

슬러리형 돈사폐수에서 자원회수와 질소제거를 위한 순차적 결합공정 제안

황인수 · 민경석^{†*} · 배진연*

상주시축산폐수처리사업소 · *경북대학교 환경공학과

(2005년 11월 8일 접수, 2006년 1월 18일 채택)

A Proposal of Sequencing the Combined Processes for Resources Recovery and Nitrogen Removal from Piggery Waste

In-Su Hwang · Kyung-Sok Min^{†*} · Jin-yeon Bae*

Off. Livestock Wastewater Treatment Plant, Sangju, Kyungpook

*Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

ABSTRACT : The combined ADEPT(Anaerobic Digestion Elutriated Phased Treatment)-SHARON(Single reactor system for High Ammonium Removal Over nitrite)-ANAMMOX(Anaerobic ammonium oxidation) processes were operated for resources recovery and nitrogen removal from slurry-type piggery waste. The ADEPT process operated at an acidogenic loading rates of 3.95 gSCOD/L-day, the SCOD elutriation rate and acid production rate were 5.3 gSCOD/L-day and 3.3 gVFAs(as COD)/L-day, respectively. VS reduction and SCOD reduction by the hydrolysis were 13% and 0.19 gSCOD_{prod}/gVS_{feeding}, respectively. Also, the acid production rate was 0.80 gVFAs/gSCOD_{prod}. In methanogenic reactor, the gas production rate and methane content were 2.8 L/day(0.3 m³CH₄/kgCOD_{removal}@STP) and 77%, respectively. With these operating condition, the removals of nitrogen and phosphorus were 94.1% as NH₄-N(86.5% as TKN) and 87.3% as T-P respectively.

Key Words : Anaerobic Digestion Elutriated Phased Treatment, SHARON-ANAMMOX Process, Nitrogen Removal, Resource Recovery, Slurry-Type Piggery Waste

요약 : 슬러리 형태의 돈사폐수로부터 자원회수와 질소제거를 위하여 순차적으로 ADEPT(Anaerobic digestion elutriated phased treatment) 공정과 SHARON(Single reactor system High Ammonium Removal Over nitrite)-ANAMMOX(Anaerobic ammonium oxidation)공정을 결합하여 운전하였다. ADEPT 공정은 부하율 3.95 gSCOD/L-day에서 운전되었고, SCOD 생성율과 산생성율은 각각 5.3 gSCOD/L-day와 3.3 gVFAs/L-day(as COD)였다. 가수분해에 의한 VS감소와 SCOD생성율은 각각 13%와 0.19 gSCOD_{prod}/gVS_{feeding}였으며, 산생성율은 0.80 gVFAs/gSCOD_{prod}였다. 메탄발효조에서 가스생성율과 메탄함량은 각각 2.8 L/day(0.3 m³CH₄/kgCOD_{removal} @STP) 및 77%였다. 운전조건에서 NH₄-N 94.1% (TKN으로서 86.5%) 및 T-P 87.3%가 제거되었다.

주제어 : 혐기성 소화 세정상분리처리, SHARON-ANAMMOX 공정, 질소제거, 자원회수, 슬러리형 돈사폐수

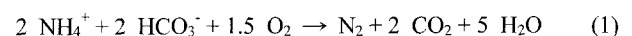
1. 서론

돈사폐수는 고농도 유기물과 질소를 함유하고 있기 때문에, 이를 처리할 수 있는 새로운 처리공정의 개발은 수질환경을 보존하기 위하여 매우 중요하다. 특히, 슬러리형 돈사폐수는 140 gCOD/L, 96 gTSS 및 12 gTKN/L을 가지는 고농도 폐수로서 고액분리가 어렵지만, 자원으로써 고려될 수 있는 양면성을 가지고 있다.

ADEPT 공정은 미립자형태의 폐수처리를 위한 새로운 고효율 혐기성 처리 공정으로서, 가수분해/산생성을 위한 세정산발효조와 상향류 혐기성 슬러지베드반응조(UASB)와 같은 고율 메탄반응조로 구성되어 있다.¹⁾ 그러나 ADEPT 공정은

자원을 회수할 수 있는 장점이 있는 반면에, C/N비가 매우 낮은 유출수를 생산하기 때문에 처리에 많은 어려움이 있다. 이러한 경우, ANAMMOX 공정은 고농도 질소를 함유한 ADEPT 유출수로부터 질소를 제거하기 위한 효과적인 방법으로 평가된다.

