

초전도 하이브리드 자기부상 마그넷 시스템의 코어 형상 설계 연구

A Study on the Design on Iron-Core Shape for Superconducting Hybrid Electro-Magnet System

황영진^{1,*}, 최석진¹, 장재영¹, 고태국², 이창영³, 양동규⁴, 이해근⁵

Young Jin Hwang^{1,*}, Sukjin Choi¹, Jae Young Jang¹, Tae Kuk Ko², Chang Young Lee³, Donggyu Yang⁴ and Haigun Lee⁵

Abstract: This paper deals with the design on iron-core shape for superconducting hybrid electromagnet (SH-EM). A proto-type SH-EM was developed by Yonsei University[1]. It is the first step study on the fundamental technology for advanced railroad system development. We proposed the method that reduce the number of cooling systems in order to improve operating efficiency of the SH-EM. The results was obtained by changing of iron-core shape were verified by the FEM analysis. This paper can be expected to suggest useful data for an advanced SH-EM.

Key Words: cooling system, FEM analysis, iron-core, superconducting hybrid electromagnet system.

1. 서 론

자기부상 열차는 차량에 설치된 다수의 마그넷에서 발생하는 기전력을 이용하여 차량을 부상하고 추진시키는 운송 방법이다. 이 시스템은 종래의 바퀴식 철도 시스템의 주행속도의 한계를 극복할 수 있는 차세대 철도 시스템 중 하나로 주목 받고 있다. 자기부상 시스템은 크게 EMS (electro-magnetic suspension) 시스템과 EDS (electro-dynamic suspension) 시스템으로 구분되며, 이 중 EMS 시스템의 대표적인 모델은 독일의 Transrapid07로서 차량에 설치된 전자석을 이용하여 차량을 궤도에 흡착시켜 부상력을 유지하는 방법이다. 이 시스템은 상전도 전자석을 이용하며, 추진과 부상력에 필요한 공극자속밀도를 유지하기 위해 8~10 mm의 부상공극을 가진다. 이러한 부상공극은 그 크기가 작을수록 궤도시공의 정밀성을 크게 요구하기 때문에 궤도 건설비용을 상승시키는 요인이 된다. 따라서 부상공극의 크기를 키우는 방안의 하나로 초전도 전자석

을 적용한 초전도 하이브리드 자기부상 시스템 (SH-EM) 에 대한 연구가 연세대학교에서 진행되어 왔다[1]. 하지만, 자기부상시스템에 초전도 전자석을 적용할 경우 초전도 전자석을 냉각시키기 위한 다수의 냉각 시스템을 필요로 하게 된다. 이러한 냉각 시스템은 철도 차량의 제작비와 운용비 상승의 직접적인 요인이 되기 때문에 냉각시스템의 개수를 줄이기 위한 연구는 초전도 하이브리드 자기부상 시스템의 상용화에 중요한 요인이 될 수 있다. 본 연구에서는 초전도 하이브리드 자기부상 시스템의 코어 형상 연구를 통하여 냉각시스템의 개수를 줄일 수 있는 방안을 제시하였다.

2. SH-EM의 코어 설계

2.1. SH-EM의 개념

그림 1은 기존에 연구된 초전도 하이브리드 자기부상 시스템의 개념도이다. U자형 철심의 양측 자극에 한 쌍의 제어코일이 설치되며, 초전도 마그넷은 철심 중앙에 위치하는 형태이다. 이때 초전도 마그넷은 극저온 냉각시스템에 의해 초전도 상태를 유지하게 된다. 초기 자기부상에 필요한 SH-EM의 기자력은 초전도 마그넷에 인가되는 DC 전류를 통해 발생시키며, 이와 별도로 제어코일에 흐르는 전류를 통해 부상 공극을 유지시킨다. 철도차량의 무게와 차량 수에 따라 이러한 부상 마그넷 시스템이 그림 1과 같이 직렬 형태로 설치되어야 하므로 실제 차량에는 다수의 부상 마그넷 시스템이 필요하게 된다. 기존에 연세대학교에서 연구된 초전도 하이브리드 자기부상 시스템에서는 그림과 같은 6개의 자극에서 부상력을 발생시키기 위해서는 3개의 초전도 마그넷과 냉각시스템이 필요하며, 자극의 개수가 증가함에 따라 냉각시스템의 개수도 이에 비례하여 증가하게 된다.

