

DSP 카드 및 PC 에 의한 공압구동장치의 실시간 모의시험기 개발

Development of a Pneumatic Actuation System Real-Time Simulator Using a DSP Board and PC

이 성 래, 신 호 필
(Seongrae Lee and Hyopil Shin)

Abstract : The real-time simulator of a pneumatic actuation system that is composed of differential PWM signal generator, charge solenoid valve, discharge solenoid valve, actuator, load, and rotational potentiometer is developed using a DSP board and a PC. The simulator receives the control signals from the external controller through the A/D converter, updates the state and output variables of the pneumatic actuation system responding to the input signals every sampling time, and sends out the output signals through the D/A converter in real time. The user can observe the displacements, velocities, pressures, and mass flows representing the operation of pneumatic actuation system through the PC monitor in real time. Also the user can see the moving images between the pistons and rotating arm realistically in real time. The accuracy of the real-time simulator is verified by the good agreement of the real-time simulation results and the experimental results of the pneumatic actuation system.

Keywords : pneumatic actuation system, real-time simulator, DSP board

I. 서론

새로운 공압구동장치를 설계 제작할 때 설계 방법의 타당성을 증명하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한다[1]. 컴퓨터 시뮬레이션은 실험에 비해서 시간과 비용을 적게 들이고 시스템의 동특성을 파악할 수 있으나 컴퓨터 시뮬레이션에 근거하여 실제 시스템을 하드웨어적으로 구성할 때는 미처 생각치 못한 문제가 발생하여 계획된 개발기간이나 비용을 초과할 수도 있다.

이에따라 컴퓨터 시뮬레이션과 완성된 장치를 사용한 실험의 중간 단계인 실시간 모의시험기를 개발하게 된 것이다. 실시간 모의시험기가 필요한 경우는 다음과 분류할 수 있다. (1) 전체시스템의 여러 구성품 중에서 개발 및 제작기간이 오래 걸리는 구성품이 있는 경우 이 구성품에 대해서만 실시간 모의시험기를 구성하여 이미 만들어진 구성품과 결합시켜 실험을 수행함으로써 이미 만들어진 구성품의 성능 및 인접한 구성품과의 결합성을 입증한다. (2) 시스템이 완성된 후에 시스템의 성능실험을 하는 경우 실험준비시간이 오래 걸리거나 운전비용이 크다. (3) 완성된 시스템을 다루게 될 기술자나 사용자를 교육 및 훈련시킬 때 실제 시스템을 사용하기에는 비용이 많이 들고 위험이 따른다[2,3,4].

본 논문에서는 공압구동장치의 구성품 중에서 제어기를 제외한 차동 PWM 신호발생기, 흡기용 솔레노이드 밸브, 배기용 솔레노이드 밸브, 액추에이터, 부하 및 회전각센서를 종합하여 한 개의 실시간 모의시험기로 구성하였다. 실

시간 모의시험기로 구현한 공압구동장치와 실제 제어기를 하드웨어적으로 결합시켜 작동실험을 실시하였으며 실험 결과는 공압시스템의 심한 비선형성에도 불구하고 실제 공압구동장치의 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다.

II. 공압구동장치의 수학적 모델

그림 1은 실시간 모의시험기에 의해 구현될 공압구동장치의 구성품인 차동용 PWM 신호발생기, 흡기용 솔레노이드 밸브, 배기용 솔레노이드 밸브, 액추에이터, 부하, 회전각변위센서를 나타내고 있다. 고압용기와 압력조절기로 구성된 공압공급장치 및 제어기는 그림 1에 나타내지 않았다. 공급기체로서는 헬륨을 사용하였으며 이는 헬륨이 공기에 비해 유동성이 좋고 압축성이 크기 때문이다. 차동 PWM 신호발생기는 제어기로부터 제어신호를 받아 자체적으로 발생시키는 진폭 5 볼트, 주파수 125 Hz인 삼각파와 더하며 변형된 삼각파전압의 크기에 따라 흡기용 솔레노이드 밸브나 배기용 솔레노이드 밸브를 열리게 하는 펄스신호를 발생시킨다. 흡기용 솔레노이드 밸브가 열리면 고압기체가 제어실린더로 유입되어 피스톤을 아래방향으로 밀며 피스톤 로드와 연결된 레버암을 시계방향으로 회전시킨다. 배기용 솔레노이드밸브가 열리면 제어실린더 내의 고압기체가 대기 중으로 방출되어 제어실린더 내의 피스톤이 위 방향으로 움직이며 레버암을 반시계방향으로 회전시킨다. 감쇠실린더 내의 피스톤에는 작은 구멍이 뚫려 있어서 피스톤의 움직임에 적절한 감쇠작용을 한다. 즉 레버암의 회전운동에 감쇠작용을 한다. 레버암의 회전각은 센서에 의해 감지되며 감지된 센서신호는 제어기로 보내진다. 공압구동장치의 구성품들을 모의시험기로 구현시키려면 먼저 구성품에 대한 정확한 수학적 모델식이 필요하다[1].

