

고온초전도 자기부상자석의 최적설계에 관한 연구

Study on the Optimal Design for HTS Magnetic Levitation Magnet

윤경용¹, 배덕권^{2*}, 조흥제³

Kyung Yong Yoon¹, Duck Kweon Bae^{2*}, Heungje Cho^{3*}

Abstract: Superconducting Electrodynamic suspension (EDS) system is generated by the interaction between the magnetic field made by the induced the eddy current in the ground conductor and the moving magnetic field made by onboard superconducting magnet. The levitation force of EDS system, which is proportional to the strength of the moving magnetic field, becomes saturated according to the increase of the velocity. Especially, the levitation force is influenced by the structure of HTS magnet and ground magnet. This paper deals with the optimal design condition for the HTS levitation magnet. The 3-D numerical analysis with FEM was used to find the distribution of the magnetic field, the optimal coil structure, and the calculation of the levitation force.

Key Words: electrodynamic suspension, HTS magnet, ground conductor, moving magnetic field, maglev.

1. 서 론

KTX, TGV, 신간선 등의 고속열차는 내연기관을 사용하던 기존 열차 기술을 혁신시켜 다른 어느 때보다 빠른 철도여행을 제공하고 있지만 현재의 기술로 가능한 최고의 속도에 도달해 있는 실정이다. 이들 고속열차는 전동기 및 다른 장비들이 차량에 탑재되고 차량 상부의 전선으로 전력을 공급받으며 바퀴가 레일 위를 달리는 기존의 철도방식을 이용하고 있는데 기존의 방식으로는 시속 350 km 이상으로 속도를 증가시킨다는 것은 매우 어려운 일이다. 열차의 속도를 더 이상 증가시키기 어려운 기존 철도의 몇 가지 본질적인 제한은 첫째 차량에 탑재된 장비들의 큰 부피 및 하중, 둘째 고속열차로의 집전이 어려움, 셋째 고속에서 바퀴와 레일의 마찰력 감소에 따른 바퀴의 미끄러짐 현상 등에 기인한다 [1].

자기부상열차는 크게 흡인식 자기부상열차와 반발식 자기부상열차로 나뉜다. 흡인식 자기부상열차는 고정밀 제어기로 열차를 8-10mm 정도 부상 시키고 반발

식 자기부상열차는 움직이는 자장에 의해 지상코일에서 발생하는 와전류에 의한 자장과 차량에 설치된 자석의 자장이 상호 반발하는 원리로 차량을 부상시킨다 [2, 3]. 반발식 자기부상에 초전도를 응용하면 매우 강한 자석을 발생시킬 수 있어 일본의 MLX01과 같이 높은 높이의 안정된 부상을 얻을 수 있으므로 이를 바탕으로 시속 500km 이상의 초고속 자기부상열차의 구현이 가능할 수 있다 [3]. 특히 반발식 자기부상은 고정밀 제어기를 필요로 하지 않으므로 제어기의 동작 불량에 따른 부상계의 고장 가능성을 원천적으로 제거할 수 있다. 초전도체를 이용한 반발식 자기부상은 차량 정지 시에는 부상력이 없어 일정속도까지는 기존 열차 방식으로 차량을 견인해주어야 하는 점이 있으나 기존의 방식으로 도달하기 힘든 부상높이 및 차량속도를 구현할 수 있어 미래의 신 교통수단으로 각광받고 있다.

2. 부상자석의 설계

2.1. 고온초전도 부상자석의 설계 순서

그림 1은 본 연구에서 사용된 고온초전도 부상자석의 설계 순서를 나타낸다. 먼저 부상자석에 유리한 코일의 형태를 설정하였다. 코일의 형태를 정한 후에는

