

소형 초전도 부상자석의 특성 연구

Study on the Characteristics of a Small Scale HTSC Levitation Magnet

조홍제^{1,*}, 배덕권², 이종민¹, 고태국³

Hungje Cho^{1,*}, Duck Kweon Bae², Jongmin Lee¹, and Tae Kuk Ko³

Abstract: This paper deals with the characteristics of a small scale high-T_c superconducting (HTSC) levitation system. The levitation tester, which models after electrodynamic suspension (EDS) maglev, consists of one HTSC magnet, a reaction plate, and force measuring components. Instead of moving magnet, AC current was applied to the fixed HTSC magnet. The magnet also has persistent current switch (PCS). The inductance of the magnet was 18.5 mH and total joint resistance of the magnet was $5.74 \times 10^{-7} \Omega$. AC current was applied into the HTSC magnet with various frequencies and the levitation force was calculated and measured. According to the increase of the vehicle speed, the levitation force was saturated.

Key Words: levitation, superconductor, electrodynamic suspension, magnetic field.

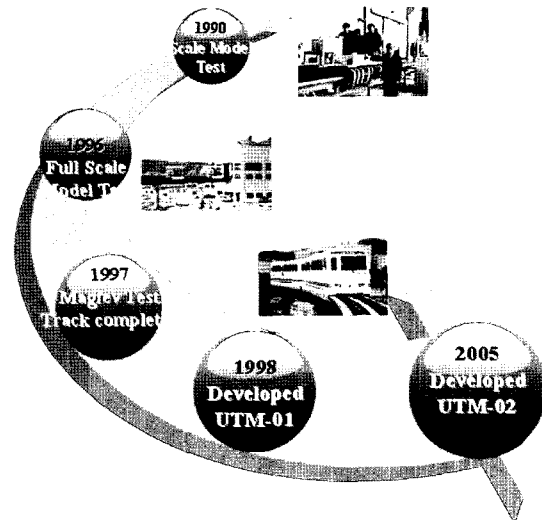


Fig. 1. Brief history of the development of maglev in Korea.

1. 서 론

1989년부터 1993년까지 자기부상열차 개발을 위한 기본 연구가 정부의 지원 하에 한국에서 진행되었으며 이 연구를 기반으로 1998년 2량 1편성인 도시형 자기부상열차가 개발되었다. 세계에서 세 번째로 한국에서 개발된 본 자기부상열차의 명칭은 UTM01이었으며 2007년 가을에 우리나라 최초의 상용 자기부상열차의 운영을 목적으로 한 UTM02가 현재 시험중이다.

Fig. 1은 한국의 자기부상열차 개발에 대한 간략한 역사를 나타낸다. 지난 십 수 년간 수행한 도시형 자기부상열차 개발의 경험을 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 상용운전을 목적으로 개발된 MLX 01이 야마나시(Yamanashi) 시험선로에서 시험주행 중이며 멀지않은 미래에 동경과 오사카를 이어주는 제 2 신간선으로 건설될 것으로 예상된다. 초전도 자기부상열차는 초전도 부상자석의 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 댐핑으로 승차감이 상전도흡인식에 비해 떨어지지만 500km/h 이상의 초고속에서는 공기역학적 문제가 승차감에 보다 많은 영향을 줄 수 있으므로 복잡한 제어가 필요없는 단순하고 안정적인 시스템이 승객의 안전을 위한 적절한 선택이라 할 수 있다.

본 연구에서는 초전도 자기부상열차 개발을 위한 기초연구로써 반발식 자기부상을 위한 소형 초전도 부상자석을 설계 제작하여 그 특성을 평가하였다. 현재 상용화되어 판매되고 있는 1세대 고온초전도선재인 Bi-2223 선재를 사용하여 2개의 싱글 팬케이크 형 코일을 제작하였으며 이 두 코일을 직렬로 연결하여 고온초전도 부상자석을 제작하였다. 또한 초전도 자기부상열차용 초전도 부상자석은 차량 운행 시 영구전류모드로 운행되므로 이를 위한 영구전류스위치(PCS)도 시스템에 장착하여 시험하였다.

