

ORIGINAL ARTICLE

## 하수처리시설의 질산화 진단기반 제어 방법의 개발 및 실규모 플랜트 적용을 통한 평가

김예진\* · 김효수<sup>1)</sup>

부산가톨릭대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>엔바이론소프트

### Evaluation of Diagnosis-based Control Strategy for NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>x</sub>-N Removal of a Full-scale Wastewater Treatment Process

Yejin Kim\*, Hyosoo Kim<sup>1)</sup>

Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

<sup>1)</sup>Environsoft Co., Ltd. Yangsan 50565, Korea

#### Abstract

In this research, the target process was a modified type of a conventional aeration tank with four different influent feeding points and alternated aeration to obtain nitrogen removal. For more accurate switching of influent feeding, the process was operated under a designed control strategy based on monitoring of NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>x</sub>-N concentrations in the tank. However, the strategy did have some limitations. For example, it was not sensitive to detecting the end of each reaction when losing the balance between nitrification and denitrification of each opposite part of biological tank. To overcome the limitations of the existing control strategy, a diagnosis-based control strategy was suggested in this research using the diagnosis results classified as normal (N), ammonia accumulation (AA) and nitrate accumulation (NA). Using the pre-designed rules for control actions, the aeration and volume of the aerated part of the reactor could be increased or decreased at a fixed mode time. In simulations of the suggested diagnosis-based control strategy, the NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>x</sub>-N removal rates in the reactor were maintained at higher levels than those of the existing control strategy.

**Key words** : Altered influent feeding process, Ammonia accumulation, Nitrate accumulation, Nitrification, Diagnosis-based control strategy, ASM3+Bio-P model

#### 1. 서론

현존하는 다양한 생물학적 질소 제거 공정 중에서, 2개의 완전혼합형 반응조에 유입수의 교차 주입과 간헐폭기를 수행함으로써 질산화와 탈질을 수행하는 공

정(APID 공정, Advanced Isolation Ditch)은 유입수의 성상 변화에 능동적으로 대처가 가능할 뿐 아니라, 표준활성슬러지 공법으로부터 개조가 쉬운 것으로 제안되어 온 바 있다(Yoon et al., 2008; Kim et al., 2009; Kim et al., 2014). APID 공정 운전은 기본적으로

Received 9 May, 2018; Revised 30 May, 2018;

Accepted 18 June, 2018

\*Corresponding author: Yejin Kim, Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea  
Phone : +82-51-510-0621  
E-mail : yjkim@cup.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유입수의 간헐적 교차 주입이며, 이로 인해 반응기 내의 질산화와 탈질 반응이 조절된다. 유입수의 간헐적 교차 주입을 채용하고 있는 이러한 공정들의 기본은 변화하는 유입수의 성상과 양의 변화에 따라 반응조 내에서 질산화와 탈질이 순차적으로 일어나도록 공정의 유입수 주입 지점과 반응조의 폭기를 적절한 시간에 제어해 주는 것으로, 대부분의 경우 수학적 모델의 결과를 활용한다(Zhao et al., 1994a; Zhao et al., 1994b; Lukasse et al., 1999; Kim et al., 2000). 그러나, 모델에 의해 추정된 반응조 내의 암모니아성 질소와 질산성 질소의 농도는 오차를 가지게 마련이어서, 이러한 수학적 모델 기반 제어의 단점을 보완하기 위하여 pH, DO 그리고 ORP와 같은 기초상용계측기 값의 변화로 질산화와 탈질의 진행 상황을 확인하기도 한다(Paul et al., 1998; Thomsen et al., 1998). 그러나 기존의 수학적 모델 기반 접근이나 기초상용계측기를 활용한 접근 방법 모두 반응조 내에서의 실제적인 농도를 활용하지 않았으므로 질산화와 탈질 반응의 정확한 진행 상황을 인지하지 못했다. 1990년대 공정 내 영양염류의 실시간 측정이 일반화된 후, APID 공정의 제어 방법으로 반응조 내의 암모니아성 질소 농도와 질산성 질소의 농도를 측정하고 그 비율을 실시간으로 계산함으로써 질산화와 탈질 반응의 종료지점을 감지하는 방법의 규칙 기반 제어 알고리즘이 제안되어 활용되었다(Isaacs and Thornberg, 1998a; 1998b). 유입수 주입 시점을 결정하고 폭기 on/off 여부를 결정하는 가장 유사한 제어 방법을 연속회분식 반응기의 제어 사례에서 찾아볼 수 있지만(Poo et al., 2006; Hong et al., 2008; San Martin et al., 2014), 영양염류 농도의 실측에 기반한 규칙 기반 제어방법이 APID 공정의 제어 사례로는 가장 간단하고 확실한 성과를 얻을 수 있는 것으로 인지되었다.

그러나, 영양염류의 비율에 의한 공정 제어방법을 현장에 적용한 결과로부터, 암모니아성 질소와 질산성 질소의 균형이 이론처럼 유지되지 않아 반응조 내에서의 영양염류의 축적이 발생하여 유출수 수질을 위협하는 사례가 발견되었다. 이는 실시간으로 변화하는 유입수의 농도 변화 때문인 것으로 판단된다. 안정적인 운영을 위해서는, 유입수 주입 지점 변경 및 폭기의 on/off를 수행하여 다음 단계로 넘어가기 전에

두 개의 반응조에서 암모니아성 질소와 질산성 질소가 낮은 농도로 존재하여야 한다. 그러나 높은 농도의 암모니아성 질소가 유입된 경우 이를 질산화시키기 위해서 많은 시간의 폭기시간이 필요하게 되고, 질산화에 충분한 시간을 보장하기 위해 한 반응조에서의 폭기 시간을 연장하게 되면 나머지 반응조의 유입 시간이 늘어나는 상황을 피할 수 없다. APID 공정 운영에서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 제어동작의 수행에 적합한 상황인지를 진단하기 위한 별도의 알고리즘이 필요하다.

