

자기부상열차

김 인 근

한국기계연구원 자기부상열차사업단

I. 서 론

자기부상열차에 대한 전반적인 기술현황 그리고 전망이 기록되었다

2장에는 현재 세계적으로 개발중인 제반 자기부상열차의 기술방식, 현황 및 전망이 소개되었으며 3장에서는 본 특집의 취지에 맞추어 초전도 자기부상열차 기술을 좀더 상세하게 기록하였다.

II. 자기부상열차란?

자기부상열차는 자력에 의해서 “떠서” 움직이는 궤도차량을 의미한다. 일반적인 철도차량이 “바퀴”에 의해서 지지되고 Rotary Motor에 의해서 구동되는 반면 자기부상열차는 “자력”에 의해서 지지되고 Linear Motor에 의해서 구동된다. 자기부상열차도 궤도는 필요하나 차량이 궤도와 접촉 없이 주행하게 되며 따라서 바퀴와의 접촉에서 오는 소음이나 진동이 없고 속도나 구배의 제한이 거의 없는 장점을 가지고 있다. 자기부상열차는 이러한 장점을 최대한으로 살리는 방향으로 개발되고 있다. 소음과 진동이 없는 장점을 살려서 개발되는 중저속 경전철용 자기부상열차와 소음, 진동은 물론 고속의 장점을 살리는 초고속 자기부상열차는 이러한 장점을 최대한으로 활용하고 있다.

바퀴식 철도는 약 160년의 역사를 가지고 있으며 현재의 시속 300Km/Hr 급의 고속전철이 개발되기까지 많은 개선이 이루어졌으나 차륜에 의한

“1차 지지”의 근본방식은 변함이 없었다. 현재는 바퀴식 철도도 장대 Rail의 사용, 철차륜의 개선, 2차 Suspension의 개선 등을 통하여 초기의 단점들 많이 보완되었으나 바뀌없는 비접촉 철도차량에 대한 꿈은 많은 연구의 대상이 되어 왔다. 대표적인 것이 자기부상열차와 압축공기에 의한 Hover Craft의 개발인데 실용화 수준의 기술로 발전된 것은 자기부상열차 하나인 것 같다.

자기부상열차의 Idea가 처음 나온 것은 1934년 독일의 Hermann Kemper로 알려졌으나 당시의 제반기술수준이 이 Idea를 뒷받침할 수 없었기 때문에 실용화기술로 개발될 수 없었다. 자기부상열차 Idea를 최초로 실용화 개념으로 발전시킨 사람은 미국의 James Powell과 Gordon Danby로 알려져 있는데 이들은 자기부상열차연구가 시작되던 1960년대초 미국 New York의 Brookhaver Notional Lab의 연구원들이었다. 당시 Brookhaver National Lab은 새로 개발된 NbTi 선재를 이용한 초전도 자석연구를 선도하고 있었다. 그들은 당시 New York 주변의 심각한 교통문제를 경험하면서 초전도 자석의 강력한 자력을 이용한 철도차량, 즉 초전도 자기부상열차를 구상하게 되었고 60년대, 70년대 중반까지 많은 연구논문들을 통하여 300Mile/Hr급 초고속 자기부상열차의 개념을 확립하였다.

이렇게 시작된 자기부상열차 개발연구는 초기에는 미국을 중심으로 이루어졌으나 60년대 후반부터 일본 및 독일로 확산되었다. 그러나 철도차량의 수요가 적은 미국의 경우 자기부상열차 연구는 1975년경 미국정부의 연구비 삭감으로 실질적인 연구가 중단된 반면, 일본과 독일의 연구는 정부의

적극적인 지원아래 계속되어 실용화 수준의 기술로 발전하게 되었다.

1960년도 초의 초전도 자석 기술수준은 그러나 자기부상열차에 적용하기에는 많은 문제점을 안고 있었으며 따라서 상전도 방식에 의한 자기부상열차 연구도 병행되었다. 독일은 초기에 상전도 방식과 초전도 방식을 비교연구하였으나 70년대 중반에 상전도 방식을 채택, 현재 450Km/Hr급의 TRANSRAPID를 개발하게 되었다. 독일의 상전도 자기부상열차 기술의 일부는 1974년경 일본에 수입되어 HSST(High Speed Surface Transport) System으로 개발되었다. 일본의 철도 기술연구소(현 RTRI)를 중심으로 한 초전도 자기부상열차 기술개발은 초전도자석 기술의 어려움 때문에 오랜 지연이 있었으나 현재 대부분의 기술적 문제를 해결하고 550Km/Hr급의 초고속 자기부상열차를 개발, 시험중이다.

