

소형 초전도 코일의 켄치특성에 관한 기초 연구

김 심래, 오 상수\*, 오 병환\*, 권 영길\*, 한 일웅, 하 동우\*, 조 전욱\*, 류 강식\*  
 대성전선(주) 기술연구소 \* 한국전기연구소

A Study on the Quench Characteristics in the Small Superconducting Coils

S.R.Kim, S.S.Oh\*, B.H.Oh\*, Y.G.Kwon\*, I.Y.Han, D.W.Ha\*, J.W.Cho\*, K.S.Ryu\*  
 Daesung Cable Co, LTD, \* KERI

Abstract

In order to study the basic I-V behavior and quench characteristics, we fabricated two kinds of small superconducting coils which were wound with different superconductors. In this study, it was made clear that the propagation velocity of normal zone preferentially depends on the operation current rather than heat pulse energy and also increases exponentially with respect to operation current.

1. 서론

마그네트용 초전도선재는 열전도도가 나쁘기 때문에 적은 양의 발열로도 상전도영역을 발생시키고 초전도 마그네트에 켄치를 일으킬 수 있다. 초전도 마그네트에서 켄치는 열적, 기계적 교란에 의하여 국부적으로 발생하며, 상전도 영역은 점점 성장하여 그 주위로 전파된다. 이러한 상전도 영역의 전파속도는 초전도 마그네트를 설계하는데 있어서 켄치에 의한 위험으로 부터 초전도 시스템을 보호하기 위해서 매우 중요한 변수로 사용된다. 그래서 본 연구에서는 소형 초전도 코일을 제작하여 I-V 특성을 살피고 히트 펄스를 가하여 코일을 켄치시켰을 때 상전도영역의 전파속도를 구하였다. 또한 켄치를 일으키는 외부교란에너지와 동작전류를 변화시켜 가면서 켄치특성을 연구하였다.

2. 초전도 코일 제작 및 실험

초전도 코일을 제작하기 위한 보빈은 저온 특성이 우수한 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)를 사용하여 길이 60 mm, 내경 25 mm, 외경 45 mm로 가공하였다. 이 보빈에 자체 제조한 36심 NbTi 초전도선재와 Furukawa사의 24심 NbTi 초전도선재 2종류를 0.7 kgf의 장력으로 권선하였으며 최외층에는 전류 인가시 발생하는 전자기력에 의한 선재의 움직임을 최소화 하기 위하여 직경 0.6 mm의 에나멜선을 1층 권선하였다.(코일A, B라 칭함) 권선에 사용한 선재의 사양은 표 1과 같다.

초전도 코일의 켄치 발생을 위하여 코일의 중심부에 폭 1 mm, 깊이 1 mm의 홈을 낸 뒤 저온용 25Mn-5Cr 선으로 권선하였는데 히터의 저항은 약 25 Ω 정도였다. 그리고 초전도 선재로의 열전달을 좋게 하며 히터를 고정시키기 위하여 열전도도가 좋은 Stycast로 접착시켰다. 히터선의 제원은 표 2와 같다.

또한 켄치 발생시 내부의 온도와 전압의 분포를 알기 위해 온도 센서와 전압탭을 그림 1과 같이 부착하였다. 온도 측정용 센서로는 Chromel-AuFe(0.07%) 열전대를 사용하였으며, 이것들을 코일의 층과 층 사이에 Stycast를 사용하여 고정시켰다. 위와 같은 방법으로 제작한 초전도 코일은 각 층당 80 turns씩 총 18층에 1440회를 감았으며 에폭시에는 함침시키지 않았다.

히터에 공급하는 에너지는 정전류를 사용하였는데 100 mA의 정전류를 시간을 바꾸어 가며 히터에 공급하였다.

표 1 초전도선재 제원

구 분	선 재 A	선 재 B
도체직경 (mm)	0.47	0.47
절연층 두께 (mm)	0.03	0.03
Filament 수	36	24
Cu/Sc 비	6.2	10.91
Twist pitch (mm)	20	20
층수	18	18
총 turn 수	1440	1440

