

## 국내외 초고속 자기부상 철도 연구 개발 현황

이 창 영  
한국철도기술연구원

### 1. 서 론

2004년 경부고속선 1단계 개통을 시작으로, 2010년에는 서울-부산 전 구간, 2015년에는 호남고속선, 그리고 지난 2017년 12월에는 평창 동계올림픽을 대비한 경강선까지 전국을 일일생활권으로 묶은 300km/h급 고속철도망이 완성되었다. 고속철도는 여행 시간 단축에 따른 지역 간 교류 증대 뿐 아니라 전 국토의 균형 발전 측면에서도 큰 역할을 해 주었으며, 국내 뿐 아니라 세계적으로도 고속철도에 의한 중·장거리 육상 여객 수송 비중은 더욱 증가되고 있는 실정이다.

한편, 현재의 바퀴식 고속철도보다도 더 빠른 차세대 초고속 육상 교통수단으로서 초고속 자기부상철도의 실용화도 꾸준히 진행되고 있다. 중국 상하이에서는 이미 독일이 개발한 시속 430km의 초고속 자기부상철도(Transrapid)가 2004년 영업 개통한 이후 지금까지도 안정적으로 운행되고 있다. 또한, 고속철도 분야 기술 선두 국가인 일본은 초전도 기술을 기반으로 한 500km/h급 초고속 자기부상철도 개발을 완료하고, 현재 영업 노선을 건설 중에 있다. 특히, 최근에는 테슬라 모터의 창업자인 엘런 머스크가 제안한 시속 1200km의 하이퍼루프가 세계적으로 큰 관심을 받고 있다. 하이퍼루프 또한 초고속 자기부상철도 기술을 기반으로 하고 있다.

국내에서도 초고속 자기부상철도에 대한 다양한 연구 개발이 진행되어 왔다. 본 글에서는 초고속 자기부상철도 기술과 최근의 국외 동향, 그리고 현재 국내에서 진행되고 있는 연구 개발 현황에 대해 간략히 소개하고자 한다.

### 2. 초고속 자기부상 철도 기술의 특징

바퀴식철도에 비해 자기부상철도가 초고속

화를 가능하게 하는 가장 큰 기술적 특징은 자기부상 외에도 차량의 추진방식에 있다고 할 수 있다. 바퀴식 고속철도는 차량에 탑재된 모터를 이용한 차상 동력으로 추진력을 얻는다. 속도를 높이기 위해서는 모터 시스템 용량이 커져야 하고, 모터 용량이 커지면 차량 중량도 함께 증가할 뿐 아니라 전차선로에 의한 차상 급전용량도 커지게 된다. 이러한 이유 때문에 차량 속도가 증가할수록 차륜 마모, 전차선로 이선 현상에 의한 급전 성능 저하 등의 문제를 발생시킨다. 또한 초고속화에 따른 차륜과 레일 사이 접촉 구동 성능 저하 등 차상 동력 방식의 바퀴식 고속철도는 초고속화의 기술적 한계가 있다.

반면, 초고속 자기부상철도는 지상 1차 선형동기 모터(Linear Synchronous Motor: LSM)를 추진방식으로 하고 있다. 추진 동력을 지상궤도를 따라 설치된 전기자 코일로 부터 얻기 때문에 차량으로의 대용량 급전을 위한 전차선 시스템을 필요로 하지 않는다. 또한 차량에 설치되는 추진용 계자 전자석은 자기부상용 전자석 역할을 겸할 수 있도록 설계할 수 있기 때문에 바퀴식 철도 대비 차량 중량을 가볍게 할 수 있는 장점이 있다. 이러한 지상 1차 LSM 추진 방식은 중저속 자

