

자기부상열차용 유도형 리니어 모터의 작용력 시험

장석명, 장건우, 이성호, 김봉섭, 성호경, 조홍제  
충남대학교 전기공학과, 한국기계연구원

Force Test of the Linear Induction Motor for Magnetic Levitation Train

S.S. Jang, K.W. Chang, S.H. Lee, B.S. Kim, H.K. Sung, H.J. Cho  
Chungnam National Univ. KIMM

**Abstract** - In this paper, the force test of arch-type LIM is treated. The method of direct measurement is used load-cell on 3-component force guage. Indirect method is used search coil on LIM. PC-based data aquisition system include two method and measure the force in driving state. Measured data of direct and indirect method are analyzed and compared.

1. 서 론

LIM(Linear Induction Motor)은 직선운동이 필요한 시스템에서 전기에너지를 동력전달의 변환과정없이 직접 직선구동력으로 변환시키는 장점을 지닌다. 이러한 장점 때문에 모터 자체의 효율면에서는 회전형 유도전동기에 비해 낮음에도 불구하고 시스템 측면에서 낮은 효율을 보상할 수 있다. 따라서 자기부상열차, 경전철, 엘리베이터, 그리고 자동화 서보시스템 등의 구동장치로 널리 이용되고 있으며 앞으로 그 응용범위는 더욱 확대 될 것으로 기대된다[1].

본 논문에서는 운전 중에 LIM에 작용하는 힘을 측정하기 위해 고안된 3차원 블록게이지의 로드셀을 통한 직접적인 방법과 자속 검출에 의한 간접적인 방법을 선택하였다. 이 두 가지 측정방식을 모니터링 시스템을 통해 실시간으로 계속하였으며, 비교 분석하였다.

2. 작용력 측정 및 측정시스템 구성

2.1 시험기의 구성

LIM에서의 각종 운전 성능시험을 통한 특성결과는 정격 속도까지 연속적인 운전을 해야 하므로, 2차축 트랙이 충분히 길어야만 한다. 그러나 실제로 이러한 설비 조건에서 시험을 하기는 매우 어려우므로 무한 연속 운동이 가능한 구조인 그림 5와 같은 아크형 LIM의 시험장치를 제작하여 특성시험을 하였다. 즉, LIM의 1차축을 아크형으로 하고 2차축을 원판으로 구성하여 연속 회전을 할 수 있도록 하였다. 표 1에서는 LIM 시험기의 사양을 나타내었다.

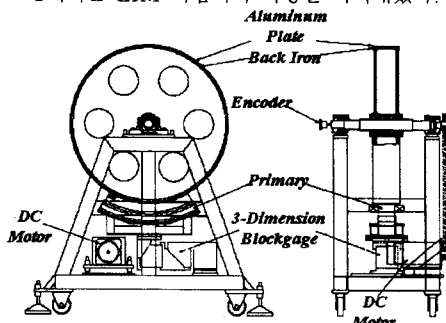


그림 1. Arch-Type LIM 시험기

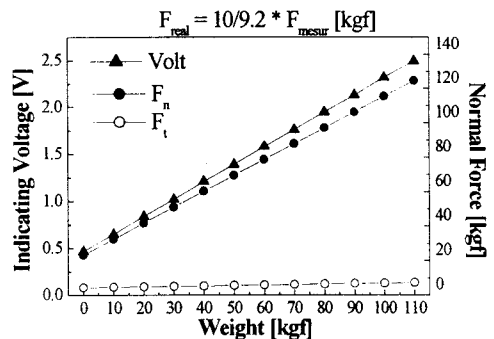
항 목	제 원
극 수	6
공 극	5(mm)
1차축 길이×폭×높이	570×190×130(mm)
1차축 arch 반경	R545(mm)
단 절 율	2/3
극 간 격	66(mm)
코일 간격	44(mm)
슬롯 간격	23(mm)
치 폭	11(mm)
병렬회로수	2
매 슬롯당 권선수	(25턴/층) × 2층
Wheel 사양	
지 름	0.86 (m)
폭	0.15(m)
알루미늄 두께	5(mm)
Back iron 두께	10(mm)

