

論文 91-28B-7-7

# 하수처리 활성오니공정을 위한 규칙 베이스 퍼지 제어기 설계

(Design of Rule-Based Fuzzy Controller for Activated Sludge Process in Sewage Water Treatment)

黃 熹 秀\*, 金 賢 起\*, 吳 聖 權\*, 禹 廣 芳\*

(Hee Soo Hwang, Hyun Ki Kim, Sung Kwun Oh, and Kwang Bang Woo)

## 要 約

활성오니공정은 하수와 폐수 처리에 있어 가장 보편적으로 사용되며 이 공정은 생물학적 특성으로 인해 제측의 어려움과 항상 명확치 않은 제어 목표를 갖는 특성을 갖고 있다. 이러한 공정에서 퍼지 제어 개념이 잘 적용될 수 있으며 본 논문에서는 전체 제어 규칙으로부터 공정 상태에 따라 부분 제어 규칙의 집합을 결정하고, 그 결정된 부분 제어 규칙 집합으로부터 다변수 퍼지 추론 알고리즘을 적용하는 퍼지 제어기 설계 기법이 제시된다. 광범위한 외란과 다양한 동작 특성을 갖는 활성오니공정을 체계적이고 효율적으로 제어하기 위해서 본 논문에서는 규칙 베이스 퍼지 제어기가 제안되고 하부의 제어기들에 공정의 입출력 상태에 따라 적절한 설정치(제어목표)를 제공하는 역할을 담당한다.

## Abstract

The activated sludge process is a commonly used method for treating sewage and waste waters. The process is characterized by a lack of measurement instrumentations and control goals that are not always clear and not well understood. In such process, fuzzy control concept may be able to be adapted, so this paper presents a design method for fuzzy controller based on a selected sub-rule set from the total rule set and a multivariable fuzzy reasoning algorithms. In order to achieve systematic and efficient control of the activated sludge process under a great deal of disturbances and a variety of performance characteristics, a top-level rule-based fuzzy controller is proposed which provides lower-controllers with the suitable set-points according to the input-output states of the process.

## I. 序 論

하수처리는 1차 처리후에 하수중에 잔존하는 용해

물질을 미생물의 힘에 의해 제거하는 활성오니 처리가 필요불가결하며 수질의 향상과 질적 변화를 줄이기 위해 하수처리 시스템에서의 활성오니의 질과 양의 관리 및 적정화가 중요하다.<sup>[1]</sup> 이 공정은 생물학적 메카니즘의 특성으로 1) 수질 측정이 어려우며, 2) 부하변화가 심하고, 3) 공정 특성이 복잡하여 제어량과 조작량의 선택이 명확치 않아 조작자는 의사

\*正會員, 延世大學校 電氣工學科  
(Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.)  
接受日字: 1991年 2月 2日

결정에 있어 경험을 기초로 하는 질적 정보의 사용을 필요로 한다.<sup>16,17)</sup> 이와 같은 특성을 갖는 공정 제어에 있어 조작자에 의한 조절 기능이 효율적 공정 제어를 가능하게 하며 조작자는 제어 전략을 의사결정 규칙의 집합으로 언어적으로 표시할 수 있다. 따라서 보다 효율적이고 체계화된 질적 제어를 수행하기 위해서는 조작자의 제어 전략을 기술하고 있는 언어적 제어 규칙으로부터 제어 알고리즘을 구현하는 것이다. 이를 위해 퍼지 집합 개념을 사용하여 활성오니공정의 조작자가 사용하는 제어 전략을 제어 규칙으로 만들고 컴퓨터가 형성된 제어 규칙에 입각하여 공정을 자동적으로 제어할 수 있도록 하는 퍼지 제어기 설계 기법이 다루어진다.<sup>2)</sup>

본 논문에서는 규칙 베이스 퍼지 제어기가 제안된 전체 제어 규칙 베이스로부터 공정의 특성 변화에 따라 그 특성에 부합하는 제어 규칙군을 선택하고, 선택된 제어 규칙의 집합을 기반으로 하여 다변수 퍼지 추론을 수행하여 제어 조작량을 결정한다. 이 퍼지 제어기는 활성오니공정을 체계적이고 효과적으로 제어하기 위해 하부의 제어기들에 공정 상태에 적합한 설정치(제어목표)들을 제공하는 역할을 담당한다.

II. 하수처리 시스템에서 활성오니공정

하수처리 시스템의 구성은 그림1과 같으며 침사지, 최초 침전지, 폭조기 및 최종 침전지로 이루어지며 그 중 활성오니공정은 폭조기와 최종 침전지를 중심으로 이루어진다. 폭조기에서는 연속적으로 수시간 하수중에 공기가 흡입되고 하수중의 유기물질과 활성오니(미생물)를 접촉시켜 폭조내 공기로부터 용해한 산소에 의해 유기물을 생물화학적으로 산화해서 증식하고 미생물 덩어리인 플록(floc)을 형성한다. 최종 침전지에서는 플록이 침강 제거되고 맑은 물이 유출된다. 최종 침전지에서 침강한 미생물은 폭조기 입구로 재순환되어 다시 유기물 제거에 사용된다. 이때 일부는 활성오니 양의 과도한 증가를 방지하기 위하여 인발해 오니처리공정으로 보내진다.

