



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2010年 2月
碩士學位論文

修正A/O-生物膜시스템을 이용한
N, P 同時除去

朝鮮大學校 大學院

環境工學科

申 在 炯

修正A/O-生物膜시스템을 이용한
N, P 同時除去

Simultaneous Removal of Nitrogen and Phosphorus
using Modified A/O-Biofilm process

2010年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

環境工學科

申 在 炯

修正A/O-生物膜시스템을 이용한
N, P 同時除去

指導教授 申 大 允

이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함

2009年 10月 5日

朝鮮大學校 大學院

環境工學科

申 在 炯

申 在 炯의 工學碩士學位 論文을 認准함

審 查 委 員 長 崔 炯 一 (印)

審 查 委 員 鄭 京 勳 (印)

審 查 委 員 申 大 允 (印)

2009年 11月 30日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

目 次

I. 서론	1
II. 이론적 배경	3
A. 생물막 공법	3
1. 생물막법의 이론	3
a. 용해성 기질의 이동과 대사반응	4
b. 기질과 반응산물의 이동	8
(1) 속도제한기질	8
(2) 유기물 산화, 질산화 및 탈질반응의 상호관계	9
2. 생물막법의 연구동향	10
B. 수정A/O-생물막시스템	11
1. 장치구성	11
2. 미생물 담체	12
3. 오염물질 제거원리	14
(1) 유기물	14
(2) 질소	14
(3) 인	15
III. 실험 및 분석방법	16
A. Pilot 실험장치의 운전방법	16
B. 분석 방법	17
IV. 결과 및 고찰	19
A. 유입수의 수질	19
B. MLSS 및 MLVSS농도	20

C. 유기물 제거	22
D. SS 제거	23
E. 질소 제거	24
F. 인 제거	29
G. 수정A/O-생물막시스템과 A/O시스템의 비교	32
V. 결 론	33
참 고 문 헌	34

List of Tables

Table 1. Physicochemical properties of polyester media	12
Table 2. Specification of each area in A/O-biofilm system in pilot plant	13
Table 3. Compositions of synthetic wastewater	16
Table 4. Operation conditions of pilot plant	17
Table 5. List of analytical methods	18
Table 6. Properties of wastewater	19
Table 7. Comparison of modified A/O biofilm process and A/O process	32

List of Figures

Fig. 1. Diffusion of material in biofilm	3
Fig. 2. Basic theory of biofilm model	4
Fig. 3. Relationship between removal rate and concentration of substrate	7
Fig. 4. Schematic diagram of A/O-biofilm system.	11
Fig. 5. Cell of media	13
Fig. 6. MLSS and MLVSS concentration according to process using municipal wastewater	21
Fig. 7. Variation of BOD and COD concentration in influent and effluent using municipal wastewater	22
Fig. 8. Variation of SS concentration in influent and effluent using municipal wastewater	23
Fig. 9. Variation of T-N concentration in influent and effluent	24
Fig. 10. Variation of $\text{NO}_x\text{-N}$ concentration according to process using municipal wastewater	25
Fig. 11. Variation of $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration according to process using municipal wastewater	26
Fig. 12. Variation of alkalinity according to process using municipal wastewater	28
Fig. 13. Variation of nitrification and denitrification efficiency using municipal wastewater	28
Fig. 14. Variation of T-P and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration in influent and effluent using municipal wastewater	30
Fig. 15. Variation of $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration according to process using municipal wastewater	31
Fig. 16. Variation of $\text{PO}_4\text{-P}$ consumption in oxic area I, II and III using municipal wastewater	31

ABSTRACT

Simultaneous Removal of Nitrogen and Phosphorus Using Modified A/O–Biofilm process

Written by Jae-Hyung Shin

Advised by professor Dae-Yewn Shin Ph. D.

Department of Environmental Engineering

Graduate school of Chosun University

The rapid development of human activity has resulted in large amounts of nutrients flowing from wastewater into rivers and lakes. Consequently, the water environment has deteriorated. To improve water quality, it is very important to remove nutrients such as nitrogen and phosphorus from wastewater. In this study, for solving these problems, the simultaneous removal of N and P of wastewater using modified A/O–Biofilm process with media coated microorganism as support carrier in pilot plant was investigated. The findings are as follows:

1. The average removal efficiency of BOD was 90.54%. The average concentration of SS in effluent was ranged from 7.00 to 19.00mg/L.
2. The average removal efficiency of T-N in plant was 60.71%. In the case of average specific efficiencies of nitrification and denitrification, they were 72.14 and 97.5mgN/gMLVSS · day, respectively.
3. The average removal efficiency of T-P in pilot plant was 72.76%. In the case of PO₄-P, it was 66.4%. The consumption of T-P in the oxic area were 32.42mgP/gMLVSS · day. Especially, about 62.8% of T-P was removed in the oxic area I.

4. The average removal efficiencies of SS, BOD and T-P in the modified A/O-Biofilm process were similar to those of the conventional A/O process. However, in the case of COD and T-N, they were increased by about 7.4 % and 24.3 %, respectively.

I. 서론

산업이 발달하여 다종다양한 산업폐수가 배출되고, 생활수준이 향상됨에 따라 국민 1인당 용수소비량이 증가하여 하수발생량이 증가하고, 육류소비량이 증가하여 축산폐수의 발생량 또한 증가하는 추세이다. 이에 따라 우리나라에서는 1967년부터 분뇨처리시설을 필두로 산업폐수처리시설, 하수처리시설, 축산폐수처리시설 등을 설치하여 운영하고, 정부에서는 점오염원의 처리효율을 제고하기 위해 배출허용기준을 강화하여 관리해 오고 있다.

즉 오수, 분뇨 및 축산폐수처리에 관한 법률이 1997년 3월부터 시행되고, 2004년 1월부터는 방류수 수질기준이 BOD 20mg/L, SS 20mg/L, T-N 60mg/L 및 T-P 8mg/L로 적용되었으며, 2002년 1월부터 잠실 상수원 팔당 특별 대책지역 등 특정지역에 대해서 적용되던 방류수 수질기준(BOD 10mg/L, SS 10mg/L, T-N 20mg/L, T-P 2mg/L)이 2004년 1월부터는 한강·낙동강·영산강·금강 수계 등 4대강 수계에 적용되고, 2008년부터는 전국적으로 확대 적용되고 있다.

이와 같이 점오염원에 대한 배출허용기준을 강화함에도 불구하고 주요하천의 수질이 오히려 악화되어 목표수질을 달성할 수 없음은 물론 연례적으로 댐과 저수지에서는 부영양화가 발생하고 연안에서는 적조현상이 발생되어 경제적 손실은 물론 수생생태계가 파괴되고 있다.

최근에는 그 동안 운영되어 온 점오염원 처리시설에서 SS와 유기물은 어느 정도 제거되나 N과 P는 거의 처리되지 않고 배출되었다는 관점에서 영양염류를 처리하기 위한 3차 처리시설을 추가하거나 새로운 공정으로 교체하고 있다. 영양염류 처리방법은 물리화학적 및 생물학적 처리방법으로 구분되지만, 대부분 혐기, 호기의 순환반응을 통해 질산화 및 탈질소화하고 미생물의 인 과잉흡수를 유도하는 생물학적방법을 도입하고 있다. 생물학적 영양염류처리공정은 화학적 전처리여부, 혐기성, 무산소 및 호기성 반응조의 배치방법, 운전모드, 부대시설, N·P 단독처리와 동시처리, 처리수의 막여과 등에 따라 다양한 방법이 개발되고 있다.¹⁻³⁾ 생물학적 인 제거방법의 하나인 A/O공정은 폐수의 유기물과 인을 제거하기 위한 방법으로 혐기성조-호기성조-침전조 순으로 조합된 단일 슬러지 부유성장 처리공정이며 호기성조의 체류시간을 조절하여 질산화를 도모한다.

또한 생물막법은 담체(media)에 미생물을 부착시켜 오염물질을 처리하는 공법으로 살수여상법, 회전원판법, 접촉산화법, 자기조립법, 포괄고정화법 등이 있다. 생물막법은 미생물농도를 높게 유지할 수 있어서 장치규모가 작아지고, 부하변동에 강하며 탈질소화가 가능하고 슬러지 반응이 필요하지 않다. 또한 질산화균과 같이 비증식 속도가 느린 미생물이 부착되기 쉽고, 슬러지 발생량이 적으며, 저농도 유기성 폐수에도 적용할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 폐수의 N, P를 동시에 제거하고, 시설을 compact화하여 시설비와 관리비를 절감하며 동절기에도 안정적으로 처리할 수 있는 수정A/O-생물막시스템을 개발하고자 한다. 이를 위하여 기존 A/O공정의 호기성조에 미생물담체를 충전하는 pilot 규모의 장치를 제작하고 도시하수를 유입시키며 약 1년 동안 유기물, N, P 등의 제거율을 조사하며 적정 운전조건을 모색하였다.

II. 이론적 배경

A. 생물막 공법

1. 생물막법의 이론

생물막 반응조에서는 액체 중의 기질과 생물막이 접촉하는 동안 bulk용액에서의 혼합, 생물막으로 이동, 생물막 내부로 확산, 생물막에서 분해, 반응산물의 bulk용액으로 외부확산 등 물질확산이 일어난다. Fig. 1에 생물막 반응조의 물질확산을 개략적으로 나타내었다.

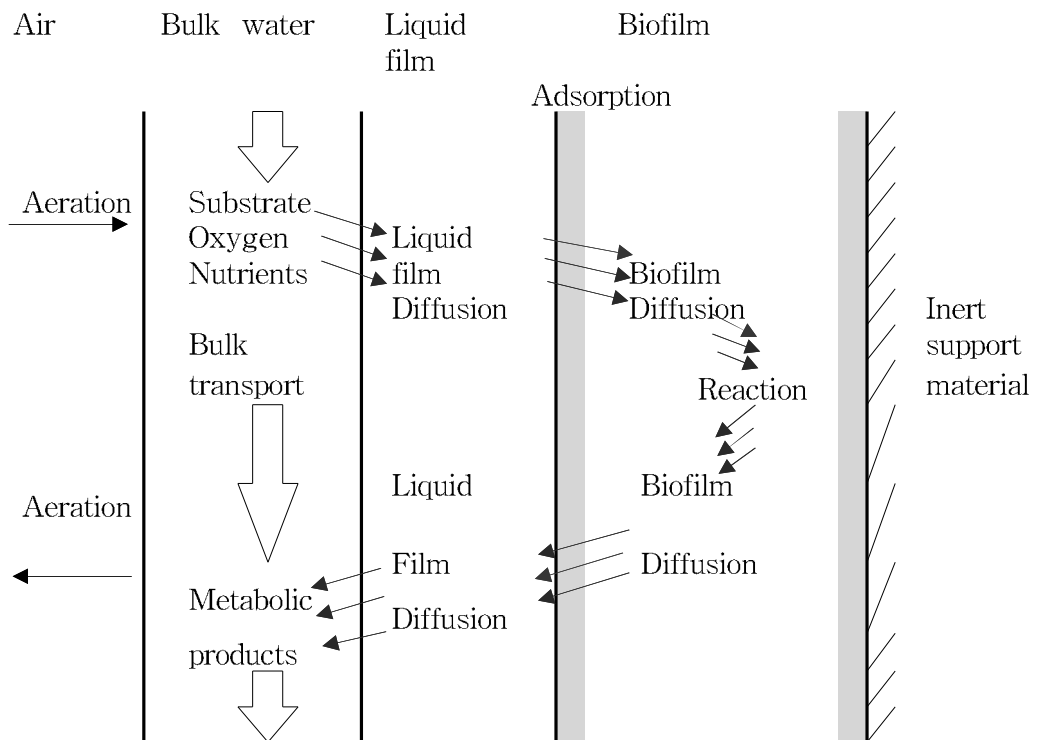


Fig. 1. Diffusion of material in biofilm.

a. 용해성 기질의 이동과 대사반응

Fig. 2에 생물막 이론의 기본개념을 나타내었다.

