

## 초전도 Power Supply의 전류펌핑 과정에서 발생하는 조기 펜치발생 진단

김호민, 배준한, 노정섭, 심기덕, 장원갑, 고태국

연세대학교 전기공학과 초전도연구실

### A study on the Detection of Premature Quench Generated in the Process of Current Pumping in a Superconducting Power Supply

Ho Min Kim · Joon Han Bae · Jeong Sub Noh · Ki Deok Sim · Won Kap Jang · Tae Kuk Ko  
Dept. of E. E. YONSEI UNIV.

**Abstract** - This paper is to analyze the Premature Quench characteristics of a rotating magnet type superconducting fluxpump and consider the method of detecting and protecting this premature quench. Practically, there is contact resistance between the fluxpump and the load, namely the S.C. magnet. The thermal increase due to the contact resistance cause the premature quench before the charging current amounts to the critical current of S.C magnet. Therefore, this paper is devoted to solving the heat equation on contact region using cylindrical coordinates and to calculating the rate of thermal increase during the current is pumped up. Doing so, the predictive value of the maximum pumping current is obtained. It has been verified that the results of simulation are coincident with those of experiment. It must be considered essentially to minimize the contact resistance in designing the S.C. fluxpump system in order to protect the premature quench and improve the maximum pumping current.

#### 1. 서 론

초전도 응용 기기의 특성해석 및 설계에 필수적인 것은 초전도의 펜치과정을 이해하는 것이다. 초전도체가 초전도성(Superconductivity)을 유지하기 위해서는, 임계온도(Critical temperature) 이하의 온도를 유지해야한다. 이 임계온도는, 초전도체에 흐르는 전류의 크기 및 외부의 자계크기에 의존하며, 이 세 가지 파라미터의 임계치에 의해서 임계곡면이 정의된다. 따라서 초전도체는 항상 이 임계곡면 밑에서 동작하게 된다. 한편 초전도체 내부에서 국부적으로 초전도상태를 벗어나게 되는 부분이 발생할 때, 그러한 국부 점에서 동작점이 임계곡면 위에 위치하게 되며, 따라서 임계곡면에서 이탈한 양 만큼 상전도 상태의 발열(Joule heating)을 하게된

다. 이러한 발열량은 확산을 통하여 (Thermal diffusion) 선재의 인접부분으로 파급되며 파급된 부분은 다시 상전도 상태로 천이(Transition)하게 된다. 어떤 조건하에서는 이러한 일련의 과정들, 즉 상전도 상태로의 천이, 발열, 인접으로의 확산, 확산된 곳에서 다시 상전도 상태로 천이 되는 과정들이 급격히 진행될 수 있으며, 이와 같이 상전도 영역(Normal zone)이 전체 초전도체에 급속히 전파(Propagation) 되는 것을 펜치(Quench)라고 한다.

특히 본 논문에서 다루어지는 펜치현상은 초전도 전원장치와 초전도 부하와의 접합부분에서 발생할 수 있는 열적 조기 펜치메카니즘에 관한 부분으로서 시스템 응용에 있어 필수 불가결하게 부딪히는 문제라 할 수 있겠다. 초전도 전원장치에서 만들어지는 펌핑전류를 초전도 부하에 전달해 주기 위해서는 시스템간에 회로 적으로 폐회로를 만들어 주어야 하는데 이 때 접합 부분은 서로 다른 매질로 결합되어진다. 따라서 펌핑전류에 의한 즐열이 접합부분에서 생겨나 열적 펜치가 발생하게 되는데 이러한 모델을 수치해석적인 유한차분법으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 고찰하고, 이를 실험에서 얻어지는 결과와 비교 분석하여 이러한 열적 조기펜치 문제를 해결하는 방법을 알아보자 한다.

