

핵자기공명 마그네트용 알루미늄 보빈 영구전류스위치

고락길, 배준한, 이언용, 권영길, 손명환, 진홍범, 백승규, 류강식
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

AL-bobbin Persistent Current Switch for MRI Magnet

Rock-kil Ko, Joon-Han Bae, Eon-Yong Lee, Young-Kil Kwon, Myong-Hwan Sohn,
Hong-Beam Jin, Seng-Kyu Baik and Kang-Sik Ryu
Korea Electrotechnology Research Institute
rkko@keri.re.kr

Abstract - 전류의 손실 없이 MRI 마그네트의 영구전류 운전을 위한 영구전류스위치(Persistent Current Switch;PCS)를 설계 및 제작하여 그 특성을 측정하였다. 한국전기연구소의 Whole body MRI 마그네트로의 적용을 위해 설계되었으며, 또한 PCS 보빈을 기존의 FRP에 비해 열전도 특성과 기계적 강도가 우수한 알루미늄으로 제작하였다.

Main 코일 1개와 Shim 코일 9개의 PCS에 대한 필요한 파라미터를 계산하여 제작하였다. PCS의 기본요구조건인 step 형태의 스위칭 특성과 각 PCS가 실온저항의 50%~55%의 상전도 저항 특성을 보임을 확인하였다.

1. 서 론

전기저항이 zero라는 초전도 현상이 갖는 큰 장점 중에 하나가 에너지의 손실이 없다는 것이다. 이를 이용해 초전도 시스템에 전원을 한번 공급하고 폐회로를 구성함으로써 더 이상의 전류 공급이 없이도 계속 가동되는 상태를 영구전류모드라 한다. 전원과 초전도 시스템 사이에 병렬로 초전도체를 연결하여 폐회로를 구성하며, 이때 병렬로 연결되는 초전도체에 열을 가해 이를 퀸치시키므로 영구전류상태를 on, off 시키는 열트리거 방식의 스위치 역할을 하게 된다. 영구전류모드를 구현하므로써 안정적인 고자장을 발생시킬 수 있으며, 전류 리드선을 제거시켜 이를 통한 열침입에 의한 LHe의 증발이 억제되므로 운전비용을 절약할 수 있다. 또한 전체적인 초전도 마그네트 시스템의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있으므로 PCS는 MRI, NMR, SMES, MAGLEV 등 많은 초전도 마그네트 응용 시스템에 쓰이게 된다.

MRI용 PCS 설계시 고려되어야 할 기본적인 사항들로 먼저, MRI 시스템에 필요한 최대 동작 전류를 흘릴 수 있도록 충분한 임계전류 값을 갖는 초전도선재를 선택해야 한다. 그리고 충전시는 에너지 손실을 최소가 되도록하고, 퀸치시는 PCS가 과열되어 손상을 입지 않도록 해야한다. 또한 전류인가시 자계교란을 최소화시킬 수 있도록 하며, 히터에 의한 열손실은 최소가 되고, 열

전달은 최대가 되도록 히터 저항 및 히터 전류의 최적 값과 히터 권선 위치를 결정해야 한다.

2. 본 론

2.1 PCS 설계

2.1.1 초전도선재길이 결정과 히터 설계

PCS의 설계는 충·방전시 에너지 손실을 최소로 하는 조건과 퀸치시 시스템과 PCS를 보호할 수 있는 보호 조건으로부터 유도되어질 수 있다.

MRI 시스템은 전원으로부터 선형적으로 전류를 인가하여 동작전류인 $I_0(t)$ 까지 충전시켜 영구전류모드로 만든다. 이때 충전시간 t_m 동안 PCS의 상전도 저항 R_s 와 보호저항 R_p 에도 양단 전압 V_p 에 비례하는 전류가 흐르게 되어 에너지 손실이 발생한다.[1] 따라서, 이 에너지 손실이 최소가 되도록 PCS를 설계 해야한다.

Fig.1.과 같은 MRI 마그네트 충전시 회로를 고려하자. 그림에서 R_{loss} 는 R_s 와 R_p 의 병렬등가저항으로 즉, $\frac{1}{R_{loss}} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_p}$ 이며, I_{loss} 는 등가저항에 흐르는 손실전류이다.