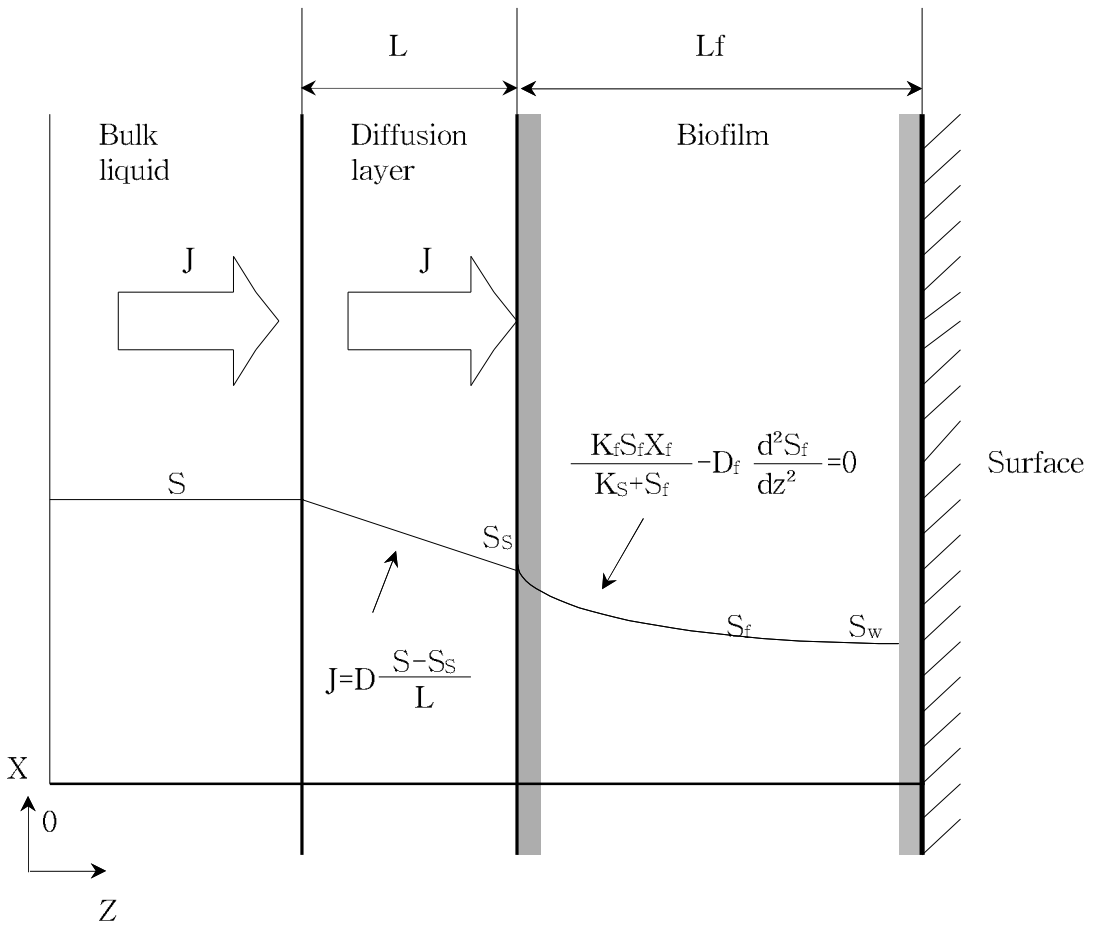


Fig. 2. Basic theory of biofilm model.

용액으로부터 수막을 통과하여 생물막 표면으로 전달되는 기질의 flux(J)는 Fick의 제1법칙에 의하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$J = -D \frac{\partial S}{\partial Z} = D \frac{S-S_s}{L} \quad (1)$$

J : 기질의 flux, $M_S L^{-2} T^{-1}$

S : 용액의 기질농도, $M_S L^{-3}$

S_s : 생물막 표면에서의 기질농도, $M_S L^{-3}$

L : 수막두께, L

D : 분자확산계수, $L^2 T^{-1}$

Z : 기질침투깊이

수막을 통과한 기질은 생물막 표면으로부터 내부로 확산됨에 따라 저항으로 인하여 S 곡선형태의 하향 농도경사를 나타낸다. 이 때 기질확산속도는 Fick의 제2법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial S_f}{\partial t} = -D_f \frac{\partial^2 S_f}{\partial Z^2} \quad (2)$$

S_f : 생물막내에서의 기질농도, $M_S L^{-3}$

D_f : 생물막내에서의 기질의 분자확산계수, $L^2 T^{-1}$

t : 시간, T

생물막의 물질대사에 의한 기질제거속도는 다음과 같이 Monod식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial S_f}{\partial t} = - \frac{k_{max} \cdot X_f \cdot S_f}{K_S + S_f} \quad (3)$$

k_{max} : 최대기질제거속도, $M_S M_X^{-1} T^{-1}$

K_S : 기질의 반포화농도, $M_S L^{-3}$

X_f : 생물막내의 세포물질농도, $M_X L^{-3}$

따라서 정상상태 ($\partial S_f / \partial t = 0$)에서 생물막의 기질농도는 식(2)와 (3)을 합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 S_f}{dZ^2} = \frac{k_{\max} \cdot X_f \cdot S_f}{D_f (K_s + S_f)} \quad (4)$$

한편, 미생물의 물질대사로 인한 기질제거, 즉 생물막 자체의 고유반응은 Monod 식에 따르지만, 대개는 K_s 의 값이 적으므로 이를 무시하고 X_f 를 상수로 간주할 때 식(3)은 0차 반응이 된다. 즉,

$$r_f = -k_{\max} \cdot X_f = -k_f \quad (5)$$

r_f : 생물막 고유의 기질제거속도, $M_s L^{-3} T^{-1}$

기질이 생물막 내부로 침투할 때 생기는 확산저항은 기질제거속도와 반응차수에 영향을 미친다. 즉, 기질이 생물막 심층까지 완전히 침투했을 때 기질제거속도는 0차 반응을 유지하지만 침투가 불완전할 때는 1/2차 반응으로 전환된다. 이 사항은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{완전침투일 때 ; } r_{su} = -k_0 = -k_f \cdot L_f \quad (6)$$

$$\text{부분침투일 때 ; } r_{su} = -k_{1/2} S^{1/2} = \sqrt{(2D_f \cdot k_f \cdot S_s)} \quad (7)$$

r_{su} : 단위 생물막 표면당 기질 제거속도, $M_s L^{-2} T^{-1}$

k_0 : 0차 반응 기질제거속도, $M_s L^{-2} T^{-1}$

$k_{1/2}$: 0.5차 반응의 기질제거속도, $M_s^{1/2} L^{-1/2} T^{-1}$

k_f : 생물막 고유의 기질제거속도, $M_s^{1/2} L^{-1/2} T^{-1}$

L_f : 생물막의 두께, L

0차 반응에서 1/2차 반응으로의 변환을 결정짓는 것은 생물막의 상대적 침투도인 β 를 도입하여 나타낼 수 있다.

$$\beta \approx \sqrt{(2D_f \cdot S_s) / (k_f \cdot L^2)} \quad (8)$$

$\beta \geq 1$ 일 때는 완전침투이고, $\beta < 1$ 이면 부분적 침투이다.

식(6)과 (7)에서 보는 바와 같이 기질제거속도는 기질이 생물막 심층까지 완전히 침투하면 기질농도에 상관없이 생물막 두께에 비례하고, 기질의 생물막 침투가 완전하지 못하면 기질농도에 1/2차 반응에 의존한다.

Fig. 3에 용액의 기질농도와 제거속도의 관계를 나타내었다. 용액의 기질농도가 낮은 초기에는 기질확산이 제한조건이 되며 제거율은 식(7)과 같은 1/2차 반응으로 나타난다. 그 후 용액농도의 증가와 확산의 증가에 따라서 기질이 생물막 심층까지 완전히 침투하면 용액농도에 관계없이 식(6)과 같은 생물막 고유의 기질 제거속도가 제한조건이 된다.

Removal rate, r_{su}

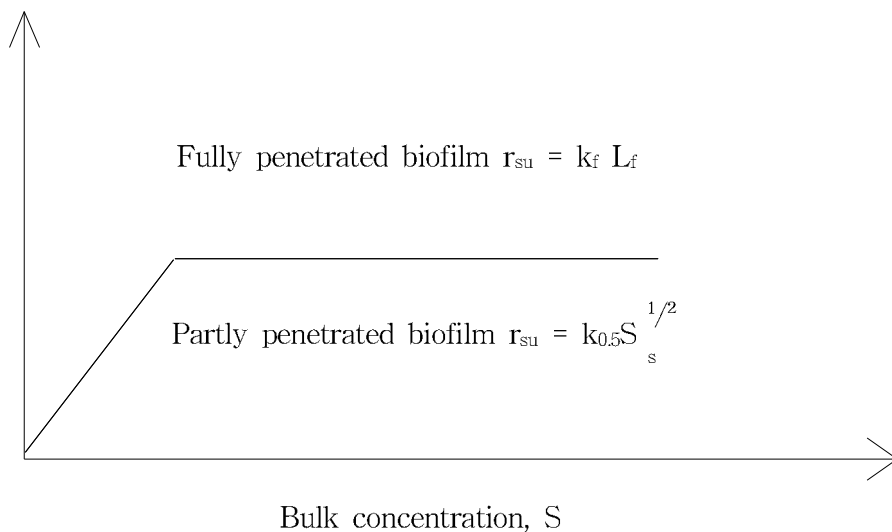
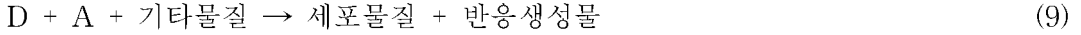


Fig. 3. Relationship between removal rate and concentration of substrate.

b. 기질과 반응산물의 이동

(1) 속도 제한 기질

생물학적 기질제거는 생물학적 산화환원반응에 의하여 진행되며 세균에 의한 전자공여체(D)의 산화와 전자수용체(A)의 환원에 의한다.



생물막의 산화환원반응에 의한 기질제거는 식(4)에서 알 수 있듯이 전자공여체와 전자수용체의 확산속도에 따라 좌우된다. 즉, 0차 고유반응속도를 가진 생물막에서 전자공여체와 전자수용체가 생물막을 완전하게 침투할 때는 기질제거속도가 0차 반응을 유지하지만 실제로는 생물막이 두껍기 때문에 두 기질 모두 혹은 한 기질만이 생물막을 침투하게 된다. 이러한 경우에는 가장 적게 침투한 기질이 속도제한 기질로서 작용하며 기질제거속도는 1/2차 반응이 된다.

