

# 여자전류에 따른 저온초전도전원장치의 3차원 정자계 유한요소 시뮬레이션

論 文

51B-7-5

## 3-D Magnetostatic Finite Element Simulation of a Low-Tc Superconducting Power Supply with Respect to the Excitation Current

裴德權\* · 尹庸銖\*\* · 金鎬民 · 李燦周\* · 李相鎭\*\*\* · 高太國§

(Duck Kweon Bae · Yong Soo Yoon · Ho Min Kim · Chan Joo Lee · Sang Jin Lee · Tae Kuk Ko)

**Abstract** - In this paper, 3-D magnetostatic finite element simulation of a rotating flux type Low-Tc superconducting (LTS) power supply is analyzed. The operating mechanism of this system is the magnetic-triggered switch which is the partial quenching and recovery of superconducting foil by generated magnetic flux from the rotating pole. The magnetic flux density on the superconducting foil caused by two exciters is therefore sufficiently greater than its critical magnetic flux density and it is an essential point in LTS power supply design.

To establish the sufficient flux path of this machine, ferromagnetic materials is used in this power supply. When ferromagnetic material is used at extremely low temperature, its characteristic of magnetization differs to that at room temperature. For this reason, special consideration is needed in the magnetic analysis of cryogenic systems.

When the excitation current is 10A, the normal spot appears on superconducting foil. The results of this analysis are calculated and compared with the experimental results. The linkage flux due to the excitation current of 10, 20, 30, 40 and 50A are respectively  $1.30 \times 10^{-4}$ ,  $2.67 \times 10^{-4}$ ,  $3.92 \times 10^{-4}$ ,  $5.08 \times 10^{-4}$  and  $6.15 \times 10^{-4}$ Wb.

**Key Words** : LTS superconducting power supply, finite element method, cryogenic system, superconducting foil

### 1. 서 론

초전도자석은 대전류를 흘려 고자장을 발생시킬 수 있을 뿐 아니라, 영구전류모드 운전으로 고자장을 매우 일정하게 유지할 수 있다. 이러한 장점을 이용하여 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage), MRI(Magnetic Resonance Imaging), NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 등의 초전도 기기가 상용화되고 있다.

초전도자석에 대전류를 충전시키기 위하여 상전도전원장치를 사용하고 있는데, 이러한 대전류용 상전도 전원장치는 그 크기가 크다는 점 이외에 큰 전류도입부를 통하여 외부의 열이 극저온영역으로 직접 전달됨으로써 초전도자석의 안정도가 저하될 수도 있는 단점을 가지고 있다. 그러므로 초전도자석과 결합하여 운전할 수 있는 초전도전원장치의 개발은 초전도기기의 경량화 및 안정도 향상을 위해 매우 중요한 연구과제이다 [1].

회전자속형 저온초전도전원장치는 회전자계로 초전도 폐회로의 일부분을 퀘칭시키고 회복시키는 자계트리거 스위치를 이용한다. 자계트리거 스위치의 반복동작으로 전류가 펌핑되어 초전도부하에 저장된다. 본 논문은 회전자속형 저온초전

도전원장치 최적설계 기술개발의 일환으로 시스템의 자계분포 및 자계트리거 스위치로 사용되는 초전도박막의 자계분포를 해석하였다. VECTOR FIELDS 사의 FEM(Finite Element Method) 시뮬레이션 프로그램인 OPERA를 이용하여 3차원 정자계 해석을 수행하였으며, 실험값과 비교하여 시뮬레이션의 적합성을 검증하였다.

### 2. 회전자속형 저온초전도전원장치의 구조 및 원리

초전도전원장치는 “초전도체에 의한 무저항폐회로를 통과하는 총 자속( $\Phi$ )은 초전도성을 유지하는 한 변하지 않는다.”는 자속보존의 법칙 [5]을 이용한 장치이며 그 구조는 그림 1과 같다. 상·하 두개의 여자기에 의해 발생된 자속이 초전도박막의 임계자속밀도 이상일 때 초전도박막이 부분적으로 퀘칭되어 자속을 투과시키며, 투과된 자속이 초전도폐회로와 쇄교하는 것이 자계트리거 스위치의 원리이다.

