

## 고정밀선반용 모터내장형 주축의 열변형 특성 해석 (An Analysis of Thermal Deformation of Motor Integrated Spindle on High Precision Lathe)

이득우<sup>1)</sup>, 송영찬<sup>2\*</sup>, 이찬홍<sup>2)</sup>, 장석남<sup>3)</sup>  
1) 부산대학교, 2) 한국기계연구원, 3) 한화기계(주)

### ABSTRACT

This paper proposes the thermal characteristics of motor integrated spindle on high precision lathe and investigates the thermal deformation and the running error of spindle. The deformation and the running error of spindle shaft are continuously measured by the gap sensor mounted on machine. The temperature distribution is measured by the thermal vision system and the thermocouple. The results show that the running error of spindle is dependent on the rotational speed and the thermal deformation.

Key Word : Thermal Deformation, Motor Integrated Spindle, Running Error, Precision Lathe

### 1. 서 론

최근 선반에 있어서도 고속화와 고정밀화가 주요 연구과제로 대두되고 있으며, 선삭에서 고속, 고정도가공을 실현하기 위해서는 주축의 고속화와 고정밀화가 이루어져야 한다. 이에 따라 선반주축의 경우에도 주축시스템을 모터내장형으로 구성하여 고속화를 이루고 있다.

모터내장형 주축의 경우 모터라는 발열원 자체를 주축부에 내포하고 있어 주축이 모터의 열에 의해 직접적으로 영향을 받게 됨으로 열변형 문제의 해결이 중요하다. 공작기계중에서 선반의 경우 공작물을 척킹하여 회전시키며 가공이 이루어지고 있기 때문에 주축부의 변형이 가공정도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 주축부의 변형은 열에 의한 열변형과 질삭력에 의한 변형으로 나누어 볼수 있는데, 특히 모터내장형 주축의 경우 가공정도를 저하시키는 주요인이 열변형으로 이를 줄이기 위한 대책이 가공정도의 향상을 위한 핵심기술이 되고 있다.

그러므로 설계단계에서부터 여러 가지 열변형 방지대책이 요구되고 있으며, 기계구조를 열적으로 대칭이 되도록 하는 방법 및 열 발생부위를 냉각시키는 방법 등이 연구되어 왔다. 또한 최근에는 주축의 변형량을 미리 예측하고 이를 보정하는 방법에 대해서도 연구가 수행되고 있다.

그러나 기존의 연구[1,2,3,4]에서는 주축의 유회시스템이나 구동계에서의 열에 의한 주축의 변형 등에 대해 행하고 있고, 주축단품에 국한되어 수행되고 있다. 또한 공작기계 주축의 열변형 해석을 통한 가공정도 및 주축의 회전정도 등에 미치는 영향에 대해서도 거의 연구가 수행되지 않고 있는 실정이다.

그런데 공작기계의 경우 가공정도에 직접적인 영향을 미치는 것은 질삭점에서의 변형으로 가공기 전체시스템의 열특성에 의해 복합적으로 나타나게 되며 공작기계에 설치된 주축을 중심으로 열특성 해석을 수행하여 열변형 보정을 행하여야 가공정도를 향상시킬수 있을 것이다.

그러므로 본연구에서는 공작기계에 주축이 장착된 상태에서 주축시스템의 열특성을 파악하고, 모터내장형 주축시스템의 열영향을 최소화하기 위한 각 설계요소의 적정성 여부를 평가하며, 주축의 회전정도 및 열변형을 평가하는 실험방법에 대해 제시한다. 이를 위해 운전상태에서 회전수에 따른 주축부의 온도와 주축 선

단부의 변형량을 측정하며, 이의 정도를 보정하기 위한 열변형해석방법에 대해 살펴본다.

