

스케일 계수 자동 조정 퍼지제어기 설계

Design of Fuzzy Controller with The Automatic Adjustment of Scaling Factors

이상윤*, 한성현*, 신위재**

*경남대학교 기계자동화공학부, **경남대학교 전기전자공학부

Abstract

When the fuzzy controller apply to a real plant, We have not excepted result of a satisfactory control by modeling error and lacking information about an plant. In this case, we have to adjust the scale factors for improvement of the control performance and this method need a lot of time and cost for perform a trial and error.

In this paper, we proposed the fuzzy controller with the automatic adjustment of scaling factors. It was improve upon the control performance using a adequate scale factor by fuzzy logic and normalizer.

As the results of simulation through the second order plant, we confirmed that the proposed the fuzzy controller within the function of automatic scale get a good response compare with the fuzzy controller within the fixed scale factor.

있다.[2][3] 경험이나 시행착오에 의한 설계방법은 어느 정도 양호한 제어 결과를 얻을 수 있지만, 그 제어 시스템에 최적이라고 보장할 수 없을 뿐만 아니라 이런 설계 방법은 많은 시간, 노력과 비용이 드는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 정규화와 퍼지논리를 사용하여 플랜트 응답에 따라 적절한 스케일링 계수를 결정하는 스케일 계수 자동조정 퍼지 제어기를 설계한다. 설정치에 따라 오차와 오차 변화량은 정규화되고, 스케일 계수의 출력 범위는 재조정된다. 정규화된 오차와 오차 변화량을 입력으로 퍼지 제어기는 플랜트 응답에 따라 스케일링 계수를 결정하게 된다. 구해진 스케일링 계수에 의해 퍼지제어기의 출력은 재조정되어 적절한 제어입력을 결정하게 된다. 이를 확인하기 위해 2차 플랜트에 적용하여 모의실험하였다.

I. 서론

퍼지제어기는 제어대상에 대한 작업자의 경험이나 전문가의 언어적인 표현을 쉽게 제어기와 결합시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 플랜트 파라미터 변동이나 외부 외란에 크게 영향을 받지 않는 강인한 제어기의 특성도 지니고 있다.[1] 이러한 퍼지제어기의 성능은 입출력 변수의 스케일링 계수(Scaling factors), 소속함수의 모양, 제어 규칙에 의해 영향을 받는다. 이들 제어인자들은 작업자의 경험이나 설계자의 플랜트에 대한 지식으로부터 결정되며 시행착오와 경험적으로 선택되

II. 퍼지제어기[3][4]

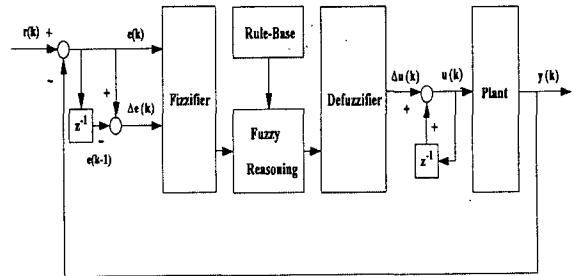


그림 1. 퍼지 제어기의 구조

그림 1은 본 연구에서 사용한 퍼지 제어시스템 구조를 나타내고 있다. 일반적으로 퍼지제어기는 퍼지화기(Fuzzifier), 퍼지 추론(Fuzzy reasoning), 비퍼지화기(Defuzzifier)로 구성되어 있다.

설정치 $r(k)$ 와 플랜트 출력 $y(k)$ 사이의 오차 $e(k)$ 와 오차 변화량 $\Delta e(k)$ 을 입력변수로 하여 퍼지제어기 출력의 변화량 $\Delta u(k)$ 을 결정한다. 실제 플랜트 제어입력 $u(k)$ 은 과거의 제어입력 $u(k-1)$ 과 제어입력 변화량 $\Delta u(k)$ 의 합으로 이루어진다.

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (3)$$

여기서 $r(k)$, $y(k)$ 는 각각 기준 설정치와 플랜트 출력을 나타낸다.

입력변수인 오차와 오차 변화량에 대한 퍼지 집합과 언어변수는 "NB", "NMB", "NM", "NMS", "NS", "NVS", "ZE", "PVS", "PS", "PMS", "PM", "PMB", "PB"로 각각 13개씩 정하였다. 입출력 변수들의 언어값의 종류는 제어규칙의 수와 제어기 성능에 큰 영향을 미친다. 언어값의 수가 많으면 제어성능을 향상시킬 수 있으나 제어기의 계산량이 많아지는 단점이다.

