

A²/O 공정의 유출수 NH₄-N에 대한 모델기반 예측 제어 알고리즘 개발 및 평가

Development and Evaluation of Model-based Predictive Control Algorithm for Effluent NH₄-N in A²/O Process

우대준 · 김효수 · 김예진 · 차재환 · 최수정 · 김민수 · 김창원[†]
Daejoon Woo · Hyosoo Kim · Yejin Kim · Jaehwan Cha · Soojung Choi · Minsoo Kim · Changwon Kim[†]

부산대학교 사회환경시스템공학과
Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

(2010년 12월 23일 접수, 2011년 1월 13일 채택)

Abstract : In this study, model-based NH₄-N predictive control algorithm by using influent pattern was developed and evaluated for effective control application in A²/O process. A pilot-scale A²/O process at S wastewater treatment plant in B city was selected. The behaviors of organic, nitrogen and phosphorous in the biological reactors were described by using the modified ASM3+Bio-P model.¹⁾ A one-dimensional double exponential function model¹²⁾ was selected for modeling of the secondary settlers. The effluent NH₄-N concentration on the next day was predicted according to model-based simulation by using influent pattern. After the objective effluent quality and simulation result were compared, the optimal operational condition which able to meet the objective effluent quality was deduced through repetitive simulation. Next the effluent NH₄-N control schedule was generated by using the optimal operational condition and this control schedule on the next day was applied in pilot-scale A²/O process. DO concentration in aerobic reactor in predictive control algorithm was selected as the manipulated variable. Without control case and with control case were compared to confirm the control applicability and the study of the applied NH₄-N control schedule in summer and winter was performed to confirm the seasonal effect. In this result, the effluent NH₄-N concentration without control case was exceeded the objective effluent quality. However the effluent NH₄-N concentration with control case was not exceeded the objective effluent quality both summer and winter season. As compared in case of without predictive control algorithm, in case of application of predictive control algorithm, the RPM of air blower was increased about 9.1%, however the effluent NH₄-N concentration was decreased about 45.2%. Therefore it was concluded that the developed predictive control algorithm to the effluent NH₄-N in this study was properly applied in a full-scale wastewater treatment process and was more efficient in aspect to stable effluent.

Key Words : Predictive Control, Ammonia Control, Influent Pattern, Model Optimization, Control Schedule

요약 : 본 연구에서는 하수처리공정의 유출 수질을 안정적인 유지하기 위하여, 유입수 패턴을 이용한 모델 기반 NH₄-N 예측 제어 알고리즘을 개발하고 A²/O 공정을 대상으로 적용 및 평가하였다. 평가에 사용된 자료는 B 시 S 하수처리장에 위치한 pilot 규모의 A²/O 공정 운전자료를 사용하였다. 생물학적 반응조를 모사하기 위해 수정된 ASM3+bio-P 모델(Lee, 2003)을 사용하였고, 침전조 농도 거동 모사를 위해 일차원 이중 지수 함수 모델(Takacs et al., 1991)을 사용하였다. 유입수 패턴을 이용하여 하루 뒤 유출수 NH₄-N 농도를 예측하고, 사전 작성된 NH₄-N 제어 schedule을 사용하여 pilot plant의 호기조 DO를 조절하는 제어 로직을 적용하였다. 제어 적용성을 평가하기 위해 제어를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우를 비교하였고, 계절적 영향을 알아보기 위해 여름철과 겨울철에 NH₄-N 제어 schedule을 적용한 실험을 하였다. 여름철 및 겨울철 모두 제어를 적용하지 않은 경우 수질기준을 초과하는 사례가 발생하였지만, 제어를 적용한 경우 목표수질 이내의 안정적인 유출수질이 방출됨을 확인하였다. 제어를 적용하지 않은 경우에 비교해서, 예측 제어를 적용한 경우에는 송풍기의 RPM이 약 9.1% 증가하였고, 유출수의 NH₄-N 농도는 약 45.2% 감소하였다. 이를 통해 본 연구에서 개발된 유출수 NH₄-N 예측 제어 알고리즘 적용으로 인한 운영비용 증가 대비 수질 개선 효과가 크게 나타났기 때문에, 안정적인 유출수 확보를 위한 측면에서 효율적인 제어기법으로 판단된다.