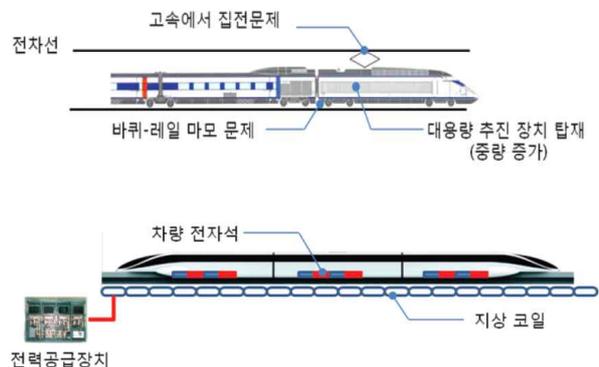


그림 1. 바퀴식 고속철도와 초고속 자기부상철도 추진 방식 비교 : (위)바퀴식 고속철도 (아래) 초고속 자기부상철도

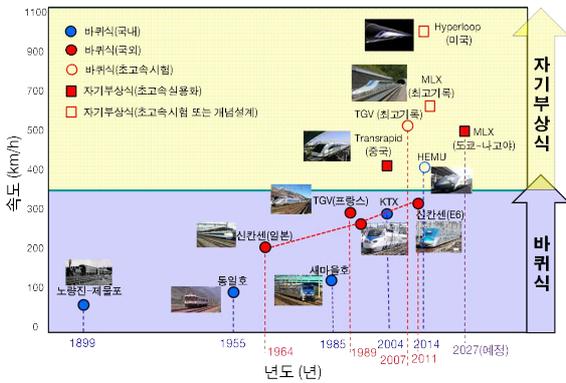


그림 2. 철도의 속도 발전에 따른 기술 개발 동향

자기부상철도의 추진방식인 차상 1차 선형 유도모터 (Linear Induction Motor : LIM)에 비교해서도 추력 및 출력 밀도가 클 뿐 아니라 전차선 급전 문제가 없기 때문에 철도 차량의 초고속화에 유리한 추진 시스템이라고 할 수 있다.

세계적으로 철도의 속도발전을 위한 기술 개발 추세를 볼 때 바퀴식 철도의 경우 시험 차량으로는 574.8km/h (2007년 프랑스 페제베 기록)까지 최고 기록을 달성한 바는 있으나, 전술한 여러 가지 기술적 한계로 인해 실제 가능 영업 속도는 최고 350 km/h로 보고 있으며, 500 km/h 이상의 영업 속도는 초고속 자기부상철도로 개발되고 있다.

초고속 자기부상철도에 적용되고 있는 자기 부상기술은 부상 원리에 따라 흡인제어식 부상 (Electro Magnetic Suspension : EMS)과 유도반발식 부상 (Electro-dynamic Suspension : EDS)이 있다.

흡인제어식은 차량 하부에 설치된 상전도 철심 전자석과 지상 궤도와와의 흡인력으로 차량을 부상 시키고, 철심 전자석의 전류를 제어하여 부상을 유지시키는 기술이다. 도시형 중저속 자기부상철도, 독일의 초고속 자기부상철도인 Transrapid가 흡인제어식으로 개발되었다. 자기부상에 사용되는 철심 전자석은 추진용 계자전자석 역할을 겸하고 있다. 차량의 추진 및 부상력은 전자석과 궤도 사이 공극자속밀도의 크기에 비례하는데, 철심 전자석의 자속포화 때문에 8~10 mm의 공극을 유지해야만 충분한 추진 및 부상력을 낼 수 있다. 차량 속도가 빠를수록 공극 외란이 크기 때문에 고도의 부상제어기술이 필요하다.

유도반발식은 차량 주행시 차량 전자석과 궤도 도전판(또는 코일)의 전자기 유도에 의한 자기장과의 반발력을 이용하여 차량을 부상시키는 기술이다. 충분한 부상력을 얻기 위해서는 일정 속도 이상의 차량 주행이 필요하며, 부상을 유지하기 위한 별도의 부상제어 장치가 필요하지 않다. 차량 전자석으로는 영구자석 또는 초전도 전자석을 이용할 수 있는데, 일본의 초고속 자기부상철도(L0)의 경우 초전도 전자석을 이용한 유도반발식으로 개발되었다. 초전도 전자석은 철심이 없는 공심형 구조로서 자속포화가 없기 때문에 전자석과 궤도사이 큰 공극에도 추진 및 부상력에 필요한 자속밀도를 만들 수 있다.[1]

실용화된 초고속 자기부상철도 기술은 초전도 전자석을 이용한 초전도 LSM추진-유도반발식 자기부상기술과 상전도 전자석을 이용한 상전도 LSM추진-흡인제어식 자기부상기술이다. 두 방식 모두 장단점이 있으나, 부상제어의 불필요, 큰 부상공극에 따른 궤도 시공정밀도 완화 측면에서 500km/h 이상의 속도에서는 초전도 유도반발식이 유리할 것으로 판단되고 있다.

