

HTS 전동기용 계자코일의 자장 특성 연구

A Study of Magnetic Field Characteristic of Field coil in HTS motor

이정중*, 조영식*, 홍정표**, 손명환***, 김석환***, 권영길***

Jeonng-Jong Lee*, Young-Sik Jo*, Jung-Pyo Hong**, Myung-Whan Sohn***, Seog-Whan Kim***,
Young-Kil Kwon***

Abstract : In this paper, flux distribution and operating current is calculated according to the field coil change in HTS(High Temperature Superconducting) motor. In order to calculate magnetic field characteristic of the field coil, it is computed by changing the outer radius and the inner width of field coil. Bio-Savart equation is used as the analysis method for the characteristic analysis of magnet. 2D and 3D FEA(Finite Element Analysis) is used for the magnetic field distribution in HTS motor. The operating current is calculated by $B \perp$ linked with the field coil and I_c - B curve of superconductor.

Key Words : magnetic circuit, magnetic field distribution, operating current, I_c - $B \perp$ curve.

1. 서 론

초전도 전동기 개발의 초기 단계에서는 LTS(Low Temperature Superconductor)를 사용하여 저온초전도 발전기에 대한 연구가 많았지만 최근에는 HTS를 이용한 고온초전도 전동기의 연구가 진행되고 있다. 특히 미국에서는 33,000 hp급의 초전도 전동기를 군함의 추진시스템으로 개발하고 있으며 현재 기초시험을 수행 중에 있다 [1]. 현재 국내에서는 프론티어 사업의 일환으로 한국전기연구원에서 100hp급 고온초전도 전동기를 개발 중에 있다.

HTS 전동기는 소형, 경량화가 가능하며, 고온초전도체의 안정성이 우수해서 수년 이내로 상용화제품이 가능할 것으로 기대되고 있다. HTS 전동기의 설계에서는 일반적인 전동기와 달리 극저온 냉매를 사용하여 초전도체의 운전온도를 만들어야 하기 때문에 극저온 냉매의 선정이나 유입, 배출구조 및 단열구조를 포함한 열 설계가 매우 중요하다. 하지만 열 설계에서는 HTS 전동기의 자장특성을 고려할 수 없고, 자기회로 설계에서는 열 설계에 따른 구조파악이 어려워져 최적의 설계가 매우 어렵다. 따라서 열 설계나 자기회로 설계에서 초기 설계를 기준으로 각각의 특성을 파악하여 열 설계와 자기회로 설계에서의 부담을 적절히 조절할 수 있다면 최적의 HTS 전동기 설계가 가능할 것이다.

기존의 전동기의 경우 전기자 입력과 계자 입력의 분배비로 설계에 적용하는 장하분배법을 이용하고 있다. 초전도 전동기에서도 기본적으로 장하분배법을 기초로 설계를 하고 있으나 냉각시스템과 초전도체 특성을 설계에서 고려 할 수 있는 방법이 필요하다. 초전도 전동기의 경우 냉각 시스템을 포함하고 있어 치수 제약이 크고, 계자와 전기자 치 부분에 철심을 사용하지 않아 자기적인 공극이 매우 커서 축방향 자속밀도 변화가 크다. 따라서 설계시 3차원 해석이 필요하여 많은 시간이 소요되는 어려움이 있다. 또한 계자코일을 초전도체를 사용하므로 일반 전동기와는 달리 쇠교하는 $B \perp$ 에 의해 코일에 흐르는 임계전류가 변하므로 운전전류를 선정하기 위해서는 몇 가지 사항을 고려하여야 한다. 임계전류를 선정하기 위해서는 쇠교하는 자속성분, 온도와 기계적 특성(Strain-Strree)을 고려하여야 한다.

