

굽힘 반경에 따른 HTS tape 임계전류 측정

주진홍*, 김해준**, 김석환**, 송규정**, 홍정표*
 창원대학교 전기공학과*, 한국전기연구원**

The Critical Current Measurement of HTS tapes According to Bending Diameter

Jin-Hong Joo*, Hae Joon Kim**, Seog-Whan Kim**, Kyu Jeong Song**, Jung-Pyo Hong**
 Changwon National University*, Korea Electrotechnology Research Institute**

Abstract - High temperature superconductor (HTS) tapes are now commercially available for practical applications to apply various purposes. However HTS tapes show different electrical and mechanical characteristics, according to the manufacturers who are trying to apply various fabrication processes and treatments. From the viewpoint of an application, it is very important to investigate the properties of HTS tapes under mechanical stress, because the tapes will be wound with twisting and tension in applications such as magnets and cables. Thus, we studied characteristics of HTS tapes and measure critical current under bending, considering of a mechanical conditions. A description of some typical results will be presented with discussions.

2. 본 론

2.1 실험 대상 및 방법

본 논문에서 다루는 선재는 InnoST(社)(Innova Superconductor Technology)에서 2002년 중반에 생산되었으며 사양은 표 1과 같다.

굽힘 실험은 다음과 같이 8본의 sample을 대상으로 각각 굽힘 반경을 다르게 적용하였다. 최초, 선재의 초기 임계전류를 측정하고, 이후 굽힘 횟수를 1회씩 거듭하여 총 3회까지 측정하였다. 변화된 임계전류는 굽힘 횟수마다 3회씩 측정하여 평균값을 취하였다. 또한, 굽힘시에 발생할지도 모르는 다른 변인들을 줄일 수 있는 방법을 찾기 위해 예비실험을 선행하였다. 그림 1은 지름 $\phi 55, 65(\text{mm})$ 에서 굽힘을 7회까지 진행시켰을 때의 I_c 변화를 보여준다. 이를 바탕으로 적용될 굽힘반경과 굽힘실험전 선재의 임계전류값을 표 2에서 보여준다.

측정을 위한 sample은 그림 2-(a)와 같이 선재를 중심으로 양쪽으로 각각 2cm, 4cm가 이격된 지점에 두 개씩 전압탭을 설치했다. 이것은 굽힘에 의해서 야기될 선재의 I_c 변화를 선재의 중심을 기준으로 4cm, 8cm 부위의 전압탭에서 각각 측정하여, 굽힘에 따른 선재의 부위별 기계적인 파손을 고찰할 목적이다. 그림 2-(b)는 측정전의 sample이다.

1. 서 론

1986년 고온초전도체 발견이래, 최근 공학적 임계전류밀도가 $100(\text{A}/\text{mm}^2)$ 이상이며 우수한 특성을 가지는 Bi-2223선재가 장선화(長線化)된 형태로 생산되고 있다. 이는 고온초전도를 응용하는 전력기기의 상용화 연구 및 개발에 더욱 유리한 근간이 된다. 고온초전도 전력기들은 고온초전도 선재를 보빈이나 튜브형태의 former등의 지지물에 권선하여, 용도에 알맞은 형태로 제작된다. 이와 같은 고온초전도 전력기기가 실용화 과정을 거쳐 상용화되기 위한 요건으로, 높은 임계전류를 가지는 장선화된 선재의 경계성 및 효율을 무시할 수 없다. 또한, 응용물 제작중에 선재에 미치는 기계적인 영향과 전자기적인 영향에 의한 선재의 특성변화 또한 간과할 수 없을 것이다.

고온초전도 선재의 중요한 특성 중 공학적 임계전류가 있다. 이 공학적 임계전류는 선재에 미치는 기계적인 외력이나 전자기적인 영향에 의해 비선형적으로 떨어지는 특성을 가진다. 즉, 응용물을 설계하고 제작할 때, 외부 영향에 따른 선재의 임계전류 변화를 참고할 자료가 필요하다. 이는 응용의 목적이나 대상에 따라 다르게 적용되어야 하기 때문에 다양한 경우에 대한 자료가 필요하다.

