

수학적 모델을 활용한 alternating 형태 공정과 recirculating 형태 공정의 성능 평가

김호수 · 김예진 · 차재환 · 최수정 · 민경진* · 김창원†

부산대학교 사회환경시스템공학부

* (주)태화강재산업

Performance Evaluation between Alternating Type Process and Recirculating Type Process by using a Mathematical Model

Hyosoo Kim · Yejin Kim · Jaewhan Cha · Soojung Choi · Kyungjin Min* · Changwon Kim†

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

*Taiwha industrial Co., Ltd

(Received 26 November 2009, Revised 23 December 2009, Accepted 24 December 2009)

Abstract

In this research, the performance evaluation between an alternating type process and a recirculating type process was investigated by using mathematical models. The Advanced Phase Isolation Ditch (APID) process and the A²/O process were selected the target processes of the alternating type and recirculating type, respectively. For more quantitative evaluation, 5 performance indexes which included economy and energy efficiency as well as effluent quality were used, and various disturbance conditions of influent were given to the process models. As simulation results, the APID process which had the specific operation modes to use the organic matter in influent effectively showed higher efficiency of denitrification than the A²/O process. In the case of effluent TSS, the A²/O process that the retention time in reactors could be maintained stably was more effective than the APID process. In the cases of various disturbance condition, although it was identified that both two processes had similar effluent quality, the sludge production of the A²/O process showed lower than that of the APID process while the APID process showed higher energy efficiency.

keywords : Advanced Phase Isolation Ditch, Alternating type, A²/O, Mathematical model, Performance evaluation, Recirculating type

1. 서론

생물학적 영양염류 제거(Biological Nutrient Removal, BNR) 공정은 하천 및 호소수에 기준치 이상 방류될 때 부영양화를 유발할 수 있는 질소, 인과 같은 영양염류의 원활한 제거가 가능한 공정이다. 지금까지 다양한 BNR 공정들이 개발되었고, 실험실 규모 및 파일럿 규모의 테스트를 거쳐 실증 시설과 같은 대규모 하수처리장에 적용되어 안정적인 유출 수질을 유지하고 있다.

대부분의 BNR 공정들은 운전 형태에 따라 크게 두 가지 종류로 구분할 수 있다. 하나는 반응조의 운전 조건을 유입 지점 및 폭기 여부에 따라 시간적으로 구분하고, 별도의 내부반송 라인을 제거한 alternating 형태의 공정들이고, 다른 하나는 반응조의 운전 조건을 공간적으로 구분하고, 내부반송 라인을 통해 미처리된 오염물질을 선행 반응조로 재순환시키는 recirculating 형태의 공정들이다. 선행 연구자들에 의해 하수처리 공정들의 경제성 평가, 두 가지 BNR

공정의 모델 기반 평가, 소규모 하수처리 공정들의 성능 안정성 평가 등 다양한 공정들을 비교 및 평가하는 연구는 보고되어 왔으나(김민한과 유창규, 2008; Hao et al., 2001; Karlsson, 1996; Ødegaard and Skrøvesth, 1997; Tam et al., 2004), alternating 형태의 공정들과 recirculating 형태의 공정들 사이의 성능을 비교 및 평가가 보고된 사례는 전무하다. 이는 공정 형태에 따른 운전 조절 변수가 서로 다르고, 최근까지 대규모 하수처리장에서 alternating 형태의 공정이 장기간 운전되고 있는 사례가 드물었기 때문이다.

하지만, 최근 국내에서 실증 규모의 하수처리장에 alternating 형태의 공정이 성공적으로 운전되는 사례가 보고되고 있고(안상우 등, 2009; 윤영한 등, 2007; Kim et al., 2009), 이에 따라 국내 하수처리공정의 대부분을 차지하는 전통적인 recirculating 형태의 공정과 비교할 경우, alternating 공정 성능에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다. 운전 형태가 서로 다른 공정들 간의 성능을 실험적으로 비교하기에는 유입 수질, 온도, 반응조 부피, 미생물 농도 등과 같은 운전 및 설계 조건을 동일하게 유지하면서, 장기간 정상 상태로 운전되어야 하는 어려움이 존재하기에 현실적으로 불가능하다.

† To whom correspondence should be addressed.

cwkim@pusan.ac.kr

이를 해결할 수 있는 한 방법 중 수학적 모델링은 장기 간의 실험에 소요되는 비용과 시간을 절감해 줄 수 있고, 지금까지 공정 모사, 최적 제어 및 서로 다른 공정 간의 비교 평가를 위해 다양하게 사용되어 왔었다. 수학적 모델링은 파일럿 규모의 실험을 극복하고, 공정의 모든 변수들의 영향을 빠르게 평가할 수 있다(Hao et al., 2001).

따라서 본 연구에서는 생물학적 처리 공정에서 보편적으로 사용되고 있는 활성슬러지 모델을 활용하여 운전 형태가 다른 alternating 및 recirculating 공정의 성능을 평가하고자 하였다. 이를 위해 alternating 형태의 공정으로서 최근 국내에서 실증 규모로 운전되고 있는 Advanced Phase Isolation Ditch(APID) 공정을 선정하였고, recirculating 형태의 공정으로서, 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 A²/O 공정을 선정하였다. 공정 평가를 위해 Copp(2002)에 의해 보고된 5가지 평가 지표를 활용하였으며, 유입 유량 및 농도 변화와 같은 다양한 외란들이 발생한 경우에 대해서도 공정의 비교 평가를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상 공정 및 운전 조건