활성오니공정의 적절한 제어를 위해서는 1) 하수중에 포함된 부유성 및 용해성 유기물질의 산화, 그리고 흡착하는 역할을 하는 활성오니의 농도를 최적으로 유지하기 위해 반송오니량이 적절히 조절되어야 하고, 2) 활성오니가 용해성 및 부유 유기물질을 산화, 흡착시켜 침강성의 플록을 형성하는데 필요한 DO(dissolved oxygen)를 최적으로 유지하기 위해 적당 양의 공기를 폭조기에 유입시켜 주어야 하며,

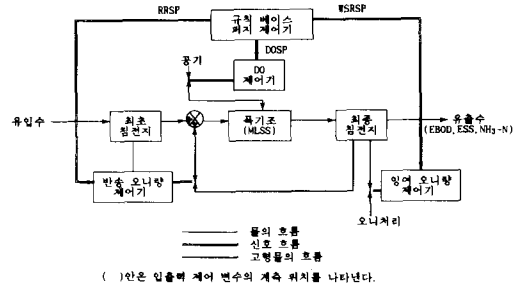


그림 1. 하수처리 시스템 구성도  
Fig. 1. System configuration of the sewage water treatment.

3) 수질의 향상과 질적 변화를 줄이기위한 활성오니의 양적 관리를 위해 폭조기로부터 유출된 오니는 최종 침전지에서 회수되어 폭조기로 되돌려지는데 이때 활성오니의 양의 과도한 증가를 피하기 위해 적당 양을 인발해 오니처리하여야 한다.<sup>24,25)</sup>

따라서 활성오니공정 제어는 위에 언급한 반송 오니량의 적절한 조정, 폭조기내의 최적 용존 산소의 유지를 위한 송풍량 조정, 그리고 잉여 오니의 인발 처리에 의해 수행되는데, 규칙 베이스 퍼지 제어기는 공정의 상태에 따라 최적의 RRSP(recycle ratio set-point)와 WSRSP(waste sludge ratio set-point) 및 DOSP(dissolved oxygen set-point)를 하부제어기인 반송 오니량 제어기, 잉여 오니량 제어기 및 용존 산소 제어기에 제공한다. 하부 제어기는 퍼지 제어기로부터 받은 설정치(제어목표)에 도달하도록 반송 오니량, 잉여 오니량 및 송풍량을 조정한다.

III. 규칙 베이스 퍼지 제어기의 설계

하수처리 시스템에서 기존의 제어 기능은 조작자가 공정 시스템에서 측정된 정보 및 경험에 기초하여 용존 산소량, 잉여 오니량 및 반송 오니량을 조정한다. 본 논문에서 검토되는 규칙 베이스 퍼지 제어기는 이런 조작자의 역할을 제어기로 구현한 것이며 다음과 같은 과정을 거치게 된다. 1) 공정 상태를 결정하는 입출력 제어 변수(언어 변수)를 정의하고, 2) 각 제어 변수값과 이에 상응하는 멤버쉽함수를 결정하고, 3) 조작자의 제어 전략을 언어적 제어 규칙의 집합으로 변환하여 규칙 베이스를 형성하고, 4) 공정 상태에 적합한 제어 규칙군을 규칙 베이스로부터 선택하여 관계 행렬을 구성한 후 측정된 입력에 기초하여 다변수 퍼지 추론이 이루어지며, 5) 추론된 결과는 비퍼지화되어 공정에 인가된다.

1. 제어변수의 선정

퍼지 제어에서는 언어 변수가 사용되는데 대단히 복잡하거나 잘 정의되지 아니한 시스템을 근사적으로 규정하고 특성평가가 가능케되는 체계적인 수단이 제공된다. 활성오니공정 제어는 유입수의 양적, 질적 변화에도 불구하고 공정 상태의 계측정보(입력 변수)에 입각하여 하수의 질을 유지하고 하수처리 공정을 수행하기 위해 제어변수 RRSP, DOSP, WSR RSP를 조작하는 것이다. 이에 대한 퍼지 입출력 변수가 표1에 기술된다.

표 1. 입출력 제어변수  
Table 1. Input-output control variables.

입출력변수	내 용	
입 력	EBOD	유출수중의 총BOD량
	ESS	유출수중의 부유물
	MLSS	폭조기를 떠나는 오니중의 부유물
	NH <sub>3</sub> -N	유출수중의 NH <sub>3</sub> -N
	DOSP	폭기조내의 용존산소 설정치
	WSRSP	잉여오니 흐름을 설정치
출 력	△ DOSP	DOSP의 변화율; $DOSP(t) = DOSP(t-1) + \Delta DOSP(t)$
	△ RRSP	RRSP의 변화율; $RRSP(t) = k + \Delta RRSP(t)$ , k는 RRSP의 기준치
	△ WSRSP	WSRSP의 변화율; $WSRSP(t) = WSRSP(t-1) + \Delta WSRSP(t)$

2. 퍼지 변수값과 멤버십 함수 (Membership Function)

1) 퍼지 변수값

퍼지 언어 변수값은 언어 변수의 라벨(표기어)로 ("small", "big", "positive" 등), 부정어(not), 그리고 수식어("very", "more or less" 등)의 결합으로 이루어진다.<sup>6)</sup> 예를들어 언어적 변수 MLSS는 다음과 같이 복합용어로 이루어질 수 있다. "MLSS is very small", 즉, 각 제어변수의 특성에 맞도록 라벨을 설정하면 그 제어변수(언어 변수)의 값은 위에 설명된 복합용어로 이루어진다. 활성오니공정의 입력변수 값은 S (small), M (medium), L (large), VS (very small), NS (not small), NL (not large) 중에서 선택되며 출력변수 값은 LN (large negative), SN (small negative), SP (small positive), LP (large positive) 중에서 선택된다.

