

Characteristic Analysis and Experiments on Components of Low-Tc Power Supply

尹庸銖* · 朱敏皙** · 高太國***
(Yong Soo Yoon · Min Seok Joo · Tae Kuk Ko)

Abstract - This paper deals with characteristic analysis and experiments on components of low-Tc(LTS) power supply. A LTS power supply consists of two exciters, a rotor, a stator, and an LTS magnet. The power supply has eight rotating poles, which make rotational magnetic flux. These flux penetrate superconducting sheets and cause currents which charge an LTS load. In this experiment, a 25.8mH LTS magnet was used, and rotor revolutions from 30 to 300rpm were used. In order to measure the pumping-current with respect to the magnet flux changes, a hall sensor was installed at the center of the LTS magnet. The experimental observations have been compared with the theoretical predictions. In this experiment, the pumping-current has reached about 372A.

Key Words : LTS power supply, exciter, rotor, LTS magnet, pumping-current

1. 서론

초전도자석을 사용하는 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage), MRI(Magnetic Resonance Imaging) 등의 초전도전력기기들의 전원공급원으로 상전도전원장치를 사용하면 열손실 등의 에너지 손실과 영구전류 운전의 어려움 등이 따른다. 그러나 기존의 상전도전원장치를 초전도전원장치로 대체하여 초전도부하를 충전시킬 경우 상전도체와 초전도체간의 접합을 피할 수 있어 접촉저항에 의한 열 손실을 제거할 수 있고, 크기를 줄일 수 있으며 전체적인 시스템의 안정도를 향상시킬 수 있다. 이러한 이유로 여러 연구그룹에서 초전도전원장치를 제안하고, 개발하여 왔다 [1]-[2].

또한 이러한 관점에서 1.8mH 용량의 초전도자석에 전류를 공급할 수 있는 소용량급 저온초전도전원장치가 개발하고 실험을 완료하였다 [3]. 본 연구에서는 상용화에 보다 근접하기 위하여 25.8mH 용량의 초전도자석에 충전이 가능한 저온초전도전원장치를 설계, 제작하고 성능을 평가하는 것을 목적으로 하고 있다.

그림 1(a)은 전체적인 시스템의 개략도를 보여주고 있으며 그림 1(b)에서는 25.8mH 초전도부하에 충전이 가능하도록 제작된 시스템의 사진을 볼 수 있다.

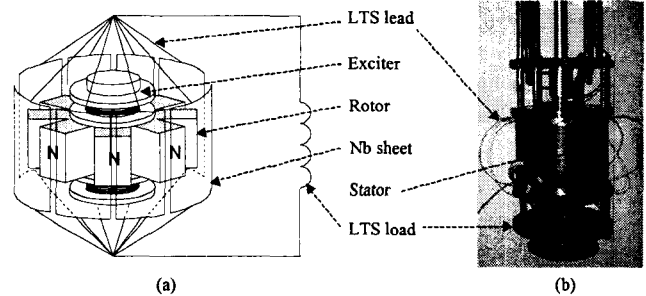


그림 1 저온초전도전원장치 시스템의 구조도와 사진
Fig. 1 Schematic overview and assembled system of the LTS power supply

제작된 저온초전도전원장치는 여자기(exciter)에서 공급된 자속이 8극의 회전자(rotor)를 통하여 회전자속을 발생시키며 발생된 회전자속은 niobium박막으로 제작된 8장으로 구성된 초전도박막(Nb sheet)을 각각 투과하여 초전도상태를 상전도상태로 전이하는 역할을 한다. 이 과정에서 펌핑전류가 발생되며 초전도연결선(LTS lead)을 통하여 초전도부하에 충전하게 된다.

저온초전도전원장치의 동작 특성을 명확히 규명하고 이론적으로 설계파라미터의 도출을 위하여 8장의 초전도박막을 직렬과 병렬의 2가지 구조로 결선 하여 실험을 실시하였으며 초전도전원장치의 해석을 위하여 전기적 등가모형을 이용한 지배방정식을 도입하였다. 최종적으로 지배방정식에 유한차분법을 이용하여 수치해석을 실시하였으며 실험 결과와 비교하여 이론적으로 검증하였다.

