리니어모터 동특성 계측 및 인버터 성능분석

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

The measurement of LIM dynamic chracteristics and the analysis of the inverter performance

S.M.Jang*, °S.S.Jeong*, H.G.Lee*, B.S.Kim**, H.K.Chung**
Chungnam Nat'l Univ.*, KIMM**

Abstract

In this paper, the experiment on the dynamic characteristics of LIM for the propulsion system UTM(Urban Transit Maglev) is threated. Untill now LIM has been mainly experimented by using the rotational arch type system, but this system compose of the test vehicle mounted LIM, which driven by PWM inverter.

And the anlysis of the performance and the steady-state characteristics of the LIM is treated under various operation patterns. This paper may be available to compose the operating system of LIM driven by the open or closed loop control.

1. 서 론

본 논문에서는 자기부상열차에 사용될 대용량 LIM을, 동특성 시험용으로 제작된 차량에 장착하여 300m 정도의 직선레일구간에서 동특성시험을 수행하였다. 또한 이때 사용된 인버터 출력 파형 등의 성능이 리니어모터의 특성을 전적으로 결정하기 때문에 이의 실험을 통하여 얻은 고조파 파형, 고조파 함유율 등의 성능을 분석 검토하였다.

따라서 본 논문에서는 리니어모터의 특성과 인버터 성능의 자동계측 방법을 개발하여 실제 시험을 함으로써 향후 이 분야의 응용연구에 기본 자료를 제시하게 되었다.

2. 동특성 시험장치와 시스템 구성도

2.1 동특성 시험장치

동특성시험을 위한 시험기는 사진 1과 같으며, 시험차량과 2차측 사양은 표 1과 같다. 자기부상열차에서는 리니어모터를 1차측과 2차측의 공극을 일정하게 유지하기 위하여 전자석으로 부상시키지만, 본 시험에서는 바퀴와 레일로 유지하는 방법을 사용하게 된다. 시험기는 폭 1.2[m], 길이 300[m]의 레일위를 시험장비를 탑재하고 주행하므로 안전장치와 더불어 운전에 유의해야 한다. LIM을 운전할 인버터의 전원과 계측기에 사용될 인버터 전원은 펜터그라프를 통하여 DC600 [V]를 공급받는다. 시험기의 하단부에는 2차측 알루미늄판과 13[㎜] 공극을 일정하게 유지한 1차측 LIM을 설치하였고 양쪽 레일 중간지점에는 폭 300 [㎜]의 2차측 알루미늄판을 설치하였다.

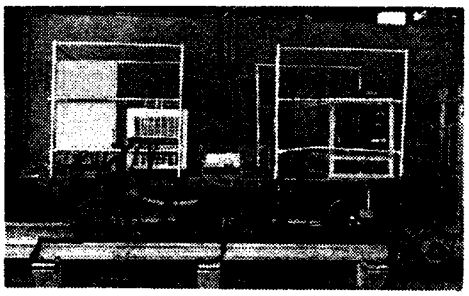

사진 1. 동특성 시험장치

표 1. 동특성시험 차량과 2차측 사양

시 험 장 치		제 원	비 고
차 량	연장	270 [㎝]	유압브레이크
	총무게	2,100 [kgf]	
	레일폭	120 [㎝]	
2차측 사양	Al 폭	300 [mm]	
	Al 두께	6 [mm]	
	backiron 두께	16 [mm]	
	길 이	300 [m]	직선시험구간

2.2 시험 LIM과 운전용 인버터

시험에 사용된 LIM은 자기부상열차의 추진용으로 출력 180 [kVA], 추력밀도 1250 [N/㎡]급인 대용량으로 설계제작되었으며 그 설계사양은 표.2와 같다. 따라서 운전용 인버터는 정격전압 440[V], 정격전류 400[A]급 이상의 대용량이 필요하다. 그러나 여건상 정격전류 200[A] 정도인 인버터를 사용하여 시험하였기 때문에 이를 감안한 허용범위내에서 동특성 시험을 하였다.

