

# 초정밀 위치제어 스테이지의 온도드리프트 보상을 위한 측정보조링크 설계에 대한 연구

## A Study on the Design of the Sensing-assistant Linkage for Compensation of Thermal Drift of Ultra-precision positioning stage

\*이경수<sup>1</sup>, #김수현<sup>2</sup>, 꺾윤근<sup>3</sup>

\*K. S. Lee<sup>1</sup>, #S. H. Kim(soohyun@kaist.ac.kr)<sup>2</sup>, Y. G. Kwak<sup>3</sup>

<sup>1</sup>국방과학연구소 기술연구본부, <sup>2</sup>한국과학기술원 기계항공시스템학부, <sup>3</sup>한국과학기술원 기계항공시스템학부

Key words : Ultra-precision positioning stage, Compensation of thermal drift, Sensing-assistant linkage

### 1. 서론

생체분자의 기계적 특성을 측정하는 실험에서는, 현미경 위에 탑재가 가능한 중공구조의 초정밀 위치제어 스테이지가 요구된다. 현미경 스테이지와 같은 정밀스테이지의 경우 온도변화에 매우 민감한 특성이 있는데, 위치제어 스테이지에 온도드리프트가 발생할 경우, 스테이지의 드리프트량과 생체 분자의 운동을 구분하기 어렵게 된다. 따라서 실험을 수행하는 수분동안 온도드리프트에 안정적인 스테이지의 설계가 필요하다.

본 연구의 목표는 초정밀 위치제어 스테이지의 온도드리프트를 줄이는 방법으로, 측정보조링크의 설계를 제안하고, 그 설계안에 대한 타당성과 성능을 검토하는 데 있다.

### 2. 온도드리프트 보상을 위한 측정보조링크 설계

위치제어 스테이지의 측정시스템이 목표로 하는 측정대상은 스테이지의 중공구조의 중심부이다. 하지만 센서는 그 중심부에 올려놓을 수가 없다. 측정위치차이가 만드는 경로의 열팽창에 의해 거리 측정오차가 발생하고, 이로 인해 위치제어 시스템에서 온도 드리프트 현상이 일어나게 된다. 그런데 만약 측정보조링크를 사용하여, 스테이지의 중공구조의 중심부가 측정 보조링크와 연결이 되어 설계가 되고, 측정 보조링크는 열팽창이 적은 물질로 제작이 된다면, 중공구조 중심부의 위치 측정이 가능할 것이다. Fig. 1 과 같이 2자유도의 Z축과 Y축의 병진운동구속을 가진 힌지를 3개 이용하여, 평행판을 연결할 경우, 힌지의 운동 제한으로, 상판이 온도에 따라 늘어나더라도, 각 힌지의 면에 수직한 선들이 만나는 지점은 바닥과 상대운동을 하지 않게 된다. 이 개념을 중공구조와 측정 보조 링크를 연결하는데 사용할 수가 있다. 이를 중공구조 스테이지에 적용하면, 컨트롤 하기를 원하는 중심부분을 중심축으로 하여 대칭한 방향으로

3개의 힌지를 붙이고 나서, 그 위에 나란하게 측정보조링크를 연결한다. 이 연결은 스테이지의 중심과 측정보조링크의 중심의 상대운동을 제한함으로써, 열변형시 측정보조링크의 중심이 항상 스테이지의 중심에 올 수 있게끔 한다. 이때, 측정보조링크의 경우 온도에 따른 열변형이 매우 작기 때문에, 센서가 측정보조링크의 중심부로부터, 멀리 떨어져있더라도 그 길이에 따른 열팽창량은 상대적으로 아주 작기(1/40~1/20배) 때문에, 측정시 드리프트를 줄여줄 수 있다.

힌지구조의 1축 위치제어 스테이지에 적용할 수 있는 측정보조링크를 설계하였다. 결합힌지는 Fig. 2와 같이 0.5mm두께의 Y축과 Z축 운동에 강성이 큰 힌지를 설계해서, 측정하고자 하는 중심점을 지나는 축과 X축이 평행인 방향으로 3개의 힌지를 Fig. 3과 같이 결합했다. 그리고 꺾센서는 스테이지가 아닌, 측정보조링크의 위치를 측정함으로써 중심축의 이동을 측정하도록 설계했다.

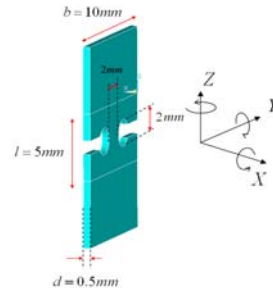


Fig. 2 Size of the coupling hinge

Table 1 Stiffness of the Coupling hinge

Stiffness (MN/m)		Torsional Stiffness (Nm/rad)	
$k_x$	0.5	$k_{xt}$	11.9
$k_y$	5.88	$k_{yt}$	0.58
$k_z$	28	$k_{zt}$	4.9

