

이 논문은 '87 한국자동제어 학술회의에 발표한 논문임.

SISO 제어시스템을 위한 마이크로 컴퓨터 지원설계

주 해호*, 조 덕현**

영남대학교 기계설계공학과

Microcomputer-Aided Design For A SISO Control System

Haeho Joo and Deokhyun Cho

Yeungnam Univ.

ABSTRACT

This paper presents the development of a microcomputer-aided design program for a SISO 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 for the 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 원가절감이 요구되는 첨단 과학기술시대에서 컴퓨터를 이용한 온-라인 디지털 제어 시스템 개발이 크게 진행되고 그 용도도 다양하다. 디지털 제어 시

스템은 재래식의 아날로그 제어 시스템에 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.^[1] 더우기 화

* 영남대학교 기계설계공학과 교수

** 영남대학교 대학원

학공정이나 핵발전소와 같은 다변수 공정제어에는 컴퓨터의 도움없이 제어가 불가능하다.

따라서 기술이 발전되고 시스템이 복잡해질수록 디지털 제어 시스템이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 이러한 디지털 제어 시스템을 해석하고 설계하는데 필요한 도구의 역할을 하는 마이크로컴퓨터 지원설계(MCAD)을 단일입력-단일출력 시스템에 대하여 개발하였고 시뮬레이션 기법을 제시하였다.

컴퓨터 시뮬레이션은 실험을 직접 실험하기 않고 시스템의 수학적 모형을 만들어 수치해석법에 의하여 컴퓨터가 풀이해주므로 시스템을 해석하고 설계하는데 상당한 시간의 절약과 비용의 절감, 계산의 신속성과 정확성 등의 장점이 있다.¹⁾ 최적의 알고리즘이나 파라메타를 수학적 기법에 의하여 찾아낼 수 있으나 이 수치를 그대로 사용할 수 없고 과연 최적의 결과를 나타내는가를 반드시 확인해야 하는데 이것을 실험적으로 검증하기에는 경제적, 시간적 낭비가 많다. 그러나 컴퓨터 지원설계 프로그램을 이용하면 신속 정확하게 그리고 저렴한 비용으로 실험을 대응할 수 있고 시행착오법에 의하여 쉽게 계수조정이 가능하다. 이러한 시뮬레이션 기법을 이용하면 실험에 의한 시간과 비용을 절감할 수 있다.

마이크로 컴퓨터 지원 설계 프로그램은 Intel 8086II CPU를 갖는 IBM-XT 호환기에 사용되는 GWBASIC 언어를 사용하였으며 640KB 기억용량으로 사용이 가능하도록 만들었다. 프로그램은 사용자와 대화형식으로 구성하였으며 사용자가 임의로 시스템 각 요소의 전달함수를 대치할 수 있도록 각 요소별로 모듈(module)화 시켜 놓았다. 시뮬레이션 기법은 디지털 제어 시스템을 구성하고 있는 각 요소별로 입력과 출력과의 관계를 선형차분방정식으로 표시하여 매 샘플링(sampling)마다 각 요소의 입력과 출력을 알 수 있도록 작성하였다. 지금까지의 시뮬레이션 결과는 전체 시스템의 전달함수로 부터 그 시스템의 최종변수의 시간반응만을 표시하게 되므로 각 요소가 어떻게 반응하고 있는가를 직접 확인할 수 없는 단점이 있었다.

개발한 MCAD 프로그램으로 디지털 제어 시스템을 설계할 수 있는 범위는 다음과 같다. (1) 디지털 제어 알고리즘의 선택과 제어기의 파라메타의 결정, (2) 최적 샘플링 시간의 결정, (3) 시스템의 지연시간 분석, (4) A/D 및 D/A 변환기의 최적 비트수 결정, (5) 각 요소의 특성 분석, (6) 디지털 제어 시스템의 안정성 검토 등이다.

