

**외부장영향에 따른 HTS 선재의 임계전류 변화에 대한 연구**

최석진, 이상진, 심기덕, 배준한, 조전욱  
 위덕대학교, 한국전기연구원

**Research on the critical current of high-Tc superconducting tapes with external magnetic field.**

S.J. Choi, S.J. Lee, K.D. Sim\*, J.H. Bae\*, J.W. Cho\*  
 Uiduk Univ., \*KERI

**Abstract** - 고온 초전도 선재는 자장의 세기, 방향 그리고 온도에 따라 임계전류가 달라지는 특성이 있다. 임계전류가 달라지는 특성은 초전도 선재를 사용하는 초전도 기기에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 자장의 세기, 인가 방향이 선재의 임계전류에 미치는 영향에 대하여 알아보기 위하여, prototype magnet을 제작하고, 선재에 전압 tap을 부착하여 실험을 하였다. 자장의 세기와 고온 초전도 선재가 받는 자장의 방향을 변화시켜가며 실험을 하였다. 또한, 주파수에 대한 선재의 영향을 알아보기 위하여, 주파수 변화에 따른 선재의 임계전류 변화도 측정하였다. 본 논문은 고온 초전도 선재를 이용하여 제작하게 되는 고온 초전도 기기 설계의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

**1. 서론**

기존의 금속계 저온 초전도 선재와 달리 고온초전도 선재는 액체질소 온도 이상에서 전기저항이 영인 초전도 특성을 나타내는 세라믹 재료이다. 일반적으로 은(Ag) 튜브에 초전도 세라믹 분말을 충전하는 PIT(Power In Tube)공정을 이용하여 기계적, 열적 가공 후 선재상태로 이용된다. 이러한 고온초전도체에는 Bi계, Y계, Tl계 등의 재료가 이용되며, 특히 Bi계 고온 초전도체 중에서도 Bi-2223(Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>)가 선재 응용의 대부분을 차지한다. 향후 저온 초전도 선재를 대체하여 초전도 응용분야의 기초기술로서 크게 각광받을 것이며 현재 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 PIT법으로 제조된 초전도 선재의 응용분야는 광범위하며 특히 고온 초전도 송전 케이블, 모터, 환류기, 발전기, 고자장용 마그네트 등에 응용이 기대된다. 고온초전도 선재의 특성은 극저온(주로 액체질소 온도인 77K)에서 1μV/cm의 기준으로 단위면적당 전류통전능력으로 평가된다.[1]

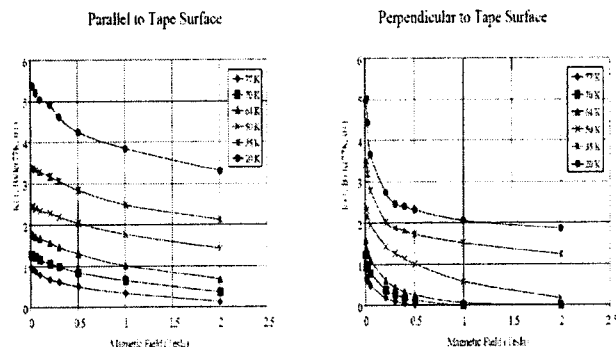
Bi계 초전도체는 고유의 자기적 취약성과 테입형 초전도 선재가 갖는 형상적 문제로 인하여 외부 인가 자장에 대한 의존성을 갖게 된다. 즉, 고온 초전도체에 외부에서 자장이 인가되면, 고온 초전도체의 임계전류는 낮아지게 된다. 이러한 영향은 고온 초전도체를 이용하여 제작한 초전도 기기의 성능 저하를 가져오거나 심한 경우에는 켄치 현상이 일어날 수도 있다.

본 연구에서는 외부 인가 자장이 고온 초전도 선재에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 외부 인가 자장과 초전도 선재가 받는 자장의 방향을 변화시켜 가며 실험을 하였다. 고온 초전도체의 특성상 수직방향의 자장을 받는 경우에 수평방향의 자장을 받는 경우보다 임계전류 저하가 심한 것으로 예상되며, 실험을 통하여 임계전류의 변화를 측정하였다.

