

◆특집◆ 정밀 공작기계를 위한 측정/평가기술

정밀공작기계용 이송시스템의 성능평가 사례

박천홍*, 황주호*

Examples of Performance Estimation on the Feed Sytem of Precision Machine Tools

Chun Hong Park * and Joo Ho Hwang*

Key Words : Performance estimation(성능평가), Centerless grinding machine(무심연삭기), Ultra precision lathe(초정밀선반), Feeding system(이송시스템), Linear motor(리니어모터), Ballscrew(볼스크류)

1. 서론

정밀 공작기계에 있어 안내/이송계(이하, 이송 시스템)의 중요성은 새삼스럽게 강조할 필요가 없을 정도로 꾸준히 강조되어 왔다. 또한, 최근 들어서는 광부품, 반도체, 디스플레이 등 초정밀 가공 기술시장의 급격한 확대에 따라 이들 산업의 제조 장비용 핵심기술로서 이송시스템의 역할 및 수요는 훨씬 확대되어가고 있으며, 오히려 요구정밀도 면에서는 공작기계상에서의 요구성능을 초월하여, 이들 산업에서 개발된 기술이 역으로 공작기계에 적용되어야하는 시점으로까지 진전되고 있다.

저자가 소속되어 있는 한국기계연구원 공작기계그룹에서 이송시스템에 관련된 본격적인 연구를 시작한 것은 1990년대 중반부터이며, G7 첨단생산 시스템, 공업기반기술, 국가지정연구실사업 등의 일련의 정부과제를 통해 다양한 특성을 갖는 공작기계용 이송시스템 개발에 참여할 수 있는 기회를 얻게 되었다. 이들 연구개발에 있어 한국기계연구

원의 주된 역할은 이송시스템의 고정밀화를 위한 설계 및 성능평가를 통한 보완대책의 수립 등이었으며, 이 과정에서 얻어진 성능 분석 및 보완기술은, 관련 기술을 지속적으로 향상시키는 데 매우 유효한 경험으로 작용하였다. 특히 최근 공작기계에도 활발히 응용되기 시작하고 있는 리니어모터의 등장은 기존의 볼스크류와 더불어, 이송시스템의 고정밀화 및 설계기술 다양화에 큰 영향을 미치고 있다.

본 연구실에서도 볼스크류로 구동되는 유정압 안내면을 이용한 무심연삭기 이송시스템 개발¹ 및 리니어모터로 구동되는 유정압안내면을 이용한 초정밀선반용 이송시스템 개발 연구²를 수행한 바 있다. 본 원고에서는 이들 이송시스템 개발을 위해 수행했던 평가 사례들을 제시함으로써 국내 기술동향을 간략히 소개하고자 한다.

2. 볼스크류와 리니어모터의 특성 비교

앞에서도 언급했듯이 리니어모터기술의 급격한 발전과 함께 공작기계분야에 있어서도 리니어모터를 적용하고자 하는 연구가 많이 시도되고 있다. 특히, 비교적 경부하의 절삭력을 받는 고정밀 공작기계의 경우에는, 반도체나 LCD, 광부품 제조 장비에 적용되어 정밀도 및 안정성을 검증받고 있

* 한국기계연구원 공작기계그룹
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.

Table 1 Comparison of performance characteristics between the linear motor and ballscrew

특성	볼스크류	리니어모터
구동방식	접촉구동	비접촉구동
위치결정 방식	볼스크류자체로도 위치결정가능	피드백센서가 기본적으로 필요
고속 이송	스크류축의 위험속도가 한계 다출, 장 pitch 화에 의해 100 m/min 가능	피드백센서의 응답주파수가 속도한계, 마이크로미터 분해능의 경우 120~150 m/min 가능
장거리 이송	장거리화에 따라 정밀도, 이송속도 약화	stator 의 단순연결로 가능
가속성/추종성	커플링등에 의한 회전 inertia 큼	stage 경량화에 의해 가속성 향상
추력방향 외란	감속기구, inertia 에 의해 강함	추력만으로 지지
오염	윤활계의 오염원 존재	magnete 특성 이외에는 없음

는 무철심형 리니어모터의 적용 가능성이 매우 높아지고 있다. Table 1 은 현 시점에서 볼스크류와 리니어모터의 특성을 비교하여 정리한 것이다.

