

## 온도챔버의 퍼지 자동조정 제어시스템

## (Fuzzy Self-Organizing Control of Environmental Temperature Chamber)

金仁植\*, 權五錫\*\*

(In Sik Kim and Oh Seok Kwon)

## 要約

본 논문에서는 환경시험용 온도챔버를 대상으로 퍼지 자동조정 제어를 설계하여 실험하였다. 온도챔버는 지연시간 및 불감시간을 갖는 비선형 시변 시스템으로, 기존의 PI제어로는 시스템의 특성변화에 따른 제어성능 저하시 파라미터의 동조가 요구되었으나, 변화하는 작동환경과 공정의 특성을 감지하여 지식 베이스를 자동으로 수정하고, 공정의 이상화한 모델에 의한 지연시간을 보상하는 새로운 퍼지 자동조정 제어기법을 제안하였다. 실험을 통한 퍼지제어의 가능성 확인과, 제안된 퍼지 자동조정 제어기법으로 충분한 성능 개선을 기할 수 있음을 입증하였다.

## Abstract

The design and implementation of a fuzzy self-organizing controller for an environmental temperature chamber is discussed. The chamber is a non-linear, time-variant system with delay-time and dead-time. And the parameter tuning is required in PI control when the performance degraded. However the proposed fuzzy-SOC monitors the performance of the process, modifies the data base, and performs the delay-time compensation based on the idealized process model. A series of experiments was performed for the conventional PI and the fuzzy-SOC. These experimental results show the usefulness of the fuzzy-SOC.

## 1. 서론

퍼지제어는 제어 대상체에 대한 인간의 상식과 경험을 종합한 일련의 언어적 퍼지 제어규칙에 기반하

고 있으나 적합한 제어규칙을 만드는 것은 쉽지 않으며, 복잡한 시스템에 대하여는 더욱 그러하다. 또한 시간에 따라 특성이 비선형적으로 변화하는 경우 초기에 작성한 고정된 제어법칙으로는 계속하여 정확한 제어를 할 수 없게 된다. 따라서 항상 변화하는 작동환경과 시스템 특성을 감지하고 그로부터 제어의 정확도를 유지할 수 있도록 제어방식을 수정해야만 한다. 이러한 이유로 자동조정제어(Self-Organizing Control : SOC)가 연구되어 왔다.<sup>[1]</sup>

퍼지 자동조정 제어(Fuzzy-SOC)는 학습 제어적 사상을 도입한 방법으로서, 퍼지 제어규칙을 학습에

\*正會員, 國防科學研究所  
(Agency for Defense Development)

\*\*正會員, 忠南大學校 컴퓨터工學科  
(Dept. of Computer Eng., Chungnam National Univ.)

接受日字 : 1993年 3月 16日

의해 자동적으로 생성하거나, 초기에 적당히 만들어진 규칙을 수정해가는 제어방식이다. 이를 위해서는 축적된 과거의 자료를 바탕으로 현재의 제어 성능을 평가하고, 미리 결정된 수준으로 수렴할 때까지 성능의 향상을 위하여 제어방식을 적절히 변화시켜 가는 것이 필요하다.

본 논문에서는 현재 PI방식으로 제어되고 있는 환경시험용 온도챔버(Environmental temperature chamber)를 대상으로 하였다. 통상 온도챔버의 제어기로는 PID형태이며, 시스템의 특성변화에 따른 제어성능 저하시는 파라미터의 동조(parameter tuning)가 요구된다.

온도챔버는 비선형 시변 시스템으로서 일반적인 단순한 퍼지 제어방식을 적용하여 보면 시간이 경과함에 따라 제어가 잘 되지 않음을 알 수 있으며, 작동환경 및 시스템 특성의 변화를 감지하고 제어방식을 수정하는 자동조정 제어방식이 요구된다. 본 논문에서는 단순한 퍼지제어기와 이를 기본으로 한 퍼지 자동조정 제어기를 설계하여 실험하였다. 실험을 통한 기존의 PI제어와 단순 퍼지제어 및 자동조정 제어의 결과를 비교하여 퍼지제어의 가능성을 확인하고, 퍼지 자동조정 제어의 우수성을 증명하고자 한다.

