

# 원자력발전소 원자로 제어봉 제어계통에 대한 자기조정 퍼지제어기 설계

## Design of SOFLIC for reactor rod control system in nuclear power plant

(Abstract)

This paper presents a novel SOFLIC(self organizing fuzzy logic intelligent controller) for reactor rod control system in nuclear power plant. The output of fuzzy controller is generated by using two signal : the error between reference and average temperature, and the error between reference and neutron flux-converted temperatures. Flexibility of the controller is enhanced by using self-organizing feature and the controller respond to variation of system parameter with more precision. performances of the SOFLIC and PID are simulated with the model developed for a nuclear power plant. The SOFLIC is superior to PID : SOFLIC provides more rapid load following capability, more robustness for variation in process dynamics and minimization of engineer's mistakes in controller design.

### 1. 서론

1965년 미국 캘리포니아 대학의 Zadeh 교수에 의해 제창된 퍼지이론은 런던대학 Mamdani 교수에 의해 퍼지논리제어기로 발전되어 왔으며, 최근 산업분야에 퍼지이론의 적용이 널리 확산되었고 부분적으로 상용제품도 생산되고 있다.<sup>[1]~[5]</sup> 퍼지제어기는 기존의 제어기 설계에서 대상 시스템의 모델이 잘 알려지지 않았거나 비선형성에 의한 모델링의 어려움을 극복할 수 있으나 시행착오법에 의한 매개변수들의 조정이나 이론적으로 안정성을 판별하기가 어려운 문제점을 갖고 있다. 그러나, 이러한 문제점에도 불구하고 퍼지이론이 널리 적용될 수 있는 것은 애매하고 불분명한 여러가지 사실을 논리화 시킬 수 있다는 것과 그 논리가 사람이 생각하는 방식과 유사하여 언어적인 표현을 처리할 수 있다는 점이다. 또한, 퍼지제어기는 기존의 제어기와 다르게 대상플랜트에 대한 수학적 모델이 필요하지 않고 전문가의 지식과 경험을 제어규칙으로 작성하여 손쉽게 적용할 수 있다.<sup>[6]</sup>

최근 기존제어방식이 갖는 한계성을 극복하기 위해 발전플랜트에도 퍼지이론의 도입이 활발하게 진행되고 있다. 발전소에 대한 퍼지이론의 적용사례는 이론적인 연구가 주로 이루어지고 있으며, 실용화된 사례는 일본의 후겐원자력의 드럼수위 퍼지제어기로서 현재 성공적으로 운전되고 있다. 원자력 발전소에 대한 퍼지제어기 적용연구가 활발하게 진행되고 있으며, 초기에는 국외에서 많은 연구가 이루어졌으나 최근에는 국내에서 더 많은 연구가 이루어지고 있다. 원자력 발전소의 적용사례를 보면 증기발생기의 수위제어에 대한 연구가 주종을 이루고 원자로 제어봉에 대한 적용사례는 거의 없다. 원자로 제어봉 제어시스템에 대한 퍼지적용 연구는 Bernard가 처음 연구를 하였으며, 이 경우 단순한 퍼지제어기를 연구로에 시험 적용하였다.<sup>[4],[5],[7]</sup> 본 연구에서는 국내

의 발전소를 대상으로 원자로 제어봉 제어시스템에 자기조정 퍼지제어기를 도입하여 설계하였고 이의 제어성능을 확인하기 위해 기존의 PID제어기, 퍼지제어기 및 자기조정 퍼지제어기를 시뮬레이션하였다.

## 2. 계통구성

### 2-1. 원자로 계통

원자력 발전소는 원자로 계통에서 핵분열에 의해 생성된 열을 증기발생기로 보내고 증기발생기에서 생산되는 2차 증기를 이용하여 터빈을 구동시켜 전력을 생산한다. 원자로 계통은 핵연료봉의 핵분열과 생성된 중성자(neutron)를 제어하기 위한 제어봉(control rod)과 생성된 열을 증기발생기로 전달시키기 위한 원자로 냉각재계통(RCS : reactor coolant system)으로 구성된다. 노심으로부터 유입된 냉각수는 핵연료봉에서 핵분열에 의해 생성된 열을 냉각시키는 냉각재와 고속중성자(fast neutron)를 저속중성자(열중성자)로 감속시키는 감속재의 역할을 하며, 화학 및 체적 제어계통(CVCS : chemical & volume control system)으로부터 유입된 독물질로 중성자속 분포(neutron flux distribution)를 제어한다.

