

경면가공용 고정밀CNC 선반 개발

박 천 홍*, 이 후 상*, 신 영 재*, 이 군 석**, 김 춘 배**

Development of a High Precision CNC Lathe for Mirror Surface Machining

C. H. Park*, H. S. Lee*, Y. J. Shin*, G. S. Lee**, C. B. Kim**

ABSTRACT

In this paper, the development of a precision CNC lathe prototype for mirror surface machining is presented. To obtain high precision machining accuracy, a hydrostatically supported precision spindle and a sliding guideway with turcite pad are adopted as the motion elements. The machining accuracy of the prototype machine, and the motional accuracy of its motion elements are tested and evaluated to confirm the validity of the application of these elements on the prototype. The hydrostatic spindle shows $0.09\mu\text{m}$ of rotational accuracy and the guideway shows about $0.8\mu\text{m}/170\text{mm}$ of horizontal straightness. The surface roughness of copper and aluminium cylinder machined by the prototype machine with diamond tool are $0.07\mu\text{m}$ and $0.10\mu\text{m}$ Rmax respectively. From these results, it is verified that the prototype lathe is available for high precision machining.

Key Words: High precision lathe(고정밀 선반), mirror surface(경면), hydrostatic bearing(유정압베어링), rotational accuracy(회전정도), straightness(진직도), machining accuracy(가공정밀도)

1. 서 론

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 연질금속 즉 Al, Cu, Ni/P 등을 다이아몬드공구를 이

용하여 가공하게 되며 이 때 사용되는 가공기의 운동특성이 가공표면의 표면거칠기 및 형상정밀도에 결정적인 영향을 주게 되므로 가공정도의 향상을 위해서는 주축, 안내면 등 각 운동요소의 운동정밀도를 향상시킬 필요가 있다.

이를 위한 대표적인 예로 공기베어링 주축, 안내면 및 레이저간섭계에 의한 피이드백 제어시스템을 사용, 각각의 운동요소의 운동정도를 극대화시킨 초정밀가공기가

* 한국기계연구원 공작기계그룹

** 한화기계(주) 연구소

있으며 최근 국내에서도 각 운동요소 및 가공기에 관한 초정밀화 연구가 활발히 진행되고 있다.^{(1), (2)}

그러나 이러한 초정밀가공기들은 대부분 단일 가공물의 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 μ m의 최소 설정단위 및 레이저 스케일을 이용한 피드백루프의 구성을 통해 일반 정삭가공에서 진원도 0.2 ~ 0.3 μ m, 표면거칠기 0.2 μ mR_{max}로 가공하고 있으며 주축의 허용회전수를 10,000rpm까지 고속화함으로써 생산성의 증가도 함께 겨냥하고 있다.⁽³⁾

또한 다른 모델에 비해 큰 모터용량을 갖춤으로서 상대적으로 강력절삭이 가능하도록 하여 생산성을 향상시키면서도 ϕ 75mm의 쾌삭황동에 대해 0.2 μ mR_{max}의 가공진원도를 나타내는 고정밀선반의 개발 예도 발표되고 있다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 이러한 고정밀선반에의 요구성능에 대응하기 위해, 유정압베어링 주축(이하 유정압주축) 및 다키아트수지를 이용한 미끄럼안내면을 이용함으로써 고정밀경면가공시에 가공정도에 크게 영향을 미치는 주축 운동정도의 고정도화 및 안내면의 고감쇠, 고정도화를 꾀하여 시작품 선반의 가공정도향상을 실현하고자 하였다. 또한 시작품 선반의 경면가공 특성과 함께 각 요소의 운동정도를 평가함으로써 경면가공에의 적용 타당성을 검증하고 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 용접구조에 콘크리트를 충전시킨 구조로 되어 있으며 베드위에는 X축과 Z축이송계가 십자형으로 배치되어 있다. X축 테이블은 최대 8개의 공구대를 일시에 부착할 수 있도록 되어 있고 컨트롤러는 FANUC 0TC를 사용하였으며 각 이송축의 최소 이송 분해능은 0.1 μ m로 되어 있다. 가공기의 제원을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of the prototype lathe

