

자유곡면가공기용 초정밀 회전테이블의 설계 및 평가

Design and Evaluation of an Ultra Precision Rotary Table for Freeform Machine Tools

황주호^{1,✉}, 박천홍¹
Jooho Hwang^{1,✉} and Chun-Hong Park¹

1 한국기계연구원 초정밀기계시스템 연구실 (Department of Ultra Precision Machine and Systems, KIMM)
✉ Corresponding author: jooho@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7119

Manuscript received: 2010.2.2 / Accepted: 2010.5.12

This paper describes the design and evaluation procedure of an ultra-precision rotary table for freeform generating machined tools. Design of the thrust and journal hydrostatic bearings and experimental evaluation of the table were performed. To get the compact size and less lost motion direct drive servomotor with ultra precision encoder. From the considered design, following performance were confirmed by experiment. The total stiffness of the prototype rotary table was 483.6 N/ μ m and 97.6 N/ μ m for axial and radial direction, respectively. Rotational accuracy of the table was investigated by capacitive sensor and reversal measurement technique, and 0.10 μ m radial direction and 0.05 μ m axial direction of the rotational accuracy were confirmed. The micro resolution of the table was also investigated with displacement of capacitive sensor, and 0.5/10000° of micro resolution was confirmed. Index accuracy of the table was evaluated by the autocollimator and polygon mirror, and the ± 0.39 arcsec accuracy and ± 0.16 arcsec repeatability of the table were confirmed. Those are under the general requirements of ultra precision rotary tables for freeform generating machined tools.

Key Words: Ultra Precision Rotary Table (초정밀 회전테이블), Hydrostatic Bearings (유정압 베어링), Stiffness (강성), Rotational Accuracy (회전정밀도), Index Accuracy (각분할 정밀도)

1. 서론

수 십여년 전부터 우주 관측용 광학계에서 볼터거울(Wolter mirror), 비축 타원 토로이드(Off-axis elliptical toroid)등 다양한 볼록, 오목 거울의 초정밀 가공이 요구되고 있으며, 광, 정보산업 등에 있어서는 프레벨 렌즈, F- θ 렌즈 등 비구면 렌즈의 초정밀 가공이 요구되고 있다. 다양한 형상의 가공에 필요한 초정밀 자유곡면가공을 위해서 적어도 4 축 이상을 갖춘 가공기가 필요로 하고 있으며, 최소한 1 축 이상은 높은 회전정밀도 및 분해능을 갖춘 회전축을 필요로 하게 된다. 이같이 초정밀 자유곡면 가공기에 필수적 요소인 회전테이블은

정밀한 각도 분할, 회전중 작은 런아웃 오차와 높은 강성이 요구되는 특성을 가지고 있으며, 선진제품의 경우 유정압이나 공기 베어링을 이용한 저마찰 구조를 활용하고 있다.¹

초정밀 회전테이블은 등속운동을 하는 가공용 회전주축과 달리 수십 rpm 이하의 저속운동을 하면서 서보에 의한 위치결정을 해야 하는 특징을 가지고 있다. 따라서 지지 베어링은 초정밀 스피ndl의 형태의 저널 베어링을,^{2,4} 위치결정 서보, 위치검출 장치 및 제어는 직선운동 테이블의 특징을 가지고 있어^{5,6} 이에 대한 복합적인 연구 및 기술의 적용이 필요하다. 본 논문에서는 초정밀 자유곡면가공기에 사용될 유정압 베어링과 빌트인 서

보 모터를 내장한 직구동 방식의 회전테이블의 설계 및 성능평가를 중심으로 한 개발연구에 대하여 기술하였다.

2. 초정밀 회전테이블의 설계

2.1 회전테이블의 구조

초정밀 가공기용 회전테이블의 베어링은 유정압 베어링과 공기정압 베어링이 혼용되어 주로 사용되고 있으며, 가공기 전체에서 요구되는 구조강성의 오차분배 및 제작자 고유의 가공 및 조립기술에 따라 적절히 채용된다. 또한 회전테이블은 주로 회전각의 각도분할 위치결정용으로 사용되며 높은 회전수를 필요로 하지 않는 반면에 정도 높은 위치결정 특성을 위해 $1/10000^\circ$ 이내의 최소 이송 단위를 필요로 한다. 이상의 특성들 및 선진 제품의 사양을 고려하여 1 초정밀 가공기용 회전테이블의 목표 제원을 Table 1 과 같이 결정하였다.

