

## 혐기성 아키아 주입이 간헐폭기 시스템에서 질소제거에 미치는 영향

이상형\* · 박노백 · 박상민 · 전향배<sup>†</sup>

충북대학교 환경공학과 · \*일리노이대학교 토목환경공학과

(2004년 2월 11일 접수, 2005년 11월 23일 채택)

### Effect on nitrogen removal in the intermittent aeration system with the anaerobic archaea added

Sang-Hyung Lee\* · Noh-Back Park · Sang-Min Park · Hang-Bae Jun<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

\*Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign

**ABSTRACT** : The relationship between bacteria and anaerobic archaea, sludge yield coefficient and nitrogen removal rate were investigated in intermittent aeration systems(I/A) with added archaea, I/A and conventional activated sludge system. As the archaea solution was added to the I/A reactor, organic removal rate as well as nitrogen removal rate increased. Also, sludge production rate in I/A system added the archaea was maintained lower than other systems because sludge yield coefficient was decreased due to the role of anaerobic archaea such as anaerobic degradation of organics. The experimental data supported the possibility of symbiotic activated sludge system with anaerobic archaea under intermittent aeration, leading to the enhanced nitrogen removal. Crucial results to be presented are: 1) specific oxygen utilization rate(SOUR) of the I/A-arch system was 2.9 mg-O<sub>2</sub>/(g-VSS·min). SOUR and nitrification rate of the sludge from the I/A-arch system was higher than those from the I/A and A/S reactors. 2) Removal efficiencies of TCOD<sub>Cr</sub> in the I/A-arch, I/A and A/S reactors were 93, 90 and 87%, respectively. 3) Nitrification occurred successfully in each reactor, while denitrification rate was much higher in the I/A-arch reactor. Efficiencies of TN removal in the I/A-arch, I/A and A/S reactors were 75, 63 and 33%, respectively.

**Key Words** : Symbiosis, Archaea, Bacteria, Nitrogen Removal

**요약** : 간헐폭기시스템에 혐기성 아키아 주입에 따른 질소제거율 변화와 슬러지 발생량변화 및 박테리아의 상관관계를 관찰하기 위해, 표준활성슬러지 공정과 아키아를 주입한 간헐폭기공정과 주입하지 않은 공정을 비교하며 운전하였다. 회분식 실험결과 혐기성 아키아 배양액을 간헐폭기조에 주입한 경우에 유기오염물질 분해율이 향상되었으며, 질산화와 탈질반응 속도가 증가하였다. 특히 표준활성슬러지 공정이나 일반 간헐폭기 시스템에 비해 슬러지 발생량이 매우 낮게 유지되었는데, 이는 혐기성 아키아가 주입됨에 따른 슬러지 생산량이 감소되었기 때문으로 판단된다. 또한, 폭기조에서 용존산소농도를 조절함으로써 혐기성 아키아와 활성슬러지의 공생관계에 따른 효율향상을 간접적으로 확인할 수 있었고 다음과 같은 결과를 얻었다. 1) 아키아 배양액을 주입한 간헐폭기조에서 비산소소비속도(SOUR)는 2.9 mg-O<sub>2</sub>/(g-VSS · min)이었으며 비산소소비속도와 질산화 속도는 아키아 배양액을 주입하지 않은 반응조보다 높은 것으로 나타났다. 2) 아키아 배양액을 주입한 간헐폭기조, 주입하지 않은 간헐폭기조와 표준활성슬러지 공정에서의 유기물질(TCOD<sub>Cr</sub>)의 제거효율은 각각 93%, 90%와 87%이었다. 3) 각각의 반응조에서 모두 질산화 효율은 높았으나, 탈질속도는 아키아 배양액을 주입한 간헐폭기조에서 비교적 매우 높았다. 아키아 배양액을 주입한 간헐폭기조, 주입하지 않은 간헐폭기조와 표준활성슬러지 공정에서 질소제거효율은 각각 75%, 63%와 33%이었다.

**주제어** : 공생관계, 아키아, 박테리아, 질소제거

## 1. 서론

질소를 제거하기 위한 고전적인 질산화-탈질 방법 외에 특정 미생물이나 반응을 이용하는 방안이 제시되고 있다. 예를 들어 Bacillus를 이용한 공정이나, 유기물을 사용하지 않고 암모니아와 아질산성질소를 이용해 탈질시키는 SHARON - ANAMMOX 공정, 용존산소의 농도를 0.2 mg/L 이하로 낮

게 유지시켜 질산화와 동시에 탈질을 시키는 SNdN (simultaneous nitrification and denitrification) 반응을 이용한 Sym-Bio<sup>TM</sup>공정과 Orbal<sup>TM</sup> 공정 등이 최근 국내외에서 설치되고 있다.

특히, SNdN과 관련된 연구에서 SRT를 20-30일로 운전할 경우 DO 농도가 0.5 mg/L 이하로 낮게 유지되더라도 질산화가 완전히 일어난다고 보고되고 있다.<sup>1)</sup> 이는 결과적으로 긴 SRT에서의 적절한 DO 조절이 효과적인 질소제거 방안의 하나라는 것을 나타낸 것이므로, 본 연구에서는 간헐폭기 시스템을 도입하여 DO를 적절히 조절함으로써 질소제거율을

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: jhbcb@chungbuk.ac.kr

Tel: 043-261-2470

Fax: 043-271-7976

높이고자 하였다.

