

Coated Conductor를 이용한 소용량 영구전류스위치 시스템의 특성 해석

Characteristics Analysis of a Small Scale Persistent Current Switch System by using Coated Conductor

김영식¹, 윤용수², 양성은¹, 박동근¹, 안민철³, 고태국^{4,*}

Yeong Sik Kim¹, Yong Soo Yoon², Seong Eun Yang¹, Dong Keun Park¹,
Min Cheol Ahn³, Tae Kuk Ko^{4,*}

Abstract: This paper presents characteristics analysis of persistent current switch (PCS) system on a small scale by using YBCO coated conductor (CC). A high temperature superconductor (HTS) PCS system mainly consists of a PCS, a HTS magnet load, and a magnet power supply (MPS). To design the optimal heater triggering switch, the three-dimensional heat conduction model was analyzed by finite element method (FEM). The electrical equivalent model considering the n-value of CC was applied to analyze current decay during persistent current mode. In the experiment and simulation, the heater was applied with a current of 0.43A and the current was ramped up to 10A and 20A with 0.2A/s. Finally, experimental results of the HTS PCS system have been compared with the theoretical results. It has been concluded that flux creep can not influence the results because the operating current was 40% of critical current and optimal sequential operation of the PCS system is indispensable to enhance its performance.

Key Words: flux creep, coated conductor, persistent current, heater trigger.

1. 서 론

초전도자기공명장치, 초전도회전기, 자기부상열차, 그리고 자기융합시스템 등과 같은 초전도 기기들은 초전도 마그네트를 사용한다. 일반적으로 그와 같은 초전도 마그네트는 우수한 균일성과 안정성의 특성으로 인하여 영구전류 모드로 운전된다. 이와 같은 이유로 많은 연구기관들에 의하여 영구전류스위치(PCS) 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다[1-3]. 고온초전도체의 자기적 특성이 저온초전도체에 비하여 안정적이고 보다 높은 자기장을 발생시킬 수 있기 때문에 다양한 분야의 응용에 적합한 재료로 여겨지고 있다. 이와 같은 관점에서 BSCCO 선재를 사용한 고온초전도 PCS

시스템을 개발하고 실험을 완료하였다[4]. 2세대 고온초전도 선재인 YBCO CC는 BSCCO 선재보다 높은 인덱스 넘버(index number)를 가지고 있으며 높은 자장에서 보다 우수한 안정성 및 경제성을 가지고 있으므로 시스템 응용 측면에서 크게 기대된다.

본 논문에서는 YBCO CC 선재를 이용한 PCS 시스템을 설계하여 제작하고 그 특성을 해석하였다. PCS 시스템을 구성하고 있는 요소인 PCS의 초전도 영역과 상전도 영역 간의 상태전이를 구현하기 위한 성능을 확인하기 위하여 액체질소 온도 조건에서 히터트리거(heater trigger)를 사용하는 고온초전도 선재의 퀸치(quench)를 유한요소법(FEM)을 이용한 3차원 시뮬레이션을 통하여 해석하였고, 영구전류 모드 상태에서 전류의 감쇠를 해석하기 위하여 인덱스 넘버와 플럭스 크립(flux creep) 효과를 고려한 전기적인 등가모델이 적용된 시스템을 대상으로 유한차분법(FDM)을 적용하였다. 그리고 해석한 이론적인 결과와 실험을 통한 결과를 비교하였다.

2. 영구전류스위치의 개념 및 설계

2.1. 동작원리

Fig. 1은 YBCO CC 선재를 이용하여 제작된 PCS 시스템을 나타낸다. 초전도 상태와 상전도 상태 간의 상태전이를 열적으로 제어하기 위하여 히터를 YBCO CC 선재의 아래에 위치시켰다. 일정한 증감률을 가지고 전류를 선형적으로 외부에서 인가할 수 있도록 MPS와 PCS 시스템을 병렬로 연결할 수 있는 단자를 구성하였다.

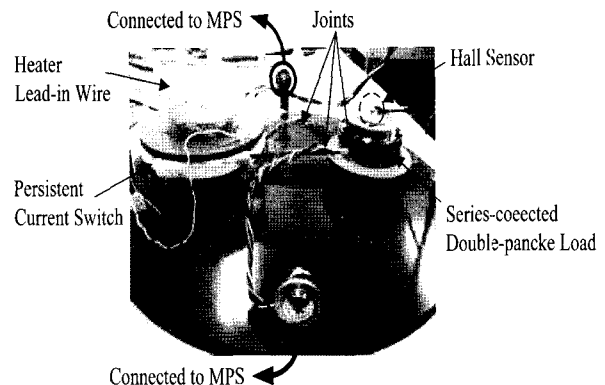


Fig. 1. Overall view of the PCS system.