표 1. Arch-Type LIM 및 wheel의 사양

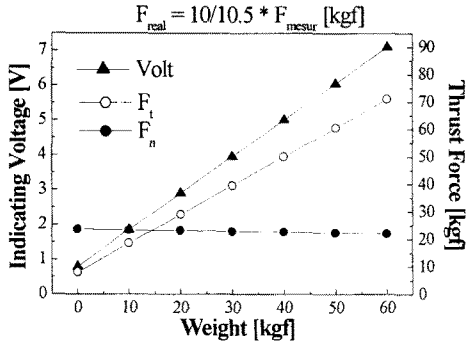
2.2 직접 작용력 측정 방법

리니어 모터에서 발생하는 추력, 수직력, 안내력은 수평, 수직, 횡방향의 힘을 동시에 계속할 수 있는 3-component force gauge를 이용하여 측정하였다. 3차원 블록게이지는 정육면체의 블록 3개가 1조로 조합되며, 1개의 블록은 4개의 브리지 형상으로 가공되었다. 각 블록에는 인장 및 압축형 로드셀이 조립되었다. 장착된 로드셀은 추력방향으로 50kgf 용과 수직력 방향의 500kgf 용으로 각각 사용하였다.

로드셀을 장착한 블록게이지는 LIM의 하부에 설치하였고 측정된 힘은 앰프를 통해 출력된다. LIM에서 발생된 힘을 정확히 측정하기 위해 발생력에 대한 기계구조적 견고성, 측정 센서의 선형성과 반복성을 확인하였고, 로드셀과 indicator의 교정(Calibration)을 하였다.



(a) 수직력



(b) 추력

그림 2. 수직력과 추력의 교정데이터

### 2.3 간접 작용력 측정 방법

간접 작용력 측정시에 추력측정을 위해 서치코일의 권선시행을 통해 필요한 파라미터를 산출하였다. LIM의 1차측 전류에 의하여 발생하는 공극자속은 와전류 및 발생 추력의 기본이 되므로, LIM의 성능에 가장 중요한 파라미터가 된다. 따라서 공극자속의 측정을 위하여 그림 1과 같이 LIM의 3상권선 시행 방식과 동일한 방법으로 서치코일을 감게된다. 서치코일에서 유도된 전압으로부터 식 (1)과 같이 각 상에 대한 공극자속을 산출할 수 있게 된다.

$$\lambda_{abc} = N\phi_{abc} = -\int e_{abc}(t) dt \quad (1)$$

여기서  $\lambda_{abc}$  는 쇄교자속,  $N$ 은 서치코일의 턴수,  $\phi_{abc}$  은 자속,  $e_{abc}(t)$  는 서치코일에 유도된 전압이다.

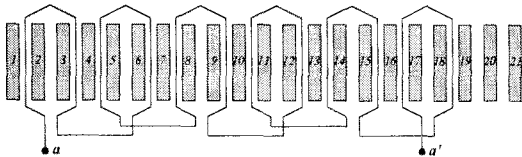


그림 3. LIM에 시행한 서치코일의 분포 및 결선도

고정자 정지좌표계에서 인가되는 3상 전류에 의하여 유도되는 각 상의 공극쇄교자속은 식 (1)에 의해  $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$  로 얻게 되며, 이를 식 (2)와 같이  $d, q$  축 전류 및 쇄교자속으로 변환하게 된다.

$$\begin{aligned} i_q &= i_a, \quad \lambda_{qm} = \lambda_a \\ i_d &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_c - i_b), \quad \lambda_{dm} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\lambda_c - \lambda_b) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda_{qm}, \lambda_{dm}$  은 쇄교자속의  $q$ 축과  $d$ 축 성분이다. 서치코일과 식 (2)로부터, 전자기적 추력을 실시간으로 모니터링 하기 위해서, 그림 2와 같이 1차측에 설치한 서치코일을 포함하는 LIM의 동가회로를 구성하고, 이로부터 식 (3)과 같은 추력식을 유도하게 된다.

$$F_x = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} [\lambda_{dm} i_{ds} - \lambda_{qm} i_{ds}] \quad (3)$$

여기서  $\tau$ 는 LIM의 극간격,  $L_m$ 은 공극 상호인덕턴스,  $i_{qs}, i_{ds}$ 는 고정자 전류의  $d, q$ 축 성분이며,  $\lambda_{dm}, \lambda_{qm}$ 은

공극 쇄교자속의  $d, q$ 축 성분을 각각 나타낸다.