여러가지 제어 알고리즘을 시스템에 적용하여 그 결과를 시뮬레이션 해 봄으로 제어목적에 적합한 제어 알고리즘을 결정할 수 있다. 디지털 제어시스템에서 샘플링시간이 시스템의 안정성과 정확성에 미치는 영향은 절대적이다. 따라서 최적의 샘플링시간을 결정하는 것은 중요하다. 화학공정과 같이 지연시간이 존재하는 시스템인 경우 지연시간이 전체 시스템에 미치는 영향을 분석할 수 있고 이에 대처하는 제어 알고리즘을 결정할 수 있다. 신호변환기인 A/D 및 D/A 변환기의 비트 수는 시스템의 정확도에 따라 8비트로 하느냐, 12비트로 하느냐를 결정할 수 있다. 각 요소의 동적 특성과 전체 시스템의 안정성을 시뮬레이션 결과로 판단 내릴 수 있다. 이 프로그램은 단일입력-단일출력(SISO) 시스템에만 국한하여 사용이 가능하며 시간의 영역에서의 해석만을 취급하였다. 이 프로그램을 이용하여 열전식 열펌프를 이용한 정밀 온도 제어 시스템²⁾을 개발하였다.

2. 디지털 제어 시스템 구성

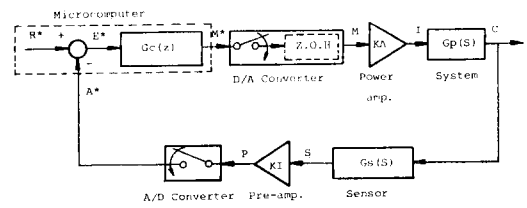


Fig. 1 Digital Control System Block Diagram

일반적으로 디지털 제어 시스템은 제어기의

역활을 하는 마이크로컴퓨터, 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환시켜 주는 D/A 변환기와 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜 주는 A/D 변환기, 제어신호를 증폭시켜 주는 전력 증폭기, 제어대상인 시스템, 그리고 출력신호를 궤환(feedback) 시켜 주는 센서와 그의 전치 증폭기(pre-amplifier)로 구성되어 있다. 디지털 제어시스템의 전체 블록선도는 Fig. 1과 같다.

3. 수학적 모형

(1) 시스템의 차분 방정식

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

$$C(k) = \exp(-T/TP) \times C(k-1) + KP \times [1 - \exp(-T/TP)] \times I[k-(N+1)] + [\exp(-M \times T/TP) - \exp(-T/TP)] \times I[k-(N+2)]$$

여기서 M은 $(1 - (TD - NT)/T)$ 로 정의 되는 수정 Z변환(modified Z-transform)의 상수이다. C(k)는 k번째 시스템 출력, $I[k-(N+1)]$ 는 $k-(N+1)$ 번째 전력 증폭기 출력, KP는 시스템의 이득, TP는 시스템의 시정수, TD는 시스템의 지연시간, T는 샘플링 시간, N은 지연시간에 대한 샘플링 시간의 최대 정배수이다.

(2) 궤환센서의 차분방정식

궤환센서의 동특성은 상수와 일차 시스템 두 가지를 선택하도록 하였다.

$$\text{상수일 때 : } S(k) = KS \times C(k)$$

일차 시스템일 때

$$S(k) = \exp(-T/TS) \times S(k-1) + KS \times C(k)$$

여기서 S(k)는 k번째 궤환센서의 출력, KS는 궤환센서의 이득, TS는 궤환센서의 시정수이다.

(3) 전치증폭기의 차분방정식

전치증폭기의 전달함수는 상수로 가정하였다.

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

여기서 P(k)는 k번째 전치증폭기의 출력, KI는 전치 증폭기의 이득이다.

(4) 전력증폭기의 차분방정식

전력증폭기의 전달함수는 상수로 가정하였다.

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

여기서 I(k)는 k번째 전력증폭기의 출력, KA는 전력증폭기의 이득, M(k)는 k번째 D/A 변환기의 출력이다.

