

초전도 자기부상열차

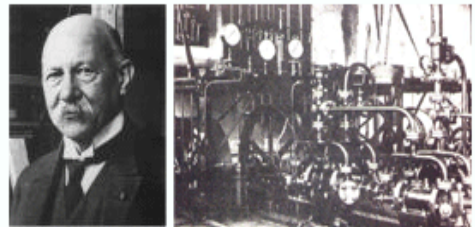
I 초전도 현상과 초전도체

1. 초전도 현상의 정의

초전도(Superconductivity) 현상이란 최고(Super)와 전도체(Conductor)의 합성어로 어떤 종류의 금속이나 합금을 절대영도($0\text{ K}:-273.16\text{ }^{\circ}\text{C}$) 가까이까지 냉각하였을 때, 전기저항이 갑자기 소멸하여 전류가 아무런 장애 없이 흐르는 현상을 말한다.

2. 초전도의 역사

1911년 네델란드 Leiden 대학의 한 연구실의 카멜링 온네스(Heike Kamerlingh Onnes)는 액체 헬륨을 이용하여 고체수은을 냉각하면서 전기저항을 측정하던 중, 액체헬륨의 기화온도인 4.2 K 근처에서 수은의 저항이 갑자기 0으로 떨어지는 것을 확인했다. 서서히 떨어지던 전기저항이 어느 특정한 임계온도를 넘어서 갑자기 사라져버린 것이다. 바로 이 순간이 초전도 역사의 출발점이다. 온네스는 액체헬륨을 액화



[그림1-1]온네스와 실험기기

하여 극저온 연구를 가능하게 한 공적으로 1913년에 노벨 물리학상을 수상하게 되었고, 이렇게 저항이 사라지는 물질을 초전도체(Superconductor)라 부르게 되었다.

초전도의 역사에 있어서 또 다른 역사적 발견은 1933년 독일사람 마이스너(Meissner)와 오센펠트(Oschenfeld)가 이루어냈다. 이 두 사람은 초전도체가 단순히 저항이 없어지는 것뿐 아니라 내부의 자기장을 밖으로 내보내는 현상(자기 반발 효과)이 있음을 발견하였다. 이러한 초전도체의 완전반자성으로 나타난 효과를 마이스너 효과(Meissner effect)라 부르며 마이스너 효과는 전기저항이 없어지는 특성과 함께 초전도의 가장 기본적 특성으로 손꼽힌다. 우리가 흔히 알고 있는 자기 부상열차의 원리는 초전도체의 마이스너효과를 이용한 것이다.

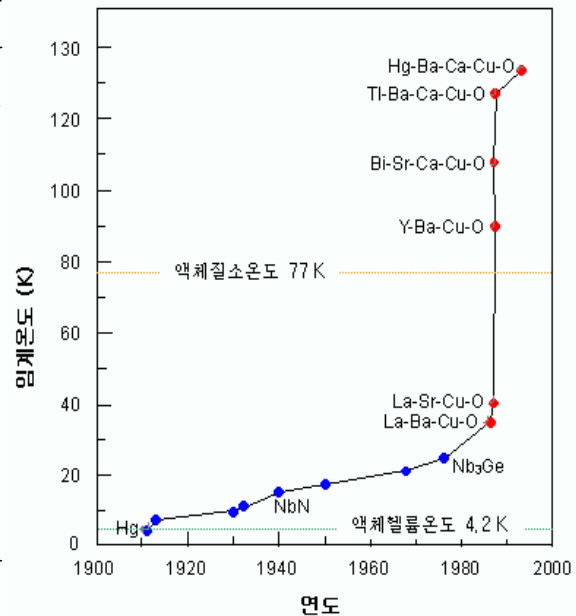
한편으로는 초전도현상을 이론적으로 설명해내려는 이론물리학의 노력도 뒤따랐다. 1957년 바딘(John Bardeen), 쿠퍼(Leon Cooper), 슈리퍼(Robert J. Schrieffer) 세 사람은 초전도 이론(BCS 이론)을 완성하여 초전도 현상의 원리를 설명하였다.

