

고온초전도 자기부상 마그네트

배덕권, 조흥제, 김봉섭, 조정민, 성호경, 김동성
한국기계연구원

High-Tc Superconducting Levitation Magnet

Duck Kweon Bae, Hungie Cho, Bong Seop Kim, Jeong Min Jho, Ho-Kyung Sung, Dong Sung Kim
Korea Institute of Machinery and Materials

Abstract - This paper deals with the preliminary study on the HTSC levitation magnet for MAGLEV operating in persistent current mode (PCM). The high temperature superconducting (HTSC) levitation magnet consists of two single-pancake type coils wound with Bi-2223 wire and a persistent current switch (PCS). The levitation magnet was designed by using 3-D finite element analysis. The suspension system for high-speed electrodynamic suspension (EDS) maglev should operated in persistent current mode. It is important to develop a technology to minimize the joint resistance of splice between two HTSC wires. The PCS was observed with respect to various magnitude of charging current. Based on these results, the levitation system using HTSC wire will be further studied.

1. 서 론

1990년대 후반 정부의 지원으로 세계에서 세 번째로 개발된 한국의 자기 부상열차 UTM01은 현재 그 후속모델인 UTM02를 시험 중에 있으며 2007년 가을에는 우리나라 최초의 상용 자기부상열차가 운영될 예정으로 선로 공사가 진행 중이다. 지난 십 수 년간 도시형 자기부상열차 개발의 경향을 바탕으로 차세대 초고속 자기부상열차 개발을 위한 연구가 국내에서 시작되고 있다.

세계적으로 두 가지의 고속형 자기부상열차가 개발되었다. 하나는 독일의 트랜스라피드(transrapid)로 중국 상하이 푸둥공항과 도심을 이어주는 약 30km 노선에 상용화되었다. transrapid는 현재 TR08까지 개발되었는데 상전도 흡인식 자석을 사용하여 차량을 10mm로 부상시키며, 선형동기전동기로 차량을 추진시킨다 [1]. 다른 하나는 일본의 초전도 자기부상열차이다. 현재 MLX01이 야마나시(Yamanashi) 시험선로에서 시험주행 중이며 멀지 않은 미래에 동경과 오사카를 이어주는 제 2 시간선으로 건설될 것으로 예상된다. 초전도 자기부상열차는 초전도 마그네트의 강한 자기장과 지상코일의 상호작용으로 발생하는 반발력을 이용하여 차량을 부상시키며, 선형동기전동기를 사용하여 차량을 추진시킨다 [2].

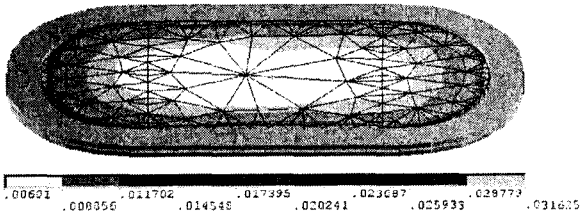
상전도흡인식 초고속 자기부상열차는 차량을 일정한 높이로 부상시키기 위하여 매우 정밀하고도 신뢰성 높은 제어가 필요하다. 반대로 초전도 자기부상열차는 이러한 제어가 필요치 않다. 물론 초전도 자기부상열차는 낮은 탭핑으로 승차감이 상전도흡인식에 비해 떨어지지만 500km/h 이상의 초고속에서는 공기역학적 문제가 승차감에 보다 많은 영향을 줄 수 있으므로 보다 단순하고 안정적인 시스템이 승객의 안전을 위해 적절한 선택이라 할 수 있다.

본 연구에서는 초전도 자기부상열차 개발을 위한 기초연구로써 소형 초전도 마그네트를 설계 제작하여 그 특성을 평가하고자 한다. 현재 상용화되어 판매되고 있는 1세대 고온초전도선재인 Bi-2223 선재를 사용하여 2개의 싱글 팬케이크 형 코일을 제작하였으며 이 두 코일을 직렬로 연결하여 고온초전도 마그네트를 제작하였다. 또한 초전도 자기부상열차용 초전도 마그네트는 차량 운행 시 영구전류모드로 운행되므로 이를 위한 영구전류스위치(PCS)로 마그네트에 포함시켜 제작하였다.

