

도시형 자기부상열차 실용화 현황

■ 박도영, 신병천 / 도시형자기부상열차실용화사업단

■ 유문환, 김동성 / 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

1. 서론

1989년부터 국내에서는 자기부상열차에 대한 연구 개발이 시작되어 현재까지 약 17년간의 기간동안 연구 개발이 진행되어 오고 있다. 국내에서는 전자석을 사용하는 흡인식(EMS, ElectroMagnetic Suspension) 부상방식과 추진전동기로는 선형유도전동기(LIM, Linear Induction Motor)를 사용하는 중저속 자기부상열차의 개발에 연구역량을 집중하여 왔다. 이 기간 동안 한국기계연구원에서는 UTM-01, (주)로템에서는 UTM-02와 같은 자기부상열차를 개발하는 성과를 올려 왔다.

건설교통부는 국내의 자기부상열차의 실용화 개발을 위하여 2006년 12월에 '도시형 자기부상열차 실용화사업'을 시작하였다. '도시형 자기부상열차 실용화사업'은 6년간 약 4,500억원의 예산을 투입하여 무인자동운전이 가능한 110km/h급 자기부상열차 3편성(총 6량)을 개발하고, 약 7km의 시범노선을 건설하여 상업운전이 가능하도록 하는 사업이다. 본 고에서는 자기부상열차의 세계적인 기술개발 현황, 특징을 간략하게 설명하고 '도시형 자기부상열차 실용화사업'을 소개하도록 한다.

2. 자기부상열차의 기술방식

바퀴없이 떠서가는 자기부상열차의 개념은 20세기

초 독일의 헤르만켄퍼 등에 의해 제안되었으며, 20세기 중반 미국의 제임스포엘, 고든덴비 등에 의해 초전도방식에 의한 고속자기부상열차의 기본설계개념이 정립되었다.

독일은 1969년부터 국가예산을 투입(BMFT: 과학기술성)하여 일반전자석을 이용한 흡인식 부상방식으로 철차륜식 고속전철의 속도한계(당시 ~300km/h)를 능가하는 고속자기부상열차 개발을 추진하였다.

이와는 달리 일본은 1970년부터 역시 국가예산(운수성)을 투입하여 당시 철도총합연구소 주관으로 초전도자석을 이용한 반발력을 이용한 반발식 초고속자기부상열차 개발에 착수하였다.

오늘날, 독일과 일본의 이 두가지 모델(독일: Transrapid, 일본: MLX)이 기술적으로 가장 진보된 자기부상열차로 평가받고 있으며, 이중 독일의 시속 450km 급 트란스라피드 모델은 2004년 1월 세계최초로 중국의 상하이(30km)에서 상용화 되어 현재 정상 운행중에 있다.

일본의 초전도자기부상열차 MLX는 현재 제2신간선 예정노선인 후지산 인근 아마나시 시현선로에서 고속(시속 500km 내외)주행실험중이며, 극저온도를 지속적으로 유지해야 하는 초전도발생장치를 차내에 탑재해야 하는 시스템의 특성상, 비용과 신뢰도 면에서 앞으로 수년간의 기술적 검증과 보완을 거쳐 상용화

계획이 수립될 전망이다.
이다.

도시형 자기부상열차의 개발은 일반전자석을 이용한 고속 자기부상열차(독일 Transrapid) 개발 과정에서 획득한 기술을 중저속용으로 활용하는 형태로 초기 개발이 시작되었다. 이는 자기부상방식이 기본적으로 채택하고

환경친화적이며 구배·곡선 주행력이 뛰어나서 고속용으로 뿐만이 아니라 도시교통용으로도 매우 유망한 것으로 인식되었기 때문이다.

오늘날 도시형자기부상열차의 유력한 기술방식인 상전도흡인식 도시형자기부상열차 기술은 당초 독일의 Transrapid-04가 모체가 된것으로서, 일본이 이 기술을 도입하여 HSST를 개발해 온 이후, 한국과 중국도 기본적으로는 이 방식을 따르고 있다.

최근 미국이 독자적으로 영구자석반발식 도시형자기부상열차 개발을 새롭게 추진하고 있으며, 개발에 성공할 경우 앞으로 세계 시장에서 이 2가지 방식이 주로 결합하게 될 것으로 예상된다. 표 1에서 부상방식과 추진 방식에 따라 자기부상열차를 분류하였다.