Beer 등(1998)은 폭기조의 DO 농도를 적절히 조절할 경우 활성슬러지 비사상성 플럭내에 무산소 조건이 존재함을 밝혔고,<sup>2)</sup> Li와 Bishop(2004)은 microelectrode를 이용하여 활성슬러지 플럭를 분석한 결과, 호기성상태에서 DO 농도를 1.5 이하로 유지시키면 플럭내부의 중심부가 무산소조를 거쳐 혐기성 상태를 유지할 수 있으며, DO를 4 mg/L 이하로 유지시키면 무산소상태가 유지됨을 증명하였다.<sup>3)</sup> 결과적으로 DO 농도를 적절히 조절하여 2 mg/L 내외로 유지하고 간헐폭기로 무산소상태를 유지시키면 혐기성 아키아 미생물도 성장할 수 있는 조건을 갖출 수 있다는 것을 증명한 것이다.

최근 Philippot (2002)는 탈질균과 메탄아키아간의 발생학적 유사성이 있음을 발견하였고, 이들 두 미생물이 동일한 생물군에서 유래하였으며, 박테리아와 아키아로 분류되어 진화했다고 제안하였다.<sup>4)</sup> 또한 여러 연구자들은 다양한 박테리아와 아키아들이 생물학적 탈질에 관여하고 있다고 보고하고 있으며, 일부 연구자들은 진핵생물(eukaryote)이 eubacteria와 메탄생성 아키아(archaea)의 공생관계에 관여하는 대사작용을 통합하면서 유래되었다는 가설을 제안하기도 하였다.<sup>5-7)</sup>

매탄균은 아키아의 한 분류에 속하는 완전 혐기성균으로써 고농도 유기물을 처리할 수 있으며 성장률이 매우 느린 특성을 갖고 있다. 따라서, 하수처리장에서는 슬러지의 혐기성 소화공정에 메탄 아키아를 배양하여 활용하고 있으며, 생물에너지 회수차원과 고농도 유기폐수처리 목적으로 활발하게 연구되어 온 바 있다. 그러나 최근 이러한 완전 혐기성균인 매탄균도 호기성 반응조에서 존재할 수 있다는 사실과, 일부 아키아는 산소를 이용할 수 있는 능력을 박테리아로부터 배운다는 주장도 보고되고 있다.<sup>8)</sup> Lens 등(1995)은 표준 활성슬러지 호기성 공정 내 미생물의 매탄발생률이 혐기성 반응조의 미생물의 1%라고 보고하였고,<sup>9)</sup> Field 등(1995)은 호기성조에서도 종종 산소의 영향을 전혀 받지 않는 혐기성 영역이 존재해 매탄균이 공존할 수 있다고 보고하였다.<sup>10)</sup> 특히 생물막 여재를 이용한 경우 DO 농도가 2 mg/L 이상이어도 매탄균이 존재한다고 Wable(1994)이 보고하였고,<sup>11)</sup> Li 등(2004)은 활성슬러지 플럭에 대해 microelectrode를 이용하여 이러한 혐기성 영역이 존재함을 입증하였다.<sup>3)</sup> 그리고, Zito-mer(1998)는 혐기성 매탄균이 산소에 일정기간 노출되어도 죽지 않고 저해만 받는다고 보고하였다.<sup>12)</sup> 이렇게 완전혐기성균과 호기성균이 활성슬러지 공정에 동시에 존재하는 경우, 미생물 종간의 공생관계가 하폐수 내의 오염물질을 제거하는데 영향을 줄 것으로 판단된다. 미생물 종간의 영향에 대해 Ratsak(1996)은 박테리아와 원생동물(protozoa)간의 섭생관계(공생관계)로 인하여 생물막 공정에서 슬러지 발생량이 줄고, 유출수의 농도를 향상시킬 수 있었다고 보고하였다.<sup>13)</sup> 그러나, 아직 이러한 완전혐기성균과 호기성균과의 공생관계에 대한 연구나 가능성에 대한 평가는 이루어 지지 않고 있는 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 간헐폭기 시스템에 완전혐기성균인 아키아를 연속적으로 주입하여 질산화 및 탈질에 따른 질소 제거율과 슬러지 발생량이 받는 영향을 평가하고자 하며, 효

율 평가를 위해 아키아를 주입하지 않은 간헐 폭기시스템과 표준활성슬러지 공정에서의 슬러지 발생량을 비교하고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 생활하수

본 연구에 사용된 생활하수는 청주시 하수종말처리장으로 유입되는 원수를 채수하여 사용하였으며, 슬러지소화조 반류수를 포함한 유입하수의 총화학적산소요구량(TCOD)은 약 330 mg/L이었고, 용존성 COD(SCOD)는 78 mg/L로 나타났다. 총질소와 암모니아성 질소의 농도는 각각 44 및 33 mg/L이었으며, 유입수의 C/N (TCOD/T-N) 비는 약 7.5이었고, 기타 다른 성분들은 Table 1과 같다.

