

3차원 미세형상 측정용 탄성힌지 기반 압전구동식 격자 스캐너

A Piezo-Driven Grating Scanner Based on Flexure Hinges for Measuring 3-Dimensional Microscopic Surface

최 기 봉*, 텐 알렉세이 대성, 이 재 중, 김 성 현, 고 국 원, 권 순 기

(Kee-Bong Choi, Aleksey-Deson Ten, Jae Jong Lee, Sung-Hyun Kim, Kook Won Ko, and Soon Ki Kwon)

Abstract: This paper proposes a grating scanner which is driven by a stack-type piezoelectric element. The mechanism of the grating scanner is based on flexure hinges. Using some constraints, the compliant mechanism is designed and then verified by Finite Element Analysis. The designed compliant mechanism is manufactured by wire electro-discharge machining, and then integrated with a stack-type piezoelectric element for actuation and a capacitance displacement sensor for measuring ultra-precision displacement. Experiments demonstrates the characteristics and the performances of the grating scanner using the terms of working range, resonance frequency, bandwidth and resolution. The grating scanner is applicable to a Moiré interferometry for measuring 3-dimensional microscopic surface.

Keywords: stack-type piezoelectric element, grating, scanner, flexure hinge, notch hinge

I. 서론

마이크로 부품의 형상측정 및 검사시스템으로는 3차원 광학식 비접촉 측정방법이 널리 사용되고 있다. 이 중 모아레 무늬를 갖는 격자 스캔방식의 간섭계는 측정영역 및 속도의 측면에서 매우 우수하기 때문에 고속 측정 및 검사 시스템에 유리하다[1].

모아레 간섭계는 모아레 무늬가 있는 격자를 주사(走射)해 가며 마이크로 부품의 표면에 투사된 격자의 무늬를 해석해서 부품의 형상을 얻는다[2]. 이 때 격자를 고속으로 주사하는 것이 매우 중요하며, 주로 압전 구동기를 이용한 스캐너 시스템을 이용하고 있다. 이것은 압전소자의 빠른 동특성을 이용한 것으로, 특히 적층형 압전소자는 nm 의 분해능으로 수 천 N 의 힘을 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 발생할 수 있는 변위는 무부하 상태에서 압전소자 길이의 0.1 % 정도에 지나지 않기 때문에 수십 μm 를 스캔하기 위해서는 수십 mm 의 압전소자를 사용하거나, 변위증폭 메커니즘을 이용해야 한다. 또한 히스테리시스(hysteresis) 및 이력(creep) 현상과 같은 비선형성이 존재하기 때문에 압전소자의 거동을 정확히 모델링하는 것은 사실상 불가능하지만, 압전소자의 변위를 측정된 후 제어를 이용하여 나노 분해능의 초정밀 위치결정을 실현할 수 있다.

스캐너 시스템은 미소영역에서 고속으로 구동하기 때문에 운동안내를 위해서 기존의 베어링과 같은 접촉식 관절 보다 탄성힌지에 의한 메커니즘을 이용한 비접촉·비마찰 안내 메커니즘이 효과적이다. 여기서 탄성힌지란 강체 또는 링크를 연결하는 미소변위용 스프링을 의미하는 것으로 탄성관

절로 응용된다. 일반적으로 임의의 한 물체 내에서 다 부분에 비해 상대적으로 가는 부분을 지칭하는 것으로 단일체로 제작된다. 제작방법으로는 와이어 방전가공, 지그 보링 및 에칭 등이 있다. 탄성힌지는 미소영역 내에서 스프링으로 작용하기 때문에 선형적인 힘과 변위의 관계가 성립하며, 비마찰 및 연속운동 능력을 가지고 있기 때문에 초정밀 위치결정 및 미세 고속 주사용 메커니즘에 응용되고 있다. 특히 탄성힌지를 기반으로 한 메커니즘[3-5]은 나노 및 마이크로 운동 및 조작에 매우 유용하다.

