

◆특집◆ IT 활용을 통한 제어 시스템의 기술발전과 나노 정밀도 구현방안

Nano 서보 모터시스템 시험을 위한 정밀 Dynamometer개발

이응석*, 노창열**, 이민기**, 노명환**, 김주경**, 박종진**

Development of a Precision Dynamometer for Testing of Nano Servo Motor System

E.S.Lee*, C.Y. Roh**, M.K.Lee**, M.H.Roh**, J.K.Kim** and J.J.Park**

Key Words : Dynamometer(동력계), Linear Servo Motor(직선형 서보 모터), MR (Magnetic Rheological) Fluid, Rotary Servo Motor(회전형 서보 모터)

1. 서론

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 Powder 를 동시에 사용하는 Hybrid 형, 또는 DC 동력계가 주로 사용된다. 본 연구는 MR (Magnetic Rheological) Fluid 를 이용하여 제동이 가능한 장치를 구성하여 최근 개발되는 초정밀 Nano 서보 모터 시스템 시험을 위한 장치를 설계, 제작하였다. 설계되는 동력계는 가변 부하의 측정뿐만 아니라, 회전형 서보 모터의 각도 및 직선형 모터 시스템의 부하에 따른 위치 제어 성능을 측정, 분석하고자 하였다. 회전형 서보 모터의 각도 분석을 위하여, 각도 표준기인 Autocollimator 부착이 가능하도록 설계하였으며, 직선형 서보모터의 위치제어 오차를 분석하기 위하여 Interferometer 를 통하여 이송 거리 측정 시험

을 수행 하였다. 또한 한 개의 MR Brake 를 사용하여, 회전형 및 직선형 서보 모터를 시험하도록 동력계를 설계하였다. 본 연구에서 개발된 동력계를 이용하여 국내에서 생산중인 회전형 및 직선형 서보 모터 시스템의 위치제어 성능의 측정 및 분석 가능성을 보였다.

2. MR Damper 를 이용한 동력계 설계

MR Fluid 는 마찰력 제어 가능한 유체 중 하나이며, 자기장이 유체에 가해지면 자유롭게 유동하던 선형 점성 유체가 수백분의 일 초 사이에 제어

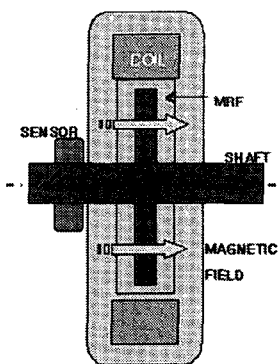


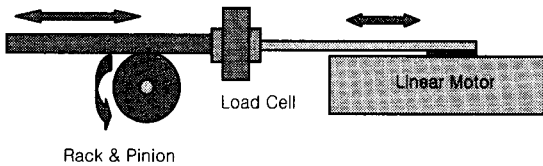
Fig. 1 Rotary MR fluid damper (LORD Co., U.S.A.)

* 충북대학교 기계공학부
Tel. 043-261-2442, Fax. 043-263-2441
Email : eungsuk@chungbuk.ac.kr
정밀기계 특히, 공작기계시스템의 시험방법에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.
** 충북대학교 기계공학부 대학원

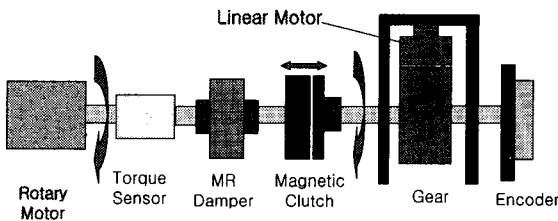
Table 1 Specification of rotary MR damper (LORD co.)

Diameter	3.63 in (92.2 mm)
Length	1.44 in (36.6 mm)
Weight	3.1 lb (1.41 kg)
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
Inductance	150 mH
Operating temperature range	-20° to 106°F (-30° to 70°C)

가능하고 반고체 상태로 변환되고, 또한 역 변환도 가능하다. 최근의 연구결과에 의하면 MR Fluid Damper는 능동제어 시스템에 적용 가능한 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 연구가 세계적으로 활발히 연구된다. Fig. 1은 미국 LORD사의 Rotary MR Fluid Damper의 원리를 보여주고 있다. Fig. 2는 MR Damper를 사용한 직선형 모터와 회전형 모터를 연결하는 장치를 보여주는 동력계 설계이다. Rack&Pinion Gear 사용하여 회전형 모터 및 Rotary MR Damper와 연결되며, Magnetic Clutch를 사용하여 필요 시 회전형 또는 직선형 모터를 별도로 실험할 수 있게 하였다.



