

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.6.169>

JIIBC 2019-6-24

탄성힌지를 이용한 초정밀 통신용 미리 구동 6축 메커니즘 구현과 실험적 강성 모델링

Design of 6 DOF Mechanism with Flexure Joints for telecommunication mirror and Experimental Stiffness Modeling

강병훈*

Byoung Hun Kang*

요약 최근 원격통신용 미러의 정밀 제어를 위한 초정밀 구동 메커니즘 설계에 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 초정밀 구동 메커니즘의 구성 조건을 만족하기 위하여 마이크로미터(um)의 분해능을 가진 탄성힌지(flexure hinge)를 이용한 6자유도 스테이지 메커니즘을 제안한다. 탄성힌지를 조인트로 이용하여 공간상의 6자유도 스테이지를 설계하고, 탄성힌지의 탄성변형을 이용하여 반복적인 운동을 제공한다. 공간상의 6 자유도 스테이지를 개발하기 위하여 탄성힌지를 이용한 평면상의 2 자유도 스테이지를 설계하고 이를 조합하여 6 자유도 스테이지를 제작하였다. 유한요소 해석을 통하여 단위입력에 대한 최대 출력변위를 생성하는 탄성힌지의 크기와 형상을 결정하였고, 전체 스테이지를 구동 할 때, 개별 탄성힌지가 탄성 영역 안에서 구동됨을 유한요소 해석을 통하여 증명하였다. 또한 전체 스테이지 구동의 변위보정과 강성검증을 실험적으로 증명하기 위하여 CCD 레이저 변위센서를 이용한 스테이지 변위 해석을 진행하였다.

Abstract Flexure joints are recently used in the ultra-precision mechanism for a telecommunication mirror stage. Flexure joints have several advantages coming from their monolithic characteristics. They can be used to reduce the size of manipulators or to increase the precision of motion. In our research, 6 dof(degree of freedom) mechanism is suggested for micrometer repeatability using a flexure mechanism. To design the 6-dof motion, the 2-dof planar mechanism are designed and assembled to make the 6-dof motion. To achieve a certain performance, it is necessary to define the performance of mechanism that quantifies the characteristics of flexure joints. This paper addresses the analysis and design of the 6-dof parallel manipulator with a flexure joint using a finite element analysis tool. To obtain experimental result, CCD laser displacement sensor is used for the total displacement and the stiffness for the 6-dof flexure mechanism.

Key Words : 6 dof mechanism, flexure joint, precise stage

*정회원, 한국산업기술대학교 기계설계공학과
접수일자: 2019년 10월 28일, 수정완료: 2019년 11월 28일
게재확정일자: 2019년 12월 6일

Received: 28 October, 2019 / Revised: 28 November, 2019 /
Accepted: 6 December, 2019

*Corresponding Author: kangb@kpu.ac.kr

Dept. of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic
University, Korea

I. 서 론

광통신 장비에서 사용되어지는 초정밀 미러 구동용 스테이지는 높은 정밀도와 위치 반복성을 유지하기 위해 구동 오차가 최소화하는 것이 매우 중요하다^[1]. 이를 위하여 미러 구동용 이송 메커니즘은 높은 이송 분해능을 유지하도록 설계되어야 하며, 이러한 조건들을 만족하기 위하여, 최근의 광통신 미러 구동용 초정밀 스테이지에서는 기어의 백래쉬 효과가 없는 탄성 힌지(flexure hinge)^{[2],[3]}와 압전 소자 구동기(PZT actuator)를 많이 사용하고 있다^[4].

탄성힌지를 이용한 다축 스테이지 설계에 관한 최근 연구를 보면 전체적인 6자유도 메커니즘 보다는 각각의 개별 스테이지 부품에 대한 제어형식에 대하여 진행되고 있다^[5]. 기존의 탄성힌지 연구동향은 개별조인트와 이를 이용한 평면 스테이지 설계에 많은 결과가 있는 반면, 공간상의 다자유도 스테이지 설계에는 수치 해석에 관한 연구 많지 않고, 또한 상용화된 제품이 적다. 따라서 본 연구에서는 공간상의 움직임이 구현되는 6 자유도 스테이지 메커니즘을 제안하고자 한다.

