

힌지 형태에 따른 나노 스테이지의 거동특성

오현성*, 이성준+, 최수창++, 박정우+++, 이득우++++

(논문접수일 2006. 11. 10, 심사완료일 2007. 2. 27)

Behavioral Characteristics of Nano-Stages According to Hinge Structure

Hyun Seong Oh*, Sung Jun Lee+, Soo Chang Choi++, Jung Woo Park+++, Deug Woo Lee++++

Abstract

Nano-stages are used in many ultra-precision systems, such as scanning probe microscope(SPM), optical fiber aligners, ultra-precision cutting, measuring systems, and optical systems. It is difficult to find the solutions because the performances and characteristics of nano-scale motion stage are determined by various factors. To understand effects of nano-scale motion stage, three types of hinge structures were designed and manufactured. Each hinge structures were designed following with the results of simulation. And from the result of experiments, hysteresis, displacement, and accuracy were compared with each hinge structures.

Key Words : Nano-Stage(나노스테이지), Hysteresis(히스테리시스), Position Accuracy(위치정도), Response Characteristics(응답성)

1. 서론

나노기술의 발달로 인해 보다 높은 수준의 가공 및 측정 정밀도를 갖는 시스템이 필요하게 되었고, 나노 스테이지의 필요성이 대두 되었다.

현재 SPM이나 광섬유 정렬장치, 광학계 등에 사용되는 스테이지는 이동 범위가 넓으면서도 높은 정밀도를 갖는 것이 필요하다. 그리고 높은 강성과 큰 하중 이송 능력도 중요

하다. 이러한 관점에서 제작되는 스테이지는 응력의 부조화와 원하지 않는 변형을 야기하기 때문에 주의 깊게 설계되어 져야 한다. 만일 제대로 설계되지 않은 구조라면 움직임의 정밀도는 몇 배 낮아지게 된다⁽¹⁾. 나노미터 단위의 정밀도를 가지는 스테이지에 대한 연구와 함께 이러한 스테이지에 사용되는 힌지 자체에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 나노 스테이지에 사용되는 힌지는 크게 평면힌지와 3차원 힌지로 구분된다.

* 부산대학교 정밀기계공학과
+ 부산대학교 정밀기계공학과
++ 부산대학교 나노융합기술학과
+++ 부산대학교 나노융합기술학과
++++ 교신저자, 부산대학교 나노융합기술학과 (dwoolee@pusan.ac.kr)
주소: 627-706 경남 밀양시 삼랑진읍 청학리 50

기존의 연구들은 힌지 자체의 변형, 응력 등의 변화에 대한 수학적 모델링과 한 종류의 유연힌지만으로 스테이지를 제작하여 그 스테이지의 거동에 대한 연구 중심으로 이뤄졌다^(2,3). 따라서 본 논문에서는 여러 종류의 유연힌지를 같이 사용하여 한 종류의 유연힌지만을 사용한 스테이지와 성능을 비교하고 보다 우수한 성능을 구현하기 위한 설계 방안을 제시하고자한다.

2. 힌지 메커니즘

유연힌지 메커니즘은 다양한 종류의 유연힌지가 사용되고 있는데, 많이 사용되고 있는 힌지는 판스프링형(leafspring)과 노치형의 두 종류로 구분할 수 있다. 각 힌지 메커니즘의 지배식은 아래와 같이 구해질 수 있다⁽⁴⁾.

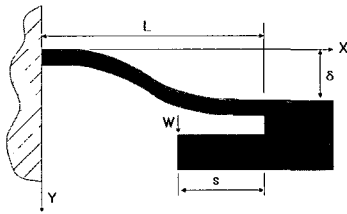


Fig. 1 Leafspring Mechanism

$$F_y = \frac{12EI}{L^3} \delta_y \quad (1)$$

$$\theta = \frac{F_y}{EI} \left[(s-L)x + \frac{x^2}{2} \right]$$

$$K_{\delta_x M_z} = \frac{M_z}{\delta_x} = \frac{F_y L}{\delta_x 2} = \frac{6EI}{L^2}$$

$$\delta_x = -\frac{3\delta_y^2}{5L}$$

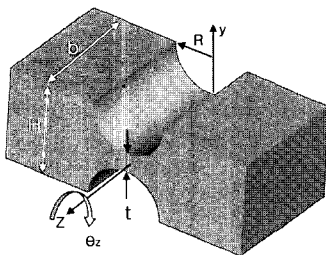


Fig. 2 Hinge Mechanism

$$\theta_z = \frac{9\pi R^2 M}{5 Ebt^2} \approx \frac{24KRM}{Ebt^3} \quad \text{for } t < R < 5t \quad (2)$$

$$K = 0.565 \frac{t}{R} + 0.166 \quad : \text{ correction factor}$$

$$\sigma_{\max} = (0.1 \sim 0.3) \sigma_y \quad \theta_{\max} = \frac{4K}{K_t} \frac{R}{Et} \sigma_{\max}$$

