
Hybrid type linear motor의 설계와 추력특성시험

김문환*

A design of hybrid type linear motor and measurement of the thrust force characteristics

Moonhwan Kim*

요 약

저가격형으로 프로토타입 하이브리드형 리니어 펄스 모터(LPM)가 편측형으로 설계되었다. 모터의 정특성 및 동특성 측정위한 측정기기를 설계 제안하였다. 실험측정결과 프로토타입 리니어 펄스 모터의 정특성 및 동특성을 구체적인 추력의 값으로 확인하였다. 프로토타입 리니어 펄스 모터를 구형파와 마이크로스텝 구동으로 구동하여 각각의 경우의 추력의 변화를 확인하였다. 실험결과 마이크로스텝구동방식에서 추력리플이 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

A Hybrid type Linear Pulse Motor (LPM) for low cost is designed as single side stator structure. The static and dynamic characteristics measurement systems are designed. Experimental measurement systems, which measure the static and dynamic characteristic of the LPM, are suggested for the prototype LPM. It becomes known the values of the thrust forces. Finally the microstep drive method is adopted to the drive of prototype LPM. The waveform difference is measured between the microstep method and rectangular wave. From the experimental results, it can be confirmed that the repetitive ripple of the thrust force of the prototype LPM are reduced by taking the microstep drive method.

키워드

Linear motor, Microstep, Microprocessor control, Pull-in, Pull-out, Thrust force

I. 서론

글로벌 시장 환경에서 경쟁력을 갖기 위한 것으로 공장자동화가 있다. 공장 및 생산시설의 자동화에 반드시 거론되는 것으로 직선이송 및 가공장치를 들 수 있다. 직선운동의 경우, 대부분 회전운동에서 직선운동으로 변환하는 변환기를 사용하여 왔다. 랙 앤 피니언, 볼스 크류 등을 들 수 있다. 이러한 변환기를 자동화기구에 사용할 경우 백러쉬로 인하여 반복된 사용에는 필수적으로 누적 위치 오차가 커지는 단점이 있다. 이러한 위치오차를 보상하는 방법으로 로터리엔코더를 사용하기도 한다. 그러나 점차 리니어 모터가 직선운동 변환기를 사용하는 시스템을 대신하여 오고 있다. 고정밀의 XY-스테이지에도 리니어모터가 채택되어 보급이 확대되고 있다. 하지만 범용기기에는 고가의 리니어 모터 대신 볼스크류가 많이 사용되고 있다. 리니어 모터의 경우, 위치 정밀성을 높이기 위하여 고정자를 정밀 연삭가공으로 제작하여, 모터가격이 매우 높아지기 때문이다. 이에 본 연구에서는 적층코어 구조로 고정자를 구성, 저가격형을 목표로 영구자석을 사용한 하이브리드형 리니어펄스모터(LPM)의 시제품을 개발하였다. 완성된 시제품의 정추력을 수치모델 해석 값과 실험치를 비교했으며 정특성 및 동특성을 실험으로 측정하였다. 구동시험으로 구형과 제어에 의한 구동과 마이크로 컴퓨터 제어에 의한 마이크로 스텝구동에서 추력의 변화를 관찰 하였다.

II. LPM 설계 및 제작

적층 코어의 저가격형 LPM 설계 및 제작을 목표로 하고 시제품은 하이브리드형으로 설계를 하였다. 전 가동 구간에서 지지기구에 의하여 공극을 0.1mm로 균등하게 유지될 수 있도록 하였다. 다음 그림 1은 제작한 하이브리드형 LPM의 설계 단면도를 나타낸다. 그림에서 forcer는 가동자, platen은 고정자를 나타낸다. 그림에서 가동자는 고정자위에서 지면에 평행한 방향으로 좌우로 이동한다. 제작한 LPM은 2상이다. 가동자의 재질은 SM23, 고정자에는 순철을 사용하였다.

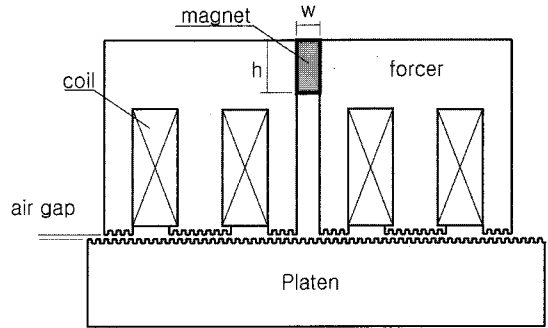


그림 1. 설계한 LPM의 단면도
Fig. 1 Schematic diagram of LPM

추력의 계산에는 재질에 맞추어 B-H 특성곡선의 알려진 값을 사용하였다. 영구자석은 희토류의 Neomag-35를 사용하였으며 $B_r = 1.13 \text{ Wb/m}^2$, $\mu_r = 1.05$ 로 가정하여 사용하였다.