주제어 : 예측 제어, 암모니아 제어, 유입수 패턴, 모델 최적화, 제어 스케줄

1. 서론

생활수준의 향상으로 하수 발생량이 증가함으로써 국내 하수처리시설의 경우 유입 하수의 톤당 처리비용이 2000년부터 2009년까지 4.2~9.8%씩 증가해 왔다.¹⁾ 또한 2009년 437개의 하수처리시설 중 7개의 시설이 여전히 방류수질을 초과하는 것으로 조사되었다.¹⁾ 향후 2012년 1월 1일부터 BOD, COD, T-N, T-P의 방류수질 기준이 각각 5 mg/L, 20 mg/L, 20 mg/L, 0.2 mg/L로 강화될 예정²⁾이며, 그로 인해

방류수질을 초과하는 시설이 더 늘어날 것으로 예상된다. 강화되는 방류 수질 기준 중 T-P는 0.2 mg/L로 기존 생물학적 처리만으로는 방류수질 기준을 만족시키지 못하기 때문에 응집제 주입과 같은 화학적 처리가 필요하며,³⁾ T-N을 제거하기 위한 질산화 반응과 탈질 반응 중 탈질 반응은 무산소조의 외부탄소원 주입으로 손쉬운 제어가 가능하므로⁴⁾ 본 연구의 대상에서 제외하였다. 본 논문의 대상이 되는 질산화 반응은 온도, 종속영양균의 활성도 및 pH, 용존 산소 농도와 같은 여러 가지 환경인자에 의해 영향을 받아

[†] Corresponding author E-mail: cwkim@pusan.ac.kr Tel: 051-510-2416 Fax: 051-515-5347

이들 인자들을 실시간으로 조절함으로써 암모니아 농도 제어를 수행한 사례가 있다.⁵⁾ 그러나 이들 사례들 중 되먹임 제어에 기초하고 있는 사례의 경우 용존산소 농도가 원하는 수준까지의 즉각적 조절이 어려우므로 질산화 반응의 제어가 효율적이지 못하였다. 이는 유입수 부하가 변화함에 따라 질산화에 필요한용존산소 농도를 유지해주기 위한 송풍량의 증가시 반응조 내의 DO 농도는 시간 지연을 가지고 상승하기 때문이다.

이를 개선하기 위한 방법으로 하수처리시설에 ASM No.1을 이용한 시뮬레이션을 통해 암모니아와 질소의 시간별 거동을 이용하여 feedforward 제어로써 DO 농도를 2.25 mg/L로 고정하여 사이클 시간으로 제어를 하였을 경우 다양한 상태를 조절하는데 적합했다는 연구⁶⁾와 MPC (Model predictive control)를 하수처리공정 Benchmark simulation model 1에 적용하여 암모니아 농도와 폭기량변화에 관한 시뮬레이션 결과만 도출한 경우⁷⁾와 DO 농도를 간헐적으로 변화시켜 하수처리공정의 DO 농도 제어에 효율적이라는 결과를 얻은 연구⁸⁾가 있었다. 그리고 SBR 반응조에서 유입수 암모니아 농도를 측정하여 ASM1을 이용하여 목표한 유출수 암모니아 농도가 되도록 제어하고 초과하면 최적 폭기 시간을 산정하여 적용하는 연구,⁹⁾ Benchmark Simulation Model 1 (BSM1)에 model predictive control (MPC)을 적용한 regulations-specified limits에서 유출수질 기준을 유지하는 하수공정을 적용하여 유입외란이 생겼을 때 유입유량 측정을 기초로 하여 앞먹임 먹이 제어 동작을 추가하는 경우, 다른 하나는 penalty function 추가로부터 비선형 모델 예측 제어를 사용하는 경우이다. 두 제어 방법을 적용한 경우 암모니아와 질소 농도의 감소를 확인한 연구¹⁰⁾ 등 모델을 이용한 안정적인 처리를 위한 연구들이 있었다. 이와 같은 다수의 연구를 기초로 하여 하수처리장의 누적 일간 및 주간의 유입수 성상 데이터를 이용한 유입수의 거동을 사전에 분석하여, 특정 패턴을 도출한 후 수학적 모델을 이용해 유출수 NH₄-N 농도를 예측하고, 적절한 운전제어 방안을 도출 및 적용하면 안정적인 유출수질을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 지속적이고 안정적인 유출수질을 확보하기 위한 방법으로 유입수 패턴과 적용한 모델 기반 예측 제어 알고리즘을 적용한 A²/O 공정의 NH₄-N 제어 schedule을 도출 및 제어 가능성을 평가하였다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1. 대상 장치 및 사용 모델

본 연구의 대상 공정은 B 시 S 하수처리장에 위치한 pilot 규모의 A²/O 공정이다.

공정의 유입수는 하수처리장의 1차 월류수를 사용하였고 유입유량은 18 m³/day이고 SRT와 HRT는 각각 15일과 7시간이다. 대상 공정의 설계 사양과 운전 조건을 Table 1에

Table 1. Plant specification and operation condition in pilot A²/O process

Reactor	Volume	Influent flowrate	18 m ³ /day
Anaerobic	1 m ³	Inner return sludge flowrate	36 m ³ /day
Anoxic tank	2 m ³	Return sludge flowrate	9 m ³ /day
Aerobic tank	2.5 m ³	MLSS Concentration	1,500~3,500 mg/L
		NH ₄ -N Concentration	29.2 mg/L
settler tank (cylindricality)	2 m ³	Load	0.526 kg/day
		SRT	15 day
		HRT	7 hour

나타내었다.