### 2.2. 실험장치 및 운전조건

효과적인 질소제거가 이루어지고 반응조내 용존산소(DO)의 농도변화를 쉽게 관찰하기 위해 간헐폭기공법(Intermittent Aeration)을 도입하였으며, 본 연구에 사용된 간헐폭기 실험장치는 Fig. 1과 같다. 폭기조 부피가 4 L, 침전조 부피는 1.4 L로 수리학적체류시간(HRT)은 6시간이었고, 산기장치와 교반장치를 설치하여 폭기조내 DO공급 및 혼합이 잘 이루어지도록 하였으며, 시간에 따른 순차적인 제어가 가능하도록 구성하였다. 폭기 및 비폭기 시간 주기를 1시간/1시간으로 조정하여, 폭기시간 종료 후의 DO가 약 2.5 mg/L가 되도록 하였고, 비폭기 후의 DO는 0.1 mg/L 이하로 유지되었다. 실험장치는 두 개의 간헐폭기방식 반응조와 표준활성슬러지 반응조로 구성되었으며 간헐폭기 한개의 반응조에 1000 mg/L 혐기성아키아(미생물 배양액, (주) 태흥테크놀로지)를 하루에 4 mL 주입하여 주었다. 이때 혐기성 아키아 배양액의 TS 3.8 mg/L, VS 1.85 mg/L, 총질소 11.1 mg/L, 총인 7.4 mg/L, pH 6.9 TCOD 110 mg/L이었다.

간헐폭기 시스템은 고도처리공정에서의 질소제거율 변화를 비교하기 위해 운전하였고, 표준 활성슬러지 공정은 슬러지 생산량에 대하여 추가적으로 비교하기 위해 운전되었다.

Table 1. Characteristics of domestic sewage used in this study

Parameters	Range, mg/L	Average, mg/L
SS	100-500	176
TCOD <sub>Cr</sub>	160-400	330
SCOD <sub>Cr</sub>	20-100	78
T-N	25-70	44
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	18-40	33
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	1-3	2.1
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0	0
T-P	4-10	5.8
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	2-5	3.0
pH	6.9-7.3	7.1
Alkalinity(as CaCO <sub>3</sub> )	80-120	140

표준활성슬러지 공정의 폭기조 DO는 약 2.0-2.5 mg/L로 유지하였으며, 폭기조내 미생물 농도는 세 반응조 모두 MLSS를 기준으로 3,500 mg/L로 일정하게 유지되도록 고정시키면서 운전하였다. 따라서, 세 반응조에서 배출된 폐슬러지의 양은 각각 다르게 운전되었다. 결과적으로 SRT의 경우 아키아를 주입한 경우 SRT는 약 7.5일 그렇지 않은 경우 약 15일로 운전되었고 기타 각각의 반응조별 실험조건은 Table 2와 같다.

식중슬러지는 청주시 하수종말처리장에서 채취한 후 협잡물을 제거하여 사용하였고, 각 반응조에 초기 MLSS 농도가 약 4,000 mg/L가 되도록 균등하게 분배시켜 주었다. 음이온은 이온크로마토그래피를(Ion Chromatography, Metrohm modular, Switzerland)를 사용하여 분석하였고, COD는 중크롬산으로 고온에서 산화시킨 후 흡광도를 측정하여 분석하였으며, 암모니아성 질소는 네슬러 방법(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N distillation method; HACH Co., USA)으로 분석하였다. 기타 항목들은 Standard Methods에 의하여 분석하였다.<sup>14)</sup>

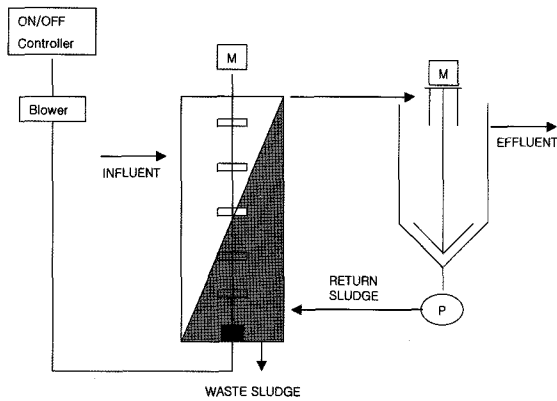


Fig. 1. Schematic diagram of I/A system used in this study.

Table 2. Operational conditions of I/A-arch, I/A and A/S system

Item	Intermittent Aeration activated sludge system		Activated sludge system
	Archaea(w/o)	Archaea(w/)	Archaea(w/o)
Q, (mL/min)	11.1	11.1	11.1
Volume (L)	5.4	5.4	5.4
HRT (hr)	6	6	6
SRT (d)	15	7.5	15
MLSS (mg/L)	~3500		
MLVSS (mg/L)	1500~2000		
DO (mg/L) (Aeration reactor)	0~2.5 (at the end of aeration)		2.5
Archaea dose (mL/6 hr)	-	4~40	-
Temperature(°C)	19~22		
Operation condition	Aeration 1 hr / Mixing 1 hr		Continuous aeration

w/o : without; w/ with

### 2.3. 회분식 실험

회분식 실험은 OUR, 질산화율 평가, 슬러지 생산량 평가에 대해 각각 수행되었다.

#### 2.3.1. 산소소모율 측정

활성슬러지 공정과 간헐폭기공정, Archaea를 주입한 간헐폭기 공정의 sludge를 채취하여 회분식 실험을 하였다. 채취된 슬러지는 2~3회 세척 후 3시간 이상 공폭기를 수행하여 슬러지내 부착되어 있던 유기물을 배제한 후 300 mL BOD 병을 이용하여 OUR(oxygen uptake rate)을 측정하였다. 사용된 하수는 TCOD 140 mg/L, 암모니아 27.5 mg/L, MLSS농도는 AS(Activated sludge system)는 2,230 mg/L, IA(Intermittent aeration activated system)은 2,460 mg/L, IA(Archaea)는 2,350mg/L이었다.