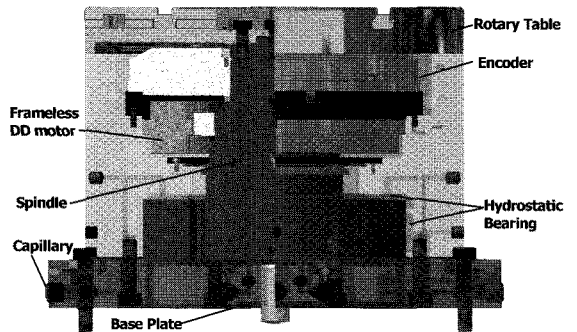


Fig. 1 Configuration of the ultra precision rotary table

2.2 유정압 베어링 설계

2.2.1 스러스트 베어링 설계

유정압 스러스트 베어링에 요구되는 축방향 강성은 강성분배에 따라, 요구강성에 대하여 약 두 배인 $1,000 \text{ N}/\mu\text{m}$ 을 기준으로 설계를 하였다. 가공기 본체의 시작품에 사용되는 공급압력은 다른 유정압 요소(X, Y, Z 축 이송테이블)를 함께 고려하여 $10 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 을 기준으로 설계하였으며, 이 공급압력에서 목표강성을 얻기 위해서는 스러스트 베어링의 외경을 가능한 크게 하여 베어링 면적을 넓게 할 필요가 있다. 이는 장착될 테이블의 외곽 크기와 높이, 배관 등 여러 가지 사항을 고려한 경우 최대 베어링 외경은 225 mm이었다.

한편, 이외에도 베어링 강성에 영향을 미치는 치수로는 베어링 내경과 베어링 간극이 있다. 베어링 내경이 클 수록 베어링 면적이 넓어지므로 큰 강성을 갖기에 유리해진다. 그러나 이 경우 실재로는 썰이나 샤프트의 조립상에 문제가 생길 수 있으며 이를 고려한 최소 내경인 175 mm 를 베어링 내경으로 결정하였다. 한편, 유정압 베어링에 사용되는 윤활유의 점도는 적용될 가공기의 다른 이송테이블에서의 소비유량 및 성능도 함께 고려하여 설계하여, 소비유량과 온도상승의 관계에 대한 기존 사용경험으로부터 5 cSt 로 결정하였다.

베어링의 성능을 수치계산을 통하여 예측하기 위하여, 유정압 베어링 간극의 유막 특성을 나타내는 Reynolds 방정식을 유한 요소화하였으며, 수치해석법은 FEM 을 사용하였다.⁷⁻¹⁰

정해진 베어링 외형치수에 있어 베어링 간극이 증가하면 베어링 강성은 감소하고 소비유량은 증가하여 성능이 약화되는 경향을 보이게 된다. 그러나 베어링 간극을 너무 작게 하면 회전에 따른 온도상승과 함께 조립에 매우 어려운 단점이 있다.

Table 1 Specification of the hydrostatic rotary table

Specifications		Objectives
Bearings Type		Hydrostatic
Stiffness of table	Axial	$450 \text{ N}/\mu\text{m}$
	Radial	$90 \text{ N}/\mu\text{m}$
Index accuracy		$\leq 2.0 \text{ arcsec}$
Driving Motor		Brushless DC
Diameter of the table		300 mm
Rotation angle		360°
Rotational accuracy	Axial	$\leq 0.1 \mu\text{m}$
	Radial	$\leq 0.1 \mu\text{m}$
Feedback resolution		0.02 arcsec
Maximum speed		50 rpm
Height of the table		225 mm

가공기의 공구대 축으로의 역할을 고려할때 축방향의 강성을 크게 설계할 필요가 있으며, 회전정밀도는 축방향 및 반경방향 모두 가공정밀도에 영향을 미칠 수 있으므로 $0.1 \mu\text{m}$ 이내의 성능을 필요로 한다. 한편, 회전테이블이 놓여질 직선테이블 상의 공간 및 가공기의 공간치수 등을 고려하여 회전테이블의 외형치수는 직경 300 mm 및 높이 225 mm 로 결정하였다.