본 논문에서는 선재의 임계전류 변화에 영향을 주는 기계적인 외력, 즉, 인장(tension), 꼬임(twisting), 굽힘(bending)중 굽힘에 대해 논의하고자 한다. 선재를 다양한 반경으로 굽힐 때, 동일한 회사에서 동일한 생산공정으로 같은 시기 생산되어 거의 유사한 특성을 가질 것으로 기대되는 선재를 대상으로 임계전류 변화에 대한 정량화된 특성에 대해 고찰하고자 한다. 또한, 실제 제작을 위한 권선을 고려할 때 굽힘에 대한 영향은 본 논문에서 다루고자 한다.

표 1. InnoST(社) 고온초전도 도체 사양

두께	0.32 [mm]
폭	4.1 [mm]
임계 전류 @77[K]	65 [A]

표 2. 실험전 Sample의 임계전류 및 적용 반경

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8
I_c [A]	66.5	66.76	66.47	67.04	65.48	64.44	64.36	66.93
반경 [mm]	20	22.5	25	27.5	30	32.5	35	37.5

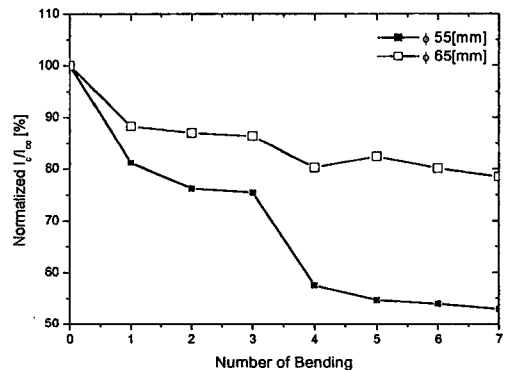
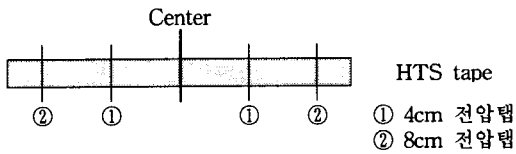
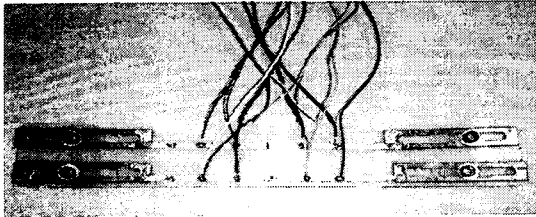


