

하수처리 활성오니공정의 에너지 절감을 위한 퍼지 제어 방법에 관한 연구

A Study on Fuzzy Control Method of Energy Saving for Activated Sludge Process in Sewage Treatment Plant

남 의 석*
(Eui-Seok Nahm)

Abstract - There are two major issues for activated sludge process in sewage treatment plant. One is how to make sewage be more clean and the other is the energy saving in sewage treatment process. The major monitoring sewage qualities are chemical oxygen demand, phosphorus, nitrogen, suspended solid in effluent. These are transmitted to the national TMS(Telemetry Monitoring System) at every hour. If these exceed the environmental standard, the environmental charges imposed. So, these water qualities are to be controlled below the environmental standard in operation of sewage treatment plant. And recently, the energy saving is also important in process operation. Over 50% energy is consumed in blowers and motors for injection oxygen into aeration tank. So, with the water qualities to be controlled below the environmental standard, the energy saving also is to be accomplished for efficient plant management. Almost researches are aimed to control water quality without considering energy saving. AI techniques have been used for control water quality. AI modeling simulator provided the optimal control inputs(blower speed, waste sludge, return sludge) for control water quality. Blower speed is the main control input for activated sludge process. To make sewage be more clean, the excessive blower speed is supplied, but water quality is not better than the previous. In results, non necessary energy is consumed. In this paper we propose a new method that the energy saving also is to be accomplished with the water qualities to be controlled below the environmental standard for efficient plant management. Water qualities in only aeration tank are used the inputs of fuzzy models. Outputs of these models are chemical oxygen demand, phosphorus, nitrogen, suspended solid in effluent and have the environmental standards. In test, we found this method could save 10% energy than the previous methods.

Key Words : Activated sludge process, Fuzzy model, Environmental standards, Sewage treatment, TMS

1. 서 론

하수처리장은 최근 수질 기준 강화에 따라 질소와 인을 제어하기 위하여 고도처리인 활성오니법을 주로 사용한다. 이 때, 질소를 제거하기 위하여 송풍기를 운영하는데 하수처리장 운영 전력 중 송풍기에서 소비되는 전력이 하수처리장 운영비의 50% 이상을 차지하고 있어 이에 대한 절감이 핵심 이슈로 부상하고 있다[1].

폭기조의 송풍기 및 슬러지 반송펌프를 제어하여 하수의 용존 산소 및 산소 환원계를 제어하도록 설계되어 있다. 그러나, 실제 운전상 제어량인 용존 산소 값은 송풍기의 가동 시간으로 조절하는데 용존 산소값과 송풍기 가동시간의 비례 관계의 부정확하여 과도하게 송풍량이 가동되는 경우가 많다. 또한, 제어량인 송풍기 가동시간, 반송 및 잉여 슬러지 펌프 가동 시간 등과 고도처리

목적인 질소, 인과 상관관계가 정확하지 않아 최적의 송풍량 산출이 어렵다[2,3].

국내의 경우는 기업체와 몇몇 대학을 중심으로 정부 연구개발 사업으로 주로 생물학적 질소·인 제거 공정에 대한 연구는 많이 진행되어 왔고 모델링과 시뮬레이션에 대한 연구 및 기술 개발도 일부 진행되어 왔다. 하수처리장에서 공정처리 효율과 더불어 경제성 점차 강화되는 추세로 최적 공법의 선택 및 설계의 필요성으로 인해 국내에서도 하·폐수처리 공정모델 및 동적 시뮬레이션의 필요성이 점차 대두되고 있다. 현재까지 활성슬러지모델 및 지능형 알고리즘(퍼지, 인공지능경망 등) 관련하여 진행되고 있는 국내 연구를 살펴보면, 먼저 부산대학교에서는 IWA 활성슬러지모델의 민감도 분석 및 매개변수 최적화로부터 고도 하·폐수처리 공정의 거동분석 및 각종 운전변수의 영향에 대한 연구를 진행하고 있다. 서울시립대학교에서는 주로 선형모델과 활성슬러지모델을 개발하여 SBR 공정 최적화에 대한 연구를 수행하였으며, KAIST에서는 인공지능경망을 기반으로 하수처리장의 주요변수를 추정하는 software-sensor를 최근 개발하였다. 포스텍(POSTECH)에서는 지난 6여 년간 하·폐수처리공정을 대상으로 수학적 모델 개발과 함께 인공지능경망을 적용하는 연구를 지속적으로 수행해오고

* Corresponding Author : Dept. of Aviation and IT Convergence,
Far East University, Korea.

E-mail: nahmes@kdu.ac.kr

Received : August 31, 2018; Accepted : October 10, 2018

있다[4-6].

활성슬러지모델을 사용한 고도 하·폐수처리 공정용 모델링 및 시뮬레이션 분야에 있어 국내 몇몇 연구진들의 수준은 이미 선진국의 수준에 도달해 있다고 판단된다. 하지만 현재까지 국내에서는 대부분 시뮬레이터로서 기능으로 실제 제어가 수행된 결과는 거의 없고, 이마저도 대부분의 관련 연구자들과 산업체 종사자들은 국외에서 개발한 GPS-X, WEST++, Aquasim를 구입하거나 원시프로그램(Basic, C++, Fortran)이나 범용프로그램인 matlab등을 사용하여 대상 공정을 모델링하고 있는 실정이다. 따라서 국내 하수 및 공정 특성에 맞는 간단화한 활성슬러지모델과 모델기반의 실질적인 제어 기술을 확보하고 이를 시제품화 하는 개발이 시급한 실정이다[7].