탄성힌지는 노치형과 복합형으로 분류할 수 있다. 노치형 힌지는 원형 노치 힌지, 타원 노치 힌지 및 판스프링형 힌지 등이 있다[6,7]. 노치형 힌지는 탄성힌지 메커니즘의 기본을 구성하는 것으로 회전운동 방향으로 변형을 일으킨다. 이것은 매우 미소한 영역에서의 변형을 발생시키기 때문에 회전영역이 커 질수록 기본적인 노치형 힌지만으로 전 회전영역을 담당할 수 없다. 이것을 개선하기 위하여 복합형 힌지가 고려되었으며, 이것은 다 수의 노치형 힌지 들로 구성된 일종의 탄성 메커니즘이다. 십자교차형 힌지(cross strip pivot) 및 십자형 힌지(cartwheel hinge), 등이 복합형 힌지에 속한다[6].

1축 선형운동을 위한 탄성힌지 메커니즘으로는 4절 링크 탄성 메커니즘(four-link compliant mechanism) 및 이중복합선형 탄성 메커니즘(double compound linear compliant mechanism)등이 있다. 전자는 구조가 단순한 반면 구동축과 수직 방향으로 미소한 기생오차가 발생한다는 단점이 있다. 반면, 후자는 전자의 기생오차 발생의 단점을 극복한 메커니즘으로 초정밀 운동에 많이 응용되고 있으나, 구조가 전자에 비해 복잡하다는 단점이 있다. 전자의 경우 운동축의 수직방향 오차가 전체 시스템에 별로 문제를 발생시키지 않을 경우 단순구조 때문에 선호되고 있다.

본 연구에서는 2개의 격자를 동시에 구동시킬 수 있는 적층형 압전소자 구동형 격자 스캐너를 제안한다. 기존의 상용 스캐너는 일반적인 용도로 개발되었기 때문에 격자주사만을 목적으로 개발된 스캐너는 존재하지 않기 때문에 기존의 스캐너에 격자를 설치하기 위해서는 부가적인 장치가 요구

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 5. 15., 채택확정: 2009. 6. 15.

최기봉, 텐 알렉세이 대성, 이재중: 한국기계연구원 나노융합기계본부 (kbchoi@kimm.re.kr/tendeson@kimm.re.kr/jilee@kimm.re.kr)

김성현: 넥스타테크놀로지(주) 연구소 광학팀(ksh@nexstar21.com)

고국원: 선문대학교 정보통신공학과(kuks2309@sunmoon.ac.kr)

권순기: 호서대학교 산학협력단(skkwon@hoseo.edu)

※ 본 연구는 지식경제부 성장동력 중기거점/차세대신기술개발사업 및 교육과학기술부 첨단연구분석장비개발사업에 의해 지원, 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

된다. 따라서 본 연구와 같이 2개의 격자를 동시에 구동하는 특수한 스캐너는 목적과 사양에 맞게 특수 설계 및 제작되어야 한다. 스캐너의 안내 메커니즘의 구조는 이중복합선형 탄성 메커니즘에 비해 구조가 간단한 4절 링크 탄성 메커니즘의 운동안내 메커니즘을 채택한다. 또한 압전소자의 미세한 변위를 지렛대형 변위증폭 메커니즘에 의해 증폭시켜 운동안내 메커니즘을 구동시키도록 한다. 격자 스캐너의 개발을 위해 격자 스캐너의 설계 기본방향을 정한 후, 설계를 수행하여 스캐너를 제작하고, 실험을 통해서 그 유효성을 타진하고자 한다.

II. 격자 스캐너의 구조

적층형 압전소자에 의해 구동되는 격자 스캐너는 탄성힌지 관절을 갖는 4절 링크 메커니즘으로 1축 선형운동을 한다. 적층형 압전소자는 전기장이 인가될 경우 무부하 상태에서 길이의 0.1%에 상당하는 변위가 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 격자 스캐너의 크기가 소형이며, 적층형 압전소자의 길이 또한 최대 수십 mm에 지나지 않기 때문에 압전소자에 의해 격자 스캐너를 구동할 경우 최종 변위가 너무 작아 확대할 필요성이 요구된다. 본 연구에서는 탄성힌지를 갖는 지렛대 방식의 변위증폭 메커니즘을 이용한다.