(5) A/D 변환기

A/D 변환기는 unipolar형과 bipolar형 두 경우를 선택하고 비트 수를 4, 8, 12, 16 등의 임의의 수를 선택한다.

unipolar형인 경우 :

$$A^*(k) = (2^n - 1) \times P(k) / \text{IMAXV}$$

bipolar형인 경우 :

$$A^*(k) = \text{INT}[(2^n - 1)/2 + 0.5] + \text{INT}[(2^n - 1) \times P(k) / \text{IMAXV}]$$

여기서 A*(k)는 k번째 A/D 변환기의 출력, n은 A/D 변환기의 비트 수, IMAXV는 A/D 변환기의 정격 입력전압이다.

(6) D/A 변환기

unipolar형인 경우 :

$$M(k) = \text{OMAXV} \times M^*(k) / (2^n - 1)$$

bipolar형인 경우 :

$$M(k) = \text{OMAXV} - 2 \times [\text{OMAXV} \times M^*(k) / (2^n - 1)]$$

여기서 M(k)는 k번째 D/A 변환기의 출력, n은 D/A 변환기의 비트 수, OMAXV는 D/A 변환기의 사양출력전압, M*(k)는 k번째 제어 알고리즘의 출력이다.

(7) 제어 알고리즘

1) PID 제어 알고리즘

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

여기서 CKP는 비례이득, CKI는 적분이득, CKD는 미분이득, E*(k)는 k번째 오차신호의 디지털 값이다.

2) DUAL-PID 제어 알고리즘

E*(k) < |LIMV| 인 경우 :

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

E*(k) > |LIMV| 인 경우 :

$$M^*(k) = \text{상수 (최고치)}$$

여기서 LIMV는 제한 오차신호 값이다. 그밖의 변수명은 (1)항과 같다.

3) PID 예측 제어 알고리즘

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

여기서 변수명은 1)항에서 설명한 것과 같다.

4. 시뮬레이션 프로그램

(1) 프로그램의 흐름도

디지털 제어 시스템을 시뮬레이션 하기 위해 각 요소를 모듈로 표시하면 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 각 모듈을 서브루틴(GOSUB) 형태로 표시하였다. 컴퓨터의 스위치를 넣고 프로그램 MCAD를 디스켓으로 부터 읽어들이 실행하면 화면에 입력자료가 요구된다. 입력자료를 바로 디스켓에 저장한 다음, 디지털 시간 K=0에서 오차를 계산한다. 선택한 제어 알고리즘으로

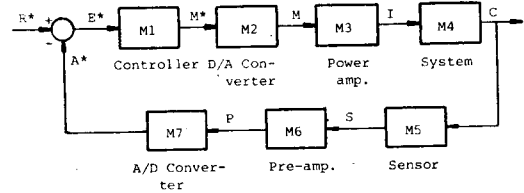


Fig. 2 Module Simulation Block Diagram of a Digital Control System

부터 제어 변수가 계산되고, 이 변수는 D/A 변환기와 전력증폭기를 거쳐 시스템의 입력으로 작용한다. 시스템의 반응은 궤환센서에 의하여 측정되어 전치증폭기를 거쳐 A/D 변환기로 전달된다. 각 요소의 출력 값을 프린트 한다. 디지털 시간을 다음의 샘플링 시간으로 하고 오차를 계산하는 순서로 되돌아 간다. 시간이 최종 시간에 도달하면, 그동안 각 요소의 입출력 자료들을 데이터 파일에 저장한다. 다음 그래프를 원하느냐는 질문이 나오고 그래프를 원한다고 응답하면 프로그램 GRAPH가 실행이 된다. 그래프를 원하지 않는다고 응답하면, 이 프로그램을 처음부터 새로 입력할 것인지 아니면 부분적으로 수정할 것인가를 묻는다. 이에 응답하면 요구대로 실행되고, 다시 오차신호를 계산하는 순서로 되돌아 간다. 재 실행을 요구하지 않으면 프로그램은 종료된다. 위와 같은 논리 흐름을 흐름도라 표시하면 Fig. 3과 같다.

