

고온 초전도 선재의 굽힘횟수와 온도차에 의한 임계전류저하특성

김해준, 김석환, 송규정, 김해종, 배준한, 조전욱, 성기철
한국전기연구원

Critical Current Degradation Characteristics by Temperature Difference of LN₂-Normal in Repetitive Bending Strain of High Temperature Superconducting Tape

Hae Joon Kim, S.W. Kim, K.J. Song, H.J. Kim, J.H. Bae, J.W. Cho, K.C. Seong
Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)

hibaree@hanmail.net

Abstract - Critical current(I_c) degradation of HTS tapes after bending is one of the hottest issues in HTS development and application studies. Many people are measuring I_c degradations for effect of bending radius. However even if the bending radius is larger than the breaking radius a HTS tapes can be damaged by repetitive bending, which is unavoidable in the winding processes. Therefore, We studied the I_c degradation after repetitive bending, at 77K with self-field, of Bi-2223 tapes processed by "Powder-in-Tube" technique, which was made by America Superconductor Corporation(AMSC) and superconducting tapes that strain is imposed measured critical current by temperature difference of LN₂ and normal temperature. Like this, critical current could measure that degradation about 1 ~ 3% by temperature difference. These results will amount the most important basis data in power electric machine of superconductivity cable, magnet, etc that winding work is require.

1. 서 론

고온 초전도 선재에서 장력이나 굽힘 변형과 같이 임계전류의 저하를 일으키는 메커니즘을 분석하는 것은 오랫동안 issue가 되어왔다. 그 이유는 고온 초전도체 특유의 취약함으로 인해 취급에 많은 어려움이 있기 때문이다. 고온 초전도 선재는 Tape 형태로 되어 있기 때문에 이것을 이용하는 전력기기 제작시에는 반드시 권선작업이 요구되고, 권선작업을 하기 위해 초전도 선재에 장력과 함께 굽힘 변형이 가해지는데 이때의 초전도 선재의 multi-filament 결합이 어긋나면

서 임계전류가 저하는 특성이 나타난다.

실제의 권선 작업 시에는 많은 수의 롤러를 통해 장력이 설정되므로 굽힘 변형 횟수에 따른 임계전류의 저하특성 연구가 더욱 중요하게 요구되고 있다. 또한 각 선재에 Bending이나 Tension과 같은 stress가 동반되어 임계전류의 저하를 초래함과 동시에 반복적인 냉각에 의해 임계전류가 저하하는 특성을 가진다. 이러한 특성은 초전도 선재를 다루는 사람이라면 누구나 예상할 수 있는 문제점이지만, 또한 쉽게 간과할 수 있는 점이다.

따라서 본 논문에서는 이러한 초전도 응용 전력기기의 제작 시 기본적인 데이터로 사용될 수 있는 임계전류의 특성을 살펴보기 위해 현재 판매되고 실제 사용되고 있는 AMSC(America Superconductor Corporation)사의 고온초전도 선재의 각 굽힘 반경에 따라 굽힘 횟수가 변할 때 임계전류의 감소 특성에 대하여 측정, 분석하였다. 그리고 이러한 각각에 경우에 대해 액체질소와 상온을 오고가며 발생하는 온도차에 의한 임계전류의 저하특성을 측정하였다.

이러한 데이터는 향후 고온 초전도 선재를 이용한 초전도 케이블, 초전도 마그네트와 초전도 에너지 저장장치와 같은 전력기기 제작 시 중요한 기초데이터가 될 것으로 사료된다.

2. 본 론

2.1 실험방법

Fig.1과 같이 HTS tape을 current 단자에 붙이고, 임계전류를 측정하기위해 중심으로부터 각각 4cm 와 8cm 간격으로 전압탭을 내었다. 전압탭은 아래 그림에서와 같이 납땜에 의해 선재에 신호선을 직접 붙였다. Fig.3에서와 같이 bending 된 상태로 임계전류를 측정하는 것이 아니고 Fig.1에서와 같이 다시 직성상태로 한 후 임계전류를 측정하였다.

Fig.2와 같이 초전도 tape을 bending 도구

사이에 놓고, 일정한 곡률 반경에 따라 tape을 반복적으로 bending 시켰다. 전압탭을 내기위해 사용된 신호선과 초전도 tape과는 납땜에 의해 붙여놓았기 때문에 bending 시 tape에 damage를 주지 않기 위해서 아래 그림과 같이 bending 도구에 약간의 홈을 내었다. Fig.2와 Fig.3은 HTS Tape을 Bending 하는 과정과 장치 및 bending시의 사진이다.

