

소변분리변기오수(Brown water)의 혐기성 처리 시 음식물 쓰레기 혼합에 따른 수소생산 특성

Effect of Food Waste Mixing on Hydrogen Gas Production in Anaerobic Digestion of Brown Water from Urine Diversion Toilet

성충열 · 윤조희* · 서규태[†]

Chung-Yeol Seong · Cho-Hee Yoon* · Gyu-Tae Seo[†]

창원대학교 환경공학과 · *경남대학교 도시환경공학과

Department of Environmental Engineering, Changwon National University

*Department of Urban Environmental Engineering, Kyungnam University

(Received November 13, 2014; Revised December 17, 2014; Accepted December 26, 2014)

Abstract : The study was conducted to evaluate the effect of addition of food waste in brown water for anaerobic hydrogen production. Batch experiment was carried out to determine appropriate food waste to brown water mixing ratio. Maximum hydrogen yield of 6.92 mmol H₂/g COD_{removed} was obtained at 70% food waste and 30% brown water. Semi-pilot scale reactor was operated based on result of batch experiment. Semi-pilot reactor operated, mixing 70% food waste and 30% brown water showed significant increment in butyric acid concentration. B/P (Butyric to propionic acid ratio) which is considered as governing factor for hydrogen production was found high (52.64). Maximum hydrogen yield of 25.03 mmol H₂/g COD_{removed} was obtained. Result of this study concluded that mixing of food waste to brown water at appropriate ratio assists in enhanced hydrogen fermentation.

Key Words : Anaerobic Digestion, Brown Water, Carbohydrate, Food Waste, Hydrogen

요약 : 본 연구는 수소가스 생산을 위한 brown water(소변을 제외한 대변 + 대변세척수 6 L)의 혐기성 소화 시, 음식물쓰레기 혼합 효과를 평가하기 위해 실시하였다. brown water와 음식물쓰레기의 적절한 혼합 비율을 찾기 위해 회분식 실험이 수행되었고, 도출된 결과는 연속운전 세미파일럿 규모 brown water의 혐기성 소화장치의 실험에 적용되었다. 회분식 실험에서 70%의 음식물쓰레기와 30%의 brown water를 혼합하였을 때 6.92 mmol H₂/g COD_{removed}의 최대 수소생산수율을 나타내었다. 동일한 혼합비율로 투입한 음식물쓰레기 및 brown water의 세미파일럿 규모 혐기성 소화조를 운전하였을 때, 반응조 내부에서 수소생산의 중간산물인 butyric acid의 현저한 증가를 보였다. 이 때 수소 생산의 지표인 B/P (butyrate/propionate) 비는 52.64로 나타났고, 수소생산수율은 최대 25.03 mmol H₂/g COD_{removed}로 나타났다. 이상의 실험적 연구결과 brown water의 혐기성 수소발효에서 음식물쓰레기의 혼합은 수소발생을 촉진하기 위한 좋은 대안임을 확인하였다.

주제어 : 혐기성 소화, 소변분리변기오수, 탄수화물, 음식물쓰레기, 수소

1. 서론

현재 우리나라의 하수처리시스템은 중앙집중식으로 가정, 빌딩 등 건물에서 발생하는 오수는 모두 하수종말처리장으로 이송하여 처리한다. 이는 대규모의 처리장과 하수관거의 설치가 필요할 뿐만 아니라, 유입 유기물의 부하변동에 따른 처리의 어려움과 하수관거의 매설 및 유지관리에 많은 문제점이 있다. 또한 최근에는 음식물쓰레기의 처리·처분이 사회적 이슈로 부각되고 있다. 즉 음식물쓰레기는 대부분 가정에서 65.8%가 배출되는데, 2005년 직 매립 금지 및 수거운반 처리비용 증가, 병원성 세균증식의 2차오염 유발 등 많은 문제가 야기되고 있어, 해결책이 시급한 시점이다.¹⁾

최근 유럽에서 적용되기 시작한 분산형 오수처리시스템은 오수의 발생원을 세분화시켜 소변분리형 변기에서 brown water(소변을 제외한 대변 + 대변세척수 6 L)와 소변 (yellow

water)으로 분리하고 또한 기타 저 농도 오수(grey water)를 각각 분리 배출하여 brown water는 혐기성 처리를 통한 수소 생산, 분리된 yellow water는 비료화료 재이용, grey water는 별도의 수처리에 의한 재생과 순환이용이 가능하다. 또한 이러한 시스템에서 brown water의 혐기성 처리 시 음식물 쓰레기의 혼합처리에 대한 연구가 수행된 바 있다.²⁾ 이와 같이 가정오수로부터 에너지 및 영양물질 회수와 물재이용과 같은 자원의 재순환이 가능한 미래의 하수처리 시스템으로서 활발한 연구가 진행 중에 있다.¹⁻⁴⁾ 이러한 시스템의 성공적인 적용은 소변분리형 변기가 필수적으로 요구되며 유럽에서는 소변분리형 변기를 설치한 실증주거단지과 350~400세대 규모의 실 주택단지에 분산처리 시스템을 적용한 바 있다.^{2,3,5)} 이후 간이화장실 오수와 음식물쓰레기 혼합 처리 방안과 Pilot 규모의 적용 연구가 추가적으로 진행되었다.^{21,24)} 이러한 개념은 DESAR (Decentralized Sanitation and Reuse) 즉, 분산형 오수처리 및 재이용 시스템으로 발전

[†] Corresponding author E-mail: gts@changwon.ac.kr Tel: 055-213-3746 Fax: 055-281-5841

