

공압서보시스템에 의한 미세 간극제어 시스템 설계

김동환*, 김영진**, 정대화***

Fine Gap Control Using Pneumatic Servo System

Dong Hwan Kim*, Young-Jin Kim**, Dae Hwa Jeong***

ABSTRACT

A pneumatic servo system requiring a fine gap control in a photo-electric sensor which is used for a LCD array detection device is introduced. The gap controlled by the pneumatic servo system remains within around 50~80 μm , and the system possesses an effect to eliminate undesirable particles on the LCD plate by blowing air out. The air flow rate is initially controlled by a servo valve and expanded by a booster valve, thus the controlled air pressure contributes to maintaining an appropriate gap between the LCD plate and photo-electric sensor. An air floating plate of two degrees of freedom is designed and fabricated, and a fine tilting motion control is also implemented by assigning different gap commands. The pressure control and direct gap control are proposed, and each performance is verified experimentally.

Key words : pneumatic servo system (공압서보시스템), fine gap control (미세간극제어), pneumatic servo valve (공압서보밸브), LCD detect device (LCD 검사장치), pressure control (압력제어), displacement control (변위제어)*

1. 서론

LCD(Liquid Crystal Display)는 현재 대부분의 전자제품에서 가장 유용하게 사용되는 디스플레이이며, 보다 우수한 성능을 보장하기 위하여 픽셀의 완전 무 결점을 필요로 한다. 따라서 픽셀의 오류(defect)를 판단하는 것이 LCD 제조공정 중에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 오류의 측정을 위해 일반적으로는 CCD 카메라를 이용한 화상처리 방식이 주요한 검사장비로 사용되어 왔으나 이 방식은 화상처리의 불안정에 의해 절대적인 오류를 찾지 못하는 경우도 발생하고 있다. 따라서 모든 픽셀을 빠른 시간 안에 검사하기 위하여 비접촉식의 새로운

유형의 센서가 개발되고 있다. 여기서는 픽셀 오류 검출용 광센서를 대상으로 하여 이 센서를 작동하기 위한 미세 구동 시스템제어에 대한 연구를 소개한다. 본 논문에서 적용하는 광센서는 통상 LCD 표면과 수십 μm 내외의 간극을 유지해야 하며, 주위로부터의 전기 및 자기장의 영향이 배제되어야 한다. LCD 표면 위에 미세한 먼지가 있을 경우에 LCD면에 수직방향으로 센서가 이동되는 경우, 기존의 마이크로 스테핑 모터^[1] 및 압전소자^[2-3]에 의한 구동의 경우 센서와 미세 입자가 함께 이동하게 된다. 미세 입자가 센서의 표면에 부착되어 이동하게 될 경우, LCD 표면에 치명적인 파손을 가져오게 되어 제품에 불량률이 발생된다. 또 다른

2002년 3월 18일 접수

* 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

** 서울산업대학교 기계설계학과 대학원

*** LG 생산기술원 검사기술센터

형태는 자기부상 방식^{14,15)}에 의한 방식으로 LCD 표면과 비접촉을 유지하며 미세 간극제어를 할 수 있으나, 이 방식은 자기장이 광센서에 직접적인 영향을 줄 수 있으므로 적절하지 않다.

여기서는 미소먼지가 검사장치의 표면에 부착되어 LCD 표면에 상처를 내는 것을 방지하고, 미소먼지의 효과적인 제거와 더불어 검사 센서 부에 전기장의 영향을 주지 않기 위한 검사방법으로 공압 제어 시스템을 제안한다. 공압을 이용함으로써 광센서에 전기장의 영향을 막고, LCD 표면에 공기를 분사함으로써 미소먼지를 제거하는 효과를 동시에 얻을 수 있게 된다. LCD 픽셀검사 시스템에서 요구되는 위치제어 정밀도는 앞서 언급한대로 마이크로 단위이다. 그러나 공기가 가지고 있는 압축성 및 비선형성의 문제 등으로 단순한 공압 제어 방식으로는 마이크로 단위의 제어가 어렵다. 이에 대응하기 위하여 공압 서보제어 시스템^{6-7,12,14)}을 도입하게 된다.

압력을 직접 형성하는 오리피스와 고정부와 구동부 사이의 간극의 크기에 비례하여 공기 막의 압력은 떨어지며, 이는 부상체의 이동을 야기 시킨다. 본 연구에서는 광센서가 요구하는 수십 μm 간극을 유지하며 추적할 수 있는 공압서보 제어시스템 설계 및 제어 전략을 소개한다. 여기에서는 일정한 오리피스를 통과하는 공기량을 서보 밸브를 통해 제어함으로써, 부상체에 제어압력을 형성하여 부상체의 간극을 제어하는 시스템이다. 즉 유입되는 공기량은 오리피스를 통과하면서 압력을 발생시키고, 이 압력의 차이로 인하여 부상체는 부상을 하게 된다. 부상되는 간극은 자중과 외부에서 공급되는 공기량에 의한 압력과 힘의 평형에 의해 결정된다. 따라서 이 공기량을 제어하여 공기막을 형성하고 부상체의 수직 이동변위에 의한 공기막의 체적을 조절함으로써 간극조절 효과를 볼 수 있다. 부상체 표면과 공기가 방출되어지는 끝단에 공기가 방출되어질 때 부상체의 운동 방향으로 팽창하려는 공기막이 부상체를 지지한다. 이러한 공기의 특성 때문에 공기 부상체는 기계적인 접촉면이 없이 부드러운 동작이 가능하며 이 공기막이 부상의 간극을 형성한다. 부상되어진 높이는 변위 센서를 이용하여 측정하며 수십 μm 를 유지하기 위한 간단한 PID 제어 방식을 채택한다.

제어방식은 압력센서에 의한 압력제어 방식과 변위 센서를 이용한 변위제어 방식을 채용한다. 두

가지 방식 모두 장단점이 있으며 상세한 내용은 본문에서 기술한다. 공압 서보제어에 의한 부상체의 미세간극제어 시스템을 구성하고 실험적으로 미세간극제어의 효율성을 검증하고자 한다.

