

◆특집◆ 정밀계측제어

# 최적베어링위치결정과 최신의 윤활 시스템을 적용한 초정밀 절삭 유닛의 최적설계기술

박대광\*, 조영태\*\*, 김재열#

(\* 조선대학교 첨단부품소재공학과, \*\* 전주대학교 기술융합디자인공학과, # 조선대학교 기계시스템공학과)

## Optimal Design Techniques of the Ultra Precision Cutting Unit through using Optimized Bearing positioning and Latest Lubrication Systems

Dae-kwang Park\*, Young-Tae Cho\*\*, Jae-yeol Kim#

(Received 15 December 2014; received in revised form 18 December 2014; accepted 26 December 2014)

### ABSTRACT

With a conventional positioning apparatus, it is very difficult simultaneously to achieve desired driving ranges and precision levels at the sub-micrometer level. Generally, a lead screw and friction drive 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.

**Key Words :** Global stage(조동스테이지), Ultra Precision Cutting Unit(초정밀선반), Linear motion(직선운동), Laser Interferometer(레이저 인터페로메타), Capacitive-sensor(정전용량형센서)

### 1. 서 론

초정밀 절삭의 기본 원리는 매우 정도가 높은 공작기계의 운동을 날카로운 공구를 이용하여 공작물에 전달하는 것을 말한다. 최근 항공 우주산

업, 반도체, 컴퓨터, 영상정보산업, 정밀기계산업 등의 발달로 인해 정밀기계부품의 가공은 고 부가 가치 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 고도화됨에 따라 그중요성이 더욱 강조되고 있는 초정밀 가공기술은 제품의 고부가가치 창출은 물론 산업 전반에 가공기술의 파급 효과를 미치고 있다.<sup>[1,2,3,4]</sup>

따라서 본 연구에서는 주축의 지지방식과 주

\* Dept. of Advanced Parts & Materials, Chosun UNIV.

\*\* Dept. of Manufacturing Technology and Design Engineering, Jeonju UNIV.

# Corresponding Author :

School of Mechanical Engineering, Chosun UNIV.

E-mail : angel@heaven.ac.kr

축베어링의 종류, 크기 배열방식은 주축의 특성을 결정하였으며, 초정밀가공기 중 고 강성, 고 정도 베드를 기반으로 고 정도 Global stage를 설계 개발 하였으며, 위치 재현성 실험의 직선 이송축 오차측정 및 보정에는 레이저 간섭계, 정전용량 센서를 활용하여 측정 평가하여 서브마이크로 단위의 정밀도를 목표로 Global Stage를 설계 보정 실험을 하였다.

## 2. 주축최적설계

### 2.1 주축설계개념

공작기계의 주축계는 주축, 주축베어링 및 주축에 동력을 전달시키는 구동장치로 구성되어 있다. 이러한 주축계는 가공정도, 가공능률과 밀접한 관계가 있어서 공작기계의 전 성능의 대부분을 지배하고 있다. 또한 고속화, 고능률, 고정도화를 항상 요구받는 시대의 요구에 따라 매우 중요한 기술인 자로서의 위치를 점하고 있다. 크게 주축계의 영향인자에 대해서 정리하면, 주축의 지지방법과 주축베어링의 종류 등이 있다.

주축계의 성능을 향상시키기 위해서는 고유진동특성, 위험속도, 회전 불평형 정도, 강제진동 응답해석 등을 종합적으로 결합한 동적 특성분석이 선행되어야 한다. 따라서 주축의 정/동적특성에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 최적 설계기술이 확보하여야 한다.

주축 계에서 문제가 되는 점 및 그와 관계하는 영향인자에 대해서 정리하면 이 가운데 주축의 지지방식과 주축베어링의 종류, 크기 배열방식은 주축의 특성을 결정하는 주된 요소라 할 수 있다. 이러한 인자들을 고려하여 베어링의 위치를 결정하기 위한 고유진동해석을 하였다.

