

자기부상열차

장석명*, 김봉섭**, 유문환**, 김인근***

(* 충남대 전기공학과 교수, ** 한국기계연구원 선임연구원,

***한국기계연구원 자기부상열차사업단 단장)

1. 서론

자기부상열차는 전자기적인 힘으로 부상·추진되므로 바퀴가 없이 운전되는 새로운 궤도교통수단의 차량(MAGLEV; Magnetically Levitated Vehicle)이다. 따라서 선로와 선체간에 아무런 접촉 부분이 없어 기계적 진동이 없이 조용히 주행할 뿐만 아니라 동력발생 시스템에 별도의 회전-직선형 운동변환장치가 전혀 필요 없어 시스템의 가동 신뢰성이 높고 보수유지비가 적은 것이 큰 특징이다.

1825년 영국의 Stockton으로부터 Darlington까지 바퀴식 기차의 선로가 처음으로 놓여진 이래로 꾸준히 발전하여, 175년이 지난 오늘날 비접촉 자기부상방식으로 프로펠러 비행기속도 수준인 550km/h로 나르는 초고속 열차가 개발된 것이다. 현재 독일에서는 고속형인 Transrapid 모델의 개발을 완료하고 함부르크~베를린 간 290Km 노선 건설을 추진중에 있으며, 일본은 종래의 초전도방식 MLU-002N 모델의 큐슈 미야자키 시험선로(7Km) 대신에 실용화를 겨냥한 야마나시 신실험선(18Km) 건설을 완료하고 MLX01모델을 개발하여 주행시험을 진행 중이다. 또한 일본은 우리나라

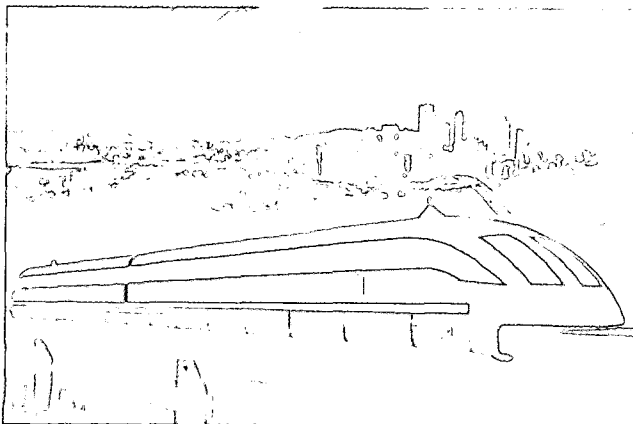


그림 1. 독일의 자기부상열차 Transrapid

의 도시형 자기부상열차(UTM: Urban Transit Maglev)와 유사한 상전도방식의 HSST 모델 개발도 이미 완료하고 나고야 등지에 실용화 준비를 진행중이다.

우리나라는 현재 국책연구개발사업으로 도시형 자기부상열차 UTM모델을 개발중이며 현재 제1호 시제품 차량의 주행시험이 대덕 한국기계연구원 내에서 진행되고 있다. 이 사업은 한국기계연구원 자기부상열차사업단이 총괄 주관하고, 현대정공 주식회사(현재는 한국철도차량주식회사)가 참여하고 있으며 한국전기연구소, 현대중공업주식회사 그리고 주요 대학 등이 동참하고 있다.

2. 자기부상열차 기술

2.1 개발의 역사

최초로 자기부상열차 개념이 제안된 것은 1900년대 미국의 R.Goddard, E. Bachelet에 의해서 였다. 그후 1930년대에 독일의 H. Kemper가 기차와 비행기의 장점에 자기부상의 원리를 덧붙여 사용하는 개념을 생각해 냈다. 이러한 개념들이 제안된 후 1960년대 초 미국 Brook Haven National Lab.의 J. R. Powell, G. T. Dandy가 최초로 자기부상열차를 설계하였다.

□ 개발 연혁

- 1934 : Hermann Kemper, Germany 의 특허 획득
「Levitation Transportation Systems Composed of Vehicles without Wheels Guided and Levitated over Iron Rails by means of Magnetic Fields」
- 1960 : James Powell & Gordon Danby, Brook Haven National Lab.,USA
* 초전도 반발식 자기부상열차 개념 정립
- 1984 : 영국철도기술연구소
* 상전도흡인식 자기부상열차 실용화
→ Birmingham 공항 ~ 철도역 : 약 600m



보다 빠르고 보다 편리한 차세대 교통수단(Ⅲ)

- 1969~현재 : MLU, MLX(일본, 야마나시선로)
: 초전도 반발식 자기부상열차
- 1970~현재 : Transrapid(독일, 엠슬란트 시험선로)
: 상전도 흡인식 자기부상열차
- 1974~현재 : HSST(일본) : 상전도 흡인식 자기부상열차
- 1989~현재 : UTM(한국) : 상전도 흡인식 자기부상열차

2.2 자기부상열차의 특성

2.2.1 속도 측면에서 본 자기부상열차 시스템 특성

- 디젤기관으로 추진하는 종래의 열차는 시속 144Km/hr 정도의 속도이며 현재까지 가장 보편적으로 활용되고 있는 시스템이다.
- 바퀴/레일식의 전기철도는 현재 시속 300Km/hr급으로 프랑스의 TGV, 독일의 ICE, 일본의 신간선이 있으며 일부에서는 그 이상으로 실험을 진행중이다.
- 자기부상열차의 경우 시속 500km 이상이 가능하여 육상운송시스템으로는 최고이며 목적지까지의 평균도달 속도 면에서는 제트여객기보다도 유리해질 수 있다.

2.2.2 환경 측면에서 본 자기부상열차의 시스템 특성

- 주요 소음 비교
 - 자연생태계의 소음 : 20dB
 - 시계 소리 : 30dB
 - 나뭇잎 소리 : 40dB
 - 자동차가 주행하는 소리 : 80dB
 - 항공기 이륙시의 소리 : 120dB
- 자기부상열차의 경우는 200Km/hr로 주행하는 경우 27m 떨어진 거리에서 62dB정도, 400Km/hr의 경우 74dB로 측정된 바 있으며, 250Km/hr로 주행하는 동일 조건에서 자기부상식은 60dB, 차륜식은 70dB로 측정된 바 있다.

