

고온초전도 선재의 과전류 통전 특성에 대한 피치의 영향

Influence of pitch on over-current characteristics of HTS tapes

임성우*, 황시돌*, 최효상*, 김혜림*, 한병성**

(Seong Woo Yim, Si Dole Hwang, Hyo Sang Choi, Hye Rim Kim, Byoung Sung Han)

Abstract

In economical points of view, AC loss of high temperature superconducting devices is considered as a serious problem that must be solved. Expecially, in case of HTS cables, HTS tapes are wound helically on the former to reduce AC loss. Critical characteristics of HTS tapes, however, are influenced by mechanical stress as well as electrical, temperature, and magnetical factors. The purpose of this study is to investigate the over current characteristics of HTS tapes given mechanical stress when they are wound on the former. We prepared HTS tapes with the pitch angle 20°, length 25cm as well as tapes with pitch angle 0°. When current of over 200A_{rms} was applied, we found out that there are differences to the rate of resistance increase between the case of pitch angle 20° and that of 0°. The rate of resistance variation in HTS tapes of pitch angle 20° increased more slowly than that of pitch angle 0°. As a result, we concluded that if critical characteristics of HTS tapes are degraded by any external factor, when over current is applied, the current limiting characteristics in HTS tapes won't be able to be expected any more.

Key Words : HTS tapes, pitch, over current characteristics, rate of resistance increase

1. 서 론¹⁾

대표적 초전도 응용 기기 중 하나인 고온초전도 케이블은 일반적으로 수백 또는 수천 m 이상의 장선의 고온초전도 선재로 구성된다. 그러므로 고온초전도 선재의 장선화에 의한 임계특성의 저하를 줄이기 위해서는 길이에 관계없이 균일한 특성을 갖는 우수한 선재가 요구된다.[1] 또한 케이블의 길이와 통전용량을 고려하였을 때, 냉각시스템의 효율적 운용을 위해서는 통전 시 자기 및 외부 자계에 의한 교류 손실 발생 등의 문제점 해결은 매우 중요한 사안으로 고려되고 있다.[2] 이에 대한 해결방안으로써, 케이블 제작 시 초전도 선재를 일방

향이 아닌 축 방향에 대해 회전하는 형태로 피치를 갖도록 설계하여 케이블 내의 자계에 의한 결합손실 등을 최소화할 수 있도록 제작한다.

한편, 고온초전도체는 초전도-상전도 천이에 있어 상당히 완만한 곡선을 이룬다. 뿐만 아니라 우수한 전도체인 은 피복재가 안정화제 역할을 하고 있어 임계전류 이상의 과전류가 인가되었을 경우에도 열폭주가 발생하지 않아 사고전류에 안정적으로 대처할 수 있는 특징이 있다. 반면, 지중에 위치하고 있으며 대용량의 전력을 운송하는 초전도 케이블의 특성을 고려하였을 때, 최적 운전 조건 하에 안정적인 통전은 매우 중요하다 할 수 있다.[3]

본 연구에서는 고온초전도 케이블과 유사한 형태를 갖는 모의 케이블 제작하기 위한 기초 자료로 활용하기 위해 고온초전도 선재를 포머 상에 피치를 고려하여 배치하여 시험 샘플을 제작하였다. 이 샘플에 대한 특성을 시험하기 위해 임계전류 이상의 직교류를 인가하여 과전류 통전 특성을 조사하고 데이터를 분석하였다.

* : 한전전력연구원 신에너지 그룹 초전도응용팀
대전광역시 유성구 문지동 103-16
Fax: 042-865-5804
E-mail : yimsw@kepri.re.kr
** : 전북대학교 전기공학과
전북 전주시 덕진구 덕진동 1가
E-mail : hbs@moak.chonbuk.ac.kr

2. 실험

2.1 실험장치

2.1.1 포머 상 고온초전도 선재 샘플 제작

모의 케이블 제작을 고려하여 베이클라이트 재질의 지름 3cm 포머 상에 준비된 고온초전도 선재를 피치를 고려하여 장착하였다. 피치각은 20°이며 피치길이는 약 25cm로 설정하였다.