본 연구에서는 탄성힌지를 이용한 2자유도 평면 스테이지를 제안하고, 제안된 평면 스테이지를 공간상으로 결합하여 6축 스테이지 메커니즘을 설계하였다. 또한, 제안한 6축 스테이지 메커니즘의 성능 평가를 탄성힌지에 대한 유한요소 해석과 실험을 통하여 증명 하였다.

II. 탄성 힌지 해석

본 연구에서는 원형 노치 타입 탄성힌지 (Circular Notch Flexure Joint)를 사용하였다. 이 탄성힌지의 강성과 운동의 정확도는 그림 1에서와 같은 설계변수에 의하여 정해진다.

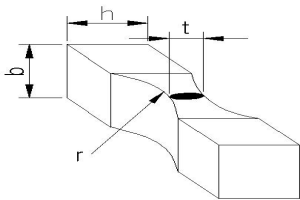


그림 1. 원형 노치 타입 탄성힌지의 설계 변수
Fig. 1. Design Variables of Circular Notch Flexure Joint

그림 1에서 b는 힌지 높이, h는 힌지폭, t는 힌지두께, r은 힌지곡률을 나타낸다. 원형 노치 타입 탄성힌지의 회전탄성계수와 선형탄성계수는 다음 식과 같다^[6].

$$K_{\theta z, Mz} \equiv \frac{Mz}{\Delta\theta z} = \frac{2Eb^2t^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (1)$$

$$K_{\Delta y, Fy} \equiv \frac{Fy}{\Delta y} = \frac{2Eb}{9\pi(1-\alpha^2)}(2\alpha)^{5/2} \quad (2)$$

위의 식에서 E 는 joint의 재질에 따른 Young's Modulus, $\alpha = \frac{t}{2R}$ 이다. 원형 노치 타입 탄성힌지의 강성과 운동의 정확도는 노치 부분의 중심 정확도와 형상 크기에 따라 영향을 받으므로 유한요소해석을 통하여 중심부의 크기를 결정하였다. 결정된 탄성힌지의 모델링 치수는 $t = 0.5\text{mm}$, $R = 0.5\text{mm}$, $b = 18\text{mm}$ 이며, 탄성힌지의 재질은 Aluminum 6061-T6 이다.

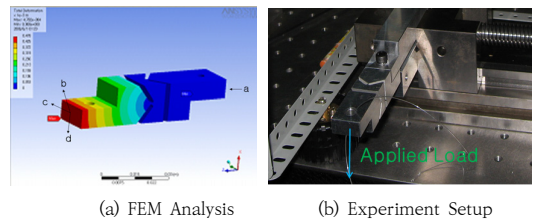


그림 2. 원형 노치 타입 탄성힌지 해석 및 실험구성
Fig. 2. FEM Analysis and Experiment Setup of Circular Notch Flexure Joint

그림 2은 설계된 탄성힌지의 유한요소 해석과 실험 구성에 대한 설명이다. 그림 2 (a)의 유한요소 해석에서 a 면을 고정하고 각각 b, c, d 의 방향으로 1N 씩의 힘을 증가 시킬 때마다 탄성변위 값과 응력을 얻는 해석을 진행하였다. 유한요소 해석에서 Element 크기는 2mm, Mesh의 크기는 40760개의 Nodes, 26841개의 Elements 로 해석하였다.