또 1962년 캠브리지 대학의 조셉슨(Brian D. Josephson)은 두 초전도체가 얇은 절연체 막을 사이에 두고 결합되었을 때 초전도체만이 갖는 조셉슨 효과(Josephson Junction effect)를 예측하였다.

1986년 스위스의 IBM 연구소의 베드노르츠(A. Bednortz)와 뮐러(Karl A. Muller)는 절연체로만 생각했던 세라믹 합성물 La-Ba-Cu-O가 35K에서 초전도성질을 가진다는 것을 발견하였다.

그리고 연이어 1987년 1월 알라바마 대학의 우(M. K. Wu)와 추(C.W. Chu)가 액체질소온도보다 높은 92K의 임계온도를 가진 $YBa_2Cu_3O_7$ 초전도체 합성이 발표하였고, 마에다(H. Maeda)에 의해 발견된 비스무스 화합물 $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$ 이 110K, 쉹(Z. Z. Sheng)과 허만(A. M. Hermann)은 합성된 탈륨화합물 $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ 이 임계온도 125K의 나타낸다는 것을 밝혔다. 이 때가 1988년이다.

1993년에는 스위스의 쉘링(A. Schilling)등이 임계온도가 133K인 수은화합물 $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ 을 합성하는데 성공하였다. 이 후 고온초전도체(HTS : High Temperature Superconductor)의 발견과 그 응용에 관한 연구가 본격적으로 시작되었다.



[그림1-2]초전도체의 임계온도 변천과정

3. 초전도체의 응용 분야

초전도체의 응용분야는 응용하는 초전도물질의 형태에 따라 나누거나 혹은 응용하는 분야에 따라 나눌 수 있다.

가. 응용 형태에 따른 분류

(1) 선재 응용 - 손실이 없는 송전선, 강한 자기장이나 아주 안정한 자기장을 발생시키는 초전도자석, 에너지저장장치, 모터, 발전기 등 많은 전류를 발생 또는 수송하는 전력계통 응용과 초전도 자기부상열차, 초전도추진선박 등 교통 분야의 응용 등이 있다.

(2) 박막 응용 - 박막의 저전류손실 특성을 이용한 수동소자와 조셉슨접합 등 초전도접합을 이용한 능동소자가 있는데, 수동소자에는 저손실 고주파통신 등의 응용을, 능동소자에는 SQUID(초전도 양자간섭장치, Superconducting Quantum Interference Device) 등 생체자기응용, 초고속 디지털소자 응용이 가능하다.

나. 응용 분야에 따른 분류

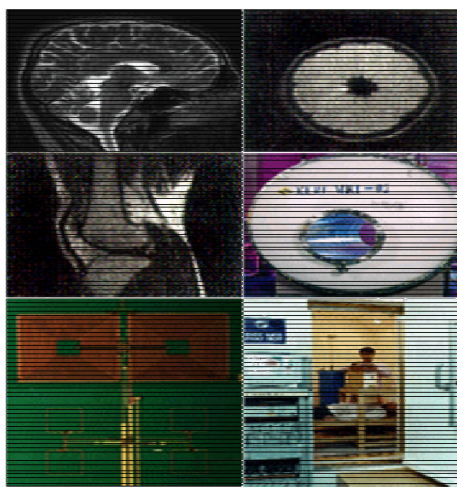
(1) 기계분야



[그림1-3 기계분야에서 응용]

기계분야에서는 초전도모터와 무접촉 자기베어링, 그리고 이를 응용한 플라이 휠(Fly wheel) 등으로 응용될 수 있으며, 마지막으로 천연자원이 부족한 한국에서 가장 필요로 하는 고효율, 친환경적인 전력에너지 관련기기로 응용할 수 있다.