소속함수의 모양은 여러 가지 형태를 생각할 수 있으나 그림 2, 3과 같은 종형 소속함수를 사용하였다. 이와 같이 정의된 입력변수와 출력변수의 퍼지집합을 이용하여 표1과 같은 제어규칙을 작성하였다.

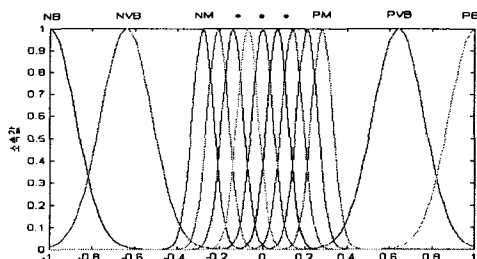


그림 2. $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 에 대한 소속함수

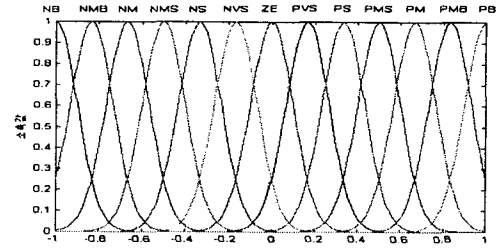


그림 3. $\Delta u(k)$ 에 대한 소속함수

퍼지 추론과 비퍼지화 방법에는 다양한 방법이 있지만, 본 논문에서는 그림 4와 같은 퍼지추론과 비퍼지화를 사용하였으며 스케일링 계수 SF 를 고려한 $\Delta u(k)$ 는 식(4)와 같다.

$$\Delta u = SF \times y \quad (4)$$

표 1. 퍼지제어기의 제어규칙

E ΔE	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE
NMB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS
NM	NB	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS
NMS	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS
NS	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM
NVS	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB
ZE	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB
PVS	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB
PS	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB
PMS	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB
PM	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB	PB
PMB	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i y_i^*}{\sum_{i=1}^m \tau_i} \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^m y_i^* \left[\exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}} \right)^2 \right) \right]}{\sum_{i=1}^m \left[\exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}} \right)^2 \right) \right]} \\
 &= \sum_{i=1}^m v_i y_i^* \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기서, x_{ij}^* , σ_{ij} , y_i^* 는 각각 가우스 함수의 중심, 가우스 함수의 폭, 결론부 퍼지집합의 비퍼지화된 값을 나타낸다. 식(4)을 이용하여 식(3)을 다시 정

리하면 다음과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + SF \times y \quad (6)$$

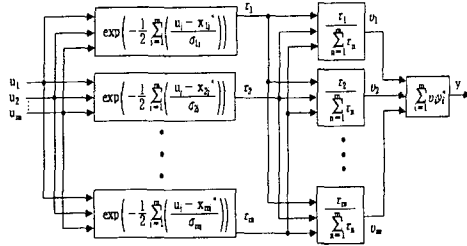


그림 4. 퍼지추론과 비퍼지화

그림 5와 표 2는 각각 스케일링 계수에 따른 플랜트 응답과 성능 비교표를 나타내었다. 스케일 계수가 0.175일 때 작은 최대오버슈트와 빠른 정정시간을 가지게 되고 0.5일 때는 지연시간과 상승시간은 빠르지만 높은 최대오버슈트와 느린 정정시간을 가지게 된다. 그리고 0.05일 때는 매우 느린 지연시간과 상승시간, 정정시간을 갖지만 오버슈트가 발생하지 않는다. 스케일 계수가 너무 크다면 큰 최대 오버슈트를 가지면서 진동하게 된다. 너무 작다면 긴 지연시간과 상승시간으로 인해 주어진 시간내에 수렴하지 못한다.

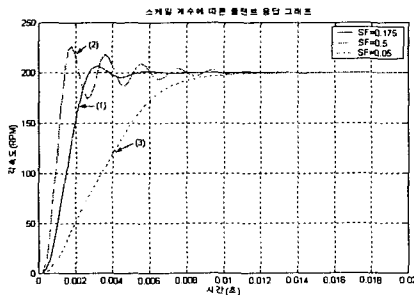


그림 5. 스케일 계수에 따른 플랜트 응답 (200rpm)

표 2. 스케일 계수에 따른 성능 비교

특성 SF	지연시간	상승시간	정정시간	최대 오버슈트
0.05	3.387 ms	5.322 ms	7.560 ms	없음
0.175	1.476 ms	1.641 ms	2.491 ms	3.06 %
0.5	0.905 ms	0.787 ms	4.802 ms	13.3 %