본 연구에서 선정된 APID 공정은 현재 P시 J하수처리장 내 설계 유량 10,000 m³/day의 실증 규모로 운전되고 있다. 반응조는 2조로 구성되어 있고, 각각 장방형 2차 침전조와 연결되어 있다. 반응조는 총 8개의 단으로 구성되며, 개별 단의 유효 부피는 330 m³으로, 총 유효 부피는 2,640 m³이다. 2개 침전조의 표면적과 수심은 각각 216 m²과 3.5 m이다. Fig. 1에 APID 공정의 현장 시설 사진과 운전 모드를 나타내었다. APID 공정의 기본 운전 모드는 네 개로 구성되어 있고, 각 모드의 기본 운전 시간은 30분으로 모드에 따라 유입 지점과 슬러지반송 유량 주입 지점이 변하게 된다. Tank1과 Tank2는 2개 단으로 구성되어 있고, 유입수가 주입되는 일련의 단들은 비폭기로 운전되며, 반대편의 일련의 단들은 폭기로 운전된다.

Recirculating 형태의 공정으로 선정된 A²/O 공정은 현재 운전되고 있는 APID 공정과 동일한 부피를 가지며, 2개 조가 결합하여 한 개의 조로 운전된다고 가정하였다. 개별

반응조의 부피는 혐기조 330 m³, 무산소조 330 m³, 호기조 1,980 m³으로 Vesilind(2003)에서 언급한 A²/O 공정의 적정 HRT 범위 내에서 계산하였고, 침전조 표면적과 유효 수심은 각각 432 m²과 3.5 m로 설정하였다.

APID 공정과 A²/O 공정 모두 슬러지반송 유량은 유입 유량 대비 35%로 설정하였고, SRT는 15.5 day로 유지하였다. A²/O 공정에만 존재하는 내부슬러지반송 유량은 유입 유량 대비 200%로 설정하였다.

2.2. 공정 모델 및 유입 수질

본 연구에서는 반응조 내 농도 거동을 모사하기 위해, 혐기조에서 질산염의 인 방출 저해 반응을 포함한 수정된 ASM3+Bio-P 모델(이성학, 2006)을 적용하였다. 또한, 침전조 거동 모사를 위해 침전조 내 반응이 없고 물리적인 flux만을 고려한 일차원 이중 지수 함수 모델(Takacs et al., 1991)을 사용하였다. APID 공정은 시간에 따라 동일 반응조에서 폭기/비폭기가 반복되므로, 모델 입력값인 산소 전달 계수(kLa)를 A²/O 공정보다 높은 75/d로 설정하였고, A²/O 공정은 50/d로 설정하였다.

시뮬레이션에 사용된 유입 수질은 2009년 8월 17일~28일 동안 2시간 간격으로 분석되었고, 모델 입력 자료로 활용된 분석 및 측정 항목의 범위를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Influent characteristics during 12 days

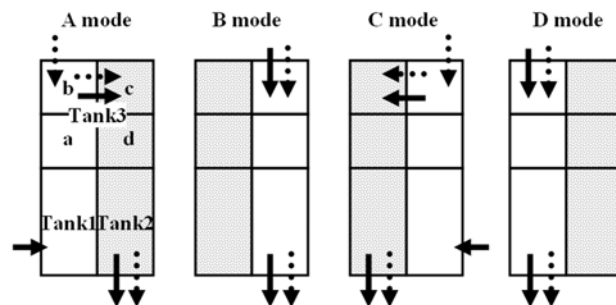
Subject	Range	Average
Flowrate (m ³ /day)	4053.0~10869.9	8598.6
TCOD (mg/L)	54.0~201.0	118.4
SCOD (mg/L)	43.0~154.0	72.8
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	4.8~22.7	15.7
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	0.1~5.2	2.1
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	0.5~3.5	2.1

2.3. 공정 평가 지표 도출

본 연구에서 선정된 두 공정에 대한 유출 수질 비교를 포함한 경제성 및 에너지 측면에서의 종합적인 평가를 수행하기 위해 Copp(2002)에 의해 제안된 5가지 평가 지표를 적용하였다. 5가지 평가 지표는 유출 수질(Effluent Quality, EQ), 슬러지 생산량(Sludge Production, SP), 펌핑 에너지



(a) APID picture



(b) APID operation modes

Fig. 1. Picture of APID field operation and operation modes of APID (▨: aeration, →: influent flow, ⇄: return sludge flow; Kim et al., 2009)

(Pumping Energy, PE), 폭기 에너지(Aeration Energy, AE) 그리고 교반 에너지(Mixing Energy, ME)로 정의된다. EQ의 경우, 유출수 TSS, COD, BOD₅, NH₄⁺-N, NO_x-N 그리고 PO₄³⁻-P 항목을 고려하여 계산하였고, 각 항목의 가중치를 부여하기 위해 현행 방류수 수질 기준을 고려하여 TSS 10 ppm, COD 20 ppm, BOD₅ 10 ppm, NH₄⁺-N 10 ppm, NO_x-N 10 ppm 그리고 PO₄³⁻-P 2 ppm으로 설정한 후 각 항목값의 역수를 도출하고 평준화하였다. 평준화된 값은 TSS 2, COD 1, BOD₅ 2, NH₄⁺-N 2, NO_x-N 2 그리고 PO₄³⁻-P 10이었고, 이때 영양염류 항목에 대한 보다 높은 가중치를 적용하여 NH₄⁺-N 20, NO_x-N 20 그리고 PO₄³⁻-P 40으로 설정한 후 적용하였다.

