

하수처리 시스템에서의 활성오니공정 제어를 위한 퍼지제어기 설계

황희수 오성권 김현기 우광방

연세대학교 전기공학과

Design of Fuzzy Controller for Activated Sludge Process in Sewage Water Treatment System

Hee Soo Hwang Sung Kwon Oh HyunKi Kim Kwang Bang Woo

Dept. of Electrical Engineering

Yonsei University

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 neither well defined nor well understood. In the present study the concept of fuzzy control is employed for such process in which a design method for fuzzy controller based on a multivariable fuzzy reasoning algorithms is investigated and then simulation results are presented.

1. 서론

오늘날의 하수 처리는 1차 처리후에 하수중에 남아있는 용해물질들 미생물의 힘에 의해 제거하는 활성오니 처리를 필요불가결하게 하고 있어서 수질의 향상과 안정화를 위해서는 활성오니의 질과 양의 관리와 적정화가 중요하다. 이 공정은 생물학적 메카니즘의 특성으로 1) 수질 측정이 어려우며, 2) 부하 변화가 심하고, 3) 공정 특성이 복잡하여 제어량과 조작량의 선택이 명확치 않아 조작자는 의사결정에 있어 경험에 기초한 질적 정보의 사용을 필요로한다. 이와같은 특성을 갖는 공정제어에 있어 조작자가 자동화 시스템보다 효율적으로 공정을 제어할 수 있으며 조작자는 제어전략을 의사결정 규칙의 집합으로 표시할 수 있다. 이러한 질적 제어전략을 수치변수에 의한 양적 제어기의 설계로 변환시키는 것은 규칙의 부정확성으로 인해 어렵다.

따라서 보다 효율적이고 체계화된 질적제어를 수행하기 위해서는 조작자의 제어전략을 기술하고 있는 언어적 제어규칙으로부터 제어 알고리즘을 구현하는 것이다. 이를 위해 퍼지 개념을 사용하여 활성오니 공정의 조작자가 사용하는 제어전략을 제어규칙으로 만들고 컴퓨터가 형성된 제어규칙에 입각하여 공정을 자동적으로 제어할 수 있도록 하는 퍼지 제어기의 설계 기법이 본 논문에서 다루어진다.

2. 하수처리 시스템에서 활성오니 공정

하수 처리방식에는 여러방식이 있지만 활성오니법이 일반적으로 사용되고 있는데 그림1에 하수처리 시스템의 구성이 보여져 있으며 그 구성은 침사지, 최초 침전지, 폭기조 및 최종 침전지로 이루어지며 그 중 활성오니공정은 폭기조와 최종 침전지를 중심으로 이루어진다. 폭기조에서는 수시간 연속적으로 하수중에 공기가 흡입되는데 하수중의 유기물질과 활성오니라 부르는 미생물을 접촉시켜 폭기조내 공기로부터 용해한 산소에 의해, 유기물을 생물화학적으로 산화해서 증식하고 플록(floc)이라는 미생물 덩어리를 형성한다. 최종 침전지에서는 플록이 침강 제거되고 맑은 물이 유출된다. 한편 최종 침전지에서 침강한 미생물은 폭기조 입구에 재순환되어 다시 유기물 제거에 사용된다. 이때 일부는 활성오니의 양이 지나치게 증가하는 것을 피하기 위하여 인발해 오투리공정으로 보내진다.

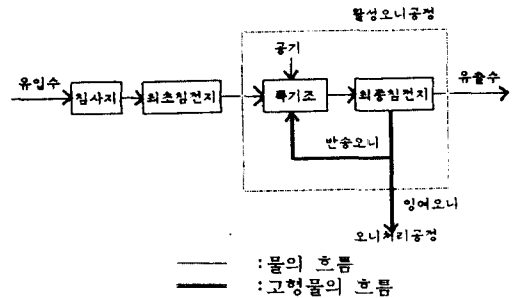


그림 1. 하수처리 시스템 구성도

활성오니 공정을 적절히 제어하기 위해서는 1) 하수중에 포함된 부유성 및 용해성 유기물질을 산화, 흡착하는 역할을 하는 활성오니의 농도를 최적으로 유지하기 위해 반송오니량을 적절히 조절하여야 하고 2) 활성오니가 용해성 및 부유 유기물질을 산화, 흡착시켜 침강성의 플록을 형성하는데 필요한 DO(Dissolved Oxygen)를 최적으로 유지하기 위해 적당한 양의 공기를 폭기조에 넣어 주어야 하며 3) 수질의 향상과 안정화를 위한 활성오니의 양적

