

*Laminaria japonica*를 이용하여 탄수화물과 환원당 생산을 위한 바이오리파이너리 공정 특성

김지현 · 하정협^{*,†} · 최석순^{**} · 박종문^{***}

(주)씨케이바이오텍, *평택대학교 환경융합시스템학과, **세명대학교 바이오환경공학과, ***포스텍 화학공학과
(2019년 8월 27일 접수, 2019년 9월 10일 심사, 2019년 9월 17일 채택)

Characteristics of Biorefinery Process Using *Laminaria japonica* for the Production of Carbohydrate and Reducing Sugar

Ji Hyun Kim, Jeong Hyub Ha^{*,†}, Suk Soon Choi^{**}, and Jong Moon Park^{***}

CK Translational Research Center, CK Biotech, Seoul 03722, Korea

^{*}Department of Integrated Environmental Systems, Pyeongtaek University, Pyeongtaek 17869, Korea

^{**}Department of Biological and Environmental Engineering, Semyung University, Jecheon 27136, Korea

^{***}Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea

(Received August 27, 2019; Revised September 10, 2019; Accepted September 17, 2019)

초 록

본 연구에서는 호기성 혼합 균주의 기질로서 *Laminaria japonica*를 사용하여 수용성 당과 환원당을 생산하였다. *Laminaria japonica*는 대표적인 갈조류 바이오매스로 높은 생장율, 저렴한 가격 및 탄수화물 함량이 높은 특성을 가지고 있다. 본 실험에 적용된 당화공정은 호기성 혼합 균주를 배양 및 순응시켜서 안정화하였다. 수용성 당과 환원당의 생산이 각기 다른 수리학적 체류시간에서 관찰되었으며, 당화 효율은 수리학적 체류시간을 낮출수록 증가하였다. 또한, 연속식 공정을 이용하여 1 day의 수리학적 체류시간 조건에서 최대 당화 효율을 나타내었으며, 17.96 g/L/day의 가용화된 탄수화물과 4.30 g/L/day의 환원당을 수득하였다. 그러나 수리학적 체류시간을 0.5 day로 낮추었을 때 당화수율이 급격히 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 실험결과를 통하여 *Laminaria japonica*가 바이오리파이너리 공정을 통하여 유용물질을 생산하기에 매우 적합한 바이오매스임이 확인되었다. 결론적으로 혼합균주를 이용한 연속 생물학적 전처리 시스템이 바이오리파이너리 기술에 성공적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this study, *Laminaria japonica* was used as a substrate for a mixed aerobic microbial consortium. *Laminaria japonica* is well-known as a representative brown algal biomass possessing advantages of cheap cost, and high productivity and carbohydrate content. A biological saccharification system was established by inoculating and enriching the mixed aerobic microbial consortium. Production of the soluble carbohydrate and reducing sugar at different hydraulic retention times (HRT) was observed. The efficiency of saccharification increased according to the decrease of HRT. The maximum saccharification yield in a continuous biological pretreatment process was 17.96 and 4.30 g/L/day for the soluble carbohydrate and reducing sugar, respectively at the HRT of 1 day. In contrast, the staccharification yield decreased drastically at the HRT of 0.5 day. Experimental results indicate that *Laminaria japonica* is a promising material for the production of useful products, in particular for the saccharification through a biorefinery process. It can thus be concluded that a continuous biological pretreatment process using a mixed cultivation system can be successfully employed for the biorefinery technology.

Keywords: Algal biomass, Biological pretreatment, Microbial consortium, Biorefinery, Saccharification

1. 서 론

대부분의 화학산업 소재의 원료물질로 사용되고 있는 석유자원의 의존성이 심화됨에 따라 원유매장량이 빠르게 줄어들고 있으며 2020년 이후에는 원유의 생산량을 증가시키고 싶어도 늘릴 수 없는 피크 오일에 도달할 가능성이 대두되고 있는 실정이다[1]. 산업화 이후 화학산업 소재의 원료, 에너지원으로 사용된 석유, 석탄, 천연가스 등의

† Corresponding Author: Pyeongtaek University,
Department of Integrated Environmental Systems, Pyeongtaek 17869, Korea
Tel: +82-31-659-8309 e-mail: jhha@ptu.ac.kr

화석연료는 연소 시 발생하는 황산화물, 질소화합물, 일산화탄소 등의 환경오염물질을 배출하여 대기, 수질 및 토양 오염을 유발, 오존층 파괴 등의 문제점을 야기하고 인류의 건강을 위협하고 있다. 또한 대표적인 화석연료 연소 산화물인 이산화탄소 농도의 급격한 증가는 지구 온난화의 주범으로 알려졌으며, 이에 따른 기후변화와 해수면 상승은 향후 우리에게 또 하나의 재앙으로 다가올 가능성이 높은 실정이다.