가공능력	베드상의 스윙	ϕ 260 mm	
	최대가공물size	ϕ 150 × 240 mm	
	최대chuck직경	6 inch	
	최대공구부착수	8개	
주축계	베어링 형식	유정압	
	최대회전수	70-3,000rpm	
	구동방식	V벨트구동	
	모터용량	AC 3.7/5.5kW	
이송계	최대stroke (X, Z)	200, 300 mm	
	급송이송속도 (X, Z)	12 m/min	
	절삭이송속도	분당 이송	1 - 5,000 mm/min
		회전당 이송	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)		

2.2. 각 운동요소의 구성

2.2.1 유정압주축

Fig. 2는 유정압주축의 조립도를 나타낸 것이다. 주축의 축방향 및 반경방향 모두에서 가공이 이루어지고 경절삭, 고정도가공용이므로 주축 강성의 극대화보다는 온도상승의 극소화, 특히 전부저어널베어링의 온도상승을 억제할 수 있도록 베어링간극을 설계하였으며 하우징의 직경을

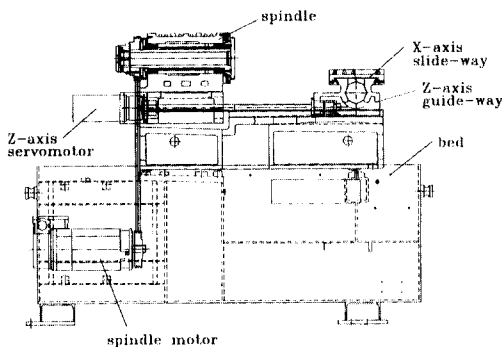


Fig. 1 Assembly of prototype machine

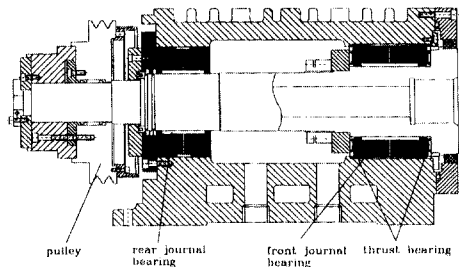


Fig. 2 Assembly of a hydrostatic spindle

가능한 한 작게 하고 조립이 용이하도록 스러스트베어링의 양 패드를 전부저어널베어링의 양단에 설치하였다. 주축

3. 실험장치 및 방법

Table 2. Designed performances of hydrostatic bearings

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

* 공급압력 25kg/cm², 설계편심율 0.1, (): 스러스트베어링

의 구동은 듀플렉스형 V벨트에 의한 벨트구동형으로 하였다. 윤활유 공급유온의 변화가 베어링의 운동정도에 큰 영향을 미치므로 상대적으로 설정온도에 대해 ±0.5°C 이내로 탱크유온을 제어할 수 있는 오일냉각장치를 윤활장치 탱크에 연결, 사용하였다. 주축용 유정압베어링 패드형상은 회전시의 온도상승등을 고려하여 multi-pad형으로 하였으며 이 형상의 이론해석을 위해서는 자체 개발한 유한요소해석 프로그램(JRSKY)⁽⁵⁾을 사용하였다.

Table 2에 사용된 유정압베어링의 설계결과를 요약하였다.

2.2.2. 안내면 및 이송계

안내면의 동특성은 가공면의 표면거칠기에 직접적인 영향을 미치므로 본 가공기에는 제작이 비교적 용이하고 강성, 감쇠특성면에서도 우수한 타카이드(turcite)수지를 이용한 미끄럼안내면을 X, Z축에 모두 사용하였으며 안내면의 구조는 도브레일형으로 하였다.

