

압전소자를 이용한 정밀 액츄에이터의 구동특성 평가

김상채, * 김수현, ** 박기환, *** 곽윤근**

Evaluation on the Driving Characteristics of a Precise Actuator Using Piezoelectric Elements

S. C. Kim, * S. H. Kim, ** K.H. Park, *** Y. K. Kwak**

ABSTRACT

A prototype of a linear piezoelectric actuator is developed, and its dynamic behaviors are investigated. The actuator consists of a driving tip with two stacked piezoelectric elements and a slider. Dynamic characteristics of slider over various vibration loci of the driving tip and changes of normal force acting on the vibratory tip are examined through experiments. The moving direction of slider can be controlled by changing a phase angle between input signals applied to piezoelectric elements. A change of phase difference between input signals also have a great influence on the vibration locus of driving tip. Changes of slider motion due to different vibration loci are examined by experiments.

Key Words : Piezoelectric element(압전소자), Actuator(액츄에이터), Driving tip(구동선단), Vibration locus(진동궤적), Phase angle(위상각)

1. 서론

최근들어 구동영역은 수 mm에서 수 cm정도, 최소 위치정밀도는 0.01~0.1 μ m 를 필요로 하는 반도체 제조장치용 위치기구의 경우와 같이 구동영역에서 고정밀도를 요구하는 액츄에이터에 대한 필요가 급증하고 있다. 기존의 형태는 큰변위 위치결정과 정밀 위치결정을 수행하는 두개의 액츄에이터를 병행하여 사용하고 있으나 구조나 구동이 복잡해지는 단점이 있었다. 이러한 이유

로 고정밀 위치분해능을 가지고 있는 압전소자를 이용하여 구동영역과 위치정밀도의 두가지 요건을 충족시키는 간단한 구조의 변위 발생 메카니즘 연구에 관심이 집중되고 있다. 이러한 액츄에이터는 반도체 제조장치, 초정밀 가공기계, 정밀 계측장비, 의료기기 등에서 초정밀 구동이 필요한 부분에 적용이 가능하다.

위에 언급한 압전소자를 이용한 액츄에이터의 구동방식은 공진형과 비공진형으로 크게 대별할 수 있으며 비공진형이 공진형에 비하여 구조와 구동방법이 간단하다

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

*** 광주과학기술원 기전공학과

고 할 수 있다. 공진형 액츄에이터는 공진이 되는 대상에 따라서 유도선로 또는 슬라이더 공진 방식으로 다시 나뉘어진다. 유도선로의 공진방식은 압전 진동자가 선로를 한쪽 단(端)에서 가진하여 진행파를 발생시키고 다른 한쪽 단에서는 진행파 형태로 전달되는 에너지를 흡수하는 구조로 되어 있고 슬라이더는 진행파에 접촉하여 움직이게 된다. 이러한 형태의 선형 액츄에이터는 일반적으로 복잡한 구조이고 크기도 커지게 된다. (1) (2), (3)

유도선로대신 굽쇠 형태의 슬라이더를 공진시켜 이동시키는 방식에서는 가진 주파수를 변경하여 진행 방향을 바꾸게 된다. 이러한 유형에서는 양쪽 굽쇠다리의 고유 진동수를 서로 다르게 설계하여야 하는 점과 이동 특성에 중요한 영향을 주는 굽쇠다리 끝의 진동궤적을 임의로 변화시킬 수 없는 단점이 있으며 가진 주파수도 굽쇠다리의 고유 진동수에 동일하게 맞춰야 하는 문제점이 있다. (1), (4)

비공진형 액츄에이터에 대한 연구는 H. Okamoto가 적층형 압전소자와 바이몰프형(bimorph type)의 압전소자를 이용한 접촉 구동방식의 액츄에이터를 제안하여 각 방식의 성능을 대기중과 수중에서 비교하였다. (5) 특히, 비공진형 액츄에이터는 특별한 유도선로가 필요하지 않으며 다양한 유형의 운동 특성이 가능하다는 점에서 많은 장점이 있고 소형화하는 데에도 구조적으로 유리하다.