초전도여자기에서 발생된 자계의 경로는 회전자속, 회전자극, 공극, 초전도박막, 고정자로 형성된다. 자극이 회전하므로 초전도박막 내부에 상전도영역이 회전하게 된다. 회전하는 상전도영역에 의해 초전도박막 내의 유기기전력은 지속적으로 발생하며, 회전자속이 주기적으로 회전할 때 페러데이 법칙에 의한 한 주기 동안의 유기기전력은 다음과 같다 [6].

$$emf = \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\phi_0}{T} \quad (1)$$

\* 準 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 安山工科學大學 電氣科 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 威德大學 電氣工學科 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 11月 21日

最終完了 : 2002年 5月 6日

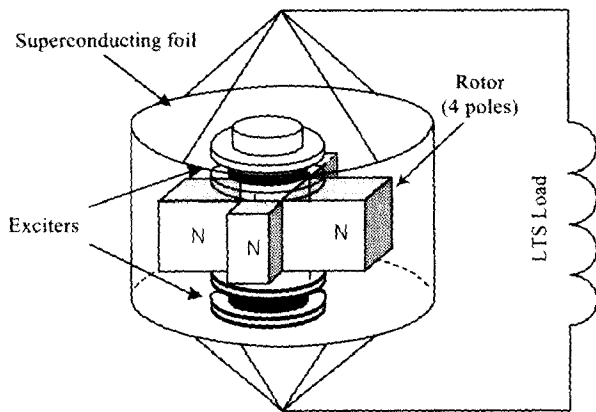


그림 1 회전자속형 초전도전원장치의 구조  
Fig. 1 Schematic of a rotating flux type LTS power supply

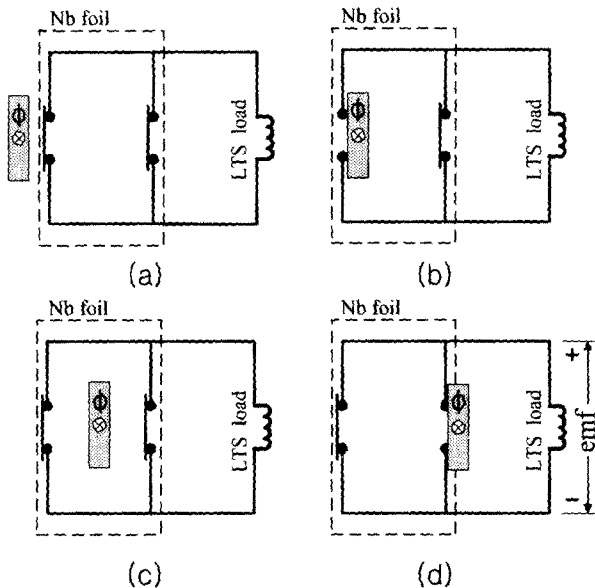


그림 2 자계스위치를 이용한 초전도전원장치의 동작  
Fig. 2 Operational procedure of superconducting power supply using the magnetic switch

여기서,  $T$ 는 회전하는 상전도영역이 초전도폐회로를 반복하여 자르는 데에 걸리는 시간이며,  $\phi_0$ 는 전기각  $2\pi \text{ rad}$  마다 초전도폐회로에 채교되는 자속량이다.

여자기는 NbTi 선재, 초전도박막은 니오븀(Nb) 박막, 회전자는 연철, 고정자는 무방향성 규소강판을 각각 사용하였다.