2.2. 제안된 SH-EM에 의한 자기부상 시스템 개념

그림 2(a)는 본 연구에서 제안하는 초전도 하이브리드 자기 부상 마그넷 시스템을 설명하기 위한 개념도이다. 그림에서 보이는 바와 같이 기존에 연구된 초전도 하이브리드 자기부상 마그넷 시스템이 U자형 철심 코어마다 초전도 마그넷이 개별적으로 설치된 구조인 반면 본 연구에서 제안된 철심 코어는 U자형 철심 코어가 일체형으로 직렬 연결된 형태를 갖고 있으며, 초전도 마그넷은 코어의 중앙 부분에만 위치하게 된다. 이러한 형태의 초전도 하이브리드 자기부상 마그넷 시스템은 기존의 마그넷 시스템과 비교하여 적은 수의 초전도 마그넷과 냉각시스템을 필요로 한다. 자기부상

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

²정 회 원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 정교수

³정 회 원 : 한국철도기술연구원

⁴학생회원 : 고려대 신소재공학과 석사과정

⁵정 회 원 : 고려대 신소재공학과 교수

*교신저자 : ocopy@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2011년 01월 31일

심사완료 : 2011년 03월 02일

게재확정 : 2011년 03월 02일

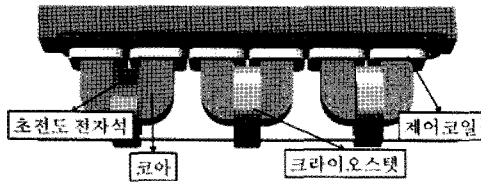


Fig. 1. Conceptual Schematic of SH-EM.

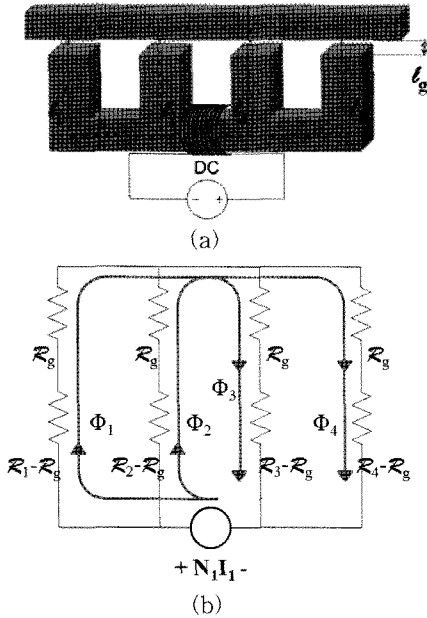


Fig. 2. Proposed SH-EM: (a) design model, and (b) magnetic circuit.

마그넷 시스템의 안정적인 부상과 추진을 위해서는 각각의 자극마다 동일한 크기의 공극자속 밀도가 발생되어야 한다. 그림 2(b)는 본 시스템에서 동일한 크기의 공극자속 밀도가 발생하는 원리를 설명하기 위한 자계 회로이다.

여기서 궤도와 자기부상 마그넷의 자극 사이의 공극 거리를 l_g 라고 하고, 공기의 투자율을 μ_0 , 자극의 단면적을 S 라고 한다면 공극에서의 릴럭턴스 R_g 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 S} \quad (1)$$

또한, 철심 코어에서의 릴럭턴스는 초전도마그넷에서 각각의 자극으로 쇄교되는 자속의 경로 길이에 비례하여 증가하게 된다. 이때, 철심 코어와 궤도 및 공극을 따라 쇄교되는 자속의 총 경로길이를 각각 l_1, l_2, l_3, l_4 라고 하고, 철심의 투자율을 μ , 자속이 지나는 철심의 면적을 S_c 라고 한다면 각각의 자극을 지나는 자속 폐경로에서의 릴럭턴스는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_1 = \frac{(l_1 - l_g)}{\mu S_c} + \frac{l_g}{\mu_0 S}, R_2 = \frac{(l_2 - l_g)}{\mu S_c} + \frac{l_g}{\mu_0 S} \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{(l_3 - l_g)}{\mu S_c} + \frac{l_g}{\mu_0 S}, R_4 = \frac{(l_4 - l_g)}{\mu S_c} + \frac{l_g}{\mu_0 S}$$

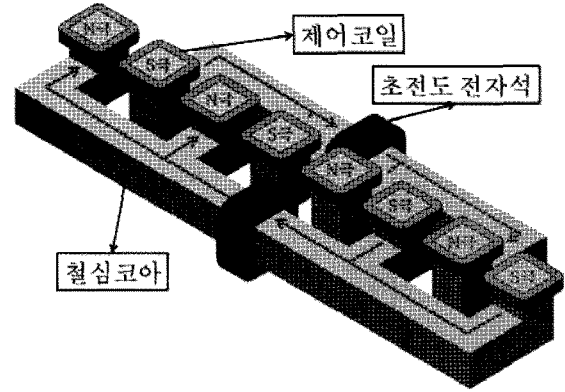


Fig. 3. Conceptual schematic of proposed SH-EM.

