# 정규화 스케일계수를 이용한 퍼지제어기

정동화**, 이동욱**, 이상윤*, 신위재**
*경남대학교 기계자동화공학부, **경남대학교 전기전자공학부

# A Fuzzy Controller using normalized Scale Factor

Dong-Hwa Jung**, Dong-Wook Lee**, Sang-Yun Lee*, Wee-Jae Shin**
*Dept. of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.
**Dept. of Electronic Engineering, Kyungnam Univ.

## 요 약

플랜트 모델이나 경험에 근거하여 설계된 퍼지제어기를 실제 플랜트에 적용할 경우, 모델링 오차와 플랜트에 대한 관련지식의 부족으로 만족할 만한 제어 결과를 나타내지 못할 경우가 있다. 이 경우 제어성능을 향상시키기 위해 제어기의 제어인자를 다시 조정하여야 하고, 이 조정과정은 시행착오 방법으로 수행되기 때문에 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 본 논문에서는 정규화된 오차와 오차 변화량를 사용하여 플랜트 응답에 따라 입력과 출력의 적절한 스케일 계수를 조정하는 퍼지제어기를 제안한다. 정규화된 오차를 출력 소속함수의 중심과 폭에 곱해 출력 범위를 재조정하고, 플랜트 응답에 의해 입력의 스케일 계수를 결정한다. 이를 확인하기 위해 2차 플랜트에 적용하여 모의 실험을 수행하였다.

## 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, 제어규칙에 의해 영향을 받는다. 이들 제어인자들은 작업자의 경험이나 설계자의 플랜트에 대한 지식으로부터 결정되며 시행착오와 경험적으로 선택되었다.[2][3] 경험이나 시행착오에 의한 설계방법은 어느 정도 양호한 제어결과를 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 정규화된 오차와 오차 변화량를 사용하여 플랜트 응답에 따라 입력과 출력의 적절한 스케일 계수를 조정하는 퍼지제어기를 제안한다. 정규화된 오차를 출력 소속함수의 중심과 폭에 곱해 출력 범위를 재조정하고, 플랜트 응답에 의해 입력의 스케일 계수를 결정한다. 이를 확인하기 위해 2차 플랜트에 적용하여 모의 실험을 수행하였다.

## II. 퍼지제어기

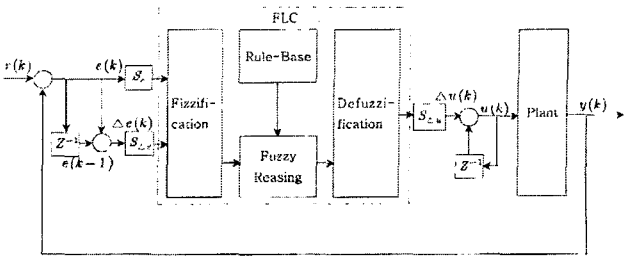


그림1. 퍼지 제어기의 구조.
Fig. 1. The Structure of Fuzzy Controller.

그림 1은 본 연구에서 사용한 퍼지 제어시스템 구조를 나타내고 있다. 일반적으로 퍼지제어기는 퍼지화기(Fuzzifier), 퍼지 추론(Fuzzy reasoning), 비퍼지화기(Defuzzifier)로 구성되어 있다.[3][4]

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 퍼지집합과 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.

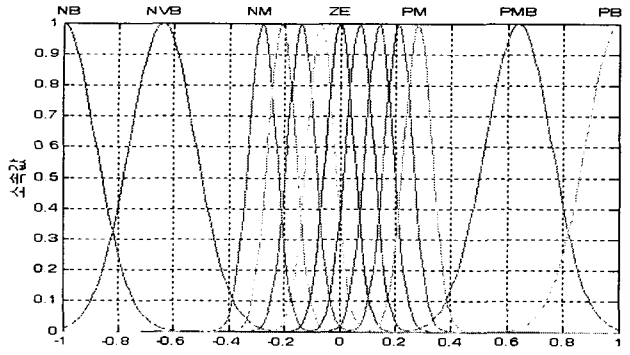


그림 2. $e(k)$와 $\Delta e(k)$에 대한 소속함수

Fig. 2. The membership function of $e(k)$ and $\Delta e(k)$

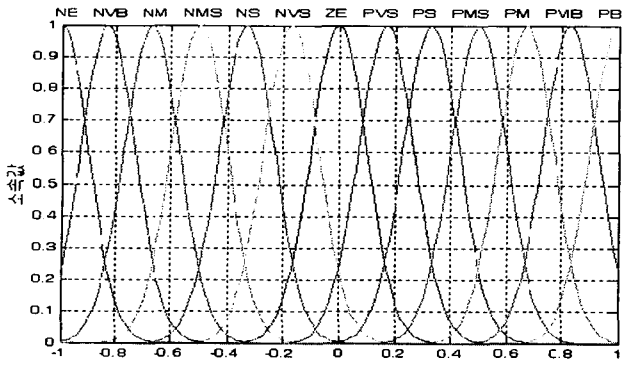


그림 3. $\Delta u(k)$에 대한 소속함수

Fig. 3. The membership function of $\Delta u(k)$

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.