제안된 격자 스캐너의 그림 1과 같이 이동부에 격자를 2개 배치하여 동시에 구동시키도록 하였다. 격자 스캐너는 적층형 압전소자, 지렛대형 변위확대 메커니즘, 4절 링크, 예압 스프링 및 정전용량형 변위센서로 구성된다. 각 관절은 원형노치를 갖는 탄성힌지로 구성된다. 스캐너를 조립할 때 압전소자의 한쪽 면은 점접촉을 하기 때문에 조립상태유지를 위해 예압 스프링이 필요하다. 또한 격자의 운동제어를 위해서 정전용량형 변위센서에 의해 나노 분해능으로 변위가 측정된다. 압전소자에 전기장이 인가되면, 압전소자에서 힘이 발생되며, 이 힘에 의해 각 탄성힌지가 회전방향으로 미세변형을 하기 때문에 각 탄성힌지는 관절의 역할을 담당할 수 있다. 따라서 각 관절의 회전변위에 의해 지렛대의 변위확대와 최종적으로 격자의 선형운동이 완성된다.

III. 격자 스캐너의 수학적 모델

격자 스캐너의 매개변수에 대한 스캐너 특성 및 성능의 해석을 위해 스캐너의 운동방정식을 구해야 한다. 탄성힌지 메커니즘의 모델링을 위해서는 탄성힌지의 강성행렬을 구한 후, 각 강체(rigid body) 내의 임의의 좌표에서 탄성힌지의 강

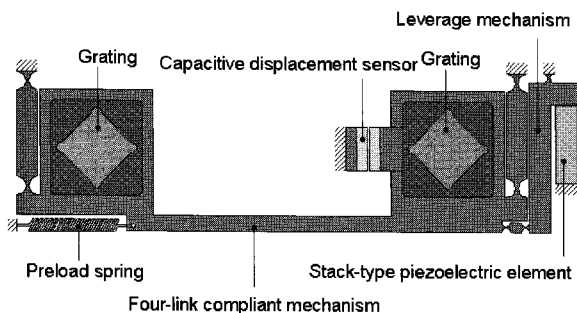


그림 1. 격자 스캐너의 구조.
Fig. 1. The structure of a grating scanner.

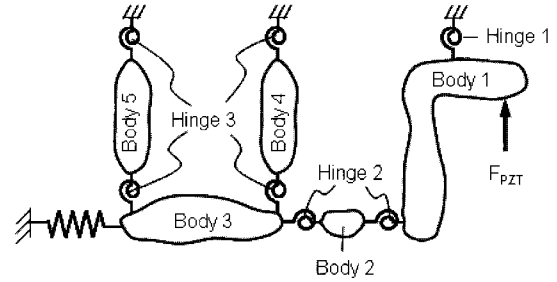


그림 2. 격자 스캐너의 질량-스프링 모델.
Fig. 2. Mass-spring model of the grating scanner.

성을 표현하여 행렬식으로 기술한 운동방정식 모델[8]이 유용하다.

탄성힌지 이외의 물체를 강체이고, 각 강체는 평면운동만 한다고 가정하자. 각 강체의 질량행렬과 각 탄성힌지의 강성행렬은 각각 3x3 정방행렬로 표현되며, 이것을 이용한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\tilde{M}\ddot{q} + \tilde{K}q = Q \tag{1}$$

여기서 그림 2와 같이 강체는 5개가 존재하므로 상당질량행렬 \tilde{M} 은 15x15의 행렬로 표현되며 다음과 같다.

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & M_5 \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 아래첨자 1~5는 각 강체를 나타낸다. 또한 각 강체에 연결된 탄성힌지의 상당강성행렬은 15x15의 행렬로 표현되며 다음과 같다.

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} \tilde{K}_{11} & -\tilde{K}_{12} & \dots & -\tilde{K}_{15} \\ -\tilde{K}_{21} & \tilde{K}_{22} & \dots & -\tilde{K}_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\tilde{K}_{51} & -\tilde{K}_{52} & \dots & \tilde{K}_{55} \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서 각 아래첨자는 번호에 상당하는 강체들 사이의 연결관계를 나타낸다. 따라서 각 요소행렬 \tilde{K}_{ij} 는 i번째 강체와 j번째 강체 사이에 존재하는 탄성힌지의 기하학적 연결관계에 의한 좌표변환에 의해 표현된다.

