

공압구동장치를 위한 PWM 제어기 설계  
(Development of a PWM Controller for the Pneumatic Actuation System)

\*이 동 우      안 병 홍      문 의 준  
(D.W.Lee ,      B.H.Ahn ,      E.J.Moon)

국 방 과 학 연 구 소

This paper describes the design and development of a PWM electronic controller for a high performance Pneumatic Actuation System. The task includes the design of a closed center valve circuit for minimum gas consumption, the selection of optimum values for key parameters in the PWM circuit, and the design of lag-lead compensation circuit. These were carried out through specific experiments using a prototype pneumatic actuation system. The final performance obtained with the actuation system confirmed the successful design of the developed PWM electronic controller.

1. 서 론

최근 공압구동장치는 소형 항공병기용 고성능 비행제어구동장치로 많이 응용되고 있다. 공압구동장치의 이러한 응용 확대는 저렴한 가격, 작은 체적과 무게, 높은 정비성 및 환경성 등의 고유한 장점에도 일부 기인된다. 그러나 공압구동장치가 관심을 모으는 주된 요소는 서보제어 분야에서의 새로운 설계와 기술의 개발로 유압구동에 버금가는 높은 성능을 얻을 수 있다는 데 있다.

공유압 구동장치에서는 일반적으로 아래의 세가지 구동방식이 밸브 구동에 사용된다.

- 비례 구동
- bang - bang 구동
- 펄스 폭 변조 (Pulse Width Modulation : PWM) 구동

공압구동장치의 경우, 비례 제어 되는 서보밸브 대신 비교적 저렴하여 경제적으로 유풍한 on-off 형 솔레노이드 밸브가 사용된다. 서보밸브의 경우 비례 제어가 용이한 반면 구동모타 부분이 복잡하며 움직이는 기계적 부분도 정밀 가공이 요구되는 스프링을 사용함으로 가격이 비싸다. 이에 비해 on-off 밸브는 직동 (direct acting) 포핏형의 사용이 가능하여 구조가 간단하고 값이 싸다. 이외에, 공압구동장치에서와 같이 작동유체로서 점성이 낮은 기체를 사용할 경우, 스프링은 'null' 누설이 높으나 포핏형은 닫혔을 때 누설이 작다.

한편 값싼 on-off 형 솔레노이드 밸브와 함께 적용되는 bang-bang 구동은 구동회로가 간단한 반면에 높은 비선형 특성을 가져 시스템 성능이 뒤떨어진다. 따라서 로봇 제어 등에 응용되는 공압구동장치에서도 on-off 형 솔레노이드 밸브를 사용할 경우 거의 예외없이 PWM 구동회로가 함께 사용된다 (1)(2).

PWM 밸브 구동은 입력신호의 크기에 따라 on-off 밸브에 인가되는 on 혹은 off 펄스신호의 시간폭을 조절하는 방식으로 그림 1과 같이 삼각파 발생기에서 나오는 삼각파와 입력신호를 서로 비교하여 두 신호의 크기가 가로 지름 (crossing) 이 있을 때에만 펄스가 밸브에 인가된다. 이때 펄스 폭은 입력신호의 크기에 비례하게 된다.

본 논문은 높은 기동성이 요구되는 비행체의 비행조종 날개를 구동하는 고성능 공압구동장치용 PWM 전자제어기 개발을 그 내용으로 한다. 개발이 요구되는 제어기는 개발된 공압구동장치가 최소한의 동력을 소모하면서 주어진 높은 성능조건을 만족시키게 설계 되어야 하며, 또한 일회용 군용장비의 특성상 부가되는 심각한 환경조건 등을 만족시켜야 한다.

공압구동장치의 동력원이 되는 압축기체의 소모를 최소화하기 위해서는 closed-center 밸브의 구현이 요구되며 closed-center 의 구현은 자연히 밸브 dead-band 를 더욱 증가시키는 결과를 초래하여 성능을 저하시킨다. 따라서 closed-center 를 기하면서 동시에 주어진 높은 성능의 구동장치를 얻기 위해서는 PWM 제어기의 각 계수들의 최적화와 함께 효과적인 보상회로의 설계가 요구된다. 이를 위해 시도된 노력과 기술적 사항들이 실험결과와 함께 구체적으로 서술된다.