LPM의 고정자, 가동자의 치와 공극의 폭과 깊이는 모두 1mm, 가동자 이동방향에서 수평 법선 방향으로 가동자와 고정자의 폭은 50mm, 이동방향으로 가동자 길이는 69mm, 가동자의 자극의 수직길이는 22mm, 가동자의 극당 치수는 8개, 가동자의 극간거리는 22.5mm로 설계하였다. 코일의 턴수는 120으로 하였다. 가동자와 고정자의 공극은, 가동자와 고정부를 각각 다른 비자성체의 틀에 고정시킨 후 휠에 의한 지지기구를 사용하여 두 틀간의 공극간격을 일정하게 유지하였다.

일반적으로 자계내 전기-기계 결합계에서 이동거리 x에 대한 힘 f_x 는 자기수반에너지 W'_m 으로 다음과 같이 표현된다,

$$f_x = \frac{\partial W'_m(i, x)}{\partial x} \tag{1}$$

먼저, 그림 1, LPM의 자기등가회로를 구하면 그림 2와 같다.

그림에서 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 는 LPM 구동시의 자속을 나타낸다. ϕ_1, ϕ_3 는 그림 1에서 권선이 감겨있지 않은 부분의 자로가 두개로 나누어져 있는 부분을 1개의 자로로 등가 표시한 것이다. 그림 2에서 위에 있는 점선은 영구자석을 구분하여 나타낸다.

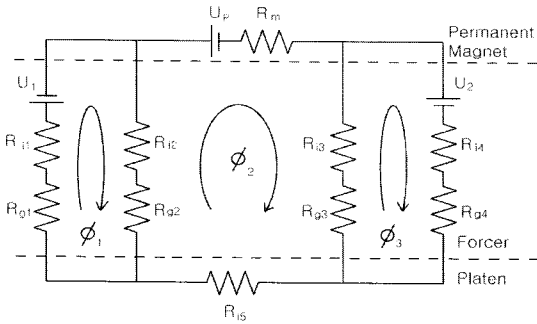


그림 2. 설계한 LPM의 자기 등가 회로
Fig. 2 Magnetic equivalent circuit of LPM

아래에 있는 점선에서 위로는 가동자, 아래 부분은 고정자 부분을 나타낸다. U_1, U_2 는 가동자 각상의 전원에 의한 기자력이다. $R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, R_{i4}$ 는 가동자측 자로의 자기저항을 그리고 $R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}, R_{g4}$ 는 각각 가동자와 고정자간의 공극 자기저항이다. R_{i5} 는 고정자측 자로의 자기저항이다. U_p 는 영구자석에 의한 기자력, R_m 은 영구자석의 내부 자기저항을 나타낸다.

그림 2의 자기등가회로에서 각 자로에 따라 변위 x 를 포함한 자기등가방정식을 구하면 다음과 같다[1],[2].

$$f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) = (R_{g1} + R_{i1})\phi_1 + (R_{g2} + R_{i2})(\phi_1 - \phi_2) + U_1 \quad (2)$$

$$f_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) = (R_{g2} + R_{i2})(\phi_2 - \phi_1) + (R_{g3} + R_{i3})(\phi_2 - \phi_3) + (R_{i5} + R_m)\phi_2 + U_p \quad (3)$$

$$f_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) = (R_{g3} + R_{i3})(\phi_3 - \phi_2) + (R_{g4} + R_{i4})\phi_3 + U_2 \quad (4)$$

위의 비선형 방정식의 해는 주어진 $B-H$ 곡선, 공극 자기 저항 값, 전류 값을 사용, Newton Raphson 법으로 구하였다[3]. 가동자의 변위 값마다 (2)-(4)식의 해를 구했으며, 수렴된 해교 자속값에서 구해지는 자기수반 에너지의 값으로 식 (1)에 의하여 정추력을 구하였다. 여자전류 1.5A의 경우 계산한 정추력의 변화를 그림 3에 보인다.

