

UASB를 적용한 이상 혐기공정 granule에 의한 양돈폐수의 바이오가스 생성과 생분해 특성 평가

A Characteristics of Biogas Recovery and Biodegradability of Piggery Wastewater Using Granule of Two-Phase Anaerobic Process with UASB

오성모 · 배윤선 · 박철휘*

Sung Mo Oh · Yoon Sun Bae · Chul Hwi Park*

서울시립대학교

(2007년 2월 13일 논문 접수; 2007년 5월 29일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The purpose of this study was to investigate the biodegradability and performance of organic removal and methane production rate when treating piggery wastewater using a granule of two-phase anaerobic process applied UASB. BMP test was conducted as simple means to monitor relative biodegradability of substrate and to determine methane production of an organic material.

The two-phase anaerobic process is consisted of a continuous flow stirred-tank reactor (CFSTR) for the acidification phase and an Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor (UASB) for the methanogenesis. The acidogenic reactor played key roles in reducing the periodically applied shock-loading and in the acidification of the influent organics. A stable maximum biogas production rate was 400mL. The methane contents ranged from 73 to 80% during the experimental period. It is known that most of the removed organic matter was converted to methane gas, and the produced biogas might be high quality for its subsequent use.

Key words: Two-phase anaerobic process, UASB, piggery wastewater, biogas recovery, methanogenesis, BMP test, granule

주제어: 이상혐기공정, UASB, 양돈폐수, 바이오가스, BMP test, 입상슬러지

1. 서론

축산의 전업화·기업화에 따라 양돈 농가의 사육
두수가 급격히 늘고 있으며 축산기술과 사료의 개발

로 대량으로 배출되는 축산분뇨의 처리는 심각한 문
제가 되고 있다. 2003년 현재 41만 농가에서 하루
142천 톤의 분뇨가 발생하는데 그 중 56%가 양돈에
의해 발생하였다. 축산분뇨는 고농도의 유기성 물질
로서 우리나라 전체 오·폐수 발생량의 0.6%에 불과

*Corresponding author Tel: +82-2-2210-2176, FAX: +82-2-2244-2245, E-mail: chpark@uos.ac.kr (Park, C.H.)

하지만 오염물질 발생 부하는 25.8%나 차지하고 고농도의 영양염류로 인해 미처리 방류시 하천의 수질을 악화시킨다. 축산분뇨에 포함된 병원성 미생물은 지하수에 유입되어 오염될 우려가 있으며 법규의 강화로 인한 기존시설의 성능 개선 향상이 시급한 실정이다. 특히 돈사폐수는 함유율이 높고 고액분리가 어려운 돈사슬러지가 대부분을 차지하고 있어 적정처리 방법에 대한 연구가 필요한데 이에 대한 방법이 정립되어있지 않아 축산농가에서는 분뇨처리에 많은 시행착오를 범하고 있다. 축산폐수의 처리뿐만 아니라 자원화에 대한 인식의 고조로 대체에너지를 생산하는 연구가 주목받고 있다. 양돈폐수와 같은 고농도 유기성 폐수로부터 생물학적인 방법을 이용한 대체에너지의 생성이 관심의 대상이 되고 있다.

따라서 본 연구는 양돈 폐수를 기질로 사용하여 메탄생성을 최대한 유도하기 위한 기초연구로서 혐기성 생분해도(biodegradability)에 미치는 영향을 평가하기 위하여 회분식 BMP(biochemical methane potential) test를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 유입원수 및 슬러지

2.1.1. 대상 유입원수

본 연구는 축산연구원내 양돈사육장의 폐수를 원수로 사용하였다. 돈사의 분뇨 및 사육장의 세척 폐수가 혼합되어 유입수의 성상이 일정하지 않기에 유량조정조를 두어 균등화시켜 실험을 수행하였다. 대상 양돈폐수의 pH는 7.1~8.1의 범위를 나타내고 alkalinity는 평균7,688mg/L as CaCO₃를 나타내어 축산폐수의 전형적인 특징인 높은 pH와 높은 alkalinity를 보였다. 시료의 TCOD_{Cr}는 3,740~23,116mg/L으로 soluble COD_{Cr} 비율은 40.4%, BOD₅, soluble 분율은 49.4%로 입자성 유기물질의 비율을 갖으며 유기물에 대한 영양물질의 비가 평균 COD: NH₃-N: PO₄³⁻-P = 250:40:1을 나타낸다.