비공진형 액츄에이터에서 A. Endo는 적층형 압전소자를 2차원 구조로 배열하여 구동선단(驅動先端; driving tip)의 진동궤적이 다양하게 변화될 수 있음을 실험적으로 확인하고 이를 선형 초음파 액츄에이터에 이용하였다. (6) 그러나 위와 같은 연구들은 구동선단의 진동궤적을 발생시켜 이를 직진 구동형 액츄에이터에 이용하였으나 구동선단의 진동궤적과 가동부의 운동 특성에 대한 관계에 대해서는 자세한 연구가 이루어지지 않아 실험 결과나 평가가 없는 상태이다.

이 논문에서 제시된 액츄에이터는 본 연구팀이 설계, 제작한 것으로 두개의 압전소자가 수직하게 배치된 구동선단에 다양한 진동궤적을 발생시켜, 접촉되어 있는 슬라이더에 정밀한 직선 운동을 발생시키는 구조로 되어 있다. (7)

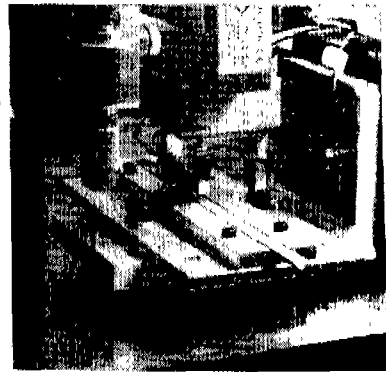
본 논문에서는 액츄에이터의 운동 특성에 영향을 주는 구동선단의 진동궤적 형태와 구동 입력신호의 관계에 영향을 주는 인자를 실험을 통하여 조사하고자 한

다. 아울러 슬라이더에 접촉되어 있는 구동선단의 진동궤적 형태에 따른 슬라이더의 운동특성의 변화를 실험적으로 조사하며, 슬라이더와 구동선단 사이 접촉부의 수직하중 변화가 슬라이더의 운동 특성에 어떠한 영향을 주는지에 대하여도 규명하고자 한다.

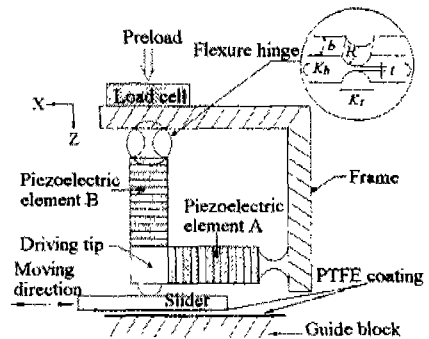
2. 정밀 액츄에이터의 구조 및 구동 원리

2.1 정밀 액츄에이터의 구조

Figure 1(a)는 본 연구에서 제작한 정밀 액츄에이터이고, Fig. 1(b)는 각 부의 구성을 나타내는 개략도이다. 이 액츄에이터는 압전소자와 몸체를 연결하는 탄성관절, 직각으로 배열한 압전소자, 그리고 압전소자의 교차 지점에 부착된 반구형(半球型)의 구동선단이 구동



(a) Photograph of the precise actuator



(b) Schematic diagram

Fig. 1 Schematic diagram of the precise actuator

부를 형성한다. 가동부인 슬라이더(slinder)는 V홈 형태의 안내면(guide-block)을 따라 직선운동을 하도록 되어 있고, 슬라이더와 반구형 구동선단 사이의 수직력(vertical force)을 측정하기 위해서 로드셀(load cell)을 부착하였다.

구동부에 이용된 압전소자는 적층형으로 단면이 5mm × 5mm, 길이가 9mm이고 Tokin사 제품이다. 이 압전소자의 최대 구동전압은 100V로 외부하중이 없는 상태에서 자유단(free end)의 최대 변위는 6.5μm이다. 탄성관절은 구동부를 구성하는 압전소자의 자유로운 변위 발생을 위하여 필요하며, 형태는 Fig. 1(b)와 같은 회전관절을 선택하였다. 이때 비틀림 스프링상수는 $K_t = (2Ebt^{5/2})/9\pi\sqrt{R}$, 선형 스프링상수 $K_s = Eb/(\pi\sqrt{R}l) - 2.57$ 로 표시할 수 있다.⁽⁸⁾ 탄성관절은 수직력에 의한 좌굴(buckling)이 일어나지 않도록 두께(t)는 0.4mm, 폭(b)은 5mm로 하여 비틀림 스프링상수는 4.5(N·m), 선형 스프링상수는 충분히 큰 값인 1.9×10^{10} (N·m)로 설계하였다. 수평 압전소자 A에 최대 전압 100V가 가해졌을 때에 수직 압전소자 B에 가해지는 힘의 발생은 0.062(N)으로 작아서 수평 압전소자의 변위 발생에 방해가 되는 저항력을 주지 않는다. 또한 선형 스프링상수는 대단히 크므로 수직력에 의한 변형은 거의 발생하지 않는다.

