

# ASM No. 2 간략화 모델에 기초한 인산염의 제어 및 인섭취 제한현상에 대한 고찰

김신걸 · 최인수 · 구자용<sup>†</sup>

서울시립대학교 환경공학부

(2007년 4월 18일 접수, 2008년 1월 22일 채택)

## Control of Wastewater Treatment Removing Phosphate Based on ASM No. 2 Simplified Model and Investigation of Luxury Uptake Limitation

Shin Geol Kim · In Su Choi · Ja Yong Koo<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

**ABSTRACT :** Phosphate is the limiting factor leading to the eutrophication in nature and has been usually removed by the luxury uptake of PAOs(Phosphate accumulating organisms). The purpose of this study was the control of wastewater treatment removing phosphorus. The control of wastewater treatment process was performed by optimal and adaptive control. They were performed as followings. Firstly the inflow phosphate concentration was measured and the optimal aeration time was calculated by simplified ASM No. 2 for the phosphate to be 1.0 mg/L in effluent. It was optimal control. But when the phosphate concentration in effluent was not 1.0 mg/L, adaptive control was necessary to coincide the objective of control with real value. Then it was performed as the objective phosphate concentration in effluent was changed according to calculation of errors and it was adaptive control. The wastewater treatment process had been controlled by them for about one month. The range of phosphate concentration in effluent 0.2~3.2 mg/L and the average of it was 1.0 mg/L. The limitation of luxury uptake occurred two times while wastewater treatment process was running. After the analysis of laboratory tests, we knew the reasons were the shortage of ammonia nitrogen and the excessive aeration.

**Key Words :** Adaptive Control, Limitation of Luxury Uptake, Optimal Control, Simplified ASM No. 2

**요약 :** 인은 자연계에서 부영양화 현상을 일으키는 주요한 인자로서 하수중의 인은 주로 인축적 미생물의 과잉섭취에 의해 제거된다. 이 연구의 목적은 인을 처리하는 하수처리공정을 제어하는 것이다. 이를 위해서 본 연구에서는 두가지의 제어방법을 응용하였으며 이 방법은 최적제어(Optimal control)와 적응제어(Adaptive control)이다. 우선 최적제어는 유입수중의 인농도를 측정 한 이후에 간략화된 ASM No. 2 모델을 이용하여 유출수중의 인농도가 1.0 mg/L가 되는 포기시간을 산정하고 이 산정된 포기시간에 따라 반응조를 제어함으로써 이루어진다. 그런데 실제 반응조를 최적제어로 한 경우에도 실제 유출수중의 인농도는 1.0 mg/L가 되지 않는 경우가 발생한다. 이 때에는 적응제어로서 목표로 한 1.0 mg/L를 벗어난 만큼 목표농도를 변화시켜 주며 제어를 실시하였다. 약 한달간의 제어결과 유출수중의 인농도는 0.2~3.2 mg/L이었으며 평균은 1.0 mg/L로서 만족스러웠다. 연구수행중 하수처리공정에서 두 번에 걸쳐 인섭취가 제한되는 현상이 발생하였다. 이에 대한 원인을 규명한 결과 원인은 암모니아의 부족과 과다한 포기가 원인인 것으로 나타났다.

**주제어 :** 간략화된 ASM No. 2, 적응제어, 인 과잉섭취 제한, 최적제어

### 1. 서론

우리나라는 고도성장기 이후에 오염부하량이 급증하였음에도 낮은 하수도 보급률로 인하여 하천 및 호소 등에 대해 오염 및 부영양화 현상에 의해 상수원이 위협받아 왔다. 또한 이후에 하수도 보급률은 증가하였으나 시민의식 수준의 향상으로 최근에는 수변공간에 있어서 보다 쾌적한 공간에 대한 시민사회의 요구가 더욱 높아짐에 따라 하수처리에 있어서도 유기물질뿐만 아니라 인과 질소에 대한 고도처리공정이 도입되어 운용되고 있다. 그런데 하

수처리공정에 대해 고정적인 운전모드로 운용하는 경우에는 유입농도에 따른 하수처리공정의 제어가 이루어지지 않아 하수처리수질을 장담할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 하수처리공정을 제어하여 유출수의 수질을 보장함과 동시에 경제적인 운용을 이루는 것을 목적으로 한다. 이러한 하수처리 공정의 제어는 크게 센서에 의한 제어(Sensor-based control), 모델에 의한 제어(Model-based control), 규칙에 의한 제어(Rule-based control)로 나누어진다. 이중 센서에 의한 제어는 제어가 간단히 이루어진다는 장점을 가지고 있으며 규칙에 의한 제어는 경험에 의존하기 때문에 비교적 정확한 제어를 이룰 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 센서에 의한 제어는 센서에 전적으로 의존한다는 점과 규칙에 의한 제어는 많은 경험이 뒷받침 되

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: jykoo@uos.ac.kr  
Tel: 02-2210-2624

Fax: 02-2244-2245

어야 한다는 점을 고려해야 한다. 이에 대해 모델에 의한 제어는 하수처리 시뮬레이션에 기초한 제어로서 물질의 변동에 기초한 합리적인 모델이기 때문에 안정적인 제어를 이룰 수 있다는 장점을 가진다.<sup>1)</sup>

하수처리를 묘사하는 모델로서 질소와 인을 모두 포함하는 경우에는 ASM No. 2 모델을 기초로 하여 이루어진다. 그러나 이 모델은 17가지의 물질분류와 46개의 파라미터들로 구성되어 있기 때문에 모델의 입력자료를 분석하고 파라미터의 값을 조정하는 등 많은 작업들을 필요로 하고 있다.<sup>2)</sup> 따라서, 많은 연구에서는 ASM No. 2 모델을 간략화시킨 형태로 변환시켜 제어에 응용하고 있다.<sup>3~5)</sup> 본 연구에서도 이전의 연구에서 제안된 모델을 이용하여 하수처리 공정을 제어하였다. 이 간략화 모델을 실증하기 위해 SBR 반응조를 이용한 처리공정은 혐기-호기-무산소의 공정으로 약 7개월간 운영하였으며 그 이후 약 1개월간 이 간략화 모델에 의해 제어되었다.