(2) 의료분야



[그림1-4 의료분야에서의 응용]

의료분야에서 응용할 수 있는 것으로는 SQUID, MRI(Magnetic Resonance Imaging), NMR(핵자기 공명, Nuclear Magnetic Resonance), 자기차폐 장치가 있다. MRI는 초전도코일에 의하여 강력한 자장을 신체에 투과하여 극히 초기상태의 암은 물론 뇌를 비롯한 신체의 기능이상을 조기에 진단할 수 있어 질병의 공포로부터 해방되게 한다.

또 SQUID에 의한 초감도 자기센서가 완성되면, 현재 지자기의 1/150억에 해당하는 자기를 감지할 수 있고, 또한 뇌자기의 미묘한 변화를 탐지

하고 뇌의 활동을 해명하고 해석하는 일이 가능해진다.

(3) 수송분야

초전도기술을 수송시스템에 적용한다면, 환경 친화적인 전자추진선, 자기부상열차, 우주정거장, 엘리베이터 등으로 응용될 수 있다.

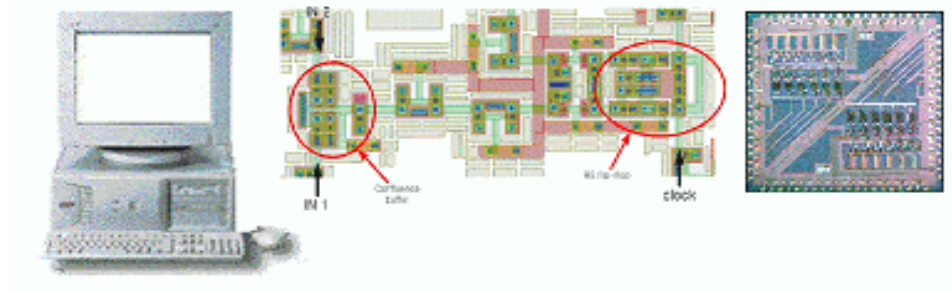
초전도 자석에 의해서 발생하는 자장을 이용하면 소리 없이 고속으로 이동이 가능한 잠수함을 만들 수 있고, 초전도자기부상에 의한 자기부상열차는 시속 500km 이상까지의 속도로 주행하는 것이 가능하며, 눈 또는 비와 같은 기상조건에 구애되지 않고 서울-부산간을 1시간대에 주파하여 일일통근권에 들게 할 수 있다.



[그림1-5 수송분야에서의 이용]

(4) 전자분야

전류리드선, 이동통신 기지국용 및 위성통신장비, 현재 데스크 탑 부피의 슈퍼컴퓨터, 초전도 전자소자, 초전도 양자간섭소자 등으로 응용되어 정보 인프라 구축의 발판이 되는 제품들을 만들 수 있다.



[그림1-6 전자분야에서의 응용]

(5) 에너지 물리분야

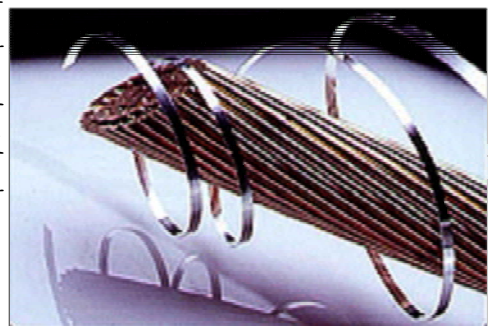
대형 가속기나 방사관 장치에 이용될 수 있다. 초전도자석의 강력한 자장을 이용하여 핵융합발전을 하게 되면 인공태양과 같은 새로운 개념의 에너지를 생산할 수 있다. 21세기의 새로운 에너지자원으로 주목 받고 있는 핵융합발전은 해수 중에 무한히 함유되어 있는 중수소를 연료로 사용함으로써 방사성 폐기물이 거의 없는 깨끗한 에너지를 생산하고 사용할 수 있게 된다.



