

## 돼지분뇨 처리를 위한 Farm-scale Two-phase Anaerobic Digester의 실증운영에 관한 연구

백인규 · 이상락 · 안정제 · 권윤정\* · 맹원재  
건국대학교 동물생명과학부

### A Study on the Practical Operation of a Farm-scale Two-phase Anaerobic Digester for the Treatment of Swine Manure

Back, I. K., S. R. Lee, J. J. Ahn, Y. J. Kwon\* and W. J. Maeng  
Department of Nutrition Resource Science, Konkuk University

#### Summary

A two-phase anaerobic digestion system for the treatment of swine waste was constructed in a commercial hog farm. The digester system was composed of 4 major units; slurry storage pit, acidogenic digester, methanogenic digester and sedimentation pit. A biogas boiler unit was also attached to maintain the digester temperature of 37°C. Substrate loading was made with 2hr-interval by pumping about 2.1m<sup>3</sup> of slurry type swine waste from the slurry pit into the acidogenic digester, which corresponds to hydraulic retention time of 4 days for the acidogenic digester and of 11 days for the methanogenic digester.

Digester temperature were well maintained as the set temperature of 37°C in the methanogenic digester, while the temperature in the acidogenic digester showed around 34°C. pH also showed a steady-state results of 7.3 in the acidogenic digester and of 7.6 in the methanogenic digester during the operation period. Average biogas production rate was 0.66m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> digester volume. Reduction rate of total solid and volatile solid were 42.8% and 55.8%, respectively. Total nitrogen and ammonia nitrogen were not reduced during the anaerobic fermentation, however, most of VFAs seemed to be converted to the biogas. These fermentation performance data may suggest that the newly developed a two-phase anaerobic digester for the swine waste treatment worked so successfully.

(Key words : Farm-scale two-phase anaerobic digester, Swine wastes, Biogas)

---

\* 건국대학교 공과대학 섬유공학과(Textile Engineering, Konkuk University)

## 서 론

유기성폐수의 처리에서 가장 효율이 좋은 방법으로 알려져 있는 활성오니법은 BOD 함량이 높은 가축폐기물의 처리에는 적합하지 않다. 활성오니법에 의한 처리의 경우, 폐기물중의 유기물 함량이 1% 이하이어야 하나 돈사와 우사 등에서 발생하는 폐수의 유기물 함량이 3~20%의 범위여서 이를 활성오니법으로 처리하기 위해서는 5~20배로 희석해야 함으로써 처리대상 폐기물량이 5~20배로 증가해 버리기 때문이다. 또한 이 활성오니법은 환경온도가 낮을 경우 그 처리효율이 극단적으로 낮아지게 되는데, 실제 이 방법을 적용하고 있는 국내의 농가들에서 겨울철에 크게 정화효율이 떨어지는 것이 확인되고 있다.

많은 축산폐기물의 처리 또는 재활용 방법 중에서 미생물의 대사능력을 이용하여 폐기물을 가연성의 바이오가스와 동, 식물의 영양자원으로 전환시키는 방법이 가장 이상적일 것이다. 특히 주에너지원인 원유의 전량을 수입에 의존하고 있는 우리 나라의 실정에 비추어 볼 때 축산폐기물을 혐기적 조건에서 발효시켜 발열량이 매우 높은 바이오가스를 얻는 방법은 매우 중요하다고 할 수 있다. 축산폐기물의 혐기적 발효과정은 자연계에서의 생물학적 분해과정을 인위적으로 모방한 방법으로서, 이 과정에서 폐기물 유기성분의 1/3 이상이 바이오가스로 전환된다. 그리고 발효가 끝난 잔류물은 비료나 액비로 활용이 가능한 여러 가지 물질을 함유하고 있어서 탈수, 건조 등의 과정을 거쳐 재활용이 가능하다. 이러한 혐기발효과정을 시스템화할 경우, 발효과정에서 냄새가 전혀 발생하지 않고, 시설 운전비가 거의 들지 않으며 유지관리가 간단하다는 등의 추가적인 장점을 갖고 있다. 그리고 이 혐기적 발효법은 고형물의 약 10%까지 유기물부하가 가능하

여 활성오니법이 가지는 단점을 해결할 수 있는 처리시스템으로도 활용할 수 있다.