#### 2. 모델 설정 및 특성 해석

열이 전달되는 과정에는 전도, 대류, 복사가 있다. 전도는 격자진동에너지가 인접한 분자를 따라 전달되는 것이고, 대류는 주로 액체나 기체 같은 유체에서 일어나는 주된 열전달 현상으로, 액체나 기체 분자가 직접 에너지를 가지고 움직인다. 복사는 열에너지가 전자기파의 형태로 전달되는 것을 말한다.

본 논문에서는 초전도선재들간에 접합을 시켰을 경우 그림2.1과 같이 모델링을 한 후 에너지보존법칙을 이용한 차분화(Control Volume Method)를 적용하여 열전달 문제를 해석하고자 한다.

## 2.1 전도에 의한 열전달 특성

초전도체에서의 펜칭은 전자기력에 의한 마찰력, AC손실과 선재간의 접합에 의한 출열 발생 등의 연속적인 교란에너지에 의한 선재의 온도상승에 의해 최소전파영역(MPZ)보다 큰 상전도 영역이 국부적으로 발생하면, 상전도 영역에서의 열 발생, 냉매로의 열전달, 그리고 비열과 열전도도에 의한 열흡수 등의 복잡한 전기적, 열적현상에 의해 상전도 영역은 등속도로 전파된다. 한편 초전도체의 접합부분에서는 그림2.1에서 보듯이 외부 초전도체에서 내부 초전도체로 전류가 흐르게 되는데 접합부분 내에서 Sn과 같은 LHe 온도에서도 전기적인 저항을 갖고 있는 물질에 의해 접촉저항이 존재하게 된다. 따라서 이러한 접합부분에서는 NbTi보다 비저항이 더 크므로 펌핑전류가 커지면서 출열이 발생하여 접합부분을 상전도 상태로 만든다. 결국 상전도 영역의 저항은 초전도체 내에 흐르고 있는 전류를 감소시키도록 커지게 된다.

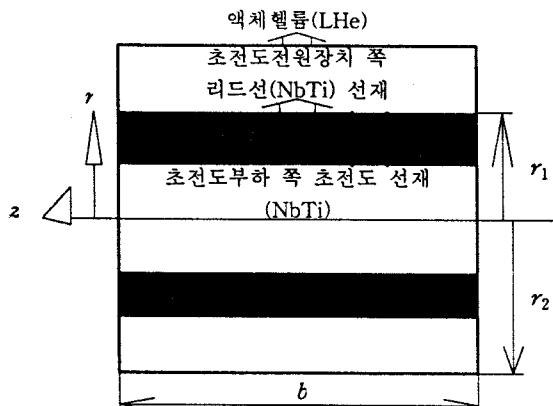


그림 2.1 초전도 선재의 접촉부분에서의

열전달 개념도

### 2.1.1 열전달 방정식

초전도전원장치와 초전도부하 사이의 접촉부분에서의 온도해석을 위하여, 에너지보존의 법칙(열역학 제1법칙)과 Fourier 법칙을 적용하여, 다음과 같이 원통좌표계에서  $r$ 방향의 1차원 비정상 열전달 방정식을 얻을 수 있다. 여기서, 온도는 거리  $r$ 과 시간  $t$ 의 함수로서  $T = T(r, t)$ 로 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + g(T) = C_v(T) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.1)$$