* 正會員 : 安山工科大学 電氣科 助教授 · 工博
** 正會員 : 安山工科大学 電氣科 兼任教授 · 工博
*** 正會員 : 延世大學校 電氣 · 電子工學科 教授 · 工博
接受日字 : 2003年 4月 7日
最終完了 : 2004年 1月 8日

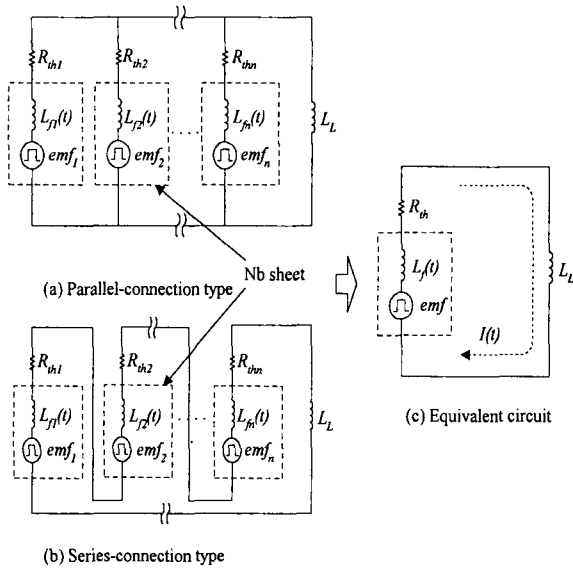


그림 2 저온초전도전원장치의 전기적 등가회로
Fig. 2 Equivalent electric circuit of the LTS power supplies

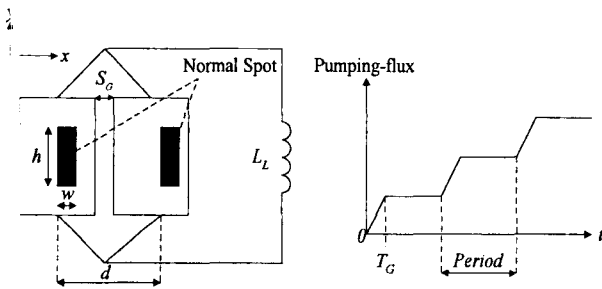


그림 3 단순화된 모델과 자속펌핑 패턴
Fig. 3 Simplified model and pumping-flux pattern

2. 저온초전도전원장치의 동작 원리 및 특성해석

외부에서 자속밀도 B_a 을 인가하고 초전도 링을 임계온도 이하로 냉각하였을 때 링으로 둘러싸인 면적을 A 라고 하면 링을 통과하는 자속은 $\phi = AB_a$ 라고 할 수 있다. 여기서 외부자속의 값이 변화하면 전자유도법칙에 따라 유도되는 유기기전력 및 전류는 다음과 같다.

$$- \frac{d\Phi}{dt} = -A \frac{dB_a}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

R, L = 초전도 링의 총 저항 및 인덕턴스

초전도회로가 아닌 일반 상전도회로에서는 발생된 유도전류가 바로 사라지게 된다. 그러나 초전도 회로에서는 저항 $R=0$ 이므로 초전도회로의 경우 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$- A \frac{dB_a}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

식(2)에 적분을 실시하면 다음과 같다.

$$Li + AB_a = \text{Constant} \quad (3)$$

식(3)에서 좌변은 초전도 링의 총 자속이다. 즉, 좌변의 첫째 항은 회로 내에 유기 되는 전류에 따른 자속량이고 둘째 항은 외부에서 인가된 자계에 따른 자속량이다. 따라서 초전도회로의 경우 회로를 지나가는 총 자속은 변하지 않는다는 자속보존의 법칙이 증명되었다. 초전도회로의 전류는 영구전류이기 때문에, 초기 자속량은 계속 지속된다 [4].

초기자속량 지속에 따른 초전도전원장치의 전류펌핑의 동작 특성을 규명하기 위해서는 그림 2에서 보여지는 것과 같은 전기적 등가회로를 도입하였다.