III. 스케일 계수 자동조정 퍼지제어기 설계

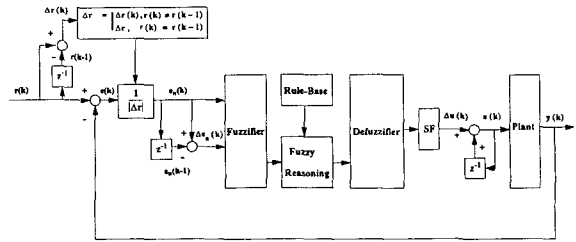


그림 6 스케일 계수 자동 조정 퍼지제어기 구조

오차 $e(k)$ 와 오차 변화량 $\Delta e(k)$ 의 정규화 (Normalizer)는 두 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다. 첫 번째 설정치가 바뀌지 않고 과거의 설정치 $r(k-1)$ 가 현재의 설정치 $r(k)$ 를 유지할 때 과거의 Δr 를 그대로 유지한다. 두 번째는 설정치가 변화하여 과거의 설정치 $r(k-1)$ 와 현재의 설정치가 같지 않을 때는 Δr 를 $r(k) - r(k-1)$ 으로 바꾸어준다. 식(7)과 같이 설정치의 변화량 Δr 를 계산한다면 식(8)에 적용한다. 식(8)은 오차 $e(k)$ 를 설정치의 변화량으로 정규화 함으로서 $\Delta e_s(k)$, $e_s(k)$ 그리고 $\Delta e_s(k)$ 까지 정규화가 된다.

$$\Delta r = \begin{cases} r(k) - r(k-1), & r(k) \neq r(k-1) \\ \Delta r, & r(k) = r(k-1) \end{cases} \quad (7)$$

$$e(k) = \frac{r(k) - y(k)}{\Delta r} \quad (8)$$

$$e_s(k) = |e(k)| \quad (9)$$

$$\Delta e_s(k) = e_s(k) - e_s(k-1) \quad (10)$$

언어변수와 단어 집합은 표 3과 같으며, $e_s(k)$ 와 $\Delta e_s(k)$, $SF(k)$ 소속함수는 각각 그림 6, 7과 같다. 그리고 제어규칙은 표 4와 같으며 퍼지 추론과 비퍼지화 과정은 그림 4와 같다.

표 3. 단어집합과 언어변수

매우 작다.	작다	작지는 않다	중간 보다 는 작다	중간 이다.	중간보 다는 크다	크지는 않다.	크다.	매우 크다.
VS	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB

표 4. 스케일링 계수 퍼지 제어기의 제어규칙

E_{sf} \ ΔE_{sf}	VS	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB
VS	VS	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB
S	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB	VB
NS	NS	SM	M	BM	NB	B	VB	VB	VB
SM	SM	M	BM	NB	B	VB	VB	VB	VB
M	M	BM	NB	B	VB	VB	VB	VB	VB
BM	BM	NB	B	VB	VB	VB	VB	VB	VB
NB	NB	B	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB
B	B	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB
VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB

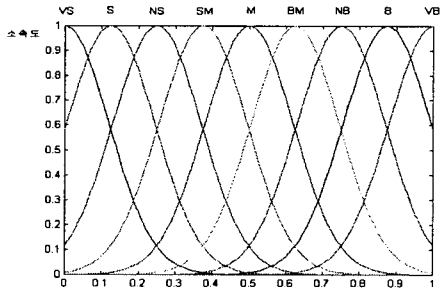


그림 7. $e_s(k)$ 와 $\Delta e_s(k)$ 소속함수

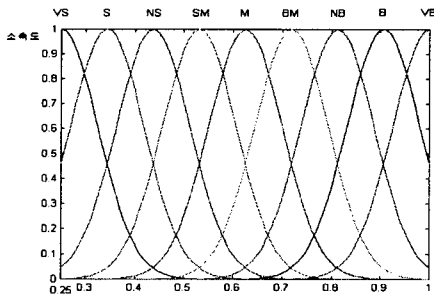


그림 8. $SF(k)$ 소속함수

$SF(k)$ 에 대한 소속함수의 대집합 범위는 $[0.25 \cdot M, M]$ 이다. 여기서 M 은 $SF(k)$ 에 대한 대집합 최대값을 의미하며 설정치 $r(k)$ 가 바뀔 때마다 M 의 값은 식(11)에 의해 결정된다.

$$M = \frac{r(k)}{R_I} M_I \quad (11)$$

여기서, R_I , M_I 는 각각 초기 설정치와 그때의 $SF(k)$ 에 대한 대집합 최대값을 나타낸다.