### 2.4 계측 시스템의 구성

LIM의 운전시에 직간접 작용력을 모두 측정하기 위해서 통합적인 시스템을 그림 과 같이 구성하였다. 직접 방식으로 측정되는 작용력의 경우 로드셀에서 나오는 신호를 indicator를 통해 A/D 보드로 입력하여 PC로 실시간 계측하였다. 이와 동시에 서치코일에서 유기되는 전압을 이용하여 자속량을 측정하고, CT와 PT를 통해 LIM으로 입력되는 전류, 전압을 이용하여 간접적인 방식을 계측해 내어 자속과 전류값에 의해 추력을 산출하였다. 이로서 운전 중에 직간접의 작용력이 비교가능한 시스템을 구축하였다. 계측 프로그램은 National Instrument 사의 LabVIEW를 이용하였고, 12비트 분해능의 16채널 A/D 보드를 이용하였다.

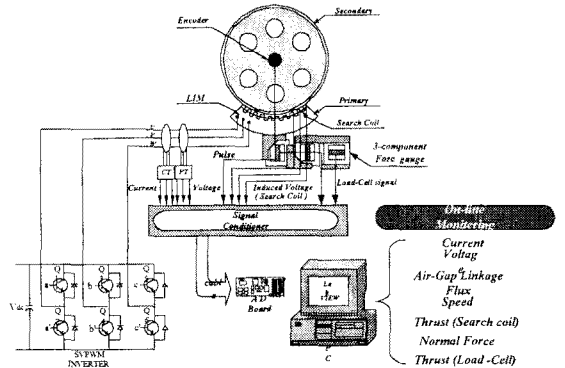


그림 4. LIM 작용력 측정시스템의 블록도

작용력 측정을 위해 LIM의 하부에는 3차원 블록계지를 장착하였고, LIM의 권선부에 서치코일을 시행하여 자속측정장치를 구성하고 역학적 힘의 측정시 필요한 속도를 입력받기 위해 엔코더를 장착하였다. 그림 2는 시험기에 구성된 작용력 측정시스템의 사진을 나타낸 것이다.

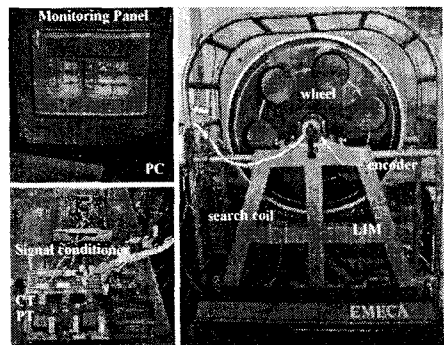


그림 5. LIM 작용력 측정시스템의 사진

### 2.5 측정 결과

그림 6은 인버터로 LIM을 운전하였을 경우, 기동시 별도로 설치한 로드셀로 측정한 추력과 서치코일 방식에 의해 측정된 추력을 비교한 것이다. 전자기적 추력과 로드셀 측정결과 사이의 차이는 적으며, 30[Hz] 이상에서는 측정결과들은 거의 잘 일치함을 알 수 있다.

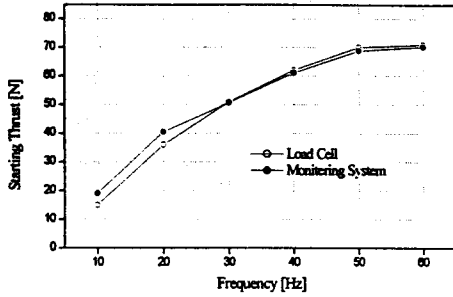


그림 6. 기동시의 추력비교 결과

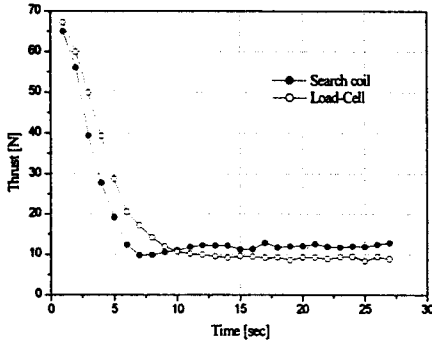


그림 7. 운전시의 추력비교 결과

그림 7은 직간접 방식의 측정된 추력의 결과를 비교한 것이다. 시간 지연에 의한 차이는 Load-Cell의 indicator의 출력지연에 의해 발생하는 것으로 사료되며, 정상상태시에 간접방식의 추력이 조금 큰 이유는 연산시에 위상오차에 의한 것이다.

