

상전도식자기부상열차의 주행성능시험 및 평가

°조 홍 제*, 이 종 민**

Performance Test of the Urban Transit Maglev Vehicle (UTM-01) in Korea

Hungje Cho, Jongmin Lee

ABSTRACT

UTM-01 is the first full sized maglev test vehicle which is being developed by KIMM and Hyundai Precision and Industrial Co., since 1995. The vehicle employs normal conducting magnets for levitation and single sided linear induction motor for propulsion. The test vehicle has been under tests to assure its required performance since last May 1997. This paper reports various system level test results compared with simple 2 degree of freedom dynamic calculations. Test results include performance of the levitation and guidance system, propulsion system, and the dynamic behavior of the elevated guideway under the passage of the maglev vehicle.

1. 서 론

한국기계연구원 자기부상열차사업단에서는 1995년부터 SOC 국책연구 2 단계사업으로 현대정공(주)와 공동으로 도시형자기부상열차를 개발하고 있다.

본 연구원에서 개발중인 자기부상열차는 일반 전자석을 사용하는 상전도방식 (Electromagnetic Suspension System)으로서 일본 RTRI에서 개발중인 초전도자석을 이용한 초고속용 자기부상열차와는 다른 시스템이다. 초전도자기부상열차는 차상에 설치된 강력한 초전도자석과 지상에 설치한 코일간의 Null Flux 방식에 의한 반발력을 이용하여 레일위를 100 mm 정도 부상하는 시스템으로서 레일과 부상용 Magnet 간의 Stiffness 와 Damping 이 작다. 본 연구원에서 개발중인 상전도방식의 자기부상열차는 일본 HSST, 독일 Transrapid 와 유사한 시스템으로 차체에 부착된 Magnet 와 레일간의 흡인력을 이용하여 10 mm 정도 부상·추진되는 시스템으로 레일과 Magnet 와의 부상간극은 작은 반면 Stiffness 와 Damping 이 커야한다. 흡인력에 소비되는 전력은 1 Kw / ton 정도이다.

본 연구팀은 97년 6월 이후부터 도시형자기부상열차 UTM-01 (Urban Transit Maglev Vehicle)의 부상계, 추진계 등 시스템 전반에 걸쳐서 성능시험을 수행해오고 있으며 이하의 내용은 현재까지 수행된 주요 시험결과와의 일부이다.

사진 1은 주행시험중인 UTM-01을 보여주고 있으며 UTM-01의 주요사양은 표 1에 보이는 바와 같다.

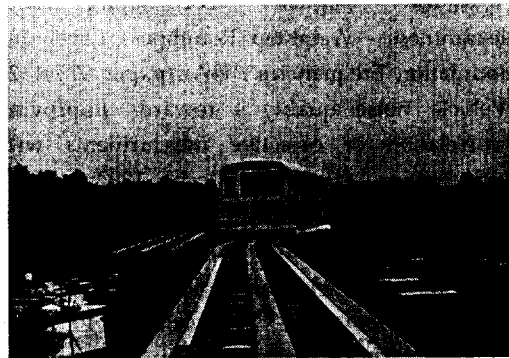


Fig. 1. UTM-01 under performance test

* 정희원 : 한국기계연구원 자기부상열차사업단

** : 한국기계연구원 자기부상열차사업단

Table 1. Major Specifications of UTM-01

1	Max. Speed	110 Km/h
2	차량제원	Dimension : 13 mL×3 mW×4mH 공차중량 : 23 ton 만차중량 : 27 ton
3	승차정원	최대 120 인승
4	열차편성방식	2 량 1 편성
5	부상계	-Magnet 와 레일간의 흡인력을 이 용한 상전도방식, 24 Magnets/Car -2 차 Suspension 으로 Air Spring 사용 -지지방식 : 3 대차 / 1 차량에 의한 분산지지방식 -안내방식 : Staggered Magnets
6	추진계	편축식 선형유도전동기
7	제동계	전기제동(회생, 역상), 기계제동병용
8	시험선로	-시험선로길이 : 1 km -최소곡률반경 : 60 m -4%, 6% 구배 설치 -고가케도구조
9	전원공급계	공급전압 : DC 1500 V 제 3 궤조방식 (Third Rail)

