

유한요소법을 이용한 저온초전도전원장치의 자기장분포 해석

배덕권*, 윤용수**, 김호민*, 안민철*, 김영식*, 한태수***, 고태국*
 연세대학교 전기전자공학과*, 안산공과대학 전기과**, 기술표준원***

Analysis on the Magnetic Field Distribution of Low-Tc Superconducting Power Supply Using Finite Element Method

Duck Kweon Bae, Yong Soo Yoon, Ho Min Kim, Min Cheol Ahn, Yeong Sik Kim, Tae Su Han and Tae Kuk Ko

Dept. of Electrical and Electronic Engin., Yonsei Univ.*,

Dept. of Electric Engin., Ansan College of Technology**, Agency for Tech. and Standards***

Abstract - Magnetic field distribution of rotating flux type Low-Tc superconducting(LTS) power supply with respect to the applied current on exciters is investigated in detail by using Finite Element Method(FEM). LTS power supply consists of two exciters, a rotor, a stator and superconductor foil attached to the inner surface of the stator and LTS load. The current pumping of LTS power supply is induced by partial-quenching and recovery of superconductor foil. For this reason, magnetic flux density on superconductor foil must be sufficiently greater than the its critical magnetic density. In this analysis, the normal spot on superconductor foil appears more than 10A of excitation current. The results of this analysis are calculated and compared with the experimental results.

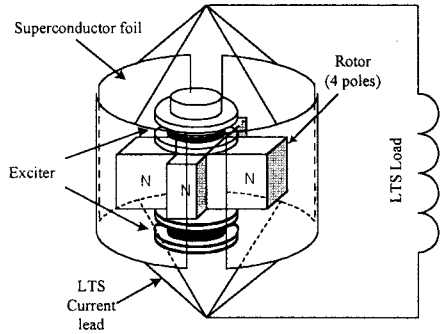


그림 1 회전자속형 초전도전원장치의 구조

Fig. 1 Schematic of rotating flux type LTS power supply

1. 서 론

고자장을 필요로 하는 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage), MRI(Magnetic Resonance Imaging), NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 등은 초전도자석을 이용하므로 상용화가 가능하다. 초전도자석은 고자장을 발생시키는 장점 외에 고전동자장도 구현할 수 있다.

그러나, 현재 상용화되어있는 초전도자석은 상전도전원장치를 이용하여 전류를 충전하기 때문에 발생하는 초전도체와 상전도체간의 접합으로 인하여 전체적인 시스템의 안정도가 저하되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점은 동일한 저온조(cryostat)에 장착할 수 있는 초전도전원장치를 사용하므로 개선이 가능하다. 이러한 요구에 의해 여러 종류의 초전도전원장치에 대한 연구가 수행되었다[1]-[2].

최적의 저온초전도전원장치 설계기술을 확립하기 위해서는 자기장 분포해석, 스위칭 특성해석, 초전도접합기술 확립 등이 필요하다.

대표적인 초전도전원장치는 고정자속형과 회전자속형으로 구분할 수 있다. 고정자속형은 히터 등의 열을 이용하여 초전도전체를 부분적으로 퀸치/회복시키고, 회전자속형은 여자기에서 공급되는 회전자속을 이용하여 초전도박막을 부분적으로 퀸치/회복시켜 전류펌핑이 이루어지도록 설계한다.

본 논문에서는 회전자속형 초전도전원장치를 대상으로 하여 유한요소법을 이용한 2차원의 자기장분포를 해석을 실시하였다. 또한 해석 결과를 실험 결과와 비교하므로 시뮬레이션의 적합성을 검증하였다.

2. 초전도전원장치의 원리

2.1 동작 원리

그림 1은 저온초전도전원장치의 구조를 보여주고 있다. 상·하 두 개의 여자기에 의하여 발생된 자기장은 4극 회전자를 통하여 고정자에 부착된 초전도박막을 투과한다. 투과된 자기장에 의하여 초전도 박막에서 기전력이 유기되며, 이 기전력으로 발생한 전류가 초전도부하 충전되므로 전류펌핑이 가능하다. 제작된 여자기와 초전도부하에는 NbTi 선재, 초전도박막에는 Nb 박막, 회전자에는 탄소강, 고정자에는 실리콘강이 각각 사용되었다.