접수일자 : 1999. 10. 28., 수정완료 : 2000. 1. 19.

이성래 : 건양대학교 기계공학과

신호필 : 국방과학연구소

※ 본 논문은 한국과학재단에서 지원한 핵심전문연구과제(과제번호: 981-1001-005-1)의 연구비로 수행되었습니다.

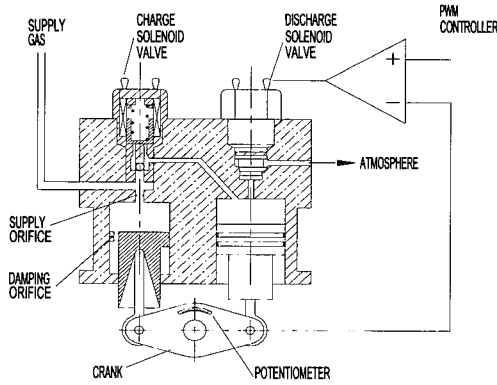


그림 1. 공압구동장치의 개략도.
Fig. 1. The schematics of pneumatic actuation system.

1. 차동 PWM 신호 발생기

차동 PWM 신호발생기는 진폭 5 볼트, 주파수 125 Hz 인 삼각파를 발생시키며 제어기에서 받아들인 제어신호를 삼각파에 더한다. 변형된 삼각파전압이 임계전압(4 볼트) 보다 크면 흡기용 솔레노이드 밸브를 열리게 하는 펄스신호를 발생시키며 변형된 삼각파전압이 임계전압(-4 볼트) 보다 작으면 배기용 솔레노이드 밸브를 열리게 하는 펄스신호를 발생시킨다. 여기서 임계전압은 액추에이터 구동밸브의 closed-center 요구조건을 만족시키면서 dead zone 을 최소화하도록 설정한다.

$$V_{in}=1 \quad \text{if } V_c+V_{tr} \geq V_{cr} \quad (1)$$

$$=0 \quad \text{if } V_c+V_{tr} < V_{cr}$$

$$V_{out}=1 \quad \text{if } V_c+V_{tr} \leq -V_{cr} \quad (2)$$

$$=0 \quad \text{if } V_c+V_{tr} > -V_{cr}$$

- V_c : 제어기의 출력신호[V]
- V_{cr} : PWM 임계전압[V]
- V_{tr} : 삼각파형 전압[V]
- V_{in} : 흡기용 솔레노이드밸브에 가해지는 펄스신호[V]
- V_{out} : 배기용 솔레노이드밸브에 가해지는 펄스신호[V]

2. 흡기용 ON-OFF 솔레노이드 밸브 유량식

솔레노이드 밸브에 펄스신호가 가해지면 솔레노이드 밸브가 즉시 열리는 것은 아니며 솔레노이드의 자화시간만큼 지연된 후 밸브가 열린다. 마찬가지로 솔레노이드 밸브에 가해진 펄스신호가 없어지면 솔레노이드의 비자화시간만큼 지연된 후 밸브가 닫힌다. 흡기용 솔레노이드 밸브는 공압공급장치에서 제어실린더로 유입되는 기체의 양을 조절하는 역할을 한다. 공압공급장치의 압력과 온도가 주어지고 제어실린더 내의 압력이 주어지면 밸브를 통과하는 기체의 질량유량을 계산할 수 있다.

$$V_{sin}=g(V_{in}) \quad (3)$$

$$A_{vi}(t)=K_{vi}V_{sin} \quad (4)$$

g: 펄스신호에서 실제 흡기밸브 ON, OFF 신호로의 변환함수

V_{sin} : 흡기용 솔레노이드밸브 ON,OFF신호[1 또는 0]

K_{vi} : 흡기용 솔레노이드밸브 개구면적 이득[m²/V]

A_{vi} : 흡기용 솔레노이드밸브 개구면적[m²]

$$dm_{bi}/dt=[C_dKA_{vi}P_s/T_s^{1/2}]f(P_b/P_s) \quad (5)$$

$$K=[(k/R)\{2/(k+1)\}^{(k+1)/(k-1)}]^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{if } P_b/P_s \leq b \quad f(P_b/P_s)=1 \quad (7)$$

$$\text{if } P_b/P_s > b$$

$$f(P_b/P_s)=\frac{(P_b/P_s)^{2k} - (P_b/P_s)^{(k+1)/k}}{[2/(k+1)]^{(k+1)/(k-1)}(k-1)/2}^{1/2} \quad (8)$$

$$b=[2/(k+1)]^{k/(k-1)} \quad (9)$$

dm_{bi}/dt : 공압공급장치에서 흡기용 솔레노이드 밸브를 통하여 제어실린더로 유입되는 질량유량

C_d : 유량계수

K : 밸브오리피스 유량식의 상수 [°K^{1/2}sec/m]

k : 비열비

P_s : 공압공급장치의 압력[Pa]

