

## 이중 퍼지 추론에 의한 자동 동조 제어기

김봉재<sup>\*</sup>, 안종록<sup>\*</sup>, 최종수<sup>\*</sup>, 정광조<sup>\*\*</sup>, 정원용<sup>\*</sup>, 이수홍<sup>\*</sup>

\*경남대학교 전기공학과, \*\*한국기계연구원

### An Auto Tuning Controller with Double Inference Engine

Bong-Jae Kim<sup>\*</sup>, Jung-Rok Ahn<sup>\*</sup>, Jong-Su Choi<sup>\*</sup>, Gwang-Jo Chung<sup>\*\*</sup>,  
Won-Yong Chong<sup>\*</sup>, Soo-Huem Lee<sup>\*</sup>

\*Dept. of Electric Engr. KyungNam Univ., \*\*KIMM

#### ABSTRACT

The shape and width of fuzzy membership function has an effect on performance of fuzzy controller.

In this paper, fuzzy controller is proposed to improve the control performance of fuzzy controller. It has two fuzzy inference engine. The one is typical fuzzy inference engine, the other is proposed to infer optimal width of membership function in fuzzy controller from plant constant ( $K, T, L$ ).

To show the effectiveness of this fuzzy controller with double fuzzy inference engine, it is applied to plant (dead time + 1st order delay) with various plant constant.

#### 1. 서론

퍼지 제어는 전문가의 지식을 바탕으로 제어규칙을 언어적으로 쉽게 표현할 수 있고, 제어대상에 대한 정확한 수학적 모델이 아니라 제어대상의 입력과 출력의 관계만으로 우수한 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있으며, 제어대상의 파라미터 변동이나, 외란에 대해 강인한 특성을 보인다. 그러나 전문가의 경험적 지식이나 사고를 제어 규칙으로 적절히 표현할 수 없는 경우 시행착오적으로 제어규칙을 만들어야 하는 등의 문제점이 있다.

이를 보완하기 위해 퍼지 제어기에 학습능력을 부여하여 자동으로 제어규칙을 만드는 자기동조 능력을 가진 규로-퍼지 제어기<sup>5)</sup>나 유전자 알고리즘에 의한 최적의 규칙을 찾아내는 여러 가지 알고리즘<sup>6)</sup>이 나오고 있다.

앞서 언급한 많은 연구의 결과, 퍼지 제어기의 규칙은 어느 정도 일반화되었다고 할 수 있다. 그러나 퍼지 제어에 있어서 퍼지 소속함수의 모양과 폭에 따라 퍼지 제어기의 성능에 영향을 준다는 연구 결과가 몇몇 보고된 바 있으며,<sup>7)</sup> 또한 퍼지 제어기의 소속함수의 모양을 시스템의 입출력 특성에 따라 자동으로 조절하는 방법도 보고된 바 있다.<sup>8)</sup>

이에 본 연구에서는 이러한 퍼지 제어의 단점을 보완하기 위해서, 이중 퍼지 추론을 통한 퍼지 제어기를 제안하고자 한다. 첫 번째 퍼지 추론기는 제어대상(부동작 시간 + 1차 지연계)을 결정짓는 파라미터( $K, T, L$ )들로부터 적절한 퍼지 제어기의 소속함수의 폭을 결정하고, 이를 바탕으로 퍼지 제어기는 입력과 출력의 변화를 추론하여 적절한 제어 신호를 내보낸다.

본 논문은 제안한 퍼지 제어기의 소속함수 폭의 결정을 위한 퍼지 추론기를 설계하고, 시뮬레이션을 통해서 그 타당성을 확인한다.

#### 2. 소속함수의 폭의 변화에 대한 응답의 변화

퍼지 제어기는 크게 Fuzzifier, Inference Engine, Defuzzifier로 나누어지며, Fuzzifier에서는 수치적 데이터를 인간의 모호한 언어적 표현으로 바꾸는데 이용된다. 그럼 1은 일반적인 퍼지 제어기에서 사용된 E(목표치와 출력과의 오차)와 dE(오차의 변화율)에 대한 소속함수이다.

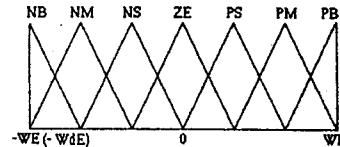


그림 1. E와 dE에 대한 소속함수  
Fig. 1. Membership function of error & change-in-error

여기서 WE, WdE는 Fuzzifier에서 사용되는 오차와 오차의 변화율에 대한 소속함수의 폭을 나타낸다.

