

3D 프린터를 사용한 정밀 스테이지의 제작

Fabrication of Piezo-Driven Micropositioning Stage using 3D printer

정호제¹, 김정현¹✉
Ho Je Jung¹ and Jung Hyun Kim¹✉

¹ 경성대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Kyung Sung Univ.)
✉ Corresponding author: dwellnom@ks.ac.kr, Tel: +82-51-663-4694

Manuscript received: 2013.11.26 / Revised: 2014.2.19 / Accepted: 2014.2.20

This paper presents the design, optimization and fabrication of a piezo driven micro-positioning stage constructed using a 3D-printer. 3D printing technology provides many advantageous aspects in comparison to traditional manufacturing techniques allowing more rapid prototyping freedom in design, etc. Micro-positioning stages have traditionally been made using metal materials namely aluminum. This paper investigates the possibility of fabricating stages using ABS material with a 3D printer. CAE simulations show that equivalent motion amplification can be achieved compared to a traditional aluminum fabricated stage while the maximum stress is 30 times less. This leads to the possibility of stages with higher magnification factors and less load on the driving piezo element. Experiment results agree with the simulation results. A micro-position stage was fabricated using a 3D printer with ABS material. The motion amplification is very linear and 50 nm stepping was demonstrated.

Key Words: Piezoelectric Element (압전 소자), 3D Printer (3 차원 프린터), Rapid Prototyping (쾌속조형), Flexure Hinge (유연 힌지), Micropositioning Stage (정밀 스테이지)

1. 서론

현대 산업은 눈 부신 발전을 하고 있다. 그 중에서도 반도체 산업 및 마이크로, 나노미터 수준의 정밀도를 요구하는 산업들이 많은 발전을 하였다. 그로 인해 빠르고 소형화 된 전자 제품과 첨단 장비들이 실생활과 산업 현장 곳곳에서 사용되면서 좀 더 편리하고 스마트해진 업무 환경과 실생활을 누릴 수 있게 되었다. 또한 반도체 산업은 Micro/Nano-Electro-Mechanical-Systems (MEMS/NEMS) 과 같은 기계적 시스템의 빠른 발전과 함께 성장하였다. 반도체 산업뿐만 아니라 정밀 기계 장비들의 종류와 수요가 늘어나면서 의료기기, 미세 가공, 원자력 현미경, 정밀공작기계, 3차원 프린터(3D

Printer), 항공·우주 분야 등 많은 분야에서 핵심적인 역할을 하고 있다. 이러한 정밀 기술 분야의 기초이자 핵심 분야인 정밀 스테이지는 지금도 많은 연구가 되고 있다. 그 중 1자유도 정밀 스테이지에 대한 연구로는 병렬 레버 구조와 일체식 구조(Monolithic Structure),^{1,2} 2단 레버 구조², 토글 증폭 구조³ 등이 있으며 그 밖에도 2, 3, 6 자유도에 대한 다양한 스테이지들이 연구되었다.^{4,6}

최근 3차원 프린터의 기술 발전과 많은 이점으로 인해 시장이 급속히 성장하였다. 그 결과 미국, 영국, 중국 등 많은 나라에서 정부 차원의 R&D를 추진하고 있으며,⁷ 제조·생산업과 자동차 부품 산업 등 많은 산업 분야에서도 주목을 하고 있다.

3차원 프린터를 사용한 연구들을 보면 자동차

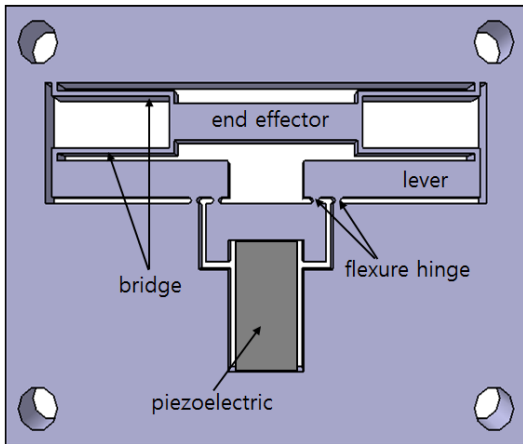


Fig. 1 Diagram of Micropositioning Stage

의 함수형태의 가상 공력설계 모델을 3차원 프린터를 사용하여 신속하게 프로토타입으로 실현하여 초기 설계/제작 시간의 단축 및 최적화 정확도의 향상 가능성을 확인하였다.⁸ 금형 분야에서는 3차원 프린터에서 직접 제작한 왁스패턴을 이용하는 새로운 캐속금형(Rapid Tooling; RT)공정을 개발하였다.⁹ 이렇듯 다양한 산업 분야에서 3차원 프린터를 사용한 연구가 활발 하게 진행되고 있다.