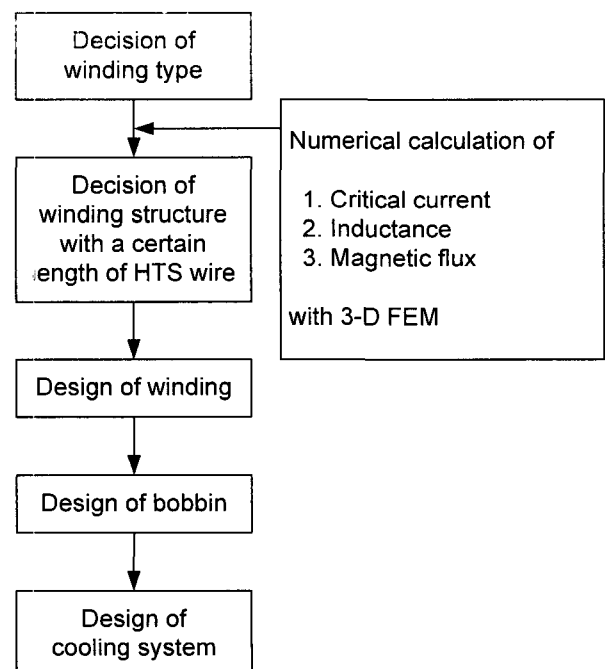


Fig. 1. Design procedure of HTS levitation magnet.

¹정 회 원 : 연세대대학원 전기전자공학부 박사과정

²정 회 원 : 충주대 안전공학과 전임강사

³정 회 원 : 한국기계연구원 선임연구원

*교신저자 : dkbae@cjnu.ac.kr

원고접수 : 2008년 01월 10일

심사완료 : 2008년 02월 26일

Table 1. Specifications of used HTS wire

	Specification
Type	HTS High Strength Plus Wire
Avg. thickness	0.255-0.285 mm
Avg. width	4.2-4.4 mm
Min. 10 m I_c	145 A (@77 K self-field, 1 μ V/cm)
Min. critical bend dia.(RT)	95% I_c retention for 38 mm dia.
Min. critical tensile stress (77K)	250 MPa at 95% I_c retention
Max. critical tensile strain (77K)	0.4% at 95% I_c retention

Table 2. Proposed winding structures

	Piece length (m)	Inner dia. (mm)	Outer dia. (mm)	Inductance (mH)	Estimated I_c (A)
4-100	200	100	291.0	330.2	35-40
4-150		150	359.6	319.0	35-40
4-200		200	259.2	308.1	35-40
2-100	400	100	334.8	283.5	40-45
2-150		150	234.4	279.7	40-45
2-200		200	315.6	275.7	40-45

Table 3. Maximum magnetic flux density of each winding condition

	Maximum B normal to surface (T)				
	10A	20A	30A	40A	50A
4-100	0.0769	0.1538	0.2307	0.3076	0.3845
4-150	0.0721	0.1442	0.2163	0.2884	0.3605
4-200	0.0674	0.1348	0.2022	0.2696	0.3370
2-100	0.0503	0.1006	0.1509	0.2012	0.2515
2-150	0.0497	0.0994	0.1491	0.1988	0.2485
2-200	0.0488	0.0976	0.1464	0.1952	0.2440

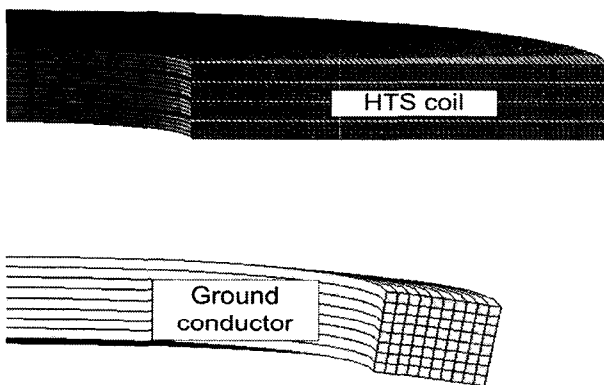


Fig. 2. 3-D model for FEM analysis.

