

ORIGINAL ARTICLE

2단 혐기성소화조의 슬러지 반송율 변화를 통한 Bio-Gas 생산 증대

권구호 · 이태우¹⁾ · 정용준²⁾ · 민경석*

경북대학교 환경공학과, ¹⁾대구광역시 환경시설공단, ²⁾부산가톨릭대학교 환경공학과

The Improvement of Bio-gas Production through the Change of Sludge-Recycle Ratio with Two-Stage Anaerobic Digestion

Kooho Kwon, Taewoo Lee¹⁾, Yongjun Jung²⁾, Kyungsok Min*

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

¹⁾Daegu Metropolitan City Environmental Installations Corporation, Daegu 210, Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea

Abstract

This study has cross checked the change of internal sludge-recycle in Anaerobic-Digestion, and researched about not only the improvement of Bio-gas production from the digested sludge but also the efficient method of sludge minimization. Ultimate object of the study is to reduce the amount of sludge by the improved efficiency of contact with the organic-matter and the microbes in Anaerobic-Digestion. The sludge-recycle fluidized sludge layer and raised the activity of the sludge, the optimal sludge-recycle ratio, VS and COD removal ratio were 1,000%, 28.2% and 27.7%, respectively. Through these results of this study, it may be of use to treat waste sludge by the sludge-recycle ratio in terms of minimization and circulation of resources.

Key words : Anaerobic digestion, Sludge, Biogas, Organic waste.

1. 서 론

2011년 말 기준, 국내에서 가동 중인 공공하수처리시설은 500 m³/일 규모 이상이 505개소이고, 연간 309만6천 m³/년의 하수슬러지가 발생하고 있다. 하수슬러지는 하·폐수에 포함되어 있는 입자상, 콜로이드 및 용존상의 오염물질 제거시 발생하는 오염물질로써, 합수율이 높고 유기물질을 다량 함유하여 부적절한 처리시 2차 오염의 우려가 있다.

국내 폐기물관리법에는 2003년 6월부터 하수슬러지

의 직매립을 금지하고, 소각 및 퇴비화 하여 잔재만을 매립토록 명시하고 있다. 폐기물관리법시행규칙[별표4]의 규정에 의하여 처리용량 1 만톤/일 이상의 하수처리시설에서 발생하는 유기성슬러지는 소각 또는 수분함량 75% 이하로 매립하거나, 고형화, 퇴비화 등의 방법으로 처리하도록 규정되어 있다.

2012년부터 런던협약에 의해 하수슬러지의 해양배출이 전면 금지되면서 많은 지자체들이 하수슬러지의 육상처리시설을 설치·운영하고 있어 하수슬러지의 효율적인 처리와 감량화가 요구되고 있다(Nam과 Han, 2011;

Received 2 August, 2013; Revised 9 April, 2014;

Accepted 28 April, 2014

*Corresponding author : Kyungsok Min, Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Phone: +82-53-950-6581

E-mail: ksmin@knu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

Park 등, 2012).

혐기성소화는 하수슬러지 감량화에 이용되는 가장 일반적인 방법이다. 혐기성소화 공정은 슬러지의 안정화를 위한 공정으로, 용존산소가 존재하지 않는 상태에서 혐기성 미생물의 구성에 의해 크게 가수 분해단계, 산생성 단계, 메탄가스생성 단계 등 3단계로 구분하여 하수슬러지 중의 유기물질을 CH₄와 CO₂로 분해한다(McCarty와 Smith, 1986). 혐기성소화 처리는 활성슬러지법이 보급되면서 적극적으로 사용되지는 않았으나, 1970년대 중반 석유쇼크 이후에 회수가스(CH₄: 60~70%, CO₂: 30~40%)를 연료로하여 이용하는 것이 가능하고, 많은 량의 공기를 통기시켜야 하는 활성슬러지법에 비교하여 소비전력이 적은 장점으로부터 적극적인 석유 대체 에너지 수단으로서 도입되었다(Kim 등, 2002). 지속적으로 분뇨와 하수슬러지 뿐만 아니라, 도시쓰레기 등의 많은 유기성폐기물로부터 에너지를 회수하는 목적으로 연구가 진행되어 에너지 절약 플랜트로서 많이 가동되고 있으며, 바이오 가스를 정제하여 취사, 난방, 발전 및 수송용 연료로 사용하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다(Kim, 2010).

