

하수중의 질소·인 제거를 위한 A²/O공정의 적용

안철우[†]·박진식*·문추연*

동아대학교 환경공학과
*경운대학교 환경공학과

Application of A²/O Process for Removal of Nitrogen and Phosphorus in Sewage

Chul Woo Ahn[†], Jin Sick Park* and Choo Yeun Moon*

Dept. of Environmental Engineering, Dong-A University
*Dept. of Environmental Engineering, Kyungwoon University
(Received 20 October 2000 ; Accepted 28 November 2000)

ABSTRACT

In this study, the removal efficiencies of organics, nitrogens and phosphorus from municipal wastewater using A²/O process were investigated. BOD₅ removal efficiencies were indicated 95% and 94% with HRT of 12 hr and 10 hr, respectively. COD_{Cr} average removal efficiency and concentration of effluent were indicated 87% and 34 mg/l. SS average removal efficiency and concentration range of effluent were indicated 93% and 4~17 mg/l. T-N removal efficiency and concentration of effluent were shown as 60~80% and below 15 mg/l. In aerobic basin, removal efficiency of NH₄-N was shown over 97% with NH₄-N volume load 0.16 kg NH₄-N /m³·d and in anoxic basin, denitrification efficiency was indicated over 80% with return sludge rate 0.5 Q and internal recirculation rate 2.5 Q. Removal efficiency and effluent concentration of phosphorus were shown over 80% and below 2 mg/l with return sludge rate 0.5 Q.

Keywords : A²/O Process, Nitrogen, Phosphorus, Municipal wastewater

I. 서 론

우리 나라 하수처리는 지금까지 대부분 부유물질(SS)과 유기물(BOD₅) 제거에 중점을 두고 그에 적합한 처리공법들이 적용되어왔다. 그러나 호소 또는 만(灣)과 같은 정체수역에서 하폐수의 질소 및 인이 처리되지 않고 유입됨에 따라 부영양화 현상이 일어나 상수 및 농업용수 등의 용수원의 이용이 제한되고 있다. 이에 정부에서는 1996년 1월부터 처리수의 질소와 인에 대한 배출허용기준을 각각 60 mg/l, 8 mg/l로 정하여 규제하면서부터 고도처리에 관심을 가지기 시작하였다.¹⁾

우리 나라 도시하수의 수질은 도시여건, 산업기반, 환경조건 등의 차이로 지역에 따라 큰 차이를 나타내고 있으며 오염물의 농도들이 하수의 차집관거 미비 등으로 선진국들에 비해 낮다. 실제 유입하수의 질소와 인

의 농도는 대부분 배출허용기준보다 낮아 수질환경보호를 기대하기 어려워 장래 방류수질기준이 강화될 예정으로 신설될 예정인 도시하수처리장뿐만 아니라 기존 하수종말처리장에도 유기물 및 부유물질 제거뿐만 아니라 질소 및 인을 제거할 수 있는 고도처리공법의 도입 및 개선이 요구된다.

일반적으로 도시하수처리장 건설계획에서 처리대상 하수의 수질을 예측하고 처리의 신뢰성을 가진 최적 처리공법을 선정하는 것은 무엇보다도 중요하다. 현재 고도처리 공법들이 국내외에 매우 다양하게 개발되어 있으나 처리 대상 하수의 성상에 적합한 고도처리공법 선정과 설계기준을 정하는 것이 쉽지는 않다.

고도처리공법 중에서 질소와 인을 동시에 처리하는 방법으로는 A²/O(Anaerobic- Anoxic-Oxic), Bardenpho, UCT(University of Capetown), VIP(Virginia Initiative Plant) 등의 공정들이 국외에서 개발되어 하수내에 존재하는 질소 및 인의 처리에 적용되고 있는 실정이다.^{2,3)} 이 중 A²/O공정은 인의 처리에 이용되는 A²/O공정에 무산소반응조를 추가시켜 호기성반응조에서 질산화된

[†]Corresponding author : Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Pusan
Tel: 051-200-7674, Fax: 051-200-6983
E-mail: start-now@hanmail.net

질소를 탈질시켜 제거하는 공정으로서 질소와 인을 동시에 처리하는 공정 중 가장 간단한 구조로 구성되어 있다.^{4,6)}

따라서, 본 연구에서는 생물학적 질소 및 인 제거 공법중의 하나인 A²O공법을 이용하여 실제 생활하수의 오염물 제거효율을 조사·분석하여 A²O공법의 도시생활하수의 질소 및 인제거를 위한 현장적용 가능성을 검토하고자 한다.

