

선형유도전동기의 정특성에 대한 실험적 연구 (I)

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

An Experimental Study on Static Test of Linear Induction Motor (I)

B.S. Kim*, H.K. Jeong*, Y.T. Park**, H.G. Lee**, S.M. Jang**
Korea Institute of Machinery & Metals*, Chung-Nam University**

Abstract : This paper deals with experimentation on static test of linear induction motor for the propulsion system of UTM(Urban Transit Maglev). It is very important that vertical force zero effects to levitation field of maglev. Because it is continuous for air gap 11mm of levitated maglev vehicle. Then we found the slip frequency that the vertical force zero due to it is variable. Thus we had compared between simulation value and experiment value for lim by static test jig.

Key word : UTM, Vertical force zero, Slip Frequency, Static Test Jig.

1. 서론

선형유도전동기는 근래에 들어 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히 직선 운동을 필요로 하는 시스템은 동력전달의 변환과정 없이 직접 직선 구동력을 얻을 수 있다는 장점이 이용된다. 단점으로 효율 면에 있어서 선형유도전동기는 회전형 전동기에 비해 단부효과와 공극이 상대적으로 커서 전반적으로 효율이 좋지 않다. 그러나 동력전달 시 중간 변환과정이 없어 상대적으로 낮은 효율을 보상할 수 있으며, 기계 구조적으로 단순하여 마찰을 최소화할 수 있으므로 보수 유지면에서 훨씬 유리하다.¹⁾²⁾

도시형 자기부상열차의 추진용 선형유도전동기(LIM; Linear Induction Motor)는 자기부상열차가 일정 공극(11mm)을 유지한 채 저속 영역에서 고속 영역까지 추진을 시켜야 하는 장치이다. 또한 자기부상열차의 기동시 LIM의 수직력 특성은 슬립주파수에 따라 흡인력에서 반발력으로 반전되며, 흡인력은 차랑 부상시에 부상력으로 작용하게 되지만 역으로 반발력은 부상제어계통에 외란으로 작용하게 된다. 따라서 LIM의 수직력 성분이 쉘(zero)이 되는 반전점이 되는 슬립주파수를 찾아 기동을 시켜야 한다. 이와 같은 주행패턴에 따라 주행하기 위해서는 적절한 슬립 주파수를 찾아 수직력이 쉘(zero)이 되는 운전 조건을 설정하여야 한다.

본 논문에서는 상기의 LIM 운전조건을 설정하기 위한 LIM의 정특성시험을 수행하였다. LIM의 정특성시험을 위하여 지상 2차속인 reaction rail(AI reaction plate + Back iron)을 고정시키고 차상 1차속인 LIM을 test jig 상부 frame에 LIM을 hanging 시키고, LIM과 frame 사이에는 loadcell 3개를 써서 수직력을 계속할 수 있게 하였으며, 추력은 LIM의 길이 방향에 loadcell을 설치하여 계속하였다.³⁾(사진 1 참조) 실험 방법은 reaction rail이 있는 경우의 구속시험과 AI reaction plate가 없는 경우의 무부하시험 2가지 방법을 택하였다.

실험 결과에 있어 인버터의 용량 부족으로 정격 상태의 시험은 미치지 못하였으나 슬립주파수에 따른 추력, 수직력 특성에 대한 전반적인 경향이 이른 해석치에 근접하여 차기에 수행할 LIM의 동특성 시험의 가능성을 보였다. 이에 따라 추후 정격 용량의 인버터를 확보하고 3-component force gauge를 이용한 정특성시험기를 개량 보완하고자 한다. 또한 1km 시험선로에서 Sted를 이용한 LIM의 동특성 시험을 계획하고 있다.⁴⁾⁵⁾

2. 정특성 시험기와 시스템 구성도

2.1. 정특성 시험기

LIM의 정특성 시험을 하기 위한 정특성 시험기는 사진 1과 같으며, 시스템 구성도는 그림 1과 같다. 정특성 시험기는 대전 EXPO'93 자기부상열차용 LIM(2.4kN)을 시험했던 것으로 현대정공에서 제작하였다.¹⁾