혐기성 소화조의 장점에도 불구하고, 전국 64개소(Kim과 Lee, 2011)에 건설된 대부분의 혐기성소화조의 경우, 체류시간이 길고, 유기성슬러지 감량화율이 30~40% 정도로 낮으며, 혐기성 미생물 배양조건이 복잡하여 소화조 운영상 어려움이 많은 것으로 알려져 있다. 또한 온도, pH, 기질 부하량, 필수영양원 및 독성물질 등과 같이 다양한 인자가 혐기성소화조의 소화효율에 끼치는 영향 인자로 평가됨에 따라 bio-gas 생산량을 증대시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(Kim 등, 2012)

하수처리장에서 발생하는 2차 슬러지의 성상은 미생물 성장에 따라 크게 변하는데, 생물학적 슬러지 중 유기물양인 VS(Volatile Solid) 함량은 SRT(Solid Retention Time)에 따라 변화하며, 2차 슬러지를 농축시켰을 때 pH는 6.5~7.5, TS(Total Solid)는 0.83~1.16%, VS는 TS중의 65~80%, 질소는 TS중의 2.4~5.0%, 인은 2.8~11.0%라고 하였다(Kim, 2008).

하수슬러지의 혐기성소화시 반응변화로 미생물의 완전혼합을 유도하고 SRT를 길게 하여 TS의 분해가능 분율을 높여 주어 유기물 분해를 증대시켜 슬러지를 감량화 할 수 있다. 특히, TS의 분해가능 분율을 증대시키기

위해서는 SRT가 최소한 40일 이상은 유지되어야 한다. 반송율을 증가하여 SRT를 길게 유지할 수 있도록 하여야 하지만 유기물부하요인 등을 고려하여 반송율을 결정하여야 한다.

Min과 Ahn(1996)의 연구에 의하면 최적 반송비는 200~400%로 나타났으며, 700% 이상의 경우 효율이 급격하게 떨어지는 것으로 나타났다. Min과 Ahn(1996)의 경우 반응조에서 슬러지 혼합방식을 상향류로 하여 슬러지 접촉율을 증대시켰으나, 기존 full-scale 반응조는 상향류 접촉이 어렵고 기계식 교반에 있어도 완전혼합이 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 슬러지 반송율을 증가시켜 슬러지 접촉율 증대와 긴 SRT를 확보하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 슬러지의 감량화를 위해 2단 혐기성소화조의 내부 슬러지 반송변화를 통하여 처리효율을 향상시키는 적정 반송비를 도출하고, bio-gas 생산량 증가 등에 따른 슬러지 감량을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1에 본 실험에 사용된 lab-Scale의 2단 혐기성소화조 실험장치를 나타내었다. 하수슬러지의 bio-gas를 생산하기 위한 실험은 유효 용적이 10 L(5 L×2조)인 원통형 이크릴로 제작된 2단 반응조 3기를 실험에 사용하였다. 연속 반응조는 온도 센서가 부착되어 증온소화(35 ± 1°C)로 운전하였다. pH 및 온도는 pH-meter와 온도센서를 이용하여 조정하였으며, 반응조내 온도유지를 위하여 예열기를 반응조 1단에 설치하여 사용하였다. 유입 하수슬러지는 1단 반응조 중앙으로 정량펌프를 이용하여 유입하고 슬러지의 균일한 혼합을 위하여 교반기를 설치하여 가동하였다. 유출슬러지는 2단 반응조 하부로 유출시켰으며, 유출수는 2단 반응조 상부로 자연 월류가 되도록 하였다. 또한 반응변화를 위하여 2단 반응조에서 1단 반응조로 순환될 수 있도록 정량펌프를 설치하여 24시간 균일하게 순환되도록 하였다.