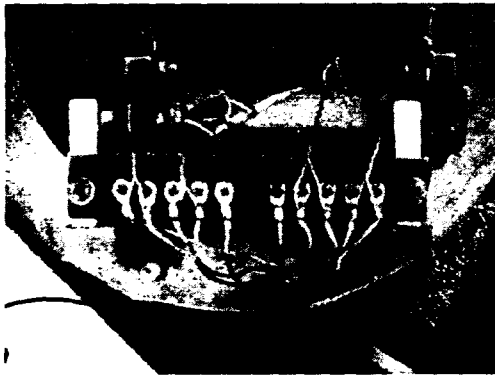


그림 1. 샘플 홀더에 장착된 고온초전도 선재
Fig. 1. HTS tapes considered pitch on former

2.1.2 임계특성 및 과전류 특성

선재의 기계적 변형에 의한 임계특성 저하를 알아보기 위하여 4단자법을 이용하여 10cm부터 5cm 간격으로 증가시키며 전압 단자를 부착하였으며 직류를 증가시키며 통전하여 임계전류를 측정하였다. 통전 전류는 1A 간격으로 100A까지 증가시켰으며 나노볼트미터를 이용하여 전압을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

피치의 영향을 고려한 선재와 고려하지 않은 경우에 대하여 각각 과전류 특성을 조사한 후 양 데이터를 상호 비교하였다.

3.1 피치를 고려하지 않은 선재의 과전류 특성

고온초전도 선재에 직류를 인가하여 측정된 통전 특성이 그림 1에 제시되어 있다. 측정된 임계전류 특성은 59A(0.1 μ V/cm)이며 68A(1 μ V/cm)로 측정되었다. 또한 78A를 통전하였을 때, 1mV의 전압이 발생하였다.

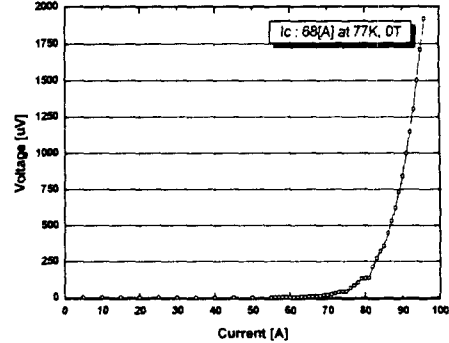


그림 2. HTS 선재의 임계전류 특성
Fig. 2. Critical current of HTS tapes

한편, 최고치가 임계전류의 5배에 해당하는 교류(180A_{rms})를 인가하였을 때의 통전 특성이 그림 2에 제시되었다. 전압곡선을 살펴보면, 각 주기에 있어 임계전류를 넘지 않는 범위에 초전도 영역이 존재하며 임계전류 이상의 과전류가 인가되었을 때는 초전도체와 은 피복재의 전체 저항에 비례하는 전압이 검출되고 있다.

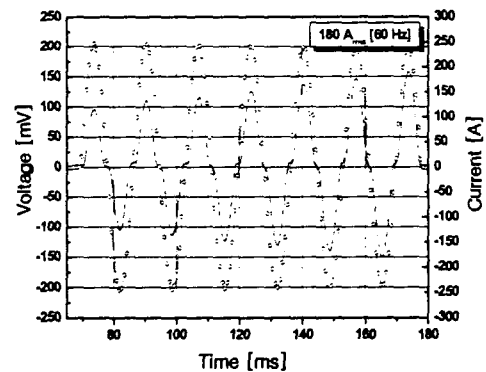


그림 3. 180 Arms 인가 시 과전류 통전특성
(○ : 전류, - : 전압)
Fig. 3. Over critical current characteristic of HTS tape with 180A_{rms}, 60Hz
(○ : current, - : voltage)

인가된 전류가 임계전류를 초과하게 되면 선재 내부의 초전도체는 상전도성을 띄게 되어 저항이 급격히 증가하므로 전류는 저항이 상대적으로 낮은 은 피복재로 흐르게 된다. 교류의 크기가 +와-

