

NMR 자석용 고온 초전도 내부 코일을 위한 플럭스 펌프에 대한 실험

Experiment of Flux pump for High Temperature Superconductor Insert coils of NMR magnets

정 상 권*

Sangkwon Jeong*

Abstract : This paper describes a model flux pump experiment recently performed at the MIT Francis Bitter Magnet Laboratory. The results of the model flux pump will be used in the development of a prototype flux pump that will be coupled to a high-temperature superconductor (HTS) insert coil of a high-field NMR (Nuclear Magnetic Resonance) magnet. Such an HTS insert is unlikely to operate in persistent mode because of the conductor's low index (n). The flux pump can compensate for field decay in the HTS insert coil and make the insert operate effectively in persistent mode. The flux pump, comprised essentially of a transformer and two switches, all made of superconductor, transfers into the insert coil a fraction of a magnetic energy that is first introduced in the secondary circuit of the transformer by a current supplied to the primary circuit. A model flux pump has been designed, fabricated, and operated to demonstrate that a flux pump can indeed supply a small metered current into a load superconducting magnet. A current increment in the range of microamperes has been measured in the magnet after each pumping action. The superconducting model flux pump is made of Nb₃Sn tape. The pump is placed in a gaseous environment above the liquid helium level to keep its heat dissipation from directly discharged in the liquid; the effluent helium vapor maintains the thermal stability of the flux pump.

Key Words : Flux pump, HTS (High Temperature Superconductor), NMR (Nuclear Magnetic Resonance), Index

1. 서 론

플럭스 펌프는 기존의 상전도전원장치를 대체하여 초전도시스템에 효율적으로 전류를 공급하는 장치이다 [1]. 초기의 플럭스 펌프는 그 효율이 낮아서 극저온 냉각 시스템에 비교적 큰 부하가 걸린다는 단점이

있었고, 좀 더 복잡한 형태의 것은 효율 문제는 극복하였으나 [2], 신뢰성이 문제가 되어, 일반적으로 초전도 전기 공급시스템으로 응용이 되지 못하여 왔다. 본 논문에서 소개하는 플럭스 펌프의 특징은, 이전의 시스템과는 달리, 비교적 간단한 구조로서, 정확하게 고정된 미소 양의 전류를 초전도 코일에 공급한다는 것이다. 특히 이 플럭스 펌프는 고자장 NMR 자석용의 고온 초전도 내부 코일이라는 특별한 응용 분야를 고려하여 연구, 개발이 되었다.

일반적으로 고온 초전도체인 BSCCO-2212 혹은 2223 선재는 앞으로 1 GHz 이상의 고자장 NMR 자석의 내부 코일로서 사용될 것으로 기대된다 [3]. NMR 자석용으로 사용되는 초전도 선재의 가장 필요한 특성은 높은 임계전류(J_c)와 인덱스 값(n)이다. 일반적으로 이 분야에 사용되는 초전도 자석의 동작 전류는, 전체 시스템의 크기를 줄이기 위하여 임계전류와 가까운 값을 가지며, 현재 많이 사용이 되고 있는 NbTi 와 Nb₃Sn 의 경우에는 그 값이 충분히 커서, 다음 식에 의하여 표현되는 인덱스 손실을 무시할 수 있고, 결과적으로 NMR 자석은 영구모드로 작동하면서 매우 안정된 자기장을 유지하게 된다. 일반적으로 초전도 선재의 인덱스 손실을 임계전류밀도와 인덱스 값에 따른 전기장으로써 표현할 수 있다 [4].

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

식 (1)에 의하면, 어떠한 초전도 선재의 경우에도 필연적으로 유한한 값($n < \infty$)의 인덱스 값에서는 전기장이 0이 될 수 없다. 즉 초전도 선재에 비록 임계전류보다 작은 전류가 흐를 때에도, 완벽한 초전도성 ($E = 0$)은 가지지 못하며, 인덱스 손실을 보이고 있는 것이다. 또한 식 (1)에 의하면, 인덱스 값, n 이 작을수록 그 손실 에너지는 증가하게 되는데, NbTi 의 경우에는 50-100 정도이며, Nb₃Sn 은 40-80 이다. 반면 고온 초전도 선재의 경우에는 인덱스 값이 이보다 훨씬 낮아서, 간혹 20 까지 나타나기도 하지만 대부분 10-14인 것으로 알려져 있다[5]. 따라서 이러한 고온 초전도 자석이 영구 모드로서 작동한다는 것은, 그 동작 전류가 임계 전류보다 매우 낮지 않는 한 ($J_{op} \ll J_c$), 거의 불가능하다고 할 수 있다. 본 논문에서 소개하는 미소 플럭스 펌프는, 일단 NMR 초전도 자석이 정상적인 영구모드로 충전이 된 후에 시간이 지남에 따라서, 영구모드 스위치 부분의 저항이 작아지고 하여도 고온 초전도 코일 자체에서 인덱스 손실 때문에 감소 되는 자기장을, 일정한 주기를 가지고 보충하도록 연구, 개발된 것이다. 또한 NMR 초전도 자석의 특성상, 자석을 냉각하는 극저온 액체 헬륨의 소모량을 감소시키기 위하여, 플럭스 펌프는 액체 헬륨

