

論文97-34S-11-10

다점 온도 제어 장치의 Power 공급을 조정을 위한 Fuzzy-PWM제어 (Fuzzy-PWM Control for Adjustment of Power Rate of a Multiple Point Temperature Controller)

李章明*, 尹鍾普**

(Lee Jang Myung and Yun Jong Bo)

요 약

본 연구는 하나의 프로세서를 사용하여 다점의 온도를 효율적으로 제어하는 방식에 대하여 초점을 맞추고 있다. 원사 생산시스템에서 히터들의 표면온도 제어는 품질관리를 위한 결정적인 요소이다. 따라서, Draw and Twist Machine을 위한 온도제어기를 설계하고 Fuzzy-PWM 알고리즘을 이 제어기에 적용하였다. 개별 채널별로 프로세서를 사용하여 PID제어를 하는 경우에는 경제적으로 비효율적이며, 하나의 프로세서를 사용하여 여러 점들의 온도를 기존의 ON/OFF방식에 의해 제어하는 경우 정밀한 온도 제어가 어렵다. 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 기존의 ON/OFF 방식에 히터의 Power공급을 조정을 위한 새로운 개념의 Fuzzy-PWM 제어방식을 고안하였다. 이 새로운 방식의 제어는 개별 채널별로 프로세서를 사용하여 PID 제어를 실현하는 것과 같은 효과가 있음을 보였다. 본 논문에서 제안한 히터의 Power공급을 조정을 위한 Fuzzy-PWM제어방식에 의한 히터 온도 제어가 작업 조건 및 작업 환경의 변화에 강인한 특성을 갖도록 하기 위하여 Power 공급을 설정 온도, 원사의 굵기에 따라 Fuzzy Rule들을 사용하여 조절하도록 하였다. 최적의 Fuzzy Rule들을 찾기 위하여 히터의 모델링을 하고 제어 알고리즘 적용에 따른 온도 제어 특성을 시뮬레이션하였다. 본 연구에서의 알고리즘은 설계된 다점 온도 제어기에 적용되어 우수한 성능을 나타냄을 보였다.

Abstract

This research focuses on an efficient control method of temperature for multiple points using only one processor. For a yarn production system, the surface temperature control of heaters are very important for quality control. Therefore, we designed a temperature controller for a draw and twist machine and applied Fuzzy-PWM algorithm to the controller. If we use a processor for the temperature control of each point with the PID algorithm, the system becomes bulky; If we use a processor for the temperature control of multiple points with the conventional ON/OFF control, the control performance of the system becomes poor. To overcome these problems, we developed a new Fuzzy-PWM algorithm for the adjustment of power rate to the heaters in the conventional ON/OFF control. It is shown that this algorithm has the same effects as the PID algorithm for the temperature control of each point. The proposed algorithm is robust against the production condition and environment such as the reference temperature and the thickness of yarn, since the power rate to the heater is adjusted by Fuzzy Rules derived from the values of the reference temperature and the thickness of yarn. To obtain optimal Fuzzy Rules, the control simulations are performed through the modelling of the heater and simulation of Fuzzy rules. This algorithm is applied for the multiple point temperature controller and showed satisfactory performance.

* 正會員, 釜山大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Pusan National University)

(ShinSung Eng. Techno. Center)

接受日字: 1996年10月16日, 수정완료일: 1997年11月4日

** 正會員, 신성 ENG, 기술 연구소

I. 서 론

다점 온도 제어 장치는 한 개의 제어기를 사용하여 여러 점(Point)들의 온도를 제어해 주는 제어 장치를 지칭하는 것이다. 일반적으로, 하나의 프로세서를 사용하여 하나의 히터를 제어하는 것에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔다^[6-8]. 히터의 모델링에서부터 제어 알고리즘 적용까지 비선형 시변 시스템 특성에 대한 연구가 진행되어 일정 온도를 유지해야 하는 히터의 온도 제어가 정밀하게 수행되는 것은 이론적으로 재고의 여지가 없다. 그러나 산업계에서는 하나의 제어기를 사용하여 수십 혹은 수백 점의 온도를 동시에 제어해 줄 필요성이 있다. 일 예로, 원사를 생산하는 D/T 기계(Draw and Twist Machine)의 경우에서 일반적으로 156 혹은 144개의 히터를 사용하며, 이들 히터의 온도 제어를 하나의 제어기에서 수행해 주고 있다. 종래의 아날로그 제어방식을 사용하는 경우에도 이들 히터 하나 당 한 개의 PID 제어부를 취부하여 일정 시간마다 k_P , k_I 및 k_D 이득을 작업자가 가변 저항의 조절에 의해 맞추어 주고 있었다^[9].

이러한 번거러움을 해소하고 사용자가 간편하게 조작하기 위하여 최근의 디지털 제어기가 제안되어 사용되고 있다. 그러나 하나의 프로세서로 156개의 히터의 온도를 제어하기 위하여 각각에 제어 알고리즘을 실현하는 것은 그 제어 알고리즘의 연산 시간의 지연으로 인하여, 전체 제어 사이클을 증대시키게 되어 결과적으로 히터의 표면 온도를 일정하게 유지시키기가 어렵다. 물론, DSP 등과 같이 빠른 프로세서를 사용하든지 다수 개의 프로세서를 사용하면 제어 사이클을 줄일 수 있을 것이나, 경제적으로 손실이 크며, 아울러 복잡해진 시스템의 신뢰성 및 내구성이 떨어질 수도 있다^[2-4].

본 연구에서는 그 시스템 구성을 간편하게 하고 상용의 프로세서를 사용하여, 여러개 히터의 표면 온도를 제어하는 시스템을 소개하고, 이 시스템에서 기준 설정 온도와 실의 굵기(Denier) 등의 작업환경의 변화에 대해 효율적이고 안정된 온도제어를 실현하기 위하여 Power의 공급을 조절을 위한 Fuzzy-PWM 제어를 실현하고, Power의 공급을 조절에 따른 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘이 일반적인 PID 제어 알고리즘을 등가적으로 실현하는 것과 같은 효과를 가질 수 있다는 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 고찰한다.

본 논문은 서론을 포함하여 전체 7절로 구성되며, 제 II절에서는 설계된 제어기의 전체 시스템의 구성을 보여 주고, 제 III절에서는 제어 대상인 히터의 수학적 모델링을 보여 주고, 제 IV절에서는 히터에의 Power 공급율의 변화를 위한 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘을 설명하고, 제 V절에서는 Fuzzy-PWM 제어와 PID 제어를 비교 설명하고, 제 VI절에서는 실제 시스템에서의 실험 결과를 보이고, 제 VII절에서는 본 제어방식의 효율성을 결론으로 정리한다.

II. 다점 온도 제어기의 구성 및 기능

다점 온도 제어기는 한 개의 마이크로 프로세서(일 예로, Intel사의 8086)를 사용하여 156개의 히터로부터 온도 센서를 통해 온도값을 읽어들이고 제어 알고리즘에 따라 ON 혹은 OFF의 출력을 156개의 히터 Power 공급 트라이악(Triac)으로 제공하는 것이다. 전체 시스템의 구성은 아래 그림 1과 같다.

그림 1에서 다점 온도 제어기의 구성은 CPU 보드, I/O 인터페이스 카드, 디스플레이 제어보드, 8×20 LED 어레이, 예러 램프, 키-보드, 10장으로 구성된 센서카드부 및 히터카드부로 구성되어 있다.