하였고,²⁾ 이 시스템의 도입으로 연간 물소비의 25% 감소와 연간 소비되는 에너지에서 415,825 GJ를 저감하는 효과를 나타낸다.⁴⁾ 대개 brown water의 혐기성 소화는 주로 메탄가스를 생산하기 위한 연구가 주로 이루어졌다.¹⁻¹⁰⁾ 이는 혐기성 반응에서 다당류의 유기물이 가수분해와 발효 과정을 통하여 평균 50~60% 이상의 메탄가스가 안정적으로 생성되므로, 이에 대한 많은 연구와 함께 효율적 에너지 생산 수단으로 이용되고 있기 때문이다.¹⁻⁵⁾ 그러나 메탄생성균은 독립영양세균으로 환경 조건에 상당히 민감하며, 특히 반응 과정에서 생성되는 수소에 의하여 메탄 생성균의 활성이 저해되는 영향을 받고, 반응경로가 길기 때문에 오히려 수소를 생성시키고자 하는 연구들이 진행된 바 있다.^{14,16,17,20)} 또한 최근 수소가 청정연료로서 많은 관심을 받고 있어 혐기성 소화반응에서 단순한 pH 조절을 통해 수소가스의 생성에 관한 연구도 수행되었다.^{6,11,13)}

한편 혐기성 반응에서 수소의 생성은 기질 내 충분한 탄수화물을 필요로 한다. 실제의 brown water는 탄수화물의 농도가 낮아 연속적으로 안정적인 수소가스 생성에 어려움이 있고, 그 효율을 높이기 위하여 추가적인 탄소원의 주입 방안을 마련할 필요가 있다.^{16,17)}

따라서 본 연구에서는 brown water의 에너지 효율적 처리를 위한 혐기성 수소발효공정에서 수소생성 효율 향상을 목적으로, 최근 이슈화 되고 있는 음식물 쓰레기 처리와 연계하여, Brown water의 수소발효 시, 음식물쓰레기 첨가에 따른 수소 생성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 사용 균주 및 기질

실험에 사용된 균주는 도시하수처리장(김해 H하수종말처리장)의 혐기성 소화조 슬러지에서 채취하였다. 채취한 시료는 90℃에서 25분간 열처리를 하였고, 실온에서 약 12시간 냉각 후 사용하였다. 음식물 쓰레기는 교내식당에서 수거하였으며, brown water는 소변 분리형 변기(Flushing water 6 L)에서 배출되는 실제 오수를 사용하였다. brown water 및 음식물쓰레기의 오염물질 성분분석 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of Brown water and food waste

Contents	Concentration (mg/L)	
	Brown water	Food waste
tCOD	62,400	149,400
sCOD	39,000	67,300
pH	6.7	4.0
T-N	3,460	6,230
TS	9,450	264,000
VS	8,980	248,200
Carbohydrate	436.7	89,000

2.2. 운전조건 및 실험방법

실험에 사용된 시스템 구성을 Fig. 1과 2에 나타내었다. 반응조는 CSTR (Continuous stirred tank reactor) 형태의 완전 혼합 반응조를 이용하였으며, Fig. 1은 음식물쓰레기 첨가량에 따른 수소생성 실험을 위한 lab scale batch 실험 반응조이고, Fig. 2는 혐기성 소화 연속실험을 위한 semi pilot 반응조이다. Fig. 2의 반응조 상부에는 슬러지 및 가스의 원활한 구분을 위해 GSS (Gas liquid Solid Separator)를 설치하여 운전하였다.

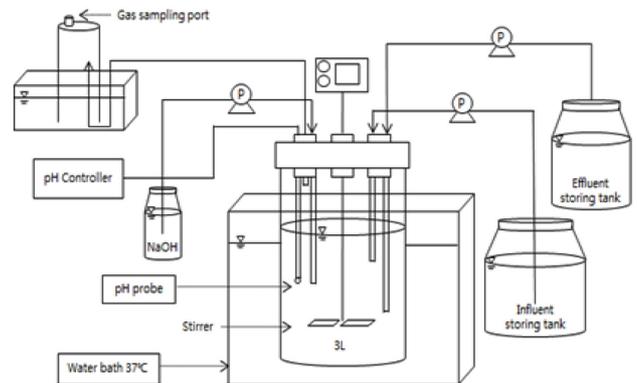


Fig. 1. Lab scale reactor for batch experiment.

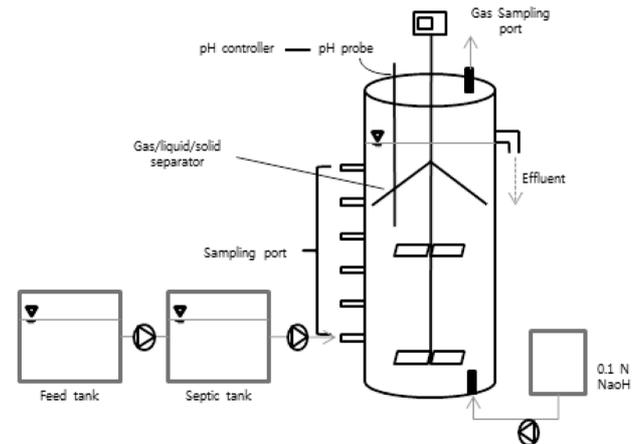


Fig. 2. Semi pilot scale reactor for continuous operation.

