

초고속 자기부상열차 적용을 위한 초전도 하이브리드 전자석 시작품의 설계

Design of Prototype Superconducting Hybrid Electromagnet for High Speed Maglev

이창영^{1,*}, 강부병², 조정민², 한영재², 주승열³, 황영진⁴, 조현철⁴, 장재영⁴, 고태국⁵

Chang Young Lee^{1,*}, Bu Byoung Kang², Jung Min Jo², Young Jae Han²,
Sung Yul Chu³, Young Jin Hwang⁴, Hyun Chul Jo⁴, Jea Young Jang⁴, Tae Kuk Ko⁵

Abstract: This paper deals with the design and fabrication of prototype superconducting hybrid electromagnet(SH-EM) for EMS(Electromagnetic suspension)-based Maglev. The design requirements are based on the normal conducting EM used in the German high-speed Maglev. From the MMF-Levitation force curves simulated by FEM analysis, the required MMF by superconducting coil is suggested. As an experimental test setup to demonstrate the SH-EM, the experimental SH-EM with HTS coil cooled in LN₂ is fabricated. From the expected operating current of the HTS coil, the levitation performance of the SH-EM is estimated.

Key Words: Maglev, EMS, levitation, superconducting electromagnet.

1. 서 론

초고속 자기부상열차는 종래의 바퀴식 고속철도의 주행속도한계를 극복할 수 있는 미래첨단철도교통기술이다. 그러나 기존 바퀴식 고속철도 대비 높은 궤도건설비용은 초고속자기부상열차의 실용화의 확대에 큰 제약이 되고 있다.

현재 중국 상하이에 영업노선으로 운행중인 독일의 초고속 자기부상열차(Transrapid07)는 흡인제어식(Electromagnetic Suspension : EMS)부상기술을 특징으로 하고 있다. 상전도 전자석을 이용하기 때문에 추진 및 부상력에 필요한 공극자속밀도를 유지하기 위하여 차량과 궤도 사이 8~10 mm의 부상공극을 가진다. 그러나 부상공극이 좁기 때문에 정밀한 궤도시공을 필요로 하며, 이 때문에 바퀴식 고속철도에 비해 궤도건설비용이 높아진다. 부상 공극을 크게 하면 궤도시공정밀도 기준을 완화시킬 수 있으나, 기자력이 큰 전자석이 필요하며 기존 상전도 코일만으로는 부피 및 허용 전류등의 문제로 기자력을 높이는데 한계가 있다.

¹정 회 원 : 한국철도기술연구원

²비 회 원 : 한국철도기술연구원

³학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정

⁴학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

⁵정 회 원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 정교수

*교신저자 : cylee@krii.re.kr

원고접수 : 2010년 10월 07일

심사완료 : 2011년 03월 05일

게재확정 : 2011년 03월 05일

초전도 하이브리드 전자석(Superconducting Hybrid Electromagnet : SH-EM)은 상전도 전자석에 초전도 마그넷을 결합한 구조의 전자석으로서, 부상제어가 가능하면서도 초전도 마그넷으로서 전자석의 기자력을 높여 차량의 부상공극을 크게 할 수 있는 장점이 있다[1]. 본 연구에서는 Transrapid 07의 상전도 전자석을 대체할 수 있는 SH-EM의 개발을 목적으로 SH-EM 시작품을 설계하였다. 또한 설계된 SH-EM의 운전 특성을 데모하기 위하여 고온 초전도(HTS) 마그넷을 적용한 시험용 SH-EM를 제작하고, LN₂ 냉각조건에서 초전도 코일의 운전전류로부터 시험용 SH-EM의 성능을 추정하였다.

2. SH-EM 시작품의 설계

2.1. 독일 Transrapid 07 개요

표1 및 그림 1은 각각 Transrapid 07 차량의 주요 기술 사양과 차량의 안내 및 추진-부상 전자석의 구조이다. 차량의 추진은 선형동기전동기방식으로서, 지상 궤도에 설치된 3상 코일에 흐르는 전류의 크기와 주파수를 제어하여 추진력과 속도를 제어한다. 차량의 부상과 안내를 위하여 차량대차의 측면 및 하부에 각각 안내 및 부상전자석이 설치된다. 전자석에 흐르는 전류로서 전자석과 궤도사이의 흡인력을 제어하여 간격을 유지한다. 부상전자석은 차량의 부상뿐 아니라 선형동기전동기 추진 시스템의 계자극으로 사용되며 N-S가 교대로 반복된 6개의 자극이 하나의 전자석을 구성한다. 8~10 mm의 부상공극에서 최고 450 km/h의 주행이 가능하다[2-3].

