

회전자속형 초전도 전원장치의 박막상에서의 2차원 자장분포 및 전류 특성 해석

심기덕 김호민 윤용수* 추웅 한태수** 고태국
 연세대학교 전기공학과 *안산공업전문대학 전기과 **국립기술품질원

Analysis of the Magnetic Field Distribution and the Current Characteristics of Rotating Type Low Tc Superconducting Power Supply.

Ki-Deok sim · Ho-Min Kim · Yong-Soo Yoon* · Yong Chu · Tae-Su Han** · Tae Kuk Ko
 Dept. of EE Yonsei Univ. *Dept. of EE An-San Technical college. **National Institute of Technology and Quality.

Abstract -By computer simulation, the pattern of magnetic field distribution on the Nb-foil of a rotating flux type superconducting power supply has been calculated. Using the results, the current pumping rate has been calculated and compared with the results obtained by the experiment. The experiment has been executed with small-size flux-pump in the environment of LN2 and LHe in order to compare the pattern of magnetic filed in the superconducting state and in the normal state. Five hall-sensor was located on the center, right side, left-side, upper side, lower side of the Nb-foil in order to obtain more accurate pattern of the magnetic field generated by rotating pole. In the simulation, the effects of the excitation-magnet and the iron core located at the inner-side and circumference of the magnet have been considered. By comparing the data from the experiment and the results from the simulation, the size of normal spot estimated. At the same time, by calculating the linkage flux, the current-pumping-rate has been obtained. Consequently, the results obtained from experiment and simulation coincided as expected.

화하는 자계가 존재하는 공간에서는 새로운 전계가 유도 되는데 이것은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

\vec{B} : 외부에서 가해 준 시변 자기장
 \vec{E} : 자기장에 의해서 유도된 전기장

즉, 시변 자기장이 존재하는 공간에서의 전계는 더 이상 보존되지 않는다. 위의 식 (2.1)에 Stoke's Theorem을 적용하면 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (2.2)$$

위의 식 (2.2)은 폐곡선 C로 둘러싸인 어떠한 평면 S에 대해서도 타당한 식으로 사용할 수 있다. 고정된 폐회로내에 시변 자계가 존재하는 경우에는 식 (2.2)의 각 파라미터를 다시 정의해서 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$V = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.3)$$

= emf induced in circuit with contour C

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.4)$$

=magnetic flux crossing surface S

따라서, 식 (2.3)과 (2.4)를 사용하면 식 (2.2)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

즉, 정지하고 있는 폐회로 내에 유도되는 기전력은 폐회로 내에 쇄교되고 있는 자속량의 시간에 대한 변화량과 같다는 것으로써 이 경우의 유도된 기전력을 특별히 "transformer emf"라고 한다. 이때 식 (2.5)과 같은 기전력이 유도된 폐회로의 선저항을 R, 인덕턴스를 L_m 이라 하고, 폐회로에 유도된 전류를 I라 한다면 아래와 같은 회로 방정식을 구성할 수 있다.

$$-\frac{d\phi}{dt} = RI + L_m \frac{dI}{dt} \quad (2.6)$$

1. 서 론

초전도 전원장치는 기본적으로 무저항 폐회로를 통과하는 총 자속은 그 회로가 무저항 상태를 유지하는 한 변하지 않는다'는 자속 보존법칙(magnetic flux conservation law)에 근거하고 있다. 초전도박막의 상부 임계 자계 이상의 외부 자계를 인가해서 초전도박막 상에 상전도 영역이 형성된 상태에서 외부 자계가 인가 되면 초전도박막 내에서는 기전력이 유도된다. 따라서, 본 논문에서는 외부 자계에 의한 상전도 영역 내에서의 자계 분포를 알아보고 자계분포 해석을 통해 구한 총자속량을 이용하여 초전도박막에서의 단위시간에 대한 전류범핑율을 구한다. 외부 자계에 의한 상전도 영역 내에서의 자계 분포를 해석하기 위해서 박막 형태의 모델을 선정한다.