초전도박막에 인가되는 자속밀도는 Nb의 임계자속밀도인 0.2T보다 커야 부분퀸치가 가능하게 된다.

2.2 자기장분포해석 이론

벡터포텐셜 \vec{A} 를 정자계해석의 변수로 하면 자속밀도 B는

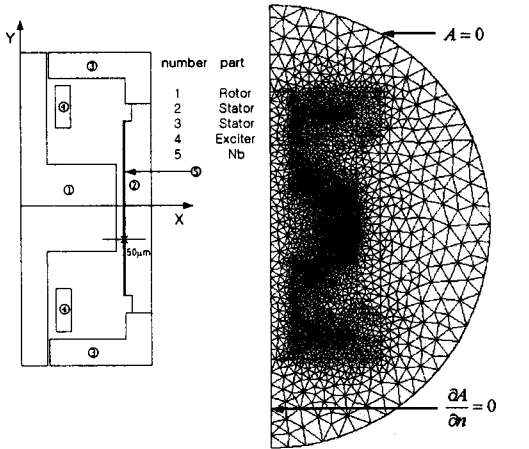
$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{1}$$

이 되고, 기본방정식은

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \tag{2}$$

$$\vec{j} = \vec{j}_o + \vec{j}_e = \vec{j}_o - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V$$

여기서 H 는 자기장의 세기, J 는 총 전류밀도, J_o 는 전류밀도, J_e 는 유도전류밀도, V 는 전위차이다.



(a) Analytic model (b) Finite element mesh

그림 2 해석 모델과 유한요소 분할
Fig. 2 Analytic model and finite element mesh

$\vec{B} = \mu \vec{H}$ 임으로, 지배방정식은

$$\nabla^2 \times \vec{A} = \vec{j} \quad (3)$$

여기서 μ 는 투자율이다.
2차원해석에서 z축 성분의 J만 고려하고 정전계해석을
을 고려하면 지배방정식은

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) = -J_z + \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \quad (4)$$

가 된다.
초전도전원장치의 회전자 축을 y축으로 여자기, 고정
자, 회전자 및 초전도박막을 모델링하였다. y축 대칭 구
조이며 대칭축의 경계조건은 $\partial \vec{A} / \partial n = 0$ 인 Neumann
경계조건, 외각경계조건은 $A=0$ 인 Dirichlet 경계조건
을 인가하였다. 그림 2에 이상화모델의 결과 및 유한요
소 분할을 나타내었다.
여자기에 인가하는 전류의 크기에 따라 전원장치의 자
속경로를 순환하는 자기장의 크기가 결정된다. 인가한
여자전류의 범위는 0A~50A이며, 각 인가 전류별 수치
해석 결과로 전원장치 자기장분포 해석을 수행하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 자기장분포

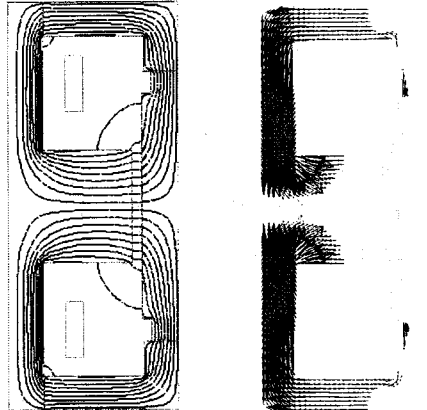
Nb의 임계자속밀도는 0.2T이며, 이 자속밀도를 얻기
위해서는 10A 이상의 여자전류를 인가하여야 함이 해석
결과 확인되었다.
여자기에 30A의 전류를 인가하였을 때의 자속선분포
를 그림 4의 (a)에 나타내었다.
고정자와 회전자 축 사이의 0.5mm 틈에서 자기장의
누설이 관측된다. 설계상의 주요 자속경로는 회전자에서
초전도박막 쪽이고 누설된 정도가 미약하므로 이 누설이
시스템 성능에 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.
회전자의 가장자리로 갈수록 자속선 간격이 커지고,
가장자리 부근에서 자속선이 번져 가는 것을 관측할 수
있다. 그러므로 회전자의 면적보다 큰 면적의 상전도영
역을 얻기 위해서는 10A 보다 큰 여자전류가 필요할 것
이며, 가장자리 부근에서 자속밀도의 감소하기 시작할

