

기준모델 추종 자기구성 퍼지 논리 제어기 Reference Model Following Self-Organizing Fuzzy Logic Controller

裴相旭**, 權椿起***, 朴貴泰*
Sang-Wook Bae, Chun-Kl Kwon, Gwi-Tae Park

ABSTRACT

A RMFSOC(Reference Model Following Self-Organizing Fuzzy Logic Controller) is proposed in this paper. In the RMFSOC, the reference model is introduced, where the desired control performance can be specified by an operator of the controlled process. The self-organizing level of the RMFSOC organizes the control rules of FLC which make the process output follow the reference model output. In addition, for the use of preventing improper modifications of control rules, a complementary decision rule is induced from the possible relations between the process output and reference model output. Through a simulation study, it is shown that the robustness of the control system using the proposed RMFSOC to the set-point changes and disturbances can be greatly improved being compared with that of the control system using the Procyk and Mamdani's SOC.

요 약

본 논문에서는 기준모델 추종 자기구성 제어기(RMFSOC: Reference Model Following Self-Organizing Fuzzy Logic Controller)를 제안한다. 제안된 RMFSOC에서는 제어 대상 프로세스의 운전자가 원하는 제어 성능을 명시할 수 있는 기준모델이 도입된다. RMFSOC의 자기구성 레벨은 프로세스의 출력이 기준모델의 출력을 추종하도록 하는 퍼지 논리 제어기의 제어규칙을 생성한다. 또한, 부적절한 제어규칙의 개정을 방지할 수 있는 보조적인 제어규칙 개정 판단규칙을 프로세스 출력과 기준모델 출력간의 관계로부터 유도한다. 시뮬레이션 연구를 통하여, 제안된 RMFSOC에 의한 제어계가 Procyk과 Mamdani가 제안한 SOC에 의한 제어계에 비해 출력 설정치 변동 및 외란에 대해 더욱 강인한 특성을 가짐을 보인다.

*高麗大學校 電氣工學科, 教授, 工博, 서울대 ERC-ACI 연구위원

**Dept. of Electrical Eng., Korea Univ., Prof., Ph. D.

**高麗大學校 電氣工學科, 博士過程 修了

**Dept. of Electrical Eng., Korea Univ., Ph. D. Candidate

***高麗大學校 電氣工學科, 碩士過程

***Dept. of Electrical Eng., Korea Univ., Master course

I. 서 론

퍼지 논리 제어기(FLC : Fuzzy Logic Controller)는 그 특성이 복잡하거나, 수학적 모델의 수립이 불가능함으로 인해 기존의 해석적 제어 기법에 의한 제어기 설계가 어려운 프로세스의 제어에 특히 유용한 것으로 인식되고 있다.[1] FLC의 제어 성능에 가장 큰 영향을 미치는 제어규칙의 습득은 환산 계수의 선정과 함께 FLC의 설계시 가장 어려운 작업 중의 하나이다. 통상적인 제어규칙의 습득 방법은 전문가의 지식을 언어적으로 표현하는 것이나, 제어 대상 프로세스의 제어 목적에 적합한 제어규칙을 항상 습득할 수 있는 것은 아니며, 모든 운전 환경에 적용될 수 있는 제어규칙을 언어적으로 표현한다는 것은 매우 어려운 일이다. 그리고, 고정된 제어규칙을 갖는 FLC에 의해 프로세스를 제어하는 경우, 외란 및 프로세스 자체의 특성 변화에 강인한 것은 사실이지만, 운전 환경 변화에 대한 실제적인 적용 능력은 없는 것이다. 이러한 제어규칙 습득의 어려움과 적용 능력에 대한 문제를 해결하기 위해 자기구성 제어기(SOC : Self-Organizing Controller)[2-5], 퍼지 모델 근거 제어기(FMBC : Fuzzy Model Based Controller)[6,7], 신경망-퍼지 제어기(NFC : Neuro Fuzzy Controller)[8]등 여러 다양한 접근법에 의한 연구가 진행되고 있다.

SOC 접근법들 중 Procyk과 Mamdani[2]에 의해 제안된 SOC는 프로세스를 제어하는 FLC, 제어 성능 평가에 의해 FLC의 제어규칙을 생성 또는 개정하는 자기구성 레벨(self-organizing level)로 구성된 것으로서, SOC의 패러다임으로 인식될 수 있으며, 초기의 제어규칙 습득이 어려운 프로세스에 대한 FLC 설계에 매우 유용한 것이다. 그러나, 이 SOC의 가장 큰 문제점은 설정치 변화와 외란이 존재하는 경우 그 특성이 나쁘다는 것이며, 이외에도 응답 특성에 주기적 진동 현상(cyclic phenomenon)이 나타날 수 있으며, 제어규칙의 수립 시간이 길며, 경우에 따라 불안정한 제어 입력이 발생할 수 있다는 문제점이 있다.[4,5] 이에 대한 주요 원인은 출력 설정치 변화 또는 외란 투입시 과도 응답에 대한 확실한 제한이 없기 때문에 설정치 변화시 과도한 제어 규칙 개정이 발생하기 때문이다. 그리고, 부분적으로는 계통 출력 응답이 만족스러운 경우에도 불필요한 제어규칙 개정을 수행하기 때문으로 인식된다. 이러한 문제점들을 개선하기 위한 SOC의 구조 및 제어규칙 학습 방법들이 Zhang[4], Maeda[5] 등에 의해 제안된 바 있다.

