시킨다. 2시간 후 증류수 84 ml에 희석시켜 121 °C에서 2차 가수분해를 시킨다. 가수분해 된 액체를 냉각한 후 HPLC(Waters, USA)로 정량분석을 수행하였다.

리그닌 성분은 NREL procedures LAP-003에 따라 분석하였다. 분석할 샘플을 1.0000(\pm 0.0005) g으로 무게를 잰 후 72%(v/v)의 황산 15 ml와 충분히 혼합한 후 20 °C에서 2시간 동안 반응시킨다. 2시간 후 증류수를 이용해 3%(v/v)의 황산이 되게 희석시키고 4시간 동안 가열을 한다. 상온으로 식힌 뒤 도가니에 넣어 575 \pm 25 °C의 전기화로에서 발화시킨 후 잔여물의 무게를 측정하여 리그닌 성분을 계산하였다.

2-5-2. HPLC 분석

기질의 성분분석과 당화액 그리고 발효액의 분석에는 HPLC(Waters, USA)를 사용하였다. 분석에 사용된 column은 Biorad사의 Aminex HPX-87H column이었다. 검출에 사용된 detector는 Waters 410 RI detector(Waters, USA)이었다. 이동상으로는 0.005 M의 황산을 사용하였고 유속은 0.6 ml/min으로 운전되었다. Column의 온도는 60 °C이었고, detector의 온도는 50 °C이었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 볏짚의 전처리

암모니아수에 의한 침지 공정으로 3, 12, 24 그리고 72시간 동안 전처리된 볏짚 성분변화를 초기 볏짚과 비교하여 Fig. 1에서 나타내었다. 목질계 바이오매스를 구성하는 주요한 성분인 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 그리고 리그닌의 성분변화를 보면 3시간 동안 전처리된 볏짚의 경우, 초기 볏짚과 비교하여 셀룰로오스는 12.9%, 헤미셀룰로오스는 12.1% 그리고 리그닌은 59.4%의 손실이 일어났다. 12시간 동안 전처리된 볏짚의 경우에는 각각 17.7%, 22.1% 그리고 72.2%의 손실이 있었고, 24시간 동안 전처리된 볏짚의 경우에는 각각 18.4%, 27.7% 그리고 73.3%의 손실이 있었다. 또한 72시간 동안 전처리된 볏짚의 경우에는 각각 22.1%, 37.0% 그리고 76.1%의 손실이 있었다. 이를 Table 1에 나타내었다. 이러한 결과에 따르면 암

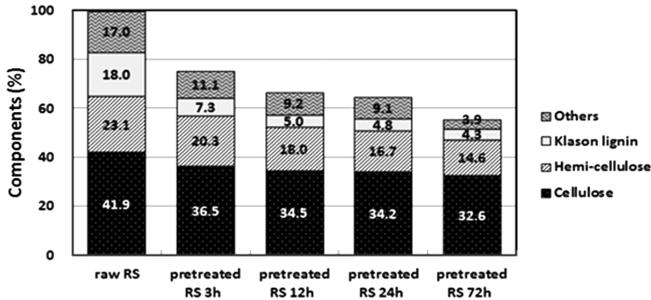


Fig. 1. Changes of major components (%) after SSA pretreatment for 3, 12, 24 and 72 h.

Table 1. Components loss (%) after SAA pretreatment for 3, 12, 24 and 72 h

	Pretreated RS 3h	Pretreated RS 12h	Pretreated RS 24h	Pretreated RS 72h
Cellulose loss (%)	12.9	17.7	18.4	22.1
Hemi-cellulose loss (%)	12.1	22.1	27.7	37.0
Klason lignin loss (%)	59.4	72.2	73.3	76.1
Solid remain (%)	75.2	66.7	64.8	55.3

RS : rice straw

모니아수에 의한 침지 공정을 적용할 경우 반응시간이 증가할수록 바이오매스의 주요 구성성분의 제거율은 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 리그닌의 제거율에 비해 셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스의 손실은 낮았다. 결과적으로 암모니아수에 의한 침지 공정은 낮은 에너지 비용으로도 효율적으로 리그닌을 제거할 수 있는 방법으로 판단되었다[10].

