

## 마찰구동기구로 구동되는 초정밀 가공기 이송계의 특성 평가

송창규\*, 신영재\*, 이후상\*

### Performance Assessment for Feeding System of Ultraprecision Machine Tool Driven by Friction Drive

Chang Kyu Song\*, Young Jae Shin\*, Husang Lee\*

#### ABSTRACT

The positioning system for the ultraprecision machine tool should have nanometer order of positioning resolution. For the purpose of achieving that resolution, various feed drive devices have been proposed and currently hydrostatic lead screw and friction drive are paid attention. It is reported that an angstrom resolution can be achieved by using twist-roller friction drive. So we have manufactured ultraprecision feeding system driven by the twist-roller friction drive and perform performance assessment for problem definition and solution finding. As a result, we found that the twist-roller friction drive is mechanically suitable for ultraprecision positioning but some considerations are needed to get higher resolution.

**Key Words** : twist-roller friction drive(트위스트 롤러 방식 마찰구동기구), ultraprecision machine tool(초정밀가공기), coupling(커플링), feeding system(이송계), positioning resolution(위치결정 분해능)

#### 1. 서론

초정밀 가공 기술은 비디오 카메라 등에 사용되는 고정밀도 미러나 렌즈 등의 광학부품과 실리콘 웨이퍼 등 반도체 부품의 제조 기술을 중심으로 발달해 왔다. 최근에는 각종 기기의 소형화, 고집적화에 수반하여 초정밀 가공이 적용되는 형상 및 가공물 그 자체의 마이크로화가 진행되고 있다. 그리고 마이크로 부품이 더욱 초소형화됨에 따라서 상대적으로 요구되는 정밀도가 올라가기 때문에 그 가공기의 이송계에는 나노미터 단위의 위치결정이 요구

된다<sup>[1]</sup>. 이와 같은 초정밀 이송계에 있어서 나노미터 단위로 제어하기 위해서는 이송계를 구성하는 요소들 중 구동기구의 위치결정 분해능이 나노미터 단위를 가져야 한다<sup>[2]</sup>. 최근의 초정밀 가공기 이송계의 구동기구는 유정압 리드스크류<sup>[3]</sup>와 마찰구동기구<sup>[4]</sup>에 집중되고 있다. 특히 마찰구동기구는 트위스트 롤러 방식을 사용하면 옹스트롬 단위의 분해능을 보일 수 있음이 보고<sup>[5]</sup>되고 있다.

마찰구동기구의 장점은 설계와 제작이 용이하고 백래쉬가 없으며 높은 분해능과 광대역의 이송스트로크를 갖는다는 점이다. 본 연구에서는 이와

2001년 11월 28일 접수  
\* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

같은 트위스트 롤러 방식의 마찰구동기구를 사용한 초정밀 이송계의 성능 평가를 통하여 구동시 발생할 수 있는 문제점들을 파악하고 이의 극복방안을 제시하므로써 1nm의 분해능이 실현되는 초정밀 가공기 이송계를 구축하는 토대를 마련하고자 한다.

## 2. 트위스트 롤러 방식 마찰구동기구

### 2.1 구동원리

Fig. 1(a)와 같이 직경이  $D$ 인 구동축상에 접촉되어 있는 피구동롤러의 회전축이 구동축의 회전축과 각도  $\alpha$  를 이루고 있는 상태에서 구동축이 1회전 할 때 피구동롤러는 Fig. 1(b)와 같이 구동축 방향으로  $L = \pi D \tan \alpha$  만큼 이송하도록 되어 있다. 여기서 구동축의 회전운동을 구동축의 축방향으로 직선운동으로 변환하기 위하여 피구동롤러가 자전운동만을 하도록 하는 지지체가 필요하므로 지지체는 회전되지 않고 구동축의 축방향으로 직선운동만을 하도록 직선안내시켜야한다.

