

<技術論文>

원보드 마이컴을 이용한 정밀온도 제어시스템에 관한 연구

주해호* · 조덕현*

(1989년 4월 24일 접수)

A Precision Temperature Control System Using One-Board Micom

Haeho Joo and Deokhyun Cho

Key Words : Thermoelectric Heat Pump(열전 열펌프), One-Board Micom(원보드 마이컴), Digital Control(전산기 제어), Dual PID Predictor Control(이중 비례-미분-적분 예측제어), Temperature Control(온도 제어)

Abstract

In this study an one-board micom controlled precision temperature control system using the thermoelectric heat pumps has been developed. The digital temperature control system is consisted of an one-board micom as digital controller, a 12-bit A/D and D/A converter, a power amplifier, a NTC thermister, a preamplifier and a heat chamber. An operating control program for the control system was written in Z80 machine language. A dual-PID predictor control algorithm was proposed. Experiments were conducted with different sampling time and limited error value. As a result, the temperature in a heat chamber can be well controlled within $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ when the sampling time was applied to 10 sec and the limited error value $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ under the dual-PID predictor control algorithm. By means of one-board micom the overall system has been reduced in size and volume, thus the system becomes compact and less expensive.

1. 서 론

일상 생활에서 열은 필요한 물리량이지만 시각적으로 잡기 어려울 뿐아니라 의외로 취급하기 어려운 물리량이다. 온도를 정확하게 제어 한다는 것은 바로 열관리를 정확하게 한다는 의미가 된다. 특히 실험실에서나 과학 실험기기중에서 화학 반응에 관련된 장비들은 상당한 정밀 온도의 유지가 요구된다. 예를 들면 액체의 비중을 측정하는 실험기구는 일정한 온도를 유지하는데 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이하의 정확도를 요구한다. 이러한 정밀온도를 유지하는데 재래적인 전열기나 기계식의 냉난방장치로서는 거의 불가능하다. 그러나 최근에 실용화되고 있는 열전 열

펌프(thermoelectric heat pump)를 사용하므로 정밀 온도 제어가 가능하게 되었다. 최근에 이러한 열전 열펌프와 마이크로 컴퓨터를 이용한 정밀 온도 제어 시스템이 개발 되었다⁽¹⁾.

이 제어시스템은 항온조, 전력 증폭기, 전치 증폭기, 온도 센서, 디지털 제어기, A/D 및 D/A 변환기로 구성되어있다. 이 온도 제어 시스템은 제어기로 Apple II마이크로 컴퓨터를 사용한 디지털(digital) 제어방식이다.

디지털 제어 방식은 종래의 애널로그(analog) 제어방식에 비해 정밀도와 신뢰성이 높고, 잡음이나 외란에 대해 영향을 적게 받으며, 하드웨어(hardware)의 변경없이 단지 제어 프로그램의 변경만으로 제어기의 제어 알고리즘을 변경할 수 있는 유연성 등의 장점이 있다.

*정회원, 영남대학교 공과대학 기계설계공학과

본 연구에서는 앞에서 개발된 온도 제어 시스템을 더욱 소형 경량화하기 위해서 일반 마이크로 컴퓨터 대신에 원보드 마이컴(one-board micom)을 사용하였다. 원보드 마이컴은 프로그램을 기계어로 작성해야하는 어려움이 있으나 가격이 저렴하고 주변장치가 필요없으며, 크기가 작아 제어시스템을 소형경량화 시킬수 있는 장점이 있다⁽²⁾.

제어 알고리즘의 선택과 샘플링 시간의 결정 및 A/D와 D/A 변환기의 비트수 결정을 하기 위하여 마이크로 컴퓨터를 이용한 지원설계 프로그램(MCAD)⁽³⁾을 이용하였다. 제어알고리즘은 일반적으로 화학 공정에 많이 사용되는 PID 알고리즘에 선형 예측 제어 알고리즘을 적용한 PID 예측 알고리즘⁽⁴⁾을 이중 모드(dual-mode)로 사용한 dual-PID 예측 제어 알고리즘을 제안하였다. 여러가지 알고리즘 PID, Dual-PID, PI 예측, PID 예측, dual-PID 예측 제어 알고리즘을 시뮬레이션한 결과 Dual-PID 예측 제어 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 정상 상태에 도달하는 시간이 빠르고 정상 상태 오차도 없고 진동현상이 없었다. 샘플링 시간은 10초 이고, A/D 및 D/A변환기의 비트 수는 12 비트인 경우에 $\pm 0.2\%$ 까지 제어가 가능함을 실험결과 확인되었다.