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과

²정 회 원 : 안산공과대학 전기과

³정 회 원 : 기초전력연구원

⁴정 회 원 : 연세대 공과대 전기전자공학과

*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2007년 1월 15일

심사완료 : 2007년 2월 26일

Fig. 2는 PCS 시스템을 운전하기 위한 순서도를 나타낸다. 퀘칭활성시간 (quench activation time)은 히터에 전류를 공급하는 시간 (Hs)과 초전도 루프에서 상전도 영역이 나타나는 순간까지의 기간으로 정의되고, 초전도 상태로의 회복시간 (recovery time)은 히터에 공급되는 전류를 차단하는 시간(He)과 PCS 주변의 액체질소에 의하여 고온초전도 선재에서 상전도 영역이 사라지는 순간까지의 기간으로 정의된다. Fig. 2에 나타난 점선은 히터에 의하여 형성된 고온초전도 선재의 온도변화를 나타낸다. PCS 시스템은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 두 개의 폐루프 회로로 구성되어 있다. 시스템을 동작하기 위한 순서는 다음과 같다. 히터에 전류를 인가(Hs)하여 PCS를 구성하는 고온초전도 선재의 온도를 임계온도(Tc)이상으로 상승시켜서 상전도 상태로 전이시킨 후, Fig. 3에 나타난 루프 1에 전류를 주입시키기 위하여 외부의 MPS를 작동(Ms)시킨다. 전류의 주입이 완료된 후, 히터에 인가된 전류를 차단(He)하여 초전도 상태로 회복시키면 트랩된 전류는 루프 2로 보내진다. 그 순간 MPS로부터 주입되는 전류를 차단(Me)하면 자속보존의 법칙에 따라서 영구전류가 루프 2에 지속적으로 흐르게 된다.

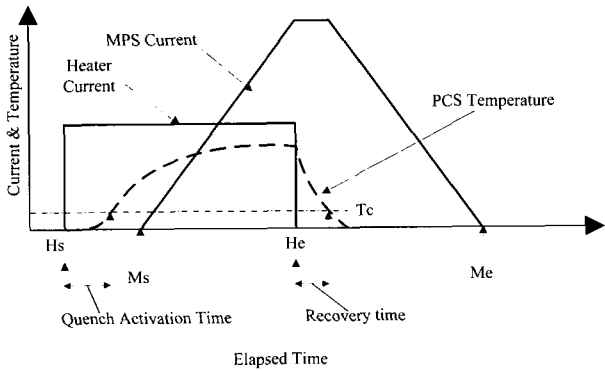


Fig. 2. Sequential diagram of the PCS system.

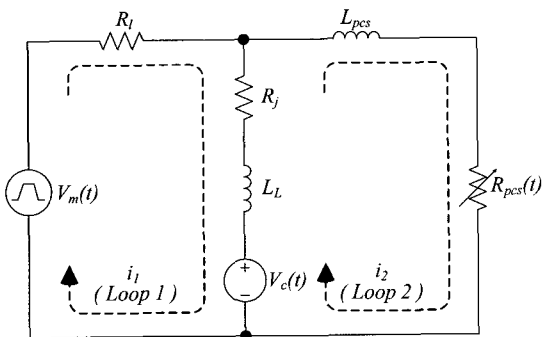


Fig. 3. Equivalent circuit of the PCS system.

2.2. PCS 시뮬레이션 해석

액체질소로 둘러싸여 있는 상태에서 히터에 의하여 열적으로 제어되는 PCS의 초전도 상태와 상전도 상태 간의 상태전이를 정확히 해석하고자 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 통해서 열 특성 해석을 수행하였다. 해석은 열전달방정식을 사용하여 Fig. 4와 같이 실험에 사용될 PCS와 유사한 모델을 적용하여 실시되었다. 히터트리거 스위치의 YBCO CC 선재 내부에서의 온도분포는 아래와 같은 과도열전달방정식(5)에 의하여 결정되었다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q - h(T - T_{ext}) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, C 는 비열, t 는 시간이고, T 는 해석 대상의 온도, T_{ext} 는 주변온도이며, Q 는 열원, h 는 대류계수, 그리고 k 는 열전도도이다.