를 반복하면서 연속적으로 전류는 초전도 영역과 은피복재료의 분류를 반복한다. 이와 같은 과정에서 초전도체가 상전도체로 전이하면서 발생한 줄열은 액체질소에 의해 냉각되어 다시 초전도 상태로 복귀한다. 그러나 시간이 경과함에 따라 초전도체의 줄열이 완전히 냉각되지 못하게 되는 경우, 각 주기가 경과하면서 초전도 영역은 점차 줄어들게 된다. 마침내 초전도체의 온도가 임계온도를 초과하게 되면 초전도체는 완전히 상전도성을 띄며 저항은 매우 커지므로 거의 모든 전류가 은 피복재로 흐르게 되는 것을 예상할 수 있다. 그림 3에서 이와 같은 추론을 확인할 수 있다. 주기가 경과함에 따라 초전도 영역은 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며 이에 따라 선재 전체 저항이 점차 증가하여 전류 제한 효과가 나타나고 있다. 그러나 전압이 증가하고 있는 데 비해 6주기 이상 영역에서 초전도 영역이 여전히 존재하고 있는 것으로 보아 초전도체는 임계 온도 이하로 냉각되고 있다고 판단할 수 있다.

3.2 피치의 영향을 고려한 선재의 과전류 특성

고온초전도 선재의 과전류 인가 시 피치가 주어졌을 때의 변화를 알아보기 위해 통전 특성을 조사한 데이터가 그림 4에 나타나 있다. 피치를 고려한 고온초전도 선재에는 선재가 축방향과 원주방향으로 기계적 스트레스가 가해지므로 임계전류의 저하가 초래된다.

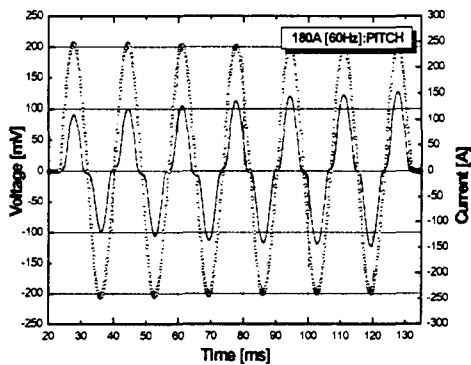


그림 4. 피치를 고려한 선재의 과전류 특성
(○ : 전류, - : 전압)

Fig. 4. Over current characteristics of HTS tapes considered influence of pitch
(○ : current, - : voltage)

그림 3과 동일한 크기의 교류를 피치가 없는 선재에 인가하였을 경우와 비교하였을 때, 임계전류가 55A로 약 20 % 감소하여 전압곡선의 추이로부터 초전도 영역이 감소하였음을 알 수 있다. 또한 검출된 전압의 증가율이 피치의 영향을 고려하지 않은 경우와 비교하여 상당히 완만한 것을 알 수 있다. 전류가 인가된 후 첫 주기에 발생한 전압의 크기는 두 경우 비슷한 크기를 나타내고 있지만 마지막 6 주기의 경우 상당한 차이를 보이고 있다. 이것은 선재 내부의 초전도체의 임계전류가 감소함에 따라 과전류가 인가되었을 경우 발생하는 저항과 그에 의한 줄열이 감소하므로 이러한 경향이 발생하는 것으로 사료된다.

한편 피치를 고려한 선재에 200A_{rms}를 인가하였을 때 나타나는 과전류 통전 특성에 대한 그래프가 그림 5에 나타나 있다. 선재 중심으로부터 전압 단자 간격이 10cm인 경우와 20cm인 경우를 비교할 때, 거리에 비례하여 전압이 증가하고 있는 것으로 보아 전류의 분류가 어느 한 지점에 국한되지 않고 있음을 알 수 있다.

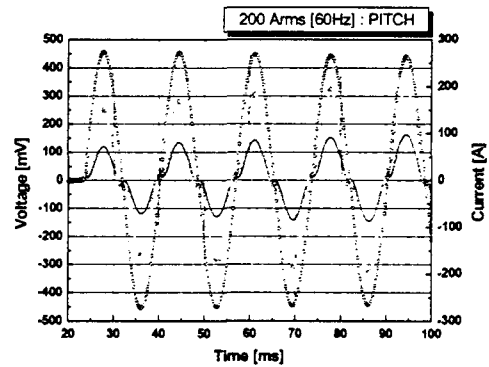


그림 5. 200A_{rms} 통전 시 피치의 영향이 고려된 고온초전도 선재의 과전류 특성
(○:전류, △:20cm, -:10cm:전압)

Fig. 5. Over current characteristics of HTS tapes considered pitch when applied 200A_{rms}
(○:current, △:20cm, -:10cm:voltage)

과전류 인가 시 선재 전체에 발생하는 저항 추이를 알아보기 위하여 200A_{rms}의 전류를 피치를 고려한 선재와 그렇지 않은 경우에 대해 상호 비교하였다. (그림 6) 그림 3과 4에서 고찰한 결과와 같이 피치가 없는 경우 저항 증가율이 피치를 고려한 경우에 비해 점점 커지고 있다.

