

불규칙한 정보 프로세스를 위한 퍼지제어 시스템 개발

- Development of Fuzzy Control System for Process with Irregular Information System -

박주식 *, 김길동 **, 강경식 ***

Abstract

This study is to develop and operate the R-FCE(Real-time Fuzzy Control Expert System) model on the SBR(Sequency Batch Reactors) type sewage disposal facility which is for the environmental problem of future and the effective treatment. It is the system that regularly handles the input, output information in real time by the Fuzzy control IF-THEN rule.

Nowadays the water pollution caused by the increase of population and the industrialization already exceeds the purifying ability of nature and is getting worse. The sewage disposal facility needs an expert having wide experience and know-how because the quality or quantity of inflow water is so irregular that the process of sewage disposal is difficult. In the nation, however, the accumulation of technology is so weak because field-operators avoid the long-term duty. So the accurate and speedy decision or control of field are difficult in the case of emergency situation.

제 1 장 서 론

최근에 시스템 분석 연구자들은 다양한 방법으로 시스템 모델을 설계하는데 많은 관심을 가지고 있다. 과거에는 여러 가지 형태의 시스템을 모델링 하는데 있어서 그 시스템의 변수들을 경험적으로 추측할 수 있는 모델 설계자, 즉 전문가를 필요로 했으나 여기에는 전문가의 주관적인 판단으로 객관적인 모델을 구축하기가 곤란하였다. 따라서 객관적인 모델을 구축하기 위한 방법으로 수학적인 선형 시스템 방법을 사용하였다.

그러나, 시스템 운영시 비선형적이고 복잡한 실 시스템의 특성을 해석하는데 선형화된 모델 일지라도 내, 외부적인 영향 및 기타여건으로 인하여 순간적으로 비선형 모델로 변하고, 특히 그 구조 자체가 비선형이거나 시스템을 모델링 하기 어려운 불규칙하고 불명확한 대상, 그리고 제어변수가 대단히 많은 선형 변형과 같은 대상은 모델링이 곤란하다. 일반적으로 산업 전반의

* 명지대학교 산업공학과 박사

** 충청대학 산업정보과 교수

** 명지대학교 산업공학과 교수

현황으로 교통, 통신, 물류 등은 불규칙한 입력에 따른 정보흐름과 결과를 가지고 있으며 이를 총체적으로 측정, 제어하기 위해서는 서로 다른 차원의 속성을 통합하여 총합가치를 구하는 방안이 필요하다. 이것을 해결하기 위해서 규칙기반에 따른 전문가시스템, 신뢰성에 관한 이론 및 퍼지이론 등이 있는데, 이러한 불규칙하고 불확실성을 표현하고 처리하는 방법으로 L.A. Zadeh가 제안한 퍼지이론을 이용한 퍼지제어 시스템이 있다.

본 연구에서는 기존 SBR(Sequency Batch Reactors)모델 오수처리시설에서는 오수처리진행 방식이 오수 유입에서 폭기반응을 거쳐 침전한 뒤에 배출이 이루어지고 있다. 이러한 처리과정은 제어량과 조작량이 일정한 시간 간격에 의해 순환방식으로 제어되고 있어 원하는 배출수 관리에 어려움이 있었다.

먼저 불규칙한 수위와, 탁도 측정값과 유입, 폭기, 반송 및 배출펌프제어기를 규칙 베이스화하여 퍼지제어기를 제안한다. 전체 제어 규칙베이스로부터 공정의 특성 변화에 따라 그 특성에 타당한 규칙시스템을 선택하고, 선택된 제어 규칙의 집합을 기반으로 다변수 퍼지추론을 수행하여 제어 조작량을 결정한다. 이 퍼지 제어기는 SBR모델 오수처리시설의 공정을 체계적이고 효과적으로 제어하기 위해 하부의 제어기들에 공정 상태에 적합한 설정치(제어목표)들을 제공하는 역할을 할 수 있다.

실험을 통하여 구축된 모델의 타당성을 검증하였는데, R-FCE 모델을 위한 퍼지 추론 규칙 실험을 통한 규칙 설정을 체계화하고 적절한 규칙의 수로 효율적인 추론규칙을 설계하였다. R-FCE 모델 사례 적용을 위해 컴퓨터시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 제작하고, 퍼지제어를 통한 오수처리시설의 원활한 운영체계를 만들어 퍼지제어를 통한 오수처리시설 배출 수질의 농도를 낮추어 관리를 하는 데에 주안점을 맞추었다.

제 2 장 퍼지이론 고찰

퍼지이론은 퍼지집합론, 퍼지추론, 퍼지제어, 퍼지대수, 퍼지측도 및 퍼지적분 등을 총칭하는 것으로 산업전반에 다양하게 적용되고 있으며 우리들 주위에서 일어나는 복잡하고 대규모적인 대상이나 기존의 수학적 문제로는 해결이 어려운 문제에 대하여 의사결정, 문제해명, 제재 등을 요할 경우, 이 이론으로부터 정보를 검색, 인식, 고찰하고 판단하는 지적 처리의 모델을 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 현재 대표적인 응용분야는 교통, 물류, 토목, 기상, 데이터베이스, 자동제어, 산업공학 등 다양한 분야에 이용되고 있다.