해외의 경우, 생물학적 하·폐수처리 공정에 대한 수학적 모델링은 1970년대 이후 많은 연구자들에 의해 시도되었다. 현재까지 이들 공정에 대한 모델링 결과로서 가장 널리 알려진 연구 내용은 1983년에 구성된 'International Association on Water Pollution Research and Control (IAWPRC)'에서 보고한 활성슬러지모델 No. 1(Activated Sludge Model No. 1, ASM1)으로 단일 미생물군을 사용한 부유성상 미생물 공정에 대해 광범위한 적용이 가능한 것으로 알려지고 있으며 지금까지 알려진 여러 모델가운데 실제 공정을 모사함에 있어서 가장 정확하고 응용성이 큰 것으로 알려져 있다. ASM1은 독립영양미생물, 종속영양미생물의 성장과 사멸, 가수분해 등 8개의 공정과 4종류의 유기물질과 질소성 물질 등 13개의 성분을 포함하며, 효과적으로 모델을 표현하기 위해서 Petersen 행렬을 사용하였다. ASM1에 사용된 매개변수는 5개의 양론계수와 14개의 동력학 계수로 구성되어 있다. 따라서 ASM1은 모두 13개의 미분방정식으로 구성되어 있으며, 이들 미분 방정식을 시간에 대해 적분함으로써 각 성분들의 농도 변화를 예측할 수 있다. 여러 개의 미분 방정식을 동시에 푸는 방법으로는 Runge-Kutta를 비롯한 많은 방법이 개발되어 있다. 활성슬러지모델 No. 3(Activated Sludge Model No.1, ASM3)는 위에서 기술한 ASM1의 단점을 보완하고자 1999년 IWA(International Water Association; former IWPRC)에서 개발하여 제안하였다[8-10].

한편, 캐나다의 University of Laval의 Grandjean그룹은 활성슬러지모델의 오차를 보정하기 위하여 인공신경망을 사용하였으며, 미국 University of Maryland의 Hao그룹은 연속회분기반응기에서의 질소, 인화합물 농도를 예측하기 위하여 활성슬러지모델과 인공신경망을 결합한 복합모델을 개발하였다. 그러나 하·폐수처리 공정 모델링 및 시뮬레이션 분야에서 지능형 알고리즘(퍼지, 신경회로망 등)의 응용 사례는 매우 적다[11-13].

국내 하수처리장의 활성슬러지공정은 하수와 폐수를 처리에 있어서 가장 보편적으로 사용되며, 이 공정은 생물학적 특성으로 인해 NH₄, NO₃, DO(Dissolved Oxygen), PH, ORP, 온도, MLSS(Mixed Liquid Suspended Solid) 등의 다수 영향 인자에 따라 송풍량, 반송 슬러지량, 잉여 슬러지량을 제어하는데 상호 복합적으로 운영되어 각각의 제어목표를 결정하기가 어렵다. 또한, 국내 하수처리장 대부분이 송풍기는 DO값에 의해 운전하고 슬러지 반송 펌프는 MLSS값에 의해운전이 되도록 설계되고 있으나 실제

운전은 대부분 운전자의 경험에 근거하여 운영된다.

따라서, 본 연구에서는 하수처리장의 활성슬러지 공정 제어를 위해 공정 특성을 반영한 활성슬러지 공정을 운전자의 경험에 기반하여 모델링하고, 이 모델로부터 송풍량을 최소로 하면서도 방류수의 수질을 보장할 수 있는 퍼지제어기를 구현하고자 한다. 또한 실제적인 제어를 위해서는 제어량 결정과 더불어 계측기 오류 보정을 위한 입력 영향 요소 보정 기술도 개발하고자 한다.

전체 구성도는 그림1과 같다. 활성오니공정으로부터 데이터를 수집한 후, 이를 이용하여 공정을 퍼지모델링 하고, 이 모델을 기반으로 최적 제어값을 추론하여 공정을 제어한다. 최적공정이란 방류수의 수질(COD, T-P, T-N, SS)이 법적 기준치를 초과하지 않고 소비전력을 최소화하도록 공정 제어값(DOSP, RRSF, WSR)을 제어하는 것이다. 또한 공정의 현실적 적용을 위해 입력 수질 값 보정을 수행한다.

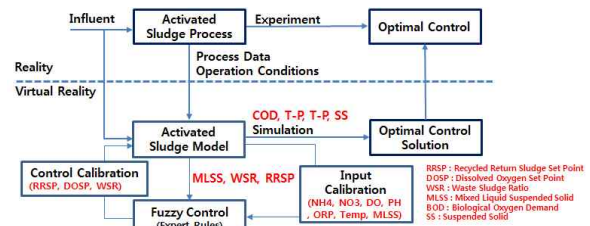


그림 1 시스템 구성도

Fig. 1 Block Diagram of System

2. 하수처리 활성오니 공정

고도처리 공정이란 국내 하수처리장의 대부분은 2차 처리공정인 활성슬러지 공정을 설계하여 운영하는데 이 방법은 BOD (Biological Oxygen Demand), SS(Suspended Solid) 등을 90% 정도를 제거하는, 반면 질소(NO₃)와 인(P)은 미생물에 필요한 영양소로만 제거되어 질소는 10~30%, 인은 10~30% 정도만 제거된다. 따라서 이러한 질소와 인을 처리하기 위한 3차 처리공정인 고도처리 시설을 추가 설치한다. 그림 2는 2차 공정과 3차 공정의 통합공정이다. 혐기조는 용존산소가 없으며 유기물의 인 방출량이 증가한다. 무산소조는 혐기조와 같이 용존산소가 없는 조로서 호기조에서 내부 반송하여 유입되는 질산성 질소를 질소가스로 환원시켜 대기 중으로 방출시켜 질소를 제거하기 위한 부분으로 미생물이 유기물을 해할 때 용존 산소 대신 NO₃를 이용하여 NO₃를 N₂가스로 처리하여 기능적인 면에서 질소조라고도 부른다. 호기조는 무산소조와 혐기성조에서 미처리된 유기물질을 제거하고 암모니아성 질소(NH₄)를 질산성 질소(NO₃)로 산화시키기 위하여 호기성 상태를 유지한다. NH₄를 NO₃로 질산화 시키는 미생물은 호기성 미생물이기 때문에 호기 상태로 유지시켜 주고, NO₃ 혼합액을 무산소조로 내부 반송시켜 탈질이 일어나도록 한다. 또한 인을 섭취한다. 마지막으로 중침은 물 속의 부유물을 가라앉히는 곳에서 부유물(슬러지)을 제외한 정화된 물만 배출할 수 있는 구조를 가지고 있다.

