

페를가공용 무심연삭기 이송계 개발

박천홍*, 황주호(한국기계연구원 공작기계그룹), 조순주(쥬세스코)

A Study on the Feeding System of Centerless Grinder for Machining the Ferrule

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

ABSTRACT

In order to practicalize high precision centerless grinder for machining the ferrule, its feeding system is designed and tested. For satisfying the desired diametric tolerance and cylindricity of the ferrule, the feeding system is designed to have relatively high axial stiffness of 600 N/μm, high angular motion accuracy of 0.5 arcsec/mm in yaw direction and minimum resolution of 0.05 μm. A prototype of feeding system is built up with hydrostatic guideway and ballscrew. A linear scale with 0.05 μm of resolution is used for position feedback. Experimental results show that the feeding system has the infinity of axial stiffness within the range of 1000 N and 0.3 arcsec/mm of yawing error. Also the feeding system shows obvious step response against 0.05 μm/step command without the lost motion or backlash. Although the vertical stiffness is reduced to 440 N/μm by the elastic deformation of rail, it is good enough to use for machining the ferrule. From above, it is confirmed that the feeding system is applicable to centerless grinder for machining the ferrule.

Key Words : Centerless grinder (무심연삭기), Feeding system (이송시스템), Ferrule (페를), Axial stiffness (축강성), yawing error (요오차)

1. 서론

페를에 있어 빛의 경로를 일정하게 유지하여 품질을 높이기 위해서는 내경을 기준으로 한 외경 연삭공정의 고정밀화가 필수적이며, 외경의 마무리 연삭에는 정밀도와 생산성면에서 CNC 무심연삭 메커니즘이 가장 유리하다.

페를의 가공에 요구되는 각종 정밀도는 대부분 서브미크론대이며, 이 가운데 특히 요구정밀도가 엄격한 원통도와 치수정밀도 등은 연삭기 안내면/이송계의 정밀도 및 강성에 크게 의존하게 된다. 따라서 페를의 가공을 고려하는 경우, 일반적인 정밀 무심연삭기에 비해 전체적인 구조는 콤팩트하면서도 상대적인 치수대비 강성은 높아져야 하므로 이에 적합하도록 가공기 각 요소의 구조를 새롭게 설계할 필요가 있다.

본 연구에서는 페를의 요구정밀도를 고려하여, 이를 만족할 수 있는 무심연삭기의 이송시스템(안내면 및 구동계)의 레이아웃(layout)설계 및 상세설계를 수행하였으며, 시작품의 제작 및 정밀도와 강

성실험을 통해 설계된 무심연삭기의 실용화 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 이송계의 레이아웃설계

2.1 페를의 요구정밀도

무심연삭기의 개발에 있어, 가공 대상으로 하는 고정밀 페를의 제원 및 요구정밀도를 요약하여 표 1에 나타내었다.

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

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

2.2 무심연삭기의 layout

이송계의 설계를 위해서는, 먼저 가공대상인 페룰에 대한 가공조건 및 생산성을 고려하여 무심연삭기의 전체 구조를 결정할 필요가 있다. 그림 1은 표 1의 페룰가공에 적합하도록 설계된 무심연삭기의 layout을 나타낸 것이다.

일반적인 무심연삭기와 구조면에서는 거의 동일하나, 전체 치수면에서는 페룰 치수에 맞도록 콤팩트하면서도 상대적인 치수대비 강성은 높게 설계되어 있다. 페룰가공에 있어서 생산성을 확보하기 위해 스톨치수는 $\phi 250$ 에 폭 150 mm로 설계하였으며, 이에 대응하는 조정차축은 페룰진입시의 정밀도를 고려하여 $\phi 205$ 에 폭은 180 mm로 설계하였다. ZrO_2 소재의 페룰가공을 위해 스톨의 재질은 다이아몬드를 사용하며, 이 스톨을 드레싱하기 위한 드레싱용 2축 LM 베어링 안내면이 스톨축 뒷면에 장착되도록 하였다. 가공시의 목표 진원도와 조도를 고려하여 스톨축 및 조정차축은 유정압베어링 주축으로 설계하였다.

