

간략화된 활성슬러지 모델(ASM No. 1)을 이용한 유출수 중 암모니아성 질소의 제어에 관한 연구

김신걸 · 최인수 · 구자용[†]

서울시립대학교 환경공학부

(2007년 3월 5일 접수, 2007년 4월 24일 채택)

Control of NH₄-N in Wastewater Treatment Effluent According to Simplified ASM No. 1

Shin Geol Kim · In Su Choi · Ja Yong Koo[†]

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

ABSTRACT : The control of wastewater treatment has two merits; one is to regulate water quality of effluent and the other is to reduce the cost of wastewater treatment. The purpose of this study was to control the ammonium nitrogen in effluent that is known to cause eutrophication. The control was based on simplified ASM No. 1 which had 3 component materials and 8 coefficients, and the control method was as following. Firstly the ammonium concentration of inflow was measured and the optimal aeration time in effluent was determined according to simplified ASM No. 1 to be 1.0 mg/L. If ammonium concentration of effluent was not equal to 1.0 mg/L, the influent ammonium was corrected by adaptive control. These processes above were repeatedly performed. The SBR running aerobic-anoxic phase had been controlled for 1 month with this method. As a result, the ammonium concentration of the effluent showed in the range of 0.22~3.1 mg/L with an average concentration of 1.1 mg/L. The adaptive control method used in this study was found very useful to control and predict the effluent concentration of ammonium.

Key Words : Ammonium Nitrogen, Control of Wastewater Treatment, Simplified ASM No. 1, Nutrient Removal, Adaptive Control

요약 : 하폐수 처리에 대한 제어는 2가지의 장점을 가지고 있다. 유출수의 수질을 제어할 수 있다는 것과 하폐수 처리 비용의 절감이 그것이다. 본 연구의 목적은 부영양화의 원인물질로 잘 알려져 있는 암모니아성 질소를 제어함을 목적으로 한다. 제어는 간략화된 활성슬러지 모델 1(ASM No. 1)에 기초하고 있으며, 제어 방법은 다음과 같다. 우선, 유입수중 암모늄 농도를 측정하고, 간략화된 활성슬러지 모델 1(ASM No. 1)에 의하여 유출수 암모늄 농도가 1.0 mg/L가 아닐 경우 유출수의 암모늄 농도가 1.0 mg/L가 되도록 최적의 포기 시간을 산정하고 결정한다. 다음단계에서 유입수의 암모늄 농도를 교정한다. 이 과정은 계속적으로 반복되었다. 이와 같은 방법에 의해 호기-무산소 조건을 반복하는 SBR 반응조가 한달간 제어되었다. 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 유출수의 암모늄 농도는 0.22~3.1 mg/L 범위를 순회하였으며, 유출수 암모늄 농도의 평균값은 1.1 mg/L이었다. 본 연구에서 사용된 Adaptive control 방법은 암모늄의 유출수 농도를 제어하고 예측하는데 매우 효과적이었다.

주제어 : 암모니아성 질소, 폐수처리 제어, ASM No. 1의 간략화, 영양염류 제거, Adaptive Control

1. 서론

산업화가 진전됨에 따라 하천, 호소 등의 방류수역의 오염이 증가하게 되었으며 이에 부영양화의 방지 및 친수공간의 확보, 수자원의 안정적 공급을 위하여 방류수의 수질규제가 강화되고 있다.^{1,2)} 부영양화의 주요 오염물질로는 질소물질을 꼽을 수가 있는데 우리나라에서는 이와 관련하여 T-N(Total nitrogen)의 수질기준이 2008년에는 전국의 하수종말처리장에 대해 20 mg/L로 강화됨에 따라 하수처리공정에 대해서도 이들 기준에 부합하도록 제어되어야 한다.²⁾ 고도처리의 대상이 되는 유입수중의 질소물질은 주로 유기질소와 암모니아성 질소이며 이들은 질산화의 포기공정과 무산소의 탈

질공정 등 두 가지 공정으로 제거된다. 이와 같은 하수의 처리공정에 있어서 최적 제어가 필요한데 이것은 안정된 방류수질을 확보하고 에너지 비용을 경감시키기 위함이다.

이러한 하수처리 공정의 제어를 위한 방법으로는 크게 센서에 의한 방법(Sensor-based control), 모델에 의한 방법(Model-based control), 규칙에 의한 방법(Rule-based control) 등으로 나누어질 수 있다. 센서에 의한 방법은 pH, ORP, DO 등의 센서를 이용하여 실시간으로 제어하는 방법으로서 주로 이들 센서의 신호를 조합하여 "Ammonia valley"와 "Nitrate knee" 등을 찾는 기법이다.³⁾ 이러한 방법은 센서의 경제성, 안정성 등에 좌우되며 센서의 신호에만 의존하는 제어를 피하기 위하여 모델과 결합한 형태의 제어를 실행한 연구사례도 있다.⁴⁾

본 연구에서 이용하고자 하는 제어방법은 모델에 기초한 제어방법으로서 유출수중의 질소물질제어를 목적으로 하고

[†] Corresponding author
E-mail: jykoo@uos.ac.kr
Tel: 02-2210-2624

Fax: 02-2244-2245

있다. 이 방법이 응용된 예로서는 ASM No. 1 모델의 간략화를 통한 방법들이 이용되었다.^{5,6)} 이 방법은 단순히 센서의 신호만에 의지하지 않고 이론적 기반에 기초하기 때문에 안정적인 결과값을 도출할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 이전의 연구에서 제시된 간략화된 ASM No. 1 모델을 기초로 하여 하수 유출수중의 암모니아성 질소 농도를 일정하게 제어하고자 한다. 여기에서 이용된 제어방식은 분단위의 최적 포기시간을 결정하는 방식이며 동시에 모델과 실제 변동과의 오차가 다음 제어에 반영되도록 Adaptive control을 도입하였다.

2. 연구범위 및 내용

본 연구는 간략화 모델에 기반하여 하수처리공정을 제어하여 유출수중의 암모니아성 질소 농도를 제어하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 SBR 반응조를 약 7개월간 운영하였다. 따라서 본 연구에서는 우선 이 7개월간의 운영자료에 대해서 고찰한다. 그리고 이후 약 1개월동안 간략화된 ASM No. 1 모델을 이용하여 하수중의 암모니아성 질소 유출수 농도를 제어하였으며 이와 관련된 세부사항은 다음과 같다.

