

## 한국형 차세대 자기부상열차 개발을 위한 선진기술 현황 및 기술분석

조한욱, 방제성, 한형석, 성호경, 김병현  
한국기계연구원 차세대자기부상열차연구팀

### Status of Advanced Technologies and Technical Analysis for Development of Korean Next Generation Maglev

Han-Wook Cho, Je-Sung Bang, Hyung-Seok Han, Ho-Kyoung Sung, Byung-Hyun Kim  
Next Generation Maglev R&D Team, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM)

**Abstract** - This paper describes the status of advanced technologies and technical analysis for development of Korean next generation maglev. The propulsion systems of worldwide maglev and research status of Korean maglev have been represented.

#### 1. 서론

자기부상열차(MAGLEV : Magnetically Levitated Vehicle)는 자석의 힘으로 부상하고 가이드웨이 상에서 자기장에 의해 일정한 공극을 유지한채 선형전동기로 추진하는 새로운 개념의 교통수단이다. 이미, 독일은 1969년 당시 흡인식으로 자기부상열차의 개발을 시작하였으며, 그보다 1년 늦은 1970년, 일본은 초전도자석 기술을 활용하여 초전도 반발식 자기부상열차의 개발을 착수, 현재까지 진행해 왔다. 현재 독일의 자기부상열차는 중국 상하이에서 시속 431 km 상용화와 더불어 성능 개량을 통해 앞으로 시속 500 km 까지 도달이 예상되는 바이며, 일본의 초전도 반발식 초고속 자기부상열차인 MLX의 경우 현재 시속 약 581 km 를 기록하는 시점에 있다. 이 처럼, 전 세계가 차세대 새로운 교통수단인 자기부상열차에 높은 관심을 가지고 있는 가운데, 우리나라는 1998년 국책연구사업의 결과로 2량 1편성의 도시형 자기부상열차 UTM-01을 개발하는데 성공하였으며, 지난 2008년 4월 21일 대전엑스포-국립중앙과학관 구간에서 UTM-02를 상용화 개통한 바 있다. 더불어, 2012년 11월 28일 까지 도시형 자기부상열차 실용화 사업의 수행을 통한 인천국제공항 내 자기부상열차 시범노선의 건설이 확정되었다.

현재 우리나라의 자기부상열차의 연구는 지난 2006년 시작된 도시형 자기부상열차 실용화 사업과 시속 550 km급 차세대 자기부상열차의 핵심기술개발, 두 가지의 목표를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 한국형 차세대 자기부상열차의 개발을 위한 세계 자기부상열차 선진국의 연구 현황을 소개하고 기술을 면밀히 분석하여, 국내 차세대 자기부상열차 연구를 위한 학술적 공감대 형성 및 다양한 연구 분야로의 확대를 도모하고자 하다.

#### 2. 초고속형 자기부상열차의 선진기술 현황

자기부상열차 시스템의 부상방식은 EDS (Electro-Dynamic Suspension)과 EMS (Electro-Magnetic Suspension)이 대표적이며, 추진방식으로는 차상 1차형 선형유도전동기 (Linear Induction Motor:LIM)를 이용하는 방식과 지상 1차형 선형동기전동기 (Linear Synchronous motor:LSM)를 이용하는 방식이 대표적이다.

##### 2.1 상전도 흡인식 자기부상열차 - 독일 Transrapid

자기부상열차 기술은 독일에서 태생되어, 기술분야의 선두주자로서 주도적으로 개발해 왔다. 대표적 초고속 자기부상열차인 독일의 Transrapid 의 경우, EMS 방식과 LSM 추진방식을 채택하고 있다. EMS에서 부상용 전자석은 차상에 취부되어 있는 LSM의 계자에 의해 이루어지며, 열차의 주행시 정격부상공극이 궤도로부터 평균 10 mm 정도가 유지되도록 제어를 수행한다. 1차 추진요소는 궤도에 설치되어지는 3상 권선 고정자이며, 부상 및 안내 시스템은 부상 전자석에 통합된 선형발전기를 통하여 비접촉으로 에너지를 전달받는다.

