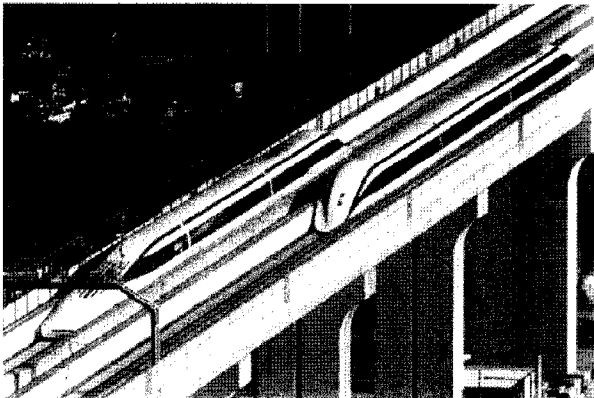


# 일본의 초전도 자기부상열차 기술 개발 및 실용화 현황

| 이창영 · 한영재 · 이형우 · 이영훈 · 권혁빈 · 강부병 |  
한국철도기술연구원 초고속열차연구실

## I. 머리말



현대사회의 고속·고급 교통수단에 대한 요구에 부응하고, 고유가 및 온실가스 등 원유기반의 교통시스템의 문제를 해결할 수 있는 신교통시스템으로서 초고속 자기부상철도에 대한 관심이 국내외적으로 고조되고 있다.

이에 따라, 2003년 중국 상하이(푸둥공항~ 시내)에 성공적인 상업운전으로서 그 신뢰성을 입증한 독일의 초고속 자기부상열차인 Transrapid는 금년 8월의 항주우 연장(약200km) 초고속자기부상열차사업의 재개와 미국 연방교통부의 캘리포니아(애니하임~라스베가스)의 초고속자기부상열차 구축사업의 예산 승인등으로 본격적인 노선 확대를 준비하고 있다.

한편, 581km/h의 세계최고주행기록을 달성한 일본의 초전도 자기부상열차는 2005년 실용화를 위한 기술개발이 완료되었음을 선언하고 지난해 4월에는 동경-오사카간을 시속

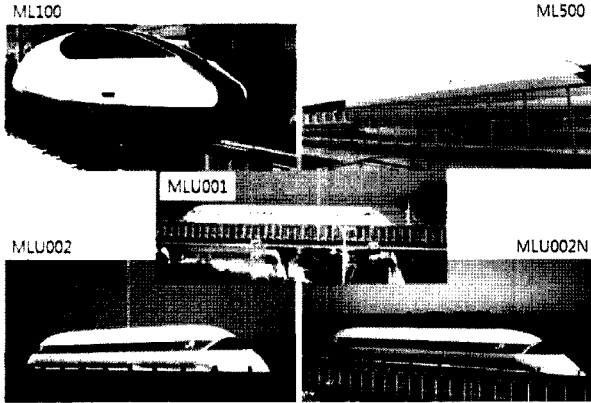
500km/h의 속도로 주파하는 추오신칸센을 건설할 것을 발표함으로써 본격적인 실용화에 착수하였다. 전체 노선 중 1단계 우선사업으로서 약5조원을 투입하여 동경에서 나고야까지의 290km 구간을 2025년까지 완료하는 것으로 계획하고 있다.

본 논문에서는 일본의 초전도 자기부상열차의 기술 개발 이력과 추진 및 부상·안내 원리를 소개하고 실용화를 위한 기술 개발 현황에 대해서 살펴보고자 한다.

## II. 초전도 자기부상열차 기술 개발 이력

일본의 초고속 자기부상열차는 일본 최초의 고속열차인 동해도신칸센이 개통되기 전부터 그 필요성이 제기되면서 1962년 리니어모터에 의한 추진시스템의 조사를 시작으로 연구개발의 역사를 거슬러 올라간다. 당시 JR부설연구소에 초고속철도연구회를 설치하고 종래의 바퀴식 철도의 속도 한계를 극복하기 위한 다양한 추진방식에 대한 조사 및 모의실험과 함께 차량의 지지를 위한 공기부상, 영구자석 또는 초전도 자석에 의한 반발식 자기부상 등의 기초 연구를 실시하였다. 이러한 기초연구를 통하여 초고속 자기부상열차를 구현하기 위한 기술로서 초전도 반발식 자기부상방식으로 결정하였고 1970년 당시 일본 교통성의 지원하에 본격적인 연구개발에 착수하게 되었다.