(a) Linear motor connection using load cell and rack & pinion



(b) Rotary motor connection with torque cell

Fig. 2 Block diagram of rotary and linear motor dynamometer using MR damper

회전형 동력계를 구성하는 토크 센서는 계측용 Op Amp인 Texas Instrument社의 INA118을 사용하고, PC통신은 마이크로프로세서(PIC16873A)와 내장된 A/D Converter(10bit)를 사용하였다. 로드 셀은 Cass社의 MNT-100L을 사용하고, 100Kg의 인장 및 압축 하중을 측정할 수 있다. Fig. 3은 CATIA s/w를 사용하여 설계된 전체 동력계 모형이다. Fig. 4는 MR damper에 필요한 전류와 로드 셀에서 측정된 부하와의 Calibration 도표이다. 사용된 제어보드 (MEI PCI/DSP, 4 Axis model, 16 bit servo output resolution)에서 사용된 직선형 서보 모터의 시험조건은 Table 2와 같다.

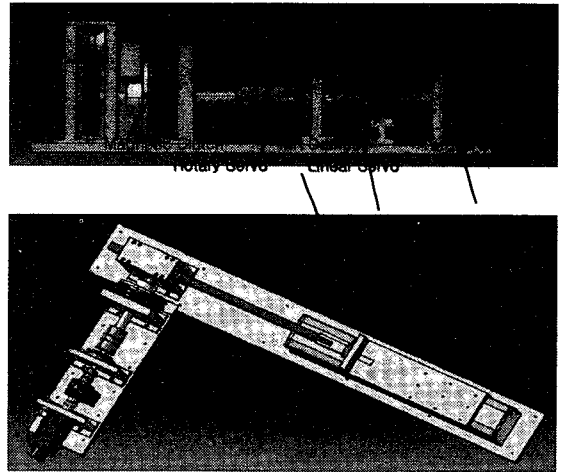


Fig. 3 Design of rotary and linear motor dynamometer using CATIA

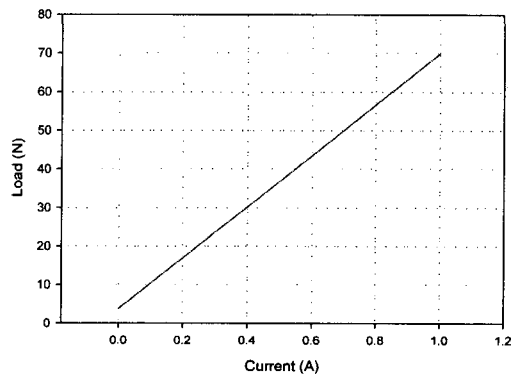


Fig. 4 Calibration chart for MR current vs. load variation

Table 2 Linear motor testing condition(1) for MEI /PC controller

Torque Control Mode for 400mm full stroke
Velocity : 100 mm/sec
Acceleration : 900 mm/sec ²
Jerk : 900 mm/sec ³

3. 서보 모터 시험

3.1 직선형 모터

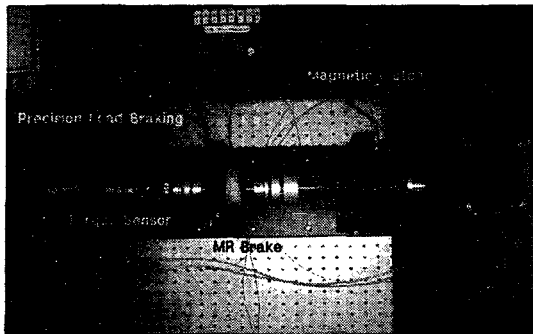
직선형 모터는 회전형 모터의 직선변환기구에 비해 기계적인 변환장치가 필요 없으므로 구조가 간단하며 고속, 고정밀 위치제어가 가능하다. 또한 공극에 있어 가동부 및 고정부가 비접촉 구동을 하므로 마찰이 없으며 소음이 적다. 그러나 직선형 모터는 공극을 일정하게 유지해야 하고, 회전형 모터에 비해 누설자속이 많이 발생하는