ANAMMOX 공정에서 암모늄은 혐기성 조건에서 아질산성 질소를 전자수용체로 하여 질소로 전환되어진다.²⁾ 일반적인 질산화/탈질공정과 비교하여, ANAMMOX 공정은 SHARON 공정과 결합하여 운영하면 탄소원, 산소 및 슬러지 생산량에 있어서 많은 장점을 가진다. 결합된 SHARON-ANAMMOX 공정은 식 (1)과 같이 표현된다.



지난 몇 해 동안, 본 연구자들은 돈사폐수로부터 질소를 제거하기 위하여 일반적인 질산화-탈질공정보다 더 유용한 방

[†] Corresponding author
E-mail: ksmin@knu.ac.kr
Tel: 053-950-6581

Fax: 053-950-6579

법을 연구하는데 중점을 두어왔다.^{3~6)} 비록 ANAMMOX 미생물의 성장은 어려운 일로 간주되지만, 앞선 연구에서 혐기성 입상슬러지는 ANAMMOX 미생물을 성장시키기 위한 순응시간을 단축시킨다는 사실이 밝혀졌다.

본 연구에서는 순차적으로 ADEPT 공정과 SHARON-ANAMMOX 공정을 결합하여 운전하였고 돈사폐수의 자원회수와 질소제거에 적용하여 결과를 도출하였다. 또한 메탄발효조와 ANAMMOX 반응조의 미생물에 대하여 분석하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

순차적으로 세정산발효조-메탄발효조(UASB)로 구성된 ADEPT 공정과 SHARON-ANAMMOX 공정이 결합된 실험실규모 장치를 35℃ 증온조건에서 운전하였다(Fig. 1).

세정산발효조와 메탄발효조를 2 L 크기로 제작하였고, 각각 0.5 L 크기의 침전조를 부가적으로 설치하였다. 수리학적 체류시간은 각각 5일 및 2일이었다. 기질은 0.4 L/day 비율로 세정산발효조의 슬러지층 상부에서 공급하였고, 반응조 바닥에 누적된 난분해성 슬러지는 매일 폐기하여 세정산발효조의 슬러지베드 수위를 일정하게 유지하였다. 세정산발효조에서 유입기질에 대한 세정수의 비율은 2.5 (L/L)였다. 메탄발효조는 UASB 형태로서, 주정폐수를 처리하는 처리장의 혐기성 입상슬러지를 식종하였고, 세정산발효조의 유출수를 유입기질로 사용하였다.

가동 중인 축산폐수처리장의 질산화 슬러지를 식종한 SHARON 반응조는 유효용량 1 L로서 SBR 형식의 fill-and-draw 형태로 기질을 주입하였고, HRT는 1일로 운전하였다. 반응조는 35℃ 증온에서 DO를 약 3~4 mg/L로 유지하면서 NO₂-N을 축적하였다. ANAMMOX 반응조는 상향류 형식의 1 L 용량의 UASB 반응조와 0.5 L의 침전조로 구성되었고, 메탄발효조와 동일하게 주정폐수를 처리하는 처리장의 혐기성 입

상슬러지를 식종하였다. 반응조 기질은 SBR 형식의 fill-and-draw 형태로 주입하였고, HRT는 2.5일이었다. 침전조 하부에서 매일 0.5Q의 비율로 슬러지를 폐기하였다. 또한 DO에 대한 ANAMMOX 반응의 악영향을 방지하기 위하여 ANAMMOX 반응조 앞에 DO를 제거하기 위한 SHARON 유출수 저장조(탈기조)를 따로 설치하였다.

2.2. 유입기질

직경 5 mmφ의 스크린으로 협잡물을 제거한 슬러리형 돈사폐수를 기질로 사용하였다. 평균 pH, COD 및 TS는 각각 8.5, 59 gCOD/L 및 66 gTS/L였고, TS에 대한 VS의 비율은 71%였다. Table 1에 기질로 사용한 돈사폐수의 특징을 나타내었다. pH는 운전기간 동안 인위적으로 조절하지 않았다. SHARON 반응조에는 질산화를 위하여 중탄산알칼리(NaHCO₃)를 첨가하였으며, bicarbonate alkalinity/NH₄-N 비율을 약 7로 조절하였다.