표 1 자기부상열차 기술방식 종합

부상		추진	기종	상용화 최고속	시스템 비용
흡인식	상전도 흡인식	선형유도식: LIM (차상전원: 집전방식)	UTM(한국) HSST(일본)	: ~110km/h : ~100km/h	저비용 저비용
	상전도 흡인식	선형동기식: LSM (지상전원: 무집전방식)	Transrapid(독일)	: ~431km/h	고비용
반발식	초전도 반발식	선형동기식: LSM (지상전원: 무집전방식)	MLX(일본)	: ~500km/h 예정	고비용
	영구자석 반발식	LSM 또는 LIM	개발중 (미국) 기초연구중 (한국)	: 저속시험중 : 원리시험중	저비용 저비용

- * 반발식: EDS, ElectroDynamic Suspension
- * LIM: Linear Induction Motor
- * LSM: Linear Synchronous Motor

전시운행을 거치면서 홍보효과와 함께 기술개선을 도모해 나갔으며, 1991년 부터 나고야 1.5km 시험선로상에서 실용화 모델 시험을 거쳐, 1992년 최고 100km/h급

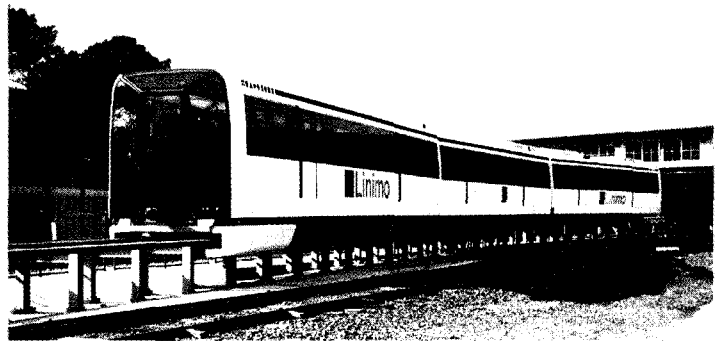


그림 1 일본 Linimo

2. 일본 중저속형

2-1. 개발 경위

중저속자기부상열차 HSST(High Speed Surface Transport)는 1972년 신설 나리타 공항 연결노선 적용을 위해 일본항공(JAL) 주도로 개발을 시작했다. 당시 독일 Transrapid-04 기술을 도입하여 개발하기 시작한 HSST는 수차례의 국제박람회장 내

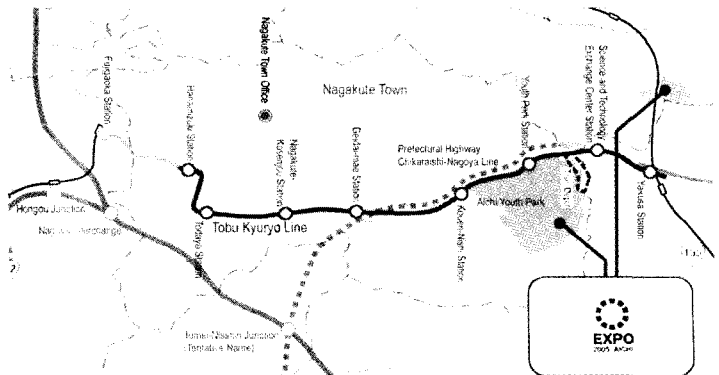


그림 2 동부구릉선 노선도

표 2 Linimo 차량의 제원 및 성능

○ 제원
- 차량 치수 : L14.0 * W2.6 * H3.45 (m) (중간차 : L 13.5)
- 승차 정원 : 244명/편성 (좌석정원 104명), 선두차 : 80(34)명, 중간차 : 84(36)명
- 차체 구조 : 알루미늄 합금용접구조
- 차량 성능 : 최고운행속도 100km/h, 최대가속도 4.0km/h/s
최대상용감속도 4.0km/h/s
최대구배 6%, 최소곡선반경 75m

으로 교통안전공해연구소의 실용화 인증을 받았다.

HSST의 상용화는 2005년 초 일본 나고야 시에서 이루어졌다. 2005년 아이치(환경)엑스포 행사장을 연결하는 신교통시스템으로 자기부상열차가 선정되어 2002년부터 공사를 진행하여 2005년 3월 8.9km 노선 (동부구룡선 : Tobu Kyuryo 선, 차량 : Linimo)을 개통하였으며 엑스포기간 중 수송목표를 초과달성한 이후 현재 정상적으로 상업운영중에 있다. 그림 1은 Linimo 차량의 사진이며, 그림 2는 동부구룡선 노선도이다. Linimo 차량의 제원 및 성능은 표 2와 같다.