¹정 회 원 : 한국기계연구원
²정 회 원 : 충주대학교 안전공학과
³정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과
*교신저자 : cho_hj@kimm.re.kr
원고접수 : 2007년 1월 8일
심사완료 : 2007년 2월 12일

2. 부상자석 및 시험기의 제작 및 실험

2.1. 부상자석의 설계

Fig. 2는 3차원 유한요소법으로 부상자석에 10A의 전류를 인가한 상태에서 해석한 고온초전도 부상자석의 자장분포를 나타낸다. 회색 부분은 권선을 나타내며 그림에는 보빈 상부의 자장분포를 나타내었다. 본 권선의 인덕턴스는 18.5mH였으며 하나의 싱글 팬케이크형 코일의 턴수는 89턴이었다. 전체 권선은 두개의 싱글 팬케이크형 코일을 직렬로 연결하여 구성하였으며 본 해석을 바탕으로 예측한 임계전류는 55A 정도일 것으로 예측되었다. 레이스트랙형 코일인 본 부상자석의 곡선부의 내경은 200mm였으며 권선의 높이는 스페이서를 포함하여 11mm였다.

2.2. 부상자석의 제작

Table 1은 본 부상자석 제작에 사용된 고온초전도선재의 사양을 나타내며 Table 2는 부상자석의 사양을 나타낸다. 초전도선은 미국 AMSC사의 Bi-2223 선재를 사용하였다. 본 선재는 스테인레스 테이프를 기계적 강도를 강화시킨 선재로써 10m의 최소 임계전류는 115A 이상이다. 본 선재로써 싱글팬케이크형 초전도권선을 제작하였다. 2개의 싱글 팬케이크형 코일 2개를 직렬로 연결하여 고온초전도 부상자석을 제작하였다. 총 사용된 선재의 양은 약 206m였다. 총 권선수는 178턴으로 하나의 싱글팬케이크형 권선은 각각 89턴으로 제작되었다. 보빈은 유리섬유강화 플라스틱(GFRP: glass fiber reinforced plastic)으로 제작하였다. 권선을 마친 후에는 안전성 확보를 위하여 예폭시로 함침하였다. Table 2에 나타낸 바와 같이 제작한 자석의 인덕턴스는 18.5mH였다. 권선 후 측정된 고온초전도 부상자석의 임계전류는 53A였다.

2.3. 영구전류스위치의 설계 및 제작

영구전류스위치는 히터에 의해 동작하며 이 히터는 니켈-크롬 합금으로 만들어졌다. 히터의 저항은 33.8 Ω이었다. 본 연구에서 제작한 고온초전도 부상자석은 2개의 접합을 가지고 있다. 하나는 두 개의 싱글 팬케이크 코일 사이의 접합이고 다른 하나는 영구전류스위치에 존재하는 접합이다.

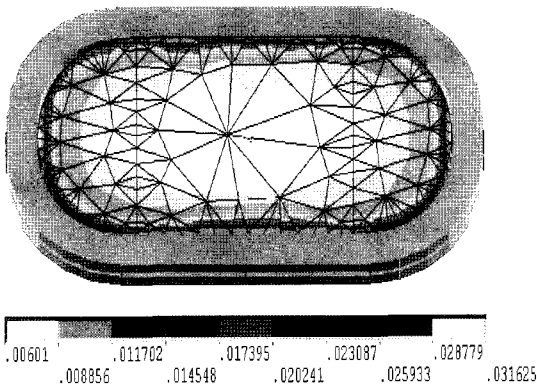


Fig. 2. Distribution of magnetic field in HTSC magnet (10A).

Table 1. Specifications of Bi-2223 wire.

	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

Table 2. Specifications of the HTSC levitation magnet system.