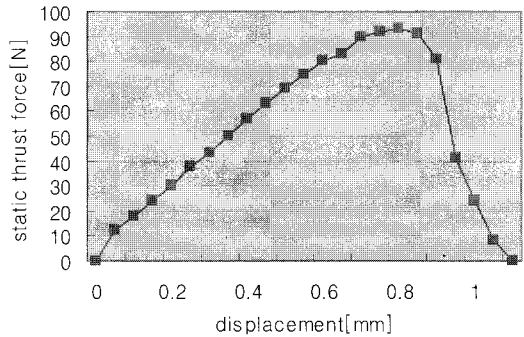


그림 3. 가동자 위치변화에 따른 정추력의 변화 값(여자전류 1.5A의 경우, 계산치)
Fig. 3 Static thrust force values with the displacement of Forcer (by simulation, exciting current = 1.5A)

III. LPM의 특성시험

모터를 새롭게 제작하였을 경우 모터의 토크 혹은 추력의 정특성과 동특성을 기본적으로 반드시 확인 하여야 한다. LPM의 경우 추력의 측정시험방법이 아직 정착되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 특성시험 장비를 고안하여 시작품 LPM의 추력 정특성과 동특성을 측정하였다.

3.1. 정특성 측정

정특성측정으로 LPM의 정추력 값을 확인하였다. 그림 4에 본 연구에서 개발한 정추력 측정장치를 보여 준다. 틀(그림에서 Base plate)의 중앙 가동 철편부에 스트레인 게이지형의 load cell의 본체를 고정 시킨다. load cell의 센서 부에는 직경 7 mm의 원통형 강철봉을 이용하여 LPM의 가동자에 접촉 시키는 구조이다. 틀은 LPM의 고정자에 고정시킨다. load cell의 본체가 부착된 중앙 가동 철편부를 틀의 다른 쪽면에 고정된 마이크로 메타를 사용하여 밀면 load cell의 센서부에 부착된 강철봉이 가동자를 밀어 가동자의 미세 변위를 마이크로미터로, 가동자에서 발생하는 추력의 변화 값을 load cell에서 읽을 수 있도록 하였다. 가동자가 여자 혹은 여자되지 않은 두 상태에서 각각 가동자의 변위와 추력의 관계를 측정할 수 있다.

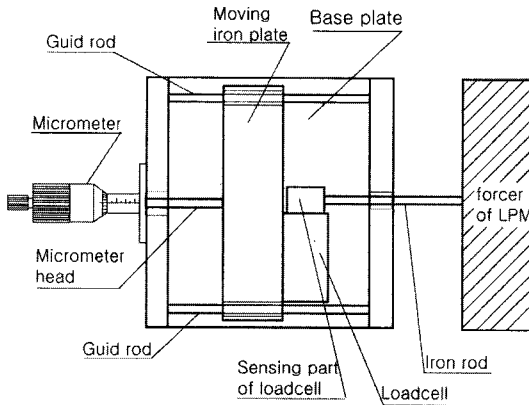


그림 4. 정추력 측정장치
Fig. 4 static thrust force measuring equipment system

직류전류 1A, 1.5A로 각각 여자된 상태에서 정추력의 변화를 측정하였다. 여자된 가동자에 마이크로 메타를 사용하여 가동자를 밀어서 미소변위를 주었다. 이때 가동철편에 고정되어있는 load cell로 정추력의 일부인 holding force를 측정하였다. LPM의 반 피치에서 추력의 변화는 대칭을 이루므로 가동자 변위의 최대치는 LPM의 반 피치에 해당하는 1mm로 하였다. 그림 5에 실험결과를 나타낸다. 여자전류가 1.5A의 경우, 그림 3의 시뮬레이션결과와 비교하여 가동자의 변위에 대한 정추력의 변화가 매우 유사함을 보인다. 다만 크기에서 실험치가 계산치의 약 70%밖에 못 미치는 것은 수치모델에서 파라미터 값의 계산오차범위, 실험에서는 가동자 이동시 발생하는 기계적 오차에 의한 공극 간격의 변화, 가동자와 고정자 표면의 가공정밀도의 한계 등에 기인한다고 생각되어진다.

3.2. 동특성 측정

LPM의 동특성으로는 일정한 크기의 구형파의 펄스 전원을 인가하여 정지된 상태의 가동자가 구동되기 시작하는 구형파의 최소 pulse per second(pps)값과 그때의 추력을 구하는 pull in 특성과, 출발과 정지 시의 가속시간을 제외하고 일정한 속도로 구동되는 주파수인 slewing 주파수에서의 추력의 최대값을 측정하는 pull out 특성을 들 수 있다.