2-2. 부상·추진 기본원리

일본 Linimo의 부상원리는 그림 3에 나타난 것처럼 차량의 대차하부에는 전자석, 궤도에는 부상용 철제레일 설치하여 전자석에 전원을 인가하면 전자석이 레일을 끌어당김으로써 부상력을 얻는 방식이다. 상전도 전자석을 이용한 흡인식 부상방식은 정지상태에서도 부상이 가능한 특징을 가진다. 부상 제어를 위해서는 갭센서의 신호를 제어기로 연결하고, 제어기는 전자석 전력 공급기(Magnet Driver)를 제어하여 부상전자석과 부상레일 간 간격을 8mm 정도로 항상 유지한다.

추진력은 선형유도전동기를 사용하여 얻는데, 그림 3에 나타난 것처럼 차량에는 전동기의 1

차축 3상 권선, 궤도에는 도체판(2차축)을 설치하는 구조로 되어 있다. 궤도를 따라 설치된 제3레조(third rail 또는 power rail)을 통해 직류 1,500V 전원을 공급받아서 차량에 탑재된 전력 변환장치를 이용하여 전동기 1차축에 3상 전원을 공급한다. 전동기로의 전원공급은 VVVF 인버터를 이용한다.

선형유도전동기는 일반적인 농형 유도전동기를 잘라서 펼친 형태의 전동기이며, 그림 4는 이의 개념도이다.