정밀 온도 제어 프로그램은 Z80기계어로 작성하였고 제어할 수 있는 온도 범위는 0°C 에서 40°C 이고, 정확도는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이다. 본 연구에서 설계제작한 정밀 온도 제어 시스템의 블록선도는 Fig. 1과 같다.

2. 시스템 및 제어 알고리즘

정밀 온도 제어 시스템은 항온조, 전력증폭기, 온도센서, 전치 증폭기, A/D 및 D/A 변환기, 원보드 마이컴으로 구성 되어있다.

항온조는 외부치수가 $350 \times 200 \times 250(\text{mm})$ 이고 내부치수는 $240 \times 102 \times 110(\text{mm})$ 인 통을 만들어 내외벽 사이에는 단열재 스티로폼과 석면을 사용하였고, 내부 전열판은 열전도성을 높이기위하여 동판을 사용하였다. 동판아래쪽에 두개의 열전식열펌프(CP 1.4-71-10L)를 직렬로 양쪽에설치하고, 두개의 알루미늄 방열핀과 한개의 냉각용 직류전동기로 구성되어있다.

전력증폭기는 T형 선형증폭기로서 입력전압은 $\pm 5\text{V}$ 이고 출력전압은 $\pm 12\text{V}$, 3A이다. 온도센서는

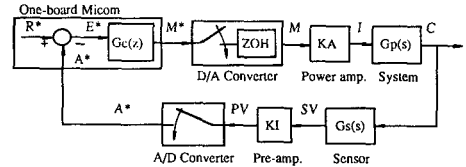


Fig. 1 Block diagram of a precision temperature control system

NTC 써미스터를 사용하였고, 측정온도범위는 -30°C 에서 100°C 이고 정확도는 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이다. 전치증폭기(preamplifier)는 OP.Amp 324를 사용하여 입력전압이 $0\text{V} \sim 2\text{V}$ 에서 $0\text{V} \sim 5\text{V}$ 출력되도록 설계제작 하였다. A/D변환기는 1채널 12비트 ADC 80Z IC를 사용하였고 입력전압은 0V 에서 5V 이다. D/A변환기는 1채널 12비트 DAC 85-DBI IC를 사용하였고 출력전압은 $\pm 5\text{V}$ 이다.

디지털 제어로 원보드 마이컴을 사용하였다. 원보드 마이컴은 마이크로 프로세서를 중심으로 기억장치와 외부 기기에의 입출력 제어 회로를 접속한 소형 범용 계산기를 의미한다. 이 마이컴의 중앙 연산 처리장치는 158개의 명령어를 갖는 Z80 마이크로 프로세서를 채택하였으며, 시스템의 클럭은 1.97MHz 이다. 기억장치로는 모니터 프로그램이 내장되어있는 2516 EPROM과 static RAM인 6116가 있으며 사용자가 기억장치의 용량을 확장할 수 있게되었다. 입출력 포트는 24개의 입출력 선을 갖는 programmable I/O 포트인 8255 IC, 16개의 입출력 선을 갖는 programmable PIO IC 4개의 독립된 카운터, 타이머를 갖는 programmable CTC IC가 있다. 입력장치는 19개의 기능키, 16개의 16진수 키, 1개의 사용자 키로 구성된 키보드(key-board)가 있으며 출력장치는 6개의 LED 디스플레이(display)가 있다.