II. 실험장치 및 실험방법

1. 실험장치 및 시료

본 실험에 사용된 Pilot Plant는 Fig. 1과 같이 최초 침전지(185 L), 생물반응조로서 전단에 임의성 미생물에 의한 인의 방출을 위한 혐기성 반응조(210 L), 탈질화를 위한 무산소조(430 L), 질산화와 인의 과잉섭취를 위한 호기성 반응조(650 L), 그리고 활성슬러지 분리를 위한 최종침전지(145 L)로 구성되어 있다. 각 반응조는 직렬로 연결되어 있으며, 생물 반응조의 유효 용적은 1.29 m³이었으며, 전체 Pilot Plant의 규격은 W0.6 m × L3.64 m × H0.7 m로서 총 용적은 1.53 m³이다. Pilot plant의 규격은 Table 1에 나타내었다.

실험에 사용된 시료는 분류식 하수관거로 차집되는

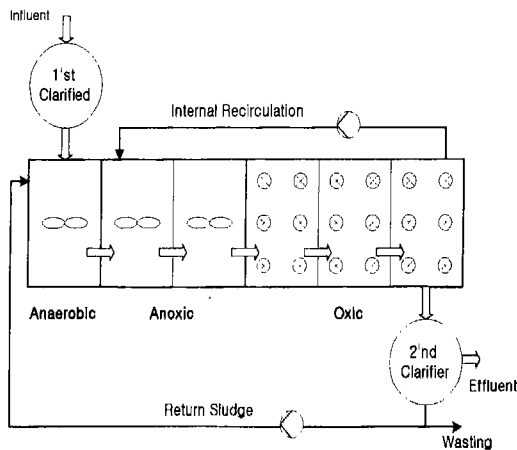


Fig. 1. Diagram of pilot plant.

Table 1. Specifications of pilot plant

Item	1st Clarifier	Anaerobic	Anoxic	Oxic	2nd Clarifier
Type	Circle	Rectangle	Rectangle	Rectangle	Circle
Size(m)W×L×H	Φ0.5×H1.2	0.6×0.57×0.7	0.6×1.2×0.7	0.6×1.8×0.7	Φ0.5×H1.0
Volume(L)	185	210	430	650	145

도시하수를 이용하였으며, 원수의 BOD₅는 93~240 mg/l의 범위로 평균 155 mg/l를 보였으며 COD_{Cr}의 범위는 150~499 mg/l로 평균 320 mg/l를 나타내었으며 유입수의 COD_{Cr}/BOD₅의 비는 Fig. 2에 나타낸 비와 같이 약 2로서 전형적인 도시하수의 성상을 나타내고 있으며, 생물학적 질소제거에 있어서 탈질율은 유기물과 질소의 비율에 따라 달라지는데 유입수의 COD_{Cr}/TKN의 비가 7.46으로 나타나 생활하수에서 COD/TKN의 비는 10~15:1이고 일반적으로 외부탄소원의 공급없이 충분한 탈질효율을 얻을 수 있다고 한 Henze⁶⁾와 US EPA⁷⁾의 보고에 의하면 탈질에 불리한 C/N비는 아니다.

