

## 적응 퍼지 제어를 이용한 가스로 자동온도조절 시스템

# Auto Temperature-Controlled System using Adaptive Fuzzy Controller for Gas Furnace

권혁승\*, 김선종\*

Hyeog-Soong Kwon\*, Seon-Jong Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 온도제어에 있어서 수동식 로온도 제어 전문가의 행위와 유사한 결과를 나타낼 수 있도록 퍼지 제어 룰과 퍼지 변수 및 퍼지 추론 등을 이용하여 밸브의 Gas-to-Air 비율을 조절하는 적응 퍼지 제어를 설계하였다. 이를 적용한 가스로 자동온도조절 시스템을 개발하고 온도와 소결된 세라믹 시료의 불량률 평가를 통해 그 성능이 우수함을 확인하였다. 적응 퍼지 제어를 이용한 제안 시스템의 온도오차의 경우 학습 전은 약  $\pm 20^{\circ}C$  이상 생기던 것이 학습 후에는  $\pm 2^{\circ}C$  내외로써 입력 온도 프로파일을 우수하게 추종해 냄을 확인할 수 있었다. 또한 기존 수동로 시스템과 제안된 시스템 간에 세라믹 제품 소결 후의 불량률을 비교하기위해 시료 A와 B에 대해 각각 두 번에 걸쳐 실험하였다. 불량률을 확인한 결과 개선효과가 시료 A와 시료 B에 대해 각각 평균 50.5%와 48.4%로 상당히 좋아짐을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, for auto temperature-controlled, we developed a system that an adaptive fuzzy controller using fuzzy control rule base, fuzzy variable and fuzzy inference can get same results as an expert of temperature -controlled gas furnace system by experience and obtained a good result by experiment. It's results showed that temperature error is less than  $\pm 2^{\circ}C$  and widely used in the area of industrial fields. For measurement of error rate of sintered ceramic products between the manual system and the proposed system, we tested two times sample A and B respectively. We verified the improvement of error rate was mean 50.5% and 48.4% for each sample A and B. Through the experiments, we confirmed that it has very superior performance compared with the conventional gas furnace system by manual.

**Keywords** : Fuzzy Control, Gas Furnace, Fuzzy Variable, Adaptive Fuzzy Controller

## I. 서론

현재 국내에서 쓰이고 있는 세라믹 소성용 공업용 가스로는 대부분이 내부 체적이  $1\sim 2(m^3)$ 인 소규모 크기의 수동식 가스로이며 액화천연가스(LPG)를 주 에너지원으로 사용하고 있다.

그림 1은 일반적인 수동형 세라믹 소결용 고온로의 구

성도이다. 숙련기술공이 공기 및 가스량을 제어하기 위한 밸브조작은 온도센서인 TC-B type 써모커플러를 이용한 온도 측정값 및 육안에 의한 경험적 불꽃검사 값을 목표 온도프로파일과 비교하여 그 오차량 만큼 밸브를 제어하여 로온도를 결정한다. 이 때 가스 공급은 LPG를 기화기를 통하여 공급하며, 공기는 3상 유도모터를 이용 팬을 회전시킴으로써 공급 되어진다.

자동화를 위해 일부 세라믹 사업장에 사용되고 있는 반 자동가스제어시스템의 경우 저온에서의 온도 컨트롤에 문제가 많아 다시 수동으로 전환하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 또한 현재 쓰이고 있는 가스로 구조의

\*부산대학교 바이오시스템공학부

논문 번호 : 2006-3-7

접수 일자 : 2006. 5. 26

심사 완료 : 2006. 7. 7

특성상 온도에 의존한 Gas-to-Air의 이상적인 배합 비율을 수치적으로 산출하여 적절하게 배합비를 조정하는 시스템을 구하는 것이 매우 어렵다. 이는 일반적으로 세라믹제품을 1700도 이상으로 고온소결 하기 위해서는 LPG 가스가 500~1000LPM(liter per minute)이상 소모되어지며, 이에 비례하여 공기량은 약 20~500kLPM으로 40~50배 이상이 필요하다. 그러나 이러한 대량의 공기량을 공급할 수 있는 장비는 매우 고가로써 아래와 같은 일반적인 소규모 세라믹 소성용 가스로 시스템에 적합하지 않다. [1][2]

본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위해 온도제어에 있어서 수동식 로온도 제어 전문가의 행위와 유사한 결과를 나타낼 수 있는 적응 퍼지 제어를 적용한 가스로 자동 온도조절시스템을 개발하고 평가를 통해 그 성능이 우수함을 확인하였다.

