

# 열 제어형 초전도 스위치의 최적화 설계 및 특성 평가

고락길, 배준한, 권영길, 조영식\*  
한국전기연구원, 창원대학교\*

## Optimal design and performance test of thermally controlled superconducting switch

Rock-Kil Ko, Joon-Han Bea, Young-Kil Kwon, Young-Sik Jo\*  
Korea Electrotechnology Research Institute,  
Changwon National university\*

rkko@keri.re.kr

**Abstract** - We had designed thermally controlled superconducting switches using a general nonlinear optimized algorithm with constraints and tested its performance. Objective function was to minimize the total volume of the superconducting switch. And constraints were to have designed resistance in normal status and temperature.

In order to compare performance of the optimized superconducting switch, we made another one which had geometrically different parameters but had same structure and resistance value when the superconductor part is normal status by heater.

Objective function converged very rapidly. As result, volume of the adiabatic part and total volume of the switch were reduced to more than 70% and 30% respectively.

Also, even if same heater power was supplied with NiCr wire heater, the optimized superconducting switch had very fast On-OFF switching performance comparing with unoptimized switch

## 1. 서 론

초전도 마그네트의 영구전류운전을 위해 초전도 스위치는 안정적인 ON-OFF 스위칭 특성을 가져야 한다. 일반적으로 초전도 스위치는 열적으로 제어되므로 효율적인 단열구조의 설계는 매우 중요하다.

본 연구에서는 최적화 방법을 적용하여 작은 부피를 가지면서 효율적인 단열 구조를 갖는 초전도 스위치를 설계 및 제작하였다.

또한 최적화 방법을 적용하지 않은 일반적인 초전도 스위치를 제작하여 최적화된 초전도 스위치의 geometry parameters 및 스위칭 특성을 비교 평가하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 최적화 설계

#### 2.1.1 PCS의 구조

본 연구에서 적용한 초전도 스위치는 원형의 보빈 위에 초전도 권선부, 히터 열 발생부, 단열부 순의 일반적인 구조이다. 반경  $R_0$ , 권선폭  $L$ 을 갖는 FRP 보빈 위에 비저항이 큰 CuNi을 안정화재로 사용한 NbTi 초전도선을 전류의 방향이 서로 반대가 되도록 bifilar로  $R_1$ 까지 무유도 권선을 한다. 이는 초전도 스위치의 상전도 저항을 높이고, 인덕턴스에 의한 자계 교란을 최소화 시키기 위해서이다.[1] 히터 열 발생부는 NiCr선을 초전도 권선부의 중간층에 열전도가 우수한 AL 테이프를 한층 깔고 그 위에 권선하여 히터에 의한 열이 초전도 권선부를 거쳐 단열부까지 전달되도록 한다. 단열부의 단열재료는 천 테이프를 사용하여  $R_2$ 까지 구성한다.[2] Fig.1.은 초전도 스위치의 구조를 보여준다.

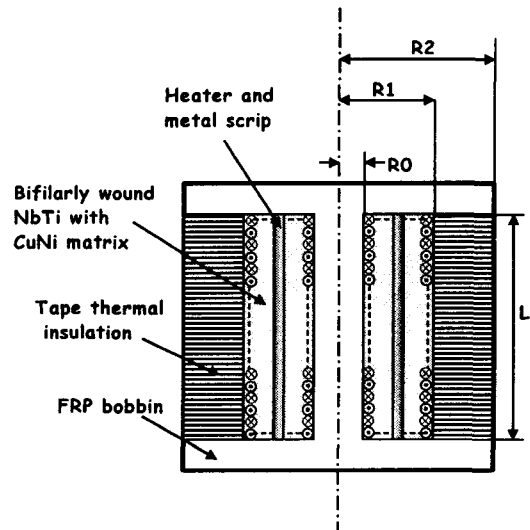


Fig. 1. The schematic picture of thermally controlled superconducting switch.

### 2.1.2 최적화 방법

PCS의 설계는 다음의 과정을 통해 이루어진다. 첫째, 주어진 마그네트의 인덕턴스에 대해 운전전류 인가 속도에 따른 헬륨 소비율을 고려하여 상전도 저항값 결정한다. 둘째, 10K에서 결정된 저항값을 갖는 PCS 선재 길이를 계산한다. 셋째, PCS의 놓일 위치에 따른 PCS geometry를 고려하여 계산된 PCS 선재 길이를 권선할 수 있는 단열부의 길이(L)와 단열부 안쪽 반경(R1)을 계산한다. 넷째, 히터 열량을 정하고 이에 대한 히터 길이를 계산한다. 다섯째, 결정된 히터 열량으로 PCS의 중심온도가 10K에 도달 할 수 있는 단열부 바깥쪽 반경(R2)를 계산한다. 여섯째, 히터 열량과 분류 열량에 의한 PCS의 상승온도를 계산하고 수용 여부를 결정한다.[3]

