

전류인가시간에 따른 Bi-2223 테이프의 과전류 통전특성 측정

이광연, 이희준, 차귀수, 이지광*
순천향대학교 전기공학과, 우석대학교 전기공학과*

Measurement of Bi-2223 Tape's properties at Various Duration of the Over Current

K. Y. Lee, H. J. Lee, G. Cha, J. K. Lee
Soonchunhyang University, Woosuk University

kwang-1@hanmail.net

Abstract - Bi-2223 tape is one of the most widely used HTS tapes for power application. This paper presents the basic properties such as temperature and resistivity rise of the Bi-2223 tape which is exposed to the over current. Temperature and resistivity were measured by E-type thermocouple and voltage taps. Results of the measurement showed that rise of voltage depended on the magnitude of the over current until several times of the rated current. When the current largely exceeded the rated current, rise of voltage depended on the magnitude of the resistivity of the the Ag matrix because temperature of the matrix increased to a great extend.

1. 서 론

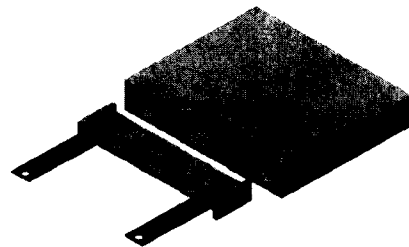
고온초전도선재가 변압기나 다른 전력기에 사용될 경우, 정상운전시에는 선재가 갖는 임계전류 이하인 정격전류가 흐르게 되지만, 단락과 같은 사고가 발생할 경우는 전력계통에서 전류의 변동은 수 사이클 동안 정상상태의 20배 수준까지 발생할 수 있다[1], [2]. 현재, 사고전류제한기에 사용되는 Bi-2223/Ag 테이프 구성물질의 물질특성을 조사·연구하기 위하여 수 사이클 이내의 과전류하에서 실험이 실행되어지고 있으며, 권선형태의 선재에 있어서 피치각에 따른 임계전류의 감소와 과전류 인가시 저항성장 특성이 연구되어지고 있다[3]. 이러한 연구는 테이프의 임계전류 증가와 모재 저항률의 향상 측면에서 필요하다.

본 연구에서는 실제 전력계통안에서의 과전류를 모의하기 위하여 함수발생기로 교류전원을 제어하였고, 전류인가시간 증가와 절연에 따른 통전특성의 변화를 측정하기 위해 비절연과 절연 선재에 각각 3, 10, 60 주기의 과전류를 인가하였다.

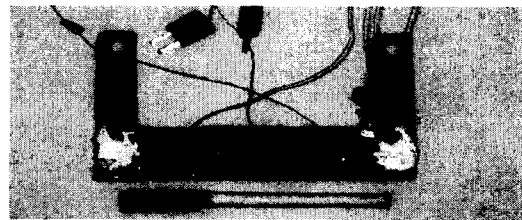
2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 실험장치들과 고온초전도선재인 Bi-2223 테이프의 사양을 그림 1과 표 1에 각각 나타내었다. 그림 1의 a)는 전압과 온도측정을 위한 샘플 홀더에 전압탭과 E형 열전대가 설치된 샘플 홀더와 액체질소 용기를 나타내며, 온도측정을 위한 열전대를 전기적 절연과 고정을 위해 열전도도가 우수한 저온에폭시수지(2850FT)로 얇게 도포하였다. 캡톤테이프를 사용한 선재의 절연은 저항성장과 온도상승의 절연에 대한 영향을 조사하기 위하여 type I, type II 선재 각각에 대하여 비절연과 1겹 절연으로 나누어 측정하였다. 그림 1의 b)는 실제 제작된 절연샘플의 모습으로 샘플홀더는 베이클라이트와 전류도입단자인 구리바로 구성되어 있다. 절연에 사용된 캡톤테이프의 규격과 열전도도, 유전강도는 각각 $25(\mu\text{m})$, $0.16(\text{W/m-K})$, $300(\text{kV/mm})$ 이다.



