

경면가공용 고정밀CNC 선반 개발

(Development of A High Precision CNC Lathe for mirror surface)

박 천 홍, 이 후 상, 신 영 재(한국기계연구원), 이 군 석, 김 상 환(한화기계)

C. H. Park, H. S. Lee, Y. J. Shin(KIMM), G. S. Lee, S. H. Kim(Hanhwa Mach. Co.)

ABSTRACT

In this paper, A hydrostatic bearing spindle for high precision machining and a motor built-in spindle for high speed machining are developed to obtain the high precision machining accuracy of the prototype lathe. The sliding bearing with fluoric resin (turcite) pad is adopted for improving the damping characteristics of guide ways. The running accuracy of moving elements is estimated to confirm the validity of application on the prototype; the high precision CNC lathe.

The surface roughness of Copper and Aluminium machined by the hydrostatic spindle are $0.07\mu\text{m}$ and $0.10\mu\text{mR}_{\text{max}}$. The surface roughness of Aluminium machined by the built-in spindle are $0.10\mu\text{mR}_{\text{max}}$. From this results, it is verified that the prototype lathe is effective to high precision machining.

1. 서론

최근들어 가전, 광 정보산업용 각종 하이테크제품의 핵심부품인 드럼, 렌즈 및 렌즈금형등을 절삭가공만에 의해 고정밀도로 가공하고자 하는 수요가 급속히 증가하고 있다.

이러한 부품은 가공정밀도의 향상을 위해 절삭성이 좋은 연질 금속 즉 Al, Cu, Ni/P 등을 다이아몬드공구를 이용하여 가공하게 되며 이 때 사용되는 가공기의 운동특성이 가공표면의 조도 및 형상정밀도에 결정적인 영향을 주게 되므로 가공정도의 향상을 위해서는 주축, 안내면등 각 운동요소의 운동정밀도를 향상시킬 필요가 있다.

이를 위한 대표적인 예로 공기베어링주축, 안내면 및 레이저 간섭계에 의한 피드백제어시스템을 사용, 각각의 운동요소의 운동정도를 극대화시킨 초정밀가공기가 있으며 최근 국내에서도 각 운동요소 및 가공기에 관한 초정밀화 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1), 2)}

그러나 이러한 초정밀가공기들은 대부분 단일가공물의 가공정도 극대화에 초점을 맞추고 있으며 가격면에서도 상당히 고가이므로 VTR드럼 등과 같이 서브미크론대의 가공정밀도를 다량으로 생산하고자 하는 용도에는 적합하지 못한 특성을 지니고 있다.

실제로 VTR드럼 등의 고정밀도 부품의 대량 가공을 목적으로 개발된 고정밀선반의 예를 보면 볼베어링주축을 사용하고 이송계에는 $0.1\mu\text{m}$ 의 최소설정단위 및 레이저스케일을 이용한 피드백루프의 구성을 통해 일반 정삭가공에서 진원도 $0.2 \sim 0.3\mu\text{m}$, 표면조도 $0.2R_{\text{max}}$ 로 가공하고 있으며 주축의 허용회전수를 $10,000\text{rpm}$ 까지 고속화함으로써 생산성의 증기도 함께 겨냥하고 있다.³⁾

또한 다른 모델에 비해 큰 모터용량을 갖춤으로서 상대적으로 강력절삭이 가능하도록하여 생산성을 향상시키면서도 $\phi 75\text{mm}$ 의 쾌삭활동에 대해 $0.2\mu\text{m}$ 의 가공진원도를 나타내는 고정밀선반의 개발 예도 발표되고 있다.⁴⁾

본 연구에서는 이러한 고정밀선반에의 요구성능에 대응하기 위해, 고정도가공을 위한 유정압베어링주축(이하 유정압주축) 및 고속가공을 위한 모터내장형 볼베어링주축(이하 고속주축)등 두 가지 유형의 주축을 선택적으로 사용할 수 있어 고정밀, 고속의

경면가공이 가능한 선반시작품을 개발하고 성능평가하는 것을 목표로 하였으며 성능평가에 있어서는 시작품의 경면가공특성과 함께 요소의 운동정도를 함께 평가함으로써 유사한 모델의 개발이나 성능개선에 기초가 될 수 있는 자료를 제시하고자 하였다.