2.1.2. 접종 슬러지

초기 운전시간을 단축시키기 위해서 접종슬러지는 청원의 H주정공장의 입상슬러지와 J발효의 소화슬러지를 사용하였으며, 이들의 비율을 80%, 20%로 주

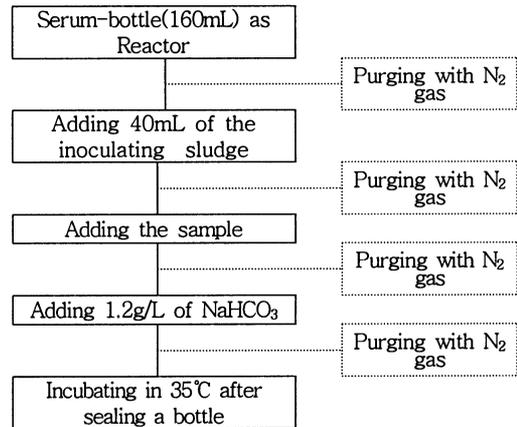


Fig. 2.1. Flow chart of BMP test.

입하여 양돈폐수가 기질로서 적용되도록 하였다. 주입된 입상슬러지의 TSS는 평균 37,570mg/L, VSS는 평균 29,793mg/L이었으며, VSS/TSS의 비율은 0.79이다.

2.2. BMP test

Owen 등이 개발한 BMP(biochemical methane potential) test는 혐기 반응조건에서 유기물이 CH₄로 전환되는 농도를 분석하여 대상 양돈폐수의 생분해도 및 혐기성 프로세스의 잠재적 효율을 평가한 것으로 Speece가 기술한 방법으로 Fig. 2.1에 그 분석 절차를 나타내었다.

Serum bottle 내에 슬러지 및 대상 시료를 주입한 후 가스 투과율이 작은 butyl rubber인 septum으로 막은 다음 알루미늄 뚜껑을 이용하여 밀봉하였고 광합성미생물의 성장을 막기 위해 은박호일로 감싼 후에 35°C가 유지되는 항온조(incubator)에서 혐기성 분해를 유도하도록 하였다. 일정기간 경과마다 발생하는 가스의 부피와 그 조성을 분석한 후 CH₄ 생성량을 기록하였다. 접종 슬러지에서 발생하는 가스량과 다른 영향을 보정하기 위해서 기질을 첨가하지 않은 접종 슬러지만 첨가한 대조실험(control)을 동일한 조건에서 실시하였다.

2.3. 분석 방법 및 평가항목

2.3.1. 양돈폐수의 특성 분석

본 연구에서 이용한 양돈폐수의 특성을 분석하기

Table 2.1. Analytical methods

Item	Instrument	Method
pH	pH meter(YSI 63, Metrohm 744)	Electrometric method
COD _{Cr}	-	Closed reflux, titrimetric method(5220 C.)
BOD ₅	-	5-day BOD test, 5210 B.
TKN	AutoAnalyzer3(Bran+Luebbe)	Titrimetric method (4500-N _{org} B.)
TP	-	Ascorbic acid method
SO ₄ ²⁻	HIC-20A super(SHIMADZU)	Ion chromatographic method
PO ₄ ³⁻ -P	HIC-20A super(SHIMADZU)	Ion chromatographic method
NH ₄ ⁺ -N	DR-2010 (Hach)	Nesslerization method
TSS, VSS	-	TSS dried at 103~105°C (2540 D. E.)
TS, VS	-	TS dried at 103~105°C (2540 D.,E.)
Alkalinity	pH meter (Metrohm 744)	Titrimetric method (2320 B.)

위해 시료채취 후 total sample과 soluble sample로 나누어 4°C에서 냉장 보관하여 사용하였으며, soluble의 경우 시료 채취 후 3,000rpm에서 30분간 원심분리 한 후 상정액을 입경 1.0 μ m GF/C filter(Whatman)를 이용하여 여과하였다. 실험에 사용한 각 항목별 방법 및 활용 기기를 **Table 2.1**에 나타내었다. 휘발성 지방산의 조성 및 농도는 Gas chromatograph/FID (GC-2010, SHIMADZU)를 이용하여 분석하였다. 각 시료는 3% 인산으로 pH가 3이 되도록 전처리하였고 VFA 표준 용액(Supelco, No. 4-6975)을 이용하