마이크로 프로세서와 A/D 및 D/A 변환기와의 인터페이스는 원보드 마이컴의 Z80APIO의 입출력 버스를 이용하였다. A/D변환기의 데이터 버스라인은 IC 74 LS 373 버퍼(buffer) 2개를 이용하여 Z80 PIO의 A 포트와 B포트에 연결하였으며, 어드레스 디코드(address decode)는 Z80 CPU의 어드레스라인 A10번과 A13번을 74 LS 138와 74 LS 04를 사용하여 A/D변환기의 변환신호의 시작과 버퍼를 선택하도록 하였으며, D/A변환기의 데이터 버스라인은 IC 74 244(latch) 2개를 사용하여 Z80 PIO의 A포트와 B포트를 연결하여 설계 제작하였

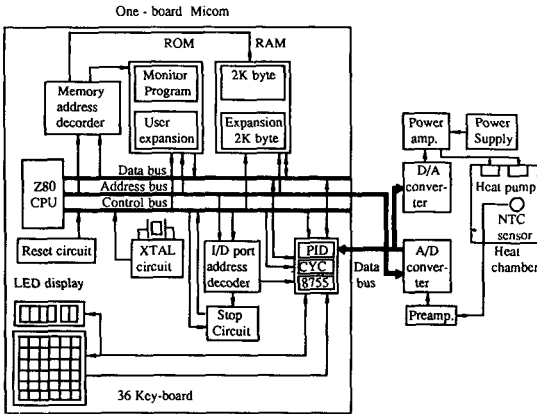


Fig. 2 A circuit diagram of the precision temperature control system using one-board microm

다. 데이터의 입출력은 Z80기제어인 IN, OUT 명령어를 사용한다. 원보드 마이컴을 이용한 정밀 온도 제어 시스템의 회로도도 Fig. 2와 같다.

제어 알고리즘은 Dual-PID 예측 알고리즘을 이용하였다. PID 예측 제어 알고리즘만으로 제어를 하였을때 시스템의 시간 반응이 정상상태에 도달하는 시간이 늦기 때문에 정상상태에 도달하는 시간을 줄이기위해서 실제 출력이 요구 입력에 가까운 값(제한 오차 범위)까지는 최대의 조작변수를 발생하게 하고 제한 오차 범위 내에 도달하면 PID 예측 제어 알고리즘이 작동되도록 하는 방법을 "Dual-PID 예측 제어 알고리즘" 이라고 필자는 명명 하였다.

이 알고리즘을 차분 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &e(k) > |LIMV| \text{ 인 경우} \\
 &M^*(k) = \text{최대치} \\
 &e(k) < |LIMV| \text{ 인 경우} \\
 &M^*(k) = M^*(k-1) + (2KP+4KI \\
 &\quad \times T/2 + KD/T) \times e(k-1) \\
 &\quad + (-3KP-3KI \times T/2 \\
 &\quad - 2KD/t) \times e(k-2) + (KP \\
 &\quad \times T/2 + KD/T) \times e(k-3)
 \end{aligned}$$

여기서 LIMV는 제한오차 범위의 값이고, 주파수 응답 설계 방법⁽⁶⁾으로 구한 비례이득(KP)은 13.843, 적분이득(KI)은 0.0025, 미분이득(KD)은 700이다. 제한오차 범위(LIMV)가 시스템반응의 정확도에 영향을 미치므로 임의로 결정할수없

고, 시뮬레이션을 통해서나 실험을 통하여 최적의 범위를 결정해야한다. 시뮬레이션 결과 이 시스템에서는 ±0.5°C가 가장 좋은 결과를 얻었다. 이 시뮬레이션에서 사용된 시스템 모델을 차분방정식⁽³⁾으로 표시 하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 C(K) &= \exp(-T/TP) \times C(K-1) + KP \\
 &\quad \times [1 - \exp(-T/TP)] \times I[K - (N \\
 &\quad + 1)] + \exp(-T/TP) \times I[K - (N+2)] \\
 S(K) &= KS \times C(K) \\
 P(K) &= KI \times S(K) \\
 D(K) &= KA \times M(K) \\
 A(K) &= (2^n - 1) \times P(K) / IMAX \\
 M(K) &= OMAX \times M^*(K) / (2^n - 1)
 \end{aligned}$$

여기서 C(K), S(K), P(K), D(K), A(K), M(K)는 각각 K번째 시스템출력, 제한센서출력, 전치증폭기 출력, 전력증폭기출력, A/D변환기 출력, D/A 변환기 출력이다. N는 지연시간에 대한 샘플링시간의 최대 정배수이고, n는 변환기의 비트수이고, TP는 시스템 시정수, T는 샘플링 시간이다.

