

Analysis of the Operational Characteristics of Superconducting Power Supply Considering the Structure of the Sheets

金 鎬 民* · 尹 庸 銖** · 安 敏 哲* · 高 太 國*** · 韓 泰 洙§ · 吳 詳 秀§§

(Ho Min Kim · Yong Soo Yoon · Min Cheol Ahn · Tae Kuk Ko · Tae-Su Han · Sang-Soo Oh)

Abstract - This paper deals with comparison of characteristics of continuous-sheet type low-Tc superconducting (LTS) power supply and discrete-sheet type LTS power supply. These characteristics have been analyzed through experiments. These power supplies consist of two exciters, a rotor, a stator, and a LTS load. A continuous-sheet type has a single continuous niobium (Nb) sheet attached to the inner surface of on the stator. In the case of discrete-sheet type, four separated Nb sheets are used. This experiment is using 1.81 mH LTS magnet load and maximum 30 A dc exciter current. A discrete-sheet type is expected to produce much better pumping rate than a continuous-sheet type. The experimental observations have been compared with the theoretical predictions. In this experiment, the maximum pumping-current has reached about 926 A.

Key Words : Discrete-sheet type, continuous-sheet type, pumping-rate

1. 서 론

현재 상용화되어 있는 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage), MRI(Magnetic Resonance Imaging) 등은 초전도자석에서 발생하는 고자장을 이용하고 있다. 초전도자석은 고자장을 발생시키기 위하여 대전류를 필요로 하며, 전류공급원으로 상전도전원장치를 사용하고 있다. 상전도전원장치를 사용할 경우 초전도자석과의 접합부가 존재하여 외부의 열침입과 열손실이 발생하게 되므로 전체적인 시스템의 안정도가 저하되는 경향이 있다. 또한 상전도전원장치로부터 대전류를 공급받아 초전도자석의 영구전류모드운전을 하기 위해서는 초전도스위치가 필요하게 된다. 그러나 상전도전원장치를 초전도전원장치로 대체하게 되면 대부분의 문제점을 해결할 수 있다.

이러한 필요성에 의해 여러 종류의 초전도전류공급장치들이 제안되고 개발되어 왔다 [1]-[3]. 여러 종류의 초전도전류공급장치들은 초전도정류장치(superconducting rectifier), 초전도전원장치(superconducting power supply), 플럭스펌프(flux pump) 등으로 알려져 있으며 여러 연구 그룹과 기관에

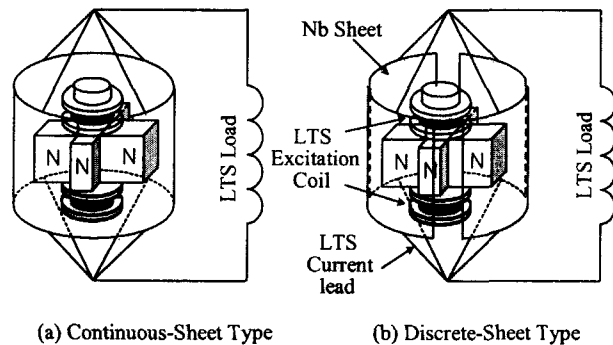


그림 1 초전도전원장치의 개략도
Fig. 1 Schematic overview of the power supplies

서 연구 개발을 진행하고 있다.

본 논문의 목적은 회전자속형 초전도전원장치의 박막구조에 따른 동작특성을 알아보는 데 있다. 초전도전원장치의 성능은 회전하는 상전도영역(Normal Spot)의 물리적 특성에 의해 크게 좌우된다고 할 수 있다. 초전도박막은 초전도와 상전도의 전이가 쉬운 임계자속밀도가 0.2T인 Niobium(Nb)박막을 주로 사용하고 있다. 그동안 개발된 박막구조는 원통형의 연속형 박막구조를 사용하였다. 그러나 본 논문에서는 분리형 박막구조를 갖는 새로운 형태의 초전도전원장치를 구성하였다. 또한, 두 모델의 동작특성을 해석하기 위해 전기적 등가방정식을 세우고 유한차분법(Finite Difference Method)을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 실험값과 비교하였다.