표 2 히터용 선재 제원

구 분	내 용
종 류	25Mn-5Cr
비 저항 (μΩcm)	34.2
선재 직경 (mm)	0.17
절연 두께 (μm)	35

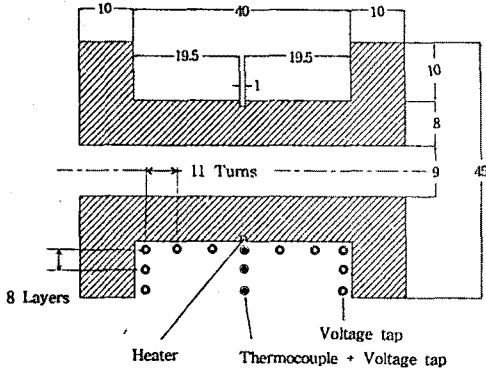


그림 1 초전도 코일 내부의 온도 센서와 전압탭의 위치도

선재의 축방향 전파속도와 횡방향 전파속도의 상대적인 비중은 마그네트의 크기 및 선재의 직경의 크기에 의존한다. 횡방향 전파 우세 마그네트의 경우는 상전도 영역이 에폭시를 통해 전달되는 시간이 코일의 주위를 따라 전달되는 시간보다 빠를 때이다. 이 두 시간을 정량적으로 비교하면 아래와 같으며 이 조건이 성립하면 횡방향 전파 우세 마그네트가 된다.

$$\frac{V_t}{V_l} > \frac{d}{\pi \cdot D}$$

여기서  $D$ 와  $d$ 는 각각 마그네트와 선재의 직경이다. 일반적으로  $V_t/V_l$ 은  $10^{-2}$  오더인데 본 실험에서 제작된 소형 코일은 코일의 직경이 45 mm이고 초전도 선재의 직경이 모두 0.5 mm이므로 2종류의 코일 모두 횡방향 전파 우세 조건을 만족한다고 볼 수 있다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 코일 A에 대한 임계전류의 자장의존성을 나타내고 있다. 외부 인가 자장이 증가함에 따라 임계전류는 거의 선형적으로 감소하고 있음을 보여준다.

그림 3은 코일 B에 40 A의 동작전류를 인가한 후 퀀치를 발생시키기 위한 히터에너지와 전파속도와와의 관계를 나타낸 그래프이다. 히터에 공급하는 에너지가 증가함에 따라 퀀치 전파속도는 별 변화가 없었다. 이는 코일에 공급되는 교란 에너지의 크기와 상전도영역 전파 특성과는 거의 무관한 것을 보인 것으로 공급되는 외부 교란에너지가 코일의 퀀치를 일으키는 최소에너지 이상만 되면 퀀치가 발생하며, 진행되는 현상은 공급되는 교란에너지 보다는 코일 주변의 상황 및 동작전류에 더욱 더 밀접한 관계가 있음을 보여 주는 것이다.

그림 4는 코일 B에 50 A의 동작전류를 인가하였을 때, 히터에 에너지를 공급하여 퀀치를 일으켰을 때의 시간에 대한 온도 변화의 그림이다. 선재 내층의 온도는 급격하게 38 K까지 상승하였다가 감소한 반면 외층의 온도는 16 K까지는 급격하게 상승하다가 약 20 K 을 정점으로 완만한 증가와 감소를 보였는데 이는 액체헬륨과 접한 코일의 온

도 구배와 관계가 있는 것으로 생각된다. 그리고 히터에 에너지를 주입한 뒤 약 1.4초후에 퀀치가 발생하였는데 이는 히터가 액체헬륨과 접하고 있어 히터의 열이 액체헬륨으로 전달되어 상온에서 계산된 열보다 충분히 더 큰 에너지를 공급하여야 함을 알 수 있다.

그림 5는 코일 A에 대하여 외부에서 자장을 인가하였을 경우에 초전도 코일에 흐르는 동작전류를 증가시켜가며 퀀치를 일으켰을 때의 전파속도에 대한 그림이다. 각 자장하에서 동작전류를 증가시키에 따라 횡방향 전파속도는 지속적으로 증가하였다. 동작전류가 작은 경우는 퀀치 전파속도가 외부 자장의 변화에 별 변화가 없었으나 동작전류의 값이 증가함에 따라 전파속도는 매우 큰 폭의 증가를 나타내었다. 한편 외부 인가 자장이 0.5 T인 경우 동작전류가 15A 이하에서, 그리고 1 T에서는 동작전류가 10A 이하에서는 히터에 공급하는 에너지의 시간을 10초 까지 증가시켜도 퀀치가 일어나지 않았는데 이는 히터에 공급된 열이 액체 헬륨에 의해 냉각되는 열보다 작아 초전도 퀀치를 일으키지 않은 것으로 사료된다.

