

### 영구전류모드 마그넷을 위한 고온초전도 전원장치

이세연\*, 김영일\*, 이지영\*, 박상호\*, 김우석\*, 이지광\*\*, 최경달\*  
 한국산업기술대학교\*, 우석대학교\*\*

## High Temperature Superconducting Power Supply for a Persistent Current Mode Magnet

Seyeon Lee\*, Yungil Kim\*, Ji-Young Lee\*, Sang-Ho Park\*, Woo-Seok Kim\*, Ji-Kwang Lee\*\*, Kyeongdal Choi\*  
 Korean Polytechnic University\*, Woosuk University\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 2세대 고온초전도 선재를 이용하여 영구전류 모드 운전이 가능한 상전도 접합부가 없는 초전도 모델 코일을 제작하고, 영구전류 인가를 위해 플럭스 펌프형태의 소규모 초전도 전원장치를 제작 77 K 운전 온도에서 영구전류 충전 시험을 진행하였다. 플럭스 펌프는 영구자석을 이용한 회전 자속형으로 제작되었고, 2세대 고온초전도 선재를 이용한 영구전류 마그넷의 적용에 필요한 초전도 전원장치의 기초 특성연구를 수행하였다.

### 1. 서 론

수 [T] 이상의 자기장을 발생시키는 고자기장 마그넷 분야는 대표적인 초전도 기술의 응용 분야로 NMR(Nuclear Magnetic Resonance), MRI(Magnetic Resonance Imaging)와 같은 진단 의료, 분석 장비에 주로 사용되고 있다. 분석 기기의 성능 향상을 위해 초전도 마그넷의 고자기장화 연구는 국내, 외에서 지속적으로 진행되고 있으며 최근에는 2세대 고온초전도 선재를 이용한 고온초전도 마그넷 개발이 주로 진행되고 있다. 초전도 마그넷은 극저온 환경에서 높은 전류밀도를 가지고 있어 수 [T] 이상의 매우 높은 자기장을 발생시킬 수 있을 뿐 아니라 초전도 코일의 터미널 부분을 연결하여 초전도 폐회로를 구성할 경우 영구전류 모드로 운전이 가능하다. 영구전류 모드 운전 시 전류의 균일성과 안정성이 매우 뛰어나고 발생하는 자기장의 시간적 균일도 또한 매우 우수한 특성을 가지고 있으며, 극저온 용기로부터 외부 전류도입선을 차단, 제거하는 것이 가능해 상온-극저온 접합부에서 발생하는 열손실을 줄일 수 있어 냉각 비용의 절감 및 마그넷 시스템의 안정성을 높일 수 있다.

초전도 마그넷의 영구전류 모드 운전을 위해서는 우선 초전도 선재의 초전도 접합기술과 영구전류 스위치의 개발이 선행되어야 한다. 4.2 K 온도에서 운전되는 1세대 저온 초전도 선재의 경우 초전도 접합기술이 개발되어 영구전류 모드 마그넷의 제작 및 극저온 초전도 전원장치의 연구가 진행되었었지만 최근에 주로 사용되고 있는 77 K 운전온도의 2세대 고온초전도 선재를 이용한 영구전류 모드 마그넷에 관한 연구는 초전도 접합기술의 개발이 진행되고 있는 단계로 국내외에서 초전도 전원장치에 대한 연구가 부분적으로 진행되고 있으나 아직까지 완전한 고온초전도 영구전류 모드 운전 기술의 개발은 완료되지 못한 실정이다 [1]-[4].

본 논문에서는 선행연구를 통해 개발된 2세대 고온초전도 선재를 이용한 무접점 코일 권선 방법을 사용하여 소형 고온초전도 마그넷을 제작하고 이동 자속형 플럭스 펌프를 이용한 실험을 통해 고온초전도 선재를 이용한 영구전류 모드 운전 및 플럭스 펌프의 적용 가능성을 확인하였다[5].

### 2. 본 론

#### 2.1 초전도 전원장치

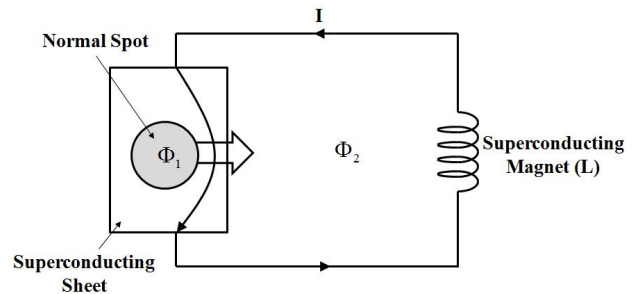
초전도 자석을 영구전류 모드로 운전하기 위한 방법으로는 크게 외부 마그넷을 이용한 필드 쿨링 방식, 영구전류스위치를 이용한 방식, 플럭스 펌프를 이용한 방식이 있다. 본 논문의 초전도 전원장치는 초전도 마그넷의 전류조절이 용이하고 마그넷의 저온용기 내부에서 동작하는 직류 전원장치로 활용이 가능한 회전 자속형 플럭스 펌프 방식을 적용하였다[6].

