

# 수학적 모델 및 퍼지 추론에 의한 고도 활성슬러지 공정의 통합 평가

## Integrated Evaluation of Advanced Activated Sludge Processes Based on Mathematical Model and Fuzzy Inference

강동완 · 김효수 · 김예진 · 최수정 · 차재환 · 김창원†

Dongwan Kang · Hyosu Kim · Yejin Kim · Sujung Choi · Jaehwan Cha · Chanwon Kim †

부산대학교 사회환경시스템공학과

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

(2009년 11월 26일 접수, 2010년 1월 12일 채택)

**ABSTRACT** : At present, the biological nutrient removal (BNR) process for removal of nitrogen and phosphorus is being constructing to keep pace with the reinforced standard of effluent quality and the traditional activated sludge process of preexistence is being promoting to retrofit. At the most case of retrofiting, processes are subjected to be under consideration as alternative BNR process for retrofiting. However, process evaluation methods are restricted to compare only treatment efficiency. Therefore, when BNR process apply, process evaluation was needed various method for treatment efficiency as well as sludge production and aeration cost, and all. In this study, the evaluation method of alternative process was suggested for the case for retrofitting S wastewater treatment plant which has been operated the standard activated sludge process. Three BNR processes for evaluation of proper alternative process were selected and evaluated with suggested method. The selected  $A^2/O$ , VIP and DNR processes were evaluated using the mathematical model which is time and cost effective as well as gathered objective evaluation criteria. The evaluation between 5 individual criteria was possible including sludge production and energy efficiency as well as treatment performance. The objective final decision method for selection of optimal process was established through the fuzzy inference.

**Key words** : Activated Sludge Models, Fuzzy inference, Simulation, Performance Criteria, Process Evaluation

**요약** : 현재 강화된 방류수 수질 기준에 발맞춰 질소·인 제거를 포함한 고도처리 공정을 건설 중이거나 기존 표준활성슬러지 공정에서 고도처리공정으로의 개선이 추진되어지고 있다. 그러나 다양한 고도처리공정의 적용을 검토함에 있어 제거 효율 측면에서의 단순 평가만이 사용되고 있다. 따라서 고도처리공정 적용 시 제거 효율 뿐 아니라 슬러지 생산, 포기 비용 등을 복합적으로 평가할 수 있는 방법이 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 표준활성슬러지 공정으로 운영 중인 S 하수처리장을 Biological nutrient removal(BNR) 공정으로 개선할 경우를 가정한 대안 공정 평가 방법을 제안하였다. 시간적, 비용적 장점을 가지며 객관적인 평가 기준으로 대두되고 있는 수학적 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 대안 공정으로 선정된 Anaerobic/anoxic/oxic ( $A^2/O$ ), Virginia initiative plant (VIP), Daewoo nutrient removal (DNR) 공정에 대해 평가하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 공정의 처리 성능 뿐 아니라 슬러지 생산량 및 에너지 효율을 포함한 5가지 성능 지수들을 적용함으로써 개별 항목간의 비교 평가가 가능하였으며, 최적 공정을 제시하기 위한 객관적 판단과정을 퍼지 추론을 통하여 구현하였다.

**주제어** : 활성슬러지 모델, 퍼지 추론, 시뮬레이션, 성능 지수, 공정 평가

## 1. 서론

최근 법적방류수질이 강화 되면서 하수처리장에서의 유기물 및 질소와 인과 같은 영양염 제거의 중요성이 강조되고 있다. 이에 영양염 제거를 위한 고도처리 공정의 신설이나 기존 하수처리장의 고도처리공정으로의 개선사업이 추진되어 왔으며 2000년 7.6%에 불과하던 고도처리공정이 2007년 말 65.1%로 크게 증가<sup>1)</sup>되고 있는 추세이다. 기존 하수처리장의

고도처리공정으로 개선할 경우 다양하게 존재하는 각종 질소·인 동시제거 공정들 중 적절한 공정을 선정해야 하는 과제가 수반되는데, 과거 전통적 물질수지에 의한 계산 혹은 실험에 의한 적정 공정 선정은 인력 및 비용 소모적이라는 단점을 가진다.<sup>2)</sup> 이에 최근 신설공정의 선정이나 기존 공정의 개선 사업에서도 수학적 모델을 이용하여 공정 설계를 수행하거나 처리성능을 추산해보는 사례가 늘고 있다.