본 논문에서는 3차원 프린터를 사용하여 단층의 병렬 레버 구조와¹ 일체식 구조의² 간단한 스테이지를 제작하여 정밀 스테이지 분야에서의 적용 가능성을 확인하였다. 또한 기존 스테이지들이 주로 사용하던 재료인 알루미늄을 사용하지 않고 ABS수지(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene copoly mer)를 사용하였다. 그 결과 최대 응력이 발생하는 힌지 부분의 응력이 줄었으며 스테이지 구동에 필요한 힘 또한 줄어 압전소자(Piezoelectric Element)의 선택 시 힘에 대한 이점이 생겼다. 이렇듯 3차원 프린터를 사용하여 제작 과정 단축과 비용 절감, ABS수지의 사용으로 보다 효율적인 스테이지를 설계하였다.

2. 정밀 스테이지의 구조와 제작

2.1 정밀 스테이지 구조

Fig. 1과 같이 정밀 스테이지의 전체 크기는 80×60×10 mm이다. 좌우 대칭의 병렬 레버 구조, 구조에 끊어짐이 없는 일체식 구조, 엔드 이펙터를 연결하는 4개의 다리를 사용하여 정밀도 향상 및 부하를 낮추었다. 기구적 연결 부분으로는 기



Fig. 2 Project® 5000(3D Systems) 3D Printer

하학적으로 대칭구조를 가지며, 노치 구조이다. 한 쪽 방향의 굽힘 운동만 허용하며 다른 방향의 운동에는 강한 강성을 갖는 유연 힌지(Flexure Hinge)를 사용하였다.

2.2.3 3차원 프린터

3차원 프린터는 캐속조형(Rapid Prototyping; RP)으로 설계 데이터에 따라 액체, 파우더 형태의 폴리머(수지), 금속 등의 재료를 가공·적층 방식(Layer-by-Layer)으로 쌓아 올려 입체물을 제조하는 장비이다.⁷ 벌집구조와 같이 복잡하고 내부가 비어있는 형상도 3차원 도면 파일만 있으면 빠른 시간 내에 구현이 가능하여 정밀 스테이지 설계 시 구조적 한계를 극복 할 수 있다. 다양한 기계적 구조와 설계 기법을 적용 하여 새로운 형태의 스테이지 설계가 가능하다.

그리고 적층 방식과 입체물 제조에 활용 가능한 재료에 따라 다양한 기술로 구분 할 수 있다. 본 논문에서는 MJM(Multi Jet Modeling) 방식, 즉 프린터 헤드에서 광경화성 수지와 왁스를 동시분사 후, UV 빛으로 고형화하는 방식으로 적층 하는 3차원 프린터인 Fig. 2와 같은 Project® 5000(3D Systems)을 사용하여 정밀 스테이지를 제작하였다. 이 장비의 성능은 제작크기 550×393×300 mm, 정밀도 0.025-0.05 mm, HD 모드에서 해상도 375×375×790 DPI (xyz), 최소 적층두께 32 μm (0.0012 inches, 0.032 mm)의 정밀 3차원 프린터이다.

2.3 정밀 스테이지 제작

기존의 연구들을 보면 정밀 스테이지를 제작 할 때 주로 CNC선반(Computerized Numerical Control Lathe), 밀링기계(Milling Machine) 등의 정밀 공작

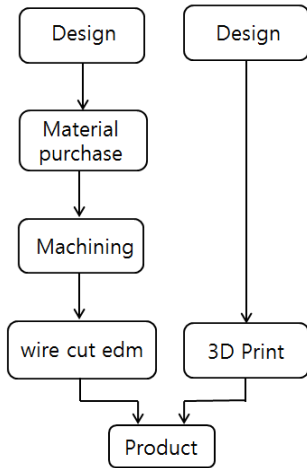


Fig. 3 Production process

기계, 와이어방전가공(Wire Cut Electrical Discharge Machining) 등을 사용하여 제작하였다.^{6,10,11} 위와 같이 제작하게 되면 Fig. 3처럼 재료 구입부터 기계 가공 등 여러 공정을 거쳐야 한다. 이러한 공정이 한 곳에서 모두 이루어 지지 않기 때문에 많은 시간과 비용이 소요된다.