2. 시스템 모델링

공기압에 의한 부상을 해석하기 위하여 시스템의 모델링과 해석이 요구된다. 적절한 부상 간극을 형성시키기 위한 오리피스의 크기 및 부상체의 질량 등 여러 요소들에 대한 모델링과 시뮬레이션이 필요하게 된다. 부상체의 해석에서는 공기의 물성치와 부상부위의 간극 및 오리피스에 의한 공기량 방정식 등 여러 사항이 고려되어야 한다. 우선 공기의 여러 물성치를 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Physical properties of air

명칭	기호	값	단위	비고
표준 대기압	P_a	0	$\text{kgf/cm}^2 \text{ abs}$	0 kPa (N/m ²)
밀도	ρ	1.168	kg/m^3	100 kPa, 298.15 K 에서
기체상수	R	0.287	kN m/(kg K)	

주) 공기 밀도(ρ)는 온도와 압력에 따라 변화됨

$$\left(\rho = \frac{P}{RT}, P: \text{압력}, T: \text{절대온도}\right)$$

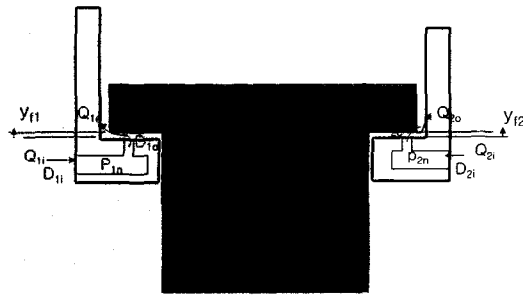


Fig. 1 Modeling of the air gap generation system

Fig. 1은 공기를 이용한 간극제어 시스템에 대한 간략화 된 시스템이다. 부상체의 운동방정식은 다음과 같다.

$$F_1 + F_2 - mg - F_f = m\ddot{y}_f + b\dot{y}_f \quad (1)$$

여기서 F_1 과 F_2 는 공기압에 의한 양단의 부상력을 나타내고 이 값은 압력과 공기량으로 결정되며 자세한 것은 아래에 기술한다. F_f 는 부상체와 서포트부 사이의 표면 접촉에 의한 마찰력을 표시하며 본 시스템에서는 이 간극이 부상간극에 비해 상대적으로 크므로 거의 무시할 수 있다. 그리고 m 은 부상체의 질량이며 b 는 점성계수이다. 부상체가 부상을 하기 위한 에너지원은 공기이다. 공기의 분출이 발생하는 순간부터 부상을 하기 시작한다. 공기가 분출되는 순간 부상체는 공기 중으로 부상하기 시작하며, 이때 공기막의 체적은 증가하게 된다. 공기막이 체적이 최대가 되면 부상체의 부상높이도 최대가 된다.

다음으로 부상체에 미치는 힘들을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같이 부상체를 플래퍼 노즐(Flapper nozzle)^[8]로 간주하여 공기량과 압력과의 관계를 유도한다. 여기서 공기의 체적유량(volumetric flow rate)은 Q , 질량유량(mass flow rate)은 \dot{m} 으로 표시하면 $\dot{m} = \rho Q$ 가 성립한다.

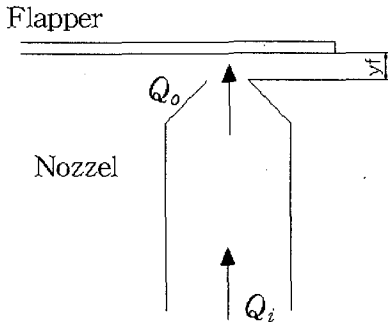


Fig. 2 Flapper nozzle arrangement

부상체가 일정 높이까지 상승하기 위해서는 부상체 사이에 공기막이 형성되어야 하고 이 공기막의 분출 압력과 공기막의 체적과는 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 플래퍼 노즐로 가정할 때 플래퍼를 움직이게 하는 공기는 플래퍼를 y_f 방향으로 움직이게 하며 노즐을 통과하는 공기의 질량유량은 식(6)으로 나타낼 수 있다^[9].

$$\dot{m}_o = \pi C_d D_o y_f \sqrt{2\rho(P_n - P_a)} \quad (2)$$

여기서 P_n 은 노즐압력이고 P_a 는 대기압을 나타내며 통상적으로 0 (계기압력)이다. C_d 는 공기유량계수(discharge coefficient)를 나타낸다. D_o 은 노즐부의 직경이다. 다음으로 노즐 입구에 형성되는 질량유량 (\dot{m}_i)은 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\dot{m}_i = C_d \frac{\pi}{4} D_i^2 \sqrt{2\rho(P_s - P_n)} \quad (3)$$

여기서 D_i 는 노즐 입구 쪽 직경이며 플래퍼 간극에 관계없이 일정한 값을 가진다. P_s 는 공급압력을 나타낸다. 플래퍼를 y_f 방향으로 움직이는 힘 F 는 식(4)로 나낼 수 있다^[10].

$$F = P_n \left(1 + \frac{1}{2} \rho u^2\right) A_o \quad (4)$$

여기서 u 는 공기의 속도 A_o 은 노즐 출구의 면적이며 본 시스템에서는 오리피스 4개의 대한 단면적의 합이다.

$$u = \frac{Q}{A_o} = \frac{\dot{m}_o}{\rho A} \quad (5)$$

\dot{m}_o 를 식(5)에 대입하면 식(6)이 구하여 진다.

$$u = \frac{\pi C_d D_o y_f \sqrt{2\rho(P_n - P_a)}}{\rho \frac{\pi D_o^2}{4}} = \frac{4C_d y_f \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_n - P_a)}}{D_o} \quad (6)$$

식(6)을 식(4)에 대입하여 공기가 오리피스를 통과하여 플래퍼를 밀어내는 힘을 계산 할 수 있다. 플래퍼를 밀어내는 공기의 힘은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = P_n \left(1 + \frac{C_d^2 y_f^2 (P_n - P_a)}{D_o^2} \right) A_o \quad (7)$$

전체 분출면적 (A_N)은 현 시스템이 4개의 상호 대칭으로 오리피스로 구성되어 있으므로 식(8)과 같이 계산되어진다.

$$A_o = 4 \frac{\pi D_o^2}{4} = \pi D_o^2 \quad (8)$$

오리피스 유량계수 C_d 는 통상적으로 0.6 정도의 값을 가진다²⁾. 본 논문에서는 실험상의 한계로 이 값은 직접 측정하지 않고 공기 및 유압공학에서 채용하는 값으로 사용하였다. 힘에 관한 식을 정리하면 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m \ddot{y}_f = P_n \left(1 + \frac{C_d^2 y_f^2 (P_n - P_a)}{D_o^2} \right) A_o - b \dot{y}_f - F_f - mg \quad (9)$$

여기서 b 는 댐핑계수를 나타내며 이 값 역시 실제 측정하지 않고 통상적인 값으로 사용한다. 따라서 시뮬레이션과 실제 실험과는 약간 다른 결과를 나타낼 수 있음은 주지의 사실이다.

