

# 고정밀 이송을 위한 볼스크류용 체결기구에 관한 연구

박천홍\*, 김인찬\*\*, 정윤교\*\*\*, 이후삼\*

## Study on the Floating Couplings for High Precision Feeding with Ballscrew

C. H. PARK\*, I. C. KIM\*\*, Y. K. CHUNG\*\*\*, H. S. LEE\*

### ABSTRACT

In the case of direct connecting the nut of ballscrew to guide table, machining error and misalignment of ballscrew largely affect to the motional accuracy of guideway. For decreasing these influences, two type of floating couplings: leaf spring type and hybrid type which releases the table from nut of ballscrew except feed and rotational direction is proposed in this study. In order to verify practical availability of the proposed floating couplings, motional accuracy, dynamic characteristics and micro step response of hydrostatic guideway, mounted with each type of couplings are tested. The conventional fixed type coupling is also tested as the reference in characteristics. From the results of experiments, it is proved that the hybrid type coupling is superior to other couplings and is available to high precision feeding system with ballscrew.

**Key Words** : floating coupling(부상 체결기구), high precision feeding(고정밀 이송), ballscrew(볼스크류), motional accuracy(운동정도), micro step response(미소이송응답), dynamic characteristics(동특성)

### 1. 서 론

최근들어 고정밀 이송시스템에 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)와 볼스크류를 대표적으로 들 수 있으며 이 외에도 유정압스크류<sup>(1)</sup>, 공기정압스크류<sup>(2)</sup> 등이 사용되고 있으나, 이송방향 강성

을 얻기 어렵고 제작이 어려워 실제로 응용된 예는 극히 드물다.

마찰구동기구는 미국의 LLNL에서 최초로 초정밀 공작기계에 적용한 이후 활발히 응용연구가 지속되고 있으며, 볼스크류에 비해 미소이송 분해능면에서 유리하여 0.5nm정도의 분해능을 달성한 예도 보고되고 있다<sup>(3)</sup>. 그러나 이송방향으로의 추력이 공작기계에 사용하기에는 아직 다소 미흡하고 부하가 작용할 경우 구성요소의 접촉 운동부에서 발생하는 미소 슬립현상등의 문제점이 있어<sup>(4)</sup> 경부하의 초정밀 공작기계 이송계에 한정되어 적용되고

\* 한국기계연구원 공작기계그룹  
\*\* 대우중공업(주) 공작기계연구소  
\*\*\* 창원대학교 기계공학과

있는 실정이다.

볼스크류는 상대적으로 높은 이송계 강성을 지니고 있고 정밀 이송에 있어서도 서브미크론대까지는 용이하게 미소이송 분해능을 얻을 수 있으며, 최근의 제어기술의 발전과 함께 페루프제어를 이용하는 경우 볼의 탄성변형을 이용하여 nm대의 분해능이 얻어지는 연구 사례도 발표되는 등<sup>(5)</sup> 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 볼스크류를 안내면 테이블에 직접 체결하여 구동하면, 회전에 따른 흔들림, 조립오차 등에 의해 볼스크류와 테이블간에 상대변위가 발생하며 이 때 테이블지지강성이 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 고정도를 얻는 데에는 적합하지 못하다. 또한 어느 경우에도 외부의 진동이 테이블에 직접 전달되므로 테이블의 운동특성을 악화시키게 된다. 따라서 운동정도를 고정도 화하기 위해서는 Fig. 1과 같이 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<sup>(6)</sup>은 4개의 구를 연결한 체결기구 및 공기마운트식 체결기구를 이용하여 볼스크류 구동에 따른 영향을 감

