

초정밀 선삭가공을 위한 글로벌스테이지의 재현성 실험

박대광^a, 곽남수^b, 권대주^c, 김재열^{d*}

Global Stage of Reproducibility Experiment for Single Point Diamond Turning

Dae-kwang Park^a, Nam-su Kwak^b, Dae-ju Kwon^c, Jae-yeol Kim^{d*}^a Dept. of Advanced Parts & Materials, Graduate School of Chosun University, Gwangju, 501-759, Republic of Korea^b Dept. of Advanced Parts & Materials, Graduate School of Chosun University, Gwangju, 501-759, Republic of Korea^c Iksan Campus of KOREA PLOYTECHNIC, Sunhwaro 579, Iksan-city, Jeollabuk-do, 570-210, Republic of Korea^d Dept. of Mechatronics Engineering, Chosun University, Gwangju, 501-759, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	7	November	2013
Revised	25	November	2013
Accepted	26	November	2013

Keywords:

Global stage
Ultra precision cutting unit
Linear motion
Laser interferometer
Capacitive sensor

ABSTRACT

With conventional positioning apparatus, it is very difficult to simultaneously achieve the desired driving range and precision at the sub-micrometer level. Generally, lead screw and friction drive, etc., have been used as servo control systems. These have large driving ranges, and high-speed positioning is feasible. In this study, we present a global servo system controlled by a laser interferometer acting as a displacement measurement sensor for achieving positioning accuracy at the sub-micrometer level.

1. 서론

초정밀 절삭의 기본 원리는 매우 정도가 높은 공작기계의 운동을 날카로운 공구를 이용하여 공작물에 전달하는 것을 말한다. 최근 항공 우주산업, 반도체, 컴퓨터, 영상정보산업, 정밀기계산업 등의 발달로 인해 정밀기계부품의 가공은 고 부가가치 기술로서 매우 중요하게 인식되고 있으며, 특히 이러한 제품을 생산하기 위해서 초정밀 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 현대 산업 사회는 고정도 가공에 대한 필요성이 확대되고 있다. 산업이 고도 화됨에 따라 그중요성이 더욱 강조되고 있는 초정밀 가공기술은 제품의 고부가가치 창출은 물론 산업 전반에 가공기술의 파급효과를 미치고 있다^{1,2,3}.

국내연구소를 중심으로 초정밀가공기 기술개발 및 초정밀 제어 공학에 대해 꾸준히 연구 중 이지만 선진국에 비하여 극히 미진한 수준이다. 선삭의 특성상 고정밀도가 필요한 알루미늄, 구리 무전해 니켈 등의 금속 및 플라스틱, 실리콘, 게르마늄 등의 비금속 등이 사용되고 있으며 이런 재료들은 연삭 가공으로는 높은 정도를 내기 어렵다. 이와 같은 단점들을 해소하기 위해 최근에는 고정도, 고강성을 지닌 초정밀 가공기와 내마모성이 큰 천연 다이아몬드공구를 이용한 초정밀 절삭 가공기술이 급속히 발전하고 있다⁴. 따라서 본 연구에서는 초정밀가공기 중 고강성, 고정도 베드를 기반으로 고정도 Global stage를 설계 개발 하였으며, 위치 재현성 실험의 직선 이송축 오차측정 및 보정에는 레이저 간섭계, 정전용량 센서를 활용하여 측정 평가하여 서브마이크로 단위의 정밀도를 목

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-7035

Fax: +82-62-230-7035

E-mail address: jykim@chosun.ac.kr (Jae-yeol Kim).

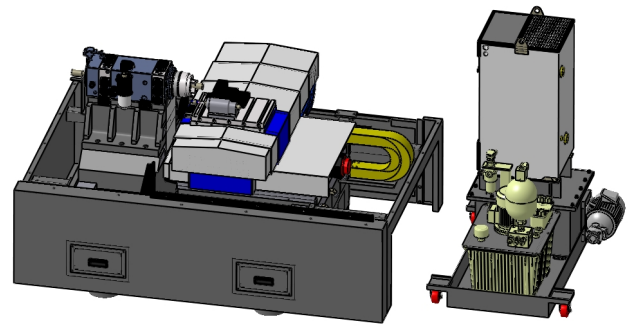
표로 Global Stage를 설계 보정 실험을 하였다.