그러나 혐기발효법이 이와 같은 중요하고도 본질적인 장점을 갖고 있음에도 불구하고 우리나라에서 실용예가 그다지 많지 않은 것은 현실적인 적용에 몇 가지 문제점을 안고 있기 때문이다. 그것은 폐수를 완전하게 정화해야 할 경우 발효가 끝난 소화오수를 재처리할 필요가 있으며, 또한 발효효율을 높이기 위하여 발효조를 가온할 필요가 있어서 가온에 에너지가 소모된다는 점 등이다. 그러나 이와 같은 현실적인 문제점은 이 기술이 갖는 본질적인 장점에 비추어 볼 때, 충분히 극복될 문제이다.

이러한 관점에서 본 연구팀은 가축폐기물을 혐기발효를 통하여 바이오가스와 액비를 생산하는 two-phase anaerobic digestion system을 개발하고 이 시스템의 성능을 확인하기 위하여 실증 실험을 진행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 혐기발효조

내용량 약 770m<sup>3</sup>의 혐기발효조 시스템을 4,000두 규모의 양돈농장(경상북도 군위군 군위읍 대흥농장)에 설치하였다. 시스템전체의 구성은 원분뇨저장조, 발효조, 침전조 및 발효잔류물 저장조로 구성하였고(표 1, 그림 1), 발효조의 주요 골격은 철근콘크리트로 설비하였다. 혐기발효조는 다시 콘크리트격막으로 용량비 약 4 : 11이 되도록 산생성조와 메탄생성조로 분리하였다. 격막의 상단부에는 생성된 바이오가스의 이동이 자유롭도록 직경 40cm의 구멍 2개를 설치하였고, 하단부에는 폐수가 산생성조에서 메탄생성조로 자연 유입될 수 있도록 통로를 설치하였다. 각 발효조의 하단부는 cone type로 설비하여 sludge가 발효조 중앙으로 모이도록 하였다.

Table 1. Practical size and hydraulic retention time(HRT) of a farm-scale two-phase anaerobic digester system for the treatment of swine wastes

Compartment	Size (m <sup>3</sup> )	Working volume (m <sup>3</sup> )	HRT (day)
Storage pit	96	76.8	3
Acidogenic digester	128	102.4	4
Methanogenic digester	352	281.6	11
Settling tank	96	76.8	3
Storage tank	96	76.8	3
Total	768	614.4	24

발효조의 내부는 보온재로 처리하였으며, 그 위에 방수도료를 칠하였다. 발효내용물의 가온을 위하여 발효조 내부에는 heating coil을 벽과 바닥에 설치하고 보일러시스템과 연결하였다.

혐기발효조에서 생성된 바이오가스는 불순물, 황화수소, 수분 등을 제거하기 위하여 설치된 filter, de-sulfer tank 및 de-water tank를 차례로 통과토록 하였고, gas meter와 gas pressure controller를 지나 가스보일러에서 연소되도록 설비하였다. 가스보일러는 상업용으로 생산된 LNG(Liquid natural gas)용 보일러를 개조하여 사용하였다.

발효조에서의 발효상태를 계측하기 위하여 산생성조와 메탄생성조의 하단과 상단에 각각 온도 sensor와 pH meter를 설치하였다.

## 2. 발효조의 운용

혐기발효에 사용된 양돈 고액혼합형 분뇨의 화학적 조성은 표 2와 같다.

혐기발효조로의 기질의 투입은 돈사에서 유입되어 저장조에 모여진 고액혼합형 분뇨를 하루 12회 일정량(평균 약 2.1m<sup>3</sup>)을 수중 slurry pump를 이용하여 산생성조로 이송하여 실시하였다. 매회 pump를 작동하기 전에 저장조 내부의 기질을 blower로 교반하여 기질

의 내용물 조성이 일정하게 유지되도록 하였다. 산생성조로 투입된 기질의 양만큼 산생성조 발효내용물은 메탄생성조로 보내지며, 동시에 같은 양의 메탄생성조 발효잔류물이 침전조로 넘쳐 흐르게 된다.

산생성조와 메탄생성조의 온도는 바이오가스 보일러에 의해 37±1℃로 유지되도록 설정하였고, 발효조내의 gas 압력은 약 180 mmH<sub>2</sub>O가 되도록 조절하여 운영하였다. 모든 발효조 운영은 sensor류와 timer 등을 이용하여 제작한 controller에 의해 자동으로 이루어지도록 하였다.

