

고농도 암모니아를 함유한 돈사폐수의 고율혐기성 소화시 메탄균의 활성연구

오세은 · 이채영*

대전산업대학교 환경공학과
*삼성건설 기술연구소

(2000년 2월 3일 접수, 2000년 3월 10일 채택)

Activity of Methanogens in the High Rate Anaerobic Digestion of Swine Wastewater Containing High Ammonia

Sae-Eun Oh · Chae-Young Lee*

Dept. of Environmental Engineering, Taejon National University of Technology
**R & D Team, Institute of Technology, Samsung Engineering & Construction, Samsung Corporation*

ABSTRACT

Upflow anaerobic sludge blanket(UASB) reactor was operated for treating swine wastewater containing high ammonia nitrogen to assess their performance and toxicity of free ammonia concentration. In the reactor, chemical oxygen demand(COD) removed about 70% at 2.6kgCOD/m³.day of organic loading rate(OLR) and 3 days of hydraulic retention time(HRT), while it was decreased when OLR and HRT was maintained 7kg COD/m³.day and 2 days, respectively. Also UASB reactor was evaluated the activity of methane producing bacteria(MPB) according to change of free ammonia concentrations. MPB activity of applied sludge in the 500 and 1000 mg-N/ℓ of free ammonia concentration was inhibited by 4% and 40%, respectively. This clearly showed that free ammonia concentration less than 500mg-N/ℓ showed no inhibition to MPB in anaerobic treatment of organics. UASB reactor was stabilized easily less than 1000 mgVSS/ℓ due to degradation of organic solids by the high activities of anaerobes.

Key Words : Anaerobic Treatment, UASB, Swine Wastes, Ammonia, Inhibition

요약문

축산분뇨에 대한 처리도 및 암모니아에 대한 독성을 평가하기 위하여 UASB 반응조를 운전하였다. 반응조의 운전결과 유기부하량 $2.6\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 과 수리학적 체류시간 3일에서 70%의 COD 제거효율을 얻을 수 있었으나, 유기부하량과 수리학적 체류시간을 각각 $7\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 과 2일로 유지한 경우 COD 제거율이 급격히 감소되었다. 반응조 슬러지의 유리암모니아에 대한 독성을 평가하기 위하여 수행된 회분식 실험 결과, 각 단계별 슬러지의 메탄균 활성은 0.5, 0.47 및 $0.3\text{kgCH}_4\text{-COD}/\text{kgVSS}\cdot\text{day}$ 로 반응조내 유리암모니아 농도가 $500\text{mg-N}/\ell$ 에서는 메탄균의 활성이 4%, 유리암모니아 농도가 $1000\text{mg-N}/\ell$ 에서는 메탄균의 활성이 40% 감소되었다. 이러한 결과로부터 유리암모니아 농도가 $500\text{mg-N}/\ell$ 이하에서는 반응조 미생물에 미치는 저해정도가 작은 것으로 판단된다. 한편 $1000\text{mgVSS}/\ell$ 이 내의 휘발성 고형물질을 포함하는 폐수는 혐기성균에 의해 쉽게 분해되므로 UASB 반응조를 안정적으로 운영할 수 있다.

주제어 : 혐기성처리, UASB, 축산폐수, 암모니아, 저해

1. 서론

지난 수십년 동안 혐기성처리 시스템은 UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)나 AF(Aerobic Filter)와 같은 고율혐기성 공법이 개발된 이후 다양한 도시 및 산업폐수에 광범위하게 이용되고 있다. 이러한 형태의 반응조에 있어서 혐기성균은 모래, 플라스틱과 같은 불활성물질에 부착하거나 박테리아 자신의 자발적인 응결과정을 통하여 응집된다.^{1,2)} 따라서 혐기성 반응조내에서 혐기성 미생물의 고형화에 의해 미생물의 농도는 높게 되고, 결과적으로 높은 유기부하율의 적용이 가능하게 되었다. 하지만 축산, 증류수의 유출수, 토마토 가공산업과 같이 고농도의 아미노산이나 단백질을 포함하는 폐수에는 암모니아가 존재한다. 즉, 유기성 질소는 혐기성 소화과정 중 암모니아로 전환되고, 이러한 암모니아는 혐기성균에 저해를 미치므로 고농도의 질소함량을 포함한 폐수의 혐기성 적용에 제한적으로 사용되고 있다.