2. 마그네트의 설계 및 제작

2.1 마그네트의 자장해석

그림 1은 3차원 유한요소법으로 해석한 고온초전도 마그네트의 자장분포를 보여준다. 이때의 인가전류는 10A였다. 회색은 코일을 나타내며 자장분



<그림 1> 고온초전도 마그네트의 자장분포(10A 인가 시)

<표 1> 고온초전도선재의 사양

Wire Property	Specification
Type	Bi-2223-reinforced wire
Avg. thickness	0.29-0.32 mm
Avg. width	4.0-4.4 mm
Min. 10 m I_c	115 A(@77 K self-field, 1 μ V/cm)
Min. double bend diam.(RT)	95% I_c retention for 50 mm diam.
Max. rated tensile stress(77K)	300 MPa at 95% I_c retention
Max. rated tensile strain(77K)	0.35% at 95% I_c retention

<표 2> 고온초전도 마그네트의 사양

Number of coils	2 ea
Number of turns	178 turns
Inductance	14.86 mH
Length of used wire	206 m
Resistance(300K)	14.7 Ω
Number of joints	2 ea
Resistance of heater	33.8 Ω
Critical current	60 A(@77 K 1 μ V/cm))

포를 나타낸 곳은 마그네트 보빈의 상부이다. 싱글 팬케이크형 코일의 턴수는 89턴이었다. 본 자장해석 결과 보빈에 장착될 자장센서 부분의 자장은 약 0.07T로 나타났다.

2.2 마그네트의 제작

표 1은 본 마그네트 제작에 사용된 고온초전도선재의 사양을 나타낸다. 그림 2는 고온초전도 코일의 권선 모습을 나타낸다. 2개의 싱글 팬케이크형 코일 2개를 직렬로 연결하여 고온초전도 마그네트를 제작하였다. 영구전류 모드 운전을 위한 영구전류스위치도 설치하였다. 영구전류스위치는 히터에 의해 동작하며 이 히터는 니켈-크롬 합금으로 만들어졌다. 히터의 저항은 33.8 Ω 이었다.

본 연구에서 제작한 고온초전도 자기부상 마그네트는 2개의 접합을 가지고 있다. 하나는 두 개의 싱글 팬케이크 코일 사이의 접합이고 다른 하나는 영구전류스위치에 존재하는 접합이다. 일반적으로 영구전류스위치는 가지는 초전도 마그네트는 별도의 영구전류스위치를 제작하여 사용하므로 (코일 개수-1)+2개의 접합을 가지나 본 연구의 고온초전도 마그네트는 일반적인 마그네트보다 하나 작은 (코일개수-1)+1개의 접합을 가진다. 영구전류모드 운전 시 전류의 감쇄율을 결정하는 것은 마그네트의 인덕턴스와 저항의 비이다. 저항이 완전히 0이라면 전류의 감쇄는 없을 것이나 이것은 이상적인



<그림 2> 고온초전도 코일의 권선

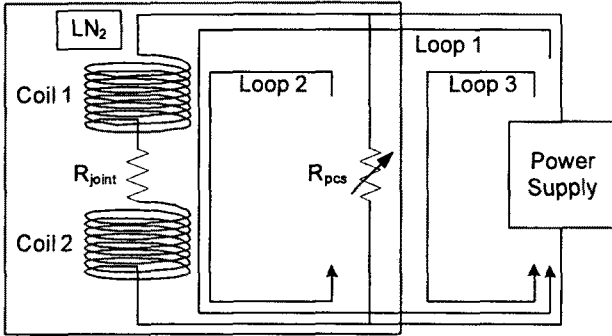
경우이고 실제로는 초전도 코일 사이의 접합에 의한 저항이 존재한다. 이 저항의 합과 마그네트 인덕턴스 비에 따라 전류의 감쇄가 결정되는데 이 감쇄율은 저항의 크기에 반비례하고 인덕턴스의 크기에 비례한다. 표 2에 나타낸 바와 같이 제작한 마그네트의 인덕턴스는 14.86mH였다.