본 논문은 기존의 제어 방법을 보완하기 위해 반응조 내에서의 질소 축적을 감지하는 진단 알고리즘을 제안한다. 반응조 내에서의 질산화와 탈질 반응이 원활이 이루어지는지를 진단하기 위해 군집분석 및 판별분석과 같은 통계적인 방법을 활용하였다. 본 연구에서 개발된 진단 기반 제어 알고리즘을 평가하기 위해 현장 규모의 APID 공정으로부터 획득된 운영자료를 기반으로 구성된 ASM3+Bio-P 모델을 활용하였다. 모델을 활용하여 제어 알고리즘의 성능을 확인한 후 운영 중인 현장에 제어 알고리즘을 적용하여 그 효과를 알아보았다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상 공정 및 기본 제어 알고리즘

본 연구의 대상이 되는 APID 공정은 40,000 m<sup>3</sup>/day를 처리하는 실규모 하수처리시설의 일부로 10,000 m<sup>3</sup>/day의 용량을 처리한다. 두 반응조 Tank1, Tank2에서는 MLSS와 DO, ORP를 실시간으로 측정하여 운영시스템에 표시하고 데이터베이스에 저장하였고, 같은 지점에서는 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>x</sub>-N이 매 10분마다 샘플링되어 분석되었다.

Fig. 1(a)는 APID 공정의 기본 운전모드인 A→B→C→D 모드를 나타내고 있다. 각 모드별로 유입수의 주입 지점이 다르며, 기본적으로 각 모드는 30분씩의 반응 시간을 가지고 운전된다. 유입수가 주입되는 부분의 반응조는 유입수에 포함된 탄소원을 이용하여 탈질 반응이 일어나도록 비폭기로 운전되며, 그 동안 반대편 반응조는 이전 모드에서 주입된 유입수 내의 암모니아성 질소를 질산화하기 위해 폭기된다. Isaacs

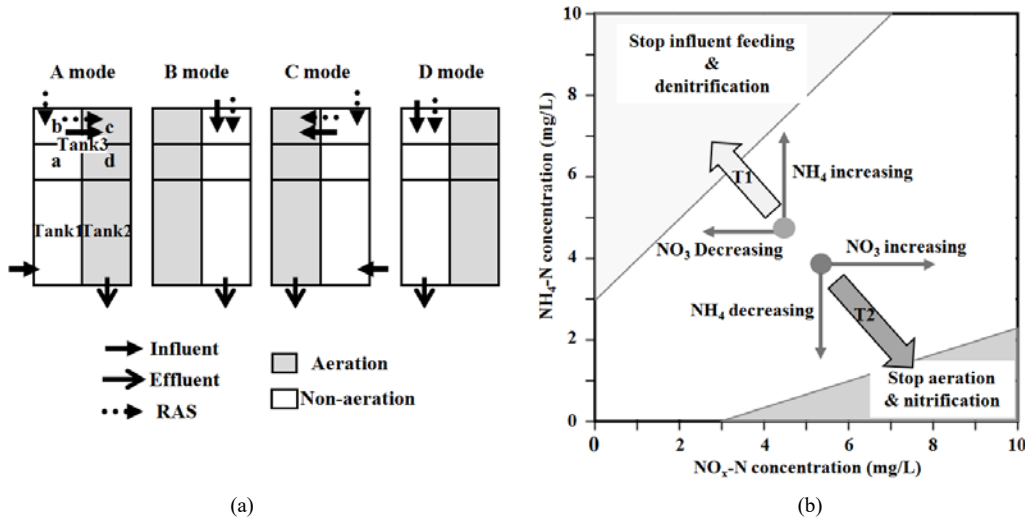


Fig. 1. Schematic diagram for the basic operation modes of the full-scale APID process(a) and influent feeding control strategy in the case of the A mode(b) (T1- Tank1; T2 - Tank2).

and Thornberg(1998a, 1998b)는 각 모드별 운전 시간을 최적화하기 위한 제어 알고리즘을 제안하였다. Fig. 1(b)는 A 모드에서의 제어 전략을 나타내고 있다. 유입수는 Tank1으로 유입되고, Tank 1이 비폭기 모드로 운영되는 동안 Tank 2는 폭기된다. 따라서 Tank 1에서는 탈질 반응에 의해 질산염의 농도가 감소하고 암모니아성 질소는 하수의 유입에 의해 증가하게 되어 반응조 내 영양염 농도인( $\text{NO}_x\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ )을 도시한 점은 좌측 상부로 이동하게 된다. 반대로, Tank 2의 영양염 농도의 궤적은 우측 하단으로 이동하게 된다. 두 반응조의 영양염 농도의 궤적 중 하나가 A 모드가 시작된 지 30분 안에 직선으로 표시된 경계선을 지나게 되면 운전 모드는 B 모드로 진행된다. 만일 두 점 모두 경계선을 넘지 않고 2차원 그래프의 중간 부분에 계속 머무른다면, 30분 뒤에 B 모드로 움직이게 된다.