2.1. 하수처리 공정제어

본 연구는 간략화된 ASM No. 1 모델에 기초하여 SBR 반응조의 유출수중 암모니아성 질소 농도를 제어하였다. 목표가 되는 유출수중의 암모니아성 질소 농도는 1.0 mg/L이다. 이 목표값을 달성하기 위하여 Adaptive control이 포함된 최적포기시간으로 제어하였으며 Fig. 1과 같다.

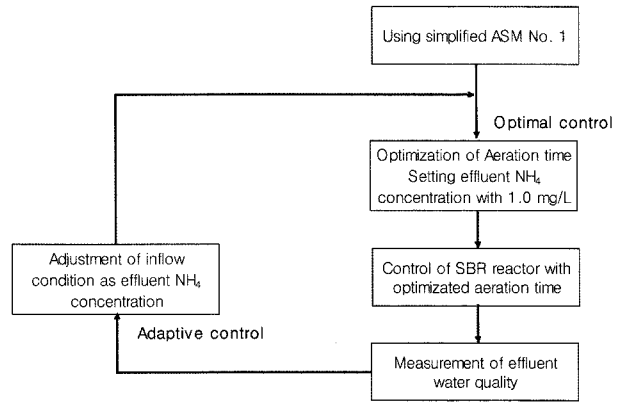


Fig. 1. Optimization scheme for SBR system managing aerobic-anoxic phase.

여기에서 최적 포기시간의 결정은 간략화된 ASM No. 1 모델을 기반으로 하였다. 이것을 예로서 설명하면 다음과 같다. 우선 유입수중의 암모니아성 질소 농도를 측정 한 후에 측정된 값을 모델에 대입하여 원하는 유출수중의 암모니아성 질소 농도가 1.0 mg/L이 되는 포기시간을 산출하여 SBR 반응조를 운영한다.

그리고 반응조의 운전이 끝난 이후에는 유출수에 대해 암모니아성 질소를 분석한다. 분석된 암모니아성 질소 유출수에 대해서 암모니아성 질소의 농도가 1.0 mg/L에 대해서 얼마나 오차를 가지는가를 분석하여 2.1.3절의 Adaptive control을 이용하여 보정값을 결정한다. 그리고 그 다음날 유입수중의 암모니아성 질소 농도를 분석하여 보정한 후에 그 값을 유입수로 하여 다시 모델에 기초한 최적포기제어를 실

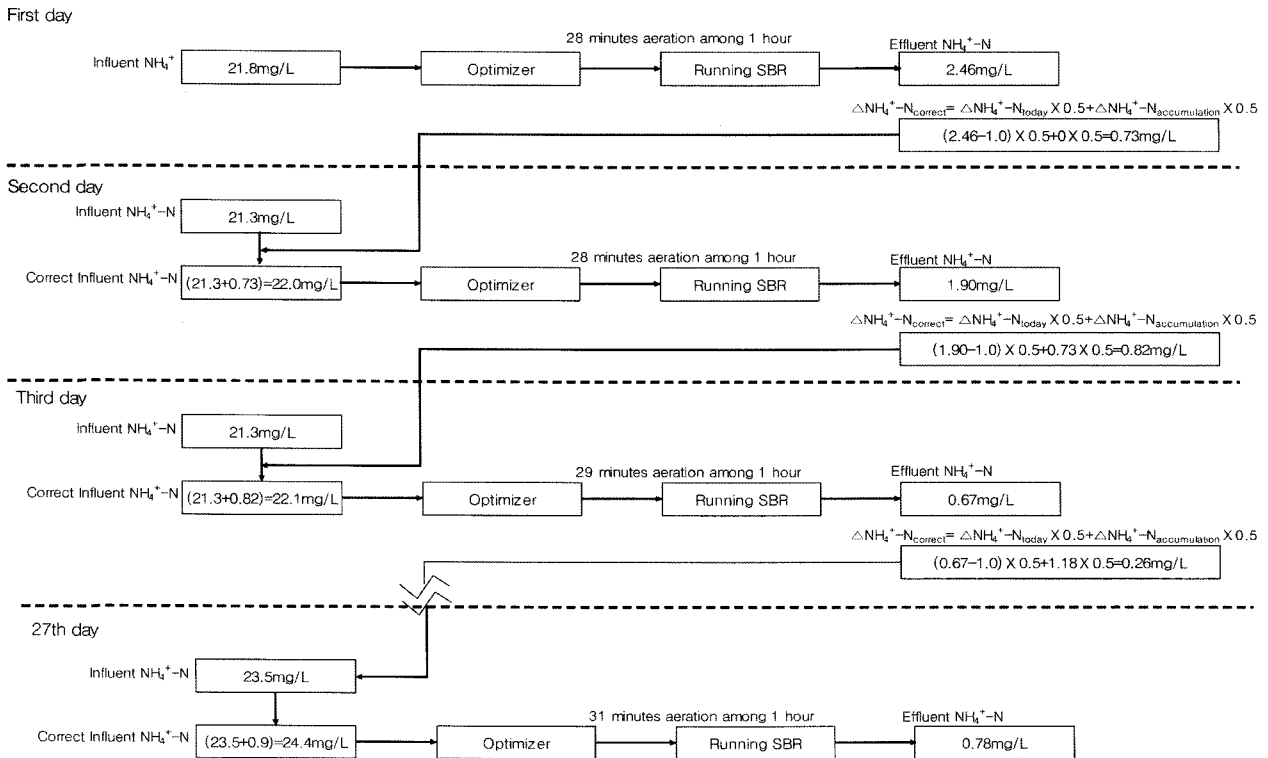


Fig. 2. Adaptive control for regulating effluent NH_4^+-N .

시하며 이것이 반복되며 Fig. 2와 같이 하수처리의 공정제어가 이루어진다.

Fig. 2는 암모늄 유출수의 농도를 조절하기 위한 Adaptive control의 방법을 도식으로 잘 보여주고 있다.

2.1.1. 간략화된 ASM No. 1 모델

간략화 모델은 ASM No. 1 모델의 구성성분을 COD, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N로 줄이고, 이를 호기 및 무산소 조건에 대한 물질변동을 표현한 모델이다. 모델식은 Table 1 및 식 (1)~(6)과 같다. Table 2는 모델식에 사용된 용어들에 대한 설명이다.

