

Nb₃Sn 테이프 임계전류의 자장 · 온도 의존성

장 현만*, 오 상수, 하 동우, 조 전욱, 류 강식, 김 상현*
 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, 경상대학교 전기공학과*

Critical Current Density Dependence on Magnetic Field · Temperature of Nb₃Sn Tape

H.M. Jang*, S.S. Oh, D.W. Ha, J.W. Cho, K.S.Ryu, S.H. Kim*
 Korea Electrotechnology Research Institute,
 Gyeongsang National University

Abstract - The stability of superconducting wires was studied by considering thmperature and magnetic field. We measured critical current density of Nb₃Sn tape at 4.2 K, 12 K, 13 K and 14 K in various field. The critical current density at 4.2 K, 6 T is 16.5 times higher than at 12 K, 6 T. We expressed the critical current density as a function of temperature and magnetic field, expanding on work by Hampshire, et al.

1. 서 론

경제성장에 따라 전력수요가 대용량화 및 고밀도화되는 경향이 강해지며 전력공급의 양적인 문제뿐만 아니라 높은 안정성과 신뢰성이 요구되고 있다. 이와같은 요구에 대한 대처 방안으로 초전도 발전기, 토카막 핵융합장치용 초전도 자석[1], 초전도 송전케이블 및 에너지저장장치(SMES)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재 선재분야에서 응용 가능한 초전도체는 액체 헬륨온도(4.2 K)에서 사용하는 금속계 저온초전도체로써 대표적으로 Nb-Ti와 Nb₃Sn을 들수 있으며, 특히 Nb₃Sn 선재의 경우 고자장용 마그네트 등으로 주로 응용되고 있다.

초전도 마그네트를 운전할 경우 전류도입선에 의한 열침입, 주울열 및 외부 교란에 의해 국부적인 퀸치(quench)가 발생될수 있으며, 순간적으로 발생된 퀸치가 코일전체로 전파되어 전체 시스템의 손상을 줄 우려가 있다. 초전도 선재분야에서 이러한 퀸치에 대한 안정성 연구로서 온도와 자장 변화에 따른 초전도체의 전기적 열적 물성 측정과 분석이 요구된다 할수 있다[2].

본 연구에서는 미국 GE사에서 제조한 Nb₃Sn복합초전도테이프를 온도와 외부 자장을 변화시키면서 임계전류를 측정하며, 임계전류밀도의 자장과 온도 의존성에 대하여 고찰 하였다.

2. 측 정

그림 1은 측정시 사용된 cryostat와 온도를 가변용 insert dewar의 구조를 나타내고 있다. 그림 1에서 나타낸것처럼 액체 헬륨을 담을수 있는 cryostat에 솔레노이드 형태로 권선한 Nb-Ti 초전도 마그네트를 침적시키고 다시 insert dewar를 삽입한후 외부 cryostat에 있는 4.2 K의 헬륨을 insert dewar 내부로 적정량 주입하면서 열교환기와 히터로 insert dewar 내부의 온도를 조절하였다. 시편은 insert dewar 내부에 두고, 마그네트의 중심부에 위치하도록 하였다. 시편부의 온도와 외부자장을 정확히 읽기 위하여 온도센서와 hall 센서로 온도와 자장을 측정하였다. 이때 온도센서는 자장하에서도 안정한 특성을 보이는 CGR 센서를 사용하였다. 시편의 임계전류 측정은 4단자 법으로 시편 양단에

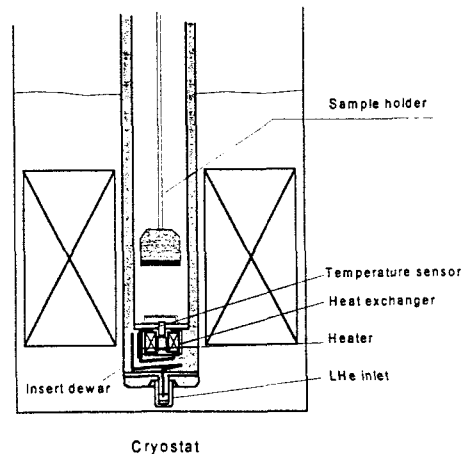


Fig. 1 The structure of temperature variable insert dewar and cryostat

전류를 흘리고 시편에 발생하는 전압을 계측하여 측정하였으며, 임계전류치는 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전압이 생길때의 전류값으로 정의 하였다.