2. 고정밀 선반 본체 설계

2.1 초정밀 가공을 위한 최적선반 모델링

Fig. 1에 UP3초정밀 선반의 구조는 4열 서큐러 아크 홈 타입의 Linear motion guide는 적절한 접촉각을 부여한 2점 접촉구조로서 볼의 탄성변형과 접촉점의 이동에 의해 취부면의 오차가 다소 있어도 Linear motion블록 내부에서 흡수하여 부드러운 운동이 얻어진다. 또한 홈의 형상은 서큐러 아크홈이기 때문에 필요에 따른 예압을 부여할 수 있어 강성을 높이는 것이 가능하다. 따라서 반송장치와 같은 곳에서는 높은 강성정도를 가진 강고한 취부 베이스를 필요로 하지 않으며, 주행 정도면에서 취부면의 정도가 조금 거칠더라도 볼의 탄성변형 등으로 그 정도오차를 흡수하여 고정도가 얻어진다. 또한 움직임도 가벼우며 수명에도 거의 영향을 주지 않는 특성을 가지고 있다. 위치정밀도 측면에서 Linear motion guide는 이상적인 구름안내 이므로 동마찰과 정마찰의 차이가 작아 로스트모션 등이 거의 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 이를 기반으로 고강성화와 고정도화한 초정밀 CNC머신의 프레임과 Global stage을 제작하였다. 고정도·고강성화를 base로 설계된 Global Stage은 정밀도가 0.5 $\mu\text{m}/200\text{ mm}$ 이며 이는 서브마이크로 단위의 정밀도로 제작되었다. 그러나 서브마이크로 정밀도는 일반적인 정밀 선삭가공은 가능하나 초정밀 가공이 불가능하며 나노 단위의 정밀도를 구현하기 위해서는 외란에 대한 오차 및 환경오차, 가공 중에 발생하는 오차 등을 보상해주어야 한다. 우연오차 성분을 줄이는 방법에는 1차적으로 오차가 없는 요소부품을 만드는 것이고 2차적으로는 발생한 오차 성분을 보상하는 방법이다. 1차적인 방법은 계속 연구가 진행 중이며 많이 진보 하였으나 한계가 있다고 생각된다. 따라서 2차적 방법으로 측정과 제어에 의해서 우연 오차 성분과 계통오차 성분 모두를 보정한다. 2차적인 보상 방법으로 이중 서보 개념으로 2개의 서보 메카니즘에서 긴 행정을 구동하는 부분과 작은 행정을 정밀하게 구동하는 부분으로 나누어 구동하게 된다. 소프트웨어적인 보상은 요소부품의 가공정도와 조립정도에 의해서 도달할 수 있는 정밀도가 정해지지만 측정과 제어에 의한 실시간 오차보상은 측정기의 정밀도와 서보능력에 의해서 도달 정밀도가 정해진다.

본 논문은 이중 서보 System중 긴 행정을 구동하는 Global Stage에 관한 논문이며 작은 행정에 해당하는 Micro Stage System은 다음 논문에 Global Stage의 외란에 대한 보상 정도 및 가공정밀도에 대해 다루어 보도록 하겠다.



(a) Modelling of Ultra-precision Cutting Unit 3



(b) UP3

Fig. 1 Developments of UP3 (Ultra-precision Cutting Unit)

2.2 외란 에러에 대응 가능한 프레임 제작

외부환경에 의한 온도변화로 생기는 가공물의 치수오차를 ETVE (Environmental Temperature Error)라고 하고 Fig. 2에서 보는 바와 같이 온도변화로 발생한 치수오차를 최소화한 대칭구조설계와 함께 초정밀가공기가 설치될 지면(Surface of the earth)에서 발생하는 에러를 최소화 하기위하여 일체형 주물 베드구조로 설계되었으며, 동작기계의 내구성을 높이는 베드 표면 열처리를 하였다.

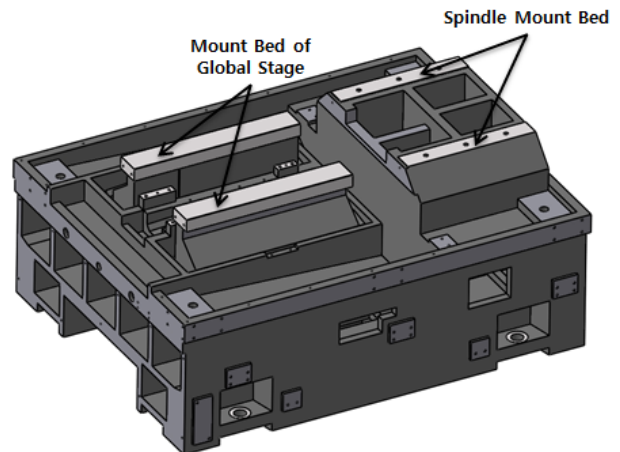


Fig. 2 Modeling of UP3 Base

2.3 방사상 대칭구조의 Y-Z 스테이지 설계

선삭 가공 시 절삭력과 주축의 주기적인 회전에 의한 고주파진동이 발생하기도 하며 주축의 중심선을 기준으로 대칭구조가 아니면 표면의 조도가 떨어지며 공구 수명단축 등으로 이어진다.

