

# 퍼지 제어 이론과 응용

(Fuzzy Control Theory and It's Applications)

金 正 鎬\*  
Kim, Jeong Ho \*

## 목 차

1. 서 론	3. 비퍼지화
2. 퍼지제어법	4. 퍼지제어기 설계
2.1 퍼지관계	5. 응 용
2.2 퍼지변수	5.1 시멘트 킬른제어
2.3 퍼지추론	5.2 수질정화 공정제어
2.3.1 직접법	5.3 전동차 구동 시스템
2.3.2 간접법	6. 결 론
2.3.3 혼합형 추론법	

### 1. 서 론

종래의 고전 제어이론이나 현대 제어이론은 플랜트의 수학적 모델링이 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 비선형 시스템, 시스템을 모델링하기 어려운 불명확한 대상, 선형 시변형과 같은 복잡한 프로세서는 수학적 모델을 구성하기가 어렵고 또한 적절한 제어를 설계하기가 쉽지 않다. 이에 대해 퍼지제어는 선형 특성인 시스템은 물론 비선형 특성, 시스템의 정확한 동특성 기술이 어려운 시스템에 대해서 매우 유용한 것으로 알려지고 있다.

퍼지집합론은 1965년 Zadeh가 처음으로 제창한 이후, 퍼지이론과 그 응용에 관한 연구가 급속하게 진전되어 왔으며, 퍼지제어는 퍼지이론의

응용분야로서 가장 활발하게 활용되어 성공을 이룬분야이다.

퍼지제어는 Mamdani가 스팀엔진의 실험장치에 적용한 것을 계기로 이후 급속하게 실용화 연구가 진전되어 시멘트 킬른제어, 지하철의 자동운전, 정수장의 수질제어, 화학공정 반응제어 등 많은 분야에 적용한 사례가 발표되고 있다.

퍼지논리는 기존의 2치논리 시스템에 비해 운전자가 수행하는 불확실한 정보를 토대로 적응성이 높은 조작방법을 유연하게 언어적으로 모델화한 다치논리에 퍼지성을 도입한 것으로서 인간의 사고와 자연언어에 아주 밀접한 논리이다. 따라서 근사적으로 불확실한 성질들을 표현하는데 아주 효과적인 논리이다. 이러한 퍼지논리를 이용한 퍼지제어는 전문가의 경험지식과 제어대상의 특성에 대해서 축적된 지식을 사용하여

\* 정보처리 기술사(전자계산기조직응용), 전자(공업계측제어), 한국전자통신연구소 선임연구원

if-then 형식으로 언어적 제어규칙을 기술하여 사용할 수 있다. if부(전건부)에는 제어 대상의 상태를, then부(후건부)에는 상태에 응답할 수 있는 최적의 조작내용을 기술한다. 이 언어적 제어규칙에는 제어대상의 상황판단의 기준과 조작내용이 모호한 양으로 표현되는데 이 양에 대해서 각각의 멤버십 값을 취하여 정량화할 수 있다. 퍼지제어기는 정성적이고, 모호한 표현을 구사하여 언어적 제어규칙을 모아 구성하고 제어기에 입력을 인가하였을 경우에 제어출력은 퍼지추론에 의해서 구한다. 그러므로써 퍼지제어는 기존의 제어 알고리즘보다 더 우월한 결과를 얻을 수 있다.

## 2. 퍼지 제어법

### 2.1 퍼지관계

보통관계는 “y는 x보다 크다”, “y는 x와 같다” 등을 나타내는 등가, 대소 관계와 같은 분명한 관계를 나타내는 반면에, 퍼지관계는 “y와 x는 거의 같다”, “y는 x보다 매우 크다” 등과 같은 모호한 관계를 나타낸다. 이와같은 모호한 관계를 나타내는 퍼지관계의 정의는 다음과 같다.

집합 X에서 Y로의 퍼지관계 R은  $X \rightarrow Y$ 로 mapping 되는  $X \times Y$ 의 퍼지부분집합이다.

$$R \subset X \times Y$$

$$R = \{ (x, y), \mu_R(x, y) \mid x \in X, y \in Y \}$$

$$\mu_R(x, y) : X \times Y \rightarrow [0, 1]$$

예를들면, “x와 y는 대개 등가이다”인 퍼지관계를 R이라 하면 멤버십 함수는 다음과 같다.

$$\mu_R(x, y) = \exp(-(x-y)^2)$$

로 나타낼 수 있다. 그림 1에 멤버십 함수의 그래프를 도시하였다.

퍼지집합  $X_1, X_2, \dots, X_n (x_i \in X_i)$ 의 Cartesian product  $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$  상의 n항의 퍼지관계 R은 다음과 같이 정의한다.

$$R = \{ x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n, \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n) \mid (x_1, x_2, \dots, x_n) \}$$

로 정의하고 퍼지관계 R의 멤버십 함수  $\mu_R$ 은

$$\mu_{A.E}(x, y) = e^{-(x-y)^2}$$

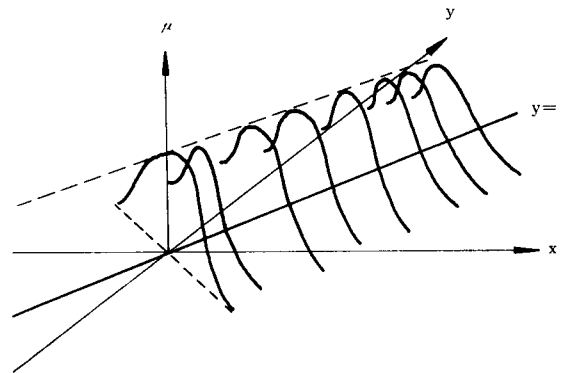


그림 1.  $y=x$ 인 경우의 멤버십 함수값

다음과 같다.

$$\mu_R : X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow [0, 1]$$

퍼지집합  $X, Y, Z (x \in X, y \in Y, z \in Z)$ 에 대해서 R과 S를 각각  $X \times Y, Y \times Z$ 상의 퍼지관계라면 R과 S의 퍼지관계의 합성  $RoS$ 는  $X \times Z$ 에서 퍼지관계가 되고 관계식은 다음과 같다.

