

도시형 자기부상열차의 성능시험 및 평가

Performance Test and Evaluation of the Urban Transit Maglev

김국진* 박계서* 김남해** 조흥제***
Kim, Kuk-Jin Park, Gye-Seo Kim, Nam-Hae Cho, Hung-Je

ABSTRACT

The EMS/LIM driven system, called UTM-01 has been under development for LRT type urban transit applications. At the present time, the 1st vehicle of UTM-01(a two vehicle system) is undergoing various tests on the 1.1km test track at the KIMM premises in Taejon. This paper describes the design, characteristics and test results of the Levitation/Guidance, the Propulsion/Braking System and the Leakage Flux for 1st vehicle of UTM-01.

1. 서론

급격한 경제성장과 산업발전으로 도시인구가 과밀화 되고, 승용차의 과도한 보급에 따라 도심의 교통문제가 심각한 과제로 대두되고 있다. 또한 각종 교통수단에 의해 발생하는 소음, 매연 등은 환경공해를 야기하고 삶의 질을 저하시킨다.

이러한 문제를 해결하기 위해 우리 도시의 특성에 맞는 대체 교통수단의 필요가 대두되고 있으며, 이 일환으로 건설비, 운영비가 저렴하고 소음, 진동이 작은 미래 지향적 교통수단인 자기부상열차가 조속히 실용화 되어야 함을 인식하게 되었다.

현대정공(주)의 대전 EXPO'93 자기부상열차 전시·운영은 국내 자기부상열차 실용화의 가능성을 입증하게 되었으며, 이 기술을 기반으로 1994.5부터 과학기술부 특정연구과제로 한국기계연구원 이 주관, 현대정공(주)가 참여기관, 한국전기연구소/현대중공업(주)가 협동기관으로 구성되어 도시형 자기부상열차(UTM-01)를 개발중에 있다.

본 논문의 2장에서는 도시형 자기부상열차의 설계조건을 기술하고, 3장에서는 주요 시스템의 설계결과, 4장에서는 시험결과 및 이에 대한 평가를 기술하고 마지막 5장에서는 자기부상열차의 향후 실용화에 대비한 개선책을 제시하고자 한다.

2. 도시형 자기부상열차 설계조건

도시형 자기부상열차는 도심내 또는 대도시와 인근도시를 연결하는 교통수단으로 중·저속형 상전도 흡인식 부상(EMS), 선형 유도전동기(LIM) 구동으로, 급경사 및 작은 곡률에도 우수한 주행특성을 갖는 시스템으로 설계한다.

2.1 선로(궤도) 조건

도시형 자기부상열차의 시험선로는 그림2.1과 같은 형태로 건설 되었다.

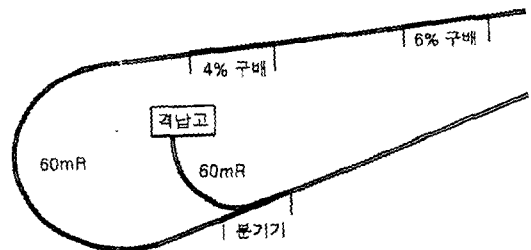


그림2.1 도시형 자기부상열차 시험선로

* 현대정공(주) 기술연구소 선임/수석연구원

** 현대중공업(주) 연구소 수석연구원

*** 한국기계연구원 선임연구원

그리고 본 선로의 주요 사양은 다음과 같다.

- 총 선로길이 : 1.1km
- 주행시험 거리 : 약 0.9km
- 최소 곡률반경 : 60mR
- 최대 구배 : 4, 6%
- 궤도높이 : 3 ~ 7m
- 궤간 : 2m

2.2 차량 설계조건

차량의 부상 및 추진의 구조는 그림2.2와 같으며, 차량의 설계조건은 다음과 같다.