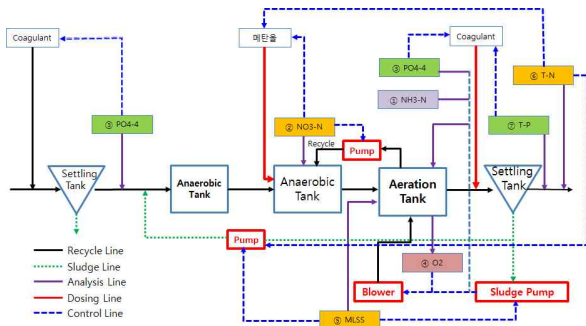


그림 2 하수처리 활성오니공정
Fig. 2 Activated Sludge Process in Sewage Treatment

여기서, 기존 활성슬러지공정에서는 DO 및 MLSS에 의한 방식에 의한 자동운전은 정확도가 떨어져 수동운전을 실시하고 있었으며, 구체적인 이유는 첫째, 제어량 조절의 어려움으로 실제 운전상에서 조절하는 제어량은 송풍기의 가동시간이다. 특정한 용존 산소 값을 가지도록 송풍기의 가동 시간을 조정하나 포기조별로 송풍기가 설치된 것도 아니고 여러 개의 포기조가 하나의 송풍기에 병렬로 연결되어 있고 특정 시간을 가동시켜도 각 포기조마다 들어가는 용존 산소의 양이 상이함. 따라서, 운전자는 경험치를 토대로 송풍기 가동시간을 조절한다. 이 경우, 2가지 문제가 발생한다. 실제 필요 이상의 송풍기 가동으로 전력량 과다 사용과 포기조별 용존 산소량 차이로 수질의 조절이 어렵다는 것이다. 둘째로, 입력 영향 요소 계측기의 상당한 오차가 발생한다. 제어의 핵심은 용존 산소와 반송오니, 잉여오니를 얼마로 설정하는 것인가이다. 많은 연구에서 이에 대한 상관 관계를 연구를 진행하여 왔으며 상당한 시뮬레이터들도 개발되어 있다. 그러나, 정작 큰 문제는 입력 센서가 상당히 부정확 하다는 것이다. 실제 데이터를 보면 계측기의 입력값이 요동을 치고 있어 현장 근무자들은 사용하지 않는다. 따라서, 아무리 좋은 시뮬레이터도 현장에서 사용이 불가능하다. 제어의 경우도 제어 설정치 본 개발의 경우, 송풍기 가동시간, 반송량, 잉여 오니량의 결정이 입력 요소에 따라 결정되어야 하는데 현장에서는 이런 입력 데이터가 유효하지 않다고 한다. 따라서, 실제적인 제어를 위해서는 입력 데이터에 대한 보정 기술이 제어기 안에 반드시 포함되어야 한다. 셋째로 제어량(송풍기 가동시간, 반송 및 잉여 슬러지 펌프 가동 시간)과 고도처리 목적인 질소, 인과 상관관계가 정확하지 않다는 것이다. 현재까지는 운전자가 포기조의 용존 산소를 보면서 송풍기 가동시간을 결정한 것이 보편적이다. 그러나, 이 경우 최적한 제어치 설정이 어려워 과도한 전력 낭비가 발생된다.

3. 공정 퍼지 모델링

3.1 퍼지모델링

활성슬러지 공정 제어는 유입수의 양적, 질적 변화에도 불구하고 공정 상태 계측 정보(입력변수)에 입각하여 하수의 질을 유지하고 공정의 실패를 방지하기 위해 RRSP, DOSP, WSR을 조작한

다. 활성슬러지 공정 입출력 변수의 멤버십 함수는 이산치형으로 이루어지며 컴퓨터에서의 계산을 용이하게 하기 위해 0~1 사이의 값인 멤버십 그레이드(membership grade)를 0~10 사이의 값으로 잡았다. 예를 들면 “NH₃ - N is Small”에 대한 멤버십 함수는 다음과 같다.

$$\mu_s(NH_3 - N) = [10/2, 10/4, 5/6, 5/8, 0/10, 0/12, 0/14, 0/16, 0/18, 0/20]$$

그러나, 실제 하수처리장 현장 특성의 현장 조사에서 다음과 같은 내용을 현장 전문가로부터 알 수가 있었다. 실제 하수처리장의 주요 제어를 위한 활성오니공정 변수는 표 1과 같다.

표 1 하수처리 활성오니공정 입출력

Table 1 Inputs/Outputs in Activated Sludge Process

Influent Variables(Aeration Tank)			
DO (Dissolved Oxygen)	NH ₄		MLSS (Mixed Liquid Suspended Solid)
Effluent Variables			
COD (Chemical Oxygen Demand)	T-P (Total P)	T-N (Total N)	SS (Suspended Solid)
Control Variables			
DOSP (Dissolved Oxygen Set Point)	RRSP (Recycled Return Sludge Set Point)	WSR (Wasted Sludge Set Point)	

그러나, 유입수 계측항목 BOD, T-N, T-P, NH₄, PO₄, NO₃, SS는 계측기 오차로 신뢰할 수 없는 데이터였다. 따라서, 실제적인 제어를 위해서는 포기조의 데이터를 참조하므로, 제어를 위해서는 포기조 입력항목을 사용하는 것이 최선이다. 따라서, 포기조 데이터로 퍼지모델의 입력변수로 DO, MLSS, NH₄로 정하였다.

출력변수는 실제 하수처리장에서 관리하는 항목으로 매시간 환경관리공단으로 전송되는 4개 방류수 항목임(COD, T-N, T-P, SS). 이 항목은 각각 법정 기준치 이하를 유지해야 된다. 따라서, 출력변수는 4개 방류수 항목으로 정하였다.

입출력 변수 및 활성오니 공정의 특징과 제어의 특징은 다음과 같다.

- DO 제어를 지별 밸브제어를 수행.
- 수질은 COD 적용(BOD는 BOD5를 적용해야 함으로 실질적으로 불가)
- DO 계측기는 설치 위치에 따라 값이 다름
- T-N, T-P에 따라 송풍량 조절
(T-N, T-P ∇ → 송풍량 ∇, T-N, T-P ▲ → 송풍량 ▲)
- T-N, T-P에 데이터 취득에 1시간 소요
- 암모니아(NH₃)가 T-N에 영향 미침

- 외부 온도에 따라 송풍기 압력 변화
- 비가 오면 DO 올라감 (그래프 특성 파악이 필요)
- 수질과 무관하게 DO 조절

공정제어 특성은 다음과 같다.