2. 가공기의 구성

2.1. 가공기의 제원

제작된 고정밀선반의 조립도를 Fig. 1에 나타내었다. 베드구조물은 용접구조로 되어 있으며 베드위에는 X축과 Z축이송계가 십자형으로 배치되어 있다. X축테이블은 최대 8개의 공구대를 일시에 부착할 수 있도록 되어 있고 컨트롤러는 FANUC 0TC를 사용하였으며 각 이송축의 최소이송분해능은 $0.1\mu\text{m}$ 로 되어 있다. 가공기의 제원을 정리하면 Table 1과 같다.

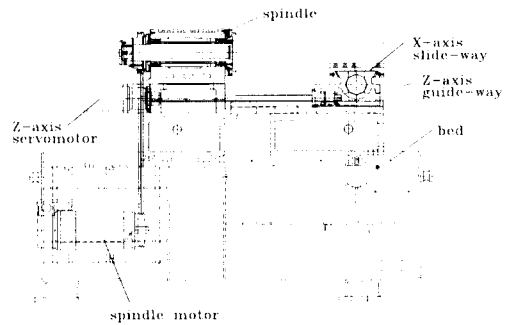


Fig. 1. Assembly of the prototype lathe

2.2. 각 운동요소의 구성

2.2.1. 모터내장형 주축

Fig. 2에 모터내장형주축의 조립도를 나타내었다. 전, 후부베어링에는 앵글러컨택트볼베어링을 각각 복렬로 사용하였으며 그리스윤활방식을 사용하고 있다. 전, 후부베어링 사이에 빌트인모터를 설치하여 최대 $8,000\text{rpm}$ 까지 회전이 가능하며 고속에 따른 예압의 변화를 방지하기 위해 후부베어링부에는 스프링을 이용

Table 1. Specifications of the prototype lathe

가공능력	베드상의 스윙	φ260 mm		
	최대가공물size	φ150 × 240 mm		
	최대chuck직경	6 inch		
	최대공구부착수	8개		
주축계	베어링 형식	앵귤러콘택트볼	유정압베어링	
	최대회전수	70-8,000rpm	70-3,000rpm	
	구동방식	빌트인모터	V벨트구동	
	모터용량	4.5/5.5kW	AC 3.7/5.5kW	
이송계	최대stroke (X, Z)	300 mm		
	급송이송속도 (X, Z)	12 m/min		
	절삭이송 속도	분당 이송	1 - 5,000 mm/min	
		회전당이송	0.0001 - 71.4000 mm/rev	
	최소설정단위 (X, Z)	0.0001 mm		
	모터용량 (X, Z)	DC 0.5, 1.0kW		
NC controller	FANUC-0TC (α series)			

한 정에압장치를 삽입하였다.

또한 고속에서의 냉각을 위해 하우징에는 냉각자켓을 설치하였으며 모터의 로터와 스테이터사이에 압축공기를 분사함으로써 주축 내부를 냉각하도록 하였다.

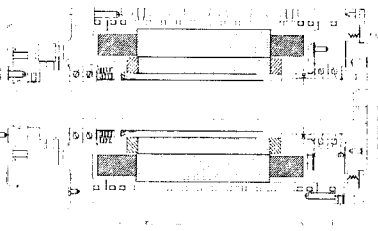


Fig. 2. Assembly of a built-in spindle

2.2.2 유정압주축

Fig. 3은 유정압주축의 조립도를 나타낸 것이다. 주축의 축방향 및 반경방향 모두에서 가공이 이루어지며 경질삭, 고정도가 공용이므로 전부저어널베어링의 양단에 스프리트베어링을 배열함으로써 주축의 열변형이 선단쪽으로 매우 적게 전달이 되고 대부분의 열변형은 후단쪽으로 전달되도록 하였다.