- 부상 방식 : 상전도 흡인식(EMS)
- 추진 방식 : 선형 유도전동기(SLIM)
- 차량편성 : 2량1편성
- 최대 승차인원 : 120명/량
- 대차수량 : 3대/량
- 설계 최대 속도 : 110km/h

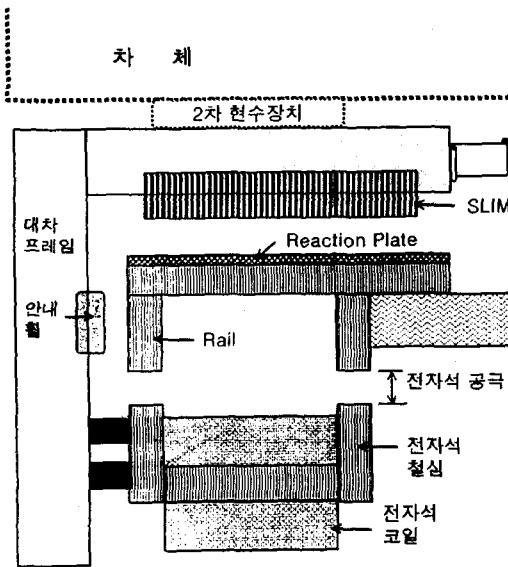


그림2.2 대차(Bogie) 구조

3. 설계 결과

3.1 차량 일반제원

2장의 설계조건에 따라 차량 주요 시스템의 사양을 선정하기 위해 먼저 열차 모의 주행시험을 작성하고, 이 모의 주행시험의 결과에 따라 차량의 가·감속도 등 차량의 제원출

하였으며, 그 결과는 표3.1과 같다.

표3.1 차량 일반제원

순번	항 목	제 원
1	최대 가속도	0.8 ㄱ/ㄱ
2	최대 감속도	0.8 ㄱ/ㄱ
3	운행 최대 속도	70 km/h
4	차량 치수	L13, W3, H4 m
5	최대 중량	25 ton
6	자중	18 ton
7	최대 승객 중량	7 ton
8	최대 요구전인력	20 kN
9	대차 수량	3대
10	제동 방식	회생/공기제동
11	공급 전원	1,500 VDC

3.2 부상/안내시스템

3.2.1 구성

부상/안내시스템은 차량의 대차당 구성도는 그림3.1과 같다.

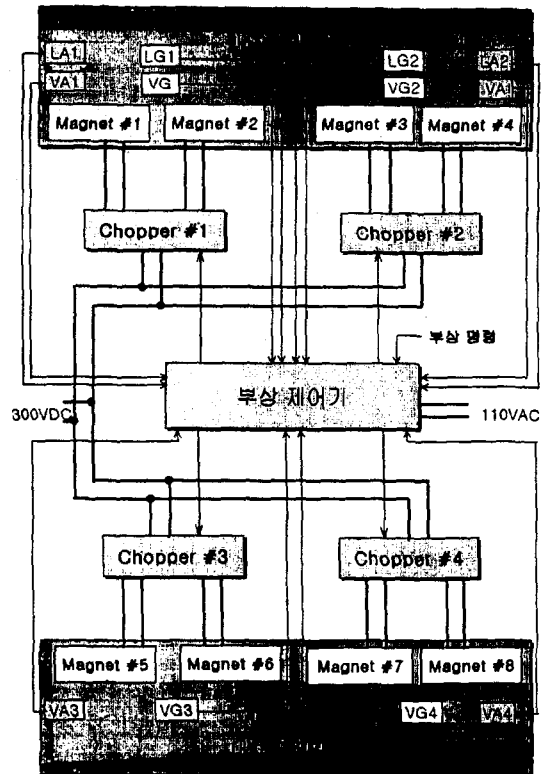


그림3.1 부상/안내시스템 구성도

3.2.2 부상력 특성

차량은 착지시 대차의 상부 프레임에 취부되어 있는 착지휠에 의해 지지되며, 부상시에는 전자석에 의해 지지된다. 전자석은 열차를 안정적으로 부상시키기 위한 충분한 특성을 가져야 한다. 표3.1의 제원을 만족시키기 위한 전자석의 부상력 해석특성은 그림3.2와 같다.

