

음식물류폐기물 수소 발효액의 유변학적 특성과 교반강도 고찰

김민균, 이모권, 임성원, 신상룡, 김동훈[†]

인하대학교 사회인프라공학과

Rheological Characteristics of Hydrogen Fermented Food Waste and Review on the Agitation Intensity

Min-Gyun Kim, Mo-Kwon Lee, Seong-Won Im, Sang-Ryong Shin, Dong-Hoon Kim[†]

Department of Civil Engineering, Inha University

(Received: Dec. 13, 2017 / Revised: Dec. 18, 2017 / Accepted: Dec. 18, 2017)

ABSTRACT: The design of proper agitation system is requisite in biological waste treatment and energy generation plant, which is affected by viscosity, impeller types, and power consumption. In the present work, hydrogen fermentation of food waste was conducted at various operational pHs (4.5~6.5) and substrate concentrations (10~50 g Carbo. COD/L), and the viscosity of fermented broth was analyzed. The H₂ yield significantly varied from 0.51 to 1.77 mol H₂/mol hexose_{added} depending on the pH value, where the highest performance was achieved at pH 5.5. The viscosity gradually dropped with shear rate increase, indicating a shear thinning property. With the disintegration of carbohydrate, the viscosity dropped after fermentation, but it did not change depending on the operational pH. At the same pH level, the H₂ yield was not affected much, ranging 1.40~1.86 mol H₂/mol hexose_{added} at 10~50 g Carbo. COD/L. The zero viscosity and infinite viscosity of fermented broth increased with substrate concentrations, from 10.4 to 346.2 mPa·s, and from 1.7 to 5.3 mPa·s, respectively. There was little difference in the viscosity value of fermented broth at 10 and 20 g Carbo. COD/L. As a result of designing the agitation intensity based on the experimental results, it is expected that the agitation intensity can be reduced during hydrogen fermentation. The initial and final agitation intensity of 30 g Carbo. COD/L in hydrogen fermentation were 26.0 and 10.0 rpm, respectively. As fermentation went on, the viscosity gradually decreased, indicating that the power consumption for agitation of food waste can be reduced.

Keywords: H₂ fermentation, Rheological properties, Viscosity, Shear thinning, Agitation design

초 록: 점도, 임펠러 종류, 소비전력 등에 의해 영향을 받는 생물학적 폐기물 처리시설 및 에너지 생산 플랜트에 서 적절한 교반 시스템의 설계는 필수적이다. 본 연구에서는 적절한 교반 시스템의 설계를 위해 음식물류폐기물 을 이용하여 다양한 조건(운전 pH 및 농도)에서의 수소발효 시 유변학적 특성의 변화를 조사한 후, 이를 기반으로 교반강도를 설계하였다. 운전 pH에 따른 수소발효 실험에서 수소전환율은 0.51~1.77 mol H₂/mol hexose_{added}였고, 가장 높은 수소전환율은 운전 pH 5.5에서 나타났다. 발효액은 전단속도가 증가함에 따라 점도가 감소하는 Shear thinning 거동을 보였다. 탄수화물이 분해되면서 발효 이후 점도는 초기 점도보다 감소하는 경향을 보였으나, 운전 pH의 변화에 따른 발효액의 점도 변화는 크지 않았다. 탄수화물 농도 10~50 g Carbo. COD/L에서

[†] Corresponding author(e-mail : dhkim77@inha.ac.kr)

수소전환율은 1.40~1.86 mol H₂/mol hexose_{added}로 운전 pH 조건이 수소전환율에 미친 영향과 비교했을 때 큰 차이는 없었다. 발효액의 Zero viscosity와 Infinite viscosity는 탄수화물 농도에 따라 각각 10.4~346.2 mPas와 1.7~5.3 mPas로 나타났는데, 10 g Carbo. COD/L와 20 g Carbo. COD/L에서 발효액의 점도 값은 거의 차이가 없었다. 실험 결과에 기초하여 교반강도를 설계한 결과, 기질농도 30 g Carbo. COD/L의 수소발효 초기 및 발효 후 교반강도는 각각 26.0, 10.0 rpm으로 약 2.5배 정도의 교반강도를 줄임으로써 에너지를 절약할 수 있을 것으로 사료된다.

주제어: 수소발효, 유변학적 특성, 점도, 전단박화, 교반설계

1. 서론

국내 음식물류폐기물 처리는 감량화와 자원화를 목표로 정책이 시행되고 있으며,¹⁾ 그 중 감량화는 국가기관 및 연구기관에서 음식물류폐기물 양을 줄이기 위해 노력하고 있는데, 그 예로 2010년에 수립된 음식물쓰레기 줄이기 종합대책이나 2013년부터 도입된 음식물 쓰레기 종량제 방식이 있다.²⁾ 이러한 노력에도 불구하고 실제 감량 효과는 미미하고 최근 들어 음식물류폐기물의 양이 더 증대된 것으로 보고되고 있다(2015년 기준 0.27 kg/인/일).³⁾ 자원화의 경우, 발생량의 90% 이상이 사료화 및 퇴비화로 재활용되고 있는데 염분함량이 높은 특징으로 인해 수요가 적고 재활용 과정에서 낮은 pH와 높은 염도를 가진 다량의 음식물류폐기물 탈리액(음폐수)이 발생하는 문제점을 가지고 있다.⁴⁾