그림 2는 자계스위치의 동작을 보여주기 위한 단순화된 등가 회로이다. (a)에서는 초전도전원장치 시스템과 초전도부하가 무저항 폐회로를 이루고 있으며 자계스위치는 모두 전기적으로 단혀져 있다. 이해를 돕기 위해 점선으로 둘러싸인 초전도박막 내에 가상의 스위치를 도시하였다. (b)에서는 회전자극에서 나오는 자속에 의해 초전도박막에 상전도영역이 형성된다. 상전도영역이 초전도박막으로 진입하는 순간 자계

스위치는 전기적으로 열리게 된다. (c)에서 상전도영역이 초전도박막 내부로 완전히 진입하면 (b)에서 열린 자계스위치는 초전도상태로 회복되어 다시 닫힌다. (d)에서 상전도영역이 초전도박막을 벗어나려는 순간에 나머지 자계스위치가 열리게 되어 초전도박막과 초전도부하로 구성된 폐회로 내에는 상전도영역을 통과하는 총자속량만큼이 채교되어 남아있게 된다. 채교된 자속량만큼 유기기전력이 발생하여 초전도부하에 전류를 충전한다. 회전자의 회전에 의해 상전도영역은 일정한 속도로 (a), (b), (c), 및 (d)의 과정을 반복하게 되므로 채교되는 자속은 자계스위치의 동작에 의해 계속해서 증가하게 된다. 전원장치의 동작이 계속되는 한 시스템 내부 자속량의 변화는 계속해서 유기기전력을 발생시키고 초전도부하에 전류를 충전하게 된다. 또한, 회전자의 동작을 중지하고 여자기의 전류를 없애면 자계스위치는 더 이상 동작하지 않으므로 초전도전원장치 시스템은 영구전류 운전모드로 동작하게 되어 더 이상의 전원공급 없이 초전도부하를 운전시킨다. 초전도부하의 에너지를 소비하기 위해서는 회전자의 방향을 바꾸어 자계스위치의 동작 모드를 반대로 하면 방전모드 운전이 가능하며 본 시스템은 충전, 영구전류 및 방전 모드 동작이 아주 용이하다.

### 3. 모델링 및 해석조건

설계한 전원장치의 구조와 유한요소해석을 위한 모델링 및 요소분할을 그림 3에 나타내었다. 본 기기는 상·하 두개의 여자기로 초전도박막에 자속을 공급하므로, 이 두 여자기 모두를 모델링에 포함시켰다. 회전축을 z축으로 하고 회전축의 중심을 원점으로 하였다. 그림 3의 (b)와 같이 전원장치의 1/4을 모델링하여 해석대상으로 삼았다. 초전도박막으로 최대 자속이 공급되도록 상·하 각 여자기의 전류방향은 반대이며 10A에서 50A 사이의 여자전류에 대한 해석을 수행하였다. 표 1은 경계조건을 나타내는데, 외각면은 전원장치 외각의 헬륨층을 포함한 해석대상의 최외각 경계부분을 말하고 분할면은 전원장치를 1/4로 분할한 경계면을 의미한다. 표 2는 전원장치의 주요 제원을 나타낸다.

자성체의 자화특성은 비선형이며 이 특성은 또한 재료의 온도에 따라 달라진다. 저온초전도전원장치의 동작온도인 4.2K에서의 자화특성을 측정하여 이 값을 바탕으로 비선형 정자계 유한요소 해석을 하였다. 온도에 따른 연철(S45C)과 무방향성 규소강판(SN-18)의 자화특성을 그림 4에 나타내었다.

표 1 자장해석의 경계조건

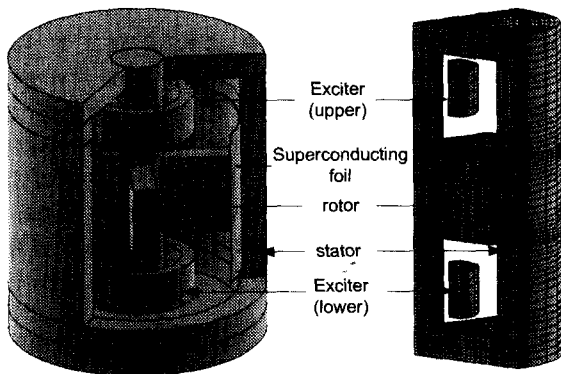
Table 1 Boundary condition of magnetic analysis

