

최적 조정 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 레벨 제어 응용에 관한 연구

양 태 진^{*}, 조 규 상, 김 규 남, 김 경 기
^{*} 한양 대학교 전자 공학과

A Study on the Level Control Application of the Fuzzy Controller using the Optimal Regulating Algorithm

Tae-Jin Yang, Gyu-Sang Cho, Kyu-Nam Kim, Kyong-Gi Kim
^{*} Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ

ABSTRACT

In this paper, the Optimal Regulating Algorithm are developed by adjusting the scaling - factor and estimating the linguistic control rule according to the results which are attaining from the first defined parameters, and the Fuzzy Level Controller is realized using the algorithm. The proposed controller apply to the fuzzified level control process, the Cement Grinding Plant. The results shows that the control Performance is greatly improved.

1. 서 론

퍼지 제어기는 자연어를 프로그래밍하는 것이 방법이며 인간의 지식이나 경험에 근거하는 다수의 언어적 제어규칙 (Linguistic Control Rule:이하 LCR)을 이용하여 전문가의 제어방식을 언어규칙으로 표현하여 설계한다. 퍼지제어에 의한 제어결과는 전문가의 제어방식에 의해 표현된 LCR에 의존하므로 전문가 지식을 언어규칙으로 설계하는 일도 중요하지만 완벽하게 규칙화하는 것은 더욱 어렵다. 그러므로, LCR을 구성하여 시험하고 제어결과 혹은 제어도중 결과에 의하여 지식을 조정하여 규칙을 재구성

하고 제어성능을 평가하여 최적의 제어규칙 조정 알고리즘을 작성하여 제어한다. 퍼지 제어기의 구성에 있어서 가장 중요한 문제인 적절한 LCR의 조정, 파라미터의 설계및 조정, 멤버쉽 함수의 수정문제를 해결하기 위하여 제어결과를 평가하여 LCR을 변경하거나 대상 플랜트의 파라미터와 Scaling-factor를 자동조정하는 새로운 알고리즘이 요구된다.

본 논문에서는 퍼지레벨 제어기에 의한 LCR의 수정및 Scaling factor 조정, 적절한 멤버쉽 함수선정을 통하여 제어기 성능을 조정하고 개선해 나가는 최적 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에 의해 구현한 퍼지레벨 제어기를 이용하여 제어가 비선형이고 측정이 애매한 대표적 레벨제어 시스템인, 시멘트 분쇄기 레벨제어 모델에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 제어기의 성능을 분석, 검토한다.

2. 최적조정 알고리즘

부하에 의한 제어량의 변동이 심하고 안정하지 않을 경우, 일의적(--善的)으로 설정한 파라미터를 이용하여 제어를 수행하면 최적의 제어결과를 얻기가 어렵다. 이런경우 제어결과를 평가한 Scaling factor의 조정이나 LCR 수정등을 통하여, 초기 설정치를 조정하여 제어

대상 플랜트에 적합하도록 파라미터를 수정하는 것이 최적조정 알고리즘이다. 여기서 제안 알고리즘의 흐름도는 그림 .1과 같다.

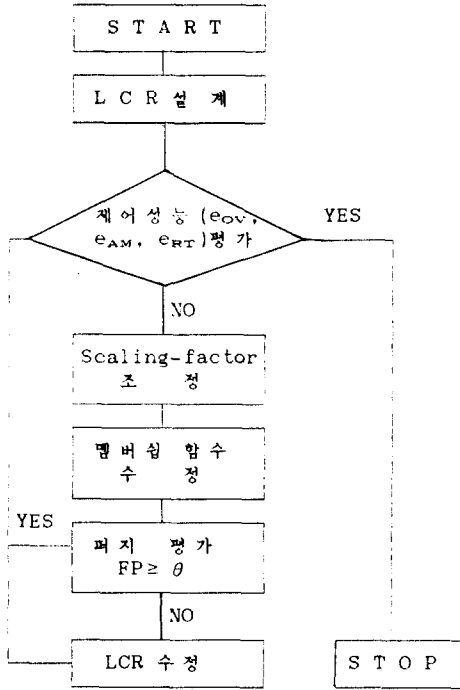


그림 .1 최적조정 알고리즘의 흐름도

본 절에서는 제어결과 평가방법 및 최적의 알고리즘 조정기법을 제안한다.