표 2. 동특성시험 LIM의 사양

상 수	3	back iron 두께	40 [mm]
극 수	8	2차측 Al판두께	6 [mm]
1차측철심폭	250 [mm]	2차측 폭	310 [mm]
1차측 철심높이	90 [mm]	극간격	261 [mm]
1차측 길이	2300 [mm]	LIM 추력	6600 [N]
슬롯 높이	65 [mm]	치 폭	10 [mm]
슬롯 폭	19 [mm]	공 극	13 [mm]
매상당 직렬 권선수	96	매극매상당 슬롯수	3

2.3 동특성 계측 시스템 구성 및 방법

그림.2는 동특성 시스템의 구성도이고 표.3은 계측장비의 제원이다. LIM의 추력, 수직력, 횡력은 각각 x, y, z방향으로 load cell를 설치하여 3차원 계측이 이루어지도록 하였다. load cell은 블록게이지를 이용하여 LIM의 앞과 뒷부분에 설치하였고 측정된 힘은 앰프를 통해 출력된다. LIM에서 발생된 힘을 정확히 측정하기 위해 발생력에 대한 기계구조적 견고성, 측정 센서의 선형성과 반복성을 확인하였고 load cell과 indicater의 교정(Calibration)을 하였다. 또한 매번 시험 후에는 반드시 재교정하여 재시험을 실시하였다. LIM의 속도는 시험기의 바퀴에 근접스위치를 설치하여 1회전 4 pulse를 출력되며 F/V컨버터를 통해 출력된다. LIM의 입력 선간 전압과 상전류는 2:1 PT와 5000:1 CT를 이용하여 측정하였고 입력주파수는 인버터 주파수 출력단에 F/V를 컨버터를 연결하여 출력하였다.

실제 시험에서 측정한 물리량은 추력, 수직력, 속도, 전압, 전류, 주파수로 0.1[s]간격으로 실시간 처리하여 Data Acquisition 시스템을 통해 컴퓨터로 출력된다.

표.3. 계측 장비의 제원

계측량 및 계측장비			제 원	비고
힘	Load Cell	추 력(x방향)	1000 [kgf] 用	인장압축 겸용 Bongshin사
		수직력(y방향)		
		복원력(z방향)		
	Indicator			
	Block Gauge			
속도	속도센서		근접스위치	4 pulses/회전
	F/V Converter			주파수입의 설정가능
주파수	F/V Converter			〃
선간전압	PT		2 : 1	LT505-S LEM사
상전류	CT		5000 : 1	LV-100 LEM사
Data Acquisition or Recorder			A/D컨버터 내장	10채널 DASH 10
Personal Computer			A/D컨버터 내장	RS232C

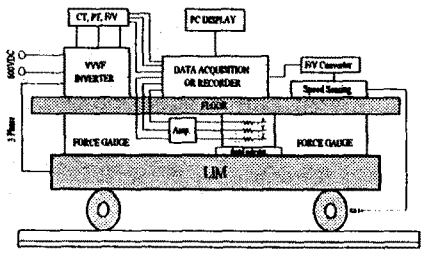

그림 2. 동특성시험 시스템 요소 및 구성도

3. 인버터 성능 분석

LIM의 운전특성은 인버터의 성능에 의해 좌우된다. 따라서 동특성시험 결과를 분석하기 위해 인버터의 성능을 파악해야 한다. 인버터 성능 시험에 사용된 계측기는 영국의 Voltech사 제품인 PM3000으로서 고조파성분까지 측정이 가능한 전력분석기이다. 그림.3은 인버터 성능시험을 위한 구성도이다. 그림4.와 그림.5는 7[Hz]와 13[Hz]일 때 인버터 출력전압·전류파형 및 각각의 고조파(함유율)을 계측한 결과이다.

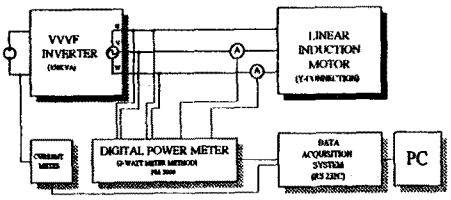

그림 3. 인버터 성능시험 구성도

7[Hz]에서는 20~26차 고조파가, 13[Hz]에서는 5~13차 고조파가 많이 함유됨을 알 수 있다. 또한 전류·전압파형은 주파수가 커질수록 좀 더 정현파에 가까워짐을 알 수 있다.