2. 저온 초전도전원장치의 모델 및 구성

초전도 전원장치의 기본적인 동작 원리는 패러데이의 법칙이다. 즉, 자계의 변화가 없는 공간에서 시간에 따라서 일정하게 유지되는 정전계와는 달리 시간에 따라 변

위 회로 방정식을 초전도 폐회로에 적용하면 초전도선의 저항 R 은 0이므로 이것을 식 (2.6)에 적용시킨 뒤 양변을 적분하면 아래와 같은 "자계 자속 보존 법칙 (magnetic flux conservation law)"을 유도하게 된다.

$$\Phi + L_m I = \text{상} \quad (2.7)$$

즉, 초전도 폐회로의 외부에서 자속 Φ 를 변화시키면 자속의 변화를 정확히 보상하는 자속이 생기도록 하는 그러한 크기의 전류 I 가 유도될 것이고, 초전도 폐회로 내에는 저항이 없기 때문에 유도된 전류는 초전도 폐회로를 영원히 순환하여 초기 자속량은 영원히 유지될 것이다. 또한, 초전도 회로의 구성을 적절히 변화시켜 식 (2.7)의 우변에 있는 상수를 변화시켜 가면 유도 전류를 증가시킬 수 있다.

3. 초전도 박막에서의 자장분포와 펌핑전류의 계산

초전도 박막에서의 자장분포는 회전자의 형상과 여자전류에 많은 영향을 받는다. 여기서는 회전자가 정지한 상태에서 모델을 간략히 하여 초전도박막위에서의 자장분포를 구한다.

그림 2는 회전자의 단면을 나타낸 것이다. 여기서 $a=3.5(\text{mm})$, $b=25(\text{mm})$ 이다.

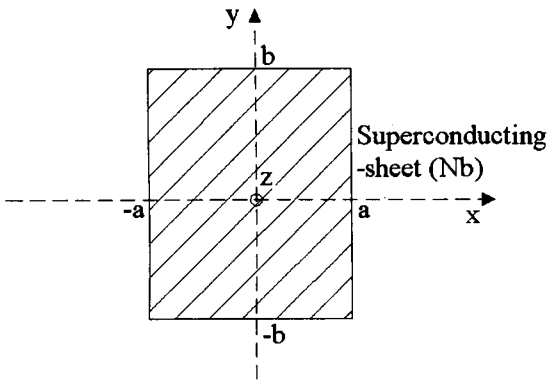


그림 1 초전도전원장치의 회전자크기

Fig 1 The Magnitude of Rotor of Superconducting Power Supply

초전도박막에서의 자계분포는 식(3.1)의 Biot-Savart 법칙을 사용하여 3-D로 수치해석적 계산을 하여 구하였다. 그림 3은 여자전류가 12A일 경우에 초전도박막에서의 자속 밀도 분포를 나타낸 그림이다.

$$dH = \frac{Idl \times a_R}{4\pi R^2} \quad (3.1)$$

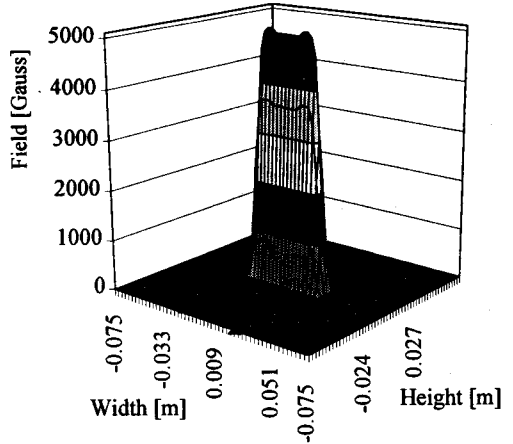


그림 2. 회전자의 2차원 자계분포

Fig 2. 2D Magnetic distribution of the Rotor

위의 자장 결과로부터 초전도박막에 가해지는 자장의 모양은 회전자의 모양과 유사하다는 것을 알 수 있다. 그리고 상전도 영역의 크기는 상부 임계자장 (1960Gauss)을 초과하는 영역의 크기로부터 $a=3.2\text{mm}$, $b=23\text{mm}$ 로 계산된다. 따라서 상전도 영역의 크기 또한 pole의 크기와 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