● 자기부상열차의 기술방식

자기부상열차의 부상과 추진을 위한 기술방식에는 여러가지 방식이 개발되고 있다.(Table 1) 우선 부상방식에는 상전도 흡인식, 초전도 반발식 그리고 Hybreed 방식으로 상전도 자석과 영구 자석을 사용하는 방식과 초전도 Null Flux 방식이 대표적이라 하겠다. 추진방식에는 차상 1차 방식인 Linear Induction Motor(LIM) 추진방식과 지상 1차방식인 Linear Synchronous Motor(LSM) 방식이 있다. LIM 추진방식은 일반적으로 Short Stator 방식, LSM 방식은 Long Stator 방식으로 표현하기도 한다. LSM방식중 일본의 초전도 방식은 Air Core 방식이며 독일의 상전도 방식은 Iron Core 방식을 사용하고 있다.

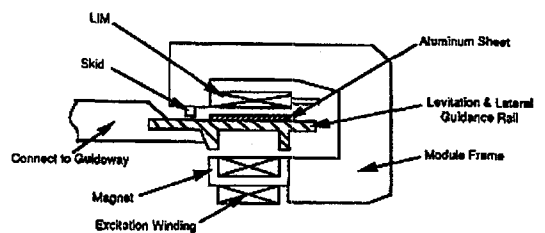
〈표 1〉 실용화 자기부상열차의 기술방식

부상	추진	적용
상전도 흡인식	LIM	HSST, UTM(한국)
상전도 흡인식	LSM	TRANSRAPID
초전도 반발식	LSM	MLU
초전도 Null Flux	LSM	MLX

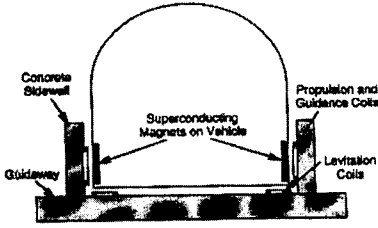
상전도흡인식 부상방식은 차량에 탑재된 상전도 전자석과 궤도사이의 흡인력(S-N, N-S)에 의해서 부상하는 방식으로써 Gap Sensor를 이용 일정 Gap을 유지한다. 일반적으로 10mm내외의 부상이 가능하다. 초전도 반발식은 차량의 바닥에 탑재된 초전도 자석과 궤도상에 설치된 Al 유도Coil 간의 반발력을 이용 부상하는 방식으로써 약 100mm 내외의 부상을 목표로 하고 있다. 초전도 Null Flux 방식은 차량의 벽면에 설치된 초전도 자석과 궤도벽면에 설치된 8자형 유도Coil에 의해서 부상력을 얻는 방식으로 반발식과 마찬가지로 약 100mm의 부상을 목표로 하고 있다.

LIM 추진방식은 Rotary Motor의 Stator에 해당하는 LIM을 직선으로 펴서 차상에 탑재하고 Rotor에 해당하는 Reaction Rail과의 반발력에 의해서 추진되는 방식으로서 차량에 탑재된 VVVF Inverter에 의해서 구동된다. LSM방식은 궤도에 설치된 추진 Coil(Stator)과 차량의 유도Coil 또는 초전도 자석간의 반발력에 의해서 추진되며 지상에서 차량이 통과하는 일정구간의 전력을 변환하여 구동한다. TRANSRAPID의 경우 궤도의 하부에 추진Coil을 부착하고 있으며 MLU, MLX의 경우 궤도 벽면에 설치되어 있다. 그림 1은 상전도 흡인식 자기부상열차의 단면을 보여주고 있으며 그림 2와 그림 3은 초전도 자기부상열차의 단면을 보여준다.