또한 본 연구에서는 SBR 반응조를 운전하는 동안 호기 공정에서 인섭취가 제한되는 현상이 발생되었다. 인은 일반적으로 혐기에서의 인방출과 호기에서의 인섭취라고 하는 생물학적 인처리공법을 통하여 처리된다. 이때 호기에서의 인섭취시에 인이 완전히 섭취되지 않고 멈추는 현상이 발생되었는데 그 원인으로서는 다른 미생물과의 경쟁, 과다포기, 높은 질산염농도 등이 원인인 것으로 알려져 있다. 이에 대해 본 연구에서는 다양한 조사를 통하여 인섭취 제한현상에 대해 원인을 검증하였다.

## 2. 연구 범위 및 내용

본 연구는 간략화 모델에 기초하여 하수처리공정을 제어하여 유출수중의 인농도를 제한하고자 한다. 이를 위해서 SBR 반응조를 약 7개월간 혐기-호기-무산소의 조건으로 운전하였으며, 그 결과를 정리 고찰하였다. 그 이후 1개월간 모델에 기초하여 SBR 반응조를 제어하였다. 제어 방법은 두 가지가 이용되었는데 하나는 모델에 기초한 최적제어(Optimal control)이며 다른 하나는 제어에 의해 발생한 오차를 반영하는 적응제어(Adaptive control)이었다. 또한 SBR 반응조를 운전하는 중에 나타난 인섭취 제한현상에 대해서도 고찰하였다.

### 2.1. 하수처리 공정제어

본 연구에서는 생물학적인 인처리를 위해 혐기-호기-무산소로 포기시간을 달리한 Phase 1~3의 운영모드로 SBR 반응조를 운전하였다. 공정시간 중 호기시간을 최적화하여 유출수중의 인농도를 제어하기 위해서 간략화 모델을 이용하였으며 결과값이 다시 보정되도록 적응제어를 이용하였다. 전체 제어 흐름도는 Fig. 1과 같다.

#### 2.1.1. 간략화 모델

본 연구에서 사용된 간략화 모델은 ASM No. 2 모델에 대하여 물질분류와 미생물의 정상상태, 반응조건 등을 간

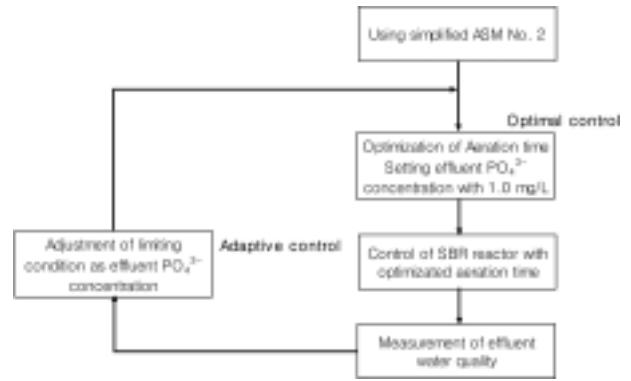


Fig. 1. Optimization scheme for SBR system running Anaerobic-Aerobic-Anoxic condition.

략화하여 성립시킨 모델이다. 물질분류는 유기물질은 COD와 용존성 유기물, 질소물질은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 인 물질은 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 등 5가지의 물질분류를 가진다. 그리고 이들 물질들은 혐기, 호기, 무산소 조건별로 모델화 된다.<sup>6)</sup> 이 간략화된 모형은 이전의 연구를 통하여 제시한 모델이며 실제 ASM No. 2 모델과 비교하였을 때 동등한 물질모사능력을 보여주었다.

#### 2.1.2. 최적 포기시간의 결정

본 연구에서의 최적 포기시간은 유출수중 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 농도가 1.0 mg/L 이하가 되기 위한 최소포기시간이 된다. 이 최적 시간을 결정하는 방법으로는 최적화 기법이 있지만 본 연구에서 간략화된 모델은 비선형 모델이기 때문에 전역해(Global solution)를 얻을 수가 없으며 경사법(Gradient method) 등의 탐색기법을 통하여 국지해(Local solution)밖에 얻을 수가 없다. 이에 본 연구에서는 Heissian 방법을 이용한 Matlab의 Optimizer를 이용하여 최적 해를 찾으려 했지만 정해진 초기값의 부근을 벗어나지 못하고 초기값의 부근에서 국소해로 수렴되는 현상이 발생되었다. 그런데 만일 하수처리 공정제어의 시간단위가 분단위로 이루어진다면 간략화된 모델은 연산시간이 짧기 때문에 분단위로 전체 해 가능영역을 탐색할 수 있다. 이에 본 연구에서는 분단위의 전역 탐색을 통하여 최적 포기시간을 결정하도록 하였다.

#### 2.1.3. Adaptive control(적응제어)

Adaptive control이란 어떤 현상을 제어하고자 할 때에 원하는 목표에 정확히 접근하지 못하였을 때에는 제어의 입력값 혹은 제한조건에 이를 반영하여 다음의 제어에 있어서는 더욱 정확한 제어가 이루어지도록 하는 것이다. 본 연구의 경우에는 목표 값을 유출수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 수질이 1.0 mg/L가 되는 포기시간을 최적의 포기시간으로 하고 있다. 그러나 실제 유출수중의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 값은 1.0 mg/L에서 벗어날 수가 있다. 이 벗어난 값만큼 입력값 혹은 제한값에 보정을 하여 다음 제어에서 정확한 제어를 하도록 Adaptive control이 이루어졌다. 이때에 보정되는 방법은 모델의 입력값 혹은 제한값을 수정하여 이루어진다. 이들 중 어떠한

방법을 선택하는가에 대해서는 보정이 민감하게 이루어지는 것이 좋다.  $PO_4^{3-}$ -P값의 변화는 인의 방출 후 과다섭취를 통해 이루어지기 때문에 초기 입력값 보다는 제한값의 영향을 더 크게 받는다. 따라서 본 연구에서는 제한값을 수정하는 Adaptive control을 이용하였다. 이에 관한 사항은 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$\Delta PO_4^{3-}\text{-P} = PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{criterion}} - PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{effluent}} \quad (1)$$

$$\Delta PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{correct}} = \Delta PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{today}} \times 0.5 - \Delta PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{accumulation}} \times 0.5 \quad (2)$$

