

나노 가이드 시스템에서 초기 변위의 영향에 관한 연구 Effect of an initial displacement on a nano-guiding system

이동연[†]·이무연*·권대갑**·박준호***

Dong-Yeon Lee, Moo-Yeon Lee, Dae-Gab Gweon and June-Ho Park

Key Words: Flexural guide (유연 가이드), Preload (예압), Input amplitude (입력 크기), Separation frequency (분리주파수), Natural frequency (고유진동수), Piezoelectric actuator (압전 소자 구동기)

ABSTRACT

This study shows that the system performance of a positioning system composed of a piezoelectric actuator-driven flexure guide depends largely on the preload applied on the flexure guide and the driving input amplitude. We used a flexure guided system that had an original resonant frequency of 54Hz. Our experiment showed that we could increase the driving bandwidth above the original resonant frequency, for a case involving a large preload and a small input amplitude. Results show that there is a specific "separation frequency" where the response of the moving mass of the flexure system decouples from the response of the piezoelectric actuator, and this specific separation frequency can be selected by a proper choice of the preload and the input amplitude. To find the separation frequency, sine sweep tests were performed. To confirm the increased system bandwidth frequency, open-loop sine tracking experiments were performed. Test results show that the system responds very well up to 130 Hz frequency higher than the original natural frequency (54Hz).

1. 서론

고속 및 고분해능이 필요한 나노 구동 시스템(원자현미경 등)으로서 압전 구동기와 유연 가이드를 이용하는 방법이 각광받고 있다. 현재까지 압전 구동기 자체의 재료적인 관점에서 많은 연구가 행해지고 있지만, 유연 가이드에 가해지는 예압에 대한 효과는 선행 연구가 부족한 실정이다.⁽¹⁻²⁾ 본 논문에서는 압전 구동기 자체 보다는 가이드 시스템의 이동부의 응답 특성에 대한 연구가 주된 관점이다. 압전 구동기와 가이드 시스템이 조립된 나노 구동 시스템에서 압전 구동기의 가속도와 가이드 이동부의 가속도 차이에 의해 특정한 주파수에서 압전 구동기와 가이드 시스템이 분리되는 주파수를 발견하였다. 이 주파수를 분리주파수(Separation frequency)라고 정의했고, 이 분리 주파수는 가속도에 영향을 미치는 예압, 입력 크기, 가이드 시스템의 공진 주파수 등에 의해서 결정된다. 대개의 경우, 분리 주파수는 가이드의 공진 주파수보다 고 주파수이다. 정적 상태에서 분리 주파수까지,

가이드의 이동 부는 압전 구동기의 입력 운동을 마치 한 몸체처럼 충실하게 따라간다.

분리 주파수 이상 구동 시 압전 구동기가 팽창하게 되면, 가이드 이동 부는 압전 구동기의 큰 추력으로 인해 입력을 충실히 따라간다. 그러나, 압전 구동기가 수축하게 되면, 가이드 이동부의 회복 가속도가 압전 구동기의 수축 가속도보다 작기 때문에, 이동부가 압전 구동기와 분리된다. 본 논문에서는 분리 주파수가 가이드 이동 부에 가해진 예압 및 압전 구동기의 입력 크기에 따라서 결정되는 것을 이론 및 실험으로 검증하였다. Fig. 1은 유연 가이드, 압전 구동기 및 센서가 조립된 개념도이다. 가이드 이동부에 예압을 가하기 위해 압전 구동기를 조립 시 한 끝단에 예압 스크류를 사용하였다. 또한, 변위 측정 센서는 정전 용량 형 간극 센서를 사용하였다.

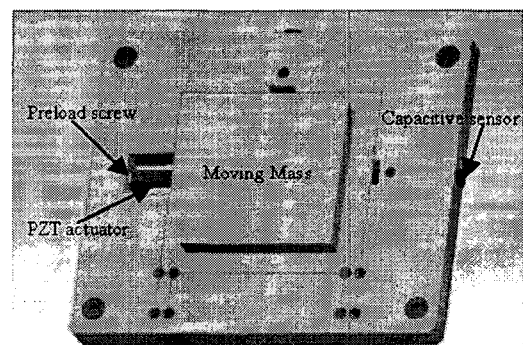


Fig. 1 Flexure guided system with the PZT actuator

[†] 책임저자, 정희원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : ldymav@kaist.ac.kr, Tel : (042) 869-8763

* Digital Appliance Research Laboratory, LG Electronics Corp.