2.4. 유입수 외란 발생에 따른 공정 성능 평가

분석된 12일간의 유입수에 대한 두 공정의 성능 평가뿐만 아니라, 본 연구에서는 유입수에 외란이 발생할 경우를 가정하여, 이에 대한 두 공정의 성능을 평가해보고자 하였다. 유입수 외란은 강우 발생과 같은 고유량 및 저농도 조건, 심야시간대와 같은 저유량 조건, 고농도 조건 그리고 유량과 농도가 동시에 증가하는 조건과 같은 총 네 가지의 외란 조건을 가정하고, 12일간의 유입수 중 5~8일간, 총 3일 동안 그 영향을 반영한 후 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 수행할 때 외란의 영향을 일정 부분 제어할 수 있도록 두 공정의 운전 변수를 조절하였다. APID 공정의 경우, 슬러지반송 유량과 폭기량이 조절되었고, A²/O 공정의 경우, 슬러지반송 유량, 폭기량 그리고 내부슬러지반송 유량이 조절되었다(Table 2).

3. 결과 및 고찰

3.1. 동적 상태 시뮬레이션 결과

측정된 12일간의 유입수를 모델 입력 자료로 사용하여 APID 공정과 A²/O 공정의 동적 상태 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 캐나다 Hydromantis 사의 GPS-X 프로그램 사용하여 수행되었다. APID 공정의 경우, GPS-X 프로그램 내 흐름을 분할해주는 splitter 기능과 흐름을 결합시켜주는 combiner 기능을 통해 운전 모드에 따른 유입수 및 슬러지반송 유량의 주입지점을 변경하였고, 산소 전달 계수(k_{1a})를 입력 자료로 활용하여 반응조 내 폭기 및

비폭기를 설정하였다. 각 공정의 유출수 NH₄⁺-N, NO_x-N, PO₄³⁻-P 그리고 TSS 농도를 Fig. 2에 나타내었다.

NH₄⁺-N 농도의 경우, APID 공정과 A²/O 공정 모두 비슷한 제거 효율을 나타냈지만, 유출수 NO_x-N 농도 제거의 경우, APID 공정이 보다 더 효율적인 공정으로 확인되었다. 이는 A²/O 공정의 경우, 유입수 내 존재하는 유기물이 혐기조를 거쳐 무산소조로 이동되어, 탈질 반응에 필요한 충분한 유기물이 부족할 수 있는 반면에 APID 공정의 경우, 운전 모드가 30분 간격으로 변함에 따라 반응조의 각 부분에 유입수 내 유기물이 효율적으로 사용될 수 있었기 때문으로 사료된다.

유출수 PO₄³⁻-P 농도의 경우, 제거율에서 약간의 차이만 존재하며 두 공정 모두 방류수 수질 기준인 2 ppm보다 낮은 PO₄³⁻-P 농도가 유출됨을 확인할 수 있었다. A²/O 공정은 혐기 조건으로 유지되는 반응조가 공간적으로 분리되어 있는 반면, APID 공정은 별도의 혐기조가 없지만, 운전 모드에 따라 슬러지반송 유량을 유입 유량과 다른 반응조로 주입하여 혐기 조건을 조성해줌으로써 효율적인 인 제거가 발생할 수 있었다고 사료된다. 다른 항목과는 달리 TSS 농도의 경우, 두 공정의 거동에서 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. A²/O 공정은 유출수 TSS 농도가 10 ppm을 기준으로 큰 차이가 발생하지 않는 반면, APID 공정은 최소 약 6.2 ppm에서 최대 약 15.3 ppm까지 변화하였다. 이는 시간에 따라 유입 유량과 슬러지 반송 유량의 주입 지점이 달라지게 되는 APID 공정의 운전 조건에 의한 결과로 사료된다. Fig. 1의 B와 D 모드 운전에서는 유입 유량과 슬러지 반송 유량이 함께 침전조로 유출되어 침전조 내 부유성 물질이 높게 유출되지만, A와 C 모드에서는 낮은 유량이 침전조로 유입되므로 TSS 농도가 낮게 유출될 수 있다.

두 공정의 반응조 내에서 오염물질 제거를 수행하는 미생물 농도의 차이를 확인하기 위해, APID 공정의 Tank2와 A²/O 공정의 마지막 호기조에서 종속영양균, 독립영양균 및 인 축적 미생물의 변화를 확인하였다. Table 3에 일간 미생물 농도 변화를 나타내었고, 12일간의 평균 미생물 농도를 Fig. 3에 나타내었다.

반응조 내의 종속영양균과 독립영양균의 농도는 A²/O 공정이 높게 나타났고, 인 축적 미생물은 APID 공정이 높게 나타났다. APID 공정은 A²/O 공정에 비해 낮은 종속영양

Table 2. Influent disturbance conditions and control of each process during 3 days

Disturbance conditions	Change of operation condition	
	APID process	A ² /O process
Flowrate 200% ↑	Qr 200% ↑	Qr 200% ↑
Concentrations 50% ↓	Qr 200% ↑	Qir 150% ↑
Flowrate 50% ↓	k _{1a} 50% ↓	k _{1a} 50% ↓
Concentrations 200% ↑	Qr 200% ↑ Qw 200% ↑ k _{1a} 200% ↑	Qr 200% ↑ Qw 200% ↑ Qir 150% ↑ k _{1a} 200% ↑
Flowrate 200% ↑	Qr 200% ↑ Qw 200% ↑	Qr 200% ↑ Qw 200% ↑
Concentrations 200% ↑	k _{1a} 300% ↑	Qir 150% ↑ k _{1a} 300% ↑

Qr: return sludge flowrate, Qir: inner retrun sludge flowrate, Qw: waste sludge flowrate

