

## RVEGA - 최적 퍼지 제어를 이용한 온도 제어 시스템의 구현

◦ 김정수\*, 정종원\*, 송호신\*\*, 김태우\*\*\*, 박영식\*\*\*\*, 이준탁\*  
 \*동아대학교 전기공학과, \*\*부산정보대 전기전자계열, \*\*\*한국전력, \*\*\*\*동의대학교 전자계산학과

### Implementation of a Thermal Control System using RVEGA - Optimal Fuzzy Controller

◦ Jung-Soo Kim\*, Jong-Won Jeong\*, Ho-Shin Song\*\*, Tae-Woo Kim\*\*\*, Young-sik\*\*\*\*, Joon-Tark Lee\*  
 \*Dong-A Univ., \*\*Pusan Info. College, \*\*\*KEPCO, \*\*\*\*Dong-eui Univ.

**Abstract** - In general, the thermal control system has nonlinearity and the time delay, furthermore, it is difficult to design the free size controller, because the external environmental disturbances, such as rapid temperature change. Many researchers in this field are preferring to adapt the fuzzy logic control methods. But it is noted that the actuator identification of MF's used in FLC is very difficult. Therefore in this paper, an implementation technique of thermal control system using RVEGA based optimal fuzzy control was proposed. It's superiority and exaction in controller design processes hardware in implementation were proved through a series of simulations and experimentations.

#### 1. 서 론

온도 제어의 경우, 실제 산업현장에서는 다양한 온도 시스템이 존재하므로 가능한 모든 온도 시스템에 범용적으로 적용될 수 있는 제어기 구성이 필연적이다. 특히, 설정온도의 변화가 다양한 플랜트, 아주 정밀한 온도제어를 요구하는 플랜트 등과 같은 제어대상에 대해서는 더욱 절실하다고 할 수 있다. 또한, 외란에 대해 강인하고 제어대상이나 설정온도의 변화에 신속하게 제어 파라미터를 동조하여 항상 최적의 제어상태를 유지할 수 있도록 제어시스템을 구성하는 것이 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 시간 지연을 갖는 비선형 온도 제어 시스템의 안정화 제어를 위해 지능형 제어 기법 중의 하나인 퍼지 제어를 적용, 최적의 온도 제어를 실현하고자 하였고, 제어기의 설계 부분에서 퍼지 규칙 및 퍼지 멤버십 함수를 실변수 엘리트스트 유전 알고리즘(Real Variable Elitist Genetic Algorithm : RVEGA)을 이용하여 최적화시켰다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 온도 제어 시스템의 구조 및 수학적 모델링

본 논문의 실험에서 사용된 온도 제어 시스템(CEI03, TECQUIPMENT LIMITED, ENGLAND)은 크게 팬(Fan)부, 히터(Heater)부 및 셔터(Shutter)부의 세부분으로 구성되어 있으며, 아래 단자에 의해 전원을 공급받는다. 출력부인 백금 저항형 온도 센서의 스케일은 100(mV/°C)이다.

CEI03의 기본구조를 그림 1에서, 공정 블록의 세부도는 그림 2에서 보여준다.

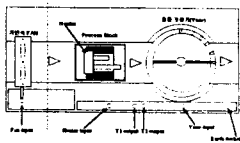


Fig. 1. Structure of CEI03 Thermal Process Control Apparatus

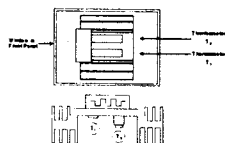


Fig. 2. Process Block

만약 블록이 복사와 대류에 의해서 열을 잃는다고 가정하면, 열출력  $q_0$ 는 블록의 온도  $T$ , 주변 온도  $T_{am}$ , 블록의 표면 영역과 다른 파라미터들의 비선형 함수로서 복잡해진다. 따라서 본 논문에서의 온도 제어 시스템은 미소 변위의 온도 차이에 대해서는 선형에 관계된다고 가정한다.

$$q_0 = h \cdot A(T - T_{am}) \quad (1)$$

$h$ : 열전달계수

$A$ : 열전달에 직접 사용된 블록의 표면 영역

주위의 주변온도( $T_{am}$ )에서  $\Delta T$  만큼의 작은 변화를 고려한다면, 시스템 모

델은 선형 1차 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$c \frac{d\Delta T}{dT} + h \cdot A \cdot \Delta T = q_i \quad (2)$$

