

자기부상열차의 추진시스템과 부상시스템의 상호 영향

The Dynamic Interaction Between Propulsion And Levitation System In a MAGLEV

김국진*

Kim, Kuk Jin

강병관**

Kang, Byung Kwan

이종성***

Lee, Jong Seong

ABSTRACT

An electromagnets and a single-sided linear induction motor(SLIM) are used for suspension and propulsion equipment respectively. The electromagnets and SLIM are installed in the same frame, called a bogie, to reduce the volume under the vehicle floor and to raise the response characteristics to follow the track. Then the 3-dimensional forces(thrust force, normal force, side force) generated by SLIM directly affect the suspension system as the disturbance force. Moreover, in the running condition, the gap length variation in the electromagnets is the same as the SLIM. Therefore, the mutual interaction between the electromagnets and the SLIM is an important problem to realize the smaller gap length. In this paper, the dynamic interaction is analyzed and confirmed by the experimental data of UTM-01 maglev.

1. 서론

자기부상열차의 부상 방식에는 초전도 자석을 이용하여 부상하는 초전도 반발식과 일반 전자석을 이용하여 부상하는 상전도 흡인식이 있으며, 추진 방식으로는 선형동기전동기를 이용하는 고속 방식과 선형유도전동기를 이용하는 중·저속 방식이 있다. 국내에서는 흡인식 부상 및 선형유도전동기를 이용하여 추진하는 중·저속용 자기부상열차를 개발하고 있다.

현대정공(주)는 EXPO'93 자기부상열차의 전시·운행을 통해서 자기부상열차의 실용화 가능성을 입증하게 되었으며, 이 기술을 기반으로 1994. 5부터 과학기술부 특정연구과제로 한국기계연구원과 공동으로 도시형 자기부상열차(UTM-01)를 개발하여 실용화를 위한 안정성 및 신뢰성을 향상시키기 위해서 다양한 시험을 수행하고 있다.

자기부상열차는 속도향상에 따라 부상용 전자석과 추진용 선형유도전동기의 상호 영향이 시스템의 특성을 좌우하는 중요한 문제이므로, 본 논문에서는 상전도 흡인식 자기부상열차에 대한 부상시스템과 추진시스템의 상호영향 및 해결방법에 대해서 기술 하고자 한다.

* 현대정공(주) 기술연구소 선임연구원, 정회원

** 현대정공(주) 기술연구소 주임연구원, 비회원

*** 현대정공(주) 기술연구소 주임연구원, 비회원

2. 자기부상열차 개요

2.1 대차(BOGIE)

상전도 흡인식 자기부상열차에서 차체를 지지하고 부상용 전자석 및 추진용 선형유도전동기가 취부되는 대차는 2차 현수장치인 공기 스프링에 의해 차체와 체결되며, 부상력을 발생시키는 8대의 전자석은 레일 밑에, 추진력을 발생시키는 2대의 선형유도전동기는 레일 위에 균일하게 분포되어 있다. 따라서 각 대차는 주행시 선형유도전동기와 전자석의 공극 변화에 따라 heaving, rolling, pitching, sway 및 yawing 운동을 하게 된다.

선형유도전동기 및 전자석이 취부된 대차의 구조는 그림 2.1과 같다.