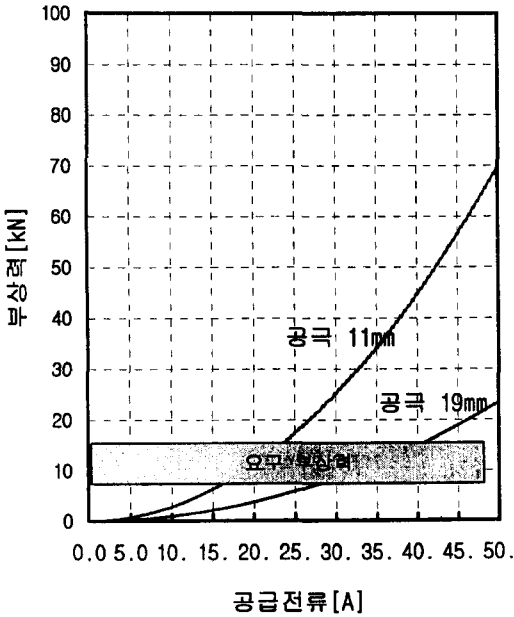


그림3.2 전류 대 부상력 특성

3.2.3 부상시스템의 설계결과

설계조건 및 특성해석 결과에 따라 부상시스템의 사양은 표3.2와 같다.

표3.2 부상시스템 사양

- 전자석

순번	항 목	사 양
1	착지시 Gap	19 mm
2	부상시 Gap	11 mm
3	횡방향 Gap	15 mm
4	최대 요구 부상력	12 kN
5	Pole 길이	680 mm
6	Pole 폭	32 mm
7	Yoke 폭	168 mm
8	Stagger 량	2.5 mm
9	초기 부상시 전류	36 A
10	정상 부상시 전류	21 A
11	절연등급	H종

- Chopper

1	용량	1.2 kW
2	과부하	300% 10초
3	입력전압	300 VDC
4	제어방식	PWM
5	스위칭 소자	IGBT

- 제어기

1	제어방식	4 Edge
2	CPU	TMS320C31
3	입력전압	110VAC
4	제어 주파수	4 kHz

3.3 추진시스템

3.3.1 구성

추진시스템은 차량당 그림3.3과 같이 구성된다.

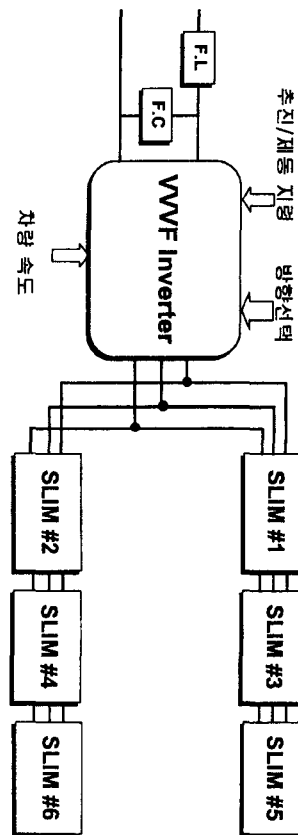


그림3.3 추진시스템 구성도

3.3.2 추진력 및 수직력 특성

1) 추진력 특성

차량이 정상적으로 부상된 상태에서 추진(주행)을 시작하며, SLIM당 속도 대 추진력 특성은 그림3.4와 같다.

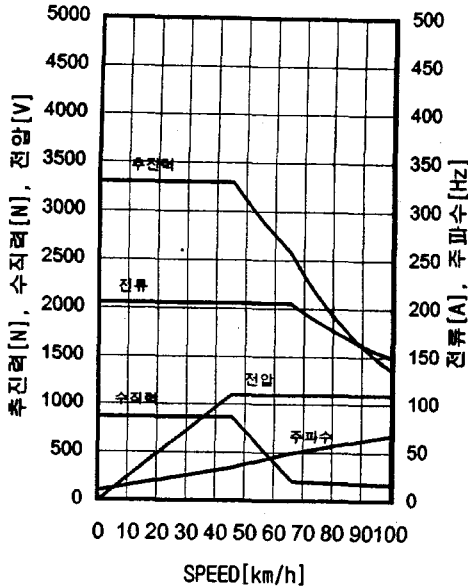


그림3.4 속도 대 추진력 특성

2) 수직력 특성

SLIM의 코일은 추진력 뿐만아니라 수직력도 발생한다. 이 수직력은 부상시스템에 외란으로 작용하며, 크기와 방향은 그림3.5와 같이 슬립 주파수에 의존한다.