최근에는 석유화학 기반의 경제를 대체하는 미래 선택으로 바이오매스의 전환을 통한 에너지 생산 공정을 개발하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 바이오매스를 이용한 화학소재, 정밀화학제품 등의 개발은 탈 석유시대의 필수불가결한 대안으로 부각되고 있다[2]. 이에 필요한 바이오 유용산물을 얻기 위해 당질계(사탕수수) 및 전분질계(옥수수, 감자) 1세대 바이오매스가 사용되었으나 식량자원 수급에 악영향을 끼칠 수 있기 때문에 최근 1세대 바이오매스 사용에 대해 회의적이고[3], 2세대의 목질계 바이오매스인 리그노셀룰로오스는 리그닌을 분리 및 제거하기 위해 복잡하고 고비용의 전처리 과정을 거쳐야 한다는 단점이 있으며[4-6], 육상 바이오매스만을 대상으로 하는 것은 재배면적의 포화로 인해 발생하는 환경오염과 바이오매스 전환과정에서의 경제성 문제점도 대두되고 있다. 따라서 총에너지 전환수율이 높으며 이산화탄소 저감에도 효과가 있고 환경문제와 자원고갈의 문제를 해소할 수 있는 바이오매스의 확보가 중요시되고 있다.

3세대 바이오매스로 분류되는 해조류는 여타 바이오매스에 비해 생장속도가 높아 원료 수급이 용이하고 바다를 이용하기 때문에 재배가용면적이 넓으며 총에너지 전환수율이 높아 대체 바이오매스로 주목받고 있다[7-9]. 대형조류는 홍조류, 갈조류, 녹조류로 나누어지며, 이들의 성장과 구성성분은 온도에 크게 영향을 받기 때문에 계절별, 지역별로 두 개체가 다르게 결정된다. 해양 바이오매스로 대표적인 갈조류의 경우 알긴산(alginate), 라미나란(laminaran) 등의 난분해성 다당류와 만니톨(mannitol) 등의 단당류가 주요 탄수화물이며 이 중 알긴산과 만니톨이 건조 중량대비 구성함량이 높다[10,11]. 따라서 조류별 각 성분의 특징에 따라 당화, 발효 공정이 달라지므로 융·복합적 접근을 통하여 효율적인 바이오리파이너리 생산 시스템을 개발하는 것이 필요하다. 한편 대체 바이오매스로서 해조류가 갖는 가장 큰 장점은 저렴한 원가와 공급의 안정성에 있으며, 전분계, 목질계 바이오매스나 석유자원에 비해 해조류 바이오매스가 자원의 활용 측면에 있어서 경제적 비교우위를 가지고 있다.

최근, 갈조류 다당류의 생물학적 전처리를 위해 갈조류의 분쇄물에 특정 미생물을 첨가하거나 유전자 조작된 미생물을 이용하는 생물학적 전처리 공정이 개발되었으나[12,13], 다당류의 분해속도가 늦고 만니톨과 같은 유용한 단당류가 소비되는 문제점이 있으며, 유전자 변형 균주의 경우 통제된 연구실에서 벗어날 경우 잠재적 위험에 대해 우려가 있어 왔다. 따라서 본 연구에서는 갈조류 중 우리나라에서 가장 많이 수확되고 있는 다시마를 실험에 적용하여 고부가가치 산물을 생산하기 위한 기질 생산의 일환으로 생물학적 연속 당화생산시스템을 개발하고자 하였다. 또한 회분 및 연속공정을 도입하여 전처리 효율의 최적화 조건을 확립하고 이를 바탕으로 해조류 고상 바이오매스의 저비용 및 고효율 당화 조건을 알아보았다.

2. 실험

2.1. 실험재료

본 실험에서 사용된 완전 혼합 반응조(continuous stirred tank reactor, CSTR)의 식종균은 갈조류를 바이오매스로 한 반응조에 하수처리장의

Table 1. Raw Material Characteristic

Raw material characteristic	<i>L. japonica</i> (30 g/L)	<i>L. japonica</i> solid phase (per L)
TCOD (g/L)	21.4	32.1
SCOD (g/L)	10.23	7.0
Soluble carbohydrate (g/L)	2.54	1.96
Reducing sugar (g/L)	0.01	0.01
TN (mg/L)	387.5	800
TP (mg/L)	80	155
TS (g/L)	28.4	46.4
VS (g/L)	20.0	34.6
Inorganic matter (%)	29.6	25.4

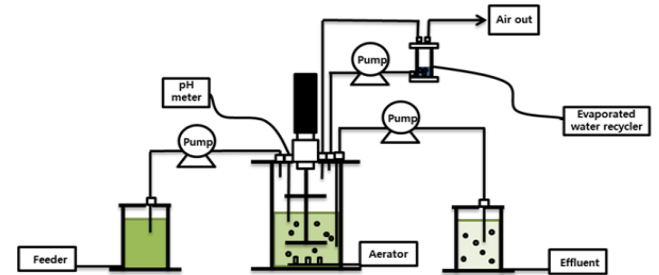


Figure 1. Schematic diagram of lab-scale biological biorefinery process.

