

운전패턴을 고려한 LIM의 동특성 시뮬레이션 및 시험

장석명* °정연호* 이현구* 박영태** 김봉섭***
* 충남대학교 전기공학과 ** 한국표준과학연구원 *** 한국기계연구원

Simulations and Experiments for Dynamic Characteristics of LIM with the Consideration of Operating Pattern

S.M. Jang* °Y.H. Jeong* H.G Lee* Y.T Park** B.S. Kim***
* Dept. of Electrical Engineering Chungnam Nat'l Univ. ** KRISS ** KIMM

Abstract

When LIM is driven by the general purpose inverter, there is no feed-back of speed and thrust, etc. Therefore, through analysis of LIM by the simulation, the prediction of operating characteristics and patterns of LIM is necessary. But, the open-loop control system is used widely, because it can consist of simple and cheap.

In this paper, we dealt with the dynamic characteristics of LIM driven by V/f constant during acceleration, cruising speed, deceleration. And, we compared the simulation value with actual measurement value.

1. 서론

LIM(Linear Induction Motor)은 전기에너지를 역학에너지로 직접변환하여 직선추력을 발생시키는 장치로 자기부상열차, 경전철, 엘리베이터, 그리고 자동차 서보시스템 등의 구동장치로 널리 이용되고 있으며 앞으로 그 응용범위는 더욱 확대될 것으로 기대된다. 차량용 LIM의 경우 구조적으로 수직력이 크게 발생하게 되어 공극의 크기를 십수 mm 정도까지 취해야만 하므로 회전형 유도기에 비하여 역률이 나쁘다. 또 단부효과 및 공극에서의 누설자속을 적게 하기 위하여 극간격이 가능한 한 크게 해야하는 등 회전기와는 구조 및 특성이 매우 다르다⁽¹⁾.

LIM을 수송기관, 산업자동화 서보시스템 등의 구동용으로 응용하는 경우 속도, 위치 등에 관하여 최적 주파수 제어, 더 나아가 백터제어 등, 고도의 제어가 필요적이며, 또한 제어의 정확도는 다소 낮아도 간단하고 저렴하게 제어시스템을 구성해야만 하는 경우가 많다. 이 경우에 가장 적합한 방법이 범용 VVVF 인버터를 이용한 개루프제어법이다. 즉 개루프제어법의 일종인 V/f비 일정제어는 각 주파수, 전압 등의 변화에 따라 모의시험을 통하여 얻은 운전특성의 예측과 운전패턴 등의 자료를 종합적으로 고려하여 수동으로 제어할 하게 되므로써, 제어시스템을 간단하고 저렴하게 구성 할 수 있다는 장점을 갖는다. 이 경우 운전특성의 예측이 필수적이므로 전자장 이론, 등가회로 이론 등에 의한 특성의 정밀한 해석이 우선되어야만 한다.

따라서 본 논문은 전자장이론을 적용한 공간고조파법에 의해 회로정수를 결정하는 등가회로 해석법⁽²⁾⁻⁽⁴⁾을 기본으로 가속, 정상운전, 감속의 운전패턴을 고려하여 동특성을 해석하였다. 또한 동특성계산치의 타당성을 검토하기 위해서 LIM의 회전형 원판시형장치를 이용하여 동특성을 실측하고 비교하였다.

2. 동특성 시뮬레이션 및 시험

2.1 LIM 사양

동특성계산에 적용할 모델로는 표1과 같은 사양의 편축식 LIM으로 이는 시험기의 SLIM 사양과 같다.

표 1. LIM의 설계치

사양	설계치
상수(m)	3
매상매극당 슬롯수(q)	3
전체슬롯수	39
극수(p)	4
극간격(r)	75 [mm]
상당권선수(N _{ph})	360 [turns]
1차 철심폭(h)	100 [mm]
슬롯폭(w _s)	5.2 [mm]
치폭(w _i)	3.2 [mm]
슬롯높이(d _s)	29 [mm]
2차 Al판두께(d _b)	5 [mm]
Backiron 두께(d _i)	10 [mm]
공극(g)	4 [mm]
Al의 도전율(σ ₂)	5.8E7
철의 투자율(μ ₁)	500 μ ₀

2.2 시뮬레이션

LIM의 특성을 계산하는데 가장 기본적인 것은 그림(2.1)의 알고리즘에 나타낸 것과 같이 주파수, 전압, 속도이다.