따라서 다양한 공정의 대안들을 수학적 모델을 이용하여

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

가상으로 모사할 경우 어떠한 기준에 따라 최적 공정을 선정하는가에 관한 방법 및 지수가 요구되었으며, 이에 IWA task group에서 제안한 Benchmark simulation model (BSM)은 좋은 예가 될 수 있다.<sup>3)</sup> BSM이 제안하고 있는 평가기준은 일련의 지수 형태로 계산될 수 있는 각종 COD 및 영양염의 제거 효율(Effluent Quality, EQ)과 슬러지 생산량(Sludge Production, SP), 포기 에너지(Aeration Energy, AE), 교반 에너지(Mixing Energy, ME), 펌핑 에너지(Pumping Energy, PE)로 다양하다. 국내에서도 이를 토대로 fsEBPR 공정의 제어전략의 성능 평가<sup>4)</sup>에 EQ 단일 항목을 사용하거나, 고도처리 공정 설계와 환경성 및 경제성을 통합하여 다양한 고도처리 공정에 관한 평가가 수행<sup>5)</sup>되었으나 실제 하수처리장에 적용된 사례는 아니었으며, 유럽기준을 그대로 적용하여 국내 적용에 한계점을 가지고 있다. 더구나 이러한 사례들은 다양한 성능을 나타내는 여러 가지 지수들의 값을 제시하는데 그치고 있으며 어떠한 공정이 최적의 대안으로 제시될 수 있는가에 대한 객관적인 결과를 제공하지는 못한다는 한계를 안고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 하수처리장의 개선 시 대안 공정을 평가하기 위한 수학적 모델을 활용한 평가 과정을 제안하고, 처리 효율 및 슬러지 생산량, 에너지 효율 등을 복합적, 객관적으로 평가하여 최적 대안 공정에 대한 결론을 내려주기 위한 퍼지 추론방법을 제안하였다. 그 사례로서 본 논문에서는 국내 S 하수처리장에서 운영 중인 표준활성슬러지 공정을 질소·인 동시제거 공정으로 개선하는 경우에 대해 제안된 방법을 활용한 결과를 소개하고자 한다.  $A^2/O$ , VIP, DNR 공정을 대안 공정으로 선정 한 후 수학적 모델을 이용하여 S 하수처리장의 1년 유입수 성상 자료로 각 대안공정들의 성능을 모사하였다. 각 대안 공정에서 얻어지는 성능의 지수인 EQ, SP, AE, ME, PE 등의 값을 활용하여 최적 대안 공정을 제안하기 위해 개발된 규칙과 퍼지 추론기를 통해 세 가지 대안공정 중 최적 대안 공정을 제시하였다.

본 연구에서 제안된 평가방법은 대안 공정의 형태와 개수



Fig. 1. Process evaluation protocol.

가 달라지더라도 능히 적용될 수 있으며, 5개의 다양한 지수의 값에 대한 정보만을 제공했던 기존 방법의 단점을 보완한 퍼지 추론기를 포함함으로써 선정된 대안공정 중 최적으로 적용될 만한 공정을 제안할 수 있어 기존의 수학적 모델을 활용한 공정평가 사례들과 차이점을 가진다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 하수처리장을 신설하거나 운영 중인 하수처리장을 평가하기 위한 방법으로 사용자가 원하는 공정 설계가 가능하고, 뛰어난 공정 모사 능력이 뛰어난 수학적 모델을 활용한 시뮬레이션, 신뢰성 있는 모델링 결과를 얻기 위한 필수 과정인 운전조건 최적화 수행, 유출 수질 및 슬러지 생산량과 에너지에 대한 성능 지수 평가, 의사결정자의 합리적인 의사결정을 지원할 수 있는 퍼지 추론을 활용한 통합 성능 평가 방법이 사용되었다. 이러한 모든 절차는 5단계로 나누어 Fig. 1에 나타내었다. 1단계는 비교 평가하고자하는 공정들을 선정하고, 유입 조건과 공정의 설계 부피 및 운전조건을 결정한다. 2, 3단계는 시뮬레이터를 활용하여 시뮬레이션과 공정 최적화를 수행한다. 이후 4단계에서 공정들의 개별 성능 지수를 평가하고, 5단계에서 개별 성능 지수 결과를 통합하여 하나의 정량적인 값으로 비교 평가한다.

### 2.1. 공정 선정

현재 표준활성슬러지 공정으로 운영 중인 S하수처리장을 BNR 공정으로 개선하기 위해 BNR 공정 중 표준활성슬러지 공정과 유사한 수리학적 체류시간(Hydraulic retention time, HRT)을 가지는  $A^2/O$ , VIP, DNR 공정을 선정하였다. 선정된 공정의 공정도는 Fig. 2에 나타내었다.  $A^2/O$ 와 VIP 공정은 국내에서도 잘 알려진 대표적인 BNR 공정으로 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성되어 질소와 인제거가 동시에 이루어지는 공정이다.<sup>6)</sup> DNR 공정은 표준활성슬러지 공정을 변형한 공정으로 슬러지 탈질조, 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성되며 질산성 질소를 제거하기 위한 내부반송과 침전지 슬러지 반송으로 구성되어 있으며, VIP,  $A^2/O$  공정과 유사하나 슬러지 탈질조가 설치되어 있어 내생탈질에 의한 질산성 질소를 제거함으로써 혐기성조에서 질산성 질소에 의한 인방출 저해작용을 억제할 수 있는 공정이다.<sup>7)</sup>

### 2.2. 유입 조건 결정

활성슬러지 공정의 신뢰성 있는 모델링을 위한 필요불가결

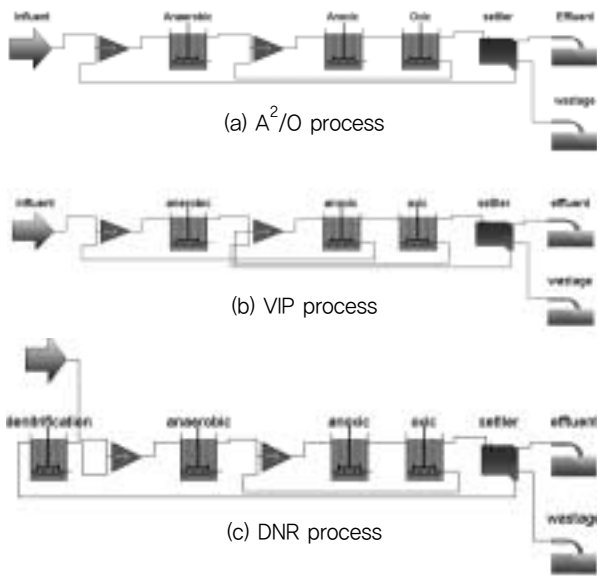


Fig. 2. Removal of Cu(II) with the hydroxylapatite (no pH control).