슬러지를 혼합균주균으로 접종하고 35 °C의 온도와 pH 7.0에서 200 rpm으로 교반하여 호기조건에서 배양하였다. 본 반응조에는 갈조류 (*L. japonica*)를 기질로 하여 35 °C 온도 조건 및 호기성 상태에서 한 달 동안 미생물을 순용시켰다. 순용 반응조의 활동 부피는 1 L로 하였고 90% (v/v)의 갈조류 기질을 미생물 성장을 위해 일주일에 한 번씩 공급하였다. 유입 갈조류 기질의 성상은 Table 1에 정리하였다.

2.2. 실험장치 및 운전

해조류 바이오매스의 당화를 위한 실험실 규모의 처리 공정의 모식도는 Figure 1과 같다. 시스템 운영을 위해 다시마는 영양분과 전처리 없이 건조다시마와 수돗물을 균일하게 섞어 고상과 액상을 분리하고 만니톨이 가용화된 액상부분을 제외한 다당류가 고농도로 농축된 고상 바이오매스를 제조 후 공정 시스템의 기질로써 연속적으로 투입하였고 호기발효를 통해 당화액을 생산하기 위해 혼합균주를 호기조건과 고상 기질에서 본 반응조에 접종 후 멸균 처리 없이 107 day간 연속적으로 안정되게 운전하였다. 반응조의 온도는 35 °C로 유지되었으며 활동부피는 2 L로 하였다.

연속 복합공정 시스템 최적화에 앞서 고상 바이오매스를 회분식 생물학적 전처리 공정에서 가용화 당량 및 환원당 생산을 최적화하였다 (Table 2). 해조류 당화 복합 처리 공정은 총 4단계로 운전되었으며, 회분 공정을 기반으로 연속식 공정에서 수리학적 최후 시간을 4 day부터 순차적으로 2, 1, 0.5 day (17.3, 34.6, 69.2, 138.4 g/L/day of volatile solid)로 낮추어 가며 최적의 당화가 이루어지는 시점을 확인하였다. 수리학적 체류시간을 4 day로부터 절반씩 낮출수록 당화는 점차 증가하는 양상을 보였다. 각 단계별로 정상상태에 이르기까지 약 30 day간 운전하였다.

Table 2. Effect of Biological Pretreatment at Temperature of 25 °C

Analytical methods	Biological pretreatment			
	Medium	Inoculant	Batch initiation (0 h)	Batch maximum point (36 h)
TS (g/L)	46.4	21.8	44.3	33.0
VS (g/L)	34.6	14.0	34.1	23.7
SCOD (g/L)	7.0	1.2	6.7	9.7
TCOD (g/L)	32.1	32.1	31.7	26.5
Solubilization (SCOD/TCOD)	0.22	0.04	0.21	0.37
Soluble carbohydrate (g/L)	1.96	1.86	2.04	20.37
Reducing sugar (g/L)	0.01	0.02	0.01	1.42
VFA (g/L)	n.d ^a	n.d	n.d	1.31 ^b

Note: Data was the means of duplicates.

^aa = Not detected.

^bb = VFA was the means of total short chain acid: acetic acid, propionic acid, lactic acid, formic acid, and etc.

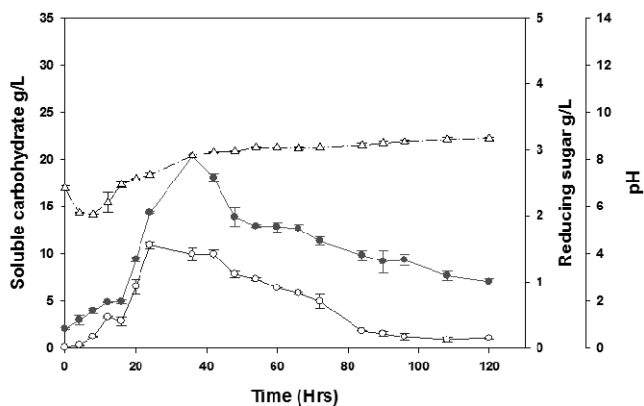


Figure 2. Batch reactor performance of soluble carbohydrate and reducing sugar production by biological treatment; ●: soluble carbohydrate, ○: reducing sugar, △: pH.