동작원리는 우선 전원이 전원 스위치에 의해 인가되면 CPU 보드상에 있는 Programmable I.C 및 RAM의 초기화가 수행된다. 이 초기화 과정에서 CPU 보드상의 충전용 배터리, CPU, A/D 변환기 등의 자체 진단 과정이 수행되어 예러 램프 및 경보음을 통하여 오류발생 여부를 알려준다. 이러한 진단 과정에서 이상이 발견되지 않았을 경우 제어기는 상태신호 (SET-UP/ RUN)를 확인한다. 이 상태신호는 정상 동작시에는 RUN 모드로 유지되며, 사용자가 보수, 정비 혹은 가동조건 변경의 목적이 있을 때는 SET-UP 모드를 사용한다.

SET-UP 모드로 되어있는 경우 제어기는 우선 키-보드로부터 인터럽트에 의해 받아들인 신호들을 처리하고, 각 채널의 온도를 읽어들이고, 정상 동작에서의 설정온도보다 5~10도 낮은 예비온도로 제어를 한다. 이 과정에서 센서카드들의 채널 선택 신호의 전송에 의한 선로상의 불량(SENS SCN ERR) 및 히터카드들의 채널별 ON/OFF 제어신호의 전송에 의한 선로상의 불량(HEAT SCN ERR)을 감지하여 디스플레이 제어보드로 나타낸다. 이 SET-UP 모드에서 사용

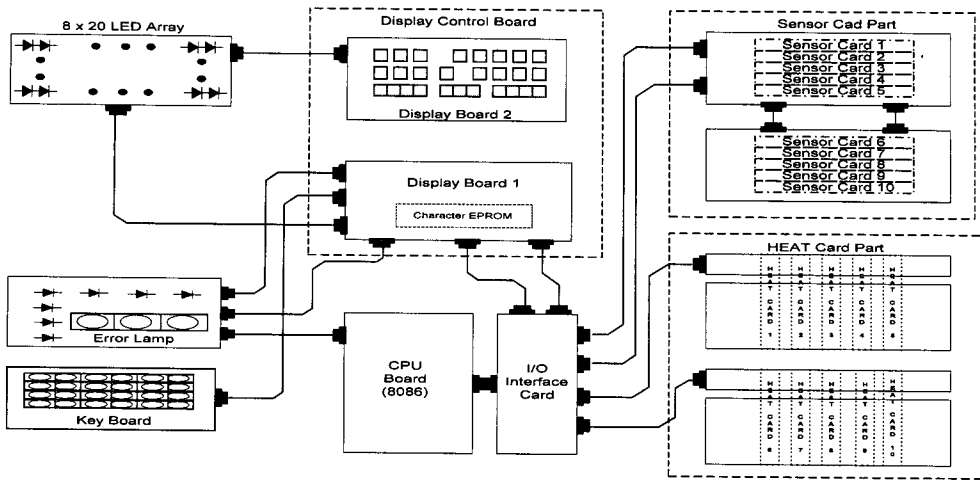


그림 1. 전체 시스템의 구성도

Fig. 1. Structure of the Whole System.

자는 가동을 위한 기본 입력들, 즉, 가동 기준온도(설정 온도), 허용 편차, 사용하지 않는 채널의 번호, 가동 예비 단계시의 기준온도, 8×20 LED 어레이의 표시방법(Error Mode 혹은 ON/OFF Mode), 각 채널별 Offset값을 키이-보드를 사용하여 입력한다. Offset값은 각 채널별로 히터의 실제 표면 온도와 온도 제어기상의 판독 온도값의 차이로 이것은 각 센서의 특성의 차이, 단자대의 접촉저항, 센서선로에서의 유기전압 등에 의한 것으로 초기에 제어기를 설치한 후에 측정하여 보상에 준다.

제어기가 정상 동작상태로 사용될 때 SET-UP/RUN스위치는 RUN모드로 선택되어지며, 전체 채널에 대응하는 히터들의 온도값을 센서카드로부터 읽어들이고 히터카드부로 각 채널에 대응하는 히터들에게 Power 공급의 ON/OFF 제어가 수행된다. 현재 사용중인 전체 채널은 156개로 되어 있으며, 각 채널별로 온도 센서와 히터가 부착되어 있다. 제어기는 8086 마이크로 프로세서 한 개를 사용하여 순차적으로 돌아가면서 히터의 ON/OFF 신호를 내보내는 순서로 제어를 수행한다. 즉, 1 ~ 156번 채널까지의 온도를 순차적으로 읽어들이고, 제어 알고리즘에 따라 각각의 히터의 ON/OFF를 결정한 후 1 ~ 156번까지의 히터들에 ON/OFF신호를 내보낸다. 시스템의 전체 프로그램 Flowchart는 그림 2에 나타내었다. 본문에서는 하드웨어의 개발보다는 알고리즘에 초점을 맞추므로 시스템의 구성을 간략히 설명한다. 자세한 내용은 특허^[16]로 등록되어있다.

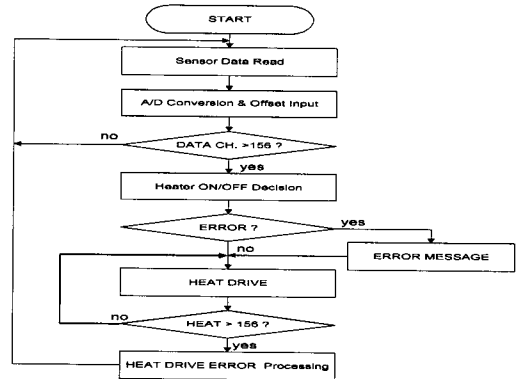


그림 2. 전체 프로그램의 Flowchart

Fig. 2. Flowchart of the Whole Program.

1. CPU 보드

CPU보드의 자세한 구성도는 다음의 그림 3에 나타내었다. CPU로 8086 마이크로프로세서를 Maximum mode로 사용하며 8288 Bus 제어기로 주변 소자들에 제어 신호를 공급한다. MAX691 Watchdog신호 발생기를 사용하여 CPU의 상태를 지속적으로 감시하여 CPU로부터 신호가 들어오지 않을 경우 CPU 에러로 처리하여 경보 신호를 발생시키고, Reset 신호를 CPU로 보내어 시스템의 일시적인 오류시 안정된 동작을 하도록 하였다. 82C59A Programmable 인터럽트 제어기를 통하여 키이-보드와 디스플레이부로부터 입/출력 신호를 인터럽트로 받아 들인다.

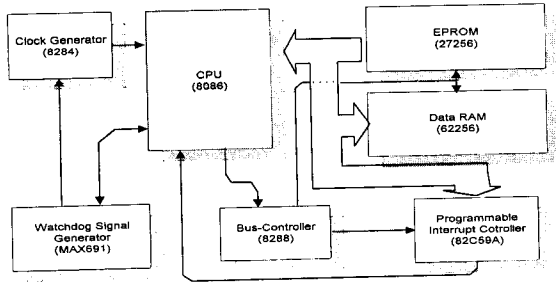


그림 3. CPU 보드 구성도
Fig. 3. Structure of the CPU Board.

2. I/O 인터페이스 장치

82C55A Programmable Peripheral 인터페이스용 IC 2개를 사용하여 CPU와 히터, 센서, D/A 변환기, A/D 변환기, 키-보드, 디스플레이부 사이의 신호를 주고 받는다. 하나의 82C55A의 한 포트(이하 PPI-1)의 데이터는 직/병렬 변환 회로에서 직렬로 변환하여 전송한다. 직렬로 변환된 신호의 출력은 PPI-1에서 내보낸 3 Bits의 데이터 값에 따라 디코딩 회로에서 PPI-1을 통하여 히터 제어 신호, 센서의 채널 선택 신호, D/A 출력 신호, A/D 변환 시작신호, 키-보드 신호 및 디스플레이 제어보드 신호를 내보내고 받도록 결정되어진다. 나머지 82C55A의 포트는 프린터에 출력을 내보내고 시스템의 가동/정지 신호를 받아 들인다.

