

주방용 오물분쇄기로 처리된 음식물류 폐기물의 혐기성 수소 발효

최재민¹ · 이채영^{2†}

¹수원대학교 토목공학과, ²하천환경기술연구소

Anaerobic Hydrogen Fermentation of Food Waste Treated by Food Waste Disposer

JAE MIN CHOI¹, CHAE YOUNG LEE^{2†}

¹Dept. of Civil Eng., The University of Suwon, 17, Wauan-gil, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea

²Institute of River Environmental Technology, 17, Wauan-gil, Gyeonggi-do, Korea

Abstract >> This study was conducted to evaluate the characteristics of mesophilic fermentative H₂ production from food waste which was treated by food waste disposer. It was found that H₂ yield and lag phase were affected by particle size of food waste. The H₂ yield decreased with increasing particle size while lag phase increased. The maximum H₂ yield was found 0.584±0.03 mol H₂/mol hexose at particle size smaller than 0.30 mm. The H₂ production rate was also affected by chemical composition of food waste. The H₂ production rate linearly decreased with increasing proteins to carbohydrates ratio(P/C ratio) where the maximum value was 0.031±0.006 mol H₂/mol hexose·h at 0.17.

Key words : Food waste(음식물류 폐기물), Anaerobic H₂ fermentation(혐기성 수소 발효), Food waste disposer(주방용 오물분쇄기), Particle size(입자 크기), Proteins to Carbohydrates ratio(단백질/탄수화물 비)

1. 서 론

음식물류 폐기물의 발생은 생활수준의 향상과 외식비 증가 등의 요인으로 인해 매년 증가하는 추세를 보이고 있다¹⁾. 음식물류 폐기물은 주거 환경에 미관 및 악취 문제를 유발한다. 또한, 차량 수거로 인해 CO₂, 소음 및 인건비 등이 발생한다²⁾. 국내에서는 발생하는 음식물류 폐기물은 재활용, 소각 및 직매립

등에 의해 처리되었다. 그러나 2013년부터 음식물류 폐수의 해양투기 금지와 사료화 등의 재활용 기준 강화로 인해 대안이 필요한 상황이다¹⁻³⁾.

음식물류 폐기물은 에너지원으로써 잠재력을 가지고 있으며 적절한 기술 적용 시 기존 자원의 소비를 감소시키며 환경 보전에도 크게 기여할 수 있다³⁾. 최근 신·재생에너지에 대한 관심이 증대됨에 따라 음식물류 폐기물 혐기성 소화 처리가 주목받고 있다²⁾. 혐기성 소화의 경우 음식물류 폐기물의 효율적 처리 및 에너지화를 동시에 달성할 수 있어 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁾. 또한, 혐기성 소화를 통한 메탄

[†]Corresponding author : chaeyoung@suwon.ac.kr

[접수일 : 2014.10.12 수정일 : 2014.10.28 게재확정일 : 2014.10.31]

Copyright © 2014 KHNES

가스 생산뿐만 아니라 혐기성 수소 발효를 통해 수소가스 생산에 대한 연구도 진행되고 있다.

수소는 높은 열량을 가지고 있으며 화석 연료로 인해 유발된 대기 오염 문제를 극복할 수 있는 미래의 에너지 매개체로서 주목받고 있다⁵⁾. 수소를 생산하는 방법으로는 물리적, 화학적 및 생물학적 방법이 있다. 그 중 생물학적 방법은 저렴하고 친환경적 재생가능한 에너지원을 이용하여 전 세계적으로 주목받고 있다⁶⁾. 생물학적 방법에는 크게 광합성 방법과 혐기성 수소 발효가 있다. 혐기성 수소 발효는 광합성 방법에 비해 수소 발생 속도가 빠르며 상대적으로 저렴한 비용으로 다양한 유기성 폐기물에 적용이 가능하여 보다 실현 가능하며 다양한 분야에 적용될 수 있다⁷⁻⁹⁾.