다음 서보 밸브를 통하여 입력되는 공기량 (m_s)에 대하여 살펴보면 통상적으로 질량유량은 입력전압에 비례하므로 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_s = k v \quad (10)$$

여기서 k 는 계수이며 v 는 서보밸브^[11]에 인가되는 입력전압이다. 본 시스템은 2개의 서보밸브를 채용하므로 양단에 형성되는 공기량은 식(11)과 같이 정의 될 수 있다.

$$\dot{m}_{s1} = k_1 v_1, \quad \dot{m}_{s2} = k_2 v_2 \quad (11)$$

m_{s1} 과 m_{s2} 는 좌측 및 우측 부상체에서 분출되는 오리피스 통과 유량 [kg/s]이고 v_1, v_2 는 두 개의 서보밸브에 각각 인가되는 전압이다. 본 시스

템에 적용한 서보밸브는 유량이 미세하므로 부상체를 부상시키기 위한 충분한 유량 공급을 위해 공기 증폭기(booster)^[11]를 사용한다. 이 증폭기를 통하여 출력되는 공기량은 바로 부상체의 오리피스의 입력 단으로 전해진다. 따라서 부상체의 입력 공기량은 식(12)로 표현된다.

$$\dot{m}_{a1} = \alpha \dot{m}_{s1}, \quad \dot{m}_{a2} = \alpha \dot{m}_{s2} \quad (12)$$

여기서 α 는 증폭 비례상수이며 \dot{m}_{a1} 과 \dot{m}_{a2} 는 좌측 및 우측 부상체로 입력되는 공기 증폭 유량 [kg/s]이다. 식(11)를 식(12)에 대입하여 공기 증폭기로 증폭되어 부상체로 입력되는 공기량을 서보밸브 인가 전압과의 관계를 구하면 식(13)과 같다.

$$\dot{m}_{a1} = \alpha k_1 v_1, \quad \dot{m}_{a2} = \alpha k_2 v_2 \quad (13)$$

2축 부상 시스템의 경우 식(14-15)에 의해 노즐 내의 압력변화는 아래의 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} C_f \frac{dP_{n1}}{dt} &= \dot{m}_{a1} - \dot{m}_{o1} \\ &= C_d \frac{\pi}{4} D_i^2 \sqrt{2\rho(P_s - P_{n1})} - C_d \pi D_o y_{f1} \sqrt{2\rho P_{n1}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} C_f \frac{dP_{n2}}{dt} &= \dot{m}_{a2} - \dot{m}_{o2} \\ &= C_d \frac{\pi}{4} D_i^2 \sqrt{2\rho(P_s - P_{n2})} - C_d \pi D_o y_{f2} \sqrt{2\rho P_{n2}} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 P_{ni} , \dot{m}_{oi} , $i=1,2$ 는 좌우측 노즐내의 압력과 노즐을 빠져나가는 공기량을 나타낸다. 그리고 $C_f = \frac{V}{RT}$ 로서 플래퍼 노즐의 캐퍼시턴스(capacitance) 역할을 한다.

상태방정식을 유도하기 위하여 상태변수를 정의한다. 우선 왼쪽 축에 대해 상태변수를 다음과 같이 지정한다.

$$Z_1 = P_{n1}, \quad Z_2 = y_{f1}, \quad Z_3 = \dot{y}_{f1} \quad (16)$$

오른쪽 측에 대해서도 같은 방법으로 상태변수를 지정한다.

$$Z_4 = P_{n2}, \quad Z_5 = y_{f2}, \quad Z_6 = \dot{y}_{f2} \quad (17)$$

양쪽 측은 본 시스템의 경우 4 방향으로 구속되어 서로 독립적으로 작동하므로 개별적인 제어를 시행할 수 있다. 위의 상태변수 정의에 따라서 본 시스템에 대해 다음과 같은 상태방정식을 기술한다.

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= \frac{C_d}{C_f} \frac{\pi}{4} D_{1i}^2 \sqrt{2\rho(P_s - Z_1)} - \frac{C_d}{C_f} \pi D_{1o} Z_2 \sqrt{2\rho Z_1} \\ \dot{Z}_2 &= Z_3 \\ \dot{Z}_3 &= \frac{Z_1 A_{1o}}{m} \left(1 + \frac{C_d^2 Z_2^2 (Z_1 - P_a)}{D_{1o}^2}\right) - bZ_3 - mg \end{aligned} \quad (18)$$

오른쪽 부상체의 경우 역시 다음과 같이 상태방정식이 기술된다.

$$\begin{aligned} \dot{Z}_4 &= \frac{C_d}{C_f} \frac{\pi}{4} D_{2i}^2 \sqrt{2\rho(P_s - Z_4)} \\ &\quad - \frac{C_d}{C_f} \pi D_{2o} Z_5 \sqrt{2\rho Z_4} \\ \dot{Z}_5 &= Z_6 \\ \dot{Z}_6 &= \frac{Z_4 A_{2o}}{m} \left(1 + \frac{C_d^2 Z_5^2 (Z_4 - P_a)}{D_{2o}^2}\right) - bZ_6 - mg \end{aligned} \quad (19)$$

앞서 서술한 공기 부상시스템의 모델링을 토대로 시뮬레이션을 수행한다. 사용된 파라미터 값들은 $V=1.57 \times 10^{-6} m^3$, $A_{10}=A_{20}=7.06 \times 10^{-6} m^2$, $D_{1o}=D_{2o}=0.003 m$, $D_{1i}=D_{2i}=0.01 m$,

$C_f=1.85 \times 10^{-9} m^2 s^2$, $b=0.3 Ns/m$, $m=0.75 kg$ 이다.

공기의 물성치는 Table 1에 명시되어 있으며 공기 유량계수 (C_d)는 전술한대로 0.6으로 하였다. 시스템의 모델링을 통하여 시뮬레이션에서 서보밸브의 입력 전압을 변화시키면서 부상되는 현상을 관찰할 수 있다. Figs. (3-4)의 그래프는 시뮬레이

션의 결과 응답곡선이다. 입력 전압에 대한 압력의 변화와 부상 높이를 나타낸 그래프이다.