일정한 길이의 고온초전도선을 이용하여 제작할 수 있는 최적의 고온초전도 부상자석의 조건을 찾기 위하여 3차원 유한요소법을 이용한 수치해석을 수행하였다. 고온초전도 선재의 제조 특성 상 유한한 일정길이 (piece length)로 선재가 제작되므로 몇 가지 일정길 이로 구성된 총 선의 길이를 고정시킨 채로 부상자석에 가장 적합한 권선 구조를 선정하였다. 수치해석을 통하여 최적의 권선구조를 정한 후에는 권선, 보빈 및 냉각시스템을 차례로 설계하였다.

2.2. 권선 형태 선정

고온초전도권선의 형태는 크게 솔레노이드형과 팬케이이크형의 두 가지로 나뉜다. 솔레노이드형의 경우 전기적 절연에 이점을 가지고 있지만 고전류밀도로 고자장을 발생시켜야 하는 자기부상용 초전도자석에는 작은 부피에서 보다 큰 인덕턴스를 가질 수 있는 팬케이이크형 권선이 유리하다. 특히 자기부상열차는 영구전류 모드로 운전되므로 고온초전도권선에서 고전압이 인가되는 부위가 존재할 가능성도 매우 작다. 따라서 본 연구에서는 고온초전도 부상자석으로 팬케이이크형 권선을 선정하였다. 고온초전도 팬케이이크형 권선은 더블팬케이이크 권선이 적용될 수 있으므로 이후의 설계는 더블팬케이이크형 권선으로 진행되었다.

2.3 수치 해석을 통한 권선 구조 설정

부상자석 본연의 임무를 위해서는 목표 부상질량을 먼저 정한 후 해당 부상력을 구현하기 위한 설계가 이루어지는 것이 정석이라 할 수 있지만 본 연구에서는 고온초전도체의 특성을 고려하여 고온초전도선 800m로 최상의 특성을 가질 수 있는 부상자석의 최적설계 조건을 구하였다. 본 연구에서 고려한 초전도선의 piece length는 200m와 400m였다.

표 1은 본 연구에서 사용한 AMSC사의 고온초전도선의 특성을 나타내며 표 2는 최적조건 산출을 위해

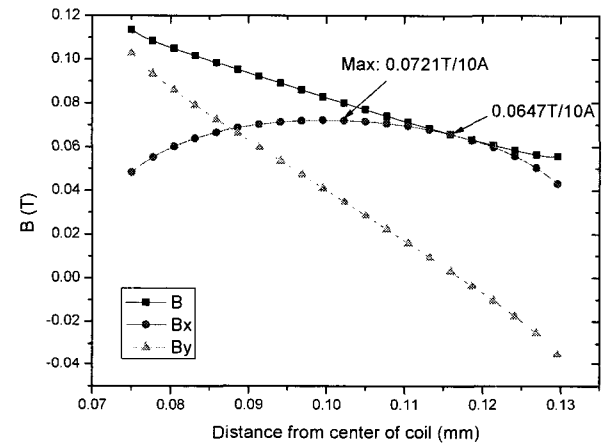


Fig. 3. Magnetic flux density of the uppermost layer of magnet (4-150, 1.5 mm below from top of winding).

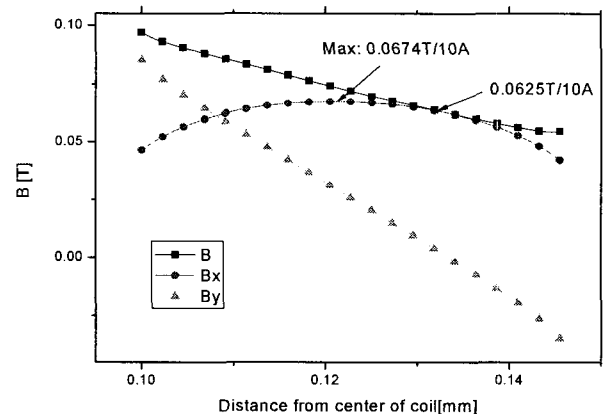


Fig. 4. Magnetic flux density of the uppermost layer of magnet (4-200, 1.5 mm below from top of winding).

