

도시형 자기부상열차 추진용 선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(N)

김봉섭, 정현갑, 조흥재
한국기계연구원

An Experimental Study on Dynamic Test of LIM for Urban Transit Maglev Vehicle (N)

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

Abstract: This paper deals with propulsion system for the UTM-01(Urban Transit Maglev). We experiment about the LIM and the inverter at running test maglev vehicle. It is measured voltage, current, power factor for inverter output. And we discussed about efficiency of the LIM about maglev system.

Keyword: LIM, Inverter, propulsion system, Effect of LIM, Urban Transit Maglev

1 서 론

도시형 자기부상열차는 차세대 교통수단으로서 기존의 바퀴식(wheel on rail)방식과는 전혀 다른 개념이다. 자기부상열차의 부상원리는 전자석의 흡인력 또는 반발력을 응용하여 차체를 레일과의 일정한 공극을 유지하도록 부상제어를 하게된다. 주행방식은 선로와의 마찰이 없어야 하므로 LIM 또는 선형유도전동기(LSM)를 이용한다.

본 연구에서 응용되는 도시형 자기부상열차는 상전도흡인 방식의 부상원리와 단1차 장2차(short primary and long secondary)방식의 LIM을 이용한 주행방식을 사용한다. 상기의 부상 및 주행방식은 구조적으로나 기술적으로 접근이 용이하고 제작비가 크게 들지 않는 장점이 있다. 또한, 바퀴식에 비해 비접촉 주행에 의한 마모가 없어 유지보수가 적게 들어 경제적 장점이 있다.

필자들은 3차레에 걸쳐 실차용 LIM에 대한 정특성, 동특성 등을 시험하여 발표한 적이 있다. 실차 추진용 LIM의 실험을 시작으로 정특성 시험기를 이용하여 구속시험을 통하여 추력, 수직력 등을 조사하였으며, 슬립주파수 변화에 따른 추력 및 수직력의 변화를 계속, 실차 운전에 필요한 조건을 제시한 바 있다. 또한, Sled type의 동특성시험기를 이용하여 정특성시험과 동특성시험 결과를 비교한 바 있다.^{1)~5)}

본 실험연구에서는 실차를 이용한 주행시험에서 슬립주파수가 부상제에 미치는 영향을 관찰하였고, 인버터의 출력단의 전압, 전류, 역률을 측정하여 추진용 LIM의 효율을 계속 하였다. 슬립주파수의 범위는 8Hz~18Hz의 2Hz 단계별로 변화를 주었으며, 주행 조건은 1.2.3.4notch(주행 속도 조절용 레버)로서, 인버터의 출력전류를 각 notch별로 100A, 200A, 320A, 410A로 구동하도록 되어있다.

주행시험결과 추진용 LIM의 추진력은 당초 설계와 비교하여 약 81.3% 정도이었으며, 이는 부상제에 미치는 LIM의 수직력의 영향을 적게 할 경우이다. 수직력의 경우 슬립 주파수가 16Hz에서 적게 나타남을 알 수 있었다. 직선선로의 길이가 약 350m로 열차의 최고 주행속도는 50km/h까

지는 가능하나 제동거리 확보 등의 안전 유지관계로 40km/h까지 시험을 하였다. 자기부상열차의 속도가 40km/h까지 도달할 때 LIM의 효율은 47% 정도로 설계치보다 약 10% 미치지 못하였는데, 이는 인버터의 출력 전압이 설계치보다 7% 정도 작게 계측이되었고, 정확한 차량 총 중량의 계측 오차 및 속도 계측의 오차가 있는 것으로 판단된다. 인버터의 출력 계측에는 Voltech사의 power analyzer(PM3300)을 사용하였다.

2 추진용 선형유도전동기와 추진용 인버터

도시형 자기부상열차(사진1)는 승객 만차시 1차량의 무게가 약 25ton 정도이다. 1차량은 3대의 대차(bogie)로 구성되어 있고, 각 대차는 2대의 LIM이 추진을 담당하도록 되어있다. 차량 설계 가속도가 0.8(m/s²)일 때 1대의 대차(bogie: 2LIM)가 담당해야 할 추진력은 25,000(kg)×0.8(m/s²)/3≈6,600(N) 이다. 따라서, LIM 1대가 발휘해야 할 추진력은 약 3,300(N)이다.