2. 공압구동장치의 구조

연구대상 공압구동장치는 상온기체 (cold gas) 공압구동장치로 그림 2 의 개략도와 같이 고압용기, 작동기 및 PWM 전자 제어기로 구성된다.

고압용기는 동력원으로서 압축된 헬륨기체를 압력 조절기를 거쳐 작동기로 공급한다. 작동기는 push-push 형 차동면적 피스톤에 감쇄오리피스가 포함된 형으로 한쪽 실린더 안의 압력이 두 개의 흡기 및 배기 솔레노이드 밸브에 의해 조절됨으로써 작동된다. 사용된 솔레노이드 밸브는

2-way, on-off 작동방식의 direct acting, 포펫형으로 최대 PWM 주파수 200 Hz 까지 사용이 가능하다. 작동기의 크랭크에는 위치감지기로 전위차계 (potentiometer) 가 부착되어 있어 전자 제어기에 의해 위치제어 폐회로를 구성한다.

그림 3 은 PWM 전자 제어기의 블록선도로서 각도위치 명령과 전위차계로부터 감지된 실제 위치와의 차이 (오차 각도)를 출력하는 차동 증폭기를 비롯하여, 위치제어 폐회로 시스템의 정적 및 동적 특성을 높여주기 위한 보상회로, 삼각파 발생기를 포함하는 펄스 폭 변조 (PWM) 회로, 밸브 구동을 위한 전류증폭회로 및 헬륨기체 소모를 최소화 하기 위한 closed-center 회로들을 기본으로 하여 구성된다. 그리고 잠음 제어를 위한 적역통과 필터가 추가된다.

### 3. Closed-center 밸브의 구현

비행체에서는 각 부분의 무게 및 체적이 대단히 제한된다. 공압구동장치에 있어서 동력원이 되는 고압기체의 소모량은 금속고압용기의 크기와 무게에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 고압용기의 크기/무게를 줄이기 위해서는 기체의 소모를 최소화 하여야 한다.

공압구동장치에서 기체소모의 최소화는 'closed-center' 밸브를 구현함으로써 얻어질 수 있고 'closed-center' 밸브가 기체감소의 역할을 최대한으로 수행하기 위해서는 구체적으로 두가지 조건을 만족시켜야 한다. 즉 첫째, 입력신호의 변화가 없을때, 기체의 흐름은 없거나 미소량이어야 하며 둘째, 입력신호가 인가되더라도 흡기밸브(혹은 포트)와 배기밸브(혹은 포트)가 동시에 열리는 순간이 없어야 한다.

이같은 closed-center 를 구현하는 방법은 다음의 두가지로 구분될 수 있다. 그 첫번째는 밸브의 구조 자체를 3-위치, 3-way 밸브로 만들어 3-위치 PWM 방식으로 구동하는 방법이며, 두번째 방법은 두개의 2-위치, 2-way 밸브를 전자회로를 이용하여 밸브들의 작동양상 혹은 순서를 조절하여 구현하는 방법이다. 본 연구에서는 비교적 획득이 쉬운 2-way 밸브를 구매하여 전자회로로 closed-center 밸브를 구현하는 방법을 택하였다.

설계된 제어기에서는 closed-center 를 위해서, 그림 4 에 도시된 것처럼 삼각파의 양, 음의 최대값과 같은 직류전압값을 임계치로 미리 정하여 이 임계치를 오차신호와 삼각파가 합쳐진 신호와 비교함으로써 PWM 펄스를 발생한다. 이 경우, 오차 신호가 0 이면 펄스는 발생되지 않아 양쪽 밸브 모두 닫혀있으며 오차신호가 변화할 경우에만 오차신호의 부호에 따라 PWM 펄스가 한 쪽 밸브만을 구동하게 되어 앞서 정의된 closed-center 의 개념을 만족시킨다.

### 4. PWM 회로 최적 계수 값의 선정

#### (1) 삼각파 크기 선정

PWM 제어회로에서 제일 먼저 선정되어야 할 설계 변수는 삼각파의 크기로서 삼각파 크기는 시스템이득에 직접적인 영향을 미친다. 즉 삼각파의 크기가 작을수록 시스템 이득은 반비례적으로 증가하며 이를 보상하기 위한 전향경로 이득은 상대적으로 감소한다.