- 산소 잔류 DO량은 전체 필요량은 2-3%
- 송풍량으로 암모니아 제어를 하는 경우도 있음.
- pH 변화에 따른 DO 그래프 분석이 필요
- 제어 : 암모니아(NH₃)가 1.0 이하
→ 송풍량과 MLSS 같이 올려야 함. 반송오니 늘림.
- 에너지 절감 : 인버터 + 조절펌프
- 주요 인자 : COD, SS, T-P, T-N, PH, 유출수 유량
- 제어 프로그램
 - 계측기 문제로 필터링 기능이 필요
 - 온라인 제어보다는 전문가시스템 개발이 좋음
 - 제어주기 : 2~3시간

따라서, 최종적으로 적용할 퍼지모델 기반 퍼지제어기는 아래와 같은 규칙을 기반으로 작성하였다.

- 계측 데이터 : T-P, T-N, NH₄, MLSS, DO, COD, SS(수동 설정 가능, 상하한 설정 가능)
- 제어 기본 알고리즘 : 검증 및 제어 최적화 목적 함수(방류수 수질 기준치 이하)
- ° 규칙 1) T-N, T-P에 따라 송풍량 조절
(T-N, T-P ▽ → 송풍량 ▽, T-N, T-P ▲ → 송풍량 ▲)
- ° 규칙 2) 암모니아(NH₃)가 1.0 이하
→ 송풍량과 MLSS 같이 올려야 함. 반송오니 늘림.
- ° 규칙 3) DO 제어
→ DO : 1.5~4 mg/L에서 유지
→ 연속제어보다는 상하한으로 On/OFF 제어

이를 기반으로 최종 퍼지모델은 다음과 같이 구현하였다.

- 입력변수 3개 : 폭기조 NH₄, DO, MLSS
- 출력변수 4개 : 방류수 COD, T-N, T-P, SS

따라서, 퍼지모델(퍼지 규칙 2개인 경우)은 아래 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 COD &= f(NH_4, DO, MLSS), \\
 T-P &= f(NH_4, DO, MLSS) \\
 T-N &= f(NH_4, DO, MLSS), \\
 SS &= f(NH_4, DO, MLSS)
 \end{aligned} \tag{1}$$

각각의 퍼지모델 후반부는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 f(NH_4, DO, MLSS) : R_i : \text{If } NH_4 \text{ is } A_1^i, DO \text{ is } A_2^i, MLSS \text{ is } A_3^i \\
 \text{Then } y^i = a_0^i + a_1^i NH_4 + a_2^i DO + a_3^i MLSS \\
 (\text{규칙이 2개이므로 } i=1, 2)
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{If } (x < c), \text{ then } A_j^i(x) &= e^{-\frac{(x-c)^2}{\sigma_1}} \quad (x < c) \\
 \text{Else } A_j^i(x) &= e^{-\frac{(x-c)^2}{\sigma_2}}
 \end{aligned}$$

(A_jⁱ의 파라미터는 c, σ₁, σ₂ 3개임)

- i번째 규칙의 파라미터 : 13개

$$A_1^i(3개 : c, \sigma_1, \sigma_2), A_2^i(3개 : c, \sigma_1, \sigma_2), A_3^i(3개 : c, \sigma_1, \sigma_2), a_0^i, a_1^i, a_2^i, a_3^i$$

퍼지모델의 출력 계산은 아래 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 W_1 &= \min(A_1^1(NH_4), A_2^1(DO), A_3^1(MLSS)) \\
 W_2 &= \min(A_1^2(NH_4), A_2^2(DO), A_3^2(MLSS)) \\
 y^1 &= a_0^1 + a_1^1 NH_4 + a_2^1 DO + a_3^1 MLSS \\
 y^2 &= a_0^2 + a_1^2 NH_4 + a_2^2 DO + a_3^2 MLSS \\
 \hat{y} &= \frac{(W_1 \times y^1) + (W_2 \times y^2)}{W_1 + W_2}, (y \text{는 } COD, TN, TP, SS)
 \end{aligned} \tag{3}$$

퍼지모델별 오차는 아래 식 (4)로 계산한다.

$$Error = \sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2 / N \tag{4}$$

(y는 실제값(COD, TN, TP, SS), \hat{y} 는 퍼지모델값, N : 데이터 수)

파라미터 튜닝은 유전알고리즘을 사용하였다. 유전알고리즘은 코딩, 집단으로부터의 탐색, 보조정보의 불필요, 랜덤화된 연산자들의 직접사용이라는 특성으로 인해 복잡한 최적화 문제나 탐색에 있어서 뛰어난 강인성을 발휘하고 있다. 초기 집단으로부터 시간이 경과함에 따라 개선된 집단을 발생시키는 유전알고리즘은 유전 연산자로 구성되는데 많은 실용적인 문제에 있어서 좋은 결과를 낳는 단순한 유전알고리즘은 재생(Reproduction), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation) 연산자로 구성된다. 본 연구에서 사용된 단순 유전알고리즘의 순차는 다음과 같다.

[단계 1] 진화 세대 수, 집단의 크기, 교배 및 돌연변이율로 문자열의 크기와 같은 파라미터를 설정한다.

[단계 2] 초기 집단을 랜덤하게 발생하고 문자열로 구성된 각 개체의 적합도를 평가한다.

[단계 3] 유전 연산자에 의해 새로운 개체 집단을 발생한다. 적합도에 비례하여 새로운 개체가 재생되어 교배풀안에 할당되고 교배풀에서 랜덤하게 선정된 두개의 개체가 교배되며 그 가운데 랜덤하게 선정된 개체가 돌연변이가 된다.

[단계 4] 발생된 개체의 적합도를 평가하고 정해진 진화세대 수가 될 때까지 [단계 3]으로 반복한다. 이 과정에서 적합도가 가장 높은 개체의 문자열은 보존되며 찾고자 하는 파라미터 집합은 이 문자열의 디코딩으로부터 얻

어진다.

본 논문에서 사용된 교배율과 돌연변이율은 여러 가지 값을 시행착오를 통하여 적용한 결과 최종적으로 교배율 0.6, 돌연변이율 0.033으로 정하였다. 목적함수(F)는 식 (4)의 역함수를 사용하여 최소의 문제를 최대의 문제로 변환하였다.