### 2-2. 제어봉 제어계통

본 논문에서 사용된 제어 모델은 울진원전의 rod control system(temperature control by rod)을 대상으로 하였으며, TBN 부하(2nd stage pressure)에 의한 부하 추종 방식(load follow\_up)으로 전 출력 영역(0~100%)에서 완전 자동으로 운전이 가능하도록 설계되었다.

시뮬레이션에서 사용된 모델프로그램은 원자로 노심모델과 계통 열수력모델로 구성되며, 원자로 노심, hot leg, cold leg, 증기발생기로 연결된 1차 계통 프로세스와 원자로 제어봉 제어계통, 터빈 요구출력에 의한 증기발생기의 열전달 등을 모의하였다. 또한 1차 계통의 압력은 항상 일정하게 제어된다고 가정하였으며 원자로노심 및 제어봉 제어계통을 제외한 계통은 기능적인 모의를 하였다. RCS 계통은 TBN 2nd stage load에 의한  $T_{ref}$ 와 3개 set로된 S/G hot leg/cold leg으로부터의 최대  $T_{avg}$  및 neutron flux loop로 이루어지는 프로세스 제어계통과 제어봉 제어장치인 CRDM(control rod drive mechanism)으로 구성된다.

각 제어 루프의 기능은 기본적으로  $T_{ref}$ 와  $T_{avg}$ 의 차의 값의 부호 및 크기에 따라 제어봉의 방향 및 속도가 결정 되지만, 응답 속도가 느린  $T_{avg}$ 의 특성을 보완 하기위해 neutron flux 값으로 보상한다.

제어 특성은 분당 5%의 ramp 신호, 10%의 step 신호이고, 허용 오차는  $T_{avg} \pm 0.8 \text{ } ^\circ\text{C}$  이다.

다음은 제어 알고리즘과 function diagram을 나타낸다.

$$\begin{aligned} ET &= TREF - TAVG + dQ \\ &= TREF - F(s) \cdot Tm + G(s) \cdot (Qtu - Qn) \end{aligned}$$