여기서,  $PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{criterion}}$  : 유출수중 인산염 제한농도(= 1.0 mg/L)  
 $PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{effluent}}$  : 실제 유출수중 인산염 농도(mg/L)  
 $\Delta PO_4^{3-}\text{-P}$  : 목표농도와 실제 유출수중 암모니아 농도 (mg/L)  
 $\Delta PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{today}}$  : 당일의 인산염 보정값(mg/L)  
 $\Delta PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{accumulation}}$  : 누적된 인산염 보정값(mg/L)  
 $\Delta PO_4^{3-}\text{-P}_{\text{correct}}$  : 최종 인산염 보정값(mg/L)

제어에 대한 구체적인 예는 Fig. 2와 같다. 제어 첫째 날에 유입된  $PO_4^{3-}$ -P의 농도가 6.8 mg/L-P일 때에 간략화된 ASM No. 2 모델에 의한 유출수의  $PO_4^{3-}$ -P농도는 1.0 mg/L 최적 포기시간은 154분으로 결정된다. 그 다음날의 유입수 중의  $PO_4^{3-}$ -P농도는 5.9 mg/L-P이며 유출수는 0.86 mg/L-P

이었다. 따라서, 유출수의 제한농도는 1.0 mg/L-P에서  $1-0.86 = 0.14$  mg/L-P만큼 더 제거가 되었기 때문에  $1+0 \times 0.5+0.14 \times 0.5 = 1.07$  mg/L-P로 제한조건이 바뀌게 된다. 이렇게 해서 둘째 날에 결정된 최적포기시간은 152분이 된다. 세 번째 날의 유입수 농도는 4.5 mg/L이며 유출수의 농도는 0.92 mg/L이다. 이로써, 제한조건은 다시  $1+0.14 \times 0.5+0.08 \times 0.5 = 1.11$  mg/L가 되며 이 제한조건에 따라 포기시간은 149분이 되고, 이와 같이 반복하여 제어를 계속 실시하였다.

### 2.2. 실험기기 및 분석방법

본 연구에서 사용된 실험기기의 구성은 Fig. 3과 같다. 연속회분식 반응조의 전체 용적은 10 L이며 이중 운전용적은 5 L이다. 반응조의 유입과 유출 펌프, 교반기 등은 모두 타이머에 의해 제어되었다.

유입, 유출수질 중 TKN과 암모니아, COD, 알칼리도는 Standard method에 따른 수분석으로 실시하였다. 그리고, TKN과 COD의 부유물질과 입자상물질은 0.45  $\mu\text{m}$ 의 여과지를 사용하여 분리하였다.  $PO_4^{3-}$ ,  $NO_3^-$ 는 Dionex ICS-90 모델을 이용하였으며, 컬럼은 IONN PAC AS 14 4  $\times$  250 mm이다.

### 2.3. 운전조건

SBR 반응조는 Phase 1, 2와 3의 형태로 운전되었으며, Table 1과 같다.

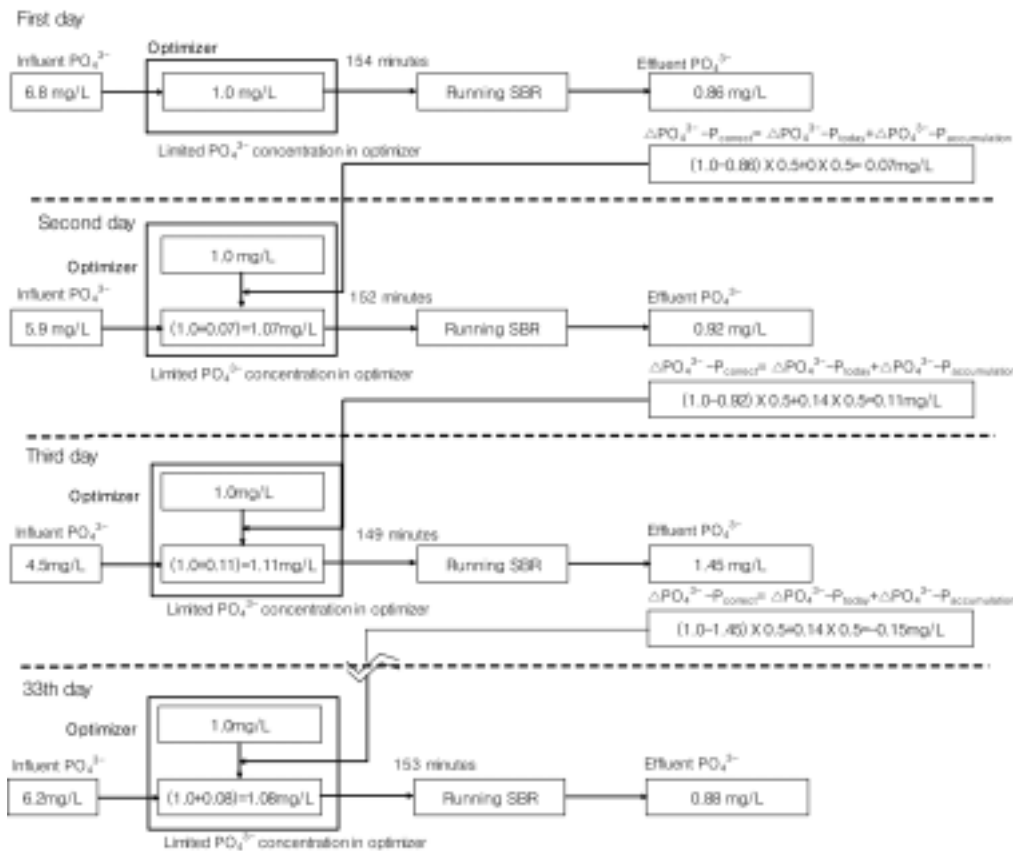


Fig. 2. Adaptive control and optimal control to regulate effluent  $PO_4^{3-}$ -P.

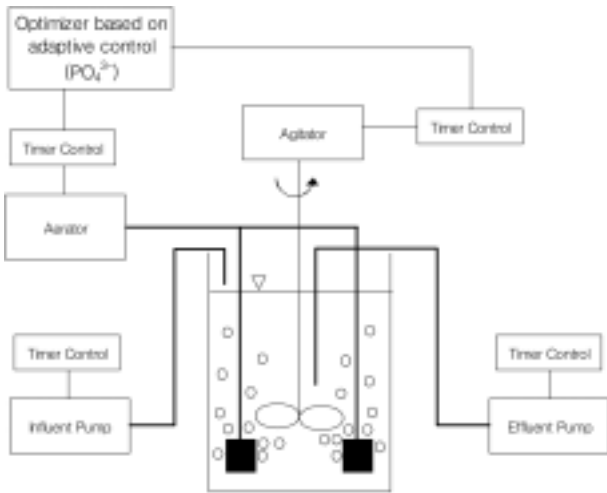


Fig. 3. Schematic diagram of laboratory SBR system.