퍼지이론의 대상은 퍼지니스(fuzziness)라고 부르는 불확실성이다. 우리가 정하는 대상 중에 명확하게 그 소속을 정의 할 수 없는 경우가 많다. 예를 들면, “키가 큰사람의 모임”, “적당한 수위가 되면 밸브를 잠גיע 하라”, “방안이 더우면 에어컨을 가동하라” 등이다. 이러한 대상들은 보통 개념의 ‘집합’을 이룰 수 없다. 일반적으로 집합을 표현하기 위해서 세 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 ‘원소나열법’으로 알려진 방법으로 어떤 집합에 소속된 원소를 일일이 나열하는 방법이다. ‘요일’ = {월요일, 화요일, 수요일, 목요일, 금요일, 토요일, 일요일}와 같이 나타낸다. 두 번째 방법은 ‘조건제시법’으로 그 집합의 성질을 서술하는 방법으로 유리수의 집합을 나타낼 때 유리수 = $\{x | x = p/q, \text{ 단 } q \neq 0 \text{ 정수}\}$ 로 나타낼 수 있다. 하지만 이와 같은 방법으로 퍼지 집합을 표현하기엔 알맞지 않다. 그래서 ‘소속함수(Membership Function)표시법’을 사용한다. 소속함수란 어떤 원소가 집합에 속한 정도를 나타내어 주는 함수를 뜻한다. 어떤 집

합 A의 소속함수는 $(m_A : X \rightarrow [0, 1])$ 와 같은 형태를 가지는 어떤 함수라도 좋다. 우리가 배워온 보통의 집합도 물론 소속함수 표시법으로 표현될 수 있다. 이 경우는 아주 특별한 경우로 소속함수가 취하는 값은 0(그 집합에 소속되어 있지 않은 경우)과 1(소속되어 있는 경우)의 값만을 가진다. X에 속한 임의의 원소 x 각각에 대해 어떤 특정한 성질을 가지는 정도를 나타내는 소속함수 $m_A(X)$ 가 정의된다고 하였을 때,

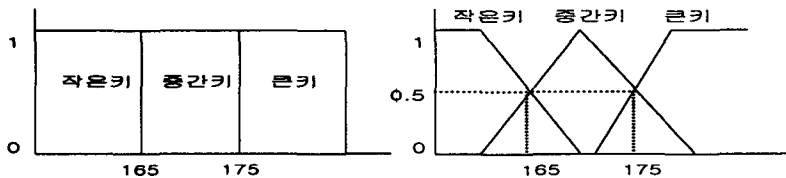
$$A = \{ (x, m_A(x)) \mid x \in X \}$$

를 '소속함수 $m_A(X)$ 을 갖는 퍼지집합'이라 한다. 이와 같은 개념을 오수처리시설에 적용하면 유입수의 불확실하고 불규칙적인 입력과 수위 위치가 일정하게 정해지지 않고 애매한 위치에 따른 처리방법을 위한 퍼지제어 규칙베이스를 설계하여 기존의 제어방법(규칙적)보다 효과적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

퍼지 개념은 하나의 대상이 하나의 값으로 정의되는 것이 아니라 여러 값을 통해 단계적으로 정의되기 때문에 집합의 개념을 사용하여 표시한다. 퍼지집합 A에 대한 소속함수는 μ_A 라 표시하고 일반적으로 0과 1사이의 값을 가진다. 퍼지집합 A의 소속함수를 $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$ 라고 했을 때,

- μ_A 가 1근처에 있는 경우 : 요소 x는 퍼지집합 A에 속하는 정도가 높다.
- $\mu_A = 1$: 요소 x는 퍼지집합 A에 완전히 속한다.
- $\mu_A = 0$: 요소 x는 A에 완전히 속하지 않는다.

만약에 A는 175cm, B는 166cm, C는 163cm 라하고 작은 키와 중간키를 구분하는 기준을 165cm, 중간키와 큰 키를 구분하는 기준은 175cm라고 했을 때, 이를 소속함수를 이용한 크리스프 집합과 퍼지집합의 표현하면 <그림 2-1>와 같이 설명할 수 있다. 크리스프 집합에서는 165cm를 기준으로 165cm 보다 작으면 작은 키로 165cm 보다 크면 중간키를 나눌 수 있다. 그러나, 퍼지집합은 165cm를 기준으로 얼마만큼의 값이 크거나 작은 관계로 만약 166cm는 작은 키로 164cm도 중간키로 표현할 수 있다.



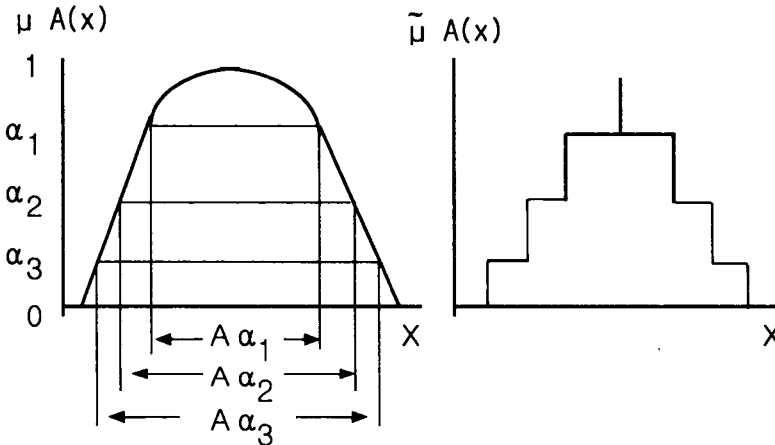
(a) 크리스프 소속함수 (b) 퍼지 소속함수
 <그림 2-1> 크리스프 소속함수와 퍼지 소속함수

2.1 α -cut와 분해원리

α -cut의 의미는 소속함수 값을 기준으로 일정한 값 이상의 요소를 취해야 할 필요가 있을 경우에 사용되는 것이며 α 는 일정한 값을 의미한다. α -cut을 하는 이유는 퍼지집합에 α -cut을

적용하면 크리스프 집합이 얻어진다. 이것은 일정수준이상을 소속정도 '1'로 취한다는 의미이다. 이렇게 해서 퍼지화된 정보를 퍼지제어 시스템에서의 제어값으로 한다.

그리고 집합 A의 약 α -cut과 α 값과의 최소값을 취하는 원리가 분해원리라 한다. 이와 같이 A의 소속함수를 이용하면 퍼지집합 A를 $0 < \alpha \leq 1$ 범위의 α -cut A_α 들로 분해할 수 있고 역으로 α -cut을 이용하여 퍼지집합을 재구성할 수 있다. <그림 2-2>와 같은 세 α 값 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 에 대하여 $A_{\alpha_1}, A_{\alpha_2}, A_{\alpha_3}$ 을 구했을 때 근사 $\mu_A(x)$ (Approximate Version of $\mu_A(x)$)인 $\tilde{\mu}_A(x)$ 를 계단 형태의 그래프로 표현될 수 있다.