$$\Delta u(k) = SF \times du \quad (4)$$

표 1. 퍼지제어기의 제어규칙

Table 1. The control rule of fuzzy controller

| 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 |

$$du = \frac{\sum_{i=1}^{m} \tau_i \, du^*_i}{\sum_{i=1}^{m} \tau_i} = \frac{\sum_{i=1}^{m} du^*_i \left[ \exp\left( -\frac{1}{2} \left( \frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}} \right)^2 \right) \right]}{\sum_{i=1}^{m} \left[ \exp\left( -\frac{1}{2} \left( \frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}} \right)^2 \right) \right]} = \sum_{i=1}^{m} v_i \, du^*_i \quad (5)$$

여기서, $x_{ij}^*$, $\sigma_{ij}$, $du^*_i$는 각각 가우스 함수의 중심, 가우스 함수의 폭, 결론부 퍼지집합의 비퍼지화된 값을 나타낸다. 식(4)을 이용하여 식(3)을 다시 정리하면 다음과 같다.

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

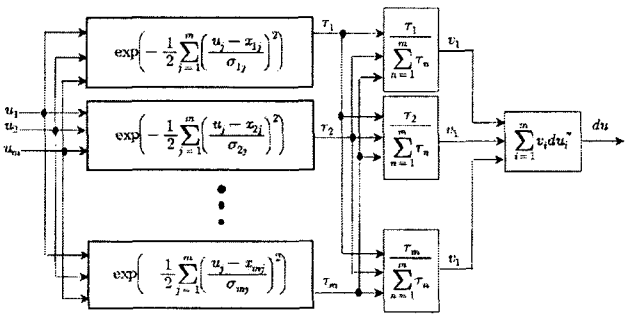

그림 4. 퍼지추론과 비퍼지화

Fig. 4. The fuzzy inference and defuzzifier

## III. 정규화 스케일계수을 이용한 퍼지제어기

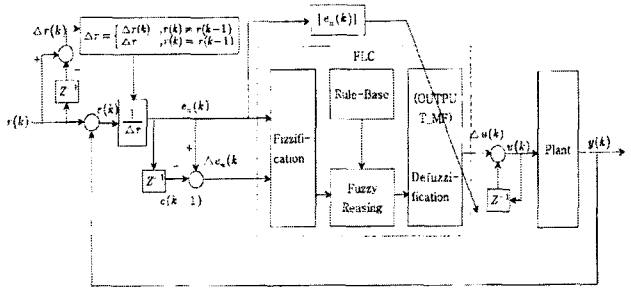


그림 6 정규화 스케일계수을 이용한 퍼지제어기
Fig. 6. A Fuzzy Controller using normalized Scale Factor

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 $r(k)$을 유지할 때 과거의 $\Delta r$을 그대로 유지한다. 두 번째는 설정치가 변화하여 과거의 설정치 $r(k-1)$와 현재의 설정치가 같지 않을 때는 $\Delta r$을 $r(k) - r(k-1)$으로 바꾸어준다. 식(7)과 같이 설정치의 변화량 $\Delta r$을 계산한다음 식(8)에 적용한다. 식(8)은 오차 $e(k)$를 설정치의 변화량으로 정규화한다.

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

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

$\Delta e(k)$는 식(2)와 동일하다. 제안한 퍼지제어기에서 입력 소속함수는 그림2 동일하며, 출력 소속함수 $\Delta u(k)$에 대해 식(8)의 $e(k)$를 출력 소속함수의 중심과 폭에 $|e(k)|$를 각각 곱한 그림 7.과 같다.

