

고정밀 이송을 위한 볼스크류용 체결기구의 특성에 관한 연구

(Characteristics of floating couplings of ball screw for high precision feeding system)

김 인 찬^{*}, 박 천 홍^{**}, 정 윤 교^{**}, 이 후 상^{**}

I. C. KIM, C. H. Park, Y. K. Chung, H. S. Lee

* 창원대학교 대학원 ** 창원대학교 *** 한국기계연구원

ABSTRACT

As the run out error and misalignment of ball screw connected directly to guide table largely affect the motion accuracy of guideway, floating coupling that releases the table from screw nut except feed and rotational direction is needed to decrease its influences. The purpose of this study is to propose a practical model of floating coupling of ball screw for high precision feeding system. The straightness, dynamic characteristics and micro step response of hydrostatic guideway, mounted with three types of coupling; fixed type, leaf spring type and hydrostatic type, are tested and compared. From the results of experiments, it is proved that a hydrostatic type floating coupling is superior to other couplings and is available to high precision feeding system with ball screw.

key words : floating coupling, high precision feeding, ball screw, straightness, micro step response, dynamic characteristics

1. 서론

최근들어 고정밀이송시스템에 대한 연구가 활성화되고 있으며 특히 서보모터의 회전운동을 테이블의 직선운동으로 변환시키는 이송기구의 고정밀화가 대부분의 관련 연구의 핵심이 되고 있다.

공작기계용 정밀안내면을 고정도로 구동할 경우 응용가능한 이송기구로는 마찰구동기구(friction drive), 볼스크류 등을 대표적으로 들 수 있으며 이 외에도 유정압스크류¹⁾, 공기정압스크류²⁾ 등이 간헐적으로 사용되고 있으나, 이송방향 강성을 얻기 어렵고 제작이 어려워 응용 예는 극히 드물다.

마찰구동기구는 미국의 LLNL에서 최초로 초정밀공작기계에 적용한 이후 활발히 응용연구가 지속되고 있으며, 볼스크류에 비해 미소이송분해능면에서 유리하여 0.5nm정도의 분해능을 달성한 예도 보고되고 있다³⁾. 그러나 이송방향으로의 추력이 공작기계에 사용하기에는 아직 다소 미흡하고 부하가 작용할 경우 구성요소의 접촉운동부에서 발생하는 미소 슬립현상등의 문제점이 있어⁴⁾ 경부하의 초정밀 공작기계 이송계에 한정되어 적용되고 있는 실정이다.

볼스크류는 상대적으로 높은 이송계 강성을 지니고 있고 정밀 이송에 있어서도 서브미크론대까지는 용이하게 미소이송분해능을 얻을 수 있으며, 최근의 제어기술의 발전과 함께 페루프제어를 이용하는 경우 볼의 탄성변형을 이용하여 nm대의 분해능이 얻어지는 연구 사례도 발표되는 등⁵⁾ 정밀·초정밀 공작기계 이송계에 광범위하게 이용되고 있다. 또한 상대적으로 메카니즘이 널리 알려져 있어 성능면에서 쉽게 신뢰성을 얻을 수 있는 장점도 지니고 있다.

한편, 볼스크류로 안내면을 정밀 이송하는 경우 볼스크류물 안내면 테이블에 직접 체결하여 구동하면, 회전에 따른 흔들림, 조립오차 등에 의해 볼스크류와 테이블간에 상대변위가 발생하며 이 때 테이블 지지강성이 볼스크류의 굽힘강성에 비해 충분히 크지 못한 경우 상대변위는 테이블의 운동정도를 악화시키게 된다.

볼스크류용 베어링의 지지방법을 조절하면 이러한 영향은 어느 정도 감소되나 위치결정정도의 악화 및 백래쉬 등을 유발하게 되어 고정밀도를 얻는 데에는 적합하지 못하다. 또한 어느 경우에도 외부의 진동이 테이블에 직접 전달되므로 테이블의 운동특성을 악화시키게 된다.

따라서 운동정도를 고정도화하기 위해서는 볼스크류 너트(이하 너트)와 테이블 사이에 로스트모션(lost motion)이 없도록 너트의 이송방향 및 회전방향을 높은 강성으로 구속하고 그 외의 방향에 대해서는 테이블의 변위를 자유롭게 함으로써 이송계의 운동오차 및 진동을 흡수할 수 있는 메카니즘, 즉 부상용 체결기구(floating coupling, 이하 체결기구)의 구성이 필요하다.