전향경로이득을 조절하여 시스템 이득을 일정하게 유지하고 PWM 삼각파의 크기를  $\pm 3$  volt 에서  $\pm 12$  volt 까지 변화시키면서 여러가지 크기의 정현파 및 계단입력 반응을 살펴보았으나 시스템 특성의 좋고 나쁨을 구별할 수 있을만큼 뚜렷한 차이를 얻지 못하였다. 한편 삼각파의 크기가  $\pm 5$  volt 보다 더 클 경우 공급 전압이  $\pm 15$ VDC 인 Op-Amp 의 포화가 일어날 수 있으므로 PWM 삼각파의 크기는 선형관계를 주는 범위내에서 잠음등의 영향을 적게 받기 위해  $\pm 5$  volt 로 결정하였다.

#### (2) PWM 주파수 선정

PWM 주파수는 적분효과를 충분히 얻을 수 있도록, 적어도 구동장치 주파수 대역의 4-5배 이상이 되어야 한다. 특히 반송파 주파수가 너무 낮으면 limit cycle 이 일어난 확률이 높다. 그러나 이 주파수가 너무 높으면 마모 등에 의하여 밸브의 수명이 짧아지며 솔레노이드 밸브의 유한한 반응 시간이 PWM 주기의 큰 몫을 차지하여 충분한 선형이득범위를 얻지 못하게 된다. PWM 펄스의 유효범위는 밸브 포펫이 움직일 수 있는 최단 폭의 펄스로부터 포펫을 계속적으로 열어주는 최장 폭의 펄스까지 이용이 가능하다. 따라서 PWM 주파수의 상한은 주로 솔레노이드 밸브의 반응 시간에 의해 결정되며 충분한 선형 이득범위를 얻기 위한 솔레노이드 밸브의 반응시간은 PWM 주파수의 10% 이내가 될 것이 추천된다.

그러나 이러한 사항들은 PWM 주파수의 대략적인 범위를 줄 뿐이므로, 본 연구에서는 실제 실험을 통하여 PWM 주파수의 변화가 시스템의 거동에 미치는 영향을 살펴본 후 개발중인 공압구동장치에 가장 적합한 PWM 주파수를 선정하였다. 이때 PWM 삼각파의 크기와 closed-center 를 위한 임계치는 각각  $\pm 5$ volt 로 하고 시스템 전향경로 이득은 일정하게 고정시켰으며 PWM 주파수의 영향만을 살피기 위하여 보상회로는 사용하지 않았다.

실험에 사용된 PWM 주파수는 시스템 반응 주파수의 4 배에 가까운 80 Hz 이므로 75 Hz 에서 200 Hz 사이의 6 개 주파수 (75, 100, 125, 150, 175, 200 Hz) 를 선정하여 실험하였다.

실험결과, PWM 주파수는 히스테리시스의 크기에 가장 큰 영향을 끼치며 125 Hz 부근이 가장 적당한 것으로 판단되었다. 이 경우의 계단입력 반응, 정현파 입력반응,

히스테리시스 곡선은 각각 그림 5의 (a), (b), (c) 에 나타나 있다.

### (3) Closed-center 회로 임계치 선정

Closed-center 구현방식에서 펄스 triggering 임계치 크기의 영향을 실험을 통하여 조사하고 그 최적값을 결정하였다. 임계치 크기가 시스템 특성에 미치는 가장 큰 영향은 임계치의 감소가 이득의 증가와 비슷한 효과를 준다는 것이다. 이는 임계치의 크기가 밸브의 dead-band 값에 영향을 주기 때문이다. 즉, 솔레노이드가 밸브 스프링 예압력을 이겨 스템을 움직일 수 있는 자기력을 내기 위해서는 밸브 코일에 적정값 이상의 전류가 흐를 것이 요구되므로, 코일의 인덕턴스에 의해 'ON' 전압펄스가 가해진 후 얼마간의 전류 상승 시간이 지나야 비로소 밸브가 열리기 시작한다. 이 전류상승시간이 밸브 dead-band 의 역할을 하며 임계치가 낮을수록 더 큰 폭의 펄스가 밸브에 인가되므로 dead-band 가 감소한다. 작은 크기의 입력반응 특성들을 위해 비선형 dead-band 는 작을수록 좋으므로 밸브 전류 상승시간을 보상해 주는 최적 임계치를 찾기 위해 전향경로 이득을 낮추고 임계치를  $\pm 5.0$  VDC 에서 감소시켜가면서 실험을 하였다.

