

선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(Ⅱ)

김봉섭, 정현갑, 조홍제
한국기계연구원

An Experimental Study on Dynamic Test of Linear Induction Motor(Ⅱ)

Bong Seop Kim, Hyun Kap Chung, Hung Je Cho
Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract - In this paper we report test results of the dynamic characteristics of the linear induction motor(LIM) used for propulsion of the UTM-01. To test a vehicle scale LIM, we manufactured a bogie type sled propelled by LIM. In this report, the LIM end effects for both cases when the vehicle is at rest and when the vehicle is running were measured and compared with the calculations. The LIM thrust and the vertical forces were measured by the 3-component load cell and the results were compared with the calculations from measured vertical load and vehicle velocity.

1. 서 론

본 연구는 도시형 자기부상열차 개발에 있어 제1호로 제작되는 차량 추진용으로 사용될 선형유도전동기(LIM)의 성능을 시험하여 설계 및 해석치와 비교 검토하고 평가하여 LIM 성능을 향상시키고, 차기 제2호로 제작될 차량용 LIM의 설계에 적용하여 LIM의 성능을 개선도록 하는데 있다.

본 연구에서는 실차량용 대형 LIM에 대한 특성시험의 신뢰성을 높이기 위해 실차와 동일한 조건하에서 시험 할 수 있도록 ① 대차방식의 시험장치인 sled를 제작하였고, ② 자기부상열차 시험선로 상에 LIM 시험을 위한 철차륜용 주행 rail(50N)과 LIM의 2차측인 reaction rail을 추가로 설치하였다.

LIM의 추력 및 수직력의 특성을 파악하기 위하여 S. NONAKA¹⁾, R. A. LANGMAN²⁾, D. EBIHARA³⁾, M. IWAMOTO⁴⁾등 이 시험에 사용한 시험기는 회전형을 사용하였거나, 소형 또는 축소형 LIM을 제작, 시험 실 차원에서 시험한 것이 대부분이다.

회전형 시험기에는 반드시 원호형으로 된 시험용 LIM을 사용하므로 실제의 직선형과는 상이하며, 또한 2

차측인 회전체는 중심축의 회전 bearing에 의해 지지되어 회전하므로 회전형 전동기와 같이 mechanical air gap의 변동이 전혀 없고, air gap의 변화를 줄 수 없어 실차량에서의 성능과는 상이할 가능성이 많을 것으로 생각된다. 또 시험실 차원에서 소형 LIM을 사용한 시험은 LIM의 특성인 end effect와 scale effect로 인한 성능 차이가 예상된다. 그러나 본 연구에서는 이러한 결함을 최소화하기 위해 실제 차량조건과 같은 조건하에서 시험을 수행하였으므로 실제와 동일한 신뢰성있는 시험 결과를 얻을 수 있어 정확한 평가를 할 수 있었다.

또한 LIM특성에 큰 영향을 미치는 단부효과에 대하여는 S. YAMAMURA⁵⁾들에 의한 보고가 있으나 LIM의 정지시와 주행시의 특성차이에 대한 평가결과는 충분히 기술되어 있지 않았다. 본 연구에서는 LIM의 정지, 주행시의 단부효과에 따른 추력 및 수직력의 변화를 파악하기 위해 시험선로 상에 시험기를 고정시켜 정지 상태에서의 단부효과와, 주행시의 단부효과를 측정하였고, 측정치를 해석치와 비교하였다.

시험장치의 전체무게(sled + LIM + measuring device + people)를 2.29ton, 3.29ton, 4.49ton(시험용 LIM의 정격 하중=4.49ton)로 바꾸어 시험하였다. 속도와 시간을 정확히 계측하여 $F=m \cdot a$ 의 식으로 추력을 산출하고, 수식에 의하여 산출된 값과 load cell에 의해 실측된 실측치와 비교한 결과, 양자가 서로 일치함을 알게 되었다.

2.1 시험장치

2.1 시험장치의 설계·제작

LIM의 성능을 시험하고 평가하기 위하여는 신뢰할 수 있는 시험 결과를 얻을 수 있는 시험기의 제작이 필수적이라 하겠다.

자기부상 차량은 부상용 전자석에 의하여 부상되어 추진되므로 차량의 속도 변화에 따라 추진기의 1차측인 LIM과 2차측인 reaction rail과의 기계적인 공극의 변

동과 횡방향의 변위가 발생할 뿐만 아니라 곡선궤도에 의한 횡방향 변위도 발생하게 된다. 그러므로 LIM의 시험은 이러한 상황이 고려된 상태에서 이루어져야 하며, 서론에서도 언급했듯이 LIM의 크기 또한 실차량용을 사용하여 수행하여야 하는 복잡한 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 최소화하기 위하여 사진 1에서 보여주는 바와 같이 힘의 계측결과를 상호비교 확인할 수 있도록 같은 방향의 힘을 2중으로 계측하도록 시험 장치를 설계하였다. 즉 3-방향 힘을 동일축 상에서 인장형 load cell에 의해 계측할 수 있는 3-component force gauge를 lower strong-bag과 upper strong-bag 사이에 설치하여 추력, 횡력 및 수직력을 계측할 수 있게 하였다.