노치타입 메커니즘에서의 중요 설계 변수는 노치의 두께와 노치의 직경이다. 쉽게 생각할 수 있는 바와 같이 노치의 두께가 얇아질수록 그리고 노치의 반경이 커질수록 변위는 증가한다. 그러나 Fig. 3~5에서 보는 바와 같이 노치의 반경의 변화는 변위의 변화에 크게 영향을 주지는 못하고 노치의 두께의 변화가 지배적인 영향을 준다⁽⁵⁾.

3. 힌지의 유한요소해석

각각의 힌지로 구성된 스테이지 제작에 앞서 어느 힌지가 실제로 어떤 특징을 가지고 있는지 알아보기 위해 유한요소 해석을 통하여 그 결과를 알아보았다. 그런 후 판스프링과 평면 힌지 스테이지를 함께 사용한 스테이지를 제작하여 두 힌지 구조의 장점만을 이용하는 시도를 하였다.

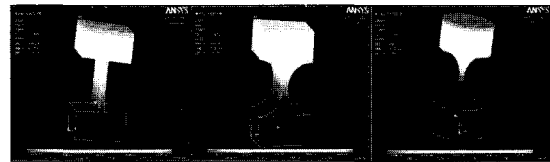


Fig. 3 Joint's displacement on the same horizontal force

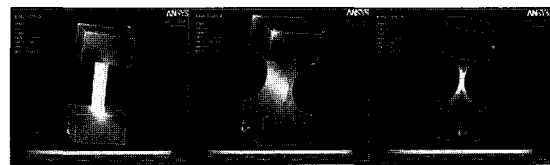


Fig. 4 Joint's stress on the same horizontal force

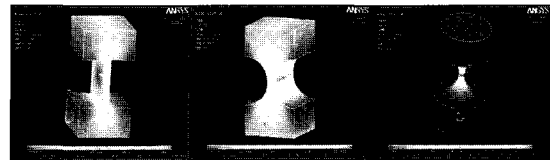


Fig. 5 Joint's stress on the same vertical force

Fig. 3~Fig. 5는 그 해석 결과를 보여주고 있다. 각 요소들의 크기는 실제로 스테이지에 사용되는 크기와 최대한 유사하게 선정하여 계산하였다. 상용 유한요소 해석프로그램(ANSYS)을 이용하였고, 해석에는 solid185 요소와 A17075(density : 2810kg/m³, poisson ratio : 0.33, modulus elasticity : 72GPa) 재료를 사용하였다. 판스프링 힌지의 치수는 10mm × 10mm × 19mm이고, 힌지 부위의 크기는 길이 L=9mm, 두께 t=1mm이다. 평면 힌지의 치수는 10mm × 10mm × 19mm이고, 힌지 부위의 크기는 반경 R=4.5mm, 두께 t=1mm이다. spherical 힌지의 치수는 직경 d=10mm, 길이 L=19mm이고, 힌지 부위는 반경 R=4.5mm이다.

설계에 있어서는 스테이지의 최종 움직이는 부분에서 30 μm이상의 변위를 얻을 수 있도록 평면 힌지를 이용한 스테이지와 두 힌지를 섞어 사용한 스테이지를 설계하였다.

힌지의 제작 측면에서 판스프링과 평면 힌지는 드릴링이나 방전가공을 적절히 병행하면 단시간 내에 제작이 가능한 형태인데 비해 구면형 힌지는 3차원 운동을 하도록 축 대칭으로 제작 되어야 하며 응력집중에 따른 피로파괴의 가능성이 높아 다른 두 방법에 비해서 어려움이 따른다. 따라서 스테이지의 제작 및 해석에는 판스프링 힌지와 평면 힌지만을 사용하였다. 또한, 증폭비 예측의 오차를 크게 줄이기 위하여 탄성힌지 메커니즘을 설계할 때에는 단순한 기구학적 증폭비가 아닌 힌지부와 변위확대 기구의 탄성변형을 고려하여야 한다⁽⁶⁻⁸⁾.