* 正 會 員 : 延世大 電氣電子工學科
 ** 正 會 員 : 安山工大 電氣科 專任講師
 *** 正 會 員 : 延世大 電氣電子工學科 教授 · 工博
 § 正 會 員 : 技術標準院 情報標準課 課長 · 工博
 §§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 前任研究員 · 工博
 接受日字 : 2001年 3月 6日
 最終完了 : 2001年 4月 13日

2. 초전도전원장치의 해석 및 시뮬레이션

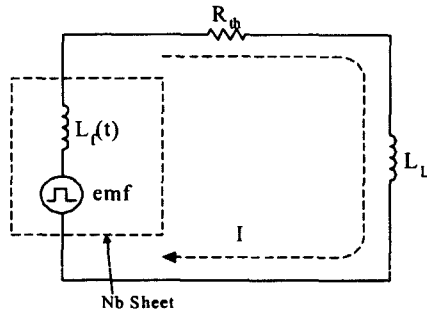


그림 2 초전도전원장치의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of the super-conducting power supply

초전도전원장치의 원리는 “자속보존의 법칙” [5]으로부터 출발한다.

전류충전모드의 정상상태동작에 있어서 초전도전원장치 시스템의 특성을 살펴보기 위해 초전도전원장치시스템의 전기적 등가회로 [6]를 구성하였다.

두 형태의 전원장치는 그림 1에 나타내어져 있다. 분리형 박막형태와 연속형 박막형태인 경우, 각각의 박막은 초전도전원장치의 고정자 내부에 원통형으로 부착되어지며 일정한 간격으로 배열되어진 4개의 회전자극에 의해 상전도영역이 만들어진다. 그림 2는 그림 1에서 보여진 초전도전원장치를 전기적으로 등가화 시킨 단순회로이다.

위 회로의 전기적 변수는 다음과 같이 정의된다.

$L_f(t)$: Nb박막의 유효인덕턴스

L_L : 부하인덕턴스

R_{th} : 테브난 등가저항

그림 2의 등가회로에 의해 얻어진 지배방정식은 다음과 같다.

$$V = emf = R_{th}I + \frac{d}{dt}(LI) = R_{th}I + I\frac{dL}{dt} + L\frac{dI}{dt} = R_{th}I + I\dot{L} + L\dot{I} \quad (2)$$

여기서, 전원장치의 인덕턴스는 $L = L_f(t) + L_L$ 이다.

초전도전원장치의 단순화모델과 자체형상은 그림 3에 나타내었다. 회전속도에 따른 주기는 다음과 같다.

$$period = \frac{60}{P \times rpm} \quad (3)$$

여기서, P 는 회전자의 자극수이며, rpm 은 회전자의 분당 회전수이다.

회전자가 주기적으로 회전할 때, 유기기전력은 페르레이법칙에 의해 얻어진다. 한 주기 동안 연속 박막형인 경우 유기기전력은 다음과 같다.

$$emf = \frac{\phi}{period} \quad (4)$$

여기서, ϕ 는 초전도박막을 통과하는 총자속량이다.

그러나, 분리형 박막모델의 경우에는 박막사이에 S_G 만큼의 간격을 유지하고 있기 때문에 상전도영역이 시간축 0과 T_G 사이에 위치하고 있을 때는 유기기전력이 선형적으로 증가한다. 이 때의 유기기전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$emf = \frac{\phi \times t}{T_G} \quad (5)$$

한편, T_G 와 한 주기의 마지막 시간 사이에서 발생하는 유기기전력은 다음과 같다.

$$emf = \frac{\phi}{period - T_G} \quad (6)$$

여기서, t 는 경과시간, $T_G = (Pw \times period) / 2\pi R_r$, R_r 은 회전자의 반지름이며, 그리고 ϕ 는 상전도영역을 통과하는 자속 밀도와 면적($w \times h$)의 곱으로 구할 수 있다.