	Specification
Number of coils	2 ea
Number of turns	178 turns (89 turns/coil)
Inductance	18.5 mH
Length of used wire	206 m
Resistance(300K)	14.7 Ω
Resistance of heater	33.8 Ω
Critical current of magnet	53 A(@77 K 1 μ V/cm))
Critical current of PCS wire	115 A(@77 K 1 μ V/cm))
Reaction plate	Aluminum
Load cell	Max. 294.2 N

일반적으로 영구전류스위치를 가지는 초전도 부상자석은 별도의 영구전류스위치를 제작하여 사용하므로 (3), {(코일 개수-1)+2}개의 접합을 가지나 본 연구의 고온초전도 부상자석은 일반적인 것 보다 하나 작은 {(코일개수-1)+1}개의 접합을 가진다. 영구전류모드 운전 시 전류의 감소율을 결정하는 것은 자석의 인덕턴스와 저항의 비이다. 저항이 완전히 0이라면 전류의 감소는 없을 것이나 이것은 이상적인 경우이고 실제로는 초전도 코일 사이의 접합에 의한 저항이 존재한다. 이 저항의 합과 자석의 인덕턴스 비에 따라 전류의 감소가 결정되는데 이 감소율은 저항의 크기에 반비례하고 인덕턴스의 크기에 비례한다.

Fig. 3은 영구전류스위치를 장착한 고온초전도 부상자석 시스템의 등가회로를 보여준다. 그림에 나타나 있듯이 2개의 페루프로 구성된다. 영구전류스위치는 히터에 의한 온도로 초전도 페루프의 일부가 상전도와 초전도상태로 전이되면서 동작한다.

영구전류스위치의 동작 순서는 Fig. 4와 같다. 켄치 발생시간은 히터에 전류가 가해지는 시점에서 초전도 페루프에 상전도영역이 나타나기까지의 시간을 말한다. 회복시간은 히터에 전류가 제거되는 시점(He)에서 상전도영역이 사라지는 시점까지의 시간을 말한다. Fig. 4에서 PCS의 온도는 히터에 의한 초전도페루프의 저항을 나타낸다.

PCS 운전의 순서는 아래와 같다.

- 1) 히터 ON(켄치, 영구전류스위치 OFF): $H_s \rightarrow E_s$
- 2) 전원장치 전류 상승: $E_s \rightarrow E_c$
- 3) 충전 지속: $E_c \rightarrow E_d$
- 4) 히터 지속: $E_c \rightarrow H_e$
- 5) 전원장치 전류 감소: $E_d \rightarrow E_e$

E_d 이후에는 자속보존의 법칙에 따라 Fig. 3의 루프 2(I_2)에 전류가 흐르게 된다 [4]. 다시 말해 이 순간부터 영구전류모드운전이 시작된다.

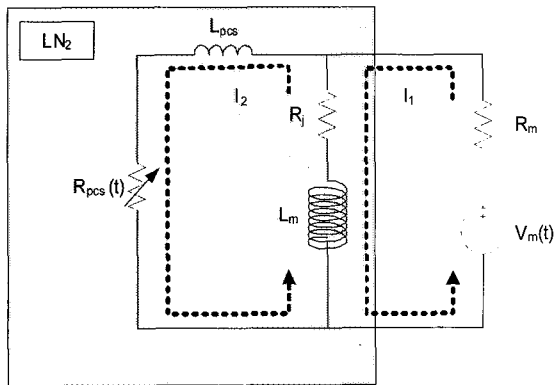


Fig. 3. Equivalent circuit of HTSC levitation magnet having PCS.

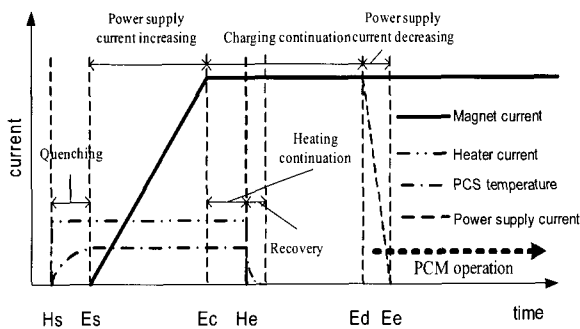


Fig. 4. Sequence diagram of persistent current mode operation.