음식물류폐기물의 처리의 대안으로 혐기성소화를 통한 바이오가스화가 점차적으로 국내에 도입되고 있으며, 혐기성소화는 단상(Single-stage) 소화와 이상(Two-stage) 소화방식으로 나뉜다. 단상 소화방식은 산생산 박테리아와 메탄생산 미생물을 한 반응조에 존재하면서 유기물을 처리하는 방법이고, 이상 소화방식은 이 두 가지 다른 종류의 미생물군을 공간적으로 분리하여 증식시킨 후 유기물을 처리하는 방법이다.^{5,6)} 이상 소화방식은 단상 소화방식에 비해 바이오가스 생산 및 VS감량이 안정적이고 HRT가 10~15일 정도로 경제적인 처리가 가능하다고 보고되고 있다.⁷⁾ 또한 1단 반응단계에서 다양한 유기산과 더불어 청정에너지원인 수소를 생산할 수 있는 장점이 있다.⁸⁾ 하지만, 이상 소화방식의 뛰어난 성능에도 불구하고 두 개의 반응조를 사용하면

서 운영비용이 많이 소모되는 단점이 있어서 대부분의 혐기성 소화는 단상 소화방식을 택하고 있으며, 그 예로 유럽에서 운영중인 실규모 바이오가스 플랜트의 95%가 단상 소화방식을 사용하고 있다.⁹⁾ 국내에서도 주로 단상 소화방식을 사용하는데, 혐기성 소화조 설계 시 소화효율을 60%정도로 설정하는데 반해, 실제 운영중인 대다수 혐기성 소화조의 소화효율은 소화조내의 낮은 교반 효율로 인해 설계 소화효율 절반에도 못 미치는 실정이다.¹⁰⁾

이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법은 적절한 교반시스템을 설계하여 교반효율을 높이는 것이다. 생물학적 폐기물 처리시설에서 교반은 반응조 내의 미생물과 기질을 적절히 혼합시켜 바이오가스 생산성을 증대시킬 수 있는 중요한 인자이다. 교반이 원활하게 이뤄지지 않을 경우, 층 분리로 인해 소화가스 생산 효율이 낮아질 수 있고, 반대로 너무 과도한 교반은 플러의 구조를 파괴하고 미생물간 공생관계를 방해하여 소화효율이 떨어지게 되고 교반에 사용되는 에너지가 많이 소모되므로 경제성을 떨어뜨리는 문제가 발생한다.^{11,12)}

유변학은 외부의 힘에 의한 물질의 흐름 및 변형을 다루는 학문으로, 본 연구에서 물질의 거동을 해석하는데 있어서 기초가 되는 학문이다. 생물학적 반응조에서 원활한 교반상태를 유지하기 위해 기질 및 식중균으로 사용될 유기성폐기물의 유변학적 특성이 조사되어야 하고 반응조의 교반 방법과 교반기의 형태 등 다양한 인자들을 고려하여야 한다. 현재까지 보고된 다수의 연구들은 하수슬러지의 혐기성소화 시 유변학적 특성의 변화를 파악하거나 하수슬러지, 그레놀슬러지, 가축분뇨 등 유기성폐기물 자체의 유변학적 특성을 조사하였고 수소발효 시

음식물쓰레기의 유변학적 변화에 관해 보고된 바는 없었다.¹³⁾¹⁶⁾ 혐기성 수소발효에 의해 수소가 생산되는 과정에서 pH, 기질 농도, 온도 등 발효에 영향을 미치는 인자는 다수 존재하나, 특히 pH와 기질 농도가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고되어 왔다.¹⁷⁾

따라서, 본 연구에서는 혐기성 수소발효 시 다양한 운전 pH와 농도에 따른 음식물류폐기물의 유변학적 특성을 파악하는 연구를 수행하였고, 이를 기반으로 하여 기계식 교반기가 장착된 반응조의 교반시스템 설계에서 발효 전과 후의 적정 교반강도를 산출하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 음식물류폐기물 및 하수슬러지

본 실험에서 사용된 음식물류폐기물은 인천광역시 I 대학 학생식당에서 배출된 것으로 혼합 시 균일성을 높이고 발효속도를 높이기 위해 믹서로 분쇄하였다. 수소발효 성능을 증대시키기 위해 기질 부피의 10%에 해당하는 양을 하수슬러지로 혼합하여 실험을 진행하였다.¹⁸⁾ 혼합된 슬러지는 인천광역시 S 하수처리장에서 채취하여 4°C에서 냉장보관한 후, 실험에 사용될 때 생슬러지와 잉여슬러지를 동일한 부피비로 혼합하여 사용하였다. 음식물류폐기물과 하수슬러지의 입자 크기는 유변학적 측정을 위해 Rheometer의 Gap size보다 작아야 되므로 1 mm 체로 걸렀고, 하수슬러지는 메탄생성균의 활성도를 억제하기 위해 90°C에서 20분간 열처리를 하고 음식물류폐기물은 6 N HCl 용액을 사용하여 pH 2에서 2시간동안 산처리를 한 후 사용하였다.^{19,20)} 음식물류폐기물과 하수슬러지의 성상은 Table 1에 제

Table 1. Characteristics of food waste and sewage sludge

Item	Unit	Food waste	Sewage sludge
TS	g TS/L	158.0	35.3
VS	g VS/L	152.0	24.0
TCOD	g COD/L	232.5	44.0
SCOD	g COD/L	51.2	2.9
Carbohydrate	g Carbo. COD/L	100.0	3.6

시하였다.