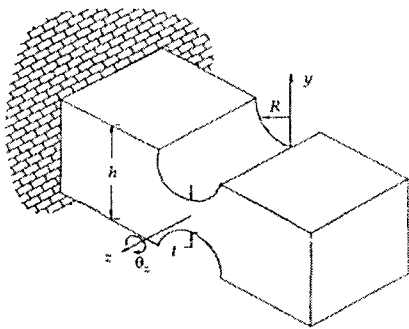
** 한국과학기술원, 기계공학과

*** 아주대학교, 기계공학과

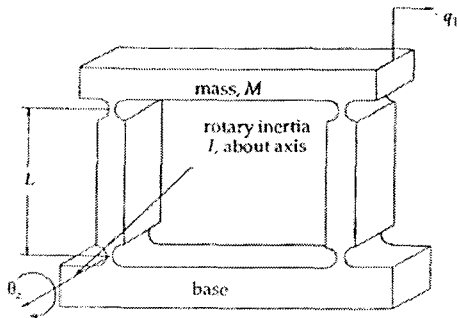
2. 유연 가이드 시스템의 설계

2.1 유연 가이드의 공진 주파수

본 연구에서, 유연 가이드로서 재료의 탄성 변형을 이용하는 노치형 힌지(Notch-type hinge)를 사용하였다. 운동방정식을 구하기 위해 운동 에너지, 위치 에너지를 유도하였고, 마지막으로 라그랑지 방정식(Lagrange's equation)을 사용하였다. (1,3,4,5)



(a)



(b)

Fig. 2 Simple linear spring: (a) notch type hinge and (b) four-bar linkage type motion guide

Fig. 2 에서 4 절 링크의 운동 에너지는 다음 식(1)과 같다.

$$T = \frac{1}{2} M \dot{q}_1^2 + 2 \times \frac{1}{2} m_l \left(\frac{\dot{q}_1}{2} \right)^2 + 2 \times \frac{1}{2} I \left(\frac{\dot{q}_1}{L} \right)^2 \quad (1)$$

여기서 M 은 이동 부 질량, m_l 은 링크의 질량 (길이: L) 그리고, I 는 링크의 회전 관성 모멘트이다. 위치 에너지는 회전 변형을 고려하여 다음 식(2)과 같다.

$$V = 4 \times \frac{1}{2} K_\theta \left(\frac{q_1}{L} \right)^2, \text{ while } \theta_z \cong \frac{q_1}{L} \quad (2)$$

여기서, K_θ 는 링크의 회전 강성이다. 식 (3)과 같은 라그랑지 방정식에 식 (1)~(2)를 대입하면 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial (T-V)}{\partial q_1} = F \quad (3)$$

$$\left(M + \frac{1}{2} m_l + \frac{2}{L^2} I \right) \ddot{q}_1 + \frac{4}{L^2} K_\theta q_1 = F \quad (4)$$

식 (4)로부터 유효 질량(Effective mass) 과 유효 강성(Effective stiffness)은 식(5)와 같다.

$$M_{eff} = M + \frac{1}{2} m_l + \frac{2}{L^2} I, \quad K_{eff} = \frac{4}{L^2} K_\theta \quad (5)$$

단축 유연 힌지의 경우 모멘트 (M_z)와 z -축에 대한 회전 각 (θ_z)의 비는 식(6)과 같다.

$$\frac{1}{K_\theta} = \frac{\theta_z}{M_z} = \frac{3}{2EbR^2} \left[\frac{1}{2\beta + \beta^2} \right] \left\{ \frac{1 + \beta}{\gamma^2} + \frac{3 + 2\beta + \beta^2}{\gamma(2\beta + \beta^2)} \right\} \left[\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2} \right] + \left[\frac{6(1 + \beta)}{(2\beta + \beta^2)^{3/2}} \right] \left[\tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \times \frac{(\gamma - \beta)}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \right) \right] \quad (6)$$

여기서 t 는 힌지 두께, h 는 힌지 폭, b 는 힌지 길이, $\beta = t/2R$ 그리고, $\gamma = h/2R$ 이다.

여기서 $\beta \ll 1$ 와 $\beta \ll \gamma$ 인 경우, 식 (6)은 다음과 같이 단순해진다.

$$K_\theta = \frac{M_z}{\theta_z} = \frac{2Eb t^5}{9\pi R^{1/2}} \quad (7)$$

따라서, 유효 강성은 다음 식과 같다.

$$K_{eff} = \frac{8Eb t^{5/2}}{9\pi L^2 R^{1/2}} \quad (8)$$

마지막으로 유연 가이드의 공진 주파수는 식 (9)와 같다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}} \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여, 설계 시 주어진 치수와 파라미터 ($t=0.5, h=0.6, b=14, R=3, L=20[mm]$)를 대입하면, 공진 주파수는 다음과 같이 약 56.9Hz 이다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}} = 56.9\text{Hz}$$

2.2 유한 요소 해석

유한 요소 해석으로, 가이드의 공진 주파수를 결정하기 위해 상용 프로그램인 ProMechanica™ (PTC corp.)를 사용하였다. 모델링은 압전 구동기를 고려하지 않고, 가이드만의 공진 주파수를 해석하였다. Fig. 3 과 같이 수평 방향의 첫 번째 공진 주파수는 57.6Hz 이고, 이론 해와 비교적 일치함을 알 수 있다.

