

## 고온 혐기성 소화공정의 start-up seed로서의 호기성 폐 활성슬러지 이용가능성 연구

김문일<sup>†</sup> · 신규철

한양대학교 건설환경시스템공학전공

### Waste Activated Sludge for Start-up Seed of Thermophilic Anaerobic Digestion

Kim, Moonil<sup>†</sup> · Shin, Kyuchul

Department of Civil & Environmental System Engineering, Hanyang University

(Received 22 March 2005, Accepted 8 June 2005)

#### Abstract

Since there are very limited numbers of thermophilic anaerobic digesters being operated, it is often difficult to start up a new one using sludge from an existing reactor as a seed. However, for obvious reasons it seems few attempts have been made to compare the start-up performance of thermophilic anaerobic digestion using different sources of seed sludges. The purpose of this study was to evaluate the start-up performance of anaerobic digestion using aerobic Waste Activated Sludge (WAS) from a plant and mesophilic Anaerobic Digested Sludge (ADS) as the seed source at both mesophilic (35°C) and thermophilic (55°C) temperatures. In this study, two experiments were conducted. First, thermophilic anaerobic reactors were seeded with WAS (VSS = 4,400 mg/L) and ADS (VSS = 14,500 mg/L) to investigate start-up performance with a feed of acetate as well as propionate. The results show that WAS started to produce CH<sub>4</sub> soon after acetate feeding without a lag time, while ADS had a lag time of 10 days. When the feed was changed to propionate, WAS removed propionate down to below the detection limit of 10 mg/L, while ADS removed little propionate and produced little CH<sub>4</sub>. Second, in order to further compare the methanogenic activity of WAS and ADS, both mesophilic and thermophilic reactors were operated. WAS acclimated to anaerobic conditions shortly and after acclimating it produced more CH<sub>4</sub> than ADS. WAS at mesophilic temperature biodegraded acetate at the same rate as for thermophilic. However WAS at mesophilic temperature biodegraded propionate at a much faster rate than at thermophilic. WAS as the seed source of anaerobic digestion resulted in much better performance than ADS at both mesophilic and thermophilic temperatures for both acetate and propionate metabolism.

**keywords** : Anaerobic digestion, Anaerobic digested sludge, Mesophilic, Start-up seed, Thermophilic, Waste activated sludge

### 1. 서론

고온 혐기성 소화공정은 높은 유기성 고형물의 분해율과 효과적인 병원성 미생물의 제거 등의 장점으로 인해 관심이 증대되고 있는 반면, 고온 혐기성 소화를 이용하는 처리장은 그 수가 매우 제한되어 있어 새로 운전을 시작하는 처리장에서는 고온 혐기 미생물을 식중슬러지로서 이용하는데 어려움을 겪고 있다(Wiegant et al., 1985; van Lier et al., 1992; Kim et al., 2002). 여러 가지 소스들이 고온 혐기성 소화 공정의 식중슬러지로서 이용될 수 있는 가능성을 가지고 있음에도 불구하고 같은 혐기 조건이라는 이유로 증온에서 이용되는 혐기성 슬러지만이 주로 고온 혐기성 소화 공정의 식중슬러지로서 적용되어 왔지만 몇몇 연구자들은 증온의 혐기성 공정 미생물 외에 다른 미생물 소

스를 이용하여 유사하거나 오히려 더 나은 연구결과들을 보고해 오고 있다(van Lier et al., 1993). Wiegant 등(1985)은 서로 다른 세 가지 소스, 즉, 축분, mesophilic granular sludge, digested sewage sludge와 이들의 혼합물에 대해 고온 start-up 기간에서의 메탄 생성능 평가를 통해 증온의 혐기성 소화 슬러지와 다른 소스가 차이가 없다고 보고하였으며, Fang 등(1996)도 여러 가지 서로 다른 증온의 혐기성 미생물들에 대해 고온의 UASB에서의 start-up 기간의 비교평가를 수행한 결과, 고온에서의 메탄 생성능과 그래놀 생성능에서 차이가 없다고 보고하였다. 호기성 활성 슬러지는 현재까지 하수 및 폐수 처리장에서 가장 많이 쓰이는 미생물로서 새로운 처리장에서 식중슬러지로서 이용하기가 매우 용이하다. Wu 등(1987)은 세가지 이유를 들어 혐기성 소화 슬러지의 대안으로서 호기성 활성 슬러지를 설명하고 있는데, 활성 슬러지는 첫째, 비교적 많은 양의 메탄생성 미생물을 함유하고 있고, 둘째, 기존 활성슬러지 공정에서 많은 양의 슬러지를 얻을 수 있고, 셋째, 슬러지 내 무기

