나노 스케너용 더블-벤트 유연가이드에 대한 연구

박은주*, 이영형*, 이동연**
*기계공학부
**영남대학교
e-mail: dylee@ynu.ac.kr

A double-bent planar leaf flexure for a nano-scanner

Eun-Joo Park*, Young-Hyoung Lee*, Dong-Yeon Lee**
*School of Mechanical Engineering
**Yeungnam University

요 약

본 논문에서는 나노 분해능을 가지면서 수mm의 이송능력을 가지는 AFM용 스캐너의 구현을 위하여 새로운 형태의 더블-벤트 유연 가이드를 연구하였다. Castigliano 이론을 이용하여 유연 가이드의 강성을 구하였으며, 모든 과정은 FEA(Finite Element Analysis)를 통하여 이론의 타당성을 검증하였다. 또한, 더블-벤트 유연 가이드의 성능 검증을 위하여 평면 스캐너의 모델링에 응용하여 보았다. 응용된 평면 스캐너의 구성 요소 성분 변수들은 Double-bent 유연 가이드의 나노 분해능 및 이송 변위의 최대화를 구현함과 동시에 빠른 응답 속도를 보장하기 위해 최적화 설계를 통하여 이루어졌다. 더블-벤트 유연 가이드를 적용한 평면 스캐너 역시 FEA를 통한 검증 단계를 거쳤다.

1. 서론

정밀이송장치는 정밀기계, LCD장비, AFMs (Atomic Force Microscopes), STMs (Scanning Tunneling Microscopes), 정밀 광학기기등 다양한 분야에 사용되고 있다. 특히 나노기술분야의 정밀 스캐너는 소형크기, 빠른 응답 속도, 나노분해능, 이송 변위의 최대화 구현을 필요로 하게 되었다.

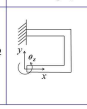
이러한 요구사항들을 구현하기 위해 나노스캐너는 부드러운 움직임과 기생오차가 발생하지 않는 가이딩 메커니즘을 요구한다. 다양한 가이드 메커니즘 중 유연가이드가 짧은 거리 또는 적당한 범위의 이송에 가장 적합하다. [1,2]

평면 스캐너는 적층형이나 단일형으로 구성이 되어진다. 적층형 스캐너는 X축, Y축, 회전이 가능한 스테이지로 구성되어 있다.[3-5] 적층형 스캐너가 축사이에 커플링 오류들을 최소화 할 수 있지만 전체 크기와 질량이 증가되어 진다. 그리고 엑츄에이터와 나사등 조립 부품의 숫자가 많아지고 조립공정이 복잡해 지는 단점이 있다. 이 논문에서는 긴 이송거리와 나노 분해능을 가지고 있는 더블-벤트 유연가이드를 설명 할 것이다. 소형 크기와 긴 이송변위를 가지기 위해 단일체 구조의 유연가이드를 선택하였다. 이론 강성은 FEA(Finite Element Analyses)통해 검증하였다. 단일체 평면 나노스캐너에 대한 최적화 설계를 하였고 FEA를 통해 검증했다.

2. 평면 유연가이드의 분석

유연가이드는 [표1]에서와 같이 분류된다. 싱글 유연가이드는 2축을 가이드 할 수 있다. 그러나 싱글 유연가이드는 이송변위가 작다.[6-8] 싱글 벤트 유연가이드는 2축의 직선운동과 1축의 회전운동을 가이드 할 수 있고 중간 이송변위(~100㎛)를 갖는다.[9,10] 2장에서는 더블-벤트 굴곡 가이드의 분석과 FEA를 통한 검증에 관한 내용을 서술해 놓았다.

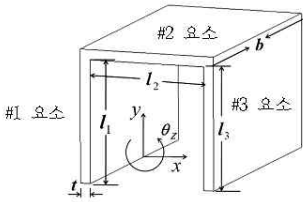
[표 1] Schematic diagram of a flexural element. *H* is the horizontal force, V is the vertical force, and M is the moment.

