



신교통 대용량 유도형 리니어모터의 특성시험

김 봉 섭*
(*한국기계연구원 자기부상열차그룹)

1. 서 론

신교통 시스템의 일종인 자기부상열차의 등장은 기존의 교통 시스템에 비해 저소음, 저진동 및 환경 친화적이라는 장점으로 최근에 활성화되고 있다. 전력 전자계통의 신기술이 도입되어 전력 변환계통의 고효율 소형화로 인한 차량 시스템이 경량화되고 있으며, 무인 자동운전에 의한 효율적 운영 체계를 이룩하고 있어 차세대 교통 수단으로 주목받고 있다.

신교통 시스템에 대한 최근의 추세는 열차의 자동운전에 의한 headway를 줄이고 소형 경량화하여 열차의 편성수를 늘임으로서 승객이 바로 승차할 수 있도록 하고 있다. 이러한 신교통 시스템은 기존의 대중교통수단의 대체 및 보완수단으로서 역할을 충분히 할것으로 기대된다.

자기부상열차, LIM Car 등은 이와 같은 목적을 달성하기 적합한 시스템으로서 자기부상열차는 부상 전자석을 이용하여 차체를 부상시켜 SLIM(Single-sided Linear Induction Motor)으로 추진함으로써 저 진동 저 소음의 장점이 있다. LIM Car는 SLIM의 전기적 에너지를 추진에너지로 직접 변환되는 장점을 이용함으로써 별도의 기계적 변환장치가 불필요하고 유지보수가 적게 드는 장점이 있다.

필자들은 도시형 자기부상열차 및 경전철의 추진용 SLIM에 대한 특성시험¹⁾²⁾³⁾⁴⁾을 수년간 여러 각도에서 수행하였으며, 현재는 시험 열차에서 실험을 함으로서 SLIM 특성시험⁵⁾⁶⁾에 대하여 시험 장치 및 시험 방법에 대한 개선 연구를 하고 있다. 이러한 개선연구는 추진용 SLIM의 효율을 개선하고 자기부상열차의 주행에 적합한 운전 조건을 제시하는데 있다.

본 논문에서는 지금까지 수행한 시험을 통하여 SLIM의 특성시험기 및 시험방법 및 시험 평가⁷⁾를 기술하고자 한다.

2. SLIM 특성 시험기

대용량 SLIM의 특성 파악을 위한 시험 방법은 크게 두가지로 분류할 수 있다. SLIM을 구축하여 시험하는 정특성 시험과 SLIM을 가동시키면서 시험하는 동특성 시험이 있다.

그리고, 동특성 시험은 회전형 시험기⁸⁾를 이용하는 방법과 대차형식을 이용하는 방법이 있다. 회전형 시험기는 SLIM의 형상을 2차측 형상 즉, 원호형으로 구성하여야 하는 단점이 있으며, 실차용 SLIM의 경우 제작 후 특성시험은 곤란하다. 반면에 대차형식의 특성 시험기는 실차용 SLIM을 간단한 bracket을 사용하여 시험 가능하다.

2.1 정특성 시험기

정특성 시험기는 시험용 SLIM을 구축하고 기계적 힘인 추력과 수직력을 측정하고, 전기량인 전류, 전압 등을 측정하도록 구성되어있다. 그림 1은 정특성 시험기의 구성도를, 사진 1은 실차용 규모의 SLIM을, 사진2는 시험기 외형을 보여주고 있다.

정특성 시험기는 구조가 간단하고 시험 방법이 단순한 반면에 구동 인버터의 사양이 다양하게 요구된다. 시험기의 main frame은 SLIM을 구축해야 하므로 견고해야 하며, 1차측과 2차측 간의 공극길이 조절이 용이하여야 한다. SLIM을 구축하되 추력 및 수직력 측정 시 마찰과 같은 영향을 받지 않도록 수평을 유지하도록 한다. 수직력의 경우 SLIM의 평형을 고려하여 3점지지방식으로 하였다. 추력 및 수직력 힘 측정용 센서는 1,000kgf의 인장압축 겸용 loadcell을 사용하였다.