본 논문에서는 위에서 지적한 SOC의 문제점들을 해결하기 위한 한 방법으로서, 기준모델 추종 자기구성 제어기(RMFSOC : Reference Model Following Self-Organizing Fuzzy Logic Controller)를 제안한다. 제안되는 RMFSOC에서는 프로세스의 원하는 응답 특성을 전문가가 확실하게 명시할 수 있도록 하기 위해 기준모델(reference model)을 도입한다. RMFSOC의 자기구성 레벨은 프로세스의 출력이 기준모델의 출력을 추종하도록 하는 FLC의 제어규칙을 생성하고 개정하도록 한다. 또한, 기준모델의 출력과 프로세스 출력간의 발생 가능한 양상으로부터 유도된 간단한 제어규칙 개정 판단규칙을 도입하여 불필요한 제어규칙의 개정을 제거함으로써 제어 계통 특성의 진동 현상을 방지한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 Procyk과 Mamdani가 제안한 SOC에 대해 간략히 기술하며, III장에서는 RMFSOC를 제안하고, IV장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 RMFSOC의 유용성을 보이며, 마지막으로 V장에서는 본 연구에서 얻은 결론 및 추후 과제에 대해 기술한다.

II. 자기구성 퍼지 논리 제어기

Mamdani와 Procyk[2]가 제안한 SOC는 상층과 하층 레벨을 갖는 계층 구조로 구성되어 있으며, 하층 레벨은 프로세스에 대한 제어를 행하는 FLC, 상층 레벨은 FLC의 제어 성능을 평가하고 그 결과에 따라 제어규칙을 개정하는 자기구성 레벨이다.

2.1 퍼지 논리 제어기

FLC는 퍼지화기, 제어규칙, 퍼지 추론기, 비퍼지화기로 구성되며, 제어규칙은 이들 중 가장 중요한 요소이다. 일반적으로 제어규칙은 제어 대상 프로세스에 대한 전문가의 직관과 경험에 의해 습득되고 있으며, 언어적 규칙

들의 집합 또는 퍼지관계로 표현된다. 프로세스의 출력 편차 $e(nT)$ 및 그 변화량 $ce(nT)$ 를 FLC의 입력 퍼지 변수로, 제어 입력 $u(nT)$ 를 FLC의 출력 퍼지 변수로 정의하였을 때, 하나의 언어적 규칙은 각 입출력 퍼지 변수들의 Cartesian 공간 $E \times CE \times U$ 에서 다음과 같이 정의되는 퍼지관계로 표현될 수 있다.

$$R_i = E_i \times CE_i \times U_i \tag{1}$$

여기서 E_i, CE_i, U_i 는 i 번째 제어규칙에서 사용된 언어적 수치(linguistic value)에 해당되는 퍼지 집합들이다. 전체 제어규칙들의 집합에 대한 퍼지관계 R 은 각 제어규칙에 대한 퍼지관계들의 합집합으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_i \cup \dots \cup R_N \tag{2}$$

여기서 N 은 제어규칙의 갯수이다. 프로세스 출력 측정에 의해 $E(nT), CE(nT)$ 가 주어졌을 때, FLC의 출력 $U(nT)$ 은 합성 추론 법칙(Compositional rule of inference)에 의해 다음과 같이 추론될 수 있다.

$$U(nT) = (E(nT) \times CE(nT)) \circ R \tag{3}$$

식(3)에서 $E(nT), CE(nT)$ 는 다음의 과정에 의해 표현되는 퍼지 집합들이다.

$$\begin{aligned} E(nT) &= F\{GE \times e(nT)\} = F\{GE \times [S - y(nT)]\} \\ CE(nT) &= F\{GC \times ce(nT)\} = F\{GC \times [y(nT - T) - y(nT)]\} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 S 는 출력의 설정치(set-point)이며, GE, GC 는 각각 출력 편차와 그 변화량에 대한 환산 계수 (scaling factor)이다. $F\{\cdot\}$ 는 퍼지 변수의 퍼지 표현(fuzzy representation)을 의미한다.

식(3)에서 추론된 FLC의 출력 $U(nT)$ 는 무게중심법(center of gravity)에 의해 비퍼지화되어 프로세스의 제어 목적에 사용되며, PI형 FLC인 경우에는 식(5)의 형태로, PD형 FLC의 경우에는 식(6)의 형태로 프로세스에 투입된다.

$$u_i(nT) = u_i(nT - T) + Q\{U(nT)\} \tag{5}$$

$$u_i(nT) = Q\{U(nT)\} \tag{6}$$

2.2 자기구성 레벨(self-organizing level)

자기구성 레벨은 프로세스의 응답으로부터 FLC의 제어 성능을 평가하고, 그 결과에 근거하여 제어 성능을 개선하도록 FLC의 제어규칙을 개정하는 계층으로서, 성능 평가, 증분 모델, 제어규칙 개정 부분의 세 단계로 구성된다.