측정한 Nb_3Sn 테이프를 살펴보면 단면의 중앙에 미반응 Nb 층이 있고 양쪽에 Nb_3Sn 화합물층이 있으며 양쪽 최외층에는 Cu 안정화제로 이루어져 있다. 테이프의 두께와 폭은 각각 0.2 mm , 0.35 mm 이며 전체 단면적 중에서 Nb_3Sn 이 차지하는 면적은 약 20 %이다.

3. 임계전류밀도의 자장 · 온도 의존성

Hampshire 등은 Nb_3Sn 선재의 임계전류 밀도를 자장과 온도의 함수로서 측정한 결과를 보고한바 있다[3]. 그들의 연구에서 여러 온도 범위에서 자장과 임계전류의 관계는 자장에 대하여 $I^{1/2} \times B^{1/4}$ 에 비례한다는 결론을 얻었다. 그리고 임계전류밀도 (J_c)는 다음과 같은 공식으로 표현된다.

$$J_c(B, T) = CB^{-1/2}(1-t^2)^2b^{-1/2}(1-b)^2 \quad \text{---- (1)}$$

여기서 $t = \frac{T}{T_0}$ (T 는 온도, T_0 는 임계온도)

$$b = \frac{B}{B_2(T)}$$

C 는 온도와 자장에 대하여 독립적인 계수이다.

그리고 온도에 의존하는 상부임계자장 $B_{c2}(T)$ 는 다음과 같은 공식으로 표현되어진다[4].

$$B_{c2}(T) = B_{c20}(1-t^2)[1 - 0.31t^2(1 - 1.77 \ln t)] \quad \text{-- (2)}$$

4. 결과 및 고찰

그림 2 는 14 K, 2 Tesla에서 측정한 데이터를 나타낸 그림이다. 이그래프에서 임계전류(I_c)는 38

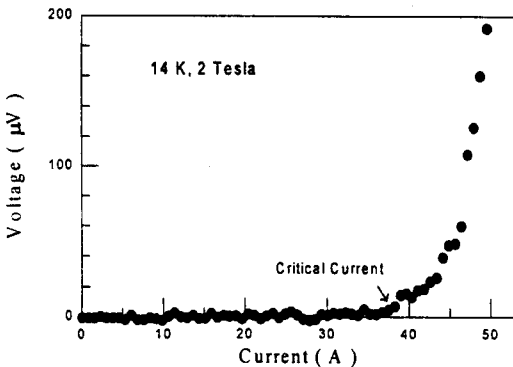


그림 2 V-I curve of the specimen at 14 K, 2 Tesla

A이며 초전도체의 단면적으로 나눈 J_c 는 $326.45\text{ A}/\text{mm}^2$ 이다. 같은 선재를 4.2 K, 6 Tesla에서 측정했을 때 I_c 와 J_c 는 각각 418 A, $3591\text{ A}/\text{mm}^2$ 의 값을 나타내었다.

그림 3은 시편을 5, 6 Tesla의 외부자장에 측정한 임계전류밀도의 온도의존성을 나타내는 그래프이다. 그림에서 나타난 것처럼 온도가 상승함에 따라서 임계전류밀도가 급격히 저하됨을 알 수 있다. 그리고 6 Tesla의 테이터를 12 K와 4.2 K에서 비교할 경우 약 16.5배의 차이가난다. 이러한 결과로 외부 열침입에 의해서 초전도 선재에 국부적으로 열이 발생할 경우의 임계전류밀도 특성을 정량적으로 분석할 수 있으며, 시스템의 안정화 문제에 대한 해석도 보다 용이해질 것으로 예상된다.