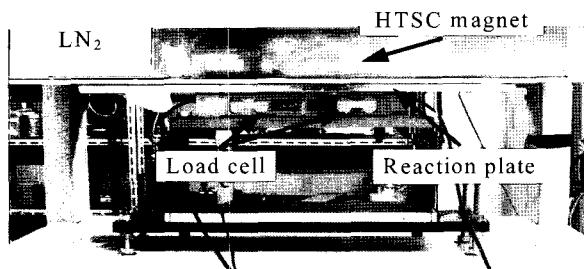


Fig. 5. Schematic drawing of the HTSC levitation tester.

Table 3. Operation mode of persistent current mode operation.

	Applying time (sec)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
H_s	0	0	0
E_s	10	10	10
E_c	210	190	160
H_e	510	490	460
E_d	2010	1990	1960
E_e	2014	1994	1963

2.4. 부상자석 시험기의 설계 및 제작

차상의 부상자석이 지상 코일 위를 고속으로 지나갈 때 발생하는 와전류에 의한 부상력으로 반발식 자기부상열차는 부상된다. 따라서 어느 정도의 차량속도 이후에 안정된 부상이 이루어진다. 본 연구에서는 부상자석을 움직이는 것과 등가적인 교류 전류를 인가함으로써 지상코일에 와전류를 유기시켜 부상력을 발생시켰다. 지상코일로는 두께 10mm의 알루미늄판을 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에서 제작한 시험기를 보여준다. 부상력을 측정하기 위하여 2개의 로드셀을 설치하였다. 알루미늄판 상부에 고온초전도 부상자석을 고정시켰으며 액체질소에 본 부상자석을 넣어서 77K을 유지시켰다. 고온초전도 부상자석과 지상코일의 역할을 하는 알루미늄판 사이의 거리는 35mm였다.

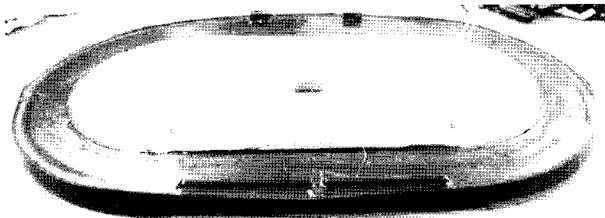
2.5. 실험

Fig. 6은 실험전경을 나타낸다. 고온초전도 부상자석은 액체질소용기 속에서 냉각되어 77K을 유지하였다. 임계전류를 측정하기 위한 전류는 직류전원장치로 인가하였으며 부상력을 측정하기 위한 전류는 교류 200V-200A 전원장치로 인가하였다.

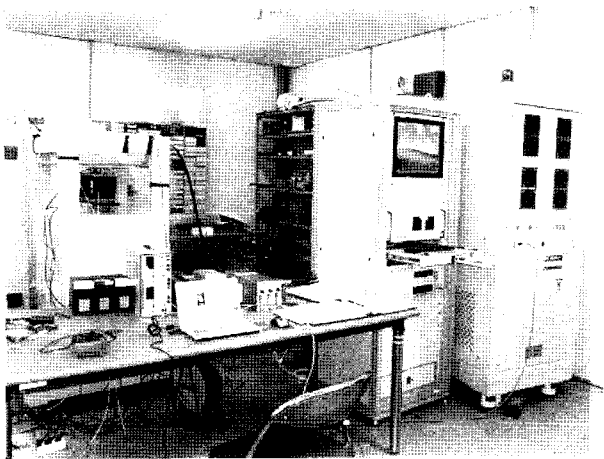
부상자석의 임계전류는 4단자법을 사용하여 측정하였으며 $1\mu V/cm$ 의 기준을 사용하였다.