본 연구에서는 현재 HTS 선재로 사용되고 있는 PIT(Powder in Tube) 기술로 만들어진 AMSC 선재를 사용하여 bending 실험을 하였다. AMSC 선재는 Bi-2223 High Strength Reinforced Wire로 두께 $0.3(\pm 0.02)\text{mm}$, 폭 $4.1(\pm 0.2)\text{mm}$, 그리고 I_c 는 $115[\text{A}]$ 이며, 75ϕ 의 보빈에 감겨있다. 따라서 75ϕ 보다 작은 직경의 55ϕ 의 bending 직경으로 임계전류의 저하를 측정하였다.

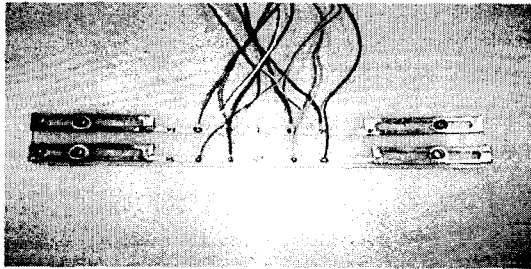


Fig.1. Bending 후 current 단자에 연결된 sample

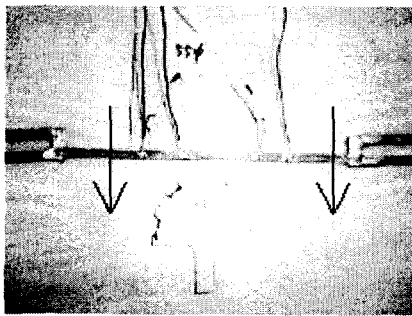


Fig.2. Bending하는 과정



Fig.3. Bending시 사진

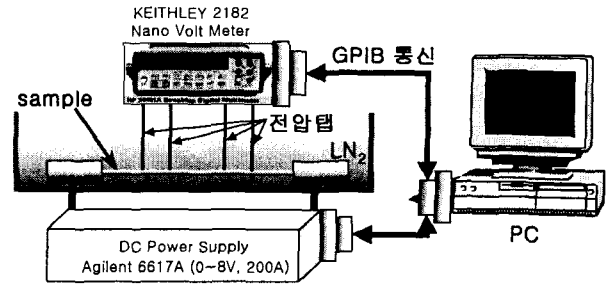


Fig.4. 실험장치 및 실험회로

또한 이것의 바깥쪽에 있는 sus tape으로 인해 강도가 아주 우수한 선재이고, 여러 예비실험단계를 거쳐서 2가지 sample에 각각 그 굽힘 횟수를 반복적으로 9회씩과 18회씩으로 단방향으로 굽혀서 측정하였다. 한번에 9회씩과 18회씩 굽히고 난 후 액체질소에서 측정하고 상온에서 건조시킨 후 약 하루가 지난 후 굽힘없이 다시 임계전류를 측정하였다.

Fig.4와 같이 임계전류 측정 시 전원장치는 Agilent6617A(0~8V, 200A)인 DC power-supply를 사용하였고, 전압신호를 측정하기 위해 KEITHLEY의 nano-Voltmeter를 사용하였고, 이러한 신호를 Labview를 이용하여 GPIB통신으로 그대로 PC에서 측정하였다.

2.2 실험결과

Fig.5는 Bending 반경을 55ϕ 로 하여 Bending 횟수를 각각 9회씩(9N)으로 하여 측정한 normalized $\{(I_c / I_{c0}) \times 100\}[\%]$ 값으로 Bending 횟수가 많아질수록 임계전류가 저하되고 있다는 것을 알 수 있다. 굽힘 변형 횟수가 많아질수록 초전도체의 multi-filament 결합에 손상을 주어 결합이 깨어지면서 점점 초전도의 성질을 잃어버리게 된다. 특히 normal상태에서의 임계전류의 측정 곡선에 비해 굽힘 변형 횟수가 높아질수록 점점 저항 성분이 나타나는 곡선의 형태로 변화되었다. 9회씩 총 4회 즉 total 36회 ($9 \times 4 = 36$) bending 시에 normal상태와 비교하여 약 90% 정도로 감소되었다.

또한 본 실험에서는 9회씩 bending 후 상온에서 하루에서 사흘정도 건조시킨 후 다시 bending 시키지 않고 그대로 다시 LN₂에 넣고 임계전류도 측정을 하였다. Fig.6과 7에서는 bending에 의해 초전도 선재가 어느 정도 damage를 받은 상태에서 상온과 LN₂의 온도차에 의해 multi-filament가 수축과 팽창을 반복하면서 damage가 발생할 수도 있다는 가정에 이와 같은 것을 고려하며 실험하였다. 그 결과 9회씩 bending 후 상온과 LN₂의 온도차에 의해서도 임계전류는 아주 미세하지만 조금씩은 감소가 되었고, 특히 damage를 많이 받은 sample일수록 이러한 현상이 더욱더 두드러지게 나타났다. 이러한 온도차에 의한 임계전류의 감소현상 포화되는 시점까지 측정을 계속한 후 다시 9회씩 반복 bending하였다.