혐기성 수소 발효는 복잡한 일련의 과정에 따라 진행되며 기질의 입자 크기와 농도, pH 및 온도 등에 영향을 받는다⁹⁾. 특히 기질의 입자 크기는 초기 수소 생산 속도에 영향을 미치는 인자 중 하나이다¹⁰⁾. Yuan 등(2011)은 입자 크기에 따른 수소, 초산 및 낙산의 누적 발생량을 평가하였다. 그 결과에 따르면 입자의 크기가 커질수록 발생량은 감소하는 것으로 나타났다⁹⁾.

음식물류 폐기물을 이용한 혐기성 수소 발효에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. Okamoto 등(2000)은 혐기성 회분식 수소 발효를 통해 양배추, 당근 및 쌀밥의 수소 발효 특성을 평가하였다¹¹⁾. Tawfik과 El-Qelish(2012)는 음식물류 폐기물과 주방 하수를 이용하여 중온 혐기성 연속 수소 발효의 특성을 평가하였다¹²⁾. Kim 등(2011)과 Shin 등(2004)은 음식물류 폐기물을 이용하여 혐기성 수소 발효를 평가하였으며, 그 결과 수소 수율은 1.9 및 1.80mol H₂/mol hexose로 나타났다¹³⁻¹⁴⁾. Lee 등(2011)은 주방용 오물분쇄기를 이용하여 배출된 음식물류 폐기물의 혐기성 수소 발효 특성을 평가하였다. 그 결과 수소 수율은 65.5 mL H₂/g Volatile Solids(VS)로 나타났다²⁾.

주방용 오물분쇄기로 처리된 음식물류 폐기물의 혐기성 수소 발효에 대한 연구는 일부 연구자들에 의해 수행되어져 왔다. 그러나 주방용 오물분쇄기 사용 시 음식물류 폐기물의 입자 크기에 따른 혐기성 수소 발효 특성에 관한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 주방용 오물분쇄기를 이용하여 처리된 음식물류 폐기물의 특성을 평가하고, 이에 이용한 혐기성 수소 발효 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 식종 미생물 및 기질

2.1.1 식종 미생물

식종 미생물은 하수처리장 소화조에서 유출하는 소화슬러지를 이용하였다. 소화슬러지의 총 부유물질(Total Suspended Solids, TSS), 휘발성 부유물질(Volatile Suspended Solids, VSS), pH 및 알칼리도는 각각 18.7±0.2g/L, 13.8±0.2g/L, 6.7과 2.3±0.3g as CaCO₃/L로 나타났다. 채수한 소화슬러지는 식종 미생물로 이용하기 위해 10mm 체를 이용하여 불순물을 제거하였다. 걸러진 소화 슬러지는 수소 소모 미생물과 비수소 미생물의 성장을 억제하기 위해 90°C에서 20분간 열처리를 수행하였다²⁾.

2.1.2 기질

기질인 음식물류 폐기물은 무게 함량을 기준으로 국내 공동 주택에서 발생하는 조성과 동일하게 구성하였다¹⁵⁾. 합성 음식물류 폐기물의 조성은 곡식류(쌀밥) 35%, 야채류(배추) 35%, 과일류(수박 껍질) 25%, 그리고 육류(닭가슴살) 5%이다. 합성 음식물류 폐기물은 주방용 오물분쇄기로 분쇄하였으며 입자 크기는 5개의 체(0.30, 0.60, 0.85, 2.00, 4.75mm)를 이용하여 분류하였다.

2.2 실험장치 및 운전조건

혐기성 회분식 수소 발효 장치의 총 체적 및 유효 체적은 각각 560과 300mL이며 아크릴 재질로 제작하였다. pH 및 가스 측정을 위해 반응조 상단면에 측정구를 장착하였다. 식중은 반응조 유효 체적의 30%를 식중 미생물로 채우고 나머지 부분은 탄수화물의 농도 30g Chemical Oxygen Demand(COD)/L로 채웠다¹³⁾. 식중 완료 후 고순도 질소를 이용하여 5분간 탈기시켜 혐기성 상태로 치환하였다. 초기 pH는 8.0으로 고정하였으며 운전 pH는 5N KOH와 3N HCl을 이용하여 5.3±0.1로 유지하였다^{13,15)}. 배양 온도는 열순환 펌프가 장착된 온탕기를 이용하여 35±1°C로, 교반 속도는 150rpm으로 고정하였다.

