

# 기준모델 추종 자기 구성 제어기

권 춘 기<sup>o</sup>, 배 상 욱, 박 태 홍, 박 귀 태  
고려 대학교 전기공학과

## Reference Model Following Self-Organizing Controller

Choon-Ki Kwon<sup>o</sup>, Sang-Wook Bae, Tae-Hong Park, Gwi-Tae Park  
Dept. of Electrical Eng., Korea Univ.

### ABSTRACT

A new RMFSOC( Reference Model Following Self-Organizing Controller ) is proposed. It is composed by adding the reference model and decision rule to the Mamdani's SOC. The reference model is introduced to explicitly specify the control performance. The self-organizing level of the RMFSOC organizes the control rule which makes the process output follow the reference output generated by the reference model. In order to avoid unnecessary control rule modification, a decision rule is also introduced to determine whether the control rule modification is needed or not.

### 1. 서 론

퍼지 논리 제어기(FLC)는 Mamdani [1]에 의해 Steam engine generator의 제어에 처음 적용된 이래, 많은 다양한 프로세스의 실제 제어에 성공적으로 적용되어 그 유용성이 입증되고 있다[2]. FLC는 주로 프로세스에 대한 전문가의 지식을 기반으로 설계되므로, 복잡하고 수학적으로 잘 정의되지 않는 계통에 대해서도 비교적 간단하게 설계될 수 있으며, 실제 적용시 외란 및 파라미터 변동에 대해 강한 특성을 갖는다. 그러나, FLC의 설계시 그 성능에 가장 큰 영향을 미치는 제어규칙 및 환산계수(scaling factor)의 선정에 많은 어려움이 있으므로, 이들을 자기 학습에 의해 자동적으로 습득하고자 하는 노력이 진행되고 있다. Mamdani[3]가 제안한 자기 구성 제어기(SOC: Self-Organizing Controller)도 그러한 노력의 결과중 하나로서, 언어적 제어규칙을 자동적으로 생성하기 위한 알고리즘이다. 그러나, Mamdani의 SOC에서는 성능 평가표(performance measure)에 의해서만 제어규칙의 바람직한 특성을 명시하므로, 습득되는 제어규칙의 제어 성능을 보다 엄격히 제한할 수 없으며, 계속적으로 제어규칙을 개정함으로써 인해 진동 특성을 보일수 있다는 문제점들이 있고, 특히, 출력 설정치 변화에 대해 나쁜 특성을 보인다.[4]

본 연구에서는 Mamdani의 SOC에 기준모델과 제어규칙 개정 판단규칙을 도입한 새로운 기준모델 추종 자기 구성 퍼지 논리 제어기( RMFSOC: Reference Model Following Self-Organizing Controller )를 제안하고, 제안된 RMFSOC를 저장 탱크의 출력 유량 제어 문제에 적용하여 그 유용성을 보인다.

### 2. 자기 구성 제어기(SOC)

본 장에서는 FLC 설계시 제어규칙 습득의 어려움을 해결하고자 Mamdani와 Procyk[3]가 제안한 SOC에 대해 간략히 기술한다. SOC는 기본 FLC의 하층 레벨과 기본 FLC의 제어 성능을 평가하고, 그 결과에 따라 제어규칙을 개정하는 자기 구성 레벨(self-organizing level)의 계층 구조로 구성된다.

### 2.1 퍼지 논리 제어기( FLC )

FLC는 퍼지화기, 제어규칙, 퍼지 추론기, 비퍼지화기로 구성되며, 제어규칙은 이들중 가장 중요한 요소이다. 일반적으로 제어규칙은 적용 프로세스에 대한 전문의 직관과 경험에 의해 습득되고 있으며, 언어적 규칙들의 집합으로 표현된다. 프로세스의 출력 편차  $E_k$  및 그 변화량  $CE_k$ 를 FLC의 입력 퍼지 변수로, 프로세스의 제어 입력  $U_k$ 를 FLC의 출력 퍼지 변수로 정의하였을때, 하나의 언어적 규칙은 각 입력 퍼지 변수들의 Cartesian 공간에서 다음과 같이 정의되는 퍼지 관계로 표현될 수 있다.

$$R_k = E_k \times CE_k \times U_k \quad (1)$$

전체 제어규칙에 대한 퍼지 관계 R은 각 제어규칙에 대한 퍼지 관계들의 합집합으로 다음과 같이 구할 수 있다.[5]

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_i \cup \dots \cup R_n \quad (2)$$

프로세스 출력 측정에 의해  $E(nT)$ ,  $CE(nT)$ 가 주어졌을때, 프로세스에 대한 제어 입력은 Zadeh의 합성 추론 법칙( Compositional rule of inference )에 의해 다음과 같이 추론될 수 있다.

$$U(nT) = ( E(nT) \times CE(nT) ) \circ R \quad (3)$$

이와 같이 추론된 제어 입력  $U(nT)$ 는 비퍼지화기에 의해 비퍼지화되어 프로세스에 투입된다.