### 2.2 주축설계조건

고유치해석은 모든 동해석의 기본으로 이를 통하여 대상 계의 고유진동수와 이에 상응하는 주모드 형상(principal mode shape)을 구할 수 있으며 진동이나 주기적인 하중을 받는 구조물의 동적 특

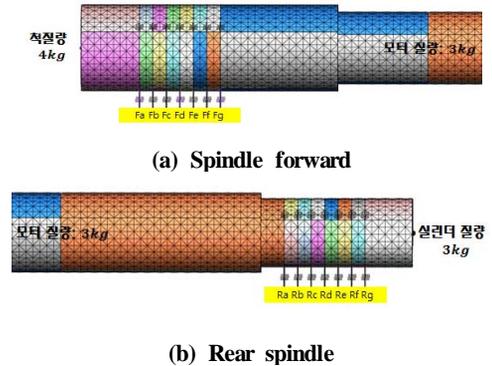


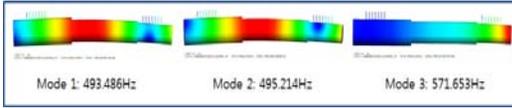
Fig. 1 Finite element model of spindle

성(고유주기, 고유진동수, 모드형상)을 파악하여 구조물의 공진과 파손을 방지할 수 있다. 그리고 구조물의 동적특성에 따라 동적하중에 대한 응답이 정해지기 때문에 동적해석의 기본이라고 할 수 있다. 고유치해석을 수행하기 위해 주축계의 동해석계를 압축할 필요가 있다. 주축계의 구성은 회전요소인 주축과 주축의 기하학적 위치를 잡아 주는 주축프레임과 주축과 주축프레임사이의 상대적으로 회전이 가능한 베어링과 Chuck의 질량, 내장 모터 또는 동력전달용 폴리의 질량, Chucking을 위한 공압 또는 유압실린더 질량을 고려하여야 한다. 그리고 주축의 정·동적 특성을 제어하기 위해서 사용할 수 있는 조건은 주축의 지름과 축방향 치수, 전·후부 베어링의 강성크기와 설치위치가 중요한 요인이다. 이 중에서 주축의 길이 및 주축 지름은 공압척의 크기와 사용모터의 크기에 의해 이미 정해졌다고 보고 주축 베어링의 위치선정을 기초로 하여 구조해석을 실행하였다. 그림과 같이 전부 베어링7변수 후부베어링7변수로 놓고 총 49개의 변수에 관한 고유치해석을 실시하였다.

### 2.3 고유치 해석 결과

초정밀 주축의 최대 속도는 12,000rpm으로 최대 속도일 때 작동 주파수로 환산하면 200Hz이다. 이것으로 주축계의 고유진동수를 200Hz이상 설계 목표로 하였다. 해석한 결과 Fig. 2의 (f)와 같이 베어링 최적 위치는 전방 베어링위치를 Ff에 설치하고 후부베어링 위치는 Rb위치에 고정 하였을

때 최적의 베어링 위치라고 판단되며, table 1과 같이 최적의 베어링 위치에서 고유진동수 1차: 557.745Hz, 2차:560.529Hz, 3차:589.655Hz이며 이는 최고 회전수 12,000rpm에서 발생하는 200Hz보다 월등히 높으며, 설계적용 시 만족한 결과이다.



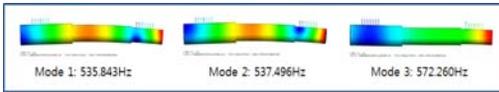
(a) Fa, Ra



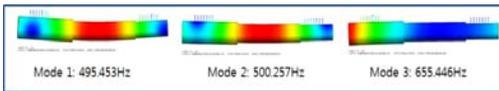
(b) Fb, Ra



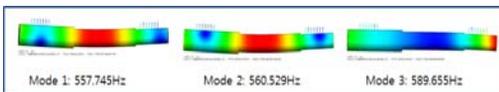
(c) Fc, Ra



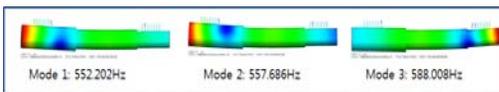
(d) Fd, Ra



(e) Fe, Re



(f) Ff, Rb



(g) Fg, Rb

Fig.2 principal mode shape of UP3

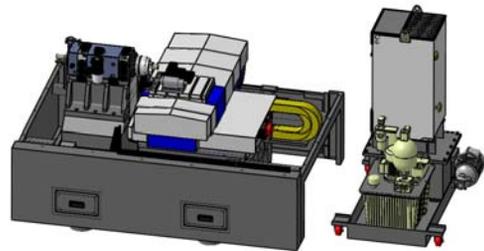
Table 1 Natural frequency analysis result of the spindle