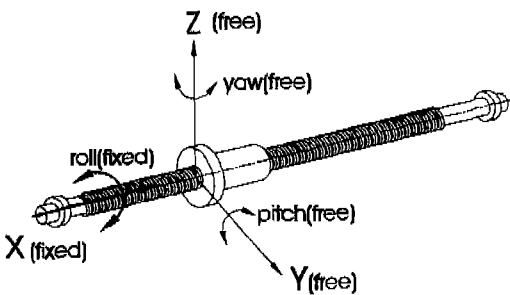


Fig. 1 Ideal motion of ballscrew nut for high precision feeding

소시킨 실험결과를 발표하였으나 정밀위치결정에 필요한 미소이송의 응답성 및 동특성에 대해서는 언급되지 않았으며 Slocum<sup>(7)</sup>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 고정밀 이송용 볼스크류에의 응용에 적합한 체결기구의 실용화 모델을 제시하고자 하였다. 이를 위해 유정압안내면을 대상으로, 탄성체로 체결하는 판스프링형(leaf spring type) 및 탄성힌지와 유정압의 이중구조를 이용하여 비접촉으로 체결하는 복합형(hybrid type)의 두 가지 방식의 체결기구를 제안, 운동정도(진직도 및 각운동정도), 동특성, 미소응답특성 등을 측정하고 각 방식의 특성을 비교함으로써 실용성을 검증하고자 하였으며 이 때의 비교기준을 위해 일반적인 체결방식인 테이블과 너트간을 강체로 체결하는 고정형(fixed type) 체결방식도 병행하여 실험을 수행하였다.

## 2. 체결기구의 구조

Fig. 2에 실험용 체결기구의 구조를 나타내었다.

고정형은, 너트와 테이블사이의 상대운동이 없도록 일체로 체결하기 위해, 너트가 고정되어 있는 너트하우징과

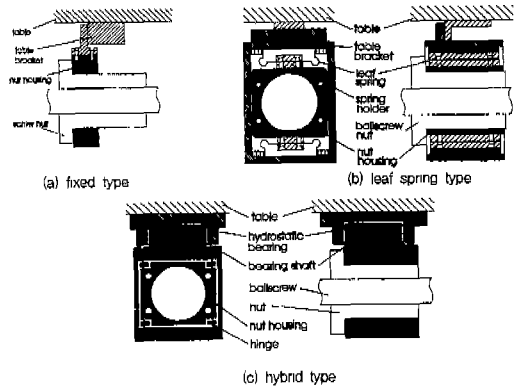


Fig. 2 Structure of the tested couplings

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 2매의 판스프링으로 연결하는 구조로 되어 있으며 판스프링은 두께 0.6mm, 이송방향 길이 40mm의 모자형태로 하여 상대적으로 이송방향 강성이 크고 상하, 좌우방향 강성이 약한 구조로 함으로써 가능한 한 볼스크류의 조립, 운동오차가 판스프링의 탄성변형에 의해 흡수되도록 하였다.

복합형은, 볼스크류의 수직방향 조립, 운동오차는 1.5mm의 공차를 갖는 유정압베어링과 베어링용 샤프트의 수직방향 미끄럼운동에 의해, 요(yaw)오차는 유정압저어널베어링의 회전으로 인해 흡수되고 수평방향 조립, 운동오차를 하부에 연결된 탄성힌지가 흡수하도록 이중 구조로 되어 있다. 본 실험에서 사용한 체결기구의 유정압저어널베어링부는 4포켓을 갖는 멀티패드형으로  $\phi 45 \times 16$ mm의 크기에 간극은  $10\mu\text{m}$ 로 되어 있으며 공급압력은 유정압테이블의 압력과 동일한  $100\text{N}/\text{cm}^2$ 로 설정하여 사용하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1. 실험장치의 구성

실험용 안내면 및 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 유정압테이블은 양면패드방식(double pad