2.2. 실험방법

본 실험에서는 기계식 교반기가 장착된 유효부피 2 L(총 부피 5 L)의 반응기에 음식물류폐기물과 부피비로 10% 혼합된 하수슬러지를 주입하였다. 운전 pH는 5.5에서 탄수화물 농도 10~50 g Carbo. COD/L에 따라 수소발효를 진행하였고, 운전 pH 영향에 대한 실험은 농도 30 g Carbo. COD/L에서 4.5~6.5로 설정하여 실험하였다. 농도 기준을 탄수화물로 한 것은 단백질, 지방에 비해 탄수화물의 수소 생산 잠재량이 훨씬 높기 때문이다.²¹⁾ 두 조건의 초기 pH는 6 N KOH를 이용하여 음식물류폐기물 수소발효에 적합한 8.0 ± 0.1 로 조절하였고²²⁾, 반응기는 질소가스(99.999 %)로 충분히 치환하여 혐기성 상태로 만들어주었다. 반응기의 운전 온도는 항온 순환 수조를 사용하여 35°C로 유지하였으며, 교반속도는 100 rpm으로 실험을 진행하였다. 실험 초기와 발효가 종료되었을 때, 교반속도 200 rpm에서 유효부피 중간 지점의 토출구를 이용해 일정량을 샘플링 한 후 성상 분석 및 Rheometer를 이용한 유변학적 측정을 진행하였다.

2.3. 분석방법

실험에 사용된 음식물류폐기물과 하수슬러지에 대한 TS, VS, TCOD, SCOD는 Standard method에 따라 측정하였고²³⁾, pH는 pH Meter(HM-30R, DDK-TOA)를 이용하여 측정하였다. 바이오가스 발생량은 2시간 단위로 Wet Gas Meter(W-NK Type)에서 측정한 후에 STP(Standard temperature and pressure)조건으로 환산하여 계산하였다. 메탄가스 발생량은 반응조 내의 Head space를 Gas-Tight 실린지로 0.5 mL 채취하여 Gas-Chromatography (GOW-MAC serie 580, USA)로 분석하였다. 운반기체는 고순도 질소(99.999 %)가스를 사용하였고, 유량은 30 mL/min으로 유지하였으며 Injector, Column, Detector의 온도는 각각 70, 50, 80°C로 하였다. 유기산 분석은 실험 초기와 발효가 종료된 시점의 샘플을 20배 희석하여 공극이 0.45 μm 인 멤브레인 Filter로 여과한 후 Aminex HPX-87H(BioRad, USA)컬럼이 장착된

HPLC(Model VP, Shimadzu Co., Japan)로 분석하였다.

2.4. 유변학적 측정 및 모델

유변학적 측정은 Air Compressor(OS100, Air-Maker)가 연결된 Rheometer(MCR-92 model, Anton-parr)를 이용하여 측정하였다. 장착된 Plate는 Parallel Plate Geometry(직경: 49.975 mm, Gap size: 1 mm)를 사용하였으며, 측정 온도는 반응조의 온도와 같은 35°C로 측정하였다. 유변학적 측정에 앞서, 각 샘플들은 측정의 재현성을 확보하기 위해 전단속도 500 s⁻¹에서 5분동안 pre-shear를 수행하였다.²⁴⁾ 측정 중에 샘플이 증발하는 것을 방지하기 위해 식용유를 이용하여 Plate 사이를 얇게 덮어주었다.²⁵⁾

본 연구에서 유변학적 측정에 사용된 모델은 Casson model로 1959년에 N. Casson이 수립한 공식이다. 이 식은 초기에 프린터 잉크의 유변학적 특성을 분석하고자 개발되었으나, 후에 음식물의 유변학적 측정에 쓰이고 있다.²⁶⁾ Casson model의 식은 다음과 같다.

$$\tau - \tau_0^{0.5} = \eta_\infty^{0.5} \gamma^{0.5}$$

여기서,

τ = 전단응력 (Shear stress, Pa)

τ_0 = 항복응력 (Yield stress, Pa)

η_∞ = 전단속도 1000s⁻¹ 이상일 때의 점도 (Infinite viscosity, Pas)

γ = 전단속도 (Shear rate, s⁻¹)

2.5. 교반시스템 설계

최근까지 유기성폐기물의 농도, 온도에 따른 유변학적 특성 및 혐기성 소화 시 유변학적 특성의 변화는 다수 보고되어 왔는데, 그 특성을 기반으로 실제 설계시스템을 제시한 연구는 없었다.²⁷⁾⁻²⁹⁾ 조사한 특성을 기반으로 교반 시스템을 구축하지 못한 이유는 다양한 유변학적 측정방법 및 절차, 모델의 존재가 원인이다.³⁰⁾ 따라서, 본 연구에서 음식물류폐기물의 유변학적 측정 시 사용된 방법과 절차를 기

반으로 산출된 점도를 이용하여 교반시스템 설계 시 반응조의 크기와 직경-높이 비, 임펠러를 설정하여 최적의 교반강도를 계산하였다. 반응조는 원기둥형으로 총 부피는 5 m³, 반응조 직경-높이 비(D_t:H_t)는 1:1로 설정하였으며 임펠러의 형상은 Paddle형으로 하였고 반응조 직경-임펠러 직경 비(D_t:D_i)는 3:1로 하였다. 임펠러가 장착된 반응조의 설계도는 Fig. 1에 나타내었다.