<그림 2-2> α -cut과 근사소속함수 구성

$$\mu_A(x) = \max[\alpha \wedge \chi_{A_\alpha}(x)] = \max[\alpha \wedge \chi_{A_\alpha}(x)] \dots \dots \dots (2.1)$$

where, $\chi_{A_\alpha}(x)$: 집합 A_α 의 특성함수

3개의 α 값에 대해서 $\mu_A(x)$ 와 같이 $0 < \alpha \leq 1$ 에서 무한개의 α 값에 대하여 식 2.1에서와 같이 $\mu_A(x)$ 를 구할 수 있다. α -cut을 사용하여 소속함수가 재구성될 수 있음을 보여준다. 이것은 퍼지로 처리화된 정보와 또는 그 반대로 퍼지화 할 수 있는 호환을 갖게 된다.

퍼지수는 수를 소속정도에 따라 그 수 근처를 퍼지화 하여 표현한 것이다.

2.2 IF-THEN Rule

추론을 하기 위해 먼저 필요한 것이 규칙(rule)으로 IF-THEN형식으로 표현된다. IF절은 전반부, 전건부 등으로 불리고 THEN절은 후반부, 후건부 등으로 불린다. 규칙의 일반적인 형태로

규칙 예 1) IF x is A , THEN y is B

규칙 예 2) IF x_1 is A_1 and x_2 is A_2 , THEN y is B

전반부 변수와 후반부 변수의 수는 상황에 따라 결정하고, A, B, A_1, A_2 는 퍼지소속함수(또는 퍼지수)로 정의된다.

IF x_1 is A_1 and x_2 is A_2 and ... and x_n is A_n THEN y is B 여기에서, A_1, A_2, \dots, A_n, B 는 퍼지수, x_1, x_2, \dots, x_n 은 전반부 변수, y 는 후반부 변수이다. 직접법의 가장 큰 특징은 후반부 변수가 상수라는 점이다. 그래서 다른 추론에 비해 추론 속도가 빠르고, 전반부 변수들과 후반부 변수들을 통해 관계(relation)를 구할 수 있다. 이러한 직접법의 모델링 과정을 보면 다음과 같다.

- 단계 1: 주어진 입력에 대한 각 규칙의 전반부 적합도를 구한다.
- 단계 2: 전단계 적합도를 기초로 각 규칙의 추론결과를 구한다.
- 단계 3: 각 규칙의 추론결과로부터 최종적인 추론결과를 구한다.
- 단계 4: 비퍼지화를 통해 실제 필드에 사용 가능토록 한다.

모델링에 의한 추론과정을 보면, 다음과 같은 규칙이 있을 때

- 규칙 1 : IF x is A_1 and y is B_1 , THEN z is C_1
- 규칙 2 : IF x is A_2 and y is B_2 , THEN z is C_2

여기서, A_1, B_1, C_1 은 퍼지소속함수(퍼지수), x, y 는 입력변수, z 는 출력변수라 하면 다음과 같은 단계로 추론과정을 거치게 된다.

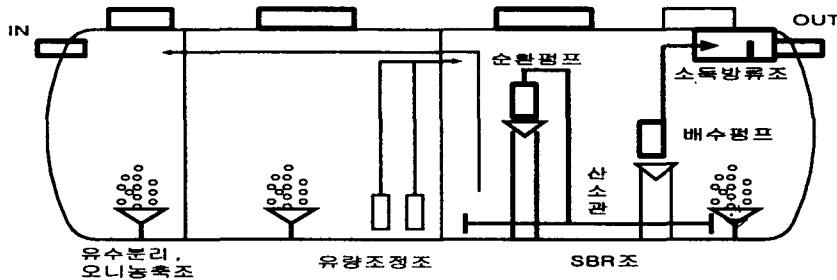
- 단계 1 : (x_0, y_0) 입력에 대한 각 규칙의 적합도
 - R^1 의 적합도 : $W_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0)$
 - R^2 의 적합도 : $W_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$
- 단계 2 : 개개의 규칙의 추론 결과를 구한다.
 - R^1 의 추론결과 : $\mu_{c_1}(z) = W_1 \wedge \mu_{c_1}(z)$, $\forall z \in Z$
 - R^2 의 추론결과 : $\mu_{c_2}(z) = W_2 \wedge \mu_{c_2}(z)$, $\forall z \in Z$
- 단계 3 : 최종적인 추론결과
 - $\mu_x(z) = \mu_{c_1}(z) \vee \mu_{c_2}(z)$
- 단계 4 : 비퍼지화
 - 규칙 1에서 A_1 과 A_2 에 x_0 가 입력된 그림이 (a)와 (d)이고, B_1 과 B_2 에 y_0 가 입력된 그림이 (b)와 (e)이다.
 - 구해진 적합도 4개중에서 A_1 과 x_0 를 통해 구해진 적합도와 B_1 과 y_0 를 통해 구해진 적합도중에서 작은 값이 규칙1에 대한 전반부 적합도($W_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0)$)가 된다.
 - A_2 와 x_0 를 통해 구해진 적합도와 B_2 와 y_0 를 통해 구해진 적합도중 작은 값이 규칙2에 대한 전반부 적합도($W_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$)가 된다.
 - 전반부 적합도 W_1 과 W_2 보다 작은 부분을 각각 C_1 과 C_2 의 소속함수에서 취하면 각각 규칙1과 규칙2에 대한 관계가 된다. ($\mu_{c_1}(z) = W_1 \wedge \mu_{c_1}(z)$, $\mu_{c_2}(z) = W_2 \wedge \mu_{c_2}(z)$)
 - 구해진 관계들의 max를 취하면 추론의 출력값($\mu_x(z) = \mu_{c_1}(z) \vee \mu_{c_2}(z)$)을 구할 수 있다.
 - 비퍼지화를 위해 구해진 도형면적의 평균을 나타내는 위치(y_{out})를 취한다.(최종출력값)