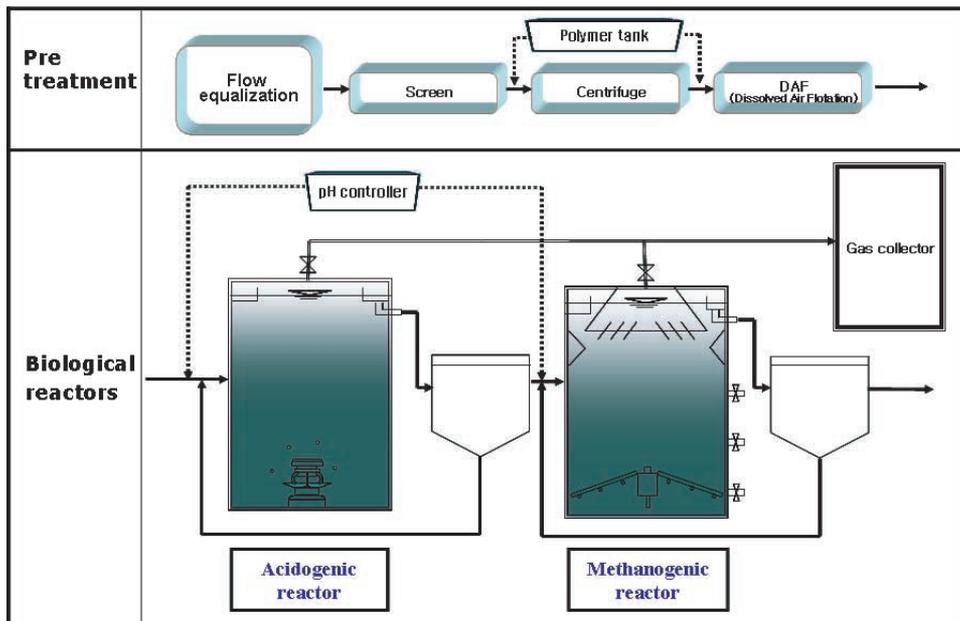
여 외표준법으로 각 성분의 농도를 구하였다.

2.3.2. BMP test를 통한 가스발생량 산정

가스발생량은 일정기간 경과마다 유리 실린지를 이용하여 측정하였고, 가스 농도는 Gas chromatograph/TCD(GC-8A, SHIMADZU)를 이용하여 CH₄ 생성량을 분석하였다.

2.3.3. 입상슬러지 분석

전체 pilot plant의 공정도는 **Fig 2.2**와 같이 구성되

**Fig. 2.2.** Schematic diagram of Two-Phase anaerobic process.

어있으며 UASB의 입상슬러지의 분포와 조성을 확인하기 위하여 높이별 입상슬러지를 분석 하였다. 원소 분석기(Elemental Analyzer, NA 1500 Series 2)에 의해 건조중량당 탄소, 수소, 질소, 황 및 산소 함량을 측정하였고, 전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)에 의해 형태학적 특성을 조사하였다. 입도 조성을 측정방법으로는 현미경, 카메라사진, coulter counter, 광투과법 및 체분석 등이 이용되는데, 본 연구에서는 체분석 방법을 이용하였으며 입자가 파쇄되지 않도록 수중에서 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. BMP test를 통한 생분해 특성

본 실험에서 사용된 원수의 성상과 산발효조, 메탄발효조 각 슬러지의 성상을 Table 3.1과 Table 3.2에 나타내었다.

산발효조와 메탄발효조 각각의 반응조에서 우점한 미생물의 특성과 반응조의 형태에 따른 반응의 특징

을 확인하기 위해서 Fig. 3.1과 Fig. 3.2에 시간 경과에 따른 BMP/BMP_{control}을 나타내었다.

두 반응조의 결과 초기 BMP/BMP_{control}의 차이가 뚜렷했으며 두 반응조 모두 200시간이 경과하자 BMP/BMP_{control}이 점차 약 1.5로 일정해졌다.

산발효조 슬러지에 의한 BMP/BMP_{control}은 초기에 급격히 1 이하로 떨어진 후 점차 그 비율이 1.8을 회복하여 1.5를 유지한다. 이러한 현상은 기질에 의한 급격한 유기산 생성으로 산발효조 반응조 슬러지의 초기 메탄 발생량이 컸기 때문으로 사료된다. 이것은 산발효조의 미생물이 기질에 순응하여 활발히 메탄화성반응이 일어나기 전에 상대적으로 대조실험(control)에서 발생하는 가스량이 BMP/BMP_{control}에 영향을 미친것으로 판단된다. 이때 생성된 바이오 가스중 메탄의 함량은 최대 54.4%의 비율을 나타내고 있고, 28%의 이산화탄소의 함량을 나타낸다.

