

MRI용 영구전류스위치의 열적 트리거 제어를 위한 단열 방법 및 조건에 관한 연구

고락길, 배준한, 심기덕, 진홍범, 권영길, 류강식
한국전기연구소

Study on the adiabatic method and condition of persist current switch for MRI

Rockkil Ko, Joonhan Bae, Kideok Sim, Hongbeam Jin, Youngkil Kwon, Kangsik Ryu
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

In order to design thermally trigger controlled persistent current switch(PCS) for MRI magnet system, it is very important to know informations of applied adiabatic method and condition to get designed resistance and characteristics.

Adiabatic part of PCS is consist of cotton-gummed tape and cryogenic stycast. This adiabatic method has the advantage of continuously winding superconducting and adiabatic part of PCS and reducing the time of manufacture. We experimentally derived averaged thermal conductivity on the assumption that shape of adiabatic part of PCS is that of pipe.

In result, averaged thermal conductivity is about 0.29 W/m·K and designed value is very satisfied with actual experimental data.

1. 서 론

초전도 기술의 대표적인 특징 중에 하나인 초전도영구전류운전은 극저온 환경에서 전기적인 저항이 영이 되는 초전도 상태인 도체에 높은 전류를 손실 없이 연속적으로 통전 시킬 수 있다는 특징을 이용하는 것으로 외부로부터 한번의 충전으로 일정기간동안 원하는 자장을 얻을 수 있는 상태를 말한다. 특히 MRI, NMR 등과 같은 초전도마그네트 시스템에서는 한번 충전 후 외부로부터의 전원 장치와 완전히 분리시켜 초전도영구전류상태로 운전시킨다. 이때 충전 상태의 운전에서 초전도영구전류운전 상태로 초전도마그네트시스템을 전환시켜주는 역할을 하는 것이 초전도영구전류스위치(PCS; Persistent Current Switch)이다. 그림 1(a)는 초전도마그네트 시스템 충전 상태의 운전을 나타내고, 그림 1(b)는 초전도영구전류의 운전 상태를 나타낸다. 일반적으로 PCS는 비자성체의 보빈에 초전도선재와 히터를 솔레노이드 형태로 권선하고 이를 외부의 극저온 환경으로부터 단열시키게 구성된다. 이때 히터의 제한된 열용량으로 초전도선재와 권선되어 있는 영역을 켈치 온도이상으로 증가시켜 초전도선재가 일정한 저항값을 갖도록 제어할 수 있는 단열 구조를 구성하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 솔레노이드형 PCS의 단열부의 형태를 제한된 길이를 갖는 파이프 상태로 가정하여 면-고무 테이프를 이용해 구성된 단열부의 평균열전도율을 실험적으로 유도하여, 이를 이용한 PCS의 열적 트리거 제어 가능성함을 고찰하려 한다.