2. 실험방법

처음 미생물의 식종은 하수처리장의 반송 슬러지를 seeding한 후 시료를 수리학적 체류시간을 20시간으로

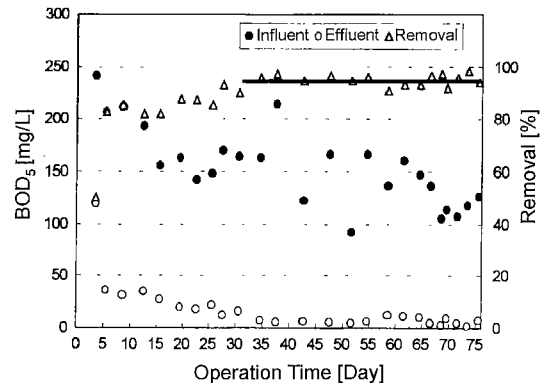


Fig. 2. Variation of BOD₅ concentration and removal efficiencies.

Table 2. Influent wastewater characteristics

Item	Concentration (mg/l)	Item	Concentration (mg/l)
BOD ₅	93~240	NH ₄ ⁺ -N	13~60
COD _{Cr}	150~499	NO ₂ ⁻ -N	<0.3
COD _{Mn}	53~155	NO ₃ ⁻ -N	<0.4
SS	80~260	PO ₄ ³⁻ -P	0.4~3.5
T-N	23~78	Alkalinity	106~260
T-P	2~6	pH	7.2~8.1

주입하면서 약 1주일간의 적응기를 두었다. 혐기조와 무산소조에는 뚜껑을 설치하여 외부로부터 산소의 공급을 막아 각 조의 용존산소(DO)를 각각 0.07, 0.1 mg/l 미만으로 유지되었다. 이들 반응조에서 미생물과 기질의 균일한 혼합을 위하여 교반기로 30~40 rpm 이하의 교반속도를 교반시켰다. 또한 혐기조에 ORP-meter를, 호기조에 DO와 pH-meter를 설치하여 자동적으로 모니터링할 수 있도록 하였다. 그리고 하수처리장 건설초기에는 합류식 하수관거 및 정화조 등으로 인한 낮은 유입수질로 하수처리에 어려움이 있었으나 점차 이들이 정비되고, 또 신도시 등의 경우에는 분류식 하수관거가 설치되어 생활하수가 정화조나 오수정화시설을 거치지 않고 바로 유입되기 때문에 호기조의 MLSS 농도를 3,000~4,000 mg/l로 유지하였으며 DO는 2.0~3.0 mg/l를 유지하였으나 온도상승에 따라 감소하는 경우도 있었다. 유입수의 pH는 7~8로서 조절이 필요하지 않았지만 폭기조에서 질산화가 진행될 때 감소되어 NaOH를 주입하여 7로 유지하였다. Pilot plant내의 충격부하를 방지하기 위하여 유입수는 저류조를 통하여 공급될 수 있도록 하였다.

분석을 위한 시료는 최종침전지 유출구에서 채취하였으며 수질은 환경오염공정시험법(수질편)⁸⁾과 Standard Methods⁹⁾에 따라 분석하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 유기물 제거

유기물의 제거는 일반적으로 BOD₅와 COD_{Cr}로 알 수 있는데 Fig. 2는 운전일수에 따른 BOD₅ 제거효율을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 질소 및 인의 처리효율을 향상시키고자 생물반응조의 체류시간을 일반적인 체류시간 4.5~8.5 hr보다 다소 긴 11~14 hr로 실험하였다. 실험초기 전체 체류시간은 14시간으로 비교적 긴 체류시간임에도 불구하고 유입수 및 유출수의 BOD₅ 농도가 148.1 mg/l 및 21.8 mg/l로 각각 나타나 제거율이 약 85%로서 그리 높지 않았다. 이는 초기 단계에 미생물 식종 후 1주일간의 적응기를 거쳤지만 A²O시스템에서 온도 등 환경인자 및 운전미숙에 따라 정상상태에 도달하지 못한 것으로 판단된다. 그러나, 운전일수 26일이 지난 후부터 정상적으로 운전되어 BOD₅ 제거효율은 89.9%~98.2%의 범위로서 평균 94.6%의 제거효율을 보임으로서 실험에 사용된 생활하수가 A²O공법에서 잘 처리됨을 알 수 있다. 이때 체류시간이 12시간 및 10시간으로 감소되었음에도 불구하고 BOD₅의 제거효율은 각각 평균 95%, 94%로 방류수 기준을 충족하