Fig. 3.2의 메탄발효조의 슬러지를 이용한 BMP/BMP_{control}은 반응 시점에서 그 비율이 2.6까지 급격히 상승한 후 반응시간이 지나면서 점차 1.5로

Table 3.1. Characteristics of wastewater used in BMP test

Item	Concentration
pH	7.2
BOD ₅ (mg/L)	3,260
TCOD _{Cr} (mg/L)	7,316
SCOD _{Cr} (mg/L)	3,392
TKN (mg/L)	1,112
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	148
TP (mg/L)	765
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	93
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	90
S ²⁻ (mg/L)	15.2
Alkalinity (mg/L)	2,891
TSS (mg/L)	2,160
VSS (mg/L)	1,550

Table 3.2. Characteristics of sludge used in BMP test

Item	Acidogenic sludge	Methanogenic sludge
TSS (mg/L)	11,733	64,450
VSS (mg/L)	6,867	41,000
VSS/TSS (%)	58.5	76.1
TS (%)	1.40	6.51
VS (%)	0.73	4.16
VSS/TSS (%)	52.1	63.9

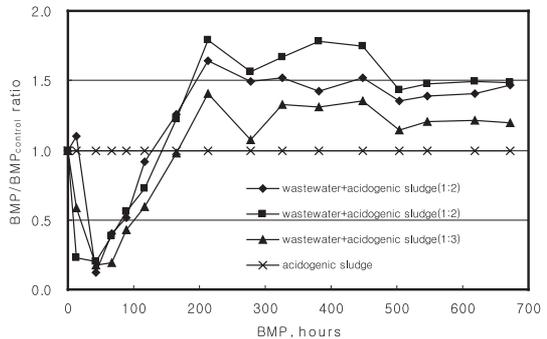


Fig. 3.1. BMP/BMPcontrol of acidogenic sludge.

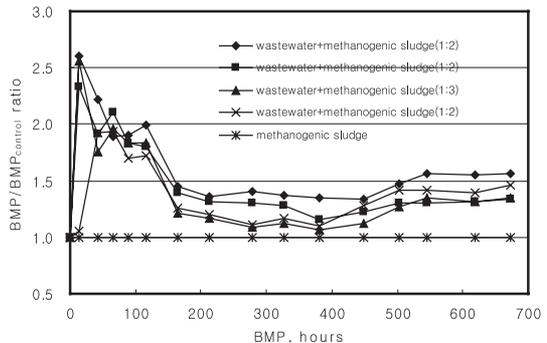


Fig. 3.2. BMP/BMPcontrol of methanogenic sludge.

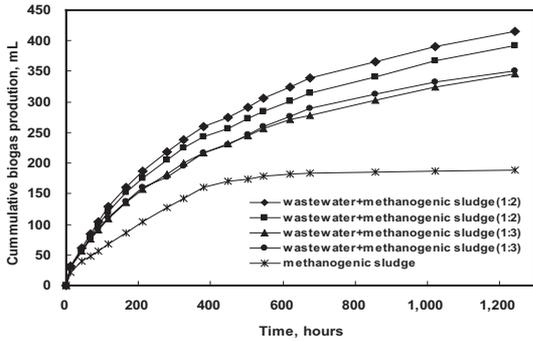


Fig. 3.3. Cumulative biogas production by methanogenic sludge.

안정되어 일정한 메탄가스가 발생하는 것을 알 수 있다. 이렇게 초기의 급격한 메탄가스의 발생은 본 연구에서 메탄발효조로 사용한 UASB의 고농도 입상슬러지의 메탄생성 미생물의 활발한 활성으로 인해서 양돈폐수와 접촉 초기부터 메탄 발생량이 급격히 증가한 것을 볼 수 있다.

3.2. BMP test를 통한 바이오가스 생성

메탄발효 슬러지에 의해 발생한 누적 바이오 가스량(mL)의 결과를 Fig. 3.3에 나타내었다.