(2) 프로그램의 입출력

MCAD 프로그램을 실행하기 위한 입력과 출력 데이터는 Table 1, Table 2와 같다. 입력 데이터는 계산에 필요한 데이터들이므로 반드시 입력이 되어야 하나 출력, 데이터는 사용자의 선택에 따라 결정한다. 시간 반응 변수들은 Tabular 형태로 표시되고 선택에 따라 그래프로 표시할 수 있다.

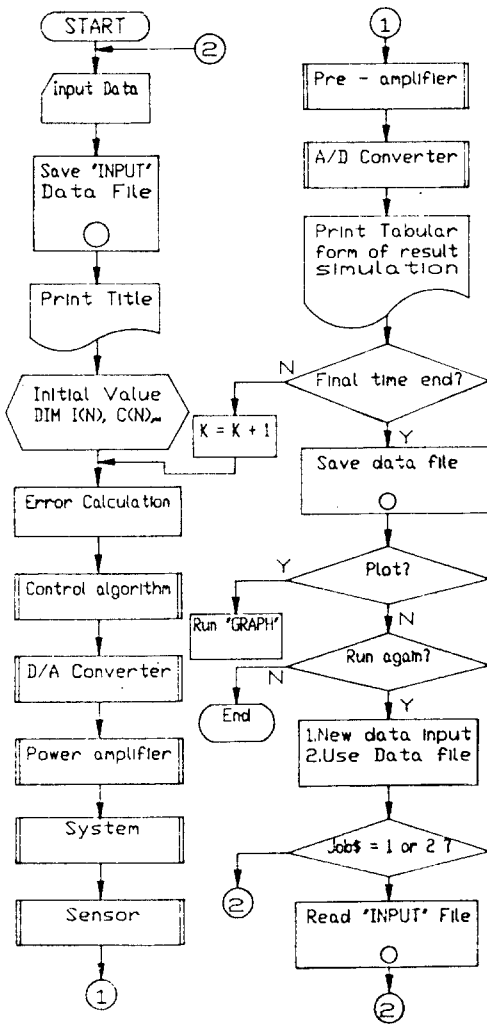


Fig. 3 Flowchart of MCAD

Table 1. Input data

PARAMETERS	COMPUTER VARIABLES
Time constant of system	TP
Gain of system	KP
Time delay of system	TD
Control algorithm	CON, CON\$
Constants of control algorithm	CKP, CKI, CKD
Time constant of sensor	TS
Gain of sensor	KS
A/D converter bits	ADBIT
A/D converter max. reference input	IMAXV
A/D converter min. reference input	IMINV
D/A converter bits	DABIT
D/A converter max. reference output	OMAXV
D/A converter min. reference output	OMINV
Power-amplifier gain	KA
Pre-amplifier gain	KI
Max. value of controlled variable	MAXCON
Min. value of controlled variable	MINCON
Initial value	INIV
Required value	REQV
Sampling Time	SAMPT
Terminal Time	OPERT
Time interval for print output	OUTSAMP
Limited value for dual mode	LIMV

Table 2. Output data

PARAMETERS	COMPUTER VARIABLES
Analog value of error	E
Digital value of manipulated variable	M
Analog value of D/A converter	DA
Analog value of controlled variable	C
Analog value of sensor output	SV
Digital value of A/D converter	AD

5. 운용시스템

프로그램 MCAD는 Intel 8086II CPU에 적합한 GWBASIC 언어로 작성되었으며 시뮬레이션 결과를 계산하는 프로그램과 그래픽 프로그램으로 구성되어 있다.