P_b : 제어실린더 내의 압력[Pa]

T_s : 공압공급장치의 온도[°K]

b : 유량이 쇼크(choke)되는 임계압력비

3. 배기용 ON-OFF 솔레노이드 밸브 유량식

배기용 솔레노이드 밸브는 제어실린더에서 대기 중으로 유출되는 기체의 양을 조절하는 역할을 한다. 제어실린더 내의 압력과 온도가 주어지면 밸브를 통과하는 기체의 질량유량을 계산할 수 있다.

$$V_{sout}=h(V_{out}) \quad (10)$$

$$A_{vo}(t)=K_{vo}V_{sout} \quad (11)$$

h: 펄스신호에서 실제 배기밸브on-off신호로의 변환함수

V_{sout} : 배기용 솔레노이드 밸브 on-off 신호 [1 또는 0]

K_{vo} : 배기용 솔레노이드 밸브 개구면적 이득

A_{vo} : 배기용 솔레노이드 밸브 개구면적 [m²]

$$dm_{bo}/dt=[C_dKA_{vo}P_b/T_b^{1/2}]f(P_e/P_b) \quad (12)$$

dm_{bo}/dt : 제어실린더에서 배기용 솔레노이드 밸브를 통하여 대기 중으로 유출되는 질량유량[kg/sec]

P_e : 대기 중의 압력[Pa]

T_b : 제어실린더 내 온도[°K]

4. 감쇠실린더 공급 오리피스 유량식

공압공급장치의 압력과 온도가 주어지고 감쇠실린더 상측챔버의 압력이 주어지면 공급오리피스를 통과하는 기체의 질량유량을 계산할 수 있다. 감쇠실린더 상측챔버 내의 온도는 공압공급장치의 온도와 압력 그리고 감쇠실린더 상측챔버 내의 압력으로부터 구할 수 있다.

$$\text{if } P_a < P_s \quad dm_{as}/dt=[C_dKA_{vs}P_s/T_s^{1/2}]f(P_a/P_s) \quad (13)$$

$$\text{if } P_a > P_s \quad dm_{as}/dt=-[C_dKA_{vs}P_a/T_a^{1/2}]f(P_s/P_a)$$

A_{vs} : 감쇠실린더 공급 오리피스의 개구면적 [m²]

dm_{as}/dt : 공압공급장치에서 공급오리피스를 통하여 감

최소실린더 상측챔버로 유입되는 질량유량

P_a : 감쇠실린더 상측챔버의 압력[Pa]

T_a : 감쇠실린더 상측챔버의 온도[°K]

5. 감쇠실린더 감쇠 오리피스 유량식

감쇠실린더의 상측 및 하측 챔버의 압력과 온도가 각각 주어지면 상측 챔버에서 감쇠오리피스를 통하여 하측 챔버로 유입되는 기체의 질량유량을 계산할 수 있다.

$$\text{if } P_a > P_d \quad dm_{ad}/dt = [C_d K A_{vs} P_a / T_a^{1/2}] f(P_d/P_a) \quad (14)$$

$$\text{if } P_a < P_d \quad dm_{ad}/dt = -[C_d K A_{vd} P_d / T_d^{1/2}] f(P_a/P_d)$$

dm_{ad}/dt : 감쇠실린더 상측챔버에서 감쇠오리피스를 통

하여 하측챔버로 유입되는 질량유량

A_{vd} : 감쇠실린더 감쇠오리피스의 개구면적 [m²]

P_d : 감쇠실린더 하측챔버의 압력[Pa]

T_d : 감쇠실린더 하측챔버의 온도[°K]

6. 제어실린더 연속방정식

흡기용 솔레노이드 밸브를 통하여 기체가 제어실린더로 유입되면 제어실린더의 압력은 증가하고 반대로 제어실린더 내의 기체가 배기용 솔레노이드 밸브를 통하여 대기 중으로 방출되면 제어실린더의 압력은 감소한다. 제어 피스톤의 이동에 의해 제어실린더의 부피가 작아지면 제어실린더 압력은 증가하고 제어실린더의 부피가 커지면 제어실린더의 압력은 감소한다.