전문가 및 현장 기술자들의 경험이나, 지식들을 언어적 규칙으로 나타내면 다음과 같다.

- $R_1 : If \ e \ is \ NB \ and \ de \ is \ NB \ then \ dU \ is \ NB$   
⋮  
 $R_k : If \ e \ is \ E_k \ and \ de \ is \ dE_k \ then \ dU \ is \ dU_k$   
⋮  
 $R_{49} : If \ e \ is \ PB \ and \ de \ is \ PB \ then \ dU \ is \ PB$

여기서  $E_k, dE_k, dU_k$ 들은 퍼지 소속함수를 의미하고, If 절의 조건절을 전건부(Premise)라고 하고, 결론부를 후건부(Consequence)라고 한다. 이러한 규칙들을 다음의 표 1로 나타낸다.

Defuzzifier에서는 모호한 언어적 표현을 수치적 데이터로 바꾸는 역할을 수행하는 데에 사용된다. dU는 퍼지 제어기가 내는 제어 입력의 변화량을 말한다.

dU는 Defuzzifier의 제어 입력의 변화량에 대한 소속함수의 폭을 말한다. 이 퍼지 제어기에서 비퍼지화(Defuzzification) 방법은 무게 중심법을 사용한다.

이렇게 구성된 퍼지 제어기의 동작을 수식으로 나타내면 다음과 같다. 식 (2.1)과 (2.2)는 오차와 오차의 변화율

표 1. dU를 계산하기 위한 규칙

Table 1. Rule table for calculating change-in-control input

dE \ E	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

에 대한 퍼지화(Fuzzification) 단계이고, 식 (2.3)은 퍼지 추론부에서 Min-Max연산을 통해 추론하는 과정이다. 식 (2.4)는 무게 중심법을 이용하여 비퍼지화(Defuzzification) 하는 단계이다.

$$a_1 = \mu_{E_1}(e_1) \wedge \mu_{dE_1}(de_1) \quad (2.1)$$

$$a_2 = \mu_{E_1}(e_1) \wedge \mu_{dE_1}(de_1) \quad (2.2)$$

$$\mu_{dU} = [a_1 \wedge \mu_{dU_1}] \vee [a_2 \wedge \mu_{dU_2}] \quad (2.3)$$

$$dU = \frac{\sum(x\mu_{dU}(x))}{\sum\mu_{dU}(x)} \quad (2.4)$$

여기서  $\wedge$ 는 Minimum 연산자이고,  $\vee$ 는 Maximum 연산자이다.

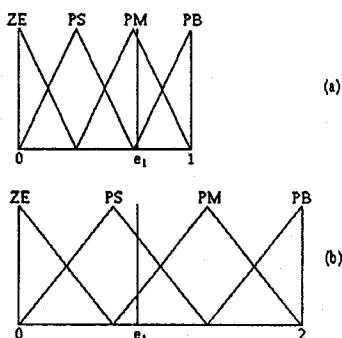


그림 2. 소속 함수의 폭에 따른 결과의 차이  
Fig. 2. A difference of result, caused by width of membership function

일반적으로 퍼지 제어기의 성능은 퍼지 규칙의 적절한 선택과 소속 함수의 모양에 의해 결정된다고 알고 있지만, 실제로 이에 못지 않게 퍼지 제어기의 성능에 중요한 요인인 폭이 되는 부분이 바로 여기서 논하고자 하는 소속 함수의 폭이다. 실제 문제의 적용에 있어서, 대부분의 퍼지 제어기는 소속 함수의 폭을 제어대상에 따라 적절히 시행착오적으로 조정하여 사용하고 있다. 소속 함수의 폭에 따른 응답의 변화를 그림 2로 설명한다.

그림 2의 a)는 오차에 대한 소속 함수의 폭이 1일 때, 오차가 0.75인 경우의 그림이고, 그림 2의 b)는 오차에 대한 소속 함수의 폭이 2이고, 오차가 0.75인 경우의 그림이다. 여기서 볼 수 있듯이 그림 a)에서 소속 함수의 값은  $\mu_{PB}(e_1), \mu_{PM}(e_1)$ 가되고, 그림 b)에서의 소속 함수의 값은  $\mu_{PS}(e_1), \mu_{PM}(e_1)$ 이 된다. 즉, 이 소속 함수의 폭에 따라 추론 결과가 달라지게 된다. 다시 말해 이러한 방식으로 설계된 기존의 제어기의 제어대상이 바뀌면, 또다시 퍼지 제어기의 소속 함수의 폭을 동조하여야만 한다.

