

Special

# Thema | 초전도 자기부상 시스템

이상현 교수  
(선문대 전자공학부)

## 1. 서론

초전도 자기 부상식 열차의 기본적인 개념은 1960년대의 미국의 J. R. Powell 과 G. R. Danby의 발상으로부터 시작되었다[1]. 비접촉으로 선로와의 마찰계수를 적게 하여 고속 주행에 적합하도록 설계한 획기적인 철도 유송 시스템의 출현이었다. 초전도 자기 부상식 열차는 안전성, 안정성, 에너지절감, 대용량성의 특징이외에도 초고속, 환경 친화적인 유효성을 지닌 유송 시스템이라 할 수 있다. 자기 부상열차 시스템은 저 공해의 초고속 도시간 대량 여객 유송 시스템으로서 개발이 시도 되었다. 초전도 유송기관이 실제 인력수송의 한축으로 실용화되기 위해서는 진보된 자기 부상시스템의 출현과 역, 여객 정보 장치 등의 교통시스템이 일체화 되어야만 한다. 초전도 현상이 어떻게 적용될 수 있는가에 대한 원리적인 개념에서부터 응용시스템의 경제성 및 기존의 유송기관이 지닐 수 없는 기술적으로 매력적인 유효성들을 언급하고자한다. 고온 초전도체를 자기 부상 식 열차에 도입하기 위해서는 움직이는 이동체위에 냉동시스템을 갖추어야하며, 고자계의 조건에서 Meissner 효과 등의 새로운 개념의 원리를 적용하여 초전도 유송 시스템의 기술적인 가능성을 보다 확실하게 구축할 필요가 있다. 본고에서는 초전도 자기 부상 식 열차의 유송시스템 및 에너지공급, 전송 등의 이미지를 명확하게 그려 보고자 한다.

## 2. 자기 부상 추진원리 와 초전도 기술

초전도 자기 부상식 열차시스템은 차량부분에 초전도 자석을 탑재하며, 초전도 자석을 자기부상열차를 부상 시키고 추진하는 계자로서 사용하고 있다. 궤도측에는 차체를 부상시키기 위하여 단락 코일 및 전도성 시트를 설치하며, 도우너츠 형태의 공심의 전기자 코일을 설치하여 열차 추

진동력원으로 활용한다. 초전도 자석과 궤도에 설치된 자기부상용 코일을 설치방법을 그림1에 제시한다.

차량이 진행하게 되면 궤도에 설치된 자기부상용 코일에는 초전도 자석으로부터 쇄교 자속이 변화하여 전류가 유기 된다. 이때 유기된 전류와 초전도 자석간에는 자기 부상력이 발생하여 차량을 지지하게 된다. 따라서 열차가 정지 중에는 부상하지 않고, 부상력이 속도에 비례하여 증가하여, 일정이상의 속도에서는 일정한 값의 부상력에 근접하게 된다. 이러한 방식은 초전도 자석을 차량에 탑재하는 기술의 개발이 필요로 하나, 다음과 같은 특징이 있다.

1. 상하 좌우 방향의 자기력을 발생하는 코일을 조합하여 특별한 제어 방식 없이도 안정한 계통을 유지할 수 있다.
2. 영구자석에 비하여 커다란 자기력의 초전도 자석을 활용함으로써 유효한 부상력을 도출할 수 있다.
3. 부상 코일로 유기된 전류는 코일의 저항으로 인하여 Joule열을 발생하여 자기부상차량으로서 는 주행 시 저항으로 작용하게 된다.

부상코일의 저항, 인덕턴스를 R, L로 하고, 유기된 전류의 각주파수를  $\omega$ 로 하면  $R = \omega L$ 이 되는 속도로 주행저항(자기항력 0이 최대가 되며, 그 이상의 속도에서는 주행저항은 속도에 반비례하여 작아진다. 그림 1의 설치에서 (a)는 가장 원리에 근접한 배치로서 초전도 코일과 부상코일을 대향하는 방식으로 배치한 것으로 구조는 간단하다. (b)는 플럭스방식으로[2], 초전도 코일이 중심위치에 오게 되면 전류는 유기되지 않으며, 중심부분으로부터 초전도 자석이 하부로 변위하게 되면 전류는 유기되어, 자기 부상력이 발생하게 되며 주행저항이 작아지는 구조를 하게 된다. (c)는 (b)방식의 변형으로 측면부분에 코일을 설치하는 방식이다.