관리를 위해 폭기조로부터 유출된 오니는 최종침전지에 의해 회수되어 폭기조로 되돌려지는데 이때 활성오니의 양이 지나치게 증가하는 것을 피하기위해 적당한 양을 인발해 오니처리 하여야 한다.

3. 퍼지 제어기의 설계

기존의 제어 시스템은 공정으로부터 계속된 정보로부터 제어변수의 값을 결정하여 공정을 조작하게 되는데, 퍼지 제어기는 이런 조작자의 역할을 제어기로 구현한 것으로 다음과 같은 과정을 거쳐 이루어진다. 1) 공정 상태를 결정하는 입출력 변수(언어변수)를 정의하고, 2) 각 제어변수의 값과 멤버십(membership) 함수를 결정하고, 3) 퍼지 관계(relation)와 공정으로부터 계속된 입력이 주어지면 추론합성규칙(compositional rule of inference)에 의해 어떤 퍼지 조건문이 공정에 적용될지가 추론되며 그 조건문이 명확한 제어동작으로 변환되어 공정에 인가된다.

3-1. 제어변수의 선정

퍼지 제어에서는 언어적 변수를 사용하는데 언어적 제어변수는 공정에 영향을 미치는 요소로서 대단히 복잡하거나 잘 정의되어있지 않은 시스템을 근사적으로 특성화시켜주는 체계적인 수단을 제공해 준다.

활성오니 공정 제어는 유입수의 양적, 질적 변화에도 불구하고 공정 상태 계속 정보(입력변수)에 입각하여 하수의 질을 유지하고 공정의 실패를 방지하기 위해 RRSP, DGSP, WSR을 조작하는 것으로 퍼지 입출력 변수가 표1에 기술되어 있다

표 1. 입출력 제어변수

입력변수	내 용
EBOD	유출수중의 총BOD량
ESS	유출수중의 부유물
MLSS	폭기조를 떠나는 오니중의 부유물
NH ₃ -N	유출수중의 암모니아-N
RIS	정화조에서 부상오니가 발생한 상태
BUS	정화조에서 경화오니가 발생한 상태
DOSP	폭기조내의 용해산소 결정지
WSR	잉여오니 흐름률
출력변수	내 용
ΔDGSP	DOSP의 변화율: $DOSP(t) = DGSP(t-1) + \Delta DGSP(t)$
ΔRRSP	RRSP의 변화율: $RRSP(t) = RRSPo - \Delta RRSP(t)$, RRSPo는 RRSP의 기준치
ΔWSR	WSR의 변화율: $WSR(t) = WSR(t-1) + \Delta WSR(t)$

3-2. 퍼지 변수 값과 멤버십 함수(Membership Function)

1) 퍼지 변수 값

퍼지 언어 변수의 값은 복합용어 $x = x_1 x_2 \dots x_n$ 으로 이루어지며 이는 원소적 용어(Atomic term)의 연쇄적 나열로 이루어진다. 원소적 용어에는 다음 4개의 부류가 있다. i) 기본용어(primary term): 언어변수의 label로 "small", "medium", "big", "high" 등이 주로 쓰인다. ii) 부정 not과 연결어 and 또는 or, iii) hedges (very, much, slightly, more or less), iv) 괄호[11]

가령 예를들면 언어적 변수 MLSS는 다음과 같이 복합용어로 이루어질 수 있다. "MLSS is very small." 즉, 각 제어 변수의 특성에 맞도록 라벨을 설정하면 그 제어 변수(언어 변수)의 값은 위에 설명된 복합용어로 이루어진다. 활성오니 공정의 입력변수의 값은 S(small),

M(medium), L(large), VS(very small), NL(not large) 가운데 하나이며 출력변수의 값은 LN(large negative), SN(small negative), SP(small positive), LN(large negative) 가운데 하나이다.