임계치를 낮출 경우 히스테리시스가 감소함을 볼 수 있으나 임계치가  $\pm 3.5$  VDC 이하로 떨어졌을 때에는 오차 신호의 값이 영이어서 스템을 움직이기에 충분히 큰 폭의 펄스가 인가되어 closed-center 회로가 제 구실을 하지 못함이 판명되었다.

위의 관찰을 종합하면 closed-center triggering 임계치는 될 수 있는 한 낮추어 비선형 요소인 dead-band 를 줄이는 것이 바람직하지만 closed-center 를 유지하기 위한 최소 dead-band 값 보다는 커야한다. 따라서 PWM 주파수가 125 Hz 인 경우 closed-center 를 유지하기 위한 임계치의 최소값은  $\pm 3.5$  VDC 부근으로 밸브간의 불균일한 반응 특성들을 고려하여 얼마간의 여유를 두어  $\pm 3.7$  VDC 가 선정된다.

## 5. 보상회로의 설계

### (1) 공압구동장치를 위한 보상회로

본 제어기는 조종장치의 위치명령에 따라 위치제어를 하는 단일입력 단일출력 (SISO) 아나로그 제어기로서 이에 적합한 제어 알고리즘이 선택된다. 흔히 위치 제어 시스템에는 속도, 가속도 혹은 압력신호 귀환에 의한 부 (minor) 귀환 보상회로가 사용된다. 특히 공압 혹은 유압 시스템에서는 작동기 양쪽 실린더의 천이 (transient), 차동 (differential) 압력신호가 이용된다 (3). 그러나 일회용인 항공장비 공압구동장치에서는 무게와 체적 조건 그리고 가격 등을 고려해 볼때, 위치제어에

필수적인 위치감지기외에 속도, 가속도 혹은 압력감지기의 추가 부착은 피해야 한다. 아나로그 회로에 의한 미분신호 획득은 잡음증폭 효과에 의해 시스템 성능을 오히려 저하시킬 염려가 있으므로 결국 부 (minor) 귀환 보상회로의 사용은 어렵다. 그외에 최적 제어 알고리즘은 물론, 웬만한 상태 공간 접근방법에 의한 알고리즘들도 아나로그 제어기의 특성 및 상태정보의 제한에 따라 적용이 용이하지 않다. 결국 공압구동장치와 같은 SISO 아나로그 제어 시스템을 위해서는 전형적인 lag-lead 보상회로, complex zero 를 이용한 보상회로 또는 pole-placement 보상회로 등이 적용될 수 있으며 본 제어기에서는 lag-lead 보상회로가 사용되었다.

### (2) Lag-lead 보상회로의 설계

Lag-lead 보상회로는 가장 전형적인 보상회로로서 간단한 수동 혹은 능동 아나로그 회로로서 구현할 수 있으며 때때로 대단히 효과적이어서 실제에서 자주 사용된다. Lag-lead 회로중 lag 회로는 PID 제어회로의 적분 (I) 회로 역할을 하며 시스템 이득 증가를 가능케하여 시스템을 'stiff' 하게 만들어 주며 정상상태 오차를 줄여 준다. Lead 회로는 PID 제어 회로의 미분 (D) 회로 역할을 하며 위상여유를 증가시켜 안정성을 높이고 주파수 반응대역을 넓혀 빠른 반응속도를 얻게 해 준다.

Lag-lead 보상회로의 전달함수와 능동소자를 이용하여 구현하는 구체적인 방법들은 여러가지가 있다. 일반적으로 이들 lag-lead 보상회로 중 lag 회로는 전향 경로상에 넣고, 미분작용을 하여 입력이 갑작스럽게 변화 할 때에 Op-Amp 를 포화시키는 lead 회로는 후향 경로상에 넣는다. 그러나 서보 시스템에서 입력의 변화가 갑작스럽지 않고 시스템이 입력신호의 변화에 빨리 반응하게 만들고자 할 경우 lead 회로도 전향 경로상에 넣는다 (4).