$$\text{여기서 } dQ = G(s) \cdot (Qtu - Qn)$$

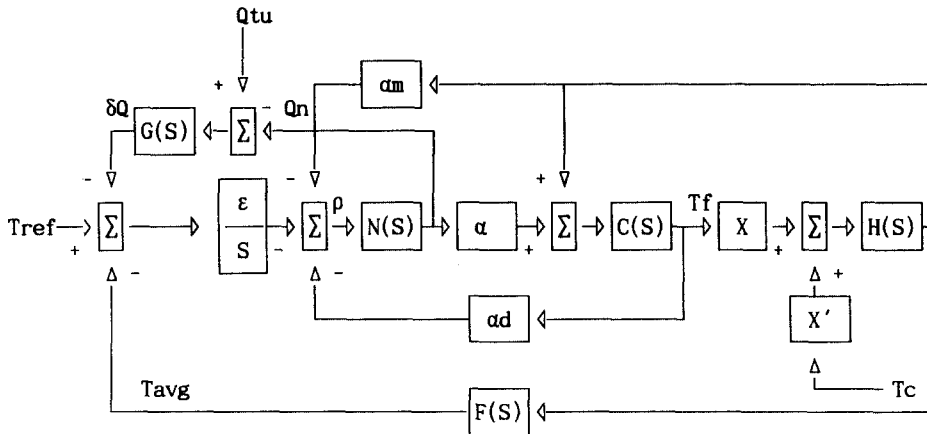
$Qtu$  : 터빈출력

$Qn$  : 중성자속

$$TAVG = Tm \cdot F(s)$$

$Tm$  : 측정온도

$ET$  : 온도오차



- |                            |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|
| $Q_{tu}$ : Turbine Load    | $T_c$ : Cold Leg Temperature       |
| $Q_n$ : Neutron Power      | $\alpha_m$ : Moderator Temperature |
| $\rho$ : Total Reactivity  | Feed Back Coefficient              |
| $T_f$ : Fuel Temperature   | $\alpha_d$ : Moderator Temperature |
| $F(S)$ : Transfer function | Doppler Feed Back                  |
|                            | Coefficient                        |

그림 1. Function Diagram

### 3. 퍼지제어기의 설계

#### 3-1 제어봉 퍼지제어기 설계

퍼지제어기는 크게 fuzzifier, inference engine, defuzzifier로 나누어지며, fuzzifier에서는 수치적 데이터를 인간의 애매모호한 언어적 표현으로 바꾸는데 이용된다. 일반적인 퍼지제어기에서는 E(목표치와 출력과의 오차)와 dE(오차의 변화율)에 대한 소속함수로 퍼지화하는데 비해, 본 연구에서는 좀더 빠르고 효율적인 제어를 위하여 그림 2와 같이 E대신에 Error TrTa, dE대신에 Error TrTf를 제안하여 사용하였다.

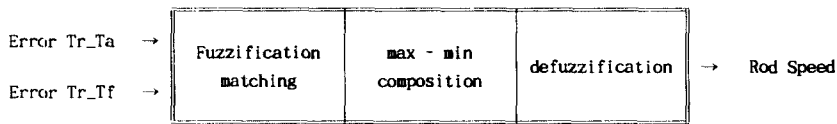


그림 2. 퍼지제어기의 구성

추론부에서는 전문가 및 현장 기술자들의 경험이나, 지식들을 언어적 규칙으로 나타내며 이것은 다음과 같다.

- $$R_1 : \text{ If } E\_TrTa \text{ is } NH \text{ and } E\_TrTf \text{ is } EL \text{ then } RD\_SPD \text{ is } EL$$
- $$\vdots$$
- $$R_k : \text{ If } E\_TrTa \text{ is } E_i \text{ and } E\_TrTf \text{ is } dE_j \text{ then } RD\_SPD \text{ is } dU_k$$
- $$\vdots$$
- $$R_{\theta l} : \text{ If } E\_TrTa \text{ is } PH \text{ and } E\_TrTf \text{ is } EH \text{ then } RD\_SPD \text{ is } EH$$

여기서  $E_i, dE_j, dU_k$ 들은 퍼지 소속함수를 의미하고, If절의 조건절을 전건부(premise)라 하고, 결론부를 후건부(consequence)라 한다. 이러한 추론 규칙들을 표로 나타내면 다음과 같다.

RD_SPD		E_TrTa								
		NH	NB	NM	N	Z	P	PM	PB	PH
E_TrTf	EL	EL	EL	EL	EL	EL	VVL	LOW	MED	MED
	VVL	EL	EL	EL	EL	VVL	VL	HIGH	HIGH	MED
	VL	EL	EL	EL	VVL	VL	MED	VH	VH	VH
	LOW	EL	EL	VVL	VL	MED	MED	VH	VVH	VVH
	MED	EL	EL	VVL	LOW	MED	HIGH	VVH	VVH	EH
	HIGH	VL	VVL	VL	MED	MED	VH	VVH	EH	EH
	VH	LOW	VL	VL	MED	VH	VVH	EH	EH	EH
	VVH	MED	LOW	LOW	VH	VVH	EH	EH	EH	EH
EH	MED	MED	HIGH	VVH	EH	EH	EH	EH	EH	