3. 센서카드

온도 센서(Thermo-Coupler)로부터의 전압은 수 mV의 아주 작은 값이므로 주변의 미세한 노이즈에도 민감하다^[1]. 따라서 증폭기의 성능과 멀티플렉서의 성능에 따라 입력되어지는 값의 정밀도가 결정된다. 센서카드에서는 온도 센서의 입력값을 차동증폭기를 통하여 1차 증폭시키고, A/D 변환기(ADC84)의 변환 범위(0 [V] ~ 10 [V])에 두기 위하여 AD524 Instrumentation Amplifier를 사용하여 적절히 증폭한다. AD524의 이득은 구성에 따라 간단하고 다양하게 조절이 가능하다(1 ~ 1000배 증폭). 센서카드는 유지 및 보수가 간편하도록 각 카드당 16채널의 온도 입력을 선택적으로 받아들이고 증폭하게 구성되어, 전체 10장의 카드로 구성되어 있다. 각 채널 선택 신호는 쉬프트 레지스터를 거쳐 156채널을 순차적으로 선택하고, 이 쉬프트 제어 신호에 의해 해당 채널의 온도를 A/D변환기로 읽어 들인다.

4. 히터카드

히터카드 는 CPU로부터 히터의 제어 신호를 받아 히터에 Power를 공급한다. CPU에서 히터카드로 쉬프트/래치 레지스터를 통하여 히터 제어 신호, 래치 제어 신호, 쉬프트 제어 신호 및 출력 감지 신호를 보내고, 이들 제어 신호에 의해 Photo-Coupler로 보내어 트라이악(Triac)을 ON/OFF 시키는 기능을 수행하여 히터의 Power공급을 ON/OFF 시켜준다. 그리고 히터카드에서는 히터의 보호를 위하여 CPU 에러, A/D 에러 등 시스템에 치명적인 오류가 발생하였을 때 히터의 Power공급 중지 신호를 발생하여 전체 히터에의 Power 공급을 차단시킨다.

5. 키-보드

키-보드는 6×4의 24개 푸시 버튼들로 구성되어 있다. 행 감지기와 열 감지기로 키 입력을 감지하여 Strobe 신호 발생기로 키에서 신호가 입력 되었음을 알린다. Strobe 신호는 CPU로 인터럽트를 요구하여 ASCII 코드형태의 키 데이터 값을 메모리에 저장시킨다.

각 버튼의 기능은 다음과 같다. 전 채널에 동일 조건을 설정하기 위한 "ACH"키, 그룹별(16 채널) 동일 조건을 설정하기 위한 "GCH"키, 개별 채널별 온도설정 혹은 확인을 위한 "ECH"키, 기준 설정 온도를 위한 "RTP"키, 허용 편차 값을 설정하기 위한 "TOL"키, 채널별 에러 내용을 표시하도록 하는 "EDP"키, 다음 채널의 온도 값 혹은 에러 내용을 확인하기 위한 "NXT"키, 각종 기능을 선택하기 위한 "MODE"키, 히터 표면의 실제 온도와 측정 온도의 차이를 보상하기 위한 Offset 설정에 사용되는 기능키(F2, F3), 에러의 내용을 메모리에서 지우는 기능키(F1), 입력된 값을 메모리에 저장하도록 하는 "RTN"키, 입력된 값을 취소하는 "CLR"키, "0 ~ 9"까지의 숫자키 및 소수 이하의 값을 입력하기 위한 "."키가 있으며, 이러한 키들의 기능은 소프트웨어적인 처리로 변경 및 확장이 용이하다.

6. 디스플레이 제어보드

디스플레이 장치는 기준 설정 온도, 허용 편차, 사용하지 않는 채널의 번호, 가동 예비 온도, 에러 발생 채널, 개별 히터의 현재 온도, 히터의 전원 공급 상태 등을 8×20의 LED어레이와 숫자 표시기에 표시한다. 여기서 LED 어레이는 1 ~ 156까지 번호가 새겨져

있으며 정상적인 동작 상태 시에 히터에 공급되는 전원의 ON/OFF 상태를 표시하여 주며, "MODE" 키를 사용하여 모드를 변환하게 되면 에러가 발생한 채널을 표시한다. 숫자 표시기는 현재 지시해 주는 채널의 번호를 표시해 주는 3자리의 채널 번호 표시부, 그 채널의 현재 온도를 0.1℃까지 표시하는 4자리의 현재 온도 표시부, 그 채널의 기준 설정 온도를 표시하는 3자리의 설정 온도 표시부, 그 채널의 허용 편차 온도를 표시하는 2자리의 허용 편차 표시부로 구성되어 있다. 디스플레이부의 자세한 구성도는 아래 그림 4에 나타내었다.

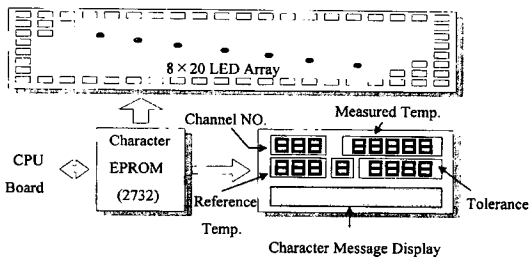


그림 4. 디스플레이 제어보드의 구성도
Fig. 4. Structure of the Display Control Board.

III. 히터의 모델링 및 제어

다점 온도 제어기의 히터 부분은 동적 시스템으로 에너지의 발생, 저장, 발산의 에너지 보존의 법칙을 사용하여 시스템의 모델링이 가능하다. 시스템의 에너지는 열 에너지로 히터 내부에 공급된 Power에 따라 발생된 열 에너지가 저장되어 있다가 히터의 회전 운동에 의해 주변 온도에 따라 일정한 속도로 에너지가 발산된다.

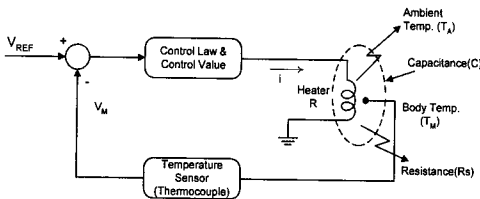


그림 5. 히터의 동적 모델링
Fig. 5. Dynamic Modelling of a Heater.

히터는 비선형적 특성을 나타내고 오직 제한된 작동 범위 내에서만 선형 시스템의 특성을 [6-8] 가지고 있으므로 비선형 시스템을 Taylor급수의 1차 항까지 근

사하여 선형 시스템으로 모델링한다. 그림 5는 히터의 동적 모델링을 보여 주는 것으로 히터의 주변 온도(외란) T_A , 히터 자체 온도 T_M 사이의 비선형 미분 방정식은 에너지 보존의 법칙에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$Q_C = Q - Q_R \quad (1)$$

식 (1)에서 $Q = Ri^2$ 는 에너지 소스(Source)로부터 시스템에 들어온 일률이며, i 는 히터에 흐르는 전류이며, R 은 히터의 전기 저항이다. $Q_C = C \frac{dT_M}{dt}$ 는 에너지 저장 요소(C)에 저장된 에너지의 시간 변화율이고, $Q_R = (T_M - T_A)/R_s$ 은 에너지의 발산 요소(R_s)로부터 소멸된 일률을 의미한다. 이 식은 온도 변화를 히터에 흘리는 전류, 주변 온도 및 히터 자체의 온도의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dT_M}{dt} = \frac{R_s Ri^2}{R_s C} + \frac{T_A - T_M}{R_{sc}} = f(i, T_A, T_M) \quad (2)$$

이 식 (2)를 동작점 ($i = 1 [A]$, $T_A =$ 주변 온도 ($k_a \text{ } ^\circ\text{C}$)), $T_M =$ 히터 자체 온도($k_m \text{ } ^\circ\text{C}$) 를 기준으로 선형화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\Delta T_M) &= \frac{\partial f}{\partial i} \Big|_{i=1} \Delta i + \frac{\partial f}{\partial T_A} \Big|_{T_A=k_a} \Delta T_A + \frac{\partial f}{\partial T_M} \Big|_{T_M=k_m} \Delta T_M \\ &= \frac{2R_s R}{R_s C} \Delta i + \frac{1}{R_s C} \Delta T_A - \frac{1}{R_s C} \Delta T_M \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)를 양변에 $R_s C$ 를 곱하고 $\Delta T_M(0)=0$ 의 가정하에서 Laplace변환을 취하면 다음과 같다.

$$\Delta T_M(s) = \frac{1}{sR_s C + 1} (2R_s R \Delta i(s) + \Delta T_A(s)). \quad (4)$$

식 (4)에서 주변 온도에 따른 열 발산을 외란으로 간주하고, 온도 센서로 사용된 열전대의 전달함수를 $V_M = \frac{K_T}{\tau s + 1} T_M$ 으로 모델링하며, 위의 히터 동역학식에 따른 제어 시스템의 블록도는 그림 6와 같이 제안되어진다.

