

활성오니 공정의 모델링 및 다변수 퍼지 제어기 설계에 관한 연구

남 의석, 오 성권, 황 희수, 최 진혁, 우 광방
연세대학교 전기공학과

A Study on the Modeling and the Design of Multivariable Fuzzy Controller for the Activated Sludge Process

Department of Electrical Engineering
Yonsei University

ABSTRACT

In this study, We proposed the fuzzy modeling method and designed a model-based fuzzy logic controller for Activated Sludge Process(A.S.P.) in sewage treatment.

The identification of the structure of fuzzy implications is carried out by use of fuzzy c-means clustering algorithm. And to identify the parameters of fuzzy implications, we used the complex and the least square method. To tune the premise parameters automatically the complex method is implemented.

The model-based fuzzy controller is designed by rules generated from the identified A.S.P. fuzzy model. The feasibility of the proposed approach is evaluated through the identification of the fuzzy model to describe an input-output relation of the A.S.P.. The performance of identified model-based fuzzy controller is evaluated through the computer simulations.

1. 서론

본 논문에서는 활성오니 공정의 퍼지 모델링과 동정된 모델을 기초로한 퍼지 제어기의 설계가 다루어진다.

활성오니 공정은 현재 널리 사용되고 있는 하수처리 공정이다. 그러나 활성오니 공정은 (1) 하수에 포함된 요소의 복잡성, (2) 유입 하수량의 변화, (3) 공정의 조작 오차(Adjustment error) 등으로 작동을 최적으로 유지하기가 어렵다. 그러므로 유출수의 기준을 만족시키기 어려우므로 결과적으로 에너지와 경제적 차원에서 손실이 있게된다.

현재의 대부분의 하수처리 플랜트는 제어 공정에 있어서 조절 데이터를 얻기 위해 수학적 모델을 채택하고 있다. 그러나 위에서 열거된 이유로 인하여 이러한 수학적 공식이 정확하고도 효과적으로 하수처리 공정의 변수와 파라미터간의 관계를 나타 내지는 못한다.

본 논문에서는 이러한 점들을 개선하기 위해 활성오니 공정을 퍼지 "If-then" 규칙으로 모델링하고 동정된 퍼지 모델을 기초로 퍼지 제어기를 설계한다. 활성오니 공정의 퍼지 모델링은 2개의 부분으로 나누어진다. 첫째는 구조 동정이고 둘째는 파라미터 동정이다. 본 논문에서 구조동정에는 퍼지 c-means 클러스터링 알고리즘을 이용하고 파라미터 동정에는 최적화 기법인 컴플렉스 기법과 최소사승법을 이용한다. 마지막으로 본 논문이

제안한 기법의 유용성이 실제 하수처리 데이터를 이용하여 검증된다.

2. 활성오니 공정

하수처리 시스템의 구성은 다음의 4가지 공정으로 구성된다. 즉 1) 하수의 수집, 수송 공정, 2) 하수처리 공정, 3)오니처리 공정, 4) 3차처리 공정이다. 하수 처리방식에는 활성오니법이 일반적으로 사용되고 있다. 활성오니는 생태계이고 환경조작 조건에 의해 각각 안정한 상태간을 천이한다. 이 천이의 제어를 잘 진행하면 세부적인 제어를 불필요하게 한다. 활성오니법은 침사지, 최초 침전지, 폭기조 및 최종 침전지로 구성된다. 침사지와 최초 침전지에서는 하수중에 포함된 현탁물질의 입자가 중력에 의해 침강된다. 폭기조에서는 수시간 연속적으로 하수중에 공기가 흡입된다. 유기물 제거의 중심을 이루는 미생물은 폭기조의 과정에서 자연발생하는 다종류의 미생물 군이고 이것을 활성오니라 한다. 이 응집한 미생물의 덩어리를 플록(floc)이라 한다. 활성오니는 폭기조내 공기로부터 용해한 산소에 의해 유기물을 생물화학적으로 산화해서 증식하고 대사과정에서 유기물을 물과 탄산가스로 분해한다. 최종 침전지에서는 플록(floc)은 침강 제거되고 맑은 물이 3차처리 프로세스로 유입된다. 한편 최종 침전지에서 침강한 미생물은 폭기조 입구에 recycle되어 다시 유기물제거에 사용된다. 하수처리 시스템 및 활성오니 공정 제어 구성도는 그림 1에 나타나 있다.