## 3. 실증운영 및 성적조사

설치된 혐기발효조에 대한 운영성적을 1998년 2월부터 7월까지 6개월간 조사하였다.

생성된 바이오가스의 양은 gas meter를 통하여, 발효조내의 pH와 온도는 산생성조 및 메탄발효조에 설치한 pH meter와 온도sensor를 각각 이용하여 매 5일간격으로 측정하였으며, 매월 2회 산생성조로 투입하는 기질과 침전조로 넘어오는 배출수를 채취하여, 총고형물(TS), 휘발성고형물(VS), 총질소(TN), NH<sub>3</sub>-N 및 휘발성지방산(VFA)의 농도를 A.O.A.C.(1993)의 방법에 준하여 분석하였다.

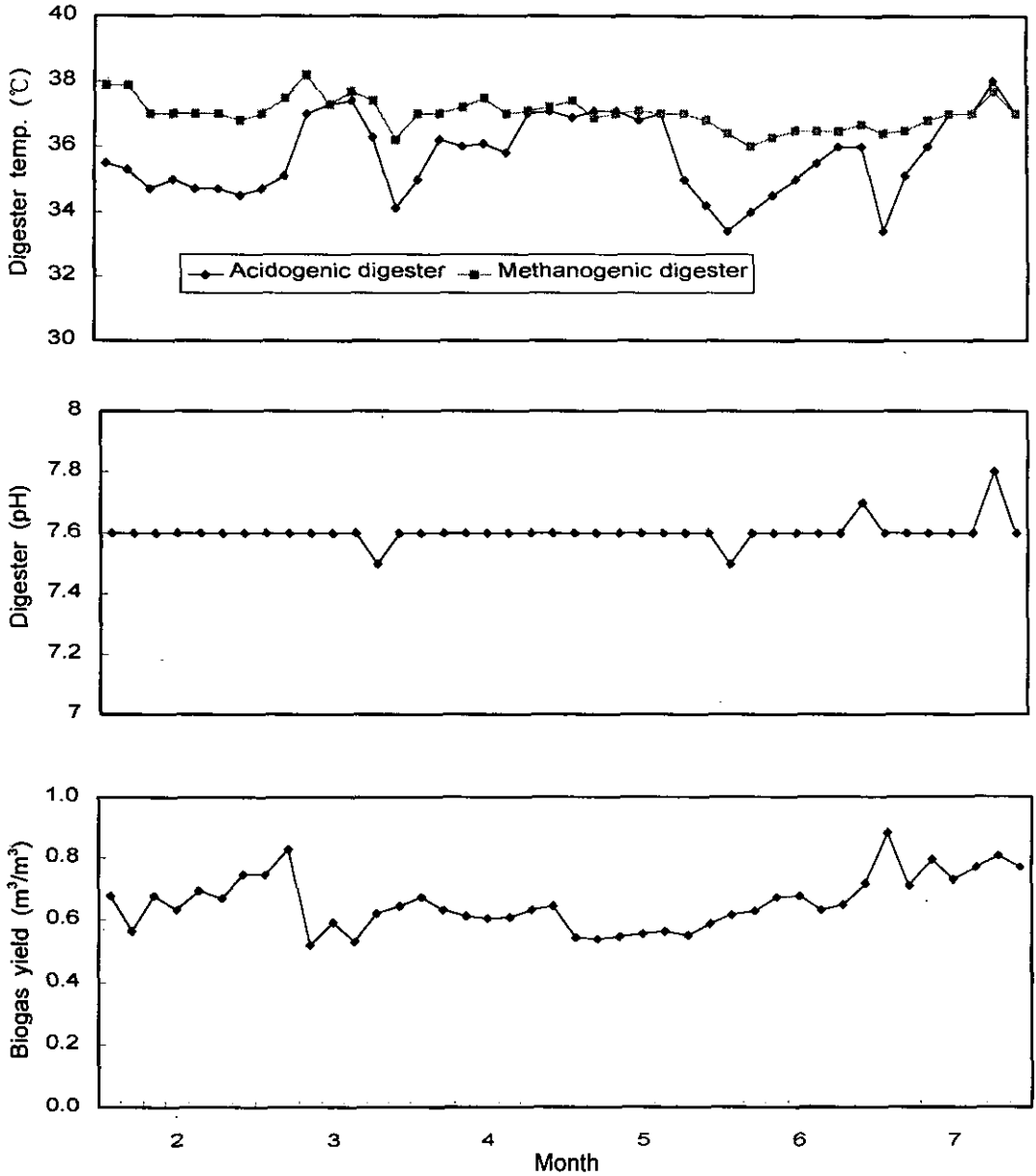


Fig. 1. Changes of digester temperature, pH and biogas yield during the experimental period.