반면 3차원 프린터는 제작공정의 간소화로 제작비용 및 시간 절감과 3차원 디자인만 있으면 실시간으로 설계 수정보완이 가능하여 빠른 연구 개발이 가능하다. 또한 제품이나 부품을 만들 경우 조립과정이 생긴다. 그러나 3차원 프린터를 사용하게 되면 일체형 생산(One Body)을 할 수 있어 이에 따른 시간·비용 절감 및 조립과정에서 생길 수 있는 오차나 불량률을 줄일 수 있다. 이는 정밀 스테이지 설계에서 중요한 문제이다.

위와 같은 많은 장점을 가지고 있는 3차원 프린터를 이용하여 정밀 스테이지 제작에 적용함으로써 보다 신속, 저렴하고 다양한 구조의 스테이지 제작이 가능하다.

3. 최적화 설계 및 시뮬레이션

3.1 최적화 설계

본 논문에서는 정밀 스테이지 설계 시 가장 중요한 부분인 힌지를 최적화 설계 모델로 선정하였으며, 스테이지 제작에 사용되는 알루미늄(Al 7075-T6)과 3차원 프린터 제작에서 사용되는 ABS수지 이 두 가지 재질을 시뮬레이션에 적용하여 비교하였다.

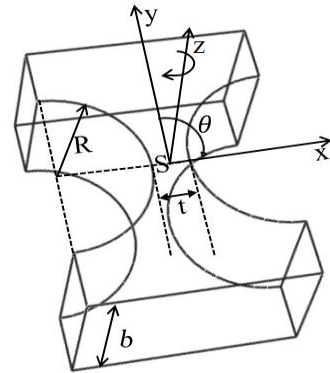


Fig. 4 Flexure hinge

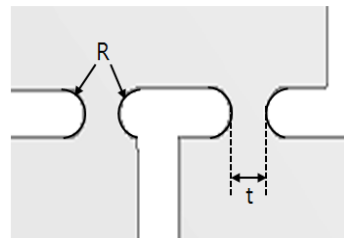


Fig. 5 Design factor

스테이지의 입력은 압전소자 PSt150/10×10/20 (Piezomechanik GmbH)로 길이 18 mm, 변위 20 μm, 공진주파수 50 KHz, 강도 250 N/μm, 최대부하 8000 N이다. 출력 변위가 20 μm 이므로 이를 입력에 반영 하였다.

힌지는 응력집중이 생기는 구조로 설계 시 가장 중요한 인자는 Fig. 4와 같이 유연 힌지의 두께(t)와 반지름(R)이며, 힌지의 응력과 움직임에 많은 영향을 준다. 아래의 식과 같다.¹²

$$\sigma_{max} = \frac{6M_{max}K_t}{t^2b} \tag{1}$$

$$\theta_{max} = \frac{4K}{K_t Et} \sigma_{max} \tag{2}$$

M_{max} 는 힌지에 걸릴 수 있는 최대 굽힘 모멘트, K_t 는 응력 집중 계수, σ_{max} 는 최대 응력, θ_{max} 는 회전중심(S)에서의 z축의 최대 회전이다. 식(1)을 보면 두께(t)가 제곱 값으로 응력에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 식(2)를 보면 θ_{max} 와 σ_{max} 가 비례한다. 이는 θ_{max} 의 값이 스테이지의 움직임 정도로 볼 수 있어 변위와 응력이 비례함을 알 수 있다. 그리고 두께(t)와 반지름(R)이 힌지의 움직임에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

위에 두 인자들을 이용하여 최적화 설계를 하였다. 설계 기법으로는 반응표면분석법(Response surface analysis)을 사용하였다.

설계인자는 Fig. 5와 같이 힌지의 라운딩 부분의 반지름(R), 두께(t) 이렇게 총 2개를 선정 하였으며, 인자는 2수준이다.

인자 반지름(R)과 두께(t)의 수준은 아래와 같다.

$$0.8 \text{ mm} < R < 2 \text{ mm} \quad (3)$$

$$0.8 \text{ mm} < t < 2 \text{ mm} \quad (4)$$

최소 범위 0.8 mm은 제작시 제품의 디테일과 안전성을 위해 설정하였고 최대 범위 2 mm는 정해진 외부 규격 내에서 움직일 수 있는 길이이다.