리니어모터의 경우, 이송계를 구성하는 부품수가 적고, 조립공차가 매우 크면서도 운동오차에의 간섭효과가 없다는 장점을 지니고 있어 설계 및 조립자에게 매우 매력적인 장점을 지니고 있다. 단, 기본적으로 피드백센서를 갖추어야 제어가 가능하고 자체의 가격이 아직 상대적으로 비싸다는 단점을 지니고 있다. 또한 공작기계에 적용하기 위해서는 특히 추력방향의 외란에 대한 성능이 검증될 필요가 있다.

3. 볼스크류를 이용한 무심연삭기용 이송시스템의 성능평가³

3.1 무심연삭기 이송시스템의 구성

현재 개발이 진행중인 무심연삭기는 광커넥터용 폐를 가공하기 위한 것으로, 지르코니아소재를 Fig. 1 에서와 같이 내,외경 동심도 0.5 μm, 진원도 0.1 μm 및 치수공차 ±0.2 μm 이내로 가공해야 한다. 또한 생산성의 확보를 위해 10 여개의 폐를 이 스루피드작업을 통해 연속적으로 가공이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 무엇보다도 이송시스템의 축방향강성이 좋아야하며, 조정차축이 경사되어 치수가 변화되지 않도록 안내면의 자세오차(yawing 및 pitching)를 최소화할 필요가 있다. 이를 위해 유정압안내면을 적용하고 볼스크류는 6 개의 지지베어링을 고정-고정형으로 체결하였으며 500 N/μm 이상의 축방향 정강성을 목표로하였다.

또한 0.1 μm 이내의 절입이 가능하도록 0.05 μm 의 분해능을 갖는 리니어스케일을 피드백센서로 사용하였다. 구조면에서는 중량언밸런스에 따른 열변형 및 이송오차가 발생하지 않도록 이송계의 구조는 최대한 대칭으로 설계하였다. Fig. 2 에 이송시스템 시작품을 나타내었다.

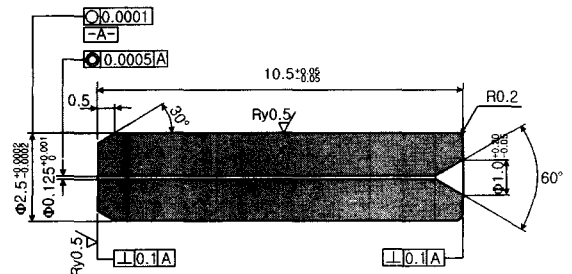


Fig. 1 Required machining accuracy in the ferrule

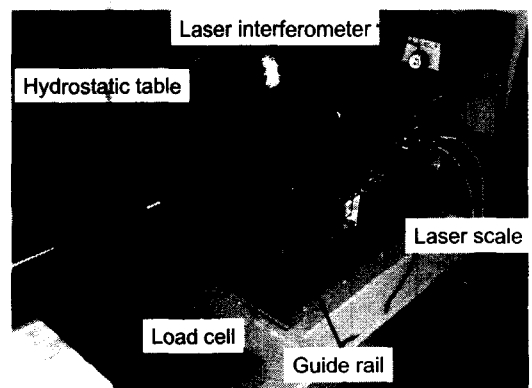


Fig. 2 Feed unit of CGM(Centerless Grinding Machine)

3.2 무심연삭기 이송시스템의 성능평가

3.2.1 축방향 정강성

Fig. 3 은 안내면의 축방향에 로드셀을 설치하고 변위계를 이용하여 정강성을 측정된 결과이다. 시작품에는 리니어스케일을 사용하므로 실제로 절삭시의 축방향 강성은 스케일을 작동시켰을 때의 서보강성을 포함한 결과로 나타나게 된다. 따라서 스케일을 작동시켰을 때와 작동하지 않았을 경우에 대해 각각 실험하여 결과를 비교하였다.

먼저 스케일을 작동하지 않았을 경우, 축방향 강성은 약 300 N/ μ m 로, 최종목표치 500 N/ μ m 에는 다소 부족하지만, 기계 구조적인 강성 목표치 250 N/ μ m 보다는 높게 나타나고 있다.