Lag-lead 회로의 설계에는 phase-lag 회로의 유무에 별로 영향을 받지 않는 lead 회로가 먼저 설계되고 그 다음 lead 회로가 포함된 새로운 전달함수를 토대로 lag 회로가 설계된다. 이 방법은 간혹 시행착오 과정을 거쳐야 하며 이를 피하기 위해 nonlinear programming 등 제한된 최적화 (constraint optimization) 방법을 이용하여 구하기도 한다. 그러나 참고문헌(5)에서 Hang 은 위치-명령 (set-point) 반응특성을 고려하여 최적화된 시스템은 부하 변동 고란에 대한 반응특성이 낮을 수 있음을 경고하고 일반적으로 받아들여지는 설계지침의 배경을 충분히 이해할 필요가 있음을 보였다.

일반적으로 인정되는 설계지침은 lag 회로의 lead 절환 주파수는 시스템이득 cross-over 주파수나 폐회로 주파수 반응대역의 0.5 에서 1.0 decade 작은 주파수로 극점/영점인  $\beta$  의 값은 10 이내로 취할 것을 추천하며 또한 lead 회로의 영점/극점인  $\alpha$  값도 10 이내로

추천된다. 적분작용을 하는 lag 회로의 큰 capacitor 값에 의해 정상상태 도달시간이 길어지거나 큰 입력에 대한 과도응답에서 큰 overshoot 현상이 나타날 수 있으므로 lag 회로의 절환 주파수는 요구되는 적분효과를 주는 범위내에서 될 수 있는한 높여야 한다.

본 논문에서는 설계된 lag-lead 보상회로를 전향경로 상에 삽입해서 공압구동장치를 구동하여 실험하였으며 실험 조건으로서 PWM 삼각파의 주파수와 크기는 각각 125 Hz,  $\pm 5$  volt 이며 임계치는  $\pm 3.7$  VDC 이었다. 앞에서의 고찰과 실험을 통한 약간의 시행착오를 거쳐 설계된 보상회로는 0.31 Hz, 3.12Hz, 7.81Hz, 52.04Hz 의 절환 주파수를 갖는다.

## 6. 실험 결과

Closed-center 방식의 효과는 공압구동장치의 배기구에 유량계 (Ramapo, V-3/8-SSM) 를 부착하여 계단입력 반응에 대한 반응특성과 두 밸브에 들어가는 펄스 신호 및 배기 유량을 측정함으로써 행하였다.

그림 6 은 설계된 제어기를 이용하여 계단입력 반응과 그 때의 배기유량을 측정한 결과이며 이때의 조건으로 PWM 주파수는 125 Hz, 입력의 크기는  $\pm 2^\circ$ , Closed-center 를 위한 임계치는  $\pm 5.0$  VDC 이다. 이 경우 작동기의 위치가 변화하는 순간에만 큰 피크치의 유량이 흐르고 일단 정상상태에 도달한 후에는 유량의 흐름이 없으며 반응곡선에도 ripple 이 발견되지 않았다. 유량곡선상의 작은 떨림은 주파수가 350 Hz 부근으로서 제작회사에서 제시한 유량계의 공진주파수와 일치하여 유량계의 잡음인 것으로 판명되었다. 결론적으로, 사용된 closed-center 방식이 기체소모 감소에 대단히 효과적임을 알 수 있다.

PWM 회로의 주요 변수 중의 하나인 임계치의 크기를 변화시키면서 시스템의 특성을 실험하여 가장 적합한 값으로 선정된  $\pm 3.7$  VDC 일 때의  $\pm 18^\circ$  삼각파 입력에 대한 히스테리시스 측정 결과는 그림 7 과 같이 그림 5 (c) 와 비교할 때 그 크기가 많이 줄어들었음을 알 수 있다.