슬라이더 상하 양면의 마찰계수를 다르게 해주기 위해서 V홈 안내면과 슬라이더 밀면에 15μm의 두께를 갖도록 건성 피막 윤활제인 불소수지(PTFE: polytetrafluoroethylene)를 코팅하였다. 피막된 재료는 불소수지 파우더가 유기 용제중에 분산되어 있는 도료로 마찰계수를 아주 작게 하여 주는 윤활제 역할을 한다.

2.2 구동 원리

슬라이더는 구동선단과 슬라이더 윗면 사이의 마찰력과 슬라이더 밀면과 V홈 안내면 사이의 마찰력 차이로 이동하게 되어 있다. 슬라이더 윗면에 작용하는 최대 마찰력은 밀면의 최대 마찰력보다 항상 크며 상하면의 마찰력차에 따라 슬라이더의 운동 특성이 변화하게 된다.

슬라이더 이동은 구동선단의 규칙적 반복운동에 의하여 이루어진다. 압전소자 각각에 가하는 입력신호는 구동선단의 궤적을 결정하게 된다. 구동선단이 슬라이더에 접촉하면 구동선단 궤적의 수평변위 성분은 슬라이더의 직진 운동에 기여하고, 수직변위 성분은 슬라이더

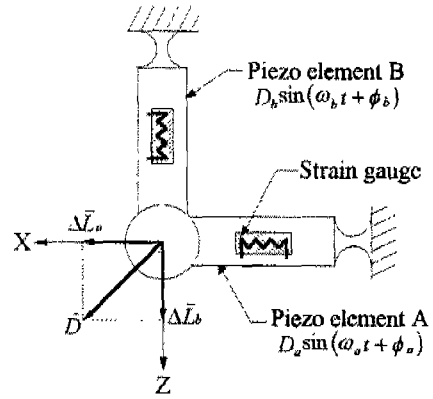


Fig. 2 Construction of driving tip

에 가해지는 수직력을 변화시키게 된다.

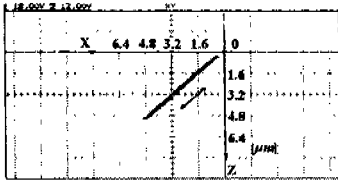
Figure 2는 구동선단의 구성을 나타낸 그림이다. 스트레인 게이지는 압전소자 자체의 발생변위를 측정하기 위하여 수직으로 배치된 압전소자 각각의 표면에 부착하였다. 두개의 스트레인 게이지에 의해 발생변위의 교점인 구동선단의 진동궤적을 계산할 수 있었다.

첫번째 유형은 압전소자 A, B에 사다리꼴 형태의 구동전압을 가하여 생성시키는 진동궤적으로 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 자벌레(Inch worm)형태 선형 액츄에이터의 입력신호로 슬라이더를 압전소자 B로 힘을 가한 상태에서 압전소자 A로 끄는 형식의 사각형 궤적이 구동가능 신호인지를 확인하기 위해 사다리꼴과를 입력신호로 사용한다. 사다리꼴 궤적의 최대 전압은 80V, 전압 상승 및 강하 시간은 0.85msec로 동일하고, 주파수는 300Hz이다.

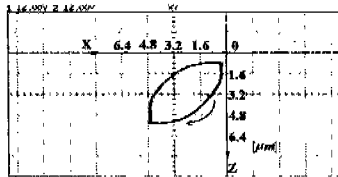
실험적으로 조사한 두번째 유형은 구동선단 운동이 타원 궤적을 형성하는 경우이다. 타원형 운동은 선형, 회전 초음파 액츄에이터의 슬라이더와 구동면 사이에서 발생되어 구동 마찰력을 일으키는 궤적 형태이다. 압전소자 A, B에 진폭과 위상의 차이가 있는 정현파를 가하였을 때 각 압전소자에 발생하는 변위(ΔL)는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta L_a(t) &= D_a \sin(\omega_a t + \phi_a) + D_o \\ \Delta L_b(t) &= D_b \sin(\omega_b t + \phi_b) + D_o \end{aligned} \quad (1)$$

