

## 초전도여자기를 이용한 초전도전원장치의 설계·제작 및 특성해석

### Design, Manufacture and Characteristic Experiment of a Superconducting Power Supply with Superconducting Excitation Coil

추 용\*, 김 호 민\*\*, 윤 용 수\*\*\*, 고 태 국#, 한 태 수##

Yong Chu\*, Ho Min Kim\*\*, Yong Soo Yoon\*\*\*, Tae Kuk Ko#, Tae Su Han##

**Abstract** : This paper describes a series of experiments to investigate the operational characteristics of a superconducting power supply with superconducting excitation coil. In this experiment, the superconducting excitation coil is introduced to control the pole-flux in the air gap of the machine. The operating current of the superconducting power supply is designed to have the value of 300 [A] for the rotational speed of 600 rpm. Sensors installed on the Nb sheet yield the information on the spatial and temporal behaviors of the magnetic field in spot and on the characteristics of the superconducting power supply.

**Key Words** : superconducting power supply, superconducting excitor, Nb sheet, magnetic field.

## 1. 서 론

종래의 초전도자석의 여자방식에는 전류도입선으로부터의 열침입으로 인한 열손실 발생 문제와 여자를 일정하게 하기 위한 영구전류모드화 등의 문제가 있다. 그러므로 초전도 기기의 고효율화를 위해 여자방식의 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다.[1] 이러한 이유로 1980년 중반부터 미국, 일본, 러시아 등의 주요 선진국에서는 고효율이면서, 대전류를 발생할 수 있는 회전자속형 초전도 fluxpump를 연구, 개발해 왔다.[2-3]

따라서, 본 논문에서는 초전도 박막에 공급되는 자속량을 제어할 수 있는 초전도 여자코일을 이용한 새로운 방식의 회전형 초전도 fluxpump의 모델을 제시·제작하였으며, 이 모델로부터 수학적 해석을 위한 등가회로를 구성하였으며, 이를 통해 시스템의 개념설계를 수행하였다. 또한, 소용량의 회전형 초전도 fluxpump를 설계 및 제작하여 pole의 회전 속도와 여자 전류의 크기를 바꿔 가면서 초전도 부하의 충전 전류를 측정하는 실험을 수행하였다.

\* 학생회원 : 연세대 대학원 전기공학과 박사과정

\*\* 학생회원 : 연세대 대학원 전기공학과 박사과정

\*\*\* 정 회 원 : 안산공과대학 전임강사

# 정 회 원 : 연세대 공대 전기공학과 교수

## 정 회 원 : 산업자원부 기술표준연구원

원고접수 : 1999년 11월 29일

심사완료 : 2000년 03월 27일

## 2. 동작원리

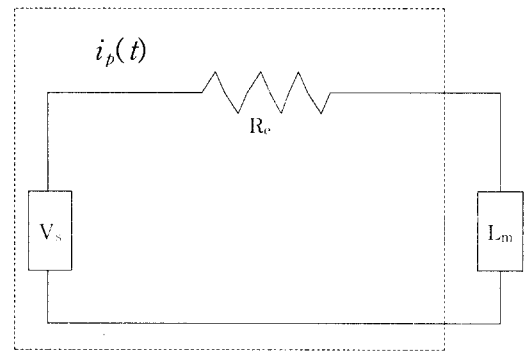


그림 1. 초전도 Fluxpump의 등가회로

Fig.1. Equivalent circuit of the fluxpump

초전도 플럭스펌프는 '무저항 폐회로를 통과하는 총 자속(Φ)은 그 회로가 무저항 상태를 유지하는 한 변하지 않는다'는 자속 보존 법칙을 이용한 장치로서 에너지 전달 메커니즘을 고려할 때 아래와 같은 간단한 등가 회로를 구성할 수 있다.