표 1. RD\_SPD(rod speed)를 계산하기 위한 규칙

defuzzifier에서는 fuzzifier에서 행해진 수치적 데이터의 언어적 표현화를 다시 알맞은 수치적 데이터로 바꾸는 역할을 수행하는 데에 사용되며,  $dU$ 는 퍼지 제어기가 내는 제어 입력의 변화량을 의미한다. 추론 메커니즘은 이와 같은 형태로 최대최소법과 무게 중심법을 이용하여 퍼지화하고 비퍼지화 하였다. 이와같이 구성된 퍼지 제어기의 동작을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_1 = \mu_{E_1}(e_1) \wedge \mu_{dE_1}(de_1) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\alpha_2 = \mu_{E_2}(e_1) \wedge \mu_{dE_2}(de_1) \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\mu_{dU} = [ \alpha_1 \wedge \mu_{dU_1} ] \vee [ \alpha_2 \wedge \mu_{dU_2} ] \dots\dots\dots (3.3)$$

$$dU = \frac{\sum(x \mu_{dU}(x))}{\sum \mu_{dU}(x)} \dots\dots\dots (3.4)$$

위에서 식 (3.1)과 (3.2)는 오차와 오차의 변화율에 해당하는 E\_TrTa와 E\_TrTf에 대한 퍼지화(fuzzification) 단계이고, 식 (3.3)은 퍼지 추론부에서 min-max연산을 통하여 추론하는 과정을 나타낸 것이며, 식 (3.4)는 무게 중심법을 이용하여 비퍼지화(defuzzification)하는 단계이다.

3-2. 퍼지 소속함수 설계

다음은 RD\_SPD의 출력 소속함수이며, E\_TrTa와 E\_TrTf는 universe of discourse가 -50~50이라는 것만 다르고 형태는 제어계에서 가장 널리 사용하는 삼각형을 이용하였다.

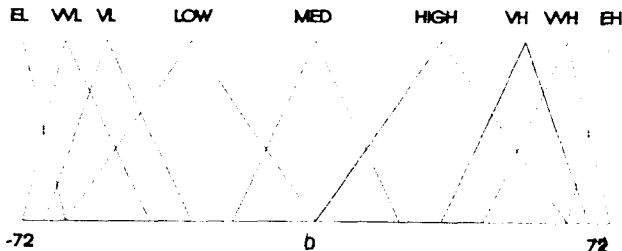


그림 3. E\_TrTa 와 E\_TrTf, 그리고 RD\_SPD의 출력 소속 함수

4. SOFLIC(self organizing fuzzy logic intelligent controller) 설계

4-1 SOFLIC의 구조

단순 퍼지제어기는 복잡하고 거의 정의되지 않은 동적계통을 취급하는데 있어서 강인하고

정확하나, 이용된 규칙생성기법에 의해 사용이 제한되고, 또한 제어처리에 있어서의 변화 또는 환경과의 상호작용을 반영하는 온라인 적합성을 제공하지 않는다. 따라서, 계통응답은 제어전략을 바꾸어 주는 적당한 피드백 적용 신호를 생성하기 위해서 평가될 수 있는데 이에 대하여 지능적 학습 또는 자기 조정 퍼지 논리제어기는 성능 측정/지표(performance measure/index, PM) 또는 목적 함수를 필요로 하며, 자기 조정 퍼지 논리 제어기는 순수하게 경험적 수단에 의해서 자동적으로 구조화하고 개발하고 개선시킬 수 있는 능력을 가진 제어기이다. model reference adaptive control(MRAC)를 제공하는데에는 (i) direct control (ii) indirect control 의 두 가지 접근 방법이 있는데, 본 연구에서는 보다 효율적인 간접제어 방식으로 구성하였다.