양돈폐수와 메탄발효조 미생물을 혼합한 반응조에서는 초기 100여 시간 동안에는 모든 시료 전체 가스 발생량이 급격하게 증가하고, 지속적인 미생물의 활성으로 인해 바이오 가스가 활발하게 발생함을 알 수 있다. 메탄발효조 미생물에 의한 누적 가스 발생량이 점차 일정한 수준으로 안정화되면서 발생한 총 바이오 가스 평균 약 400mL 중에 80.6%의 메탄가스 분율을 가지는 것으로 나타났고 일정량의 바이오 가스와 함께 그 함량비도 지속적으로 78~80%를 유지하며 발생하였다. 양돈폐수와 메탄발효 슬러지의 혼합 비율 역시 1:2인 경우에 가스발생량이 400mL로 1:3의 혼합비율의 발생량인 340mL보다 약 1.18배 차이가 났다. 이 실험 데이터를 바탕으로 하여 pilot scale 반응조의 운전모드에 적용하여 효율을 최적화 하였다.

따라서 메탄발효조 슬러지에 의한 메탄가스 발생을 산발효조 슬러지에 의한 가스량과 비교해보면 5.5 배 이상의 바이오 가스가 발생하는 것으로 분석되었으며, 메탄 발효조로 사용한 UASB의 미생물이 활발한 활성으로 인해 메탄발생 작용이 일어나고 있음을

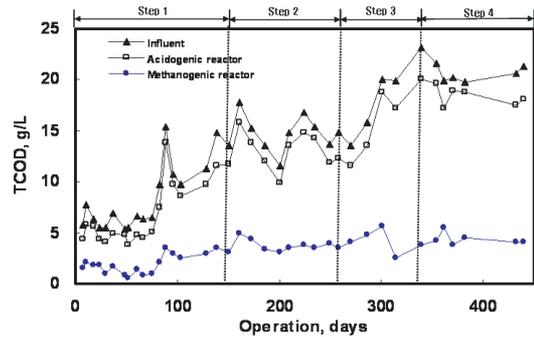


Fig. 3.4. Variation of TCOD concentration in each reactor.

알 수 있다.

3.3. Pilot-scale reactor 실험결과

3.3.1. 기질 농도 변화와 미생물량의 변화

생물반응조로 유입되어 유출되는 유기물 거동을 평가하기 위하여 Fig. 3.4에 운전 시간에 따른 유입수와 산발효조 유출수 그리고 메탄발효조의 유출수 TCOD 농도를 나타내었다. 운전 기간동안 20,000 mg/L 이상의 양돈폐수가 유입되어 산발효조와 메탄 발효조를 거친 후에 최종 유출수의 TCOD 농도는 평균 3,868mg/L로 일정하게 유지한다.

Pilot-scale reactor의 메탄발효조로 이용한 UASB 반응조에서 입상슬러지의 변화를 알아보기 위하여 운전 시간에 따른 MLVSS와 MLSS 농도의 변화와 MLVSS/MLSS 비를 Fig. 3.5에 나타내었다. 운전 초기 150일 동안에는 MLVSS와 MLSS 농도의 변화가 불규칙적으로 증가하였지만 그 이후에 꾸준히 미생물량이 증가하여 MLSS는 45g/L, MLVSS는 30g/L에 도달하였다. 이것은 기질이 유입되면서 입상슬러지의 증가를 단적으로 보여주는 것인데 입상슬러지의 형성과 메탄 생성 미생물의 활성을 예상 할 수 있다. 또한 MLVSS/MLSS 비도 점차 70% 수준을 유지하여 UASB 반응조가 안정한 상태에서 운전되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.6은 메탄 발효조에서 유입된 기질 TCOD 소모량과 미생물량의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 기질의 소모율이 높아짐에 따라서 생성된 미생물량도 점차 증가하고 있는 것을 볼 수 있고, 기질 소모량과 생성된 미생물량의 관계를 식으로 나타내면 $Y = 45.067X + 23336 (R^2 = 0.7140)$ 으로 두 인자의 상관관

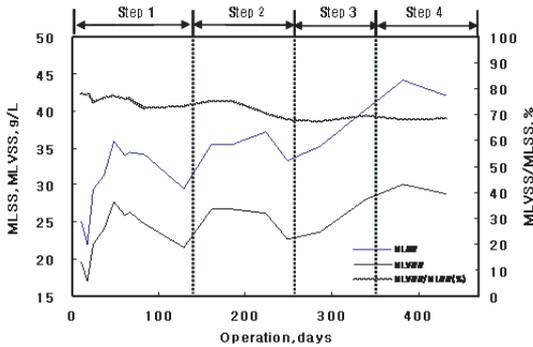


Fig. 3.5. Biomass concentration in the UASB reactor.