실험계획법(Design of Experiment; DOE)은 중심합성법(Central Composite Design; CCD)이며 요인점 2², 축점 2×2개, 중심점1개 등의 총 9개의 설계 조건이 선정된다.

3.2 Ansys 시뮬레이션

Fig. 6은 스테이지에서 최대 응력이 발생하는 부분으로 힌지의 두께(t)가 제일 얇은 곳에서 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 Al 7075-T6에 대한 반응표면 이다. (a)는 엔드 이펙터의 변위에 관한 반응표면이며 반지름(R), 두께(t)가 0.8 mm에 가까워 질수록 변위가 증가 하는 것을 알 수 있다. (b)는 응력에 관한 반응표면이다. 두께(t)는 거의 영향을 주지 않고 반지름(R)의 영향을 많이 받는다. 반지름(R)이 0.8 mm에 가까워 질수록 응력이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 ABS수지에 대한 반응표면이다. 그 결과는 Al 7075-T6와 거의 같음을 알 수 있다. 위의 반응표면 결과를 바탕으로 최적화한 결과는 Table 1과 같은 결과를 얻었다.

변위는 두 재질이 비슷함을 알 수 있으며 입력 대비 출력에 대한 증폭비(출력/20 μm)는 Al 7075-T6가 3.515, ABS는 3.56이다. 응력에서는 30 배 정도의 많은 차이가 발생 했으며 압전소자의 입력부분의 반력 또한 약 31배 정도의 차이가 발생했다. 이는 ABS 재질을 사용하여 스테이지를 제작 할 경우 압전소자는 Al 7075-T6보다 힘이 낮은 사양의 압전소자를 선택할 수 있어 원가 절감 등의 효과가 있다.

위의 반응표면 결과를 바탕으로 최적화한 결과는 Table 1과 같은 결과를 얻었다. 변위는 두 재질

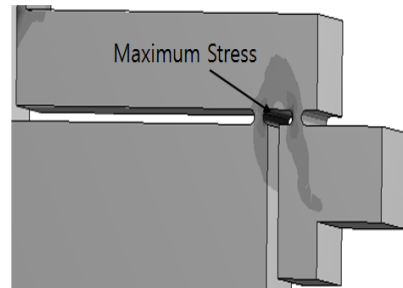


Fig. 6 Maximum stress

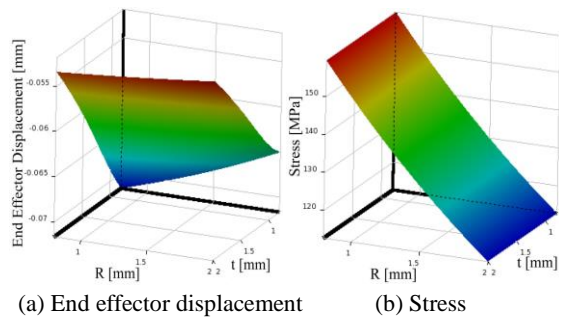


Fig. 7 Response surface of Al 7075-T6

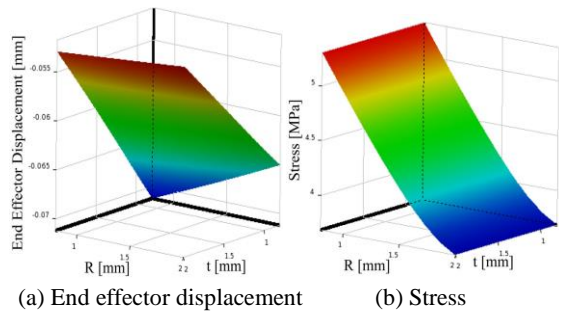


Fig. 8 Response surface of ABS

Table 1 Simulation Result

Parameters	Al 7075-T6	ABS
Displacement [mm]	0.0703	0.0712
Stress [MPa]	157.25	5.26
Reaction Force [N]	380.29	11.99

이 비슷함을 알 수 있으며 입력 대비 출력에 대한 증폭비(출력/20 μm)는 Al 7075-T6가 3.515, ABS는 3.56이다. 응력에서는 30배 정도의 많은 차이가 발생 했으며 압전소자의 입력부분의 반력 또한 약 31배 정도의 차이가 발생했다. 이는 ABS 재질을 사용하여 스테이지를 제작 할 경우 압전소자는 Al

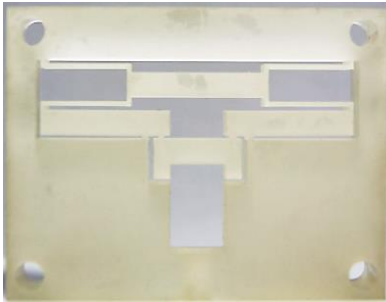


Fig. 9 Micropositioning Stage

7075-T6보다 힘이 낮은 사양의 압전소자를 선택할 수 있어 원가절감 등의 효과가 있다.