Table 1. Characteristics of slurry-type piggery waste used as a substrate

Items	Range	Average ± S.D.
pH	8.3~8.6	8.5±0.5
TCOD	42,950~81,770	58,600±21,100
SCOD	17,340~38,810	25,490±12,090
TKN	5,650~6,100	5,880±320
NH ₄ -N	3,240~4,960	4,390±700
T-P	1,620~2,040	1,860±160
PO ₄ -P	315~772	454±163
TS	55,990~81,840	66,160±8,720
VS	40,250~57,210	46,800±6,900
Total Alkalinity	12,350~13,830	13,090±1,040
Bicarbonate Alkalinity	4,250~6,250	5,250±1,410

Unit: mg/L except pH

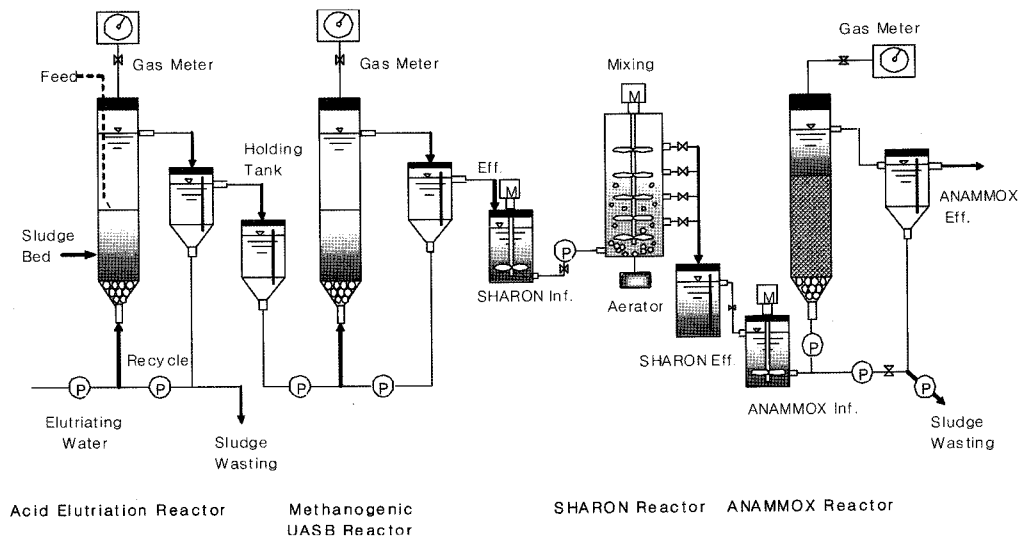


Fig. 1. Schematic diagram of sequencing ADEPT and the combined SHARON/ANAMMOX processes.

2.3. 수질분석방법

수질분석은 Standard Methods⁷⁾에 준하여 측정하였다. pH, COD, TKN, NH₄-N, T-P, PO₄-P, TS, VS, TSS, VSS와 알칼리도를 매일 측정하였다. 가스생산량은 습식가스미터(Sinagawa Model W-NK-0.5A)를 사용하여 측정하였다. VFAs(Volatile fatty acids)는 UV 탐측기와 유기산 분석칼럼(Aminex HPX-87H, Bio-Rad, Inc., U.S.A.)을 장착한 HPLC(Shimadzu Model LC-10AD, Japan)를 사용하여 측정하였다.

2.4. 미생물 분석방법

입상슬러지를 식종한 메탄발효조와 ANAMMOX 반응조에서 반응에 관여하는 미생물의 성장과 특성을 파악하기 위하여 반응조 미생물을 분석·관찰하였다. 메탄발효조와 ANAMMOX 반응조에 식종한 입상슬러지의 형태는 SEM(scanning electronic microscope)을 이용하여 관찰하였다. 운전 전후의 ANAMMOX 반응조 활성미생물을 관찰하기 위해서 FISH(Fluorescent in situ hybridization)기법을 사용하였다. *Planctomycetales*, *Candidatus* *Kuenenia stuttgartiensis*, ammonia-oxidizing β -subclass proteobacteria와 *Nitrobacter* spp.의 미생물 구성비율은 Pla46, Kst1275, NSO190과 NIT3 등 16S rRNA-targeted oligonucleotide probe들을 이용한 FISH로 평가하였다. 각각의 목(目), 속(屬)과 집단특이미생물 그리고 전체 세포수는 형광현미경(Zeiss Axioplan, Germany)를 사용하여 임의로 15곳을 계수하여 결정하였고, 결과는 전체 박테리아에 대한 대상 박테리아의 수를 퍼센트로 표현하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. ADEPT 공정