구분	경계조건	비고
외각면	Dirichlet boundary condition	$\hat{n} \times \vec{A} = \vec{P}$
분할면	Neumann boundary condition	$\hat{n} \times (\nabla \times \vec{A}) = 0$

표 2 전원장치의 주요 제원

Table2 Specifications of superconducting power supply

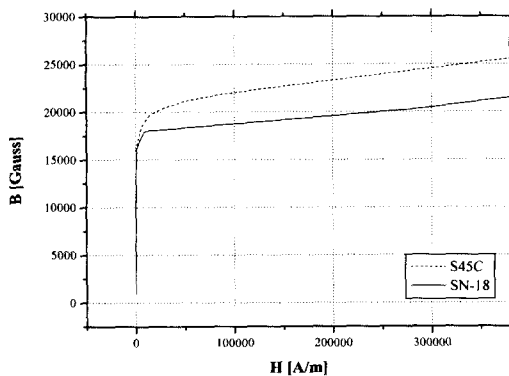
구 분		제 원
회전자(rotor)	재 질	연철(S45C)
	축 외 경	30 mm
	축방향 길이	180 mm
	자 극 외 경	110 mm
	자 극 폭	14 mm
	자 극 높 이	50 mm
	자 극 수	4 극
고정자(stator)	재 질	무방향성 규소강판 (SN-18)
	내 경	120 mm
	외 경	150 mm
	높 이	180 mm
여자기(exciter)	재 질	NbTi/Cu
	권 선 수	192 turns
	내 경	50 mm
	외 경	66 mm
	높 이	25 mm
초전도박막 (superconducting foil)	재 질	Nb
	두께	50 μm
	높 이	100 mm



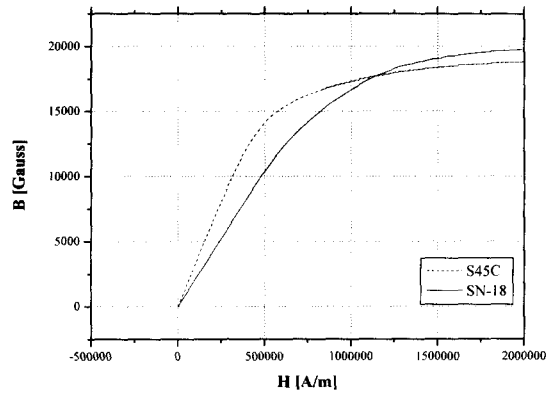
(a) Total system design (b) Generated mesh

그림 3 해석모델 및 유한요소분할

Fig. 3 Analytic model and finite element meshes



(a) At room temperature



(b) At 4.2K

그림 4 온도에 따른 연철과 규소강판의 자화특성

Fig. 4 Magnetic properties of soft iron and silicone steel sheet

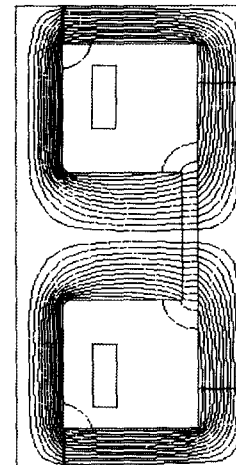


그림 5 x-z 평면의 자속선 분포

Fig. 5 Distribution of the flux lines on x-z plane

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

##### 4.1 초전도전원장치의 자속밀도분포

본 시뮬레이션의 주요 해석대상은 자계트리거 스위치 역할을 하는 초전도박막의 자속밀도 분포와 초전도 폐회로에 쇄교되는 자속량의 계산이다. 상·하 여자기에 의한 자속이 회전자극을 통하여 전달되어, 고정자에 부착된 초전도박막을 부분적으로 켜치시키고 회복시킨다. 고정자와 회전자를 통하는 자속경로가 형성됨을 그림 5의 자속선 분포로 확인할 수 있었다.