2.2.1 성능 평가 (performance measure)

성능 평가는 측정된 $e(nT)$ 와 $ce(nT)$ 로부터 $(nT - mT)$ 시간에서 제어 입력을 발생하였던 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 언어적 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 발생된다. 본 논문에서는 [2]에서 사용된 것과 같은 성능 평가표를 사용하며, 이를 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, 멀어지는 경우에는 그 정도에 따른 소정의 값을 $p(nT)$ 의 값으로 출력함으로써 원하는 응답 특성을 명시하도록 고안된 것으로서, 특정 프로세스에 국한되지 않고 사용될 수 있는 것이다.

표 1. 성능 평가표
Table 1. Performance table

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

2.2.2 증분 모델(Incremental model)

프로세스의 증분 모델은 출력 보정량 $p(nT)$ 를 보정하는데 필요한 제어 입력의 보정량 $r(nT)$ 를 구하여 제어규칙의 후건부를 개정할 목적으로 구성된다. 그러나, 프로세스에 대한 정밀한 특성의 증분 모델을 구하기는 일반적으로 어려운 일이므로 SISO 선형 계통에 대해서는 상수로, 비선형 다변수 계통의 경우에는 Jacobian 행렬로 대치하여 사용한다. 모델의 낮은 정밀도는 제어규칙 개정 알고리즘의 적용 능력에 의해 극복될 수 있기를 기대할 수 밖에 없으며, 프로세스의 입출력 특성이 단조 증가 또는 단조 감소인 경우 대개 가능하다. 출력 보정량 $p(nT)$ 에 해당되는 입력 보정량 $r(nT)$ 는 다음과 같이 증분 모델 M 의 역모델로부터 계산된다.

$$r(nT) = M^{-1}p(nT) \tag{7}$$

2.2.3 제어규칙 개정(control rule modifier)

제어규칙의 개정은 증분 모델의 출력인 입력 보정량 $r(nT)$, 현재의 나쁜 제어 성능을 초래한 $(nT-mT)$ 시간에서의 제어규칙 $R(nT-mT)$ 및 현재의 제어규칙 $R(nT)$ 에 근거하여 수행된다. $p(nT)$ 는 과거 $(nT-mT)$ 시간에서 측정치 $e(nT-mT)$ 및 $ce(nT-mT)$ 로부터 $R(nT-mT)$ 에 의해 발생 투입된 제어 입력 $u(nT-mT)$ 에 대한 제어 성능을 평가한 결과 얻어진, 필요한 출력 보정량을 의미하므로, 식(7)에서 얻어진 $r(nT)$ 는 $u(nT-mT)$ 의 부적절성을 보상하는 제어량이 된다. 따라서, $V(nT-mT) = F\{u(nT-mT) + r(nT)\}$ 는 $(nT-mT)$ 시간에서 $E(nT-mT)$ 및 $CE(nT-mT)$ 에 대응하여 $R(nT-mT)$ 에 근거하여 추론된 $U(nT-mT)$ 대신에 추론 되었어야 할 FLC의 출력울 의

미하게 된다. 이들을 퍼지함의로 표현하면 식(8), (9)과 같으며, 이들을 퍼지관계 형태로 표현한 것이 식(10), (11)이다. 따라서 제어규칙 개정은 퍼지함의 (8)이 (9)로 대치되도록(즉, 퍼지관계 (10)이 (11)로 대치되도록) 수행된다.

$$E(nT-mT) \rightarrow CE(nT-mT) \rightarrow U(nT-mT) \tag{8}$$

$$E(nT-mT) \rightarrow CE(nT-mT) \rightarrow V(nT-mT) \tag{9}$$

$$R'(nT) = E(nT-mT) \times CE(nT-mT) \times U(nT-mT) \tag{10}$$

$$R'(nT) = E(nT-mT) \times CE(nT-mT) \times V(nT-mT) \tag{11}$$

식(10)을 식(11)로 대치하는 효과를 발생하는 방법 중 한가지는 다음의 언어적 표현에 의한 것이며, 이에 상응하는 퍼지 집합 연산은 식(13)과 같다

$$R(nT+T) = \{R(nT) \text{ but not } R'(nT)\} \text{ else } R'(nT) \tag{12}$$

$$R(nT+T) = \{R(nT) \wedge \overline{R'(nT)}\} \vee R'(nT) \tag{13}$$

III. 기준모델 추종 자기구성 퍼지 논리 제어기

본 장에서는 출력 설정치 및 외란에 강인한 특성을 가짐으로써 프로세스의 서보 제어 목적에 사용될 수 있는 기준모델 추종 자기구성 제어기(RMFSOC)를 제안한다. RMFSOC에서는 기준모델을 도입하고, 전장에서 기술한 SOC의 자기구성 레벨에 의해 프로세스의 출력이 기준모델의 출력을 추종하도록 하는 FLC의 제어규칙을 생성하도록 한다. 또한 성능 평가의 보조적인 역할을 할 수 있는 제어규칙 개정 판단규칙을 도입하여 불필요한 제어규칙 개정을 방지함으로써 계통 특성의 진동 현상을 제거한다. 그림 1은 제안되는 RMFSOC의 블럭도를 나타낸 것이다.