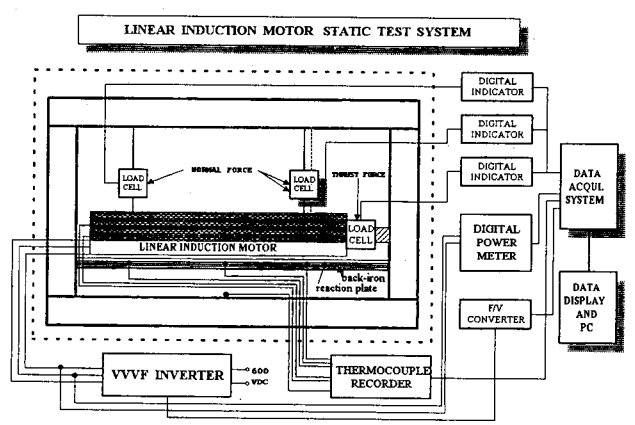


그림 1. 정특성 시험기 구성도

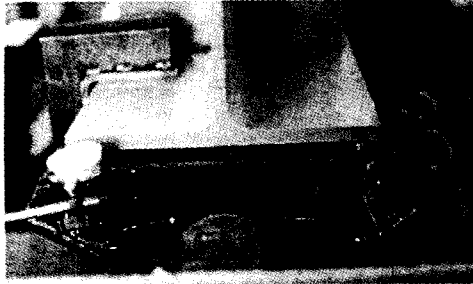


사진 1. 정특성 시험기의 시험용 SLIM

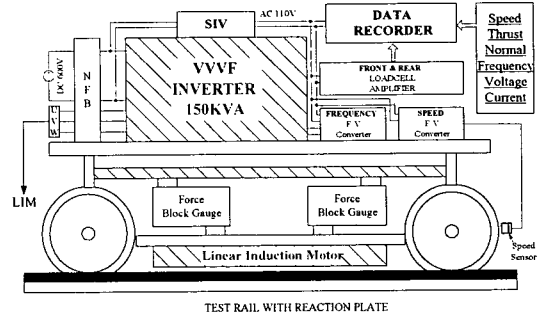


그림 2. 동특성 시험기 구성도

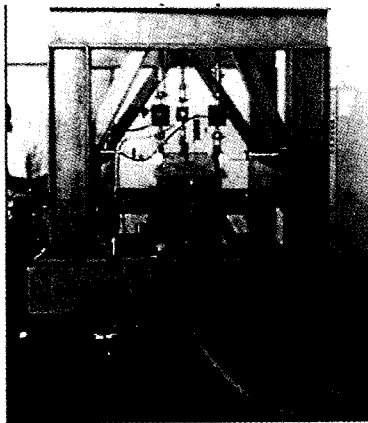


사진 2. 정특성 시험기 외형도

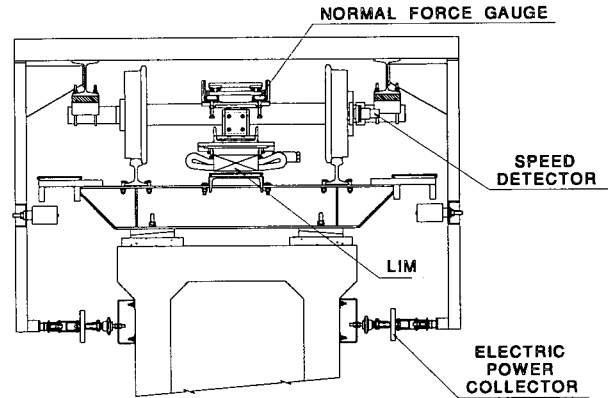


그림 3. 동특성 시험기의 정면도

SLIM과 2차축의 온도를 측정하기 위한 K-type의 온도센서를 구성하였으며, 시험의 정확도를 높이기 위해 적정 온도에서 반복 시험할 수 있도록 하였다. 과열에 의한 2차축의 변형을 방지하기 위하여 수냉장치를 장착하였다.