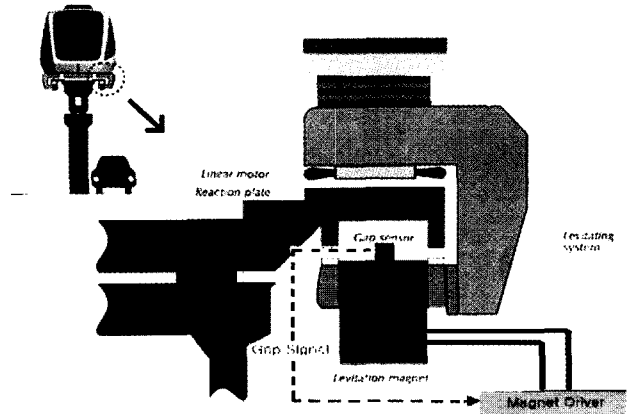


그림 3 Linimo 부상/추진 시스템의 구조

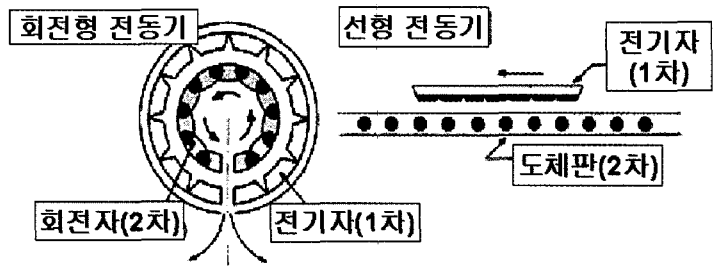


그림 4 선형유도전동기

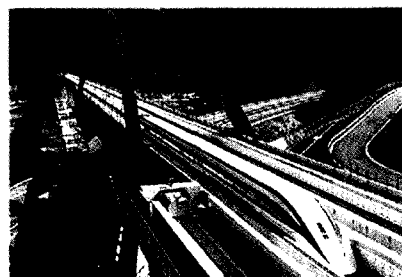


그림 5 일본 MLX 주행시험장면
- 아마나시 시험선로: 18.4km

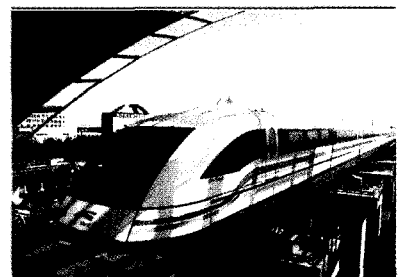


그림 6 독일 Transrapid 운행장면
- 중국 상하이 노선: 30km

3. 일본 초고속형

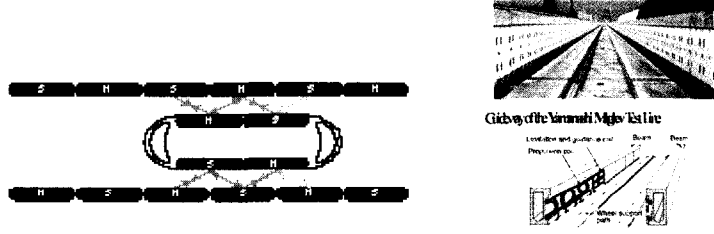
3-1. 일반 현황

- 고속형 개요(일본, 독일)
- 일본 MLX: 초전도자석을 이용한 반발식 부상시스템
 - 1970년부터 개발에 착수하여 현재 실용화를 위한 주행실험중(시험최고속도 시속 581km)이며, 상용화 목표는 시속 500km임
 - 특징: 부상계가 구조적으로 안정하나 저비용화 필요

- 독일 Transrapid : 일반전자석을 이용한 흡인식 부상시스템
 - 1969년부터 개발에 착수하여 2004년 1월 중국 상하이 30km 노선에 투입, 세계 최초로 상용화했으며 운행최고 속도는 시속 431km임
 - 특징: 흡인식이므로 정밀부상제어가 필요하며, 비용은 초전도반발식에 비해 저렴함

3-2. 일본 MLX의 부상·추진 원리

【추진원리 : 선형동기전동기(LSM) 사용】

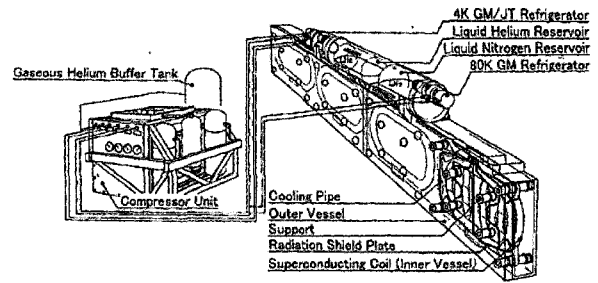


- 궤도에 추진전력공급용 코일(1차측)을 설치하고 지상에서는 차량의 위치에 따라 극성이 변환하여 전력을 공급
- 차상 집전이 불필요하므로, 초고속 자기부상열차에 적합

그림 7 MLX 추진 원리

【MLX 에 설치된 초전도자석】

- 초전도자석의 하부는 4개의 초전도코일 유니트로 구성되어 있고 상부는 냉동기를 탑재한 액체헬륨탱크로 구성되어 있음
- 각 초전도 코일은 수직으로 배열되어 있고 헬륨탱크로부터 공급된 액체헬륨에 담겨져서 초전도상태를 유지되며, 영구전류모드운전으로 초전도자석이 동작됨



MLX01에 설치된 초전도자석

- 최근 고온초전도전자석을 개발, 차량에 장착하여 성공적으로 시험 ('05년 말)

그림 8 MLX의 초전도자석

4. 독일 초고속형

4-1. 중국 상하이 트랜스라피드

독일에서 개발된 초고속 자기부상열차인 트랜스라피드는 2004년 1월부터 중국 상해 공항에서 세계 최초로 상업운전을 개시하였다. 그림 9는 상해의 트랜스라피드 열차 사진이고, 그림 10은 상해공항과 푸둥지구를 연결하는 30km의 노선도이다. 표 3은 상업운전을 시작하여 2006년 4월 9일 까지의 운영 현황을 보여준다.