따라서, 이러한 기본 제어 전략에 의하면, 각 모드의 최대 운전 시간은 최대 30분이며, 그보다 빠른 모드 진행은 경계선의 기울기 설정에 따른다. 현장에서 이러한 기울기는 운전자의 시행착오와 운전 경험에 의하여 결정된 값을 따른다. 운전자는 반응의 진행 상황을 실시간으로 측정되어 운영 시스템으로 전송되는

영양 염류의 농도를 관찰하고 양 반응조의 농도 균형을 맞추기 위해 직관적으로 경계선을 조절하여 운전 하였으며, 이는 종종 잘못된 판단에 의해 반응조 내의 영양염류 누적을 초래하였다.

## 2.2. 영양염류 축적 현상

변화하는 운전 모드로 APID 공정이 운영되면서 2 차원의 그래프로 표현되는 각 반응조에서의 영양염류의 농도는 Fig. 2(a)에 도시된 것과 같은 전형적인 궤적을 그리게 된다. 그래프에서 영양염류의 농도는 상승과 하강을 반복하는데 이는 모드의 변화에 따라 유입과 질산화에 의한 농도 상승과 질산화 및 탈질에 의한 농도 감소를 겪기 때문이다. 각 모드별로 암모니아성 질소의 가장 높은 농도의 변화는 하루 동안 발생하는 유입 부하의 변화를 의미한다. 그러나 각 모드에서 질산화를 이루기 위한 반응시간이 모자라는 경우 반응조 내 암모니아성 질소의 농도가 축적되어 영양염류의 그래프는 Fig. 2와 같은 모양을 가지게 되며, 질산성 질소의 축적시에도 유사한 결과를 낳는다.

영양염류의 축적이 일어나는 경우를 2차원 공간에 도시한 결과가 Fig. 3에 제시되어 있다. 질산성 질소가 축적되는 경우(NA, Nitrate Accumulation)와, 암모니아성 질소가 축적되는 경우(AA, Ammonia Accumulation),

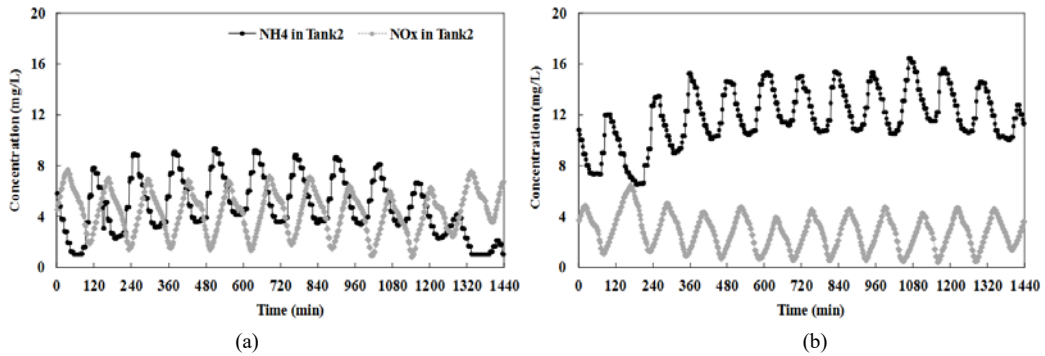


Fig. 2. The nutrient profiles of the normal state(a) and ammonia accumulated(b).

그리고 정상상태(N, Normal state)가 각각 구분 가능한 영역에 분포한다는 사실을 알 수 있다. 사실, Fig. 3에서 질산성 질소의 축적을 의미한다고 표현된 NA의 경우에는 암모니아성 질소와 질산성 질소가 동시에 축적된 상황을 포함하고 있다. 이는 공정 운전 결과 질산성 질소만 축적된 경우가 사실상 낮은 빈도로 얻어짐에 따른 것이다.

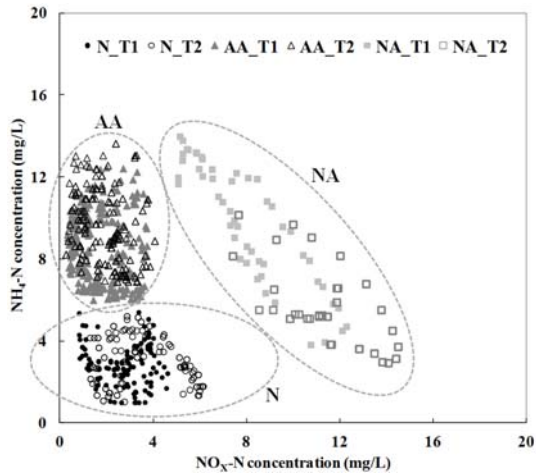


Fig. 3. The locations of nutrient concentrations according to the pre-defined state diagnosis.

