

고온초전도 자석 개발현황

배덕권 | 한국기계연구원

1. 개 요

1911년 네델란드의 물리학자 온네스(Onnes)에 의해 발견된 초전도체는 저항 없이 전류를 흘릴 수 있어 이 성질을 이용하면 매우 강력한 전자석을 만들 수 있으며, 물질 내부로 자기장을 침입시키지 않는 초전도체의 성질을 이용하면 물질을 자기적 힘으로 부상시킬 수 있다. 이러한 초전도체는 NbTi를 이용한 저온초전도 선재가 개발된 1960년 이후 자기부상열차(Magnetic Levitation Vehicle), 자기공명영상장치(Magnetic Resonance Imaging), 핵자기공명장치(Nuclear Magnetic Resonance), 핵융합(Nuclear Fusion), 초전도에너지 저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage) 등에 이용되고 있다^{[1],[2]}. 저온초전도체는 액체 헬륨을 사용하기 때문에 냉각비용이 많이 들어가는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결해 주는 고온초전도체가 1987년 발견되었지만 기계적 강도가 약하여 초전도체의 응용을 위한 선재의 제작에 어려움이 있었다. 이때문에 고온초전도체를 사용한 기기의 개발이 즉각적으로 이루어지지 못하였으나 비스무스계 고온초전도체를 사용한 제 1세대 선재가 상용화되어 이를 이용한 고온초전도 기기의 개발이 활성화되고 있다. 특히 보다 좋은 성능을 가지고 있는 이트륨계 제 2세대 선재의 상용화가 다가옴에 따라 고온초전도체를 사용한 기기에 대한 기대가 더욱 커져가고 있다. 고온초전도 기기는 액체헬륨을 사용하는 저온초전도 기기에 비하여 매우 경제적인 뿐 아니라 넓은 온도적 사용범위, 임계 온도에 대한 여유분, 비열 특성, 다양한 냉각 장치(여러 종류의 액체, 고체, 전도 냉각 등) 등으로 저온초전도체에 비하여 보다 안정된 초전도 시스템을 구축할 수 있는 장점이 있다.

초전도체를 이용한 자기부상에 관한 연구는 현재 2가지로 진행되고 있다. 하나는 초전도체가 자기장을 배척하는 성질을 이용한 초전도 자기부상인데 독일 및 중국에서 시제차량을 만들어 시험하고 있다^{[3],[4]}. 다른 하나는 반발식 자기부상(Electrodynamic Suspension)이다. 반발식 자기부상은 자석이 도체 위로 이동함에 의해 도체에서 유기되는 자장으로 움직이는 자석과 도체 사이에 발생하는 반발력을 이용하는 것이다. 전자의 경우 초전도체의 고유한 현상을 이용한 자기부상이고 후자의 경우 초전도체는 대전류를 흘려 강한 자석을 만들 수 있기 때문에 사용된다. 또한 전자의 경우 단거리의 이송용으로 연구되고 있고 후자의 경우 초고속 자기부상열차로 연구되고 있다.

본 고에서는 초고속 자기부상열차에 응용될 수 있는 고온초전도 자석에 대하여 기술할 것이다. 특히 일본의 초고속 자기부상열차 MLX01에 설치되기 위해 개발된 고온초전도 자석에 대한 내용을 중점적으로 기술할 것이다.

일본 동경과 오사카사이의 제 2 신칸선(Shinkansen)인 주오 신칸선(Chuo Shinkansen)은 초전도 자기부상 및 선형동기전동기를 이용한 초고속 자기부상열차 시스템이 될 것이다. 이 노선의 상용화를 위한 야마나시

(Yamanashi) 시험선로에서 운영되고 있는 자기부상열차 MLX01은 초전도 자석을 이용한 부상 및 안내시스템을 사용한다. 기존의 초전도 자석에는 저온초전도체인 NbTi와 구리로 만들어진 선으로 제작된 4개의 레이스트랙(racetrack) 형 저온초전도코일이 설치되어 있다. 이 초전도 코일은 액체 헬륨에 의해 냉각된다. 자기부상열차의 초전도 자석은 차고에서 충전된 후 영구전류모드로 운전되어 자석을 위한 별도의 전원이 필요 없다. 여기에서 영구전류모드 운전은 초전도체는 저항이 없기 때문에 한 번의 충전 후 별도의 재충전이 필요 없는 상태로 운전하는 것을 말한다. 저온초전도 자석은 그림 1에 나타낸 바와 같은 구조이며, 초전도 코일은 액체헬륨을 이용하여 약 4K의 온도로 냉각되며 액체질소는 4K의 코일의 안정적 운전을 위한 단열층을 약 77K으로 냉각시키는 역할을 한다. 저온초전도 자석에 설치된 극저온 냉동기는 각각 증발되는 액체 질소 및 헬륨을 재응축시켜 운전의 효율성 및 경제성을 좋게 한다.