해석된 결과를 증명하기 위하여, 그림 2 (b)와 같이 탄성힌지 조인트를 제작하여 실험 장치를 구성하였다. 그림과 같이 1N에서 8N까지 외부 하중을 적용 할 때, 비접촉 CCD Laser Displacement Sensor를 사용하여 변위 측정을 하였다. 측정 센서의 측정 정밀도는 0.005mm 이다. 본 연구에 사용한 재질의 항복강도는 280Mpa 이며, 최대응력 값이 이를 넘어서면 소성변형이 생기므로 탄성힌지의 구동 재현성은 떨어진다. 따라서 본 연구에 설계

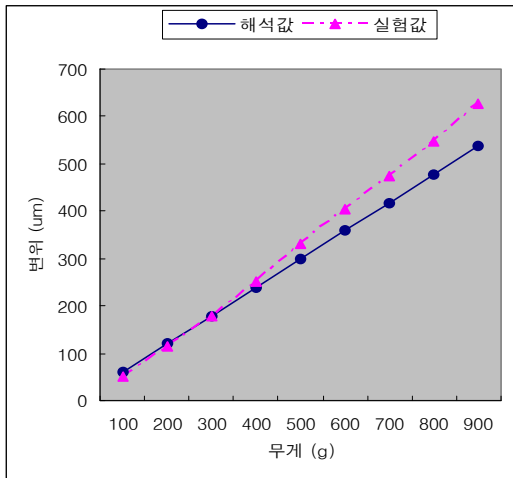
된 탄성한지가 견딜 수 있는 최대 응력은 x축은 9N, y축은 8N, x+y축은 11N이므로, 실험과 해석은 이 범위 내에서 진행 하였다. 실험과 해석에 대한 결과 값을 그림 3에 정리 하였다.

그림 3에서 x축은 외부 하중의 증가량, y축은 이에 따른 측정 변위값을 나타낸다. 그림의 측정 데이터 값을 보면, 외부하중이 증가할수록 해석 값과의 차이가 벌어짐을 알 수 있다. 이것은 센서의 측정 오차와 더불어 탄성한지가 탄성변형율의 최대치에 가까워지므로 작은 외부하중 때의 변위량보다 큰 외부하중에서 변위량이 탄성한지 보원력 오차가 누적되어 차이가 커짐으로 해석된다.

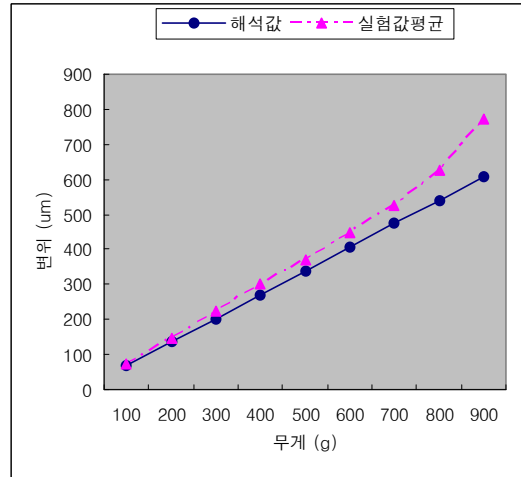
그림 3 (a) 에서 X 축에 대한 해석값과 실험값의 평균 편차는 $31.28\mu\text{m}$ 이며, 해석값과 실험값이 약 90.62%로 일치함을 알 수 있다. 또한, 그림 3 (b) 에서 Y 축에 대한 해석값과 실험값의 평균편차는 $48.78\mu\text{m}$ 이며, 해석값과 실험값이 약 89.48%로 일치함을 알 수 있다.

마찬가지로, 그림 3 (c) 그래프에서 보듯이 외부 하중을 XY평면의 45도로 가했을 때의, 해석값과 실험값의 평균편차는 $61.53\mu\text{m}$ 이며, 해석값과 실험값이 약 86.78% 일치하는 것으로 증명하였다.

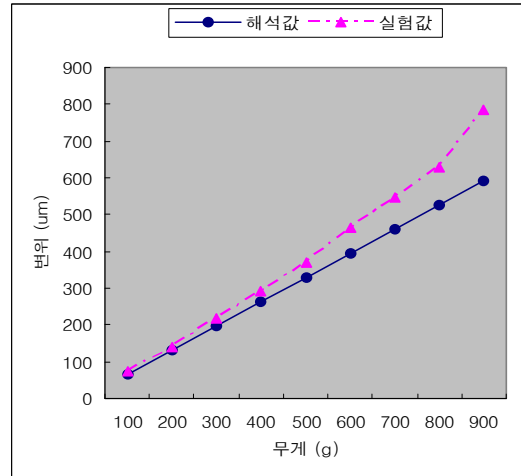
해석과 모델링에 대한 데이터 값 차이는 외부 하중에 가해지는 방향과 측정 센서의 측정부위차이, 탄성한지의 중심위치에 따른 기하학적 형상 편차에 기인한 것으로 판단된다.