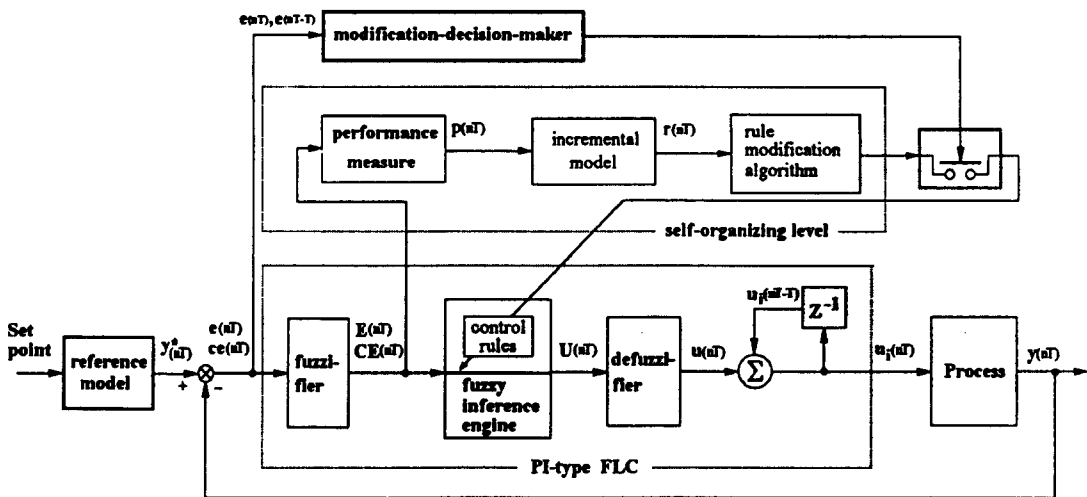


그림 1. 제안된 RMFSOC의 블럭 다이어그램
Fig 1. Schematic diagram of RMFSOC

3.1 기준모델

기준모델 $P_m(s)$ 는 프로세스가 추종해야 할 기준 응답을 발생하도록 설계하며, 그 성능규정을 쉽게 하기 위해 식(14)과 같은 전형적인 2 차계로 선정한다. ζ 와 ω_n 은 제어 대상 프로세스에 대한 운전자 또는 전문가의 경험에 의해 결정될 수 있다.

$$P_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (14)$$

RMFSOC에서 FLC 및 자기구성 레벨의 입력 변수로서는 식(15)와 같이 기준모델의 출력 y^* 와 프로세스의 출력 y 의 편차와 그 변화량으로 정의한다.

$$\begin{aligned} e(nT) &= y^*(nT) - y(nT) \\ ce(nT) &= e(nT) - e(nT-T) \end{aligned} \quad (15)$$

이와 같이 기준모델을 도입한 RMFSOC에서는 다음과 같은 장점들을 얻을 수 있다. 먼저, 성능 평가표에 의해 확실하게 명시할 수 없었던 상승 시간(rise time), 오버슈트등 프로세스의 원하는 과도 응답 특성을 전문가에 의해 기준모델로서 확실하게 명시할 수 있게 함으로써, 프로세스에 대한 전문가의 지식을 SOC 설계에 고려할 수 있게 된다. 또한, 식(15)로 정의된 SOC의 입출력 변수들은 과도상태 및 정상상태에서 항상 비슷한 정도의 작은 값들을 갖게 되므로 출력 설정치 변화 또는 외란 투입시에도 제어규칙 개정의 정도가 크게 변화하지 않게 된다.

3.2 제어규칙 개정 판단규칙

제안되는 RMFSOC에서는 불필요한 개정을 함으로 인한 제어 성능 저하를 방지하기 위해 개정이 필요한 상황과 필요치 않은 상황을 판단할 수 있는 제어규칙 개정 판단규칙을 제안하여 도입하였다. 개정 판단 함수는 $e(nT)$ 와 $e(nT-T)$ 의 비로 설정하였으며 식(16)과 같다.

$$d(nT) = e(nT) / e(nT-T) \quad (16)$$

개정 판단규칙은 그림 2에서 보이는 바와 같은 판단 함수 $d(nT)$ 와 출력 응답 특성과의 관계로부터 유도될 수 있다. 즉, 그림 2 (a)와 (b)는 $y(nT)$ 가 $y^*(nT)$ 에서 멀어지는 상황을 나타내므로 제어규칙의 개정이 필요한 경우가 되며, 이때 $d(nT)$ 는 1 보다 크다. (c)와 (d)는 출력 $y(nT)$ 가 $y^*(nT)$ 에 근접해가므로 제어규칙의 개정이 필요치 않은 경우이며, 이때 $d(nT)$ 는 0 보다 크고 1 보다 작게 된다. (e)와 (f)는 출력 $y(nT)$ 가 $y^*(nT)$ 와 교차하는 응답이며 이 경우 또한 오버슈트를 발생할 수 있으므로 제어규칙 개정이 필요한 경우가 되며, 이때 $d(nT)$ 는 0 보다 작게 된다. 따라서 제어규칙 개정 판단규칙은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Rule modify} &: d(nT) < 0, d(nT) > Th \\ \text{No rule modify} &: 0 < d(nT) < Th \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $Th(0 < Th < 1)$ 는 프로세스 응답의 원하는 수렴 속도를 명시하기 위한 임계치로서, 프로세스의 출력이 기준 출력에 접근하더라도 그 접근 속도가 느린 경우에는 제어규칙을 개정하도록 하기 위한 것이다.