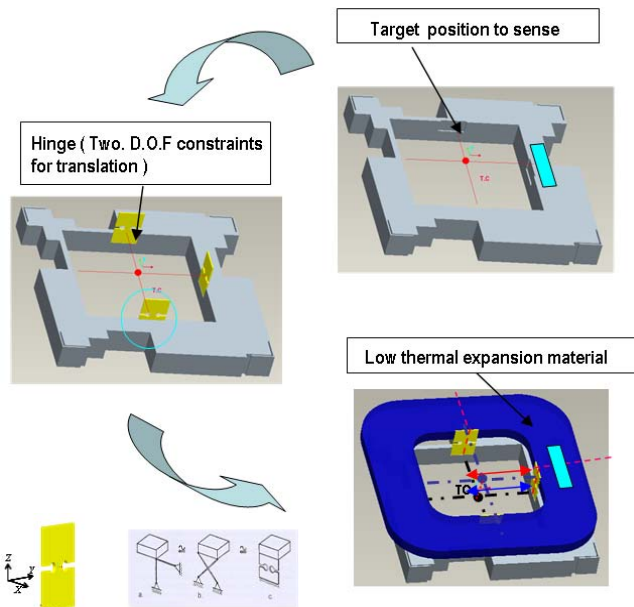


Fig. 1 Kinematic coupling on center axis

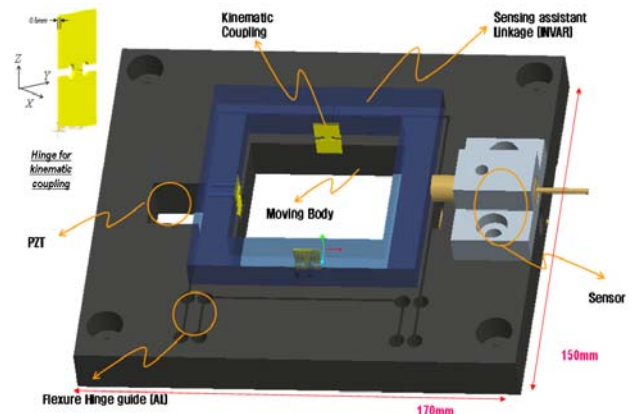


Fig. 3 Kinematic coupling on center axis

### 3. 측정보조링크의 구조해석 및 성능평가

측정보조링크의 타당성 및 성능을 평가하기 위해, 시뮬레이션을 통해, 다양한 온도변화 환경에 대하여 측정보조링크의 열변형을 확인하였고, 보조링크의 제작 및 운용시 발생할 수 있는 문제점들에 대해서도 설계검토를 실시하였다.

시뮬레이션 결과를 보면, 설계된 측정보조링크에 균일한 온도 변화(1°C)를 주었을 경우, Fig. 4 와 같이 AL 재질의 스테이지는 열팽창을 많이 하지만 인바(Invar) 재질의 측정 보조링크는 열팽창을 적게 한다. 이때 X축상의 커플링 힌지는 X축상의 열팽창량을 보상(Fig.4의 Hinge C 오른쪽 그림 참조)하고, Y축상의 커플링 힌지는 스테이지와 측정보조링크의 중심점을 유지시켜 주는 역할(Fig.4의 Hinge B 왼쪽 그림 참조)을 한다. 시뮬레이션 DATA 결과를 통해 스테이지는 95%의 열팽창오차를 줄여주는 것으로 확인하였다.

현미경위에 탑재시 열오차를 발생하는 주열원이 광원이고, 대부분 열전도와 열대류에 의해 발생함을 고려하여 스테이지에 온도구배 발생시 생길 수 있는 변형량과 이에 대한 보조링크의 성능평가도 실시하였다. 이 경우에도 스테이지가 열구배에 의해 비대칭 변형량이 있다라도, 중심축은 총 열변형량의 2% 내외로 중심축이 유지되고, 따라서 온도드리프트에 대해서는 90% 이상 줄일 수 있음을 확인하였다.

또한 시뮬레이션을 통해, 측정보조링크 제작시 발생할 수 있는 길이 오차나 정렬오차 등과, 현미경 스테이지로 사용시 실험물체의 무게 등의 영향 등에 대해, 측정보조링크의 성능이 강건함을 유지하는 것을 확인하였다. (Table 2. 참조)

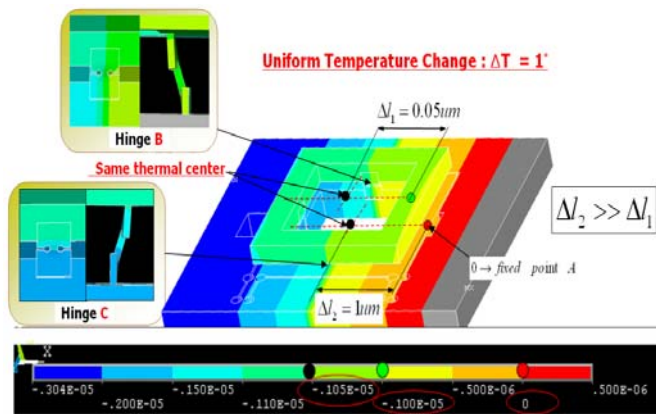


Fig. 4 Evaluation of the performance of sensing assistant in uniform temperature change,  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  (simulation)

