

# 초정밀 유정압 베어링 이송 테이블의 나노미터 위치결정 제어에 관한 연구

## On Nanometer Positioning Control of Ultra-precision Hydrostatic Bearing Guided Feeding Table

심종업<sup>1,✉</sup>, 박천홍<sup>1</sup>, 송창규<sup>1</sup>  
Jongyoup Shim<sup>1,✉</sup>, Chun-Hong Park<sup>1</sup>, and Chang-Kyu Song<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 첨단생산장비연구본부 초정밀시스템연구실 (Ultraprecision Systems Lab., KIMM)  
✉ Corresponding author: jyshim@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7112

Manuscript received: 2013.10.1 / Accepted: 2013.11.13

*An ultraprecision multi-axis machine tool has been designed and developed in our laboratory. The machine tool has four moving axes which are composed of three linear axes and one rotational axis. It has a gantry type structure and the Z-axis is on the X-axis and the C-axis, on which a workpiece is located, is inside the Y-axis. This paper shows control performance improving method and procedure for the ultra-precision positioning control of a hydrostatic bearing guided linear axis. Through improvements of electrical and mechanical components for the control system such as control electronics and oil pumping systems, the control disturbing noise is decreased. Also by the frequency domain analysis of control system those problem-making components are identified and modified with analytical methods. The controller is analyzed and designed from frequency domain data and system information. In the experimental control results the nanometer order control result is successfully presented.*

Key Words: Ultraprecision Machine Tool (초정밀가공기), Hydrostatic Bearing (유정압베어링), Nanometer Positioning Control (나노미터 위치결정 제어), Frequency Domain Analysis (주파수영역 분석), Control System Analysis (제어시스템 분석)

### 1. 서론

최근 디스플레이, 모바일 기기 및 반도체 산업의 핵심 요소 부품의 요구 정밀도 및 기능 향상으로 더욱 정밀한 초정밀가공기를 요구하고 있다. 모바일 기기 및 가전제품의 LCD 디스플레이에 사용되는 BLU(Back Light Unit)의 구성품 중 기능성 필름의 제조에 있어서 초정밀 선삭/레이저 가공기가 요구되고 있으며 모바일 기기 카메라 렌즈 몰드를 가공하기 위한 초정밀 다축 가공기 및 나노미터급 변위측정 엔코더 및 홀로그래프 부품 제작에

있어서 초정밀가공기의 요구가 증대되고 있다.<sup>1-3</sup> 이러한 초정밀가공기 요구에 대응하기 위하여 가공기의 설계/보정 및 제어 기술의 연구가 필요하다.<sup>4-7</sup> 고강성, 고감쇠 및 높은 힘-경로(Force-Loop) 고유진동수 설계 기술, 이송축 이송정밀도, 각 축간 기하학적 오차, 열발생 및 자중에 의한 오차 보정기술 및 제어 시스템 분석을 통한 고속제어 기술 및 초정밀 위치결정 제어 기술 등이 연구대상 기술이라 하겠다.

본 논문에서는 유정압베어링을 채용한 직선 이송 시스템의 나노미터 분해능 제어에 관하여 논하

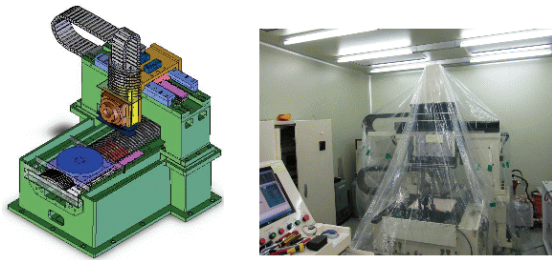


Fig. 1 The 4-axis machine tool (1,300 × 1,800 mm<sup>2</sup>) which is adopting hydrostatic bearings. The machine is composed of three linear axes and one rotary axis