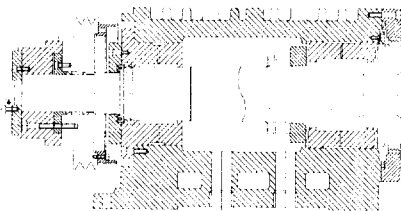


Fig. 3. Assembly of a hydrostatic spindle

주축의 구동은 듀플렉스형 V벨트에 의한 벨트구동형으로 하였다. 윤활유 공급유온의 변화가 베어링의 운동정도에 큰 영향을 미치므로 상대적으로 설정온도에 대해 ±0.5°C이내로 탱크유온을 제어할 수 있는 오일냉각장치를 윤활장치 탱크에 연결, 사용하였다.

주축용 유정압베어링 패드형상은 회전시의 온도상승등을 고려하여 multi-pad형으로 하였으며 이 형상의 이론해석을 위해서는 자체 개발한 유한요소 해석프로그램(JRSKY)⁵⁾을 사용하였다.

Table 2에 사용된 유정압베어링의 설계결과를 요약하였다.

Table 2. Designed performances of hydrostatic bearings

	직경(외경)	길이(내경)	부하용량	베어링강성
전부저어널	80mm	80mm	490kg	26kg/μm
후부저어널	65mm	60mm	300kg	14kg/μm
스프리트	115mm	85mm	280kg	20kg/μm

· 공급압력 25kg/cm², 설계편심율 0.1, 회전수 0rpm
()는 스프리트의 치수

2.2.3. 안내면 및 이송계

안내면의 동특성은 가공면의 조도에 직접적인 영향을 미치므로 본 가공기에는 제작이 비교적 용이하고 강성, 감쇠특성면에서도 우수한 타카이트(turcite)수지를 이용한 미끄럼안내면을 X, Z축에 모두 사용하였다.

안내면 이송용 볼스크류유는 C0급을 사용하였고 각각 고정-지지(X축), 고정-자유(Z축)방식에 의해 지지되어 있으며 위치결정은 양축 모두 엔코더를 이용하여 세미클로즈드루프 구조되어 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 주축선단의 정강성

주축 선단의 정강성은, 와이어로프사이에 로드셀을 설치한 후 로프의 상단은 고정용 빔에 설치된 스크류유에, 하단은 주축 선단에 연결하고 스크류유에 의해 하중을 가감하면서 그 때의 변위를 전기마이크로미터로, 하중값은 로드셀을 이용하여 측정하였다.

3.2. 주축의 회전정도

유정압주축은 회전운동의 반복오차(비재현성)가 매우 작으므로 Fig. 4의 반전법을 이용한 회전정도측정시스템⁶⁾을 이용하였으며 재현오차의 영향은 표준편차를 이용하여 나타내었다.

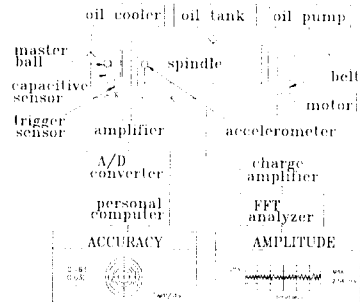


Fig. 4. Experimental apparatus by the reversal method

실제 측정에 있어서는 피측정면으로 사용될 마스터구를 원판에 접촉시켜 주축 선단에 조립하였으며 마스터구의 측정기준면의 진원도는 0.11μm이다.

측정용 센서로는 용량형센서(Pioneer PDG500, 분해능 10nm)를 사용하였으며 출력을 앰프 및 A/D 컨버터(RTI860, 200kHz)를 통해 PC로 받은 후 마스터구의 편심에 따른 영향을 없애기 위해 FFT해석을 통해 회전수 동기성분을 제거하였다.

측정시 샘플링데이터수는 1회전당 256개로 하였으며 반복오차를 확인하기 위해 15회전성분을 연속측정하였다. 측정범위는 센서의 주파수특성(10kHz)을 고려하여 1000 rpm이하로 한정하였다.