일본은 현재 개발되어 있는 저온초전도 자석을 이용한 MLX01의 운전성능 및 경제성을 개선하기 위하여 고온초전도 자석을 개발했다. 1999년 전도냉각되는 영구전류모드운전 고온초전도 자석을 개발한 이래로 그 성능을 계속 향상시켜 왔다. 이 자석은 직렬로 연결된 레이스트랙 형태의 싱글 팬케익 형 코일(single pancake type coil)로 구성되어 있으며 영구전류모드를 위한 영구전류스위치(PCS: Persistent Current Switch)는 YBCO 박막으로 제작하였다.

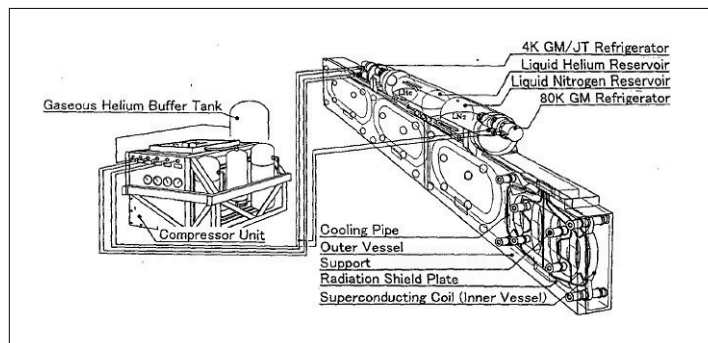


그림 1. MLX01에 설치된 저온초전도 자석

2. 고온초전도 자석의 기본적 특성

2.1 고온초전도 코일의 안정성

그림 2는 부하선과 온도에 따른 코일의 임계전류 변화를 나타낸다. MLX01에 설치된 초전도 자석의 운전전류는 700kAT이다. 그림에서 원으로 표시된 부분이 바로 이 운전점이다. 고온초전도 코일은 30K 온도에서 운전조건을 만족시키나 실제 고온초전도 코일의 운전온도는 20K이므로 10K의 온도 여유가 있다. 표 1은 저온초전도 코일과 비교한 고온초전도 코일의 안정성이다. MPL은 쿼치의 최소전파거리(Minimum Propagation Length), Q는 임계 에너지를 나타낸다. MPL이 도체보다 훨씬 길기 때문에 쿼치의 최소전파영역(MPZ: Minimum Propagation Zone)은 $MPL \times \text{도체면적}$ 이고 Q는 $MPZ \times \text{평균비열} \times \Delta T$ 이다. 계산된 고온초전도 코일의 임계에너지는 현재 MLX01에 설치된 저온초전도 코일 보다 약 200배 크다. 즉, 고온초전도 코일의 안정성은 매우 크기 때문에 쿼치는 거의

일어나지 않을 것이다.

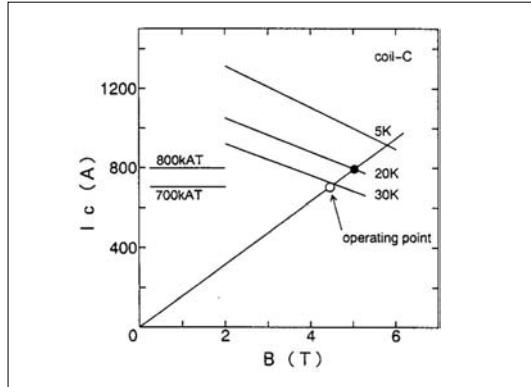


그림 2. 부하선과 온도에 따른 초전도코일의 임계전류 변화

표 1. 저온초전도 코일과 비교한 고온초전도 코일의 안정성

도체	$\Delta T(K)$	MPL(mm)	Q(mJ)
고온초전도(BSCCPO/Ag)	10	39.5	210
저온초전도(NbTi/Cu)	4.3	14.1	1.3

2.2 운전온도 20K의 전도냉각 시스템

그림 3은 20K로 운전되는 전도냉각 초전도 자석의 초기 설계 구조를 나타낸다. MLX01에 실제 장착되어 운전되고 있는 고온초전도 자석과 전체적인 구조는 비슷하지만 냉동기의 설치 등 세부적인 부분에는 차이가 있다. 70K으로 냉각되는 열차폐층은 알루미늄 열도체와 알루미늄으로 코팅된 유리섬유 에폭시 판으로 구성되어 있다. 이 열차폐층은 냉동기 1단에 연결되고 코일은 냉동기 2단에 연결된다.