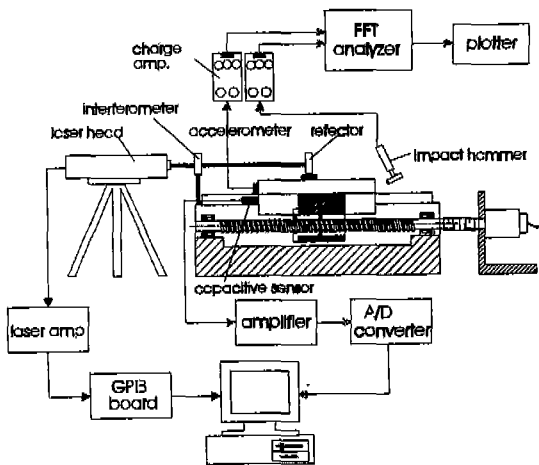


Fig. 3 Experimental setup

type)의 반밀폐형구조로 되어 있고 테이블 밑면에 고정되는 체결기구를 이용하여 볼스크류와 결합되어 있다. 유정압테이블의 공급압력은  $100\text{N}/\text{cm}^2$ , 사용 유효유압의 점도는 10cSt이며 사용 압력에서 측정된 유정압테이블의 강성은 수직방향  $92\text{N}/\mu\text{m}$ , 수평방향  $53\text{N}/\mu\text{m}$ 이다.

볼스크류는 라이드 5mm의 C0급이며 양단은 고정-고정방식으로 지지되어 있다. 한편 각 체결기구를 교체하여 조립할 때에 양단 지지베어링의 예압량이 달라질 수 있으므로 토오크렌치를 이용, 일정한 토오크로 베어링너트를 체결하였으며 체결기구를 결합하지 않은 상태에서 볼스크류의 조립오차는, 수직, 수평방향 평행오차를  $3\mu\text{m}$ 이내로 함으로써 볼스크류의 변동오차  $3\mu\text{m}$ 를 포함한 볼스크류 자체의 회전오차가 테이블의 직선운동궤적을 중심으로  $6\mu\text{m}$ 이내가 되도록 하였다. 볼스크류와 구동용 모터(AC servo, 1.5 kW)는 플렉시블커플링을 이용하여 연결되어 있고 구동모터는 DSP보드(MEI)를 내장한 PC를 이용하여 PID방식에 의해 제어되며 5,000ppr의 로타리 엔코더가 모터 뒷면에 부착되어 있다.

이송시스템은 반폐루프(semi-closed loop)방식으로 제어되고 이송분해능을 향상시키기 위해 엔코더의 파형을 10채배할 수 있는 채배막스를 사용하였으며, 컨트롤러내에서 4채배가 추가되어 최소이송분해능은  $0.025\mu\text{m}$ 가 되도록 구성되어 있다. Fig. 4는 이송시스템의 제어계를 나타낸 것이다.

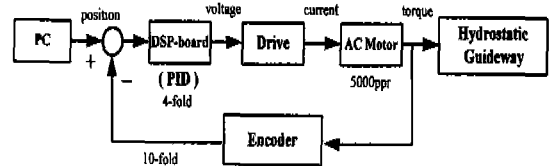


Fig. 4 Control loop of feeding system

#### 3.2 실험방법

##### 1) 운동정도

각 체결기구가 운동정도에 미치는 영향을 파악하기 위해 체결기구가 장착된 테이블중앙에 반사경을 설치하고 테이블을 5mm/s로 이송하면서 그 때의 수직방향, 수평방향 진직도 및 각운동정도(요, 피치)를 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, 테이블과 모터사이에 와이어를 연결하여 구동하고 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) 미소응답특성

각 체결기구에 의해 구현될 수 있는 미소이송분해능 및 응답성을 비교하기 위해 이송시스템의 1스텝당 이송량을 감소시켜가면서 그 때의 응답변위를 테이블의 이송방향 후면에 용량형센서(Microsense 3401)를 설치하여 측정하였다.

측정시에는 한 스텝당 1초의 정지시간(dwell time)을 주어 총 26초간의 응답을 측정하였으며 이송속도는 5mm/s로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 운동정도

Fig. 5는 먼저 레일의 형상오차에 의한 테이블의 운동오차(이하 테이블의 고유오차)를 알아보기 위해 와이어를 이용, 175mm를 구동했을 때의 측정된 결과를 나타낸 것으로 수평방향 2.1 $\mu$ m, 수직방향 2.42 $\mu$ m의 진직도 및 1.5arcsec의 요, 피치오차를 보이고 있으며 수직방향으로는 레일을 베드위에 고정하기 위해 120mm간격으로 체결된 볼트의 영향으로 2산성분의 운동체적을 보임을 알 수 있었다.