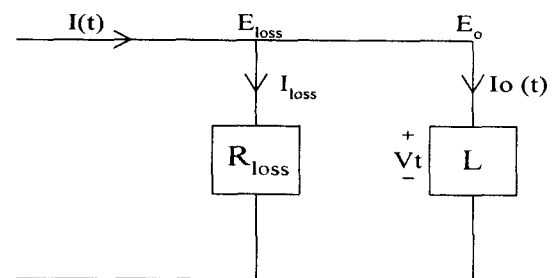


Fig.1. Equivalent circuit for charging a MRI magnet.

또한 E_0 , E_{loss} 는 각각 MRI마그네트에 필요한 에너지와 손실에너지이다. Fig.1.을 이용하여

손실에너지 대 충전에너지로 정의되는 에너지 손실률 ζ 를 계산하면 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{E_{loss}}{E_0} \times 100 = \frac{200L}{R_{loss}t_{ru}} [\%]$$

위 식을 통해 알 수 있듯이 MRI 마그네트 충전시 에너지 손실을 작게 하려면 R_s 를 크게 하고, 전류증가 시간 t_{ru} 를 길게 하면 된다. 이는 비저항이 큰 CuNi를 모재로 하는 초전도선재를 선택하고, 전류의 선형 증가율을 작게 하여 충전 시간을 길게 하면 된다. 따라서, 손실저항 R_{loss} 와 전류증가 시간 t_{ru} 에 의하여 결정되는 에너지 손실률 ζ 를 이용하여 MRI 마그네트 충전시 에너지 손실이 ζ [%] 이하가 되도록 하는 R_{loss} 에 대한 조건식을 얻을 수 있다.

$$R_{loss} \geq \frac{200L}{\zeta t_{ru}}$$

퀀치시 MRI 마그네트의 저장 에너지 E_0 는 PCS의 상전도 저항 R_s 를 통하여 소모되며 PCS는 전체 시스템의 보호를 위해 이를 감당할 수 있도록 충분히 길게 설계되어야 한다. 또는 마그네트 저장 에너지를 분산시킬 수 있는 보호 저항을 연결하면 초전도선재의 길이를 짧게 할 수도 있다.

마그네트의 저장 에너지 E_0 를 에너지 분배율 α ($0 < \alpha < 1$)를 적용해서 PCS가 감당해야 할 에너지 E_s 와 보호저항이 감당해야 할 에너지 E_p 로 나눌 수 있다. 즉,

$$E_s = \alpha E_0 = \alpha \int_0^t \frac{V_t^2(t)}{R_{loss}(t)} dt$$

$$E_p = (1 - \alpha)E_0$$

퀀치 발생은 매우 짧은 시간에 이루어지는 단열과정으로 $R_s(t)$ 를 일정하다고 가정할 수 있으며, 일단 R_{loss} 가 결정되면, PCS의 상전도 저항 R_s 와 보호저항 R_p 를 각각 계산할 수 있다. 또한, PCS의 보빈 설계를 위한 선재길이 l_s 를 결정할 수 있다.[2] 즉,

$$R_s = \frac{1}{\alpha} R_{loss}$$

$$R_p = \frac{1}{(1 - \alpha)} R_{loss}$$

$$l_s = \frac{R_{loss}}{\alpha} \frac{A_s}{\rho_s}$$

PCS에 필요한 초전도선재 길이는 α 와 R_{loss} 를 적당히 조절하여 결정할 수 있다. 이때 선재의 비저항이 중요한 변수인데 선재의 구성물질에 따라 적절히 고려해야 한다. 또한 PCS에서 감당할 에너지를 작게 설계하려면 보호저항 값은 PCS의 상전도저항 보다 더 작은 값이 되도록 한다.

MRI 마그네트를 충전시 히터에 의한 열효율

을 높이기 위해, 히터선을 PCS의 중앙에 권선하여 히터열과 냉매와의 직접적인 열접촉을 피하도록 한다. 또한 빠른 상전도 전이를 위하여 보빈 길이 방향으로 촘촘하게 히터선을 권선 한다. PCS의 보빈 형태와 사용할 히터선재가 정해지면 히터 권선을 위한 각 파라미터를 구할 수 있다. 본 연구에서는 Fig.2.와 같이 히터 권선을 단층으로 하고, 히터 권선 반지름 r_h 와 히터 권선수 N_h , 히터선재 길이 l_h , 그리고 히터저항 R_h 등의 설계 파라미터를 도출하였다.(Table.1.)