2.2 동특성 시험기

2.2.1 대차형 동특성 시험기

동특성 시험기는 SLIM을 구동시키면서 슬립주파수 별 또는 속도에 따른 특성을 측정한다. 정특성 시험기에 비해 구조가 복잡하고 시험 방법에 어려운 점이 많이 발생한다.

정특성 시험 시는 속도를 고려하지 않고 구동 인버터의 V/f 및 출력 주파수를 조절하여 시험하지만, 동특성 시험은 SLIM의 슬립주파수 일정 제어를 고려하여 시험기의 속도를 인버터에 feedback하여야 한다. 시험기의 주행저항은 무시할 정도는 아니지만 여기서는 고려하지 않았다. 시험기의 총 중량과 정확한 속도계측 및 전기량을 측정할 수 있어야 SLIM의 추력 및 수직력에 대한 제반 특성을 정량적으로 얻어낼 수 있다.

그림 2에서 동특성시험기의 구성도를 보여주고 있으며, 그림 3은 시험기의 정면도를 나타내고 있다. 시험선로의 girder beam으로부터 인버터의 입력 전압을 집전기에 의해 공급받는다. 그림 4는 동특성시험기의 핵심요소로서 3방향 힘 측정기다. 3개의 1,000kgf loadcell이 xyz 3방향으로 설치되어 있어, SLIM의 추진력, 수직력, 횡력을 출력하도록 되어있다.

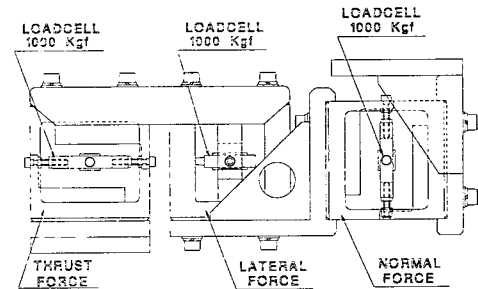


그림 4. 추력, 수직력 측정용 Force Block Gauge

사진 3은 시험기 외형과 사진 4에는 시험용 SLIM을 보여주고 있다. 특성 시험기의 총 중량은 4.7ton으로 하였으며, 슬립주파수 일정제어를 위한 속도는 encoder와 근접스위치를 병행하였다. 근접스위치는 바퀴부분에 치차를 달아 속도를 정확하게 측정할 수 있게 하였다. SLIM은 하부 strong bag에 취부되어 있으며, 상부 strong bag에 취부되어 있는 force block gauge에 의해 추진력, 수직력을 측정하도록 되어있다.

사진 3과 4는 동특성 시험기의 외형과 시험용 SLIM이 장착된 모습이다. 사진 4는 SLIM의 1차축과 지상 2차축을 보여주고 있다.