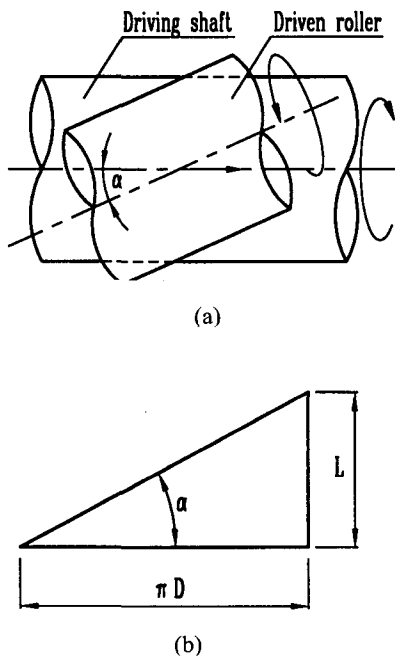


Fig. 1 (a) Driving principle of twist roller friction drive  
(b) moving trajectory of driven roller

### 2.2 마찰구동기구의 제작

Fig. 2는 실험을 위하여 제작된 트위스트 롤러를 이용한 마찰구동기구의 모습이다. Fig 2의 (a)는 마찰구동기구의 구성을 나타내는 그림이며, (b)는 구동기구의 핵심 부분인 구동축(driving shaft)과 피구동롤러(driven roller), 즉 트위스트 롤러와 이들을 지지하고 있는 지지체(supporter)를 자세히 나타낸 것이다.

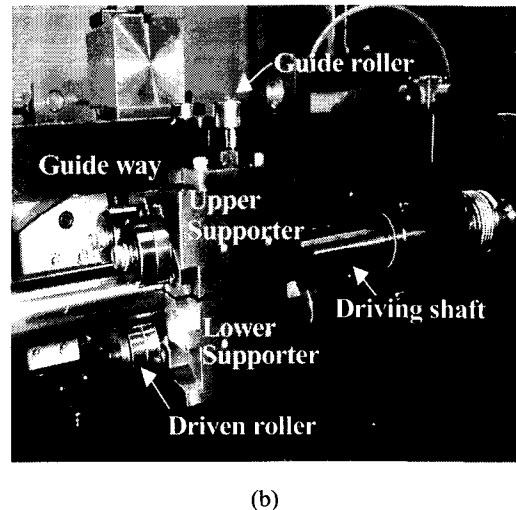
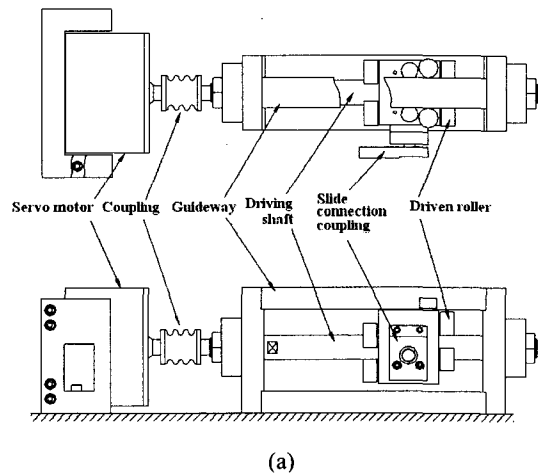


Fig. 2 (a) Schematic diagram of twist roller friction drive  
(b) Photography of twist roller friction drive

피구동롤러와 구동축 사이의 예압력이 동일하게 작용하도록 하기 위하여 구동축의 한 수직단면

상에서 피구동롤러 3개가 120°등간격으로 지지체의 전후에 고정되어 있다. 지지체 조립의 편이성과 예압력(구동축과 피구동롤러 접촉부에 작용하는 수직하중을 결정하기 위한 하중)을 용이하게 가하기 위하여 지지체는 상·하부 2개로 구성되어 있으며, 피구동롤러는 지지체에 2 곳에서 설치한 스프링에 의하여 구동축에 밀착된다. 가이드(guide way)는 구동축의 양단 베어링 하우징사이에 연결되어 있으며 상부 지지체에 부착된 2개의 가이드 롤러가 가이드를 따라 전,후진한다.