그림 8은 Load-Cell에서 측정된 수직력의 결과이다. 일반적으로 LIM의 수직력은 기동시에 반발력이 작용하고 정상상태에 이르면 인력이 작용하게 된다. 그림에서 양의 방향이 흡인력의 방향이고, 음의 방향이 반발력이다. 결과에서는 기동시의 반발력이 나타나지 않는데, 이것은 수직력을 측정하기 위한 Load-Cell의 입력범위(500kgf)가 너무 커서 계측되지 못한 현상으로 사료되며, 낮은 입력범위를 가지는 Load-Cell으로 재실험이 요구된다.

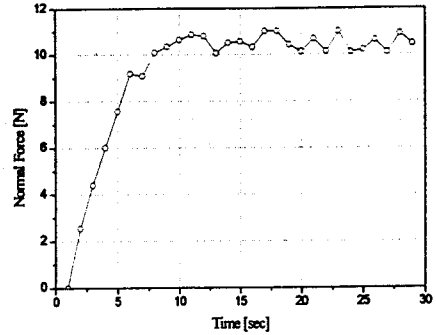


그림 8. 수직력 측정 결과 (Load-Cell)

### 3. 결 론

본 논문에서는 인버터로 운전되는 LIM을 무한계도 연속운전이 가능한 드럼형 시험기를 통하여 직간접 방식으로 LIM에 작용되는 힘들을 실험·분석하였다.

실험의 결과 Load-Cell을 이용한 직접측정방법과 Search-Coil을 이용한 간접측정방식이 일치함을 알 수 있었다. 게다가 기동시 뿐만 아니라 운전시에 실시간 계측하여 제어 및 진단 시스템의 토대를 마련하였다.

추후 간접측정방식으로 수직력을 측정하기 위해 공극을 측정장치를 장치해서 직접측정방법과 비교·분석이 요구된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 장석명, 정상섭, 이성래, 양현섭, 정락교, 박찬일, "유도형 리니어모터의 인버터 운전시의 동특성 시험", 대한전기학회, 하계학술대회, A권, pp. 284~286, 1998
- [2] D.W.Novotny and T.A.Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", 1997
- [3] Donald S. Zinger, "A Direct Field-Oriented Controller for Induction Motor Drives Using Tapped Stator Windings", IEEE Trans. on Power Electron., vol 5, No. 4, pp.446-453, 1990
- [4] 임달호, 권병일 외, "Stator Tapped Coil을 이용한 편축식 선형유도전동기의 직접백터제어", 대한전기학회, 하계학술대회, 1992

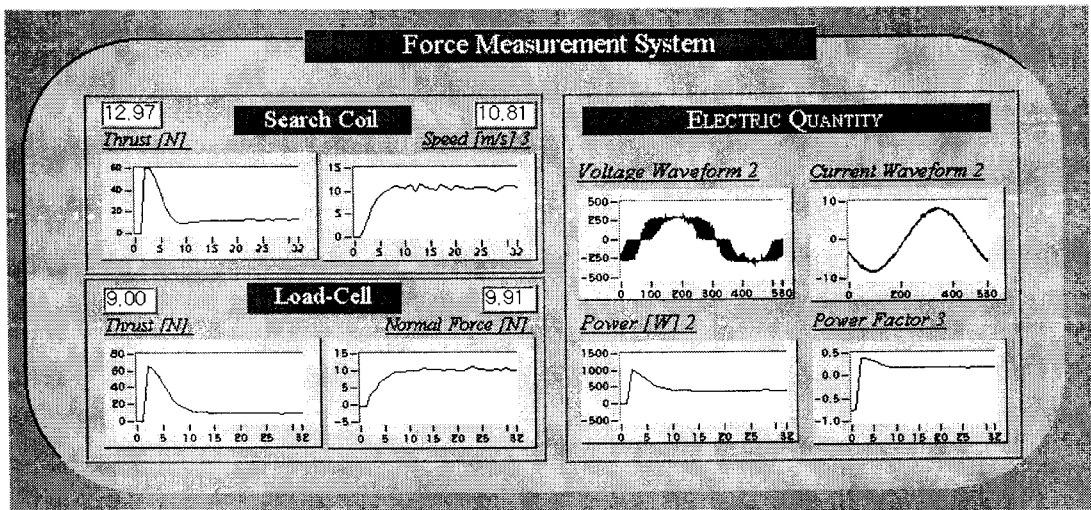


그림 9. 측정 시스템의 Panel