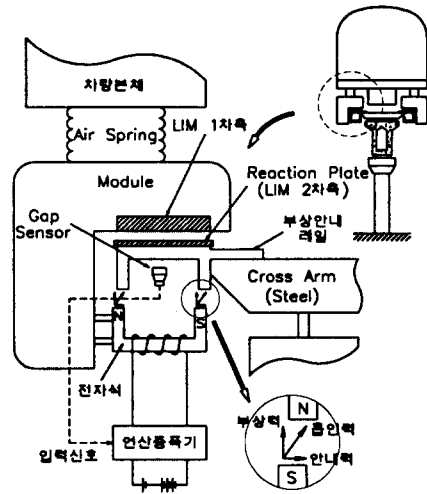


Fig. 2. Basic Model of Attractive electromagnetic levitation system

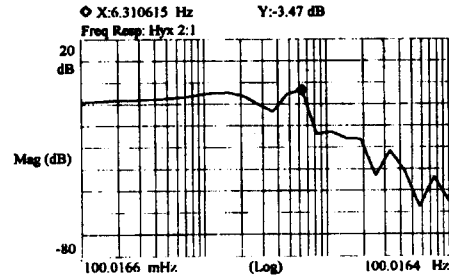


Fig. 3. FRF of the Current Levitation Controller on the Single Magnet Tester

기계연구원내에 설치된 1 km 자기부상열차 시험 선로의 최소곡률반경은 60 m이며, 4%와 6%의 구배를 갖고 있다.

2. Magnet - Rail Characteristics

철차륜으로 지지되는 일반철도와 달리 자력에 의해 10 mm 정도 부상하여 운행되는 자기부상열차에서는 열차의 바퀴에 해당하는 역할을 담당하는 Magnet 와 레일(역U자형 Guideway) 간의 전자기적 파라미터로 결정되는 Suspension System 이 적절한 Stiffness 와 Damping 값을 갖도록 Control 하는 것이 가장 중요하다. 흡인식 자기부상시스템의 기본적인 부상원리는 그림 2에 보이는 바와 같다.

그림 3은 UTM-01 부상제어기에 의한 Single Magnet Tester 에서의 Frequency Response 를 보여주고 있다. 계는 10 Hz 의 Cutoff Frequency 를 갖고 있음을 알 수 있다.

바퀴식 일반전동차와 달리 레일위를 10 mm 정도 떠서 주행하는 자기부상열차의 부상/안내계의 필요조건은 설계상의 최고운행속도내에서 가능한 작은 Gap 변동폭을 가지고 레일을 추종하는 것이라고 할 수 있다. 레일은 Main Beam 과 전자석과 대향면을 이루는 Guideway 로 구성된다. Main

Beam의 고유진동수는 6~7Hz이며 Guideway의 고유진동수는 그림 4에서 보이는 바와 같이 30Hz 이상에서 고유진동수를 갖고 있다. Guideway의 형상은 Random Irregularities 이외에 Guideway를 Beam에 고정하기 위해 사용되는 Cross Arm 볼트 취부부 인하여 파장 5m, 진폭 1~2mm 정도의 파상면을 갖고 있다. Bogie와 차량을 연결하는 2차 Suspension의 고유진동수는 1Hz이다. 그러므로 Magnet과 레일로 구성되는 1차 Suspension계는 Guideway의 고유진동수를 피하기 위하여 20Hz 이하에서 Cutoff Frequency를 가져야 할 것이며, 6~7Hz, 1~2Hz 부근의 고유진동수를 갖고 있어서는 안된다.

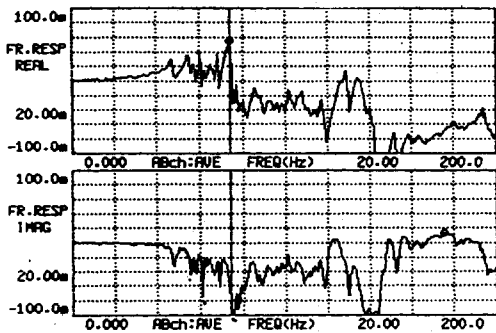


Fig. 4. Impact Hammer Test Results of the Maglev Guideway. Natural frequencies are at 30, 47, 55, 60 Hz.