3. 마그네트 특성 실험

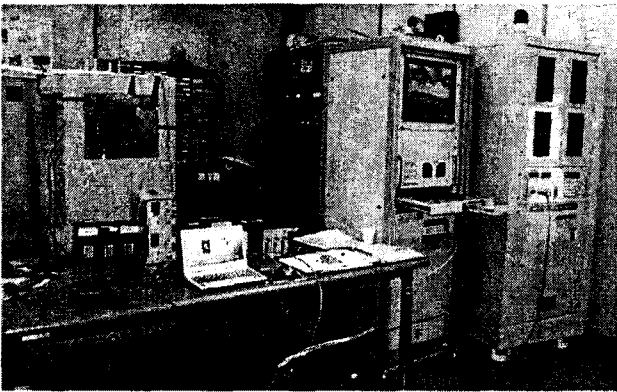
3.1 영구전류모드 운전

그림 3은 고온초전도 마그네트의 특성실험의 등가 회로를 나타내고 그림 4는 특성실험 장면을 나타낸다. 영구전류스위치가 장착된 고온초전도 마그네트를 액체질소 속에 위치시켜 온도 77K를 유지하도록 하였다. 1 μ V/cm의 기준으로 측정된 고온초전도 마그네트의 임계전류는 60A였다.

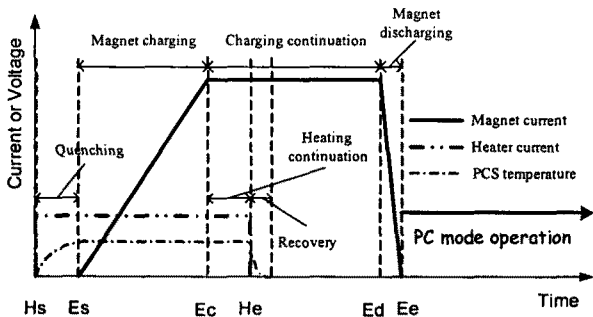
초전도 자기부상열차의 운전을 위한 중요한 고온초전도 마그네트의 특성 중 하나는 영구전류모드 운전 특성이다. 이 특성을 측정하기 위하여 세가지 모드의 충전 방식으로 영구전류모드 운전 특성을 측정하였다. 히터에 전류를 인가하여 영구전류스위치의 온도가 120K에 도달한 이후 마그네트의 충



〈그림 3〉 특성실험 등가회로



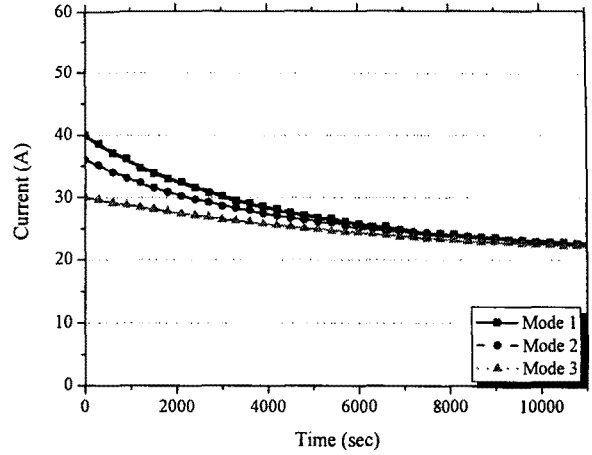
〈그림 4〉 특성실험 장면



〈그림 5〉 영구전류모드 운전

〈표 3〉 영구전류모드 운전

	Applying time (sec)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Hs	0	0	0
Es	10	10	10
Ec	210	190	160
He	510	490	460
Ed	2010	1990	1960
Ee	2014	1994	1963