3. 원보드 마이컴 제어 프로그램 설계

3.1 논리 흐름도

원보드 마이컴의 사용자 영역인 1800-1FFF번지의 내용을 원보드 마이컴 제어 프로그램 실행시 필요한 데이터를 저장하기 위해서 클리어(clear)한다. 그 다음 A/D변환기로 부터 초기치 온도를 읽어 들여 애널로그 온도 값으로 변환 하여 원보드 마이컴의 출력 장치인 LED출력 장치에 나타내고, 사용자는 LED출력 장치에 "rEq"가 표시되면 키-보드를 통하여 요구온도를 입력 시키면, 디지털 요구 온도값을 계산한다. 그 다음에 시간을 측정하기위해서 Z80 CTC타이머(timer)를 초기 설정하고, LED출력장치에 현재 온도와 요구온도를 표시하기 위해 디스플레이데이터 형태인 16진수로 변환을 한다. 샘플링 시간의 측정은 Z80A CTC의 타이머 기능을 이용한 타이머 인터럽트 루틴(interrupt routine)을 사용한다. 타이머는 샘플링 시간이 되면 Z80 CPU에 인터럽트를 건다. 그러면 원-보드 마이컴 제어 프로그램은 인터럽트 서비스 루틴으로 실행이 옮겨진다. 인터럽트 서비스 루틴에서는 샘플링 시간이 되면, A/D 변환기로부터 현재의 온도값을 읽어 들여 애널로그 온도 값을

계산후, 디지털 요구온도 값과 비교하여 오차값을 계산 한다. 샘플링 시간에 도달하지 않으면 인터럽트 서어비스 루틴을 빠져 나온다. 만약 오차값이 사용자가 지정한 제한오차 범위 보다 큰경우 조작변수의 값은 최대의 값을, 작은경우는 조작변수의 값이 0으로, 범위안에 있는 경우는 PID 예측제어 알고리즘에 의해서 조작변수의 값이 계산되는 Dual-PID 예측 제어 알고리즘이 실행된다. 계산된 조작변수의 값은 D/A 변환기 출력 루틴에 의해서 D/A 변환기로 출력되면 인터럽트 서어비스 루틴의 실행이 끝나고, 현재 애널로그 온도값과 요구온도값을 LED 출력장치에 출력한다. 출력된 값은 타이머 인터럽트 루틴에 의해서 Z80 CPU에 인터럽트가 걸릴 때까지 그 값을 계속 유지한다. 다음의 샘플링 시간이 되면 타이머 인터럽트 루틴에 의하여 Z80 CPU에 인터럽트가 걸리고, 인터럽트 서어비스 루틴으로 되돌아가서 다음 A/D 변환기로부터 그 때의 온도 값을 읽어 애널로그 온도 값으로 계산하고, 오차 값을 계산하는 순서로 되돌아간다. 사용자가 온도 제어 시스템의 온도 제어를

중지 시킬 때 까지 계속 해서 위와 같은 순서를 되풀이 하면서 사용자가 원하는 제어 동작을 하게된다. 위와 같은 순서를 논리 흐름도로 나타내면 Fig. 3과 같다. 제어 프로그램은 Z80 기계어로 작성하여 6116 RAM에 기억 시킨다. 실행 시킬 때는 어드레스 2000번지를 입력한 후 키-보드에 있는 [GO]키를 누르면 제어 프로그램이 실행한다.

3.2 기계어 프로그램 작성

원보드 마이컴 제어 프로그램을 Z80 어셈블러(Assembler)언어로 작성한 후 Apple II마이크로 컴퓨터의 CP/M상에서 Z80 컴파일러를 이용하여 기계어로 변환시킨다. 제어 프로그램에서 A/D변환기의 출력 값은 디지털 온도 값으로 표시되므로 아날로그 온도 값으로 변환 하기위해서 16진 곱셈과 4바이트 2진-BCD 변환 루틴을 사용하였고, 입력된 요구 온도 값을 디지털 요구 온도 값으로 변환하기 위해서 1바이트 BCD-2진 변환 루틴과 8진 곱셈을 사용하였다. 프로그램 실행시 오차신호를 계산할때, 계산결과가 음이 되는 경우가 있어서 계산된 결과의 최상위 바이트에 부호를 저장하는 바이트로 하여, 계산된 값이 양인경우는 "00"를, 계산된 결과가 음인 경우는 "FF"가 부호 바이트에 저장 되어 지도록 하는 부호 처리방법을 채택 하였다. 제어 알고리즘에 의해서 조작변수를 계산하는 과정에서 덧셈을 하는 경우 부호에 따라 2가지 경우가 발생 한다. 더하는 수와 더해지는 수의 부호가 양인 경우에 두 수를 더하고, 더 하는 수와 더해지는 수의 부호가 음인 경우에는 두 수를 더하고 부호를 음으로 하고, 더 하는 수와 더 해지는 수의 부호가 다른 경우 두 수를 빼도록 하였다. 뺄셈을 할 때, 빼는 수와 빼지는 수의 부호가 양인 경우는 두 수를 빼고, 빼는 수와 빼지는 수의 부호가 다른 경우 두 수를 더하고, 두수의 크기에 따라 부호가 정해 지도록 하였다. 기계어 프로그램 실행시 각 레지스터의 내용을 분석할 수 있고 프로그램의 실행을 추적할 수 있는 ZBID 프로그램을 이용하여 작성한 온도 제어 프로그램의 문장의 잘못과 로직의 잘못을 수정하였다.