초전도 플럭스 펌프의 동작원리를 그림 1에 나타내었다. 그림 1은 초전도 시트와 초전도 선재 및 초전도 부하로 이루어진 완전한 초전도 폐회로를 나타낸 것이다. 폐회로는 자속  $\Phi_2$ 를 가지고 있으며, 좌우로 이동하고 있는 자석에 의한 상전도 영역의 자속  $\Phi_1$ 은 초전도 시트의 임계자기장보다는 크고 폐회로를 구성하는 초전도 선재의 임계전류보다는 작은 크기이다. 상전도 영역의 이동에 따라 폐회로를 흐르는 전류  $I$ 는 초전도 시트 내에서 저항이 있는 상전도 영역 이외의 영역으로 흐르게 된다.  $\Phi_1$ 이 이동하여 폐회로 내부로 들어가면 폐회로 내부의 자속은

$\Phi_2 + \Phi_1$ 가 된다. 이때 상전도 영역이 제거되면 자속 보존 법칙에 의해 감소된 자속  $\Phi_1$ 만큼 폐회로 내의 자속이 증가하게 되고 이때 유지된 전류는 초전도 폐회로를 채교하는 자속이 감소하는 것을 상쇄하는 방향으로 흐르게 된다. 이러한 과정을 거쳐 증가된 전류  $\Delta I$ 는 식 (1)과 같고, 여기서  $L$ 은 초전도 폐회로의 전체 인덕턴스이다.

$$\Delta I = \frac{\Phi_1}{L} \quad \text{식 (1)}$$

$\Phi_1$ 을 만드는 자석이 이러한 과정을 계속 반복하면 폐회로를 흐르는 전류를 얻을 수 있고, 이렇게 유지된 전류는 초전도 루프를 흐르므로 영구전류 상태로 플럭스 펌프의 전류발생 과정이 끝난 후에도 사라지지 않고 계속 폐회로를 순환하게 된다.



〈그림 1〉 이동자속형 플럭스 펌프의 동작원리

하지만 이러한 플럭스 펌핑 과정에는 이동하는 자속에 의한 초전도 박막의 상변이 과정이 포함되어 있다. 고온초전도 선재의 경우 이러한 상변이에 필요한 임계 자속밀도의 크기가 매우 큰 수준으로 전자석이나 영구자석을 이용하여 쉽게 상변이를 발생시키기가 어렵다는 문제가 있다. 하지만 최근에는 고온초전도 선재의 임계 자속 이하의 자속밀도에서도 플럭스 펌프의 구현이 가능하다는 연구결과들이 발표되었고, 임계자속밀도 이하라도 2종 초전도 선재 경우 혼합상태(mixed state)에서 초전도 상태에서 부분적인 상전도 영역이 존재하므로 본 논문에서는 고온초전도 선재를 사용한 회전 자속형 플럭스 펌프 방식을 사용하였다[7][8].

#### 2.2 영구전류 모드 운전을 위한 고온초전도 마그넷

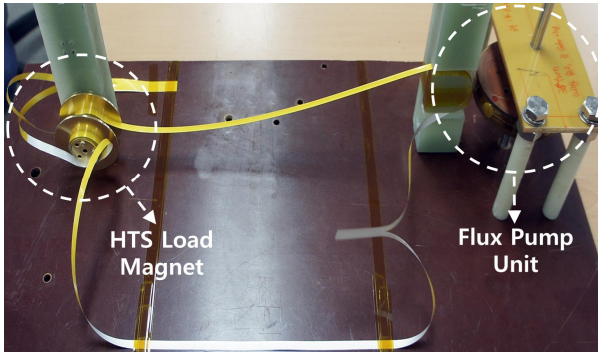
부하 마그넷의 제작은 선행 연구를 통해 개발된 무접점 권선 방식을 사용하였다. 무접점 권선방식은 2세대 고온초전도 선재의 양 끝부분을 제외한 가운데 영역을 분할하여 상전도 접합부 없이 완전한 초전도 폐회로를 구현할 수 있는 권선 방식이다. 제작된 무접점 고온초전도 코일의 제원은 표 1에 나타내었다. 코일에 적용된 2세대 고온초전도 선재는 SuperPower사에서 제작된 12 mm 폭의 선재가 사용되었고, 코일의 중심에는 영구전류에 의한 중심 자기장의 측정을 위한 홀센서가 위치해 있다.