사용자와 컴퓨터와의 대화는 Fig. 4와 같이 수행된다. 사용자측에서는 제어 시스템을 먼저 모델링한 다음 모듈 변경이 필요하면 프로그램을

읽어 들여 모듈에 해당되는 서어브루틴을 수정한다. 수정이 필요없는 경우는 프로그램 MCAD를 실행시킨다. 시뮬레이션에 필요한 입력 데이터가 요구되는 사용자가 이에 응답하면 시뮬레이션 결과가 시간대 변수로서 Tabular 형태로 프린트 되고 모든 데이터는 그래프를 위하여 데이터 파일에 저장 된다. 사용자가 시뮬레이션 결과를 그래프로 표현하기를 원한다면 프로그램 GRAPH가 실행된다. 그래프를 위하여 변수 별로 개별적으로 표시된다.

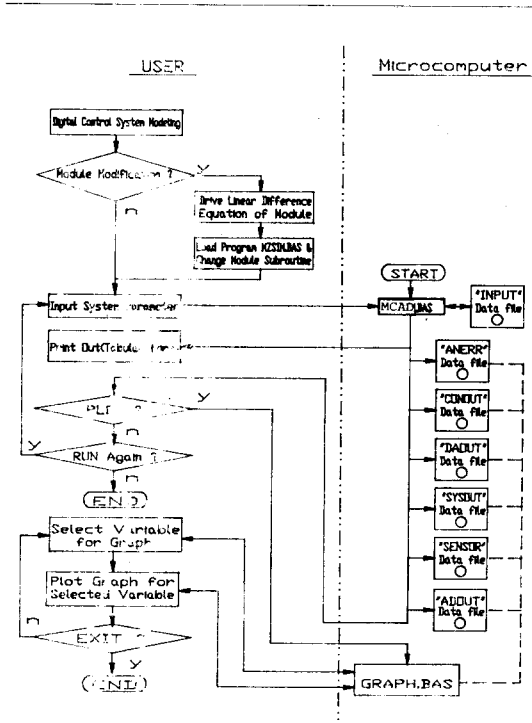


Fig. 4 Operating system flow chart

6. 사용 예

마이크로 컴퓨터 지원 설계 프로그램을 마이크로 컴퓨터를 이용한 정밀 온도 제어 시스템 설계에 이용하였다.¹³⁾ 온도 제어 시스템에서 어

떤 제어 알고리즘을 선택할 것이며, A/D 및 D/A 변환기의 비트 수는 얼마로 정할 것이며, 샘플링 시간을 얼마로 선정해야 할 것인지, 이 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 결정할 수 있다. 프로그램의 입력 데이터는 Table 3과 같다.

Table 3. Numerical value for input parameters

PARAMETERS	NUMERICAL VALUES
Time constant of system	954 SEC
Gain of system	5.74
Time delay of system	30 SEC
Control algorithm	PID PREDICTOR
Constants of control algorithm	13.843, 0.0025, 700
Time constant of sensor	0.1 SEC
Gain of sensor	49 mV/°C
A/D converter bits	12 BITS
A/D converter max. reference input	5 V
A/D converter min. reference input	0 V
D/A converter bits	12 BIT
D/A converter max. reference output	5 V
D/A converter min. reference output	-5 V
Power-amplifier gain	0.6 A/V
Pre-amplifier gain	2.55
Max. value of controlled variable	40°C
Min. value of controlled variable	0 °C
Initial value	25 °C
Required value	20 °C
Sampling Time	10 SEC
Terminal Time	60 MIN
Time interval for print output	30 SEC
Limited value for dual mode	0 °C

Fig. 5 (a)는 시뮬레이션 결과와 실험치 결과를 비교한 것이다. 그림에서 두 결과가 상당히 잘 일치하므로 MCAD 프로그램의 정확성을 알 수 있다. Fig. 5 (b)와 Fig. 5 (c)는 샘플링 시간을 변경 하였을 때 시스템의 시간반응을

표시한 것이다. 샘플링 시간이 증가할수록 시스템의 반응은 불안정하게 요동함을 알 수 있다.

