

루프형 영구전류회로의 설계 및 제작

성진태, 김정호*, 주진호*, 나완수
 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부, *성균관대학교 금속재료공학부

Design and Fabrication of Loop Superconducting PCS Circuit.

Jintae Sung, Jungho Kim*, Jinho Joo*, Wansoo Nah
 Dept. of Electrical and Computer Engineering SKKU,
 Dept. of Metallurgical Engineering SKKU*

vertexs@ece.skku.ac.kr

Abstract - This paper deals with the design and fabrication of loop superconducting Persistent Current Switch(PCS) circuit. The self and mutual inductances of the circuits are calculated and compared to the measured values. The size of loop circuits was determined using the calculated inductances, and the fabrication processes of the superconducting persistent current switch are described.

1. 서 론

초전도 영구전류스위치는 초전도 마그네트를 외부에서 전원을 연결시켜 여자시킨 후, 원하는 시점에서 영구전류 스위치를 동작시켜 폐루프를 형성, 초전도 마그네트를 영구전류모드로 동작시키는 소자이다. 초전도영구전류스위치 Superconducting Persistent Current Switch)를 사용하면 마그네트에 흐르는 전류를 대단히 안정적으로 흐르게 할 수 있어서 초전도 마그네트 내에서 시간적으로 높은 안정도를 갖는 자장을 얻을 수 있게 된다. 본 논문에서는 원형 루프의 형상을 갖는 초전도 영구전류 회로를 설계, 제작하고 그 특성들을 예측하였다. 초전도 루프회로의 여자는 내부의 구리코일에 의한 전자유도현상을 이용하여 여자하였으며, 루프회로의 설계를 위해서 구리코일과 초전도선재코일의 형상에 따르는 인덕턴스 값과 상호인덕턴스값을 계산하였다. 이 계산 값들을 이용하여 영구전류 스위치의 전기회로해석을 하였으며, 해석결과를 기초로 하여 영구전류스위치의 여러 가지 변수들-적당한 선재의 반경, 여자코일의 턴수 및 직경-을 선택하였다. 끝으로 여기에서 산출된 변수에 따라서 루프형 영구전류회로를 제작하였다.

2. 본 론

2.1 영구전류스위치의 형상 및 치수 결정

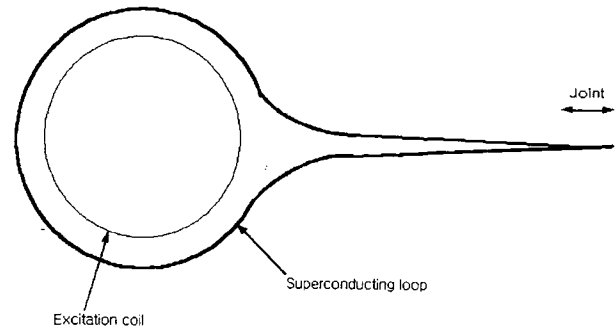


Fig. 1. Modeling of PCS switch.

본 논문에서 설계하려고 하는 PCS의 형상은 그림1과 같다. 이와같이 형상을 결정하게 된 이유는 히터의 영향과 굽힘변형에 의한 선재의 특성 변화를 최소화 하려는 의도에서 시도되었다. 또한, 실험적으로 이러한 형태의 모델을 이용하여 인덕턴스값들을 측정된 기존의 데이터를 이용하여 계산의 신빙성을 검증하기 위한 것도 원형의 영구전류 회로 형상을 선택한 이유중의 하나이다. 이 모델에서의 인덕턴스는 초전도 코일 부분이 완전한 원형이라고 가정하고 Gaussian Quadrature를 이용한 수치적분 프로그램을 제작하여 계산에 사용하였다. 원형 코일의 지름을 3Cm부터 1Cm씩 값을 증가시켜가면서 10Cm까지 각각의 인덕턴스 값들을 계산하였으며 각각의 계산값은 표1과 그림2에 나타내었다. 한편, 실험적으로 측정된 논문의 데이터 값을 이용하여 본 계산식에 값을 대입하여 계산한 값과 비교하면 표 2와 같다. 논문의 측정값과 계산값을 비교하여보면 측정된 값에 비교하여 약 60%정도의 계산값을 보여주고 있다[2]. 이는 프로그램이 완전한 원형이라고 가정하에서 해석을 하였기 때문으로 특히 선재의 접합부 부분의 면적을 고려하지 않았기 때문으로 해석할 수 있다. 또, 비교하고자 했던 구리코일의 정확한 사양을 얻을 수가 없었던 것도 오차의 한 원인으로 사료된다. 위와