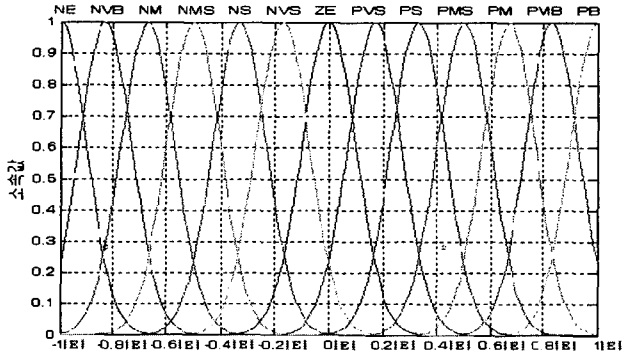


그림 7. $|e(k)|$를 곱한 출력 소속함수
Fig. 7. The out-membership function multiplied $|e(k)|$

본 논문에서는 그림 8과 그림 9와 같은 퍼지추론과 비퍼지화를 사용하였으며 스케일링 계수 $SF$를 제외한 $\Delta u(k)$는 식(10)과 같다.

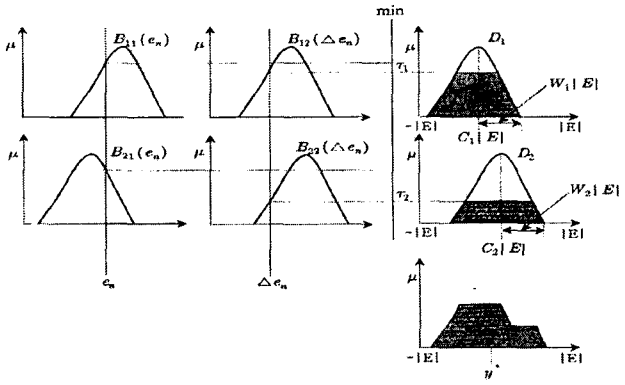


그림 8. 퍼지추론 알고리즘의 그림 표현
Fig. 8. Graphical representation of the reasing algorithm

$$\begin{aligned} du &= \frac{\sum_{i=1}^{m} \tau_i y^*_i}{\sum_{i=1}^{m} \tau_i} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{m} y^*_i \left[ \exp\left( -\frac{1}{2} \left( \frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}} \right)^2 \right) \right]}{\sum_{i=1}^{m} \left[ \exp\left( -\frac{1}{2} \left( \frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}} \right)^2 \right) \right]} \\ &= \sum_{i=1}^{m} v_i y^*_i \end{aligned} \tag{9}$$

$$\Delta u(k) = du \tag{10}$$

여기서, $x_{ij}^*$, $\sigma_{ij}$, $y^*_i$는 각각 가우스 함수의 중심, 가우스 함수의 폭, 결론부 퍼지집합의 비퍼지화된 값을 나타낸다. 식(10)을 이용하여 식(3)을 다시 정리하면 식(11)과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + du \tag{11}$$

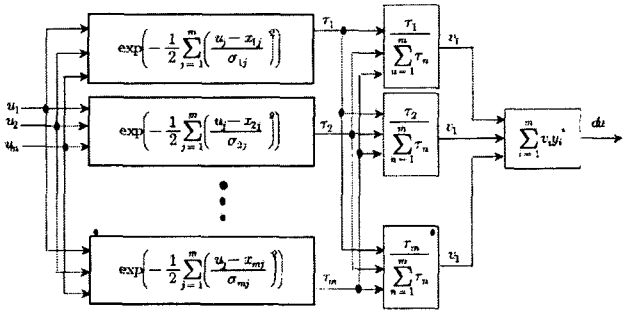

그림 9. 제안한 퍼지제어기의 퍼지추론과 비퍼지화
Fig. 9. The fuzzy inference and defuzzifier of the proposed fuzzy controller

## Ⅳ. 모의실험및 고찰

모의실험에 사용한 2차 플랜트의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s)=\frac{1.2033\times10^{8}}{s^{2}+2.9627s+6.5775\times10^{6}} \quad (12)$$

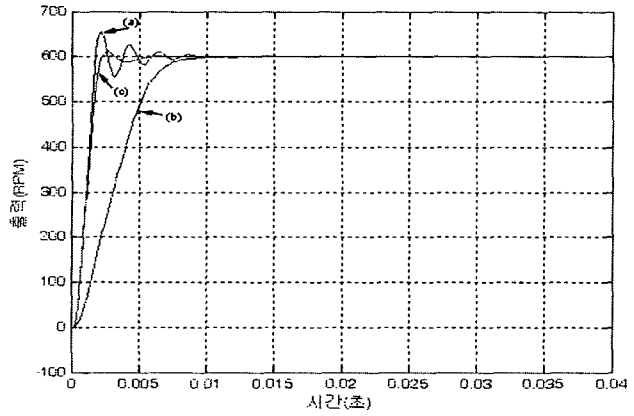


그림 10. 설정치 600rpm일 때, 2차 플랜트 응답

Fig. 10. The plant respanse of second order (set point 600rpm)

