

< 기술논문 >

Linear 모터의 위치 제어 성능 시험을 위한 Dynamometer 개발

이응석* · 노창렬* · 노명환* · 김주경* · 박종진*
(2005년 12월 2일 접수, 2006년 4월 12일 심사완료)

Development of a Linear Motor Dynamometer for Positioning Control Performance Test

Eung-Suk Lee, Chang-Yul Roh, Myung-Hwan Rho, Ju-Kyung Kim and Jong-Jin Park

Key Words: Cogging Force(코깅력), Dynamometer(동력계), MR Fluid(Magnetic Rheological, 자기 점성유체), Velocity Response(속도응답), Traction Force(추력), Positional Accuracy(위치정밀도)

Abstract

Recently linear motor has been used mainly for high speed feeding performance of machine tools. The advantages of linear motor are not only high speed but high accuracy, because it is not required the coupling and ballscrew for converting rotary to liner motion. Before applying in different moving system, the dynamometer is necessary to test the performance. In Korea, the linear motor is producing in a couple of company. However, the liner motor dynamometer is not commercialized yet, like as rotary motor dynamometer. In this paper, a linear motor dynamometer is designed and manufactured using a MR damper. The dynamometer system developed in this study could be used for testing the positioning accuracy for different loading conditions, traction forces, dynamic performance and so on.

1. 연구배경

Linear 모터는 고속가공기 및 고속 직선 이송계 등의 산업계 요구에 따라 최근 국내에서도 상품화하여 시판되고 있다. Linear 모터는 모터의 기본이 되는 회전모터의 Stator, Primary part와 회전모터의 Rotor, Secondary part사이에서 일어나는 유도기전력에 의해 모터자체가 직선운동을 한다. Linear 모터는 회전형 모터의 직선변환기구에 비해 기계적인 변환장치가 필요 없으므로 구조가 간단하며 신뢰성이 좋을뿐만 아니라 기계적인 Back-lash가 발생하지 않아 고속, 고정밀 위치제어가 가능하다. 또한 공극에 있어 가동부 및 고정부가 비접촉 구동을 하므로 마찰이 없으며 소음이 적다. 그러나 Linear 모터는 공극을 일정하

게 유지해야 하고, 회전형 모터에 비해 누설자속이 많이 발생하는 단점이 있다. 또한 공작기계 구조물과 직접 결합되기 때문에 발생하는 열이 구조물에 직접 전달된다. 따라서 열발생은 Linear 모터의 성능을 저하시키며 특히 고가감속 시 위치정밀도를 저하시키게 된다. 현재 많이 이용되고 있는 동력계(Dynamometer)는 동력의 흡수만이 가능한 형태와 흡수와 구동이 동시에 가능한 형태로 나뉘어 진다. 엔진 시험에는 동력의 흡수만이 가능한 Eddy Current 형태가 많이 사용되며, 모터에는 Powder를 동시에 사용하는 Hybrid형, 또는 DC 동력계가 주로 사용된다. Linear 모터의 특성 연구는 주로 구조변경을 통한 열특성을 평가하기 위한 연구가 대부분이며, 신호 처리 시험 등 측정관련 연구가 이루어져 왔다.^(1,2)

본 연구는 MR유체(Magnetic Rheological Fluid, 자기점성유체)를 이용하여 제동이 가능한 장치를 구성하여 최근 개발되는 초정밀 서보모터 시스템

* 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부
E-mail : eungsuk@cbnu.ac.kr
Tel : (043)261-2442

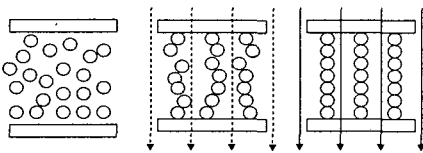
* 충북대학교 대학원 기계공학부

시험을 위한 장치를 설계, 제작하였다. 설계되는 동력계는 서보모터 시스템의 부하에 따른 위치 제어 성능을 측정, 분석하고자 하였다. Linear 서보모터의 위치제어 오차를 분석하기 위하여 간섭계를 통하여 이송 거리 측정 시험을 수행 하였다. 장치는 시판용 MR Brake를 사용하여 Linear 서보 모터를 시험하도록 동력계를 설계하였다. 본 연구에서 개발된 동력계를 이용하여 국내에서 생산중인 Linear 서보 모터 시스템의 위치제어 성능의 측정 및 분석 가능성을 보였다.