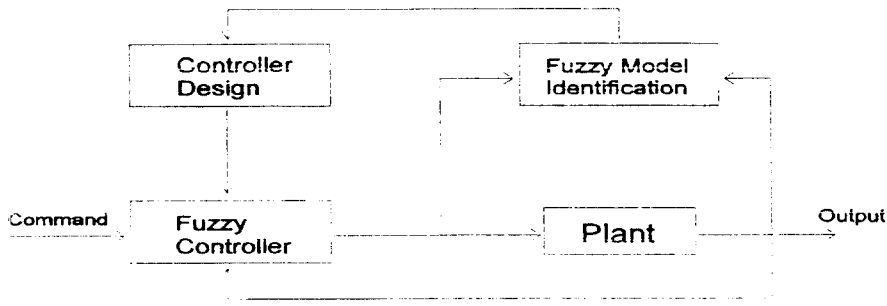


그림 4. Self-organizing fuzzy logic controller

#### 4-2. 동적 모델 구성

입력과 출력들 사이의 등가적인 시간지연 또는 시간변동을 포함하는 것은 현재의 입력/출력들(U/Y)로부터 출력 미분치(  $\dot{Y}$ )를 예측 가능한 퍼지모델을 구조화함으로써 얻을 수 있다.

$$Y \times U \xrightarrow{R} \dot{Y}$$

퍼지관계 R은 implications 또는 규칙들의 집합이다.

$$R_i : \text{IF } Y_i(t) \text{ AND } U_i(t) \text{ THEN } \dot{Y}_i(t), \quad i=1, 2, \dots, N$$

여기서  $U_i(t)$ 와  $Y_i(t)$ 는 현재의 입력과 출력 퍼지 집합들이고,  $\dot{Y}_i(t)$ 는 현재의 출력 미분치이다. 만약  $U_i(t)$ 와  $Y_i(t)$ , 그리고  $\dot{Y}_i(t)$ 가 소속함수  $\mu_{u_i}(t)$ 와  $\mu_{y_i}(t)$ , 그리고  $\mu_{\dot{y}_i}(t)$ 를 가진 퍼지 집합들에 의해서 기술된다면 이 특별한 규칙  $R_i$  대한 관계는, intersection 에 대해서 min 연산자의 사용을 가정한다면 다음과 같다.

$$\mu_{R_i}(Y, U, \dot{Y}) = \min \{ \mu_{y_i}(t)(Y), \mu_{u_i}(t)(U), \mu_{\dot{y}_i}(t)(\dot{Y}) \}$$

이러한 규칙 구조는 현재의 출력 미분이 현재의 입력치에 의해서 기인된다는 것을 가정한다. 지연 T를 고려하여 더욱 적당한 규칙 구조는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_i : \text{IF } U_i(t) \text{ AND } Y_i(t) \text{ THEN } \dot{Y}_i(t+T) \quad \Bigg|_{i=1, 2, \dots, N}$$

$$\mu_{R_i}(Y, U, \dot{Y}) = \min \{ \mu_{y_i}(t)(Y), \mu_{u_i}(t)(U), \mu_{\dot{y}_i}(t+T)(\dot{Y}) \}$$

이러한 지연 패러미터 T는 Mamdani self-organizing controller에서의 신뢰 분배 문제를 해결하기 위해서 사용된 보상 패러미터의 지연과 같은 것이다. 또한 새 관계 R'이 현재의 관계 R으로부터 계산된다.

$$\mu_{R'}(Y, U, \dot{Y}) = \max \{ (D \times \mu_R(Y, U, \dot{Y})), \max \{ \min \{ \mu_{Y1}(t)(Y), \mu_{U1}(t)(U), \mu_{\dot{Y}1}(t+T)(\dot{Y}) \} \} \}$$

갱신 절차는 다음을 만족하는 R의 영역이 적용되어야 한다.

$$\min \{ \mu_{Y1}(t)(Y), \mu_{U1}(t)(U) \} > \theta$$

계통 출력 미분치에 대한 예측은 composition에 의해서 다음과 같이 알 수 있다.

$$\dot{Y}'(t+T) = R \circ (U'(t) \times Y'(t))$$

이 결과 출력 집합은 예측된 출력을 결정하기 위해서, 적분되어야 할  $\dot{Y}'(t+T)$ 에 대한 출력 예상을 따르기 위해서 무게중심법에 의해서 비퍼지화 된다.