베어링에서의 소비유량은 120 l/min 전후의 윤활탱크 용량 및 조립이 함께 될 이송테이블에서의 소비유량도 함께 고려할 때 약 1.5 l/min 이내를 설계 목표로 하였다. 이러한 두가지 목적을 만족하는 조건을 찾기 위하여 베어링의 간극변화에 대한 성능계산을 수행한 결과를 Fig. 2 에 도시하였다. 베어링 간극이 16 μm 인 경우 목표강성에 가까운 값을 가지면서도 소비유량은 1.5 l/min 이내가 됨을 알 수 있다. 따라서 유정압 스러스트 베어링의 간극은 16 μm 로 결정하였으며 이때의 베어링의 강성은 1,135 N/ μm 이 된다.

2.2.2 Journal 베어링 설계

유정압 저널 베어링에 요구되는 반경방향 강성은 시스템의 강성배분을 통하여 350 N/ μm 로 결정하였다. 저널 베어링에서도 마찬가지로 공급압력은 10 kgf/cm²으로 설정하며, 저어널 베어링에 있어 강성을 결정하는 주요 치수로는 베어링 직경, 베어링 길이, 베어링 간극, 포켓 비, 포켓 압력비 등이다. 유정압 베어링 간극의 유막 특성을 나타내는 Reynolds 방정식을 스러스트 베어링에서와 마찬가지로 유한 요소화하여 수치해석을 수행하였다.⁷⁻¹⁰ 포켓압력비는 0.5 일 때 가장 높은 강성을 갖게 되므로⁹ 0.5 (즉, 포켓압력이 공급압력의 1/2 인 5 kgf/cm²)로 설정하였으며, 베어링 패드에서 포켓의 길이가 차지하는 비를 나타내는 포켓비는 그 값이 클수록 강성이 증가하므로 0.8 로 높게 설정하였다.⁹ 베어링의 직경은 적용될 자유곡면가공기와 회전테이블의 공간적인 허용치 내에서 결정되며, 본 시차폼에서는 저널 베어링의 길이를 짧게 하면서도 강성을 키우기 위해 저널 베어링의 직경이 스러스트 베어링의 외경보다 커서 Fig. 1 에서 보이는 바와 같이 바깥쪽으로 설치되도록 설계하

였다. 가능한 최대 직경은 약 230 mm 이므로 이를 저널 베어링의 외경으로 설정하였다. 저널 베어링의 경우 진원도 및 동심도 가공 등의 문제로 인하여 베어링의 간극을 줄이기 힘들므로 베어링의 축방향 길이와 간극을 변화시키면서 계산을 수행하였다. 직경 230 mm, 길이 40 mm로 했을 때의 베어링 간극의 변화에 따른 베어링 강성 및 소비유량을 계산한 결과를 Fig. 3 에 도시하였다. 가공 및 조립 조건 등을 고려하여 20 μm 로 베어링 간극을 결정하였으며, 이때 이론적인 강성은 목표 강성보다 조금 상회하는 358 N/ μm 가 됨을 알 수 있었다.

2.3 회전테이블 구조 해석

설계된 초정밀 회전테이블의 기본구조를 바탕으로 유한요소해석을 실시하여 중력과 외부 가공력이 테이블에 가해질 때, 테이블의 정적 변형의 양을 수치적으로 해석하였다.