초전도 전동기 내에서 초전도체는 회전하는 기계 구조에서 계자 자속을 만드는데 사용된다. 이때 초전도 계자코일의 위치에 따라 초전도체에 쇠교하는 자속 성분 $B \perp$, $B //$ 에 의해 운전 전류와 전동기의 성능에 많은 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 계자코일 위치 변화에 따른 자계 특성을 알아보기 위해서 계자코일의 외반경과, 내폭을 변화시켜 2차원 자장 해석을 수행하여 열설계의 범위를 제시하고 운전전류 산정을 위해 3차원 자장분포를 계산하여 HTS 계자코일의 임계전류를 산출하였다. 해석방법은 초전도 magnet 해석을 위해서 Biot-Savart 방정식을 이용하였으며 HTS 전동기의 자계해석을 위해서는 2D, 3D FEA를 이용하였다. 정확한 HTS 전동기의 자장특성을 계산하기 위해서는 3차원 해석을 필요하지만, 2차원 자장해석 결과의 변화추이만으로도 계자코일의 위치 변화에 따른 특성을 예측할 수 있으므로 2차원 해석을 이용하였으며, 정확한 자속분포가 요구되는 부분은 3차원 해석을 수행하였다 [2]. 3D 자계 해석 결과와 초전도체의 I_c - $B \perp$ 특성곡선을 기준으로 HTS 계자코일의 임계전류를 계산하였다.

2. 100hp급 HTS 전동기

2.1. HTS 전동기

그림 1은 고온초전도 전동기의 단면을 나타낸다. 4극으로 정격출력 100hp이며, 회전자는 TR(Thermal reserve)를 포함한 냉각 단열 부로 구성되어 있다. TR은 외부에서 침투하는 열과 시변자속을 차단하고 냉동기 사고시에도 급격한 온도상승에 의한 사고대처 시간을 확보하기 위해서 고안되었으며, Magnetic shield와 계자코일을 제외한 대부분의 재질은 Al(Aluminum)등의 비투자율이 공기와 거의 같은

* 학생회원 : 창원대학교 전기공학과 박사과정

** 정 회 원 : 창원대학교 전기공학과 부교수

*** 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

원고접수 : 2002년 04월 06일

심사완료 : 2003년 01월 24일

사용되어서 자기적인 공극이 매우 크다. 표 1은 고온 초전도 전동기의 사양을 보여준다.

그림 2는 초전도 계자코일의 단면을 나타낸다. B_⊥ 성분은 초전도체에 수직으로 쇄교하는 자속 성분이 되며, B//는 수평성분이 된다. 그림 3은 각 자속 밀도 성분에 의한 초전도체의 임계전류를 나타낸 것이다. 초전도체에서는 B//의 영향에 비해 B_⊥성분에 의한 영향이 현저히 크므로 각 모델에 대해 계산된 B_⊥을 고려하여 운전 전류를 산정하였다.

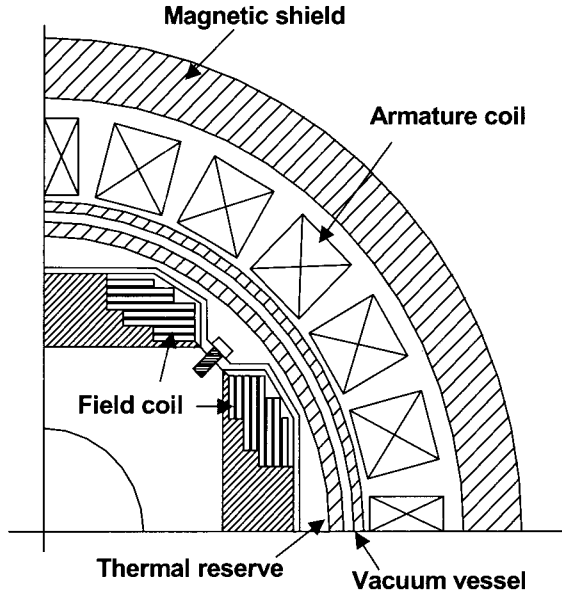


그림 1. 100hp급 HTS 전동기의 단면.
Fig. 1. Cross-section view of the 100hp class HTS motor.