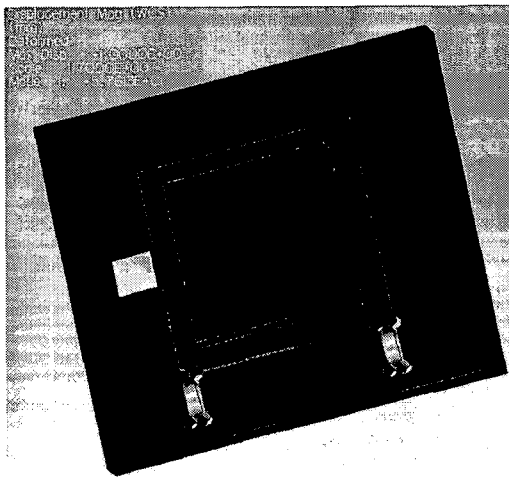


Fig. 3 Resonant frequency: lateral direction ($f_n=57.6\text{Hz}$)

3. 분리 주파수: 이론적인 배경

3.1 압전 구동기의 팽창 시 가이드의 응답 특성

압전 구동기가 정지 상태에서 외부 전압을 인가하여 팽창하게 되면, 가이드 이동 부는 압전 구동기의 큰 추력으로 인해 입력을 충실하게 따라간다. 이 때, Fig. 4와 같이 압전 구동기와 가이드는 한 몸체처럼 응답하게 된다.

3.2 압전 구동기의 수축 시 가이드의 응답 특성

Fig. 4 와 같이 시간 t_0 에서 압전 구동기가 수축할 때, 가이드 이동 부는 가이드 이동부의

t_0 에서의 가속도에 따라서 압전 구동기의 운동을 따라가기도 하고 따라가지 못하기도 한다. 따라서, 압전 구동기와 가이드 이동 부 사이의 물리적인 분리가 일어 날 수 있다.

가이드 이동 부에 예압 (A_0) 과 입력 ($A_1 \cos \omega_d t$) 이 가해지면, 가이드 이동부의 최종 입력은 $x_i = A_0 + A_1 \cos(2\pi f_d t)$ 이다. 이 때, 예압은 압전 구동기를 조립 시 예압용 스크류를 통해서 가해진다. 가이드 시스템을 경 감쇠 2 차 시스템으로 가정하면, 가이드의 출력은 $x_o = (A_0 + A_1) e^{-\zeta 2\pi f_n t} \cos(2\pi f_n t)$ 이다. 여기서 ζ 는 감쇠 계수 그리고, f_d 는 가진 주파수이다. 만약, 감쇠가 없다고 가정하면, 출력은 $x_o = (A_0 + A_1) \cos(2\pi f_n t)$ 이다. 따라서, 출력은 그림 4 와 같이 초기 변위 ($A_0 + A_1$)를 갖는 자유 진동을 하게 된다.

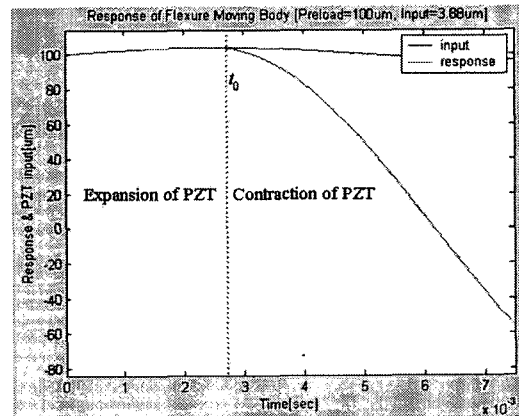


Fig. 4 Response of the moving body, explaining the separation frequency

본 연구에서 압전 구동기는 접착제를 사용하지 않고, 예압 스크류를 통해 조립이 되므로, 구동기와 가이드 사이의 분리가 일어날 수 있다. 가이드 이동부가 입력을 따라가기 위해서는 이동부의 출력 가속도 ($a_0(t)$)가 압전 구동기에 가해진 입력 가속도 ($a_1(t)$)보다 크거나 같아야 한다. 만약, 압전 구동기가 가이드 이동부의 회복 속도보다 빠르게 수축하면, 구동기와 가이드 사이의 분리가 발생하게 된다. 따라서, 시간 t_0 에서 분리가 발생하는 조건은 식(10)과 같다.

$$a_0(t_0) \leq a_1(t_0) \tag{10}$$

여기서, $a_1(t) = -A_1 2\pi f_d^2 \cos(2\pi f_d t)$ 는 압전 구동기의

수축 시 입력 가속도 그리고, $a_o(t) = -(A_o + A_i)2\pi f_n^2 \cos(2\pi f_n t)$ 는 압전 구동기의 수축 시 가이드 이동부의 출력 가속도이다.