회전테이블의 구조 해석시 반영된 주요 설계변수로 유정압 베어링의 포켓유압 5 kgf/cm², 스러스트

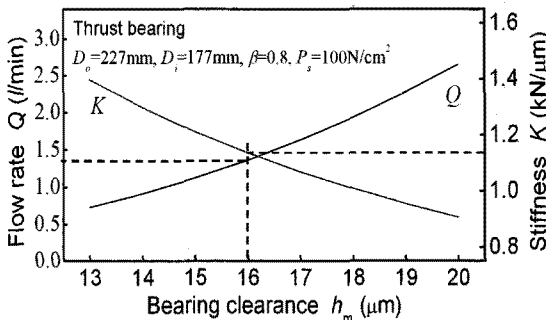


Fig. 2 Stiffness and flow rate of the thrust bearing

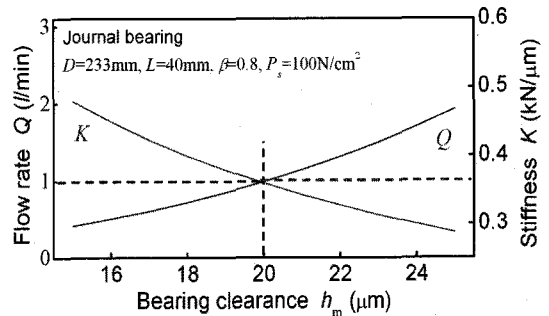


Fig. 3 Stiffness and flow rate of the journal bearing

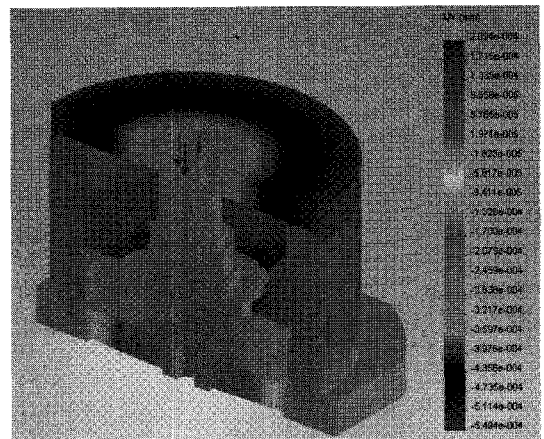


Fig. 4 Deformation analysis of the table

베어링의 강성 1,135 N/μm, 저어널 베어링의 강성 358 N/μm로 설정되어 해석되었다.

테이블 중앙에 50 N의 수직방향 집중하중이 작용할 때의 회전테이블의 변위를 해석한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 테이블 중앙부가 하중 작용 전 대비 0.1 μm 더 내려가는 변위를 보임으로 축방향 강성은 약 500 N/μm 정도 될 것임을 예상할 수 있다. 마찬가지로 방법으로 반경방향에 대한 테이블 상단에서의 하중에 대한 변위해석도 수행하였으며 결과로부터 약 100 N/μm 정도의 강성을 얻을 수 있을 거로 예상하였다.

3. 회전테이블 성능평가

3.1 강성 평가

정강성은 정적인 힘이 움직이지 않는 상태에서 외력이 가하여 졌을 때, 힘의 작용방향에 대한 변위를 측정하여 평가하였다. 작용하는 힘을 단계적으로 측정하기 위하여 Fig. 5에 보이는 바와 같이 하중을 일정방향으로 주기 위하여 분동을 이용해 일정 무게마다 증가시키면서 이때의 변위는 와류

형 센서를 이용하여 측정하였다. 하중이 작용하는 부위는 분동 설치로 인하여 변위를 측정할 수 없으므로, 정 삼각형을 이루고 있는 설치점의 3개의 센서 값의 산술 평균을 이용하여 축방향의 변위를 구하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 변위대 힘의 대표기울기는 483 N/μm임을 알 수 있으며, 이는 해석을 통하여 예상한 500 N/μm의 95.6% 수준이다. 이러한 차이는 해석 모델은 한 개의 일체된 부품으로 모델을 하는 것과 달리 실제 유닛은 여러 부품간의 볼트 결합이나 끼워 맞춤 등의 접촉 강성을 가지고 있기 때문에 이러한 차이로 강성이 저하된 것으로 보여진다.⁴ 반경 방향 강성은 로드셀을 통하여 힘을 가하면서 힘이 가해지는 테이블의 반대편에서 변위를 측정하여 변위대 힘의 관계를 구하여 Fig. 7에 도시하였다. 그림에 보이는 바와 같이 97.6 N/μm임을 알 수 있으며, 이는 해석을 통하여 예상한 100 N/μm의 97.6% 수준으로 축방향 강성결과에서와 마찬가지로 결합부에서의 강성 저하의 영향으로 보여진다.