(a) X축 부하에 대한 해석값과 실험값 비교



(b) Y축 부하에 대한 해석값과 실험값 비교



(c) X축 + Y축 부하에 대한 해석값과 실험값 비교

그림 3. 원형 노치 타입 탄성한지의 해석값과 실험값 비교

Fig. 3. Comparison of Analysis Data and Experiment Data of Circular Notch Flexure Joint

III. 2자유도 스테이지 구현

위의 설계와 해석값에서 나온 탄성한지를 이용하여, 1 자유도 스테이지를 구현하고, 이를 직교로 배치하여 평면상의 2 자유도 스테이지를 설계하였다. 스테이지 재질은 알루미늄 6061-T6이며, 전체적인 크기는 300mm * 300mm이며, 구동 PZT 모터의 변위를 1:10 증폭비로 구동하게 설계되었다.

1. 1자유도 스테이지 설계

그림 4 에서 보듯이 1 자유도 스테이지는 총 10개의 탄성힌지로 이루어져 있으며, 스테이지 크기는 전체 스테이지 크기에 비례하여 유한요소 해석에 의해 결정하였다. 1 자유도 스테이지 구동은 C 방향으로 힘을 가하면, 레버구조인 A와 B의 비율에 의해 증폭되는 구조이다. 구동되는 부위를 자세히 보면, 피에조(PZP) 모터의 움직임에 의하여 1번(4번)이 상승되고, 레버의 힌지인 2번(5번)의 구조에 의해서 3번(6번)이 아래로 움직이게 구동된다. 본 연구에 사용한 1 자유도 스테이지의 레버 비율인 A : B는 1 : 10의 비율로 설계하였다. 피에조 모터는 LabView 보드를 이용하여 제어 되었고, 최대 정밀도는 0.9 μ m, 분해능은 0.45 μ m 이다.

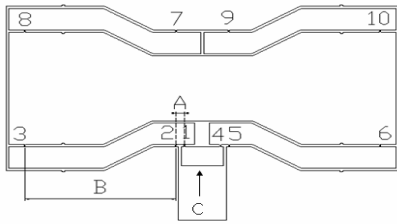


그림 4. 레버 구조에 의한 1 자유도 스테이지 설계
Fig. 4. Design of 1 DOF Stage with Lever Structure

2. 2자유도 스테이지 설계

위에서 설계한 1 자유도 스테이지를 서로 평면상에서 수직으로 배치하여 직교방향으로 움직일 수 있는 2자유도 스테이지를 그림 5 과 같이 제작하였다. 이것은 2개의 피에조모터를 이용하여 구동되며, 축방향의 동작 원리는 1 자유도 스테이지와 같다.

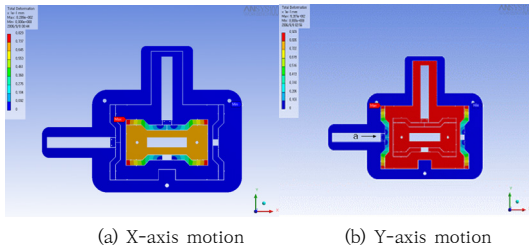


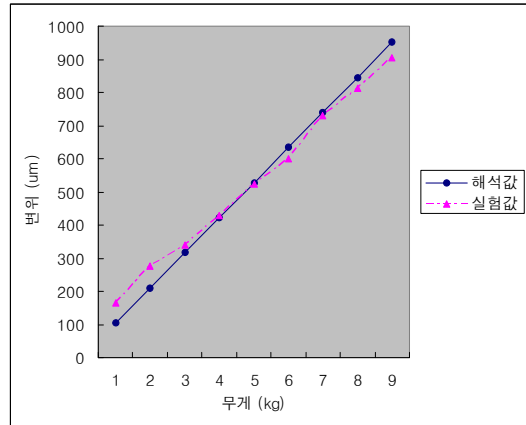
그림 5. 2 자유도 스테이지의 해석
Fig. 5. FEM Analysis of 2 DOF Stage

