

디지털 제어시스템을 위한 마이크로컴퓨터 지원설계

주 해 호

조 덕 현

영남대학교 기계설계학과

Microcomputer-Aided Design for A Digital Control System

Haeho Joo and  
Yeoungnam Univ.

Dukhyun Cho  
Yeoungnam Univ.

Abstract

This paper presents the development of a micro-computer-aided design program for a digital control system. The program has been written in GWBASIC language which is suitable for Intel 8086II CPU with 640KB memory. By utilizing this program, sampling time, the number of bits A/D and D/A converter, and the stability for the digital control system can be determined. To demonstrate the utility of this program, a microcomputer controlled precision temperature control system has been employed as an example.

1. 서 론

제품의 고급화, 생산성의 향상 및 원가 절감이 요구되는 첨단 과학기술시대에서 컴퓨터를 이용한 온-라인 디지털 제어시스템 개발이 크게 진행되고 있고 그 용도도 다양하다. 디지털 제어시스템은 재래식 아날로그 제어시스템에 비해 정밀도와 신뢰성이 높고 드리프트(drift) 현상이 없고 잡음이나 외란에 대한 영향이 적고 하드웨어(hardware)의 개조없이 소프트웨어(software)만 변경하면 새로운 제어기의 역할을 할 수 있는 가변성이 높은 장점이 있다<sup>[1]</sup>. 더욱이 화학공정이나 핵 발전소와 같은 다변수 공정제어에는 컴퓨터의 도움없이 제어가 불가능하다. 따라서 기술이 발전되고 시스템이 복잡해질수록 디지털 제어시스템이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 이러한 디지털 제어시스템을 해석하고 설계하는데 필요한 도구의 역할을 하는 마이크로컴퓨터 지원설계 프로그램(MCAD)을 단일입력-단일출력 시스템에 대하여 개발하였고 시뮬레이션 기법을 제시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 실험을 직접 실험하지 않고 시스템의 수학적 모형을 만들어 수치해석법에 의하여 컴퓨터가 풀이 해주므로써 시스템을 해석하고 설계하는데 상당한 시간의 절약과 비용의 절감, 계산의 신속성과 정확성등의 장점이 있다<sup>[2]</sup>. 최적의 제어알고리즘이나 파라메타

를 수학적 기법에 의하여 찾아낼 수 있으나, 이 수치를 그대로 사용할 수는 없고 과연 최적의 결과를 나타내는가를 반드시 확인해야 하는데 이것을 실험적으로 검증하기에는 경제적, 시간적 낭비가 많다. 그러나, 컴퓨터 지원설계 프로그램을 이용하면 신속정확하게 그리고 값싸게 실험을 대응할 수 있고 시행착오법에 의하여 쉽게 계수조정이 가능하다. 이러한 시뮬레이션 기법을 이용하면 실험에 의한 시간과 비용을 절감할 수 있다.

마이크로컴퓨터 지원설계 프로그램은 Intel 8086II CPU를 갖는 IBM-XT 호환기종에 사용되는 GWBASIC 언어를 사용하였으며 640 KB 기억용량으로 사용이 가능하도록 만들었다. 프로그램은 사용자와 대화형식으로 구성하였으며 사용자가 임의로 시스템 요소의 전달함수를 대치할 수도록 각 요소별 모듈(module)화 시켜놓았다. 시뮬레이션 기법은 디지털 제어시스템이 구성하고 있는 각 요소별로 입력과 출력의 관계를 선형차분방정식으로 표시하여 매 샘플링(sampling)마다 각 요소의 입력과 출력을 알 수 있도록 작성하였다. 지금까지 시뮬레이션 결과는 전체시스템의 전달함수로 부터 그 시스템의 최종변수의 시간반응만을 표시하므로 각 요소가 어떻게 반응하고 있는가를 직접 확인할 수 있는 장점이 있다.