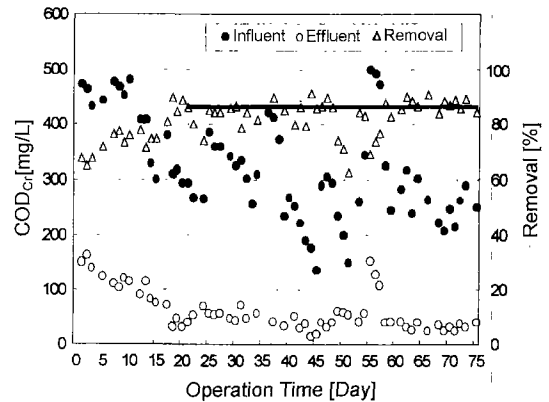


Fig. 3. Variation of COD_{Cr} concentration and removal efficiencies.

는 값으로 체류시간에 큰 영향을 받지 않고 안정적인 처리수질을 얻을 수 있다고 판단된다.

폭기조에서의 DO는 2~3 mg/l, pH는 6.8~7.5, MLSS농도는 2,340~4,560 mg/l, MLVSS는 1,960~3,080 mg/l로 유지되었다. 또한 폭기조에서 수리학적 체류시간은 7, 6, 5시간으로 운전되었으며 BOD₅용적부하는 0.38~0.90 kg/m³·d, 슬러지부하(F/M비)는 0.14~0.34 kgBOD₅/kg MLVSS·d로 유지되었다.

COD_{Cr}의 경우 Fig. 3에 나타난 바와 같이 제거효율은 운전개시 66일째에 유입수 264 mg/l, 유출수 24 mg/l로서 최대 90.9%의 COD_{Cr} 제거효율을 얻었으며, 평균 84.5%의 제거효율을 나타내었으며, 운전기간동안에 BOD₅의 제거효율과 유사한 경향을 나타내었다. 운전기간동안 유입 COD_{Cr}용적부하는 전체 생물반응조에 대하여 0.26~1.62 kg/m³·d로 유입 COD_{Cr}농도가 크게 변함에 따라 넓은 범위로 운전되었다. 운전일 55일에서 57일 사이에는 유입수의 COD_{Cr}농도가 약 620 mg/l로서 농도변화에 따른 충격부하로 운전의 방해받아 COD_{Cr}의 제거효율이 갑자기 낮게 떨어졌다.

처리수의 부유물(SS) 농도는 Fig. 4에서와 같이 초기 운전일수에서는 20 mg/l이상이었으나 운전시간 약 20일이 지난 후에는 평균 93%의 제거효율로서 유출 농도는 4~17 mg/l로 떨어졌다. 유입수의 SS농도가 92~280 mg/l로 농도변화가 매우 심함에도 불구하고 처리수의 SS는 매우 안정적이다.

2. 질소 제거

본 실험에서의 질소제거를 살펴보면 처음 안정기간과 운전이 방해받는 기간을 제외하고 Fig. 5에 나타난 바와 같이 총질소(T-N)의 유입수 농도는 23~78 mg/l,

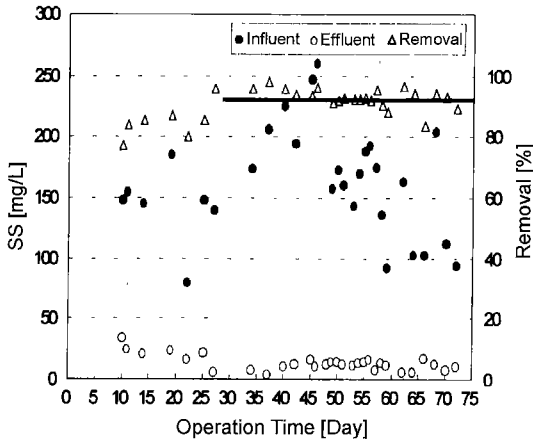


Fig. 4. Variation of SS concentration and removal efficiencies.