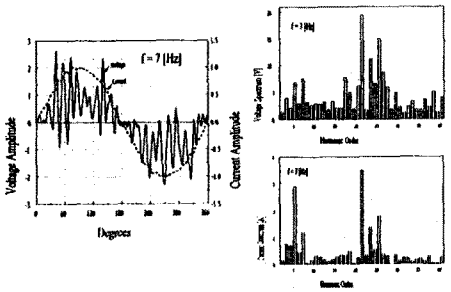

그림 4. 7[Hz]의 전압·전류파형 및 고조파 스펙트럼

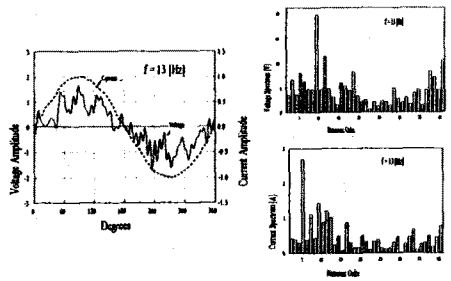

그림 5. 13[Hz]의 전압·전류파형 및 고조파 스펙트럼

그림. 6에는 동특성시험에서 설정된 주파수 f_1에 대하여 선간전압 실효치 V_{line}, 상전압실효치 V_p, 상전압 기본파성분 V_{p1}, 상전압의 왜곡률 DF의 관계를 나타내었다.

출력전압의 실효치에 포함된 기본파성분의 실효치는 주파수가 커질수록 고조파성분에 비해 구성비가 커짐을 그림.6에서 볼 수 있다. 고조파 성분은 LIM의 운전시에 인해 의한 손실의 증가, 전자기력 진동에 의한 힘의 맥동, 그리고 소음 증가 등의 나쁜 영향만을 초래한다.

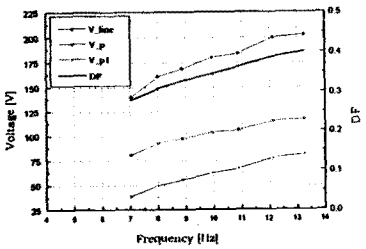

그림 6. 인버터 출력전압 특성

4. 실험 결과

4.1 정상특성

본 절에서는 7[Hz]부터 13[Hz]까지 2[Hz]씩 변화시켰을 때, 각각의 주파수에 대한 정전압 구동시 속도에 대한 추력, 수직력, 1차측 전류에 대하여 기술한다. 시험은 5초의 가속시간을 주었고 부하는 차량무게에 해당되며, 각 주파수에 대한 공급전압치는 그림.6에서 나타내었다. 또한 차량의 심한 진동이 공극의 변화와 load cell에 영향을 미치므로 추력과 수직력도 심하게 진동한다.

그림.7는 주파수별 속도에 대한 추력특성을 보여준다. 각 주파수별로 추력은 슬립과 함께 감소하는 수하특성을 보여준다. 7, 9, 11, 13 [Hz]에서 실측치 슬립은 각각 0.065, 0.072, 0.047, 0.026이다.

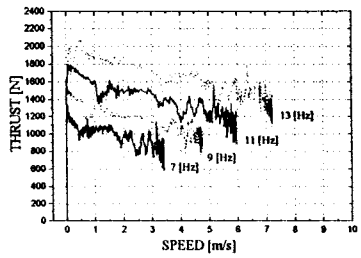

그림 7. 주파수별 속도에 대한 추력특성

그림.8은 속도에 대한 수직력 특성을 주파수별로 나타내었다. 이 때의 수직력은 LIM의 앞과 뒷부분의 수직력을 합한 값이며, 계측값중에서 7[Hz]와 13[Hz]만을 나타내었고 정(+)값은 흡인력을 표시한다. 본 시험의 주파수 조건에서는 전 슬립에서 흡인력을 갖는다. 만약 주파수가 커진다면 반발력 성분에 의해 수직력이 영(Zero)가 되는 슬립이 나타난다. 그림.9에서는 13[Hz]에서 LIM의 앞쪽과 뒷쪽에서 발생하는 수직력을 나타낸다. 공극자속이 뒷쪽에 쏠리므로 저슬립에서 LIM 뒤쪽에 큰 흡인력이 발생한다.