2.1 멤버십 함수의 수정

1) 제어 규칙의 멤버십 함수

제어규칙의 조정 멤버십 함수는 삼각형 퍼지 변수를 사용하고 구간을 $[-1, 1]$ 로 정규화한다.

2) Scaling factor 조정규칙의 멤버십 함수

Scaling factor에 대한 조정규칙(표 .1)에서 언어변수 멤버십 함수의 전건부는 \arctan 형, 후건부는 삼각형 형태를 갖는 퍼지변수를 사용하고 구간을 $[-1, 1]$ 로 정규화한다.

2.2 Scaling factor 조정기법

Scaling factor 조정은 반복 파라미터 조정 방법과 같이 제어가 종료되었을때, 그 결과를

평가하여 제어기 파라미터를 일의적으로 설정하고 조정하는 방법이다. 제어결과 평가로는 그림 .3과 같이 오버슈트(Overshoot:OV)량, 진폭 (Amplitude:AM), 목표도달 시간 (Reaching-Time:RT)을 기준하며 지연시간도 고려한다. $e_{OV} = OV - OV^*$ (OV, OV^* : 오버슈트 실제치와 목표치) $e_{AM} = RT - RT^*$ (RT, RT^* : 목표도달시간의 ") $e_{RT} = AM - AM^*$ (AM, AM^* : 진폭의 ")

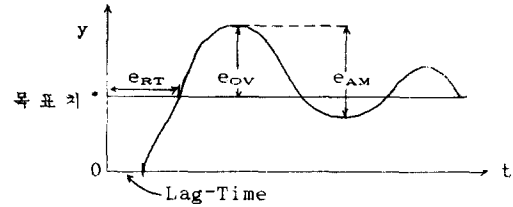


그림 .2 제어성능의 평가 기준도

이러한 제어성능을 평가하여 Scaling-factor를 조정하는 규칙은 표 .1과 같다.^{1,2,3)}

표 .1 Scaling factor 조정규칙

전 건 부		후 건 부		
		ΔGE	ΔGD	ΔGC
e_{OV}	PE	PB	NS	NB
	NE	NB	PS	PB
e_{AM}	PE	PB	NB	NB
	NE	NB	PB	PB
e_{RT}	PE	NB	PB	PB
	NE	PB	NB	NB

일의적으로 평가한 제어결과를 표 .1의 조정규칙에 적용하여 간략추론하면 파라미터 조정량 ΔGE , ΔGD , ΔGC 를 얻는다. 따라서 조정된 새로운 Scaling factor는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 GE^{NEW} &= GE^{OLD} + (1-FP) (\Delta GE + \Delta GE_L) \\
 GD^{NEW} &= GD^{OLD} + (1-FP) (\Delta GD + \Delta GD_L) \\
 GC^{NEW} &= CG^{OLD} + (1-FP) (\Delta GC + \Delta GC_L) \quad (1)
 \end{aligned}$$

(여기서 ΔGE_L , ΔGD_L , ΔGC_L 은 지연시간이 존재할경우의 각 Scaling factor 조정값이다.)

Scaling factor 조정은 가장좋은 결과가 얻어

질때 종료한다. 제어종료를 나타내는 퍼지평가 기준 FP(Fuzzy Performance)는 식 (2)와 같다.

$$FP = \text{Min}\{\text{Min}[\mu \text{PEOV}(e_{OV}), \mu \text{NEOV}(e_{OV})], \text{Min}\{\text{Min}[\mu \text{PEAM}(e_{AM}), \mu \text{NEAM}(e_{AM})], \text{Min}\{\text{Min}[\mu \text{PERT}(e_{RT}), \mu \text{NERT}(e_{RT})]\} \} \quad (2)$$

(여기서, μPE 와 μNE 는 각각 Positive Error와 Negative Error시 멤버십 함수값이다.)