식 (1)에서 히터에 의해서 발생된 열(Q)은 정해진 일정시간 동안 YBCO CC 선재에 인가되고, 초기의 주변온도는 액체질소의 온도로 균일하게 분포한다고 가정하였다. 해석은 COMSOL사의 COMSOL 3.2를 이용하여 수행하였으며, 보다 간소화된 요소분할과 해석을 위하여 해석대상의 16분의 1만을 3차원으로 모델링하여 시뮬레이션하였다. 경계조건에서 절단된 단면은 단열조건으로 하여 해석하였다. Fig. 5의 (a)는 요소분할된 해석대상을 나타내며, (b)는 해석된 모델의 y-z단면에서의 온도분포를 나타낸다. 해석된 대상의 흰색부분은 온도가 가장 높은 것을 나타낸다. 그림에서 보빈과 폴리우레탄 폼의 대부분은 액체질소와 닿아 있으므로 히터전류를 인가한 후에도 77K을 유지하지만, 열을 발생시키는 히터 위에 감겨진 YBCO CC 선재 층의 최외각에 위치한 선재와 테프론 테이프가 만나는 지점에서의 선재의 온도는 0.43A의 히터전류를 인가하였을 때 약 268s 경과한 후에 최대 148K까지 올라가는 것을 알 수 있었다. 고온초전도체인 YBCO CC 선재의 임계온도가 95K이하임을 고려할 때, 영구전류스위치로 작동되는 고온초전도 선재가 퀘칭을 발생할 만큼의 충분한 온도상승 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 이 결과를 기초로 하여 히터에 의해 제어되는 PCS를 제작하였다.

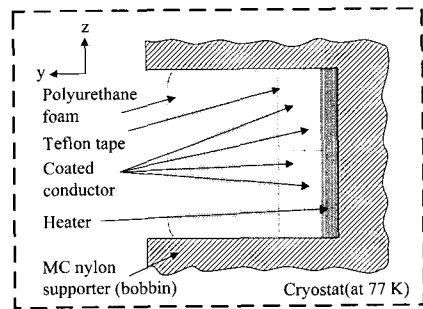


Fig. 4. Cross-sectional view of the heater-triggered switch.

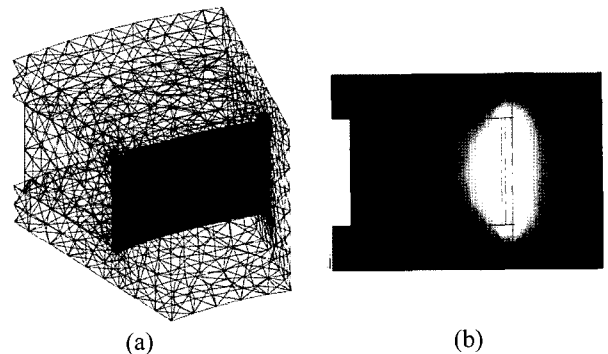


Fig. 5. Simulation results of thermal analysis.

2.3. 전기적 등가회로

정상상태에서 전류를 펌핑하는 동작을 수행 중인 전체 시스템의 특성을 알아내기 위하여 MPS를 포함하는 PCS 시스템을 전기적인 등가회로로 구성하였다. Fig. 1과 같은 구조를 갖는 PCS 시스템은 Fig. 3과 같은 전기적인 등가회로로 나타낼 수 있다. 회로 상에 표시된 전기적 파라미터들은 다음과 같다[4].

- R_i : MPS와 마그네트 부하간의 선저항
- R_j : 접합저항
- $R_{pcs}(t)$: 히터에 의해 발생하는 PCS 저항
- L_L : 고온초전도 마그네트 부하의 자기인덕턴스
- L_{pcs} : PCS의 자기인덕턴스
- $V_m(t)$: MPS에 의한 공급전압
- $V_c(t)$: 플럭스클립과 n-value를 고려한 전압
- i_1 : 루프 1의 전류
- i_2 : 루프 2의 전류

Fig. 3의 전기적 등가회로로부터 얻어진 방정식에 유한차분법을 적용하면 다음과 같다.

$$I[n] = \left(R + \frac{L}{\Delta t} \right)^{-1} \times \left(\frac{L}{\Delta t} \times I[n-1] + V \right) \quad (2)$$

$$I = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_m - V_c \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_i + R_j & -R_j \\ -R_j & R_j + R_{pcs}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_L & -L_L \\ -L_L & L_L + L_{pcs} \end{bmatrix} \quad (6)$$

접합저항은 영구전류모드에서 다음과 같이 얻어진다.

$$R_j = -\frac{L_L}{T_E - T_I} \times \log\left(\frac{I_E}{I_I}\right) \quad (7)$$

여기서, T_E 와 T_I 는 각각 영구전류모드의 종료시간과 시작시간이고, I_E 와 I_I 는 각각 영구전류모드의 종료전류와 시작전류이다.