Table 3 Linear motor specification for the test

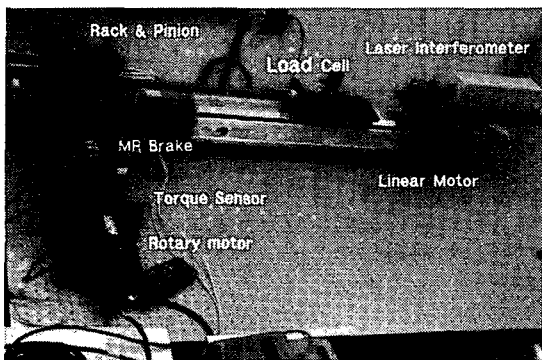
Items / Model	Motor (JTM10-420)
Rated Traction force	73.2N
Max. Traction force	219.7N
Displacement	420mm
Position resolution	1 μ m
Accuracy	4 μ m
Max. Velocity	3m/s
Max. Acceleration	5g
Induction type	Permanent magnet
Weight	35Kg

단점이 있다. 직선형 모터를 공작기계에 적용할 경우 기존의 회전모터의 회전운동을 직선운동으로 변화시키는 기구가 생략되기 때문에 고속 직선운동이 가능하고 관성모멘트가 낮아져 높은 위치제어가 및 가속능력을 가진다. 직선형 모터를 공작기계의 이송장치로 사용할 경우 공구를 교환하기 위한 그리고 가공위치나 기준점으로 이동시키는 비절삭 시간을 많이 줄일 수 있어 생산성을 향상시킬 수 있다. 여기서는 직선형 모터의 운동 특성 및 제어보드의 성능을 시험하며, 부하에 따른 위치정밀도 분석, 위치결정능력, 속도응답특성을 보아서 모터 및 제어보드의 특성을 알아보고자 한다. Laser Interferometer 를 이용한 위치정밀도를 부하에 따라 측정, 분석한다. 직선형 모터는 국내 JUSTEK 社의 JTM10 - 420 모델을 선정하였다. 이 제품의 사양은 Table 3 과 같다. Fig. 5 에 직선형 모터실험을 위해 제작된 동력계이며, 정밀 길이 측정을 위해 HP Laser Interferometer (Model 5527, Resolution: 0.6 Nano, Measuring velocity : 254 mm/s, Range: \pm 10,600 mm)을 설치한 사진이다.

Fig. 6 은 직선형모터의 부하별 위치 재현성 (Repeatability) 측정치이다. 반복 횟수가 증가함에 따라 오차가 화살표 방향으로 안정화 되는 것을 볼 수 있다. 반복횟수가 더 증가하면 직선형 모터의 온도가 올라가면서 오차는 다시 커지게 될 것으로 보인다. Fig. 7 은 20mm 구간별 오차와 전체 누적 오차이다. 구간별로는 최대 구간오차는 1.2 μ m 의 오차가 있다. 구간별 위치 s/w 오차 보상을 통해 오차가 줄어들 것으로 보인다.