#### 2.3.2. 암모니아성 질소 산화율 측정

암모니아성 질소의 제거특성을 관찰하기 위한 실험에서는 각각의 반응조에서 배양된 슬러지를 이용하였고 pH는 미생물의 활성도에 영향을 주기 때문에 모든 실험에서 초기 pH는 7.5(±0.5)로 유지하였다. 각각의 반응조에서 배양된 슬러지내 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N을 배제하기 위해 4시간 공폭기를 실시한 후 침전시켜 증류수로 3회 이상 세척하여 사용하였다. 슬러지를 1L 삼각 Flask에 500 mg/L 주입하여 나머지를 미량영양염류를 포함한 증류수로 채운 후 교반 및 폭기하였다. 이 때 용존산소 농도는 연속식 실험에서의 농도인 2.5 mg/L로 하였으며 각각의 시료에 대해 암모니아의 초기 농도를 25 mg/L로 하여 일정시간 간격으로 채취하여 분석하였다.

#### 2.3.3. 미생물의 슬러지 생산량 비교

미생물의 슬러지 생산량 비교를 위해 각각의 연속식 실험 장치에서 배양된 슬러지를 이용하여 다섯 개의 반응조에 식종하여 24시간 동안 폭기하였고, 폭기는 gas flow 조절기를 이용하여 용존산소 농도를 2.5 mg/L로 유지하였다. 다섯 개의 반응조에 각각 500, 1000, 1500, 2000, 3000 mg/L의 슬러지 농도로 seeding한 후 도시하수와 1:1로 혼합하여 실험하였다. 실험 시작 전과 24시간 후 MLVSS와 COD를 측정하였고, MLVSS는 실험 오차를 줄이기 위해서 3회 측정하여 평균값으로 하였다.

### 2.4. 미생물 개체수 측정

활성슬러지를 구성하고 있는 각 미생물의 개체수는 평판계수법(heterotrophic plate count, HPC)과 Pour plate method (Standard method, 1995)를 이용하여 분석하였다.<sup>14)</sup> 호기성 박테리아 수는 펩톤 10 g/L, NaCl 5 g/L, beef-extract 10 g/L, 한천배지 15 g/L의 비율로 조성된 배지(Difco Lab.)를 사용하여 배양시킨후 측정하였고, 혐기성 미생물의 수는 트립토스 10, NaCl 5, yeast extract 5, hydrochloride cysteine 0.6

(Sigma), glucose 2.5 g/L로 조성된 혐기성 VL(Viande Levure) 배지(Difco Lab.)를 이용하여 배양시킨 후 측정하였다. 혐기성 미생물 개체수 측정시 배지위의 공간을 질소가스로 채운 후 45°C에서 5일간 배양하였으며, 호기성 미생물은 28°C에서 5일간 배양하였고, 미생물 개체수는 1 mL당 콜로니수(colony forming unit, cfu)로 나타내었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 연속공정에서의 TCOD와 총질소 제거 특성

Fig. 2는 TCOD와 총질소 제거특성을 나타낸 것이다. 실험 시작 약 30일까지는 침전된 하수를 사용하였고, 그 이후에는 하수 원수를 그대로 사용하여 실험하였다. 침전된 하수의 TCOD는 약 200 mg/L이었고, 침전전의 원하수의 TCOD는 약 350 mg/L로 나타났다. 본 실험은 아키아균 주입을 4개월 단위로 12 mL에서 4 mL씩 감소시켜가며 12개월간 진행하였고, 간헐폭기반응조(I/A)의 경우 60일 동안의 적응기간을 거쳐 정상상태에 도달한 후의 결과를 나타내었다. I/A-arch, I/A와 A/S 반응조의 평균 TCOD 제거효율은 각각 93%, 90% and 87%로 I/A-arch 반응조의 효율이 다소 높게 나타났으나 차이는 크지 않았다. 운전의 안전성 측면에서 볼 때, 표준활성슬러지(A/S) 반응조 유출수의 TCOD가 다소 변동의 폭이 큰 것을 알 수 있다. 총질소 제거율에 있어 I/A-arch, I/A, A/S 각 반응조의 정상상태에서의 제거효율은 평균적으로 각각 75%, 63%, 33%로 나타났으며, 이때 평균적인 유출수의 총질소 농도는 10, 18, 31 mg/L이었다.

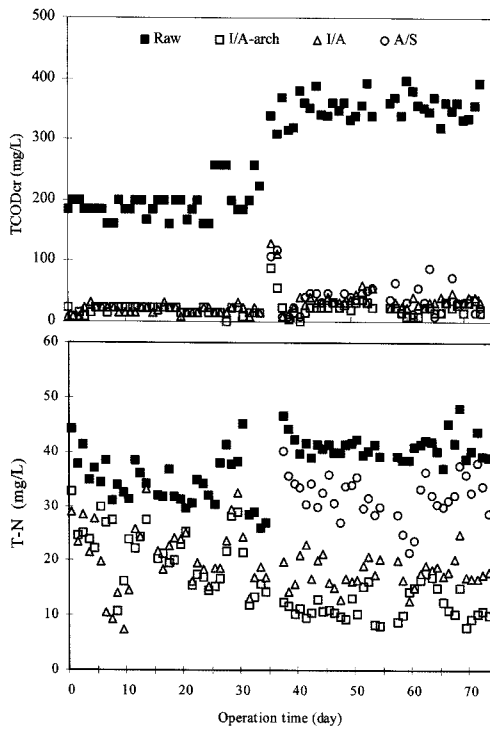


Fig. 2. TCOD and Nitrogen profiles in each system.