3. 시험결과 및 고찰

이하 기술된 것은 97년 9월 이후부터 주행시험 중인 UTM-01 시스템에 대한 주요 시험결과와 일부이다 [1].

3.1 Gap Variations

그림 5에서 직선구간, 곡선구간, 4% 구배구간을 주행시 측정된 Magnet와 레일사이의 gap의 변동을 보여주고 있다.

주행속도에 따른 수직, 횡방향 Gap 변동측정결과에 대한 요약은 다음과 같다.

- (1) 직선궤도에서 50 km/h 이하의 속도에서 최대 Gap Peak to Peak 변동폭은 5mm 정도이며, 4% 구배구간에서는 7mm 정도이다. 허용최대 수직 Gap 변동폭은 ± 6 mm이다.
- (2) 60 mR 곡선구간을 주행할 수 있는 최대속도는

25 km/h이다.

- (3) 차상에서의 수직방향 rms 가속도평균치는 4~8Hz 구간에서 $\pm 0.05 \text{ m/s}^2$ 정도로 ISO의 1시간 Fatigue Proficiency Boundary Level과 비교할 때 우수한 승차감을 보여주고 있다.
- (4) 현 UTM-01의 2차 Suspension은 전동차와 같이 Bogie를 구성하는 좌우 Module의 중앙에서 차체와 연결되어 있는 바, 곡선주행시 가운데 Bogie와 차체와의 횡방향 변위가 문제가 된다. 측정결과 60 mR 곡선을 25 km/h로 주행중 앞뒤 Bogie와 차체와의 횡방향 변위는 30mm인 반면 가운데 Bogie의 경우에는 횡방향변위가 88mm였다. 사용중인 Air Spring의 허용 횡방향변위가 최대 100mm임을 감안할 때 곡선을 원활하게 주행하기 위해서는 Linear Bearing 같은 모종의 Steering 기구를 사용해야 함이 명백하다.

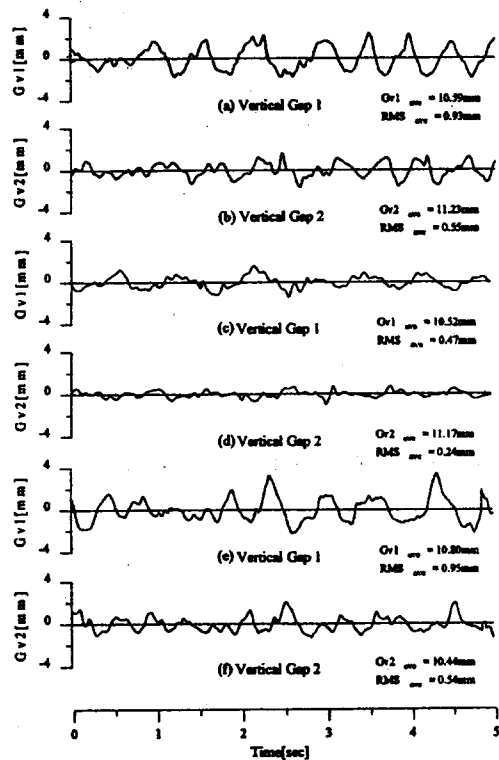


Fig. 5. Vertical Gap Variations between magnet and rail. (a & b) on the straight section, (c & d) on the 60 mR curved section (e & f) on 4% grade

3.2 가·감속성능

그림 6은 직선구간에서 정지상태에서 출발하여 45 km/h에서 정지하기까지의 추진계에 관련된 주요 시험 파형이다. 가·감속($\pm 0.6 \text{ m/s}^2$)이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 0.8 m/s^2 로 가속시 정지상태에서 출발후 45 km/h에 도달하는데 불과 35초밖에 걸리지 않았으며, 이는 바퀴식열차에 비하여 자기부상열차가 갖는 장점중의 하나이다. 그림에서 감속시 24 km/h에서 역상제동이 원활히 작동됨을 알 수 있다.