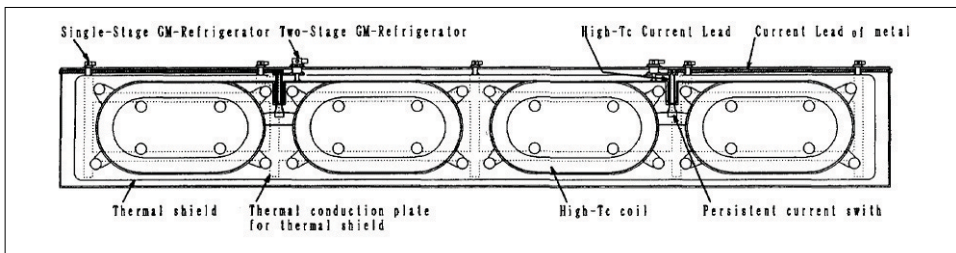


그림 3. 20K 전도냉각 초전도 자석의 구조

3. 초전도 자기부상열차용 1-코일 고온초전도 자석 개발사업

초전도 자기부상열차용 고온초전도 자석 개발사업의 목표는 MLX01에 설치되어 사용되고 있는 저온초전도 자석의 비용절감과 신뢰성 향상에 있다. 본 사업을 시작하기 위하여 첫 번째로 필요한 것은 고온초전도 자석의 타당성과 적용가능성을 평가하는 것이다.

초기 평가기간 동안 고온초전도 자석이 저온초전도 자석을 대체할 수 있을 지를 확인하는 것에 사업의 초점이

맞추어졌다. 하나의 고온초전도코일로 구성된 자석을 제작하여 평가하는 것으로 이 검증이 이루어졌다.

검증의 주된 목적은 영구전류모드 운전으로 현재 저온초전도 자석과 동일한 수준인 10%/day의 전류감쇠를 얻는 것이었다.

3.1 연구개발사업의 진행과정

하나의 고온초전도코일로 구성된 자석에 대한 연구개발 사업은 크게 두 기간으로 나뉘어졌다. 이 기간은 “일본중앙철도회사의 연구개발사업”과 “국가 사업기간”이었다.

3.1.1 일본중앙철도회사의 연구개발사업(1999-2000) : 고온초전도의 역량 및 구성요소의 확인 연구개발 사업

1999년 일본중앙철도회사는 자기부상열차 적용을 위한 고온초전도 자석 기술의 연구를 시작하였다. 그림 4는 MLX01의 실제 초전도코일의 1/2 스케일에 해당하는 1-코일 고온초전도 자석의 타당성조사부터 시제 코일제작까지의 과정을 나타낸다. 시간을 절약하기 위하여 영구전류스위치의 개발이 동시에 이루어졌다.