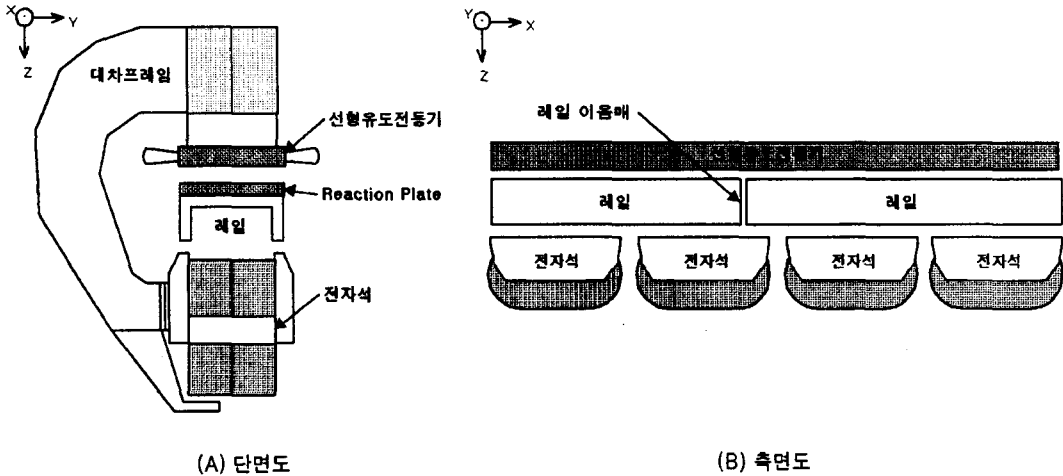


그림 2.1 대차(BOGIE) 구조

2.2 부상 시스템

부상 시스템은 열차를 부상/지지하는 장치로서 부하변동 및 선로 조건(레일 이음매 및 단차 등)에 따라 부상 갭이 변화되면, 전력변환장치(Chopper)는 일정갭을 유지하기 위해서 전자석에 공급되는 전류를 가변시킨다. 각 전자석은 독립적으로 제어되며 전자석과 선형유도전동기의 대향면이 동일한 레일을 사용하기 때문에 전자석의 상·하 변화는 선형유도전동기의 공극의 변화를 발생시켜 추진 시스템의 동적 특성에 영향을 주게된다.

대차당 부상/안내 시스템의 구성도는 그림 2.2와 같다.

2.3 추진 시스템

선형유도전동기의 1차측(고정자)은 대차의 좌우에 현가식으로 장착되어 있으며, 도체판(Raaction Plate인 2차측(회전자)은 1차측과 동일한 넓이로 전자석의 대향면으로 사용되고 있는 레일의 상부에 설치되어 있다. 따라서 선형유도전동기에서 발생하는 수직력은 부상 시스템에 영향을 주게된다. 수직력이 흡인력으로 발생되면 전자석의 전류를 상승시키고 반발력으로 발생되면 전자석의 전류를 감소시켜 일정갭을 유지하려는 부상 시스템에 외란으로 작용한다.

따라서 일정한 추진력과 수직력을 발생시키기 위해서는 선형유도전동기의 제어기법이 중요하며, 이러한 방법으로 슬립 주파수 일정제어가 요구된다. 슬립 주파수 일정제어에는 다음의 두가지 사항을 고려하여야 한다. 첫 번째는 부상용 전자석에 외란으로 작용하는 영향을 최소화 하면서, 두 번째는 선형유도전동기의 추진력을 최대로 발생시킬 수 있는 슬립 주파수를 설정하여 일정제어를 하여야 한다.

차량당 추진 시스템의 구성도는 그림 2.3과 같다.