2) 멤버십 함수

x에 대한 멤버십 함수,  $\mu_A(x)$ 는 x가 논리공간(universe of discourse) A에 속하는 정도를 나타낸다. 퍼지 변수 값 계산을 위한 퍼지 연산이 필요하며, 퍼지 집합 A의 부정(not)은  $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ , 퍼지 집합 A와 B의 합집합(논리연산 AND)은  $\mu_C(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ , 퍼지 집합 A와 B의 교집합(논리연산OR)

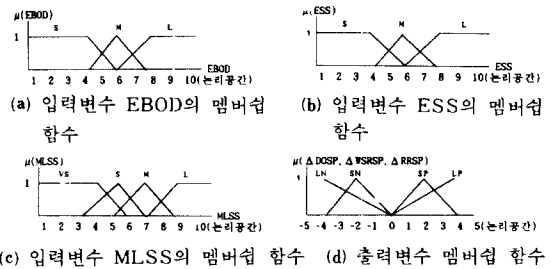


그림 2. 입출력 제어변수의 멤버십 함수  
Fig. 2. Membership function of input-output control variables.

표 2. 입출력 제어 변수의 논리공간에 대한 환산계수

Table 2. Scaling factors of universe of discourse of control variables.

입출력 변수	환산 계수	실제 논리공간	
입력	EBOD	4	0~40 mg / l
	ESS	3	0~30 mg / l
	MLSS	300	0~3000mg / l
	DOSP	1.5	0~15 mg / l
	WSRSP	0.2	0~2 mg / l
출력	△ DOSP	4	-2~2
	△ WSRSP	1.4	-1~1
	△ RRSP	13.6	-5~5

는  $\mu_C(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ 로 정의된다. 활성오니 공정 입출력 변수에 대한 멤버십함수의 예가 그림 2에 보여진다.

표2에서 입출력 변수의 멤버십함수에서 입출력 변수의 논리공간을 각기 0~10, 및 -5~5로 택하는데 실제 각 변수의 논리공간 값과의 관계는 식(1)에 의해 결정된다.

$$(\text{입출력 변수 값}) / (\text{각 변수의 환산계수}) = (\text{멤버십함수상에서 변수의 논리공간 값}) \quad (1)$$

3. 퍼지 제어 알고리즘

퍼지 제어 알고리즘은 하수처리 공정으로부터 계측된 값에 의해 퍼지 집합이 발생(퍼지화)하면 이러한 퍼지 집합에 의해 제어 규칙 베이스로부터 적용될 제어 규칙군이 선택되고, 다변수 퍼지 추론 알고리즘에 의해 선택된 제어 규칙군으로부터 추론 합성이 이루어지면 추론된 결과를 명확한 제어 동작으로 변환(비퍼지화)하여 공정에 인가하도록 구성된다. 이 과정의 개념도는 그림3과 같다.

1) 퍼지 제어 규칙

제어 규칙 베이스를 형성하는 제어 규칙 집합의 예가 표3에 주어진다. 이들 제어 규칙이 어떤 공정

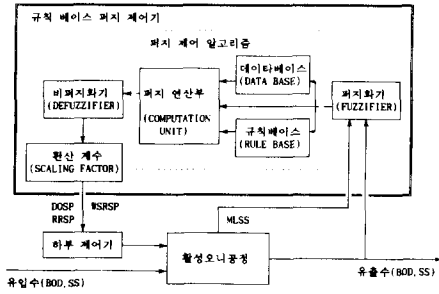


그림 3. 퍼지 제어 알고리즘의 개요도  
 Fig. 3. Schematic diagram of fuzzy control algorithm.

표 3. 제어 규칙 베이스를 형성하는 제어 규칙  
 Table 3. Control rules constituting control rule base.

규칙 번호	입력 변수					출력 변수		
	EBOD	ESS	MLSS	DOSP	WSRSP	ΔDOSP	ΔWSRSP	RRSP
1	S	S	M	NL	M	*	*	*
2	S	S	M	L	S	LN	SP	
3	S	S	M	L	L	LN	SN	
4	M	S					SN	
5	L	S					LN	
6	NL	M						SP
7	NL	L	VS					LP
8			L		S			SP
9			L		L		LP	SN
10			S				SN	
11			VS				LN	
12								

(\*는 정상 상태이기에 추가적 제어 조치가 불필요한 경우)

상태에서 동시에 모두 적용되는 것은 아니고 공정 특성에 따라 5개의 부분 조작상태로 나누어진 제어 규칙군에 의해 각 조작상태에 해당하는 제어 규칙이 적용된다.<sup>2,6,7)</sup>

- 조작상태 1; 유출수는 정상 수질이나 WSRSP, DOSP가 비정상인 경우 (규칙2-3)
  - 조작상태 2; 유출수의 BOD 농도가 비정상인 경우 (규칙4-5)
  - 조작상태 3; 유출수의 ESS 농도가 비정상인 경우 (규칙6-7)
  - 조작상태 4; 공정 상태 변수 MLSS와 WSRSP이 비정상인 경우 (규칙8-10)
  - 조작상태 5; 공정 상태 변수 MLSS가 비정상인 경우 (규칙11-12)
- 현재의 공정 상태가 위에 언급된 조작상태 중 어

는 상태에 가장 적합한지는 아래에 의해 결정된다.