제 3 장 규칙베이스 모형 설계

3.1 SBR형 오수처리시설 구조

SBR(Sequency Batch Reactors)은 주기적인 시간에 따라 질산화와 탈질화 공정을 반복함으로써 암모니아 성분을 질소가스로 배출하는 생물학적 처리 시스템으로서 운전조건이 시간에 따라 주기적으로 바뀐다는 것이 특징이다. 다시 말해, 호기조(aerobix reactor)와 무산소조(anoxic reactor)가 분리되지 않고 하나의 반응기에서 정해진 시간에 의한 실시간 제어 처리하는 시설이다. <그림 3-1>은 SBR형 오수처리시설의 내부구조이다. 유량조정조의 유입펌프와 폭기를 발생하는 폭기펌프로 구성된다. 이것이 퍼지제어 시스템에서 퍼지규칙에 의한 제어대상이다. 오수처리시설은 여러 개의 실로 나뉘어져 있다.

탈질 미생물은 에너지원으로 탄소를 반드시 필요로 하는데, 일반적으로 탄소 산화반응이 질산화 반응보다 빨리 일어나므로 호기 단계에서 질산화가 완료되었을 경우 무산소 단계는 거의 모든 탄소원이 소비된 상태이다.



<그림 3-1> 오수처리시설의 내부구조

SBR은 유입-유출의 과정을 반복하며 운전되는데, 각각의 공정은 오수의 유입(FILL), 반응(REACTION), 침전(SETTLE), 배출(DRAW) 그리고 휴지(IDEAL)로 구성된다. 유입과 반응 구간 동안 원수의 유입과 더불어 반응이 진행된다. 호기성 반응이 종료된 후 미생물들이 플럭을 이루며 침전되면 처리수는 배출된다. 새로운 유입은 잠시 동안의 휴지기를 거치고 나서 시작된다. 영양염류 제거를 위해서는 반응구간 동안 적절한 용존 산소의 공급과 pH유지가 질산화에 영향을 미치며, 유입구간과 반응종료 후 구간동안에 무산소적 혼합이 이용되는데 이 구간동안의 탄소원공급, pH, 그리고 용존 산소의 농도가 탈질의 효율에 중요한 영향을 미치는 것이다.

SBR은 저 비용이 소요되며, 각 단위 공정이 정해진 시간의 배열에 따라 연속적으로 행해지는 장치로 이차 침전지가 불필요하고, 최소 부지 면적이 요구되므로 소규모 처리시설에 적합한 것으로 알려져 있다. 그러나 운영상의 애로점으로 무산소와 호기조건을 적절히 조합하는 순서(Sequence)를 확보하기가 어려우며 특히 무산소 상태에서 환원상태를 유지하기가 어려워 고도처리(질소·인제거)가 용이하지 않는 것이 본 공정의 미비점으로 지적되어왔다.

이러한 반응기의 배출수 농도와 불규칙한 수위량에 따른 현재 수위를 본 연구에서는 퍼지제어 시스템을 이용하여 원활하고 확실한 배출수를 방류하기 위한 연구이다.

3.2 규칙베이스 설계

규칙베이스 퍼지제어기는 이러한 규칙시간 제어를 대신하여 규칙기반 제어를 구현한다. 첫 번째 단계로 공정상태를 결정하는 입·출력 제어변수(언어변수)를 정의하고 두 번째 단계는 각 제어 변수값과 이에 상응하는 소속함수를 결정한다. 세 번째는 제어 전략을 언어적 제어 규칙의 집합으로 변환하여 규칙 베이스를 형성하고, 네 번째는 공정 상태에 적합한 제어 규칙군을 규칙베이스로부터 찾아내어 관계행렬을 구성한후 계측된 입력에 기초하여 다변수 퍼지추론이 이루어지며, 다섯 번째로 추론된 결과는 비퍼지화하여 공정에 적용한다.

퍼지제어에서는 언어변수가 사용되는데 대단히 복잡하거나 잘 정의되지 않은 시스템을 근사적으로 규정하고 특성평가가 가능하게 하는 체계적인 방법을 제공한다. SBR모델 오수처리시설 제어는 불규칙한 유입수의 양적, 질적 변화에도 불구하고 공정상태의 계측정보(입력변수)에 입각하여 배출수의 농도를 낮게 유지하고 오수처리공정을 원활하고 효율적으로 하기 위해 제어변수를 <표 3-1>과 같이 설정하였다. 오수처리시설의 입력변수는 S(small), M(medium), L(large), VS(very small), NS(not small), NL(not large)중에서 선택되며, 출력변수는 LN(large negative), SN(small negative), SP(small positive), LP(large positive)중에서 선택된다.

<표 3-1> 입·출력 제어변수

구분	변수명	변수
입력	수위위치	Le
	배출수 농도	Do
출력	폭기펌프	BP
	유입펌프	IP
	순환펌프	CP

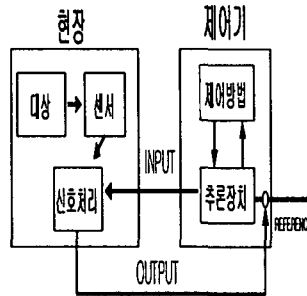
3.3 퍼지제어 알고리즘

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

퍼지제어기든 일반제어기든 제어기라면 제어대상의 선정, 모델링, 해석, 설계, 검증의 다섯 가지 큰 흐름은 일치한다. 퍼지제어기의 설계는 일반제어기의 설계와 큰 흐름은 같지만 표현방법의 근본적인 차이에서 오는 여러 가지 차이점을 고려해 주기 위해서는 퍼지제어기만의 독특한 설계방법을 적용하여야 한다. 퍼지제어기 설계를 단계별로 구분해보면 다음과 같다. 일단 퍼지제어기 설계를 위해서는 무엇을 제어해야할 것인가를 알아야 한다. 이렇게 제어할 대상이 선정이 되면 어떻게 제어해야하는지를 파악하고 이를 위해 필요한 제어변수를 추출해내야 한다. 다음으로 이 변수들을 바탕으로 제어규칙을 설정한다. 이 과정은 기계가 대신해 줄 수 있는 과정이 아니다. 그 계통에 숙련자나 전문가의 의견을 통하여 수행한다. 이 때 규칙에 포함되는 변수나 상수들의 소속함수도 적절하게 설정해 주어야 한다. 이렇게 작성된 제어기를 통해 성능을