제어를 적용하지 않은 운전은 5일간 실시되었고, 제어 운전은 7일간 실시되었다.

본 연구에 사용된 모델로는 반응조내 탄소, 질소 및 인의 거동을 모사하기 위하여 수정된 ASM3+bio-P 모델¹¹⁾을 사용하였고 침전조 거동 모사를 위해 일차원 이중 지수함수 모델¹²⁾을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 프로그램은 GPS-X 4.1.2 (Hydromantics Inc., Canada)이다.

2.2. 호흡율 측정 실험

수학적 모델인 ASM3+bio-P에 적용하기 위해 일반적인 측정 항목인 COD를 S_s (readily biodegradable substrate), S_i (inert soluble organic material), X_s (slowly biodegradable substrate), X_i (inert particulate organic material)와 같이 세분화된 성분으로 형태의 변환이 필요하다.¹³⁾ 유입수내 COD를 S_s, S_i, X_s, X_i의 형태로 성상분류하기 위해 호흡율 실험을 하였고, 호흡율 측정기는 Ens-R2010 (Environsoft Co. Ltd., Korea)를 사용하였다.

호흡율 측정 실험에 사용된 미생물은 반송슬러지를 이용하였고, 기질로는 plant 유입수를 이용하여 하루 동안 공폭시킨 후 호흡율 측정기를 이용하여 실험 하였다. 호흡율은 다음 식을 이용하여 구하였다.¹⁴⁾

$$R_a = \frac{Q/V}{(1-A)} [(1-A) \cdot C_{i,t-T_d} + C_{o,t-T_d} - C_{o,t}] \quad (1)$$

여기서, R_a는 호흡율(mg O₂/L·h)을 나타내고, Q는 호흡실 유입 시료유량(mL/min), V는 호흡실 부피(L), T_d는 DO 채취 간격(sec), C_{o,t}는 호흡실 유출 DO (mg O₂/L), C_{i,t}는 호흡실 유입 DO (mg O₂/L)이며, A는 exp (-Q/V·T_d)로 계산된다.

2.3. 모델 최적화

Pilot 공정 시뮬레이션에 사용된 모델을 최적화하기 위해 매개변수 민감도 분석¹⁵⁾을 수행하였다. 민감도 분석은 매개변수의 기본값의 50~200%까지 단계별로 10%씩 값을 변화시켜가며 반복적으로 시뮬레이션을 수행하였고, 시뮬레이션 결과와 측정된 유출수질과의 오차의 합이 가장 높은 순서대로 매개변수를 선택하였다. 민감도 분석을 통해 총 49

개의 화학양론 계수 및 동역학 계수 중 가장 민감도가 높은 6개의 매개변수를 선택하였다.

선택된 민감한 매개변수의 값을 기본 값의 50~200%범위 내에서 변화시키며 수행하여 목적 함수와 오차가 가장 낮은 최적의 매개변수 값을 도출하였다. 시뮬레이션 결과와 측정된 유출수질 사이의 오차는 Absolute Difference 식을 사용하여 계산 하였다.

$$Absolute\ Difference = \sum_{j=1}^M \cdot \sum_{i=1}^N |Z_{i,j} - f_{i,j}| \quad (2)$$

여기서, Z_{ij}는 i번째 실험(날짜)에서 항목 j에 대한 측정된 값 (목표수질)

f_{ij}는 i번째 실험(날짜)에서 예측된 항목 j에 대한 값

2.4. 유입수 패턴 도출

유입수 패턴 도출을 위해 50일간의 운전 데이터를 이용하였다.

유입수 패턴 도출 방법은 Autosampler를 이용하여 하루 한 시간 단위로 대상 장치 유입수를 채취하였고, 채취된 유입수를 분석용 kit를 이용하여 COD, NH₄-N, NO_x-N, PO₄-P를 분석하여 유입수 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터는 요일별로 분류 하고 다시 시간별로 분류하였다. 분류된 데이터의 같은 요일 같은 시간대의 데이터 값을 평균하여 유입수 패턴을 도출 하였다.

2.5. 사전 예측 제어 알고리즘 및 NH₄-N 제어 schedule 적용

사용된 알고리즘은 ASM3+bio-P 모델을 적용한 시뮬레이션 결과 유출수 NH₄-N 농도가 목표수질보다 낮은 경우 경제성을 고려한 최소의 DO 설정값을 제어 schedule이 적용하였고, 시뮬레이션 결과 유출수 NH₄-N 농도가 목표수질

보다 높은 경우 DO 설정값을 변화시키며 목표수질을 만족하는 NH₄-N 제어 schedule을 적용하였다. 예측제어 알고리즘은 Fig. 1과 같다.