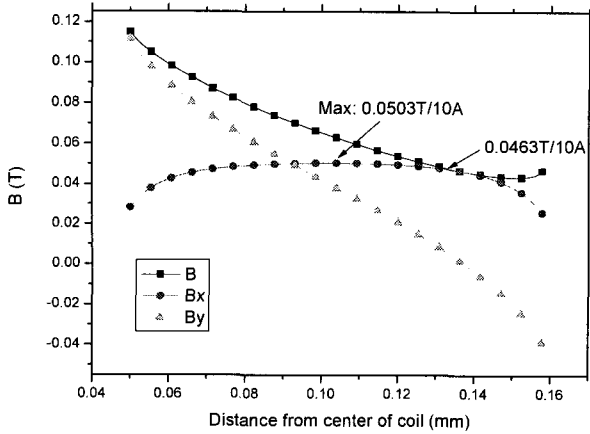


Fig. 5. Magnetic flux density of the uppermost layer of magnet (2-100, 1.5 mm below from top of winding)

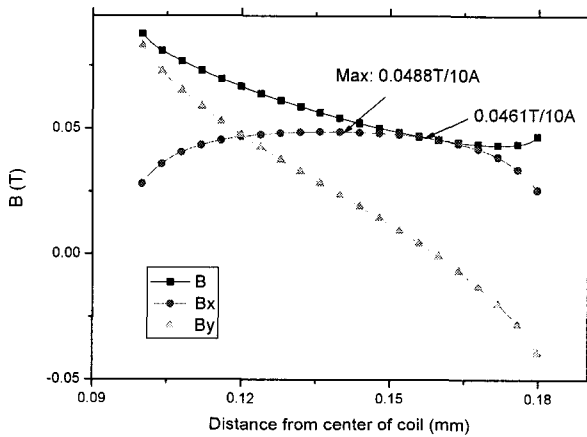


Fig. 6. Magnetic flux density of the uppermost layer of magnet (2-200, 1.5 mm below from top of winding)

고려한 고온초전도권선의 구조들 및 몇몇 해석결과를 나타낸다. 각 piece length에 대하여 3가지의 내경 (100mm, 150mm, 200mm)을 고려하여 총 6가지의 권선구조를 비교하였다. Piece length 400m의 고온초전도선을 사용한 경우에는 두개의 더블팬케이크형 코일을 직렬로 연결하여 부상자석이 구성되며 200m를 사용하였을 경우에는 4개의 더블팬케이크형 코일이 직렬로 연결된다. 3차원 유한요소법으로 계산한 인덕턴스 면에서는 200m 선재로 내경 100mm로 권선한 4-100이 가장 우수하였다.

인덕턴스 면에서는 4-100이 가장우수하나 초전도선은 임계전류에 따라 저항 없이 흘릴 수 있는 전류가 결정되는데 이 임계전류가 자기장에 따라 변하므로 AMSC에서 제공한 자장에 의한 임계전류 변화 특성과 표 3에 나타낸 권선의 자장분포해석을 바탕으로 각 구조의 임계전류를 예측하였다 [4].

그림 3-6은 각 권선 최상층 부분의 자장분포를 나타낸다. 권선에서 자장이 가장 강한 부분은 권선 중앙 부분이나 이 부분의 자장은 초전도선의 표면에 평행한 방향이므로 초전도선의 임계전류에 크게 영향을 미치지 않고 선재 표면에 수직인 자장 성분이 가장 큰 권선 최상층 및 최하층 외각부분의 자장분포가 권선의 임계전류에 크게 영향을 끼친다 [4]. 권선의 내경에

따라 자장분포의 차이가 있었으나 이는 그리 크지 않았고 코일 개수에 따라 자장분포의 차이를 보였다. 본 계산을 토대로 200m 선재로 제작한 권선 즉, 4개 코일로 구성된 권선의 임계전류는 약 35-40A로 예측되었고 2개의 코일로 구성된 권선의 임계전류는 40-45A로 예측되었다.