[그림1-7 에너지 물리분야에서의 이용]

(6) 전력분야

전력케이블, 발전기, 변압기, 차단기 등에 상전도 코일 대신 초전도코일을 사용하게 되면 기본적인 설계부터 초소형, 고효율의 전력기기들을 만들 수 있다. 또한 초전도 전력저장(SMES)을 이용하면 각 지역 또는 대륙에서 심야의 잉여전력을 초전도 전력저장장치에 비축하고 이것을 낮동안의 수요지역으로 전력 손실 없이 수송함으로써 에너지의 효율적인 이용은 물론 전력의 국제무역을 가능하게 된다. 이렇게 초전도체를 응용하게 되면 기존의 기기에 비해 전력 소모와 손실이 적고, 작동 속도가 빠르며, 환경친화적인 동시에 감도가 높아진다.



[그림1-8 전력케이블]

Ⅱ 초전도 자기부상열차

1. 정의

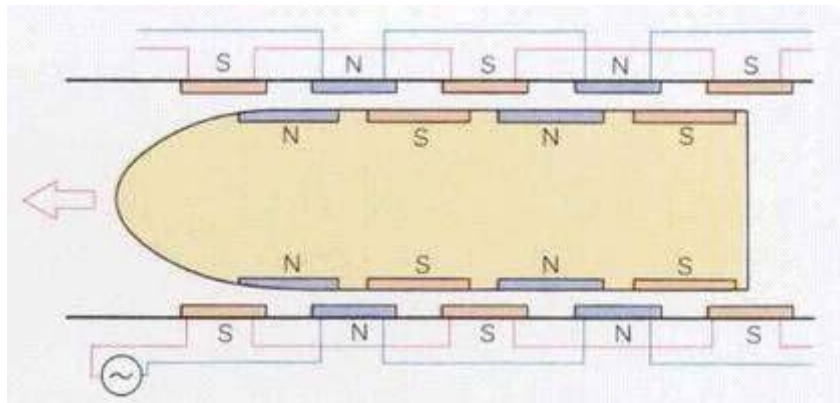
초전도 재료를 이용하여 만든 전자석의 자력을 이용해 차량을 선로 위에 부상시켜 움직이는 열차를 말한다.

2. 원리

철 등의 자성체와 자석 사이나 자석의 양극(N극)과 음극(S극) 사이에는 흡인력이 작용하고, 동일한 극 사이에는 반발력이 작용한다. 자기 부상의 원리는 이 자석의 성질로 차체를 뜨게 하여 리니어모터 등의 추진력으로 차체를 움직여 달리게 한다. 이용하는 힘에 따라서 흡인식자기부상과 반발식자기부상으로 나뉜다.

가. 자기부상식 철도 - 추진 원리

추진안내용 지상코일에 전류를 흐르게 하여 차 속의 자석과 사이의 반발력과 흡인력을 이용한다. 차의 자석 뒤쪽에 있는 코일과는 반발력이, 앞쪽에 있는 코일과는 흡인력이 작용하도록 코일에 흐르는 전류의 방향을 바꾼다.



[그림2-1 자기부상열차의 추진 원리]

나. 좌우안내원리

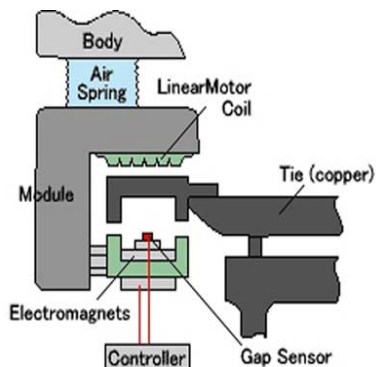
차량이 좌·우 어느 쪽으로 기울면 차의 자석이 가까운 쪽의 추진안내용 지상코일과 반발하여 떨어진 쪽과 서로 당기기 때문에 언제나 가이드 웨이의 중앙에 차량이 놓이게 된다.