IV. 모의실험과 고찰

모의실험에 사용한 2차 플랜트의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{1.2033 \times 10^8}{s^2 + 2.9627s + 6.5775 \times 10^6} \quad (12)$$

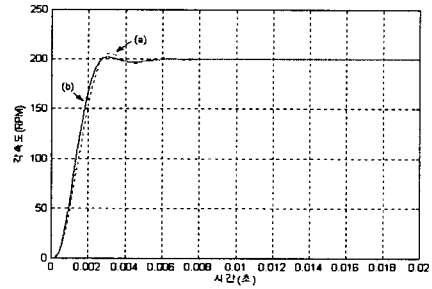


그림 9. 설정치 200rpm일 때, 2차 플랜트 응답

- (a) SF=0.175로 고정시킨 퍼지제어기
- (b) 제안한 퍼지제어기

표 5. 설정치 200RPM일 때 응답비교

특성 제어기	지연시간	상승시간	정정시간	최대 오버슈트
SF=0.175로 설정된 퍼지제어기	1.476ms	1.641ms	2.491ms	3.055 %
제안한 퍼지제어기	1.341ms	1.544ms	2.367ms	1.012 %

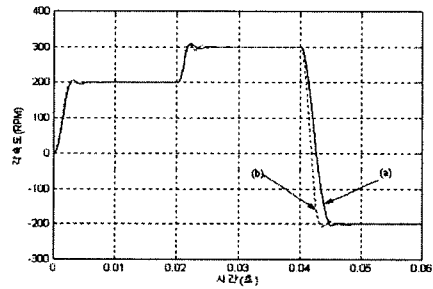


그림 10 설정치 가변속일 때, 2차 플랜트 응답

- (a) SF=0.175로 고정시킨 퍼지제어기
- (b) 제안한 퍼지제어기

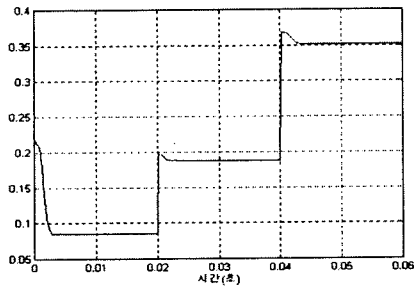


그림 11. 스케일 계수의 변화

$R_I = 300\text{rpm}$, $M_I = 0.23$ 그리고 설정치 200rpm 으로 설정하여 모의 실험한 결과 그림 9에서 제안한 퍼지제어기가 스케일 계수를 0.175로 고정된 퍼지 제어기 보다 지연시간이 0.135ms, 상승시간이 0.097ms 더 빠른 것으로 나타났고 이로 인해 수렴시간 역시 0.124ms 더 빠른 것으로 나타났다. 그리고 최대오버슈트는 2.043%로 낮게 나왔다. 그림 10은 속도를 가변속했을 때의 모의 실험 결과로 속도가 높아졌을 때 차이가 확실히 나타난다. 그림 11은 스케일 계수의 변화를 나타낸 것으로 첫 번째 설정치에 도달하기 이전까지는 감소하다가 도달 이후에는 0.0872로 수렴한다. 그리고 속도의 변화량에 비례하여 최적의 값으로 자동조정된다.

V. 결론

스케일 계수 자동조정 퍼지 제어기가 스케일 계수를 고정하여 사용하는 퍼지제어기보다 지연시간, 상승시간, 정정시간, 최대오버슈트 모두 우수한 성능을 나타내는 것을 모의실험을 통하여 확인하였다. 또한 스케일 계수의 조절로 상승시간을 증가시키면서 최대 오버슈트를 낮출 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

VI. 참고문헌

- [1] E.H.Mamdani, "Twenty years of fuzzy control: Experiences gained and lessons learnt", proc. 2nd IEEE Int. Conf. fuzzy systems, San Francisco, CA, pp339-344, 1993
- [2] M. Braae and D.A.Rutherford, "Selection of

parameters for a fuzzy logic controller", Fuzzy sets and systems, Vol.2, pp.185-199, 1979

- [3] Kevin M.Passino, Stephen Yurkovich, "Fuzzy Control", Addison-Wesley, Inc. pp.21-85, 1998
- [4] Ronald R.Yager, Dimitar P.Filev, "Essentials of Fuzzy Modeling and Control", John Wiley & Sons, Inc. pp.109-238, 1994