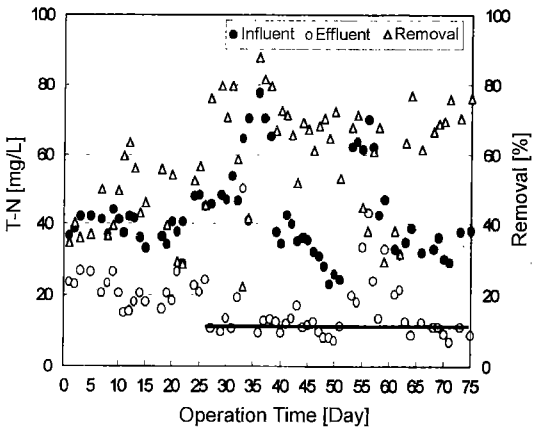


Fig. 5. Variation of T-N concentration and removal efficiencies.

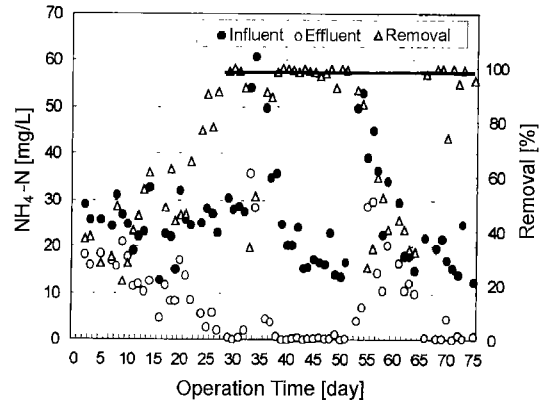


Fig. 6. Variation of $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration and removal efficiencies.

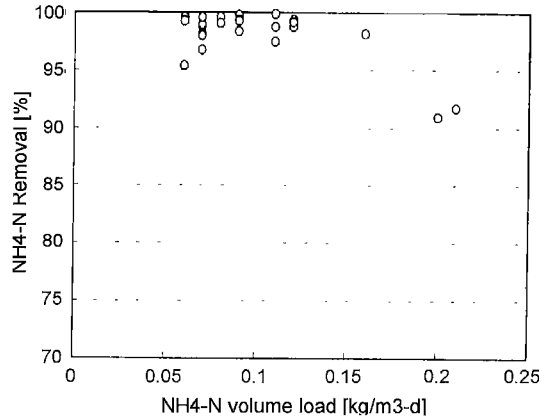


Fig. 7. Variation of $\text{NH}_4\text{-N}$ removal efficiencies with $\text{NH}_4\text{-N}$ volume load.

제거효율은 60~80%로서 얻어졌으며, 정상적으로 운전 되어진 26일 이후의 처리수의 T-N농도는 15 mg/l이하 로 안정된 처리결과를 보였다.

질소제거를 위하여 우선적으로 암모니성 질소는 질산 염으로 생물학적으로 산화되어야 하는데 Fig. 6에 보인 바와 같이 운전 초기에 폭기조에서 질산균의 분율이 낮 고 약 10°C 정도의 일교차 등에 영향을 받는 것으로 판단되어 질산화율이 낮으나 운전일수 약 30일이 지나 정상상태에 도달하였다. 질산화율은 운전중 충격부하를 받는 일수를 제외하고 97% 이상으로 충분한 질산화가 일어났다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 제거율은 $\text{NH}_4\text{-N}$ 용적부하에 영향을 받는데 Fig. 7에서와 같이 용적부하 0.16 kg $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 까지 97% 이상이 질산화 되었다. 원수의 알칼리 도가 낮을 경우 폭기조에서 질산화가 진행되는 동안 생 성되는 H^+ 이온에 의하여 pH값이 때때로 6이하로 감소

되었으며 적정 pH값을 유지하기 위하여 NaOH가 주입 되었다.