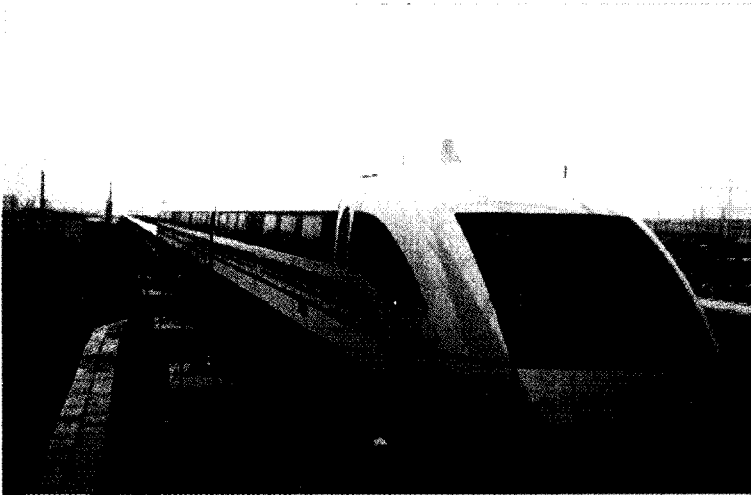


그림 9 상해의 트랜스라피드 열차

4-2. 트랜스라피드 부상·추진 원리

트랜스라피드는 상전도 전자석을 이용하는 흡인식(EMS) 부상방식을 사용하고 있으며, 추진력은 선형동기전동기를 이용하는 시스템이다. 그림 11은 트랜스라피드의 전자석과 선형동기전동기를 보여주고 있다.

그림 11에서 알 수 있는 것처럼 차량이 레일을 감싸는 구조이며, 차량의 하단에 부상용 전자석이 설치되어 있고, 전자석과 마주 보는 레일의 하단에 동기전동기 권선이 설치되어 있다. 전자석 옆에는 갭 센서(Gap Sensor) 코일이 설치되어 있고, 1cm 정도의 부상높이를 유지한다. 출발 시 차내 배터리에 의해 부상한 후, 궤도상의 동기전동기 권선에 3상전력이 공급되어 추진력을 얻게 된다.

5. 국내 개발 연혁

우리나라의 자기부상열차 개발은 1989년 12월 과학기술부 국책연구착수와 함께 본격적으로 시작되었으며, 그 이전의 연구개발은 한양대학교의 리니어모터 개발, 당시 현대정공의 상전도흡인식 축소모델 개발 등이 진행된 바 있다.

한국기계연구원은 1988년 수립한 중장기발전계획에 자기부상 열차 개발계획을 반영하였으며, 1989년 4월 부터 진행된 과학기술부의 10대 국책연구사업 선정 과정에서 자기부상열차 개발사업을 적극 제안하여 평가단계를 거쳐 최종선정되어, 1989년 12월 1일 부터 국책연구 주관기관으로서 관계기관과 협력하여 자기부상열차 개발을 주도적으로 추진해 왔다.

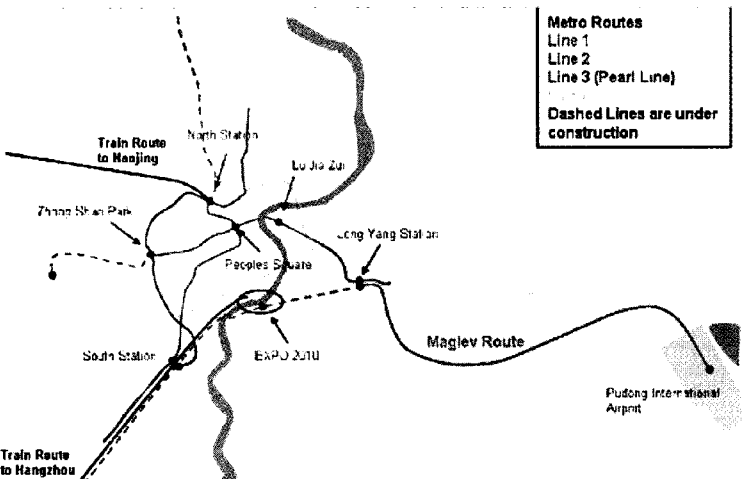
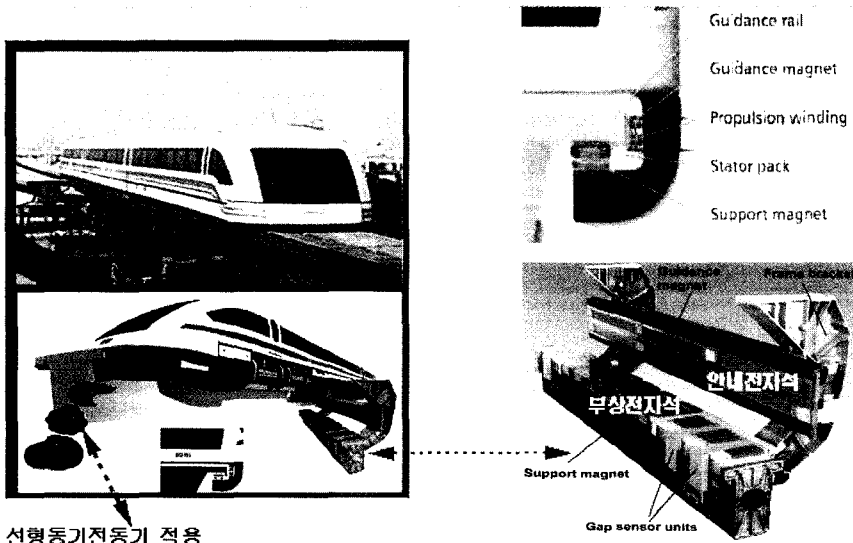