### 2. 고정밀선반용 모터내장형 주축의 구조

그림 1은 경면선반용 모터내장형 주축의 조립도를 보여주고 있으며, 표 1은 주축시스템의 제원을 나타내었다. 본 연구의 경면선반용 모터내장형 주축은 회전정도 0.3 $\mu$ m를 목표로 설계·제작되었다. 주축베어링부의 직경은 전,후부베어링 각각  $\phi$ 65,  $\phi$ 55로 정밀급 앵글러컨택트 볼베어링을 복렬로 배열하였으며, 유회방식은 그리이스 유회방식을 사용하였다. 후부베어링에는 고속에 의해 주축이 열팽창하여도 일정한 여유가 걸릴 수 있도록 정압압장치의 역할을 할수 있는 스프링이 설치되어 있으며, 주축내부에는 척을 장착할 수 있도록 내경  $\phi$ 25로 관통되어 있다. 내장형모 설치하고 오일을 강제순환시킬수 있는 구조로 하였으며, 축에 설치된 모터의 모터부는 압축공기에 의해 냉각될 수 있는 구조로 하였다. 또한 불평형질량을 줄이기 위해서 축은 척 등이 장착된 상태에서 0.1g까지 발런싱작업을 하였다.

표 1 모터내장형 주축의 제원

항 목	제 원	
최대 회전수	10,000 rpm	
최 대 출 력	30분 정격	3.7 kW
	연속 정격	5.5 kW
베 어 링	전 반 부	HS7013(내경 65 mm)
	후 반 부	HS7011(내경 55 mm)
유회 방 식	그리이스 유회	
척	에어 척, Bar Feeder	
냉 각 방 식	하 우 징	자켓 유냉각
	모터내부	압축공기 냉각

### 3. 실험장치 및 실험방법

그림 2는 주축시험장치의 개략도를 보여주고 있다. 주축부에서의 발열특성을 살펴보기 위하여 주축의 하우징부에 냉각자켓이

있는 부분에 길이 방향으로 3곳과 전·후반부 베어링부에 열전대를 설치하여 온도를 측정하고, 축심의 온도는 축의 전반부, 모터의 로터가 설치된 중앙부, 후반부의 각각 3곳을 외부에서 열전대를 사용하여 접촉식으로 측정하였다. 또한 주축 후반부 전면의 온도분포를 열상장치로 측정하였다. 경면선반의 가공정도에 영향을 미치는 열변위량은 절삭점인 선반의 척이 설치되는 부분에 측정용 지그를 설치하여 선반 자체의 Self-cutting을 실시한 후 주축의 3축방향인 지그의 반경방향 상부, 측면부 및 축방향 전반부에 변위센서를 설치하여 운전 중의 변형량을 연속적으로 측정하였다. 측정값은 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터를 사용하여 처리하였다. 주축의 회전정도는 주축선단 측정부의 형상오차의 영향을 줄이기 위해 측정부 전원도 0.11 $\mu$ m의 마스터볼을 주축선단에 장착하고 Runout을 측정하였다. 이때 A/D변환기를 통해 얻어지는 데이터수는 센서의 주파수특성과 측정회전수를 고려하여 1회전당 128개로 하였으며, 15회전성분을 연속측정하고 각각 FFT분석을 통하여 편심성분인 1산성분 및 정도에 거의 영향을 미치지 않는 20산성분 이상을 제거한 후 15회전성분의 평균값을 구해 Runout값으로 하였다. 측정에 있어 주축선단의 열변형 등에 의한 영향을 최소화하기 위해 각 회전수에서는 충분한 초기운전을 시킨후 안정화 영역에서 측정하였다.

실험조건을 요약하여 표 2에 나타내었다. 자켓 유냉각의 냉각유는 정도 2cSt이며, 설정온도는 15 $^{\circ}$ C이고 유량은 5.5l/min으로 주축선단부에서 후단부로 공급하였다. 압축공기에 의한 주축내부의 냉각은 5기압인 압축공기를 주축선단부에서 후단부로 공급하였다. 그림 3,4는 온도 및 변위의 측정 위치를 보여주고 있다.

실험은 주축의 운전시간에 따른 열특성을 파악하도록 수행하였다. 운전조건은 무부하상태에서 운전속도를 4000rpm, 6000rpm, 8000rpm으로 3단계로 증가시키며, 운전시간에 따라 온도상승량 및 열변형량을 측정하였다. 주축의 냉각방법으로 하우징부는 항상 자켓 유냉각을 사용하고, 주축내부는 압축공기 냉각의 부가여부에 따라 열특성을 살펴보았다.