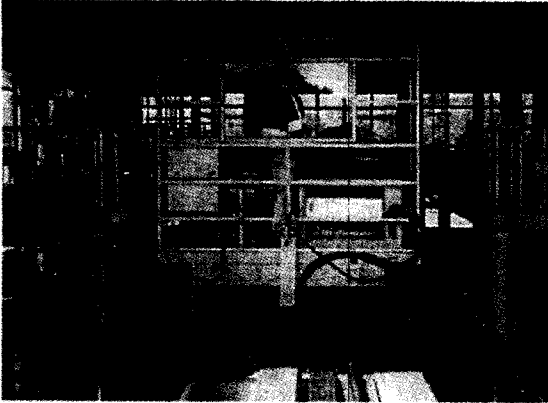


사진 3. SLIM용 동특성 시험기

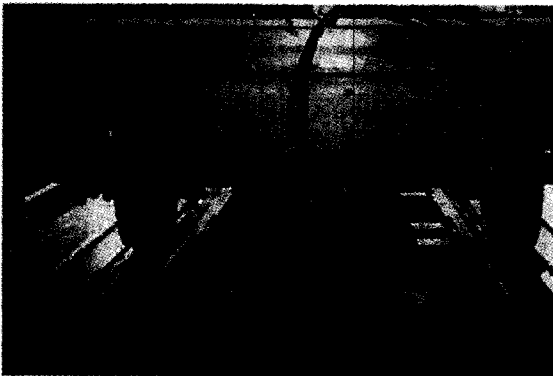


사진 4. 동특성 시험기에 장착된 시험용 SLIM

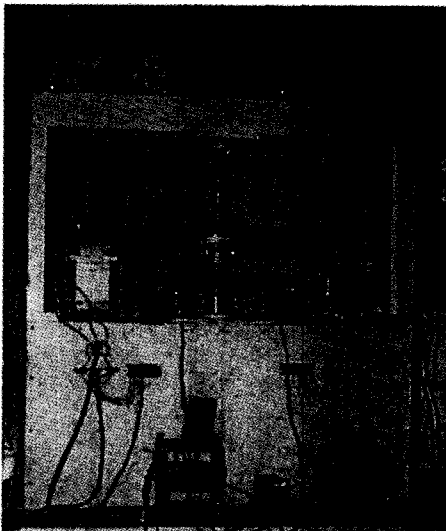


사진 5. 소형 LIM을 위한 회전형 동특성 시험기

2.2.2 회전형 동특성 시험기

아래의 사진 5는 소형 LIM에 대한 특성 시험을 위한 시험기다. 본 시험기는 1차측 LIM을 고정시키고 2차측을 회전시키면서 시험기에 고정된 LIM과 시험기사이에 force block

gauge를 설치, 추력을 측정한다. 회전형 시험기는 LIM의 동특성 이외에 회전부에 각종 장치를 부착하여 속도 위치 검지 장치 또는 속도제어 시험, 자동운전을 위한 시뮬레이터로 사용한다. 2대의 LIM으로 구동되며, 각각의 LIM에 대한 구동용 인버터를 구성하여 시험 가속도를 높일 수 있게 하였다. 회전속도를 측정하기 위하여 main shaft 상부에 encoder를 설치하였으며, 안전을 고려하여 비상 disk brake를 설치하였다.

3. 시험 방법

3.1 정특성 시험 방법

SLIM에 대한 정특성 시험은 설계, 제작된 SLIM을 실차 적용에 앞서 설계 자료와의 비교 및 제반 특성을 파악하기 위하여 비교적 짧은 시간에 선형유도전동기를 구속한 상태에서 시험하는 것이다.

SLIM의 용도에 따라 시험 방법 및 내용이 다를 수 있으나 본 고에서는 도시형 자기부상열차용으로 시험 기준을 설정하였다.

SLIM을 구속한 상태에서 인버터의 전류를 정격 전류까지 증가하면서 추력을 측정한다. SLIM을 구속할 경우 2차측간의 정격 공극은 13mm로 하였으며, 2차측의 급격한 온도변화를 측정할 수 있도록 K-type의 온도센서를 삽입하였다. 또한 공극 변화에 따른 추력 및 수직력의 변화를 측정하여 자기부상열차가 주행시 공극변화에 따라 SLIM의 추력이 주행특성에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

SLIM이 구속된 상태이므로 슬립은 1이므로 인버터의 공급주파수가 슬립주파수가 되므로 슬립주파수의 변화에 따른 SLIM의 추력 및 수직력의 변화를 파악할 수 있다. 1,2차측간의 공극, 슬립주파수, 시험 온도, 인버터의 출력 전류 및 전압 등은 자기부상열차의 운전 조건을 확인하는 가장 확실한 방법이 되므로 반복적인 시험 수행이 요구된다.

시험에 앞서 가장 중요한 것은 전류, 전압 센서, 계측기의 검정 및 loadcell의 calibration이다. 전류 센서는 LEM사의 CT를 사용하였으며, 10A/V로 조정하였고, 전압은 LEM사의 PT를 사용하여 10V/V로 조정하여 계측하였다. 인버터의 공급주파수는 F/V 컨버터를 사용하여 데이터를 기록하였다.

3.2 동특성 시험방법

SLIM에 대한 동특성 시험 방법은 SLIM의 용도에 따라 차이가 있다. 자기부상열차의 경우 1,2차측 간의 공극의 변화가 발생하므로 공극의 변화를 중요시하여야 한다. 또한 자기부상열차는 일정 공극을 유지하며 주행하므로 SLIM의 수직력이 크게 작용하면 부상계통에 외란으로 작용되어 시스템을 불안정하게 한다. 따라서 SLIM의 수직력이 부상계에 미치는 영향을 비교적 적게되는 슬립주파수를 결정해야 한다. SLIM으로 구동하여 추진하는 LIM Car의 경우는 공극 변동이 작으므로 문제 시 되지 않는다.

