

# Twist Friction Driver의 이송특성에 관한 연구

정준휘<sup>†</sup>·이응석\*·안동을\*\*

## A Study on the Feed Characteristics of Twist Friction Driver

Jun Hui Jeong, Eung Suk Lee, Dong Yul An

**Key Words:** Twist Friction Dirve(마찰구동장치), Angular position error(각도오차), Backlash (백래쉬), Slip error(슬립오차)

### Abstract

This paper propose a study on the Feed Characteristics of Twist Friction Driver. We are using Twist Friction Driving mechanism system. The system consists of Twist Friction Driver elements such as driving shaft, driven roller, Spring for pre-load, Air bearing guide, Servo motor, and measuring devices such as Encoder of Servo motor, Laser interferometer, LVDT . The Twist Friction driver is mechanically simple and very quiet at high speed, and has low pre-load. So The Twist Friction driver can materialize an ultra precision feed-resolution. The feed characteristics of the driver is determined by slip and angular error, backlash.

### 1. 서 론

최근 전반적인 산업의 발달과 함께 부품의 소형화와 고정밀화가 여러 분야에서 요구되어지고 있다. 초정밀 가공기술은 비디오 카메라, 휴대폰 카메라 등에 사용되어지는 미러나 렌즈와 자기디스크용 기판, 스캐너에 사용되어지는 다면경(polygon) 등의 광학 부품과 고정밀 연삭가공이 필요한 실리콘 웨이퍼 등의 반도체 부품 제조 기술로 발달해 왔다. 따라서 가공품의 초정밀화와 초소형화에 따라 그 가공기의 위치 정밀도는 나노미터 단위의 정밀도를 요구하게 되었다.

그리고 마이크로 부품이 더욱 초소형화됨에 따라서 상대적으로 요구되는 정밀도가 올라가기 때

문에 그 가공기의 이송계에는 나노미터 단위의 위치 결정이 요구된다. 최근 초정밀 위치이송계로 사용되어지는 이송계는 PZT 소자를 이용한 방법 및 리니어모터와 마찰 구동에 의한 초정밀 위치 이송계가 연구 개발되어 상용화되어지고 있다. 마찰구동기구(friction driving mechanism)의 장점은 구조가 간단하여 설계와 제작이 용이하고 기계적인 결합에 의한 백래쉬(backlash)가 없으며 높은 위치 결정 분해능과 더불어 광대역의 이송 스트로크를 갖는다는 점에서 부각되고 있다. 특히 마찰구동기구의 트위스트롤러(twist-roller) 방식을 적용하면 기존의 마찰구동기구에 간단한 구조 변경만으로 초정밀 위치 분해능을 갖는 이송계를 구성 할 수 있다는 장점이 있다.

초정밀 이송계의 경우 이송계 자체의 이송오차와 함께 구동모터의 회전각 정밀도 검증이 필요하다. 구동모터의 회전각 정밀도는 모터제어를 위해 피드백 신호용으로 장착되어있는 엔코더 외에 엔코더의 편심오차 및 세팅 오차를 보정하기 위하여 각도 측정 표준기인 오토콜리메이터(Autocollimator)를 사용한 검증이 필요하다. 현

† 충북대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : wjdwngnl@lycos.co.kr  
TEL : (043)263-5789 FAX : (043)261-2441

\* 충북대학교 기계공학부  
\*\* 충북대학교 기계공학과 대학원

재까지의 연구는 직교마찰구동장치의 슬립조건에 대한 연구가 있으며[1], 구동축의 형상정밀도에 의한 이송오차 요인을 설명하고 Hertz의 접촉이론을 바탕으로 한 구동축 설계 방법이 제시되었다.[2] 이송계 자체의 진동에 의한 흔들림 오차를 판스프링 커플링을 사용하여 방지하는 연구와 미소 변위에 대한 응답특성으로 20nm이하의 위치정밀도를 구현한 연구내용을 발표하였다.[4]

본 연구에서는 일차적으로 마찰구동장치 및 이송오차 측정 및 분석을 위한 장치를 구성하고 위치 오차를 측정 분석과정을 통하여 마찰구동 장치의 구조적 특성을 파악하는 것뿐만 아니라, 장치 조립 과정에서 발생하는 오차 요인을 교정하여 이송정밀도를 높이는 방법과 예압과 구동모터의 가속도의 변화에 의한 슬립 이송오차를 측정함으로써 마찰구동장치의 이송정밀도 향상 및 평가에 목적이 있다.