〈그림 6〉 영구전류모드 운전 결과

전을 시작하였다. 충전율은 0.2A/s였다. 충전이 완료된 시점을 기준으로 5분 동안 히터의 전류를 유지시킨 후 제거하여 영구전류스위치의 저항 R_{pcs} 를 최소화 시켰다. 히터에 전류를 인가한 시간동안 영구전류스위치의 온도는 120K로 유지시켰다. 각 모드별로 설정한 전류가 마그네트에 충전된 이후에도 30분 동안 충전전류를 유지시킨 후 10A/s의 비율로 마그네트의 전류를 0으로 감소시켜 영구전류모드 운전을 시작하였다. 영구전류모드 운전을 시작하기 위한 영구전류스위치의 히터 전류 및 충전전류를 일정 시간동안 유지시킨 이유는 초기자장 감쇄의 감소를 위한 것이다. 초기자장 감쇄는 2중 초전도의 혼합상태 운전 시 초전도체 내부에 침투된 양자화된 자장의 재배열에 의해 발생하는 저항에 의한 것인데 마그네트를 충전시킨 이후 그 충전전류를 바로 제거할 경우 초기자장 감쇄가 커지기 때문에 일정시간동안 전류를 유지시켜 자장의 재배열에 의한 전류 감쇄분을 보상할 수 있도록 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

그림 6은 영구전류모드 운전결과를 나타낸다. 각 모드별로 약 3시간동안 영구전류모드 운전을 지속시켰다. 모드 1, 2, 3은 각각 40A, 36A, 30A의 전류로 고온초전도 마그네트를 충전시켰다. 측정된 마그네트의 임계전류가 60A이므로 각 모드 별 충전전류는 임계전류의 67%, 60%, 50%였다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 충전전류의 크기와 초기자장 감쇄율은 비례하였다. 40A와 36A를 충전하였을 경우에는 초기자장감쇄가 관찰되었다. 30A의 전류를 충전하였을 경우에는 초기자장감쇄가 적었다. 결과적으로 볼 때 초기자장감쇄의 영향으로 세 가지 모드의 영구전류운전에서 3시간 이후 전류값은 각각 22.7A, 22.5A, 22.2A로 비슷하였다. 본 연구에서 측정된 마그네트의 경우 영구전류모드 운전을 위한 적절한 충전 전류는 임계전류의 50%인 것으로 나타났다. 그러나 이 비율은 마그네트의 인덕턴스와 접합저항의 비율에 영향받는 것이기 때문에 인덕턴스가 큰 마그네트의 경우에는 임계전류에 대한 충전할 수 있는 전류의 크기는 커질 것으로 예상된다.

초기자장감쇄 이후의 전류감쇄율로 계산한 마그네트의 저항은 약 160 n Ω 이었다. 마그네트의 접합부는 2곳으로 각 접합부분의 저항은 약 80 n Ω 인 것으로 계산되었다.

5. 결 론

초고속 자기부상열차 개발을 위한 기초연구의 일환으로 소형 고온초전도 마그네트를 제작하여 그 특성을 측정하였으며 그 결론은 아래와 같다.

- [1] 접합저항 및 제작의 편의성을 위하여 별도의 영구전류스위치를 제작하지 않고 권선한 선재를 이용하여 영구전류스위치를 제작하였다.
- [2] 임계전류의 50% 이상의 전류를 충전시킬 경우 초기자장 감쇄가 관찰되었다.
- [3] 접합부분의 저항은 약 80 n Ω 정도였다.
- [4] 본 연구의 결과는 초전도 반발식 자기부상열차를 위한 부상용 고온초전도 마그네트 설계의 기본 자료로 활용될 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Holmer, "Faster than a speeding bullet train," IEEE Spectrum, Vol. 40, No. 8, pp. 30-34, Aug. 2003.
- [2] M. Ono, S. Koga, H. Ohtsuki, "Japan's superconducting Maglev train," IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Vol. 5, No. 1, pp 9-15, March 2002.