2.3 이송시스템의 layout 설계

안내면과 구동계의 설계를 위해서는 먼저, 무심연삭기의 가공 정밀도와 그에 상응하는 이송시스템의 정강성을 추정해볼 필요가 있다. 무심연삭기의 절삭구조를 고려하면 절삭력은 안내면의 이송방향에 대해 주로 작용하므로 이송축방향으로의 높은 강성이 요구된다. 구체적으로는 150 mm의 스톨폭에 작용하는 절삭력은 약 100 N 정도로 추정되므로, 이러한 절삭상태에서 목표로하는 치수공차 $\pm 0.2 \mu m$ 를 만족하기 위해서는 최소 $250 N/\mu m$ 이상의 강성이 필요하다. 그러나 실제로는 주축과의 루프강성까지 고려해야하므로 안정적인 성능을 위해서는 적어도 2 배 이상의 높은 이송방향 강성이 필요하므로 목표강성은 $500 N/\mu m$ 로 설정하였다.

안내면의 수직방향의 경우에는 강성보다는 조정

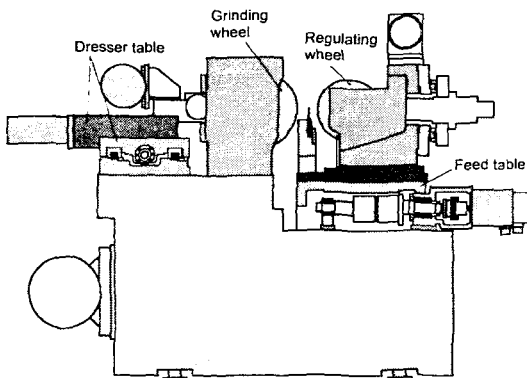


Fig. 1 A designed centerless grinder for ferrule

차축 및 그 구동계의 하중(약 2000 N)을 지지할 수 있는 부하특성이 필요하다. 또한 치수공차를 고려하면 $0.1 \mu m$ 이내의 미소절입이 필요하므로 최소이송분해능은 $0.05 \mu m$ 로 설정하였으며, 총 유효이송량은 스톨의 유효 사용반경과 공작물의 장착을 고려하여 50 mm로 결정하였다. 한편, 운동오차에 있어서는 안내면의 요(yaw)오차가 치수정밀도에 영향을 크게 미친다. 스톨 폭 150 mm를 고려하면 1 arcsec 당 $0.7 \mu m$ 의 오차가 발생하므로 한번 가공에 필요한 총 절입량을 약 1 mm로 예상하면, 전 이송구간에 있어 최소한 0.5 arcsec/mm 이내의 오차값을 갖어야 한다.

이상의 이송분해능, 운동정밀도 및 부하특성등을 고려하여 안내면은 유정압베어링을 채용하였으며, 안내면의 구조는 조립 및 구조강성면에서 유리하도록, 그림 2와 같이 레일이 유정압베어링을 감싸는 역구속형으로 하였다. 이송기구로는 양단에 지지베어링을 각각 4개 및 2개를 고정된 볼스크류(BNFN4506A, C1 급, THK 사)를 사용하였으며(그림 1 이송부 참조), 미소이송분해능과 이송계의 서보강성을 고려하여 분해능 $0.05 \mu m$ 의 리니어스케일(RSF 사)을 이용한 페루프 제어계를 구성하였다.

2.4 유정압안내면의 성능설계

그림 3은 전절에서 언급한 것처럼, 수직방향의 부하를 안정적으로 지지할 수 있도록 패드치수를 결정하고 베어링간극에 따른 강성 및 유량의 계산 결과를 나타낸 것이다. 앞에서의 성능범위를 만족하고, 안내면의 제작성 및 사용유량등을 고려하여 베어링간극은 $25 \mu m$ 로 결정하였으며, 이에 따른 유정압안내면의 형상치수와 성능해석 결과를 표 2에

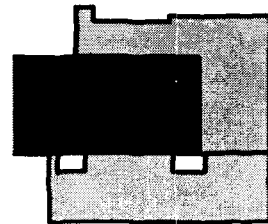


Fig. 2 Structure of a designed hydrostatic guideway

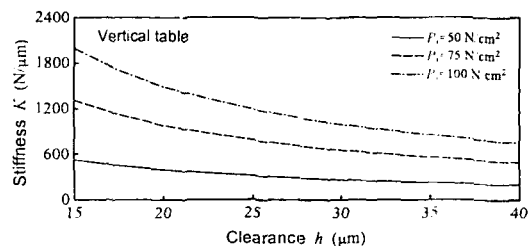


Fig. 3 Relationship between clearance and stiffness in vertical direction of a designed hydrostatic table