3-2. 효소당화

3-2-1. 효소사용량의 결정

효소당화에 사용할 효소사용량을 결정하기 위해 볏짚, 암모니아수에 의한 침지공정으로 전처리된 볏짚 그리고 비교군(Whatman no.1, α -cellulose and microcrystalline)을 각각 Celluclast 1.5L 60 FPU/ml, Novozyme-188 406 CBU/ml와 20 FPU/ml, 135 CBU/ml의 효소사용량으로 72시간 동안 온도조건 50 °C에서 당화하였다. 효소당화 후 Celluclast 1.5L 60 FPU/ml, Novozyme-188 406 CBU/ml를 사용했을 때와 효소사용량을 66% 감소시켜 Celluclast 1.5L 20 FPU/ml와 Novozyme-188 135 CBU/ml를 사용했을 경우의 최종 글루코오스 전환율(%; 초기 바이오매스의 셀룰로오스 기준)을 비교한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 효소사용량 변화에 따른 글루코오스 전환율을 비교해보면, 전처리 되지 않은 볏짚은 43.67%, Whatman no.1은 40.19% 그리고 α -cellulose는 51.08%의 당화율의 감소를 보였지만 12시간 동안 전처리된 볏짚은 8.42%, 24시간 동안 전처리된 볏짚은 15.95%의 감소를 보였다. 이러한 SAA 공정을 통하여 전처리된 볏짚의 효소당화 결과를 효소사용량 대비 글루코오스로 전환되는 당화율을 비교하였을 때, 고가인 효소들의 낮은 사용량(Celluclast 1.5L 20 FPU/ml, Novozyme-188 135 CBU/ml)으로도 당화 및 발효에 충분히 적용 가능하다고 판단되었다.

3-2-2. 볏짚의 효소당화

볶짚, 암모니아수에 의한 침지공정으로 전처리된 볏짚 그리고 비

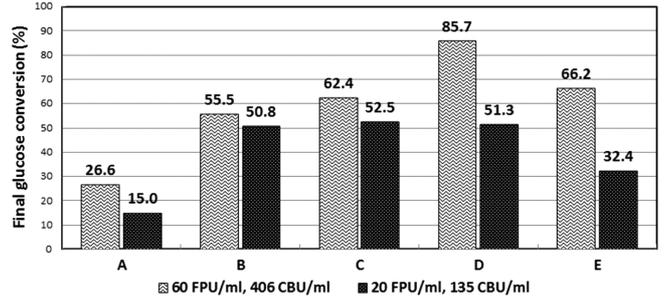


Fig. 2. Effect of enzyme dosage on the enzymatic hydrolysis of substrates for 72 h. A is raw rice straw, B is pretreated rice straw for 12 h, C is pretreated rice straw for 24 h, D is Whatman no.1 (filter paper) and E is α -cellulose. Substrate concentration 5% (w/v), pH 4.8, temperature 50 °C.

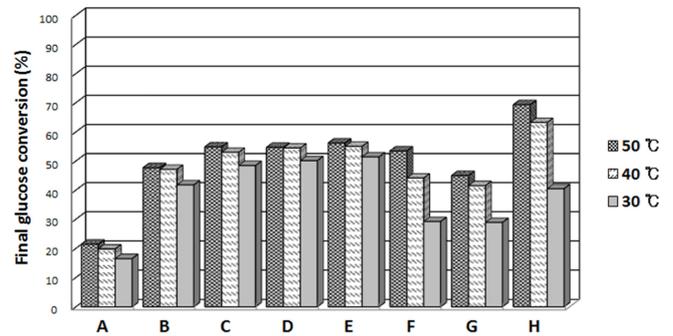


Fig. 3. Effect of pretreatment and temperature on the enzymatic hydrolysis of substrates for 72 h. A is raw rice straw, B, C, D and E are pretreated rice straw each for 3 h, 12 h, 24 h and 72 h. F is Whatman no.1, G is α -cellulose and H is microcrystalline. Substrate concentration 5% (w/v), pH 4.8, enzyme dosage Celluclast 1.5L 20 FPU/ml, Novozyme-188 135 CBU/ml.

