

◆특집◆ 지능형 연삭 가공 시스템 I

페룰가공용 무심연삭기의 이송시스템 개발

박천홍*, 황주호*, 조순주**

A Feeding System of Centerless Grinder for Machining the Ferrule

Chun Hong Park*, Joo Ho Hwang* and Soon Joo Cho**

Key Words : Centerless grinder (무심연삭기), Feeding system (이송시스템), Ferrule (페룰), Static stiffness (정강성), Motion accuracy (운동정밀도), Positioning accuracy(위치결정정밀도)

1. 서론

페룰은, 광커넥터에 있어, 정보의 전송효율과 정보의 질을 결정하는 극히 중요한 역할을 수행하는, 극도로 높은 정밀도가 요구되는 초정밀 부품이다. 고급 통신의 경우에는 페룰의 소재로 지르코니아(ZrO₂) 세라믹을 사용하고 있으며, 이에 따라 제품의 가공은 전적으로 연삭작업에 의존한다. 특히, 빛의 경로를 일정하게 유지하여 품질을 높이기 위해서는, 내경을 기준으로 한 외경 연삭기술이 가장 중요한 가공공정이 된다. 이러한 외경의 마무리 연삭에는 정밀도와 생산성면에서 가장 유리한 CNC 무심연삭 메카니즘이 주로 채용되고 있다.

페룰의 외경 마무리가공에 요구되는 각종 정밀도는 대부분 서브미크론대이며, 이 가운데 원통도와 치수정밀도 등은 특히 엄격한 정밀도가 요구되고 있다. 이러한 정밀도들은, 가공메카니즘의 특성상, 무심연삭기 안내면/이송계의 정밀도 및 강성에 크게 의존하게 된다. 따라서 페룰의 가공을 고려하는 경우, 일반적인 정밀 무심연삭기에 비해

전체적인 구조는 컴팩트하면서도 상대적인 치수대비 강성은 높아져야 하므로 이에 적합하도록 가공기 각 요소의 구조를 새롭게 설계할 필요가 있다.

본 연구에서는 페룰의 요구정밀도를 만족할 수 있는 무심연삭기의 이송시스템(안내면 및 구동계)의 개발을 목표로 하였으며, 이를 위해 레이아웃 및 상세설계를 수행하고 제작된 이송시스템 시제품의 운동정밀도, 반복정밀도, 미소분해능 및 안내면의 정강성 실험 등을 통해 설계된 무심연삭기의 실용화 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 이송계의 레이아웃 설계

2.1 페룰의 요구정밀도

무심연삭기의 개발에 있어, 가공 대상으로하는 고정밀 페룰의 제원 및 요구정밀도를 요약하여 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Required accuracies of the ferrule

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

무심연삭 공정을 고려하면, 요구정밀도 가운데 특히 치수정밀도, 원통도는 안내면/구동계의 정밀

* 한국기계연구원 공작기계그룹

** ㈜세스코

Tel. 042-868-7117, Fax. 042-868-7180

Email pch657@kimm.re.kr

초정밀기계, 정밀기계, 반도체 및 디스플레이 관련 장비 등의 위치결정기술 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

도 및 강성에 크게 좌우되며, 진원도의 경우에는 주축 및 조정차축의 회전정밀도에 의해 대부분 영향을 받는 특성을 갖게 된다.

2.2 무심연삭기의 구조

이송시스템의 설계를 위해서는, 먼저 가공대상인 페룰에 대한 가공조건 및 생산성을 고려하여 무심연삭기의 전체 구조를 결정할 필요가 있다. Fig. 1 은 Table 1 의 페룰가공에 적합하도록 설계된 무심연삭기의 개략도를 나타낸 것이다.

일반적인 무심연삭기와 구조면에서는 거의 동일하나, 전체 치수면에서는 페룰 치수에 맞도록 컴팩트하면서도 상대적인 치수대비 강성은 높게 설계되어 있다. 페룰가공에 있어서 생산성을 확보하기 위해 슷돌치수는 $\phi 250$ mm 에 폭 150 mm 로 설계하였으며, 이에 대응하는 조정차축은 가공대상 페룰의 진입시 정밀도를 고려하여 $\phi 205$ mm 에 폭은 180 mm 로 설계하였다. ZrO_2 소재의 효율적인 가공을 위해 슷돌의 재질은 다이아몬드를 사용하며, 이 슷돌을 드레싱하기 위한 드레서용 2 축 LM 베어링 안내면이 슷돌축 뒷면에 장착되도록 하였다. 가공시의 목표 진원도와 표면조도를 고려하여 슷돌축 및 조정차축은 유정압베어링 주축으로 설계하였다.