Q 는 각 강체의 기준점에 작용하는 15x1의 힘 벡터이고, q 는 각 강체의 기준점의 변위를 나타내는 15x1의 변위 벡터이다. 여기서는 압전소자에 의해 발생하는 힘이 변위확대 메커니즘의 지렛대에만 작용한다. 압전소자에 의해 발생하는 힘 벡터 F_{PZT} 는 다음과 같이 표현된다[9].

$$F_{PZT} = K_V E - K_{PZT} q_{PZT} \tag{4}$$

여기서 K_V , K_{PZT} , E 및 q_{PZT} 는 각각 전압상수, 압전소자의 스프링상수, 인가전압 및 압전소자의 변위이다. 식 (4)의 우변의 첫 번째 항은 인가된 전압에 의해 발생하는 힘이며, 두 번째 항은 압전소자의 강성에 의한 힘이다. 따라서 압전소자를 탄성힌지로 모델링하고, 탄성힌지에서 인가전압에 의해 힘이 발생하는 것으로 고려할 수 있다. 식 (4)의 우변 첫번째

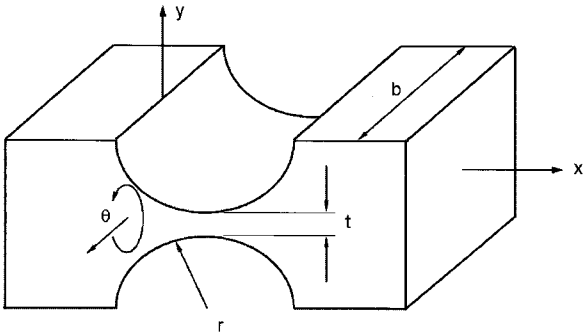


그림 3. 원형노치 힌지.
Fig. 3. Circular notch hinge.

항인 인가전압에 의한 발생력이 강체 i 에 작용할 때, 힘 벡터는 다음과 같이 변환된 좌표로 표현할 수 있다.

$$Q_i = [K_V E \mid r \times K_V E]^T \quad (5)$$

여기서 r 은 힘이 작용 위치에서 지렛대의 회전중심까지의 변위벡터이다. 또한 식 (4)의 우변 두번째 항은 압전소자를 탄성힌지로 고려한 것으로 식 (1)의 좌변 두번째 항의 일부로 모델링된다.

본 연구에 사용된 탄성힌지는 원형 노치 힌지로서 그림 3과 같은 형태이다. 그림 3과 같은 좌표에서 원형 노치의 컴플라이언스 행렬 C 는 다음과 같다.

$$C = \begin{bmatrix} c_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & c_{yy} & c_{y\theta} \\ 0 & c_{\theta y} & c_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서

$$c_{xx} = \frac{\pi}{Eb} \left(\sqrt{\frac{r}{t}} - \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

$$c_{yy} = \frac{9\pi r^{5/2}}{2Ebt^{5/2}} + \frac{3\pi r^{3/2}}{2Ebt^{3/2}} \quad (8)$$

$$c_{y\theta} = c_{\theta y} = \frac{9\pi r^{3/2}}{2Ebt^{5/2}} \quad (9)$$

$$c_{\theta\theta} = \frac{9\pi r^{1/2}}{2Ebt^{5/2}} \quad (10)$$

또한 E 는 탄성힌지 재료의 탄성계수를 나타낸다. 탄성힌지의 강성행렬 K 는 컴플라이언스 행렬의 역행렬로 다음과 같이 표현된다.

$$K = C^{-1} \quad (11)$$

IV. 격자 스캐너의 설계

격자 스캐너의 메커니즘 용으로 283 mm × 92 mm × 20 mm의 AL-7075 평판이 준비되었다. 또한 구동원으로 36 mm × 10 mm × 10 mm의 적층형 압전소자가 준비되었다. 격자 스캐너의 설계를 위해서 다음과 같은 구속조건이 고려되었다. 첫째, 첫번째 압전소자를 제외한 메커니즘의 공진주파수 f_1 은 기준주파수 f_d 보다 커야 한다.

$$f_1 \geq f_d \quad (12)$$

다음은 압전소자에 최대전압을 인가할 때 발생하는 격자의 최대변위 δ_{max} 은 기준변위 δ_d 보다 커야 한다.

$$\delta_{max} \geq \delta_d \quad (13)$$

마지막으로 최대변위 상태에서 발생하는 탄성힌지에서의 최대응력 σ_{max} 은 재료의 항복응력 σ_Y 보다 작아야 한다.

$$\sigma_{max} \leq \frac{\sigma_Y}{S_f} \quad (14)$$

여기서 S_f 는 안전계수이다.