교군(Whatman no.1, α -cellulose and microcrystalline)의 효소당화를 통해 글루코오스 전환율, 당화 온도조건과 당화 시간에 대한 전처리 효과를 파악하였다. 기질들을 Celluclast 1.5L 20 FPU/ml, Novozyme-188 135 CBU/ml로 72시간 동안 온도조건 30, 40 그리고 50 °C에서 당화를 수행하였다. 각 온도조건에서의 최종 글루코오스 전환율을 Fig. 3에 나타냈다. 온도조건 50 °C에서 볏짚과 전처리된 볏짚의 최종 글루코오스 전환율을 비교해보면 3, 12, 24 그리고 72시간 동안 SAA전처리 됨으로써 볏짚의 글루코오스 전환율이 각각 3.2, 3.4, 3.5 그리고 3.8 배 커짐을 보였다. 보편적인 효소당화 공정의 온도조건은 50 °C로 알려져 있으나, 암모니아수에 의한 침지 공정을 적용하여 전

Table 2. Decrement (%) of final glucose conversion according to change of temperature

	Decrement (%) 50 °C→40 °C	Decrement (%) 40 °C→30 °C	Decrement (%) 50 °C→30 °C
Raw RS	7.8	16.6	23.1
Pretreated RS 3 h	1.2	11.3	12.4
Pretreated RS 12 h	3.5	8.5	11.7
Pretreated RS 24 h	0.4	7.9	8.3
Pretreated RS 72 h	2.1	6.5	8.5
Whatman no.1	17.4	33.8	45.3
α -cellulose	7.8	30.4	35.8
Microcrystalline	8.8	35.9	41.6

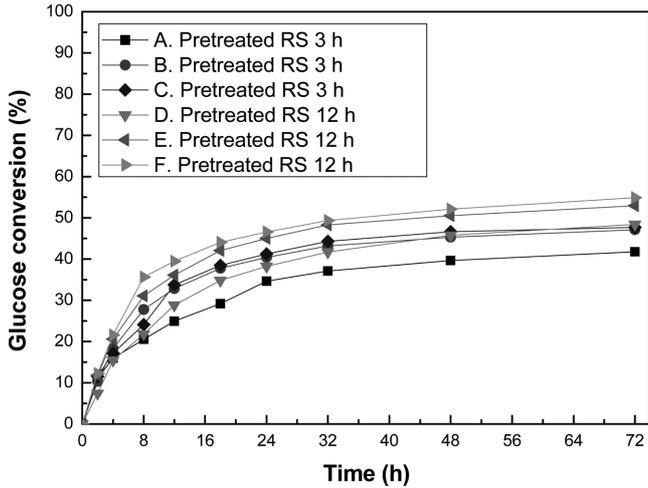


Fig. 4. Effect of pretreatment about reaction time on the enzymatic hydrolysis of pretreated rice straw. The hydrolysis temperature is that A and D are 30 °C, B and E are 40 °C, C and F are 50 °C. Substrate concentration 5% (w/v), pH 4.8, enzyme dosage Celluclast 1.5L 20 FPU/ml, Novozyme-188 135 CBU/ml.