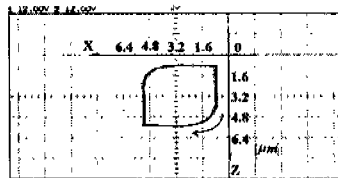
윗 식에서 D_a , D_b 는 압전소자 A, B에서 발생하는 정현파 변위의 진폭을 나타내고, D_o 는 압전소자 구동 오프셋(offset) 전압에 의해 발생하는 오프셋 변위이다. ω, ϕ 는 압전소자에 가해지는 구동신호의 주파수와



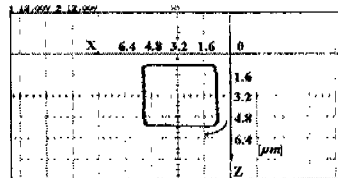
(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 30^\circ$



(c) $\theta = 60^\circ$



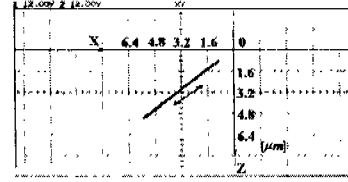
(d) $\theta = 90^\circ$

Fig. 3 Vibration loci of driving tip
(trapezoidal signals are applied, $\theta = \phi_b - \phi_a$)

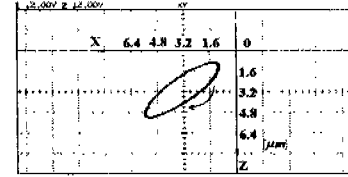
위상각을 나타낸다. 압전소자 A가 X축 변위, 압전소자 B가 Z축 변위를 발생시켜 구동선단은 식(2)와 같은 궤적을 발생시키게 된다. \vec{D} 는 압전소자 A, B의 변위 합성으로 구동선단의 진동궤적을 나타낸다.

$$\vec{D} = \begin{cases} \sqrt{\{D_a \sin(\omega_a t + \phi_a) + D_0\}^2 + \{D_b \sin(\omega_b t + \phi_b) + D_0\}^2} \\ \angle \tan^{-1} \left(\frac{D_b \sin(\omega_b t + \phi_b) + D_0}{D_a \sin(\omega_a t + \phi_a) + D_0} \right) \end{cases} \quad (2)$$

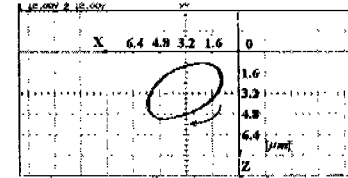
주파수가 동일하고 위상각이 90° 차이가 나는 구동신



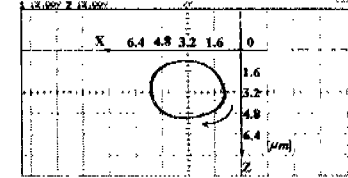
(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 30^\circ$



(c) $\theta = 60^\circ$



(d) $\theta = 90^\circ$

Fig. 4 Vibration loci of driving tip
(sinusoidal signals are applied, $\theta = \phi_b - \phi_a$)

호를 가하면 구동선단의 진동궤적은 각 압전소자의 최대 신장 변위를 장축과 단축으로 하는 타원이 된다. 수직으로 배치된 압전소자에 가하여지는 정편파 구동신호의 진폭, 주파수, 위상을 조절함으로써 구동선단의 운동을 다양하게 변화시킬 수 있으며 이에 따라 슬라이더 운동 특성인 방향, 속도, 이동거리도 효과적으로 제어할 수 있게 된다.

본 연구에서는 동일한 진폭과 주파수를 가지나 위상차가 있는 구동신호를 압전소자에 가하여 구동선단에

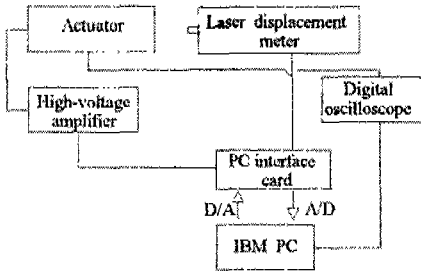


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

여러 가지 형태의 진동궤적을 발생시키고 이에 따른 슬라이더의 운동 특성을 분석하였다. Figure 4는 정현파 구동전압이 압전소자에 가하여 진 경우, 두 압전소자에 가한 정현파 입력신호의 위상각 차이 θ 에 따라서 구동선단의 진동궤적을 측정된 결과이다. 이 그림에서 화살표는 진동궤적의 운동 방향을 나타낸다.