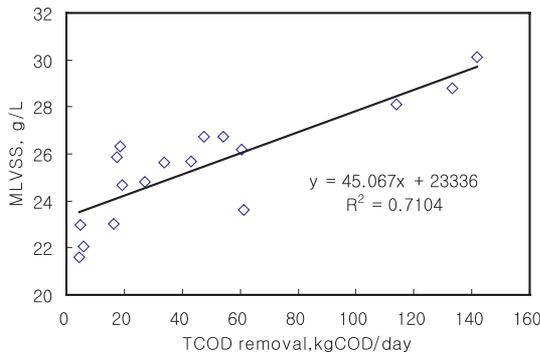


Fig. 3.6. Relationship between TCOD removal and MLVSS.

계를 알 수 있다.

3.4. 입상슬러지의 특성과 성장조건

3.4.1. 입상슬러지의 입경 특성

UASB 반응조에서 생성된 granule은 대상 폐수에 따라 형태 및 색깔이 달라지는데 Rim과 Han(2000)의 연구에 기초할 때, 양돈폐수에서도 충분히 granule이 생성되고 성장이 가능하기 때문에 초기에 식중환 granule은 반응이 진행됨에 따라 충분히 성장할 것으로 판단하였다.

입상슬러지 분포를 확인하기 위하여 UASB 반응조의 높이별 입상슬러지를 각각 분석하였다. 입상슬러지의 평균 입경은 >0.2mm부터 0.150~0.250mm까지의 분포를 보이고 있다. 62.1%가 0.85~2.0mm의 입도의 크기를 보이고 있으며 0.425~0.85mm 크기의 입상 슬러지는 37.1%를 형성함을 볼 수 있다. 이는 전분공장 폐수 0.7~2.8mm, 제지공장 폐수가 1.0~3.0mm 정도의 범위와 비교해 볼 수 있다. 입경은 영양물질, 미생물의 성장률, 전단력, extracellular

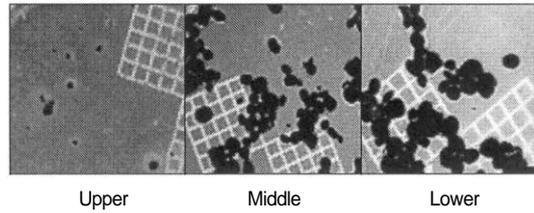


Fig. 3.7. Characteristics of granule in UASB reactor height.

Table 3.3. Particle size distribution of granular sludge in UASB reactor

Sieve number(mesh)	Diameter(mm)	Weight fraction(%)
10	>2.0	5.5
20	0.85~2.0	62.1
40	0.425~0.85	31.7
60	0.250~0.425	0.5
100	0.150~0.250	0.2
200	0.075~0.150	-

polymers 뿐만 아니라 가스의 발생, inorganic precipitates 등 많은 인자에 의존한다고 보고하였다 (Tramper et al., 1984). 반응조 하단의 고흡물 농도는 30,000~45,000mg/L 정도로 고흡물의 미생물이 유지되었으며, 침강성이 매우 우수하였는데 침전속도는 2.42cm/sec로서 Yoon(1995)의 축산폐수를 기질로 한 연구에서 생성된 granule의 2.0cm/sec 이하와 비슷한 침강성을 보인다.

3.4.2. 화학적 조성

UASB 반응조로부터 채취된 granule의 화학적 조성을 알아보기 위하여 입상슬러지의 원소 분포를 조사하였다. 입상슬러지의 원소 성분을 분석한 결과 탄소의 함량이 평균 36.7%로 시간이 지남에 따라 큰 변화는 없으며 그 외 수소, 질소 그리고 황은 각각 평균 6.1, 6.4, 1.9%이다.

하지만 UASB의 입상슬러지는 MLVSS/MLSS의 비와 VS/TS의 비가 반응조의 상단에서 하단부로 갈수록 64%에서 최대 77%까지 늘어나는 경향을 볼 수 있고, 원소분석의 결과도 역시 반응조의 하단부의 입상슬러지 일수록 탄소함량이 증가함을 보이므로 미생물의 양을 상대적 수치로서 나타내어 볼 수 있다.