최대응력은 최대변위 상태에서 원형 노치 힌지의 목 부분에서 발생한다. 각 원형 노치 힌지의 회전량이 θ 일 경우, 목 부분에서 발생하는 응력 σ_i 는 다음과 같다.

$$\sigma_i = K_i \frac{6}{bt^2} c_{\theta\theta} \theta_i \quad (15)$$

여기서 K_i 는 응력집중계수로 다음과 같다[10].

$$K_i = \frac{2.7t + 5.4r}{8r + t} + 0.325 \quad (16)$$

위의 구속조건 (12)-(14)를 만족하는 원형 노치 힌지의 반경 r 및 목 부분의 폭 b 를 구하고자 한다. 구속조건에 사용되는 기준값 f_d , δ_d , σ_Y 는 각각 100 Hz, 80 μm, 505 MPa이다. 최대응력 계산에 사용된 S_f 는 10이다. 이 때 위의 구속조건을 만족하는 각 노치의 설계변수는 표 1과 같다. 또한 표 1의 선택된 설계변수에 의해 계산된 격자 스캐너의 특성은 표 2와 같다.

ANSYS를 이용한 요한요소 해석을 통해서 계산된 특성치들과 비교하였다. 그림 4는 선택된 설계변수에 의해 설계된 격자 스캐너의 정해석 결과이다. 압전소자에 최대전압이 인가될 때, 압전소자에서 발생하는 힘에 의해 변위증폭 메커니즘을 통해 4절 탄성링크의 격자가 최대 91.7 μm의 변위가 도달함을 알 수 있다. 또한 그림 5는 압전소자 이외의 메커니즘에서 발생하는 최대응력을 해석하였다. 그림 5와 같이 변위 증폭 메커니즘의 회전 중심용 힌지에서 발생하였고, 그

표 1. 설계변수.

Table 1. Design parameters.

Param.	Value (mm)	Comment
r_1	2.00	Rotational center of displacement amplification mechanism
b_1	1.00	
r_2	2.00	Connector between displacement amplification and 4-link mechanisms
b_2	0.50	
r_3	4.35	4-link mechanism
b_3	1.00	

표 2. 계산된 특성치.

Table 2. Calculated characteristics.

Characteristic	Value	Comment
f_1	120 Hz	The first resonance frequency
δ_{max}	93 μm	Maximum displacement
σ_{max}	43 MPa	Maximum stress

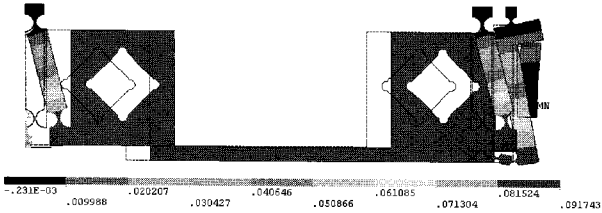


그림 4. 변위 해석.
Fig. 4. Displacement analysis.



그림 5. 응력 해석.
Fig. 5. Stress analysis.



그림 6. 모드 해석.
Fig. 6. Modal analysis.

값은 47 MPa이다.

모드 해석을 통해서 압전소자를 제외한 메커니즘에서 발생하는 첫 번째 공진주파수를 해석하였다. 그림 6과 같이 운동방향은 정해석과 동일하게 수평축 방향이며, 이 때의 첫 번째 공진주파수는 125 Hz이다. 두 번째 이상의 공진 주파수는 강체라 가정했던 물체 들의 변형 모드로서 첫 번째 공진 주파수 보다 5 배 이상 큰 공진 주파수를 갖는다. 이러한 두 번째 이상의 모드들의 변위는 매우 작기 때문에 고려대상에서 제외되었다.