1972년에는 초전도 자기부상 LSM(Linear Synchronous Motor) 추진 실험차인 LSM200과 초전도 자기부상 LIM



〈사진자료 : www.rtri.or.jp〉

그림 1. 초전도 자기부상 시제 차량

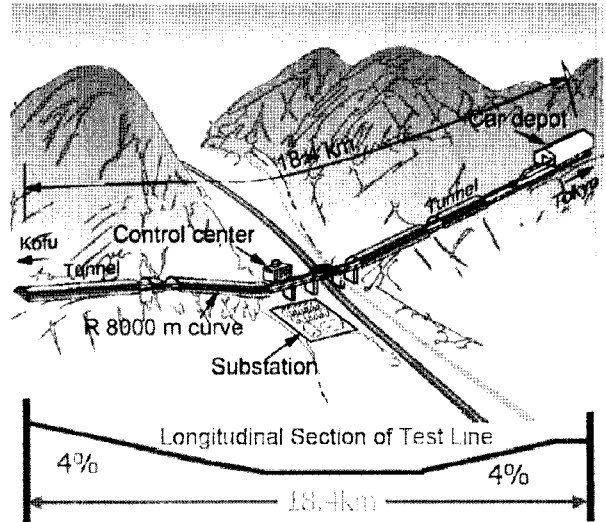
(Linear Induction Motor) 추진 실험차인 ML100으로서 자기 부상주행실험에 성공함으로써 초전도에 의한 초고속 자기부상 열차의 실현 가능성을 확인하였다.

이러한 성과를 바탕으로 1977년에는 500km/h의 주행가능성을 확인하기 위하여 미야자키현에 길이 7km의 실 규모에 가까운 시험선을 건설하고, 시험차인 ML500에 의한 주행 시험을 실시하여 1979년에 목표 최고속도인 500km/h를 초과한 무인 517km/h의 속도를 달성하였다.

이후, 보다 효율적인 추진 및 부상 안내 방식을 개발하여 가이드웨이 단면형상을 역T에서 U로 개조하고, 승객의 탑승이 가능하도록 실제 차량에 가까운 유인형 시험차인 MLU001, MLU002, MLU002N을 제작하여 2량 또는 3량 편성 주행에 따른 승차감등의 시험을 실시하였다. 또한 분기기의 연구, 초전도 마그넷 및 냉각시스템 성능평가, 비접촉 집전장치 및 전력 공급장치 특성평가 등 실제 운행 차량과 궤도의 설계를 위한 데이터를 확보하였다.

미야자키 시험선에서의 연구 성과를 토대로 1996년에는 야마나시 시험선을 건설하고 실제 주행 환경에서의 시제차량에 대한 신뢰성 및 내구성 평가, 공력특성 개선, Cost 저감 등 초전도 자기부상열차의 실용화를 위한 기술개발을 진행하게 되었다.

야마나시 시험선은 당초 42.8km 규모의 시험 구간을 계획하였으나 용지매수 지연, 주행시험의 조속시행의 필요성 등으로 인해 18.4km구간을 우선 건설하였다. 시험차량(MLX)은 전 두부 형상을 달리한 3종의 선두차량과 표준 및 장대 중간 객차



〈그림자료 : MT-19, 2005, JR 발표자료〉

위치	Sakaigawa ~ Akiyama
노선길이(km)	18.4(12.8km 이중 트랙)
터널 구간 길이(km)	16.0
교각 구간 길이(km)	2.4
커브반경 (km)	8 ~ 20
최대 구배	4%
관제소	1 개소
급전소	1 개소

그림 2. 야마나시 시험선 개략도

를 3량 또는 5량 편성하여 1997년부터 주행시험을 개시하였다.