2.3 이송시스템의 설계

안내면과 구동계의 설계를 위해서는 먼저, 무심연삭기의 가공 정밀도와 이에 상응하는 이송시스템의 정강성을 추정해볼 필요가 있다. 무심연삭

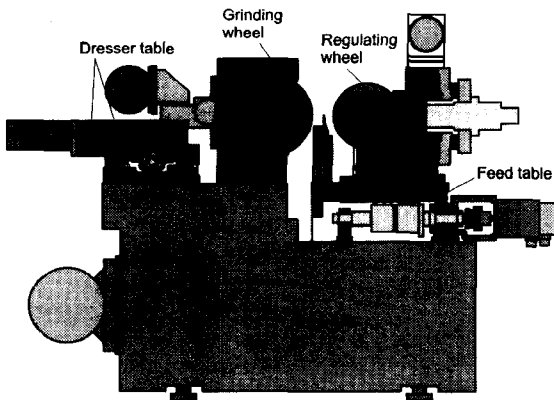


Fig. 1 A designed centerless grinder for machining the ferrule

기의 가공 구조를 고려하면, 연삭저항은 안내면의 이송(축)방향에 대해 주로 작용하므로 이송방향에서의 높은 정강성이 요구된다. 구체적으로, 150 mm 의 슷돌폭에 작용하는 연삭저항은 약 100 N 정도로 추정되므로, 이러한 가공상태에서 목표로하는 치수공차 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 를 만족하기 위해서는 최소 250 $\text{N}/\mu\text{m}$ 이상의 정강성이 필요하다. 또한, 실제로는 주축과의 루프강성까지 고려해야하므로, 안정적인 성능을 위해서는 적어도 2 배 이상의 높은 이송방향 강성이 필요하므로 목표강성은 500 $\text{N}/\mu\text{m}$ 로 설정하였다.

한편, 페룰의 치수공차를 고려하면 0.1 μm 이내의 미소절입이 필요하므로 0.05 μm 의 분해능을 갖는 리니어스케일(MSA670, RSF 사)을 설치하였다. 이 경우, 축방향 부하에 대한 변위는 제어기로 피드백되므로 기본적으로 축방향 강성은 서보계에 의해 무한강성으로 유지될 수 있으나, 이송계 자체의 기계적인 강성이 너무 작을 경우에는 서보계가 유지해야 할 부하가 너무 커져 불안정하게 될 우려가 있다. 따라서, 이송계가 갖는 기계적인 정강성만으로 치수공차를 만족하도록 볼스크류 이송계의 정강성은 250 $\text{N}/\mu\text{m}$ 이상으로 설계하였다. 이를 위해 이송기구로는 양단에 지지베어링을 각각 4 개 및 2 개를 고정된 볼스크류(BNFN4506A, C1 급, THK 사)를 사용하였다(Fig. 1 이송부 참조). 리니어스케일의 부착위치는 가능한한 구동점과 근접할수록 좋으나, 실제 안내면 구조상 구동점에 설치하기는 어려우므로 테이블 측면에 설치하고 이에 따른 Abbe 의 offset 오차는 실험을 통해 소프트웨어적으로 보정하였다. 이송시스템의 총 유효이송량은 슷돌의 유효반경과 공작물의 장착을 고려하여 50 mm 로 결정하였다.

2.4 안내면의 설계

무심연삭기의 구조상, 안내면의 요(yaw)오차는 치수정밀도에 크게 영향을 미치게 된다. 실제, 슷돌 폭 150 mm 를 고려하면 요오차가 1 arcsec 일 경우 슷돌 양단에서 0.7 μm 의 평행도 오차가 발생한다. 한번 가공에 필요한 총 절입량을 약 1 mm 로 예상하면, 전 이송구간에 있어 최소한 0.5 arcsec/mm 이내의 각운동정밀도를 유지할 필요가 있다.

