

고온초전도 선재의 Bending횟수에 따른 임계전류의 특성

김해준*, 주진홍*, 김석환*, 김해종*, 배준한*, 조전욱*, 성기철*

* : 한국전기연구원

Characteristic of Critical Current after Repetitive Bending for High Superconducting Tapes

Hae.Joon. Kim*, J.H. Joo*, S.W. Kim*, H.J. Kim*, J.H. Bae*,J.W. Cho*, K.C. Seong*

* : Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)

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), Innova Superconductor Technology(InnoST) and Korea Electro-technology Research Institute(KERI). For each specimen I_c degradation was measured various bending radius as function of repetitive bending number.

1. 서 론

고온 초전도 선재에서 장력이나 굽힘 변형과 같이 임계전류의 저하를 일으키는 메커니즘을 분석하는 것이 오랫동안 issue가 되어왔다. 고온 초전도체는 특유의 취약함으로 변형이나 취급에 많은 어려움이 있으며, 고온 초전도 선재는 Tape 형태로 되어 있기 때문에 이것을 이용하는 전력기기 제작시에는 반드시 권선작업이 요구되고, 권선작업을 하기 위해 초전도 선재에 장력과 함께 굽힘 변형이 가해지므로 이때의 초전도 선재의 Multi-Filament 결합이 어긋나면서 임계전류가 저하는 특성이 나타난다.

그러므로 장력과 굽힘 변형에 따른 임계전류의 저하특성을 많이 연구 중이며, 특히 굽힘 변형에 따른 것으로 권선 작업 시 장력을 설정하는 물리의 환경에 따라서의 굽힘 변형에 따른 임계전류의 변화를 측정하는 연구가 많이 진행중이다. 실제의 권선 작업 시에는 많은 수의 롤러를 통해 장력이 설정되는 구조이므로 굽힘 변형 횟수에 따라 임계전류의 저하특성 연구가 더욱 중요하게 요구되고 있다.

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)사 및 InnoST(Innova Superconductor Technology)사의 고온초전도 선재의 각 굽힘 환경에 따라 굽힘 횟수가 변할 때 임계전류의 감소 특성에 대하여 측정, 분석하였다.

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

2. 실험 방법

2.1 실험 방법

그림 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. 그림 3에서와 같이 bending 된 상태로 임계전류를 측정하는 것이 아니고 그림 1에서와 같이 굽힘 이후에 I_c 값을 측정하였다.

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

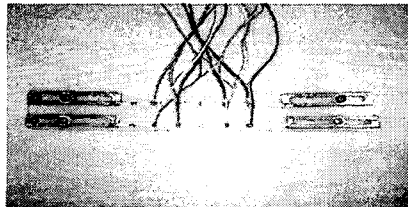


그림1. Bending 후 current 단자에 연결된 sample

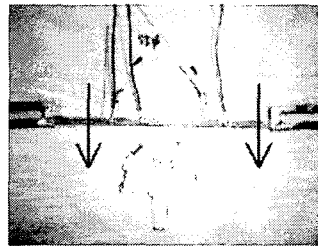


그림 2. Bending하는 과정



그림 3. Bending시 사진

본 연구에서는 현재 HTS 선재로 사용되고 있는 PIT(Powder in Tube) 기술로 만들어진 AMSC와 InnoST 선재를 사용하여 bending 실험을 하였다. 먼저 AMSC 선재는 Bi-2223 High Strength Reinforced Wire로 두께 $0.3(\pm 0.02)$ mm, 폭 $4.1(\pm 0.2)$ mm, 그리고 I_c 는 $115[A]$ 이며, 75ϕ 의 보빈에 감겨있다. 따라서 75ϕ 보다 작은 직경의 55ϕ 의 bending 직경으로 임계전류의 저하를 측정하였다. 또한 이것의 바깥쪽에 있는 sus tape으로 인해 강도가 아주 우수한 선재이고, 여러 예비실험단계를 거쳐서 3가지 Sample에 각각 그 굽힘 횟수를 반복적으로 3회씩과 9회씩으로 단방향으로 굽혀서 측정하였다.