이것을 다시 미분식으로 표현하면,

- 호기성 조건(Aerobic condition)

$$\frac{dCOD}{dt} = -C_{1AE} \cdot \rho_H \quad (1)$$

$$\frac{dS_{NH_4}}{dt} = -C_{2AE} \cdot \rho_A \quad (2)$$

$$\frac{dS_{NO_3}}{dt} = C_{3AE} \cdot \rho_H \quad (3)$$

Table 1. Simplified model processes and parameters

	COD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Process rate
Aerobic condition	⊖ C _{1AE}	⊖ C _{2AE}	⊕ C _{3AE}	· Autotrophic reaction(ρ _A): $\left(\frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}}\right) MLSS$
Anoxic condition	⊖ C _{1AX}	⊖ C _{2AX}	⊖ C _{3AX}	· Heterotrophic reaction(ρ _H): $\left(\frac{COD}{K_{COD} + COD}\right) \left(\frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}}\right) MLSS$

Table 2. State variables and parameters used in simplified ASM No. 1

Symbol	Definition and Units
Influent conditions	
COD	Influent total COD, mg COD/L
NH ₄ ⁺ -N	Influent NH ₄ ⁺ -N, mg N/L
NO ₃ ⁻ -N	Influent NO ₃ ⁻ -N, mg N/L
Coefficients	
C _{1AE}	COD decreasing coefficient in aerobic condition, d ⁻¹
C _{2AE}	NH ₄ ⁺ -N decreasing coefficient in aerobic condition, d ⁻¹
C _{3AE}	NO ₃ ⁻ -N increasing coefficient in aerobic condition, d ⁻¹
C _{1AN}	COD decreasing coefficient in anoxic condition, d ⁻¹
C _{2AN}	NH ₄ ⁺ -N decreasing coefficient in anoxic condition, d ⁻¹
C _{3AN}	NO ₃ ⁻ -N decreasing coefficient in anoxic condition, d ⁻¹
Monod Half saturation coefficients	
K _{COD}	COD, mg COD/L
K _{NH4}	NH ₄ ⁺ -N, mg N/L

- 무산소 조건(Anoxic condition)

$$\frac{dCOD}{dt} = -C_{1AX} \cdot \rho_H \quad (4)$$

$$\frac{dS_{NH_4}}{dt} = -C_{2AX} \cdot \rho_A \quad (5)$$

$$\frac{dS_{NO_3}}{dt} = -C_{3AX} \cdot \rho_H \quad (6)$$

Table 2에 사용된 Coefficients 값은 IWA에서 발간한 “Activated sludge models ASM 1, ASM 2, ASM 2d and ASM 3”에서 사용한 Default 값을 기본으로 하였으며, 실제 실험 데이터를 이용하여 보정하였다.

2.1.2. 최적 포기시간의 결정(Optimal control)

본 연구에 쓰인 간략화식은 3개의 미분방정식으로 구성되어 있기 때문에 최적 시간의 결정은 선형계획법(Linear programming)에 기초한 전역해(Global solution)로 구할 수가 없다. 따라서 경사법(Gradient method)이나 유전자 알고리즘(Genetic algorithm) 등의 비선형적인 방법에 의해서 이루어져야 하지만 이 방법들은 국지해(Local solution)를 구하는 방법으로서 최선의 방법이 아니다. 그런데 하수의 최적제어를 위한 대상은 전체 반응시간과 포기시간으로 두 가지라고 할 수 있다. 그러나 이 경우에는 전체 반응시간과 포기시간 두 가지 모두가 변수가 되어 다른 최적화 방법을 도입하여야 한다. 이에 본 연구에서는 전체 공정시간을 고정시켜 두고 해(포기시간)의 범위를 분단위로 제한하여 가능한 해의 범위 내에서 전역해를 구하였다. 이때에 IF문에 제한 값은 유출수 중의 NH₄⁺-N의 농도이며 NH₄⁺-N의 농도가 1.0 mg/L 이하가 될 때의 최소 포기시간을 최적 포기시간으로 결정하였다.

2.1.3. Adaptive control

2.1.2절의 방법은 Open loop에 의한 제어로서 제어결과가 다시 다음 제어를 위한 자료로 사용되고 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 Adaptive control을 이용하여 제어결과가 다시 다음 제어에 응용될 수 있도록 보완하였다. Adaptive control은 제어결과를 참고하여 새로운 환경에 적응하도록 제어하는 방식이다. 본 연구에서 Adaptive control은 두 가지 방식으로 응용될 수 있다. 하나는 유입조건에 유출수의 결과를 반영하는 것이고 다른 하나는 모델의 제한 값에 반영하는 것이다. 이 두 가지의 방법 중에 어떤 것을 선택할 것인가는 모델의 최적해 값이 어떤 방법으로 제어할 때에 더욱 민감하게 반응하는가에 따라 결정하는 것이 좋다. 따라서 본 연구에서는 암모니아성 질소가 포기시간에 따라 선형적으로 감소하는 성격이 있다는 점과 모델의 제한 값으로 하는 경우에 보정값이 1.0 mg/L로 제한되는 점을 고려하여 모델의 제한 유입수의 조건을 바꾸어 주는 방식으로 제어를 하였다. 여기에 식 (7)

과 (8)을 이용하였다.

$$\Delta NH_4^+ - N = NH_4^+ - N_{\text{criterion}} - NH_4^+ - N_{\text{effluent}} \quad (7)$$

$$\Delta NH_4^+ - N_{\text{correct}} = NH_4^+ - N_{\text{today}} \times 0.5 - NH_4^+ - N_{\text{accumulation}} \times 0.5 \quad (8)$$

여기서, $NH_4^+ - N_{\text{criterion}}$: 유출수중 암모늄 이온 목표농도
(= 1.0 mg/L)

$NH_4^+ - N_{\text{effluent}}$: 실제 유출수중 암모늄 이온 농도(mg/L)

$\Delta NH_4^+ - N$: 목표농도와 실제 유출수중 암모늄 이온 농도의 차이(mg/L)

$\Delta NH_4^+ - N_{\text{today}}$: 당일의 암모늄 이온 농도 보정값(mg/L)

$\Delta NH_4^+ - N_{\text{accumulation}}$: 누적된 암모늄 이온 농도 보정값 (mg/L)

$\Delta NH_4^+ - N_{\text{correct}}$: 최종 암모늄 이온 농도 보정값(mg/L)

이것을 구체적으로 예를 들어 설명하면 Fig. 2와 같다. 우선 제어 첫날은 하수처리장의 유입수의 COD, $NH_4^+ - N$, $NO_3^- - N$ 가 입력자료가 된다. 이후 모델에 기초한 분단위의 탐색을 통하여 유출수중의 암모니아성 질소가 1.0 mg/L가 되기 위한 최적 포기시간이 산출된다. 그리고 산출된 시간으로 운영된 반응조의 암모니아성 질소 유출수 농도가 측정된다. 측정된 암모니아성 질소 농도는 1.0 mg/L에서 얼마의 오차를 가지는가가 계산되며 이것은 다시 유입수 조건에 가감되어 반영된다.