처리된 볏짚의 경우에는 30, 40 및 50 °C의 온도조건에서 커다란 변화가 없음을 확인하였다. 온도조건이 50 °C에서 40, 30 °C까지 떨어질 경우, 전처리된 볏짚의 최종 글루코오스 전환율의 감소폭보다 비교군의 감소폭이 더 컸다. 3시간 동안 전처리된 볏짚이 50 °C에서 30 °C로 떨어질 때 12.4%, 12시간 동안 전처리된 볏짚은 11.7%, 24시간 동안 전처리된 볏짚은 8.3%, 72시간 동안 전처리된 볏짚은 8.5%의 감소를 보인 반면, 비교군인 Whatman no.1은 45.3%, α-cellulose는 35.8% 그리고 microcrystalline은 41.6%의 감소를 보였다. 이러한 결과는 발효공정에 적용되는 일반적인 온도조건인 37 °C [11]와 병행할 수 있는 30-40 °C 범위에서 효소당화공정을 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 전처리된 볏짚의 최대량의 글루코오스를 생산할 수 있는 당화시간은 24-32시간 범위에서 완료될 수 있음을 Fig. 4에 나타내었다.

3-3. 동시당화발효

볏짚, 암모니아수에 의한 침지공정으로 전처리된 볏짚 그리고 비교군(Whatman no.1, α-cellulose and microcrystalline)의 동시당화발효

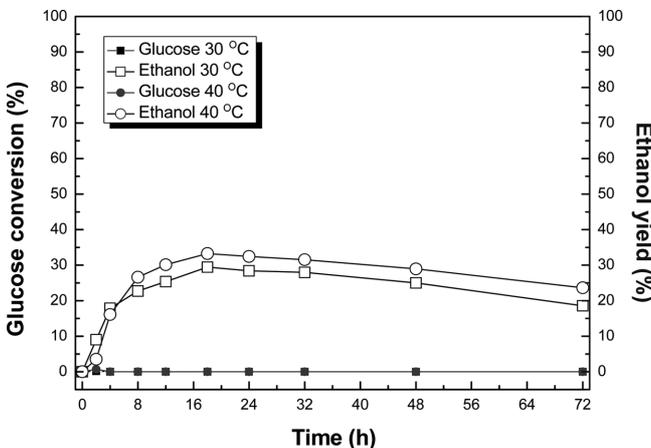


Fig. 5. Effect of temperature on the SSF of pretreated rice straw for 3 h. Substrate concentration 5% (w/v), pH 4.8.

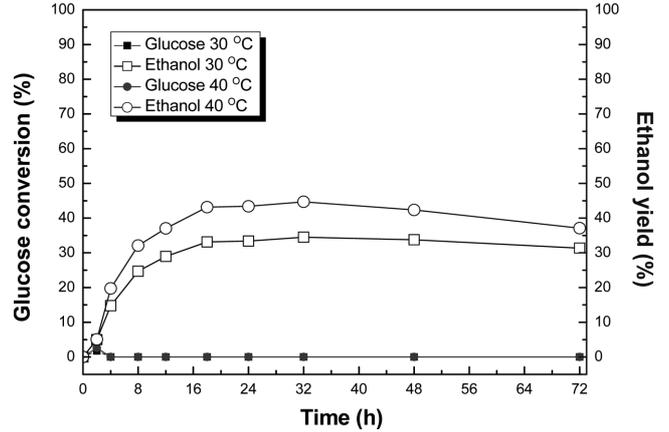


Fig. 6. Effect of temperature on the SSF of pretreated rice straw for 12 h. Substrate concentration 5% (w/v), pH 4.8.