식(2)에 유한차분법을 적용하면, 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

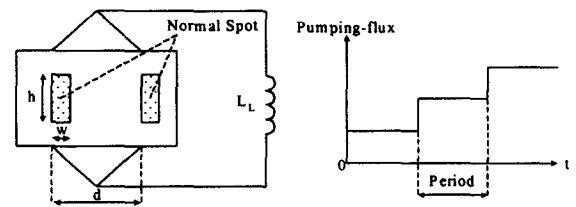
$$I[n+1] = I[n] + L^{-1}[V[n] - (R_{th} + \dot{L})I[n]]\Delta t \quad (7)$$

부하양단전압은 식(7)로부터 얻어질 수 있으며, 다음과 같다.

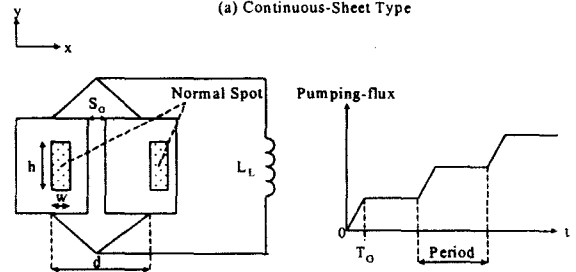
$$V_{out} = L_L \frac{I[n+1] - I[n]}{\Delta t} = V[n] - L_f(t) \frac{I[n+1] - I[n]}{\Delta t} - (R_{th} + \dot{L})I[n] \quad (8)$$

유효인덕턴스는 상전도영역과 전류리드선 사이의 거리에 비례한다. 그러므로 인덕턴스는 상전도영역이 리드선과 일직선상에 있을 때 최소값을 갖는다. 그림 2에 나타낸 유효인덕턴스값은 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다 [7].

$$L_f(t) = \left| L_0 + L_1 \sin\left(\frac{2\pi v_x t}{d}\right) \right| \quad (9)$$



(a) Continuous-Sheet Type



(b) Discrete-Sheet Type

그림 3 전원장치의 모델 및 자속 변화 패턴

Fig. 3 Simplified model and pumping-flux pattern of the power supply

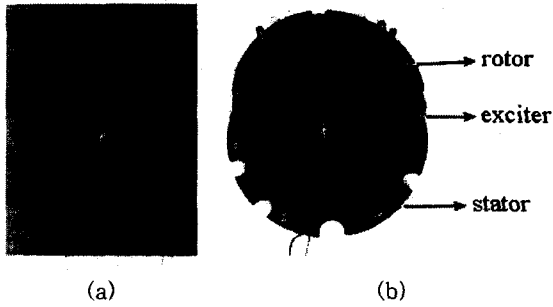


그림 4 고정자와 회전자의 구조
 (a) 고정자 내부에 부착된 초전도박막
 (b) 여자기와 회전자 그리고 고정자로 구성된 전원장치

Fig. 4 The structure of stator and rotor
 (a) Nb sheet attached in stator and power
 (b) supply is consist of a exciter, rotor, and stator

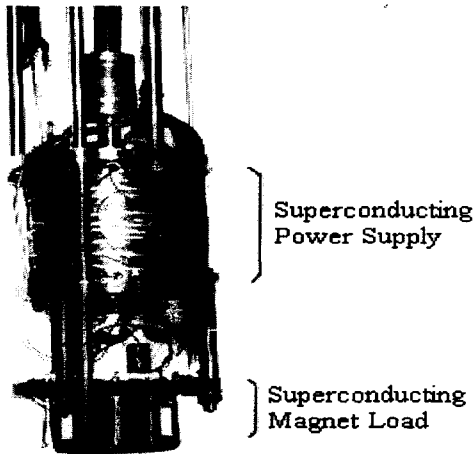


그림 5 초전도전원장치와 초전도부하
 Fig. 5 Manufactured superconducting power supply and magnet load

상전도영역이 리드선과 일직선 축에 있을 때, L_{ρ} 는 일정 극저온 홀센서를 초전도부하 보빈의 중앙에 위치시켰다. 한편, 초전도박막에서 자속의 분포를 관찰하기 위해 초전도박막의 정중앙에 극저온용 홀센서를 위치시켰다.

