

병렬 구조 초전도박막을 이용한 회전 자속형 저온 초전도전원장치의 동작 특성 해석

김호민·배준한·윤용수·추 옹·심기덕·고태국
연세대학교 전기공학과 초전도연구실

The Analysis of Operating Characteristic of a Rotating Flux type superconducting Power supply with a parallel-sheets

Ho-Min Kim · Joon-Han Bae · Yong-Soo Yoon · Yong Chu · Ki-Deok Sim · Tae-Kuk Ko
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - This paper deals with the design and fabrication of a novel superconducting power supply system, and characteristics have been analyzed through experiments. Superconducting power supply consists of rotating and static parts, and superconducting magnet. In this experiment, the current-pumping characteristics have been analyzed with superconducting sheets placed in parallel within the static part of the machine. In addition, in order to observe the 3-dimensional flux distribution in the superconducting sheet, several hall-sensors were placed in it. With the flux distribution acquired, the effect of the flux on the superconducting sheet during the process of current pumping have been analyzed. Also, general operational characteristics of the superconducting power supply system have been investigated on the basis of the current and voltage data, and magnetic field values acquired through the experiments. In this experiment, maximum pumping current has been achieved to about 1280 amps..

1. 서 론

초전도 전원장치는 대전류 에너지 공급원으로 사용될 수 있으며 미래의 전력사회에 있어서 에너지 절약형 고효율 전원장치로 다목적 사용이 가능한 기기이다. 초전도 전원장치의 응용분야는 MRI, 초전도 에너지 저장장치(SMES), TOKAMAK(핵융합발전용 초전도 전자석) 등 초전도 응용기기이다. 이러한 기기에 사용되는 초전도 마그넷은 외부의 전원장치에 의해 대전류를 공급받는다. 그러나, 보통의 전원장치를 이러한 초전도 기기들에 접속하여 사용할 때 초전도-상전도 접합을 통해 전기에너지를 초전도 회로에 전달하게 되는데, 이런 경우 뚜렷이 다른 두 환경(상온-극저온)의 양자간 결합에 의한 상호작용으로 인하여 서로 영향을 미치게 되고, 따라서 접합부에 의해 극저온 시스템으로 열이 침입하는 현상이 일어나며 이에 따른 에너지 손실이 불가피하다. 따라서, 초전도 부하에 에너지를 전달할 수 있는 초전도 전원장치를, 만들어서 완전히 액체헬륨 온도에서 동작할 수 있도록 하여야한다. 이러한 기기들은 모두 '순수 초전도 회로와 쇄교된 자계자속은 일정하다'는 자속보존의 법칙(Flux conservation law)에 기본 원리를 두고 있다. 실험을 위해 제작된 초전도전원장치는 지금까지 연구되어 왔던 형태와는 달리 초전도 박막을 4개로 분리하였다. 같은 크기로 제작된 초전도 박막은 각각 병렬 연결하여 초전도부하에 연결하였고, 이러한 시스템은 최대 펄핑전류 값을 높여주고 각각의 박막에 대한 전압 및 자장분포 해석을 하는데 필요하다.

2. 초전도전원장치의 구조

회전 자속형 초전도전원장치는 액체 헬륨 온도(4.2K)에서 동작하는 기기이다. 회전부가 있기 때문에 구동축을 지지하고 회전을 시켜야 한다. 한편, 초전도부하를 극저온 용기 내에서 초전도 전원장치와 시스템적으로 하나의 회로가 되도록 연결시켜 주어야 한다. 초전도 간의 접합에 있어서는 여러 가지 방법이 제시되고 있는데 본 실험에서는 ostalloy 158 solder를 이용하여 접합시켰다. 이러한 여러가지 문제점들을 고려하여 시스템을 제작하고 초전도전원장치 시스템의 동작특성을 수행하였다.

2.1 초전도 여자코일 및 부하

고장자 내부에 부착된 초전도 박막을 권치시키기 위해서는 외부에서 초전도박막의 임계자계값 이상이되는 자장을 투과시켜야 한다. 이를 위해서 초전도 선재를 이용한 소형의 초전도마그넷을 제작하고 이 여자코일을 회전축 상·하에 위치시켰다.