표 1. 초고속 자기부상철도 기술 비교

	Transrapid(독일)	L0(일본)
실용화 노선	중국 상하이 (30 km : 2004년)	동경~나고야 (270 km : 2027년 예정)
최고 속도	500 km/h	603 km/h
영업속도	430 km/h	500 km/h
추진	상전도 전자석 철심형 LSM	초전도 전자석 공심형 LSM
부상	흡인제어식 (8~10mm, 공극 제어 필요)	유도반발방식 (120mm 이상 부상제어불필요)
차량중량	1.9 ton/m	0.9 ton/m
기타	궤도시공 정밀도 높음	초전도 전자석 필요

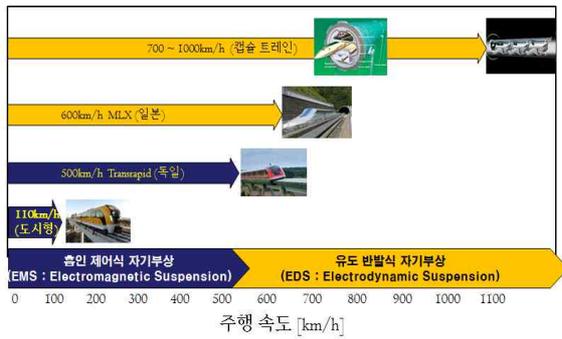


그림 3. 속도에 따른 자기부상 기술 동향

### 3. 국외의 초고속 자기부상 철도 연구 동향

현재까지 상용화 되었거나 건설중인 초고속 자기부상철도는 독일이 개발한 430km/h급 Transrapid와 일본의 500km/h급 L0(MLX)이다.

1976년부터 개발된 Transrapid는 2004년 중국 상하이의 푸둥공항과 시내를 연결하는 30km의 영업노선을 세계 최초로 상용 개통하였으며 현재까지 운행 중에 있다. 2008년 Transrapid09 모델을 끝으로 더 이상의 연구개발은 없는 상태이다. 상하이 노선의 성공적 개통 이후 홍차오공항과 항조우까지 노선 연장 계획이 있었으나, 현재는 취소된 상태이다.

한편, 1970년부터 개발 시작된 일본의 초고속 자기부상철도는 1996년~2005년 동안 야마나시 시험선(18.4km)에서의 장기주행 시험을 통해 기술 개발을 완료하였다. 이후 시험선을 42.8 km로 연장하고 8량1편성의 실용화 차량에 대한 시험을 진행하고 있으며, 2015년에는 세계최고속도 603 km/h를 기록하기도 했다. 현재 일본 동해철도 주식회사(JR-Central) 주도로 동경~나고야(270km)를 연결하는 500km/h급 상용화 노선을 건설 중에 있으며, 2027년 개통 예정이다.

일본의 경우 상용노선의 건설과 함께 이미 개발 완료한 차량의 추진 및 부상 시스템 성능 향상을 위한 연구도 진행되고 있다. 현재 실용화 노선에 투입될 차량은 NbTi 소재를 이용한 액체헬륨냉각방식의 저온 초전도 전자석을 탑재하고 있다. 그러나 저온 초전도 전자석을 향후 고온 초전도 전자석으로 대체하기



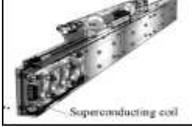
그림 4. 중국 상하이에 운행중인 독일의 초고속 자기부상철도(독일 Transrapid)



그림 5. 건설중인 일본의 500km/h급 초고속 자기부상철도(일본 L0)

위한 연구도 꾸준히 진행되고 있다. 2005년, 일본 철도종합연구소(RTRI)에서는 초전도 전자석의 냉각시스템에 요구되는 차상 전력을 저감시킬 목적으로 1세대 고온초전도 선재를 이용한 고온 초전도 전자석을 개발하여 553km/h의 주행시험에 성공하기도 하였다.[2]