입상슬러지의 화학적 조성은 일반적인 미생물의 조성 과 비슷하다. 단백질과 탄수화물(총 건조중량의

약 50%, 7%)은 전형적인 박테리아와 유사하고, Ash 함량(10~30%)은 높는데 이는 FeS의 존재에 의해 입상슬러지가 검은색을 띄게 하고 UASB 입상슬러지의 황의 축적은 FeS 및 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 의 침전에 의해 형성된 것으로 판단된다. Ash 중 약 30%가 FeS로 구성되어 있고(Dolfing, et al., 1985), FeS가 부착된 표면은 물보다 높은 표면장력을 가지고 있어 granule의 안정성에 기여하고 있음을 의미한다(Grotenhuies, et al., 1986).

3.4.3. 입상슬러지의 생물학적 특성

입상 슬러지는 운전기간 동안 30,000mg/L 이상의 높은 농도 MLSS를 유지하였다. McLoed 등(1990)은 granule을 세 개의 층으로 구분하여 보고한 바 있는데, 내부 핵층은 Methanotrix로 구성되고 이들은 초기 granule의 자발적인 입상화 형성에 필수적이다. 이때 발견되는 미생물은 rod 형태이며 filamentous 미생물로 자라는 경향이 있다. Granule 중간층은 수소 생성균과 수소이용 미생물 모두를 포함하는 rod 형태의 미생물이 우점하고, 외부 층에는 rod, cocci, 그리고 filamentous 형태의 미생물이 혼합되어 나타나고 기질에 VFAs를 함유하는 경우 granule에서 발견되는 미생물은 주로 Acetoclastic Methanogen으로 *methanotrix soebnigenii*와 매우 흡사하다고 보고하였다.

Fig. 3.9는 UASB 반응조의 슬러지 bed 층으로부터 채취한 입상슬러지를 전자현미경(SEM)으로 형태학적 특성 및 내부구조를 관찰한 것이다. Granule은 *methanotrix* spp.의 기반 위에 다양한 종류의 bacteria가 network을 형성한다. 입상슬러지는 생물막 또는

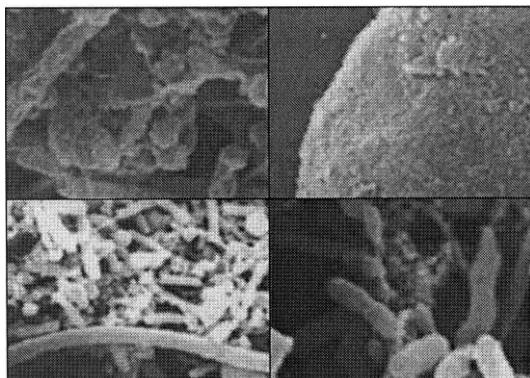


Fig. 3.8. Scanning electron microscopes of granular sludge.

각종 입자상 물질을 초기 부착할 수 있는 핵으로 성장하였고, 운전시간이 지나면서 점차 초기 식종한 슬러지 입자와 비교하여 전체적으로 둥근 모양으로 전환되었다. 입상슬러지의 내부는 대체로 acetate를 기질로 이용하는 filaments 형태의 미생물들이 서로 얽혀 있음을 관찰할 수 있으며, 이러한 미생물들은 대부분 *Methanotrix*종으로 추측된다. 즉 long chain fatty acid의 분해결과로 발생하는 acetic acid를 기질로 이용하는 *Methanotrix*종의 성장으로 대부분 filaments 형태로 성장하기 때문이다.

전자현미경 관찰에 의하면 granule의 표면에서는 hydrolytic 또는 acidogenic bacteria가 주로 관찰되었고 내부에서는 filamentous 형태의 methanotrix genus bacteria가 지배적이다. 기질로써 acetate를 이용한 결과 F420함량, ATP pool 및 메탄형성 박테리아의 활성도는 각각 $0.04 \sim 0.77 \mu\text{M}$ F420/g VSS, $0.046 \sim 0.32 \text{mg ATP/g VSS}$ 그리고 $0.62 \sim 2.1 \text{g CH}_4\text{-COD/g VSS/day}$ 로 보고되며, 이 값은 소화슬러지의 경우보다 4~30배, 1.1~8배 그리고 7~23배 정도 더 크다.

4. 결 론

양돈 폐수로부터 최적 메탄생성을 유도하기 위한 batch 실험을 통해 대상 양돈 폐수와 산발효조, 메탄발효조 슬러지의 적절한 혼합비를 선정하여 식종미생물과 기질의 식종비에 따른 메탄발생량의 추이분석을 통해 생분해 특성을 평가하였다. 반응조의 pH를 각각 5.5~6.5, 6.8~7.4로 맞추어서 운전한 이상 혐기 공정(Two-Phase Anaerobic process)의 산생성 미생물과 메탄생성미생물을 이용해 양돈폐수의 바이오가스 생성과 생분해 특성을 평가하였다.