* 정 회 원 : 한국과학기술원 기계공학과 부교수
 원고접수 : 2001년 10월 05일
 심사완료 : 2001년 11월 09일

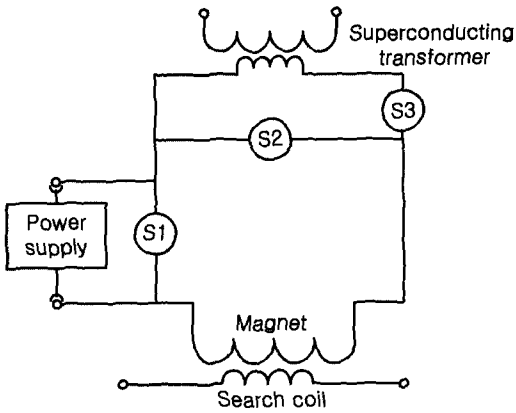


그림 1. 플럭스 펌프의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of flux pump

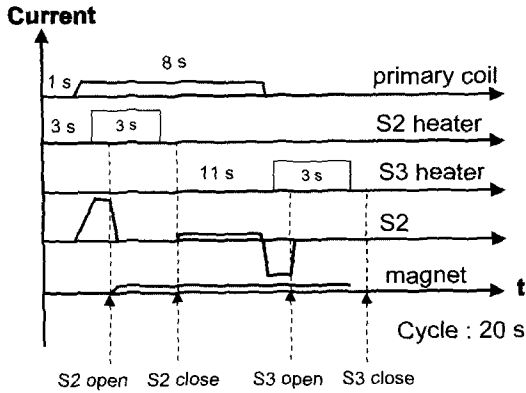


그림 2. 플럭스 펌프에서의 스위치 동작 순서
Fig. 2. Sequential switch actions of flux pump

의 계면 위에서, 증발하는 저온의 헬륨 가스에 의하여 냉각이 되도록 설치되었다. 이러한 방법은, 완벽한 초전도 상태가 되지 못하는 고온 초전도 코일의 전류를 일정하게 유지하기 위하여 상온의 전원 장치와 직접 연결하는 방식보다 액체 헬륨의 소모량을 줄이면서, 더 안정된 방식으로 일정한 자기장의 세기를 유지하게 할 수 있다. 본 미소 플럭스 펌프는 주기적으로 정확하게 일정한 미소 양의 자석 전류를 증가시키도록 설계되어 있고, 플럭스 펌프에 의한 고온 초전도 코일이 발생시키는 자기장의 섭동은, 그것과 전자기적으로 연결된 저온 초전도 자석에 의하여 줄어들게 되어 있다.

본 논문은 이러한 개념으로 연구, 개발된 초전도 미소 플럭스 펌프를 소개하는 것으로서, 예비 실험 결과에 의하면, 일정한 미소 전류가 플럭스 펌프에 의하여 주기적으로 충전되는 특성이 확인되었고, 고자장용 NMR 자석의 고온 초전도 코일을 효과적으로 영구 모드로 운전할 수 있는 가능성도 보여 주었다.

2. 실험

2.1. 실험 장치

그림 1은 실험용 부하 초전도 자석과 연결이 되어 있는 플럭스 펌프의 개략도 이다. 본 플럭스 펌프의 구조는, 토러스(torus) 형태의 초전도 변압기와 S2, S3로 표시된, 신속하게 작동되는 초전도 스위치로서