시험해보고 원하는 수준에 이를 때까지 규칙과 소속함수 등을 조정해 주어야 한다. 이와 같은 과정을 통해 제어규칙과 소속함수가 정의되면 앞 절에서 알아본 추론법을 이용하여 출력값을 구한 후 비퍼지화 과정을 거치면 실제로 시스템을 제어할 수 있다. 마지막 검증과정에서 필요한 규칙을 추가하고, 제어에 악영향을 미친다고 생각되는 규칙을 제거하는 제어 규칙의 수정과정을 통해서 최적의 제어규칙을 찾아낸다.

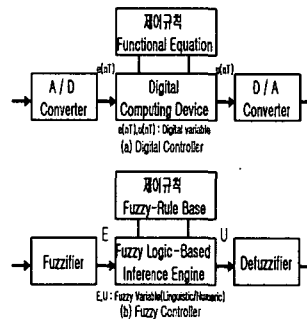
Fuzzy제어기의 구조는 그 내부에서 취급되는 정보가 Fuzzy Sets 이므로 재래식의 제어기와는 매우 다를 것으로 예상된다. 그러나 <그림 3-2>에서처럼 R-FCE 모델 Fuzzy 제어기도 하나의 제어기로서 기본구성이 소프트웨어적인 제어측(control부)과 하드웨어로서의 계산장치(computing device)로 나누어지는 기본 구조로 되어있다. 단지 제어기 안에 처리되는 정보의 형태가 다르다고 볼 수 있다.



<그림 3-2> R-FCE 모델 Fuzzy 제어기 구조

일반 상용화 되어있는 SBR방식의 오수처리시설의 제어기는 현장과 제어기에서 수위에 따른 단순한 시간 제어시스템으로 구성되어있다. 그러나 Fuzzy 제어기는 <그림 3-3>의 (b)에서 보는바와 같이 Fuzzy 규칙베이스와 fuzzy 추론엔진을 중심으로 종래의 수치변수값을 fuzzy 집합변수값으로 바꾸거나 그 반대의 작용을 하는 Fuzzifier와 Defuzzifier 로 구성되어 있다. Fuzzifier는 종래의 수치적 정보(Crisp Data)를 퍼지집합으로 변환하는 연산자이고, Defuzzifier 는 퍼지집합으로 표시된 퍼지 양으로부터, 보통의 수치값을 얻는 과정을 나타내는 변환장치이다.

Fuzzy 제어기는 (a)에 보인 바와 같은 기능상 일반 디지털제어기와 유사한 구조를 갖고 있음을 알 수 있다. 즉 디지털 변수를 다루는 디지털 제어기에서 A/D converter나 D/A converter의 역할을 하는 것이 각각 Fuzzifier와 Defuzzifier이며, PID 제어규칙과 같은 함수식 대신에, "If e if \bar{A} then u is \bar{B} "와 같은 Fuzzy 규칙베이스가 쓰이고 있고 디지털 연산 장치 대신에 Fuzzy 추론 엔진이 계산을 하는 것이다.



<그림 3-3> 퍼지와 일반 제어기 구조

3.4 규칙베이스화 이론

규칙화 단계에서는 획득한 상세 지식을 IF-THEN의 규칙형태로 전환하며, 작성된 규칙에 대한 일관성과 정확성을 확인한다. 개발 관련자들간의 긴밀한 협조를 필요로 하는 단계로써 규칙을 얼마나 효율적으로 작성하느냐가 규칙화 단계에서의 목표가 된다. 규칙을 작성하는데 사용되는 판단 요소와 기준은 상당히 난해한 부분을 가지고 있어 규칙의 중복, 규칙의 누락, 불필요한 규칙작성 등을 유발시킬 수 있으므로 생성규칙의 정제 과정이 필요하다. 또한, 생성규칙이 획득된 지식을 정확히 포함하고 있는지, 획득된 지식이 변화되지 않고 일관성을 유지하면서 규칙으로 만들어졌는지 등을 확인한다.

오수처리시설에서 유입되는 양을 입력규칙의 대상으로 판단요소 및 기준식별 태스크에 대하여 설명하면 다음과 같다. 유입되는 오수의 종류와 농도, 양 등 이러한 유입수 요소는 오수처리를 하는 장치들의 가동제어에 영향을 미치게 된다. 제어되는 규칙으로는 유입, 폭기펌프 가동이며, 배출수 농도에 따른 역순환 펌프가동이다.

이러한 결과에 영향을 미치는 오수처리시설의 폭기조와 반응조의 레벨에 따른 규칙지식을 설정한다. 즉, 수위가 Low 미만이면 유입펌프 모두 가동과 폭기 펌프 모두 정지, Middle 위치가 되면 간헐적인 펌프제어, High가 되면 Low 미만인 상태의 반대로 유입펌프는 모두 정지하고 폭기 펌프가 모두 가동된다. 생성규칙 정제 태스크는 지식베이스 모듈을 효과적으로 구축하기 위하여 지식 규칙화에서 작성된 모든 규칙들을 상호 연관성과 중복성을 고려하여 규칙간의 통합, 규칙의 삭제 등을 수행한다.