이를 보완하기 위해서 선반의 경우 전체적인 구조는 방사상 대칭 구조를 채용하여야 한다. 특히 주축중심선에 대하여 각 이송계의 배치가 방사상 대칭을 이루어야 한다. 주축 중심선에 대해 이송계가 방사상 대칭을 이루도록 Z축방향 가이드웨이의 지지구조 개념

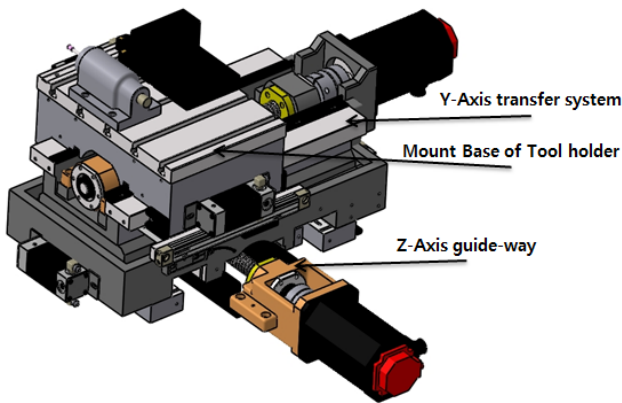


Fig. 3 Structural mechanics of the global stage

으로 설계하였으며 Fig. 3와 같이 가공기에 실제 적용하여 주축 중심선에 대하여 이송계가 방사상 대칭의 배치를 가진 구조를 보여 주고 있다.

가공정밀도에 가장 큰 영향을 주는 주축계(Spindle System)를 프레임에 고정하고 초정밀가공기에서 중요한 X방향의 완벽한 대칭구조를 위하여 평 베드 구조를 채택하였으며, 평베드 구조에서 X축은 주축에 대하여 정확히 대칭이 되는 점이 존재하며, 대칭점에서 Drift는 이론적으로 0 mm/hr가 된다.

본 연구에서는 UP2의 정밀도를 한 단계 향상 하기위해 UP2의 X-Y Micro Stage를 X-Y-Z Micro Stage같은 구조로 UP Grade 설계를 하였다. 기본적인 개념은 같으나 UP2에서 보상하지 못했던 Rolling error, Pitching error, Yawing error에 대응할 수 있는 구조이다. 설계형상은 Fig. 4와 같으며 Global Stage는 X-Y-Z Stage를 최적의 상태로 마운트 할 수 있고 기본적인 정밀도를 향상 시켰다.

3. UP3 Global stage의 이동시스템 계측원리

3.1 Laser Interferometer의 계측원리

레이저 간섭계는 레이저광의 간섭현상을 이용하여 길이측정, 연마면의 형상측정, 평면도 검사 등의 미세한 패턴 계측에 사용한다. 레이저의 특징으로는 평행성, 집속성, 단색성, 간섭성, 고 에너지 밀도, 초단펄스 등이 있고 그 중에서 간섭성질을 이용한 Michelson 간섭계의 원리를 이용하여 고 정도의 변위를 측정하는 것이다. Fig. 5는 레이저 간섭계의 원리를 도시한 그림으로서 두 가지 서로 주파수 f_1, f_2 의 He-Ne 레이저를 주사하여 도플러 효과(Doppler effect)에 의한 beating현상으로 두 주파수의 차 Δf 를 결정할 수 있고, 이 Δf 로서 변위를 측정한다. 두 가지 주파수의 레이저를 사용하는 이유는 높은 레이저 주파수, 제한된 광 감지기의 응답속도, 레이저 광 자체의 절대주파수 측정이 불가능하기 때문이다^[5].

간섭계 관련식은 다음과 같다.

Doppler effect

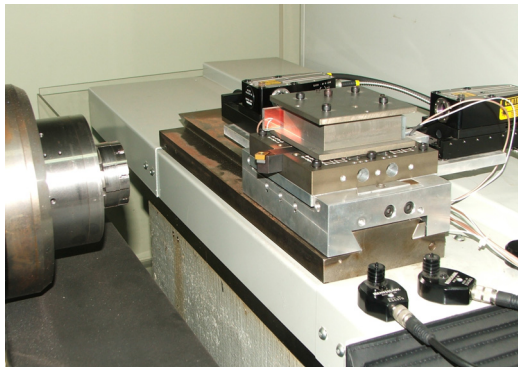
$$\Delta f = \frac{2v}{c} \cdot f_2 \quad (1)$$

Displacement

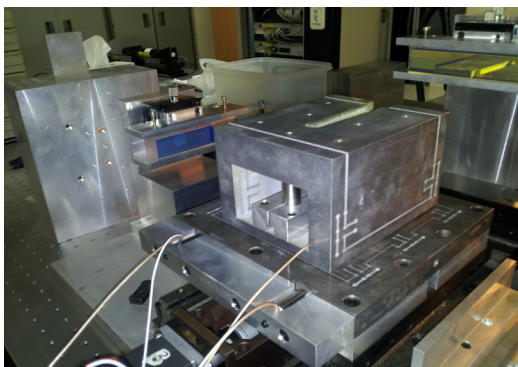
$$s_m = \int_0^t v dt = \int_0^t \frac{\Delta f_1 \cdot c}{2f_1} dt = \int_0^t \frac{\lambda_1}{4} (2 \cdot \Delta f_1) dt \quad (2)$$