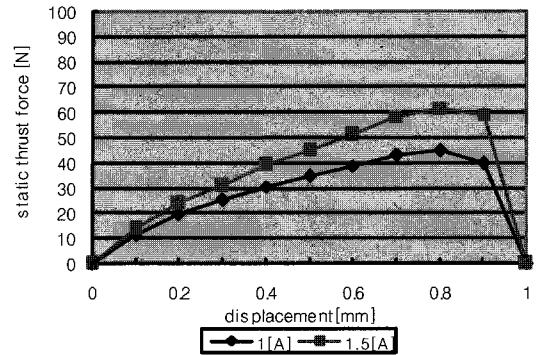


그림 5. LPM의 정추력 측정(실험치)
Fig. 5 Static thrust force values with the displacement of Forcer (by experiment, exciting current = 1 & 1.5A)

1) pull in특성: LPM의 속도 0~170 mm/sec에 해당하는 0~85pps의 구형파 전류를 1.5~2.5A까지 전류의 크기를 바꿔 주며 각각 인가한 결과, 속도범위 내에서 인가되는 펄스 값에 관계없이 가동자가 구동되기 시작했다. 이때의 여자전류의 값과 pull in 추력의 변화를 측정한 결과를 그림 6에 나타낸다. 실험결과 두 값의 관계가 선형적인 관계에 있음을 확인할 수 있었다.

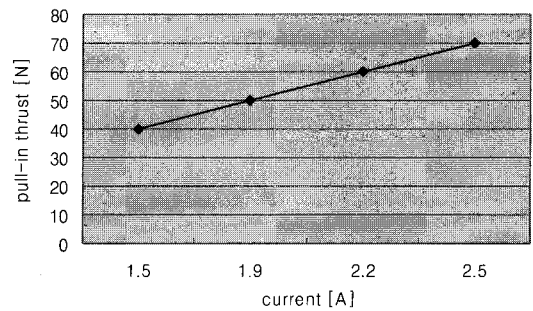


그림 6. pull in thrust force의 측정결과
Fig. 6 Pull in thrust force values with exciting current values

2) pull out 특성: pull in 특성에서 확인된 펄스의 값 중 30pps를 pull out특성측정에 있어서, 구동가속 시작 펄스의 값으로 하였다. 가속시간은 1초로 slewing 주파수까지 일정한 가속도로 가속하도록 하였다. 가속 후 일정속도로 구동되는 slewing주파수로 100, 150, 200, 250, 500 pps로 하였다. 여자전류를 변수로 하여 1.5~2.5A까지 전

류의 크기를 바꿔 주며 각각 pull out 특성을 확인하였다. 측정은 가동자 가속 후, 속도가 slewing 주파수에 도달한 순간의 추력을 측정하였다. 그림 7에 측정결과를 나타낸다. pull in 특성처럼 여자전류의 크기와 추력의 크기가 선형적인 관계가 있음을 확인 하였다.

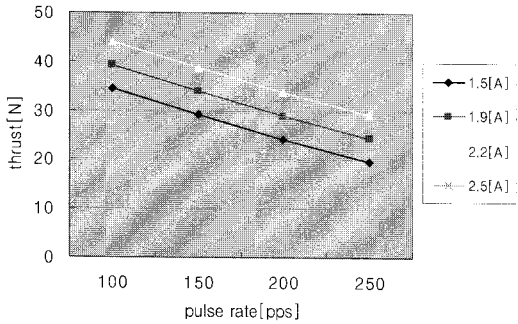


그림 7. pull out thrust force의 측정결과
Fig. 7 Pull out thrust force values with excited pulse rate

3) 가속시간: Pull out 특성 측정에서는 가속시간 간격을 1초로 일정하게 하여 slewing 주파수까지 구동 후 추력측정을 하였으나 모터의 시동과 속도변화의 특성을 알기 위하여 가속시간의 최저값 확인이 필요 하다. 정지 상태에서 구동시작 주파수를 30pps로 하고 slewing 주파수를 각각 100, 150, 200, 250pps로 하였을 때 slewing 주파수까지 도달하는데 걸리는 최소 가속시간을 측정하였다.