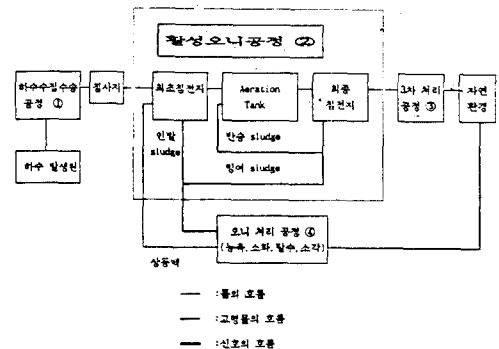


그림 1. 하수처리 시스템의 활성오니 공정제어 구성도

3. 활성오니 공정의 퍼지 모델링

활성오니 공정 퍼지 모델링의 전체적인 구성도는 그림 2와 같다.

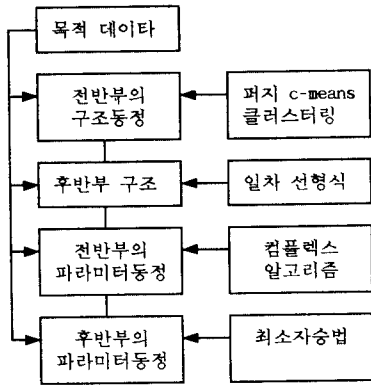


그림 2. 퍼지 모델링의 기본 구성도

3.1 선형식 퍼지 조건문의 추론 알고리즘

선형식 퍼지 조건문의 추론 알고리즘에서의 퍼지 모델은 식 (1)의 형태를 가지는 구현규칙(implication rule)들로 구성된다.

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1}, \dots \text{ and } x_k \text{ is } A_{ik}, \text{ then } y = a_{i0} + a_{i1}x_1 + \dots + a_{ik}x_k \quad (1)$$

여기서, R^i 는 $i(i=1, \dots, n)$ 번째 규칙, $x_j(j=1, \dots, k)$ 는 입력 변수, $A_{ij}(i=1, \dots, n; j=1, \dots, k)$ 는 퍼지 집합의 멤버십 함수로써 전반부의 파라미터, 그리고, $a_{ij}(i=1, \dots, n; j=0, \dots, k)$ 는 후반부의 파라미터이다.

전반부의 모든 변수 x_j , A_{ij} 는 입력 변수의 공간을 규칙 수 만큼 퍼지 분할된 부분 공간으로 나누는 것과 관련되고, 후반부의 a_{ij} 는 각각 퍼지 분할된 부분 공간에서 입출력 관계를 묘사한다. 식 (1)에서 입력 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0$ 에 대한 전반부의 적합도 W_1, W_2, \dots, W_n 은 식 (2)와 식 (3)과 같이 대수곱 혹은 최소 연산(min operation)에 의해 구해진다.

$$W_i = A_{i1}(x_1^0) \times \dots \times A_{ik}(x_k^0) \quad (2)$$

혹은,

$$W_i = A_{i1}(x_1^0) \wedge \dots \wedge A_{ik}(x_k^0) \quad (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

각각의 규칙에 의한 추론결과는 후반부에 직접 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0$ 를 대입한다. 즉

$$y_i = f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0) \quad (i=1, \dots, n) \quad (4)$$

전체의 추론결과는 식 (5)와 같이 표기된다.

$$y^0 = \frac{W_1 f_1(x_1^0, \dots, x_k^0) + \dots + W_n f_n(x_1^0, \dots, x_k^0)}{W_1 + W_2 + \dots + W_n} \quad (5)$$

이것은 규칙이 복수개인 경우, 입력 공간을 퍼지 부분 공간으로 분할해서 각각의 부분 공간에서 선형 입출력 관계를 알아내고, 그들 모임에 의해 전체의 비선형 입출력 관계를 표시한다.

