

인버터로 구동되는 대용량 LIM의 정특성 시험과 동특성 해석

장석명*, 이현구*, 정상섭*, 박영태*, 김봉섭**, 정현갑**
 충남대학교 전기공학과* 한국기계연구원**

The Analysis on Dynamic Characteristics and the Static test of Inverter-fed Large capacity LIM

S.M. Jang*, H.G. Lee*, S.S. Jeong*, Y.T. Park*, B.S. Kim**, H.G. Jeong**
 Chungnam Nat'l University* KIMM**

Abstract

Until now the test of LIM have been mainly experimented for a small capacity LIM. This paper deals with the static characteristics of a large capacity LIM which is designed for MAGLEV. And we develop the simulation program using electro-magnetic field theory and equivalent circuit method. Hence it is evaluated the performance of a large capacity LIM.

Also this paper predicts the dynamic characteristics of LIM with the proposed simulation program.

Higuchi 등에 의하여 제안된 공간고조파를 고려한 전자장이론을 적용하여 동가회로의 회로정수에서 구한 특성식에 의해 작성하였다.[1] VVVF 인버터로 구동되는 LIM의 정특성을 해석하기 위한 시뮬레이션 과정은 그림 1에 나타낸 흐름선도와 같으며 해석 및 시험에 사용한 LIM의 사양은 표 1과 같다.

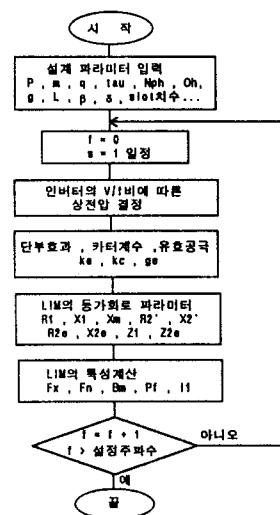


그림 1 시뮬레이션 흐름선도

표 1 LIM의 사양

상 수 m	3	back iron 두께	40 [mm]
극 수 P	8	2차축 AI판두께	6 [mm]
1차축 철심폭 h	250 [mm]	2차축 폭	310 [mm]
1차축 철심높이	90 [mm]	극간격 r	261 [mm]
1차축 길이	2300 [mm]	LIM 추력	6600 [N]
슬롯 높이	65 [mm]	차 폭 Z _t	10 [mm]
슬롯 폭	19 [mm]	공극 g	13 [mm]
매상당 직렬 권선수 N _{sh}	96	매극매상당 슬롯수	3

3. LIM의 정특성 시험

LIM의 정특성 시험은 그림 2와 같이 구성된 정지시험장치에서 행하였다. 수직방향으로 3개의 로드센을 연결하여 수직력을 측정하였으며 추력 역시 구속면에 로드센을 설치하여 측정하였다.

2. LIM의 정특성 시뮬레이션

LIM의 특성 해석을 위한 시뮬레이션 프로그램은 Nonaka,

또한, 정지시험시에 1차측 권선 및 2차측 도체판에서 발생되는 고열을 식하기 위해 수냉설비를 갖추었다.

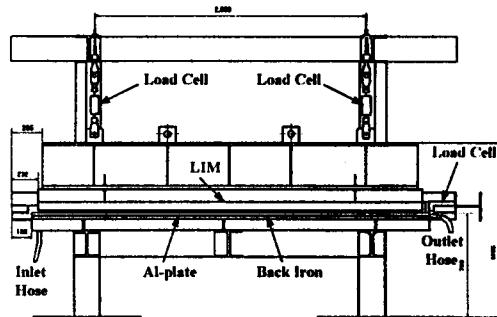


그림 2 LIM의 정지형 시험장치

LIM의 구동은 국내 K사가 일본과의 기술제휴로 개발한 150 [kVA]급의 IGBT형 인버터를 사용하였다. 하지만, 인버터 용량의 한계로 출력전류의 최대치가 200[A]로 제한되므로 정격운전까지는 실험이 불가능하였다. 따라서, 넓은 영역의 주파수 범위에서 특성시험을 하기 위하여 V/f비가 440/120인 F-모드, 440/110인 E-모드 그리고 440/100인 D-모드에서 실험이 이루어졌다. 각각의 인버터 모드에 대하여 주파수와 전압을 계측한 결과 V/f비가 일정하지 않음을 그림 3에 보았다. 여기서 실선은 계측값이고 점선은 제작사에서 제시한 값이다. 주파수가 작을수록 오차가 크며 주파수가 커짐에 따라 계측값에 접근하는데 이는 저주파 출력전압에 대한 인버터의 성능문제인 것으로 보이며 특성해석 프로그램에서는 계측치를 사용하였다.