스케일을 작동시킨 상태에서의 경우의 축방향 강성 측정결과를 Fig. 3(b)에 나타내었으며, 스케일의 위치보정효과로 약 1000 N 까지의 하중에 대해 정강성이 무한대로 됨을 보이고 있다. 예상되는 연삭저항이 최대 약 100 N 이므로, 페룰가공시에 축방향 강성이 가공 형상오차에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

3.2.2 운동정밀도

Fig. 4 는 안내면의 각운동오차를 레이저간섭계를 이용하여 측정한 결과이다. 전체 50 mm 의 이송구간에 대해 요오차는 1.5 arcsec, 피치오차는 1.2 arcsec 를 나타내고 있다. 페룰의 치수공차($\pm 0.2 \mu$ m)와 절입량을 고려하면 최대 0.5 arcsec/mm 이내의 각운동정밀도가 필요하게 되며, 측정결과 는 어

느 임의의 구간에 있어서도 0.3 arcsec/mm 이내의 각운동정밀도를 나타내고 있어 충분히 목표정밀도를 만족함을 확인하였다. 한편, 각운동오차의 구체적인 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 mm 와 정확히 일치하는 주기로, 볼스크류의 회전에 따라, 볼스크류 조립오차 및 런아웃오차가 테이블을 상하방향으로 변위시킴에 의해 발생하는 오차이다. 이러한 리드동기오차는 테이블의 강성과 볼스크류의 굽힘강성 및 볼스크류의 런아웃오차의 비에 따라 크기가 결정된다. 따라서, 보다 운동정밀도를 개선시킬 필요가 있을 경우에는 테이블의 강성의 증가, 볼스크류 굽힘강성 감소(직경감소, 길이증가, 지지방식변경 등) 또는 테이블과 볼스크류 사이에 커플링설치 등의 방법을 통해 개선을 기대할 수 있다.

3.2.3 미소이송특성

Fig. 5 는 유정압안내면의 미소이송에 따른 응답특성을 정전용량형변위계를 이용하여 측정한 결과로, 실험은 1step 당 0.5, 0.1, 0.05 μ m 의 변위를 5 step 연속으로 전, 후진할 수 있도록 입력값을 주고 그 때의 테이블의 응답변위를 측정한 것이다. 그림으로부터 테이블은, 리니어스케일의 최소분해능인 0.05 μ m/step 의 분해능까지 정확히 변위량을 보이며 잘 응답하고 있음을 보이고 있으며, 0.05 및 0.1 μ m/step 의 경우에 있어 왕복운동간에

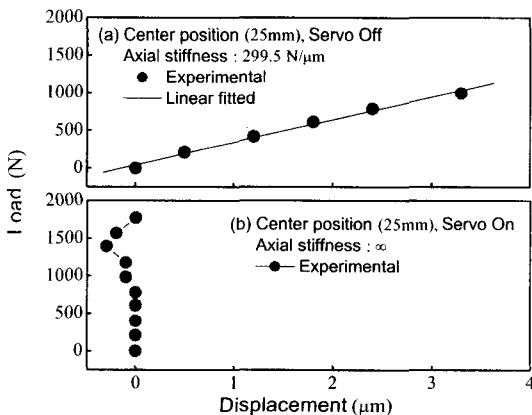


Fig. 3 Axial stiffness of feed unit (CGM)

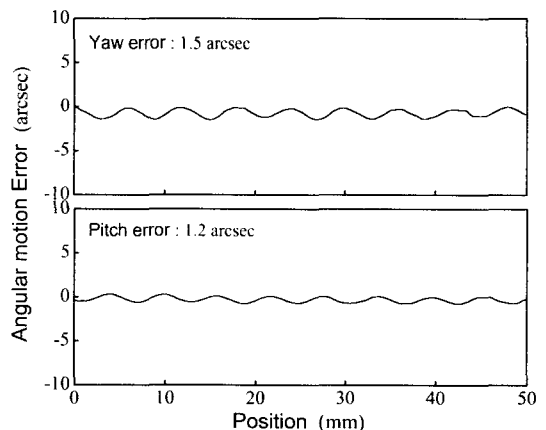


Fig. 4 Angular motion error of feed unit (CGM)

약간의 위치차이를 보이고 있는 것은, 주로 스케일의 신호체배에 있어서의 오차에 의한 것으로 볼스크류의 비선형 탄성변형이나 마찰력 변화등에 기인하는 로스트모션은 없음을 확인할 수 있다.