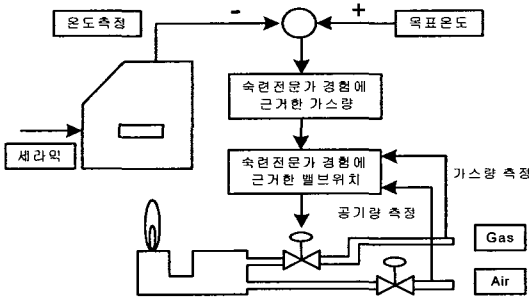


그림 1. 일반적인 수동형 가스로 시스템  
Fig. 1. General Gas Furnace System by manual.

## II. 퍼지 제어를 베이스를 이용한 가스로 자동온도조절 시스템

그림 2는 전문가의 퍼지 제어 룰 베이스를 이용한 가스로 자동 온도조절 시스템이다. 공기의 공급은 3상 유도 모터구동 전용 인버터를 통하여 10마력 용량의 유도 모터를 이용 공기 주입용 팬의 회전속도를 제어함으로써 이루어지며, 가스유량은 최대용량 1000LPM의 정밀 조절이 가능한 MFC(mass flow controller)를 사용한다. 또한 로온도 측정은 1700도 고온 측정용 TC-B type thermo-coupler를 사용한다. 목표온도 프로파일은 그림 3과 같이 시간에 의한 프로파일로써 이상적인 온도상승 및 유지가 제어 입력값으로 사용된다. 이때에 목표 온도와 측정온도사이의 온도 오차가 발생하게 되고, 이 오차값을 이용하여 PI(proportional integrative) 제어기를 구성하고, 이 제어기의 출력값과 feed-forward 제어값인 온도프로파일 값을 합하여 제안한 퍼지 제어 룰 베이스 Gas-to-Air 모델링에 적용하였다. [3][4]

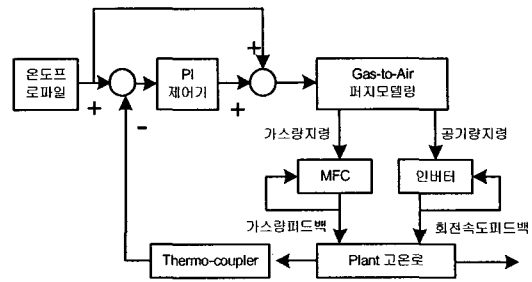


그림 2. 전문가의 경험적인 퍼지 제어 룰 베이스를 이용한 가스로 자동온도조절시스템  
Fig. 2. Auto Temperature-Controlled Gas Furnace System using Fuzzy Control Rule Base by an Expert

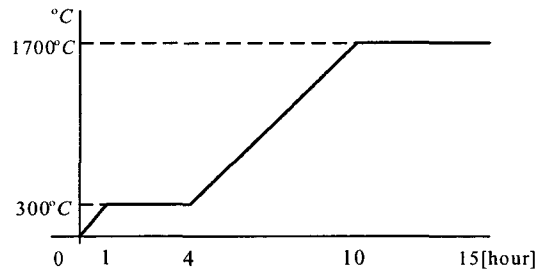


그림 3. 소형세라믹 소성공정 온도프로파일  
Fig. 3. Temperature Profile for a Small Ceramic Plastic Process

이는 온도 제어 전문가가 제어한 것과 같은 행위의 Gas-to-Air의 비율을 추론하여 PLANT인 세라믹 소성용 고온로에 입력함으로써 온도제어가 이루어지게 된다. 이때에 가스 지령값 및 공기의 지령값은 종속제어(Cascade Control)방식으로 하위 프로세서에게 전달되어지며, MFC 및 인버터에 내장된 하위프로세서는 각각 흐르는 가스량 및 모터 회전속도를 피드백하여 종속루프제어를 행하게 된다.