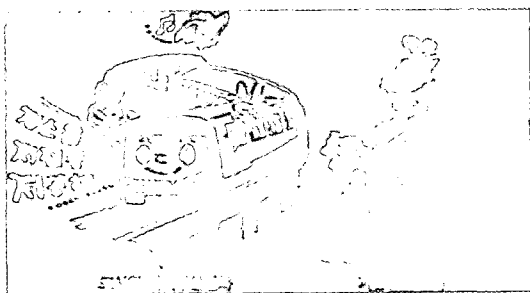


그림 2. 자기부상열차와 기존전동열차 특징

표 1. 자기부상열차 특성 요약

항 목	내 용
빠른 속도 (High Speed)	○ 부상, 안내, 추진이 물리적 접촉 없이 일어난다. ○ 기존의 지상 고속운송수단에 비해 우수한 곡선주행성능을 지니고 있어 더 빠른 속도와 가속도를 제공한다.
낮은 유지비용 (Low Maintenance)	○ 차량과 궤도 사이에 직접적인 접촉이 없고 바퀴등의 회전 부품이 없다 : 유지·보수비 절감
안전성 과 이용성 (Safety & Availability)	○ 기존의 운송수단에 비해서 구조적으로 안전성이 높고 유지비용이 적다.
적은 소음 (Lower Noise)	○ 저속주행시 일반 철도차량의 주소음원인 차체와 레일의 접촉소음이 없다.. ○ 고속주행의 경우에도 실험에 의해 차륜식 고속전철에 비해 적다.

- 대기 오염
 - 자기부상열차의 경우 매연에 의한 환경오염 요인은 없으며, 바퀴식에서 정지시의 브레이킹 동작에 따른 레일 마모에 의한 철분 비산 같은 경우가 발생치 않는다.
- 전자파 장애
 - 지구자계의 세기는 마이크로 테슬라(μT ; Tesla) 단위로 40, 칼러TV의 경우 500, 헤어드라이어 1,000인 데 비하여 Transrapid의 경우 100으로써 TV에서 발생하는 전자파 보다도 훨씬 적어 그 영향을 무시하여도 무리가 없다. 그러나 일본의 초전도자기부상열차인 MLU, MLX의 경우는 전자파의 크기가 매우 커서 차폐대책이 요구되고 있다.

2.2.3 시스템 성능면에서의 특성

- 구배 및 곡선주행 능력
 - 바퀴식 열차 : 300Km/hr에서 최소곡선반경 4,000m, 400Km/hr에서 최소 곡선반경 7,000m
 - 자기부상열차 : 300Km/hr에서 최소곡선반경 2,250m, 400Km/hr에서 최소 곡선반경 4,000m
 - 주요 노선의 최소곡률반경
 - : UTM 시험선로(한국) : 60m
 - HSST 시험선로(일본) : 100m
 - Transrapid 시험선로 : 1,000m
 - 신간선(동해도선) : 2,500m
- 경사 등판 능력
 - 자기부상열차는 경사 등판능력이 8% 이상으로 매우 우수하여 노선 설계시 거리의 단축은 물론 노선 선정조건이 매우 수월해진다.
UTM 시험선로(한국) : 6%, 신간선(동해도선) : 2%
- 안전성
 - 구조적으로 탈선의 위험이 없고 미끄러짐이 없으며, 부상계에 고장이 발생하여도 비상용 바퀴가 구동하여 안전하다.

2.2.4 경제성

- 토지 점유율, 매입비
 - 자기부상열차 노선은 전부 교가구조로 건설되기 때문에 토지 점유율이 대폭 낮아지고 지역을 兩分하지 않아 인접지역 주민의 불편을 야기하지 않기 때문에 매입보상조건이 매우 유리 해진다.

- 선로 건설비
 - 언덕주행능력이 우수하기 때문에 노선 선정 조건과 건설공사의 조건이 까다롭지 않아 비용이 크게 절감된다. 상대적으로 산악지대 등 지형조건이 나쁜 곳일 수록 차륜식에 비해 건설비가 크게 절감된다.
 - 터널공사의 경우 공사비는 단면적에 비례하는데 자기부상열차는 차륜식에 비해 단면적이 적어지기 때문에 터널공사비가 경감된다.
 - 자기부상열차의 경우 방음벽 설치비가 필요 없다.
- 유지·보수비
 - 주동력계에 마모부품이 전혀 없어 유지보수비가 교통수단중 최저이다.

2.3 자기부상열차의 기술 방식

부상 방식에 따라 자기부상열차의 방식은 상전도 흡인식과 초전도 반발식으로 구분되는데, 흡인식의 경우는 일반적으로 약 10mm내외, 반발식의 경우는 약 100mm 이상이 부상된다.

상전도흡인식은 기존의 전자석 제작 방식이 그대로 적용된 것으로서 부상력 한계로 인해 부상높이를 10mm 이상 크게 늘릴 경우 과도한 전류를 전자석에 흘리게 되어 부상 에너지 효율이 떨어지게 된다. 이 방식은 차량 하부에 설치된 전자석이 단지 레일을 끌어당기는 힘(흡인력)을 사용하는 것이기 때문에 구조가 비교적 간단하고 경제적인 부상 시스템의 구현이 가능하다. 반면에 궤도를 매우 정밀하게 설치해야 하는 어려움이 있지만 현재의 토목기술로 궤도의 정밀설치문제는 쉽게 해결되고 있고 장기간이 지나 궤도 높이에 변형이 생길 경우는 궤도 상단의 부상레일의 높이를 조절할 수 있도록 되어 있다.

초전도 반발식은 자기부상 개발 초기부터 이론적 정립이 이루어져 온 것으로서 이는 강력한 초전도전자석의 힘으로 자기부상열차를 10cm이상 충분히 부상시켜 궤도의 정밀도와 큰 연관없이 초고속화를 실현할 수가 있다. 현재로서는 거대한 냉동장치를 차량에 설치해야 하는 설계·제조 기술상의 어려움과 고비용 문제로 인하여 경제성 있는 실용화 모델 개발에 어려움을 겪고 있다. 이 방식에서는 차량의 초전도전자석과 대항하는 궤도면 전체에 걸쳐 상호 반발력을 발생시킬 수 있는 코일을 설치하게 되는데 코일 설치 방법은 궤도면 하단에 설치하는 방법과 궤도측벽에 설치하는 2가지 방법이 있고 현재는 측벽에 설치하는 방법이 횡방향 안 내력 확보면에서 유리하여 주로 적용되고 있다.

상전도방식을 고속 모델에 적용한 경우는 독일의 고속 자기부상열차 Transrapid가 있고 중저속 모델에 적용한 경우는 영국의 Birmingham People Mover, 독일의 M-Bahn, 일본의 HSST(High Speed Surface Transport), 그리고 한국의 UTM(Urban Transit Maglev)모델이 있다.