Table 1. Calculated inductance value. L_s : Self inductance of superconducting loop, L_e : Self inductance of copper loop, [Unit: μH]

| 직경 | L_s | L_e | M |
|------|----------|--------|---------|
| 3cm | 0.050643 | 4.6513 | 0.30866 |
| 4cm | 0.070311 | 6.5274 | 0.40717 |
| 5cm | 0.089731 | 8.4090 | 0.50575 |
| 6cm | 0.10900 | 10.292 | 0.60438 |
| 7cm | 0.12817 | 12.152 | 0.70302 |
| 8cm | 0.14728 | 14.049 | 0.80168 |
| 9cm | 0.16635 | 16.008 | 0.90034 |
| 10cm | 0.18538 | 16.664 | 0.99902 |

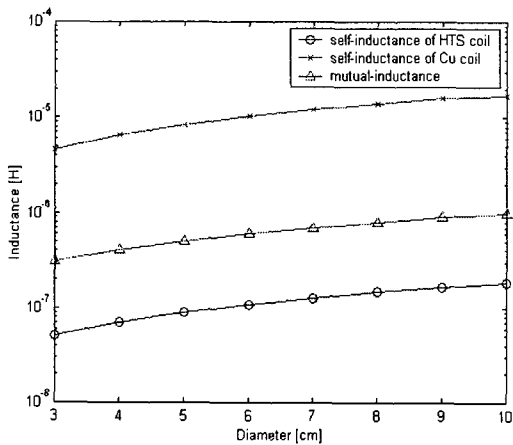


Fig. 2. Calculated Inductances

Table 2. Measured and calculated inductances [Unit: μH]

| | 측정값 | 계산값 |
|-------|------|---------|
| L_s | 0.47 | 0.28196 |
| L_e | 14.0 | 8.437 |
| M | 1.36 | 0.5753 |

같이 계산된 인덕턴스 값을 근거로 하여 제작할 루프형 영구전류 스위치의 직경을 각각 3cm, 5cm, 10cm로 결정하였다.

2.2 초전도영구전류스위치의 전기회로 해석
해석 대상의 전기회로는 그림3의 등가회로로 표현할 수 있다.

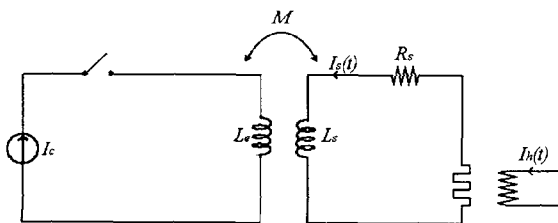


Fig. 3.

그림3-1에서 $I_e(t)$ 는 구리 코일에 흐르는 전류값이고, $I_s(t)$ 는 초전도 코일에 흐르는 전류값이며, $I_h(t)$ 는 히터전원에 흐르는 전류값이다. 구간 (I)과 (II)에서는 초전도스위치가 open상태이므로 $I_s(t)=0$ 이다. 구간 (III)의 시작점을 0이라 놓고 T시간동안 선형적으로 전류를 감소시켰다고 하면, 구간 (III)에서의 전류값은

$$R_s I_s(t) + L_s \frac{dI_s(t)}{dt} + M \frac{dI_e(t)}{dt} = 0$$

$$\frac{dI_e(t)}{dt} = \frac{0 - I_0}{t_3 - t_2} = -\frac{I_0}{T} \quad (1)$$

$$R_s I_s(t) + L_s \frac{dI_s(t)}{dt} = M \frac{dI_0}{T}$$

$$\therefore I_s(t) = \frac{M I_0}{T R_s} (1 - e^{-\frac{R_s}{L_s} t}) \quad (2)$$