4. 실험

4.1 스테이지 제작

Fig. 6은 제작한 세 종류 형태의 스테이지를 나타내었다. 판스프링 힌지 스테이지가 150mm × 150mm × 10mm, 평면 힌지 스테이지가 84.5mm × 84.5mm × 10mm, 조합 힌지 스테이지가 91mm × 91mm × 16mm이다. 스테이지에 사용된 PZT는 NEC/TOKIN 사의 AE0505D44H40(Displacement : 28.0 ± 6.6μm, Generated force : 850N, 판스프링 힌지 스테이지)와 AE0505D16(Displacement : 11.6 ± 2.0μm, Generated force : 850N, 평면 힌지 스테이지, 조합 힌지 스테이지)을 사용하였다. 판스프링 힌지 스테이지에는 변위 확대 기구가 없기 때문에 변위가 30μm이상인 PZT를 사용하였다. PZT는 볼트를 이용하여 스테이지에 예압이 걸리는 형태로 고정시켰다. 모든 스테이지는 와이어 컷 방전가공으로 가공하였고, 가공 후 전주도금처리 하였다.

4.2 실험방법

Fig. 7에 전체 시스템의 개략도를 나타내었다. 컴퓨터에서 프로그램을 이용하여 직류 0~5V의 전압을 출력하면 D/A 변환기를 거쳐 전압 증폭기를 지나면서 직류 0~150V의 전압이 된다. 이 전압이 스테이지에 장착되어 있는 PZT에 공급되어 전압에 비례하여 스테이지가 움직이게 된다. X방향과 Y방향으로 독립하게 전압을 입력할 수 있도록 제작되었으며 스테이지의 변위는 용량형 캡센서를 이용하여 측정되고 오실로스코프에 기록되어 컴퓨터로 분석하였다.

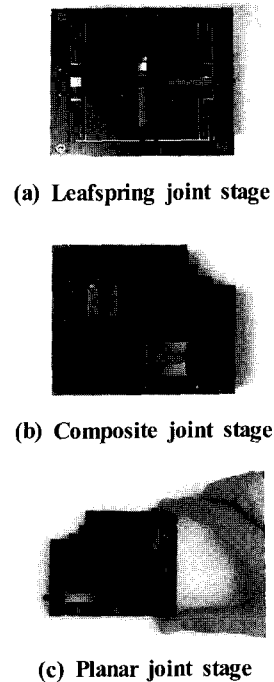


Fig. 6 The stages examined in the experiment

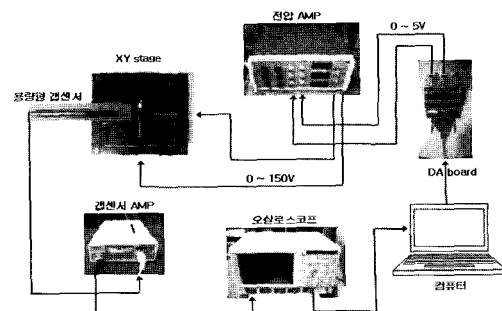


Fig. 7 Schematic diagram of experimental system

5. 스테이지 거동 특성 결과

5.1 히스테리시스

PZT가 스테이지에 장착되기 전에 어떠한 고유한 특성을 가지고 있는지 알아보기 위해 PZT에 예압을 걸지 않은 상태에서 입력을 주어 변위 특성을 관찰하였다. 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

히스테리시스 특성을 보면 짧은 PZT가 2.2 μ m 정도로 긴 PZT(5.0 μ m)보다는 훨씬 작다. 그러나 입력전압이 80V 이상 일 때 짧은 PZT는 변위가 입력전압에 비례하게 증가하지 않고 변화 없이 일정한 값을 가지는 구간이 있는 반면에 긴 PZT는 짧은 PZT에 비해서는 선형적이다. 스테이지에 PZT를 사용함에 있어서 이러한 변위 특성을 먼저 측정 한 후 변위가 입력전압에 선형적인 구간에서만 사용해야 할 것이다.