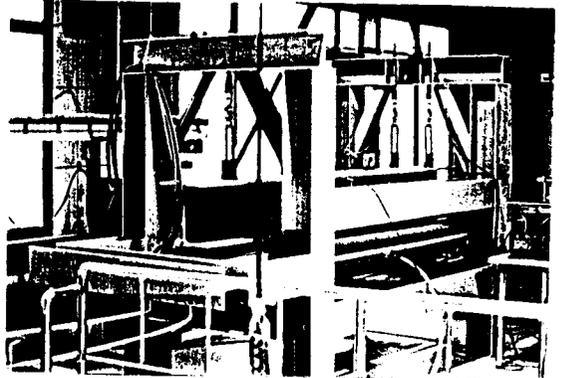


사진 1. 정특성 시험기(W×D×H : 3710×1400×2100 [mm])

2.2. 정특성 시험 시스템 구성도

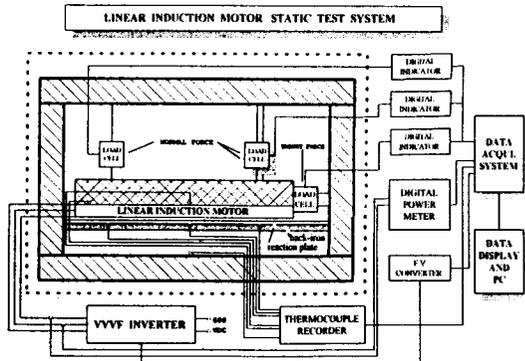


그림 1. LIM의 정특성 시험 시스템 구성도

그림 1에서와 같이 1차속 LIM의 추력 성분 측정을 위한 loadcell 1개, 수직력 성분 측정을 위한 loadcell 3개로 구성되어 있으며, 2차속인 reaction

rail은 test jig에 고정되어 있다. 각각의 loadcell에 대하여는 다음절에 부연한다. 구속시험시 AI reaction plate의 발열을 방지하기 위한 냉각장치가 부착되어 있다. 그리고 1차속과 2차속간의 공극 조절이 가능토록 되어 있으며, reaction rail의 평형도를 조절할 수 있도록 구성하였다.

2.2.1. 힘(Force)의 측정

LIM에서 발생하는 힘을 정확히 측정하기 위하여 다음과 같은 조건이 필요하다.

- 가. Test jig의 기계적인 마찰을 최소화하여야 한다.
 - 나. 발생되는 힘에 대하여 기계구조적으로 견고하여야 한다.
 - 다. 측정용 센서의 직선성(linearity)가 최대한 보장되어야 한다.
 - 라. Test jig의 반복성(repeatability)이 5% 미만이어야 한다.
 - 마. 용도에 따라 Loadcell의 정확도 교정(Calibration)이 이루어져야 한다.
- 본 시험에서 사용한 힘 측정용 센서는 Straingauge Type(DBBP, 1000kgf)으로 인장 압축 겸용이며, 정확도는 0.5% 이내 이다.

2.2.2. Reaction Rail의 냉각 장치

구속시험에서 2차속인 AI reaction plate에 유도되는 와전류에 의한 발열은 정격 시험시 수분 이내에 170℃를 넘어설 정도이다. 이러한 발열은 재질이 시인 reaction plate에 변형 또는 손상을 주게 된다. 따라서 본 시험에서는 reaction plate 상부에 물을 지속적으로 흘리는 냉각방법을 이용했다. 결과적으로 최대 50℃-60℃ 범위의 냉각효과를 볼 수 있었다.

2.3. 선형유도전동기와 구동용 인버터

2.3.1. 선형유도전동기

시험에 사용된 LIM의 사양은 표 1과 같으며, 용량은 180 [KVA]이며, 정격 추력은 6.6 [kN] 이다. 입력 조건은 정격 전압 3 상 440[VAC], 정격전류는 400[A] 이다. LIM의 무게는 440 [kg] 이다.