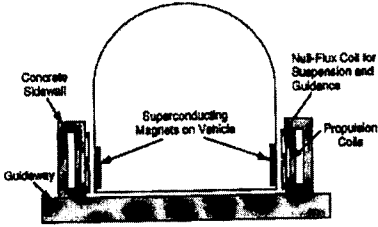
상전도 흡인식 부상방식은 Electro Magnetic Suspension(EMS)방식으로 불리며 차량이 주행에 관련없이 정지시에도 부상이 가능하다. 반면, 반발식 또는 Null Flux 방식은 Electrodynamic Suspension 방식으로써 차량이 일정속도 이상을 유지해야만 부상이 가능하다. 비행기의 바퀴와 비



〈그림 1〉 상전도 흡인식 자기부상열차의 개략단면도



<그림 2> MLU 단면도

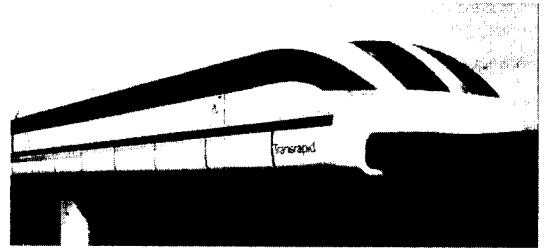


<그림 3> MLX 단면도

스한 고무 Tire를 사용, 주행을 시작하게 되며, 약 120Km/Hr 이상의 속도에서 부상이 이루어진다. EMS 방식은 근본적으로 불안정한 부상방식으로써 정교한 Gap Control이 필요하며 가장 핵심기술이 된다. 반면 EMS 방식은 원천적으로 안정된 부상 방식이나 차량탑재용 초전도 자석의 개발이 가장 어려운 기술과제이다.

국가는 독일(TRANSRAPID), 일본(MLX, HSST), 한국(UTM) 등으로써 이러한 System 들의 현황을 간략히 기술한다.

독일은 1960년대 후반부터 자기부상열차 개발을 추진해 왔다. 한때(1970년대 중반까지) 초전도 방식의 자기부상열차 개발을 고려한 적도 있었으나, EMS 방식의 TRANSRAPID를 중점적으로 개발해 왔으며 독일 EMSLAND에 있는 31.5Km 시험선로에서 500,000Km의 시험(TR06, TR07)을 마치고 실용화를 추진중이다. 현재 추진중인 실용화 사업은 Berlin-Hamberg간 295Km로써 2005년 실용화 예정이다. Table 2는 TRANSRAPID Series의 개발 역사를 보여주고 있으며 그림 4는 TR07의 시험주행을 보여준다.



<그림 4> TR 07의 시험주행 사진

● 국내외 개발현황

현재 실용화를 목표로 자기부상열차를 개발하는

<표 2> TRANSRAPID Series의 개발과정

Vehicle Designation	Year Built	Weight (metric tons)	Maximum Speed (km/h)	Guideway Length (m)	Suspension Systema	Propulsion Systemb
TR01	1969				EMS	LIM
MBB	1971	5.8	100	700	EMS	LIM
TR 02	1971	10.7	164	930	EMS	LIM
TR 03	1972	8	140	930	AC	LIM
TR 04	1973	18.5	253.2	2400	EMS	LIM
EET	1974	17	200	900	EDS	LIM
KOMET	1976	8.8	401.3	1300	EMS	Booster
HMB 2	1976	2.5	36	100	EMS	LSM
TR 05	1979	30.8	75	908	EMS	LSM
TR 06	1983	122	412.6	31,500	EMS	LSM
TR 07	1989	110	500*	31,500	EMS	LSM

일본 MLU, MLX Series의 현황 및 기술내역은 다음장에서 상세하게 기술한다.

일본 HSST는 독일 TR04 까지의 기술을 수입 개발한 EMS 방식의 자기부상열차이다. 1974년에 시작한 HSST 개발은 HSST 05 까지의 시험차량을 개발한 후 실용화 Prototype 차량 HSST 100S, HSST 100L을 개발, Nagoya의 1.5Km 시험선로에서 약 100,000Km 시험을 완료하고 현재 실용화사업을 추진중이다.(Table 3 참조) 가장 유망한 실용화 선은 2005년 Nagoya Expo장까지의 관람객 수송을 목표로 하고 있는 약 12Km 선로로써 Expo 후에는 상용선으로 사용예정이며, 그 외에도 Hiroshima, 미국 Connecticut 등 수곳의 실용화를 추진중이다.