베어링 위치	Ra	Rb	Rc	Rd	Re	Rf	Rg	최대값
Fa	493.486 495.214 571.653	481.125 483.521 605.798	467.23 469.845 649.726	463.05 455.671 699.969	439.733 443.398 761.094	425.094 427.435 811.233	411.813 413.891 854.529	Fa, Ra
Fb	505.744 507.481 571.715	493.918 496.455 605.012	479.884 482.687 648.563	465.451 468.266 697.586	451.894 455.789 754.717	436.903 439.413 784.908	423.322 425.549 795.068	Fb, Ra
Fc	521.026 522.728 571.862	509.862 512.564 603.870	495.378 498.417 646.890	480.418 483.471 693.799	466.406 470.623 736.427	450.836 453.544 744.809	436.781 439.178 747.555	Fc, Ra
Fd	535.843 537.496 572.260	526.208 528.975 601.709	511.160 514.366 642.955	495.592 498.817 680.587	481.075 485.601 697.333	464.895 467.739 699.255	450.349 452.854 700.410	Fd, Ra
Fe	548.552 550.762 573.499	542.729 545.372 596.956	526.823 530.052 631.582	510.534 513.789 649.723	495.453 500.257 655.446	478.664 481.518 656.552	463.633 466.132 657.407	Fe, Re
Ff	555.768 561.671 576.409	557.745 560.529 589.655	540.686 543.902 615.141	523.892 527.057 624.227	508.464 513.578 627.370	491.285 494.025 628.454	475.948 478.327 629.156	Ff, Rb
Fg	547.067 557.165 576.304	552.202 557.686 588.008	541.773 545.498 597.640	528.060 531.249 599.148	514.377 519.644 599.068	498.252 500.851 598.736	483.592 485.825 598.406	Ff, Rb
고유진동수 최대값								

### 3. 고 정밀 선반 본체 설계

#### 3.1 초정밀 가공을 위한 최적선반 모델링

위치정밀도 측면에서 Linear motion guide는 이상적인 구름안내 이므로 동마찰과 정마찰의 차이가 작아 로스트모션 등이 거의 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 이를 기반으로 Fig. 3와 같이 고강성화와 고정도화한 초정밀 CNC머신의 프레임과 Global stage을 제작하였다. 고정도·고강성화를 base로 설계된 Global Stage은 정밀도가 0.5 $\mu$ m/200mm이며 서브마이크로 단위의 정밀도로 제작되었다.



(a) Modelling of Ultra-precision Cutting Unit 3

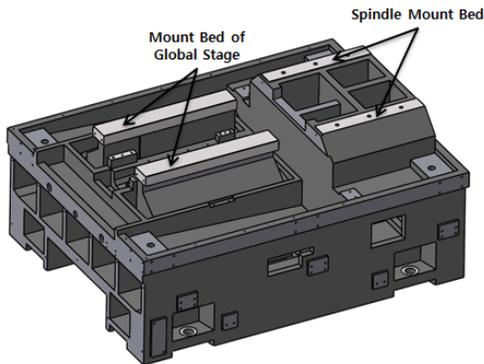


(b) UP3

**Fig. 3 Developments of UP3(Ultra-precision Cutting Unit)**

### 3.2 외란 에러에 대응한 프레임 제작

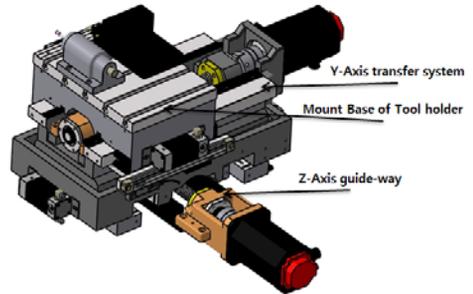
외부환경에 의한 온도변화로 생기는 가공물의 치수오차를 ETVE(Environmental Temperature Error)라고 하고 Fig. 2에서 보는 바와 같이 온도변화로 발생한 치수오차를 최소화한 대칭구조설계와 함께 초정밀가공기가 설치될 지면(Surface of the earth)에서 발생하는 에러를 최소화 하기위하여 일체형 주물 베드구조로 설계되었으며, 동작기계의 내구성을 높이는 베드 표면 열처리를 하였다.



**Fig. 4 Modeling of UP3 Bas**

### 3.3 방사상 대칭구조 Y-Z 스테이지 설계

선삭 가공 시 절삭력과 주축의 주기적인 회전 에 의한 고주파진동이 발생하기도 하며 주축의 중심선을 기준으로 대칭구조가 아니면 표면의 조



**Fig. 5 Structural mechanics of the global stage**

도가 떨어지며 공구 수명단축 등으로 이어진다.