Fig. 6은 각 체결기구를 장착했을 때의 운동정도를 측정된 결과를 나타낸 것으로 Fig. 5와 비교해볼 때 1 ~ 2산의 저주기성분은 레일의 형상오차에 의한 영향이 지배적인 것을 알 수 있다.

Fig. 6(a)는 고정형 체결기구를 장착했을 때의 운동정도로, 레일의 형상오차의 영향 이외에 5mm주기의 파형이 뚜렷하게 나타나고 있음을 보이고 있다. 이 주기는 볼스크류의 리이드와 일치하는 것으로, 고정형의 경우 볼스크류의 가공오차나 조립오차에 의해 발생하는 회전오차에 의한 가진력이 테이블의 평형위치에 직접적으로 영향을 미치는 구조로 되어 있어 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 한편 각운동정도의 측정결과로부터 테이블에

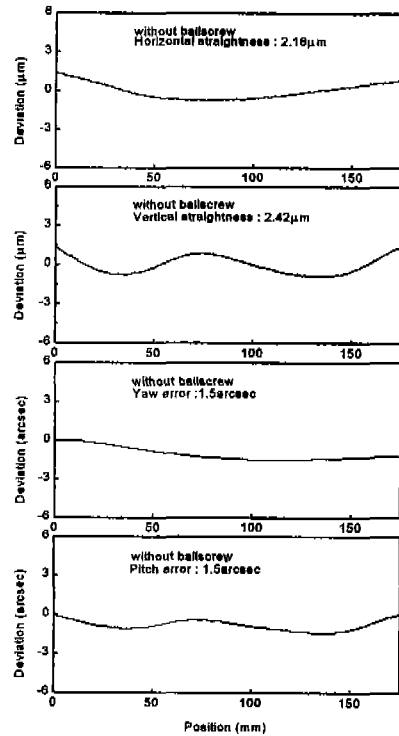


Fig. 5 Motional accuracy of hydrostatic table not connected with ballscrew

볼스크류를 직결함으로써 테이블의 각운동오차가 악화됨을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 판스프링형 체결기구를 장착했을 때의 측정결과로 볼스크류의 리이드에 의한 오차가 고정형에 비해 상당히 감소하고 있음을 보이고 있다. 특히 수평, 수직방향에 있어서는 고정형과는 달리 판스프링의 강성이 볼스크류의 강성과 병행, 작용하여 볼스크류의 회전오차에 의한 가진력이 테이블에 미치는 영향을 감소시키는 오차 흡수능력으로 테이블의 고유오차에 의한 영향과 거의 같은 레벨로 운동정도가 감소하고 있으나 각운동 가운데 피치방향에서는 테이블의 고유오차에 비해 운동정도가 나빠짐을 보이고 있어 피치방향에 대한 오차흡수능력이 떨어짐을 알 수 있다.

Fig. 6(c)는 복합형 체결기구를 장착했을 때의 측정결과로 볼스크류의 리이드에 의한 오차의 영향이 대부분 흡수되어 거의 나타나지 않으며 직선운동은 물론 각운동오차의 파형도 테이블의 고유오차와 일치하고 있어 이송계에 의해 발생하는 오차성분이 체결기구에 의해 대부분 흡수되고 있음을 알 수 있다.