자기부상열차의 추진시스템으로는 유도형 리니어모터(LIM: Linear Induction Motor)와 동기형 리니어모터(LSM: Linear Synchronous Motor)가 주종을 이루고 있는데 2가지

방식 모두 회전형 모터를 직선형으로 펼쳐놓은 것과 같은 원리이다.

LIM은 구조가 비교적 간단하고 제어가 용이한 반면 입구단과 출구단에서의 단부 효과(End Effect)에 의한 효율 저하 문제, 2차도체판(알루미늄 또는 동판)에 과전류가 유도되고 2차도체판을 지지하기 위한 철판(Back Iron) 철손과 와전류손에 의한 에너지 손실 문제가 상존하고 있다.

이에 반해 LSM의 구조는 회전형 동기전동기와 마찬가지로 계자와 전기자로 구성되어 있으며 이를 펼친 형태이므로 LIM에 비해 구조가 복잡하고 비용이 많이 드는 반면 계자와 전기자의 구성 방법에 따라 효율을 LIM 보다 높일 수 있고 고속운전이 가능해진다.

자기부상열차는 바퀴식 열차와는 달리 속도면에서 이론적인 제한은 없으나 동기형 리니어모터(LSM)를 채용한 고속화 모델의 경우는 시속 약 550km까지의 실용화를 목표로 하고 있으며 유도형 리니어모터(LIM)를 채용한 방식은 약 100km 내외의 도시형에서 400km이상의 고속형까지로 개발되고 있다.

LSM을 이용한 방식은 상전도 전자석을 이용한 독일의 고속형 모델 Transrapid와 초전도 전자석을 이용한 일본의 고속형 모델 MLU(Magnetically Levitated U-shape), MLX01 모델이 있고, LIM을 이용한 방식은 영국의 BPM, 일본의 HSST, 한국의 UTM이 대표적이다.

종합적으로 살펴 볼 때 상전도 흡인식 부상과 LIM 추진이 결합된 방식이 저속형으로는 가장 경제적인 방식인데, 기술 향상에 따라 시속 400km 정도까지도 실용화 가능하기 때문에 우리나라의 국책연구모형인 UTM에는 이 방식이 적용되고 있다.

표 2. 자기부상열차의 기술방식과 사례 비교

유형	부상	추진	속도	비고
TYPE 1	상전도 흡인식	유도형 리니어모터 (LIM)	중저속	한국 UTM, 일본 HSST, 영국 BPM
TYPE 2	상전도 흡인식	동기형 리니어모터 (LSM)	고속	독일 TR
TYPE 3	초전도 반발식	동기형 리니어모터 (LSM)	고속	일본 MLU
TYPE 4	Hybrid		중저속	독일 M-Bahn

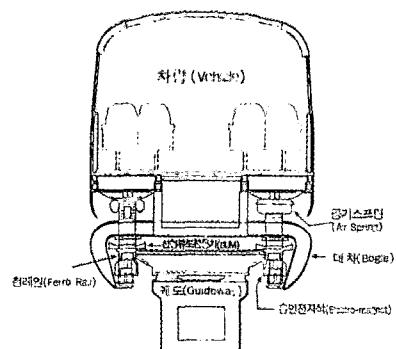


그림 3. 상전도 흡인식 구조

표 3. 부상·추진·제동 시스템의 기술적 특성

구성 요소	구 분	방 법	기능 / 원리
부상/안내장치 (Levitation & Guidance)	부상 방식	상전도흡인식 (EMS : Electromagnetic Suspension)	○철제 레일과 차량에 설치된 전자석 간에 서로 잡아 당기는 흡인력을 이용하여 부상시키는 방식 -대차의 각 중 센서(Gap Sensor 등)로부터 받아들인 데이터가 차상의 부상/안내 제어장치로 입력되고 그 결과 필요한 만큼의 전류를 초퍼에서 전자석으로 보내주어 부상력을 발생
	안내 장치	부상/안내 겸용	○안내력(Guidance Force)은 대차의 전자석들을 서로 비틀게 배치함으로써 발생 -중심축이 일치하지 않도록 설치된 전자석들과 부상레일 간의 간격을 각각의 Gap Sensor로 측정하여 Gap을 유지하기 위한 부상력이 공급되면 한쪽으로 치우치는 경우 자동으로 변위를 보상토록 작용
추진장치 (Propulsion)	장 치	유도형 리니어모터 (LIM)	○회전식 유도형 모터와 같은 원리로 구동 ○편측식 유도형 리니어모터 ○대차 1대 당 2조, 1차량에 총 6조
	설치방법	차상 1차식 (Short primary)	○차상에 LIM과 인버터를 설치 ○추진레일은 AI 재료로 하고 구조 보강을 위해 궤도상판간 Back Iron 설치
제동장치 (Brake)	제동방식	전기제동	○리니어모터가 제동시 발전기로 작동하여저항부하를 이용 제동함
		기계제동	○압축공기를 이용 제동기를 작동하여 Brake Lining이 레일과 마찰됨으로서 제동력을 발생 -차량의 정위치 정지 또는 비상시에 사용

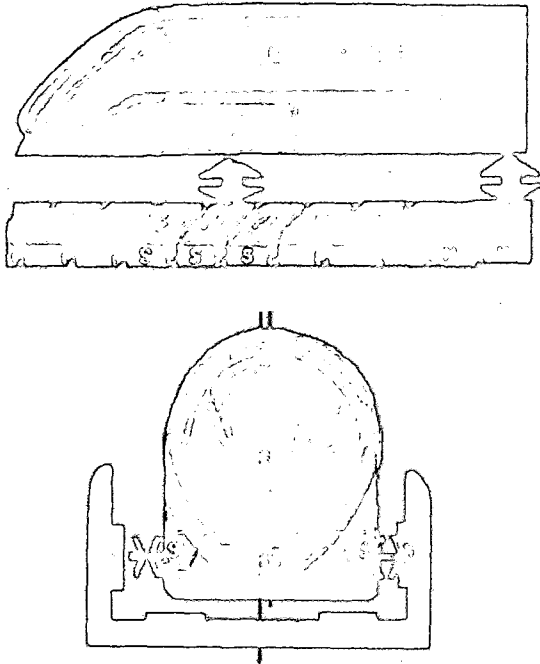


그림 4. 초전도 반발식의 부상, 추진, 안내의 개념

3. 세계적인 개발현황

미국은 1950년대부터 자기부상열차에 대한 개념을 정립하고 선도적으로 연구해왔으나 1960년대 말 경제적인 이유로 중단하였다. 중장기적으로 초전도자석과 상전도를 겸용하는 하이브리드형 자석을 응용하는 모델을 응용하는 고속 자기부상열차를 개발 추진중이다.