$$dP_b/dt = -(nP_b/V_b)(dV_b/dt) + (nRT_b/V_b)(dm_b/dt) \quad (15)$$

$$dm_b/dt = dm_{bi}/dt - dm_{bo}/dt \quad (16)$$

$$V_b = V_{b0} + A_b l \theta \quad (17)$$

$$dV_b/dt = -A_b l (d\theta/dt) \quad (18)$$

V_b : 제어실린더의 부피[m³]

n : 기체 단열과정 지수, R : 기체상수[m²⁰K/sec]

dm_b/dt : 제어실린더로 유입되는 총 질량유량

A_b : 제어실린더의 피스톤 단면적 [m²]

l : 제어실린더 피스톤에 연결된 회전 암의 길이[m]

θ : 회전 암의 회전각[rad]

$d\theta/dt$: 회전 암의 회전속도[rad/sec]

7. 감쇠실린더 상측챔버 연속방정식

감쇠실린더의 상측챔버 압력은 공급오리피스를 통하여 상측챔버로 유입되는 질량유량과 감쇠오리피스를 통하여 유출되는 질량유량의 차이가 양이면 증가하고 음이면 감소한다. 또한 감쇠피스톤이 위방향으로 이동하여 상측챔버의 부피가 작아지면 상측챔버의 압력은 증가하고 반대의 경우에는 상측챔버의 압력은 감소한다.

$$dP_a/dt = -(nP_a/V_a)(dV_a/dt) + (nRT_a/V_a)(dm_a/dt) \quad (19)$$

$$dm_a/dt = dm_{as}/dt - dm_{ad}/dt \quad (20)$$

$$V_a = V_{a0} - A_p l \theta \quad (21)$$

$$dV_a/dt = -A_p l (d\theta/dt) \quad (22)$$

V_a : 감쇠실린더 상측챔버의 부피 [m³]

dm_a/dt : 상측챔버로 유입되는 총 질량유량

A_p : 상측챔버의 피스톤 단면적 [m²]

8. 감쇠실린더 하측챔버 연속방정식

감쇠실린더의 하측챔버 압력은 감쇠오리피스를 통하여 하측챔버로 유입되는 질량유량이 양이면 증가하고 질량유량이 음이면 감소한다. 또한 감쇠피스톤의 이동에 의해 하측챔버의 부피가 작아지면 하측챔버의 압력은 증가하고 반대로 하측챔버의 부피가 커지면 하측챔버의 압력은 감소한다.

$$dP_d/dt = -(nP_d/V_d)(dV_d/dt) + (nRT_d/V_d)(dm_d/dt) \quad (23)$$

$$dm_d/dt = dm_{ad}/dt \quad (24)$$

$$V_d = V_{d0} + A_d \theta \quad (25)$$

$$dV_d/dt = A_d (d\theta/dt) \quad (26)$$

V_d : 감쇠실린더 하측챔버의 부피 [m³]

dm_d/dt : 하측챔버로 유입되는 총 질량유량

A_d : 하측챔버의 피스톤 단면적 [m²]

9. 회전 암의 운동방정식

회전암을 회전시키는 구동토크는 제어실린더 압력, 감쇠실린더 상측 및 하측압력에 의해 발생되며 회전암의 부하는 관성부하, 점성마찰부하, 공력부하, 정지마찰부하 및 쿨롱마찰부하로 구성된다. 정지마찰부하와 쿨롱마찰부하는 실린더와 피스톤 사이의 마찰에 기인하며 전산모사에 주의를 요한다.

$$J(d^2\theta/dt^2) + C(d\theta/dt) + K_f\theta + T_f = P_b A_b l - P_a A_a l + P_d A_d l \quad (27)$$

$$V_y = K_f \theta \quad (28)$$

J : 총 회전 관성[Nms²]

C : 점성 마찰계수[Nms/rad]

K_f : 공력부하 등가스프링 상수[Nm/rad]

T_f : 정지마찰토크 또는 쿨롱마찰토크에 의해 발생하는 마찰토크[Nm]

K_f : 회전각 센서이득[V/rad]

III. 실시간 모의시험기의 구성

공압구동장치의 실시간 모의시험기는 공압구동장치를 실시간으로 모의작동시키는 것으로서 그림 2에 나타난 것처럼 PC와 DSP보드로 구성된다. DSP는 이산신호처리기로써 단위시간당 연산능력이 뛰어나므로 그래픽처리, 측정기기, 음성처리, 제어, 군사, 통신, 자동차, 의료장비 등에 응용되고 있다[5]. 여기서 사용된 DSP보드는 TMS320C31 - 40MHz DSP칩(40 MFLOPS)을 장착하였으며 4 개의 A/D 채널, 4 개의 D/A채널, 8 개의 D/I 채널, 4 개의 D/O 채널을 내장하고 있다[6]. PC와 DSP보드의 역할은 표 1과 같으며 DSP보드의 핵심적인 역할은 매 샘플링 시간마다 공압구동장치의 상태변수나 출력변수를 실시간으로 정확하게 구하는 것이다. 만일 매 샘플링시간마다 정확한 상태변수나 출력변수값을 구하기 위해 필요한 계산량이 작