2.3 분석 및 해석 방법

바이오가스 발생량은 유리 주사기를 이용하여 반응조 상단의 가스 배출구를 이용하여 측정하였으며 수소 가스의 함량은 gas-tight syringe를 이용하여 0.2mL 채취한 후 열전도검출기(Thermal Conductivity Detector, TCD)가 장착된 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, Gow Mac series 580, USA)를 이용하여 측정하였다. 가스 크로마토그래피의 운반체로는 초고순도 질소(99.999%)를 사용하였으며 유속은 30mL/min으로 고정하였다. Column은 molecular sieve 5A(80/100mesh)를 충전제로 사용한 1.8m × 3.2mm stainless steel column을 이용하였다. Column, injector와 detector의 온도는 50, 80 및 90°C로 유지하였다.

발생된 수소 가스는 수정된 Gompertz 식을 이용하여 지체 시간, 수소 발생을 및 최대 수소 발생량을 평가하였다(식 (1)).

$$H = P \cdot \exp \left[- \exp \left\{ \frac{R_m \cdot e}{P} (\lambda - t) + 1 \right\} \right] \quad (1)$$

여기서, H는 누적 수소 발생량(mol H₂/mol hexose), P는 최대 수소 발생량(mol H₂/mol hexose), λ는 지체 시간(h), R_m은 최대 수소 발생 속도(mol H₂/mol hexose·h) 그리고 e는 지수를 나타낸다.

음식물류 폐기물의 총 고형물(Total Solids, TS), VS 및 COD는 Standard Methods에 준하여 수행하였다¹⁶⁾. 음식물류 폐기물의 원소 분석(C, H, O, N)은 동결 건조 후 원소분석기(EA1110, Italy)를 이용하였으며 탄수화물, 지방, 단백질 분석은 식품공전에 따라 수행하였다¹⁷⁾.

소화 슬러지의 TSS, VSS, 및 알칼리도는 Standard Methods에 준하여 수행하였으며 pH는 Orion 8102 BNUWP ROSS Ultra[®] pH 전극(Thermo scientific, USA)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주방용 오물분쇄기로 처리된 음식물류 폐기물의 입자 크기별 특성

Fig. 1에는 주방용 오물분쇄기로 처리된 합성 음식물류 폐기물의 입도 분포를 제시하였다. 오물분쇄기로 분쇄 시 0.85~2.00mm 범위의 음식물류 폐기물이 가장 높은 분포로 나타났으며 0.3mm 이하의 입자

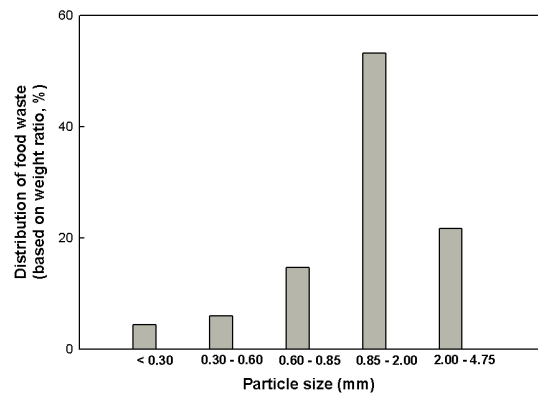


Fig. 1 Particle size distribution of food waste from food waste disposer

Table 1 The characteristics of food waste from food waste disposer

Item	Total	Particle size(mm)				
		< 0.30	0.30 - 0.60	0.60 - 0.85	0.85 - 2.00	2.00 - 4.75
COD(g/L)	42.7	24.0	27.6	28.7	50.6	54.7
VS(g/L)	47.6	26.8	31.2	32.9	57.2	59.7
C(%)	47.6	40.8	51.8	49.0	49.0	51.2
H(%)	5.8	6.8	6.6	7.5	7.2	7.4
O(%)	43.4	47.7	37.2	37.7	41.0	35.5
N(%)	3.2	4.7	4.4	5.8	2.8	5.9