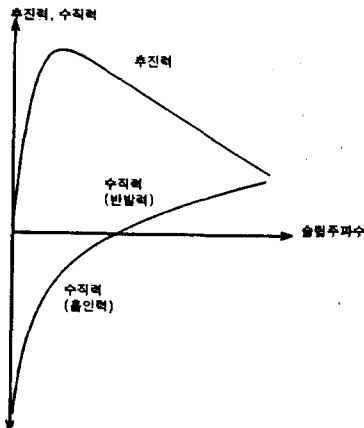


그림3.5 슬립주파수와 수직력의 관계

3.3.3 추진시스템 사양

상기의 조건 및 특성해석 결과에 따라 추진시스템의 사양은 표3.3과 같다.

표3.3 추진시스템 사양

- SLIM

순번	항 목	사 양
1	최대 추진력	3.3 kN
2	상수	3상
3	1차축 길이	2300 mm
4	1차축 폭	220 mm
5	극수	8극
6	Pole Pitch	261 mm
7	슬롯/극/상	3
8	공극	12 mm
9	2차 도체판 두께	6 mm
10	Slip 주파수	10 Hz
11	최대 전류	205 A

- VVVF Inverter

1	용량	800 kVA
2	입력전압	1,500 VDC
3	출력전압	0 ~ 1150 VAC
4	SLIM 결선	3S2P
5	출력주파수	5 ~ 80 Hz
4	출력전류	0 ~ 440 A
5	스위칭 소자	GTO Thyristor
6	스위칭 주파수	400 Hz
7	CPU	TMS320C31

4. 시험 결과 및 평가

그림4.1은 도시형 자기부상열차 1호 차량의 시험 관경을 보여준다.

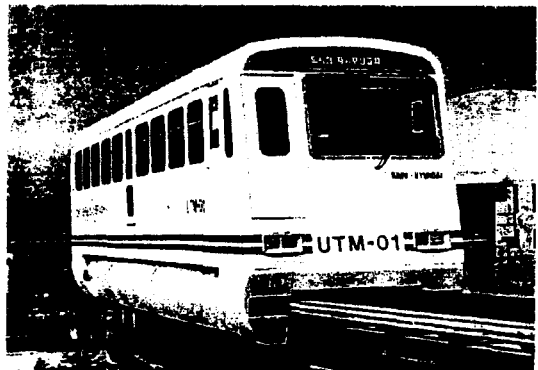


그림4.1 도시형 자기부상열차

4.1 부상/안내 성능시험

차량의 부상특성은 자기부상열차의 성능을 결정하는 중요한 요소이다.

1) 정적 상태에서의 부상 특성

그림 4.2는 정지된 Test 지그에서 전자석의 부상력을 측정(공극 11mm)한 결과를 나타내고 있다. 이 결과에서 12kN의 부상력을 얻기 위해서는 22.5A가 필요하며, 이 값은 이론치(21A) 보다 조금 크게 나타났다.

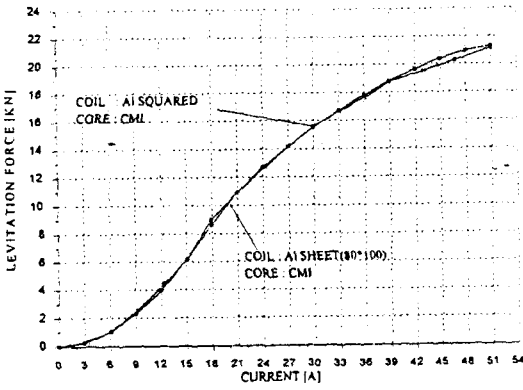


그림 4.2 전류 대 부상력

그림 4.3은 차량의 1대차에 대하여 부상/착지시 각 코너별 전자석의 전류(25A/div.) 변화를 보여준다.