Table 2. Reactor operation conditions for batch and continuous experiment

Parameters	Conditions	
	Batch exp.	Continuous exp.
HRT		48 h
Temperature		37.5℃
pH		5.5±0.1
Reactor volume	3 L	30 L
Mixing velocity		55 rpm

실험에 사용된 각 반응조의 운전조건을 Table 2에 나타내었다. 회분식 실험을 위한 반응조의 용량은 3 L이고, 연속 운전 실험 semi pilot 규모 반응조는 30 L의 용량을 이용하

Table 3. Food waste & Brown water Mixing ratio (%)

	Mixing ratio (%)				
Food waste	0	20	50	70	100
Brown water	100	80	50	30	0

였다. 그 외의 운전조건은 양 실험에서 모두 동일하게 HRT 2 day, 교반속도 55 RPM, pH 5.5 ± 0.1 , 그리고 수온 37.0°C 로 유지하였다. 이 때 pH는 pH센서를 이용하여 1N NaOH 로 자동적으로 조절하였고 수온은 항온수조를 이용하여 일정하게 유지하였다. SRT는 별도로 조절하지 않았다.

실험은 총 세 단계로 이루어졌다. 먼저 brown water만을 이용한 semi pilot 규모의 혐기성 소화 연속 반응조에서 수소 생성 상태를 파악하였고, brown water 및 음식물쓰레기의 적정 혼합비를 찾기 위한 실험실 규모의 회분식 실험과 음식물쓰레기의 적정 혼합비를 적용한 혐기성 소화 연속 반응조에서 수소생성 semi pilot 실험을 진행하였다. 이러한 과정의 실험을 통하여 반응조에서 발생하는 유기산(VFAs)의 분석과 가스발생량 그리고 유기물 변화를 측정하였다.

회분식 실험에서 음식물 쓰레기와 brown water의 최대 수소 생성수율을 알아보기 위한 혼합비는 Table 3에 나타내었으며, 음식물쓰레기의 혼합비는 각각 0, 20, 50, 70, 100%로 하여 CSTR을 이용하여 실험을 진행하였다.

2.3. 분석 방법

반응조에서 생성되는 총 가스량은 수증치환법으로 실린더에 포집된 가스의 부피를 측정하였다. 측정된 총 가스 생성량 중 수소 가스 함량은 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC)를 이용하여 분석하였다. 검출기는 열전도도 검출기(Thermal Conductivity Detector, TCD)를 사용하였으며 분석조건은 Table 4에 나타내었다.

본 연구의 수소생성 반응에서 중점적인 중간 유기산은 acetic acid, butyric acid, propionic acid이다. 혐기성 반응과정에서 이들 유기산의 생성 패턴을 살펴보기 위해서 고성능 액체크로마토그래피(High performance Liquid Chromatography, HPLC)를 이용하여 분석하였다. 액체크로마토그래피의 운전조건은 Table 5와 같다.

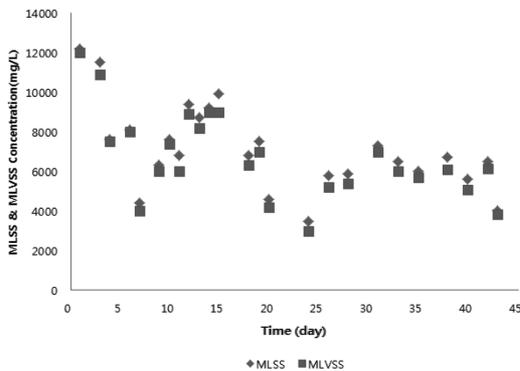


Fig. 3. Variation of MLSS and MLVSS during the anaerobic reactor operation.

Table 4. Condition of gas chromatography for hydrogen gas analysis

Model	Shimadzu jp/ GC-2010 plus
Detector	Thermal Conductivity Detector, TCD
Column	Molecular Sieve 5A porous layer open tubular capillary column
Sample volume	200 μL
Column oven	35°C
Injection port	50°C
Detector port	120°C
Carrier gas	He 99,999%
Gas flow rate	30 mL/min

Table 5. Condition of HPLC for VFAs analysis

Model	LC-20A, Shimadzu
Detector	UV detector
Column	300×7.8 mm Aminex HPX-87H column
Sample volume	20 μm
Column oven	35°C
Wavelength	210 nm
Solvent	0.005 M H_2SO_4
Solvent flow rate	0.6 mL/min

3. 결과 및 고찰

3.1. Brown water의 혐기성 수소발효

3.1.1. 미생물 농도변화 및 COD 제거

Brown water를 연속적으로 유입시킨 semi pilot 혐기성 반응조의 운전기간(45일) 동안, 반응조 내 미생물 농도와 COD 농도 변화를 Fig. 3과 4에 각각 나타내었다. 초기 반응조내 미생물의 농도는 MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solid) 11,800 mg/L로 유지되었으나, 운전 45일 동안 4,050 mg/L로 감소하는 경향을 보였다. 이는 유기물 분해에 의한 미생물의 성장보다 반응기로부터 유출되는 미생물의 양이 많은 것에 기인하였고, 미생물의 성장에 필요한 탄수화물이

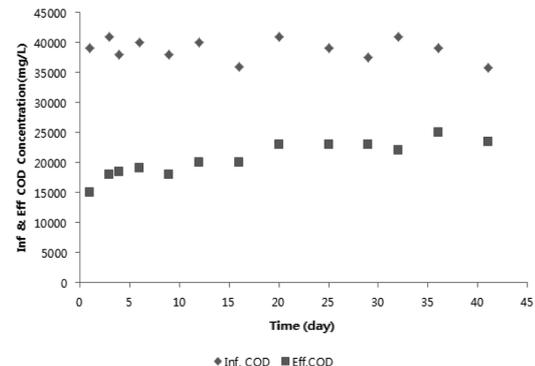


Fig. 4. COD removal by the anaerobic reactor during operation.