Phase 1의 경우에 전체 공정이 6시간으로 1일 4번의 사이클로 운영될 수 있는 공정이며, Phase 2와 3은 전체 공정이 8시간으로 1일 3번의 사이클로 운영될 수 있다. 이러한 공정의 운영은 하수 중 유기물과 질소, 인의 처리가 적절한지 또한 인의 섭취가 완전히 일어나기에 충분한 시간인지를 검토하기 위한 것이었다.

Table 1. Operational condition of SBR system

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Total cycle time	360	480	480
Fill	30	30	30
Mix	90	90	150
Aerate	120	180	180
Idle	60	120	60
Settle	30	30	30
Decant	30	30	30
Aeration ratio( $f_a$ )	0.17	0.38	0.38
MCRT(Day)	20	20	20

### 3. 반응조의 운전결과

#### 3.1. 반응조의 운전결과

최적 운전조건을 검토하기 위해서 단위공정 시간을 변경하여 운전하였다. 반응조의 운전결과는 Fig. 4~6과 Table 2와 같다.

COD의 감소량은 Phase 1~3에서 85.9~88.0%이며, T-N의 감소는 71.5~75.6%이었다.  $PO_4^{3-}$ 의 감소량은 Phase 1에서는 81.3%, Phase 2에서는 77.4%, Phase 3에서는 68.8%로서 다소 저조하였다. 그러나 이것은 Phase 2의 경우에

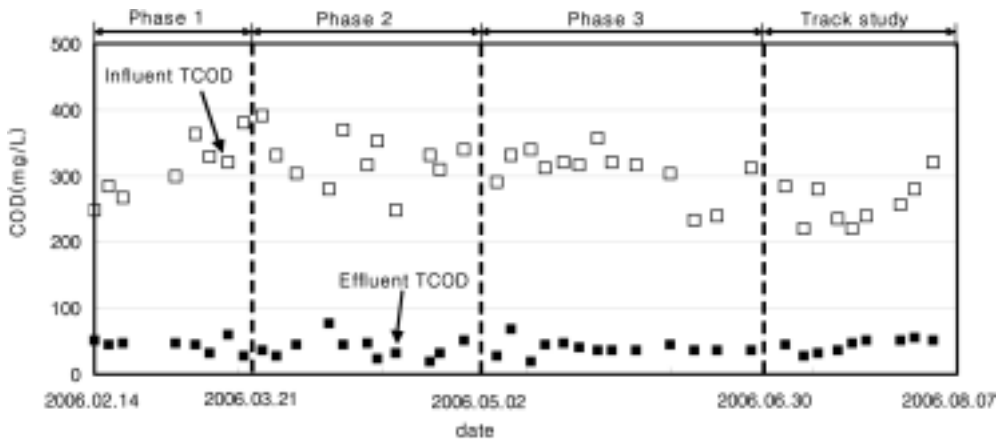


Fig. 4. Overall performance of the SBR system operated by the simplified model and optimizer in COD material.

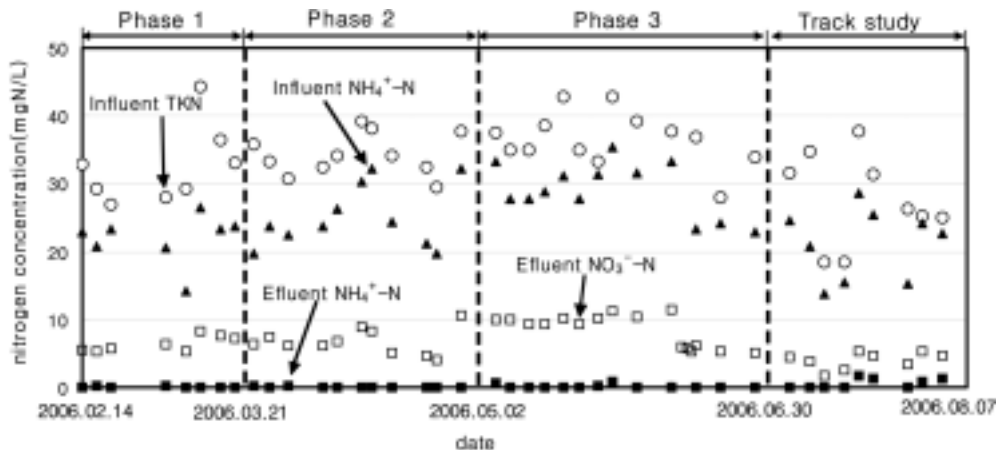


Fig. 5. Overall performance of the SBR system operated by the simplified model and optimizer in Nitrogen material.

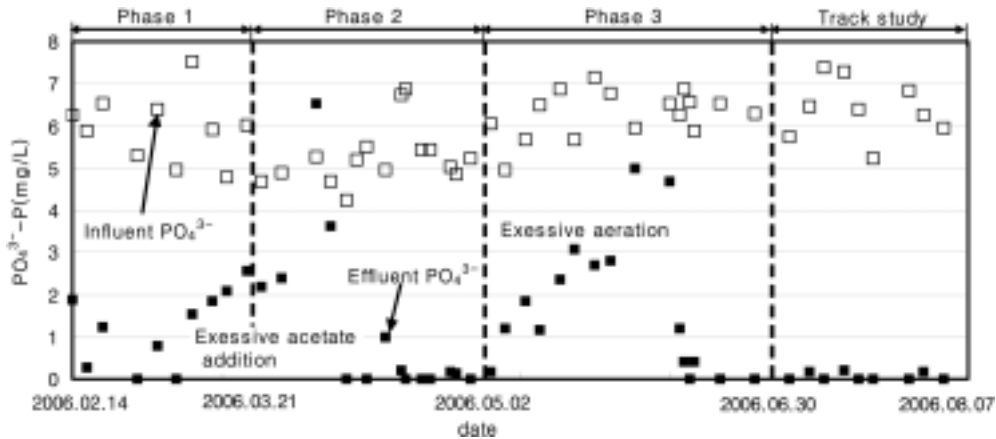


Fig. 6. Overall performance of the SBR system operated by the simplified model and optimizer in phosphate material.