2 자유도 평면 스테이지의 유한요소 해석을 위하여, Mesh의 Element size 크기를 5mm 로 정하고,

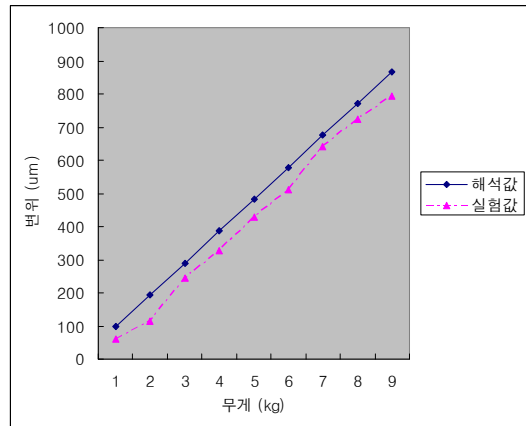
133,360개의 nodes, 79,185개의 elements로 진행하였다. 2 자유도 스테이지의 외각면을 고정면으로 잡았고, 10kg 까지의 외력에 따른 변위값과 항복강도를 해석을 통하여 도출하였다.



그림 6. 피에조 모터를 이용한 2 자유도 스테이지의 실험 구성
Fig. 6. Experimental Setup for 2 DOF Stage with PZT Motor



(a) X축 부하에 대한 해석값과 실험값 비교



(b) Y축 부하에 대한 해석값과 실험값 비교

그림 7. 2 자유도 스테이지의 해석값과 실험값 비교
Fig. 7. Comparison of Analysis Data and Experiment Data of 2 DOF Stage

그림 6은 제작된 2 자유도 스테이지의 정밀도를 측정하기 위한 실험 구성이다. 정확한 외력을 인가하기 위하여 피에조 모터를 사용하였으며, 센서는 1자유도 스테이지 실험장비와 동일한 비접촉 CCD Laser Displacement Sensor를 사용하여 변위 측정을 하였다.

그림 7은 외력에 의한 2 자유도 스테이지의 해석결과와 실험값을 정리한 그래프 이다. 실험은 위에서 탄성힌지의 실험과 동일하게 하였다.

그림 7의 (a) 그래프는 X축에 대한 해석값과 실험값을 나타내며, 이 그래프에서 보듯이 해석값과 실험값의 평균 편차는 $30.67\mu\text{m}$, 해석값과 실험값이 약 90.80%로 일치하는 것으로 나왔다. 그림 7의 (b) 그래프는 Y축에 대한 해석값과 실험값을 나타내며, 이 그래프에서 보듯이 해석값과 실험값의 평균편차는 $55.33\mu\text{m}$, 해석값과 실험값이 약 83.04%로 일치하는 것으로 나왔다.

IV. 6자유도 스테이지 구현

제안된 2자유도 평면 스테이지는 평면상의 병진운동을 구현하며, 2개의 피에조 모터부에 의해서 x축과 y축의 2자유도 운동을 가지고 있다. 이 운동을 토대로 3개의 2자유도 평면 스테이지를 그림 8과 같이 배치하여, 공간상의 6 자유도 구동상판 (Moving Stage)의 움직임을 구현하는 스테이지를 구성하였다. 6 자유도를 구현하기 위하여, 2 자유도 스테이지와 구동상판은 6개의 탄성링크 (Flexure Link)와 공간상으로 결합되어 있다.