이송계의 이송분해능 및 안내면의 운동정밀도 등을 고려하여 안내면의 베어링형식은 유정압베어

링으로 결정하였으며, 이에 따른 안내면의 구조는, 조립 및 구조강성면에서 유리하도록, Fig. 2 와 같이 레일이 이송테이블을 감싸는 역구속형으로 하였다.

안내면의 수직방향의 경우에는 조정차축 및 그 구동계의 하중(약 2000 N)을 안정적으로 지지할 수 있는 부하특성이 필요하며, 적재하중에 의해 안내면의 간극이 한 방향(아래 방향)으로 크게 치우치는 경우에는 가공오차 등과 중첩되어 레일과 접촉할 우려가 있으므로 적재하중에 의한 최대 편심을(설계간극에 대한 안내면 변위의 비)이 0.2 이하가 되도록 설계하였다. 수평방향의 경우에는 특별히 큰 부하특성이나 강성을 필요로 하지 않으므로 수직방향과 같은 치수의 패드로 설계하였다. 따라서, 유정압안내면의 구조상, 수평방향의 패드수는 수직방향의 패드수의 1/2 이 되므로 부하용량이나 정강성도 수직방향의 1/2 이 된다.

Fig. 3 은 수직방향의 부하를 안정적으로 지지할 수 있도록 패드치수를 결정하고 공급압력이 변화할 때의 베어링간극에 따른 정강성의 계산결과를 나타낸 것이다. 베어링간극을 크게 할수록 제작면에서 유리하고 발열의 우려가 적다는 장점을 갖게 되나, 정강성이 작아지고 유량이 크게 증가하는 단점이 있다. 또한, 공급압력을 크게하면 같은 베어링 형상치수와 베어링간극에서 정강성을

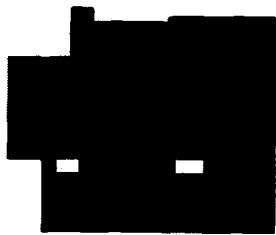


Fig. 2 Structure of designed hydrostatic guideway

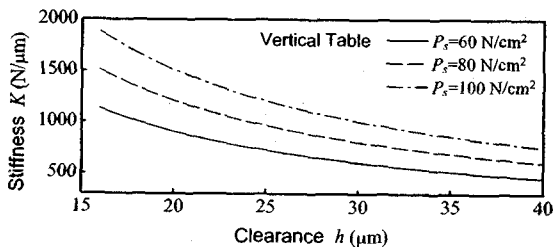


Fig. 3 Relationship between bearing clearance and vertical stiffness of hydrostatic guideway

증가시킬 수 있다는 장점이 있으나, 안내면의 구조에 따라서는 레일이나 테이블의 탄성변형량을 크게 하여 베어링간극이 커지게 되므로 실제로 강성이 증가하는 효과를 얻기 어려운 경우가 발생한다. 본 연구에서는 안내면의 제작성, 사용유량 및 탄성변형등을 고려하여 공급압력은 60 N/cm², 베어링간극은 32 μm 로 결정하였으며, 이에 따른 유정압안내면의 형상치수와 성능해석 결과를 Table 2 에 정리하였다.

한편, 유정압안내면에서의 윤활유의 온도변화는 패드내 압력분포의 변화를 발생하게하여 구동중의 테이블 부상높이를 미소하게 변화시킴으로써 운동정밀도에 영향을 미치게 된다. 따라서 공급온도를 가능한한 일정하게 유지하도록 ± 0.1°C 의 온도제어능력을 갖는 냉각장치(AKZ206, DAIKIN 사)를 윤활탱크에 연결하여 윤활유를 냉각하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 4 는 무심연삭기용 이송시스템의 시작품을 나타낸 것이다. 실험에서는 안내면의 각방향 정강

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 (ε=0.1)	975 N	1,850 N
Static stiffness (ε=0)	255 N/μm	510 N/μm
Flow rate	0.74 l/min	1.48 l/min
Supply pressure 60N/cm ² , Oil viscosity 10cSt(40°C)		