Reference Signal

$$f_2 - f_1 \quad (3)$$



(a) X-Y Micro Stage of UP2



(b) X-Y-Z Micro Stage of UP3

Fig. 4 Flexure hinge type micro stage

Measurement Signal

$$f_2 - (f_1 \pm \Delta f_1) \tag{4}$$

레이저 간섭계에서는 위와 같은 식을 따르며 두 가지 서로 다른 주파수 f_1, f_2 의 He-Ne 레이저를 주사하여도플러 효과(Doppler-effect)에 의한 beating현상으로 두 주파수의 차 Δf 를 결정할 수 있고, 이 Δf 로서 변위를 측정한다. 두 가지 주파수의 레이저를 사용하는 이유는 높은 레이저 주파수, 제한된 광 감지기의 응답속도, 레이저광 자체의 절대주파수 측정의 불가능 때문에 사용한다.

이동한 반사경의 변위 L 은 식 (5)와 같다.

$$L = \int_0^t v dt = \int_0^t \frac{\Delta f \cdot c}{2f_1} dt \quad (\Delta f = \frac{2v}{c} \cdot f_1) \tag{5}$$

$$= \int_0^t \frac{\lambda}{4} (2 \cdot \Delta f) dt$$

본 논문에서 사용한 레이저 정밀 계측 장비는 단파장 레이저의 간섭효과를 이용해서 물체의 거리를 극도로 정밀하게 측정하도록 구성한 장비이다. 반도체 레이저에서 발생한 단파장 레이저는 계측 대상의 표면에서 산란되거나 반사되는데, 반사되는 레이저 광선중에서 입사각과 동일한 각도로 반사되는 레이저광을 특수하게 고안된 반도체 광도파로 내에서 원래의 광원과 간섭시켜 그 결과로 출력되는 레이저 광선의 강도를 전기 신호로 변환시켜 물체와 광원과의 거리를 알 수 있는 원리를 이용하여 초정밀 진동, 변위, 응력, 두께, 변위교정, 하드드라이브 진동 X-Y 위치 측정등을 비접촉으로 측정할 수 있다.

초정밀을 요하는 측정에서는 피 측정물의 진각도(Angular), 진직도(Straightness), 평평도(Squareness) 등을 충분히 고려해 주어야한다. 이러한 요소들이 모두 충족하였을 때 측정데이터의 신뢰성을 갖게 된다.

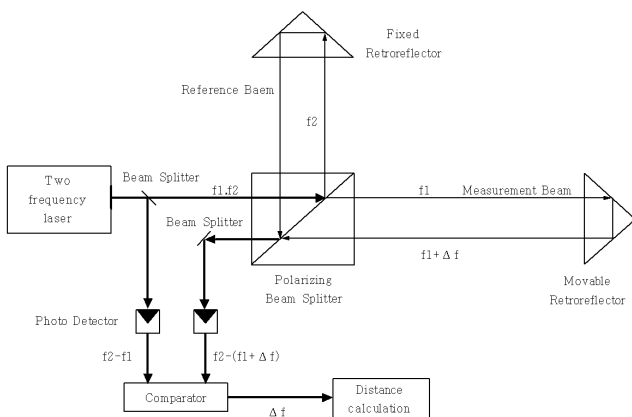


Fig. 5 Schematic diagram of laser interferometer

3.2 정전용량형 변위 센서 측정원리

정전용량형 변위 센서(capacitive sensor)는 수 백 μm 이하의 측정 범위에서 나노 미터 수준의 높은 분해능을 얻을수 있어 정밀 변위 측정에 널리 사용되고 있다. 구조가 간단하고 크기가 작기 때문에 측정 대상물의 크기와 형상에 제한되지 않고 용이하게 적용될 수 있는 장점을 갖고 있다.

정전용량형 변위 센서의 두 전극 사이에 형성 되는 정전 용량 C 는 식 (2)와 같이 표현된다. ϵ_r 은 전극간 매질의 상대 유전율(permeability), ϵ_0 는 진공에서의 유전율, A 는 두 전극의 겹침 면적, d 는 두 전극 사이의 간극을 각각 나타낸다.