시뮬레이션을 통해 도출된 하루 뒤의 DO 설정값에 대해 0시부터 23시까지의 한시간 단위의 제어 schedule이 작성되며 pilot plant에 적용하여 목표수질 기준을 만족하는지 확인하였다. 겨울철 목표수질은 5 mg/L로 하였으며 여름철은 계절적 영향을 생각하여 3 mg/L로 정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 호흡율 실험 결과

유입수 COD를 모델 내 입력 가능한 S_s, S_i, X_s, X_i의 형태로 변환하기 위한 호흡율 실험은 두 차례 수행하였으며, 1차 실험과 2차 실험에 의해 구한 정상 분류값을 평균하여 사용하였다. 평균한 유입수 COD의 성분 비율은 S_s, S_i, X_s, X_i가 각각 25.8%, 4.1%, 51.8%, 15.6%이다. 두 번의 호흡율 실험 결과와 본 연구에 사용된 유입수 정상 비율값을 Table 2에 나타내었다.

3.2. 모델 최적화 결과

모델 최적화 과정은 화학양론 계수 및 동역학계수 중 Table 3에 나타난 것과 같은 가장 민감도가 높은 6개의 매개변수값을 선택한 후 연속적인 시뮬레이션을 수행하여 이전 단계에서 계산된 유출수질의 오차와 현재 단계에서 계산된 오차를 비교하여 오차 값이 작은 경우의 매개변수 값이 보존되도록 하였다. 최종적으로 유출수질 예측이 가장 우수한 최적의 매개변수 조합이 도출되게 된다. 이때 오차를 평가하기 위한 목적함수로는 유출수 NH₄-N 및 PO₄-P 농도로 설정 하였다. 유출수 NH₄-N와 PO₄-P 농도에 대한 모델 기본값 및 최적값 사용 시 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타

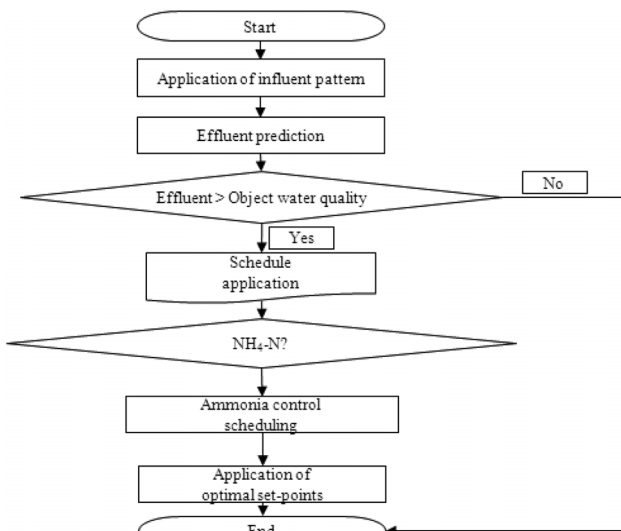


Fig. 1. Flow chart of predictive control algorithm.

Table 2. Respiration rate experiment

	1 st result	2 nd result	Used values
S _s	1.64%	6.55%	4.10%
S _i	26.97%	29.96%	28.47%
X _s	8.98%	22.21%	15.60%
X _i	62.41%	41.28%	51.58%

Table 3. Six sensitive parameters of ASM3+bio-P model

Symbol	Description	Default values	Estimation values
μ _{max,A}	Autotrophic maximum growth rate	1.0	1.09
K _{O,A}	Oxygen half saturation coefficient	0.5	0.52
b _A	Maimum aerobic restiration rate of X _A	0.15	0.131
K _{PO4,A}	Phosphorus half saturation coefficient	0.01	0.011
μ _{max,PAO}	Maximum specific growth rate of poly-P acculating biomass	1.0	1.09
K _{SS,PAO}	Saturation constant for SS	10	11

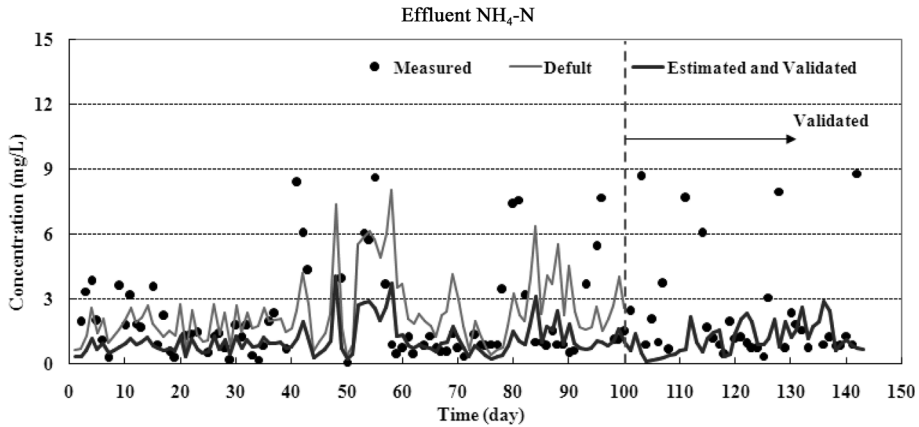


Fig. 2. Effluent NH₄-N concentration graphs of applied default, measured, estimated and validated values.