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
moonilkim@hanyang.ac.kr

고형물이 적다고 보고하였다. 또한 호기성 활성 슬러지를 이용해서도 혐기성 소화 슬러지를 이용하여 생산한 것과 유사한 그래놀을 생산할 수 있다고 하였다. Lens 등(1995)은 활성슬러지 내에는 아세테이트와 수소 뿐만 아니라 여러 가지 유기산을 이용하는 메탄생성 미생물들이 존재한다고 보고하였다. Noyola 등(1994)은 짧은 수리학적 체류시간 (< 8h)을 통해 호기성 활성 슬러지를 혐기성 그래놀로 쉽게 전환시킬 수 있었다고 보고하고 있다.

소수의 연구자들에 의해 호기성 활성 슬러지의 혐기성 소화 공정의 식중슬러지로서의 가능성이 제기되고 있지만 연구결과는 매우 적으며, 특히 고온의 start-up 기간에 대한 연구는 매우 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 중온 혐기성 소화 슬러지와 호기성 활성 슬러지의 활성도를 중온과 고온의 혐기조건에서 비교함으로써 호기성 활성 슬러지의 혐기성 소화공정의 식중슬러지로서의 이용 가능성을 평가하는데 그 목적이 있다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구에서는 두 가지의 실험이 수행되었다.

**실험 1(고온에서 WAS와 ADS의 소화능 비교평가):** 각각 17 L의 Waste Activated Sludge(WAS)와 중온(35°C)에서 사용되어온 Anaerobic Digested Sludge(ADS)를 식중슬러지로, calcium acetate와 calcium propionate을 기질로 사용하여 고온(55°C)에서의 혐기성 소화능을 비교 평가하였다. WAS의 농도는 4,400 mg VSS/L, ADS는 14,500 mg VSS/L였고 기질주입은 가스 발생이 멈출 때마다 반복 주입하였다. 두 반응조에서 일 가스 발생량은 매일, 메탄 발생량과 VFAs는 일주일에 두 번 측정 및 분석하였다.

**실험 2(중온 및 고온에서 WAS와 ADS의 메탄생성능 비교평가):** 32개 serum bottle 중 16개에는 WAS를, 나머지 16개에는 ADS를 식중슬러지로 각각 50 mL씩 주입하고 실험 1과 같은 종류의 기질을 가스 발생이 멈출 때마다 반복 주입하여 중온(35°C)과 고온(55°C)에서 methanogenic activity를 비교 평가하였다. 가스 및 메탄 발생량과 VFAs는 이틀에 한 번씩 측정 및 분석하였고, 8가지 다른 조건으로 실험하였으며, 각각의 조건은 같은 기질을 주입한 3개의

serum bottle의 평균값에서 기질주입을 하지 않은 1개의 control bottle값을 고려하여 계산하였다. 실험 2에서의 반응조 이름과 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 고온에서 WAS와 ADS의 소화능 비교평가

Fig. 1은 축적된 가스 발생량, 반응조 Head space에서의 메탄 조성율, acetate와 propionate 농도를 통해 WAS와 ADS의 고온에서의 혐기성 소화능 비교 결과를 보여주고 있다. 가스 발생량은 또한 초기 주입된 단위 VSS당 축적된 가스 발생량으로도 환산하여 비교 평가하였다.

WAS는 acetate 주입시 지체시간 없이 바로 메탄을 생산하였지만 ADS는 최초 acetate 주입 후 10일이 경과한 후부터 메탄을 생산하였다. 또한 각각 두 번씩 주입된 acetate를 모두 분해하는데 WAS는 20일이 소요된 반면 ADS는 그 두 배인 40일이 소요되었다. 같은 기질주입량에 대해서 생산된 가스량은 비슷하였으나 식중된 단위 VSS당 가스 발생량은 WAS가 ADS보다 세배 이상 많았다. 메탄 조성 분석결과는 발생한 가스가 혐기성 대사작용에 의한 결과임을 보여주고 있다.