폭기조에서 유기질소 및 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 질산화로 생성된 $\text{NO}_2\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 무산소조에서 N_2 가스로 탈기된다. 이때 탈질효율은 유기탄소원에 의존한다. A²/O공법은 질 소제거를 위하여 전단탈질(pre-denitrification) 시스템으 로 먼저 무산소조로 원수의 유기탄소가 유입되기 때문 에 이들 유기탄소를 탄소원으로서 탈질화에 직접 이용 할 수 있다. 또한 전체 질소제거율은 폭기조에서 질산 화로 생성된 질산염들이 무산소조로 순환함에 결정되 는데 본 실험에서 원수유입량의 약 250%가 내부순환 되었다. 그리고 최종침전지의 활성슬러지는 50%가 혐 기조로 반송되어 질산염이 함유된 혼합물의 전체 순환 량은 300%에 달한다. Fig. 8은 무산소조에서 탈질효율 을 나타낸 것이다. 정상운전에서 탈질효율은 80%이상

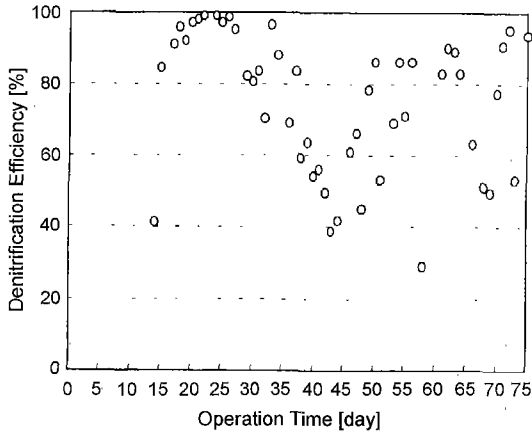


Fig. 8. Denitrification efficiency in anoxic basin during operation time.

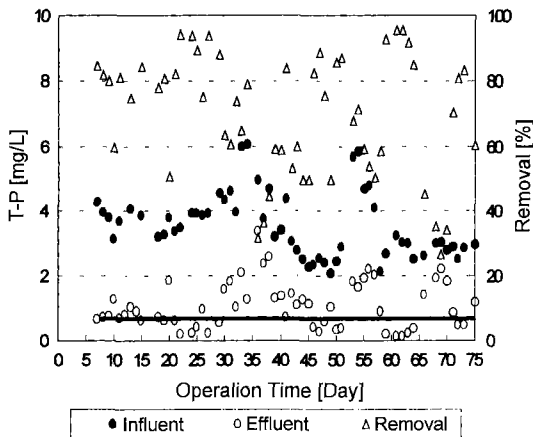


Fig. 9. Variation of T-P concentration and removal efficiencies.

으로 양호한 것으로 판단된다.

3. 인 제거

A²/O공법은 생물학적으로 인을 제거할 수 있는 공법으로 혐기-호기성 환경에서 폐수중의 인이 슬러지내의 중합인산(Poly-phosphate)으로 축적되어 잉여슬러지로 체외로 배출된다.¹⁰⁾

혐기성상태에서 인이 방출되고 호기성상태에서 인을 과잉섭취하는 Luxury Uptake를 이용한 처리 방법이다. 이러한 생물학적 인 제거 메카니즘에 따라 본 A²/O Pilot Plant의 운전에서 얻어진 인의 제거효율은 Fig. 9에 보인바와 같이 운전초기인 26일까지 불안정한 운전일수를 제외하고 80%이상으로 나타났다. 이때 처리수의 인농도는 2 mg/l 미만으로 아주 만족할 수 있다.

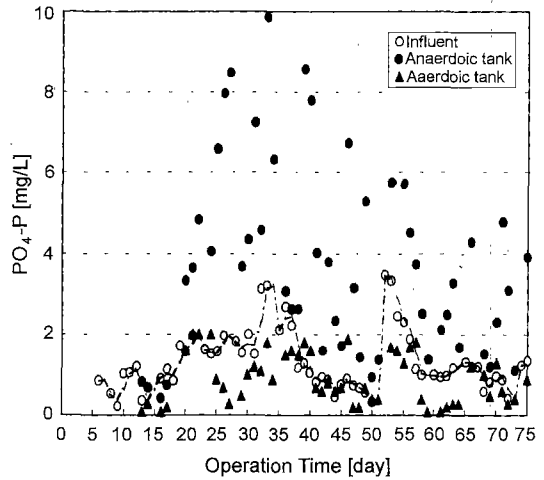


Fig. 10. Variation of PO₄-P concentration during operation time.