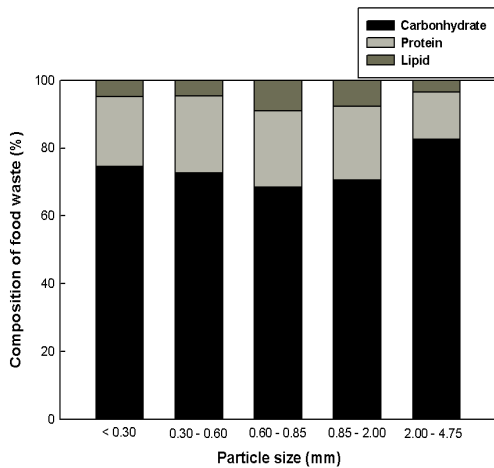


Fig. 2 Chemical composition in various particle size of food waste from food waste disposer

가 가장 적은 분포로 나타났다. Lee(2011)는 주방용 믹서기를 이용하여 음식물류 폐기물을 분쇄하였다. 그 결과 0.075mm 이하의 입자 크기에서 가장 큰 분포를 차지하였다¹⁸⁾. Yoo(2009)의 연구에 따르면 식당에서 발생하는 음식물류 폐기물의 입자 크기는 4.75mm 이상 범위에서 가장 높은 분포를 나타냈으며 오물분쇄기 사용 시 0.85 - 4.75mm 사이의 입경이 주된 분포로 나타났다¹⁹⁾. Table 1에는 오물분쇄기로 처리된 음식물류 폐기물의 화학적 조성을 제시하였다. 입자의 크기가 클수록 COD 및 VS 농도는 증가하는 경향으로 나타났다. 원소 조성은 0.30mm 이하의 음식물류 폐기물만 다른 범위에 비해 탄소는 낮고 산소는 높게 나타났다.

Fig. 2에는 입자 크기에 따른 음식물류 폐기물의

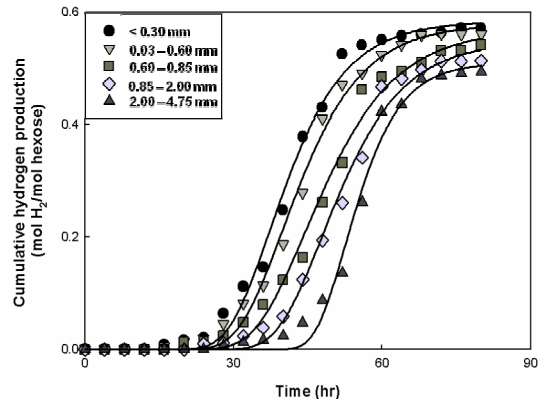


Fig. 3 Hydrogen production of food waste from food waste disposer

탄수화물, 단백질 및 지방 함량을 제시하였다. 탄수화물 농도는 2.00 - 4.75mm 범위의 입자 크기에서 82.5%, 단백질의 경우 0.60 - 0.85mm 범위에서 22.5%, 지방의 경우 0.60 - 0.85mm 범위에서 9.0%로 가장 높게 나타났다.