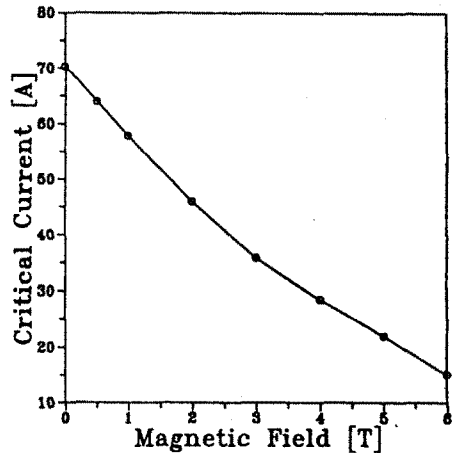


그림 2 코일 A의 외부 자장에 대한 임계전류의 변화

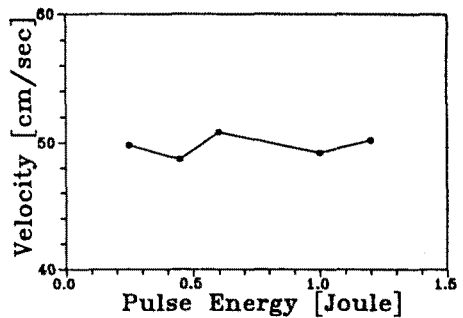


그림 3 코일 B의 히터에너지와 퀀치 전파 속도와의 관계

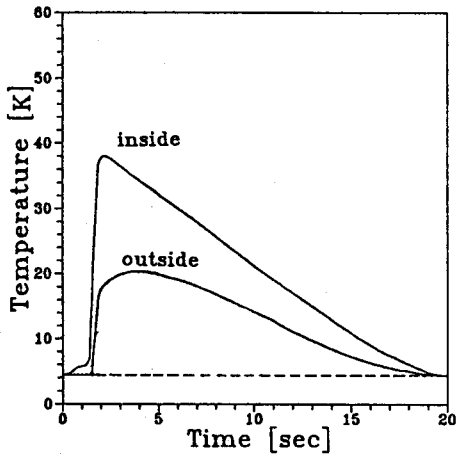


그림 4 코일 B의 내부 온도의 변화

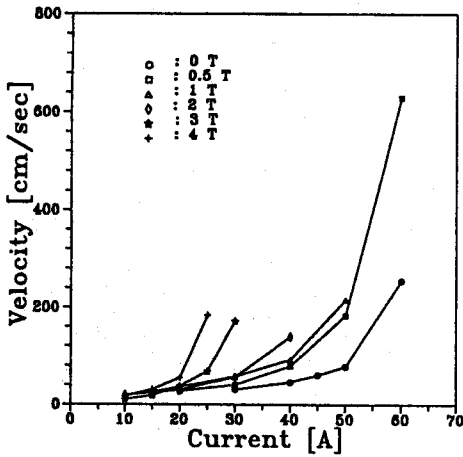


그림 5 코일 A의 외부 자장 인가시 동작전류와 전파속도와와의 관계

#### 4. 결론

본 실험을 위해 제작한 소형 초전도 코일은 횡방향 우세형으로 제작하였으며 이 코일에 인위적인 켄치를 일으켰을 때 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초전도 코일을 켄치시키기 위한 외부 유입에너지는 동작전류의 값이 증가할수록 작아졌다.
2. 상전도영역 전파속도는 동작전류가 10 A에서는 외부자장의 크기에 별 관계가 없이 약 20 cm/s 내의였으나 동작전류의 값이 증가함에 따라 전파속도는 지수적으로 증가하였다.
3. 켄치 전파속도는 히터에 공급하는 에너지의 양 보다는 코일에 흐르는 동작전류에 더욱 더 큰 영향을 받았다.

본 연구는 생산기술발전 5개년 계획에 의거 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행된 것임

#### 참고문헌

1. 나 완수, "초전도 마그네트의 켄치 특성에 관한 연구", 서울대학교 공학박사학위 논문, 1991.
2. 배준한, 박영철, 오윤상, 고태국, 류강식, "히터에너지와 전송전류가 상전도영역 전파속도에 미치는 영향에 대한 실험적고찰", Trans. KIEE, Vol.43, No.11, pp.1835, 1994.
3. M.N.Wilson, "Superconducting magnets", Oxford : Clarendon Press, 1983.