2) 멤버십 함수

x에 대한 멤버십 함수, $\mu_A(x)$ 는 x의 의미로 정의되며 퍼지 용어(term: 라벨일 수도 있고 복합용어 일수도 있다) x가 논리영역(universe of discourse) A에 속하는 정도를 나타낸다.

활성오니 공정 입출력 변수의 멤버십 함수는 이산치 형태로 이루어지며 컴퓨터에서의 계산을 용이하게 하기 위해 0~1 사이의 값인 멤버십 그레이드(membership grade)를 0~10 사이의 값으로 잡았다. 예를들면 "NH₃-N is Small"에 대한 멤버십 함수는 다음과 같다.

$$\mu_S(NH_3-N) = \{10/2, 10/4, 5/6, 5/8, 0/10, 0/12, 0/14, 0/16, 0/18, 0/20\}$$

3-3. 퍼지 제어 알고리즘

퍼지 제어기의 기능은 공정으로부터 계속된 값에 의해 퍼지 집합이 발생하면 발생된 퍼지 집합에 (fuzzification) 의해 제어규칙 베이스로부터 적용될 규칙이 추론하고(fuzzy control algorithm), 그 규칙을 다시 명확한 제어동작으로 변환하여(defuzzification) 공정에 적용하는 것이다. 퍼지 제어 알고리즘은 먼저 조작자의 경험적 제어전략으로부터 제어규칙을 형성하고, 그 제어규칙으로부터 공정 상태에 적합한 규칙을 추론하는 추론알고리즘으로 이루어진다.

1) 퍼지 제어 규칙

활성오니 공정에 적용될 제어 규칙은 공정 상태에 따라 아래와 같이 4개의 조작상태(부분공간)에 대응하는 제어규칙군으로 나누어진다.

- IF 부상오니가 발생하면 THEN 조작상태 1.
- ELSE IF 팽화오니가 발생하면 THEN 조작상태 2.
- ELSE IF NH₃-N이 비정상 상태이면 THEN 조작상태 3
- ELSE 조작상태 4.

여기서는 조작상태4에서 적용될 제어규칙만이 예로 주어진다.

표2. 조작상태4에서 적용될 제어규칙

i	입력변수				출력변수	
	EBOD	ESS	MLSS	WSR	ΔWSR	ΔRRSP
1	S	S	M	S	SP	
2	S	S	M	M	*	*
3	S	S	M	L	LN	
4	NL	M				SP
5	NL	L				LP
6	M	S				SN
7	L	S				LN
8			L			LP
9			L	L		SN
10			S			SN
11			VS			LN
12			VS	S		SP

*는 정상상태로 현재의 제어 조작량을 특별히 변경할 필요가 없는 경우이다.

각 조작 상태에서의 제어규칙은 IF (전건부:공정 상태에 대한 퍼지 기술) THEN (후건부:제어동작에 대한 퍼지 기술) 형식으로 이루어지며 조작상태4에서의 입력변수는 4개이고 출력변수는 2개이므로 다변수 퍼지 추론을 하여야 한다.

2) 다변수 퍼지 조건문의 추론 알고리즘

공정의 상태 계속으로 부터 결정된 조작 상태에서 어떠한 퍼지 조건문이 규칙 베이스(퍼지 implication 연산자에 의해 퍼지 관계 행렬로 변환되어 있음)로 부터 적용될지를 추론하기 위해 그림2와 같은 다변수 시스템을 생각해 보자. 이 시스템은 4개의 입력과 2개의 출력을 가지고 있다.