(a) MR brake set-up



(b) Laser interferometer set-up

Fig. 5 Linear motor testing dynamometer set-up

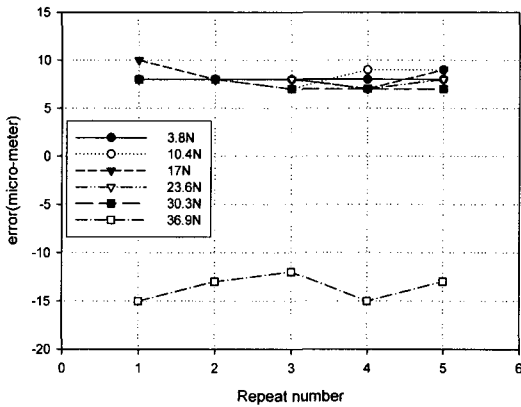


Fig. 6 Positional repeatability of the linear motor for different MR loading

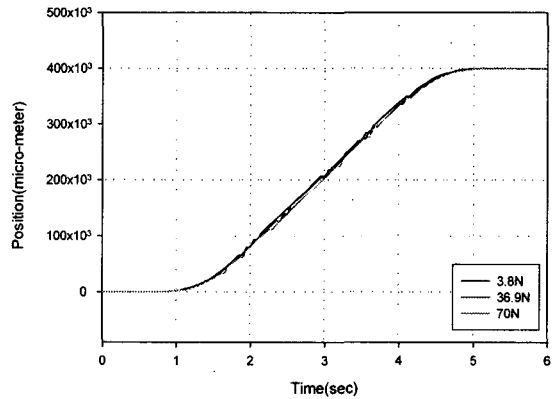


Fig. 8 Position tracing performance of the linear motor

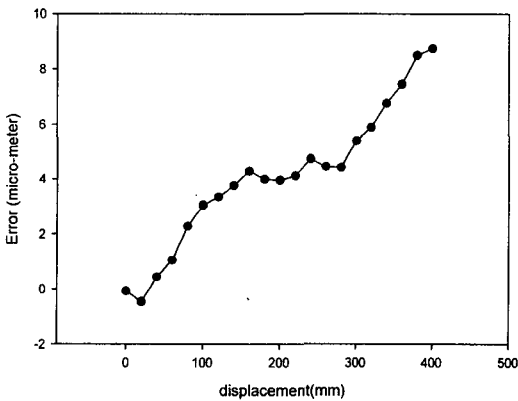


Fig. 7 Accumulated positional error in full stroke movement for the linear motor

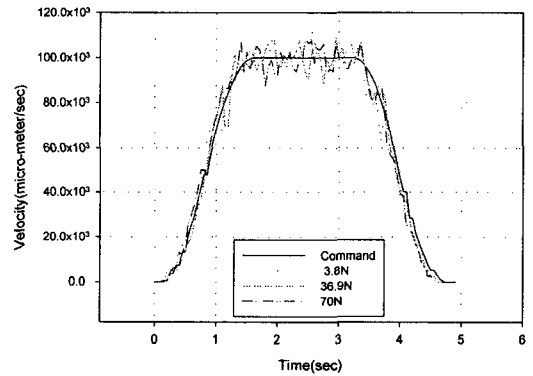


Fig. 9 Velocity tracing test for given command of linear motor

Fig. 8 은 부하별 위치 추적 성능 실험이다. 초기 부하가 증가함에 따라 지령 위치까지 도달하는 시간이 증가함을 알 수 있다. Fig. 9 는 속도 응답 곡선이다. 초기 부하가 증가함에 따라 속도 추적이 불안정 함을 보이며, 모터의 추력제어가 잘 되지 못함을 알 수 있다. 이러한 현상은 제어기의 원인인 것으로 보이며, Fig. 9 에서 보여지는 Command 값은 Feed-back Encoder (Linear Scale) 신호로 그려진 것이며, 결국 서보 모터는 제어기 신호만 추적하기 때문에 제어기에서 잘못된 명령을 주는 것으로 분석 할 수 있다.

Fig. 10 은 부하에 따른 추력변동 특성이다. 부하가 증가함에 잔류 인장력이 증가함을 알 수 있다. 잔류 인장력의 발생 원인으로는 직선형 모터의

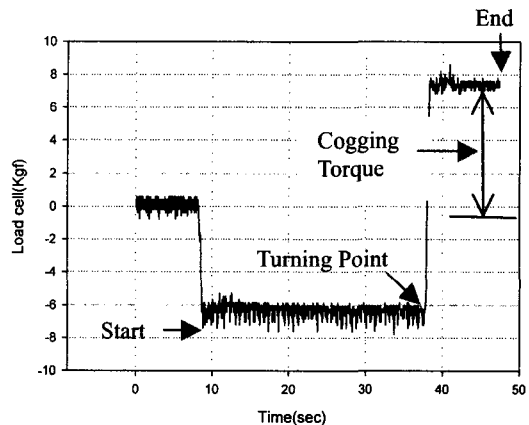
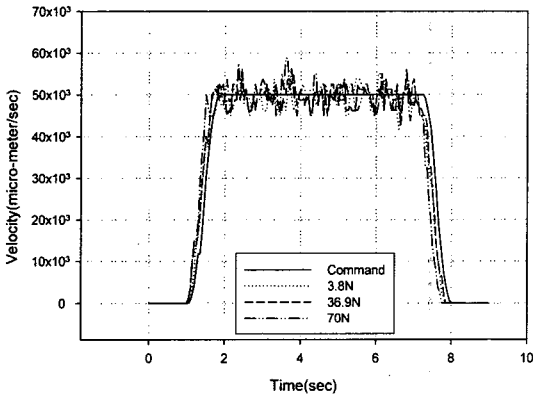
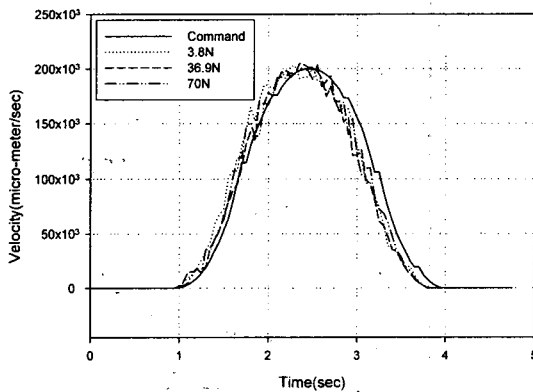