표 2. 실험조건

주축의 회전수 [rpm]	4000, 6000, 8000
부 하 상 태	무 부 하
변위 측정시간 간격	연 속 측 정
온도 및 회전정도 측정시간 간격	10 분
실 험 시 간	120 분

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### (1) 모터내장형 주축의 온도특성

그림 5는 회전수 6000rpm에서 하우징 각 부의 시간에 따른 온도상승량의 변화를 보여주고 있으며, 실험조건은 주위온도 19 $^{\circ}$ C에서 냉각유의 온도를 15 $^{\circ}$ C로 설정하여 하우징 자켓 냉각만을 수행하였다. 냉각유의 온도상승은 약 3 $^{\circ}$ C 정도의 상승이 있으나 거의 하우징의 외부 온도변화와 일치하여 정적 평형상태에 도달하고 있음을 볼 수 있다.

주축시스템의 전반적인 열적 평형상태는 운전 시작 후 60분 정도가 경과하면 도달하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 향후 본 연구에서 개발된 경면선반의 시운전 시간은 최소 60분 정도가 필요하다. 전체시스템에서 측정된 부분 중에서 온도상승이 가장 높은 곳은 축심내부 모터의 로터가 위치한 부분으로 최대 38.5 $^{\circ}$ C

정도의 온도상승이 있고, 그 다음이 후반부 베어링이 위치한 부분으로 11 $^{\circ}$ C의 온도상승이 있으며, 냉각자켓이 설치된 부분에도 약 8 $^{\circ}$ C 정도의 온도상승이 이루어지고 있다.

그림 6은 그림 5와 같은 운전조건에서 주축내부에 압축공기 냉각을 추가함에 따른 열특성을 살펴본 것이다. 압축공기 냉각이 전반부 베어링부에서 후반부 베어링부로 이루어지고 있으므로 전반부 베어링부 및 축심은 압축공기의 냉각효과로 전반적으로 온도상승량이 줄어들었으나 후반부 베어링부는 오히려 전반부에서의 가열된 공기가 후반부에 영향을 미쳐 오히려 온도상승량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 후반부 베어링부의 최대온도상승량은 13 $^{\circ}$ C 정도로 압축공기를 공급하지 않은 경우에 비해 2 $^{\circ}$ C 정도 증가하고 있으나 축심의 온도상승량은 33 $^{\circ}$ C 정도로 압축공기를 공급하지 않은 경우보다 5 $^{\circ}$ C 정도 낮아짐을 볼 수 있다. 따라서 주축 내부의 상대적인 온도차이는 7 $^{\circ}$ C 이상으로 냉각조건에 따라 줄어짐으로 내부냉각 효과가 있음을 확인할 수 있다. 그러나 축심은 여전히 30 $^{\circ}$ C 정도의 온도상승이 이루어지고 있으므로 축심의 냉각에 대한 추가적인 고려가 필요함을 알 수 있다.

그림 7은 회전수에 따른 각 부의 온도상승량을 보여주고 있다. 이 그림에서 나타낸 측정점은 그림 4에서의 온도측정위치의 번호와 동일하며, 하우징부의 온도 중에서 온도상승에 관해 고찰이 필요하다고 판단되는 위치만을 나타내었다. 세 위치 모두 회전수에 따른 온도상승량의 변화는 크지 않으며, 냉각자켓이 설치되지 않은 1번과 5번의 베어링이 위치한 하우징부가 비교적 큰 온도상승을 나타내고 있음을 알 수 있다.

##### (2) 모터내장형 주축의 열변형 특성

그림 8, 9, 10은 시간에 따른 주축선단의 3축방향에 열변형량을 보여주고 있다. 운전속도는 6000rpm이고 하우징 자켓냉각만을 수행한 경우이다.