정특성 시험에서는 슬립이 1인 구속된 상태에서 SLIM의

추력 및 수직력을 측정하지만 동특성 시험에서는 인버터의 슬립주파수를 가변하면서 수차례 반복시험을 수행한다. 자기 부상열차의 경우 SLIM의 수직력 특성은 그림 5에서 보는 바와 같이 슬립주파수에 따라 크게 달라진다. 따라서, 실제의 동특성 시험에서는 슬립주파수의 범위를 2~30Hz로 설정하여 시험을 하였으며, 각 point test를 수차례 반복하여 가장 근접한 값을 취득한다.

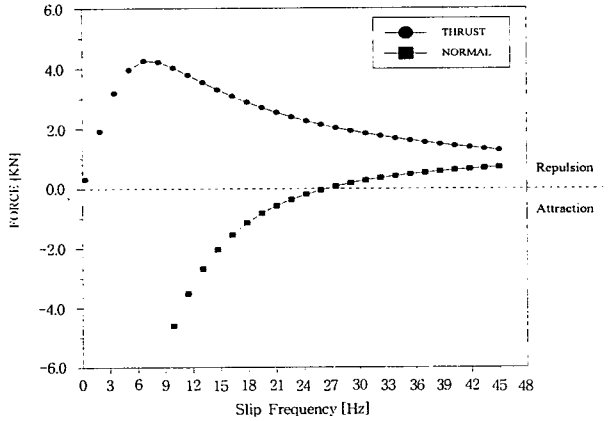


그림 5. 슬립주파수에 따른 LIM의 추력과 수직력 특성

4. 시험 평가

도시형 자기부상열차 추진용 SLIM은 슬립주파수에 따라 수직력 특성이 크게 작용하므로, 일정한 수직력을 갖기 위한 주행패턴은 그림 6과 같다. 주행패턴은 break point speed 인 속도 55Km/h까지는 슬립주파수 일정 제어 mode, 속도 110Km/h까지는 power 일정 제어 mode로, 속도 110Km/h에 도달하면 속도 일정 제어 mode로 전환된다.

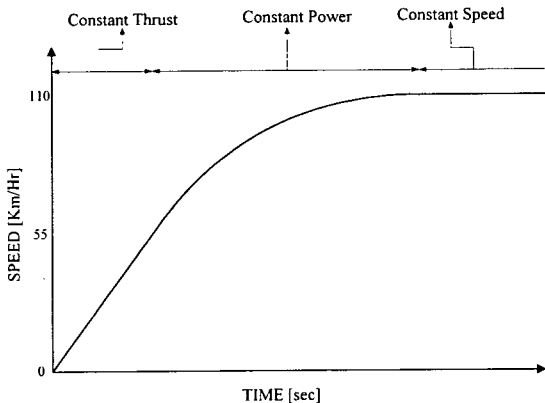


그림 6. 도시형 자기부상열차의 주행 Pattern

자기부상열차의 SLIM 구동용 VVVF 인버터의 용량은 정격 가속도 $0.8m/s^2$ 을 갖기 위해 break point speed까지 필요하다. 그림 7부터 그림 10까지는 도시형 자기부상열차의 추진용 SLIM에 대한 제반 특성으로 시험 기준 및 시험 평가를 위해 이론값이다.

그림 7은 차량 속도 변화에 따른 SLIM의 추력 및 수직력 특성을 나타내고 있다. 정격 가속도 $0.8m/s^2$ 을 내기 위하여 슬립주파수를 10Hz에서 운전이 되며, 이 때의 추력은 약 3,300N을, 수직력의 경우 700N 정도가 된다. 수직력이 최소로 되는 슬립주파수를 운전조건으로 취득하지 않는 것은 부상용 전자석 4대가 SLIM 1대의 수직력을 감당하므로 부상전류의 증가는 크지 않고, 오히려 전체 차량의 stability를 좋게 해준다.