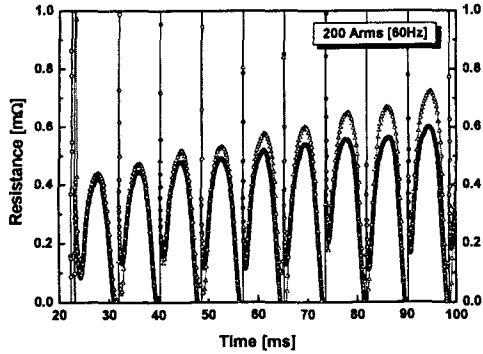


그림 6. 200A_{rms} 인가 시 HTS 선재의 저항 비교
(○:피치가 있을 때, △:피치가 없을 때)
Fig. 6. Comparison of resistance variation of HTS tapes when 200A_{rms} was applied
(○:with pitch, △:with non pitch)

그림 7은 임계전류가 다른 고온초전도 선재에 대한 과전류 특성 변화를 알아보기 위해 임계전류가 35A인 고온초전도 선재에 200 A_{rms}를 인가하였을 때 과전류 통전 특성에 대한 데이터가 제시되어 있다.

선재 내부 초전도체의 임계전류가 낮으므로 첫 주기의 전압과 마지막 주기의 전압차가 거의 변화가 나타나지 않고 있다. 즉, 임계전류가 낮은 초전도 선재의 경우, 전류 인가 시 한류 특성을 기대하기 어렵다는 결론을 얻을 수 있다.

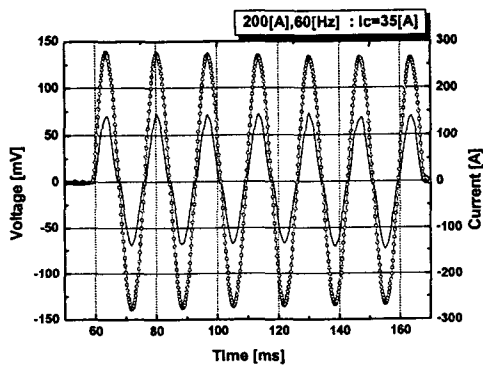


그림 7. 200A_{rms} 인가 시 고온초전도 선재(I_c:35A)의 과전류 특성
(○:전류, -:전압)
Fig. 7. Over current characteristics of HTS tapes(I_c:35A) when 200A_{rms} was applied
(○:current, -:voltage)

4. 결론

고온초전도 모의 케이블을 제작하기 위한 기초 실험으로써 고온초전도 선재를 피치각 20°이며 피치길이 약 25cm로 설정하여 외적 스트레스를 가하여 과전류 통전 시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

임계전류 이상의 과전류가 인가되었을 때, 선재 내부의 초전도체는 상전도체로 전이된다. 이때 발생하는 저항과 줄열은 시간이 경과함에 따라 점차 증가하는 경향을 보인다. 그러나 피치를 고려한 선재의 경우, 고려하지 않은 경우에 비해 저항 증가율이 낮아짐을 알 수 있었다. 즉, 임계전류가 저하됨에 따라 과전류 인가 시 전류제한 특성이 감소하였다. 이것은 초전도체의 임계전류가 작아짐에 따라 과전류 인가 시 저항이 높은 초전도체 대신 대부분의 과전류가 은 피복재로 통전하게 되어 첫 주기에 발생한 저항이 이후 선재 전체 저항을 결정하는 주요 요인이 된다고 판단된다. 이러한 특성은 초전도케이블의 과전류 통전 특성의 관점에서 주요한 요소로 고려해야 할 사항이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] L.Masur, D.Parker, M.Tanner, E.Podtngurg, D. Buczek, J.Scudiere, P.Caracino, S.Spreafico, P.Corsaro, and M. Nassi, "Applied superconductivity Conference at virginia beach", September 17-22, 2000.
- [2] S.Fukui, O.Tsukamoto, N.Amemiya, K.Miyahita, M.Hakamata, " AC Loss of ac superconducting cable due to transport current in external ac magnetic field", IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 7, No. 2, 282-285, June 1997
- [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