그림 6에서 $G_C(s)$ 는 제어 전달함수, K_T 는 열전대의 이득, τ 는 열전대의 시정수, V_M 은 센서의 출력 전압을 나타낸다.

식 (4)에서 구한 히터의 선형모델을 이용하여 전체

시스템의 전달함수는 구해진다. 즉, 히터 자체의 온도 (ΔT_M)은 히터의 입력전압(ΔV_T)과 주변온도(ΔT_A)의 함수로 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta T_M = \frac{G_C(S)(\tau s + 1)}{R_s C_s + 1(\tau s + 1) + G_C(s)K_T} \cdot \Delta V_T + \frac{\tau s + 1}{(R_s C_s + 1)(\tau s + 1) + G_C(s)K_T} \cdot \Delta T_A \quad (5)$$

식 (5)에서 Power 공급율의 변화에 의한 제어 알고리즘을 포함하는 제어 전달함수는

$$G_C(s) = K_a \times 2R_s R \quad (6)$$

로 표시되며 식 (5)에서 보듯이 $G_C(S)$ 의 조절에 의하여 2차계의 고유 주파수 및 감쇄율이 조절될 수 있으며, 상승시간 및 오버슈트를 상호 보완적으로 조절할 수 있음을 알 수 있다.

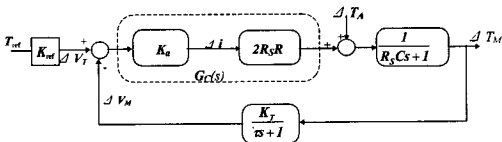


그림 6. 전체 제어 시스템의 블록선도.
Fig. 6. Block Diagram of the Control System.

IV. 제어 알고리즘

1. PWM 제어 알고리즘

한 개의 프로세서에 한 개의 히터를 제어할 경우는 단순한 ON/OFF 제어만으로 제어가 이루어질 수 있지만, 한 개의 프로세서로 다수(156개)의 히터를 ON/OFF 할 경우 단순한 ON/OFF 제어를 하는 경우 제어 사이클이 지연된 효과로 인하여 정밀한 제어를 하기가 어렵다. 따라서, 보다 정밀한 제어를 하기 위하여 제어 사이클의 대부분의 시간을 차지하는 데이터 수집 동안에 전체 히터의 ON/OFF의 비율을 설정하여 히터 ON/OFF의 비율에 의한 PWM 제어를 하였다^[11,12]. 이 PWM 제어에 의하여 시스템의 응답특성의 조절이 가능함은 앞 절에서 밝혔다. ON/OFF 비율에 의한 PWM제어는 온도값을 채널별로 순차적으로 읽어 들일 때, 히터의 ON/OFF 제어를 비례 (N_c):ON(N_{on}):OFF(N_{off}) 3 구간으로 분할하여 수행한다.

1 구간 : 1번 채널에서 N_c 번 채널까지의 온도값을 읽어 들이는 동안은 ON/OFF의 제어 신호에 따라 히터의 Power 공급을 ON/OFF 시킨다.

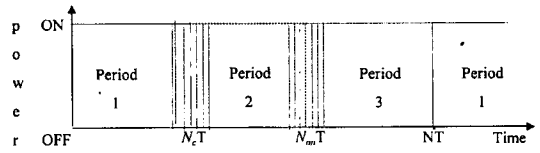


그림 7. 한 제어 사이클내에서의 PWM 제어 파형
Fig. 7. PWM Waveform within a control cycle.

2 구간 : N_c+1 번 채널에서 $N_c + N_{on}$ 번 채널까지의 온도값을 읽어 들이는 동안 전체 히터를 ON시킨다.

3 구간 : $N_c + N_{on} + 1$ 번에서 $N(156)$ 번 채널까지의 온도값을 읽어 들이는 동안 전체 히터를 OFF시킨다.

위와 같이 정의된 제어 알고리즘은 한 채널에 대하여 한 제어 루프의 Power ON/OFF 공급율로 정리하게 되면 그림 7와 같이 나타낼 수 있으며, 다음 절의 설명에 의해 ON율(N_{on})과 OFF율($N_{off}=156 - N_c - N_{on}$)이 변하게 된다.

따라서, N_c 와 N_{on} 의 설정값에 따라 그림 7에서 표시한 바와 같이 파형의 폭이 변하게 된다. 이것은 일정 주기 NT 를 가지는 펄스 폭 변조에 의한 PWM으로 나타낼 수 있다. Non값과 Noff값은 히터의 특성이나 히터의 가동 전압에 따라 적절히 키-보드에서 입력시킬 수 있으며, 이것을 히터의 Power 공급율이라 한다. 온도값 판독 및 히터 제어가 수행되고 나서 오류가 없을 때에는 정상적인 채널들에 대해 히터의 Power ON/OFF 제어 신호를 결정한다. 히터 Power ON/OFF 제어 신호의 결정은 센서에서 읽어 들인 온도값(T_M)이 설정 온도(T_{ref})보다 낮으면 α 를 1로 하고, 설정 온도(T_{ref})보다 높으면 α 를 0으로 한다 [식 (13)].

이상의 3단계 제어를 하면 식 (6)의 PWM 제어 전달함수 K_a 는 다음과 같이 표시 되어진다.

$$K_a \frac{\alpha N_c + N_{on}}{N}, \left(\begin{matrix} \alpha = 1, T_{ref} > T_M \\ \alpha = 0, T_{ref} < T_M \end{matrix} \right) \quad (7)$$

식 (7)에서 N 은 전체 채널수를 나타낸다.

본 연구에서 사용하는 PWM제어는 기존의 모타 제

어 등에서 사용하는 제어와는 근본적으로 다르다.

즉, 기존의 PWM 제어에서는 한 개의 제어 사이클에서의 오차 신호를 사용하여 삼각파 기준 신호로 Modulation을 하여 이 PWM신호에 의하여 제어를 수행한다. 이러한 PWM제어를 위하여서는 기준 신호 발생 회로 및 비교 신호 등이 추가되어 다수 개의 채널 제어를 위하여서는 하드웨어가 지나치게 복잡하게 되므로, 다채널 히터 제어에는 적합하지 못하다. 따라서, 일반적으로 다채널 히터 제어를 위하여서는 단순히 한 제어 사이클내에서 ON/OFF 동작에 의하여 온도를 제어하고 있다. 본 연구에서 사용한 PWM제어는 한 제어 사이클 즉, 한 개의 히터의 온도를 측정하여 전원 공급의 ON/OFF를 결정하는 제어 사이클내에서 ON이나 OFF로 결정되었을 지라도 한 사이클 동안 지속적으로 전원을 공급 혹은 차단하는 것이 아니고, K_a 부분 동안만 전원을 공급하는 것이다. 이와 같이, 한 제어 사이클내에서 ON/OFF에 의해 1, 0로 제어되는 것이 아니고, K_a 의 값에 의해 제어되어 결국 한 제어 사이클내에서 PWM이 수행되도록 한 것이다. 이는 한 제어 사이클마다 오차를 사용하여 PID 보상을 하고 그 결과를 한 제어 사이클내에서 PWM을 실현하도록 설계되어질 수도 있을 것이다. 즉, 그림 6에서 K_a 블럭 전단에 PID 보상 블럭을 추가할 수도 있으나 보상 알고리즘에 의해 제어 사이클이 길어져 제어 성능 측면에서 도리어 역효과를 가져오므로, 본 연구에서는 PWM에 의해 PID보상과 같은 효과를 얻을 수 있음을 밝히고 PID보상 블럭을 추가하지 않는다.