정리하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

그림 4 는 무심연삭기용 이송시스템의 시작품을 나타낸 것이다. 실험은 안내면의 각방향 정강성, 운동정밀도, 위치결정오차 및 반복오차, 미소이송분해능 등에 대해 수행하였다. 정강성은 축방향 및 수직방향에 각각 로드셀을 설치하고 스크류로 하중을 가했을 때의 테이블의 변위를, 전기마이크로미터(Mahr, 0.1 μm 분해능)를 4 곳에 배치하여 측정하고 그 평균값으로부터 계산하였다. 운동정밀도, 위치결정오차 및 반복오차는 테이블 중앙에 반사경을 설치하고 레이저간섭계(HP, 5529A)를 이용하여 측정하였다. 미소이송분해능은 테이블 끝단의 중앙부에 정전용량형센서(ADE, Microsense 3401, 분해능 1nm)를 설치하고 0.05, 0.1, 0.5 $\mu\text{m}/\text{step}$ 의 이송을 왕복했을 때의 응답특성을 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 정강성

그림 5 는 안내면의 수직방향 정강성 측정결과를 이론치와 함께 비교하여 나타낸 것이다. 먼저, 공급압력 60 N/cm^2 의 경우 부하특성 실험구간에서의 정강성은 실험치 평균은 477 $\text{N}/\mu\text{m}$ 를 보이고 있

Table 2 Designed performances of hydrostatic guideway

Specifications	Horizontal	Vertical
Number of pad	3	6
Pad size	120×40 mm	120×40 mm
Load capacity ($\epsilon=0.4$)	8,250 N	16,500 N
Static stiffness ($\epsilon=0$)	600 $\text{N}/\mu\text{m}$	1,200 $\text{N}/\mu\text{m}$
Flow rate	0.65 l/min	1.30 l/min
Supply pressure 100 N/cm^2 , Oil viscosity 10cSt(40°C)		

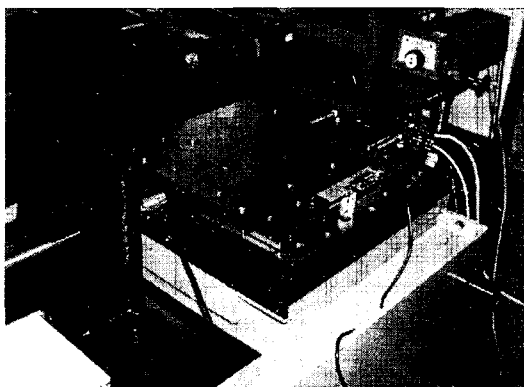


Fig. 4 Test Feeding system of Centerlee grinder

으며, 공급압력 100 N/cm^2 의 경우에는 정강성이 오히려 444 $\text{N}/\mu\text{m}$ 로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 안내면 레일이 역구속형으로 되어 있으나 수직방향 윗레일이 수평방향 레일로부터 길게 외팔보형으로 돌출되어 있어, 유정압패드 면압에 의해 탄성변형을 일으키기 때문이다. 이 경우 탄성변형은 베어링 간극이 증가하는 효과를 주게되며, 이를 고려하여 이론적으로 다시 계산한 결과를 그래프에 함께 나타내었다. 실험값과 잘 일치하고 있어 정강성의 감소가 수직방향 레일의 탄성변형에 의한 것임을 확인할 수 있다.

한편, 무심연삭에 있어 수직방향이나 수평방향 정강성이 가공정밀도에 직접 미치는 영향은 거의 없으므로 이대로 적용해도 무리는 없으나, 후에 나타내는 볼스크류에 의한 리드동기오차가 직선운동 정밀도에 미치는 영향등을 고려하면 레일의 구조강성을 높여 탄성변형량을 줄이고 정강성을 증가시키는 것이 운동정밀도를 향상시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 6 은 시작품 안내면의 축방향 강성을 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 시작품에는 리니어스케일을 사용하므로 실제로 절삭시의 축방향 강성은 스케일을 작동시켰을 때의 서보강성을 포함한 결과로 나타난다. 따라서 스케일을 작동시켰을 때와 작동하지 않았을 경우에 대해 각각 실험하여 결과를 비교하였다.