Flexure guide		Degrees of freedom	Features
Single leaf		2	Coupled error Small range of travel
Single-bended leaf		3	Medium range of travel Medium overall stiffness
DOUBLE-BENDED LEAF		3	**LARGE RANGE OF TRAVEL LOW OVERALL STIFFNESS MINIMAL COUPLED ERROR**

2.1. 더블-벤트 유연가이드의 강성

[그림1]에서와 같이 더블벤트 유연가이드의 강성을 구하였고 Castigliano의 이론을 사용하여 다음과 같

은 요소(#1, #2, #3)에 저장된 변형 에너지를 식으로 표현하였다.



[그림 1] Schematic diagram of a leaf spring. l_1 ,l_2, l_3, t and b are lengths, the thickness and the width, respectively. The moment of inertia is $I_{zz}=bt^3/12$.Schematic diagram of a flexural element. H is the horizontal force, V is the vertical force, and M is the moment.

$$U_1 = \frac{H^2 l_1}{2AE} + \int_{l_1} \frac{(M + V(l_1 - x_1))^2}{2EI} dx_1 \quad (1)$$

$$U_2 = \frac{V^2 l_2}{2AE} + \int_{l_2} \frac{(M + Vl_1 + H(l_2 - y_2))^2}{2EI} dy_1 \quad (2)$$

$$U_3 = \frac{H^2 l_3}{2AE} + \int_{l_3} \frac{(M + Vl_1 + Hl_2 - V(l_3 - x_3))^2}{2EI} dy_3 \quad (3)$$

다음 식과 같이 가이드내의 모든 변형에너지를 표현할 수 있다.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (4)$$

또한 압축과 인장으로 인한 변형에너지는 굽힘에 의한 변형과 비교해 무시할 수 있다. 그러므로 식(4)와 같이 간소화 할 수 있다.

$$U \approx \int_{l_1} \frac{(M + V(l_1 - x_1))^2}{2EI} dx_1 + \int_{l_2} \frac{(M + Vl_1 + H(l_2 - y_2))^2}{2EI} dy_1 + \int_{l_3} \frac{(M + Vl_1 + Hl_2 - V(l_3 - x_3))^2}{2EI} dy_3 \quad (5)$$

2.1.1 수직 강성

수직이동에 의한 수직 힘과 모멘트에 의해 발생한 변형은 없는 것으로 가정한다. V=F의 가정은 식(6)~(7)에 적용된다.

$$\delta_H = \frac{\partial U}{\partial H} = 0 \quad (6)$$

$$\delta_M = \phi_M = \frac{\partial U}{\partial M} = 0 \quad (7)$$

$$H = -\frac{24}{25}F,\ M = -\frac{14}{75}lF \quad (8)$$

수직 처짐은 다음과 같은 방정식을 통해 도출 되어 진다.

$$q_V = \delta_V = \frac{\partial U}{\partial V} \quad (9)$$

$$\delta_V = \frac{l^3}{3EI}F \quad (10)$$

유연가이드의 수직 강성은 식(11)로 표현된다.

$$k_V = \frac{F}{q_V} = \frac{3EI}{l^3} \quad (11)$$

2.1.2 수평 강성

수평이동에 의한 수직 힘과 모멘트에 의해 발생하는 변형은 없는 것으로 가정한다. 다음과 같이 수직 강성을 구할 때 적용한 과정을 적용하여 식을 구하였다. 수평 힘 H는 F로 가정한다.

$$\delta_V = \frac{\partial U}{\partial V} = 0 \quad (12)$$

$$\delta_M = \phi_M = \frac{\partial U}{\partial M} = 0 \quad (13)$$

수평강성은 다음 식과 같이 요약된다.

$$k_H = \frac{F}{q_H} = \frac{13EI}{7l^3} \quad (14)$$

2.2 FEA 검증

위에 설명한 더블-벤트 유연가이드의 이론적 강성을 Pro-Mechanica, PTC Corp를 사용하여 검증하였다. 모든 유연가이드의 길이는 동일하고 1N의 힘이 적용된다고 가정하였다. 특정축의 굴절에 의한 다른 축의 변형은 이론방정식의 일관성을 위해 없는 것으로 가정하였다. [표2]에서와 같이 이론과 FEA에 의한 결과 값이 8%이내의 차이를 보였다. 따라서 이론적 강성방정식은 나노 스캐너의 설계에 사용 할 수 있다.

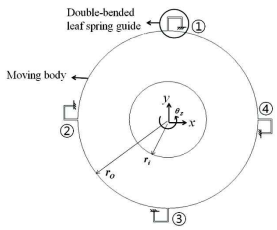
[표 2] Comparison between the theoretical and FEA results.