다면 굳이 DSP보드를 사용할 필요가 없으며 일반적인 입출력 인터페이스카드를 PC에 설치하고 PC에서 계산을 수행하면 된다. DSP보드에서 실행되는 프로그램은 C 언어로 작성되며 가능하면 공압구동장치의 구성품 별로 II장에서 유도된 수학적 모델식을 참고하여 C 함수로 작성하는 것이 이해하기가 쉬우며 유사한 시스템의 모의시험기를 개발할 때 재사용이 가능해진다. 그러나 함수가 많아 질수록 실행속도가 느려진다는 사실을 알고 있어야 한다. 그림 2에 나타난 모듈은 각각 C 언어로 작성된 함수를 나타낸

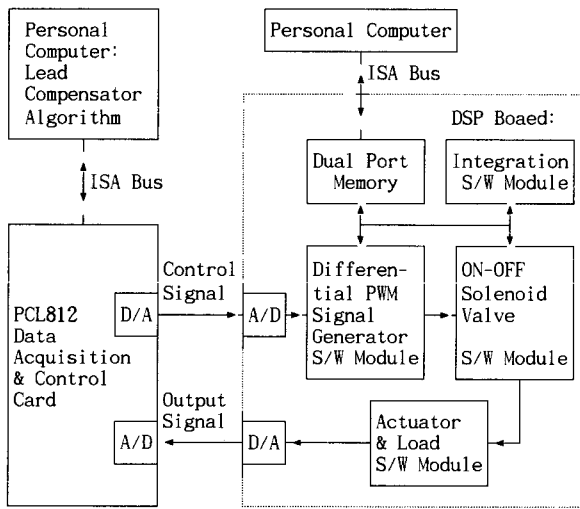


그림 2. 공압구동장치의 실시간 모의시험기.
Fig. 2. The real-time simulator of pneumatic actuation system.

표 1. 실시간 모의시험기의 구성품 및 역할.
Table 1. The role of components of the real-time simulator.

구성품	역할
PC	<ul style="list-style-type: none"> 타겟파일(DSP보드용 프로그램의 실행파일)을 DSP 보드에 다운로드(download)시킨다. DSP 보드에서 모의작동되는 결과를 일정한 간격으로 DSP보드에 있는 듀얼포트 메모리로부터 읽어들이며 읽어들이는 값을 참고하여 PC 모니터에 동적 그림이나 그래프로써 실시간으로 나타낸다.
DSP 보드	<ul style="list-style-type: none"> 입력포트(A/D, D/I)를 통하여 제어기의 제어신호를 실시간으로 받아들인다. 매 샘플링 시간마다 주어진 제어신호값을 입력으로 하여 샘플링 주기를 시뮬레이션 시간으로 설정하고 공압구동장치의 동특성을 나타내는 미분방정식의 해를 구한다. 즉 액추에이터 변위, 속도, 압력 등을 실시간으로 계산한다. 공압구동장치의 출력신호(회전각)를 출력포트(D/A, D/O)를 통해 제어기에 실시간으로 전달한다.

다. 적분 모듈은 미분방정식을 풀기 위한 모듈이며 적분 알고리즘으로서 Fixed Step Runge-Kutta 4th order method를 채택하였다[7,8].

공압구동장치의 실시간 모의시험기를 구성하는 일련의 과정을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 공압구동장치의 부품별 수학적 모델식 유도.
- 2) 공압부품별 C 함수 및 적분 C 함수 작성.
- 3) DSP 보드용 프로그램 작성(부품별 C 함수 및 적분함수의 조합) 및 실행파일 만들기.
- 4) PC용 프로그램(DSP 보드용 프로그램 다운로드, DSP보드의 듀얼포트 메모리에서 데이터 가져오기, 그래프 그리기, 동적영상 만들기)의 작성 및 실행파일 만들기.
- 5) PC용 프로그램의 실행(DSP 보드용 실행파일이 다운로드되고 실행됨, 모의작동의 결과가 실시간으로 PC 화면에 나타남).

표 2. 공압구동장치의 시스템 상수값.

Table 2. The system constants of pneumatic actuation system.