그림 6은 초전도박막의 자속밀도 분포를 나타낸다. 자극과 마주보는 부분의 자속밀도가 가장 크며 이 부분의 분포는 비교적 균일한 것으로 관찰된다. 여자전류가 10, 20, 30, 40, 50A일 때 최대자속밀도는 각각 2257, 2899, 3381, 3772, 4115Gauss이다. 초전도박막인 Nb의 임계자속밀도는 0.2T로 이 값 이상의 자속이 박막으로 전달되는 부분에서 상전도영역이 형성된다.

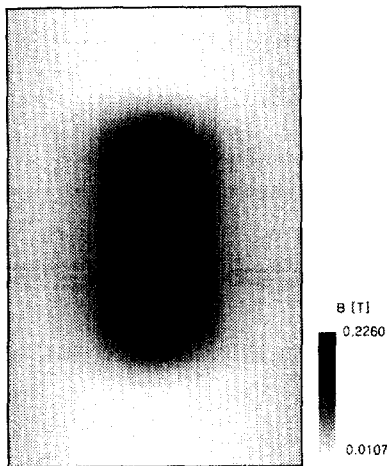


그림 6 초전도박막의 자속밀도 분포  
 Fig. 6 Distribution of the magnetic flux density on superconducting foil

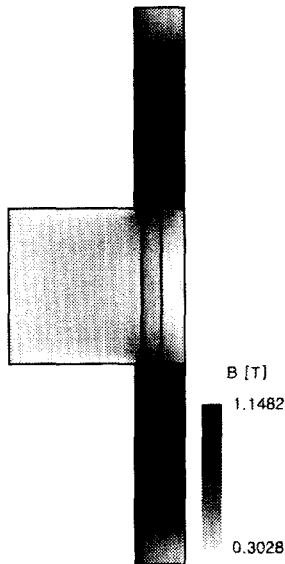


그림 7 회전자의 자속밀도 분포  
 Fig. 7 Distribution of the magnetic flux density on rotor

그림 7은 회전자의 자속밀도 분포를 나타낸다. 축과 회전자극이 만나는 부분에서 모서리효과(edge effect)에 의한 자속집중을 관찰할 수 있었으나 자극의 끝부분에서는 거의 일정한 자속밀도 분포를 나타내는 것을 역시 확인할 수 있었다.

본 논문에서 해석한 전원장치는 고정자와 회전자 사이에 0.5mm, 회전자극과 초전도박막 사이에 5mm의 공극이 있다. 공극에서의 자속누설을 줄일수록 초전도박막의 상전도영역을 증가시켜 채교되는 자속량을 증가시킬 수 있다. 이러한 조건으로 볼 때 공극에서의 누설자속을 최소화시키는 방향으로 전원장치를 설계하여야 한다. 그런데, 저온초전도전원장치는 극저온 냉매인 액체헬륨 속에서 회전운동을 한다. 이 회전운

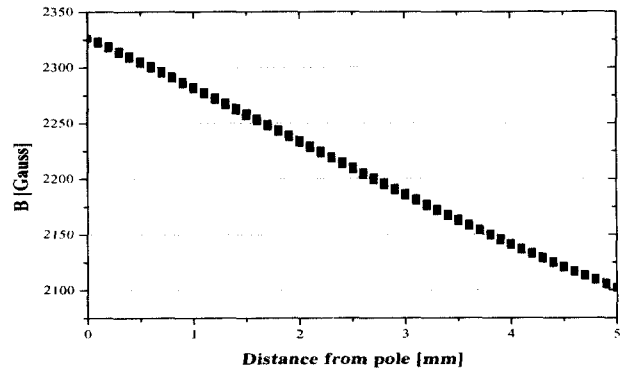


그림 8 자극중심과 고정자 사이 공극에서의 자속밀도 분포  
 Fig. 8 Distribution of magnetic flux density in the air gap between center of pole and stator