### 2-1. 퍼지 제어 룰 베이스의 구성

그림 1과 같은 구조에서 가스의 공급은 LPG가스를 기화기를 통하여 공급하며, 공기는 유도모터에 의해 회전팬을 구동함으로써 공급되어진다. 이때에 온도에 따른 가스 및 공기의 혼합비는 숙련공의 경험에 의한 섬세한 가스 및 공기밸브 조작에 의해서 이루어지고 있다. 이러한 Gas-to-Air의 비율을 시간에 따라 관측하면 숙련공 사이에서도 약간의 차이를 가지게 되고 그림 4와 같은 곡선들로 나타난다. 여기서 500도 이하의 저온에서는 가스 혼합비가 공기에 비해서 상대적으로 적으며 고온으로 올라 갈수록 가스밸브를 더욱 개방하여 1700도 이상의

고온 시 Gas-to-Air 밸브의 개방 비율이 100%로써 둘 다 완전 개방이 이루어지는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 여러 숙련공의 행위를 관측하여 통계를 내고 가스유입량과 Gas-to-Air 혼합비에 따른 로의 온도변화를 퍼지 제어 룰 베이스로 세운다. 그림4 에서 어느 한 시점에서의 온도 오차에 대한 Gas-to-Air 비율을 구하기 위해 언어변수를 도입한 퍼지 제어 룰은 다음과 같이 구할 수 있다<sup>[5]</sup>

**Fuzzy Control Rule-Bases:**

If TEMP is VL then GAS VALVE is AC and AIR Valve is AC

If TEMP is L then GAS VALVE is SO and AIR Valve is SO

If TEMP is M then GAS VALVE is MO and AIR Valve is MO

If TEMP is H then GAS VALVE is LO and AIR Valve is LO

If TEMP is VH then GAS VALVE is FO and AIR Valve is FO

**Linguistic Variables:**

FO(Full Open), LO(Large Open), MO(Medium Open), SO(Small Open), AC(Almost Close), VL(Very Low),L(Low),M(Medium),H(High), VH(Very High)

위에서 퍼지 제어 룰의 의미는 숙련공의 밸브조작행동에 대한 규칙을 수차례에 걸쳐 평가한 것으로 온도가 매우 낮을 시 공기와 가스밸브를 최소한 개방 한 후 착화시키고, 공기와 가스 밸브를 서서히 개방시켜 온도가 상승하게 되면 숙련공은 가스와 공기 밸브를 완전히 개방 된 상태를 의미한다.

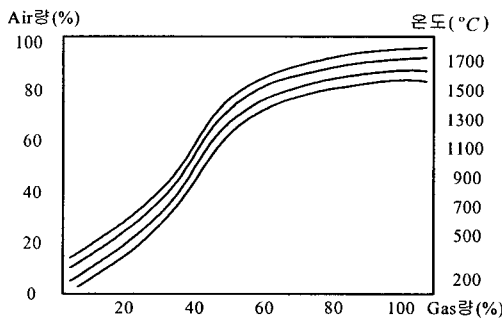


그림 4. 가스로제어 숙련공들에 의한 밸브조작비율

Fig. 4. Valve Control Rate of Gas Furnace by an Expert.

**2-2. 퍼지변수의 도입**

그림 5는 퍼지 변수를 나타낸 것으로 측정온도 퍼지 변수화는 측정온도를 고온로의 최고 온도인 1700도로 나눈 값을 기준으로 설정하며, 가스량의 퍼지 변수화는 현

재 출력의 가스량을 최고 유입가능 가스량인 1000LPM로 나눈 값을 기준으로 설정한다. 공기량의 퍼지 변수화는 현재 팬의 속도를 팬의 최대 회전속도 3600RPM로 나눈 값을 기준으로 이용한다.

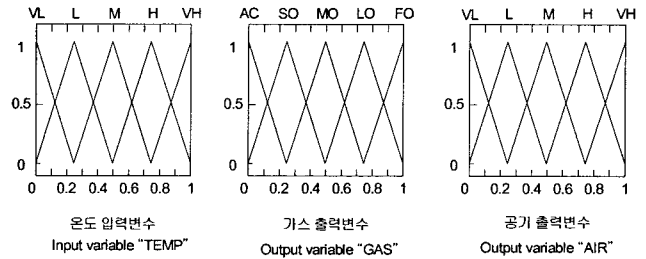


그림 5. 퍼지 언어 변수의 도입

Fig. 5. Adoption of Fuzzy Linguistic Variables..

이때에 온도에 대한 퍼지변수를 예로 들면 “1”일 때는 정규화 된 최고 온도인 1700도를 의미하며 “0”일 때는 최소 온도인 0도를 의미한다.