### 3. 초정밀 가공기 이송계의 구성

트위스트 롤러 방식 마찰구동기구로 구동되는 초정밀 가공기 이송계의 모습을 Fig. 3에 보였다. 그림에서 보듯이 이송계의 구동은 서보모터가 회전하면 마찰구동기구가 직선운동을 하고 이 직선운동에 의해 마찰구동기구와 커플링으로 연결된 공압베어링 테이블이 이송하는 식으로 이루어진다. 테이블의 위치 검출은 레이저 간섭계(Zygo社 ZMI)가 맡게 되는데 이를 위해 테이블 위에 평면 반사경을 부착하였다. 레이저 간섭계의 분해능은 5nm로 설정하였고 검출된 위치정보는 엔코더에서처럼 AquadB의 신호로 나오게 하였다. 이송계 전체는 외부의 진동원으로부터 진동을 차단하기 위하여 공압베드위에 올려 놓았다.

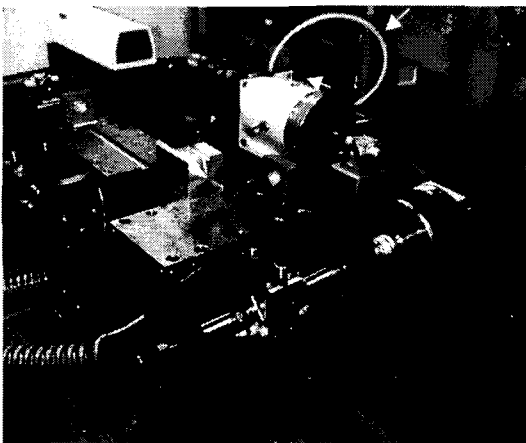


Fig. 3 Photography of feeding system

구동모터(DD motor)는 제어용 보드(MEI社 PC

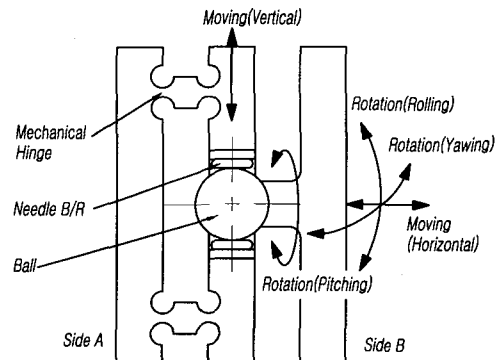
-DSP)를 내장한 PC를 이용하여 PID 방식에 의해 페루프 방식으로 제어된다. 모터와 마찰구동기구는 플렉시블커플링(Mayr, 비틀림강성 8Nm/rad)을 이용하여 연결되어 있고, 테이블과 마찰구동기구의 연결부는 피구동롤러와 구동축의 가공오차, 조립오차 등에 의해 발생하는 구동오차 및 외란이 테이블에 주는 영향을 감소시키기 위해 5자유도를 가지도록 설계되었다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

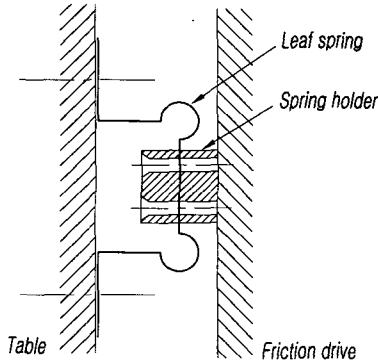
### 4.1 실험방법

#### 4.1.1 운동정도

마찰구동기구로 초정밀 가공기의 이송계를 구동할 때 전체 이송계의 운동정도를 평가하기 위해 테이블 중앙에 반사경을 설치하고 스트로크 50mm에 대해 수직방향, 수평방향 진진도 및 각운동정도(yaw, pitch)를 레이저 간섭계(HP 5529)를 이용하여 측정하였다. 또한 마찰구동기구의 영향이 없는 공기정압 슬라이드 테이블 자체의 운동정도를 측정하여 마찰구동기구의 영향을 평가하기 위해 테이블과 이송기구를 분리한 후, 테이블에 와이어를 연결하여 스테핑 모터로 구동하고 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였고 또 마찰구동기구 자체의 운동정도도 측정하였다. 그리고 마찰구동기구와 테이블을 연결시켜 주는 5자유도 커플링이 제 기능을 수행하는지 여부를 판단하기 위해 판스프링으로 커플링을 교체하여 운동정도를 측정하였다. Fig. 4에 5자유도 커플링과 판스프링 커플링의 모습을 보였다.