$$RoS \leftrightarrow \mu_{RoS}(x, z) = \bigvee_y \{ \mu_R(x, y) \wedge \mu_S(y, z) \}$$

$$\bigvee : \max, \bigwedge : \min$$

특히 A를 X상에 퍼지집합이라면 A와 R의 퍼지관계합성  $AoR$ 은 Y상에 퍼지집합이며 관계식은 다음과 같다.

$$AoR \leftrightarrow \mu_{AoR}(y) = \bigvee_x \{ \mu_A(x) \wedge \mu_R(x, y) \}$$

집합 X, Y가 유한집합인 경우 행렬과 벡터를 이용한 합성연산은 다음과 같다.

$$X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$$

$$Y = \{ y_1, y_2, \dots, y_m \}$$

X, Y의 퍼지부분집합 A, B는 각각 다음과 같다.

$$A = \sum a_j / x_j$$

$$B = \sum b_l / y_l$$

퍼지관계 R은 다음과 같다.

$$R = \sum \sum r_{ij} / (x_j, y_l) \quad r_{ij} = \mu_R(x_j, y_l)$$

퍼지집합 B는 R과 A의 합성으로 구할 수 있다.

$$B = RoA$$

$$\mu_B(y_i) = \max[\mu_R(x_i, y_i) \wedge \mu_A(x_j)]$$

$$\therefore b_i \times \vee [r_{ij} \wedge a_j] \quad i=1,2,\dots, m$$

여기에서 B=RoA를 벡터와 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}$$

지금까지 사용한 max-min 합성연산법 이외에 다음과 같은 합성연산법이 있다.

$$RoS = \{[(x, z), \sup(\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z))], x \in X, y \in Y, z \in Z\}$$

\*: 임의의 연산자 즉 min, product, bounded product, drastic product

## 2.2 퍼지변수

퍼지제어 이론에서 퍼지관계는 공정의 퍼지입력과 관련이 있고, 퍼지관계의 응용조건을 퍼지 제어규칙이라 한다. 예를들면, 1개의 입력과 1개의 출력인 공정에 대하여 퍼지제어 규칙을 다음과 같이 정할 수 있다.

if E is PS and CE is PB, then CO is NM

if E is Zo and CE is ZO, then CO is ZO

(E: 출력오차, CE: 오차변화량, CO: 출력변화량, PB(Positive Big), PS(Positive Small), NM(Negative Medium), ZO(Zero): 퍼지변수)

이와 같은 퍼지변수는 연속형과 이산형이 있다. 연속계의 퍼지변수는 멤버십 함수가

$$A(x) = \exp(-a^2(x-b))$$

로 나타나는 범종형과

$$A(x) \times 1 / a(-|x-b| + a) \vee 0, a > 0$$

로 나타나는 삼각형이 있는데 이것은 2개의 매개변수, a, b로 특성이 기술된다. 매개변수 b는 멤버십 함수의 등급이 1로 되는 x값이고, a는 멤버십 함수의 퍼지성을 의미한다. 최근에 퍼지변수를 삼각형을 많이 사용하는데 이것은 삼각형

퍼지변수가 계산이 편하고 성능면에서 범종형과 거의 차이가 없기 때문이다.

이산형의 경우에 퍼지변수는 보통 표 1과 같이 구성한다. 퍼지변수 A는 3개의 매개변수 a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>로서 특성을 기술하는데 다음과 같다.

$$A = a_1 / x_1 + a_2 / x_2 + 1 / x_3 + a_2 / x_4 + a_1 / x_5$$

만약 a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>가 표 1과 같이 공통으로 사용하면 퍼지변수는 간단하게 1개의 매개변수 x<sub>3</sub>로 명기된다. 각 형태에 대한 퍼지변수를 그림 2, 3, 4에 나타나 있다.

표 1 이산형의 퍼지변수

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	10	
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	10	7	3
PS	0	0	0	0	0	0	0	3	10	7	3	0	0
ZO	0	0	0	0	3	7	10	7	3	0	0	0	0
NS	0	0	3	7	10	7	3	0	0	0	0	0	0
NM	3	7	10	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	10	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

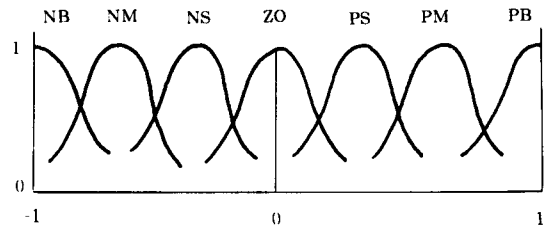


그림 2. 범종형 퍼지변수

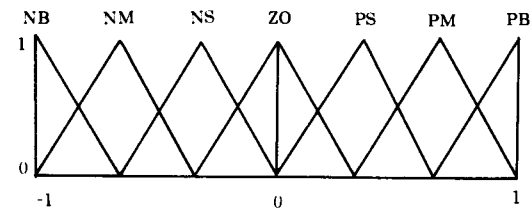


그림 3. 삼각형 퍼지변수

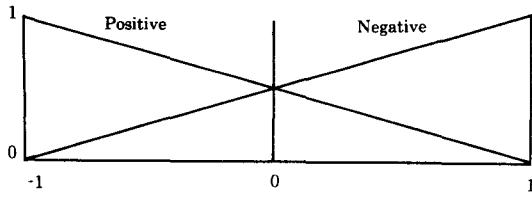


그림 4. 단조형 퍼지변수

### 2.3 퍼지추론

퍼지추론은 퍼지집합과 퍼지논리를 사용하여 몇개의 퍼지명제로부터 하나의 퍼지명제를 유도해 내는 것이다. 간단한 예로 다음과 같은 조건문을 생각하여 보자.

전제 1 : if x is A then y is B  
 전제 2 : x is A' (GMP)

결론 : y is B'

전제 1 : if x is A then y is B  
 전제 2 : y is B' (GMT)

결론 : x is A'

여기에서 x와 y는 대상명, A, A' 및 B, B'는 퍼지술어이고 퍼지변수는 X, Y에서 퍼지부분집합이다. 이와같이 퍼지변수를 포함하는 명제를 퍼지명제라 한다. 다음과 같은 전제 1, 2의 조건문에서 결론을 추론할 수 있다.

전제 1 : If a man is old then his wife is old

전제 2 : Mr. Smith is very old

결론 : His wife is very old

따라서 전제 1의 조건문에서 전반부의 퍼지집합 A와 다른 퍼지집합 A'가 전제 2에 조건문으로 나오게 되면 결론적으로 퍼지명제의 퍼지집합 B'를 구할 수 있다.