표 1. 100hp급 HTS 전동기의 사양
Table 1. Specifications of 100hp HTS motor

정격출력 100hp	정격속도 1800rpm
극수 4	정격전류 45.45A
임계전류 40A(77K)	운전온도 30K

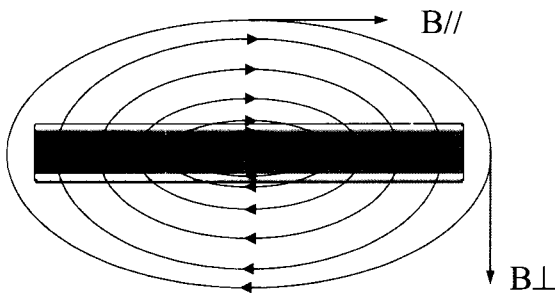


그림 2. 고온 초전도 계자코일의 단면
Fig. 2. Cross-section view of HTS field coil

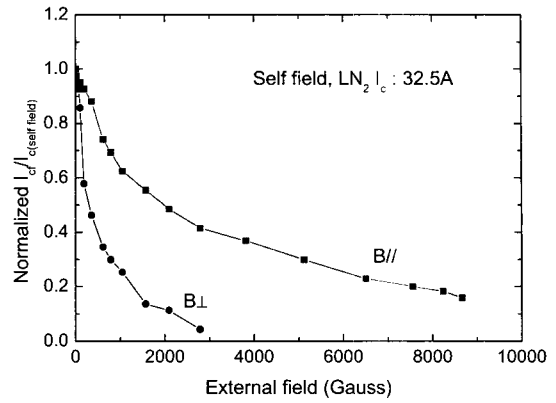


그림 3. B_⊥과 B//에 따른 임계전류
Fig. 3. Relative I_c vs. B_⊥ and B//

2.2. 계자코일 외 반경 변화에 따른 해석 모델

계자코일의 위치변화에 따른 자계특성을 알아보기 위해서 계자코일 외 반경을 변화시키는 모델과, 계자코일 내 폭을 변화시키는 모델 2가지로 설정하였다. 그림 4는 설계에서 결정된 HTS 전동기의 계자코일의 위치와 형상을 나타내었다. 계자코일의 외 반경은 134 mm, 내 반경은 107 mm이다. 따라서 운전온도를 만들기 위한 외부와의 단열 및 냉각 구조는 반경 134 mm에서 반경 160 mm 이내에서 설계되어야 한다. 만약 열 설계에서 계자코일의 외 반경을 약간 줄이면 냉각이나 단열에는 큰 효과가 있지만 자장분포 특성을 정확히 계산할 수 없다면 변경하기 어려우며, 외 반경을 증가시켜 출력증가에 큰 효과가 있다라도 열 설계에서의 특성을 정확히 파악하지 못한다면 제약 조건으로 설계되어야 하므로 최적의 HTS 전동기 설계가 어려워진다. 본 논문에서는 초기 열 설계시 자장분포 특성을 예측할 수 있도록 계자코일의 외 반경이 122, 142 mm인 두가지 모델에 대해서 자장분포 특성을 해석하였다.