사진1. 도시형 자기부상열차 UTM-01 (Urban Transit Maglev-01)

그림 1은 도시형 자기부상열차의 가속패턴을 나타내고 있다. Breakpoint speed인 50km/h까지는 thrust 일정, 속도 50~110km/h까지는 power 일정, 이후에는 speed 일정 주행패턴을 갖는다. 이러한 가속 패턴은 최소한의 인버터 용량을 확보하기 위한 것이다.^{5)~7)} 따라서, 인버터는 LIM측에 그림 1에서 보듯이 속도 50km/h에 도달하기 위하여 20,000(N)×13.89(m/s)≈278(kw)의 전력을 공급하여야 한다. 여기에 추진용 LIM의 효율 60%, 역률 60% 정도를 고려하면 약 780KVA의 인버터 용량이 계산된다.

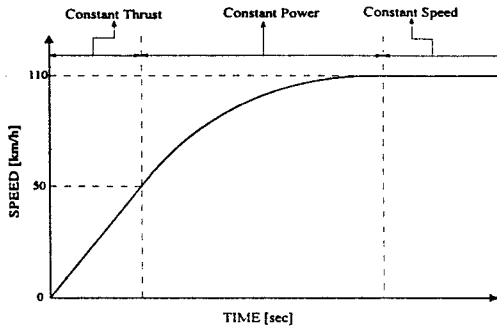


그림1. 도시형 자기부상열차의 주행 패턴

추진용 인버터는 현대중공업에서 설계, 제작되었으며, VVVF 방식으로 전압형 GTO 소자를 사용하고 있고, 용량은 800KVA 급으로 주요 내용은 표1에 제시하고 있다. 급번에 제작 완료된 도시형자기부상열차 2호차량에는 IGBT 소자를 사용하여 인버터의 무게를 30% 정도 줄일 수 있었고, 인버터의 소음을 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

표1. 추진용 VVVF Inverter의 기본사항

항목	내용	비고	
기본사항	형태	전압형 GTO VVVF	4500V/2000A
	용량	800KVA	
	제동	회생제동	
	출력회로	선형유도전동기	3S2P 결선
전기적 사항	입력전압	정격 1500VDC	
	출력전압	AC 3상 1100V	AC373V/LIM
	주파수	최대 120Hz	
	출력전류	410A	205A/LIM
제어사항	제어방식	일정 슬립주파수 제어	
	PWM방식	비동기, 동기PWM 혼합제어	비동기:공간전압벡터

3 시험 방법 및 시험 결과

도시형 자기부상열차는 총 중량이 약 23ton으로 실차 주행시험은 상당히 주의를 기울여야 한다. 더욱이 시험선로의 총 길이는 1.1km 이지만 직선 구간의 길이는 약 350m 이다. 직선구간에서 시험가능 최대 속도는 약 50km/h 이지만 제동 및 안전거리 확보 등으로 시험속도는 40km/h 로 하였다.

본 실험연구에서는 인버터의 슬립주파수를 8Hz~18Hz 사이의 2Hz 별로 변화를 주며 LIM의 추진시 수직력이 부상계에 미치는 영향을 관찰하였다. 정지부상 상태의 24대의 전자석에 흐르는 전류와 부상공극의 평균치로 부상력을 계산하여 정상 상태의 기준으로 보고, 슬립주파수를 8Hz부터 2Hz 간격으로 18Hz까지 변화 시킬 때 부상 전류의 변화로 LIM의 수직력 영향을 관찰하였다.