그림 1. 굽힘 직경 $\phi 55, 65(\text{mm})$ 에 대한 예비 실험 결과



(a) 측정을 위한 HTS tape에 전압탭 위치



(b) 측정전 Current 단자에 연결한 HTS tape
그림 2. 굽힘에 대한 Ic 변화 측정 sample

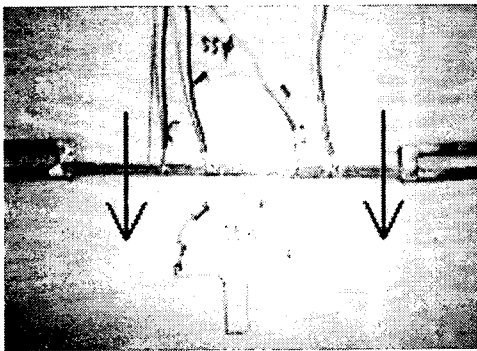


그림 3. sample 굽힘 과정

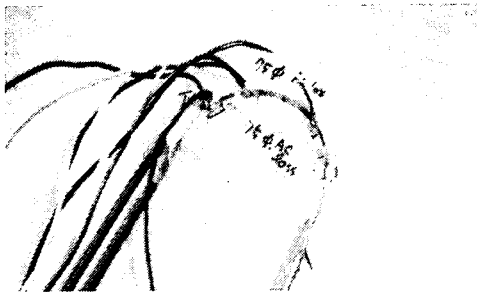


그림 4. sample 굽힘시 모습

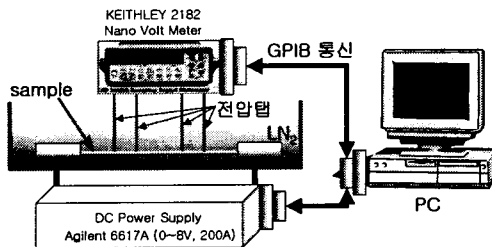


그림 5. sample 측정 장비 구성도

그림 3과 같이 초전도 선재로 가공한 sample을 굽히기 위해, 고안된 도구 사이에 두고, 선재의 넓은 면이 굽혀지도록 위 아래로 도구를 이동시켜 누른다. 그러면 일정한 곡률반경을 가지는 도구의 틀에 의해서 선재가 굽혀지게 된다. 그런데, 전압탭은 선재의 넓은 면 위에

남뎀으로 부착되어 있다. 이것으로 굽히는 동안 선재가 전압탭에 의해 손상받을 수 있어, 굽힘도구에서 sample의 전압탭과 맞닿는 부분에 약간의 홈을 만들었다. 그림 4는 sample을 굽힐 때 sample과 장치를 보여주고 있다. 그림 5에서는 sample을 액체질소 용기 속에 넣은 후 임계전류를 측정하는 장치 구성을 보여주며, 직류 전원을 공급하는 전원과 sample의 전압탭으로부터 전압신호를 측정하는 nano-Voltmeter같은 계측기가 있다. 여기서 컴퓨터는 LabVIEW라는 상용 프로그램 이용하여 GPIB통신을 통해 전원이 전류가 2(A/sec)로 증가되도록 제어를 하며, 전원과 nano-Voltmeter에서 동기적으로 측정되는 전압신호와 전류 데이터를 받는다.

2.2 실험 결과 및 분석

그림 7, 8은 InnoST 도체로 만들어진 8개 sample에 대해 지름이 40~75(mm)까지 각각 5(mm)씩 증가시켜 굽혔을 때 임계전류의 변동을 측정하여 normalized시킨 값을 보여 준다. 먼저 그림 7은 4(cm) 전압탭에서 측정된 값으로, 굽힘의 횟수가 1~3회까지의 값들을 이은 그래프이다. 그림 8의 경우 그림 7과 마찬가지로 8(cm) 전압탭에서 측정된 임계전류를 normalized시킨 값을 나타내는 그래프이다. 그래프를 보면, $\phi 60$ (mm)를 제외하고는 굽힘의 곡률반경이 작을수록 임계전류를 normalized한 값들이 작아지고, 굽힘의 곡률반경이 커질수록 임계전류를 normalized한 값들이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 많은 횟수는 아니지만, 3회를 굽히는 동안 첫 회에 임계전류의 normalized한 값이 크게 떨어졌다. 하지만, 이후의 굽힘에서는 임계전류의 감소율이 크지 않음을 확인할 수 있다. 즉, 임계전류가 한 번 감소한 후에는 몇 번의 굽힘이 주어져도 그 값이 어느 정도 유지되는 것이다.

