

고온초전도테이프의 사고전류 특성

이성수, 박관배, 류경우, 차귀수\*  
전남대학교, 순천향대학교\*

Fault Current Characteristics of a HTS tape

Sung-Soo Lee, Kwon-Bae Park, Kyung-Woo Ryu, Guee-Soo Cha\*  
Chonnam National Univ., Soonchunhyang Univ.\*

**Abstract** - 동일한 임계전류 특성을 갖는 Bi-2223테이프에 전력기기의 실제 응용에서 발생하는 큰 사고전류를 고려한 임계전류보다 큰 과임계전류를 흘렸을 때 테이프의 온도상승 및 저항 특성을 중요한 인자에 대해 조사하였다. 냉각이 좋은 즉 비절연 테이프의 경우 온도상승은 없고, 표피효과에 의한 저항의 증가도 없고, 특히 비절연 테이프의 경우 과도 및 정상 상태 저항이 동일한 반면 절연 테이프의 경우 매우 상이하고, 전기절연 길이를 전압탭보다 길게만 해주면 길이에 무관하게 온도상승 및 저항이 동일하였으며 마지막으로 모재의 저항율이 상이하여도 임계전류만 동일하면 온도상승 및 저항은 유사함을 알 수 있었다.

1. 서 론

사고 시 변압기의 경우는 정격전류보다 20 - 30 배 정도, 송전케이블의 경우는 약 100 배 정도의 큰 사고전류가 수 사이클동안 흐르게 된다. 이와 같은 전력기기에 최근 장선화에 성공한 대표적인 고온초전도도체인 Bi-2223테이프를 사용할 경우 테이프는 상기의 큰 사고전류에 대해 손으로부터 안전해야 한다. 또한 초전도체의 고유한 특성인 임계전류보다 대단히 큰 사고전류에 의해 테이프는 상전도로 전이되고, 그 결과 Bi-2223테이프에는 급격한 저항이 발생되어 사고전류를 제한하는 효과 (limiting effect)가 일어난다. 따라서 본 연구에서는 사고전류와 같이 큰 과임계전류에 대하여 Bi-2223테이프의 온도상승 및 저항 특성을 조사하였다(1).

2. 실험 샘플 및 방법

2.1 실험 샘플

과임계전류 특성 실험에 사용된 두 종류의 Bi-2223 테이프에 대한 사양을 표 I에, 실험 샘플에 대한 개략도를 그림 1에 각각 나타내었다.

과임계전류에 대한 샘플의 온도상승 측정을 위하여 테이프와 E형 열전대와와의 직접적인 접촉에 의해 접촉부에서 발생하는 테이프의 전압강하를 억제할 목적으로 전기절연 및 열전도 특성이 비교적 우수한 Stycast를 수  $\mu$ m 두께로 코팅하여 절연하였고, 또한 코팅된 박막 위에 열전대를 테이프와 열적으로 안정하게 접합시키기 위하여 동일한 Stycast로 열전대를 도포하였다. 또한 과임계전류에 대한 샘플의 전압을 측정하기 위해서 Edge리드를 사용하였다. 이것은 교류 손실측정시 사용되는 전압리드 중의 하나로 유도전압이 비교적 작은 전압리드도 별도의 상쇄코일을 제작할 필요가 없기 때문에 본 실험에서 동일하게 적용하였다.

그리고 Bi-2223테이프의 전력기기 응용시 도체의 전기절연을 고려하여 테이프를 전기적으로 절연하지 않은 샘플에 대해서뿐만 아니라 동일한 샘플(따라서 임계전류 특성이 동일)을 Kapton테이프로 절연한 샘플에 대해서도 동일한 특성을 조사하였다.

표 I Bi-2223테이프의 중요 사양

모 재	사이즈 (mm)	조 성 (Bi/모재)
Ag	3.5×0.3	23/77
AgMgNi	3.5×0.3	25/75

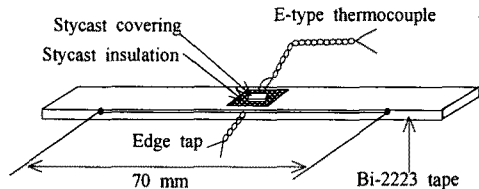


그림 1. 실험 샘플의 개략도.

2.2 실험 방법

그림 1과 같은 Bi-2223테이프의 온도상승 및 저항 특성을 조사하기 위하여 사용된 실험장치의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 큰 사고전류에 대해 Bi-2223테이프가 얼마나 손으로부터 안전한가를 조사하기 위하여 샘플용 전원으로서는 300 A 전원을, 전력기기에 Bi-2223테이프를 사용할 경우 테이프는 교류자계를 경험하게 되며 이러한 상황을 고려하여 샘플에 교류자계를 인가하기 위한 외부자석용 전원으로서는 30 A 전원을 각각 사용하였다.