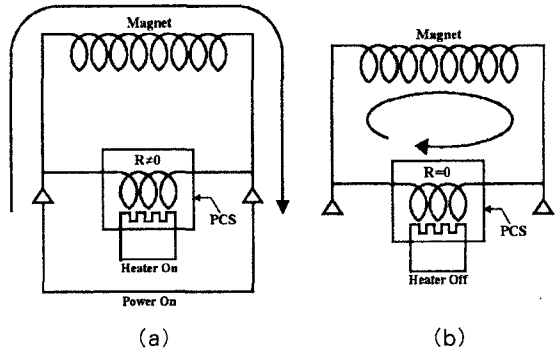


그림 1 (a)충전 상태의 운전 (b)초전도영구전류 상태의 운전

2. 본 론

2.1 PCS 구조

본 연구에서 적용한 PCS의 기본적인 단열구조는 그림 2와 같다. FRP bobbin 위에 상전도 저항 값을 높게 하기 위해 비저항이 큰 CuNi를 안정화제로 사용한 NbTi 초전도선재를 권선한다. 일반적으로 전류의 방향이 서로 반대가 되어 흐르도록 선재를 bifilar로 하여 인덕턴스가 최소가 되는 무유도 권선을 함으로써 자체의 교란을 최소화시키게 된다. 초전도 권선과 함께 히터선의 권선도 함께 이루어지게 되며, 이때 히터의 발열은 초전도 권선부를 거쳐 그 외층의 단열부까지 전달된다. 그림 2에서 R0는 권선되어 지는 보빈의 반경이고, R1과 R2는 보빈의 중심으로부터 단열부의 안쪽 반경과 바깥쪽 반경을 나타낸다. L은 단열부의 길이를 나타내고, ΔQ는 히터에 의한 발열을, ΔT는 PCS의 중심부 온도와 단열부 바깥쪽 온도차를 나타내며 CGR1-CGR3로부터 측정된다. 히터에 의한 발열은 0부터 시작하므로 ΔQ = I_h² R_h라 할 수 있다. 여기서 I_h는 히터 전류이고, R_h는 히터 저항이다. 그러므로 단열부의 형태를 파이프 상태로 가정하고 후리에 법칙을 적용하면 단열부의 평균 열전도율 λ를 다음과 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$\lambda \approx -\frac{I_h^2 R_h}{2\pi L \Delta T} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (1)$$

본 연구에서는 PCS의 초전도 선재가 10K에서 갖는 저항값을 기준으로 단열 조건을 설정하였다. 이는 PCS의 단열에 의해 단열부 바깥쪽은 액체 헬륨온도인 4.2K를 거의 유지하고 내부의 초전도 권선부에서는 10K를 유지하는 것을 개발 목표로 하는 것이다. 그러므로 ΔT의 기준은 10-4.2=5.8K이 된다. 본 연구에서는 온도

센서의 오차를 고려하여 6.0K를 사용하였다.

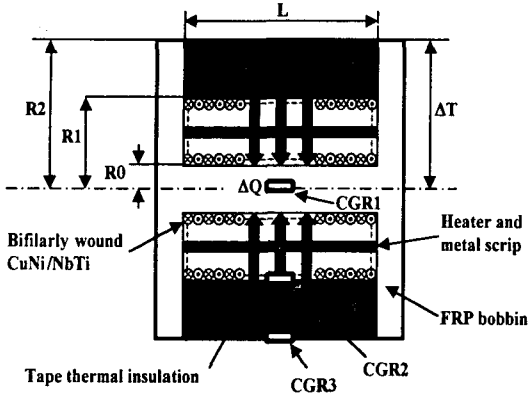


그림 2 PCS의 구조

2.2 PCS 제작

모두 5개의 PCS를 제작하였으며, 그 중 하나에 실험을 위해 그림 2와 같이 FRP 보빈 중심(CGR1)과, 단열부 안쪽(CGR2)과 바깥쪽(CGR3)에 각각 극저온 온도 센서인 CGR 센서를 부착하였다. 각 PCS에 대한 제작 parameters는 표 1에서 알 수 있다. 초전도 권선의 중간 층 사이에 중심에서 대칭이 되게 히터를 촘촘히 권선 했으며, 히터에 의한 열전달을 높이기 위해 금속 조각으로 알루미늄 테이프를 한 층 깔고 권선 했다.

본 연구에서는 PCS의 단열을 위해 일반적으로 전기절연용으로 사용하는 면-고무 테이프를 설계 수치만큼 권선 하였으며, 이를 극저온 에폭시인 stycast로 고정하였다. 이 방법은 PCS의 초전도 권선 작업 후 연속적으로 단열 작업이 가능하여 제작의 편의성을 제공하고 제작 시간을 단축시키는 장점을 갖는다.

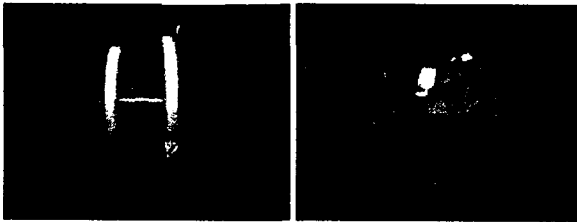


그림 3 (a) PCS1의 초전도선재 권선 후 모습
(b) PCS1의 완성된 모습

2.3 실험 방법

CGR 센서가 내장된 PCS1에 히터 전류를 변화시키면서 PCS 양단에 전류 100mA를 흘리며 4단자법으로 양단전압을 측정하여 히터 전류에 의한 PCS의 저항 변화를 측정하였다. PCS의 운전은 정해진 히터 저항에 전류를 변화시켜서 히터 열량을 변화시키게 되므로 히터 열량과 저항의 관계를 측정하는 것 보다 히터 전류와 저항과의 관계를 측정하는 것이 유리하다. 실제로 PCS의 히터 전류 또는 히터 열량과 저항 관계는 PCS의 단열 조건에 의해 열평형이 이루어지는 저항값에서 포화되게 되므로 포화저항 도달 이후의 더 높은 히터 전류는 포화