a) Test sample and Vessel



b) Insulator with Kapton film

Fig. 1. Schematics of the test apparatus

Table 1. Specifications of the test samples

타입 \ 항목	Type I	Type II
재질	Bi-2223	Bi-2223
테이프 두께	0.164 [mm]	0.2 [mm]
테이프 폭	2.9[mm]	3.1 [mm]
모재	Ag	Ag
트위스트 유·무	무	무
임계전류	70 [A]	68 [A]

본 실험의 과전류 통전특성의 측정에 있어서는 전원의 용량과 전력계통안에서 상황을 고려하여 임계전류가 20[A]가 되는 외부자계를 선택하였다. 샘플테이프가 위치할 공극은 약 34mm이고, 측정의 정확도에 영향을 미치는 자계의 균일성을 측정하였다. 표 2와 그림 2는 각각 두 타입의 샘플테이프에 가해지는 외부자계값과 외부자계 인가용 마그넷 자장의 균일도를 나타낸다. 샘플테이프가 위치할 외부자계 인가용 상전도 마그넷의 공극 중앙(BM)과 좌우 50mm(BL, BR) 지점에서의 자장값의 차이는 약 4% 이하로 균일함을 알 수 있다.

Table 2. External field applied to tapes

타입 \ 항목	Type I		Type II	
	비절연	절연	비절연	절연
임계전류 I_c [A]	20	20	20	20
외부자계 B [mT]	151	151	163	163

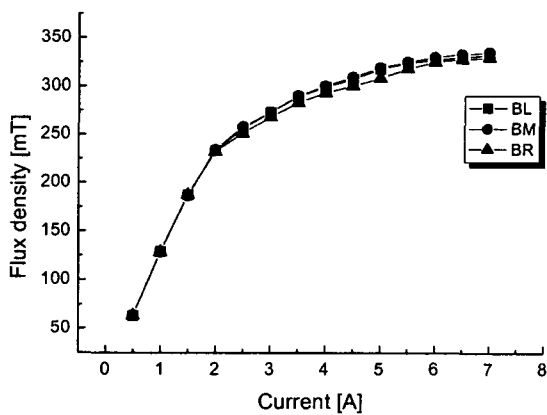


Fig. 2. Magnet current and the generated field

2.2 실험방법

Bi-2223테이프의 과전류 인가시 온도상승과 전압상승을 측정하기위해 테이프의 세 부분에 E형 열전대를 부착하였고 각 열전대 사이에 전압탭을 설치하여 열전대 부착부분과 관련된 테이프의 탭전압을 측정하였다. 온도측정에 앞서 테이

프의 초기온도를 액체질소온도(77K)에 맞추기 위해 백금측온저항체인 Pt-111을 사용하여 온도 측정모듈의 각 채널들을 교정하였다. 그림 3는 탭전압과 온도측정을 위한 측정방법을 나타낸다. 전압탭은 각각 10cm, 7cm, 3cm로 거리를 두고 부착하였고, 측정기기의 측정단자간 (-)단자를 공통 접지하였다. T_{part1} , T_{part2} , T_{part3} 는 세 부분에서의 열전대로 측정된 온도값을 나타내고, V_{part1} , V_{part2} , V_{part3} 는 열전대 부착부위와 관련된 부분인 세 부분에서의 전압탭으로부터 측정된 전압값을 나타낸다. V_{part1} , V_{part2} , V_{part3} 는 각각 V3, V2-V3, V1-V2의 전압값을 갖는다.

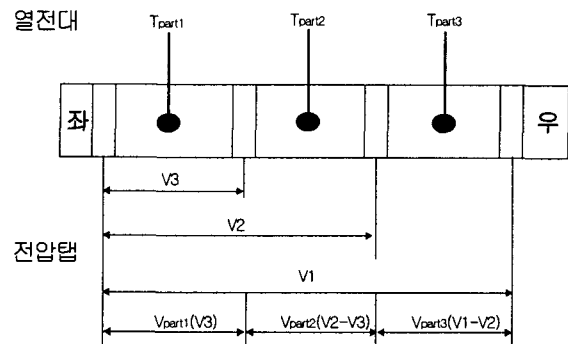


Fig. 3. Measurement parameter and points of voltage taps, thermocouples

그림 4는 실제 측정에 사용된 측정회로도를 나타낸다. 임계전류 20[A]의 10배 수준까지 3, 10, 60 주기의 과전류를 모의하기 위하여 변압기를 사용하였고, 2채널 함수발생기로 각 주기의 전류가 샘플 테이프에 인가되도록 전원을 제어하였다. 샘플 테이프에 인가한 전류는 션트를 이용하여 측정하였다. 샘플에 인가되는 과전류의 주파수와 주기는 각각 60Hz, $3 \cdot 10 \cdot 60$ 주기이다. 모든 측정값들은 동시 측정하였다.