라플라스 변환을 통해 전달함수를 구하면,

$$\Delta T(s) = \frac{k}{\tau s + 1} q_i(s) \quad (3)$$

가 된다. 여기서,  $\tau$ 는 계의 시상수,  $k$ 는 이득으로서 다음과 같다.

$$\tau = \frac{c}{h \cdot A}, \quad k = \frac{1}{h \cdot A} \quad (4)$$

위의 모델에서는 일정한 냉각율이 적용되었다고 가정했다. 그러나 본 시스템에서는 사실상의 냉각율이 냉각팬의 속도에 따라서 변화된다. 이것은 블록의 열전달계수인  $h$ 에 변화를 주어 모델에 적용할 수 있다. 팬 속도가 입력 전압  $V_i$ 에 의해서 제어된다면,

$$h = h_0 + k_g \cdot V_i \quad (5)$$

$h_0$ : 공기중의 기본 열전달계수

$k_g$ : 블록의 열전달 특성과 함께 팬의 냉각 효과에 관련된 상수

늘어나는 팬 속도의 영향은 계의 시상수  $\tau$ 와 이득  $k$ 를 감소시켜 모델을 선형화 시킬 수 있다.

열전달 시스템을 제어 시스템으로 이용할 때, 열 흐름을  $q_i$ 는 전기 히터에서 공급된 전압에 의해서 제어된다. 또한, 온도는 두 전기적 센서( $T_1, T_2$ )중 하나에 의해서 감지될 것이다. 전체의 시스템은 그림 3에서 보여주는 것처럼 도식적으로 표현될 수 있다.

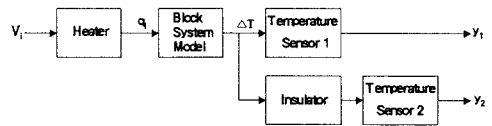


Fig. 3. Heater & Temperature Sensor System

만약  $k_0$ 와  $k_{s1}$ 이 히터와 센서 1의 이득이라면,

$$\begin{aligned} q_i &= k_0 \cdot V_i \\ T_1 &= k_{s1} \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (6)$$

로 되고, 식 (3)의 전달함수와 결부시키면 아래와 같은 표준 1차 시스템이 주어진다.

$$T_1(s) = \frac{G}{(\tau s + 1)} \cdot V_i(s) \quad (7)$$

두 번째 센서는 절연체에 의해서 온도 지연이 발생하기 때문에 별도의 센서 시상수인  $\tau'$ 를 도입하였다. 온도  $\Delta T$ 와 센서 2의 출력은 다음과 같이 관련된다.

$$T_2(s) = \frac{k'_{s2}}{(\tau' \cdot s + 1)} \Delta T(s) \quad (8)$$

따라서, 센서 2를 통하여 블록 온도를 감지할 때, 다음과 같은 표준 2차 시스템 전달 함수가 다음과 같이 나타난다.

$$T_2(s) = \frac{G'}{(\tau \cdot s + 1)(\tau' \cdot s + 1)} V_i(s) \quad (9)$$

본 논문에서 사용될 온도 제어 시스템 각각의 파라메타 값들은, 앞에서 가

술한 온도 제어 시스템의 구조와 수학적 모델링 및 열역학의 이론에 기초하여 실제 실험을 통하여 취득한 값으로서 다음의 표 1과 같이 설정하였다.