부족할 경우 미생물의 성장요건이 충족되지 않아 반응조내 슬러지가 부상하는 문제 발생으로 인해, 대부분 유출된다는 연구결과와 유사한 현상으로 설명된다.¹³⁾ 한편 음식물쓰레기의 가수분해를 위한 최소한의 체류시간(HRT)은 36시간으로 알려져 있으나,²²⁾ 본 실험에서 적용한 brown water의 혐기성 소화 반응조의 체류시간(HRT) 48시간 내 brown water의 유기물 성분이 충분히 분해되지 않는 것으로 나타났다. 이에 따라 Fig. 4에서 보는 바와 같이 COD 제거율도 초기 40%로 그다지 높지 않고, 이 역시 미생물 농도의 감소와 함께 그 제거율도 감소하는 것을 보여준다.

3.1.2. 중간 유기산(VFAs) 농도 변화

Fig. 5는 혐기성 반응조 운전 45일 동안 반응조 내 유기산의 농도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 반응조 운전초기 수소생성에 유리한 butyric Acid의 농도가 다소 높게 나타났으나, 운전 20일 이후 유기산의 분포는 propionic acid 농도가 높게 나타난 반면, butyric acid 농도는 상대적으로 아주 낮았다. 이러한 결과로부터 반응조 내에서는 식 (1)에서 보는바와 같이 propionic acid 생성반응이 우위를 점하고 있음을 알 수 있고, 이에 따라 일부 생성된 수소는 다시 소모되는 것으로 해석할 수 있다.^{14,15)}

Fig. 6은 수소생산의 중요한 지표인 B/P비를 나타내는 그

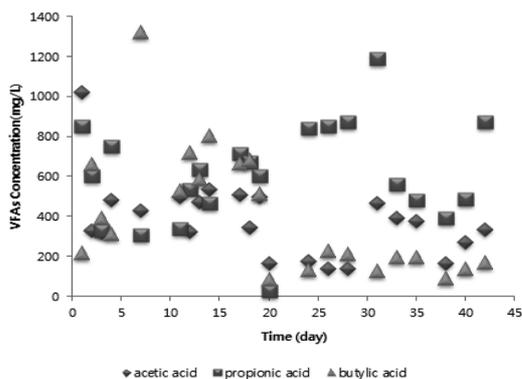


Fig. 5. Variation of VFA's in the anaerobic reactor during operation,

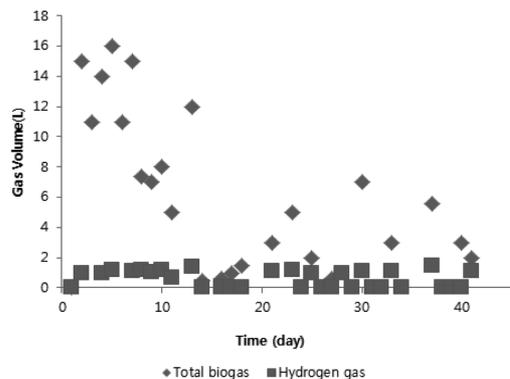


Fig. 7. Variation of bio-gas production during the anaerobic reactor operation,

래프이다. 운전 초기에 1~4.3의 범위에 있었으나, 운전 20일 이후 propionic acid의 농도가 증가함에 따라 0.5이하로 감소하여 수소생성의 적정 범위를 벗어났다. 대부분의 연구자들에 의해 나타난 B/P비는, glucose를 기질로 이용할 경우 반응조의 용량과 수리학적체류시간(HRT)에 따라 차이가 있으나 대개 7.1~40.5의 범위로 나타난다.^{11,14)} 한편 음식물쓰레기를 기질로 이용하였을 때 B/P비는 8~28의 범위로 알려진다.^{11,14)} 그러나 본 실험에서 사용한 brown water는 B/P비가 최대 4.3으로 매우 낮게 나타나 이는 혐기성 수소발효에 적정 범위를 벗어남을 알 수 있다.

Propionic acid production



3.1.3. 바이오가스 발생량 및 수소생성 수율

혐기성 반응조의 운전 기간 중 바이오가스의 발생량 및 성분을 분석하였다. Fig. 7은 운전기간 동안 총 바이오가스의 발생량과 수소가스의 발생 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7의 초기 총 가스 발생량은 최대 17.2 L, 수소가스 발생량은 1.4 L로 나타났는데, 시간이 지남에 따라 총 가스발생량은 2 L, 수소가스발생량은 1.1 L로 감소하였다. 이는 Fig. 4의 COD제거에서 보는 것과 같이 혐기성 반응조에서 유기물