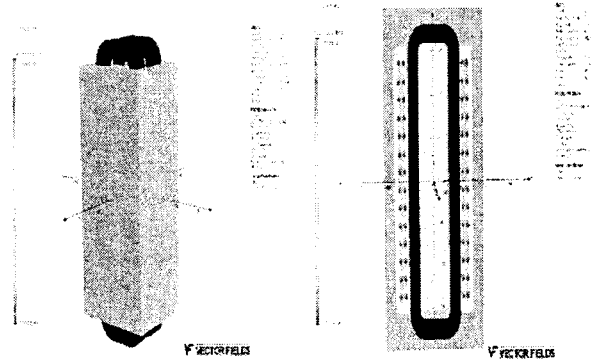
**2. 본론**

**2.1 실험 방법**

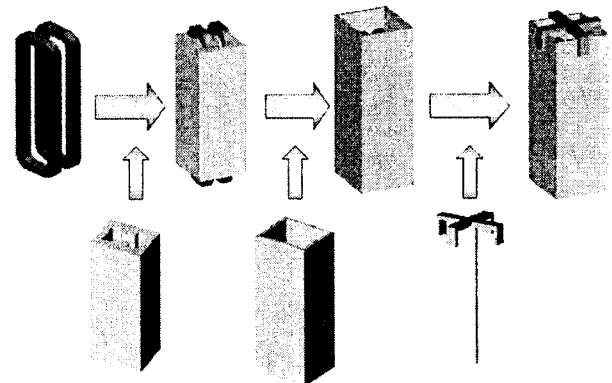
실험은 외부 인가 자장이 없을 때 임계전류가 130A이며, 0.4(Thickness)×4.45(Width)의 사양을 가지는 고온 초전도 선재를 사용하였다. 선재에 직류 자장이 외부에서 인가되었을 때의 임계전류 변화는 <그림 1>과 같다. 고온 초전도 선재에 외부에서 자장을 인가하기 위하여 홀더와 prototype magnet을 제작하였고, 외부에서 인가하는 자장은 교류자장 0~400Gauss, 고온



<그림 1> 외부 직류 자장을 받을 때의 임계전류 변화 - AMSC spec 참조



<그림 2> prototype magnet 전자장 해석



<그림 3> 실험 장치 조립

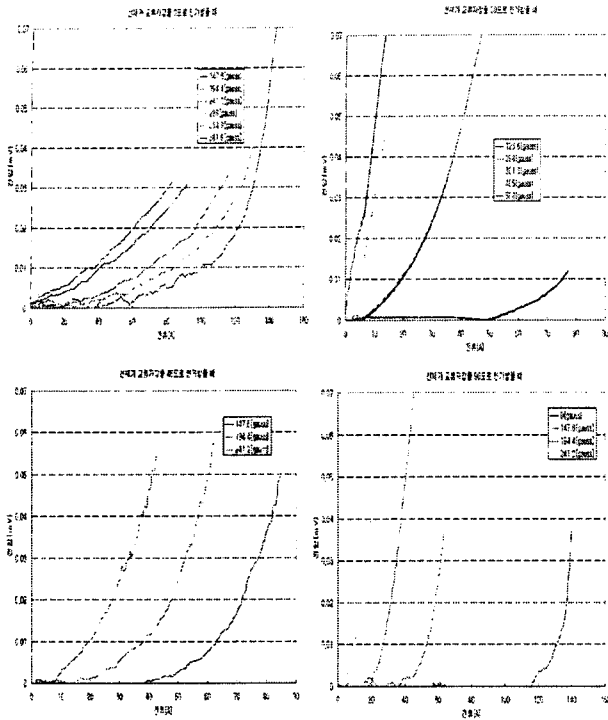
초전도 선재가 받는 자장의 방향은 0°~90°까지 변화시켜가며 실험을 하였고, 이 각각에 대하여 주파수 60Hz, 200Hz에 대한 실험을 함으로써 주파수에 따른 영향도 측정하였다. 외부에서 자장을 인가하기 위하여 prototype magnet을 제작하였다. 고온초전도 선재에 인가하는 자장을 정하고, 전자장 해석 프로그램인 opera-3d를 사용하여 전자장 해석을 수행하여 prototype magnet 사양을 결정하였다.[2] <그림 2>는 prototype magnet의 전자장 해석모습이다. 이렇게 제작된 prototype magnet은 <그림 3>과 같이 조립하게 된다. 고온 초전도 선재는 마지막에 조립되는 홀더에 위치하게 되며, 전압을 측정하기 위해 고온 초전도 선재에 7cm의 전압탭을 부착하였다. 외부 인가 자장의 방향을 가변할 수 있도록, 고온 초전도 선재가 위치한 홀더는 회전이 용이하게 제작하였다.