모든 신호는 절연증폭기를 거쳐 아날로그 레코더에 저장되며 동시에 DAQ 보드에서 모니터링 되도록 하였다.

3. 시스템 구조

저온 초전도전원장치의 제원은 표 2에 나타내었다. 그림 4의 (a)는 초전도박막과 초전도 전류리드선이 부착된 고정자의 모습이며, (b)는 초전도여자기와 회전자가 장착된 전원장치 모습이다. 그리고 그림 5는 초전도전원장치와 초전도부하가 결합된 모습을 보여주고 있다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Electrical parameters for the simulation

| | |
|------------|--------------------|
| L_L | 1.81mH |
| L_{ρ} | 1.45 μ H |
| L_{ρ} | 3.65 μ H |
| R_{th} | 0.039 $\mu \Omega$ |

표 2 회전자와 고정자의 제원

Table 2 Specifications of the rotor and the stator

| 항 목 | | 제 원 |
|-----|---------|----------|
| 회전자 | 재 질 | 탄소강(45C) |
| | 외 경 | 110 mm |
| | 회전자극 수 | 4 |
| | 회전자극 폭 | 7 mm |
| 고정자 | 회전자극 높이 | 50 mm |
| | 재 질 | 실리콘강 |
| | 내 경 | 120 mm |
| | 외 경 | 150 mm |
| | 적층 두께 | 110 mm |

외부인가 자계의 변화에 따른 충전전류를 측정하기 위해 극저온 홀센서를 초전도부하 보빈의 중앙에 위치시켰다. 한편, 초전도박막에서 자속의 분포를 관찰하기 위해 초전도박막의 정중앙에 극저온용 홀센서를 위치시켰다.

모든 신호는 절연증폭기를 거쳐 아날로그 레코더에 저장되며 동시에 DAQ 보드에서 모니터링 되도록 하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과 비교

회전자는 초전도박막의 임계자속밀도값(0.2T) 이상이 되도록 초전도여자기를 이용하여 자계를 발생시키고 다양한 속도로 회전시켰다. 회전자의 극수는 4극으로 제작하였다.

그림 6은 하나의 연속형 초전도박막을 사용한 실험결과를 보여준다. 초전도여자기의 여자전류는 12A이고, 모터의 회전속도는 30, 60, 120rpm을 인가하였다. 충전전류는 20, 40, 그리고 60초가 경과한 후에 각각에 대하여 2.65A, 7.45A, 그리고 17.1A가 초전도부하에 충전되었다. 이때 전류충진율은 30rpm일 때 0.132A/sec, 60rpm일 때 0.241A/sec, 그리고 120rpm일 때 0.483A/sec 이었다. 또한 최대 부하양단전압은 각각 0.23mV, 0.49mV, 그리고 1.19mV를 얻었다.

그림 8은 분리형 박막구조를 갖는 시스템의 실험결과를 보여주고 있다. 실험에서 초전도여자기의 여자전류는 12A이고 회전속도는 30, 60, 그리고 120rpm을 인가하였다.

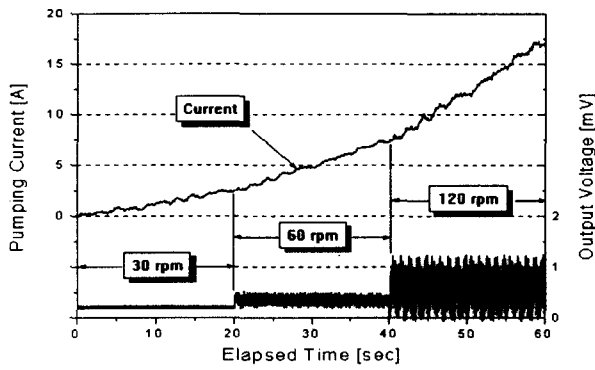


그림 6 여자전류 12A일 때 회전속도에 따른 연속형 박막 구조의 실험 결과
 Fig. 6 Experimental result of the continuous-sheet type at 30, 60, 120 rpm with 12A excitation current