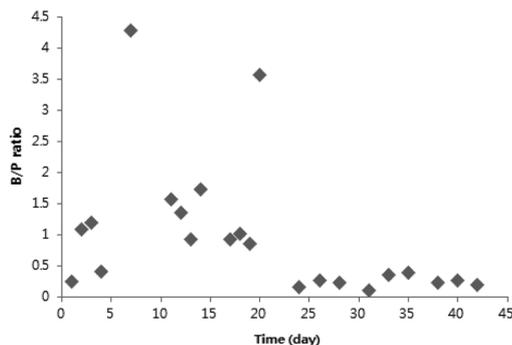


Fig. 6. Variation of B/P ratio in the anaerobic reactor during operation,

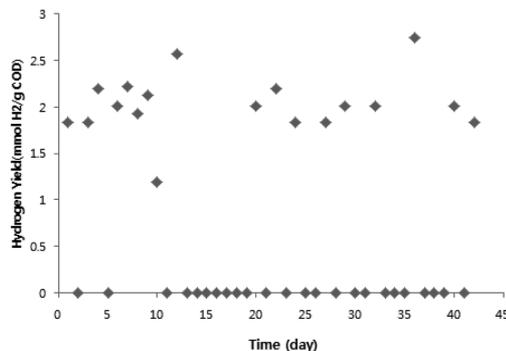


Fig. 8. Variation of hydrogen yield during the anaerobic reactor operation,

의 분해가 활발히 이루어지지 않았고, 이에 따른 유기산의 생성이 원활하지 않고 결과적으로 바이오가스 생성량이 낮은 것으로 나타났다. 수소가스의 발생량과 제거된 유기물량을 이용하여 수소생성 수율을 계산하여 Fig. 8에 나타내었다. 수소생성 수율은 수소가스가 발생하지 않는 날을 제외하고도 평균 1.88 mmol H₂/g COD_{removed}로 매우 낮았다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 반응조내 미생물의 감소와 propionic acid의 생성에 기인한 것으로 설명된다.

3.2. 음식물쓰레기 혼합비에 따른 특성분석

음식물쓰레기의 혼합에 의한 brown water의 혐기성 수소발효에 미치는 영향을 보기 위하여 brown water에 대한 음식물쓰레기 혼합비를 각각 0, 20, 50, 70, 100%로 변화시키면서 회분식 실험을 수행하였다.

3.2.1. 미생물 농도변화

Fig. 9는 회분식 운전 CSTR (용량 3 L)에서 brown water에 대한 음식물쓰레기의 혼합비(부피비 1:1)에 따른 유기물(COD) 제거를 나타낸 것이다. 음식물쓰레기가 혼합되지 않은(0%) brown water만의 COD제거율은 40%로 이전의 연속실험 결과와 유사하게 나타났다. 음식물쓰레기를 50%까지 혼합한 경우의 COD 제거율은 그다지 증가하지 않는 것으로 나타났지만, 음식물쓰레기 혼합비를 70%로 증가함에 따라 COD 제거율은 60%로 증가하였고, 음식물쓰레기만의 혐기성 반응에 의한 COD 제거는 73%로 상승하였다. 이 때

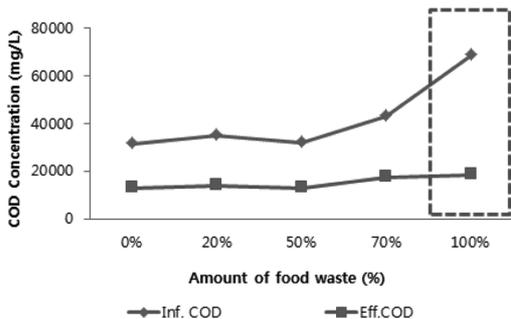


Fig. 9. COD removal at various food waste mixing ratio on brown water.

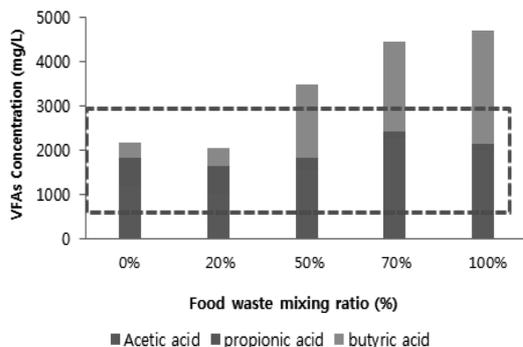


Fig. 11. Cumulative VFAs production at various food waste mixing ratio.

반응조의 미생물 농도는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 음식물쓰레기 혼합비 0%일 때 4,200 mg/L였으나 혼합비를 증가시키기에 따라 5,600 mg/L로 증가하였다.

3.2.2. 중간 유기산(VFAs) 농도 변화

Brown water의 혐기성 분해에 의한 유기산 생성은 수소소모반응을 일으키는 propionic acid 생성반응이 일어남으로써 반응조내 propionic acid의 농도가 높았다. 그러나 Fig. 11에서 보는 바와 같이 음식물쓰레기의 혼합비를 증가시키기에 따라 propionic acid의 농도는 628 mg/L에서 120 mg/L로 줄어들었고, butyric acid의 농도가 증가하는 양상을 보였다. 즉, 음식물쓰레기가 혼합되지 않은 경우 butyric acid의 농도는 350 mg/L였으나 혼합비 70% 이상에서는 2,045~2,560 mg/L로 증가하였다. 이에 따라 수소생성의 중요한 지표인 B/P비 역시 brown water로부터 생성되는 값에 비하여 약 20배 높았다(Fig. 12).

3.2.3. 수소가스 발생량 및 수소생성 수율

Fig. 13은 48시간 동안 음식물쓰레기 혼합비에 따라 발생되는 총 수소발생량을 나타냈다. 음식물쓰레기 혼합비가 증가할수록 수소발생량 또한 증가하는 경향을 볼 수 있는데, brown water만의(음식물쓰레기 혼합비 0%) 수소발생량은 34.01 mL로 가장 낮았고, 첨가량 50%일 때 수소발생량이 급격히 증가하였다. 그리고 음식물쓰레기만의(음식물쓰레기 혼합비 100%) 수소발생량은 453.46 mL로 가장 높게 나타

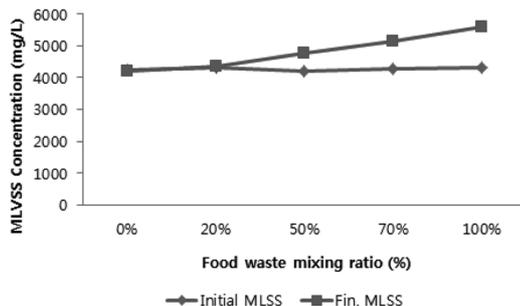


Fig. 10. MLSS concentration at various food waste mixing ratio on brown water after 48 hrs of operation.