유입기질을 propionate으로 바꾼 경우, WAS는 짧은 지체시간 경과 후 제거된 propionate(< 10 mg/L)에 상응하는 가스(메탄 > 75%)가 발생되었으나 ADS는 운전 50일 경과 후까지 propionate의 제거가 미미하였으며 따라서 가스 발생(메탄 < 35%)도 미미하여 acetate주입의 경우보다 WAS와 ADS의 propionate에 대한 혐기성 분해능 차이가 더 심화되는 결과를 보였다.

이상의 결과로부터 WAS는 고온의 혐기성 상태에서 acetate와 propionate의 생분해 능력이 있으며 오히려 중온의 혐기성 소화 슬러지보다 더 뛰어난 것을 알 수 있었고 이와 같은 현상은 Table 2의 초기 가스 발생률계산 값을 통하여도 그 차이를 확인할 수 있었다.

### 3.2. 중온 및 고온에서 WAS와 ADS의 메탄생성능 비교평가

Fig. 2는 중온과 고온에서 식중된 슬러지, WAS와 ADS의 단위 반응조 용적(1 L)당 축적된 메탄 발생량을 보여주고 있다. 각 반응조(serum bottle)의 기질 주입은 가스 발생량이 5 mL/day 이하로 떨어질 때마다 반복 주입하였다.

Acetate가 초기기질로 주입된 경우, WAS는 중온과 고온 모두에서 5일 안에 메탄이 발생되었고 고온의 ADS는 약 30일 경과 후부터 메탄이 발생되었다. 중온에서의 WAS와 ADS의 총 메탄 발생량은 별 차이가 없었으나 고온에서는 WAS가 ADS보다 상당히 많은 메탄을 발생시켰다.

Propionate이 초기기질로 주입된 경우, 지체시간은 중온의 WAS가 약 20일, 중온의 ADS는 약 5일이었지만 지체시간 경과 후 메탄 발생량은 WAS가 ADS보다 더 많았다. 고온의 경우, WAS는 약 50일의 지체시간 경과 후 메탄을 발생하였지만 ADS는 100일까지도 propionate을 전혀 분해하지

Table 1. Reactor name and operating condition

Reactor name	Temp. (°C)	Seed source	Starting feed
M-WAS-AC	35	WAS	Acetate
M-WAS-PR	35	WAS	Propionate
M-ADS-AC	35	ADS	Acetate
M-ADS-PR	35	ADS	Propionate
T-WAS-AC	55	WAS	Acetate
T-WAS-PR	55	WAS	Propionate
T-ADS-AC	55	ADS	Acetate
T-ADS-PR	55	ADS	Propionate