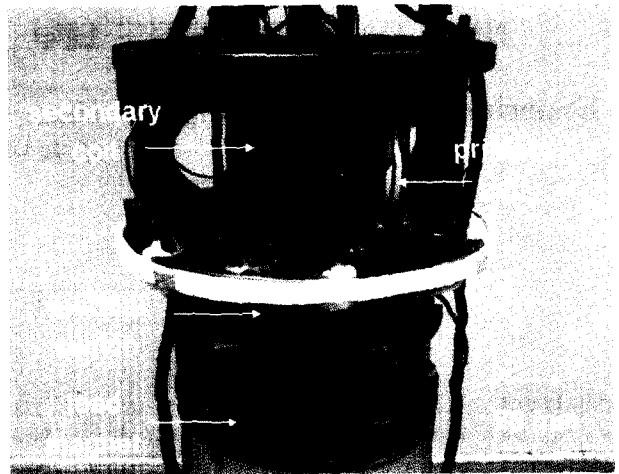


그림 3. 플럭스 펌프의 실제 사진
Fig. 3. Photograph of model flux pump

매우 간단하다. 그림에서 S1 은 일반적인 영구 모드 초전도 스위치로서 on-off 시간이 느린 것이다. 그림 2에서 볼 수 있는 플럭스 펌프의 작동 순서는 다음과 같다. 첫째, 초전도 변압기의 일차 코일(primary coil)에 적절한 크기의 전류를 공급하여 이차 코일(secondary coil)의 전류가 0에서부터 어느 특정한 값으로 여기 된다. 둘째, 스위치 S2가 열리면서, 이차 코일의 전류는 감소하고 부하 자석 측의 전류는 증가하면서 두 전류의 값은 강제적으로 일치하게 되며, 이차 코일에 축적되어 있던 에너지는 부하 자석 측으로 전달된다. 셋째, 에너지가 부하 자석 측으로 전달된 후 스위치 S2는 닫히고, 이제 부하 자석 측과 이차 코일의 회로는 각각 폐 회로를 구성하게 되어 독립적인 전류값을 가질 수 있게 된다. 그러므로, 스위치 S3를 열어 이차 코일의 전류를 0으로 감소시키고, 초기의 상태로 다시 돌아와서 다음 주기의 동작 대기 상태를 만든다. 그림 2는 초전도 변압기의 일차 코일, 스위치 S2, S3의 히터 전원 장치의 동작 시간을 전체 주기 20초인 경우에 대하여 예시하고 있다. 스위치 S2, S3는, 일반적인 영구 모드 스위치인 S1과는 달리 짧은 시간 동안에 개폐되어야 하므로, 그 시간 상수가 작다. 또한 이러한 열 스위치에서 발생하는 열이 액체 헬륨으로 유입되는 것을 방지하기 위하여, S2, S3는 액체 헬륨의 계면 위에 위치한다. 따라

표 1. 플럭스 펌프의 주요 설계 변수

Table 1. Parameters of model flux pump system

Parameter	Value
Self inductance of the primary coil	2.13 mH
Self inductance of the secondary coil	16 μ H
Mutual inductance of the transformer	73 μ H
Nominal injected current to load magnet	10 μ A
Switch S2 or S3 resistance	100 μ Ω
Thermal time constants of switches S2 and S3	< 1 s
Operating temperature range	5-15 K

서, 이 스위치는 빠른 온도 변화를 위하여 특별히 열 관성이 작아야 되며 스위치의 on-off 특성을 위해서는

충분한 저항값을 가지도록 설계, 제작되었다. 좀 더 자세히 설명하자면, 이 스위치 선재는 폭 3.1 mm 두께 0.36 mm 인 미국 GE 사의 Nb3Sn 테이프이며, 폭 25 mm, 두께 0.1 mm 인 스테인레스 강판을 지름 50 mm로 동그랗게 말아서 스폿 용접하여 원통형의 구조를 만들고, 그 주위에 Nb3Sn 테이프가 2 회 감겨서 고정되도록 하였다. 그리고 적당한 단열 및 기계적인 강도를 위해서는 Stycast 2850FT 에폭시가 선재의 외부에 사용되었고, 상온에서 스위칭 시간을 측정함으로써 해서 그 열적 특성을 확인하는 작업을 거쳤다. 그림 3은 제작된 플럭스 펌프와 특성 실험을 위하여 부하 초전도 자석이 연결된 사진이다. 초전도 변압기의 일차 코일과 이차 코일은 각각 4 개의 이중 팬케이크 코일이 겹쳐져 감기어서 90° 각도로 구분이 되어있는 토러스 (torus) 형태이므로 이 들로 부터 발생하는 자기장은 바깥으로 많이 누설되지 못하는 구조로 제작되었다. 사진에서 보이는 토러스 형태인 변압기의 전체 지름은 100 mm 이며, 주요 설계 변수는 표 1에 나타내었다. 플럭스 펌프의 좀 더 자세한 설계 변수와 사용된 초전도 선재의 사양은 참고 문헌 [5]에 수록된 바와 같다.

앞에서 언급한 바와 같이 본 플럭스 펌프는 액체 헬륨의 계면 위에서 동작을 하므로, 그 온도 조절이 매우 중요하다. 액체 헬륨이 증발하여 발생된 차가운 헬륨 증기는 저온조를 빠져 나가기 전에, 충분한 시간 동안 냉각 작용을 하여 초전도 변압기와 열 스위치가 5 K 과 15 K 사이에서 항상 작동할 수 있도록, 냉각 통로가 구성되었다. 열 스위치는 히터가 장치되어 있으므로 가장 열이 많이 발생하는 부분이다. 따라서 그림 3에서 볼 수 있듯이, 열 스위치는 액체 헬륨으로 냉각이 되는 부하 자석의 바로 위에 설치되어 있으므로 해서, 스위치가 off 상태이었다가 on 상태로 신속하게 돌아올 수 있도록 하였다. 변압기 부분은 사진에 나타나 있는 바와 같이, 두께 1 cm의 구리 판이 위 아래로 감싸고 있어서 코일의 온도가 항상 임계온도 이하로 균일하게 유지된다.