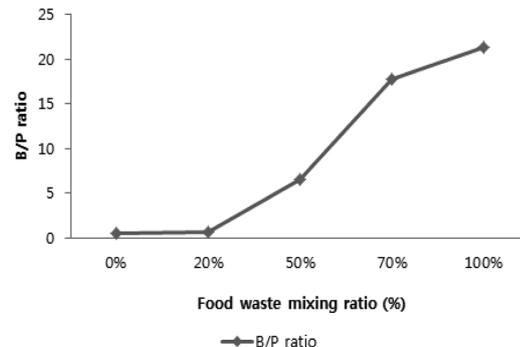


Fig. 12. B/P ratio at various food waste mixing ratio.

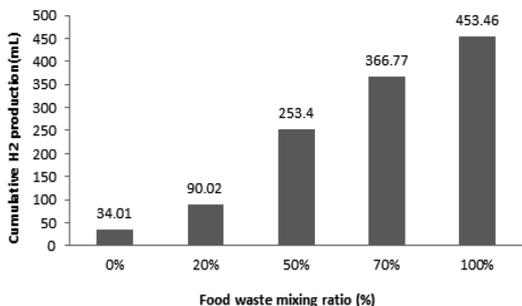


Fig. 13. Cumulative H₂ production at various food waste mixing ratio.

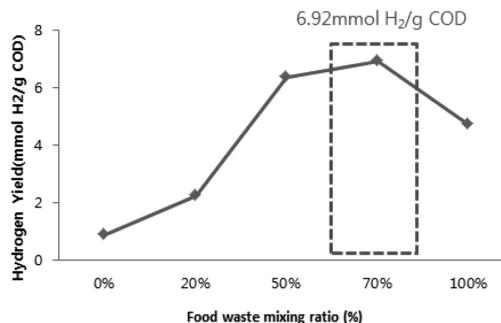


Fig. 14. Hydrogen yield at various food waste mixing ratio.

났다. 그러나 Fig. 14에서 보는 바와 같이 수소생성 수율은 음식물쓰레기 70%일 때 6.92 mmol H₂/g COD_{removed}로 가장 높게 나타나, brown water에 대한 음식물쓰레기의 혼합비는 70%가 적절한 수준인 것으로 볼 수 있다.

3.3. 음식물쓰레기 혼합 Brown water의 연속운전 혐기성 수소발효

3.3.1. 미생물 농도 변화

회분식 실험 결과를 바탕으로, 수소발생 수율이 가장 높았던 음식물쓰레기 70%, brown water 30%의 혼합조건을 이용하여, 세미파일렛 혐기성 반응조의 40일 동안 운전특성을 분석하였다. Fig. 15에 미생물 성장을 나타내었다. 초기 MLVSS 농도가 8,300 mg/L에서 운전 20일 만에 20,000 mg/L 이상으로 증가하였고 이후 평균 20,500 mg/L을 유지하였다. 이러한 미생물의 활발한 성장은 음식물쓰레기에 함유되어 있는 탄수화물 농도에 기인한 것이다.

3.3.2. 중간 유기산(VFAs) 농도 변화

Fig. 16과 17은 음식물쓰레기/brown water 혼합비(F/B mixing ratio) 70/30에서의 연속운전 혐기성 반응조내 VFAs 농도 및 B/P비 분석 결과이다. Fig. 16의 경우 수소를 소모하면서 생성되는 propionic acid의 농도가 20~150 mg/L로 현저히

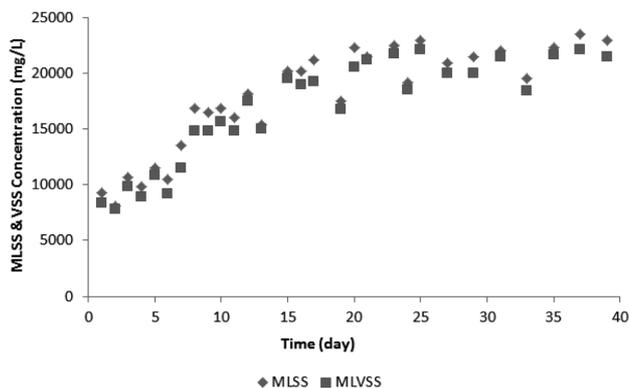


Fig. 15. Daily variation of MLSS and MLVSS concentration in the anaerobic reactor (Food waste/Brown water ratio, F/B : 70/30).

낮은 것을 볼 수 있고, 주로 수소를 생성하는 중간생성물인 butyric acid가 평균 2,500 mg/L로 전체 유기산 중 54%를 차지하였다. 이에 따라 수소생성의 주요 지표인 B/P비는 35로 앞서 실행한 회분식 실험결과에 비하여 약 1.5배 높게 나타났다. 유기산중 propionic acid에 비하여 butyric acid의 높은 생성은 이분해성 유기물의 분해에 의하여 butyric acid 생성균의 성장이 활발하게 이루어지고 있다는 증거이고, B/P비 역시 높은 값을 나타냈으므로, 수소가스발생수율 역시 높을 것으로 예측할 수 있다.