Table 2. Overall Performance of SBR system

	Phase 1			Phase 2			Phase 3		
	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency(%)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency(%)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency(%)
Total COD	311	44	85.9	325	39	88.0	302	39	87.8
Particulate COD	151	-	-	138	-	-	124	-	-
Soluble COD	160	-	-	187	-	-	178	-	-
Total Nitrogen	33.6	8.2	75.6	34.3	9.6	72.0	36.8	10.5	71.5
Organic N	7.7	1.9	-	7.7	1.8	-	8.4	1.8	-
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	21.9	0.1	99.5	26.6	0.1	99.6	28.4	0.1	99.6
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-	6.2	-	-	7.7	-	-	8.6	-
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	5.9	1.1	81.3	5.3	1.2(0.16*)	77.4(97.0)	6.4	2.0(0.13*)	68.8(98.0)

\* is the result except high effluent phosphate of excessive acetate addition and aeration period.

는 암모니아가 보충되고 반응시간이 늘어난 시기에 있어서 유출수의 농도가 0.16 mg/L이었으며, Phase 3의 경우에는 송풍량이 감소한 시기에 0.13 mg/L로서 98.0%의 제거율을 보여주었다. 연구기간동안 반응조에서는 슬러지의 별킹과 인의 과다유출이 발생하였다. 3.2 절에서는 전체 반응조의 운영지표를 파악하여 이들의 문제발생과 해결 및 고찰에 대해 검토한다.

### 3.2. 인섭취의 제한현상 및 고찰

혐기-호기-무산소로 운영되는 SBR 반응조에서 유기물질은 호기공정에서 제거되었으며 질소는 암모니아와 유기질소가 호기공정에서 질산성질소로 변환된 후에 이후 무산소 공정에서 탈질로 제거되었다. 인은 혐기에서 인의 방출과 호기공정에서의 과다섭취에 의하여 제거되었다. 한편 본 연구를 진행함에 있어서 호기공정의 후반부에서 인의 과다 섭취가 제한되어 인의 처리가 제대로 되지 않는 현상이 발견되었다. 이러한 현상은 처음에는 2006년 3월 초순경에 처음 나타났으며 이후 2006년 6월에도 같은 현상이 나타났다. 그 원인에 대해 문헌고찰을 한 결과 GAO(Glycogen accumulating organism)와의 경쟁, 높은 NO<sub>2</sub>에 의한 저해작용, 과다한 포기, 영양원의 부족 등 여러 가지로 가능성에 대해 실험과 고찰을 한 결과 질소원과 송풍량과의

관계에 의한 것임을 알게 되었다.<sup>7~9)</sup>

#### 3.2.1. 첫번째 인섭취 제한현상

본 SBR 반응조는 2005년 11월에 가동을 시작하여 2006년 1월 이후에 유출수를 분석한 결과 질소 및 인을 만족스럽게 제거하는 것으로 나타났다. 반응조의 운전상태가 정상화되었다고 판단되는 2006년 2월 중순부터 본격적인 유출수 분석을 시작하였다. 그런데 2006년 3월 초순부터 인의 유출현상이 나타나기 시작하였다. 3월 초순에 나타난 인의 유출현상은 정도가 약하였고 1.0 mg/L 농도 이하로 나올 때가 많았기 때문에 반응조 및 원수조의 관리가 부실하다고 판단하여 매일 청소를 하였다. 그럼에도 불구하고 3월 중순경부터는 유출수중의 인의 농도가 1.0 mg/L를 넘는 경우가 많았다. 따라서 트랙 스테디를 통하여 인의 거동을 살펴보았다. 인의 거동을 살펴본 결과 Fig. 7에서와 같이 호기공정의 후반부에서 인의 섭취가 제한되는 현상이 관찰되었다.

본 연구에서는 호기공정의 후반부에서 발생하는 인의 섭취가 제한되는 현상에 대해 PAO가 호기공정의 후반부에서 질소 혹은 유기물질의 부족에 따라 활동력이 떨어졌을 것이라고 판단하여 암모니아와 Acetate를 추가하여 각각 트랙 스테디를 하였다. 그러나, 트랙 스테디 결과 질소와 Acetate

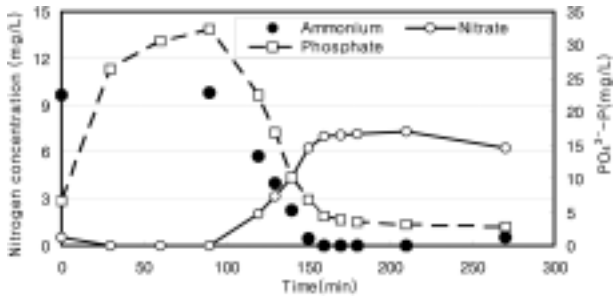


Fig. 7. Phosphate uptake limited in Phase 1.

두 물질 모두에 대해서 반응을 보이지 않았다. 그 이후에 약 2주일간 미생물의 MLSS는 큰 변동이 없었지만 슬러지의 침강성이 계속 악화되어 SVI값이 200을 넘는 별킹 현상이 발생하였다. 이에 별킹은 생물이 영양분을 충분히 섭취하지 못하여 사상성 미생물이 증가하여 발생하였다고 생각하였으며 그 원인으로서는 짧은 반응시간 혹은 질소원의 부족이라고 판단하여 반응조의 운전모드를 변경하여 포기시간과 무산소 시간을 늘려 8시간 주기로 공정을 운영하였다. 또한 별킹 현상을 벗어나기 위해 탄소원인 Acetate의 주입을 200 mg/L까지 높였다. 그러나 Acetate의 주입 이후에도 인의 섭취에 제한이 발생하는 현상은 계속되었고 오히려 유입되는 Acetate의 농도증가에 따른 인의 방출농도가 더욱 높아져 인의 섭취제한에 의한 유출수중의 인의 농도가 더욱 증가하는 부작용도 발생하였다.

이러한 제한현상은 Phase 2에서도 Fig. 8과 같이 계속 나타났다.