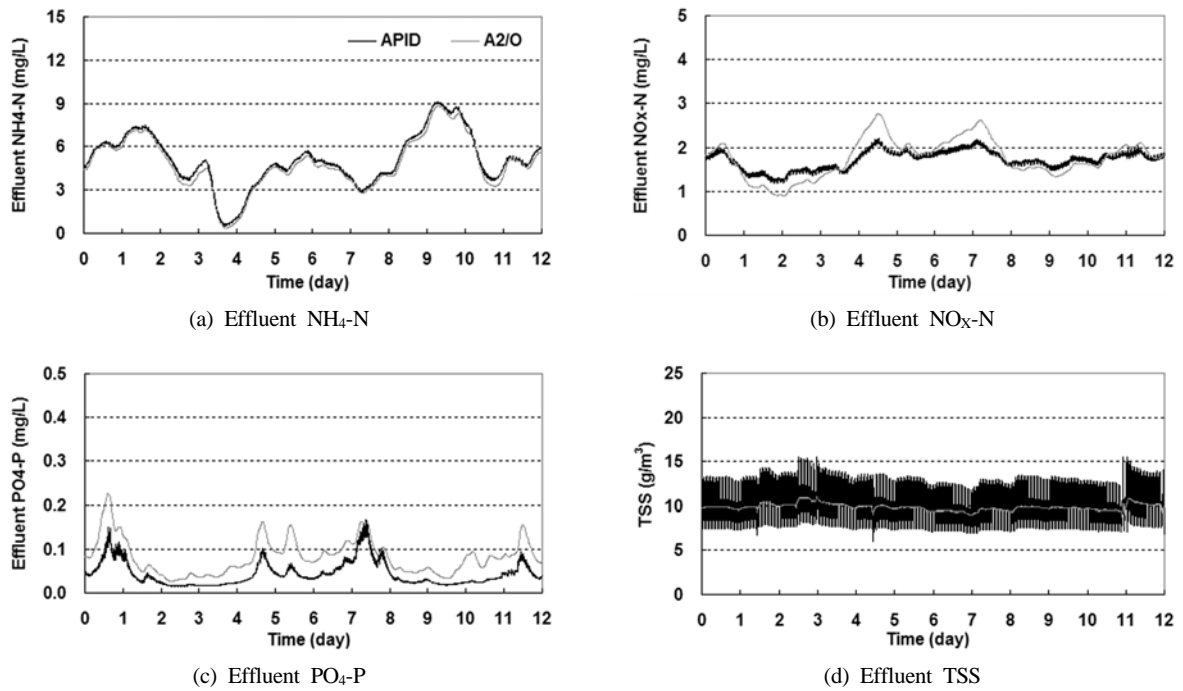


Fig. 2. The comparison of simulation data between APID and A²O process.

Table 3. Daily concentration changes of three biomass

Time (day)	Heterotrophic biomass		Autotrophic biomass		PAOs	
	APID	A ² O	APID	A ² O	APID	A ² O
1	338.8	399.1	52.7	60.8	167.0	156.9
2	345.0	407.9	53.2	61.4	168.9	156.9
3	348.2	423.6	53.1	61.7	181.0	170.8
4	337.6	430.2	51.7	62.2	187.0	182.2
5	338.7	407.8	52.2	59.9	194.7	179.4
6	327.0	389.7	51.2	59.3	184.0	170.2
7	325.9	383.5	51.0	58.2	179.3	162.2
8	324.1	376.9	50.8	57.8	171.5	155.4
9	316.5	369.8	49.8	56.9	166.6	153.6
10	316.9	381.5	49.7	57.8	172.5	162.2
11	323.4	397.6	50.1	58.7	179.5	167.6
12	304.9	406.8	46.9	59.8	165.1	166.5

PAOs: Phosphorous Accumulating Organisms

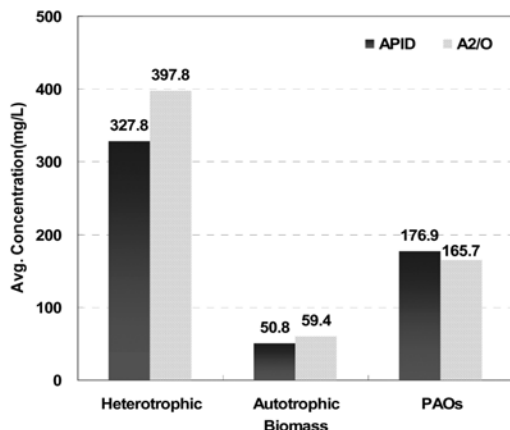


Fig. 3. Average concentrations of three biomass.

균이 존재하였지만, 반응조 전체에 균등하게 분포가 되어 A²O 공정 대비 효율적인 탈질 반응이 발생하였다고 사료되며, A²O 공정은 공간적으로 분리된 호기조가 존재하므로 APID 공정 대비 질산화 반응에 관여하는 독립영양균의 농도가 높게 나타나는 것으로 판단되었다. 두 공정에서 세 가지 미생물 농도가 비슷한 값으로 반응조 내 존재하므로, APID 공정과 A²O 공정 모두 영양염류 제거를 위한 적합한 공정이라 판단되었다.

3.2. 유입수 외란 발생 - 고유량+저농도, 저유량

일반적으로 강우가 발생하면, 하수처리장으로 유입되는 유량은 증가하는 반면, 유입 농도는 희석되게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 강우가 발생하였을 경우를 가정하고, 두 공정의 성능을 모델을 통하여 평가하였다. 또한 하루 중 심야 및 새벽시간대와 같이 유입 유량이 줄어드는 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였고, 결과 중 유출수 NO_x-N 및 PO₄³⁻-P 농도를 Fig. 4에 나타내었다.