3. 구동 실험

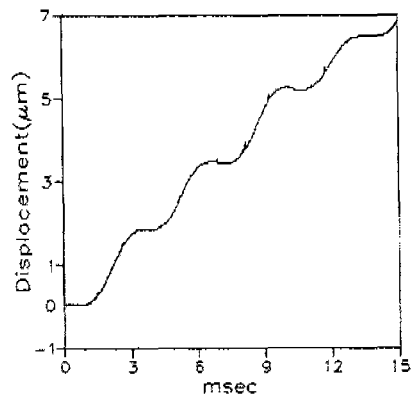
정밀 액츄에이터의 구동 실험을 위하여 Fig. 5와 같이 실험 장치를 구성하였다. 압전소자 구동시 움직이게 되는 슬라이더의 이동거리를 정밀하게 측정하기 위해서 분해능이 $0.05\mu\text{m}$ 인 laser displacement meter를 사용하였다. 슬라이더의 이동방향과 같은 일직선상에 떨어지게 위치시킨 후 이동을 측정하였다. 압전소자에 가하는 최대 전압폭(V_{pp})은 40V, 60V, 80V로 변화시키고, 주파수는 300Hz인 정현파 입력신호와 사다리꼴 입력신호를 사용하였다.

두 압전소자에 가한 전압의 형태와 입력신호간의 위상차 $\phi_2 - \phi_1$ 에 따른 슬라이더 운동 특성의 변화는 Fig. 6, Fig. 7과 같다. 단위주기당 슬라이더의 순이동 변위는 구동선단이 슬라이더를 이동방향쪽으로 밀어주는 변위와 구동선단이 이동방향과는 반대쪽으로 복귀할 때 끌어 당기는 변위의 차이가 된다.

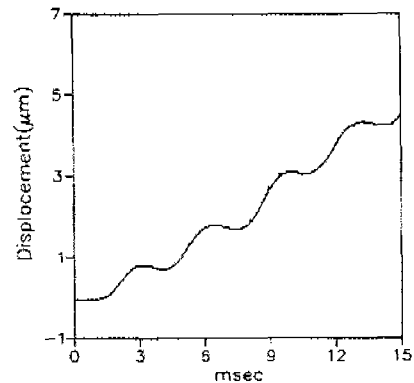
정현파 입력신호일 때 슬라이더의 이동특성은 Fig. 6과 같이 단위 주기 내에서 후퇴 변위의 양이 적어 순이동 변위가 커짐을 볼 수 있고 따라서 전체적으로 부드러운 진전 운동이 발생됨을 알 수 있다. 또, 위상차는 60° 경우가 90° 경우보다 평균 이동속도가 약 50% 정도 증가됨을 알 수 있다. Figure 7은 사다리꼴 입력

신호일 때 슬라이더의 이동특성을 나타낸 실험 결과로 Fig. 6의 결과와는 크게 다른 양상을 보여준다. 특히, 동일한 위상각 차이를 갖는 Fig. 6의 경우와 비교하면 단위 주기내에서 후퇴 변위의 크기가 증가되어 평균 이동속도가 정현파 구동신호에 비하여 크게 낮아지는 것을 알 수 있다. 사다리꼴 입력신호의 경우에 위상각 차이가 90° 로 증가되면 Fig. 7(b)에서 볼 수 있는 것처럼 후퇴 변위가 더욱 증가하여 슬라이더의 운동 방향이 바뀌고 있는 것을 알 수 있다.