그림 2(a)는 초전도박막을 병렬로 연결한 구조이고, 그림 2(b)는 초전도박막을 직렬로 연결한 구조이며, 그림 2(c)는 이들을 전기적 등가회로로 변환한 회로도이다. 등가회로에서 보여지는 각각의 파라미터들은 다음과 같이 정의된다.

R_{th} : 테브닌 등가저항

$L_f(t)$: 유효 인덕턴스

L_L : 부하 인덕턴스

그림 2의 등가회로에서 $R_{th1} = R_{th2} = \dots = R_{thn}$, $L_{f1}(t) = L_{f2}(t) = \dots = L_{fn}(t)$, $emf_1 = emf_2 = \dots = emf_n$ 이라고 가정하면 각각의 파라미터는 아래와 같다.

$$R_{th} = \frac{n_s}{n_p} R_{th1} \quad (4)$$

$$L_f = \frac{n_s}{n_p} L_{f1} \quad (5)$$

$$emf = n_s \times emf_1 \quad (6)$$

여기서, n_p 는 초전도박막의 병렬연결 개수, n_s 는 직렬연결 개수를 나타낸다.

그림 3은 단순화된 모델과 자속펌핑 패턴을 보여준다. 회전자는 주기적으로 회전하고 있으며 유기기전력은 파라데이 법칙으로부터 구할 수 있다. 그림 3에서 보여지는 것과 같이 각각의 초전도박막 사이에는 gap S_g 가 있으며, 회전자에 의하여 발생된 상전도부분(normal spot)의 위치가 0과 T_G 사이에 존재하게 되면 유기기전력은 인가되는 자속과 시간에 비례하게 되며, 상전도부분이 T_G 에서 각 주기의 끝지점에 위치해 있을 때에는 일정한 유기기전력을 갖는다. 따라서 한 주기 동안 발생하는 유기기전력은 다음과 같다.

$$emf_1 = \frac{\Phi \times t}{T_G} [u(t) - u(t - T_G)] + \frac{\Phi}{T - T_G} [u(t - T_G) - u(t - T)] \quad (7)$$

여기서, Φ 는 초전도박막을 통과하는 자속이고, T_G 는 자속이 초전도박막 사이의 gap을 지나는데 걸리는 시간으로

$T_G = (30 \times w) / (\pi R r \times rpm)$ 이며, w 와 h 는 각각 상전도부분의 폭과 높이이고, R_r 은 회전자의 반경이다.

그림 2(c)의 등가회로로부터 회로방정식을 도입하면 다음과 같다.

$$V = emf = R_{th} + I \frac{dL}{dt} + L \frac{dI}{dt} \quad (8)$$

여기서 $L = L_L + L_f(t)$ 이다.

펌핑전류를 구하기 위하여 식(8)에 유한차분법을 적용하면 다음과 같다.

$$I[n+1] = I[n] + L^{-1} \{ V[n] - (R_{th} + L_f)I[n] \} \Delta t \quad (9)$$

부하의 양단 전압은 식(9)을 정리하여 얻을 수 있으며 다음과 같다.

$$V_{out} = V[n] - L_f(t) \frac{I[n+1] - I[n]}{\Delta t} - (R_{th} + L)I[n] \quad (10)$$

부분품의 경우 접합저항은 측정을 통하여 어느 정도는 얻을 수 있으나, 시스템으로 제작되어 있는 경우에는 측정을 통하여 얻는 것이 매우 힘들다. 그러나 제작된 전체 시스템의 등가저항은 시스템용 영구전류모드로 운전을 실시하면 쉽게 구할 수 있다. 영구전류모드로 운전하여 얻은 결과로부터 테브넨 등가저항을 계산할 수 있으며 다음과 같다.

$$R_{th} = - \frac{L_L}{T_E - T_I} \times \log \left(\frac{I_E}{I_I} \right) \quad (11)$$

여기서 L_L 은 부하인덕턴스, T_I 와 T_E 는 각각 영구모드 시작 및 끝 시간이고, I_I 와 I_E 는 시작 및 끝 전류이다.