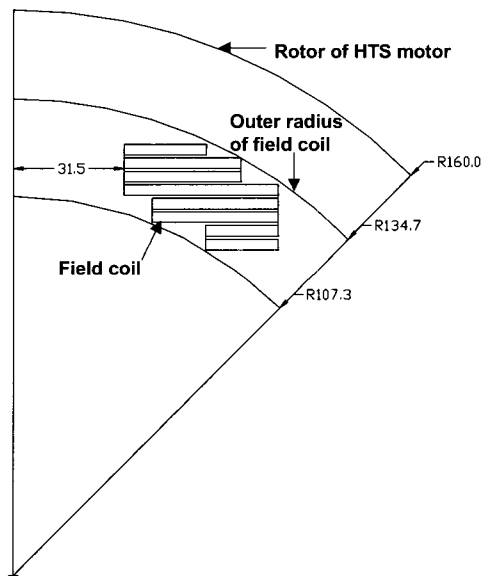


그림 4. HTS 회전자의 단면
Fig. 4. Cross-section view of Simple structure of HTS rotor

2.3. 계자코일 내 반경 변화에 따른 해석 모델

그림 5는 설계된 고온 초전도 마그네트의 단면으로 총 1075턴으로 4개의 더블 팬케이크 코일로 구성되며, 턴당 정격 전류는 45.45[A]이다. 계자코일의 형상은 반경 120~132mm 사이에 적절히 배치하기 좋은 형태로 결정된 것이다. 계자코일의 내쪽은 HTS의 곡률반경을 고려하여 선정된 것이며, 외쪽은 계자코일을 고정할 수 있는 기계적 공간을 고려하여 결정된 것이다.

계자코일 내 반경 변화에 따른 특성을 알아보기 위해서 그림 5와 총 턴수는 동일한 모델 그림 6과 같은 단순한 마그네트 형상으로 검토하였다. 설계초기 단계에서는 그림 6과 같은 형상으로 설계 후 그림 5와 같은 형상으로 변경하므로 내 반경 변화추이를 확인하기 위한 해석모델은 설계초기 단계인 그림 6을 선정하였다. 표 2는 각 해석 모델에 대한 내 반경을 나타내었다.

3. 해석 방법

초전도 마그네트의 형상 변화에 따른 자장 분포 결과를 알아보기 위하여 마그네트 하나에 대한 자장특성을 검토하였다. 제작과정에서는 하나의 마그네트에 대한 특성실험을 기준으로 전동기의 제작이 진행되므로 먼저 마그네트 하나에 대한 자장특성을 검토하였다. HTS 마그네트 하나에 대하여 HTS 테이프 도체에 쇄교하는 수직자장(B_⊥)의 크기를 계산하기 위해서 Bio-Savart 방정식(1)을 사용한 해석적 방법으로 구하였다. HTS 전동기의 최외각 자기철드를 제외한 모든 재료가 비자성체이므로 자기영상법을 이용한 해석적 방법으로 2차원 자장분포를 계산할 수 있다.

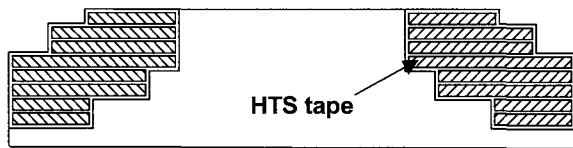


그림 5. HTS 계자 코일의 단면도
Fig. 5. Cross-section view of the HTS field coil

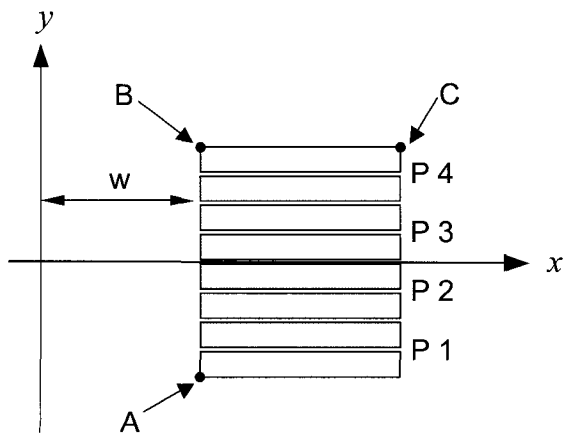


그림 6. 계자코일의 사각형 모델
Fig. 6. Rectangle model of field coil

표 2. 사각형 모델의 분류

Table 2. Classifications of rectangle model

Unit (mm)					
모델명	w1	w2	w3	w4	w5
곡률반경	31.5	34.5	37.5	40.5	43.5

매질이 균일하고 HTS 마그네트 하나만 존재할 때, 수식 (1)을 사용하여 자기 벡터포텐셜 **A**를 구할 수 있고, 수식 (2)에 대입하여 계산하면 임의의 점에서 자속밀도를 구할 수 있다.