속도 계측용으로는 근접센서와 타코메터 2종류의 센서로부터 계측하여 결과치를 상호비교 정확도를 확보할 수 있도록 하였으며, 기계적 공극은 eddy current 방식의 센서를 LIM 전방과 후방 2곳에 설치 수직력에 의한 공극 변동을 계측할 수 있도록 하였다.

선간전압은 PT 방식으로, LIM에의 공급 전류는 CT로, 속도는 proximity S/W로부터 계측이 되도록 시스템을 구성하였으며 그의 구성도를 그림 2에 나타낸다. 위에서 기술한 각종 센서 및 load cell로부터 계측되는 결과치는 모두 analog 전압으로 변환되어 20 종류의 data를 동시에 수록할 수 있는 DASH-20(recorder)에 수록된다.

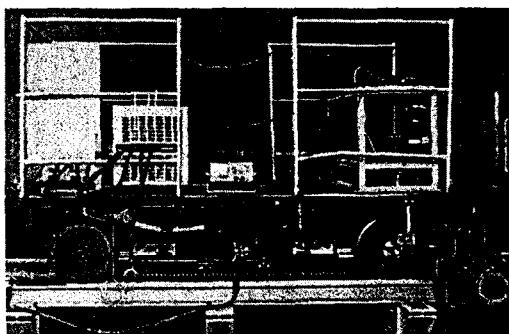


사진 1. LIM 시험장치

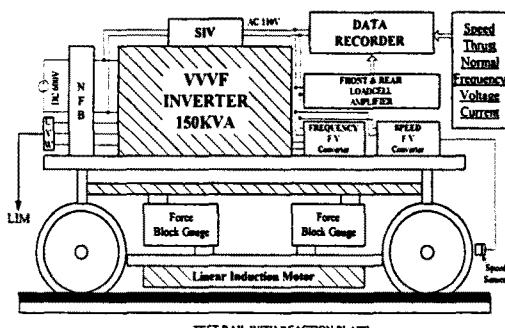


그림 2. 계측 시스템의 구성도

2.2 3-방향 힘 동시계측용 Force Gauge

3-방향 힘 동시계측용 force gauge (3-component force gauge)는 그림 3와 사진 2에서 보는 바와 같이 정육면체의 block이 3개 1조로 조합되어 3방향의 힘을 계측할 수 있도록 되어 있으며, 1개의 block은 4개의 bridge 형상으로 가공되어 제작되었다.

4개의 bridge 안쪽에 load cell이 조립되어 있고, bridge의 직각 방향으로 힘을 받으면 bridge는 탄성 한계 내에서 힘의 작용방향으로 변위를 갖게 된다. 변위에 따른 힘의 크기가 load cell에 전달되며, 전달된 힘은 전압으로 변환되어 출력이 digital indicator 혹은 recorder로 전송되어 수록되거나 수치로 표시된다. 사용된 load cell은 strain gauge type의 1000Kgf이다.

3개 1조의 3-component force gauge가 LIM 길이 방향의 전방에 1set, 후방에 1set를 설치하였다.

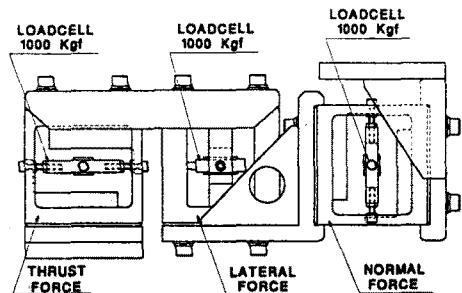


그림 3. 3-Componet Force Gage의 외형도

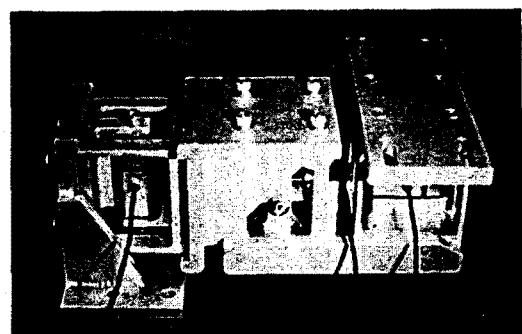


사진 2. 3-Component Force gauge

2.3 LIM 2차측인 Reaction Rail

선형유동전동기의 구성은 1차측인 철심 core와, 2차측인 reaction rail로 구성되며, reaction rail은 그림 4에서 보는 바와 같이 reaction plate, back iron으로 이루어진다.