(a) 5 degree-of-freedom coupling



(b) Leaf spring coupling

Fig. 4 2-type Coupling

#### 4.1.2 미소응답특성

마찰구동기구 이송계가 구현할 수 있는 미소이송분해능 및 응답성을 살펴보기 위해 이송시스템의 1스텝당 이송량을 감소시켜가면서 그 때의 응답변위를 레이저 반사경과 같은 위치에 설치한 정전용량형 캡센서(ADE社 Microsense 3401)로 측정하였다. 측정시에는 한 스텝당 2초의 정지시간(dwell time)을 주어 총 26초간의 응답을 측정하였으며 샘플링 속도는 100Hz이다.

### 4.2 실험결과와 고찰

#### 4.2.1 운동정도

Fig. 5는 공기정압 슬라이드 테이블 자체의 운동정도이며, Fig. 6은 마찰구동기구의 운동정도이다. Fig. 5의 오차는 테이블을 와이어로만 연결하여 스테핑 모터로 와이어를 끌었을 때의 오차이므로 마찰구동기구와 같은 구동메카니즘의 오차가 개입되지 않은 공기정압 가이드 자체의 고유한 오차라고 할 수 있다. Fig. 5에서 고주파 성분이 보이는 것은 와이어의 수축, 팽창이 반복되면서 테이블이 흔들리는 현상에 더불어 공압베어링에서 볼 수 있는 동압효과(빼기효과)<sup>[6]</sup>가 더해져서 발생하는 것이다. Fig. 6의 오차 측정은 마찰구동기구의 너트 부위에 레이저 간섭계의 반사경을 부착하여 측정한 마찰구동기구 자체의 운동오차이다. Fig. 6에서 보면 모든 운동오차가 마찰구동기구의 리드(0.91mm)에 해당되는 간격으로 크게 흔들리고 있음을 알 수 있

다. 이는 피구동롤러와 구동축이 편심되게 조립되어 나타나는 오차이다.

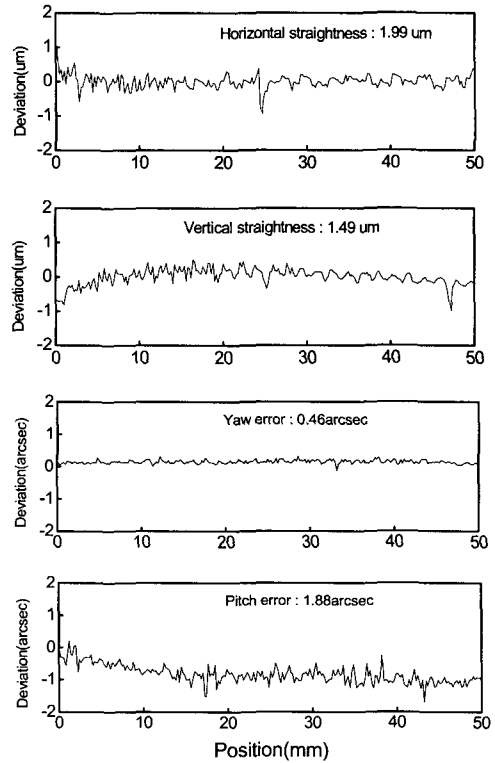


Fig. 5 Motional accuracy of air bearing table not connected with friction drive

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 5자유도 커플링과 판스프링 커플링으로 체결했을 때의 테이블의 운동오차이다. Fig. 7에서 보면 5자유도 커플링은 마찰구동기구의 리드에 따른 흔들림을 흡수하지 못하고 있음을 보여주고 있다.