한편 고속주축의 회전정도는 볼의 형상오차 등에 의해 상대적으로 큰 반복오차가 예상되므로 1점에서의 런아웃을 측정하고 가공정도에 영향을 주지 않는 회전수동기성분을 FFT처리를 통

해 제거한 후 측정값으로 나타내었다. 이 때 8,000rpm까지의 고속에서의 회전정도 측정이 가능하도록 센서로는 윤량형센서(ADE, 분해능 10nm, 응답주파수 40kHz)를 사용하였으며 1회전당 샘플링데이터수는 128개로 하였다.

3.3. 이송계의 운동정도

실험에 있어 측정 항목은 X, Z축 각각에 대한 위치결정정도(반복정밀도 포함) 미소이송정도, 진직도등으로 하였다.

측정장치는 레이저간섭계(HP5527A, 분해능 0.01 μ m)를 사용하였으며 측정데이터는 GPIB보드(Philips)를 이용하여 PC로 저장하였다.

위치결정정도의 측정에 있어서는 ISO머시닝센터 검사규격에 의한 방법을 이용하여 170mm의 스트로크에 대해 5회 반복측정한 값으로 부터 통계값을 얻어 나타내었으며 진직도는 각 축에 대해 수평, 수직방향의 진직도를 측정하고 최소자승법을 이용하여 레이저간섭계의 설치오차를 제거하였다.

또한 이송계의 최소분해능을 알아보기 위해 컨트롤러상의 최소분해능인 0.1 μ m까지 펄스간격을 감소시켜가며 20펄스(펄스간격 5초)를 주었을 때의 응답특성을 측정하였다.

3.4. 경면절삭가공

주축의 특성에 따른 가공결과를 얻기 위해 유정압주축 및 고속주축을 교대로 장착하고 각각의 주축에 대해 다이아몬드공구에 의한 경면가공실험을 수행하였다.

사용된 바이트는 R0.8의 천연다이아몬드공구이며 공구설치각은 약 5 $^{\circ}$ 로 하였다. 절삭유는 사용하지 않았으며 절삭칩은 압축공기를 분사하여 제거하였다. 가공실험용 소재로는, Al(2218-T6) 및 Cu(C1012, 순도 99.95%)를 이용하였으며 형상은 외경 56mm, 길이 75mm의 원통형으로 하였다. 가공조건에 따른 경향을 파악하기 위해서 주축의 회전수 N 및 공구의 이송속도 f를 변수로 하여 실험하였으며 절입량 a는 0.01mm로 일정하게 설정하였다.

표면조도측정방법으로는, 측정거리를 0.08mm하여 동일방향으로 25회를 연속 측정(총측정길이 2mm)한 후 최소값 및 최대값으로부터 각각 3개를 제외한 19회 측정값에 대한 분포도를 구해 중심값을 대표치로 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 유정압주축

4.1.1 정강성

Fig. 5는 축 정지에서의 하중변화에 따른 주축 선단부의 변위를 측정된 결과로 하중대 변위특성은 전 범위에 걸쳐 비교적 선형성을 유지하고 있음을 보이고 있다. 측정범위에서의 측정값의 평균치는, 공급압력 15kg/cm 2 에서 강성 5.6kg/ μ m, 20kg/cm 2 에서 6.5kg/ μ m였으며 25kg/cm 2 에서는 7.4kg/ μ m를 나타내었다. 축이 회전하는 실제 절삭가공상태에서는 베어링에 동압효과가 발생, 부하용량 및 강성이 증가하게 되므로 가공시의 선단 강성은 측정값보다 클 것으로 예상된다.