위와 같은 설계 과정에 구속 조건을 가진 일반적인 비선형 최적화 방법을 적용하여 PCS 최적화 설계를 수행하였다. 본 연구에서는 Digital Fortran Language에서 제공하는 IMSL MATH/LIBRARY의 최적화 subroutine 함수인 NCONF를 사용했으며, 이 subroutine 함수는 successive quadratic programming 알고리즘과 finite difference gradient를 이용하며, 수학적 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{subject to } g_j(x)=0 \text{ for } j=1, \dots, m_e \\ & \quad g_j(x) \geq 0 \text{ for } j=m_e+1, \dots, m \\ & \quad x_l \leq x \leq x_u \end{aligned}$$

즉, 일정 범위를 갖는 변수x에 대해 m개의 제한 조건을 만족시키면서 목적 함수 f(x)를 최소화시킬 수 있는 최적화 방법이다. 본 연구에서는 목적함수를 PCS의 전체 부피로 하고, 구속 조건은 PCS의 중심온도가 10K일 때, 결정된 저항값을 갖고, 코일 권선의 마무리 방향을 고려하여 짝수의 층수가 되도록 하였다.

히터에 의해 1W의 열량을 공급하여 10K에서 40Ω의 상전도 저항값을 갖는 초전도 스위치의 최적화 설계를 수행했으며, 고정된 parameter 값인 보빈의 반경 R0는 20mm, 초전도 선재의 지름은 1.0mm, 단열재 평균 열전도율은 0.29W/m·K를 사용하였다.[2] geometry parameters인 R1, R2, L의 변수 범위는 모두 0mm < x ≤ 70mm로 하였다. Fig.2.는 PCS 최적화 설계의 흐름도를 보여주고 있다.

### 2.2 성능 평가

최적화 설계된 치수로 초전도 스위치를 제작했으며, 비교를 위해 같은 상전도 저항값과 heater 저항값을 가지면서 최적화 방법을 적용하지 않은 초전도 스위치를 동일한 구조로 제작하였다. 사용한 초전도 선재는 Vacuumshmelze의 지름 1mm의 Vacryflux 5001 type FKN 54이다. 제작된 초전도 스위치들은 100mA의 전류

를 통전시킨 상태에서 양단전압을 측정하는 4단자법으로 저항을 측정하여 ON-OFF 스위칭 특성을 평가하였다.

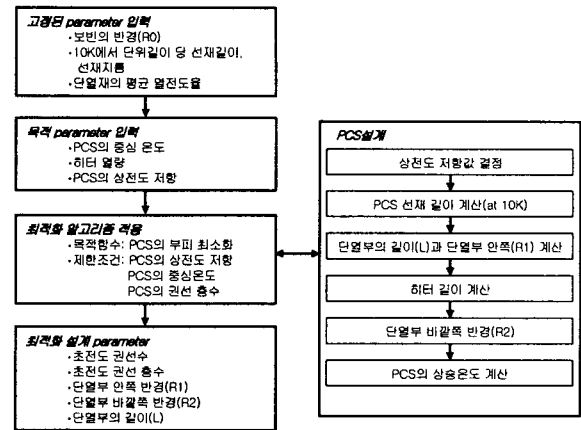


Fig. 2. Optimal design flow of switch.

이를 위해 초전도 스위치의 동작 과정을 히터 파워의 공급부터 스위치의 저항이 나타나는데 걸리는 시간인 켄치 시간(quench time)과 저항이 나타난 후 저항이 포화되는데 걸리는 시간인 포화 시간(saturated time), 그리고 켄치 시간과는 반대 개념으로 히터 파워의 공급을 중단시킨 후 다시 저항이 "0"로 되는데 걸리는 시간인 회복 시간(recovery time)의 세 부분으로 나누었다.[4]

### 2.3 결과 및 고찰

제한 조건과 최적화 목적함수인 PCS의 부피는 모두 잘 수렴됨에 따라 geometry parameters도 빠르게 수렴됨을 Fig.3.과 Fig.4.에서 보여주고 있다. 약 20번 정도의 반복계산에서 초전도 스위치의 상전도 저항값과 상승온도에 대한 제한 조건은 매우 빠르게 수렴되었으며, 그 후 짝수 층수의 제한 조건에 대한 미세 수렴이 약 120번 반복된 후 수렴이 완료 되었다.