3.2 입자 크기에 따른 혐기성 수소 발효 특성

Fig. 3에는 입자 크기에 따른 수소 발생량을 제시하였으며 식 (1)을 이용하여 도출된 동역학적 상수는 Table 2에 정리하였다. Kim 등(2011)과 Shin 등(2004)의 연구 결과에 따르면 음식물류 폐기물로부터 혐기성 수소 발효 시 최대 수소 발생량은 1.9 및 1.8mol H₂/mol hexose로 높게 나타났다¹³⁻¹⁴⁾. 그러나 Lee(2011)의 연구 결과에 따르면 합성 음식물류 폐기물을 이용한 혐기성 수소 발효 시 최대 수소 발생량은 0.58±

Table 2 Fermentative hydrogen production of food waste with various particle size

	Particle size(mm)				
	< 0.30	0.30 - 0.60	0.60 - 0.85	0.85 - 2.00	2.00 - 4.75
H ₂ yield(mol H ₂ /mol hexose)	0.584±0.03	0.578±0.04	0.569±0.04	0.533±0.05	0.510±0.04
H ₂ production rate(mol H ₂ /mol hexose·h)	0.025±0.003	0.024±0.004	0.021±0.003	0.022±0.004	0.031±0.006
Lag phase(h)	29.0±2.4	30.1±2.3	34.4±3.2	38.8±4.1	46.5±4.8

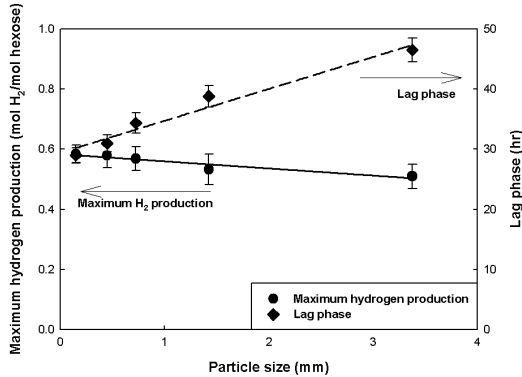


Fig. 4 Correlation between kinetic parameters(P and λ) and particle size

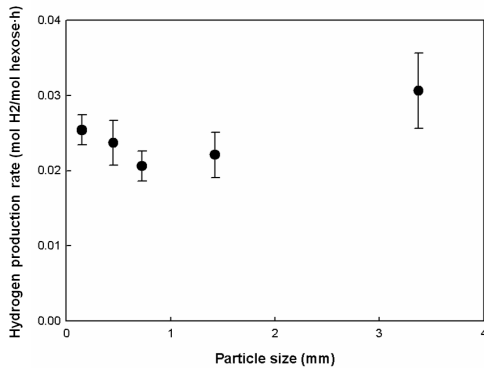


Fig. 5 Relationship between hydrogen production rate(R_m) and particle size

0.11mol H₂/mol hexose로 본 연구 결과와 유사하게 나타났¹⁸⁾. Fig. 4 및 5에는 기질 입도 분포의 중간 값을 이용하여 최대 수소 발생량, 지체 시간 및 수소 발생속도의 상관관계를 제시하였다. 실험 범위 내에서 입자 크기가 증가할수록 최대 수소 발생량은 선형적으로 감소하였다. 반면에 지체 시간은 입자 크기에 비례해 감소하는 경향으로 나타났다. 그러나 수소 발생 속도는 0.06 - 0.85mm 범위의 입자크기에서 가

장 낮게 나타났으며, 2.00 - 4.75mm 범위의 입자 크기에서 가장 높은 수소 발생 속도가 나타났다.

Yuan 등(2011)은 기질의 입자 크기를 1, 5 및 10mm로 구분하여 혐기성 수소 발효 특성을 평가하였다. 그 결과에 따르면 본 연구와 유사하게 입자 크기가 작아질수록 수소 발생량이 증가하는 것으로 나타났다⁹⁾. Izumi 등(2010)은 섬유질의 함량이 높고 분해도가 낮은 기질의 경우, 분쇄를 통해 바이오가스 발생량을 증가시킬 수 있는 것으로 보고하였다²⁰⁾. Zhang과 Banks(2013)의 연구에 따르면 기질의 입자 크기가 작을수록 표면적이 증가하여 미생물과의 접촉이 용이한 것으로 보고 하였다²¹⁾. 본 연구와 선행 연구들의 결과를 종합해 볼 경우, 음식물류 폐기물의 입자 크기가 작아질수록 최대 수소 발생량의 증가의 원인은 분해되기 어려운 물질이 분쇄를 통해 상대적으로 분해되기 쉬운 물질로 전환된 것으로 판단된다. 또한 지체 시간은 음식물류 폐기물의 입자 크기 감소에 따른 비표면적의 증가로 인해 미생물과 접촉이 용이해진 것으로 판단된다.