2. 트위스트 롤러 마찰구동기구

2.1 Twist Roller 마찰구동장치 설계 및 제작

마찰구동장치는 피치가공이 필요 없어 구조가 간단하므로 설계 제작이 용이하고, 회전운동의 마찰력으로 이송 마찰이 적어 고속 운전시에도 소음이 적다. 따라서 부하용량 또한 적다. 초정밀 이송 분해능을 구현 할 수 있으면서도 광대역의 이송 스트로크를 갖는 다는 장점이 있다. 그러나 마찰구동장치의 기하학적 정밀도에 의한 이송 오차와 가감속시 발생하는 과도한 이송추력에 의해 슬립이 발생하는 단점이 있다.

트위스트롤러 마찰구동장치의 기본구조는 구동롤러와 슬라이더의 축사이의 각을 기존의 임의의  $\alpha$ 각으로 변경한 구조이다. 따라서 트위스트롤러 마찰구동장치에서는 구동축(driving shaft)과 종동롤러(driven roller)가 모두 회전운동을 하게 되며, 구동축과 종동롤러가  $\alpha$ 각으로 이루어진 구동축의 회전 운동에 의해 종동롤러가 나선모양의 궤적을 가지고 운동하게 된다.  $\alpha$ 각이 작아지면 질수록 구동축 1회전당 이송 거리는 작아진다. 마치 볼스크류의 피치가 작아지면 모터 1회전당 이송 분해능을 높일 수 있는 것과 같은 원리로 이송 위치 분해능을 극대화 할 수 있다. 모터 1회전당 이송 거리(L)는 식(1)과 같이 계산되어 기존의 구조에 비해 매우 높은 위치 분해능

을 구현 할 수 있다. 모터를 사용하고 구동롤러의 반경을 같도록 하였을 경우  $\tan \alpha$  만큼 작아지게 된다.  $\alpha$ 를 1도로 하였을 경우 기존의  $\alpha$ 각을 90도로 하였을 때에 비하여 약 57배 이상의 이송 분해능을 높일 수 있다. 또한 구동축과 종동롤러 사이의 트위스트각(twist angle)  $\alpha$ 를 더욱 작게 하는 것은 불가능한 일이 아니므로 실현 가능성이 있는 이송분해능 극대화 방법이다.

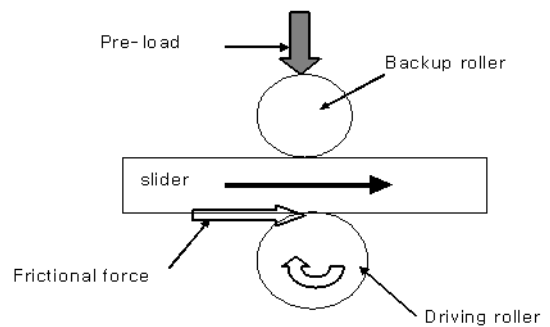
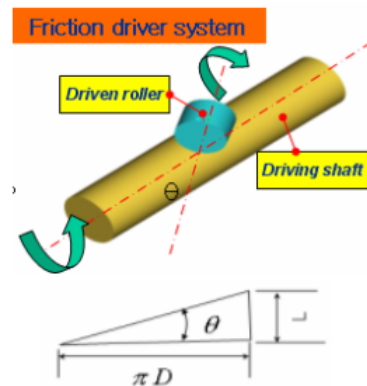
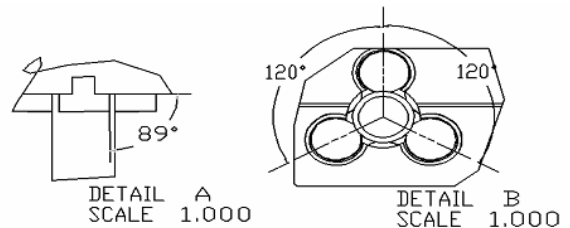