또한 그림 5와 같은 페루프 제어시스템에서 종래의 제어법과 퍼지제어법의 차이점은 다음과 같다.

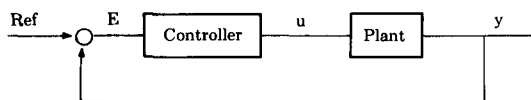


그림 5. 페루프 제어 블록 다이어그램

종래의 제어방법

if E is 0.8 and CE is 0.2, then u is 0.9

퍼지제어방법

if E is PB and CE is PS, then u is PB

즉	Classical	Fuzzy
	$A \rightarrow B$	$A \rightarrow B$
	$A'$	$A'$
	$B$	$B'$

이와같은 방법의 차이가 있다.

퍼지추론의 방법에는 퍼지집합의 멤버십 값을 진리치로 해석하여 추론을 수행하는 직접법과 그 진리치를 퍼지화한 퍼지진리치를 해석하여 추론하는 간접법이 있는데 그 내용은 다음과 같다.

#### 2.3.1 직접법

가. Mamdani의 최소 연산법

퍼지조건문 if x is A then y is B(A→B)에 대한 관계 R을 직접법을 사용하여 추론하면 다음과 같다.

$$R = A \rightarrow B = A \times B$$

$$A \rightarrow B$$

$$A'$$

$$B' = A' \circ (A \rightarrow B)$$

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y)$$

결론 B'는 퍼지조건문 A→B의 합성에 의하여 다음과 같이 추론할 수 있다.

$$B' = A' \circ R$$

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y) \}$$

$$= \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \}$$

$$= \bigvee_x \{ (\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x)) \wedge \mu_B(y) \}$$

$$= [ \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \} ] \wedge \mu_B(y)$$

$$= w \wedge \mu_B(y)$$

$$w = \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \}$$

이것을 추론의 합성규칙이라 한다. 추론의 과정을 나타내는 불럭다이어그램은 그림 6과 같다.

이것은 임의의 시스템의 임·출력간의 퍼지관계들을 알 수 있고, 퍼지입력이 주어졌을 때 퍼지출력을 구하는 방법을 제시한 것이다. 또한 Zadeh는 퍼지조건문 A→B의 퍼지관계 R을 다음과

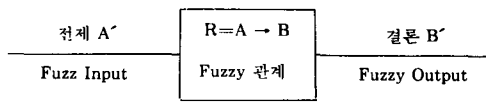


그림 6. 퍼지출력관계  $B' = A' \circ R$ 의 블록 다이어그램

같이 표현하였다.

$$R = A \rightarrow B = (A \times Y) + (Y \times B)$$

$$\mu_R(x, y) = 1 \wedge (1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))$$

이와같은 추론과정을 그래프로 도시하면 그림 7과 같다.

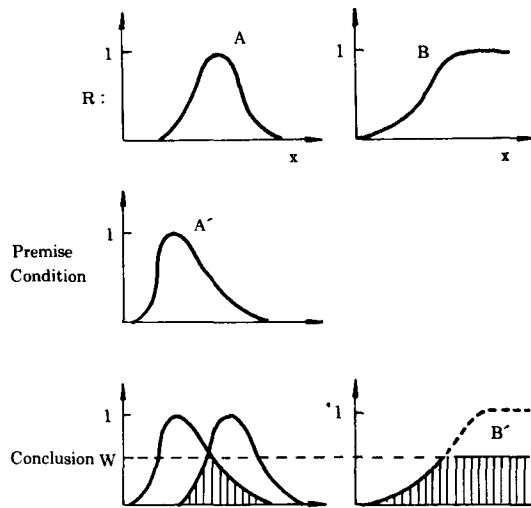


그림 7. 직접법에 의한 추론도

만약 입력에 인가할 제어규칙이 많은 경우에 관계에 대한 일반식은 다음과 같다.

$$R_1: \text{if } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{12}, \text{ then } u \text{ is } B_1$$

or

$$R_2: \text{if } x_1 \text{ is } A_{21} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{22}, \text{ then } u \text{ is } B_2$$

or

$$R_i: \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2}, \text{ then } u \text{ is } B_i$$

or

$$R_n: \text{if } x_1 \text{ is } A_{n1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{n2}, \text{ then } u \text{ is } B_n$$

$$x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, u \in U$$

퍼지관계  $R_1$ 와  $R$ 은 다음과 같다.

$$R_1 = (A_{11} \times A_{12}) \times B_1$$

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n = \cup R_i$$

만약 입력  $x_1^0$ 와  $x_2^0$ 가 인가되었을 경우에  $w_1$ 와  $B^0$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$R_1(x_1^0, x_2^0, y) = A_{11}(x_1^0) \wedge A_{12}(x_2^0) \wedge B_1(y)$$

$$= w_1 \wedge B_1(y)$$

$$w_1 = A_{11}(x_1^0) \wedge A_{12}(x_2^0)$$

$$\therefore B^0(y) = R(x_1^0, x_2^0, y) = R_1(x_1^0, x_2^0, y) \vee R_2$$

$$(x_1^0, x_2^0, y) \vee \dots \vee R_n(x_1^0, x_2^0, y)$$

$$= \vee [w_i \wedge B_i(y)]$$

출력  $y^0$ 는 멤버십 함수  $B^0(y)$ 를 무게중심법으로 계산하는 식은 다음과 같다.

$$y^0 = \int B^0(y)y \, dy / \int B^0(y) \, dy$$

상기에서 논한 관계식에 대하여 블록다이어그램과 추론과정이 각각 그림 8, 9에 나타나 있다.