新野⁶⁾은 4개의 구를 연결한 체결기구 및 공기마운트식 체결기구를 이용하여 볼스크류구동에 따른 영향을 감소시킨 실험결과를 발표하였으나 정밀위치결정에 필요한 미소이송의 응답성 및 동특성에 대해서는 언급되지 않았으며 Slocum⁷⁾은 유정압체결기구 및 보조가이드를 이용하여 이송방향 및 회전방향을 구속하는 모델을 제시하고 있으나 보조가이드 레일의 형상오차가 볼스크류 너트의 회전각도에 영향을 미치지 않게 하기 위해서는 상대적으로 큰 공간을 필요로 하고 이중 가이드 설치에 따른 제작, 조립의 난이도가 증가하는 어려움이 있어 일반적으로 적용하기는 어렵다.

본 연구에서는 상대적으로 간결한 구조를 가져 제작, 조립 및 공간적인 측면에서 효율적이면서도, 볼스크류의 흔들림 및 외란의 영향을 가능한 한 감소시킬 수 있어 고정밀이송용 볼스크류에의 응용에 적합한 체결기구의 실용화 모델을 제시하고자 하였으며 이를 위해 유정압안내면을 대상으로, 테이블과 너트간을 강체로 체결하는 고정형, 탄성체로 체결하는 판스프링형 및 탄성힌지와 유정압의 이중구조를 이용하여 비접촉으로 체결하는 유정압형의 세 가지 방식의 체결기구를 이용하여 진직도, 미소이송, 동특성 등을 측정하고 각 방식의 특성을 비교함으로써 실용성을 검증하고자 하였다.

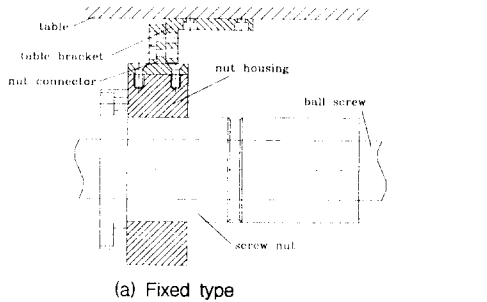
2. 실험용 체결기구의 구조

Fig. 1에 본 논문에서 실험대상으로 한 체결기구의 구조를 나타내었다.

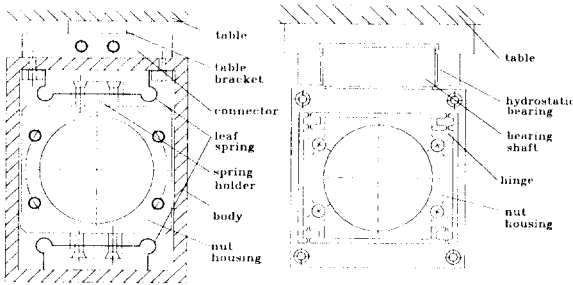
고정형은, 너트와 테이블사이의 상대운동이 없도록 일체로 체결하기 위해, 너트가 고정되어 있는 너트하우징과 테이블이 고정되어 있는 테이블브라켓을 고정용 커넥터를 사용하여 볼트로 고정하는 체결구조로 되어 있으며, 볼스크류에서 조립, 운동오차가 발생하는 경우 볼스크류의 굽힘변형 및 테이블의 변위에 의해 오차가 흡수된다.

판스프링형은 너트가 고정되어 있는 너트하우징과 테이블에 고정된 몸체부 사이를 2개의 판스프링으로 연결하는 구조로 되어 있으며 판스프링은 두께 0.6mm, 이송방향 길이 40mm로 하여 상대적으로 이송방향강성이 크고 상하, 좌우방향 강성이 약한 구조로 함으로써 가능한 한 볼스크류의 조립, 운동오차가 판스프링의 탄성변형에 의해 흡수되도록 하였다.

유정압형은 볼스크류의 수직방향 조립, 운동오차는 유정압베어링과 베어링용 샤프트의 수직방향 공차(1.5mm)에 의해, 요(yaw)오차는 유정압저어널베어링의 회전에 의해 흡수되고 수평방향 조립, 운동오차를 하부에 연결된 탄성힌지가 흡수하도록 이중 구조로 되어 있으며 유정압저어널베어링의 간극은 10 μ m로 되어 있다.