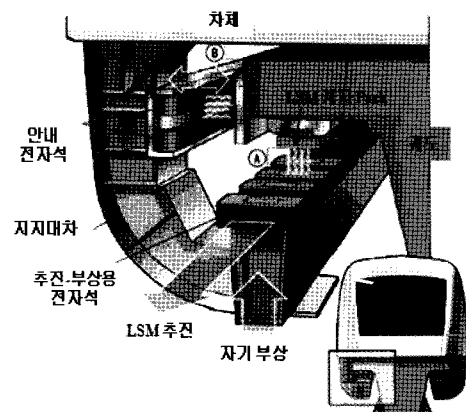


Fig. 1. Electromagnet configuration of Transrapid 07.

Table 1. Technical data of Transrapid 07.

영업속도(최고속도)	430 km/h (500 km/h)
추진 및 부상 방식	선형동기전동기 추진방식, 흡인제어식
최대 추진력	100 kN
LSM 추진 주파수	0~217 Hz
극 피치	258 mm
정격 부상 공극	8~10 mm

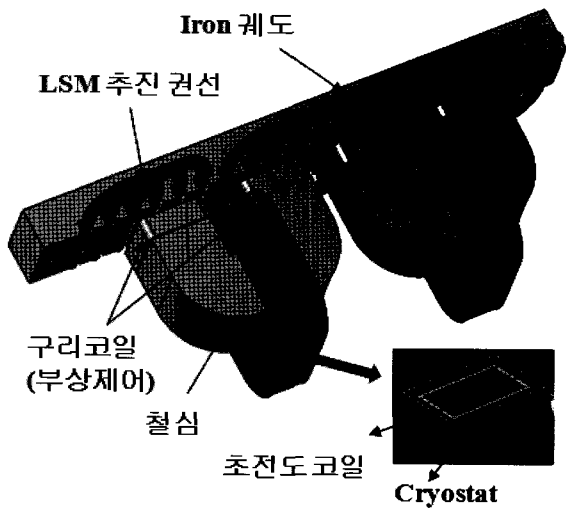


Fig. 2. Configuration and interface scheme of SH-EM.

2.2. SH-EM에 의한 자기부상 시스템 개념 및 시작품 설계

그림 2는 SH-EM의 기본 구성과 자기부상차량과 레도와의 인터페이스 개념도이다. SH-EM은 U형 철심 구조로 철심의 양쪽 극은 한 쌍의 구리코일이 설치되고 초전도 코일은 적절한 냉각 구조로 설계된 원통형 냉각조에 설치되어 철심의 중앙에 위치한다. SH-EM의 극면은 자기부상열차의 주행레도면과 나란히 위치하게 되며, 차량하부의 대차 양측에 설치된다.

그림 3은 SH-EM을 이용한 흡인제어식 부상시스템의 운전 개략도이다. 자기부상에 필요한 SH-EM의 기자력은 초전도 코일의 DC 전류로서 발생시키며, 구리 코일에 흐르는 전류를 제어하여 부상을 유지시킨다. SH-EM의 초전도 코일은 1 Hz 미만의 DC 전류원으로 운전한다. 목표 부상 공극에서 부상력을 내기 위한 SH-EM의 모든 기자력은 초전도 코일이 담당한다. 부상제어시스템은 공극 센서와 제어기, 초퍼회로로 구성된다. 제어기에 설정된 부상공극 값과 공극 센서에 의해 검출된 값의 차이에 따라 제어 코일에 흐르는 DC 전류를 제어함으로써 부상을 유지한다.

SH-EM 시작품에 대한 주요 설계 치수는 표 2와 같다 철심 자극 단면적 및 피치는 각각 129 mm × 129 mm, 258 mm로서, Transrapid07의 상전도 전자석과 동일하게 한다.

또한 추진 시스템과의 인터페이스를 고려하여 Transrapid07과 동일한 레도 형상을 적용한다.

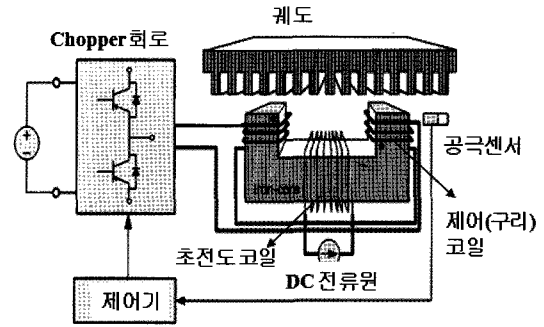


Fig. 3. Operating principle of EMS system using prototype SH-EM.