파라미터 동정은 목적함수 F를 최소화시키는 파라미터를 동정하는 일이다. 유전알고리즘에 서는 적합도에 따라 재생 연산자에 의해 문자열이 복제되는데 이는 적합도가 큰 문자열이 이후의 세대로 더 많이 복제되는 것을 의미한다. 따라서 적합도 함수를 최대화시키도록 진화가 이루어지므로 최소화 문제를 최대화 문제로 변경하여야 한다. 이 둘의 이중성은 이미 널리 알려져 있듯이 최소화 문제를 유전알고리즘에 맞도록 최대화 문제로 쉽게 변환할 수 있다. 그 변환 방법에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 목적함수의 역수를 적합도 함수로 결정한다.

소수 집단으로 구성된 유전알고리즘에서 만족할만한 결과를 얻기 위해서는 집단내의 경계수준을 조정하는 것이 필요하며 이는 적합도 환산을 통해 복제되는 문자열 수를 조정함으로써 이루어진다. 적합도 환산 절차에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 $f = af + b$ 선형환산을 사용하며 식 $f_{max} = C_{mult} \times f_{avg}$ 는 선형 환산을 만족시켜야 한다.

여기서, f 는 본래 적합도, f' 는 f 의 환산된 적합도이고 계수 a , b 는 평균 환산 적합도로 f_{avg} 와 본래의 평균 적합도 f_{avg} 가 같도록 결정된다. 이는 각 집단내의 평균적인 구성원이 다음 세대에 단지 하나의 자손만을 낳을 수 있음을 의미한다. 여기서, C_{mult} 는 집단내의 최적 구성원에 대한 복제수로 본 연구에서는 2.0이다. 이러한 적합도 환산은 유전알고리즘의 초기 수행에서 몇 개의 특별한 개체들의 적합도를 낮추고 낮은 적합도를 갖는 개체들은 적합도를 증가시켜 바람직하지 않은 조기수렴을 방지할 수 있으나 유전알고리즘이 상당히 진화되어 집단의 적합도 평균치와 최대치가 상대적으로 비슷해지면 낮은 값을 갖는 적합도 최소치 f_{min} 을 환산된 적합도 $f'_{min} = 0$ 에 대응하도록 선형 환산한다.

다수 파라미터로 구성된 최적화 문제를 푸는데 성공적으로 사용된 한가지 코딩방식은 다수의 단일 파라미터를 직렬로 연결하는 코딩 방식이다. 이를 위해 디코딩된 양의 정수[0,2L]를 규정된 구간[P_{min} , P_{max}]로 선형적으로 사상시키다. 길이(L) 4의 이진수로 된 문자열을 고려하면 여기서 코드 0000와 1111 사이의 코드는 P_{min} 과 P_{max} 사이의 값으로 식 $f_{max} = C_{mult} \times f_{avg}$ 에 의해 선형적으로 디코딩된다. 다수 파라미터를 동정하기 위해서는 단일 파라미터 코드를 필요한 수만큼 직렬로 연결하고 각각의 파라미터는 자신의 코드길기와 최대값과 최소값을 갖는다. 따라서 구하고자 하는 파라미터 값은 문자열 중 그 파라미터에 해당되는 코드를 지정된 파라미터의 최대값과 최소값의 사이값으로 선형적으로 디코딩된다.

유전알고리즘은 여러 방향에서 탐색을 통해 언덕을 올라감으로 국부수렴의 문제가 발생하지 않지만 최적한 값을 보증하지 못하며 적합도 함수를 극대화시키기 위한 파라미터 수의 증가는 유전알고리즘의 탐색영역을 증가시키고 결과적으로 이는 언덕의 정

점값 또는 정점 근방의 값을 찾는데 많은 시간이 걸리게 한다. 이러한 문제점을 해결하는 한 수단으로 탐색영역 축소를 통한 유전알고리즘의 수렴성을 개선하는 방법이 제시되는데 유전알고리즘의 탐색영역 축소를 통해 보다 빨리 최고치 언덕의 점 근방으로 수렴될 수 있고 파라미터의 디코딩 오차도 신속하게 줄일 수 있다. 탐색영역조정은 유전알고리즘이 진화되어 집단내의 적합도 함수 최대값이 α 보다 큰 개체(문자열)가 m 개 발생하면 그 m 개의 문자열로부터 파라미터 값들을 디코딩하고 이 값에 기초하여 파라미터의 최소값을 증가시키고 최대값은 감소시킴으로써 이루어진다. 탐색영역이 조정되어 줄어들수록 α 는 크게 하고 m 은 줄인다. 탐색영역 조정에 의한 유전알고리즘의 순차는 다음과 같다.

- [단계 1] 초기 집단, P(0)를 랜덤하게 발생하고 P(0)내의 모든 개체의 적합도 값을 계산하고 t를 1로 설정한다.
- [단계 2] P(t)로부터 P(t+1)을 다음과 같이 발생시키다. P(t)에서 적합도 값에 비례하여 개체를 발생하고 교배 풀에서 랜덤하게 두 개체를 선택하여 교배와 돌연변이 연산을 수행하여 P(t+1)을 발생하고 P(t+1)내의 모든 개체의 적합도를 계산한다.
- [단계 3] 만약 적합도 값이 탐색영역 조정을 위한 값, α 보다 크면 문자열을 디코딩하고 디코딩된 문자열이 m 개가 되면 디코딩된 파라미터 값 가운데 최소값과 최대값에 의해 탐색영역이 결정된다.
- [단계 4] 적합도가 가장 높은 개체의 문자열은 보존되며 최대 진화 수에 도달할 때까지 [단계 2]로 복귀한다.

3.2 퍼지 제어기

기본적인 제어 방법은 다음과 같다.