2.3. 분석방법

Total solid (TS), volatile solid (VS), total chemical oxygen demand (TCOD), soluble chemical oxygen demand (SCOD)은 standard method [14]에 준하여 분석하였으며, 수용성 탄수화물은 phenol-sulfuric acid method[15]를 이용하여 분석하였다. 환원당의 측정에는 말토스(maltose)를 표준으로 하여 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) 방법을 사용하여 측정하였다[16]. 잔류 만니톨(mannitol)과 다양한 유기산의 분석에는 high-performance liquid chromatography (HPLC) (Model 1100, Agilent Inc., USA)를 이용하여 연속적으로 모니터링하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 용존성 탄수화물 및 환원당 생산

실험기간 동안 회분식 반응조 내의 pH 및 용존성 탄수화물, 환원당의 변화양상을 Figure 2에 나타내었다. 본 실험에서는 갈조류 바이오매스를 혼합 균주를 이용한 생물학적 전처리 효과를 알아보기 위해 혼합 미생물군을 이용하여 30~35 °C로 유지하였으며, 120 h 동안 pH 적정 없이 1.0~5.0 L/min의 공기를 에어펌프로 넣어 주어 증온호기 조건을 유지하였다. 갈조류 바이오매스 고상을 생물학적 전처리를 수

행 시 36 h에서 20.73 g/L로 가장 높은 가용화 당량을 얻었으며 환원당 또한 1.42 g/L의 측정치를 얻었다. 따라서 혼합균주를 이용한 생물학적 전처리 방법이 고농도의 고상으로부터 선행연구에서 행해진 물리적, 화학적 전처리보다 높은 수율의 당량을 얻을 수 있음이 확인되었다. 또한, 생물학적 당화과정은 기존 물리적, 화학적 당화과정에서 행해진 중화과정을 거치지 않고 전처리가 가능하며, 또한 가수분해 촉매 및 높은 열을 투입하지 않고 상온에서 자체 생성되는 당화효소에 의해 가용성의 단당, 올리고당 및 다당체를 생산하여 발효공정에 사용될 기질을 용이하게 생산할 수 있다[8,17].

회분식 반응조에서 사용된 것과 동일한 기질을 사용하여 연속식 공정에서 당화 실험을 107 day 동안 관찰하였다(Figure 3). 수리학적 체류시간을 4 day로부터 절반씩 시간을 낮출수록 당화는 점차 증가하는 양상을 보였다. 연속식 공정을 수행했을 때 1 day의 수리학적 체류시간의 조건에서 최대 당화 효율을 보였으며 반응기가 안정화된 후 17.96 g/L의 가용화된 탄수화물과 4.30 g/L의 환원당이 측정되었다. 이 결과는 기존의 물리적, 화학적 전처리 대비 1.08배 높은 가용성 탄수화물과 3.84배 높은 환원당을 수득함으로써 높은 수율의 당량이 확인되었다[8]. 하지만 수리학적 체류시간을 0.5 day로 낮추었을 때 반응기로 유입되는 고상 바이오매스의 당화 효율이 급격히 떨어지는 현상을 확인할 수 있었다. 이것은 유입되는 고상 바이오매스가 미생물에 의해 분해되는 당화 속도보다 빠르며, 유출되는 처리산물 중에 당화에 관련된 미생물이 상당량이 포함되어 있음을 예상할 수 있다. 또한 수리학적 체류시간 0.5 day에서 당화 효율이 급격히 떨어지는 원인 중 하나로 고농도의 고상 바이오매스에서 액화되는 비율이 상당히 줄어들기 때문에 교반에 의한 산소 전달 효율이 급격히 떨어진다. 따라서 고상 바이오매스의 상당 부분이 남아 있게 되며 수용화 되는 당화 효율이 줄어들게 된다.

생물학적 전처리 공정에서 적절한 pH 유지는 관련 미생물의 활성도 유지에 중요하며, 이는 공정 최적화와 효율 향상에 직접적인 관련이 있다. Figure 3에는 본 실험 기간 동안의 pH의 변화양상이 나타나 있다. Figure 3에는 본 실험 기간 동안의 pH의 변화양상이 나타나 있다. 4 day의 수리학적 체류시간의 조건에서는 pH는 8.3 근처로 유지되었으며, 수리학적 체류시간을 4 day로부터 절반씩 시간을 낮출수록 pH는 점차 감소하는 양상을 보였으며, 1 day의 수리학적 체류시간의 조건에서 pH가 6.0 정도의 안정적인 값을 유지하였다. 이는 일반적인 당화공정이 안정적으로 운전되는 범위의 pH로서[8], 본 실험이 진