초전도 스위치의 Geometry parameters와 부피에 대한 최적화 설계 결과를 최적화되지 않은 초전도 스위치와 비교하여 Table.1.에 나타내었다. 스위치의 부피에 직접 관련된 R2와 L의 길이가 감소되었고, 전체 스위치의 부피는 최적화 되지 않은 스위치에 비해 50% 이하로 줄어들었으며 특히, 단열부의 부피는 30% 이하로 감소되어 설계되었다. 초전도 스위치의 상전도 저항은 사용된 초전도 선의 길이에 의해 결정되므로, 초전도체 부분의 부피는 10K에서 같은 저항값을 나타내기 위해 기하학적 모양만 변화될 뿐, 그 부피는 일정하게 된다. 이는 1W의 히터 파워를 사용하여 원하는 초전도 스위치의 저항을 얻을 수 있는 최적의 단열부 설계를 의미한다. 또한 초전도 스위치는 마그네트와 함께 Cryostat 내부에 위치하므로 영구전류 운전을 하는 초전도 마그네트 시스템의 전체적인 크기와 제작비용에 영향을

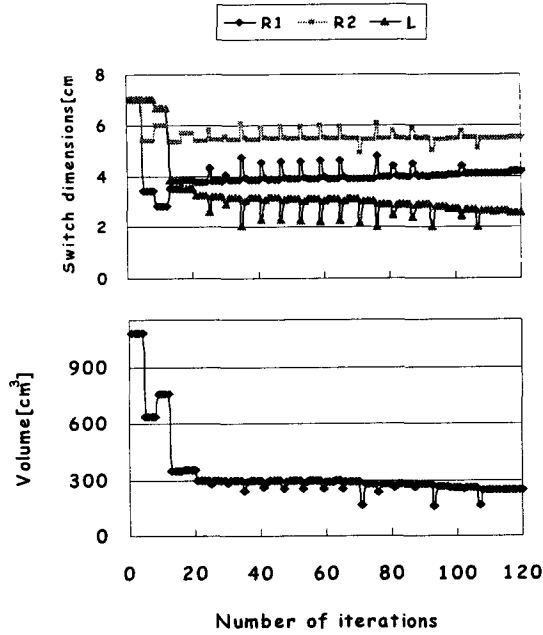


Fig. 3. Optimization geometry parameters and total volume of superconducting switch as a function of iteration number.

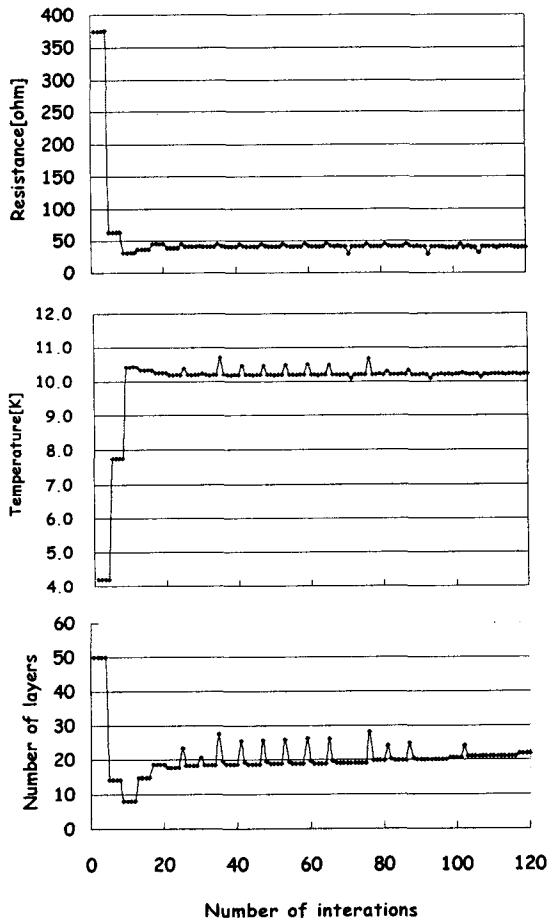


Fig. 4. Optimization constraints as a function of iteration number.

줄 수 있으므로 스위치의 부피 감소는 Cryostat 설계의 유연성에 도움이 된다.

Table 1. Comparing geometry parameters of superconducting switches.

Geometry parameters				
	R0[cm]	R1[cm]	R2[cm]	L[cm]
Unoptimized	2	3.4	6.2	4
Optimized	2	4.2	5.5	2.47

(a)

Volume			
	Unoptimized	Optimized	$V_{op}/V_{unop}$
Total [cm <sup>3</sup> ]	482.8	234.6	49%
Adiabatic part [cm <sup>3</sup> ]	337.6	97.8	29%

(b)

제작된 최적화 스위치와 비최적화 설계된 스위치는 초전도 선재 길이, 히터선의 길이 등에서 약간의 제작오차를 가지나, 특성 평가 결과 수용할 수 있는 수준임을 확인하였다. 또한 포화 저항의 경우 40Ω으로 설계하였지만, 특성 평가 결과 약 37Ω를 가졌다. 스위치의 단열 구조를 파이프 모양으로 가정한 설계 방법의 한계로 단열층이 없는 보빈 위, 아래 쪽의 FRP를 통한 액체 헬륨의 열침입으로 초전도체 부분의 측면에서 온도가 10K 이하가 되는 것으로 사료되며, 이는 경험에 의해 어느 정도 예상했던 부분이다.