인덱스 넘버(n)와 플럭스클립을 고려한 전압은 다음과 같다.

$$V_c = E_l \left(\frac{i_1 + i_2}{i_c} \right)^n \quad (8)$$

E_c , l , i_c 그리고 n 은 각각 $0.1\mu V/cm$ 에 대한 임계전류로 정의되는 전계, 팬케이크 부하의 전체 길이, 임계전류, 인덱스 넘버이다.

식 (8)의 인덱스 넘버는 E_1 , E_2 , I_1 , I_2 의 측정치에 의해서 다음과 같이 결정된다.

$$n = \frac{\ln(E_2/E_1)}{\ln(I_2/I_1)} \quad (9)$$

여기서, E_1 과 E_2 는 각각 $0.1\mu V/cm$ 와 $1\mu V/cm$ 이다. 시뮬레이션에 적용된 전기적 파라미터의 값들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Electrical parameter for the simulation.

L_L	1.1mH
L_{pcs}	83 μ H
R_j	4.2 $\mu\Omega$

3. 시스템의 제작 및 실험

고온초전도 PCS 시스템은 해석된 결과를 기초로 하여 제작되었다. PCS와 마그네트 부하는 폭과 두께가 각각 4.4mm와 0.2mm인 YBCO CC 테이프 선재를 이용하여 제작되었다. PCS의 제작 방법은 다음과 같다. MC 나일론으로 이루어진 보빈의 가장 안쪽에 비저항이 33 $\mu\Omega/m$ 이고 길이가 약 3.24m인 니켈-크롬 합금의 히터를 1층으로 감은 뒤, 그 위에 길이가 약 1.36m인 YBCO CC 테이프 선재를 2층으로 총 4회 감았으며, 히터에 의하여 발생된 열이 액체질소로 대류가 되는 것을 최소화함으로써 YBCO CC 테이프 선재에서 상전도 영역의 발생을 용이하게 하도록 테프론 테이프를 감고 폴리우레탄 폼을 차례로 도포하였다. PCS는 Fig. 4에 나타난 구조와 유사하게 제작되었다. 마그네트 부하는 길이가 12m인 두 개의 더블팬케이크 코일로 구성되어 있으며, 인듐(indium) 솔더를 사용하여 직렬로 접합하였다. 접합저항을 최소화하기 위해서 접합길이를 50mm로 조정하였다. 이 접합방법은 부하의 기계적 강도를 충분히 유지할 수 있다. 제작된 PCS와 마그네트 부하는 동일한 접합방법으로 서로 접합되었다. 77K의 온도 조건에서 마그네트 부하와 PCS의 임계전류는 $1\mu V/cm$ 에서 각각 48A와 67A로 측정되었다.

자속밀도를 측정하기 위하여 고온초전도 마그네트 부하의 중앙에 홀 센서를 설치하였고, 열적으로 제어되는 PCS의 온도를 측정하기 위하여 열전대를 YBCO CC선재와 테프론 테이프 사이에 설치하였다. 절연증폭기를 통하여 증폭되어 측정된 모든 신호들은 데이터수집용 보드를 사용하여 모니터링되고 동시에 저장장치에 기록되도록 구성하였다. Table 2는 실험과 시뮬레이션에 적용된 제어신호에 대한 동작시간을 나타낸다.

Table 2. Time table of the experiment and simulation.