표 2. 일본 초고속 자기부상철도의 초전도 전자석 성능 사양 비교[2]

	1세대 고온 초전도 전자석	저온 초전도 전자석
외관		
극수	4	4
기자력	750 kA	700-750 kA
코일크기	1.070 × 500 mm	1.070 × 500 mm
정격전류	544 A	500 A
코일 턴수	1,380	1,400 -1,500
초전도체	BSCCO	NbTi
연구전류모드	< 1%/day	< 0.1%/day
냉각온도	< 20 K	4.2 K
냉각방식	전도냉각	액체헬륨냉각

또한 2세대 고온초전도 선재를 이용한 고온 초전도 전자석 연구도 꾸준히 진행되고 있는데, 최근에는 SuperPower 사의 SCS6050-AP 선재를 이용하여 초전도 전자석에 장착될 실 사이즈의 고온 초전도 코일을 개발하였다. 이 시작품은 초전도 코일의 운전 온도를 35K까지 높임으로서 1단 냉동기만으로도 운전이 가능하도록 하여 차상 전력을 줄일 수 있을 뿐 아니라, 전자석의 냉각조 설계가 간단해짐에 따라 추진 및 부상 성능의 향상에도 기대할 수 있다. 이 밖에도 차량의 추진, 부상, 그리고 안내를 하나의 지상코일계에서 가능한 추진-부상-안내 일체형 시스템 개발, 그리고 차상 유도 급전 시스템 개발 등도 진행하고 있다.

최근에는 1200km/h의 속도로 주행하는 초음속 열차인 하이퍼루프(Hyperloop)가 미래 초고속 교통수단으로 큰 주목을 받고 있다. 2013년 미국의 테슬라모터 창업자인 엘런머스크에 의해 제안된 하이퍼루프는 공기저항이 없는 아진공 상태의 튜브중을 주행하는 캡슐 차량 시스템 개념으로서, 초고속 자기부상철도 기술을 기반으로 하고 있다. 진공철도에 대한 아이디어는 이미 1800년대에도 있었으나, 근래 증가하는 항공 수요를 대체할 미래 육상 초고속 교통수단의 필요성과 교통과학기술의 비약적 발전에 따른 실현 가능성과 맞물려 최근 들어 더욱 주목받게 되었다. 중국의 서남교통대에서는 2014년에 약 10 m 직경의 원형 캡슐 트랙에서 고온초전도 전자석을 이용한 자기부상 기술을 적용한 초고속 캡슐차량 모형을 세계 최초로 데모하는데 성공하기도 하였다.



그림 6. 2세대 고온초전도 선재 적용 초전도 코일 시작품 (일본 RTRI) [3]



그림 7. 중국의 초고속 진공철도 데모 시험선로 (중국 서남교통대)



그림 8. 미국 네바다 사막에 건설된 500m Hyperloop 시험선 (Hyperloop One)

현재 하이퍼루프는 미국과 캐나다의 스타트업 기업에서 실용화를 목표로 개발이 활발히 진행되고 있다. 엘런머스크가 소유한 민간 우주개발업체인 Space X에서는 2016부터 전 세계 대학 및 연구기관을 대상으로 하이퍼루프의 추진 및 부상을 데모할 수 있는 캡슐 디자인 대회를 개최하고, 오픈소스방식으로 하이퍼루프 기술 개발을 진행하고 있다. 실용화 개발에 뛰어난 스타트업 기업으로는 미국의 Hyperloop One, HTT (Hyperloop Transportation Technology), 그리고 캐나다의 Transpod 등이 있다. 이 중 Hyperloop One은 2017년 8월에 네바다 사막의 500m 시험선에서 선형 추진 및 자기부상에 의한 실험 차량으로 시속 310km의 주행시험에 성공하였다.