#### 3.2. 슬러지 생산량 및 산소소비속도와 질산화속도비교

Fig. 3은 각 반응조가 정상상태에 도달한 후 미생물들이 유기물질을 분해하는 동안 발생하는 슬러지 생산량을 비교한 것이다.  $X'$ 은 MLVSS의 평균농도를 나타낸 것이며  $\Delta X$ 는 미생물 증가량,  $\Delta S$ 는 소모된 유기물량,  $S$ 는 초기 유기물량,  $Y$ 는 미생물의 슬러지생산량을 나타낸 것이다. 실험결과  $Y$  값이 AS 0.41, IA 0.37, Archaea 0.28로써 활성슬러지 공정에 비해 아키아를 주입하였을 경우 슬러지 발생량이 32% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Li와 Bishop(2004)이 밝힌 것처럼, 유입수내 COD가 60 ~120 mg/L로 유입되는 경우 포기조 DO농도가 1.2 mg/L로 유지되더라도 활성슬러지 플럭 내에 무산소 상태로 인한 탈질과 중심부에서의 혐기상태를 유지할 수 있는 특성이, 본 연구에서의 호기상태에서도 활성슬러지 플럭내에서 발생된 것으로 판단된다.<sup>3)</sup> 또한, Beer (1998)등은 포기조내에 공기의 포화상태가 20%로 유지될 경우 활성슬러지 플럭내에 탈질 미생물은 물론 혐기성 균인 황산염환원세균도 존재한다고 보고한 바,<sup>2)</sup> 본 연구에서와 같이 혐기성 아키아를 주입한 경우 이들이 공정내에서 충분히 성장할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 혐기성 아키아가 주입된 경우 슬러지 발생량이 감소한 것은 간헐폭기로 운전중인 반응조내의 유기물이 활성슬러지 플럭 내부의 혐기성균에게 전달되어 성장률이 느린 혐기성균에 의해 분해되는 양이 증가하였기 때문으로 판단된다. 그 결과 미생물의 농도를 일정하게 유지시킨 결과 아키아를 주입한 간헐폭기 공정의 SRT는 7.5일 주입하지 않은 공정은 약 15일로 운전되었다.

Fig. 4는 각 반응조에서 정상상태에 있는 슬러지의 하수에 대한 산소소비속도(OUR)를 측정된 것이다. I/A-arch의 비산소소비속도(Specific OUR, SOUR)가 약 2.9 mg-O<sub>2</sub>/(g-VSS·min)로 가장 큰 것으로 나타났으며, I/A와 A/S 반응조의 SOUR은 각각 1.9와 2.0 mg-O<sub>2</sub>/(g-VSS·min)로 유사하게 나타났다. 이는 세 반응조를 운영함에 있어 동일한 미생물 농도를 유지시킨 결과, 슬러지 발생량이 적게 나타난 아키아를 주입한 공정이 결과적으로 SRT가 증가된 상태에서 운영되었기 때문에, 동일한 유기물 부하에 있어 SRT 증가로 인한 질산화미생물 및 중속영양미생물의 증가 때문에 산소소비속도가 증가한 것으로 판단된다. 반면 I/A와 A/S의 경우는 전반적으로 유사하게 SOUR 값이 나타나, 이 경우에는 미생물의 활성화도 차이가 크지 않음을 알 수 있었고, 결과적으로 혐기성 아키아를 첨가해 줄 경우 혐기성 아키아가 활성슬러지내 호기성 미생물의 활성화도에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 슬러지 생산량이 감소할 지라도 OUR값이 높게 나타난 것을 통해 혐기성 아키아 주입으로 SRT가 증가하더라도 실제 활성을 갖는 미생물의 양이 감소하지 않거나 혹은 질산화 미생물의 양이 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이는 Henze에 의해 제시된 모델구성성분과 값들을 이용하여 모델링한 결과 SRT가 증가하는 경우 중속영양 미생물과 독립영양 미생물의 농도가 함께 증가한다는 Yuan(2000)등의 연구에서도 나타난 바 있다.<sup>15)</sup>

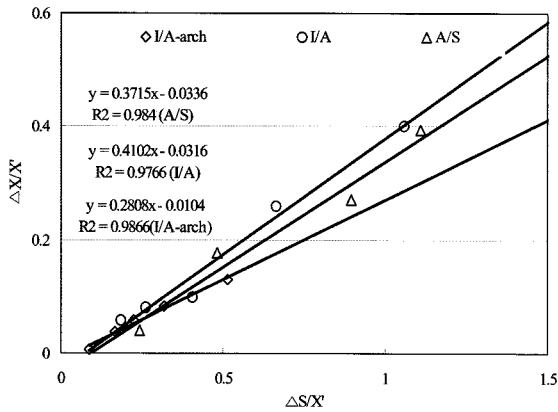


Fig. 3. Comparison of sludge yield value in each reactor.

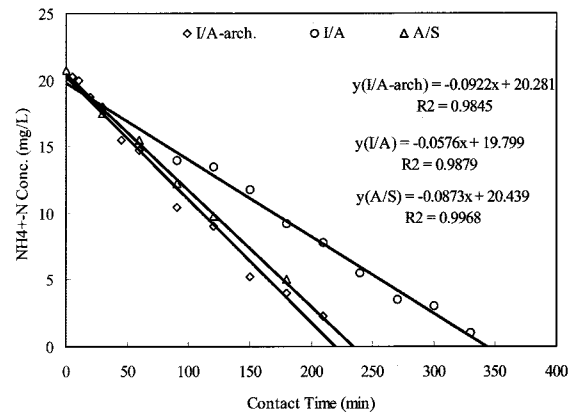


Fig. 5. Nitrification rate with I/A-arch, I/A and A/S sludge.