2.3. 이상상태 분리를 위한 판별분석

판별분석은 목표변수의 그룹을 미리 정의내린 경우에, 새로운 목표변수의 자료가 어느 그룹에 속하게 될 지를 결정하기 위한 기준이나 함수식을 만들고자

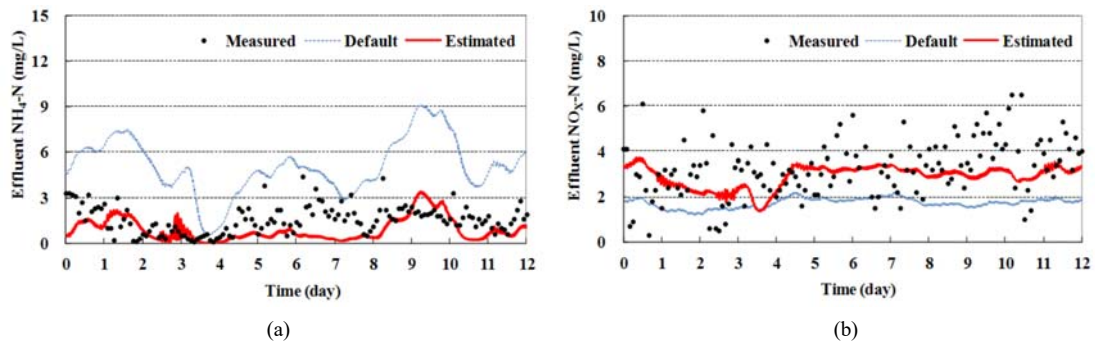
할 때 사용되는 다변량 통계분석 기법 중의 하나이다 (Sharma, 1996). 선형 판별분석은 자료를 특정 공간상에서 각 그룹별 분리를 최대화하는 축으로 사상하여 선형 부공간으로 차원을 축소하는 방법을 바탕으로 판별을 위한 함수식을 생성해 낸다. Fisher가 제안한 방법은 각 그룹 내의 분산을 최소화하고 그룹 간의 분산을 크게 만드는 집단 간 절단선을 찾는 방법이다. 본 연구에서 판별의 대상이 되는 그룹은 앞서 정의한 바 있는 AA, NA, 그리고 N으로 설정하였고, Fisher의 선형 판별분석에 의하여 각 그룹을 의미하는 세 개의 함수식( $Y_{AA}$ ,  $Y_{NA}$ ,  $Y_N$ )이 도출되었다. 각 반응조에서 어떠한 시점에 측정된 암모니아성 질소와 질산성 질소의 농도 두 쌍을 함수식에 입력하면, 가장 큰 값을 도출하는 함수식이 의미하는 그룹에 해당 시점의 자료가 속하게 된다고 판단할 수 있다. 따라서 10분마다 측정되는 영양염류의 값이 운영시스템으로 전송되면, 간단한 계산에 의해 그 시점 반응조 내의 상태가 질산염 축적 상태(NA)인지, 암모니아 축적 상태(AA)인지 혹은 정상상태인지를 판별하게 된다.

2.4. 제어 전략 평가를 위한 공정 시뮬레이션

판별 함수에 의한 현재 상태의 진단 이후에 공정을 정상 상태로 되돌리기 위한 제어 전략을 수립하였고 (Fig. 4), 제어 전략의 효과를 미리 알아보기 위하여 공정모의를 활용하였다. 모의를 위한 공정 모델은 ASM3+Bio-P 모델(Lee et al., 2006; Kim et al., 2012)을, 침전을 위한 모델은 1차원 이중지수함수 모델 (Takacs et al., 1991)을 활용하였다. 모델의 계산값에

**Table 1.** Sensitive parameters and their calibrated values

Symbol	Description	Default Values	Estimated values
$\Gamma_{NO}$	Reduction factor for anoxic endogenous respiration	0.6	0.31
$\mu_A$	Maximum growth rate of autotrophic biomass	1.0	2.14
$K_{O,A}$	Saturation coefficient for ammonium	0.5	0.39
$b_A$	Aerobic endogenous respiration rate	0.15	0.12
$\mu_{PAO}$	Maximum growth rate of $X_{PAO}$	1.0	0.56
$K_{O,PAO}$	Saturation coefficient for $S_{PO_4}$	0.2	0.16



**Fig. 4.** Process model optimization results for NH<sub>4</sub>-N (a) and NO<sub>x</sub>-N (b).

가장 큰 영향을 미치는 민감한 매개변수를 찾기 위해, 모델 개발자들이 제안한 기본값(default value)으로부터 50~200%의 범위 내에서 10%씩 변화시켜 민감도 분석을 수행하였고 민감한 변수를 위주로 매개변수 조정 과정을 수행하였다. 12일의 공정 운전결과를 사용하여 모델의 최적화 과정이 수행되었고, 식 (1)은 그 과정에 사용된 목표 오차함수를 제시하고 있다. 공정 모의 과정은 하수처리시설의 처리성능 모의를 위한 전문적 소프트웨어인 GPS-X (ver. 4.1.2, Hydromantis Inc., Canada)를 활용하였다.

$$F = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} \left| z_{i,j} - f_{ij} \right| \quad (1)$$

여기서,  $z_{i,j}$ 는  $i$  번째 테스트의  $j$  번째 요소의 측정된 값을 의미하고,  $f_{ij}$ 는  $i$  번째 테스트의  $j$  번째 요소에 대해 모델이 계산해 낸 값을 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 공정 모델의 최적화

제어 전략을 평가하기 위한 공정 모델의 가장 민감한 매개변수들과, 모델이 실제 공정의 성능을 모사하게 하기 위해 조정된 매개변수들의 값을 Table 1에 제시하였다. 민감한 것으로 제시된 매개변수들은 주로 질소 제거에 관련된 변수들이었으며 이는 최적화된 모델이 생성하는 유출수질이 생물반응조의 질소 제거 성능에 크게 의존한다는 것을 의미한다. Table 1에 제시된 값을 활용하여, 공정 모델은 공정의 실측 자료에 보다 가까운 값을 계산해 낼 수 있도록 최적화되었다는 사실을 Fig. 5로부터 알 수 있다. 암모니아성 질소의 경우 RMSE(Root Mean Square Error) 값은 매개변수 기본값으로 모의하였을 경우 4.0이었으나 모델 최적화로 1.3으로 감소하였고, 질산성 질소의 경우 2.2에서 1.4로 감소하였다.