3.2 회전정밀도 특성

3.2.1 반경방향 회전정밀도

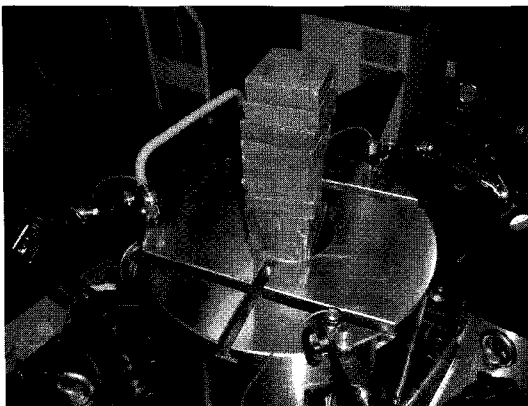


Fig. 5 Axial static stiffness test

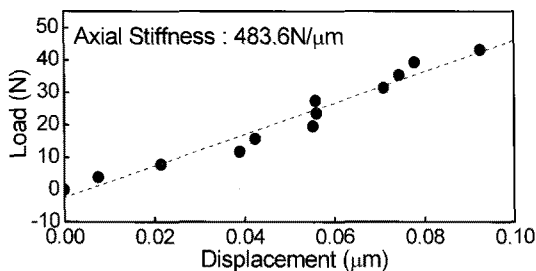


Fig. 6 Axial static stiffness of the table

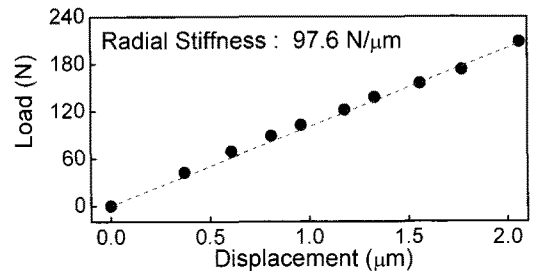


Fig. 7 Radial static stiffness of the table

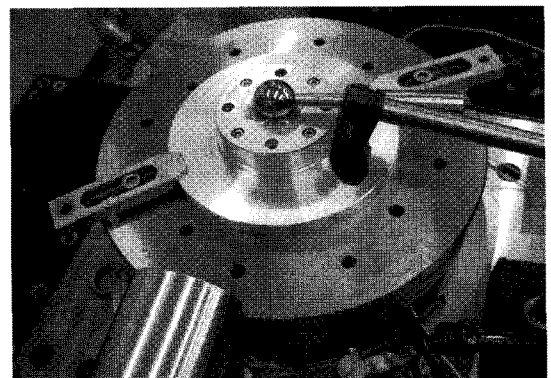


Fig. 8 Radial run-out test

회전테이블의 회전정밀도 평가를 위하여 Fig. 6 에 보이는 바와 같이 0.05 μm 의 진구도를 갖는 마스터 볼을 테이블 중심에 설치하여 정전 용량형 센서를 이용하여 축의 흔들림을 측정하였다. 측정 센서는 0.1 mm의 분해능까지 측정이 가능한 정전용량형 센서(ADE3401)을 사용하였으며 한 회전당 일정 위치에서 측정시작(triggering)을 위하여 광 픽업 센서를 사용하였으며, 마스터볼의 진구도가 평가 대상의 1/2 수준으로, 영향을 줄 수 있기 때문에 반접법을 이용하여 볼에 의한 형상오차를 분리하였다.¹¹ 회전에 관한 결과를 분석한 결과 Fig. 9 에 보이는 바와 같이 0.10 μm 의 총 운동오차, 0.09 μm 의 평균오차와 0.03 μm 우연오차를 달성할 수 있었다. 이는 선진 초정밀가공기 회전정밀도의 요구 정밀도 수준의 양호한 결과를 얻을 수 있었다.¹ 보다 높은 정밀도를 얻기 위해서는 이미 높은 우연오차를 보이고 있기 때문에 평균오차를 향상시키는 것이 필요함을 알 수 있으며, 제작시 회전축과 베어링 면의 형상가공 및 조립오차를 정밀측정하고 그 크기를 줄이는 것이 필요할 것으로 예상된다.