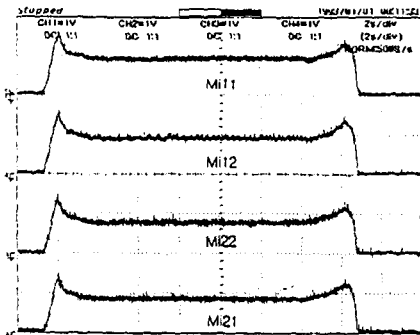


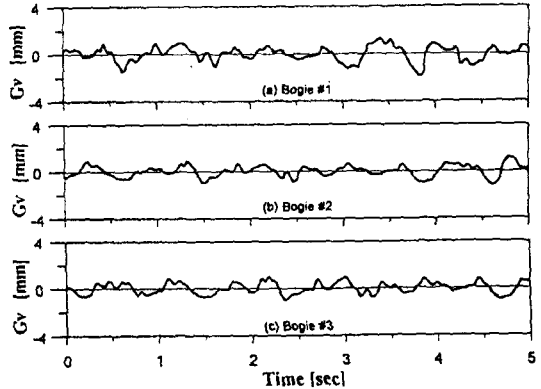
그림 4.3 대차 부상/착지시 전자석 전류 변화

2) 동적 상태에서의 부상 특성

동적 상태에서 부상시험은 다음과 같은 항목에 주안을 두었다.

- 직선구간에서의 주행시 수직방향 Gap 변화
- 레일 수직단차에서의 주행시 Gap 변화

- 구배에서의 주행시 수직방향 Gap 변화
- 최소 곡률반경에서의 수직 및 횡방향 Gap 변화
- 비상제동시 수직 및 횡방향 Gap 변화



(a) $\Delta Gv_{pk} = 1.6$ [mm], $\Delta Gv_{RMS} = 0.50$ [mm]

(b) $\Delta Gv_{pk} = 1.2$ [mm], $\Delta Gv_{RMS} = 0.39$ [mm]

(c) $\Delta Gv_{pk} = 1.2$ [mm], $\Delta Gv_{RMS} = 0.40$ [mm]

그림 4.4 직선구간, 20km/h시 수직 Gap 변화

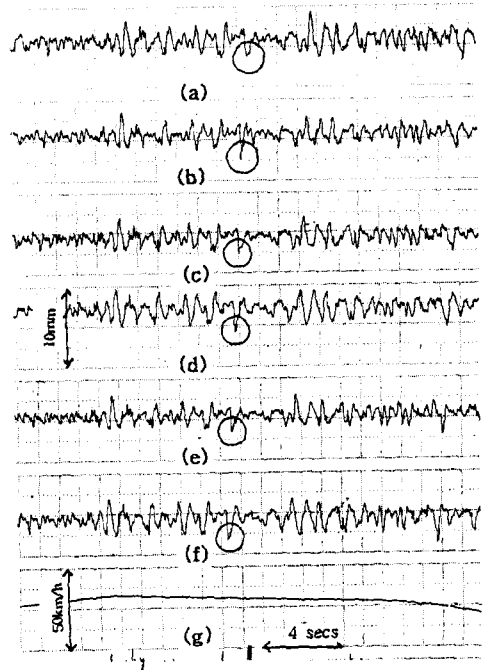
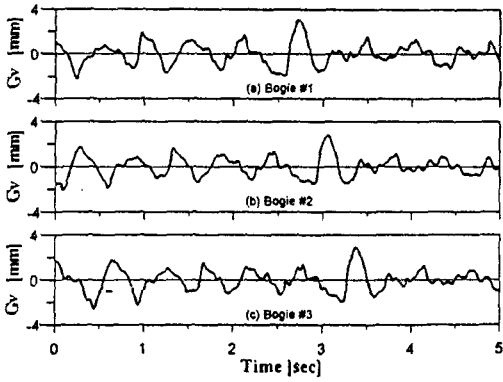


그림 4.5 레일 수직단차(2mm) 통과시 수직 Gap 변화



- (a) $\Delta Gv_{pk} = 2.6$ [mm], $\Delta Gv_{RMS} = 0.75$ [mm]
- (b) $\Delta Gv_{pk} = 2.4$ [mm], $\Delta Gv_{RMS} = 0.70$ [mm]
- (c) $\Delta Gv_{pk} = 1.7$ [mm], $\Delta Gv_{RMS} = 0.74$ [mm]

그림4.6 6% 구배, 35km/h시 수직 Gap 변화

그림4.4 ~ 4.6에서

- 저속 주행시 수직 Gap 변화는 1.6mm 이내
- 수직단차 통과시 수직 Gap 변화는 일반 레일 Joint부와 크게 차이가 없음
- 6% 구배 주행시에도 수직 Gap 변화는 3.2mm 이내로 측정되어 매우 양호한 특성임을 보여주고 있다