Table 2. Dimensional specification of prototype SH-EM.

전자석	극 단면 크기	129 mm × 129 mm
철심	극피치(극간거리)	258 mm (129 mm)
레도	레도크기(두께 × 폭)	91.5 mm × 129 mm
	권선 슬롯 크기	30 mm × 28 mm
	권선 슬롯 간격	32 mm

2.3 SH-EM 시작품의 부상력 특성

이상적인 U 형 전자석 모델에 있어서 부상력(흡인력)은 아래 식으로부터 구한다.

$$f_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot 2S = \frac{B^2 S}{\mu_0} \text{ [N]} \quad (1)$$

여기서, μ_0 는 진공의 투자율, S는 전자석 극 단면적, 그리고 B는 레도와 전자석사이 공극에서의 평균자속 밀도이다. 공극 자속 밀도 B는 전자석 코일의 권수(N)와 운전전류(I)의 곱으로 나타나는 기자력과 부상공극(z)의 크기에 따라 결정되며, 아래 식으로 표현된다[4-5].

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2z} \text{ [T]} \quad (2)$$

그러나 실제 공극 자속밀도의 계산에는 코일 및 공극 주변에서의 누설자속과 철심에서의 자속포화를 고려해야 한다. 특히 SH-EM의 경우 레도의 슬롯 형상 때문에 공극에서의 자속밀도 분포가 달라진다. 따라서 그림 4와 같이 SH-EM 시작품의 형상모델에 대한 FEM 해석을 통해 구해진 평균공극자속밀도로서 부상력을 계산하였다. 철심 및 레도의 재질은 B-H 곡선로부터 1.3~1.5 T에서의 포화자속밀도를 갖는 규소강판을 적용하였다.

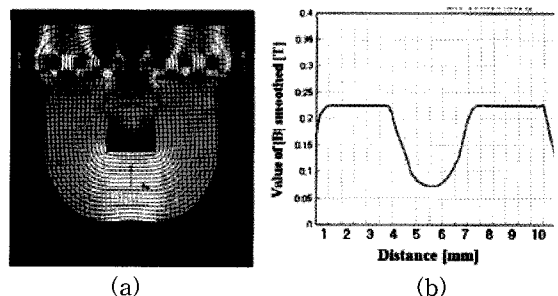


Fig. 4. Magnetic field distribution(a) and magnetic flux density in airgap(b) of prototype SH-EM.

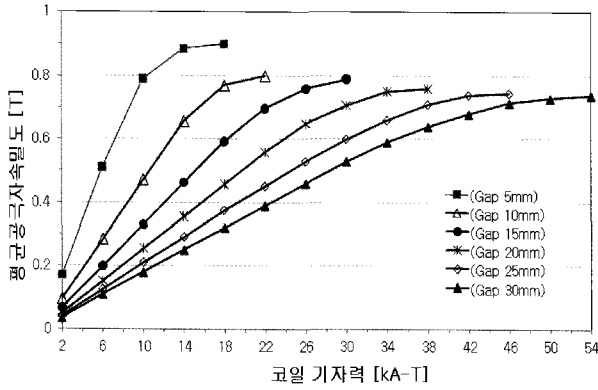


Fig. 5. Mean magnetic flux density in airgap of prototype SH-EM resulting from increase in MMF.

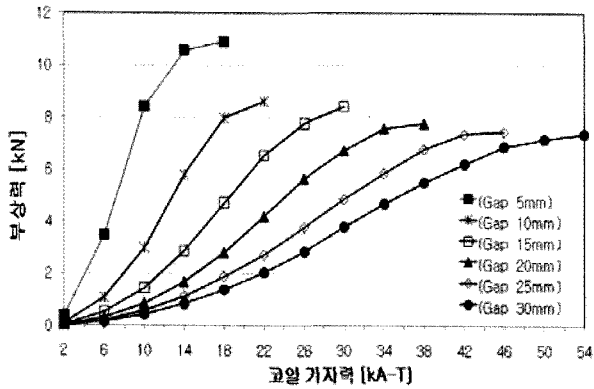


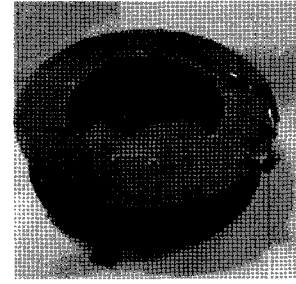
Fig. 6. Levitation forces of prototype SH-EM resulting from increase in MMF.