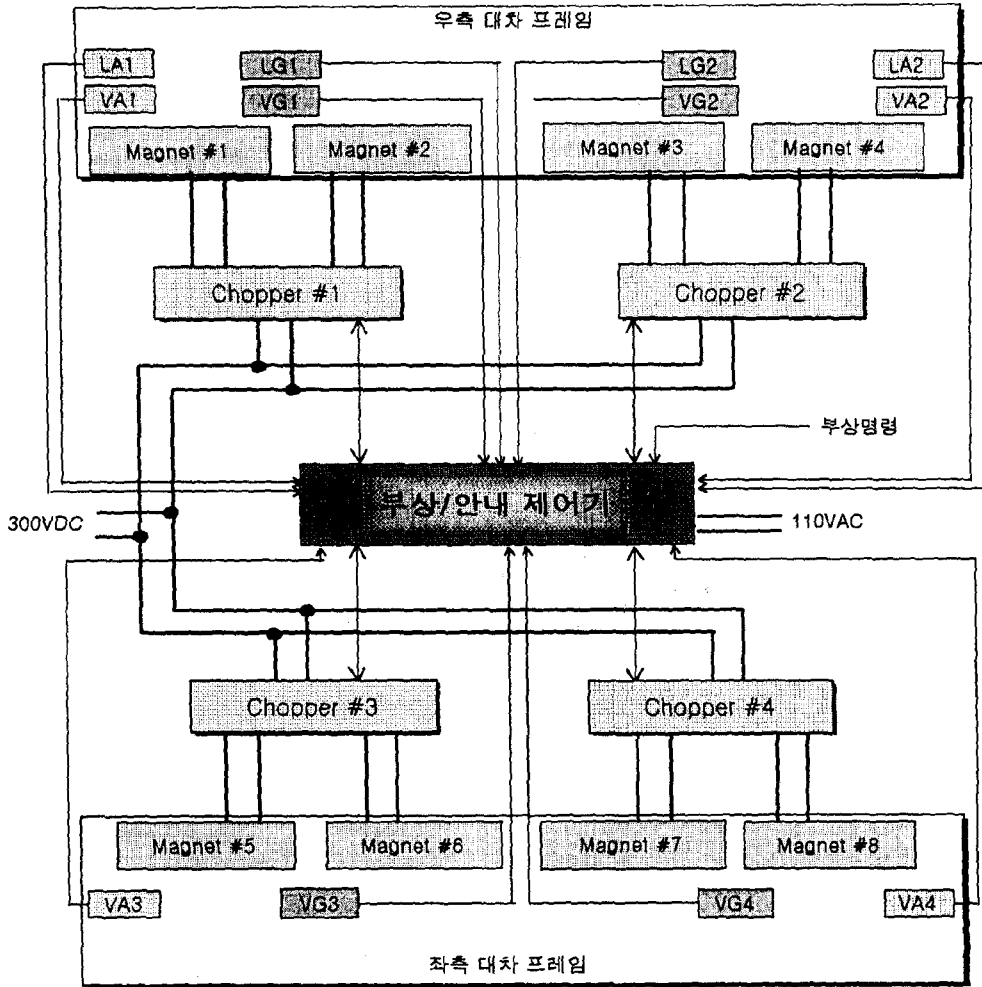


그림2.2 부상/안내 시스템 구성도

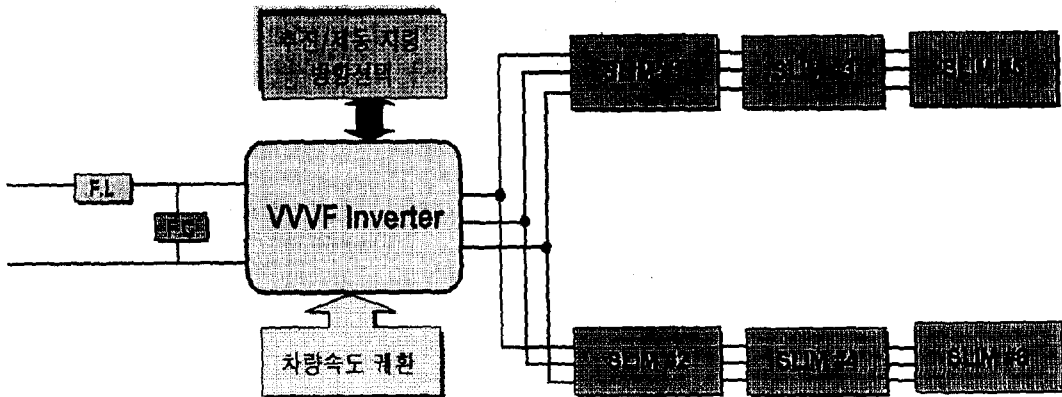


그림2.3 추진 시스템 구성도

3. 자기부상열차의 특성

3.1 선형유도전동기(SLIM) 특성

선형유도전동기는 1차측(고정자)과 2차측(회전자)을 이용해서 추진력을 발생 시키며, 관계식은 식 3-1과 같고 선형유도전동기 1대의 속도변화에 따른 추진력 특성은 그림 3.1과 같다.

$$T = K_1 \cdot \Phi \cdot I_r = K \cdot (V/f)^2 \cdot f_s \text{ [N, m]} \text{ ----- (3-1)}$$