〈표 3〉 HSST Series의 개발과정

	개발년도	최고속도	비 고
HSST01	1975	37.8Km/Hr	시험 Model
HSST02	1977		
HSST03	1985	60Km/Hr	EXPO 전시 Model
HSST04	1987	43Km/Hr	"
HSST05	1989	55Km/Hr	"
HSST100S	1991	110Km/Hr	실용화 Model
HSST100L	1994	110Km/Hr	"



〈그림 5〉 HSST 100L 사진

국내의 자기부상열차 개발사업은 1994년 5월을 기점으로, 그 이전까지 1단계 개발기와 이후의 2 단계 개발기로 나누어 생각할 수 있다.

1단계 기간중 「자기부상열차사업단」, 「현대정공」, 「대우중공업」은 각각의 목표를 가지고 독자적인 연구개발이 이루어졌으며, 2단계 기간중에는 사업단과 현대정공의 협력에 의한 「(국책)도시형 자기부상열차 개발사업」을 중심으로 수행되었다.

국내의 자기부상열차 개발사업의 기술방식은 개발 초기부터 3기관 공히

- 상전도 흡인식 부상
- 선형유도전동기(LIM) 추진

방식을 택해 왔으며 2단계에도 계속되고 있다.

그림 6은 도시형 자기부상열차의 2차량 연계시험장면을 보여주고 있다. 국내의 자기부상기술은 실용화까지는 약 4년의 집중적인 연구개발이 요구되고 있다. 현재 추진중인 실용화 계획으로는 인천 신공항의 PMS, IAT System과 대전의 경전철노선 등이 있다.



〈그림 6〉 UTM-01 2량연계 주행사진

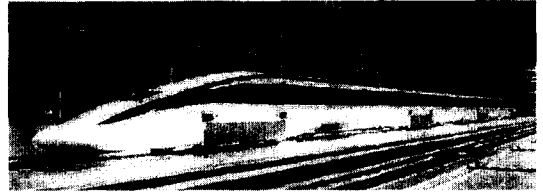
III. 초전도 자기부상열차 - ML Series

초전도 자석을 이용한 자기부상열차의 Idea는 미국에서 시작, 초기의 연구와 개념정립이 이루어졌으나 이 기술은 일본으로 전파되어(1960년대 후반) 지금의 실용화 수준의 기술로 발전되었다. 일본의 ML Series는 실용화를 겨냥한 유일한 초전도자석 자기부상열차로써 현재 기술개발이 거의 완료된 상태이다(1998.5월). 최고속도 550Km/Hr를 목표로 개발된 MLX 차량은 현재 매일 150Km의 시험주행을 수행중이며 2005년에는 동경-OSAKA간 500Km에 실용화 예정이다.

일본의 초전도 자기부상열차는 동경-OSAKA 간의 제2신간선을 목표로 개발되었다. 1964년 개통한 신간선의 이용자수가 급증하면서 일본정부는 제2신간선의 필요성을 느끼게 되었다. 그러나, 초전도 자석기술의 발전속도는 초기의 예상보다 늦어서 자기부상열차에 필요한 수준의 경량, 고효율의 초전도 자석과 Refrigerator가 개발되는데는 20년 이상이 시간이 필요했으며 1990년에 들어와서야 실용화 설계가 가능하게 되었다. 초기부터 상전도 EMS 방식을 채택한 독일의 TRANSPRAPID는 초기에는 발전이 일본의 초전도 자기부상열차보다 빨랐으나 초전도 자석기술이 완성된 지금은 초전도방식 자기부상열차 기술의 우월성이 눈에 띄게 나타나고 있다.