구동신호가 정현파일 경우 위상차가 90° 이면 구동선단이 시계 방향으로 Fig. 4(d)와 같은 진동궤적을 생



(a) Phase angle difference $\phi_2 - \phi_1 = 60^\circ$

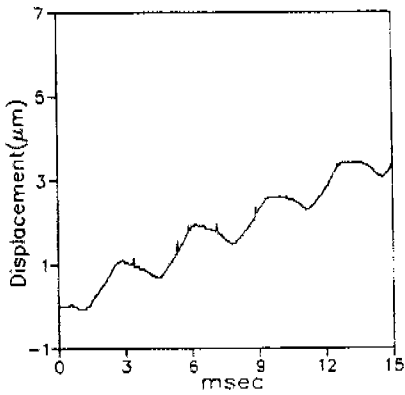


(b) Phase angle difference $\phi_2 - \phi_1 = 90^\circ$

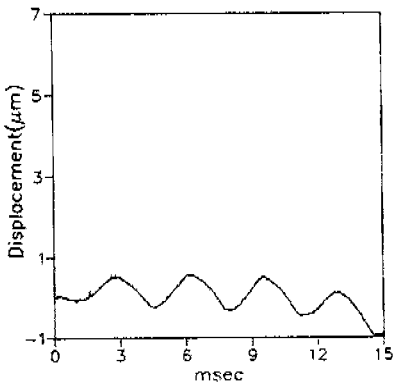
Fig. 6 Translational motion of slider with sinusoidal input (preload 0.5N, $V_{pp}=40\text{V}$, input frequency 300Hz)

성하여 슬라이더를 전진시키고, 위상각 차이가 270° 이면 위상각 차이가 90° 인 경우와 반대 방향으로 진동계적이 생성되어 슬라이더를 역방향으로 움직이게 된다. 구동선단 진동계적의 움직임이 슬라이더의 원하는 구동 방향 쪽으로 갈 때는 접촉하고 역방향으로 돌아올 때 분리된다면 슬라이더의 순이동거리가 최대로 될 것이다. 그러나 구동선단이 슬라이더에서 분리되어 있는 순간에 외부하중에 의해서 슬라이더가 움직이기 때문에 외부하중에 의한 슬라이더의 미끄러짐을 방지하기 위해서는 구동선단과 슬라이더가 항상 접촉되어 있어야 하며 마찰력을 발생시키기 위한 일정한 수준의 초기하중

(preload)이 필요하게 된다. Figure 8은 구동선단과 슬라이더 접촉부 사이의 수직력을 0.2(N)씩 증가시키면서 슬라이더의 전후진 운동 특성을 측정 한 것이다. 표시된 변위는 구동선단의 진동계적이 20사이클 반복된 후 슬라이더의 총이동거리를 실험에 의하여 구한 것이다. 수직력은 Fig.1에서 볼 수 있는 것처럼 구동선단이 부착된 프레임의 높낮이를 마이크로미터로 조절하고 이때의 수직력을 연결된 로드셀로 측정하였다. Figure 8(a)에서 보는 것과 같이 수직력이 증가함에 따라서 이동거리가 감소하고 2(N)이상의 수직력이 가해지면 이동거리의 변화가 거의 없을 뿐 아니라 순이동거리도 크

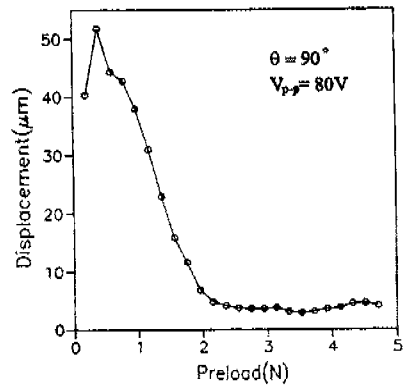


(a)Phase angle difference $\phi_b - \phi_s = 60^\circ$

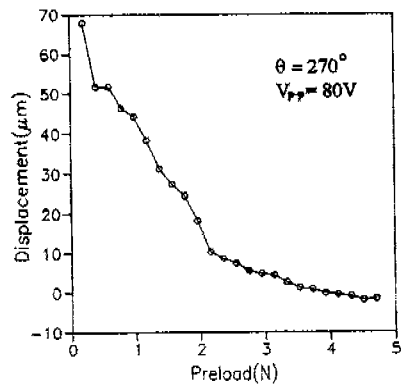


(b)Phase angle difference $\phi_b - \phi_s = 90^\circ$

Fig. 7 Translation motion of slider with trapezoidal input (preload 0.5N, $V_{pp}=40V$, input frequency 300Hz)