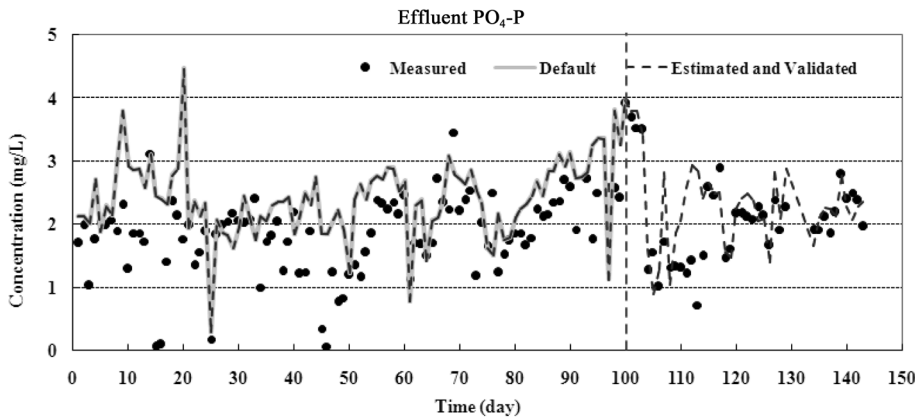


Fig. 3. Effluent PO₄-P concentration graphs of applied default, measured, estimated and validated values.

내었다. 최적화된 모델을 검증하기 위하여 모델최적화에 사용되지 않은 43개의 데이터를 이용하여 모델을 검증하였으며 정량적인 평가를 위해 식 (2)에 의해 RMSE를 구할 수 있으며, Table 4에 나타내었다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{m,i} - X_{p,i})^2}{N}} \quad (3)$$

N: Total number of compared variables
 X_{m,i}: measured value
 X_{p,i}: predicted value

Table 4. RMSE of simulation result by default, estimated and validated values

	RMSE	
	NH ₄ -N	PO ₄ -P
Default	2.27	0.87
Estimated	2.22	0.87
Validated	3.03	0.61

3.3. 유입수 패턴 도출 결과

겨울철의 도출된 유입수 패턴은 제어를 적용한 실험 기간의 실제 유입수 데이터와 비교하여 일별로 다소 오차를

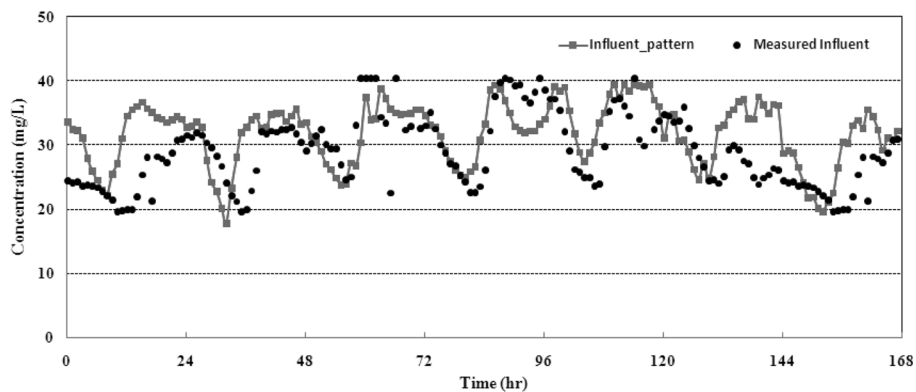


Fig. 4. Influent NH₄-N pattern and measured influent NH₄-N concentration.

보이지만 실제 유입수와 비슷한 거동형태를 가지며, 지속적인 데이터 누적을 통해 단기간 측정 자료를 보완할 수 있을 것으로 판단된다. 도출된 패턴은 Fig. 4에 나타낸 것과 같다.

3.4. NH₄-N 예측 제어 schedule을 적용하지 않은 경우

7일간 송풍기의 RPM을 18~20으로 유지하여 pilot 공정을 운전 하였다. 그 결과 DO 농도가 1 mg/L 정도로 유지되었음에도 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 NH₄-N 목표수질 농도인 5 mg/L를 초과하는 결과가 나타났다. 이것은 전체적인 DO 농도는 충분한 것으로 보이지만 하루동안에 유입농도가 변화하므로 필요한 산소요구량이 달라져서 필요한 산소요구량이 달라져서 필요한 시점에 충분한 만큼의 폭기량이 공급되지 못했기 때문으로 판단된다.