한 단계인 유입수 특성화는 ‘유일한 정확한 척도’인 호흡률 분석을 통해서만이 가능하다.<sup>8)</sup> 따라서 본 연구에서는 S 하수처리장의 1차 침전조 월류수 및 반응슬러지를 사용하여 호흡률 분석을 수행하였다. 호흡률 분석 장치는 Autoload and Biotox(Environsoft Co. Ltd., Korea)를 사용하였고 유기물 성상 분류는 물리·화학적 방법과 생물학적 방법을 결합하여 분류하였다.<sup>9)</sup> 유입수 특성화 결과와 S하수처리장의 2007년 1월부터 12월까지의 운전 자료를 이용하여 유입 조건을 결정하였으며, 연평균 유입유량은 221,743 m<sup>3</sup>/d이다. 결정된 유입 조건의 평균값은 Table 1에 정리하였다.

### 2.3. 공정의 초벌 설계사양 및 운전조건

본 연구의 3 가지 대안 공정에 대한 초벌 설계사양 및 운전 조건은 문헌<sup>10)</sup>에서 제시된 각 반응조 별 수리학적 체류시간과 슬러지 체류시간(Solids retention time, SRT), 내부반송률, 슬러지 반송률의 평균값을 이용해 Table 2와 같이 결정하였다. 이때 총 HRT는 S하수처리장의 표준활성슬러지 공정 총 HRT와 동일하게 설정하였고, 침전조는 기존 표준활성슬러지

Table 1. Mean concentration of influent components (unit: mg/L)

Subject	Influent quality	Effluent quality	Subject	Influent component
BOD	126.7	10.5	S <sub>i</sub>	17.0
COD	117.7	10.0	S <sub>s</sub>	48.7
TSS	135.2	3.0	X <sub>i</sub>	22.5
T-N	34.7	18.7	X <sub>s</sub>	29.4
T-P	3.2	1.9	S <sub>p</sub>	2.9
			S <sub>NH</sub>	24.3

공정의 침전조 원형 그대로 사용하였다.

### 2.4. 적용 모델 및 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해 적용된 반응조 모델과 침전조 모델은 ASM3+Bio-P 모델<sup>11)</sup>과 1 차원 이중지수함수 모델<sup>12)</sup>을 사용하였으며, 시뮬레이터는 GPS-X 4.1.2 (Hydromantis Inc, Canada)를 사용하였다. 이때 사용된 모델 내 매개변수는 IWA task group에서 권장하고 있는 기본 값<sup>11)</sup>을 사용하였다. 3 가지 공정에 대한 layout을 Fig. 2에 나타내었고, 초벌 시뮬레이션의 유입 조건과 반응조 부피 및 운전조건은 Table 1과 Table 2에서 결정한 값들을 적용하였다. 또한 최적운전 조건 결정 후 운전조건을 변화하여 같은 방법으로 최적시뮬레이션을 수행하였다.

### 2.5. 운전조건 최적화

2.3 절에서 설정된 초벌 운전조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 방류수 수질 기준을 만족하지 못하며, 공정 특성이나 유입수 특성이 반영되지 않았기 때문에 최적화가 수행되어야 한다.

운전조건 최적화에 사용된 조절 변수는 내부반송 유량, 슬러지 반송 유량, 폐슬러지 유량, k<sub>La</sub>이고, 목표 변수는 유출수의 TN, TP이며 각각의 값은 S하수처리장 유출수 데이터의 80%를 설정하였다. 최적화를 위해 적용된 방법은 운전조건을 일정 범위 내에서 임의의 쌍을 이루는 값을 도출하여 시뮬레이션을 수행하고, 이전 계산 결과에서 도출된 목적함수의 값과 비교 후, 현재 값들을 선택 혹은 대체하는 방식을 사용하여, 목표 유출 수질과 예측된 유출 수질과의 차이가 가장 최소가 되는 운전 조건의 조합을 도출하는 식 (1)과 같은 Absolute difference method를 사용하였다. 이때 공정 운전 조건에 계절적 영향을 반영하기 위해 S하수처리장의 2007년 운영 자료를 3개월씩 나누어 적용함으로써, 목표 유출 수질과 예측된 유출 수질과의 차이가 가장 최소가 되는 운

Table 2. Initial design and operating condition of process

Subject	A <sup>2</sup> /O	VIP	DNR
Recirculation flow_1 (m <sup>3</sup> /d)	442,000	442,000	221,000
Recirculation flow_2 (m <sup>3</sup> /d)	-	442,000	-
Return sludge flow (m <sup>3</sup> /d)	154,000	154,000	110,000
Waste sludge flow (m <sup>3</sup> /d)	3,500	5,400	6,000
Denitrification(m <sup>3</sup> )	-	-	5,980
Anaerobic(m <sup>3</sup> )	11,900	18,670	11,960
Anoxic(m <sup>3</sup> )	8,900	18,670	11,960
Oxic(m <sup>3</sup> )	56,600	40,400	47,850
Settler surface(m <sup>2</sup> )	1,320	1,320	1,320
k <sub>La</sub> (1/d)	100	100	100

전 조건을 도출하였다.

$$Absolute\ difference = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} |Z_{ij} - f_{ij}| \quad (1)$$

여기서,  $Z_{ij}$ 는  $i$ 번째 실험(날짜)에서 항목  $j$ 에 대한 측정된 값(목표수질),  $f_{ij}$ 는  $i$ 번째 실험(날짜)에서 공정 모델에 의해 예측된 항목  $j$ 에 대한 값을 나타낸다.