이 된다. 식(1)에 따라 코일에 유도되는 최대유기전류는

$$R_s \rightarrow 0 \text{ 일 때 } I_s(T) = \frac{M I_0}{L_s} \text{ 가 된다.}$$

구간(IV)에서는 구간(III)에서의 최대값을 I_{init} 라고하면

$$R_s I_s(t) + L_s \frac{dI_s(t)}{dt} = 0$$

$$I_s(t) = I_{init} e^{-\frac{R_s}{L_s} t} \quad (3)$$

가 된다.

그림 4은 위 식들의 결과에 의하여 초전도 코일에 유기되는 전류값의 응답을 개념적으로 나타낸 것이다.

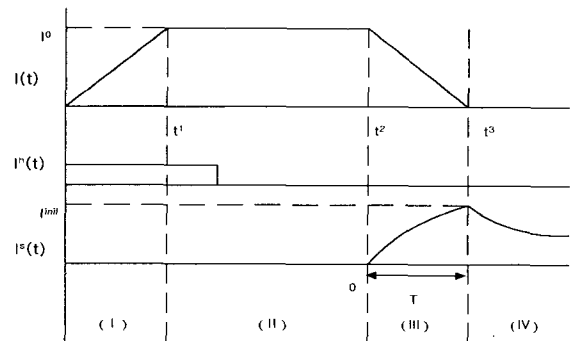


Fig. 4.

2.2 영구전류스위치의 제작

영구전류스위치회로는 그림 1과 같이 원형을 갖는 형태로 제작하였다. 이는 굽힘변형율을 고려한 최적의 모델이었다고 생각하였고 제작과 실험시 측정이 용이하다고 생각하였기 때문이다. 먼저 원형배이클라이트로 그림6와 같은 모형의 틀을 만든 뒤 지름 1mm의 구리선을 10회감은 뒤 캡톤(Kapton)테이프를 사용하여 절연을 시켰다. 그위에 초전도테이프를 감았다. 조인트부

분(그림1참조)은 초전도 접합을 사용하였으며 히터부분은 에폭시로 함침을 시켰다.

그림 5는 가로1mm,세로1cm의 구리선을 5cm의 지름을 가지는 원형루프 형태로 만든 뒤 구리선에 10[A]의 전류를 인가하였을때의 자장값을 보인 것이다. 이 해석에 따라서 가장 가까운 곳에 두 선재를 위치시키기 위하여 먼저 구리선재를 감고 캡틴테이프로 절연을 한 뒤 그위에 초전도 선재의 루프를 감았다. 세부과정은 그림 7에 나타내었다.

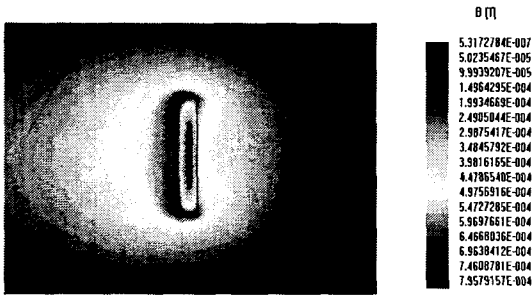


Fig. 5. Distribution chart of magnetic flux(copper wire)