2.3 지상코일을 고려한 자속량의 계산

본 연구에서 수행한 계산 결과 인덕턴스는 2개의 코일로 가장 작은 내경으로 설계한 4-100이 가장 컸으나 임계전류는 2개의 코일로 설계한 권선이 5A 정도 컸다. 반발식 자기부상의 부상력은 전류의 제곱에 비례하므로 인덕턴스 및 임계전류의 계산만으로는 어떤 조건이 유리하다고 할 수 없고 반발력을 고려한 자장분포의 계산이 추가되어야 최적 자기부상자석의 조건을 도출할 수 있다고 판단된다 [5].

반발식 자기부상에서 자기부상력 $F_L(t)$ 는 지상코일에서 유기한 자장과 움직이는 고온초전도 부상자석 사이의 상호작용에 의한 것으로 아래 식 (1)로 표현할 수 있다 [5].

$$F_L(t) = [i(t)]^2 \frac{dM(x, y, t)}{dy} \quad (1)$$

여기서 $i(t)$ 는 초전도 부상자석에 흐르는 전류이고 $M(x, y, t)$ 는 고온초전도 부상자석과 지상코일 사이의 상호인덕턴스이다. y 방향은 지상코일 표면에 수직인 방향이고 x 방향은 초전도 부상자석의 진행방향이다. 식 (1)에서 부상력은 시간에 따른 y 방향의 자속변화 (B_y)에 대한 함수라는 것을 알 수 있다. 다시 말하여 초전도 부상자석에서 발생한 이동자장 중 y 방향 성분의 크기가 부상력에 크게 관여한다. 따라서 지상코일에 채교되는 B_y 의 크기를 계산하는 것이 부상자석의 최적 설계를 위해 필요하다.

그림 7과 8은 지상코일과 초전도권선의 간격이 각각 20mm와 40mm일 경우에 대하여 지상코일에서의 자장분포를 나타낸다. 표 4는 식 (2)로 계산한 지상코일의 자속분포를 나타낸다. 여기서 r 은 코일 중심에서 B_y 가 0이 되는 지점까지의 거리를 나타낸다.

$$\Phi = \int_0^{2\pi} \int_0^r B(r) r dr d\theta \quad (Wb) \quad (2)$$

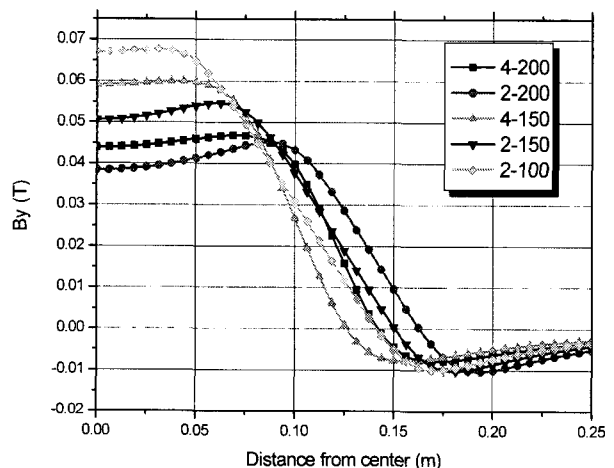


Fig. 7. B_y at 20mm below the HTSC levitation magnet.

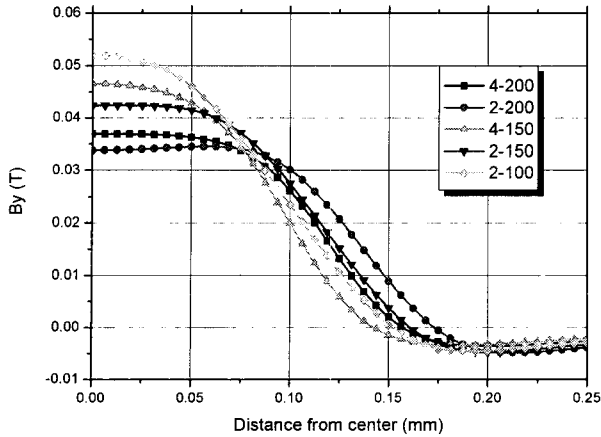


Fig. 8. B_y at 40mm below the HTSC levitation magnet.