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \tag{6}$$

식 (2)에서 나타나것과 같이 두 전극 사이의 겹침 면적과 간극에 따라 정전용량이 변화되고, 이를 이용하여 변위를 측정할 수 있다. 정밀 변위 측정을 위해서는 간극 변화 방식을 적용한 정전 용량형 변위 센서를 사용하여야 한다. 그러나 간극 변화 방식을 적용한 정전 용량형 변위 센서는 간극 변화에 따른 정전용량 변화를 선형적인 전기 신호로 변환하기 위해서는 간극 변화가 선형적인 전기 신호로 변환하기 위해서는 간극 변화가 정전용량 변화와 반비례하는 점을 해결하고 낮은 주파수의 간극 변화도 측정할 수 있는 신호 처리 회로가 필요하다^[6]. 이러한 문제를 해결하기 위해서 연산 증폭기와 고주파로 변조된 신호를 이용하는 방법이 적용된다^[7].

정전용량이 고정된 콘덴서의 정전용량 C_f 를 이용하여 반전 증폭 회로를 구성한다. 연산 증폭기의 입력 단에 고주파로 변조된 입력 신호 e_{cx} 를 인가해 주면, 연산 증폭기의 출력 단에서는 변조출력 신호 e_0 를 얻을 수 있다. 연산 증폭기의 특성을 고려하면, 이러한 입력 단과 출력 단 변조 신호 진폭 간의 관계식은 식 (3)와 같이 구해진다.

$$E_0 = -\frac{C_f}{C_d} \cdot E_{cx} = -\frac{C_f \cdot E_{cx}}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A} \cdot d = K \cdot d \tag{7}$$

e_0 와 e_{cx} 는 각각 출력 단과 입력 단의 변조 신호의 진폭을 나타낸 것으로 진폭의 크기 비는 고정 콘덴서와 가변 콘덴서의 정전용량 크기 비로 결정된다. 변위 센서의 전극들로 구성된 가변 콘덴서의 정전용량을 식 (2)를 이용하여 정리하면 출력 간의 변조 신호의 진폭이 전극 사이의 간격 d 와 비례하게 됨을 알 수 있다. 따라서 출력 단 변조 신호의 진폭 변화를 이용하여 두 전극이 부착된 측정면 간의 변위를 측정 할 수 있다.

4. Global stage의 이동시스템 성능시험 평가

4.1 Global stage 진직도

본 연구에서 개발한 Global stage는 서브미크론대의 진직도를 목표로 하고 있다. 따라서 정확한 성능을 평가하기 위해서 측정된 프로파일로부터 이송테이블의 오차 프로파일을 제거해야 하므로, 이송테이블의 고유 운동오차를 가능한 정확히 측정하여 미리 데이터베이스화 필요하다.

Fig. 6와 같이 안내면의 각운동오차를 레이저 간섭계를 이용하여 측정한 결과를 각운동오차의 가장 큰 원인은 레일가공오차와 시작품인 볼스크류의 오차가 존재하다. Fig. 7~Fig. 8와 같이 Y-Axis 200 mm, Z-Axis 100 mm를 이송한 결과 10 mm를 주기로 일정한 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

Y-Axis stage은 Fig. 7와 같이 최대이송거리 200 mm의 이송구간에 최대 변위 중 Vertical straightness : 1.43 μm , Horizontal straightness : 3.2 μm 이다.

Z-Axis stage은 Fig. 8와 같은 결과로 최대이송거리 100 mm의 이송구간에 최대변위 중 Vertical straightness : 0.61 μm , Horizontal straightness : 0.63 μm 이다.

실험결과 Y-Axis는 1.43 μm / 200 mm, 3.2 μm / 200 mm인 것으로 50 ϕ 인 가공모재를 가공하는 것으로 초정밀가공을 하는데