(a) Fixed type



(b) leaf spring type

(c) hydrostatic type

Fig. 1. Structure of the proposed floating couplings

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치의 구성

Fig. 2는 실험용 안면면의 구조를 나타낸 것이다.

유정압테이블은 양면패드방식(double pad type)의 반밀폐형구조로 되어 있고 테이블 밑면에 고정되는 체결기구를 이용하여 볼스크류와 결합되어 있으며 사용가능한 스트로크는 240mm로 되어 있다. 실험에 있어서 유정압테이블의 공급압력은 10kg/cm², 사용운환유의 점도는 10cSt이며 사용압력에서 측정된 유정압테이블의 강성은 수직방향 53N/ μ m, 수평방향 35N/ μ m이다.

볼스크류는 피치 5mm의 C0급이고 백래쉬를 없애기 위해 더블 너트형 너트를 사용하였으며, 양단 베어링은 고정-고정방식으로 지지되어 있다. 한편 각 체결기구를 교체하여 조립할 때에 양단

지베어링의 예압량이 달라질 수 있으므로 토오코렌치를 이용, 일정한 토오코로 베어링너트를 체결하였으며 볼스크류는 플렉시블커플링을 이용하여 구동용 모터(AC servo, Pacific scientific, 1.5 kW)에 연결되어 있다.

구동모터는 DSP보드(MEI, 1축용)를 내장한 PC를 이용하여 PID 방식에 의해 제어되며 5,000ppr의 로타리엔코더가 모터 뒷면에 부착되어 있다.

이송시스템은 반폐루프(semi-closed loop)방식으로 제어되고 이송분해능을 향상시키기 위해 엔코더의 파형을 10채배할 수 있는 채배박스를 사용하였으며, 컨트롤러내에서 4채배가 추가되어 최소이송분해능은 0.025 μ m가 되도록 구성되어 있다. Fig. 3은 이송시스템의 제어계를 나타낸 것이다.

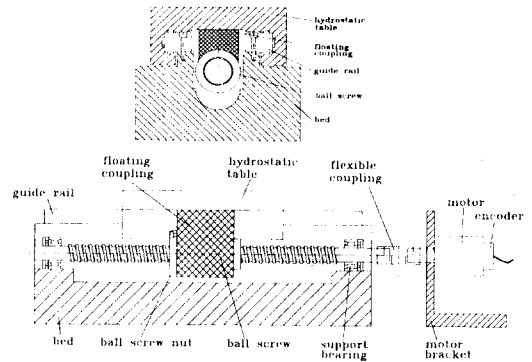


Fig. 2. A hydrostatic guideway for experiment

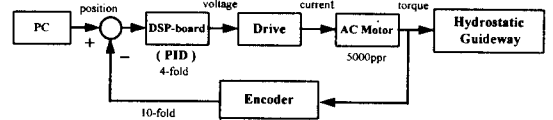


Fig. 3. Control loop of feeding system

3.2. 실험방법

1) 진직도

각 체결기구가 운동정도에 미치는 영향을 파악하기 위해 체결기구가 장착된 테이블중앙에 반사경을 설치하고 테이블을 속도 5 mm/s, 스트로크 200mm로 이송시키면서 그 때의 수직방향 및 수평방향 진직도를 레이저간섭계(HP 5528A)를 이용하여 측정하였으며, 측정된 데이터는 샘플링속도 20Hz의 GPIB보드를 통해 PC로 저장되도록 하였다.

또한 볼스크류 및 체결기구의 영향이 없는 유정압테이블 자체의 진직도를 측정하기 위해서는 테이블과 이송기구를 분리한 후, 와이어를 테이블에 연결하고 수동으로 20mm씩 이동시켜가면서 레이저간섭계를 이용하여 측정하였다.

2) 동특성

체결기구에 따른 동특성을 평가하기 위해 테이블의 이송방향에 가속도계를 설치하고 반대편을 임팩트해머로 타격하여 그 응답신호를 FFT(B&K, 2032)를 이용하여 측정하였다.