3.2.4 위치결정정밀도 및 반복정밀도

Fig. 6 은 레이저간섭계를 이용하고 ISO 평가규격을 적용하여 유정압안내면의 위치결정오차 및 반복정밀도를 측정된 결과를 나타낸 것이며, 측정값은 5 회 반복측정값으로부터 통계적으로 구한 것이다. 먼저, 조립된 상태 그대로에서의 위치결정오차 및 반복오차는 각각 $3.13 \mu\text{m}$ 및 $0.23 \mu\text{m}(2\sigma)$ 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 그림에 나타내었다. 위치결정오차는 $0.47 \mu\text{m}$ 으로 대폭 향상되었으나 반복오차는 $0.21 \mu\text{m}(2\sigma)$ 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, 실제 폐물

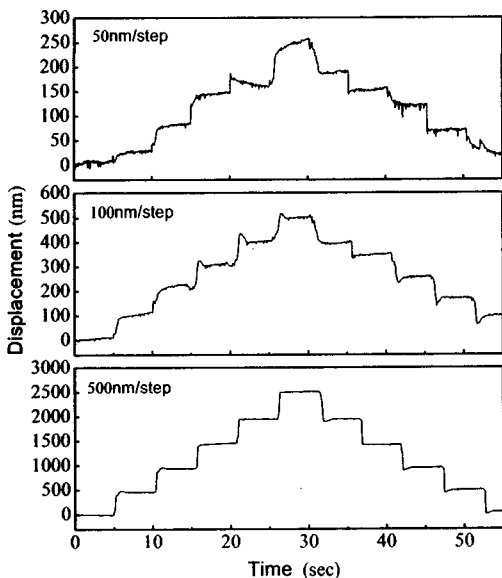


Fig. 5 Micro step response of feed unit (CGM)

의 가공환경과 같이, 향온을 유지하고 윤활특성 및 온도특성을 안정화할 경우 $0.1 \mu\text{m}(2\sigma)$ 대까지의 반복정밀도는 기대할 수 있을 것으로 추정된다.

4. 리니어모터를 이용한 초정밀선반용 이송시스템의 성능평가⁴

4.1 초정밀선반용 이송시스템의 구성

$0.1 \mu\text{m}$ 이내의 형상정밀도를 얻을 수 있는 초정밀선반을 제작에 있어 가공물의 형상정밀도와 안내면의 정강성의 관계를 고려할 때, 기본적으로 $100 \text{N}/\mu\text{m}$ 이상의 절삭계의 정강성을 필요로 한다. Fig. 7 의 일반적인 초정밀가공기의 구조를 고려하면, 절삭계의 정강성(루프강성)은 X 축 안내면의 수평방향 정강성, Z 축 안내면의 이송방향 정강성, 주축의 축방향 정강성 및 톨포스트의 정강성 등의 조합으로 이루어진다. 여기서, 톨포스트의 구조강성이 충분히 높다고 가정해도, 주축은 일반적으로

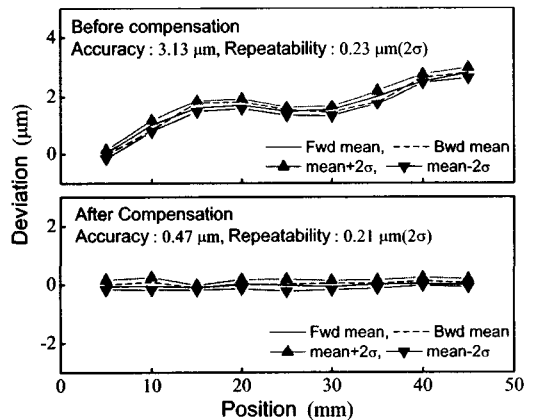


Fig. 6 Positioning error of feed unit (CGM)

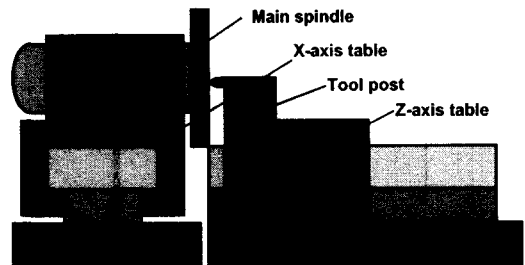


Fig. 7 Example of an UPL (Ultra Precision Lathe)

안내면에 비해 강성이 작으므로, 충분한 루프강성을 유지하기 위해서는 안내면의 정강성을 높일 필요가 있으며, 따라서 안내면의 수평방향 정강성은 루프강성의 2 배가 되는 200 N/μ m를 목표로 하고 있다. 유정압안내면의 구조는, 조립의 용이성 및 구조강성을 고려하여, 레일이 유정압베어링을 감싸는 역구속형으로 되어있으며, 유정압안내면의 이송길이는 250 mm 이다.