이에 비해 판스프링 커플링은 상대적으로 뛰어난 오차흡수 능력을 보여주고 있어 거의 테이블 자체의 오차와 근사한 운동오차를 보이고 있다. 이러한 결과는 마찰구동기구로 구동되는 이송계의 경우에 리드 동기 오차의 영향이 매우 크므로 테이블과 마찰구동기구간의 커플링이 마찰구동기구 자체의 오차를 흡수할 수 있도록 설계되어야 함을 의미한다. 하지만 판스프링 커플링은 구동방향으로도 강성이 떨어져서 응답속도가 늦고 진동이 발생하므로 꼭 최적의 커플링이라고 할 수는 없다. 결국 모든 구동기구에서와 마찬가지로 구동의 수직 방향으

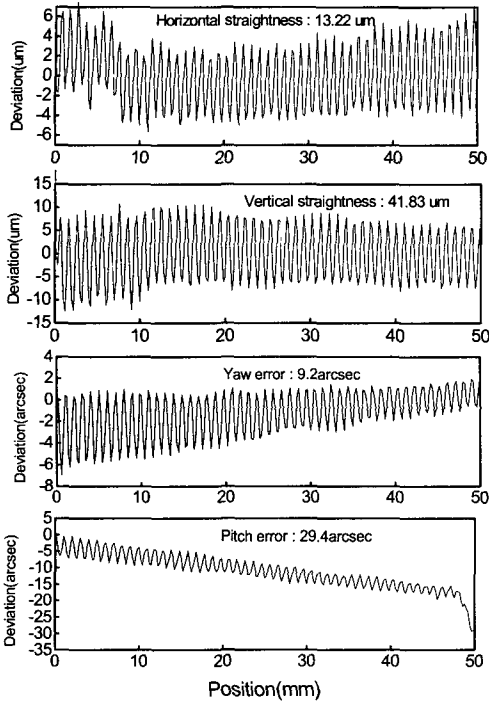


Fig. 6 Motional accuracy of the friction drive

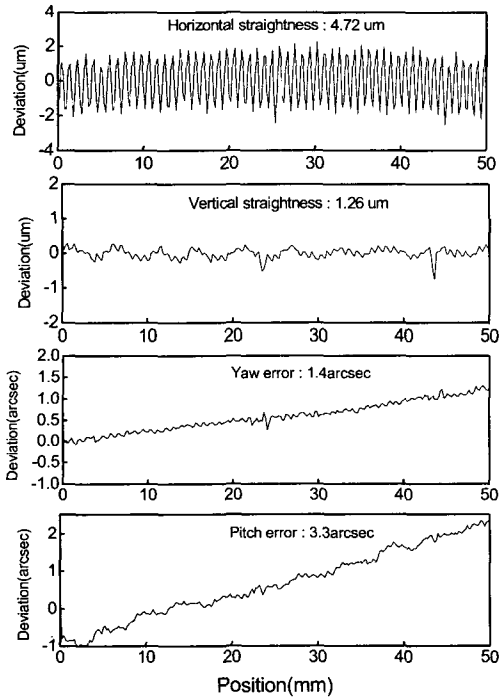


Fig. 7 Motional accuracy of the feeding system with 5 degree-of-freedom coupling

로는 강성이 거의 없고 구동방향으로 강성이 큰 커플링의 설계가 필요하다. 각운동오차중 피치오차는 두 커플 모두 마찰구동기구와 반대의 경향을 보이는데 이는 커플링의 위치가 중심에 있지 않아 생기는 지렛대효과에 의한 것으로 판단된다.