3) 미소이송특성

각 체결기구에 의해 구현될 수 있는 미소이송분해능 및 응답성을 비교하기 위해 이송시스템의 1스텝당 이송량을 감소시켜가면서 그 때의 응답변위를 테이블의 이송방향 후면에 용량형센서(ADE Microsense, 분해능 10nm)를 설치하여 측정하였다.

측정에 있어서는 한 스텝당 5초의 정지시간을 주어 총 65초간

의 응답을 측정하였으며 이송속도는 5mm/s로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 진직도

Fig. 4는 먼저 유정압테이블과 레일간의 상대운동에 의한 테이블만의 진직도를 알아보기 위해 와이어를 이용, 수동으로 240mm를 구동했을 때의 측정된 결과를 나타낸 것으로 수평방향 2.89 μm , 수직방향 2.95 μm 의 진직도를 보이고 있으며 수평방향으로는 1산성분의 오목한 파형, 수직방향으로는 레일을 베드위에 고정하기 위해 120mm간격으로 체결된 볼트의 영향으로 2산성분의 운동궤적을 보임을 알 수 있었다.

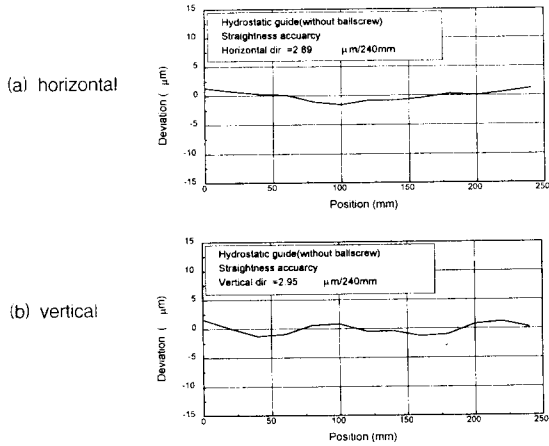


Fig. 4. Straightness of hydrostatic table without feeding system

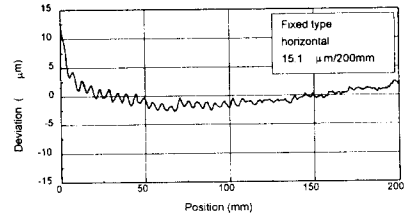
Fig. 5 - Fig. 7은 각 체결기구를 장착했을 때의 진직도를 측정하는 것으로, 수평, 수직방향의 모든 데이터에 있어 레일의 형상오차에 따른 유정압테이블의 고유 운동오차인 1 또는 2주기성분(Fig. 4 참조)이 지배적으로 나타나고 있으며 상대적으로 고주파성분인 각 체결기구의 특성에 따른 영향이 그 위에 실려있는 파형으로 운동하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5의 고정형의 수평방향 진직도 측정결과로부터 볼스크류 피치와 같은 5mm의 회전주기가 뚜렷하게 나타나고 있어 볼스크류의 흔들림이 테이블의 운동정도에 전달되고 있음을 알 수 있다. 또한 초기에 진직도가 급격히 나빠지는 것은 베어링지지 위치부근에서 볼스크류의 굽힘강성이 커져 상대적으로 볼스크류의 조립오차의 영향이 테이블에 크게 전달되기 때문이며 볼스크류 회전주기에 의한 진폭이 Fig. 5의 좌측에서 크게 나타나는 것으로도 그 영향을 확인할 수 있다. 수직방향 진직도 측정결과에서는 볼스크류의 회전주기 이외의 파형도 큰 진폭으로 나타나고 있는 데 이것은 강체로 연결하기 위한 테이블브라켓의 수직방향 구조 강성이 충분하지 못해 구조의 탄성변형 등이 영향이 복합되어 나타남에 따른 영향이다.

Fig. 6은 판스프링형을 체결했을 때의 진직도 측정결과로 양 방향 모두 운동궤적이 심한 진폭을 보이고 있으며 이것은 볼스크류의 운동이 판스프링의 오차출수범위를 넘어서면서 테이블브라켓 및 체결기구 구조가 탄성변형을 일으켜 테이블의 운동정도에 영향을 미치고 있기 때문이다.