비상시 기계 Brake 만을 사용한 비상제동시험을 실시한 결과 비상제동시 수직 Gap 변동은 없었으며 감속도는 -1.25 m/s^2 였다.

3.3 Beam Deflection

차량주행시 발생하는 PC와 Steel Girder Beam의 처짐을 Beam의 중앙부에서 측정하였으며, 측정 결과는 그림 7과 같다. 50 km/h 이하의 속도에서의 처짐은 거의 일정하였으며 PC와 Steel Girder Beam은 각각 2.4 mm와 2.0 mm였다. 계산결과에 의하면 80km/h 이내의 주행속도에서는 차량의 주행으로 인한 Dynamic 처짐은 차량이 Beam의 가

운데에서 정지중일 때의 처짐(Static Deflection)의 1.2배를 초과하지 않는다. 그러므로, 현시험선로의 강성은 필요이상으로 충분함을 알 수 있다.

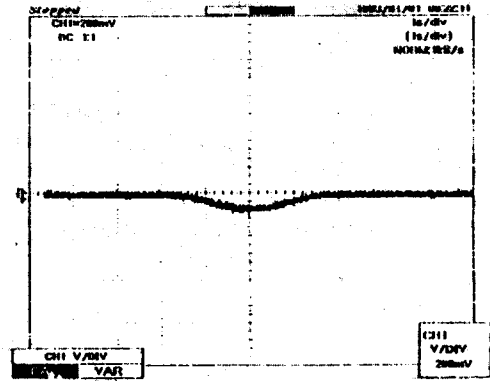


Fig. 7. Beam Deflections under the passage of the maglev vehicle. $V = 30 \text{ km/h}$

3.4 A Two Degree of Freedom Vehicle on a Flexible Guideway

단순지지된 Beam 위를 자기부상열차가 운행할 때의 차량과 Beam의 수직방향운동을 간단한 1차

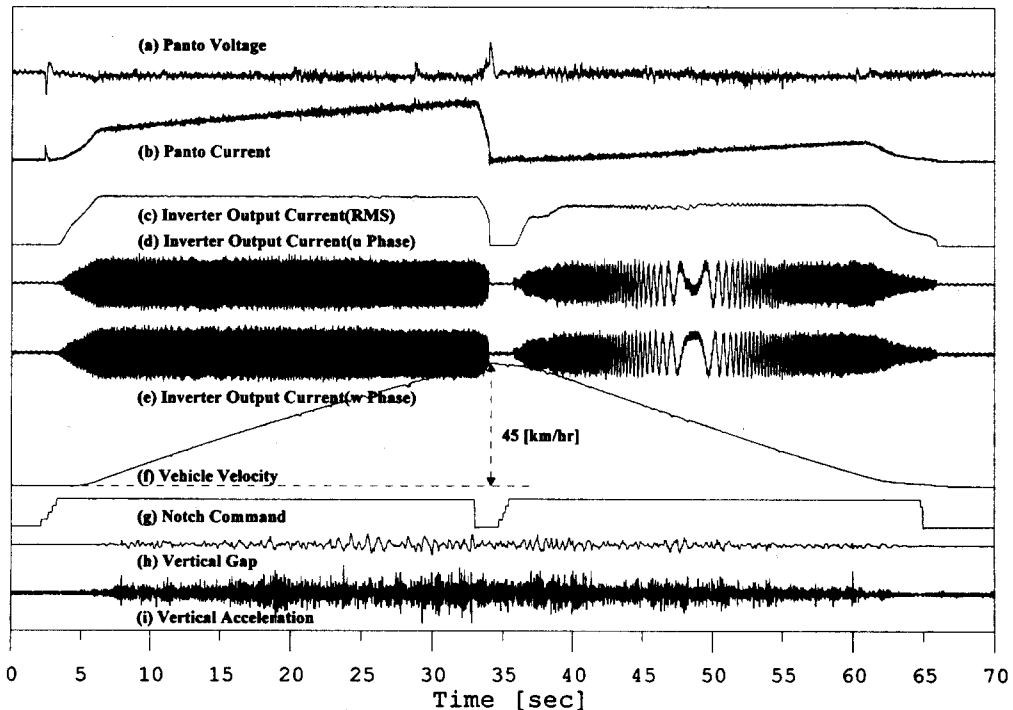


Fig 6. VVVF Inverter output signals when accelerating from stationary to 45 km/h

원 Model로 해석하였다. 해석에 사용된 Model은 그림 8과 같으며, 계산은 차량을 지지하는 12 conner 중 한 conner에 해당하는 1/12 Scale Model을 사용하였다.