압전 구동기와 가이드 이동부의 분리가 발생하는 분리 주파수 (f_s)는 식(11)~(12)으로부터 구할 수 있다.

$$|a_o(t_o)| = |a_i(t_o)| \quad (11)$$

$$\Rightarrow (A_o + A_i)f_n^2 = A_i f_s^2 \text{ where } f_d = f_s$$

$$\Rightarrow f_s = \left(\sqrt{\frac{A_o + A_i}{A_i}} \right) f_n$$

$$\Rightarrow f_s = (\sqrt{d+1})f_n, \text{ where } d = \frac{A_o}{A_i}$$

$$\frac{f_s}{f_n} = \sqrt{d+1} \quad (12)$$

식(12)에서 분리 주파수는 예압 (A_o), 입력 크기 (A_i), 그리고 가이드의 공진 주파수 (f_n)에 따라서 결정된다. 여기서 정규 예압(Normalized preload, d)은 예압과 입력의 비로서 결정된다.

만약, 가진 주파수가 분리 주파수보다 작으면, ($f_d \leq f_s$), 가이드 이동부의 출력 가속도가 구동기 입력 가속보다 크게 된다 ($a_o(t_o) \geq a_i(t_o)$). 이 경우, 압전 구동기의 팽창 과 수축 상태 모두, 압전 구동기와 가이드는 한 몸체처럼 운동하게 되고, 분리가 발생하지 않는다. 그러나, 가진 주파수가 분리 주파수보다 크면, ($f_d > f_s$), 가이드 이동부의 출력 가속도가 구동기 입력 가속보다 작게 된다 ($a_o(t_o) < a_i(t_o)$). 이 경우, 압전 구동기의 팽창 상태에서는 한 몸체처럼 운동하지만, 수축 상태에서는 가이드 이동부가 압전 구동기보다 느린 속도로 운동하게 되고, 압전 구동기와 가이드 이동부사이의 분리가 발생하게 된다. 이 경우에는 구동 시스템의 제어가 불가능하게 된다.

분리 주파수의 하 한계는 가이드 시스템의 공진주파수이고, 상 한계는 $f_s'' = \sqrt{(K_{eff} + K_p)/M_{eff}}$ 이다. 여기서 K_p 는 압전 구동기의 강성이다. 분리 주파수의 상 한계는 압전 구동기가 가이드 이동부에 접촉제로 고정되어 있다고 가정하였고, 이 경우에는 구동기와 가이드가 한 몸체라고 생각할 수 있다. 실제 응용에서는 압전 구동기의 특성 상 인장력에 취약하므로, 접촉제를 사용하여 조립하지 않는다.

4. 분리 주파수: 실험 결과

4.1 실험 장치

본 연구의 실험 장치는 Fig. 5 와 같이, 다음과 같은 실험 장비를 사용하였다.

- ① Flexure guide system
- ② Driver for piezoelectric actuators
- ③ FFT analyzer (HP 35670A)
- ④ Capacitive sensor

본 연구에서 사용된 압전 구동기의 특성은 Table 1 과 같고, 압전 구동기의 전압 증폭기의 특성은 Table 2 와 같다. 가이드 이동부의 변위를 측정하기 위해 정전 용량 형 간극 센서를 사용하였고, 감도는 $0.4V/\mu m$, 그리고 측정 범위는 $500 \mu m$ 이다.

다양한 예압과 입력 크기에 대한 분리 주파수의 변화를 측정하기 위하여 정해진 주파수 영역에서 정현파 가진 실험(Sine sweep test)을 하였다. 주어진 예압과 입력 크기에서, 정현파 가진 실험 시 압전 구동기의 전압 증폭기 입력은 일정하게 유지하고, 가진 주파수가 정해진 주파수 영역에서 연속적으로 변화하게 된다. 동시에 가이드 이동부의 변위를 간극 센서를 사용하여 측정하였고, 입력과 출력의 크기 비와 위상 차를 FFT 분석기를 이용하여 측정하였다.

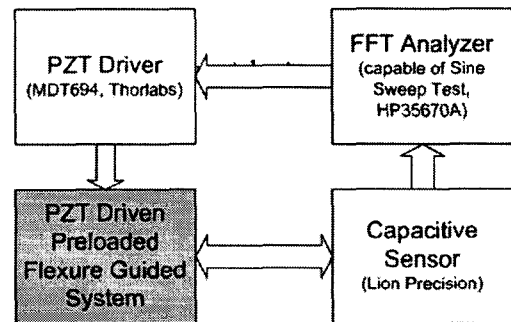


Fig. 5 Experimental setup

Table 1 Characteristics of PZT actuator (AE05016, NEC-Tokin Corp.)