2.2. 실험재료 및 방법

본 실험에 사용한 하수슬러지는 대구광역시 B하수처리장의 소화슬러지 및 1차 슬러지를 사용하였다. 소화슬러지 및 1차 슬러지는 협잡물을 제거하기 위하여 2.36

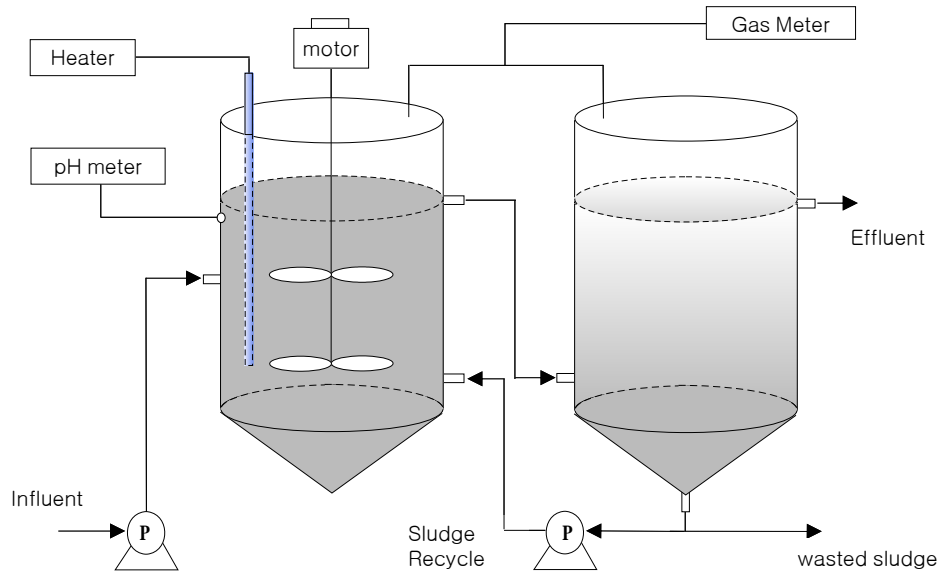


Fig. 1. Schematic diagram of anaerobic digestion reactor.

mm의 메쉬로 여과하였으며, 일정량을 4℃에서 냉장 보관 하였다. 시료의 채취 시기는 1차 슬러지의 경우 2월에 이루어졌고, 초기 식중에 사용된 슬러지는 기존 B하수처리장의 소화조에서 운영되고 있는 소화슬러지를 그대로 이용하였다. Table 1에는 본 연구에 사용된 1차 슬러지와 소화슬러지의 성상을 정리하였다.

Table 1. Compositions of primary and digestion sludge

Sludge	pH	TS	VS	TCOD	VA	Alkalinity
Primary	6.72	18,350	14,010	27,100	-	-
Digestion	6.97	16,130	10,110	21,580	158	1,985

※Unit: mg/L

pH는 7정도, 반응조내 온도는 35±1℃로 유지하였고, 각 반응조는 소화슬러지의 반송변화를 통한 혐기성소화조의 처리효율 비교조건으로 내부순환 방법을 2단 반응조에서 1단 반응조로 슬러지를 순환시켰으며, Table 2와 같이 유입슬러지 대비 반송율(반송슬러지량/유입슬러지량)을 모드-A, B, C의 형태로 변화를 주어 운전하였다. 예비실험 결과 혐기성 소화조의 슬러지 반송율은 소화효

율에 영향을 끼쳤으므로 미생물과의 접촉을 증대시켜 완전혼합을 유도하고, 반응조의 부피를 감소시킬 수 있도록 SRT를 오래 유지하기 위하여 본 연구에서는 반송율을 500%와 1,000%로 설정하였다.

Table 2. Operating conditions of anaerobic digestion

Mode	pH control	HRT(day)	OLR	SRT(day)	Sludge-Recycle ratio (%)
A			1.121	20.5	0
B	6.8~7.2	25	0.984	22.3	500
C			0.913	23.8	1,000

※OLR: Organic Loading Rate

모든 시료는 standard method(APHA, 1998)와 수질 오염공정시험법(MOE, 2008)에 따라 분석하였고, 결과는 최소 3회 이상의 분석 자료를 바탕으로 평균하여 나타내었다. 분석항목은 pH, CODcr(total, soluble), TS, VS, VA(Volatile Acid), Alkalinity 등으로 하였다. 이를 위해 대상 시료는 3,000 rpm으로 15분 동안 원심분리시킨 후 상정수를 채취하여 0.45 μm 여과지로 여과하는 전처리 과정을 거쳐 측정되었다. 가스성분의 경우 유량은 습식 가스미터를 사용하여 측정하였고, 성분분석은