Reaction plate 재질은 LIM 성능에 많은 영향을 준다. 일반적으로 높은 가속력을 요구할 경우는 동(銅) 합금을 사용하지만 가격이 고가이므로 경제성에 문제가 있다. 그러나 철도와 같이 거리가 수십, 수백 Km일 경우에는 동합금에 비하여 가격이 저렴한 알루미늄 합금을

사용하지만, 역과 역사이의 거리가 짧을 경우에는 급가 속을 위하여 역구내 구간만을 동합금을 사용할 경우도 있다. 본 연구에는 알루미늄 합금(Al-6061)을 사용하였다. Al-6061의 전기저항률은 $3.5 \times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$ 이다. 자로 형성을 위하여 사용되는 back iron은 일반 구조용 강인 SS-41을 사용하였고, SS-41의 전기저항률은 $10 \times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$ 이다.

2.4 속도 계측

속도 계측은 추력 계산에 사용되는 변수로서 무엇보다도 계측의 신뢰성이 필요로 되는 것이다. 그러므로 표 1에서 보는 바와 같이 2가지 방식의 속도센서를 사용하여 계측된 값을 비교 신뢰성을 확인하도록 하였다.

표 1. Speed Sensor의 사양

근접 센서		Rotary Encoder	
Type	들출형	Type	Incremental
검출거리	$4\text{mm} \pm 10\%$	Puls/Rev.	600
표준검출 물체(철)	12×12 mm	Output Phase	A,B,Z Phase
전원	10~30 [VDC]	최대응답주파수	100[KHz]
응답주파수	400[Hz]	기계적 회전수	5,000 [rpm]

2.5 PWM방식VVVF Inverter

PWM(pulse width modulation)방식이라 함은 펄스 폭을 변조하는 것이며, 신호 필스의 폭을 가변하여 제어하는 방식을 말한다. 최근 스위칭 소자로는 IGBT(insulated gate bipolar transistor)를 많이 사용하고 있다. IGBT소자는 종래의 transistor 보다 스위칭 속도가 빠르고 소형이면서, 대용량이 개발되어 VVVF(variable voltage variable frequency) inverter에 사용하게 되어 inveter가 소형화, 대용량화되는 추세에 있다. 본 시험에는 종래의 transistor를 사용한 범용 inveter를 LIM의 구동에서 constant slip frequency control이 가능하도록 control driver를 개조하여 사용하였으며 그의 사양은 표 2와 같다.

표 2. VVVF Inverter의 사양

Items	Contents
Capacity	150 KVA
Current	max. 200 Amp
Nominal input voltage	600 VDC
Control method	PWM, v/f control
Constant slip frequency	0~30 [Hz]
Switching element	Transistor
Electric brake	Regenerative
Cooling method	Forced air cooling

2.7 선형유도전동기

LIM은 전술한 바와 같이 1차측(primary)과 2차측(secondary)으로 구성된다.

자기부상열차에서는 1차측을 기동자로하고 2차측을 고정자로하고 있다. 1차측은 철심, 권선 및 bracket으로 이루어진다. 여기서 철심은 silicon steel sheets에 치와 slot을 만들어 적층하였고, slot에는 권선이 몇겹으로 감겨져 배치되어 있다. 권선은 중량 감소를 위하여 Al-squared coil을 사용하였다.

전류공급 즉, 부하에 따른 온도상승의 방지는 차량 주행시 natural cooling 방식을 채택하고 있다. LIM의 1차측에 대한 외형도를 그림 5에, 실물 형상을 사진 5에 표시하며, 도시형자기부상열차 제1호용 LIM의 설계사양을 표 3에 표시한다. 표 3에서 보는 바와 같이 LIM은 정격 전류 205[A]에서 3,300[N]을 내도록 되어 있으며, 이때 정격 하중 4.5ton에서 가속도는 0.8m/s^2 이다.