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

3.1. 주축선단의 정강성

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

3.2. 주축의 회전정도

유정압주축은 회전운동의 비반복오차가 매우 작으므로 Fig. 3의 반전법을 이용한 회전정도 측정시스템⁽⁶⁾을 이용하였으며 비반복오차의 영향은 표준편차를 이용하여 나타내었다. 실제 측정에 있어서는 피측정면으로 사용될 마스터구를 원판에 접촉시켜 주축 선단에 조립하였으며 마스터구의 측정기준면의 진원도는 0.11mm이다. 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 동기성분(1산성분)을 제거하였다. 측정시 샘플링데이터수는 1회전당 256개로 하였으며 비반복오차를 확인하기 위해 15회전성분을 연속 측정하였다. 측정범위는 센서의 주파수 특성(10kHz)을 고려하여 1000 rpm이하로 한정하였다.

3.3. 이송계의 운동정도

실험에 있어 측정 항목은 X, Z축 각각에 대한 위치결정정도(반복정밀도 포함), 미소이송정도, 진직도등으로 하였다. 측정장치는 레이저간섭계(HP5527A, 분해능 0.01μm)를 사용하였으며 측정데이터는 GPIB보드(Philips)를 이용하여 PC로 저장하였다.

위치결정정도의 측정에 있어서는 ISO머시닝센터 검사규격에 의한 방법을 이용하여 170mm의 스트로크에 대해 5회 반복 측정된 값으로부터 통계값을 얻어 나타내었다. 또한 이송계의 미소이송특성을 알아보기 위해 컨트롤러상의 최소분해능인 0.1μm까지 펄스간격을 감소시켜가며 20펄스(펄스간격 5초)를 주었을 때의 응답특성을 측정하였다.

3.4. 경면질삭가공

주축의 특성에 따른 가공결과를 얻기 위해 유정압주축을 장착하고 다이아몬드공구에 의한 경면가공실험을 수

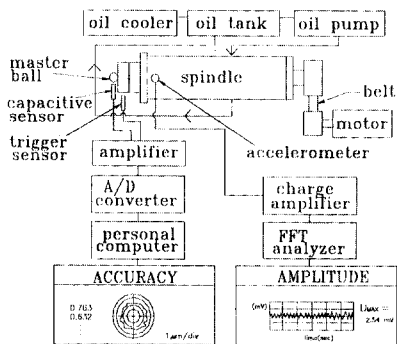


Fig. 3 Experimental apparatus by the reversal method

행하였다. 사용된 바이트는 R0.8의 천연다이아몬드공구이며 공구 설치각은 약 5°로 하였다. 절삭유는 사용하지 않았으며 절삭칩은 압축공기를 분사하여 제거하였다. 가공실험용 소재로는, Al(2218-T6) 및 Cu(C1012, 순도 99.95%)를 사용하였으며 형상은 외경 56mm, 길이 75mm의 원통형으로 하여 원통면에 대한 가공실험을 수행하였다. 가공조건에 따른 경향을 파악하기 위해서 주축의 회전수 및 공구의 이송속도를 변수로 하여 실험하였으며 절삭깊이는 0.01mm로 일정하게 설정하였다.

표면거칠기 측정방법으로는, 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 주축선단의 정강성

Fig. 4는 축 정지시 하중변화에 따른 주축 선단부의 변위를 측정된 결과로 하중대 변위특성은 전 범위에 걸쳐 비교적 선형성을 유지하고 있음을 보이고 있다. 측정범위에서의 측정값의 평균치는, 공급압력 15kg/cm²에서 강성 5.6kg/μm, 20kg/cm²에서 6.5kg/μm였으며 25kg/cm²에서는 7.4kg/μm를 나타내었다. 축이 회전하는 실제 절삭가공 상태에서는 베어링에 동압효과가 발생, 부하용량 및 강성이 증가하게 되므로 가공시의 선단 강성은 측정값보다 클 것으로 예상된다.