##### 2.2 초전도 반발식 자기부상열차 - 일본 MLX

일본의 초고속 자기부상열차인 MLX는 지상에 LSM 추진 코일과 부상 코일을 구성하고, 초전도 자석(SCM : Super-Conducting Magnet) 을 차상에 취부하여 부상 및 추진력을 동시에 얻어내는 방식을 갖는다. 1970 년 초전도 자석을 이용한 반발식 자기부상열차 시스템이 공식적으로 시작된 이래, 수많은 연구와 실험을 통해 세계 최고속도인 581 km/h 까지 달성한 세계 최고의 기술이다. 그러나, 궤도 및 차상의 초전도 자석등 시스템이 매우 복잡하고 비용에 대한 경제성이 대표적 EMS 시스템인 독일의 Transrapid 보다 떨어진다. 그럼에도 불구하고, 초전도 반발식 자기부상열차 시스템은 초고속을 달성하기 위한 자기부상열차에



(a) Transrapid-독일 (b) MLX-일본  
〈그림 1〉 세계 주요 국가의 자기부상열차 - 지상 1차형



(a) Linimo (HSST)-일본 (b) UTM, 한국  
〈그림 2〉 세계 주요 국가의 자기부상열차 - 차상 1차형

있어서 가장 적합한 시스템으로 평가된다.

#### 2.3 영구자석 반발식 자기부상열차 - 미국 GA (Inductrack)

영구자석 반발식 부상장치(Inductrack)의 기술은 미국 GA(General Atomics)社 에 의하여 제안되었으며, 극저온으로 냉각시킨 초전도 자석을 이용한 초전도 반발식의 경제적 단점을 극복하고 상온에서 EDS 시스템을 구현하기 위하여 고안된 방식이다. 와전류에 의한 부상력을 얻기 위해 궤도상에는 높은 도전율을 갖는 2차축을 부가적으로 설치해야 하며, GA 방식의 경우 상-하 부상용 영구자석을 Halbach 배열하여 부상력을 얻음과 동시에 과부상을 억제하는 기구적 특성을 갖는다. 추진장치의 경우에서는 영구자석 Halbach 배열을 이용하여, PM-LSM 추진 방식을 구현하였다.

### 3. 추진시스템 기술 분석

#### 3.1 주요 기술

고속주행을 위한 자기부상열차의 추진시스템으로는 선형동기전동기 (Long-Stator Linear Synchronous Motor)가 일반적이며, 상전도 흡인식 LSM이 독일에서 개발되어 Transrapid 에 적용되었고, 초전도방식의 LSM이 일본 MLX에 적용되어 각각 상용화 및 상용화 추진 중에 있다. 또한, 영구자석형 LSM 은 미국 GA사에 의해 개발되어 시험트랙에서의 실험단계에 있으며, Magnemotion사는 제어 영구자석형 LSM을 개발하여 축소형 모델 단계의 자기부상열차의 실험 및 제어 알고리즘에 관한 연구를 계속 진행중이다.

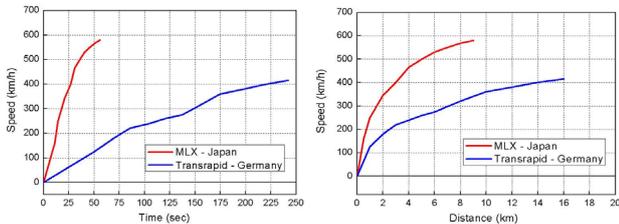
그림 1(a)에서 보여지는 바와 같이 Transrapid 에 적용되어진 지상 1차형 선형동기전동기 추진시스템은 주요 전력의 공급이 지상측에서 이루어진다. 즉 선형동기전동기의 고정자측이 지상에 설치되고, 차량측에는 선형 추진 및 부상을 위한 전자석과 안내 전자석이 노반을 감싸고 있다. 노반의 하부에는 구조강관으로 성층된 선형동기전동기의 고정자가 취부되며, 권선은 구리 또는 알루미늄 소재를 갖는 Solid wire 가 파권 형태로 설치된다.

그림 1(c)에서 보여지는 바와 같이 일본은 전자석으로 차량을 부상시켜 추진시키는 도시형 자기부상열차인 HSST 기술을 상용화시켜 8mm의 부상높이로 운전되는 Linimo를 개발하였다. 일본은 동시에 동경-오사카 구간의 제2신간선 건설을 목표로 고속 자기부상열차의 개발도 진행해 오고 있는데, 현재 MLX라는 모델명으로 야마나시현에 설치된 야

마나시(Yamanashi) 자기부상열차 시험선로에서 상용화 준비를 위한 시험을 활발히 진행 중이다. MLX는 초전도 자석을 이용하여 차량을 100 mm 부상시켜 추진시키는 자기부상열차로써 초고속도는 581km/h로써 기네스북의 인정을 받았으며 교차시험에서 상대속도 1,000 km/h 이상의 주행실적을 가지고 있다.