다. 상전도 자기 부상식- 흡인식

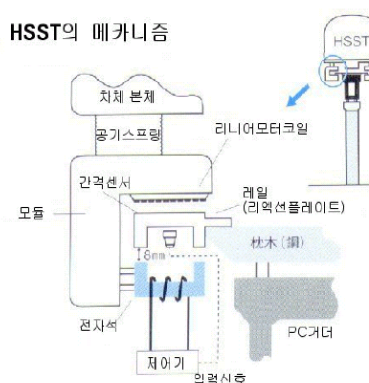
흡인식은 철 등의 자성체 궤도와 차체에 고정되어 자기력의 세기를 제어할 수 있는 전자석으로 구성되어 있다. 전자석과 레일의 틈새를 검지(檢知)하여, 틈새가 적어지면 자기력을 약하게 하여 흡인력을 작게 하고, 틈새가 커지면 자기력을 세게 하

여 흡인력을 증대시킴으로써 뜨는 높이를 일정하게 유지한다.

자석은 일반적인 전자석을 이용하므로 상전기전도자기부상식이라고 한다. 반발식은, 틸새가 작아지면 자동적으로 반발력이 증대하여 뜨는 안정계이므로 자기력 제어는 필요없다. 그러나 강력한 자석이 필요하므로 초전기전도원리에 의한 초전기전도자기석을 이용하여 초전기전도 자기부상방식이라고도 한다. 이러한 상전기전도식과 초전기전도식의 차이점은, 부상 높이가 0.8~1.5cm 정도인 상전기전도식이 속도에 관계없이 부상력을 얻을 수 있다.



[그림2-2] 중·저속용 상전도 흡인식의 부상원리



[그림2-3] 일본 HSST의 메카니즘

라. 초전도 자기 부상열차의 원리

반발식은 보통 차체에 장착한 강한 자석과 궤도에 연속적으로 배치한 코일로 구성되어 있다. 코일의 윗면을 강력한 자석이 이동하면 전자기유도 원리에 의해 코일의 자기극은 이동하는 자석과 동일한 극성이 되어 둘 사이에 큰 반발력이 생긴다. 이 반발력에 의해 뜨는 것이 유도반발식 자기부상이다

부상 높이가 10cm 가량인 초전기전도식은 시스템의 안정성과 신뢰성이 높은 반면에 저속에서는 뜰 수가 없어 별도의 지지 기구를 필요로 한다. 몇몇 선진국에서는 이미 도심내의 단거리 구간을 달리는 중·저속형 상전기전도식 자기부상식 철도가 상업화 단계에 들어갔으나, 초전기전도식은 고온초전기전도체의 실용화에 어려움이 있어 시간이 걸릴 것으로 예상된다.

]

3. 자기부상열차의 국내외 개발현황

가. 국외개발현황

(1) 독일 - 트랜스 래피드



- 1969년 : 독일의 연방정부 고성능고속열차의 조사연구에 기초, 고속자기부상열차의 개발을 결정. 같은해 최초의 자기부상식 리니어 모터가의 모형이 서독연구 기술성의 지도로 크라우스 맛파이(KM)사에 의하여 시험제작.
- 1971년 : 최초의 자기부상 리니어 모터카(차상 1차방식) 메사슈미트사에서 제작 660m궤도 90km로 주행.
- 1974년 : 티센헨셀사가 상전도 자기흡인으로 지상 1차 방식의 리니어 모터카를 개발 100m로 달림. MBB사는 KOMET를 제작하여 401km/h 1300m 원주궤도에서 달림.
KM사는 AEG사와 함께 트랜스피드의 테스트 개시 유인으로 253km/h를 2400m궤도에서 기록.
- 1977년 : 상전도 자기 흡인 부상. 지상 1차 동기형 리니어 모터카가 선정.
- 1984년 : 독일북부 메르스란토에 실험선 20.7km의 궤도에서 기록.
- 1987년 : 전장 31.5km의 노선공사 완공. 상업운전과 거의 같은 모드의 연속주행시험이 가능.
- 1988년 : TR06 412km/h달성. • 1989년 : TR07 435km/h달성.
- 1991년 : 트랜스 래피드 시험주행 누적이 12만km에 달하여 독일 연방철도에서 기술적 적용 성숙도 판정 리포트에 의하여 리스크없이 시스템을 실용화할 수 있다고 평가.
- 1993년 : TR07 450km/h달성
- 1995년 : TR07 누적 주행거리 200,000km를 달성