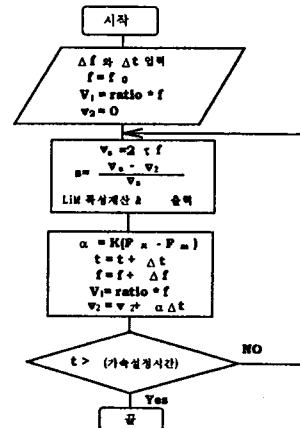


그림 2.1 동특성계산 알고리즘

주파수와 속도에 의해서 동기속도와 슬립이 결정되고, 전압에 의해서 특성값을 구할 수 있다. 그런데 시간 증분치와 주파수 증분치, 전압은 미리 VVVF 인버터에 설정되는 값이므로, 현재의 속도만 주어지면 시간변화에 따른 동특성들이 계산된다. 따라서 미소시간변화에 따른 속도와 가속도가 일정하다고 한다면, 식(2.1)과 같이 속도는 가속도와 미소시간을 곱한 것과 같다. 즉

$$v_2 = a \cdot \Delta t \tag{2.1}$$

식(2.1)에서 미소시간변화량은 이미 주어진 값이므로 속도를 구하기 위해서는 가속도를 알아야 한다. 그런데 역학방정식인 $F_x = M \cdot a$ 로 부터 추력 F_x 를 부하의 중량 M 으로 나누면, 그때의 가속도 a 가 구해진다. 2차축이 회전원판이므로 이러한 구조와 기계손에 상당하는 부하추력을 고려하여 가속도는

$$a = \left(\frac{r^2}{J}\right)(F_x - F_m) < r : 원판의 반경, J : 관성모멘트 >$$

으로 표현된다⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾. 이러한 관계에 의해 기동시에는 속도가 뛰고, 기동주파수이며, 전압은 V/f 비 일정에 의하여 기동주파수에 대한 전압이 결정된다. 따라서, 동기속도와 슬립이 결정되어 기동초기의 특성이 구해지며 반복계산에 의해 가속, 정속, 감속시의 동특성이 계산된다.

2.3 시험장치 및 방법

동특성을 시험하기 위한 장치는 그림(2.2)와 같다.

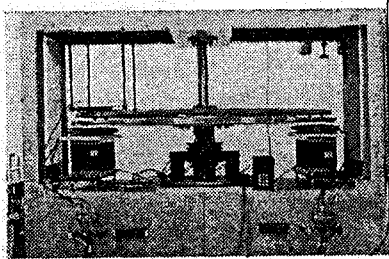


그림 2.2 동특성시험장치

운전패턴에 따라 인버터에 가속속시간을 설정한 후, 전원을 투입하면 그림(2.3)의 계측개념도에 나타난 측정장치를 통하여 추력과 속도, 전압, 전류 등의 값을 읽을 수 있다. 이때 계측된 값들은 컴퓨터에 장착된 A/D Converter Interface에 의해서 실시간으로 동시에 수집처리되어 그 결과는 디지털값으로 저장된다. 샘플링타입은 A/D Converter Interface를 구동시키는 프로그램에 의해서 결정되며 테이타 1개당 20 [ms]로 하여 입력받았다.

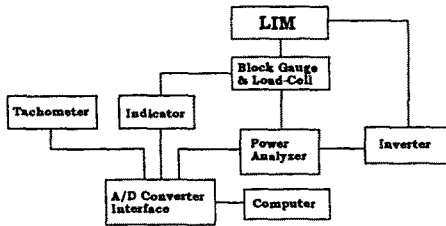


그림 2.3 계측개념도

추력은 그림(2.3)에서의 Load-Cell이 부착된 Block Gauge에 의해서 측정된다. LIM에 전압이 인가되어 추력이 발생되면 작용반작용에 의해서 Block Gauge를 밀게되며 이때, 부착된 Load-Cell이 인장강도에 따라 추력에 대응하는 DC 전압을 발생시킨다. DC 전압은 Indicator에 의해서 디지털값으로 표시되는 동시에 컴퓨터로 전송된다. 속도는 Tachometer에 의해서 측정된 것으로 회전판의 회전속도를 컴퓨터에 입력받아서 시간당 Km로 변환한 값이다.