시뮬레이션 결과를 살펴보면 부상 높이가 증가할수록 정상상태에서의 압력은 증가한다. 즉 입력 전압이 상승하면 분출되는 공기량이 증가하여 노즐부의 압력을 증가시켜 부상체를 더 상승시킨다.

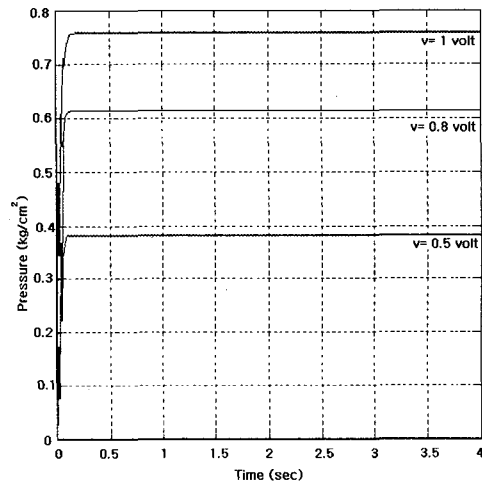


Fig. 3 Histories of pressure under servo valve input $v=0.5, 0.8, \text{ and } 1 \text{ volt}$

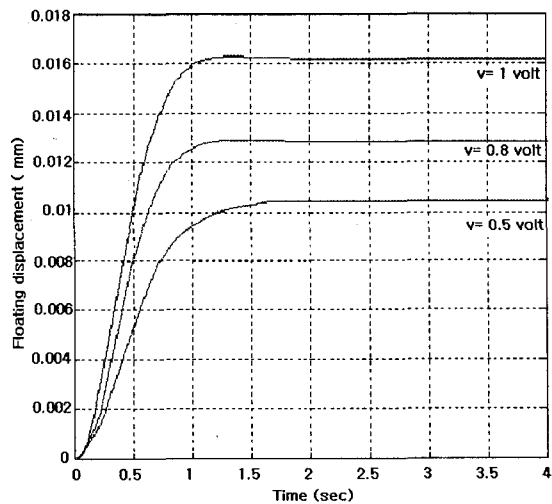


Fig. 4 Histories of floating displacement under servo valve input $v=0.5, 0.8, \text{ and } 1 \text{ volt}$

그림에서 압력의 변화 후에 부상체의 변위 상승이 발생하는 것은 부상체의 동특성에 기인한다. 부상체에서의 정착시간(settling time)이 다소 느림을 알 수 있으며 폐회로 제어를 통하여 이 시간을 줄이는 것이 가능함을 후에 기술한다. 또한 개회로 제어에서는 부상체의 무게에 따라 간극이 동일한 서보 밸브 입력 전압에서도 각기 다른 값을 가지게 된다. 이 또한 폐회로 제어가 필요하다는 당위성을 나타낸다.

3. 공압서보제어 시스템의 구성

Fig. 5는 실험과 모델링에 사용된 부상부의 실제 형상을 보여준다. 제작된 시스템은 2축 부상구조이고 양단의 변위를 측정하는 변위센서를 부착하였다. 변위 센서는 광센서의 자장의 영향을 배제하기 위하여 부상체 상부에서 PSD 센서를 사용하여 미소변위를 측정하게 구성하였다.

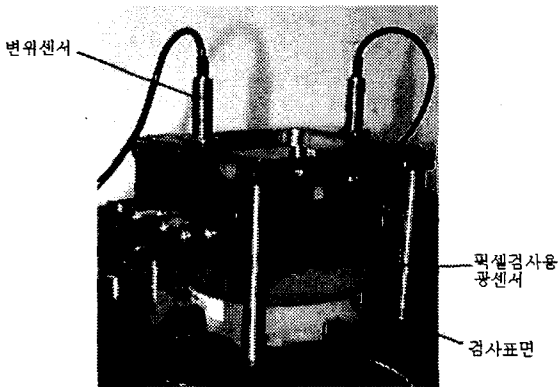


Fig. 5 Photo of the pneumatic floating part

Fig. 6은 공압 부상 서보 제어시스템의 회로도이다. y방향(수직방향)으로 픽셀 검사용 광센서가 평면 검사표면으로부터 미세 간극을 유지시키거나 수직 방향으로의 시변(time varying) 목표치를 추적하기 위한 공압 서보제어시스템의 구성을 보여준다. 부상 위치를 측정하기 위하여 2개의 변위 센서(gap sensor)와 2개의 압력센서(pressure transducers)가 부착되어 있다. 압력센서는 오리피스를 통과하기 직전의 공기의 압력을 측정하고 이 값을 제어기로 피드백(feed back) 시킨다.

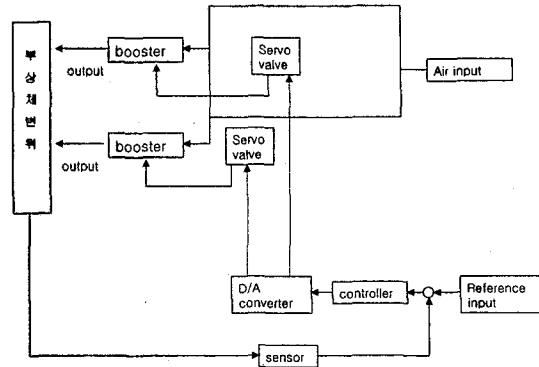


Fig. 6 Schematic diagram of pneumatic servo system for air gap control

서보 밸브를 통하여 분출되는 공기의 유량은 735g 정도 되는 물체를 직접 부상시키기에는 아주 작은 유량이므로 공기량 증폭기(pneumatic booster)를 사용하여 이 공기의 양을 증가시킨다. 이 유량 증폭기는 파일럿 밸브(pilot valve)를 통하여 밸브 스템(valve stem)을 작동시키며, 공기량은 이 밸브 스템에 의하여 조절되어 진다. 밸브 스템은 공기 유량 증폭기의 밸브로 작용을 하며, 밸브가 많이 열리면 즉 공기신호가 증가하면 밸브는 더욱 많이 열리게 되어 출력측의 공기의 양은 증가하게 되는 것이다.