$$A = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{dz'}{\sqrt{(z' - z)^2 + r^2}} a_z \quad (1)$$

여기서 **A**는 자기 벡터포텐셜, μ_0 는 공기 중에서의 투자율, z' 은 미소 전류소의 중심 좌표값, z 는 임의의 점에서 z 축으로 투영시켰을 때의 z 좌표값, r 은 z 에서 임의의 점까지의 거리, $2L$ 은 미소 전류소의 길이이다.

$$B = \nabla \times A = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} a_r - \frac{\partial A_z}{\partial r} a_\phi \quad (2)$$

초기 설계 단계에서는 2차원 해석으로 B_⊥의 변화 추이를 확인 할 수 있으므로 2차원 해석으로 알맞은 위치를 설정하여 3차원 해석을 수행하였다. 3차원 자장해석은 상용프로그램인 Magnet VI를 사용하였으며 그림 7은 요소분할을 수행한 해석모델을 나타낸다.

3차원 해석의 결과로부터 초전도체에 쇄교하는 자속 밀도 B_⊥를 산정하고, NTS사에서 제공하는 Ic-B 특성을 이용하여 운전 전류 Ic를 계산하였다.

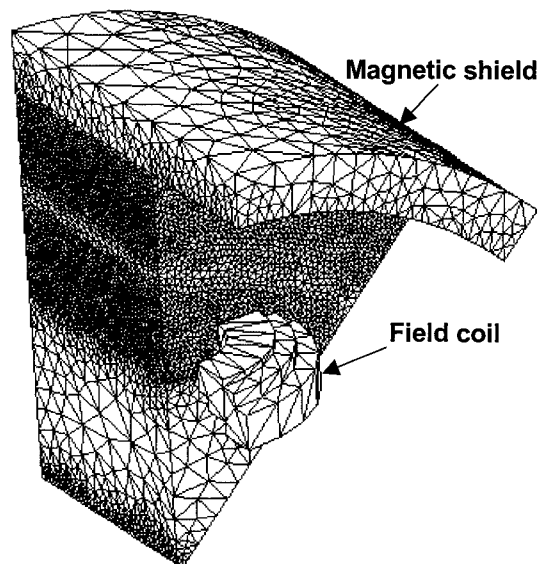


그림 7. 해석모델의 3차원 요소분할도
Fig. 7. Mesh generation of 3D analysis model

4. 해석 결과 및 검토

4.1 계자 코일 외 반경 변화에 따른 자장특성

그림 8은 계자코일의 외 반경 변화에 따른 자장특성을 나타낸다. 계자 코일의 외 반경이 142 mm인 경우에 운전전류에 큰 영향을 미치는 B_{\perp} 은 감소하고 고온초전도 전동기의 출력특성에 큰 영향을 미치는 B_r (자속밀도의 반경방향성분)은 증가하였다. 만약, 냉각공간 감소에 따른 열적인 문제가 미진하다면 계자 코일의 외 반경을 증가시키는 것이 유리할 것으로 사료된다.

4.2 계자 코일 내 반경 변화에 따른 자장특성

그림 7은 설계된 모델과 곡률반경 변화에 따른 B_{\perp} 의 크기변화를 보여준다. 곡률반경이 적을수록 B_{\perp} 이 적으므로, 운전온도에서 곡률반경에 대한 고온초전도체의 임계전류의 감소가 적다면 곡률반경을 적게하는 것이 유리함을 알 수 있다. 설계된 모델과 직사각형 단면의 형상에서 B_{\perp} 의 차이는 크지 않았고, 마그네트 하나만 있는 경우보다 전동기에 4극으로 주기적으로 배치되면 B_{\perp} 이 적어질 것으로 예상된다.