(a) SF를 적용 하지않은 퍼지제어기

(b) SF=0.175로 고정시킨 퍼지제어기

(c) 정규화 스케일계수를 적용한 퍼지제어기

표 2. 설정치 600rpm일 때 응답비교

Table 2. The comparision of response(set point 600rpm)

| 특성 / 제어기 | 지연시간 | 상승시간 | 정정시간 | 최대 오버슈트 |
|---|---|---|---|---|
| SF를 적용 하지않은 일반 퍼지제어기 | 1.0941ms | 1.0530ms | 5.64201ms | 9.1124 % |
| SF=0.175로 고정 시킨 퍼지제어기 | 3.0613ms | 4.6406ms | 7.6167ms | 없음 |
| 제안한 퍼지제어기 | 1.1320ms | 1.2804ms | 2.1296ms | 1.9270 % |

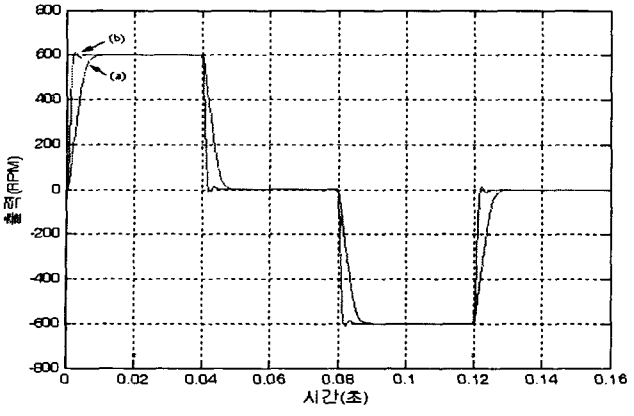


그림 11. 설정치 가변속일 때, 2차 플랜트 응답

Fig. 11. The plant respanse of second order (set point is variable speed)

(a) SF=0.175로 고정시킨 퍼지제어기

(b) 정규화 스케일계수를 적용한 퍼지제어기

설정치를 600rpm으로 하여 모의 실험한 결과 본 논문에서 제안한 제어기가 스케일 계수를 0.175로 고정한 제어기 보다 지연시간이 0.1929ms, 상승시간이 3.3602ms 더 빠른 것으로 나타났고, 이로 인해 수렴시간 역시 5.4871ms 빠른 것으로 나타났다. 제안한 퍼지 제어기가 스케일 계수를 적용하지 않은 제어기 보다는 지연시간과 상승시간이 약간 늦는 것을 알 수 있지만, 제안한 제어기는 진동없이 바로 수렴하지만 SF를 적용하지 않은 퍼지 제어기는 정정시간이 길어 제안한 제어기의 수렴시간이 3.3460ms 더 빠른 것을 알 수 있었다. 그리고 제안한 퍼지 제어기의 최대오버슈트는 1.9270%로 낮게 나왔다. 그리고 600rpm 일때 의 결과를 표2에 나타내었다. 그림 11은 속도를 가변속했을 때의 모의 실험결과로 속도가 높아졌을 때 차이가 확실히 나타난다. 속도의 변화량에 비례하여 스케일 계수가 최적의 값으로 자동조정 된다.

## Ⅴ. 결론

정규화 스케일계수를 사용한 퍼지 제어기가 스케일 계수를 고정하여 사용하는 퍼지제어기와 스케일 계수를 사용하지 않은 제어기 보다 정정시간 면에서 우수한 성능이 나타남을 모의실험을 통하여 확인하였으며, 또한 스케일 계수 적용없이도 상승시간을 증가시키면서 최대 오버슈트를 낮출 수 있다는 것을 알 수 있었다.

앞으로 연구과제는 잡음에 대한 견실성과 제어규칙의 자기구성에 관한 연구입니다.

## 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] 이상구, 秋月 影雄,"미지 시스템에 대한 퍼지 제어기의 자동동조", 퍼지 및 지능시스템학회 논문지, Vol. 7, No. 3, 1997. 8.

[3] M. Braae and D.A.Rutherford, "Selection of parameters for a fuzzy logic controller", Fuzzy sets and systems, Vol.2, pp.185-199, 1979

[4] 이상열, "위상평면을 이용한 퍼지제어기 설계 및 유압 서보 시스템에서의 적용", 한국과학기술원, 박사학위논문, 1999.

[5] Kevin M.Passino, Stephen Yurkovich, "Fuzzy Control", Addison-Wesley, Inc. pp.21-85, 1998

[6] 이상윤,신위재 "스케일 계수를 자동조정하는 퍼지제어기 설계에 관한 연구", 한국 신호처리 · 시스템 학회 논문지, Vol. 3, No. 4, 2002. 10.