그림 8은 축하중방향인 X축방향의 열변형량을 보여주고 있으며, 운전영역에서 3 $\mu$ m 정도의 변형이 일어나고 있으며, 전 운전영역에서 거의 선형적으로 변형이 계속 일어남을 볼 수 있다. 그림 9는 축하중에 직각인 방향인 Y축방향의 열변형량을 보여주고 있으며, 변형량은 13 $\mu$ m 정도이다. 결과에서 알 수 있듯이 70분까지는 급격한 열변형이 이루어지고 그 이후는 거의 평형상태에 도달하고 있음을 보여주고 있다. 그림 10은 축방향인 Z축방향으로의 열변형량을 보여주고 있으며, 55 $\mu$ m 정도이고, 운전시작 후 40분정도가 지나면, 거의 평형상태에 도달함을 알 수 있다.

##### (3) 모터내장형 주축의 회전정도 특성

그림 11은 회전수 8000rpm으로 열적으로 안정화된 상태에서의 runout의 측정결과로 그림에서 (a)는 FFT처리 이전의 측정된 결과이고, (b)는 FFT처리를 통해 편심량 등을 제거하여 나타내었다. 그림에서 runout은 각각 0.43 $\mu$ m 및 0.15 $\mu$ m의 결과를 얻었다. 그림 12는 회전수의 변화에 따른 runout의 측정결과를 보여주고 있다. 주축의 runout은 회전수가 증가함에 따라 증가하는 경향으로 이는 불평형질량에 의한 원심력의 증가에 따른 결과로 보인다. 그러나 선삭의 경우 회전 동기성분인 1산 성분은 가공정도에 영향을 미치지 않으므로 FFT처리에 의한 1산성분을 제거한 경우의 회전정도는 회전수의 증가에 따른 영향을 받지 않고 거의 0.16 $\mu$ m의 안정적인 값을 나타내었다.

그림 13은 회전수 6000rpm에서 주축이 운전을 시작한 이후 시간에 따른 회전정도의 변화를 측정한 결과로 15회전 성분의 runout을 중첩하여 그린 것으로 runout의 밴드폭 즉 회전정도의 재현성을 의미하는 비반복오차를 나타낸 것이다. 운전초기에서의 비반복오차는 0.39 $\mu$ m의 값을 나타내고 있으나 운전후 40분이 경과한 후의 비반복오차는 0.51 $\mu$ m로 나빠진 것을 볼 수 있다. 이는

운전 초기에는 주축의 온도상승이 이루어지지 않아 축의 열변형이 거의 없는 상태로 설계시 계산된 양의 베어링예압이 작용하고 있으나 운전후 40분이 경과한 후에는 축심부의 온도상승이 높아 베어링의 내외륜의 온도차이를 나타낼 것으로 예상되며, 이에 따른 베어링의 예압변화에 의해 회전정도가 나빠지는 것으로 보인다.

그림 14는 회전수 4000rpm 및 8000rpm에서의 비반복오차를 나타낸 것으로 각각 0.32 $\mu$ m, 0.54 $\mu$ m를 나타내고 있다. 회전수가 증가함에 따라 비반복오차는 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 회전수의 증가에 따른 볼의 원심력의 증가로 운동궤적의 변화가 증가하는 것으로 해석된다.

### 5. 결 론

공작기계의 열변형 원인분석과 대책에 대해 검토하여 보았다. 실험에 사용된 공작기계는 정밀 CNC선반을 대상으로 하여 온도상승 및 열변형을 측정하였으며, 이에 따른 회전정도의 변화를 측정하였다. 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. CNC경면선반은 약 60분 경과후 정상상태에 도달함으로 시운전 시간은 최소 60분 정도가 필요함을 볼 수 있었다.
2. 주축내부에 압축공기 냉각을 실시할 경우 주축계 내부에 냉각효과가 있음을 확인하였다.
3. 모터내장형 주축부의 열변형량은 축방향으로 지배적으로 나타나고 있다.

4. 모터내장형 주축부의 회전정도는 축심의 열변형에 의한 영향이 크다.
5. 회전수가 증가함에 따라 비반복오차가 증가한다.