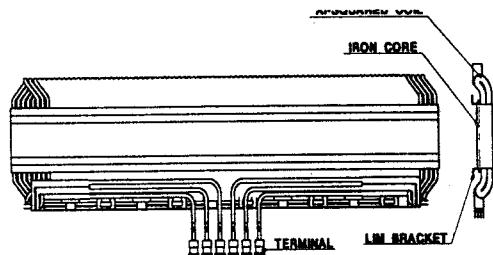


그림 5. 선형유도전동기의 외형도

표 3. Design parameters of test LIM

Items	Parameter	Value
Primary (Stator)	max. operating speed	110 [Km/h]
	thrust force	3.3 [KN]
	coil connection	Y(star)
	number of phase	3 [φ]
	critical speed	55 [Km/h]
	length of primary	2300 [mm]
	number of poles	8 [P]
	pole pitch	261 [mm]
	core width	220 [mm]
	core height	60 [mm]
	slots/pole/phase	3
	slot pitch	29 [mm]
	width of tooth	9 [mm]
	depth of slot	40 [mm]
	number of slot	79
	coil pitch	7/9
Secondary (Rotor)	number of coil turn	5(10T/Slot)
	coil section area	50 [mm ²]
	mechanical air gap	13 [mm]
	Reaction plate:	
	Resistivity	$3.9 \times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$
	Thickness	6 [mm]

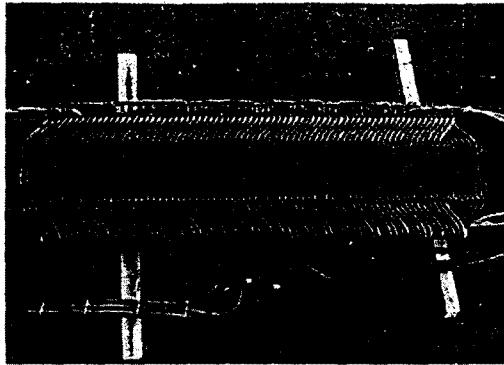


사진 3. 선형유도전동기

3. 시험조건

시험은 정지시험(sled를 주행 rail 상에 고정시킨 상태에서 시험수행) 즉 static test와, 주행시험(dynamic test)으로 나누어 수행하였으며, LIM의 공급 전류 100[A], 150[A], 205[A]에 대하여 계측 항목은 추력, 수직력, 속도, 시간, 주파수, 전류, 전압 등이다.

4. 시험결과

4.1 Load Cell의 교정

LIM의 시험에 들어가기 전에 시험장치에 설치되어 있는 모든 계측기류의 교정(calibration)이 반드시 필요하다.

먼저 힘을 계측하는 추력용과 수직력용의 load cell의 교정을 실시하였다. 추력에 대한 교정 결과를 그림 6-1에, 수직력에 대한 교정결과를 그림 6-2에 표시한다. 그림에서 보는 바와 같이 직선성이 매우 좋으며, 이때의 기울기는 추력 및 수직력에서 0.98정도로서, 1volt = 98Kgf이다.

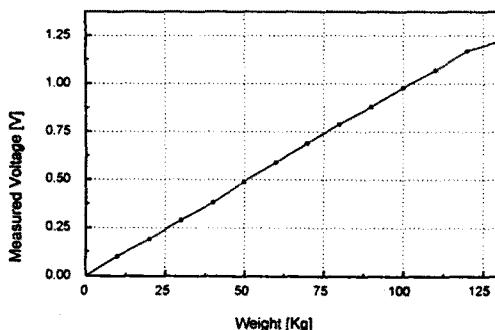


그림 6-1 추력 계측용 Load Cell 교정

수직력의 경우에는 LIM의 길이 방향 앞쪽으로 load cell 이 1개 뒤쪽에 2개가 설치되어 있어, 전방과 후방의 경우를 별개로 교정한 결과 그림 6-2에서 보는 바와 같이 전·후방 모두 직선성이 양호 한 결과를 얻었다.

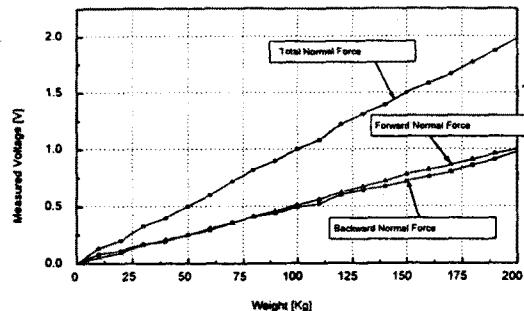


그림 6-2 수직력 계측용 Load Cell 교정

4.2 슬립주파수 변화에 따른 실측 추력과 계산치

($F=m \cdot a$)와의 비교

시험을 위해 승차하는 인원의 체중을 포함한 시험기 자체 하중을 2.29ton, 3.29ton, 449ton일 경우에 대하여, 전류가 205[A]일때에 각 슬립주파수별 추력과 가속도를 계측하였고, 각 슬립주파수 별 가속도에 각 하중(질량으로 환산)을 곱한 값($F=m \cdot a$)과 계측된 추력치와 비교한 결과를, 하중 2.29ton일 경우 그림 7-1에, 4.49ton일때를 그림 7-2에 표시한다. 3경우의 결과를 그림에서 보듯이 모든 경우에 가속도와 시험기의 하중을 정확히 계측하면 추력 계측을 별도로 할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.