Displacement at 150V input	17.4 ± 2.0 (μm)
Generated force	850 (N)
Resonant frequency	69 (kHz)
Capacitance	1.4 (μF)
Dimension	5x5x20 (mm ³)

Table 2 Characteristics of the PZT driver (MDT694, Thorlabs Corp.)

Maximum external input	10 (V)
Maximum output current	60 (μ A)
Output impedance	50 (Ω)
Output voltage range	0~150 (V)
External input gain	15 \pm 5% (V/V)

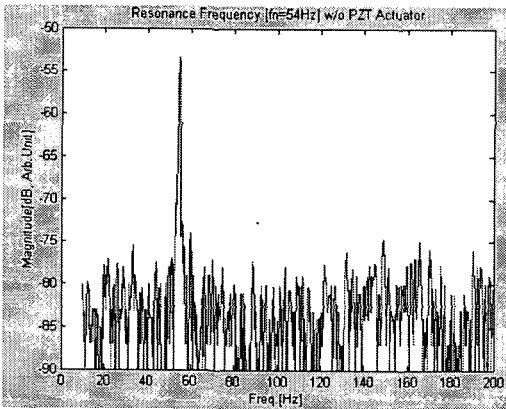


Fig.6 Original resonant frequency of the moving mass without PZT actuator [$f_n = 54\text{Hz}$]

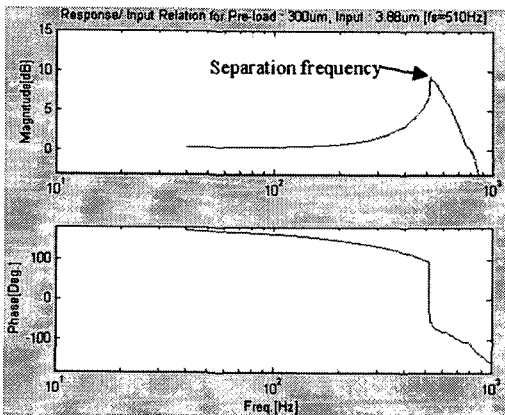


Fig. 7 Response/input relation for preload: 300 μ m, input amplitude: 3.88 μ m

4.2 실험: 가이드의 공진 주파수

압전 구동기가 조립되지 않은 상황에서, 가이드의 첫 번째 공진 주파수는 Fig. 6 과 같이 약 $f_n = 54\text{Hz}$ 이고, 이론 해 및 유한 요소 해석 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

4.3 실험: 분리 주파수

분리 주파수를 실험적으로 증명하기 위하여 다양한 예압과 입력 크기에서 정현파 가진 실험을 행하였다. Fig. 7 에서 예압은 300 μ m, 입력 크기는 3.88 μ m 인 경우, 분리 주파수는

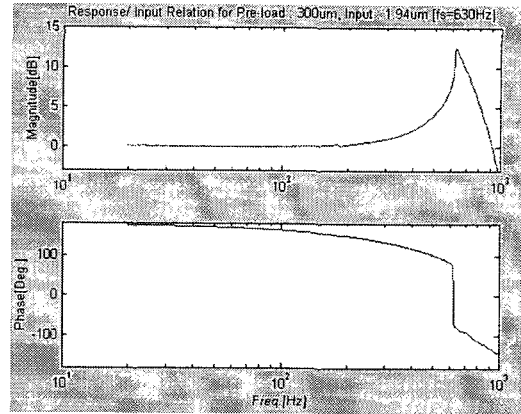


Fig. 8 Response/input relation for preload: 300 μ m, input amplitude: 1.94 μ m

$f_s = 510\text{Hz}$ 이다. 여기서 정규 예압 (d)은 약 77.3 이다. Fig. 7 에서 알 수 있듯이, 분리 주파수까지는 가이드의 출력 변위가 입력과 같지만, 분리 주파수 근처에서 공진시의 거동과 유사하게 출력 변위가 갑자기 증가하며, 위상도 급격하게 변한다. 이 때, 분리 주파수는 가이드의 공진 주파수보다 고 주파수이며, 실제 공진과 같은 운동 특성을 보인다.

Fig. 8 에서 예압은 300 μ m, 입력 크기는 1.94 μ m 인 경우, 분리 주파수는 $f_s = 630\text{Hz}$ 이다. 여기서 정규 예압 (d)은 약 154.6 이다. Fig. 7 의 실험 결과와 비교 시 입력은 약 절반을 인가하였고, 예압은 동일하다. Fig. 8 의 결과에서 분리 주파수는 식 (12)와 같이 입력 크기에 역 비례함을 알 수 있다. Fig. 7 과 같이 응답 특성의 양상은 동일하지만, 분리 주파수는 증가하였다.