개발한 MCAD 프로그램으로 디지털 제어시스템을 설계할수있는 범위는 다음과 같다. (1)디지털 제어알고리즘의 선택과 제어기의 파라메타 결정, (2)최적 샘플링 시간 결정, (3)시스템의 지연시간 분석, (4)A/D 및 D/A 변환기의 최적 비트 수 결정, (5)각 요소의 동적 특성 분석, (6)디지털 제어시스템의 안정성 검토등이다. 여러가지 제어알고리즘을 시스템에 적용하여 그 결과를 시뮬레이션 해봄으로써 제어목적에 적합한 제어알고리즘을 결정할 수 있다. 디지털 제어시스템에서 샘플링 시간이 시스템의 안정성과 정확성에 미치는 영향은 절대적이다. 따라서 최적의 샘플링시간을 결정하는 것은 디지털 제어시스템에서 상당히 중요하다. 화학공정과 같이 지연시간이 존재하는 시스템인 경우 지연시간이 전체시스템에 미치는 영향을 분석할 수 있고 이에 대처하는 제어알고리즘을 결정할 수 있다. 신호변환기인 A/D 및

D/A 변환기의 비트 수는 시스템의 설계목적에 따라 8비트로 하느냐, 16비트로 하느냐를 결정할 수 있다. 각 요소의 동적 특성과 전체시스템의 안정성을 시뮬레이션 결과로 판단내릴 수 있다. 이 프로그램은 단일입력-단일출력 시스템에만 국한하여 사용이 가능하여 시간의 영역에서의 해석만을 취급하였다.

## 2. 디지털 제어시스템 구성

일반적으로 디지털 제어시스템은 제어기의 역할을 하는 마이크로컴퓨터, 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환시켜주는 D/A 변환기와 아날로그 신호를 디지털 신호 변환시켜주는 A/D 변환기, 제어신호를 증폭시켜주는 전력증폭기, 제어대상인 시스템, 그리고 출력신호를 궤환(feedback) 시켜주는 센서와 그의 전치 증폭기(pre-amplifier) 로 구성되어 있다. 디지털 제어시스템의 전체블록선도는 Fig. 1 과 같다.

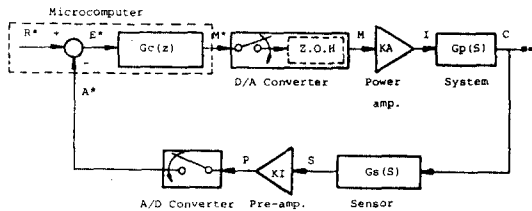


Fig. 1 Digital Control System Block Diagram

## 3. 수학 모형

### (1) 시스템의 차분방정식

여기서는 지연시간을 갖는 일차 시스템으로 가정하였다. 사용자의 요구에 따라서 시스템의 방정식을 대치할 수 있다.

$$C(K) = e^{-T/TP} C(K-1) + KP \times [(1 - e^{-T/TP}) \times I[K - (N+1)] + (e^{-mT/TP} - e^{-T/TP}) \times I[K - (N+2)]]$$

$$m = 1 - (TD - NT) / T$$

여기서 C(K) 는 K 번째 시스템 출력, I[K - (N+1)] 는 K - (N+1) 번째 전력증폭기 출력, TP 는 시스템의 시정수, KP 는 시스템의 이득, T 는 샘플링시간, TD 는 시스템의 지연시간, N 은 지연시간에 대한 샘플링시간의 최대정수배이다.

### (2) 궤환센서의 차분방정식

궤환센서의 동특성은 상수와 일차 시스템 두가지를 선택하도록 하였다.

상수일 때:  $S(K) = KS \times C(K)$

일차 시스템일 때:

$$S(K) = e^{-T/TS} \times S(K-1) + KS \times C(K)$$

여기서 S(K) 는 K 번째 궤환센서의 출력, KS 는 궤환센서의 이득, TS 는 궤환센서의 시정수이다.

### (3) 전치증폭기의 차분방정식

전치증폭기의 전달함수는 상수로 가정하였다.

$$P(K) = KI \times S(K)$$

여기서 P(K) 는 K 번째 전치증폭기의 출력, KI 는 전치증폭기의 이득이다.

### (4) 전력증폭기의 차분방정식

전력증폭기의 전달함수는 상수로 가정하였다.

$$I(K) = KA \times M(K)$$

여기서 I(K) 는 K 번째 전력증폭기의 출력, KA 는 전력증폭기의 이득, M(K) 는 K 번째 D/A 변환기의 출력이다.