초전도 자기부상열차의 운전을 위한 중요한 고온초전도 부상자석의 특성 중 하나는 영구전류모드 운전 특성이다. 이 특성을 측정하기 위하여 Table 3과 같은 세 가지 모드의 충전 방식으로 영구전류모드 운전 특성을 측정하였다. 히터에 전류를 인가하여 영구전류스위치의 온도가 120K에 도달한 이후에 자석의 충전을 시작하였다. 충전율은 $0.2A/s$ 였다. 충전이 완료된 시점을 기준으로 5분 동안 히터의 전류를 유지시킨 후 제거하여 영구전류스위치의 저항 R_{pcs} 를 최소화시켰다. 히터에 전류를 인가한 시간동안 영구전류스위치의 온도는 120K로 유지시켰다. 각 모드별로 설정한 전류가 부상자석에 충전된 이후에도 30분 동안 충전전류를 유지시킨 후 $10A/s$ 의 비율로 전원장치의 전류를 0으로 감소시켜 영구전류모드 운전을 시작하였다. 영구전류모드 운전을 시작하기 위한 영구전류스위치의 히터 전류 및 충전전류를 일정 시간동안 유지시킨 이유는 초기자장 감소의 감소를 위한 것이다. 초기자장 감소는 2중 초전도의 혼합상태 운전 시 초전도체 내부에 침투된 양자화된 자장의 재배열에 의해 발생하는 저항에 의한 것인데 자석을 충전시킨 이후 그 충전전류를 바로 제거할 경우 초기자장 감소가 커지기 때문에 일정 시간동안 전류를 유지시켜 자장의 재배열에 의한

전류 감소분을 보상할 수 있도록 하였다. 부상력은 두 개의 로드셀로 측정하였다. 전송전류는 10, 20, 30, 40A였으며 각 전류에서 주파수는 5, 10, 30, 50... Hz의 순으로 인가하였다. 인가한 주파수는 파워서플라이의 용량으로 제한되었다. 즉 전송전류가 커짐에 따라 인가할 수 있는 전류의 주파수가 제한되었다. 40A의 전송전류를 인가한 상태에서는 전류의 주파수를 50Hz까지 상승시킬 수 있었다. 모든 측정값은 필터를 거쳐 절연증폭기로 증폭하였다. 또한 모든 장비는 LabVIEW와 GPIB 통신으로 제어하였다.



a) HTSC magnet



b) Tester and testing devices

Fig. 6. Experimental setup.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 임계전류

Fig. 7은 고온초전도 부상자석의 전압-전류 특성을 보여준다. 본 시험을 위해 고온초전도권선 내부에 전압탭을 설치하여 전류증가에 따른 초전도권선 양단의 전압을 측정하였다. 10V-1000A 용량의 전원장치를 사용하여 전류를 인가하였다. 전류의 상승속도는 2A/s였다. 측정된 임계전류는 53A였다. 2.1에서 예상한 임계전류는 55A 정도였으므로 예측한 값 보다 2A 작은 임계전류가 측정되었다.

3.2. 영구전류모드 운전

Fig. 8은 영구전류모드 운전결과를 나타낸다. 각 모드별로 약 3시간동안 영구전류모드 운전을 지속시켰다. 모드 1, 2, 3은 각각 40A, 36A, 30A의 전류로 고온초전도 부상자석을 충전시켰다. 측정된 고온초전도 자석의 임계전류는 53A였다.

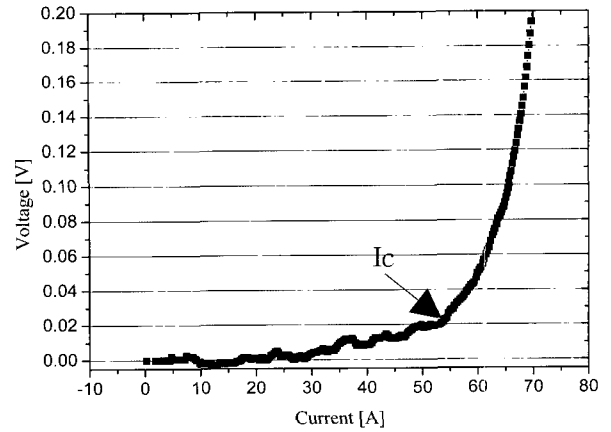


Fig. 7. V-I characteristic of the HTSC magnet.