차량	특징	2량 1조
	폭	3.7m
	전체길이	54.2m
	높이	4.2m
	무게	108ton
	최대속도	406km/h
suspension	특징	차량당 32개의 suspension magnet 차량당 28개의 guidance magnet
	부상방식	EMS
	부상높이	10-12 mm
추진(propulsion)	종류	Long stator iron-cored LSM(Linear synchronous motor)
	추력(400km/h)	46kv
	최대전압	4.2kv
	최대전류	1.2kA
	주파수	0 - 215 HZ

[표 1] 트랜스 래피드의 사양

(2) 일본

(가) 상전도부상식 - HSST

- 1972년 : 일본항공은 공항엑세스로서 자기 부상식 리니어 모터카의 연구새시
- 1975년 : HSST 01호기(2인승)을 완성 요코하마시신스기타 실험장에서 부상 주행시험에 성공. 주행구간 200미터.
- 1978년 : 가와자기시 오오기시마에서 01호기가 무인 주행으로 시속 307.8km를기록. 같은해 02호기 (8인승)에 의한 공개시승 개시.
- 1985년 : 쓰쿠바 과학박람회에서 03호에 의한 전시주행. 61만명 탑승.
- 1991년 : HSST-100S형 주행실험.
- 1993년 : 운수성 상전도 자기 부상식 철도에 관한 기술 평가 방법 등의 조사 검토회에서 HSST-100형의 안전성. 신뢰성등을 확인하여 “실용화에 대한 기술적인 문제는 없다.” 라는 견해발표.
- 1995년 : HSST-100L형의 시험주행 개시
- 1996년 : 7월말 현재까지의 주행시험으로서 100S 형이 1991년 4월부터 누적 주행거리 62592km, 100L형이 1995년 5월부터 누적 주행거리 16.218km에 달하고 있다.



[그림2-5 일본의 HTTS]

차량	길이	13.8m
	폭	2.95m
	높이	3m
	무게	12ton
	최대속도	300km/h
Suspension	특징	차량당24개의 suspension magnet
	부상방식	EMS
	부상높이	11m
	전원	210v DC(외부에서 공급)
추진 (propulsion)	종류	Short stator single sided LIM
	모터수	6개
	최대출력	11.2KN
	전원	3상가변 주파수 전원(외부에서 공급)
	최대 전압	550KV
	주파수	0-70HZ

[표 2] HTTS의 사양

(나)초전도방식 - MLU

- 1972년: ML100 부상주행성공
- 1979년: 517km성공. MLU방식은 실용화될 움직임 보이고 있다.



[그림2-6 일본의 MLU]

차량	길이	8.2m
	폭	3m
	높이	3.3m
	무게	10ton
	최고속도	400km/h
초전도자석	배열	4극, 차량당 2열
	냉각장치	He 액화장치 차량 탑재
부상	부상방식	EDS(Electrodynamic suspension)
	부상력	98kN
	부상높이	100mm
안내	안내력	49kN(이격거리 50mm)
	Cleanance	150mm
추진	종류	Air core long stator LSM
	Power conditioner	Cycloconverter
	주파수	0 - 27hz
	최대전압	3kv
	최대전류	1.1kA
	주파수	51kN까지

[표 3] MLU의 사양

(3)영국

- 버밍엄공항에서 상전기전도 자기부상방식의 수송시스템이 89년 3월부터 영업운전에 들어감. 저속, 소규모이지만 세계최초의 실용화.