Ⅱ. 환경시험 온도챔버

환경시험용 온도챔버인 미국 Thermotron사의 WP-315-TCHM1-5-5를 대상으로 퍼지 제어기를 설계하여 실험하였으며, 온도챔버의 간단화한 블록도를 그림 1에 나타내었다.

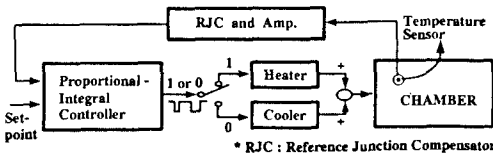


그림 1. 간단화한 온도챔버의 블록도  
Fig. 1. Simplified block diagram of temperature chamber.

제어변수는 챔버 내부온도이며, 제어기 출력은 ON/OFF 신호로서, ON일 때는 히터, OFF일 때는 냉동기만을 작동시켜 미리 설정된 온도에 도달하게 하는 단일 입출력 제어시스템이다.<sup>[2-3]</sup>

온도챔버는 지연시간 및 불감시간을 갖는 단순 1차 시스템으로서 다음과 같이 근사적으로 모델링할 수 있지만 :

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ts}}{1 + \tau s} \tag{1}$$

장입되는 피시험물의 시험사양에 따라 설정온도를 달리하면 시스템 특성이 비선형적으로 변화한다. 또한 시험물의 크기, 발열 또는 흡열 여부, 외기온도, 히터나 냉매의 상태 등에 따라서도 시스템 변수가 변화하는 비선형 시변 제어시스템이다.

Ⅲ. 퍼지 제어기의 설계

온도챔버의 경우는 주변환경과 피시험물의 영향을 많이 받는 시스템으로서 우선 단순 퍼지제어기를 설계하여 실험하였으나 성공적인 제어를 행할 수 없었다. 따라서 단순 퍼지제어기를 기본으로 하고 자동조정 부분을 부가한 퍼지 자동조정 제어기를 설계하여 실험하였다.

1. 단순 퍼지 제어기

온도챔버를 위한 단순 퍼지제어기는 그림 2와 같은 구조로 설계하였다.

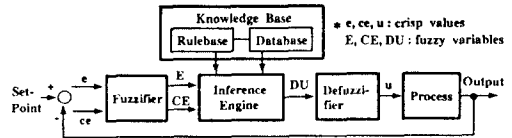


그림 2. 단순 퍼지 제어기의 구조  
Fig. 2. Structure of a simple fuzzy controller.

퍼지화기는 측정된 입력변수 값을 퍼지집합으로 변환하기 위한 것으로 퍼지 단일값(fuzzy singleton)을 사용하였다.

입력변수는 설정온도 T0와 측정온도 TC와의 오차 E와 이의 변화량 CE로 구성하고, 출력변수 DU는 샘플링 주기 T이내에서의 히터 작동시간(ON)의 변화량으로 하였다. 냉동기 작동시간(OFF)은 T와 U의 차이에 의해 자동으로 결정된다.

제어규칙은 가능한 모든 입력변수의 영역을 포함하여 표 1과 같이 37개로 결정하였으며, 식 (2)와 같은 상태평가형의 속도형 규칙으로 하였다.

$$Rule\ k : IF\ E\ is\ E_k\ and\ CE\ is\ CE_k,\ THEN\ DU\ is\ DU_k \tag{2}$$

여기에서 E, CE, DU는 각각 시스템의 상태오차, 오차의 변화량, 제어 입력변수의 변화량을 나타내고,

$E_k, CE_k, DU_k$ 는 전체공간에서 정의된 퍼지변수중의 하나로서 그림 3에 나타내었다. 퍼지변수는 연속형 삼각퍼지숫자를 사용하였으며, 출력변수는 물리의 모멘트(MOMENT) 개념으로 대체하여 구현하므로써 연산을 용이하게 하였다. 즉 삼각숫자의 면적(AREA)을 힘(force), 그 무게중심(CENTROID)의 힘의 작용 거리(moment arm)라 하면 모멘트는 식 (3)과 같이 표현된다.<sup>6</sup>

$$MOMENT = (force) \times (moment\ arm) = AREA \times CENTROID \quad (3)$$

표 1. 퍼지 제어규칙  
Table 1. Fuzzy control rules.