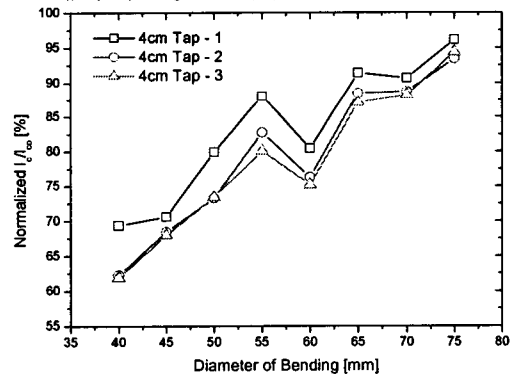


그림 6. 4cm 전압탭에서 곡률반경과 굽힘횟수에 따른 Ic의 normalized값 경향

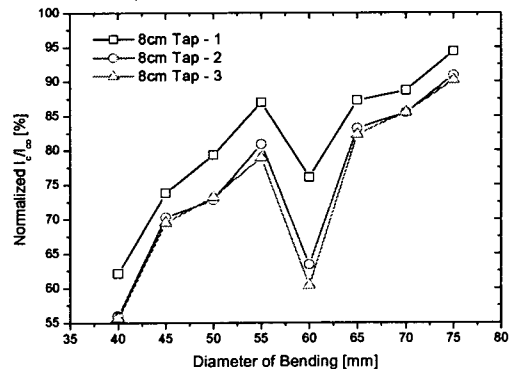


그림 7. 8cm 전압탭에서 곡률반경과 굽힘횟수에 따른 Ic의 normalized값 경향

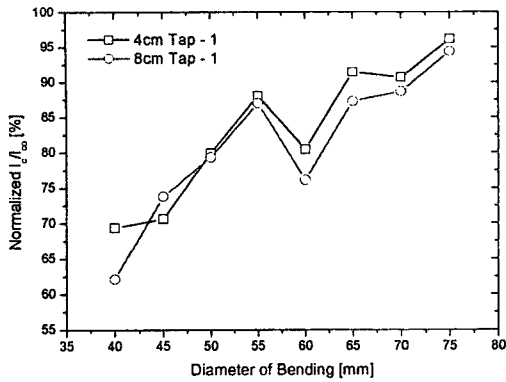


그림 8. 1회 굽힘시 두 전압탭에서 측정된 임계전류

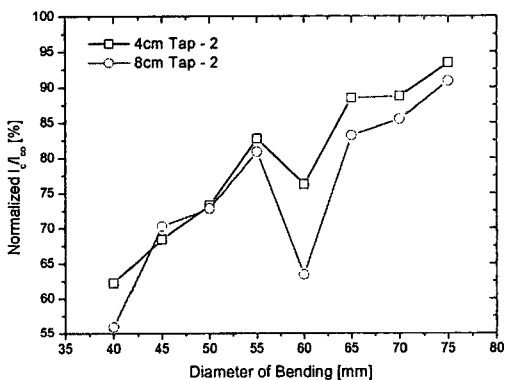


그림 9. 2회 굽힘시 두 전압탭에서 측정된 임계전류

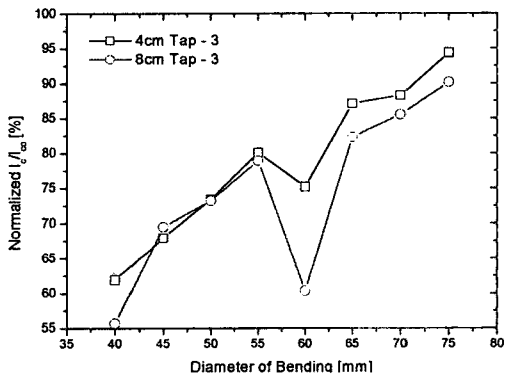


그림 10. 3회 굽힘시 두 전압탭에서 측정된 임계전류

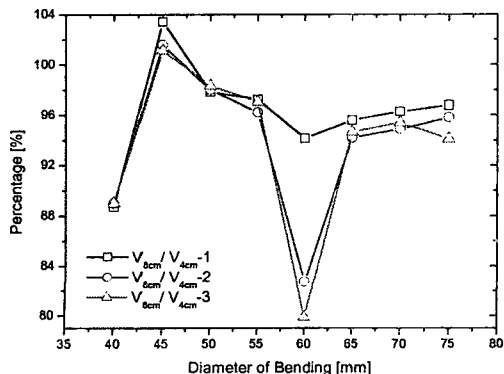


그림 11. 4cm 및 8cm 전압탭간 측정된 I_c 비율

그림 8~10은 굽히는 횟수에 따라 두 전압탭에서 측정된 임계전류를 normalized하여 보여주고 있다. 1회 굽혀질 때, 반경에 따라 다르지만, 곡률반경이 40[mm]에서는 임계전류가 30~40% 감소하고, 곡률반경이 75[mm]에서는 임계전류가 5%내외로 감소함을 보여준다. 횟수가 거듭되더라도, 곡률반경이 40[mm]에서는 1회 굽힘 때보다 임계전류가 5% 내외로 감소하고, 곡률반경이 75[mm]에서는 임계전류가 10%내외로 감소함을 보여준다. 즉, 굽힘횟수가 증가할 때, 곡률반경이 작은 곳의 임계전류 감소율은 미미하지만, 곡률반경이 다소 큰 곳에서는 굽힘횟수에 비례해서 임계전류의 감소가 진행되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

그림 11은 그림 8~10을 종합한 것이며, 두 전압탭에서 측정된 임계전류를 normalized시킨 값의 비를 보여주고 있다. 이 그림은 전체적으로 볼 때, 4cm 전압탭보다 8cm 전압탭에서 측정된 임계전류가 낮다는 것을 알 수 있다. 4cm 전압탭에서의 임계전류 감소율에 비해 8cm 전압탭에서의 임계전류 감소율이 작게는 2%내외에서 크게는 20%에까지 이른다. 즉, 선재가 굽혀질 때, 굽혀지는 중심뿐만 아니라 중심에서 이격된 곳에서도 선재가 손상되어 임계전류가 낮아진다. 횟수를 거듭해 본다면 좀더 좋은 결과를 얻을 것으로 예상되며, 굽히는 방향을 달리 했을 때 전압탭의 위치에 따라 측정된 값이 다를 것이라는 예상도 가능케 하는 결과이다.