높은 증폭비를 필요로 하는 스테이지는 증폭비가 증가하면 응력과 부하도 증가하는 문제가 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 ABS재질로 스테이지를 제작하게 되면 낮은 응력과 부하가 생기는 이점이 있다. 이런 이점을 통해 많은 증폭비를 요구하는 스테이지 설계 시(지렛대를 쌓아 올리는 등의 구조)응력과 부하가 증가하는 문제를 해결하여 보다 많은 증폭비를 얻는 스테이지 설계가 가능하다.

그러나 ABS수지는 알루미늄 보다 열 변형에 취약하다. ABS수지의 열팽창 계수는 10.1×10^{-5} , 알루미늄은 23.1×10^{-6} 이다. ABS수지가 알루미늄 보다 약 4.3배 열 변형에 취약하다. 이로 인한 드리프팅이 발생할 수 있으나 피드백 제어를 통해 보상이 가능 하며 열이 많이 발생 하는 곳에서 ABS수지로 제작된 스테이지 사용에 주의가 필요하다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험

Ansys의 최적화 설계 시뮬레이션 결과값을 토대로 ABS 재질을 사용하여 3차원 프린터로 간단한 구조의 Fig. 9와 같은 정밀 스테이지를 제작하였다.

정밀 스테이지의 실험은 Fig. 10과 같이 광학현미경을 사용 하였고 Fig. 11의 측정블록선도의 흐름과 같이 광학현미경에 비전 카메라를 결합하여 얻은 이미지를 컴퓨터로 전송하여 LabVIEW 프로그램의 Pattern Match를 사용하여 정밀 스테이지의 변위를 측정하였다. 우선 실시간 측정되고 있는 이미지에 패턴을 설정 한 다음 스테이지가 움직이면 그 이미지에서 패턴을 찾아 변위를 측정한다.

아래와 같이 이미지 모델 $M_i(x, y)$ 는 대상 각

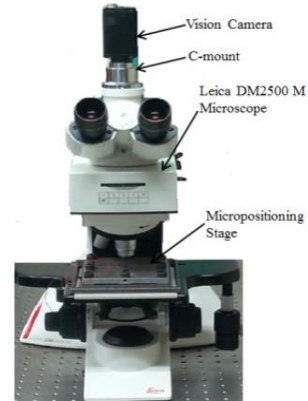


Fig. 10 Microscope

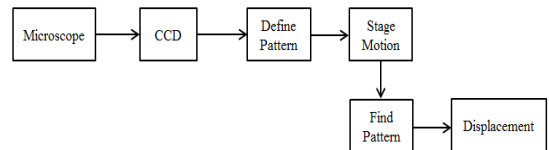


Fig. 11 Measurement block diagram

각에 대해 정의된다. 이러한 각 대상들은 실시간으로 들어오는 이미지 $I(x, y)$ 와 일치된다.⁶

$$r(u, v) = \frac{\sum I(x, y)M_i(x-u, y-v) - \bar{I} \cdot \bar{M}_i}{\sqrt{[I(x, y)^2 - \bar{I}^2][\sum M_i(x-u, y-v)^2 - \bar{M}_i^2]}} \quad (5)$$

여기서 \bar{M}_i 는 모델 i 뜻하고 \bar{I} 는 $I(x, y)$ 를 뜻 한다. 따라서,

$$r(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \max\{r(u, v)\} \quad (6)$$

위와 같은 방법으로 대상을 실시간 측정하였다. 압전 소자의 입력은 0 ~ 200V까지 20단계의 전압을 인가하여 압전소자와 엔드 이펙터의 변위를 실시간 측정하였다.