(2)는 식 (3)과 같이 간략화 될 수 있다.

$$R_1, R_2, R_3, R_4 \approx R_g = \frac{l_g}{\mu_0 S} \quad (3)$$

즉, 그림 2와 같은 마그넷 시스템 구조에서는 철심 코어의 자속 경로와 상관없이 릴럭턴스 값은 거의 동일하게 나타난다. 따라서 각각의 자극 단면을 통해 쇄교되는 총 자속의 크기 Φ 는 식(4)로 유도된 바와 같이 동일하다[2, 3].

$$\Phi = \frac{\nu}{R} = \frac{N \cdot i}{R} \quad (4)$$

$$\Phi_1 \approx \Phi_2 \approx \Phi_3 \approx \Phi_4 \approx \frac{N \cdot i}{R_g \parallel R_g + R_g \parallel R_g}$$

$$= \frac{\mu_0 S N \cdot i}{l_g}$$

여기서 ν 는 기전력을 나타내며, N 은 초전도 전자석의 권선 수, i 는 운전전류를 의미한다.

또한, 자기부상 마그넷 시스템의 추진을 위해서는 각각의 자극에서 쇄교되는 공극 자속밀도의 극성은 인접한 자극마다 반대로 교차되어야 하는데, 그림 3은 본 연구에서 제안된 초전도 하이브리드 마그넷 시스템의 실제 적용 방법을 제시하였다. 그림과 같이 1개의 초전도 마그넷과 4개의 자극으로 구성된 전자석 시스템을 서로 맞물려서 시스템을 구성할 경우 총 8개의 자

Table 1. Dimensional specification of SH-EM.

		Type_A	Type_B
철심 코어	극 단면 크기	129 mm × 129 mm	
	극 피치 (극간 거리)	258 mm (129 mm)	
궤도	궤도 크기	91.5 mm × 129 mm	
	권선 슬롯 크기	30 mm × 28 mm	
	권선 슬롯 간격	32 mm	
초전도 마그넷 개수		4	2
자극 개수		8	
철심 및 코어 재질		규소강판 (포화자속 밀도:1.3~1.5T, 상대투자율 : 40000)	

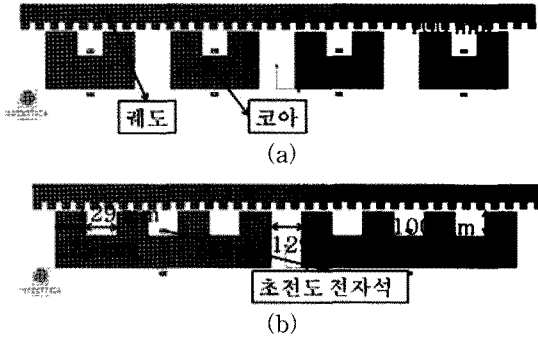


Fig. 4. Analytical model: (a) Type A (b) Type B.

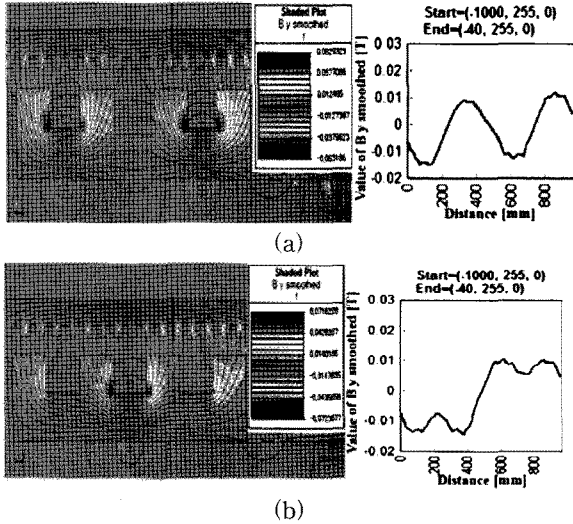


Fig. 5. Simulation Results: (a) Type A (b) Type B.