이 부분에 대해서 구체적인 예를 들어 설명하면 제어 첫 번째날의 유입 암모니아성 질소의 농도가 21.8 mg/L로 입력 자료가 들어갔을 때에 모델에서 산정한 최적 포기시간은 27분이다. 제어 이틀째의 유입 암모니아성 질소 농도가 21.3 mg/L이고, 유출 암모니아성 질소의 농도가 2.46 mg/L이면, 유입 암모니아성 질소 농도는 $0 \times 0.5 + 2.46 \times 0.5 = 1.26$ 만큼 보정되어 $21.3 + 1.26 = 22.56$ mg/L가 된다. 22.56 mg/L로 들어간 입력값에 의해 제어 이틀째의 포기시간은 28분으로 정해진다. 제어 삼일째에는 유입 암모니아성 질소의 농도가 21.3 mg/L이며, 유출수의 암모니아성 질소 농도가 1.9 mg/L이다. 이때에 유입 암모니아성 질소 농도는 $1.9 \times 0.5 + 2.46 \times 0.5 = 2.18$ mg/L로 보정되고 세 번째 날의 유입수 농도는 $21.3 + 2.18 = 23.48$ mg/L가 된다. 이 유입수에 의한 포기시간은 30분으로 정해지며 이러한 방법으로 매일의 유입수와 유출수를 분석하여 유입수의 값이 보정되어 제어가 이루어진다.

2.2. 실험기기

본 연구에서 사용된 실험기기의 구성은 Fig. 3과 같으며 연속회분식 반응조의 전체 용적은 6 L이며 이중 운전용적은 3 L이다. 반응조의 유입과 유출 펌프, 교반기 등은 모두 타이머에 의해 제어되었다.

2.3. 반응조의 운전

본 연구의 반응조는 2006년 2월부터 8월까지 총 7개월간

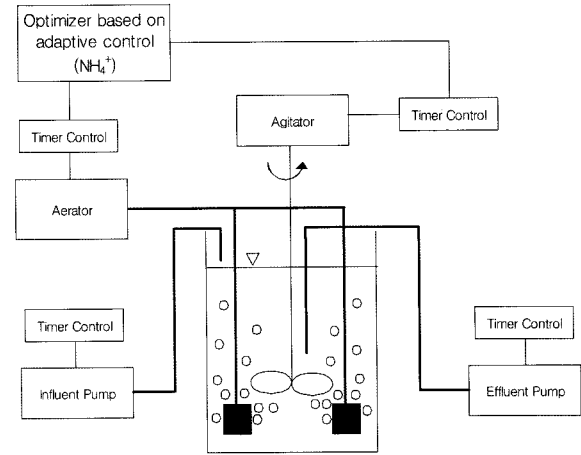


Fig. 3. Schematic diagram of laboratory SBR system.

Table 3. Operational condition of the SBR system(unit: minute)

	Phase I	Phase II
Aerobic time	12	20
Anoxic time	18	10
Total reaction time	240	240
Inflow time(times)	40	40
Settling time	40	40
Effluent time	40	40
Total cycle time	360	360

Phase I, II, 단계주입법 등 세 가지로 운영되었다. 그런데 단계주입법은 반응조의 운전중 별킹(Bulking)현상이 발생하였기 때문에 결과에서 다루지 않는다. 따라서 그중 Phase I과 II의 운영결과만을 다루며 Table 3과 같다.

Phase I은 호기 12분, 무산소 18분의 한 사이클이 8번 반복되었으며, Phase II는 호기 20분, 무산소 10분의 한 사이클이 8번 반복되었다. 이 두 운전모드는 모두 유입, 침전, 유출 등 각각 40분으로 한 사이클 총 시간은 6시간이다. 한 사이클이 하루 4번 반복되며, 6시간 중 4시간이 반응시간이었으며, 2시간은 입수, 침전, 퇴수 등으로 각각 40분씩 이루어졌다.

3. 연구결과

3.1. SBR 반응조의 운전결과

본 SBR 실험의 첫 번째 목적은 간략화 모델을 적용하기 위해 포기시간이 다른 두 가지의 모드로 약 7개월간 운전하였으며 단계주입법(Step feeding)으로 운전하여 공법을 비교하려 하였다. 그러나 단계주입법으로 운전시 별킹이 발생하여 미생물을 새로 식종하였으며, 식종 후 1개월이 지나 데이터 값을 분석한 결과 반응조의 미생물이 안정되었다고 판단하였다. 그리고 미생물과 관련한 파라미터를 다시 정해주기 위해 트랙 스테디(Track study)를 실시하였다. 여기에서는 두 가지의 운전모드 Phase I과 II의 결과를 고찰한다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 COD와 질소 화합물에 대한 농도 변화 그래프이다.

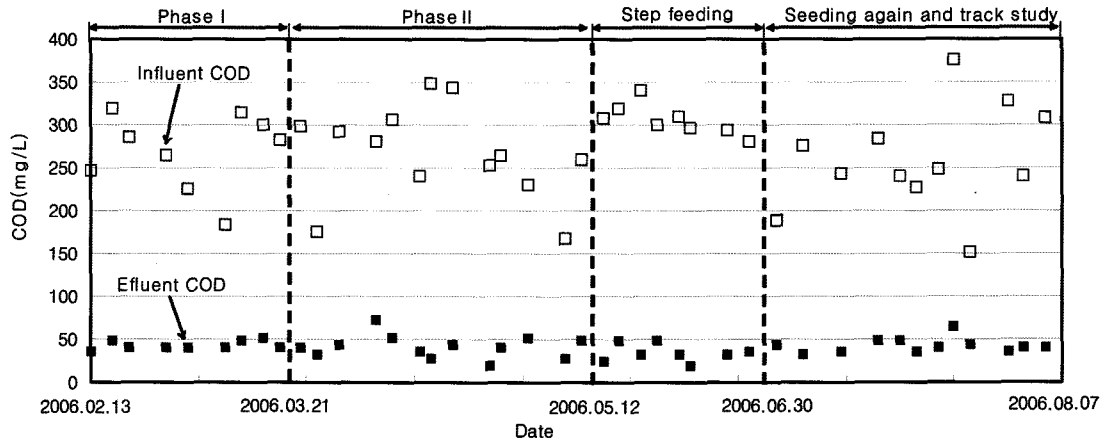


Fig. 4. Overall COD performance of the SBR running aerobic-anoxic phase.