일반적으로 암모니아는 혐기성균의 영양물질로 이용되지만 $700\text{mg-N}/\ell$ 이상의 농도에서는 메탄균에게 저해를 일으키는 것으로 알려져 있다.³⁾ 메탄균은 혐기성 처리와 관련된 여러 미생물 중 가장 민감한 박테리아로 암모니아와 같은 저해인자에 대한 그들의 반응을 규명하는 것이 혐기성 처리의 성공적

운전에 매우 중요하다. 고농도 암모니아에 대한 메탄균 저해에 대한 연구는 다양한 종류의 폐수를 대상으로 보고되고 있다. McCarty는 $1500\sim 3000\text{mg-N}/\ell$ 사이의 암모니아 농도와 7.4 이상의 pH에서 저해를 일으키는 반면, $3000\text{mg-N}/\ell$ 이상의 암모니아 농도에서는 모든 pH에서 저해를 준다고 보고하고 있다.^{4,5)} 하지만 메탄균을 충분히 암모니아 농도에 적용시켰을 때 $5000\text{mg-N}/\ell$ 이하의 농도에서는 어떠한 영향도 주지 않는다고 하였다.⁶⁾ 암모니아 독성에 관한 지금까지의 광범위한 연구에도 불구하고 혐기성 소화시 메탄활성에 영향을 미치는 종류가 무엇인지는 명확하게 밝혀지지 않았다. 많은 연구자들은 유리 암모니아(free ammonia)가 혐기성 소화에 영향을 주거나 메탄균에 독성을 유발할 수도 있다고 제시하고 있다.^{7,8)} 유리 암모니아는 일반적으로 총 암모니아 농도, 온도, pH 등에 의존하는 것으로 알려지고 있다. Angelidaki는 분뇨의 혐기성 분해를 제어하는 중요한 요소로서 암모니아, pH, 온도라는 사실을 밝혀냈다.⁷⁾ 증온성과 pH 7.5에서 $80\sim 150\text{mg-N}/\ell$ 의 유리 암모니아 농도는 반응조 혐기성균에 독성영향을 미치는 것으로 알려지고 있다.³⁾ 한편, 암모니아에 적용되지 않은 슬러지의 경우 $50\sim 80\text{mg-N}/\ell$ 의 유리암모니아 농도에서 50%의 저해를 받았으나, 2개월 적용 후에는 $300\text{mg-N}/\ell$ 의 유리 암모니아 농도에서도 문제없이 잘

진행되었다³⁾. 하지만 지금까지 암모니아에 대한 혐기성균의 평가는 주로 재래식 혐기성 소화공정의 미생물을 대상으로 하였다.

따라서 본 연구에서는 암모니아를 함유한 폐수의 고율 혐기성 반응조에 대한 적용성을 확대하기 위하여 고농도 암모니아를 함유한 돈사폐수를 UASB 반응조에 적용하여 연속운전을 통한 처리도를 조사하였으며, 또한 고농도 암모니아 농도에 대한 메탄균의 저해정도를 평가하기 위한 실험을 수행하였다.

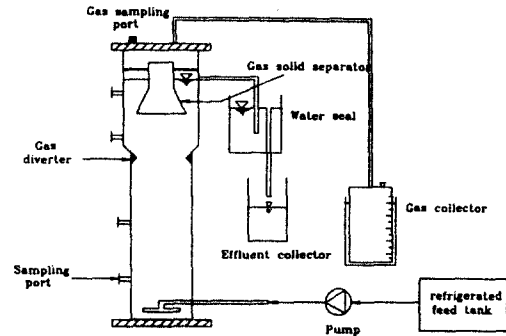


Fig. 1. Schematic diagram of UASB reactor.