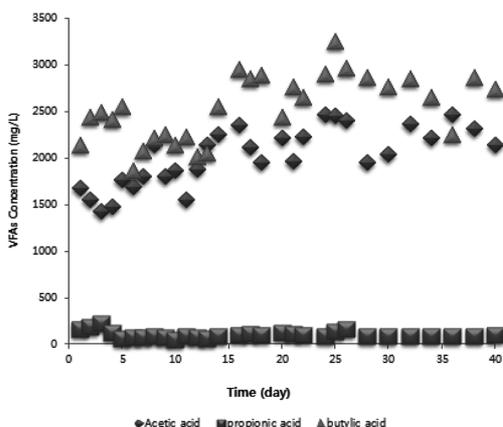


Fig. 16. Variation of VFA's produced in the anaerobic reactor at F/B mixing ratio, 70/30.

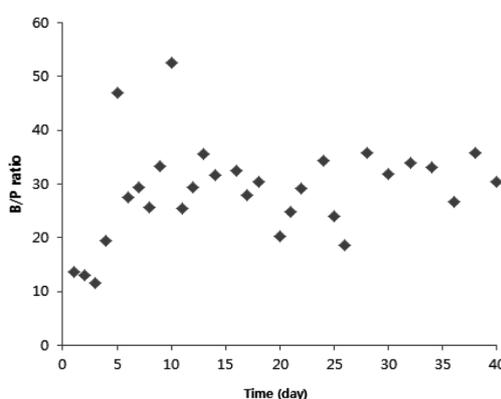


Fig. 17. Variation of B/P ratio in the anaerobic reactor at F/B mixing ratio, 70/30.

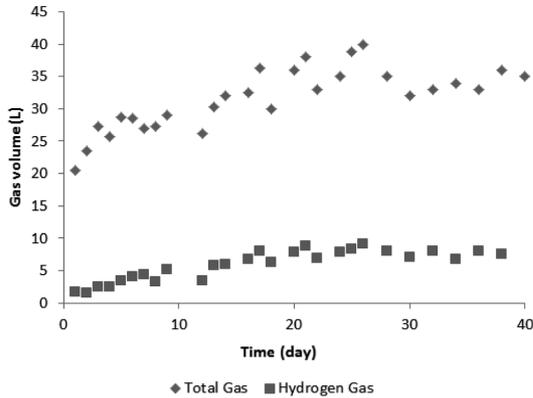


Fig. 18. Total biogas & Hydrogen gas production at F/B mixing ratio, 70/30.

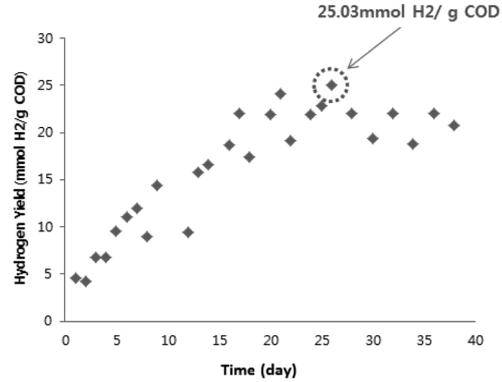


Fig. 19. Hydrogen yield by the anaerobic reaction at F/B mixing ratio, 70/30.

3.3.3. 바이오가스 발생량 및 수소생산 수율

Fig. 18과 19는 음식물쓰레기/brown water 혼합비 70/30 일 때 연속운전 혐기성 반응조의 수소가스 발생량 및 수율을 나타낸 것이다. brown water만의 혐기성 수소발효에 비하여 수소발생량과 수율이 비교적 높은 것을 볼 수 있다. 기질 주입 후 26일에서 총 가스 발생량은 40 L로 가장 높았고, 그 중 수소가스 발생량은 9.1 L이다. 이 때 수소발생 수율은 25.03 mmol H₂/g COD_{removed}로 비교적 높은 값을 나타냈다. 또한 각 반응시간대별 총 가스 발생량 중 수소의 함량 측정결과 30~40%로 나타났고, 나머지는 대부분 이산화탄소와 질소 성분으로 구성되어 있었다. 이상의 실험 결과로부터 brown water의 혐기성 수소발효에서 음식물쓰레기 혼합에 의한 탄수화물의 공급은 수소발생에 상당히 좋은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

과 미생물 성장이 원활하게 일어나 반응조내 MLSS 농도는 20,500 mg/L를 유지하였고, 이에 따른 수소생산 중간산물인 butyric acid 농도의 증가와 함께 B/P비가 35로 높았다. 그 결과 수소생산 수율 역시 25.03 mmol H₂/g COD_{removed}로 높게 나타나 brown water의 혐기성수소발효에 음식물쓰레기의 혼합은 상당히 효율적인 것으로 나타났다.

Acknowledgement

이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

KSEE

4. 결론

소변 분리형 변기에서 배출되는 brown water의 혐기성 수소발효에서 음식물쓰레기의 혼합에 관한 영향을 실험적으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) Brown water만의 혐기성 수소발효를 위한 연속운전 semi pilot 반응조로부터 생성되는 수소 수율은 2.7 mmol H₂/g COD_{removed}로 상당히 낮게 나타났다. 이는 brown water의 유기물이 48시간 동안 분해되기 어려운 물질로 구성되어 반응조 내 미생물 성장이 적절하게 이루어지지 않았고, 또한 propionic acid 생성반응이 주로 일어난데 기인하였다.