독일은 1969년 부터 본격적인 연구개발을 시작하여 1984년에 도시형인 M-Bahn 모델을 베를린에 실용화한 바 있으며, 현재 고속모델인 Transrapid-07 모델의 실용화 준비를 완료하고 2005년 상업운전을 목표로 베를린-함부르크 간 290Km 노선 건설을 추진중이다.

일본도 1970년대 부터 본격적인 연구개발을 추진하여 도시형인 HSST 모델을 여러 차례 박람회에서 전시운행 하였으며, 현재는 HSST-100 L 모델의 실용화 준비(나고야)를 진행중이다. 이와 더불어 초전도자석을 사용하는 고속모델인 MLU-002N(시속 500Km급)모델의 시험연구를 진행중이며, 최근 동경-오사카간 신계획 노선의 중간지점인 야마나시현에 실용노선의 일부인 18Km 시험선로의 공사를 완료하고 주행시험중(시험차량 : MLX -01)이다.

영국은 세계에서 가장 먼저 자기부상열차를 1984년에(실용화모델('84년):BPM(버밍햄 공항내 셔틀))한 바 있다. 또한 대만, 중국, 러시아, 이태리 등 여러나라에서 소규모로 시험연구 중이다.

3.1 독일

1960년대에 독일에서는 기존 바퀴식 철도를 대체할 새로운 고속 육상운송시스템으로 자기부상식과 공기부상식에 대한 비교우위 평가 논의가 있었던 바, 결국 자기부상식이 안정적인 제어가 가능하다는 점에서 우월한 시스템인 것으로 결론지어졌다. 아울러 연방교통성 주관으로 자기부상 방식으로 상전도와 초전도 방식에 대한 비교평가가 있었으며 결국 고속 자기부상열차의 방식으로 상전도방식이 채택되어 1969년부터 연방과학기술성(BMFT)이 주요 연구소와 기업을 규합하여 개발체제를 구축하고 예산을 지원하기 시작

한 바 있으며 1970년에 전자기 지지와 안내 시스템, 그리고 우선 LIM을 이용한 최초 주행시험 Model이 제작되었다.

수년간의 연구를 거쳐 1979년에는 Transrapid 05가 개발되어 동년의 함부르크 교통박람회 전시운행이 있었으며, 여기서는 908m의 Guideway를 90km/h로 주행하여 5만명의 승객을 태웠다. 한편 이해 과학기술성으로부터 Emsland에 실험선을 건설하도록 허가를 받았으며, 1983년에는 상전도 흡인식 LSM 추진 방식의 본격 고속 모델인 Transrapid 06을 개발하고 엠슬란트 시험선로상에서 주행실험을 장기간 실시하였다.

엠슬란트 시험선로는 1983년에 한쪽에 Loop가 있는 20.7km의 Test Course가 완성되어 일단 주행시험이 개시되었으며 1984년에는 Lufthansa 등이 출자한 MVP사를 설립, 실용화 준비에 한발 더 다가선 바 있다. 엠슬란트 시험선로는 1987년 말에 양끝에 폐Loop(곡선반경 1,000m & 1,690m)가 있는 현재의 31.5km 시험선로를 최종 완성되었으며 이 선로에서 Transrapid-06은 1988년 1월 22일 유인차량의 세계 신기록인 412.6km/hr를 달성한 바 있다. 1990년부터는 최종 실용화모델인 TR-07을 투입, 경부선 철도 3회 왕복운행거리에 해당하는 하루 2,500Km의 시험운행실적을 보유하고 장기간주행시험을 실시하고 있으며 현재까지 최고시속 450km/hr를 달성하고 있다.

최종 모델인 Transrapid-07은 상전도흡인식 LSM 방식의 도시간 중장거리 고속 대량 수송용 모델로 전자동 무인운전이 가능한 시스템으로 상세한 내역은 표 4와 같다.

표 4. TRANSRAPID-07 및 엠슬란트시험선로 내역

구분	항 목	내 역	
시스템 (TR-07)	부상가이드시스템	비접촉 상전도 자기부상방식 (흡인식)	
	주행시스템	지상1차 동기형 리니어모터(Long Stator형)	
	차량	2~12 량 연결, 72~120인/량	
	Guideway	통상 고가식, 최소반경	6,200m(500Km/hr), 2,250m(300Km/hr)
		최대 Cant	12, 구배 : 최대 10%
	운전 간격	5분	
	수송 인원	최대 편방향 : 15만인/일	
	소비 전력	63Wh/석.Km(500Km/hr) 28Wh/석.Km(300Km/hr)	
	크기(2량 연결)	길이, 폭, 높이(m) : 50.0 × 3.7 × 4.06	
	중량(공, 적 : 톤)	39.4, 90.0	
	좌석수(2량 연결)	200	
	설계 속도	500Km/hr	
	전자석	부상용 16개, 안내용 14개	

최근에는 함부르크-베르린간 290km 상업로선을 건설하기로 결정하고, 건설비확보, 토지매입등을 하고 있는데 여기에는 Transrapid 08모델이 투입된다.

3.2 일본

일본은 중저속용으로 상전도 방식의 HSST모델, 초고속용

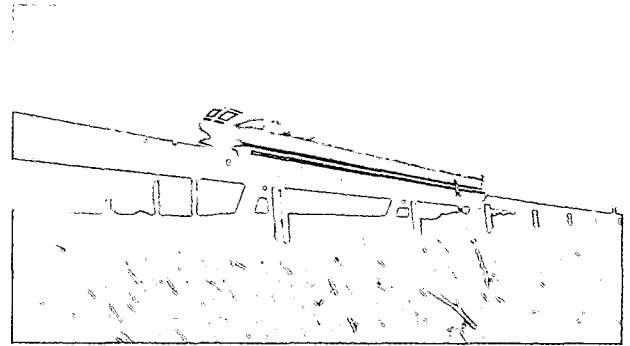


그림 5. 독일의 Transrapid 시스템

으로 초전도반발식의 MLU모델을 개발하여 90년대 초반까지 시험운행을 하였으나, 1997년 MLX-01모델을 야마나시 시험선로에서 개발하여 시속 550km/h를 달성한 바가 있다.