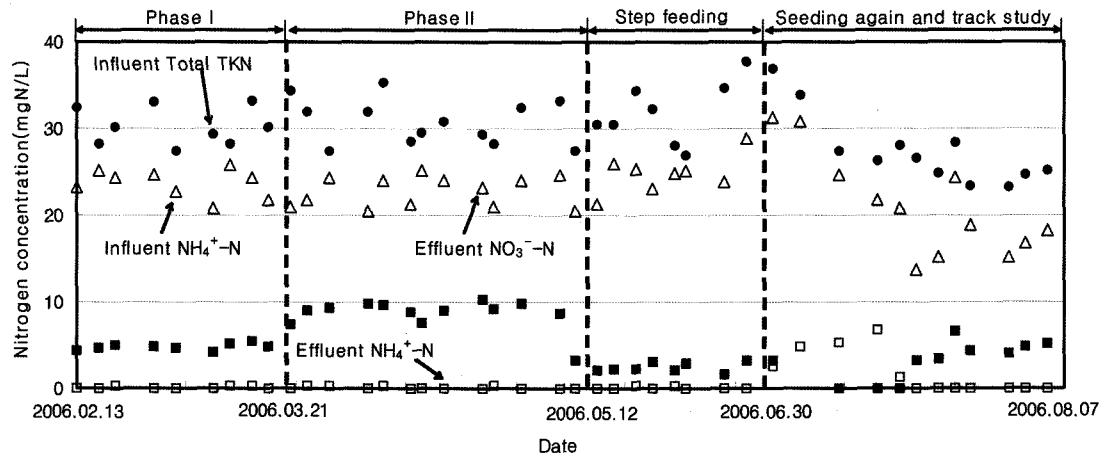


Fig. 5. Overall performance of the SBR system in nitrogen material.

Table 4. Overall performance of SBR system

Wastewater characteristics	Phase I			Phase II		
	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)
Total COD	269	43	84.0	266	41	84.5
Particulate COD	103	-	-	122	-	-
Soluble COD	166	-	-	144	-	-
T-N	30.2	7.4	75.5	30.8	9.9	67.8
Organic N	6.6	2.5	-	8.1	1.2	-
Particulate N	4.7	-	-	5.3	-	-
Soluble N	1.9	-	-	2.8	-	-
NH ₄ ⁺ -N	23.7	0.1	-	22.7	0.1	-
NO ₃ ⁻ -N	-	4.8	-	-	8.6	-

Table 4는 Fig. 4와 5의 결과를 요약한 것으로 보는 바와 같이 Phase I과 II에서 전체 COD의 제거율은 84.0%와 84.5%로서 거의 차이가 없었다. 총질소(T-N)의 경우에는 제거율이 각각 75.5%와 67.8%로서 일본의 고도처리 시설 설계 매뉴얼에서 제시한 70~90%의 제거율 범위와 비슷한 결과를 보여주었다. 그러나 포기시간이 더 긴 Phase II에서 총 질소의 제

거율이 더 작다는 것을 보여주고 있다. 이것은 탈질이 충분한 시간을 가지고 일어나지 않고 암모니아성 질소가 질산성 질소로 과도하게 전환되어 발생한 현상으로 Phase II는 과도한 포기를 하고 있다는 것을 반증한 결과로 판단된다. 또한 T-N의 제거효율이 높은 직접적인 이유는 유출수의 질산성 질소가 Phase II에서는 8.6 mg/L로서 Phase I의 4.8 mg/L보다 높았기 때문이다. 그리고 본 연구에서는 반응조 등 단계주입법으로 운영하여 그 결과를 다른 공법과 비교하려 하였지만 운영한지 2주만에 SVI가 200 이상으로 증가하여 별킹이 일어났다. 별킹의 주요한 인자인 C/N비는 본 연구에서 약 12:1로서 충분한 값이 들어갔다.⁸⁾ 별킹을 일으킬 수 있는 원인은 이밖에도 수온, pH, 알칼리도, 독성물질 등 다양하기 때문에 이들에 대한 보다 다양한 연구가 필요하다.

3.2. 반응조의 변수조정

슬러지를 새로 식종한 이후 1개월간 유출수의 NH₄⁺-N와 NO₃⁻-N를 관찰한 결과 반응이 정상화되었다고 판단하여 다시 Phase I과 II에 대한 트랙 스테디를 실시하였다. 트랙 스테디 결과 질산화 및 탈질 속도가 모두 기존 슬러지보다 약하다는 것이 밝혀졌다. 이에 우선 Phase I의 자료를 이용하여 파라미터를 수정하였다. 그런데 수정하는 방법은 두 가지

로 하나는 전체 반응식의 파라미터를 모두 고치는 것이고 다른 하나는 두 미생물의 반응에 모두 포함되어 있는 MLSS의 농도를 수정하는 것이다. 이에 대해 전반적으로 질산화 및 탈질속도가 떨어져 있다는 점과 MLSS의 농도가 전반적으로 낮게 유지되고 있다는 점들을 고려하였다. 이러한 이유로 MLSS의 농도를 수정하는 것으로 하여 MLSS의 농도 값을 변화시켜 최적의 값을 찾았다. 그 결과 최적의 MLSS 값을 1,820 mg/L-MLSS로 하였으며 그 결과는 Fig. 6 및 7과 같다. 암모니아성 질소의 경우에는 Phase I과 II에서 모두 $R^2 = 0.992$ 와 $R^2 = 0.985$ 로 매우 정확하였지만 질산성 질소는 Phase II에서는 $R^2 = 0.870$ 이었지만 Phase I에서는 $R^2 = 0.460$ 으로 낮았다. 질산성 질소는 둘 다 최종 농도에는 근사를 하였지만 중간시간대에서는 그 정확도가 낮았다.