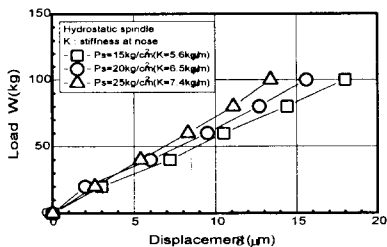


Fig.5. Stiffness of the hydrostatic spindle

4.1.2. 회전정도

Fig. 6은 회전수 1,000rpm에서 공급압력을 각각15, 25kg/ μ m 2 로

하였을 때의 반경방향 회전정도를 연속15회 측정, 중첩하여 나타낸 것이다. 측정결과로 부터 각 1회전성분에 대한 회전정도는 각각 0.07 μ m에서 0.17 μ m까지 다양하게 나타났으며 이것은 유정압베어링의 회전중심이 윤활유온도변화에 따라 미소하게 이동됨에 따른 비재현성 오차의 영향이다. 따라서 1회전성분의 데이터만으로 회전정도를 판별하기 어려우므로 그림에서와 같이 15회 연속측정한 값을 중첩하여 나타내고 그 때의 각각의 측정값의 오차평균을 회전정도 대표값으로, 통계치리에 의한 3 σ 를 오차범위로 정리하였다. Fig. 6으로 부터 회전정도는 0.09 μ m로 나타났으며 공급압력에 관계없이 일정한 회전정도값을 보이고 있어 본 주축의 경우 강성의 변화가 회전정도에 미치는 영향은 거의 없음을 확인하였다.

이상의 반경방향 회전정도의 측정결과를, 오차범위를 포함하여 요약하면 Table 3과 같다.

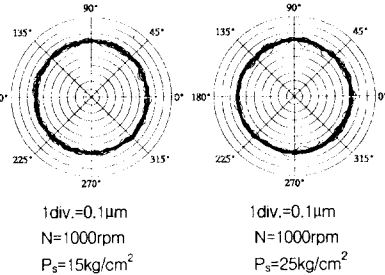


Fig. 6. Rotational accuracy of hydrostatic spindle

Table 3. Rotational accuracy of hydrostatic spindle

공급압력	500 rpm		1000 rpm	
	평균 회전정도	오차범위 (3 σ)	평균 회전정도	오차범위 (3 σ)
15kg/cm 2	0.09	0.05	0.09	0.05
25kg/cm 2	0.11	0.06	0.09	0.06

4.2. 고속주축

4.2.1. 정강성

Fig. 7은 모터내장형 주축의 선단에서의 정강성을 정지상태에서 측정된 결과를 나타낸 것으로 주축 선단 강성은 약 8.8kg/ μ m을 보였으며 선단의 변위는 하중에 선형적으로 비례하고 있음을 나타내고 있다. 실제로 주축의 사용시에는 공작물을 고정할 에 어척 및 공작물이 주축 선단부에 설치되어 오버행으로 작용하게 되므로 가공시의 주축 강성은 본 측정치에 비해 다소 감소할 것으로 예측된다.

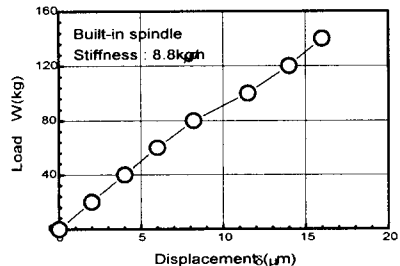


Fig. 7. Stiffness of the built-in spindle

4.2.2. 회전정도

Fig.8은 8000rpm까지의 회전수의 변화에 따른 FFT처리 이전(회전수동기성분을 제거하기 이전)의 측정값 및 FFT처리 이후

(회전수동기성분을 제거한 이후)의 런아웃의 측정결과를 나타낸 것으로 편심량을 제거하지 않은 런아웃은 회전수의 증가에 따른 주축 선단의 일련형의 영향으로 마스터볼의 편심량이 증가하여 런아웃이 커지는 경향을 보이고 있으나 편심량을 제거한 후의 런아웃은 전 회전수 범위에서 0.16 μm 이내의 안정된 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