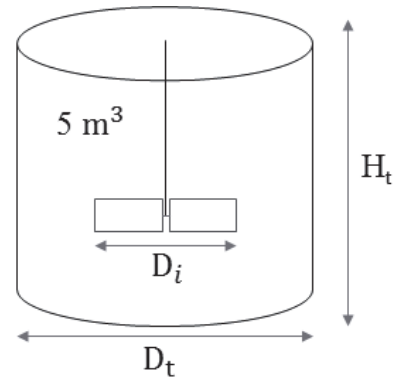


Fig. 1. Design of reactor with paddle type impeller.

최적 교반강도는 임펠러에 기반한 레이놀즈수를 이용하여 난류(Re_i>10,000)가 됐을 때, 그 때의 교반강도를 산출하였다. 임펠러가 존재할 때의 레이놀즈수와 관련된 식은 다음과 같다.³¹⁾

$$Re_i = \frac{D_i^2 N \rho_f}{\mu_f}$$

여기서,

Re_i = 임펠러에 기반한 레이놀즈수

D_i = 임펠러의 직경 (m)

N = 초당 회전 속도 rps

ρ_f = 유체의 밀도 (kg/m³)

μ_f = 유체의 점성 (Pas)

위의 레이놀즈수를 구하는 식에서 rps는 Rheometer에 장착된 Parallel plate의 각속도를 rpm으로

로 변환해주어 구할 수 있다. 이와 관련된 그림은 Fig. 2에 나타내었고 식은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{R\Omega}{h}$$

여기서,

R = Parallel plate의 반경 (mm)

Ω = 각속도 (rad/s)

h = Gap 크기 (mm)

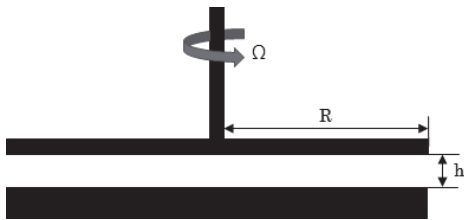


Fig. 2. Parallel plate.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수소발효 성능

하수슬러지가 혼합된 음식물류폐기물의 수소발효 시 농도에 따른 누적 수소 생산량과 수소발효 성능은 Fig. 3과 Table 2에 나타내었다. 기질의 농도가 증가할수록 누적 수소생산량은 증가하였고, 10, 20, 30, 40, 50 g Carbo. COD/L에서의 수소전환율은 각각 1.40, 1.65, 1.86, 1.82, 1.67 mol H₂/mol hexose_{added}로, 30 g Carbo. COD/L에서 가장 높은 수소전환율을 보였다. 50 g Carbo. COD/L의 농도 조건에서는 수소생산과 무관한 유산이 전체 유기산의 32.7%를 차지하는 것을 보아 수소생산이 고농도에서 저해되는 것으로 관찰되었다.³²⁾ 기질 농도가 30 g Carbo. COD/L일 때, 운전 pH 4.5~6.5에 따른 수소전환율은 각각 0.51, 1.76, 1.77, 1.55, 1.11 mol H₂/mol hexose_{added}로, 운전 pH 5.5에서 수소전환율이 가장 높았다. 기존 문헌에서는 뷰틸산/아세트산의 비율이 3~4 일 때, 수소생산이 가장 활발한 것으로 보고되어져 왔는데 본 연구에서 운전 pH에 따른 뷰틸산/아

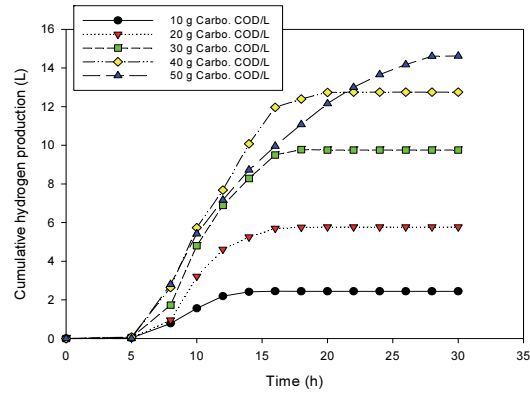


Fig. 3. Cumulative H₂ production at various substrate concentrations of food waste.