Fig. 6에서 초기 암모니아성 질소의 농도와 전환된 질산성 질소의 농도에 약 4 mg/L의 차이가 나는데, 이는 약 4 mg/L 질산성 질소가 탈질을 통하여 질소가스의 상태로 제거되었기 때문이라 할 수 있다. 여기서 탈질은 무산소 조건에서 뿐만 아니라, 낮은 용존산소 농도 상태(~0.5 ppm)인 호기조건에서도 일어났던 것으로 판단된다. 질산성 질소가 감소하는 것은 호기시간과 관련이 있으며 연속된 호기시간이 길어질수록 DO농도가 상대적으로 고농도로 유지되어 탈질 능력이 떨어지는 것으로 판단된다. 본 연구에서 사이클중 호기시간이 12분인 경우에는 반응 전반부의 호기공정에서 DO의 농도가 0.5 mg/L를 넘지 않았다. 따라서, 본 논문에서의 탈질현상은 무산소 조건에서만 이루어진 것이 아니라 호기 조건(낮은 용존산소 농도)에서도 일어났기 때문에 탈질이 강하게 일어났던 것으로 결론지을 수 있었다.

또한, Fig. 6에서 보는 바와 같이 실험시간 90분까지의 질산성 질소의 실험값과 모델값 사이에 약 2배 정도의 차이가 나타나는데, 이는 간략화 모델중 암모니아성 질소를 제거 대상으로 하였기 때문에 질산성 질소의 정확도에 대해서는 간

과한 측면이 있었기 때문이다. 이러한 오차를 줄이기 위한 해법으로는 2가지를 우선 제시할 수 있다. 첫 번째는 실험을 통하여 탈질능력이 다른 성격을 가지는 용존산소 농도대를 찾아서 그 농도를 중심으로 다른 실험식을 구성하는 것이고 두 번째는 현재의 모델에서 파라미터를 조정하여 포기시간에 따른 변동에 대해 파라미터의 값을 적절히 변환하여 약간의 오차를 감수하면서 고농도와 저농도의 중간부근이 되도록 예측하는 방법을 제시할 수 있을 것이다.

암모니아성 질소의 경우에는 전체적으로 잘 근사되었으며 특히 제어에 있어서 중요한 지점인 암모니아성 질소의 소멸시간을 잘 예측하고 있다. 질산성 질소의 경우에는 Phase I과 II에서 모두 중간 단계에서는 다소 오차가 발생하였지만 최종 질산성 질소의 농도를 양호하게 근사하였다. 그러나 반응조에서의 결과를 관찰하면 중간단계의 오차는 모델에서 예측한 것보다 강한 탈질능력을 오랫동안 가지고 있었다. 이러한 결과는 두 가지 요인으로서 고찰할 수가 있는데 하나는 반응조에 투입된 80~150 mg/L의 저분자 유기물질인 아세테이트가 초기 반응시, 즉 무산소 조건에서 포기조건으로 이행한 후 반응조에 형성되는 낮은 용존산소의 농도조건에서 암모니아성 질소의 산화로부터 생성된 질산성 질소를 탈질 미생물에 의해 강력하게 탈질반응이 일어나게 하기 때문이다. 다른 하나의 요인으로는 실험에 이용된 하수가 실제 하수이었 때문에 실제 하수에 포함되어 있는 서서히 생분해 되는 물질(X_s)이 반응시간동안 지속적으로 가수 분해되어 저분자의 유기물질을 공급시켜 주기 때문에 이러한 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 두 가지의 이유로서 반응시간 중반부까지 모델에서 예측한 것보다 더 강한 탈질력을 가지게 된 원인이라 할 수 있다.

한편 Fig. 7에서는 질산성 질소가 최종적으로 최대 3 mg/L까지 생성되어졌는데, 이는 Fig. 6에서의 최대 10 mg/L에 비해 상당히 낮은 수치이다. 이에 대한 원인은 2가지로 요약

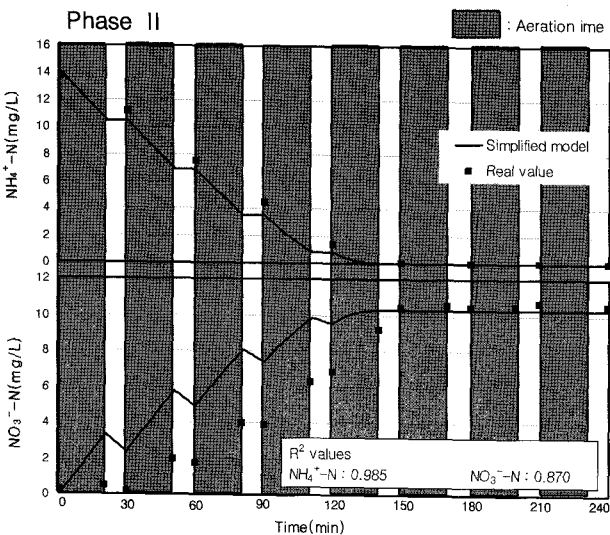


Fig. 6. Comparison simplified model modified parameter with real data in Phase II.

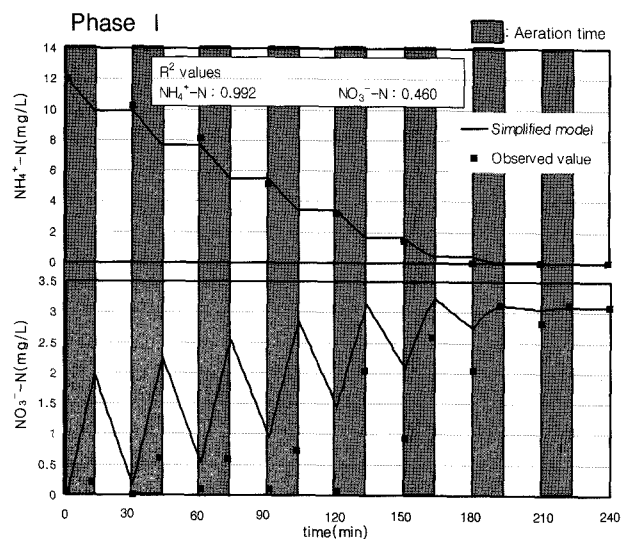


Fig. 7. Comparison simplified model modified parameter with real data in Phase I.