서보밸브에 입력전압이 주어지면 서보밸브가 열리게 된다. 이 서보밸브를 통하여 유출되는 유량은 증폭기의 파일럿으로 작용된다. 다음으로 증폭기의 파일럿에 형성되는 압력에 의해 부스터의 포켓이 조절되어 대 유량을 형성시킨다. 본 시스템에서는 증폭기를 통과하는 유량은 좌우 부상체 별로 4개씩 분기된다. 오리피스를 통하여 유출된 유량은 공기막이 체적을 증가시키게 된다. 부상되어진 공기는 대기 중으로 방출되어지며 이 때 부상체가 부상되어지는 지점에서 고정면과 부상체 사이에는 약간의 공기막이 형성되어지며 이 공기막이 부상체의 간극이 된다. 한편 변위센서는 현재의 간극 위치를 입력받아 A/D 컨버터를 거쳐 컴퓨터로 입력시킨다. 부스터 이후부터 부상체 사이에 압력센서가 위치한다.

부상체 상부에 있는 CCD 카메라는 부상체의 바닥면에 장치한 광선 정반의 간섭무늬를 관찰하고 그 변화에 따라서 겹을 수동 또는 자동으로 조작하기 위하여 설치한 것이다. 간섭무늬의 변화를 통하

여 어떤 지점으로 기울어져 있는지 평탄도는 잘 되어있는지 등을 검사할 수 있으며 이를 통하여 좀더 정밀한 간극제어를 할 수 있다. 간섭무늬에 따른 간극과 회전량을 Fig. 7 에 정리하였다^[13]. 여기서 알 수 있듯이 상하 표면의 위치 및 표면의 편평도 별로 서로 다른 무늬가 나타남을 알 수 있다.

4. 실험 및 결과 고찰

Fig. 7에 있는 공압 서보제어 시스템으로 미세 간극제어 실험을 수행한다. 시스템제어의 블록선도를 Fig. 8에 표현한다.

제어기는 컴퓨터를 사용하였으며 컴퓨터에서 연산한 결과를 토대로 제어기에 제어 명령을 내리게 된다. 즉 컴퓨터에서 제어 프로그램을 통하여 제어량을 내리면 D/A 컨버터(converter)를 통하여 서보밸브에 지령전압이 입력된다. 이 때 서보 밸브를 통하여 부스터(booster)의 파일럿 밸브(pilot valve)에 입력된 공기는 밸브 시스템을 작동시킨다. 간극에 도달하며 변위 센서에 의하여 변위량이 측정되어지고, 측정된 변위는 A/D 컨버터(converter)를 통하여 입력된다. 피드백(feedback) 되어진 결과를 가지고 기준전압(reference voltage)과 비교하여 다시 명령을 입력하는 방식의 제어이다. 공기라는

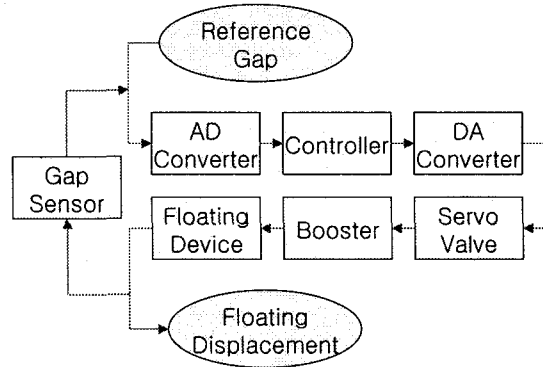


Fig. 8 Schematic diagram of control system

특수한 상황 하에서 공기와 관련된 파라미터(parameter)가 너무 많이 존재하며, 제어되는 동안 불안정한 요인이 발생하게 된다. 본 제어기는 시스템의 비선형 모델을 배제한 PID 제어로 제어 성능을 고찰하였다. 제어 프로그램의 샘플링 시간은 50ms로 하였다.

4.1 부상체의 중량, 압력 및 부상 간극의 관계

압력을 변화시키면서 부상체 중량과 간극간의 관계를 알아보기 위하여 정특성 실험을 수행하였다. 중량이 변화하여 일정한 압력 및 유량에서 최대의 부상할 수 있는 중량을 알아보기 위한 실험이다.

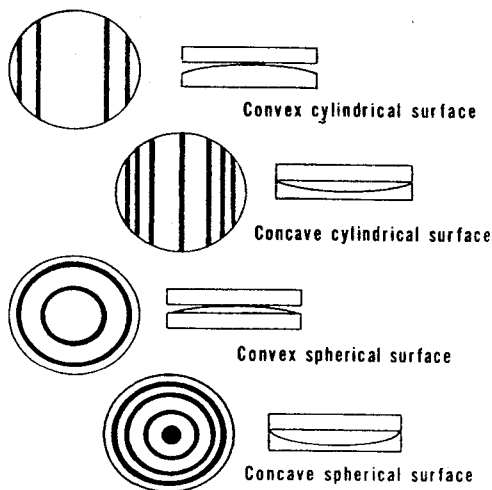


Fig. 7 Fringe patterns for variations of two surfaces

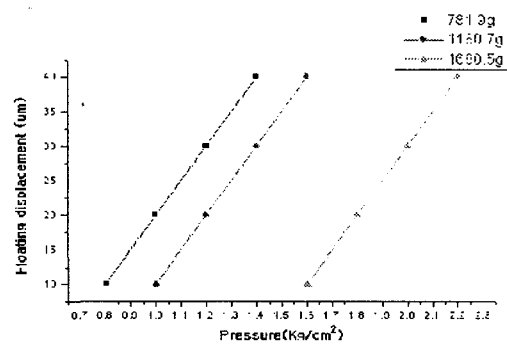


Fig. 9 Relationship of the displacement and pressure under the change of weight (orifice diameter 2mm)

Fig. 9의 실험은 1개의 서보 밸브를 사용하여 개루프(open loop)상태에서 입력을 변화시키면서 관찰한 그래프이다. Fig. 9에서 보듯이 30 μ m상태에서의 압력을 보면 781.9g 일 경우 약 1.2kg/cm² 압력이 소요되고, 1180.7g일 때 약 1.4kg/cm² 1680.5g 일 경우 약 2kg/cm²의 압력이 소요됨을 보였다. 이 실험을 통해 부상체 중량, 압력과 부상간극의 실험 결과 상호 비례관계가 있음을 알 수 있다. 추후 제어에서는 현재의 부상체 중량을 아는 경우 특정압력에서 부상간극을 알 수 있기 때문에 기준 부상간극을 정의하여 간극제어를 수행하게 된다.