여기서  $L_m$  은 부하 인덕턴스이며,  $R_e$ 는 eddy current에 의한 손실을 증가화시킨 저항으로써 아래의 식으로 표현된다.

$$R_e = \frac{\text{Ohmic power loss}}{(\text{eddy current})^2} = \rho \frac{b}{ac} \quad [\Omega] \quad (1)$$

$\rho$  : nb foil의 전도도,  $a$  : nb foil의 가로길이

$b$  : nb foil의 세로 길이,  $c$  : nb foil의 두께

또한, 전원전압( $V_s$ )은 회전하고 있는 pole에서 nb foil로 전달하는 에너지를 증가화시킨 것으로 페르데이 법칙에 의해 펌핑중 지속적으로 유도되는 DC 전압( $V_d$ )과 자속 보존법칙에 의해서 전기각  $2\pi$ 마다 유도되는 펄스 전압( $V_p$ )의 합으로 구성된다.

이 중에서  $V_d$ 는 아래와 같이 단위 회전당 유도되는 전압으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{d\phi}{dn} = B \times v \times l \quad [V] \quad (2)$$

$B$  : nb foil에 link되는 총 자속 밀도

$v$  : normal spot의 회전 선속도

$l$  : normal spot의 세로 방향 길이

이 때  $n$ 은 전기각을 기준으로 한 회전수로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = N_k \times \frac{vt}{2\pi r} \quad (3)$$

여기서,  $N_k$ 는 리드선의 개수,  $r$ 은 회전 반경이다.

또한, 식(2)를 이용해서 시간에 대한 자속량의 변화량을 구하기 위해 식(3)을 미분하면 아래와 같다.

$$dn = N_k \times \frac{v}{2\pi r} \times dt \quad (4)$$

이것을 식(2)에 대입하면  $V_d$ 가 구해진다.

$$V_d = \frac{d\phi}{dt} = \frac{N_k B l v^2}{2\pi r} \quad [V] \quad (5)$$

한편, 전기각  $2\pi$ 마다 발생하는 전압  $V_p$ 는 아래와 같이 근사적으로 쓸 수 있다.

$$|emf| = \frac{\Delta\Phi(t)}{\Delta t} \cong \frac{\Phi_0}{T} = \Phi_0 \times f_s [V] \quad (6)$$

$\Phi_0$  : 전기각  $2\pi$ 마다 쇄교되는 자속량(=  $abB$ )

$T$  : pole의 회전 주기

$f_s$  : pole의 회전 주파수

식(6)은 특정시간  $t = nT$  순간에서의 전압이므로 이것에 전원의 내부 임피던스를 고려해서 임의의 시간으로 확대하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_p(t) = \Phi_0 f_s e^{-\frac{(t-nT)}{\tau}} \quad [V]$$

단,  $nT \leq t \leq (n+1)T$ ,  $n$ 은 자연수 (7)

여기서,  $\tau$ 는 전원의 내부 임피던스로 표현되는 시정수이다. 따라서, 펄핑중 발생하는 유도 기전력과 앞의 등가회로에서의 회로 방정식은 아래와 같다.

$$V_s(t) = \frac{N_k B l v^2}{2\pi r} + \Phi_0 f_s e^{-\frac{t-nT}{\tau}} \quad [V]$$

단,  $nT \leq t \leq (n+1)T$ ,  $n$ 은 자연수 (8)

$$V_s(t) = R_e i_p(t) + L_m \frac{di_p(t)}{dt} \quad [V] \quad (9)$$

### 3. 설계 및 제작

#### 3.1. 설계

전기기기의 설계는 크게 전기적인 특성을 결정짓는 개념설계와 기계적 제원을 결정하는 상세설계로 나누어진다. 따라서, 본 논문에서는 표1의 Nb sheet와 표2의 초전도 선재와 그림 1의 모델을 이용하여 입력 변수와 출력변수를 결정하였고, 식(9)를 이용하여 특성해석을 통한 개념설계를 한 후, 여기서 얻어진 결과를 이용하여 실제 제작에 필요한 변수들의 값을 결정하는 상세설계를 하였다. 또한, 초전도 Fluxpump의 운전시 원하는 펄핑전류의 최대값 및 펄핑속도(펄핑율)을 달성기 위해 다음의 몇가지 설계 조건들을 고려하였다.