Fig. 1 Moving principle of friction driver



$$L = \pi \times D \times \tan \alpha \quad (1)$$

Fig. 2 Moving principle of friction driver using a twist roller



(a) twist angle (b) driven roller array

Fig. 3 Twist roller friction driver design

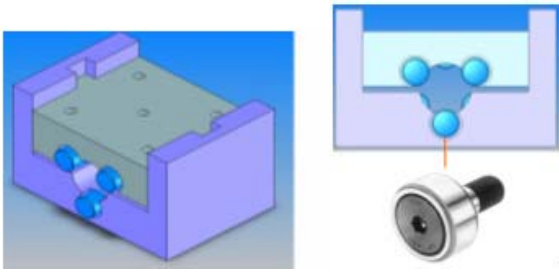


Fig. 4 Design of twist roller friction driver using three bearing follower

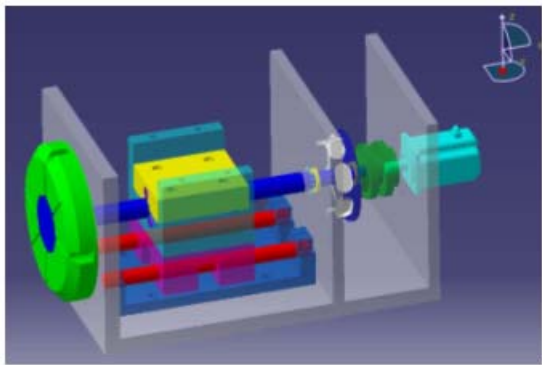
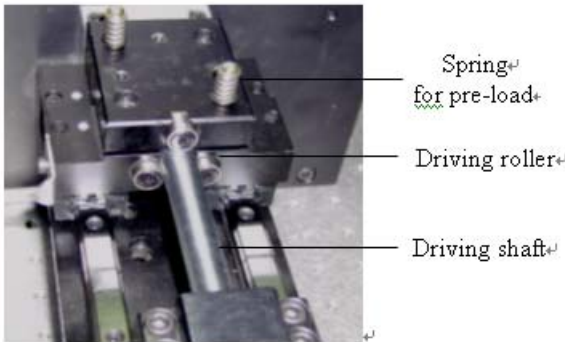


Fig. 5 Design and assembly of one axis twist roller friction driver using air bearing guide

트위스트롤러 마찰구동장치의 구동축의 직경을 20mm로 설정하였고, 구동축과 종동롤러의 중심축이 이루는 트위스트각을 1도로 설정하여 구동축이 1회전하는 하면 이송블럭의 이송량은 분리하여 설계하였으며, 각각의 블럭에 3개씩의 종동롤러가 120도 간격으로 장착하였다. 종동롤러는 THK사의CF 12-A 상용품을 사용하였으며 스테인레강으로 가공하였다. 조립된 상태를 종동롤러 3개가 구동축의 중심축을 중심으로 하는 120도 등간격으로 삼각형의 각 꼭지점에 위치하도록 하였다. 이송블럭의 반대쪽 면에도 역삼각

형 모양의 같은 형태로 종동롤러 3개가 부착되어 총 6개의 종동롤러가 구동축의 중심축을 기준으로 1도씩 틀어져있는 파배기 모양의 형태이다. 이때 각 종동롤러와 구동축의 각의 가공정밀도가 이송오차에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 정밀 가공이 요구된다. 이 이송계의 이송분해능은 시험되어지는 모터의 최대 회전각 분해능을 바탕으로 계산된다. 종동롤러와의 마찰에 의한 구동축의 마모를 방지하기 위해 구동축을 표면경화 하였다. 이송 슬라이더로 Air bearing guide를 사용하여 이송계의 진직도를 확보하였다. 예압은 압축 강성 스프링을 사용하여 인가하였다. 1축 Rotary Servo 위치오차검증용 Stage를 위하여 Friction Driver System 및 Air slide 을 이용하여 설계 및 제작하였다.