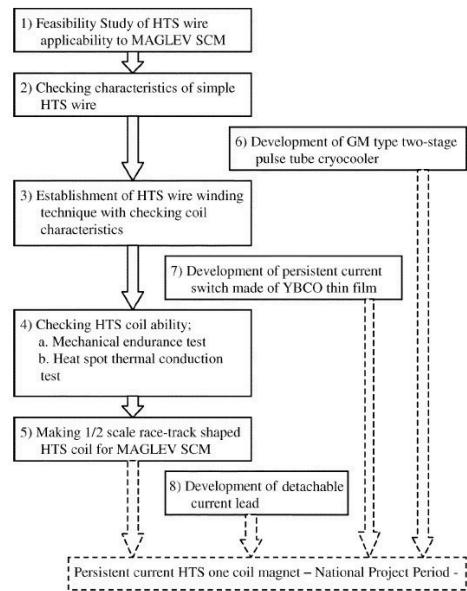


그림 4. 1999년의 가능성 연구에서부터 2003년 1-코일 고온초전도 자석 제작까지의 연구개발사업의 진행과정

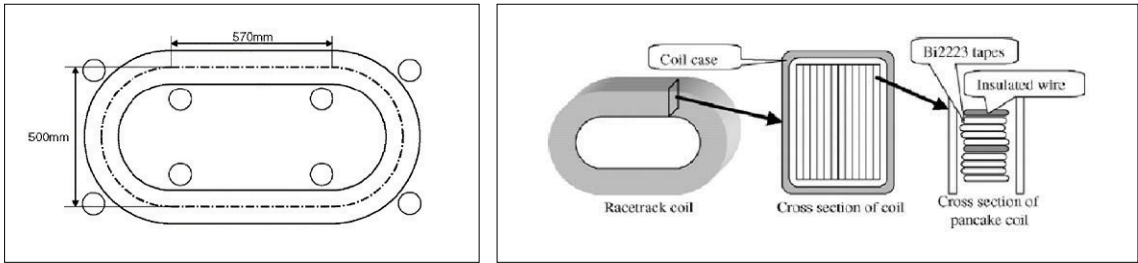
3.1.2 국가 사업으로서의 연구개발사업(2001-2003) : 영구전류모드로 운전되는 고온초전도 자석

2001년 일본중앙철도회사는 “일반적인 산업을 위한 비원형 고온초전도코일 자석의 개발”이라는 제목으로 ISTEK을 통하여 NEDO에 사업을 위임하였다. 본 사업을 통하여 자기부상열차 적용을 위한 레이스트랙 형태의 고온초전도 자석의 개발에 발걸음을 내딛었다.

그림 4의 점선은 국가 연구개발사업으로써의 개발 과정을 나타낸다. 2003년 고온초전도 코일, 필요한 구성요소, 소프트웨어와 시험을 포함한 1-코일 고온초전도 자석의 개발이 완료되어 그 개발 결과가 얻어졌다. 자석의 연구개발 결과로 고온초전도 자석은 0.44%/day의 전류감쇠를 가지고 운전할 수 있다는 것을 알려주었다. 이 결과는

표 2. 저온 및 고온초전도 코일의 사양

	저온초전도코일		고온초전도코일	
코일중심부크기H×L(mm)	500×570		500×570	
초전도체	NbTi		BSCCO	
권선	턴수	1000-1500	병렬/팬케익수	4/12
운전온도	4.2K		20K	
냉각방식	액체 냉각		전도 냉각	
기자력	700-750kA		750kA	
운전전류	500A		521A	



(a) 코일의 크기

(b) 고온초전도코일의 구조

그림 5. 초전도 코일의 사양

매우 낮은 전류 감쇠율을 의미하여 사실상 영구전류운전이라고 말할 수 있다.

표 2와 그림 5는 자기부상열차용 저온초전도 코일과 고온초전도 코일의 사양을 나타낸다.

4. 전도냉각된 자기부상열차용 영구전류모드 고온초전도 자석

GM 2단 펄스튜브 극저온냉동기에 의해 냉각되는, MLX01의 적용을 위한 실제 크기의 영구전류모드 운전 고온 초전도 자석이 설계 제작되었다. 이 자석은 12개의 레이스트랙형 싱글 팬케익 코일로 구성되어 있으며 각 코일은 4개의 Bi-2223 고온초전도선이 병렬로 권선되었다. 표 2와 3은 고온초전도선 및 고온초전도 자석의 사양을 보여 준다. 고온초전도선은 미국 AMSC사의 제품이다. 20K로 냉각되어 정격 기자력 750kA로 운전될 때 영구전류모드 운전 시 전류감쇄 목표는 10%/day 이하였다. 이 전류감쇄는 초전도체 내부의 자속유동(flux-flow) 저항에 의한 전류감쇄이다. 10%/day의 전류감쇄율을 얻기 위해서는 10^{-6} V/cm에서 10^{-9} V/cm까지의 전계영역에서 높은 n값(n-value)을 가지는 고온초전도선이 필요하다. 따라서 전계영역에서 14이상의 n값을 가지는 선을 선택하였다. 본 조건을 만족하기 위해서는 코일의 n값이 10 이상이어야 한다. 10^{-6} V/cm에서 10^{-9} V/cm까지의 전계영역에서 측정된 12개의 싱글팬케익 코일을 연결하여 만든 코일의 n값은 10^{-13} 이었다.

4.1 초전도 자석의 영구전류모드 운전

고온초전도 자석의 영구전류모드운전을 위한 영구전류스위치(PCS)는 YBCO 박막으로 제작되었다. 그림 9는 영구전류스위치를 나타낸다.

4.1.1 정격 기자력에서 영구전류모드 운전

영구전류모드로 운전되는 고온초전도 자석은 진공용기 속에 설치되어 전도냉각을 통해 20K 이하로 냉각된다. 영구전류스위치 온도, 중심부의 자속밀도, 충전 시 전원장치의 전류는 그림 8에 나타낸 바와 같다. 정격충전전류는 532A였다. 동작순서는 아래와 같다.