3.2 활성오니 공정의 퍼지 모델링 알고리즘

3.2.1 구조동정

전반부의 구조동정은 입출력 관계를 최적하게 동정하기 위한 최적한 퍼지 구현 규칙의 수를 찾아내는 것으로, 본 논문에서는 퍼지 c-means 클러스터링 알고리즘을 이용한다. 후반부의 구조는 일차 선형식으로 한다. 퍼지 c-means 클러스터링은 시스템의 양적 정보에 기초한 분류지향적(classification oriented) 접근으로 입력 공간을 클러스터 수 만큼 퍼지하게 분할한다. 그러므로 입출력 관계를 최적하게 구현할 수 있는 클러

스터의 수를 찾는 것이 최적한 전반부의 구조를 동정하는 것이다.

퍼지 클러스터링 알고리즘에서 초기값 U^0 는 $1/c$ 로 초기화 했고, ϵ 는 10^{-6} 으로 했다. 수렴 판단기준을 $|J_m(p) - J_m(p+1)|$ 로 사용한 이유는 J_m 이 최소화 될 목적함수이기 때문이다. 본 논문에서 사용된 퍼지 분할 평가기준 S 는 식 (6)과 같다.

(퍼지 클러스터링 알고리즘)

데이터 집합 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$

STEP 1: ① 클러스터 수를 c 개로 정한다. ($2 \leq c \leq n$), n =데이터 항목 수, m 을 정한다. ($2 \leq m \leq \omega$)

② D_{ik} 를 inner product norm으로 정의한다.

③ set $p = 1$.

④ $U^{(p-1)}$ 을 초기화. $c \times n$ 행렬 $U^{(p-1)}$ 의 j 번째 열은 클러스터 c 에 X_j 의 멤버십을 나타낸다.

STEP 2: 클러스터의 중심값 계산.

$$V_{iL} = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m X_{kL}}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m}, \quad L=1, 1, \dots, d$$

d : 데이터 X_k 의 dimension,
 $\mu_{ik} = \mu_i(X_k)$: 퍼지 집합 μ_i 에 대한 X_k 의 멤버십 값.

STEP 3: Update $U^{(p)}$ for $k = 1$ to n .

① I_k 와 I_k' 계산.
 $I_k = \{i | 1 \leq i \leq c, D_{ik} = \|X_k - V_i\| = 0\}$
 $I_k' = \{1, 2, \dots, c\} - I_k$

② k 번째 데이터 항목에 대해서 새로운 멤버십 값을 계산.

i) If $I_k = 0$,
 $\mu_{ik} = D_{ik}^{2/(1-m)}$

$\mu_{ik} = \mu_{ik} / \sum_{i=1}^c (\mu_{ik})$

ii) If $I_k' \neq \emptyset$
 $\mu_{ik} = 0$ for all I_k' , $\sum_{i \in I_k} (\mu_{ik})$

③ Next k

STEP 4:

$$J_m(p) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (\mu_{ik})^m D_{ik}^2$$

compare $J_m(p)$ and $J_m(p+1)$.
 If $|J_m(p) - J_m(p+1)| < \epsilon$, stop.
 otherwise set $p = p + 1$, go to STEP 2.

$$S = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (\mu_{ik})^m \|X_k - V_i\|^2}{n \cdot \min_{i,j} \|X_k - V_i\|^2} \quad (6)$$

$m = 2$ 인 경우에 S 는 식 (7)과 같다.

$$S = \frac{J_2}{n \cdot (d_{min})^2} \quad (7)$$

여기서 $d_{min} = \min_{i,j} \|X_k - V_i\|^2$ 는 클러스터 centroid 사이의

최소 거리이다. S 를 최소화 하는 것이 J_2 를 최소화 하는 것이다. S 의 분모 $(d_{min})^2$ 으로 인하여 클러스터들의 분리 정도가 커지면 클수록 $(d_{min})^2$ 가 커지므로 S 는 더욱더 작은 값이 된다.