#### 4-3. 계통 설계

상기의 동적모델을 제외하고, 나머지 사항들은 앞에서 설계한 FLC를 이용하였으며, (e, de, d<sup>2</sup>e) 이러한 에러신호 대신에 조금 더 효율적으로 제어하기 위하여 FLC에서와 마찬가지로 neutron flux 값으로 보상하여 구성하였다. 또한 고정된 정수 범위를 (±6)으로 정량화하였다. 다음은 언어적 정량화를 정의한 것이다.

	E, ΔE, Δ <sup>2</sup> E												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1	0.7	0.3
PS	0	0	0	0	0	0	0.3	0.7	1	0.7	0.3	0	0
PZ	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.7	0.3	0	0	0
AZ	0	0	0	0	0.3	0.7	1	0.7	0.3	0	0	0	0
NZ	0	0	0	0.3	0.7	1	0.5	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.3	0.7	1	0.7	0.3	0	0	0	0	0	0
NM	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1	0.7	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

표 2. SOFLIC에 대한 언어적 정량화

### 5. 시뮬레이션 및 결과 검토

본 연구에서는 제안한 퍼지추론제어기와 자기조정퍼지제어기의 성능을 검증하기 위하여, 부하 요구치(demand power : 퍼센트를 온도로 환산하여 출력, 예 100% = 304.6℃)를 계단 감소, 선형적 감소, 안정상태, 선형적 증가, 계단입력으로 변화시켰다. 이러한 부하 요구치에 대하여 냉각재 평균온도를 출력으로 하여 각각 제어기에 따라 시뮬레이션하여 검증하였다.

#### 5-1. PID 제어기와 FLC

다음 시뮬레이션에서처럼 초기화(100%, 304.6℃)를 수행한후, 변화하는 부하요구치에 대하여 PID제어기는 상당히 느린 응답특성을 나타내고 있으며, 반면에 퍼지 추론 제어기는 빠른 응답 특성으로 PID제어기 보다 훨씬 나은 부하추종 능력을 보여주고 있다.

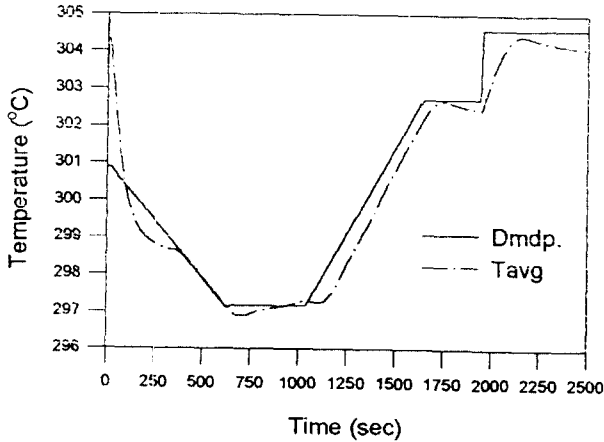


그림5. PID 제어기의 Tavg 출력

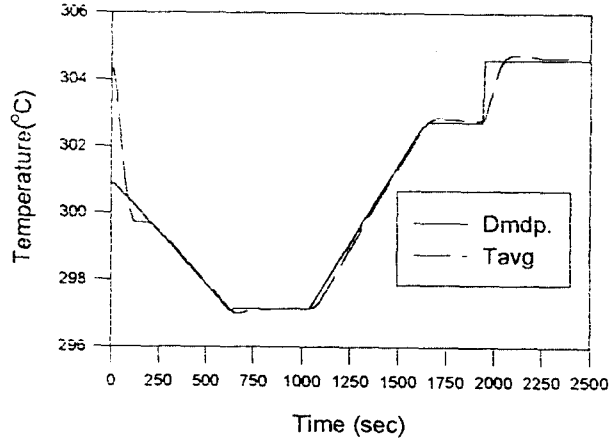


그림6. FLC의 Tavg 출력

### 5-2. SOFLIC

그림에서 보는바와 같이 자기 조절이 잘 수행되어 FLC와 거의 유사한 특성을 나타내고 있으며, 계단입력등의 빠른 부하 요구치에 대해서는 좀 더 빠른 제어 성능을 보이고 있다.