**2-3. 맘다니(Mamdani)방식에 의한 Gas-to-Air 결정 방식의 퍼지모델링**

가스로 온도 측정에 의한 Gas-to-Air 비율에 대한 Min-Max-Gravity 방식의 퍼지 의사결정 과정을 주는 그림이다. 측정된 온도 값에 정규화를 거쳐 입력이 되어질 때에, 가스 및 공기의 값은 각각 Min-Max에 의한 연산 값의 무게 중심(Center of Gravity)을 구함으로써 결정되어 진다<sup>[3]</sup>.

**2-4. 퍼지추론에 의한 온도에 따른Gas-to-Air 비율 그래프**

그림 6은 [0,1] 사이로 정규화 된 온도의 값에 대한 가스 및 공기 비율의 퍼지의사 결정을 나타내는 그래프로써 이것을 조합하여 다시 그리면 그림 4의 숙련공들의 제어 행위와 유사한 데이터를 추종해 낼 수 있다.

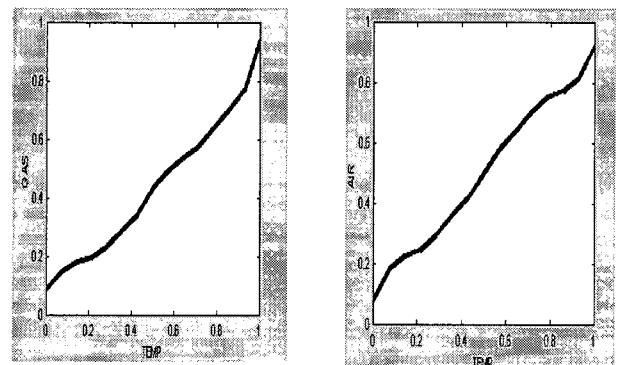


그림 6. 정규화 된 온도 값에 대한 가스와 공기비율에 의한 의사결정

Fig. 6. Decision of Gas-to-Air Rate according to Normalized Temperature Value.

### III. 제안된 시스템

#### 3-1. 적응 퍼지 제어를 이용한 가스로 자동온도조절시스템

그림 7은 앞에서의 퍼지 제어 룰 베이스를 적용하고 가스로의 온도를 전문가의 행위와 유사하게 조절할 수 있는 적응 퍼지 제어를 이용한 가스로 자동화 시스템의 구성도이다. 요소의 도입은 가스 및 공기량 지령의 변화를 도입한 것으로써 시스템 평가(performance index) 방정식( $J(t)$ )은 전체 시스템 동작시간 동안 온도오차( $e$ )의 제곱의 합으로써 결정한다. 또한 Gas-to-Air의 적응 퍼지 제어모델링은 경도 감소법에 의해 가스 및 공기의 언어변수의 중심 및 폭을 이산 랜덤변수를 이용하여 변화시킨다.

$$J(t) = \sum_{k=0}^n e^2(kT) \quad (1)$$

여기서  $e$ 는 온도오차이고  $k$ 는 정수이며  $T$ 는 온도이다. 식 (1)은 일정 시간동안의 시스템의 성능을 표현한 식으로써 값이 낮을수록 시스템이 안정화 되어있음을 의미한다.

가스 및 공기량의 퍼지 변수는 다음과 같은 제어 알고리즘에 의하여 학습 되어질 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$m(t+1) = m(t) + \eta r(t) f(n(t) - \theta) \quad (2)$$

여기서  $\eta$ 는 학습률,  $f$ 는 활성화 함수,  $n$ 는 이산랜덤과정( $0 < n < 1$ ),  $\theta$ 는 바이어스(=0.5)값이다. 식 (2)에서 학습의 요소는 가스 및 공기변량에 관한 퍼지 변수의 중심축 및 삼각형 룰의 폭에 관한 것으로써 식(1)이 안정화 되어 가는 방향으로 계속적인 학습이 이루어짐으로써 시스템 성능의 향상을 꾀한다. 여기에서, 강화학습 신호  $r(t)$ 는 다음과 같이 정의 되어 질수 있다.

$$r(t) = u(J(t) - J(t-1))$$

$$\text{where, } u(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \leq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

또한  $f$ 는 활성화 함수로써 이극 계단함수(step function)이며 시스템 평가 식이 감소시, 랜덤 프로세서에 의한 학습이 발생하고 그렇지 않을 시는 기존의 학습은 취소되어진다.

$$f(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } x > 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