Sampling interval of controller: 0.002 sec(500 Hz)
Sampling interval of DSP board: 0.001 sec(1000 Hz)
Integration method: Runge-Kutta 4th order
Integration interval: 0.0005 sec
Controller gain: $K_v=6.0$ V/V
PWM critical voltage: $V_{cr} = 4.0$ V
Position sensor gain: $K_f=0.5$ V/deg
Area gain of solenoid valve: $K_{v1}=K_{v0}=7.74 \times 10^{-7}$ m ² /V
Solenoid on-off valve discharge coefficient: $C_d = 0.8$
Supply orifice area: $A_{vs} = 1.963 \times 10^{-7}$ m ²
Damping orifice area: $A_{vd}=1.257 \times 10^{-7}$ m ²
Fixed orifice discharge coeff.: $C_d = 0.7$
Effective piston area(damping cylinder): $A_a=5.73 \times 10^{-4}$ m ² , $A_d=2.90 \times 10^{-4}$ m ²
Effective piston area(control cylinder): $A_b=5.73 \times 10^{-4}$ m ²
Volume of chamber(damping cylinder): $V_{a0}=5.73 \times 10^{-6}$ m ³ , $V_{d0}=3.16 \times 10^{-6}$ m ³
Volume of chamber(control cyl.): $V_{b0}=7.26 \times 10^{-6}$ m ³
Stiction torque: $T_{st}=3.3$ Nm
Length of moment arm: $l=0.0278$ m
Inertia: $J=2.03 \times 10^{-4}$ J-sec ²
Viscous friction coeff.: $C=1$ J-sec/rad
Coulomb friction torque: $T_c=2.1$ Nm
Spring constant: $K_f=181.25$ Nm/rad
Critical velocity: $\omega_{min}=10^{-6}$ rad/sec
Supply pressure: $P_s=6.895 \times 10^6$ Pa
Supply temperature: $T_s=294$ °K
Critical pressure ratio: $b=0.4881$
Gas constant: $R = 2077$ m ² K/sec
Polytropic exponent(Helium): $n=1.66$
Ratio of specific heats(Helium): $k=1.66$

IV. 실시간 모의 작동실험과 실제 작동실험의 비교
공압구동장치의 실시간 모의시험기에 사용된 상수값은 표 2와 같으며 솔레노이드 밸브, 회전각변위센서에 관한 상수값은 각각 제작업체에서 제공하는 규격표를 참고하였

으며 구동장치의 점성마찰계수, 쿨롱마찰토크 및 정지마찰 토크는 실험과 시뮬레이션에 의해 시행착오적으로 구하였다. DSP보드를 프로그램에서의 적분시간간격은 실험에 사용된 공압구동장치의 동특성을 정확하게 모사할 수 있는 시간간격이어야 하며 공압구동장치의 부품 중에서 가장 응답이 빠른 것은 솔레노이드 ON-OFF 밸브로서 밸브 코일의 자화시간은 0.001초이고 비자화시간은 0.0004초이므로 적분수행간격은 0.0004초보다 작아야 하나 DSP 보드의 계산능력에 한계가 있으므로 적분시간간격을 0.0005 초로 선정하였다. 물론 적분시간간격 0.0005초의 타당성은 공압구동시스템의 비실시간 시뮬레이션에서 미리 조사하였다. DSP보드에서의 신호 입출력 시간간격은 입출력신호의 변화율에 따라 결정되며 공압구동장치의 페루프 주파수응답대역이 약 30 Hz 이므로 페루프 주파수응답대역의 30 배이상인 1000 Hz로서 신호를 주고 받을 수 있도록 0.001 초로 선정하였다.

공압구동장치의 모의시험기에 제어신호를 주는 제어기로서는 입출력 인터페이스 카드[9]가 설치된 PC를 사용하였으며 제어기에서의 샘플링 주기는 전체 페루프시스템 응답대역(약 30 Hz)보다 10 배 정도 빠르게 선정하면 충분하며 여기서는 0.002 초로 충분히 작게 선정하였다. 제어기에서의 제어알고리즘은 실제 구동장치의 제어실험에서 사용된 위상앞섬제어를 적용하였으며 비례계인은 6 [v/v], 제어기 전달함수의 분자항의 절점주파수는 10 Hz이며 분모항의 절점주파수는 30 Hz이다. 마찬가지로 회전각변위 명령신호는 실제 구동장치의 제어실험에서 사용된 주파수가 1 Hz 인 정현파와 구형파를 제어기 내부에서 생성하여 사용하였다.

그림 3, 그림 4 및 그림 5는 각각 실제 공압구동장치의 실험결과와 공압구동장치의 실시간 모의시험기를 이용한 모의실험결과를 함께 나타낸다. 그림 3은 회전각변위 명령신호의 진폭이 2 도이고 파형이 정현파인 경우에 실제 공압구동장치의 실험에 의한 회전각변위 출력값과 실시간 모의시험기의 모의실험에 의한 회전각변위 출력값을 나타낸다. 그림 3을 관찰하면 실시간 모의시험기에 의한 모의 실험결과는 실제 공압구동장치에 의한 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 사실상 공압구동장치에는 차동 PWM 신호발생기, 솔레노이드밸브의 ON-OFF 특성, 오리피스를 통과하는 질량유량특성, 정지마찰력 및 쿨롱마찰력 등이 포함되어 있기 때문에 비선형성이 매우 심하다. 비록 시뮬레이션에서 비선형성을 고려한 (1)-(28)을 사용하더라도 수식에는 모델링오차가 포함되며 또한 실시간으로 많은 연산을 수행해야 하기 때문에 적분시간 간격을 무한정 줄일 수는 없으며 이에따라 부득이 수치적 계산오차가 발생하게 된다. 따라서 시뮬레이션결과와 실험결과가 매우 잘 일치하는 것을 기대하기는 어렵다. 그림 4는 회전각변위 명령신호의 진폭이 2 도이고 파형이 구형파인 경우에 실제 공압구동장치의 실험에 의한 회전각변위 출력값과 실시간 모의시험기의 모의실험에 의한 회전각변위 출력값을 나타낸다. 그림 4에서 실시간 모의시험기에 의한 모의실험결과는 실제 공압구동장치에 의한 실험결과와 비