Table 2 Evaluation results of Sensing-assistant linkage

		Thermal Expansion error of stage	Thermal expansion error of Linkage	Offset of TC	Maximum Stress	% of Compensation
Uniform Temperature change : 1°C		1um	0.05um	0	2.3Mpa	95%
Non-uniform Temperature change of the microscope stage	0.1°C	0.014um	0.0005um	0.001um	.	90%
	0.5°C	0.069um	0.003um	0.004um	.	90%
	1°C	0.133um	0.005um	0.008um	.	90%
Effect of Fabrication Error at $\Delta t = 1^\circ$	Vertical error on hinge Plane ( $\delta_1 = \delta_2 = 1\text{mm}$ )	1um	0.05um	0.02um	2.3Mpa	93%
	Parallel error to hinge Plane ( $\delta_1 - \delta_2 = 1\text{mm}$ )	1um	0.05um	0.02um	3.4Mpa	93%
	Tilting error between hinge plane & stage (0.05rad)	1um	0.05um	0.035um	2.3Mpa	91%

측정보조링크의 동적특성은, 위치제어 스테이지의 구동와 측정보조링크에 직접 가해지는 외부 입력(충격량, 힘, 변위) 등에 대한 응답특성을 통해서 설계 검토를 실시하였다. 측정보조링크를 집중질량모델로 놓고 진동폭을 계산한 결과, 측정보조링크는 스테이지의 구동속도를 제한함(1um/s)으로서 위치제어에 안정적인 운용이 가능하지만, 충격량이나 힘, 변위 등 외부입력에 대한 변형에는 불안정함을 알 수 있었다. 이에 측정보조링크는 측정보조링크로만 사용이 가능하고, 보조링크에 외부입력이 들어가는 다른 기능을 포함하는 것은 구조적으로 안정하지 못하다는 결론을 얻었다. 따라서 측정보조링크를 현미경에 적용할 경우에는 보조링크는 외부 입력을 받지 않도록 스테이지 아래부분에 결합하여 측정보조링크로서의 순수 역할만을 수행하는 구조를 제안할 수 있다.

### 4. 결론

위치제어 시스템에서 드리프트를 일으키는 가장 큰 원인이 되는 것은 위치 측정시 발생하는 오차이다. 스테이지의 온도 드리프트를 줄이기 위해서는 측정시 발생하는 열오차를 줄일 수 있는 구조적인 메커니즘이 필요하다. 본 연구는 정밀 위치제어시스템에서 발생하는 온도 드리프트 현상을 보상하기 위한 측정보조링크의 설계를 제시하였다.

그리고 측정보조링크의 타당성 및 성능을 평가하기 위해, 1축 위치제어 스테이지에 적용할 수 있는 측정보조링크를 설계하였다. 시뮬레이션을 통한 분석결과, 측정보조링크의 중심이 스테이지의 중심을 유지되는 것을 확인하였고, 측정보조링크를 사용함으로써 온도차에 의한 위치 측정 에러를 90% 이상 줄일 수 있음을 확인하였다.

또한 측정보조링크가 제작, 조립오차들에 대해 성능이 강건함을 확인하였다. 그리고 측정보조링크의 동적 해석 결과로부터, 측정보조링크를 현미경 탑재식 스테이지에 적용시, 필요한 위치제어 스테이지의 구동속도 및 측정보조링크와 현미경 시스템과의 결합방식을 제안함으로써, 측정보조링크의 활용에 대한 설계검토를 하였고, 이를 통해 설계 제작 및 운용성을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] J. Adler & S.N.Pagakis, "Reducing image distortions due to temperature-related microscope stage drift", Journal of Microscopy, Vol. 210, pp.131-137, 2003
- [2] J. Bryan, "International Status of Thermal Error Research" Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 645 - 656. , 1990
- [3] KAIST 기계공학과, "초정밀 시스템 설계 일반", 제 6회 산학협동단기강좌. , 2004
- [4] Thomas R Hicks, "The NanoPositioning Book", Queensgate Instrument Ltd. , 1997
- [5] P. Schellekens, 1998, "Design for Precision: Current Status and Trends", Annals of the CIRP, Vol. 47, pp. 557 - 596.
- [7] Smith ST, Chetwynd DG. Foundations of Ultraprecision Mechanism design. Gordon and Beach Science Publishers, 1992. P.95-104
- [8] Smith ST, Chetwynd D.G. Design and Assessment of Monolithic High Precision Translation Mechanism, Science Instrument, 20(1987)977
- [9] Daniel J. Inman, Engineering Vibration, second edition, Prentice Hall
- [10] Stuart T. Smith, Flexure, Elements of Elastic Mechanisms, Gordon and Breach Science Publishers
- [11] 이경수, 안정호, 권순근, 박효준, 곽윤근, 김수현, "현미경 탑재식 초정밀 위치제어 스테이지 개발에 대한 연구 : 온도 드리프트 제어 설계", 대한기계학회 2006년도 추계학술대회논문집, pp. 959-964, 2006