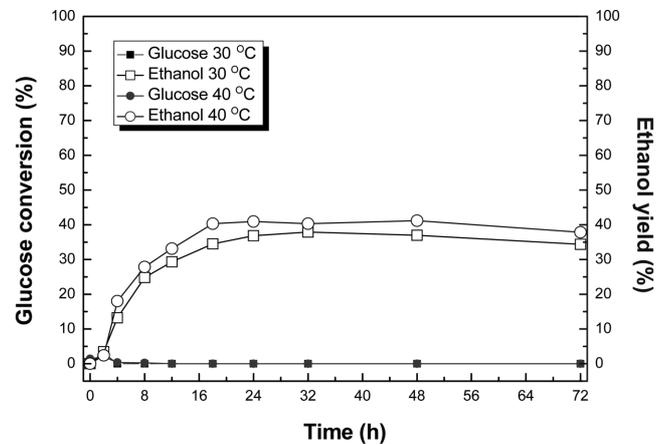


Fig. 7. Effect of temperature on the SSF of pretreated rice straw for 24 h. Substrate concentration 5% (w/v), pH 4.8.

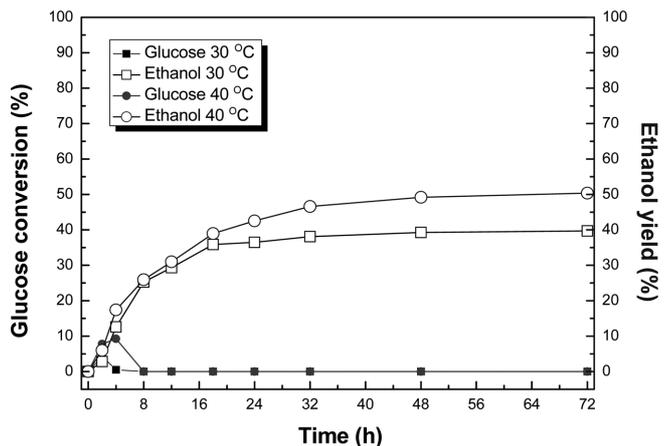


Fig. 8. Effect of temperature on the SSF of pretreated rice straw for 72 h. Substrate concentration 5% (w/v), pH 4.8.

효를 통해 반응온도조건과 동시당화발효의 시간 및 에탄올 생산에 대한 전처리 효과를 비교하였다. 동시당화발효에 적용된 효소사용량은 Celluclast 1.5L 20 FPU/ml, Novozyme-188 135 CBU/ml이었으며, 발효 균주로는 *Saccharomyces cerevisiae*를 사용하여 온도조건 30, 40 그리고 50 °C에서 72시간 동안 동시당화발효를 수행하였다. 적용

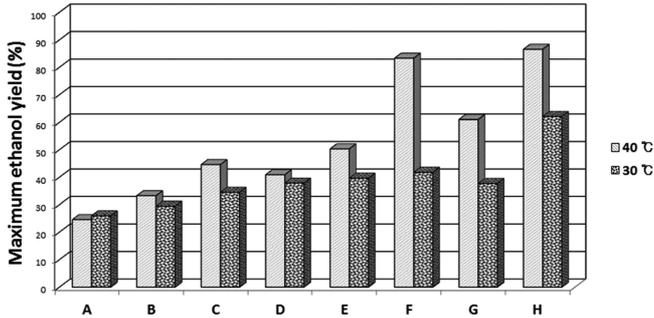


Fig. 9. Effects of pretreatment and temperature on the SSF of substrates for 72 h. A is raw rice straw, B, C, D and E are pretreated rice straw each for 3 h, 12 h, 24 h and 72 h. F is Whatman no.1, G is α-cellulose and H is microcrystalline. Substrate concentration 5% (w/v), pH 4.8.