Fig. 10 Traction force performance for given positional command

여자 방식이 영구 자석형이기 때문이다. 영구자석형 모터에서 발생하는 Cogging 토크에 의한 것으로 분석된다. Cogging 토크는 모터가 안정된 위치에 있지 못해서 안정된 위치로 가려는 힘을 말한다. 부하가 작을 때에는 Cogging 토크가 초기 부하보다 크기 때문에 안정된 위치로 복귀했기 때문에 잔류 인장력이 작은 것이다. Fig. 11은 속도, 가속도의 변화에 따른 시험 데이터이다. Fig. 12는 정격부하를 시험한 것이며, 직선형 모터의 정지상태에서의 최대 추력시험을 수행하였다. 그림에서 보면 12kgf 근처에서 안전 스위치가 작동한 것으로 나타났으며, Table 3의 실제 사양인 22kgf (220Nm)에 못 미치는 것으로 보인다.



(a) Velocity : 50 mm/sec, Acceleration : 500 mm/sec²
Jerk : 500 mm/sec³



(b) Velocity : 200 mm/sec, Acceleration : 900 mm/sec²,
Jerk : 900 mm/sec³

Fig. 11 Velocity traction performance for different control condition (Torque Control Mode for 400mm full stroke)

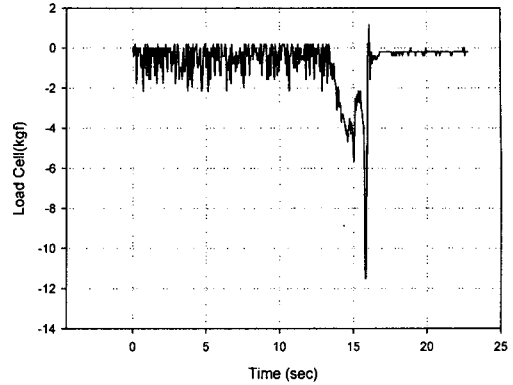


Fig. 12 Maximum traction force test for the linear motor

3.2 회전형 모터

회전형 모터는 국내 LG-OTIS 社의 KN 07 모델을 선정하여 구입 하였다. 이 제품의 사양은 Table 3 과 같다. Fig. 13 에서 보면 초기 부하가 증가함에 따라 목표 위치까지 도달하는데 시간이 함께 증가함을 알 수 있다. Fig. 14 는 2.95N 의 하중을 가하였을 때 시간에 따른 토크의 변화에 대해 실험한 것이다. 시작점의 토크와 끝나는 점의 토크가 거의 비슷하게 나오는 것으로 보아 Cogging Torque 가 거의 영향을 안 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 15 는 속도 응답 곡선이다. 초기 부하가 증가함에 따라 속도 응답곡선이 많이 진동하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 계단형 이송으로 보이는 부분은 Sampling rate 의 차이로 보인다.