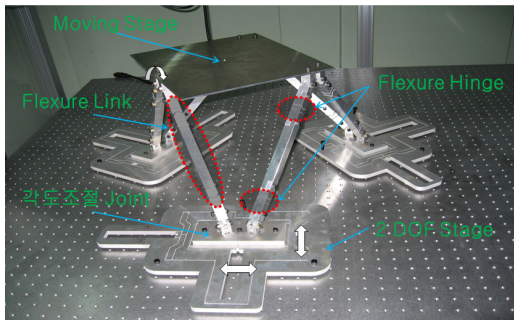
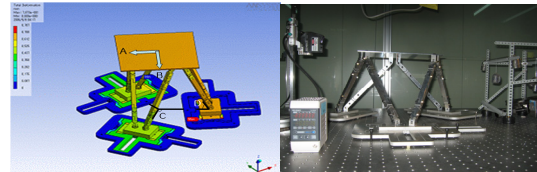


그림 8. 세개의 2자유도 스테이지와 탄성힌지로 결합된 6자유도 메커니즘
 Fig. 8. Suggested 6 DOF Mechanism with three 2 DOF Stage using Flexure Joint

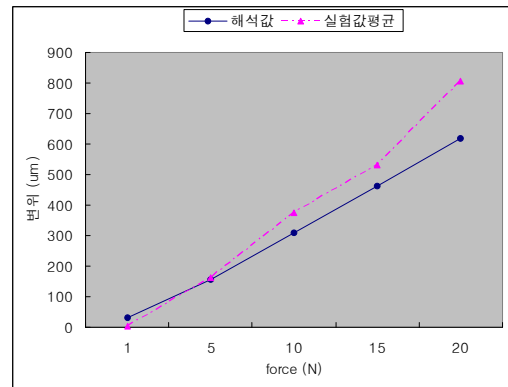
탄성링크의 구성은 공간상의 6 자유도 움직임에 매우 중요하다. 개별 탄성링크에는 탄성힌지 2개를 서로 직교

의 위치로 결합하여 2축 움직임을 구현한 “2자유도 탄성힌지”를 각각 2개씩 위치시켜 제작하였다. 이러한 탄성링크를 구동상판과 총 6개를 결합하여 6자유도 스테이지를 제작하였다. 따라서 6개의 탄성링크에는 총 24개의 개별 탄성힌지가 위치한다. 2 자유도 스테이지는 평면상에서 120° 각도로 대칭이 되도록 설치하고, 6개의 탄성링크는 공간상에서 50° 각도로 설치하여 구동상판의 위치를 잡았다.

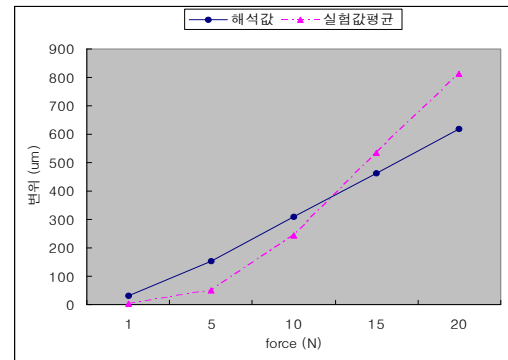


(a) 6자유도 스테이지 해석 (b) 6 자유도 스테이지 실험

그림 9. 6자유도 스테이지 해석 및 실험구성
 Fig. 9. FEM Analysis and Experiment Setup of 6 DOF Stage



(a) X축 부하에 대한 해석값과 실험값 비교



(b) Y축 부하에 대한 해석값과 실험값 비교

그림 10. 6자유도 스테이지의 해석값과 실험값 비교
 Fig. 10. Comparison of Analysis Data and Experiment Data of 6 DOF Stage

그림 9는 6 자유도 스테이지의 유한요소 해석과 6개의 피에조 모터와 결합되어 공간성의 움직임을 구현한 실험구성을 나타낸다. 유한요소 해석은 2자유도 스테이지의 외각면을 고정면으로 잡고 구동상판을 각각 A방향과 B방향으로 힘을 가했을 때, 얻어지는 변위값을 해석하였다. 6 자유도 스테이지 구동 실험은 3개의 2자유도 스테이지 각각에 피에조모터를 조립한후, 전압입력을 인가하여 구동상판의 변위량을 동일한 CCD Laser Displacement Sensor를 사용하여 변위 측정을 하였다.