Parameter		Applying time[s]	
		10A	20A
Hs	Heater start time	15	15
Ms	Magnet start time	154	152
He	Heater end time	235	283
Me	Magnet end time	299	397

4. 토의 및 고찰

Fig. 6은 인가전류의 함수로서 OT, 77K의 온도조건에서 측정된 YBCO CC 마그네트 부하의 전압을 보여준다. 초전도 상태와 상전도 상태 간의 상태전이가 명확하게 이루어지는 지를 확인하기 위하여 전류 I에 대한 전계 E의 그래프는 $E = kJ^n$ 의 함수로 설정되었다. Fig. 6에 나타난 것처럼 43A와 48A의 전류에서 실제로 E_1 과 E_2 의 해당 전압에 각각 도달하였다. 식 (9)에 따라서 계산된 인덱스 넘버 n은 약 20.93이다. 실제로 실험에 사용된 PCS 시스템은 PCS와 마그네트 부하로 구성되었다. 먼저 PCS는 니켈-크롬 히터에 약 0.43A의 전류를 인가함으로써 발생된 열에 의해 약 145K까지 가열되었고, MPS에 의하여 일정한 비율로 주입된 충전전류가 목표로 하는 값까지 도달하였을 때 히터에 인가된 전류는 차단되었으며, 충전전류가 PCS로 바이-패스된 다음 폐순환전류는 마그네트 부하로 흘러들어 갔다. 최종적으로 영구전류시스템은 고온초전도 PCS 시스템으로부터 MPS를 분리시킴으로써 완료되었다. 본 연구에서 적용된 전류의 충전율은 약 0.2A/s이었고 최대충전전류는 각각 10A와 20A이었다. 측정된 PCS의 선재의 온도는 시뮬레이션의 결과인 148K와 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 7과 8은 시스템이 각각 10A와 20A의 MPS 최대 충전전류로 운전되었을 때의 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 유한차분법에 식 (2)를 적용하여 얻어진 시뮬레이션 결과를 Fig. 7과 8의 그래프에 나타내었다. 시뮬레이션은 플럭스클립전압을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우에 대해서 각각 수행되었다.

Fig. 8에 나타난 20A의 최대전류에 대한 실험결과에서 볼 수 있는 것과 같이 약 900s의 시간이 경과한 후에 전류는 최대전류에 비교하였을 때 전류가 약 8.5%까지 감소하였다. 그리고 실험결과와 동일한 동작시간으로 수행된 플럭스클립을 고려한 시뮬레이션 결과와 플럭스클립을 고려하지 않은 시뮬레이션 결과는 최대전류와 비교하였을 때 두 가지 경우 모두 전류가 약 9.5%까지 동일하게 감소하였다. 두 가지 시뮬레이션의 결과는 서로 차이를 보이지 않으며, 이와 같은 현상은 PCS 시스템을 구성하는 마그네트 부하의 임계전류에 비하여 약 40% 이하의 매우 낮은 전류로 부하가 운전되어서 최대충전전류가 플럭스클립전압에 영향을 미치지 않았기 때문이다. Fig. 7의 시뮬레이션 결과 역시 동일한 이유로 플럭스클립의 영향을 받지 않았다고 판단된다.

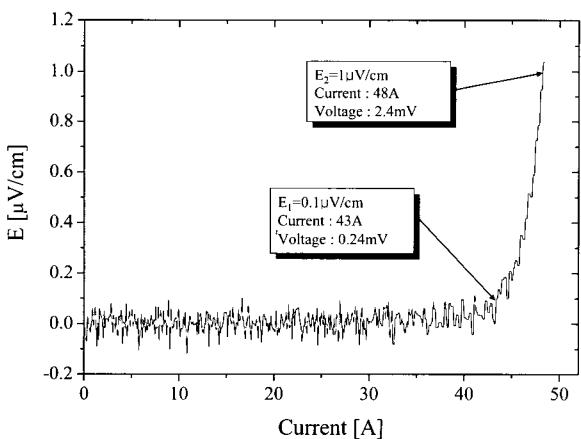


Fig. 6. Typical E-I trace to determine an index number.

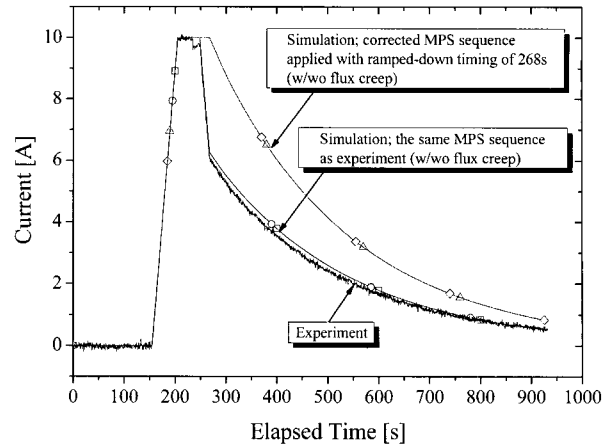


Fig. 7. Experimental and simulation results of 10A maximum current.