것을 예측할 수 있다.
그림 4의 (b)는 여자기에 의해 발생된 자기장이 회전
자를 거쳐 초전도박막 쪽으로 향하는 자기장벡터의 분포
를 보여주고 있다.

3.2 자속밀도분포

그림 4는 저온초전도전원장치의 B-I 곡선을, 그림 5
는 상전도영역의 평균자속밀도를 보여주고 있다. 시뮬레
이션 결과가 실험결과보다 크며 이 차이는 평균자속밀도
에서 더 크게 나타났다. 이 원인은 자속밀도 측정에 사
용된 홀센서의 특성과 회전자의 속도 때문이라 생각된
다. 실험에서 자속밀도는 초전도박막에 부착된 홀센서로
측정하였다. 홀센서는 자기장의 입사각에 따라 감도가
달라진다. 자기장은 x, y 두 방향으로 존재한다고 가정
하였고, 자기장을 발생하는 자극이 회전하고 있으므로
홀센서로 입사하는 자기장의 작은 수직 성분만 있는 것
이 아니다. 그러므로 홀센서는 초전도박막을 투과하는
자속밀도를 100% 감지하지 못한다. 본 2차원 자기장분
포 해석에서는 회전자의 회전에 대한 영향을 고려하지
않았으나, 향후 회전자의 회전속도를 고려한 3차원 자기
장분포해석을 하게되면 이러한 차이에 대한 완전한 규명
을 할 수 있을 것으로 생각된다.

자속밀도분포 해석 결과 여자전류 20A 이후에서 자기
포화현상을 관찰할 수 있었다. 일반적인 탄소강과 실리
콘강의 경우 상온(300K)에서는 1T 이상에서 자기포화
현상이 나타나 극저온으로 내려갈수록 자기포화점이



(a) Flux line distribution (b) Field vector distribution

그림 3 자기장분포
Fig. 3 Magnetic field distribution

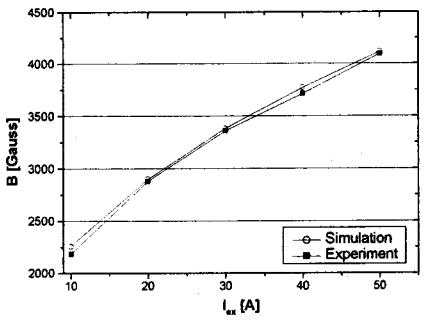


그림 4 저온초전도전원장치의 B-I 곡선
Fig. 4 B-I curves of LTS power supply

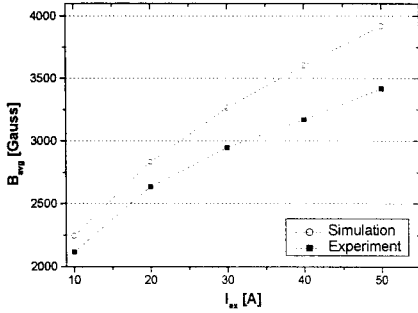


그림 5 여자전류에 따른 상전도영역의 평균자속밀도
Fig. 5 The average of magnetic flux density in normal spot area versus excitation current

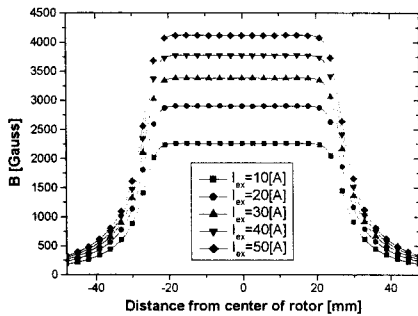


그림 6 초전도박막의 자속밀도분포
Fig. 6 Magnetic flux density distribution on superconductor foil

낮아지므로 이러한 현상이 나타난 것으로 생각된다. 본 실험에서는 액체헬륨을 냉매로 사용하여 4.2K의 온도를 유지하였으며, 이때 회전자와 고정자에 사용된 철심에서 약 0.28T 이후에서 자기포화가 발생되었다[3].