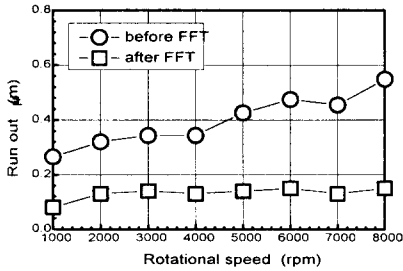


Fig. 8. Run-out of built-in spindle with speed

Fig.9는 회전수 4000rpm 및 8000rpm에서 각각 측정된 15회전 성분의 런아웃을 중첩하여 그린 것으로 런아웃의 밴드폭 즉 회전정도의 재현성을 의미하는 비반복오차는 0.32 μm 및 0.54 μm 를 나타내고 있음을 보이고 있으며 8,000rpm에서 비반복오차가 증가하는 것은 원심력의 증가로 베어링내 각각의 볼에 대한 운동 궤적이 증가함에 따른 영향으로 추정된다.

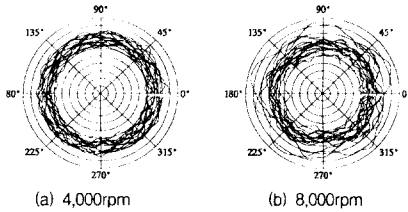


Fig. 9. Non-repeatable error of built-in spindle

4.3. 이송계의 운동정도

4.3.1. 위치결정정도 및 반복정도

Table 4에 X, Z축 이송계의 150mm스트로크에 대한 위치결정정도 및 반복정밀도 측정결과를 요약하였다.

Table 4. Positioning accuracy of feeding system

Performances		X-axis	Z-axis
Positioning accuracy	positive	4.72 μm	1.33 μm
	negative	4.41 μm	1.69 μm
	bidirectional	5.33 μm	1.74 μm
	mean reversal	-0.59 μm	-0.21 μm
Repeatability	positive mean	0.41 μm	0.17 μm
	negative mean	0.35 μm	0.21 μm
	bidirectional mean	1.34 μm	0.60 μm
	positive maximum	0.58 μm	0.27 μm
	negative maximum	0.54 μm	0.36 μm

X, Z축의 반복정도로 부터, 동일한 치수의 가공물을 연속가공하는 경우 발열 등에 의한 영향이 없으면 항상치수공차는 0.3 - 0.6 μm 의 범위에 들 수 있음을 예측할 수 있다.

4.3.2. 미소이송정도

Fig.10은 X축 이송계의 미소이송단위를 0.1 및 0.3 μm /스텝으로 하였을 때의 20스텝에 대한 응답을 측정된 결과로 0.3 μm /스텝에서는 매우 안정된 응답특성을 보이거나 0.1 μm /스텝이 되면 스틱슬

립현상이 일어남을 보이고 있으며 이러한 현상은 Z축에서도 나타나고 있어 본 가공기 이송계의 미소이송정도는 0.3 μm 라고 할 수 있다.

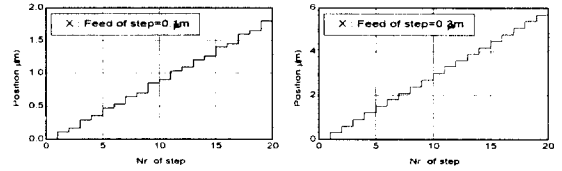


Fig.10. Micro step response of X-axis feeding system

4.3.3. 진직도

Fig.11은 X축, Z축의 170mm스트로크에 대한 수평방향 및 수직방향의 진직도를 측정된 것이며 본 가공기의 구조상 특히 수평방향성분은 가공물의 진직도와 같은 형상정도에 직접 영향을 미치는 성분이다. 측정결과로 부터 본 시작품을 이용하여 가공하는 경우 이송테이블이 가공물의 형상정도에 미치는 영향은 축방향, 직경방향 모두 약 0.8 μm 정도임을 알 수 있다.