4.2 실험 결과

실험 결과는 Table 2와 같다. 증폭비를 Ansys의 해석결과와 비교해 보면 Ansys는 3.56배, 실험은 평균 약 4.07배 정도로 Ansys 해석 결과 보다 조금 높게 나왔지만 시뮬레이션과 실제 실험 결과가 거의 비슷하게 나온 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 압전소자와 엔드 이펙터의 히스테리시스 그래프이다. Fig. 13과 Fig. 14은 압전소자와 엔드 이펙터의 전압에 대한 변위를 나타낸 그래프 이다.

Table 2 Experiment Result

Voltage [V]	Piezo [μm]	End Effector [μm]	Amplification Ratio
10	0.98	3.90	3.98
20	2.12	8.54	4.03
30	3.33	13.54	4.07
40	4.55	18.71	4.11
50	5.79	23.76	4.10
60	7.00	28.74	4.11
70	8.12	33.47	4.12
80	9.21	37.85	4.11
90	10.24	41.97	4.10
100	11.17	45.78	4.10
110	12.03	49.28	4.10
120	12.86	52.54	4.09
130	13.60	55.55	4.08
140	14.30	58.36	4.08
150	14.96	60.96	4.07
160	15.58	63.37	4.07
170	16.16	65.68	4.06
180	16.70	67.84	4.06
190	17.22	69.84	4.06
200	17.72	71.77	4.05

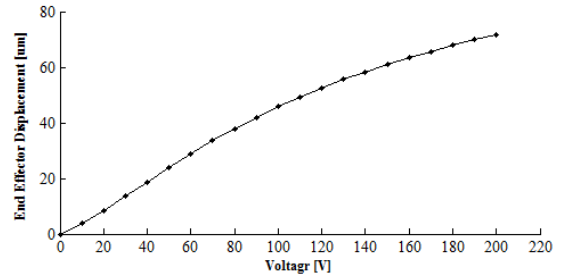


Fig. 14 End effector displacement

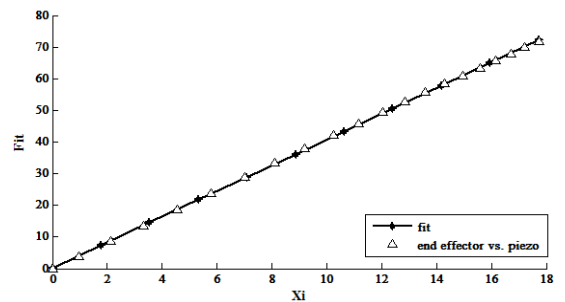


Fig. 15 Piezo vs End effector displacement

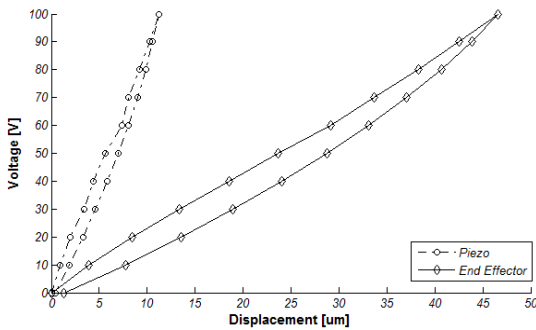


Fig. 12 Hysteresis

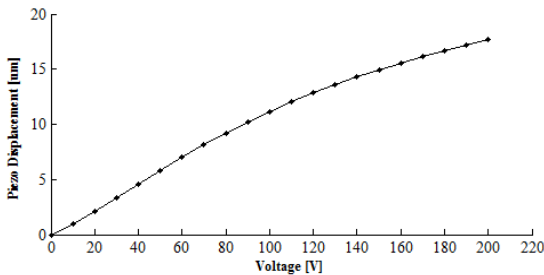


Fig. 13 Piezo displacement

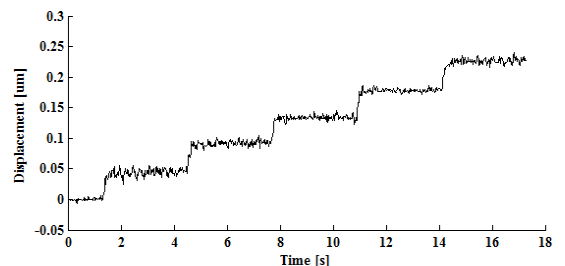


Fig. 16 50 nm Stepping

Fig. 15는 압전소자와 엔드 이펙터의 변위를 커브 피팅(Curve Fitting)한 그래프 이다. 계수(95%신뢰범

위), 적합도는 SSE: 0.08519, R-square: 0.999, Adjusted R-square: 0.9999, RMSE: 0.2118 이다. 그래프를 보면 점들이 피팅된 선과 거의 일치하는 모습을 볼 수 있다. 이는 스테이지의 증폭비가 선형성을 가지는 것이다.