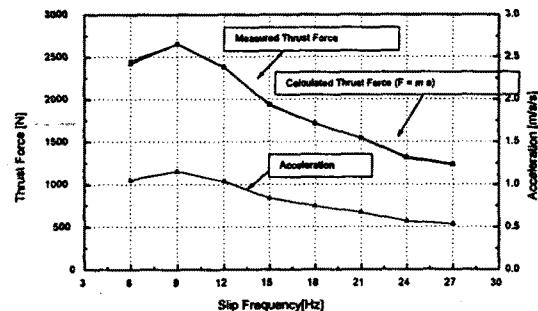


그림 7-1. 슬립주파수 변화에 따른 실측 추력과 $F=ma$ 값과의 비교

(sled weight = 2.29ton, current = 205A)

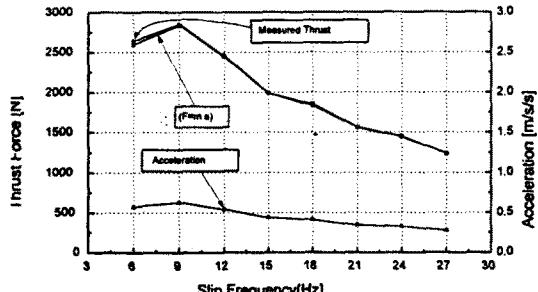


그림 7-2. 슬립주파수 변화에 따른 실측 추력과 $F=ma$ 값과의 비교

(sled weight = 4.49ton, current = 205A)

Sled를 주행하면서 추력을 계측한 결과 차량 진동(주행레일의 불균형 등의 원인에 의해 진동 발생)때문에 계측에 어려움이 많이 있었으나, 가속도 계측은 시험기 진동에 의한 영향을 받지 않으므로 보다 정밀한 계측이 가능하였다.

4.3 정지(Static) 및 주행시(Dynamic)의 슬립주파수 변화에 따른 추력 변화

시험기를 주행 레일 상에 고정시켜 LIM의 1차축이 정지된 상태에서 추력 특성을 시험하는 것을 static test, 시험기를 주행 레일 상에서 주행하면서 시험하는 것을 dynamic test이라 칭한다. 그림 8에 전류 205[A]일 경우 정지 및 동적인 추력 시험 결과를 표시 한다. 그림 5에서 정적인 상태에서의 추력이 동적인 경우에 비하여 크게 나타나는 것은, 정적인 경우에는 LIM의 normal force에 end effect가 크게 영향을 주지 않으므로 수직력이 동적인 경우에 비하여 상대적으로 적게 작용하게 되고, 수직력으로 작용된 힘 외에 나머지는 추력으로 발생되기 때문이다며, 동적인 경우에는 수직력이 정적인 경우에 비하여 크게 나타나기 때문이다(그림 12참조). 즉 수직력은 시험기의 하중을 증가 시켜 주는 것으로 작용하기 때문이다.

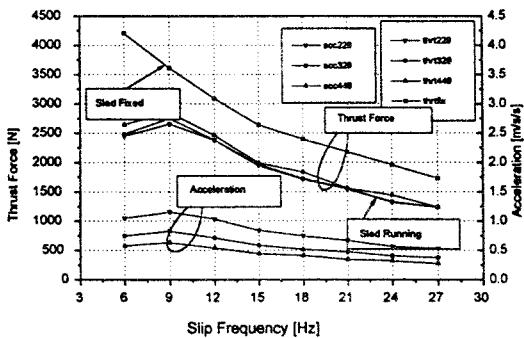


그림 8. 정지 및 주행시의 추력 특성(205A)

4.4 추력과 수직력의 실측치 비교

그림 9에 전류 205[A]일 경우의 슬립주파수 변화에 따른 추력과 수직력의 실측치 변화를 나타내고 있다. 그림에서 정지 시에 비하여 주행시의 추력 변화의 차가,

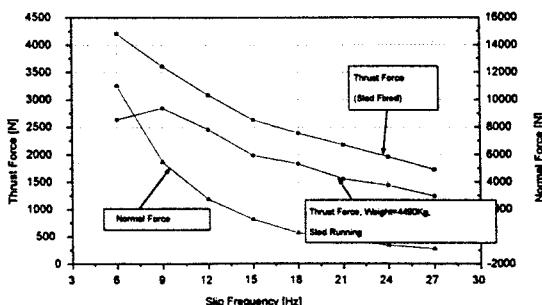


그림 9. 수직력이 추력에 미치는 영향

낮은 슬립 주파수 영역에서 크게 나타나는 것은 그림 5에서도 기술한 바와 같이 특히 낮은 슬립주파수 영역에서 수직력의 차가 정지시에 비하여 주행시에 크게 나타나 때문이다.