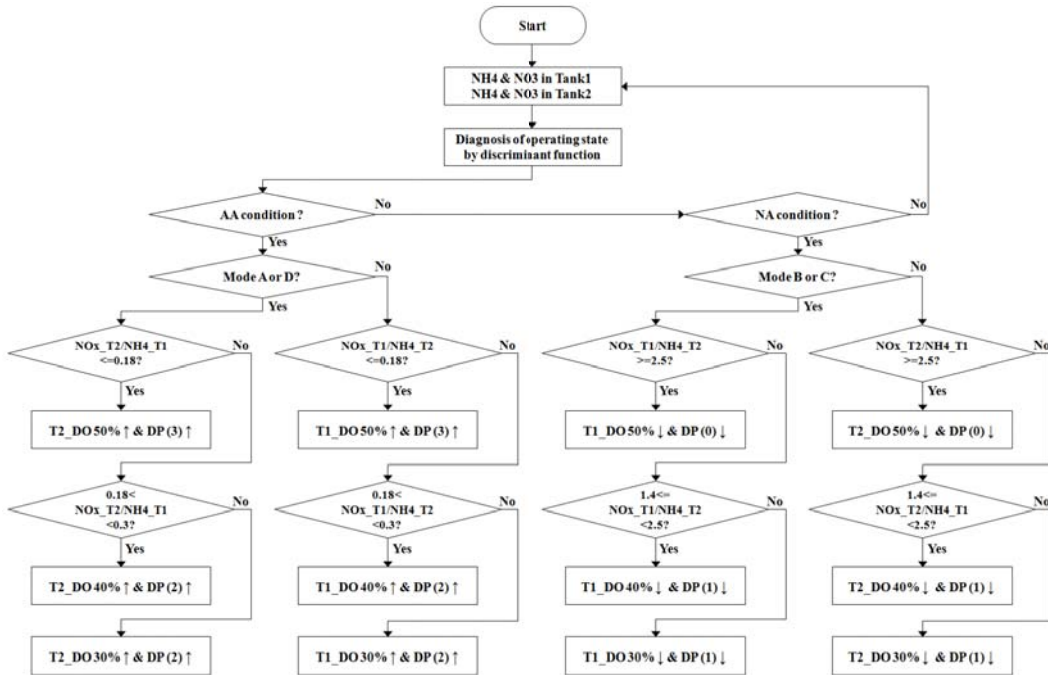


Fig. 5. The control strategy starting with the identified nutrient accumulation cases.

3.2. 상태 진단을 위한 판별함수

현장 운영 자료로부터 암모니아성 질소 축적시의 자료와 질산성 질소 축적 현상시의 운영 프로파일을 분리하여 정상 프로파일과 함께 판별함수를 적용하였다. 판별함수에 쓰인 운영자료는 Tank1과 Tank2에서의 암모니아성 질소의 농도와 질산성 질소의 농도로 4개의 변수가 각각이 속한 그룹이라는 변수와 함께 총 5개의 변수를 대상으로 Fisher의 선형 판별함수를 도출하였다(SPSS ver. 18.0). 도출된 판별함수는 아래 식 (2)~(4)와 같다. 어느 시점의 새로운 영양염류의 농도가 반응조에서 측정이 되면, 아래의 판별함수 식에 입력으로 들어가게 되고, 가장 높은 계산 결과를 도출하는 함수가 의미하는 그룹에 속한다고 판별하게 된다.

$$\begin{aligned}
 Y_N &= 7.20 \times NH_{4n} + 7.55 \times NH_{4r2} \\
 &\quad + 10.11 \times NO_{Xn} + 8.67 \times NO_{Xr2} - 52.02 \\
 Y_{AA} &= 13.45 \times NH_{4n} + 14.25 \times NH_{4r2} \\
 &\quad + 15.22 \times NO_{Xn} + 12.51 \times NO_{Xr2} - 151.57
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{NA} &= 20.98 \times NH_{4n} + 20.91 \times NH_{4r2} \\
 &\quad + 29.51 \times NO_{Xn} + 25.49 \times NO_{Xr2} - 428.37
 \end{aligned}$$

3.3. 진단 기반 제어 전략의 수립

한 번 영양염류 축적의 상태로 진행된 반응조를 정상화시키기 위해서는, 적절한 운전조건의 조절이 수행되어야 한다. 예를 들면, 폭기 시간의 증가 혹은 각 반응조 내의 폭기 영역(DP)의 개수의 증가 등의 조치가 필요하다. 이들 대안 중 폭기시간의 증가는 사실상 반대편 반응기로의 유입량의 증가를 동반하므로 바람직하지 않아, 각 운전모드 별 최대 운전시간(최대 유입시간)은 제한적으로 30분으로 정해졌다. 암모니아 축적을 의미하는 AA 상태에서는, 반응조의 폭기 영역을 증대시켜 질산화를 도모하여야 한다. 반응조 내 질산염 농도가 높은 경우에는, 직전 운전 모드의 종료 시점에서의 용존산소의 농도가 잔류 DO로서 탈질을 방해하지 않도록 반응조 내의 폭기 영역은 적당히 축소되어 운전되어야 한다. Tank1에서의 암모니아성 질소 농도에 대한 Tank2에서의 질산성 질소의 농도의