그림 5는 SH-EM 시작품의 설계 부상공극에 대하여 코일 기자력 증가에 따른 평균공극자속 밀도를 구한 결과이다. 또한 평균공극자속밀도로서 계산된 부상력 특성곡선은 그림 6과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 코일 기자력이 증가하면 공극자속밀도도 증가한다. 그러나 기자력이 일정 수준 이상이 되면 철심에서의 자속 포화 때문에 공극자속밀도는 0.7~0.9 T수준에서 포화되며, 이에 따라 부상력도 더 이상 증가하지 않는다. 이러한 공극에서의 자속포화는 설계 부상 공극이 커질수록 더 높은 기자력에서 일어나며, 코일의 최대 설계 기자력은 공극에서의 자속 포화가 시작되는 기자력이 된다. 따라서 부상력 특성곡선으로부터 부상시스템 설계 공극에 따른 초전도 코일의 설계 사양이 도출된다.

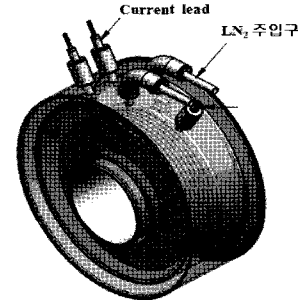
3. 시험용 SH-EM의 제작

3.1 설계 사양

SH-EM 시작품의 제작에 앞서, 본 연구에서는 설계 모델의 부상력과 운전 특성을 검증하고 부상시스템을 데모하기 위한 시험용 SH-EM을 제작하였다. 시험용 SH-EM은 시작품의 설계 형상과 동일한 극 단면 및 극 피치를 가지며, 전자석의 최대 설계 중량에 대하여 운전공극은 15 mm, 정지상태의 초기 공극은 17 mm를 시운전 목표로 하였다. 제어코일은 5 mm²의 구리권선을 양 극에 나누어 총 300 턴으로 설계하였다. 정지 상태에서 운전 공극으로 부상시키기 위해 필요한 기자력은 제어코일로 발생시킨다. 운전공극에 도달하기 위한 제어코일의 단시간(2~3초) 운전전류는 최대 50 A로



(a)



(b)

Fig. 7. Fabrication of HTS magnet for experimental SH-EM : (a) HTS coil (b) Cryostat assembly.

Table 3. Design results of experimental SH-EM.

구분	설계 항목	설계값
SH-EM	목표부상공극	15 mm
	부상초기공극	17 mm
	제어코일권수	300 턴
	제어코일 운전전류	단시간(2~3초) : 50 A 상시 : 2.5 A
	중량	120 kgf 이하
초전도 마그넷	선재 사양	AMSC사 Bi-2223/Ag I _c = 145 A (@77K)
	권선 형상	더블 팬케익코일 × 4ea
	권선내경/외경	140 /190 mm
	총 권선수	360 턴
	냉각 방식	LN ₂
	Cryostat 내경/외경/폭	106 /280 /120 mm

제한하고 15 kA-T의 기동 기자력을 낼 수 있도록 하였다. 부상상태에서의 상시 제어전류는 2.5 A 이내로 하였다. 시험용 SH-EM의 초전도 코일은 고온초전도체인 Bi-2223 선재를 사용하였으며, 직렬 연결된 4개의 더블 팬케익 (DP) 코일로 설계하였다. 초전도 코일은 원통형 냉각조 내에 설치되며, 액체질소로 냉각시켜 초전도 상태를 유지할 수 있도록 하였다. 초전도 코일의 권수는 냉각조의 최대 외경을 고려하여 각 DP 당 90 턴씩, 총 360 턴으로 하였다. 시험용 SH-EM의 제작 사양을 요약하면 표 3과 같다.