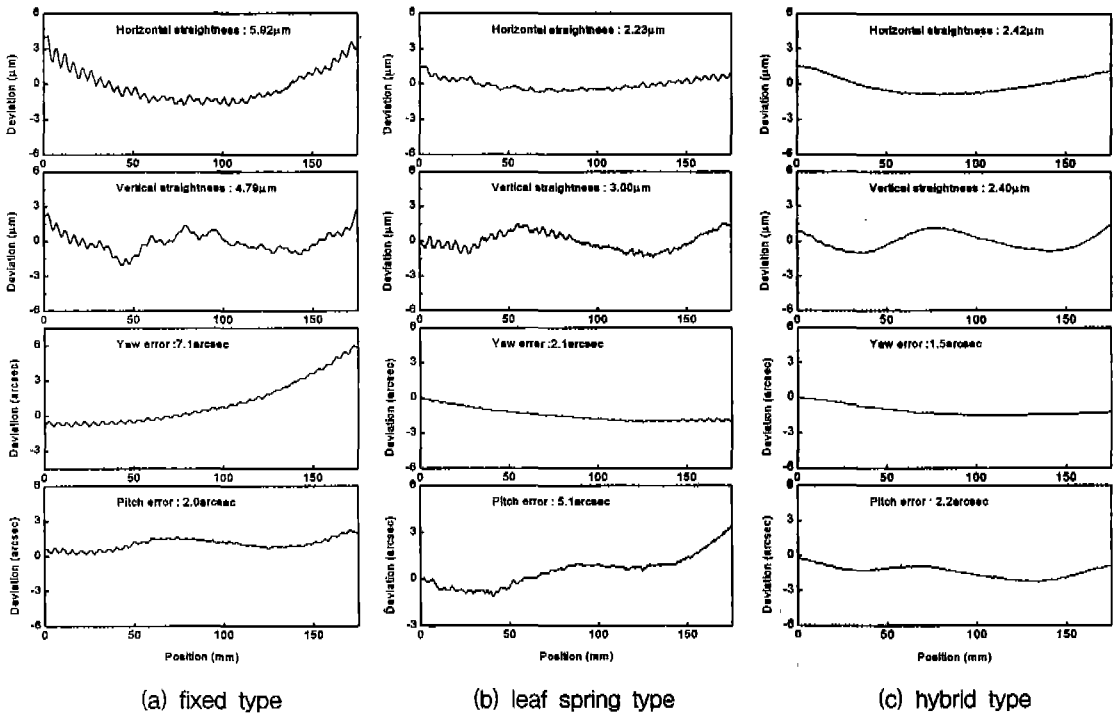


Fig 6. Motional accuracy by each type of coupling

이상의 결과로부터 복합형 체결기구의 경우 고정형 체결기구에서 나타나는 볼스크류의 가공, 조립오차 등 이송계에 의해 발생하는 운동오차성분의 전방향에 대해 뛰어난 흡수효과를 가짐을 확인할 수 있으며 판스프링형 체결기구의 경우에는 직선운동에 대해서는 우수한 오차흡수 성능을 보이나 각운동에 대한 오차흡수 성능이 다소 떨어짐을 알 수 있다.

#### 4.2. 동특성

Fig. 7은 각 체결기구를 장착했을 때의 이송방향에 대한 임펄스 가진에 따른 동특성을 측정된 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 고유진동수의 측정결과로 고정형 120Hz에 비해 판스프링형은 68Hz로 감소하며 복합형의 경우에는 152Hz로 증가함을 보이고 있다. 판스프링형의 고유진동수가 고정형에 비해 감소하는 것은 구조상 이송방향의 강성이 상대적으로 크게 감소하게 됨에 따른 영향이며 이에 반해 복합형의 경우에는 유정압베어링의 비점축 구속효과로 증가질량이 감소함에 따라 고유진동수가 증가함을 알 수 있다. 한편 Fig. 7(b)는 이 때의 시간축을 표시한 것으로 복합형은 유막에 의해 감쇠효과가

상대적으로 커짐을 보이고 있으며 실험결과로부터 감쇠비를 구해보면 고정형의 0.13에 비해 복합형은 0.38로 매우 큰 감쇠능을 가짐을 알 수 있다. 한편 판스프링형의 경우에는 가진에 의한 진동이 0.2초 이상 지속됨을 보이고 있어 상대적으로 감쇠능이 가장 떨어짐을 알 수 있다.

#### 4.3. 미소이송특성

미소이송특성을 파악하기 위해 미소변위 입력에 대한 응답변위와 그 때의 임의의 한 스텝에 대한 시간적인 응답특성을 확대하여 Fig. 8에 나타내었다. 측정에 있어서는 용량형센서를 고정한 마그네틱스탠드의 고유진동에 의한 노이즈를 제거하기 위해 30Hz이상의 응답신호는 필터링하였으며 각각의 체결기구에 대해 안정적인 응답특성이 얻어질 때 까지 PID게인을 반복적으로 튜닝하였다.