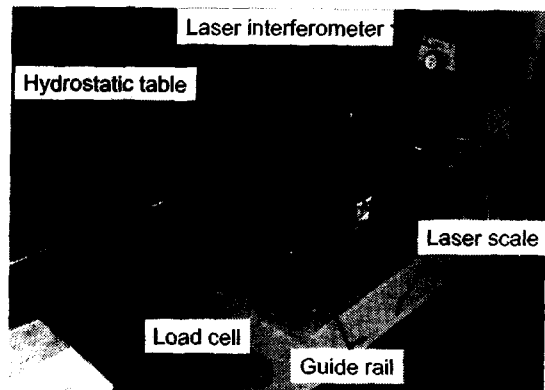


Fig. 4 Prototype of hydrostatic guideway

성, 운동정밀도, 위치결정오차 및 반복오차, 미소이송분해능 등을 평가하였다. 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(5529A, HP)를 이용하여 측정하였다. 미소이송분해능은 테이블 끝단의 중앙부에 정전용량형센서(Microsense 3401, ADE 사, 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

Fig. 5 는 안내면의 수직방향 정강성 측정결과를 이론치와 함께 비교하여 나타낸 것이다. 공급압력 60 N/cm^2 의 경우 부하특성 실험구간에서의 정강성 실험치 평균은 477 $\text{N}/\mu\text{m}$ 를 나타내고 있으며, 이론치와는 약 90 %이상 잘 일치하고 있다. 이론치와의 미소한 차이는 레일의 탄성변형에 의해 베어링간극이 미소하게 증가하기 때문이다. 이를 확인하기 위해 공급압력을 100 N/cm^2 으로 증가시켰을 때의 정강성 실험결과를 아래 그림에 나타내었다. 공급압력의 증가에도 불구하고, 실제로 측정된 정강성은 오히려 공급압력 60 N/cm^2 의 경우에 비해 감소하는 결과를 보였다. 수직방향 레일이 수평방향 레일로부터 길게 외팔보형으로 돌출되어 있어(Fig.2 참조), 유정압패드의 면압에 의해

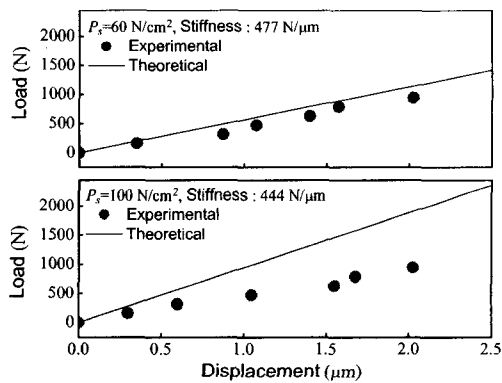


Fig. 5 Vertical stiffness of hydrostatic guideway

탄성변형을 일으키게 되며, 이 탄성변형만큼 베어링 간극이 증가하여 정강성이 약해지게 된다.

따라서, 유정압안내면 시작품의 수직방향 정강성은 공급압력에 크게 관계없이 약 450 $\text{N}/\mu\text{m}$ 정도임을 알 수 있다. 무심연삭에 있어 수직방향이나 수평방향 정강성이 가공정밀도에 직접 미치는 영향은 거의 없으므로 강성면에서는 이대로 충분히 적용가능하다고 판단된다. 단, 다음 절에서 나타내는 볼스크류에 의한 리드동기오차가 직선운동정밀도에 미치는 영향등을 고려하면, 레일의 구조강성을 높여 정강성을 증가시키는 것이 운동정밀도를 향상시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

한편, Fig. 6 은 시작품 안내면의 축방향 강성을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 시작품에는 리니어 스케일을 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, 최종목표치 500 $\text{N}/\mu\text{m}$ 에는 다소 부족하지만, 기계적인 강성 목표치 250 $\text{N}/\mu\text{m}$ 보다는 높게 나타나고 있다. 스케일을 작동시킨 상태에서의 경우의 축방향 강성 측정결과를 그림 6(b)에 나타내었으며 스케일의 위치보정효과로 약 1000 N까지의 하중에 대해 정강성이 무한대로 됨을 보이고 있다. 예상되는 연삭저항이 100 N이므로, 페룰가공시에 축방향 강성이 가공 형상오차에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