설계된 lag-lead 보상회로를 포함하는 최종 설계된 제어기로 실험하여 얻은 결과는 그림 8~10에 나타나 있다. 그림 8 은 계단입력 반응, 그림 9 는 정현파 입력 반응 그리고 그림 10 은 히스테리시스 반응곡선이다. 계단입력 반응곡선의 출력값을 실제로 측정한 결과, 정상상태 오차가  $2^\circ$  입력 (그림 8a)에서는  $0.33^\circ$ ,  $10^\circ$  입력 (그림 8b)에서는  $0.36^\circ$  로서 공압구동장치의 설계 요구조건인  $\pm 0.5^\circ$  의 정적 정확도를 만족하게 되었다. 그리고 그림 10 은 히스테리시스의 크기가  $\pm 0.15^\circ$  임을 보여 그림 7 의 경우보다 훨씬 줄어들었음을 알 수 있다. 이는  $\pm 0.25^\circ$  의 히스테리시스 요구 조건도 만족

하는 값이다.

그리고 20 Hz 의 주파수 반응대역을 만족하며, 최대각속도는  $530^\circ/\text{sec}$  가 됨이 관찰 결과 확인 되었다.

## 7. 결 론

관련 문헌조사, 각 구동회로의 세부 설계 및 보완, 실험 시제, 이론적인 고찰과 여러가지의 성능시험을 통하여 공압구동장치용 PWM 전자 제어기가 개발되었다.

설계된 제어기의 주요 특성으로 다음의 세가지를 들 수 있다.

- On-off 밸브로 비례제어를 얻기 위한 PWM 밸브 구동
- 기체감소를 최소화하기 위한 closed-center 전자회로
- 성능 향상을 얻기 위한 lag-lead 보상회로

설계된 제어기로 공압구동장치를 구동한 성능시험의 주요 결과는 모든 요구조건을 만족시킴을 보여 준다.

표 1. 성능 시험 결과

항 목	요 구 치	실험결과
주파수 반응 (Hz)	20	20
정적 정확도 ( $^\circ$ )	$\pm 0.50$	$\pm 0.36$
최대 각속도 ( $^\circ/\text{sec}$ )	400	530
히스테리시스 ( $^\circ$ )	$\pm 0.25$	$\pm 0.15$

## 참 고 문 헌

1. Noritsugu, T., "Development of PWMmode Electropneumatic Servomechanism, Part I: Speed Control of a Pneumatic Cylinder," The J. of Fluid Control
2. Lee, S.G. and H.S.Cho, " On the Development of a PWM Control-based Pneumatic Servomechanism," Int. Symp. on Fluid Control and Measurement, Tokyo, Sept. 1985, pp 37-46.
3. Mannetje, J.J., "Pneumatic Servo Design Method Improves System Band-width Twenty-fold," Control Engineering, Jun. 1981, pp 79-83.
4. Rosenbroch, H.H., Computer-Aided Control System Design, Academic Press, 1974.
5. Hang, C.C., "The Choice of Controller Zeros", IEEE, Control Systems Magazine, Jan. 1989, pp 72-75.

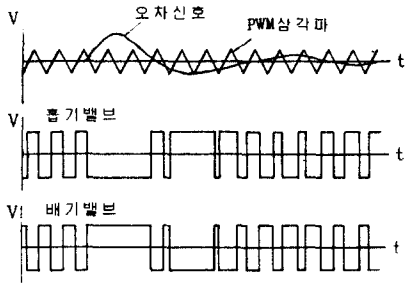


그림 1. 일반적인 펄스폭 변조 (PWM)