이러한 개정 판단규칙을 도입하여 불필요한 제어규칙 개정을 하지 않음으로써 제어규칙의 진동과 같은 제어 성능의 저하를 방지하고, 결과적으로 제어규칙의 빠른 수렴 특성을 기대할 수 있게 된다.

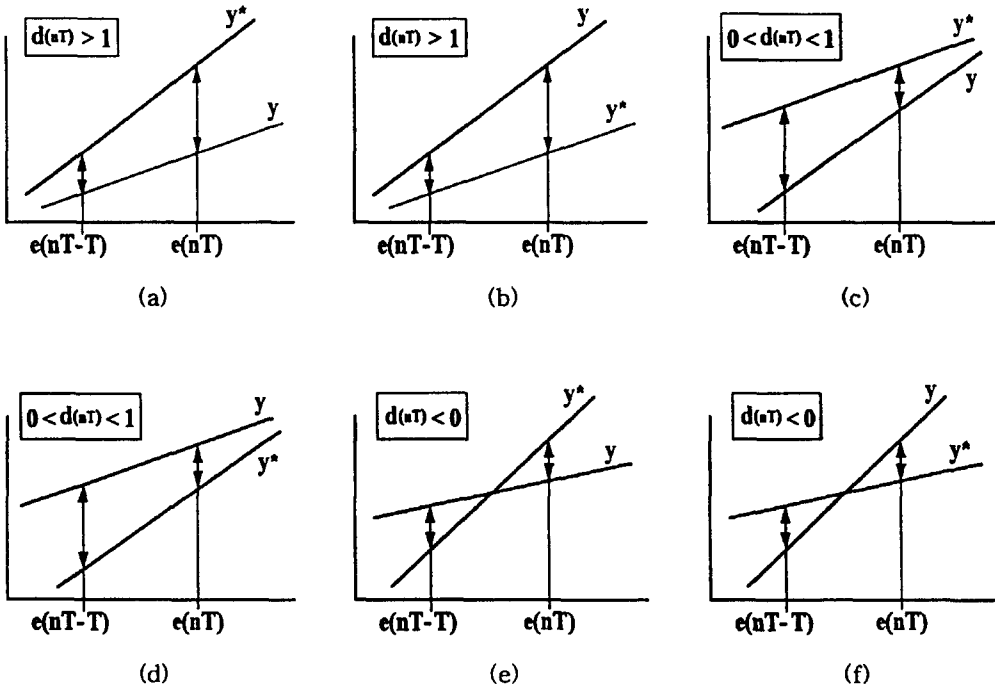


그림 2. 출력 특성과 규칙 개정 판단 함수간의 관계
 Fig 2. Relations between decision function and output characteristic

3.3 제어규칙표의 생성

본 논문에서는 FLC의 출력 추론시 퍼지관계에 의한 추론을 행하지 않고, 제어규칙 개정 알고리즘에 의해 구해진 퍼지관계 형태의 제어규칙으로부터 언어적 제어규칙표를 도출하여 언어적 제어규칙에 의한 추론을 행하여 제어 입력을 구한다. 이를 위해 본 논문에서는 식(4)에서의 퍼지 표현 $F\{\cdot\}$ 를 퍼지 이산화법(fuzzy discretization) [9]으로 정의하여 사용한다. 즉, singleton법에 의해 퍼지화된 입력 퍼지 집합들을, 각 퍼지 변수의 전체 공간에서 정의된 기준 퍼지 집합들(reference fuzzy sets)에 대해 퍼지 이산화하여 표현한다. 이 방법에 의해 각 퍼지 집합들을 표현하면 퍼지관계의 차수를 작게 유지하면서, 각 퍼지 변수의 연속치에 대한 추론을 행할 수 있게 되고, 또한 기준 퍼지 집합들은 언어적 수치들과 대응될 수 있기 때문에 언어적으로 기술된 제어 전략으로부터 식(3)의 퍼지관계 R 을, 또는 자기구성 알고리즘에 의해 구해진 퍼지관계 R 로부터 언어적 제어규칙을 쉽게 도출할 수 있게 된다. 퍼지관계 R 로부터 언어적 제어규칙을 유도하는 방법은 다음과 같다.

퍼지 이산화법에 의해 표현된 임출력 퍼지 변수들을 사용하여 식(13)으로부터 퍼지관계 R 을 구했을 때, R 의 각 요소값들은 해당되는 하나의 제어규칙에 대한 진리 정도(truth degree)를 나타내게 된다. 따라서, e 와 ce 에 대한 각 언어적 수치의 쌍(E_i, CE_j) ($i=1,2,\dots,c_e, j=1,2,\dots,c_{ce}$)에 대응하여 투입되어야 할 u 에 대한 언어적 수치는 U_l ($l=1,\dots,c_u$)들 중 가장 큰 진리 정도를 갖는 언어적 수치를 할당함으로써 하나의 제어규칙을 생성하고, 그 제어규칙의 진리 정도 λ_{ij} 는 그 규칙에 해당하는 퍼지관계 R 의 요소값으로 다음과 같이 할당된다.

$$\lambda_{ij} = \max_l R(i, j, l), \quad (l=1, 2, \dots, c_u) \tag{18}$$

동일한 쌍(E_i, CE_j)에 대해 진리 정도가 같은 규칙이 2개 이상일 경우가 발생할 수도 있는데, 2개인 경우에는 0에 가까운 출력을 발생할 수 있는 언어적 수치를 할당하고, 3개인 경우 중간의 언어적 수치를 할당한다. 이 과정에 의해 구해진 제어규칙표는 표2와 같은 형태를 취하게 된다. 표2의 각 요소에는 해당되는 u 의 언어적 수치와 그 규칙의 진리 정도 λ_{ij} 가 함께 저장된다.