4.2 서보밸브 입력전압과 부상과의 관계

Figs. 10과 11은 서보밸브의 입력 전압에 대한 압력과 부상간극을 실험한 그래프이다. 이 실험은 서보밸브의 특성을 알아보기 위한 실험으로 입력전압의 변화에 대한 유량의 변화 및 이에 따른 간극을 알아보기 위한 실험이다. 그래프에서 알 수 있듯이 약간의 곡선을 보이며 증가하지만 전반적으로는 비례적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

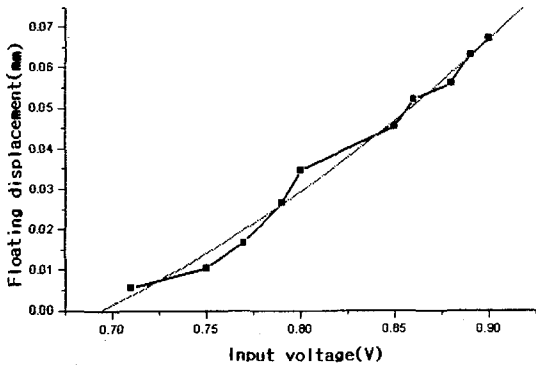


Fig. 10 Relationship between input voltage and floating displacement

전압의 증가에 따라서 밸브의 유량은 증가하며, 이때 Fig. 11에서 보여지듯이 입력전압의 변화에 따른 압력의 변화 역시 비례적으로 움직이고 있음을 관찰할 수 있다. 실험에서 알 수 있는 것처럼 압력과 입력 전압과의 비례관계를 적용 할 수 있다. Fig. 10은 입력 전압에 따른 변위 변화는 그래프에 나타난 것과 같이 비례적으로 변화함을 알 수 있다. 서보 밸의 작동은 약 0.5V 이상부터 동작하기

시작한다. 사용한 오리피스 경 (orifice diameter)은 3mm를 사용하여 측정하였다.

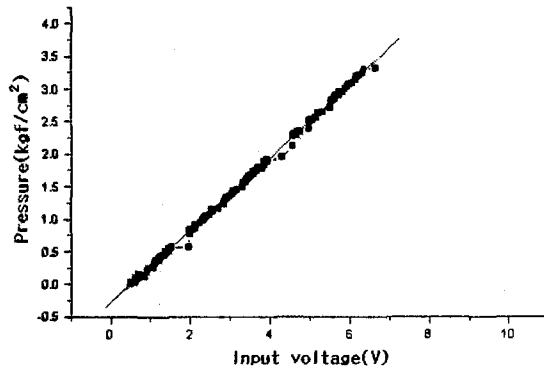


Fig. 11 Relationship between input voltage and pressure

4.3 압력과 변위의 관계

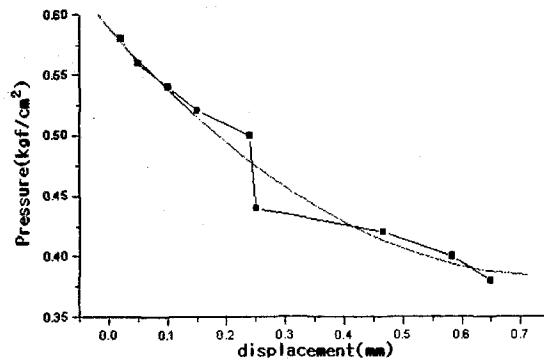


Fig. 12 Relationship between pressure and flapper displacement

Fig. 12의 그래프는 735g의 부상체를 대상으로 실험하여 구한 변위와 압력과의 관계를 나타낸 것이다. 위에서 언급한 것처럼 압력이 증가하면 간극은 비선형적으로 감소한다. 실험치를 곡선적합(curve fitting) 하면 다음과 같은 관계를 가진다.

$$Y = 0.58927 - 0.55111X + 0.36941X^2 \quad (20)$$

Y : 압력센서의 전압

X : 간극센서의 변위

플래퍼의 간극이 증가하면 공기가 유출되는 부피가 증가하여 노즐의 압력은 감소하게 되며 압력과 간극과의 관계는 비선형성을 가지는 것을 알 수 있다.

4.4 압력제어를 통한 부상 시스템

피드백 제어에서 압력을 피드백하여 일정한 압력을 유지하도록 제어한다. 일정한 압력이 유지되면 4.3절에서 언급한대로 압력과 간극사이의 정특성에 근거하여 일정한 간극을 유지한 것으로 판단한다.

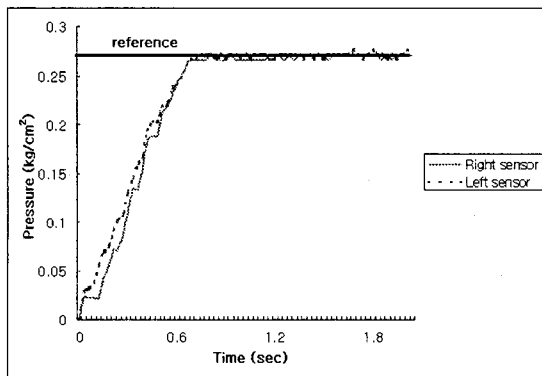


Fig. 13 Histories of the pressure control with PID control

Fig. 13은 각각의 게인을 적절히 조절을 한 상태의 시스템 응답곡선이다. 우측 서보 밸브 입력 게인(P gain : 1.5, I gain : 0.03, D gain : 0.03), 좌측 서보 밸브 입력 게인(P gain : 2, I gain : 0.03, D gain : 0.03)으로 각각의 게인을 조정하였다. 시스템은 안정적으로 목표에 도달하는 것을 관찰할 수 있다. 이때의 부상 높이는 약 60 μ m이다. 여기서 부상간극은 일정 부상질량에 대한 압력과 간극과의 특성(Fig. 9)으로부터 유도 할수 있다. 압력제어를 수행할 경우 압력센서는 자기장을 발생시키지 않으므로 픽셀 검사용 광센서에 효율적으로 적용될 수 있다. 그러나 압력제어는 부상체의 무게가 변하거나 오리피스 크기가 변하는 등 외부의 변화가 발생할 경우 또 다른 정특성 실험을 수행하여 압력과 간극과의 관계를 찾아야 한다. 이 점은 압력제어의 한계이며 따라서 변위제어가 경우에 따라서는 더 효율적일 것이다.