이에 Phase 2에서 탄소원과 질소원 중 어느 것이 부족한가를 알기 위해 Acetate를 200 mg/L을 투입한 것과 암모늄 10 mg/L을 투입한 대조군 실험을 재 실시 하였다. 그 결과는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같이 나타났다.

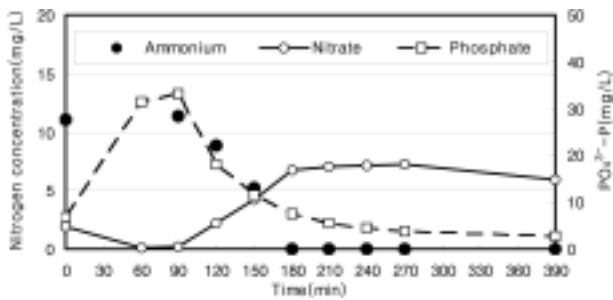


Fig. 8. Phosphate uptake limited in Phase 2.

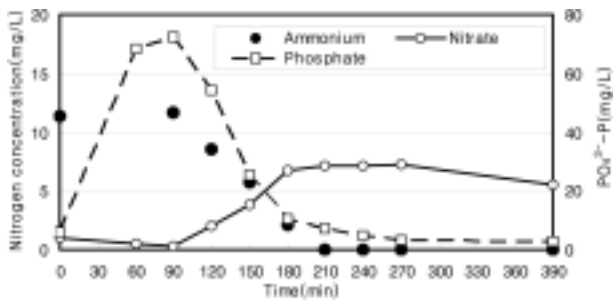


Fig. 9. Phosphate uptake after adding acetate in Phase 2.

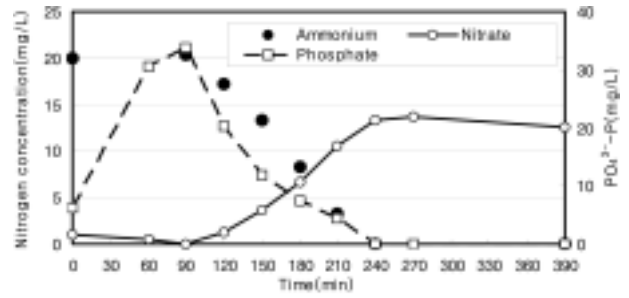


Fig. 10. Phosphate uptake after adding ammonia in Phase 2.

Acetate를 투입하였을 때에는 인의 섭취가 제한되는 현상이 해소되지 않았지만 암모늄을 추가로 투입하였을 때에는 인의 섭취가 정상적으로 이루어졌다. 이러한 현상은 앞의 Fig. 8 및 Fig. 9에서와 같이 암모니아가 소멸된 이후에 인의 흡수가 제한되는 것을 알 수 있다. 따라서 제한현상의 문제점을 파악한 이후에는 암모늄 10 mg/L씩을 원수에 투입하였으며 인의 제한현상은 Fig. 10에서와 같이 해소된 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2.2. 두 번째 인섭취 제한현상의 발생과 해결

원수에 암모늄을 10 mg/L씩 투입한 후, 호기성에서의 인의 섭취 제한현상은 발생하지 않았지만 침강성은 개선되지 않았다. 따라서 슬러지의 침강성을 향상시키기 위해 하수 원수에 투입되는 암모니아와 더불어 Acetate를 추가 투입하였으며, 송풍량을 강화시킨 결과 반응조의 SVI 값은 계속 낮아져 침강성이 회복되었다. 그러나 추가된 Acetate로 인하여 인의 유출값은 더욱 높아졌고 이 문제를 해결하기 위해 다시 암모니아를 초과로 투입하는 문제에 대하여 고려하였지만 이미 10 mg/L의 암모니아가 투입되고 있는 상황이기 때문에 유입수중의 암모니아가 부족한 것이 원인이 아니라고 판단하였다.

인의 섭취가 제한되는 원인에 대한 문헌을 고찰한 결과, 인의 섭취가 제한되는 원인으로서는 GAO(Glycogen accumulating organism)와의 경쟁, NO<sub>2</sub>의 축적, 과도한 포기 등의 원인으로서는 발생할 수 있었다.<sup>7-9)</sup> 따라서 본 연구에서 이에 대한 원인으로 검토한 결과 첫 번째 원인인 GAO와의 경쟁에 대해서는 이미 반응조에 Acetate가 추가 투입되고 있기 때문에 PAO(Phosphate accumulating organism)가 이들과의 경쟁에서 우위를 차지할 것이라 판단되어 인의 섭취 제한 원인에서 배제하였다. 두 번째 원인인 NO<sub>2</sub>의 경우에도 충분한 폭기량에 의해 대부분의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 NO<sub>3</sub>까지 산화되어, NO<sub>2</sub>가 존재하더라도 PAO가 활동을 제한받을 정도의 고농도로 존재하지 않기 때문에 인 섭취 제한의 원인에서 배제되었다. 마지막 원인이 될 수 있는 과도한 포기의 경우 포기의 강도가 강해짐에 따라 유기물과 암모니아의 감소속도가 증가하여 결국 PAO에 공급되는 암모니아를 제한하여 인흡수를 제한할 수 있다고 판단하여 송풍량을 줄여 최적화하고자 하였다.

송풍량을 줄여준 결과 첫째날에는 인의 유출수 농도가

4.2 mg/L로 높았지만 그 다음날인 이틀후에는 0.46 mg/L로 감소하였다. 결국 인의 선택 제한은 과다한 송풍량에 의해 암모니아가 조기에 고갈되어 발생한다는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 암모니아를 질산성질소로 산화시키는 독립영양 미생물들의 반응은 송풍량에 민감하게 움직이지만 인을 과다 선택하는 PAO는 송풍량의 변화에 둔감하다는 것이 원인이었던 것으로 판단된다.