전자공여체와 전자수용체 중에서 어느 것이 속도제한기질로서 작용하는지는 다음과 같은 Williamson과 McCarty의 수학적 모델에 따라 결정된다.

$$\frac{S_D}{S_A} \begin{cases} \geq \\ < \end{cases} \frac{D_{f,A}}{D_{f,D}} \cdot \frac{k_{f,D}}{k_{f,A}} = \frac{d(MW)D}{a(MW)A} \cdot \frac{D_{f,A}}{D_{f,D}} \quad (10)$$

S_A : 전자수용체의 농도, $M_S L^{-3}$

S_D : 전자공여체의 농도, $M_S L^{-3}$

D_F : 생물막 기질의 분자확산계수, $L^2 T^{-1}$

a : 전자수용체의 화학양론적 몰수

d : 전자공여체의 화학양론적 몰수

A, D : 각각 전자수용체, 전자공여체

MW : 분자량, M

식(10)에서 좌변 항이 우변 항보다 클 경우에는 전자수용체의 확산속도가 속도결정단계가 되고, 우변 항이 클 경우에는 전자공여체의 확산속도가 속도결정단계가 된다.

질산화반응의 경우 전자공여체인 암모니아와 전자수용체인 산소의 농도한계비가 0.3~0.4 mgNH₃/mgO₂이기 때문에 사실상 DO가 질산화반응을 지배하게 된다. 따라서 만약 DO가 3 mg/L일 경우 질소가 질산화반응을 지배하기 위해서는 NH₃-N가 1 mg/L이하로 유지되어야 한다.

(2) 유기물 산화, 질산화 및 탈질반응의 상호관계

생물막에서는 호기성 영역에서 유기물 산화와 질산화반응이 동시에 일어나므로 두 반응의 전자공여체인 유기물과 암모니아가 동일한 전자수용체인 산소를 두고 경쟁하는 양상이다. 그러나 실제로는 유기물 산화세균이 질산화미생물보다 우점종이기 때문에 유기물이 분해된 다음 질산화가 진행된다.

생물막의 질산화반응은 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{S_s}{S_o} > \frac{D_o k_{f,s}}{D_s k_{f,o}} \tag{11}$$

o, s : 각각 산소 및 유기물질

질산화는 좌변 형이 우변 항보다 작을 때 일어나며, DO외에도 용액의 온도, pH, 알칼리도 등의 영향을 받는다. 질산화는 알칼리도를 소비하여 pH를 저하시키기 때문에 질산화가 진행되는 생물막 반응조에서 알칼리도가 낮으면 pH가 저하한다. 이러한 현상은 생물막 심층에서 주로 나타나는데, pH 6.0이하에서는 질산화반응이 제한된다.

생물막은 DO확산에 따라 호기성과 혐기성영역으로 구분된다. DO가 공급되는 호기성영역에서는 질산화가 진행되어 미생물이 증식되지만, 혐기성영역에서는 미생물의 약육강식에 의한 자기분해가 진행되어 생물막이 얇아지고 NO₃-N는 N₂O 또는 N₂가스가 되어 탈기되며, 이때 생성된 알칼리도로 인해 pH가 상승한다. 또한 pH가 상승하면 생물막 내부에서 인산염의 용해도적이 초과하여 인산염이 침강할 수 있다.

질소분자가 외부로 확산되기 위해서는 농도경사가 있어야 하기 때문에 생물막 심층에서는 질소분자가 축적되어야 한다. Harremoes 등의 보고에 따르면⁴⁾ NO₃-N가 6mg/L 이상이 되면 생물막 심층에 질소분자가 과도하게 축적되어 과포화상태가 되고, 이로 인하여 생물막이 탈리될 수 있다고 한다.

2. 생물막법의 연구동향

생물막법은 여러 가지 접촉재에 부착한 미생물막을 이용하여 처리하는 방법으로 상수처리에서는 완속여과법, 하수처리에서는 살수여상법의 형태로 도입되어 왔으며, 하수처리에 있어서는 부유생물을 이용한 활성슬러지법보다 훨씬 오래 전부터 2차 처리기술로서 사용되어 왔다.

생물막법은 증식속도가 늦은 질산화미생물을 유지하기 쉽다는 특징이 있으며, 1930년대에는 회전원판법이 실용화되고, 1960년대에는 Bach나 Buswell이 나무막대, 코크스 등을 사용한 접촉산화법을 개발하고, 1970년대에는 Leglise 등이 입경 3~5mm의 돌을 사용하여 고부하 조건에서도 최종침전지를 사용하지 않고 처리효율이 높은 호기성 생물여과법을 개발하였다.

생물막법은 표준 활성슬러지법의 위세에 눌려 점차 적용되는 곳이 위축되었으나, 유기물제거율의 제고 및 N·P제거에 의한 수계의 목표수질달성과 용수의 재이용정책이 대두되면서 효율적 활용방안이 모색되어 왔다.

그 후 생물막법은 재료과학, 자동제어, 미생물 배양 및 막분리기술 등이 급속히 발전함에 따라 대학, 연구소, 산업체 등을 중심으로 활발하게 연구되어 왔으며, 유기물뿐만 아니라 N, P 와 같은 영양염류까지 처리하면서도 제거율이 높고 유지관리가 용이한 효율적인 공정들이 개발되고 있다.

생물막법에 사용하는 담체의 성분이나 형상, 미생물을 부착·증식시키는 방법 등도 매우 다양하다. 많이 사용되는 담체는 PP(poly propylene), PVA(poly vinyl alcohol), PS(poly styrene), PU(poly urethane), 나일론 등으로 만든 선형(실), 점모상 또는 스펀지형 담체 외에 활성탄, 안트라사이트, 돌, 나무, 세라믹, 제올라이트 등을 소재로 한 입상(granule type)등이 단독 또는 조합되어 고정상 또는 유동상으로 사용되고 있다. 또 최근에는 세라믹, 활성탄, 고분자등을 적절하게 결합시킨 기능성 담체도 개발되고 있다^{5~8)}.

B. 수정A/O-생물막시스템

1. 장치구성

수정A/O-생물막시스템은 본 연구에서 폐수의 탈질을 도모하고 장치규모를 compact화하며 처리효율을 제고하고 효율적으로 관리하기 위하여 개발한 기술이다. 처리공정은 혐기성조, 호기성조 I, II, III 및 침전지로 구성되며, 호기성조 I 과 II에 미생물 담체를 충전한 것이 기존의 A/O공법과의 차이점이다.

Fig. 4에 수정 A/O-생물막시스템의 공정도를 나타내었다.

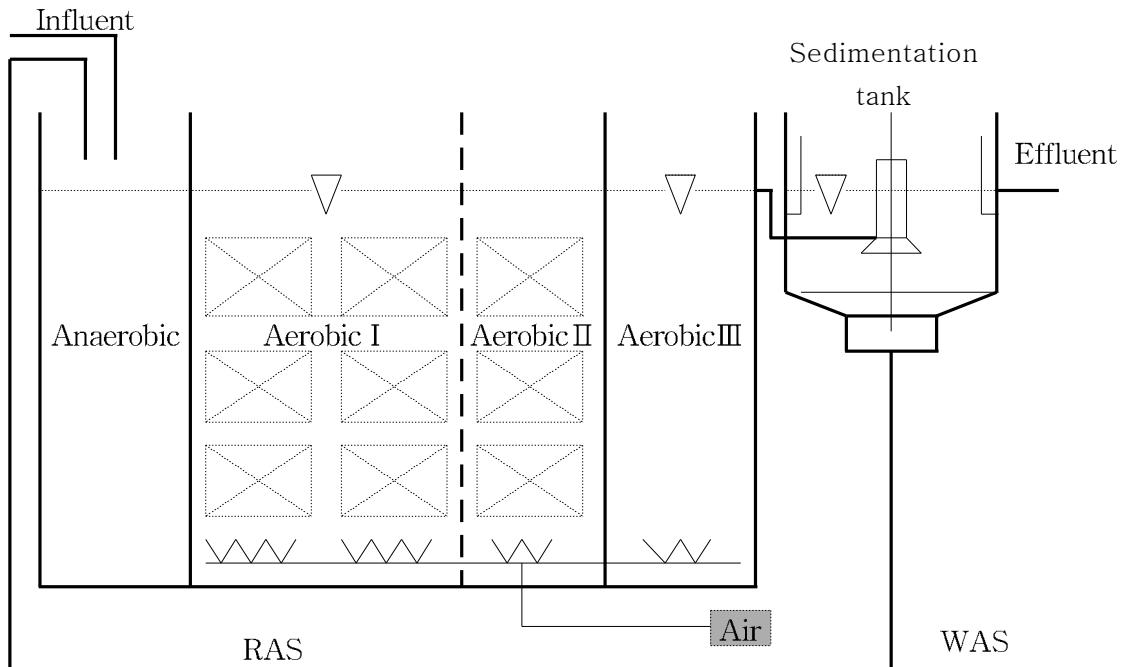


Fig. 4. Schematic diagram of modified A/O biofilm system.

공정별 주요 생물학적 반응은 혐기성조는 혐기성분해 및 인 방출, 고정상 미생물 접촉재가 충전된 호기성조 I, II는 동시 질산화/탈질반응 및 인의 흡수, 호기성조 III은 일종의 예비조로서 탈리된 미생물의 부유성장에 의한 유기물 흡수이며, 침전지는 고액분리이다. 한편 생물막 내부에서는 혐기성미생물이 자가분해가 진행되어

생물막이 얇아져서 슬러지 처분량이 줄어든다. 수정A/O-생물막시스템은 부하변동이 강하고 SRT를 길게 유지할 수 있으며 수온이 낮은 겨울철에도 제거율이 안정적으로 유지된다.

2. 미생물 담체

Table 1에 호기성조 I, II에 충전한 polyester 담체의 물리화학적 특성을 나타내었다. 담체의 재질은 폴리에스테르이고, 융점은 252℃, 비중은 1.38, 겉보기밀도는 0.017g/cm³, 공극율은 98.1 %, 비표면적은 1938.8m²/m³이며, 내식성은 pH 3~11범위이다. 스폰지 형태로서 미생물이 쉽게 부착될 수 있는 조건을 가지고 있다.

생물막 담체는 담체에 순수분리·배양된 미생물을 부착시키기 전에 담체의 비표면적을 넓혀주기 위해 binder로서 경량물탈에 사용하는 pelite를 coating한 후 질산화 미생물인 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*를 부착시켰으며, pelite의 주성분인 SiO₂가 미생물 성장에 영향을 주지 않도록 고려하였다.

Table 1. Physicochemical properties of polyester media

Item	Property
Melting point	252 °C
Void ratio	98.1 %
Specific gravity	1.38
Apparent density	0.017 g/cm ³
Specific surface area	1938.8 m ² /m ³
Chemical resistance	pH 3~11

호기성조 I, II에 폴리에스테르 재질의 미생물 담체를 각각 30조와 10조씩 충전하였는데, 조별 매체의 겉보기 용적충전율은 각각 14.39 %와 13.19 %이며, 담체 1조는 크기 160mm(L)×120mm(W)×11mm(T)의 담체 8cell로 구성된다.