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_{11}) \ \& \ (x_2 \text{ is } A_{12}), \dots, \\ (x_n \text{ is } A_{1n}) \ \text{THEN 조작상태1 with } CF_1, \\ \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_{51}) \ \& \ (x_2 \text{ is } A_{52}), \dots, \\ (x_n \text{ is } A_{5n}) \ \text{THEN 조작상태5 with } CF_5,$$

여기서  $x_i$  : 공정 상태 변수,  
 $A_{j,k}$  : 조작상태 j에서의 공정 상태 변수  $x_k$ 의 퍼지 값으로 3-2-1절에 보여진 언어 변수 값 가운데 하나,  
 $CF_i$  : 현 공정 상태와 i번째 조작상태와의 적합도를 나타낸다.

$CF_i$ 는 아래식에 의해 구해진다.

$$CF_i = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(A_{ij})}{n} \quad (3)$$

$\mu(A_{ij})$ 는 공정 상태i의 j번째 상태 변수에 대한 멤버십 정도를 나타낸다. 하수처리 공정에서 계속된 정보에 의해  $CF_1 \sim CF_5$ 이 결정되면  $CF_i \geq \alpha$ 를 만족하는 모든  $CF_i$  가운데 가장 큰  $CF_i$  값을 갖는 조작상태i가 결정되어 조작상태i에 해당하는 제어 규칙군이 활성오니 공정에 적용되고 이 결과에 따라 새로운  $CF_i$ 가 계산되어 위의 절차를 반복 수행한다.

2) 다변수 퍼지 조건문문의 추론 알고리즘

공정 상태의 계속으로 부터 조작상태1이 결정되면 조작상태1의 제어 규칙군은 5개의 입력 변수와 2개의 출력 변수로 구성되고 있어 다변수 퍼지 추론을 하여야 한다. 4개의 입력 변수와 2개의 출력 변수로 된 다변수 시스템이 그림4에 보여진다.<sup>1)</sup>

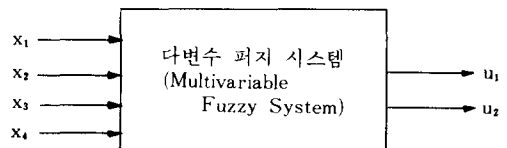


그림 4. 다변수 퍼지 시스템  
 Fig. 4. Multivariable fuzzy system.

이 시스템에 대한 언어적인 기술은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{IF } (X_{1n}) \ \& \ (X_{2n}) \ \& \ \dots \ \& \ (X_{4n}) \ \text{THEN } U_{1n} \ \& \ U_{2n}, \\ \dots \dots \dots$$

OR IF ( $X_{1(n)} \& X_{2(n)} \& \dots, X_{4(n)}$ ) THEN  $U_{1(n)} \& U_{2(n)}$  (4)

OR IF ( $X_{1(n)} \& X_{2(n)} \& \dots, X_{4(n)}$ ) THEN  $U_{1(n)} \& U_{2(n)}$

여기서  $X_{k(n)}$  : 논리공간(universe of discourse)  $X^k$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) 내에서 정의된  $k$ -입력 변수의 퍼지 값,

$U_{j(n)}$  : 논리공간  $U^j$  ( $j=1, 2$ ) 안에서 정의된  $j$ 번째 출력 변수의 퍼지 값

주어진 현재의 입력  $X_1, X_2, X_3, X_4$ 에 대한 출력  $U_1, U_2$ 를 구하기 위해 다음의 추론 합성 규칙이 사용된다.

$$\begin{aligned} U_1 &= X_1 \circ R_{11} \wedge X_2 \circ R_{21} \wedge X_3 \circ R_{31} \wedge X_4 \circ R_{41} \\ U_2 &= X_1 \circ R_{12} \wedge X_2 \circ R_{22} \wedge X_3 \circ R_{32} \wedge X_4 \circ R_{42} \end{aligned} \quad (5)$$

이 경우 퍼지 관계는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{kj} = \bigvee_{i=1}^n \{X_{k(i)} \wedge U_{j(i)}\}, k=1, 2, 3, 4 \quad j=1, 2 \quad (6)$$

여기서 OR : max 연산자

: max-min 합성 연산자

출력  $U$ 는 8개의 퍼지 관계 행렬,  $R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_{41}, R_{12}, R_{22}, R_{32}, R_{42}$ 과 4개의 입력  $X_1, X_2, X_3, X_4$ 의 max-min 합성 결과를 논리곱한 것이다.

#### 4. 비퍼지화

다변수 퍼지 추론에 의해 추론 결과가 나오면 이를 명확한 제어 동작으로 변환하여 공정에 인가하는 것이 비퍼지화인데 비퍼지화는 수개의 방법으로 처리되며 여기서는 흔히 사용되는 이산치형 무게 중심법을 사용한다.

$$y_0 = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot y_i / \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (7)$$

여기서  $y_i$  : 추론된 퍼지값의 이산화된 논리공간 값,

$\mu_i$  : 추론된 결과로 멤버십 정도를 나타내며,

$n$  : 이산화 포인트 수

공정에 인가될 최종 출력  $y^*$ 는 다음식에 의해 결정된다.

$$y^* = y^0 \times (SCF_0 / SCF_1) = y^0 \times G \quad (8)$$

윗 식에서  $SCF_0$ 와  $SCF_1$ 는 입출력 환산계수(표 2 이고, 입출력 환산계수의 비,  $G$ ,는 퍼지 제어기 성능에 영향을 주는 이득과 같은 역할을 한다.

