

초정밀 자유곡면 가공기용 회전테이블 개발

Development of a rotary table for ultra-precision machine tools

*황주호¹, 박천홍¹, 이종판², 김태형³

*J. Hwang(jooho@kimm.re.kr)¹, C. H. Park¹, J. P. Lee², T. H. Kim³

¹ 한국기계연구원 지능생산시스템연구본부, ² EWS 코리아(주), ³ 두산인프라 코어(주)

Key words : rotary table, ultra-precision, rotational accuracy, accuracy of index

1. 서론

우주관측용 광학계에 있어서는 윌터밀러를 위시한 다양한 concave, convex 밀러의 초정밀 가공이 요구되고 있으며, 광, 정보산업 등에 있어서는 플레넬렌즈, F- θ 렌즈 등 비구면 렌즈의 초정밀 가공이 요구되는 경우, 다양한 형상의 초정밀가공을 위해서 적어도 4 축 이상을 갖춘 초정밀가공기를 필요로 하고 있으며 따라서 최소한 1 축 이상은 높은 회전정밀도 및 분해능을 갖춘 회전축을 필요로 하게 된다. 이같이 초정밀 자유곡면가공기에 필수적인 요소인 회전 테이블은 정밀한 각도 분할, 회전중 작은 런 아웃 오차와 높은 강성이 요구되는 특성을 가지고 있으며, 선진 제품의 경우 Hydrostatic 이나 Airbearing 을 이용한 저마찰 구조를 활용하고 있다.

본 연구에서 초정밀가공기용으로 사용될 유정압 베어링과 Flameless servomotor 를 내장한 직동구동 방식의 회전테이블의 설계 및 성능의 평가에 대하여 소개하고자 한다.

2. 초정밀 회전테이블의 설계

초정밀 가공기용 회전테이블의 베어링은 유정압 베어링과 공기 정압베어링이 혼용되어 주로 사용되고 있으며, 가공기 전체에서 요구되는 구조강성과의 밸런스 및 메이커 특유의 가공 및 조립기술에 따라 적절히 채용된다. 또한 로타리 테이블은 주로 회전각의 인덱스용으로 높은 회전수를 필요로 하지 않는 반면에 정도 높은 위치결정 특성을 위해 0.0001° 이내의 최소이송단위를 필요로 한다. 이상의 특성들을 고려하여 초정밀 가공기용 로타리 테이블의 제원을 Table 1의 우측에서와 같이 결정하였다.

Table 1 Specification of the hydrostatic rotary table

항목	제원	
베어링방식	유정압베어링	
테이블강성	Axial	400 N/ μ m
	Radial	200 N/ μ m
위치결정정밀도	≤ 2.0 arcsec (0.00056°)	
구동모터	Brushless DC	
테이블 직경	300 mm	
회전각도	360°	
회전정밀도	Axial	$\leq 0.1 \mu$ m
	Radial	$\leq 0.1 \mu$ m
피드백분해능	0.02 arcsec (0.0000056°)	
최대회전수	15 rpm	
테이블 높이	225 mm	

가공기의 B 축으로의 역할을 고려할 때 축방향의 강성을 크게 설계할 필요가 있으며, 회전정밀도는 축방향 및 반경방향 모두 가공정밀도에 영향을 미칠 수 있으므로 0.1 μ m 이내의 성능을 필요로 한다. 한편, B 축이 놓여질 직선테

이블 상의 공간 및 가공기의 공간치수 등을 고려하여 로타리 테이블의 외형치수는 직경 300 mm 및 높이 225 mm로 결정하였다.

3. 성능평가

회전테이블의 절삭중 변위에 큰 영향을 주는 강성의 평가 결과를 Fig. 2 에서 도시하였다. 변위대 힘의 결과는 483.6 N/ μ m 임을 알 수 있으며, 이는 초정밀 가공중 높은 절삭력에 해당하는 10N 에 대하여 0.021 μ m 로서 매우 작은 값임을 알 수 있다. 한편, 강성결과는 설계시 해석결과와 5%정도의 차이를 보였는데 해석 모델은 한개의 solid 로 모델을 하는 것과 달리 실제 기계는 여러 부품간의 볼트를 끼워 맞추는 등의 접촉 강성을 가지고 있기 때문에 이러한 차이로 강성이 저하된 것으로 일반적인 기계 구조물에서 해석한 것과 실험간에 발생하는 차이로 보여 진다.¹