고자 한다. 디스플레이 필름 및 광학부품 가공을 위한 초정밀 4축 가공기를 본 연구실에서 개발하였으며(Fig. 1)<sup>6</sup> 이 가공기의 Y방향 이송축에 대하여 나노미터 분해능 제어 기술을 적용하고자 한다. 초정밀 4축 가공기의 기본적인 구조는 X, Y, Z, C축의 4축 구조를 갖고 있으며 가공기의 크기는 1,300 × 1,800 mm<sup>2</sup>이며 X축 및 Y축의 유효이송 거리는 각각 550 mm이다. 자세제어(Self-leveling) 센서를 채용한 공기스프링 방진대를 이용하여 4점 지지 방식의 방진시스템을 적용하였다. 각 축의 안내 베어링은 모두 유정압베어링을 사용하였고 각 축의 구동기로서 직선 이송축은 무철심 리니어 모터(coreless linear motor)를 사용하였고 회전축은 직구동방식(rotary BLDC motor)을 사용하였다. 제작된 초정밀가공기는 각 직선/회전 축에 유정압 베어링을 채용하여 진동 및 마찰력 등의 측면에서 초정밀 가공기로서 장점을 가지나 유정압베어링 유체의 온도 및 맥동을 정밀하게 제어해야 성능을 극대화 시킬 수 있다. 또한, 나노미터급 위치결정 제어를 위하여 제어시스템의 주파수 영역 분석을 통한 시스템 개선 및 제어기의 설계를 수행하여야 한다.

**2. 이송 테이블의 나노미터 위치결정 제어특성**

이송테이블의 구조를 Fig. 2에 보이고 있으며 제어시스템의 제어기로서 Delta Tau사의 Umac 제어기가 사용되었으며 구동기로서 Trilogy사의 리니어모터 및 Magnescale SONY사의 직선엔코더가 사용되었다. 또한 실제 나노미터 위치결정 변위측정을 위하여 ADE사의 정전용량형 센서를 사용하였으며 이송테이블의 위치결정 제어 결과를 Fig. 3에

Table 1 The 4-axis machine tool design specifications

Machine Size		Specifications
		1,300×1,800×1,200 mm <sup>3</sup>
C axis	Feed table	Oil hydrostatic
	Motor	Brushless DC motor
	Feedback	Encoder
Y axis	Feed table	Oil hydrostatic
	Motor	Coreless linear motor
	Feedback	Laser scale, resolution 0.34 nm
X axis	Feed table	Oil hydrostatic
	Motor	Coreless linear motor
	Feedback	Laser scale, resolution 34 nm
Z axis	Feed table	Oil hydrostatic
	Motor	Coreless linear motor
	Feedback	Laser scale, resolution 0.34 nm

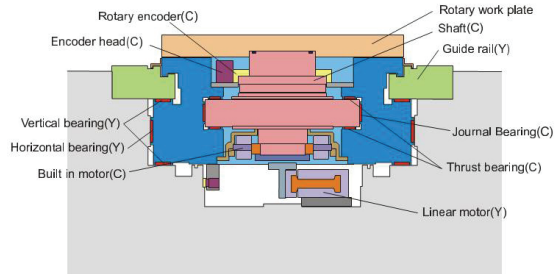


Fig. 2 Y-axis feeding table structure showing hydrostatic bearing, linear motor and moving table

보이고 있고 20 nm에 가까운 위치결정 제어성능을 가짐을 알 수 있다. 이 실험은 진동절연장치를 가동시키고 제어한 결과이며 Fig. 4에 제어 시의 엔코더 데이터를 이용하여 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행한 결과를 보이고 있다. 약 58 Hz 및 18 Hz 주파수 영역에서 커다란 제어오차를 보이고 있으며 0 ~ 100 Hz 영역에서 전반적인 제어오차 스펙트럼을 나타내고 있다. 일반적으로 오일 펌프 시스템의 유압맥동에 의한 외란의 영향은 0 ~ 100 Hz 주파수 영역에 걸쳐서 나타나며 추후 실험적 분석을 통하여 18 Hz 영역은 오일 펌프 시스템에 사용되는 어큐뮬레이터 튜닝 오차에 의한 영향이고 58 Hz 영역은 스케일 고정 지그의 영향으로 파악되었다.