이를 보완하기 위해서 선반의 경우 전체적인 구조는 방사상 대칭구조를 채용하여야 한다. 특히 주축중심선에 대하여 각 이송계의 배치가 방사상 대칭을 이루어야 한다. 주축 중심선에 대해 이송계가 방사상 대칭을 이루도록 Z축방향 가이드웨이의 지지구조 개념으로 설계하였으며 Fig. 5와 같이 가공기에 실제 적용하여 주축 중심선에 대하여 이송계가 방사상 대칭의 배치를 가진 구조를 보여주고 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 0mm/hr가 된다.

### 3.4 이동시스템 성능시험 평가

#### 3.4.1 Global stage 진직도

본 연구에서 개발한 Global stage는 서브미크론 대의 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 200mm, Z-Axis

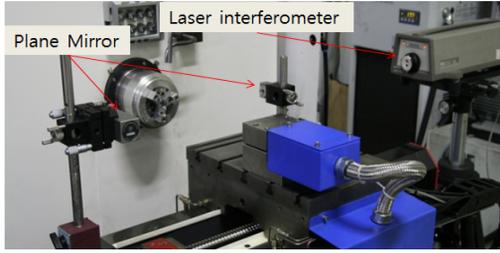


Fig. 6 Performance Evaluation Using Laser Interferometer

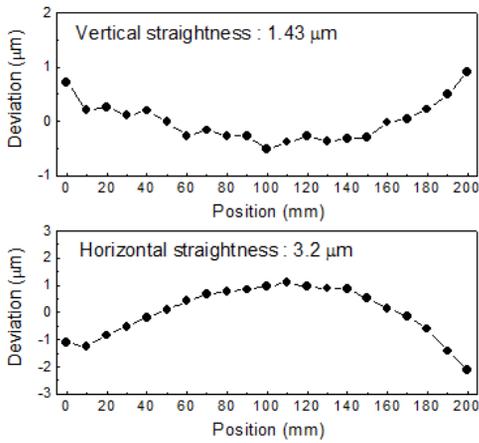


Fig. 7 Axial straightness of Y-axis

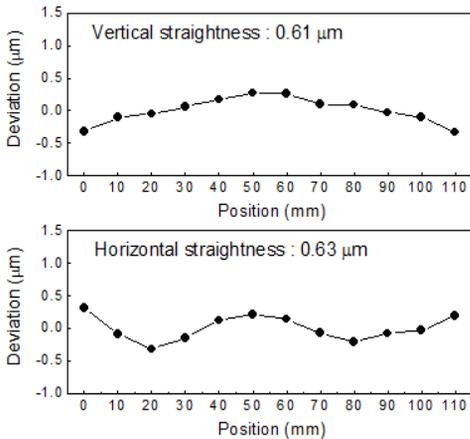


Fig. 8 Axial straightness of Z-axis

100mm를 이송한 결과 10mm를 주기로 일정한 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

Y-Axis stage은 Fig. 7와 같이 최대이송거리 200mm의 이송구간에 최대 변위 중 Vertical straightness :  $1.43\mu\text{m}$ , Horizontal straightness :  $3.2\mu\text{m}$ 이다.

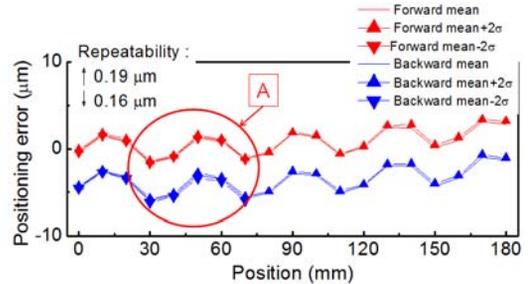
Z-Axis stage은 Fig. 8와 같은 결과로 최대이송거리 100mm의 이송구간에 최대변위 중 Vertical straightness :  $0.61\mu\text{m}$ , Horizontal straightness :  $0.63\mu\text{m}$ 이다. 실험결과 Y-Axis는  $1.43\mu\text{m}/200\text{mm}$ ,  $3.2\mu\text{m}/200\text{mm}$ 인 것으로  $50\phi$ 인 가공모재를 가공하는 것으로 초정밀가공을 하는데 문제가 되지 않을 것으로 본다.