PZT의 히스테리시스를 측정 한 결과에서도 짧은 PZT는 80V 이상에서는 변위가 입력 전압에 비선형이었으며, 스텝 입력의 결과 그래프에서도 짧은 PZT는 최상단부분에서 스텝이 불명확한 것을 볼 수 있었다. 그리고 각 계단의 높이를 비교해 보면 상승할 때는 거의 일정한 높이를 가지지만 하강할 때는 하강 초기와 말기의 높이차가 크다. 그리고 긴 PZT는 변형을 마친 후에 원래의 위치로 되돌아오지 못하고 약간의 변위를 계속 갖고 있었지만, 짧은 PZT는 긴 PZT에 비해 그 양이 월등히 작았다. 따라서 PZT 자체의 특성만을 따져 본다면 변위와 선형성에서는 긴 PZT가 우수하고, 이외의 특성에서는 짧은 PZT가 우수한 것을 알 수 있었다.

5.2 이송정밀도

Fig. 9는 스테이지별 이송정밀도 측정결과를 나타내었다. X 축 방향과 Y 축 방향의 최소 스텝 이송량이 약간 다르지만 조합 힌지 스테이지에서는 약 9.5nm 정도의 최소 스텝 이송량을 얻을 수 있었고, 판스프링 힌지 스테이지에서는 약

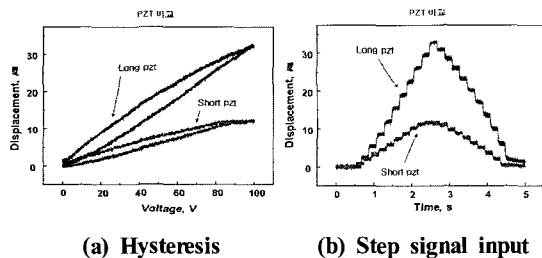
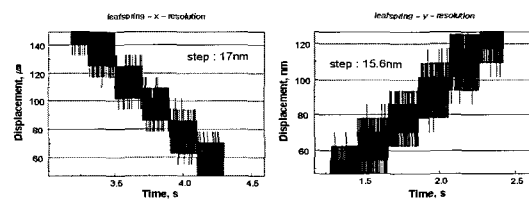


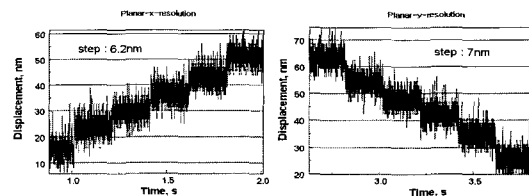
Fig. 8 Comparison of the long & short PZT

15.6nm의 최소 스텝 이송량을 관찰 할 수 있었다. 그 이하의 이송도 가능하였지만 스텝의 크기가 전 구간에 대해서 다르게 나타났기 때문에 스테이지의 성능을 나타내는 값으로 사용할 수 없었다. 측정 전 구간에 대해 균일한 스텝 이송량을 나타낼 때의 스텝 이송량을 이송정밀도로 선정하였다. PZT는 입력 전압을 다른 추가적인 장치 없이 바로 변위로 바뀌기 때문에 이론적으로 무한대의 이송정밀도를 가진다.

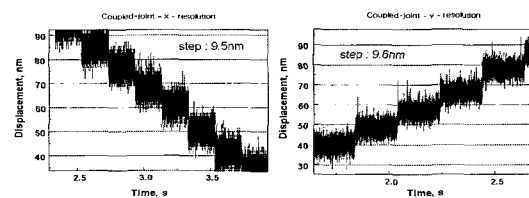
따라서 PZT의 변위를 변위확대 기구 없이 그대로 스테이지의 이동으로 이용하는 판스프링 힌지 스테이지의 이송정밀도가 더 좋을 것으로 예상되었지만 측정 결과 조합 힌지 스테이지의 이송정밀도가 최소 9.5nm로 판스프링 힌지 스테이지보다 더 우수한 성능을 보였다. 이것은 조합 힌지 스테이지는 PZT의 변위가 변위확대기구와 평면 힌지를 거친 후에 최종 이동하는 부분에 도달하기 때문에 여러 과정을 거치는 동안 재료 및 구조적인 감쇠효과로 인해 액츄에이터에서 발생했던 진동성분이나 노이즈들이 감쇠되어 우수한 이송정밀도를 얻을 수 있었던 것으로 보인다.



(a) Leafspring joint stage



(b) Planar joint stage



(c) Composite joint stage

Fig. 9 Resolution of the each stages

반면 판스프링 힌지 스테이지는 PZT의 변위가 바로 변위 측정 부분으로 전달되기 때문에 액츄에이터의 진동이나 노이즈가 별로 감쇠되지 않기 때문에 상대적으로 큰 최소 이송량을 얻을 수 있는 것으로 보인다. 그리고 힌지 부분의 강성 또한 이송정밀도에 중요한 영향을 줄 것으로 여겨진다. 그래서 상대적으로 강성이 약한 판스프링이 가장 낮은 이송정밀도를 나타내는 것으로 보인다.