한편 송풍량에 대한 결과는 Fig. 9와 10에서도 알 수 있듯이 송풍량이 적절한 경우에는 인의 과다선택이 일어나는 동안 암모니아가 존재하기 때문에 질소원에 의한 제한이 일어나지 않았지만 송풍량이 과다한 경우에는 암모니아의 소멸시간이 대폭 축소되어 인의 선택에 제한이 발생하였다. 또한 송풍량이 적절하였을 때에는 탈질 개선과 같은 이점도 있다. 특히 본 연구에서 호기공정의 초기에 풍부한 유기물질이 존재하기 때문에 탈질반응이 제한을 받지 않고 원활히 이루어진다.<sup>10)</sup> 따라서 송풍량이 강하였을 때에는 잔류 용존산소에 의해 영향을 받아 탈질작용이 제대로 일어나지 않고 암모니아의 감소 및 질산성질소의 증가와 바로 연결되는 모습을 보여주고 있다. 그러나 송풍량이 적절하였을 때에는 초기에 암모니아의 감소에 따른 질산성질소의 증가가 바로 나타나지 않고, 반응 후반부에 나타나서 초기에 감소된 암모니아양의 상당량이 탈질로서 하수중에서 완전히 제거되는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 혐기공정에서 인을 방출시키고 호기 공정에서 인을 과다선택하도록 하는 공정으로 인을 처리하는 경우에는 송풍량을 조절하여 암모니아의 조기 소멸에 따른 질소원의 제한이 발생하지 않도록 하여야 한다. 또한 송풍량을 적절하게 조절할 경우에 호기공정 초반에 감소되는 암모니아의 상당량을 탈질로서 처리할 수 있다는 장점도 가질 수 있다고 판단된다. 한편 송풍량의 조절은 반응조내 용존산소의 증감과 밀접한 관련이 있는데, 낮은 용존산소 농도는 암모늄을 질산염까지 산화시킨 후 다시 탈질의 환원과정을 거치는 것이 아니라, 아질산염 축적 과정을 통한 질소화합물의 제거에도 중요한 영향인자이기에 송풍량의 조절은 포기를 위한 투입에너지의 절약이라는 장점과 탈질과정에서 투입되는 탄소원으로써의 유기물의 절감이라는 장점이 있다. 또한 이는 발생되어 처리되어야 할 슬러지의 양을 감소를 의미하기도 한다.<sup>11)</sup>

#### 4. SBR 반응조의 제어결과

본 연구에서는 간략화된 ASM No. 2 모델<sup>6)</sup>을 기반으로 하여 제한조건을 수정하는 Adaptive control을 통하여 제어하였다. 제어는 총 33일간에 걸쳐서 이루어졌으며 그 결과는 Table 3 및 Fig. 11과 같다. COD에 대한 반응조의 제거효율은 86%, 총질소(T-N) 제거효율은 76%이었으며, 인산염의 제거효율은 86.3%로 모두 Phase 1~3에서의 제거효율과 비슷한 모습을 보여주었다.

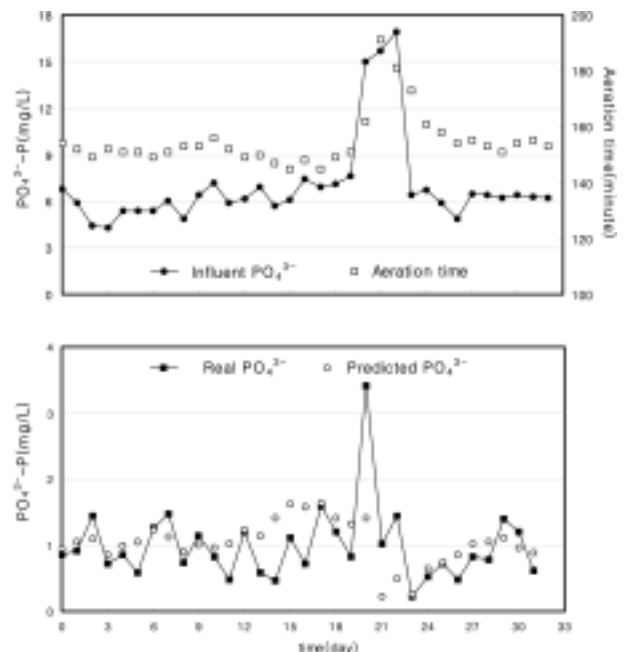
**Table 3.** Performances of SBR system controlled with simplified model and optimizer

Wastewater characteristics	Influent average (mg/L)	Effluent average (mg/L)	Removal efficiency(%)
Total COD	314	44	86
T-N	30.3	7.5	76
Organic N	8.0	2.2	-
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	22.3	0.1	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	-	5.2	-
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	7.0	1.0	86.3

유입 인산염의 농도는 19일까지는 원수에 3~5 mg/L-P의 인산염을 첨가하였다. 한편 20일째에는 과도한 인산염의 유입에 최적 제어가 잘 이루어지는지를 알아보기 위해 15.0~16.9 mg/L의 고농도로 유입시켜 운전하였으며 결과는 Fig. 11과 같다.

일반적인 하수처리장의 인주입 농도에서 모델의 제어는 첫날에 6.8 mg/L의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P와 22.8 mg/L의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N가 유입하였으며, 이에 따른 제한 인의 농도를 1.0 mg/L로 한 최적포기시간은 154분으로 결정되었다. 제어 이틀째에는 유입수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P농도는 5.9 mg/L이며, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도는 23.2 mg/L이었으며, 유출수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P농도는 0.86 mg/L이었다. 이에 제어기에서는 1.0 mg/L에서 1.0+0×0+(1-0.86)×0.5=1.07 mg/L로 보정된 후에 최적 포기시간을 152분으로 결정하였다.

이후 제어 21일째에는 15.0 mg/L의 고농도 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P가 유입되었다. 21일째의 Adaptive control의 제한값은 1.47 mg/L-P로서 포기시간은 169분으로 결정되었다. 그러나 그 다음날인 22일째의 인의 유출수값은 3.42 mg/L-P로 매우 높은



**Fig. 11.** Results of effluent phosphate control according to optimal and adaptive control.

값이 나왔다. 이에 고농도 유입 이틀째의 유입수값은 15.7 mg/L-P이었으며, 제한값은 0.25 mg/L로 낮게 책정되었으며, 이에 따라 포기시간은 191분까지 증가하였으며, 유출수중의  $PO_4^{3-}$ -P값은 안정되었다.