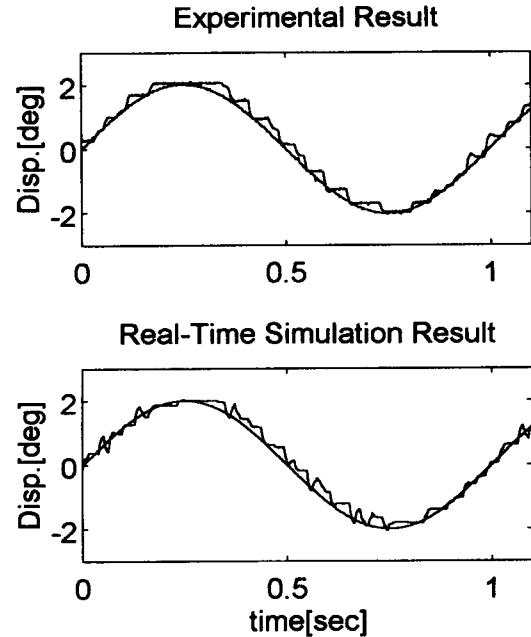


그림 3. 실제 실험결과와 모의실험결과(기준신호: 주파수 1Hz, 진폭 2도인 정현파).

Fig. 3. The experimental and simulation results (Reference signal: sinewave, frequency=1Hz, amplitude=2deg).

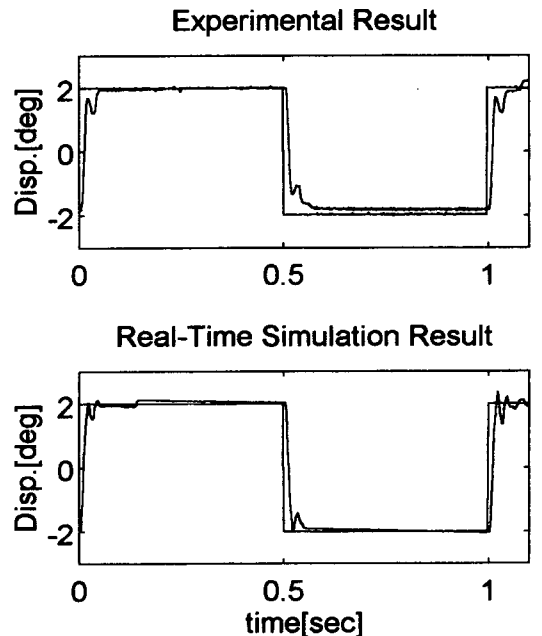


그림 4. 실제 실험결과와 모의실험결과(기준신호: 주파수 1Hz, 진폭 2도인 구형파).

Fig. 4. The experimental and simulation results (Reference signal: squarewave, frequency=1Hz, amplitude=2deg).

교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 5는 회전각변위 명령신호의 진폭이 10 도이고 파형이 구형파인 경우에 실제 공압구동장치의 실험에 의한 회전각변위 출력값과 실시간 모의시험기의모의실험에 의한 회전각변위 출력값을 나타낸다. 그림 5에서도 실시간 모의시험기에 의한 모의실험결과는 실제 공압구동장치에 의한 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

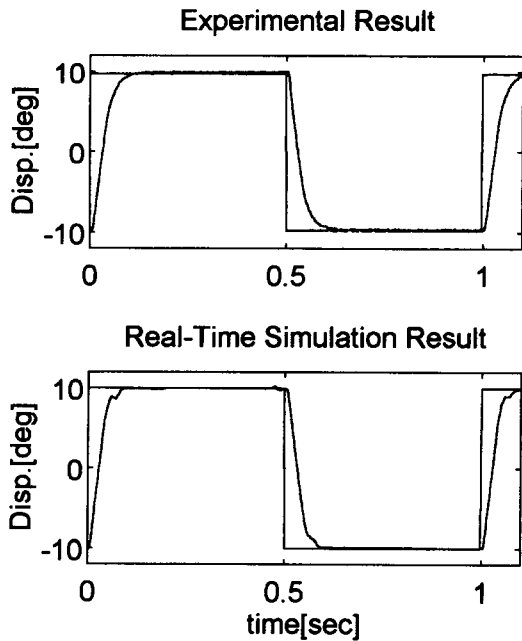


그림 5. 실제 실험결과와 모의실험결과(기준신호: 주파수 1Hz, 진폭 10도인 구형파).
 Fig. 5. The experimental and simulation results (Reference signal: squarewave, frequency=1Hz, amplitude=10deg).