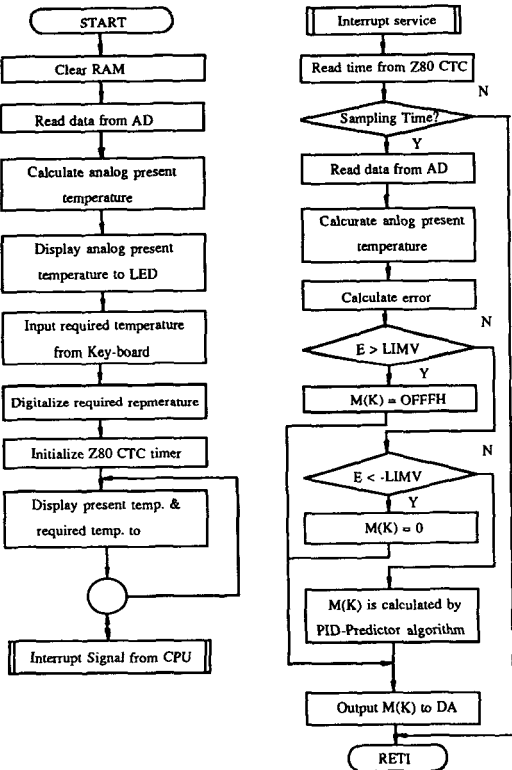


Fig. 3 Flow chart of a precision temperature control program.

4. 실험

3.1 실험장치

원보드 마이컴 정밀 온도 제어 실험장치의 개략

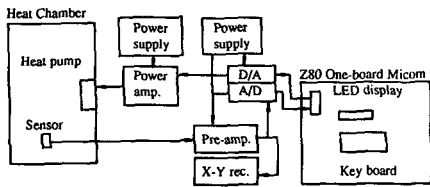


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up

도는 Fig. 4와 같다. 실험장치는 원보드 마이컴, 정전원 공급장치, A/DA 변환기, 항온조, 온도센서, 전력증폭기, 전치증폭기, X-Y기록기, 디지털 온도계로 구성되어 있다. 각 실험기기들의 사양은 Table 1과 같다.

4.2 실험 방법 및 고찰

실험은 원보드 마이컴에 Dual-PID 예측 제어알고리즘의 작동 프로그램을 6116 RAM에 저장하여 냉각, 가열모드 두 가지 경우에 대하여 실험을 하였다. 실험순서는 원보드 마이컴에 일시 저장된 원보드 마이컴 제어 프로그램의 어드레스인 2000번지

를 키를 이용하여 입력한후 키보드에 있는 [GO]키를 누르면 제어프로그램이 실행되며, 초기 온도가 LED 디스플레이 출력장치에 나타난다. 그러면 사용자는 요구온도를 입력한다. 이렇게 함으로써 온도 제어 동작이 실행되고, Z80 원보드 마이컴의 LED 디스플레이 출력장치에는 현재온도와 요구온도가 표시되며, X-Y기록기에서는 온도 대 시간 곡선을 그린다. 실험의 종류는 냉각모우드에서 제한 오차범위를 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 로 하고, 샘플링 시간을 10초, 20초, 30초로 변경시키면서 실험하였고 (EXP. 1-EXP.3), 가열모우드에서는 샘플링 시간을 10초로 고정하고, 제한 오차 범위를 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 와 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 경우를 실험하였다(EXP.4-EXP.5). 실험결과를 Table 2에 요약 하였다. Table에서 요구온도값을 다르게 정한 이유는 주어진 초기온도를 감안하여 임의로 선정하였기 때문이다. 실험 1에서 실험 3까지는 샘플링 시간을 변화시켜 보면서 제어온도 정확도를 조사 해 본것이다. 샘플링 시간이 가장 짧은 10초에서 정확도가 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 내에 도달함을 알수 있다. 실험 4와 실험 5는 같은 샘플링 시간에서 제