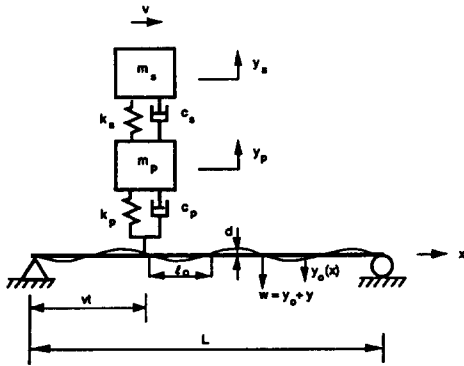


Fig. 8. A Two degree of freedom vehicle traveling on a simply supported guideway

그림 8에서 y_s 와 y_p 는 차량과 Bogie의 변위이고, $w(x,t) = y_o(x) + y(x,t)$ 는 Beam의 변위이며, $y_o(x)$ 는 Guideway의 Irregularity, $y(x,t)$ 는 Beam의 Deflection이다.

Beam의 운동은 Euler Equation으로 주어지며, 계산에 사용된 Parameter 값은 다음과 같다.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k_p}{m_p + m_s}} = 50.24 \text{ Hz}$$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} = 6.28 \text{ Hz}$$

$$\omega_1 = 43.96 \text{ Hz, Beam의 1차 고유진동수}$$

$$\zeta_p = \frac{c_p}{2(m_p + m_s)\omega_p} = 0.4, \quad \zeta_s = \frac{c_s}{2m_s\omega_s} = 0.3$$

$$\epsilon = \frac{m_p + m_s}{mL} = 0.394, \quad \epsilon_p = \frac{m_p}{mL} = 0.246$$

$$\epsilon_s = \frac{m_s}{mL} = 0.148, \quad \Omega = \frac{\omega_1}{\omega_p} = 1.75, \quad \gamma_f = \frac{\omega_s}{\omega_p} = 0.25$$

where, m : 단위길이당 Beam의 Mass
 L : Beam Span Length (= 25 m)

Magnet 대향면인 Guideway는 Beam에 1.25m 간격으로 Bolt로 지지되어 있다. 지지점의 수직변위를 측정된 결과는 그림 9와 같다.

$y_o(x) = d \sin(2\pi x/l_o)$ 로 근사화가 가능하며, 여기에서 $d = 1\text{mm}$, $l_o = 5\text{m}$ 로 하였다.

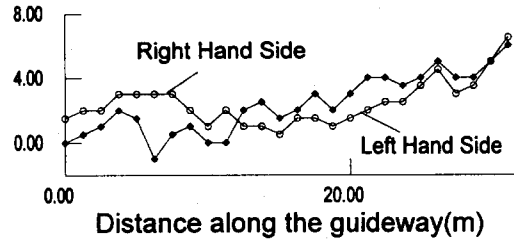


Fig. 9. Measured Vertical Displacement of the Guideway (Unit for the vertical axis : mm)

그림 10은 주행속도에 따른 Vertical rms Gap의 변동 계산결과를 측정된 데이터와 함께 보여주고 있으며, 그림 11은 차량이 50 km/h로 주행할 때 발생하는 측정된 Gap 변동과 간단한 2 Degree of Freedom으로 계산된 Gap 변동과의 비교를 보여주고 있다. 그림 11에서 측정된 Gap 변동파형은 단순한 Sine Wave Input으로 계산된 값과 세부적인 파형은 같을 수 없으나, 25m span을 주행할 때 발생하는 파수와 Gap Peak to Peak의 값은 유사함을 알 수 있다. 즉, 위와같은 간단한 모델로서도 Gap 변동폭과 Beam의 처짐동을 양적으로 유추해 낼 수 있다.