시험은 크게 제1기 시험기간(1997~1999)과 제2기 시험기간(2000~2004)으로 나뉘어지며 시제편성차량에 대한 장기신뢰성의 평가를 비롯하여 실용화에 요구되는 다양한 기술 및 구성품의 개발을 중심으로 진행되었다. 특히, 2003년에는 3량 편성 MLX로서 유인 세계최고기록인 581km/h의 주행 속도를 달성하였다.

2004년도 말에는 8년에 걸친 야마나시 시험선에서의 기술 개발성과에 대해서일본 국토교통성 산하 '초전도 자기부상식 철도 실용 기술 평가위원회'에서「초전도자기부상식철도에 대해서실용화의 기반기술이 확립되었다」는 최종 평가를 내렸다.

2006년에는 JR동해가 현 야마나시 시험선을 당초 계획구

연도	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
기본주행시험	신뢰성 내구성의 검증												
중간가속시험	고속연속주행 시험												
	비용의 절감												
	신장식지상코일개발 등성판인사범(초전도자기부상열차용성형시험)												
신뢰성 확보인사범	내구성의 검증 계속												
	고속연속주행시험												
	신장식 전시소입개발 등성판인사범 개발												
신뢰성 확보인사범	고효율전력변환기개발 등성판인사범 개발												
	신장식 전시소입개발 등성판인사범 개발												
	기타도입이구조의개선 등성판인사범개발												
신뢰성 확보인사범	코어 기술을 중심으로 한 기반기술의 레벨업												
	코어 기술의 공력적 특성의 개선												
	선두부 중간차량개발 등성판인사범 개발												
신뢰성 확보인사범	연관(내)이터 위주시험												
	고온초전도마그넷의 개발												

그림 3. 초전도 자기부상열차 주행시험 경과 및 계획

간인 42.8km로 연장 건설하기로 발표하였다. 이에 따라 야마나시 시험선에서의 연장시험과 노선 변경에 관한 계획을 담은 「초전도자기부상식 철도기술개발 기본계획」과 「초전도자기부상식철도 야마나시시험선 건설계획」을 국토교통성으로부터 승인을 받게 되었다. 이것으로서 초전도자기부상방식철도 기술개발기본계획은, 2005년도부터 2009년도까지 5년 더 연장하여 실용노선에 투입될 차량의 장기내구성에 대한 검증과 영업선에 적용할 설비사양의 검토를 실시하게 되었다.

### III. 추진 및 부상·안내 원리

독일의 초고속 자기부상열차(Transrapid)와 구별되는 일본의 초고속 자기부상열차의 가장 큰 특징은 EDS (Electro-dynamic Suspension) 방식에 의한 부상 및 안내 원리에 있다. 독일식은 차량에 설치된 전자석으로 부상 및 안내를 제어하는 EMS 방식으로서 정지시에도 충분한 부상력과 안내력을 얻을 수 있다. 그러나 차량과 궤도사이의 부상격이 10mm 내외로 작기 때문에 궤도의 정밀시공이 필요하며 부상과 안내를 유지하기 위한 지속적인 제어와 신뢰성의 확보가 요구된다. 이에 비해 EDS 방식은 차량의 주행으로 야기되는 전자기력을 부상 및 안내력으로 이용하기 때문에 별도의 제어 장치가 필요하지 않으며, 부상 격 또한 100mm 이상으로 충분히 크기 때문에 안정성이 뛰어나다. 그러나 부상력을 얻기 위해서는 바퀴식으로 일정 속도 이상으로 주행 시켜야 하고 차

량에 강력한 자기장을 만들 수 있는 마그넷의 탑재가 필요하다. 추진 및 부상·안내 원리를 간단히 소개하면 다음과 같다.

