

무심연삭기 주축계의 설계 및 성능평가

박천홍*, 황주호, 오윤진(한국기계연구원), 조순주(㈜세스코)

Design and Estimation of a Spindle System for Centerless Grinding Machine

C. H. Park, J. H. Hwang, Y. J. Oh(Machine Tools Group, KIMM), S. J. Cho(CESCO, Co.)

ABSTRACT

Design and estimation of a spindle system which was composed of grinding spindle and regulating spindle for the centerless grinding of ferrule was performed and prototypes of each spindle were manufactured. Loop stiffness of the spindle system was 130 N/μm. Although the value was lower than the target value of 150 N/μm, as there included 20% of the safety factor, it was enough to machine the ferrule. Rotational accuracies of each spindle were about 0.2 μm at the primary speed of 2,300 rpm(grinding spindle) and 300 rpm(regulating spindle). Temperature rises at the same speed were about 4.4 ~ 4.7 °C in the case of grinding spindle and 1.8 °C in the case of regulating spindle, which were well agreed with the designed value. From these results, it was estimated that the prototype of spindle system had a enough performances for the centerless grinding machine to machine the ferrule.

Key Words : Spindle system(주축계), Centerless grinding machine(무심연삭기), Loop stiffness(루프강성), Rotational accuracy(회전정밀도), Temperature rise(온도상승)

1. 서론

페룰의 외경 마무리가공에 요구되는 각종 정밀도는 대부분 서브미크론대이며, 이 가운데 진원도, 원통도, 표면조도 등은 특히 엄격한 정밀도가 요구되고 있다. 이러한 정밀도들은, 가공메카니즘의 특성상, 연삭축 및 조정차축으로 이루어지는 주축계의 정밀도 및 강성에 크게 의존하게 된다.

본 연구에서는 페룰의 요구정밀도를 만족할 수 있는 무심연삭기용 연삭축 및 조정차축의 시작품 개발을 목표로 하였으며, 이를 위해 각 축의 레이아웃, 상세설계 및 유정압베어링의 설계를 수행하고 제작된 연삭축 및 조정차축 시작품의 강성, 회전정밀도, 열특성 실험 등을 통해 설계된 무심연삭기 주축계의 실용화 가능성을 검토하고자 하였다.

면, 요구정밀도 가운데 특히 치수정밀도, 원통도는 안내면/구동계의 정밀도 및 주축/이송계의 강성에 크게 좌우되며, 진원도의 경우에는 주축 및 조정차축의 회전정밀도에 의해 대부분 영향을 받는 특성을 갖게 된다.

개발하고자하는 페룰가공용 무심연삭기는 일반적인 무심연삭기와 마찬가지로 연삭축, 조정차축 및 지지대를 이용하는 메카니즘으로 구성되며, 연삭사의 절입량은 조정차축의 하부에 배치되어 있는 안내면의 이송량에 의해 결정된다. 스톨치수는 직경 250 mm 에 폭 150 mm 로, 이에 대응하는 조정차는 직경 205 mm 로 설계하였으며 특히 가공대상 페룰의 진입시 자동적으로 가이드가 되어 가공정밀도를 향상시킬 수 있도록 조정차의 폭은 180 mm 로 설계하였다. 가공시의 목표 진원도와 표면조도를

2 페룰가공용 무심연삭기

먼저, 무심연삭기의 개발에 있어, 가공 대상으로 하는 고정밀 페룰의 제원 및 요구정밀도를 요약하여 Table 1 에 나타내었다¹⁾. 무심연삭 공정을 고려하

Table 1 Specifications of a ferrule for machining

Dimension Size	φ2.5×10mm	Dimension Accuracy	±0.2μm
Material	ZrO ₂	Roundness	0.1μm
Roughness	0.5μmRy	Cylindricity	0.5μm

고려하여 연삭축 및 조정차축의 베어링은 유정압베어링을 채용하였다.