표 2. 퍼지관계 R로부터 도출되는 제어 규칙표

Table 2. Control rule table induced from the fuzzy relation R.

	CE^1	CE^2, \dots	CE^j, \dots	CE^{c*}
E^1				
E^2				
\vdots				
E^j	...		$(U^{1\dots j}, \lambda_{ij})$...
\vdots				
E^{c*}				

IV. 시뮬레이션 연구

본 장에서는 시뮬레이션 연구를 통하여 제안된 RMFSOC와 Mamdani와 Procyk이 제안한 SOC[2]간의 성능 비교를 통해 그 유용성을 보인다. 특히, 제어규칙 개정 판단규칙 도입에 따른 효과를 살펴 보기 위해 판단규칙을 도입하지 않은 RMFSOC에 대해서도 별도의 시뮬레이션을 행하였다.

시뮬레이션에 사용된 프로세스는 다음과 같이 표현되는 2차의 비선형 계통이며[2], 이 계통의 스텝 응답은 그림 3과 같다.

$$\ddot{X} + 0.1X\dot{X} + 0.375X = 0.00375U \tag{19}$$

FLC로는 PI형을 사용하였으며, FLC의 입력 및 출력 변수 $e(nT)$, $ce(nT)$, $\Delta u(nT)$ 에 대한 기준 퍼지 집합의 갯수는 각각 5, 5, 7 개로 정의하고, 각 퍼지 집합은 대칭형 삼각함수 형태로 정의하였다. 각 퍼지 변수에 대한 환

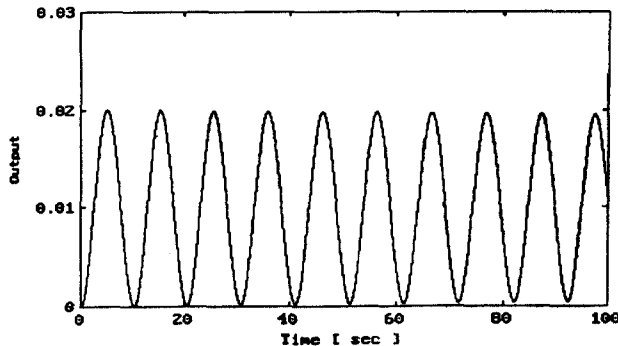


그림 3. 2차 비선형 계통 프로세스(식16)의 스텝 응답

Fig 3. Step response of the second-order nonlinear process of Eq.(16)

산 계수 GE, GC, GU는 SOC의 경우 각각 0.4, 5., 400.로, RMFSOC의 경우 0.5, 2.5, 600으로 선정하였다. 중분 모델 M은 두 경우 모두 0.667로 선정하였다. 특히, RMFSOC의 경우 기준모델의 파라미터 ζ 와 ω_n^2 은 각각 1.033, 0.15로 선정하고, 제어규칙 개정 판단규칙의 임계치는 $Th=0.8$ 로 선정하였다. 시뮬레이션시 FPLC의 디지털 실현을 위한 샘플링 시간은 0.3 초로 선정하여 사용하였고, 초기 제어규칙 R은 모두 0이다.

그림 4 (a), (b), (c)는 400 초에 크기 2667의 스텝형 입력 외란이 투입되는 경우 각각 SOC, 판단규칙이 없는 RMFSOC와 판단규칙을 갖는 RMFSOC에 의한 제어계의 출력 응답 및 입력을 나타낸 것이다. RMFSOC의 제