Fig. 5 (d) 와 Fig. 5 (e) 는 A/D 및 D/A 변환기의 비트 수를 변경하였을 때 시스템의 시간 반응을 표시한 것이다. Fig. 5 (f) 와 Fig. 5 (g) 는 DUAL-PID 제어 알고리즘과 재래식 PID 제어 알고리즘을 사용했을 때 시스템의 시간 반응을 표시한 것이다. DUAL-PID가 PID 보다 성능이 우수함을 보여준다. Fig. 6 (a) 에서 Fig. 6 (c) 까지는 디지털 제어 시스템의 다른 변수(예를 들면 오차변수(B), 조작변수(M), 센서의 출력변수(S))의 시간 반응을 표시한 것이다. 이 결과로부터 각 요소의 동적 거동을 분석할 수 있다.

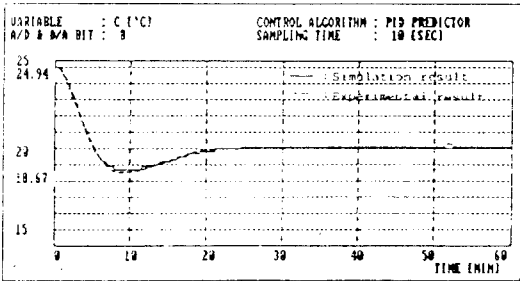


Fig. 5 (a) Comparison of simulation result with experimental result.

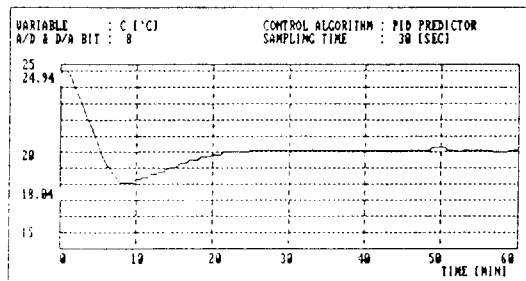


Fig. 5 (b)

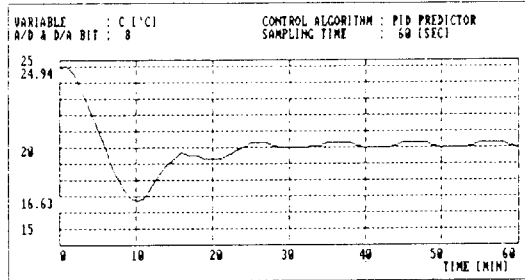


Fig. 5 (c)

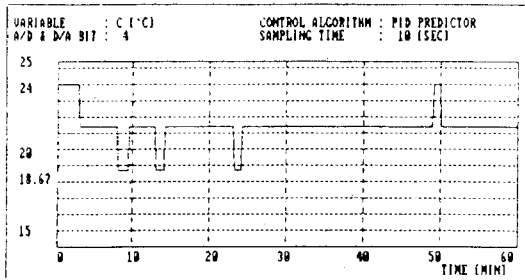


Fig. 5 (d)

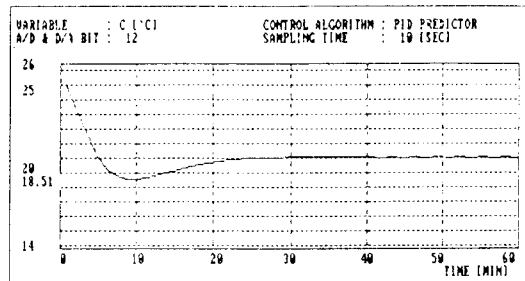


Fig. 5 (e)

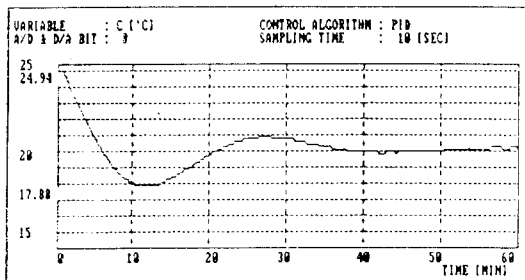


Fig. 5 (f)