### (5) A/D 변환기

A/D 변환기는 unipolar 와 bipolar 두 경우를 선택하고 비트 수를 4, 8, 16 등의 임의의 수를 선택한다.

unipolar 영인 경우:

$$A^*(K) = (2^N - 1) \times P(K) / IMAXV$$

여기서 A\*(K) 는 K 번째 A/D 변환기의 출력, N 은 A/D 변환기의 비트 수, IMAXV 는 A/D 변환기의 사양 입력전압이다.

bipolar 영인 경우:

$$A^*(K) = INT((2^N - 1) / 2 + 0.5) + INT((2^N - 1) \times P(K) / IMAXV)$$

### (6) D/A 변환기

unipolar 영인 경우:

$$M(K) = OMAXV \times M^*(K) / (2^N - 1)$$

bipolar 영인 경우:

$$M(K) = OMAXV - 2 \times (OMAXV \times M^*(K) / (2^N - 1))$$

여기서 M(K) 는 K 번째 D/A 변환기의 출력, N 은 D/A 변환기의 비트 수, OMAXV 는 D/A 변환기의 사양 출력 전압, M\*(k) 는 제어알고리즘의 K 번째 출력이다.

### (7) 제어알고리즘

#### 1) PID 제어알고리즘

$$M^*(K) = M^*(k-1) + (CKP + CKI \times T/2 + CKD/T) \times E^*(K) - (CKP + CKI \times T/2 + 2CKD/T) \times E^*(K-1) + CKD/T \times E^*(K-2)$$

여기서 CKP 는 비례이득, CKI 는 적분이득, CKD 는 미분이득, E\*(K) 는 K 번째 디지털 오차이다.

## 2) DUAL-PID 제어알고리즘

$E^*(K) < |LIMV|$  인 경우:

$$M^*(K) = M^*(K-1) + (CKP + CKI \times T/2 + CKD/T) \times E^*(K) - (CKP - CKI \times T/2 + 2CKD/T) \times E^*(K-1) + CKD/T \times E^*(K-2)$$

$E^*(K) > |LIMV|$  인 경우:

$M^*(K) = \text{Maximum Value.}$

## 3) PID 예측 제어알고리즘

$$M^*(K) = M^*(K-1) + (2CKP + 4CKI \times T/2 + CKD/T) \times E^*(K-1) - (3CKP + 3CKI \times T/2 + 2CKD/T) \times E^*(K-2) + (CKP + CKI \times T/2 + CKD/T) \times E^*(K-3)$$

## 4. 시뮬레이션 프로그램

### (1) 프로그램 흐름도

디지털 제어시스템을 시뮬레이션하기 위해 각 요소를 모듈로 표시하면 Fig.2 와 같다. Fig. 2 에서 각 모듈을 서어브루틴(GOSUB) 형태로 표시하였다. 컴퓨터를 on 하고 프로그램 MCAD 를 디스켓으로부터 읽어들이 실행하면 화면에 입력자료가 요구된다. 입력자료를 바로 디스켓에 저장한 다음 디지털 시간  $k = 0$ 에서 오차를 계산한다. 선택한 제어알고리즘으로부터 제어변수가 계산되고 이 변수는 D/A 변환기와 전력증폭기를 거쳐 시스템의 입력으로 작동한다. 시스템의 반응은 변환센서에 의하여 측정이 되어 전치증폭기를 거쳐 A/D 변환기로 전달된다. 각 요소의 출력값을 프린트한다. 디지털 시간을 다음의 샘플링시간으로 하고 다시 오차를 계산하는 순서로 돌아간다. 시간이 최종시간에 도달하면 그동안의 각 요소별 입출력자료를 데이터 파일에 저장한다. 다음에 그래프를 원하는지는 질문이 나오고 그래프를 원하면 프로그램 GRAPH 가 실행이 된다. 그래프를 원하지 않으면 이 프로그램을 처음부터 실행할 것인가를 묻는다. 원한다면 입력데이터를 처음부터 새로 입력할 것인지, 아니면 부분적으로 수정할 것인지를 묻는다. 이에 응답하면 요구대로 실행되고 다시 오차 계산순서로 되돌아간다. 재 실행을 요구하지 않으면 이 프로그램은 종료된다. 위와같은 논리 흐름을 흐름도로 표시하면 Fig. 3 과 같다.

