

고온초전도 선재의 과전류 통전 특성

임성우, 황시돌, 최용선, 최효상, 현옥배, 유재무*
한전 전력 연구원, 한국 기계 연구원*

Over critical current characteristics of HTS tapes

Seong Woo Yim, Si Dole Hwang, Yong Sun Choi, Hyo Sang Choi, Ok Bae Hyun, Jae Moo Yoo*
Korea Electric Power Research Institute, Korea Institute of Machinery & Materials*

yimsw@hanmail.net

Abstract - We investigated over critical current characteristics of HTS tapes fabricated by KIMM. The critical current (I_c) of the HTS tapes was 68A/cm. In order to acquire over current I-V characteristics of HTS tapes, we applied AC that is 2-7 times of I_c to these tapes. When applied AC whose peak value is twice of I_c , we found out that total resistance of HTS tapes did not change. In case of 3 times of I_c , resistances of HTS tapes began to increase slowly. However, superconducting regions of them were maintained stably in this condition. In addition, 280 A_{peak} was applied, superconducting regions began to be decreased gradually. Finally, 0.62m Ω of resistance was measured in HTS tapes which was applied AC correspond to 7 times of I_c at first cycle.

1. 서 론

세라믹 산화물인 고온초전도체의 고유 특성으로 인하여 이를 이용한 선재의 개발에는 임계특성 및 기계적 강도의 향상 그리고 선재 장선화 등에 있어 어려움이 존재해왔다. 그러나 지속적인 연구 및 개발에 힘입어 최근 고온초전도 선재는 실 기기에 적용 가능할 정도의 우수한 특성을 보이고 있다.

한편, 일반적으로 초전도체는 직류 통전 시 손실이 존재하지 않는 장점을 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 교류를 통전할 경우, 교번자계에 의한 손실이 필연적으로 존재하게 된다. 따라서 고온초전도 선재를 교류기에 적용하기 위해서는 선재의 교류 손실을 측정하고 예측하여 최소화할 필요가 있으며 이에 대한 연구는 수년 동안 선재 연구의 중요한 부분을 차지하고 있다.(1,2)

아울러 케이블이나 변압기와 같은 대전력 기기는 과부하 또는 단락 사고 등의 원인에 의해

과전류를 통전해야 할 상황이 발생될 수 있다. 따라서 이러한 과전류 통전 시 문제점들에 대처하기 위해서는 초전도 선재의 임계전류를 초과하는 과전류를 통전하였을 때 선재에 발생하는 현상을 명확히 규명할 필요가 있다.(3,4)

본 연구에서는 고온초전도 선재의 임계전류의 수 배에 해당하는 교류를 통전하여 그 특성을 조사하였다. 이를 위해 우선 직류 통전 시 임계전류 및 과전류 특성을 조사한 후, 수 배의 교류를 단계적으로 통전시키며 선재에 나타나는 전류 전압 특성을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

본 연구에 사용된 고온초전도 선재는 기계연구원에서 제작하였으며 선재는 피복재 위에 절연층이 입혀져 있는 형태이다. 선재의 특성 평가를 위해 임계전류를 측정 후 과전류를 인가하여 특성 평가를 행하여 이들 데이터를 서로 비교하였다.

2.1.1 임계 전류 측정

선재의 임계전류는 4단자법을 이용하여 측정되었다. 시편을 13cm로 준비하여 전류 및 전압 단자를 연결하기 위해 사포와 아세톤을 사용하여 피복 위의 절연층을 제거하였다. 전류 단자는 시편 양단에 납으로 연결되었으며 외부로부터의 열 전달이 없도록 충분히 냉각하였다. 전압 단자는 선재 중앙을 기준으로 10cm 간격을 두고 부착되었으며 직류전원을 사용하여 1A 간격으로 100A 까지 전류를 증가시키며 프리앰프가 장착된 멀티미터(Keithley 2001)를 사용하여 전압 단자에 검출되는 전압을 계측하였다.

2.1.1 과전류 통전 시험

정확한 데이터 비교를 위하여 임계전류 측정에 사용된 동일한 시편을 사용하여 과전류를 통전하여 그 특성을 조사하였다. 시편이 위치하고 있는 샘플 홀더를 액체 질소 저온조에 담아 액체 질소의 유동과 외부로부터의 불필요한 잡음을 최대한 줄이고자 하였다. 교류 전류 공급을 위해

440V까지 공급할 수 있는 전압원과 1Ω의 저항을 사용하여 전류의 양을 가변하였으며 위상제어기를 이용해 교류의 파형과 주기를 조절해가며 전압 전류 특성을 조사하였다. 정확한 계측을 위하여 100MHz급의 전압 프로브(Tektronix P5205)와 전류 프로브(Tektronix A622)로부터 신호를 검출하여 모니터링 시스템(VXI CT-400 series)을 통하여 데이터를 분석하였다.