V. 격자 스캐너의 실험 및 고찰

선택된 설계변수를 기반으로 격자 스캐너를 제작하였다. 그림 7은 가공된 격자 스캐너에 적층형 압전소자와 용량형 변위센서를 조립한 형상이다. 격자 스캐너는 와이어 방전가공을 이용해서 가공하였다.

격자 스캐너의 압전소자에 임펄스 전압을 인가하여 스펙트럼 실험을 수행하였다. 그림 8은 주파수 스펙트럼의 실험

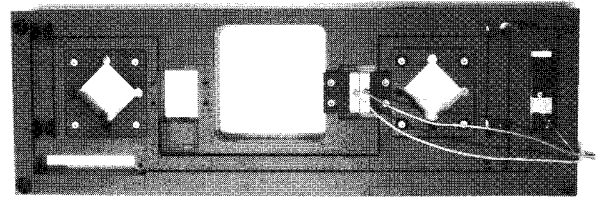


그림 7. 격자 스캐너.
Fig. 7. Grating scanner.

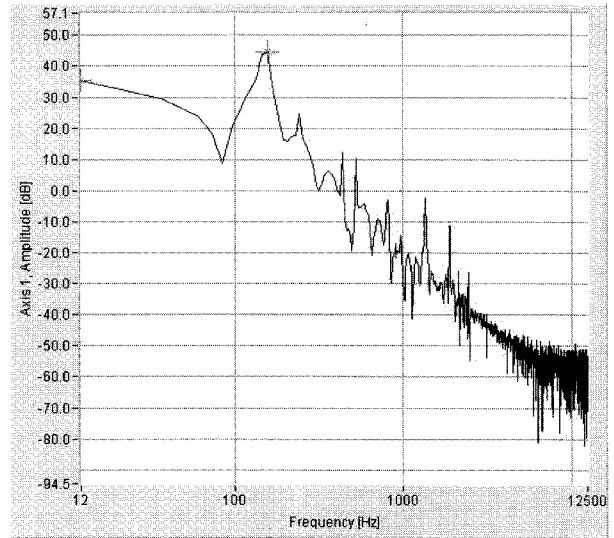


그림 8. 주파수 응답.
Fig. 8. Frequency response.

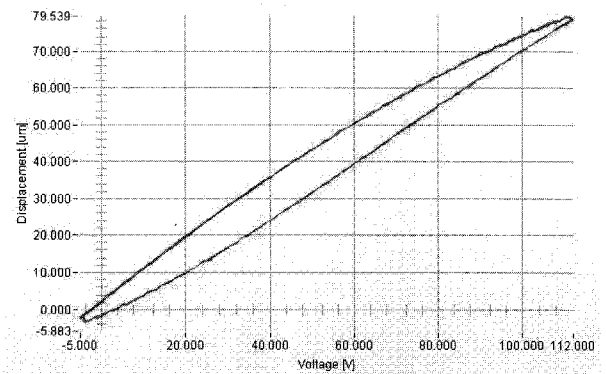


그림 9. 구동영역 측정.
Fig. 9. Measurement of working range.

결과이다. 실험 결과 158 Hz의 공진주파수가 발생됨을 알 수 있다. 이 값은 계산 및 해석된 값과는 차이를 보이는데, 이 이유 중 하나로서 가공된 격자 스캐너가 설계치 보다 더 큰 강성을 갖도록 가공이 된 것으로 추측할 수 있다. 또 다른 하나는 계산 및 해석치는 압전소자가 배제된 메커니즘만을 고려한 것이며 실험치는 압전소자에 전압을 인가하여 메커니즘의 주파수 스펙트럼을 실험한 것으로, 압전소자의 영향이 메커니즘에 전달되어 나타난 현상이라 할 수 있다.