3.2.1 HSST

HSST시스템을 개발하게 된 직접적인 동기는 나리따 국제공항이 동경 도심으로부터 65km나 떨어져 있어 나리따공항 이용 승객이 교통문제로 상당히 어려움을 겪을 것이라는 생각에서 비롯 되었다. 1977년 JAL(Japan Airlines)이 독일 클라우스 마파이사가 축적한 LIM을 이용한 상전도부상식 자기부상열차 TR-04의 기술을 활용하여 HSST(High Speed Surface Transport) 시스템 개발을 착수하였다. HSST 시스템 개발이 착수될 당시 개발목표는 시속 300km/h로 도쿄중심-나리따 공항간을 15분내에 주행하는 고속자기부상열차 개발하는 것이었으나 이후 목표를 조정하여 보다 넓은 범위의 속도를 갖는 3가지 형태의 HSST시스템 개발 목표를 설정하여 단계적으로 개발해 나가고 있다.

- HSST-100 : 도시내 또는 공항내 Shuttle타입의 저속 자기부상열차, 평균속도 : 100 Km/h
- HSST-200 : 도시와 도시외곽간 중속자기부상열차, 200Km/h
- HSST-300 : 도시간 또는 도시외곽의 공항과 도심간 고속자기부상열차, 평균속도 : 300 Km/h

1976~1981년간 도쿄부근 1,600m 시험선로에서 시험주행을 거친 후 HSST는 여러번 일본 국내 및 세계박람회에 참가하여 성능을 입증하였는데, 특히 1989년 요코하마 세계박람회에서 운행된 HSST-05는 560m 길이의 직선시험선로에서 126만명의 승객을 수송하였다. HSST는 우리나라의 UTM과 부상추진시스템이 거의 유사한 것으로서 사실 UTM은 부상추진시스템 설계시 HSST모델의 기본 개념을 상당부분 참조한 바가 있다.

1991년 부터는 일본 나고야에 1.6Km 시험선로를 건설하고 본격 실용화를 겨냥한 시험차량인 HSST-100모델의 시험주행에 돌입했으며 2량/1편성으로 구성된 이 시험차량은 1991년 5월이래 총 35,000Km 주행실적 보유하고 시험중 교통안전공해연구소의 교통안전심사를 받아 시속 100Km 급의 상업용 모델로 기술평가에 합격한 바 있다.



최종모델인 HSST-100L 시스템은 1량 당 3대의 대차(Bogie)로 구성된 HSST-100과는 달리 1량 당 5대의 대차(Bogie)로 구성하고 경량화면에서도 진일보했고 차체의 외관도 실용화를 겨냥하여 보다 미려한 디자인을 채택하고 있다. 이 모델은 현재 동경 교외 오후나 지역의 약 6Km 상업노선, 나고야 실용 노선 등에 적용 예정이다.

3.2.2 MLU, MLX-01

ML-500은 Inverted T형의 Guideway 위를 차상L형 Cryostat의 측면과 아래면에 설치된 초전도자석에 의해 부상 및 추진되며 1977년부터 1979년 12월까지 시험운행 되었다.

MLU-001 시스템에서는 열차 좌우에 설치된 초전도자석이 부상.추진.안내제어의 3가지 기능을 수행하도록 설계되었고 이를 위한 U Type Guideway를 채택한 것이 ML-500과 크게 다른 점이다. 지상코일에는 SMC(Sheet Mold Compound)로 주조된 알루미늄이 사용되었으며 바닥에 설치된 코일이 부상, 측벽에 설치된 코일이 추진 및 안내에 이용됨은 ML-500 시스템의 경우와 동일하다. On-board 냉동시스템이 초전도 자석 각각에 설치되어 있다. Miyazaki Test Center에서 8년간 주행시험이 이루어 졌고 최고 속도는 420Km/hr를 달성하였다.

1987년 부터 시험이 시작된 MLU-002는 상업운전을 위한 모델로서 MLU-001과 다른 점은 초전 도자석이 객실과 떨어진 곳에 위치한 대차(Articulated Bogie)에 설치되어 객실에 미치는 자장의 세기를 감소시킨 것 외에 초전도자석과 이에 관련된 냉동시스템기술에서 많은 진전이 이루어진 점이다. 각 Bogie에 설치된 초전도자석의 길이가 1.5배로 길어졌으며 Pole Pitch의 증가 2Poles/2Lines 방식의 배열이 채용되었다. 이로 인하여 필요한 초전도자석의 수가 감소되었으며 이에 따라 부상력/자중비를 MLU-001의 3.9로부터 MLU-002에서는 10까지 향상시켰다. 또한 Guideway 바닥에 코일을 설치함이 없이 지상 측벽에 설치된 코일과 차상 측벽의 초전도 자석만 이용하여 부상.추진.안내 3가지 기능을 수행하는 새로운 형태의 Null Flux 방식이 적용되었다. 이 모델은 시속 500Km/hr, 12~16량 편성 차량으로 하루 200,000명 수송 목표로 시험운행되다가 전자석의 화재로 소실되었다.

이러 MLU시스템에서의 쓴 실패를 거울삼아 미비된 기술을 해결하므로써 인간사에 있어서 획기적인 업적을 달성하게 되었다. 즉 새로운 시스템인 MLX-01시스템을 1990년대 들어 국가적인 프로젝트로 시작하여 1997년 4월 개발을 완료하면서 획기적인 속도인 시속 550km/h를 성공적으로 달성한 바가 있다. 이 모델은 동경~나고야~오오사카(Linear Express)노선에 야마나시 시험선로 운행시험을 하며, 선로를 계속 연장하여 전 구간을 실용화 추진 할 예정이다.

3.3. 영국

□ BPM BPM(Birmingham People Mover)