Fig. 7은 유정압형에 대한 진직도 측정결과로 위의 두 방식에 비해 정도면에서는 상당히 개선된 결과를 보이고 있다. 수평방향 진직도는 2.88 μm 로 이송계의 영향을 제외한 테이블의 진직도(Fig. 4(a))와 거의 일치하고 있어 볼스크류에 의한 영향이 대부분 차단

(a) horizontal



(b) vertical

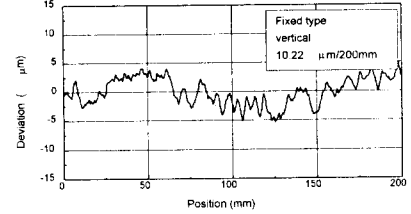
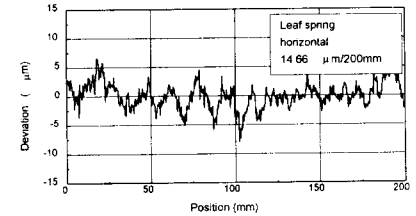


Fig. 5. straightness by fixed type coupling

(a) horizontal



(b) vertical

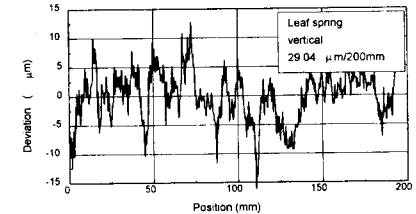
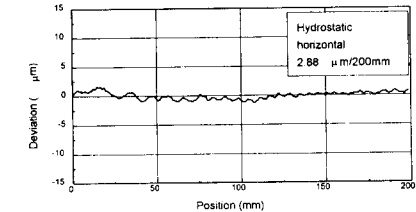


Fig. 6. straightness by leaf spring type floating coupling

(a) horizontal



(b) vertical

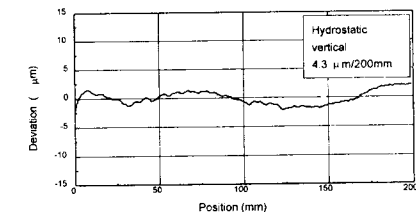


Fig. 7. straightness by hydrostatic type floating coupling

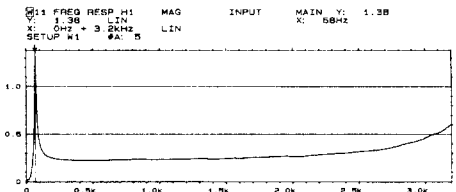
됨을 알 수 있다. 단, 초기부분에서는 힌지의 조립오차 흡수범위가 적어 힌지에 작용되는 볼스크류의 굽힘모멘트의 변화가 유정압타입에 일부 전달되고 있음을 보이고 있어 이러한 영향을 감소시키기 위해서는 조립오차 흡수능력 즉 힌지의 수평방향 강성을 더욱 감소시킬 필요가 있음을 알 수 있다.

한편 수직방향 진직도는 4.3 μm 로 이송계의 영향을 제외한 테이블의 수직방향 진직도(Fig. 4(b))와 다소 차이를 보이고 있으나 체결기구의 오차흡수범위인 유정압베어링과 하우징부 샤프트간의 수직방향공차(1.5mm)가 크고 Fig. 4(b)의 측정시에 측정간격을 20 mm간격으로 함에 따라 진직도 파형의 peak값이 포함되지 못한 것을 고려하면 수직방향에 있어서도 볼스크류의 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

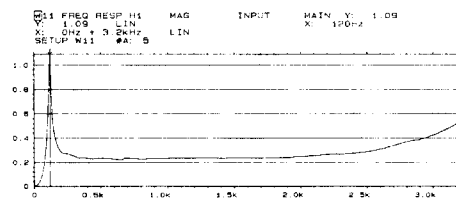
4.2. 동특성

Fig. 8은 각 체결기구의 임펄스 가진에 따른 주파수특성을 측정 한 결과로 (a)의 고정형은 이송방향으로 120Hz의 고유진동수를 가지고 있음을 나타내고 있으며 (b)의 판스프링형의 경우에는 고유진동수가 68Hz로 떨어져 동특성이 고정형에 비해 상대적으로 나빠짐을 알 수 있다. (c)의 유정압형에 있어서는 고유진동수가 152Hz로 나타나 세 가지 방식 가운데 가장 동특성이 뛰어나음을 알 수 있다.