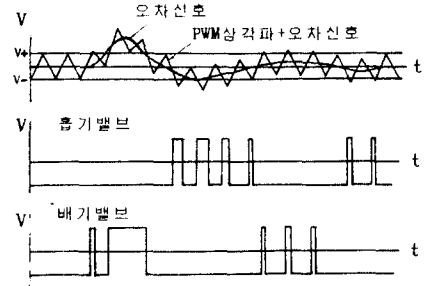


그림 4. Closed-center 를 위한 PWM

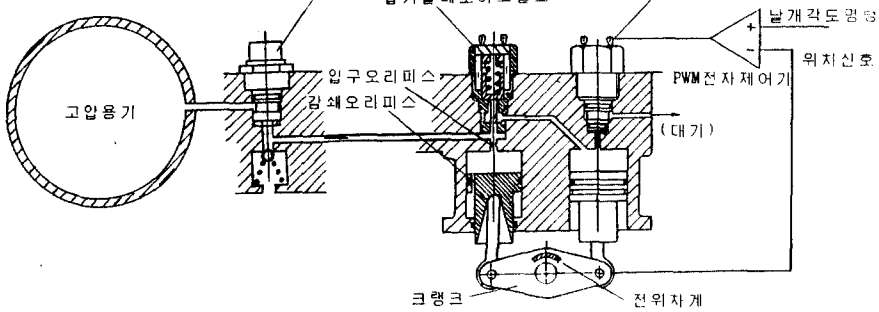


그림 2. 공압 구동장치 개략도

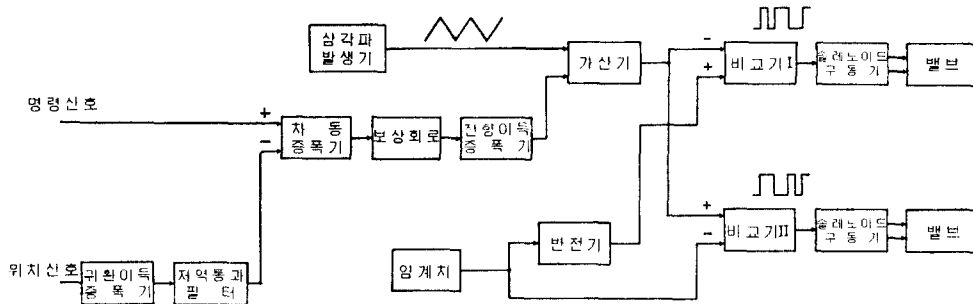


그림 3. PWM 전자제어기 블록선도

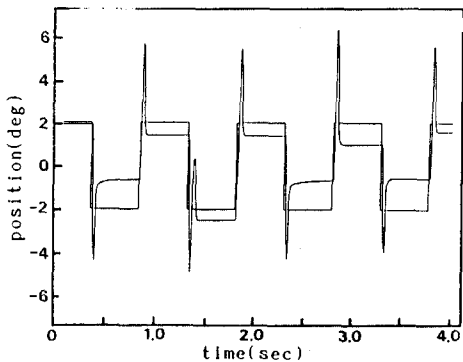


그림 5(a). 계단 입력반응,  $\pm 2^\circ$  입력

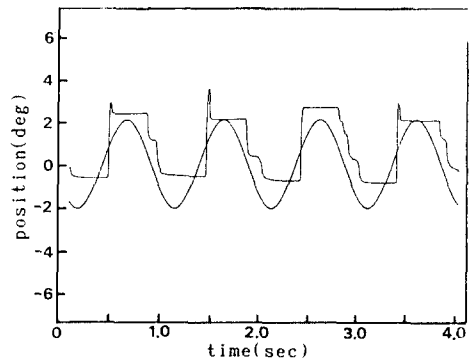


그림 5(b). 정현파 입력반응,  $\pm 2^\circ$  입력

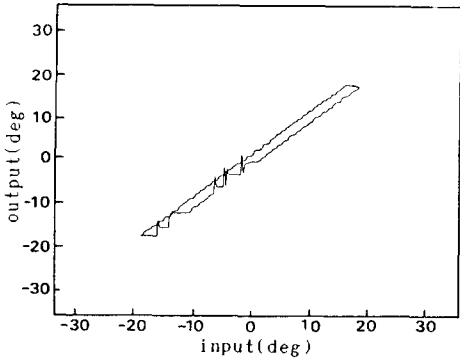


그림 5(c). 히스테리시스 곡선,  $\pm 18^\circ$  입력

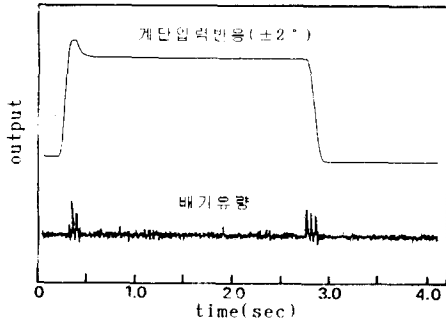


그림 6. 계단 입력 반응과 배기 유량