초전도전원장치에서 발생한 전류를 충전시키기 위해서 극저온 용기 최하단부에 초전도 선재로 권선한 초전도 마그넷을 위치 시켰다. 이 초전도 부하는 초전도 전원장치를 정방향회전, 역방향회전, 정지모드로 회전시켜, 발생되는 전류를 충전·방전·영구모드로 동작할 수 있도록 초전도 선재간의 접촉저항이 최소가 되도록 접합시켜야 한다. 표 1, 표 2는 제작된 여자코일 및 초전도부하의 제원이다.

표 1. 제작된 여자코일의 제원
Table 1. Spec. of the manufactured excitation coil

구 분	초전도 여자코일		
	상 축	하 축	비 고
인 덕 턴 스 [mH]	2.14	2.21	
외 측 지 림 [mm]	66	66	
내 측 지 림 [mm]	50	50	
보 빈 길 이 [mm]	25	25	
선 재 길 이 [m]	35.5	35.7	
층 수 [층]	8	8	
층 당 권 선 수 [turn]	24	24	
총 권 선 수 [turn]	195	196	
중 심 자 장 [T]	0.56	0.56	at 10A
상 전 도 전 령 [Ω]	1.05	1.08	at 상온

표 2. 제작된 초전도 부하의 제원
Table 2. Spec. of the manufactured sc load

구 분	초전도 부하	
	제작값	비 고
인 덕 턴 스 [mH]	1.97	
외 측 지 림 [mm]	78	
내 측 지 림 [mm]	70	
보 빈 길 이 [mm]	45	
선 재 길 이 [m]	40.2	
층 당 권 선 수 [층]	4	
총 권 선 수 [turn]	43	
총 권 선 수 [turn]	173	
중 심 자 장 [T]	0.18	at 100A
상 전 도 저 항 [Ω]	1.23	at 상온

여자코일 및 부하의 보빈으로는 포베이크를 원통형으로 가공하여 사용하였고, 초전도 선재로 권선한 후 외부 충격에 의한 움직임을 방지하기 위해 극저온용 에폭시 수지로 함침 하였다. 그림 1, 그림 2는 각각 제작된 초전도 여자코일 및 부하의 모습이다.

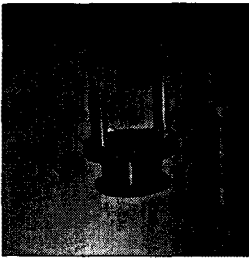


그림 1 제작된 여자코일

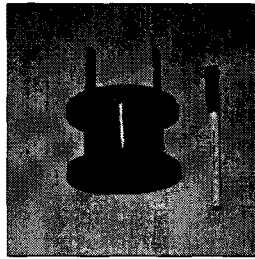


그림 2. 제작된 초전도 부하

Fig. 1. Manufactured excitation coil Fig. 2. Manufactured sc load

2.2 회전자 및 고정자

초전도전원장치의 회전자는 그림 3과 같은 모양으로 연철을 사용하여 제작하였고 축 양쪽에 위치시킨 여자코일에서 발생하는 자장을 4개의 초전도박막으로 투과될 수 있도록 만들어 주기위해 경로를 만들어 주었다. 초전도박막과 회전자와의 공극은 3mm로 하였고, 회전방향의 크기는 7mm, 축방향길이는 50mm로 하여 자극이 회전시 발생하는 액체헬륨의 손실을 최소화하기 위해 포베이크를 가공하여 자극 부분을 완전히 감싸도록 원통모양으로 제작하였다. 고정자는 자기저항을 최대한 줄일 수 있도록 자로를 고려하였으며, 잔류자속이 남아있지 않도록 하기 위해 무방향성 규소강판을 원형으로 만들어서 적층하였다. 고정자에 부착한 초전도박막은 같은 크기로 4개를 제작하여 극저온용 양면테이프로 고정자 내부에 부착하였다. 초전도박막과 초전도 lead 선간의 접합은 점접촉 용접을 이용하여 접합저항을 줄일 수 있도록 하였다. 그림 4는 회전자와 고정자의 조립모양이다. 그림 5는 초전도전원장치와 부하가 연결된 모습이다.

한편, 초전도선재로 권선되어진 부하에 흐르는 전류의 크기를 측정하기 위해 Hall sensor를 부하 보빈 중앙에 위치시켰고 부하 양단에 전압탭을 위치 시켰다. 또한 Nb sheet의 양단에 전압탭을 위치 시켜 전류 펄스 발생전압의 형태를 알아볼 수 있도록 하였다. 모든 신호는 절연증폭기를 통하여 아날로그 레코더에 기록 되는 동시에 Lab-view aquisition card를 이용하여 모니터 할 수 있게 시스템을 구축하였다.