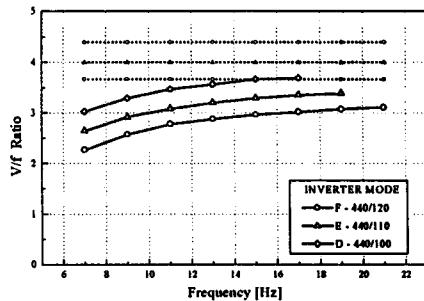


그림 3 인버터 모드에 따른 주파수 대 V/f비

4. 해석 및 시험결과의 비교 검토

본 장에서는 공간고조파를 고려한 전자장이론으로부터 구한 특성식을 이용하여 2장에서 얻은 해석결과와 3장의 정특성 시험결과를 비교검토해 보도록 하겠다.

4.1 추력 특성

그림 4는 공극이 13[mm]일 때 각각의 인버터 모드에 따른 주파수 대 추력특성을 나타낸다. 여기서 점선은 계측치이며 실선은 해석치이다. 처음에는 급격히 증가하다가 주파수가 증가함에 따라 완만히 감소함을 볼 수 있다.

그림 5는 인버터가 F-모드일 때 공극의 변화에 따른 주파수 대 추력의 특성을 나타낸다. 이 때 공극은 각각 9, 13, 17[mm]이며 점선은 계측치를 실선은 해석치를 나타낸다. 동일한 입력전원에 대하여 공극이 증가함에 따라 추력은 감소한다.

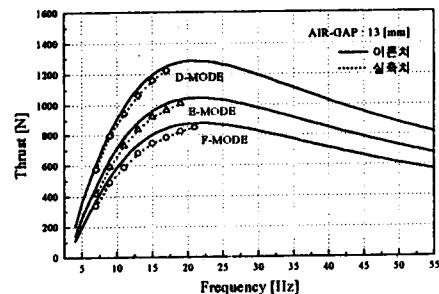


그림 4 인버터 모드에 따른 주파수 대 추력특성

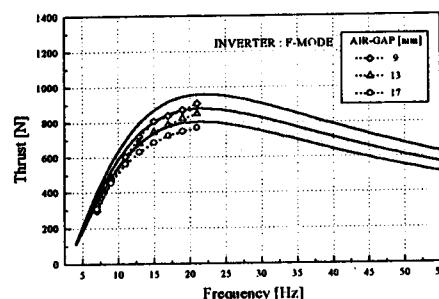


그림 5 공극의 변화에 따른 주파수 대 추력특성

그림 6은 F-모드에서의 공극변화에 따른 추력특성을 주파수별로 나타낸 해석치이다. 이를 통해 자기부상연자 운전시 부상높이에 따른 추력특성을 예측할 수 있었으며 계측치와 해석치는 비교적 잘 일치하기 때문에 여기에선 해석치만을 나타내었다.

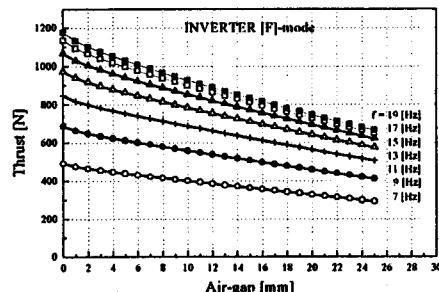


그림 6 주파수 변화에 따른 공극 대 추력특성

4.2 수직력 특성

그림 7은 공극이 13[mm]일 때 각각의 인버터 모드에서 주파수의 변화에 따른 수직력특성의 실직치를 그린 것이다. 그림 8에는 이에 대한 해석치를 나타내었다. 약 12[Hz] 근처에서 수직력이 영이 됨을 볼 수 있으며 저주파수대에서의 큰 오차는 인버터의 저주파 출력전압이 제대로 출력되지 못하기 때문에 2차측에 유기되는 유기기진력이 작아지므로써 생기는 현상으로 보인다.

그림 9는 F-모드에서의 공극변화에 따른 수직력특성을 주파수별로 나타낸 것이다. 공극이 증가함에 따라 수직력이 감소함을 알 수 있으며 실제 운전시 입력전원 및 부상높이의 변화에 따른 수직력을 산정할 수 있다.

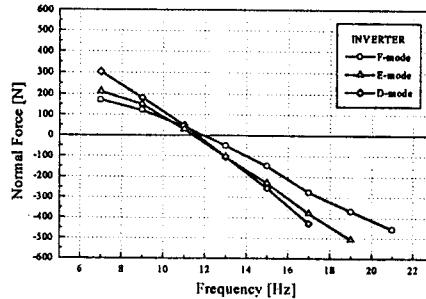


그림 7 인버터 모드에 따른 주파수 대 수직력의 동특성

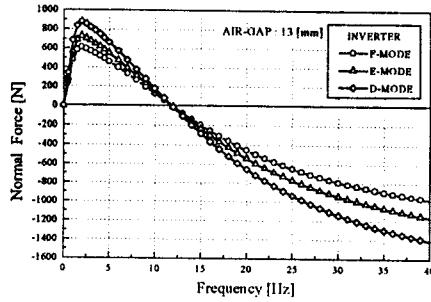


그림 8 인버터 모드에 따른 주파수 대 수직력 해석치

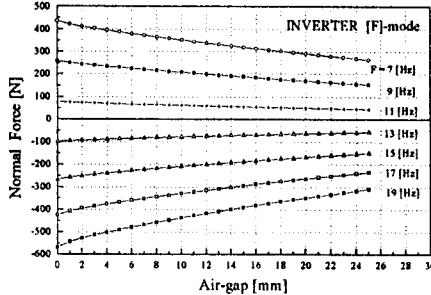


그림 9 주파수 변화에 따른 공극 대 수직력 특성

5. LIM의 동특성 시뮬레이션

본 장에서는 정특성 시험을 통해 입증된 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 LIM의 동특성을 산정한다.[4]