안내면의 축방향 정강성은 리니어모터 자체의 이송방향 추력과 피드백센서로 사용되는 리니어스케일의 패루프 제어강성에 의존하게 된다. 리니어모터의 실제 추력은 제어계의 튜닝에 의해 변화하므로 최대 절삭력을 충분히 견딜수 있도록 선정되어야 하며, 또한 초정밀가공기에 적합하도록 발열 특성도 좋아야한다. 본 시스템에는 이러한 요구 특성을 고려하여 156 N의 이송방향 연속추력을 갖는 무철심형 리니어 DC 모터를 사용하였으며, 피드백센서로는 최소분해능 0.01 μ m의 레이저스케일(정밀도 0.28 μ m)를 사용하였다. 또한 0.1 °C의 온도제어능력을 갖는 오일컨디셔너를 윤활탱크에 연결하여 윤활유를 냉각함으로써 유온변화가 유정압안내면의 반복정밀도에 미치는 영향을 최소화하였다. Fig. 8에 유정압안내면 시작품의 구조를 나타내었다.

4.2 초정밀선반용 이송시스템의 성능평가

4.2.1 정강성

Fig. 9에 수직방향 및 수평방향에 대한 정강성 측정결과를 이론치와 함께 비교하여 나타내었다.

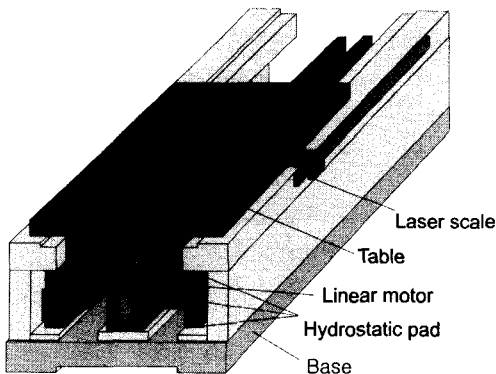


Fig. 8 Structure of hydrostatic guideway and feed unit for UPL

먼저 수직방향 실험결과는 428 N/μ m를 보이고 있으며 이론치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 수평방향의 경우에는 설계치에 비해 다소 부족한 177 N/μ m를 나타내고 있다. 이것은, Fig. 8의 유정압안내면의 구조를 참조하면, 수평방향 레일의 두께가 얇으므로, 유정압패드에 작용하는 면압에 의해 수평방향 레일이 탄성변형을 일으키게 되고 이에 따라 정강성이 감소되기 때문이다. 실험결과 평균 4 μ m의 탄성변형이 있음을 확인하였으며, 이 변형값을 베어링간극의 증가로 간주하여 다시 계산한 이론치($h_0=29 \mu m$)는, 그림에서와 같이, 실험결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 10은 안내면의 이송방향 정강성 실험결과를 나타낸 것이다. 이상적으로는 리니어모터의 연속추력 156 N까지 무한강성을 기대할 수 있다. 그러나, 실제로는 제어계인, 특히 오차를 누적 보상

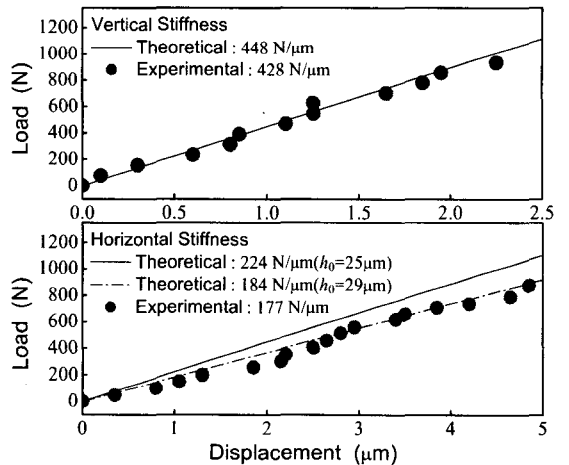


Fig. 9 Vertical and horizontal stiffness of guideway (UPL)