#### 1. 추진 방식

일본의 초전도 자기부상열차의 추진방식은 선형동기전동기(LSM : Linear Synchronous Motor) 방식을 채택하고 있다. 지상에 1차 계자코일을 설치하고 차량에 초전도 마그넷을 대향 극으로 배치함으로써 지상 코일에 공급되는 전력의 동기 주파수에 따라 차량에 추력을 발생시키게 된다. LSM은 선형 유도전동기(LIM : Linear Induction Motor)에 비해 효율 및 출력특성이 뛰어나기 때문에 고속주행용에 적합하다. 독일의 Transrapid도 LSM에 의한 추진 방식을 적용하고 있다. 그러나 일본의 LSM 방식은 차량에 탑재된 초전도 마그넷에 의해 추력에 충분한 공극자속밀도를 만들 수 있기 때문에 철심이 없는 공심형 1차 계자코일을 사용하고 있다. 이 때문에 궤도의 경량화가 가능한 장점이 있다.

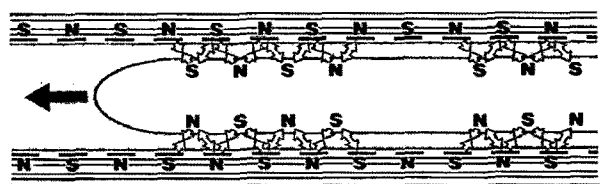
#### 2. 부상 및 안내 원리

EDS 방식이란 마그넷을 코일에 가까이 할 때 코일과 마그넷 사이에 발생하는 로렌츠 힘에 의한 반발력을 부상력으로 이용하는 원리이다. 그래서 마그넷을 탑재한 차량이 코일이 설치된 지상궤도를 따라 주행함으로써 부상력을 얻을 수 있다. 충분한 부상력을 얻기 위해서는 강력한 자기장을 만들 수 있



〈사진자료 : www.rtri.or.jp〉

그림 4. 야마나시 시험선에서의 초전도 자기부상열차 시제 차량(MLX)



〈그림자료 : www.rtri.or.jp〉

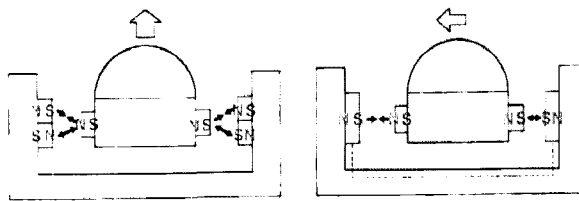
그림 5. LSM에 의한 추진 방식

는 마그넷이 필요하며 이러한 이유 때문에 초전도 마그넷을 이용한다.

초기 미야자키 시험선에서 주행한 MLU의 경우에는 지상 코일을 궤도바닥에 설치하여 초전도 마그넷과 수직으로 위치하게 하는 대향 부상방식을 적용하였다. 그러나 주행시 발생하는 자기저항 문제 때문에 이를 줄이기 위하여 야마나시 시험선에서는 8자형 지상코일을 궤도 측면에 설치하고 초전도 마그넷과 마주보도록 배치한 측벽 부상 방식을 적용하고 있다.

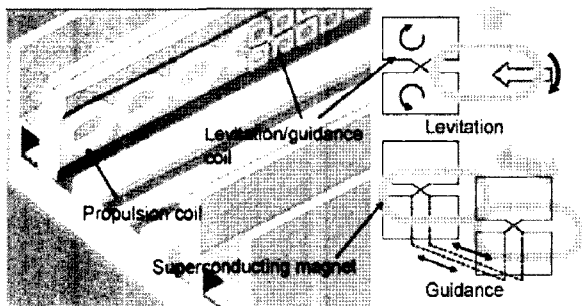
안내는 궤도 양측면에 안내용 코일을 Null Flux방식으로 연결하여 차량의 초전도마그넷과 궤도에 근접하는 측면에서는 반발력이, 멀어지는 측면에서는 흡인력이 작용하도록 함으로써 안내를 유지하도록 한다. 미야자키 시험선에서는 별도의 안내코일을 두었으나 야마나시 시험선에서는 8자형 지상코일이 부상 및 안내를 겸하고 있다.

현재에는 궤도건설의 Cost 저감을 위하여 추진, 부상, 안내가 하나의 코일에서 가능한 일체형 Coil시스템을 개발 중에 있다.