- (1) 영구전류스위치 가열(OFF): 온도조절장치를 사용하여 영구전류스witch는 100K까지 가열시켜 그 온도를 유지시킨다.
- (2) 자석 여자: 고온초전도코일은 전원장치를 사용하여 일정한 비율로 설정된 전류까지 여차시킨다.

표 3. 고온초전도선의 사양

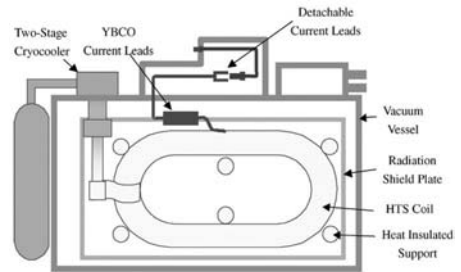
Superconducting wire	Ag-sheathed Bi2223 wires
Width	<4.4mm
Thickness	0.19-0.21mm
lc(10 ⁻⁶ V/cm criterion)	>125 A@77K.s.f.
n-value	>14@10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷ V/cm
Tensile Stress@95% lc	>65MPa

표 4. 고온초전도 자석의 사양

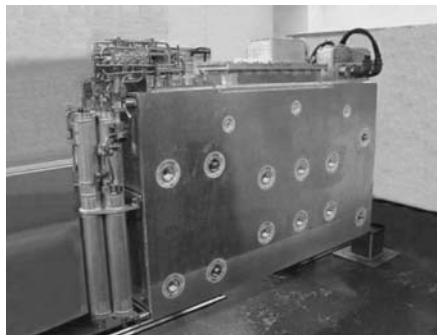
Diameter of arc part	500mm
Length of straight line part	570mm
Number of pancake coil	12
Operating temperature	20K
Magnetomotive force	750kA
Operating current	532A
Inductance	2.4H



(a) 케이스에 장착된 고온초전도코일



(b) 자석 시스템의 구조



(c) 제작된 고온초전도 자석 시스템

그림 6. 제작한 고온초전도 자석

- (3) 영구전류스위치 냉각(ON): 영구전류스위치로의 열원을 차단하여 25K을 넘지 않도록 냉각시킨다.
- (4) 전원장치 출력전류의 감소: 전원장치의 전류를 감소시킨다.
- (5) 영구전류모드 운전: 전원장치의 전류가 0에 도달할 때 영구 전류모드 운전의 시작

그림 9에 나타난 바와 같이 영구전류모드 운전은 정상적으로 수행되었다. 그림 11에 나타난 바와 같이 영구전류모드운전은 10시간동안 행하였으며 그 전류감쇠는 0.44%/day로 목표치를 훨씬 상회하여 달성하였다. 따라서 본 자석은 자기부상열차에 충분히

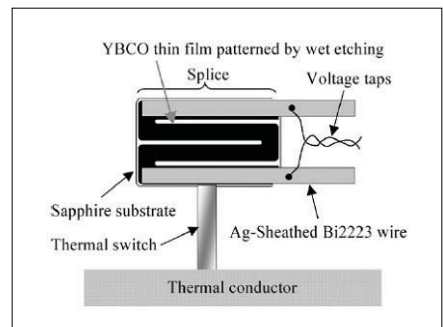


그림 7. YBCO 박막으로 제작한 영구전류스위치

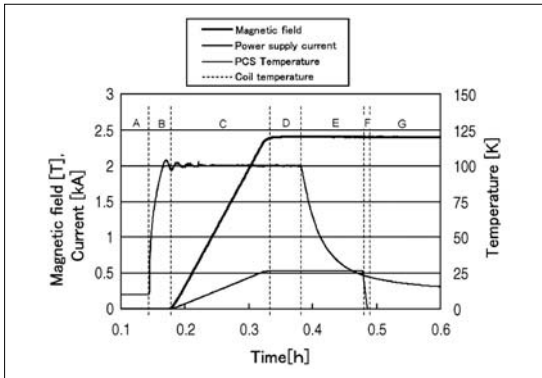


그림 8. 영구전류스위치 동작 결과

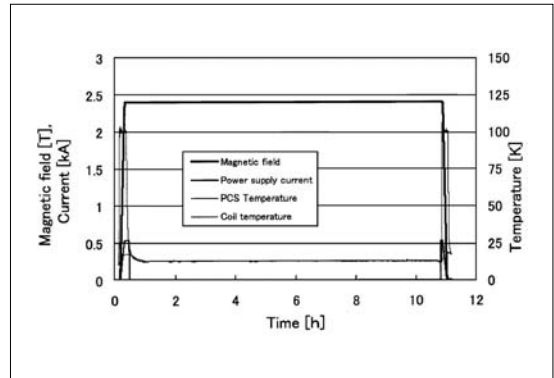


그림 9. 10시간동안의 운전 결과

적용할 수 있음이 확인되었다.