결과 및 고찰

1. 발효조내의 온도 및 pH

조사기간동안의 혐기발효조의 산생성조

(acidogenic digester)의 온도는 34.1~38.0°C의 범위였으며, 평균 35.8°C를 나타내었다(그림 1, 표 3). 반면 메탄생성조(methanogenic digester)는 36.0~38.2°C의 범위에서 변화하였고, 평균 37.0°C를 나타내었다. 혐기발효는

일반적으로 광범위한 온도에서 발효가 가능하지만 고온대(thermophilic)의 경우 55~65℃가, 중온대(mesophilic)의 경우는 27~40℃가 적온범위이며 37℃가 최적발효온도로 알려져 있어서(Lawrence와 McCarty, 1969), 본 연구에서는 두 개의 발효조가 37℃로 유지되도록 설정하였다. 조사결과 메탄생성조는 37℃로 설정한 온도를 잘 만족하였으나 산생성조는 설정온도보다 약 1℃가 낮게 유지되었는데 이는 낮은 온도로 저장되어 있던 분뇨가 하루 12회나 산생성조로의 투입됨에 따라 산생성조의 온도가 낮게 나타난 것에 기인하는 것으로 판단되었다. 혐기발효에 있어서 온도는 매우 중요한 영향인자로서 하루중의 온도변화가 1℃를 초과하는 것은 바람직하지 않다(David 등, 1985). 따라서 향후에는 분뇨의 투입에 따른 산생성조의 온도저하를 방지하기 위하여 각 발효조별로 독립된 온도제어방식을 채택할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

조사기간동안의 메탄생성조의 pH는 인위적인 pH의 조절없이 거의 일정하게 7.6을 유지하였으며, 최저 7.5, 최고 7.8을 나타내었다(그림 1, 표 3). 산생성조에는 pH meter를 설치하지 않아서 발효내용물을 연속적으로 측정하지 못하였으나 발효조 내용물을 sampling할 때에 pH를 측정해 본 결과, 거의 7.3을 유지한 것으로 나타남으로써 산생성조와 메탄생성조를 연결한 two-phase anaerobic digester의 기능이 잘 유지되고 있는 것으로 생각되어졌다.

## 2. 바이오가스 생성량

바이오가스의 생성량은 발효조 내용적(digester volume; DV) m<sup>3</sup>당 최저 0.5m<sup>3</sup>/day에서 최대 0.9m<sup>3</sup>/day를 나타내었으며, 6개월간의 평균 바이오가스의 생산량은 0.66m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>DV/day를 나타내었다.

Table 2. Chemical composition of swine wastes<sup>1)</sup>

Item	Content
Total solid (%)	2.64 ± 0.21
Volatile solid (%)	2.00 ± 0.35
Total nitrogen (ppm)	4213 ± 518
Ammonia nitrogen (ppm)	2519 ± 172
pH	8.14 ± 0.12
Total VFA (mM/100mL)	132.90 ± 17.81
BOD (ppm)	23560 ± 1760

<sup>1)</sup> n = 12.

평균 바이오가스생산량 0.66m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>DV/day는 본 연구팀이 설치하여 운영중인 동일한 구조의 pilot-scale two-phase anaerobic digester (DV; 0.8m<sup>3</sup>, loading rate; 2.0VS kg/m<sup>3</sup>/day, HRT; 15 days)에서의 평균 생산량인 0.8m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>DV(맹과 이, 1993) 보다는 다소 낮은 것이었다. 이와 같이 pilot-scale과 farm-scale에서의 발효성적이 차이가 나타난 것은 우선 부하량에서 farm-scale digester 쪽이 낮은 것이 원인 중의 하나로 분석되었다. 원래 본 연구의 실험농장의 digester 용량은 농장의 규모확장을 고려하여 육성돈 4,200두의 분뇨처리를 위하여 설계하였으나, 실증 운영기간 중에는 약 2,700~3,000두 만이 사육되고 있어서, 투입되는 유기물의 양이 digester의 규모에 비해 상대적으로 적었기 때문이었다.