먼저 스케일을 작동하지 않았을 경우, 축방향 강성은 약 300 $\text{N}/\mu\text{m}$ 로 목표치에 비해 60%정도 작게 나타났다. 가능하면 스케일의 작동에 관계없이 기계적인 정강성을 높이고자 하였으나, 공간적인 문제등으로 지지베어링용 플랜지를 충분한 강성을 갖도록 설계하지 못한 것이 목표치보다 작아진 가장 큰 원인으로 추정된다. 한편, 스케일을 작동시킨 경우에는 스케일의 위치보정효과로 약 1000 N까지의 하중에 대해 정강성이 무한대로 됨을 보

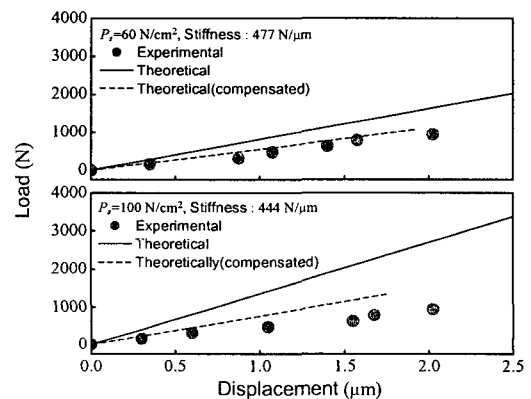


Fig. 5 Stiffness of hydrostatic table in vertical direction

이고 있다. 따라서 예상되는 절삭력 100 N 을 고려하면, 스케일을 작동시키는 경우에 충분한 축방향 강성을 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다.

4.2 운동정밀도

그림 7 및 그림 8 은 안내면의 직선 및 각운동 오차의 측정결과를 나타낸 것이다. 직선운동오차의 경우 수직방향, 수평방향 모두 50 mm 의 이송구간에 대해 약 0.7 μm 의 오차를 보이고 있어 무심연삭기용 안내면으로서의 적용이 충분히 가능성을 확인 할 수 있다. 구체적으로 파형을 보면 약 8 주기성분의 오차가 대부분의 오차량의 원인이 되고 있다. 이것은 시작품에 사용한 볼스크류의 리드 6 mm 와 정확히 일치하는 주기이며, 볼스크류의 회전에 따라, 볼스크류 조립오차 및 런아웃오차가 테이블을 상하방향으로 변위시킴에 의해 발생하는 리드동기 오차이다.

그림 8 의 각운동오차 측정결과에 있어서도 주 오차원인은 볼스크류 리드동기오차에 의한 것임을 확인할 수 있으며, 전체구간에 대해 요오차는 1.5 arcsec, 피치오차는 1.2 arcsec 를 나타내고 있다. 가공물 치수정밀도에 영향이 큰 요오차를 1 mm 구간에 대해 분석하면 별로 최대 0.3 arcsec/mm 로 목표 정밀도를 잘 만족하고 있을 알 수 있으며, 직선 및 각운동오차 모두 볼스크류 리드동기오차가 주도적이므로 정강성의 개선에 의해 운동정밀도는 개선될 수 있음을 알 수 있다^{1),2)}.

4.3 미소이송분해능

그림 9 는 유정압안내면의 미소이송에 따른 응답특성을 실험한 결과로, 실험은 1step 당 0.5, 0.1, 0.05 μm 의 변위를 5step 연속으로 전, 후진할 수 있도록 입력값을 주고 그 때의 테이블의 응답변위를 측정 한 것이다. 그림으로부터 테이블은, 리니어스케

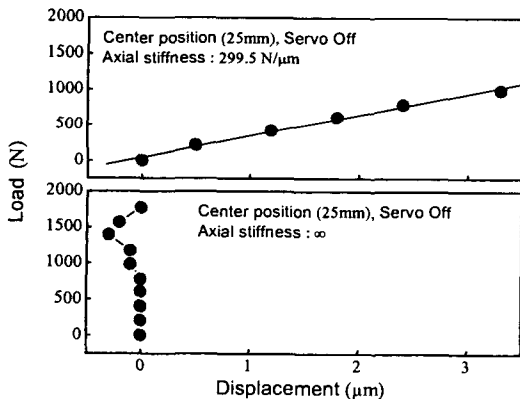


Fig. 6 Stiffness of feeding system in axial direction when the servo state is (a) off, (b) on