2. 재료 및 방법

2.1. UASB 반응조

본 연구에 사용된 UASB 반응조는 Fig. 1과 같이 아크릴로 만들어 졌으며, 유효용량 4.0ℓ (내경 10 cm, 높이 23cm)로 구성되었다. 축산폐수는 유입 분배조를 통해 활성이 뛰어난 슬러지층 하부로부터 유입된다. UASB 반응조 상부에는 가스-고형물 분리가 설치되어 있어, 슬러지와 가스가 동시에 부상할 때 가스와 슬러지를 쉽게 분리되어 반응조내 활성이 뛰어난 미생물의 체류를 증가시켜 기질의 제거에 효과적이다. 반응조는 35℃ 항온조에서 운전하였다. 반응조로부터 발생하는 가스는 황산을 첨가한 포화 소금용액을 이용한 수위변동식 포집장치를 이용하여 정량화하였으며, 유출수는 반응조 침전부에서 채취하여 분석하였다.

2.2. 식종물질

반응조에 투입한 식종슬러지로는 D시 하수종말처리장의 혐기성 반응조에서 채취한 혐기성 슬러지 70%와 J사의 주정폐액을 처리하는 UASB 반응조에서 입상슬러지 30%를 혼합하여 이용하였다. 반응조내 초기 식종슬러지의 농도는 8gVSS/ℓ 이었으며 VSS/SS비는 0.75이었다. UASB 반응조는 0.2kg COD/kgVSS.day의 초기부하율에서 시작하였다.

Table 1. Characteristics of swine wastewater

Parameter	Raw effluent	Pretreated effluent
COD	30000~35000	15000~20000
TSS	25000~30000	4000~5500
VSS	20000~28000	3300~4400
TKN	3000~8000	1500~5000
PO ₄ -P	250~400	200~300
pH	7.8~8.3	7.9~8.2

2.3. 실험폐수

본 연구에 사용된 기질로는 K시의 돈사시설로부터 발생하는 돈사폐수로 고농도의 부유물질과 암모니아 등을 함유하고 있으므로 UASB 반응조의 부유물질에 의한 영향을 최소화하기 위하여 원수를 300 μm의 체를 통과한 여액을 이용하였다. Table 1은 돈사의 원폐수와 체를 통과한 여액의 특성을 보여주고 있다.

2.4. 운전조건

Table 2는 본 연구에서 수행된 UASB 반응조의 운전조건을 요약하였다. UASB 반응조는 암모니아에 대한 메탄균의 활성특성 및 부유물질에 대한 반응조의 처리특성을 평가하기 위하여 처리수를 I단계(0~139일)에서는 4배, II단계(140~190일)에서는 3배, 그리고 III단계(191~220일)에서는 2배 희석하였다. Fig. 2는 전 실험기간 동안 수리학적 체류시간과 유입수 COD 농도 변화를 보여주고 있다.

Table 2. Operating conditions

Stage Number	I	II	III
Exp. periods(days)	0~139	140~190	191~220
Dilution rate	4D	3D	2D
HRT(days)	3~7	2	2
OLR(kgCOD/m ³ .d)	1.1~3.6	4.5	7

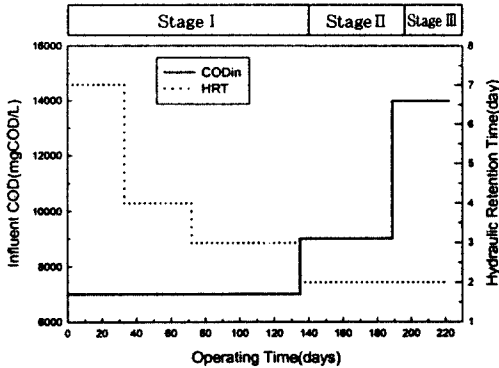


Fig. 2. Change of hydraulic retention time and influent COD.

2.5. 슬러지 활성화실험

암모니아에 대한 반응조의 메탄균 활성을 측정하기 위하여 연속 운전기간 중 일정한 시간별로 슬러지를 채취하여 회복식 실험을 수행하였다. 이용기질로는 초산, 프로피온산, 뷰틸산(COD 기준으로 1 : 1 : 1)의 혼합물을 이용하였으며, 영양물질 및 미량원소는 Anderson 등⁹⁾에 의해 제시된 방법을 이용하였다. 실험은 125mL serum bottle를 이용하였으며, 기질의 농도는 1200mgCOD/l이었다. 활성화실험을 위해 주입된 슬러지의 농도는 1.2gVSS/l이었다. Serum bottle는 35℃의 shaker에서 운전하였으며 pH 7.2를 유지하였다. 슬러지 활성은 기질의 농도, 암모니아의 농도와 메탄생산량에 의해 평가되었다.