Fig. 5에 담체 1조의 사진을 나타내었다.

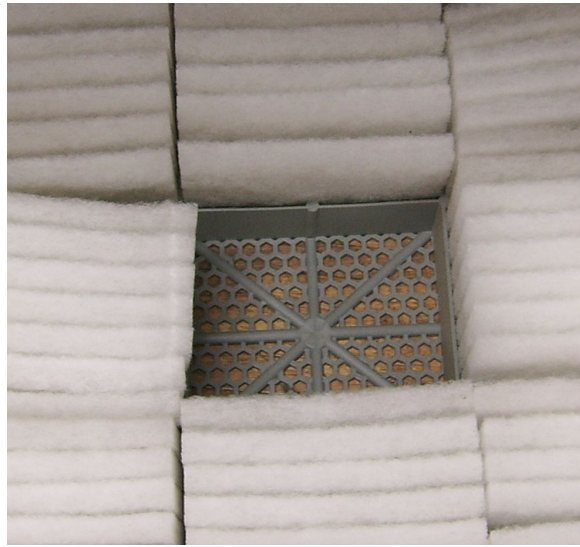


Fig. 5. Cell of media

Table 2에 공정별 제원을 나타내었다. 수리학적 체류시간(HRT)은 6.35hr이며, 공정별로는 혐기성조는 1.3hr, 호기성조 I, II는 총 3.34hr이며, 호기성조 III은 1.71hr이다.

Table 2. Specification of each area in modified A/O biofilm system in pilot plant

Items	Size (L _{mm} ×W _{mm} ×H _{mm})	Capacity (m ³)	Retention time (hr)	Media rate (%)
Anaerobic area	1000×1250×2260	2.82	1.3	
Oxic area I	1100×2180×2260	5.42	2.5	14.39
Oxic area II	1120×720×2260	1.82	0.84	13.19
Oxic area III	1120×1460×2260	3.7	1.71	
Precipitation reserver	Φ2300×H1910	7.89	3.64	

3. 오염물질 제거원리

(1) 유기물

유기물은 혐기성조에서 혐기성 분해과정을 통하여 일부 제거되고 나머지는 호기성조에서 분해된다. 저분자 지방산은 유기산 등으로 분해되고 인의 방출과정에서 PHB(polyhydroxybutyrate)의 형태로 미생물 내부에 축적된다.

호기성조 I, II에서 유기물은 담체에 고농도로 부착, 증식된 미생물의 생물학적 산화, 환원반응에 의하여 분해된다. 즉 생물막 표면에서는 호기성미생물에 의하여 산화반응이 일어나고, 생물막 내부에서는 혐기성미생물에 의하여 생물학적 환원반응이 일어난다. 호기성 미생물은 유산소하에서 효소(enzyme)를 이용하여 유기물을 산화, 분해하여 에너지를 얻고 이중 일부로서 원형질을 형성한다.

또, 유기물은 생물막 내부로 침투하여, 혐기성 영역에서 탈질과정의 전자공여체로서 이용된다. 내생호흡에 의하여 산화되지 않는 세포물질은 잉여슬러지로서 계외로 배출되므로, 대부분의 유기물은 잉여슬러지 처분과정에서 제거되고, 일부는 방류수에 포함되어 유출된다.

(2) 질소

질소는 질산화 및 탈질소화 반응을 거쳐 탈질된다. 질산화 반응은 3단계로 진행된다. 즉 유기성질소가 산화되어 $\text{NH}_3\text{-N}$ 이 된 후 독립영양세균인 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*에 의해 $\text{NO}_2\text{-N}$ 및 $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 전환된다.

호기성조 I, II에서는 담체에 충전하기 전에 인위적으로 부착시켜 증식된 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*와 수중의 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*에 의하여 질산화반응이 일어난다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 미생물의 동화작용에 의해 소모되며 C/N비가 높을 경우에는 대부분이 미생물의 증식에 이용되어 제거된다.

우리나라 하수의 경우 유기물 농도가 낮기 때문에 질소는 주로 탈질소화반응에 의하여 제거된다. 탈질은 혐기성미생물이 $\text{NO}_3\text{-N}$ 를 N_2 혹은 N_2O 의 형태로 전환함으로써 탈기되거나, 슬러지를 인발함으로써 계외로 배출된다. 혐기성조에서 탈질미생물은 bulk 용액에서 확산되는 기질을 이용하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 를 N_2O 나 N_2 로 전환한다.

호기성조 I, II에서 혐기성미생물에 의한 탈질소화반응은 주로 생물막 내부 혐기성영역에서 자가분해에 의하여 진행되거나, 사멸한 미생물의 Lysis에 의해 발생하는 2차 기질을 탄소원으로 이용함으로써 진행된다. 탈질미생물은 유기물농도가

비교적 낮고 알칼리도가 높으며 수온이 28℃ 정도에서 증식속도가 빠르므로 이와 같은 조건에서 생물막이 쉽게 탈리되지 않도록 운전하는 것이 중요하다.

하수의 유기물 농도가 너무 낮아서 탈질에 소요되는 탄소원이 부족하면 생물막 내부에서 발생하는 2차 기질에 의한 내생탈질이 이루어지지만 이 경우 알칼리도가 부족하면 산성화되어 질산화미생물의 활동이 둔화된다. 이 시스템에서는 동일 반응조에서 질산화와 탈질소화가 동시에 수행됨으로써, 탈질소화에서 소요되는 알칼리도에 대한 경비를 절감하고, 내부순환을 생략할 수 있어서 경제적이다.

(3) 인

인은 미생물이 혐기성조에서는 방출하고 호기성조에서는 흡수하므로 침전지에서 슬러지를 인발하여 계 외로 배출함으로써 제거된다.

하수 중의 인은 ortho-phosphate(PO_3^-), polyphosphate 및 organic phosphate 등 세 가지 형태로 존재한다. 하수의 무기인 점유율은 70 %정도이며, ortho-P/total-P 비는 발생원 및 인 함유 유기물의 분해 정도에 따라 다르다. Polyphosphate는 산 분해과정에서 phosphate로 쉽게 전환되지만, organic phosphate는 유기물의 전체가 산화, 분해됨으로써 다른 물질로 전환된다.

A/O공법에서 인은 미생물이 혐기성상태에서 방출하고 호기성상태에서 과잉 섭취하는 luxury uptake를 이용하여 제거한다. 미생물은 혐기성조에서 유기물을 섭취하여 글리코젠 및 PHB(polyhydroxybutyrate)형태로 저장한 후 세포에 축적된 폴리인(poly-phosphate)을 가수분해하여 방출한다.

호기성상태에서는 세포에 저장된 기질을 산화·분해할 때 발생하는 에너지를 이용하여 혐기성상태에서 방출된 $\text{PO}_4\text{-P}$ (ortho-phosphate)를 과잉섭취(luxury uptake)하고 폴리인(poly-phosphate)으로 재합성한다. 인은 최종적으로 슬러지 인발을 통하여 계 외로 배출된다.

III. 실험 및 분석방법

A. Pilot 실험장치의 운전방법

Pilot규모의 실험은 현장설치 이전단계의 기술적 검토과정으로서 1년간 연속 가동하면서 공정별 기능이 발휘되고 시스템이 안정적으로 유지되는가를 검토하며 적정 운전조건을 모색하는 단계이다.

실험에 사용한 미생물은 G시 하수종말처리장 농축조에서 반입한 것으로 반송슬러지와 합성폐수를 1:1부피비로 혼합하여 장치에 주입하였다. 유입수는 G시 하수종말처리장의 1차침전지 유출수를 사용하였으며, 미생물이 담체에 부착하고 폐수에 충분히 적응하도록 순응기간을 거쳐 처리수의 수질이 안정적으로 유지될 때부터 자료를 수집하였다.

Table 3에 순응실험에 사용한 합성폐수의 조성을 나타내었다.

Table 3. Compositions of synthetic wastewater

Reagent	Amount (mg/L)
Glucose	190.5
NH ₄ Cl	160.8
KH ₂ PO ₄	26.0
NaHCO ₃	230.0
FeCl ₃	0.325
KCl	5.7
MgSO ₄ ·7H ₂ O	50.0
CaCl ₂ ·2H ₂ O	10.0

Table 4에 pilot plant의 운전조건을 나타내었다. Pilot plant의 유입유량은 52m³/day이고, 슬러지 반송률은 47.5 %이며, ASRT는 12시간이고 F/M비는 0.172 kgBOD/kgMLSS · day이다. 호기성조의 DO농도는 유기물농도에 대응하여 단계적으로 낮게 주입되도록 폭기량을 조절하였으며, 평균 2.4mg/L(1.63mg/L~5.8mg/L)로 유지하였다.

Table 4. Operation conditions of pilot plant

Items	Average	Range
Influent rate(m ³ /day)	52.0	54.7~50.4
Return rate(m ³ /day)	22.3	16.8~33.0
Return ratio (%)	47.5	32.63~63.5
HRT(hr)	6.35	6.0~6.6
SRT(hr)	15.09	49.13~6.83
ASRT(hr)	11.99	39.29~5.43
F/M(kgBOD/kgMLSS·day)	0.172	0.12~0.305

B. 분석 방법

Table 5에 수질분석항목과 방법을 나타내었다.

모든 항목은 수질오염공정시험법 및 Standard Method에 준하여 실험하였다. 즉 BOD는 BOD test(SM 5210B), COD는 Closed reflux method(SM 5220C), NH₃-N는 Automated ion analyzer(Quickchem 8000), NO₂-N, NO₃-N 및 PO₄-P는 Ion chromatography(Dionex-100), SS는 Total suspended solids dried method(SM 2540D), MLSS는 Fixed and volatile solids ignited method(SM 2540E), T-N과 T-P는 Ultraviolet method, 알칼리도는 Titration method(SM 2320B)를 사용하였다.

Table 5. List of analytical methods

Items	Analytical methods
BOD	5-day BOD test(SM 5210B)
COD	Closed Reflux Method(SM 5220C)
SS	Total Suspended Solids Dried at 103~105°C(SM 2540D)
NH ₃ -N	Automated Ion Analyzer(Quickchem 8000)
NO ₂ -N	Ion Chromatography(Dionex-100)
NO ₃ -N	Ion Chromatography(Dionex-100)
PO ₄ -P	Ion Chromatography(Dionex-100)
MLSS	Fixed and Volatile Solids ignited at 550°C(SM 2540E)
T-N	Ultraviolet Method
T-P	Ultraviolet Method
Alkalinity	Titration Method(SM 2320B)

IV. 결과 및 고찰

A. 유입수의 수질

Table 6에 유입수의 수질을 나타내었다.