Table 2. H₂ fermentation performance at various substrate concentrations

Concentration (g Carbo. COD/L)	10	20	30	40	50
Cumulative H ₂ production (L)	2.4	5.8	9.8	12.8	14.6
H ₂ yield (mol H ₂ /mol hexose _{added})	1.40	1.65	1.86	1.82	1.67
Organic acids (g COD/L)	6.9	11.9	19.1	25.8	43.3

세트산의 비는 각각 5.5, 3.4, 4.0, 2.9, 2.8로 H_{Bu}/H_{Ac}의 비율이 3~4 사이값인 pH 5.0과 5.5에서 가장 높은 수소전환율을 나타내었다.³³⁾

3.2. 유변학적 측정

농도에 따른 발효 전/후 샘플의 유변학적 측정 결과를 Table 3과 Table 4에 나타내었고, 농도 및 운전 pH 조건에서 전단속도에 따른 점도 변화 그래프는 Fig. 4에 나타내었다. 최근 보고된 음식물류폐기물 조성에 따른 유변학적 특성을 조사한 문헌에 따르면, 탄수화물이 많을수록 점도는 증가하며 모든 조성에서 전단속도가 증가함에 따라 점도가 비선형으로 감소하는 Shear thinning 거동을 보였다.³⁴⁾ 본 실험에서도 모든 탄수화물 농도 조건에서 전단속도 증가에 따라 점도가 감소하는 Shear thinning 거동이 나타났고, 탄수화물 농도가 증가함에 따라 Zero viscosity와 Infinite viscosity, 항복응력이 증가하는 경향을 보였다. 혐기성 수소발효 이후 음식물류폐기물

Table 3. Rheological properties of food waste prior to H₂ fermentation

Concentration (g Carbo. COD/L)	10	20	30	40	50
Yield stress (mPa)	1.3	41.0	141.3	89.7	788.1
Zero viscosity (mPas)	6.8	77.0	215.3	231.3	1,274.1
Infinite viscosity (mPas)	2.2	5.6	7.8	32.9	58.1

Table 4. Rheological properties of food waste after H₂ fermentation

Concentration (g Carbo. COD/L)	10	20	30	40	50
Yield stress (mPa)	3.6	14.5	28.4	47.1	265.7
Zero viscosity (mPas)	10.4	23.9	47.8	80.4	346.2
Infinite viscosity (mPas)	1.7	1.2	2.5	4.4	5.3

의 점도는 모든 농도 조건에서 실험 초기보다 감소하였고, 탄수화물 농도가 높을수록 수소발효 후에 점도의 감소폭이 컸다. 실험 초기 Zero viscosity와 Infinite viscosity는 농도가 증가함에 따라 각각 6.8~1,274.1 mPas, 2.2~58.1 mPas였고, 발효 종료 후 Zero viscosity는 5.8~346.2 mPas, Infinite viscosity는 1.7~5.3 mPas로 감소하는 경향이 나타났다. 저농도 (10, 20 g Carbo. COD/L) 수소발효액의 점도는 큰 차이가 없었는데, 이는 실험 초기의 점도가 다른 농도에 비해 현저히 낮았던 것이 원인으로 사료된다. 고농도(30~50 g Carbo. COD/L)에서 점도가 감소한 이유는 음식물류폐기물의 복잡하고 긴 사슬 분자들이 절단되면서 짧은 사슬 분자가 되었기 때문으로 판단된다.

기존의 슬러지 관련 유변학 연구결과에 따르면, 농도가 증가함에 따라 점도가 증가하는 이유는 입자간 상호작용이 향상되었기 때문으로 보고되었다. 농도가 증가하면 내부 입자가 서로 가까워짐에 따라 입자 네트워크가 형성되고 슬러지 입자의 상호작용이 크게 촉진되어 점도가 증가될 수 있다고 한

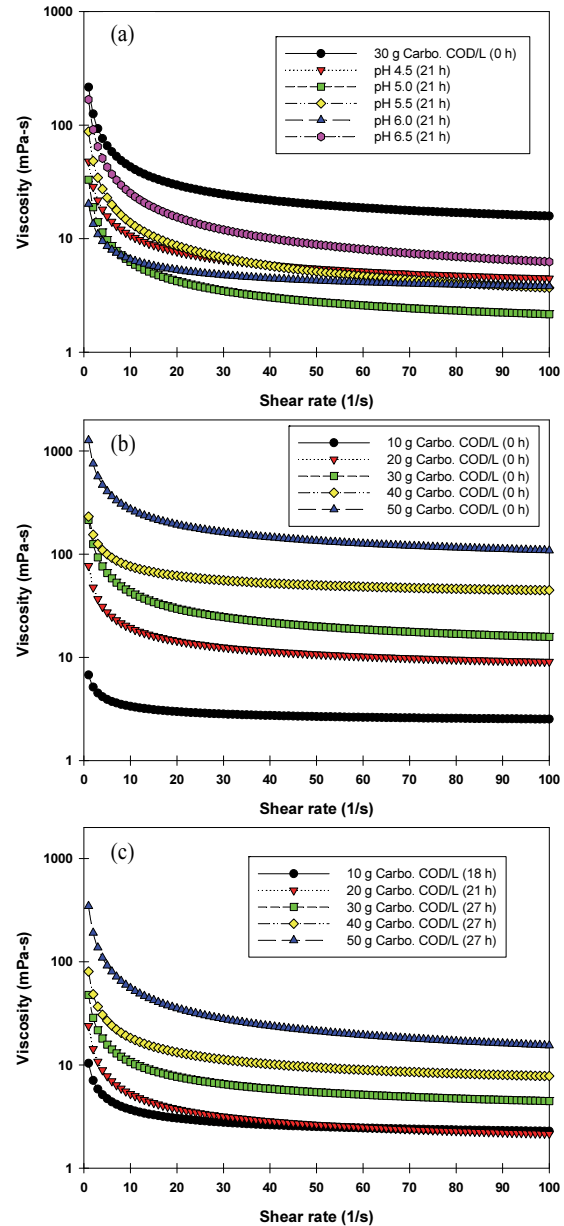


Fig. 4. The viscosity change of hydrogen fermented food waste depending on (a) the operational pH, (b) substrate concentrations (before fermentation), and (c) substrate concentrations (after fermentation)