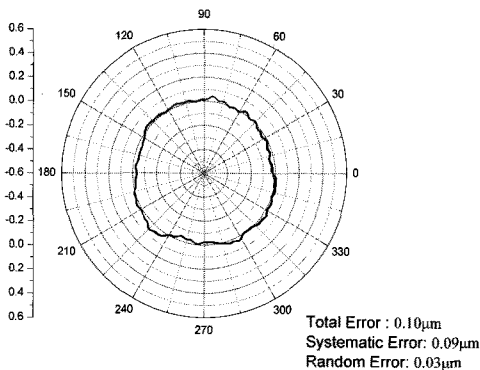


Fig. 9 Radial run-out of the table

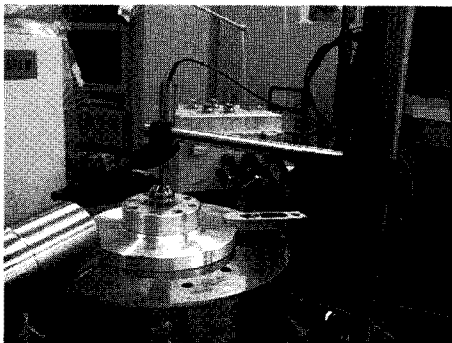


Fig. 10 Axial run-out test

3.2.2 축방향 회전정밀도

축 방향의 회전정밀도 평가를 위하여 Fig. 10 에 보이는 바와 같이 정전용량형 변위센서를 마스터 볼이 위치한 축방향으로 설치하여 흔들림 정도를 평가하였다. 회전 각도에 따른 흔들림은 그림 9 에 나타낸 바와 같이 회전테이블이 회전하면서 광 픽업 센서의 위치를 기준으로 360° 회전시 축방향 흔들림 변위를 측정하였으며 이때 8 회전한 결과를 Fig. 11 에 표시하였다. 측정 결과 0.05 μm 의 총 운동오차, 0.04 μm 의 평균오차 및 0.04 μm 우연 오차를 얻었으며 이는 선진 초정밀가공기용 회전테이블의 요구 정밀도 수준을 상회하였다.¹

3.3 위치결정 특성

3.3.1 미송분해능

회전테이블의 주요 성능 중 하나가 미소분해능이다. 미소분해능은 본 과제에의 주요 적용대상 중 하나인 프레넬 렌즈와 같은 grating 을 가지고 있는 대상으로 가공을 위하여 필요한 기능 중 하나이다. 본 연구의 목표인 1/10000°의 분해능을 갖는 회전테이블이 일반적인 선진 제품의 성능 중 하나이며 테이블의 외각에서의 변위에 대한 분해능은 약 0.2 μm 가 된다. 최소 구현 가능한 분해능을 살펴보기 위하여 최소 제어 입력인 0.5/10000°, 1/10000° 및 2.5/10000°의 분해능으로 6 스텝을 왕복하면서 측정을 수행하였다. 미세한 각운동에 대하여는 직선 운동의 변위로 간주할 수 있기 때문에 정전용량형 센서를 이용하여 테이블의 반경 95 mm 지점에 대하여 직선 변위를 측정하여 이를 각도로 환산하였다.