(a)Forward

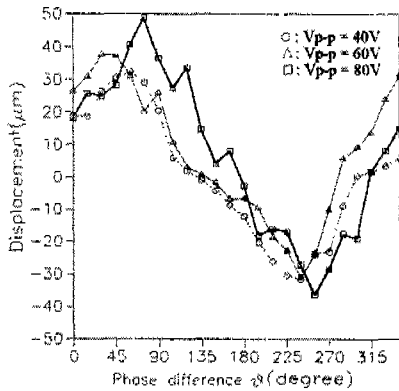


(b)Backward

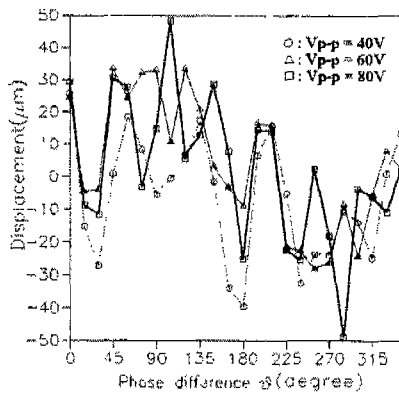
Fig. 8 Effect of preload on the displacement of slider (300Hz, after 20cycles, sinusoidal input)

게 줄어드는 것을 알 수 있다. 반대 방향의 이동도 유사하다. Figure 8(b)는 역방향의 순이동거리 변화를 나타낸 것으로 유사한 결과를 보여주고 있다.

압전소자에 가하는 입력신호의 위상각 차이에 따른 슬라이더의 이동특성을 자세히 조사하기 위해서 정현파와 사다리꼴 형태의 구동신호 각각에 대하여 압전소자 구동신호의 위상차이를 15°씩 변화시키면서 실험을 수행하였다. Figure 9(a)와 같이 정현파의 구동신호에 대해서 이동거리의 형태는 두 입력신호의 위상차이에 따라 크게 변화됨을 알 수 있다. 그러나 구동전압의 크기에 따른 이동특성의 변화는 많지 않음을 보여주고 있



(a) Sinusoidal input signals



(b) Trapezoidal input signals

Fig 9 Effect of phase difference on the displacement (preload : 0.5N, 300Hz, after 20 cycles)

다. 사다리꼴의 구동신호에 대해서는 Fig. 9(b)와 같이 구동 입력신호의 위상차에 따라 매우 급격하게 이동거리가 변할 뿐 아니라 이동방향도 변화되는 것을 알 수 있다. 사다리꼴의 경우에도 구동전압의 크기 변화는 정현파의 경우와 마찬가지로 이동특성을 크게 변화시키지 않는다. 아울러 사다리꼴이나 정현파 두 경우에 있어서 최대 이동거리는 비슷하다.

Figure 10은 구동전압이 80V인 경우 정현파와 사다리꼴 입력 파형에 대한 위상차의 영향을 직접 비교하기 위하여 나타낸 실험 결과이다. 이 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 정현파의 입력과 사다리꼴 파형 입력의 커다란 차이점은 입력신호 사이의 위상차이 변화에 따른 슬라이더 이동방향과 이동거리의 변화이다. Figure 10에서 이동방향을 살펴보면, 정현파 입력의 경우 전진 운동이 발생하는 입력신호의 위상차이 범위가 0°~160°와 290°~0°사이로 넓은 범위를 가지고 있으나, 사다리꼴 파형은 위상차의 변화에 따라 이동방향의 변화도 심하고 동일한 운동 방향을 줄 수 있는 위상차 허용범위가 좁은 것을 알 수 있다. 또한, 이동거리가 정현파 경우에는 연속적으로 부드럽게 증가 또는 감소하나, 사다리꼴 파형은 삼각과 형상으로 이동거리가 급격히 달라짐을 보여 준다.

정현파와 사다리꼴파의 두가지 형태 구동입력 신호에 대해서 위상차에 따라 슬라이더 상하면의 한주기 동안의 마찰력 변화가 달라진다. 수직 압전소자 A의 신장변위에 대한 그 순간의 수평 압전소자 B의 신장변위가 이동특성을 결정짓는다. 정현파의 경우는 위상차 변화에

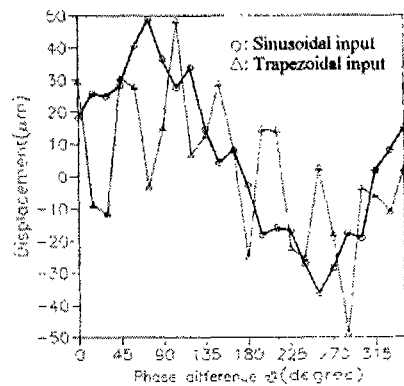


Fig 10 Comparison of translational motions (preload : 0.5N, 300Hz, after 20 cycles)