2.2 위치 오차 측정 실험 장치

실험장치는 이송계와 이송 정밀도 측정을 위한 측정 시스템으로 나뉘고 마찰구동장치의 이송블럭의 이송 오차측정과 종동롤러의 회전각을 측정을 위하여 Laser Interferometer를 사용하였고, 이송계 구동 초기시 연속적인 이동 데이터를 취득하고 슬립 현상을 측정하기 위한 마찰 토크 측정부분으로 이루어져 있다. 모터 컨트롤은 전용 컨트롤 보드를 사용하였으며, 각 센서의 데이터 및 신호들은 측정용 컴퓨터에 연결된 A/D board, Counter board 및 Image board와 RS232 통신을 통하여 자체 제작한 분석 프로그램으로 통합되어 데이터를 저장하고 이송 오차를 분석한다. 마찰구동장치 예압(Pre-load)의 크기를 측정하기 위하여 FVUII SEIKI사의 스프링 시험 장치를 사용하여 측정하였다.

마찰구동장치의 이송 특성을 분석하기 위하여 마찰력 측정이 필요하다. 마찰력은 모터에 인가되는 전류의 양을 측정하여 점접촉이라는 가정하에 계산하여 산출하였다. 또 마찰구동장치에 가해지는 예압과 조립과정에서 발생 할 수 있는 구동축의 기하학적인 변형에 의한 회전중심의 편심의 영향으로 편심량을 최대 크기로 하는 사인파 형태의 이송오차를 발생시킨다. 따라서 구동축 회전 중심의 편심 보상이 필요하다. 모터와 구동축의 연결을 위해 사용된 커플링의 축 방향 비틀림에 의한 이송오차는 모터의 회전방향이 달라 질 때 백래쉬 형태로 발생하게 된다.

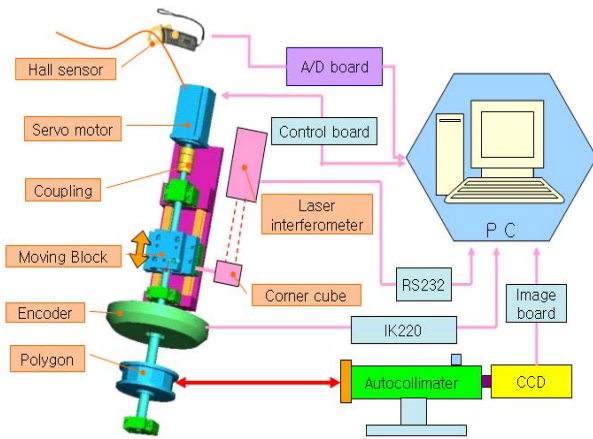


Fig. 6 Positioning experimental set-up for rotary servo system

커플링에 의한 백래쉬와 증동롤러(Driven roller)의 축방향 공차오차로 생기는 백래쉬를 제외하고는 장치 자체의 백래쉬 요인이 존재하지 않는다. 마찰구동장치 중요한 이송오차 요인으로 구동축의 가속 구간에서 발생하는 슬립(slip) 현상과 구동축의 비틀림에 의한 백래쉬이다. 구동축의 비틀림과 슬립은 모터의 회전 가속도와 마찰구동장치에 가해진 예압의 크기에 의해 달라진다.

### 3. Friction driver 시스템의 정밀도 검증

#### 3.1 최적 구동 조건

제작된 마찰구동장치의 이송 분해능을 검증하기 위하여 모터 1회전시 이송블럭의 이송량을 반복 측정하였다. 구동축과 증동롤러의 트위스트각은  $1^\circ$ 로 설정하였으며 계산된 모터 1회전당 이송블럭의 이송량 설계값은  $1096.7\mu\text{m}$  이다. 실제 측정된 이송량은 설계값과는 큰 차이를 나타내고 있으나 측정된 이송량의 평균값 기준으로 매우 작은 이송 오차( $0.8\mu\text{m}$  이내)를 보이고 있다. 이송량이 큰 오차를 보이면서도 우수한 반복정밀도를 나타내고 있는 것은 가공오차에 의해 구동축과 증동롤러가 이루고 있는 트위스트각에 의한 요인으로 분석된다. 구동축의 지름이 20mm 일 때 트위스트각의 변화에 따른 구동축 1회전당 이송량은 트위스트각이  $1^\circ$ 일 때 1.096mm이고  $2^\circ$ 일 때 2.193mm로 트위스트각의 작은 변화에도 큰 영향을 받는다. 측정된 이송량의 평균값으로부터 트위스트각을 계산한 결과  $0.7388^\circ$ 로 계산되었다.