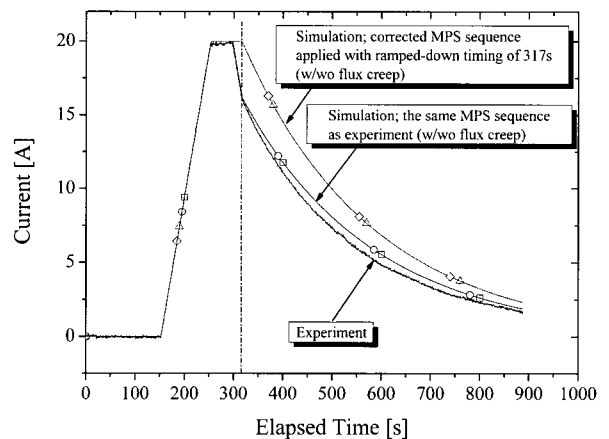


Fig. 8. Experimental and simulation results of 20A maximum current.

Fig. 7과 8의 실험결과에서 최대전류 이후에 전류가 감소하기 시작하는 시점부터 약 20s의 기간 동안에 급격한 전류의 감쇠가 나타나는 것을 볼 수 있다. 그와 같은 급격한 전류의 감쇠에 영향을 미치는 주요 원인은 히터로부터 공급된 열에 의하여 PCS 상에 발생된 저항이다.

Fig. 9는 히터에 공급되는 전류를 차단한 후에 MPS로부터 공급되는 전류를 감소시켰을 때, PCS의 온도변화와 그에 따른 부하전류의 변화를 나타내는 실험결과이다. 히터에 공급되는 전류를 차단하였음에도 불구하고 PCS의 온도가 YBCO CC 선재의 임계전류인 95K 이하로 충분히 낮아져서 초전도 상태로 회복되기 이전에 MPS 전류를 감소시키는 운전방식이 부하전류의 급격한 감쇠의 원인으로 작용하였음을 Fig. 9는 잘 보여주고 있다. 이를 검증하기 위하여 최대전류가 10A인 실험 결과에서 248s인 MPS 전류의 감소시기를 268s로 수정하고, 최대전류가 20A인 실험 결과에서 297s인 MPS 전류의 감소시기를 317s로 수정하여 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 Fig. 7과 8에 나타내었다. MPS 전류의 감소시기를 조정함으로써 실험에서 일정한 구간에 걸쳐서 나타난 급격한 부하전류의 감쇠현상이 나타나지 않음을 시뮬레이션 결과로부터 확인하였다.

Fig. 9는 히터에 공급되는 전류를 차단한 후에 MPS로부터 공급되는 전류를 감소시켰을 때, PCS의 온도변화와 그에 따른 부하전류의 변화를 나타내는 실험결과이다. 히터에 공급되는 전류를 차단하였음에도 불구하고 PCS의 온도가 YBCO CC 선재의 임계전류인 95K 이하로 충분히 낮아져서 초전도 상태로 회복되기 이전에 MPS 전류를 감소시키는 운전방식이 부하전류의 급격한 감소의 원인으로 작용하였음을 Fig. 9는 잘 보여주고 있다. 이를 검증하기 위하여 최대전류가 10A인 실험 결과에서 248s인 MPS 전류의 감소시기를 268s로 수정하고, 최대전류가 20A인 실험 결과에서 297s인 MPS 전류의 감소시기를 317s로 수정하여 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 Fig. 7과 8에 나타내었다. MPS 전류의 감소시기를 조정함으로써 실험에서 일정한 구간에 걸쳐서 나타난 급격한 부하전류의 감소현상이 나타나지 않음을 시뮬레이션 결과로부터 확인하였다.