**3. 제어 시스템 분석 및 성능 향상 설계**

Fig. 3 및 Fig. 4의 실험결과로부터, 제어기의 설계 및 제어시스템의 모드 분석을 진행하기 전에 전체 제어시스템 기반요소들의 재설계를 수행하였다. 이 기반요소는 전기시스템과 오일 펌프시스템

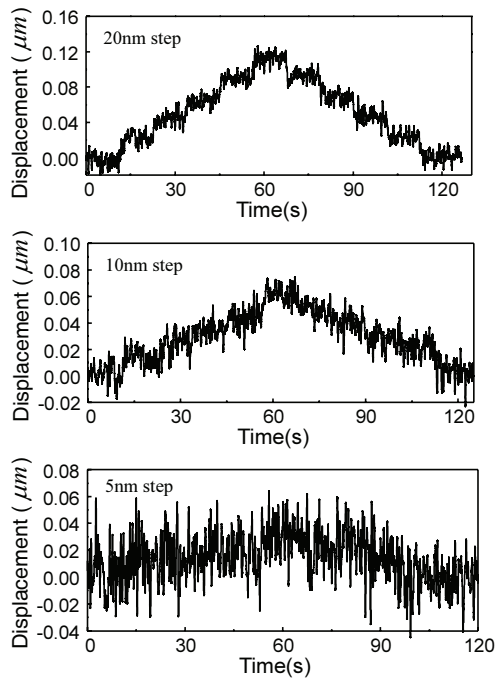


Fig. 3 Multi-step positioning control result which shows 10 to 20 nm resolution performance. The control noise have electrical and mechanical disturbance effect which should be eliminated to improve positioning control performance

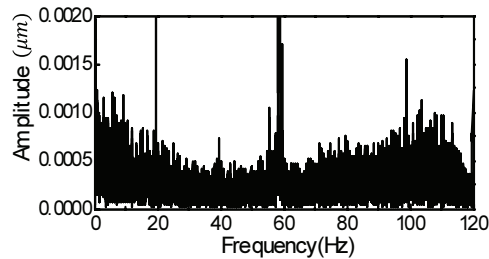


Fig. 4 Frequency domain analysis(FFT) result from the controlled table positioning data

이고 전기시스템의 노이즈 감소를 위하여 장비접지, 전원소스, 노이즈 필터 등에서 재설계된 전장 시스템을 구성하였다. 또한, 오일 펌프시스템의 어큐뮬레이터를 2개 적용하여 감압밸브 전/후에서 한번씩 진동을 저감하였으며 진동 저감 T-필터를 채용하였다. 또한, 기존에 초과 설계되었던 펌프의 용량을 현재 초정밀 가공기의 압력-유량 소비량에 적합하게 조절하여 설계하였다.

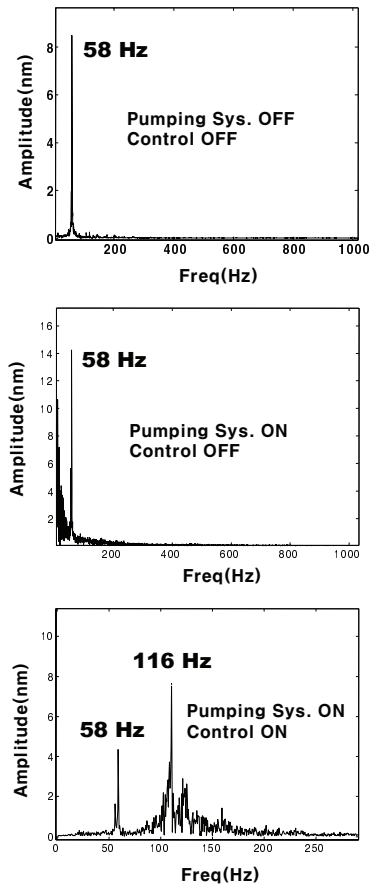


Fig. 5 FFT result of encoder scale signal with various experiment conditions

전기시스템 및 유압시스템을 교체하고 이송계리니어스케일 신호를 이용하여 주파수 분석을 수행하였다. 진동요인 효과의 극대화를 위하여 진동절연시스템을 정지시키고 실험하였다. 위치 제어 시스템을 정지시키고 유압 공급 시스템도 정지시킨 상태에서 주파수응답특성을 보면 (Fig. 5), 58 Hz의 노이즈 성분이 존재하는 것을 알 수 있다.