고유량+저농도 외란이 발생했을 때(Fig. 4의 (a)), A²O 공정에서의 유출수 PO₄³⁻-P 농도는 외란이 발생하지 않을 경우 대비하여 약 2배 정도 높게 유출되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 유량의 흐름이 단일 방향으로 구성되어 있고, A²O 공정 중 PO₄³⁻-P 방출이 가능한 혐기조의 위치가 흐름 방향에 대해 처음이므로, 높은 유량으로 인해 혐기조에서 인 방출에 필요한 충분한 체류 시간이 확보되지 않아 나타난 결과라 판단된다. 이와는 반대로 APID 공정은 유량 증가에도 불구하고 유출수 PO₄³⁻-P 농도는 증가하지 않았는데, 이는 유입수를 운전 모드에 따라 반응조 네 지점에 교대로 주입함으로써 A²O 공정과는 달리 인 방출에 필요한 체류 시간이 더 길어질 수 있었기 때문으로 사료된다. A²O

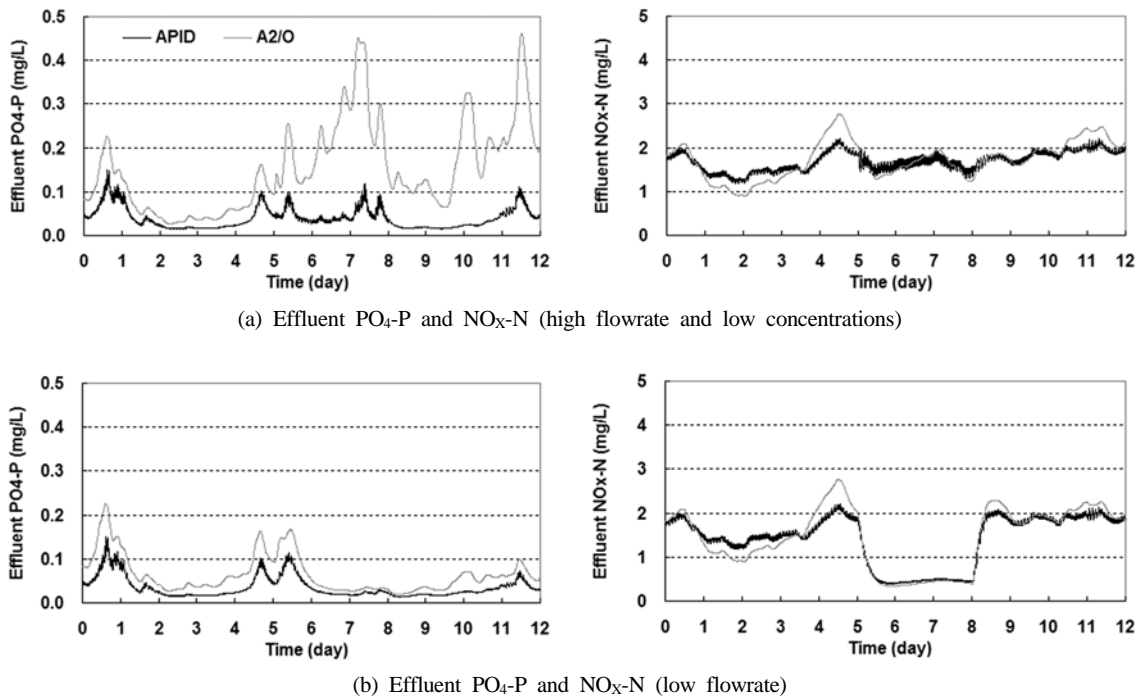


Fig. 4. The comparison of simulation data between APID and A²/O process in the case of high flowrate and low concentrations (a) and low flowrate (b) during three days.

공정의 유출수 NO_x-N의 경우, 외란이 발생한 5~8일 기간 동안 내부반송슬러지 유량을 증가시킴으로 인해 APID 공정과 비슷한 유출수 농도를 나타내었다.

저유량 외란이 발생했을 때는(Fig. 4의 (b)) 낮은 유입 부하율을 감안하여 폭기량을 감소시켰음에도 불구하고 두 공정 모두 안정적인 유출 수질이 유지됨을 확인하였다. 하지만, 낮은 유입 부하율 및 폭기량으로 인해 외란 발생 기간 동안 반응조 내 미생물 중 종속영양균과 독립영양균은 감소하였고, 인 축적 미생물은 증가하였다.

Fig. 4에는 나타나지 않았지만 유출수 NH₄⁺-N 농도는 고유량+저농도 및 저유량 외란 조건에서 두 공정 모두 동일한 거동을 나타내었고 두 공정 간의 NH₄⁺-N 농도 차이도 거의 나타나지 않았다. 고유량+저농도 외란이 발생하였을 때 유출수 TSS 농도에서는 외란이 발생하지 않았을 경우와 비교하면, APID 공정은 외란 발생 기간 중 유출수 TSS 농도가 약 2.3배 증가하였고, A²/O 공정은 약 1.9배 증가하여 APID 공정이 A²/O 공정보다 더 높게 나타났다. 이는 APID 공정의 경우, B와 D 모드 운전에서 유량이 높아지면 반응조 내 슬러지가 빠른 시간 내에 침전조로 유입되어 부유성 물질이 가라앉지 못하고 유출되기 때문으로 사료된다.