한편, 충전시 히터를 이용하여 초전도선재의 온도를 임계온도인 T_c 이상까지 올리는 과정은 완전한 단열과정으로 볼 수 없다. 따라서 초전도 권선에 가해진 히터에너지는 초전도선의 온도를 T_c 이상으로 유지시키는 열량과 냉매인 LHe으로 빼앗기는 열량을 모두 고려한 값이어야 한다. 또한 임계온도보다 약간 높은 온도에서 PCS가 안정된 상전도 상태에 있도록 하여 냉매의 증발량을 최소화할 수 있다.

Table.1. Designed parameters for a PCS.

	Main	Z2	Z3	Z1,X,Y,XZ,YZ, X2-Y2,XY
Ls[m]	40.0	37.7	28.5	4.4
Rs[Ω]	14.8	14.2	10.7	2.0
Rp[Ω]	0.78	1.5	1.1	0.2
Lh[m]	9.37	9.37	9.37	4.0
Rh[Ω]	346	346	346	147

2.1.2 보빈 설계

결정된 길이의 초전도 선재를 가지고 PCS 보빈에 권선을 하기 위해서는 보빈 크기가 결정되어야 한다. 무유도 권선은 PCS의 인덕턴스 성분을 최소화 시켜 전류인가 시 유도전류에 의한 자계교란을 최소화시킬 수 있다. 본 연구에서는 Fig.2.와 같이 내·외층이 동일한 권선수(N_s)를 갖는 무유도 형태의 PCS를 기준으로 보빈 설계를 하였다. Fig.2.에서 r_{inner} , r_{outer} , b , r_h 는 각각 권선내측 반지름, 권선외측 반지름, 보빈 길이, 그리고 히터권선 반지름이다. 결정된 선재길이를 기준으로 r_{inner} , r_{outer} , b 의 적당한 범위를 주면서 동심·동축 코일의 경우에 적용되는 Nagaoka 공식을 이용하여 PCS의 인덕턴스 L_s 를 계산한다.[3] 이때 파라미터의 변화에 따라 $L_s \approx 0$ 되는 적당한 데이터를 결정한다. Table.2.는 Main과 Shim용 PCS에 대한 각각의 보빈 설계 값과 권선을 위한 값을 나타낸다.

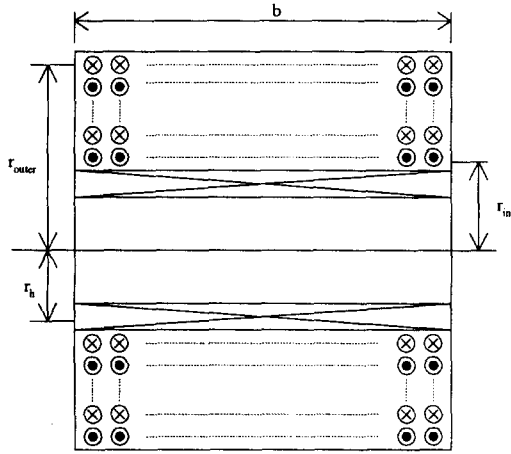


Fig.2. Design parameters of a PCS bobbin.

Table.2. Designed parameters of PCS bobbin.

	Main	Z2	Z3	Z1,X,Y,XZ,YZ, X2-Y2,XY
r_{inner} [cm]	2.06	2.06	2.06	15.6
r_{outer} [cm]	6.44	6.44	6.44	16.8
b [cm]	4.5	4.3	3.2	2.6
N_{layer} [layer]	6	6	6	2
N_s [turns]	37	35	26	21
r_h [cm]	2.36	2.36	2.36	1.62
N_h [turns]	63	46	46	51

2.2 PCS 제작

전기연구소의 whole body MRI용 초전도 마그네트는 기존의 FRP보다 열전도 특성과 기계적 강도가 좋은 알루미늄 보빈을 사용하여 제작하였다. 이에 맞추어 PCS도 같은 알루미늄 보빈을 사용하여 열전도 냉각효과를 극대화시키고자 했다.

알루미늄 보빈의 경우 도체이므로 캡톤 테이프를 전기적인 절연을 철저히 시켰다. PCS의 크기는 마그네트 내에 부착 될 위치 및 공간을 고려하여 10cm×20cm×10cm을 넘지 않도록 제한 조건을 주어 설계되도록 프로그램을 작성하였다.