일의 최소분해능인 0.05 $\mu\text{m}/\text{step}$ 의 분해능까지 정확히 변위량을 보이며 잘 응답하고 있음을 보이고 있으며, 0.05 및 0.1 $\mu\text{m}/\text{step}$ 의 경우에 있어 왕복운동간에 약간의 위치차이를 보이고 있는 것은, 주로 스케일의 신호체배에 있어서의 오차에 의한 것으로 볼스크류의 비선형 탄성변형³⁾이나 마찰력 변화등에 기인하는 로스트모션은 없음을 확인할 수 있다

4.4 위치결정오차 및 반복오차

그림 9 는 ISO 평가규격을 이용하여 유정압안내면의 위치결정오차 및 반복정밀도를 측정한 결과를 나타낸 것이며, 측정값은 5 회 반복측정값으로부터 통계적으로 구한 것이다. 먼저, 조립된 상태에서 그대로에서의 위치결정오차 및 반복오차는 각각 3.13 μm 및 $\pm 0.23 \mu\text{m}(2\sigma)$ 를 나타내고 있으며, 위치오차는 파드백센서인 리니어스케일의 고유제작오차 및 스케일이 테이블의 측면에 부착됨에 따른 아베오프셋(Abbe offset)오차 등에 기인한 것이다. 이 오차값을 이용하여 테이블중양을 기준으로 소프트웨어적으로 오차보정을 수행한 결과를 아래 그림에 나타내었다.

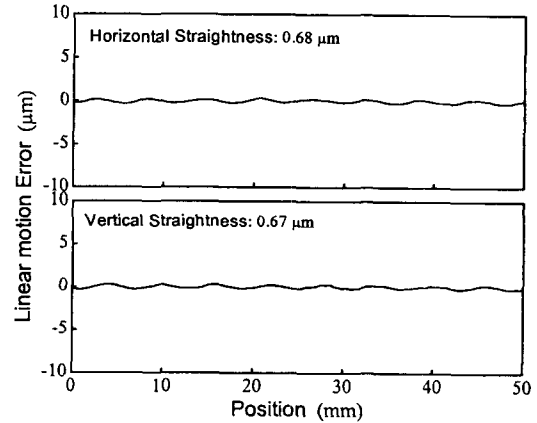


Fig. 7 Linear motion error of hydrostatic table

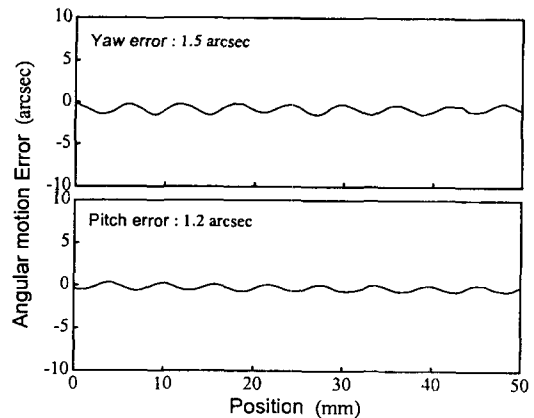


Fig. 8 Angular motion error of hydrostatic table

위치결정오차는 $0.47 \mu\text{m}$ 으로 대폭 향상되었으나 반복오차는 $\pm 0.21 \mu\text{m}(2\sigma)$ 로 거의 같은 수준을 유지하고 있으며, 반복오차에 의해 위치결정오차가 더 이상 향상되지 못함을 알 수 있다. 특히 본 안내면의 실험은 여러 가지 여건상 향온이 유지되지 못한 환경에서 실험된 결과로, 향온을 유지하고 윤활특성 및 온도특성을 안정화할 경우 $\pm 0.1 \mu\text{m}(2\sigma)$ 대까지의 반복정밀도는 기대할 수 있을 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 페롤가공용 고정밀 무심연삭기의 이송시스템을 설계, 제작하고 실험을 통해 실용상