조사기간 동안 보일러시스템에서의 바이오가스 연소에 문제가 발생되지 않은 것으로 미루어보아 바이오가스중의 methane 함량도 일정수준(약 65%) 이상에 도달하고 있는 것으로 판단되었다. 일반적으로 혐기발효시 발생하는 바이오가스는 돈분뇨가 발효기질일 경우 methane이 약 65~70%를 차지하며, 그 나머지 30~35%가 이산화탄소로 구성되어 있다(Smith 등, 1979).

본 조사에서는 혐기발효조내의 온도를 일정하게 유지하는데 소모되는 바이오가스의

양을 직접 조사하지는 않았으나, 7월(여름철)에는 생산된 바이오가스의 약 20% 정도만이 digester를 가온하는데 사용되어 약 80% 이상이 잉여 바이오가스로 배출되는 것으로 추정되었으며, 2월(겨울철)에는 50% 정도가 발효조 가온에 사용되어지고, 약 50%가 잉여 바이오가스가 생산되는 것으로 추정되었다. 조사농장에서는 겨울철에 digester의 재가온에 사용하고 남은 잉여 바이오가스를 농장주택과 일부 돈방의 난방에 이용하였다. 이는 우리나라에서는 겨울철이 길고 추워서 발효조 가온에 추가의 연료가 필요하기 때문에 혐기발효가 성공할 수 없다는 통념을 깨트린 것으로 주목할만한 일이다. 또한 앞으로 잉여 바이오가스의 다양한 활용방법과 장치의 개발에 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 3. 총고형물 분해율

조사기간동안 산생성조로 투입된 총고형물(TS)의 최고치는 3.14%이었고 최저치는 2.33%로 나타났으며, 그 평균 함량은  $2.64 \pm 0.21$  %였다(그림 2, 표 3). 이 수치는 일반적인 slurry형태 양돈분뇨의 TS 함량인 약 2.0%보다 약간 높게 나타났다.

배출된 TS의 함량은 최저 1.37%에서 최고 1.69%이었고 6개월간의 평균은 1.50%였으며, 표준오차는 0.10%로 나타났다. 이러한 결과는 유입되는 TS의 함량의 변화에 대하여 혐기발효 후의 배출되는 TS의 함량이 안정적으로 유지되는 것을 보여준다. TS의 분해율(reduction rate)은 조사기간 중 최저 33.46%, 최고 48.74%의 범위에 있었으며, 평균 분해율은 42.81%이었다. 그러나 TS 분해율의 표준편차는 4.44%로서 유입, 유출 TS 농도의 변화율보다 높게 나타났다. TS의 분해율에 가장 크게 영향을 미치는 주요 인자는 부하율과 체류시간(hydraulic retention time; HRT)으로 부하율이 높아질수록 TS의 분해율은