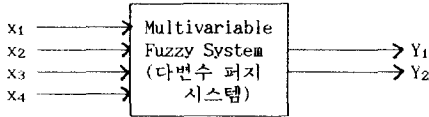


그림 5. 다변수 퍼지 시스템

위 시스템 공정에 대한 언어적인 기술은 다음과 같이 주어진다.

IF $(X_1(i) \text{ AND } X_2(i) \text{ AND } X_3(i) \text{ AND } X_4(i))$.
THEN $(Y_1(i) \text{ AND } Y_2(i))$

ELSE

IF $(X_1(i) \text{ AND } X_2(i) \text{ AND } X_3(i) \text{ AND } X_4(i))$
THEN $(Y_1(i) \text{ AND } Y_2(i))$

ELSE

IF $(X_1(n) \text{ AND } X_2(n) \text{ AND } X_3(n) \text{ AND } X_4(n))$
THEN $(Y_1(n) \text{ AND } Y_2(n))$

여기에서, i 는 규칙 수이고 $X_k(i)$ 는 논리영역(universe of discourse) X^k ($k = 1, 2, 3, 4$) 안에서 정의된 k -입력 변수의 퍼지 값이고 $Y_j(i)$ 는 논리영역 Y^j ($j = 1, 2$) 안에서 정의된 j 번째 출력 변수의 퍼지 값이다. 주어진 현재의 입력 X_1, X_2, X_3, X_4 에서 현재의 출력 Y_1, Y_2 를 얻기 위해 다음과 같은 추론의 합성 규칙이 사용된다.

$$Y_1 = X_1 \circ R_{11} \wedge X_2 \circ R_{21} \wedge X_3 \circ R_{31} \wedge X_4 \circ R_{41}$$

$$Y_2 = X_1 \circ R_{12} \wedge X_2 \circ R_{22} \wedge X_3 \circ R_{32} \wedge X_4 \circ R_{42}$$

여기서 퍼지 관계는 다음과 같이 정의된다.

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

이를 벡터 형식으로 표시하면 $Y = X * R$ 로 되며 $Y = [Y_1 \ Y_2]$, $X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]$, $*$ 는 (\circ, \wedge) 연산자의 압축된 형태로 보며 관계 행렬 R 은 8개의 부분 행렬로 이루어져 있다.

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \\ R_{31} & R_{32} \\ R_{41} & R_{42} \end{bmatrix}$$

즉, 출력 Y 는 8개의 부분 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 composition 결과를 논리곱한 것이다.

위에 정의된 추론 알고리즘에 의해 공정에 적용될 규칙이 결정되면 이를 명확한 제어 동작으로 변환시켜 공정에 인가하는데 가령 추론된 것이 " ΔWSR is SP(small positive).", 즉 $\Delta WSR_{sp} = [\mu_1/x_1, \mu_2/x_2, \dots, \mu_{10}/x_{10}]$ 이면 $\Delta WSR = [\sum_i (\mu_i)(x_i)]/scf_i$ 로 비퍼지화되고 이는 $WSR(t) = WSR(t-1) + \Delta WSR$ (t 는 현재 상태)로 되어 공정에 인가된다. 여기서 i 는 출력변수 ΔWSR 의 논리영역을 이산치화한 것수이고 그 이산치 값이 x_i 이다. 또한 scf_i 는 PID제어에서의 비례 이득과 같은 역할을 하므로 이득 정수라 부른다.

4. 시뮬레이션 및 결과고찰

우리는 하수의 1년치 수질 데이터를 토대로 활성오니 공정 조작모델을 만들었고 그 모델을 기초로하여 최초침전지로부터의 유입수의 질적변화(BOD와 SS농도의 변화)에 대응하여 퍼지 제어가 활성오니 공정을 적절히 제어하여 유출수의 BOD와 SS 농도를 소정치 이하로 유지시키는지를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션을 위한 활성오니 공정 시스템이 아래 그림에 보여져 있다.