Table 4. Linked magnetic flux at ground conductor

	20 mm		40 mm	
	Radius (mm)	Flux@10A (mWb)	Radius (mm)	Flux@10A (Wb)
4-150	126.3	4.553	141.3	3.816
4-200	141.3	4.757	156.3	4.094
2-100	141.3	5.707	151.3	4.609
2-150	150.0	5.702	160.0	4.735
2-200	162.5	5.738	172.5	4.866

Table 5. Optimal design results of HTS levitation magnet for EDS system

	Specification
Number of double-pancake	2 ea
Number of turns	1228 turns
Inductance	283.5 mH
Thickness of spacer	1 mm
Wire length	800 m
Critical current	40-45 A (@77K, 1 V/cm)

코일의 단면적을 정사영했을 때 코일의 외경보다 조금 작은 지점에서 B_y 가 0이 되는데 이 지점 이후의 자속 분포는 부상력 증대에 도움이 되지 않는다. 자속이 0보다 큰 영역의 자속을 표 4에 나타내었는데 자속 자체로만 보았을 경우에는 2-200이 가장 큰 부상력을 가질 수 있는 고온초전도 부상자석 설계결과가 될 수 있다. 그런데 부상자석의 설계에 있어 추가로 고려해야 할 사항은 부상자석과 반응하는 지상코일의 구조인데 지상코일은 열차 운행 구간 전체에 설치되어야 하므로 지상코일의 크기가 큰 것은 자기부상열차 건설의 경제적 관점으로 장점이 될 수 없다. 따라서 자속량의 차이가 크지 않으면서 지상코일의 크기를 줄일 수 있는 2-100을 최적의 고온초전도 자기부상설계의 설계조건으로 제시하였다. 표 5는 도출한 부상자석의 설계 조건을 나타내고 있다.

3. 부상자석의 제작 및 시험

3.1. 부상자석의 제작

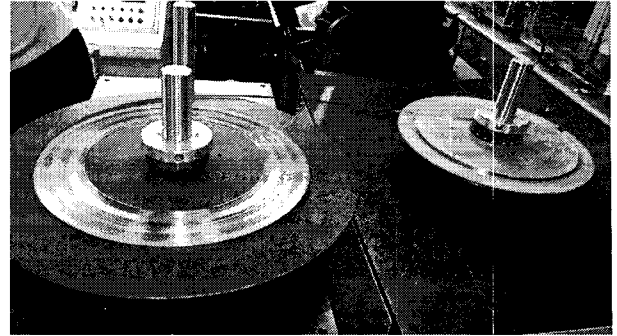


Fig. 9. Winding procedure of HTS magnet.

그림 9는 부상자석을 제작하는 모습을 나타낸다. Piece length 400m인 AMSC 사의 “HTS High Strength Plus Wire”는 Bi-2223 고온초전도선의 양면에 stainless steel tape를 납땜으로 붙여서 선재의 기계적 특성을 강화시킨 것으로서 제품 출고 시 절연이 되어있지 않아 우선 폴리이미드 테이프로 절연을 한 다음 권선기를 이용하여 2개의 더블판케이크형 코일을 각각 제작한 후 이를 직렬로 연결하여 부상자석을 제작하였다.

3.2. 부상자석의 시험

그림 10은 부상자석의 임계전류 특성을 시험하는 모습을 나타내고 있으며, 그림 11은 측정된 결과를 나타낸다. 본 자석의 예상 임계전류는 40-45A였는데 측정

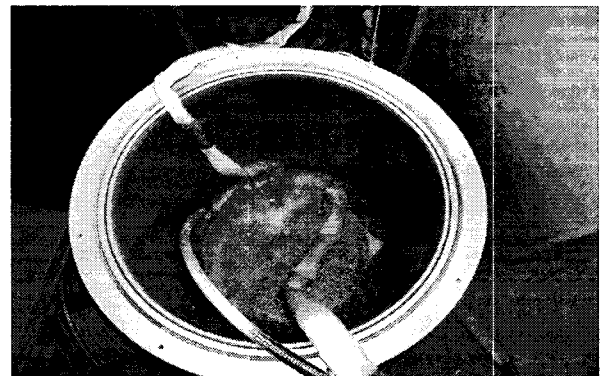


Fig. 10. Test of manufactured magnet.