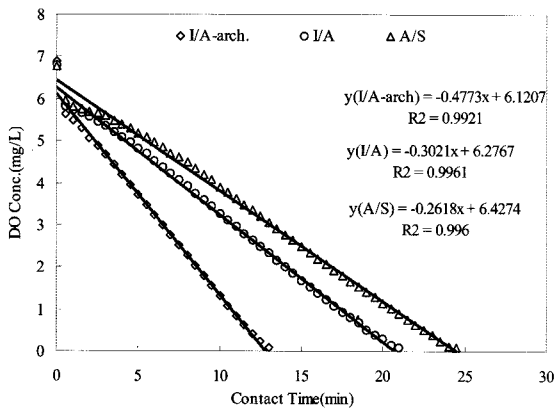


Fig. 4. OUR test results with I/A-arch, I/A and A/S sludge.

따라서, 이러한 질산화 미생물의 증대를 확인하기 위해 각 반응조의 슬러지를 이용하여 하수 및 침전슬러지를 혼합한 후 암모니아농도를 추가로 주입하여 질산화 속도를 측정할 결과, I/A-arch 반응조의 질산화속도가 Fig. 5에서 나타난 것처럼 I/A 및 호기성조건으로 운전한 A/S보다 높게 나타났다. 이는 슬러지 생산량이 감소하여 SRT를 길게 유지해 줌으로써 질산화미생물의 상대적인 증가를 유도해 질산화 효율이 증가하였기 때문은 물론, 혐기성 영역에서 혐기성 미생물들이 보다 많이 존재함으로써 Barker와 Stuckey(1999), Kuo (1996), Germirli(1993) 등의 논문에서 밝혀진 바와 같이 질산화에 영향을 주는 SMP(soluble microbial product)가 적게 생산되어 오히려 활성이 증가되었기 때문으로 판단된다.<sup>16~18)</sup>

즉, 슬러지 발생량의 감소에도 불구하고 SOUR이나 질산화율이 감소하지 않았다는 결과로부터 혐기성 메탄아키아를 활성슬러지 공정에 첨가해 줄 경우 활성슬러지 내 혐기성 미생물의 개체수가 증가함을 알 수 있었고, 결과적으로 주입해준 혐기성 메탄아키아가 종속 및 독립영양 박테리아의 활성에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다. 그림에서 아키아가 주입된 경우와 표준활성슬러지 공정의 경우 보다 간헐폭기 공정의 질산화율이 적은 것은 아키아가 주입된 경우는 SRT가 길게 유지되었고, 표준활성슬러지 공정의 경우는 지속적인 호기상태로 유지되었기 때문에 질산화균의 성장이 더 잘 이루어졌기 때문으로 판단된다.

### 3.3. 미생물종류별 개체수

Table 3은 각 반응조에 있는 혐기성 및 호기성 미생물의 개체수를 나타낸 것이다. I/A-arch 반응조의 혐기성 미생물의 개체수는 약  $9.6 \times 10^5$  cfu/mL이었고, I/A와 A/S 반응조의 혐기성 미생물 개체수는 각각  $1.9 \times 10^5$  및  $6.5 \times 10^4$  cfu/mL로 나타났다. 이 표로부터 간헐폭기방식으로 운전되는 활성슬러지 반응조 내에 혐기성 미생물이 보다 효과적으로 배양되고 있음을 알 수 있으며, 혐기성 아키아 용액을 첨가해 줄 경우 혐기성 미생물의 개체수가 더 증가하고 있음을 알 수 있었다. 결과적으로, 혐기성 메탄아키아와 호기성 박테리아의 관계에 있어 Li와 Bishop(2004)의 연구나 Lens(1995) 등의 연구에서 밝혀진 것처럼 활성슬러지의 폭기조 슬러지 플러내에서 혐기성 균들이 생존하고 또 그 영역이 존재할 수 있으며, 이로 인해 두 미생물 종들의 공존할 수 있음을 알 수 있다.<sup>3,9)</sup>

또한, 활성슬러지 공정내에 혐기성 아키아를 첨가하여 혐기성 미생물 개체수가 증가하고 상대적으로 다른 공정에 비해 적은 호기성균의 개체수를 나타냄에도 불구하고 Fig. 4와 5에서와 같이 호기성 박테리아의 질산화도나 호흡률에 있어 더 높은 활성도를 나타내는 것으로 보아, 단순히 혐기성 미생물의 개체수가 증가하는 것이 호기성 박테리아의 활성에 영향을 주지 않는 것으로 생각된다. 특히, 다른 연구자들 (Barker와 Stuckey, 1999; Kuo, 1996; Germirli, 1993; Eckenfelder, 1995; Chudoba, 1985)에 의해 밝혀진 바와 같이 혐기성 시스템에서의 SMP 발생량 감소와 이로 인한 질산화 저해인자 감소 등의 효과로 인해<sup>16~20)</sup> 즉, 혐기성 메탄아키아가 호기성 박테리아의 활성에 저해가 될 수 있는 SMP와 같은 중간산물이나 난분해성 물질을 제거해 주거나 기타의

Table 3. Population densities of anaerobes and aerobes in the I/A-arch, I/A and A/S reactors