	E							
CE		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		NB	NB	NB	NB	NM	NS	
NM		NB	NB	NM	NS	ZO		
NS		NB	NM	NS	ZO	PS		
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM		
PS		NS	ZO	PS	PM	PB		
PM		ZO	PS	PM	PB	PB		
PB		PS	PM	PB	PB	PB		

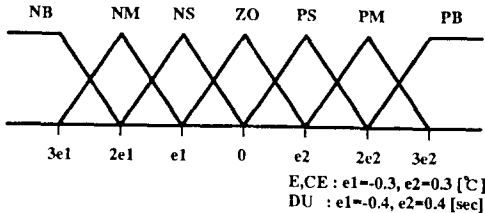


그림 3. 퍼지 입 출력 변수  
Fig. 3. Fuzzy input/output variables.

퍼지 제어규칙은 퍼지 조건명제(implication)로 표현되는 퍼지관계로서, 이의 연산으로 Larsen의 product연산을 사용하였는데, 이는 퍼지변수가 연속형 삼각숫자일 경우 연산이 간단하기 때문이다.

추론방법으로는 Zadeh의 sup-min연산을 사용하였으며, 다음과 같이 근사화한 방법을 사용하였다.<sup>16</sup> 즉, 식 (3)에서 출력변수를 모멘트로 환산하였으므로, 추론연산은 합집합 연산대신 식 (4)와 같이 단순한 덧셈으로 대체할 수 있다.

$$SUM\_AREA = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot DU\_AREA_k \quad (4a)$$

$$SUM\_MOMENT = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot DU\_MOMENT_k \quad (4b)$$

여기에서  $\alpha_k$ 는 적합도로서 k번째 규칙이 제어동작에 기여하는 정도를 나타낸다.

비퍼지화방법으로는 무게 중심법을 사용하였으며 식 (4)로부터 다음과 같이 구한다.

$$CENTROID = SUM\_MOMENT / SUM\_AREA \quad (5)$$

2. 퍼지 자동조정 제어기

자동조정 제어기는 적절한 제어행동을 취하면서 변화하는 시스템 특성을 관찰하고, 성능을 향상시키도록 제어방식을 변화시켜야만 한다.<sup>11</sup> 초기에 작성한 기본 제어방식을 수정하는 방법으로는 제어규칙, 또는 환산계수(scaling factor)를 수정하거나, 이들을 동시에 보상하는 방법이 소개되었으나<sup>14</sup>, 본 논문에서는 지식베이스를 수정하고, 지연시간을 보상하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 퍼지 자동조정 제어기는 (Ⅲ. 1)항에서 기술한 단순 퍼지제어기를 기반으로 하고 자동조정 부분을 추가하였다. 자동조정 부분은 그림 4에 나타낸 바와 같이 공정의 성능평가, 데이터베이스의 수정, 공정의 이상화한 모델(idealized model)에 의한 지연시간의 보상으로 구성되어 시스템 특성의 변화에 실시간으로 적응하도록 하였다.

(1) 성능 평가

제어기의 성능을 정량적으로 측정하여 평가한다. 현재의 제어행동이 최적에 얼마나 가까운가를 나타내며, 데이터베이스를 수정하는 기준이 된다.

매 50샘플마다 E의 평균값  $\bar{E}$ 와 표준편차  $\sigma_E$  U의 평균값  $\bar{U}$ 를 구한다.  $\bar{E}$ 와  $\sigma_E$ 는 데이터 베이스의 수정에,  $\bar{U}$ 는 지연시간의 보상에 사용한다.

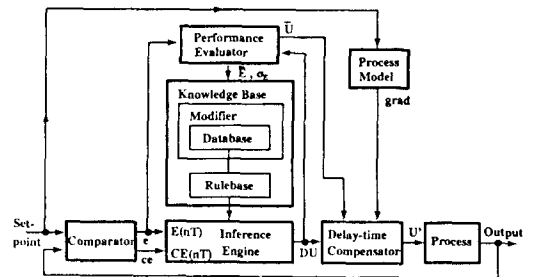


그림 4. 퍼지 자동조정 제어기의 구조  
Fig. 4. Structure of a fuzzy self-organizing controller.