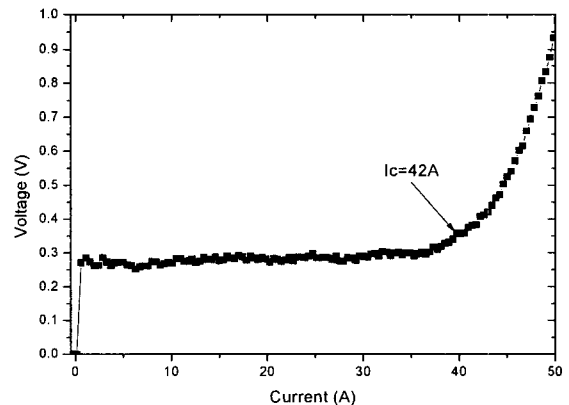


Fig. 11. Voltage and current characteristic of manufactured magnet.

된 임계전류는 42A로써 설계한 예상범위 내에 있어 임계전류 설계가 성공적이었다는 것을 증명하고 있다. 임계전류 측정 시 전류 상승률은 1A/s였다. 또한 측정된 인덕턴스는 279.4mH로써 설계치 283.5mH와 별다른 차이를 나타내지 않았다.

4. 요약

본 연구에서는 초고속 자기부상열차의 개발을 위한 기초연구의 성격을 가지고 있는 고온초전도 자기부상자석의 최적 설계를 수행하였다. 고온초전도 자기부상자석은 임계전류, 발생자장, 지상도체 등을 고려하여야 하는데 3차원 수치해석법을 이용하여 권선의 구조를 설계하였다. 권선의 형태로써 더블팬케이크형 고온초전도 권선을 선택하였으며 일정한 길이의 초전도선으로 최적의 부상조건을 가지는 구조를 도출하였다. 본 연구에서 제시한 조건은 총 800m 고온초전도선을 사용하는 가정 하에 piece length 400m로 내경 100mm인 더블팬케이크형 코일 2개를 제작하여 직렬로 연결한 부상자석이다. 제작한 자석의 인덕턴스는 279.4mH였으며 임계전류는 42A 였다. 인덕턴스, 발생자장 모두 설계 시 제시한 계산 값과 일치하는 결과를 보여주었으므로 본 연구는 성공적으로 수행되었다고 할 수 있으며 본 결과는 향후 초전도 자기부상자석의 설계에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구구조사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00157).

참고 문헌

- [1] Kazuo Sawada, "Superconducting maglev developed by RTRI and JR central," Japan Railway & Transport Review 25, pp. 58-61, October, 2000
- [2] Philip Holmer, "Faster than a speeding bullet train," IEEE Spectrum August 2003, pp. 30-34, August 2003.
- [3] Motoharu Ono, Shunsaku Koga, and Hisao Ohtsuki, "Japan's Superconducting Maglev Train," IEEE Instrumental & Measurement Magazine, March 2002, pp. 9-15, March 2002.
- [4] Available at <http://www.amsuper.com/products/htsWire/103419093341.cfm>.
- [5] P. K. Sinha, *Electromagnetic Suspension Dynamics & Control*, Peter Peregrinus Ltd., 1987.

저 자 소 개



윤경용 (尹景鏞)

1964년 8월 24일생. 1987년 한양대학교 졸업, 1997년 용인대학교 전산통계학과 졸업, 2001년 연세대학교 공학대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 연세대학교 대학원 전기전자공학부 박사과정



배덕권 (裴德權)

1971년 8월 16일생, 1998년 광운대학교 전기공학과 공학사, 2000년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 2005년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사) 2005.9-2006.8 한국기계연구원 선임연구원, 2006.10-현재 충주대학교 안전공학과 전임강사



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