Fig. 8(a)는 스텝당 0.1µm의 입력변위에 대한 연속적인 응답특성을 측정된 결과로 각 체결기구 모두 구별가능한 응답변위를 보이고 있으나 고정형과 판스프링형에 있어서는 1 ~ 2스텝의 응답에 있어 불안정상태에 가까운 한계상태를 보이고 있다. 또한 정지시간시의 토오크리플의 폭을 비교할 경우에도 복합형이 가장 안정되어 있음을

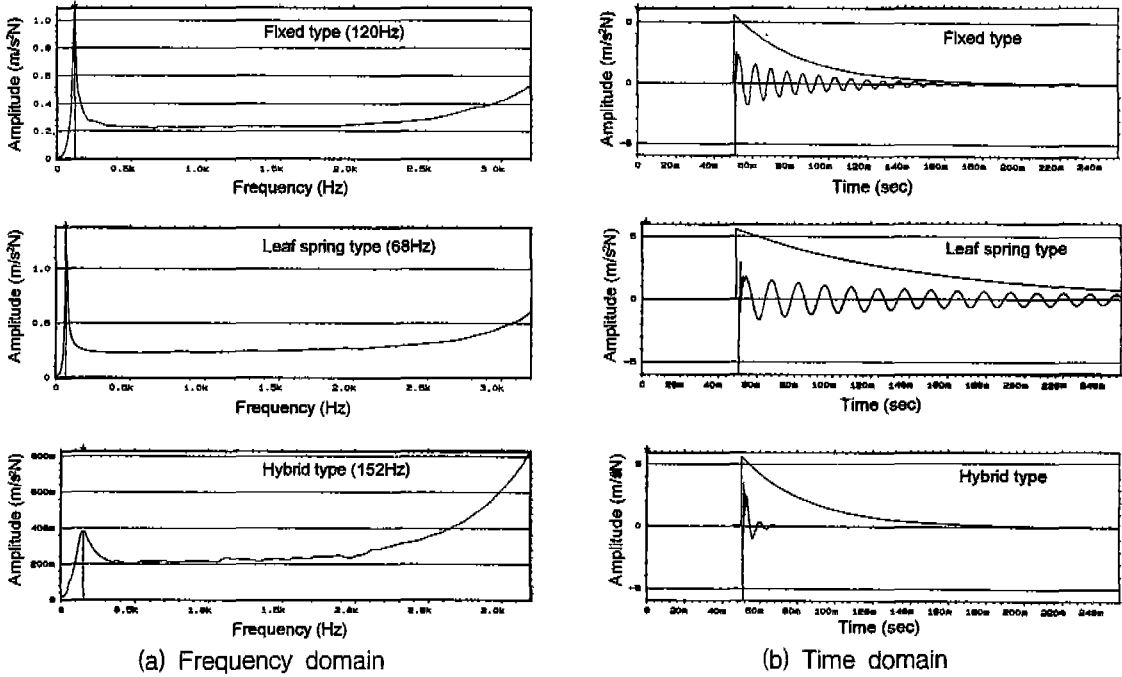


Fig. 7 dynamic characteristics by each type of coupling

볼 수 있다. 본 실험장치에 있어서는 제어계가 반페루프구조 구성되어 있어 스텝당 변위를 0.1 $\mu\text{m}$ 이하로 감소시킬 경우에는 모든 체결기구에 있어 부분적으로 불안정한 응답 특성을 보였으나 페루프제어계를 적용하여 제어계의 분해능을 낮출 경우 이상의 결과로부터 복합형의 분해능은 더욱 향상될 수 있을 것으로 추정된다.

Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 각 체결기구에 대한 측정결과로부터 한 스텝에 대한 응답특성을 확대하여 나타낸 것으로 복합형은 고정형과 거의 같은 안정시간(settling time)을 갖는 데 반해 판스프링형은, 표 1에 나타난 바와 같이 볼스크류의 회전에 따른 비틀림강성 등의 영향으로, 안정시간이 약 2배정도 늦어짐을 보이고 있다. 또한 표 1에 이때의 각 체결기구를 장착했을 때의 최종으로 튜닝된 PID 게인값을 나타내었으며 이로부터 서어보강성면에서도 복합형은 고정형보다 다소 우수함을 확인할 수 있다.

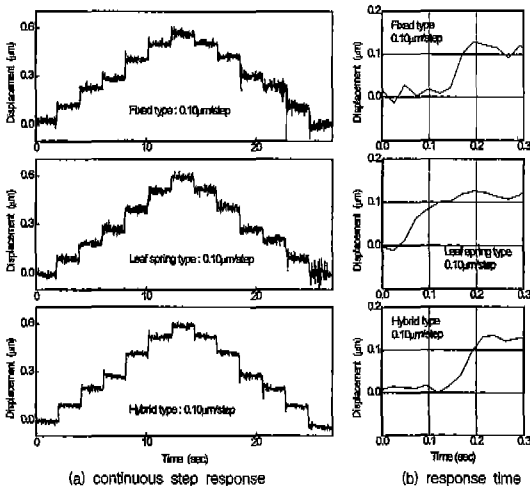


Fig. 8 micro step response by each type of coupling

Table 1 PID gain and torsional stiffness

	Fixed type	Leaf spring type	Hybrid type
Proportional gain $K_p$	4.21	2.93	4.68
Integral gain $K_i$	0.10	0.07	0.08
Derivative gain $K_d$	11.72	11.70	31.25
torsional stiffness (experimental)	-	$1.48 \times 10^3$ Nm/rad	$2.99 \times 10^4$ Nm/rad

## 5. 결 론

## 참 고 문 헌

본 논문에서는 볼스크류를 이용한 이송계의 고정밀화를 위해 유정압안내면을 대상으로 고정형, 판스프링형 및 복합형의 세 가지 방식의 체결방식을 적용하여 운동정도, 동특성, 미소이송특성 등의 실험을 수행. 각 방식의 특성을 비교하였다. 실험 결과로 부터 탄성힌지와 유정압의 이중구조를 이용하여 비접촉으로 체결하는 복합형을 적용하는 경우 고정형에 비해 매우 개선된 성능을 보여 고정밀이송에 적합한 체결기구임을 확인하였으며 실험으로 부터 얻어진 구체적인 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 복합형 체결기구를 장착하여 운동정도를 측정 한 결과 이송계에 의해 발생하는 진직운동 및 각운동 오차에 대해 뛰어난 흡수효과를 가짐을 확인할 수 있었다.
- 2) 복합형 체결기구를 적용한 이송계의 동특성 실험결과 고유진동수와 진동감쇠능이 고정형에 비해 상당히 증가하여 이송계의 동특성이 향상됨을 알 수 있었다.
- 3) 복합형 체결기구를 적용하여 유정압안내면을 반폐루프로 구동한 결과 응답시간 및 서어보강성면에서도 고정형과 동등하거나 다소 우수한 성능을 보였으며 미소변위 입력에 대해서도 가장 안정적인 응답변위를 나타내어 미소응답특성이 고정형에 비해 개선됨을 알 수 있었다.
- 4) 판스프링형 체결기구의 경우 고정형에 비해 직선운동에 대해서는 우수한 오차흡수 성능을 보이나 피치오차에 대한 오차흡수 능력이 없음을 확인하였으며 동특성과 미소이송특성이 저하됨을 알 수 있었다.

1. 上 芳啓, "超精密送り位置決め装置の開発", 精密工學會超精密位置決めに関する専門委員會前刷集 95-2, pp1-7, 1995.
2. 秋山 勝, 高橋 伸充, "ナノメータ位置決め用空氣靜壓ねじの開発", 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関する比較研究", 精密工學會超精密位置決めに関する専門委員會 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會 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駆動系の連結機構に対する二,三の新提案", 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.