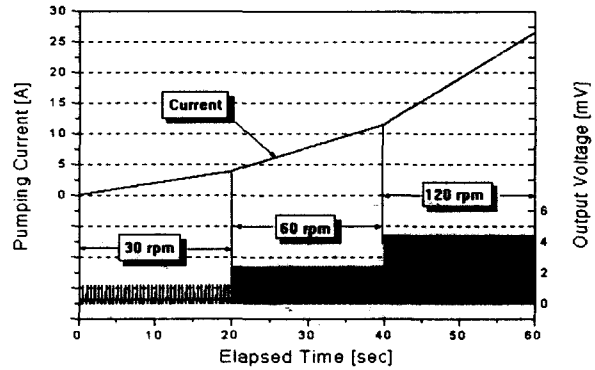


그림 9 여자전류 12A에서 회전속도에 따른 분리형 박막 구조의 시뮬레이션 결과
 Fig. 9 Simulation result of the discrete-sheet type at 30, 60, 120 rpm with 12 A excitation current

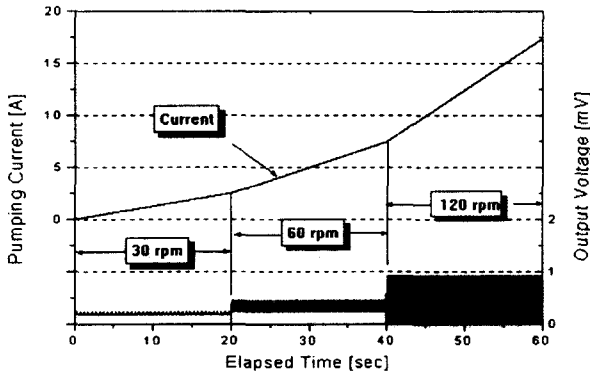


그림 7 여자전류 12A에서 회전속도에 따른 연속형 박막 구조의 시뮬레이션 결과
 Fig. 7 Simulation result of the continuous-sheet type at 30, 60, 120 rpm with 12 A excitation current

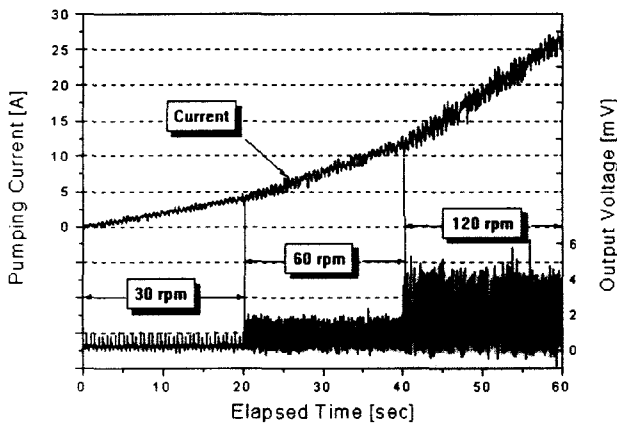


그림 8 여자전류 12A에서 회전속도에 따른 분리형 박막 구조의 실험 결과
 Fig. 8 Experimental result of the discrete-sheet type at 30, 60, 120 rpm with 12 A excitation current

전류충전율은 회전자의 회전속도 30, 60, 그리고 120rpm에 대해 각각 0.188A/sec, 0.384A/sec, 그리고 0.723A/sec를 얻었으며, 최대 부하양단전압은 1.1mV, 1.9mV, 그리고 5mV를 얻었다. 식(7)을 이용하여 계산된 시뮬레이션 결과들은 그림 7과 9, 그리고 11에 나타내었다.

그림7은 그림 6과 같은 조건에서 동작될 때 연속형 초전도 박막구조를 갖는 전원장치의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 전류충전율은 회전자 속도가 30, 60, 그리고 120rpm일 때 0.123A/sec, 0.245A/sec, 그리고 0.49A/sec의 결과였으며, 최대 부하양단전압은 각각 0.25mV, 0.45mV, 그리고 0.91mV이었다.