(2) 데이터베이스의 수정

입력변수  $E$ 를 좌우로 영역이동하므로써 오프셋(offset)  $\bar{E}$  를 줄일 수 있다. 또한 히터와 냉동기의 단위시간 작동에 의한 온도의 변화량은 일정치 않고 설정온도가 바뀌면 달라지게 되므로  $\bar{E}$ 의 부호에 따라 양·음쪽 변수의 폭을 상호 반대로 확대 축소한다. 한편 제어출력의 심한 변화는 채터링(chattering)을 유발하므로  $\sigma_E$ 가 허용 편차를 초과하면  $DU$ 의 폭을 축소하여 출력의 변화를 완화시키도록 하였다.

이러한 수정은 매 샘플링 주기마다 일정크기의 미세량을 가감하는 반복적인 조정으로서 시스템이 안정화되면 더 이상의 조정은 필요치 않게 된다.

- i.  $\bar{E}$ 에 의한 입력변수  $E$ 의 영역이동과 폭의 확대·축소

$\bar{E}$ 가 양이면 입력변수  $E$ 의 전체 영역을 좌우 이동하고, 음의 변수폭을 축소, 양의 변수폭을 확대한다.  $\bar{E}$ 가 음이면 반대로 한다.

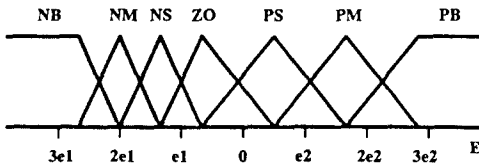


그림 5. 입력변수의 영역이동 및 폭의 확대 축소  
Fig. 5. Modification of input variable.

- ii.  $\sigma_E$ 에 의한 출력변수  $DU$ 의 폭의 축소  
 $\sigma_E$ 가 미리 설정된 허용편차를 초과하면  $DU$ 의 가운데 꼭지점을 중심으로 좌우측의 폭을 축소한다.

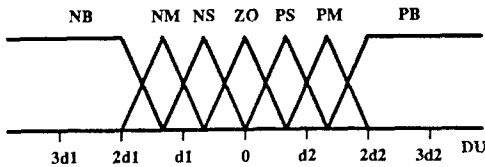


그림 6. 퍼지 출력변수의 폭의 축소  
Fig. 6. Modification of output variable.

(3) 공정모델에 기반한 지연시간의 보상  
어느 시점에서의 나쁜 제어성능은 지연시간 이전의

제어행동에 기인한 것으로 공정의 이상화한 모델에 의한 지연시간 보상을 구성하였다.

만약 온도의 변화율을 알고 있다면, 현재온도  $TC(nT)$ 와 제어입력  $U$ 에 의해 다음번 샘플시의 온도  $TC(nT+T)$ 를 예측할 수 있으며, 이것이 설정온도  $T0$ 와 일치하도록  $U$ 를 보상하여 새로운 제어입력  $U'$ 를 생성해 낼 수 있게 된다 :

$$TC(nT + T) = TC(nT) + (U - \bar{U}) \times grad \quad (6)$$

$$U' = \bar{U} + [T0 - TC(nT)] / grad \quad (7)$$

- 여기에서 TO: 설정온도
- TC: 측정온도
- n: 샘플 번호
- T: 샘플링 주기
- grad: 온도 변화율
- $\bar{U}$ :  $nT$ 이전  $U$ 의 평균값
- $U'$ : 보상된 제어입력

온도 변화율은 전달함수 식(1)을 역 Laplace 변환하고 미분하여 구한다:

$$f'(t) = \frac{K(T-t)}{\tau^2} \exp[(T-t)/\tau] = grad \quad (8)$$

한편 설정온도를 변화시키면 히터와 냉동기의 단위시간 작동에 의한 온도변화량도 변화하므로, 온도변화율을 상승(up\_grad)과 하강(down\_grad)변화율로 분리시키고,  $\sigma_E$ 와  $\bar{E}$ 에 의해 다음과 같이 수정한다 :

- i. 설정온도의 변경시 up\_grad와 down\_grad를 같은 값으로 초기화한다.
- ii.  $\sigma_E$ 가 허용편차를 초과하고  $\bar{E}$ 가 양이면 down\_grad, 음이면 up\_grad를 증가시킨다.