로타리 테이블의 회전정밀도 평가를 위하여 0.05 μ m의 진구도를 갖는 마스터 볼을 테이블 중심에 설치하여 정전용량형 센서를 이용하여 축의 흔들림을 측정하였다. 측정 센서는 0.1 nm의 분해능까지 측정이 가능한 정전용량형 센서(ADE3401)을 사용하였으며 한 회전당 일정 위치에서 측정 시작(triggering)을 위하여 optical pickup sensor 를 사용하였다. 8 회전에 관한 결과를 ISO230-7 규격에 의하여 분석한 결과 Fig. 3 에 보이는 바와 같이 0.09 μ m의 평균오차와 0.03 μ m 우연 오차를 보였으며 total error 는 0.1 μ m 를 보였다. 이는 선진 초정밀 가공기의 수준으로 양호한 결과이다. 보다 높은 정밀도 향상을 위하여는 높은 우연오차를 보이고 있기 때문에 평균오차를 향상시켜야하고, 스핀들과 베어링면의 진원도를 향상시켜야 함을 평가결과로부터 알 수 있다. 같은 측정방법을 통하여 축방향에 대하여 축방향 흔들

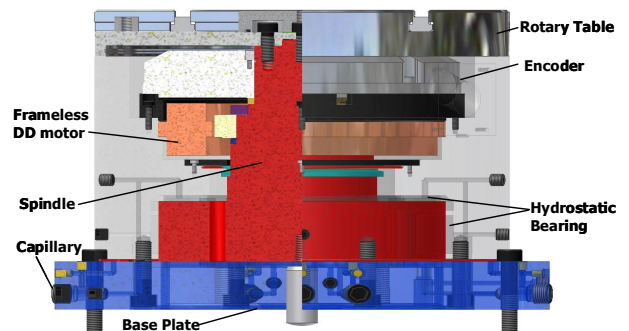


Fig. 1 Configuration of the ultra precision rotary table

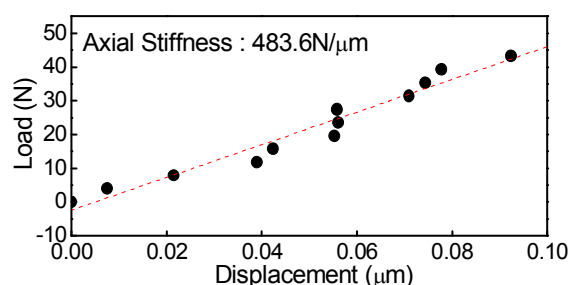


Fig. 2 Axial static stiffness of the table

림 오차를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었으며 그림에 보이는 바와 같이 0.05 μm의 total 오차를 보임을 알 수 있다.

회전 테이블의 주요 성능 중 하나가 미소분해능이다. 미소분해능은 본 과제에의 주요 적용대상 중 하나인 Fresnel 렌즈와 같은 grating을 가지고 있는 대상으로 가공을 위하여 필요한 기능 중 하나이다. 본 연구의 목표인 1/10000°의 분해능을 갖는 회전테이블이 주요 선진 제품의 성능 중 하나이며 테이블의 외각에서의 분해능은 약 0.2 μm가 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 그림 8에 보이는 바와 같이 정전용량형 센서를 이용하여 테이블의 반경 92 mm 지점에 대하여 직선 변위를 측정하여 이를 각도로 환산하였다.

회전테이블의 정확한 회전위치를 갖게하기 위한 각도분할 정밀도측정을 위하여 Autocollimator와 30° 간격의 다면경을 이용하여 12 개의 지점에 대하여 평가를 수행한 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 평균오차를 보정한 후 ISO 230-2 규격으로 위치결정정도는 ±0.39 arcsec이다. 이는 양방향 반복 정도인 ±0.16 arcsec의 2.5 배 수준으로 보정이 잘 수행되었음을 알 수 있으며, 초정밀 가공기에 적용하기에 충분한 분할정밀도임을 알 수 있다.

회전테이블의 축방향 열적 안정성은 장시간 가공에 있어서 중요한 요소중 하나이다. 이를 측정하기 위하여 테이블 상단에 마스터 볼을 장착한 후 정전용량형 센서를 Invar 스텐드에 장착하여 8 시간 운전중의 열변형을 측정하였으며, 10 rpm 속도로 운전중 테이블 주요부위, 대기 및 유온의 변화를 측정하기 위하여 열전대를 삽입하여 측정하였다. Fig. 7에 보이는 바와 같이 유정압 베어링이 위치하는 테이블 하우징의 온도변화에 따른 영향이 나타남을 알 수 있으며 변화는 ±0.2 μm 이하로 양호함을 알 수 있다.