3.5. NH₄-N 예측 제어 schedule을 적용한 경우

Fig. 6에 나타난 것과 같이 NH₄-N 제어 schedule을 적용하여 시뮬레이션된 유출수는 목표수질인 5 mg/L 이하의 농도를 가지는 반면 NH₄-N 제어 schedule을 pilot A²/O 공정에 직접 적용하여 측정된 유출수 NH₄-N 농도는 Fig. 7에 나타난 것과 같이 실험 시작 후 5일 동안 유출 목표수질을 초

과하였다. 하지만 5일 후 부터는 목표 수질을 만족한다. 제어가 잘되지 않은 원인으로는 제어 운전 시작 5일 동안 기온이 15℃ 이하로 유지되었다가 5일 후부터 기온이 18℃ 이상으로 상승하였다. 이런 온도의 영향으로 인하여 실험 초기 미생물의 활성이 저하되어 질산화가 잘되지 못하다가 5일 후부터 온도가 상승하면서 미생물의 활성이 좋아 지면서 질산화가 잘된 것으로 판단된다. 이런 점으로 미루어 볼 때 NH₄-N 제어 schedule이 범용적으로 적용되기 위해서는 온도에 대한 고려가 포함되어 하며, 다양한 온도에서의 운전자료 확보로 제어 schedule을 개선하고자 한다.

3.6. 제어 전 후 폭기량 비교

3일 간의 데이터를 비교해 보았을 때 제어 전 평균 RPM은 20이며 이때 평균 DO 농도는 1.12 mg/L이다. 유출 NH₄-N의 평균 농도는 9.3 mg/L이다. 하지만 제어를 하였을 경우 평균 RPM이 22이고 이때 평균 DO는 1.44 mg/L이며 유출 NH₄-N 농도는 5.1 mg/L이다. 제어를 하였을 경우가 제어를 하지 않았을 경우 보다 RPM이 9.1% 증가하여 전력 소모량은 많지만 유출수 NH₄-N 농도가 45.2% 감소하기 때문에 더 효율적이라 판단된다. NH₄-N 제어 schedule을 적용하여 공정을 제어한 경우 DO 농도가 10초마다 측정되기 때

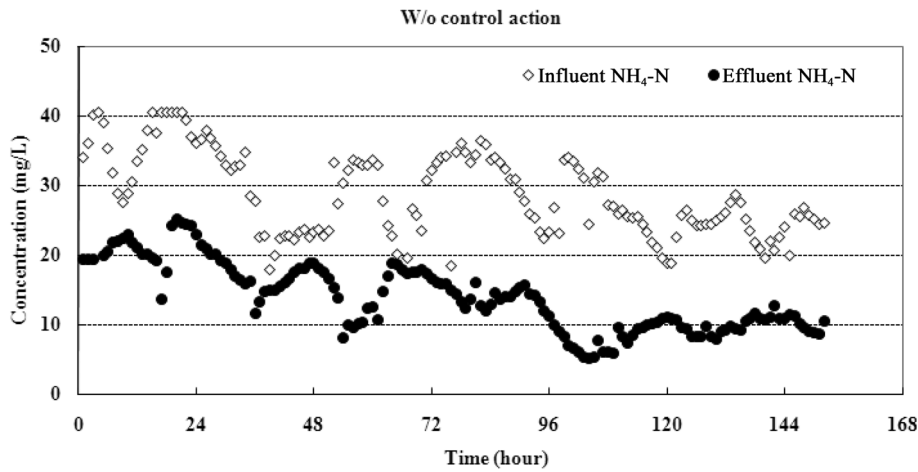


Fig. 5. NH₄-N concentration of influent and effluent without control.

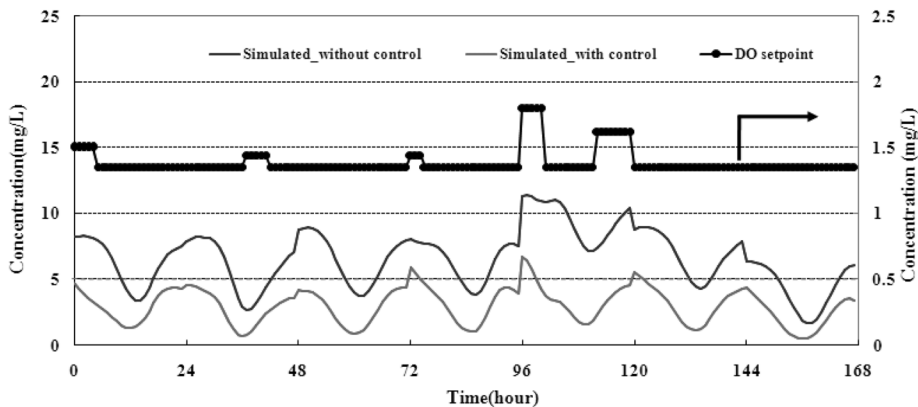


Fig. 6. Applied NH₄-N control schedule and simulation result.