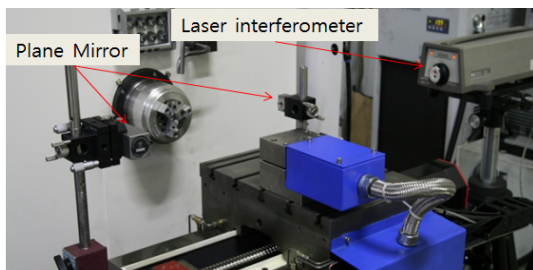


Fig. 6 Performance evaluation using laser interferometer

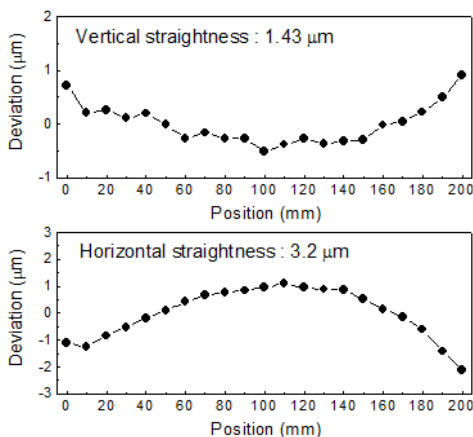


Fig. 7 Axial straightness of Y-axis

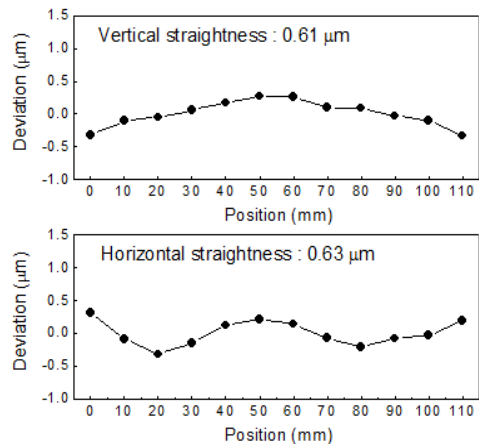
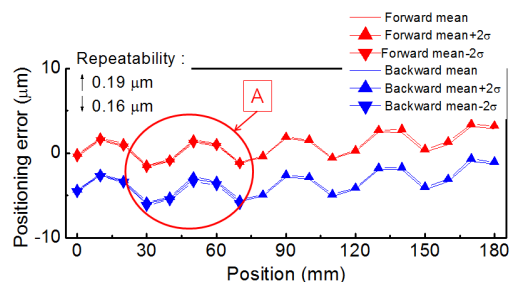


Fig. 8 Axial straightness of Z-axis

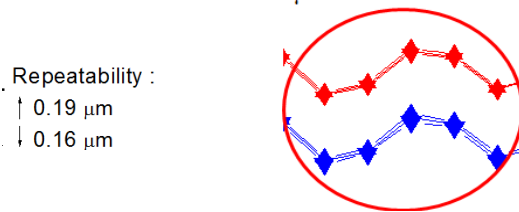
문제가 되지 않을 것으로 본다.

4.2 Global stage의 위치결정도

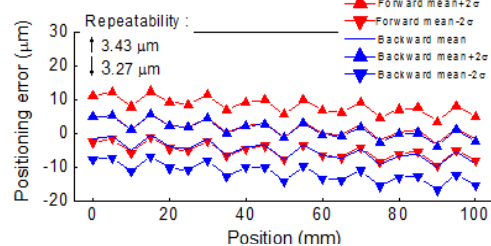
Fig. 9은 레이저 간섭계를 이용하여 ISO 평가규격을 적용하여 유정압안내면의 위치결정오차를 측정한 결과를 나타낸 결과이며, 측정값은 5회 반복측정값으로부터 통계적으로 구한 것이다.



(a) Positioning error of Y-axis



(b) Extended Figure of A



(b) Positioning error of Z-axis

Fig. 9 Performance evaluation of Global stage

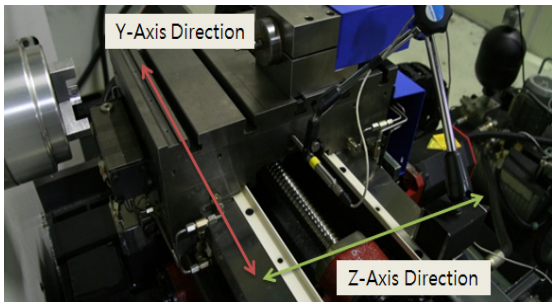


Fig. 10 Direction of Global stage

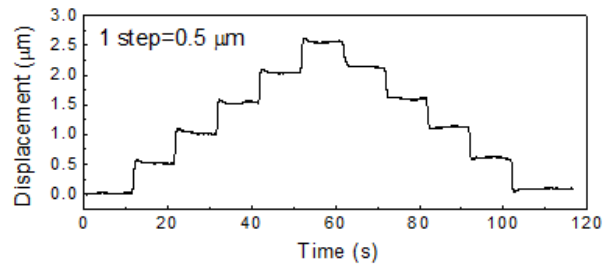
Y-Axis을 실험한 결과 위치경정오차는 $+3.43 \mu\text{m}$ (2σ) ~ $-3.27 \mu\text{m}$ (2σ)를 나타내고 있으며, Z-Axis을 실험한 결과 위치경정오차는 $+3.43 \mu\text{m}$ (2σ) ~ $-3.27 \mu\text{m}$ (2σ)를 나타내고 있다.

이는 Y-Axis 스테이지가 Z-Axis 스테이지가 적층 되어 있는 결과라고 파악되며 결과 같은 ECTS(에러 보상 툴 스테이지: Error Compensation Tool Servo)를 장착하고 항온항습 유지 및 유휴특성 및 온도 특성이 안정화 될 경우 더욱 안정적인 결과 값을 보일것 이라 생각된다. 특히 Fig. 10와 같이 Z-Axis의 이송은 거의 활용하지 않는 평면 가공 위주로 가공을 할 것 이므로 Y-Axis 위치결정도가 중요하리라 보고 Z-Axis의 강성 유지에 셋팅이 필요하리라 사료된다.