시간을 단축시키고 열적 손실을 증가시킬 뿐이다. 그러므로 포화저항에 이르는 가장 낮은 히터 전류를 선택하는 것이 유리하다. 또한 히터 전류를 적게 사용하면 그만큼 PCS의 회복 속도 또한 빠르게 된다. PCS의 스위칭 시간은 포화저항까지 도달하는 켄치 시간과 다시 초전도 상태로 돌아가는 회복 시간으로 나눌 수 있는데, 실제 MRI의 충전 시는 오랜 시간이 걸리므로 켄치 시간보다는 회복 시간이 빠른 것이 유리하다.

PCS1의 데이터로부터 식(1)을 이용하여 테이프를 이용한 단열 방법에 대한 수용 가능한 평균열전도율인 λ 의 유도가 가능하다. 유도한 λ 를 이용하여 다른 PCS 2~5의 측정결과와 비교하여 그 타당성을 검증한다.

2.4 실험 결과 및 논의

히터 전류를 인가한 후 PCS의 내부 온도 곡선은 처음에 급격히 증가하다가 점점 어느 온도이상에서는 그 증가가 매우 둔화되면서 포화되는 양상을 보인다. 이는 포화되는 시점에서 PCS의 내부와 외부 사이의 열적 평형 상태가 도달됨을 의미한다. 온도 상승으로 인해 PCS의 저항 또한 포화되는데, 온도의 경우 온도 상승 기울기가 완만해지면서 완전 포화까지 오랜 시간이 소요되지만, 상대적으로 저항의 포화는 빨리 이루어진다. 본 실험에서는 전류에 따라 PCS의 저항 증가 기울기가 급격히 감소할 때와 시간을 두고 PCS의 온도가 포화되어 최고 온도를 가질 때의 PCS 온도차와 저항을 각각 측정하여 그림 4에 나타내었다. 측정된 ΔT 를 식(1)에 대입시켜 각 히터전류에 대한 열전도율을 구하고 이를 fitting 하여 PCS1에 대한 실제적인 곡선을 그림 4에 나타내었다. 여기서 두 곡선은 비선형적인 열관계를 나타내는 실제적인 곡선으로써, 일정 온도 영역 내에서 수용 가능한 선형 단순화 관계를 유도함에 있어서 이 두 곡선은 경계값으로 생각할 수 있으므로 평균적인 열전도율 λ 를 적용하여 두 곡선 사이에서 얻는 값을 신뢰할 수 있을 것이다.

본 연구에서 실험을 통해 얻은 면-고무 테이프를 이용한 단열재의 평균열전도율은 $\lambda=0.29 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 이다. 이를 제작 parameters가 다른 PCS에 적용하여 확인한 결과, 실험을 통해 얻은 평균열전도율을 적용해 계산된 $\Delta T=6$ 일 때의 히터 전류가 실제 제작된 PCS의 10K일 때 갖는 설계 저항값에 대해 모두 97%이상을 나타내었다.

이를 표 1과 그림 5에 나타내었으며, 그림 5에서 점선의 곡선은 인가된 히터 전류인 I_h 에 따른 PCS의 포화 곡선이고, 실선의 곡선은 계산에 의한 ΔT 의 예측 곡선이다. 화살표는 $\Delta T=6$ 에서 예측 곡선의 히터 전류와 이때의 포화 저항을 알려주며, 그 값이 매우 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 여기서 표 1의 R_s 는 PCS의 포화저항이다.

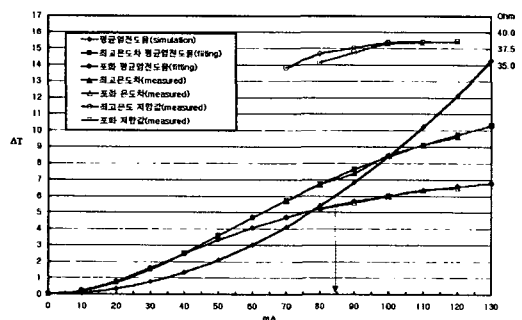


그림 4 PCS1에 대한 I_h vs. ΔT 과 I_h vs. R_s 그래프

표 1 PCS1~5에 대한 제작 parameters와 simulation에 의한 I_h , R_s 의 설계값과 측정값

	R1 (mm)	R2 (mm)	L (mm)	Rh (Ω)	Ih (mA)	Rs(Ω)	
						설계값	측정값
PCS1	34	62	40	102.4	84	37.8	37 (98%)
PCS2	17	23	10	46.8	88	0.76	0.74 (97%)
PCS3	17	23	10	44.1	91	0.76	0.74 (97%)
PCS4	17	23	10	38.1	97	0.76	0.74 (97%)
PCS5	17	23	14	38.5	115	1.06	1.03 (97%)