실제로 소속 함수의 폭에 따른 응답의 변화를 그림 3, 4, 5에 나타내었다. 제어대상은 부동작 시간(L)을 갖는 1차 지연계를 사용하였고, 각각의 파라미터(K, T, L)는 식 (2.5)와 같다.

$$G_P(s) = \frac{Ke^{-Ts}}{1+Ts} \quad \dots \dots \dots \quad (2.5)$$

이 예에서 사용된 퍼지 제어기는 앞절에서 설명한 기준의 일반적인 제어기를 사용하였다.

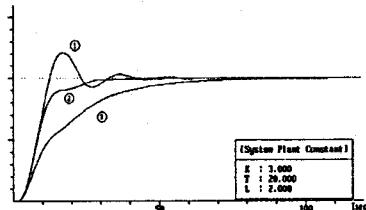


그림 3. WE의 변화에 따른 응답의 변화  
Fig. 3. Result (WE=0.5, 1.0, 2.0, WdE=1.0, WdU=2.0)

그림 3은 퍼지 제어기의 WE의 변화에 따른 응답을 나타낸 것으로, ①은 폭이 0.5일 때, ②는 1.0일 때, ③은 2.0일 때의 퍼지 제어기의 응답을 나타낸 것이다. 이 그래프를 살펴보면, ①에서 WE가 작기 때문에 처음부터 큰 언어적 변수(PB)의 영향을 받아 제어 입력이 과도하게 증가되어 나타나는 현상으로 제어 입력의 변화가 크고, 오차에 민감하기 때문에 출력이 진동이 있고, ③의 경우 WE가 크기 때문에 상대적으로 작은 언어적 변수(PS, PM 파위)의 영향을 받아 제어 입력이 작고, 이에 따른 오차의 변화율이 너무 작아 출력이 서서히 목표치에 도달하고 있다.

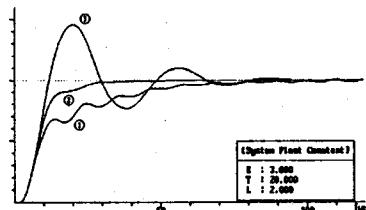


그림 4. WdE의 변화에 따른 응답의 변화  
Fig. 4. Result (WE=1.0, WdE=0.5, 1.0, 2.0, WdU=2.0)

그림 4는 퍼지 제어기의 WdE의 변화에 따른 응답을 나타낸 것으로, ①은 폭이 좁으므로 작은 오차의 변화량에 대해서도 큰 언어적 변수의 소속 함수의 값에 의한 영향으로 제어 입력의 변화가 커지게 되면 출력  $y(t)$ 의 변화도 커지게 되고, 이로 인하여 다시 오차의 변화율이 커지게 되어 출력이 진동하게 되며, ③은 폭이 넓어 상대적으로 낮은 언어 변수의 소속 함수의 값에 의한 영향으로 제어 입력의 변화가 둔해지므로 출력이 큰 오버슈트를 내면서 진동하고 있다.

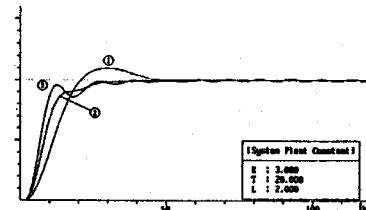


그림 5. WdU의 변화에 따른 응답의 변화  
Fig. 5. Result (WE=1.0, WdE=1.0, WdU=1.0, 2.0, 3.0)

그림 5는 퍼지 제어기의 후건부(Consequence)에서 WdU의 변화에 따른 응답을 나타낸 것이다. ①은 제어 입력의 변화량이 적어 출력의 움직임이 둔화되고 있으며, 이

에 따라 점점 오차의 변화율까지 둔화되어 제어 입력의 증가를 억제하고 있다. 제어 입력의 변화량이 큰 ③의 경우에는 너무 큰 제어 입력으로 인하여 출력의 변화가 심해지고, 이로 인하여 오차의 변화율이 커져 제어 입력의 변화량을 더욱 크게 부추기는 결과가 되어 출력이 약간의 진동을 보이고 있다. 이런 식으로 WdU를 계속해서 크게 한다면, 이런 결과가 더욱 심해지게 되어 퍼지 제어기가 오히려 발산하거나 진동하는 경우도 있다. 실제의 시뮬레이션에서도 그러한 예를 볼 수 있다.

### 3. 이중 퍼지 추론에 의한 제어기 설계

최적의 계단 응답을 결정하기 위한 성능지수로서 IT.A.E. (Integral of Time multiplied Absolute Error)를 사용하며, IT.A.E.는 식 (3.1)로 정의한다.

$$ITAE = \int |r - y(t)|t \quad \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

표 2. IT.A.E.를 최소화하는 소속함수의 폭

Table 2. Width of membership function which minimized IT.A.E.