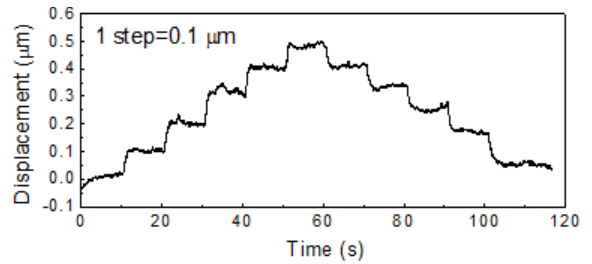
4.3 Global stage의 분해능 및 반복성

유정압안내면의 미소 이송에 따른 응답특성을 정전용량형 변위계를 이용하여 Fig. 11와 Fig. 12의 a), b)와 같이 측정하였다.

Fig. 11와 같이 Y-Axis: 1step 당 $1 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$ 의

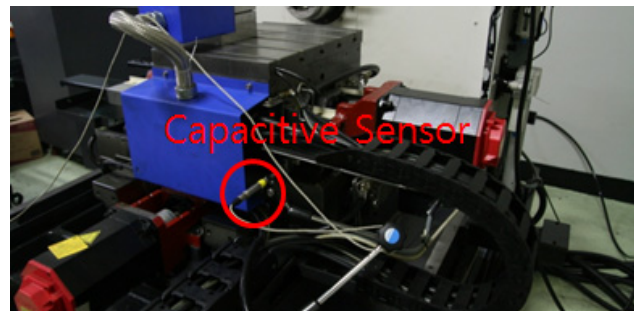


(c) 1step = $0.5 \mu\text{m}$

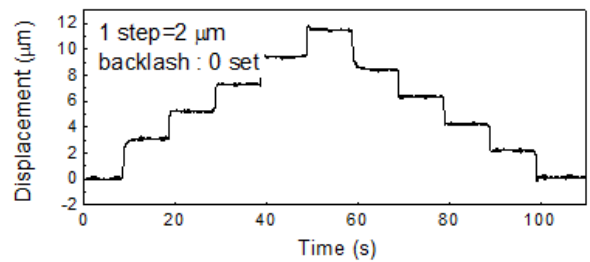


(d) 1step = $0.1 \mu\text{m}$

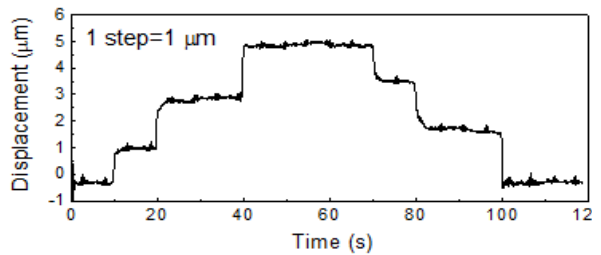
Fig. 11 Micro step response of Y-axis



(a) Resolution experiments using the capacitive sensor

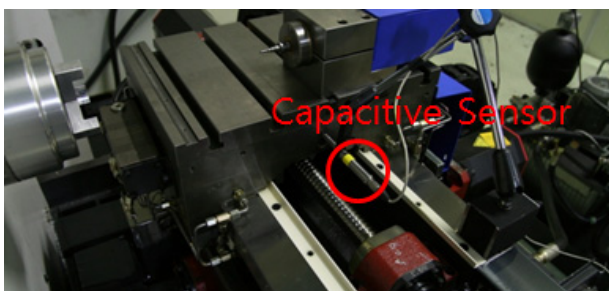


(b) 1step = $2 \mu\text{m}$

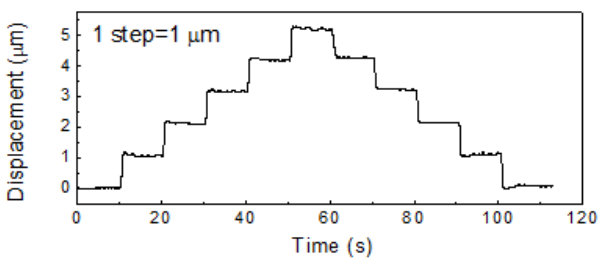


(c) 1step = $1 \mu\text{m}$

Fig. 12 Micro step response of Z-Axis



(a) Resolution experiments using the capacitive sensor



(b) 1step = $1 \mu\text{m}$

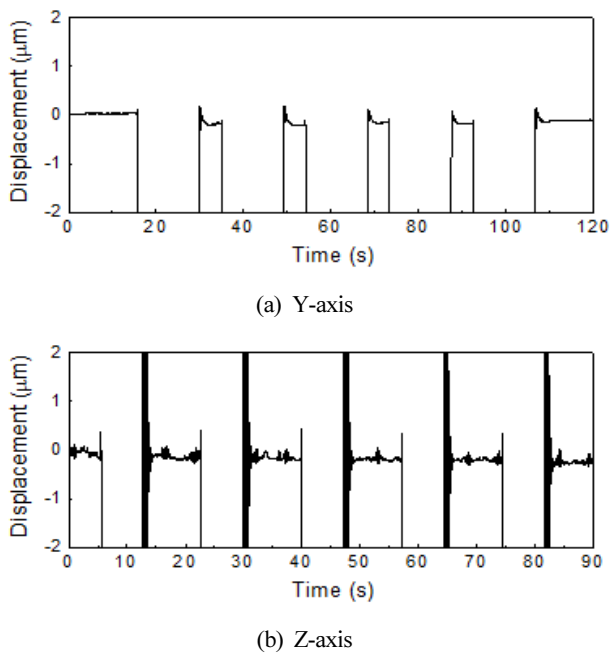


Fig. 13 Repeat Performance of 1-Point

변위를 5step 연속으로 전, 후진 할 수 있도록 입력값을 주고 그때의 테이블의 응답변위를 측정하는 것이며, Fig. 12와 Z-Axis: 1step 당 2 μm , 1 μm 의 변위를 5step 연속으로 전, 후진 할 수 있도록 입력값을 주고 그때의 테이블의 응답변위를 측정하는 것이다.

실험결과 Y-Axis는 0.1 μm 까지 비교적 정확한 계단형식의 분해능을 보여 주었으며, Z-Axis는 2 μm 까지 정확한 응답특성을 보여주었으나 1 μm 스텝응답특성은 불안정한 계단형식의 그래프를 보여주고 있다. 1 μm 의 경우에 있어 오름 이송 스텝응답특성은 Y-Axis가 적층된 구조의 스테이지 이므로 관성모멘트 및 스테이지의 가이드의 불균일한 윤활, 볼스크류의 비선형 탄성 변형이나 마찰력의 변화 특성이 외곡 된 그래프를 보여주고 있는 것뿐이며 Lost Motion은 존재하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 13와 같이 1Point 반복능 실험결과는 약 0.2 μm 내외의 정도로 X축과 Z축이 거의 비슷한 결과 값을 확인하였다.

5. 결론

본연구에서는 초정밀가공을 하기 위하여 개발한 UP3 (Ultra Precision Cutting Unit 3)의 Global Stage의 서브미크론 정밀도, 분해능, 및 반복성을 실험하여 다음과 같은 결론을 제시 하였다.