4.3 운전 전류 선정

그림 10은 설계된 계자코일의 곡률반경과 같은 직사각형 단면을 가지는 해석모델의 최대 B_r 을 기준으로 각 해석모델의 결과를 표준화한 것이다.

계자의 폭이 커질수록 B_{\perp} 의 증가에 비해 B_r 이 크게 증가함을 알 수 있다. 하지만, 운전온도에서 HTS의 임계전류 값이 B_{\perp} 에 큰 영향을 받으므로 운전전류의 결정에 신중하여야 한다.

고온초전도 계자코일의 기초실험은 NST (Nordic Superconductor Technologies)에서 구입한 HTS를 사용하였다. 운전온도에서 운전전류 선정의 타당성은, 그림 11과 같이 NST에서 제공된 25K에서의 임계전류와 자장에 대한 특성을 근거로 검토하였다. 3차원 자장해석을 통해 HTS 계자코일에 채교하는 최대 B_{\perp} 은 0.52T로 계산되었다. 운전온도 25K에서의 임계전류는 액체질소 온도에서 보다 약 1.6배정도 증가하므로 약 61A 정도이다. 따라서 HTS 전동기의 30K에서의 임계전류가 조금 감소하고, 더블 팬케이크 코일간 3번의 상도체 접합에 의한 I_c 감소를 고려하더라도 타당하다고 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 100hp급 고온초전도 전동기의 계자코일 외 반경과 내 반경을 변화시켜서 자장특성을 검토하고 계자코일의 자장분포 특성을 기준으로 운전전류를 계산하였다. 계자코일의 외 반경이 증가할수록 B_{\perp} 이 감소하고 B_r 이 증가하였으며, 계자코일의 내폭이 적을수록 B_{\perp} 의 최대값이 감소하여 HTS의 임계전류의 증가가 예상되었다. 설계된 고온초전도 계자코일의 임계전류는 약 61A로 계산되었다.

초전도 전동기 계자코일의 설계시 계자코일 반경은 열 설계에서 허용되는 범위 내에서는 전기자에 가깝게 하는 것이 B_{\perp} 이 감소하고 B_r 이 증가할 것으로 예상된다.

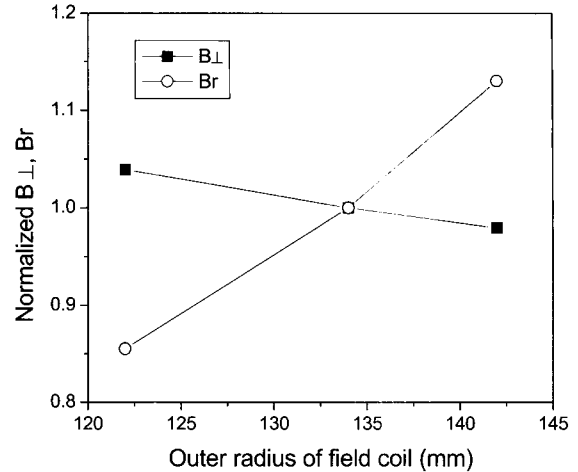


그림 8. 계자 코일 외 반경 변화에 따른 B_{\perp} 과 B_r 의 특성
Fig. 8. Characteristics of B_{\perp} and B_r according to the variation of the outer radius of field coil