2.6. 분석방법

UASB 반응조 시료는 침전부의 시료채취구에서 채취하였다. 가스발생은 매일 측정하였고, COD, TSS, VSS, 암모니아 농도 및 가스성분은 2~3일 간격으로 측정하였다. 가스조성은 Porapak Q 칼럼

(80/100mesh)을 이용하여 column 50℃, injector 80℃, detector 90℃에서 운반기체(He) 유속 30 mL/min의 조건에서 분석하였다(Gow-Mac, 5860). 모든 측정 항목은 Standard Methods¹⁰⁾를 이용하였다.

2.7. 유리 암모니아 농도의 계산

반응조내 메탄균에 영향을 미치는 것으로 알려진 유리암모니아(NH₃)의 농도는 반응조의 온도, pH에 의해 영향을 받는다. 유리암모니아 농도는 다음 식에 의해 계산할 수 있다.¹¹⁾

$$\frac{[NH_3]}{[TNH_3]} = \left[1 + \frac{10^{-pH}}{10^{-(0.09018 + 2729.92/T(K))}} \right]^{-1}$$

여기서, [NH₃]: 유리암모니아농도, [TNH₃]: 총 암모니아농도, T(K): 온도(Kelvin).

3. 결과 및 고찰

3.1. UASB 반응조의 처리특성

UASB 반응조는 전 실험기간 동안 35℃에서 운전되었다. Fig. 3은 전 실험기간 동안 유기물 부하량, COD 제거율 및 메탄가스 발생량의 관계를 보여주고 있다.

0~70일 동안 COD 부하량은 1.1에서 1.6kg COD/m³.day까지 단계적으로 증가하였으며, 수리학적 체류시간은 운전초기 7일에서 4일까지 단축하였으나 수리학적 체류시간 감소에도 불구하고 COD 제거율은 75%까지 증가하였다. 이 기간동안 메탄가스 발생량은 운전초기 0.6 l/day에서 70일에는 약 1.7 l/day까지 증가되었다. 70~139일 사이에 수리학적 체류시간을 3일로 단축하므로 유기부하량은 2.6kgCOD/m³.day로 증가하였다. 운전초기 유기부하량 증가에 의해 COD 제거율이 63%까지 감소되었으나, 바로 회복되어 운전 139일경 COD 제거율이 약 70%까지 증가되는 경향을 보이고 있다. 이 기간 동안 메탄발생량은 꾸준히 증가하여 2.5 l/day까지 증가되었다. II단계인 140~190일 동안

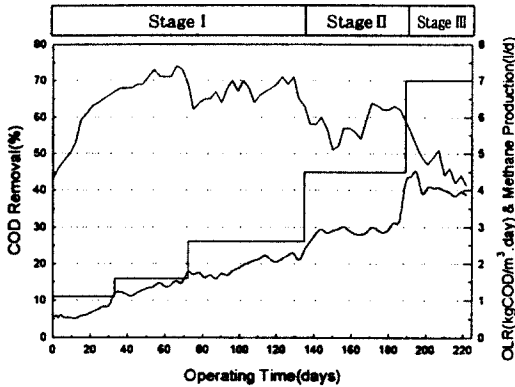


Fig. 3. COD removal and methane production.