## 2.6. 공정의 개별 성능 평가

각 공정의 최적 공정 시뮬레이션 결과를 바탕으로 유출 수질(Effluent quality, EQ), 슬러지 생산량(Sludge production, SP), 펌프 에너지(Pumping energy, PE), 포기 에너지(Aeration energy, AE), 교반 에너지(Mixing energy, ME)에 대하여 평가 하였다. 개별 성능 평가에 사용된 식은 식 (2)~(6)에 정리하였다.

$$EQ(kg/d) = \frac{1}{T \times 1000} \int_{t=1}^{t=365} (B_{SS} \cdot SS_e(t) + B_{COD} \cdot COD_e(t) + B_{NH} \cdot NH_e(t) + B_{NO} \cdot NO_e(t) + B_{BOD} \cdot BOD_e(t) + B_{SP} \cdot SP_e(t)) \cdot Q_e(t) \cdot dt \quad (2)$$

$$SP(kg/d) = \frac{1}{T} \int_{t=1}^{t=365} (TSS_w \cdot Q_w(t) + TSS_e \cdot Q_e(t)) \cdot dt \quad (3)$$

여기서,  $C_e(t)$ = $t$ 시간의 유출수 농도(mg/L)  
 $C$ =유출수 항목(SS, COD,  $S_{NH}$ ,  $S_{NO}$ , BOD, SP)  
 $Q_e$ =유출 유량( $m^3/d$ )  
 $B_C$ =유출 성분의 가중치(SS=2, COD=1, NH=20, NO=20, BOD=2, TP=30)

$$PE(RWh/d) = \frac{1}{T} \int_{t=1}^{t=365} (Q_{ir}(t) + Q_r(t) + Q_w(t)) \cdot dt \quad (4)$$

여기서,  $TSS_w$ =폐슬러지내 TSS 농도(mg/L)  
 $TSS_e$ =유출수내 TSS 농도(mg/L)  
 $Q_w$ =폐슬러지 유량( $m^3/d$ )

$$AE(RWh/d) = \frac{S_0^{sat}}{T \cdot 1.8 \cdot 1000} \int_{t=1}^{t=365} \sum_{i=1}^m V_i \cdot K_{La_i}(t) \cdot dt \quad (5)$$

여기서,  $SO^{sat}$ =포화 산소량(mg/L)  
 $k_{La}$ =산소전달계수( $d^{-1}$ )

$V_i$ = $i$  반응조의 부피( $m^3$ )

1.8, 1000=단위환산 계수 및 에너지 환산 계수

$$ME(RWh/w) = \frac{24}{T} \int_{t=1}^{t=365} \sum_{i=1}^n [a \cdot V_i \cdot K_{La_i}(t)] \cdot dt \quad (6)$$

여기서,  $a$ = $i$  반응조의  $k_{La}$ 가 20미만 일 때는 0.005이고, 20이상 일 때는 0

24=단위환산 계수

유출 수질에 대한 평가는 유기물뿐만 아니라 영양염의 영향도 반영하기 위해 1일부터 365 일까지의 유출수 TSS, COD,  $NH_4-N$ ,  $NO_x-N$ ,  $BOD_5$ ,  $PO_4-P$  농도에 각각의 가중치를 곱하여 EQ를 정량화 하였다. 사용된 가중치는 방류수 수질 기준의 역수를 기본으로 하되, BNR공정의 평가이므로 TN, TP에 관련 가중치를 높게 설정하여 평가하였다. 슬러지 생산량의 평가는 공정 외부로 빠져나가는 유출수와 폐슬러지 유량 내에 존재하는 TSS 농도의 총합으로 평가하고, 펌프 에너지는 내부반송 유량, 슬러지 반송 유량, 폐슬러지 유량과 같이 공정 운영을 위해 사용되는 펌프의 사용량으로 평가하였다. 포기 에너지의 평가는 반응조의  $k_{La}$ 가 0인 반응조를 제외한 호기조에서의 포기량으로 평가되고, 교반 에너지는 포기기에 의해 교반이 필요 없는 호기조를 제외한 반응조의 교반 에너지로 평가되었다.