Fig. 9 의 경우, 예압은 200 μ m, 입력 크기는 1.94 μ m, 분리 주파수는 $f_s = 475\text{Hz}$ 이다. 여기서 정규 예압 (d)은 약 103.1 이다. Fig. 8 과 Fig. 9 의 실험을 비교하면, 예압은 감소하였고, 입력 크기는 동일하다. Fig. 9 의 결과에서, 분리 주파수는 식 (12)와 같이 예압에 비례함을 알 수 있다.

실험 결과의 명료성을 위해, 가이드의 공진 주파수와 분리 주파수에 국한된(Band-limited) 정현파 가진 실험을 수행하였다. 예압과 입력 크기는 Fig. 8 의 경우와 동일하다. Fig. 10(a)의 결과에서 압전 구동기가 가이드 시스템에 적절한 예압으로 조립이 되었다면, 가이드만의 공진 주파수 근처에서 공진 현상이 관찰되지 않는다. 따라서, 가이드의 공진 주파수

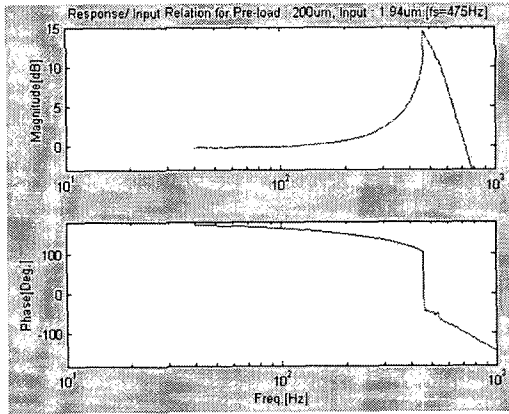


Fig. 9 Response/input relation for preload: 200µm, input amplitude: 1.94µm

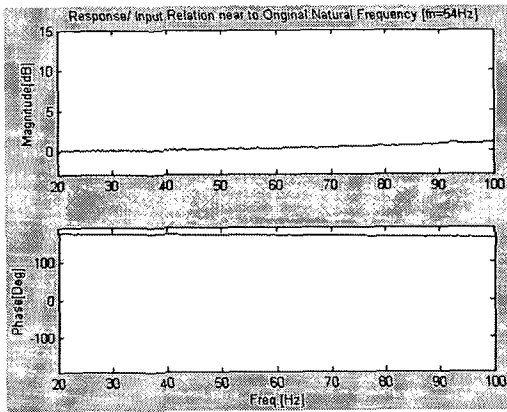


Fig. 10(a) Response/input relation near the original resonant frequency (54Hz)

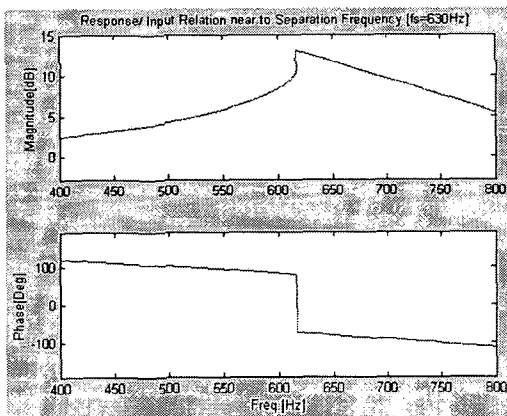


Fig. 10(b) Response/input relation near the separation frequency (630Hz)

이상에서도 시스템을 제어할 수 있게 된다. 또한, Fig. 10(b)의 결과는 Fig. 8의 결과와 일치

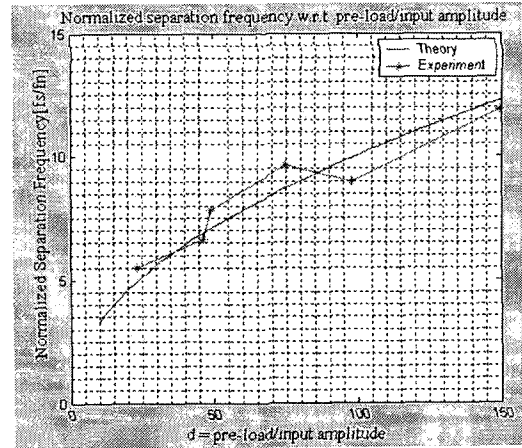


Fig. 11 Dependency of separation frequency on the preload/input amplitude

함을 알 수 있고, 실험의 재현성을 확인할 수 있다.