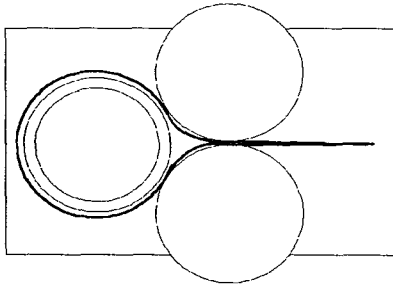


Fig. 6. Loop Superconducting PCS circuit

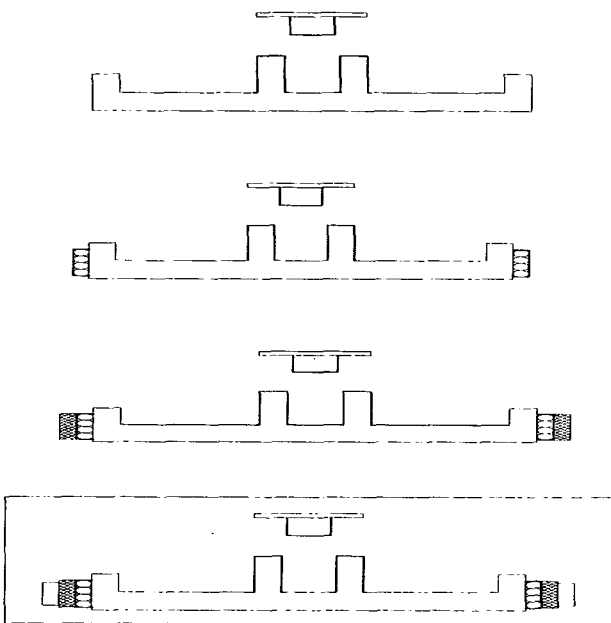


Fig. 7. Process of loop PCS circuit manufacture

Table 3. Calculated $I_s(T)$

| 지름[단위:cm] | $I_s(T)$ [단위:A] |
|-----------|-----------------|
| 3 | 6.0948 |
| 4 | 5.5693 |
| 5 | 5.6363 |
| 6 | 5.5448 |
| 7 | 5.4851 |
| 8 | 5.4432 |
| 9 | 5.4123 |
| 10 | 5.3890 |

그림 6과같이 실험장치를 만들고 난 뒤 루프의 중심부분에 홀센서를 고정시켰다. 그 뒤 구리코일에 전류를 흘려 초전도 코일에 전류를 유기시킨 뒤 히터를 OFF시킨 뒤 구리코일에 공급되는 전류를 끊고 초전도 코일에 흐르는 전류값을 관찰 할 수 있었다. 실험적으로는 초전도 코일에 유기되는 전류가 있음을 확인하였으나 Data aquisition의 준비 부족으로 인하여 값을 측정하지는 못하였으나 예측되는 최대 유기전류는 $\frac{M I_0}{L_s}$ 로 나타난다. 예측되는 값을 표3에 나타내었다.

3. 결 론

본 논문에서의 계산한 인덕턴스의 값을 이용하여 각각 는 완전한 원형의 모양의 영구전류스 위치를 해석하였고 이는 실제로 제작하고자하는 모형의 측정치의 약 60%의 값을 가졌다. 이는 형상의 모양이 완전한 원형이 아니였기에 이 부분의 영향으로 인하여 오차가 생긴 것으로 생각 된다. 초전도 영구전류스위치 전기회로의 응답을 해석적으로 구하는 수식을 유도, 정리 하였다. 정확한 값의 계산을 위하여 프로그램의 계속적인 수정을 필요로 한다. 실험적으로는 초전도 코일에 유기되는 전류가 있음을 확인하였으나 Data aquisition의 준비 부족으로 인하여 값을 측정하지 못하였다. 향후 이문제를 해결하는 방향으로 연구를 계속할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Reitz, Milford, Chisty, "Foundation of electromagnetic theory", Forth edition, pp.197-199, 1993
- [2] Kazufumi Tanaka, Akira Ninamiya, Takeshi Ishigohka, Kiyoshi Kurahashi, "Measurement of Joint resistance of BI-2223/Ag tapes using One-turn shorted coil", 2000