3. 무심연삭기 주축계의 설계

3.1 주축계의 강성 설계 및 배분

일반적인 페룰의 가공조건인 절입량 15 μm , 절삭폭(실제 페룰과 접촉하는 숫돌폭) 100 mm 에 있어서 절삭부하는 약 50 N 정도로 추정되므로, 가공후 목표로 하는 치수공차 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 이내를 얻기 위한 주축계의 최소 루프강성은 125 $\text{N}/\mu\text{m}$ 가 된다. 따라서, 주축계의 설계에 있어서는 20% 정도의 안전율을 고려하여 150 $\text{N}/\mu\text{m}$ 의 루프강성을 목표로 설정하였다.

연삭축 및 조정차축의 강성 설계에 있어서는 1) 레이아웃 설계, 2) 베어링치수 결정, 3) 베어링 성능 설계, 4) 축강성 해석, 5) 각 축간 강성의 배분의 순서로 설계를 진행하였으며, 목표로 하는 루프강성이 얻어질 때 까지 3), 4), 5)의 순서를 반복하였다.

한편, 주축계의 구조를 고려하면 루프강성 K_l 은 연삭축의 강성 K_g , 조정차축의 강성 K_r 및 주축계의 구조강성 K_s 등이 직렬로 연결되어 있는 것으로 모델링할 수 있으므로 식 (1)의 관계를 갖는다.

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{K_g} + \frac{1}{K_r} + \frac{1}{K_s} \quad (1)$$

각 축의 레이아웃 설계를 이용하여 각 축의 강성에 대한 1 차적인 해석 결과, 목표로 하는 루프강성을 얻기위해 연삭축 약 400 $\text{N}/\mu\text{m}$, 조정차축 약 260 $\text{N}/\mu\text{m}$ 로 각 축강성의 목표치를 배분하였다.

3.2 연삭축의 설계

Fig. 1 에 유정압베어링을 이용하여 설계한 연삭축의 구조를 나타내었다. 연삭숫돌의 양단을 같은 치수의 저어널베어링이 지지하고 있는 구조로 하였으며, 스러스트베어링은 공간적인 면을 고려하여 축 앞단에 설치하였다. 축의 구동은 스피들모터에 인버터를 연결하여 무단변속이 가능하도록 하였으며 절삭 회전수는 2,300 rpm 이다. 이 때 모터에 의한 진동이 주축에 전달되는 것을 가능한한 방지하기 위하여 플로팅 폴리 및 플렉시블 커플링을 주축

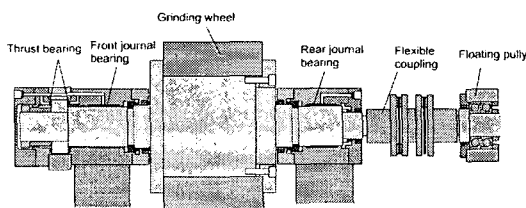


Fig. 1 Sectional view of a grinding spindle

과 모터 사이에 삽입한 구조로 설계하였다.

연삭숫돌의 탈착을 고려하여 축경은 공간이 허용하는 최대경인 60 mm 로 결정하였다.

연삭축용 유정압 저어널베어링의 성능설계 결과를 Table 2 에 정리하였다. 저어널베어링의 설계 결과를 이용하여 연삭축의 변위특성을 해석한 결과, 연삭축의 강성은 403 $\text{N}/\mu\text{m}$ 를 나타내었다.

3.2 조정차축의 설계

Fig. 2 에 조정차축의 구조 설계 결과를 나타내었다. 연삭주축과 마찬가지로 유정압베어링이 조정차 휠의 양단을 지지하는 방식으로 설계되어 있으며, 유정압베어링의 양단은 V 스플과 라비린스스플을 설치하여 누유와 외부로부터 먼지의 흡입을 방지하였다. 스러스트베어링은 스투피드(through feed) 연삭에 있어 경사각에 따른 절삭부하를 고려하여, 연삭주축과는 달리 후부에 설치하였다.

조정차축의 회전수는 가공과 드레싱을 고려하여 10 ~ 300 rpm 의 범위에서 무단변속이 가능하게 되어 있다. 조정차축은 서보모터와 감속기를 이용하여 구동된다.