3. 결과 및 검토

표2에 나타난 운전패턴에 의해 가속속운전시의 동특성시험치와 이론치를 계산하여 분석하였다.

표 2. 운전패턴에 따른 운행시간(단위: sec)

	가속시간	정속시간	감속시간	추가시간	총 운행시간
패턴 A	15	15	15	5	50
패턴 B	40	35	40	5	120

시험에서 사용된 인버터 출력의 전압설정관계는 각 주파수에 대해 V/f 비가 일정하지 않고, 주파수에 따라 다르게 나타났으며 출력전압의 실효치에 포함된 기본파성분의 실효치는 54.28 [V]에서 71.44 [%]인 38.78 [V], 124.5 [V]에서 82.023 [%]인 102.11 [V], 218.7 [V]에서 92.19 [%]인 201.6 [V]로 구성되었으며 나머지는 고조파성분이다. 즉 전압이 커질수록 고조파성분에 비해 기본파성분의 구성비가 커짐을 보였다. 따라서 동특성실험치는 V/f 일정으로 계산한 이론치와 비교할 때 약간의 오차가 발생하게 되므로 이를 고려해야만 한다. 동특성계산에서 외부손실력은 원판중량의 1.25 [%]인 1.5 [kgf]로 전체 운전구간에서 일정하다고 가정되었다.

3.1 V/f 비 일정제어에 의한 동특성

운전패턴은 표3에서 나타난 패턴 A로서 가속속 지령시간을 15초로 설정하여 V/f 비 일정제어에 의해서만 운전을 하였다. 즉 주파수 60 [Hz]까지 $\sqrt{3}V_1 = 4 \cdot f$ [v]의 관계를 유지하면서 전압을 인가하게 된다.

그림(2.4)는 추력특성 계산치와 실험치 및 수직력계산치를 나타낸다. 추력계산치와 실험치를 비교할 때 전체적으로 비슷한 운전패턴을 보이고 있다. 그러나 가속초기와 감속 끝부분, 정속구간에서 추력의 차이를 보였는데, 이것은 추력계산치에서는 외부손실력이 일정하다고 가정하였지만 실제의 동특성시험에서는 속도에 따라 다르게 작용하기 때문인 것으로 추정되고, 직사각형의 1차축과 회전원판으로된 2차축의 시험장치 구조상의 차이, 동특성시험에 사용된 인버터의 출력전압에 시간고조파가 포함되어 시간고조파손실 등 여러가지 손실요인이 작용된 것으로 추정된다. 수직력계산치의 경우 가속되는 동안 약 500 [N]까지 흡인력이 상승하여 정속구간까지 거의 같은 흡인력이 유지되다가 감속초기에 약간 증가되면서 약해지기 시작한다. 이러한 흡인력은 외부손실력으로 작용하여 속도상승 등을 저하시키기도 한다.

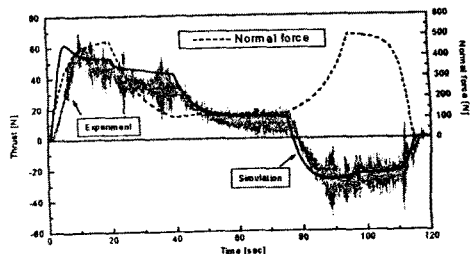


그림 2.4 추력과 수직력특성(패턴 A)

그림(2.5)에서 속도계산치와 실험치를 비교할 때 가속구간과 감속구간에서 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 그림(2.4)의 추력특성에서 검토한 원인과 같은 이유인 것으로 분석된다. 정속구간에서는 계산치와 실험치의 속도가 슬립 0.02와 0.03 정도로서 거의 동기속도에 이르고 있다. 또한 정속구간에서 속도실험치가 국부적으로 삼각파형태의 불안정한 특성을 보이는 것은 시험장치의 축이 밸런싱의 불량에 따른 진동에 의해 공극이 불안정해져서 속도에 영향을 주는 것으로 생각된다.