세정산발효조에서 평균 유기물부하율(OLR, Organic loading rate)과 HRT는 각각 14.3 gCOD/L-day(8.4 gVS/L-day) 및 5일이었고, 메탄발효조에서는 각각 4.9 gCOD/L-day(3.1~5.3 gCOD/L-day)와 2 HRT였다.

3.1.1. 세정산발효조

Fig. 2(a)에서 보는 것처럼, 유입기질 및 유출수의 pH는 각각 8.3~8.6 및 7.2~7.5로서 유기산의 생성으로 인하여 pH가 낮아졌다. 유출수의 총알칼리도 및 중탄산알칼리도는 각각 3,800 mg/L(2,100~4,400 mg/L)과 2,700 mg/L(2,000~3,500 mg/L)로서 유입수에 대비하여 총알칼리도의 27%가 소모되었다. 반응조에 유입되는 기질부하율은 3.95 gSCOD/L-day였으며, 유출수를 기준으로 한 SCOD 생성율과 산생성율은 각각 5.3 gSCOD/L-day와 3.3 gVFAs(as COD)/L-day였다. 유입수의 SCOD/ICOD 비율은 3.95 g/10.4 g으로서 전체 COD 중 ICOD가 73%로서 매우 높았다. 가수분해에 의해 SCOD는 유입수 대비 26%가 증가하였고, 가용화율은 0.40(gSCOD_{prod}/gICOD_{red})으로서 ICOD의 13%가 가용화되었다. 또한 유입된 VS당 SCOD 생산율로 계산한 가용화율은 0.19(gSCOD_{prod}/gVS_{red})였다.