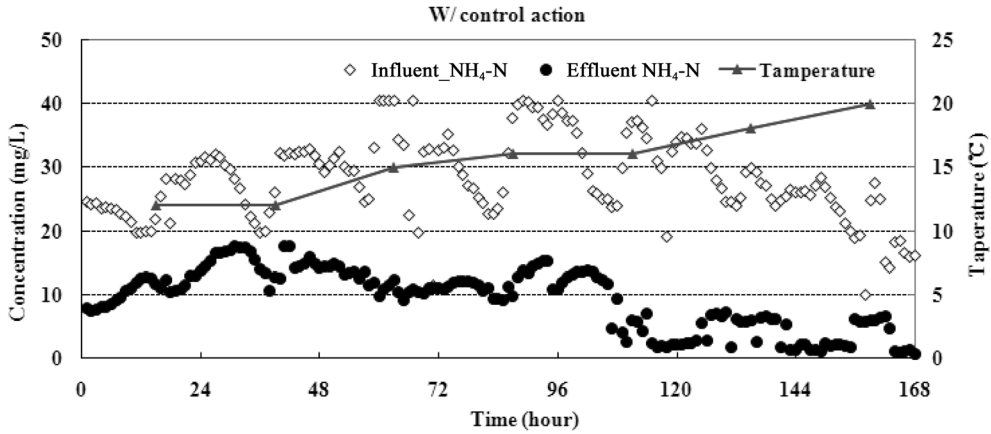


Fig. 7. NH₄-N concentration of influent and effluent with control.

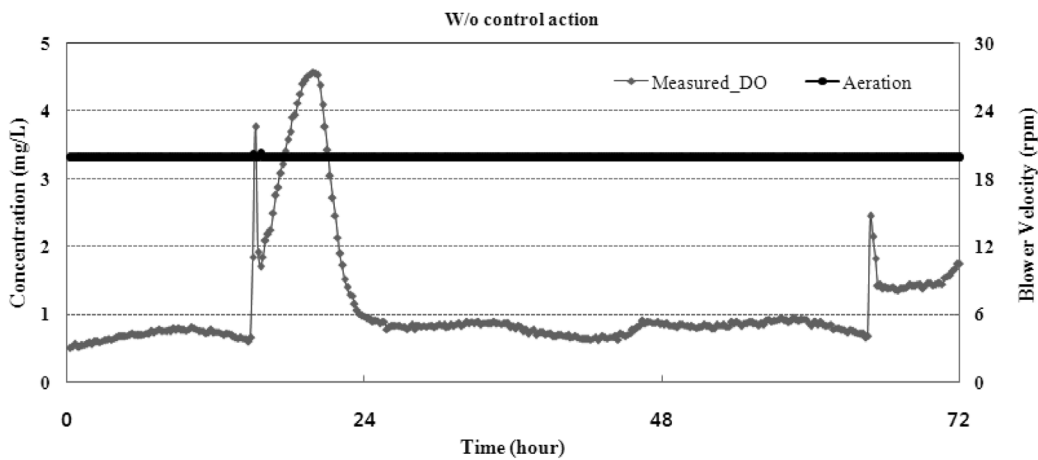


Fig. 8. RPM and measured DO concentration without control.

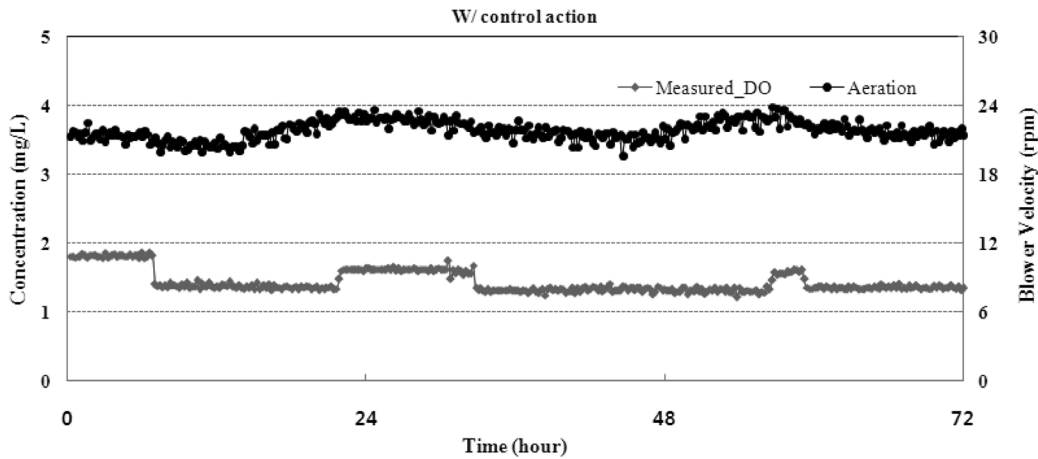


Fig. 9. RPM and measured DO concentration with control.