그림 9는 압전소자에 -5 V에서 120 V의 전압을 인가해 가며 격자 스캐너의 구동영역을 측정한 결과이다. 개회로 시스템이기 때문에 인가된 전압이 증가 후 감소함에 따라 히스테

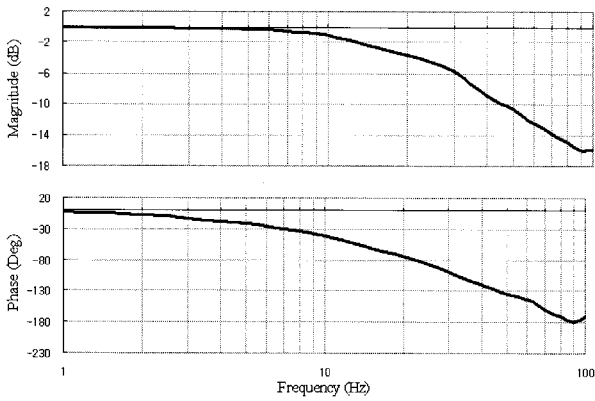


그림 10. 폐회로 주파수 응답.
Fig. 10. Frequency response in closed loop state.

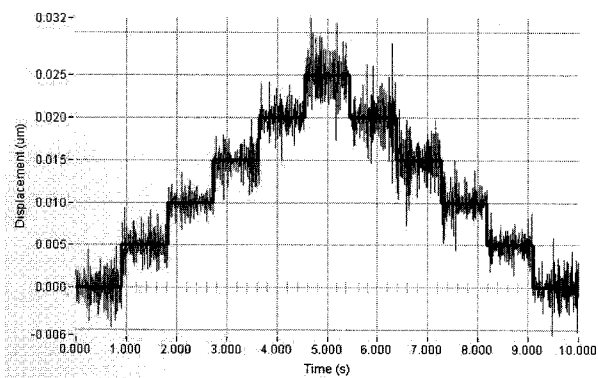
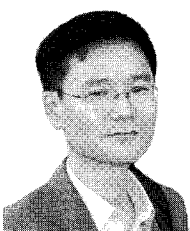


그림 11. 분해능 실험.
Fig. 11. Resolution test.

리시스가 발생되었다. 이것은 압전소자의 특성이 그대로 반영된 결과이다. 센서의 측정 범위 한계로 인하여 80 μm 이상은 측정이 어려웠다. 112 V 근방에서 측정 범위가 포화되었다. 그러나 이 결과로 미루어 보아 격자 시스템은 80 μm 이상의 구동범위를 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 PI 제어를 통해서 구현한 시스템의 주파수 응답을 실험한 결과이다. 실험을 통해 제어된 격자 스캐너는 약 20 Hz의 주파수 대역폭(bandwidth)을 갖는 것으로 확인되었다.

그림 11은 격자 스캐너의 분해능 실험한 결과이다. 다만 계단응답을 통해서 개발된 격자 스캐너는 5 nm의 분해능을 갖는다.



최기봉

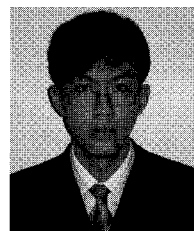
1963년 3월 31일생. 1985년 전북대학교 정밀기계공학과(공학사). 1988년 KAIST 생산공학과(공학석사). 1998년 KAIST 기계공학과(공학박사). 2001년~현재 한국기계연구원 책임연구원. 관심분야는 압전소자 응용 초정밀 메커니즘 설계 및 제어, 탄성힌지 메커니즘 개발, 나노임프린트 기술.

VI. 결론

본 연구에서는 4절 링크 탄성 메커니즘의 운동안내 메커니즘과 지렛대형 변위증폭 메커니즘을 갖는 적층형 압전소자 구동형 격자 스캐너를 제안하고, 격자 스캐너의 설계기본 방향을 정한 후 설계를 수행하였다. 그 후 스캐너를 제작하고 실험을 통해 그 유효성을 증명하였다. 구속조건을 기반으로 설계된 격자 스캐너는 유한요소 해석을 통해 특성을 비교하였고, 계산치와 해석치가 서로 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 실험을 통해서 격자 스캐너의 특성과 성능이 실험되었다. 개발된 격자 스캐너는 PI 제어를 통해서 80 μm 이상의 변위와 20 Hz의 밴드폭 및 5 nm의 분해능을 갖는 것으로 확인되었으며, 이 것은 모아레 간섭계의 격자 스캐너로 응용 가능하다.