3.2 시험용 SH-EM의 성능 추정

시험용 SH-EM의 15 mm 운전공극에 대한 최대 부상력은 초전도 코일의 운전전류에 의해 결정된다. 초전도 코일의 운전전류는 초전도 코일의 임계전류(I_c)의 70% 에서 설정한다. 그림 8과 같이 SH-EM의 형상에 대한 FEM 해석 결과, 초전도 코일의 최대 수직자장은 약 0.15 T이다. AMSC Bi-2223 선재의 I_c-B-T 곡선부

터 77 K 온도에서 초전도 코일의 I_c 감쇄율은 초전도 선재 I_c 의 약 26% 수준인 38 A이며, 최대 운전 전류는 I_c 의 80%인 30 A로 설정한다. 따라서 코일의 설계 권수와 운전전류로부터 초전도 코일에 의한 시험용 SH-EM의 예상 기자력은 10.8 kA-T가 된다.

그림6의 부상력 특성 그래프에서 15 mm로 운전할 경우 초전도 코일의 기자력에 의한 부상력은 약 1.8 kN이 되며, 따라서 시험용 SH-EM의 설계 중량인 120 kgf에 대하여 15 mm의 부상공극에서 충분히 운전 가능할 것으로 사료된다.

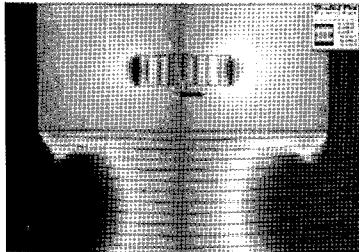


Fig. 8. Magnetic field distribution for the HTS coil

4. 결 론

본 연구에서는 흡인제어식 초고속 자기부상열차에 적용하기 위한 SH-EM 시작품 모델을 설계하고, 설계 모델의 구현에 필요한 부상공극별 초전도 코일의 요구 기자력을 제시하였다. 제시된 기자력을 만족하는 초전도 코일의 설계에는 냉각시스템을 고려한 운전전류와 코일권수와와의 최적화가 필요하며 이와 관련해서는 별도의 연구가 진행 중에 있다.

제작된 시험용 SH-EM으로는 SH-EM 시작품의 설계 형상에 대한 부상력 특성과 운전에 따른 초전도 코일의 신뢰성, 그리고 운전특성을 확인하기 위한 시험이 진행 중에 있으며, 시험을 통해 얻어진 결과는 향후 SH-EM 시작품의 보완 설계와 제작에 반영될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] S. Kalsi, M. Proise, T. Schultheiss and B. Dawkins, "Iron-core superconducting magnet design and test results for maglev application", IEEETrans. Appl. Supercond., vol.5, no. 2, pp. 964 - 967, Jun. 1995.
- [2] James H. Lever, "Technical Assessment of Maglev System Concepts", Cold Regions Research & Engineering Lab., US Army Corps of Engineers, Special Report 98-12, Oct. 1998.
- [3] G. Bohn and G. Steinmetz, "The Electromagnet Levitation and Guidance Technology of the Transrapid Test Facility Emsland", IEEE Trans. Magn., Vol. Mag-20, No. 5, pp. 1666-1671, Sep. 1984.
- [4] P.K. Sinha, Electromagnetic Suspension-Dynamics & Control. Peter Peregrinus Ltd., London, 1987, Chap. 4.
- [5] Roger Goodall, "Generalized design models for EMS maglev", in Proc. 20th Conf. Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, San Diego, 2008, No. 007.

저 자 소 개



이창영(李昌榮)

1970년 12월 01일생, 1993년 부산대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 선임연구원.



강부병(姜扶秉)

1969년 6월 25일생, 1992년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 공학석사, 2008년 Imperial College London 기계공학과 공학박사, 현재 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 선임연구원.



조정민(趙正珉)

1972년 1월 10일생, 1997년 충주대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 명지대 공대 전기공학과 공학석사, 2004년 동 대학원 전기공학과 공학박사, 현재 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 선임연구원.



한영재(韓咏材)

1969년 5월 9일생, 1994년 홍익대 공대 전기공학과 졸업, 1996년 동 대학원 전기제어공학과 공학석사, 2004년 동 대학원 제어정보전기공학과 공학박사, 현재 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 실장.



주승열(朱承烈)

1985년 2월 1일생, 2009년 연세대 공대 전기전자공학과 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



황영진(黃英珍)

1980년 3월 31일생, 2007년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2010년 동 대학원 전기전자공학과 공학석사, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



조현철(趙賢哲)

1979년 11월 30일생, 2007년 동국대 공대 전기공학과 졸업, 2009년 연세대 전기전자공학과 공학석사, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



장재영(張宰榮)

1982년 11월 8일생, 2007년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2009년 동 대학원 전기전자공학과 공학석사, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph. D), 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008~2010년 한국초전도·저온공학회 회장, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 명예회장.