### 3.4.2 Global stage의 위치결정도

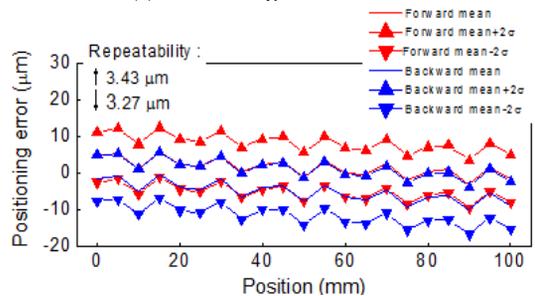
Fig. 9은 레이저 간섭계를 이용하여 ISO 평가규격을 적용하여 유정압안내면의 위치결정오차를 측정된 결과를 나타낸 결과이며, 측정값은 5회 반복 측정값으로부터 통계적으로 구한 것이다.

Y-Axis을 실험한 결과 위치결정오차는  $+0.19\mu\text{m}(2\sigma) \sim -0.16\mu\text{m}(2\sigma)$ 를 나타내고 있으며, Z-Axis을 실험한 결과 위치결정오차는  $+3.43\mu\text{m}(2\sigma) \sim -3.27\mu\text{m}(2\sigma)$ 를 나타내고 있다.

이 는 Y-Axis 스테이지가 Z-Axis 스테이지가 적



(a) Positioning error of Y-axis



(b) Positioning error of Z-axis

Fig. 9 Performance evaluation of Global stage

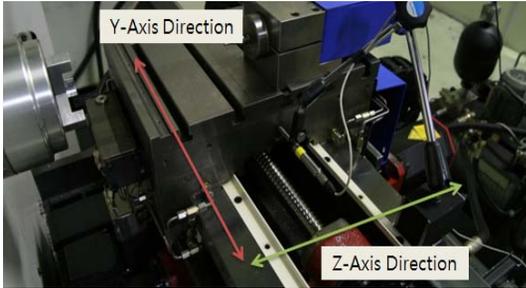


Fig. 10 Direction of Global stage

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

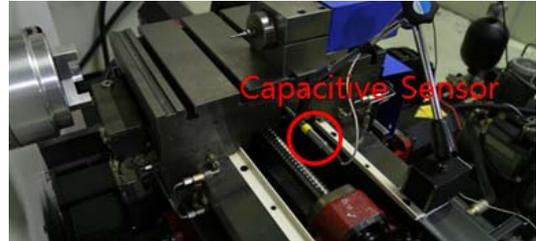
### 3.4.3 Global stage의 분해능 및 반복능

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

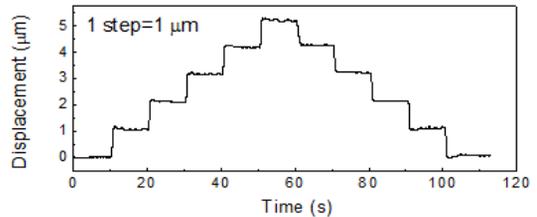
Fig. 11와 같이 Y-Axis: 1step 당  $1\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $0.1\mu\text{m}$ 의 변위를 5step 연속으로 전, 후진 할 수 있도록 입력값을 주고 그때의 테이블의 응답변위를 측정하는 것이며, Fig. 12와 Z-Axis: 1step 당  $2\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$ 의 변위를 5step 연속으로 전, 후진 할 수 있도록 입력값을 주고 그때의 테이블의 응답변위를 측정하는 것이다.

실험결과 Y-Axis는  $0.1\mu\text{m}$  까지 비교적 정확한 계단형식의 분해능을 보여 주었으며, Z-Axis는  $2\mu\text{m}$  까지 정확한 응답특성을 보여주었으나  $1\mu\text{m}$  스텝응답특성은 불안정한 계단형식의 그래프를 보여주고 있다.  $1\mu\text{m}$ 의 경우에 있어 오름 이송 스텝 응답특성은 Y-Axis가 적용된 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 실험결

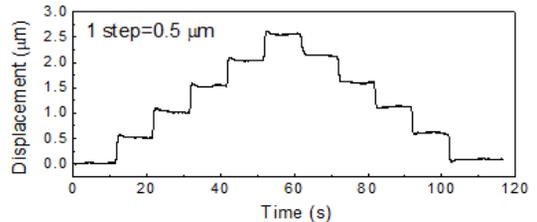
과는 약 $0.2\mu\text{m}$ 내외의 정도로 X축과 Z축이 거의 비슷한 결과 값을 확인하였다.