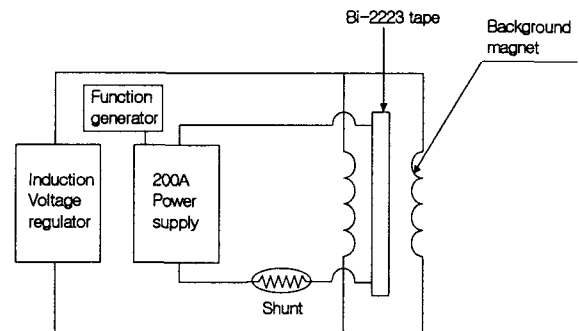


Fig. 4. Circuit for measurement

3. 측정결과

3.1 과전류 통전시 전압·전류 파형

그림 5는 샘플테이프의 세 부분에서 측정된

탭전압 중 3주기(50ms)파형을 나타낸다. 임계 전류(20(A)) 1배~10배의 과전류 중 저전류 영역인 3배, 중전류 영역인 6배, 고전류 영역인 9 배에서의 전류·전압 파형을 나타낸다. 임계전류 3배의 전류 인가시, 첫 번째 주기와 마지막 주기의 전압파형의 크기는 거의 동일하였다. 반면에 임계전류 9배의 전류 인가시, 마지막 주기의 전압은 첫주기에 비하여 상승함을 측정하였다. 이는 큰 과전류 인가시 샘플테이프에서 발생하는 저항성장에 기인한다. 또한 과전류의 크기가 증가할수록 임계전류이하에서의 통전시간의 감소에 따라 초전도상태를 유지하는 영역이 감소함을 알 수 있다.

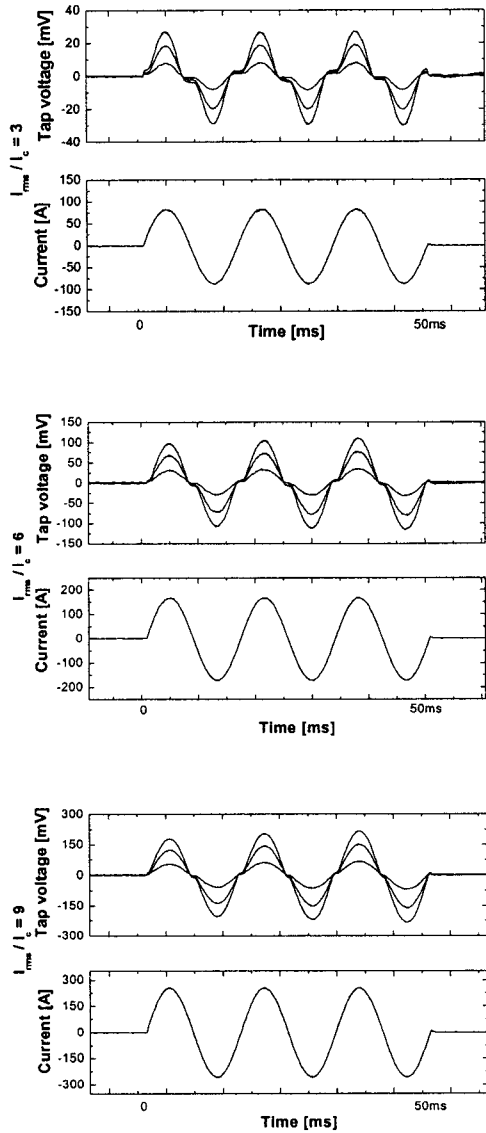


Fig. 5. Over current/voltage waveforms at 60Hz, 3 consecutive cycles

3.2 저항성장 특성

그림 6은 Type I 절연 선재에 각각 3, 10, 60 주기의 과전류를 인가한 경우 측정된 저항성장을 나타낸다. meaR은 인가전류와 10cm 전압 탭에서 측정된 전압으로부터 계산된 저항이다.