## 2.7. 공정의 통합 평가

5개의 개별 성능 지수를 모두 통합하여 평가하기 위해서 퍼지 추론(fuzzy inference) 기법을 사용하여 의사결정자의 판단을 지원하였다. 5가지 개별 성능 지수를 전건부(premise part) 변수, 공정 통합 성능 평가를 후건부(consequent part) 변수로 각각 excellent, good, moderate의 퍼지 집합으로 구분하였다. 이때 퍼지 집합(fuzzy set)의 소속 함수(membership function)는 사다리형 소속함수를 사용하였다. 퍼지 추론을 위해 mamdani method의 minmax 추론 방법을 사용하였고, MATLAB의 Fuzzy tool을 사용하여 적용하였다. 이때 구해진 출력은 무게중심법(centroid method)으로 비퍼지화하여 실수값으로 정량화하여 공정 통합 성능을 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 시뮬레이션 및 공정 최적화 결과

**Table 3.** Simulation results of initial design (unit: mg/L)

Subject	A <sup>2</sup> /O	VIP	DNR
COD	24.16	24.08	24.49
PO <sub>4</sub> -P	2.72	0.01	2.73
NH <sub>4</sub> -N	3.40	24.85	10.99
NO <sub>x</sub> -N	15.85	0.02	8.53
TSS	9.36	8.89	9.04
BOD <sub>5</sub>	2.54	3.22	2.95

각 공정의 초벌 설계 사양 및 운전 조건을 활용하여 초벌 시뮬레이션을 수행한 결과 Table 3에서 알 수 있듯이 유기물 성분인 COD, TSS, BOD<sub>5</sub> 는 방류수 수질 기준을 만족하지만 영양염 성분인 PO<sub>4</sub>-P, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>x</sub>-N 는 대부분 방류수 수질 기준을 초과하는 결과를 확인할 수 있다. 이것은 공정의 설계 사양 및 운전 조건을 유입수 특성과 계절적 영향을 전혀 고려하지 않고 문헌의 평균값을 사용하였기 때문에 공정의 최적화 수행이 필요한 것을 나타낸다.

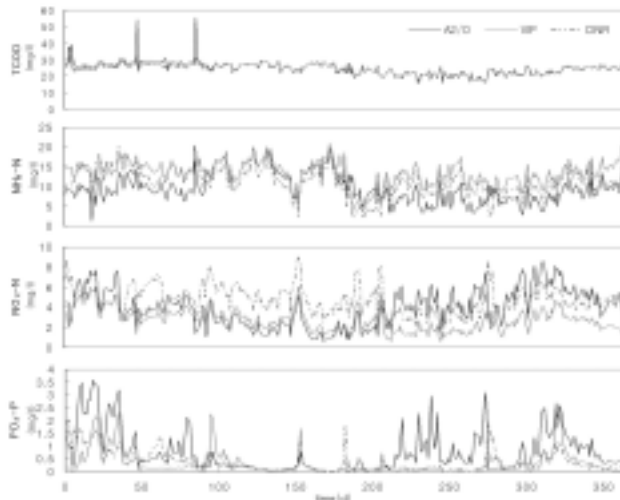
따라서 초벌 시뮬레이션 결과 방류수 수질 기준을 만족하는 유기물 성분을 제외한 TN, TP 성분에 대해 목표 변수로

설정하고, Absolute difference method를 사용하여 운전조건을 최적화한 결과 Table 4와 같은 값을 얻을 수 있었다. 2007년, 2008년 S 하수처리장의 운영 자료를 검토해본 결과 계절별로 운전조건이 달리 적용된 것을 확인할 수 있었다. 이것은 계절별 온도 차이에 기인한 것으로 판단되므로, 계절별로 운전조건을 최적화하여 초벌시뮬레이션과 동일한 방법으로 최적시뮬레이션을 수행하였다.

최적시뮬레이션 결과는 Fig. 3과 Table 5와 같이 나타난다. 먼저 Fig. 3의 결과 중 유출수 TCOD의 그래프는 A<sup>2</sup>/O, VIP, DNR 공정 모두 효율적인 탄소 제거가 이루어진 것을 나타낸다. 그러나 A<sup>2</sup>/O 공정은 46일과 84일 TCOD 농도가 크게 증가하여 방류수 수질 기준을 초과하는 것으로 나타난다. 이는 46일과 84일 유입 유량과 유입 부하가 크게 증가하여 나타난 것으로 A<sup>2</sup>/O 공정이 다른 두 가지 공정에 비해 외란에 대한 완충 능력이 부족하여 나타난 것으로 사료된다. 그리고 NH<sub>4</sub>-N 그래프는 A<sup>2</sup>/O 공정이 혐기조 및 무산소조의 부피에 비해 호기조의 부피를 크게 둘 수 있어서 가장 효율적

**Table 4.** Optimized operating condition of process

process	month	Recirculation flow_1(m <sup>3</sup> /d)	Recirculation flow_2(m <sup>3</sup> /d)	Return sludge flow(m <sup>3</sup> /d)	Waste sludge flow(m <sup>3</sup> /d)	k <sub>la</sub> (1/d)
A <sup>2</sup> /O	1~3	268,188	-	209,600	1,922	63
	4~6	570,467	-	178,975	1,769	55
	7~9	490,975	-	107,514	1,812	53
	10~12	562,209	-	101,656	2,344	55
VIP	1~3	464,338	656,713	206,854	2,253	75
	4~6	434,121	668,247	212,480	2,475	77
	7~9	527,932	595,871	171,650	2,171	76
	10~12	520,944	605,956	149,142	2,531	75
DNR	1~3	250,658	-	164,972	2,893	76
	4~6	242,265	-	161,232	2,422	73
	7~9	248,180	-	155,480	2,602	73
	10~12	212,002	-	164,303	2,700	78



**Fig. 3.** Simulation results of the optimized design

**Table 5.** Simulation result of optimized design (unit: mg/L)

Subject	A <sup>2</sup> /O	VIP	DNR
COD	24.70	24.14	23.91
PO <sub>4</sub> -P	0.73	0.30	0.35
NH <sub>4</sub> -N	9.73	13.41	11.10
NO <sub>x</sub> -N	3.89	2.70	4.63
TSS	12.11	10.87	10.47
BOD <sub>5</sub>	2.02	2.24	2.16