4.2 전자기 진동특성 평가

산업적으로 사용할 수 있는 초전도 자석의 특성을 평가하기 위해서는 전기적 특성 뿐 아니라 기계적 특성 또한 중요하다. 그림 10과 같은 구성으로 전자기 진동시험을 수행하였다. 이는 아마나시 자기부상 시험선로에서 사용되고 있는 저온초전도 자석의 특성 평가에 사용하였던 것과 동일한 시스템이다.

이 설비는 아마나시 시험선로에서 관측된 전자기력과 비슷한 환경을 제공한다.

그림 11의 측정결과에서 고온초전도코일은 530A를 충전한 상태에서 영구전류모드로 운전되었다. 전자기 진동의 주파수는 80Hz에서 2-3Hz/s의 비율로 상승되었다. 500km/h의 운행속도에 해당하는 진동수는 309Hz이다. 80Hz에서 309Hz까지의 영역을 측정할 결과 과도한 가속은 측정되지 않았다.

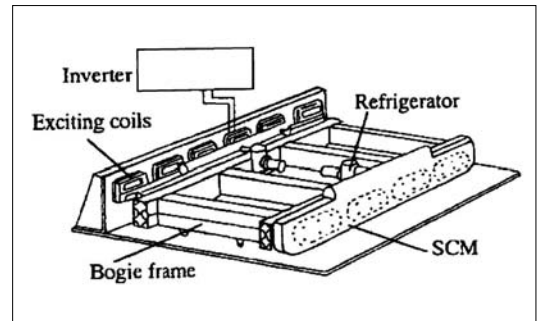


그림 10. 전자기 진동시험의 구조

5. 고온초전도 자석의 실차 적용 및 시험 결과

완벽한 고온초전도 기술 구현을 위해 진행되는 노력의 일환으로, 일본중앙철도회사는 아마나시 자기부상열차 시험선로에서 사용하기 위한 비스무스계 고온초전도 선재를 사용한 고온초전도 자석을 성공적으로 개발하였다. 개발한 고온초전도 자석 자체의 성능에 대한 시험(냉동 능력 검증, 여자 특성 등)을 계속하여 2005년 가을에 예정된 아마나시 시험선로의 실차량 시험운전 수행 이전에 개발한 고온초전도 자석을 자기부상열차 차량에 탑재하기 위한 준비를 하였다.