5.3 변위응답특성

Fig. 10은 스텝입력에 대한 스테이지들의 변위특성을 나타내었다. 평면 힌지 스테이지의 경우에 안정화에 걸리는 시간은 짧으나 오버슈트가 매우 높게 발생하였다. 판스프링 힌지 스테이지의 경우에 안정화에 시간은 많이 걸렸으나 강성이 낮기 때문에 오버슈트는 발생되지 않았다. 조합 힌지 스테이지의 경우에 나머지 두 스테이지의 평균값이 나왔다.

5.4 입력파형에 따른 스테이지 응답

Fig. 11은 각 스테이지에 사각파 형태의 입력을 입력하면서 목표전압을 25V, 50V, 75V, 100V로 높여갈 때 스테이

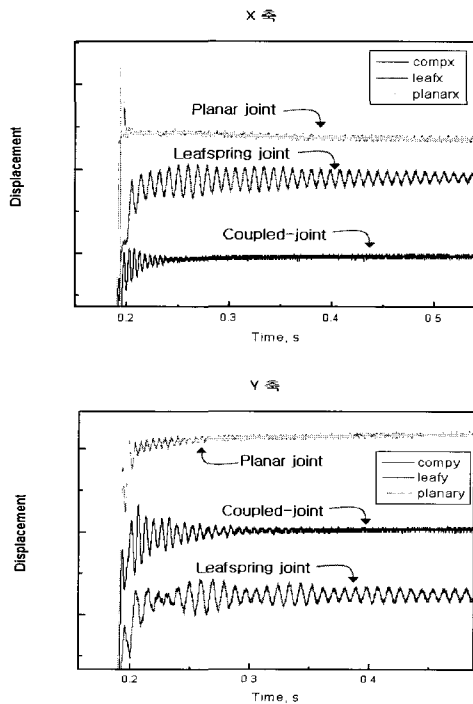
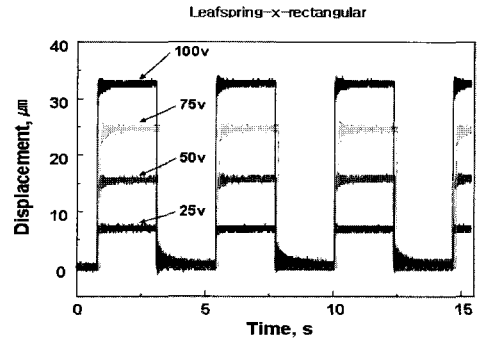


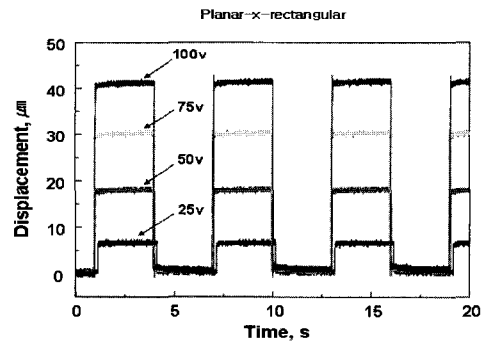
Fig. 10 Response characteristics of the three stages

지가 어떻게 움직이는지 확인하기 위한 그림이다. 목표전압을 선형적으로 증가시킬 때 스테이지도 선형적으로 움직인다면 우수한 성능의 스테이지라고 판단 할 수 있다.

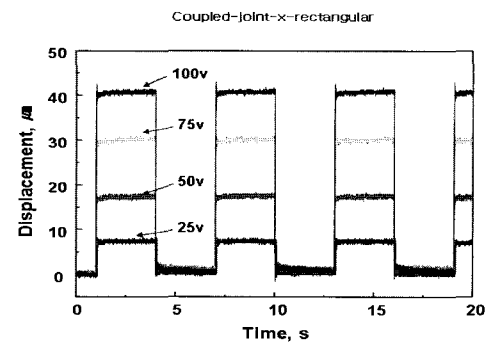
판스프링 힌지 스테이지는 입력에 대해 스테이지가 이동 후 안정화 될 때까지 다른 스테이지에 비해 오래 걸린다. 그