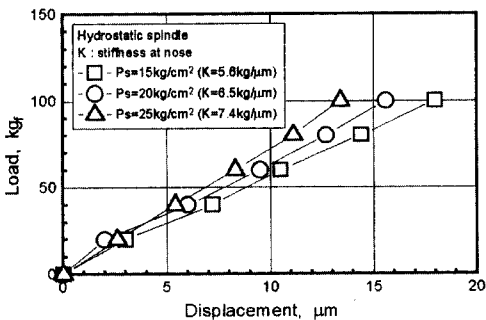


Fig.4 Stiffness of the hydrostatic spindle

4.2 회전정도

Fig. 5는 회전수 1,000rpm에서 공급압력을 각각 15, 25kg/μm²로 하였을 때의 반경방향 회전정도를 연속15회

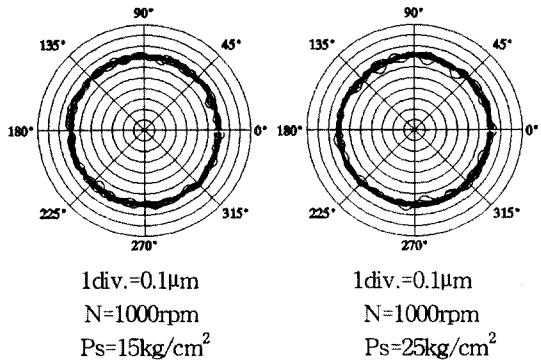


Fig. 5. Rotational accuracy of hydrostatic spindle

Table 3. Rotational accuracy of hydrostatic spindle

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

측정, 중첩하여 나타낸 것이다. 측정결과로부터 각 1회 전성분에 대한 회전정도는 각각 0.07μm에서 0.17μm까지 다양하게 나타났으며 이것은 유정압베어링의 회전중심이 윤활유온도변화에 따라 미소하게 이동됨에 따른 비반복성 오차의 영향이다. 따라서 1회전성분의 데이터만으로 회전정도를 판별하기 어려우므로 그림에서와 같이 15회 연속 측정된 값을 중첩하여 나타내고 그 때의 각각의 측정값의 오차평균을 회전정도 대표값으로, 통계처리에 의한 3σ를 오차범위로 정리하였다. Fig. 5로 부터 회전정도는 0.09μm로 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.

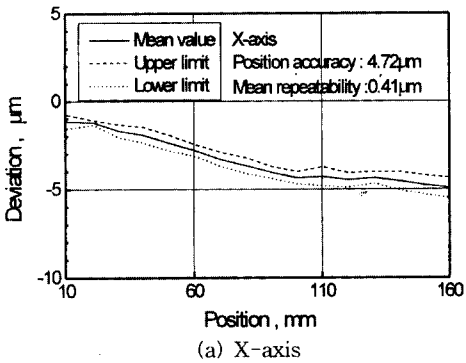
4.3 이송계의 운동정도

4.3.1 위치결정정도 및 반복정밀도

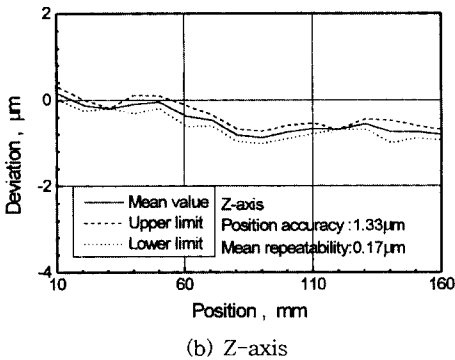
Fig. 6은 이송속도 100mm/min로 구동하였을 때의 X, Z축의 정방향(절삭방향)에 대한 위치결정정도 및 반복정밀도를 측정된 결과를 나타낸 것으로 실선은 5회 측정값의 평균값이며 점선 및 은선으로 표시된 상, 하한값

은 각 위치에서의 편차값의 한계, 즉 반복정밀도의 상, 하한값을 나타내고 있다. 그림으로부터, 본 시작품의 볼스크류가 고정-지지(X) 및 고정-자유(Z)형으로 설치되어 있어 상대적으로 고정-고정형에 비해 볼스크류의 굽힘강성이 작아지고 이에 따라 구동시의 마찰토크의 변동성분이 작아져 엔코더 펄스에 대한 추종성이 향상되기 때문에, 위치결정정도 4.72 μm (X), 1.33 μm (Z), 반복정밀도 $\pm 0.41\mu\text{m}$ (X), $\pm 0.17\mu\text{m}$ (Z)로 우수하게 나타나고 있음을 알 수 있으며 이로 부터 본 시작품에 사용된 타카이드 패드 안내면 및 볼스크류에 의한 이송계를 고정밀가공에 적용 가능함을 알 수 있다.