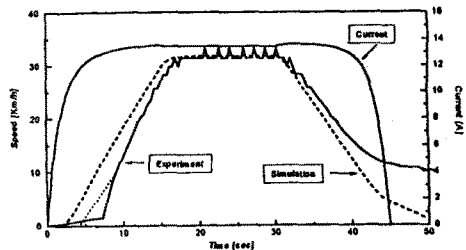


그림 2.5 속도와 전류특성

그림(2.6)은 역률과 효율특성이다. 가속시 역률은 주파수의 감소에 따른 리액턴스의 감소로 증가되고, 효율은 추력이 반대 방향으로 작용하는 발전기영역이기 때문에 나타내지 않았다.

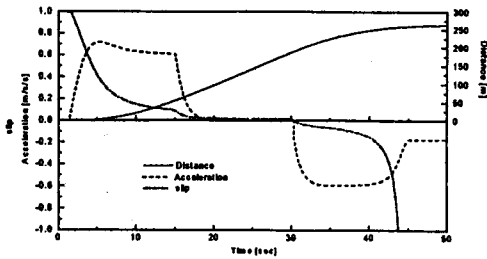


그림 2.7 가속도, 운행거리 및 슬립변화(패턴 A)

그림(2.7)에 가속도, 운행거리 및 슬립변화를 나타내었다. 패턴 A에 의해 운행되어질 때 실차운전시 270 [m]이상의 거리가 요구된다. 또한 슬립은 정속구간에서 상당히 작으며 가속시 (-)의 크기를 나타내는데 이때 회생제동, 발전제동에 의한 가속이 이루어진다.

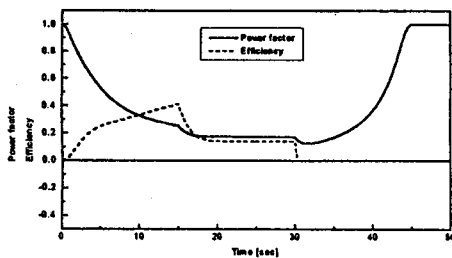


그림 2.6 역률과 효율특성(패턴 A)

3.2 전압일정구간이 포함되는 경우의 동특성

표3의 패턴 B에 의해 운행한 결과이다. 즉 V/f비 일정구간에 전압일정구간을 포함한 전압, 주파수관계에 의해 전압설정관계는 식(3.1)과 같다.

$$\sqrt{3} V_1 = 4 \cdot f \text{ [V]} \quad (f \leq 60 \text{ [Hz]}) \quad (3.1)$$

$$= 240 \text{ [V]} \quad (60 < f \leq 120 \text{ [Hz]})$$

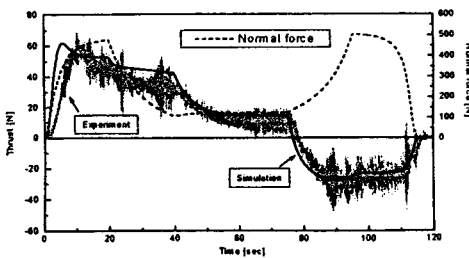


그림 2.8 추력과 수직력특성(패턴 B)

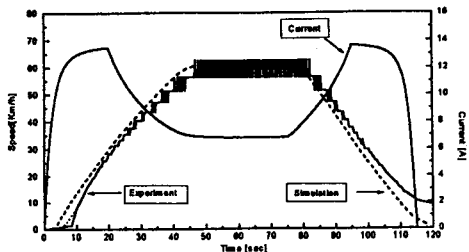


그림 2.9 속도와 전류특성(패턴 B)

그림(2.8)의 추력특성계산치와 실측치는 전체적으로 비슷한 운전패턴을 보이고 있으나, 가속초기의 차이는 패턴 A에 의한 운

전에서 검토된 이유와 같다. 또한 수직력은 V/f일정에 의해서만 운전되는 LIM에 비해서 상당량의 흡인력이 제거되어 진다.