여기서, 여자전류가 12A일 경우 회전자에서 초전도박막에 가해지는 총 자속량은 그림 2의 자속밀도를 상전도 영역의 크기에 대해 면적적분으로 구해지며, 그 값은 $0.0002167(\text{Wb})$ 이다. 그에 대한 수식은 식(3.2)와 같이 쓸 수 있고, 여기서 A 는 초전도 박막에서 상전도 영역의 면적을 나타낸다.

$$\Phi = B \cdot A \quad (3.2)$$

기존의 펌핑메카니즘(한번 쇠교하는 자속량 만큼 전류가 펌핑된다.)을 이용하여, 초전도 부하의 인덕턴스가 1.8mH 정도 임을 고려하면, 전류펌핑율을 근사적으로 구해낼 수 있다.

한번 쇠교할 때 증가하는 전류 I 는 식(3.3)으로 구한다.

$$I = \frac{\Phi (\text{Wb})}{L (\text{H})} [\text{Amps/revolution}] \quad (3.3)$$

예를 들어, 15rpm 의 경우 하나의 pole(전체 4pole)에 대해 1초에 한번 자속이 쇠교한다. 따라서 전류 펌핑율은 $dI/dt = 0.1203 [\text{A/sec}]$ 가 된다.

그림 3은 초전도박막 위에 홀센서를 위치 시켜 질소상에서 회전자를 여자시켰을 때의 자계분포와 액체헬륨에서의 회전자에 의한 자계분포를 나타낸 것이다. 여기서 액체헬륨 내에서의 자계 분포가 액체질소에서의 자계 분포보다 폭이 작게 나타나는 것은 초전도 박막에서의 자속투과를 막으려는 screen current의 영향으로 해석될 수 있다. 이 screen current는 상전도영역 외의 부분에 투과하려는 자장을 막으려는 모양으로 생겨 날 것이다.

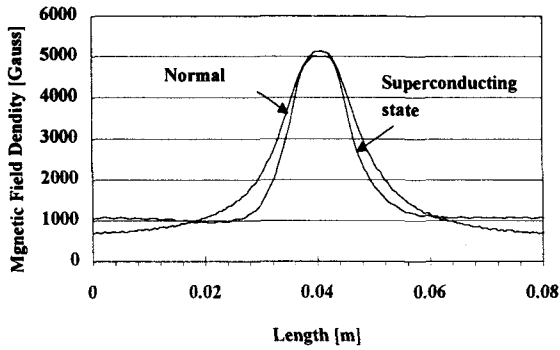


그림 3. 상전도상태와 초전도상태의 자기분포
 Fig 3. The Magnetic Distribution of the Normal and Superconducting State

4. DC 부하전압의 계산 및 실험데이터와의 비교

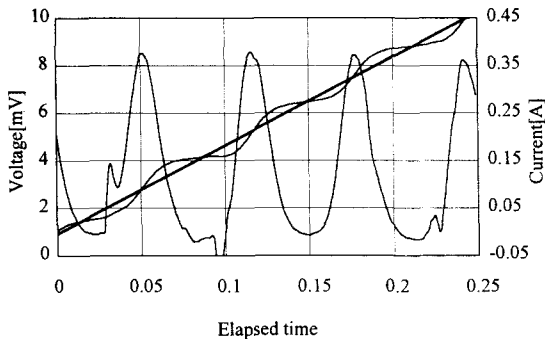


그림 4. 120rpm 에서의 전압 전류
 Fig4 DC voltage and pumping current for 120rpm

그림 4는 회전 속도가 120 rpm인 경우 전류와 전압관계를 나타내는 실험 데이터이다. Pole의 회전속도가 120rpm인 경우 current-pumping rate는 식 (3.3)과 쇄교자속량으로부터 1.9054 A/sec임을 알 수 있다. 실제 실험값에서 전류펌핑율은 $I = 1.8638$ A/sec로 시뮬레이션에 의한 전류펌핑율과 비교해 볼 때 아주 근사한 결과치임을 알았다. 이것은 시뮬레이션을 이용한 투과 자속량의 계산값이 실제 실험치와 유사하다는 결론을 얻게 한다.