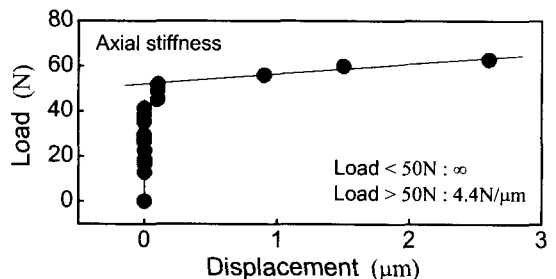


Fig. 10 Axial stiffness of feed unit (UPL)

하는 적분게인의 포화상태에 의해 약 50 N 까지의 하중에 대해서는 무한강성을 얻을 수 있지만, 그 이상의 하중이 작용할 경우에는 약 4.4 N/ μ m 로 강성이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 안내면의 경량화, 스케일 분해능의 저하 및 제어기의 제어성능 개선등을 통해 무한강성의 범위를 다소 확장하는 것은 가능하다고 예측되며, 본 연구에서는 최대 질삭력 10 N 을 기준으로 설계하였으므로, 50 N 까지의 무한강성 범위이면 초정밀가공기 안내면에 충분히 적용가능하다고 판단된다.

4.2.2 미소이송특성 및 위치결정정밀도

유정압안내면의 미소이송에 따른 응답특성 실험

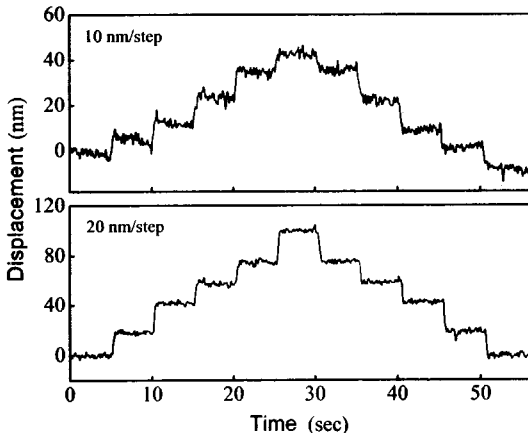


Fig. 11 Micro step response of feed unit (UPL)

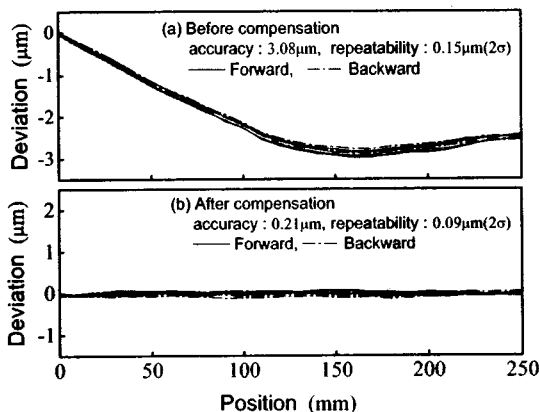


Fig. 12 Positioning error of feed unit (UPL)

험결과를 Fig. 11 에 나타내었다. 실험에서는 한 스텝당 20 nm 및 10 nm 의 변위를 5 스텝 연속으로 전, 후진할 수 있도록 입력값을 주고 그 때의 테이블의 응답변위를 측정하였다. 그림으로부터 테이블은, 실험에 사용한 레이저스케일의 최소분해능인 10 nm/step 의 분해능까지 명확히 추종하고 있음을 보이고 있으며, 왕복운동에 있어서 로스트 모션 등은 없음을 알 수 있다.