이때 잉여슬러지는 전단의 혐기조로 50% 반송되었다. 또한 혐기조에서 인의 방출을 위하여 산소 외에 NO₃-같은 전자수용체로 작용하는 물질들을 반드시 제한시켜야 하며 A²/O공법에서는 반송 잉여슬러지량의 조절이 요구된다.

Fig. 10은 혐기조 및 호기조에서의 PO₄-P의 거동을 나타낸 것이다. 50% 반송되는 잉여슬러지는 혐기조에서 잉여슬러지 중의 Poly-phosphate가 PO₄-P로 방출되어 유입 PO₄-P보다 2배 이상으로 훨씬 높음을 볼 수 있다. 그리고 혐기조에서 방출된 PO₄-P는 호기조로 유입되어 호기상태에서 유기물 산화분해가 일어나면서 과잉 섭취되는데 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 유입수 및 혐기조의 PO₄-P농도에 비해서 호기조내의 PO₄-P농도가 낮게 나타남으로서 거의 섭취되었음을 알 수 있다.

IV. 결 론

우리 나라 도시하수처리를 위하여 유기물뿐만 아니라 질소와 인을 동시에 제거할 수 있는 A²/O공법을 Pilot Plant로 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. BOD₅의 제거효율은 체류시간 12시간 및 10시간에서 각각 평균 95%와 94%으로 이들 체류시간에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 이때 처리수의 BOD₅농도는 10 mg/l로 배출허용기준을 만족시켰다. COD_{Cr}은 평균 87% 제거되었으며 처리수의 COD_{Cr}의 농도는 평균 34 mg/l에 달하였다.

2. SS는 유입수의 농도가 92~280 mg/l로 변화가 때

우 심함에도 불구하고 평균 93%의 제거효율로서 유출 농도는 4에서 17 mg/l로 안정적이었다.

3. T-N의 제거효율은 60~80%로 얻어졌으며, 처리수의 T-N농도는 15 mg/l 이하로 안정된 처리결과를 보였다. 호기조에서 $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 용적부하 $0.16 \text{ kgNH}_4\text{-N/m}^3 \cdot \text{d}$ 까지 97% 이상질산화되었으며, 무산소조에서 탈질효율은 잉여슬러지 반송율 0.5Q와 내부순환율 2.5Q에서 80%이상 얻어졌다.

4. 인은 혐기조로의 2차침전지 잉여슬러지 반송율 0.5Q에서 80%이상 제거되었으며 처리수의 인농도는 2 mg/l 미만으로 아주 만족할 수 있었다.

참고문헌

- 1) 환경부 : 환경백서, 1999.
- 2) Barnard, J.L. : Biological Nutrient Removal without the Addition of Chemicals, *Wat. Res.*, **9**, p. 485, 1974.
- 3) 東京都下水道サービス株式会社 : 嫌気-無酸素-好氣法 運轉管理マニュアル(案), pp. 25-26, 1995.
- 4) Glen T. D. and Steven R. P.: Design and operation of biological phosphorus removal facilities, ed.: Principles and practice of phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater, pp. 145-174, 1994.
- 5) M. L. Arora : Maximising the use of existing facilities to meet newly promulgated nutrient removal requirements, *Nutrient removal from wastewater*, pp. 229-238, 1991.
- 6) Mogens Henze: Characterization of Wastewater for Modeling of Activated Sludge Processes, *Wat. Sci. Tech.* **25**(6), pp. 1-15, 1992.
- 7) US EPA : Manual Nitrogen Control, EPA/625/R-93/010, 1993.
- 8) 동화기술 : 수질오염공정시험법, 1997.
- 9) APHA, AWWA, WPCF: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed.1992.
- 10) Stephens H. L. and Stensel H. D.: "Effect of operating conditions on biological phosphorus removal, *Wat. Env. Res.* **70**(3), 362-369, 1998.