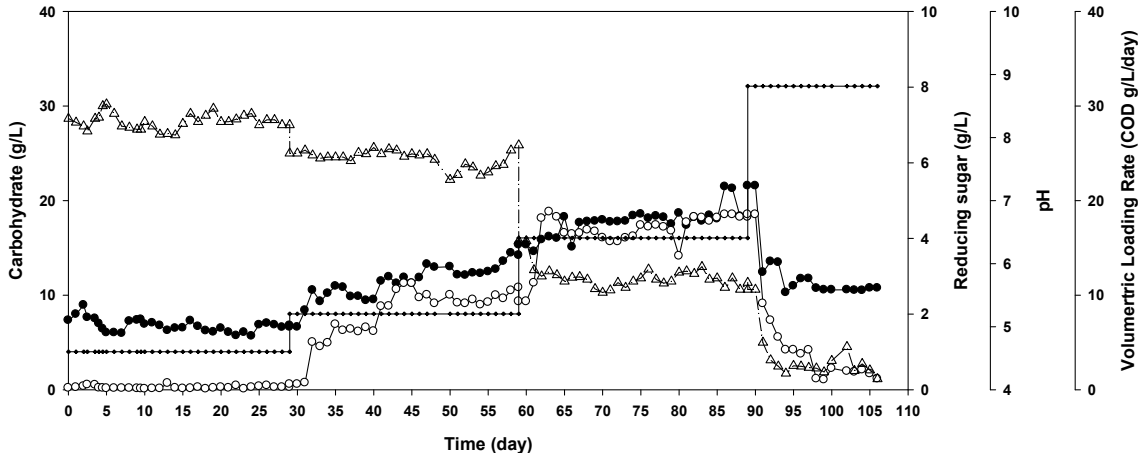


Figure 3. Continuous profiles of soluble carbohydrate and reducing sugar production in the CSTR system from *L. japonica*; ●: soluble carbohydrate, ○: reducing sugar, △: pH, ◆: VLR (total COD/L/day).

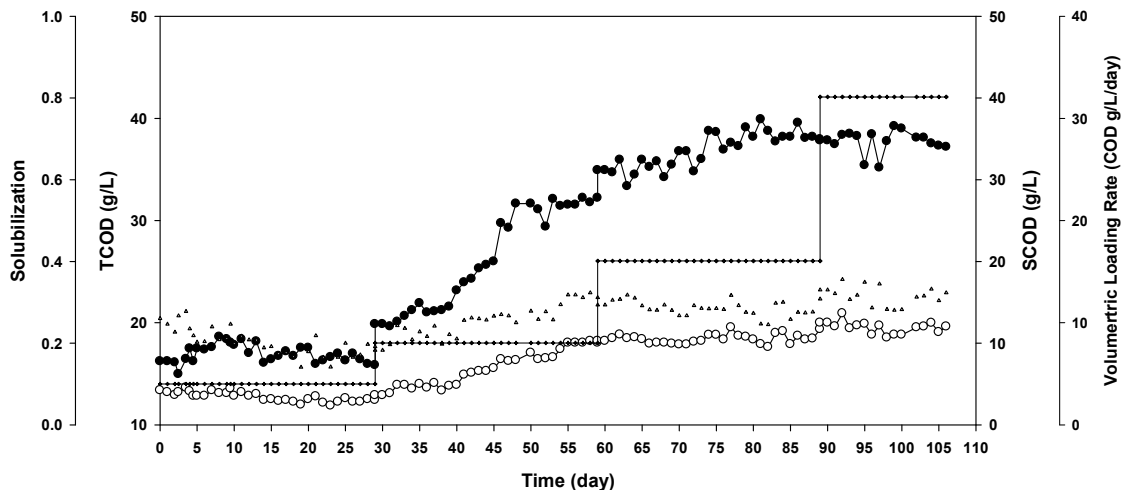


Figure 4. Continuous profiles of TCOD, SCOD, and solubilization in the CSTR system from *L. japonica*; ●: TCOD, ○: SCOD, △: solubilization, ◆: VLR (total COD/L/day).

행되는 동안 생물학적 전처리 공정의 운전이 안정적으로 유지되고 있었음을 의미한다. 하지만 수리학적 체류시간을 0.5 day로 낮추었을 때 반응기 pH는 급격히 떨어져 4.3 근처로 유지되었으며 당화 효율이 급격히 줄어드는 현상을 확인할 수 있었다.