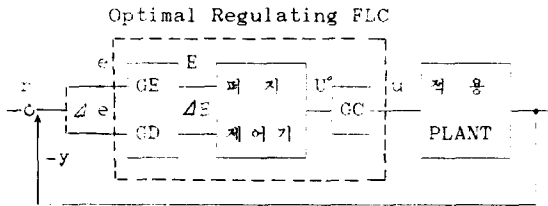
FP는 식 (3)의 조건을 만족하면 종료한다. (1.2)
 $FP \geq \theta, \theta \in [0,1] \quad (\theta : \text{제어 종료기준}) \quad (3)$

2.3 LCR의 조정

Scaling factor 조정결과만으로 원하는 제어 결과를 얻지 못할 경우 조정한 파라미터를 초기치로 하여 제어량이 목표응답에 일치하도록 초기화한 LCR을 조정하여 수정한다.

3. 퍼지레벨 제어기의 구현

퍼지 제어기 구성은 그림 .3과 같다.



(FLC: Fuzzy Logic Controller)

그림 .3 퍼지레벨 제어기의 구성

일반적인 퍼지 제어 알고리즘은 식 (4)와 같다.

$$R_1 : \text{IF } E \text{ is } A, \Delta E \text{ is } B, \text{ THEN } U \text{ is } C \quad (4)$$

여기서, R_1 : i번째의 제어규칙 ($i=1,2,\dots,N$)
 $E, \Delta E$:오차 및 오차 변화량
 A, B, C :입, 출력 퍼지변수

i번째 규칙의 퍼지관계 행렬 R_1 는 다음과 같다.

$$R_1 = E_1 \times \Delta E_1 \times U_1$$

N개의 전체 합성 제어규칙 R은 식 (5)와 같다.

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N = \bigcup_{i=1}^N R_i \quad (5)$$

지금 입력이 $E_1, \Delta E_1$ 이면, 출력 U_1° 는 다음 식으로 구한다. ($E=\{e\}, \Delta E=\{\Delta e\}, U=\{u\}$ 이다.)

$$U_1^\circ(u) = R_1 \cdot (e^\circ, \Delta e^\circ, u) = R_1 \cdot (e^\circ, \Delta e^\circ, u) \vee R_2 \cdot (e^\circ, \Delta e^\circ, u) \vee \dots \vee R_N \cdot (e^\circ, \Delta e^\circ, u) = \text{Max}\{R_1 \cdot (e^\circ, \Delta e^\circ, u)\} \quad (6)$$

$$R_1 \cdot (e^\circ, \Delta e^\circ, u) = E_1(e^\circ) \wedge \Delta E_1(\Delta e^\circ) \wedge U_1(u) \quad (7)$$

전건부 적합도 ω_1 는 (8)와 같다.

$$\omega_1 = E_1(e^\circ) \wedge \Delta E_1(\Delta e^\circ) \quad (8)$$

식 (6),(7)을 바꾸어 쓰면 식 (9)과 같다.

$$U_1^\circ(u) = [\omega_1 \wedge U_1(u)] \vee [\omega_2 \wedge U_2(u)] \vee \dots \vee [\omega_N \wedge U_N(u)] = \sum_{i=1}^N [\omega_i \wedge U_i(u)] \quad (9)$$

식 (10)은 비 퍼지화한 플랜트 입력이다.

$$U^\circ = \frac{\sum U_i^\circ(u) \cdot U}{\sum U_i^\circ(u)} \quad (10)$$

(여기서, U는 각 제어규칙에서 멤버십 함수가 최대가 되는 퍼지변수의 값이다.)