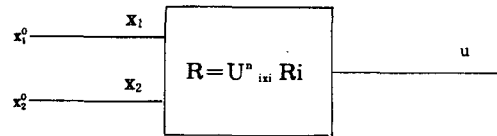


그림 8.  $X_1^0, X_2^0$  입력시 관계도

#### 나. Larsen의 승산법

Larsen은 관계 합성 연산자를 승산으로 처리하는 방법을 제안하였다. 즉 A와 A'의 적합도  $\alpha$ 에 대하여 B'의 멤버십 함수의 계산은 다음과 같다.

$$\mu_{B'}(y) = \alpha \cdot \mu_B(y)$$

우선 퍼지추론시 추론의 sup-min 합성규칙을 기반으로 추론한다. GMP에서 합성방정식의 결과를 조사하여 보면 다음과 같다.

$$B' \times A' \circ R$$

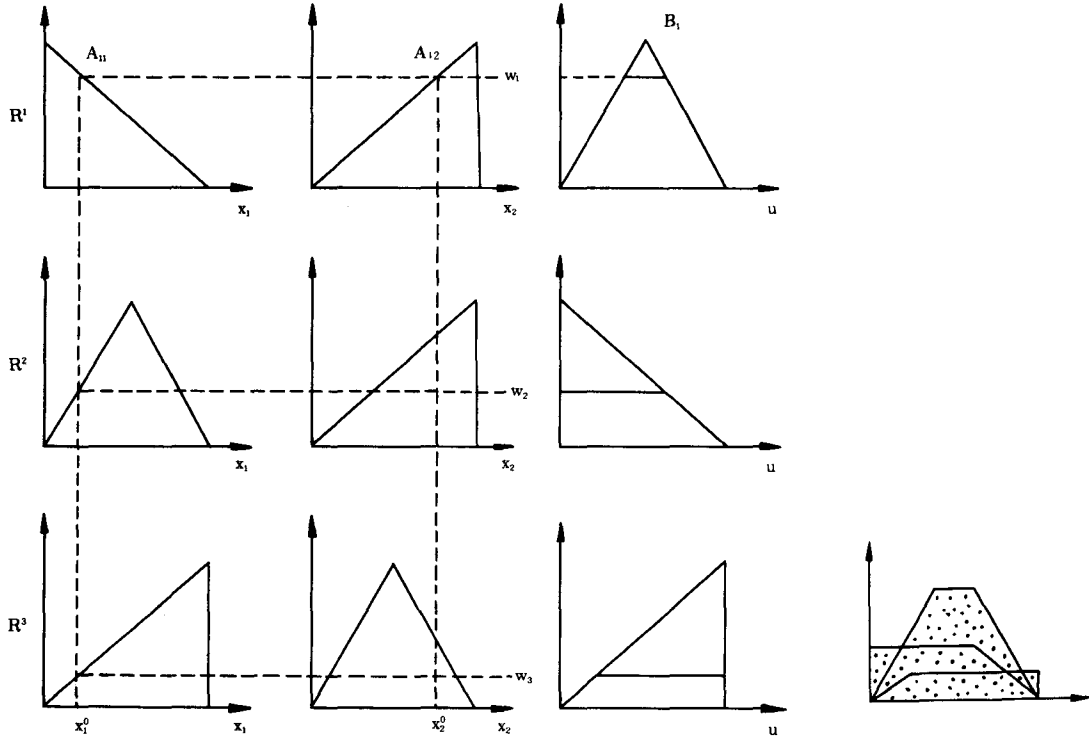
$$R: \text{퍼지관계 } \circ: \text{sup-min 합성연산자}$$

$$A': \text{다음과 같은 형태의 퍼지집합}$$

$$A = \int u \mu_A(u) / u$$

$$\text{very } A = A^2 = \int u \mu_A^2(u) / u$$

$$\text{more or less } A = A^{0.5} = \int u \mu_A^{0.5}(u) / u$$



$\text{not } A = \int_u 1 - \mu_A(u) / u$   
 GMT에서 합성방정식의 결과를 조사하여 보면 다음과 같다.

$A' = R \circ B'$

$r$ : 퍼지관계

$B'$ : 다음과 같은 형태의 퍼지집합

$\text{not } B = \int_v 1 - \mu_B(v) / v$

$\text{not very } B = \int_v 1 - \mu_B^2(v) / v$

$\text{more or less } B = \int_v 1 - \mu_B^{0.5}(v) / v$

$B = \int_v \mu_B(v) / v$

-GMP에서 Larsen의 승산법

$A' = A^\alpha (\alpha > 0)$ 이라 가정하자,  $B'$ 는 다음과 같이 추론한다.

$B' = A^\alpha \circ R$

$= \int_u \mu_A^\alpha(u) / u \circ \int_{u \times v} \mu_A(u) \cdot \mu_B(v) / (u, v)$

퍼지집합  $B'$ 의 멤버십 함수  $\mu_{B'}$ 는 모든  $v \in V$ 에서 다음과 같다.

$\mu_{B'}(v) = \sup \min\{\mu_A^\alpha(u), \mu_A(u) \mu_B(v)\} = \sup S_p(1 - \mu_A^\alpha(u))$

여기  $S_p(\mu_A^\alpha(u)) = \min\{\mu_A^\alpha(u), \mu_A(u) \mu_B(v)\}$

-GMT에서 Larsen의 승산법

$B' = \text{not } B^\alpha (\alpha > 0)$ 이라 가정하자, 결과  $A'$ 는 다음과 같이 추론한다.

$A' = R \circ (\text{not } B^\alpha) = \int_{u \times v} \mu_A(u) \mu_B(v) / (u, v) \circ \int_v (1 - \mu_B^\alpha(v)) / v$

퍼지집합  $A'$ 의 멤버십 함수  $\mu_{A'}$ 는 모든  $u \in U$ 에서 다음과 같이 정의한다.

$\mu_{A'}(u) = \sup \min\{\mu_A(u) \mu_B(v), 1 - \mu_B^\alpha(v)\} = \sup S(1 - \mu_B^\alpha(v))$

여기서  $S(1 - \mu_B^\alpha(v)) = \min\{\mu_A(u) \mu_B(v), 1 - \mu_B^\alpha(v)\}$

2.3.2 간접법

퍼지논리 즉, 퍼지화된 Lukasiewicz 논리를 기반으로 한 간접법에 대하여 퍼지변수가 단조 멤버십 함수인 관계를 알아보면 다음과 같다.

if  $x_1$  is N and  $x_2$  is P, then  $y$  is N  
 if  $x_1$  is P and  $x_2$  is N, then  $y$  is P  
 (P : Positive N : Negative)

입력  $x_1^0, x_2^0$ 에 대하여 출력  $y^0$ 는 다음과 같이 추론한다.

$$w_1 = N(x_1^0) \wedge P(x_2^0)$$

$$w_2 = P(x_1^0) \wedge N(x_2^0)$$

$$y^0 = (w_1 y_1 + w_2 y_2) / (w_1 + w_2)$$

이와같은 추론과정을 도표로 나타내면 그림 10과 같다.