3.2. TCOD, SCOD 및 용존성 물질 변화

연속식 공정의 운전 기간 중 TCOD, SCOD 및 가용화의 변동양상을 Figure 4에 나타내었다. Figure 4에서 보여진 바와 같이 생물학적 전처리를 적용한 1단계에서 TCOD의 농도는 17 g/L 정도의 농도를 나타냈으며, SCOD 농도는 5 g/L의 농도를 나타냈다. 반면 수리학적 체류시간을 4 day로부터 절반씩 시간을 낮춘 2~4단계에서는 수리학적 체류시간을 낮출수록 SCOD는 점차 증가하는 양상을 보였다. 특히 1과 0.5 day의 수리학적 체류시간의 조건에서 최대 가용화 효율을 보여, 반응기에서 11 g/L 이상의 가용화된 SCOD가 측정되었다. 이것은 TCOD 성분이 반응조에서 호기성 혼합 미생물에 의해 가용성 물질로 잘 분해되고 당 생성과정이 잘 이루어짐을 보여준다.

실제로, 갈조류 바이오매스에서 탄수화물과 환원당은 SCOD의 구성요소 중 하나이므로 SCOD의 경우 생물학적 전처리를 적용함에 따

라 반응조 내에서의 농도가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 생물학적 전처리에 의해 갈조류 바이오매스의 주요 구성요소인 세포들이 깨지고, 그로 인해 외부로 방출된 효소에 의해 세포의 구성기관들이 지속적으로 분해되면서 그 결과물로서 탄수화물과 환원당이 증가하는 것으로 보인다. 일반적으로 갈조류 바이오매스는 호기 미생물이 분해하는 효소에 의해 탄수화물, 환원당, 유기산 및 암모니아로 분해된다[8]. 본 실험에서는 1단계에서부터 4단계에 걸쳐 수리학적 체류시간을 낮출수록 많은 양의 갈조류 바이오매스가 분해되어 가용화율이 증가되는 것을 볼 수 있다. 이는 본 실험에서 운전한 연속 처리공정이 생물학적 전처리에 의해 갈조류 바이오매스를 수용성 유용물질로 효율적으로 전환하고 있음을 보여준다.

3.3. TS와 VS의 변화

실험기간동안 각 반응조 내의 TS 및 VS의 변화양상을 Figure 5에 나타내었다. 유입 TS는 1단계에서 4단계에 이르기까지 고상 갈조류 바이오매스의 부하율이 증가함에 따라 단계적으로 상승하는 것을 알 수 있다. Figure 5에서 볼 수 있듯이 1단계에서 2단계까지는 고상 갈조류 바이오매스의 TS 농도가 26 g/L에서 35 g/L로 증가하여 반응조

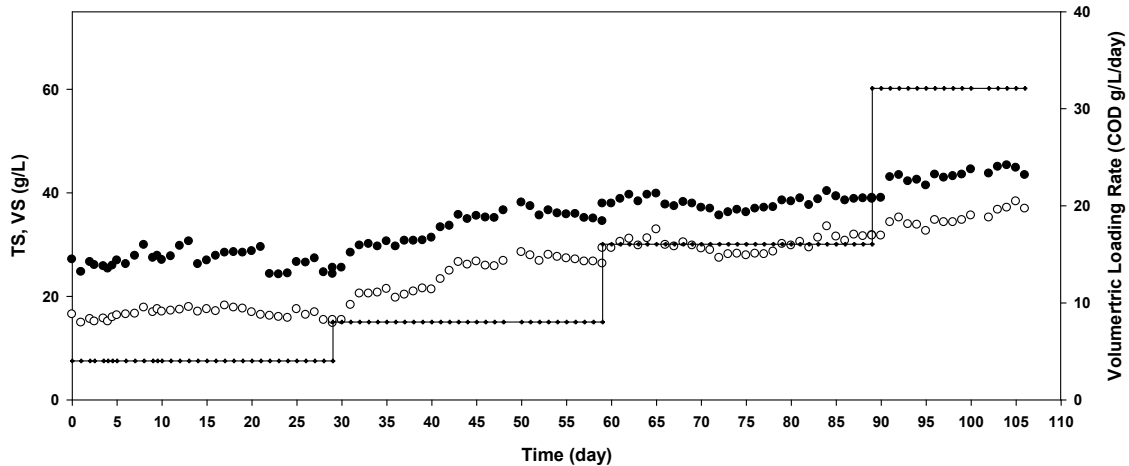


Figure 5. Continuous profiles of TS, VS in the CSTR system from *L. japonica*; ●: TS, ○: VS, ◆: VLR (total COD/L/day).