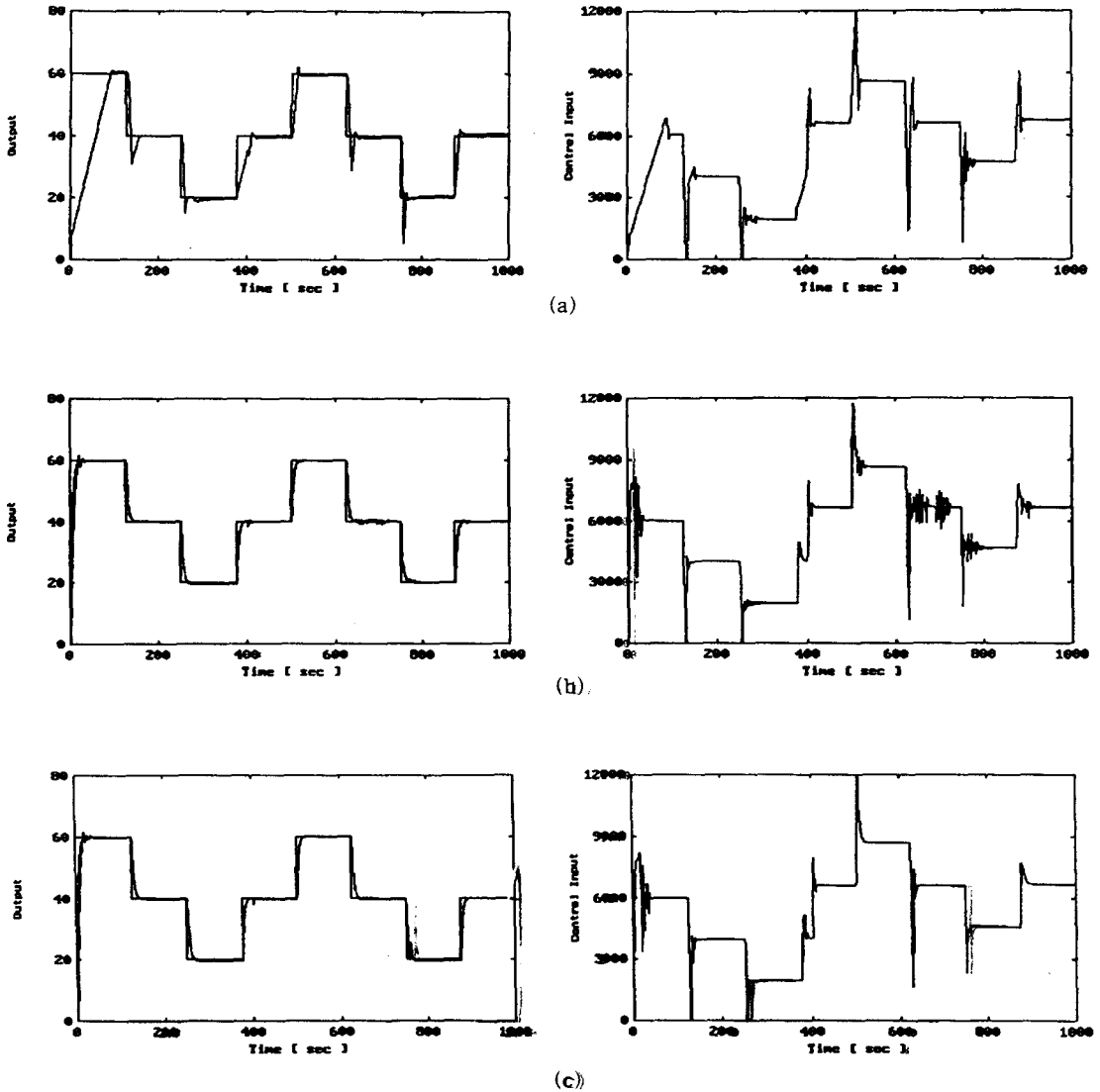


그림 4. 단위 계단 형태의 입력 외란이 400초에 투입되었을 때 계통 응답, (a) SOC, (b) 판단규칙을 갖지 않는 RMFSOC, (c) 판단규칙을 갖는 RMFSOC

Fig 4. System responses with step input disturbance at 400 [sec], (a) SOC, (b) RMFSOC without decision rule, (c) RMFSOC with decision rule

어 응답에서는 SOC의 응답에 비해 과도 응답이 크게 개선되며, 설정치 변화에도 그 응답 특성이 일정함을 알 수 있다. 특히 SOC의 결과에서는 외란이 투입된 이후 과도 응답 및 정상상태 응답이 더욱 나빠지고, 판단규칙을 도입하지 않은 RMFSOC에서는 정상상태 특성이 다소 나빠짐을 알 수 있다. 그러나, 판단 규칙이 도입된 RMFSOC의 경우 과도 응답뿐만 아니라 정상상태 응답 특성도 매우 만족스러운 것을 알 수 있다.

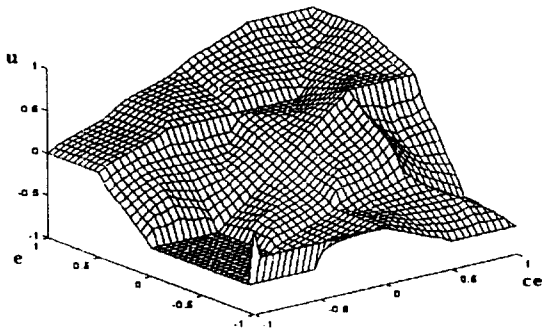
참고적으로 외란이 투입되지 않은 경우의 시뮬레이션에서 SOC와 판단규칙을 갖는 RMFSOC로부터 얻은 제어규칙표를 각각 표 3 (a)와 (b)에 보였으며, 각 제어규칙표에 의해 얻은 정규화된 전체 공간에서의 제어 평면을 그림 5 (a), (b)에 보였다. SOC에 의해 습득된 제어규칙은 유사한 크기의 퍼지 입력 변수값들에 대해 값의 차이가 큰 FLC 출력을 발생하기 쉬운 것이나, RMFSOC에 의해 습득한 제어규칙이 더욱 세밀한 출력을 발생하는 일반적인 선형 제어규칙에 더욱 가까운 것을 알 수 있으며, 이는 RMFSOC의 구조적인 특성으로 인해 FLC의 입력 변수들의 값들이 항상 작은 값으로 유지될 수 있기 때문으로 인식된다.