영국에서는 영국국철(BR)의 더비 연구소에서 Maglev의

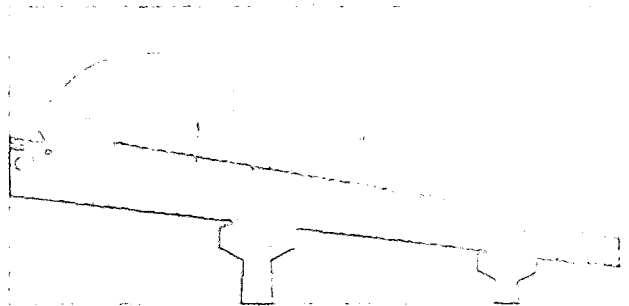


그림 6. HSST

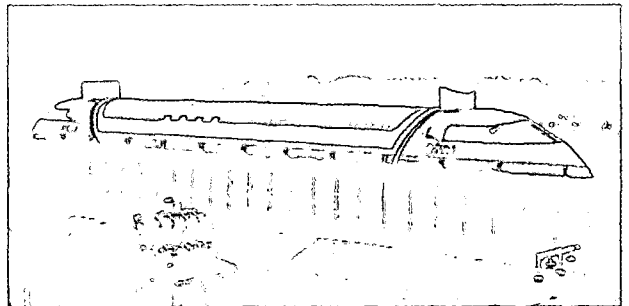


그림 7. MLU

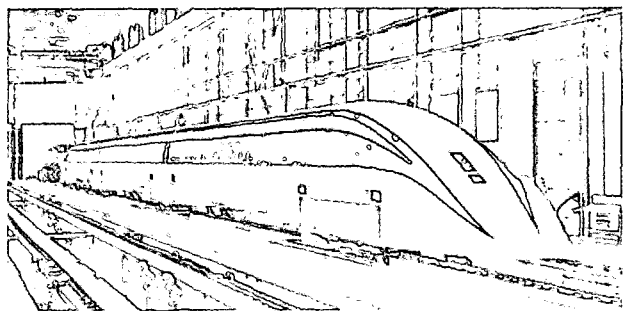


그림 8. MLX-01

개념이 연구되어 1970년대 후반에 길이 3.5m, 중량 약 3ton의 차량과 커브와 조금의 경사가 있는 연장 100m의 시험선로를 건설, 시험에 들어갔다. 그 때의 Guideway와 차량의 부상Gap은 약 15mm이었으며 시험 결과 차량은 조용하며, 저유지경비 시스템인 것이 확인되었다. 이 연구개발에는 임페리얼, Sussex, Bath, Manchester, Nottingham 대학 등이 동참하였다.

다음 단계의 문제는 적당한 실용노선을 찾는 것이었으며 여러 장소를 검토 한 결과, Birmingham의 신공항에 Maglev을 건설하기로 하였다. Birmingham 신공항에는 People Express Way라고 하는 이름의 고무타이어로 주행하는것, 스키의 리프트와 같은것, Maglev system등이 공항 이용객의 수송수단으로서 검토 되었다. 그러나 건설비, 에너지 소비, Running Cost, 소음, 무인자동화등을 면밀히 고려한 결과, 자기부상 시스템이 가장 저렴(최초의 경비는 높지만, Maintenance의 비용, 운영비가 저렴)하다는 결과가 나와 1984년에 건설을 완료하여 운전을 시작하게 되었다.

이 노선은 노선의 전체 길이가 600m 정도로 짧기는 하지만 실용화 노선으로는 세계적으로 가장 먼저 완성되어 성공적으로 무인자동운전한 사례로 기록되고 있다. 이 시스템은 우리나라의 UTM, 일본의 HSST와 유사한 상전도흡인식, LIM 추진 방식의 중저속 모델이지만 UTM과 HSST가 횡축형 전자석을 사용하는 것과는 달리 종축형 전자석을 채택하고 있어 부상시스템이 외관상 큰 차이가 난다. 부상되는 공극은 약 15mm이며 LIM에 의해 주행하는 全自動無人 운전 시스템으로 UTM이나 HSST와 마찬가지로 역시 차량과 Guideway간에 기계적으로 접촉하고 있는 곳은 집전 장치외에는 없고, 움직이는 곳에 통상 Maintenance가 필요한 곳은 출입문 이외에는 없다. 제동은 보통 LIM 역상 제동을 이용하고 이상시 기계식 제동이 사용되며, 그 이외에는 마모가 발생하는 곳은 없는 시스템이다. 따라서 유지보수할 일이 거의 없고 운영비도 저렴하다는 것이 지금까지의 운영으로 입증되었다.

노선은 신Birmingham 공항 Terminal에서 Birmingham International역 간의 623m 이다. 역은 노선 양쪽의 공항 Terminal과 BR역의 2개소에 있고, 그 두 역간의 이동시간은 약 100초이다. 운전횟수는 15분간에 8열차의 운행이 가능하다. 운영시간은 5:30부터 새벽 1:30까지인 20시간으로 BR의 시각에 맞춰서 운행되고 있다. 개업후 최초 3개월간에 10만명 이상의 사람이 승차했다. 특히, 주말에는 수요가 많아 1회에 50명을 나른 적도 있으며, 1984년의 Motorshow(12일간)에서는 51,000명을 수송한 실적도 있다. 전력소비는 1회의 주행에 평균 2KWH정도이며, 이것은 3.2KWH/량·Km 이고, 정원은 40명이고, 0.08 KWH/Km·정원이다.

3.4 미국

1960년대에 Brook Haven National Lab.의 James Powell 박사와 Gordon Danby 박사의 초전도 반발식 자기부상열차 개념 정립이 이루어진 바 있다. 1960년대에는 MIT, Westinghouse 등에서 Electropult 시스템, 운수성(DOT)의 Pueblo시험트랙에서의 Garret사, LIMRV, Grumman사의 TLRV 개발실험, 달라스 공항시스템 등의 연구가 활발히 진행되다가 1978년 정부(닉슨 정부)의 지원 중단 후 개발이 부진하였으나 1984년부터 스탠포드연구소, Ford 자동차회사, Boeing Aerospace 등에서 자기부상시스템 개발을 계속해 온 바 있다.

- 1991년 12월 18일 연방의회에서 총합체계의 육상교통 효율화 법안 채택 (ISTEA : Intermodal Surface Transportation Efficiency Act) : 美公法 102-240

* 연방 운수성(DOT) 장관이 상무성(DOC)장관, 에너지성(DOE)장관, 육군공병단(USACE) 부사령관 및 관련기관의 협의하에 대기오염, 에너지 소모, 소음, 토지점유율, 안전성 등을 고려하여 기존교통체계의 대안으로 자기부상열차의 개발 및 실용화를 위한 연방정부차원의 연구개발을 추진해야 한다는 내용

1992년 부터는 연방정부 주도로 NMI(National Maglev Initiative)를 구성하고 본격 개발에 착수한 바 있다. NMI는 미국육군공병단(USACE), 운수성(DOT), 에너지성(DOE)의 알곤 국립연구소 과학기술자들과 교통전문가들로 구성되어 1992년 부터 10개월간 65억원의 예산으로 1단계의 GMSA (Government Maglev System Assessment)팀을 구성하고 예비연구와 시스템 선정작업을 실시하였으며 이후 5년간 5,800억원 규모의 사업계획을 수립 추진하였으나 현재는 예산사정 등으로 인해 담보상황인 것으로 알려지고 있다. 이 계획에서는 알곤국립연구소가 중심이 되어 3.3km의 시험트랙, 각종 시뮬레이션 및 설계를 위한 프로그램 개발, 시험장치, 전자파 환경시험등의 내용이 포함되어 있었다.