여기서 $\Phi = K_2 \cdot V/f$ [Wb], $I_r = K_3 \cdot \Phi \cdot f_s$ [A]

T : 추진력, Φ : 자속, I_r : 회전자 전류, V : 1차 공급전압,

f : 전동기의 공급주파수, f_s : 슬립 주파수, $K_1 \sim K_3$: 상수

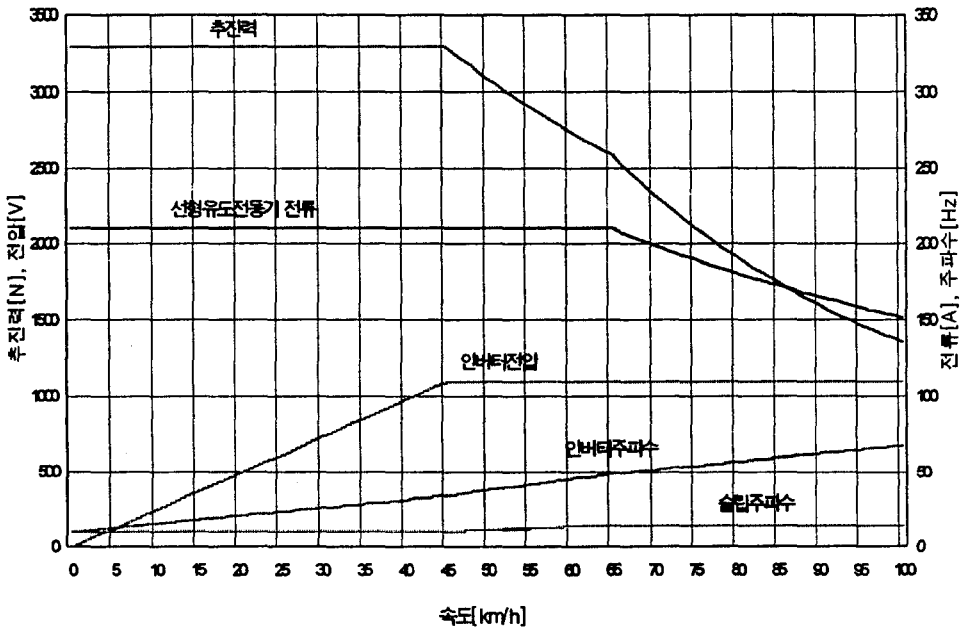


그림3.1 속도변화에 따른 추진력 특성

1차측과 2차측의 상대변위에 따라 선형유도전동기에서 발생하는 thrust force(추진력), normal force(수직력) 및 side force가 변화되며, 단부효과(end effect)를 무시한다면 선형유도전동기의 특성은 슬립 주파수에 따라 변화되며 그 특성은 표3.1과 같다.

표3.1 슬립주파수에 따른 SLIM 특성

슬립 주파수	Low	High
자속밀도(Flux density)	대	소
추진력(Thrust Force)	대	소
수직력(Normal Force)	흡인력	반발력
Pitching Moment	대	소
Sway	안정	불안정

슬립 주파수가 낮을경우 자속 밀도는 커지며, 수직력은 흡인력으로 작용해서 부상용 전자석의 전류를 증가시키게 된다.

반면에, 슬립 주파수가 높으면 자속 밀도는 작아지며, 추진력도 감소한다. 이때, 수직력은 반발력으로 작용하여 전자석의 전류를 감소시키게되는 요인이 된다.

선형유도전동기의 수직력에 대한 크기와 방향(흡인력, 반발력)은 슬립 주파수에 의존하므로 슬립 주파수 일정제어를 통해서 부상 시스템에 외란으로 작용하는 수직력을 최소화하는 것이 필요하다. 슬립 주파수에 따른 추진력 및 수직력 특성은 그림3.2과 같다.