그러므로, 퍼지레벨 제어기에 사용하는 조정원 오차 및 오차변환, 제어입력은 식 (11)와 같다.

$$\begin{aligned} e &= E \times GE \\ \Delta e &= \Delta E \times GD \\ u &= U^\circ \times GC \end{aligned} \quad (11)$$

4. 퍼지레벨 제어 플랜트의 응용

본 논문에서 적용한 시멘트 분쇄기 모델의 레벨 제어 방식은 음(音)을 이용하여 원료를 추정하여 제어하므로, 어떤 측정기나 제어기에 의한 정확한 제어는 거의 불가능 하기 때문에 운전공의 경험적인 지식이나 Know-How등에 전적으로 의존할 수밖에 없다. 개략적인 레벨 제어 시스템의 Loop는 그림 .4와 같다. 4.5.01

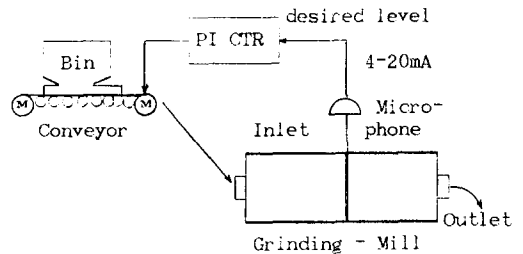


그림 .4 음(音)를 이용한 레벨 제어 시스템

적용 시스템의 동작 원리는 다음과 같다.

① 분쇄기 회전시 밀내 설치한 "실벨 (Cyllpeb) " 이라는 볼 (Ball)모양의 쇠덩어리가 마찰을 할때 원료가 분쇄되며, 이때 발생하는 음(音)의 변화를 이용하여 퍼지한 밀내 원료레벨을 추정한다. ② 마이크로-폰을 통하여 음의 변화를 감지하고 이 신호는 4~20mA의 전류로 변환되어 PI- Controller에 입력되고 설정치에 의하여 원료 공급용 모터의 회전속도를 제어한다. ③ 모터 회전속도를 제어함으로써 분쇄기내 유입하는 원료량을 제어하게 되어 결국, 원료의 레벨을 제어한다.

4.2 플랜트의 퍼지 모델

적용 플랜트의 퍼지 모델도는 그림 .5와 같다.

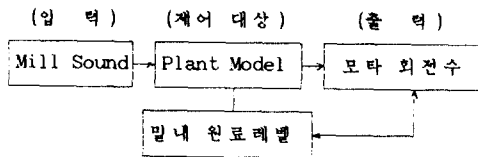


그림 .5 플랜트 퍼지모델 블록도

전문가적인 LCR의 설계 값은 표 .2와 같다.^{7,8,9)}

표 .2 LCR 설계값

	Δe						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.28	0.00
NM	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.27	0.00	0.27
NS	-1.0	-1.0	-0.67	-0.25	0.00	0.25	0.67
ZE	-1.0	-0.67	-0.23	0.00	0.23	0.67	1.00
PS	-0.67	-0.26	0.00	0.26	0.67	1.00	1.00
PM	-0.29	0.00	0.30	0.67	1.00	1.00	1.00
PB	0.00	0.32	0.67	1.00	1.00	1.00	1.00

4.3 프로세스 전달 함수

전달 함수의 Block-Diagram은 그림 (6)과 같다.