그리고 InnoST 선재는 두께 $0.32(\pm 0.01)$ mm, 폭 $4.2(\pm 0.1)$ mm, 그리고 I_c 는 $65[A]$ 이다. AMSC선재의 Bending 실험과 비교하기 위해 같은 직경으로 Bending을 하였지만 그 굽힘 횟수는 각각 1회씩과 2회씩으로 하여 임계전류의 저하를 측정하였다.

그림 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.

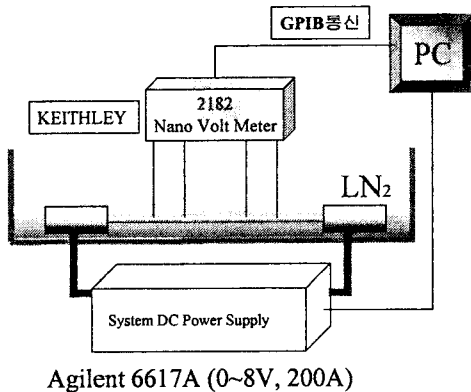


그림 4. 실험장치 및 실험회로

3. 실험 결과

3.1 AMSC社의 HTS Tapes의 I_c Degradation

AMSC社의 Superconducting tapes은 sus tape이 초전도체의 강도 향상을 목적으로 초전도체 위에 붙여져 있다. 따라서 이 도체는 강도면에서는 아주 뛰어나며 실제 강도를 측정하였을때, 50kg의 무게로 tension을 걸었을때 파단이 일어났다. 따라서 이 도체는 Bending 횟수를 한번에 3회씩(3N), 또 다른 sample로는 9회씩(9N)으로 굽혀서 각각의 임계전류를 측정하였다.

그림 5는 Bending 반경을 55ϕ 로 하여 Bending 횟수를 각각 3회씩(3N)으로 하여 측정된 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 깨지면서 점점 초전도의 성질을 잃어버리게 된다. 특히 normal상태에서의 임계전류의 측정 곡선에 비해 굽힘 변형 횟수가 높아질수록 점점 저항 성분이 나타나는 곡선의 형태로 변화되었다. 3회씩 총 4회 즉 total 12회($3 \times 4 = 12$) Bending 시에 normal상태와 비교하여 약 80% 정도가 감소되었다.

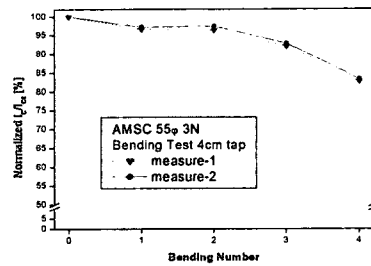


그림. 5 AMSC 도체의 55ϕ 3회씩 Bending에서의 I_c Degradation

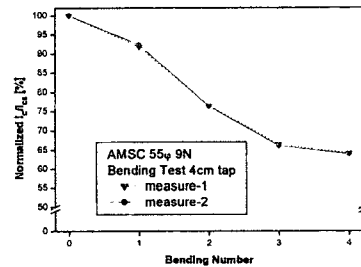


그림. 6 AMSC 도체의 55ϕ 9회씩 Bending에서의 I_c Degradation

그림 6은 그림 5에서와 같이 Bending 반경은 55ϕ 이지만 횟수를 9회씩(9N)하여 측정한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 앞의 그림 5에 비해서 굽힘 변형 횟수가 많아졌으므로 그에 따라 임계전류의 값도 많이 떨어지게 되었고 감소를 또한 거의 선형적으로 감소하다가 어느 한계에선 약간 포화되는 경향이 있었다. 총 4회 즉 $9 \times 4 = 36$ 회 bending 시에 처음과 비교해 약 60% 정도가 떨어졌다.

3.2 InnoST社의 HTS Tapes의 I_c Degradation

InnoST社의 초전도 도체는 AMSC社처럼 도체 위에 sus tape이 없다. 따라서 강도에서는 AMSC 도체에 떨어지지만 굽힘변형시 쉽게 파단이 생기지 않는다. 특히 AMSC 도체가 sus-tape의 영향으로 여러번의 굽힘 변형시에는 sus-tape이 휘러지기가 쉽다.