문에 설정된 DO 농도 값을 유지하기 위해 10초마다 RPM이 변한다. 그래서 충분한 질산화를 위한 DO 농도가 유지될 수 있었기 때문에 제어를 하지 않은 경우와 비교해 안정적인 유출수가 확보 될 수 있는 것으로 판단된다. 제어 전 후의 폭기량과 DO 농도는 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었으며, 이때의 평균 RPM, 유출수 NH₄-N 농도와 DO 농도를 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Average RPM, DO and effluent NH₄-N concentration without control and with control

	W/o control	W/ control
RPM	20	22
DO	1.12 mg/L	1.44 mg/L
Effluent NH ₄ -N concentration	9.3 mg/L	5.1 mg/L

4. 결론

NH₄-N 제어 schedule을 적용한 시뮬레이션을 통해 예측된 유출수와 pilot 공정에 적용하여 측정된 유출수 모두 목표수질을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 NH₄-N 제어 schedule 을 통한 A²/O 공정 제어가 가능함을 보여준다.

NH₄-N 제어 schedule을 적용한 경우 겨울철 낮은 기온의 계절적 특성으로 몇 일간 질산화 반응을 충분하게 유지할 수 있는 조건이 형성 되지 못한다. 이는 모델 기반 제어를 적용하여 유출수질을 안정적으로 유지하기 위해서는 온도에 대한 고려가 필수적으로 포함되어야 함을 보여준다.

A²/O 공정에서 모델 기반의 사전 예측 제어 알고리즘을 이용한 NH₄-N 제어 schedule을 적용한 실험 결과 제어 전후의 폭기량을 비교해 보았을 때 제어 후 RPM이 제어 전에 비해 2 (9.1%) 만큼 증가하여 전력 소모는 많지만 유출수의 NH₄-N 농도는 4.2 mg/L (45.2%) 감소하기 때문에 안정적인 유출수 확보를 위한 측면과 방류수질 기준을 고려해 보았을 때 더 효율적이라고 판단된다.

사사

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 또한 본 논문은 한국 연구재단 BK21 유비쿼터스 향만물류 인프라 구축 사업단의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. 환경부, 2009년도 운영실태 결과 보고서(2010).
2. 환경부, 하수도법 시행 규칙 입법예고안, 환경부 공고 제 2010-333호(2010).
3. Cheng, W. P., Chi, F. H. and Yu, R. F. "Effect of phosphate on removal of humic substances by aluminum sulfate coagulant," *Colloid and Interface Sci.*, **272**, 153~157(2004).

4. 노성희, 김선일, "SBR 공정에서 외부탄소원 주입율과 온도의 영향," *Theor. Appl. Chem. Eng.*, **10**(2), (2004).
5. Yu, R. F., Liaw, S. L., Chang, C. N. and Cheng, W. Y., "Applying real-time control to enhance the performance of nitrogen removal in the continuous-flow SBR system," *Water Sci. Technol.*, **38**(3), 271~280(1998).
6. Wett, B. and Ingerle, K., "Feedforward aeration control of a Biocos wastewater treatment plant," *Water Sci. Technol.*, **43**(3), 85~91(2001).
7. Shen, W. H., Chen, X. Q., Pons, M. N. and Corriou, J. P., "Model predictive control for wastewater treatment process with feedforward compensation," *Chem. Eng. J.*, **155**, 161~174(2009).
8. Holenda, B., Domokos, E., Rédey, Á. and Fazakas, J., "Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control," *Comput. Chem. Eng.*, **32**, 1270~1278(2008).
9. 김신걸, 최인수, 구자용, "간략화된 활성슬러지 모델(ASM No. 1)을 이용한 유출수 중 암모니아성 질소의 제어에 관한 연구," *대한환경공학회지*, **29**(5), 548~555(2007).
10. Shen, W. H., Chen, X. Q. and Corriou, J. P., "Application of model predictive control to the BSM1 benchmark of wastewater treatment process," *Comput. Chem. Eng.*, **32**, 2849~2856(2008).
11. 이성학, "탈질 및 인 흡수 동시반응을 고려한 활성슬러지 모델(ASM3) 최적화," 박사학위논문, 부산대학교 대학원 환경공학과, pp. 4~48(2006).
12. Takacs, I., Patry, G. G. and Nolasco, D., "A dynamic model of the clarification thickening process," *Water Res.*, **25**(10), 1263~1271(1991).
13. 박종부, 허형우, 강호, 장성언, "미생물 호흡률 측정에 의한 관거시스템 유형별 하수의 기질 분율 평가," *대한환경공학회지*, **31**(8), 649~654(2009).
14. 김병근, 정미경, 김창원, 박동근, "활성슬러지 공정에서 온라인 호흡율 측정과 그 활용에 대한 타당성 입증," *대한환경공학회지*, **16**(6), 779~788(1994).
15. 서창원, 정형석, 임재림, 이상형, 신항식, "혐기성 회분식 Serum bottle 실험에 대한 단순화 된 ADM1의 민감도 분석 및 적용," *대한환경공학회지*, **26**(5), 505~513(2004).