## 2.2 시뮬레이션을 위한 모델 설정

열전달미분방정식을 이용하여 초전도 전원장치와 초전도 부하간의 조인트 부분에서의 온도해석을 하기 위해서는, 조인트 부분에서 발생하는 열전달 요소를 알아야 한다. 그럼 2.2는 원통모양의 조인트 부분에서 열전달이 일어나는 과정을 도시한 것으로서, 접촉부분에 적합한 원통좌표계 ( $r, \phi, z$ )를 도입하여 각 위치를 나타냈다. 조인트 부분의 중심에서 Pb의 내측과 만나는 경계부분까지의 거리를  $r_1$ 이라 하고, 중심에서 액체헬륨(LHe) 냉매가 접촉하는 지점까지의 거리를  $r_2$ 라 하며, 조인트의 길이를  $b$ 라 한다. 내측경계  $r = r_1$ 인 지점에서는 Sn등 액체헬륨에서도 고유저항이 존재하는 물질이기 때문에 외측 초전도 권선과 내측 초전도 권선으로 흐르는 전류밀도에 의한 출열의 발생으로 일정한 열속  $q_h$ 가 초전도권선에 전해진다. 또한 외측경계  $r = r_2$ 인 지점에서는 초전도권선의 열이 냉매인 액체헬륨 쪽으로 전달된다. 이러한 출열 발생에 의해 임계온도 이상이 된 접촉부분에서는 펜치(quench)가 발생하여, 동작전류와 상전도저항에 의한 발열이 일어난다. 따라서 내부영역에서는 열유출입과 동시에 내부에너지도 생성되며, 이 때의 내부에너지 생성속도  $g(T)$ 는 온도에 관한 함수이다.

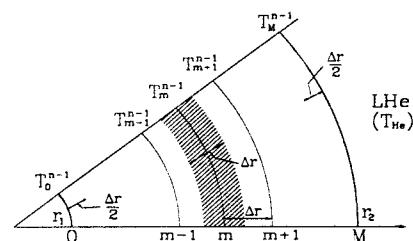


그림 2.2 1차원 열전달식의 차분화를 위한 영역 분할

### 2.2.1 1차원 모델

에너지보존법칙을 이용한 차분법을 적용하여 1차원 비정상 열전달 문제를 해석하기 위하여, 원통형 모델을 고려한다. 여기서 원통길이  $b=100[\text{mm}]$ , 내측 NbTi 반지름  $r = r_1 = 1[\text{mm}]$ , 외측 NbTi 반지름  $r = r_2 = 2.1[\text{mm}]$ , 온도구배는 반지름방향으로 존재하며, 내부에너지발생율은 온도에 관한 함수로서  $g(T)$ 라 가정하자. 이러한 조건에서 그림 2.2는 2차원 비정상 열전달 문제의 차분화를 위한 공간요소 분할을 도시한 것이다. 열전달영역  $r_1 \leq r \leq r_2$ 를  $M (=21)$ 개의 원통미소요소로 나누면,

각각의 두께  $\Delta r$ (=0.1[mm])은 다음과 같다. (이 때 요소의 크기는 통일하지 않아도 된다.)

$$\Delta r = \frac{r_2}{M} \quad (2.2)$$

또한, 시각  $n(=0, 1, 2, \dots)$ 에서 각 절점의 온도를  $T_m^n$  ( $m = 0, \dots, M$ )이라 하고, 차분식을 유도하기 위해 절점  $m$ 을 중심으로  $\Delta r$ 의 미소체적요소를 생각할 때, 이 요소내의 에너지보존식은 일반적인 개념을 도입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left( \begin{array}{l} \text{특정시각에서} \\ \text{제어체적내의} \\ \text{에너지} \\ \text{유출입속도} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{특정시각에서} \\ \text{제어체적내의} \\ \text{에너지} \\ \text{생성·소멸속도} \end{array} \right) \\ & = \left( \begin{array}{l} \Delta t \text{ 시간동안} \\ \text{제어체적내의} \\ \text{에너지} \\ \text{축적율(속도)} \end{array} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

식 (2.3)은 어떤 제어체적에서 내부발열을 포함한 비정상 열전달해석을 위한 식으로서, 차분식 (2.1)에 비해 보다 일반화된 형태이다. 따라서 이 식을 적용하면 단면적, 절점간거리(요소크기), 열전도도 및 체적비열의 위치와 시간에 따른 변화를 취급할 수 있다.