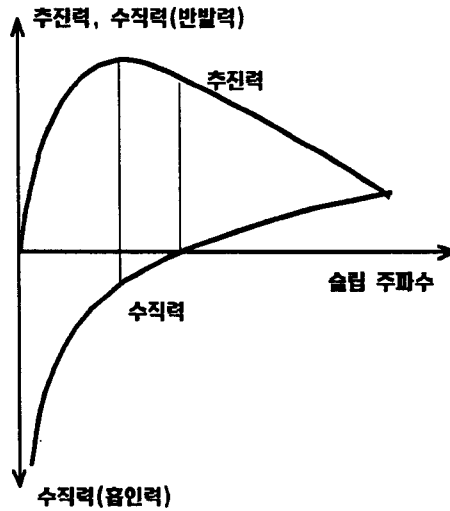


그림3.2 슬립주파수에따른 추진력 및 수직력 특성

3.2 전자석 특성

자기부상열차의 부상은 전자석과 대향면인 레일간의 자기력에 의해 이루어지며, 자기력의 발생을 위해서는 전자석과 레일간의 자로가 형성되어야 한다. 부상력의 크기는 자로에서의 자속 밀도에 따라 결정되기 때문에 Core 및 Coil의 재질과 형상에 따라 부상력 특성이 다르다.

따라서, 전자석은 자기부상열차를 안정적으로 부상/지지하기 위해서는 부상력을 감소시키는 여러가지의 외란등을 충분히 고려해서 설계·제작을 하여야 한다.

부상력은 식 3-2와 같이 나타낼 수 있으며, 전자석 1대에 대한 공극과 전류 변화에 따른 부상력 특성은 그림 3.3과 같다.

$$F = \mu_0(NI)^2S / (2g)^2 [N] \text{ ----- (3-2)}$$

단, μ_0 : 투자율, g : 공극[m], S : pole face 면적 [m],

N : 코일 turn 수, I : 전류 [A] 이다.

3.3 추진시스템 및 부상시스템의 상호영향 특성

자기부상열차의 부상 시스템은 주행중에 레일 이음매 및 단차등을 통과 할 때 전자석의 상·하운동이 발생하고 이것에 의하여 선형유도전동기의 1차축과 2차축간 공극의 변화를 가져오기 때문에 선형유도전동기의 특성에 영향을 주게 된다. 선형유도전동기의 1차축과 2차축간 상대변위에 따라 대치는 heaving, rolling, pitching, sway 및 yawing과 같은 운동을 한다.

선형유도전동기와 전자석간 상호 영향 관계는 그림3.4와 같다.

추진 시스템은 부상 시스템에 수직력과 pitching moment의 변화에 따른 영향을 주어 전자석의 전류변화를 발생시키며, 부상 시스템은 추진 시스템에 추진력과 임피던스의 변화에 따른 영향을 준다.

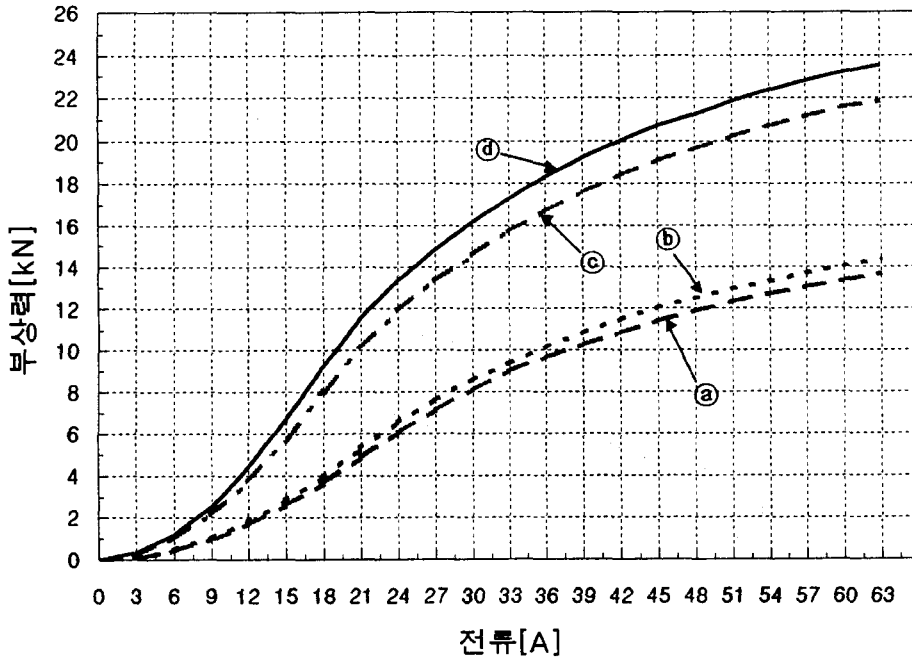


그림3.3 전류변화에 따른 부상력 특성 (공극 : ① > ② > ③ > ④)