〈표 1〉 무접점 권선형 고온초전도 마그넷 제원

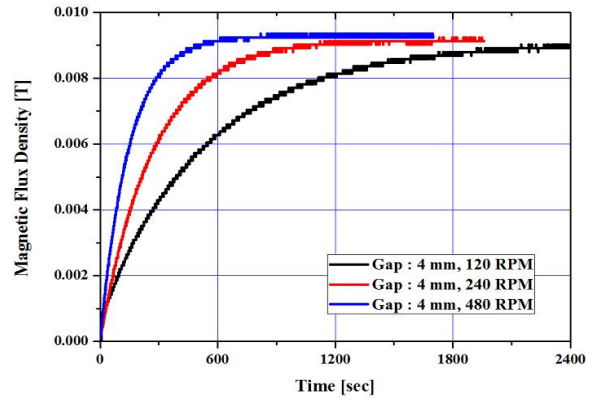
Specification	Value
Turns of Joint-less magnet	35 turn, 2 layer
HTS conductor width	6 mm
HTS conductor thickness	0.1 mm (included insulation)
HTS conductor length	3.5 m
Critical current	310 A (@ 77 K, Self-field)

### 2.3 영구자석을 이용한 이동 자속형 플럭스 펌프

플럭스 펌프를 위한 이동 자속은 네오디뮴(Nd) 영구자석을 이용하여 제작되었다. Nd 자석의 외경은 12 mm, 두께는 3 mm 로 외경 90 mm 의 디스크에 등 간격으로 4개를 설치하였고 영구자석이 부착된 디스크는 상온까지 축으로 연결되어 속도 조절이 가능한 DC 모터를 통해 가변 속도로 운전된다. 플럭스 펌프 시스템은 영구자석과 초전도 선재 사이의 공극 조절이 가능한 형태로 제작되었다. 제작된 플럭스 펌프와 부하 코일의 형태를 그림 2에 나타내었다.



〈그림 2〉 이동 자속형 플럭스 펌프 시스템



〈그림 4〉 플럭스 펌프의 회전 속도에 따른 충전전류 특성

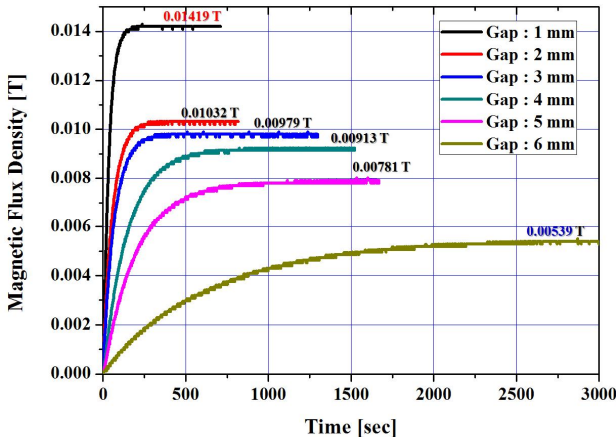
디스크의 회전 속도는 120, 240, 480 rpm 이고, 초전도 선재와 Nd 자석 사이의 거리는 4 mm 이다. 실험 결과 회전 속도에 의한 최대 충전 전류량의 차이는 크지 않으며 충전 속도에만 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 플럭스 펌프 시스템이 자속의 쇄교를 통해 전류가 충전되는 방식이므로 영구자석의 회전속도에 따라 영구전류의 충전 속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있다.