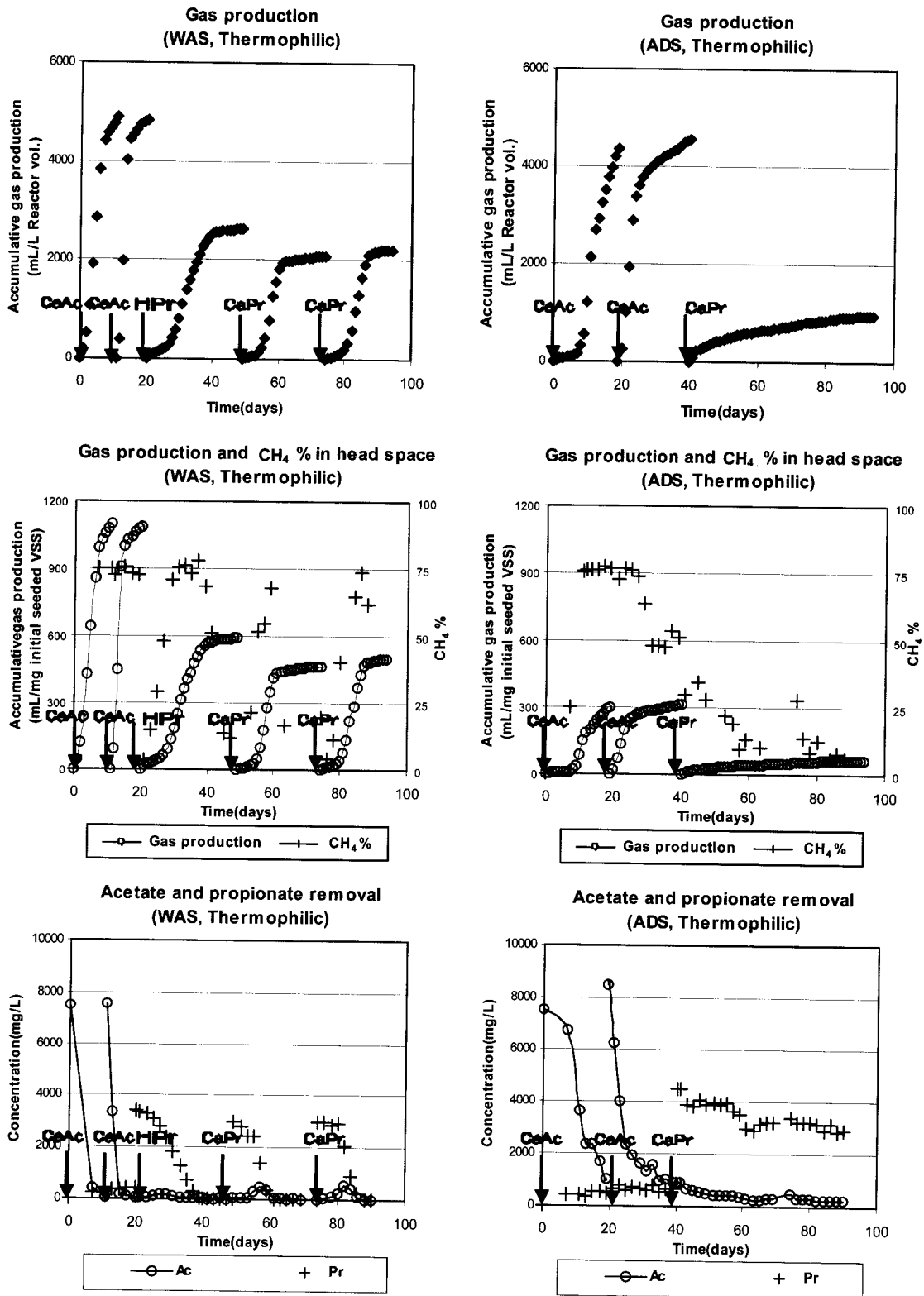


Fig. 1. Comparative anaerobic performance for the seed sources of WAS and ADS.

못하였다. 8개의 반응조 중 3개의 반응조, 즉, M-WAS-AC, M-ADS-AC, T-WAS-AC는 운전개시 후 54일에 유입기질이 propionate으로 대체되었다. 3개의 반응조 중 M-WAS-AC만이 propionate 주입에도 계속적으로 메탄을 생산해내었다.

Fig. 3은 식종된 단위 VSS당 기질주입에 의해 축적된 메

탄생산량을 보여주고 있으며 단위 VSS당으로 환산하여 비교 평가한 경우 WAS와 ADS의 혐기성 분해능의 차이는 더 현격히 차이가 남을 알 수 있다. 실험결과를 조건별로 상대적인 메탄 발생률로 환산하여 Table 3에 나타내었다. acetate주입시 중온에서는 WAS가 ADS보다 약 4배 정도

Table 2. Initial rates of gas production

Initial rate of gas production (mL gas/mg seeded VSS-day)					
WAS			ADS		
1st acetate feed	2nd acetate feed	1st propionate feed	1st acetate feed	2nd acetate feed	1st propionate feed
167	333	8	4	42	4