2) 분해되기 쉬운 유기물 공급원으로 음식물쓰레기의 첨가는 brown water의 혐기성 수소발효에 상당히 효율적임을 보여주었다. 회분식 실험 결과 음식물쓰레기/brown water의 최적 혼합비는 70/30인 것으로 나타났고 이 때의 수소 발생 수율은 6.92 mmol H₂/g COD_{removed}로 가장 높았다.

3) 음식물쓰레기/brown water 혼합비 70/30의 기질을 주입한 연속운전 semi pilot 혐기성 수소발효 반응조의 운전결

References

1. Jun, W. L. and Jing, Y. W., "Enhanced hydrolysis and methane yield by alying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion of brown water and food waste," *Waste Manage.*, **33**(4), 813~819(2013).
2. Kujawa-Roeleveld, K., Elmitwalli, T. and Zeeman, G., "Enhanced primary treatment of concentrated black water and kitchen residues within DESAR concept using two types of anaerobic digesters," *Water Sci. Technol.*, **53**(9), 159~166(2006).
3. Elmitwalli, T., Van Leeuwen, M., Kujawa-Roeleveld, K. and Sanders, W., "Anaerobic biodegradability and digestion in accumulation systems for concentrated black water and kitchen organic waste," *Water Sci. Technol.*, **53**(8), 167~175 (2006).
4. Liu, X., Ji, M. and Han, L., "Hydrogen and methane production by co-digestion of waste activated sludge and food waste in the two-stage fermentation process:substrate conversion and energy yield," *Bioresour. Technol.*, **146**, 317~323 (2013).
5. Kujawa-Roeleveld, K. and Zeeman, G., "Anaerobic treatment in decentralised and source-separation-based sanitation concepts," *Rev. Environ. Sci. Bio. Technol.*, **5**(1), 115~139(2006).

6. Wendland, C., Deegener, S., Behrendt, J., Toshev, P. and Otterpohl, R., "Anaerobic digestion of black water from vacuum toilets and kitchen refuse in a continuous stirred tank reactor (CSTR)," *Water Sci. Technol.*, **55**(7), 187~194(2007).
7. Kujawa-Roeleveld, K., "Anaerobic treatment of concentrated wastewater in DESAR concenpts," Stowa. Utrecht. The Netherlands(2005).
8. Meulman, B., Zeeman, G. and Buisman, C. J. N., "Treatment of concentrated black water on pilot scale: options and challenges. In proceedings of the sanitation challenge; wagenin-gen," *The Netherlands*, pp. 19~21(2008).
9. Kujawa-Roeleveld, K., Fernandes, T., Wiryawan, Y., Tawfik, A., Visser, M. and Zeeman, G., "Performance of UASB septic tank for treatment of concentrated black water within DESAR concept," *Water Sci. Technol.*, **52**(1-2), 307~313 (2007).
10. Rajinikanth, R., Lim, J. W. and Mao, Y., "Anaerobic co-digestion of source segregated brown water (feces-without-urine) and food waste: For singapore context," *S. Total Environ.*, **443**(15), 877~886(2013).
11. Han, S. K. and Kim, S. H., "UASB treatment of wastewater with VFA and alcohol generated during hydrogen fermentation of food waste" *Proc. Biochem.*, **40**(8), 2897~2905(2005).
12. Kim, S. H., Han, S. G., Yoon, J. H. and Shin, H. S., "Continuous Anaerobic H₂ production with a mixed culture," *J. Kor. Ind. Eng. Chem.*, **24**(1), 70~76(2003).
13. Han, S. G., Kim, H. W. and Shin, H. S., "Enhanced hydrogen fermentation of food waste," *J. Kor. Ind. Eng. Chem.*, **11**(4), 105~113(2003).
14. Arooj, M. F, Han, S. K., Kim, S. H., Kim, D. H. and Shin, H. S., "Effect of HRT on ASBR converting starch into biological hydrogen," *Int. J. Hydro. Energy*, **33**(22), 6509~6514(2008).
15. Boon, D. R., "Terminal reactions in the anaerobic digestion of animal waste," *Alieed Environ. Microbiol.*, **43**(1), 57~64 (1982).
16. Sung, S., Raskin, S., Duagmanee, T., Padmasiri, S. and Simmons, J. J., "Hydrogen Production by Anaerobic Microbial Commnities Exposed to Repeated Heat Treatments," Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen program Review NREL/CP-610-32405(2002).
17. Hussy, I., Haukes, F. R., Dinsdale, R. and Hawkes, D. L., "Continuous fermentative hydrogen production from a wheat starch co-product by mixed microflora," *Biotechnol. Bioeng.*, **84**(6), 619~627(2003).
18. Fuentes, M., Scenna, N. J. and Aguirre, P. A., "Anaerobic digestion of Carbohydrate and protein-based waste waters in fluidized bed bioreactors," *Latin Am. Alieed Res.*, **37**, 235~242(2007).
19. Marthe, S., Graaff, D., Temmink, H., Zeeman, G., Cees, J. and Buisman, N., "Anaerobic Treatment of Concentrated Black Water in a UASB Reactor at a Short HRT," *Water Journal* ISSN 2073-4441, pp. 101~119(2010).
20. Kim, D. H., Kim, S. H., Kim, K. Y. and Shin, H. S., "Experience of a pilot-scale hydrogen-producing anaerobic sequencing batch reactor(ASBR) treating food waste," *Int. J. Hydro. Energy*, **35**(4), 1590~1594(2010).