#### IV. 플랜트의 퍼지 모델링

앞서 제안된 규칙 베이스 퍼지 제어기의 성능 평가를 위해 활성오니공정 모델을 구성하게되며 기존의 수학적 모델링 기법에 의한 활성오니공정의 비선형성을 적절히 표현하는 것이 어렵기 때문에 본 논문에서는 서울의 모 하수처리장 하수의 수질 데이터(1년간)를 토대로 퍼지 기법에<sup>[5]</sup>의한 활성오니공정 모델을 구성토록한다.

1. 퍼지 조건문의 후반부가 선형인 추론 알고리즘 다음과 같은 형식의 플랜트 규칙으로 구성된 퍼지 모델에서

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

$$R^j : \text{If } x_1 \text{ is } A_{1j}, \dots \text{and } x_k \text{ is } A_{kj}, \text{ then } y = a_{j0} + a_{j1}x_1 + \dots + a_{jk}x_k$$

$$R^0 : \text{If } x_1 \text{ is } A_{n1}, \dots \text{and } x_k \text{ is } A_{nk}, \text{ then } y = a_{n0} + a_{n1}x_1 + \dots + a_{nk}x_k \quad (9)$$

여기서  $R^i$  :  $i$ 번째 규칙,

$x_j$  : 입력 변수 ( $j=1, \dots, k$ ),

$A_{ij}$  : 퍼지 집합의 멤버십함수로 전반부 파라미터 ( $i=1, \dots, n; j=1, \dots, k$ ),

$a_{ij}$  : 후반부의 파라미터 ( $i=1, \dots, n; j=0, \dots, k$ ).

전반부의 모든 변수  $x_j, A_{ij}$ 는 입력 변수의 공간을 수개(규칙의 수만큼)의 퍼지 분할된 부분 공간으로 분류하는 것과 관련되고, 후반부의  $a_{ij}$ 는 각 퍼지 분할된 부분 공간에서 입출력 관계를 나타내는 것과 관련된다. 윗 식에서, 입력  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0$ 에 대한 전반부의 적합도  $W_1, W_2, \dots, W_n$ 은 다음과 같다.

$$W_1 = A_{11}(x_1^0) \times A_{12}(x_2^0) \times \dots \times A_{1k}(x_k^0)$$

$$W_n = A_{n1}(x_1^0) \times A_{n2}(x_2^0) \times \dots \times A_{nk}(x_k^0)$$

각 규칙에 의한 추론 결과는 후반부에 직접  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0$ 를 대입한다.

$$y_1 = f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0) = a_{10} + a_{11}x_1^0 + \dots + a_{1k}x_k^0$$

$$y_n = f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0) = a_{n0} + a_{n1}x_1^0 + \dots + a_{nk}x_k^0$$

전체의 추론결과는 다음과 같다.

$$y^0 = \frac{W_1 f_1(x_1^0, \dots, x_k^0) + \dots + W_n f_n(x_1^0, \dots, x_k^0)}{W_1 + W_2 + \dots + W_n} \quad (12)$$

규칙이 복수개의 경우, 입력공간을 퍼지 부분 공간으로 분할해서 각 분할된 공간에서 선형 입출력 관계를 추출하고, 이들 집합에 의해 전체 비선형 입출력 관계를 표시하게 된다.

2. 퍼지 모델의 동정 알고리즘

앞 절에 기술된 형태의 플랜트 규칙을 발견하기 위하여 Sugeno의 논문<sup>[5]</sup>을 참고하였다. 플랜트 입출력 데이터를 사용한 퍼지 모델의 동정은 전반부와 후반부 동정으로 구성된다. 전반부의 구조(퍼지모델의 전반부 입력 변수의 선택)와 파라미터(전반부 변수의 퍼지 분할), 후반부의 구조(후반부 변수의 선택)와 파라미터 계수) 동정 알고리즘 흐름도는 그림 5와 같다.

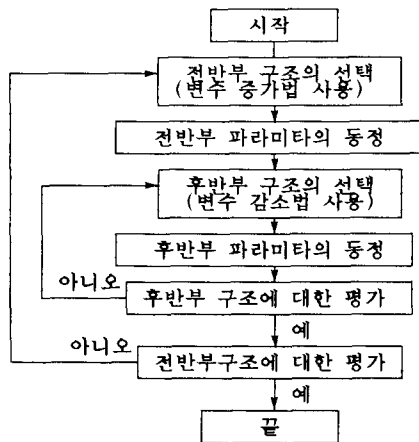


그림 5. 퍼지 모델을 위한 동정 알고리즘 흐름도  
Fig. 5. Flowchart of identification algorithm for fuzzy model.

전반부 구조 동정은 다음의 단계를 거치게 된다.