2. 모터 Dynamometer 설계 및 제작

2.1 MR Fluid를 이용한 부하 제어

MR유체 (Magneto-Rheological Fluid)는 점성 제어 가능한 유체이다. 자기장이 MR유체에 가해지면 자유롭게 유동하던 선형 점성 유체가 수 백분의 일 초 사이에 제어 가능하고 항복 강도를 갖는 반고체 상태로 변환되고 또한 그에 대한 역변환도 가능하다. Fig. 1에서와 같이 MR유체의 특성은 평상시는 보통 유체에서 자기장이 유체에 가해지면 자유롭게 유동하던 선형 점성 유체가 순간적으로 점성제어가 가능하게 되어 고체/반고체 상태로 변환된다. MR 유체 감쇠기는 제어 가능한 감쇠력을 제공하기 위해서 MR 유체를 사용한 새로운 능동 제어장치이다. 이 장치는 기존의 능동 장치들이 갖는 기술적인 어려움의 많은 부



(a),(b) Without magnetic field (c) With magnetic field
Fig. 1 Mechanism of MR fluid

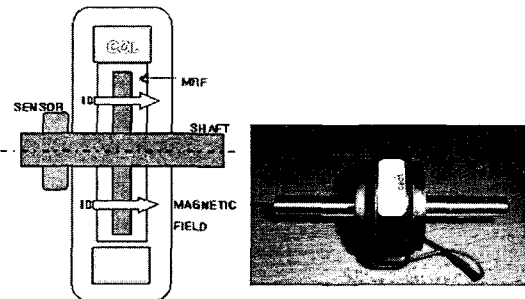


Fig. 2 Rotary MR fluid damper (Lord Co., USA)

분을 해결할 수 있다. MR 유체를 이용한 연구는 세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 본 연구에서는 이중 가장 알려진 미국 LORD사의 Rotary MR Fluid Damper 제품 (Fig. 2)을 사용하여 모터 Dynamometer의 부하 장치를 설계하였다.

2.2 MR Fluid Damper를 이용한 동력계 설계 및 제작

Linear MR fluid damper는 장치구성 비용이 높기 때문에 본 실험 장치 구성은 Fig. 3에서와 같이 Rotary MR fluid damper를 이용하여 설계하였다. 동력계 구성 원리는 직선형 서보모터의 직선 운동을 rack & pinion 기어를 통하여 직선방향을 회전 방향으로 전환한다. MR fluid damper로 가변 부하를 가하여 직선형 서보모터의 성능 시험을 수행한다. Linear 모터의 이송부와 rack사이에는 load cell을 장착하여 가해지는 부하를 측정할 수 있게 하였다. Fig. 4는 Rotary MR damper를 사용한 Linear 서보 모터 Dynamometer의 기본 설계이며, 회전형 서보 모터 시험 검용으로 제작되었다. 회전형 서보 모터 사이에는 전자클러치를 부착하여 회전형 모터와의 연결을 차단하게 하였으며,

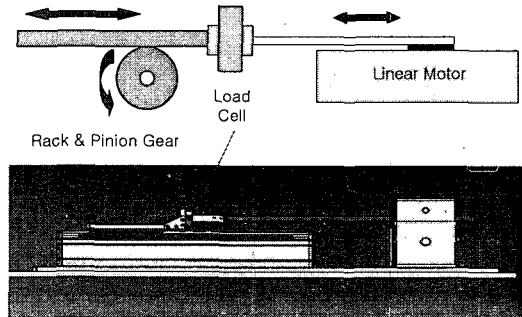


Fig. 3 Linear loading using rack & pinion gear with MR damper

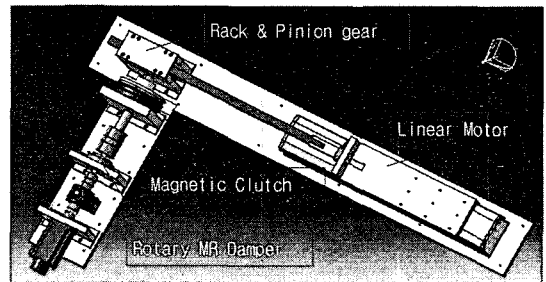


Fig. 4 Linear motor dynamometer assembly design

Table 1 MR-Damper specification (LORD Co.)