Table 1. Parameters of the Thermal Process Control System

Parameter	Description	Value	Unit
$m$	Mass of the Block	0.011	[kg]
$C_p$	Specific Heat of the Block	0.900	[kJ/kg · °C]
$h_0$	The basic Heat Transfer Coefficient for still air	0.026	[W/m <sup>2</sup> · °C]
$h$	Heat Transfer Coefficient	235	[W/m <sup>2</sup> · °C]
$A$	Surface Area of the Block for heat transfer	0.0085	[m <sup>2</sup> ]
$T_{amb}$	Around the Ambient Temp.	20	[°C]
$T_1$	Platinum resistance Thermometer Sensor	0.385	[Ω/°C]
$T_2$		10	[°C/V]

## 2.2 제안한 RVEGA-퍼지 제어기 설계

퍼지 추론 시스템에서 가장 어려운 점은 제어 규칙과 멤버십 함수를 구성하는 것이다. 온도 제어 시스템과 같은 비선형 다변수 특성을 갖는 시스템의 규칙을 단순히 전문가의 경험적 지식이나 실험에 의해 구성하는 일은 상당히 주관적이고, 또한 경험에 의존하기 때문에 최적의 성능을 갖는 제어규칙이라고 보기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 유전 알고리즘에 의해 최적의 성능을 갖는 퍼지 제어기를 설계하는 방법에 대해 논의한다.

먼저, 전형적인 입력, 출력 멤버십 함수의 형태가 그림 4와 같다.

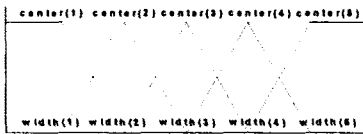


Fig. 4 Typical input-output structure of fuzzy membership function

또한 일반적으로 다루게 되는 퍼지 모델의 각 규칙은 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$i \text{ th Rule : if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } u \text{ is } Z_i \quad (i = 1 \sim n) \quad (10)$$

여기서, Rule  $i$ 는  $i$ 번째 규칙( $1 \leq i \leq n$ )을 말하며,  $x_1, x_2$ 는 입력변수,  $u$ 는 출력을 나타낸다. 만약, 각각의 입력 변수가 5개의 언어적 퍼지 집합으로 구성되어 있다고 하면 (Negative Big, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Big) 이는 중복 순열에 의하여  $5!/2 = 25$ 개의 최대 규칙수를 가질 수 있게 된다.

GA로의 적용은, 입력 변수와 출력 변수를 염색체로 구성하는데서 부터 시작한다. 각 개체의 특성들은 관련 스트링들을 하나로 통합한 유전 염색체로 나타낼 수 있으며, 아래 표 2에서는 입력부 변수  $e$ 와  $ce$ , 그리고 출력부 변수  $u$ 에 대한 멤버십 함수의 파라미터들을 입력-출력 염색체로 표현하는 방법을 나타내고 있다.

Table 2. Coding for multiparameters identification

$e$	width(1)	center(1)...	width(n)	center(n)
$ce$	width(1)	center(1)...	width(n)	center(n)
$u$	position(1)	position(2) ...	position(m)	

여기서 입력 및 출력 멤버십 함수는 삼각형의 형태를 사용하였고, 각각 중심점(center)과 폭(width)으로 구성이 되어 있다. 이는 본 논문에서 비퍼지화 방법으로 무계중심법을 사용하였기 때문이다.

GA에 의한 퍼지 모델 동정을 하기 위하여, 먼저 입력-출력 스트링의 개수를 정의하여야 한다. 그리고 개체수(population number) 만큼의 임의의 염색체를 생성한다. 모든 염색체가 생성되면 이를 바탕으로 각각의 퍼지모델을 플랜트에 대입하여 평가할 수 있게 된다. 평가를 위해 사용되는 적합도 함수는 본 논문에서는 T 시간 동안에 취득한 실제 출력과 기준 입력간의 오차의 절대치의 합의 평균을 이용하였다.

$$\text{적합도} = \frac{1}{1 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\text{error}_i|} \quad (11)$$

$N$  : T 시간동안에 취득한 데이터의 수

error : 기준입력 - 실제출력

블록의 최종 온도 제어를 위한 퍼지 추론 과정에서, 오차에 대한 언어적 퍼지 변수의 개수가 5개, 오차의 변화량에 따른 언어적 퍼지 변수가 3개이고, 각

각의 퍼지 변수는 중심점과 넓이를 요구하므로 모두 16개이다. 그리고 출력 변수 또한 5개로 하여 각각 중심점과 넓이를 포함해서 10개를 포함하면, 블록의 최종 온도 제어를 위하여 필요한 GA의 스트링 개수는 모두 26개가 된다. 본 논문에서 사용된 RVEGA를 이용한 멤버십 함수 튜닝 퍼지 제어기의 구성도가 그림 5에 나타나 있다.