안내면의 위치결정오차 및 그 때의 반복오차를 측정된 결과를 Fig. 12 에 나타내었다. 먼저, 조립된 상태 그대로에서의 위치결정오차 및 반복오차는 각각 3.08 μ m 및 0.15 μ m(2σ)를 나타내고 있다. 무심연삭기용 이송시스템과 마찬가지로 레이저스케일의 부착 위치에 따른 Abbe offset 오차에 의해 스케일의 정밀도보다 오차량이 커짐을 알 수 있으며, 소프트웨어적으로 오차보정을 수행한 결과, 아래 그림과 같이, 위치결정오차 및 반복오차는 각각 0.21 μ m 및 0.09 μ m(2σ)로 향상되었다. 여기에서도 반복오차에 의해 위치결정오차가 더 이상 향상되지 못함을 알 수 있다. 반복오차는 유정압안내면에 사용되는 윤활유의 온도특성에 의한 영향과 함께, 측정에 사용된 레이저간접계의 주위 온도변화에 따른 공기굴절을 변화에 의한 영향도 매우 크다고 추정하고 있으며, 이들 요소가 위치결정오차 및 반복오차에 미치는 영향에 대해서는 추가적인 연구를 진행하고 있다⁵.

4.2.3 운동정밀도

유정압안내면의 수평방향 운동오차는 가공형상에 그대로 전사되므로, 목표로 하는 가공정밀도를 얻기 위해서는 안내면의 운동오차를 최소한 같은 수준으로 유지할 필요가 있다. 이를 위해, 본 시스템에서는, 저자등이 기 제안한 바 있는 능동 제어모세관(Active Controlled Capillary, 이하 ACC로 약칭)을 이용한 운동오차 보정법⁶을 적용하여, Fig. 13 과 같이 수평방향 한 쪽 면의 양단 포켓에 ACC 를 설치하고 직선 및 각운동오차를 동시에 보정하도록 하였다. 구체적으로는 먼저, 운동오차 측정치로부터 보정해야할 운동오차에 해당하는 각 이송위치에서의 변위값을 구한 후, 예비실험을 통해 미리 얻은 게인값을 이용하여 각 ACC 내 압전소자에의 입력전압을 구해 제어기에 입력하고 보정을 수행한다. 게인 및 압전소자 등의 비선형성에 의해 한 번의 보정으로 충분한 정밀도를 얻지

못할 경우, 반복제어알고리즘을 이용하여 반복적인 보정을 수행하게 된다.

Fig. 14 에 보정 전, 후의 운동오차를 나타내었다. 먼저, 조립 직후의 직선 및 각운동오차는, 250 mm 의 이송구간에 대해, 각각 0.30 μm 및 3.51 arcsec 를 나타내었다. 한편, 3 회 반복 보정후의 측정결과, 직선운동오차는 0.08 μm 까지, 각운동오차는 0.10 arcsec 까지 향상되어 초정밀가공에 충분히 적용할 수 있는 결과를 보이고 있다.

4.2.4 속도변동특성

리니어모터는 일반적으로 고속특성이 우수하다고 알려져 있다. 그러나 초정밀선반 이송계에

리니어모터를 적용하기 위해서는 반대로, 저속에서의 특성을 검증할 필요가 있다. Fig. 15 는 초정밀 절삭가공의 일반적인 절삭속도 범위인 30 mm/min 와 급속이송범위인 720 mm/min 에서의 유정압안내면의 속도변동특성을 실험한 결과를 나타낸 것으로, 구형파에 대한 응답속도 측정결과로부터 안정된 정속구간의 측정값을 확대하여 나타낸 것이다. 이송속도는 지령속도와 정확히 일치하고 있으며, 속도의 최대변동값은 이송속도에 따라, 각각 0.2, 1.1 mm/min 를 나타내고 있다. 이것은 각각의 이송속도에 대해 0.6 % 및 0.15 %에 해당하는 값이므로, 매우 안정적으로 초정밀가공에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 원고에서는 현재, 개발이 진행중인 고정밀 공작기계용 이송계의 평가사례를 중심으로 볼스크류 구동 이송시스템과 리니어모터 구동 이송시스템의 특성을 비교하였다. 각각의 이송시스템이 목표로 하는 성능에 다소 차이가 있으므로 절대적인 성능의 우열을 비교하기보다는 요구되는 특성에 따라 어떤 성능을 보이는 지를 초점으로 판단을 한다면 나름대로 응용의 기준 설정이 가능하다. 리니어모터 구동형 이송계를 중심으로 판단하면, 우선, 아직 정밀도와 추력을 동시에 기대하기는 어렵다. 고추력을 위해 별도로 철심형 리니어모터가 시판되고 있지만, 이 경우에는 높은 발열특성