또한 Bi-2223테이프에 흐르는 전류와 외부에서 인가되는 자계의 위상을 동일하게 제어하기 위해서 2채널 합수 발생기를, 외부자계의 위상 검출을 위해서는 자체 제작한 자속코일 [flux coil]을 사용하여 표 I의 두 종류의 Bi-2223테이프에 대한 온도상승 및 저항 특성을 조사하였다.

본 연구에서 교류저항의 산출은 Bi-2223테이프에 정현파 전류를 흘렸을 때 측정된 비정현파 전압테이타로부터 FFT(Fast Fourier Transform)분석하여 전류와 동상인 기본파 성분의 진폭을 전류의 진폭으로 나눠서 산출하였다.

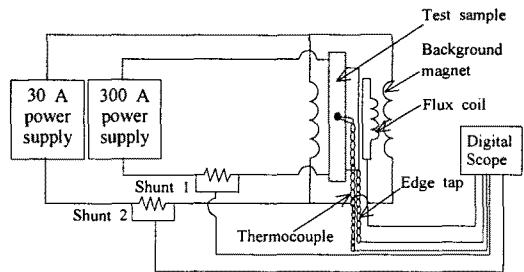


그림 2. 실험장치의 개략도.

### 3. 실험 결과 및 검토

그림 3에는 비절연 Ag모재의 Bi-2223테이프에 외부 자계를 인가한 상태에서 직류전류를 흘렸을 때 측정된 직류저항 및 온도상승을 각각 나타내었다. 그림에서  $I_{c0}$ 는 외부자계를 인가하지 않았을 때 임계전류를, 검정색 심벌과 흰색 심벌은 각각 테이프의 단위길이 당으로 환산된 저항 및 온도상승을, 실선은 Bi-2223테이프가 완전히 상전도로 전이한 상태에서는 전류가 전부 모재인 Ag로만 흐르기 때문에 테이프의 운전온도인 77 K에서 Ag의 저항률 즉  $4 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ 로부터 계산된 Bi-2223테이프의 저항을 각각 나타내었다[2].

테이프의 임계전류(21 A)보다 약 10 배정도 큰 과임계전류 영역에서 조사된 그림 3의 결과로부터 테이프의 온도상승은 없었지만 직류저항은 과임계전류가 임계전류보다 커짐에 따라 급격히 증가하다가 사고전류와 같이 큰 과임계전류 영역(실재 응용에서 중요한 영역)에서는 외부자계의 유·무에 관계없이 Ag모재의 저항률로부터 계산된 저항으로 일정하게 됨을 알 수 있다. 또한 외부자계가 증가함에 따라서 일정 저항으로 포화되는 전류는 작아지며 이는 외부자계의 인가에 따른 테이프의 임계전류가 작아진 결과로 사려되고, 테이프의 직류저항은 외부자계의 크기에만 의존하고 직·교류에는 무관함을 알 수 있다.

그림 4에는 비절연 Ag모재의 Bi-2223테이프에 전류의 주파수 10 - 360 Hz로 달린 상태에서 전류를 흘렸을 때 측정된 교류저항 및 온도상승을 각각 나타내었다. 그림 4로부터 테이프의 임계전류보다 약간 큰 과임계전류 영역에서는 교류저항이 직류저항에 비해 크나 주파수에는 무관한 반면 사고전류와 같이 큰 과임계전류 영역에서는 직·교류에 관계 없이 계산된 저항으로 일정하게 됨을 알 수 있다. 따라서 사고전류와 같이 큰 과임계전류 영역에서도 Bi-2223테이프는 상전도체에서 나타나는 표피효과에 의한 저항의 증가는 없었다.

그림 5에는 비절연 Ag모재의 Bi-2223테이프에 흐르는 과도 전류의 인가시간을 달린 상태에서 전류를 흘렸을 때 측정된 교류저항 및 온도상승을 각각 나타내었다. 그림 5의 결과로부터 테이프에 온도상승만 없으면 임계전류보다 큰 과임계전류 영역에서 저항은 인가시간에 무관하게 77K에서 모재 저항률로부터 계산된 저항과 동일함을 알 수 있다.