표 1 UTM-01 용 LIM Specification

	CONTENT	KIMM TYPE
Primary Winding	Number of Phases	m 3
	Number of Poles	p 8
	Coil Pitch / Pole Pitch	τ 261 mm
	Primary Length	L 2262 mm
	Length of Coil End	l_c 160 mm(max.)
	Sectional Area/Conductor	160 mm ²
	Winding Connection	Y connected
Secondary	Insulation Type	H
	Aluminum : Thickness	d_2 6 mm
	Width	h_2 300 mm
	Back-iron : Thickness	d_1 16 mm
Primary Core	Width	h_1 282 mm
	Primary Core Length	L_c 2301 mm
	Primary Core Width	h 250 mm
	Primary Core Depth	d_c 90 mm
	Number of Slots	N_s 79 (72)
	Slots/Pole/Phase	q 3
	Slot Pitch	τ_s 29 mm
	Slot Depth	d_s 65 mm
	Slot Width	w_s 19 mm
Tooth Width	t_s 10 mm	

2.3.2. 구동용 VVVF Inverter

LIM을 구동하기 위한 장치로 정격 시험을 위하여는 300KVA 급의 용량이 필요하다. 개략적인 인버터의 사양은 표 2와 같다.

표 2 시험용 VVVF INVERTER

CONTENT	SPECIFICATION
Input Voltage	600 VDC
Frequency Range	0~120 Hz
Output Voltage	3 ϕ 0~440 VAC
POWER	150 KVA
Maximum Current	210 A

3. 시험 조건 및 방법

정격성 시험에 있어서 시험 방법은 추력이 발생할 수 있는 상태의 구속 시험과 수직력 만 작용하는 상태의 무부하 시험으로 크게 구분할 수 있다. 시험 요건상 무부하시험을 위한 정격 상태까지의 인버터 용량이 확보되지 못한 관계로 동기회로 실험을 확인할 수 없었다.

3.1. 구속 시험

구속 시험은 상기에서 기술한 비외값이 2차속 Reaction Rail을 고정하고 1차속인 LIM의 한쪽 방향을 구속한 상태에서 loadcell을 통하여 추력, 수직력을 계속한다. 시험 과정은 인버터 모드를 설정하고 인버터의 슬립주파수를 변화시키며 인버터의 출력단에서 전압, 전류, 역률 등을 읽는다.

서론에서 언급하였듯이 인버터의 용량이 정격 시험에 도달하지 못하여 아래와 같이 인버터 시험을 하여 보았다. 인버터 모드별 주파수에 따른 출력 전압에 대한 것은 그림 2와 같다. 그림 2에서 16가지 모드 중 가장 기율기가 높은 것이 0 모드, 가장 낮은 것이 F 모드이다. 인버터의 정격 전류가 210 [A] 로 D 모드 때의 최대 선간 전압은 70 [V] 이었다. 이는 LIM이 구속된 상태에서 한계치라고 생각된다. 따라서 기율기가 낮은 D, E, F 모드를 선정하여 실험하였다.

- 가. 인버터 모드를 설정하고 기계적인 공극을 13mm로 고정한다.
- 나. 슬립주파수를 변화(2Hz 간격)시키면서 추력, 수직력을 계속한다.
- 다. 인버터 정격 전류의 150%까지 관찰하면서 계속한다.
- 라. 2차속의 reaction plate의 온도 상승을 관측한다.
- 마. 항목 가.-라.에 대한 시험을 반복한다.
- 바. 인버터 모드를 바꾸어 항목 가.-마.에 대한 시험을 반복한다.
- 사. 1, 2차속 간의 공극은 9~17[mm]까지 2[mm] 간격으로 시험하였다.