자기부상열차의 주행 속도조절은 4가지(1.2.3.4notch: 주행 속도 조절용 레버)로서, 인버터의 출력전류를 각 notch별로 100A, 200A, 320A, 410A로 LIM을 구동하도록 되어있다. 이때 각 notch 별 가속도는 0.05, 0.13, 0.38, 0.65[m/s²]이며, 설계치인 0.8[m/s²]와는 차이를 보였다. 주요 원인은 대차 side frame에 부착된 LIM과 주행 레일의 reaction plate와의 공극이 설계치 13mm 보다 크다는 추측을 할 수 있다. 이는 착지시 LIM과 reaction plate와의 기계적 공극이 정격 5mm를 초과하는 부분이 있었기 때문이다. 그리고, 정특성시험 및 sled type의 동특성 시험기를 통하여 예측하였듯이 LIM의 추력 특성이 설계보다

낮았음을 의미한다. 추진용 LIM의 경우 슬립주파수가 10Hz일 때 LIM당 추력이 3,300N이 발생하도록 설계되었으며, 수직력은 차체의 동특성을 안정성있게 하기 위하여 LIM당 약 1,000N의 흡인력이 발생토록 설계하였다. 따라서, 슬립주파수가 정격 10~12Hz보다 작은 영역에서의 수직력은 커지므로 주행특성을 나쁘지게 하는 요소가 된다.⁷⁾

주행시험결과 추진용 LIM의 추력은 당초 설계와 비교하여 약 81.3% 정도되었으며, 이는 LIM의 수직력이 부상계에 미치는 영향을 비교적 적게 할 경우이다. 이때의 슬립주파수는 12Hz이었으며, 8Hz의 경우에도 가속도가 0.69 [m/s²]으로 정격 가속도 0.8[m/s²]에 비해 약 13.7%의 감소된 결과를 보였다.

자기부상열차의 속도가 40km/h까지 도달할 때 LIM의 효율은 47% 정도로 설계치보다 약 4% 미치지 못하였는데, 이는 인버터의 출력 전압이 설계치 보다 7% 정도 작게 계측이 되었고, 정확한 차량 총 중량의 계측 오차 및 속도 계측의 오차가 있는 것으로 판단된다. 인버터의 출력 계측에는 Voltech사의 power analyzer(PM3300)를 사용하였으며, 사진2에 계측기를, 그림2에 계측 구성도를 보여주고 있다.

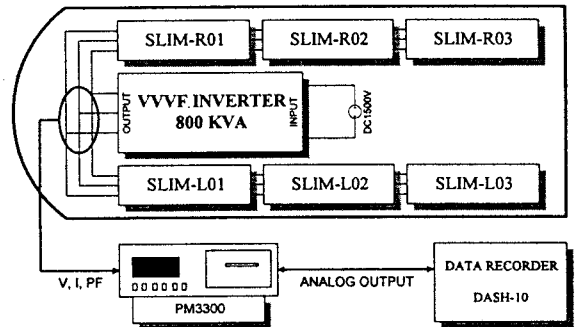


그림2. UTM-01의 INVERTER 출력계측 구성도

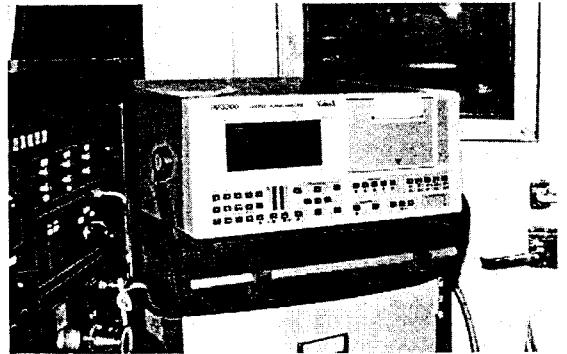


사진2. 시험에 사용된 Power Analyzer PM3300

그림2의 계측 구성도는 VVVF 인버터의 출력단에 power analyzer PM3300으로 u,v의 출력 전류를 계측하고, uw, vw의 상전압을 계측함과 동시에 역률을 계측한다. PM3300으로 계측되어진 data는 analog로 변환시켜 data recorder인 DASH-10에 수록된다.

이와 같이 계측된 출력전압, 출력전류 및 역률은 인버터가 LIM 구동에 필요한 입력 power이다. 그리고, LIM은 입력된 power로 추진력을 발생하여 차체를 주행시킨다. 따라서, LIM이 발생한 추력은 차체를 운동시키는 출력 power가 된다. 이에 대한 입출력 비가 LIM의 효율이 된다.