	Stiffness [N/m]	Vertical direction	Horizontal direction
Initial variable	Theory	1.10×10^4	6.30×10^3
	FEA	1.16×10^4	5.84×10^3
	error	4.65%	8%

3. 평면스캐너의 적용

3.1 스캐너 전체 강성과 분해능

[그림2]는 유연 가이드가 적용된 단일체 구조의 평면 나노스캐너이다.



[그림 2] Schematic diagram of the planar scanner. r_i and r_o are the inner and outer radii of the moving body, respectively.

제안된 스캐너의 주요특징은 다음과 같다. 첫 번째로 평면가이드와 회전-대칭 배열로 인해 스캐너는

x, y, θz축으로 이동이 가능하다. 두 번째로 구성 요소간의 마찰이 없는 단일체 구조이다.

3.1.1 x, y축 방향의 강성

식(11)~(14)는 x, y축 방향의 강성을 찾는데 사용되어진다. 수평 힘이 이동 몸체의 중심에 적용될 때 [그림2]에 표기된 가이드①과 ③은 수평변형의 방정식으로 변형된다. 위와 같이 수직변형에 관하여 가이드②와 ④에 적용된다. 좌우 대칭구조로 되어 있어 모든 수평(또는 수직)강성은 식(15)와 식(16)에서와 같이 두 수평 굴곡 강성(k_H)와 두 수직 굴곡 강성(H_v)을 더한 것 이다.

$$k_x = 2k_V + 2k_H \tag{15}$$

$$k_y = 2k_V + 2k_H \tag{16}$$

3.1.2 θz방향의 강성

스캐너 이동몸체위의 외부 모멘트(M_z)에 의한 회전각도는 식(17)에서 주어진다. 식(18)에서 각 굽힘 요소의 저항 힘은 스캐너의 굴곡 수평강성(k_H)과 그 지점의 수평굴절(δ)를 보여준다. 식(19)는 외부 모멘트와 같음을 보여준다. 마지막으로 스캐너의 총 회전강성은 식(20)과 같다.

$$\theta_z = \frac{\delta}{R_0} \tag{17}$$

$$F = k_H \times \delta \tag{18}$$

$$M_z = 4(k_H \times \delta) \times R_0 \tag{19}$$

$$k_{\theta_z} = \frac{M_z}{\theta_z} = 4k_H R_0^2 \tag{20}$$

3.1.3 이론적 질량 추정 및 공진주파수

굽힘 요소의 관성을 무시한다면 식(21), (22)에서와 같이 이동질량과 스캐너의 회전관성을 얻을 수 있다. 이 방정식은 공진주파수방정식에 사용되어진다.

$$m = d \times b \times \pi(r_0^4 - r_i^4) \tag{21}$$

$$I_{zz} = \frac{1}{2} d \times b \times \pi(r_0^4 - r_i^4) \tag{22}$$

d는 밀도이다.

스캐너의 처음 세 개의 공진주파수는 다음과 같다.

$$f_x = f_y = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_x}{m}} \tag{23}$$

$$f_{\theta_z} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_{\theta_z}}{I_P}} \tag{24}$$

3.1.4 FEA 검증

이론방정식을 검증하기 위해 FEA를 수행하여 [표 3] 같이 이론결과와 비교하였다. 검증결과는 2%이내 오차로 이론적 예측의 정확성을 확인하였다.

[표 3] Comparison between the theoretical result and results form FEA

Initial values: r_o=35,r_i=15,l=10,b=20,and$t$=0.4[mm]						
	Stiffness			Resonant frequency [Hz]		
	k_x [N/m]	k_y [N/m]	$k_{\theta z}$ [Nm/rad]	f_x	f_y	k_{qz}
Theory	6.93 x 10^4	6.93 x 10^4	147.03	101	101	174
FEA	6.96 x 10^4	6.96 x 10^4	160.29	100	99	171
Error	0.46%	0.46%	9.02%	0.99%	1.56%	1.37%

3.2 최적설계

주어진 제약조건에 대한 최적의 성능을 달성하기 위해 최적의 디자인을 구상했다. 최적설계의 목적함수는 긴 이송변위, 소형크기, 높은 분해능을 유지하면서 빠른 속도의 공진을 최대화 하는 것이다. 설계변수는 가이드의 두께, 너비, 길이가 되겠다. 설계방법으로는 MATLAB의 SQP(Sequential Quadratic Programming)을 이용하였다.