운전기간 동안 유입수의 pH는 6.7~7.5, BOD는 127.0~277.0 mg/L, COD는 48.0~142.0 mg/L, SS는 78.0~348.8 mg/L이었다. 또한 TKN은 16.85~50.15 mg/L, NH₃-N은 14.13~42.78 mg/L, NO₃-N은 0~1.51 mg/L, PO₄-P는 8.27~.20mg/L)이었으며, T-N과 T-P는 각각 16.96~52.06 mg/L와 3.71~10.95 mg/L이었다. 알칼리도는 140.6mg/L~214mg/L이고, SBOD/TBOD비율은 39.55 %이며, BOD/T-N비는 4.68~7.63, BOD/T-P비는 19.1~48.87이었다.

Table 6. Properties of wastewater

Items	Concentration of wastewater		
	High	Low	Average
pH	7.5	6.7	7.1
TBOD (mg/L)	277.0	127.0	160.9
SBOD (mg/L)	84.1	47.9	63.6
COD (mg/L)	142.0	48.0	79.6
SS (mg/L)	348.8	78.0	155.4
T-N (mg/L)	52.06	16.96	28.22
TKN (mg/L)	50.15	16.85	27.91
NH ₃ -N (mg/L)	42.78	14.13	24.21
NO ₂ -N (mg/L)	0.54	0	0.04
NO ₃ -N (mg/L)	1.51	0	0.27
T-P (mg/L)	10.95	3.71	6.13
PO ₄ -P (mg/L)	8.27	3.20	4.89
Alkalinity	140.6	214	176.8

B. MLSS 및 MLVSS 농도

Fig. 6에 반응초기 2개월 동안의 반응조별 MLSS 및 MLVSS농도를 나타내었다. MLSS농도는 혐기성조는 2,360~5,540 mg/L, 호기성조 I 은 2,430~4,580 mg/L, 호기성조 II는 2,240~4,360 mg/L이고, 호기성조 III는 2,120~4,200 mg/L 유지되었다.

호기성조의 MLVSS농도는 대략 2000~3000 mg/L로 유지되었고 MLSS/MLVSS비는 62.71~88.31 %이었으며, MLSS와 MLVSS의 농도차이는 평균 790 mg/L정도로 나타났다.

운전기간 동안 미생물상의 큰 변화는 없었으며, 혐기성조의 경우에도 64.6~85.4 %로 유사한 MLVSS/MLSS비를 나타내었다. MLVSS/MLSS비는 정밀하지는 않지만 슬러지의 활성정도를 나타내는 지표로 사용된다. 운전기간 동안 슬러지 활성도는 큰 변동이 없었다.

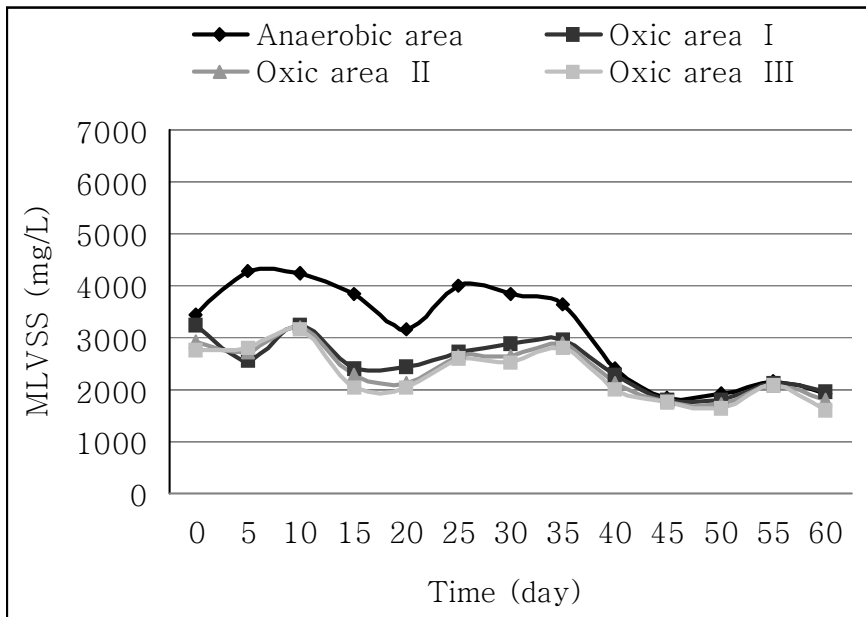
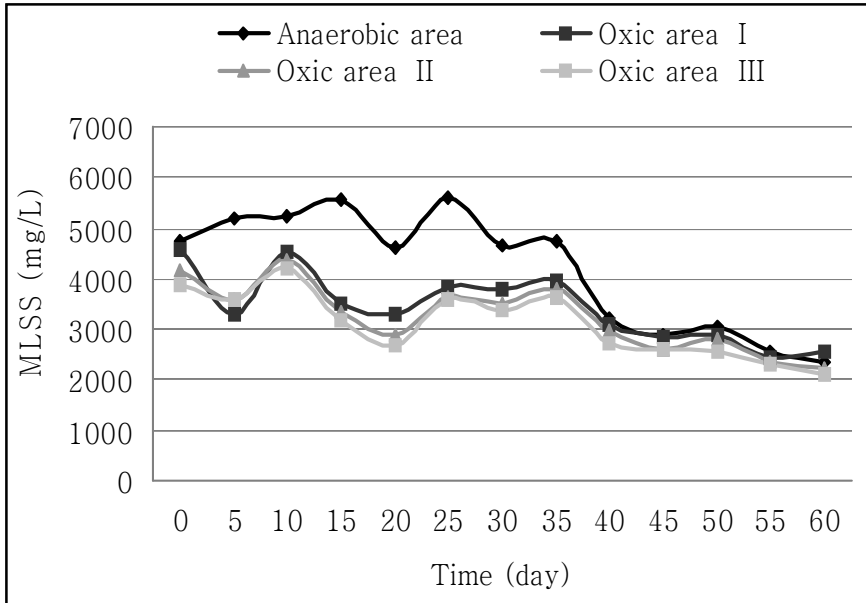


Fig. 6. MLSS and MLVSS concentration according to process using municipal wastewater.

C. 유기물 제거

Fig. 7에 유입수 및 유출수의 BOD와 COD농도를 나타내었다.

운전기간 동안 유입수의 BOD는 140~180 mg/L이고, SBOD는 51.9~64.1 mg/L로서 유입수의 BOD의 변화폭에 비해 상대적으로 안정된 값을 나타내었다. 유출수의 BOD는 9.67~9.61 mg/L이고 제거율은 85.9~94.6 %이었다.

유입수의 COD_{Mn}농도는 48.4~142 mg/L, 유출수의 농도는 6.08~24.4 mg/L로서 평균 제거율은 약 85.5(87.4~83.4) %이었다.

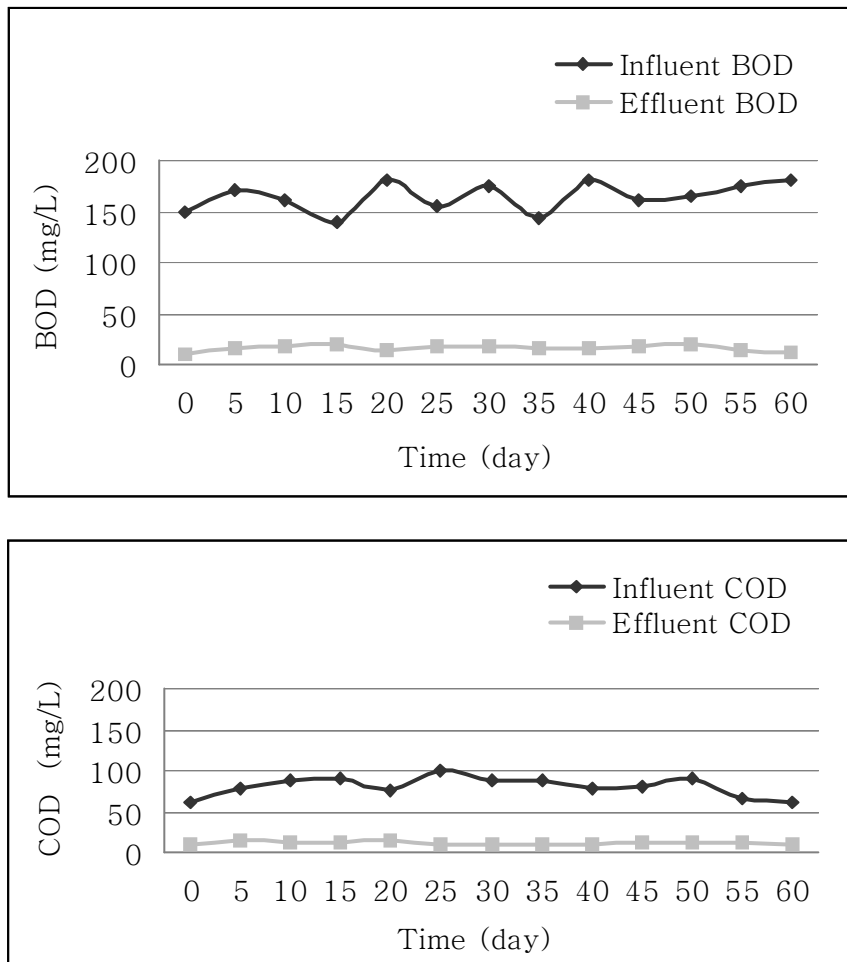


Fig. 7. Variation of BOD and COD concentration in influent and effluent using municipal wastewater.

D. SS 제거

Fig. 8에 유입수 및 유출수의 SS농도를 나타내었다. 운전기간 동안 유입수의 SS는 135.2~178.28 mg/L이고, 유출수의 SS는 10~16 mg/L로서 평균 제거율은 92.0(92.0%~94.03%) %이었다.

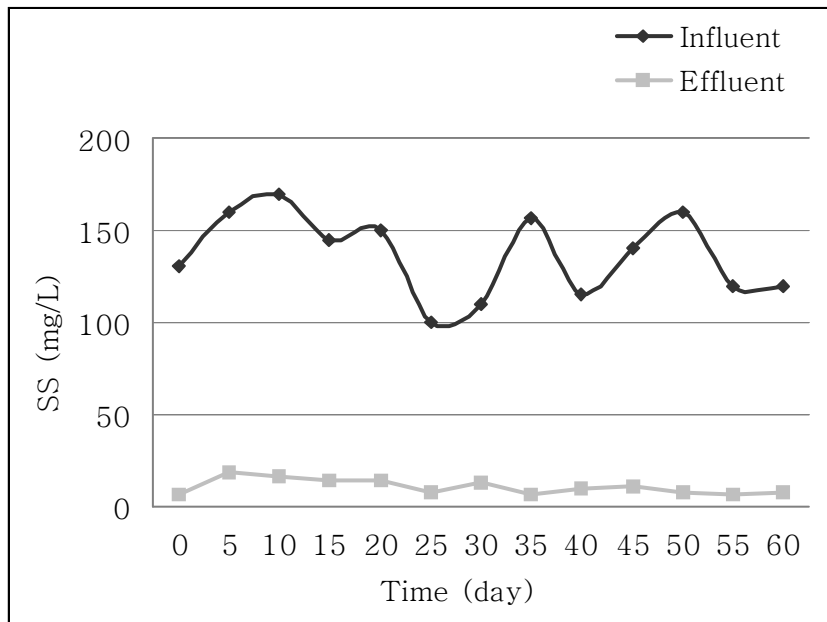


Fig. 8. Variation of SS concentration in influent and effluent using municipal wastewater.