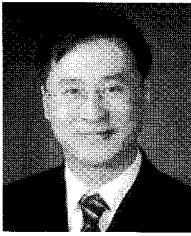
참고문헌

- [1] 김기홍, 이득우, "Micro-factory 공정간 마이크로 부품 검사 프로브 개발," 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 424-428, 2005.
- [2] 최이배, 위상천이 모아레 토포그래피를 이용한 3차원 물체의 미세형상측정, KAIST 박사학위논문, 1998.
- [3] Y. Tian, B. Shrinzadeh, and D. Zhang, A flexure-based five-bar mechanism for micro/nano manipulation, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 153, no. 1, pp. 96-104, 2009.
- [4] D. Kang, K. Kim, D. Kim, J. Shim, D.-G Gweon, and J. Jeong, "Optimal design of high precision XY-scanner with nanometer-level resolution and millimeter-level working range," *Mechatronics*, vol. 19, no. 4, pp. 562-570, 2009.
- [5] M. N. M. Zubir, B. Shirinzadeh, and Y. Tian, "Development of a novel flexure-based microgripper for high precision micro-object manipulation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 150, no. 2, pp. 257-266, 2009.
- [6] S. T. Smith, *Flexures: Elements of Elastic Mechanisms*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 2000.
- [7] N. Lobontiu, *Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges*, CRC Press LLC, Florida, USA, 2003.
- [8] K.-B. Choi, Dynamics of a compliant mechanism based on flexure hinges, *J. Mechanical Engineering Science*, vol. 219, no. C2, pp. 225-235, 2005.
- [9] K.-B. Choi and J. J. Lee, "Static model for flexure-based compliant mechanism driven by piezo stacks," *J. Mechanical Engineering Science*, vol. 222, no. C4, pp. 703-709, 2008.
- [10] J. Tlustý, S. Smith, and C. Zamudia, "Operation planning based on cutting process model," *Ann. CIRP*, vol. 39, pp. 517-521, 1990.



텐 알렉세이 대성

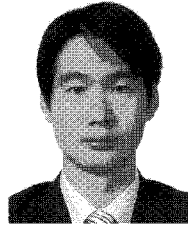
1983년 12월 19일생. 2001년 Novosibirsk State Technical University(러시아) 기계자동차공학과(공학사). 2005년 울산대학교 기계자동차공학과(공학석사). 2008년~현재 한국기계연구원 연구원. 관심분야는 압전소자 응용 초정밀 메커니즘.



이재종

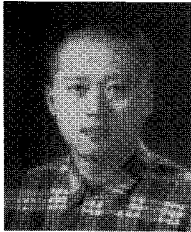
1961년 5월 18일생. 1985년 전북대학교 정밀기계공학과(공학사). 1987년 KAIST 생산공학과(공학석사). 1998년 KAIST 기계공학과(공학박사). 1987년~현재 한국기계연구원 책임연구원. 2005년~현재 과학기술연합대학원대학교 겸임교수. 관

심분야는 나노 임프린트 공정/장비기술, 나노소자기술.



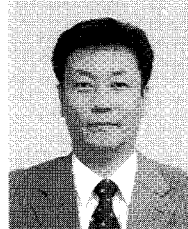
김성현

1977년 12월 27일생. 2000년 대진대학교 물리학과(이학사). 2002년 대진대학교 물리학과(이학석사). 2009년~현재 한양대학교 물리학과(박사과정). 2006년~현재 넥스타테크놀로지 과장. 관심분야는 색채, 분광, 바이오광계측, 3D 형상측정.



고국원

1970년 8월 8일생. 1992년 서울대학교 농업기계학과(공학사). 1994년 KAIST 정밀공학과(공학석사). 2001년 KAIST 기계공학과(공학박사). 2002년~현재 선문대학교 정보통신공학과 조교수. 관심 분야는 3D 측정, 영상처리.



권순기

1960년 9월 5일생. 1983년 숭실대학교 기계공학과(공학사). 1985년 Wayne State University(공학석사). 1990년 Iowa State University(공학박사). 2009년~현재 호서대학교 산학협력단 대외협력실장. 관심 분야는 최적설계, 구조해석.