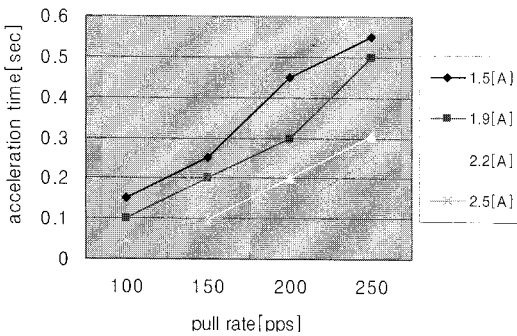


그림 8. 최소 가속시간 측정결과
Fig. 8 Minimum acceleration times with pulse rates

그 결과를 그림 8에 나타낸다. 대체로 여자전류의 크기와 가속시간의 감소 사이에는 비례관계가 있음을 확인하였으나 100, 150 pps처럼 비교적 낮은 속도에서는 여자전류의 변화가 가속시간의 감소에 크게 영향을 미치지 못함을 확인하였다.

IV. 마이크로스텝 방식에 의한 구동실험

LPM 구동시 발생하는 고유의 추력리플을 저감하기 위하여 마이크로스텝 방식을 적용하여 구동실험을 하였다. 그림 9는 제작한 마이크로스텝 방식에 의한 제어기의 블록선도를 나타낸다. 16bit CPU(8097), 입출력부분, 메모리, 논리회로, 디지털-아날로그 변환부, 증폭기, 전류 센서부 그리고 LPM으로 구성되어있다. 또한 소프트웨어로 LPM의 이동거리, 가감속시간, 속도 등을 변화시킬 수 있게 하였다. 구형과 구동방식은 분해능이 1/4 피치인데 비하여 마이크로스텝 구동방식은 1/(수십~수백) 피치의 분해능이 가능하다. 또한 구형과 펄스를 인가하여 구동할 경우 스텝간의 이동에 있어서 진동이 크게 발생하는데 비하여 마이크로스텝 구동 방식은 진동이 비교적 줄어든다.

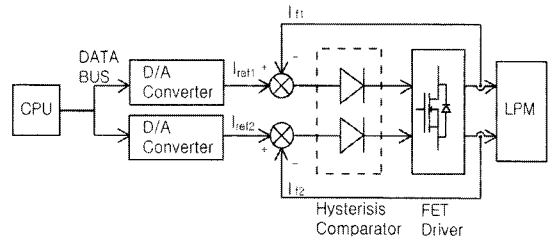


그림 9. 마이크로 스텝 구동 시스템
Fig. 9 Microstep drive system

실험실의 리니어 스케일의 분해능을 고려하여 한 피치당 마이크로스텝 수를 100으로 하였다.

마이크로스텝과 구형과 구동 방식의 진동특성을 확인하기 위하여 동일 사양의 두 대의 LPM의 가동자에 측정범위 50G의 스트레인게이지형의 가속도 센서를 각각 부착하여 동시에 같은 속도로 정속도 운전하였다. 그 결과 가속도센서에서 얻어진 추력리플에 의한

진동의 변화 파형을 그림 10에 보인다. 그림 10에서 위의 파형은 마이크로 스텝 구동시 가동자의 진동의 변화를 나타내며 아래의 파형은 구형파 구동의 경우이다. 구형파 구동의 경우 리플이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다.

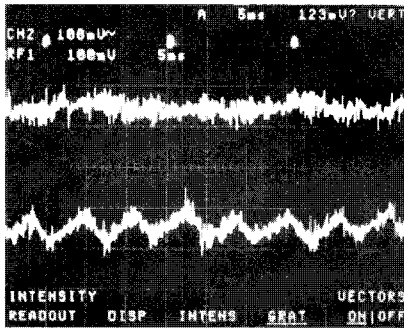


그림 10. 마이크로 스텝과 구형파 구동에서의 추력리플에 의한 진동 측정 실험 결과 (위:마이크로 스텝, 아래:구형파)

Fig. 10 Vibration of the Forcer by the ripple component of thrust forces at the microstep and rectangular wave drive method (upper: by microstep down: by rectangular wave)

과도상태에서의 추력리플의 변화, 비교하기 위하여 구동 중, 가동자의 이동 방향을 반대로 전환하였을 때 추력의 변화값을 관찰 하였다. 측정에는 가속도 센서를 사용하였다. 실험결과를 그림 11에 보인다. 그림에서 (a)는 마이크로 스텝 구동시 추력의 변화와 구동전류의 파형, (b)는 구형파 구동시의 것이다. 마이크로 스텝의 경우, 추력 리플을 보다 더 상세히 관찰하기 위하여 Y축의 스케일을 1G/div로 확대 표시하였다. 그림 11의 (b)의 경우 Y축의 스케일은 2G/div이다. X축은 시간축으로 (a), (b) 모두 50ms/div 이다.