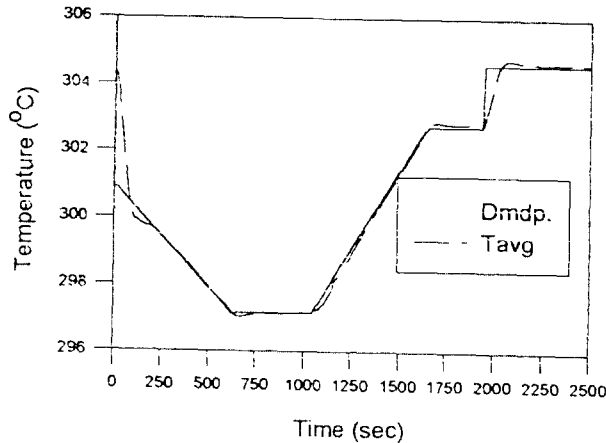


그림7. SOFLIC의 Tavg

## 6. 결론

원자력 발전소와 같이 제어하고자 하는 계통이 매우 복잡하고 또한 시스템 특성이 급격하게 변동할 때는 계통을 정확하게 분석하여 제어한다는 것은 대단히 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 SOFLIC를 제안하였다. 제어특성을 확인하기 위해 기존의 PID 제어기 및 FLC를 시뮬레이션으로 비교한 결과 동일한 입력에 대해서 PID 보다는 FLC 특성이 우수하였다. 또한, FLC를 SOFLIC와 비교하면 SOFLIC가 더욱 우수함을 알 수 있었다.

## 7. 참고 문헌

1. Michio Sugeno, "Industrial application of fuzzy control", North Holland-Amsterdam, 1985
2. E.H. Mamdani and S. Assilian, "An Experimental in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Lo

- gic Controller", Int. J. of Man-Machine Studies, Vol.7, pp 3 ~ 13, 1975
3. P. Martin Larsen, "Industrial applications of Fuzzy Logic Control", Int. J. of Man-Machine Studies, Vol.12, pp 3 ~ 10, 1980
  4. 문채주의 1인, "화력발전소의 퍼지제어시스템 적용사례 소개", 전력기술 제13호, PP 57 ~ 63, 한국전력기술주식회사, 6.1993
  5. 문채주의 2인 "원자력발전소의 퍼지제어시스템 적용사례 소개", 전력기술 제14호, PP 76 ~ 85, 한국전력기술주식회사, 9.1993
  6. Sukhbir Singh, "Stability Analysis of Descrete Fuzzy Control System", IEEE, pp 527 ~ 534, 1992
  7. John A. Bernard, "Use of Rule-based System for Process Control", IEEE Control System Magazine, pp 3 ~ 13, Oct.1988
  8. C. J. Harris, "Intelligent control Aspects of fuzzy Logic and Neural nets", World Scientific, U.S.A., pp.170~214, 1993
  9. B. C. Kuo, "Automatic Control System", Tower press, Seoul, Korea, pp.259~315, 1978
  10. M. Vidyasagar, "Control Systems syntesis", The MIT Press, Massachusctts, U.S.A., pp.9 9~155, 1985
  11. Man Gyun Na, "Application of Adaptive Control theory to Nuclear Reactor Power Control", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol.27, No.3, June 1995
  12. Lee and Park, "A Study on the Nonlinear Characteristics of the Fuzzy type Stabilizing Controller", Trans. KIEE, Vol.42, No.11, 1993
  13. Zadeh, Lotfi A., "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", IEEE Tr. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-3, No.1, pp28~44, 1973
  14. Mamdani, E. H., "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", IEEE Proc. Control & Science, Vol.121, No.12, pp1585~1588, 1974
  15. Procyk, T.J., Mamdani, E.H., "A linguistic self organizing process controller", Automatica, Vol.15, pp15~30, 1979

최 홍 관\* 전남대학교 전기공학과  
문 채 주 한국전력기술주식회사  
남 해 곤 전남대학교 전기공학과