K	T	L	WE	WdE	WdU	ITAE
1	20	2	0.8	1.0	5.0	5.068
2	20	2	1.0	1.2	3.0	4.269
3	20	2	1.0	1.3	2.4	3.867
4	20	2	1.0	1.3	1.8	3.867
5	20	2	1.0	1.3	1.5	3.895
3	10	2	1.0	1.4	1.4	3.793
3	15	2	1.0	1.4	2.1	3.893
3	25	2	1.0	1.3	3.0	3.977
3	30	2	1.0	1.3	3.7	3.869
3	20	1	0.6	1.2	3.0	2.386
3	20	3	1.6	1.5	2.0	7.155
3	20	4	1.5	1.1	1.2	12.484
3	20	5	1.5	0.9	0.8	18.866

각각의 제어대상 파라미터(K,T,L)마다 IT.A.E.를 최소로 하는 소속함수의 폭을 찾아낸 결과를 K,T,L 각각의 변화에 따라 표로 나타내었다.

위의 결과들을 종합해 보면, 퍼지 소속함수 폭에 대한 다음의 9가지 규칙을 얻을 수 있다.

- ① K가 크면, WdU를 줄인다.
- ② K가 크면, WE를 약간 늘린다. 단, ( $WE < WdE$ )
- ③ K가 크면, WdE를 약간 늘린다. 단, ( $WE < WdE$ )
- ④ L이 크면, WdU를 줄인다.
- ⑤ L이 크면, WE를 늘린다.
- ⑥ L이 크면, WdE를 약간 줄인다.
- ⑦ T가 크면, WdU를 늘린다.
- ⑧ T가 크면, WE를 약간 줄인다. 단, ( $WE < WdE$ )
- ⑨ T가 크면, WdE를 약간 줄인다. 단, ( $WE < WdE$ )

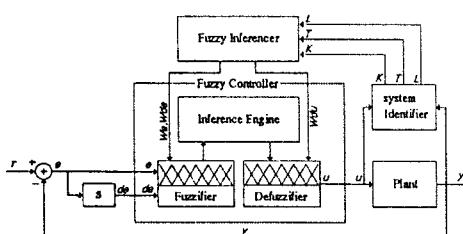


그림 6. 제안한 이중 퍼지 추론 제어기

Fig. 6. Double fuzzy inference controller

동작을 살펴보면, 시스템 동정부에서 제어대상의 입출력 관계를 이용하여 제어대상을 동정하고, 제어대상의 파라미터가 퍼지 추론기에 입력되면, 퍼지 추론기는 앞절에서 얻어낸 규칙을 기반으로 입력된 제어대상의 파라미터에 적절한 소속함수의 폭을 결정하여, 퍼지 제어기의 Fuzzifier와 Defuzzifier에 있는 소속함수의 폭을 바꾼다. 이렇게 바꿔진 폭을 기초로 하여 퍼지 제어기는 목표치와 출력치와의 오차와 이 오차의 변화율을 입력받아 퍼지 제어기로서의 동작하게 된다.

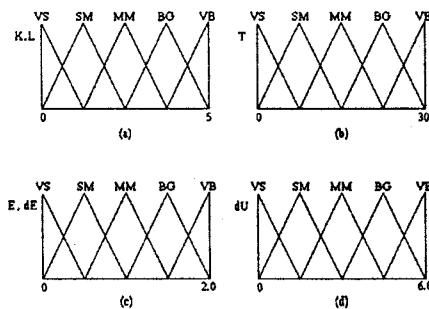


그림 7. 퍼지 추론기의 소속함수  
Fig. 7. Membership function of fuzzy inference.  
a),b) Membership function of premise  
c),d) Membership function of consequence

이렇게 제안된 제어기는 퍼지 제어기의 소속함수의 폭이 제어대상에 따라 적절하게 조정이 되므로, 어떠한 제어대상에도 용이하게 적용할 수가 있어 그 활용 범위를 넓힐 수 있다.

퍼지 추론기의 추론 규칙은 앞절에서 얻은 규칙을 토대로 표 3과 같이 구성하였다.