또한, 유정압 베어링을 작동시키기 위하여 유압 공급 시스템을 작동시키면 100 Hz 이하에서 노이즈 성분들이 추가되며 58 Hz의 성분도 역시 크게 증가함을 알 수 있다. 100 Hz 이하의 성분들은 일종의 분홍색잡음(pink noise) 형태로서 유압시스템의 작동으로 인한 공급유의 압력 맥동 영향이다. 세 번째 그래프에서는 제어시스템을 가동시켜 위치제어를 수행한 상태에서 위치 오차성분의 주파수 응답특성을 보이고 있다. 제어에 의한 영향을

최대한 관찰하기 위하여 제어기의 게인값을 크게 하여(응답성이 빠르게) 실험을 수행하였다. 두 개의 커다란 위치오차 성분으로 58 Hz와 116 Hz 성분이 보이고 있고 116 Hz 성분은 58 Hz의 하모닉 성분으로 58 Hz로 인하여 발생한 위치오차를 제어 루프가 동작하면서 부차적으로 발생한 오차 성분으로 판단된다. 제어게인이 큰 이유로 58 Hz 성분을 제외한 유압 맥동의 원인으로 판단되는 0~50 Hz 오차 스펙트럼이 크게 감소하였으나 제어기의 영향으로 100~120 Hz 영역에서 위치오차 스펙트럼이 발생하게 된다. 이러한 주파수 분석으로 58 Hz 성분의 제거 또는 보완이 요구되어 노이즈 성분의 원인이 기계적인 것인지 전기적인 것인지의 파악이 필요하였다.

여러 가지 기초 실험의 결과로 스케일 지그의 공진주파수가 영향을 미치는 것으로 판단되어 스케일 지그 부의 주파수 특성 실험을 수행하였다. 스케일 지그는 이송계에 부착되어 지그 옆면에 리니어스케일을 고정하여 같이 이송되게 하는 지그로서 베드에 고정된 스케일 헤드와 같이 이송계 위치데이터를 생성하게 된다. 따라서, 스케일 지그 자체가 진동할 경우 위치데이터에 노이즈 신호를 추가하게 된다. 주파수 특성 실험을 위하여 가속도계를 지그 끝부분에 장착하고 햄머로써 충격을 가하여 가속도계 신호로 FFT를 수행함으로써 스케일 지그 부의 주파수 특성을 얻을 수 있었다.

Fig. 6에는 스케일 지그의 주파수 특성 실험 결과를 보이고 있다. 각각 수직 방향과 수평방향의 주파수 응답특성 결과를 보이고 있다. 수직방향 결과에서 보면 58 Hz 성분이 확연히 보이고 있다. 또한 144 Hz와 473 Hz 성분도 보이고 있다. 수평방향의 결과를 보면 250 Hz가 수평방향의 성분으로 판단되고 나머지는 수직방향의 성분이 수평방향 가속도계 센서에 반영이 된 것으로 보인다. 이에 의한 결과로 스케일 신호상의 58 Hz 성분은 스케일 지그의 기계적인 공진으로 인한 결과임이 확인되었다. 이러한 제어시스템의 구조적인 공진모드가 존재하는 조건에서 제어성능을 더욱 향상시키려면 제어시스템에서 부차공진을 발생시키는 스케일 지그를 해석적 방법으로 분석하여 보강 설계할 필요가 있다.

58 Hz 성분의 영향을 제어시스템에서 감소시키기 위하여 스케일 지그의 고유진동수를 높여야 한다. 따라서, 스케일 지그의 재설계를 수행하였다. 스케일 지그의 무게를 줄이기 위하여 가장 취약한

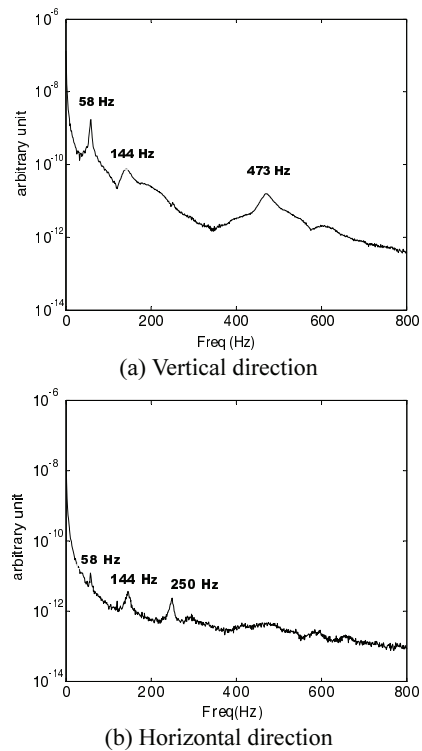


Fig. 6 FFT result of the accelerometer from impacting experiment on the scale jig structure