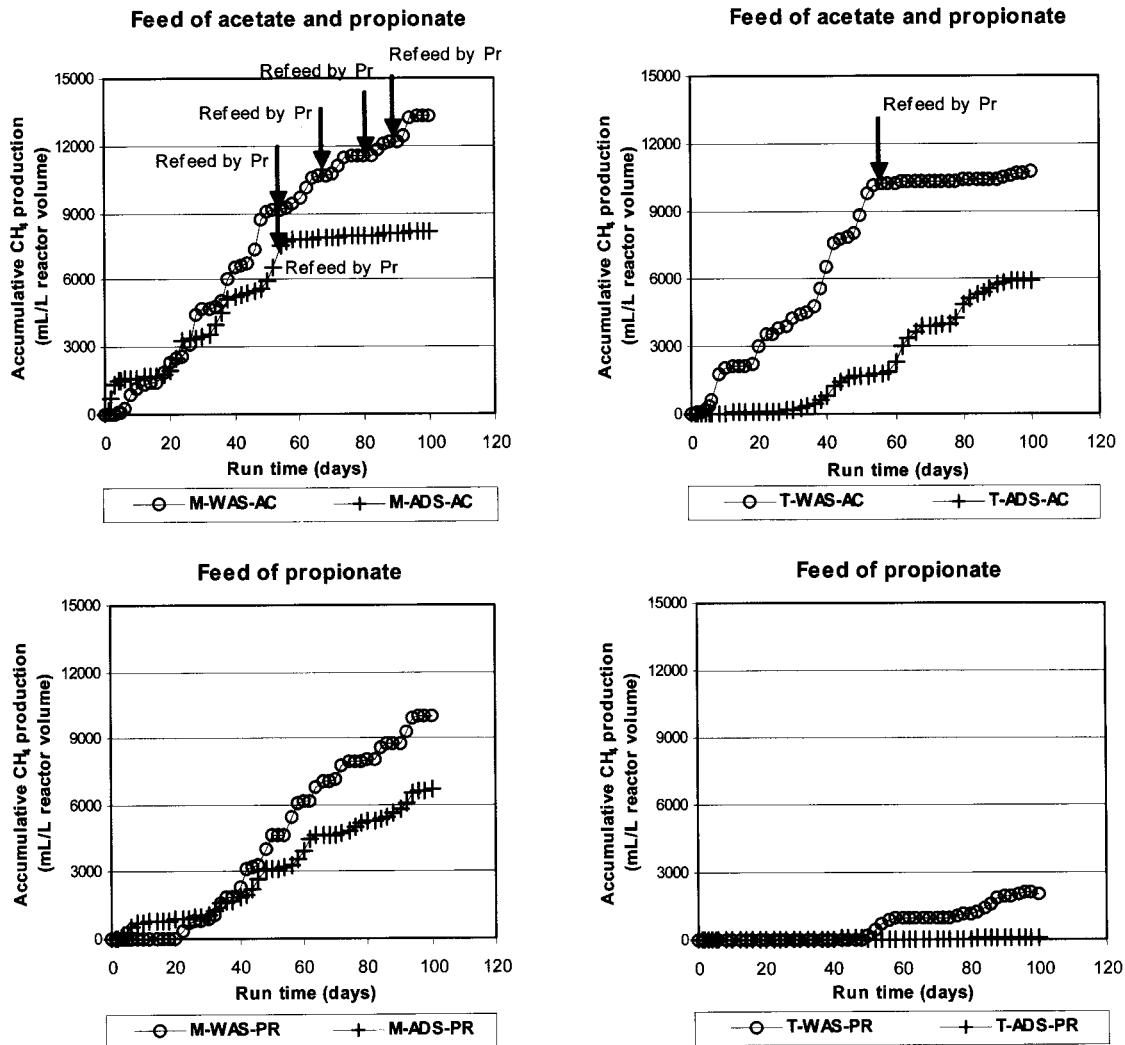


Fig. 2. Comparative CH<sub>4</sub> production for WAS and ADS at mesophilic and thermophilic temperatures (Feed of M-WAS-AC, M-ADS-AC, and T-WAS-AC was changed from acetate to propionate on day 54.).

큰 메탄생산율을 보였고 고온에서는 약 15배의 차이를 보였다. propionate주입시 중온에서는 WAS가 ADS보다 약 5배의 큰 메탄생산율을 보였고, 고온에서 ADS는 메탄을 전혀 생산하지 못하였다. 이상의 결과로부터 WAS는 중온과 고온 모두에서 ADS보다 acetate와 propionate에 대해 더 높은 혐기성 분해능을 보임을 알 수 있었다.

WAS는 ADS에 비하여 절대적인 혐기성 메탄생성 미생물이나 propionate 분해 미생물이 없다고 가정되어 왔기 때문에 호기성 조건하에서 생성, 유지되는 WAS가 혐기성 조건에서 ADS에 비하여 상당한 메탄생성 능력과 적응능력을 보이는 이유는 명확히 구명되어오지 않았다. WAS는 ADS 온도인 35°C보다 상당히 낮은 대기온도에 순응되었고 따라

서 WAS는 고온 또는 중온 혐기성소화를 위한 seed로서 고려되어지지 않았다. 그러나 본 연구의 결과는 혐기성 소화를 위한 seed source로서의 WAS의 가능성을 보여주며, 심지어 acetate와 propionate metabolism에 있어 고온과 중온 모두에서 ADS보다 더 나은 수행결과를 보여준다.