4.5 변위제어

여기서는 변위 센서를 이용하여 간극의 양을 직접 입력받아 피드백(feedback) 하도록 하였다. 변위 센서의 경우 입력 전압의 변동에 상당히 민감하게 반응한다. 센서가 정전 용량형이어서 전원 입력에 전압이 불안정하게 변동하면 센서의 값 또한 불안정하게 변화하게 된다. 사용된 센서의 정밀도는 상당히 높은 편이다. 1 μ m정도의 변위 변화를 측정할 수 있다. 그러나 압력센서에 의한 압력제어 방법은 부상체의 질량 정보를 제어기에 알려 주어야하고 공급 공기유량의 변화가 발생하면 정해진 간극과 압력사이의 관계가 변하게 되어 정확한 부상간극을 보장하지 못할 수 있다. 따라서 변위 센서에 의한 직접 제어 방식이 보다 현실적이라고 판단된다. 단지 변위 센서의 자기장 영향을 가능한 한 배제시켜야 한다는 전제가 필요하다. 시스템의 응답사양은 부상간극 68 μ m, 정착시간 < 2 sec, 최소 과도응답(overshoot) 등이다. Fig. 14에서는 제어 게인이 잘 조절된 결과를 보여주며 응답사양을 만족하는 것으로 나타난다.

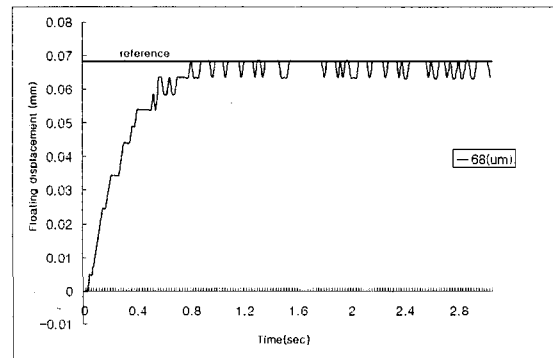


Fig. 14 A history of floating displacement with PID (P gain : 10, I gain : 0.002 D gain : 0.0003)

Fig. 14는 68 μ m 도달하도록 명령을 준 경우의 응답곡선이다. 약간 값이 튀는 부분은 변위 센서의 측정값을 A/D 변환하는 과정에서 A/D 컨버터에 잡음에 기인한 것으로 판단되나 이 값은 미소한 값에 가까우므로 무시하여도 좋다. 실제 사용한 변위 센서는 1 mm 까지 측정되는 센서이므로 실험에서 나타난 5 μ m (peak to peak)는 상당히 미세한 값이므로 잡음이 발생할 여지가 높다. 사용된 A/D 컨버터

는 10 비트용으로 정밀도가 약 $1 \mu\text{m}$ 이므로 $5 \mu\text{m}$ 정도의 값은 A/D 컨버터의 오차로 볼 수 있다. 그리고 이와 더불어 변위 센서 자체에서 잡음이 생길 여지가 있다. 실험에서는 변위 센서 신호를 50 Hz 저주파 필터를 가진 내장형 신호증폭기를 사용하여 처리하였다. 공기의 응답성을 고려하면 제어 값에 도달하는 시간은 조금 느리지만 정확히 제어 값에 도달하고 있다.

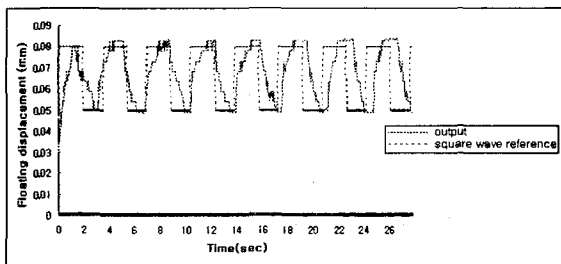


Fig. 15 A history of floating displacement by PID control with a periodical reference

Fig. 15는 부상하는 변위의 높이를 $50\sim 80\mu\text{m}$ 를 반복적으로 동작하도록 하여 얻은 결과이다. 응답 곡선에서 보듯이 $40\sim 80\mu\text{m}$ 가 제어되지만 좀더 높이 부상되어진 부분도 발생을 한다. 반복적인 부상 변위의 변화 동작에도 제어는 잘 되어짐을 보인다. 센서부분의 노이즈(noise)는 저주파 필터(low pass filter)를 통과 시켜 제거하였으나 아직도 센서의 노이즈는 남아 있지만 불 실제 시스템은 적절한 제어 성을 보인다.

4.6 200g의 외란을 가한 경우

Fig. 16은 735g의 부상체에 추가로 200g의 중량을 약 2초 정도 가하고 제거한 후의 기준 간극의 추종성을 관찰한 결과이다. 외부 부하의 변동이 발생을 하여도 시스템은 바로 목표 변위로 복귀한다. 이 실험을 통하여 PID제어가 본 시스템에서는 적절한 계인 선택을 통해서 우수한 제어성능을 가짐을 알 수 있다.

이 경우에 압력제어를 수행할 경우 새로 추가된 질량에 대해 압력과 간극의 정특성 실험을 다시 해야한다. 이를 근거로 목표간극에 대한 압력값을 기준입력으로 하여 압력제어를 수행한다.

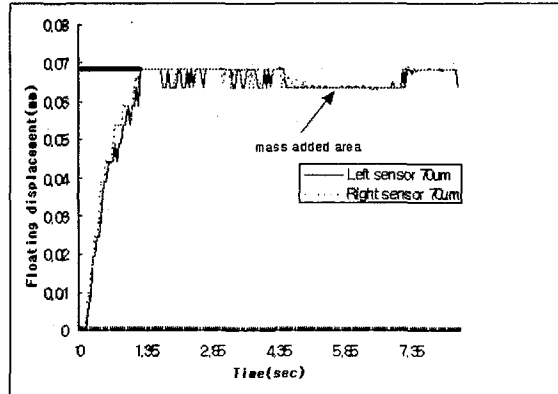


Fig. 16 A history of floating displacement by PID control with adding 200g mass

4.7 2축 제어 실험

Fig. 17은 부상체 양단에 동시에 같은 입력을 가했을 경우의 간극의 출력 값이다. 기준값은 $48\mu\text{m}$ 로 입력하였다. 하나의 공급라인에서 2개로 분기하였으므로 유량은 1/2로 분기된 상태이다.