다른 상대적인 변위발생 변화가 적어 이동속도가 위상차에 대해 정현파와 비슷한 형태로 연속적으로 변하게 되는 것을 실험적으로 관찰할 수 있다. 하지만 사다리꼴 파형의 경우는 정현파경우보다는 위상차에 따라 압전소자의 상대적인 변위발생이 급격하게 변하게 되어 이동속도의 변화가 크게 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이 실험사실로부터 슬라이더 상하면에 발생하는 한주기 동안의 마찰력 크기 변화의 형태가 이동특성을 크게 좌우함을 알 수 있다.

4. 결 론

두개의 적층형 압전소자가 수직으로 배치된 구동부와 이 구동부의 선단에 접촉된 슬라이더로 이루어진 정밀 액츄에이터를 개발하였다. 실험에 의하여 정밀 액츄에이터의 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정현파와 사다리꼴 파형의 두 구동신호는 개발한 정밀 액츄에이터의 구동 가능 신호임을 알 수 있었다. 정현파를 구동 입력신호로 가했을 때는 슬라이더가 부드럽게 움직이나 사다리꼴 구동신호를 가했을 때는 정현파 구동의 경우보다 급격하게 움직이는 것을 볼 수 있었다.

(2) 정현파의 구동신호인 경우 슬라이더에 가해지는 수직력을 증가시키면 슬라이더의 이동량이 감소함을 알 수 있었다. 2[N]이상의 수직력 범위에서는 이동거리의 변화가 거의 없으며 이동거리도 크게 줄어들게 된다.

(3) 정현파형의 경우에 동일한 이동방향을 유지시켜 주는 입력신호간의 위상차 허용 범위가 크고, 위상차의 크기가 변함에 따라 단위 사이클당 이동거리도 연속적으로 증가 또는 감소시킬 수 있다. 그러나, 사다리꼴 파형의 경우에는 이동방향 결정을 위한 입력신호간의 위상차 허용 범위가 작고 위상차의 크기가 변함에 따라 단위 사이클당 이동거리도 규칙적이지 않다.

(4) 구동신호의 진폭이 작아지면 단위 사이클당 순이동거리도 감소되나 그 영향은 크지 않다.

후 기

본 연구는 1995년도 한국과학재단의 특정 목적기초 연구(과제번호 94-0200-09-01-3)의 일부로 수행되었으며, 관계자분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Kenji Uchino, Koichiro Kato, Masayuki Tohda, 1988, "Ultrasonic Linear motor Using a Multilayered Piezoelectric actuator", *Ferroelectrics*, Vol.87, pp.331-334.
2. Atsuo Kawamura, 1991, "Linear Ultrasonic Piezoelectric Actuator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.27, No.1, pp.23-26.
3. Nobuhide Endo, Masao Nagai and Toshio Yamada, 1992, "Computer Simulation of Dynamic Characteristics of Linear Ultrasonic Motor Driven by Travelling Wave", *Conf. on Motion and Vibration Control*, Yokohama, pp.350-355.
4. M. Tohda, S. Ichikawa, K. Uchino and K. Kato, 1989, "Ultrasonic Linear Motor using a Multilayered Piezoelectric Actuator", *Ferroelectrics*, Vol. 93, pp. 287-294.
5. H. Okamoto, M. Asano, S. Mitsuishi, T. Matsuoka and T. Matsui, 1993, "Prototype Models of Piezoelectric Driving Force Actuator for Micro Moving Mechanism", *Proc. of JSME, Int'l Conf. on Advanced Mechatronics*, pp.86-91.
6. A.Endo, N.Sasaki, Y.Tomikawa, 1990, "Linear Type Ultrasonic Motor Using Two Dimensionally Positioned Piezoelectric Elements", *Ferroelectrics*, Vol.112, pp.165-170.
7. 김상채, 1995, "정밀 선형 위치결정기구의 설계 및 해석", 석사학위논문, 한국과학기술원.
8. J.M.Paros, L.Weisbord, 1965, "How to Design Flexure Hinges", *Machine Design*, Vol.27, pp.151-156, Nov.