(a) Leafspring hinge stage



(b) Planar hinge stage



(c) Composite hinge stage

Fig. 11 Input rectangular signal

리고 변위 이동 후에도 스테이지의 떨림량이 판스프링 힌지 스테이지는 약 $1.5\mu\text{m}$, 평면 힌지 스테이지가 $1.3\mu\text{m}$, 조합 힌지 스테이지가 $1.2\mu\text{m}$ 정도로 판스프링 힌지 스테이지가 가장 크다. 스테이지가 입력을 받는 순간에 평면 힌지 스테이지와 조합 힌지 스테이지는 Y축에서 오버슈트 거의 $3\mu\text{m}$ 정도까지 생긴다. 단위 스텝 입력에 대한 스테이지의 응답 특성이 사각파 입력에 대한 출력에도 그대로 나타난 것으로 보인다.

Fig. 12는 각 스테이지에 삼각파 입력을 주었을 때 스테이지의 변위 곡선이다. 평면 힌지 스테이지의 그래프는 다른 스테이지 보다 전압이 낮아질수록 삼각형의 오른쪽 부분이 상대적으로 많이 부풀린 모양을 하고 있다.

다른 스테이지는 전압이 낮아져도 높은 전압일 때와 거동이 거의 일치하지만 평면 힌지 스테이지는 높은 전압에서 스테이지로서의 특성이 좋지만 전압이 낮아지면 아래위 모서리 부분이 둥글게 되고 삼각파의 오른쪽 부분이 부풀려지는 현상이 크게 나타났다. 평면 힌지 스테이지의 이송정밀도는 가장 좋게 나타났었지만 수 μm 의 작은 변위에는 취약한 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 최저 입력전압에서 최대 입력전압까지 4단계의 스텝을 거치면서 증가하는 입력을 주었을 때 스테이지의 변위 상태를 나타내는 그림이다. 이상적으로 스테이지의 변위가 선형이거나 위치 피드백이 되는 상태라면 가장 높은 단에서 좌우 첫 번째 단의 높이 차이가 서로 같을 것이다. 그러나 실험에 사용된 스테이지는 위치 피드백을 하지 않은 상태이기 때문에 그림에서와 같은 높이 차이가 있고 판스프링 힌지 스테이지에서 그 차이가 가장 적고 변위가 안정화 된 상태에서의 떨림이 심하다.

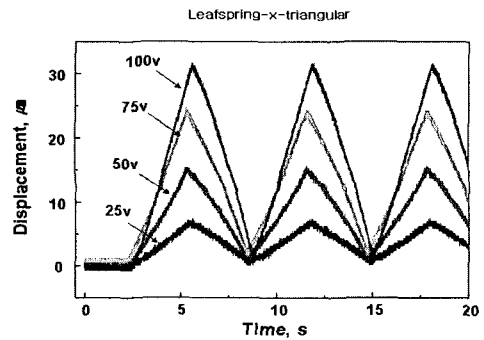
평면 힌지는 다른 두 스테이지에 비해 각 단계에서의 높이 차이도 크고 단계간의 구분도 어려워 스텝 입력에서는 가장 좋지 않은 결과를 보였다. 결국 각 단계에서의 위치 차이는 조합 힌지 스테이지가 판스프링 힌지 스테이지보다 크지만 양호한 편이고, 낮은 전압에서도 단계 간 구분이 명확하고, 변위가 안정화 됐을 때 스테이지의 떨림도 적어 가장 우수한 성능을 보였다.

Fig. 14는 사인파입력에 대한 스테이지의 거동을 나타내는 그림이다. 그리고 Fig. 14의 (c),(d),(e)는 각각 leafspring 힌지 스테이지, 평면 힌지 스테이지, 조합 힌지 스테이지 순으로 각각 사인파가 입력되는 순간에 스테이지의 반응을 나타내는 그림이다.

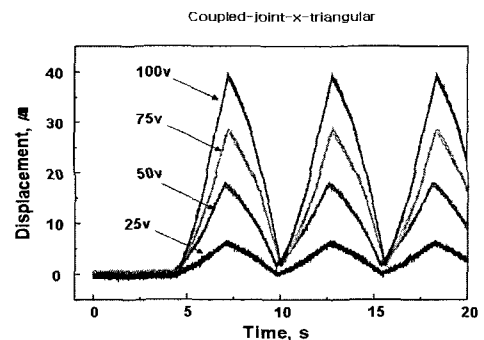
응답 그래프를 보면 세 종류의 스테이지의 특징이 확연히 구분된다. 응답시간은 판스프링 힌지 스테이지, 평면 힌지 스테이지, 조합 힌지 스테이지가 각각 0.15초, 0.08초, 0.04

초, 그리고 오버슈트는 각각 $9.8\mu\text{m}$, $12.2\mu\text{m}$, $2.6\mu\text{m}$ 로 나타났다. 응답시간이나 오버슈트가 작을수록 성능이 우수한 스테이지이므로 조합 힌지 스테이지의 성능이 우수한 함을 확인할 수 있다.