NMI가 구성한 4개의 SCD(System Concept Definition)팀인 벡텔사, Grumann 항공사, Foster-Miller사, Magne Plane사가 각각 수행한 초전도반발식, 초전도/상전도 병용식 등의 개념설계는 일단 1993년까지 완료된 바 있다. 알곤 국립연구소가 설계한 시험선로는 3.3Km로서 Argonne Basic Guideway 상에 다른 형태의 Removable Guideway를 설치 실험하는 특수한 방식이다.

3.5 기타 국가

3.5.1 이탈리아

정부기관인 National Research Council(CNR) 이 주관이 되어 1992년부터 5년 계획으로 Progetto Finalizzato Trasporti 2(PFT2) 프로젝트(예산: 960 Thousand Million 리라)를 세우고 Padova, Bologna, Milan Palermo 대학이 초전도와 상전도시스템을 병행하여 개발을 진행중이다.

3.5.2 캐나다

캐나다 정부지원기관인 CIGGT(Canadian Institute of Guided Ground Transport)가 주관이 되어 1970년대 초부터 개발하여 왔다. 종래 몬트리올~토론토를 400Km/hr 급의 초전도 반발식 자기부상열차로 연결하는 등의 계획을 세운 바 있으나 연구개발비의 국가지원이 이루어지지 않아 현재는 중단되어 있는 상황이다.

3.5.3 루마니아

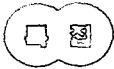
Timisoara에 Homopolar형 LSM을 추진장치로 하는 Magnibus 시스템과 150m 트랙이 개발되어 있다.

3.5.4 중국

일부 대학에서 기초연구 진행중이다.

4. 국내 현황

우리나라의 자기부상열차 개발을 위한 연구는 '80년대 중반 한양대학교와 현대 정공(주) 등에서 소규모 부상추진시스템 실험연구로 부터 시작된 바 있다.



1989년에는 한국기계연구원 내에 자기부상열차사업단이 설치되면서 본격적인 국책연구사업이 시작되었으며, 1990년까지 1년간은 기술방식 선정, 조사연구 (Feasibility Study) 그리고 여러 형태의 Small Scale Model 제작과 시험을 거친바 있으며 개발모델의 형식을 상전도흡인/LIM 식으로 결정하였다.

- 1단계 국책연구 : 과기처 지원, 기계연 주관(단독)

1991년부터는 현대정공이 대전EXPO 전시은행 자기부상열차 개발을 본격 추진하고 대우중공업은 자체적으로 시험시설을 갖추고 개발을 진행하였다.

- 기계연 자기부상열차사업단의 對기업 기술협력

- * 현대정공 : 대전EXPO 전시은행 자기부상열차 개발 협력(추진시스템 중심)
- * 대우중공업 : 자체모델 개발 지원(부상·추진 요소기술)

1994년부터는 2단계 국책연구로 본격적인 도시형 자기부상열차 개발사업이 착수되었으며, 이 사업에는 현대정공이 참여기업으로 참가하여 실용화 모델인 UTM 개발 목표를 세우고 현재 개발이 진행중이다.

- 현재 UTM-01 제1차량 개발 완료 주행시험중 : 기계연 1.1Km 시험선로상

4.1 도시형 자기부상열차(UTM: Urban Transit Maglev) 개발

1단계 국책연구('89~93)를 통하여 실차형 부상추진시스템 구현, 100m 시험선로를 통한 시험 경험을 보유한 자기부상열차사업단은, 1994년부터 본격적인 도시형 자기부상열차 실용화 모델 개발계획을 수립하고 현대정공(주)이 동참하는 2단계 국책연구사업을 출범시켰다.

당시는 우리나라에서 경상남도의 사상~김해 경전철 노선, 서울의 천호동~하남시 경전철 노선 등에 대한 활발한 논의가 시작되는 등 경전철에 대한 관심이 크게 고조되기 시작하는 시점으로서 국책연구로 개발할 도시형자기부상열차도 결국은 지하철을 대체하는 것이 아니고 주요 경전철에 적용하는 모델로 개발하는 것이 자기부상시스템의 기술적 특성이나 전반적인 도시교통정책의 흐름에 비추어 순리적인 방향이라고 결론지어졌다.

이에 따라 한국형 모델인 UTM의 기본설계가 이루어지고 부품 개발로부터 시작하여 차례로 대차(Bogie), 차체 순으로 개발을 진행하여 오늘날 UTM-01 제1차량이 탄생하여 시험주행하는 단계에 도달한 것이다.

한편 UTM 개발에 필수 요건인 주행시험을 위해서 국책연구와는 별도로 정부의 특수사업으로 도시형 자기부상열차 시험선로 건설사업을 추진하여 1993년에 기계연 인접부지를 매입하고 건설에 착수하여 1995년 말에 총연장 1.1Km의 시험선로를 완성. 가동에 들어간 바 있다. 이 시험선로는 세계적으로도 3~4위 권에 드는 자기부상열차 실용화모델 주행시험 선로로서 도시형 자기부상열차 개발의 성공적 추진을 위한 기반설비가 되고 있다.

현재 국내의 자기부상열차 시스템 개발력은 일본의 동형 모델인 HSST 수준에 근접하고 있으나 차량용 전장품의 신뢰도가 일본제품보다 아직 떨어지고, 차량의 경량화 미흡으로 중량이 HSST의 120% 수준에 머물고 있는 등 많은 개선의 여지를 남겨놓고 있다.

그러나 현재 개발·시험중인 UTM-01 모델을 대상으로 볼 때 일부 센서류를 제외한 모든 부품이 국산화(99%) 되어 있고, 유관 업체들의 기술수준이 계속 향상되고 있어 향후 전망은 매우 밝다고 볼 수 있으며 예상컨대 향후 2~3년이면 현재의 HSST 수준에는 도달 가능할 것으로 개발팀에서는 판단하고 있다.

무엇보다도 UTM은 설계는 물론 부품서부터 차량제작까지 모두 국내 연구·기술·생산 인력의 힘으로 개발하고 있는 것으로서 여기에 관련된 연구기관과 참여기업(대기업, 중소기업)이 약 30여개에 달해 실용화 사업 추진시에는 즉시 컨소시엄을 구성하여 사업을 추진하고 시스템 완성 이후에도 사후관리를 국내 기술진의 힘으로 모두 신속하게 해결할 수 있는 준비가 갖추어지고 있다. 이는 여타의 경전철 시스템이 자기부상열차에 비해 기술적으로 어렵지 않음에도 불구하고 아직 국내에서 개발한 경험이 없어 현재로서는 외국에서 들여올 수 밖에 없다는 점과 비교할 때 교통정책 추진상 결코 간과할 수 없는 비교우위점으로 나타나고 있다.