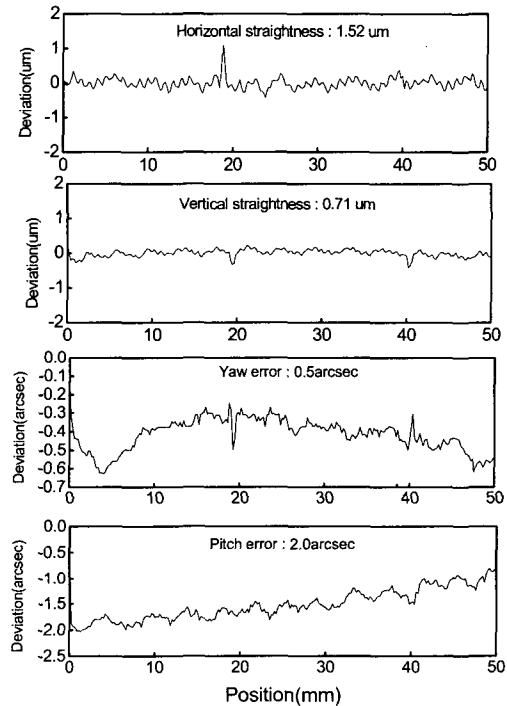


Fig. 8 Motional accuracy of the feeding system with leaf spring type coupling

#### 4.2.2 미소이송특성

미소이송특성을 파악하기 위해 미소변위 입력에 대한 응답변위를 Fig. 9에 나타내었다. 미소이송특성 실험에서 사용된 커플링은 5자유도 커플링이고 측정센서는 ADE사의 캡센서(microsense 3401)이다. 실험결과에서 30nm 응답특성은 뚜렷이 구별 가능한 응답 변위를 보였으며, 20nm 응답특성도 비교적 구분 가능하지만 10nm에 대한 응답특성은 매우 불안정한 응답특성을 보이고 있어 이송계의 분해능은 10nm와 20nm 사이에 존재하고 있음을 알 수 있다.

이러한 위치결정 분해능은 초정밀 가공기의 분해능으로서는 미흡한 것으로 그 원인은 구동기구의 진동, 모터의 진동, 변위 측정면의 진동, 변위 측정 센서의 측정오차, 모터의 각도 분할능력 등을 들

수 있다. 따라서 이러한 진동에 의한 오차요인을 흡수할 수 있도록 커플링의 설계가 이뤄져야 하며 마찰구동기구의 가공과 조립에서 비롯되는 오차를 줄이는 방법이 모색되어야 할 것이다. 또한 스텝이송의 방향이 반전되어도 일정한 높이에 스텝응답들이 위치하므로 방향전환에 의해 나타나는 구동기구의 백래쉬가 미소함을 알 수 있다.