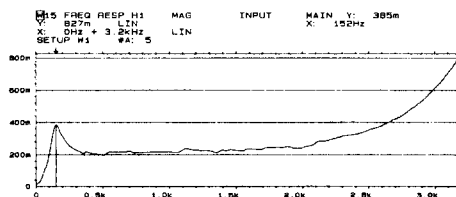
한편 Fig. 8의 고유진동 파형의 밴드폭을 이용하여 감쇠능을 비교하면 판스프링형 < 고정형 < 유정압형의 순으로 밴드폭이 넓어지고 있어 유정압형의 경우가 감쇠면에서도 가장 우수함을 알 수 있다.



(a) fixed type



(b) leaf spring type



(c) hydrostatic type

Fig. 8. dynamic characteristics of couplings

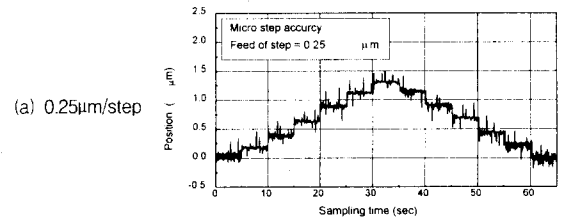
4.3. 미소이송특성

Fig. 9에 고정형 체결기구를 적용했을 때의 미소이송 실험결과를 나타내었다. Fig. 9(a)는 스텝당 0.25 μm 에 대한 응답특성으로

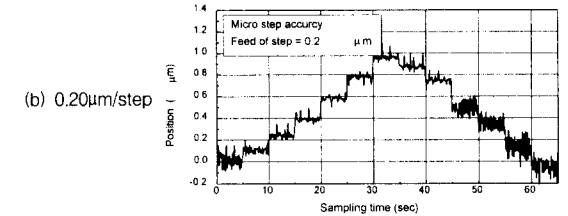
각 스텝에 대한 응답은 명확히 구별되나 전, 후진방향에 있어 모두, 최초 스텝에서는 출력변위가 입력스텝에 비해 작아지는 경향을 보이고 있다. Fig. 9(b)는 스텝당 변위를 0.20 μm 로 하였을 때의 응답특성으로 역시 전, 후진방향에 있어 최초 스텝의 출력변위는 입력스텝에 비해 작은 경향을 보이고 있어, 진행방향이 변하고 너트내의 볼의 마찰토크변동이 상대적으로 클 경우 미소슬립이나 탄성변위에 의해 발생하는 볼의 비선형 탄성변위특성⁶⁾에 의한 영향을 확인할 수 있다. 또한 스텝당 변위를 더욱 감소할 경우 Fig. 9(b)의 우측 응답에서 보이는 모터토크변동에 의한 진폭이 커져 출력변위의 구별이 어려워지는 결과를 나타내어 고정형 체결기구에 있어서 최소이송분해능은 0.20 μm 로 나타났다.

Fig. 10은 판스프링형 체결기구를 적용했을 때의 스텝당 입력변위 0.30 μm 및 0.20 μm 에 대한 응답특성으로 판스프링이 너트의 굽힘모멘트를 흡수하므로 고정형과 같은 비선형특성은 보이지 않았으며 Fig.10(b)의 입력변위 0.20 μm 에 대한 응답에서 부분적으로 모터토크변동에 따라 분해능의 구별이 어려운 결과를 나타내어 사용가능한 최소이송분해능은 0.30 μm 임을 알 수 있었다.

Fig.11은 유정압형 체결기구를 적용했을 때의 미소이송에 대한 응답특성으로 입력변위 0.15 μm 에 있어서는 탄성힌지가 너트의 굽힘모멘트를 흡수하므로 비선형특성은 나타나지 않았고 입력변위