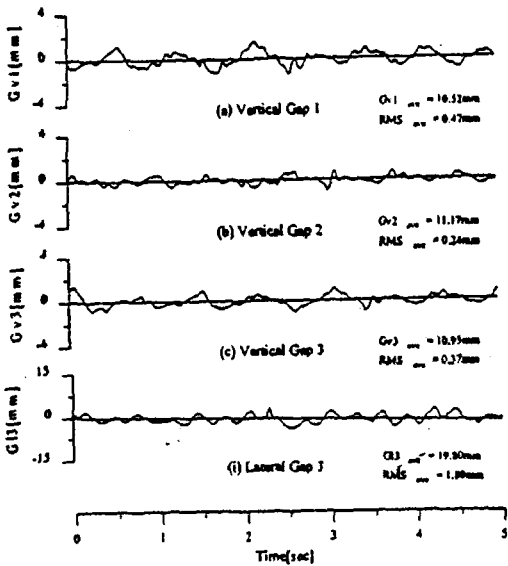


그림4.7 60mR 통과시 수직 및 횡방향 Gap 변화

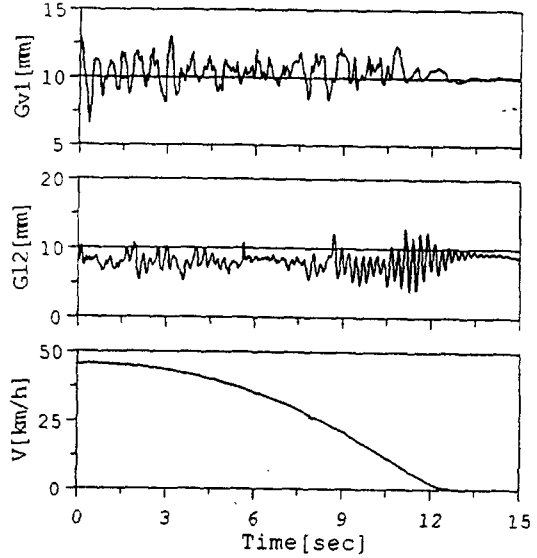


그림4.8 비상제동시 수직 및 횡방향 Gap 변화

이상에서 부상/안내시스템의 동특성은 60mR 곡률반경, 급구배 및 차량의 비상시에도 Gap 변화가 크게 없이 우수한 성능을 나타내었다.

4.2 추진 성능시험

차량의 추진시험은 SLIM 전류의 변화에 따른 추진력과 슬립주파수 변화에 따른 수직력을 측정하였다.

1) 추진력 및 회생 제동력 측정

도시형 자기부상열차의 VVVF Inverter의 출력전류는 슬립주파수 12Hz에서 표4.1과 같이 설정하였다.

표4.1 VVVF Inverter 출력전류

Notch	역행	제동
1	100A	150A
2	200A	200A
3	320A	270A
4	410A	320A

그림4.9는 표4.1의 4 Notch 상태에서의 가선 전압, VVVF Inverter 출력전류, 순시 전류 및 주행속도 등 주행특성을 나타낸다. SLIM의 공극 13mm, 차량 중량 24톤에서 역행시 0.65%의 가속도, 회생 제동시 0.53%의 감속도로 나타났다. 이 값과 이론치를 비교하면 표4.2와 같다.