MLX에서 선형동기전동기 추진용 코일은 가이드웨이 양쪽의 측벽에 설치되며 가이드웨이의 자장 이동을 만드는 3상 교류전류가 변전소로부터 공급된다. 차량에 탑재된 초전도 자석이 여자의 역할을 하고, 지상의 3상 권선은 초전도자석과 마주보고 있는 구조이다. MLX의 여자코일과 3상 전기자코일은 모두 공심(Air core)이며, 여자코일은 차량의 양측면에 설치되어 있고, 전기자는 U-형태의 가이드웨이 양쪽에 설치된다. 초전도 자석의 특성상 공극에서 자속밀도의 세기가 상당히 크므로, 약 100~200mm의 큰 공극에서도 좋은 성능을 가지며, 폴피치는 1350 mm로 고속운전에 적합하도록 설계되어 있다.

그림 3은 세계적으로 대표적 초고속 자기부상열차인 독일의 Transrapid와 일본의 MLX의 주행성능을 각각 비교한 그래프이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 MLX는 최고속도인 약 581 km/h에 도달하는데 9km 거리에서 약 60초 가량 소요되었고, Transrapid는 최고속도인 400 km/h에 도달하는데 16km 거리에서 약 240초 가량 소요되었다.



**<그림 3> Transrapid 및 MLX 추진시스템의 주행성능 비교**

한편, 영구자석형 LSM을 갖는 미국 GA의 Inductrack 자기부상열차(이하 Inductrack)는, Transrapid가 갖는 근본적 불안정한 상전도 흡인방식의 기술적 단점과 MLX가 갖는 극저온 냉각 초전도 자석의 경제성 제약에 관한 단점을 극복하고자 미국의 LLNL(Lawrence Livermore National Lab)과 GA(General Atomics)사에 의해 고안된 방식이다. 부상시스템으로 EDS 방식을 채택하고, 상대적으로 큰 부상공극의 길이를 감안하여 선형동기모터를 추진시스템을 선정하였으며, 기본 구조 및 기술은 Transrapid의 여자 전자석이 영구자석의 Halbach Array로 대체된 형태이다. Inductrack의 최대 설계속도는 160 km/h로 중저속 자기부상열차로의 적용을 목적으로 하였으며, 적용된 영구자석은 잔류자속밀도가 약 1.42 T 정도인 NdFeB 계열의 영구자석을 사용하여 큰 공극에서 자계강도를 높이는데 노력하였다. 그러나, 현재 고속/초고속에의 적용이나 MLX, Transrapid와 같은 실차형 모델에서의 연구결과가 아직 없기 때문에 초고속형 자기부상열차로써의 적용된다면, 더 많은 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

**3.2 주요 사양**

표 1은 세계 대표적인 자기부상열차 시스템의 주요사양을 간략히 보여준다. 2량 1편성된 Transrapid-06의 경우 14개 추진모듈이 1량을 견인하는 구조로, 선형동기전동기 1모듈당 추력은 약 6kN 정도이다. 그에 비해 MLX-01은 8개의 추진모듈이 3량을 견인하는 구조이므로, 선형동기전동기 1모듈당 추력이 Transrapid에 비해 10배 이상 크다.

**<표 1> 자기부상열차별 주요 사양**

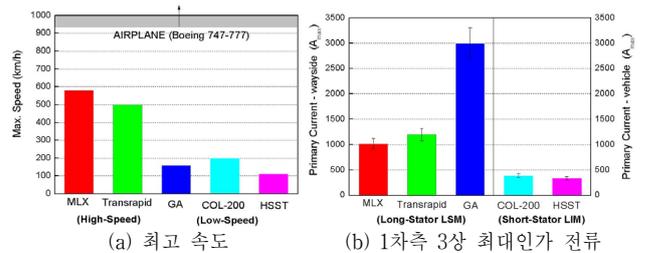
항 목	Transrapid	MLX	GA(Inductrack)
추 력	6kN/mod.	67.5kN/mod.	16.7kN/mod.
공 극	10 mm	100 mm	25 mm
극간격	258 mm	1350 mm	216 mm
주파수	215 Hz	46.3 Hz	100 Hz
	(@400 km/h)	(@450 km/h)	(@160 km/h)