Table 1 Specifications of experimental apparatus

Appartus	Specification	Manufacturer
One-board micom	CPU : Z80, ROM : 2516 RAM : 6166, I/O : 8255, Z80 PIO, Z80 CTC DISPLAY : 6 LED, 36 KEY, Power : +5V	Multitech Industrial CO. U.S.A
DC power supply	Input : 100V AC Output : $\pm 20\text{V}$, 5A	ED Engineering
DC power supply	Input : 100V AC Output : $\pm 15\text{V}$, $\pm 20\text{V}$, $\pm 12\text{V}$, 5A +5V, GND, 1A	Korea Computer
AD converter	12 bits, 1 ch Input : 0 - +5V	Self-fabrication
DA converter	12 bits, 1 ch Output : -5 - +5V	Self-fabrication
Heat chamber	350 x 250 x 200mm	Self-fabrication
Power amplifier	Input : -5V - +5V Output : -3A - +5A	Self-fabrication
Pre-amplifier	Input : 0V - 2V Output : 0V - 5V	Self-fabrication
Level recorder	LR-04	RION, Japan
Temperature probe	NTC thermister	THERM, Germany

Table 2 Summary of experimental results

Experiment No.	Sampling time [sec]	Limited error [°C]	Initial temp. [°C]	Required temp. [°C]	Error temp. [°C]	
					Max.	Min.
Exp. 1	10	0.5	24.05	19	0.2	0.1
Exp. 2	20	0.5	22.85	17	0.8	-0.3
Exp. 3	30	0.5	19.66	14	2.01	-0.2
Exp. 4	10	0.5	21.77	27	0.2	-0.2
Exp. 5	10	1	18.31	23	0.6	0.4