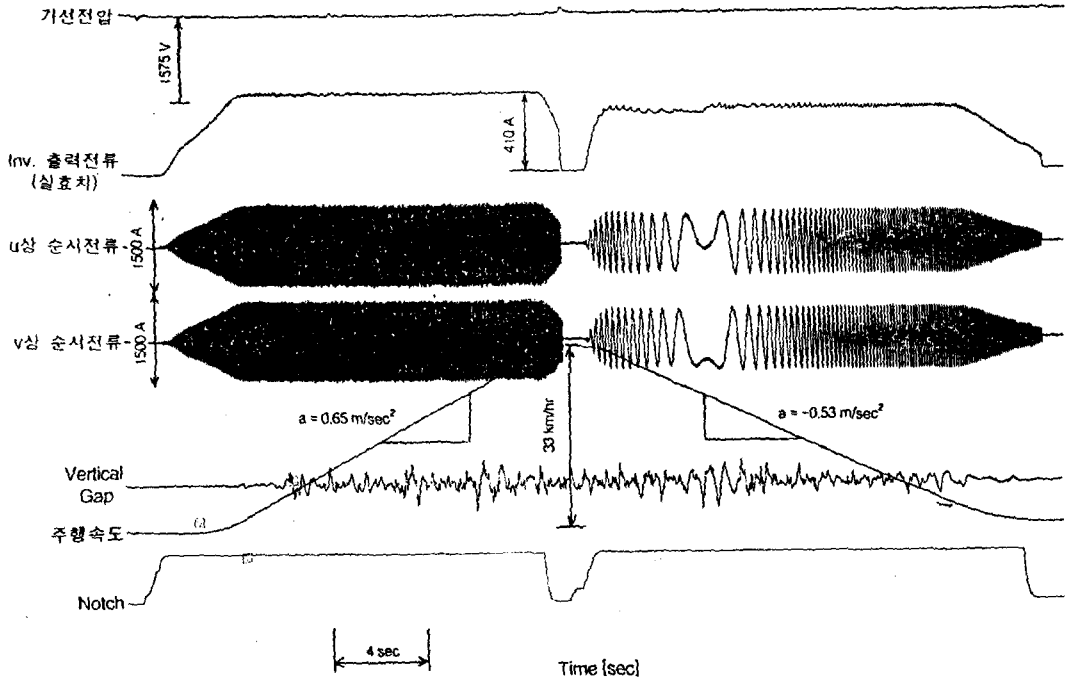


그림4.9 도시형 자기부상열차 주행특성

표4.2 이론치/실측치 비교

순번	항목	이론치	실측치
1	중량	25톤	24톤
2	슬립주파수	10Hz	12Hz
3	SLIM 공극	12mm	13mm
4	전류	410A	410A
5	가속도	0.8m/s²	0.65m/s²

실측치는 슬립주파수와 SLIM 공극이 이론치보다 크게 설정되어 있는 관계로 가속도가 작게 나타났다. 만약 이론치와 동일한 조건이라면 SLIM당 추진력 특성은 이론치와 거의 유사할 것으로 판단된다.

2) 수직력 측정

SLIM의 수직력 측정은 슬립주파수의 변경에 따라 주행시 전자석에 흐르는 전류의 변화를 측정하여 계산할 수 있다.

본 성능시험에서는 슬립주파수 10Hz, 12Hz 및 15Hz에 대하여 수직력 특성을 측정하였다.

슬립주파수 10Hz 일때의 특성은 그림4.10과 같으며, 각 슬립주파수에 따른 주행시 전자석 전류의 변화 및 이 때 SLIM당 수직력 계산 결과는 표4.3과 같다.

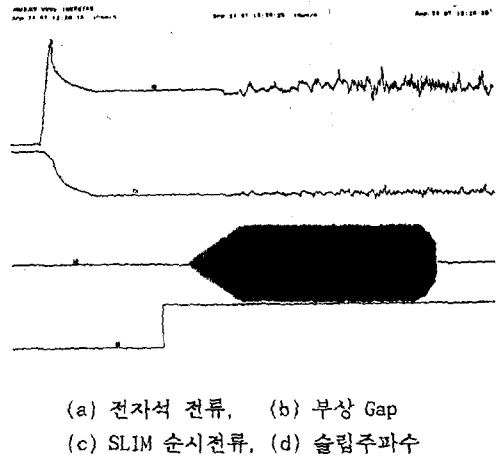


그림4.10 SLIM의 수직력 특성(10Hz)

표4.3 수직력 측정결과

슬립주파수	전자석 ΔI	SLIM 수직력
10 Hz	1 A	0.72 kN
12 Hz	0.4 A	0.46 kN
15 Hz	0.1 A	0.23 kN

SLIM의 수직력 측정에서 슬립주파수 10Hz에서 만족하는 수직력의 특성을 보여주었으며, 15Hz 부근에서 수직력이 거의 영으로 뒀을 확인하였다.

4.3 기타 특성결과

1) 누설자속 측정

자기부상열차의 누설자속치는 인체에 미치는 영향을 파악하는 관심사이다.

도시형 자기부상열차의 주요 부위별 누설자속치는 표4.4와 같이 측정되었다.