### 2.2 자기 구성 레벨

자기 구성 레벨은 프로세스의 응답으로부터 FLC의 제어 성능을 평가하고, 그 결과에 근거하여 제어 성능을 개선하도록 FLC의 제어규칙을 개정하는 계층으로서, 성능 평가 부분, 중분 모델, 제어규칙 개정 부분의 세가지 단계로 구성된다.

#### 2.2.1 성능 평가 부분 ( Performance measure )

성능 평가 부분은  $E(nT)$ 와  $CE(nT)$ 의 정보로부터  $(nT-mT)$  시간에서의 제어 입력 결정에 사용된 제어규칙의 제어 성능을 평가하고, 그 출력으로서 요구되는 프로세스의 출력 보정량  $p(nT)$ 를 발생하는 일종의 의사 결정자( decision maker )이다.  $p(nT)$ 는 제어규칙과 같은 형태의 성능 평가 규칙에 의해 발생될 수도 있으나, 일반적으로 계산 부담을 줄이기 위해  $E(nT)$ ,  $CE(nT)$ ,  $p(nT)$ 를 양자화하여 구성된 성능 평가표( performance table )에 의해 발생되며, Mamdani[3]에 의해 고안된 성능 평가표를 표1에 나타내었다. 표1의 성능 평가표는  $E(nT)$ 와  $CE(nT)$ 로부터 현재 프로세스의 출력이 설정 기준치로 접근하는가 아닌가를 판단하여 접근하는 경우에는  $p(nT)$ 를

0으로 출력하고, 떨어지는 경우에는 그 정도에 따른 소정의 값을  $p(nT)$ 의 값으로 출력함으로써 원하는 응답을 명시하도록 고안된 것으로서, 특정 계통에 국한되지 않고 사용될 수 있는 것이다.

표1 성능 평가표  
Table 1 Performnce evaluation table

		CHANGE IN ERROR												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
E R R O R	-6	0	0	0	0	0	0	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
	-5	0	0	0	-2	-3	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
	-4	0	0	0	-2	-5	-5	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-6
	-3	0	0	0	-2	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-5	-5	-6
	-2	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-3	-4	-5	-6	
	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-2	-3	-4	-5	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-4
	+0	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	+1	6	4	5	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	+2	6	5	4	3	2	2	2	0	0	0	0	0	0
	+3	6	5	5	4	4	4	4	3	2	2	0	0	0
	+4	6	6	6	6	6	6	6	4	5	5	2	0	0
	+5	6	6	6	6	6	6	6	3	2	2	0	0	0
+6	6	6	6	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	

### 2.2.2. 증분 모델(Incremental model)

성능 평가 부분에서 구한 출력 보정량  $p(nT)$ 를 보정하는데 필요한 제어 입력의 보정량  $r(nT)$ 를 발생하여 제어규칙 개정을 할 수 있도록 하기 위해 제어 대상 프로세스에 대한 증분 모델이 필요하다. 그러나, 프로세스에 대한 정밀한 특성의 증분 모델을 구하기는 일반적으로 어려우므로 SISO 선형계통에 대해서는 식(4)와 같이 상수로, 비선형 다변수 계통의 경우에는 Jacobian 행렬로 대체하고, 모델의 낮은 정밀도를 제어규칙 개정 알고리즘이 극복할 수 있기를 기대할 수 밖에 없다.