3. 초전도전원장치의 제작 및 실험

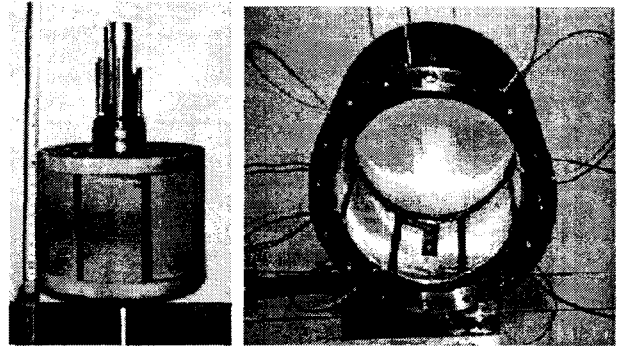
저온초전도전원장치는 액체헬륨의 온도인 4.2K에서 동작한다. 표 1은 시뮬레이션에 사용한 여자코일과 초전도부하의 파라미터이며, 표 2는 제작된 고정자와 회전자의 규격이다.

저온초전도전원장치를 구성하기 위하여 크게 고정자, 회전자, 여자기의 3부분을 제작하여 조립하였다. 고정자에는 8장의 초전도박막(Nb)을 부착하였으며 사용한 부하는 25.8mH의 초전도자석이다.

그림 4(a)는 8극을 가진 회전자를 보여주고 있으며, 그림 4(b)에서는 8장의 초전도박막이 내부에 부착된 고정자를 보여주고 있다. 각각의 박막은 NbTi 초전도 선재를 사용하여 연결하였다. 본 연구에서는 초전도박막을 각각 직렬과 병렬로 연결하여 2번의 실험을 실시하였다.

펌핑전류를 측정하기 위하여 초전도자석의 중심에 홀센서를 설치하였다. 또한 회전자에 공급되는 여자전류는 분류기를 사용하여 측정하였다.

모든 신호는 증폭 및 노이즈의 차단을 위하여 절연증폭기를 통하여 아날로그데이터프레코더에 기록되도록 구성하였으며 LAB-VIEW를 사용하여 실시간으로 측정결과를 계측하고, 제어를 실시하였다.



(a) (b)
그림 4 제작된 회전자와 고정자
Fig. 4 Manufactured rotor and stator

표 1 시뮬레이션의 파라미터

Table 1 Parameters for the simulation

파라미터	병렬연결형	직렬연결형
L_L	25.8mH	25.8mH
L_f	1.45μH	80μH
R_{th}	0.008μΩ	0.488μΩ

표 2 회전자와 고정자의 규격

Table 2 Specification of The Rotor and Stator

	파라미터	규격
회전자	재질	규소강판
	외경	200mm
	자극의 폭과 높이	10×100mm
고정자	재질	규소강판
	외경	232mm
	내경	208mm

4. 결과 및 고찰

그림 5는 시뮬레이션을 하기 위한 특성해석의 흐름도를 보여주고 있다. 회전자는 초전도박막의 임계자속밀도가 0.2T 이므로 3장의 결과에 따라 12A 이상의 여자전류를 인가하여 자계를 발생시키고 여러 가지 속도로 회전시켜 실험을 실시하였다.

그림 6과 8은 여자전류가 150A이고 회전자의 회전속도가 30rpm과 120rpm으로 각각 동작한 경우에 초전도박막의 연결을 병렬로 한 경우의 실험 결과이다.

그림 6의 실험 결과에서 30초 후에 충전전류는 30rpm에서 6.2A이고 120rpm에서 21.7A이다. 따라서 전류 펌핑율은 각각 0.21A/s, 0.72A/s 이다. 시뮬레이션 결과는 30rpm에서 0.195A/s, 120rpm에서 0.77A/s이다.