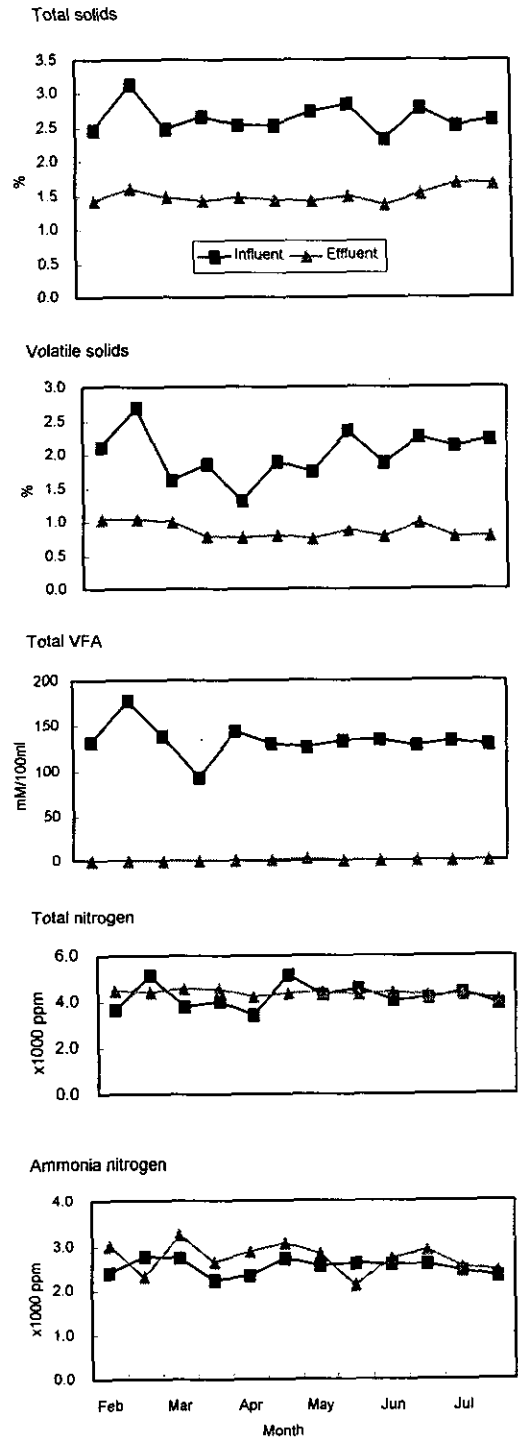


Fig. 2. Changes of digestion parameters in the digester during experimental period.

감소하며, 체류시간이 길어질수록 TS의 분해율은 증가한다. David 등(1980)은 HRT와 부하율이 유기물 분해율에 미치는 영향을 조사하였던 바, HRT를 5일에서 25일로 하였을 때 유기물의 분해율은 8배 증가하였다고 보고한 바 있다.

#### 4. 휘발성고형물 분해율

조사기간동안의 유입된 휘발성고형물(VS)의 최고치는 2.69% 이었고 최저치는 1.31%로 나타났으며, 평균 VS의 함량은 2.00%로 나타났다(그림 2, 표 3). 배출된 VS의 함량은 최저 0.74%에서 최고 1.04%를 나타내었으며,

Table 3. Summary of digestion characteristics and performance of the digester during the experimental period.

Item	Data (number of observation)
Temperature (°C)	
Acidogenic digester	35.75 ± 0.18 (n=42)
Methanogenic digester	37.01 ± 0.07 (n=42)
pH	7.60 ± 0.01 (n=42)
Total solids (%)	
Influent	2.64 ± 0.06 (n=12)
Effluent	1.50 ± 0.03 (n=12)
Reduction rate (%)	42.81 ± 1.34 (n=12)
Volatile solids (%)	
Influent	2.00 ± 0.11 (n=12)
Effluent	0.87 ± 0.03 (n=12)
Reduction rate (%)	55.75 ± 2.42 (n=12)
Total VFA (mM/100ml)	
Influent	132.94 ± 5.37 (n=12)
Effluent	0.32 ± 0.21 (n=12)
Reduction rate (%)	99.75 ± 0.17 (n=12)
Total nitrogen (ppm)	
Influent	4212.67 ± 156.34 (n=12)
Effluent	4370.25 ± 37.91 (n=12)
Reduction rate (%)	-5.25 ± 3.86 (n=12)
Ammonia nitrogen (ppm)	
Influent	2519.00 ± 51.86 (n=12)
Effluent	2719.75 ± 97.05 (n=12)
Reduction rate (%)	-8.38 ± 4.11 (n=12)
Biogas yield, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> of digester	0.66 ± 0.01 (n=42)

평균 0.87%를 나타내었다. 일반적으로 분뇨의 VS 함량은 저장기간 및 온도와 밀접한 관계를 가지며, 저장기간이 길수록 VS의 함량은 감소하며, 저장온도가 높을 때 감소한다. 따라서 VS는 TS에 비하여 상대적으로 함량의 변화가 심하다. 그러나 유출되는 VS의 함량의 변화는 매우 적은 것으로 나타났다(표준오차 0.03%).

VS의 분해율은 조사기간 중 최저 41.22%, 최고 64.86%의 범위에 있었으며, 평균 VS의 분해율은 55.75%를 나타내었다. 그러나 VS 분해율의 표준편차는 8.04%로 유입, 유출 VS 농도의 변화율보다 높게 나타났다. 또한 전체적으로 보아 TS의 분해율에 비하여 VS의 분해율의 변화가 큰 것으로 나타났다.