Fig. 12 에서 보이는 바와 같이 0.5/10000°, 1/10000° 및 2.5/10000° 모두 스텝간의 구분이

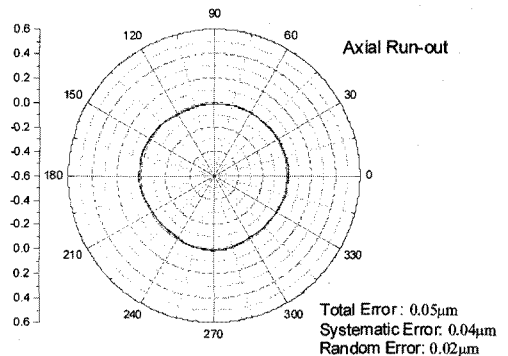


Fig. 11 Axial run-out of the table

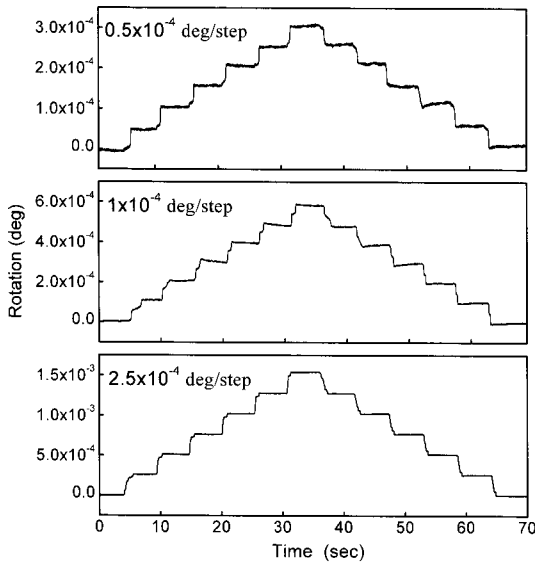


Fig. 12 Results of the micro resolution test

명확함을 알 수 있다. 이는 선진제품의 초정밀 가공용 회전테이블의 사양인 $1/10000^\circ$ 의 분해능을 만족하는 수치로 광부품 가공용 초정밀 장비에 충분히 사용할 수 있을 것으로 보인다. 현재 제어 신호 한계 까지의 움직임이 구현되므로, 제어 신호의 분해능을 보다 높이면 좀 더 높은 분해능도 구현 가능할 것으로 예상된다.

3.3.2 각도분할 정밀도

각도분할 정밀도는 회전테이블의 각도위치 정밀도로서 목표위치(측정점 위치)대 실제 측정값 간의 차이를 구하며, ISO230-2 규격에 의하면 회전테이블의 측정 점의 갯수는 180° 이상의 회전을 하는 경우 8 점 이상 측정하도록 되어있다. 이를 위하여 오토콜리메이터와 30° 간격의 다면경을 이용하여 Fig. 13 에 보이는 바와 같이 평가하였으며, 다면경의 오차는 제조사 측에서 기 측정된 오차 값을 입력하여 보정하였다. 12 개의 지점에 대하여 평가를 수행하였으며, ISO 230-2 규격에 의하여 분석한 후 각도오차를 보정하여 최종적으로 구한 결과를 Fig. 14 에 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 양방향 위치결정정도는 ± 0.39 arcsec 이며, 양방향 반복정도인 ± 0.16 arcsec 이다. 위치결정정도가 반복정도의 약 두배 수준이고 반복정밀도는 제어 분해능의 2 배 수준으로 더 이상의 보정은 어려우며,¹² 초정밀 가공기에 적용하기에 충분한 분할정

밀도임을 알 수 있다.