그림9는 그림8과 같은 조건에서 분리형 초전도박막구조를 갖는 전원장치의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 전류충전율은 30rpm에서 0.19A/sec, 60rpm에서 0.374A/sec, 그리고 120rpm에서 0.75A/sec를 얻었다. 최대 부하양단전압은 각각 1.18mV, 2.37mV, 그리고 4.37mV이다.

그림 8과 9를 비교해 보면, 제안된 방정식은 실험결과들과 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 7과 9에 의하면, 연속형 초전도박막구조의 부하양단 전압은 분리형 박막구조보다 작다. 이 결과는 식(8)을 만족시킨다. 분리형 박막구조의 전류충전율은 연속형 박막구조보다 약 55% 더 높게 나타났다. 분리형 박막구조 전원장치에서 식 (5)를 통해 얻어진 유기기전력은 전류충전율을 증가시키는데 기여한다. 하지만 연속형 구조와 비교했을 때 전압리플이 크다는 것을 알 수 있었다.

그림 10은 분리형 박막구조를 가진 전원장치의 실험 및 시뮬레이션 결과이다. 회전자극의 속도는 30rpm이며 여자전류를 각각 8A, 12A, 그리고 30A로 변화시켰을 때의 특성을 나타내었다. 실험 결과 약 3770초가 경과한 후에, 여자전류에 따른 전류의 크기는 496A, 709A, 그리고 926A에 이르렀다. 각각의 여자전류에 대한 전류충전율은 0.132A/sec, 0.188A/sec, 그리고 0.246A/sec이었다. 여기서 최대충전전류값은 약 926A였다.

시뮬레이션 결과를 살펴보면, 실험에서와 같은 회전속도와 여자전류를 인가하였을 때, 각각의 여자전류 8A, 12A, 그리고 30A에 대해 전류 충전율은 0.124A/sec, 0.191A/sec, 그리고 0.256A/sec를 얻었다. 최대충전전류값은 약 964A였다.

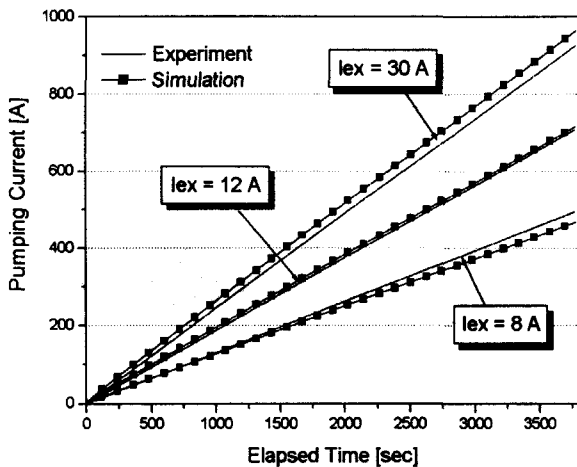


그림 10 회전속도 30rpm에서 여자전류에 따른 분리형 박막구조의 실험 및 시뮬레이션 결과
 Fig. 10 Experimental and simulation result of the discrete-sheet type at 30rpm with 8 A, 12 A and 30 A excitation current

그림 10에서 보여지는 것과 같이, 전류충전율은 여자전류의 크기에 비례하지 않음을 알 수 있다. 이것은 초전도박막을 통과하는 자속량이 여자전류 증가에 비례하지 않기 때문이다. 여자전류값이 8A, 12A, 그리고 30A일 때, 초전도박막 위에 설치된 극저온 홀센서에 의해 측정된 자속밀도값을 가지고 계산한 총자속량은 7.34×10^{-5} Wb, 1.13×10^{-4} Wb, 1.53×10^{-4} Wb 이다.

5. 결 론

본 연구에서는 900A급 회전자속형 초전도전원장치를 설계, 제작하였으며, 실험을 통해 얻어진 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 결과를 종합하면 다음과 같다.