4.5 추력의 실측치와 해석치와의 비교

그림 10에 전류 205[A]일 경우의 슬립주파수 변화에 따른 추력의 실측치와 해석치의 비교를 보이고 있다.

그림에서 정적 및 동적인 경우 모두 실측치가 해석치에 비하여 추력이 작게 나타나고 있는 것은 LIM 1차축 coil의 권선수가 적게 권선 되어 있기 때문으로 판단되며, 특히 주행시에 추력이 작게 나타나는 것은 가속도의 값을 보아 알 수 있듯이, 정격 운전조건(표6 참조)인 슬립주파수 12 [Hz]에서 가속도가 0.8m/s²인 것에 비하여 실측 가속도는 0.5 m/s² 정도이기 때문에 풀이된다.

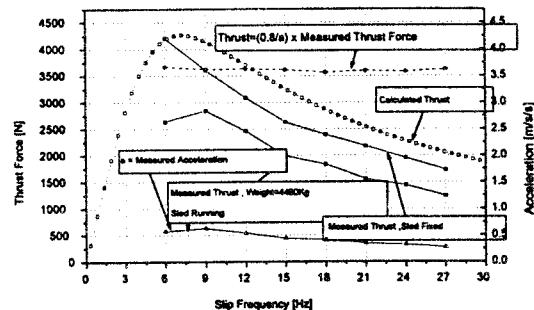


그림 10. 추력의 해석치와 실측치의 비교

이때의 시험기 하중 중량은 4.49ton(정격 하중)이다.

4.6 전류 변화에 따른 실측 추력의 변화와 해석치와의 비교

그림 11에 시험기 자중 2.29ton일 경우 전류를 100, 150, 205[A]로 변화 시켰을 때의 실측 추력변화를 나타내고 있다. 동일 슬립 주파수에서 전류치가 커짐에 따라 가속도가 증가하여 추력이 상승함을 알 수 있다.

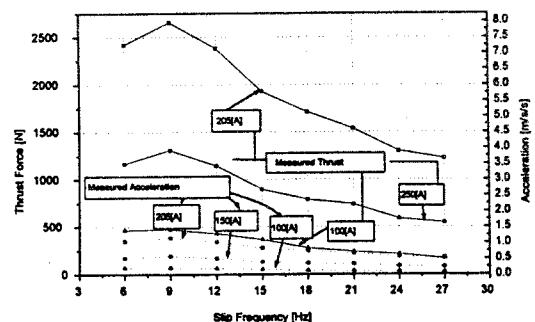


그림 11. 전류변화에 따른 실측추력의 비교
(sled weight = 2.29ton)

그림 12에 추력의 실측치와 해석치와의 비교를 나타내고 있다. 실측치와 해석치 크기의 차이를 보이는 것은,

해석치의 경우 가속도 값을 정격 설계치인 0.8m/s^2 을 적용하고 있으나, 실측치인 경우는 정격 설계치에 미달되고 있기 때문에 분석된다. 그러나 전반적인 경향은 잘 일치함을 알 수 있다.

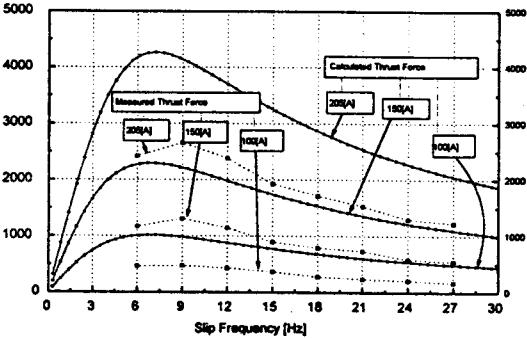


그림 12. 전류변화에 따른 추력의 실측치와 해석치의 비교(sled weight = 2.29ton)

4.7 전류변화에 따른 수직력의 실측치와 해석치의 비교

그림 13에 시험기 자중 하중이 2.29ton이고, 전류를 100[A], 150[A], 205[A]로 변화 시켰을 경우, 동적 인 상태에서의 수직력 변화를 슬립 주파수에 따라 비교한 것이다. 전반적으로 실측 및 해석치 양자가 좋은 대응을 보이고 있으며 특히 100[A]일 경우 양자가 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 150[A], 205[A]일 경우 낮은 슬립 주파수 영역에서 차이를 보이는 것은 지정된 기계적 공극 유지가 이루어지지 못한 원인과 reaction plate 재의 resistivity 차에 기인 된 것으로 판단된다.