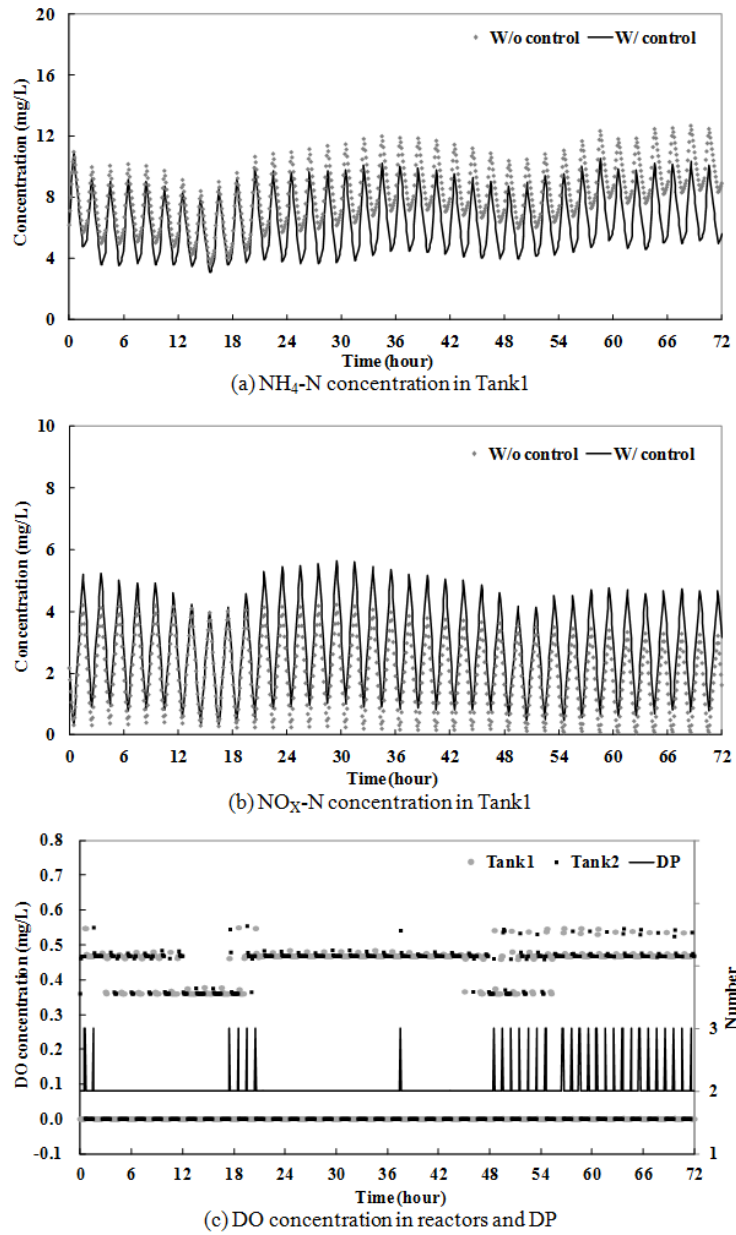


Fig. 6. Simulated test results of the developed diagnosis-based control algorithm.

비와, Tank2에서의 암모니아성 질소의 농도에 대한 Tank1에서의 질산성 질소의 농도의 비율을 제어 동작을 결정하기 위해 함께 고려해야 한다. 알고리즘에서의 “DP”는 Tank3이라고 다시 구획지어질 수 있는 네 개의 영역을 의미하며, 이는 Fig. 1(a)에서 a~d로 표현

되어, 반응조의 폭기되는 부피를 증가시키고 싶을 때 유입수의 유입 방향 및 공정의 슬러지 반송 흐름을 피할 수 있는 순서로 폭기된다. 이러한 경험적 지식에 의해, Fig. 5에 제시된 것과 같은 진단 기반 제어 알고리즘이 설계되었다.

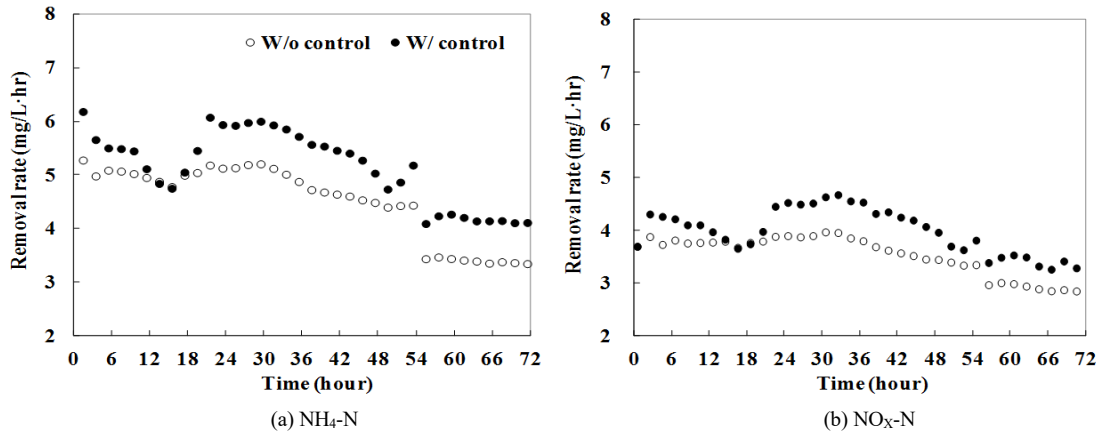


Fig. 7. Comparison of removal rates of the developed diagnosis-based control and without control.