그림 10 상해공항과 푸둥지구를 연결하는 30km의 노선도

표 3 상업운전 운영 현황

- 운영 현황
 - 구간 : 상하이 국제공항 ~ 상하이 도심(푸둥지구) 30km
 - 최고속도 : 431km/h, 편도주행시간 : 7분 20초
 - 차량편성 : 3편성 (5량/1편성)
 - 운영현황 : 2004년 4월 13일부터 2006년 4월 9일 까지
 - 전자동 운행, 일일 14시간 운영, 승객 10,000명/일
승객의 70%가 항공기 고객
 - 시스템의 기술적인 가용도 : 99.93%



선형동기전동기 적용

- 회전전동기의 고정자(녹색)를 궤도하단에 연속적으로 배치하고, 회전자(적색)를 차량의 하단에 설치

그림 11 트랜스라피드의 전자석과 선형동기전동기

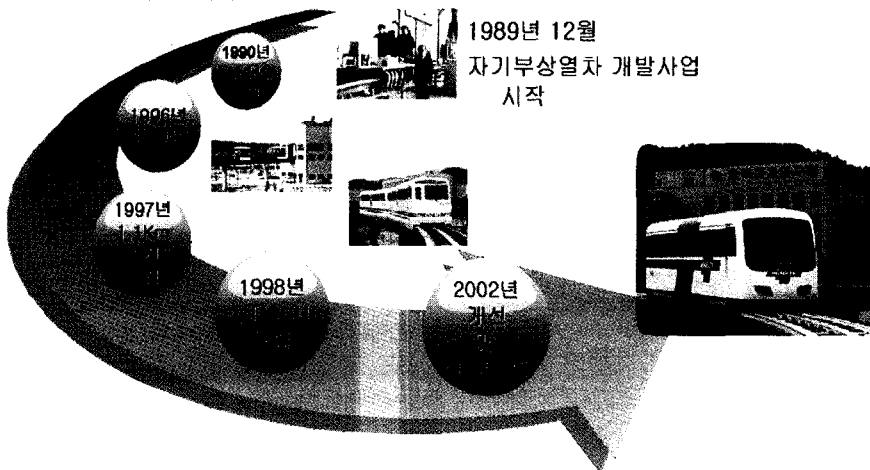


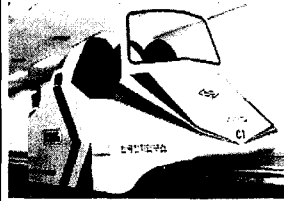
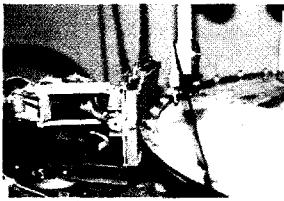
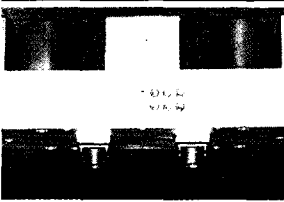
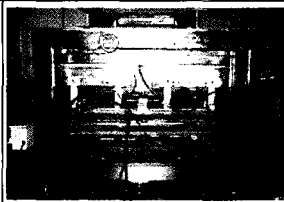