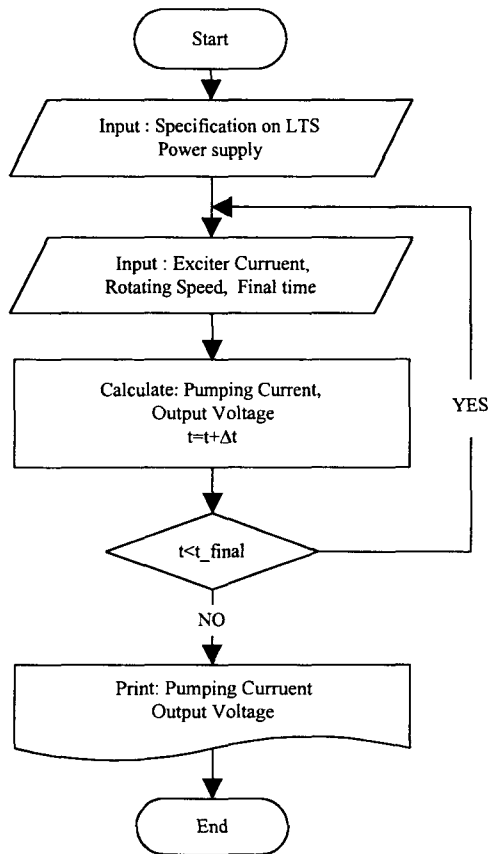


그림 5 특성해석 흐름도
Fig. 5 Flow chart for analysis of characteristics

그림 7과 9는 초전도박막을 직렬연결한 경우의 실험 결과이다. 그림 7의 실험결과에서 30초 후에 전류펌핑율은 30 rpm에서 1.63A/s 이고 120rpm에서 5.58A/s이다. 또한 시뮬레이션 결과에서는 30rpm에서 1.59A/s, 120rpm에서 6.16A/s를 얻었다.

따라서 전류펌핑율은 회전속도에 비례함을 알 수 있었다. 식(6)에 따르면 전류펌핑율은 초전도박막의 직렬연결개수에 비례하여야한다. 본 연구에서는 직렬연결개수가 8개이므로 병렬연결구조 대비 직렬연결구조의 전류펌핑율이 800%가 커져야한다. 그림 6과 7의 실험 결과를 비교하여 보면 직렬구조가 병렬구조에 비하여 780% 큰 것을 알 수 있다.

따라서 실험 결과와 수식이 거의 일치하며 펌핑전류는 초전도박막의 직렬연결개수에 비례함을 알 수 있었다.

그림 8에서 보여지는 것과 같이 실험 결과는 30rpm과 120 rpm에서 각각 7.5mV와 22mV의 출력전압을 보였으며, 시뮬레이션 결과는 6mV와 24mV의 값을 각각 나타내었다.

그림 9에서는 30rpm과 120rpm에서의 출력전압은 실험결과가 각각 49mV와 202mV이며, 시뮬레이션에서 각각 48mV와 194mV이었다. 따라서 실험결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 알 수 있으며 제안된 지배방정식은 실제 시스템을 설계, 제작할 때 사용 가능함을 알 수 있었다.

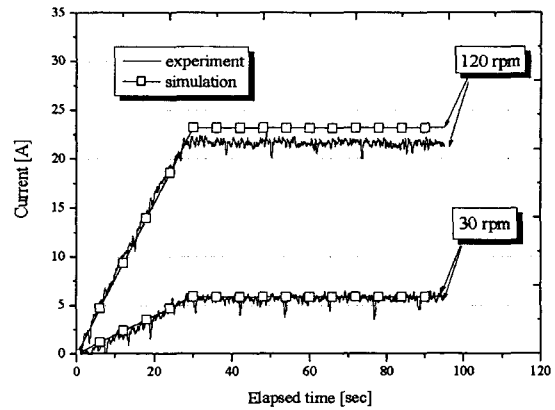


그림 6 병렬연결형의 펌핑전류 결과
Fig. 6 Pumping current results of the parallel-connected type