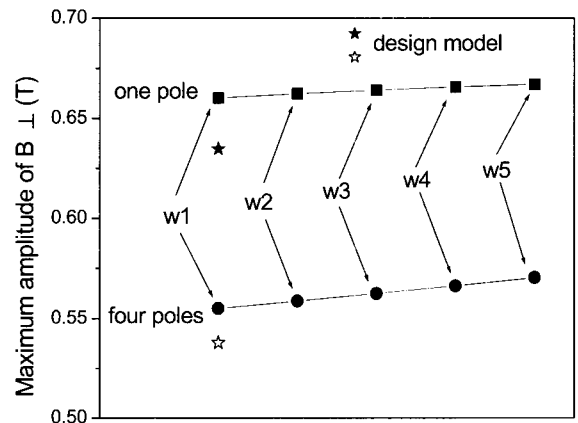


그림 9. B_{\perp} 의 최대값
Fig. 9. Maximum amplitude of B_{\perp}

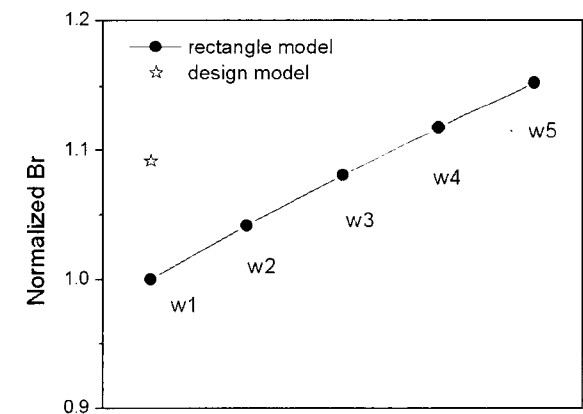


그림 10. 해석 모델에 따른 최대 B_r
Fig. 10. Maximum amplitude of B_r according to the analysis model

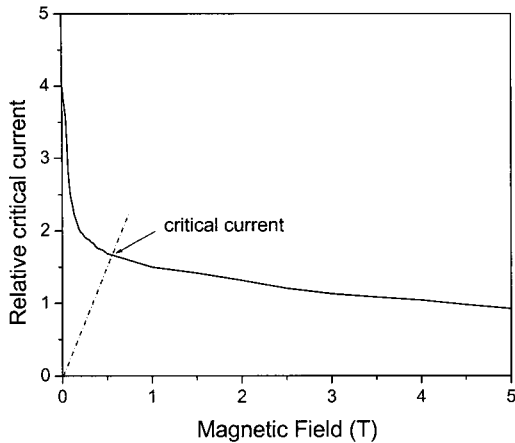


그림 11. 25K에서 B_{\perp} 에 따른 I_c 변화
Fig. 11. Relative I_c vs. B_{\perp} at 25K

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

참고 문헌

- [1] P. Tixador and H. Daffix, "Conceptual Design of an Electrical Machine with Both Low and High T_c Superconductors", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 7, No. 4, pp. 3858-3865, 1997
- [2] Shipboard Superconductors, IEEE Spectrum, February, pp. 22-23, 2001
- [3] Y. S. Jo, et al., "An Approach to the Shape Optimum Design of Superconducting Synchronous Generator", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 10, No. 1, pp. 939-942, 2000

저자 소개



이정중(李貞宗)
1976년 3월 10일생, 2000년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업, 2002년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정



조영식(曹永植)
1970년 8월 20일생, 1997년 창원대 전기공학과 졸업, 1999년 전기전자제어 대학원 졸업(석사), 1997년~현재 한국전기연구원 위촉연구원, 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



홍정표(洪正杓)
1959년 4월 17일생, 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원, 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수



손명환(孫明煥)
1963년 4월 21일생, 1986년 부산대 물리학과 졸업, 1988년 동 대학원 물리학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 물리학과(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용그룹 선임연구원



김석환(金錫煥)
1964년 1월 12일생, 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1993년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1993년 기초전력공학 공동연구소 연구원, 1994~1996년 일본 교에너지 물리학 연구소 연구원, 1997~1999년 유럽 CERN 연구소 연구원, 2000~2001년 미국 Fermi 연구소 연구원, 현재 한국전기연구원 선임연구원



권영길(權永吉)
1959년 7월 28일생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 대학원(공학석사), 1990년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 그룹장