조정차축의 탈착을 도려하여 축경은 50 mm 로 결정하였으며 베어링의 길이도 공간적인 제약상 50 mm 로 결정하였다. Table 2 에 설계된 베어링의 주요 성능을 나타내었으며 베어링간극 20 μm 에서 베어

Table 2 Designed results of hydrostatic journal bearing for grinding and regulating spindle

Terms	Grinding	Regulating
Viscosity of oil ν	5 cSt	
Supply pressure P_s	200 N/cm^2	
Bearing dia. & length $D \times L$	60 \times 60 mm	50 \times 50 mm
Pocket ratio β	0.8	0.8
Bearing clearance h_0	20 μm	20 μm
Load capacity W	1870 N	1250 N
Bearing stiffness K	246 $\text{N}/\mu\text{m}$	164 $\text{N}/\mu\text{m}$
Flow-rate Q	0.72 l/min	0.82 l/min
Temperature rise Δt	4.6 $^\circ\text{C}$	1.4 $^\circ\text{C}$

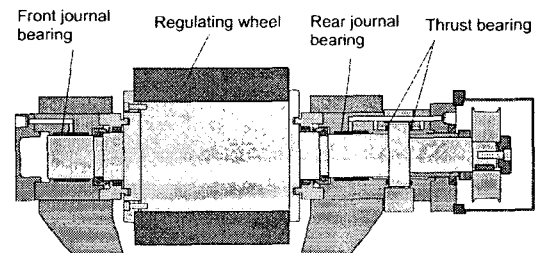


Fig. 2 Sectional view of a regulating spindle

링강성은 164 N/μm 축강성은 264 N/μm 로 계산되었다.

4. 시작품 주축계의 성능평가

4.1 각 축의 정강성

연삭축의 정강성은 압축형 로드셀을 연삭축이 장착될 중앙부에 장착하고 외력이 작용할 때 주축대에 대한 주축의 상대 변위를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 축강성은 이론해석값 403 N/μm 에 비해 다소 작은 350 N/μm 를 나타내었다. 이것은 실제 제작된 유정압베어링의 간극이 21 ~ 22 μm 로, 설계간극 20 μm 보다 다소 커짐에 따라 베어링강성이 저하됨에 따른 영향이다.

조정차축도 연삭축과 같은 방법으로 축강성을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 조정차축의 경우에는 이론해석값 264 N/μm 과 상대적으로 잘 일치하는 276 N/μm 을 나타내었다.

연삭축과 조정차축 사이에 로드셀을 설치하고 루프강성을 측정된 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 루프강성은 130 N/μm 로 축강성 설계값을 이용하여 계산한 루프강성(157 N/μm)에 비해 다소 작게 나타나고 있다. 이것은, 양 주축대에서의 미소한 변위가 루프강성에 영향을 미치기 때문으로 추정된다. 그러나 설계시에 고려한 안전율 20%(3.1 절 참조)를

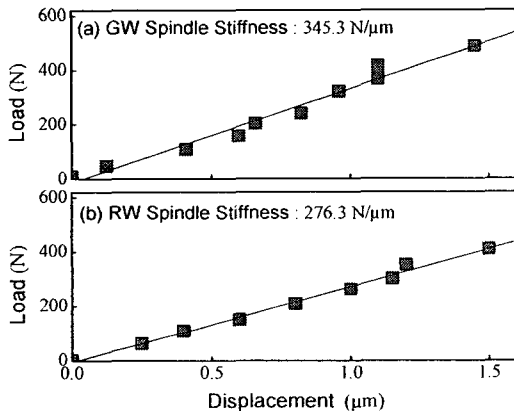


Fig. 3 Measured stiffnesses of grinding spindle and regulating spindle

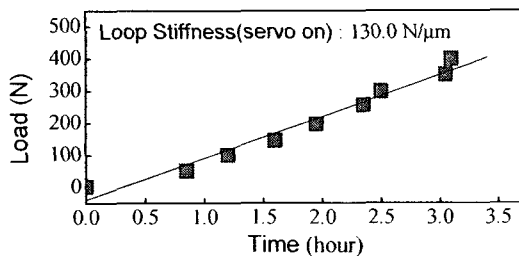


Fig. 4 Measured loop stiffness of spindle system

고려하면 페룰의 정밀가공을 위해 적합한 루프강성을 얻었음을 확인할 수 있다.