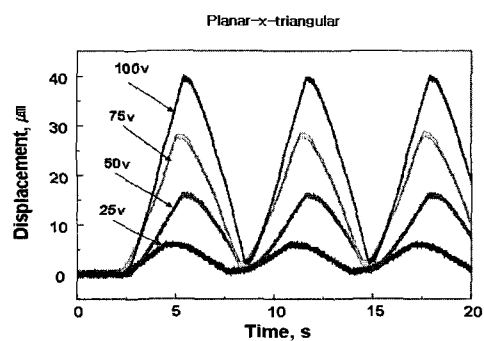
이러한 스테이지 특성은 힌지부분의 강성과 PZT에서 스테이지 최종 변위부분까지의 거리에 기인한 것으로 보인다.



(a) Leafspring hinge stage

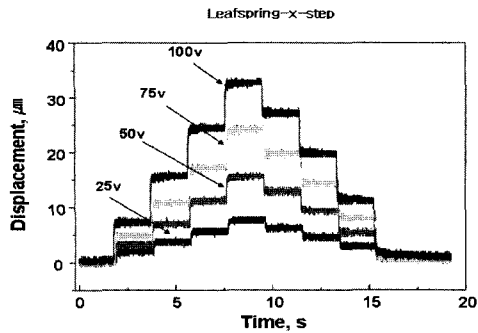


(b) Planar hinge stage

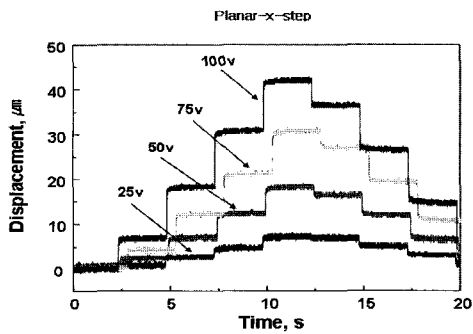


(c) Composite hinge stage

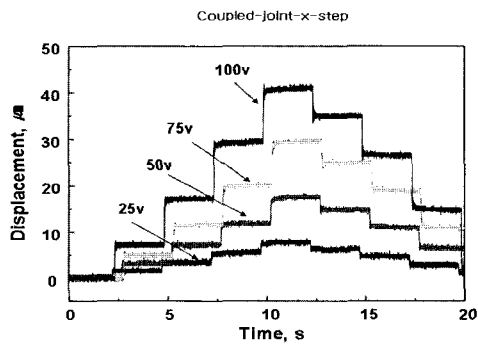
Fig. 12 Input triangular signal



(a) leafspring hinge stage



(b) Planar hinge stage

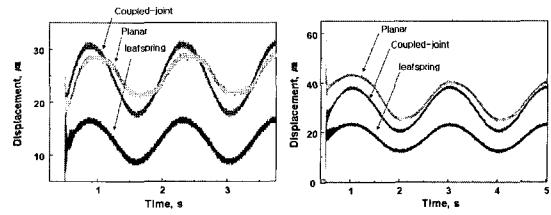


(c) Composite hinge stage

Fig. 13 Input step signal

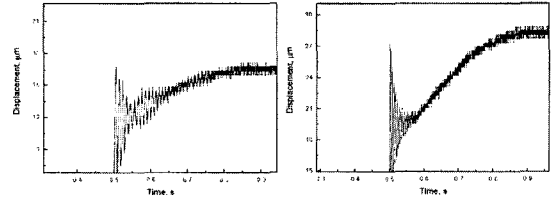
즉 강성이 작고 PZT에서 최종 변위 부분까지의 거리가 짧아서 액츄에이터의 진동이나 잡음 요소를 상쇄 시키지 못하는 판스프링 힌지 스테이지는 응답시간이 길고 오버슈트가 크게 나타난 것으로 보인다.

지금까지 실험한 내용의 각 항목별 결과를 요약하여 Table 1에 나타내었다.