된 각 기질(3, 12, 24 그리고 72시간 동안 침지공정으로 전처리된 볏짚) 별 동시당화발효를 30 °C와 40 °C에서 수행한 결과, 얻어지는 글루코오스 전환율과 에탄올 수율(%; 최대 글루코오스 전환율 대비 이론적 에탄올 생산수율)을 Fig. 5~8에 나타내었다. 각 온도조건에서 글루코오스 생산량의 변화를 확인해보면, 반응 초기부터 종료시점까지 최소량으로 일정하게 유지되었다. 이러한 결과로 동시당화발효과정에서 글루코오스가 생성되는 즉시 에탄올로 전환됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 반응온도조건에서 최대 에탄올 수율을 비교하여 나타내었다(Fig. 9). 반응온도조건 40 °C에서, 볏짚과 3, 12, 24 그리고 72시간 동안 전처리된 볏짚의 최대 에탄올 수율을 비교해보면, 각각 1.4, 1.8, 1.7 그리고 2.0 배 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 온도조건이 40 °C에서 30 °C로 낮아질 경우, 비교군의 에탄올 수율은 크게 감소하였으나, 전처리된 볏짚의 경우에는 크게 변화하지 않음을 확인하였다. 3시간 동안 전처리된 볏짚의 경우 반응온도조건이 40 °C에서 30 °C로 떨어질 때 11.5%, 24시간 동안 전처리된 볏짚의 경우 7.4%의 감소를 보인 반면, 비교군인 Whatman no.1은 49.8%, α-cellulose는 38.2% 그리고 microcrystalline은 28.3%의 감소를 보였다. 또한, 효소당화공정과 유사하게 암모니아수를 이용한 침지전처리된 볏짚의 동시당화발효는 반응이 24시간 이내에 종료됨을 알 수 있다. 결과적으로, 전처리된 볏짚으로 동시당화발효를 수행할 경우 기존의

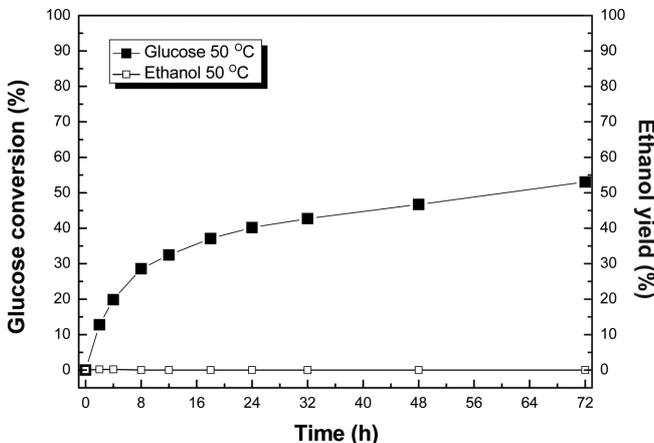


Fig. 10. Effect of temperature on the SSF of pretreated rice straw for 72 h. Substrate concentration 5% (w/v), pH 4.8, temperature 50 °C.

반응온도 및 반응시간보다[12] 낮은 온도(30 °C) 및 짧은 반응시간(24 시간) 으로도 높은 에탄올 생산 수율을 확보할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 볏짚에 암모니아수를 이용한 침지 공정(SAA; Soaking in Aqueous Ammonia)을 적용하여 전처리 효과를 알아보았다. 전처리된 볏짚의 성분분석을 통해 SAA 전처리 시 선택적으로 바이오매스의 리그닌을 제거함을 확인하였다. SAA 적용시간 별(3, 12, 24 그리고 72시간) 전처리된 볏짚을 효소당화공정(Enzymatic Hydrolysis)에 적용할 경우 Celluclast 1.5L 20 FPU/ml, Novozyme-188 135 CBU/ml의 효소사용량을 적용하여도 효율적인 글루코오스를 생산할 수 있었다. 또한 이러한 효소당화공정은 기존의 셀룰로오스 당화공정온도인 50 °C와 비교하였을 때 반응온도 30 °C 및 40 °C에서도 충분한 글루코오스 전환율을 보였고, 반응은 24-32시간 내에 종료되었다. 전처리된 볏짚을 사용하여 동시당화발효공정(SFF; Simultaneous Saccharification and Fermentation)에 적용하였을 경우, 볏짚의 전처리 시간이 증가할수록 최대 에탄올 수율이 증가하였다. 30 °C와 40 °C의 최대 에탄올 수율을 보면, SSF에 적용된 반응온도 30 °C에서도 기존의 전통적인 반응온도 40 °C와 비교하여 큰 변화가 없음을 확인하였다. 결과적으로 볏짚에 SAA 전처리를 적용함으로써 반응온도 30 °C와 40 °C에서도 당화가 수행되었고, 보편화된 동시당화발효의 반응온도보다 낮은 온도(30 °C)에서도 충분한 에탄올 생산이 가능함을 확인하였다.