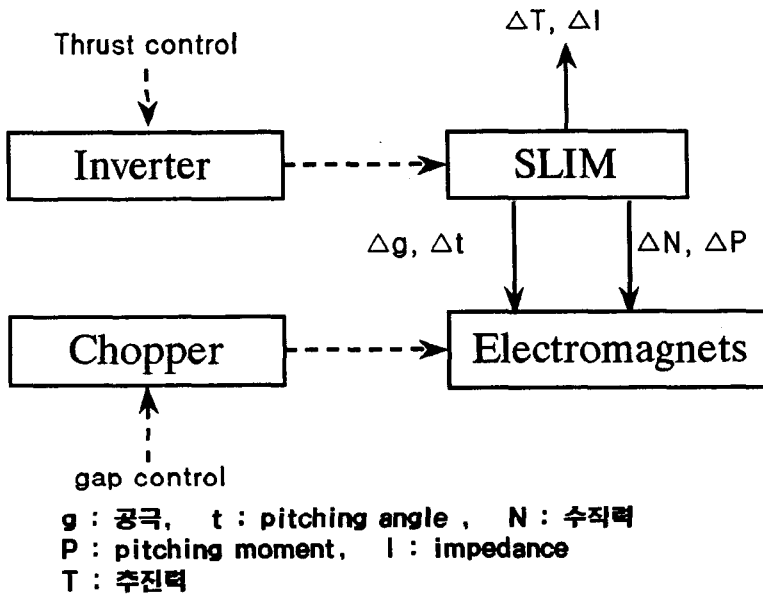


그림3.4 선형유도전동기와 전자석의 상호 간섭

4. 시험 결과

주행중 부상계와 추진계의 상호 영향을 고려하기 위하여 현재 기계연구원내 시험선로에서 도시형자기부상열차(UTM-01)를 통하여 주행시험을 실시 하였다. 차량의 일반제원은 표4.1과 같으며, 선형유도전동기는 표4.2, VVVF Inverter는 표4.3, 전자석은 표4.4와 같다.

표 4.1 차량 일반 제원

순	항 목	제 원
1	최대 가속도	0.8%g
2	최대 감속도	0.8%g
3	차량 치수	L13, W3, H4 m
4	최대 중량	25 ton
5	자중	18 ton
6	최대 승객 중량	7 ton
7	제동 방식	회생/공기제동
8	공급 전원	1,500 VDC

표 4.2 선형유도전동기 사양

순	항 목	사 양
1	최대 추진력	3,300[N]
2	상수	3 상
3	1차축 길이	2300 [mm]
4	1차축 폭	220 [mm]
5	극 수	8 극
6	Pole Pitch	261 [mm]
7	공극	12 [mm]
8	2차 도체판 두께	6 [mm]

표 4.3 VVVF Inverter 사양

순	항 목	사 양
1	용량	800 [KVA]
2	입력전압	1,500 VDC
3	출력주파수	5~80 [Hz]
4	출력전류	0~440 [A]
5	스위칭소자	GTO Thyristor
6	스위칭 주파수	400 [Hz]

표 4.4 전자석 사양

순	항 목	사 양
1	정격전류	21 [A]
2	Pole 길이	680 [mm]
3	Pole 폭	32 [mm]
4	정격 부상력	11,900[N]
5	초기 공극	19 [mm]
6	부상 공극	11 [mm]

4.1 선형유도전동기의 수직력 특성

선형유도전동기의 수직력 측정은 슬립주파수의 변화에 따라 주행시 전자석에 흐르는 전류의 변화를 측정하여 계산할 수 있다.