3.3. 유입수 외란 발생 - 고농도, 고유량 + 고농도

유량 변동없이 유입수 내 오염물질의 농도가 고농도로 유입되는 외란의 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였고, 유량과 농도 모두 증가하는 극단적인 상황에 대해서도 시뮬레이션을 통해 두 공정의 성능을 평가하고자 하였다. 두 가지 외란 조건의 경우, 부하율이 각각 2배와 4배로 증가하므로 외란이 존재하지 않을 경우 설정한 운전

조건하에서는 공정에 미치는 영향이 높은 점을 감안하여 운전 조절 변수를 증가시켜 일정 부분 외란의 영향을 제어하였다.

고농도 외란이 발생했을 때(Fig. 5의 (a)) 두 공정 모두 운전 조절 변수를 증가시켰지만, 유출수 PO₄³⁻-P 농도는 외란 발생 기간 중 방류수 수질 기준을 초과하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 고농도의 유기물 유입으로 인해 혐기 조건에서 많은 PO₄³⁻-P 방출이 있었지만, 상대적으로 호기 조건에서 다른 미생물 종과의 경쟁에 의해 충분한 PO₄³⁻-P 섭취에 필요한 폭기량이 부족하였기 때문으로 사료된다. 실제로 부하율이 2배 더 높은 고유량+고농도의 외란이 발생했을 때(Fig. 5의 (b)), 유출수 PO₄³⁻-P 농도는 고농도 외란 조건보다 낮게 유출되었음을 확인하였다. 두 외란 조건에서 APID 공정의 슬러지반송 유량과 폐슬러지 유량 및 A²/O 공정의 슬러지반송 유량, 폐슬러지 유량, 내부반송슬러지 유량 변화의 차이는 없었다. 하지만, 두 공정 모두 고농도 외란 조건에서는 폭기량을 200%만 증가시킨 반면, 고유량+고농도 외란 조건에서는 폭기량을 300%로 증가시켰다. 따라서 고유량+고농도 외란 조건에서 부하율이 2배 더 높음에도 불구하고 낮은 PO₄³⁻-P 농도로 유출될 수 있었던 이유는 폭기량이 충분하여 호기 조건에서 PO₄³⁻-P 섭취가 원활하게 발생하였기 때문으로 사료된다.

유출수 NO_x-N 농도의 경우, 고농도 및 고유량+고농도 외란 조건에서 APID 공정이 A²/O 공정보다 탈질 반응의 효율이 높게 나타났다. Fig. 5에 나타나지 않았지만, NH₄⁺-N 농도 거동은 두 공정에서 차이가 미비하였으므로, 유출수 NO_x-N 농도의 차이가 질산화 반응 차이로 인한 결과는 아니라고 사료된다. 고농도 외란 조건에서, 외란이 발생하지

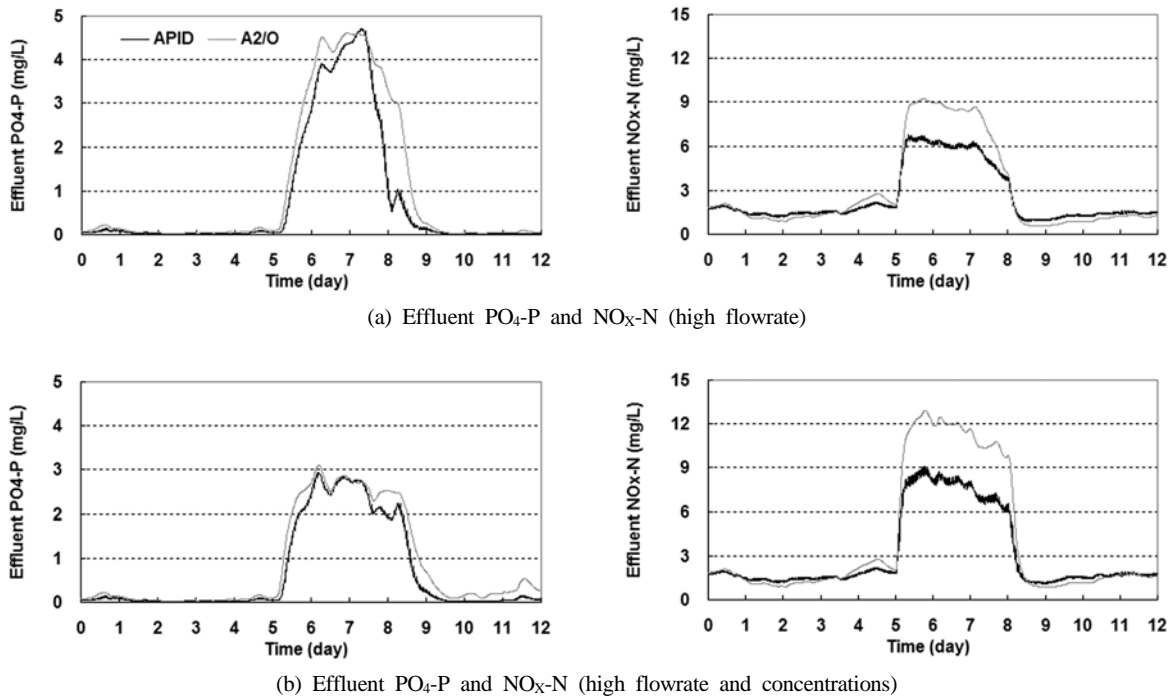


Fig. 5. The comparison of simulation data between APID and A²/O process in the case of high concentrations (a) and high flowrate and concentrations (b) during three days.