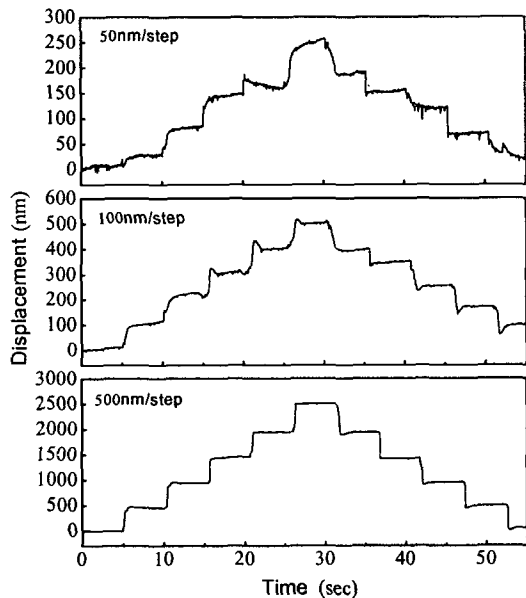


Fig. 9 Micro step response of hydrostatic table

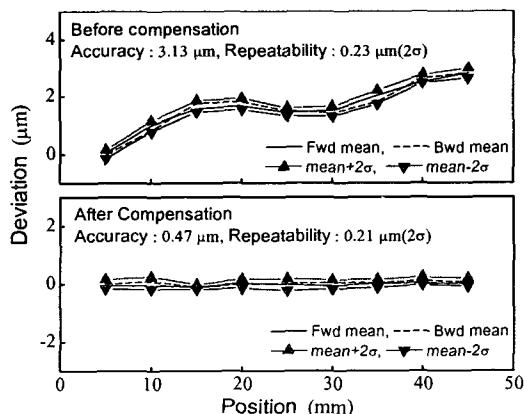


Fig. 10 Effect of NC compensation in positioning error and repeatability of hydrostatic table

의 적용가능성을 분석하였으며, 그 결과, 페롤에 대한 목표 가공정밀도를 만족할 수 있음을 확인하였다. 구체적인 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 안내면의 수직방향 정강성 실험결과 $450 \text{ N}/\mu\text{m}$ 로 실용 가능함을 확인할 수 있었으나 유정압패드에 의한 탄성변형으로 설계값보다는 감소된 결과를 얻었다. 보다 안정적인 정강성을 확보하기 위해서는 레일의 두께를 보강하여 탄성변형을 감소시킬 필요가 있었다.
- 2) 안내면의 축방향 강성은 스케일을 작동하는 경우 1000 N 까지의 하중에 대해 무한강성을 나타내었다.
- 3) 운동정밀도 실험결과, 직선운동오차는 약 $0.7 \mu\text{m}$, 각운동오차는 약 $0.3 \text{ arcsec}/\text{mm}$ 이내를 보이고 있음을 확인하였다.
- 4) 미소분해능 실험결과, 안내면은, 리니어스케일의 최소분해능인 $0.05 \mu\text{m}/\text{step}$ 의 분해능까지 정확히 추종하는 응답특성을 나타내었다.
- 5) 안내면의 위치결정오차 및 반복오차는 각각 $0.47 \mu\text{m}$ 및 $\pm 0.21 \mu\text{m}(2\sigma)$ 로 목표로 하는 가공치수공차를 만족할 수 있음을 확인하였으며, 향온환경에서 윤활특성 및 온도특성을 안정화시킬 경우 정밀도는 더욱 향상될 수 있을 것으로 추정된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 “고기능성 부품가공용 지능형 연삭가공시스템개발(중기거점사업)”의 “고정밀 이송 및 주변장치 개발”과제로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 박천홍, 김인찬, 정윤교, 이후상, “고정밀이송을 위한 볼스크류용 체결기구에 관한 연구”, 한국정밀공학회지 14-5, pp157-163, 1997.
2. 新野秀憲 橋詰 等, 伊東 誼, “精密テーブルとその送り駆動系の連結機構に對する二,三の新提案”, 日本機械學會論文集(C編) 57-742, pp174-180, 1991.
3. Ro, P. I. and Hubbel, P. I., “Nonlinear micro-dynamic behavior of a ball-screw driven precision slide system”, Precision Engineering, Vol.14, No.4, pp229, 1992.