극에서 발생하는 공극 자속밀도의 극성이 반대로 교차하게 된다. 따라서 이와 같은 구조를 통하여 초전도 마그넷과 냉각시스템의 개수를 줄이면서 기존 연구된 궤도 시스템과의 호환성을 갖는 자기부상 시스템을 개발할 수 있다.

3. SH-EM의 부상력 특성

3.1. 제안된 SH-EM의 부상력 특성 평가 방법

본 연구에서는 철심 코어의 형상 변경에 따른 초전도 하이브리드 자기부상 마그넷 시스템의 부상력 특성을 평가하기 위하여 Infoytica社의 전자장 해석 프로그램인 MagNet을 이용하였다. 표 1은 특성 평가를 위한 초전도 자기부상 마그넷 시스템의 주요 설계 치수이다. 여기서, Type A는 기존 연세 대학교에서 연구된 초전도 자기부상 마그넷 시스템의 설계 사양을 나타내며, Type B는 본 연구에서 제안된 코어 형상을 적용하였을 때의 사양을 나타낸다. 제안된 초전도 하이브리드 마그넷 시스템은 U자형 철심 코어의 직렬연결 형태와 비교하여 초전도 마그넷의 개수를 제외한 다른 변수는 모두 동일하다. 본 설계 치수는 추진 시스템과의 인터페이스 등을 고려하여 Transrapid07과 동일한 궤도 형상을 적용하였다[4]. 평가된 해석 모델은 8개의 자극을 동일하게 구성할 수 있으며, MagNet을 이용한 해석 모델의 형상은 그림 4와 같다.

이와 같은 사양으로 두 가지 형태의 초전도 하이브리드

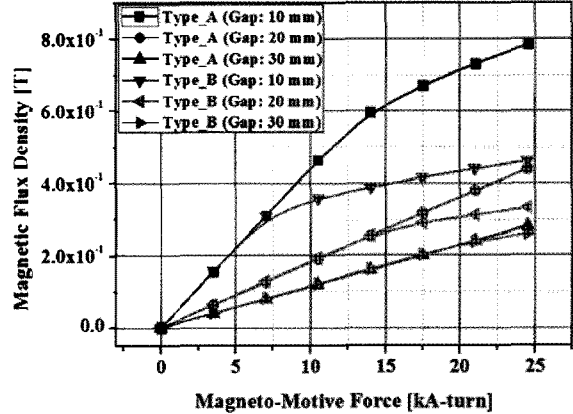


Fig. 6. Mean magnetic flux density in air-gap of SH-EMs according to Magneto-Motive Force.

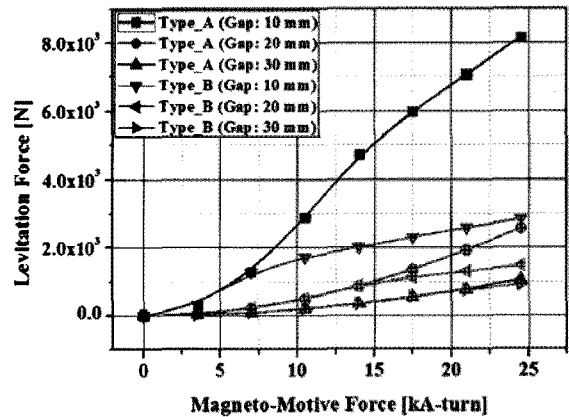


Fig. 7. Calculation Results of Levitation Force according to Gap Distance.

드 자기부상 전자석 모델에 대한 자기장 해석을 수행하였으며, 그림 5는 1 kA·turn의 기자력에서의 해석 결과를 나타낸다. 해석 결과를 살펴보면, 식 (4)에서 유도된 바와 같이 자계가 지나는 경로의 길이와 관계없이 각각의 자극에서는 거의 동일한 크기의 공극자속밀도가 쇄교된다는 것을 알 수 있다. 또한, 분석된 공극 자속밀도를 식 (5)에 대입하여 코어 형태별 부상력 F 를 계산하였다.

$$F = \hat{a}_y (F_\phi)_y = -\hat{a}_y \frac{\Phi^2}{\mu_0 S} \quad [N] \quad (5)$$

여기서, μ_0 는 진공의 투자율이며, Φ 는 공극에서의 총 자속, S 는 자극의 단면적이다.