않았을 경우와 비교했을 때, APID 공정의 탈질 반응이 더 효율적으로 발생한 것은 앞서 설명한 APID 공정의 운전 모드에 따른 효율적인 유기물 분배로 인한 결과라고 판단된다. 다른 alternating 공정과는 달리 APID 공정은 유입수가 시간에 따라 네 개 지점에 순차적으로 주입되므로, 유입수 내 유기물을 효율적으로 사용하여 추가적인 외부탄소원의 주입이 필요없는 공정으로 판단할 수 있다.

하지만, 고유량+저농도 외란 조건과 마찬가지로 고유량+고농도 외란 조건에서 유출수 TSS 농도는 A²/O 공정보다 높게 유출되었다. 본 연구를 통해 APID 공정의 운전 모드가 효율적인 탄소원 분배에는 효과적일 수 있으나, 유량이 증가할 경우, A²/O 공정이 반응조 내 미생물 유출을 방지할 수 있는 반면, APID 공정은 반응조 내 미생물이 특정 운전 모드에서는 높은 유량에 의해 침전조로 유출될 수 있는 가능성이 있다고 판단되었다.

3.4. 평가 지표를 통한 공정 성능 비교

본 연구에서는 두 공정의 성능에 대한 보다 정량적인 평가를 위해 5가지 평가 지표 지수를 도출하였다. 시뮬레이션을 수행할 때 APID 공정과 A²/O 공정의 k_{La} 값을 달리 하였지만 폭기 에너지(AE)를 계산해본 결과, 두 공정 모두 동일한 폭기 에너지를 나타내었다. 하지만 폭기를 통한 교환 에너지(ME)의 경우, A²/O 공정이 별도의 혐기조와 무산소조로 구성되어 있으므로 APID 공정보다 더 낮은 교환 에너지를 나타내었다.

Fig. 6에 외란이 발생하지 않은 경우부터 고유량+고농도 외란 조건까지 모든 시뮬레이션 결과에 대한 유출 수질(EQ), 슬러지 생산(SP), 펌핑 에너지(SP) 지수를 나타내었다.

유출 수질(EQ)의 경우, 외란이 없는 경우와 저유량 및 고유량+저농도 조건에서는 A²/O 공정이 APID 공정보다 더 낮은 EQ 지수를 나타내었다. 하지만 고농도 및 고유량+고

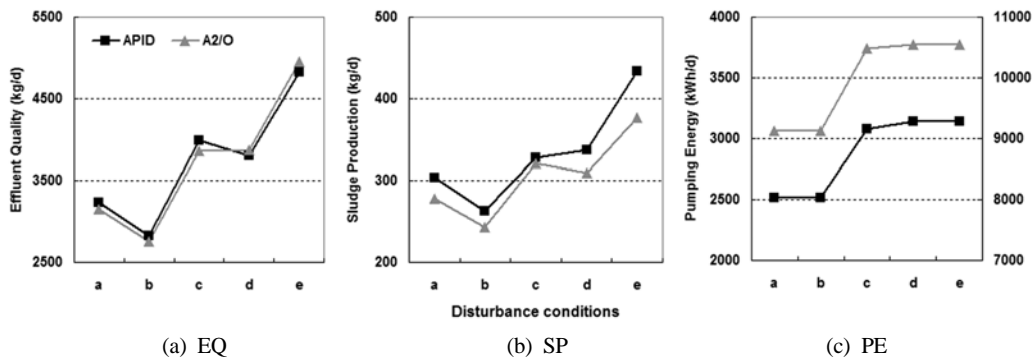


Fig. 6. Three performance index according to each different disturbance conditions (a: without disturbance, b: low flowrate, c: high flowrate and low concentrations, d: high concentrations, e: high flowrate and concentrations).

Table 4. Performance Index(PI) according to various disturbance conditions in APID and A²/O processes

PI	Without disturbance		Low flowrate		High flowrate, Low conc.		High conc.		High flowrate, High conc.	
	APID	A ² /O	APID	A ² /O	APID	A ² /O	APID	A ² /O	APID	A ² /O
EQ (kg/d)	3232	3155	2831	2755	3994	3856	3802	3874	4827	4950
SP (kg/d)	303	278	263	243	328	321	338	310	434	377
PE (kWh/d)	2515	9119	2515	9119	3076	10482	3143	10549	3143	10549
AE (kWh/d)	506	506	443	443	506	506	633	633	759	759
ME (kWh/d)	158	79	158	79	158	79	158	79	158	79

농도 외란 조건에서는 APID 공정의 EQ가 A²/O 공정보다 더 낮은 지수를 나타내었다. 이는 고농도 및 고유량+고농도 외란의 경우 미처리된 영양염류의 농도가 A²/O 공정이 APID 공정보다 더 높았기 때문으로 사료된다. 따라서 외란이 없는 일반적인 운전 상황에서는 A²/O 공정이 더 안정적으로 유지되나, 외란이 발생하는 상황에서는 반응조 전체를 효율적으로 사용할 수 있는 APID 공정의 유출 수질이 더 안정적으로 유지될 수 있다고 사료된다.

슬러지 생산량(SP)의 경우, 모든 조건에서 A²/O 공정이 APID 공정보다 더 낮은 SP 지수를 나타내었다. 이는 A²/O 공정에서 내부반송슬러지 라인으로 인해 반응조 내 미생물 농도를 더 높게 유지할 수 있고, 외란이 발생하는 조건에서도 반응조 내 체류시간을 유지할 수 있어 침전조에 부하를 줄일 수 있기 때문이라고 판단된다.