본 성능 시험에서는 슬립주파수 10Hz, 12Hz 및 15Hz 대하여 수직력 특성을 측정하였다.

슬립주파수 10Hz일때의 특성은 그림4.1, 12Hz는 그림4.2, 15Hz는 그림 4.3과 같으며, 각 슬립주파수에 따른 주행시 전자석 전류의 변화 및 이 때 선형유도전동기당 수직력 계산 결과는 표 4.5와 같다.

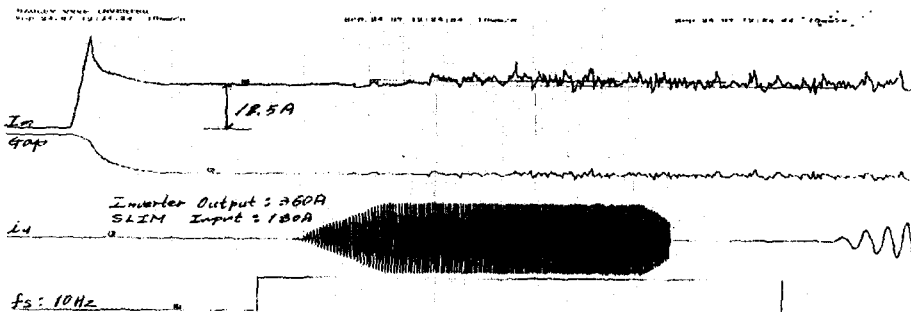


그림4.1 선형유도전동기의 수직력 특성(10 Hz)

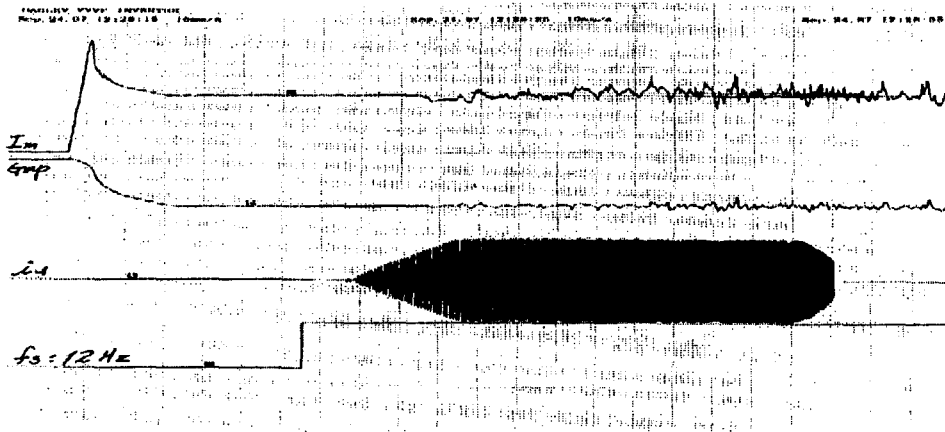


그림4.2 선형유도전동기의 수직력 특성(12 Hz)

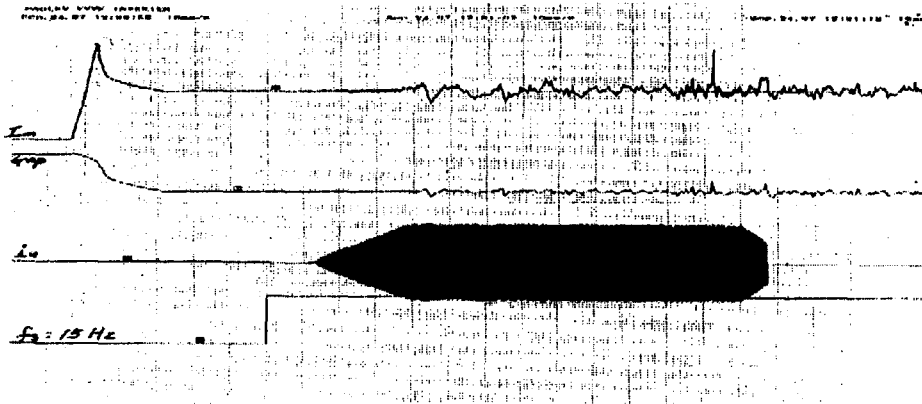


그림4.3 선형유도전동기의 수직력 특성(15 Hz)