### 3. 결과고찰

초전도전원장치에서 만들어진 펌핑전류를 8개의 300A급 초전도 선재를 통해 1000A급 초전도 선재로 만들어진 마그넷에 접합을 시켜 하나의 폐회로가 되도록 만들어 펌핑전류가 흐를 수 있도록 실험장치를 제작하였다. 초전도전원장치와 초전도부하간에 연결된 접합부분은 외부적으로는 LHe 속에 담겨져 있어서 4.2K의 온도를 유지하지만 접합 내부에서는 극저온에서도 고유저항을 유지하는 성분 때문에 대전류가 접합부분을 통해 흐를 때, 줄열이 발생을 하게된다. 이러한 내부에너지 증가는 초전도체를 열적으로 훈치 시켜 초전도전원장치에서 발생되는 전류를 부하에 전달하지 못하게 하는 원인이 된다. 따라서 이러한 내부에너지 증가를 실험치와 비교 분석해 보고자 한다.

#### 3.1 실험결과와의 비교분석

그림3.1은 초전도전원장치에서 나오는 전류를 계속해서 560A까지 펌핑을 했을 때 초전도부하와의 접합부분에서 열적 조기IVEN치가 발생한 그래프이다. 여기서는 접합부분의 펌핑전류에 의한 줄열 발생이 초전도 선재의 임계온도인 9.4K를 넘어서 버렸기 때문에 훈치가 발생하여 펌핑전류가 소실 되버렸다. 그림3.2는 초전도전원장치에서 연속적인 전류펌핑을 하면서 접합부분의 내부에너지 상승에 의한

열적 조기IVEN치가 발생할 것에 대비하여 중간에 전류평형을 멈추고 영구모드를 만들어 주었을 때의 그래프이다. 여기서는 열적 조기IVEN치가 900A 전류가 흐를 때까지는 발생하지 않았다.

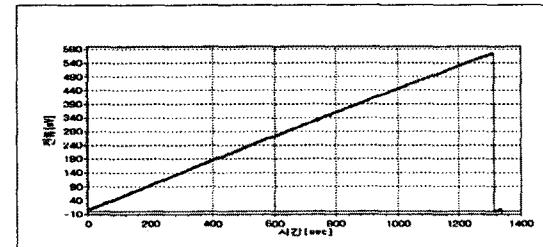


그림3.1 영구전류모드 없이 전류를 펌핑한 경우

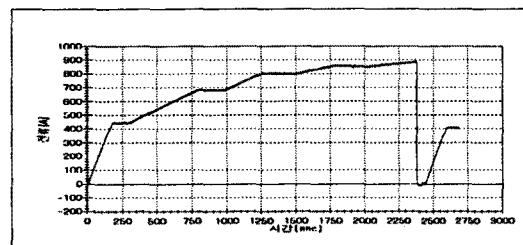


그림3.2 영구전류모드를 만들어 주었을 때의 전류펌핑

### 4. 결론

본 논문은 초전도 전원장치와 초전도 부하간에 시스템적으로 폐회로를 만들어 주기 위해 서로 접합을 시킨 후 초전도 전원장치의 펌핑전류를 초전도 부하에 인가해 주었을 때 나타나는 열적 조기IVEN치 메카니즘에 관해 고찰해 보았다. 이러한 접합부분에서의 접촉저항에 의한 열적 조기IVEN치현상을 미연에 방지할 수 있도록 하기 위해서는 펌핑전류에 인한 접합부분에서 발생되는 줄열을 외부로 방출시켜 주어야 한다. 따라서 펌핑 중에 열적조기IVEN치의 조짐이 발생하면 영구전류모드를 만들어 접합부분의 내부에너지 증가 분을 외부 헬륨으로 발산시킨다. 초전도전원장치에 의해 만들어진 전류를 초전도부하에 전달해 주기 위해서는 시스템 적인 접합부분이 반드시 필요하게 되는데 여기서 전기저항 저항이 존재하게 된다. 이러한 전기저항을 최소화 시켜 시스템을 설계·제작하여야 열적 조기IVEN치현상을 방지 할 수 있음을 알았다.

#### [참고문헌]

- [1] Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", Oxford Univ. Press, 1983.
- [2] Yildiz Bayazitoglu, M. Necati Ozisik, "ELEMENTS OF HEAT TRANSFER", FcGraw-Will, USA, 1988