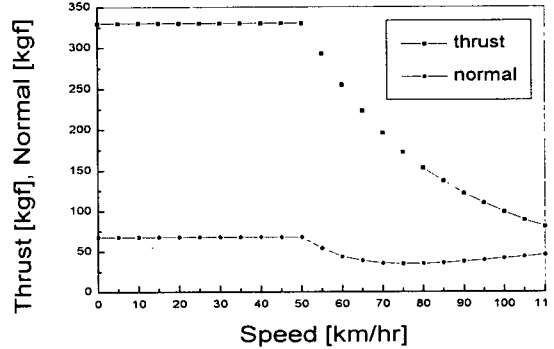


그림 7. SLIM의 추력, 수직력 특성

그림 8은 속도에 따른 SLIM의 전압, 전류 특성이다. 인버터의 용량은 800KVA이며, 1차량에 총 6대의 SLIM을 구동한다. 정격 가속도는 $0.8m/s^2$ 이며, 속도 50km/h까지 유지한다.

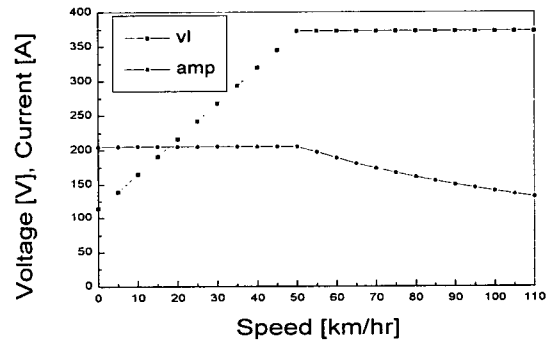


그림 8. SLIM의 운전 전압, 전류

그림 9는 슬립주파수 10Hz에서 운전할 때의 SLIM에 공급되는 주파수를 보여주고 있다. 그림 7에서의 추력 및 수직력 특성은 슬립주파수 10Hz일 때를 기준으로 한 것이다.

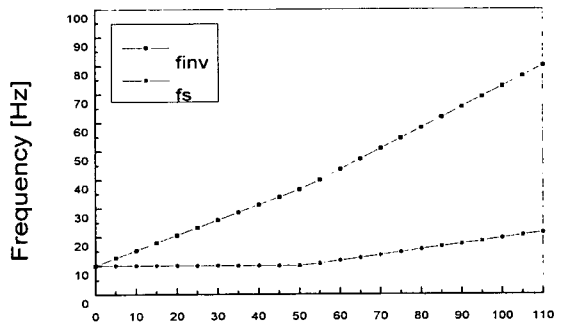


그림 9. SLIM의 운전 주파수, 슬립주파수

그림 10은 SLIM의 효율 및 역률을 나타낸 것으로 인버터의 요구조건이 된다. SLIM은 회전형 유도기에 비해 1,2차축 간의 공극이 매우 크며, 단부효과에 의해 자속의 누설이 상당히 크다. 따라서, SLIM을 설계할 때는 SLIM 자체만이 아닌 2차축의 재질 및 두께 등 고려해야 할 사항이 많다. 특히 인버터의 고조파 성분은 SLIM 운전 시 기동 특성을 나쁘게 하고 1,2차축 간의 소음 및 진동의 원인을 제공한다. 표 1에서 보는 바와 같이 실차용 SLIM의 주요 파라미터를 보여주고 있다. 본 고에서는 실차용 SLIM의 설계 목표를 알고, 이에 대한 시험기의 선정 및 시험항목, 시험방법 등을 강구함으로써 자기부상열차 운행 조건을 시험적으로 확인 및 설정을 제시하는데 있다.