**Table 6.** Evaluation results of process performance criteria

PC	A <sup>2</sup> /O	VIP	DNR
EQ(kg/d)	81,292	89,091	87,075
SP(kg/d)	21,178	18,173	18,032
PE(kWh/d)	3,190	6,106	2,391
AE(kWh/d)	16,354	15,699	15,914
ME(kWh/d)	5,670	4,505	3,608

**Table 7.** Sum total of ranking questionnaire

PC	EQ	SP	PE	AE	ME
Sum total of ranking	29	56	80	45	90

으로 질산화가 수행되고, NO<sub>x</sub>-N 그래프에서는 DNR 공정이 슬러지 탈질조가 존재하여 가장 효율적인 탈질이 수행된 것으로 나타났다. 또한 VIP 공정은 무산소조에서 혐기성조로의 내부반송 및 슬러지 반송이 일어나 인제거가 유리하고, DNR 공정은 탈질조에서 질산성 질소 제거로 혐기성조에서 질산성 질소의 저해를 최소화하여 인제거가 효율적으로 이루어진 것으로 판단된다. COD, TSS, BOD<sub>5</sub>, PO<sub>4</sub>-P, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>x</sub>-N 농도의 평균 값을 나타낸 Table 5의 결과 3가지 공정 모두 방류수 수질기준에 대해 유기물 성분과 영양염 성분 모두 만족하지만 TSS 성분에 대해서 방류수 수질기준 10 mg/L를 초과하는 결과를 얻었다. 이것은 침전조 모델인 1차원 이중지수함수 모델의 특성상 침전조에서 발생하는 생물학적 반응을 제외하여 고려하기 때문에 침전조에서 일어나는 정확한 거동 예측이 어려워 방류 수질을 초과하여 유출된 것으로 보인다.

### 3.2. 공정 개별 성능 평가 및 통합 성능 평가

최적 시뮬레이션 결과와 최적 운전 조건을 바탕으로 식 (2)~(6)에 적용하여 유출 수질, 슬러지 생산량, 펌프 에너지, 포기 에너지, 교반에너지에 대하여 평가하고 그 결과를 Table 6

에 나타내었다. 개별 성능 평가 결과 유출 수질은 A<sup>2</sup>/O 공정, 슬러지 생산량과 포기 에너지는 VIP 공정, 펌프 에너지와 교반에너지는 DNR 공정이 가장 우수하게 평가 되었다. 하지만 공정의 개별 성능 지수 평가 결과 대부분의 성능 지수 차이가 10% 내·외로 특정 공정이 확연히 뛰어난 성능을 나타내지 않고, 한 가지 공정에서 모든 성능 지수가 우수하게 나타나지 않기 때문에 단지 몇 가지 성능 지수가 우수하다고 해당 공정이 다른 공정에 비해 우수하다고 결론 내리기 쉽지 않다.

따라서 5개의 개별 성능 지수를 모두 통합하여 평가하기 위해서 퍼지 추론 기법을 사용하였다. 퍼지 추론 기법을 적용하기 위해서 전건부 변수를 유출 수질, 슬러지 생산량, 펌프 에너지, 포기 에너지, 교반 에너지로 선정하였고, 후건부 변수는 공정 통합 성능 평가로 선정하였다. 그러나 5가지 전건부 변수로 퍼지 규칙(fuzzy rule)을 생성하면 243개(3<sup>5</sup>)의 규칙으로 퍼지 규칙의 수가 지수적으로 증가하게 된다. 이러한 이유로 하수처리 전문가들 20명을 대상으로 5가지 성능 지수의 중요도 순위를 설문 조사하여 개별 성능 지수별 순위 합을 Table 7과 같이 도출하였다. 설문조사 결과 상대적으로 덜 중요하다고 판단된 펌프 에너지와 교반에너지에 대한 고려는 제외하여 유출 수질, 슬러지 생산량, 포기 에너지를 전건부 변수로 재선정하였다. 선정된 전건부 변수의 퍼지 집합은 excellent, good, moderate로 구분하고, 퍼지 집합에 따른 소속 함수는 식 (7), (8)를 사용하여 얻은 소속 함수 범위를 3등분하여 Table 8과 같이 퍼지화(fuzzification)하였다.

$$SV = MAX_{PC} - MIN_{PC} \quad (7)$$

$$MF_{PC} = (MIN_{PC} + SV) \sim (MAX_{PC} - SV) \quad (8)$$

여기서, SV는 standard value, PC는 performance criteria, MF는 membership function range를 나타낸다. 또한 후건부 변수의 소속 함수 범위는 0과 1 사이로 지정하고, 소속 함수 범위를 3등분하여 excellent, good, moderate로 퍼지 집합을 설정하였다. 설정된 전건부 변수와 퍼지 집합의 관계를 바탕으로 27개(3<sup>3</sup>)의 퍼지 규칙을 Table 8과 같이 생성하고, 각 퍼지 규칙에 따른 후건부 변수의 퍼지