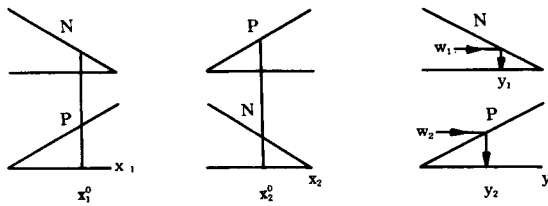


그림 10. 간접법에 의한 퍼지추론

### 2.3.3 혼합형 추론법

제어규칙이 조건부는 퍼지변수를, 후건부는 crisp 관계로 기술되는 규칙으로 표시되는 경우에 혼합형 추론법을 사용한다.

$R_1$ : if  $x_1$  is  $A_{11}$  and  $x_2$  is  $A_{12}$ , then  $y$  is  $f_1(x_1, x_2)$   
 $R_2$ : if  $x_1$  is  $A_{21}$  and  $x_2$  is  $A_{22}$ , then  $y$  is  $f_2(x_1, x_2)$   
 $f_i(x_1, x_2) = a_i x_1 + b_i x_2 + c_i$

2개의 제어규칙상에 입력  $x_1 = x_1^0, x_2 = x_2^0$ 에 대하여 출력  $y^0$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$w_1 = A_{11}(x_1^0) A_{12}(x_2^0)$$

$$w_2 = A_{21}(x_1^0) A_{22}(x_2^0)$$

$$y_1 = f_1(x_1^0, x_2^0)$$

$$y_2 = f_2(x_1^0, x_2^0)$$

$$\therefore y^0 = \{w_1 f_1(x_1^0, x_2^0) + w_2 f_2(x_1^0, x_2^0)\} / (w_1 + w_2)$$

### 3. 비퍼지화(defuzzification)

지금까지는 비퍼지한 입력에 대해서 퍼지화 과정을 거쳐 퍼지데이터로 변화하여 퍼지추론기 관에서 결정된 임의의 데이터는 퍼지한 값이다. 이를 실제 플랜트에 적용하기 위해서는 추론된 값을 비퍼지화 과정을 통하여 crisp 한 값으로 변환하여야 한다. 이것은 실제 적용하는데 제어

동작이 crisp 한 값을 필요로 하기 때문이다. 비퍼지화는 비퍼지제어동작을 산출하는 것이다. 최근에 많이 사용되고 있는 비퍼지화 방법은 최대기준방법, 최대치 평균방법(MOM), 중심값 방법(COA)이 있다. 최대기준방법은 제어동작의 실현 성분포가 최대인 점을 산출한다. 최대치 평균방법은 멤버십 함수가 최대값에 이르는 모든 제어동작을 평균하여 제어동작을 발생시킨다. 특히 불연속계인 경우에 제어동작은 다음과 같다.

$$z_0 = \sum w_j / 1$$

$w_j$ : 멤버십 함수가 최대치  $\mu_z(w_j)$ 에 이르는 support값

l: support 값의 수

가장 널리 사용되고 있는 중심값 방법은 제어동작 실현성 성분포의 중심값을 발생한다. 불연속계인 경우에 제어동작은 다음과 같다.

$$z_0 = \{\sum \mu_z(w_j) \cdot w_j\} / \sum \mu_z(w_j)$$

n: 출력양자화 준위의 수

이러한 비퍼지화의 방법이 그림 11에 나타나 있다. Braae와 Rutherford가 여러가지 비퍼지화 방법을 상세히 분석한 결과 중심값 방법이 다른 방법보다 우월함을 보였다. 그러나 COA 방법은 정상상태 성능에서 좋은 반면에 MOM 방법은 과도상태에서 좋은 성능을 발휘한다. 따라서 MOM 방법을 사용할 경우에 퍼지제어기의 성능은 multilevel 릴레이 시스템과 유사한 동작을 하고, COA 방법은 기존의 PID 제어기와 유사한 성능을 보인다. 일반적으로 퍼지제어기에서 COA 방법은 MOM 방법을 사용한 것보다 평균오차가 적게 발생한다. 또한 MOM 방법은 최대기준 방법보다 좋은 성능을 발휘한다.

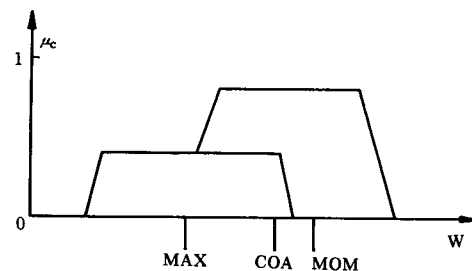


그림 11. 비퍼지화 방법 구성도

#### 4. 퍼지제어기 설계

퍼지제어에서 가장 중요한 것은 퍼지제어 규칙을 유도하여 퍼지제어를 설계하는 것이다. 이러한 퍼지제어기는 운전자의 경험이나 제어공학도의 지식을 토대로 설계된다. 운전자는 공정제어에서 중요한 역할을 하는데 운전자의 제어규칙에 관한 knowhow를 찾아서 퍼지관계를 기술하는 것이 매우 중요하다. 또한 제어공학도는 제어 대상의 공정과 일반적인 제어공학 감각 및 지식으로 프로토콜의 수를 작성할 수 있다. 예를들면, 공정이 1차 지연시간이 있는 플랜트를 케환 제어시 공정의 응답이 그림 12와 같다. 이 응답곡선을 4개 구간 I-IV로 분할하여 분석한다. 응답특성을 개선하기 위하여 각 구간별 특징점으로 표시하여 동작특성을 고려하면 다음과 같다.

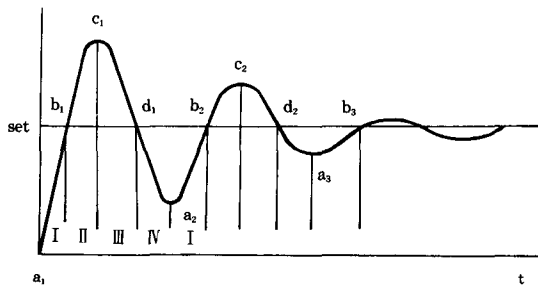


그림 12. 플랜트의 공정응답곡선

제어규칙의 형식은 전제의 전건부로서 출력오차 E와 한 샘플링 시간에서의 E의 변화분  $\Delta E$ , 후건부 변수 조작량 u의 변화분을  $\Delta u$ 라 하고 시간 n에서 출력을  $Y_n$ , 편차를  $E_n$ , 조작량을  $U_n$ , 설정치를 R이라 하면

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_n - E_{n-1} \\ &= (R - Y_n) - (R - Y_{n-1}) \\ &= Y_{n-1} - Y_n \end{aligned}$$

$$\Delta U = U_n - U_{n-1}$$

이다.