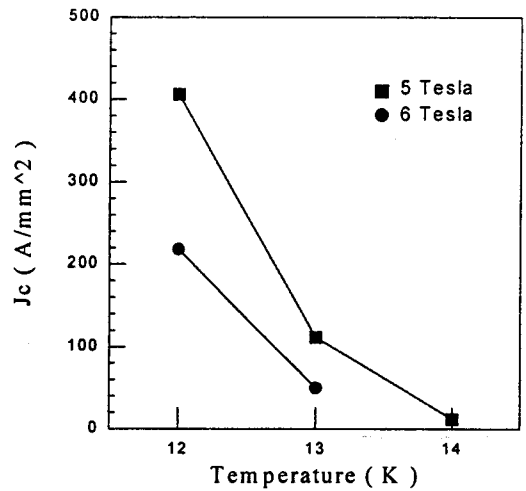


Fig. 3 Critical current dependence on temperature

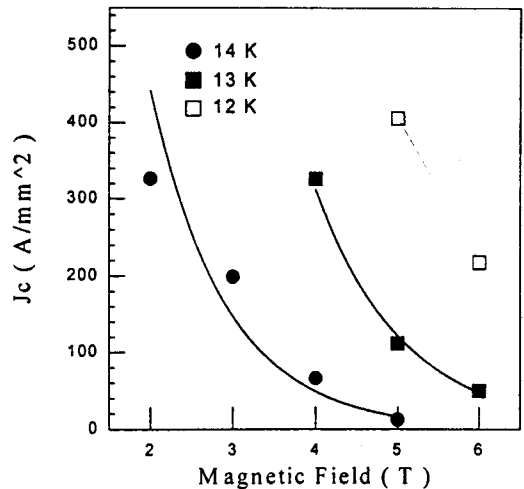


Fig. 4 Critical current dependence on magnetic field at 12, 13, 14 K

그림 4는 여러 온도에서의 임계전류밀도의 자장 의존성을 나타낸 그래프이다. 14 K와 13 K의 데이터에서 실선으로 표시한 것은 실제 측정된 데이터를 (1)의 공식으로 근사화 시킨 것이다. 초전도 임계상태모델에 의하면 Nb₃Sn의 B_{c20} = 22 T 이며, T_{c0} = 18.2 K 이다. 그림에서 실제 측정된 데이터와 계산식으로 최대한 근사한 경우 5.7 %의 오차범위내에서 C = 2620을 구할수 있었다. 이로써 저자장 영역에서 측정된 데이터로 고자장시의 데이터를 예측할수 있으며 다른 여러 온도에서의 전기적·자기적 특성 또한 예측할수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 미국의 GE사에서 입수한 Nb₃Sn 복합테이프를 온도 및 자장의 함수로써 임계전류를 측정하였다.

온도와 자장이 증가 할수록 임계전류값이 저하되는 것을 실제 측정 함으로써 알수 있었으며, 6 Tesla에서 시편부의 온도가 12 K일 때 J_c는 326.45 A/mm² 이며 4.2 K일 때 J_c는 3591A/mm² 로써 약 16.5배의 차이가났다.

Hampshire 등에 의한 Nb₃Sn 선재의 임계전류밀도를 자장과 온도의 함수와 실제 측정된 결과를 근사화 시킴으로 낮은 자장중에서 측정된 데이터로 고자장영역의 특성을 예측할수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 류 경우, 류 강식, 오 봉환, 오 상수 "토카막 핵융합장치용 초전도 자석" Proceedings of KIEE. Vol. 45 No.7. Jul, 12, 1996
- [2] M.N. Wilson, Superconducting Magnet, Clarendon Press Oxford, pp 200-232, 1993
- [3] D.P.Hampshire, H.Jones, and E.W.J.Mitchell, "An indepth characterization of (NbTa)₃Sn filamentary superconductor," IEEE Trans. Mag., Vol. MAG-21,289, 1985
- [4] L.T.Summers, M.W.Guinan, J.R.Miller, and P.A.Hahn "A Model for the Prediction of Nb₃Sn ..." IEEE Trans. Mag., Vol. 27 No.2, 2041, 1991