<부상 원리>

<안내 원리>



<그림자료 : "The Running Tests of the Superconducting Maglev Using the HTS Magnet" IEEE Tran. on Applied Superconductivity, vol. 17, No. 2, 2007>

그림 6. MLX의 부상·안내 원리

## IV. 실용화 기술 개발 현황

### 1. 신뢰성 및 내구성의 확보

1990년도에 수립된 초전도자기부상방식철도기술개발기본계획에 따라 제1기에서는 기본성능 및 종합성능 시험 위주로 진행되었고 제2기부터 현재까지는 고속 반복 주행 시험을 통한 신뢰성 및 내구성의 검증 위주로 진행되고 있다.

LSM 추진을 위하여 변전소로부터 공급되는 구분전원공급 장치의 신뢰성 시험, 대피·추월 등의 제어성능을 검증하는 복수열차제어시험 등, 영업선에서 필요로 하는 각종기능이 검증되었다. 또한 어떤 조건에서도 안정된 차량운동특성, 제동특성, 속도제어성능을 확인하였다. 특히 열차가 서로 지나칠 때의 차량운동을 검증할 목적으로 상대속도 1,026km/h의 교차주행을 실시하여 영업선의 500km/h에서의 차량 교차 운행에서도 문제가 없다는 것이 확인되었다. 이 외, 장대편성의 중간차의 차량운동을 검증하기 위해 5량 편성 주행시험도 실시하여 552km/h를 기록하였고, 2003년 12월 2일에는 영업 속도 및 야마나시시험선의 설계최고속도를 크게 넘는 581km/h를 기록하였다. 또한 기존 영업선은 1편성당 1일의 평균주행거리를 2,500km 정도로 상정되지만, 이것을 넘는 2,876km/일의 주행거리(야마나시시험선을 89왕복주행)를 기록하여, 충분한 신뢰성·내구성을 보유하고 있는 것을 확인하였다.

또한 영업선에서 각종 이상상태가 발생하는 것을 가정된 특수시험으로서 주행불능이 된 편성을 별도의 편성에 연결해서 주행하는 구조차 연결주행시험, 차량의 저속 주행시 사용하는 고무타이어가 펑크가 났거나 부상지지장치의 상태가 좋지 않을 경우 외접 보조륜 및 긴급착지륜 등에 의한 부상착지주행 시험, 차량에 낙뢰가 떨어졌을 때의 영향을 확인하는 낙뢰 시험등을 실시하였다. 어떠한 시험에서도 성능에 문제가 없다는 것이 확인되었다.

야마나시 시험선에서는 각종 주행시험을 실시하는 한편, 시승주행시험도 실시해왔다. 시승주행시험은, 제1기인 1998년 5월부터 개시되어, 2006년 11월까지 축적시승자수가 134,000명을 넘었고 누적주행거리도 55만km에 달하고 있다.

## 2. 비용절감을 위한 기술 개발

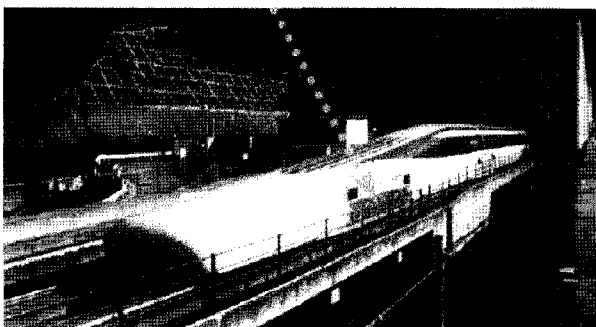
비용절감에 대해서는, 단순히 건설비의 절감을 꾀하는 것 뿐만 아니라, 보수 등의 운영에 관한 비용의 절감도 염두에 두고, 아래의 사항을 비롯하여 기술개발을 실시했다.