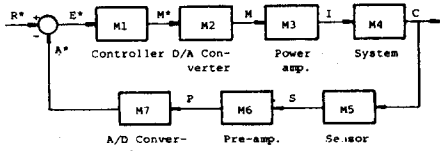


Fig. 2 Module Simulation Block Diagram of a Digital Control System

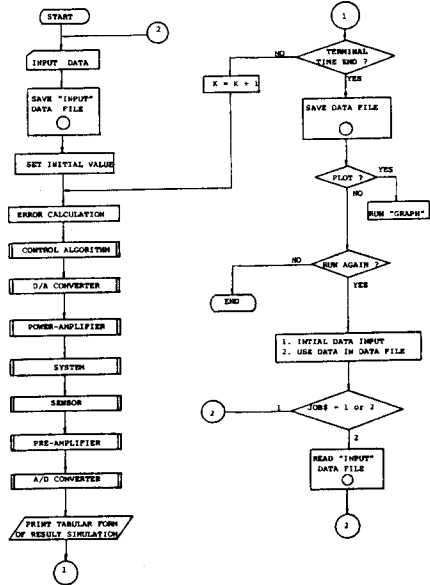


Fig. 3 Flowchart of MCAD

### (2) 프로그램의 입출력

MCAD 프로그램을 실행하기 위한 입력과 출력 데이터는 Table 1, table2와 같다. 입력 데이터는 계산에 필요한 데이터들이므로 반드시 입력이 되어야 하나 출력 데이터는 사용자의 선택에 따라 결정한다. 시간반응 변수들은 Tabular form 으로 표시되고 선택에 따라 그래픽으로 표시할 수 있다.

Table 1 Input Data

Parameter	Variable Name	Parameter	Variable Name
Time Constant of System	TP	D/A Converter Bits	DABIT
Gain of System	KP	D/A Converter Max. Reference Output	OMAXV
Time Delay of System	TD	D/A Converter Min. Reference Output	OMINV
Control Algorithm	CONS	Power-amplifier Gain	KA
Constants of Control Algorithm	CKP,CKI,CKD	Pre-amplifier Gain	KI
Error Dynamics Type	SDMOPRS	Max. Value of Controlled Variable	MAXCON
Time Constant of Sensor	TS	Min. Value of Controlled Variable	MINCON
Gain of Sensor	KS	Initial Value	INIV
A/D Converter Type	ADFORM	Reserved Value	RESV
A/D Converter Bits	ADBIT	Sampling Time	TSAMP
A/D Converter Max. Reference Input	IMAXV	Terminal Time	TTERT
A/D Converter Min. Reference Input	IMINV	Time Interval for Print Output	OUTSAMP
D/A Converter Type	DIFORMS	Limited Value for Dual-Mode	LIMV

Table 2 Output Data

Parameters	Variable Name
Analog Value of Error	E
Digital Value of Manipulated Variable	M*
Analog Value of D/A Converter	M
Analog Value of Controlled Variable	C
Analog Value of Sensor Output	S
Digital Value of A/D Converter	A*

## 5. 운용 시스템

프로그램 MCAD 는 Intel 8086II CPU 에 적합한 GWBASIC 언어로 작성되었으며 시뮬레이션 결과를 계산하는 프로그램과 그래픽 프로그램으로 구성되어 있다. 사용자와 컴퓨터와의 대화는 Fig. 4 와 같이 수행된다. 사용자측에서는 제어시스템을 먼저 모델링한 다음 모듈 변경이 필요하면 프로그램을 읽어들이 모듈에 해당하는 서어브루틴을 수정한다. 수정이 필요없는 경우는 프로그램

MCAD 를 실행시킨다. 시뮬레이션에 필요한 입력 데이터가 요구되고 사용자가 이에 응답하면 시뮬레이션 결과가 시간 대 변수로서 Tabular form 으로 프린트되고 모든 데이터는 그래픽을 위하여 데이터 파일에 저장된다. 사용자가 시뮬레이션 결과를 그래프로 표시하기를 원한다면 프로그램 GRAPH 가 실행된다. 그래프는 원하는 변수별로 개별적으로 표시된다.

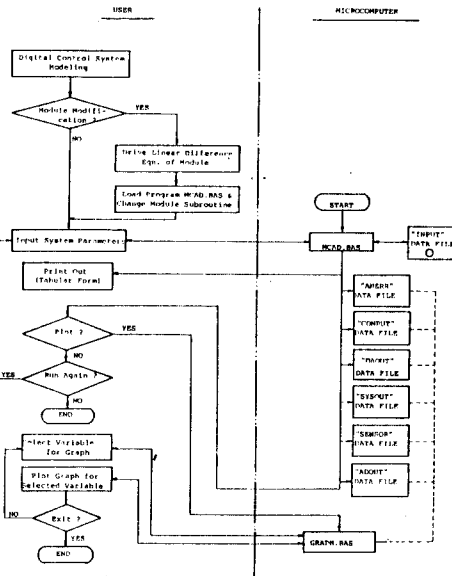


Fig. 4 Operating System Flowchart.