그림 3. 제작된 회전자



그림 4. 회전자와 고정자의 조립
Fig. 4. Constructed rotor and stator

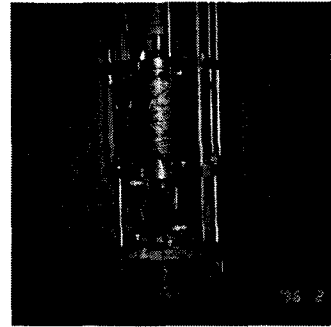


그림 5. 조립된 초전도 power supply와 부하

Fig. 5. Construction of the sc power supply and load

3. 동작 특성

초전도전원장치의 특성실험을 위해서 그림 6과 같은 회로를 구성하였다. 초전도 부하의 충전·방전시 부하 및 여자코일에 의한 자속밀도는 Hall sensor를 이용하여 측정하였다. 전압탭은 부하양단과 Nb sheet의 양단에서 각각 측정하여 발생전압의 크기를 비교할 수 있도록 하였으며, Nb sheet에는 90도 간격으로 4개의 전압탭을 설치하여 회전 때문에 발생하는 양단전압의 위상차를 알 수 있도록 하였다. 이러한 신호는 멀티미터와 후크미터 그리고 오실로스코프를 이용하여 실험중에 신호를 볼 수 있도록 하였으며, 모든 신호는 각각 절연증폭기를 통하여 Data Acquisition card를 거쳐 PC 모니터로 전체적인 신호를 한눈에 파악할 수 있도록 구성하였으며 동시에 아날로그 레코더에서 받아들이도록 하였다.

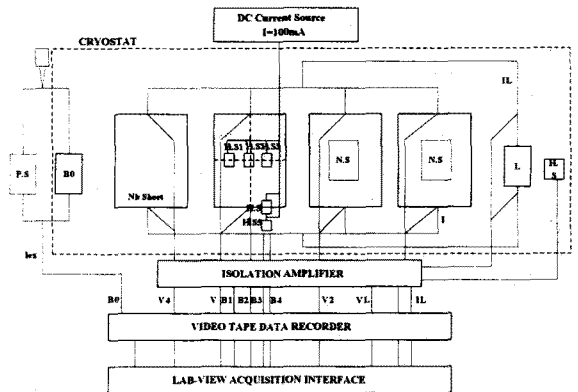


그림 6 초전도전원장치 시스템의 개략도

Fig. 6. The scheme of the SC power supply system

4. 결과 및 고찰

그림 7은 회전속도가 30rpm일 경우에 여자전류가 8A일 때 전류펌핑율은 0.144 [A/Sec]로 나타났으며, 여자전류가 12A일 때 전류펌핑율은 0.186 [A/Sec], 여자전류가 30A일 때 전류펌핑율은 0.279 [A/Sec]임을 알 수 있었다. 그림 8은 회전속도가 120rpm일 경우에 여자전류가 12A일 때 전류펌핑율은 0.69 [A/Sec]로 나타났으며, 여자전류가 30A일 때 전류펌핑율은 1.137 [A/Sec], 여자전류가 40A일 때 전류펌핑율은 1.277 [A/Sec]임을 알 수 있었다. 그림 9는 회전속도가 300rpm일 경우에 여자전류가 8A일 때 전류펌핑율은 1.203 [A/Sec]로 나타났으며, 여자전류가 40A일 때 전류펌핑율은 2.316 [A/Sec], 여자전류가 50A일 때 전류펌핑율은 3.115 [A/Sec]임을 알 수 있었다.