Table 2에서 보는 바와 같이, 유출수의 SCOD 중 약 62%가 VFAs로 회수되었으며, 생성된 주요산은 acetate(38.4%),

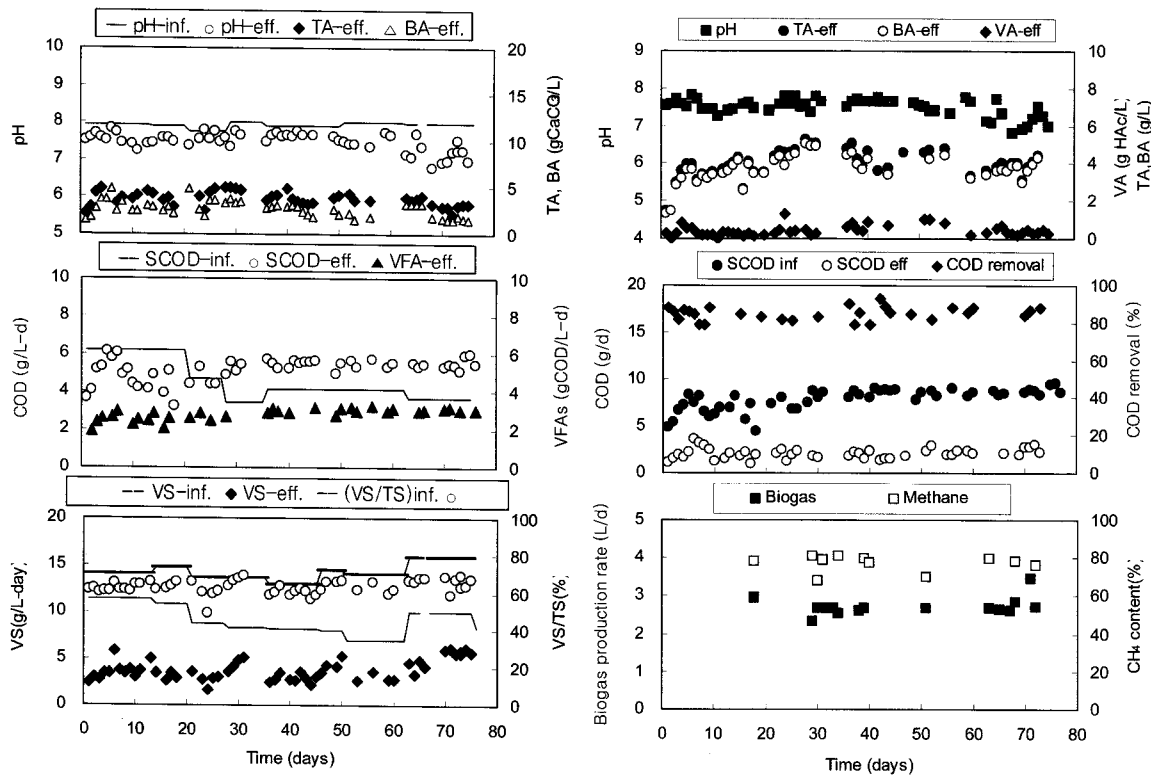


Fig. 2. Performance of the ADEPT process.

Table 2. VFAs concentration in ADEPT process

Items	Acidogenic effluent		Methanogenic UASB effluent	
	Range	Average±S.D	Range	Average±S.D
Formate	N.D	N.D	N.D	N.D
Acetate	2,980~3,950	3,410±300	250~300	290±40
Propionate	790~1,090	980±100	96~190	148±38
Butyrate	725~1,470	1,080±270	72~90	83±7
Valerate	N.D	N.D	0~90	75±21
Lactate	N.D	N.D	N.D	N.D
Total VFAs	4,860~5,900	5,470±330	515~64	594±20
Produced SCOD	8,350~9,570	8,880±460	2,120~2,790	2,520±310
VFA recovery	56~66	62±3	20~25	22±2

Unit, mgCOD/L except VFAs recovery (%); number of data points, n = 8; N.D, not detected

butyrate(12%) 및 propionate(11%)였다. 산 생성율은 0.80(gVFAs/gSCOD_{prod})이었고 유입 VS에 기초한 VFAs 생산율은 0.47(gVFAs/gVS_{fed})이었다. 유출수에 기초한 TS와 VS 제거율은 각각 약 37.8% 및 46.5%였으며, 유입수의 VS와 VS/TS 비율은 각각 42 gVS/L과 74.7%인 반면에 유출수는 각각 7.6 gVS/L과 65.3%였다.

3.1.2. 메탄발효조

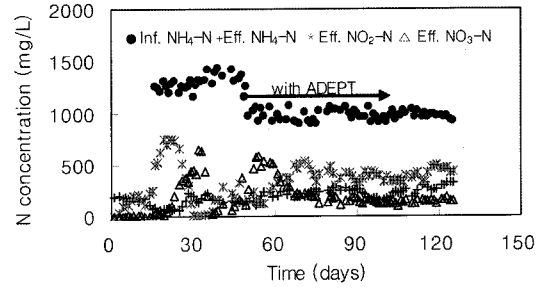
세정산발효조의 유출수인 메탄발효조의 유입수는 SCOD 8,600 mg/L(6,810~9,570 mg/L), VSS 7,620 mg/L(3,500~10,600 mg/L)였고, HRT 2일인 조건에서 유기물부하 (OLR)는 4.9 gCOD/L-day(3.1~5.3 gCOD/L-day)였다.

Fig. 2(b)에서 보는 것처럼, 메탄발효조의 COD 및 VSS 제거율은 각각 88% 및 64%였으며, 유출수의 VFAs는 약 590 mg/L로서 SCOD의 22%였다. 유출수의 유기산은 acetate와 propionate가 대부분을 차지하였다. 혼합가스는 2.8 L/day(0.3 m³CH₄/gCOD_{rem}@STP)가 생성되었으며, 메탄가스 함유율은 약 77%였다.