3.2.1 목적 함수

더블-벤트 유연가이드는 싱글-벤트 유연가이드에 비해 긴 이송변위를 보장하지만 전체적인 강성은 필연적으로 줄어 든다. 낮은 강성이 낮은 공진과 느린응답을 발생시키므로 식(25)에서와 같이 최적설계의 비용함수(J)는 빠른 응답을 위한 스캐너의 처음 세 개의 공진주파수를 최대화하기 위해 선택되었다.

$$J = \left[\left(\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_x}{m}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_y}{m}}\frac{1}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_{\theta_z}}{I_{zz}}}\right)^2\right] \tag{25}$$

3.2.2 설계변수와 제약조건

설계변수로 선택된 유연 가이드의 길이, 폭, 두께에 대한 제약 조건은 다음과 같다. 첫 번째 제약조건인 최대 변위(q_{max})는 식(26)처럼 긴 이송변위를 만족하는 주어진 이송변위(q_{fix}=2㎜)보다 커야 한다. 동시에 최대응력이 항복응력(σ_y)의 10%이하여야 한다. 세 번째 제약은 전체적인 범위가 소형화를 위해 고정된 크기(d_{fix}=100㎜)보다 작아야 한다. 마지막제약은 중력의 강성을 고려한 굽힘 너비에 있다.

$$g_1 = \frac{q_{fix}}{q_{\max}} - 1 \le 0 \tag{26}$$

$$g_2 = \frac{\sigma_{\max}}{0.1 \times \sigma_Y} - 1 \le 0 \tag{27}$$

$$g_3 = \frac{2 \times (r_0 + l)}{d_{fix}} - 1 \le 0 \tag{28}$$

$$g_4 = \frac{1.5 \times l}{b} - 1 \le 0 \tag{29}$$

3.2.3 최적설계 결과

다양한 초기 임의의 집합에 대한 굽힘 매개변수의 최적의 결과는 [표4]에 나열되어 있다.

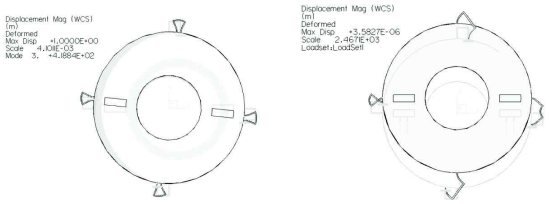
[표 4] Optimal design results of the scanner for various initial sets and FEA results. properties

Design variable	k_x (N/m)	k_y (N/m)	$k_{\theta z}$ (Nm/rad)	f_x (Hz)	f_y (Hz)	$f_{\theta z}$ (Hz)	Max. stress (MPa)	q_{max} (m)
S1	$1.42x10^5$	$1.42x10^5$	$3.01x10^2$	$2.03x10^2$	$2.03x10^2$	$3.47x10^2$	113	$5.56x10^{-3}$
S2	$7.23x10^5$	$7.23x10^5$	$1.53x10^2$	$1.46x10^2$	$1.46x10^2$	$2.50x10^2$	87.12	$2.53x10^{-3}$
S3	$4.40x10^5$	$4.40x10^5$	$0.96x10^2$	$1.17x10^2$	$1.17x10^2$	$2.00x10^2$	59.06	$3.10x10^{-3}$
S4	$4.80x10^5$	$4.80x10^5$	$1.01x10^2$	$3.58x10^2$	$3.58x10^2$	$6.12x10^2$	28.20	$2.66x10^{-3}$
S5	$2.84x10^5$	$2.84x10^5$	$6.03x10^2$	$2.77x10^2$	$2.77x10^2$	$4.75x10^2$	3.86	$2.02x10^{-3}$
Sopt	$3.32x10^5$	$3.32x10^5$	$7.03x10^2$	$2.87x10^2$	$2.87x10^2$	$4.91x10^2$	4.86	$2.10x10^{-3}$
FEA	$3.07x10^5$	$3.07x10^5$	$6.06x10^2$	$2.68x10^2$	$2.68x10^2$	$4.19x10^2$	4.23	$2.08x10^{-3}$
Error	7.80%	5.50%	14.50%	7.03%	6.47%	14.9%	14.9%	0.95%

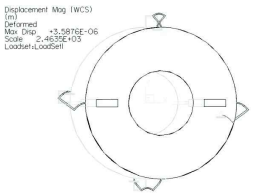
실용적인 설계값은 제작을 고려하여 선택되었다. [표4]는 다양한 초기 임의의 집합에 대한 스캐너 속성의 최적의 결과를 보여준다. 모든 최적결과는 정의된 제약 집합을 만족한다.