PCS 자체가 초전도마그네트에 대해 자계교란을 일으키지 않고, 제작이 용이하도록 직렬 무유도 권선을 한다. 비정상적인 퀘치를 방지할 수 있도록 권선기로 일정한 장력을 가하며 권선 한 후, 절연 테이프에 저온용 에폭시 수지를 얇게 바르며 각 PCS에 따라 2~5층 정도 권선하여 초전도선의 움직임이 없도록 마무리한다. 절연 테이프의 권선 정도는 PCS의 단열에 큰 영향을 미치므로 적정 권선 정도의 결정이 중요하며, 이는 제작자의 경험에 의해 이루어진다.

히터 권선 방법에는 몇 가지가 있으나, 히터에 의해 발생된 열이 되도록 넓게 PCS 초전도선에 전달될 수 있도록 초전도 권선의 중간층에

위치시키고, 촘촘하게 권선하였다. 이 방법은 확실한 퀘치와 빠른 스위칭 시간의 장점을 갖는다. Fig.3.은 Main 코일과 Shim 코일에 대한 각각의 제작된 PCS를 보여주고 있다.

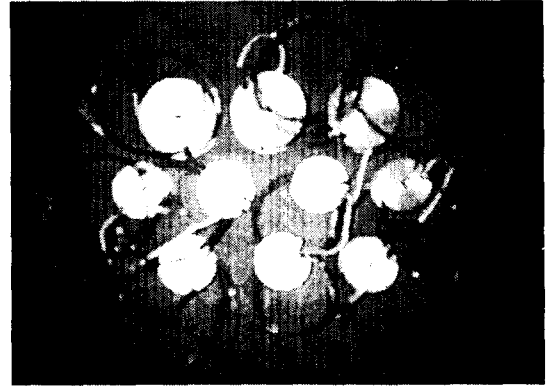


Fig.3. PCS of main and shim coils.

PCS 초전도선은 CuNi를 모재로 하는 NbTi 선재를 사용하여 선재의 길이는 짧게 하면서도 큰 상전도 저항을 얻을 수 있다.[4] Table.3.은 사용된 초전도선재와 히터선재에 대한 제원을 나타낸다.

Table.3. Specifications of
(a) the superconductor and
(b) the heater wire for the PCS.

(a)		(b)	
선재종류	CuNi/NbTi	선재종류	Ni80%-Cr
선재지름 [mm]	1.12	비저항 [$\mu\Omega m$]	107
필라멘트 수	559	선재지름	0.24
CuNi/NbTi	1.11	Fusing Current (공기중) [A]	2.5
임계전류 (@5T) [A]	653	Fusing Current (진공중) [A]	1.8
임계전류 밀도 (@5T) [A/mm ²]	1594		

2.3 PCS 특성 평가

제작된 PCS 모듈을 서로 직렬로 초전도접합 (superconducting joint)시켜 LHe cryostat에 넣고 하나씩 동작시키면서 특성을 평가한 후, 실제 Whole body MRI용 초전도 마그네트에 부착했다. Fig.4.는 제작된 PCS와 보호저항이 마그네트 플랜지에 부착된 모습이다.

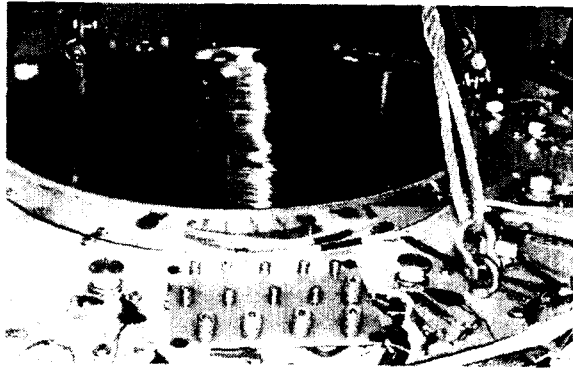


Fig.4. Installed PCS and protection resistances on the top flange.

4단자 측정법을 이용한 양단 전압 측정을 통해 제작된 PCS의 상전도 저항과 on, off 스위칭 특성을 평가하였다. 측정시 100mA의 전송전류를 흘렸으며, 이는 MRI 마그네트 시스템의 누설전류를 100mA 이하로 가정한 것이다.