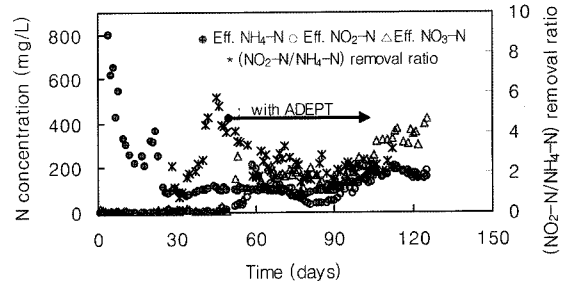
3.2. SHARON/ANAMMOX 결합공정

Fig. 3은 SHARON과 ANAMMOX 반응조의 운전결과를 나타낸 것이다. SHARON 반응조는 운전개시 후 약 65일 이후에 아질산성 질소가 축적되는 안정상태에 이르렀다. 안정운전조건에서 유입 NH₄-N의 58.8%가 NO_x-N으로 전환되었고, 15.8%는 주로 NH₃ 스트림핑과 세포합성에 사용되었다. 유입 NH₄-N의 25.4%는 전환시키지 않았다.

사용한 ANAMMOX 반응조는 본 연구이전 약 300일동안 아질산성 질소용액(stock solution)과 돈사폐수 혼합액을 기질로 하여 ANAMMOX를 유도한 반응조로서, SHARON 유출수를 주입한 지 66일 이후에 안정상태에 도달하였다. 반응조 유입 NO₂-N/NH₄-N 비율은 1.56이었고, 제거된 비율은 2.13이었다. 안정상태에서 용존성 질소 (NH₄-N + NO₂-N + NO₃-N) 부하율은 1.36 kg soluble-N/m³_{reactor}-day였으며, 질소전환율은 0.72 soluble-N/m³_{reactor}-day였다. ANAMMOX 반응조는 유입 NH₄-N의 56.8%를 질소가스와 세포로 전환시켰다.



(a) SHARON reactor



(b) ANAMMOX reactor

Fig. 3. Nitrogen conversion behavior in SHARON and ANAMMOX reactor.

Table 3. Nitrogen and phosphorus transformation and removal base on 400 mL/day of substrate

Reactor	TKN	NH ₄ -N	T-P	PO ₄ -P
Influent (400 mL/d)				
(mg/L)	5,730±780	4,300±60	1,770±300	440±50
(g/d)	2.29±0.31	1.70±0.02	0.71±0.12	0.18±0.02
Acidogenic reactor				
Elutriated effluent (1.1 L/d)				
(mg/L)	1,480±210	1,330±240	514±390	214±142
(g/d)	1.77±0.25	1.60±0.27	0.62±0.47	0.26±0.17
Wasted sludge (150 mL/d)				
(mg/L)	1,690±300	1,170±260	910±250	166±70
(g/L)	0.15±0.05	0.12±0.03	0.08±0.03	0.008±0.007
Methanogenic UASB reactor				
Effluent (1.1 L/d)				
(mg/L)	1,310±160	960±160	204±105	114±140
(g/d)	1.44±0.18	1.06±0.17	0.22±0.12	0.13±0.02
SHARON reactor				
Effluent (1 L/d)				
(mg/L)	564±105	225±49	147±36	51±15
(g/d as 1.1 L/d)	0.62±0.12	0.25±0.05	0.16±0.04	0.06±0.02
ANAMMOX reactor				
Effluent (400 mL/d)				
(mg/L)	285±99	92±14	86±28	46±4
(g/d as 1.1 L/d)	0.31±0.11	0.10±0.02	0.09±0.03	0.05±0.004
Removal rate base on effluent (%)	86.5	94.1	87.3	72.2