- ① 초전도 fluxpump의 전체크기는 140mm × 200mm 이내로 한다.
- ② 또한, Nb sheet의 지름과 높이는 각각 120mm, 100mm 이내로 한다.
- ③ 회전자극 수는 4개로 하고, 자극의 높이는 Nb sheet의 1/2 이내로 하며, 자극의 폭은 자극 높이의 1/10이내로 한다.
- ④ 부하의 충전시간을 줄이기 위해 부하의 인덕턴스는 2mH 이내로 한다.
- ⑤ 고정자와 자극간의 airgap은 5mm 이내로 한다.
- ⑥ 또한, 초전도 여자코일은 2개로 하고, airgap에서의 자장이 0.25T 이상이 나오도록 한다.

#### 표 1. Nb sheet의 제원

Table 1. Specification of the Nb sheet

Nb sheet	재질	Niobium
	두께	50 $\mu$ m
	크기	100 × 377 $mm^2$
	임계자장(at 4.2K)	0.2 T

#### 표 2. 전류리드선, 여자코일, 초전도부하를 위한 초전도선재의 제원

Table 2. Specifications of sc wires for current leads, excitation coil and sc load

구분	초전도 lead 선	여자코일 및 부하
선재종류	NbTi/Cu	NbTi/Cu
비절연 선재지름 [mm]	0.45	0.941
절연시 선재지름 [mm]	0.475	1.003
필라멘트 수 [EA]	24	24
필라멘트 지름 [ $\mu$ m]	32	
트위스트 피치 [mm]	20	53
Cu / NbTi 비	7	7.4
임계전류 [A]	80(at 1T)	300(at 3T)
	70(at 2T)	236(at 4T)
임계온도 [K]	9.4	9.4
$R_{300K} / R_{10K}$	129	129

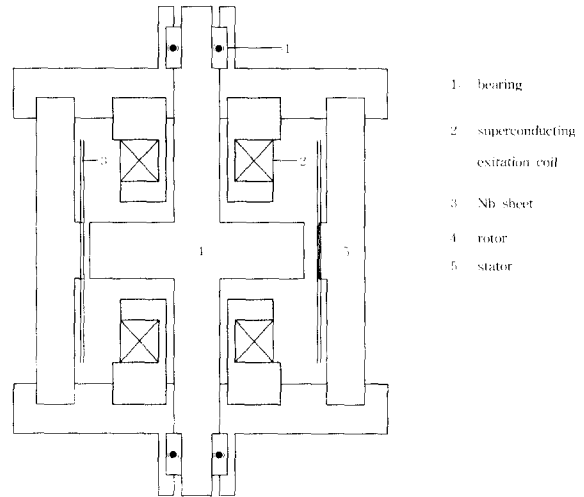


그림 2. Fluxpump의 단면도

Fig.2. Cross-section of the sc fluxpump

한편, 그림 2와 같이 2개의 초전도 여자 코일을 회전자의 상하에 위치시켰다. 이러한 여자 코일은 초전도선을 이용하여 권선을 하였기 때문에 동작중 헬륨의 증발을 억제할 수 있으며, Nb sheet에 공급되는 자속량의 제어가 가능하고, 2개의 초전도 여자코일이 직렬 연결되어 있기 때문에 여자전류의 공급량을 최소화 할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

#### 3.2. 제작

초전도 fluxpump는 극저온에서 회전하는 부위가 있는 회전기기이므로 회전에 의한 냉매의 기화, 회전축을 통한 열전달 등 극저온 상태에서 회전에 따른 여러 가지 문제들을 고려하여 제작하였다.