3.2.2 파라미터 동정

(전반부의 파라미터 동정)

전반부의 파라미터는 입력 퍼지 변수의 멤버십 함수의 파라미터를 말하는 것으로 본 논문에서는 최적화 기법인 컴플렉스법을 이용한다.

(후반부의 파라미터 동정)

입출력 데이터로써 $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki} - y_i (i=1, 2, \dots, m; m$ 은 데이터수)의 집합으로 주어졌을 때, 후반부 파라미터 $a_{i0}, a_{i1}, \dots, a_{ik}$ 는 최소자승법에 의해 구해진다.

퍼지 모델에 있어서 최소자승법에 의한 매개변수 추정은 식 (8)가 같다.

$$\sum_{i=1}^m [y_i - \sum_{j=1}^n (a_{j0} + a_{j1}x_{1i} + \dots + a_{jk}x_{ki})W_{ji}]^2 \quad (8)$$

$$W_{ji} = \frac{A_{j1}(x_{1i}) \wedge \dots \wedge A_{jk}(x_{ki})}{\sum_{j=1}^n (A_{j1}(x_{1i}) \wedge \dots \wedge A_{jk}(x_{ki}))}$$

j : 규칙수, i : 데이터수, m : 데이터총수 n : 규칙총수 이다.

4. 활성오니 공정의 퍼지 모델에 기초한 제어기 설계

프로세스가 복잡하면, 그것을 효율적으로 제어할 수 있는 속련자는 기대할 수 없게 된다. 이 경우 프로세스의 퍼지 모델로부터 통상의 제어이론으로 퍼지 제어를 설계하는 것이 바람직하다.

본절에서는 활성오니 공정이 3절에서 기술한 퍼지 모델에 의해 표현되는 경우에, 그 퍼지 모델로부터 퍼지 제어를 설계하는 방법을 고찰한다. 프로세스의 퍼지 모델은 복수의 프로세스 법칙으로부터 구성되는 비선형 모델이기 때문에, 1개의 선형 제어기로 제어하는 것은 곤란하다. 그런데, 1개의 퍼지 프로세스 법칙은 전반부에 의해 정해지는 퍼지 부분 공간에서 성립하는 1개의 선형 시스템을 후반부에 표현하고 있다. 따라서 각 퍼지 프로세스 법칙의 후반부 선형 시스템에 대한 선형 제어를 설계하고, 그것을 전반부의 퍼지 부분 공간상의 제어기로 하는 것이 가능하다. 그러면, 프로세스의 퍼지 모델과 같은 수의 규칙을 갖고 전반부가 프로세스의 퍼지 모델의 전반부와 동일한 퍼지 제어가 구성되어진다.

프로세스의 퍼지 모델에서는, 출력의 추정치는 각 프로세스 법칙의 출력을 무게치 평균으로 하여 식 (9)와 같이 구한다.

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^n W_i y_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (9)$$

여기서 $W_i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_j^0)$

그것에 대해 퍼지 제어기는 프로세스의 제어가 가능하도록 각 제어 규칙의 출력으로부터 조작량을 구하는 방법을 결정하지 않으면 안된다. 본 논문에서는 프로세스가 다중입력 단일출력 시스템인 경우에 대하여 고찰한다.

프로세스가 다중입력, 단일출력 시스템인 경우는 퍼지 프로세스 법칙의 후반부는 식 (10)과 같다.

$$y_i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_m^i x_m + b_i u \quad (10) \quad (i=1, \dots, n)$$

여기서, y_i : i 번째 퍼지 프로세스 법칙으로부터의 출력, x_j : 변수, u : 조작량, a_j^i 와 b_i : 파라미터이다.