퍼지제어기 입·출력 관계는 E,  $\Delta E \rightarrow \Delta U$ 이다.

E와  $\Delta E$ 로  $\Delta U$ 를 추론하는데 E와  $\Delta U$ 의 관계는  $U(t) = K_I \int (E(t) dt)$ 이고,

$\Delta E$ 와  $\Delta U$ 의 관계는  $U(t) = K_I E(t)$ 로서 퍼지 PI 제어이다.

제어규칙은 표 2와 같이 규정할 수 있다. 첫번째 규칙은 "E is PB and  $\Delta E$  is ZO"로서 구간 I의 출발점  $a_1$ 에 해당된다. 두번째 규칙은 점  $b_1$ 에, 이하 같은 방법으로 13번째 규칙은 설정치에 출력을 정착시키는 것이다. 이와같은 제어규칙을 적용하여 얻은 제어기의 응답이 그림 13의 A와 같다. 응답특성을 더 개선하기 위하여 몇개의 제어규칙을 추가하여 실행할 수 있는데, 예를들면, 점  $a_1$  위의 점에서 상승시간을 짧게하기 위하여 제어규칙을 설정할 수 있다.

if E is PB and  $\Delta E$  is PS, then  $\Delta U$  is PM

그리고 점  $b_1$ 의 아래에서 overshoot를 강압시키기 위하여 다음과 같은 제어규칙을 설정할 수 있다.

if E is PS and  $\Delta E$  is PB, then  $\Delta U$  is NM

이와같은 제어규칙은 표 3과 같다. 이러한 제어규칙을 적용한 결과 그림 13의 B와 같다.

이와같은 제어규칙은 몇가지 단점이 있다. 첫째는 운전자가 경험적 지식을 언어로 잘 구술할 수 없는 경우가 있다. 둘째로 만약 공정이 복잡할 경우에 제어규칙을 기술하기가 어렵다.

표 2 제어규칙 I

No.	E	$\Delta E$	$\Delta U$	기준점
1	PB	ZO	PB	$a_1$
2	ZO	PB	NB	$b_1$
3	NB	ZO	NB	$c_1$
4	ZO	NB	PB	$d_1$
5	PM	ZO	PM	$a_2$
6	ZO	PM	NM	$b_2$
7	NM	ZO	NM	$c_2$
8	ZO	NM	PM	$d_2$
9	PS	ZO	PS	$a_3$
10	ZO	PS	NS	$b_3$
11	NS	ZO	NS	$c_3$
12	ZO	NS	PS	$d_3$
13	ZO	ZO	ZO	설정치



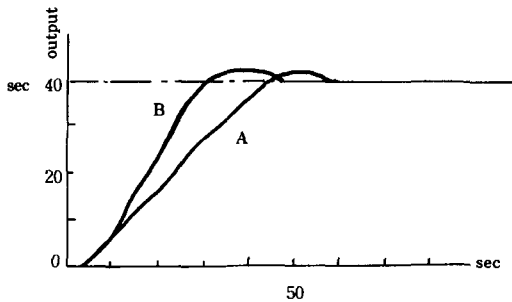


그림 13. 퍼지제어규칙을 적용한 응답곡선

표 3 제어규칙 II

No	E	ΔE	ΔU	기준점
14	PB	PS	PM	$a_1-b_1$
15	PS	PB	NM	$a_1-b_1$
16	NB	NS	NM	$c_1-d_1$
17	NS	NB	PM	$c_1-d_1$
18	PS	PS	ZO	$a_3-b_3$
19	NS	NS	ZO	$c_3-d_3$

다음에서는 공정을 모델화하여 퍼지제어를 구성하는 방법을 기술한다. 이 방법은 공정의 개략적인 특성에 대해서 기술한 것인데, 즉 입력이 증가함에 따라서 출력이 증가하고 공정은 시간지연을 갖게 되고 또한 공정제어시 이용가능한 변수만 사용하고 나머지 변수는 무시하는 방법이다. 이와같은 방법으로 설계한 퍼지제어기는 전문가만이 수행할 수 있는 공정제어에 대해서 우월한 제어성능을 발휘한다. 사실 퍼지제어기는 오차를 유발시키지 않기 때문에 전문가보다 더 훌륭히 제어를 수행할 수 있다. 그러나 만약 우리가 제어를 운전자에 의존하지 않고 어떤 운전자가 수행하는 제어성능보다 월등한 결과를 원한다면 다른 설계방법을 찾아야 한다.

만약 우리가 확실하고 애매모호한 모델을 갖는다면 더 유연한 방법으로 퍼지제어기를 설계할 수 있다. 퍼지 모델링이란 입력, 상태변수, 출력에 관한 퍼지관계를 이용하여 퍼지동작의 집합으로 공정의 특성을 표현하는 것이다. 퍼지제어 시스

템이 그림 14에 나타나 있다. 여기에서 퍼지제어기는 제어규칙의 집합으로 구성되어 있고 퍼지공정 모델은 공정동작의 집합으로 구성되어 있다.

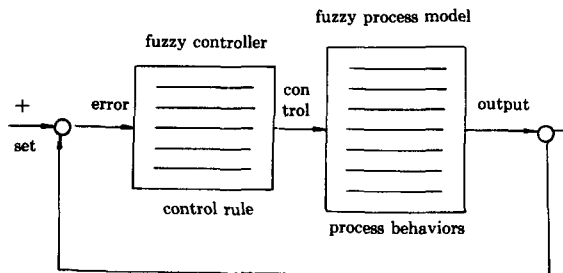


그림 14. 퍼지제어 시스템

퍼지모델을 토대로 퍼지제어기를 설계하는데 2가지 방법이 있다. 첫째는 제어목적을 고려하여 시스템의 불필요한 동작을 보상하기 위하여 퍼지 제어 규칙을 집합시키는 heuristic 방법이다. 즉, 하나의 제어규칙이 하나의 시스템을 동작시킨다. 제어규칙의 수는 일반적으로 시스템 동작수보다 적다. 왜냐하면 시스템 동작에는 보상이 불필요한 경우가 있기 때문이다. 둘째는 제어기를 함유하고 있는 시스템이 제어목적만족시도록 제어규칙의 매개변수와 구조를 결정하는 방법이다.