2.2 실험 결과

2.2.1 임계 전류

길이 10cm 시편에 직류를 통전시켜 임계전류를 측정된 결과, 59A에서 0.1μV/cm 그리고 68A에서 1μV/cm가 측정되었다. 또한 78A를 통전한 경우, 1mV의 전압이 발생하였다. (그림 1,2)

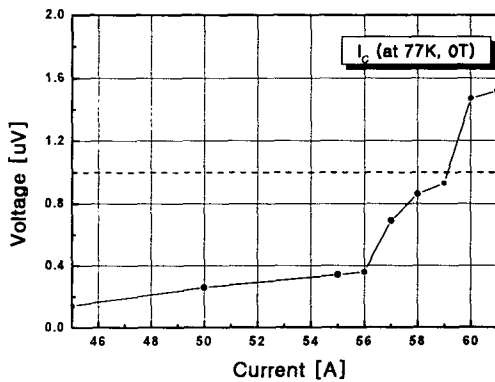


Fig. 1. Critical current of HTS tape (0.1μV/cm)

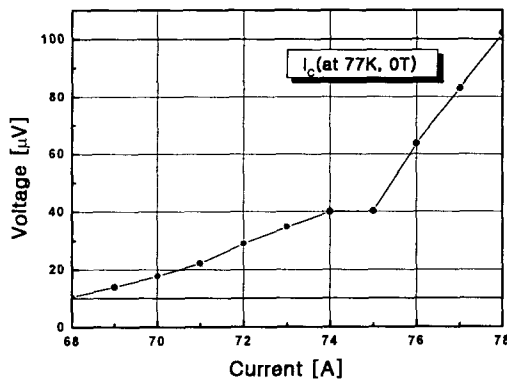


Fig. 2. Critical current of HTS tape (1μV/cm)

2.2.2 과전류 통전 특성

그림 3은 최고치가 임계전류의 약 2배인 교류전류(100 A_{rms}, 60Hz)를 6주기동안 통전하여 측정된 결과이며 실선은 전압, 점선은 전류에 대한 곡선이다. 직류 통전 시험에서 얻어진 임계전류와 비교하여 거의 동일한 범위의 초전도 영역을 보이며 특히 초전도 영역에 있어 기록이 심한 것은 전류가 0인 지점을 지나는 동안 나타나는 초전도 영역과 상전도 영역간의 급격한 변화에 의한 것이라 사료된다.