지금 (x_1, x_2, \dots, x_m) 인 어떤 입력치 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ 에 대해 프로세스의 출력이 어떤 값 y^0 로 되도록 u_r (조작량)를 퍼지 제어기로부터 구하는 방법을 고찰한다. 첫번째 프로세스 법칙의 출력이 y^0 로 되도록 조작량을 첫번째 제어 규칙의 후반부 제어기로부터 구해 그것을 u^1 으로 한다. 동일하게, 각 프로세스 법칙의 출력이 y^0 가 되도록 조작량을 각 제어 규칙으로부터

구한다. 그러면 규칙의 수가 n 개인 경우, 식 (11)을 만족시키는 u^1, u^2, \dots, u^n 이 얻어진다.

$$y^0 = a_0^i + a_1^i x_1^0 + \dots + a_m^i x_m^0 + b_i u^i \quad (11) \quad (i=1, \dots, n)$$

입력치 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0, u_r)$ 에 대한 프로세스 모델의 y 의 추론치 y_r 는 식(12)와 같다. 즉

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^n W_i (a_0^i + a_1^i x_1^0 + \dots + a_m^i x_m^0 + b_i u_r)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (12)$$

여기서, W_i 는 입력치 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0, u_r)$ 에 대한 i 번째 퍼지 프로세스 법칙의 전반부 적합도이다. 식 (10)의 각각의 식에 전반부의 적합도 W_i 를 곱하면 식 (13)과 같다.

$$\sum_{i=1}^n W_i y^0 = \sum_{i=1}^n W_i (a_0^i + a_1^i x_1^0 + \dots + a_m^i x_m^0 + b_i u^i) \quad (13)$$

지금 프로세스의 출력이 y^0 로 되는 것을 목적으로 하기 때문에 $y_r = y^0$ 로 하면 식 (12)과 식 (13)식에 의하여 식 (14)로 된다.

$$\sum_{i=1}^n W_i b_i u_r = \sum_{i=1}^n W_i b_i u^i \quad (14)$$

로 된다.

따라서, 조작량 u_r 는 u^1, u^2, \dots, u^n 으로 부터 얻어진다. 조작량 u 가 전반부 변수인 경우는, 전반부의 적합도 W_i 가 u 의 함수로 된다. 조작량 u 가 전반부 변수가 아닌 경우는 식 (14)로부터 u_r 는 식 (15)와 같이 구해진다.

$$u_r = \frac{\sum_{i=1}^n W_i b_i u^i}{\sum_{i=1}^n W_i b_i} \quad (15)$$

조작량 u 가 전반부 변수인 경우는 i 번째 프로세스 법칙과 i 번째 제어 규칙의 전반부인 퍼지 부분공간은 $\langle x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i, u \text{ is } B^i \rangle$ 로 되어 전반부의 적합도는 다음과 같다.

$$W_i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_j^0) B^i(u_r) = g^i B^i(u_r), \quad \text{여기서 } g^i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_j^0)$$

따라서 식 (14)은 식 (16)과 같이 된다.

$$\sum_{i=1}^n g^i B^i(u_r) b_i u_r = \sum_{i=1}^n g^i B^i(u_r) b_i u^i \quad (16)$$

식 (16)으로부터 퍼지 변수의 형태를 고려하여 u_r 을 구한다.

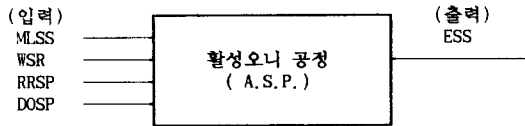
5. 시뮬레이션

본 논문에서는 수도권 하수 처리장 중의 하나를 모델로 선정하여 이 처리장의 1년치 수질 데이터를 토대로 활성오니 공정을 퍼지 모델링하고 동정된 모델로부터 퍼지 제어를 구성하여 성능평가를 하였다.