E. 질소 제거

질산화는 독성물질, SRT, DO, 온도 및 pH 등의 영향을 받는다. 질산화의 최적 온도는 30~35℃ 정도이며, 10~30℃ 범위에서 질산화 미생물의 성장률은 10℃ 상승할 때마다 2배씩 증가하며, 수온이 5℃ 이하이거나 45℃ 이상일 경우에는 질산화가 거의 일어나지 않는다고 보고되고 있다⁹⁾. Fig. 9에 유입수 및 유출수의 T-N 농도를 나타내었다. 유입수의 T-N은 24.96~37.06 mg/L이고, 유출수의 T-N 농도는 9.28~14.68 mg/L로서 제거율은 60.71 % (61.0%~60.4%)이었다.

2차 운전은 겨울에 실시되었는데 유입수 및 유출수의 T-N 농도는 각각 20.45~38.8 mg/L 및 12.4~15.6 mg/L, T-N 평균 제거율은 49.8 % (39.6~60.2 %)로서 1차 운전기간보다 약간 낮게 나타났다. 이는 수온 저하에 따른 미생물 활성도와 MLSS 농도의 감소에 기인한다고 사료된다.

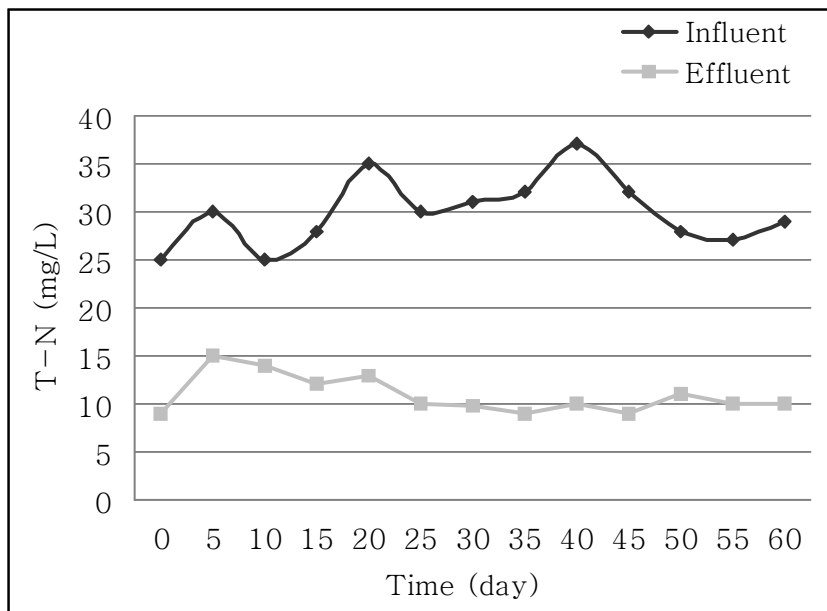


Fig. 9. Variation of T-N concentration in influent and effluent.

TKN의 감소량은 혐기성조에서 1.58~7.73 mgN/L. 호기성조 I에서 5.08~29.11 mg/L으로서 호기성조 I에서 약 40 %정도가 질산화 및 동화에 이용되는 것으로 나타났다. 호기성조 II의 제거량은 1.125~9.693 mg/L, 호기성조 III의 제거량은 0.806~4.165 mg/L로 나타났다.

TKN의 공정별 평균 제거율은 혐기성조는 16.7 %, 호기성조 I은 39.5 %, 호기성조 II는 13.5 %, 호기성조 III는 8.2 %이었고, 유출수의 TKN농도는 1.57~11.202 mgN/L로서 평균 제거율은 78.82 %이었다.

호기성조 I, II, III의 질산화율은 각각 46.5, 33.4 및 28.72 %이고, 비질산화속도는 각각 44.57, 49.31 및 14.94 mgN/gMLVSS · day이었다. 질산화율은 호기성조 I이 호기성조 II보다 높게 나타났는데 이는 용량이 3배 정도 큰 것과 관련이 있는 것으로 사료되고, 호기성조 II의 비질산화속도가 호기성조 I보다 더 높게 나타난 것은 유기물 농도가 낮아져서 질산화 미생물이 우점화한 것으로 추정된다.

Fig. 10에 공정별 NO_x-N농도(NO₂-N과 NO₃-N농도의 합) 변화를 나타내었다. 호기성조 I, II, III의 NO_x-N평균농도는 각각 3.66, 4.81 및 6.23 mg/L로서 호기성조 I에서 III으로 갈수록 증가하였다.

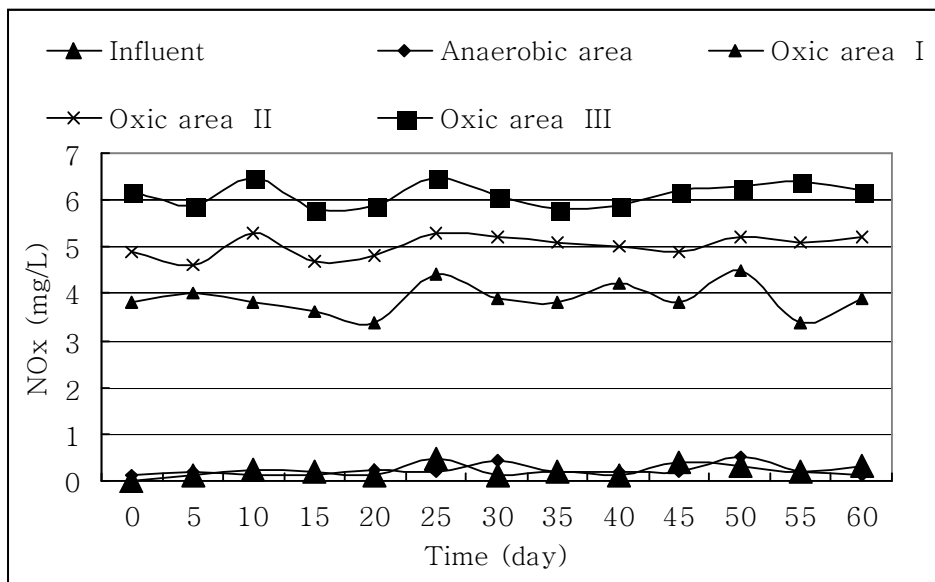


Fig. 10. Variation of NO_x-N concentration according to process using municipal wastewater.

이와 같이 호기성조 I에서 III으로 갈수록 $\text{NO}_x\text{-N}$ 농도가 증가하는 것은 유기물 농도가 낮아져서 질산화 미생물이 우점화되어 활성이 증가하고, 반면 호기성조 II에서는 기질이 부족하여 비탈질속도가 감소하며, 호기성조 III은 탈질기능이 거의 없기 때문에 질산화 활성에 비해 탈질이 불완전하게 이루어지기 때문이라고 생각된다.

호기성조 III의 $\text{NO}_x\text{-N}$ 농도는 2.8~12.52 mg/L(평균 6.03 mg/L)로 높게 나타났으나 침전지 및 슬러지 반송계통을 거치면서 0~1.61 mg/L(평균 0.03 mg/L)로 저하되어 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 의한 혐기성조에서의 인 방출 억제현상은 발견되지 않았다.

Fig. 11에 공정별 $\text{NH}_3\text{-N}$ 와 $\text{NO}_x\text{-N}$ 의 평균농도 분포를 나타내었다.

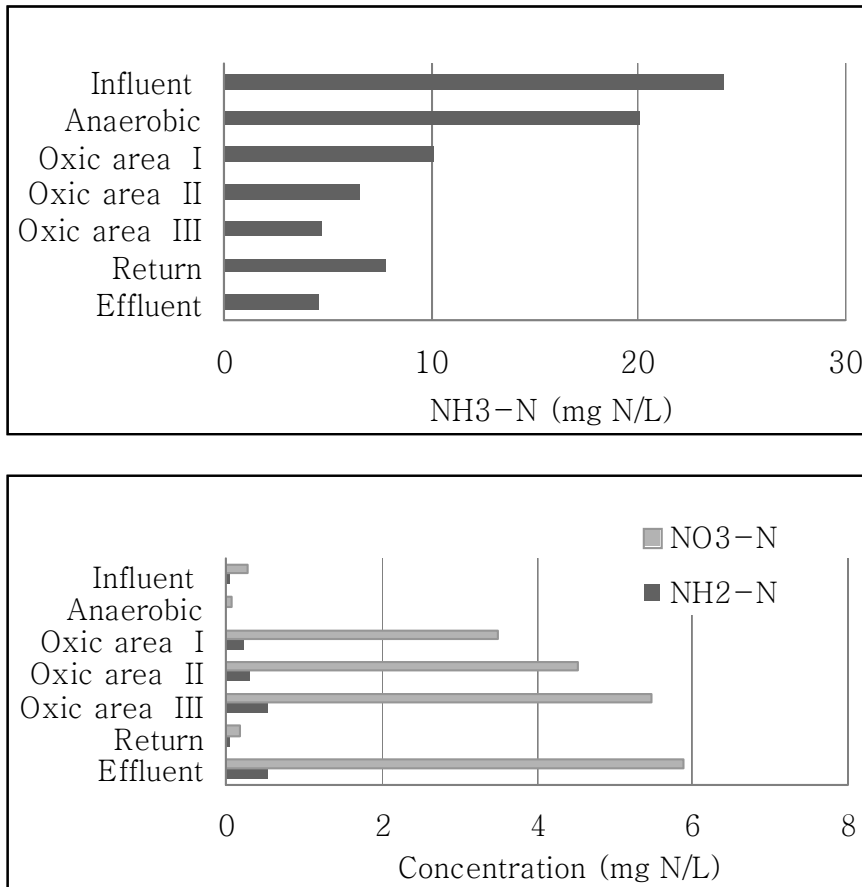


Fig. 11. Variation of $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration according to process using municipal wastewater.

호기성조 I에서는 약 65 %의 질소가 제거되고, $\text{NO}_x\text{-N}$ 농도는 약 3.68mg/L로 증가한다. 호기성조 I에서의 질소제거는 종속영양계 미생물에 의한 동화 및 동시 질산화탈질에 기인하는 것으로 생각되며, 탈질에는 하수 중의 유기물과 내생 호흡에 의해 생성된 2차 기질이 이용된 것으로 추정된다.

호기성조 I과 II의 T-N 제거율은 61.36 %와 35.6 %이고, 비탈질속도는 37.4 mgN/gMLVSS · day와 40.9mgN/gMLVSS · day이었는데, 이와 같이 질소 제거량이 적은 것은 호기성조 II의 용량이 1.82 m³로서 호기성조 I 용량(5.42 m³)의 33.6 %에 불과하고 충전담체도 30.8 %에 불과하여 생물량이 적고, 유기물농도가 감소하여 독립영양계 질산화균이 종속영양계에 비해 우점화하여 질산화량이 증가한 반면 탈질량은 감소하기 때문이다.