- [단계 1] 퍼지모델은 폭기조의 수질 상태변수들을 입력변수로 하고, 방류수의 수질 변수들을 출력변수로 한다. 다입력 단출력으로 방류수 수질별 퍼지모델을 구현한다. 입력 변수에 해당되는 수질 항목과 출력변수에 해당되는 방류수 수질항목은 다음과 같다. 이에 따른 퍼지 모델은 다음과 같다.
- [단계 2] 단계 1의 각각의 퍼지모델에서 제어가 가능한 입력항목인 DO값을 현재값으로부터 조금씩 연속적으로 변화시켜(다른 입력변수는 현재값 유지)면서 출력값인 방류수의 수질값이 법정 기준치를 범위나지 않은 DO 범위를 구한다.
- [단계 3] 단계 2에서 구한 DO의 범위에서 송풍량을 구하기 위해, DO-송풍량의 퍼지모델을 구한다. 이를 통해 송풍량의 범위를 구한다.
- [단계 4] 현재의 DO 값이 단계2에서 구한 DO의 범위 안에 있으면 송풍기를 멈춘다. 일정주기(30분 단위)로 DO 값을 측정하여 송풍기 가동여부를 결정한다.(기존의 제어기는 DO가 목적 범위 안에 있어도 DO값 유지를 위해송풍기를 가동하였지만 본 연구에서는 가동하지 않으므로 전력비가 절감된다.)

3.3 제어량 보정 알고리즘

실제 운전상에서 조절하는 제어량은 송풍기의 가동시간이다. 특정한 용존 산소값을 가지도록 송풍기의 가동 시간을 조정하나 포기조별로 송풍기가 설치된 것도 아니고 여러 개의 포기조가 하나의 송풍기에 병렬로 연결되어 있고 특정 시간을 가동시켜도 각 포기조마다 들어가는 용존 산소의 양이 상이함. 따라서 운전자는 경험치를 토대로 송풍기 가동시간을 조절한다. 이 경우, 2가지 문제가 발생한다. 1) 실제 필요 이상의 송풍기 가동으로 전력량 과다 사용. 2) 포기조별 용존 산소량 차이로 수질의 조절이 어려움. 이 문제 해결을 위해서는 다음과 같은 단계로 진행한다.

- [단계 1] 송풍량 증가에 따른 각 포기조별 용존 산소 측정
- [단계 2] 제어 설정치(용존 산소량)에 따른 송풍기 가동시간 계산 : 테이블 작성(편집 기능 포함) - DO-송풍량 퍼지 모델로 추론
- [단계 3] Controllability 측정
- [단계 4] 반송량과 잉여량 조절로 전력량 최소화 : 제어 시뮬레이션
- [단계 5] 필요에 따라 제어기 보정

3.4 입력 영향 요소 계측기의 오차 보정

본 연구의 경우, 송풍기 가동시간, 반송량, 잉여 오니량의 결정이 입력 요소에 따라 결정되어야 하는데 현장에서는 이런 입력 데이터가 유효하지 않다고 한다. 따라서 실제적인 제어를 위해서는 입력 데이터에 대한 보정 기술이 제어기 안에 반드시 포함되어야 한다. 이를 위해서 다음과 같은 단계로 진행한다.

- [단계 1] 제어 입력변수 중 이상 입력 변수 조사
- [단계 2] 이상 입력 변수 중 입력 변환 테이블에 의해 조정 가능한 입력 변수 선택 (입력 변수 조정 테이블 작성(편집 기능 포함))
- [단계 3] 필요에 따라 제어기 보정

4. 제어시스템 구현

퍼지제어기 시스템 구성은 그림 3과 같이 크게 하수처리장 운영설비인 DCS 및 SCADA Server와, 데이터 연계를 위한 DB Server, 퍼지제어기를 수행하는 EWS로 구분되어진다. DCS 및 SCADA Server에 의해 하수처리장의 수질 및 운영데이터의 수집 및 제어가 이루어지며, 퍼지제어기로의 데이터 제공 및 퍼지제어 결과 값의 제어를 위해 DB Server를 활용하여 데이터 연계를 이루어진다. EWS의 퍼지제어기에서는 퍼지모델링 생성 및 시뮬레이션, 주기설정에 의한 실시간 퍼지제어가 이루어지며, 그 결과 값을 DB Server를 거쳐 SCADA Server에 제공하여, 최종적으로 DCS에 의해 송풍량 제어가 이루어진다.

퍼지제어기 프로그램은 퍼지 제어 알고리즘을 바탕으로 과거

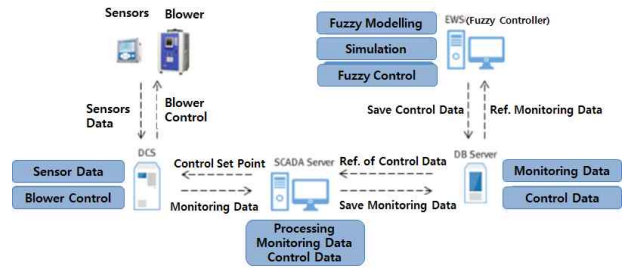


그림 3 퍼지제어기 시스템 구성

Fig. 3 Fuzzy control system

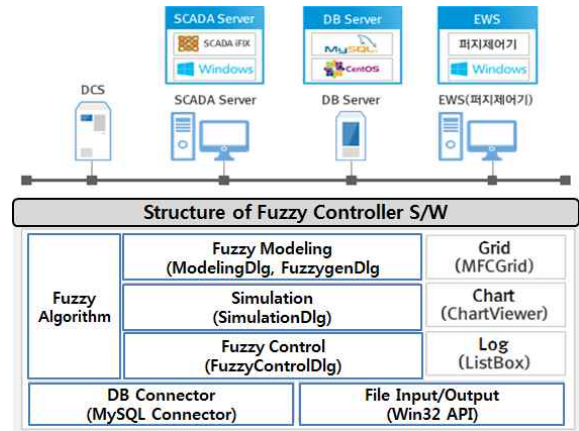


그림 4 퍼지제어기 S/W 구성

Fig. 4 Fuzzy control software scheme

데이터를 활용하여 퍼지모델링을 생성한 후 현재 데이터를 적용하여 퍼지제어에 의한 최적제어값을 산출하여, 제어가 이루어지는 프로그램이다. 프로그램 메뉴에서 아래와 같은 설정들을 할 수 있으며, 퍼지제어기를 위한 퍼지모델링 관리를 할 수 있다. 그림 4는 소프트웨어 구성을 보여준다.

5. 성능평가

5.1 퍼지 모델/제어 오차

퍼지모델 구성은 아래와 같다.