### 참고문헌

1. 中村晋哉, "工作機械主軸スピンドルの高性能化", 日本精密工學會誌, 57-4, PP.605, 1991
2. 趙成和, "工作機械の熱變形とその抑制に關する研究", 神戸大學博士學位論文, 1992
3. Nakamura, S. et al., "An Analysis on Influence of Motor Heat Generation and Effect of Shaft-bore Cooling for Motor Integrated Spindle" JSPE, Vol.60, No.7, pp.979, 1994
4. 이득우, 최대봉, 최현기, "공기냉각 모터내장형 주축계의 열거동에 관한 연구", 한국정밀공학회지 제 12 권, 8호, pp.86, 1995
5. 송영찬, 이득우, 최대봉, 김수태, "모터내장형주축의 냉각특성에 관한 연구" 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1995
6. 박천홍, 김인찬, 이후상, 이찬홍, "반전법을 이용한 정밀주축의 회전정도시스템 개발", 제3회 첨단생산시스템 Workshop, p250, 1995

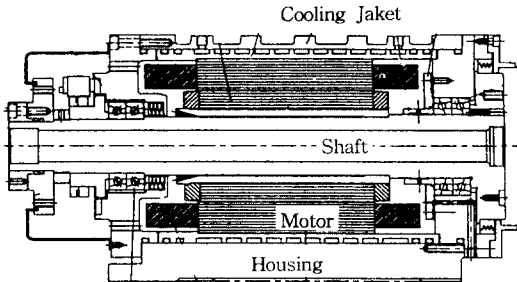


그림 1 경면선반용 모터내장형 주축의 조립도