호기성조 I, II에서는 질소제거가 확인되었으나 질산화과정에서 생성된 $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 100 %탈질화하지 못하여 수중에 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 누적되는 경향이 나타났다. 호기성조 III의 경우 탈질기능이 없기 때문에 질소 감소량은 평균 0.93mg/L로서 미생물 동화에 의해 일부 제거될 뿐 탈질이 거의 이루어지지 않은 것으로 생각된다. 유입되는 유기물량이 더욱 감소함에 따라 질산화 활성이 활발해져 NO_x 량은 더욱 증가되는 경향을 나타내었다.

슬러지 반송에 의하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 방출을 억제할 것으로 우려되었으나 침전조 및 슬러지 저류조의 무산소 영역에서 탈질이 이루어져 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 매우 낮은 농도로 감소되었다.

Fig. 12에 공정별 알칼리도를 나타내었다. 알칼리도는 질산화가 진행됨에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, 호기성조 III에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 탈질되어 반송슬러지의 알칼리도는 상승하였다.

이론적으로 질산화과정에서는 질소 1 mg당 알칼리도가 7.1 mg이 소비되고, 탈질 과정에서는 질소 1 mg당 알칼리도 3.57 mg이 생성된다. 이러한 이론에 근거하여 호기성조 I에 유지하여야 할 알칼리도를 계산하면, 질산화되는 질소 11.61 mg/L에 대해 알칼리도 82.42 mg/L이 소요되고, 탈질되는 질소 8.05 mg/L에 대해서는 알칼리도 28.74 mg/L이 생성되므로 53.68mg/L이 됨을 알 수 있다. 실제로 호기성조 I에서 소모된 알칼리도는 45.34mg/L이었으며, 그 결과 호기성조에서 동시 질산화-탈질반응에 의하여 알칼리도가 절감되었다.

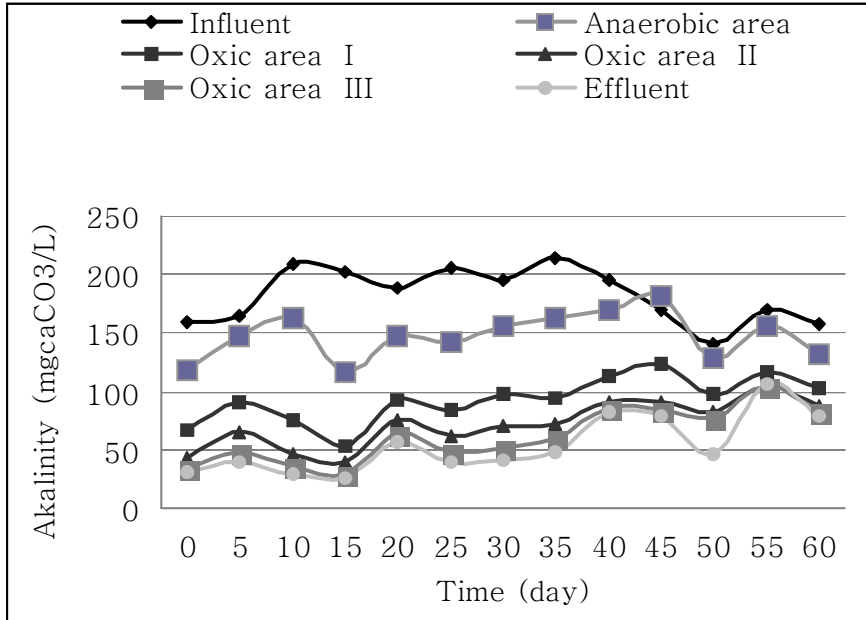


Fig. 12. Variation of alkalinity according to process using municipal wastewater.

Fig. 13에 폐수의 질산화율과 탈질율을 나타내었다.

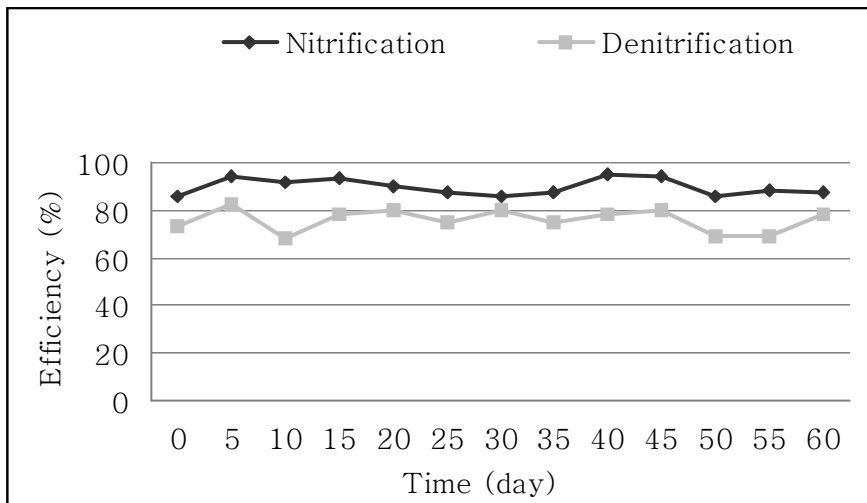


Fig. 13. Variation of nitrification and denitrification efficiency using municipal wastewater.

유입수의 T-N농도는 40.96~52.06 mg/L로 유지되고 질산화율은 86.04~93.5 % (평균 89.29 %), 탈질율은 67.6~82.2 %를 나타내었다. 비질산화속도는 32.8~117.48 mgN/gMLVSS · day이고, 담체의 부착미생물에 의한 비탈질속도는 25.36~135.24 mg N/gMLVSS · day이었다.

비질산화속도는 pilot plant의 생물막에 부착된 *Pseudomonas*의 질산화 활성이 독립영양계에 비해 매우 낮기 때문에 부유성장미생물에 대한 MLVSS만을 고려하여 계산하였고, 비탈질속도는 호기성조의 DO를 평균 2.4 mg/L로 유지하여 탈질이 저산소 혹은 무산소조건이 형성되는 담체에서만 이루어진다고 생각되어 부착미생물량만을 고려하여 구하였다.

일반적으로 비탈질속도는 탄소원에 따라 다른데, 메탄올을 사용할 경우 0.12~0.90 kgN/kgVSS · day이고, 도시하수를 사용할 경우 0.03~0.72 kgN/kgVSS · day이었다고 보고한 결과나¹⁰⁾, Robertson¹¹⁾이 내생탈질이 이루어질 경우 탈질속도는 0.019~0.084 gN/gVSS · day이고, *P.Denitrificans*가 0.5 %미만, 4~38 % 및 23~40 %일 때 N₂생성량이 각각 80, 41 및 9 nmolN/min · mg bio라고 보고한 것과 비교하면, 본 연구의 호기성조 I 과 II의 비탈질속도는 매우 높으며 이 부분에 대해서는 추후 면밀한 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

F. 인 제거

Fig. 14에 유입수 및 유출수의 T-P 및 PO₄-P농도를 나타내었다. 유입수의 T-P농도는 7.1~10.95 mg/L로서 비교적 안정적인 반면, PO₄-P농도는 4.2~8.27 mg/L로서 변동이 컸으나 유출수 PO₄-P농도는 0.83~2.5 mg P/L로서 안정적으로 나타났으며 T-P와 PO₄-P의 평균제거율은 각각 72.8 %와 67.4 %이었다.

Fig. 15에 공정별 PO₄-P농도를 나타내고, Fig. 16에 호기성조 I, II, III에서의 PO₄-P소비율을 나타내었다.

유입수의 PO₄-P농도는 평균 5.1 mg/L이고 반송슬러지의 PO₄-P농도는 평균 8.29 mg/L이었다. 혐기성조에서 인이 방출되어 PO₄-P농도는 평균 19.58 mg/L이었으며, 반송슬러지 중의 PO₄-P를 고려한 평균 방출율은 69.21 mgP/gMLVSS · day이었다.

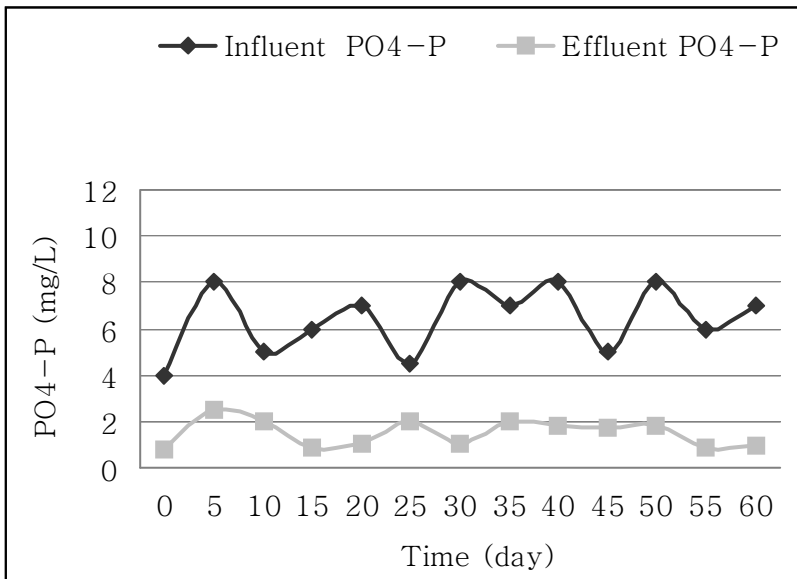
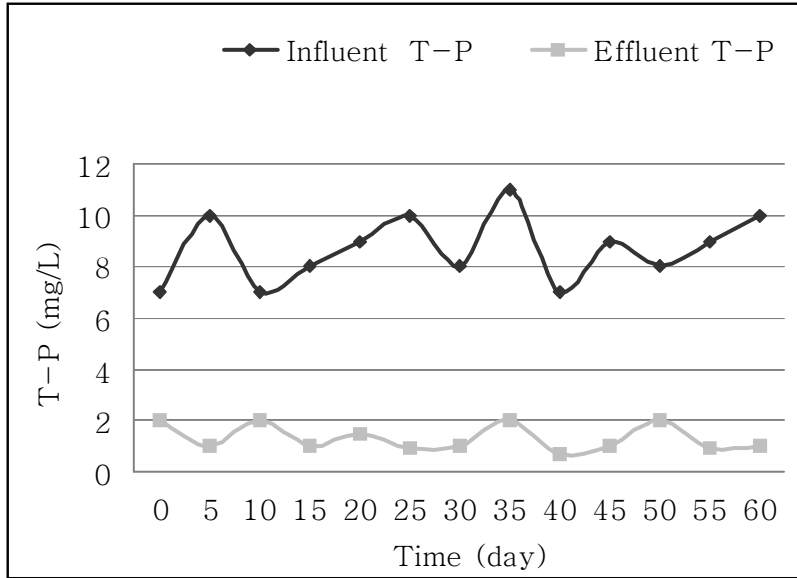


Fig. 14. Variation of T-P and PO₄-P concentration in influent and effluent using municipal wastewater.