표4.4 역행시 누설자속치

측정 위치	측정 높이	누설자속[Gauss]
운전실 중앙	1.2 m	2.97
객실 중앙	1.2 m	2.62
객실 단부	1.7 m	0.8
플랫폼	1.2/ℓ1 m	1.88
* 지자계		0.55
* 칼라 TV	2~3 m	5

이 결과에서 상전도 흡인식 자기부상열차의 경우에는 누설자속이 아주 미미하여 인체에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

2) 소음 측정

열차의 주요 부위별 소음 측정치는 표4.5와 같이 측정되었다.

표4.5 역행시 소음

측정 위치	측정 거리	소음치[dB(A)]
객실 중앙	1.2 m	65
실외	1 m	70
실외	5 m	63
실외	25 m	53

이 결과에서 자기부상열차는 궤도와 비접촉으로 주행하므로 기존 바퀴식 열차의 경우 보다 소음치가 훨씬 낮게 나타났다.

5. 결론

이상에서와 같이 도시형 자기부상열차 1호 차량의 성능시험 결과 급구배, 아주 작은 곡률 반경에서도 우수한 주행특성을 나타내었으며, 누설자속 및 소음 등 환경측면에서도 좋은 결과를 보여주었다.

'98.5달 제작완료 되는 2호 차량에서는 1호 차량에서의 미비점을 다음과 같이 수정보완하여 차량의 성능시험을 수행할 예정이다.

- 1) 거리 및 가속도 측정용 센서를 일체형으로 하여 보수유지의 간편화
- 2) 부상용 전자석의 철심 및 코일재질을 변경하여 효율성 및 경제성 도모
- 3) 부상/안내제어기에 VME 시스템을 채택하여 제어기의 신뢰성 향상
- 4) VVVF Inverter의 스위칭 소자를 GTO에서 IGBT로 교체하여 소음 및 중량 감소
- 5) 보조전원장치의 Topologies를 변경하여 부피 및 중량 감소
- 6) 대차의 구조를 변경하여 보수유지 편리
- 7) 1호/2호 차량 연계시험

그리고 자기부상열차의 실용화를 위해서는 향후 다음과 같은 Total System 기술개발이 계속되어야 할 것이다.

- 1) 속도/위치 검지장치의 개선
- 2) 열차 종합제어관리장치의 적용
- 3) ATP/ATO의 적용
- 4) 지상 및 차상 신호/통신장치의 적용
- 5) 열차 종합사령실 설비 적용
- 6) 분기기 절체시간 단축

참고문헌

1. 일본철도기술협회(1985), "저공해 범용형 차체 지지시스템의 연구개발", 연구보고서, (재)일본조선전흥재단조성사업
2. E.Masada, K.Fujisaki(1986), "Dynamic Interaction between Propulsion and Suspension System in a Maglev Vehicle", '86 MAGLEV Conference, pp.119~126
3. M.Morishita, T. Azukizawa(1986), "A New

- Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System", '86 MAGLEV Conference, pp.199~204
4. A. Ohishi(1989), "HSST-05 System General and Operational Outline at YES'89", MAGLEV'89, pp.93~100
 5. S. Tomohiro(1995), "The Development of HSST-100L", MAGLEV'95, pp.51~56
 6. M. Fujino, T. Mizuma(1995), "Total test operation of HSST-100 and planning project in Nagoya", MAGLEV'95, pp.129~138
 7. T. Amano, T. Mizuma(1995), "The Shielding against the Magnetic Field of HSST-100 Vehicle", MAGLEV'95, pp.343~348
 8. 박계서, 김국진(1997), "도시형 자기부상열차 대차 설계기술", 한국기계연구원 기계와 재료, 제9권2호, pp.20~32
 9. 서광덕, 김국진(1997), "도시형 자기부상열차용 주요 전장품 개발", 전기학회 추계학술발표회, pp.638~641
 10. Hung-Je Cho, Kuk-Jin Kim(1998), "Performance Test of the Urban Transit Maglev Vehicle(UTM-01) in Korea", MAGLEV'98, pp.72~77
 11. Bong-Seop Kim, Byoung-Guan Kang(1998), "An Experimental Study to Improve the Magnet Performance for Korea Maglev Test Vehicle(UTM)", MAGLEV'98, pp.318~323