식 (7)과 Fig. 8로부터 계산된 접합저항은 약 $4.2\mu\Omega$ 이다. 접합저항이 이와 같이 상대적으로 큰 이유는 제작에 사용된 YBCO CC 선재의 길이가 단선이기 때문이다. 단선으로 이루어진 YBCO CC 선재의 시료를 이용하여 마그네트를 제작하였기 때문에 더블팬케이크간에 접합이 존재하였고, 시스템 제작에서 사용된 마그네트 부하 간의 접합과 PCS와 마그네트 간의 접합방법이 시스템의 접합저항을 효과적으로 낮추지 못하였기 때문이다. 현재 장선의 YBCO CC 선재가 개발되고 있기 때문에 향후에 예정된 실험에서는 장선의 선재를 이용하여 마그네트 부하 간의 접합이 없는 부하를 사용하고 PCS와 마그네트 부하 간의 접합저항을 효과적으로 감소시키는 것이 필요하다. 향후 시스템을 제작하여 실험할 경우에는 부하의 최대전류가 마그네트의 임계전류에 근접하도록 실험함으로써 플럭스클립에 의한 영향을 평가할 수 있도록 하고, 시스템의 원활한 운영을 위하여 본 논문에서 시뮬레이션으로 확인한 수정된 MPS 전류의 감소시기를 적용하여 실험할 계획이다.

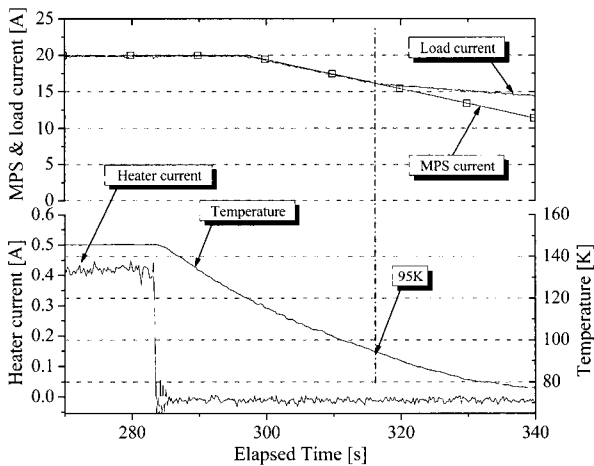


Fig. 9. Experimental results on sequential operation of the PCS system.

5. 결 론

본 논문에서는 직렬로 연결된 더블팬케이크 부하를 가진 20A급 고온초전도 PCS 시스템을 제작하였고 이론에 의한 결과와 실험에 의한 결과를 서로 비교하였다. 해석에 사용된 특성방정식은 고온초전도 PCS 시스템을 설계 및 평가하는데 이용될 수 있다. 부하전류가 YBCO CC 선재를 이용한 부하의 임계전류 보다 매우 낮다면, 플럭스클립전압에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 확인하였다. 그리고 히터와 MPS의 운전 제어방식이 PCS 시스템의 부하전류에 크게 영향을 미치는 것을 확인하였고 효과적인 제어방식을 도출하였다. 실험을 통하여 고온초전도 마그네트 루프 내의 전류가 히터트리거를 사용하는 PCS에 의하여 잘 전달됨을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특장기초연구(R01-2004-000-10788-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Y. D. Chung, I. Muta, I. T. Hoshino, T. Nakamura, "Characteristics of a Persistent Current Compensator for Superconducting NMR Magnets using Linear Type Magnetic Flux Pump," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 15, pp. 1338-1341, 2005.
- [2] T. Tosaka, K. Tasaki, K. Marukawa, et al., "Persistent Current HTS Magnet Cooled by Cryocooler (4) - Persistent Current Switch Characteristics," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, pp. 2293 - 2296, 2005.
- [3] S. S. Oh, H. S. Ha, H. M. Jang, D. W. Ha, "Fabrication of Bi-2223 HTS Magnet with a Superconducting Switch," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 11, No. 1, pp. 1828-1831, 2001.
- [4] Y. S. Yoon, H. M. Kim, H. K. Kang, D. K. Bae, M. C. Ahn, S. E. Yang, D. K. Park, T. K. Ko, "Characteristics of a HTS Persistent Current Switch System Considering the n-value," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 16, No. 2, pp. 1745-1748, 2006.
- [5] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, pp. 41-77, 1980.

저 자 소 개



김영식(金永植)
1968년 10월 30일생, 1991년 광운대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정.



윤용수(尹庸銖)
1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 공학석사, 2001년 동 대학원 공학박사, 현재 안산공과대학 전기과 부교수.



양성은(梁盛銀)
1978년 12월 3일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



박동근(朴東瑾)
1980년 11월 4일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



안민철(安敏哲)
1976년 9월 20일생, 1999년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 2006년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사). 현재 기초전력연구원 연구원.



고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve University(공학석사), 1986년 동 대학원(공학박사), 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.