그림 3, 그림 4 및 그림 5에 나타난 실시간 모의시험기를 이용한 모의실험결과는 실시간으로 모의시험기용 PC의 모니터에 그려지므로 사용자는 변위출력의 변화를 실제처럼 느낄 수 있다. 또한 C-언어의 그래픽 함수[10]를 이용하여 액추에이터의 피스톤 로드와 움직이고 레버암이 회전하는 모양을 실시간으로 PC 모니터에 나타내어 실제 공압구동장치의 작동을 보는 것과 같은 시각적 효과를 충분히 얻을 수 있었다.

V. 결론

차동 PWM 신호발생기, 흡기용 솔레노이드 밸브, 배기용 솔레노이드 밸브, 액추에이터, 부하 및 회전각센서로 구성되는 공압구동장치의 실시간 모의시험기를 PC 1대와 DSP 보드 1개로써 구현하였으며 실제 제어기와 하드웨어

적으로 결합시켜 실시한 실험결과는 공압시스템의 심한 비선형성에도 불구하고 실제 공압구동장치의 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다.

실시간 모의시험기는 일반적인 컴퓨터 시뮬레이션에 비해서 실시간으로 시뮬레이션을 수행하며 입출력 인터페이스(A/D, D/I, D/A, D/O)를 갖추고 있어 외부 시스템과 실제 신호를 주고 받을 수 있다. 따라서 실시간 모의시험기는 여러 구성품으로 구성된 시스템을 개발할 때 각 구성품 중에서 개발 및 제작기간이 오래 걸리는 구성품은 실시간 모의시험기로 미리 구현하여 이미 만들어진 구성품과 결합시켜 실험을 수행함으로써 이미 만들어진 구성품의 성능을 점검하며 인접한 구성품과의 결합성을 입증하는데 매우 유용하다. 또한 고가의 시스템이나 안전상 주의가 필요한 시스템에 대한 사용법을 교육시킬 때 실제 시스템을 사용하면 비용이 많이 들고 위험이 따르기 때문에 사용자의 임의 시간에서의 조작신호를 실시간으로 인터페이스를 통해 받아 들이고 시스템의 작동도 실시간으로 모니터에 동영상으로 나타낼 수 있는 모의시험기의 필요성은 더욱 증대한다.

참고문헌

- [1] 신 효필, 전산 모사에 의한 공압구동장치의 비선형 동특성 해석, 충남대학교 기계설계공학과 석사학위 논문, 1991.8.
- [2] W. Kading and F. Hoffmeyer, "The advanced daimler-benz driving simulator," *SAE Paper* no. 950175, 1995.
- [3] H. W. Kasan, "F-16 simulator for man-in-the-loop testing of aircraft control systems," AFIT/GE/ENG/87D-30, Air Force Institute of Technology, 1987.
- [4] 이승호, 김성덕, "PC기반형 자동차 운전연습기 개발," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제3권, 제4호, pp. 415- 421, 1997. 8.
- [5] 이수용, "DSP의 신기원," 제어·자동화·시스템공학 회지, 제4권, 제2호, pp. 20-23, 1998. 3.
- [6] Manual, 고속 디지털 신호처리 시스템 *Heron Wing/DSP6031 Board* 취급설명서, MTT Instruments Inc., Japan, 1995.
- [7] J. L. Melsa, *Computer Programs for Computational Assistance*, McGraw-Hill Inc., 1970.
- [8] C. F. Gerald and P. O. Wheatley, *Applied Numerical Analysis*, Addison Wesley, Inc., 1984.
- [9] User's Manual, *PCL-812PG Data Acquisition and Control Card*, Advantech Co.
- [10] 김주환, *C 라이브러리*, 정보문화사, 1995.



이 성 려

1977년 서울공대 기계설계공학과 졸업. 한국과학원 석사(1979), 미국 오하이오주립대학교박사(1989). 1979-1983, 1989-1991 국방과학연구소 선임연구원, 1991~현재 건양대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 유공압시스템 해석 및 제어.



신 효 필

1977년 울산공대 기계공학과 졸업. 충남대학교 기계설계공학과 대학원 석사(1991), 동대학 박사(2000). 1977~현재 국방과학연구소 책임연구원. 관심분야는 로보틱스, 제어이론의 응용, 유압제어.