실측치에서는 슬립 주파수 19[Hz]부근에서 수직력이 영이 되고 있으나, 해석치에서는 27[Hz]로 나타나고 있다. 설계치의 정격 운전 조건은 12 [Hz] 이고 이때의 수직력은 205 [A]에서 1,500[N]와 추력은 3,300[N]이 되어야 한다. 그러나 실측치는 2,000[N] 정도인데 반하여 해석 결과는 3,000[N]정도로 해석치가 높게 평가되고 있는 있으나 양자 모두 설계치에 못 미치고 있다.

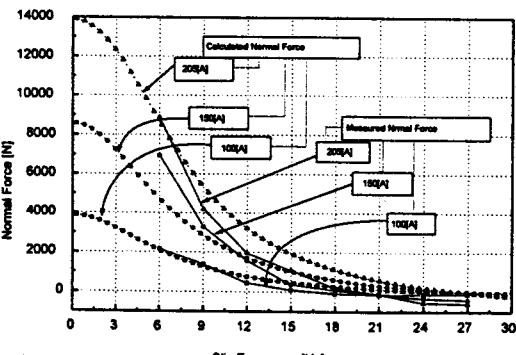


그림 13. 전류변화에 따른 수직력의 실측치와 계산치의 비교
(sled weight = 2.29ton)

본 LIM의 운전 조건을 수직력만으로 판단한다면, 슬립 주파수 20[Hz] 전후가 바람직하다. 그러나 추력은 상대적으로 그림 14에서 보듯이 정격 추력 3,300[N]에 못 미치므로 재설계가 필요 한 것으로 판단된다.

4.8 정적 및 동적 수직력의 비교

LIM의 단부효과(end effect)를 조사하기 위하여 LIM을 정지된 상태에서, 또 주행시에 수직력을 계측하여 이들을 비교하였다. 이때의 전류치는 205[A], 시험기 자중 중량은 4.49ton이다.

그림14에서 슬립주파수가 18[Hz] 이상 높은 주파수 영역에서는 정적 및 동적 수직력이 같은 값을 나타내지만, 18[Hz] 미만인 낮은 주파수에서는 정지 상태 즉 정적인 수직력이 동적 일때의 수직력보다 작은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 다음 절에서 상세하게 설명을 하겠지만, 정지시에는 단부 효과가 수직력에 큰 영향을 주지 않지만 주행시에는 추진에 의한 단부 효과가 수직력에 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있으며, 따라서 추력 또한 작게 계측되었음을 알 수 있다.

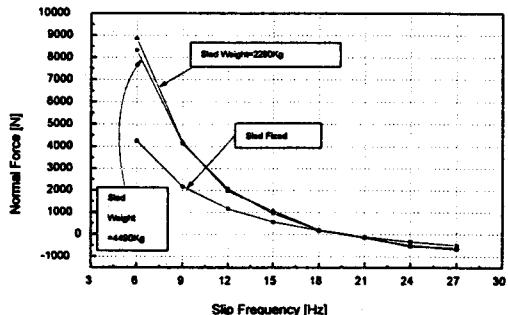


그림 14. 정지 및 주행시의 수직력 비교(205A)

4.9 정지 및 주행시의 LIM 전방 후방의 수직력 비교

수직력이 LIM의 성능에 큰 영향을 준다는 것은 S.YAMAMURA⁵⁾ 등에 의해 보고 된 바가 있으나, 실험적으로 입증한 보고는 그다지 많지 않다. 본 논문에서는 특히 수직력이 실질적으로 LIM 의 성능 어느 정도의

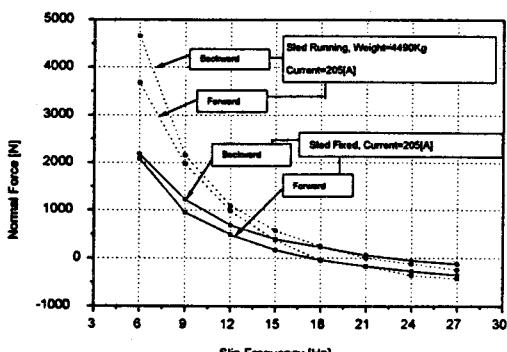


그림 15. 정지 및 주행시의 LIM의 전방,후방의 수직력 비교

영향을 미치는지를 정적 및 동적인 상태에서 시험을 통하여 입증하였다.

그림 15에서 점선으로 표시한 값이 동적인 상태에서 LIM 전방 후방(주행방향을 기준으로 앞쪽과 뒤쪽)의 수직력을 표시하며, 실선으로 표시한 값이 정지 상태에서의 수직력이다.