2.2. 미소 플럭스 변화 측정 방법

본 실험에서는 두 가지 독립적인 방법을 사용하여 주기적으로 부하 초전도 자석에 공급되는 플럭스의 양을 측정하였다. 첫 번째 방법은, 부하 자석의 중심부에 감지 코일(search coil)을 설치하여 자석의 미소 전류 변화에 의한 플럭스 변화를 측정하는 것이고, 두 번째 방법은, 자석 자체의 양단간에서 자석의 미소 전류 변화에 의한 인덕턴스 전압(inductance voltage) 변화를 직접 측정하는 것이다 [5].

2.2.1. 감지 코일에 의한 전압 측정 방법

플럭스 펌프가 매 번 작동할 때마다 부하 초전도 자석 내의 플럭스는 조금씩 증가하므로, 이때 감지 코일에서 측정된 전압의 적분값은 다음과 같다.

$$\left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1 = N_{sc} A_{sc} \Delta B_{op} \quad (2)$$

여기서 N_{sc} 는 감지 코일의 총 감은 수, A_{sc} 는 감지 코일의 유효 면적이며 B_{op} 는 동작 플럭스이다. 또한 적분기호 내의 윗방향 화살표는 플럭스 펌프가 매 번 작동시에 초전도 자석 내부 플럭스는 증가한다는 것을 뜻한다. 감지 코일의 변수들은 실험시에 주위 잡음 보다 충분한 신호값이 측정될 수 있도록 설계된

것이다 [5]. 따라서 처음 부하 자석에 전류가 없는 상태에서 플럭스 펌프를 1 번, 2 번, 3 번, ..., N 번 작동시키고, 자석이 축적하고 있었던 에너지 (혹은 플럭스)를 완전히 소멸시켜 버리면, 감지 코일은 각각

$$\left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1, 2 \times \left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1, 3 \times \left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1, \dots, N \times \left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1 \text{의 전압을 측정할 수 있을 것이다. 여기서,}$$

$$\left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1 = - \left[\int V_{sc} \uparrow dt \right]_1 = - N_{sc} A_{sc} \Delta B_{op} \quad (3)$$

적분기호 내의 아랫방향 화살표는 플럭스가 감소하는 상황을 의미한다.

2.2.2. 자석에 의한 전압 측정 방법

다음은 자석의 전압을 직접 측정하는 방법으로서, 플럭스 펌프가 매 번 작동할 때마다, 부하 초전도 자석 양단 간의 인덕턴스 전압 변화는 다음과 같이 나타난다.

$$\left[\int V_{mg} \uparrow dt \right]_1 = L_{mg} \Delta I_{op} \quad (4)$$

또한, 처음 부하 자석에 전류가 없는 상태에서 플럭스 펌프를 1 번, 2 번, 3 번, ..., N 번 작동 시키고, 자석이 축적하고 있었던 에너지 (혹은 플럭스)를 완전히 소멸시켜 버리면, 자석 양단 간의 전압 변화는 각각

$$\left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1, 2 \times \left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1, 3 \times \left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1, \dots, N \times \left[\int V_{sc} \downarrow dt \right]_1 \text{와 같이 나타난다. 여기서;}$$

$$\left[\int V_{mg} \uparrow dt \right]_1 = - \left[\int V_{mg} \downarrow dt \right]_1 = - L_{mg} \Delta I_{op} \quad (5)$$

즉, 동일한 작동법으로 플럭스 펌프를 여러 번 반복하여 부하 자석에 에너지를 충전시킨 후, 자석을 방전시켜 그 전류를 0 으로 만들면서 신호 전압을 측정하면, 매 회 플럭스 펌프의 작동 시에 전류가 얼마나 상승하였는 지를 알 수 있다.