2. Fuzzy-PWM 제어 알고리즘

히터의 Power ON/OFF에 의한 제어를 하여 안정된 온도 제어를 달성하고, 작업 환경의 변화에 보다 능동적으로 대처하고 사용자의 실제 경험을 최대한 반영하기 위한 전문가 시스템의 구현을 위하여 Fuzzy-PWM의 제어를 구현하였다^[13,14]. 즉, 퍼지 규칙에 의하여 N_{on} 값과 N_{off} 값을 적절히 조절한다.

Fuzzy-PWM 제어를 구현하기 위해 대상 시스템의 설정 온도(T_{ref} , T)와 실의 굵기(denier, D)의 전진부 입력 변수에 대한 퍼지 집합의 언어 변수를 각각 3개로 설정하였으며, 후진부의 출력 변수에 대한 ON/OFF 공급율의 언어 변수를 9개로 설정하였다. 설정 온도(T_{ref} , T)를 0 ~ 160°C 까지 범위내에서 언

어 변수를 40(°C) = LOW(L), 80(°C) = MEDIUM(M), 120(°C) = HIGH(H)로 설정하고, 실의 굵기(denier, D)를 15~135(denier) 까지 범위내에서 언어 변수를 45(denier) = LOW(L), 75(denier) = MEDIUM(M), 105(denier) = HIGH(H)로 설정한다. 그리고 출력 변수, 즉, ON과OFF 공급율에 대한 각각의 언어 변수는 LOW-LOW(LL), LOW-MEDIUM(LM), ~, HIGH-MEDIUM(HM), HIGH-HIGH(HH) 등 9개로 구성되며 이와 같은 방법으로 각 상태를 IF-THEN형식의 논리형을 사용하여 제어 규칙은 표 1, 2와 같이 정리된다.

표 1. Fuzzy-PWM의 N_{on} 에 대한 퍼지 규칙
Table 1. Fuzzy-Rule for N_{on} .

Denier \ T_{ref}	Low	Medium	High
Low	LL	LM	LH
Medium	ML	MM	MH
High	HL	HM	HH

표 2. Fuzzy-PWM의 N_{off} 에 대한 퍼지 규칙
Table 2. Fuzzy-Rule for N_{off} .

Denier \ T_{ref}	Low	Medium	High
Low	HH	HM	HL
Medium	MH	MM	ML
High	LH	LM	LL

본 연구에서 사용한 퍼지 변수의 귀속 함수는 그림 8과 같은 형태로 하였다. 이것은 각 입력 상태의 변화와 외란에 대응하는 퍼지의 출력을 강화하여 채널링의 감소와 정상 상태 오차를 줄이기 위한 것이다. 표 1, 2의 제어 규칙과 그림 8의 귀속 함수로부터 퍼지 출력값을 결정해야 한다.

퍼지 출력값을 구하기 위한 첫번째 단계로 퍼지 추론을 실행하게 된다. 본 연구에서는 직접법에 의한 퍼지 추론으로 대표적으로 가장 많이 사용되고 있는 Max-Min 방법을 사용하였다^[15]. 여기서 설정 온도(T_{ref})와 실의 굵기에 대한 퍼지 집합의 귀속 함수를 각각 $\mu_{Ti}(x)$, $\mu_{Di}(y)$ 로 두면 전진부에 대한 적합도는 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda_i = \mu_{Ti}(x) \wedge \mu_{Di}(y). \quad (8)$$

ON 및 OFF 율에 대한 귀속 함수를 각각 $\mu_{on}(z)$, $\mu_{off}(z)$ 로 두고, ON과OFF율에 대하여 각각 9개의 규칙

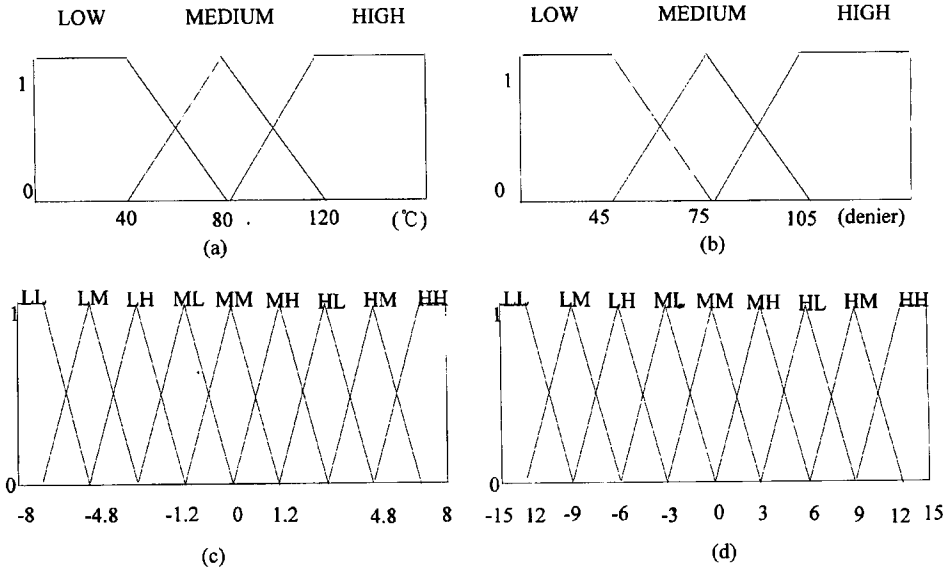


그림 8. 퍼지 제어의 귀속 함수

(a) 설정 온도(T_{ref} , T)에 대한 귀속 함수 ($\mu_T(x)$) (b) Denier (D)에 대한 귀속 함수 ($\mu_D(y)$) (c) N_{on} 에 대한 귀속 함수($\mu_{on}(z)$) (d) N_{off} 에 대한 귀속 함수($\mu_{off}(z)$)

Fig. 8. Membership Functions for Fuzzy Control. (a) Membership Function for Reference Temperature ($\mu_T(x)$) (b) Membership Function for Denier($\mu_D(y)$) (c) Membership Function for Non ($\mu_{on}(z)$) (d) Membership Function for Noff ($\mu_{off}(z)$)

기반에 대한 Fuzzy Modus Ponens^[13]에 의한 퍼지 추론의 결과는 아래와 같다.

$$\mu_{on}(z) = \bigcup_{i=1}^9 \{\lambda_i \wedge \mu_{oni}(z)\} \quad (9-a)$$

$$\mu_{off}(z) = \bigcup_{i=1}^9 \{\lambda_i \wedge \mu_{offi}(z)\} \quad (9-b)$$

위 식에서 \wedge 는 T-norm의 일종인 Min연산이며, \cup 은 T-norm의 일종인 Max 연산이다.