**2.2 실험 결과**

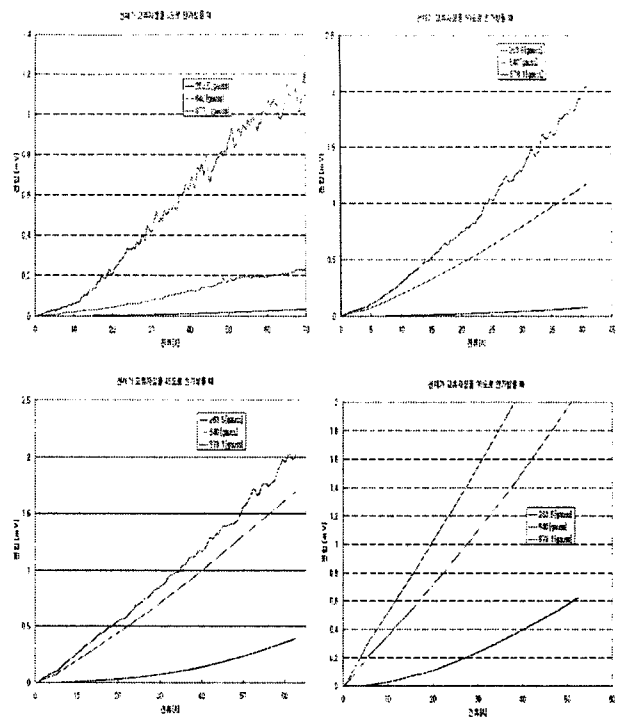
실험은 외부 인가 자장의 주파수가 60Hz일 때와 200Hz일 때로 나누고, 그 각각에 대해 선재가 받는 자장의 방향에 따른 임계 전류를 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

**2.2.1 교류 자장(60Hz)이 외부에서 인가되었을 때 전압특성과 임계전류**

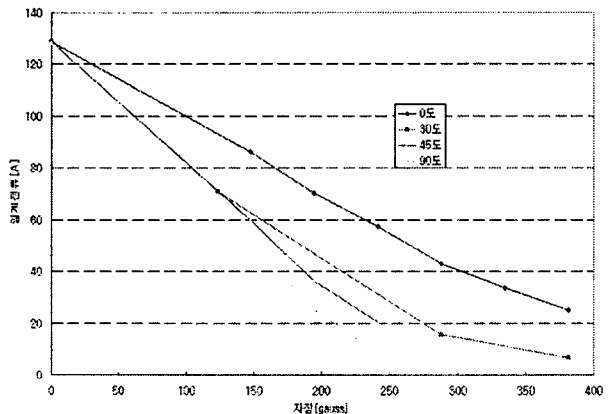
선재가 받는 자장의 방향에 따라 자장을 증가시키며, 전압을 측정하였으며 그 실험 결과는 <그림 4>와 같다. 외부에서 교류 자장을 인가하는 경우, 그림1에서의 직류 자장을 인가하는 경우보다 훨씬 큰 임계전류의 저하를 보인다. <그림 4>는 인가하는 교류자장의 방향에 따른 전압특성을 나타낸 것이며, <그림 4>의 결과를 이용하여 방향에 따른 임계전류 변화를 나타낸 것이 <그림 5>이다. 임계전류는 1μV/cm의 기준으로 정하여 나타내었다. 고온 초전도 선재에 수평자장이 가해졌을 때(0도)의 결과를 보면, 선재에 가해지는 수평방향의 자장이 100Gauss일 때, 자장이 없을 때 측정된 임계전