5.1 고온초전도 자석을 탑재한 자기부상열차의 시연

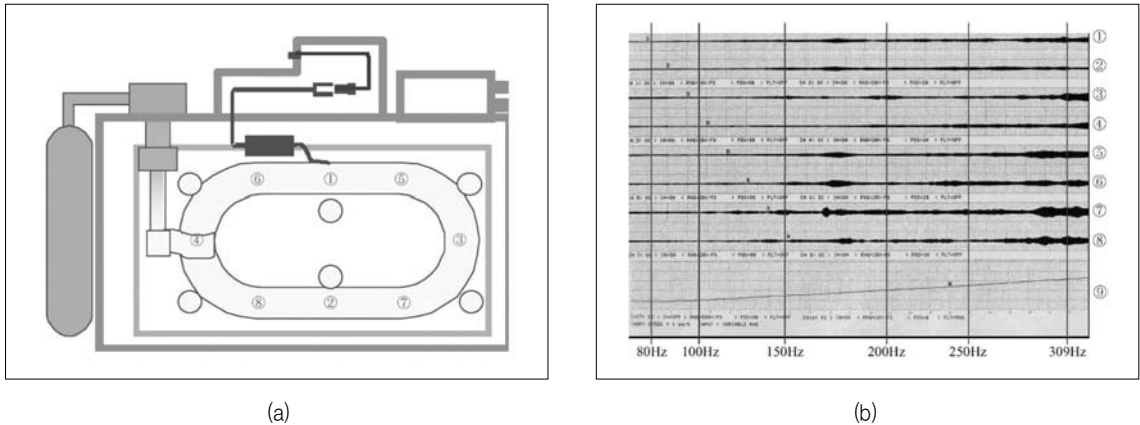


그림 11. 전자기 진동 시험결과 (a) 가속도센서의 설치위치 (b) 측정결과, ⑨는 주파수

일본 중앙철도회사는 2005년 11월 22일 고온초전도 자석을 탑재한 자기부상열차의 주행시험을 야마나시 자기 부상 시험센터에서 시작하였다. 고온초전도 자석을 탑재한 자기부상열차의 주행시험은 처음이다. 첫날 실험에서 이 자기부상열차는 시속 501킬로미터를 기록했다. 시험주행은 12월 9일까지 주행시험구간에서 이루어졌으며, 고온초전도 자석의 각 부분의 진동 특성 및 온도특성을 조사해 실용성을 검사하였다. 자기부상열차 실험선의 차량은 3량으로 편성되어 함께 8개의 초전도 자석을 탑재하고 있다. 8개의 NbTi로 제작된 저온초전도 자석이 차량에 설치되어있다. 저온초전도 자석은 액체질소와 액체 헬륨을 이용해 4K까지 냉각시켜 사용한다. 일본중앙철도회사는 본 시험에서 8개 중 1개를 고온초전도 자석으로 변환시켰다. 발생하는 자계 및 자석의 외형 크기의 경우 고온과 저온 자석이 거의 같다. 고온초전도 자석은 임계온도가 약 110K인 Bi-2223 고온초전도 선재로 제작 되었다. 냉각 시스템에서는 냉매를 사용하지 않고 냉동기를 이용한 전도냉각법을 이용하였다. 냉매를 사용하지 않으므로 구조가 간단하여 신뢰성이 향상된다. 초전도 코일은 20K까지 냉각되었다.

야마나시 자기부상열차 시험선에서 “고온초전도 자석”를 탑재한 차량의 주행 시험이 종료되었으며 지극히 안정적인 주행을 검증할 수 있었다.

(1) 시험 기간 : 2005.11.22-2005.12.9

(주행일은 11/22-25, 29-30, 12/1·2·5-9의 13일간)

(2) 최고속도 : 553.9km/h

(3) 주행거리 : 4,111km

(4) 고온초전도 자석 각 부분의 진동 특성, 온도 특성 등이 상기의 최고속도까지 별다른 문제점이 없었음.

6. 고온초전도 자석의 향후 전망

야마나시 시험선로에서 사용되기 위한 고온초전도 자석은 4-코일 자석이다. 2004년 3월 1-코일 고온초전도 자석을 성공적으로 개발하였다. 차량에 장착되어 성공적으로 주행 시험을 수행한 4-코일 자석은 이미 개발된 1-

코일 자석의 기술적 확장이다. 그림 14는 MLX에 설치된 자석을 나타내고 있으며 그림 15는 기존의 저온초전도 자석과 새로이 개발된 고온초전도 자석의 구조적 비교를 하고 있다.

보다 향상된 고온초전도선의 전류전송능력과 선재 가격 감소로 자기부상열차 상용화 운전을 위한 고신뢰 저비용 초전도 자석의 기술적 응용이 기대된다. 본 시험의 수행 및 여러 관련된 기술의 증명으로 미래의 실제 응용을 향한 기술적 개발이 지속되고 있다.

본 주행 시험에 의해 얻을 수 있던 기본 특성 데이터를 근거로 해 고온 초전도 자석의 실용화를 향한 기술개발을 실시해 가는 등 코어 기술의 한층 더 향상시켜 초전도 자기부상열차의 완성도를 더욱 높여 갈 수 있을 것이다. 현재 진행되고 있는 고온초전도선의 통전성능의 향상과 가격의 저하로 신뢰성의 높은 저비용의 영업선 용 초전도 자기부상열차의 초전도 자석으로서의 적용을 기대 할 수 있다.