그림 10은 외력에 의한 6 자유도 스테이지의 해석결과와 실험값을 정리한 그래프 이다. 그림 10의 (a) 그래프는 X축에 대한 해석값과 실험값을 나타내며, 해석값과 실험값의 평균편차는 $70.70\mu m$, 해석값과 실험값이 약 69.77%로 일치하는 것으로 나왔다. 그림 10의 (b) 그래프는 Y축에 대한 해석값과 실험값을 나타내며, 해석값과 실험값의 평균편차는 $91.87\mu m$, 해석값과 실험값이 약 57.43%로 일치하는 것으로 나왔다.

전체적으로 실험과 해석값의 차이는 단순 탄성힌지에서 6자유도 스테이지로 조립되어감에 따라 커짐을 알 수 있다. 이는 탄성힌지의 가공오차와 스테이지 조립 과정에서의 단순 오차들이 누적되어 실험에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 또한 반복 실험의 과정에서 탄성힌지의 변형에 따른 보원력 저하에 기인한 것으로 판단된다.

V. 결론

본 논문에서는 탄성힌지를 개별조인트로 이용하여 6 자유도 스테이지 설계에 대한 연구 결과를 제시하였다. 단순한 탄성힌지의 움직임을 이용하여 공간상의 6자유도 움직임을 구현하기 위하여 평면상의 2자유도 스테이지를 설계하고, 이를 공간적으로 결합하여 6자유도 움직임을 정량화 하였다. 유한요소 해석과 실험값을 비교하여 각 스테이지별 성능을 비교 분석하여 실험 데이터를 추출하였다. 이러한 실험 데이터를 통하여 탄성힌지의 크기와 변위량에 따라 6 자유도 스테이지의 운동량을 측정 하였다.

앞으로의 연구방향은 현재 제작된 6자유도 스테이지의 기구학적인 움직임을 정밀하게 구동하기 위하여 외부

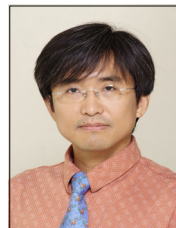
센서 측정과 결합된 페루프 제어시스템을 구성하고, 이를 통하여 보다 유연하고 정밀한 움직임이 가능하도록 진행하고자 한다.

References

- [1] Se-Jun Park, "Implementation of Mobile Robot Platform Based on Attitude Reference System for Pantilt Camera Control", The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol.16, No.2, pp.201-206, April 2016
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.2.201>.
- [2] L. L. Howell, Compliant Mechanisms. New York: Wiley, 2001.
- [3] S. Kota, "Compliant systems using monolithic mechanisms," Smart Mater. Bull., pp. 7-9, Mar. 2000
- [4] Weibin Rong, Yuliang Luan, Limin Qi, "Stiffness analysis and modal analysis of precision parallel manipulator with flexure hinge", International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, Aug 2012.
DOI: 10.1109/3M-NANO.2012.6472973
- [5] Xiaozhi Zhang ; Qingsong Xu , "Design of a new flexure-based XYZ parallel nanopositioning stage", IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Dec. 2015
DOI: 10.1109/ROBIO.2015.7419060
- [6] Byoung Hun Kang., and John T.Wen. , "Analysis and Design of Parallel Mechanisms with Flexure Joint", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, Issue 6, pp. 1179-1185, Dec. 2005
DOI: 10.1109/TRO.2005.855989

저자 소개

강 병 훈(정회원)



- 1992년 KAIST 기계공학과 졸업.
- 1995년 KAIST 자동차 및 설계공학과 석사.
- 2004년 Rensselaer Polytechnic Institute 기계공학과 박사.
- 2005년~현재 한국산업기술대학교 기계설계공학과 교수.

- 관심분야는 최적설계, 로봇자동화, 원격제어, MEMS, 영상처리.

※ 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2016R1A2B4011361)