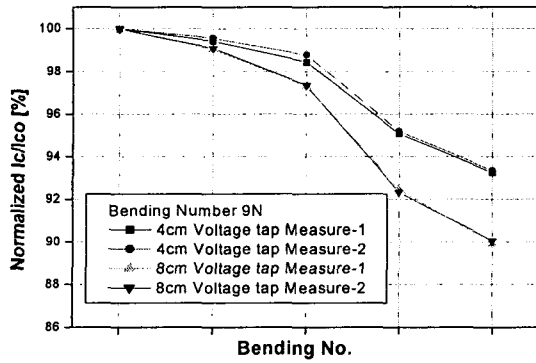


Fig. 5. 9회씩 반복 bending한 경우의 임계전류의 감소율

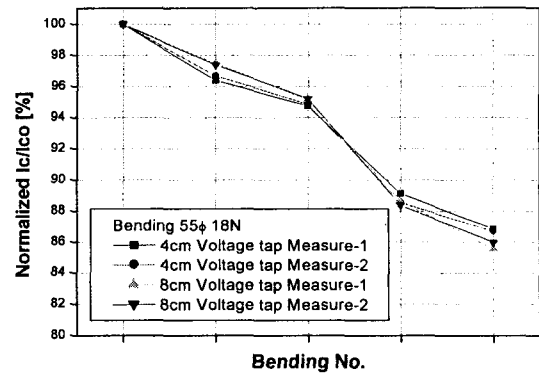


Fig. 8. 18회씩 반복 bending한 경우의 임계전류의 감소율

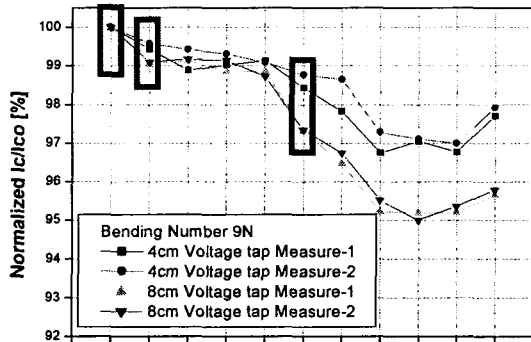


Fig. 6. 9회씩 반복 Bending시 온도차를 고려한 경우 임계전류의 감소율(N=1~2사이)

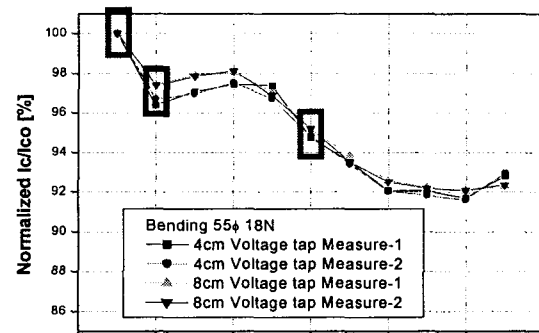


Fig. 9. 18회씩 반복 Bending시 온도차를 고려한 경우 임계전류의 감소율(N=1~2사이)

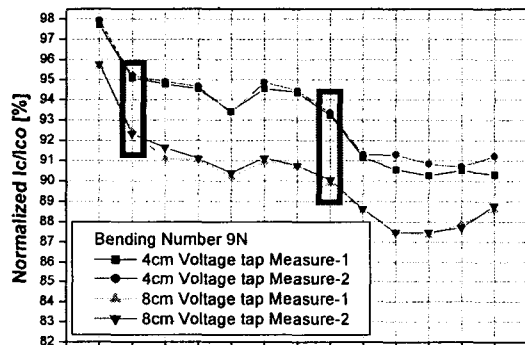


Fig. 7. 9회씩 반복 Bending시 온도차를 고려한 경우 임계전류의 감소율(N=3~4사이)

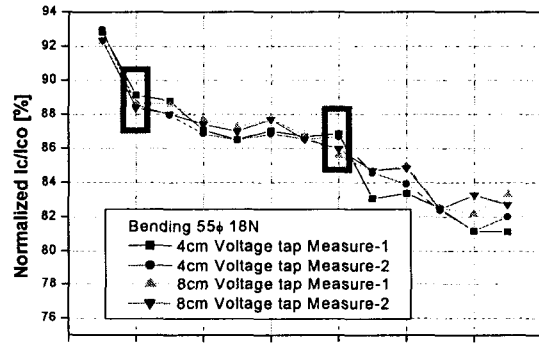


Fig. 10. 18회씩 반복 Bending시 온도차를 고려한 경우 임계전류의 감소율(N=3~4사이)