## 5. VFA 분해율

유입수중의 VFA 함량은 평균 132.94mM/100ml을 나타내었으나 유출수에서는 거의 검출되지 않아서(0.32 mM/100ml) 분해율은 거의 100%에 달하였다. 이와 같이 메탄생성조로부터의 유출수에서 VFA가 검출되지 않는 것은 VFA가 메탄생성조에서 미생물에 의하여 이용되어 완전히 바이오가스로 전환되었다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 어쩌면 더 많은 양의 VFA가 메탄생성조로 공급되었다면 더 많은 양의 바이오가스가 생성되었을 지도 모른다. 이러한 가정에 대해서는 추가적인 조사가 필요하겠지만, 만약 가정이 맞는다면 현재의 산생성조 : 메탄생성조의 HRT 비율(4:11)을 좀 더 높이거나 부하율을 높일 필요가 있을 것으로 판단되었다.

## 6. 총질소 및 암모니아태 질소 분해율

유입수의 총질소(T-N)농도는 5,145ppm에서 3,435ppm의 범위였으며 평균농도는 4,213ppm으로 나타났다(그림 2, 표 3). 배출된 T-N의

농도는 최저 4,111ppm에서 최고 4,599ppm을 나타내었으며 그 평균치는 4,370ppm이었다. 또한 T-N 제거율은 조사기간중 최저 -23.90%, 최고 14.25%의 범위에 있었으며, 평균 T-N의 제거율은 -5.25%를 나타내었다. 그러나 제거율의 표준편차는 12.79%로 높게 나타나 매우 불안정한 경향을 나타내었다.

암모니아태 질소의 농도도 유입수와 유출수에서 각각 평균 2519.00 및 2719.75 ppm을 나타내어 제거율이 -8.38%가 되었다.

원래 혐기발효 과정에서는 질소화합물이 질소가스 등으로 전환되지 않기 때문에 제거율은 0이 되어야 하나 이와 같이 제거율에서 부의 결과가 나타난 것은 발효과정 중에 다량의 수분이 증발하여 바이오가스와 함께 배출됨에 따라 유출수에서의 이들의 농도가 증가한 것에서 기인한다.

## 적 요

돼지분뇨의 처리를 위한 Two-phase anaerobic digester를 개발하여 4,000두 규모의 양돈농장에 설치하고 1998년 2월부터 7월까지 6개월간 운영하며 발효조의 성능을 조사하였다. 발효조는 철근콘크리트를 이용하여 저장조, 산생성조, 메탄생성조, 침전도, 발효잔류물 저장조의 5개조로 구성하였으며, 생성 바이오가스를 이용하기 위한 보일러시스템을 설비하였다. 37℃로 설정된 발효조에서 발효기질로 사용된 고액혼합형의 양돈분뇨는 분뇨저장조로부터 혐기발효조로 pump에 의해 유입된 후 산생성조에서 4일, 메탄생성조에서 11일간 연속적으로 발효되도록 운영되었다.

혐기발효조의 온도는 37℃로 잘 유지되었으며, 메탄생성조에서의 pH도 거의 7.6을 유지하여 안정된 양상을 나타내었다. 평균 바이오가스의 생성량은 0.66m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> digester volume이었다. 총고형물 및 휘발성고형물의



분해율은 각각 42.81%와 55.75%이었으며, 총 질소 및 암모니아태 질소의 분해율은 각각 -5.25% 및 -8.38%였다. 휘발성지방산은 제거율이 99.75%에 달하여 메탄으로의 전환효율이 매우 높은 것으로 나타났다.

이들 발효성적을 종합해 볼 때, 본 연구팀이 설치한 2단계 혐기발효시스템은 그 성능이 매우 우수한 것으로 판단되었다.

### 인 용 문 헌

1. A.O.A.C. Association of Official Analytical Chemist. 1993. Official method of analysis. 14th ed., Washington DC. 551.
2. David A. S., H. Dannis, and H. Rex, 1980: "Methane production from waste organic matter". CRC Press, Florida.
3. Lawrence, A. W., and P. L. McCarty. 1969. Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment. J. Water Pollut. Control Fed. 41: R1-R17.
4. Smith, R. J., M. E. Hein, and T. H. Greiner, 1979. Experimental methane production from animal excreta in pilotscale and farm-size units. J. Anim. Sci. 48:202.
5. 맹원재, 이상락. 1993. 가축 BIOMASS의 효과적인 이용과 환경보전에 관한 연구. 2년차 연구보고서. 동물자원연구센터.