3.2. 제안된 SH-EM의 부상력 특성 평가 결과

그림 6과 7은 초전도 하이브리드 자기부상 마그넷 시스템의 공극 자속밀도와 부상력에 대한 해석 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 기자력의 크기에 따른 공극 자속밀도와 부상력은 철심 코어의 포화 영역 이전에서는 철심 코어의 형상과 관계없이 동일한 값을 나타낸다. 하지만 Type B의 경우 Type A에 비해 비교적 작은 기자력 크기에서 공극자속밀도 및 부상력이 포화되는 특성을 나타낸다. 이는 Type B의 경우 초전도 마그넷이 권선된 철심 코어 부분으로 쇄교되는 자속의 크기가 Type A에 비해 두 배정도 크기 때문

로, 이는 식 (5)를 통하여 살펴볼 수 있다. 누설 자속을 무시한 상태에서 Type A의 철심 코어 중앙 부분으로 쇄교되는 자속량을 $\Phi_{c-Type A}$ 라고 하고 Type B의 철심코어 중앙 부분으로 쇄교되는 자속량을 $\Phi_{c-Type B}$ 라고 한다면 두 자속량 간의 관계식은,

$$\begin{aligned} \Phi_{c-Type B} &= \frac{N_1 I_1}{R_1 \parallel R_2 + R_3 \parallel R_4} \quad (6) \\ &= \frac{N_1 I_1}{R_g \parallel R_g + R_g \parallel R_g} \\ &= \frac{N_1 I_1}{R_g} \\ &= 2 \left(\frac{N_1 I_1}{2R_g} \right) \\ &= 2\Phi_{c-Type A} \end{aligned}$$

으로 나타낼 수 있다. 이는 동일한 기자력 조건에서 Type B의 철심 코어의 중앙 부분으로 쇄교되는 자속 밀도가 Type A에 비해 2배 정도 더 크다는 것을 의미한다. 따라서 Type B의 경우 더 작은 기자력에서 공극자속 밀도와 부상력이 포화되는 특성이 나타나게 된다. 하지만 일반적으로 자기부상 마그넷의 경우 철심 코어의 포화영역 이전에서 운용되고, 공극의 크기를 키우는 것을 목적으로 하는 초전도 하이브리드 자기부상 마그넷 시스템의 특성상 Type B의 효율성은 크다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 초전도 하이브리드 자기부상 마그넷 시스템의 철심 코어 형상 연구를 통하여 동일한 부상력과 궤도 시스템과의 인터페이스를 유지하면서 초전도 마그넷 및 냉각시스템의 개수를 줄일 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 FEM을 이용하여 제안된 철심 코어 형상을 가진 초전도 하이브리드 자기부상 마그넷 시스템의 효율성을 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책 연구 사업임(No. 2009 - 0082742)

참 고 문 헌

[1] S. Y. Chu, Y. J. Hwang, S. Choi, J. B. Na, Y. J. Kim, K. S. Chang, D. K. Bae, C. Y. Lee, T. K. Ko, "Desing, Manufacture and Performance Evaluation of HTS electromagnets for the Hybrid Magnetic Levitation System," in

International Symposium on Superconductivity, Epochal Tsukuba, 2010.
 [2] P.K. Sinha, Electromagnetic Suspension- Dynamics & Control. Peter Peregrinus Ltd., London, 1987, Ch. 4.
 [3] Roger Goodall, "Generalized design models for EMS maglev", in Proc. 20th Conf. Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, San Diego, 2008.
 [4] G. Bohn and G. Steinmetz, "The Electromagnet Levitation and Guidance Technology of the Transrapid Test Facility Emsland", IEEE Transactions on Magnetism, Vol. Mag-20, No. 5, pp. 1666-1671, Sep., 1984.

저 자 소 개



황영진(黃英珍)

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



최석진(崔錫鎭)

1974년 6월 10일생, 1998년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(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(M.Sc), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008~2010년 한국 초전도 저온공학회 회장, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도·저온공학회 명예회장.



이창영(李昌榮)

1970년 12월 1일생, 1993년 부산대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 선임연구원.



양동규(梁東圭)

1984년 11월 4일생, 2010년 고려대 공대 재료공학과 졸업, 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정.



이해근(李海根)

1963년 9월 26일생, 1987년 고려대 공대 재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 고려대학교 신소재공학부 부교수.