고농도의  $PO_4^{3-}$ -P가 유입되었을 때에 처음에는 포기시간이 충분히 산정되지 않아 문제가 발생하였지만 이후 최적 포기시간의 제한값이 변동함에 따라 충분한 포기시간이 산출되어 제어가 이루어졌다. 이것을 다른 연구와 비교하면 우선 Kim et al.의 연구에서는<sup>12)</sup> ASM No. 2 모델의 Monod 항을 J상수로 대체하고 반응조건을 혐기, 호기, 무산소로 나누어 모델을 간략화 하였으며 Adaptive control을 이용하여 유출수의  $PO_4^{3-}$ 의 농도를 0.5 mg/L로 제어하였다. 제어결과로는 유출수중의  $PO_4^{3-}$ 의 평균농도가 0.5 mg/L이었다. Hong et al.의 연구에<sup>13)</sup> 있어서는 MLSS와 MLVSS, SRT 등을 함수화하고 다시 DO와 ORP로 비교분석하는 전문가 시스템을 구축하여 유출수중의  $PO_4^{3-}$ 농도가 1.0 mg/L가 되도록 제어를 하였으며, 실제 제어결과 평균 0.9 mg/L 및 범위 0.4~2.1 mg/L의 유출수질을 얻었다. 또한, Ingildsen et al.의 연구에서는<sup>14)</sup> ASM No. 2d 모델에 기초하여 응집제 주입을 실시하여 유출수질의  $PO_4^{3-}$ 를 제어한 결과 0.29 mg/L의 제어결과를 얻었다. 이에 대한 본 연구에서의 결과로서 제어기간 중에 유출수  $PO_4^{3-}$ -P의 농도는 0.2~3.2 mg/L-P이었으며 평균값은 1.0 mg/L-P로서 원하는 제어결과를 얻었으며 이들 연구와 대등한 결과라고 판단된다.

## 5. 결론

인은 자연계의 제한 요소로서 하수처리공정에 의해 적절히 처리되지 않고 방류되는 경우에 부영양화현상을 일으키게 된다. 이에 본 연구에서는 하수처리공정에 대해 최적 제어와 적응제어를 실시하였다. 또한 반응조를 운영하는 중에 발생한 인섭취제한 현상에 대해서 여러 가지 원인에 대해 고찰을 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, SBR 반응조는 Phase 1~3으로 운전되었다. 운전 중 호기공정에서 인의 섭취가 제한되는 현상이 발생하였다. 그 원인은 암모니아의 부족에 따른 것으로 암모니아를 추가로 투입함으로써 인섭취 제한현상이 해소되었다.

둘째, 반응조의 침강성이 개선되지 않아 이를 해소하기 위해 포기를 보다 강하게 하였고, 이때부터 다시 인의 섭취가 제한되는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 GAO와의 경쟁,  $NO_2^-$ 의 저해작용, 과도한 포기 등의 원인이 되는 것으로 본 연구에서는 다양한 조건에서의 실험을 통하여 과도한 포기가 원인임을 알아내었으며 포기량을 낮추어준 이후 인의 섭취는 정상상태로 돌아왔다.

셋째, 간략화 모델에 기초하여 반응조의 제어를 실시하였다. 제어기간 중에 고농도 유입에 따른 제어기의 변동을 알아보기 위해 제어 21일째부터 3일간에 걸쳐 15.0~16.9

mg/L로 유입시켰다. 고농도기에 있어서는 초기에는 포기시간이 다소 작게 산정되어 유출수중의 인의 농도가 높았지만 Adaptive control에 의해 충분한 포기시간이 산정되어 제어가 만족스럽게 이루어졌다. 33일간의 제어결과는 유출수의 인 농도가 0.2~3.2 mg/L-P이었으며, 평균은 1.0 mg/L-P로서 전체적으로 제어결과는 만족스러웠다.

## 참고 문헌

1. Lee, T. T., Wang, F. Y., and Newell, R. B., "On the modelling and simulation of a BNR activated sludge process based on distributed parameter approach," *Water Sci. Technol.*, **39**(6), 79~88(1999).
2. 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).
3. Cinar, Ö., Daigger, G. T., and Graef, S. P., "Evaluation of IAWQ Activated sludge model No. 2 using steady-state data from four full-scale wastewater treatment plants," *Water Environ. Res.*, **70**(6), 1216~1224(1998).
4. Brdjanovic, D., Van Loosdrecht, M. C. M., Versteeg, P., Hooijmans, C. M., Alaerts, G. J., and Heijnen, J. J., "Modelling COD, N and P removal in a full-scale wwtp Haarlem Waarderpolder," *Water Res.*, **34**(3), 846~858(2000).
5. Kim, H., Hao, O. J., and McAvoy, T. J., "SBR system for phosphorus removal: Linear model based optimization," *J. Environ. Eng.*, **127**(2), 105~111(2001).
6. 김신결, 최인수, 구자용, 혐기-호기-무산소 SBR 반응조를 이용한 ASM No. 2 모델의 간략화에 관한 연구, 상하수도학회지, **22**(1), 3~14(2007).
7. Carucci, A., Kühni, M., Brun, R., Carucci, G., Koch, G., Majone, M., and Siegrist, H., "Microbial competition for the organic substrates and its impact on EBPR systems under conditions of changing carbon feed," *Water Sci. Technol.*, **39**(1), 75~85(1999).
8. Lee, D. S., Jeon, C. O., and Park, J. M., "Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake a sequencing batch reactor using single sludge system," *Water Sci. Technol.*, **35**(16), 3968~3976(2001).
9. Brdjanovic, D., Slamet, A., Van Loosdrecht, M. C. M., Hooijmans, C. M., Alaerts, G. J., and Heijnen, J. J., "Impact of excessive aeration on biological phosphorus removal from wastewater," *Water Res.*, **32**(1), 200~208(1998).
10. Peng, D. C., Bernet, N., Delgenes, J. P., and Moletta, R., "Simultaneous organic carbon and nitrogen removal in an SBR controlled at low dissolved oxygen concentration," *J. Technol. Biotechnol.*, **76**, 553~558(2001).
11. Choi, I. S., Aerobic degradation of surfactant and nitri-



- fication in a membrane bioreactor(MBR) with CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> gas analysis, VDI-Verlag, ISBN 3-18-383803-6(2005).
12. Kim, H., Hao, O. J., and McAvoy, T. J., "SBR system for phosphorus removal: ASM 2 and Simplified linear model," *J. Environ. Eng.*, **127**(2), 98~104(2001).
  13. Hong, S. W., Choi, Y. S., Kim, S. J., and Kwon, G., "Pilot-testing an alternative on-site wastewater treatment system for small communities and its automatic control," *Water Sci. Technol.*, **51**(10), 101~108(2005).
  14. 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).