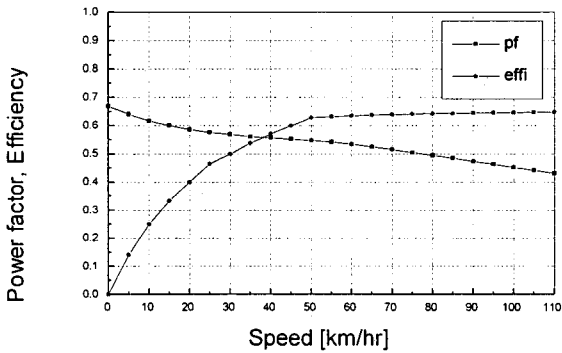


그림 10. SLIM의 효율, 역률 특성

표 1. UTM-01 추진용 LIM의 주요 내용

항목	내용	치원
1 차 축	Max. Line Voltage	373 [V]
	Max. Current	205 [A]
	Max. Operating Speed	110 [Km/h]
	Thrust Force	3.3 [KN]
	Number of Phase	3 [φ]
	length of Primary	2300 [mm]
	Number of Poles	8 [P]
	Pole Pitch	261 [mm]
	Core Width of Primary	220 [mm]
Height of Primary	60 [mm]	
2 차 축	Reaction Plate:	
	Resistivity	$3.9 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$
	Thickness	6 [mm]
	Width	250 [mm]
	Back Iron:	
Thickness	16 [mm]	
Resistivity	$10 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$	

5. 결 론

본 고는 도시형 자기부상열차와 관련하여 추진용 SLIM에 대한 정특성 시험 및 동특성 시험에 대해서 필자가 경험하고 취득한 사항에 대하여 기술하였다.

서론에서 밝혔듯이 SLIM의 특성 시험은 SLIM의 용도에 따라 시험방법 및 기준이 달라지므로 자기부상열차용으로 기준하였다. 자기부상열차의 추진용 SLIM은 공극길이가 크고 항상 공극이 변화하여 효율이 낮고 인버터의 고조파성분에 의한 소음이 발생한다. 이러한 사항에 대한 시험항목 및

시험방법을 세워 자료를 취득하고 SLIM의 설계자나 인버터 개발자로 하여금 개선점을 인지시키는데 노력을 기울였다. 아직은 회전형 유도기에 대한 기준을 대체로 적용하지만 SLIM에 대한 새로이 필요한 기준 등을 제시하여 LIM에 대한 제 특성을 세밀히 파악하는데 주력하였다.

끝으로 SLIM의 특성연구에 필요한 시험기의 개발 및 시험방법의 개선, 시험 평가 기술 등이 이루어짐으로서 LIM, 인버터의 기술 개발은 전망이 더욱 밝다고 판단된다. 아직은 개선해야 할 사항이 많고 미진한 부분을 보완하여야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] 장석명, 정현갑, 김봉섭 외 3, "V/f 일정제어로 제어되는 LIM의 동특성", 대한전기학회 1995년도 하계학술대회, 1995.7.21., pp.50-52
- [2] 김봉섭, 정현갑, 박영태, 이현구, 장석명, "선형유도전동기의 정특성에 대한 실험적 연구(I)", 1996년도 하계학술대회, 대한전기학회, 1996.7.23., pp.18-21
- [3] 장석명, 정상섭, 이현구, 김봉섭, 정현갑, "리니어모터 동특성 계측 및 인버터 성능분석", 1996년도 추계학술대회, 대한전기학회, 1996.11.16., pp.19-21
- [4] 김봉섭, 조홍제, 정현갑, "선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(II)", 1997년도 하계학술대회, 대한전기학회, 1997.7.22., pp.57-63
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 정현갑, 김봉섭, "도시형 자기부상열차 개발의 요소성능 시험 및 평가", 기계와 재료, 한국기계연구원, 제9권 제2호, 통권32호, 1997.7, pp.46-69
- [8] 김인근, 정현갑, 김봉섭, 김양모, 장석명 외 3, "유도형 리니어모터의 동특성 계측", 대한전기학회 1994년도 하계학술대회, 1994.7.22., pp.223-225

저 자 소 개



김봉섭 (金鳳涉)

1956년 10월 22일생. 1981년 동국대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 졸업 (석사). 1991-현재 한국기계연구원 신교통 기술연구부 자기부상열차개발그룹 선임연구원; 종합주행 성능 시험 및 요소 성능 개선 시험 책임자.