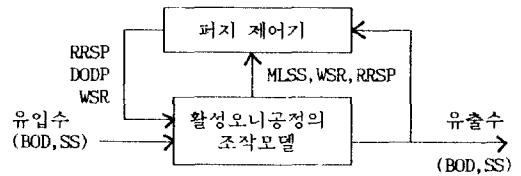


그림2. 활성오니공정 시스템

그림3은 조작자의 공정 조작에 따른 유출수의 BOD, SS 농도를 보여주며 그림4와 그림5는 각기 개루프 퍼지 제어와 폐루프 퍼지 제어를 수행했을 때의 유출수의 BOD, SS 농도를 보여주고 있다. 세 경우다 유출수의 BOD 농도가 SS 농도 보다 약간 높지만 소정치 이하로 유지되고 있음을 알 수 있으며 그림5의 경우가 유출수 수질의 질적 변화가 보다 완만함을 알 수 있다.

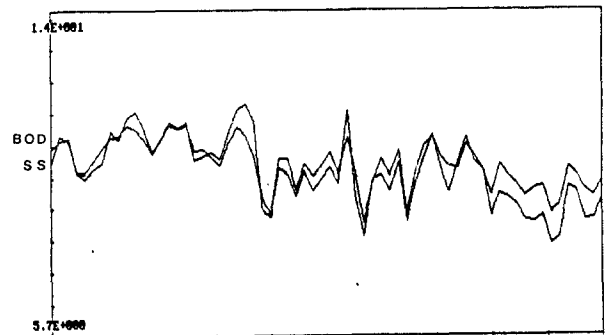


그림3. 조작자의 공정 조작에 따른 유출수의 BOD, SS농도

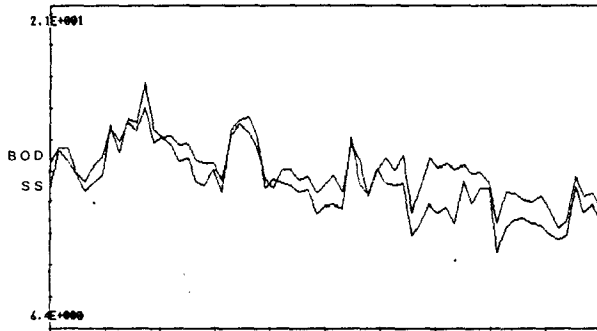


그림4. 퍼지 게루프 제어에 따른 유출수의 BOD, SS 농도

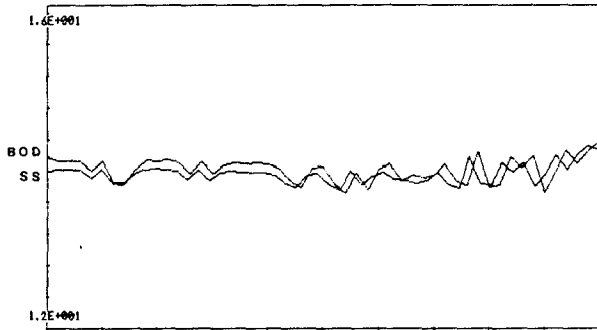


그림5. 퍼지 피루프 제어에 따른 유출수의 BOD, SS 농도

5. 김현기, 오성권, 황희수, 우광방, "하수처리 프로세서 제어를 위한 감시제어 시스템", 전기학회지, 1990년, 3월, p.67-75.
 6. 平岡正勝, 外: 水處理システムの 總括制御, OHM, 8, 17~20, 1980

5. 결론

시뮬레이션에 의해 퍼지 제어가 적절히 동작하고 있음을 알 수 있으나, 유출수 수질의 질적 변동을 보다 축소시키기 위해서는 퍼지 제어기 설계시 각 입출력 변수의 멤버십 함수를 효과적으로 선택하여 제어 규칙으로부터의 출력 추론 알고리즘이 보다 정확하게 작동하도록 하여야 하고 추론된 출력을 비퍼지화시킬 때 이득 정수를 잘 조정하여야 한다.

6. 참고문헌

1. Gupta, M.M., "Multivariable Structure of Fuzzy Control System", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-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. Tnog, R. M., Beck, M. B., and Latten, A., "Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process", Automatica, Vol. 16, pp. 659-701
 4. 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