[단계 1]  $x_i$ 의 범위는 두개의 퍼지 부분 공간, “big”와 “small”로 분할된다. 그리고 다른 변수들의 범위는 분할되지 않는다. 그것은 오직  $x_i$ 만이 규칙의 전반부에 나타나는 것을 의미하며 이러한 방법으로  $k$ 개의 모델(모델 1-1, ..., 모델 1-k)이 구성되고 이들 모델의 각각은 두개의 규칙으로 구성된다.

[단계 2] 각 모델에 대해, 최적 전반부 파라미터와 후반부 파라미터가 각 알고리즘에 의해 구해진다. 가장 적은 평가지표, PI(식13)를 갖는 최적 모델이  $k$ 개의 모델로부터 채택된다.

[단계 3] 단계1에서 최적 상태 즉 변수  $x_i$ 만이 전

반부에 나타나는 모델 1- $i$ 로 부터 시작해서  $x_i-x_j$  ( $j=1, 2, \dots, k$ )의 모든 조합을 택하고 각 변수 ( $x_i, x_j$ )의 범위를 두개의 퍼지 부분 공간으로 나눈다. 즉 조합  $x_i-x_j$ 에 대해, 오직  $x_i$ 만의 범위는 4개의 부분 공간으로 분할된다(예를들면, “big,” “medium big,” “medium small,” 그리고 “small”).  $x_i, x_j$  양쪽 사용시에는 두개의 부분 공간으로 분할된다. 이와같이  $k$ 개의 모델 2- $j$  ( $j=1, 2, \dots, k$ )을 구성하며 각 모델은  $2 \times 2$ 개의 규칙으로 이루어 진다. 단계2에서와 같이 가장 작은 평가지표를 갖는 최적 상태 모델을 발견한다.

[단계 4] 전반부에 다른 변수를 선택한 후 단계3을 반복한다.

[단계 5] 다음의 기준치(criteria)의 어느 하나가 만족되면 탐색은 완료된다. 즉

- ① 최적 상태의 평가 지표가 미리 결정된 값 보다 적은 경우, 또는
- ② 최적 상태의 규칙 수가 미리 결정된 수를 초과 하는 경우.

전반부 최적 파라미터는 구조 동정에서 선택된 전반부 변수에 대해 추적된다. 전반부 파라미터 동정은 small, big등의 퍼지 변수 ( $A_{ij}$ )의 파라미터, 즉 멤버쉽함수를 동정하는 것으로 PI를 최소화하는 최적 전반부 파라미터를 발견하는 것이다.

후반부 구조 동정은 후반부에 모든 변수가 필요하다고 가정한 후에 변수를 1개씩 감소시키면서 가장 작은 평가지표 PI를 제공하는 최적의 구조를 선택한다. 후반부 파라미터 동정은 전반부 변수와 파라미터가 결정되면 식(13)의 PI를 최소화하는 최적 후반부 파라미터를 동정한다.

$$PI = \sum_{i=1}^m \frac{(y_i - y_i^o)^2}{m} \tag{13}$$

여기서  $x_j^o, y^i$  : 실제 플랜트 입출력 데이터,  
 $y_i^o$  : 퍼지 추론된 값  
 $y_i^o$ 는 식(14)에 의해 계산된다.

$$y_i^o = \sum_{j=1}^n W^j y^j / \sum_{j=1}^n W^j \tag{14}$$

여기서  $W^j = \prod_{j=1}^k A_j^j(x_j^o)$ ,

- $n$  : 규칙의 수,
- $k$  : 변수(파라미터) 수,
- $m$  : 데이터 수

입출력 데이터로  $x_{11}, x_{21}, x_{k1}, y_i$  ( $i=1, 2, \dots, m; m$ 은 데이터수)의 집합이 주어졌을 때, 후반부 파라미터  $a_{10}, a_{11}, \dots, a_{1k}$ 는 식(15)에 대해 최소 사승 추정에 의해 구

해진다.

$$\sum_{i=1}^m [y_i - \sum_{j=1}^n (a_{j0} + a_{j1}x_{1i} + \dots + a_{jk}x_{ki}) W_{ji}]^2 \quad (15)$$

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

- j : 규칙 번호,
- i : 데이터 번호,
- m : 데이터 총 수,
- n : 규칙 총 수

V. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 논문에서는 1년간의 하수 수질 데이터를 기반으로 활성오니공정 조작 모델을 구성하고, 그 모델을 기초로하여 최초 침전지로부터의 유입수의 질적 변화(BOD, SS 농도의 변화)에 대응하여 규칙 베이스형 퍼지 제어기에 의해 활성오니공정을 적절히 제어하여 유출수의 BOD와 SS 농도를 소정치 이하로 유지시키는지 여부가 시뮬레이션에 의해 검토된다. 공정 상태 변수인 MLSS의 값은 각각의 제어 입출력 변수 값에 대한 실제 플랜트 데이터이다.

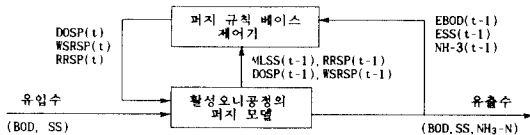


그림 6. 활성오니공정 시뮬레이션  
Fig. 6. Simulation of activated sludge process.

시뮬레이션을 위한 퍼지 모델 입력 변수의 멤버쉽 함수는 그림7에 보이는 형식을 갖게 되며 각 변수에 대해 동정된 전반부 파라미터인 a, b가 표4에 주어진다.