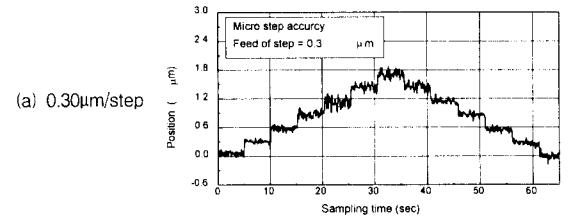


(a) 0.25 μm /step

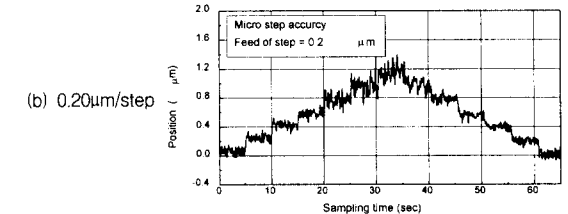


(b) 0.20 μm /step

Fig. 9. micro step response by fixed type coupling



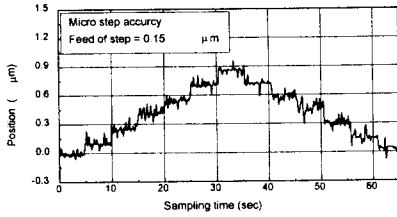
(a) 0.30 μm /step



(b) 0.20 μm /step

Fig. 10. micro step response by leaf spring type floating coupling

(a) 0.15 μ m/step



(b) 0.10 μ m/step

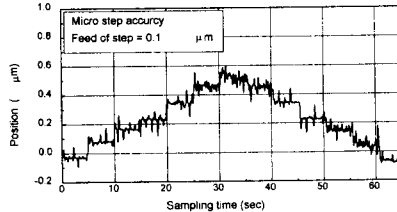


Fig. 11. micro step response by hydrostatic type floating coupling

0.10 μ m에서는 분해능이 떨어지는 결과를 보여 사용가능한 최소 이송분해능은 0.15 μ m임을 알 수 있었으며 미소이송특성에 있어서도 유정압형은 탄성한지의 모멘트흡수능력으로 가장 미소한 이송분해능을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 볼스크류를 이용한 이송계의 고정밀화를 위해 유정압안내면을 대상으로 고정형, 판스프링형 및 유정압형의 세 가지 방식의 체결방식을 적용하여 진직도, 동특성, 미소이송특성 등의 실험을 수행, 각 방식의 특성을 비교하였다. 실험으로 부터 얻어진 구체적인 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유정압체결기구를 적용하여 진직도를 측정할 결과 볼스크류의 조립오차, 흔들림오차 등이 한지의 탄성변형 및 유정압 베어링의 수직방향 공차에 의해 대부분 흡수되어 테이블의 진직도에 거의 영향을 주지 않았다.
- 2) 유정압체결기구를 적용한 이송계의 동특성 실험결과 고유진동수와 진동감쇠능이 고정형에 비해 상당히 증가하여 이송계의 동특성이 향상됨을 알 수 있었다.
- 3) 유정압체결기구를 적용하여 유정압안내면을 반폐루프로 구동할 결과 0.15 μ m까지의 최소이송분해능을 얻을 수 있었으며 이 범위내에서 볼의 비선형 탄성변위특성에 의한 영향은 없음을 확인하였다.
- 4) 판스프링형의 경우 볼스크류 오차의 흡수능력 및 동특성면에서 고정형에 비해 현저히 떨어지는 성능을 보여 고정밀이송에는 적합하지 못함을 알 수 있었다.
- 5) 이상의 결과로 부터 탄성한지와 유정압의 이중구조를 이용하여 비접촉으로 체결하는 유정압형을 적용하는 경우 고정형에 비해 매우 개선된 성능을 보여 고정밀이송에 적합한 체결기구임을 확인하였다.

참고문헌

1. 上 芳啓, "超精密送り 위치決め装置の開発", 精密工學會超精密位置決めに関する専門委員会前刷集 95-2, pp1-7, 1995
2. 秋山 勝, 高橋 伸充, "ナノメータ位置決め用空気静圧ねじの開発", NSK Technical Journal No. 655, pp46-52, 1993
3. 水本 洋 外 3人, "超精密工作機械用位置決め装置の分解能に關

する比較研究", 精密工學會超精密位置決めに関する専門委員会前刷集 95-4, pp25-29, 1995

4. 和田龍兒, "超精密非球面加工機の現状と課題", 精密工學會超精密位置決めに関する専門委員会前刷集 95-4, pp1-7, 1995
5. 大塚二郎 外 4人, "ねじ駆動による超精密位置決め(第3報)", 精密工學會誌, 59-10, pp73-79, 1993
6. 新野秀憲 外 2人, "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
7. A. H. Slocum, "Precision Machine Design", Prentice Hall, pp734 -739, 1992
8. 大塚二郎, "超精密位置決め技術の現状と今後", 精密工學會誌, 61-12, pp1645-1649, 1995