시뮬레이션에 의한 전류펌핑율 = 1.9054 [A/sec]
 실험에 의한 전류펌핑율 = 1.8638 [A/sec]

또한,

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V}{L} = \text{Pumping rate} \quad (4.1)$$

에서

펌핑에 관여하는 직류부하전압을 구해 낼 수 있다. 그림 5는 여자전류 12A 회전속도 15rpm일 때의 부하전압에 관한 실험 데이터이다. 이 데이터의 평균치 계산으로부터 DC전압은 0.218467mV인 것을 알 수 있다. 또, 식 (4.1)로부터 구해낸 DC전압은 0.217743 [mV]로 실험에 의한 DC 전압과 잘 일치함을 알 수 있다.

실험에 의한 DC전압 = 0.218467 [mV]
 시뮬레이션에 의한 DC전압 = 0.217746 [mV]

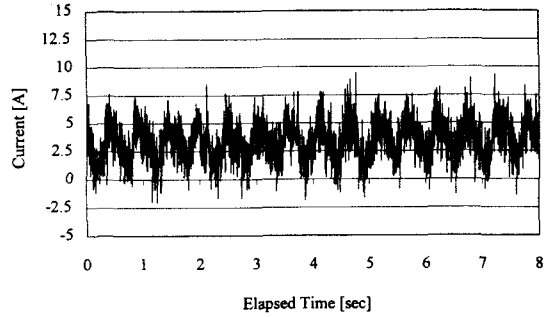


그림 5 초전도전원장치에서의 전류펌핑
 Fig 5 The current pumping in superconducting power supply

5. 결 론

본 논문의 연구결과 초전도 박막에 가해지는 자장의 모양은 pole의 모양과 별로 다르지 않다는 것을 알 수 있었다. 실험에 의한 전압파형은 실제 DC전압에 AC전압이 더해져서 발생하였는데 이 AC성분은 초전도전원장치 회로 내부의 인덕턴스 변화에 기인한 것으로 추정된다. 하지만 시뮬레이션 결과, 실제 전류펌핑에 기여하는 성분은 DC전압이 대부분 작용하는 것으로 해석할 수 있겠다. 왜냐하면, 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교·분석한 결과 자장분포에 따른 전류펌핑율과 발생전압값이 서로 잘 맞아 떨어졌기 때문이다. 한편, 실험데이터에 의한 발생전압(그림 4)을 분석한 결과 회전자가 초전도박막을 한번 쇄교했을 때 펌핑전류의 변화가 두 번 일어남을 확인할 수 있다. 이것은 초전도박막상에서 자속의 증감이 발생했음을 증명하는 것으로써, 이는 처음 회전자가 초전도박막에 진입할 때와 박막중앙의 전류리드선을 지나치는 지점에서 큰 변화를 일으켰다고 볼 수 있겠다. 이러한 이유로 인해 발생전류의 증가가 이론적으로는 계단함수 형태를 보여야 하지만 전류 흐름의 변화로 인해 상전도영역 내의 와전류 손실과 함께 전류펌핑율을 떨어뜨리는 한 요인으로 작용함을 알 수 있었다. 결과적으로 자장분포를 3차원적으로 해석하여 구한 전류펌핑율과 부하전압은 실제 실험에 의해 얻어진 데이터와 아주 잘 일치함을 알았다. 이러한 해석이 회전속도와 여자전류의 변화에 따른 전류펌핑율과 발생전압을 예측하는데에 간단하면서도 효과적이라는 결론을 내릴 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Tae-Kuk Ko, Study of the performance of a novel superconducting fluxpump, CWRU, Ph.D. Dissertation, 1985.10
- [2] O.K. Mawardi, A. GAttozzi, H. Chung, "Operational Characteristics of Flux Pump" IEEE Trans. on magn., Vol.MAG-15, No.1, pp.828-831, January, 1979
- [3] 고태국, "초전도 Fluxpump 및 교류 발전기" 전기학회지, 37권, 2호, pp.53-58, 1988
- [4] 이상진, 초전도 fluxpump의 부하전류밀도 해석에 관한 연구, 연세대학교 대학원, 석사학위논문, 1991