$$r(nT) = kp(nT) \quad (4)$$

### 2.2.3 제어규칙 개정(control rule modifier)

제어규칙의 개정은 증분 모델의 출력인 입력 보정량  $r(nT)$ ,  $(nT-mT)$  시간에서의 제어규칙  $R(nT-mT)$  및 현재의 제어규칙  $R(nT)$ 에 근거하여 수행된다. 즉,  $p(nT)$ 는 측정치  $E(nT-mT)$  및  $CE(nT-mT)$ 로부터  $R(nT-mT)$ 에 의해 발생 투입된 제어 입력  $U(nT-mT)$ 에 대한 제어 성능 평가에 의해 발생된 것이므로,  $r(nT)$ 는  $U(nT-mT)$ 의 부적절성을 보상하는 제어량이 된다. 따라서,  $V(nT-mT)=U(nT-mT)+r(nT)$  는  $(nT-mT)$  시간에서의 제어 입력  $U(nT-mT)$  대신에 투입되었어야 할 제어 입력을 의미하게 된다. 이를 퍼지 함의로 표현하면 식(5),(6)과 같고, 제어 규칙으로 표현한 것이 식(7),(8)이다. 따라서, 제어 규칙의 개정은 식(7)이 식(8)로 대체되도록 수행된다.

$$E(nT-mT) \rightarrow CE(nT-mT) \rightarrow U(nT-mT) \quad (5)$$

$$E(nT-mT) \rightarrow CE(nT-mT) \rightarrow V(nT-mT) \quad (6)$$

$$R'(nT) = E(nT-mT) \times CE(nT-mT) \times U(nT-mT) \quad (7)$$

$$R''(nT) = E(nT-mT) \times CE(nT-mT) \times V(nT-mT) \quad (8)$$

식(7)을 식(8)로 대체하는 효과를 발생하는 방법중 한가지는 식(9)의 인이적 표현에 의한 것이며, 상응하는 퍼지 집합 연산은 (10)과 같다

$$R(nT+T) = \{ R(nT) \text{ but not } R'(nT) \} \text{ else } R''(nT) \quad (9)$$

$$R(nT+T) = \{ R(nT) \wedge \overline{R'(nT)} \} \vee R''(nT) \quad (10)$$

### 3. 기준모델 추종 자기 구성 제어기(MFSOC)

전장에서 고찰한 SOC는 FLC의 입력 변수를 프로세스의 출력 편차 및 변화량으로 정의하여 사용하므로 인하여 프로세스의 출력 기준값의 변화시 나쁜 응답 특성을 보일수 있으며, 항상 제어규칙을 개정함으로써 출력 응답에서 진동

현상이 나타날 수 있다. 이에 대한 가장 큰 원인은 바람직한 프로세스의 출력 응답 특성을 성능 평가표에 의해 완전하고도 엄격하게 표현할 수 없기 때문이다. 본 장에서는 이를 해결하기 위한 기준모델 추종 자기 구성 제어기(MFSOC)를 제안한다. MFSOC는 그림 1과 같이 전장의 SOC에 기준모델(reference model), 제어규칙 개정 판단규칙을 추가하여 구성되며, 이때 자기 구성 레벨은 프로세스의 출력이 출력 설정치(setpoint)가 아닌 기준모델에 의해 발생하는 기준 출력(reference output)을 추종할 수 있는 제어규칙을 생성하게 된다.

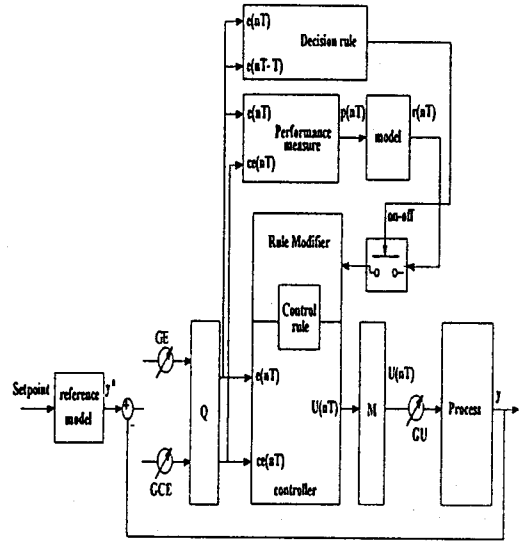


그림 1 제안된 RMFSOC의 블록 다이어그램  
Fig.1 Block diagram of RMFSOC

### 3.1 기준모델

기준모델  $P_m(s)$ 는 프로세스가 추종하여야 할 기준 응답을 발생하도록 설계함으로써, 바람직한 프로세스의 응답을 확실하게 명시하게 되고, 그 성능규정을 쉽게 하기 위해 식(11)과 같은 전형적인 2차계로 선정하며  $\zeta$ 와  $\omega_n$ 은 직용 프로세스에 대한 전문가의 경험에 의해 결정될 수 있다.

$$P_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + \zeta s + \omega_n^2} \quad (11)$$