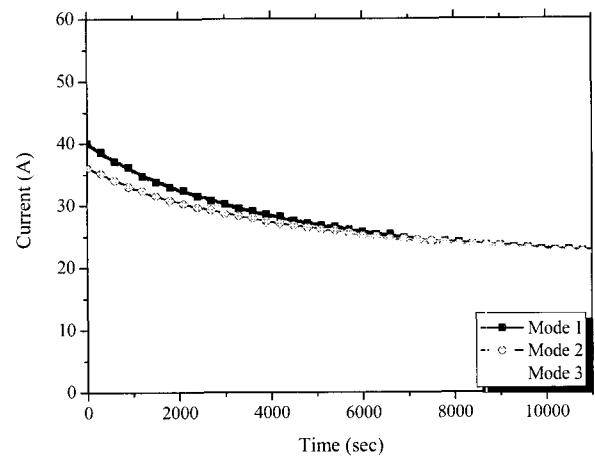


Fig. 8. Results of persistent current mode operation.

영구전류모드 운전 시 초기에 의해 가장 큰 전류 감소가 나타나는데 충전전류의 크기와 초기전류 감소율은 비례하였다. 40A와 36A를 충전하였을 경우에는 초기 전류감소가 관찰되었다. 30A의 전류를 충전하였을 경우에는 초기 전류감소가 적었다. 초기 전류감소의 가장 큰 원인은 2종 초전도체 내부에 침투된 양자화된 자속 즉, 플럭손(fluxon)의 재배열에 의해 발생하는 저항이다. 따라서 30A 보다 작은 전류를 인가할 경우 자속 재배열에 의한 전류감소분은 작아질 것이다. 초기 전류감소는 Fig. 8에 나타나 있는 바와 같이 시간의 경과에 따른 비선형적이다. 접합저항만이 영구전류모드의 전류감소에 영향을 미칠 경우에는 선형적인 전류감소가 관찰된다. 결과적으로 볼 때 초기 전류감소의 영향으로 세 가지 모드의 영구전류운전에서 3시간 이후 전류값은 각각 22.7A, 22.6A, 22.5A로 비슷하였다.

본 연구에서 측정된 부상자석의 경우 충전전류가 임계전류의 55% 이상인 경우에는 자속 재배열에 따른 초기 전류감소 등에 의한 영향으로 영구모드의 운전전류가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 이 비율은 고온초전도 자석의 인덕턴스와 접합저항의 비율에 영향을 받는 것이기 때문에 인덕턴스가 큰 자석의 경우에는 임계전류에 대한 충전할 수 있는 전류의 크기는 커질 것으로 예상된다.

초기 전류감소 이후의 전류감소율로 계산한 부상자석의 전체 등가 저항은 $5.74 \times 10^{-7} \Omega$ 이었다. 이 값은 본 부상자석 내부에 존재하는 2개의 접합에 의한 총 등가 저항을 나타낸다. 영구전류스위칭 시스템의 특성을 보고한 타 연구 결과에서 보고된 등가저항은 $3.2 \times 10^{-7} \Omega$ [5], $5.6 \times 10^{-7} \Omega$ [6] 등으로 본 연구에서 측정된 등가저항이 약간 컸다. 영구전류모드 운전에서 전류의 감소는 저항과 인덕턴스의 비로 결정되는 항목이다. 본 연구에서 제작된 자석의 인덕턴스/저항 비는 3.22×10^{-7} 이었다. 그러나 본 연구에서 대상으로 하고 있는 부상용 자석은 최소한 수백 mH 이상의 인덕턴스를 가지는 자석이므로 제작에 따른 크지않은 저항차이는 영구전류모드 운전에 영향을 미치지 않을 것이다.

3.3. 부상력

본 연구에서 제작된 부상자석은 레이스트랙형이며 긴 쪽의 길이는 약 500mm였다. 차량에 탑재된 부상자석의 운전일 경우 등가적인 부상자석의 피치가 500mm이므로 10Hz의 교류주파수에 의한 등가적인 차량의 속도는 18 km/h이다.

Fig. 9는 각각 교류전류를 인가한 상태에서 측정한 부상력을 나타낸다.