Fig. 16은 스테이지의 성능을 실험하기 위해 50 nm의 계단입력을 보여준다. 현재 현미경에 의한 평면운동의 측정 한계가 노이즈로 인해 대략 10 nm이다. 또한 그래프를 보면 약간의 드리프트가 발생하는 것이 보이나 CCD 카메라의 성능을 높이고 피드백 제어를 도입하면 더 나은 성능을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 현미경을 이용한 운동 측정을 피드백 신호로 이용한다면 특히 열에 의한 드리프팅 현상을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 연구들과 달리 3차원 프린터로 정밀 스테이지를 설계·제작하였다. Ansys를 통해 Al 7075-T6와 ABS 두 재질을 비교 하여 ABS 재질의 스테이지 적용 가능성을 확인 하였고 최적화 설계를 통해 얻은 결과를 실제 설계에 적용 하였다. 그 결과 Ansys 해석 결과와 비슷한 증폭비 결과를 얻었으며 실험에 의해 50 nm의 스테핑 모션을 선보였다.

이처럼 정밀 스테이지 분야에서 3차원 프린터 및 ABS 재질의 적용 가능성을 확인 하였으며 3차원 프린터의 이점들을 더욱 활용 하여 다양한 구조의 고증폭비를 내는 새로운 형태의 스테이지 제작이 가능 할 것이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업임(NO. NRF-2011-0015118)

참고문헌

- Kang, B. H., Wen, J. T. Y., Dagalakis, N. G., and Gorman, J. J., "Analysis and Design of Parallel Mechanisms With Flexure Joints," IEEE Transactions On Robotics, Vol. 21, No. 6, pp. 1179-1185, 2005.
- Choi, S. B., Han, S. S., and Lee, Y. S., "Fine Motion Control of a Moving Stage using a Piezoactuator Associated with a Displacement Amplifier," Smart Mater. Struct., Vol. 14, No. 1, pp. 222-230, 2005.
- Chu, C. L. and Fan, S. H., "A Novel Long-Travel Piezoelectric-Driven Linear Nanopositioning Stage," Precision Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 85-95, 2006.
- Gao, P., Swei, S. M., and Yuan, Z., "A New Piezodriven Precision Micropositioning Stage utilizing Flexure Hinges," Nanotechnology, Vol. 10, No. 4, pp.394-398, 1999.
- Lu, T. F., Handley, D. C., Yong, Y. K., and Eales, C., "A Three-DOF Compliant Micromotion Stage with Flexure Hinges," Ind. Robot, Vol. 31, No 4, pp. 355-361, 2004.
- Hu, K., Kim, J. H., Schmiedeler, J., and Menq, C. H., "Design, Implementation, and Control of a Six-Axis Compliant Stage," Rev. Sci. Instrum., Vol. 79, Paper No. 025105, 2008.
- Kwak, K. H. and Park, S. W., "Global 3D Printer Industry Technology Trends Analysis," J. of the KSME, Vol. 53, No. 10, pp. 58-64, 2013.
- Rho, J. H., Jeng, S. K., Kwak, M. H., and Lee, D. H., "Rapid Prototyping with Vehicle Modeling Function and 3D Printer," Proc. of KSAE Annual Conference, pp. 2541-2544, 2009.
- Kim, H. C., Lee, S., and Lee, S. H., "Rapid Tooling Technology for Producing Functional Prototypes using Ceramic Shell Investment Casting and Patterns Produced Directly from ThermoJet 3D printer," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 23, No. 8, pp. 203-210, 2006.
- Jung, H. J. and Kim, J. H., "Development of Novel Piezo - driven Flexure Stage," Proc. of KSPE Spring Conference, Paper No. 13S533, 2013.
- Chang, S. H. and Du, B. C., "A Precision Piezodriven Micropositioner Mechanism with Large Travel Range," Rev. Sci. Instrum., Vol. 69, No. 4, pp. 1785-1791, 1998.
- Jea, W. S., "Study on the Displacement Magnification Mechanism of Ultraprecision stage Using Linear Lever," M.Sc. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Dong Eui Univ. 2008.