펌핑 에너지(PE)는 APID 공정이 별도의 내부반송슬러지 라인이 존재하지 않으므로 A²/O 공정에 비해 낮은 PE 지수를 나타내었다. 이를 통해 공정 운전의 경제적 측면에서는 APID 공정이 A²/O 공정보다 우수한 것으로 판단된다. 외란 조건에 따른 5가지 평가 지수를 Table 4에 요약하였다.

4. 결론

본 연구에서는 alternating 형태의 APID 공정과 recirculating 형태의 A²/O 공정의 성능을 수학적 모델링을 통해 평가하고자 하였다. 시뮬레이션 결과, 두 공정 모두 방류수 수질 기준에 부합하는 안정적인 유출 수질을 유지함으로써 영양염류 제거 공정으로 적합하다고 사료되었고, 유출수 NO_x-N와 TSS 항목에서 서로 다른 공정 특성이 확인되었다. 유입수 내 유기물을 효율적으로 사용할 수 있는 운전 모드를 가진 APID 공정은 탈질 반응의 효율성이 높았고, 반응조 내 체류시간을 안정적으로 유지할 수 있는 A²/O 공정은 부유성 물질을 안정적으로 처리할 수 있었다.

12일간의 유입 데이터 중 3일간의 외란 발생을 가정하여 다양한 외란 조건에서 시뮬레이션을 수행한 결과, 고유량+저농도, 저유량 조건에서는 A²/O 공정의 EQ 지수가 APID 공정보다 더 낮게 나타나 안정적인 유출 수질이 유지됨을 확인할 수 있었고, 고농도 및 고유량+고농도 조건에서는 APID 공정에서 더 낮은 EQ 지수가 나타났었다. 이를 통해 유량 변동이 심한 지역에는 A²/O 공정의 적용성이 높고, 부하율 변화가 심한 지역에는 APID 공정의 적용성이 더 높을 것으로 사료된다. 슬러지 생산량은 A²/O 공정이 반응

조 내 미생물을 효율적으로 유지할 수 있어 더 낮은 SP 지수를 나타낸 반면, 에너지 측면에서는 APID 공정이 더 효율적인 공정으로 확인되었다.

본 연구를 통해 운전 형태가 다른 APID 공정과 A²/O 공정의 성능 평가가 성공적으로 수행되었다고 사료되며, 이후 새로이 하수처리장을 신설하거나 기존 하수처리장을 고도처리공정으로 전환할 때 공정 선택을 위한 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 결과가 가상의 수학적 모델을 사용한 시뮬레이션 결과이고, 개별 공정의 최적 제어 알고리즘 적용을 통한 공정 평가는 제외되었으므로, 향후 공정 성능에 민감도가 큰 매개변수를 최적화하여 실제 공정 거동을 보다 정확히 모사할 수 있도록 모델을 수정한 후, 개별 공정에서 적용 가능한 최적 제어 기법을 적용하여 시뮬레이션을 수행한다면 보다 더 정확한 공정 평가가 가능할 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 일부분 중소기업청의 산학 공동기술개발지원 사업의 연구비 지원 및 환경부 Eco-STAR Project 수행기관인 수처리선진화사업단(과제번호: I2WATERTECH 04-5)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 본 논문은 환경부의 「폐기물에너지화 특성화대학원사업」으로 일부분 지원되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김민한, 유창규(2008). 모델링 기법을 이용한 하수처리 공정 설계와 환경성 및 경제성 평가. *한국화학공학회지*, **46**(3), pp. 610-618.
- 안상우, 박성근, 정영욱, 정무근, 박재우(2009). APID공정 내 공정진단을 위한 dynamic x-R 관리도의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(5), pp. 784-712.
- 윤영한, 안상우, 박재로, 고광백, 이효범, 지재성(2007). 선택적 간헐포기 및 유입위치변경에 따른 생물반응조 내 질소거동 및 성능평가. *한국수처리학회지*, **15**(2), pp. 25-34.
- 이성학(2006). 탈질 및 인 흡수 동시반응을 고려한 활성슬러지모델(ASM3) 최적화. 박사학위 논문, 부산대학교.
- Copp, J. B. (ed.) (2002). *The COST simulation benchmark: description and simulator manual*, Office for Official Publications of the European Community, Luxembourg.

- Hao, X., Loosdrecht, M. C. M. V., Meijer, S. C. F., and Qian, Y. (2001). Model-based evaluation of two BNR processes-UCT and A2N. *Wat. Res.*, **35**(12), pp. 2851-2860.
- Karlsson, I. (1996). Environmental and energy efficiency of different sewage treatment processes. *Wat. Sci. Tech.*, **34**(3-4), pp. 203-211.
- Kim, H., Kim, Y., Cha, J., Min, K., Gee, J., and Kim, C. (2009). Model-based evaluation of control strategies for phosphorus removal in a full-scale advanced phase isolation ditch process. *Wat. Sci. Tech.*, **60**(4), pp. 879-888.
- Ødegaard, H. and Skrøvesth, A. F. (1997). An evaluation of performance and process stability of different processes for small wastewater treatment plants. *Wat. Sci. Tech.*, **35**(6), pp. 119-127.
- Takacs, I., Patry, G. G., and Nolasco, D. (1991). A dynamic model of the clarification thickening process. *Wat. Res.*, **25**(10), pp. 1263-1271.
- Tam, H. L. S., Tang, D. T. W., Leung, W. Y., Ho, K. M., and Greenfield, P. F. (2004). Performance evaluation of hybrid and conventional sequencing batch reactor and continuous processes. *Wat. Sci. Tech.*, **50**(10), pp. 59-65.
- Vesilind, P. A. (ed.) (2003). *Wastewater Treatment Plant Design*, Water Environment Federation, USA.