Diameter	3.63 in (92.2 mm)
Maximum on-state torque	50 in-lb (5.6 Nm)
Minimum off-state torque	≤3 in-lb (≤0.3 Nm)
Maximum current	1.0 Amp
Resistance	8 ohms
Maximum operating speed	1000 RPM
Operating temperature	-30° to 70°C

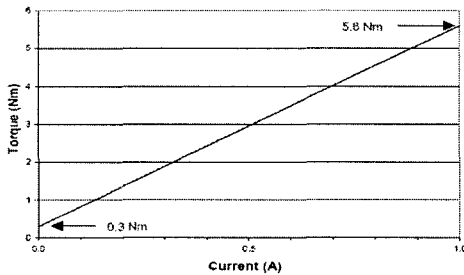


Fig. 5 Current-Load data for the MR damper (LORD Co.)

Linear 서보모터 또는 회전형 서보모터의 보다 정밀한 부하조정이 필요시에는 전자클러치를 연결하여 시험대상 모터에 반대쪽 모터가 한개의 부하로 작용하게 설계 하였다. Table 1은 부하장치로 사용된 Rotary MR damper의 사양이며, Fig. 5는 전류에 따른 가변부하 선도이다. 사용된 MR brake는 전류제어 방식이지만 부하량에 영향을 받기 때문에 상대적으로 피드백을 할 수 있도록 보완해야 한다. 따라서 본 연구에서는 가해지는 전류를 측정하여 연속적인 피드백이 가능한 제어기를 설계하였다. 제어기는 D/A, A/D 기능이 포함된 마이크로프로세서를 사용하였으며, 또한 PC와의 통신을 위하여 serial port를 추가하였다. 전류 측정장치는 Texas Instrument 社의 INA195를 사용하여 주로 휴대폰이나 전류계에 사용되는 소자로 간단히 구성할 수 있으며, 부하에 크게 영향을 주지 않는다. Linear 모터의 축 방향 부하량을 측정하기 위한 load cell은(CAS, MNT-100L) 인장과 압축 모두 측정 가능하며, 최대 허용하중은 100kgf 이다. 인장 압축의 동시 측정을 위하여 미소 전압을 증폭하는 Amp.에서 출력된 Analogue 신호는 A/D 후 PC로 입력되어 진다. Linear motor 자체적으로 발열이 심하므로 온도를 측정해야 하며, 열전대(K Type, 8chs)로부터 마이크로

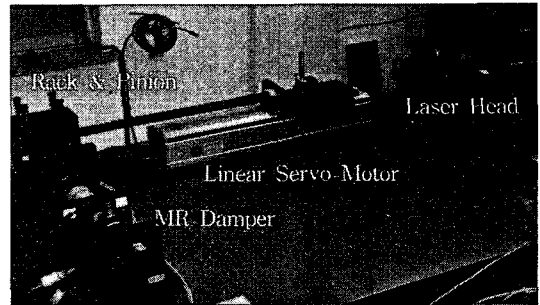


Fig. 6 Manufactured linear servo motor dynamometer

Table 2 Linear motor specification for the test

Rated Traction force	73.2N
Max. Traction force	219.7N
Displacement	420mm
Position resolution	1μm
Accuracy	4μm
Max. Velocity	3m/s
Max. Acceleration	5g
Induction type	Permanent magnet

프로세서에 내장된 A/D를 사용하여 RS232C 통신으로 PC에 온도 값을 전송하였다. 온도는 Linear 모터의 자체 발열에 의한 성능 저하이외도 MR-Brake의 온도변화에 따른 점성 변화에도 영향을 줄 수 있다. Linear 서보 모터의 위치 이송 오차 측정을 위하여 레이저 간섭계를 이용하였으며, 사용된 간섭계는 Renishaw Laser Interferometer, 분해능 1nm, Sampling rate 0.5m/s의 사양이다. Fig. 6은 서보 모터 시험을 위해 제작된 Dynamometer의 정밀길이 측정을 위해 레이저 간섭계를 설치한 사진이다.