Fig.5.(a)는 main용 PCS에 대한 히터전류 170mA를 인가시 나타낸 스위칭 특성이다. 히터전류 인가와 거의 동시에 켜치 되었고, 약 17초 후에 더 이상의 전압 상승없이 0.74V에서 포화되었다. 즉, 상전도 저항 7.4Ω임 알 수 있고 이는 PCS 실온저항의 약 50%에 해당하는 것이다. 히터 전류를 중단했을 때, 다시 초전도상태로 돌아가는데는 7.3초가 걸렸다. 그러므로 main용 PCS의 스위칭 시간은 켜치시간 17.4초, 회복시간 7.2초로 PCS와 액체 헬륨 사이의 열전달이 PCS와 히터간의 열전달 보다 약 2.4배 정도 더 활발히 진행됨을 알 수 있다.

Shim(Z1, Z2, Z3, X, Y, XZ, YZ, X2-Y2, XY)용 PCS도 전송전류 100mA와 히터전류 220mA~300mA 사이에서 스위칭 특성을 확인하였다.

Z1, X, Y, XZ, YZ, X2-Y2, XY용 PCS는 동일한 parameter로 설계되었기 때문에, 모두 거의 비슷한 특성을 보였다. 히터 전류 280mA~300mA에서 켜치시간 약 5초, 회복시간 약 3초의 스위칭 특성과 1.2Ω의 상전도저항을 가졌다.(Fig.5.(b))

Z2용 PCS는 히터 전류 190mA, 켜치시간 18초, 회복시간 6.4초, 상전도저항 7.7Ω이었고(Fig.5.(c)), Z3용 PCS는 히터전류 220mA, 켜치시간 30초, 회복시간 10초의 스위치 특성에 상전도저항 6.2Ω이었다.(Fig.5.(d))

각 PCS가 나타낸 상전도 저항은 각 PCS의 실온저항의 50%~55%에 해당하는 저항 값이다.

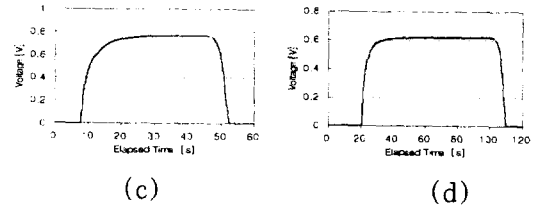
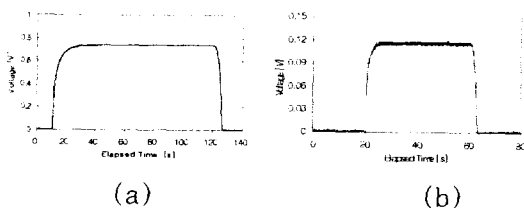


Fig.5. Switching characteristics of the PCS for (a)main coil (b)Z1,X,Y,XZ,YZ, X2-Y2,XY coils (c)Z2 coil and (d) Z3 coil.

3. 결 론

본 연구를 통한 설계법에 의해 제작된 알루미늄 보빈 MRI용 PCS가 MRI 시스템을 영구전류 모드로 운전 가능하게 하는 스위칭 역할을 충실히 수행할 수 있음을 확인하고, 각 PCS가 실온저항의 50%~55%의 저항 값을 갖음을 알 수 있었다. 이는 알루미늄 보빈을 사용해 열전도 냉각효과를 향상시키기 위한 전기연구소의 Whole body MRI용 초전도 마그네트와 잘 부합되어 냉각효과를 극대화시킬 수 있을 것이다.

또한 히터를 초전도체의 사이에 위치시키고, 촘촘하게 권선하는 것이 히터에 의한 열을 PCS에 넓고 빠르게 전파시킬 수 있음을 확인했다.

본 연구에서 누설 전류를 100mA 이하로 가정한지만, 실제로 MRI 시스템에서의 누설 전류를 정확히 알아야 하고, 천 테이프와 저온용 에폭시 수지를 이용한 단열방법에 대한 정량적인 열전달 관계를 알아내는 것이 앞으로 PCS 설계 및 제작을 위해 매우 중요하리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.N.Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press, Oxford, 1983
- [2] 한국전기연구소, "저온 초전도 선재 개발 (3차년도 중간 보고서)", 307-358, 1994
- [3] F.W.Grover, "Inductance Calculation -Working formulas and tables-, D.van Nostrand, New York, 1947
- [4] M. Urata, T. Yazawa, H. Maeda., T. Tomisaki, S. Kabashima, K. Sasaki, and T. Kumano, "Stabilization of Cu-Ni based persistent current switch", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.3, 586-589, Mar. 1993