저온용기의 헤드부에는 외부복사열의 침입을 차단하기 위해 5개의 스테인레스 방열판을 부착하였고, 회전축을 통한 열전달을 차단하기 위해 회전축 중간에 FRP 봉을 삽입하였다. 또한, 극저온에서 베어링이 얼지않도록 윤활유 및 이물질들을 모두 제거한 볼베어링을 사용하였다. 한편, 임계전류가 300A(at 3T)인 NbTi/Cu 초전도 선재를 사용하여 초전도 여자코일과 초전도 부하를 제작하였고, 펌핑전류 lead 선은 임계전류가 80A(at 1T)인 NbTi/Cu 초전도 선재를 사용하여 8쌍으로 하였다. 표 3은 제작된 여자코일 및 부하의 제원이다.

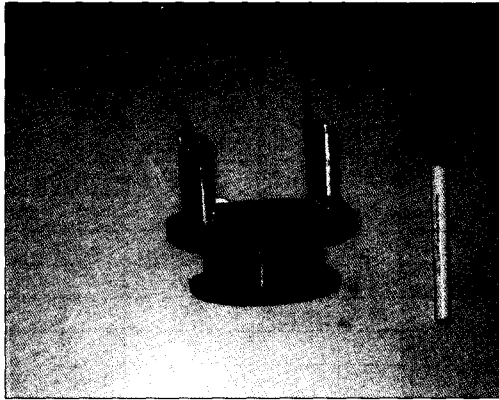


그림 3. 제작된 초전도 여자코일  
Fig. 3. Manufactured excitation coil

표 3. 제작된 여자코일과 초전도부하의 제원  
Table 3. Specifications of the manufactured excitation coil and superconducting load

구 분		초전도 여자코일		초전도부하
		상 측	하 측	제작값
인덕턴스	[mH]	2.14	2.21	1.97
외측지름	[mm]	66	66	78
내측지름	[mm]	50	50	70
보빈길이	[mm]	25	25	45
층 수	[층]	8	8	4
층당권선수	[turn]	24	24	43
상전도저항	[Ω]	1.05	1.08	1.23

표 4. 회전자와 고정자의 제원  
Table 4. Specifications of the rotor, the stator

구 분		내 용
회전자	재 질	연 철 제
	외 측 지 름	110 mm
	자 극 단 면	동근사각형
	자 극 수	4 극
	자 극 폭	7 mm
	축방향 길 이	50 mm
고정자	재 질	규소강판
	내 측 지 름	120 mm
	외 측 지 름	150 mm
	적 층 두 께	110 mm