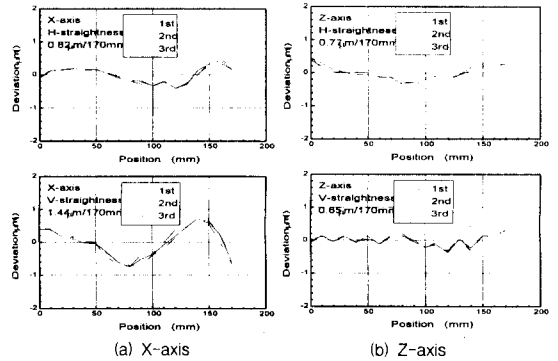


Fig. 11. Straightness of guide way

4.4. 경면절삭가공

4.4.1. 유정압주축에 의한 경면가공

Fig.12에 유정압주축에 의한 순동의 경면가공 실험결과를 정리하여 나타내었다.

먼저 공구의 이송속도를 0.005 mm/rev로 설정하고 유정압주축의 사용 최고회전수(3,000rpm)에 근접한 2,500rpm으로 부터 회전수를 감소시켜가며 가공실험을 수행하였다

Fig.12(a)는 그 결과를 나타낸 것으로, 회전수가 감소함에 따라 표면조도는 향상됨을 보이고 있으며 1,250rpm에서 유정압주축에서의 가공목표치인 0.1 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 에 접근하는 경향을 나타내었다.

Fig.12(b)는 이송속도의 영향을 알아보기 위하여 회전수를 1,250rpm으로 고정하고 이송속도를 0.001mm/rev까지 감소시켰을 때의 가공결과로, 이송속도가 감소함에 따라 표면조도가 다소 향상됨을 알 수 있으며 이송속도 0.001mm/rev에서 최대 0.10 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 까지의 표면조도를 얻을 수 있었다.

Fig.12(c)는 표면조도를 보다 향상시키기 위하여 이송속도를 0.001mm/rev로 고정하고 회전수를 800rpm까지 다시 감소시켰을 때의 가공결과로, 회전수 800rpm에서 표면조도는 최대 0.07 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 까지 향상됨을 알 수 있었다.

Fig.13은 이 때의 측정길이 2mm에 대한 표면조도 및 진원도의 측정결과를 나타낸 것으로 0.25 μm 의 진원도를 얻을 수 있었다.

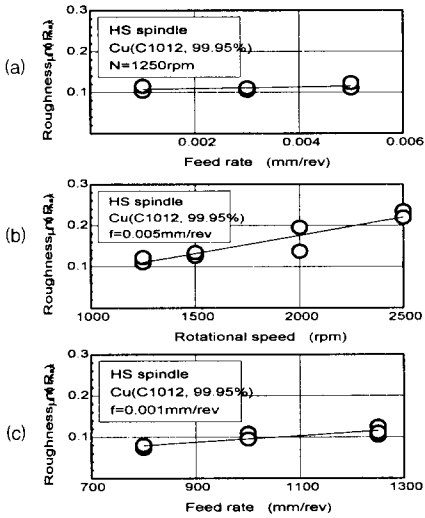


Fig.12. Roughness of Cu (by hydrostatic spindle)

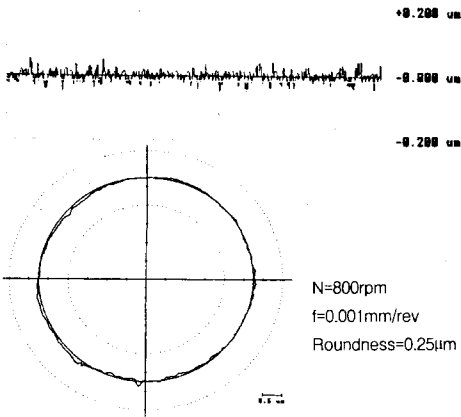


Fig.13. Measured roughness and roundness

Fig.14는 같은 방법으로 알루미늄소재(2218-T6)를 가공한 실험 결과를 정리한 것으로 순동에 대한 실험에서와 마찬가지로 회전수가 감소함에 따라 조도가 크게 향상되는 경향을 보였고 회전수 800rpm에서 최대 0.106 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 를 나타내었으며 이 때의 가공면 진원도는 0.3 μm 를 나타내었다.