### 3.4. 진단 기반 제어 알고리즘의 모의에 의한 평가

앞서 최적화된 공정 모델을 활용하여 본 논문에서 제안하는 진단 기반 제어 알고리즘의 효과를 모의하였다. 현장 플랜트에서 6일간, 2시간 간격으로 유입수를 채취하여 분석한 유입수 성상 변화 자료를 활용하여 현장 상황을 최대한 반영하며 제어 알고리즘의 효과를 평가하고자 하였다. Fig. 6에 제시된 바와 같이, Tank1의 높은 암모니아 농도가 “AA”로 감지되었고 Fig. 4에 표현된 바와 같은 제어 알고리즘이 실행되었다. 그 결과로 인해, Tank1의 질산염 농도는 제어를 수행하지 않았던 경우의 모의 결과(w/o control)보다 상승하였고, 이는 Fig. 6(c)에 표현된 바와 같이 DP(Tank3에서의 폭기영역의 개수)를 3으로 증가시키고 Tank1과 Tank2의 DO 설정값을 상승시켜 질산화를 증가시킨 제어 동작에 의한 것이다.

### 3.5. 진단 기반 제어 알고리즘의 현장 검증

본 연구에서 제안된 제어 알고리즘의 모의를 활용한 평가에 이어, 현장 적용을 통해 제어 알고리즘의 평가를 수행하였다. 제어 알고리즘 적용의 효과는 같은 유입수가 주입되는 대상 플랜트 내 타 계열의 동일한 APID 공법의 운전 결과와 비교하여 Fig. 7에 제시되었다. 제어 알고리즘의 시범 운전은 반응조 내의 암모니아성 질소가 축적된 시점부터 3일간 실시하였다. 3일간 진단 기반 제어 알고리즘은 반응조 내의 축적된 암모니아성 질소를 감소시키기 위하여 DP 증가 및

DO 설정값 증가 등의 제어 동작을 수행하였고, 질산화가 촉진되자 반응조에 질산성 질소가 축적되기 시작하여, 그를 탈질시키기 위한 제어 동작 또한 동시에 수행되었다. 이러한 결과로 인하여, Fig. 7에 제시된, A 모드에서 D 모드까지 Tank1에서 제거된 암모니아성 질소와 질산성 질소의 양은 제어 동작이 수행되지 않은 대조군의 계열에서 얻어진 결과에 비해 우수한 질소제거가 이루어졌음을 보여주고 있다. Fig. 6에 제시되었던 시뮬레이션 결과에서와 마찬가지로 DP의 조절과 DO 설정값의 조절이 수행되었으나, 현장 시스템에 자동으로 저장되지 않아 도식화하여 제시하지 못하였다. 암모니아성 질소의 제거율은 제어 동작을 수행하기 전에 최소 3.35, 최대 5.28, 평균 4.51 NH<sub>4</sub>-N mg/L·hr의 값을 가졌으나 진단 기반 제어 동작에 의해서는 최소 4.09, 최대 6.18, 평균 5.15 NH<sub>4</sub>-N mg/L·hr로 상승하였다. 또한, 질산성 질소의 경우 제어동작을 수행하기 전에는 최소 1.40, 최대 1.89, 평균 1.66 NO<sub>x</sub>-N mg/L·hr의 값을 가졌었으나 제어동작을 수행한 후 최소 1.71, 최대 2.54, 평균 2.17 NO<sub>x</sub>-N mg/L·hr의 값으로 제거율이 향상되었다. 이러한 제어 결과는 본 연구에서 개발된 진단 기반 제어 전략이 APID 공정을 운전함에 있어 반응조 내 질산화와 탈질을 감지하여 유입수 변동에 의한 축적 문제를 완화 혹은 해결할 수 있다는 것을 의미한다.



#### 4. 결론

본 연구의 대상이 되는 APID 공정은 기존 표준활성슬러지 공법으로부터 쉽게 질소제거 공정으로 개조될 수 있으며, 반응조 내 유입수 주입 지점과 폭기/비폭기 구역을 유동적으로 제어함으로써 질소 제거율을 능동적으로 조절할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 유입수의 변동과 미숙한 제어 전략은 종종 안정적인 질소 제거를 위협하여 반응조 내의 암모니아성 질소 및 질산성 질소의 축적을 동반하게 되는 단점 또한 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 불안정한 상황을 감지하고 질소 축적을 해소할 수 있는 진단기반 제어 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘을 현장 공정에 최적화된 수학적 모델을 활용하여 개발된 알고리즘을 평가한 결과, DO 설정값이나 폭기영역의 값은 변화 없이도 반응조 내의 질소 축적을 완화할 수 있음을 확인하였다. 뒤이어 실규모의 현장 플랜트에도 적용하여 본 결과, 안정적으로 질소 축적을 개선할 수 있음이 확인되었다.