1) 활성오니 공정 모델링

활성오니 공정은 폭기조 및 최종 침전지를 하나의 단일 모델로 선정하였다. 실제 최종 침전지로 유입되는 BOD(생물학적 산소 요구량) 및 SS(유입수의 부유물) 농도를 측정하고, 최종 침전지에서 유출되는 EBOD 및 ESS 농도가 주요 측정 대상이 된다. 활성오니 공정의 DOSP(Dissolved Oxygen Set-Point) 및 RRSF(Recycle Sludge Ratio Set-Point)는, 유입수의 BOD 및 SS 농도에 따라 유출수의 EBOD, ESS 농도가 영향을 받으므로 조작자가 이 유출수의 농도를 소정치 이하로 낮추기 위해 사용되는 데이

타이다. 유출수의 BOD 및 SS 농도는 측정된 데이터의 MLSS, WSR, RRSP, DOSP에 의존하며 BOD, SS 농도는 서로 일정한 상관 관계를 가지고 있다. 본 논문에서는 그림 4의 입력 및 출력 데이터를 사용하여 퍼지 모델링한다.



MLSS : 폭기조내 오니중의 부유물
WSR : 잉여오니 흐름율
RRSP : 반송율 설정치
DOSP : 용존산소 설정치
ESS : 유출수의 부유물 농도

그림 4 활성오니 공정내의 입출력 변수

활성오니 공정에서 입력을 MLSS, WSR, DOSP로 하고 출력 ESS로 하자. RRSP는 모델의 성능에 큰 영향을 미치지 않으므로 모델의 입력 변수에서 제외한다. 여기서 각 입력 대 출력 MLSS-ESS, WSR-ESS, DOSP-ESS의 최적 클러스터 수를 구하기 위해 클러스터 수에 따른 평가지수 S를 구하면 표 1과 같다.

표 1. 클러스터 수에 따른 평가지수 S 값

	MLSS	WSR	DOSP
C = 2	183.78	46.70	18.23
C = 3	35.14	361.78	47.10
C = 4	623.68	61.27	46.72
C = 5	69.97	72.52	377.60

(C는 클러스터 수)

■ : 각 입력에 대해 채택된 클러스터 수의 S 값

여기서 S값이 작으면 입력 공간이 전체적으로 잘 분할되었다고 볼 수 있다. 그러므로 MLSS에 대해서는 입력 공간을 3개로 분할하고, WSR는 2개, DOSP는 2개로 분할한다. 즉 입력 MLSS, WSR, DOSP의 멤버십 함수가 그림 5와 같은 형태가 된다고 가정한다.

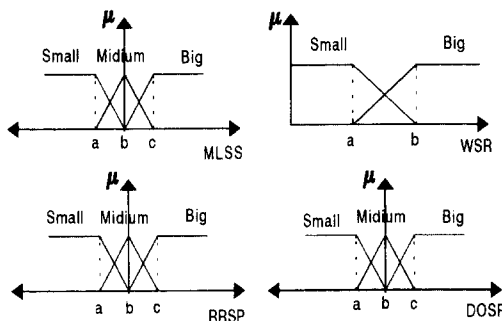


그림 5 입력 변수의 멤버십 형태

그림 5에 보이는 각 입력변수의 전반부 파라미터를 컴플렉스 기법에 의해 동정하면 표 2가 같다. 컴플렉스 기법의 적용에 있어서 각 파라미터의 초기치는 클러스터의 중심 벡터의 값으로 초기화 하였다. 그 결과 수렴속도가 증가하였다.

표 2. 동정된 각 입력변수의 멤버십 파라미터 및 PI

	a	b	c	PI
MLSS	1662.13	2111.12	2261.14	0.01
WSR	0.481	1.624		
DOSP	2.984	7.429		

여기서 x_1 은 MLSS, x_2 는 WSR, x_3 는 DOSP라고 하자. 그러면 동정된 활성오니 공정의 모델 규칙은 표 3.과 같다.