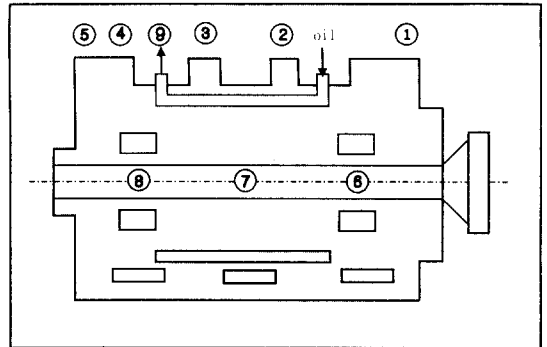


그림 3 주축의 온도 측정위치

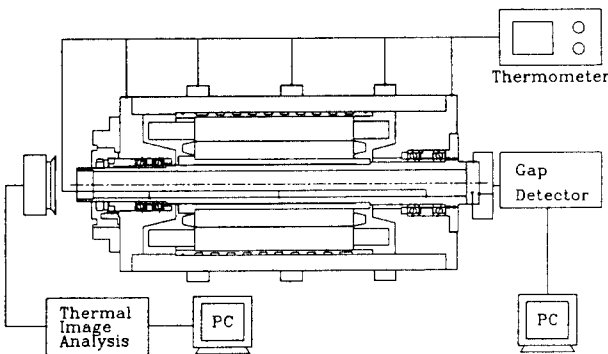


그림 2 주축 시험장치의 개략도

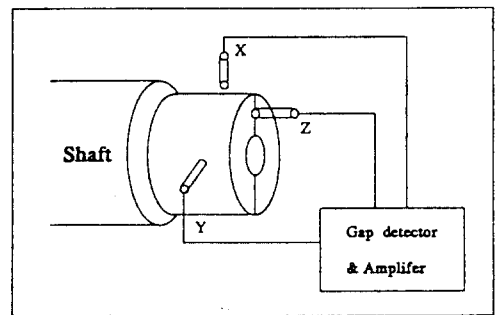


그림 4 주축의 변형 측정위치

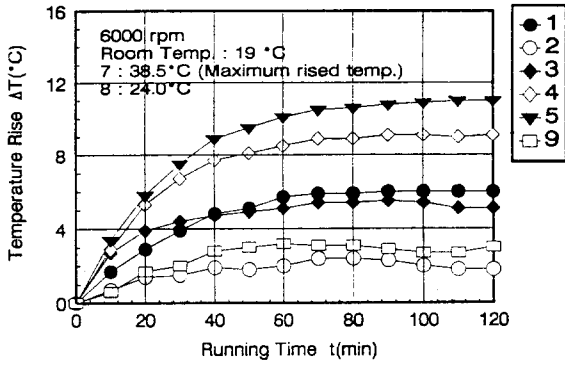


그림 5 주축부의 시간에 따른 온도상승량

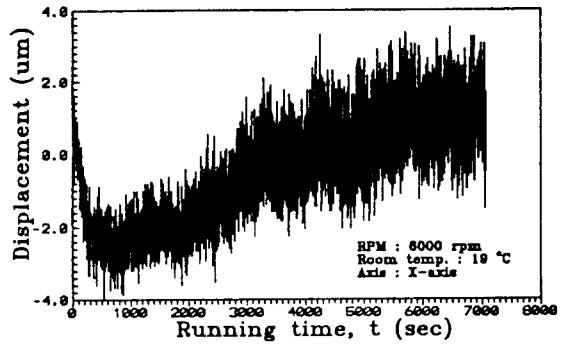


그림 8 운전시간에 따른 주축 선단의 열변형량(X축)

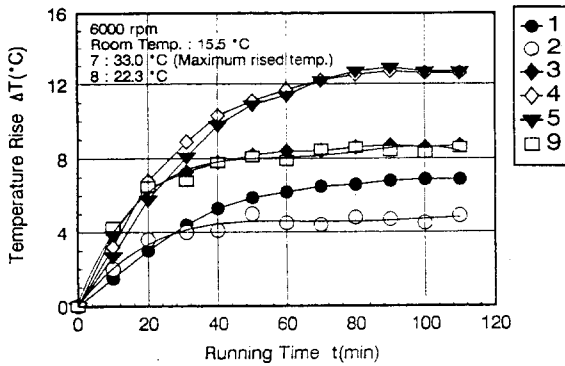


그림 6 주축부의 시간에 따른 온도상승량

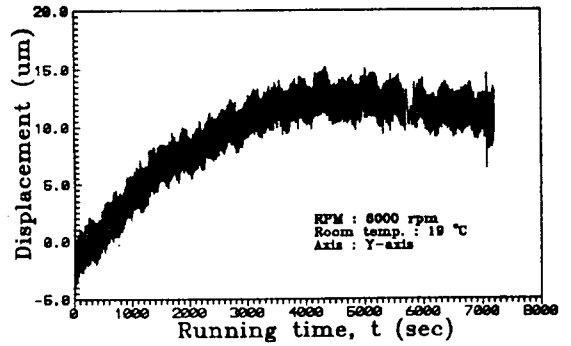


그림 9 운전시간에 따른 주축 선단의 열변형량(Y축)

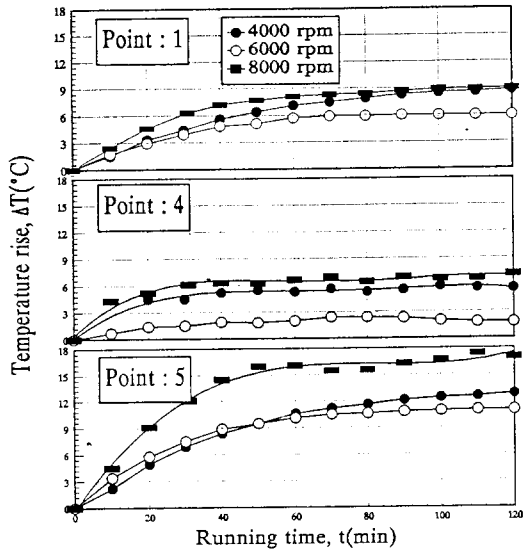


그림 7 회전수에 따른 주축 각부의 온도상승량

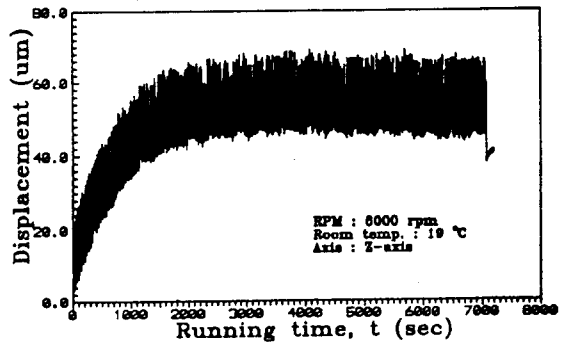


그림 10 운전시간에 따른 주축 선단의 열변형량(Z축)