3. 결과 및 토의

3.1. 감지 코일 및 자석 양단 간의 전압 교정

감지 코일 및 자석 양단 간의 전압 측정 방법은 모두 부하 초전도 자석의 매우 작은 전류 변화를 정밀하게 측정하는 방법이다. 비록 이론적으로 그 들의 신호 값을 식 (2)와 (4)의 계산에 의하여 예측하는 것이 불가능하지는 않지만 [4], 플럭스 펌프 실험에 앞서 그것을 교정하는 것이 절대적으로 필요하리라 판단되었다. 즉 이러한 교정 실험은, 스위치 S1을 열어 놓은 상태에서, 알고 있는 값의 전류를 전류 전원 장치에서 부하 초전도 자석으로 공급하고 그 다음 강제로 자석의 전류를 0 으로 만들면서 감지 코일과 자석 양단 간의 전압을 동시에 측정하면서 이루어졌다. 결과적으로 10 μ A의 자석 전류 변화 시에 감지 코일과 자석 양

단간의 전압을 각각 적분하여, $30 \mu V \cdot s$ 와 $73 \mu V \cdot s$ 를 얻을 수 있었으며, 자석 양단간의 전압이 신호 대 잡음비가 더 크다는 사실도 확인하였다.

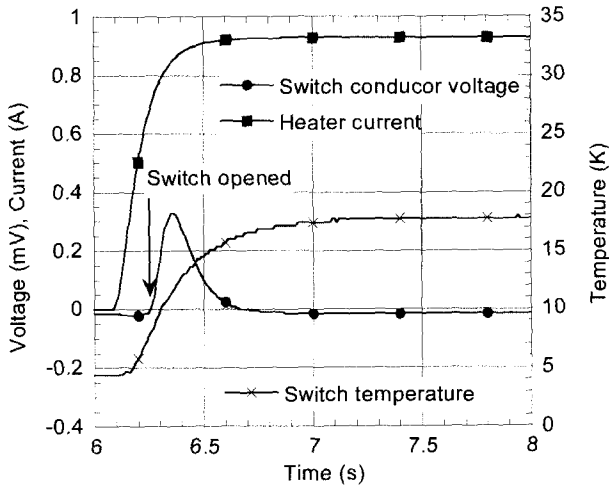


그림 4. 플럭스 펌프의 스위치 특성 실험 결과
Fig. 4. Switch test result of flux pump

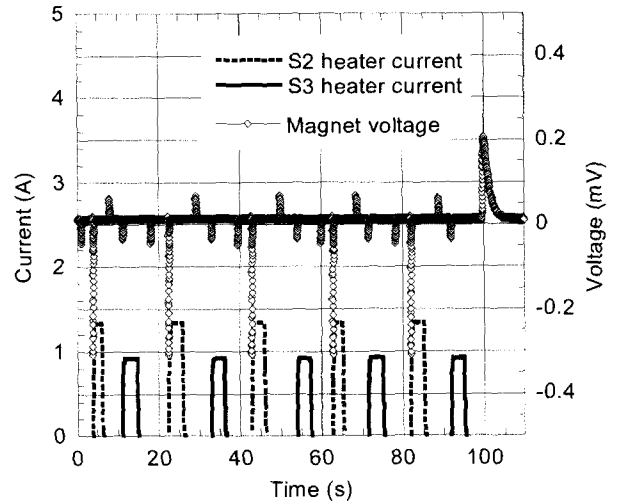
3.2. 플럭스 펌프의 스위치 특성 시험

본 실험의 목적은 플럭스 펌프용으로 제작된 스위치의 시상수를 헬륨 증기로 냉각이 되고 있는 상태에서 직접 측정하는 것으로서, 첫째, 특정한 스위치 히터의 전류값에 대하여 스위치의 개폐 시간을 조사하고, 둘째, 초전도 변압기에서 일차 코일의 입력 전류에 의하여 여기 되는 이차 코일의 전류 값을 측정하는 것이다. 스위치의 동작 특성은 스위치 선재의 온도와 전압을 통하여 알아 볼 수 있는데, 스위치 조립부의 열관성과 온도 센서와의 열저항을 무시할 수 없으므로, 온도 신호보다는 직접적인 전압 신호를 이용하여 알아보았다. 그림 4는 스위치가 열릴 때의 상황을 보여주는 신호이다. 즉, 스위치 히터가 작동하고 약 0.2 초 후에 스위치 선재가 초전도성을 잃어버림으로써, 저항 전압이 나타난 것이다. 여기서 온도 신호 또한 5 K에서 18 K으로 서서히 증가함을 알 수 있다. 이 실험에서는 스위치 양단 간의 전압 신호를 적분하여 스위치가 열리기 전에 얼마나 많은 전류가 흐르고 있는지를 추정할 수 있는데, 이 경우에는 변압기의 이차 코일 회로에 4.6 A가 일차 코일의 1 A에 의하여 여기 되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 스위치 시험은, 스위치의 신뢰성 있는 동작을 위한 히터의 최소 동작 시간에 대한 정보도 제공하였다.