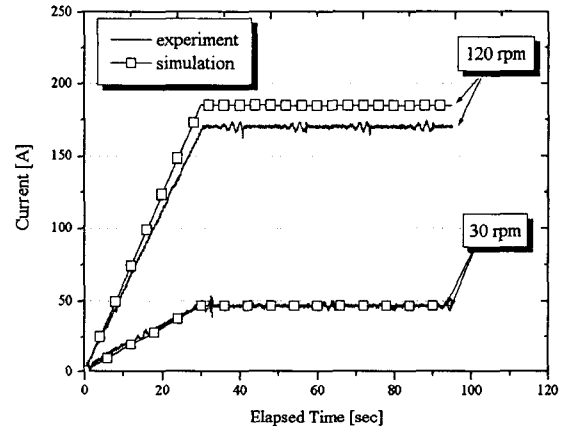


그림 7 직렬연결형의 펌핑전류 결과
Fig. 7 Pumping current results of the series-connected type

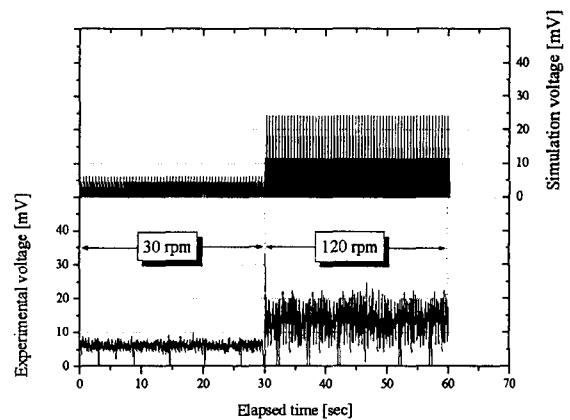


그림 8 병렬연결형의 출력전압
Fig. 8 Output voltage results of the parallel-connected

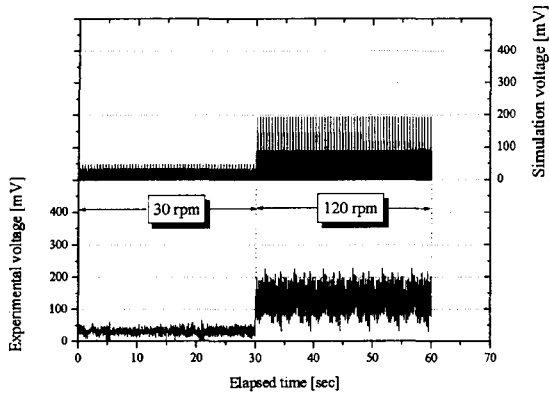


그림 9 직렬연결형의 출력전압
Fig. 9 Output voltage results of the series-connected

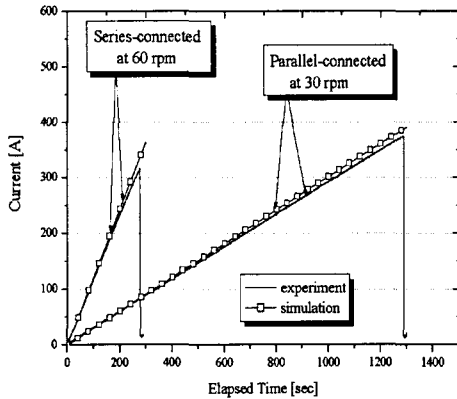


그림 10 여자전류 100 A의 경우의 최대펌핑 전류 결과
Fig. 10 Maximum pumping current results with 100 A excitation current

표 1을 보면 식 (11)에 의하여 구하여진 테브넨등가저항이 병렬과 직렬 연결시에 각각 $0.008\mu\Omega$ 과 $0.488\mu\Omega$ 으로 직렬시에 61배임을 알 수 있다. 식 (4)에 의하면 직렬개수 n_s 와 병렬개수 n_p 가 각각 8개이므로 직렬시의 테브넨등가저항이 64배가 커져야하는 것을 알 수 있다. 따라서 영구전류모드에서 구한 시험결과와 계산결과를 비교하여 보면 거의 유사한 것을 알 수 있었다.