RAg77K 과 RAg110K은 모재의 온도에 따른 저항률과 샘플테이프에서 Ag가 차지하는 점적률로써 계산된 저항값을 나타낸다. 비절연선재 보다 절연선재에서 저항의 성장이 뚜렷이 발생하였다. 또한 과전류가 인가되는 지속시간이 3~10~60 주기로 늘어날 수록 과전류 인가 첫 주기와 마지막 주기의 저항 증가폭이 커짐을 알 수 있다. 3 주기 과전류의 경우, 저항성장이 아주 작게 나타났다. 반면에 60 주기(1초)동안 과전류가 인가되었을 경우, 저항성장폭이 크게 나타났으며, 약 임계전류 9배 정도의 과전류하에서 선재의 열화·단선이 발생하였다.

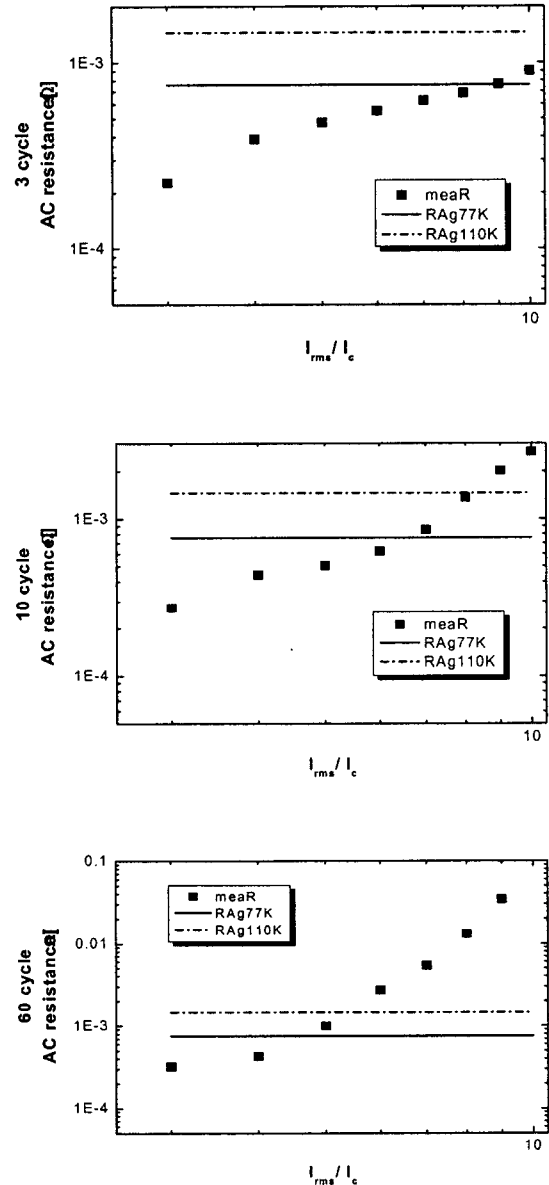


Fig. 6. Resistance rise at various duration

그림 7은 큰 과전류 하에서 저항성장특성이 뚜렷하게 측정된 Type I 절연선재의 임계전류 4배 과전류와 9배 과전류 인가시의 10 주기 전압파형 내에서의 저항률의 증가를 나타낸다. Type I 절연선재에서는 4배의 과전류하에서는 1.6 nΩ·m

로부터 $1.8 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ 까지 작은 값으로 증가하나, 9 배의 큰 과전류하에서는 $3.1 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ 로부터 $10 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ 까지 크게 증가하였다.