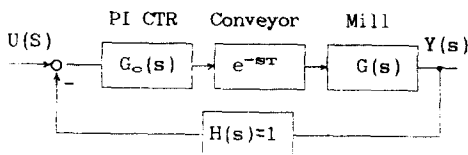


그림 .6 원료레벨 제어 시스템

여기서, 밀 프로세스의 전달함수 $G(s) = \frac{K}{\tau S + 1}$

PI Controller의 전달함수 $G_c(s) = K_P + \frac{k_I}{S}$

콘베어 지연시간 $e^{-s\tau}$, $H(s)=1$ 이므로 Closed Loop 제어 시스템의 전달함수는 식 (12)과 같다.

$$G(s) H(s) = G_c(s) H(s) G(s) e^{-s\tau} = \frac{(S K_P + k_I) \cdot k}{S (S + 1)} \cdot e^{-s\tau} \quad (\text{let, } \tau=1)$$

$$\therefore \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{C(s)}{1 + G(s) H(s)} = \frac{(S + 1) K \cdot e^{-s\tau}}{S^2 + S(K K_P + 2) + (k K_P + k k_I + 1)} \quad (12)$$

적용 플랜트는 2차 지연시간을 갖으며 k, K_P, k_I 를 선정하여 시뮬레이션 모델식으로한다.

5. 시뮬레이션 및 결과 분석

레벨제어 플랜트 모델식에 의하여 제어성능을 실험한뒤, 제안 알고리즘에 의하여 성능을 조정하여 제어기의 유효성을 검토한다.

5.1 시뮬레이션 모델

플랜트 모델식과 LCR값을 통하여 고찰한다.

$$\text{Plant-Model 1: } G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1.2 e^{-s}}{(S+0.3)(S+0.4)}$$

$$\text{Plant-Model 2: } \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{S + 0.51 e^{-1.2s}}{(S^2 + 0.35S + 0.5)}$$

퍼지 레벨제어 모델의 전달함수를 이용하여, 전달함수를 결정하는 파라미터를 일의적으로 선정하여 플랜트 모델식으로 하였다. 이 모델식은 프로그램하여 시뮬레이션한뒤, 그 제어결과를 평가하여 가장 최적의 제어성능으로 조정하는 기준이 된다.

5.2 결과 및 분석

[1] Plant- Model 1의 결과

- 1) FP=0.47 : 초기 Scaling-factor 값이 GE=0.6, GD=0.45, GC=0.9 일 경우.

1.5 Plant Model 1: y(t)

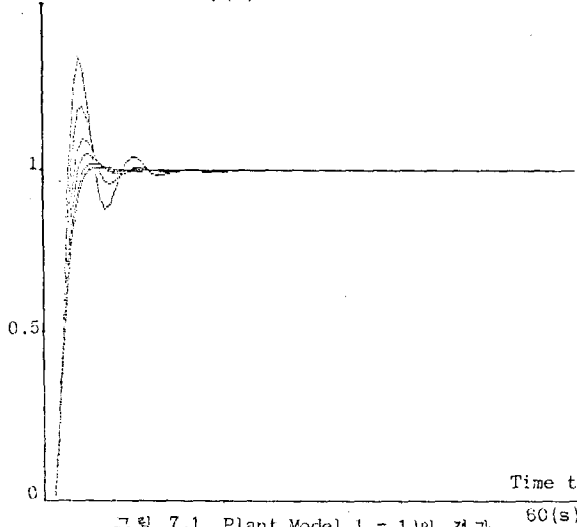


그림 7.1 Plant Model 1 - 1)의 결과

* Scaling factor 최적 조정율
 $\Delta GD = -0.11$, $\Delta GC = -1.1$

표.3 LCR의 조정 값

	Δe						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.33	0.00
NM	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.33	0.00	0.33
NS	-1.0	-1.0	-0.67	-0.33	0.00	0.33	0.67
e ZE	-1.0	-0.67	-0.34	0.00	0.34	0.67	1.00
PS	-0.67	-0.33	0.00	0.33	0.67	1.00	1.00
PM	-0.33	0.00	0.34	0.67	1.00	1.00	1.00
PB	0.00	0.34	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00

2) FP=0.46 : 초기 Scaling-factor 값이
 $GE=0.3$, $GD=0.55$, $GC=0.45$ 일 경우.