다.^{25,35)} 다른 근거로는 슬러지의 고형물 농도가 증가하면 유변학적 거동에 영향을 주는 다당류와 단백질의 농도가 증가하기 때문에 점도가 증가된 것으로 해석하였다.^{14,36)} 본 실험에서 단백질을 측정하진 않았지만, 탄수화물 농도의 증가가 점도 증가를 유발한 원인으로 사료되고, 수소발효를 통해 탄수화물이

분해되면서 점도가 감소한 것으로 판단된다. 운전 pH에 따른 수소발효의 유변학적 측정 결과, 실험 초기와 발효가 끝난 후 모든 발효액에서 Shear thinning 거동을 보였지만, 발효액에서 운전 pH에 따른 점도 값의 변화는 크지 않았다. 따라서, 음식물류폐기물의 유변학적 특성을 조사할 때, 운전 pH는 중요하게 고려되지 않아도 될 인자로 판단된다.

3.3. 교반강도 설계

농도에 따른 수소 발효액의 유변학적 측정 결과를 토대로 Paddle형 임펠러가 장착된 5 m³의 원기둥형 반응조에서 각 농도별 음식물류폐기물의 수소발효 전과 후의 교반강도를 산출하였고, 이를 Table 5에 제시하였다. 음식물류폐기물의 밀도는 발효가 진행됨에 따라 지속적으로 변하기 때문에 1,100 kg/m³으로 밀도를 고정하여 레이놀즈수가 10,000 이상이 되었을 때의 교반강도를 계산하였다. 수소전환율이 가장 좋았던 30 g Carbo. COD/L의 경우, 교반강도는 실험 초기에 26.0 rpm으로 교반을 하고 발효가 진행됨에 따라 점도가 낮아지므로 발효 이후 교반강도는 10.0 rpm으로 감소시킬 수 있을 것으로 예상되었다. 10 g Carbo. COD/L에서는 낮은 농도로 인하여 점도의 변화가 거의 없었기 때문에 실험 초기와 발효 후 교반강도가 같게 나타났다. 하지만, 20~50 g Carbo. COD/L에서는 농도가 높을수록 발효 후 교반강도를 현저히 감소시킬 수 있다는 결과를 얻었고, 이에 따라 20 g Carbo. COD/L 이상의 농도의 음식물류폐기물을 수소발효 할 때에 발효가 진행됨에 따라 교반강도를 점차 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5. Required agitation intensity levels (rpm) during hydrogen fermentation of food waste at various substrate concentrations

Concentration (g Carbo. COD/L)	RPM (1/min)	
	Initial	Final
10	5.0	5.0
20	16.4	6.1
30	26.0	10.0
40	59.2	14.9
50	94.8	26.4

3.4. 한계점

본 연구에서 사용된 설계방법에는 몇 가지 한계점이 존재한다. 이전에 언급했듯이, 비뉴턴유체의 유변학적 측정에는 다양한 방법과 절차가 존재하여 통일이 필요한 것으로 보고되고 있으며, 임펠러에 기반한 레이놀즈수를 계산할 때 임펠러의 직경만 포함되므로 임펠러의 형상까지 고려하지 못하는 한계가 있다.³⁰⁾ 또한 수소발효가 진행중인 발효액의 점도 값은 측정이 어려운데, 그 이유는 발효가 진행중인 발효액을 Rheometer에서 측정할 때에 바이오가스가 발생하여 관과 관 사이에 바이오가스로 인한 전단응력이 작용하여 점도 값의 균일한 실험 결과 도출이 불가능한 것이 원인이다. 발효가 진행중인 샘플의 유변학적 측정을 위해 수소발효 미생물의 활성을 통제하여 가스가 발생하는 것을 억제시켜야 하는데, 샘플을 냉각하여 측정하는 방법은 열이력 효과(동일한 샘플을 같은 온도에서 측정을 할 때, 다른 온도를 경험한 샘플의 경우 유변학적 특성이 변화되는 효과)에 의해 정확한 값을 얻기가 힘들다.^{37,38)} 따라서, 본 연구에서의 교반강도 설계법은 실제 하수처리 플랜트 설계에서 기초자료로 사용될 수 있으나, 발효 중인 음식물류폐기물의 정확한 유변학적 특성을 파악하기 위해 미생물 활성을 억제시킬 측정 방법이 보완되어야 할 필요가 있다.

4. 결론

음식물류폐기물의 혐기성 수소발효 시, 기질 농도 10~50 g Carbo. COD/L와 운전 pH 4.5~6.5 조건에서 유변학적 측정을 수행하였고, 탄수화물 농도 조건에서 측정된 점도 값을 이용해 교반강도 설계를 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 음식물류폐기물의 혐기성 수소발효에서 가장 적합한 조건의 기질 농도와 운전 pH는 각각 30 g Carbo. COD/L와 pH 5.5로 나타났으며, 수소전환율은 각각 1.86, 1.77 mol H₂/mol hexose_{added}였다.
- 운전 pH에 따른 음식물류폐기물의 혐기성 수소발효 실험 결과, 발효액은 비뉴턴유체로서 Shear

thinning 거동을 보였으나, 발효 이후 운전 pH에 따른 유변학적 특성에는 큰 차이가 없었다.