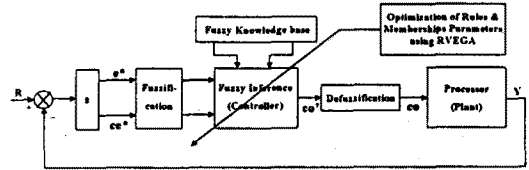


Fig. 5 Block Diagram of Fuzzy Control system using RVEGA

## 2.3 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서의 시뮬레이션은 PI 제어기, 퍼지 제어기 및 RVEGA-퍼지 제어기를 부가하여 응답을 구하여 이 세가지 경우에 대해 상호 비교하는 것으로 시뮬레이션 하였다. 또한 각각의 제어기에 외란을 투입한 뒤 시뮬레이션 한 결과를 비교하였다.

퍼지 제어기의 멤버십 함수를 최적한 값으로 튜닝하기 위한 RVEGA의 파라미터는 아래의 표 3과 같이 적용하였으며, RVEGA에 의하여 최적화 된 퍼지 제어기의 규칙과 멤버십 함수를 각각 표 4와 그림 6에 나타내었다.

Table 3. Parameters of RVEGA

crossover rate	0.85
mutation rate	0.25
size of population	20
maximum generation	150

Table 4. RVEGA based Fuzzy Rules for the Heater Input  $u$

$e$	NB	NS	ZO	PS	PB
ce					
NE		NB	NS	ZO	PB
ZO	NS	NS	ZO	PS	PB
PO	ZO	ZO	PS	ZO	

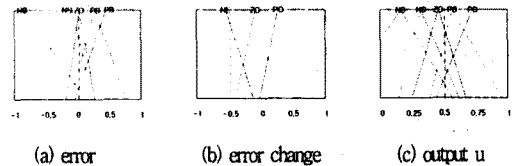


Fig. 6. RVEGA based Fuzzy Membership Function

첫번째로, PI 제어기와 퍼지 제어기 및 RVEGA-퍼지 제어기의 시뮬레이션 결과를 각각 그림 7, 8, 9에 나타내었다.

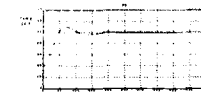


Fig. 7. Simulation results of the classical PI Controller

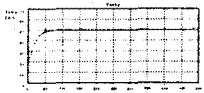


Fig. 8. Simulation results of the Fuzzy Controller

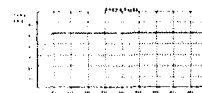


Fig. 9. Simulation results of RVEGA-Fuzzy Controller

다음으로, 외란을 투입하였을 때의 결과를 각각 그림 10, 11, 12에 나타내었다.

그리고 시뮬레이션 한 결과를 표 5를 통하여 정리, 고찰하였다.

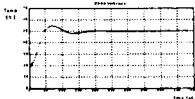


Fig. 10. Simulation results of the PI Controller with Disturbance input

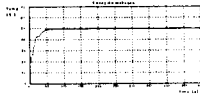


Fig. 11. Simulation results of the Fuzzy Controller with Disturbance input

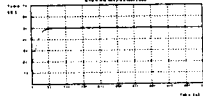


Fig. 12. Simulation results of RVEGA-Fuzzy Controller with Disturbance input

Table 5. Simulation results

	PI controller	Fuzzy Controller	RVEGA-Fuzzy Controller	비 고
Set-Point	50 [°C]			
% Max. O.S.	58.7 [°C] 117.4 [%]	50.6 [°C] 101.2 [%]	50.3 [°C] 100.6 [%]	
Settling Time	173 [s]	75 [s]	52 [s]	±2[%]이내
Rise Time	32 [s]	35 [s]	28.35 [s]	
Response to Disturbance Input	Bad	Normal	Good	

### 2.4 실험 결과 및 고찰

본 연구의 실험을 위한 장치의 구성은 그림 13과 같이 하였다.