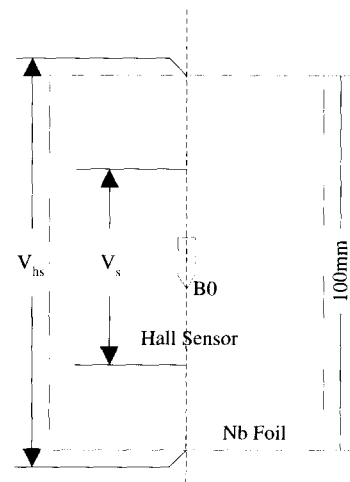


그림 4. Nb foil에 부착된 전압센서  
Fig. 4. Voltage taps attached on the Nb foil

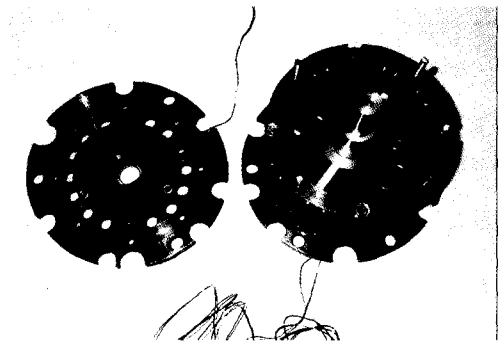


그림 5. 제작된 회전자와 고정자  
Fig. 5. Constructed rotor and stator

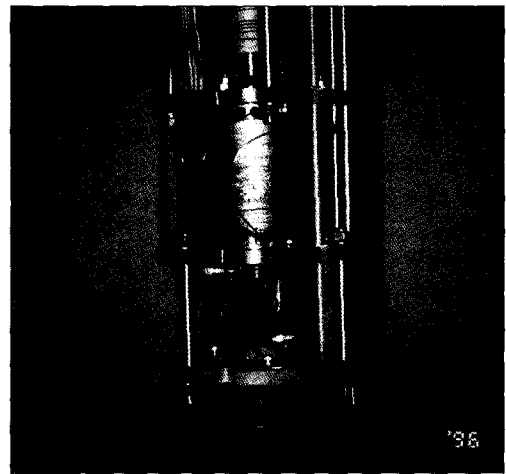


그림 6. 초전도 fluxpump와 부하의 최종결합도  
Fig. 6. Construction of the sc fluxpump and load

여자코일 및 부하의 보빈으로는 포베이크를 사용하였고, 초전도 선재의 권선시에는 초전도선의 움직임을 방지하기 위해 일정한 장력을 가하였고, 권선후에는 에폭시 수지로 함침 하였다. 그림 3은 제작된 초전도 여자코일의 모습이다. 표 4은 제작된 회전자, 고정자의 주요 제원이다. 그림 4는 Nb foil에 부착된 전압탭을 보여준다.

$V_{hs}$ 는 홀센서가 부착된 위치에서 Nb foil의 끝과 끝 부분에,  $V_s$ 는 홀센서가 부착된 위치에서 위로 25mm와 아래로 25mm에 탭을 내어 전압을 측정하게 된다. 그림 5은 회전자와 고정자의 조립이고, 그림 6는 초전도 fluxpump와 부하가 연결된 모습이다. 회전자는 연철을 사용하여 크기가 7mm×50mm인 자극을 4개 설치하였고, 자극단면은 조기켄치가 발생하지 않도록 둥근 사각형 모양을 취하였다. 고정자는 자기저항을 최대한 줄일 수 있는 모양이 되도록 자로를 고려한 형태를 취하였으며, 잔류자속이 최소화하기 위해서 무방향성 규소강판을 적층하여 제작하였다. 고정자에 부착한 Nb sheet는 에폭시로 절연후 spot welding을 하였고, Nb sheet와 초전도 lead 선간의 접합도 spot welding을 하여 접합저항을 줄일 수 있도록 하였다.

#### 4. 동작특성 실험

아래의 사항에 중점을 두고 초전도 Fluxpump 동작 특성 실험을 하였다.

- 1) 충·방전시 펌핑전류 및 전압 특성을 알아본다
- 2) 회전속도 및 여자전류에 따른 펌핑전류 특성을 알아본다.
- 3) 여자전류와 회전속도의 변화에 따른 펌핑전류의 증가율을 알아본다.
- 4) normal spot에서의 자장 분포를 알아본다.

회전자의 구동은 100W급 DC 모터를 이용하였고, 극저온상태에서 부하 및 전류 lead선에 흐르는 전류는 Hall sensor를 이용하여 측정하였고, 전압탭은 부하양단과 Nb sheet의 양단에서 측정하여 발생전압의 크기를 비교할 수 있도록 하였고, 모든 신호는 절연증폭기를 통하여 아날로그 레코더에 기록 하였다.

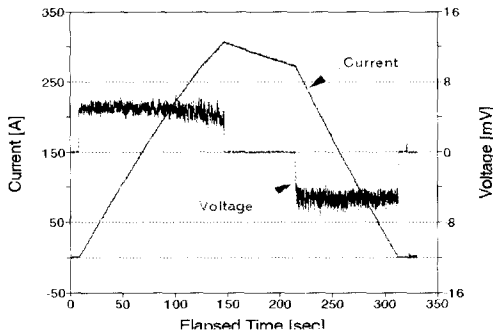


그림 7. 펌핑전류와 전압  
Fig. 7. Pumping current and voltage

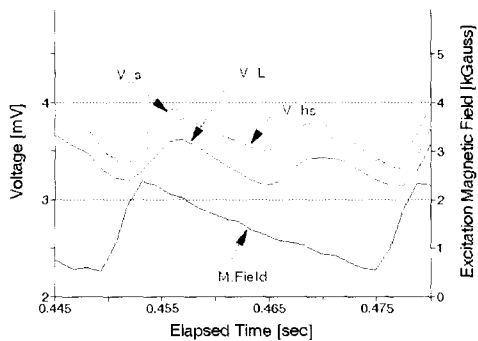


그림 8. 전압파형과 Nb 시트상의 자속분포 특성  
Fig. 8. Waveform of the voltages and flux distribution on Nb sheet