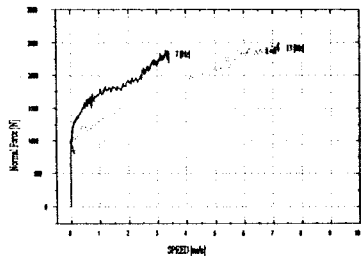

그림 8. 주파수별 속도에 대한 수직력 특성

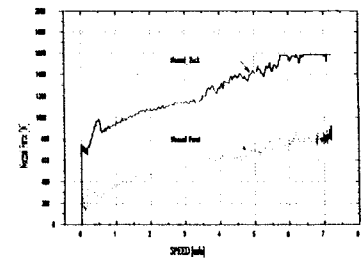

그림 9. 13[Hz]에서 LIM의 앞쪽과 뒤쪽의 수직력 특성

그림.10에는 속도에 대한 한 상의 1차측 전류특성을 주파수별로 나타내었다. 공극이 13[㎜]정도로 크기 때문에 여자전류는 상당히 큼을 알 수 있다.

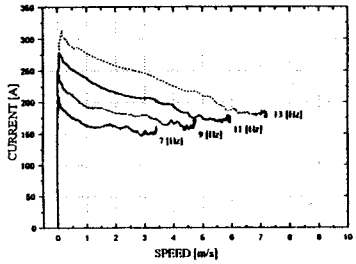

그림 10. 주파수별 속도에 대한 전류 특성

4.2 가속시 동특성

본 절에서는 그림.6에 표시된 주파수와 전압관계를 확보하면서 0~16.5[Hz]까지 약 5초간 증지시켰을 때의 무부하 가속시 동특성에 대해 기술한다. 그림.11는 무부하 가속시 추력, 수직력, 전압, 전류 특성을 나타낸다. LIM의 뒤쪽에서의 수직력은 load cell 출력계인을 초과하여 계측되지 않았다. 그림.12는 무부하 가속시 속도와 주파수 특성을 나타낸다. 정지상태에서 정속 8[m/s]까지 가속하는데 약 16초가 걸렸으며 그 사이에서 최대 1750[N], 최소 1400[N] 정도의 추력이 발생한다.

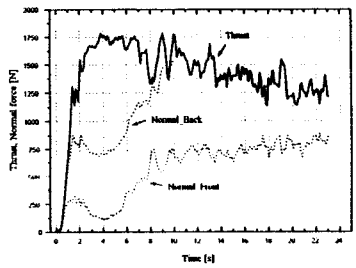

그림 11. 무부하 가속시 추력, 수직력 특성

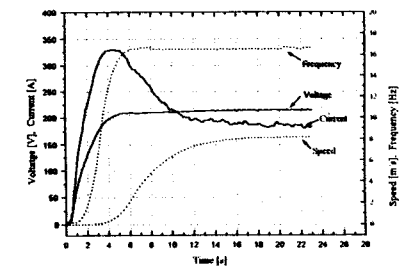

그림 12. 무부하 가속시 전압,전류,주파수,속도 특성

5. 결론

본 연구에서는 LIM을 장착한 동특성시험 차량으로 동특성시험과 함께 인버터 특성도 실측·분석하였다. 따라서 LIM의 해석치와 실측치를 비교검토한 기본자료를 얻었고, 동특성시험을 바탕으로 LIM을 V/f제 인정제어와 퍼지제어로 자동운전시스템을 구성할 수 있는 기본 자료를 제시하였다.

[참고 문헌]

1. 野中作太郎 외 3인, "新都市交通用 リニア誘導モータの特性に關する實驗的研究", 電學論D, 108卷5號, 1988