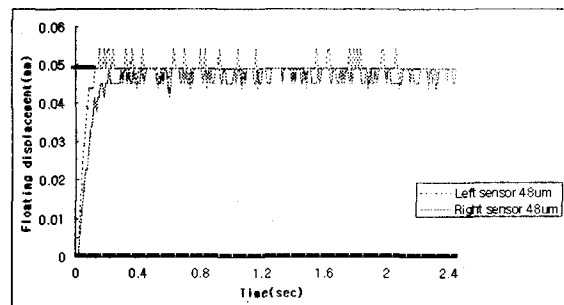


Fig. 17 Histories of floating displacement by PID control for 2 axes levitation

측정결과에 의하면 양쪽 모두 같은 기준값으로 했음에도 약간의 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 검사면(detection area)이 완전히 정밀하게 제작되지 못하였기 때문이다. 검사 면이 균일한 평면으로 가공되어 있다면 균일한 곡선이 그려질 것이다.

Fig. 18은 $100\mu\text{m}$ 에 도달하도록 명령을 준 상태이다. 이 경우 역시 $48 \mu\text{m}$ 를 기준으로 하여 제어한 경우와 유사한 제어성능을 가짐을 알 수 있다.

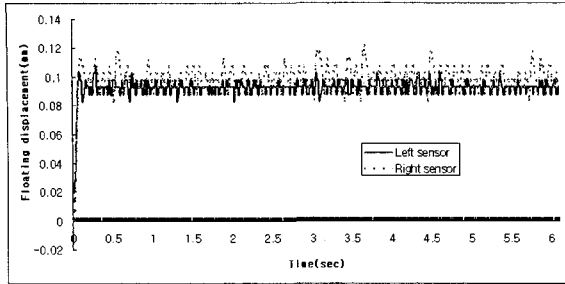


Fig. 18 Histories of floating displacements by PID control for 2 axes levitation

5. 결론

공압 서보시스템을 이용한 미세 간극 제어시스템을 구현하였으며, 이를 통하여 통상적인 마이크로 스텝핑 모터 또는 압전소자를 사용하는 경우의 한계점을 극복할 수 있었다. LCD 표면이 일정하지 않을 경우에도 픽셀 검사용 광센서가 작동하여야 하므로 매 픽셀위치마다 동일한 간극을 유지하여야 한다. 이를 위한 방안으로 부상 간극을 직접 측정하여 제어하는 방식과 압력을 측정하여 간접적으로 부상간극을 제어하는 압력제어 방식을 소개하였다. 압력제어 방안은 제어 LCD 표면을 측정하고자 하는 광센서에 전기장 등의 영향을 주지 않으므로 압력제어가 효과적임을 할 수 있다. 그러나 압력센서의 값은 공급압력 또는 부상체 무게가 변할 경우, 압력과 간극의 관계의 함수 또는 룩업테이블(look-up table)을 통하여 간극에 대한 압력의 상관값을 보정하여 주어야 하는 단점이 있다.

다음으로 변위 센서의 값을 직접 측정하여 제어하는 경우 간극제어의 효율이 증대되어진다. 변위 센서를 이용하여 제어 할 경우 간극의 변화량을 직접 알 수 있으므로 압력제어 보다는 제어 효율성이 더 큼을 알 수 있었다. 그러나 이 경우 변위 센서의 자기장의 영향이 광센서에 미칠 수 있으므로 설치에 신중을 기해야 한다.

2축 제어를 통해 부상체를 좌우에서 각기 다른 간극을 지정함으로써 부상체의 틸팅(tilting)을 가능하게 할 수 있으며, LCD 표면의 변화에 따라 부상체의 LCD 표면으로부터의 일정간극 유지와 일정방향으로의 경사를 형성하여 픽셀검사용 광센서가 정확히 반응하도록 할 수 있다.

후 기

이 논문은 서울산업대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Feng, G., "Position Control of a Stepper Motor using Neural Networks," Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 2, pp. 1766-1769, 2000.
2. Gao, P., Tan, H., and Yuan, Z.J., "The design and characterization of a piezo-driven ultra-precision stepping positioner," Measurement Science & Technology, Vol. 11, No. 2, pp. 15-19, 2000.
3. Chang, S.H., Tseng, C.K., and Chien, H.C., "An ultra-precision XY theta(Z) piezo-micropositioner-Part I: Design and analysis," IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, Vol. 46, No. 4, pp. 897-905, 1999.
4. El Hajjaji, A., and Ouladsine, M., "Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 48, No. 4, pp. 831-838, 2001.
5. Lin, C.S., Lay, Y.L., Chen, P.W., Jain, Y.J., and Chen, S.W., "The laser displacement measurement with feedback control in a magnetic levitation and suspension system," Computer Methods in applied Mechanics & Engineering, Vol. 190, No. 1-2, pp. 25-34, 2000.
6. Virvalo, T., "On the Motion Control of Pneumatic Servo Cylinder Drives," Proceedings of the Fourth International Conference on Motion and Vibration Control, Vol. 2, pp. 733-738, 1998.
7. Bashir, M., Nouri, Y., Al-Bender, F., Swevers, J., Vanherck P., and Brussel, H.V., "Modelling a Pneumatic Servo Positioning System with Friction," Proceedings of the 2000 American Control Conference Vol. 2, pp. 1067-1071, 2000.
8. McGlone, P., McGhee, J., and Henderson, I.A., "Performance Evaluation of a Differential Pressure Cell Model, " IEEE Transactions on Instrument and Measurement, Vol. 47, No. 5, pp. 1271-1276,

- 1998.
9. Ben-Dov, D., and Salcudean, S.E., "A Force-Controlled Pneumatic Actuator," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 11, No. 6, pp. 906-911, 1995.
 10. Merrit, H.E., "Hydraulic Control Systems," John Wiley & Sons, New York, 1967.
 11. Servo valve and booster Catalogue, <http://www.proportionair.com/> Proportion-Air ltd. 2001.
 12. 박상덕, 정규원, 염영일, "Fuzzy Rule을 이용한 공압 서보 제어 알고리즘의 개발," 한국자동 제어학술회의논문집 (KACC) pp. 1127-1132, 1991.
 13. Edmund Scientific Co., "Optical Techniques for Measuring Flatness," 1971.
 14. 노철하, 김영식, "정밀위치제어를 위한 공압 피스톤의 미소변위 이송방법 및 혼합제어 알고리즘 개발," 한국정밀공학회, 제18권, 제7호, pp. 40-45, 2001.