두번째 단계로 식 (9)에서 구하여진 결과를 프로세서의 제어에 맞도록 수치를 변환하고 퍼지 변수를 실제 값으로 바꾸는 Defuzzification 과정을 하게 된다. 이것은 최종 퍼지 제어값을 구하는 것으로 본 연구에서는 Center of Mass(연속적 Centroid) 방법^[13]을 사용하였다.

$$N_{on-f} = \frac{\int z \mu_{on}(z) dz}{\int \mu_{on}(z) dz} \quad (10-a)$$

$$N_{off-f} = \frac{\int z \mu_{off}(z) dz}{\int \mu_{off}(z) dz} \quad (10-b)$$

위와 같이 정의된 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘의

실현을 위해 설정 온도(T_{ref})를 80(°C), 실의 굵기를 75(denier)로 하여 이것을 기준으로 입력을 설정하였다. 그리고 80(°C), 75(denier)에서 경험 및 다음절에서 보이는 시뮬레이션을 통해 최적으로 설정된 공급을 125:5:26를 기준으로 출력값을 설정하였다.

식 (7)에서 공급을 N_{on} 와 N_{off} 은 Fuzzy-PWM에 의해 설정 온도(T_{ref})와 Denier의 변화에 대해 가장 적절한 Power 공급을 N_{c-f} , N_{on-f} 및 N_{off-f} 로 결정되어진다. 식 (10)에서 구해진 최종 퍼지 제어값에 의해 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘에 의한 전달함수는 식 (7)으로부터 다음과 같이 정리된다.

$$K_a = \frac{aN_{cf} + N_{on-f}}{N}, \quad \begin{cases} a=1, T_{ref} > T_M \\ a=0, T_{ref} > T_M \end{cases} \quad (11)$$

3. Fuzzy-PWM 제어 알고리즘에 의한 Power 공급율의 최적 결정 시뮬레이션

Fuzzy-PWM에 대한 입력 변수인 설정 온도(T_{ref})와 Denier값에 대해 출력 변수 N_{on-f} , N_{off-f} 및 N_{c-f} 값을 조정하여 각 입력 변수들의 변화에 대한 최적의 Power

공급율을 구하기 위해 시뮬레이션을 식 (11)을 바탕으로 식 (5)에서 구한 전달함수를 이용하여 표 3과 같이 실시한다.

표 3. Fuzzy-PWM 제어를 위한 시뮬레이션 조건

Table 3. Simulation Condition for Fuzzy-PWM Control

Denier	K_{ref}	$N_{c-f} : N_{on-f} : N_{off-f}$	
45(denier)	80(°C)	156:0:0	S1
		123:3:30	S2
		123:8:25	S3
75(denier)	80(°C)	156:0:0	S4
		125:5:26	S5
105(denier)	80(°C)	126:10:20	S6
		156:0:0	S7
		123:8:20	S8
		131:10:15	S9

실의 굵기는 에너지의 발산 성분(R_s)에 영향을 주게 되고, 설정 온도(T_{ref})는 PWM 제어의 N_{on} 과 N_{off} 에 영향을 주지만 Feedback 제어에 의한 요소가 아니라 Feedforward 요소를 가지게 되며, 에너지의 저장 성분(C)과 발산 성분(R_s)에 직접적인 영향을 주게 된다. 그러므로, 그림 9의 시뮬레이션 결과에서 보는 바와 같이 Denier가 높아지게 되면 ON율을 높이거나 OFF율을 낮추어 적절한 공급율을 결정할 필요가 있다. 그리고 설정 온도(T_{ref})에 의한 공급율은 T_{ref} 가 높아지게 되면 공급율에서 ON율을 높여 에너지 저장 요소에 영향을 주고, OFF율을 낮추어 에너지 발산 요소 영향을 주어 전체 제어 알고리즘을 수행해야 한다.

Fuzzy-PWM 제어 알고리즘의 시뮬레이션 결과는 그림 9(a)에서 보듯이 T_{ref} 가 80°C일 경우 45denier에서 공급율은 S2(123:3:30)인 경우가 가장 적합하며, 그림 9(b)에서 보듯이 75denier에서 공급율은 S5(125:5:26)가 적합하며, 그림 9(c)에서 보듯이 105denier에서 공급율은 S8(128:8:20)인 경우 가장 적합한 것으로 판단된다. 이는 히터의 표면 온도가 오버슈트가 최소로 되면서 응답시간도 최소가 되는 조건을 최적으로 판단하는 기준에 의하여 결정되었다.

V. Fuzzy-PWM 제어와 PID 제어 비교

이 절에서는 PID 제어와의 비교를 통해 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘의 효율성을 검증한다. 종래의 아날로그 제어방식을 사용하는 경우에 이들 히터 하나 당 한 개의 PID 제어부를 취부하여 제어를 행하였다.

그러나 일 예로 원사 생산공정과 같은 작업 현장에서 다점의 히터를 제어해야 할 필요성이 있으므로, 히터 하나 당 한개의 PID 제어부로 제어할 경우 제어 시스템이 굉장히 복잡하게 된다. 따라서, 한 개의 온도 제어기에서 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘에 의해 히터의 Power 공급율 $N_{c-f} : N_{on-f} : N_{off-f}$ 의 조정을 통해 다점의 히터의 온도를 제어하는 것이 일반적인 PID 제어 알고리즘을 등가적으로 실현하는 것과 같은 효과를 가질 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통해 고찰한다.

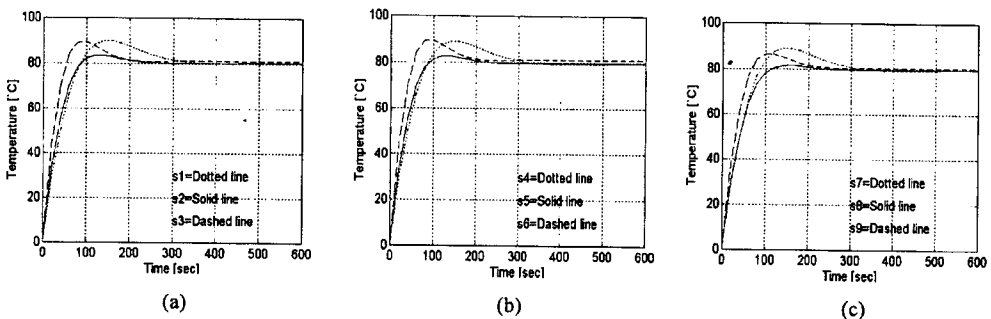


그림 9. 시뮬레이션 결과

(a) S1, S2, S3 조건 결과 (b) S4, S5, S6 조건 결과 (c) S7, S8, S9 조건 결과

Fig. 9. Simulation Result.

(a) Results for S1, S2, and S3 Condition (b) Results for S4, S5, and S6 Condition (c) Results for S7, S8, and S9 Condition

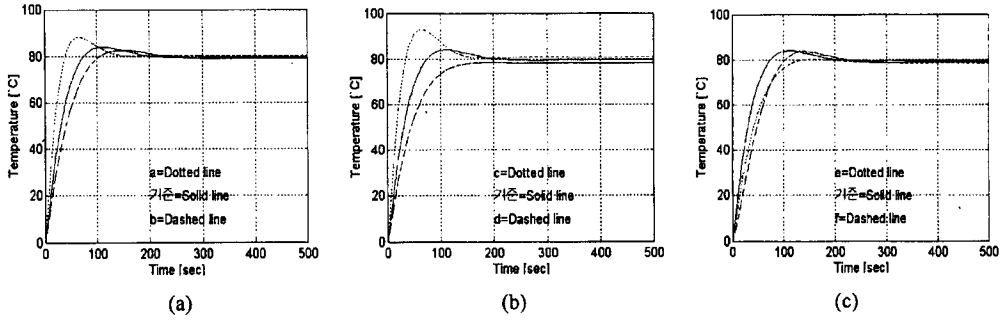


그림 10. Fuzzy-PWM 제어의 Power 공급율과 PID 이득과의 관계
 (a) ON/OFF 공급율에 의한 k_p 의 효과 (b) ON/OFF 공급율에 의한 k_i 의 효과 (c) ON/OFF 공급율에 의한 k_d 의 효과

Fig. 10. Simulation for comparison of Fuzzy- PWM and PID. (a) k_p effects on ON/OFF Power Rate (b) k_i effects on ON/OFF Power Rate (c) k_d effects on ON/OFF Power Rate

표 4. Fuzzy-PWM과 PID의 비교를 위한 시뮬레이션 조건.