표 4.5 수직력 측정 결과

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

선형유도전동기의 수직력 측정에서 슬립주파수 10Hz에서 부상력에 영향을 주지 않는 정도의 만족한 수직력 특성을 보여 주었으며, 15Hz 부근에서 수직력이 거의 영으로 됨을 확인하였다. 이 결과에서 슬립주파수 15Hz 이상으로 운행할 경우에는 수직력이 반발력으로 되어 전체 시스템이 불안정하게 된다.

4.2 부상 공극 측정

전자석이 레일의 단차를 통과 할 때 발생하는 공극의 변화는 그림4.4와 같다. 그림에서와 같이 차량이 약 30 km/h의 속도로 주행 할 때 레일 단차에 의한 전자석 공극의 변화는 미소 하므로 선형유도전동기는 레일 단차의 영향을 받지 않는다.

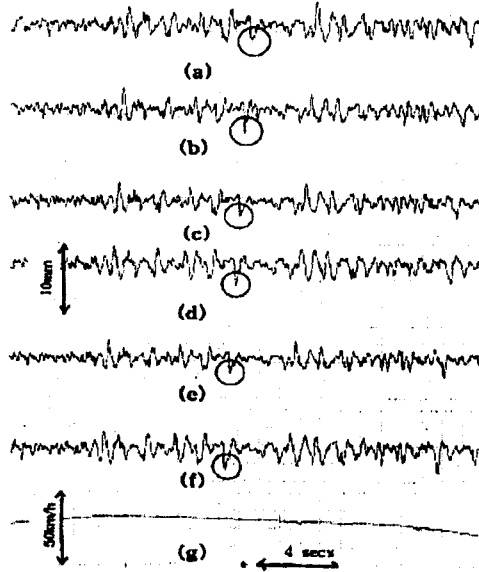


그림 4.4 2mm 수직 단차 통과시 Vertical Gap 파형
 (a) Gv1/B1 (b) Gv2/B1 (c) Gv1/B2 (d) Gv2/B2
 (e) Gv1/B3 (f) Gv2/B3 (g) 주행속도(Km/h)

5. 결론

본 연구에서는 자기부상열차의 추진계와 부상계의 상호 간섭에 따른 영향을 살펴 보았다. 선형유도전동기는 슬립 주파수의 변화에 따라 수직력 및 추진력의 변화가 있으며, 수직력의 변화는 부상계의 안정성에 직접 영향을 주게 되므로 부상계의 안정성에 영향을 주지 않는 범위내에서 슬립 주파수가 선정 되어야 하며 추후 선형유도전동기와 전자석의 효율적인 운용을 위하여 에너지 측면도 고려 되어야 할것이다.

참고문헌

1. 일본철도기술협회(1985), "저공해 범용형 차체 지지시스템의 연구개발", 연구보고서, (재) 일본조선진흥재단조성사업
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. Yamamura and T. Ito, "Analysis of speed characteristics of attracting magnet for magnetic levitation of vehicle", IEEE Trans on Magnetics, Vol.Mag-11, pp.1504~1507, '1975
6. M.Fujino, T.Mizuma(1995), "Total test operation of HSST-100 and planning project in Nagoya", MAGLEV '95, pp.129~138
7. 박계서, 김국진(1997), "도시형 자기부상열차 대차 설계기술", 한국기계연구원 기계와 재료, 제9권2호, pp.20~32
8. 박계서, 김국진, "도시형자기부상열차의 성능시험 및 평가", 한국철도학회 춘계 학술대회'98, pp.485~493
9. Hung-Je Cho, Kuk-Jin Kim(1998), "Performance Test of the Urban Transit Maglev Vehicle(UTM-01) in Korea", MAGLEV '98, pp.72~77
10. Bong-Seop Kim, Byung-Kwan Kang(1998), "An Experimental Study to Improve the Magnet Performance for Korea Maglev 1st Vehicle(UTM)", MAGLEV '98, pp.318~323