계측된 차량 속도 data에서 차량 가속도가 산출되고 LIM이 차체를 운동시킨 출력 power는 시험차량의 총 중량이 23.175ton으로 차량 가속도와 연산된다. 입력 power는 계측된 전압, 전류, 역률로서 연산되어 LIM의 효율을 구하게 된다.

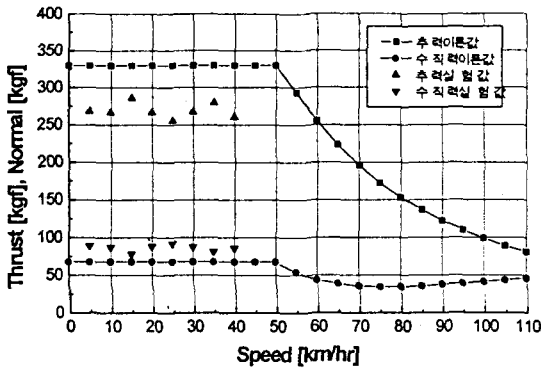


그림3. 추력 및 수직력 변화의 설계치와 실험치의 비교

그림3은 LIM이 슬립주파수 12Hz에서 주행시 추력 및 수직력의 계산치와 실험치의 비교를 나타내고 있다. 추력의 경우 15%정도 낮아졌고, 수직력의 경우 10%정도 높게 측정되었다. 따라서, 슬립주파수 12Hz에서 수직력이 크게 작용되어 추력을 저하시키는 원인이 된다고 판단된다. 따라서, LIM을 설계할 때 최소의 수직력을 가지면서 높은 추력을 발생시킬 수 있도록 LIM의 설계 parameter를 변경할 필요가 있다고 사료된다.

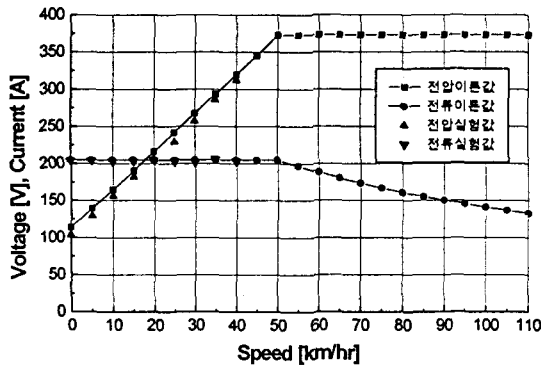


그림4. 입력 전류 및 전압의 이론값과 실험값

그림4는 슬립주파수 12Hz에서 인버터에서 출력되는 전류와 전압의 실험치를 계산치와 비교하고 있다. 전류의 경우 정격치와 같으나 전압의 경우 5% 정도 낮게 측정되었다. 인버터의 고조파 성분을 고려하지 않고 기본파 성분만 측정하여 계속오차가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 인버터의 고조파 성분을 최소화할 수 있는 전력변환기술이 요구된다.

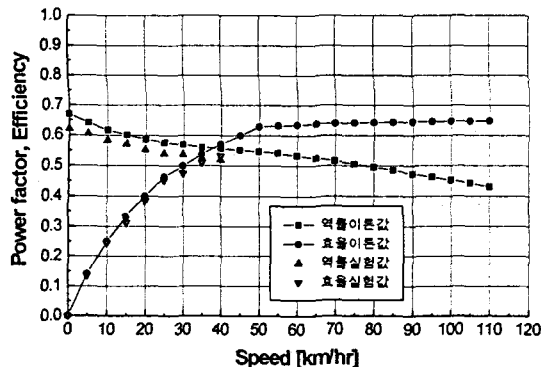


그림5. 역률 및 효율의 이론값과 실험값의 비교

인버터의 출력 전압, 전류 및 역률에 차량 가속도와 차량 중량을 연관한 결과로 LIM의 효율을 그림5에 나타내었다. 측정된 역률의 경우 1% 미만의 차이를 보이면서 계속되었으나, 효율의 경우 속도 증가에 따라 점차 저하되는 경향임을 알 수 있다. 그림3에서의 경우처럼 수직력에 의한 차량의 주행특성을 저하시켜 결국에는 차량 가속도가 정격치에 도달하지 못하고 있다. 이의 해결책으로 LIM의 효율 향상 설계 및 인버터의 고조파 성분 감소와 같은 전력변환기술 향상이 지극히 요구된다.