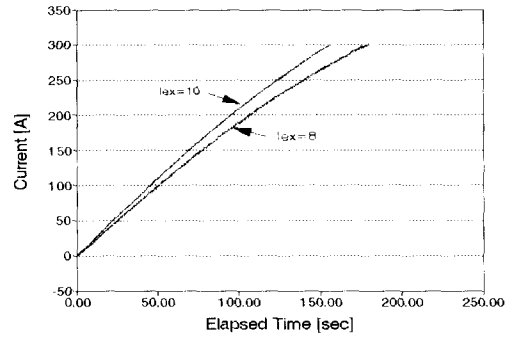


그림 9. 여자전류에 따른 펌핑전류파형  
Fig. 9. Pumping current w.r.t the excitational current

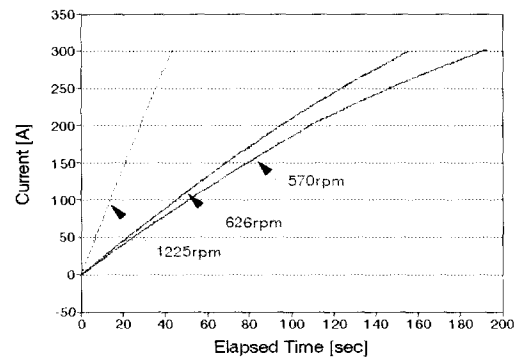


그림 10. 회전속도에 따른 펌핑전류파형  
Fig. 10. Pumping currents w.r.t the rotational speeds

#### 5. 결과 및 고찰

그림 7은 여자전류  $I_{ex}=12.4A$ , 회전속도가 640rpm으로 초전도자석을 충·방전시의 펌핑전류와 전압 특성이다.

펌핑전류는 거의 선형적으로 증가하며 켄치발생 없이 초전도 부하에 사용된 초전도 선재의 임계전류인 300A까지 충전되었다. 이것으로 좀더 임계전류가 큰 초전도 선재를 사용한다면 대전류 발생도 가능함을 알 수 있다. 유도된 전압은 최대 약 5.5mV로 DC 성분과 ripple 성분을 함께 갖고 있다. 300A 충전 소요시간은 약 150초이며 전류증가율  $dI/dt$  값은 약 2.26A/sec로서, 부하의 인덕턴스가 1.97mH임을 고려하면 부하에 유도된 전압과 거의 일치함을 알 수 있다. 회전을 멈추게 되면 펌핑전류가 서서히 감소되어 지는데 이는 부하인덕턴스와 접촉저항에 의한 RL시정수에 따라 결정된다. 그림 8은 여자전류  $I_{ex}=10.4A$ , 회전속도가 583rpm 일 때 1/4회전 동안의 부하에 유도된 전압과 spot의 자장 파형을 나타낸 것이다. 여기서,  $V_L$ 은 자석 양단전압이고  $M_{field}$ 는 홀센서 전압( $V_{hs}$ )를 환산한 자속밀도이다.

먼저, 전압 파형을 보면 펌핑중 3.5mV의 DC 오프셋 성분이 지속적으로 나타나고, 매  $\left(\frac{2\pi}{8}\right)$ 마다 약 0.5mV의 펄스 성분이 주기적으로 발생함을 볼 수 있다. 이것으로 유도된 전압이 파라데이의 법칙에 의해 펌핑중 지

속적으로 나타나는 DC 성분과 전기각  $2\pi$ 마다 스위칭에 의해 나타나는 펄스 성분의 합으로 표현되는 식 (8)와 일치됨을 알 수 있다. 한편, spot의 자장은 회전속도의 증가에 따라 spot의 앞쪽으로 점점 더 압축됨을 볼 수 있다. 이는 기존의 논문에서 실험적으로 증명된 결과와 일치함을 알 수 있다.[4]

그림 9은 회전속도가 640rpm 일때 여자전류 ( $I_{ex}$ )의 변화에 따른 펌핑전류 특성이다. 여자전류가 8.4A 일 때 전류 증가율은 1.65A/sec이고, 여자전류가 10.4A일 때 전류 증가율은 1.92A/sec이다.