3. 결 론

본 논문은 선재의 임계전류 변화에 대해 영향을 미치는 기계적인 외력중 굽힘(bending) 반경에 따라 발생하는 임계전류 변화를 측정하기 위해 측정방법과 측정도구를 고안하여 그 상관관계를 따져보았다. 굽힘의 곡률반경이 작을수록 임계전류의 감소는 심각하게 나타났다. 또한, 1회 굽힘 후에는 임계전류가 감소되는 비율이 적지만, 곡률반경이 클 경우 굽힘횟수에 따라 임계전류의 감소가 일정한 비율로 진행됨을 확인할 수 있었다. 그리고 전압탭의 위치를 달리했을 때, 굽힘의 중심처럼 국소적인 부분만이 아니라 이격된 거리에서도 임계전류를 감소시키는 기계적인 외력이 작용함을 알 수 있었다. 이러한 연구는 향후 중 초전도 선재를 이용한 다양한 전력기들을 설계 혹은 제작시 좋은 참고자료가 될 것이라 생각한다. 거듭된 실험중에 착안된 아이디어들을 취합하여, 실제 응용물을 제작할 때 선재에 인가될 기계적인 외력이나 전자기적인 영향을 고려한 선재의 특성변화에 대해 계속 연구할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 신형섭 외 5명, "Hard bending시 Bi-2223/Ag 초전도 테이프의 임계전류 열화 거동", 한국초전도·저온공학회 논문지, 4권 1호, pp.40~44, 2002
- [2] P.Skov-Hansen et al, "Stress and Strain in Multi-Filament HTS Tapes", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.2617~2620, 1999
- [3] I.I.Akimov, et al "The Effect of Bending Radius on V-I Characteristics of Mono- and Multicored BiPb-2223 Tapes with and without Ag Addition", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol 7, No2, pp.1323~1326, 1997
- [4] Takanobu Kiss et al, "Transport Properties of Multifilamentary Ag-Sheathed Bi-2223 Tapes under the Influence of Strain", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol 11, No 1, pp.3888~3891, 2001