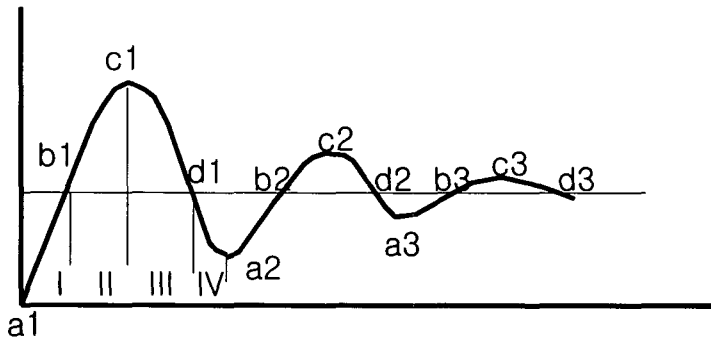
3.5 규칙베이스 설계

퍼지제어를 실제에 응용할 때 문제가 되는 것은 서두에서 언급한 것처럼 Fuzzy 제어규칙을 어떻게 만드는가 하는 것이다. 이 절에서는 구체적인 방법을 세워보기로 한다. IF 전건부 변수로서 시간 nT 에 있어서 출력은 Y_n , 편차를 E_n , 조작량 U_n , 수위 위치 L_n , 설정치 R 이라 하고 증분 dE 와 dU 를 다음과 같이 정하면

$$\begin{aligned} dE &= E_n - E_{n-1} \\ &= (R - Y_n) - (R - Y_{n-1}) \\ &= Y_{n-1} - Y_n \\ dU &= U_n - U_{n-1} \end{aligned}$$

dE 는 출력 Y 의 부호를 반대로 한 것으로 출력이 상승하였을 때는 $dE < 0$, 하강하였을 때는 $dE > 0$ 이다. 퍼지 제어기의 입출력 관계는 E , $dE \rightarrow U$ 로 표시하기로 하며, dU 를 출력으로 하는 제어 알고리즘으로 한다.

<그림 3-4>에서 알 수 있는 바와 같이 이 응답은 4가지 형태 I, II, III, IV의 반복으로 구성되어 있고, 1 cycle에 비해 2 cycle에서는 제어 출력의 크기가 감소한다. 우선 각 cycle의 특징점을 선정하여 Fuzzy 제어규칙의 전건부가 특징점을 찾도록 한다.



<그림 3-4> 탁도 출력의 제어응답

예를 들면 cycle 1 phase I의 a1부근에서는 편차(설정치-출력)가 (+)로 크다. 이것을 수위와 관계하여 수위레벨이 Low이면 Pump 1번, 2번을 PB로 하고, Blower 1번, 2번을 PL로 선정한다. 수위와 탁도편차 dE 를 Fuzzy 변수의 값을 이용하여 기술한다. 같은 방법으로 phase II의 점 b1, III의 c1, IV의 d1등의 부근에 관해서도 제어규칙을 만들면 <표 3-2>와 같이 구동기(펌프) 제어규칙을 정의할 수 있다.

cycle 2의 a2, b2 등의 부근에서는 a1, b1에 비해 E 또는 dE 의 절대치가 적게 되므로 그에 따른 값도 적게 하면 된다. 즉

a2 : IF E=PM and $dE=ZO$ THEN $dU=PM$ (Positive Middle)

b2 : IF E=ZO and $dE=NM$ THEN $dU=NM$ (Negative Middle)

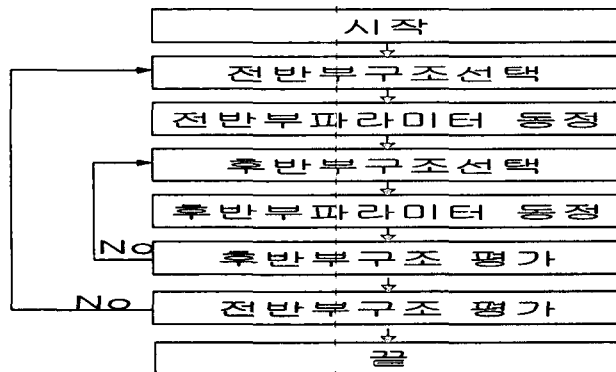
이 된다. 이와 같이 해서 만든 13개의 규칙을 나타낸 것으로 종축은 수위레벨의 Le 값, 횡축은 dE 의 값으로 dU 값을 나타내고 조건부가 정수인 경우의 제어규칙을 나타낸다. 이와 같이 적어도 되는 것은 1개의 규칙이 지배하는 영역이 넓고 현실적으로 규칙을 얻을 수 없는 영역(예를 들면 L=PB and $dE=NB$)에서는 규칙이 필요하지 않기 때문이다. 규칙 전건부와 후건부의 평가 및 결정으로 규칙의 수가 줄어들게 되고 동정을 통한 입력값에 따른 출력이 이루어지게 된다.

<그림 3-5>는 이들의 제어규칙은 IF-THEN의 형식으로 나타내어 입력 변수명과 그의 퍼지 변수명을 대립시켜 조건부 명제로 하고 출력변수명과 그 Fuzzy 변수명을 대립시켜 후건부 명제로 하여 입력시킨다. R-FCE모델은 불규칙하고 부정확한 저장조의 수위결정을 위해 탁도와 혐기조의 수위위치를 센서에 따른 입력치를 자동적으로 계산한 값을 입력량으로 한다. 퍼지 제어기는 기준목표치와 그의 보정치를 구해 Fuzzy 추론을 각 1회 수정하여 얻어진 결과를 목표치와 제어기의 설정치로 사용한다.

이와 같이 해서 얻어진 Fuzzy 제어의 효과는 센서의 입력만으로 목표값이 얻어지므로 운전원의 부담이 경감되고 사용자 훈련에 필요한 시간과 1일의 작업량이 대폭 경감된다. 또한 배출수에 대한 객관적이고 신뢰할 수 있는 값을 얻을 수 있다.