동에 의해 발생하는 기포, 기계적 마찰열 등이 초전도 기기의 안정도에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있으므로 기포발생 등을 줄이기 위해서 고정자와 회전자 사이의 이격거리가 어느 정도 확보되어야 한다. 이러한 이유로 회전자극과 초전도박막 사이에 5mm의 공극을 두었으며 슬롯이 없는 고정자 구조를 선택하였다. 이 공극에서의 자속밀도 분포를 그림 8에서 나타내었다. 자속밀도가 선형적으로 감소하였으며 고정자에 전달된 자속밀도는 5.37% 감소하였다. 고정자에 슬롯이 없기 때문에 누설자속 증가에 의한 유효단면적의 증가로 공극의 자속밀도가 감소하게 된 것으로 생각된다. 만일 냉매를 사용하지 않는 전도냉각으로 전원장치를 제작한다면 공극에서의 자속밀도 감소를 줄일 수 있을 것이다.

#### 4.2 초전도박막의 자속밀도 분포

그림 9는 여자전류 10A일 때 초전도박막의 자속밀도 분포를 나타낸다. 그림에서 자속밀도 0.2T 이상인 부분은 초전도박막의 상전도영역이 될 것이며 이 영역은 자극단면적의 83%였다. 여자전류가 20A, 30A, 40A, 50A 인 경우의 상전도영역 면적은 각각 자극단면적의 135%, 171%, 201%, 224%였다.

표 3은 여자전류에 따른 상전도영역의 자기장분포를 나타낸다. 여자전류의 증가에 따라 자속밀도가 조금씩 포화되는 경향을 나타낼 수 있었다. 0.2T 이상의 자속을 초전도박막으로 공급하기 위해서는 여자기에 지속적으로 전류를 공급하여야 한다. 상전도체로 여자기를 제작할 경우 저항에 의한 발열로 초전도 시스템에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있으므로 저온초전도체인 NbTi 선재를 사용하여 여자기를 사용하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 극저온에서 자화특성은 상온의 특성과 달리 매우 높은 자계강도에서 포화되므로 권선 수 192회의 여자기에 50A의 전류를 흘렸을 때에도 뚜렷한 자기포화현상이 나타나지 않았다 [7].

#### 5. 시뮬레이션과 실험 결과의 비교

그림 10은 제작한 저온초전도전원장치의 실험결과 중 홀센

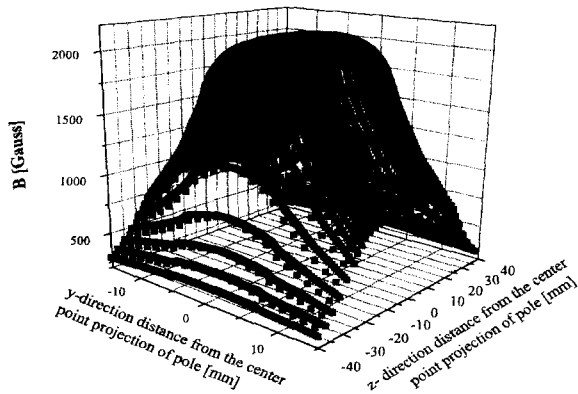


그림 9 여자전류 10A에서 초전도박막의 자속밀도 분포  
Fig. 9 Distribution of the magnetic flux density on superconducting foil at excitation current of 10A

표 3 여자전류에 따른 상전도영역의 자속분포  
Table3 Distribution of the magnetic flux in normal spot versus excitation current

여자전류 A	평균자속밀도 Gauss	상전도영역의 면적 m2	자속량 Wb
10A	2243	$5.80 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-4}$
20A	2834	$9.43 \times 10^{-4}$	$2.67 \times 10^{-4}$
30A	3263	$1.20 \times 10^{-3}$	$3.92 \times 10^{-4}$
40A	3602	$1.41 \times 10^{-3}$	$5.08 \times 10^{-4}$
50A	3919	$1.57 \times 10^{-3}$	$6.15 \times 10^{-4}$

서로 측정된 자속밀도를 나타낸다. 초전도박막 높이의 중앙에 홀센서를 위치시켰으며 측정 시의 회전자 속도는 5rpm이었다. 홀센서는 자속의 입사각에 따라 측정값이 변하며, 자속이 센서 표면에 수직으로 입사할 때 가장 정확한 값을 나타낸다. 그러므로 본 실험에 의한 홀센서 측정값은 최대값이 가장 정확하다. 실험에 의한 자속밀도값도 여자전류 증가에 따라 비례하지 않고 조금씩 포화하는 경향을 나타내었다.