처리된 유입수의 희석배율을 4배에서 3배로 조정 한 후 주입한 관제로 수리학적 체류시간이 일정함에도 불구하고 유기부하량은 $4.5\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 까지 증가하였다. COD 제거율은 초기 약 10일 동안 52% 까지 감소되었으나, 그 이후 II단계 말인 190일경에 62%로 다시 증가하였고, 메탄발생량은 $3.2\text{ l}/\text{day}$ 까지 증가되었다. I, II단계의 결과에 의하면 UASB 반응조를 이용한 돈사폐수의 혐기성 처리시 반응조 내 체류하는 활성이 우수한 미생물에 의해 고농도 암모니아 농도를 투입함에도 불구하고 양질의 메탄 가스 회수가 가능하였다. 한편 반응조의 안정성 및 고농도 암모니아에 대한 미생물을 평가하기 위하여 III단계인 191~220일 동안 유입수의 희석율을 2배로 유지하여 주입한 결과 유기부하량은 $7\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 까지 증가한 반면, COD 제거율은 급격히 감소하여 운전종료시 40%까지 감소되었다. 또한 메탄발생량도 유입부하량의 증가에도 불구하고 점차 감소하는 경향으로 볼 때 반응조내 메탄균이 심한 저해를 받고 있는 것으로 사료된다.

3.2. 암모니아에 의한 반응조 미생물의 영향

Fig. 4는 실험기간 중 반응조의 총암모니아와 유리암모니아의 농도변화를 나타내고 있다. 반응조내 유리암모니아의 농도는 운전초기 $65\text{mg-N}/\text{l}$ 로부터 I단계 종료시점인 139일에 약 $250\text{mg-N}/\text{l}$ 로 증가하였다. 이처럼 유리암모니아 농도가 증가하는 것은 운전일수가 진행될 수록 유기성 질소가 혐기성 균에 의해 암모니아로 전환되고, 이로 인한 pH의

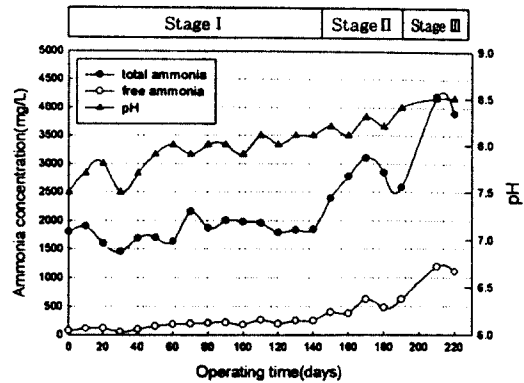


Fig. 4. Total and free ammonia concentrations in the reactor.

증가에 기인한 것으로 사료된다. 유리암모니아 농도는 총 암모니아 농도와 용액내 pH에 의존한다.¹²⁾ 반응조내 pH는 운전초기 7.5에서 점차 증가하여 I 단계 말경에는 8.1에서 운전되었기 때문에 총 암모니아 농도 중 유리암모니아 농도는 점차 증가하고 있다.

유입수의 농도를 증가시킨 II단계에서의 총 암모니아 농도는 $2500\sim3000\text{mg-N}/\text{l}$ 정도 유지하였으며, pH의 지속적인 증가로 인하여 유리암모니아 농도는 $500\sim600\text{mg-N}/\text{l}$ 를 보여주고 있으며, 반응조내 pH는 8.1~8.3이었다. 이 기간 동안 유리암모니아의 증가로 인한 COD 제거율 및 메탄발생량이 약간 감소되는 경향을 보이고 있다(Fig. 3). 이러한 현상으로 II단계에서의 유리암모니아 농도는 평균 $450\text{mg-N}/\text{l}$ 로 I단계의 평균 암모니아 농도 $250\text{mg-N}/\text{l}$ 에 비해 1.8배 증가함에도 불구하고 메탄균에 미치는 영향은 거의 없었다. III단계에서의 총 암모니아 농도 및 유리암모니아 농도는 각각 $4000\sim4500\text{mg-N}/\text{l}$ 및 $1000\text{mg-N}/\text{l}$ 이상을 보여주고 있는데 이때 COD 및 메탄발생량은 급격히 감소되고 있다(Fig. 3). III단계에서의 수리학적 체류시간은 II단계의 수리학적 체류시간과 같음에도 불구하고 메탄균 활성의 급격한 감소는 유입수의 농도를 2배 희석하여 유입농도를 증가시킨 결과 유리암모니아 농도가 $1000\sim1300\text{mg-N}/\text{l}$ 로 급격히 증가되었고, 이로 인해 반응조내 메탄균이 유리암모니아에 심한 저해를 받고 있는 것으로 평가된다.