### 1) 고온 초전도 마그네틱의 개발

초전도 자기부상열차에 사용된 종래의 초전도마그네틱은 금속산화물계의 저온초전도체(NbTi)를 사용하고 영하 269도까지 냉각시키기 위한 액체 헬륨 냉각시스템을 사용하기 때문에 마그네틱 제작에 상당한 비용이 요구된다. 그러나 액체 헬륨 냉각 방식을 적용하지 않는 세라믹계 고온초전도체(BSCCO)를 사용한 마그네틱을 개발하여 2005년에 차량에 탑재, 최고속도 553km/h의 주행시험에 성공하였다. 이로써 초전도 마그네틱의 제작에 소요되는 비용을 획기적으로 저감할 수 있게 되었다.

### 2) 신형 가이드웨이의 개발

가이드웨이에 대해서는 자립식(Free-standing RC) 가이드웨이를 개발하여 주행시험을 통한 성능을 확인하였다. 본 방식은 단면이 역T형상으로 자립이 가능한 프리캐스트구조의 측벽으로 되어있고 그 체결구조에 대해서 개량을 행한 것으로서 본체중량의 경감에 의한 작업성(시공성, 보수성)의 향상



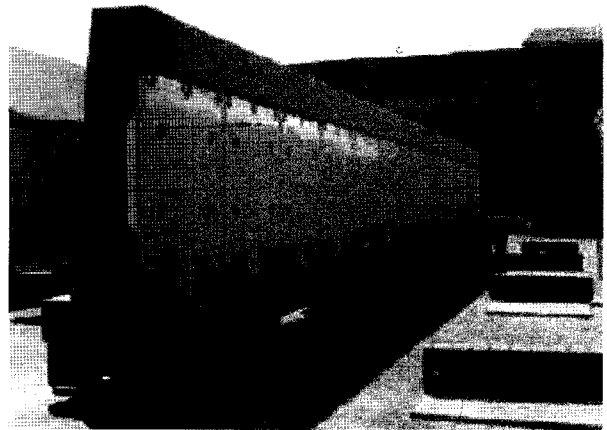
〈그림자료 : "The Project Overview of the HTS Magnet for Superconducting Maglev" IEEE Tran. on Applied Superconductivity, vol. 17, No. 2, 2007〉

그림 7. 고온초전도 마그네틱 탑재 주행 시험

및 비용 절감이 가능하게 되었다.

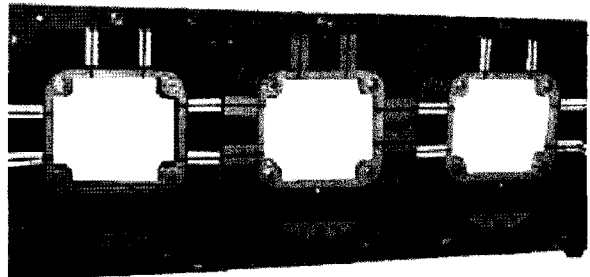
### 3) 신형지상코일의 개발

지상코일은, 종래 2층의 추진코일과 부상안내코일을 가이드웨이에 부착한 구성으로 되어있지만, 비용 절감을 위해 일체형지상코일과 케이블형추진코일을 개발하여, 야마나시 실험선에 투입해서 성능검증을 행했다. 일체형지상코일은 추진코일과 안내부상코일을 일체 성형하는 것으로 코일의 수량을 줄이고, 설치비용의 절감이 가능하고 케이블형추진코일은, 전력케이블을 사용함으로써 제작비용을 줄일 수 있다. 또한 이 코일들은 와전류손실의 절감에 의한 운영비용의 절감, 코일 장치구조의 개선이나 케이블접속부의 삭감에 의한 신뢰성, 보수성의 향상도 가능하게 되었다.



〈그림자료 : Shigeki Miyamoto(JR Central) et., "The Status of the running tests of JR-Maglev" Electromagnetics Symposium, Vol.15th, 2003〉

그림 8. 자립식 가이드웨이



〈그림자료 : Shigeki Miyamoto(JR Central) et., "The Status of the running tests of JR-Maglev" Electromagnetics Symposium, Vol.15th, 2003〉

그림 9. 케이블형 지상코일