될 수 있다. 첫째, Fig. 7과 6에서 유입 암모니아성 질소 농도가 다르다는 것이다. Fig. 6에서는 14 mg/L이었고, Fig. 7에서는 12 mg/L로 약 2 mg/L의 차이가 있다. 둘째, Fig. 7과 6에서의 호기와 무산소 조건의 시간이 다르다는 것이다. Fig. 7에서는 호기 12분, 무산소 18분인데 비하여 Fig. 6에서는 호기 20분 무산소 10분으로서 호기 조건의 시간이 훨씬 길어 DO농도가 고농도로 유지되어 탈질이 약화되어 나타났기 때문이다. 탈질을 통한 질산성 질소의 감소는 Fig. 6과 7에서 각각 볼 수 있다.

3.2. SBR 반응조의 제어결과

본 연구에서는 앞의 논문에서 제시한 간략화 모델을 바탕으로 유출수중의 암모니아성 질소 농도가 1.0 mg/L가 되는 최소 포기시간을 최적 포기시간으로 하여 반응조를 제어하였다. 이때 반응조의 제어는 전체적으로는 모델에 기초하여 포기시간이 결정되었으며, 피드백 제어를 위해 유출수의 오차를 유입수에 가감하는 Adaptive control로 이루어졌다. 반응조의 제어는 총 27일에 걸쳐 이루어졌으며 이 기간 동안의 반응조에 대한 처리결과는 Table 5와 Fig. 8에 나타나 있다.

다른 연구들을 비교하면 Kim et al.의 연구에서는⁹⁾ 모델의 모노드항을 상수 J로 대체하고 반응을 호기와 무산소로 구분한 ASM No. 1 모델에서는 NH₄⁺-N의 유출수 농도를

1.0 mg/L로 하여 Adaptive control을 한 결과 유출수의 암모니아성 질소 농도를 1.1 mg/L로 제어하여 본 연구와 유사한 결과를 얻었다. 그리고 Vrečko et al.의 연구에서는⁹⁾ 포기장치를 유출수의 암모니아성 질소 농도를 1.0 mg/L로 하여 Feedback-Feed forward로 제어한 유출수의 평균농도가 0.98 mg/L, 범위는 0.1~2.2 mg/L이었으며 Sin et al.의 연구에서는¹⁰⁾ 모델에만 기초하여 목표를 전체 질소물질의 유출수 농도를 최소화하는 제어를 실시하여 암모니아성 질소의 유출수 농도가 평균 1.1 mg/L이었다. 또한 Ingildsen et al.의 연구에서는¹¹⁾ 모델만을 이용한 제어를 실시하여 유출수의 목표 암모니아성 질소 농도를 0.5 mg/L로 제어하여 실제 0.95 mg/L의 결과를 얻었다.

이러한 결과들과 비교하여 보면 유출수의 암모니아성 질소 평균 농도값은 1.0 mg/L-N로서 제어가 성공적으로 이루어졌다는 것을 보여준다. 17~19일의 3일간에 걸쳐서는 고농도 암모니아 유입에 대한 제어를 살펴보기 위해 약 10 mg/L-N의 암모니아성 질소가 첨가되었다. 암모니아성 질소를 첨가한 이유는 일반적인 암모니아성 질소의 범위를 벗어난 충격 부하가 왔을 때 최적제어와 Adaptive control이 어떻게 이루어지는가를 알아보기 위한 것이다.

첫날의 유입 암모니아성 질소 농도는 21.8 mg/L이었으며 포기시간을 28분(실제 포기시간 28분/cycle × 3cycle = 84분)으로 결정하여 반응조를 제어하였으며 유출수의 농도는 2.46 mg/L이었다. 이어 두 번째 날의 유입 암모니아성 질소 농도도 첫날의 농도와 유사하였으며 Adaptive control에서 0.73 mg/L의 보정값을 산출하여 22.0 mg/L가 모델의 입력값이 되었다. 운전결과 유출수중의 암모니아성 질소 농도는 약 1.0 mg/L이었다. 유출수의 암모니아 농도는 세 번째 날부터 안정적인 값을 얻었다. 그 이유는 제어의 방식에 관여되는 인자가 두 가지로서 전날에 제어된 유출수값에 의한 오차와 누적에 의한 오차에 의해서 각각 1/2의 분율을 가지고 제어가 이루어지기 때문이다. 다시말하면 Adaptive control에 의한 보정은 누적값에 의한 보정값과 전일에 발생한 보정값이 모두 합해지는 2일후부터 본격적으로 이루어지기 때문이다.

고농도 하수처리 최적제어를 위하여 17일째에 10 mg/L의 암모니아성 질소를 투여하여 유입수 농도가 31.4 mg/L이었으며 이후 18일과 19일은 유입수의 농도가 각각 31.1 mg/L과 34.2 mg/L이었다. 이에 포기시간은 각각 40, 39, 42분으로 정해졌다. 이에 유출수의 농도는 3일 모두 0.22 mg/L로서 거의 0 mg/L에 가까운 값을 보여주었는데 이것은 고부하에 대하여 최적 포기시간의 결정이 과다하게 책정되었다는 것을 나타낸다. 그 이유는 무산소 조건에서 유기물이 풍부해야 질산성 산소를 소모하는 탈질이 발생하지만 포기시간이 길게 되면 호기조건에서 이미 유기물이 급격히 소비되어, 무산소 조건에서의 탈질은 일찍 종료된다. 따라서 반응후반기에는 무산소 공정에서도 산소가 잔류하여 질산화반응을 일으키기 때문이다. 이후 고부하기가 끝나는 20일의 제어값은 유입수 23.2 mg/L에 대하여 28분을 지정하고 있는데 이때에 유출수의 농도는 3.1 mg/L까지 높아졌지만 Adaptive control에 의

Table 5. Performances of SBR system controlled with simplified model and optimizer

Wastewater characteristics	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)
Total COD	294	47	84
T-N	32.7	8.9	73
Organic N	8.2	2.2	-
NH ₄ ⁺ -N	24.5	1.1	96
NO ₃ ⁻ -N	-	5.7	-

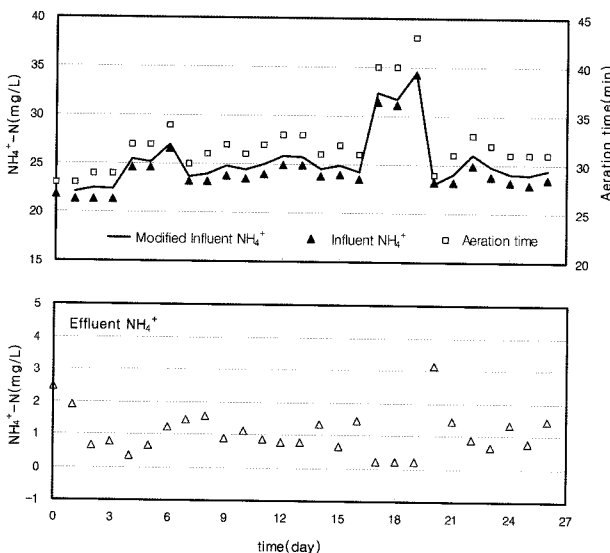


Fig. 8. Results of effluent ammonia control according to optimal and adaptive control.