그림 11과 12에서 시뮬레이션 결과를 실험값과 비교하였다. 그림 11의 최대자속밀도 비교에서 시뮬레이션값과 실험값의 차이는 수 십Gauss 정도로 평균오차는 1.19%였다. 실험에 따라 이 정도의 편차는 생길 수 있으므로 본 시뮬레이션이 성공적으로 수행되었다고 생각된다. 최대 오차는 여자전류 10A에서 75Gauss였다.

그림 12는 상전도 영역의 평균자속밀도 비교를 나타낸다. 이 비교에서는 수 백Gauss 이상의 차이를 나타내는데 그 이유는 위에서 언급한 것과 같이 자속의 입사각에 따른 홀센서의 감도차이로 생각된다. 또한 자속밀도의 평균값에서는 여자전류에 따라 포화하는 정도가 더 작아데 그 이유는 여자전류가 증가함에 따라 상전도 영역의 면적이 증가하기 때문이다.

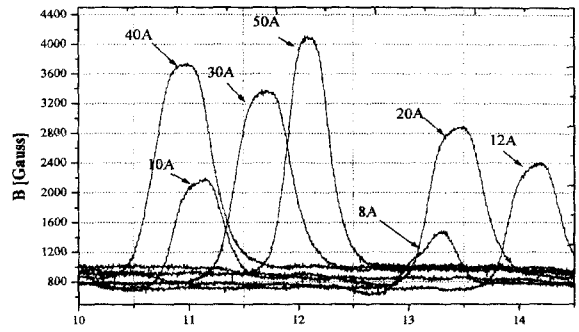


그림 10 홀센서로 측정된 여자전류에 따른 자속밀도 분포  
Fig. 10 Distribution of magnetic flux density versus excitation

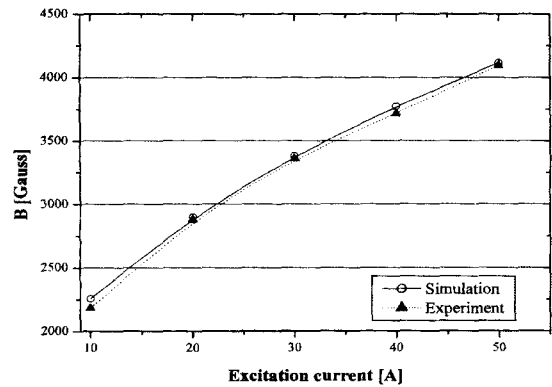


그림 11 여자전류에 따른 초전도박막의 최대 자속밀도  
Fig. 11 Maximum magnetic flux density on superconducting foil versus excitation current

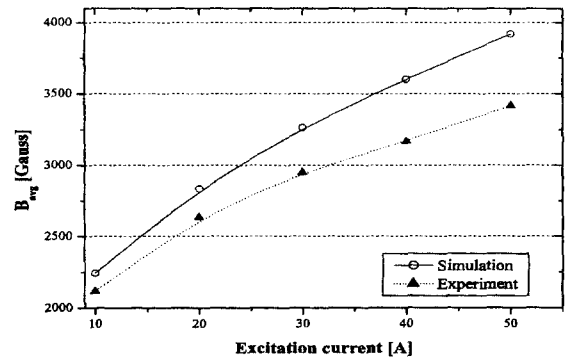


그림 12 여자전류에 따른 상전도영역의 평균자속밀도  
Fig. 12 Average of magnetic flux density in the normal spot versus excitation

## 6. 결 론

본 논문은 회전자속형 저온초전도전원장치의 3차원 정자계 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 여자전류 10A에서의 상전도영역은 자극단면적 보다 작으며 이 면적은 여자전류 20A 이상에서 자극단면적 보다 커진다.