이상의 결과를 종합하면, 분리 주파수의 이론 해인 식(12)를 실험적으로 증명하였으며, Fig. 11과 같이 이론과 실험을 비교를 위해 실험 결과를 정리하였다. Fig. 11에서 이론 해와 마찬가지로 분리 주파수는 정규 예압에 비례함을 알 수 있다. 이 때, 이론과 실험 결과는 약 10%이내에서 일치한다. 이 결과는 본 연구에서의 주된 이론인 분리 주파수는 예압 및 입력 크기에 따라서 변화함을 증명한다. 분리 주파수의 하한계는 가이드의 공진 주파수이다. 정규 예압을 증가시키면, 분리 주파수는 상한계 ($f_s'' = \sqrt{(K_{eff} + K_p)/M_{eff}}$)에 도달한다.

4.4 실험: 개루프 정현파 추종

분리 주파수 개념과 가이드 공진 주파수(54Hz) 이상에서의 응답 특성을 알아보기 위하여, 개루프 정현파 추종 실험을 수행하였다. Fig. 12에서 알 수 있듯이, 가이드의 이동부가 가이드 공진 주파수 이상(130Hz)에서도 입력을 비교적 충실하게 추종한다. 본 연구의 분리 주파수 개념을 고려하지 않는다면, 최대 구동 주파수는 가이드의 공진 주파수라고 판단할 수 있겠지만, 본 연구 내용과 같이 적절한 초기 변위(예압)를 가하면, 최대 구동 주파수는 시스템의 분리 주파수에 좌우된다. 즉, 가이드의 공진 주파수 이상에서도 적절한 제어기와 피드백 센서를 이용하여, 가이드의 공진 주파수 이상으로 분리 주파수까지 시스템을 제어할 수 있게 된다. 초기 변위(예압)를 인가 시 항복을 피하기 위하여 가이드의 탄성 영역 내에서 가한다.

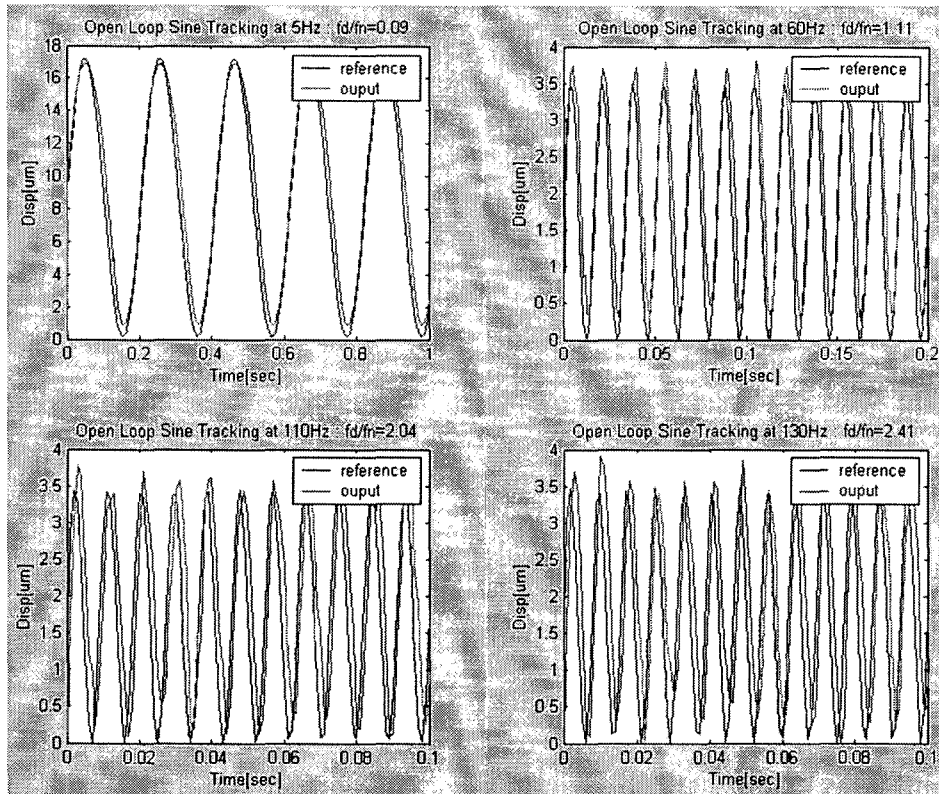


Fig. 12 Open loop sine tracking response: the original resonant frequency (f_n) = 54Hz, the separation frequency (f_s) = 416Hz, the driving frequency (f_d) = 5 ~ 130Hz, the preload = 200 μ m, the input amplitude = 3.88 μ m ($d=51.5$)