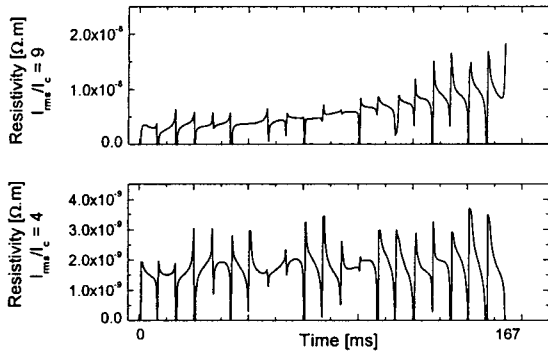


Fig. 7. Resitivity rise in 10 cycle over current

표 3은 Type I 비절연/절연 선재와 Type II 비절연/절연 선재에서의 저항률 증가값을 나타내고 있다. 비절연 선재의 경우에 있어서 4배의 과전류하에서는 저항률의 증가가 거의 없고, 9배의 과전류하에서는 뚜렷하게 저항률이 증가함을 알 수 있다. 절연 선재의 경우에 있어서는 4 배의 과전류하에서도 저항률의 증가가 나타났으며, 9배의 과전류하에서는 큰 폭으로 저항률이 증가함을 알 수 있다.

Table 3. Resitivity rise

조건 선재	$I_{rms} / I_c = 4$			$I_{rms} / I_c = 9$		
	ρ_{min}	ρ_{max}	$\Delta\rho$	ρ_{min}	ρ_{max}	$\Delta\rho$
Type I 비절연	1.6	1.6	0	3.1	6.1	3
Type I 절연	1.6	1.8	0.2	3.1	10	6.9
Type II 비절연	2	2	0	3.9	5.9	2
Type II 절연	2	2.3	0.3	3.9	9.6	5.7

3.3 구간별 온도상승과 전압증가 비교

그림 8은 선재표면의 온도상승이 뚜렷한 60 주기동안 임계전류 8배의 과전류가 인가된 샘플 선재의 구간별 온도상승과 전압증가에 대한 비교를 나타낸다. $60\text{주기}-8I_c$ 에서의 구간별 온도상승과 전압상승의 형태가 유사한 것은 긴 지속시간과 큰 과전류하에서의 저항성장으로 인한 전압증가는 그 구간에서의 온도상승에 의존하기 때문이다.

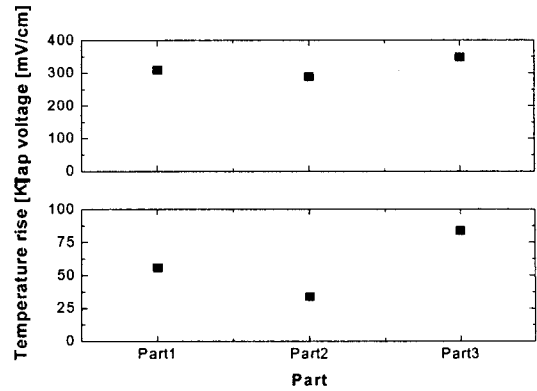


Fig. 8. Comparison of temperature and tab voltage rise

4. 결 론

실제 전력계통안에서의 사고전류를 고려한 3, 10, 60주기의 과전류가 인가된 Bi-2223 테이프의 통전특성 측정에 있어서, 두 타입의 비절연/절연선재 모두의 경우 아주 짧은 과전류 지속시간을 갖는 3주기하에서는 절연의 유무에 관계없이 액체질소에 의한 냉각으로 인해 온도상승이 거의 발생하지 않으며 저항의 증가도 크지 않음을 알 수 있었다. 또한, 10주기가상의 과전류 지속시간을 갖는 측정에서 온도상승으로 인한 큰 저항성장을 발생시키는 과전류의 크기가 지속시간의 증가와 절연에 의해 감소하게 됨을 알 수 있었다. 60주기의 임계전류 9배 수준의 과전류에 의해 실험선재는 열화·소손되었으며, 이는 선재의 온도상승과 저항성장이 과전류의 지속시간에 크게 의존함을 나타낸다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] Svetlomid Stavrev et al., "Response of Bi-2223 tapes to over-critical current excursions," Physica C 339, pp.69-74,2000.
- [2] Lue Le Lay and Darren M. Spiller, "Over-critical current behaviour of Bi-222 3 tapes," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.1324-1327, June 1999.
- [3] 임성우, 황시돌, 최효상, 현옥배, 한병성, "피치각에 따른 고온초전도 선재의 과전류 특성," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 961-963, 2002.