- ① 분리형 박막구조 전원장치의 최대 충전전류값은 926A 이다.
- ② 제안된 특성방정식은 전원장치 시스템의 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

- ③ 분리형 박막구조의 전류충전율은 연속형 박막구조보다 약 55% 더 높게 나타났다.
- ④ 시변 자기인덕턴스는 전류리드선의 거리에 의해 결정된다.
- ⑤ 근사적으로 전류충전율은 회전자의 회전속도에 비례하여 증가한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 에너지절약기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다

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] J. V. Suchtelen, J. Volger, and D. Houwelingen, The principle and performance of a superconducting dynamo, *Cryogenics*, vol. 5, no. 10, pp. 256-266, 1965.
- [3] 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.
- [4] W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling and B. Flannery, *Numerical Recipes C*, New York: Cambridge Univ. Press, pp. 762-782, 1992
- [5] Rose-Innes and E. Rhoderick, *Introduction to Superconductivity*, Oxford : Pergamon Press, pp. 3-15, 1978.
- [6] J. Nilsson and S. Riedel, *Electric Circuits*, New York: Addison-Wesley, pp. 495-546, 1996.
- [7] M. S. Joo and T. K. Ko, "The Determined of Equivalent Circuit Parameters Due to Continuous Switching Action in the Superconducting Fluxpump", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 7, no. 2, pp. 668-671, June, 1997.
- [8] M. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, New York: Oxford University Press, 1994.

저 자 소 개



김 호 민 (金 鎬 民)
1970년 8월 23일 생. 1995년 제주대 전기 공학과 졸업. 1998년 연대 공학석사. 현재 연대 전기전자공학과 박사과정
Tel : 02-2123-2772, Fax : 02-393-2834
E-mail : homin@yonsei.ac.kr



고 태 국 (高 太 國)
1955년 7월 4일 생. 1981년 연세대 전기공 학과 졸업. 1983년 Case Western Reserve University 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(공학). 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수. 현재 연세대 전 기전자공학 교수. 현재 초전도·저온공학 회 총무이사
Tel : 02-2123-2772, Fax : 02-393-2834
E-mail: tkko@yonsei.ac.kr



윤 용 수 (尹 庸 銖)
1961년 8월 27일 생. 1983년 성균관대 전 기공학과 졸업. 1995년 연세대 공학석사. 2001년 연대 (공학). 1985년~1998년 대우 전자 전장개발1팀장. 현재 안산공과대 전 기과 조교수
Tel : 031-490-6151
E-mail : ysyoon@intra.ansantc.ac.kr



한 태 수 (韓 泰 洙)
1955년 3월 3일 생. 1981년 동국대 물리학 과 졸업. 1983년 동국대 물리학과 졸업 (석 사). 1990년 일본 Tsukuba대학 공학연구과 졸업 (공학). 1990~93년 일본 공업기술원 전자기술총합연구소(ETL) 연구원. 1993 년~현재 산업자원부 기술표준원 정보표준 과 과장. 현재 과학기술부 국책연구과제 평가위원. 현재 국제 전기기술위원회(IEC) TC40/TC90 국내전문위원
Tel : 02-509-7333, Fax : 02-507-1924
E-mail : tshan@ats.go.kr



안 민 철 (安 敏 哲)
1976년 9월 20일 생. 1999년 연대 전기공 학과 졸업. 2001년 2월 연세대 공학석사. 현재 연대 전기전자공학과 박사과정
Tel : 02-2123-2772, Fax : 02-393-2834
E-mail : mcahn@yonsei.ac.kr



오 상 수 (吳 詳 秀)
1959년 11월 1일 생. 1982년 경북대 공대 금속공학과 졸업. 1989년 일본 Kyoto대 금속공학과 대학원 졸업(석사). 1992년 일본 Kyoto대 금속공학과 박사과정 수료. 1992 년~현재 : 한국전기연구원 초전도응용연 구그룹 선임연구원
Tel : 055-280-1654, Fax : 055-280-1617
E-mail: ssoh@keri.re.kr