WAS는 혐기성 슬러지 소화조가 없는 시설에서 가져오기 때문에, 메탄을 생성하거나 혐기성 propionate을 분해하는 source로서는 제외되었다. WAS의 우수한 성능을 설명하기 위하여 몇 가지 가정이 제시될 수 있다. 첫째는 WAS 내에 높은 활성성을 지닌 혐기성 박테리아가 있을 수 있다는 것이고, 둘째는 WAS내의 우점 박테리아가 혐기조건의 미세 영역에서 기능을 할 수도 있다는 것이다. 그리고 셋째는

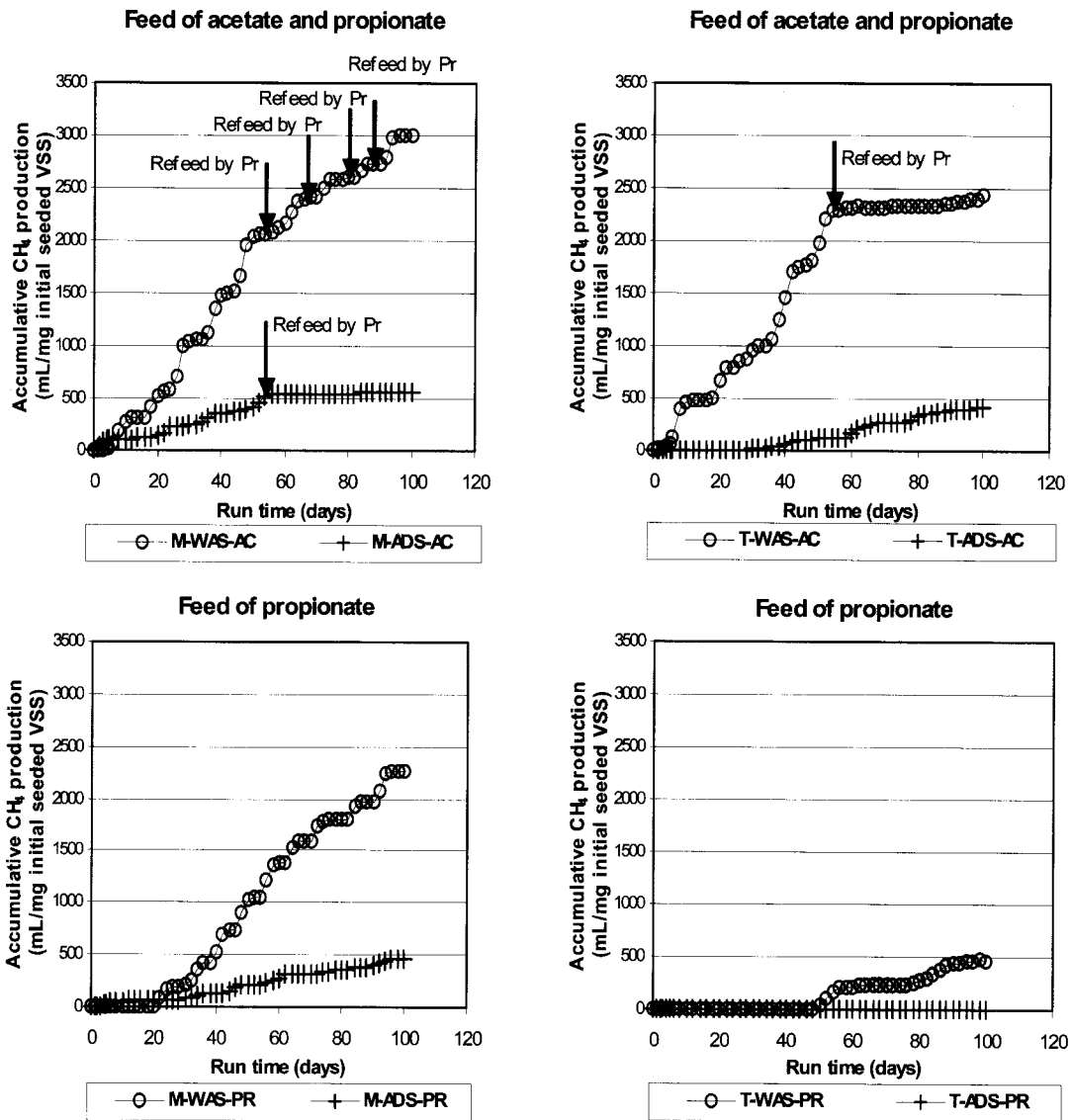


Fig. 3. Comparative CH<sub>4</sub> production normalized per unit mass of the seeded WAS and ADS at mesophilic and thermophilic temperatures (Feed of M-WAS-AC, T-ADS-AC, and T-WAS-AC was changed from acetate to propionate on Day 54).