한편 이송계 볼스크류의 열변형특성을 알아보기 위해 이송속도 100mm/min에서 2시간동안 연속구동시의 위치결정정도의 변화를 측정하였으나 양축 모두 위치결정정도의 변화는 거의 없었으며 실제 절삭가공시의 최대이송속도가 25mm/min정도인 점을 감안하면 본 이송계에 있어 볼스크류의 열변형에 의한 영향은 무시해도 좋을 것으로 판단된다.



(a) X-axis

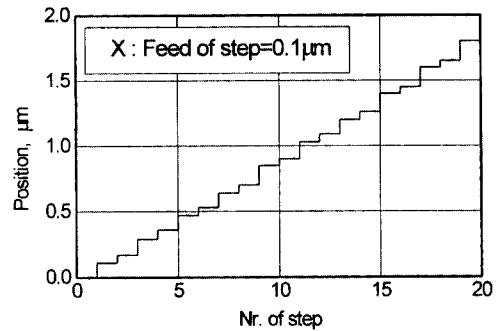


(b) Z-axis

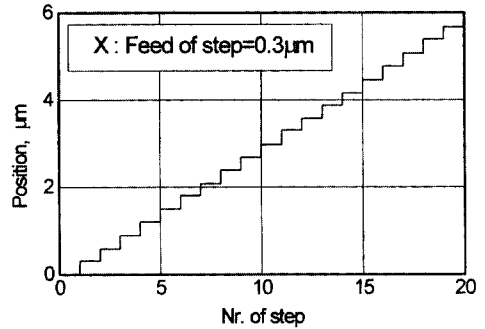
Fig.6 Positioning accuracy & repeatability of guideways

4.3.2. 미소이송정도

Fig. 7은 X축 이송계의 미소이송단위를 0.1 및 0.3 μm /스텝으로 하였을 때의 20스텝에 대한 응답을 측정할 결과로 0.3 μm /스텝까지는 매우 안정된 응답특성을 보이 나 0.1 μm /스텝이 되면 스틱슬립으로 추정되는 현상이 일어남을 보이고 있으며 이러한 현상은 Z축에서도 동일하게 나타나고 있어 이송계의 구별가능한 미소이송정도는 양축 모두 0.3 μm 임을 확인하였다.



(a) 0.1 μm /step



(b) 0.3 μm /step

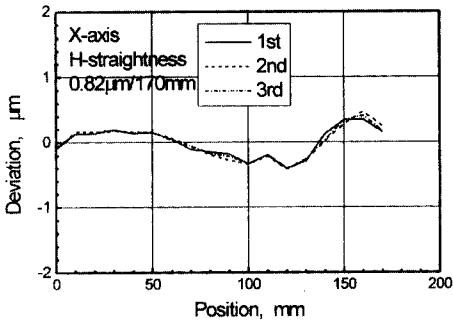
Fig.7 Micro step response of X-axis feeding system

4.3.3. 진직도

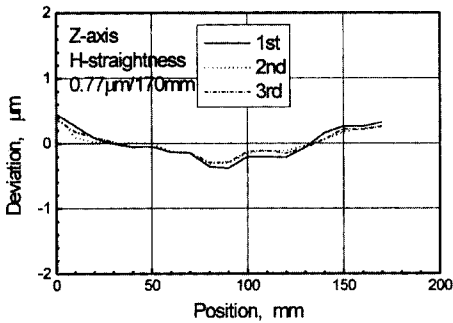
Fig. 8은 본 가공기의 구조상 특히 가공물의 진직도와 같은 형상정도에 직접 영향을 미치는 X축, Z축의 수평방향 진직도를 동일한 위치에 대해 3회측정한 결과이다. 그림으로부터 진직도 측정값은 재현성이 있음을 확인하였으며 양 축에 대한 수평방향 진직도는 각각 0.82 $\mu\text{m}/170\text{mm}$ (X), 0.77 $\mu\text{m}/170\text{mm}$ (Z)로 매우 양호한 상태를 보이고 있음을 알 수 있다. 한편 X축의 경우 베어링 지지부가 고정-지지형으로 지지되고 있어 양단에서 볼스