표 3. 소속함수의 폭을 동조하기 위한 규칙  
Table 3. Rule table for tuning width of membership function

K	VS	SM	MM	BG	VB
WE	SM	MM	BG	BG	BG
WdE	SM	MM	MM	BG	BG
WdU	VB	VB	SM	VS	VS
T	VS	SM	MM	BG	VB
WE	SM	SM	MM	VS	VS
WdE	BG	MM	MM	MM	SM
WdU	VS	VS	MM	BG	BG
L	VS	SM	MM	BG	VB
WE	VS	MM	VB	VB	VB
WdE	VB	BG	BG	MM	VS
WdU	VB	SM	SM	VS	VS

여기서 새로운 언어 변수들이 사용되었는데, 각각은 다음과 같다. (VS : Very Small, SM : Small, MM : Medium, BG : Big, VB : Very Big)

앞절에서 발견한 규칙과 약간 달라졌음을 알 수 있다. 이것은 실제 시뮬레이션을 하면서 소속함수에 따라 정확한 값을 가지도록 시행착오적으로 약간의 수정을 가했기 때문이다. 또 퍼지 추론기의 전건부와 후건부의 소속함수를 그림 7에 나타내었다. 여기서 각각의 소속함수의 폭은 시행착오적으로 조정하여 사용하였다.

### 4. 시뮬레이션 및 고찰

우선, 부동작 시간(L)을 갖는 1차 지연계를 제어대상으로 정하고, 각각의 K,T,L의 변화에 따라 퍼지 추론기의 한 소속함수의 폭에 의한 응답을 함께 나타내었다.

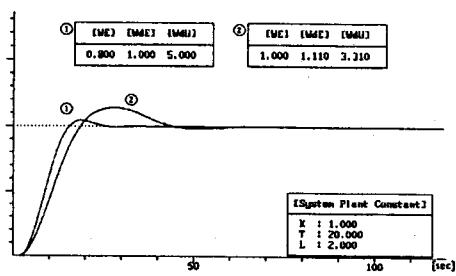


그림 8. 이중 퍼지 추론 제어기를 이용한 제어결과

Fig. 8. Control response using Double fuzzy inference controller

그림 8은 K의 변화에 대한 응답을 나타내었다. 최적의 응답에는 미치지 못하지만, 대체적으로 그와 비슷한 응답을 내고 있다. 그럼의 소속함수들의 폭도 적절히 잘 따라가고 있음을 알 수 있다.

이때 퍼지 추론기의 Fuzzifier에서 사용하는 소속함수의 폭은 각각 5.0, 30.0, 5.0으로 하였으며, Defuzzifier에서 사용되는 소속함수의 폭은 각각 2.0, 2.0, 6.0으로 하였다. 그리고 퍼지 제어기의 샘플링 타임은 0.1초로 하였다.

## 5. 결론

본 논문에서 제안한 새로운 이중 퍼지 추론 제어기의 특징은 다음과 같다.

1. 각각의 서로 다른 제어대상에 따라 퍼지 소속함수의 시행 오차 적인 조정이 필요 없다.
2. 여러 가지 제어대상에 적용하기 위해 별도로 퍼지 소속함수의 폭을 가변할 필요가 없다.

3. 기존에 나와 있는 일반적인 퍼지 제어기를 기초로하여 설계되었기 때문에 기존의 제품에 본 알고리즘의 적용이 용이하다.

이에 반해 개선 점으로는 제어대상 파라미터의 변화에 따른 퍼지 추론기의 추론 규칙의 좀더 정확한 표현이 필요하다. 부동작 시간이 상당히 큰 제어대상의 경우에는 정확한 동조가 되지 않기 때문에 최적의 제어 규칙을 찾기 위하여 유전자 알고리즘의 도입도 검토해 볼 사항이다.

## 参 考 文 献

- [1] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets," Informt. Control, vol.8, pp.338-358, 1965.
- [2] S.S.L. Chang and L.A. Zadeh, "On Fuzzy Mapping and Control," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol.15, no.1, pp.175-189, 1985.
- [3] E.H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for the Control of Dynamic Plants," Proc.IEE vol.12, no.12, 1974.
- [4] S. Assilian and E.H. Mamdani, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller," Int. J. Man-Machin Stud., vol.7, 1974.
- [5] Jyh-Shing R. Jang, "Self-Learning Fuzzy Controllers Based on Temporal Back Propagation," IEEE Trans. on Neural Networks, vol.3, no.5, pp. 714-723 September 1992.
- [6] Chin-Chih Hsu and Shin-ichi Yamada, "GAs Applied in MRFACS for Fuzzy rules set optimization," Asian Control Conference in Tokyo, vol. 1, pp. 611-614, 1994.
- [7] Hiroshi ASAYAMA and Tomoaki MORINAGA, "A New Tuning Method of Fuzzy Controllers for A First order Lag System with Dead Time," Fuzzy System Symposium in Tokyo, pp. 193-196, 1990.