TCD 검출기와 silicagel로 충전된 칼럼이 장착된 gas chromatograph(Tremetrics Model 9000, USA)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. pH 및 알칼리도 변화

본 실험에서의 혐기성 소화공정 운전기간 동안 소화조 내 pH 및 알칼리도 변화를 Fig. 2에 표시하였다. 운전 모드에 관계없이 평균 pH는 7.08~7.17을 나타내었고, 평균 알칼리도는 1,176~1,216 mg/L를 나타내었다. 하수처리장의 2차 슬러지를 혐기성소화로 처리한 경우 정상상태의 운전기간에서 체류시간별 소화액의 pH와 알칼리도가 각각 7.11~7.36 및 1,600~2,300 mg/L의 범위를 유지한 연구 결과(Kim, 2008)와 비교할 때 pH는 유사하였고, 알칼리도는 다소 낮은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 가수분해 속도 및 메탄가스 발생량과 관련되어 혐기성 소화를 위한 적정 pH를 유지하는 것으로 확인되었는데, 이러한 결과는 혐기성 소화과정 중 농축슬러지의 분해시 생성되는 VFA(Volatile Fatty Acid)가 소화조 내에 축적되지 않고 바로 bio-gas로 분해되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. 고형물 감량

VS는 TS내 휘발성고형물을 말한다. TS 내 VS 함량은 유기물질의 양을 의미하여 혐기성 소화공정에서 안정화되어 감소되며, VS 제거율은 고형물 감소에 따른 혐기성 소화효율을 나타내기 위한 지표로서 이용된다.

Fig. 3 및 Fig. 4는 혐기성 소화에 의한 VS 제거율

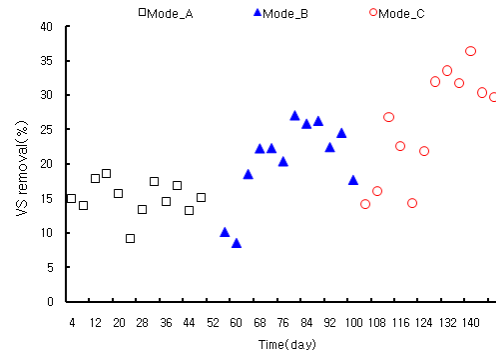


Fig. 3. VS removal profiles with anaerobic digestion.

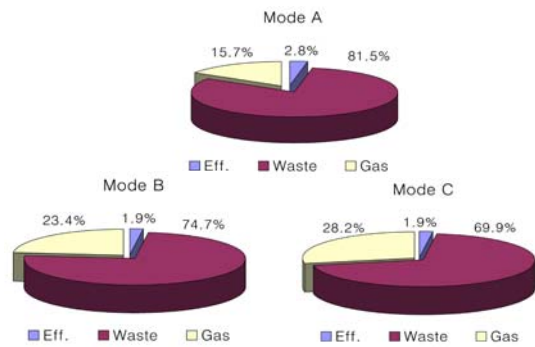


Fig. 4. VS mass balance of each mode.

결과 및 물질수지를 나타낸 것이다. 모드별로 평균 VS 제거율은 15.7%, 23.4%, 28.2%로 나타났다. 슬러지 반송율을 증가시키기에 따라 VS제거율이 증가하였다. 모드 C의 경우 모드 A에 비해 약 12.5%의 VS제거율 증가를 나타내었다. 이는 슬러지 반송으로 인해 소화조 내 기질