1.5 Plant Model 1: y(t)

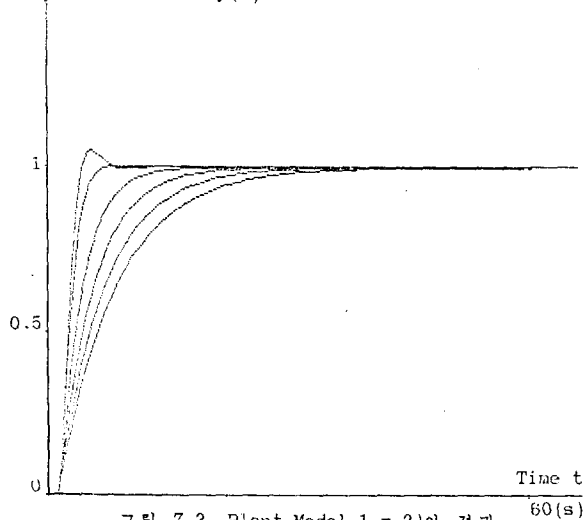


그림 7.2 Plant Model 1 - 2)의 결과

* Scaling factor 최적 조정율
 $\Delta GD = -0.15$, $\Delta GC = 0.5$

표.4 LCR의 조정 값

	Δe						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.33	0.00
NM	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.33	0.00	0.33
NS	-1.0	-1.0	-0.67	-0.33	0.00	0.33	0.67
e ZE	-1.0	-0.67	-0.34	0.00	0.33	0.67	1.00
PS	-0.67	-0.33	0.00	0.34	0.67	1.00	1.00
PM	-0.33	0.00	0.34	0.67	1.00	1.00	1.00
PB	0.00	0.35	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00

[2] Plant- Model 2 의 결과

1) FP=0.48 : 초기 Scaling-factor 값이
 $GE=0.15$, $GD=0.8$, $GC=0.71$ 일 경우.

1.5 Plant Model 2: y(t)

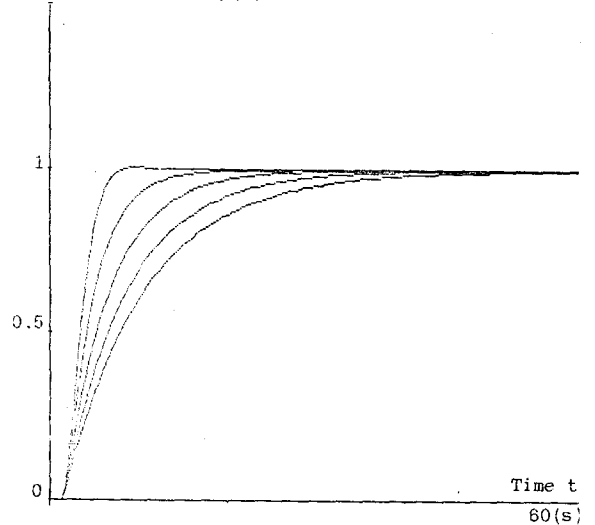


그림 7.3 Plant Model 2 - 1)의 결과

* Scaling factor 최적 조정율
 $\Delta GD = -0.172$, $\Delta GC = 0.8$

표.5 LCR의 조정 값

	Δe						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.28	0.00
NM	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.27	0.00	0.27
NS	-1.0	-1.0	-0.67	-0.25	0.00	0.25	0.67
e ZE	-1.0	-0.67	-0.26	0.00	0.23	0.67	1.00
PS	-0.67	-0.28	0.00	0.25	0.67	1.00	1.00
PM	-0.31	0.00	0.30	0.70	1.00	1.00	1.00
PB	0.00	0.32	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00

2) FP=0.46 : 초기 Scaling-factor 값이
GE=0.55, GD=0.47, GC=0.8 일 경우.