크류의 조립오차가 진직도에 영향을 미치는 결과(상대적으로 테이블 강성에 대한 볼스크류 굽힘모멘트의 증가에 의해 양단에서 진행방향이 바뀌는 현상)를 보이고 있으며 고정-자유로 지지되어 있고 스트로크가 상대적으로 긴 Z축의 측정결과에 있어서는 볼스크류 조립오차의 영향은 보이지 않고 있다.

측정결과로부터 본 시작품을 이용하여 가공하는 경우 이송테이블이 가공물의 형상정도에 미치는 영향은 축방향(Z), 직경방향(X) 모두 약 0.8 μ m정도임을 알 수 있다.



(a) X-axis



(b) Z-axis

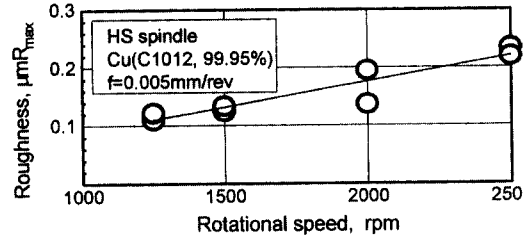
Fig. 8 Horizontal straightness of guideways

4.4. 경면절삭가공

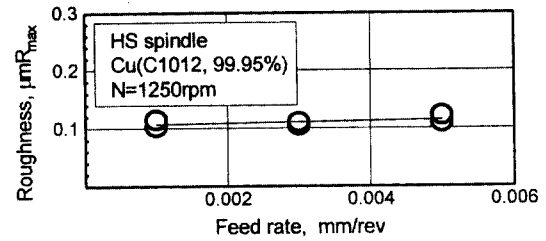
Fig. 9는 본 시작품을 이용하여 가공한 순동의 경면가공 실험결과를 정리하여 나타낸 것이다.

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

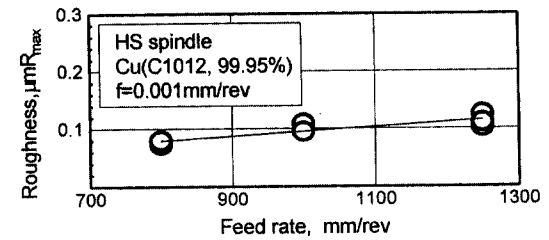
Fig. 9(a)는 그 결과를 나타낸 것으로, 회전수가 감소함에 따라 표면거칠기는 향상됨을 보이고 있으며



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Roughness of copper(C1012)

1,250rpm에서 유정압주축에서의 가공목표치인 0.1 μ mR_{max}에 접근하는 경향을 나타내었다. Fig. 9(b)는 이송속도의 영향을 알아보기 위하여 회전수를 1,250rpm으로 고정하고 이송속도를 0.001mm/rev까지 감소시켰을 때의 가공결과로, 이송속도가 감소함에 따라 표면거칠기가 다소 향상됨을 알 수 있으며 이송속도 0.001mm/rev에서 최대 0.10 mR_{max}까지의 표면거칠기를 얻을 수 있었다. Fig. 9(c)는 표면거칠기를 보다 향상시키기 위하여 이송속도를 0.001mm/rev로 고정하고 회전수를 800rpm까지 다시 감소시켰을 때의 가공결과로, 회전수 800rpm에서 표면거칠기는 최대 0.07 μ mR_{max}까지 향상됨을 알 수 있었다.

Fig. 10은 이 때의 측정길이 2mm에 대한 표면거칠기 및 진원도의 측정결과를 나타낸 것으로 0.25 μ m의 진원도를 얻을 수 있었다.