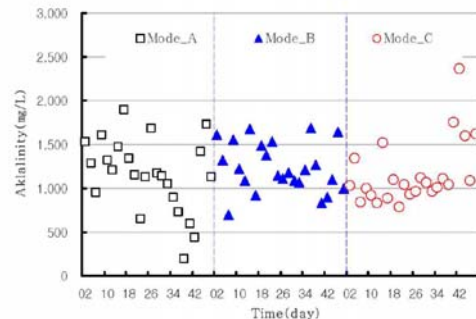
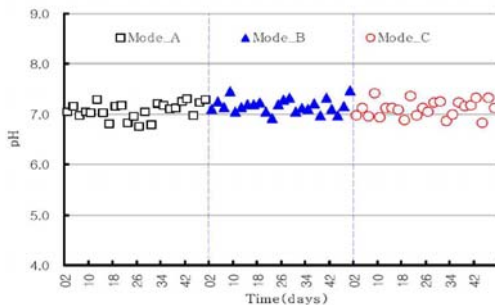


Fig. 2. Compositions of pH and alkalinity in anaerobic digestion reactor.

에 순화된 혐기성 미생물 확보가 증대된 결과로 판단된다. 하수슬러지의 혐기성 소화공정에서 반송율이 700% 이상일 경우, 고형물 감량이 급격히 감소한 Min과 Ahn(1996)의 연구결과에 비해 본 연구에서는 반송율 1,000%에서 높은 제거율을 나타낸 것은 반응조 형태의 차이에서 비롯된 것으로 판단된다.

3.3. 유기물 제거 및 메탄발생량 변화

음식쓰레기 침출수를 대상으로 bio-gas 생산량을 증가시키기 위해 소화조를 운영한 Lim 등(2012)의 연구에서는 20일의 HRT(Hydraulic Retention Time)에서 최대 0.686 L CH₄/g VA를 보고하였다. 하지만, 본 연구에서는 혐기성 소화조에 HRT는 변화없이 반송율 변화에 따른 SRT의 변화가 유기물 제거 및 혐기성 소화시 발생하는 bio-gas(CH₄) 발생량에 미치는 영향을 확인하였다. 먼저 혐기성 소화가 진행됨에 따른 평균 COD 제거 효율은 모드별로 각각 모드 A (20.6%), 모드 B (26.3%), 모드 C (27.7%)로 나타났다. 하수슬러지를 이상 혐기성 소화 공정으로 처리한 Woo와 Han(2010)의 연구에서는 반송에 의해 유입부하가 증가하여 유기물 제거효율이 다소 감소하는 경향을 나타낸 것으로 보고하였다. 하지만 본 연구에서는 반송에 의한 유입부하 증가에도 불구하고 반송을 하지 않은 반응조에 비해 약 7% 정도의 유기물 제거율 증가를 나타내었다. 이는 슬러지 반송으로 인해 고형물 체류시간이 증가하여 난분해성 유기물의 분해가 증대되어 메탄생성을 증대시킨 결과로 판단된다. 또한 고형물 감량과 같은 결과로 순유미생물 및 기질 친화율 등의 증가에 의한 것으로 판단된다.

각 모드별로 COD제거에 따른 CH₄ 발생량을 Fig. 5에 나타내었다. 각 모드별 평균 CH₄ 발생량은 모드 A (0.205 L CH₄/gCOD), 모드 B (0.210 L CH₄/gCOD), 모드 C (0.219 L CH₄/gCOD)로 나타났다. 슬러지 반송 변화가 없는 상태에서 반송율을 500%와 1,000% 증가시켰을 경우, 각각 2.4%와 6.8%의 bio-gas 발생량을 증가시키는 효과를 발생시켰다.

통상적으로 중온소화시(35℃)에는 0.40 L CH₄/gCOD로 발생되나, 본 실험에서는 0.205~0.219 L CH₄/gCOD로 이론치 보다 적게 발생하였다. 이러한 결과는 적정 SRT 유지가 어려워 분해 가능한 TSS의 분해 가능 분율이 낮아 bio-gas생산량이 다소 저조한 것으로 판단된다.