등가속도 60km/h 이상에서 부상력은 포화되는 경향을 나타내었다. 전송전류 10, 20, 30, 40A에서 포화된 부상력은 각각 7, 27, 60, 85N이었다. 1-, 20, 30, 40A를 흘린 경우에서 90km/h(50Hz)에서의 부상력과 18km/h(10Hz)에서의 부상력 비는 각각 1.75, 2, 1.93, 1.67이었다. 같은 조건에서 90km/h와 54km/h의 부상력 비는 각각 1.16, 1.08, 1.05, 1.04였다. 속도차이에 의한 부상력의 비는 전송전류가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 부상자석의 전송전류가 커짐에 따라 부상력이 빨리 포화됨을 나타낸다. 부상력이 전송전류와 비례하기 때문에 본 연구의 결과로 전송전류가 큰 부상자석일수록 보다 느린 속도에서 안정된 부상력으로 포화될 수 있음을 알 수 있었다.

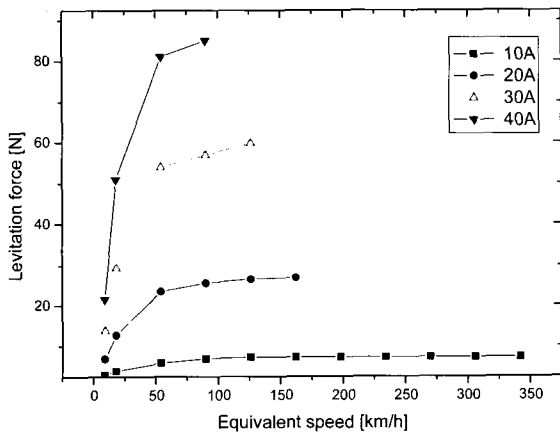


Fig. 9. Levitation force according to transport current.

4. 결 론

초고속 자기부상열차 개발을 위한 기초연구의 일환으로 소형 고온초전도 부상자석을 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 감소가 관찰되었다.
- [3] 2개의 접합에 의한 전체 등가저항은 $5.74 \times 10^{-7} \Omega$ 이었다.
- [4] 부상력은 등가속도가 60km/h 이상이 될 경우 포화되는 경향을 나타내었다.
- [5] 본 연구의 결과는 초전도 반발식 자기부상열차를 위한 고온초전도 부상자석 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.
- [3] Taizo Tosaka, Kenji Tasaki, Kotaro Marukawa, et al., "Persistent current HTS magnet cooled by cryocooler(4)-persistent current switch characteristic," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15, Np. 2, pp. 2293-2296, June, 2005.
- [4] A. Rose-Innes and E. Rhoderick, Introduction to Superconductivity, Pergamon Press, Oxford, pp. 3-15, 1978.
- [5] Seong Eun Yang, Dong Keun Park, Young Jae Kim, Yong Soo Yoon, and Tae Kuk Kim, "The characteristics of high-Tc Superconducting persistent current switch by N-Cr heater," the Proceedings of KIASC Conference 2005, pp. 155-157, Oct. 4-5, 2005.
- [6] Yong Soo Yoon, Ho Min Kim, Minseok Joo, Duck Kweon Bae, Min Cheol Ahn, and Tae Kuk Ko, "Characteristic analysis of a high-Tc superconducting power supply considering flux creep effect," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 3, pp. 1918-1923, September, 2006.

저 자 소 개



조흥제(趙興濟)
1950년 7월 24일생, 1977년 연세대학교 기계공학과 졸업, 1983년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1990년 미국, Rensselaer Polytechnic Institute Dept. of ME 졸업(공학박사), 1991~현재 한국기계연구원 선임연구원.



배덕권(裵德權)
1971년 8월 16일생, 1998년 광운대학교 전기공학과 공학사, 2000년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 2005년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사) 2005.9~2006.8 한국기계연구원 선임연구원, 현재 충주대학교 안전공학과 전임강사.



이종민(李鍾珉)
1967년 5월 5일생, 1991년 충남대학교 기계설계학과 졸업, 1993년 동대학원 기계설계학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 기계설계학과 박사과정, 1993~현재 한국기계연구원 선임연구원.



고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(M.SC), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 부회장