- 데이터 기간 : 시간 데이터 625개(이상 데이터 삭제)
- 입력변수 3개 : 폭기조 NH₄, DO, MLSS
- 출력변수 4개 : 방류수 COD, T-N, T-P, SS
- 퍼지모델(2가지) : 퍼지 규칙 2개, 4개

$$R_i : \text{If } NH_4 \text{ is } A_1^i, DO \text{ is } A_2^i, MLSS \text{ is } A_3^i \\ \text{Then } y^i = a_0^i + a_1^i NH_4 + a_2^i DO + a_3^i MLSS$$

$$\text{- 모델별 오차 : } Error = \sum_{i=1}^{625} (y - \hat{y})^2 / 625$$

표 2 퍼지모델 오차

Table 2 Least Square Error of Fuzzy Model

	COD	T-N	T-P	SS
Rule 2	0.432	1.27	0.085	0.201
Rule 4	0.504	1.60	0.106	0.232

표 2는 퍼지모델의 규칙 2개와 4개인 경우에 대한 4개의 퍼지 모델(출력이 4가지)의 최소자승오차를 보여준다. 여기서, Rule 2가 성능이 우수하였고, Rule 8개로 한 경우, 성능이 더 나빠졌다.

위의 4가지 퍼지 모델로부터 최적 DO값을 계산하기 위하여 DO값을 증가시키면서 방류수의 수질 기준을 만족하는 최적값을 구하면 된다. 즉, 출력이 COD, T-N, T-P, SS 퍼지모델에서 모두 DO가 0.3인 경우, 방류수의 수질 기준을 만족함을 알 수 있다.

5.2 전력비 절감

최적으로 도출된 DO값과 현재의 DO값을 비교하여 현재 DO값이 목표 DO값보다 적은 경우, 송풍기를 추가 가동하여 DO값을 올려주어야 한다. 이 경우, 송풍량을 얼마나 올려야 DO값이 목표치에 접근할 수 있는지가 매우 중요하다. 본 연구에서는 이를 위해, 기존 데이터를 아래와 같이 분석하여 DO 값과 송풍량과의 관계를 추론하였다.

분석 결과는 다음과 같다.

- ① 1일 24시간 데이터 분석 : 1주일 이상 그래프로 판단시 DO와 송풍량 패턴 매우 유사. 즉, 비례 관계
- ② 7일 24시간 데이터 분석 : DO와 송풍량은 비례
- ③ DO 편차 0.1 이상 증가하고 송풍량이 증가한 경우 : DO 0.1 상승을 위한 송풍량 → 79.916(그림 5)

결론적으로, DO 0.1 상승에 필요한 송풍량은 약 70.961~79.916임을 알 수 있었다.

전력비 절감을 위한 실험은 서울시의 하수처리장 1개소를 대상으로 운영 데이터를 이용하여 실시하였다. 시스템 제어방법으로 DO농도를 제어하였으며, 이때 시스템 운영에서 나타나는 효과 및 전력사용량을 송풍기량과 상호 비교하였다.

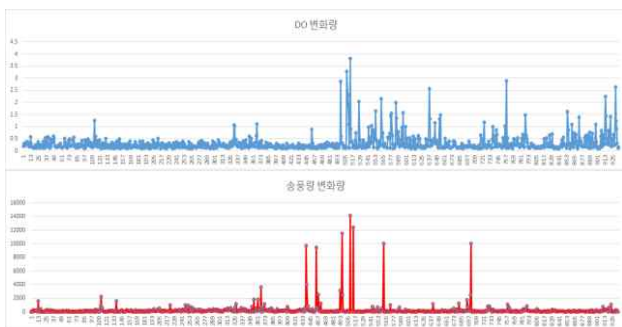


그림 5 DO증가-송풍량 그래프

Fig. 5 Graph of DO Δ 0.1-Blower

- ④ DO 편차 0.1 이상 감소하고 송풍량이 감소한 경우 : DO 0.1 감소를 위한 송풍량 → 70.961(그림 6)

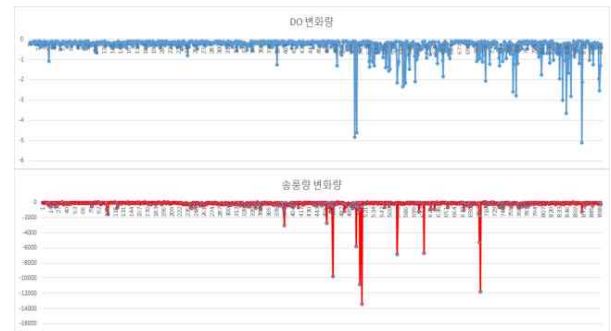


그림 6 DO 감소-송풍량 그래프

Fig. 6 Graph of DO Δ 0.1-Blower

이 제어 방식은 생물반응조의 현재 DO농도를 연속 모니터링하여 DO 최적값 보다 높을 경우, 송풍기의 속도를 감속 제어하여 반응조에 주입되는 폭기량을 감소시키며 DO 최적값보다 낮을 경우 송풍기의 속도를 증가시켜 반응조에 주입되는 폭기량을 증가시키는 방식으로 제안하였다. 앞의 결과에서 DO를 0.1 상승을 위해서는 송풍량을 80을 상승, DO 0.1 감소를 위해서는 송풍량을 70을 감소시키는 방식으로 진행하였다.

실험은 DO 농도를 제어하지 않은 상태와 제어하는 상태를 비교 관찰하였고, 이때의 방류수 수질이 법정 기준값 및 관리 설정값을 초과하는 지를 관찰하였다.

DO 농도를 제어하지 않을 때, DO 농도는 0.3mg/L~0.5mg/L, DO농도를 제어하며 방류수 수질을 관찰한 결과 일 평균 10% 이상의 송풍기량을 감소시킨 경우에도 방류수 수질이 기준값과 설정값을 만족함을 확인할 수 있었다. DO 농도가 최적값보다 큰 경우, 송풍기의 감속기를 통하여 반응조에 주입되는 공기량이 제어되어 반응조의 DO 농도가 감소되었으며, 이와 반대로 DO 값이 최적값보다 작은 경우 다시 송풍기의 속도를 증가하여 반응조의 DO 농도가 증가하였다. 결과적으로 반응조에서 DO 농도를 제어함으로써 적절한 DO 농도를 유지할 수 있고 나아가서 시스템의 안정성을 도모할 수 있었다.