좌우방향의 복원력이나 부상력은 기본적으로 같은 개념으로 생각할 수 있다. 좌우중심의 밸런스를 유지하며 주행 시에는 자기력을 발생 시킬 필요가 없다. 그림1에서와 같이 좌우의 코일을 연결하는 폐

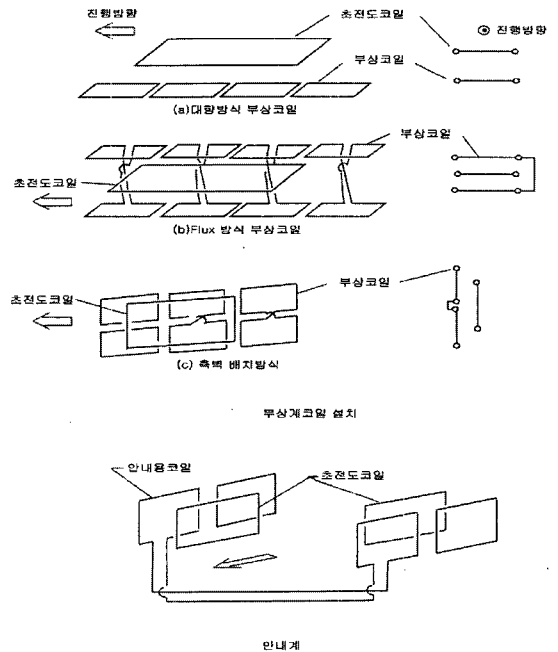


그림 1. 부상계통 코일의 배치도.

회로를 구성하는 플럭스방식으로서 평형점으로 부터 벗어난 정도에 비례한 전류를 유도 하는 방식이 유효하다. 초전도 자석은 리니어 동기모터(LSM : Linear Synchronous Motor)의 계자이며, 궤도측의 전기자코일에 3상교류의 전류를 흘리고, 이동자계를 발생시켜 추진동력을 얻는다(그림2). 이때 차량의 초전도 자석의 위치에 대응한 위상의 전류를 흘릴 필요가 있으며, 위치를 검색하는 장치와 필요한 주파수 및 진폭의 전류를 흘리는 인버터 등의 전원 설비가 필요하다. 이러한 제어장치를 구성함으로써 전류의 위상을 최선의 상태를 유지할 수 있다. 지상1차 방식에서는 추진동력을 얻기 위하여 에너지는 궤도측의 코일에 공급되므로 차량측에서의 전류를 집전하는 필요는 없다. 따라서 이 방식은 고속주행에 적합한 방식이라 할 수 있다. 전기자코일에 공급하는 전력은 코일의 길이 방향으로 Section을 나눈다. 차량이 존재하는 Section에만 전력을 공급함으로써 유효한 에너지 효율의 유지할 수 있다.

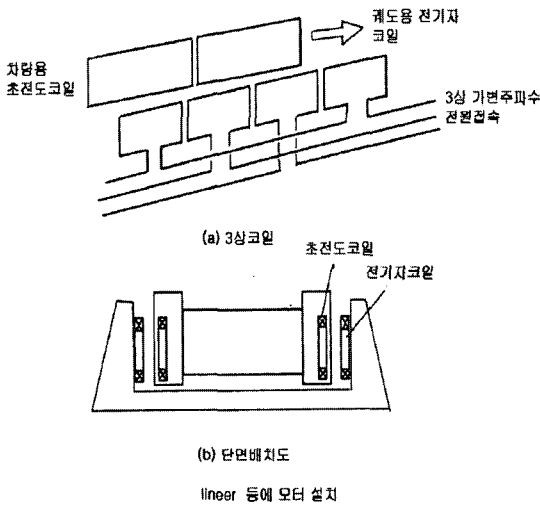


그림 2. Linear 동기모터의 배치도.

차량을 비접촉방식으로 추진시키기 위해서는 3 방향의 자기력을 발생시킬 필요가 있다. 차량의 경량화, 제작비 절감 등을 위하여 코일을 공유할 필요가 있다. 차량의 초전도 자석은 3방향의 자기력을 1 종류의 코일에서 발생하도록 구성 되어 있다. 궤도 측의 코일도 (a)추진과 안내를 병용하는 방식, (b)부상과 안내를 병용하는 방식, (c)추진과 부상, 안내를 모두 병용하는 방식 등으로 제안 되어 각각 자기부상 추진실험이 수행되고 있다.