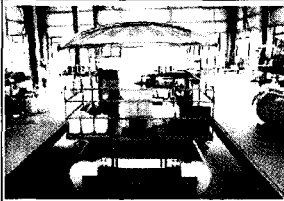
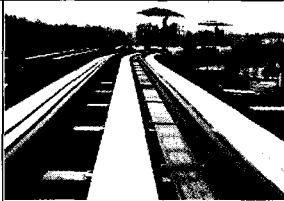
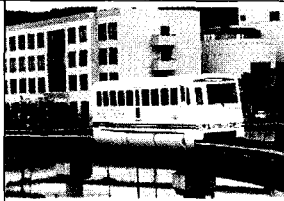
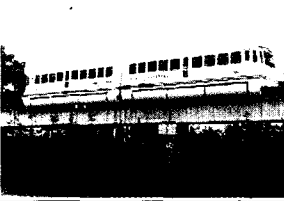
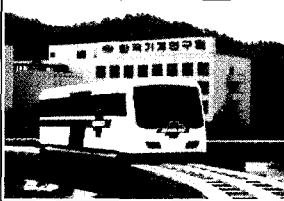
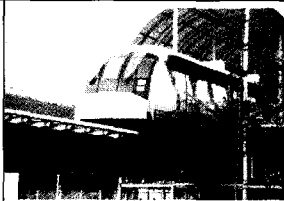


그림 12 한국기계연구원의 자기부상열차 개발사업 연혁

표 4 자기부상열차관련 주요성과

국책연구 추진 경과 (주요 개발 성과)			
국책연구 착수 1989.12 - 주관 : 기계연 - 협동 : 전기연			
→	국책연구사업단 현판식(1990.12)	축소모델(4인승) -기계연(1990.12)	축소모델(4인승) -전기연(1991.2)
			100m 선로상 대차시험 (기계연 내)
원판실험장치 -기계연(1991)	전자석 개발 -기계연(1991)	리니어모터 개발 -기계연(1991)	
			
갭센서어셈블리 개발 -기계연(1993)	부상특성(2조)시험기 개발 -기계연(1994)	LIM동특성시험기 개발 -기계연(1995)	시험선로 건설 -기계연(1996)
			
UTM-01 대차 개발 -기계연/로템(1996)	UTM대차 부상실험 -기계연/로템(1996)	UTM대차 추진실험 -기계연/로템(1997)	UTM-01 제1차량 (1998)
		UTM-01 기술보완 (기본연구)(2000.1~)	
UTM-01 2량/1편성 (1999)	UTM-01 리모델링 (2002)	산자부 중기거점 기술개발(2003.10~)	UTM-02 -로템(2005)

6. 도시형 자기부상열차 실용화사업

2006년에 건설교통부의 타당성검토와 과학기술관계 장관회의를 거쳐 최종 확정된 도시형자기부상열차 실용화사업이 2006년 12월 21일부터 시작되었다. 실용화사업은 2012년까지 총 6년간 총사업비 4,500억원(민간, 지자체부담 포함) 이 투입되며 약 7km 규모의 시범노선을 건설하고 시운전을 거쳐 실제 영업운전을 수행할 것이다.

6-1. 사업목표

도시형 자기부상열차 실용화사업의 최종목표는 110km/h급 무인운전 자기부상열차 시스템 개발 및 7km 이내 (5 ~ 7km) 시범노선 건설이다. 이를 위하여 2량 1편성으로 구성되는 자기부상열차를 총 3량을 제작하여 건설되는 시범노선에서 1년간 집중적인 시험을 수행하여 상업운전이 가능한 수준을 확보할 계획이다.

세계적인 실용화 사례는 2004년 개통한 중국 상하이의 시속 430km급 고속자기부상열차(독일모델)와 2005년 개통한 일본 나고야의 도시형자기부상열차(일본모델) 뿐이며, 실용화사업이 차질없이 추진되면 우리나라가 세계 3번째 실용화노선 보유국이 될 전망이다.

현재 대구, 대전, 인천, 창원 등 많은 지자체들이 시범노선 유치를 위해 노력하고 있는 가운데, 건설교통부에서는 2007년 7월에 객관적인 기준에 따라 후보노선을 평가·선정하기 위하여

이미 지자체들로부터 참여 의향서를 제출받았으며, 이미 제안공고가 되어있는 상태이다.