시스템의 동작이 다음과 같은 관계로 표현되는 경우에 한 공정을 추정하는 방법을 고려하여 보자.

$$\text{if } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_m^i \\ \text{then } y \times P_0^i + P_1^i x_1 + P_2^i x_2 + \dots + P_m^i x_m = 1, 2, \dots, n$$

여기에서 결과는 선형함수 관계임을 알 수 있다. 선형관계는 각 퍼지 부분집합에서 이루어진다.

입·출력 데이터를 이용하는 추정법은 구조추정, 매개변수 추정의 2개 부분으로 구성되어 있다. 구조추정은 출력에 영향을 미치는 입력변수를 찾는 것이다. 그리고 제어규칙의 전제에서 퍼지변수의 매개변수와 결론에서의 매개변수는 선형계수인데, 매개변수 추정은 매개변수를 조정

하여 출력오차가 최소가 되도록 하는 것이다.

## 5. 응용

퍼지제어의 성능을 시험하기 위한 플랜트 검사나 실제로 퍼지제어 이론을 플랜트에 응용한 많은 사례가 발표되고 있다. Mamdiani가 스텝엔진 구동에 퍼지제어 이론을 적용한 이후로 퍼지제어 응용이 급속도로 증가하고 있다. 퍼지제어 이론을 응용한 시멘트 킬른 공정제어, 수질정화 제어, 전동차구동 제어에 관하여 간략하게 서술한다.

### 5.1 시멘트 킬른제어

퍼지제어를 구성하는 주요 목적은 경험자가 사용하는 제어루틴을 자동화시키기 위한 것이다. 이것은 운전자의 경험을 토대로 설계되고, 처음에 작성된 제어규칙은 시행착오를 통하여 수정하고 이 수정된 제어규칙을 퍼지제어기에서 사용한다. 최초로 퍼지제어기를 산업공정에 적용하여 성공한 사례는 1979년 Danish 시멘트 플랜트 제조업자인 Smidth가 개발한 시멘트 킬른 제어 시스템이다. 만약 석탄입력 비율이 증가하면 킬른 구동부하와 챔버의 온도는 상승할 것이지만 반면에 산소 함유량과 석회량은 감소할 것이다. Ostergaard는 다음과 같은 제어규칙을 작성하였다.

if drive load gradient is (NS, ZO, PS) and drive is (NB, PB) and free lime content is

(LO, OK, HI)

the charge burning zone temperature is (NB, NM, NA, ZO, PS, PM, PB)

언어변수 OK 값은 표 4와 같다. 그림 15에 시멘트 킬른공정 다이어그램이 도시되어 있다.

표 4 시멘트 킬른의 제어규칙

Case	Condition	Action to be taken
1	BZ low	When BZ is drastically low: (a) reduce kiln speed (b) reduce fuel  When BZ is slightly low: (c) increase I.D. speed (d) increase fuel rate
	OX low	
	BE low	
2	BZ low	(a) reduce kiln speed
	OX low	(b) reduce fuel rate (c) reduce I.D. fan speed
	3	BZ low (a) reduce kiln speed OX low (b) reduce fuel rate BE high (c) reduce I.D. fan speed

### 5.2 수질정화 공정제어

혼합탱크에 인입된 원수에 PA(Polyaluminium Chlorine)와 염소를 투입하여 원수와 혼합시킨

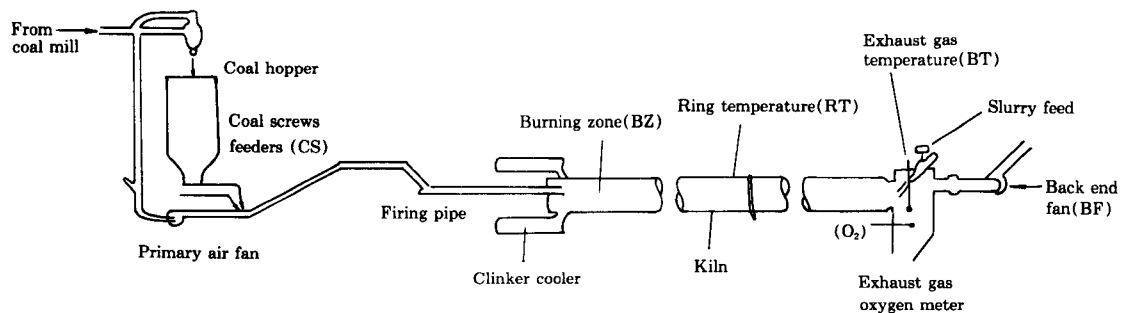


그림 15. 시멘트 킬른 공정 다이어그램

다. 혼합된 물은 침전탱크를 거쳐 혼탁한 물이 PAC와 응집하여 침전물이 바닥에 가라앉는다. 침전시킨후 처리된 물은 최종적으로 여과탱크에 흘러서 깨끗한 물을 생산하게 된다. 이러한 공정을 운전자가 제어하는데 중요한 요소는 처리된 물의 탁도가 기준치 이하가 되도록 PAC의 양을 결정하는 것이다. 이 공정은 물리적인 모델로 특성을 기술하기 어렵고 또한 강물의 탁도는 계절에 따라 크게 변화하기 때문에 강물의 탁도를 정확하게 정의하고 측정할 수 없다. 따라서 이와같은 공정에는 운전자의 경험이 아주 중요한 역할을 한다.