표 3. 활성오니 공정의 모델 규칙

R ₁ : x_1 is Small, x_2 is Small, x_3 is Small then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₂ : x_1 is Small, x_2 is Small, x_3 is Big then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₃ : x_1 is Small, x_2 is Big, x_3 is Small then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₄ : x_1 is Small, x_2 is Big, x_3 is Big then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₅ : x_1 is Medium, x_2 is Small, x_3 is Small then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₆ : x_1 is Medium, x_2 is Small, x_3 is Big then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₇ : x_1 is Medium, x_2 is Big, x_3 is Small then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₈ : x_1 is Medium, x_2 is Big, x_3 is Big then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₉ : x_1 is Big, x_2 is Small, x_3 is Small then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₁₀ : x_1 is Big, x_2 is Small, x_3 is Big then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₁₁ : x_1 is Big, x_2 is Big, x_3 is Small then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R ₁₂ : x_1 is Small, x_2 is Big, x_3 is Big then $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$

최소자승법에 구해진 후반부의 파라미터는 표 4.와 같다.

표 4. 모델 규칙의 후반부 파라미터

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
R ₁	-57.93527	-0.111084	-12.87455	8.618314	-0.443229
R ₂	-241.4946	-0.265785	-51.10861	24.463755	-1.971701
R ₃	-1045.963	0.510127	102.44847	19.312532	-57.82332
R ₄	2791.5984	0.685301	-428.8791	-123.3355	48.453232
R ₅	1166.0133	-0.762250	563.12847	7.054269	-27.99420
R ₆	2181.7959	-1.328816	2586.4675	-14.73138	-60.91581
R ₇	169.91464	0.745226	-194.0746	19.374325	-287.3609
R ₈	250.95376	0.775085	1173.2107	109.17741	-976.2988
R ₉	-2106.115	-0.114009	157.33089	5.357264	281.66098
R ₁₀	-4237.023	-0.254099	668.35510	-89.45118	933.75631
R ₁₁	-284.5643	0.726150	11.909774	-21.71359	-109.6960
R ₁₂	-1419.631	0.964962	-153.8741	47.587299	-308.4878

2) 모델에 기초한 퍼지 제어기 설계

활성오니 공정의 퍼지 모델(표 3.) 에서 퍼지 제어기의 제어 규칙을 추출한다. 퍼지 제어기의 출력은 ESS로 하고 조작량은 DOSP로 한다. 추출된 퍼지 제어규칙은 표 5.와 같다.

표 5. 활성오니 공정의 퍼지 제어 규칙

R ₁	: x ₁ is Small, x ₂ is Small, x ₃ is Small then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₂	: x ₁ is Small, x ₂ is Small, x ₃ is Big then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₃	: x ₁ is Small, x ₂ is Big, x ₃ is Small then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₄	: x ₁ is Small, x ₂ is Big, x ₃ is Big then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₅	: x ₁ is Medium, x ₂ is Small, x ₃ is Small then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₆	: x ₁ is Medium, x ₂ is Small, x ₃ is Big then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₇	: x ₁ is Medium, x ₂ is Big, x ₃ is Small then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₈	: x ₁ is Medium, x ₂ is Big, x ₃ is Big then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₉	: x ₁ is Big, x ₂ is Small, x ₃ is Small then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₁₀	: x ₁ is Big, x ₂ is Small, x ₃ is Big then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₁₁	: x ₁ is Big, x ₂ is Big, x ₃ is Small then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)
R ₁₂	: x ₁ is Small, x ₂ is Big, x ₃ is Big then y = REF - (b ₀ + b ₁ x ₁ + b ₂ x ₂ + b ₃ x ₃)

여기서 x₁은 MLSS, x₂는 WSR, x₃는 DOSP이고 REF는 기준 입력치이다. b₀, b₁, b₂, b₃는 표 5의 의해 구해진다. 그림 7은 플랜트의 출력 ESS가 잘 제어됨을 보여준다. 그림 8은 실제 모델과 퍼지 모델이 잘 일치됨을 보여준다. 제어 되지 않은 부분은 단일 제어량 DOSP 농도의 조절만으로는 출력 ESS를 일정치 이하로 제어할 수 없음을 나타낸다.