Table 3. Relative metabolism rates of WAS and ADS at 35°C and 55°C

Feed	Mesophilic		Thermophilic	
	WAS	ADS	WAS	ADS
Acetate	1	1/4	1	1/15
Propionate	1	1/5	1/4	0

메탄생성미생물과 propionate 분해 미생물이 이전에 고려된 수준보다 더 호기성 조건에 견딜 수 있을지 모른다는 것이다. 마지막 가정은 혐기 조건으로 전환되었을 때 용액 또는 활성 박테리아 세포들로부터의 충분한 영양물질과 같은 WAS내의 환경 조건이 더 유리하게 작용할 수 있다는 것이다. 이러한 가정들은 식중 슬러지에 상관없이 오랜 기간 동안의 운전 후에는 우점 biomass가 같아지기 때문에 특히 start-up 기간 동안에 중요하게 고려되어야 할 것이다. 이상과 같은 가정의 확인을 통해 혐기조건에서 seed source로서 WAS를 사용하기 위해서는 다음과 같은 연구가 필요하다: (1) 미생물 종의 확인; (2) 같은 F/M비에서 WAS와

ADS의 물질대사율 비교; (3) 여러 가지 기질에 대한 WAS의 long-term 연구; (4) WAS의 그래놀화.

#### 4. 결론

중온과 고온에서 혐기성 소화공정의 start-up seed로서 호기성 폐활성슬러지의 활용가능성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 호기성 WAS는 중온과 고온 모두에서 acetate와 propionate에 대해 혐기성 분해능을 보였다.
- 2) 호기성 WAS는 acetate와 propionate의 기질 주입시 빠

른 시간 내에 메탄을 생산하는 등 혐기성 조건에 빠르게 적응하였으며, ADS보다 식종된 단위 VSS당 더 많은 메탄 생성량을 보였다.

- 3) 호기성 WAS의 acetate에 대한 혐기성 분해율은 중온과 고온에서 차이가 없었다.
- 4) 호기성 WAS의 propionate에 대한 혐기성 분해율은 고온보다 중온에서 더 높았다.
- 5) 이상의 결과로부터 폐활성슬러지는 중온과 고온에서 혐기성 공정의 start-up seed로서 활용이 가능하리라 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2004학년도 한양대학교 공학기술연구소 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- Fang, H. H. P. and Lau, I. W. C., Start-up of Thermophilic (55°C) UASB Reactors using Different Mesophilic Seed Sludges, *Water Sci. Technol.*, **34**(5-6), pp. 445-452 (1996).
- Kim, M. and Speece, R. E., Reactor Configuration-Part II, Comparative Process Stability and Efficiency of Thermophilic Anaerobic Digestion, *Environmental Technology*, **23**(6), pp. 643-654 (2002).
- Lens, P. N. and De Poorter, M.-P., Cronenberg, C. C., Verstraete W. H., Sulfate Reducing and Methane Producing Bacteria in Aerobic Wastewater Treatment System, *Water Res.*, **29**(3), pp. 871-80 (1995).
- Noyola, A. and Moreno, G., Granule Production from Raw Waste Activated Sludge, *Water Sci. Technol.*, **30**(12), pp. 339-346 (1994).
- Van Lier, J. B., Grolle, K. C. F., Stams, A. J. M., de Macario, E. C. and Lettinga, G., Start-up of a Thermophilic UASB Reactor with Mesophilic Granular Sludge, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **37**, pp. 130-135 (1992).
- Van Lier, J. B., Brummeler, E. and Lettinga, G., Thermotolerant Anaerobic Degradation of VFA by Digested Organic Fraction of Municipal waste, *J. Ferment Bioengineer.*, **76**(2), pp. 140-144 (1993).
- Wiegant, M. and Lettinga, G., Thermophilic Anaerobic Digestion of Sugars in UASB Reactors, *Biotechnol. Bioeng.*, **27**, pp. 1603-1607 (1985).
- Wu, W., Hu, J., Gu, X., Zhao, Y., Zhang, H. and Gu, G., Cultivation of Anaerobic Granular Sludge in UASB Reactors with Aerobic Activated Sludge as Seed, *Wat. Res.*, **21**(7), pp. 789-799 (1987).