표 3. 외란이 투입되지 않았을 때 얻은 제어 규칙표, (a) SOC, (b) RMFSOC

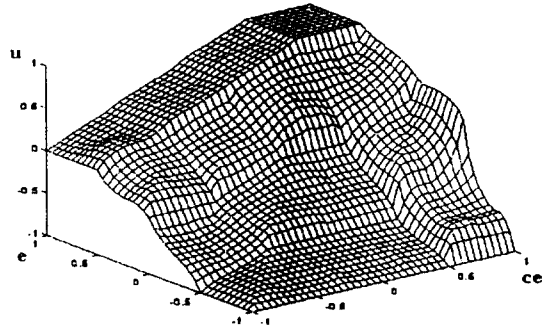
Table 3. Control rules obtained from the simulation without disturbance, (a) SOC, (b) RMFSOC

		Change of Error				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E r r o r	NB	★	★	NS(0.843)	NM(0.676)	NM(0.629)
	NS	NM(0.461)	NM(0.655)	NS(0.559)	ZO(0.435)	NM(0.629)
	ZO	NM(0.698)	NM(0.740)	ZO(0.999)	PM(0.780)	PM(0.587)
	PS	ZO(0.552)	PS(0.547)	PS(0.580)	PS(0.542)	PB(0.852)
	PB	ZO(0.557)	PS(0.513)	PM(0.558)	PB(0.706)	PB(0.706)

		Change of Error				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E r r o r	NB	NB(0.503)	NB(0.716)	NB(0.709)	NB(0.535)	NB(0.574)
	NS	NB(0.503)	NM(0.577)	NM(0.530)	NM(0.479)	PS(0.245)
	ZO	NS(0.529)	NS(0.640)	ZO(0.994)	ZO(0.569)	PM(0.512)
	PS	ZO(0.286)	PS(0.544)	PM(0.789)	PB(0.597)	PB(0.597)
	PB	ZO(0.786)	PS(0.658)	PM(0.616)	PB(0.698)	PB(0.626)



(a)



(b)

그림 5. 표 3의 제어규칙표에 의한 제어 평면, (a) SOC, (b) RMFSOC

Fig. 5. Control surfaces by the control rules of Table 3, (a) SOC, (b) RMFSOC

V. 결 론

본 논문에서는 기준모델, 제어규칙 개정 판단규칙, 자기구성 레벨과 퍼지 제어기로 구성되는 기준모델 추종 자기구성 제어기(RMFSOC)를 제안하였다. 제안된 RMFSOC에서는 기준모델의 파라미터를 적절히 선정함으로써 운전자가 원하는 제어 대상 프로세스의 출력 응답 특성을 제어계에 확실히 명시할 수 있다. 이때 자기구성 레벨은 프로세스의 출력이 기준모델의 출력을 추종하도록 하는 FLC의 제어규칙을 생성 또는 개정하게 된다. 또한 제어계가 만족스런 출력 응답을 보일 때도 제어규칙이 개정됨으로써 제어 성능이 저하되는 경우를 방지하기 위해 보조적인 제어규칙 개정 판단규칙이 도입되었다. 제안된 RMFSOC가 Mamdani와 Procyk가 제안한 SOC에 비해 과도 응답이 크게 개선되고, 설정치 변화 및 외란 투입의 경우에도 강인함을 시뮬레이션 연구를 통하여 보였다. 또한 RMFSOC 제어계에서 판단 규칙의 도입에 의해 정상상태 특성을 개선할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다. 따라서, 제안된 RMFSOC는 설정치 변화가 존재하며, 환경 변화에 대한 적응 능력이 요구되는 서보 제어계 설계에 유용할 것으로 기대된다.

본 연구 결과는 제어규칙만을 습득하고, 개정하는 자기구성 제어기에 관한 것으로서, FLC의 다른 중요한 파라미터인 환산 계수의 선정에 따라 속응성과 정상상태 응답에서의 특성 변화가 수반된다. 따라서 향후 연구 과제로는 FLC의 환산 계수를 함께 조정할 수 있는 자기구성 퍼지 논리 제어기에 관한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. E.H.Mamdani, "The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Process," *Automatica*, Vol.13, pp.235-242, 1977.
2. T.J.Procyk, E.H.Mamdani, "A Linguistic Self-Organizing Process Controller," *Automatica*, Vol. 15, pp.15-30, 1979.
3. S.Shao, "Fuzzy Self-Organizing Controller and its Application for Dynamic Process," *FSS*. 20, pp. 151-164, 1988.
4. B.S.Zhang, J.M.Edmunds, "Self-Organizing Fuzzy Logic Controller," *IEE Proceedings-D*, Vol.139, No. 5, SEP., pp.460-464, 1992.
5. M.Maeda, S.Murakami, "A self-tuning fuzzy controller," *FSS* 51, pp.29-40, 1992.
6. M.Sugeno, G.T.Kang, "Fuzzy Modelling and Control of Multilayer Incinerator," *FSS*. 18, pp.329-346, 1986.
7. B.Graham, R.B.Newell, "Fuzzy Adaptive Control of a First-Order Process," *FSS*. 31, pp.47-65, 1989.
8. S.Shihuang, F.Jianan, C.Liang, "A New Self-Organizing Fuzzy Controller using Neural Network," *Proc. of IMACS/SICE '92*, Kobe, Japan, pp.1229-1234, 1992.
9. W.Pedrycz, "An Identification Algorithm in Fuzzy Relational Systems," *Fuzzy Sets and Systems* 13, pp.153-167, 1984.