### 3. 자기 부상 열차 개발의 경위

초전도 자기부상에 관한 기초적인 특성을 파악하기 위하여 1970년 최초로 제작된 자기부상열차는 초전도 자석을 이용하였으며, 최고속도 100 km/h, 최대 부상력이 200 kgf의 회전형 시험용 설비였다. 부상력, 자기 항력 등에 관한 모동 실험을 수행하여 해석된 시뮬레이션과 모두 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그 후 강력한 초전도 자석의 제작에 노력을 기울여 초전도 자기부상 LSM 추진 주행 실험 장치, 지상 1차 LIM 추진 초전도 자기부상 차량, 추진안내

병용방식을 채택한 초전도 자기부상 열차의 주행 실험이 수행 되었다. 1977년에 7 km의 자기부상용 실험선이 제작되어 초전도 자기부상열차의 기술적 가능성을 확인하였고, 자기부상 열차의 개념설계에도 비약적인 발전을 이룩하였다.

Guide Way의 단면 형상은 역T자의 형태를 갖추고 있으며, 차량은 ML500, 차량의 하면과 좌우 측면에는 초전도 자석이 설치되어 있다. 궤도의 수평면에는 부상코일이 설치되어 있다. 또 다른 실험으로는 Guide Way의 단면을 U자형으로 구성하고, 사람을 적재할 수 있는 MLU 001 실험차로 주행 실험이 실시되었다. 차량의 승차감, 최대 3대의 차량편성으로 차량운동 상태에 관련한 실험이 수행 되었다. 초전도 자석은 부상, 안내 및 추진기능을 모두 갖춘 구조로 설치 되어있으며, 헬륨 냉동기가 탑재 되어있다. 사람이 승차된 상태에서 400 km/h의 속도를 달성 하였다.

초전도 자석은 차량 부분에 집중적으로 배치되며, 실용화에 가장 근접한 형태의 자기부상열차가 제작 되었다. 이러한 배치는 차량의 구성상 우수한 형태를 갖추고 있으나, 개개의 초전도 코일의 기저력과 하중의 부담이 증가 하였다.

### 4. 자기 부상 열차 개발의 현상

초전도 자기부상 시스템에서 가장 중요한 부품의 하나가 초전도 자석이며, 초전도 자석의 사양은 서브시스템 전 분야의 기능 좌우하는 부품요소로 작용 된다. 그림3은 초전도 자석의 구조를 나타내는 구성도이며, 4개의 코일을 갖추고 있으며, 액체 헬륨 탱크안에 액화기를 배치하고 있다. 초전도 코일은 NbTi 다심선이며, 에폭시로 보호 되어있다. 표1은 초전도 자석의 주요한 사양이며, 차량에 탑재된 초전도 자석에 요구되는 성능은 다음과 같다.

1. 가능한 한 경량일 것
2. 저온에서 열 침입량이 적을 것
3. 기계적 진동, 전자기적 부하력에 비하여 충분한 동작 신뢰성을 보유할 것

초전도 자석의 경량화를 위하여 초전도 선의 Cu 비율을 작게하여 전류 밀도를 크게 향상 시킨다. Cryostat의 구조를 개선하여 경량화를 이루고, 열침입을 적게 할 수 있는 구조를 개발 하였다. 자기부상 열차의 주행 상태에 있어서도 궤도측 코일이 만드는 자계의 고조파 성분에 의하여 자석이 진동되고 도체 부분에 Eddy current가 유도 되어 손실이 발생 하게 된다. 전자기와 기계진동에 연동된 동적인 문제점은 발생하나, 실험적 및 해석적인 다양한 사례가 검토 되어 손실을 최대한 절감 할 수 있는 개선책이 도출 되었다. 전자력이 발생하는 가장 중요한 부품은 궤도측에 배치된 코일이다. 이 코일은 궤도 전체에 걸쳐 배치되어 있기 때문에 자기부상열차의 가격 탄력성에 크게 저해를 받는다. 또한 일반적으로 코일은

옥외에 설치되며, 다수의 코일의 신뢰성을 확보 하여야만 한다.