- (2) 공극거리에 따라 전달되는 자속의 양이 감소하므로 시스템구조를 고려한 적절한 공극선정이 필요하다.
- (3) 극자극에서 자성체의 자화특성을 상온에서의 특성과 비교하면 작은 비투자율을 가지며 매우 큰 자계강도에서 포화된다.
- (4) 여자전류가 증가함에 따라 초전도박막의 상전도영역이 증가하나 전류에 정비례하지 않는다.
- (5) 본 논문의 해석결과는 선원장치 뿐 아니라 액체헬륨을 냉매로 사용하는 초전도회전기기 등의 설계 요소로 활용될 수 있다.

**감사의 글**

본 연구는 한국전력공사 지원 전력기술기초연구에 의해 지원 받았습니다.

**참 고 문 헌**

- [1] Tae Kuk Ko and Osman K. Mawardi "Parametric representation of a superconducting high-current generator", Magnetics, IEEE Transactions on , Volume: 25 Issue: 5, pp. 4346-4349, sept. 1989
- [2] David K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, Addison Wesley, pp. 226-234, 1989
- [3] Jianming Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley & Sons, pp.151-158, 1993
- [4] Q. S. Ma, K. R. Shao and J. D. Lavers, "Axisymmetrical Magnetostatic Field Computation by a Hybrid Finite Element-Series Method", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp. 4314-4316, September 1996
- [5] Rose-Innes and E. Rhoderick, Introduction to Superconductivity, Oxford : Pergamon Press, pp. 3-15, 1992
- [6] Joonhan Bae, Yunsang Oh, Sangjin Lee, Tae Kuk Ko, "The Design, Manufacture and Characteristic Experiment of a Superconducting Excitation Coil". IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol7, No. 2, pp. 672-675, June 1997
- [7] Richard M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE Press, pp. 56-60, 476-479, 1993

**저 자 소 개**



**배 덕 권 (裵德權)**

1971년 8월 16일 생, 1998년 광운대학교 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정  
 Tel: 02-2123-2772, Fax: 02-393-2834  
 E-mail: porthos@yonsei.ac.kr



**윤 용 수 (尹 庸 銖)**

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1995년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학석사, 2001년 동 대학원 전기전자공학과 공학박사, 1985년~1998년 대우전자 전장개발1팀장, 현재 안산공과대학 전기과 조교수  
 Tel: 031-490-6151  
 E-mail: ysyoon@intra.ansante.ac.kr



**이 찬 주 (李 燦 周)**

1972년 2월 20일생, 1995년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정  
 Tel: 02-2123-2772, Fax: 02-393-2834  
 E-mail: coldzoo@yonsei.ac.kr



**김 호 민 (金 鎬 民)**

1970년 8월 23일생, 1995년 제주대학교 전기공학과 졸업, 1998년 연세대학교 대학원 전기공학과 공학석사, 2002년 동 대학원 전기전자공학과 공학박사, 현재 MIT 대학 Francis Bitter Magnet Lab 박사 후 연구과정  
 Tel: 02-2123-2772, Fax: 02-393-2834  
 E-mail: homin@yonsei.ac.kr



**이 상 진 (李 相 鎭)**

1962년 03월 03일생, 1988년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1991년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 1995년 동 대학원 전기공학과 공학박사, 현재 위덕대학교 전기공학과 조교수  
 Tel: 054-760-1662, Fax: 054-760-1669  
 E-mail: sjlee@uiduk.ac.kr



**고 태 국 (高 太 國)**

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve University 공학석사, 1986년 동 대학원 공학박사, 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학 교수, 현재 초전도·저온공학회 총무이사  
 Tel: 02-2123-2772, Fax: 02-393-2834  
 E-mail: tkko@yonsei.ac.kr