각 모드별로 약 10일 정도의 기질에 대한 적응시기가 요구되었으며 이후 안정적으로 메탄생성이 이루어졌다. 분해가능한 TSS의 분해 가능 분율을 높이기 위한 적정 SRT확보 및 유기물부하 조절을 위해 적정 반송비율이 유지된다면 CH₄ 회수율을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

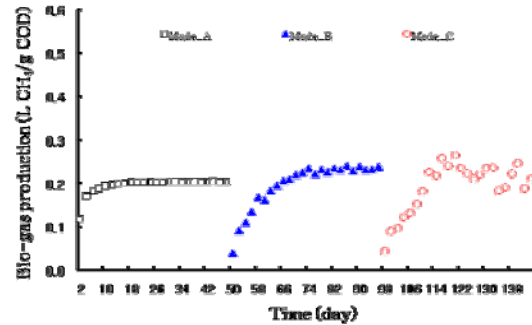


Fig. 5. Bio-gas production profiles with anaerobic digestion.

4. 결론

본 연구는 하수슬러지의 2단 혐기성 소화공정에 있어서 슬러지 반송율 변화를 통한 bio-gas 생산량 증대 및 슬러지 감량화를 통한 혐기성 소화조 운영의 효율성을 극대화하기 위한 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 운전기간 동안 혐기성 소화조내의 평균 pH는 7.08~7.17, 평균 알카리도는 1,176~1,216 mg/L를 나타내어 혐기성소화를 위한 적정 pH를 유지하였다.
- 2) 2단 혐기성 소화공정의 슬러지 반송율이 1,000% 일 때 COD와 고형물 제거효율은 각각 27.7%와 28.2%로 나타나 소화효율을 향상시켰고, bio-gas생산량도 0.219 L CH₄/gCOD로 다른 조건에 비해 높게 나타났다.
- 3) 슬러지 반송변화를 이용한 혐기성 소화공정은 SRT를 길게 유지할 수 있어 반응조 부피를 감소시키고, 반송율이 1,000%에서 bio-gas 생산량도 6.8% 증가시켰다.

참 고 문 헌

APHA, 1998, Standard methods for examination of water and wastewater, 20th ed. American Public Health

- Association Washington, D. C., USA.
- Kim, H. S., Lee, T. J., 2011, A study of the improvement in an anaerobic digester for sludge reduction, *J. Kor. Soc. Envi. Eng.*, 33, 516-522.
- Kim, J. A., Yoon, Y. M., Jeong, K. H., Kim, C. H., 2012, Effects of supplementation of mixed methanogens and rumen cellulolytic bacteria on biochemical methane potential with pig slurry, *Kor. J. Soil Sci. Fert.*, 45, 1049-1057.
- Kim, N. C., 2008, Study on biogas production and reduction of organic matters of thickened sewage sludge by anaerobic digestion, *J. Mat. Cyc. Was. Manag.*, 25, 50-57.
- Kim, N. C., Ryu, G. Y., Ahn, C. W., Kim, Y. J., Hur, G., Jung, Y. G., Bae, J. G., 2002, Special feature(Review), *J. Kor. Org. Res. Recycling Asso.*, 10, 7-23.
- Kim, S. S., 2010, Applications and technical standards for biogas, *J. Kor. Org. Res. Recycling Asso.*, 18, 38-49.
- Lim, B.S., Kim, B.C., Chung, I., 2012, Anaerobic treatment of food waste leachate for biogas production using a novel digestion system, *Environ. Eng. Res.*, 17, 41-46.
- McCarty, P. L., Smith, D. P., 1986, Anaerobic wastewater treatment, *Environ. Sci. Tech.*, 20, 1200-1206.
- Min, K. S., Ahn, Y. H., 1996, Recycle effects on the characteristics of biopellets produced in enhanced UASB(EUASB) reactor, *J. Kor. Soci. .Wat. Envi.*, 12, 333-341.
- Ministry of Environment, 2008, Certified analytical methods of water quality.
- Nam, Y. W., Han, K. S., 2011, A study on the present state and improvement plan of domestic sewage sludge treatment, *J. Mat. Cyc. Was. Manag.*, 28, 103-109.
- Park, J. K., Kim, H. I., Ahn, Y. M., Higuchi, S., Lee, N. H., 2012, Assessment of dynamic kinetics and synergistic effect for anaerobic co-digestion of sewage sludge, *J. Mat. Cyc. Was. Manag.*, 29, 624-633.
- Woo, M. H., Han, G. B., 2010, A study on the sludge reduction and biogas production through a two-phase anaerobic digestion process, *J. Kor. Soc. Envi. Eng.*, 32, 894-899.