### 6. 사용 예

마이크로컴퓨터 지원설계 프로그램을 마이크로컴퓨터를 이용한 정밀온도 제어시스템의 설계에 이용하였다[3].

온도 제어시스템에서 어떤 제어알고리즘을 선택할 것이며 A/D 및 D/A 변환기의 비트 수는 얼마로 정할 것이며 샘플링시간을 얼마로 선정해야할 것인지들이 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 결정할 수 있다. 프로그램의 입력 데이터는 Table 3과 같다.

Table 3 Numerical Value for Input Parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Time Constant of System	50(sec)	D/A Converter Bits	8
Gain of System	5.62	D/A Converter Max. Reference Output	5(V)
Time Delay of System	35(sec)	D/A Converter Min. Reference Output	-5(V)
Control Algorithm	PID-PREDICTOR	Power-amplifier Gain	0.3
Constants of Control Algorithm	$K_c = 0.015, K_D = 0.015, K_I = 0.015$	am. Value of Controlled Variable	40(°C)
Sensor Dynamics Type	First-Order	an. Value of Controller Variable	34(°C)
Time Constant of Sensor	0.1(sec)	Initial Value	25(°C)
Gain of Sensor	0.03	Required Value	20(°C)
A/D Converter Type	Unipolar	Sampling Time	10(msec)
A/D Converter Bits	8	Periodic Time	50(msec)
A/D Converter Max. Reference Input	5(V)	Time Interval for Print Output	30(msec)
A/D Converter Min. Reference Input	0(V)	Limited Value for Output	0
D/A Converter Type	Bipolar		

Table 4는 시뮬레이션 결과를 Tabular form 으로 표시한 것이고, Fig. 5(a) 는 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 그림에서 두 결과가 상당히 잘 일치하므로 MCAD 프로그램의 정확성을 알 수 있다. Fig. 5 (b) 와 Fig. 5 (c)는 샘플링시간을 변경하였을

때 시스템의 반응을 표시한 것이다. 샘플링시간이 증가할수록 시스템의 반응은 불안정하게 요동함을 알 수 있다.

Fig. 5(d)에서 Fig. 5(e).까지는 A/D 및 D/A 변환기의 비트 수를 변경하였을 때 시스템의 반응을 표시한 것이다.

비트 수가 증가할수록 시스템의 반응의 정확도가 높음을 알 수 있다. Fig. 5(f) 와 Fig.5(g) 는 DUAL-PID 제어 알고리즘과 재래식 PID 제어알고리즘을 사용했을 때 시스템의 반응을 표시한 것이다. DUAL-PID 가 PID 보다 성능이 우수함을 보여준다. Fig. 6(a) 에서 fig. 6(c)까지는 디지털 제어시스템의 다른 변수(예를 들면, 오차변수(E), 조작변수(M), 센서의 출력변수(S))의 시간반응을 표시한 것이다. 이 결과로부터 각 요소의 동적 거동을 분석할 수 있다.

Table 4 Simulation result in tabular form.

SIMULATION RESULT						
CONTROL ALGORITHM : PID PREDICTOR						
A/D & D/A BIT : 8						
SAMPLING TIME : 10 (msec)						
INITIAL VALUE :						
E = ANNUAL VALUE OF ERROR						
M = ANNUAL VALUE OF MANIPULATED VARIABLE						
S = ANNUAL VALUE OF CONTROLLED VARIABLE						
T = ANNUAL VALUE OF SENSOR INPUT						
O = ANNUAL VALUE OF A/D CONVERTER						
TIME (msec)	E	M	S	T	O	DA
0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.0000	0.9900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0000	0.9800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.0000	0.9700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.0000	0.9600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.0000	0.9500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6.0000	0.9400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7.0000	0.9300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8.0000	0.9200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9.0000	0.9100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10.0000	0.9000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11.0000	0.8900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12.0000	0.8800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13.0000	0.8700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14.0000	0.8600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15.0000	0.8500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16.0000	0.8400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17.0000	0.8300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18.0000	0.8200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19.0000	0.8100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20.0000	0.8000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21.0000	0.7900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22.0000	0.7800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23.0000	0.7700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24.0000	0.7600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25.0000	0.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26.0000	0.7400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27.0000	0.7300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28.0000	0.7200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29.0000	0.7100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30.0000	0.7000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
31.0000	0.6900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32.0000	0.6800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
33.0000	0.6700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34.0000	0.6600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
35.0000	0.6500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36.0000	0.6400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37.0000	0.6300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38.0000	0.6200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
39.0000	0.6100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40.0000	0.6000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
41.0000	0.5900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
42.0000	0.5800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
43.0000	0.5700	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
44.0000	0.5600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
45.0000	0.5500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
46.0000	0.5400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
47.0000	0.5300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
48.0000	0.5200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
49.0000	0.5100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50.0000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