스케일 고정부의 구조를 트러스 구조에 가깝게 홈을 내었으며 강성 대 질량의 비가 큰 알루미늄을 재료로 사용하였다. 이러한 결과를 확인하기 위하여 FEM 해석을 수행하였고(Ansys corp.) 결과는 Fig. 7에 보이고 있다. FEM 해석 결과 교체 전의 스케일 지그의 수직 방향으로의 첫번째 고유진동수는 133 Hz이며 교체 후의 스케일 지그에서 수직 방향으로 223 Hz의 결과를 보이고 있다. 133 Hz의 경우 58 Hz의 실험결과와 많은 차이를 보이고 있는데 이것은 FEM 해석시 경계조건을 실제와 같게 하기 어렵기 때문이며 또한 실제 조건에서 스케일 지그가 고정되는 것이 볼트로 체결되고 볼트가 체결되는 테이블 위치가 다소 복잡한 구조의 강성을 가진 구조물인 원인으로 오차가 발생하는 것으로 예상된다.

이러한 설계를 반영하여 스케일 지그를 제작하고 이송축에 설치하였고 설치된 사진을 Fig. 8에 보이고 있다. 또한, 설계된 지그의 특성을 확인하기 위하여 임팩트 햄머 및 가속도계를 사용하여 제작된 스케일 지그의 주파수 특성을 구하였다(Fig.

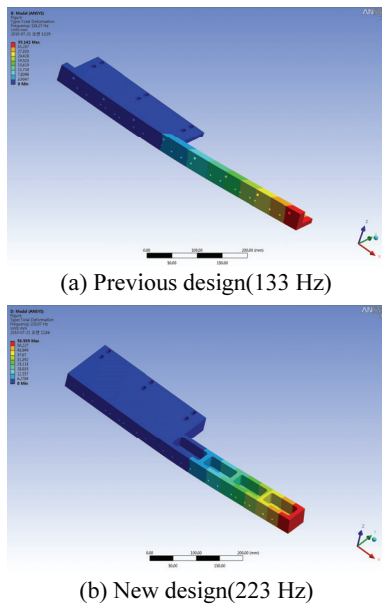


Fig. 7 FEM(Finite Element Method) analysis result for the first mode shape and frequency

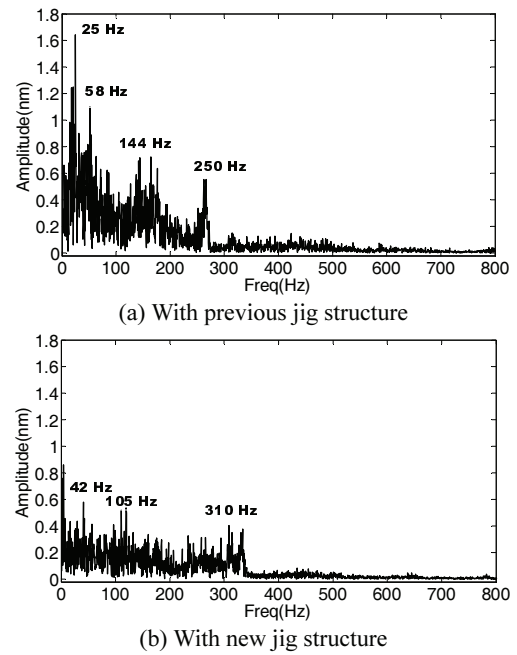


Fig. 9 Frequency domain analysis(FFT) result from the controlled table positioning data

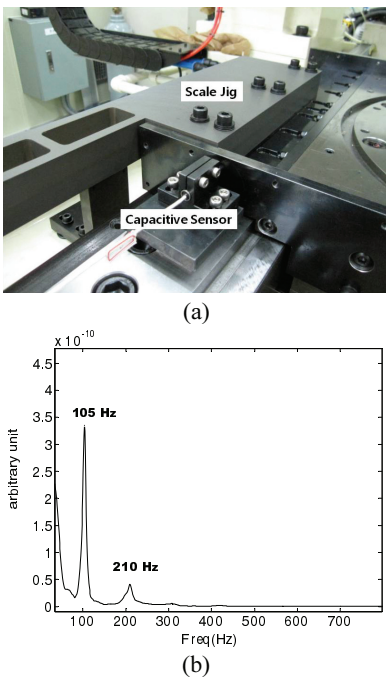


Fig. 8 (a) Y-axis feeding table picture with the installed re-designed scale jig structure (b) FFT result of the accelerometer from impacting experiment on the re-designed scale jig structure(vertical direction)

8). 실험의 결과로 첫 번째 고유진동수가 105 Hz로서 교체 전의 지그 보다 약 2배의 높은 고유진동수를 가짐을 확인하였다.