활성오니공정 모델의 동정을 완료 했을때의 최적 퍼지 모델규칙이 표5에 주어진다. 규칙 R<sub>1</sub>-R<sub>8</sub>은 출력 ESS, R<sub>9</sub>-R<sub>16</sub>은 출력 EBOD에 대한 것으로 규칙의 후반부에서 x<sub>1</sub>은 MLSS, x<sub>2</sub>는 WSRSP, x<sub>3</sub>는 RRSP이고, x<sub>4</sub>는 DOSP이며 모델의 후반부 파라미터 계수는 표6에 주어진다.

출력 ESS에 대한 최종 퍼지 모델 결과와 실 플랜트 데이터에 대한 그래프는 그림8과 같으며 여기서 활성오니공정의 비선형성을 퍼지 모델이 적절히 표

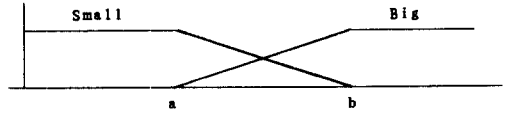


그림 7. 입력 퍼지 변수의 멤버쉽함수  
Fig. 7. Membership function of input fuzzy variables.

표 4. 동정된 각 입력변수의 멤버쉽 파라미터인 a, b 및 PI

Table 4. Identified membership parameters, a, b and PI for input variables.

	a	b	PI
MLSS	1750	2200	11.10
WSRSP	0.55	2.25	11.03
RRSP	25.3	37.0	13.31
DOSP	2.4	6.0	12.38

현하고 있음을 볼 수 있다.

퍼지 규칙 베이스 제어기의 성능 평가를 위해 유출수의 BOD와 ESS 농도에 대해 하수처리장 플랜트 조작자의 경험에 의해 제어 조작을 했을 때의 제어 결과와 퍼지 제어를 수행한 결과는 그림9 및 그림10과 같다. 그림9에서는 조작자의 공정 조작에 따른 유출수의 BOD 농도와 퍼지 규칙 베이스 제어기에 의한 페루프 제어를 수행했을 때의 BOD 농도를 보여주며 그림10은 그림9와 동일한 경우에 대한 유출수의 SS(부유물)농도가 된다.

그림9와 그림10에서 퍼지 제어가 수행되는 경우, 유출수의 BOD와 SS 농도가 제어 목표인 20mg / l 이하로 유지되고 있음이 확인되며, BOD의 질적 변화에 비해 SS의 변화가 큰 것은 퍼지 제어에서 BOD의 질적 변화를 줄이는데 보다 관심을 두었기 때문인 것으로 판단된다.

VI. 결 론

활성오니공정에 대한 퍼지 모델은 비선형 특성을 갖는 공정을 효과적으로 표현하며 조작자의 공정 조작을 위한 시뮬레이터의 기능을 수행할 수 있다. 퍼지 모델에 기초한 시뮬레이션 결과에서 규칙 베이스형 퍼지 제어기가 적절히 동작하여 유출수의 수질을 소정치(본 논문에서는 20mg / l)이하로 유지하면서 수질의 질적 변화를 제한하고 있음을 알 수 있으나, 수질의 질적 변화를 보다 감소시키도록 하기 위해서는 공정 상태에 따라 입출력 환산 계수, 공정 적합도

표 5. 활성오니공정 모델 규칙  
Table 5. Model rules of activated sludge process.

규칙 수	규칙의 전반부	규칙의 후반부
R <sub>1</sub>	WSRSP is small, DOSP is small, MLSS is small	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>2</sub>	WSRSP is small, DOSP is small, MLSS is big	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>3</sub>	WSRSP is small, DOSP is big, MLSS is small	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>4</sub>	WSRSP is small, DOSP is big, MLSS is big	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>5</sub>	WSRSP is big, DOSP is small, MLSS is small	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>6</sub>	WSRSP is big, DOSP is small, MLSS is big	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>7</sub>	WSRSP is big, DOSP is big, MLSS is small	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>8</sub>	WSRSP is big, DOSP is big, MLSS is big	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>9</sub>	WSRSP is small, MLSS is small, RRSF is small	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>10</sub>	WSRSP is small, MLSS is small, RRSF is big	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>11</sub>	WSRSP is small, MLSS is big, RRSF is small	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>12</sub>	WSRSP is small, MLSS is big, RRSF is big	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>13</sub>	WSRSP is big, MLSS is small, RRSF is small	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>14</sub>	WSRSP is big, MLSS is small, RRSF is big	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>15</sub>	WSRSP is big, MLSS is big, RRSF is small	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$
R <sub>16</sub>	WSRSP is big, MLSS is big, RRSF is big	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$

표 6. 모델 규칙의 후반부 파라미터 계수  
Table 6. Parameter coefficients of model rule consequent.