Reddy 등(2011)의 연구 결과에 따르면 탄수화물은 지방과 단백질에 비해 쉽고 빠르게 분해되는 물질로써 혐기성 수소 발효의 발생 속도에 영향을 미치는 것으로 보고하였다²²⁾. Elbeshbishy와 Nakhla(2012)는 단백질/탄수화물의 비(Proteins to Carbohydrates ratio, P/C ratio)에 따른 메탄 발생 속도에 관한 연구를 수행하였다²³⁾. 그 결과에 따르면 단백질의 비율이 증가할수록 메탄 발생 속도가 감소하는 것으로 나타났다²³⁾. 본 연구에서는 식중 시 탄수화물의 농도를 30g COD/L로 고정하였으며 단백질의 농도는 상대

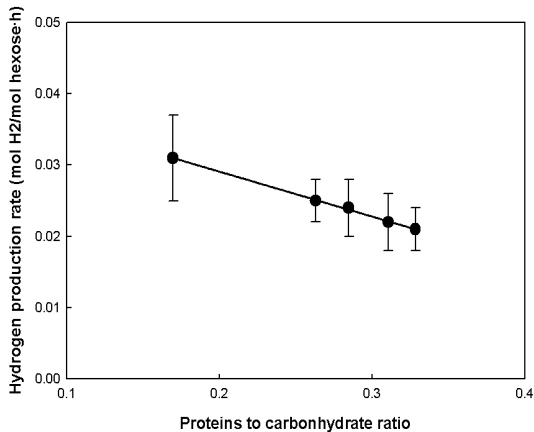


Fig. 6 Correlation between hydrogen production rate and P/C ratio

적으로 변화된다. Fig. 6에는 P/C 비에 따른 수소 발생 특성을 제시하였다. 실험 범위 내에서의 수소 발생 속도는 P/C 비가 증가할수록 선형적으로 감소하는 경향을 보였으며 Elbeshbishy와 Nakhla(2012)의 연구와 유사한 결과가 나타났다²³⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 주방용 오물분쇄기로 처리된 음식물류 폐기물의 입자 크기에 따른 혐기성 수소 발효 특성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 주방용 오물분쇄기로 처리된 음식물류 폐기물의 탄수화물 함량은 2.00~4.75mm 범위의 입자크기에서 가장 높게 나타났으며 단백질 및 지방의 함량은 0.60~0.85mm 범위에서 가장 높게 나타났다.
- 2) 주방용 오물분쇄기로 처리된 음식물류 폐기물의 지체 시간은 입자 크기에 비례해 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 수소 발생량은 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 수소 발생 속도는 P/C 비에 따라 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구는 주방용 오물분쇄기로 처리된 음식물류

폐기물의 입자 크기에 따른 혐기성 수소 발효 특성을 평가하였다. 향후 주방용 오물분쇄기 도입 시 혐기성 수소 발효 시스템 구축을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

References

1. T. W. Jeon, Y. J. Kim, M. J. Jeong, S. K. Shin, Y. W. Jeong, J. E. Park, and G. J. Oh, "Monitoring and strategies for the reduction of household food waste", *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 30, No. 8, 2013, pp. 832-840.
2. C. Y. Lee, S. W. Lee, and S. H. Kim, "Anaerobic batch hydrogen fermentation of the food waste generated from apartment houses using the food waste disposal system", *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 28, No. 5, 2011, pp. 486-492.
3. H. S. Shin, "Anaerobic digestion treatment of food waste", *Journal of The Korea Organic Resource Recycling Association*, Vol. 8, No. 2, 2000, pp. 7-13.
4. S. K. Khanal, "Anaerobic Biotechnology for Bio-energy production, Willey-Blackwell, 2008.
5. N. Z. Muradov, and T. N. Veziroğlu, "Green path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 23, 2008, pp. 6804-6839.
6. N. Ren, A. Wang, G. Cao, J. Xu, and L. Gao, "Bioconversion of lignocellulosic biomass to hydrogen: potential and challenges", *Biotechnology Advances*, Vol. 27, No. 6, 2009, pp. 1051-1060.
7. T. Zhang, H. Liu, and H. H. P. Fang, "Biohydrogen production starch in wastewater under thermophilic condition", *Journal of Environmental Management*, Vol. 69, No. 2, 2003, pp. 149-156.