#### 4. 국내의 초고속 자기부상 철도 연구 현황

국내에서는 110km/h 도시형 자기부상철도 개발을 목표로 1989년부터 연구를 시작하여 2016년 2월 인천공항에 6.1km의 시범노

## 초고속 자기부상열차

선을 개통함으로써 실용화 개발이 완료되었다. 초고속 자기부상철도에 대한 연구는 2005년부터 한국기계연구원과 철도기술연구원을 중심으로 시작되었다. 주로 초고속 자기부상철도의 핵심이 되는 다양한 자기부상 기술에 대해 기초 연구가 진행되었다. 상전도 흡인제어식 자기 부상기술은 중저속 자기부상철도를 통해 이미 확보된 기술로서, 흡인제어식인 독일 Transrapid의 성능을 향상시킬 수 있는 차별화된 기술 개발을 시도하였다. 2009년 한국기계연구원에서는 흡인제어식 자기부상기술로 부상공극을 20 mm 까지 높이기 위해 영구자석 하이브리드 부상 시스템을 연구한 바 있으며, 2011년 한국철도기술연구원에서는 40 mm의 부상공극을 목표로 초전도 하이브리드 부상 시스템을 연구하였다. 그러나 흡인제어식에 의한 부상 공극 증가는 차량 시스템 측면에서 비효율적인 것으로 확인되었다. 한편 유도반발식 자기부상에 대한 연구는 2008년 한국기계연구원에서 1,000rpm에서 300km/h의 선속도를 구현할 수 있는 회전형 시험장치를 통해 영구자석 반발식 자기부상 기술을 구현하였다.

2011~2015년에는 국토교통부 주관의 국가 R&D 사업으로 초고속 자기부상철도 핵심 기술 개발에 착수하였다. 본 연구사업에서는 초고속 자기부상철도의 핵심 기술인 LSM 추진시스템과 초고속 자기부상 기술 개발을 주요 목표로 하였다. 충북 오송의 한국철도시설공단 기지내에 150 m의 단거리 시험선을 구축하고, LSM 추진시스템과 자기부상 성능을 검증할 수 있는 시제차량을 개발하여 주행 시험에 성공하였다. 차량의 설계최고속도는 550km/h이지만 짧은 시험선에서는 고속 운전이 불가능하기 때문에 최고속도에 해당하는 추진력과 운전 성능을 확인함으로써 LSM 추진시스템의 성능을 검증하였다. LSM 추진시스템은 상전도 전자석으로 개발되었으며 부상 방식은 중저속 자기부상철도의 흡인제어식 부상 방식으로 하였으나, LSM 추진용 계자전자석을 결합할 수 있도록 개발하였다.[4]

국가 R&D와는 별도로 2014~2016년에는 개발된 초고속 자기부상철도의 핵심 기술을 바퀴식 고속철도에 응용하고자 하는 연구도 진행되었다. 특히, LSM 추진기술은 앞 절에서 소개한 바와 같이 차량 경량화, 전차선의 제거 등 기존 바퀴식 고속철도의 초고속화



(a) 초전도 하이브리드 전자석 방식 (한국철도기술연구원) (b) 영구자석 하이브리드 전자석 방식(한국기계연구원)

그림 9 . 초고속용 흡인제어식 자기부상 기술



그림 10. 550km/h급 초고속자기부상열차 시제 차량

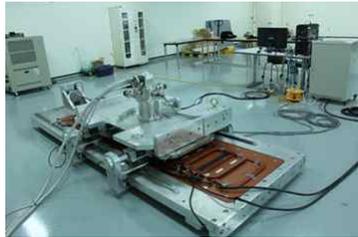
에도 응용 가능한 기술이다. 상전도 LSM 추진 기술은 철심 전자석의 특성상 차량 전자석과 지상전기자와의 좁은 공극과 과도한 흡인력 문제로 바퀴식 철도에는 적용이 불가능하다. 따라서 자기부상철도 뿐 아니라 바퀴식 철도 모두 응용 가능한 초전도 LSM 추진시스템의 개발에 착수 하였다.