DO 농도를 제어하고자 할 경우, 보다 효과적인 제어를 위해서는 각 현장에 설치되어 있는 송풍기를 DO농도와 연계하여 미세하게 제어할 수 있으면 더욱더 효과적일 것이다. 현재 전력량계 데이터가 단위 송풍기별로 설치되어 있지 않아 전력량의 절감을

표 3 방류수 기준/관리 값

Table 3 Standards and Management Value of Effluent

	Legal Standards (mg/L)	Management value (mg/L)
COD	18.00	16.00
T-N	20.00	17.00
T-P	2.00	1.80
SS	10.00	6.00

직접 비교는 불가능하여 계측 송풍기 사용량을 전체 사용량으로 가정하였다. 방류수(COD, T-N, T-P, SS)의 기준값(법적 기준) 및 설정값(하수처리장 관리 기준)은 표 3과 같다.

2개월 데이터를 통하여 검증한 결과, 송풍기량의 10% 감소에 따른 방류수(COD, T-N, T-P, SS)의 수질변화가 법정 기준값 및 설정값 이하를 유지하고 있음을 알 수 있었다.

아래 표 4는 방류수의 실제값과 오차값 평균과 실제 송풍량 절감률 평균을 보여준다.

표 4 송풍량 절감 결과(2개월)

Table 4 Results of Blower Saving for 2 Months

	Effluent(mg/L)				Blower (Nm ³ /hr)
	COD	T-N	T-P	SS	
RMS	0.45	1.32	0.90	0.22	Under 10% Saving

RMS : Root mean square error

결론적으로 1) 송풍량 10% 감소는 전력비 10% 감소에 비해 하고, 2) 방류수 수질이 기준값/설정값을 만족하므로 제안 기법이 전력비 10% 절감이 가능함을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 하수처리장의 활성슬러지 공정 제어를 위해 1) 하수 및 공정 특성을 반영한 활성슬러지 공정모델링과 실시간 운전데이터와 조작자의 제어 전략을 제어 규칙으로 만들고 이를 기반으로 공정을 자동으로 제어할 수 있는 퍼지제어기를 개발하였다. 또한 실제적인 퍼지제어를 위해 2) 제어량 조절 보정, 3) 입력 영향 요소 보정 기술을 개발하였다.

개발한 퍼지제어기는 기본적으로 최소의 DO를 공급하면서도 환경부에서 관리하는 방류수 수질(COD, T-N, T-P, SS)을 법정 기준치 이하로 제어가 가능하게 하며, 이를 통해 전력비를 10% 이상 절감하는 것이다. 퍼지모델을 방류수 수질(COD, T-N, T-P, SS)별로 4개의 모델을 구현하고, 이 모델로부터 최적의 용존산소인 DO를 계산 적용하는 방식, 그리고, 기존 운영 방식과는 다르게 현재 DO가 최적 DO보다 큰 경우 송풍기를 운영하지 않은 방식, 실용화를 위해 실제 현장에서 신뢰성이 높은 계측 데이터만을 이용한 모델 구성, 이를 통한 전력비 10% 이상 절감 등은 본 논문의 큰 효과라고 할 수 있다.

References

[1] Lardon L, Punal A, Steyer J-P, Roca E, Lema J, Lambert S, Ratini P, Frattesi S, Bernard O. "Specifications of modular internet-based remote supervision systems for wastewater treatment plants", *15th Biennial European Conference on Artificial Intelligence, Workshop 14: Binding Environmental Sciences and Artificial Intelligence*,

France; 2002.

[2] Lee DS, Jeon CO, Park JM, Chang KS. "Hybrid neural network modelling of a full-scale industrial wastewater treatment process", *Biotechnol. Bioeng.* 78, pp. 670-682. 2002.

[3] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association/ American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA. 1995.

[4] A. Keshtkar, B. Meyssami, G. Abolhamd, H. Ghaforian, M. Khalagi Asadi, "Mathematical modeling of non-ideal mixing continuous flow reactors for anaerobic digestion of cattle manure", *Bioresource Technology*, 87, pp. 113-24, 2003.

[5] Anderson, N. J., Dixon, P. J., Harbour, P. J., Scales, P. J., "Complete characterisation of thermally treated sludge, Water", *Sci. Technol.*, 46(10), pp. 51-54, 2002.

[6] Bougrier C., Albasi C., Delgens J. P., Carrire H., Effect of ultrasonic, "thermal and ozone pre-treatment on waste activated sludge solubilization and anaerobic digestion", *Chem. Eng. Process*, 45, pp. 711-718, 2006.

[7] Bougrier C., Delgens J. P. and Carrre H., "Impacts of thermal -pre-treatment on the semi-continuous anaerobic digestion of waste activated sludge," *Biochemical Engineering Journal*, 34, pp. 20-27, 2007.

[8] Choi D.W., Lee W.G., Lim S. J., Kim B. J., Chang H. N. and Chang S. T., "Simulation on long-term operation of an anaerobic bioreactor for Korean food wastes, *Biotechnol.*" *Bioprocess Eng.*, 8, pp. 23-31, 2003.

[9] Cun-fang Liu, X. Z Yuan, G. Ming Zeng, W. W. Li, J. Li, Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste, *Biores. technol.*, 99, pp. 882-888, 2008.

[10] Eskicioglu C., Droste R. L. and Kenedy K. J., "Performance of anaerobic waste activated sludge digestion by microwave pretreatment," *Water Environment Research*, 79(11), pp. 2265-2273, 2007.

[11] Garja S., Chayzy J., Fernandes P., Parria L., Cretenot D., "Enhanced anaerobic conversion of WWTP sludge: an efficient way to reduce sludge production in, 10th World Congress", *Anaerobic Digestion, Montreal, Canada*, 2004.

[12] Kim M., Y.H. Ahn and R.E. Speece, "Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion: mesophilic vs. thermophilic," *Water Res.*, 36, 4369-4385. 2004.

[13] Lastella G., Testa C., Cornacchia G., Notornicola M., Voltasio F. and Sharma V. K., "Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification", *Energy Convers. Manage.*, 43, pp. 63-75, 2002.

저 자 소 개



남 의 석 (Eui-Seok Nahm)

1991년 2월 : 연세대학교 전기공학과(공학사).
1993년 2월 : 연세대학교 전기공학과(공학석사).
1998년 2월 : 연세대학교 전기공학과(공학박사).
1998년~2002년 : LS산전 책임연구원.
2003년 2월~현재 : 극동대학교 항공IT융합학과 교수