초전도 자기부상 방식에서는 자계가 비교적 광범위한 범위에 걸쳐 작용한다. 필요한곳에 자기 Shield를 설치할 수 있으나, 미래의 Shield재료로 고온 초전도체가 검토 되고 있다.

### 5. 향후의 전망

초전도 자기부상 시스템에서는 초전도 자석이 가장 중요한 부품이며, 초전도 자석의 개발에 많은 노력이 경주 되어야 한다. 현재 개발 되고 있는 고온 초전도 재료의 온도 마진 적용 범위가 액체 질소 레벨에서 작용 되게 된다면, 냉각 시스템의 개선을 포함한 Cryostat의 구조가 간략화 되어, 초전도 코일과 궤도측의 코일의 갭을 축소할 수 있다. 따라서 궤도측의 코일의 설계가 용이하게 되어, 초전도 자석의 설치가 자유롭게 구성할 수 있기 때문에 코일의 배치 방법을 크게 개선 할 수 있다.

초전도 자기 부상식 철도는 시속 500 km/h의 속도로 주행이 가능하며, 철도주행 시 발생하는 소음과 진동을 절감 할 수 있으며, Maintenance 관리를 경감 할 수 있는 등의 장점이 있다. 고속 주행 시 발생할 수 있는 지진 등의 자연 현상에 관하여도 안정성을 확보 할 수 있는 특징을 으로 인하여 차세대의 이상적인 유송 시스템으로 기술개발에 박차를 기하고 있다. 지금까지 지속적으로 개선된 자기부상 시스템의 개발에 가일층 노력을 경주하고, 실험선의 실용화를 추진한다면, 고온 초전도 시스템으로 형성된 미래형 초전도 자기부상열차를 구성할 수 있을 것으로 사려 된다. 원리적인 관점에서 이상적인 유송 시스템인 초전도 고속 자기부상 철도의 실용화를 위해서는, 현재 개발되고 있는 시스템의 가일층의 발전과 아울러 실험선의 Data 축적과 실용화를 계산한 고온 초전도 재료 기술 등이 종합적인 자기부상 시스템과 연구개발이 추진되어야 한다.

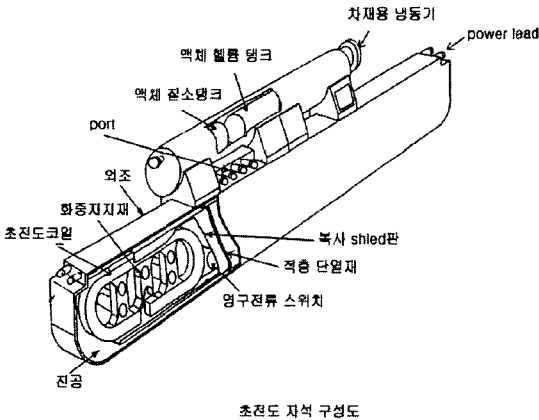


그림 3. 초전도 자석 시스템.

표 1. 초전도 자석의 사양.

자석	크기	5.4 m(L) × 1.17 m(H)
	중량	1500 kg
	He 탱크의 용량	60 l
초전도	코일	
	기자력	700 kA
	pitch	1.35 m
	수	4
내부	열침입량	4 W

## 참고 문헌

- [1] J. R. Powell and G. R. Dandy, ASME Paper 66-WA/RR-5, p.1, 1966.
- [2] J. R. Powell and G. R. Dandy, CIG, p.19, 1969.
- [3] H. Tanaka, Proceedings of International Symposium on Superconductivity, pp.59-64, Springer (1989).
- [4] H. Nakashima, M. Terai, M. Shibata,, M. Yamaji and Y. Jizo, International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, p.160, 1993.
- [5] H. Inoue, and N. Kokubun, International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, p.375, 1993.
- [6] A. D. Applton, IEEE Trans. Magn. Mag. Vol.13, p. 767, 2000.

## 저|자|약|력



성 명 : 이상현

◆ 학 력

- 1989년 일본 TOKAI Univ. 전기공학과 공학사
- 1991년 일본 TOKAI Univ. 전기공학과 공학석사
- 1994년 일본 TOKAI Univ. 전기공학과 공학박사

◆ 경 력

- 1994년 - 1997년 일본 초전도 공학연구소 책임연구원
- 1994년 - 1997년 일본 東京電氣大 연구교수
- 1997년 - 현 재 선문대 전자공학부 교수