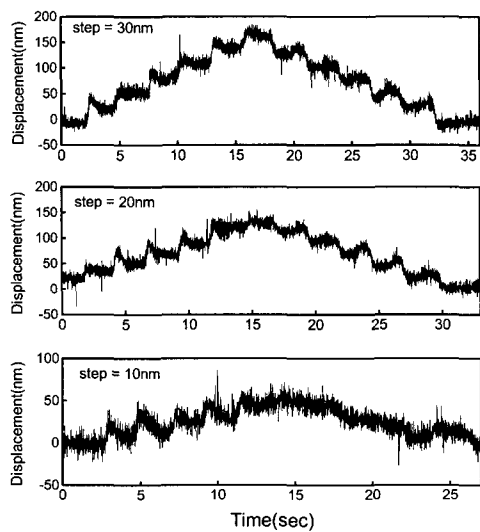


Fig. 9 Micro step response of feeding system

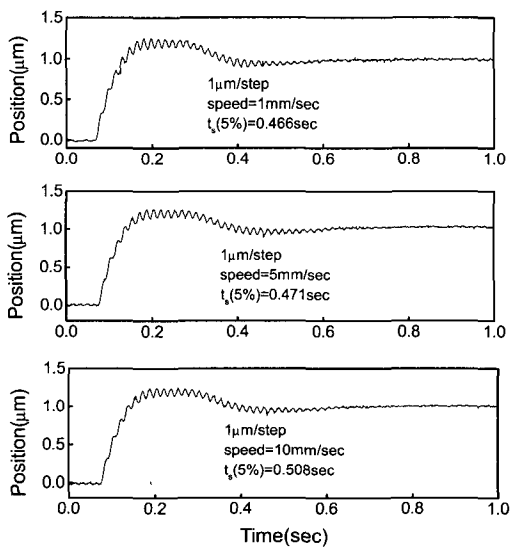


Fig. 10 Step response of the feeding system

Fig. 10은 이송속도별 미소변위( $1\mu m$ ) 입력에 대한 시간적인 응답특성을 보인 것으로 속도를  $1mm/sec$ ,  $5mm/sec$ ,  $10mm/sec$ 로 변화하여가며 스텝 응답을 측정하였다. 각각의 속도에서 안정시간 (settling time)은 각각  $0.466\ sec$ ,  $0.471\ sec$ ,  $0.508\ sec$ 를 보였으며 이러한 결과는 속도가  $10mm/sec$ 로 빨라져도 약  $0.5$ 초의 빠른 안정속도를 보이므로 통상적인 초정밀가공기 이송속도인  $1\sim 10mm/sec$ 에 잘 대응하고 있음을 알 수 있다. 이는 트위스트 롤러 방식 마찰구동기구로 구동되는 이송계의 경우에 안정된 제어특성을 갖는 것을 의미한다.

### 5. 결론

본 연구에서는 나노미터 단위의 위치결정 분해능을 갖는 초정밀가공기 이송계를 구현하기 위한 기초 연구로서 트위스트 롤러 방식의 마찰구동기구로 이송계를 구성한 후 이의 성능 평가를 통하여 마찰구동기구로 구동되는 이송계의 문제점 및 개선 방안 파악을 시도하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 마찰구동기구 자체의 운동정도를 측정할 결과 피구동롤러와 구동축간의 가공오차와 조립오차로 인한 흔들림이 존재하며 이러한 리이드에 의한 진동은 커플링에 의해 이송 테이블에 전달된다.
- (2) 마찰구동기구와 테이블간의 커플링을 변화하여 가며 운동정도를 측정할 결과 판스프링 커플링이 오차흡수효과가 뛰어나함을 확인할 수 있었다.
- (3) 미소변위에 대한 응답특성을 실험한 결과  $20nm$ 이하의 분해능을 보였으며 분해능을 향상시키기 위해서는 마찰구동기구의 가공과 조립에서 발생하는 오차를 감소시켜야 하고 또 커플링의 설계가 마찰구동기구에서 비롯되는 오차를 흡수할 수 있어야 한다.
- (4) 이송속도의 변화에 따른 스텝이송 실험 결과 초정밀 가공기의 이송속도영역 내에서는 안정시간이  $0.5$ 초 정도로 일정하여 안정된 제어특성을 보였다.

### 참고문헌

1. 次世代の超精密加工技術編輯委員會, 次世代の超精密加工技術(下卷), 日本工業技術振興協會, pp. 247-248, 1994.

2. 박천홍, 정재훈, 김수태, 이후상, "서브미크론 진  
직도 측정장치 개발," 한국정밀공학회지, 제17권  
제5호, pp. 124-130, 2000.
3. Y. Kami, M. Yabuya and T. Shimizu, "Research  
and Development of an Ultraprecision Positioning  
System," Nanotechnology, Vol. 6, pp. 127-134,  
1995.
4. H. Mizumoto, K. Yamada and T. Shimizu, "A  
Twist-Roller Friction Drive System for Nanometer  
Positioning," Preceedings of the 7th IPES, Kobe,  
Japan, May, pp. 850-853, 1993.
5. H. Mizumoto, M. Yabuya, T. Shimizu and Y.  
Kami, "An Angstrom-positioning System Using a  
Twist-Roller Friction Drive," Precision  
Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 57-62, 1995.
6. Oscar Pinkus and Beno Sternlicht, Theory of  
Hydrodynamic Lubrication, Chapter 3, McGraw  
-Hill Book Company, New York, 1961.