이러한 연구결과를 보다 정확하게 평가하기 위하

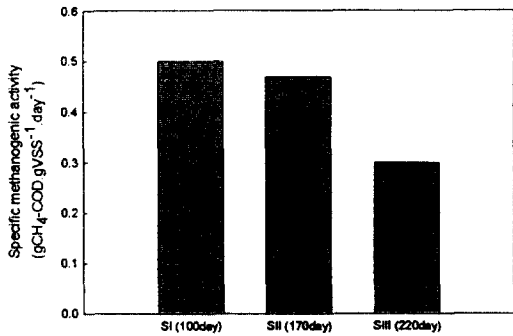


Fig. 5. Specific methanogenic activities from volatile fatty acids.

여 각 단계별 슬러지를 채취하여 회분식 실험을 수행하였다. 각 단계별 슬러지의 메탄활성도는 Fig. 5에 나타내었으며, 각 단계별 슬러지는 100일, 170일 및 220일이 경과된 반응조 슬러지를 이용하였다. 실험결과 메탄균의 활성은 각 단계별로 0.5, 0.47 및 0.3kgCH₄-COD/kgVSS.day를 보였으며, 이러한 결과로 볼 때 연속반응조의 운전시 메탄균의 암모니아에 대한 저해는 I, II단계에서 큰 차이가 없었으나, III단계에는 I단계에 비해 약 40% 정도의 활성이 감소되었다. 이는 연속운전시 반응조내 유리 암모니아 농도가 500mg-N/l에서도 메탄균의 활성에 큰 영향을 주지 않았으나, 유리암모니아 농도가 1000mg-N/l에서는 상당한 영향을 미치고 있다. 이러한 결과는 암모니아에 적용된 슬러지가 300 mg-N/l의 유리암모니아 농도에서 미생물에 어떠한 저해없이 반응조를 운영하였던 결과³⁾에 비해 더 높은 유리암모니아 농도에서도 메탄균이 성장할 수 있음을 나타내고 있다.

3.3. 고형물의 거동

Fig. 6는 UASB 반응조의 고형물 거동을 보여주고 있다. 운전초기 식종슬러지의 일부가 유출되어 높은 고형물 농도를 보였으나, 운전이 진행함에 따라 점차 안정되어 I단계 말경인 139일까지 300mg VSS/l 미만을 유지하였다. 특히 I단계에서는 유입수의 농도가 500~1000 mgVSS/l에도 불구하고 유출수의 농도가 안정을 유지하는 것은 반응조에 축적된 휘발성 고형물질이 긴 체류시간과 활성이 우수

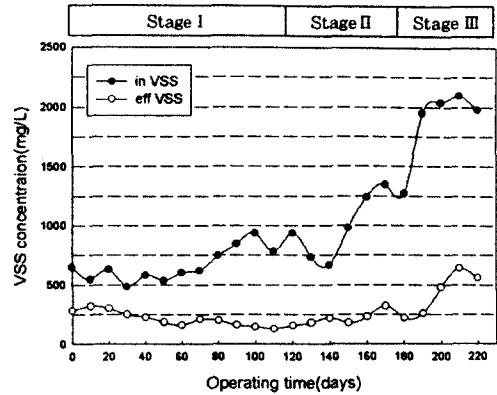


Fig. 6. Change of volatile suspended solid concentration.

한 미생물에 의해 쉽게 액화된 것으로 사료된다. 한편 운전 140일 이후부터 유입수의 농도를 증가시킨 결과 유입수 휘발성 고형물질 농도가 1000~1400 mgVSS/l로 증가되었다. 이로 인한 반응조 유출수의 농도는 400mgVSS/l 이상 증가하였으나, 170일 이후부터 다시 감소하기 시작하여 190일에는 300mg VSS/l를 유지하였다. III단계인 190일 이후 유입수의 회석을 2배로 한 결과 고형물 농도는 2000mg VSS/l까지 증가되었으며, 유출수도 500mgVSS/l 이상 증가되었다. 이와 같은 현상은 수리학적 체류 시간을 2일로 단축하여 운전함으로써 반응조내 휘발성 고형물질의 축적이 심화되었고, 또한 I, II단계와는 달리 반응조내 미생물의 활성감소로 인한 고형물질의 액화감소로 반응조내 휘발성 고형물질의 축적이 심화됨으로서 상당량의 고형물질이 유출되는 것으로 사료된다. 따라서 축산분뇨와 같은 고형물질의 농도가 높은 폐수를 UASB 반응조와 같은 고율 혐기성 반응조에 의해 처리할 때 반응조의 체류시간을 길게 하여 활성이 우수한 혐기성균에 의해 고형물이 충분히 가수분해 또는 액화하도록 하여야 하며, 또한 축적된 부유물질을 적절히 제어할 수 있도록 반응조 하부에 제거시스템을 도입하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