3. 기질의 초기 농도가 높을수록 점도가 높게 나타났고, 발효 이후 탄수화물이 분해됨에 따라 점도의 감소폭도 더 증가하였다.

4. 기질 농도에 따른 실험 결과를 바탕으로 교반강도를 설계한 결과, 10 g Carbo. COD/L는 초기 점도 값이 낮아 발효가 진행된 이후 교반강도는 차이가 없었으나, 20~50 g Carbo. COD/L에서는 농도가 높을수록 교반강도의 감소폭이 커졌다.

5. 이는 에너지 플랜트 및 비뉴턴 유체인 유기성 폐기물의 생물학적 처리 시스템에서 생물학적 반응이 진행되는 경우, 교반강도를 점차 감소시켜 교반에 사용되는 에너지를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [김의영, 홍영규, 신세계, 오택근, 이창훈, 이덕배, 김성철, “국내 음식물 폐기물의 자원화 및 감량화 정책 변화 고찰”, 한국토양비료학회지] Kim, E.Y., Hong, Y.G., Shin, S.G., Oh, T.K., Lee, C.H., Lee, D.B., Kim, S.C., “Review of food waste utilization and reduction policy in Korea”, Korean Journal of Soil Science and Fertilizer, pp. 229~229. (2015).
- [녹성장위원회, 음식물쓰레기 줄이기 종합대책] Green Growth Korea, “Comprehensive measures to reduce food waste”, (2010).
- [최근호, 엄태호, “정보기술을 활용한 지방정부 환경규제의 성과에 관한 연구: 음식물쓰레기종량제를 중심으로”, 지방정부연구학회] Choi, K.H., Eom, T.H., “A Study on the performance of environmental regulation of local government utilizing information technology: Focusing on the food waste system”, The Korean Journal of Local Government Studies, 21(2), pp. 77~102. (2017).
- [박종웅, 최동혁, “음폐수를 탄소원으로 이용시 생분해 및 탈질특성에 미치는 영향”, 한국도시환경학회지] Park, J.W., Choi, D.H., “Effect of Biodegradation and Denitrification Characteristics using Carbon Source with Food Wastes Leachate”, Journal of Korean Society of Urban Environment, 11(1), pp. 41~48. (2011).
- Ghosh, S., Buoy, K., Dressel, L., Miller, T., Wilcox, G., Loos, D., “Pilot-and full-scale two-phase anaerobic digestion of municipal sludge”, Water Environ Res, 67(2), pp. 206~214. (1995).
- [황보준권, 서재건, 윤희철, 박현건, 이보원, “단상 및 이상혐기성소화공정을 이용한 음폐수의 바이오에너지화”, 토지주택연구원 학술지] Hwangbo, J.K., Seo, J.G., Yoon, H.C., Park, H.G., Lee, B.W., “The single- and two-phase anaerobic digestion of food waste effluent”, LHI Journal, 2(1), pp. 87~92. (2011).
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T., “Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production”, Renew. Sustain. Energy Rev., 38, pp. 383~392. (2014).
- Ueno, Y., Fukui, H., Goto, M., “Operation of a two-stage fermentation process producing hydrogen and methane from organic waste”, Environ. Sci. Technol., 41(4), 1413-1419. (2007).
- Nagao, N., Tajima, N., Kawai, M., Niwa, C., Kurosawa, N., Matsuyama, T., Yusoff, F.M., Toda, T., “Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste”, Bioresour Technol, 118, pp. 210~218. (2012).
- [김홍석, 이태진, “슬러지 저감을 위한 혐기성 소화조 개선에 관한 연구”, 대한환경공학회] Kim, H.S., Lee, T.J., “A study of the improvement in an anaerobic digester for sludge reduction”, Korean Society of Environmental Engineers, 33(7), pp. 516~522. (2011).
- [환경부, 음식물류폐기물 바이오가스화시설 기술지침서 2nd Edition] Ministry of Environment, “Food waste biogasification facility technical guide book: 2nd Edition”, (2015).
- [경기개발연구원, 소화조 효율개선 및 에너지 자원화사업 타당성 평가] Gyeonggi Research