System	Aerobes (cfu)	Anaerobes (cfu)	Ratio of An./Ae
Archaea solution	$2.3 \times 10^6$	$6.2 \times 10^5$	$2.7 \times 10^{-1}$
I/A-arch	$9.9 \times 10^6$	$9.6 \times 10^5$	$9.7 \times 10^{-2}$
I/A	$1.5 \times 10^7$	$1.9 \times 10^5$	$1.3 \times 10^{-3}$
A/S	$1.2 \times 10^7$	$6.5 \times 10^4$	$5.4 \times 10^{-4}$

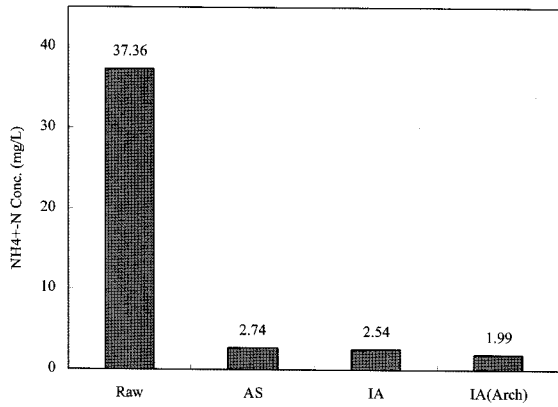


Fig. 6. Ammonium removal in each system.

환경조건을 개선시켜주어 결과적으로 혐기성 박테리아의 대사작용을 향상시켜 주었기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.4. 질소제거특성

Fig. 6은 정상상태로 운전이 이루어지고 있는 경우 각 반응조에서의 암모니아 제거효율을 나타낸 것이다. 질산화는 원수의 암모니아 농도가 심하게 변하더라도 반응조별 큰 차이 없이 수리학적 체류시간(HRT)을 6시간으로 운전할 경우 평균적으로 95% 이상 진행되었다. 혐기성 메탄아키아를 첨가해 준 I/A-arch 반응조의 경우 유출수내 암모니아 농도가 다른 반응조보다 약간 낮은 2 mg/L이하로 나타났다. 혐기성 메탄아키아의 주입과 간헐폭기 등에 의한 질산화율의 감소는 나타나지 않았는데, 이는 앞서 밝힌 바와 같이 SRT 증가로 인한 질산화미생물의 증가와 및 혐기성 미생물 증가로 인한 질산화 저해물질 감소에 따른 활성도 증가로 인해 질산화 효율이 상승되었기 때문으로 판단된다.

반면, I/A-arch, I/A와 A/S 각 반응조 유출수내 질산성 질소의 농도는 각각 9, 15, 24 mg/L, 큰 차이를 보이고 있다 (Fig. 7). A/S 반응조의 경우 질산성 질소의 농도는 24 mg/L로 대부분 유입된 질소성분이 질산성질소로 산화되었다는 것을 알 수 있었고, I/A의 경우 약 10 mg/L 정도의 질산성 질소가 탈질된 것으로 나타나 단순한 간헐폭기방식으로도 효과적으로 질소를 제거할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그리고, I/A-arch 반응조의 경우, I/A에서 제거된 질산성질소보다 추가적으로 더 많은 질소성분이 탈질된 것으로 나타나 혐기성 메탄아키아의 주입이 질산성질소의 제거에 긍정적인 효과를 미친다는 것을 알 수 있다. 이는 Philippot(2002)가 밝힌 바와 같이<sup>4)</sup> 일부 아키아들이 탈질을 할 수 있는 효소를 갖고 있기 때문으로 판단되며 또한, Li와 Bishop(2004)이 설명한 바와 같이 DO 농도가 2-2.5 mg/L로 유지되어 활성슬러지 플럭내에 혐기성 영역이 존재하고,<sup>3)</sup> 여기에 Lens 등(1995)이 밝힌 바와 같이 표준활성슬러지 공정이 갖고 있는 1%의 완전혐기성균들 외에 추가적으로 연속적인 아키아가 주입되어 전반적인 탈질 효율이 증가하였기 때문으로 판단된다.<sup>9)</sup> 또한 Lee(2003) 등이 보고한 것처럼 긴 SRT로 활성슬러지 공정을 운영할 경우 플럭이 커지는 것처럼,<sup>21)</sup> 아키아를 주입

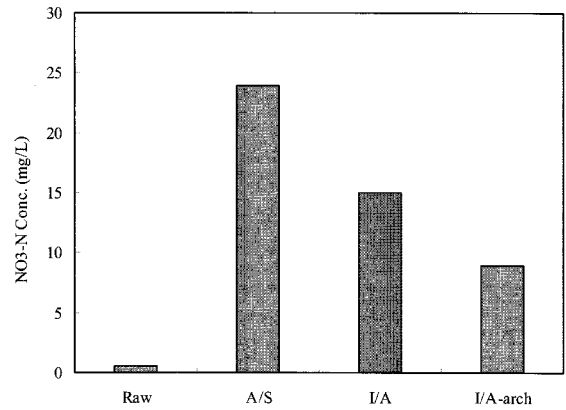


Fig. 7. Effluent nitrate in I/A-arch, I/A and A/S reactors.

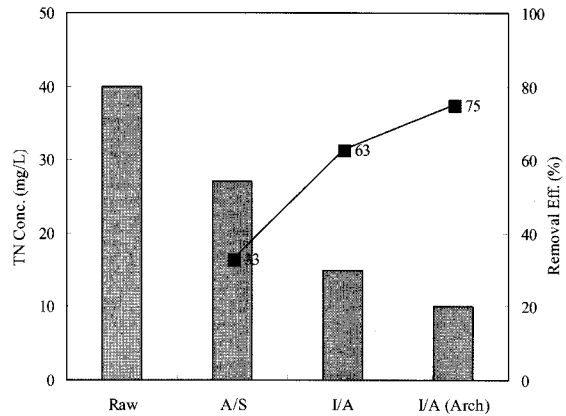


Fig. 8. TN and its removal efficiencies in I/A-arch, I/A and A/S reactors.