1) BMP test를 통한 바이오 가스 생성

산발효조 미생물에 의한 $\text{BMP}/\text{BMP}_{\text{control}}$ 은 초기 유기산의 발생으로 인해 급격히 1이하로 떨어진 후 점차 그 비율이 1.8을 회복하여 1.5를 유지하며 메탄발효조 슬러지에 의한 비율은 2.6까지 급격히 상승한 후 반응시간이 지나면서 점차 1.5로 안정되어 일정한 메탄가스가 발생하는 것을 알 수 있다. 메탄발효조 슬러지에 의한 메탄가스 발생이 산발효조 슬러지에 의한 바이오가스 보다 5.5배 이상 발생하며 메탄 발

효자로 사용한 UASB의 미생물의 활발한 활성으로 인해 최대 80.6%의 메탄이 발생하였다.

2) 입상슬러지(granule)의 특성과 생성조건

UASB 반응조의 하단에는 62.1% 이상이 0.85~2.0mm 크기의 입상슬러지가 분포하고 있었으며, 침강성이 매우 우수하였다. 또한 반응조의 상단에서 하단부로 갈수록 입상슬러지의 MLVSS/MLSS 비는 64%에서 최대 77%까지 늘어나는 경향을 볼 수 있고, 탄소 함량 역시 증가함을 보이므로 미생물의 양을 상대적으로 비교해 볼 수 있다. 입상슬러지의 MLVSS/MLSS 비는 70%수준을 유지하고 있고, 기질의 소모량과 미생물량은 선형적인 관계를 보임을 알 수 있다. 입상슬러지의 표면은 막대형, 구형 그리고 filamentous 등의 다양한 형태를 가진 미생물 의해 매우 복잡하게 둘러 싸여져 있는데 이것은 Mcloed 등 (1990), Fang(2000)의 연구와 동일한 결과이며, 내부는 대체로 filaments 형태의 미생물이 얽혀 있는 대부분 Methanotrix 중임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Banks C. J., Wang Z. (1999) Development of a two phase anaerobic digester for the treatment of mixed abattoir wastes, *Water Science and Technology*, **40**, pp 69-76.
2. Dolfing, J. (1986) Granulation in UASB reactors, *Water Science and Technology*, **18**, pp 78-81.
3. Ghosh S., Chynoweth DP., Tarman PB. (1987) Two-phase anaerobic digestion. US Patent No 4,696, 746.
4. Ghosh S., Conrad, J.R., Klass, D.L. (1975) Anaerobic acidogenesis of wastewater sludge, *Journal of Water Pollution Control Federation*, **47**(1), pp. 30-45.
5. Hulshoff Pol L. W., Castro Lopes S. I. de, Lettinga G., Lens P.N.L. (2004) Anaerobic sludge granulation, *Water Research*, **38**, pp. 1376-138.
6. Largus T. Angenent, Shihwu Sung and Lutgarde Raskin (2002) Methanogenic population dynamics during startup of a full-scale anaerobic sequencing batch reactor treating swine waste, *Water Research*, **36**, pp 4648-4654
7. METCALF & EDDY (2001) wastewater Engineering Forth edition, Mc Graw Hill
8. Nadais H., Capela I., Arroja L., Duarte A. (2005) Treatment of dairy wastewater in UASB reactors inoculated with flocculent biomass, *Water WA*, **31**(4).
9. Owen, W.F., Stuckey, D.C., Healy, J.B., Jr. Young, L.Y., and McCarty, P.L. (1979) Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity, *Water Res.*, **13**, pp. 485-492.
10. Speece, R.E. (1996) *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*, Archae Press, United States of America.
11. Wang, S.C., Cheng, S.S, Wong, K.M. and Tseng, I. (1988) Characteristics of a two-phase UASB series process with a methanosarcina type of sludge, IAWPRC's asian workshop on anaerobic treatment at SASA international house, Bangkok.
12. Wiegant WM, Zeeman G. (1986) The mechanism of ammonia inhibition in the thermophilic digestion of livestock manures, *Agriculture Manures*, **16**, pp. 243-253.
13. Yu H., Fang H.H.P. (2002) Acidogenesis of dairy wastewater at various pH levels, *Water Science Technology*, **45**(10), pp. 201-206.