Table 3에서 보는 바와 같이, ADEPT 공정에서는 주목할

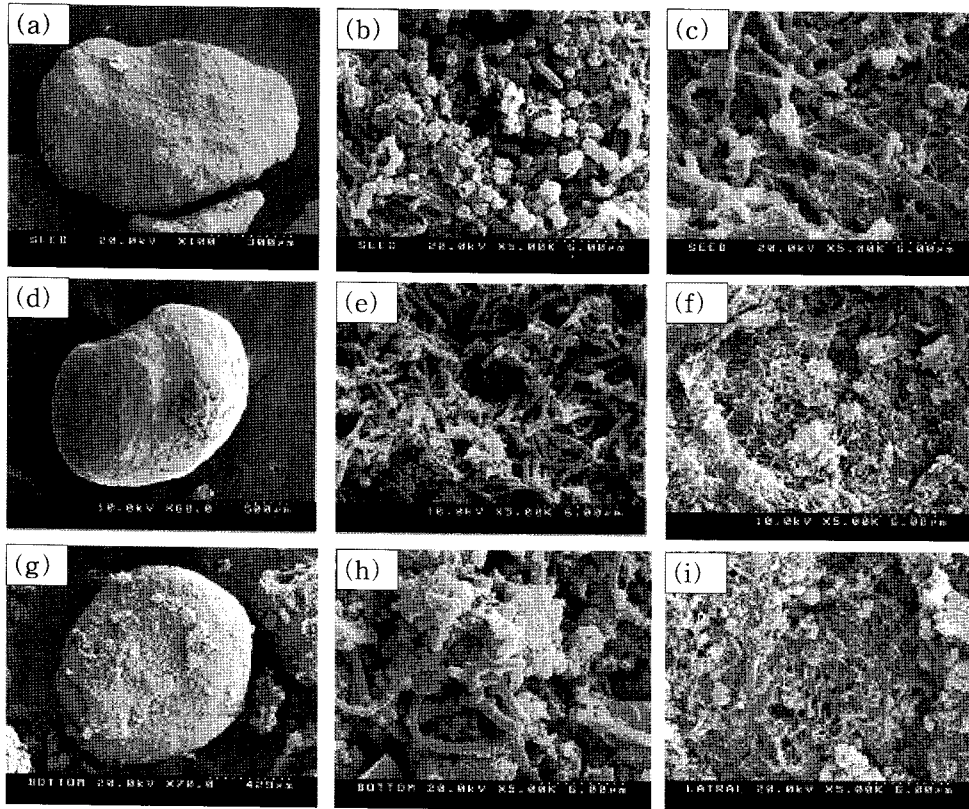


Fig. 4. Scanning electron micrographs according to succession of microbial populations and distribution of granules((a),(b),(c), start-up; (d),(e),(f), methanogenic reactor; (g),(h),(i), ANAMMOX reactor).

만한 질소와 인의 변화가 관찰되지 않았다. 메탄발효조에서의 T-P의 감소는 생고형물과 입상슬러지에 기인하는 것으로 보인다. SHARON/ANAMMOX 결합공정에서는 질소뿐만 아니라 인 (P)도 제거되는 경향을 보였다. 이는 본 연구에서 ANAMMOX 반응조의 높은 pH와 중탄산알칼리도의 영향으로 인의 결정화반응인 HAP(Hydroxy apatite) 생성반응이 진행된 것으로 보인다.

결국, ADEPT와 SHARON/ANAMMOX 결합공정을 순차적으로 연결하여 슬러리형 돈사폐수를 처리한 결과, 유기산과 메탄의 회수는 물론 94.1%의 NH₄-N(86.5% as TKN)과 87.3%의 인을 제거할 수 있었다.

3.3. 미생물 특성

초기 메탄발효조와 ANAMMOX 반응조에 식종한 슬러지는 주정폐수를 처리하는 실 UASB 반응조의 슬러지로서, 본 연구의 반응 전후 특성을 관찰하였다. 입상슬러지의 크기는 약 1~2 mm로서 입상슬러지의 형태와 구조를 반응조와 시간경과에 따라 SEM으로 관찰하였다.

초기 입상슬러지는 편평한 표면을 가진 불규칙적이고 막대형(rod-type)을 보였으며(Fig. 4(a),(b),(c)), 주로 사상형 미생물로 구성되어 있었다. Fig. 4의 (d),(e),(f)와 (g),(h),(i)는 각각 5개월 운전 후 메탄발효조와 ANAMMOX 반응조의 입상슬러지 변화를 나타낸 것이다.

메탄발효조 입상슬러지의 경우, 식종 입상슬러지에 비하여

모양이 비교적 더 규칙적이고 더 거친 표면을 가졌으며, 타원에 가까운 짧은 막대형을 보였다(Fig. 4(d)). 입상슬러지의 내부는 식종슬러지보다 더 복잡해졌으며, 사상형 미생물들이 많이 관찰되었다(Fig. 4(e)). 반면에 ANAMMOX 반응조의 입상슬러지는 비교적 규칙적이었고, 원형에 가까운 모양을 보였다(Fig. 4(g)). 생물막이 성장한 입상슬러지의 표면은 거칠고 촘촘한 구조를 보였고, 내부구조는 사상성 미생물이 극히 드문 복잡한 입체구조를 보였다(Fig. 4(h)). 이러한 결과는 Wang 등⁸⁾이 연구한 EGSB(Expanded granular sludge bed) 반응조에 혐기성 입상슬러지를 식종하고 운전한 ANAMMOX 입상슬러지와 유사하였다. 메탄발효조와 ANAMMOX 반응조의 입상슬러지는 모두 표면에 기공(biogas pores)이 관찰되었다.