트위스트롤러 마찰구동장치의 이송정밀도를 향상시키기 위해서는 각 부품의 가공 단계에서부터 구동축의 원통도에 대한 높은 정밀도를 요구하여 회전중심의 편심과 진원도 오차에 따른 구동축의 반경 변화요인을 최소화하고, 트위스트각의 작은 변화에도 구동축 1회전에 대한 이송량이 크게 변하며, 이는 구성된 이송계의 위치결정 분해능을 떨어트리므로 정밀가공이 선행되어야 한다. 이와 더불어 적합한 구동 조건의 선정이 필요하다. 구동 조건의 선정 요건으로는 예압, 모터의 회전각 가속도, 커플링의 탄성변형 및 슬립 오차가 있으며, 모든 요소들은 서로 유기적인 관계를 가지고 있다. 예압의 증가는 슬립을 방지하지만 커플링의 탄성 변형량을 증가시키므로 최적의 구동조건을 선정하기 위해서는 제어하고자 하는 가속도에 대해 예압을 변화시켜가며 슬립이 일어나지 않는 최소의 예압을 반복측정을 통하여 찾을 수 있다.

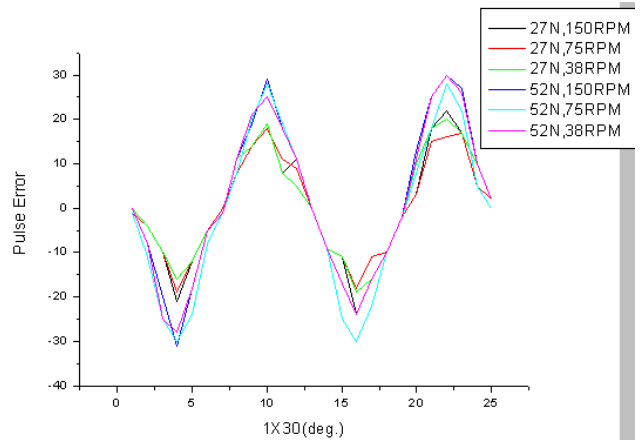


Fig. 7 Motor encoder error for variable Per-load and speed

Fig.7은 LG Servo Motor (650 W)를 사용하여 Ajin Control board (SMC-2V54)로 이송 위치정밀도 실험한 것이며, Command Pulse값이 어느 정도 오차를 가지고 있는지 실험 한 것이다. Friction drive에 각기 다른 예압(Pre-load)에서 모터속도를 주어 모터 엔코더 값과 표준 엔코더 값을 비교한 것이다. 예압의 변화에 따른 엔코더의 운동정밀도는 많은 오차가 있었으며 속도의 변화에 따른 오차는 극히 미소하다는 것이 보인다. 또한 규칙적인 sin파가 나타나며 90도 간격으로 엔코더 값의 오차는 최대가 되는 것을 볼 수 있고,

이 것은 Friction drive 축과 모터 축을 연결한 커플링으로 인해 엔코더가 편심으로 Set-up되어 일어난 현상과 구동축의 편심오차와 중동축의 슬립에 의한 현상으로 보인다.

### 3.2 구동축의 편심 오차

구동축 편심에 의해 발생하는 이송오차를 측정하기 위하여 이송블럭을 한쪽 방향으로 등속 이송시키면서 Laser Interferometer를 통하여 동일시간 간격으로 이송 위치를 측정하였다. 이때 구동축의 편심에 의한 회전직경의 크기를 측정하여 이송오차와 구동축의 회전직경 변화의 크기를 비교하였다. 측정값은 커플링의 탄성변형 및 슬립에 의한 오차를 제거하기 위하여 이송 후 등속 구간만을 취득하였다. Fig.8의 이송위치 측정에서 보면 이송 블록의 이송위치는 등속운동에 대한 이론적 이송량을 중심으로 S자 형태를 보이며 이송되고 있다. S자 형태의 이송오차는 누적되는 것이 아니라 구동축의 1회전을 주기로 하는 사인과 형태로 반복 되어 나타나고 있으며 이는 편심에 의한 구동축의 회전직경 변화의 주기와 동일하다. Fig.9는 구동축의 회전각에 따른 이송오차와 구동축의 회전반경 오차를 비교한 것이다. 이송오차와 구동축의 회전변경 오차의 주기는 구동축이 1회전하는 동안 하나의 사인파형을 나타내고 있다. 측정된 데이터를 최소자승법으로 구동축의 편심량과 진원도를 계산하여, 편심량은  $19.60\mu\text{m}$ 를 보였으며 구동축의 최대 반경과 최소 반경의 차이는  $11\mu\text{m}$ 를 보였다. 이송 오차는 편심에 의한 오차와 진원도에 의한 오차가 합하여져 나타난 이송 오차로 구동축의 진원도측정을 통한 계산값과 일치하고 있다.