4.2 각 축의 회전정밀도

무심연삭기용 연삭축 및 조정차축은 양단지지형이므로 마스터볼과 같이 형상오차를 무시하거나, 제거할 수 있는 치구의 사용이 불가능하다. 따라서 슷돌 및 조정차가 장착될 플런지의 표면을 이용하여 각 회전수에서의 DC 성분을 제거한 런아웃을 측정후, 저속(10rpm)에서 플런지 자체의 진원도를 측정하여 빼줌으로써 회전정밀도를 계산하였다.

Fig. 5 는 연삭축의 회전수에 따른 회전정밀도의 변화를 측정한 결과를 정리한 것이다. 가공 회전수 부근인 2,000 및 2,300 rpm 에 있어 계통오차는 0.2 μm 이내를 나타내고 있으며, 가공된 페룰간의 치수 편차에 영향을 미치는 비반복오차도 0.2 μm 이내를 나타내고 있어 페룰가공에 적합한 정밀도를 지니고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6 은 조정차축의 회전수에 따른 회전정밀도를 측정한 결과로 가공시 회전수에 가까운 100 rpm 이나 드레싱 회전수인 300 rpm 에서의 비반복오차가 0.2 μm 이내를 나타내고 있어 페룰가공에 사용 가능한 정밀도를 지니고 있음을 알 수 있다.

4.3 각 축의 발열특성

Fig. 7 은, 연삭축 주위 10 곳에 써모커플을 설치하고 2,300 rpm 까지의 온도특성을 측정하여 나타낸 것이다.

윗 그림으로부터 2,300 rpm 에서의 유정압베어링 주위의 온도상승량은 측정위치에 따라 27.1(P1),

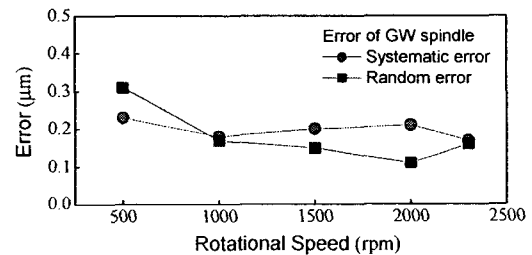


Fig. 5 Rotational error of grinding spindle

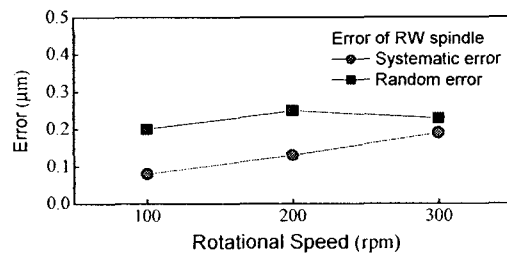


Fig. 6 Rotational error of regulating spindle

25.4(P2), 28.5(P3), 25.7(P4) °C 로 서로 다르게 나타나고 있다. 특히, 전, 후베어링 모두 위쪽이 아래쪽보다 높은 온도상승을 나타내는 현상을 보이고 있으며, 이것은 유정압베어링용 V 썰에서의 온도상승량이 베어링 자체의 온도상승량보다 크고, 아래쪽의 경우 배유에 의해 냉각효과가 있는 반면 위쪽은 냉각효과가 없어 발열량이 그대로 하우징에 전달되기 때문으로 추정된다. 한편, 이 때의 공급유온은 21°C 이므로, 유정압베어링에서의 온도상승은, 베어링 아래쪽의 온도를 기준으로 하면 4.4 ~ 4.7 °C 로, 이론적인 계산치 4.6 °C 와 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.

Fig. 8 은 300 rpm 까지에 대한 조정차축의 온도 변화를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 위의 그림으로부터 배유온도가 초기부터 공급유온에 비해 약 1.8 °C 정도 높게 나타나는 것은 유정압베어링에 사용되는 모세관에서의 저항효과에 의해 유온이 상승하기 때문이며, 전, 후부베어링의 온도가 시간이 지

남에 따라 서서히 배유온도와 같아지는 경향도 회전 때 따른 발열보다는 모세관의 저항에 따른 발열이 서서히 베어링 표면까지 전달됨에 따른 영향임을 알 수 있다. 전체적인 온도상승량은 이론적인 계산치 1.4 °C 와 비교적 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.