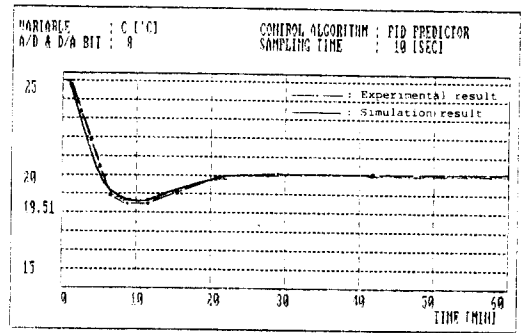


Fig. 5(a) Comparison of simulation result with Experimental result.

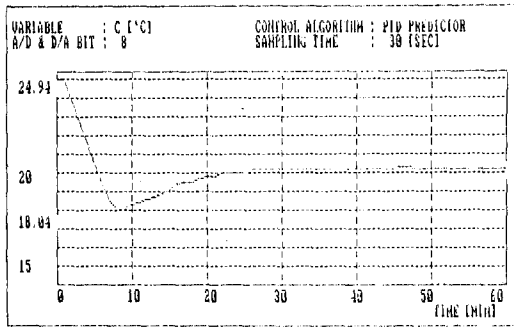


Fig. 5 (b) Time response of system output

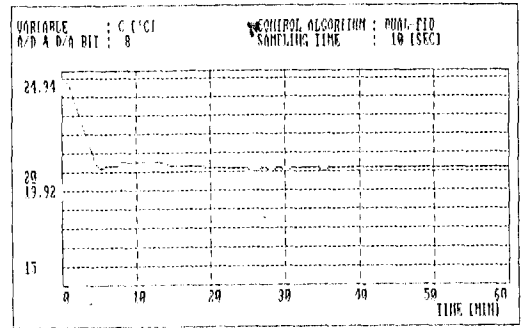


Fig. 5 (f) Time response of system output

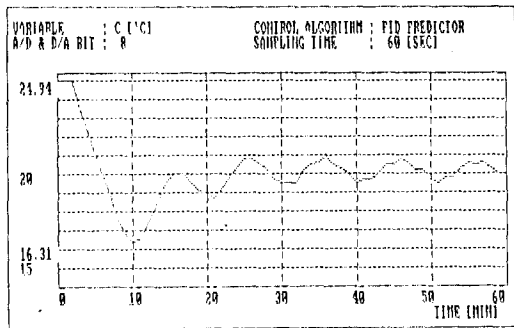


Fig. 5 (c) Time response of system output

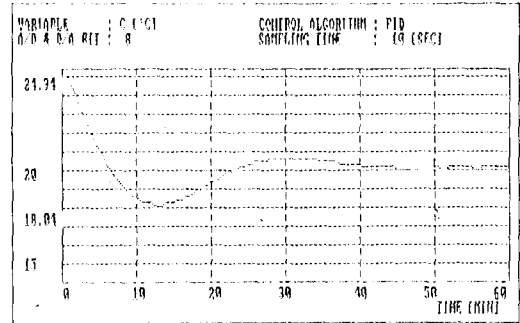


Fig. 5 (g) Time response of system output

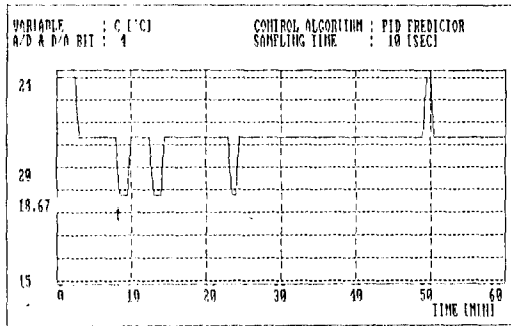


Fig. 5 (d) Time response of system output

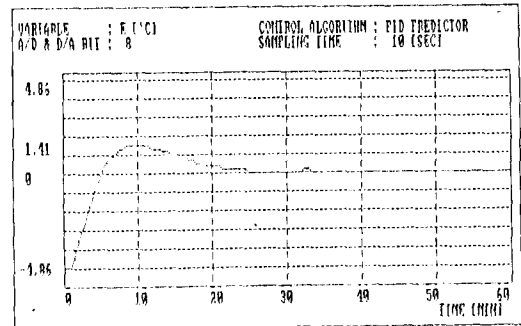


Fig. 6 (a) Time response of Error variable

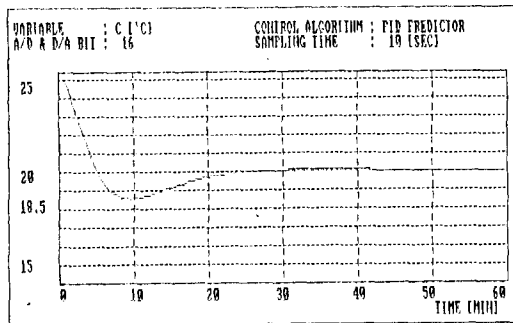


Fig. 5 (e) Time response of system output

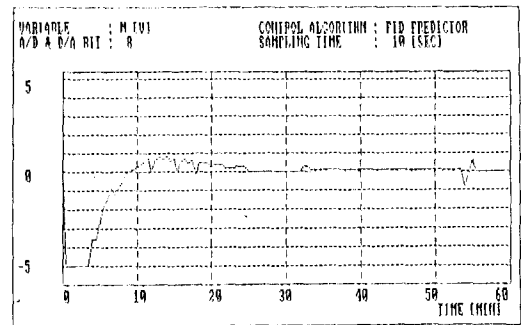


Fig. 6 (b) Time response of Manipulated variable

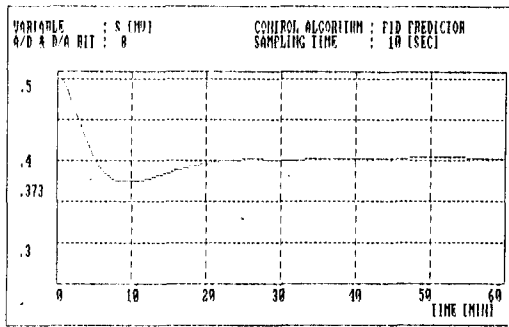