한 경우 SRT가 길어져 플럭 크기가 커짐으로써 혐기성을 유지하기 더 좋은 상태가 되어 탈질율이 증가한 것으로 판단된다. 결과적으로 정상상태에서의 I/A-arch, I/A, A/S 각 반응조의 총질소 제거효율은 Fig. 8과 같이 각각 75%, 63%, 33%이었다.

## 4. 결론

활성슬러지 공정의 운영에 있어 DO를 적격히 조절하여 플럭내에 혐기성 영역이 존재하게 만들고, 또한 거기에 혐기성 아키아 균과 같은 미생물을 주입함에 따른 영향을 평가하고자 간헐폭기 시스템에 혐기성 아키아를 주입하여 운전하였다. 그 결과 혐기성 메탄아키아를 간헐폭기로 운전되는 활성슬러지공정에 주입할 경우, 낮은 DO 농도와 이에 따른 활성슬러지 플럭내의 혐기성 영역 확대와 슬러지 생산량 감소에 따른 SRT 증가, 그리고 이로 인한 플럭크기의 향상 등으로 혐기성 메탄아키아가 서식할 수 있는 환경이 조성될 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 질산화미생물의 활성도 증가와 탈질미생물의 효율 증대로부터 혐기성 메탄아키아와 박테리아간의 공생관계가 유지될 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다.

## 사 사

이 논문은 충청북도와 태흥테크놀로지 및 중소기업청의 컨소시엄 과제에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering; Treatment and Reuse, 4th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 759~798 (2004).
2. Beer, D., Schramm, A., Santegoeds, C. M., and Nielsen, H. K., "Anaerobic processes in activated sludge," *Water Sci. Technol.*, **37**(4-5), 605~608(1998).
3. Li, B. and Bishop, P. L., "Micro-profiles of activated sludge floc determined using microelectrodes," *Water Res.*, **38**, 1248~1258(2004).
4. Philippot, L., "Denitrifying genes in bacterial and Archaeal genomes," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA), Gene Structure and Expression*, **1577**(3), 355~376(2002).
5. Jerry, E., "Biotechnological uses of archaeal extremozymes," *Biotechnology Advances*, **19**, 261~278(2001).
6. Laura, A. and Katz., "Changing perspectives on the origin of eukaryotes," *Trends in Ecology & Evolution*, **13**(12), 493~497(1998).
7. Lopez, G. and David, M., "Metabolic at the origin of eukaryotes," *Trends in Biological science*, **24**(3), 88~93 (1999).
8. Forterre, P., "Evolution of the archaea," *Theoretical Population Biology*, **61**, 409~422(2002).
9. Lens, P. L., Poorter, M. P., Cronenberg, C. C., and Verstraete, W. H., "Sulfate reducing and methane producing bacteria in aerobic wastewater treatment systems," *Water Res.*, **29**(3), 871~880(1995).
10. Field, J. A., Stams, A. J. M., Kato, M., and Schraa, G., "Enhanced biodegradation of aromatic pollutants in cocultures of anaerobic and aerobic bacterial consortia," *Antonie van Leeuwenhoek*, **67**, 47~77(1995).
11. Wable, M. V. and Randall, C. W., "Investigation of hypothesized anaerobic stabilization mechanism in biological nutrient removal systems," *Water Environ. Res.*, **66**(2), 161~167(1994).
12. Zitomer, D. H., "Stoichiometry of combined aerobic and methanogenic COD transformation," *Water Res.*, **32**(3), 669~676(1998).
13. Ratsak, C. H., Maarsen, K. A., Kooijman, S. A. L. M., "Effect of protozoa on carbon mineralization in activated sludge," *Water Res.*, **30**(1), 1~12(1996).
14. APHA, EPA and AWWA, "Standard methods for the examination of water and wastewater," 19th edn., Washington D. C. USA.(1995).
15. Yuan, Z., Bogaert, H., Leten, J., and Verstraete, W., "Reducing the size of a nitrogen removal activated sludge plant by shortening the retention time of inert solids via sludge storage," *Water Res.*, **34**(2), 539~549(2000).
16. Barker, D. J. and Stuckey, D. C., "A review of soluble microbial product (SMP) in wastewater treatment systems," *Water Res.*, **33**(14), 3063~3082(1999).
17. Kuo, W. C. and Parkin, G. F., "Characterization of soluble microbial products from anaerobic treatment by molecular weight distribution and nickel-chelating properties," *Water Res.*, **30**(4), 915~922(1996).
18. Germirli, F., Orhon, D., Artan, N., Ubay, E., and Gorgun, E., "Effect of two-stage treatment on the biological treatability of strong industrial wastes," *Water Sci. Technol.*, **28**(2), 145~154(1993).
19. Eckenfelder, Jr. W. W., "Biological treatability studies: new regulations require a new approach," *Environ. Prog.*, **14**(3), 172~175(1995).
20. Chudoba, J., "Inhibitory effect of refractory organic compounds produced by activated sludge microorganisms on microbial activity and flocculation," *Water Res.*, **19**(2), 197~200(1985).
21. Lee, W. T., Kang, S., and Shin, H. S., "Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactor," *J. of Membrane Science*, **216**, 217~227(2003).