감 사

본 연구는 2014학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- Lynd, L. R., Elander, R. T. and Wyman, C. E., "Likely Features and Costs of Mature Biomass Ethanol Technology," *Biochem. Biotechnol.*, **57/58**, 741-761(1996).
- Lee, D., Yu, A. H. C., Wong, K. K. Y. and Saddler, J. N., "Evaluation of the Enzymatic Susceptibility of Cellulosic Substrates using Specific Hydrolysis Rates and Enzyme Adsorption," *Biochem. Biotechnol.*, **45/46**, 407-415(1994).
- Mosier, N., Wyman, C. E., Dale, B. D., Elander, R. T., Lee, Y. Y., Holtzapple, M. and Ladisch, C. M., "Features of Promising Technologies for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass," *Biores. Technol.*, **96**, 673-686(2005).
- Kim, T. H., "Comparison of Inhibition Effects of Various Isolated Lignins on Enzymatic Hydrolysis of Cellulose," *Korean J. Chem. Eng.*, **29**, 82-88(2012).
- Kim, T. H. and Lee, Y. Y., "Pretreatment of Corn Stover by Soaking in Aqueous Ammonia at Moderate Temperature," *Biochem. Biotechnol.*, **137/140**, 81-92(2007).
- Kim, T. H. and Lee, Y. Y., "Fractionation of Corn Stover by Hot-Water and Aqueous Ammonia Treatment," *Biores. Technol.*, **97**, 224-232(2006).
- Mooney, C. A., Mansfield, S. D., Touhy, M. G. and Saddler, J. N., "The Effect of Initial Pore Volume and Lignin Content on the Enzymatic Hydrolysis of Softwoods," *Biores. Technol.*, **64**,

- 113-119(1998).
8. Tao, L., Elander, A. Aden, R. T., Pallapolu, V. R., Lee, Y. Y., Garlock, R. J., Balan, V., Dale, B. E., Kim, Y. M., Mosier, N. S., Ladisch, M. R., Falls, M., Holtzapple, M. T., Sierra, R., Shi, J., Ebrik, M. A., Redmond, T., Yang, B., Wyman, C. E., Hames, B., Thomas, S. and Warner, R. E., "Process and Technoeconomic Analysis of Leading Pretreatment Technologies for Lignocellulosic Ethanol Production using Switchgrass," *Biores. Technol.*, **102**, 11105-11114(2011).
 9. Park, Y. C. and Kim, J. S., "Enzymatic Hydrolysis Characteristics of Pretreated Rice Straw by Aqueous Ammonia for Bioethanol Production," *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**, 470-474(2011).
 10. Ko, J. K., Bak, J. S., Jung, M. W., Lee, H. J., Choi, I. G., Kim, T. H. and Kim, K. H., "Ethanol Production from Rice Straw using Optimized Aqueous-Ammonia Soaking Pretreatment and Simultaneous Saccharification and Fermentation Processes," *Biores. Technol.*, **100**, 4374-4380(2009).
 11. Skotnicki, M. L., Lee, K. J., Tribe, D. E. and Rogers, P. L., "Comparison of Ethanol Production by Different *Zymomonas* Strain," *Environ. Microbiol.*, **41**, 889-893(1981).
 12. Lin, Y. and Tanaka, S., "Ethanol Fermentation from Biomass Resources: Current State and Prospects," *Microbiol. Biotechnol.*, **69**, 627-642 (2006).