Fig. 6(c) Time response of Sensor output

## 7. 결론

Intel 8086II CPU 를 갖는 IBM-XT 호환기종에 적합한 GWBASIC 언어로 디지털 제어시스템의 설계를 지원하는 프로그램 MCAD 를 개발하였다. 이 프로그램은 단일입력-단일출력 디지털 제어시스템에 적용되며 설계 지원을 받을 수 있는 범위는 (1)제어알고리즘의 선택과 제어 상수 결정, (2)최적 샘플링시간 결정, (3) A/D 및 D/A 변환기의 최적 비트 수 결정, (4) 각 요소의 동특성 분석 등이다. 앞으로 더 연구되고 개발되어야 할 문제는 z-영역에서 근 궤적법과 주파수 영역에서 주파수 반응법에 의한 지원설계 프로그램과 다변수 입출력 디지털 제어시스템을 위한 지원설계 프로그램이 연구되어야 한다.

## 참고문헌

- (1)주 해호: "Simulation Language" 대한 전기학회지 제25권, 제3호, 1976
- (2)주해호, 이규만: "Microcomputer 를 이용한전동시스템 시뮬레이션에 관한 연구" 한국 정밀기계 학회지 제1권, 제3호, pp 52 - 70, 1984
- (3)주해호, 김교형, 신중철: "열전식 열펌프를 이용한 정밀 온도제어시스템 개발" 대한 기계학회 논문집, 제11권, 제4호, pp708 - 715, 1987
- (4)주해호, 서재경: "공압구동장치 해석을 위한 마이크로 컴퓨터 시뮬레이션에 관한 연구" 대한 기계학회 논문집 제10권, 제6호, pp845 - 851, 1986
- (5)Deshpande & Ash : "Elements of computer process control with advanced control applications" Instrument Society of America, 1984