\*mod. : module

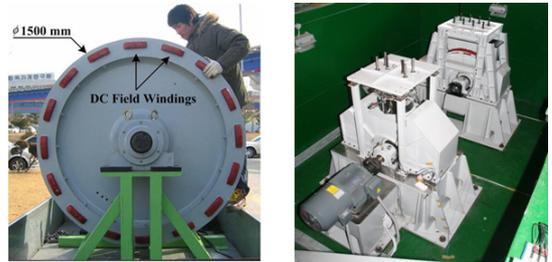
**4. 기술적/경제적 한계 및 우리나라의 연구현황**

**4.1 기술적/경제적 한계**

기존의 중저속형 자기부상열차에 적용된 선형유도전동기의 경우 차상 전력제어시스템 등, 기존 도시형 전철이나 고속철도차량에 이용되는 기술과 그 구성요소가 유사하고 일반적이어서 개발이 용이하다. 그러나 차량에 탑재되는 전력변환장치의 무게와 규모가 매우 커 총 중량의 증가를 피할 수 없다. 선형유도전동기를 적용하는 자기부상열차인 HSST와 우리나라 UTM의 경우 최고속도가 약 110 km/h이며, COL-200은 200



**<그림 4> 세계 자기부상열차 추진시스템 주요사양 비교**



**<그림 5> 차세대 자기부상열차 핵심기술개발 시험기 (부상 및 추진)**

km/h이지만, 실용적으로 가능한 최대속도는 약 160 km/h 정도로 판단한다. 이 한계속도는 차상에 추진용 전력변환장치를 탑재하는 모든 자기부상열차시스템에 동일하게 적용될 것이다. 그림 4는 세계 자기부상열차의 최고속도와 전력변환기를 통해 인가되는 최대전류량을 비교한 그래프이다.

지상 1차형 선형동기전동기 시스템은 추진을 위한 3상 고정자측이 노반에 설치되고, 전력변환장치의 주요부분이 지상에 설치되어 총중량의 감소가 용이하여 초고속 운행에 매우 적합하다. 또한 가감속 성능이 매우 우수하고 에너지 효율을 극대화 시키는데 최적의 추진시스템이라 할 수 있다. 그러나, 전동기 코어를 포함하는 노반의 복잡성, 구간별 전력변환장치, 회로의 구성, 백터제어를 위한 정밀한 속도 및 위치의 피드백 등 신뢰성 확보를 위한 기술적 검토사항이 매우 많다. 따라서, 우수한 우리나라의 선형동기전동기 설계 및 제어기술과 대형 시스템 융합기술이 적절히 접목될 때, 기술적 한계는 극복될 수 있으리라 판단된다. 그러나, 지상 1차형 시스템의 경우 전술한 바와 같이 시스템의 성능은 매우 우수하나, 노반의 건설비용이 매우 커서 초기 계획단계에서부터 매우 신중한 설계, 해석이 동반되어야 하며, 기존의 연구개발 수준이 아닌 범국민적 합의와 정책협의의 통한 기획 및 추진이 이루어져야 하는 매우 어려운 숙제를 안고 있다.

**4.2 우리나라의 연구현황 및 수준**

지난 1989년 우리나라의 자기부상열차 연구가 본격적으로 시작된 이래, 중저속 도시형 자기부상열차 기술이 확보되어, UTM-01 (기계연, 1998, 그림 1-d), UTM-02 (중기거점, 2008 상용화개통) 이 개발되었고 2012년 인천공항내 시범노선의 상용화를 위한 사업이 활발히 진행 중이다. 또한, 한국기계연구원은 2006년부터 차세대 자기부상열차 핵심기술의 개발을 목표로 그림 5와 같은 회전형 LSM 초고속 시험기를 설계/제작하여 약 300km/h의 운행속도를 달성하였고, 부상 및 추진방식의 선정 등을 위한 기본연구가 활발하게 수행되고 있다.

**5. 결 론**

인구의 증가, 1일 생활권의 확대로 말미암아, 자기부상열차가 미래 도심을 가로지르는 미래형 철단 대중교통수단으로 자리잡게 될 것이라는 견해에는 의심의 여지가 없다. 그러나, 자기부상열차 개발 선진국의 기술과 대별되는 한국형 차세대 자기부상열차 기술의 확보와 핵심기술 선점을 위한 더 많은 연구 노력과 정책적 지원이 뒷받침 되어야 할 것이다.

This work was supported by the Korea Research Council for Industrial Science & Technology within the project entitled "Development of core technologies for levitation and propulsion system of high-speed maglev."

**[참 고 문 헌]**

[1] A.Cassat and M.Jufer, "MAGLEV projects technology aspects and choices," IEEE Trans. Appl. Superconductivity, vol. 12, Mar. 2002.  
 [2] H.W.Lee, K.C.Kim, J.Lee, "Review of maglev train technology," IEEE Trans. Magn., vol.42, July 2006.