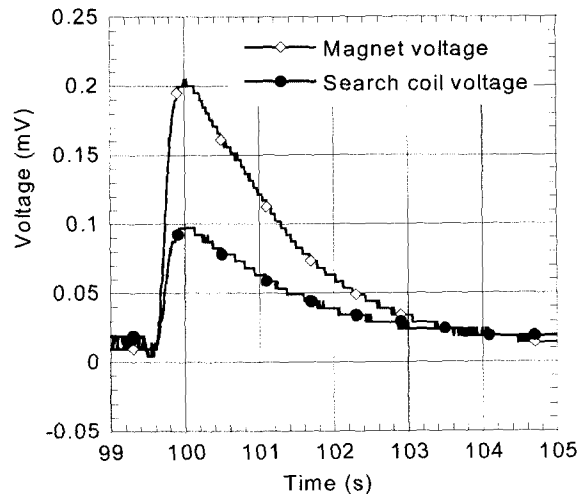
3.3. 플럭스 펌프 동작 성능 시험

본 논문에서는 플럭스 펌프를 개발하는 초기 단계로서, 자동적인 타이머를 이용하지 않고, 인위적으로 그림 2에 나타나 있는 3 개의 전원 장치의 on-off 시간을 순차적으로 조절하면서 실험한 결과를 보여주고 있다. 그림 5 (a)는 5 번의 주기적인 플럭스 펌프 동작 시간 동안에 측정된, 부하 자석의 양단간 전압, 스위치 S2 와 S3 의 히터에 공급되는 전류 데이터이다. 약 20 초의 주기를 가지고 5 번 작동을 하여 초전도 부하 자석의 전류가 0 에서부터 조금씩 일정한 양으로 증가하도록 만들었고, 약 100 초 후에 자석의 전류는 S1을 열어서 강제적으로 방전시켜 0이 되도록 하였다. 스위치 S2 히터의 전류가 S3 보다 큰 이유는, S2를 가능한 빨리 열어서 자석의 전류 변화가 이

루어지도록 했기 때문이다. 감지 코일의 신호는 여러 전원 장치의 on-off 시에 많은 잡음을 타는 것이 관측되어서, 그림 5 (a)에 표시하지는 않았다. 그림 5 (b)는, 그림 5 (a)에서 부하 자석의 전류가 $t=99.6$ s부터 0으로 감쇠되는 동안에 측정된 감지 코일과 자석



(a)



(b)

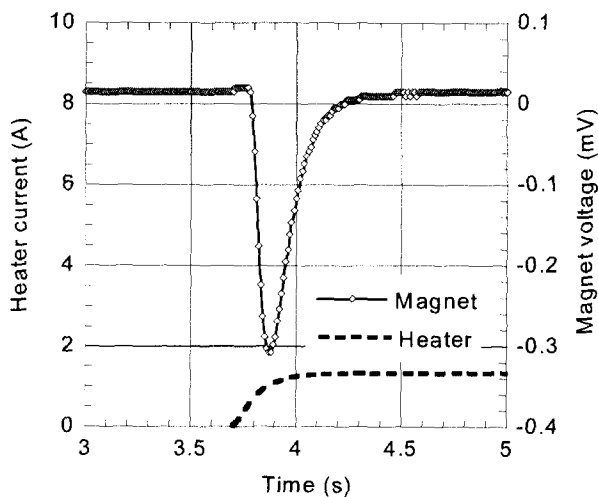
그림 5. 플럭스 펌프의 동작 성능 실험 결과 (a) 5 번의 충전 후 방전 (b) 방전 시의 신호 확대
Fig. 5. Charging and discharging process of model flux pump (a) discharging after 5 charging sequences (b) magnified view of discharging process

양단간의 전압 신호를 확대한 것이다. 이러한 전압 신호를 시간에 따라서 적분하면, 5 번의 주기적인 플럭스 펌프 동작 시에 부하 자석의 전류는 총 $45 \mu A$ 로 증가했음을 정량적으로 분석할 수 있고, 따라서 매 번 $9 \mu A$ 가 측정되었음을 증명하는 결과이다. 이러한 결과는 플럭스 펌프를 설계할 때 해석한 [5] $10 \mu A$ 에 가까운 값이다. 그림 6은 그림 5 (a)에 나타난 부하 자석의 양단간 전압과 스위치 S2의 히터 전류 신호를 확대한 것인데, (a)는 첫 번째, (b)는 다섯 번째로 부하 자석의 전류를 증가시키는 플럭스 펌프 동작 시에 얻은 신호이다. 두 전압신호는 거의 동일한 것이 확실하며, 약 1 초의 시상수로써 자석의 전류 변화가 이루어지고 있다.