FLC의 입력 변수는 아래와 같이 기준모델의 출력  $y^*$ 와 프로세스의 출력  $y$ 의 편차와 그 변화량으로 정의한다.

$$\begin{aligned} c_k &= y_k^* - y_k \\ cc_k &= e_k - c_{k-1} \end{aligned} \quad (12)$$

### 3.2 제어규칙 개정 판단규칙

불필요한 개정을 함으로 인하여 제어규칙이 수립되지 않고 진동하는 것을 방지하기 위해 개정이 필요한 상황과 필요치 않는 상황을 판단할 수 있는 제어규칙 개정 판단규칙을 제안하여 도입하였다. 개정 결정 판단 함수는  $e_k$ 와  $e_{k-1}$ 의 비로 설정하였으며 식(13)과 같다.

$$d_k = e_k / e_{k-1} \quad (13)$$

개정 판단규칙은 그림 2에서 보이는 바와 같은 판단 함수  $d_k$ 와 출력 응답 특성과의 관계로부터 유도될 수 있다. 즉, 그림 2 (a)와 (b)는 출력  $y$ 가  $y^*$ 에서 떨어지는 상황을 나타내므로 제어규칙의 개정이 필요한 경우가 되며, 이때  $d_k$ 는 1 보다 크다.

(c)와 (d)는 출력  $y$ 가  $y^*$ 에 근접해가므로 제어규칙의 개정이 필요치 않은 경우이며, 이때  $d_k$ 는 0 보다 크고 1 보다 작게 된다. (e)와 (f)는 출력  $y$ 가  $y^*$ 와 교차하는 응답이며 이 경우 또한 오버슈트를 발생할 수 있으므로 제어규칙 개정이 필요한 경우가 되며, 이때  $d_k$ 는 0 보다 작게 된다. 따라서 제어규칙 개정 판단규칙은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Rule modify} & : d_k < 0, d_k > Th \\ \text{No rule modify} & : 0 < d_k < Th \end{aligned} \quad (14)$$

$Th$  ( $0 < Th < 1$ )는 프로세스 응답의 수렴 속도를 제한하기 위한 임계치로서, 프로세스의 출력이 기준 출력에 수렴하더라도 그 수렴 속도가 느린 경우에는 제어규칙을 개정하도록 하기 위한 것이다. 이러한 개정 판단규칙을 도입하여 불필요한 제어규칙의 개정을 하지 않음으로써 제어규칙의 진동을 막고 결과적으로 빠른 수렴 특성을 기대할 수 있게 된다.

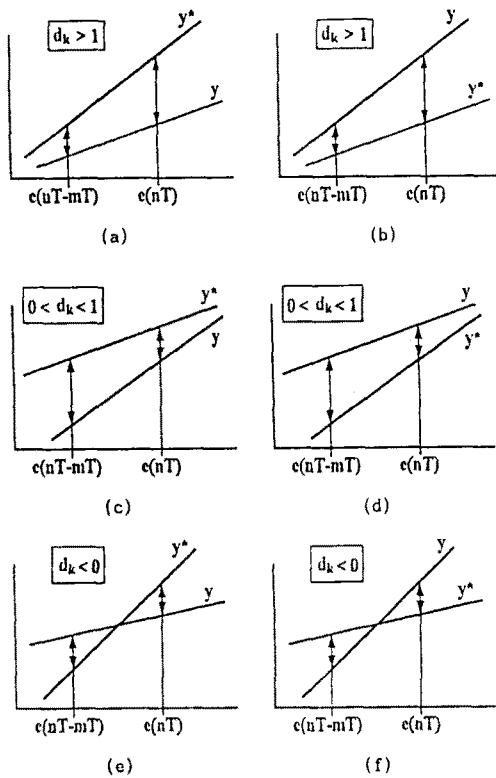


그림 2 출력 특성과 규칙 개정 판단 함수  
Fig.2 Relation between decision function and output characteristic

#### 4. 시뮬레이션 연구

본장에서는 제안된 RMFSOC를 식(15)의 비선형 동태 방정식으로 표현되는 저장 탱크(mass storage tank)의 출력 유량 제어 문제에 적용하고 그 특성을 고찰하고자 한다.

$$\begin{aligned} A \frac{dh}{dt} + \beta \sqrt{h} &= F_i \\ F_o &= \beta \sqrt{h} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $A$ 는 저장 탱크의 단면적,  $\beta$ 는 상수,  $h$ 는 수위이며,  $F_i$ ,  $F_o$ 는 각각 저장 탱크의 입력 및 출력 유량의 흐름율로서, 본 시뮬레이션에서 가정한 파라미터  $A$ ,  $\beta$ 는 각각 10, 1.0039 이고, 입력 제한은  $0 < F_i < 40$  이다.