**Table 8.** Parameter of trapezoid membership function for process evaluation

Parameter	Range	Excellent	Good	Moderate
Premise part	EQ	[73,493 73,493 81,000 83,891]	[81,000 83,891 86,491 90,000]	[86,491 90,000 96,889 96,889]
	SP	[14,886 14,886 18,000 19,081]	[16,000 19,081 20,129 21,000]	[20,129 21,000 24,324 24,324]
	AE	[15,043 15,043 15,600 15,917]	[15,600 15,917 16,136 16,400]	[16,136 16,400 17,010 17,010]
Consequent part	Evaluation	[0 0 0.3 0.33]	[0.3 0.33 0.66 0.7]	[0.66 0.7 1 1]

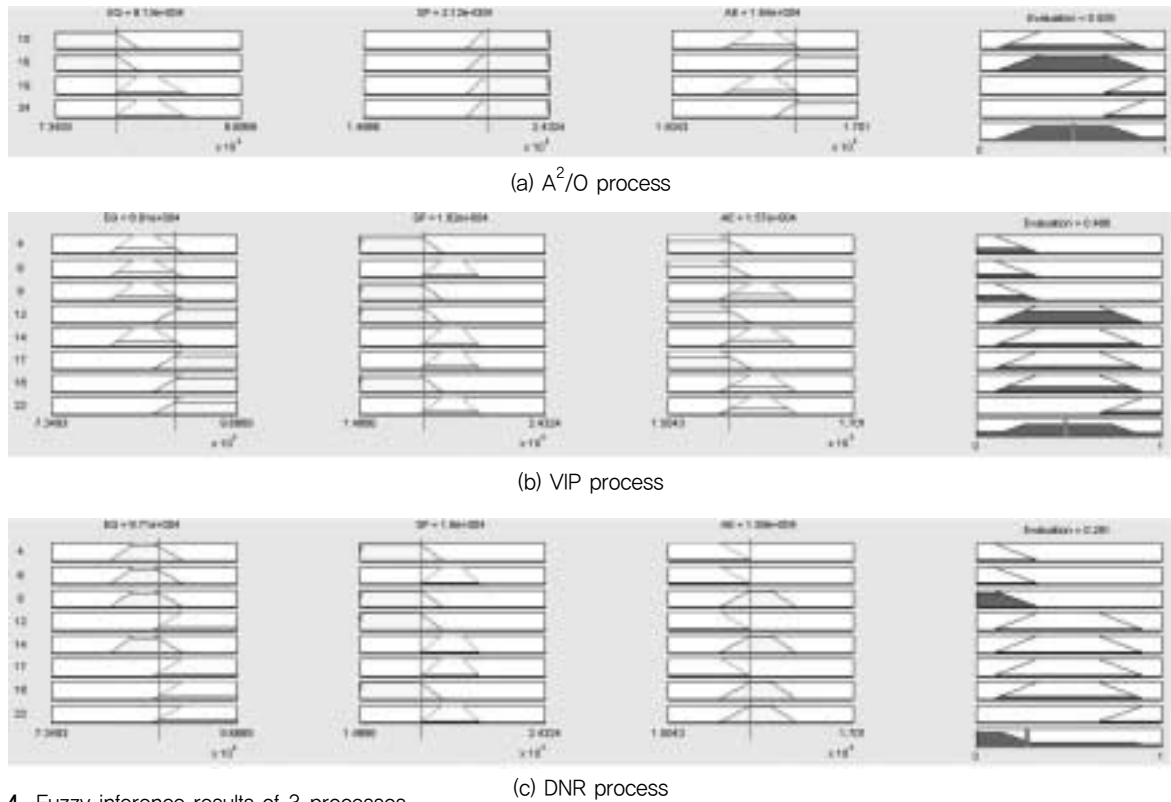


Fig. 4. Fuzzy inference results of 3 processes

Table 9. IF-THEN Rules for integrated evaluation

Rule	IF			THEN
	EQ	SP	AE	evaluation
1	excellent	excellent	excellent	excellent
2	excellent	good	excellent	excellent
3	excellent	excellent	good	excellent
4	good	excellent	excellent	excellent
5	excellent	moderate	excellent	excellent
6	excellent	good	good	excellent
7	excellent	excellent	moderate	excellent
8	good	good	excellent	excellent
9	good	excellent	good	excellent
10	excellent	moderate	good	good
11	excellent	good	moderate	good
12	moderate	excellent	excellent	good
13	good	moderate	excellent	good
14	good	good	good	good
15	good	excellent	moderate	good
16	excellent	moderate	moderate	good
17	moderate	good	excellent	good
18	moderate	excellent	good	good
19	good	moderate	good	moderate
20	good	good	moderate	moderate
21	moderate	moderate	excellent	moderate
22	moderate	good	good	moderate
23	moderate	excellent	moderate	moderate
24	good	moderate	moderate	moderate
25	moderate	moderate	good	moderate
26	moderate	good	moderate	moderate
27	moderate	moderate	moderate	moderate

집합은 소속 함수와 Table 7에서 도출된 설문 조사 결과를 바탕으로 가중치를 적용하여 설정하였다. 이때 가중치는 식 (9)에 의해 계산되었다.

$$\beta_i = \left[ \frac{\sum_{n=1}^{20} R_{i,n}}{\sum_{n=1}^{20} (R_{EQ,n} + R_{SP,n} + R_{AE,n})} \right]^{-1} \quad (9)$$

여기서,  $\beta_i$ 는 가중치,  $i$ 는 전건부 변수(EQ, SP, AE)를 나타낸다.