최고치가 임계전류의 3배에 해당하는 교류를 통전한 경우의 전류 전압 특성이 그림 4에 나타

나 있다. 그림 3에서와 마찬가지로 각 주기에

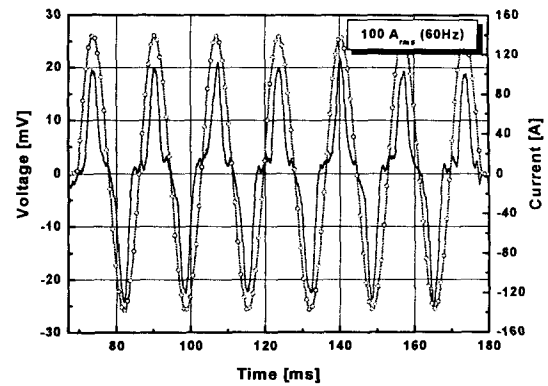


Fig. 3. Over critical current characteristic of HTS tape with 100A_{rms}, 60Hz

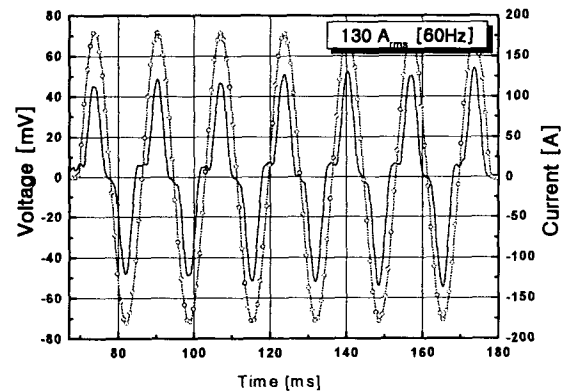


Fig. 4. Over critical current characteristic of HTS tape with 130A_{rms}, 60Hz

있어 전류가 0인 지점으로부터 임계전류를 넘지 않는 범위까지 초전도 영역이 나타나고 있다. 그러나 1주기로부터 시간이 경과함에 따라 약간씩 전압이 증가하는 경향이 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 미세한 한류의 경향이 보이는데 이러한 경향은 최고치가 임계전류의 4배에 해당하는 그림 5에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이것은 인가된 전류가 임계전류를 초과함에 따라 초전도체의 저항은 급격히 증가하므로 상대적으로 저항이 낮은 피복재로 전류가 많이 흐르게 되는데 이때 과전류에 의해 발생한 피복재의 줄열이 충분히 냉각되지 못하여 시간이 경과할수록 저항이 증가하고 있는 것으로 사료된다. 그러나 전압이 증가하고 있는 데 비해 초전도 영역이 뚜렷이 존재하고 있는 것으로 보아 초전도체는 여전히 임계 온도 이하로 냉각되고 있다고 판단된다.

그림 6은 인가된 전류의 최고치가 280A인 교류를 6주기 동안 가한 경우의 전압 전류를 나타낸 그래프이다. 1주기의 경우, 초전도 영역과 상전도 영역이 확실히 존재하고 있으나 마지막 6주기의 경우, 초전도 영역이 상당히 줄어들었다는 것을 알 수 있다. 이것은 전류의 양이 증가함에 따라 초전도체에서 발생한 줄열은 충분히 냉각되지 못하여 6주기에 이르렀을 때 초전도체는 임계온도

이상에 도달되었다고 사료된다. 피복재보다 훨씬 높

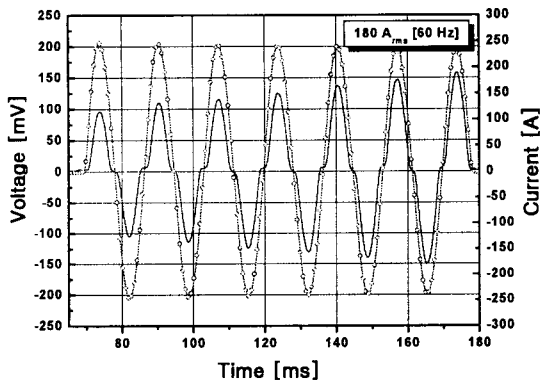


Fig. 5. Over critical current characteristic of HTS tape with 180A_{rms}, 60Hz

은 저항치를 갖는 초전도체가 임계온도를 넘을 경우, 통전 시간이 경과함에 따라 초전도체와 피복재로 구성된 시편의 전체 저항은 급격히 증가할 것이다. 이러한 경우, 과전류 통전 시간이 길어진다 면 피복재와 초전도체 간의 열팽창율의 차이에 의해 선재의 피복재가 부풀어올라 결과적으로 선재에 치명적 손상이 올 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

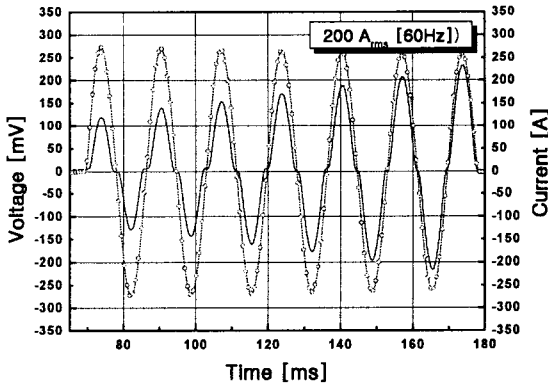


Fig. 6. Over critical current characteristic of HTS tape with 200A_{rms}, 60Hz

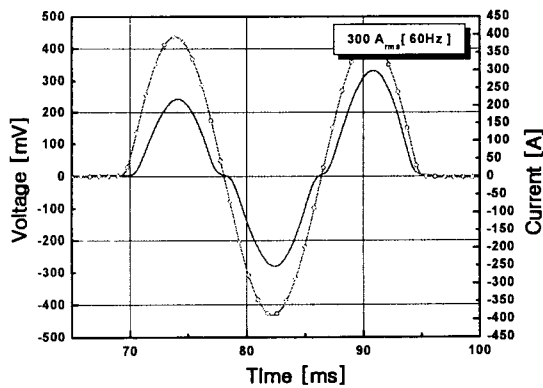


Fig. 7. Over critical current characteristic of HTS tape with 300A_{rms}

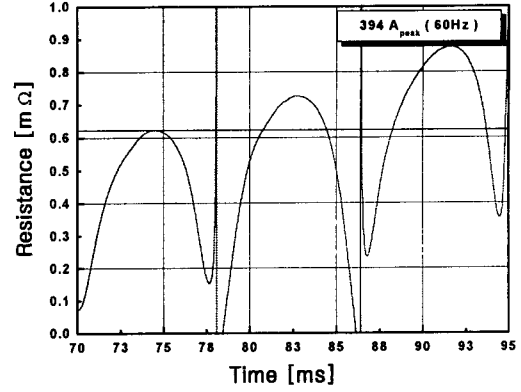


Fig. 8. Resistance variation when applied AC 300A_{rms} ($I_c \times 7$)