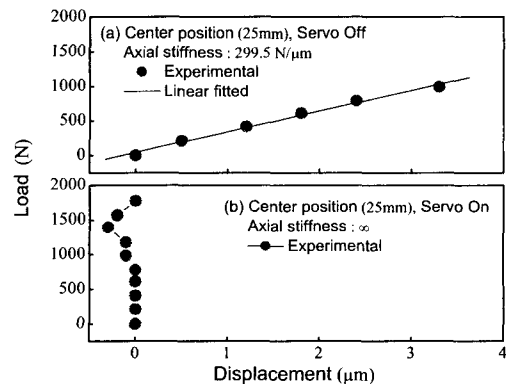


Fig. 6 Axial stiffness of feeding system when the servo state is (a) off, (b) on

4.2 운동정밀도

Fig. 7 및 Fig. 8 은 안내면의 직선 및 각운동오차의 측정결과를 나타낸 것이다. 직선운동오차의 경우 수직방향, 수평방향 모두 50 mm의 이송구간에 대해 약 0.7 μm 의 오차를 보이고 있어 무심연삭기용 안내면으로서의 적용이 충분히 가능함을 확인할 수 있다. 구체적으로 파형을 보면 일반적으로 오차의 가장 큰 원인이 되는 레일가공오차에 의한 저주기파형은 거의 없으며 약 8 주기성분의 오차가 대부분의 오차량의 원인이 되고 있다. 이것은 시작품에 사용한 볼스크류의 리드 6 mm와 정확히 일치하는 주기이며, 볼스크류의 회전 에 따라, 볼스크류 조립오차 및 런아웃오차가 테이블을 상하방향으로 변위시킴에 의해 발생하는 오차이다. 이러한 리드동기오차는 테이블의 강성과 볼스크류의 굽힘강성 및 볼스크류의 런아웃오차의 비에 따라 그 크기가 결정된다. 따라서 보다 운동정밀도를 개선시킬 필요가 있을 경우에는 테이블의 강성의 증가, 볼스크류 굽힘강성 감소(직경감소, 길이 증가, 지지방식변경 등) 또는 테이블과 볼스크류 사이에 커플링설치 등의 방법을 고려할 수 있다.

한편, Fig. 8의 각운동오차 측정결과에 있어서도 주 오차원인은 볼스크류 리드동기오차에 의한 것임을 확인할 수 있으며, 전체구간에 대해 요오차는 1.5 arcsec, 피치오차는 1.2 arcsec를 나타내고 있다. 가공물 치수정밀도에 영향이 큰 요오차를 1 mm 구간에 대해 분석하면 별로 최대 0.3 arcsec/mm로 목표정밀도를 잘 만족하고 있을 수 있으며, 직선 및 각운동오차 모두 볼스크류 리드동

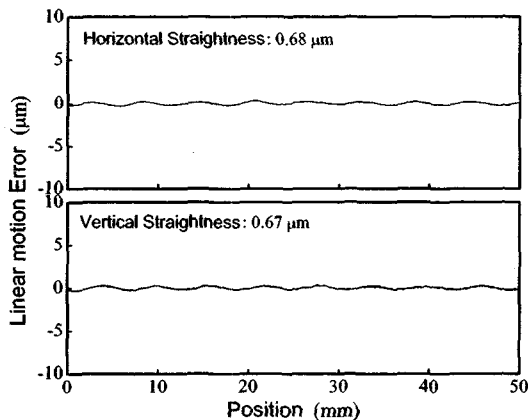


Fig. 7 Linear motion error of hydrostatic guideway

기오차가 주도적이므로 정강성의 개선에 의해 운동정밀도는 개선될 수 있음을 알 수 있다^{1,2}.

4.3 미소이송분해능

Fig. 9는 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 측정하는 것이다. 그림으로부터 테이블은, 리니어스케일의 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 탄성변형³이나 마찰력 변화등에 기인하는 로스트모션은 없음을 확인할 수 있다.