가속구간에서는 공극자속과 추력을 인정하게 유지하면서 LIM의 효율과 역률을 저하시키지 않기 위해서 V/f일정 제어를 하며 정격주행구간에서는 전압을 일정하게 유지하며 주파수를 가변시키는 방식으로 속도제어를 한다.

본 해석에서는 45[Hz]까지는 V/f일정 제어로 운전하다가 그 이상에서는 전압일정 주파수가면으로 운전하도록 주행패턴을 설정하였다. 즉 입력주파수 f 에 대한 입력전압 V 의 관계는 다음과 같다.

$$V = \begin{cases} \frac{440}{45} \cdot f \text{ [V]} & (f < 45 \text{ [Hz]}) \\ 440 \text{ [V]} & (f \geq 45 \text{ [Hz]}) \end{cases}$$

그림 10은 각각의 주파수에 따른 추력의 동특성을 나타낸다. V/f일정 제어되는 가속구간에서는 선형사양에서 요구되는 6600[N]의 추력을 발생시킬 수 있으며 전압일정 주파수가면제어되는 정격주행구간에서는 주파수 만에 의하여 속도제어가 이루어지기 때문에 리액턴스가 증가하여 추력이 감소하게 된다.

그림 11은 각각의 주파수에 대한 수직력의 동특성을 나타낸다. 2차도체의 와전류가 작은 12[Hz]이하의 저주파수에서는 전 습위에서 흡인력이 발생하지만 주파수가 키짐에 따라 면밀리 성분에 의해 흡인력이 약해져서 수직력이 양으로 되는 슬립이 나타난다. 슬립이 작아짐에 따라 최대추력 정도의 큰 흡인력이 나타나므로 동작슬립점을 크게 선정함으로써 흡인력의 영향을 줄일 수 있다.

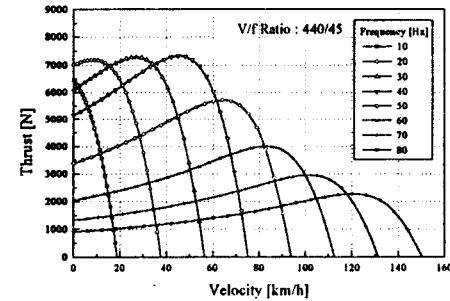


그림 10 주파수 변화에 따른 추력의 동특성

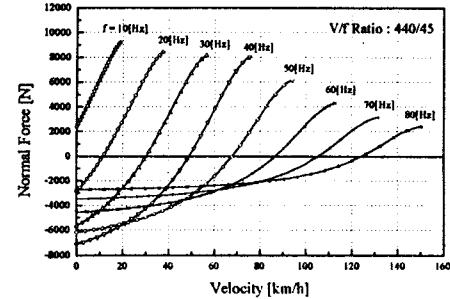


그림 11 주파수 변화에 따른 수직력 동특성

6. 결론

자기부상열차의 추진용으로 설계제작된 대용량 LIM에 대한 정특성 시험을 통하여 성능시험을 수행하였으며 이상의 정특성 시험을 기반으로 전자장 이론, 등가회로법에 의해 작성한 시뮬레이션 프로그램을 수정보완하여 V/f일정제어되는 LIM의 동특성을 추정해 보았다.

앞으로는 인버터 출력단의 고조파 및 온도 등의 제반 운전조건을 고려한 종합적이고 정밀한 전용 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 LIM이 효율적인 추진장치가 되도록 연구개발하여야 한다.

참고문헌

1. S. Nonaka and T. Higuchi "Study of High-Speed Single-Sided Linear Induction Motor Design", Memoirs of the Faculty of Engineering, Vol.42, No.1, 1982
2. S. Nonaka, N. Fuji, T. Watanabe and Y. Kojima "Experimental Study on Characteristics of Linear Induction Motor for Urban Transit", T. IEE Japan, Vol. 108-D, No. 5, pp.477-484, 1988
3. "선형유도전동기 성능평가 및 최적설계", 한국기계연구원 연구보고서 1996. 4
4. 장석명, 정현갑, 김봉섭, 박영태, 정연호, 이현구 "V/f일정 제어로 제어되는 LIM의 동특성" '95 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp.50-52