그림 7은 1주기 최고치가 395A (임계전류의 약 7배)인 60Hz 교류를 인가하였을 때의 전류 전압 특성을 나타내고 있다. 1주기와 2주기 사이의 전압차는 약 82mV로 급격히 증가하고 있다. 이 때 선재 전체에 발생한 저항변화를 그림 8에 나타내었다. 1주기에서의 최고 저항은 0.62mΩ이며 시간이 경과함에 따라 주기 당 약 0.1mΩ이 증가하고 있다.

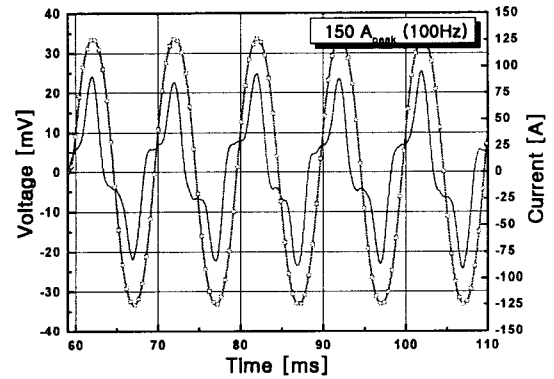


Fig. 9. Over critical current characteristic of HTS tape with 150A_{peak}, 100Hz

주파수에 따른 과전류 특성을 알아보기 위하여 150A_{peak}, 100Hz의 교류를 인가하여 얻어진 전압 전류 특성 파형이 그림 9에 나타나 있다. 같은 크기의 60Hz 교류를 인가하였을 때와 비슷한 경향을 보이고 있으며 이로 미루어 선재의 과전류 특성에서 주파수는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

3. 결 론

고온초전도 선재(기계연구원 제작)의 과전류 통전 특성을 알아보기 위해 직류를 인가하여 임계전류를 측정하고 최고치가 임계전류의 7배에 해당하는 교류를 통전하여 그에 대한 전압 전류

특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 최고치가 임계전류($I_c=68A$)의 2배에 해당하는 교류를 인가하였을 때, 선재의 초전도 영역은 안정적으로 존재하였으며 이로부터 초전도체는 주기 당 평균 온도가 임계온도를 초과하지 않았다고 사료된다.

2) 최고치가 임계전류의 3배에 해당하는 교류를 인가하였을 때, 시간이 지남에 따라 저항이 증가하는 경향을 보였으나 초전도 영역의 범위는 감소하지 않았다. 이로부터 저항의 증가는 주로 피복재에 의한 것으로 사료되며 초전도체는 임계 온도 이하로 안정하게 냉각되어지고 있다고 사료된다.

3) 최고치가 280A인 교류를 인가하였을 때 시간이 경과함에 따라 초전도영역은 감소하는 경향을 보였으며 이것은 주기 당 평균온도가 임계 온도를 초과하고 있음을 의미한다고 판단된다.

4) 최고치가 임계전류의 7배에 해당하는 교류를 통전하였을 때 선재의 저항은 1주기에서 $0.62m\Omega$ 으로 얻어졌다. 이 저항은 임계특성이 파괴된 초전도체와 피복재의 합성저항이며 시간이 경과함에 따라 저항은 크게 증가하여 뚜렷한 한류 특성을 보였다.

위의 결과로부터 과전류에 의한 고온초전도체의 파손은 인가 전류의 크기와 통전시간에 영향을 받는다는 결론을 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] W. J. Carr Jr., "Toward a more rigorous understanding of AC loss in a high- T_c superconductor", *Physica C*, 310, 1-5, 1998
- [2] Curt Schmidt, "Temperature-dependent AC loss and time constant measurements in high- T_c superconductors", *Cryogenics* 41. 393-399, 2001
- [3] Lue Le Lay, Darren M. Spiller, "Over-critical current behaviour of Bi-2223 tapes", *IEEE transactions on applied superconductivity*, Vol 9, No. 2, 1324-1327, June 1999
- [4] Svetlomir Stavrev, Bertrand Dutoit, Chris Friend, "Response of Bi-2223 tapes to over critical current excursions", *Physica C*, 339, 69-74, 2000