3. 서보 모터 Dynamometer 시험

Linear 서보 모터 시험은 로드셀을 이용하여 추력변동특성 및 모터 엔코더 신호를 변환하여 속도응답곡선, 위치추종성능 측정하였으며, 레이저 간섭계를 사용하여 부하에 따른 위치 오차 실험을 수행하였다. 시험에 사용된 Linear 서보모터는 이송거리 420mm의 국내에서 제작된 제품이며, 사양은 Table 1과 같다. 사용한 모션 콘트롤 패튼은 Fig. 7과 같은 S-Curve 모션을 사용하였다.

S-Curve 모션은 사용자가 설정하는 S-Curve 형태의 위치 패턴에 따른 모션으로서 가속도의 미분으로 충격량에 해당하는 가가속도(Jerk)를 기준으로 최적의 모션을 생성한다.

3.1 위치오차 반복성 시험

Fig. 8은 Linear 서보모터의 400mm 이송시 부하별 위치 재현성(Repeatability) 측정치이다. 부하가 40N 가까이 증가하면, 위치추종능력이 급격히 떨어지는 것이 보이며, 사용된 Linear 모터는 중고품으로 더 이상의 고부하에서의 반복시험이 불가능하였다.

3.2 위치추적 및 속도응답 시험

위치추종 및 속도응답특성 시험은 속도, 가속도, 가가속도 변화에 대하여 부하조건에 따라 시험이 수행되었으며, Fig. 9,10에 속도를 변화시켜 측정된 시험 결과를 보여준다.(400mm 목표 위치

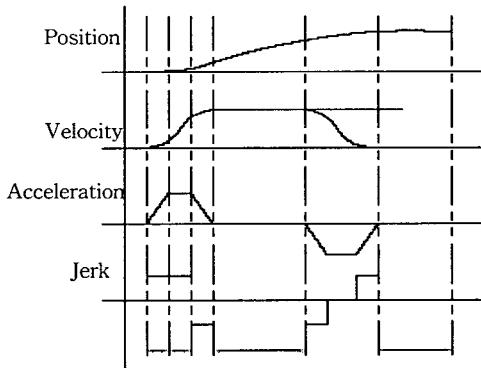


Fig. 7 Pattern of S-curve motion

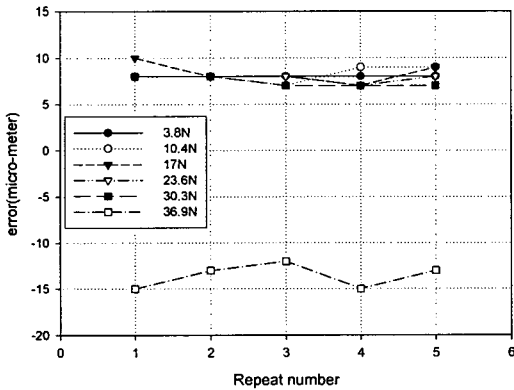
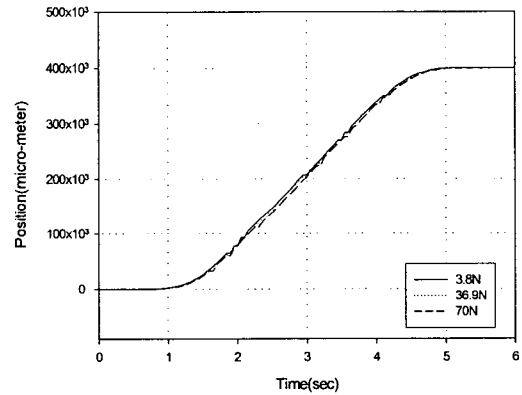


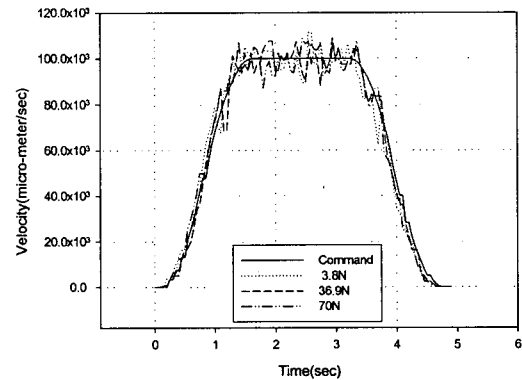
Fig. 8 Positional repeatability for different MR loading (400 mm stroke)

까지 연속 이송) 속도를 100mm/sec에서 2배로 증가시킨 Fig.10의 측정결과를 보면 목표 위치는 빨리 도달한 반면 (Fig.10b) 등속도 구간은 거의 보이지 않는 것을 알 수 있다. 데이터의 불연속으로 보이는 것은 제어기와 PC의 RS232통신 방식에서 data sampling 속도가 낮아 점 데이터의 수가 적은 원인으로 보인다.