<표 3-2> 구동장채 퍼지제어 규칙

a1	: if L=PB and dE=PB then dU=Pump->PS, Blower->PB
b1	: if L=PB and dE=ZO then dU=Pump->PM, Blower->PM
c1	: if L=PB and dE=ZO then dU=Pump->PM, Blower->PM
d1	: if L=PB and dE=NB then dU=Pump->PB, Blower->PS
:	
a2	: if L=NB and dE=PB then dU=Pump->PB, Blower->PB
b2	: if L=NB and dE=ZO then dU=Pump->PM, Blower->PM
c2	: if L=NB and dE=ZO then dU=Pump->PM, Blower->PM
d2	: if L=NB and dE=NB then dU=Pump->PB, Blower->PS



<그림 3-5> 퍼지 모델을 위한 알고리즘 과정

제 4 장 R-FCE 실험결과

일반적으로 기존 SBR형 오수처리시설을 보면 수위레벨이 유입 과정에서 저부하 상태가 발생하여 L5 이하로 오수가 줄어들면 유입펌프가 공기 중에 노출되어 고장의 원인이 될 수 있기 때문에 저부하 모드로 전환된다. 또한 에어펌프가 가동되는 이유로 미생물을 최소한으로 유지시키기 위해 폭기펌프(AP)를 퍼지출력인 NB로 설정한다. 저부하 모드 중에 L5가 ON이 되더라도 Pump를 계속 가동하였다가 오수가 L5 이상상태로 되면 다시 정상으로 작동한다.

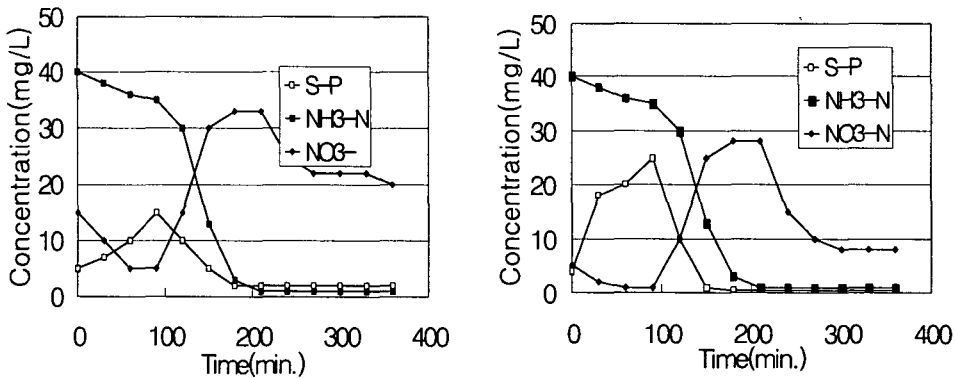
수중에 있는 수위레벨센서는 수위값이 지정한 위치에 있으면 ON, OFF 기능을 반복하게 되는데, 수위가 불규칙하게 움직이게 되면 원하는 제어규칙이 될 수 없다. 그리고 이러한 제어간격이 정해진 시간에 따라 유입에서 배출까지 이루어지고 있는데 이것은 순환제어 시스템으로 제어규칙에 적용하면 기존의 배출수 보다 더 좋은 수질이 배출하게 될 것이다.

저수위와 최저수위에서 유입펌프는 계속 가동되지 않고 간헐적으로 가동되게 되는데 이 목적은 반응조의 미생물이 살 수 있는 최소한의 영양물질을 공급하는데 있다. 이때 간헐유입과정에서 1번 폭기펌프(AP1) 과 2번 폭기펌프(AP2)는 저부하 모드와 같은 상태로 운전된다. 이러한 운전 중에 수위의 변화는 두 가지의 원인이 있다. 첫째는 유입과정에서 오수가 줄어드는 것과 둘째는

사용자가 물을 배출하여 유량조의 오수가 늘어나는 것이다. R-FCE모델은 이러한 과정을 퍼지제어 이론에 따라 제어를 하게된다.

SBR장치와 R-FCE 모델 장치와의 처리과정에서 물리적·생물학적 지표의 변화, 그리고 처리 효율을 알아보기 실험실 규모에서 비교하였다. <그림 4-1>은 운전과정에서의 물리적·생물학적 지수의 변화를 나타내었다. 그래프에서 보면 시간이 지나면서 질산화값은 기존의 SBR형이 낮게 나왔으나 R-FCE 모델이 양호하다는 것을 알 수 있는데, 이것은 기존장치에서 PLC에 의한 강제 제어방식으로 초기제어는 양호할 수 있으나 시간에 따른 제어방식으로 배출수의 농도에 따른 값을 고려하지 않기 때문에 수질이 나빠지는 것으로 알 수 있었다.

R-FCE모델이 기존 SBR형 모델보다 늦게 안정화되기까지는 퍼지추론에 따른 규칙베이스를 탐색하는데 시간이 지연되므로 초기에는 불안정하게 가동되었으나, 안정화된 시간이후는 매우 양호한 상태를 유지하게 되었다. <그림 4-1>에서는 유입수, 방류수, 처리효율을 나타내었다. R-FCE 모델이 아닌 SBR장치의 경우 혐기성 조건이 형성되어야 할 조건에서는 유입하수와 슬러지와 접촉부족으로 혐기성 또는 무산소 조건이 공존하여 인의 방출농도가 매우 저하되었으며 그 결과, 포기조건에서의 인의 흡수율이 낮았으며, 포기과정이 끝난 후 침전과정에서는 슬러지와 접촉시간 부족으로 호기와 무산소 조건이 공존하여 질소의 제거효율이 낮음을 알 수 있다.



<그림 4-1> 기존 SBR형과 R-FCE 모델제어 비교

반면에, R-FCE 모델의 경우 유입하수와 슬러지와 혼합시에는 완전혼합이 일어나 혐기성 조건이 조성되고, 포기과정이 끝난 후에는 슬러지와 질산성 질소가 함유된 수용액과의 고른 혼합으로 무산소 조건이 성립되었다. 그 결과 혐기성 조건에서 인의 방출, 호기성 조건에서의 인의 흡수 그리고 탈질 과정에서 질소제거가 원활히 이루어졌으며 <표 4-1>에서 보는 바와 같이 인 및 질소의 제거효율은 종래의 SBR공법보다 IC-SBR공법이 우수함을 보여주고 있다. 여기에서 주목해야 할 것이 인, 질소의 처리효율이다. 질소는 기존 SBR이 60%에서 R-FCE모델에서는 80%로 높아졌으며, 인처리 효율도 SBR형에서는 72.3%에서 R-FCE에서는 92.3%로 20%이상 향상되는 것을 알 수 있었다.