IV. 실험 및 고찰

1. 실험 개요

온도챔버의 내부온도를 T-형 열전대로 센싱하여 기준온도보상기(RJC)와 증폭기를 거친 후 14bit-A/D 변환한 다음 NBS의 7차 다항식<sup>[7]</sup>을 사용하여 온도 단위로 환산하였다. 사용한 컴퓨터는 386-PC(16MHz)이며, 임출력 및 퍼지추론의 계산에는 91 msec가 소요되었다. 최종의 추론결과는 Digital I/O 보드를 통하여 ON/OFF 신호로 출력한다.

실험방법으로서 샘플링 및 제어기 출력의 간격은 기존 PI제어기의 출력파형을 오실로스코프를 이용하

여 관찰하므로서 4초로 결정하였다. 이는 온도가 느리게 변화하는 물리량이고, 입출력과 제어계산에 소요되는 시간을 고려한 것으로서 제어결과에서 정보를 상실하는 등의 문제점은 없었다. 설정온도는 +20℃로 유지하다가 +50℃로 변화시켜 반복 실험하였다.

2. 결과 및 고찰

기존의 PI제어 및 단순 퍼지제어와 퍼지 자동조정 제어에 의한 결과를 그림 7~9에 도시하였다. PI제어시는 오버슈트와 채터링이 발생하였으며, 단순 퍼지제어시는 오프셋의 존재와 함께 심한 채터링이 발생하였다.

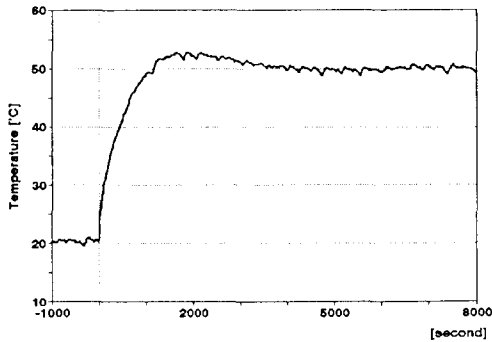


그림 7. 기존의 PI제어기에 의한 실험 결과  
Fig. 7. Experimental result of conventional PI controller.

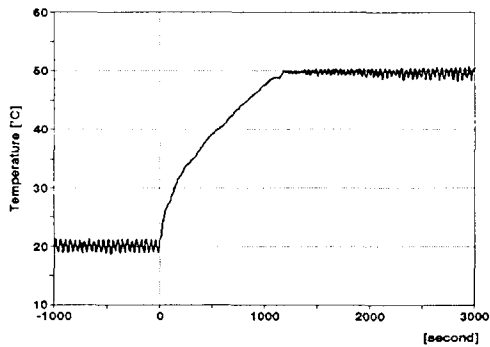


그림 8. 단순 퍼지 제어기에 의한 실험 결과  
Fig. 8. Experimental result of simple fuzzy controller.

이러한 결과는 제어규칙이 시스템의 특성변화에 적응하지 못한다에서 기인한 것이다. 퍼지 자동조정 제어시는 오버슈트 현상이 사라져 정정시간이 단축되었으며, 제어편차도  $\pm 0.12^\circ\text{C}$  미만으로 매우 양호함을 알 수 있다.

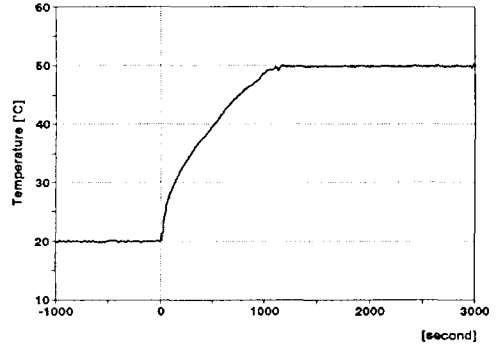
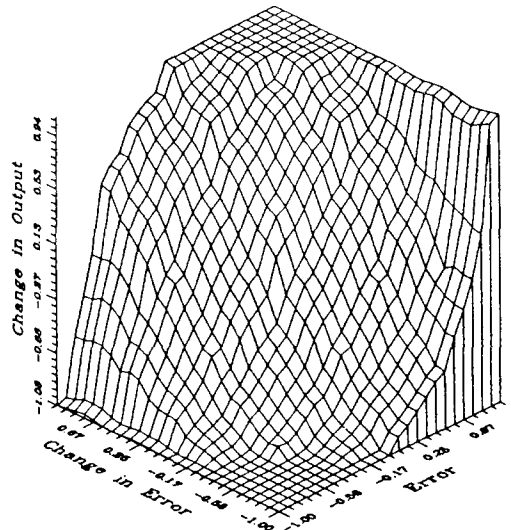
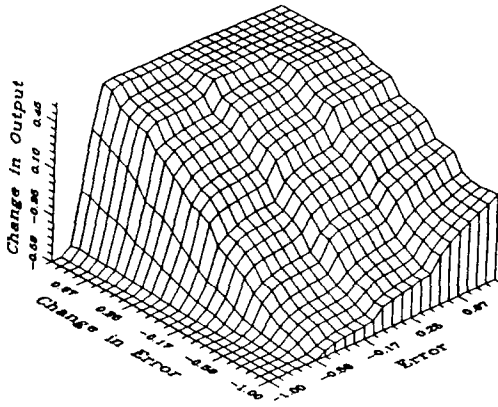