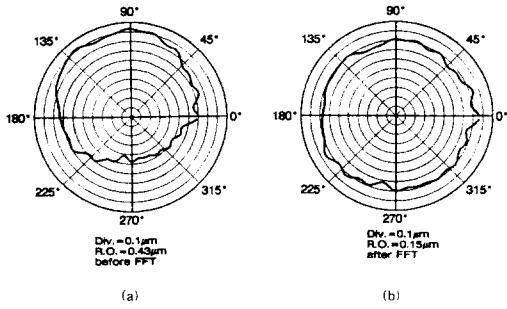
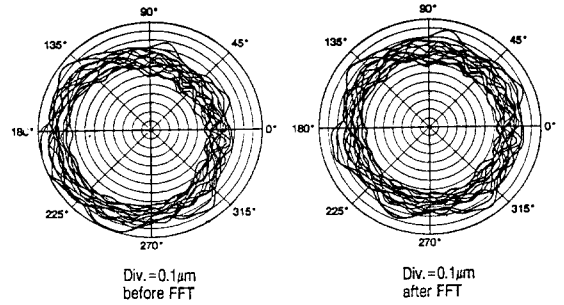


그림 11 주축의 회전정도 : 회전수 8000rpm



운전시작 직후

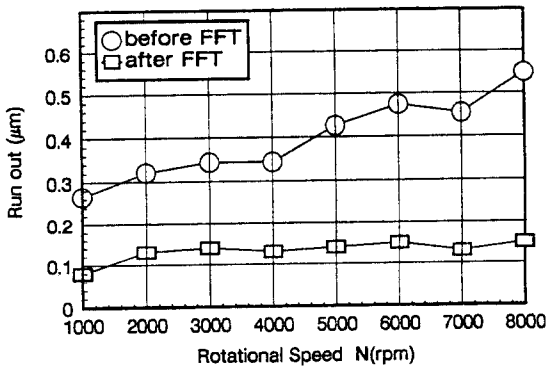
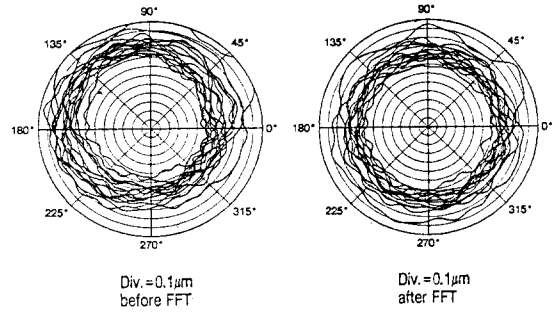


그림 12 회전수에 따른 회전정도의 변화



운전시작 40분 후

그림 14 회전수에 따른 회전정도의 비반복오차

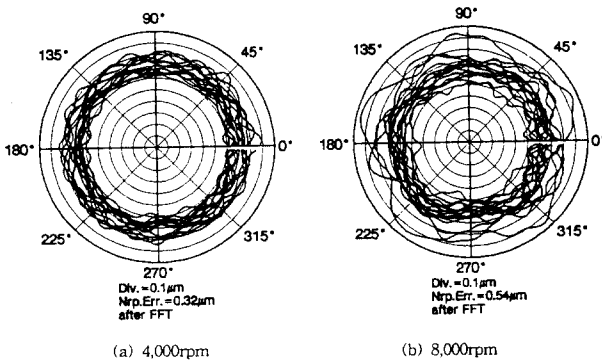


그림 13 운전시간에 따른 회전정도의 비반복오차