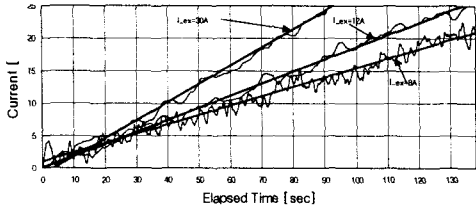


그림 7. 회전속도가 30rpm일 경우 여자전류 변화에 따른 전류펌핑율

Fig 7. the current pumping rate due to the exiting current (30rpm)

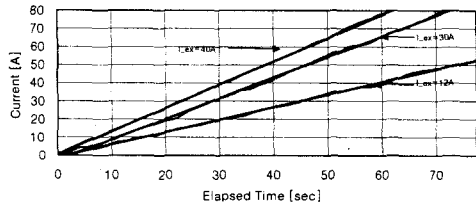


그림 8. 회전속도가 120rpm일 경우 여자전류 변화에 따른 전류펌핑율

Fig 8. the current pumping rate due to the exiting current (120rpm)

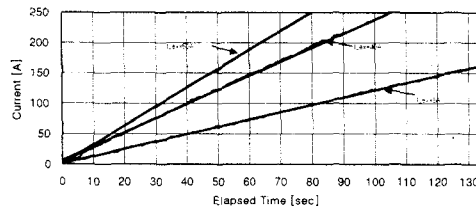


그림 9. 회전속도가 300rpm일 경우 여자전류 변화에 따른 전류펌핑율

Fig 9. the current pumping rate due to the exiting current (300rpm)

초전도 박막의 X축 방향으로 12[mm] 간격을 띄고 홀센서 3개를 위치시켰으며, Y축 방향으로는 회전하는 자석의 중앙과 끝부분(자석 중앙에서 25[mm]간격을 뺀), 그리고 초전도 박막의 끝부분(자석 중앙에서 50[mm]간격을 뺀)에 홀센서를 위치시켜서 여자자계를 변화 시켜본 결과 3차원적인 자계분포를 얻을 수 있었다. 그림 10과 그림 11, 그림 12는 실험에서 얻은 결과이다.

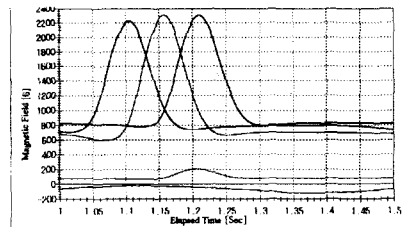


그림 10. 회전속도 30rpm, 여자전류 8A일 경우의 초전도 박막에서의 자계 분포

Fig 10. the magnetic distribution on the SC sheet (30rpm, Iex=8A)

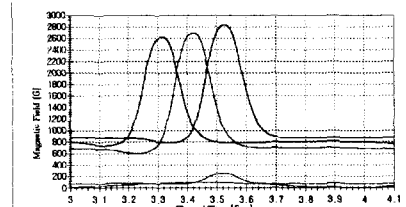


그림 11. 회전속도 15rpm, 여자전류 12A일 경우의 초전도 박막에서의 자계 분포

Fig 11. the magnetic distribution on the SC sheet (15rpm, Iex=12A)

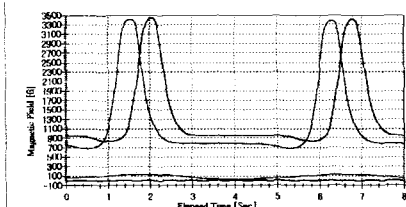


그림 12. 회전속도 5rpm, 여자전류 20A일 경우의 초전도 박막에서의 자계 분포

Fig 12. the magnetic distribution on the SC sheet (5rpm, Iex=20A)

5. 결론

- 1) 회전속도와 여자자계의 변화를 주어 초전도 전원 장치의 전류펌핑율을 살펴본 바에 의하면, 회전속도가 높을수록, 그리고 여자자계가 클수록 빠른 전류펌핑이 이루어 진다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 초전도 박막을 4조각으로 나누어 실험한 결과가 안정성면이나 전류펌핑율에 있어서 보다 유리하다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 여자자계의 변화에 따른 초전도 박막에서의 자속분포를 살펴본 바에 따르면 회전하는 자석의 방향을 X축으로 봤을 때, 두께 7[mm]인 자석에서 8.5[mm]떨어진 곳의 자속은 상전도 영역의 중앙에 위치한 자속과 거의 동일한 것을 알 수 있었다. 한편, Y축 방향으로는 회전하는 자석의 끝 부분에서의 자속은 자석 중앙에서 얻어진 자속에 비해 아주 작은 값을 갖고 있다는 것을 알 수 있었다. Y축 방향에 대해서는 초전도 전원 장치의 전류펌핑과는 무관하다는 것을 알았다.

(참고 문헌)

- [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