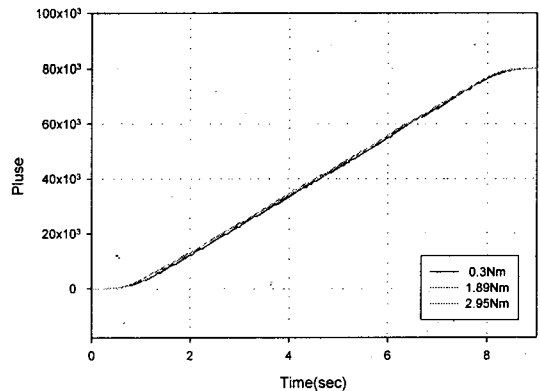


Fig. 13 Angular pulse position tracing performance for rotary servo motor

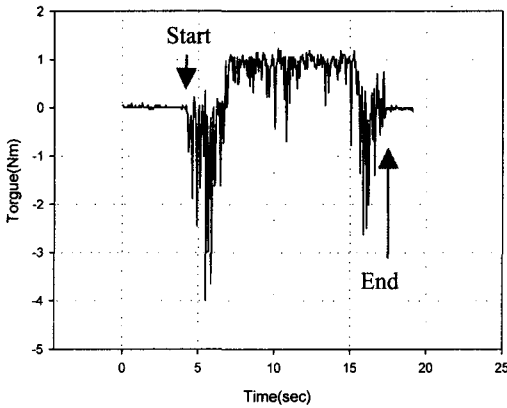


Fig. 14 Measure load cell for rotating servo motor

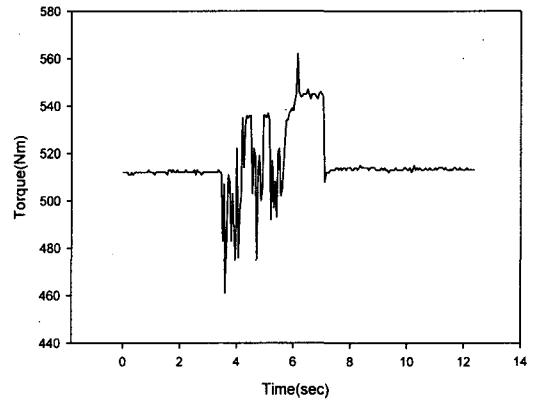


Fig. 16 Maximum torque test for the rotary motor

Table 4 Rotary servo motor specification for the test

Items/model	KN 07
Rated Output	600 W
Rated Torque	2.86 Nm
Max Torque	8.6 Nm
Rated RPM	2000 rpm
Max RPM	3000 rpm
Weight	5.5 Kg
1Rev Party Pulse	8000

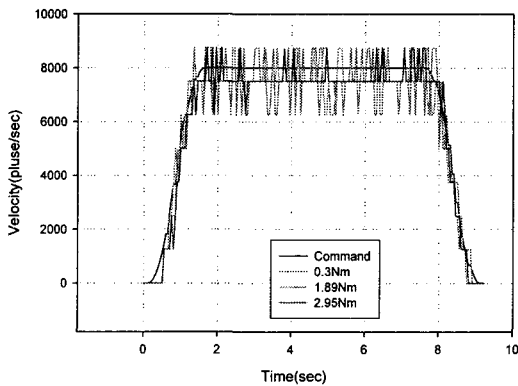


Fig. 15 Velocity tracing performance for different rotating loading

Fig. 16 은 정지상태에서 안전 스위치가 작동 할 때까지의 최대 토크를 시험한 것이며, Table 4 의 실제 사양에서 보면, 8.6Nm 에 비하여 20Nm 이 상으로 충분한 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 MR damper 를 이용한 Linear Motor 의 부하에 따른 정밀 위치 제어 성능 시험 을 위한 정밀 동력계(Dynamometer) 구성하였다. 본 연구에서 설계, 제작된 정밀 동력계는 Linear Motor 의 구간별 위치 정밀도, S-Curve, 부하별 위치 추적 성능 시험, 속도 응답 특성, 추력 변동 특성, Cogging load 등의 정밀 분석이 가능하였다. 또한 직선형모터의 정격(최대) 추력, 회전형 모터의 정격 토크 측정이 가능함을 보였으며, 시간에 따른 추력 및 토크의 변화 특성 분석이 가능함을 보였다. 또한 MR damper 의 전류를 제어하여 일정 Torque 제어 모드의 시험이 가능하며, Rotary motor 를 Load 로 하여 Linear Motor 의 제동력으로 하는 Dynamometer 시험이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Dyke, S.J., Spencer jr, B.F., Sain, M.K. and Carison, J.D., "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," Smart Materials and Structures, Vol.5, pp.565-575, 1996

2. Jansen, L.M. and Dyke. S.J., "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.126, No.8, pp.795-803, 2000
3. Spencer jr, B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carison, J.D., " Phenomenoiocal model of a magnetorheiological damper," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*. Vol.123, No.3, pp.30-238, 1997
4. Choi, J.W., Kim, S.E., Lee, K.D., Park, J. I., Lee, S.K., "Development of linear motor driver for high speed and robust rigid moving system," *KSPE Spring conference proc.*, pp.167-169, 2001
5. Choi, H.J., Kang, E.G., Jung, I. Y., Lee, S.W., "Study on the moving performance evaluation of linear motor for machine tools," *KSMTE, Spring conference proc.*, pp.215-220, 2002
6. Eun, W.L., "Technology for positioning control using linear motor," *KSPE*, Vol.17, No.12, 2000