Fig. 8에서는 18회씩 반복 bending한 경우의 임계전류 감소율을 나타낸 것이다. 우선 Fig. 8의 1번째 점과 2번째 점은 total bending 횟수가 각각 18회, 36회이며 이것은 Fig. 5의 2번째 지점과 4번째 지점과 total bending 횟수와 같으며, 서로 비교를 해보면 한번에 18번 bending한 것은 4cm 전압탭에서 약 96.38%정도이며 2번씩 나누어 9회씩 bending한 sample의 임계전류 감소율은 약 98.43%정도이다. 처음 18회 bending한 지점에서는 한번에 18회씩 bending한 것이 감소율이 크지만 36번씩 bending한 지점에서는 4회씩 나누어서 bending한 경우의 것이 감소율이 크다. 이러한 점으로 미루어 볼 때 total bending 횟수보다는 임계전류가 급격히 감소하는 임계bending 횟수가 존재하며, 그 이상에서는 급격한 감소를 나타낸다.

Fig. 9와 10은 Fig. 6과 7에서처럼 Fig. 8에서의 실험 사이사이에 액체질소와 상온사이의 온도차에 의해 임계전류의 감소율을 나타낸 것이다. 최초 N=0, 즉 전혀 bending값이 없는 지점에서는 온도차에 의한 임계전류가 감소되지는 않았다. 하지만 본 실험에서와 같이 반복적인 bending과 같은 초전도 선재에 damage가 가해진다면 액체질소와 상온의 온도차에 의해서 임계전류가 감소한다. 그 감소율은 앞의 9회씩 반복 bending의 경우보다 크게 측정이 되었으며, 이것으로부터 초전도선재에 가해지는 damage가 클수록 이러한 온도차에 의한 임계전류의 감소율도 커지게 된다.

초전도 선재내의 multi-filament결합이 먼저 반복적인 bending에 의해 깨어지면서 임계전류가 감소하게 되고 또다시 상온과 액체질소 사이

를 오고 가면서 발생하는 온도차에 의해 수축과 팽창을 하면서 다른쪽의 Filament에도 damage를 가하게 되어 임계전류가 감소되었다고 사료된다.

그리고 상온에서 dry시에 반복적인 bending에 의해 초전도 선재의 미세한 틈으로 수분이 침투한다거나 질소의 팽창 등 기타 다른 요인에 의해서도 임계전류가 감소된다고 사료된다.

3. 결 론

본연구에서는 초전도 선재의 반복적인 bending으로 그때의 임계전류의 감소율을 측정하였고, 또한 액체질소와 상온의 온도차에 의한 임계전류의 감소율도 동시에 측정하였다. 일반적으로 초전도 전력기기 제작 시 혹은 초전도 선재를 취급시에 여러번의 굽힘변형이 반복될 수 있는 곳에 몇 회 이상 bending시 임계전류가 감소된다는 기본 데이터를 제시하였다.

bending이나 tension과 같은 초전도 선재에 damage가 가해졌다면 액체질소와 상온에 의한 온도차에 의해서도 임계전류가 감소할 수 있다는 것을 확인하였다. 이러한 원인으로는 multi-filament 결합이 온도차에 의해 수축과 팽창을 반복하면서 조금씩 변형되어 다른쪽 filament에도 그 damage를 전파되어 임계전류가 감소될 수 있다고 사료된다. 또한 상온에서 건조시에 혹은 액체질소 속에서 물이나 질소가 미세한 틈 속으로 침투가 될 수 있으며 이러한 것이 수축과 팽창을 반복하여 filament에 damage를 주게 되어 임계전류가 감소할 수 있다. 그러한 damage가 커지면 커질수록 온도차에 의한 임계전류의 감소율은 더욱 더 커지게 되므로 본 연구는 초전도를 이용한 전력기기나 초전도 선재 취급시에 우선적으로 선행되어야 할 데이터가 될 것이라 사료된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 하홍수 외 7명, "Bi-2223/Ag 고온 초전도 선재의 기계적 특성 평가", 한국 초전도 저온 공학회 논문지, 4권 1호, pp40~44, 2002
- [2] P.Skov-Hansen et al, "Stress and Strain in multi-filament HTS Tapes", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp2617~2620, 1999
- [3] T.Kiss et al, "Transport E-J Characteristics in Bi-2223 tape under the Influence of Bending strain analysis by use of the percolation model" Physica C 357-360, pp1123~1127, 2001