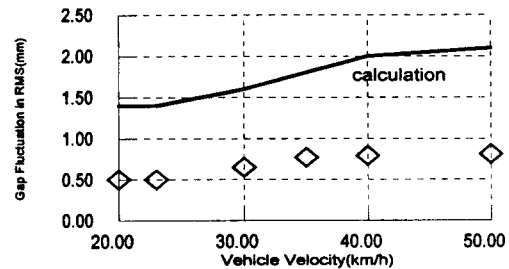


Fig. 10. Rms Vertical Gap Variations with Vehicle Running Speed

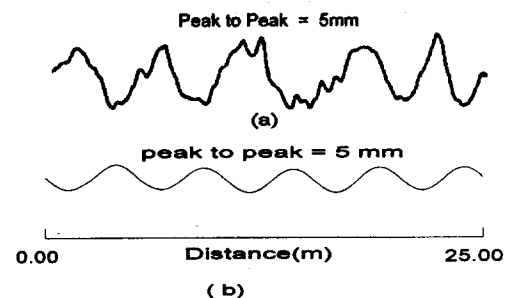


Fig. 11. Gap Fluctuations
 (a) Experiment, (b) Calculation

3.5 주행시험결과 현재까지 대두된 문제점

97년 8월이후 현재까지의 주행시험결과 실용화 수준의 도시형 자기부상열차개발을 위해서는 개선해야 할 많은 문제점이 드러나고 있다.

(1) 부상·안내 Controller

그림 1에서 보이는 Single Magnet Tester 에서의 주파수응답에서 부상제어기가 1.5 ~ 2 Hz 근처에서 공진이 있다. 이는 차량이 30 ~ 40 km/h로 주행시 Guideway가 취부되어 있는 Cross Arm 설치시 설치높이의 차이에 의한 그림 9와 같은 일종의 정현파 형상에 의하여 유발되는 주파수와 일치하므로 수직 Gap Peak to Peak가 크게되는 원인을 제공하고 있다. 제어기의 Cutoff 주파수를 20 Hz 정도로 낮추어 레일의 진동을 유발하지 않도록 해야 할 것이다. 또한 전자기적 Noise에 강하도록 부상제어기 Hardware의 신뢰성도 높여야 한다.

(2) 추진계

LIM (Linear Induction Motor)의 효율을 높여야 한다. 설계상 주어진 전류에서 $0.8 m/s^2$ 의 가·감속도가 되어야 함에도 현재 $0.65 m/s^2$ 정도의 가속도밖에 나오지 않고 있다.

- (3) 60mR의 곡선을 소정의 속도로 원활히 주행할 수 있도록 차체와 Bogie 사이에 모종의 Steering Mechanism이 있어야 한다.
- (4) 차량의 무게를 현재 공차시 23 ton 보다 5 ton 정도를 줄일 수 있어야 한다.
- (5) 마모를 최대한 줄이면서 성능이 우수한 집전 Brush, Brake Shoe 등의 개발이 필요하다.
- (6) Magnet Driver와 DC/DC Converter, VVVF Inverter 등 전장품의 신뢰도가 향상되어야 한다.
- (7) 차와 지상과의 신호통신시스템 개발 및 주행속도측정방법을 개선하여야 한다.
- (8) 자동운전시스템을 개발하여 무인운전 등에 적용하여야 한다.

4. 결론

우리나라는 철도 3사에서 지난 수십년간 철도차량을 제작해 오고 있음에도 불구하고 열차의 동특

성을 고려한 시스템설계기술은 물론 요소전장품설계기술이 전반적으로 낙후되어 있다. 자기부상열차와 같이 새로운 시스템을 지속적으로 개발하고 있는 예는 본 연구원이 처음이 아닌가 하며 2005년경에는 실용화수준의 도시형 자기부상열차가 개발되도록 최선을 다할 것이다.

참고문헌

1. 조홍제 외, 1996, "상전도자기부상식 도시형 자기부상열차의 주행성능시험 및 평가(I)", 한국기계연구원 논문집, 제 26 권
2. Y. Cai, S.S. Chen, and D.M. Rote, 1992, "Vehicle/Guideway Interaction in Maglev Systems", Argonne National Lab. Report, ANL-92/19