해 다시 유출수의 농도가 낮아졌다. 이렇게 유출수의 농도가 높아진 이유는 3일간의 과도한 포기시간으로 인해 암모니아성 질소의 누적 보정량과 전날 보정량이 모두 과도하게 낮아졌기 때문이다. 따라서 이러한 과부하시에는 기존의 제어가 만족스럽게 이루어진 구간의 값을 디폴트값으로 하여 변환시키는 등의 조치가 필요할 것으로 판단된다.

전체적으로 암모니아성 질소의 제어는 초기구간과 과부하 변동을 받은 구간을 제외하고는 0.45~1.5 mg/L-N의 유출수 암모니아성 질소 변동을 보여주었으며 고농도의 구간을 반영하면 0.22~3.1 mg/L의 유출수 암모니아성 질소 변동을 보여주었다.

4. 결론

본 연구는 간략화된 ASM No. 1 모델을 이용하여 SBR 반응조의 포기시간을 결정하여 유출수중의 암모니아성 질소 농도를 1.0 mg/L로 제어하는 연구를 하였다. 이를 위해서 우선 간략화 모델식의 파라미터를 결정하기 위하여 SBR 반응조를 Phase I, II로 운전하였으며, 그리고 단계주입법으로 운영하여 효율을 비교하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, SBR 반응조의 포기시간을 각각 12분과 20분으로 달리하여 Phase I과 II로서 운전하였다. 운전결과 COD의 제거율은 84.0%와 84.5%로서 별차이가 없었다. 그런데 T-N의 제거율은 Phase I은 75.5%이었지만, Phase II는 67.8%로 더 낮았다. 그 이유는 Phase I에서의 과다포기에 의한 질산성질소의 증가때문이었다.

둘째, 단계주입법으로 약 1개월간 운전하였지만 벌킹으로 중단되었다. 반응조의 운전을 다시 실시한 후에 Phase I과 II의 트랙터디를 실시하였으며, 전반적으로 탈질, 질산화 성능이 저하된 것을 확인하였다. 이에 간략화 모델에서의 MLSS의 농도를 2,300 mg/L에서 1,820 mg/L로 조정하였다.

셋째, 간략화 모델을 이용하여 제어를 실시하였다. 제어는 순조롭게 이루어졌으며, 17~19일의 3일간에 걸쳐 10 mg/L의 암모늄을 추가하여 고농도에서의 실험이 이루어졌다. 고농도기간에서는 최적 포기시간이 다소 과도하게 산정되어 유출수의 암모늄 농도가 0.22 mg/L로 매우 낮았다.

넷째, 고농도기 이후에는 반대로 포기시간이 과소하게 산정되었다. 그 이유는 고농도기에 유출수의 수질이 낮았기 때문에 유입수의 보정 값이 낮게 책정되었기 때문이다. 따라서 이러한 이상값을 보인 경우에는 제어가 만족스럽게 이루어진 구간의 보정값을 디폴트로 하는 등의 대책이 마련되어야 한다.

다섯째, 제어를 통한 유출수중의 암모니아성 질소 농도는 0.22~3.1 mg/L이었으며, 초기와 고농도기를 제외하면, 0.45~1.5 mg/L이다. 유출수중 암모니아성 질소 농도의 평균은 1.1 mg/L로서 제어에서 정한 1.0 mg/L와 거의 같은 값이다. 따라서 제어가 만족스럽게 이루어진 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2006년도 서울시립대학교 학술연구용 첨단장비 지원에 의하여 이루어진 것임.

참고문헌

1. Wartiovaara, J. and Heinonen, P., "The eutrophication of pulp and paper wastewater recipients," *Water Sci. Technol.*, **24**(3-4), pp. 411~415(1991).
2. 환경부, 환경백서 2005(2005).
3. Poo, K. M., Im, J. H., Jun, B. H., Kim, J. R., Hwang, L. S., Choi, K. S., and Kim, C. W., "Full-cyclic control strategy of SBR for nitrogen removal in strong wastewater using common sensors," *Water Sci. Technol.*, **53**(4-5), pp. 151~160(2006).
4. Yoo, C. K. and Lee, I. B., "Soft sensor and adaptive model-based dissolved oxygen control for biological wastewater treatment process," *Environ. Eng. Sci.*, **21**(3), pp. 331~340(2004).
5. Zhao, H., Hao, O. J., and McAvoy, T. J., "Approaches to modeling nutrient dynamics: ASM2, simplified model and neural nets," *Water Sci. Technol.*, **39**(1), 227~234 (1995).
6. Kim, H., McAvoy, T. J., Anderson, J. S., and Hao, O. J., "Control of an alternating aerobic-anoxic activated sludge system - Part 2: Optimization using a linearized model," *Control Engineering Practice*, **8**, 279~289(2000).
7. Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Van Loosdrecht, M., Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, IWA publishing(2000).
8. Zhu, G. B., Peng, Y. Z., Wu, S. Y., "Influence of C/N ratio on the biological nitrogen removal in step feed process," *China Environmental Science*, **25**(6), 641~645(2005).
9. Vrečko, D., Hvala, N., Stare, A. Stražar, M., Levstek, M., Cerar, P., and Podbevšek, S., "Improvement of ammonia removal in activated sludge process with feed-forward-feedback aeration controllers," *Water Sci. Technol.*, **53**(4-5), 125~132(2006).
10. Sin, G., Villez, K., and Vanrolleghem, P. A., "Application of a model-based optimization methodology for nutrient removing SBRs leads to falsification of the model," *Water Sci. Technol.*, **53**(4-5), 95~103(2006).
11. Ingildsen, P., Rosen, C., Gernaey, K. V., Nielsen, M. K., Guildal, T., and Jacobsen, B. N., "Modelling and control strategy testing of biological and chemical phosphorus removal at Avedøre WWTP," *Water Sci. Technol.*, **53**(4-5), 105~115(2006).