4. 결 론

도시형 자기부상열차는 바퀴식 열차에 비해 소음, 진동, 마찰이 적고, 비접촉 주행에 의한 차량의 유지보수비가 적다는 장점이 있는 반면 LIM을 이용한 추진 시스템은 일반 회전형 유도기에 비해 기계적 공극이 크고, 단부효과에 의한 효율이 저하되는 단점이 있다.

자기부상열차의 총 부하전력의 60~70%를 추진시스템인 LIM이 소비를 하고 있다. 특히 가속중인 때가 가장 높지만 일정 속도 주행이나 타행 운전시에는 전력 소비가 상대적으로 적다. 추진시스템에서 보다 높은 효율의 LIM이 개발되기 위하여 설계 기술 및 이론 해석연구 못지 않게 정확한 시험을 통하여 시험 data를 구축하는 것도 매우 중요하다.

본 논문에서는 도시형 자기부상열차(UTM-01)의 1호 차량에 대한 인버터의 출력단을 계측하고 LIM의 효율을 정량적으로 계측하였다.

시험 결과 LIM의 추력은 설계치에 비해 실험치가 약 13.5~18% 정도로 낮게 측정되었고, 수직력은 10% 정도 높게 측정되었다. 인버터의 출력전압은 약 4% 정도 낮게 측정되었으며, 전류는 정격 전류 205A에 근접했다. LIM과 rail과의 공극변화에도 기인되었지만 인버터의 고조파성분을 고려하지 않고 기본파 성분만 측정하여 계속 오차가 있는 것으로 판단되며, 수직력에 의한 차량의 주행특성을 저하시켜 결국에는 차량 가속도가 정격치에 도달하지 못하고 있다. 이의 해결책으로 LIM의 효율 향상 설계 및 인버터의 고조파 성분 감소와 같은 전력변환기술 향상이 지극히 요구된다.

자기부상열차와 관련해서 많은 연구 인력들이 제각기 관련 분야인 자기부상열차 부상제어시스템기술, 추진시스템기술, 전력변환시스템기술, 차량 경량화제작기술을 개발하고 있는 한 자기부상열차의 실용화는 가시화될 것이다.

참고문헌

- [1] 김봉섭, 정현갑, 박영태, 이현구, 장석명, "선형유도전동기의 정특성에 대한 실험적 연구(I)", 1996년도 하계학술대회, 대한전기학회, 1996.7. pp.18-21
- [2] 장석명, 이현구, 정상섭, 박영태, 김봉섭, 정현갑, "인버터로 구동되는 대용량 LIM의 정특성 시험과 동특성 해석", 1996년도 하계학술대회, 대한전기학회, 1996.7. pp.213-215
- [3] 장석명, 정상섭, 이현구, 김봉섭, 정현갑, "리니어모터 동특성 계측 및 인버터 성능분석", 1996년도 추계학술대회, 대한전기학회, 1996.11. pp.19-21
- [4] 정현갑, 김봉섭, "도시형 자기부상열차 개발의 요소성능시험 및 평가", 기계와 재료, 한국기계연구원, 제9권 제2호, 통권32호, 1997.7. pp.46-69
- [5] 김봉섭, 조홍제, 정현갑, "선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(II)", 1997년도 하계학술대회, 대한전기학회, 1997.7. pp.57-63
- [6] 김봉섭, 정현갑, 조홍제, "Performance Test of the Linear Induction Motor for Urban Transit Maglev Vehicle (UTM-01) in Korea", 15th International Conference on Magnet Technology, Beijing, China, 1997.10.20-24
- [7] 김인근, 김봉섭, 정현갑, 김국진, Pattison, L., Dawson, G.E., Parker, J.H., "Propulsion System Design for Korean Maglev Vehicle", 2Nd International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA'98), 1998.4.8~4.10, Tokyo, Japan