Table 4. Simulation Condition for Comparison of Fuzzy-PWM and PID Control.

Simulation Condition	N_c	N_{on}	N_{off}
a	Decrease	Increase	Increase
b	Increase	Decrease	Decrease
c	Increase	Increase	Decrease
d	Hold	Decrease	Increase
e	Decrease	Decrease	Increase
f	Increase	Decrease	Increase

Fuzzy-PWM에서 공급율에 의한 PID 이득들과의 관계에 관해 유도하기 위한 시뮬레이션을 표 4 a ~ f까지의 순서로 실행한다. 설정 온도(T_{ref})는 가장 많이 사용되는 80°C로 설정하고 실의 굵기도 75denier로 고정하여 실시하였다. 그림 10(a)는 표 4의 a, b에 대한 결과이며, 그림 10(b)는 표 4의 c, d에 대한 결과이며, 그림 10(c)는 표 4의 e, f에 대한 결과이다.

ON/OFF율의 조정으로 한 개의 히터에 대한 PID 제어에서 k_p , k_i 및 k_d 를 조정하는 것과 동일한 효과를 가져옴을 그림 10에서 확인할 수 있다. PID제어에서 비례 제어기만 사용시에는 일정한 입력에 대하여 정상상태 오차가 발생한다. 비례 제어기에서 일정한 외란이 존재할 경우 스텝 외란의 크기에 비례하고 비례 이득 k_p 에 반비례하는 정상상태 오차가 존재한다. 비례 이득 k_p 을 증가시키면 정상상태 오차는 줄어 들

지만 시스템에 의한 진동을 가져올 수 있다. 이것은 설정 온도(T_{ref}) 80°C에서 기준 공급율(125:5:26)조건과 조건 a, b에 대한 시뮬레이션 결과인 그림 10(a)를 분석하면 명백하다.

적분 제어기는 정상상태 오차가 발생하지 않도록 하는 효과가 있지만 시스템을 불안정하게 하는 경향이 있다. 이것은 설정 온도(T_{ref}) 80°C에서 기준 공급율(125:5:26) 조건과 c, d 조건에 대한 시뮬레이션 결과인 그림 10(b) 를 분석하면 이해할 수 있다. 미분 제어기는 오차 신호의 변화율을 가지고 제어하므로 오차 신호의 크기를 예측하여 제어할 수 있다. 또한 미분 제어기는 정상상태 오차에 직접적인 영향을 주지는 못하지만 시스템에 감쇠효과를 준다. 이 현상은 설정 온도(T_{ref}) 80°C에서 기준 공급율(125:5:26)조건과 e, f 조건에 대한 시뮬레이션 결과인 그림 10(c)로 이해할 수 있다.

Power공급을 조정을 위한 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘에서 히터의 Power ON율과 OFF율은 PID의 이득들과 표 5에 나타난 바와 같이 관련되어질 수 있다. 설정온도(T_{ref})와 실의 굵기(Denier) 등 시스템의 특성 및 주변 환경의 변화에 대해 가장 적절한 ON/OFF율을 선택하여 제어를 하므로써 오버슈트를 줄일 수 있으며, 정상 상태 오차를 없앨 수 있다. 그러므로, 히터의 Power ON/OFF 공급을 조정을 위한 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘은 개별 채널에 PID 제어를 실현하는 것과 동일한 효과가 있는 것을 보였다.

표 5. Fuzzy-PWM과 PID의 관계
Table 5. Relationship between PID and Fuzzy-PWM.

	N_{c-f}	N_{on-f}	N_{off-f}
Increase k_p	Decrease	Increase	Increase
Decrease k_p	Increase	Decrease	Decrease
Increase k_i	Increase	Increase	Decrease
Decrease k_i	Hold	Decrease	Increase
Increase k_D	Decrease	Decrease	Increase
Decrease k_D	Increase	Decrease	Increase

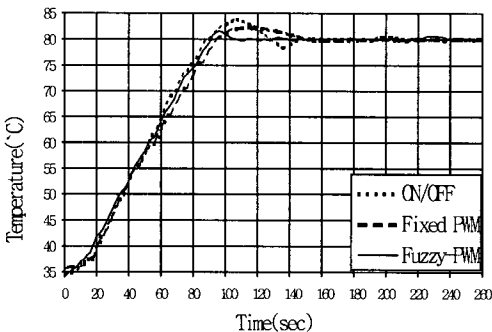
VI. 실험 및 검토

1. 실험

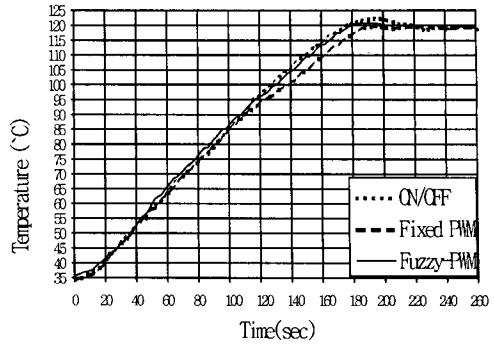
실제 원사 생산기인 D/T기의 Roll 히터를 사용하여 히터 Power ON/OFF 공급을 조정에 의한 온도 제어 실험을 실시하여, 온도 데이터를 RS-232 시리얼 통신을 이용하여 PC로 받아들이는다. 단순 ON/OFF 제어, 임의 설정된 고정 PWM (실제로, 80℃, 45 denier에서 최적으로 선정된 공급율 123:3:30 사용) 및 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘 3가지를 사용하여 실제 실험을 통하여 제어 성능을 비교 검토하여 Fuzzy-PWM 알고리즘의 우수성을 보이고자 한다.

실험 1: 설정 온도(T_{ref}) 80℃에서 실의 굵기를 75denier로 설정하여 단순 ON/OFF에 의한 제어 알고리즘, 히터의 Power공급율을 고정한 PWM 제어 알고리즘 및 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘에 따른 스텝입력에 대한 온도 제어 결과를 비교·검토한다.

실험 2: 설정 온도(T_{ref}) 120℃에서 실의 굵기를 75denier로 설정하여 단순 ON/OFF에 의한 제어 알고리즘, 히터의 Power공급율을 고정한 PWM 제어 알고리즘 및 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘에 따른 스텝입력에 대한 온도 제어 결과를 비교·검토한다.



(a)



(b)

그림 11. 실제 실험 데이터

(a) 설정 온도(T_{ref}) 80℃에서 제어 알고리즘 비교 (b) 설정 온도(T_{ref}) 120℃에서 제어 알고리즘 비교

Fig. 11. Experimental Data.

(a) Algorithm Comparison at $T_{ref}=80^{\circ}\text{C}$
(b) Algorithm Comparison at $T_{ref}=120^{\circ}\text{C}$.