Fig. 9에서 스케일 지그를 교체하기 전/후의 제어오차 주파수 분석 결과(FFT)를 보이고 있다(진동 절연 시스템 작동). 우선 교체 전 제어 오차 주파수 특성에서 58 Hz 및 144 Hz의 스케일 지그 공진 주파수 성분으로 보이는 노이즈 스펙트럼이 보이고 수평방향의 스케일 지그 공유진동수의 영향으로 판단되는 250 Hz 근방의 노이즈 스펙트럼도 보이고 있다. 25 Hz의 성분은 가공기가 놓여 있는 장소의 바닥 진동이다. 스케일 지그 교체 후 제어 오차 스펙트럼에서는 전체적인 제어 오차가 크게 줄어든 것을 알 수 있으며 이것은 스케일 지그의 고유진동수가 증가함에 따라서 제어기의 게인에 대한 마진이 증가하여 제어게인을 크게 조정할 수 있었던 원인과 유압맥동 등 외부 가진 주파수와 스케일 지그의 모드 주파수가 멀어짐에 따른 영향으로 분석된다. 58 Hz 등 교체 전 진동모드 영향이 사라지고 교체 후의 스케일 지그 첫 번째 공진 모드 105 Hz의 성분이 관찰되고 있다. 42 Hz 성분은 유압맥동의 영향으로 판단되며 310 Hz의 성분은 스케일 지그의 영향으로 예상된다. 스케일 지그

교체 후 공진모드의 증가 및 제어게인 증가로 인하여 제어 오차 스펙트럼의 주파수 대역은 300 Hz 이상으로 다소 넓어진 것을 알 수 있다.

다음에는 Fig. 9의 결과를 얻기 위하여 수행되었던 제어게인 튜닝 과정에 대하여 논하고자 한다. 이송계의 주변시스템(오일 펌프 시스템, 전기 시스템) 재설계, 펌프시스템의 운전조건 튜닝 및 스케일 지그 교체 등 상기 논의된 사항들이 최종적으로 반영된 이송계를 대상으로 제어게인을 튜닝하였다. 제어 입력에 처프신호(chirp signal)를 입력하는 방법으로 제어시스템의 전달함수들을 측정하였고(가진 진폭 0.7  $\mu\text{m}$ , 20회 평균, 균일 창함수(uniform window)) 마찰의 영향이 적은 유정압베어링의 특성으로 제어 대상 플랜트의 전달함수는 40 Hz 정도까지는 전형적인 강체운동 2차 시스템 모델의 모습을 보인다. 그러나 100 Hz 근방부터 기계적인 모드의 영향으로 전달함수의 위상지연이 조금씩 발생하였다. 300 Hz 근방에서 제어에 큰 영향을 미치는 모드가 존재하며 이 모드로 인하여 결정적으로 제어에 한계를 보이게 된다. 현재의 제어 대상 테이블의 질량 및 모터의 최대 힘을 고려하여 간단히 계산하면 1  $\mu\text{m}$  크기의 정현파 외란이 들어올 경우 약 100 Hz 이하 정도가 제어 시스템의 한계이므로 300 Hz의 모드가 가진 될 경우 제어 시스템은 그 영향을 제거하지 못하고 불안정하게 된다. 또한 500 Hz 이상에서는 전달함수의 측정에 있어서 측정노이즈의 영향이 증가하는 것으로 보인다(낮은 측정 상관도(coherence value)).

측정된 제어 대상 플랜트 전달함수를 이용하여 제어기를 튜닝하였고 제어기는 Umac 제어기에서 사용할 수 있는 PID 제어기를 이용하였다. 제어기를 튜닝한 후의 제어시스템의 루프게인에 해당하는 루프 전달함수를 Fig. 10(a)에 보이고 있다. 루프 전달함수에서 위상마진(phase margin)은 40도 정도이고 이득마진(gain margin)은 18 dB가 됨을 알 수 있어 상당히 안정하게 제어됨이 확인되었다. 제어기의 위상마진 및 이득마진은 상당히 크게 세팅되었는데 이것은 높은 분해능을 구현하기 위하여 응답의 속도 중요성 보다는 제어의 안정성을 높이는 것과 높은 주파수 기계 공진을 유발하지 않기 위한 튜닝의 결과이다. 최종적으로 구현된 이송계 및 제어기로 이루어진 페루프 제어 전달함수는 Fig. 10(b)에 보이고 있다. 시스템의 대역폭(bandwidth)을 3 dB로 판단하면 약 20 Hz 이하가 추종할 수 있는 영역으로 볼 수 있다. 이러한 대역폭을 크게 하려