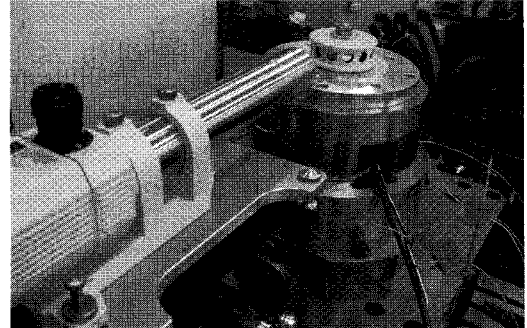


Fig. 13 Index accuracy test for the rotational table

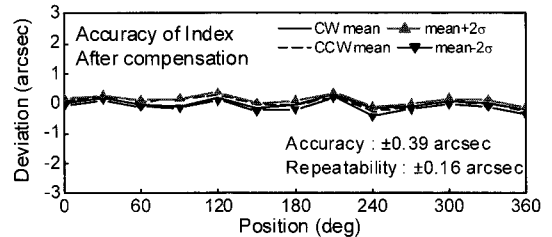


Fig. 14 index accuracy of the table

4. 결론

본 연구에서는 초정밀 자유곡면가공기에 사용되는 초정밀 회전테이블의 설계 제작하여, 실험적 성능 검증을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 회전테이블용 유정압 베어링의 성능 및 강성해석을 통하여 적합한 유정압 베어링을 설계 하였으며, 실제 실험에서의 강성은 구조부의 강성 저하 등으로 인하여 약간의 저하요소는 있지만 원하는 강성목표를 만족하는 축방향 $483.6 \text{ N}/\mu\text{m}$, 반경방향 $97.6 \text{ N}/\mu\text{m}$ 을 얻을 수 있었다.
- 2) 회전테이블의 회전중 회전정밀도오차를 마스터블과 반전법을 이용하여 측정하였으며, $0.10 \mu\text{m}$ 반경방향, $0.05 \mu\text{m}$ 축방향 오차를 확인하였다.
- 3) 정전용량형 센서를 이용하여 회전테이블의 미소분해능을 측정한 결과 안정적으로 $0.5/10000^\circ$ 의 분해능을 확인하였다.
- 4) 오토콜리메이터와 다면경을 이용하여 회전 각도분할 정밀도를 측정한 결과 양방향 위치결정정도는 ± 0.39 arcsec, 양방향 반복정도는 ± 0.16 arcsec 를 확인하였다.

참고문헌

1. Luo, X., Cheng, K. and Webb, D., "Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2-3, pp. 515-528, 2005.
2. Lu, X.-D., Paone, M. P., Usman, I., Moyls, B., Smeds, K., Rotherhofer, G. and Slocum, A. H., "Rotary-axial spindles for ultra-precision machining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 1, pp. 323-326, 2009.
3. Rowe, W. B. and Stout, K. J., "Design data and a manufacturing technique for spherical hydrostatic bearings in machine tool applications," *Int. J. of Machine Tool Design and Research*, Vol. 11, pp. 293-307, 1971.
4. Park, C. H. and Hwang, J., "Design and performance evaluation of a spindle system for centerless grinding machine," *J. of KSPE*, Vol. 22, No. 11, pp. 142-150, 2005.
5. Bono, M. B. and Kroll, J. J., "Tool setting on a B-axis rotary table of a precision lathe," *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 11, pp. 1261-1267, 2008.
6. Park, C. H. and Hwang, J., "Examples of performance estimation on the feed system of precision machine tools," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 8, pp. 19-26, 2004.
7. Majumdar, B. C., "The numerical solution of hydrostatic oil Journal bearings with several supply ports," *Wear*, Vol. 14, No. 6, pp. 389-396, 1969.
8. Ghosh, M. K. and Majumdar, B. C., "Design of multirecess hydrostatic oil journal bearings," *Tribology international*, Vol. 13, No. 2, pp. 73-78, 1980.
9. Dixon, R. S. and Leonard, R., "Formulae defining the performance of hydrostatic journal bearings incorporating 3,4,5 and 6 recesses," *Int. J. of Machine Tool Design and Research*, Vol. 14, No. 1, pp. 85-94, 1974.
10. Ghosh, M. K. and Majumdar, B. C., "Stiffness and damping characteristics of hydrostatic multirecess oil journal bearings," *Int. J. of Machine Tool Design and Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 139-151, 1978.
11. Donaldson, R. R., "A simple method for separating spindle error from test ball roundness error," *Annals of the CIRP*, Vol. 21, No. 1, pp. 125-126, 1972.
12. Jywe, W., Chen, C. J., Hsieh, W. H., Lin, P. D., Jwo, H. H. and Yang, T. Y., "A novel simple and low cost 4 degree of freedom angular indexing calibrating technique for a precision rotary table," *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 12-13, pp. 1978-1987, 2007.