실험은 20pps로 정속도 구동 중인 LPM의 구동 방향을 그림 (a),(b)의 ▲마크 부분에서 반대로 바꾸었다. 정상구동상태에서 마이크로 스텝의 경우, 구형파에 비교하여 추력리플이 상대적으로 작음을 확인할 수 있으나 구동방향이 바뀌는 과도상태에서는 큰 차이가 없음이 확인되었다.

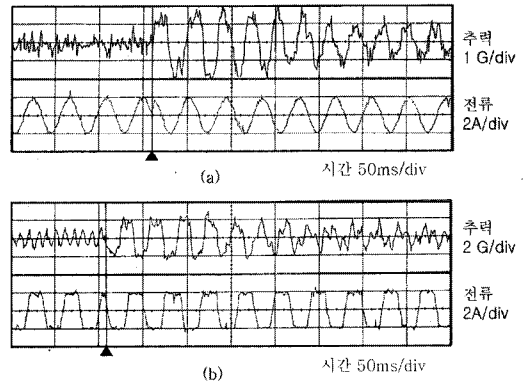


그림 11. 마이크로 스텝과 구형파 구동 시 추력리플의 비교(▲에서 구동방향 역전)

(a) 마이크로 스텝 구동 (b) 구형파 구동

Fig. 11 Ripple component of thrust forces at the microstep and rectangular wave drive method (at the ▲ point the moving direction is changed) (a) by microstep (b) by rectangular wave)

V. 결론

저가격을 목표로 한 LPM을 설계 제작하였다. 자기 등가회로를 이용한 수치모델에 의한 계산치와 제작실험기의 정추력의 변화를 확인하여 설계값의 타당성을 확인하였다. 실험기의 구동성능확인을 위하여 특성시험을 하였다. 그 결과 LPM의 정, 동특성을 여자전류, 가속시간의 구체적인 수치로 확정지을 수 있었다. 또한 구형파 구동과 마이크로 스텝 구동기법을 각각 적용하여 실험기의 구동을 확인하고 추력의 변화를 관찰 하였다.

참고문헌

- [1] Yamada 외, "Development of a Flat LPM having a large Thrust/Input Ratio of 20N/W for Artificial Heart Applications" 電氣學會 論文誌 Vol. 109, No., 1, pp.57-90, 1990
- [2] 山本, 山田, "平板狀永久磁石形リニアモータの磁石回路と始動特性解析", 電氣學會論文誌, Vol. 104-B, No. 5, pp. 265-272, 1984

- [3] 조윤현, 구대현, 이재봉, "서보액츄에이터용 Hybrid 형 LPM의 정추력 및 수직력 계산" 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 pp.43-45, 1994,
- [4] 윤신용, 백수현, 김용, "리니어 펄스 모터의 추력 및 수직력에 대한 특성 해석" 조명 전기 설비학회 논문지, Vol.13, No.4, pp.142- 151, 한국조명전기설비학회, 1999
- [5] 설진수, 임경화"선형 모터의 동특성 분석" 한국 소음진동공학회 학술대회춘계, Vol. 2005, pp. 258-263, 2005
- [6] G. Singh, B.C. Kuo, and R. Marion, "Dynamic Modelling of Permanent-Magnet Step Motors", *Proceedings Fourth Annual Symposium-Incremental Motion Control Systems and Devices*, 1975
- [7] K.S. Kordik, "Dynamic Torque Measurements for Step Motors", *Proceedings Fifth Annual Symposium-Incremental Motion Control Systems and Devices*, 1976
- [8] Takashi Kenjo, "Stepping Motors and their Microprocessor Controls", *Oxford University Press*, 1984
- [9] Yamada, "産業用 リニアモーター, 工業調査會 刊行, 1981

저자소개



김문환(Moonhwan Kim)

1981. 2 부산대학교 전기기계공학과
공학사
1984. 3 慶應義塾 이공학연구과
수료 (공학석사)

1988. 3 慶應義塾 이공학연구과 수료(공학박사)
1988. 3-1992. 8 Yokogawa 전기 제1연구부 근무
1992. 2-1998. 2 한국전기연구원 책임연구원
1998. 3-1999. 2 위덕대학교 전기공학과 전임강사
1999.3- 현재 신라대학교 자동차기계공학과 부교수

※ 관심분야 : 정보시스템, 메카트로닉스, 시스템제어, 에너지변환