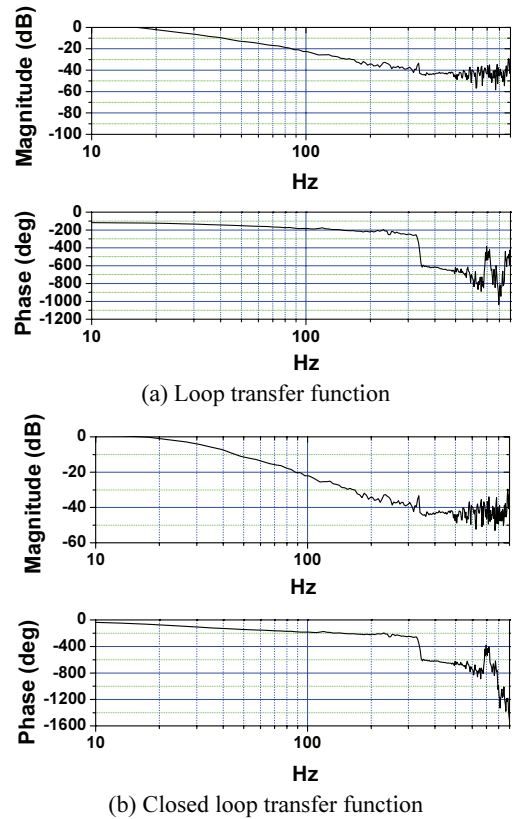


Fig. 10 Experimental control system transfer functions with control gains tuned

고 제어 게인을 높이면 대역폭은 증가하지만 100 Hz 이상의 기계진동 모드를 가진하여 제어 오차는 더욱 증가하게 되는 결과를 낳는다. 따라서, 제어 오차를 더욱 감소 시키기 위해서는 스케일 지그 부의 고유진동수/감쇠 증가 또는 스케일 고정방법의 변경을 통한 스케일 지그 제거의 방법이 요구된다.

#### 4. 제어 실험 결과

##### 4.1 나노미터 위치결정 제어 결과

튜닝된 제어시스템으로 위치결정 제어 실험을 수행하였고 최종 변위측정은 정전용량형 센서를 이용하여 측정하였다. Fig. 11에 다섯 번의 3 nm 스텝입력 제어 결과를 보이고 있다. Fig. 3의 10 nm 실험 결과와 동등한 위치결정 성능을 보이므로 대략 세 배 정도 위치결정 성능이 향상되었다 할 수 있다.

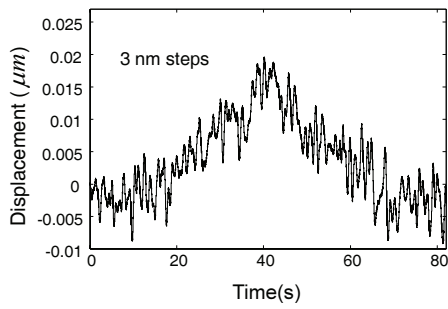


Fig. 11 Multi-step positioning control result (3 nm steps)

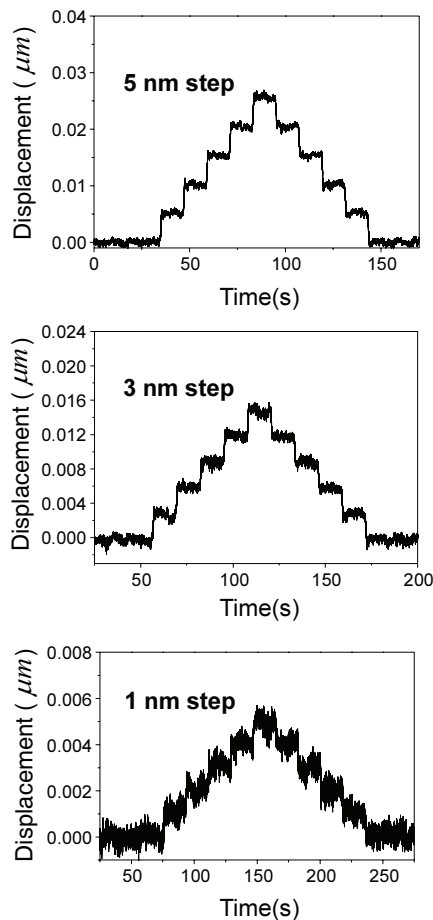


Fig. 12 Multi-step positioning control results showing 1 nm positioning control performance