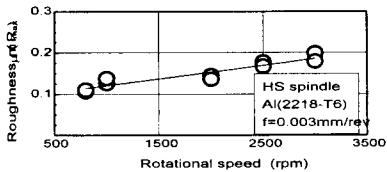


Fig.14. Roughness of Al (by hydrostatic spindle)

유정압주축의 회전수가 증가함에 따라 표면조도가 나빠지는 경향은 회전수가 상승함에 따라 주축을 구동하는 벨트의 요동(fluctuation)이 커져 유정압주축의 비반복오차값을 악화시키기 때문으로 추정되며 상대적으로 영향이 적은 플로팅타입폴리나, 빌트인모터에 의한 직접구동 등을 적용할 경우 가공조도는 더욱 향상될 수 있음을 추측할 수 있었다.

4.4. 고속주축에 의한 경면가공

Fig.15는 고속주축을 장착하였을 때의 알루미늄소재에 대한 경면가공 실험결과를 정리한 것으로 실험에 있어 이송속도는 0.003mm/rev으로 고정하고 빌트인모터의 기저속도인 1,000rpm에서부터 회전수를 1,000rpm씩 증가시켜가며 가공하였다. 측정결과로부터 회전수가 증가함에 따라 표면조도는 향상되는 경향을 보였으며 3,000rpm에서는 0.107 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 를 나타내었고 진원도는 0.45 μm 를 나타내었다.

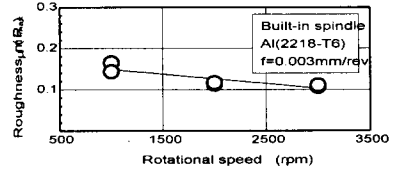


Fig. 15. Roughness of Al (by built-in spindle)

5. 결론

본 연구에서는 선반에 의한 고정밀가공시에 가공정도에 크게 영향을 미치는 주축 운동정도의 고정도화 및 안내면의 고감쇠, 고정도화를 꾀함으로써 시작품 선반의 가공정도향상을 실현하고자 하였다.

주축의 고정도화를 위한 선반용 유정압주축 모델을 설계, 제작하고 경면가공 및 고속가공이 가능하도록 모터내장형주축도 설계, 제작하였으며 안내면은 타카이드수지를 이용하여 제작함으로써 감쇠능향상에 의한 가공조도의 향상을 시도하였다. 또한 각 요소의 성능평가를 통해 경면가공에의 적용 타당성을 검증하였다.

고정밀가공용 유정압주축을 이용하여 경면가공실험을 수행한 결과 순동(C1012, 99.95%)에 대해서는 0.07 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$, Al(2218-T6)재료에 대해서는 0.10 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 까지의 조도를 얻을 수 있었으며 고속가공용 모터내장형 주축을 이용하여 가공한 결과에서도 Al재료에 대해 0.10 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 까지의 조도를 얻을 수 있어 시작품선반은 고정밀가공에 매우 적합하고 안정적인 성능을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 목적이 주로 하드웨어적인 요소 개발에 있었으므로 바이트형상, 절삭유, 가공조건 등의 영향을 크게 고려하지 않아 이 부분의 보완이 이루어지면 본 시작품에 의한 가공정밀도는 더욱 향상될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 이후상 외 3인, "초정밀가공기 시작품제작 및 성능평가", 대한기계학회춘계학술대회논문집, pp.762-766, 1993
2. 이재운 외 2인, "초정밀비구면가공기의 설계", 제3회첨단생산시스템Workshop, pp.244-249, 1995
3. 江黑, "CNC旋盤-Super NUCACE-102GL", catalog
4. 津上, "CNC旋盤-PL3B", catalog
5. 박천홍 외 2인, "점도변화를 고려한 유정압저널베어링의 정특성해석", 대한기계학회춘계학술대회초록집(II), pp.154-157, 1989
6. 박천홍 외 3인, "반전법을 이용한 정밀주축의 회전정도측정시스템 개발", 한국정밀공학회지, 12권13호, pp.168-174, 1995