기존의 히터 제어 방식인 단순 ON/OFF에 의한 제어는 그림 11에서 각 설정 온도와 실의 굵기에 대한 특성을 고려한 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘에 비해 상대적으로 오버슈트가 많이 생기며, 상승 속도가 늦다는 것을 알 수 있다. 그리고 고정 공급율에 의한 PWM 제어의 경우 정상 상태 오차가 많이 발생할 뿐만 아니라, 설정온도가 120℃인 경우에는 상승 시간이 길어짐을 알 수 있다. 따라서, 그림 11에서와 같이 Fuzzy-PWM에 의한 제어를 실시하였을 경우 단순 ON/OFF 제어와 고정 공급율을 사용한 PWM 제어 보다 안정되고 효율적인 제어가 수행됨을 알 수가 있다.

2. 검토

실제 D/T기에서 사용되는 156개의 히터의 특성은 거의 비슷하므로 일정 시간 구간에서의 각 채널별 히터의 ON 횟수를 제어보면 전체 채널의 평균 $N(ON)_{aver}$. 횟수에 대해 정상 동작하는 채널들의 전체 채널들의 $N(ON)$ 횟수의 편차가 20~30% 범위를 벗어나지 않는다. 이러한 성질을 이용하여 전체 채널을 하나의 프로세서로 제어함으로써 특정 센서의 이상 유무를 판별할 수 있게 되며, 그 채널을 Mount Error로 처리할 수 있다. 실제 시스템이 설치된 원사 생산 공정에서 센서는 회전하는 히터의 가운데 설치되므로, 어떤 채널의 온도 센서의 설치가 불완전하여 센

서 자체의 흔들림이 존재하면, 그 채널에 해당되는 히터의 실제 표면 온도와 제어가기 들어들인 온도값과의 차이가 5~10℃ 이상 발생된다. 이 경우 그 채널의 N(ON) 횟수는 평균값에서 70 ~ 80% 이상의 편차를 갖게 된다. 이때 그 채널을 Mount Error로 결정한다.

Mount Error로 결정된 채널은 히터의 표면온도가 설정온도로 유지되어 있지 못했다는 결론이고, 이 채널로부터 생산된 원사는 불량으로 처리되어질 수 있다. 이 Mount Error는 센서의 불량 혹은 센서 설치의 불량을 찾는 것으로 개별 채널을 제어하는 방식에서는 실현할 수 없는 것이며, 불량 제품을 찾아내는 매우 유용한 기능이다.

그의 어떤 히터에 ON 신호가 계속 공급됨에도 불구하고 온도 상승이 되지 않는 채널(히터 전원 공급선, 혹은 히터의 열선이 단선인 경우)을 여러 채널로 결정할 수 있다. 그리고 어떤 히터에 OFF신호가 계속 공급됨에도 불구하고 지속적으로 온도 상승이 되는 채널은 히터 카드의 트라이악(Triac)의 소스(Source)와 드레인(Drain) 사이가 단락 된 것으로 판별하여 여러 채널을 검출할 수 있다.

VII. 결 론

본 연구에서는 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘을 사용함으로 하여, 하나의 마이크로프로세서를 사용하여 여러 점들의 온도제어를 동시에 효율적으로 수행할 수 있음을 보였다. 그 제어 성능면에서는 Power 공급에 의한 Fuzzy-PWM제어 알고리즘은 단순 ON/OFF에 의한 제어보다 우수한 특성을 나타냄을 실험을 통하여 입증되었으며, 개별 채널에 대한 PID제어를 행하여 얻을 수 있는 특성과 동일한 효과를 나타낸다는 것을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 새로운 개념의 히터의 Power ON/OFF 공급을 조절을 위한 Fuzzy-PWM 제어 알고리즘은 작업 조건과 작업 환경의 변화가 심하고, 다점의 온도를 동시에 제어할 필요가 있는 D/T기 등의 제어 알고리즘으로 적합한 것이라 판단된다. 이러한 히터의 Power ON/OFF 공급을 조절을 위한 Fuzzy-PWM제어 알고리즘은 실제 특허 사정된 다점 온도 제어기 시스템에 실현되어 안정성과 실용성을 검증 받았다. 본 알고리즘은 또한 원격제어에서 통신 지연으로 인하여 제어 사이클이 길

어져 불안정하게 되는 제어 시스템에 적용되어져 한 개의 제어 사이클 내에서 적절한 제어 기능을 수행하기 위한 방안으로 향후 적용될 수 있을 것으로 판단한다.

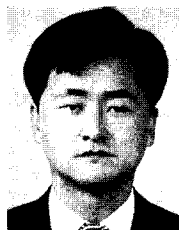
참 고 문 헌

- [1] Richard C. Jaeger, "Analog Data Acquisition Technology PartIV-System Desining, Analysis, and Performance," IEEE Micro, pp. 52-61, Feb. 1983.
- [2] Yoram Halevi and Asok Ray, "Integrated Communication and Control Systems: Part I- Analysis," Trans. of the ASME, vol. 110, pp. 367-373 Dec. 1988.
- [3] Luen-Woei Liou and A. Ray, "Integrated Communication and Control Systems: Part II- Nonidentical Sensor and Controller Sampling," Trans. of the ASME, vol. 112, pp. 357-354, Sep. 1990.
- [4] Luen-Woei Liou and Asok Ray, "Astochastic Regulator for integrated Communication and Control Systems: Part I-Formulation of Control Law," Trans. of the ASME, vol. 113, pp. 604-611, Dec. 1991.
- [5] Y. Ikebe and T. Nakada, "On a Piezoelectric Flapper Type Servovalve Operated by Pulse-Width-Modulated-Signal," Trans. of the ASME, pp. 88-94, Mar. 1974.
- [6] P. M. T. Broersen and M. F. G. van der Jagt, "Hunting of Evaporators Controlled by a Thermostatic Expansion Valve," Trans. of the ASME, vol. 102, pp. 130-135, Jun. 1980.
- [7] B. T. Kulakowski and F. W. Schmidt, "Discrete Control Algorithm for a Heat Storage System," Trans. of the ASME, vol. 102, pp. 226-232, Dec. 1980.
- [8] Qiusheng Zhang and Masayoshi Tomizuka, "Multivariable Direct Adaptive Control of Thermal Mixing Processes," Trans. of the ASME, vol. 107, pp. 278-283, Dec. 1985.
- [9] S. Thompson, "Multivariable PID Controller for Unidentified Plant," Trans. of

- the ASME, vol. 104, pp. 270-274, Sep. 1982.
- [10] J. Wen and A. A. Desrochers, "An Algorithm for Obtaining Bang-Bang Control Laws," Trans. of the ASME, vol. 109, pp. 171-175, Jun. 1987.
- [11] Shing-Gwo Wu and Wen-Liang Chen, "Analysis and PID Controller Design of PWM Systems," Trans. of the ASME, vol. 110, pp. 355-360, Dec. 1988.
- [12] N. Ye, S. Scanvarda, M. Betemps, and A. Jutard, "Models of a Pneumatic PWM Solenoid Valve for Engineering Applications," Trans. of the ASME, vol. 114, pp. 680-688, Dec. 1992.
- [13] 강 훈, " Fuzzy Control 이론 및 연구동향", The magazine of the KITE, vol. 22, no. 11, Nov. 1995.
- [14] L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," IEEE Trans. System Man & Cybernetics, vol. 3, pp. 28-44, 1973.
- [15] E. H. Mandani, J. J. Ostergaard and E. Lembessis, "Use of fuzzy logic for implementing rule-based control of industrial processes", in Advances in Fuzzy Sets, Possibility Theory and Applications, New York: Plenum, pp. 307-303, 1983.
- [16] 고안자: 이 장명, "다기능 온도 제어장치", 1996년 특허출원공고 제 5610호.

 저 자 소 개

李章明(正會員) 第34卷 S編 第1號 參照
 현 부산대학교 공과대학 전자공학과 부교수, 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 전자기술부장



尹鍾普(正會員)
 1967년 9월 2日生 1995年 2月 부경대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1997年 2月 부산대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년 11月 현재 신성 ENG 기술연구소 연구원.