8. Y. C. Lo, M. Bai, W. Chen, and J. Chang, "Cellulosic hydrogen production with a sequencing bacterial hydrolysis and dark fermentation strategy", *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 17, 2008, pp. 8299-8303.
9. X. Yuan, X. Shi, P. Zhang, Y. Wei, R. Guo, and L. Wang, "Anaerobic biohydrogen production from wheat stalk by mixed microflora: Kinetic model and particle size influence", *Bioresource Technology*, Vol. 102, No. 19, 2011, pp. 9007-9012.
10. T. Eriksson, J. Borjesson, and F. Tjerneld, "Mechanism of surfactant effect in enzymatic hydrolysis of lignocellulose", *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 31, No. 3, 2002, pp. 353-364.
11. M. Okamoto, T. Miyahara, O. Mizuno, and T. Noike, "Biological hydrogen potential of materials characteristic of the organic fraction of municipal solids wastes", *Water Science & Technology*, Vol. 41, No. 3, 2000, pp. 25-32.
12. A. Tawfik, and M. El-Qelish, "Continuous hydrogen from co-digestion of municipal food waste and kitchen wastewater in mesophilic anaerobic baffled reactor", *Bioresource Technology*, Vol. 114, 2012, pp. 270-274.
13. D. H. Kim, S. H. Kim, K. Y. Kim and H. S. Shin, "Effect of initial pH independent of operational pH on hydrogen fermentation of food waste", *Bioresource Technology*, Vol. 102, No. 18, 2011, pp. 8646-8652.
14. H. S. Shin, J. H. Youn, and S. H. Kim, "Hydrogen production from food waste in anaerobic mesophilic and thermophilic acidogenesis", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 29, No. 13, 2004, pp. 1355-1363.
15. C. Y. Lee, S. W. Lee, S. K. Han, and S. J. Hwang, "Effect of operational pH on biohydrogen production from food waste using anaerobic batch reactors", *Water Science & Technology*, Vol. 69, No. 9, 2014, pp. 1886-1893.
16. APHA-AWWA-WEF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 18th edition, American Public Health Assoc., Washington, D. C., USA, 1992.
17. Ministry of food and drug safety, "Korean Food Standards Codex", 2012.
18. S. W. Lee, "Effect of operational pH on anaerobic hydrogen fermentation of food waste" Master's thesis, Department. of Civil Engineering, The University of Suwon, 2011.
19. H. R. Yoo, "Two-stage hydrogen and methane fermentation processes for production of energy from organic waste", Master's thesis, Department of Civil Engineering, The University of Suwon, 2009.
20. K. Izumi, Y. K. Okishio, N. Nagao, C. Niwa, S. Yamamoto, and T. Toda, "Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste", *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 64, No. 7, 2010, pp. 601-608.
21. Y. Zhang, and C. J. Banks, "Impact of different particle size distributions on anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste", *Waste Management*, Vol. 33, No. 2, 2013, pp. 297-307.
22. M. V. Reddy, K. Chandrasekhar, and S. V. Mohan, "Influence of carbohydrates and proteins concentration on fermentative hydrogen production using canteen based waste under acidophilic microenvironment", Vol. 155, No. 4, 2011, pp. 387-395.
23. E. Elbeshbishy and G. Nakhla, "Batch anaerobic co-digestion of proteins and carbohydrate", *Bioresource Technology*, Vol. 116, 2012, pp. 170-178.