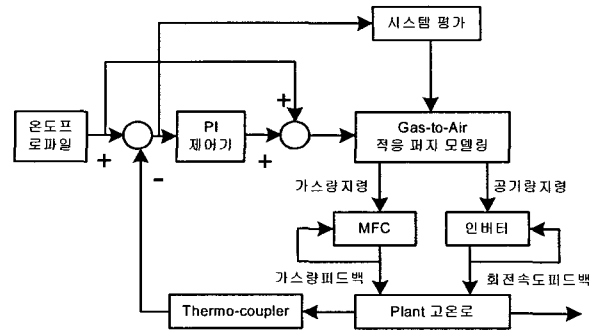


그림 7. 제안된 시스템  
Fig. 7. Proposed System

이때에 +1 은 학습의 진행을 의미하며, -1 은 학습의 되돌림을 의미하는 것으로써 시스템 성능 지수가 나빠졌을 때에는 새로운 학습을 되돌리고, 시스템의 성능이 좋아졌을 때에는 학습을 계속 진행시키는 강화 학습의 방법을 의미한다.

#### 3-2. 하드웨어 및 시스템

##### (가) 하드웨어 설계

제안된 시스템의 제어기설계 사양을 다음과 같이 하였다.

- PI제어 및 적응 퍼지제어를 위해 8bit 마이콤 제어용 콘트롤러 (AT89C52RD2-22MHZ)
- 서버 시스템과의 장거리 통신을 위한 RS485 통신(통신거리 : 1km 이상)
- 정전 대비를 위한 Back-Up Battery
- 실시간 환경변수 저장을 위한 고용량 NVSRAM
- 8bit 마이컴 I/O와 디코딩을 위해 FPGA 로직 (EPF10K1084LCC)
- 온도제어의 정밀도 향상을 위한 12bit A/D converter
- 컴퓨터 온도분석을 위한 다양한 서버통신 시스템구현 (100bytes/1sec 단위로 온도제어상황을 보고함)
- 가스압 강하, 누설, 이상 고온 등의 특수 상황에 대비할 수 있는 알람 시스템 장착
- FPGA내의 제어용 Sampling Time 시스템 구현<sup>[6]</sup> (10kHz Sampling, 0.1mSec)
- VHDL 라이브러리화에 의한 로직 재사용을 증가에 의한 개발시간의 단축화

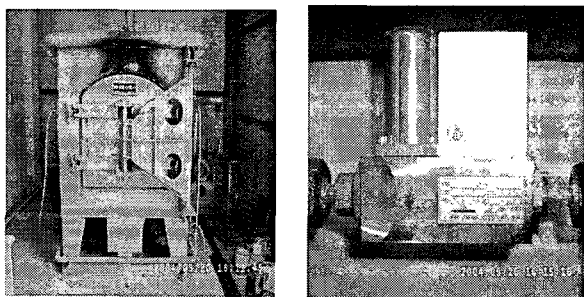
##### (나)시스템의 전기 계통 회로도 및 설명

전기 계통 회로도는 3 상 전력은 유도 모터 및 기화기로 공급 되어 지며, 2상 전력은 1kW급 UPS (무정전 공급장치: Un-interruptable Power Supply)에 공급 SMPS (Switching Mode Power Supply)를 경유하여 DC5V,15V,-15V,-5V의 전압을 각각, 전자 제어 보드 및 MFC 에 공급 되어지는

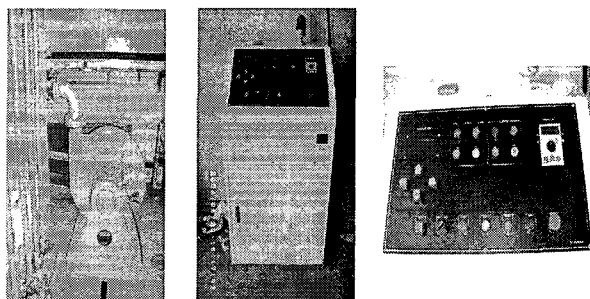
구조를 가지고 있다.