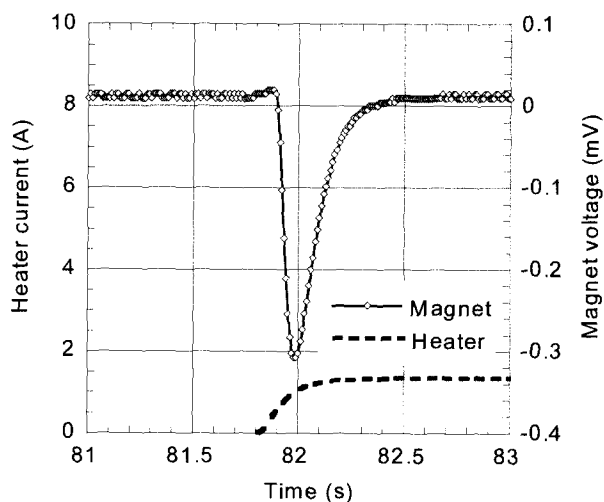
3.4. 미소 플럭스 변화 측정 정밀도

위에서 언급한 두 가지 방식으로 초전도 자석의 미소 플럭스 변화를 측정하는 데에는, 신호 대 잡음비가 작아서, 측정 기술 면에서는 어려움이 있으며, 이것은 사실상 부하 초전도 자석의 전류가 본질적으로 작게 변화하기 때문이기도 하다. 이러한 실험에서 가장 주의가 요구되는 신호 잡음의 근원은 10 K 부근의 플럭스

(thermal drift) 현상이 명확하게 나타남을 알 수 있다. 측정의 정밀도와 관계되는 또 다른 문제는, 데이터 획득 장치에서 증폭기의 성능인데, 수 마이크로 볼트를 측정하기 위하여 증폭비 1000을 사용하는 본 실험과 같은 경우, 시간에 따른 증폭기의 성능 변화에 의해서도 측정 오차가 유발될 수 있다. 그럼에도 불구하고,



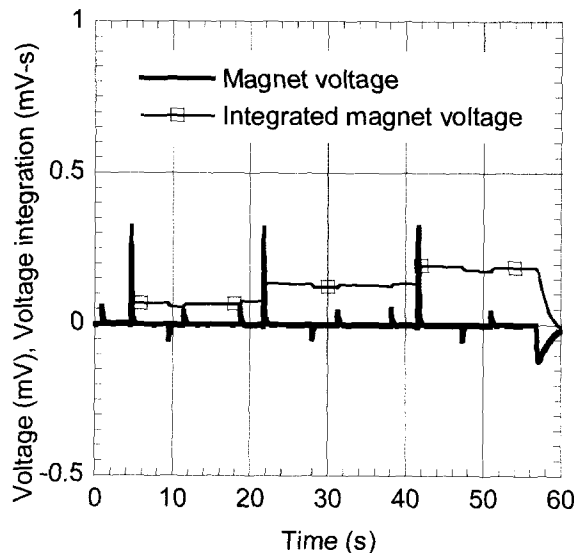
(a)



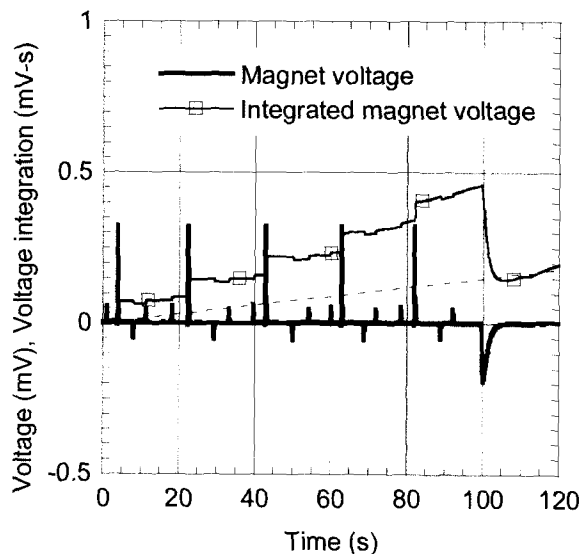
(b)

그림 6. 플럭스 펌프 작동시의 자석 전압 신호 확대 (a) 첫 번째 충전시, (b) 다섯 번째 충전시
Fig. 6. Magnified view of magnet terminal voltage during the charging processes (a) 1st charging event (b) 5th charging event

펌프와 상온의 계측 장비 사이에서 발생하는 계측선의 열전효과의 영향이다. 그림 7은 (a) 3 번의 연속적인 플럭스 펌프 동작 (b) 5 번의 연속적인 플럭스 펌프 동작 과정 동안 측정한 자석 양단간의 전압 신호와 이를 컴퓨터에서 시간 적분한 값을 나타낸다. 직접 전압 신호를 측정하는 동안에는 매우 미약하기 때문에 잘 나타나지 않지만, 적분된 신호를 보면, (a)와는 달리 (b)의 경우에 약 100 초 동안 전압 신호선에서 열전효과의 변화에 따른 전압 신호의 열적 전이



(a)