FLC로는 PI형을 사용하였으며, 입력 및 출력 변수  $e_k$ ,  $ce_k$ ,  $\Delta u_k$ 에 대한 언어적 라벨의 갯수는 각각 5, 5, 7 개로 정의하고, 각 언어적 라벨에 대한 퍼지 집합은 대칭형 삼각함수 형태로 정의하였다. 각 퍼지 변수에 대한 전체공간( Universe of discourse ) E, CE,  $\Delta U$ 는 각각 0.5, 0.02, 1.로 선정하고, 기준모델의 파라미터  $\zeta$ 와  $\omega_n^2$ 는 각각 0.15, 0.005로 선정하였다. 시뮬레이션시 디지털 제어를 위한 샘플링 시간은 0.5 초로 선정하여 사용하였고, 초기 제어규칙 R은 모두 0 이다.

시뮬레이션한 결과는 그림 3과 같다. 제어규칙의 수렴이 매우 빠름을 알 수 있고, 증가하는 출력 설정치 변화에 대해 과도 상태 및 정상 상태 특성이 우수함을 알 수 있다. 감소하는 설정치 변화에 대해서는 항상 양의 값이라는 입력의 제한때문에 과도 상태에서는 기준모델의 출력을 잘 추종하지 못하나 정상 상태에서는 특성이 우수함을 알 수 있다.

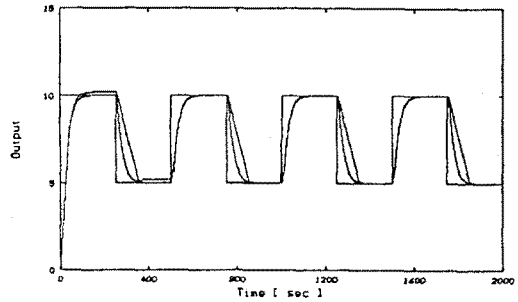


그림 3 RMFSOC에 의한 저장탱크의 출력 유량 제어 결과  
Fig.3 Control result of outlet flow by RMFSOC

#### 5. 결론

프로세스의 출력이 제어계의 출력 특성이 명확하게 명시된 기준모델의 출력을 추종하도록 제어규칙을 생성하는 새로운 기준모델 추종 자기 구성 제어기(RMFSOC)를 제안하고, 저장 탱크의 출력 유량 제어 문제에 적용하여 그 유용성을 보였다. 제안된 RMFSOC는 제어규칙 개정 판단규칙에 의해 제어규칙 개정 여부를 판단하여 불필요한 개정을 방지하고, 기준모델의 출력을 추종하는 제어규칙을 생성하게 함으로써 제어규칙의 진동 현상을 거의 제거하고 빨리 안정된 제어규칙을 발생한다. 제안된 RMFSOC는 출력의 설정치 변화에도 좋은 제어 성능을 보임을 시뮬레이션 연구를 통하여 확인하였다. 그러나, 본 연구 결과는 제어규칙만을 습득하고, 개정하는 자기 구성 제어기에 관한 것이며, 따라서 FLC의 다른 중요한 파라미터인 환산 계수의 선정에 따른 특성 변화를 보이므로 환산 계수를 함께 조절할 수 있는 자기 구성 퍼지 논리 제어기에 관한 연구가 필요하다.

#### 참고 문헌

- [1] E.H.Mamdani, "The application of fuzzy control systems to industrial process", Automatica, vol.13, pp.235-242, 1972
- [2] L.P.Holmblad, J.J.Østergarrd, "Control of cement kiln by fuzzy logic", in: M.M.Gupta, Sanchez, Eds., Fuzzy Information and Decision Process, North Holland, pp.389-399, 1982
- [3] T.J.Procyk, E.H.Mamdani, "A linguistic self-organizing process controller", Automatica, vol. 15, pp.15-30, 1979
- [4] B.S.Zhang, J.M.Edmunds, "Self-organizing fuzzy logic controller", IEE Proceedings-D, vol. 139, no. 5, SEP. 1992
- [5] L.A.Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", IEEE. Trans. Sys., Man, Cybern., SMC-1, pp.28-44, 1973.