<표 4-1> 기존 SBR공법과 R-FCE모델과의 처리수질비교

실험항목	기존 SBR			R-FCE 모델		
	유입수	방류수	처리효율	유입수	방류수	처리효율
COD	410	14	96.59	410	12	97.07
SS	158	8	94.94	158	8	94.94
T-N	60	24	60	60	12	80
T-P	6.5	1.8	72.31	6.5	0.5	92.31

제 5 장 결론 및 향후과제

본 논문에서는 시스템 운영시 선형화된 모델일지라도 내, 외부영향 및 기타여건으로 인하여 순간적으로 비선형으로 변하고, 특히 그 구조 자체가 비선형이거나 시스템을 모델링하기 어렵고, 불명확한 대상을 모델링 하는데 있어 퍼지제어 시스템으로 R-FCE모델을 오수처리시설을 대상으로 설계하였다.

퍼지제어 IF-THEN 규칙으로 입·출력 정보를 실시간으로 처리할 수 있는 제어 시스템을 설계하고, 미래의 환경문제와 관리효율을 높이기 위한 SBR형 오수처리시설을 대상으로 모델을 개발하였으며, R-FCE 모델이 실험을 통한 퍼지추론 규칙을 설계함에 있어 규칙의 설정을 체계화하고 적절한 규칙의 수로 효율적인 추론규칙을 설계하였다. 이에 따른 컴퓨터시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 개발하고, 퍼지제어를 통한 오수처리시설의 원활한 운영상태를 만들어 배출수의 수질을 높이는 데 주안점을 맞추었다.

퍼지제어가 효과적인 수 있는 제어대상으로서 수학적 모델을 적용하기 힘든 시스템으로서 경험적으로 또는 수동적인 방법으로 제어가 잘되고 있는 대상을 들 수 있다. R-FCE 모델의 자동운전도 자세히 살펴보면 사람이 제작한 컴퓨터가 사람이 지시한 운전명령 프로그램에 의해 현장에서 입력되는 각종 신호를 판단하여 운전하는 것에 불과하다. 즉, 자동운전을 시행할 때 현장시설물 및 기기가 정상이고, 자동운전과 관련한 현장 계측기 및 신호 검출장치가 정확히 작동되며 자동운전 프로그램이 현장여건에 알맞게 작성되어 있어야 한다. 그러나 설계, 현장의 환경, 유입수 조건, 기후, 기타 여러 가지 이유로 인하여 조건을 모두 완전하게 갖추기는 매우 어렵고, 설령 운전초기에 자동운전 조건을 완벽하게 갖춘 시스템이라 하더라도 자동운전을 유지관리 하다 보면 예상치 않았던 돌출변수가 생기고 운전 프로그램에 보완 사항이 생기게 된다.

따라서 앞으로의 연구로서는 이러한 환경인 구성 부품의 고장진단, 원거리 오수처리시설의 네트워크 구성을 통한 원격 감시 및 제어에 대처하는 방법을 포함한 제어방법을 연구가 필요하겠다.

6. 참고 문헌

- [1] 김길동, "자료구조 형태에 따른 퍼지 안전 진단 전문가 시스템개발", 동국대학교, 박사학위 논문, 1997.

- [2] 김화수 외2인, 전문가시스템, 집문당, 1995.
- [3] 동화기술 편집부, "수질오염 · 폐기물 · 토양오염 공정시험방법", 동화기술, 1996.
- [4] 박주식, "고장진단을 위한 퍼지 전문가 시스템의 개발", 인천대학교, 석사학위논문, 1998.
- [5] 박주식, "실시간적인 CBMS(Condition Based Management System) 연구", 한국생산성학회, 하계학술대회, pp.1-7, 2000.
- [6] 이광형, 오길록, "퍼지이론 및 응용 II 권 : 응용", 홍릉과학출판사, pp.5-1~5-91, 1991.
- [7] 이소라, "연속유입 장기포기 회분식공정의 반응시간 구성비와 운전모드에 따른 영양염류의 제거에 관한 연구", 연세대학교 석사학위 논문, 1999.
- [8] Cooley, T. W., T. O. Hicks, "A Fuzzy Set Approach to Aggregation Internal Control Justment," Management Sci., Vol.29, pp.317-334, 1983.
- [9] Downing, A. L., *et al.*, "Nitrification in the Activated Sludge Process", J. Int. Sew. Purinf., pp. 130, 1964.
- [10] Downing, A. L., *et al.*, "Fuzzy real algebra: Some results," Fuzzy Sets and Systems, Vol.2, pp.327-348, 1979.
- [11] Mamadani, H. E., "Advances in the linguistic values," Fuzzy Sets and Systems, Vol.4, pp.99-115, 1980.
- [12] Negoita, D. A. Ralescu, "Application of Fuzzy Sets to System Analysis, Birkhauser", Germany, pp.16-18, 1975.
- [13] Sugeno, M., T. Onisawa, Y. Nishiwaki, A New Approach Based on Fuzzy sets concept to Fault Tree Analysis and Diagnosis on Diagnosis of Failure and Response to Abnormal Occurences at Nuclear Power Plants, Dresden, pp.12-15, 1984.
- [14] Zadeh, L. A., "A Fuzzy Logic and Approximate Reasoning," Synthese, Vol.30, pp.407-428, 1975.
- [15] Zadeh, L. A., "The concept of a linguistic variable ant its application to approximate reasoning," Information Science, Vol.8, pp.301-357, 1975.
- [16] <http://www.ableduck.com>