그림 9. 퍼지 자동조정 제어기에 의한 실험 결과  
Fig. 9. Experimental result of fuzzy-SOC.

그림 10에는 설정온도 50℃의 경우 초기에 작성하여 입력한 제어규칙과, 자동조정에 의해 시스템이 안정되었을 때의 제어규칙을 3차원적 제어평면으로 도시하였다.



(a) 초기의 제어규칙



(b) 최종 제어규칙

그림 10. 퍼지 자동조정 제어기내에서 제어규칙의 변화

Fig. 10. The change of control surface of fuzzy-SOC.

V. 결론

온도챔버는 지연시간 및 불감시간을 갖는 비선형 시변 시스템으로, 기존의 PI제어에서는 시스템의 특성변화에 따른 제어성능 저하시 파라미터의 동조가 요구되었다. 본 논문에서는 변화하는 작동환경과 공정의 특성을 감지하여 제어가 스스로가 지식베이스를 자동으로 수정하고 공정의 이상화한 모델에 의한 지연시간을 보상하는 방식의 새로운 퍼지 자동조정 제어기법을 제안하였다.

386-PC와 주변기기를 이용한 제어시스템을 구현하여 온도제어 실험을 수행한 결과 PI제어에서는 오버슈트와 채터링이 발생하였고, 단순 퍼지제어에서는 오프셋과 함께 심한 채터링이 발생하였다. 퍼지 자동조정 제어에서는 오버슈트가 발생하지 않으므로 PI제

어시보다 정정시간이 40분정도 단축되었으며, 오프셋도  $-0.05^{\circ}\text{C}$ 로 무시할 만하고, 제어편차도  $\pm 0.12^{\circ}\text{C}$  미만으로 매우 양호하였다.

물론 본 논문과 같이 자동조정 알고리즘으로서 지식베이스중 데이터베이스의 수정에 그 초점을 맞추는 대신에 신경망 회로기법이나 최적화 기법을 이용하여 제어규칙의 수정이나 환산계수의 동조 등에 의한 방법도 고려할 수 있겠지만, 제안된 방법만으로도 충분한 성능개선을 기할 수 있음을 입증하였다.

參考文獻

- [1] T. J. Procyk and E. H. Mamdani, "A Linguistic Self-Organizing Process Controller", *Automatica*, vol.15, pp.15-30, 1979.
- [2] Thermotron Corp., "Instruction Manual for Thermotron Environmental Chamber Temperature - Humidity", 1983.
- [3] Thermotron Corp., "5200 System Controller Manual", 1983.
- [4] Shihuang SHAO, "Fuzzy Self-Organizing Controller and Its Application for Dynamic Processes", *Fuzzy Sets and Syst.*, vol.26, pp.151-164, 1988.
- [5] Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part 1, II", *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no.2, pp.404-435, March/April 1990.
- [6] Togai InfraLogic, "Fuzzy-C Development System : User's Manual", 1990.
- [7] Omega Engineering, Inc., "Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia", 1990.

## — 著 者 紹 介 —



金 仁 植(正會員)

1956年 11月 21日生. 1979年 2月  
숭실대 공대 전자공학과 졸업(공  
학사), 1993年 2月 충남대 공대  
전자계산기공학과 졸업(공학석  
사), 1979年 ~ 현재 국방과학연  
구소 선임연구원.

權 五 錫(正會員) 第 26卷 第 12號 參照

현재 충남대학교 컴퓨터공학과  
부교수