일본의 초전도 자기부상열차는 일본정부의 강력한 지원하에 Japanese National Railways(JNR) 주도로 이루어졌으며 민영화된 후에는 Railway Technical Research Institute(RTRI) 주도로 개발이 이루어지고 있다. 초기에 소형 model의 부상 및 추진원리는 시험한 RTRI는 1979년에는 Kyushu의 Miyazaki 현에 7.0Km의 직선 시험선로를 개통하고 본격적인 시험을 시작하였다. 주행 시험은 초기에 ML500(무인) 시험차량을 통해 517Km/Hr의 최고속도를 달성한 바 있으며, MLU001(1980), MLU002(1987), MLU002N(1993)의 시험으로 이어졌다. 유인 시험차량 MLU Series는 1987년부터 최고속도 400Km/Hr를 달성하고 있다.

상기한 MLU Series의 성공적인 시험은 실용화 차량(MLX)의 개발로 이어졌다. RTRI는 1991년 동경 서쪽 약 100Km지점의 Yamanashi 현에 43Km의 시험선 건설을 시작, 1995년에는 그중 18Km를 개통하였으며 현재 실용화 Prototype 차량인 MLX의 주행시험을 수행중이다. 43Km의 시험선로는 실용화시 실용화선로로 사용예정이며 평지부분에서 550Km/Hr의 속도시험을 할 수 있다. 1998년 Maglev Conference를 기해 공개된 시험선로에서 MLX는 최고속도 550Km/Hr를 달성한 바 있으며 매일 150Km 이상의 주행시험을 수행중이다.(그림 7)



〈그림 7〉 MLX 사진

● 초전도자석

EDS 자기부상열차 기술과 관련하여 가장 중요한 연구분야는 신뢰성 있고 차량탑재가 가능한 경량화된 초전도 자석의 개발이다. 일본은 1960년대부터 자기부상용 고성능 초전도 자석의 개발을 위해 대단한 노력을 경주해 왔으며 많은 개선이 이루어졌다. 초전도 자석 분야에서 일본이 이룩한 중요한 개선들이 Table 4에 비교되고 있다. 이 Table에는 일본의 시험차량에 사용된 초전도자석의 Parameter 들이 기록되어 있다. 눈여겨볼 사항은 부상력/Magnet 중량비의 개선과 Heat Leakage의 감소 등이다. 그림 8은 Yamanashi 시험선 차량에 탑재된 초전도자석 개략을 보여주고 있다. 이 Magnet은 895Kg의 중량을 가지고 있으며 약 11.5ton의 부상력을 발생시킨다. 4K의 Cryostat와 80K의 LN2 Shield를 위해 LHe Refrigerator와 LN2 Refrigerator가 각각 사용되고 있다. 초전도 자석 성능의 개선은 일본 초전도 자기부상열차의 설계에 있어서 Bogie를 차량구체의 끝에 설치 (TGV 방식) 차량의 연결을 용이하게 하였다. 이러한 설계의 개선은 초전도 자기부상열차의 중요한 문제점인 승객이 강한 자력에 Expose 되는 문제를 상당부분 저감시킬 수 있었다.

기술진의 실용화 차량용 초전도 자석을 개발하려는 노력은 90년대 들어와서 그 결과를 나타내기 시작하였으며 특히 Null Flux 방식으로 전환하면서 가속되었다. 초전도 자석을 실용화 차량에 사용되기 위한 개발의 초점은;

1) 성능개선

- Quenching에 대비한 내구성 개선

〈표 4〉 ML Series에 사용된 초전도자석의 Parameter

Parameter	MLU001	MLU002	New Commercial System
Cross section	I-shaped	I-shaped	I-shaped
Composition			
No. of coils per cryostat	2 (or 1)	1	1
No. of cryostats/helium tank	1	3	2
Dimensions of SCM (m)	4×1.15	6.1×0.885	5.18×1
Magnetomotive Force (kA)	700	700	700
Dimensions of Superconducting Coil (m)	1.7×0.5	1.7×0.5	2.3×0.5
Copper Ratio	2	1.0	1.0
Persistent Current Switch Off-State Resistance (Ω)	0.8	50	100
Support	FRP column	FRP column	FRP column
Heat Leakage to Inner Vessel (W)	2.5	3	5
Mass (without refrigerator) (kg)	650	950	895
On-Board Refrigerator	separate	built-in	built-in (약 300kg)
Refrigeration Capacity at 4.4 K (W)	5	5	8
Force per Magnet (kN)	24.5	41.7	115.5
Heat Leakage per Force (W/kN)	0.1	0.07	0.03
lift Force per Magnet Mass	3.85	4.5	~10