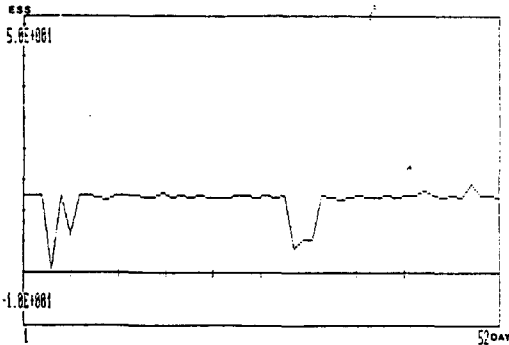


그림 7 모델 베이스형 퍼지 제어기에 의한 플랜트 출력(ESS)

6. 결론

본 논문에서 비선형 특성을 갖는 하수처리 시스템의 활성오니 공정에 선형 퍼지 추론법을 적용하여 퍼지 모델링 하였다. 퍼지 c-means 클러스터링 알고리즘에 의해 구조동정을 하였고, 파라미터의 동정에 컴플렉스법과 최소자승법을 이용함으로써 모델의 성능을 향상시켰다. 이 퍼지 모델을 기초로 모델 베이스형 퍼지 제어기를 설계하였다. 이 퍼지 제어기는 모델로부터 규칙을 추출한 것으로 비선형 활성오니 공정에 대해 정확한 목표치 제어를 수행할 수 있었다.

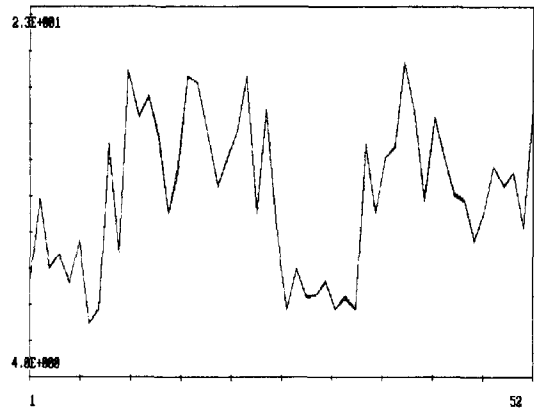


그림 8 실제 모델과 퍼지 모델의 비교

7. 참고문헌

1. M.Hiraoka, and K.Tsumura, and T.Oka, "Interactive control system in the ctivated sludge process", Proceeding of 3rd PACHEC, pp.243-248, Seoul, 1983.
2. T.Takagi, and M.Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-15, No.1, pp.116-132, 1985.
3. R.M.Tong, M.B.Beck, and A.Latten, "Fuzzy control of the activated sludge wastewater treatment process", Automatica, Vol. 16, pp. 695-701, 1980.
4. M.Sugeno and G.T.Kang, "Fuzzy modeling and control of multilayer incinerator", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 18, pp. 329-346, 1986.
5. M.Sugeno and G.T.Kang, "Structure identification of fuzzy model", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 24, pp. 15-33, 1988.
6. Bezdek, J. C., "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms", New Plenum, 1981.
7. Xuanli, L. X., and Gerardo, B., "A Validity Measure for Fuzzy Clustering", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol PAMI-13, no. 8, pp. 841-847, August, 1991.
8. 菅野道夫, "ファジー制御", 日刊工業新聞社, 1988.
9. 富士の技術 "水のシステム技術特集", FUJI ELECTRIC(株), 1989.