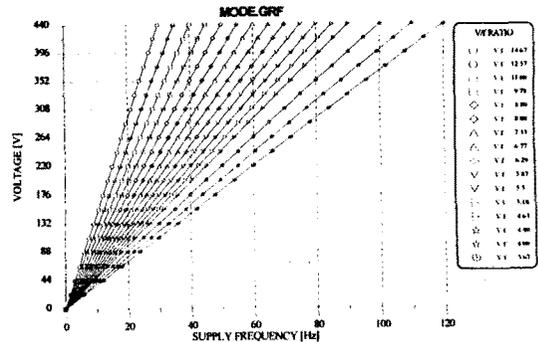


그림 2. 인버터 모드별 주파수에 따른 출력 전압

3.2. 무부하 시험

무부하 시험에서는 1차속과 2차속간의 공극을 정격 상태(13mm)로 유지한 채 AI reaction plate를 제거한 후 back iron만 있는 경우 수직력, 전압전류, 역률 등을 측정 한다. 시험의 진행 과정은 구속 시험시와 같다.⁴⁾

4. 시험 결과

4.1. 슬립주파수에 따른 추력, 수직력의 변화

슬립주파수를 변화시킬 때 LIM의 추력, 수직력의 변화는 그림 3과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 11Hz 부근에서 수직력의 변화가 홀인력에서 반발력으로 비점을 알 수 있다.

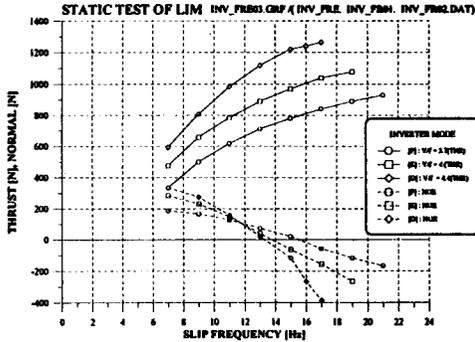


그림 3. 슬립주파수에 따른 추력 및 수직력의 변화
공극 13mm, 인버터 모드 (F, E, D)

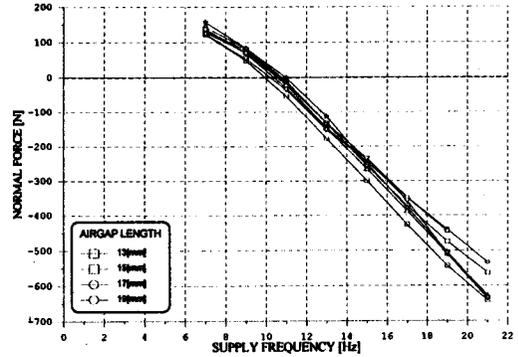


그림 6. 공극 변화에 따른 수직력의 변화(공극 13,15,17,19[mm])

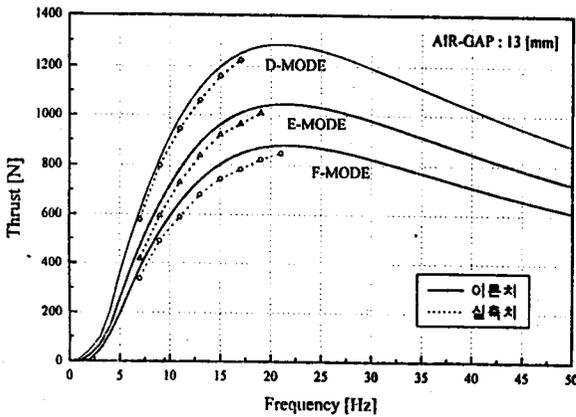


그림 4. 슬립주파수 변화에 따른 추력의 실험치와 해석치

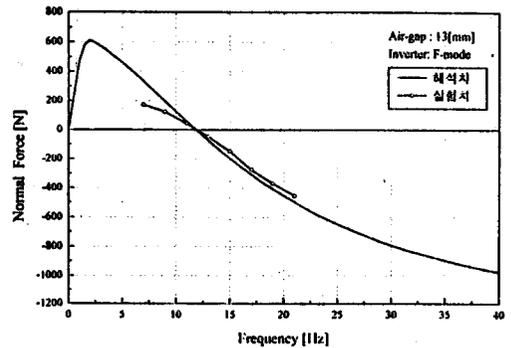


그림 7. 주파수 변화에 따른 수직력에 대한 실험치와 해석치

4.2. 공극 변화에 따른 추력, 수직력의 변화

1차속과 2차속간의 공극 변화에 따른 추력 및 수직력 시험은 자기부상열차가 주행시 공극의 변화에 따른 추력 및 수직력의 변화를 알기 위함이다.