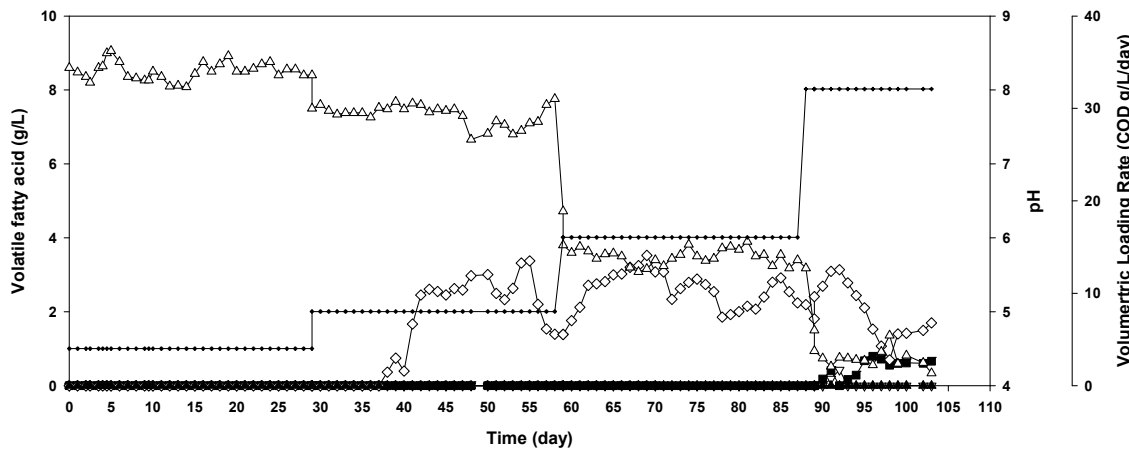


Figure 6. Continuous profiles of volatile fatty acid production in the CSTR system from *L. japonica*; ▽: succinic acid, ■: lactic acid, ◇: acetic acid, ▲: propionic acid, △: pH, ●: butyric acid, ◆: VLR (total COD/L/day).

에서 안정적으로 유지되는 양상을 보이고 있으며, 1과 0.5 day의 수리학적 체류시간을 적용한 3, 4단계에서는 TS 농도가 더 증가하여 38 및 42 g/L의 농도를 보여주고 있다. 본 연구에서 기질로 사용된 갈조류 바이오매스는 2세대 바이오매스가 지닌 난분해성 리그닌이 없으므로 유기 고상 혼합물 TS 성분을 효율적으로 생물학적 전처리를 하여 당화 효율을 높이고자 하였다[10].

VS는 TS 중에서 유기물에 해당하는 부분으로서 일부분 미생물과 유기성 고형물이 포함되어 있다. 본 실험기간 동안의 VS 농도의 변화 양상은 Figure 5에 나타내었다. 반응조의 VS 변화율은 TS와 거의 유사한 양상을 보이고 있으며, 그림에서 알 수 있듯이, 반응조에서 농도가 TS에 비해 VS가 좀 더 낮았고 VS의 농도는 TS의 70% 이상 유지하였다. VS 성분은 알긴산과 라미난란 등의 난분해성 다당류와 만니톨 등의 단당류를 포함하고 있으며[8,18], 이 중 알긴산과 만니톨이 구성함량이 높다.

3.4. 유기산 생성

실험 기간 중 연속 공정에서의 유기산 축적을 Figure 6에 나타내었다. 반응에서 SCOD 성분은 가수분해 과정을 통해 amino acids나 sugars와 같은 수용성 단분자 물질로 바뀌게 되며, 이러한 성분들은 다시 미생물의 효소에 의해 유기산 생성과정을 통해 유기산으로 전환될 수

있다. 유기산 축적은 반응조 내 pH의 감소가 주원인이며, 유용물질 생성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

최근 해조류 대상의 생물학적 전환 공정에 관한 연구에 의하면 증온 호기 소화를 통한 유기산 생성이 가능한 것으로 보고되었으나, 유기산 생성 후 반응조 내 우점종으로 알려진 *Bacillus*종에 의해 급격히 소모되는 것으로 알려졌다[19]. 그러나 상대적으로 짧은 수리학적 체류시간을 가진 2단계와 3단계에서는 *Acetobacter*와 *Enterobacter*종의 증가로 인한 급격한 acetic acid의 축적이 관찰되었고, 이는 Figure 6에 보여진 바와 같이 pH의 감소와 부하율의 증가로 인한 유기산의 축적을 나타내고 있다. 반면 수리학적 체류시간이 가장 낮은 4단계에서는 acetic acid가 감소하였고, butyric acid가 증가하는 경향을 보였다.