일본 Fuji Electric Co.사에서 설계한 퍼지제어기의 제어규칙은 다음과 같다.

if TU1=SA, ALK=SA, then DDOS=NM  
 if TU1=LA, ALK=SA, then DDOS=NM  
 if TUUP=LL, then DDOS=PB  
 if FLOC=SA, then DDOS=PM  
 if STAT=LA, then DDOS=PS

입력변수: TU1은 원수의 탁도, ALK: 알칼리도, TEMP: 수온, TUUP: 원수 탁도의 상승율, FLOC: 플럭의 크기, STAT: startup

출력변수: DDOS=PAC량 조정

침전탱크에서 PAC와 원수가 혼합되어 침전물(floc)을 생성한다. FLOC는 플럭(floc)의 크기를 나타내는데, 이것은 PAC가 원수에 어느정도

영향을 미쳤는지를 나타내는 척도를 표시한다. 그러나 현재로서는 플럭의 크기를 물리적으로 측정할 수 없기 때문에 운전자의 눈으로 크기를 판단하여 측정된 크기를 퍼지제어기에 크다, 작다와 같은 개략적인 값을 입력시킨다. 변수 STAT는 공정의 출발에서 경과된 시간이다. 이러한 변수를 제어규칙으로 확립하여 퍼지제어 규칙을 구성하는 것은 매우 중요하다. 수질정화 공정의 다이어그램이 그림 16에 나타나 있다.

### 5.3 전동차 구동시스템

일본 히다찌사는 퍼지 ATO(Automatic Train Operating system)를 개발하였는데 CSC(Constant Speed Control)와 TASC(Train Automatic Stop Control)의 동작으로 구성되어 있다. CSC에서 운전자는 안전을 위해서 다음과 같은 제어규칙을 적용하였다.

“만약 전동차가 제한속도를 초과하면 최대 브레이크를 선택하고 TASC를 적용한다”

“전동차가 TASC에서 운행될 때 지정된 홈에 정차한다면 제어 notch는 변화시키지 않는다” 전동차의 동작 성능은 안정성, 안락감, 에너지 소모, 구동시간 및 홈에서 정지위치와 같은 여러 가지면에서 평가한다.

퍼지제어는 crisp 제어 방정식 대신에 퍼지제어 규칙의 집합을 이용하여 multi-criterion 제어를 실현하는데 아주 적합하다. 퍼지 ATO는 경험이

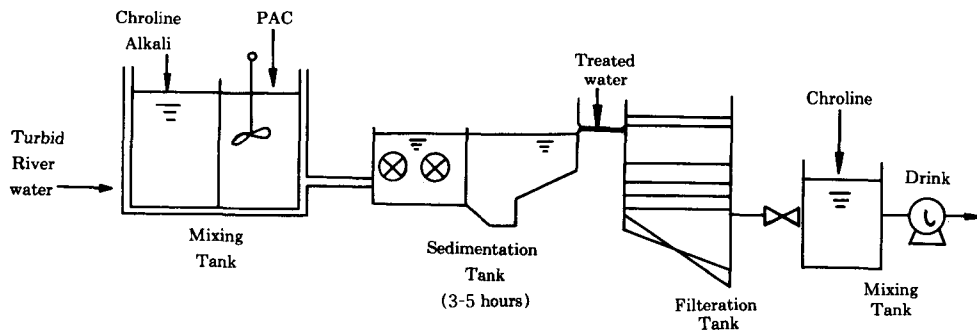


그림 16. 수질정화 공정의 다이어그램

풍부한 운전자가 제어를 실행하는 것과 같이 예측제어 방식을 사용하여 제어를 실행한다. 퍼지제어규칙은 다음과 같다.

if(u is n  $\rightarrow$  x is A and y is B) then u is n

제어 u는 crisp 값 n을 취하는 반면에 x, y는 퍼지값 A, B를 취한다. 예를들면, 안정도는 위험, 안정을 안락감은 매우 안락함, 다소 불편함 등과 같이 취한다. 제어규칙에서 전제는 전동차의 동작을 평가하는 내용이고, 이 내용을 작성하는 기준은 제어 u를 취하는 조건하에서 예측되는 전동차의 미래 상태를 기술한다. 만약 전제조건이 만족된다면 제어동작을 취하여 결과를 얻는다. 제어기는 모든 제어규칙 중에서 최대로 평가된 제어규칙에 제어 u를 출력시킨다. 이러한 내용을 토대로 시뮬레이션 한 결과 퍼지 ATO가 일반 PID ATO보다 승차감, 정지 정밀도, 에너지 소모, 주행시간면에서 아주 우월하였다.

## 6. 결 론

많은 분야에 응용이 되고 있는 퍼지제어기는 전문가 영역에서 설계하거나 또는 전문가와 긴밀한 협조관계로 설계된다. 퍼지제어기를 응용하는 경우에 지식습득은 퍼지제어 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 그러나 전문가의 의사결정을 조직적으로 구성하기가 어렵기 때문에 퍼지제어기의 토대가 되는 전문가의 지식을 이용 가능한 지식기반으로 변화하는 과정은 매우 중요하다. 비록 퍼지논리가 언어지식을 기술하는데 효과적이기는 하나 지식습득을 위하여 더 효율적이고 체계적인 방법이 절실히 필요하다.

공정의 퍼지모델을 토대로한 퍼지제어기는 고정밀도, 고신뢰성이 요구되는 곳에 필요 하지 만 공정의 퍼지모델링은 산업공정제어에서 공정

의 언어구조를 모델링하고 동작 데이터를 습득하는데 어려움이 있다.

기존의 제어이론은 수학적으로 시스템 분석을 하는데 효과적인 도구로 사용하였고, 또한 정확한 시스템 모델이 이용 가능할 때 설계되었다. 퍼지제어기는 숙련된 운전자 대응의 수단으로서 많은 분야에 응용하고 있다. 앞으로 이러한 기술들을 상호연관시켜 시스템을 설계하기 위해서는 많은 발전이 이루어져야 한다. 이러한 필요성에 부응하기 위하여 상태, 제어성, 안정성의 기본적인 개념을 토대로 퍼지다이나믹 시스템 개발이 이루어져야 한다. 이 분야에서 퍼지논리와 신경 회로망 이론의 기술을 조합하면 환경변화에 적응성이 높고, 학습하는데 인간의 능력에 필적할 만한 견고한 시스템을 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. M. Sugeno, "An Introductory Survey of Fuzzy Control," Infor. Sci., Vol.36, pp.59~83, 1985.
2. L. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," IEEE, Vol. SMC-3, No.1, pp.28~44, 1973.
3. H.J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and It's Applications," Boston: Kluwer Academic Publishers, 1985.
4. C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-part I, II," IEEE, Vol. SMC-20, No.2, 1990.
5. 菅野道夫, "Fuzzy Control System," 日刊工業新聞社, 1988.
6. 村上周太, "ファジィ制御," Computrol, No.22, pp. 51~58, 1989.