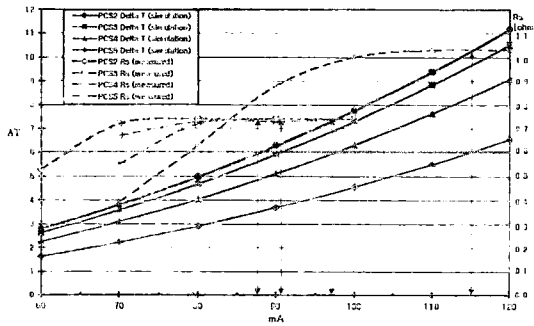


그림 5 PCS2~5에 대한 I_h vs ΔT 과 I_h vs. R_s 그래프

위의 실험 결과를 통해 PCS1의 단일 조건에서는 약 84mA의 히터 전류로 효율적인 PCS1의 운전이 가능함을 확인하였으므로 히터 전류 80mA로 영구전류실험을 하였다. 250A의 운전 전류를 1A/sec의 속도로 충전시킨 후 히터 전류를 차단하였고, 실험용 소용 초전도 마그네트의 자장을 측정하는 홀 센서가 일정한 자장을 유지함으로써 초전도영구전류 상태로 진입하는 것을 확인하였다.

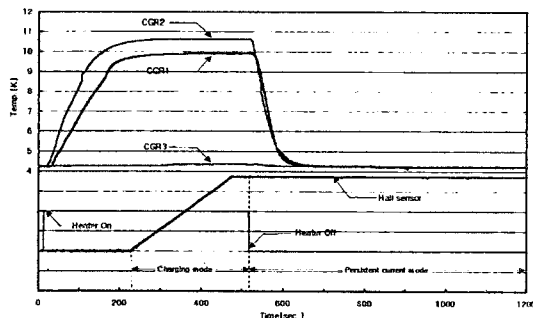


그림 6 PCS의 영구전류운전 실험

3. 결 론

PCS의 단일부를 면-고무 테이프를 이용하여 구성하기

위해 단일부의 구조를 제한된 길이를 갖는 파이프 형태로 가정하고 실험을 통해 평균적인 열전도율이 약 0.29 W/m·K임을 알았다. 이 열전도율을 적용해 단일부의 안쪽과 바깥쪽의 온도차를 6K으로 하여 설계된 PCS는 10K을 기준으로 설계된 PCS 저항값의 약 97%이상을 가지므로 선형 단일재로 제어하는 간략한 모델의 설정이 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 단일구조 설계 방법은 임의의 어떠한 단일재를 이용하더라도 평균적인 열전도율을 유도하여 최적의 단일구조를 갖도록 설계할 수 있고, 이렇게 설계된 PCS는 최소의 히터 열량으로 PCS의 포화 저항 R_s 에 도달시키므로 히터에 의한 충전 시 발생하는 액체 헬륨의 소비도 최소화되고 빠른 회복시간을 갖는 장점이 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 濑谷 和幸, "無冷媒 マグネット의 NbTi 超傳導 永久電流運轉", 低温工学, Vol. 32, No. 10, pp499-506, 1997
- [2] 한국전기연구소, 보건복지부, "G7의료공학 연구개발사업 고자장 자기공명영상 장치 및 초전도 자석 개발(2차년도 연차실적·계획서)", 1999
- [3] 고락길, "핵자기공명 마그네트용 알루미늄 보빈 영구전류스위치", 한국초전도·저온공학회, 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, 제1권 1호, pp138-141, 1999.1.
- [4] Salasoo, "Superconducting switch", US Patent 5512870, 1996
- [5] Peak, "Persistent protective switch for superconductive magnets", US Patent 5361055, 1994

감사의 글

본 연구는 보건복지부에서 시행한 선도기술·의료공학 기술개발 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.