축산분뇨에 대한 UASB 반응조에서의 처리도 및 암모니아에 대한 독성을 평가한 결과 다음과 같은

결론을 얻을 수 있다.

- 1) UASB 반응조를 이용하여 운전한 결과 유기 부하량 $2.6\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 과 수리학적 체류 시간 3일에서 70% 정도의 COD 제거효율을 얻을 수 있었으며, 유기부하량과 수리학적 체류시간을 각각 $7\text{kgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{day}$ 과 2일에서는 COD 제거율이 급격히 감소되었다.
- 2) 각 단계별 슬러지의 메탄균 활성은 0.5, 0.47 및 $0.3\text{kgCH}_4\text{-COD}/\text{kgVSS}\cdot\text{day}$ 로 반응조내 유리암모니아 농도가 $500\text{mg-N}/\ell$ 에서도 메탄균의 활성에 큰 영향을 주지 않았으나, 유리암모니아 농도가 $1000\text{mg-N}/\ell$ 에서는 메탄균의 활성이 40% 감소되었다.
- 3) 축산분뇨의 휘발성 고형물질은 UASB 반응조에 잘 축적되었으며, 수리학적 체류시간을 3일, 유입원수를 4배 희석하였을 때 매우 안정하게 유지되었으나, 희석배율을 2배, 수리학적 체류시간을 2일로 유지한 경우 상당량의 부유물질이 반응조로부터 유출되었다.

사 사

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. Lettinga, G., Hulshoff Pol, L. W., Koster, I. W., Wiegant, W. M., de Zeeuw, W. J., Rinzema, A., Grin, P. C., Roersma, R. E., and Hobma, S. W., "High-rate anaerobic wastewater treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature condition," *Biotech. Genet. Eng. Rev.*, **2**, 253~258(1984).
2. De Zeeuw, W., "Granular sludge in UASB reactors," *Proceedings of the GASMAT Workshop*, Lettinga G., Zehnder A. J. B., Grotenhuis J. T. C., and Hulshoff Pol, L. W. (Eds.), Lunteren Netherlands, pp, 132~137(1988).
3. Koster, I. W. and Lettinga, G., "The influence of ammonium-nitrogen on the specific activity of pelletized methanogenic sludge," *Agriculture Wastes*, **9**, 205~216 (1984).
4. McCarty, P. I. and McKinney, R. E., "Salt toxicity in anaerobic treatment," *J. Water Pollut. Cont. Fed.*, **33**(4), 399~415(1961).
5. McCarty, P. I., "Anaerobic waste treatment fundamentals III," *Public Works*, **95**, 91~94(1964).
6. Van Veisen A. F. M., "Adaptation of methanogenic sludge to high ammonia-nitrogen concentrations," *Wat. Res.*, **13**(10), 995~999(1979).
7. Angeildaki, I. and Ahring, B. K., "Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia," *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **38**, 560~564(1993).
8. Hashimoto A. G., "Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes," *Agric. Wastes*, **17**, 241~261(1986).
9. Anderson, G. K., Donnelly, T. and McKeown, K. J., "Identification and control of inhibition in anaerobic treatment of industrial wastewater," *Proc. Biochem.*, **17**, 28~32(1982).
10. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th edn, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA (1992).
11. Ostergard N., "Biogasproduktion I det thermofile temperaturinterval," STUB rapport nr. 21, Kemiteknik, Dansk Teknologisk Institut, Taastrup(in Danish) (1985).
12. Hansen K. H., Angelidaki I., and Ahring B. K., "Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia," *Wat. Res.*, **32**(1), 5~12 (1998).