그림(2.9)의 속도특성은 동기속도 64.8[Km/h]에 거의 근접하는 슬립 0.04로 속도를 유지한다. 속도일정치의 경우 정속구간에서 많은 노이즈가 발생했는데, 이것은 패턴 A에서 설명한 바와 같이 2차측인 원판이 회전을 할 때 실험장치구조상 중심속의 밸런스에 따라 일정한 공극을 유지하지 못하며 섀시자책도 시험장치와 같이 진동하므로 오차가 발생하기 때문이다.

그림(2.10)의 역률은 전압일정구간에서 리액턴스의 증가에도 불구하고 일시적으로 상승한다. 이것은 그림(2.11)의 슬립이 큰 동작점으로 이동하기 때문이다. 효율은 V/f일정으로만 제어되는 운전패턴에 비해서 높게 나타난다.

그림(2.11)의 가속도는 추력과 비슷한 패턴을 보이고 있다. 운행거리는 최대속도를 유지하는 정속구간에서 넓은 범위를 차지하며 1300[m]이상을 확보해야 한다.

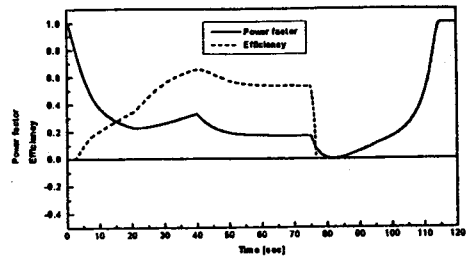


그림 2.10 역률과 효율특성(패턴 B)

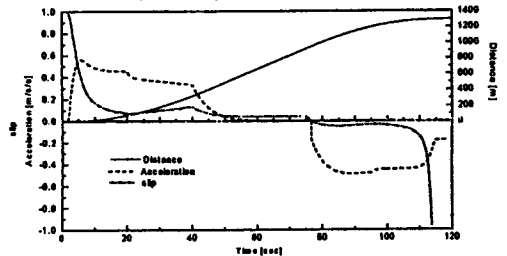


그림 2.11 가속도, 운행거리 및 슬립변화(패턴 B)

4. 결론

본 논문에서 동특성을 계산하고 실측하여 비교한 결과 비교적 잘 부합되었다. 그리고, 어느정도의 가속이 끝나면 전압을 일정하게 하고, 주파수만을 가변시켜 LIM의 속도를 제어하는 방법이 효과적인 운전패턴임을 확인하였다.

이상에서 분석한 동특성자료는 V/f비 일정제어에 의해 LIM을 운전할 때 과전류와 큰 흡인력을 발생시키지 않으며 높은 효율과 역률을 갖는 운전패턴을 결정하는 자료로서 효율적으로 자동운전하기 위한 기본자료로 이용될 수 있을 것이다.

Reference

- [1] S. Nonaka, Nobuo Fujii, Yasunobu Kojima, "Dynamic Characteristics of Linear Induction Motor for Urban Transit under Constant V/f Drive", 電學論D, 109卷7號, 1989.
- [2] S. Nonaka & Tsuyoshi Higuchi, "Study of High-Speed Single-Sided Linear Induction Motor Design", Memoirs of the Faculty of Engineering, Vol.42, No.1, 1982.
- [3] S. Nonaka, K. Yoshida, "Equivalent circuit quantities and equations for calculation of characteristics of double-sided linear motors", Jour. IEE Japan, Vol.90, 1970.
- [4] S. Nonaka, T. Higuchi and K. Ogawa, "A comparison of single-sided with double-sided linear induction motors", Technology Reports of the Kyushu University, Vol.52, 1979.
- [5] 박 민호, "전동력제어공학", 3版, 동명사, 1990.
- [6] S. Nonaka, et al 2, "Experimental Study on Characteristics of Linear Induction Motor for Urban Transit", 電學論D, 108卷5號, 1988.