6-2. 추진체계

도시형 자기부상열차 실용화사업은 건설교통부가 총괄주관하고, 과학기술부와 산업자원부가 협조하여

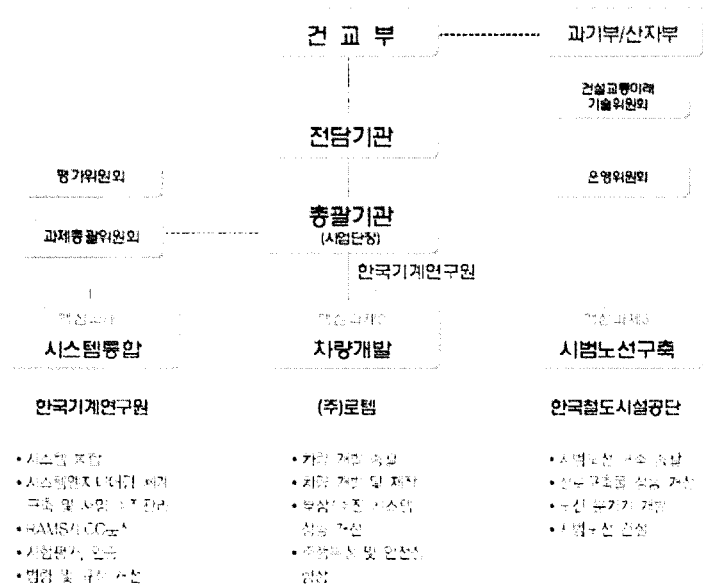
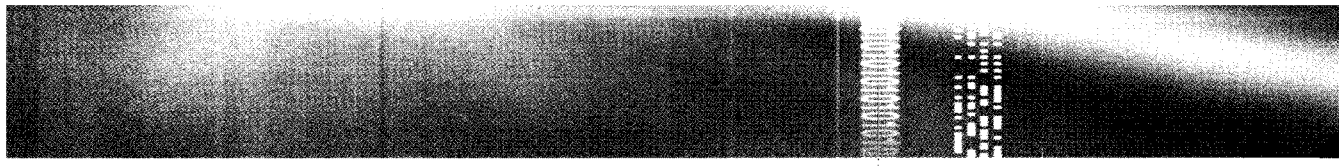


그림 13 사업단 구성체계

구분	1차	2차	3차	4차	5차	6차
	년도	년도	년도	년도	년도	년도
시스템 엔지니어링						
기술보완						
양산차량 (완성차시범구축)						
선로구축물						
노선선정						
시범노선구조						
계획						
시험선 보수 (기계연)						
노선건설/시스템통합						
승차 시운전						

그림 14 사업 일정



추진하며, 한국기계연구원이 총괄기관(사업단장: 신병천)으로 선정되어 한국기계연구원, (주)로템, 그리고 한국철도시설공단이 핵심과제를 수행하는 도시형자기 부상열차실용화사업단이 구성되었다. 사업단 산하에는 기계연구원, 철도기술연구원, 생산기술연구원, 전기연구원, 교통개발연구원, 산업기술시험원 등 주요출연연구기관과 철도시설공단, 철도차량업체인 로템 등 산·학·연 26개기관 총 300여명의 전문가가 참여하여 사업을 수행한다. 그림 13은 도시형자기부상열차실용화사업단의 구성체계를 보여 준다.

6-3. 추진일정

실용화사업 초기에는 국내기술로 개발한 도시형 자기부상열차의 최종성능개선(기술보완)이 먼저 진행되고, 이후 실용화모델 차량(2량/1편성)을 제작하여 한국기계연구원 시험선로(1.3km)상에서 기본성능시험을 마친 후 시범노선에 투입하여 속도시험, 안전성시험 등 최종 시험을 마치고 실용화한다. 그림 14는 6년간의 사업일정을 나타내고 있다.

7. 맺음말

자기부상열차의 상용화는 2004년 중국 상하이, 2005년 일본 나고야를 시작으로 세계적인 확산 추세에 들어서 있으며, 다행히 우리나라에서도 시범적 상용화 필요성을 인식하여 2006년부터 도시형 자기부상열차 실용화사업이 시작되었다.

주목할 점은 최근 중국이 기술개발 및 경쟁력 강화를 위한 노력을 전략적으로 추진하고 있다는 점이며, 중국의 고유모델이 탄생할 경우 지금까지의 선도국들의 위상이 크게 흔들릴 수도 있다는 점이다.

중저속형의 경우 앞으로의 세계시장에서 일본 대비 기술경쟁력, 중국 대비 가격경쟁력 문제에 봉착할 가능성이 크다고 예상되기 때문에 실용화사업에서는 성능과 가격면에서 국제경쟁력이 탁월한 시스템을 구축하는 것이 중요한 관건이 되고 있다. 따라서 도시형 자기부상열차 실용화사업에서는 차량개발을 담당하는 (주)로템과 노선구축을 담당하는 한국철도시설공단과 함께 기술경쟁력과 더불어 가격경쟁력을 확보하기 위한 노력을 경주할 것이다.