LIM이 정지일 경우, 이론적 계산에서는 전·후방의 수직력 차가 없으나, 그럼에서의 실측치는 약간의 차를 보이고 있다. 이것은 이론과 실제의 차라고 생각되며, 실제로는 추진 방향(전방)의 수직력이 후방의 수직력보다 작게 작용함을 알 수 있으며, 그 외에 기계적인 공극의 미소차에 기인된다고 판단된다. 그러나 슬립주파수 변화에 따라 전·후방의 수직력 차는 일정한 값을 유지

주행에서는 낮은 슬립주파수 영역에서 전방에 비하여 후방의 수직력이 크게 작용하고 있으므로, 정지 시에는 슬립주파수 변화에 따른 전·후방의 수직력 변화는 없는 것으로 판단된다.

주행에서는 낮은 슬립주파수 영역에서 전방 비하여 후방의 수직력이 크게 작용 하지만, 슬립주파수가 높아 짐(12[Hz] 이상)에 따라 그의 차는 점차 일정해 짐을 보이고 있다. 따라서 정격 운전 조건을 15[Hz] 이상으로 정하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

본 논문에서는 도시형자기부상열차의 제1호 차량용으로 사용되는 LIM의 성능을 개선하기 위하여 정적 및 동적인 상태에서 여러 종류의 시험을 하여 고찰하였다. 특히 LIM 1대가 담당해야 할 하중(차량 1대의 하중은 승객 포함 27ton이며, 차량 1대에는 6Set의 LIM이 설치되므로, LIM 1대의 정격 하중은 4.5ton임)을 고려 시험기 자체 자중을 정격 하중과 동일하게 하여 성능을 시험·평가하였다.

LIM의 성능해석은 캐나다 Queens University의 Dawson 교수 팀이 수고 하셨고, 시험 결과에 대한 평가에도 많은 조언을 받았다.

평가된 내용을 정리하면,

① 실측된 추력이 정격 추력 3,300[N]에 미달되므로 정격 추력을 얻기 위하여는 철심 코아의 재설계가 요구된다. 정격 가속도에 실측 가속도가 미달되는 coil의 권선수가 적은 것으로 판단되어 coil의 권선수를 증가 시켜야 할 것이며, coil의 권선수를 증가시키기 위하여는 철심 코아의 slot 깊이, 폭, 치(齒)폭 등의 크기가 변해야 되므로 철심 코아의 재설계가 불가피하다.

② 수직력이 정격 운전 슬립주파수 12[Hz]에서 설계치에 비해 실측치가 상대적으로 높게 계측되었다. 따라서 수직력의 증가로 추력의 감소를 유발하는 것으로 생각되어 수직력 감소를 위한 설계가 필요하다.

③ 설계 운전 조건의 슬립 주파수 12[Hz]는 수직력을 고려할 때 어려울 것으로 판단되어 최소한 15[Hz] 이상이 되어야 하는 것으로 생각된다.

④ LIM의 성능에는 회전형 전동기와는 달리 단부효과가 많은 영향을 미치므로 이를 고려하여 최소화 할 수 있는 설계가 필요하다.

⑤ 주행시(동적시험)의 추력 계측은 load cell에 의한 방법보다는 시간, 속도, 시험기 자중 등을 정확히 측정하는 것이 보다 신뢰성 있는 추력 계측이 가능하다는 것을 알게 되었다.

도시형자기부상열차의 제2호 차량에 사용될 LIM은 이상에서 기술한 내용을 충분히 고려하여 설계가 이루어져야 하겠다.

본 시험에 활용된 시험기는 간이형으로 제작된 것으로, 시험수행중 시험기의 결함 및 미비점이 많이 발견되었다. 예를 들어 2차 현가장치가 없으므로 시험기 자체의 진동 문제, 주행레일의 불균일성, 3-component force gauge의 교정 등이 있었다. 따라서 보다 신뢰성 있는 시험을 위해서 새롭게 제작되는 시험장치는 본 시험을 통하여 얻어진 경험을 설계에 충분히 반영하여 새롭게 제작하고 있으며, 주행레일의 교정도 실시할 예정에 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.NONAKA et al., "Test Facility and Test Results of Single Sides LIM for Urban Transit", 10th Maglev, 1989.
- [2] R.A. LANGMAN, "Desing and Initial Testing of a Linear Induction Motor", Electrical Energy Conference, Austrian Electrical Research, Canberra 10-12 May.
- [3] D.EBIHARA et al., "Experimental Equipment for Measuring Dynamic Charactoristics of Linear Induction Motor", Japan Industr Applications Society Conference (JIASC)
- [4] M.IWAMOTO et al., "Experimental and Theoretical Study of High Speed Single - Sided Linear Induction Motor", I.E.E PROC., Vol.128, Pt. B, No. 6, pp 306~312, November 1981.
- [5] S.YAMAMURA et al., "Influece of End -effect on Charakteristice of Linear Induction Motor", J.I.E.E.J., Vol. 91, No.2, pp 145~154, (2/'71).