- (1) 진직도 실험 결과 Y-Axis stage은 최대이송거리 200mm의 이송구간에 최대 변위 중 Vertical straightness : 1.43 μm , Horizontal straightness : 3.2 μm 이며, Z-Axis stage은 최대

이송거리 100 mm의 이송구간에 최대변위 중 Vertical straightness : 0.61 μm , Horizontal straightness : 0.63 μm 으로 최종 셋팅 하였다.

- (2) 위치결정도 실험결과 Y-Axis을 실험한 결과 위치결정오차는 +3.43 μm (2σ) ~ -3.27 μm (2σ)를 나타냈으며, Z-Axis을 실험한 결과 위치결정오차는 +3.43 μm (2σ) ~ -3.27 μm (2σ)를 나타냈다.
- (3) 분해능 및 반복능 실험 결과 Y-Axis는 0.1 μm 까지 비교적 정확한 계단형식의 분해능을 보여 주었으며, Z-Axis는 2 μm 까지 정확한 응답특성을 보여주었으나 1 μm 스텝응답특성은 불안정한 계단형식의 그래프를 보여주고 있다. 1 μm 의 경우에 있어 오름 이송 스텝응답특성은 Y-Axis가 적층된 구조의 스테이지 이므로 관성모멘트 및 스테이지의 가이드의 불균일한 윤활, 볼스크류의 비선형 탄성 변형이나 마찰력의 변화 특성이 외곡 된 그래프를 보여주고 있는 것뿐이며 Lost Motion은 존재하지 않음을 확인할 수 있었다.

References

- [1] Wang, Y., Zhao, Q., Shang, Y., 2011, Ultra-precision machining of Fresnel microstructure on die steel using single crystal diamond tool, Journal of materials processing technology, 211:12 2152-2159.
- [2] Ikawa, N., Donaldson, R. R., Komanduri, R., 1991, Ultraprecision Metal Cutting-the Past, the Present and the Future, CIRP annals manufacturing technology, 40:2 587-594.
- [3] HLeung, T. P., Lee, W. B., Lu, X. M., 1998, Diamond turning of silicon substrates in ductile-regime, Journal of materials processing technology, 73:1/3 42-48.
- [4] Yu, J., Yan, J., Ma, W., 1994, Ultraprecision diamond turning of optical crystals, Proceedings of SPIE-the international society for optical engineering, 1994 51-61.
- [5] Renishaw, 2009, Renishaw Laser Interferometer System Manual Ver. 2.1, Renishaw plc.
- [6] Hicks, T. R., Atherton, P. D., 1997, The Nano Positioning Book, Queensgate Instruments Ltd. USA.
- [7] Doebelin, E. O., 1990, Measurement Systems: Application and Design, McGraw Hill, USA.