	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>
R <sub>1</sub>	69.38	0.03	-70.36	3.84	-12.96
R <sub>2</sub>	-2114.8	-1.61	908.91	180.30	-0.96
R <sub>3</sub>	-1.92	-0.02	24.41	1.33	-2.07
R <sub>4</sub>	119.01	0.02	-54.28	-2.46	-6.28
R <sub>5</sub>	42921.22	-48.33	-36917.61	2.24	20771.75
R <sub>6</sub>	-7112.75	6.37	4553.26	-361.35	-588.89
R <sub>7</sub>	-699.99	0.11	79.17	-0.23	54.94
R <sub>8</sub>	44.4	-0.02	-42.7	1.91	7.52
R <sub>9</sub>	-167.04	0.02	1.65	6.26	-2.13
R <sub>10</sub>	154.77	-0.14	18.70	-0.65	8.99
R <sub>11</sub>	166.35	0.02	49.85	-9.07	2.80
R <sub>12</sub>	581.64	-0.03	-38.70	-9.71	-15.20
R <sub>13</sub>	295.44	-0.13	-113	1.47	9.49
R <sub>14</sub>	-923.16	0.37	41.12	9.78	1.21
R <sub>15</sub>	-244.85	-0.04	71.48	10.53	-12.09
R <sub>16</sub>	-382.69	0.10	-43.40	0.88	27.57

판정 계수인  $\alpha$  및 제어 변수의 멤버십함수를 자동 조정할 수 있는 알고리즘이 퍼지 규칙 베이스 설계시 추가되어야 할 것으로 본다.

參 考 文 獻

[1] Gupta, M.M. "Multivariable Structure of Fuzzy Control System," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-

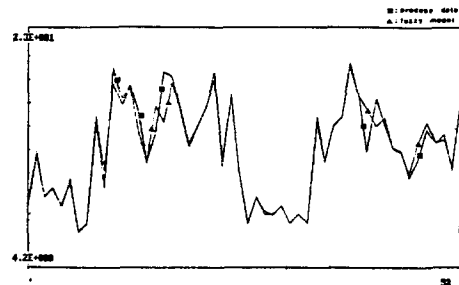


그림 8. 플랜트의 출력 데이터와 동정된 퍼지 모델의 출력  
Fig. 8. Plant output data and identified fuzzy model output.

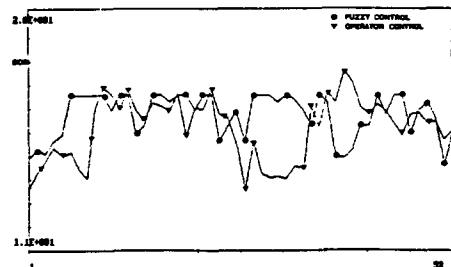


그림 9. 조작자에 의한 제어와 퍼지 제어기에 의해 제어된 유출수의 BOD 농도  
Fig. 9. Effluent BOD controlled by operator and fuzzy controller.



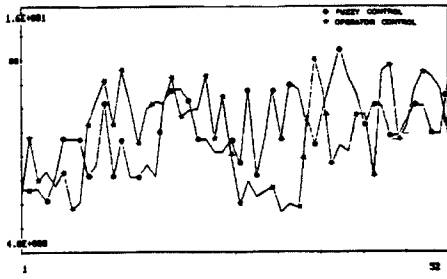


그림 10. 조작자의 제어 조작과 퍼지 제어기에 의해 제어된 유출수의 SS 농도

Fig. 10. Effluent SS controlled by operator and fuzzy controller.

16, no. 5, pp. 638-655, 1986.

[2] Hiraoka, M. and Tsumura, K. and Oka, T., "Interactive Control System in The Activated Sludge Process." *Proceeding of 3rd PACHEC*, pp. 243-248, Seoul, 1983.

[3] John, A.B., "Use of a Rule-Based System for Process Control," *System Magazine*, pp. 3-13, October, 1988.

[4] Maeda, K., "A Knowledge Based System for the Wastewater Treatment Process," *7IFAC IV*, pp. 89-94, 1984.

[5] Takagi, T. and Sugeno, M., "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.

[6] Tong, R.M., Beck, M.B., and Latten, A., "Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process," *Automatics*, vol. 16, pp. 695-701, 1980.

[7] William, E.D., "Aspects of Automation of the ASP," *Wat. Pollut Control*, pp. 439-447, 1978.

[8] Zadeh, L.A., "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3, no. 1, pp. 28-44, 1973.

[9] 양 상현, "수질공학" 동화기술, 1989.

[10] 大音透, 外, "下水處理制御技術," *電氣學會雜誌*, 104, 12, 1073~1076, 1984.

[11] Shuji Kato, "水質計と マイクロコントローラによる活性汚泥の 制御, 計装," 25, 12, 38~44, 1982.

[12] 平岡正勝, 外, "水處理システムの 總括制御", *OHM*, 8, 17~20, 1980.

著 者 紹 介



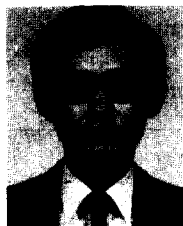
黃 熹 秀 (正會員)

1963年 6月 5日生. 1986年 연세대학교 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업. 현재 연세대학교 전기공학과 박사과정



金 賢 起 (正會員)

1955年 2月 26日生. 1977年 연세대학교 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 수원대학교 공대 전기공학과 전임강사



吳 聖 權 (正會員)

1957年 2月 13日生. 1981年 연세대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1983년~1989년 금성산전(주) 연구소 선임 연구원. 현재 연세대학교 대학원 전기공학과 박사과정

禹 廣 芳 (正會員)

1934年 1月 25日生. 1957年 연세대학교 이공대 전기공학과 졸업. 1964년 미국 오레곤 대학원 졸업(공학박사). 1966년 미국 와싱턴 대학교 조교수. 1971년 미국립 암연구소 책임 연구원. 1980년~1981년 재미한국과학기술자 협회장. 현재 연세대학교 공대 전기공학과 교수