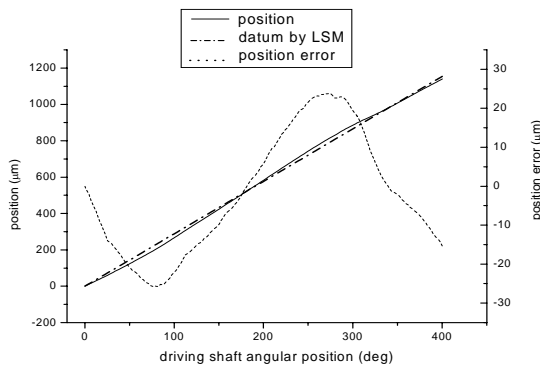


Fig.8 Feed position and angular error measurement

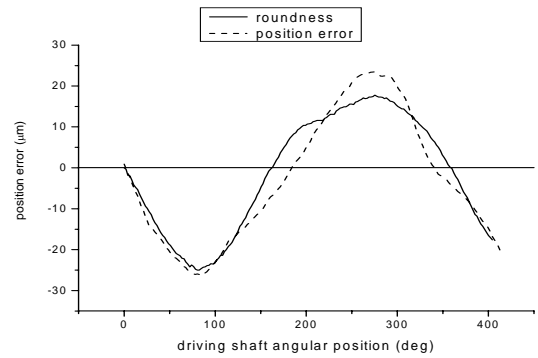
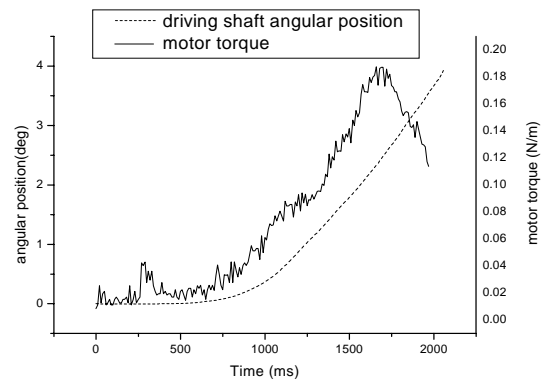


Fig.9 Compared position error with roundness of the shaft

### 3.3 롤러의 슬립 오차

트위스트롤러 마찰구동장치의 슬립현상을 측정하기 위하여 모터의 초기 가속구간에서 모터 토크의 변화와 구동축의 회전각 위치를 측정하였다. 구동 모터의 속도는 6 rpm, 예압은 12.5N을 가한 상태에서 가속구간의 가속도를 달리하며 측정하였다. Fig.10(a)는 가속도 3000 pulse/s<sup>2</sup>에서의 결과이며 가속구간 내에서 모터 토크의 급격한 변화는 없으며, 구동축의 회전각 위치 또한 2차 포물선 형태로 증가하고 있다. Fig.10(b)는 50000 pulse/s<sup>2</sup>의 측정에서 보면 모터토크가 급격히 떨어지는 현상이 일어나는 곳에서 구동축의 회전각 위치가 비정상적으로 증가하였다. 이 현상은 슬립에 의한 마찰력의 상실이 토크 변화의 요인으로 분석된다. 따라서 모터토크의 변화를 측정하여 마찰구동 장치의 슬립 유무를 확인할 수 있다.