참 고 문 헌

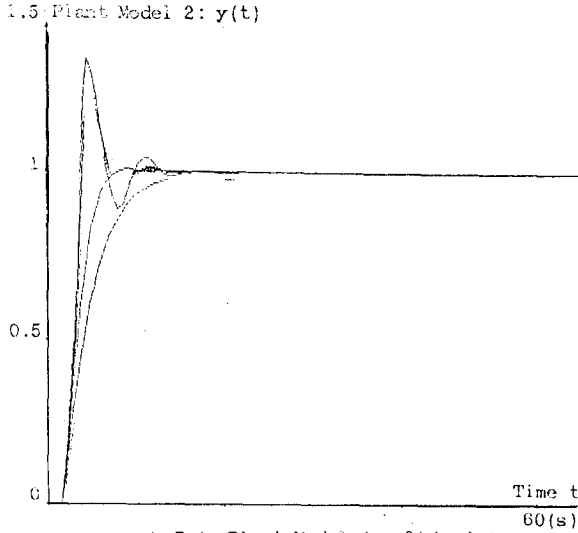


그림 7.4 Plant Model 2 - 2)의 결과

* Scaliig factor 최적 조정을
△GE=-0.09, △GC=-0.7

표.6 LCR의 조정 값

	△e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.33	0.00
NM	-1.0	-1.0	-1.0	-0.67	-0.33	0.00	0.33
NS	-1.0	-1.0	-0.67	-0.34	0.00	0.34	0.67
ZE	-1.0	-0.67	-0.34	0.00	0.34	0.67	1.00
PS	-0.67	-0.33	0.00	0.34	0.67	1.00	1.00
PM	-0.33	0.00	0.34	0.68	1.00	1.00	1.00
PB	0.00	0.36	0.71	1.00	1.00	1.00	1.00

6. 결 론

본 논문에서는 퍼지 제어기에 의하여 시스템 제어 성능을 평가하고, Scaling-factor 조정 및 언어적 제어규칙의 멤버십 함수 수정을 통한 최적조정 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘에 의하여 퍼지 레벨 제어기를 구현하였다. 퍼지한 원로레벨 제어 플랜트에 적용한 결과, 오버슈트 및 제어응답 시간을 현저히 개선하였고, 기존의 PI 제어방식 보다 안정하고, 향상된 제어 시스템을 실현하였다.

- 1) 前田幹夫, 村上周太, "自己調整 ファジィコントローラ", 計測 自動制御 學會 論文集, Vol. 24, No.2, pp.85~91, Feb. 1988.
- 2) Xian-Tu Peng, Shao-Ming Liu, "Self regulating PID controllers and its applications to a temperature controlling process", Fuzzy Computing, pp.355~364, North-Holland
- 3) T.Andersen, S.B.Nielsen, "An efficient single output fuzzy control algorithm for Adaptive applications", Automaca, vol.21, No .5, pp.519~545. 1985
- 4) Kazuhike Nakase, Takemi Aizawa, Gen Nakamura, "Optimizing control system for grinding process", 日本 小野田 研究報告 論文集, Vol.39, No. 117, pp.45~59, 1987.
- 5) 양 태진, 김경기, "멀티 프로세서를 이용한 퍼지 레벨 제어기법 및 그 응용 알고리즘 구현에 관한 연구", 한양 대학교 석사 학위 논문, Dec. 1991.
- 6) 양 태진, 김경기, "퍼지제어를 이용한 개선된 서벤트 분쇄기의 원로레벨 제어기법에 관한 연구", 한양 대학교 산업과학 연구소 논문집, No.35, Sep. 1992.
- 7) 谷 哲次, 田中一男, "ファジィ制御とPID制御の複合制御系の構成とその加熱爐溫度制御への應用", 計測 自動制御 學會 論文集, Vol. 27, No.11, pp.1274~1280, Nov. 1991.
- 8) T.J.Procyk, E.H.Mamdani, "A Self-Organizing Controller for Single-input Single-output Processes", Internal Report Dept of Electrical & Electric Eng. Queen College, 1972
- 9) E.H.Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithm for Control of Simple Dynamic Plant", proc IEEE, 121, No.12, pp.1585~1588, 1974