**(다)시스템 외형 및 장비**

그림 8은 개발된 시스템 외형 및 장비를 나타낸다. 여기서 그림(a)는 시스템 자동화 개발 대상인 1700도 세라믹 소결용 고온로이며 그림 (b)는 내부 가스량 제어 루프 기능을 가진 MFC(Mass Flow Controller)로써 가스량 제어 시스템이며, 그림(c)는 3상 유도모터와 팬으로써 속도는 컨트롤러에 내장된 유도모터 제어용 인버터에 의해서 제어 되어 지며, 그림 (d)는 개발된 자동화 제어 시스템으로써, UPS 및 인버터, 제어용 프로세서 보드 등을 탑재하고 있다. 또한 그림(e)는 제어시스템 판넬로서 사용자는 이를 통하여 목표온도로 파일 세팅 알람환경설정 등의 여러 가지 유저 인터페이스 작업을 행할 수 있다.



(a)세라믹 고온로 (b)유량제어기



(c)유도모터 팬 (d)제어시스템 (e)제어패널

그림 8. 세라믹 소결용 고온로 및 개발완성 제어 시스템  
Fig. 8. Developed System for a Ceramic Blast Furnace.  
(a)Ceramic Blast Furnace (b)MFC(Mass Flow Controller)  
(c)Induced Motor Fan(d)Control system (e)Control Panel

**VI. 시스템 평가 실험 및 고찰**

앞의 그림 3과 같이 전형적인 세라믹구조물 소성 시, 최소 10시간 이상이 소요 되며 300~600도 사이의 온도에서 약 3시간 정도의 1차 온도 유지기가 존재하며, 1700도 상에서 약 5시간 정도의 2차 온도 유지기가 필요하다. 또한 온도 상승 시 300도 이하 저온에서, 온도 일차 상승이 요구 되며, 300~1700도 사이에서 2차 온도 상승이 이루어지게 된다. 이러한 온도 상승 프로파일

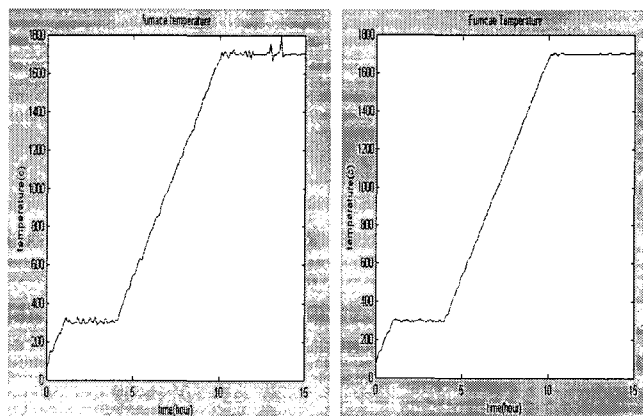
을 충실히 따라 갈 때에 양질의 제품이 얻어진다.

시스템의 평가방법 및 항목은 표 1과 같다. 평가 항목은 전형적인 세라믹 제품의 소성시간에 대한 목표 온도변화 그래프에 따른 것으로써 시간에 의한 목표온도 프로파일을 충실히 따라가며 최소의 오차를 보일 때에 평가 항목 1을 적용시키며, 프로파일 온도 상승 시 충실하게 추종(tracking)하면 평가 항목 2를 적용시킨다.

제안된 시스템에 표 1과 같이 평가항목 별로 측정된 결과 온도특성은 그림 9와 같은 결과를 얻었다. 이는 학습 전후의 시스템을 비교하는 그래프로써 학습 전은 시간당 온도 오차가 약  $\pm 20^{\circ}C$  이상 남으로써 표 1의 개발 스펙을 만족시키지 못하나 학습 후 온도차는  $\pm 2^{\circ}C$  내외로써 입력 온도 프로파일을 우수하게 추종해 념을 확인할 수 있었다.

표 1. 성능평가 항목별 개발목표치  
Table. 1. Performance Index according to each Spec.

평가항목 (주요성능 Spec)	단 위	비중 (%)	세계최고 수준 (보유국/ 보유기업)	연구개 발전국 내수준	개발목 표치	평가 방법
1.퍼지룰 베이 스 성능 평가	$\pm^{\circ}C$	40	$\pm 0.3^{\circ}C$	$\pm 2^{\circ}C$	$\pm 1^{\circ}C$	측정
2.온도제어범위	$^{\circ}C$	30	$>1700^{\circ}C$	$>1700^{\circ}C$	$>1700^{\circ}C$	측정
3. 외부온도에 대한 안정성	dB	30	$<40dB$	$<40dB$	$<40dB$	측정