일반적으로 하수처리공정에서 DO 제어 등을 수행할 경우 활용하는 전통적인 제어 방식은 주로 목표변수의 설정값과 현재의 값 사이의 차이에 의해 제어 동작의 크기가 결정되며, 목표 설정값에 도달할 때까지 조절변수의 빈번한 변경이 이루어져 제어 장비의 형태에 크게 의존하고 도리어 제어 장비의 내구성에 영향을 미치기도 한다. 그러나 이러한 진단기반 제어 알고리즘은 정성적인 상태 진단(AA, NA, N)에서 제어 동작의 수행 여부가 결정되고, 규칙에 의하여 제어 동작이 결정되어 조절변수의 빈번한 수정을 요구하지 않는다는 큰 장점을 가진다. 이러한 측면에서, 본 연구는 진단기반 제어 방법을 현장에 적용하여 확인한 사례로서 그 의미를 가진다고 할 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016년도 부산가톨릭대학교 교내연구비(과제번호: 2016-1-060)에 의하여 연구되었음.

#### REFERENCES

Hong, K. H., Kang, S. W., Hur, J. M., Han, S. B., Sunwoo,

Y., Chang, D., 2008, Effect of cycle length and phase fraction on biological nutrients removal in temporal and spatial phase separated process, *J. Ind. Eng. Chem.*, 14(4), 520-525.

Isaacs, S., Thornberg, D., 1998a, A Comparison between model and rule based control of a periodic activated sludge process, *Water Sci. Technol.*, 37(12), 343-351.

Isaacs, S., Thornberg, D., 1998b, Rule based control of a periodic activated sludge process, *Water Sci. Technol.*, 38(3), 281-289.

Kim, H., Kim, Y., Cha, J., Min, K., Gee, J., Kim, C., 2009, Model-based evaluation of control strategies for phosphorus removal in a full-scale advanced phase isolation ditch process, *Water Sci. Technol.*, 60(4), 879-888.

Kim, H. S., Kim, Y. J., Chen, S. P., Baek, G. D., Kim, S. S., Kim, C. W., 2012, Evaluation of model-based control strategy based on generated setpoint schedules for NH<sub>4</sub>-N removal in a pilot-scale A2/O process, *Chem. Eng. J.*, 203, 387-397.

Kim, H. S., Kim, Y. J., Kim, M. S., Piao, W., Gee, J. S., Kim, C. W., 2014, Performance evaluation of a full-scale advanced phase isolation ditch process by using real-time control strategies, *Kor. J. Chem. Eng.*, 31(4), 611-618.

Kim, H. O., McAvoy, T. J., Anderson, J. S., Hao, O. J., 2000, Control of an alternating aerobic-anoxic activated sludge system - Part 2: Optimization using a linearized model, *Control Eng. Pract.*, 8, 279-289.

Lee, S. H., Ko, J. H., Kim, J. R., Kim, Y. J., Lee, J. J., Kim, C. W., Lee, T. H., 2006, Identification of the adverse effect of nitrate on the phosphate release rate and improvement of EBPR process models, *Water Sci. Technol.*, 53(4-5), 115-123.

Lukasse, L. J. S., Keesman, K. J., Van Straten, G., 1999, A Recursively identified model for short-term predictions of NH<sub>4</sub>/NO<sub>3</sub> - concentrations in alternating activated sludge processes, *J. Process Contr.*, 9, 87-100.

Paul, E., Plisson-Saune, S., Mauret, M., Gantet, J., 1998, Process state evaluation of alternating oxic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO, *Water Sci. Technol.*, 38(3), 299-306.

Poo, K. M., Im, J. H., Jun, B. H., Kim, J. R., Hwang, I. S., Choi, K. S., Kim, C. W., 2006, Full-cyclic control

- strategy of SBR for nitrogen removal in strong wastewater using common sensors, *Water Sci. Technol.*, 53(4-5), 151-160.
- San Martin, J. A. D., Bournazou, M. N. C., Neubauer, P., Barz, T., 2014, Mixed integer optimal control of an intermittently aerated sequencing batch reactor for wastewater treatment, *Comput. Chem. Eng.*, 71(4), 298-306.
- Sharma, S., 1995, *Applied multivariate techniques*. John Wiley & Sons, Inc., USA, 237-246.
- Takacs, I., Patry, G. G., Nolasco, D., 1991, A Dynamic model of the clarification-thickening process, *Water Res.*, 25(10), 1263~1271.
- Thomsen, H. A., Nielsen, M. K., Nielsen, E. H., Hansen, N. P., 1998, Load dependent control of BNR-WWTP by dynamic changes of aeration volumes, *Water Sci. Technol.*, 37(12), 157~164.
- Park, J. R., Gee, J. S., Yoon, Y. H., Ko, K. B., Ahn, S. W., Min, K. J., 2008, Process evaluation of HASP with IMET system through SNR and SDNR for the efficient management of sewage treatment plant, *Wat. Pract. Technol.*, 3(1), 1~7.
- Zhao, H., Isaacs, S. H., Søeberg, H., Kummel, M., 1994a, A Novel control strategy for improved nitrogen removal in an alternating activated sludge process - PART II. Control development, *Water Res.*, 28(3), 521~534.
- Zhao, H., Isaacs, S. H., Søeberg, H., Kummel, M., 1994b, A Novel control strategy for improved nitrogen removal in an alternating activated sludge process - PART II. Control development, *Water Res.*, 28(3), 535~544.