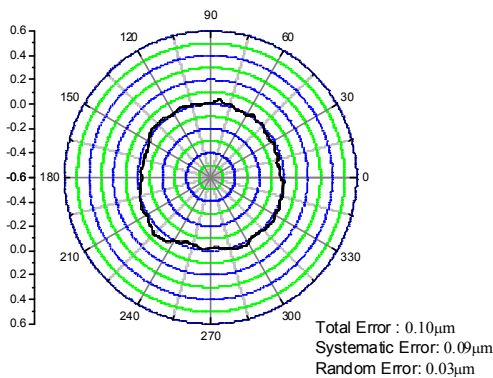


Fig. 3 Radial run-out of the table

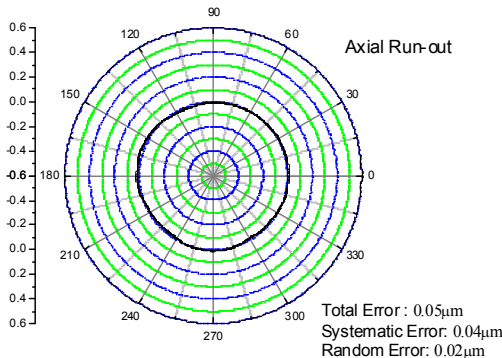


Fig. 4 Axial run-out of the table

4. 결론

초정밀 자유곡면 가공기용 회전테이블을 설계 제작하였으며 이를 초정밀 가공기에 사용하기 적합한지 여부를 판단하기 위하여 성능평가를 수행하였다.

성능평가 수행결과 회전테이블의 축방향 강성은 483.6 N/μm으로 가공중 변형이 다른 오차에 비하여 매우 적을것을 예상할 수 있으며, 회전중 발생하는 반경 및 직선방향의 흔들림 또한 0.1 μm 이하로 매우 양호한 결과를 얻었다. 테이블의 최소 분해능은 0.5/10000°, 각도분할정밀도는 ±0.39 arcsec를 획득하여 회전축의 이송정밀도도 매우 양호한 선진제품 수준이상으로 달성 가능하였다.

참고문헌

1. 박천홍, 황주호, 조순주, 조창래, “무심연삭기 주축계의 설계 및 성능평가,” 한국정밀공학회지, 22, pp143-150, 2005

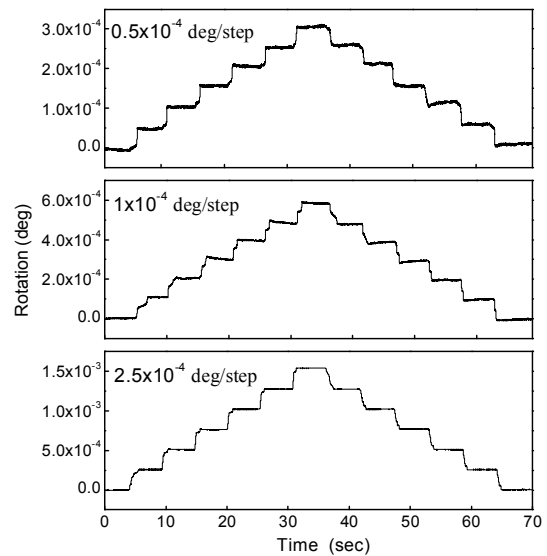


Fig. 5 Results of the micro resolution test

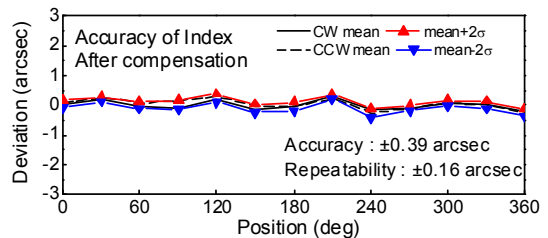


Fig. 6 index accuracy of the table

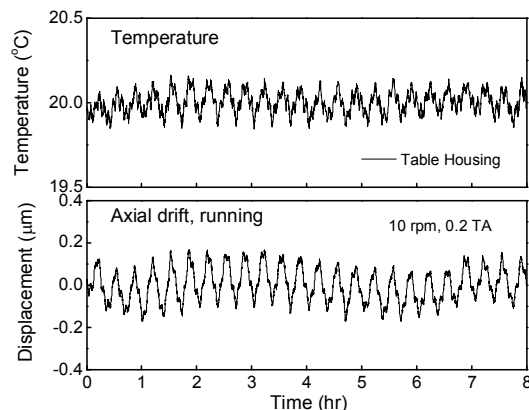


Fig. 7 Variation of table height during 8 hr operation