(a)학습 전 온도 실험 결과 (b)학습 후 온도 실험 결과

그림 9. 세라믹 소성온도 실험결과  
Fig. 9. Experimental Results of a Ceramic Plastic  
(a)Temp. result before learning Temperature.  
(b)Temp. result after learning

또한 기존 수동로 시스템 과 제안된 적응 퍼지 제어를 이용한 자동 온도조절시스템의 세라믹 제품의 소결 후의

불량률을 비교하여 표 2에 나타내었다. 검사는 육안검사와 소결 후의 제품의 밀도를 ultrasonic scan장비를 이용하여 측정하는 방법으로 시행하였다. 측정내용은 밀도검사 및 국부 밀도 측정이고, 측정범위는 1mm ~ 50mm의 제품이다. 시료 A와 B를 각각 두 번에 걸친 실험에서 불량률에 대한 개선효과가 평균 50.5%와 48.4%로 현저히 좋아짐을 확인하였다.

표 2. 불량률에 따른 개선효과  
Table 2. Improvement according to Bad Rate

시료 A 불량률			시료 B 불량률			
수동시스템	제안시스템	개선률	수동시스템	제안시스템	개선률	
1	1250PPM	450PPM	47%	2350PPM	960PPM	42%
2	1140PPM	340PPM	54%	2600PPM	760PPM	54.8%

V. 결론

본 논문에서는 온도제어에 있어서 수동식 로온도 제어 전문가의 행위와 유사한 결과를 나타낼 수 있는 적응 퍼지 제어를 이용한 가스로 자동온도조절시스템을 개발하고 시뮬레이션과 평가를 통해 그 성능이 우수함을 확인하였다.

온도오차의 경우 학습 전은 약  $\pm 20^{\circ}C$  이상 생기던 것이 학습 후에는  $\pm 2^{\circ}C$  내외로써 입력 온도 프로파일을 우수하게 추종해 념을 확인할 수 있었다. 또한 기존 수동로 시스템과 제안된 시스템에 세라믹 제품 소결 후의 불량률 비교하기위해 시료 A와 B에 대해 각각 두 번에 걸친 실험에서 불량률에 대한 개선효과가 평균 50.5%와 48.4%로 상당히 좋아짐을 확인하였다.

이는 적응제어의 결과 시스템의 성능 향상을 꾀할 수 있었으며, 품질 개선에 커다란 효과를 가짐으로써 수익성 개선에 커다란 효과가 있음을 보여 준다.

참 고 문 헌

[1] O.Taylan, A. Golec and H Taskin, "Intelligent Control of a Porcelain Factory Subsystem," 2<sup>nd</sup> International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, Sakarya, Turkey, 1998

[2] John Yen and Reza Langari, "Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent System", IEEE Press, 1995.

[3] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant", IEEE Proc. Control & Science. Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588,

[4] Dec. 1974. Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller Part 1", IEEE

transaction on Systems, MAN. and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, pp. 404-418, 1990

[5] Li Xin Wang and J.M. Mendel, "Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples", IEEE Transaction on Systems MAN. and Cybernetics, Vol. 22, No. 6, pp. 1414-1427, 1989.

[6] Xilinx, "Synopsys Interface FPGA User Guide", Xilinx, 1994.



권혁승(Hyeog-Soong Kwon)

1985년 2월 영남대 전자공학과(공학사)  
1988년 2월 영남대 전자공학과(공학석사)  
1995년 8월 영남대 전자공학과(공학박사)  
1992년 9월 ~ 1996년 4월 대구과학대학 전  
자통신과 조교수

1996년 4월 ~ 2006년 2월 밀양대학교 정보통신공학부 부교수  
2002년 2월 ~ 2003년 8월 Oregon State University 방문교수  
2006년 3월 ~ 현재 부산대학교 바이오시스템공학부 부교수  
관심분야: 디지털통신시스템, 대역확산통신방식, 퍼지이론



김선중(Seon-Jong Kim)

1989년 2월 경북대 전자공학과(공학사)  
1991년 2월 경북대 전자공학과(공학석사)  
1996년 2월 경북대 전자공학과(공학박사)  
1995년 3월 ~ 1997년 2월 순천제일대학 제

어계측과 전임강사  
1997년 3월 ~ 2006년 2월 밀양대학교 컴퓨터공학부 부교수  
2006년 3월 ~ 현재 부산대학교 바이오시스템공학부 부교수  
관심분야: 바이오 신호 및 영상처리, 컴퓨터 비전, 바이오정  
보시스템 등.