한편, 아래 그림으로부터, 회전수가 증가해도 베어링 후단의 폴리 및 벨트부근의 온도와 공급유온의 차가 크게 변하지 않는 것을 볼 수 있으며 이로부터 모터 구동이나 벨트에 발열에 의한 온도상승량은 상대적으로 매우 작음을 알 수 있다. 또한, 이 부위들의 초기온도가 대기온에 비해 다소 높은 것은 후부베어링을 통과한 윤활유가 이 부분을 통해 배출되기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 페룰의 요구정밀도를 만족할 수 있는 무심연삭기용 주축계(연삭축 및 조정차축)의 개발을 목표로 하였으며, 이를 위해 각 축의 레이아웃, 상세설계 및 유정압베어링의 설계를 수행하고 제작된 각 축 시작품의 강성, 회전정밀도, 열특성 실험 등을 통해 설계된 무심연삭기 주축계의 실용화 가능성을 검토하였다. 실험결과, 루프강성이 설계목표인 150 N/μm 에 비해 다소 낮은 130 N/μm 를 나타내었으나 설계시에 감안한 안전율을 고려할 때 실용화에는 충분한 강성을 지니고 있음을 알 수 있었다. 각 축의 회전정밀도는 주요 사용 회전수인 2,300 rpm(연삭축) 및 300 rpm(조정차축)에 있어 약 0.2 μm 를 나타내었고, 그 때의 각 축의 온도상승량도 약 4.4 ~ 4.7 °C(연삭축) 및 1.8 °C(조정차축)로 설계시의 계산치와 비교적 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 이상의 결과로부터 연삭축 및 조정차축의 시작품은 페룰가공용 무심연삭기 주축계로 충분히 실용화 적용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 "고기능성 부품가공용 지능형 연삭시스템 개발"과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Park, C. H., Hwang, J. H. and Cho, S. J., "A Feeding System of Centerless Grinder for Machining the Ferrule," J. of KSPE, Vol. 20, No. 5, pp. 22-28, 2003.

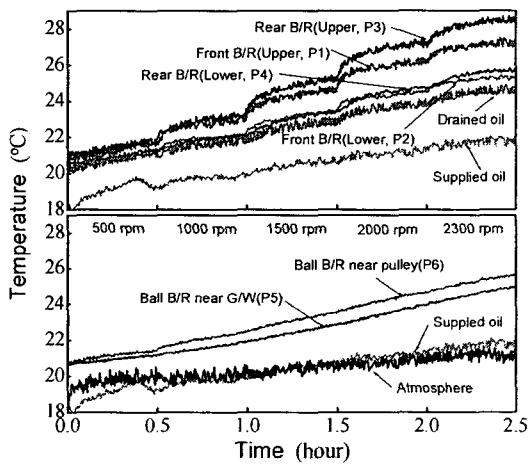


Fig. 7 Temperature rise of grinding spindle

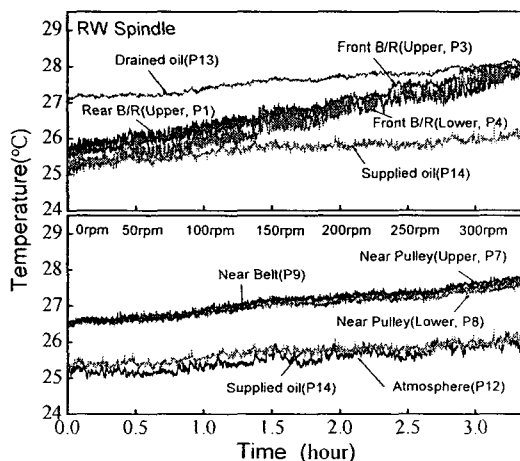


Fig. 8 Temperature rise of regulating spindle