Fig. 11은 400mm 이송 후 방향 전환 후(forward & backward) 로드셀로 측정된 추력변동 특성이다. 모터가 정지 후에도 로드셀에 잔류 인장력이 남아있음을 보인다. 잔류 인장력은 부하가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타난다. 잔류 인장력은 영구자석형 Linear 모터에서 발생하는 코깅력(Cogging force)에 의한 것으로 분석된다. 코깅력은 모터가 안정된 위치에 있지 못하여

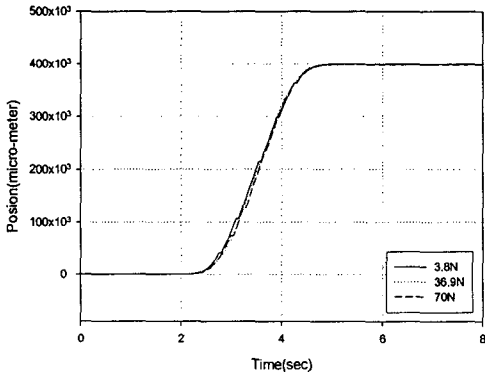


(a) Position tracing test

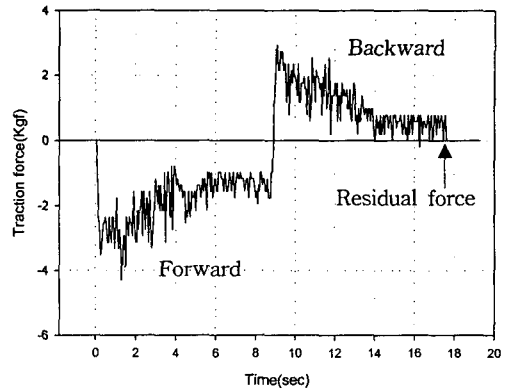


(b) Velocity response curve

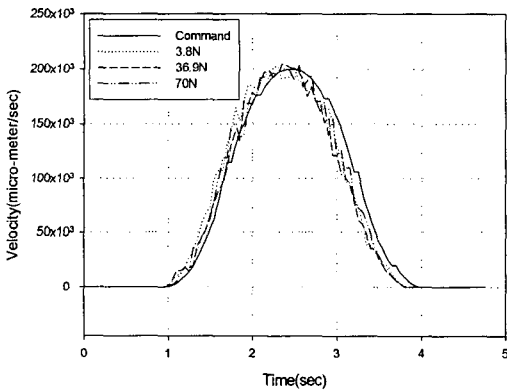
Fig. 9 Position and velocity response performance for different loads (velocity 100mm/sec, acceleration 900mm/sec², jerk 900mm/sec³)



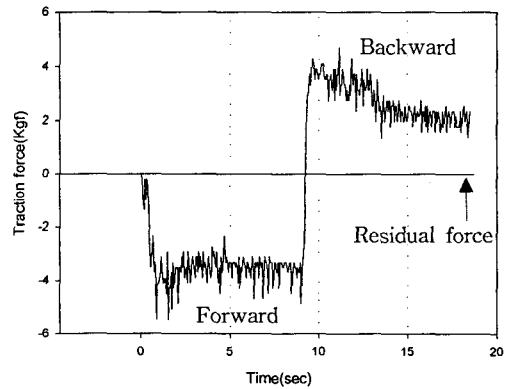
(a) Position tracing test



(a) 3.8N loading



(b) Velocity response curve



(b) 36.9N loading

Fig. 10 Position and velocity response performance for different loads (velocity 200mm/sec, acceleration 900mm/sec², jerk 900mm/sec³)

안정된 위치로 가려는 힘으로 부하가 작을 때에는 코깅력이 초기 부하보다 크기 때문에 안정된 위치로 복귀했기 때문에 잔류 인장력이 작은 것이다. 또 다른 잔류 인장력 발생 원인으로서는 가하여진 부하가 증가함에 따라 위치결정완료 신호가 나오는 위치까지 도달하지 못해서 위치결정완료가 될 때까지 직선형 모터가 움직이고 있기 때문이다. 코깅력은 영구자석이 안정위치에서 벗어남으로써 안정위치로 복귀하려는 힘에 의하여 코깅력이 발생한다.