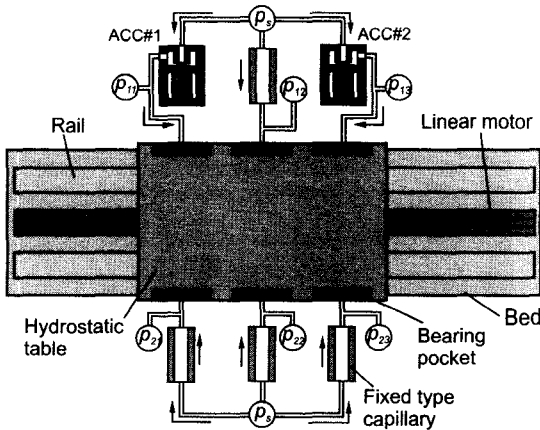


Fig. 13 Motion error compensation method using two ACCs

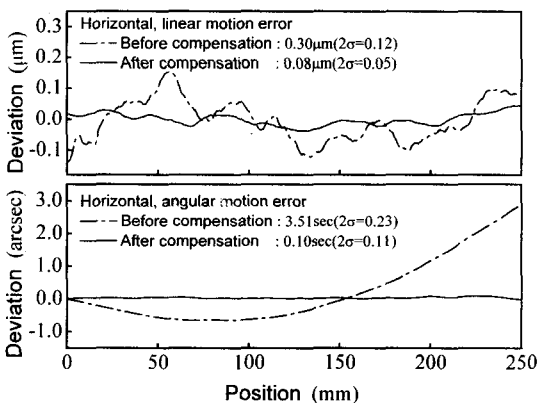


Fig. 14 Motion errors of UPL before and after the compensation

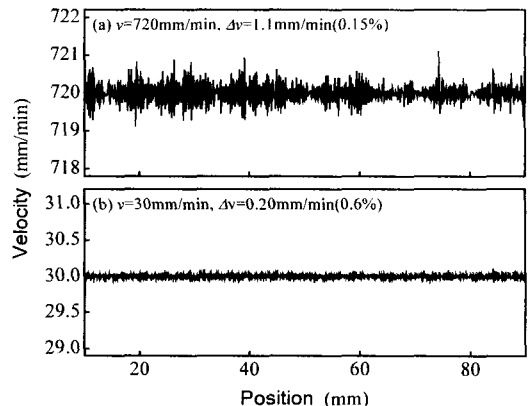


Fig. 15 Velocity variation in the range of ultra precision cutting (UPL)

등으로 인해 고정밀 이송계에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 본 실험에서 사용한 무철심형 리니어모터의 경우에는 현재까지의 평가결과로부터 초정밀선반용 정도로는 사용이 가능하다고 기대되지만, 보다 명확한 판단은, 현재 실험이 진행중인 이송방향 동강성의 평가결과를 지켜보아야 할 필요가 있다. 그러나 내용상에서도 언급했듯이, 설계자에게 있어 리니어모터는 설계, 조립의 간결성면에서 매우 매력적인 수단이다. 또한 실험결과에서는 나타나지 않지만, 성능평가과정에 있어서, 오차요인 추적의 명확성 및 보정을 통한 개선효과의 명확성 등에 있어서도 리니어모터는 많은 장점을 가지고 있다는 것을 느낄 수 있었다.

참고문헌

1. CESCO Cooperation, "Development of High Precision Feeding System and Auxiliary Devices for Grinding Machine," Project Report, Ministry of Commerce, Industry and Energy, 2003.
2. Daewoo Heavy Industry Ltd., "Ultra Precision Machining Technology," Project Report, Ministry of Commerce, Industry and Energy, 2002.
3. 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.
4. Park, C. H., Oh, Y. J., Hwang, J. H. and Lee, D. W., "Development of a Hydrostatic Guideway Driven by the Linear Motor," J. of KSPE, Vol. 21, No. 6, pp. 139-144, 2004.
5. Hwang, J. H., Park, C. H., Lee, C. H. and Kim, S. W., "Analysis and compensation of positioning error for aerostatic stage", Proceedings of the KSPE Spring Annual Meeting, pp. 378 - 381, 2002
6. Park, C. H., Song, Y. C., Kim, S. T. and Lee, H., "Improvement of Motion Accuracy Using Active Controlled Capillary in Hydrostatic Table," J. of KSPE, Vol. 14, No. 12, pp. 114-120, 1997.