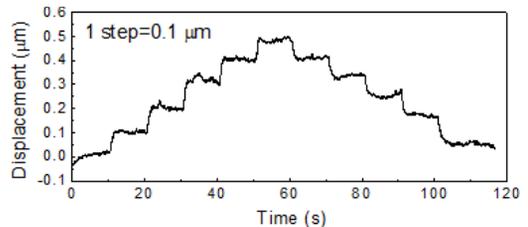
(a) Resolution experiments using the capacitive sensor



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

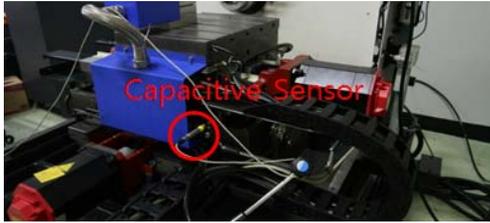


(c) 1step =  $0.5\mu\text{m}$

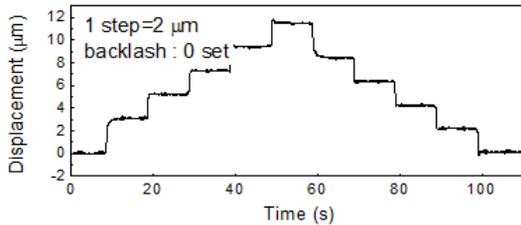


(d) 1step =  $0.1\mu\text{m}$

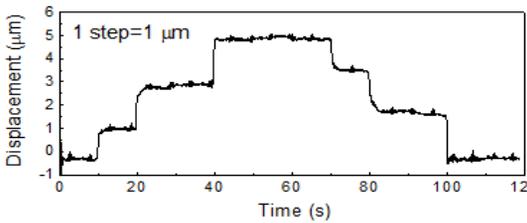
Fig. 11 Micro step response of Y-axis



(a) Resolution experiments using the capacitive sensor

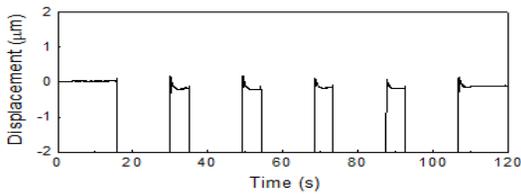


(b) 1step = 2 $\mu$ m

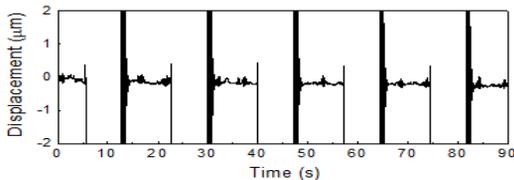


(c) 1step = 1 $\mu$ m

Fig. 12 Micro step response of Z-Axis



(a) Y-axis



(b) Z-axis

Fig. 13 Repeat Performance of 1-Point

## 4. 결론

본 연구에서는 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) 최적의 베어링 위치에서 고유진동수 1차: 557.745Hz, 2차:560.529Hz, 3차:589.655Hz이며 이는 최고 회전수 12,000rpm에서 발생하는 200Hz보다 월등히 높으며, 설계적용 시 만족한 결과이다. 최적의 베어링 위치에서 고유진동수 1차: 557.745Hz, 2차:560.529Hz, 3차:589.655Hz이며 이는 최고 회전수 12,000rpm에서 발생하는 200Hz보다 월등히 높았다.

(2) 진직도 실험 결과 Y-Axis stage은 최대이송거리 200mm의 이송구간에 최대 변위 중 Vertical straightness : 1.43 $\mu$ m, Horizontal straightness : 3.2 $\mu$ m이며, Z-Axis stage은 최대이송거리 100mm의 이송구간에 최대변위 중 Vertical straightness : 0.61 $\mu$ m, Horizontal straightness : 0.63 $\mu$ m으로 최종 셋팅 하였다.

(3) Y-Axis을 실험한 결과 위치경정오차는 +0.19 $\mu$ m(2 $\sigma$ ) ~ -0.16 $\mu$ m(2 $\sigma$ )를 나타내고 있으며, Z-Axis을 실험한 결과 위치경정오차는 +3.43 $\mu$ m(2 $\sigma$ ) ~ -3.27 $\mu$ m(2 $\sigma$ )를 나타냈다.

(4) 분해능 및 반복능 실험 결과 Y-Axis는 0.1 $\mu$ m 까지 비교적 정확한 계단형식의 분해능을 보여 주었으며, Z-Axis는 2 $\mu$ m까지 정확한 응답특성을 보여주었으나 1 $\mu$ m 스텝응답특성은 불안정한 계단형식의 그래프를 보여주고 있다. 1 $\mu$ m의 경우에 있어 오름 이송 스텝 응답특성은 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.