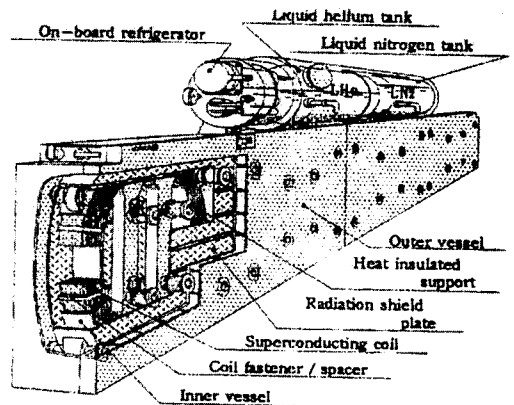
- 차량탑재용 냉동기가 감당할 수 있을 정도의 Heat Load 저감
- 차량탑재용 냉동기의 성능개선

2) 내구성, 신뢰성 개선
 냉동장치(Magnet+냉동기)의 수명을 10,000시간 이상으로

3) 운용의 간편성
 차량설비의 일부로써 초전도자석과 냉동장치의 운용을 간편하게

● On-Board Refrigerator

초전도 자기부상열차의 성공적 개발에는 초전도 자석기술 못지 않게 중요한 것이 On-Board Refrigerator이다. On-Board Refrigerator의 목



〈그림 8〉 초전도 자석 사진

적은 차량의 운행과정에서 냉매의 공급이 없이 초전도 자석을 운용하기 위한 것이다. 이를 위해 초전도 Magnet System의 Heat Leakage에 대응하는 Refrigerator가 필요하며 차량탑재에 필요한

내구성, 신뢰성과 경량화가 요구된다.

이를 위해

Liquid Helium : 4K GM/JT Refrigerator, 8.0W

Liquid Nitrogen : 80K GM Refrigerator, 140W

가 사용되고 있다.(GM/JT : Gifford Mc Mahon /Joule Thompson)

● ML Series의 현황 및 전망

시험차량 MLU002는 Miyazaki 시험선에서의 사고로 전소한 바 있다.(1991) 조사결과는 차량의 지속주행(MLX의 경우 120Km/Hr 이하)시 사용되는 고무 Tire가 파손됨으로 생긴 것으로 판명되었으며 새로운 시험차량 MLU 002N을 제작(1993) 시험을 계속하바 있다.

Yamanashi에 건설된 고속 시험선(18Km)은 1995년부터 가동을 시작하였으며 현재 시험차량 MLX01을 이용 매일 약 150Km의 주행시험을 수행하고 있다. 현재 최고속도 550Km를 목표로 안전성, 신뢰성, 내구성 그리고 승차감 개선연구를 수행중이며 차량의 개선과 함께 선로의 Switching, 다편성 운행시의 운전 Control 그리고 Tunnel에서의 주행성능에 관한 시험을 계속중이다.

일본 정부는 일본전역을 1일 생활권으로 만들기 위해 3시간에 일본전역을 주파할 수 있는 Network를 구상중이며 일부구간은 Maglev의 사용을 고려하고 있다. 현재 Yamanashi 시험을 포함하는 Chuo Shinkansen은 동경-나고야-오사카 연계를 계획하고 있으며 2005년 실용화를 목표로 하고 있다. 실용화시 동경-오사카간 500Km를 1시간이내에 주파하게 될 것이며 일 100,000내지 150,000의 승객을 실어 날르게 될 것이다.

저 자 소 개



金 仁 權

1940年1月31日生, 1965年 서울대학교 공과대학 기계공학과 졸업, 1969年 미국 콜로라도 주립대학 유체역학과 졸업(석사), 1981年 미국 와이오밍대학 유체역학 졸업(박사), 1965年~1967年 : 한

국 베아링(주), Engineer, 1972年~1977年 : 미국 Dravo Corporation, Senior Engineer, 1980年~1990年 8月 : 미국 GD Space Sys. Dvr, Engineer Specialist
(주관심분야 : 자기부상열차)