Fig. 11 Traction force variation (400mm forward and backward stroke with 5sec dwell)

3.3 최대추력 시험

직선형 서보 모터의 최대추력시험은 모션컨트롤러에서 토크제어모드에서 시험을 수행을 하였다. 모션컨트롤러 프로그램에서 최대추력을 낼 수 있는 조건을 주기위하여 DAC Output Offset 파라미터를 사용하여 인위적으로 최대 출력이 되도록 하였다. Fig. 12는 최대 추력 시험을 위하여 Linear 모터의 선단에 고정장치를 설치한 모습이다. Linear 모터를 구동시키고 과부하가 되어 자동 정지할 때까지 (Trigger off) 로드셀 값을 측정하였다. Fig. 13은 측정된 값이며, Table 1의 실험용 Linear 모터사양과 비교해 보면 최대 추력 219.7N에서 70% 이하로 떨어짐을 보인다.

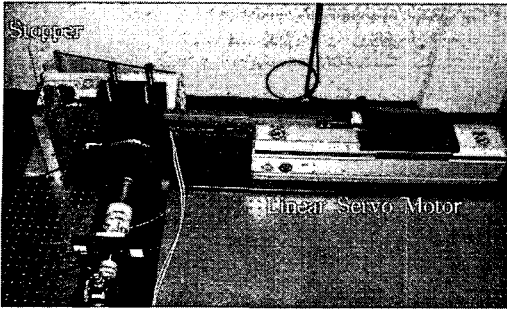


Fig. 12 Jig set-up for testing maximum traction force

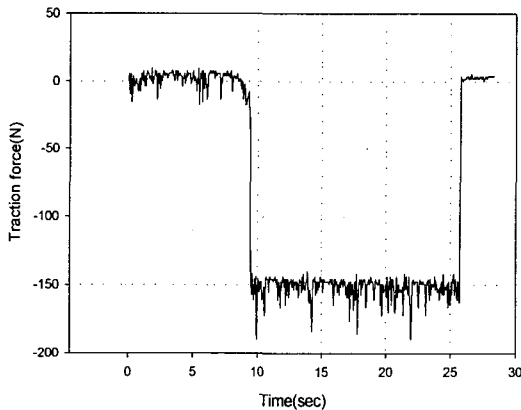


Fig. 13 Maximum traction force test for the linear motor

4. 결론

MR damper를 이용한 Linear 모터의 부하에 따른 정밀 위치 제어 성능 시험을 위한 Dynamometer 구성하여 Linear 모터의 위치 제어 정밀도, S-Curve에 따른 부하별 위치 추적 성능 시험, 속도 응답 특성, 추력 변동 특성, 코강력 등의 분석

이 가능함을 보였다.

본 연구에서 설계, 제작된 MR damper를 이용한 서보모터 시험용 Dynamometer는 MR damper의 전류를 모터 이송과 동시 제어하여 보다 정밀한 부하제어 또는 일정 부하 제어 모드 등 프로그래밍 통한 제어가 개발이 가능할 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Eung I. Y., 2002, "Thermal Behavior Optimization for High Speed Large Traction Linear Motor," *KSPE*, Vol. 19, No. 6.
- (2) Choi H. J. et al., 2002, "Study on the Moving Performance Evaluation for Linear Motor of Manufacturing Machine," *KSMTE Spring Proceeding*, pp. 215~220.
- (3) Eung I. Y., 2000, "Positioning Technology using Linear Motor," *KSPE*, Vol. 17, No. 12.
- (4) Choi J. W. et al., 2001, "Development for High Speed and Stiffness Linear Motor Moving System," *KSPE Autumn Proceeding*, pp. 167~169.
- (5) Song W. G. et al., 1995, "Modeling and Control for Precision Moving System, Ultra Precision Positioning using friction Driver System," *KACC Spring Proceeding*, pp. 236~240.