4.5 실험: 분해능 평가

본 연구의 평면 스캐너는 구동원으로서 압전 구동기와 재료의 탄성 변형을 이용하는 가이드를 사용하였다. 이러한 구조의 스캐너는 원자현미경과 같이 나노 구동 시스템으로서 사용될 수 있다. 그러나, 본 연구의 가이드와 같이 단순 스프링 형식(Simple linear spring)방식의 가이드는 기생 운동(Parasitic motion error)이 크므로, 실제 현장에서는 사용되지 않지만, 가이드 자체의 성능은 나노 미터 수준이다.⁽⁶⁻⁸⁾ 따라서, 평면 스캐너의 분해능을 판단하기 위해서 일정한 간격으로 이동하는 다단계 계단 입력 실험(Multi-step input test)을 수행하였고, 개루프 실험으로서 압전가진기의 이력 특성을 보상하였다. 실험 결과는 Fig. 13과 같고, 분해능은 약 10nm 정도로 평가되었다. 분해능을 결정짓는 요인은 센서의 노이즈, 외부 환경(진동 및 소음)에 의한 노이즈 등이다. 분해능 측정 실험시 수동형 제진대를 사용하여, 바닥 진동을 차단시켰다.

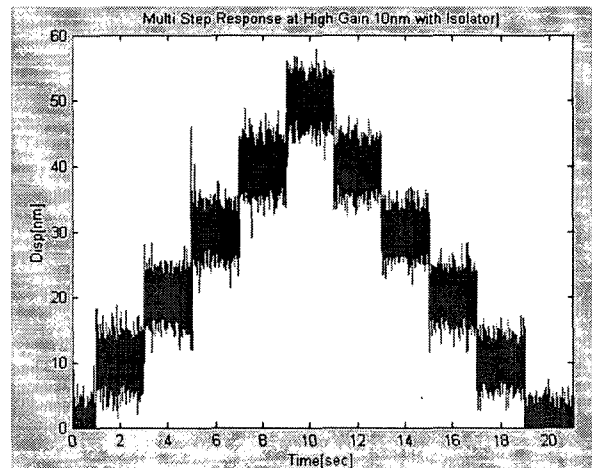


Fig. 13 Multi step response of the flexure guide system

5. 결론 및 토의

본 연구는 압전 구동기와 유연 가이드를

사용하는 평면 스캐너의 분리 주파수에 관한 이론해를 구하였고, 실험을 통하여 증명하였으며, 다음과 같이 요약된다.

(1) 압전 구동기의 수축 시, 가이드 이동부의 출력 가속도가 압전 구동기의 입력 가속도보다 작거나 같을 때, 가이드와 구동기 사이에 분리가 발생한다.

(2) 이론 및 실험 결과에서, 적절한 예압은 분리 주파수를 증가시키며, 따라서, 가진 주파수를 증가 시킬 수 있다.

(3) 분리 주파수는 예압과 입력 크기의 비(정규 예압)에 비례하며, 최대 가진 주파수는 가이드의 공진 주파수가 아니고, 분리 주파수에 의해 결정된다.

향후 나노 구동기의 설계 시 공진 주파수의 증가에 한계가 있다면, 본 연구의 분리 주파수 개념을 사용하여 최대 가진 주파수를 증가시킬 수 있다. 이때, 예압은 재료의 항복이 발생하지 않는 범위 내에서 가한다.

참고문헌

- (1) Smith, S. T., 2003, Flexure: elements of elastic mechanisms, Taylor & Francis Corp, London.
- (2) Yoo, W. D., Kim, J. O. and Park, K. H., 2005, "Development of a Contact-Type Counting Device Using a Piezoelectric Film as a Sensor," Trans. of the KSNVE, Vol. 15, No. 2, pp. 239~247.
- (3) Wei Xu, Tim King, 1996, "Flexure hinges for piezo actuator displacement amplifiers, flexibility, accuracy and stress considerations," Precision Engineering, Vol. 19, pp. 4-10.
- (4) Ryu, J. W., Gweon, D. G., Moon, K. S., 1997, "Optimal design of a flexure hinge based XYθ wafer stage," Precision Engineering, Vol. 21, pp. 18-28.
- (5) Ryu, J. W., Lee, S. Q., Gweon, D. G., Moon, K. S., 1999, "Inverse kinematic modeling of a coupled flexure hinge mechanism," Mechatronics, Vol. 9, pp. 657-674.
- (6) Lee, Dong-Yeon and Lee, M. Y., 2005, "A Flexure Guided Planar Scanner for Scanning Probe Microscope; Part1: Design and Analysis of Static and Dynamic Properties," Trans. of the KSNVE, Vol. 15, No. 6, pp. 667~673.
- (7) Lee, Dong-Yeon, Lee, M. Y. and Gweon, D. G., 2006, "Orthogonality Correction of Planar Sample Scanner for Atomic Force Microscope", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 13 (In press).
- (8) Lee, Dong-Yeon, Kim, D. M. and Gweon, D. G., 2006, "Design and Evaluation of a Two-dimensional Metrological AFM using a Planar Nano-scanner," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 3B (In press).