(b)

그림 7. 플럭스 펌프 동작시의 자석 전압과 그의 시간 적분 신호 (a) 전압 신호선에서 열전효과의 변화가 작은 경우 (3 번 펌핑) (b) 전압 신호선에서 열전효과의 변화가 큰 경우 (5 번 펌핑)
Fig. 7. Measured and integrated magnet terminal voltages during charging processes (a) small thermal drift of signal voltage at 3 pumping operations (b) large thermal drift of signal voltage at 5 pumping operations

실험 결과에 의하면, 본 플럭스 펌프가 수 마이크로 암페어의 전류를 초전도 자석에 안정되게 주기적으로 공급할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 초기 전류가 0 이었던 부하 초전도 자석을, 플럭스 펌프를 수 차례 작동시킨 후에 방전시킴으로써 해서, 이론적으

로 예상되었던 양만큼 전류가 충전되었다는 사실을 증명하였다.

3.5. 플럭스 펌프의 온도 안정성

본 플럭스 펌프는 증발하는 액체 헬륨의 증기에 의하여 초전도 상태로 대부분이 냉각되고, 일부 스위치 부분은 정상 상태(normal state) 와 초전도 상태를 전이하면서 작동하므로, 플럭스 펌프의 실제 온도는 실험장치의 저온조 내 액체 헬륨의 상태에 민감하였다. 하지만 일단, 액체 헬륨의 공급이 정상 상태에 도달한 후에는 플럭스 펌프의 온도 또한 안정된 분포를 보였다. 앞에서 보여준 실험 결과를 보면 Nb3Sn 테이프로 제작이 된 플럭스 펌프의 온도가 임계 온도 이하에서 잘 작동이 되는 것을 알 수 있다. 플럭스 펌프의 온도는 스위치 부에서 히터의 열로 인하여 시간이 감에 따라 약간의 온도 증가를 보였는데, 이러한 것은 반복된 실험을 통하여 최적의 히터 작동 시간을 경험적으로 구하고, 헬륨 증기의 냉각 조건을 조절하면 쉽게 극복이 되는 문제라 사료된다.

4. 결 론

본 논문은 수 마이크로 암페어의 전류를 정확하게 주기적으로 초전도 자석에 공급하는 플럭스 펌프의 설계, 제작 및 실험에 관한 것이다. 본 플럭스 펌프의 설계 개념은, 향후 고자장 NMR 자석의 내부 코일로서 고온 초전도 선재가 사용이 될 것을 예상하여, 이를 준 영구 모드로 작동을 시키고자 하는데 있다. 실험 결과에 의하면 본 논문에서 제작한 모델 플럭스 펌프가 매 번 9 μ A의 전류를 부하 초전도 자석에 공급할 수 있다는 것을 측정할 수 있었다. 특히 본 논문에서 언급한 플럭스 펌프는, 전체 저온 초전도 자석 시스템의 액체 헬륨 소모량을 감소시키도록, 액체 헬륨의 계면 위에서, 증발하는 헬륨 증기에 의하여 안정되게 냉각이 되며 작동할 수 있다는 것이 특징이다. 실험을 통하여 플럭스 펌프의 전반적인 설계, 제작 과정 및 동작 특성을 확인할 수 있었고 스위치 히터의 작동 시간에 대한 최적화가 필요함을 알았다.

후 기

본 논문의 실험 내용은 저자가 2000년 8월부터 1년 동안 MIT의 Francis Bitter Magnet Laboratory 를 방문하여, 그 곳에서 진행되고 있는 플럭스 펌프 연구 과제에 참여하여 수행한 것으로서, 흥미로운 연구 기회를 제공해 주고 많은 기술적인 조언을 아끼지 않은 Yukikazu Iwasa 박사님, 그리고 실험용 데이터 획득 장치 등의 도움을 준 이해근 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] Wilson, M. N., Superconducting magnets, Oxford University Press, New York, pp. 274-278, 1983.
[2] Homer, G. J., Houzego, P. J., Scott, C.

A., and Wilson, M. N., IEEE Transactions on Magnetics, Mag-11, pp. 576-579, 1975.
[3] Hazelton, D. W., Yuan, X., Weijers, H. W., and Van Sciver, S. W., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, pp. 956-959, 1999.
[4] Iwasa, Y., Case studies in superconducting magnets, Plenum Press, New York, pp. 306-308, 1994.
[5] Iwasa, Y., "Microampere Flux Pumps for Superconducting NMR Magnets Part 1: Basic Concept and Microtesla Flux Measurement", Cryogenics, Vol. 41, pp. 385-391, 2001.

저 자 소 개



정상권(丁常權)

1962년 8월 16일 생, 1985년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박), 1992년~1995년 MIT-Plasma Fusion Center 연구원, 현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수