그림 7은 InnoST 도체를 직경 55ϕ 로 한번에 1회씩만 굽혀서 임계전류를 측정하여 normalized화 시켜놓은 것이다. 역시 굽힘 변형 횟수가 늘어날수록 임계전류의 값이 감소한다는 것을 알 수 있다. 특이한 것은 예비실험에도 같은 현상이었지만 임계전류값이 한번 감소 후 어느 정도의 굽힘 변형이 가하여지더라도 감소율이 적으며 또 한번의 큰 감소 후 어느 정도 값이 유지가 되었다는 것이다. 이러한 현상은 밀의 2회씩 Bending에서도 약간은 비슷하게 측정되었다. 그리고 역시 굽힘 변형 횟수가 증가할수록 Multi-Filament 결합이 깨지므로 임계전류의 값이 감소하는 것이다.

그림 8은 그림 7의 그래프처럼 InnoST 도체를 직경 55ϕ 로 한번에 2회씩 굽혀서 임계전류의 감소율을 측정 한 것이다. 2회씩 Bending한 sample의 임계전류의 값도 1회씩 한 것에 비해서는 떨어졌으나 떨어지는 폭이 그다지 크진 않았다. 굽힘 횟수가 많아질수록 임계전류

- Acknowledgment -

"본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 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] 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, pp1323~1326, 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, pp3888~3891, 2001

는 많이 감소되지만 4회째(2×4=8회)에서부터는 임계전류가 27[A]에서 6회째(2×6=12회)에는 24로 감소율이 거의 적었다. 이것과 기존의 예비실험에서 55 μ 로 2회씩 굽힘 변형시 도체가 완전 꺾여지지 않는다면 거의 22~24[A]로 임계전류가 포화될 것으로 예상되었다.

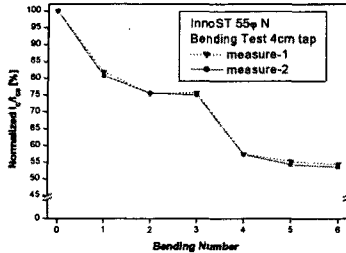


그림. 7 InnoST 도체의 55 μ 1회씩 Bending에서의 I_c Degradation

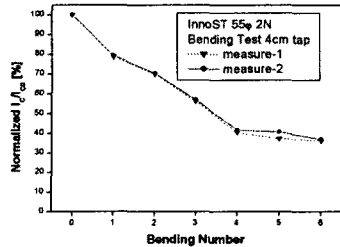


그림. 8 InnoST 도체의 55 μ 2회씩 Bending에서의 I_c Degradation

4. 결 론

본 논문에서는 일정한 Bending 반경(55 μ)에서의 AMSC 도체와 InnoST 도체의 굽힘 횟수를 변화시키면서 그때의 I_c Degradation을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

AMSC 도체로 직경 55 μ 로 굽힘 변형 횟수를 서로 다르게 하였을 때 임계전류는 횟수가 많은 것에서 감소율이 크게 나타났다. 3회씩 굽힘 변형을 준 HTS Tapes에서는 약 80% 정도까지 감소되었으며, 9회씩 굽힘 변형을 한 것에는 약 60% 정도까지 감소되었다. sus tape이 붙여져 있는 AMSC도체가 강도면에서는 우수하지만 쉽게 파단이 날 우려가 있기 때문에 굽힘 변형시에도 상당한 주의가 필요했다.

InnoST 도체의 경우에는 AMSC도체에 비해 강도가 떨어지지만 쉽게 꺾이지는 않았다. InnoST 도체로 직경 55 μ 로 굽힘 변형 횟수를 서로 다르게 하였을 때 임계전류는 횟수가 많은 것에서 역시 감소율이 크게 나타났다. 하지만 InnoST의 경우 감소율 그래프에서 보면 첫 번째의 굽힘 변형시의 감소율이 가장 크게 나타났다. 1회씩 굽힘 변형을 준 것에는 약 50%정도, 2회씩 변형을 준 것에는 약 30% 정도로 감소되었다.

이렇게 굽힘 변형의 횟수가 증가할수록 초전도체의 Multi-Filament결합에 손상을 주게 됨으로서 임계전류의 값은 계속 감소하는 것이다.