차량	길이	6m
	폭	2.25m
	높이	3.08m
	무게	5ton
	최고속도	45km/h
Suspension	특징	전자석은 E-core(Al coil winding)
	부상방식	EMS
	부상높이	15mm
추진(propulsion)	특징	inverter 차량탑재
	종류	short sator single sided LIM(7pole)
	전원	600DC, 700A
	최대추력	10KN
	주파수	0 - 45HZ(Inverter)

[표4] 영국의 자기부상열차 사양

나. 국내개발 현황



[그림2-7 HML-03]

1990년 한국전기연구소는 한국형 고유 모델인 KOMAG-01의 시승회를 가졌다. KOMAG-01은 승객 4~5명을 태우고 궤도에서 9mm쯤 떠서 20m의 시험구간을 달렸다. 무게 1.8t의 이 열차는 1.2t까지의 화물을 적재할 수 있으며, 설계 속도는 시속 40km까지 가능하나 시승회에서는 시속 5km로 운행했다. 민간기업 현대정공에서도 HML-01이라는 차량 무게 20t, 최고시속 50km, 승차 인원 8인승의 자기부상식열차 자체 개발에 성공하여 대전엑스포 자기부상식열차 개발사업을 추진하게 되었다.

1993년 8월 대전엑스포에서 선보인 HML-03은 40인승의 상전기전도 흡인식 자기부상열차로 차량 크기는 길이 17.6m, 폭 3m, 높이 3.8m, 무게 28t이고, 레일 위를 10~12mm 정도 떠서 최대 시속 50km로 달렸다. 대우 중공업도 DMV-92라는 이름의 자기부상식열차를 자체 개발, 승객 42명을 태우고 부상 및 추진에 성공하여 실용화에 한 걸음 다가섰다. 승객 14명을 태울 수 있는 열차 객차모양의 부상 추진체(모듈) 3개를 나란히 연결한 이 열차는 3개의 모듈이 동시에 15km(시험 선로가 일정 길이 이상일 경우 최고 시속 110km)의 선로를 왕복 주행했다.

내용	규격	내용	규격
차량무게	1.8ton	정격속도	40km/h
pay load	1.2ton	부상방식	EMS, 종축형 전자석
차량크기	3.6m×1.4m(길이×폭)	부상력	380kg × 8EA
트랙	20m	추진방식	SLIM(250N×2)
부상레일폭	60mm	안내방식	Stagger
Reaction plate	2차도체Al(4mm) back iron 15mm	공급전원	DC 530V
		초기Airgap	13mm
		정격부상Gap	8mm

[표5] KOMAG-01 사양

4. 초전도 자기부상열차의 장·단점

가. 장점

- (1) 레일과 차량간의 비접촉 때문에 주행저항이 적고 소음이 적다.
- (2) 부상시스템 자체가 현가장치 역할을 하므로 진동도 적다.
- (3) 주행저항이 적어 에너지가 절약되므로 장기적으로는 운영비용이 적다.
- (4) 마찰이 없으므로 철이나 고무바퀴가 닳아 없어지는 현상이 없어서 유지보수가 쉽다.
- (5) 철, 고무분진 같은 유해물질도 나오지 않는다.
- (6) 철궤도와 철바퀴간 낮은 마찰력에 의존하는 것이 아니라서 급경사 및 급커브에 강하다
- (7) 종래의 지하철은 급경사나 급커브를 지나지 못하여 노선을 자유롭게 설정할 수 가 없었다. 하지만 자기부상열차를 도입하면 보다 유연한 노선설정이 가능하다.
- (8) 차체와 레일이 서로 맞물려 있는 형태이기 때문에 탈선의 위험이 적다.



[그림2-8 급경사와 급커브를 운행하는 자기부상열차]

나. 단점

- (1) 초기 투자비용이 많이 든다.
- (2) 개발 초기 단계이기 때문에 경제성이 낮다.
- (3) 자기장이 인체에 미치는 영향이 증명되지 않았다.

항목	바퀴식 고속열차	자기부상식열차	기준
목표운행속도	300-350km/h	500km/h	
소음	약 71dB	약 62dB	250km/h
에너지소비	43WH좌석.km TGV-A	60WH좌석.km TRANSRAPID	
건설비	20억달러	25억달러	라스베가스-LA구간(370km)

[표6]바퀴식 고속 열차와 자기 부상식 열차의 비교



[그림2-9] 자기부상열차의 특징