최적화된 초전도 스위치의 ON-OFF 특성 평가 결과 최적화된 스위치는 동일한 히터 파워를 가지고 원하는 포화 저항에 대해 더 빠른 스위칭 특성을 가졌다. 설계 시 적용한 1W의 히터 파워에 대해 켜치 시간은 비슷했으며, 포화 시간과 회복시간은 각각 1.8배와 2.6배 빠른 스위칭 특성을 가졌다.

Table 2. Comparing ON-OFF performance of superconducting switches.

	Unoptimized		Optimized	
Heater current [mA]	80	100	80	100
Heater power [W]	0.66	1.02	0.67	1.05
Quench time [sec.]	11.6	4.2	22.4	4.8
Saturated time [sec.]	201.4	74.8	132.8	42.4
Recovery time [sec.]	52.5	84.1	15.2	31.8
Saturated resistance [Ω]	36.7	38	36	37

Table.2와 Fig.4.는 최적화 설계된 초전도 스위치의 ON-OFF 스위칭 특성을 히터 파워 전류가 80mA와 100mA 일때에 대해 최적화 되지 않은 스위치와 비교하여 나타내고 있다.

본 연구는 보건복지부의 선도기술·의료공학 기술개발사업(HMP-98-G-1-015)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

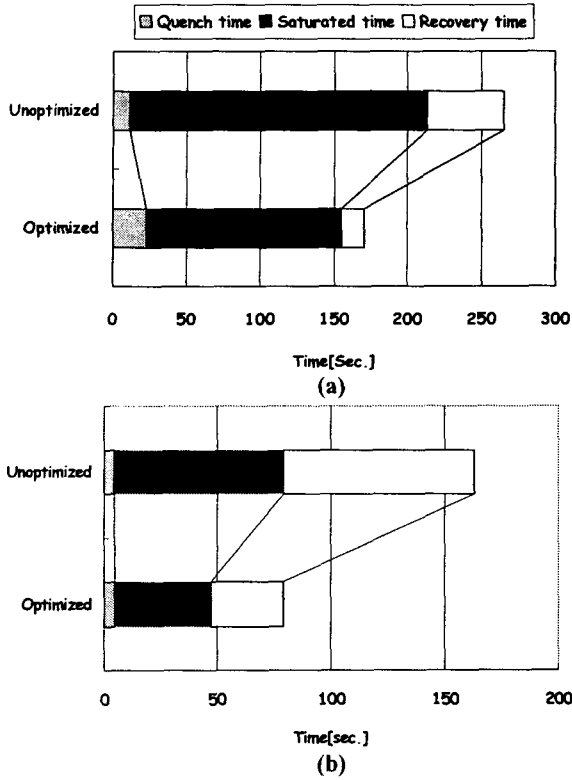


Fig. 4. Comparing ON-OFF performance of superconducting switches. Heater power current supplied as (a) 80mA and (b) 100mA.

### 3. 결 론

본 연구에서 수행한 초전도 스위치의 최적화 설계 방법을 적용한 초전도 스위치는 일정하게 공급된 히터 파워로 원하는 상전도 저항을 갖는 초전도 스위치의 최적 단일 구조를 제공하여, 최소 부피뿐만 아니라 일반 초전도 스위치보다도 매우 빠른 ON-OFF 특성을 갖도록 최적화됨을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Martin N. Wilson, "Superconducting magnets, Section 11.2 persistent-current switching", pp272-274, Oxford claredon Press, Oxford UK, 1983.
- [2] Rock-Kil Ko, Joon-Han Bea, Ki-Deok Sim, Eon-Young Lee, Hae-Jong Kim, Young-Kil Kwon and Kang-Sik Ryu, "Performance test of a persistent current switch insulated with cotton tape", IEEE Trans. On Applied superconductivity, Vol.11, No.1, pp2425-2428, March 2001.
- [3] 한국전기연구원.보건복지부, "G7 의료공학 연구개발사업 고자장 자기공명영상장치 및 초전도 자석 개발(3차년도 연차실적 계획서)", 2001.
- [4] G.B.J. Mulder, D.ter Avest, H.H.J.tem Kate, H.J.G. Krooshoop and L.J.M. Vande Klundert, "Experimental controlled superconducting switches for high frequency operation", IEEE Trans. Magn., Vol.32, No.2, pp907-910, March 1988.