4.2 UTM-01 : 일반 제원 (제1차량 / 제2차량)

UTM 모델은 경전철 개념이 적용된 것으로서 1량당 60~120인승, 2~6량 편성으로 시간당 최대 5,000~20,000명 정도의 중규모 노선에 적합한 모델이다.

(지하철의 경우 1량 당 200~300인승, 8~10량 편성, 대량 수요노선에 적합)

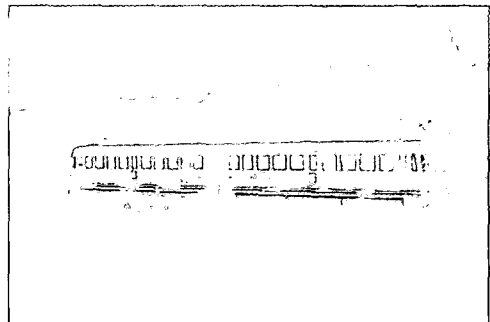


그림 9. UTM

5. 결 론

지금까지 자기부상열차 기술의 역사와 연혁, 원리와 성능면에서의 여러 장점, 기술방식, 세계적인 개발 현황 및 우리나라의 개발 현황 등을 소개·검토하였다. 즉 자기부상열차는 바퀴식 열차에 비해 안정성, 경제성, 지역을 兩分하지

표 5. UTM 및 시험선로 내역

구분	사양	제1차량 : 주입실험증	제2차량 : 개발증
설계최고속도	110Km/hr	70Km/hr까지 실험	100Km/hr까지 실험
최고 가속도	0.8m/sec ²	0.6m/sec ²	0.8m/sec ²
차량 치수	L 13,000 × W 3,000 × H 3,960	L 13,000 × W 3,000 × H 3,860	L 13,000 × W 3,000 × H 3,600
차량 중량	자중 : 21톤, 정원 승차시 : 25.5톤	21톤	19.5톤
열차 편성	2량 / 1편성		
승차 정원	60인승 (최대 120인승)	60명 탑승	120명 탑승 (60석)
지차 방식	1차량 당 3대차에 의한 분산지차		
부상 방식	상전도흡인식(EMS), 전자석 24대/량		
부상 공극	11mm	11mm → 10mm	10mm
안내 방식	전자석 Stagger 배치, 횡방향 제어	Stagger 25mm, No Lateral	No Stagger, No Lateral
추진 방식	편축식 선형유도 전동기(SLIM)		
제동 방식	회생(발전)제동, 공기제동		
Guideway	1.1Km 시험선로 : 60mR, 6% 구배		
전원공급방식	케도 양측에 Power Rail 설치		
공급 전압	1,500VDC		
운전 방식	수동 및 자동	수동	수동 및 자동

않으며 door to door가 가능한 편리성, 대기오염 및 소음등에서 환경 친화적인 측면, 가속 및 속도특성 등에서 많은 이점을 가지고 있다. 또한 자기부상 열차 기술들은 다른 분야의 적용면에서 부가가치가 매우 큰 이점도 가지고 있다. 이와 같은 많은 장점을 가지는 자기부상열차의 개발 및 응용은 기술발전뿐 만 아니라 우리의 삶의 질을 크게 향상시키는 중요한 수단이 된다. 본 내용이 향후 관련 연구자들은 물론 일반 전기공학도들에게도 중요한 참고자료가 되기를 기대하며, 아울러 국내에서도 빠른 시일내 자기부상열차의 선로 건설 및 응용이 되어 이 분야의 先導기술국이 되었으면 한다.

참고문헌

- [1] 신교통수단 도입을 위한 타당성 연구, 한국기계연구원 보고서, 대전광역시, 1998.2
- [2] 장석명“일본의 초전도 자기부상열차 ‘MLX01’의 야마나시 선로 주행시험 참관”. 전기학회지 제47권 6호, pp.45-48, 1998.6
- [3] 장석명, 박찬일“신교통시스템으로서의 자기부상열차 검토(2)”. 전기학회지 43권 7호, pp.23-30, 1994.7
- [4] 장석명“고속철도 건설사업 무엇이 문제인가? - 우리나라의 고속전철정책에 관한 의견”, 국회 민주당 교통체신위원회의원 정부고속철도 관련 정책자료집-참고자료6, pp.76-80, 1994.5
- [5] 장석명, 박찬일“신교통시스템으로서의 자기부상열차 검토(1)”. 전기학회지 43권 3호, pp.18-28, 1994.3
- [6] 장석명“ 1. 주요국가들의 자기부상열차 개발과 실용화 현황, 2.자기부상열차의 비교 우위성” 민주당 고속철도 차종선정 진상조사위원회, 조사보고서, pp.57-60, 1994.1.10
- [7] 장석명“자기부상열차 추진시스템의 리니어모터 응용추이” 전기학회지 42권 12호, pp.24-33,1993. 12
- [8] 장석명“ 자기부상열차의 특징과 각국의 개발 및 운행현황”, 국회 국정감사, 교통체신위원회 참고인 신문 자료집, pp.1-44, 1993.10.18
- [9] 장석명“자기부상열차의 각 국가별 최근의 개발동향” 전기학회지 제42권 9호, pp.46-52, 1993.9
- [10] 장석명“바퀴식 고속전철의 도입건설정책은 반드시 재고되어야 한다”전기학회지 제40권 8호, pp.5-9, 1991.8
- [11] 장석명“미국을 중심으로 한 자기부상열차의 응용전망 및 시장성과 우리나라의 개발방향” 전기학회지, 제40권 2호, pp.20-29, 1991.2

제자 소개



장석명 (張錫明)

1949년 7월 3일생. 1976년 2월 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1978년-현재 충남대 공대 전기공학과 교수. 1990년-현재 본 학회 평의원. 1999년 1월-12월 본 학회 전기기기 연구회 간사장. 1999년-현재 본 학회 편집이사.



김봉섭 (金鳳涉)

1981년 동국대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년-현재 한국기계연구원 선임연구원.



유문환 (柳文煥)

1978년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 (주)경인에너지 발전사업부. 1980년-1984년 한국원자력연구소(연구원). 1985년-현재 한국기계연구원 선임연구원.



김인근 (金仁根)

1965년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1969년 미국 콜로라도 주립대학 기계공학과 졸업(석사). 1971년-1977년 미국 Dravo Corporation(Senior Engineer). 1980년 미국 와이오밍대학 유체역학 졸업(공학박). 1980년-1990년 미국 General Dynamics(Engineering Specialist). 1990년-현재 한국기계연구원 자기부상 열차사업단 단장.