초전도 LSM 추진 기술은 신뢰성 있는 차량용 초전도 전자석 개발이 핵심이다. 국내의 경우 2세대 고온초전도 선재 뿐 아니라 다양한 고온 초전도 기기의 개발을 통해 LSM용 고온 초전도 전자석을 개발할 수 있는 요소 기술을 확보하고 있다. 이러한 국내 기술력을 기반으로 국내 GdBCO 선재를 이용한 LSM 추진용 고온초전도 전자석 시제품을 개발하고, 국내 최초로 고온 초전도 LSM 추진 기술을 구현하였다.

최근 미래부에서는 정부출연(연) 주요사업을 대상으로, 미래성장원천 창출을 위해 중장기로 추진해야 할 대표적 중대형 연구과제를 육성하는 빅사업을 지원하고 있다. 한국철도기술연구원은 미래 첨단 초고속철도 기술인 '1000 km/h 튜브트레인(하이퍼튜브) 핵심 기술 개발 과제'가 선정되어 2016년부터 연구를 진행 중에 있다. 초전도 LSM 추진, 유도반발식 자기부상, 차량, 튜브인프라, 교통



(a) 7 kW급



(b) 350 kW급

그림 11. 고온초전도 LSM 추진 시작품(한국철도기술연구원)

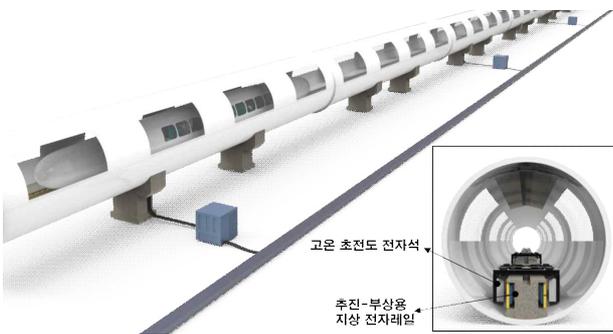


그림 12. 초전도 LSM 추진-자기부상기술을 적용한 하이퍼튜브 개념도(한국철도기술연구원)

체계, 운영제어 등 6대 핵심 기술 개발을 연구의 최종 목표로 하고 있다. 특히 하이퍼튜브에 적합한 LSM 추진 및 부상기술을 위해 저전력, 고효율의 고온 초전도 전자석을 개발 중에 있다.

## 5. 맺음말

최근의 국외동향을 볼 때 시속 500km의 초고속 자기부상철도는 실용화되었다. 또한 초고속 자기부상기술을 기반으로 시속 1000km의 하이퍼튜브 개발에도 도전하고 있다. 국내의 경우 포화 상태에 이른 경부고속철도의 여객 수송용량에 대응하고, 향후 20년 이내 노후화에 따른 대체 선로로 초고속 자기부상철도가 필요한 시점이 오고 있다. 시속 500km의 초고속 자기부상철도를 구축할 경우 서울-부산간 1시간 이내, 만약 시속 1000 km의 하이퍼루프가 구축된다면 20분 이내로 이동시간을 단축시킴으로서 출퇴근이 가능한 시간적 거리를 현재의 수도권에서 전

국토로 확대할 수 있는 교통혁명을 기대할 수 있다. 또한 미래 남북의 정치경제적 교류확대 및 통일한국을 대비하기 위해서도 한반도를 2시간 이내로 묶을 수 있는 초고속 철도 교통망 구축에도 기여할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] J.F. Gieras, Z.J. Piech, Linear Synchronous Motor- Transportation and Automation Systems, CRC Press, 2000.
- [2] S. Kusada, "The project Overview of the HTS Magnet for Superconducting Maglev", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 17, No.2, 2007.
- [3] Katsutoshi Mizuno, et al. "Experimental Production of a Real-Scale REBCO Magnet Aimed at Its Application to Maglev" IEEE Tran. on Applied Superconductivity, Vol. 27, No.4, 2017.
- [4] 한국철도기술연구원 '초고속 자기부상철도 핵심기술 개발(2015년)', 최종보고서

## 저자이력



### 이창영 (李昌榮)

1989-1993년 부산대학교 전기공학과, 1993-1995년 부산대학교 대학원 전기공학과(공학석사), 2007-2012년 연세대학교 대학원 전기전자공학과(공학박사), 1994-2005년 LS전선 전력연구소 선임연구원, 2005-현재 한국철도기술연구원 책임연구원