초기 반응조에 식종한 미생물은 주정폐수를 처리하는 혐기성 슬러지로서 *Clostridium* spp.가 대부분을 차지하였으나, ANAMMOX 활성이 활발한 반응조 슬러지의 FISH 분석에서는 *Planctomycetales*와 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*가 각각 77% 및 59%로 나타났다(그림 생략). 이들은 대부분 입상슬러지의 중심보다는 표면에 가까운 내부에 서식하는 것으로 나타났다. Ammonia-oxidizing β -subclass proteobacteria와 *Nitrobacter* spp.는 FISH에서 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 ANAMMOX 미생물, 특히 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*가 ANAMMOX 반응조에서 질소제거에 큰 역할을 하였음을 의미한다.

4. 결론

고농도 유기물과 질소가 포함된 슬러리형 돈사폐수로부터 자원회수와 질소제거를 위하여 순차적으로 연결한 ADEPT와 SHARON/ANAMMOX 공정을 적용하였다. 세정산발효조에서 가수분해로 인한 VS감소와 SCOD 생산율은 각각 13% 및 0.19 gSCOD_{prod}/gVS_{fed}였고, 산 생성율은 0.80 gVFAs/gSCOD_{prod}였다. 메탄발효조에서 COD 및 VSS 제거율은 각각 88% 및 64%였으며, 가스생성율은 2.8 L/day(0.3 m³CH₄/gCOD_{rem.}@STP)로서 메탄함량은 77%였다.

본 연구에서 순차적으로 연결한 ADEPT와 SHARON/ANAMMOX 공정을 이용하여 슬러리형 돈사폐수를 처리한 결과, NH₄-N의 94.1%(86.5% as TKN)와 T-P의 87.3%가 제거되었다. 이 결과는 혐기성 공정을 순차적으로 결합한 본 공정을 고농도 유기물과 질소를 함유한 폐수처리에 효과적으로 적용할 수 있다는 것을 보여준다.

참고문헌

- Kim, Y. H., Gomec, C. Y., Ahn, Y. H., and Speece, R. E., "Anaerobic digestion elutriated phased treatment : The role of pH and nutrients", *Proc. 9th World Congress of Anaerobic Digestion*, Sep. 2-6, Antwerp, Bergium, **1**, 799~804(2001).
- Mulder, A., van de Graaf, A., Robertson, L. A., and Kuennen, J. G., "Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor," *FEMS Microbiol. Ecol.*, **16**, 177~184(1995).
- Min, K. S., Ahn, Y. H., Hwang, I. S., and Choi, E., "Feasibility of ammonium removal from piggery waste by an anaerobic sludge bed reactor," *Proc. Animal Residuals Conference and Workshop*, May 6-8. Washington DC, U.S.A., 373~386(2002).
- Ahn, Y. H., Hwang, I. S., and Min, K. S., "ANAMMOX and partial denitrification in anaerobic nitrogen removal from piggery waste," *Water Sci. Technol.*, **49**(5-6), 145~153(2004).
- Hwang, I. S., Min, K. S., and Lee, Y. O., "Nitrogen removal from piggery wastewater using ANAMMOX reactor," *Proc. 10th World Congress of Anaerobic Digestion*, 29 Aug.-2 Sep., Montreal, Canada, **1**, 261~266(2004).
- Hwang, I. S., Min, K. S., Choi, E., and Yun, Z., "Nitrogen removal from piggery waste using the combined SHARON and ANAMMOX reactor," *Proc. World Water Congress, Nitrogen Removal II*, 19-24 Sep., Marrakech, Morocco(2004).
- APHA, WEF and ASCE, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Eds. Washington DC, U.S.A(1998).
- Wang, J., and Kang, J., "The characteristics of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) by granular sludge from an EGSB reactor," *Process Biochemistry*, **40**, 1973~1978(2005).