3.3 FEA 검증

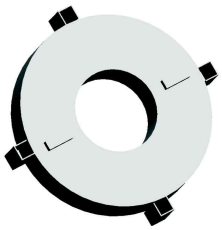
최적설계 확인하기 위해 FEA의 여러 인스턴스를 사용하였다. 강성검증을 위해 수평 및 수직변위는 각각의 힘에 대한 시뮬레이션을 실행했다.[그림4]



[그림4] Deformation due to the horizontal force



[그림5] Third resonance: Rotational mode.



[그림6] 3D model with the optimal values

[그림5]에서와 같이 공진 검증을 위해 첫 번째 공진주파수를 시뮬레이션 했다. 시뮬레이션 결과 모두 3%이내에 이론적 결과와 일치했다. 최적화된 설계변수를 최종설계에 표현하였다.[그림6]

4. 요약 및 토론

더블-벤트 유연 가이드를 평면 나노스캐너에 적용하였다. 제안된 가이드는 긴 이송변위(~㎜), 소형크기, 평면 스캐너에 적용이 적합하다. 평면유연가이드의 이론 강성방정식은 Castigliano의 이론을 사용 하여 구하였고 FEA를 통해 검증하였다. 평면유연가이드, 단일체 구조, 평면 나노스캐너의 적용으로 표현하였다. 전체 시스템의 강성과, 질량 특성 및 공진주파수를 이론적으로 유도하고 FEA결과와 비교하였다. 결과적으로, 본 논문에서 제시한 더블-벤트 유연가이드가 나노 정밀도의 대행정 스캐너에 적합함을 이론 및 FEA 검증을 통해 증명해 보았다.

참고문헌

[1] S. T. Smith(2000) Flexures: Elements of elastic mechanisms (Gordon and Breach Science Publishers), p.199

[2] Guanghua Xu and Liangsheng Qu (1996) Some analytical problems of high performance flexure hinge and micro-motion stage design. Proc. IEEE CNF: 771-775

[3] Shuo Hung Chang,Chung Kai Tseng and Hon Chan Chien (1999) An ultra-precision XYΘz piezo-micropositioner Ⅰ.Design and analysis. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. 46:897-905.

[4] B. J. Choi, S. V. Sreenivasan and S. Johnsom (2001) Design of Orientation Stages for Step and Flash Imprint Lithography Johnson, Prec. Eng. (In press) 25:192-203.

[5] Shuo Hung Chang,Chung Kai Tseng and Hon Chan Chien (1999) An ultra-precision XYΘz piezo-micropositioner Ⅰ.Experiment and performance. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. 46:906-912.

[6] D. W. Kang, K.Y. Kim and D.M Kim(2009) Optimal design of high precision XY-scanner with nanometer-level resolution and millimeter-level working range. Mechatronics 19:562-570.

[7] D. M. Kim, D.W. Kang and J.Y. Shim(2005) Optimal design of a flexure hinge-based XYZ atomic force microscopy scanner for minimizing abbe errors. Rev. Sci. Instrum, 76:073076

[8] S. B. Choi, S.S Han and Y.S. Lee(2005) Fine motion control of a moving stage using a piezoactuator associated with a displacement amplifier. Smart Mater. Struct, 14:222-230

[9] D. Y. Lee, D. M. Kim and D. G. Gweon(2007) A calibrated atomic force microscope using an orthogonal scanner and a calibrated laser interferometer. Appl. Surf. Sci. 253:3945-3951.

[10] K. B. Choi, J. J. Lee and M. Y. Kim(2007) Cartwheel flexure-based compliant stage for large displacement driven by a stack-type piezoelectric element. ICCAS'07: 2754-2758