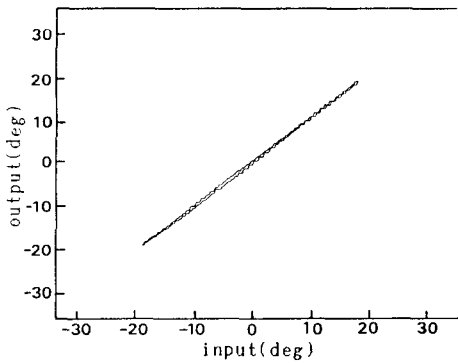


그림 7. 히스테리시스곡선,  $\pm 18^\circ$  입력, 임계치  $\pm 3.7\text{VDC}$

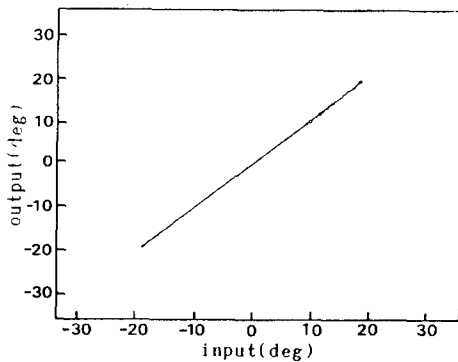
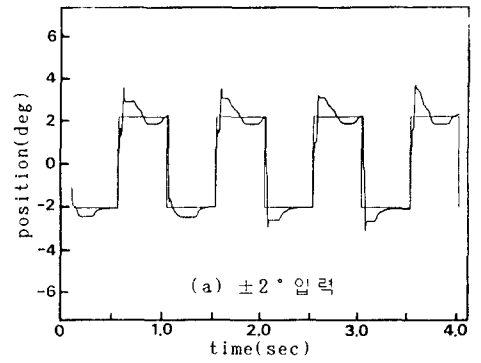
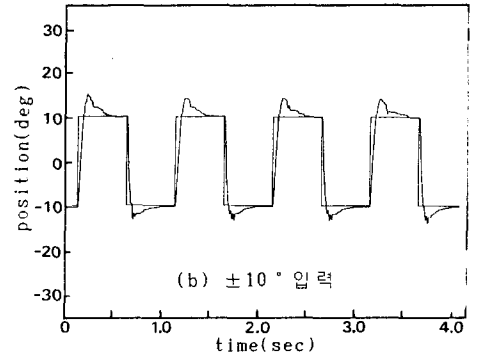


그림 10. 보상된 히스테리시스 곡선,  $\pm 18^\circ$  입력

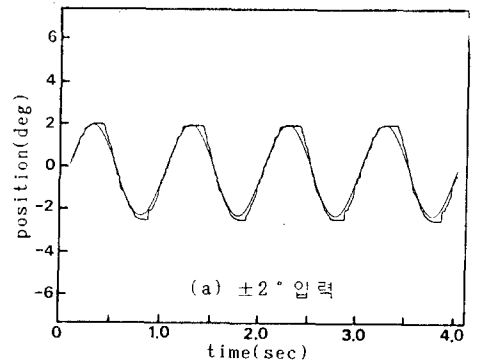


(a)  $\pm 2^\circ$  입력

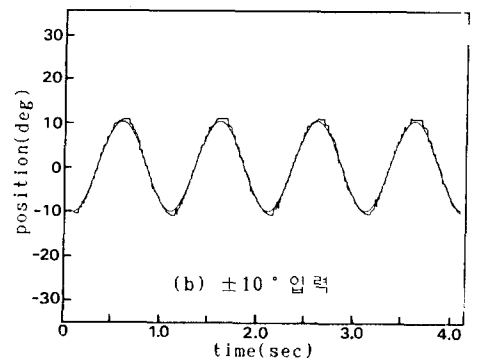


(b)  $\pm 10^\circ$  입력

그림 8. 보상된 계단 입력 반응 곡선



(a)  $\pm 2^\circ$  입력



(b)  $\pm 10^\circ$  입력

그림 9. 보상된 정현파 입력 반응 곡선