### 2.4 플럭스 펌프를 이용한 영구전류 모드 운전 시험

플럭스 펌프 시스템은 그림 2와 같이 부하 마그넷과 플럭스 펌프로 구성되며 완전한 초전도 폐회로를 구성하고 있다. 폐회로를 구성하는 초전도 선재의 일부 영역에서 Nd 자석이 부착된 디스크가 회전을 통해 쇄교 자속을 폐회로 내부로 이동시켜 부하 마그넷에 전류를 증가시키는 방식이다. 충전 전류와 자기장은 부하마그넷의 중심에 설치된 홀센서를 이용해 측정하였고, 시험은 액체질소를 이용한 냉각 방식을 사용해 77 K 운전온도에서 진행하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 2세대 고온 초전도 선재를 이용하여 영구전류 모드 운전이 가능한 소형 초전도 마그넷을 제작하고 Nd 영구자석을 이용한 플럭스 펌프 시험 모델을 제작하여 회전자속의 크기 및 회전 속도에 따른 영구전류 충전 실험을 진행하였다. 본 실험의 플럭스 펌프는 완전한 초전도-상전도 사이의 상변이 현상을 이용하지 않는 형태로 실험을 통해 고온초전도 선재를 이용한 플럭스 펌프의 구현 가능성을 확인하였다. 충전되는 영구전류는 초전도 폐회로를 쇄교하는 자속의 크기에 따라 커지는 것을 확인하였고, 회전 속도에 따라 충전 속도가 달라지는 것을 확인하였다. 아직까지는 실용 단계의 큰 전류를 충전하는 시스템은 아니지만 2세대 고온초전도 선재를 이용한 기본적인 회전자속형 플럭스 펌프의 충전 방식에 대한 가능성을 확인하였고, 추후 전류 충전 현상에 대한 이론적, 물리적인 연구와 더불어 최대 충전 전류 제한 조건에 대한 추가적인 후속 실험 및 연구를 진행할 예정이다.



〈그림 3〉 영구자석과 선재 간 공극 차이에 따른 충전전류 특성

Nd 자석과 초전도 선재 사이의 간격을 1 mm 부터 6 mm 까지 각각 1 mm 간격으로 증가시키며 영구전류 충전 시험을 진행하였다. 초전도 선재와 영구자석 사이의 거리가 증가함에 따라 쇄교 자속량의 감소가 발생하게 되므로 쇄교 자속의 크기차이에 따른 영구전류의 충전량과 충전 속도를 차이가 발생하게 된다. 그림 3에 영구자석과 초전도 선재 사이의 거리에 따른 충전 특성을 나타내다. 쇄교 자속이 커질수록 최대 충전 전류량이 커지는 것을 확인할 수 있으며, 충전 속도 또한 쇄교 자속의 크기에 비례하는 것을 확인할 수 있다. 초전도 선재와 Nd 자석 사이의 거리가 1 mm 일 때 가장 큰 0.01419 T 중심 자기장을 가지며 충전 시간은 190초, 충전되는 전류량은 10 A 이다., 간격이 6 mm 인 경우 중심 자속밀도의 크기는 0.0053 T 이고 충전시간은 약 2700초, 충전전류량은 가장 작은 3.6 A 이다. 사용된 Nd 자석의 거리에 따른 쇄교 자속밀도의 크기는 표 2에 나타내었다. 그림 3에 영구자석의 회전 속도에 따른 영구전류의 충전 특성 실험 결과를 나타내었다.

### 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2014R1A1A2058788)

### [참 고 문 헌]

- [1] S. K. Jeong, H. Lee, Y. Iwasa, "Superconducting flux pump for high temperature superconductor insert coils of NMR magnets," *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 48, pp. 305-312, 2002.
- [2] T. Nakamura, M. Sugano, T. Doi, and N. Amemiya, "Flux Pumping Effect of HTS Films in a Traveling Magnetic Field", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 20, pp. 1033 - 1036, 2010.
- [3] Y.S Yoon, S.E Yang, D.H Cho, Y.S Kim, M.C Ahn, H.M Kim, and T.K Ko, "Design and Test of a Superconducting Power Supply with YBCO Coated Conductor Load", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 18, pp.1415 - 1418, 2008.
- [4] C. Hoffmann, D. Pooke, A. David Caplin, "Flux Pump for HTS Magnets". *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 21, pp.1628 - 1631, 2011.
- [5] S Lee, W.S Kim, Y Kim, S.H Park, J.K Lee, J.H Hahn, G.W Hong, I.H Park, C Park, K.DI Choi "Characteristics of an HTS Pancake Coil in Persistent Current Mode Using Wind-and-Flip Winding Method", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 23, pp.4601305, 2013.
- [6] J. van Suchtelen, J. Volger, D. Van Houwelingen, "The principle and performance of a superconducting dynamo", *Cryogenics*, vol. 5, pp. 256-266, 1965.
- [7] M. Sander, "Novel pulsed magnetization process for cryo-permanent magnets," *Physica C*, vol. 392,396, pp. 704-708, 2003.
- [8] T. Coombs, Z. Hong, X. Zhu, "A thermally actuated superconducting flux pump," *Physica C*, vol. 468, pp. 153-159, 2008.

〈표 2〉 영구자석과 초전도 선재 사이의 거리에 따른 자속밀도

Gap [mm]	1	2	3	4	5	6
Field [T]	0.21	0.17	0.13	0.1	0.08	0.06