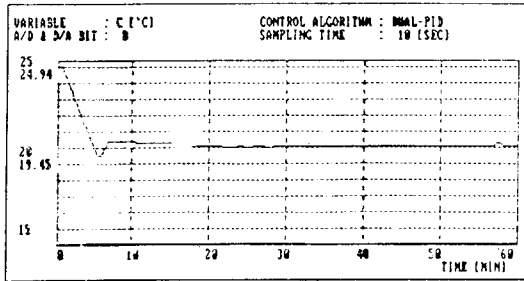


Fig. 5 (g) Time responses of system output

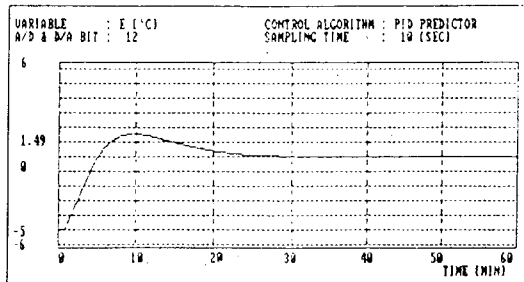


Fig. 6 (a) Time response of Error variable

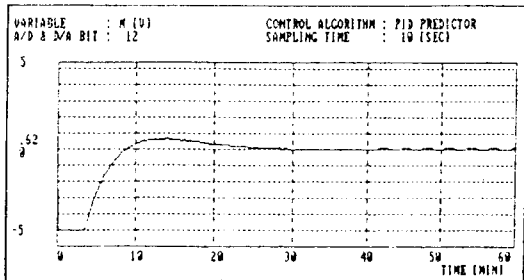


Fig. 6 (d) Time response of Manipulated variable

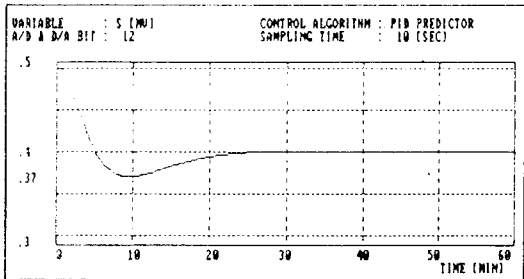


Fig. 6 (c) Time response of Sensor output

7. 결 론

디지털 제어시스템의 해석과 설계를 하기 위한 마이크로 컴퓨터 지원설계 MCAD 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 Intel 8086II CPU를 갖는 IBM-XT 호환기종에 적합한 GWB-ASIC 언어로 작성하였다. 이 프로그램은 단일 입력-단일출력 디지털 제어 시스템에만 적용되며 설계지원을 받을 수 있는 범위는 (1) 제어 알고리즘의 선택과 제어 상수 결정, (2) 최적 샘플링 시간의 결정, (3) A/D 및 D/A 변환기 최적 비트 수 결정, (4) 각 요소의 동특성 분석 등이다. 앞으로 더 연구되고 개발되어야 할 문제는 Z영역에서의 근계적법과 주파수 영역에서 주파수 반응법에 의한 지원 설계 프로그램과 다변수 입력출력 디지털 제어 시스템을 위한 지원 설계 프로그램이 연구되어야 한다.

《참 고 문 헌》

- (1) 주해호: "Simulation Language" 대한 전기학회지 제25권, 제 3호, 1976.
- (2) 주해호, 이규만: "Microcomputer를 이용한 진동 시스템 시뮬레이션에 관한 연구" 한국 정밀 기계학회지 제 1권, 제 3호, pp 52-70, 1984.
- (3) 주해호, 김교형, 신중철: "열전식 열펌프를 이용한 정밀 온도 제어 시스템 개발" 대한 기계학회 논문집 제11권, 제 4호, pp 708-715, 1987.
- (4) 주해호, 서재경: "공압구동장치 해석을 위한 마이크로컴퓨터 시뮬레이션에 관한 연구" 대한 기계학회 논문집 제10권, 제 6호, pp 845-851, 1986.
- (5) Deshande & Ash: "Elements Of Computer Process Control With Advance Control Applications" Instrument Society of America, 1984.