#### 4.2 스케일 지그 모드의 제어시스템 영향

상기의 실험 결과/분석 및 논의 결과로써 스케일 지그 구조 진동 영향을 제거한 이송시스템의 위치결정 성능에 대하여 실험하였다. 스케일 지그

를 제거하면 리니어 스케일을 피드백 센서로 사용할 수 없기 때문에 정전용량형 센서(Lion Precision 사 CPL290 - 0.3 nm 분해능)를 피드백 센서 및 변위 측정센서로 동시에 사용하는 방법으로 실험을 수행하였다. Fig. 12에 5 nm, 3 nm 및 1 nm 다중 스텝입력 실험결과를 보이고 있고 1 nm의 위치결정 제어 실험에서도 각 응답스텝을 명확히 구분할 수 있으므로 1 nm 분해능을 구현했다 할 수 있다. 이러한 실험으로써 현재 이송시스템에 있어서 리니어 스케일의 장착 방법의 재설계 등에 의하여 최대한 1 nm의 위치결정 제어 성능을 구현할 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 유정압베어링을 채용한 직선 이송 시스템의 나노미터 분해능 제어에 관하여 논하였다. 이송 시스템의 제어특성을 주파수 분석 방법으로 수행하여 기반요소인 전기시스템과 오일 펌프시스템의 설계 및 튜닝에 적용하였다. 제어시스템 노이즈 스펙트럼 분석에서 스케일 지그의 공진주파수가 크게 영향을 주는 것으로 판단되어 스케일 지그의 고유진동수를 높이기 위한 스케일 지그 재설계를 수행하였다. 이러한 제어시스템의 성능 향상 설계가 반영된 후 주파수 영역에서 제어기를 튜닝하여 루프 전달함수에서 위상마진(phase margin)이 40도 정도로 측정되었다. 이 제어계인을 적용한 위치결정 제어를 수행하여 전체적인 제어 오차가 크게 줄어든 것을 확인하였고 세 배 정도 향상된 위치결정 제어 성능을 보였다. 또한, 스케일 지그의 영향을 제거한 경우 1 nm 위치결정 제어 성능을 이송계가 가짐을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Park, C. H. and Shim, J. Y., "Large Surface Micro Machining System," Journal of the KSME, Vol. 48, No. 10, pp. 34-38, 2008.
2. Yamamoto, Y., Suzuki, H., Moriwaki, T., Okino, T., and Higuchi, T., "Precision Grinding of Micro Fresnel Lens Molding Die," Journal of the JSPE, Vol. 73, No. 6, pp. 688-692, 2007.
3. Gao, W., Araki, T., Kiyono, S., Okazaki, Y., and Yamanaka, M., "Precision Nano-fabrication and Evaluation of a Large Area Sinusoidal Grid Surface

- for a Surface Encoder,” Precision Engineering, Vol. 27, No. 3, pp. 289-298, 2003.
4. Hwang, J., Park, C. H., Gao, W., and Kim, S. W., “A Three-Probe System for Measuring the Parallelism and Straightness of a Pair of Rails for Ultra Precision Guideways,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 7, pp. 1053-1058, 2007.
  5. Carlisle, K., “Machine Tool Developments in Ultra Precision Manufacturing,” EUSPEN Precision Engineering at CERN, Paper No. 15, 2012.
  6. Park, C. H., Song, C. K., Hwang, J., and Kim, B. S., “Development of an Ultra Precision Machine Tool for Micromachining on Large Surfaces,” Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 10, No. 4, pp. 85-91, 2009.
  7. Jabben, L., Trumper, D. L., and Eijk, J. Van., “Dynamic Error Budgeting - An Integral System Design Approach for High Precision Machines,” Proc. of EUSPEN, pp. 363-367, 2008.