Fig. 4는 공정의 개별 성능 평가 결과에 대한 각 규칙의 전건부 소속도를 AND 방법의 min 함수를 사용하여 구하고, 각 규칙의 전건부 소속도를 max 방법으로 통합하여 하나의 추론결과를 구한 후, centroid 방법으로 비퍼지화 하여 추론결과를 실수값으로 정량화한 과정을 나타낸 것이다. 퍼지 추론 결과 A<sup>2</sup>/O 공정과 VIP 공정은 각각 0.509와 0.486의 공정 통합 성능 평가 결과로 good으로 평가되었고, DNR 공정은 0.281의 공정 통합 성능 평가 결과로 excellent의 평가 되었다. 개별 성능 평가 결과와 전문가들의 설문조사 결과를 충분히 반영하여 공정 통합 성능을 평가한 결과 DNR 공정이 가장 우수한 공정으로 평가 되었다.



## 4. 결론

본 연구에서는 국내에서 표준활성슬러지 공정으로 운영 중인 S 하수처리장을 BNR 공정으로 개선하기 위해 A<sup>2</sup>/O, VIP, DNR 공정을 수학적 모델을 활용하여 시뮬레이션하고, 유출수질, 슬러지 생산량, 펌프 에너지, 포기 에너지, 교반에너지에 대해 공정 성능을 개별 평가한 후, 퍼지 추론을 활용하여 5 가지 개별 성능 지수를 통합하여 평가하고자 하였다. 연구 수행 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 대안 공정한 A<sup>2</sup>/O, VIP, DNR 공정의 운전 조건을 최적화하여 시뮬레이션을 수행한 결과 모두 효율적인 탄소 제거 및 영양염 제거가 이루어졌으며, 그 결과 방류수 수질 기준을 만족하였다. 따라서 운전 조건 최적화가 정상적으로 잘 수행된 것으로 판단할 수 있다.
- 2) 최적 시뮬레이션 결과와 최적 운전 조건을 바탕으로 유출 수질, 슬러지 생산량, 펌프 에너지, 포기 에너지, 교반에너지에 대하여 평가한 결과 개별 성능 지수 별로 우수한 공정이 다르게 나타났다. 또한 공정 별 성능 지수의 차이가 크지 않기 때문에 개별 성능 지수를 통합하여 평가할 수 있는 방법이 필요한 것으로 판단된다.
- 3) 개별 성능 지수의 통합 평가를 위해 퍼지 추론 방법을 적용할 때 성능 지수의 중요도 순위를 EQ > AE > SP > PE > ME 순으로 설정하여 공정의 통합 성능 평가 결과를 비교하면, DNR 공정은 0.281, VIP 공정은 0.486, A<sup>2</sup>/O 공정은 0.509의 값을 가지므로, DNR > VIP > A<sup>2</sup>/O 공정 순으로 효율적인 공정으로 평가되었다. 본 연구 결과를 통해 S 하수처리장의 개선을 위한 가장 적절한 공정은 DNR 공정으로 선정 되었다. 본 연구에서 제시된 통합 평가 방법은 설문조사 결과를 바탕으로 가중치를 퍼지 규칙에 적용하여 의사결정자들의 판단을 합리적으로 지원할 수 있도록 제안되었다. 따라서 적용하는 하수처리장의 특성이나 의사결정자의 평가 기준에 적합하도록 가중치를 수정하는 것으로 다양한 상황에서의 공정 성능 평가 방법으로 활용 가능할 것이다.

KSEE

## 사 사

본 논문은 환경부의「폐기물에너지화 특성화대학원사업」으로 지원 되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 환경부, 하수도 통계(2008).
2. Jeppson, U., "Modelling Aspects of Wastewater Treatment Processes," Ph.D thesis, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, *Lund Institute of Technology, Sweden*.(1996).
3. Copp, J. B., "The COST simulation benchmark: description and simulator manual," *Office for Official Publications of the European Community, Luxembourg*, (2002).
4. 오수진, "정량적인 인과관계표를 이용한 5단 분할 주입 질소·인 제거 공정의 PID 제어," 부산대학교 석사학위논문, (2006).
5. 김민한, 유창규, "모델링 기법을 이용한 하수처리 공정 설계와 환경성 및 경제성 평가," *한국화학공학회지*, **46**(3), 610~618(2008).
6. 환경관리공단, 고도처리공법(2003).
7. 이의신, 박명균, 허녹용, "생물학적 질소·인 제거(DNR) 공법," *첨단환경기술*, **10**(2), 98~104(2002).
8. Orhon, D., Çokgör, E.U., "COD fractionation in wastewater characterization -The state of the art," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **68**, 284~293 (1996).
9. 정정은, "안정화된 침출수의 고농도 질소제거에 요구되는 대체외부탄소원 선정 및 적용에 관한 연구" 부산대학교 석사학위논문, (2005).
10. P. Aarne Vesilind(Ed.), "Wastewater Treatment Plant Design," *Water Environment Federation, USA*, (2003).
11. Lee, S. H., Ko, J. H., Poo, K. M., Lee, T. H., Woo, H. J. and Kim, C. W., "Practical approach to parameter estimation for ASM3+bio-P module applied to five-stage step-feed EBPR process," *Water. Sci. Technol.*, **53**(1), 139~148(2006).
12. Takacs, I., Patry, G.G. and Nolasco, D., "A dynamic model of the clarification thickening process," *Wat. Res.*, **25**(10), 1263~1271(1991).