- Institute, "Improvement of digestion tank efficiency and feasibility study on biomass gas use", pp. 1~145. (2011).
13. Hreiz, R., Adouani, N., Fünfschilling, D., Marchal, P., Pons, M. N., "Rheological characterization of raw and anaerobically digested cow slurry", *Chem Eng Res Des*, 119, pp. 47~57. (2017).
 14. Baroutian, S., Eshtiaghi, N., Gapes, D. J., "Rheology of a primary and secondary sewage sludge mixture: dependency on temperature and solid concentration", *Bioresour Technol*, 140, pp. 227~233. (2013).
 15. Baudez, J. C., Markis, F., Eshtiaghi, N., Slatter, P., "The rheological behaviour of anaerobic digested sludge", *Water Res*, 45(17), pp. 5675~5680. (2011).
 16. Wang, H. F., Hu, H., Yang, H. Y., Zeng, R. J., "Characterization of anaerobic granular sludge using a rheological approach", *Water Res*, 106, pp. 116~125. (2016).
 17. [김동훈, 이모권, 임소영, 김미선, "혐기 발효 공정을 통한 음식물류폐기물 탈리액으로부터 수소 생산", 한국수소 및 신에너지학회] Kim, D.H., Lee, M.K., Lim, S.Y., Kim, M.S., "Dark fermentative hydrogen production using the wastewater generated from food waste recycling facilities", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 22(3), pp. 326~332. (2011).
 18. Kim, D.H., Kim, S.H., Kim, H.W., Kim, M.S., Shin, H.S., "Sewage sludge addition to food waste synergistically enhances hydrogen fermentation performance", *Bioresour Technol*, 102(18), pp. 8501~8506. (2011).
 19. Eshtiaghi, N., Markis, F., Yap, S. D., Baudez, J. C., Slatter, P., "Rheological characterisation of municipal sludge: a review", *Water Res*, 47(5), pp. 5493~5510. (2013).
 20. Karthikeyan, O. P., Trably, E., Mehariya, S., Bernet, N., Wong, J. W., Carrere, H., "Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: A review", *Bioresour Technol*, (2017).
 21. Lay, J. J., Fan, K. S., Ku, C. H., "Influence of chemical nature of organic wastes on their conversion to hydrogen by heat-shock digested sludge", *Int J Hydrogen Energy*, 28(12), pp. 1361~1367. (2003).
 22. Kim, D. H., Kim, S. H., Jung, K. W., Kim, M. S., Shin, H. S., "Effect of initial pH independent of operational pH on hydrogen fermentation of food waste", *Bioresour Technol*, 102(18), pp. 8646~8652. (2011).
 23. APHA., "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 21th Edition. (2005).
 24. Baudez, J. C., Gupta, R. K., Eshtiaghi, N., Slatter, P., "The viscoelastic behaviour of raw and anaerobic digested sludge: strong similarities with soft-glassy materials", *Water Res*, 47(1), pp. 173~180. (2013).
 25. Jiang, J., Wu, J., Poncin, S., Li, H. Z., "Rheological characteristics of highly concentrated anaerobic digested sludge", *Biochem Eng J*, 86, pp. 57~61. (2014).
 26. Casson, N., "Flow equation for pigment-oil suspension of the print ing ink type. In: rheology of disperse systems", C.C. Mill, Ed., pp. 84~102, (1959).
 27. Markis, F., Baudez, J. C., Parthasarathy, R., Slatter, P., Eshtiaghi, N., "Rheological characterisation of primary and secondary sludge: Impact of solids concentration", *Chem Eng J*, 253, pp. 526~537. (2014).
 28. Mu, Y., Chen, X. H., Yu, H. Q., "Rheological properties of anaerobic hydrogen-producing flocs", *Biochem Eng J*, 34(1), pp. 87~91. (2007).
 29. Dai, X., Gai, X., Dong, B., "Rheology evolution of sludge through high-solid anaerobic digestion", *Bioresour Technol*, 174, pp. 6~10. (2014).
 30. Ratkovich, N., Horn, W., Helmus, F. P., Rosenberger, S., Naessens, W., Nopens, I., Bentzen, T. R., "Activated sludge rheology: a critical review on data collection and modelling", *Water Res*, 47(2), pp. 463~482. (2013).

31. Brodkey, R. S., Hershey, H. C., "Transport phenomena: a unified approach: Chapter 9", McGraw-Hill, pp. 359~399. (2003).
32. Noike, T., Takabatake, H., Mizuno, O., Ohba, M., "Inhibition of hydrogen fermentation of organic wastes by lactic acid bacteria", *Int J Hydrogen Energy*, 27(11), pp. 1367~1371. (2002).
33. Khanal, S. K., Chen, W. H., Li, L., Sung, S., "Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products", *Int J Hydrogen Energy*, 29(11), pp. 1123~1131. (2004).
34. Baroutian, S., Munir, M. T., Sun, J., Eshtiaghi, N., Young, B. R., "Rheological characterisation of biologically treated and non-treated putrescible food waste", *Waste Manag.* (2017).
35. Seyssiecq, I., Marrot, B., Djerroud, D., Roche, N., "In situ triphasic rheological characterisation of activated sludge, in an aerated bioreactor", *Chem Eng J*, 142(1), pp. 40~47. (2008).
36. Cao, X., Jiang, Z., Cui, W., Wang, Y., Yang, P., "Rheological properties of municipal sewage sludge: dependency on solid concentration and temperature", *Procedia Environ Sci*, 31, pp. 113~121. (2016).
37. Farno, E., Baudez, J. C., Parthasarathy, R., Eshtiaghi, N., "Rheological characterisation of thermally-treated anaerobic digested sludge: Impact of temperature and thermal history", *Water Res*, 56, pp. 156~161. (2014).
38. Farno, E., Baudez, J. C., Parthasarathy, R., Eshtiaghi, N., "The viscoelastic characterisation of thermally-treated waste activated sludge", *Chem Eng J*, 304, pp. 362~368. (2016).