그림 10은 여자전류가 100A인 경우에 펌핑된 최대전류를 나타낸다. 직렬연결형에서 최대전류는 회전속도 60rpm인 경우의 315A이며, 병렬연결형에서는 회전속도 30rpm에서 최대 372A까지 충전되었다. 따라서 최대펌핑 전류는 초전도박막의 연결방식에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 전류펌핑율은 병렬 연결에 비하여 직렬 연결이 훨씬 효과적인 것을 알 수 있다. 전류가 포화되는 것은 식 (8)에서 보여주는 것과 같이 여러 가지의 저항과 인덕턴스에 의한 시정수에 의한 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 25.8mH의 저온초전도자석부하의 충전을 위하여 400A급 저온초전도전원장치를 개발하였다. 개발된 전원장치는 박막 구조에 따른 전기적인 효율성을 검증하기 위하여 직렬연결형과 병렬연결형 2가지 방식으로 실험을 실시하였다. 또한 전기적 등가회로를 도입하여 해석을 실시하여 이를 실험결과와 비교하였다. 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 실험 결과 최대전류를 372A까지 충전하였다.
2. 제안된 특성해석은 초전도전원장치의 설계에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.
3. 전류펌핑율은 초전도박막의 직렬연결개수에 비례하므로 병렬 연결에 비하여 훨씬 효과적인 것을 알 수 있다.
4. 실험 결과 최대로 펌핑된 전류는 초전도박막의 연결방식에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.
5. 전류펌핑율은 회전속도에 비례하는 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공동연구소의 지원 및 2003학년도 안산공과대학 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] O. K. Mawardi et al., "Brushless superconducting alternator," IEEE Trans. Magn., vol. 13, no. 1, pp. 780-783, January, 1977.
- [2] G. Mulder, H. ten Kate, H. Krooshoop and L. Klundert, "Development of a thermally switched superconducting rectifier for 100 kA," IEEE Transaction on magn., vol. 27, no. 2, pp. 2333-2336, March 1991.
- [3] H. M. Kim et al., "Design, fabrication and testing of a discrete-foil type superconducting power supply," Cryogenics, vol. 41, issue 3, pp. 189-194, 2001.
- [4] A. C. Rose-Innes and E. H. Rhoderick, Introduction to superconductivity, Pergamon Press, Oxford, pp. 3-15, 1978.
- [5] 배덕권, 윤용수, 김호민, 이찬주, 이상진, 고태국, "여자전류에 따른 3차원 정자계 유한요소 시뮬레이션," 대한전기학회 논문지, 51B권 7호, pp. 364-369, 2002.
- [6] Jianming Jin, Finite elements method in electromagnetics. New York: John Wiley & Sons, INC, pp. 151-158, 1993.
- [7] T. Orlando and K. Delin, Foundation of applied superconductivity, Addison-Wesley, New York, Chap. 1, 1990.
- [8] J. H. Bae, Y. S. Oh, S. J. Lee, and T. K. Ko, "The Design, Manufacture and Characteristic Experiment of a Superconducting Fluxpump with Superconducting Excitation Coil", IEEE Trans. Magn., vol. 7, No. 2, pp. 672-675, June, 1997
- [9] J. Kraus, Electromagnetics, McGraw Hill Book Company, New York, pp 475-499, 1992
- [10] U. Inan and A. Inan, Engineering Electromagnetics, Addison-Wesley, Inc, New York, pp 505-533, 1999

저 자 소 개



윤 용 수 (尹 庸 錫)

1983년 성균관대학교 전기공학과 공학사,
1995 연세대학교 공학석사, 2001년 동대학
원 전기전자공학과 공학박사, 1985년~1998
년 대우전자(주) 개발팀장, 1998년~현재
안산공과대학 전기과 조교수

Tel: 031-490-6057, Fax: 02-490-6055

E-mail: ysyoon@ansantc.ac.kr



주 민 석 (朱 敏 皙)

1991년 연세대 공과대학 전기공학과 공학
사, 1993년 동 대학원 공학석사, 1997년 동
대학원 전기공학과 공학박사, 2000년~
2002년 미국 Wisconsin Electric Machines
& Power Electronics Consortium Post-
Doc. 2003년~현재 안산공과대학 전기과
겸임교수



고 태 국 (高 太 國)

1981년 연세대학교 전기공학과 공학사,
1983년 Case Western Reserve University
공학석사, 1986년 동 대학원 공학박사,
1986~1988년 미국 Ohio Cleveland State
University 조교수, 현재 연세대학교 전기전
자공학과 교수, 현재 대한전기학회 평의원

Tel: 02-2123-2772

E-mail: tkko@yonsei.ac.kr