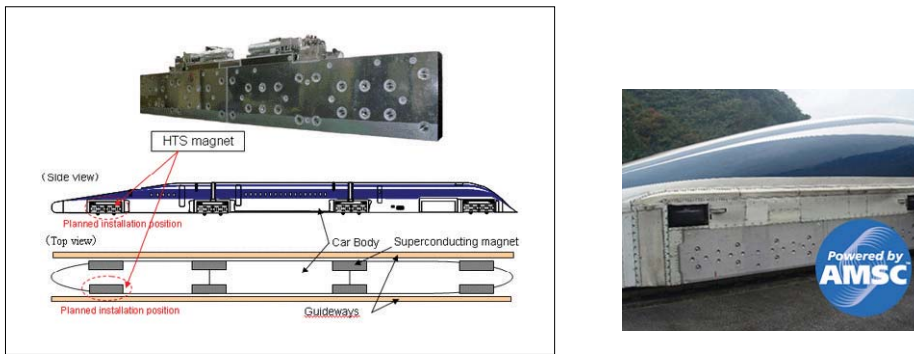


그림 12. MLX01에 설치된 고온초전도 자석

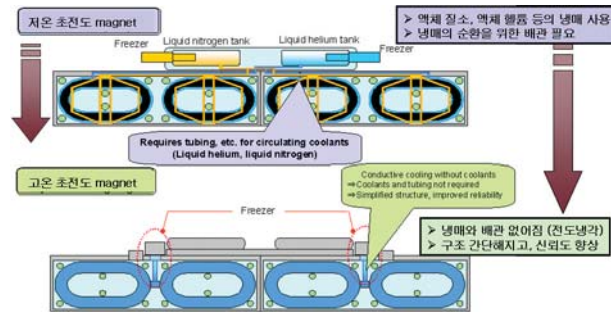


그림 13. 저온초전도 자석과 고온초전도 자석의 구조적 비교



그림 14. 고온초전도 자석을 탑재하고 운행중인 MLX01

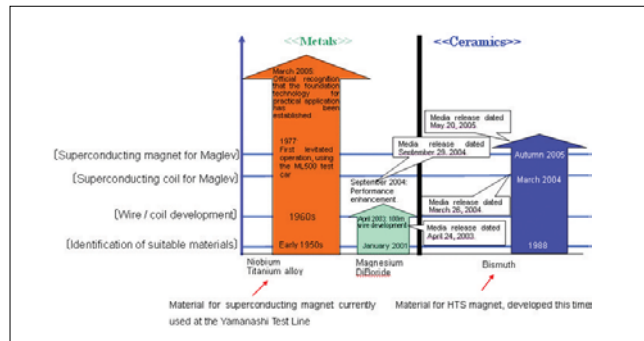


그림 15. 자기부상열차를 위한 초전도 자석의 개발현황

7. 요약

새로이 개발된 고속 자기부상열차용 고온초전도 자석의 특징을 요약하면 아래와 같다.

- (1) 기존 저온초전도 자석의 전류 감쇄율은 10%/day 이상이었으나, 전류 감쇄율 0.5%/day의 자기부상열차용 전도냉각 영구전류 고온초전도 자석이 개발되었다.
- (2) 일본중앙철도회사에 의해 개발된 고온초전도코일의 성능은 현재 초전도 자기부상열차에 사용되고 있는 NbTi 저온초전도코일에 필적하는 성능을 제공한다. 특히 새로운 고온초전도코일은 높은 진동 및 스트레스에도 견딜 수 있다.
- (3) NbTi로 제작한 저온초전도코일은 초전도를 유지시키기 위한 냉각에 액체헬륨과 액체질소가 필요하다. 새로운 고온초전도 자석은 단지 직접 연결된 냉동기만으로 충분히 냉각될 수 있어 액체 헬륨과 액체 질소가 필요하지 않다. 따라서 냉각시스템이 단순화되어 신뢰성 및 자석 시스템 제작 및 운영비용을 줄일 수 있다.
- (4) 지속적으로 발전되고 있는 고온초전도체의 성능 및 가격 감소는 고온초전도 자석을 적용한 자기부상열차의 성능, 안정성, 신뢰성 및 제작/유지비용 감소에 큰 기여를 할 것이다.

❁ 참고 문헌

- [1] P.G. Therond, I. Joly, and M. Volker, "Superconducting magnetic energy storage (SMES) for industrial applications-comparison with battery systems," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 3, No. 1, Part 4, pp. 250-253, Mar 1993.
- [2] G. Morrow, "Progress in MRI magnets," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp. 744-751, March 2000.
- [3] Suyu Wang et al., "The man-loading high-temperature superconducting Maglev test vehicle," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 2134-2137, June 2003.
- [4] L. Schultz, O. de Haas, P. Verges, C. Beyer, S. Rohlig, H. Olsen, L. Kuhn, D. Berger, U. Noteboom, and

U. Funk, "Superconductively levitated transport system – the SupraTrans project," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 2301–2305, June 2005.



배 덕 권

- 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터 선임연구원
- 관심분야 : 초전도 자석 및 자기부상 시스템
- E-mail : porthos@kimm.re.kr