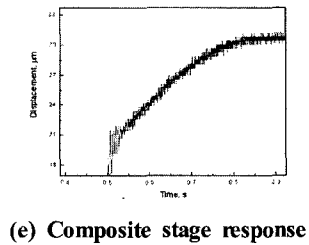
(a) X axis

(b) Y axis



(c) Leafspring stage response

(d) Planar stage response



(e) Composite stage response

Fig. 14 Input sine signal

Table 1 Comparison of the three stages

		Leafspring	Planar	Composite			
변위		31	53.3	53.6			
Hysteresis		5.0	8.0	8.7			
이송정밀도		0.0156	0.0062	0.0095			
스텝입력		0.7 s	0.4 s	0.4 s			
		Worst	Middle	Best			
사인파	응답	0.15 s	0.08 s	0.04 s			
	오버슈트	9.8	12.2	2.6			
사각파	방향	X	Y	X	Y	X	Y
	응답	0.4	0.5	0.1	0.1	0.3	0.2
	오버슈트	1.0	1.0	1.1	3.3	1.8	4.0
	진동	1.5	1.5	1.3	1.3	1.2	1.3

단위: μm, s(second)

4. 결론

나노 이송 정밀도를 구현하기 위하여 평면, 판스프링, 조합 힌지에 대하여 거동특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 변위확대기구 사용이 가능한 평면 힌지와 조합 힌지 스테이지의 경우 최대 변위를 얻는데 유리하였다. 판스프링, 평면, 조합 힌지의 경우 각각 $31\mu\text{m}$, $53.3\mu\text{m}$, $53.6\mu\text{m}$ 로 나타났다.
- (2) 히스테리시스는 판스프링 힌지 스테이지에서 $5.0\mu\text{m}$ 로 $8.0\mu\text{m}$, $8.7\mu\text{m}$ 인 다른 두 스테이지보다 우수하다. 스테이지의 히스테리시스는 사용된 PZT에 지배적이었으며 평면 힌지와 조합 힌지에 사용된 변위 확대 기구가 PZT의 히스테리시스를 확대하였다.
- (3) PZT 최종 변위 부분이 붙어 있는 판스프링 힌지 구조보다는 여러 부분을 거치게 되어 있는 평면 힌지나 조합 힌지 구조가 액츄에이터의 진동이나 노이즈를 줄여 주게 되어 이송정밀도가 우수하였다. 이송정밀도는 판스프링, 평면, 조합 힌지가 각각 15.6nm , 6.2nm , 9.5nm 로 나타났다.
- (4) 각각의 입력파에 대한 응답특성 또한 구조에 따라 다르게 나타났다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구 되었음.

참 고 문 헌

- (1) Elmustafa, A. A. and Lagally, M. G., 2001, "Flexural-hinge guided motion nanopositioner stage for precision machining : finite element simulations," *Precision Engineering* 25, pp. 77~81.
- (2) Ryu, J. W., Gweon, D. G. and Moon, K. S., 1997, "Optimal design of a flexure hinge based XY θ wafer stage," *Precision Engineering* 21, pp. 18~28.
- (3) Ryu, J. W. and Gweon, D. G., 1997, "Error analysis of a flexure hinge mechanism induced by machining imperfection," *Precision Engineering* 21, pp. 83~89.
- (4) Gweon, G. D., 2004, "Flexure motion Guide design," KAIST, KAIST Mech. Engineering, 6th Workshop.
- (5) Suleman, A., Burns, S. and Waechter, D., 2004, "Design and modeling of an electrostrictive inchworm actuator," *Mechatronics* 14, pp. 567~586.
- (6) He, L., Wang, F. Z., Mapps, D. J., Robinson, P., Jenkins, D. and Clegg, W. W., 2000, "Nanoscale positioning for magnetic recording," *Sensors and Actuators*, 81, pp. 313~316.
- (7) Paros, J. M., Weisbord, L., 2001, "How to design flexure hinges," *Mach. Des.*, Vol, 25, pp. 151~156.
- (8) Lobontiu, L. and Jeffrey, S. N., 2001, "Corner-Filletted flexure hinges," *Paine*, September, Vol. 123, pp. 346~352.
- (9) Lobontiu, N. and Jeffrey S. N., 2002, "Design of Circular Cross-section Corner-Filletted Flexure Hinges for Three-Dimensional Compliant Mechanism," *Paine*, september Vol. 124, pp. 479~484.