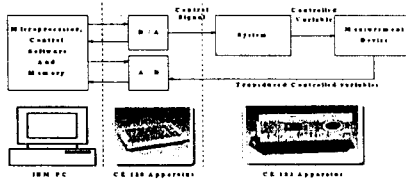
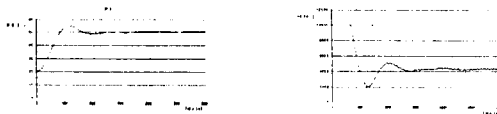


Fig. 13. Hardware Construction of Thermal Process Control System

각각의 제어기에 대한 실험 결과를 아래의 그림 14, 15 및 16에 나타내었다.



(a) Output Temperature  $T_2$  (b) Input Voltage  $V_i$   
Fig. 14. Experimental results of the PI Controller



(a) Output Temperature  $T_2$  (b) Input Voltage  $V_i$   
Fig. 15. Experimental results of the Fuzzy Controller

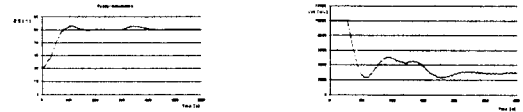


(a) Output Temperature  $T_2$  (b) Input Voltage  $V_i$   
Fig. 16. Experimental results of the RVEGA-Fuzzy Controller

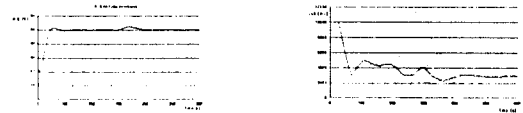
다음으로, 150 [s] 시점에서 외란 요소인 서터에 10 [V]의 입력을 가해준 후의 출력 결과를 각각에 대해서 아래 그림에 나타내었다.



(a) Output Temperature  $T_2$  (b) Input Voltage  $V_i$   
Fig. 17. Experimental results of the PI Controller with disturbance input



(a) Output Temperature  $T_2$  (b) Input Voltage  $V_i$   
Fig. 18. Experimental results of the Fuzzy Controller with disturbance input



(a) Output Temperature  $T_2$  (b) Input Voltage  $V_i$   
Fig. 19. Experimental results of the RVEGA-Fuzzy Controller with disturbance input

위의 실험 결과를 아래 표 6에 나타내었다.

Table 6. Experimental Results

	PI controller	Fuzzy Controller	RVEGA-Fuzzy Controller	비 고
Set-Point	50 [°C]			
% Max. O.S.	55.0 [°C] 110.0 [%]	53.05 [°C] 106.1 [%]	51.58 [°C] 103.16 [%]	
Settling Time	131 [s]	68 [s]	47 [s]	±2 [%]이내
Characteristics for the Disturbance Input	218 [s]	199 [s]	188 [s]	Settling Time

### 3. 결 론

본 논문에서는 시간 지연이 큰 온도 제어 시스템의 안정화 제어를 위해 RVEGA를 이용하여 설계한 퍼지 제어기를 제안하였고, 이를 실험적으로 입증하였다. 제안된 알고리즘은 퍼지의 멤버십 함수와 퍼지 규칙을 결정하는 데에 있어서 전문가의 지식이나 경험에 의존해야 하는 등의 퍼지 제어기의 단점을 해결할 수 있었다. 특히, 시뮬레이션 및 실험 결과에서 볼 수 있듯이, 제안된 제어기는 종래의 PI 제어기나 퍼지 제어기에 비해서 우수한 제어 특성을 나타내었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Yuan-Pao Hsu, Ching-Chih Tsai, "Autoruning for Fuzzy-PI Control Using Genetic Algorithm", ©1996 IEEE
- [2] Hiroyuki ISHIGAMI, Yasuhisa HASEGAWA, Toshio FUKUDA, Takanori SHIBATA, "Automatic Generation of Hierarchical Structure of Fuzzy Inference by Genetic Algorithm", 0-7803-1901-X/94, ©1996 IEEE
- [3] 寺野, 淺野, 菅野 "퍼지 시스템의 응용입문", 대영사, 1991.
- [4] 박정훈, "유전 알고리즘을 이용한 도립 진자 시스템의 최적 퍼지 제어기 설계에 관한 연구", 동아대학교 전기공학과, 석사학위 논문, 1996.
- [5] 김태우, "RVEGA SMC를 이용한 비선형 시스템의 안정화 제어", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문지, pp. 2624-2626, 2000. 7.