(a) At acceleration 3,000 pulses/s<sup>2</sup>

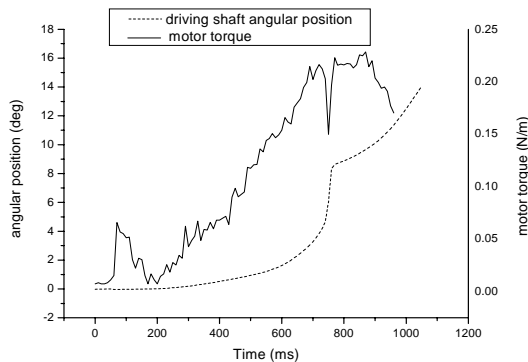
(b) At acceleration 50,000 pulses/s<sup>2</sup>

Fig.10 Motor torque and driving shaft position at pre-load 12.5N

#### 4. 분석 및 결론

##### 4.1 마찰구동장치의 정밀도

여기서는 트위스트 롤러 타입의 마찰구동장치를 구성하고 초정밀 이송계로써의 성능평가 및 이송오차 요인을 측정 분석하여 트위스트 롤러 타입의 마찰구동장치의 이송오차와 오차의 원인을 파악하여 문제점 별로 개선 방안을 찾는데 그 목적을 두었으며 이송오차의 원인별로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 트위스트롤러 마찰구동장치는 구동축의 형상 정밀도에 의한 영향으로 이송오차가 발생하며, 이 오차는 이송이 진행되면서 누적되지는 않고 구동축의 1회전 주기로 발생하며 편심량에 의한 오차는 사인파형의 형태를 보이고 진원도 오차에 의한 이송오차는 진원에 대한 반경 오차의 형태로 나타나며 실제 구동시 두 오차가 더하여져 나타난다.

(2) 트위스트 롤러 타입의 마찰구동 장치 자체는 백래쉬가 발생하지 않으나, 모터와 구동축의 연결에 필수 요소인 커플링의 탄성 변형에 의한 백래쉬가 발생한다. 또한 이송 부하에 의한 커플링의 탄성 변형은 이송 전 구간을 가속 등속 감속 구간으로 구분하여 각 구간별로 다른 탄성 변형량을 발생시키고 이는 이송궤적의 오차로 나타난다.

(3) 서보모터에 인가되는 전류 측정을 통하여 모터 토크의 변화를 측정함으로써 마찰구동장치의 슬립유무를 확인 할 수 있다.

(4) 예압(Pre-load)이 커지면 슬립을 방지 할 수 있으나 커플링 백래쉬가 증가하므로 구동 최적 조건은 슬립이 일어나지 않는 최소의 예압을 주는 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] Jiro OTSUKA, Michio TAKAHASHI, takashi USUDA, Makoto TOFUKU, "Study of Precision Positioning by Friction driver", Japan Soc, Prec. Eng., Vol. 26, No. 4, pp. 315-320 1992
- [2] 신영재, 최대봉, 이득우, "마찰구동기구에 의한 초정밀위치 결정", 한국기계연구원논문 B-8, pp. 159-162. 1995
- [3] Hiroshi Mizumoto, Katsumi Nomura, Tomio Matsubara, Tatsuhito Shimizu, "An ultraprecision positioning system using a twist-roller friction drive", PRECISION ENGINEERING, Vol 15, No 3, pp. 180-184, 1993
- [4] 송창규, 신영재, 이후상, "마찰구동기구로 구동되는 초정밀 가공기 이송계의 특성평가", 한국정밀공학회지 제 19권 제7호, pp. 64-70, 2002, July 1993
- [5] 송우근, 이응석, 최우천, 조동우, "정밀 이송장치의 모델링 및 제어, 마찰구동 장치를 이용한 초정밀 위치 이송" 한국 자동제어 학회논문집, pp. 236-240, 1995
- [6] Shigeru Futami, Akihiro Furutani, Shoichiro Yoshida, "Nanometer positioning and its micro-dynamics", Nanotechnology, pp. 31-37, 1990.
- [7] 박준호, 정밀 측정 시스템 공학, 야정 출판사, 1999.
- [8] 김화영, "모터전류신호를 이용한 드릴공정의 가공상태 감시", 부산대학교, 석사논문 1995
- [9] 김종원, "칼만필터와 이송모터의 전류 감지를 이용한 밀링 공정시의 절삭력 간접측정", 서울대학교, 석사논문 1995
- [10] 이찬홍, 박천홍, 노승국, 이후상, "볼스크류의 축-비틀림 복합 강성을 고려한 이송계 모델링", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 387-390, 2002