4. 결 론

해조류 고상 바이오매스의 저비용, 친환경, 및 효율적인 당화를 이루기 위해 생물학적 전처리 공정 적용가능성을 알아보려고 바이오리파이너리 공정을 설치 및 운영한 결과, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 순유 기간 후 연속 증온 호기 공정에서 6.0~8.3의 안정적인 pH 값을 유지하였다.

(2) 회분식 반응조 내 고상 갈조류 바이오매스를 생물학적 전처리를 수행 시 36 h에서 20.73 g/L로 가장 높은 가용화 당량을 얻었으며 환원당 또한 1.42 g/L의 측정치를 얻었다.

(3) 연속식 공정을 수행했을 때 고형물 농도는 순응 기간 후 일정한 값을 유지하는 것을 관찰하였고, 1 day의 수리학적 체류시간의 조건에서 최대 당화 효율을 보였으며 반응기가 안정화된 후 17.96 g/L의 가용화된 탄수화물과 4.30 g/L의 환원당이 측정되었다.

(4) 상대적으로 짧은 수리학적 체류시간에서는 acetic acid의 축적이 관찰되었으며 이러한 유기산의 축적은 반응조 내 pH의 감소가 주원인으로 확인되었다.

(5) 본 연구에서는 각 반응조의 다양한 미생물의 적용 및 해조류 종류에 따른 연속 공정 효율의 변화에 대한 추가 실험이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2016학년도 평택대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. P. S. Nigam and A. Singh, Production of liquid biofuels from renewable resources, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **37**, 52-68 (2011).
2. B. Dien, M. Cotta, and T. Jeffries, Bacteria engineered for fuel ethanol production: Current status, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **63**, 258-266 (2003).
3. K. A. Jung, S.-R. Lim, Y. Kim, and J. M. Park, Potentials of macroalgae as feedstocks for biorefinery, *Bioresour. Technol.*, **135**, 182-190 (2013).
4. A. Hendriks and G. Zeeman, Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass, *Bioresour. Technol.*, **100**, 10-18 (2009).
5. Y. Sun and J. Cheng, Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review, *Bioresour. Technol.*, **83**, 1-11 (2002).
6. R. E. Sims, W. Mabee, J. N. Saddler, and M. Taylor, An overview of second generation biofuel technologies, *Bioresour. Technol.*, **101**, 1570-1580 (2010).
7. P. Fasahati and J. J. Liu, Process simulation of bioethanol production from brown algae, *Cellulose*, **6**, 6-13 (2012).
8. H. R. Park, *Production of Organic Acids from Seaweed Biomass (Laminaria japonica) using a Continuous Mixed Culture System*, Graduate School of Pohang University of Science and Technology. MS Thesis, Pohang, Korea (2012).
9. S. Fernando, S. Adhikari, C. Chandrapal, and N. Murali, Biorefineries: Current status, challenges, and future direction, *Energy Fuel*, **20**, 1727-1737 (2006).
10. H. A. Kim, *Enterobacter sp. JMP3, a Potent Bacterium for the Production of Value Added Products from Marine Algal Biomass, Laminaria japonica*, Pohang University of Science and Technology. MS Thesis, Pohang, Korea (2011).
11. J. Cronshaw, A. Myers, and R. Preston, A chemical and physical investigation of the cell walls of some marine algae, *Biochim. Biophys. Acta*, **27**, 89-103 (1958).
12. F. A. Keller, J. E. Hamilton, and Q. A. Nguyen, Microbial pretreatment of biomass. *Appl. Biochem. Biotech.*, **105**, 27-41 (2003).
13. L. Ge, P. Wang, and H. Mou, Study on saccharification techniques of seaweed wastes for the transformation of ethanol, *Renew. Energy*, **36**, 84-89 (2011).
14. APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., American Public Health Association (APHA), Washington DC, USA (1998).
15. M. Dubois, K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. T. Rebers, and F. Smith, Colorimetric method for determination of sugars and related substances, *Anal. Chem.*, **28**, 350-356 (1956).
16. R. Bottle and G. Gilbert, The use of alkaline reagents to determine carbohydrate reducing groups, *Analyst*, **83**, 403-406 (1958).
17. R. P. John, G. Anisha, K. M. Nampoothiri, and A. Pandey, Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol, *Bioresour. Technol.*, **102**, 186-193 (2011).
18. M. Daroch, S. Geng, and G. Wang, Recent advances in liquid biofuel production from algal feedstocks, *Appl. Energy*, **102**, 1371-1381 (2013).
19. H. M. Jang, J. H. Ha, J. M. Park, M. S. Kim, and S. G. Sommer, Comprehensive microbial analysis of combined mesophilic anaerobic-thermophilic aerobic process treating high-strength food wastewater, *Water Res.*, **73**, 291-303 (2015).