5. 결론

Fig.11은 같은 방법으로 알루미늄 소재(2218-T6)를 가공한 실험결과를 정리한 것으로 순동에 대한 실험에서와 마찬가지로 회전수가 감소함에 따라 표면거칠기가 크게 향상되는 경향을 보였고 회전수 800rpm에서 최대 $0.106\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 를 나타내었으며 이 때의 가공면 진원도는 0.3 m를 나타내었다. 유정압주축의 회전수가 증가함에 따라 표면거칠기가 나빠지는 경향은 회전수가 상승함에 따라 주축을 구동하는 벨트의 요동(fluctuation)이 커져 유정압주축의 비반복오차값을 악화시키기 때문으로 추정되며, 이러한 경향은 상대적으로 영향이 적은 플로팅타입 풀리나, 벨트모터에 의한 직접구동방식 등을 적용할 경우 상당히 감소될 수 있을 것으로 예상된다.

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

고정밀 경면가공을 위해 선반용 유정압주축 모델을 설계, 제작하고 타카이드수지를 이용한 미끄럼안내방식을 이용함으로써 감쇠능 향상에 의한 표면거칠기의 향상을 시도하였다. 또한 각 요소의 성능평가를 통해 경면가공에의 적용 타당성을 검증하였다.

고정밀가공용 유정압주축을 이용하여 경면가공실험을 수행한 결과 순동(C1012, 99.95%)에 대해서는 $0.07\mu\text{mR}_{\text{max}}$, 알루미늄(2218-T6)재료에 대해서는 $0.10\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 까지의 표면거칠기를 얻을 수 있어 시작품선반은 고정밀가공에 매우 적합하고 안정적인 성능을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 목적이 주로 하드웨어적인 요소개발에 있었으므로 바이트형상, 절삭유, 가공조건 등의 영향은 충분히 검토되지 않았으며, 이 부분의 보완이 이루어지면 본 시작품에 의한 가공정밀도는 더욱 향상될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 이후상 외 3인, "초정밀가공기 시작품제작 및 성능평가", 대한기계학회춘계 학술대회 논문집, pp.762-766, 1993.
2. 이재윤 외 2인, "초정밀 비구면가공기의 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 유정압저어널 베어링의 정특성해석", 대한기계학회춘계 학술대회 초록집(I), pp.154-157, 1989.
6. 박천홍 외 3인, "반전법을 이용한 정밀주축의 회전정도 측정시스템 개발", 한국정밀공학회지, 12권 13호, pp.168-174, 1995.

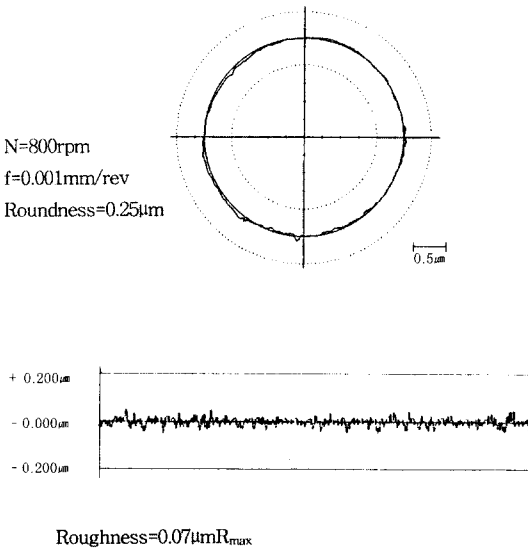


Fig.10 Measured surface roughness and roundness

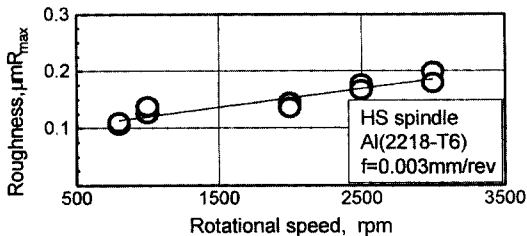


Fig. 11 Surface roughness of aluminium(2218)