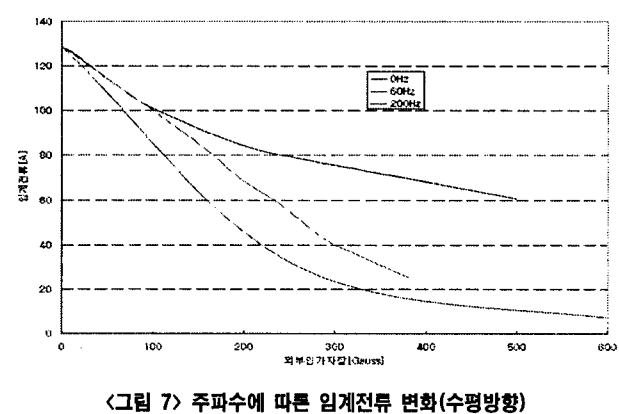
〈그림 4〉 교류자장[60Hz]의 방향에 따른 전압특성



〈그림 6〉 교류자장[200Hz]의 방향에 따른 전압특성



〈그림 5〉 자장의 방향에 따른 임계전류 변화



〈그림 7〉 주파수에 따른 임계전류 변화(수평방향)

류의 21%가 감소하였으며, 선재에 가해지는 수평방향의 자장이 200Gauss 일 때는 자장이 없을 때 측정된 임계전류의 46%가 감소하였다. 고온 초전도 선재에 수직자장이 가해졌을 때(90도)의 결과를 보면, 선재에 가해지는 수직방향의 자장이 100Gauss일 때, 자장이 없을 때 측정된 임계전류의 40%가 감소하였으며, 선재에 가해지는 수평방향의 자장이 200Gauss일 때는 자장이 없을 때 측정된 임계전류의 83%가 감소하였다. 고온 초전도 선재의 면에 수평방향의 자장보다 수직방향의 자장이 가해졌을 때 훨씬 더 큰 임계전류 저하를 가져온다. 고온 초전도 선재를 이용하여 제작한 고온 초전도 기기에는 수직방향의 자장이 수평방향의 자장이 더 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 30도, 60도의 각도로 200Gauss의 자장이 선재에 가해지는 경우에는 자장이 없을 때 측정된 임계전류와 비교하여 각각 58%, 73%가 감소하였다.

### 2.2.1 교류 자장(200Hz)이 외부에서 인가되었을 때 전압특성

주파수에 대한 영향을 알아보기 위하여, 200Hz의 주파수를 가진 교류자장을 외부에서 인가하고 앞의 실험과정을 반복하였다. 그 실험결과는 <그림 6>과 같다. 선재에 수평방향의 자장 263Gauss가 가해졌을 때, 자장이 없을 때 측정된 임계전류의 78%가 감소하였으며, 수직방향의 자장 263Gauss가 가해졌을 때, 자장이 없을 때 측정된 임계전류의 95%가 감소하였다. 주파수가 200Hz로 커짐에 따라 60Hz와 비교하여 임계전류가 크게 감소하였음을 알 수 있다. <그림 7>은 주파수에 따른 임계전류의 변화를 나타낸 것이다. 200Hz의 경우 <그림 5>와 같은 자장의 방향에 따른 임계전류 변화 데이터를 얻기가 힘들었다. 고온 초전도 선재의 통전조건인  $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준으로는 임계전류가 너무 작게 나타났기 때문이다. 고온 초전도 선재에 가해지는 자장이 수직방향인 경우와 함께, 가해지는 자장의 주파수가 높아질수록 선재의 임계전류가 크게 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 외부에서 교류자장이 가해졌을 때, 고온 초전도 선재의 임계전류 변화를 측정하였다. 외부 인가 자장의 크기를 0~400Gauss, 선재가 받는 자장의 각도를 0~90도까지 변화시키며 실험을 하였다. 또한 주파수를 바꾸어 실험을 하여 주파수에 대한 영향도 파악할 수 있었다. 수평방향의 자장보다 수직방향의 자장이 선재의 임계전류에 큰 영향을 끼쳤으며, 주파수가 커짐에 따라 임계전류도 크게 저하되었다. 고온 초전도 전력기기의 주변 환경에 의한 고주파 자장의 유입이나 전력기기 자체적으로 만들어지는 자장에 의한 영향 등을 분석할 때, 이 실험을 통해 얻은 데이터를 기초자료로 활용할 수 있을 것이며, 또한 초전도 전력기기의 설계에 응용할 수 있을 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] “산업화 가능 핵심 초전도기술 분석 보고서”, 한국전기연구원, 산업자원부, p20~32, 1999
- [2] Vectorfields, “OPERA-3d Reference Manual”. Vectorfields, v9.0, 2003

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대초전도용융기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.