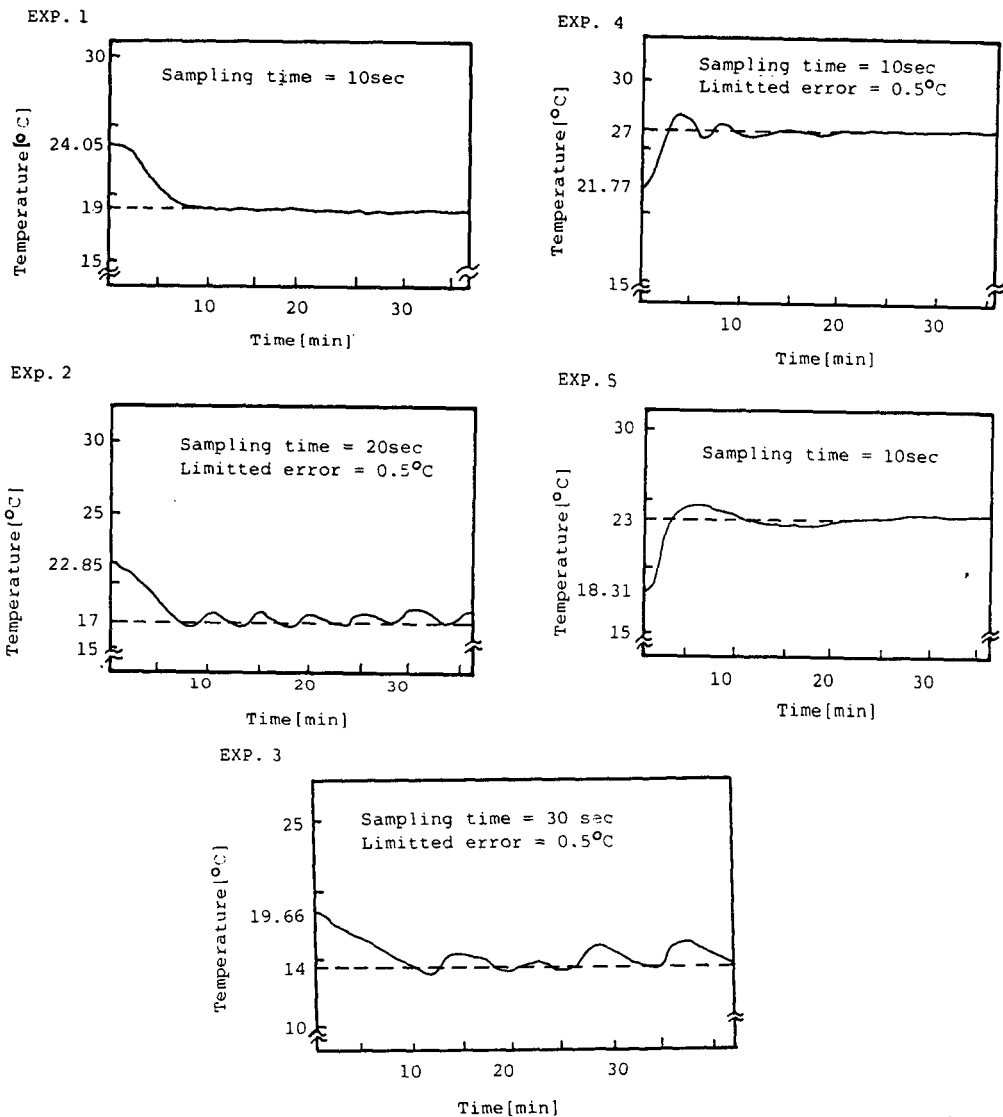


Fig. 5 Temperature responses for various conditions.

한오차 범위를 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 및 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 내에 도달함을 알 수 있었다. Fig. 5는 온도의 시간곡선을 애널로그 신호로 차트기록계에 기록한 것이고, Table 2의 수치는 디지털 출력 값을 원보드 마이컴 으로부터 기록한 것이다.

5. 결 론

원보드 마이컴을 이용한 정밀온도 제어장치를 설계, 제작, 실험하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제한오차 범위는 시스템의 시간반응의 정상상태 오차에 영향을 미친다는 것을 알았다. 제어알고리즘에 따라 알맞은 제한 오차 범위를 정해 주어야 한다. Dual-PID예측 제어 알고리즘에는 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 가 적당함을 알 수 있다.

(2) Z80 원보드 마이컴을 제어기로 하고 12비트 A/D 및 D/A 변환기를 사용하고 Dual-PID예측제어 알고리즘으로 온도제어를 한결과 요구온도에 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 까지 정확하게 제어됨을 알았다.

정밀 온도제어 프로그램을 EPROM프로그램을 이용하여 EPROM 2716등에 기억시키면서 프로그램을 영구히 보존할 수 있고, 원보드 마이컴에 탑재 하면 항상 EPROM에 기억된 제어 프로그램을 실행

시킬 수 있다.

시스템구성을 더욱 소형, 경량화 하기위해서 원칩(one-chip)마이크로 컴퓨터를 이용한 정밀 온도 제어 시스템의 개발이 요구되어진다.

참 고 문 헌

- (1) Joo, Haeho, Kim, K., 1988, "Microprocessor-Controlled Precision Temperature Control System Using Thermoelectric Heat Pumps", The 36th International Symposium Mini and Microcomputer and Their Applications, Gerona, Spain, June 27~30, pp. 612~615.
- (2) 조덕현, 1988, "정밀온도제어용 원-보드 마이컴 제어 알고리즘 개발에 관한 연구", 영남대학교 석사학위 논문.
- (3) 주해호, 조덕현, 1988, "SISO제어시스템을 위한 마이크로 컴퓨터 지원 설계", 한국정밀공학회지, 제 5권, 제 3호, pp.63~70.
- (4) 전병균, 전기준, 1986, "Robust한 입출력 PI 및 PID 예측제어기 설계", 86 한국자동제어학술회의 논문집, 제 1권.
- (5) James, H., Aylor, 1980, "Design and Application of Microprocessor PID Predictor Controller", IEEE. Tran. on Ind Elec.Cont. Inst., Vol.IECL-27, No.3.