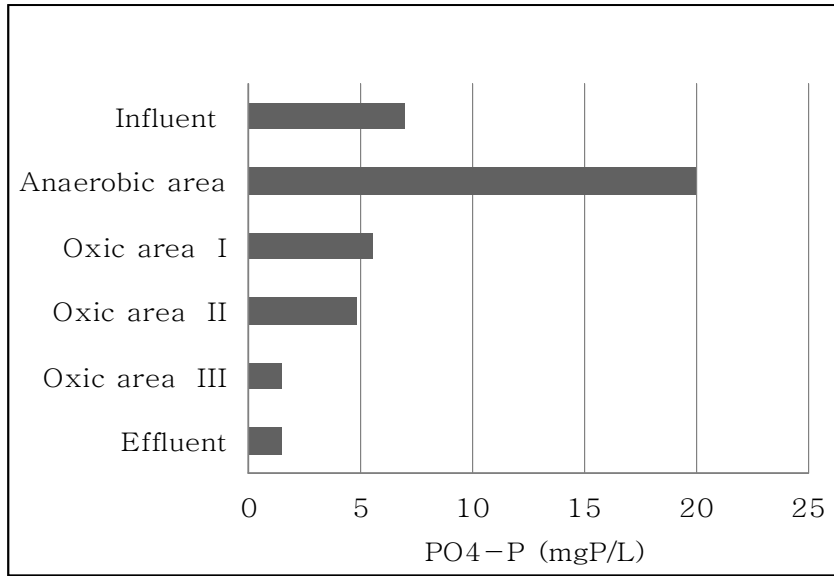


Fig. 15. Variation of PO₄-P concentration according to process using municipal wastewater.

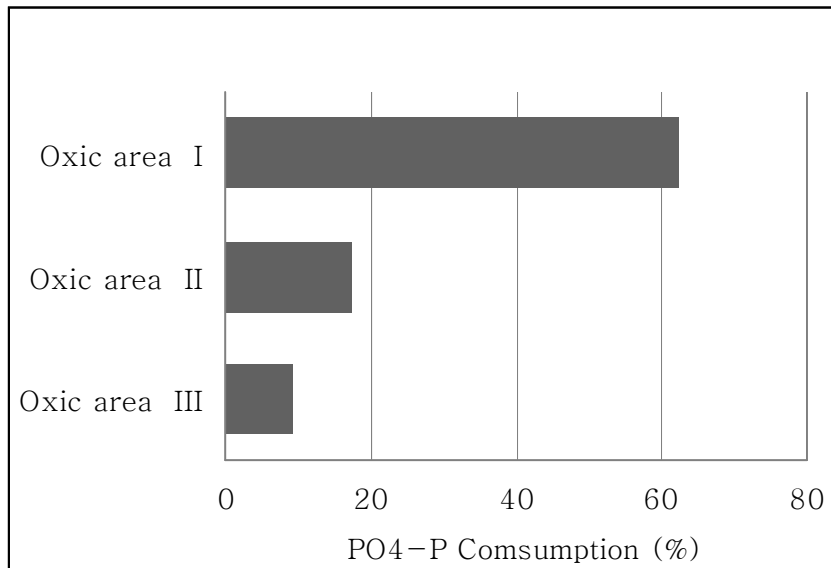


Fig. 16. Variation of PO₄-P consumption in oxidic area I, II and III using municipal wastewater.

호기성조 I, II, III에서 미생물의 인 흡수율은 평균 62.8, 16.9 및 9.2 %, 전체 호기성조의 인 섭취율은 36.42 mgP/gMLVSS · day이었으며, 유출수의 PO₄-P 평균 농도는 1.53 mg/L이었다.

혐기성조에서 인 방출의 영향인자는 NO₃-N농도, 수온, ORP, DO농도, BOD/T-P 비 및 혼합강도 등이다. NO₃-N농도를 10 mg/L이하로 유지하고 수온을 낮추며, ORP는 -450~-150 mV를 유지하는 것이 유리하다¹²⁾. 또 유기물과 미생물이 원활하게 혼합하고 단회로를 방지하기 위해서 일정한 혼합강도를 유지하고, 산소가 녹아들어가지 않도록 와류를 방지해야 한다.

G. 수정A/O-생물막시스템과 A/O시스템 비교

Table 7에 수정A/O-생물막시스템과 A/O시스템의 처리결과를 나타내었다. SS와 BOD제거율은 비슷하고, COD제거율은 수정A/O-생물막시스템이 7.4 % 높게 나타났다. T-N제거율은 수정A/O-생물막시스템이 60.7 %로서 A/O시스템의 36.4 %보다 24.3 % 높으며, T-P제거율은 비슷하였다.

이와 같이 수정A/O-생물막시스템의 T-N제거율이 A/O시스템보다 높은 것은 호기성조 I, II에 질산화 미생물인 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*를 부착시킨 담체를 충전하고 MLSS농도를 높게 유지한 데 기인한다고 판단된다.

본 연구에서 개발한 수정A/O-생물막시스템은 A/O시스템에 비해 운전이 간단하고 경제적이며, 부하변동에 안정적으로 대응하는 N, P 동시 제거기술이라고 판단된다.

Table 7. Comparison of modified A/O biofilm process and A/O process

Items	Modified A/O biofilm process	A/O Process
SS concentration (mg/L)	13.0	12.3
BOD removal efficiency (%)	90.5	89.4
COD removal efficiency (%)	85.5	78.10
T-N removal efficiency (%)	60.7	36.4
T-P removal efficiency (%)	72.7	70.3

V. 결론

기존 A/O공정의 호기성조에 질산화미생물담체를 충전하는 52m³/day 규모의 pilot실험 장치를 제작하고, 약 1년 동안 도시하수를 유입시키면서 유기물, N, P 등의 제거율을 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. BOD 및 COD 제거율은 각각 90.54 %와 85.5 %이고, 유출수의 SS농도는 13.0 mg/L이었다.
2. T-N 제거율은 60.71 %이고, 비질산화속도는 72.14mgN/gMLVSS · day이며, 비탈질속도는 97.5mgN/gMLVSS · day이었다.
3. T-P 및 PO₄-P 제거율은 각각 72.76 %와 66.4 %이었다. 호기성조의 평균 인 섭취율은 32.42 mgP/gMLVSS · day이었으며, 특히 호기성조 I에서 62.8 %가 섭취되었다.
4. 수정A/O-생물막시스템은 A/O시스템에 비해 SS, BOD 및 T-P제거율은 비슷하였으나, COD제거율은 7.4 %, T-N제거율은 24.3 % 높게 나타났다.
5. 질산화 미생물 담체를 전전한 호기성조에서 질산화와 무산소 탈질이 진행되고, 시스템 전체적으로 N, P제거가 동시에 이루어졌다.

참고 문헌

1. 농촌소규모 오수처리 효율적 처리방안에 관한 연구 (1991) 한국과학연구협의회.
2. Metcalf and Eddy (1991) *Wastewater Engineering*. 3rd Edition, pp 35~39.
3. Arora, M. L., F. B. Edwin and B. U. Margaret (1985) Technology evaluation of sequencing batch reactors. *J. W. P. C. F.* **5**: 7~16.
4. Harremoes, P., "Jansen, J. la cour and Kristensen, G. H. (1980) Practical problems related to nitrogen bubble formation in fixed film reactors, *Prog. Water. Tech.*, Vol 12, **6**: pp. 253~269.
5. Kim, C. O., M. S. Park, J. S. Park, S. H. Lee and C. S. Hyun (1998) *Environmental microbiology*. Hyungseul press. Seoul, 326~330.
6. Lee, K. H., J. H. Lee. S. L. Song, and T. J. Park (1997) Characteristics of nitrification from wastewater treatment using a combined fixed film reactor process. *J. K. S. E. E.* **19(12)**: 1509~1522.
7. Yoon, C. H. and H. J. Jim (2001) Decolorization Characteristics of secondary treatment effluent of livestock wastewater by electrochemical process. *Livestock Wastewater Symposium Korea*.
8. Barth, E. F. and H. D. Stensel (1981) International nutrient control technology for municipal effluents. *J. WPCF.* **53**: 1691~1699.
9. Orhon, D. (1994) Assessment of nitrification-dinitrification potential of Istanbul domestic wastewaters. *Wat. Sci. Tech.*, **30**: 21~30.
10. Masuda, S. (1991) Biofilm properties and simultaneous nitrification and denitrification in aerobic rotating biological contactors. *Wat. Sci. Tech.*, **21**: 1355~1363.
11. Robertson, L.A. (1995) Confirmation of 'aerobic denitrification' in batch cultures, using gas chromatography and ^{15}N mass spectrometry, *FEMS Microbiology Ecology*, **18**: 113~120,

12. Takai, T. (1997) Effects of temperature and volatile fatty acids on nitrification-denitrification activity in small-scale anaerobic-aerobic recirculation biofilm process, *Wat. Res.* **35**: 101~108.

감사의 글

계절이 바뀔때면 늘 아쉬움과 그리움이 사무치지만 그래도 양쪽을 느끼는 신비스러움에 경이감을 표하곤 합니다.

2년전 늦각이로 대학원문을 들어설 때가 생각납니다. 다소 낯설기도 하고 힘들기도 했지만 그 모든 것들이 이젠 편안한 기억으로 되돌아 옵니다. 어려서도 그랬지만 성인이 된 지금도 학문이란 문앞에 서면 그 크고 장대함에 늘 왜소해짐을 느낍니다.

이 논문이 완성되기까지 도움을 주신 많은 분들이 생각납니다.

먼저 배려와 격려를 아끼지 않으시고 늘 관심과 사랑으로 돌보아주신 신대윤 교수님께 진심으로 머리 숙여 감사드립니다. 부족한 작은 논문이지만 아낌없는 조언을 해주신 최형일 교수님, 정경훈 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

또한 학위과정동안 많은 가르침을 주신 이성기 교수님, 김시욱 교수님, 이인화 교수님, 전영남 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

준비과정에서 늘 관심을 가져준 대학원실의 문옥란 선생님과 대학원 동기인 진영선군에게도 감사의 마음을 전합니다.

그리고 본 논문 실험을 잘할 수 있도록 도와주신 (주)신우환경건설의 전영길 이사님, 박춘희 부사장님, 이은희 대리, 김성수대리에게도 감사드리며 서류 준비 등에 많은 시간을 할애해준 정옥진 기사에게도 많은 감사를 드립니다.

끝으로 오늘의 제가 있도록 낳아주시고 길러주셨고 늦각이로 학생이 된 제게 등록금을 손에 꼭 쥐어주셨던 저희 부모님과 곁에서 늘 지켜봐주는 큰매형, 큰누나, 셋째매형, 셋째누나에게 이 논문을 드리며, 늘 아낌없는 배려와 헌신적으로 뒷바라지해준 아내 박춘희님에게도 정말 사랑하고 고맙다는 말을 전합니다.

그리고 보는 것만으로도 사랑과 행복을 주는 아들 영환이, 귀여운 딸 수미에게도 진정으로 고맙고 사랑한다는 말을 전합니다.

저작물 이용 허락서

학 과	환경공학과	학 번	20087116	과 정	석사과정
성 명	한글 : 신재형	한문 : 申在炯	영문 : Shin Jae Hyung		
주 소	광주광역시 서구 금호동 805 남양파크 104-503				
연락처	011-605-2062				
논문제목	한글 : 修正A/O-生物膜시스템을 利用한 N, P 同時除去 영문 : Simultaneous Removal of Nitrogen and Phosphorus using Modified A/O-Biofilm process				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(O) 조건부 동의() 반대()

2010년 2월 일

저작자 : 신 재 형 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하