4.4 위치결정오차 및 반복오차

Fig. 10은 ISO 평가규격을 이용하여 유정압안내면의 위치결정오차 및 반복정밀도를 측정하는 결과를 나타낸 것이며, 측정값은 5회 반복측정값으로부터 통계적으로 구한 것이다. 먼저, 조립된 상태 그대로에서의 위치결정오차 및 반복오차는 각각 3.13 μm 및 $\pm 0.23 \mu\text{m}(2\sigma)$ 를 나타내고 있으며, 위치오차는 피드백센서인 리니어스케일의 고유제작오차 및 스케일이 테이블의 측면에 부착됨에 따른 아베오프셋(Abbe offset)오차 등에 기인한 것이다. 이 오차값을 이용하여 테이블 중앙을 기준으로 소프트웨어적으로 오차보정을 수행한 결과를 아래 그

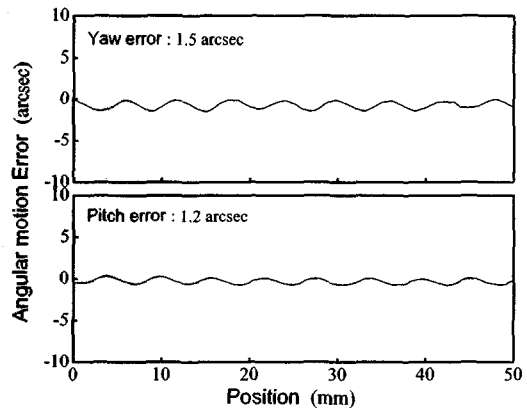


Fig. 8 Angular motion error of hydrostatic guideway

림에 나타내었다. 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.

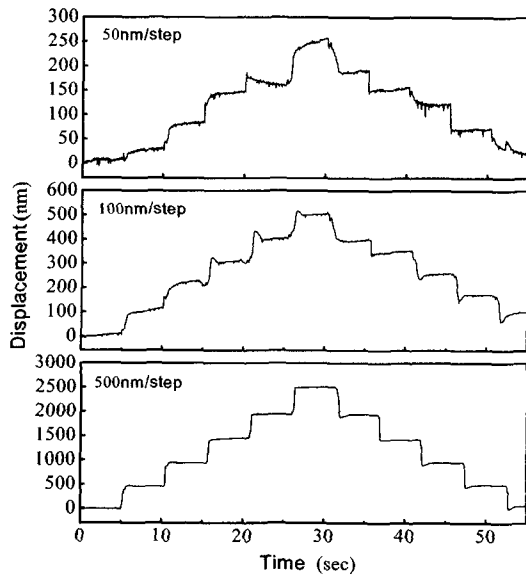


Fig. 9 Micro step response of hydrostatic guideway

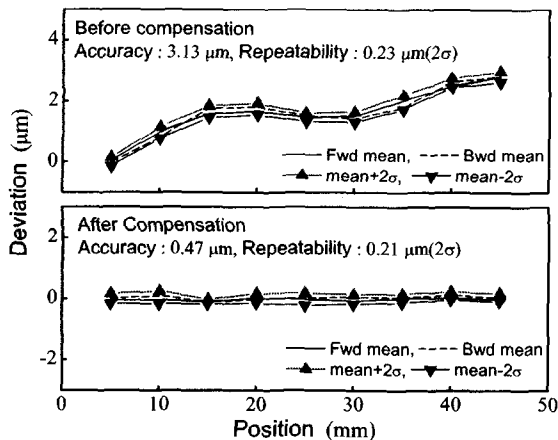


Fig. 10 Effect of NC compensation in the positioning error and repeatability of hydrostatic guideway

5. 결론

본 연구에서는 폐물가공용 고정밀 무심연삭기의 이송시스템을 설계, 제작하고 실험을 통해 실용상의 적용가능성을 분석하였으며, 그 결과, 폐물 에 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 유정압 패드에 의한 탄성변형으로 설계값보다는 다소 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 나타내었다.
- 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 주관하는 “고기능성 부품용 지능형 연삭시스템개발”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Park, C. H., Kim, I. C., Chung, Y. K. and Lee, H. S., “Study on the Floating Couplings for High Precision Feeding with Ballscrew,” J. of the KSPE, Vol. 14, No. 5, pp. 157-163, 1997.
2. Shinno, H., Hashizume, H. and Ito, Y., “New Proposals for Connecting Mechanism of Table to Its Driving System in Precision Machine Tools,” Tr. of

- the JSME Series C, Vol. 57, No. 542, pp. 3286-3292, 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, pp. 229, 1992.