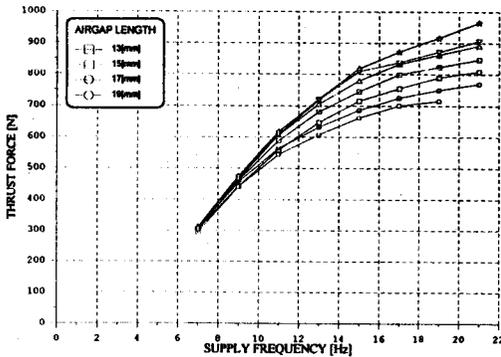


그림 5. 공극 변화에 따른 추력 변화(공극 13,15,17,19[mm])

그림 6에서 보는 바와 같이 VVF 인버터로부터 LIM에 공급되는 전원 조건을 동일시키고 공극만을 변화시켰을 시, 공극 변화에 따른 수직력의 변화는 그다지 크지 않았다. 수직력의 발생 원인은 슬립주파수의 영향이 크다는 것을 입증하는 것으로 공극변화가 적은 영역에서는 수직력 변화에 크게 영향을 주지 않는다는 것을 입증시켜주고 있다. 그림 7에서는 수직력의 실험 결과와 해석치를 비교한 것으로 실험치와 해석치가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

4.3. 무부하 특성 시험

무부하특성 시험시 요구되는 조건은 동기회로 정수를 산정하기 위하여 일반 회전형 유도기와는 달리 LIM은 정격 상태까지의 실험을 하여야 한다. 인버터의 용량이 부족한 관계로 정격상태의 동기회로 정수를 산정하기에는 충분치 못하였다. 무부하시험에 관한 분석은 참고문헌 6)에 나타내었다.

5. 검토 및 결론

도시형 자기부상열차의 추진용 LIM은 10[mm] 공극을 유지한 상태로 부상 제어된 열차를 시속 110 [Km/Hr] 로 주행시키는 전동기이다. 대차 당 1대의 LIM(6.6 [KN])을, 속도 55[Km/Hr] 까지 일정 Slip, 속도 110[Km/Hr]까지는 일정 Power, 속도 110[Km/Hr] 부터는 일정 Speed로 운전 제어하게 된다.

따라서 자기부상열차 추진용 LIM에 대한 정특성 시험에서 자기부상열차 기동시 슬립주파수가 부상계통에 미치는 영향을 최소로 하는 값을 실험을 통해 알아야 한다.

실험 결과 대략 11[Hz] 부근에서 수직력이 영(zero)이 됨을 알 수 있었으며, 이 경우의 추력은 상대적으로 6.6[KN]에 미치지 못하는 결과를 보였다. 이는 제한적 요건으로 슬롯폭과 치폭, 코일에 대한 설계변경과 제작사의 제작 경험 부족 등으로 사료된다. 공극에 따른 추력 및 수직력의 변화는 그다지 큰 변화는 보이지 않았으나 정특성 시험기에서의 정확한 공극 유지가 원활치 않았음을 관찰할 수 있었다.

이러한 결과 등을 토대로 추후 개선된 정특성 시험기를 이용한 정확한 실험을 보충할 필요가 있으며, 1Km 시험선로에서 Sled Type의 동특성 시험에 중요한 자료가 되리라 생각된다.

[참고 문헌]

- 1) Sakae Yamamura, "Theory of Linear Induction Motors", University of TOKYO Press, 1978
- 2) "리ニア모터とその 應用", 일본전기학회, 1976
- 3) "대전 EXPO'93 자기부상열차용 SLIM의 정특성시험 및 평가", 한국기계연구원 수탁연구보고서, 1992.12
- 4) "인버터의 V/f비 특성을 고려한 대용량 LIM의 정특성시험 및 동특성 추정", 대한전기학회 하계학술대회, 1996.7.
- 5) Jacek F. Gieras, "Linear Induction Drives", Clarendon Press Oxford, 1994
- 6) "선형유도전동기 등가회로의 구성", 대한전기학회 하계학술대회, 1996.7.