여자전류 10, 20, 30, 40, 50A일 때의 평균자속밀도는 각각 2243, 2834, 3263, 3602, 3919Gauss이다.

그림 6은 초전도박막으로 투과되는 자속밀도분포를 보여주고 있다. 초전도박막과 인접한 회전자 부분의 길이는 50mm이며 초전도박막과의 거리는 4mm이다. 회전자 중심에서 약 20mm까지는 균등한 자속밀도분포를 나타내나, 이후에서는 자속밀도가 지수적으로 급격히 감소한다. 그림 3에서 알 수 있는 것과 같이 회전자의 가장자리 부근에서 자속선이 변저 가는 현상이 있으므로 이러한 자속밀도분포가 이루어졌을 것으로 생각된다. 이러한 감소는 회전자와 초전도박막의 거리를 줄이면 가능하다. 또한 자속밀도가 감소하기 이전에 조금 증가하는 현상이 나타남을 알 수 있었다.

회전자 중심에서 최단거리인 초전도박막의 자속밀도는 여자전류 10, 20, 30, 40, 50A일 때 각각 2257, 2599, 3381, 3771, 4115Gauss이다.

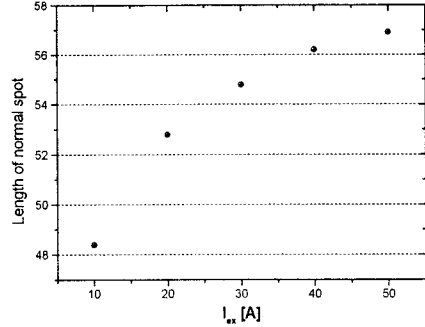


그림 7 여자전류에 따른 상전도영역 폭
Fig. 7 Length of normal spot versus excitation current

그림 7은 여자전류에 따른 상전도영역의 폭을 보여주고 있다. 그림 3의 (a)에서 예측했던 바와 같이 여자전류가 10A일 때에는 상전도영역의 길이가 회전자의 길이보다 작았으며 여자전류 15A 이후에서 상전도영역의 폭이 회전자의 길이보다 커졌다. 상전도길이가 여자전류에 따라 증가하기는 하지만 이 또한 여자전류의 증가에 따라 포화되는 현상을 나타내었다.

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 회전자속형 저온 초전도전원장치의 자기장분포해석을 실시하였다. 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시뮬레이션 결과를 실험결과와 비교하였을 때 본 자기장분포해석을 성공적으로 수행되었다.
- (2) 여자전류 10A 이상에서 초전도박막에 상전도영역이 나타난다.
- (3) 0.28T 이후에서 자기포화현상이 나타난다.
- (4) 초전도박막에서 자속밀도가 일정한 면적은 회전자의 면적보다 작으며, 자속밀도가 조금 증가한 후 감소하기 시작한다.
- (5) 여자전류가 증가함에 따라 초전도박막의 상전도영역이 증가하나 전류에 정비례하지 않고 포화되는 현상을 나타낸다.

(참 고 문 헌)

- [1] L. J. M. van de Klundert and H. H. J. ten Kate, "Fully Superconducting Rectifiers and Flux Pumps", *Cryogenics*, Vol. 21, pp. 195-206, 1981.
- [2] T. K. Ko and O. K. Mawardi, "Parametric Representation of a Superconducting High-Current Generator", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 25, no. 5, pp. 4346-4349, September, 1989.
- [3] R. Bozorth, *Ferromagnetism*, IEEE Press, New York, pp. 49-60, 1993.