그림 10은 여자전류  $I_{ex}=8.4A, 10.4A$ 일 때 회전속도에 따른 펌핑전류 특성이다. 그림에서 회전속도의 증가에 따른 시간당 전류 증가율인 펌핑율을 보면 펌핑율이 회전속도의 제곱에 비례한다. 따라서, 이러한 결과는 앞에서 언급된 식(5)와 일치됨을 확인할 수 있다. 한편, 공통적으로 회전속도와 여자전류가 클수록 pump rate는 빨라진다. 이것은 여자전류가 클수록 단위 회전당 전류증가량이 증가하고, 회전속도가 빠를수록 단위시간 당 포획되는 자속량이 많기 때문이다.

## 6. 결 론

본 연구 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- ① 펌핑 전류는 여자전류와 회전속도에 비례한다.
- ② 펌핑 전압은 펌핑중 지속적으로 나타나는 DC 성분과 전기각으로  $2\pi$ 마다 발생하는 펄스 성분을 합으로 나타난다.
- ③ spot의 자장은 회전속도의 증가에 따라 spot의 앞쪽으로 점점 더 압축된다.
- ④ 펌핑율은 회전속도의 제곱에 비례한다.

이상과 같이 임계전류가 보다 큰 초전도 선재를 사용하여 초전도 fluxpump를 적절히 설계한다면 펌핑율을 향상시킬 수 있을 뿐만아니라 수천 A의 대전류 발생도 가능함을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부 에너지절약기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다

## 참 고 문 헌

- [1] O. K. Mawardi, S. A. Muelder and R. A. Michelotti, "Brushless superconducting alternators", IEEE Trans. Magn., vol. 13, No. 1, pp. 780-783, January 1977
- [2] O. K. Mawardi, A. M. Ferendeci, "Optimum Performance of a rotating spot Flux Pump", IEEE Trans. Magn., vol.25, No.5, pp. 346-349, September 1982
- [3] Taekuk 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] O. K. Mawardi, A. GAttozzi, H. Chung, "Operational Characteristics of Flux Pump" IEEE Trans. Magn., vol. 15, No. 1, pp. 828-831, January 1979

## 저 자 소 개



### 추 용 (秋龍)

1970년 10월 24일생, 1993년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1995년 연세대학교 공학석사, 현재 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 박사 과정



### 김호민 (金鎬民)

1970년 8월 23일생, 1995년 제주대학교 전기공학과 졸업, 1998년 연세대학교 공학석사, 현재 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 박사 과정



### 윤용수 (尹庸錫)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 1995년 연세대학교 공학석사, 1996년~현재 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 박사과정, 1985년~1998년 대우전자 전장개발1팀장, 현재 안산 공과대학 전기과 전임강사



### 고태국 (高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. 공학석사, 1986년 동 대학원 공학박사, 1986~88년 미국 Ohio Clevelan State Univ. 조교수, 현재 연세대학교 전기·컴퓨터공학 교수, 현재 대한전기학회 평의원



### 한태수 (韓泰洙)

1955년 3월 3일생, 1981년 동국대학교 물리학과 졸업, 1993년 동국대학교 물리학과 이학석사, 1990년 일본 Tsukuba대학 공학연구과 공학박사, 1990~93년 일본 공업기술원 전자기술 총합연구소(ETL) 연구원, 1993년~현재 산업자원부 기술표준원 공업연구관, 현재 과학기술부 국책연구 과제평가위원, 현재 국제전기기술위원회 (IEC) TC40/TC90 국내전문위원