그림 6에는 절연 Ag모재의 Bi-2223테이프의 전기절연 길이를 35 -100 mm로 달린 상태에서 전류를 흘렸을 때 측정된 직류저항 및 온도상승을 각각 나타내었다. 그림 6의 결과를 비절연 Ag모재의 Bi-2223테이프에 대한 결과 즉 그림 3과 비교해 보면 먼저 절연 유·무

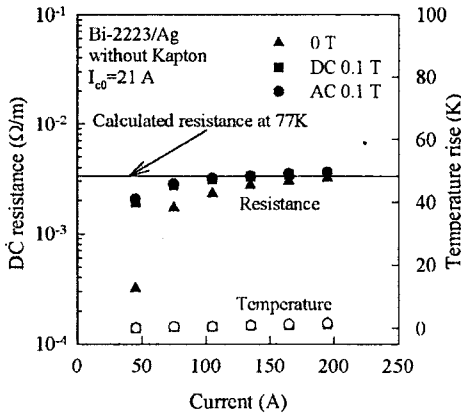


그림 3. 직류저항 및 온도상승 - 전류 관계: 외부자계 효과.

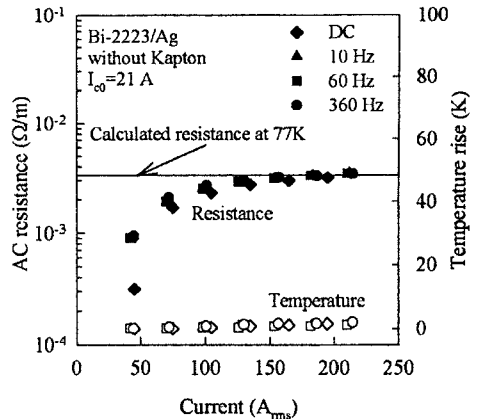


그림 4. 교류저항 및 온도상승 - 전류 관계: 표피 효과.

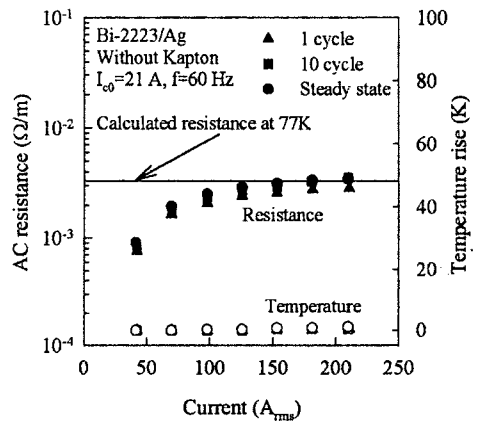


그림 5. 교류저항 및 온도상승 - 전류 관계: 과도 효과.

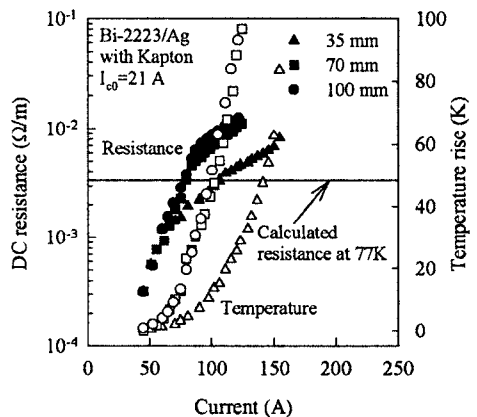


그림 6. 직류저항 및 온도상승 - 전류 관계: 절연길이 효과.

가 테이프의 온도상승 및 저항에 미치는 영향이 대단히 클 수 있다. 또한 절연이 된 경우라 할지라도 전기절연 길이가 증가함에 따라서 77 K에서 계산된 저항으로 되는 전류의 크기가 비절연의 경우는 약 200 A에서, 35 mm 절연의 경우는 약 80 A, 70 및 100 mm의 경우는 약 60 A의 동일한 전류로 절연 길이가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 또한 저항을 측정하기 위해

설치한 전압탭의 길이 즉 70 mm보다 전기절연 길이가 길어지기만 하면 절연 길이에 무관하게 온도상승 및 저항 특성이 동일함을 알 수 있고, 동일한 과임계전류에 대해서 그림 3의 결과와 비교하면 온도상승이 일어나기 이전까지의 전류 영역에서는 절연 및 비절연 모두 거의 동일한 저항 특성을 보이는 반면 이상의 전류 영역에서는 절연 테이프의 저항이 비절연 테이프의 저항보다 매우 커짐을 알 수 있고, 이는 Bi-2223테이프의 온도상승에 의한 모재 Ag 저항의 상승에 기인하는 것으로 사려된다.

그림 7에는 절연 Bi-2223테이프의 모재 즉 Ag 및 AgMgNi로 달리한 상태에서 전류를 흘렸을 때 측정된 교류저항 및 온도상승을 각각 나타내었다. 이 실험에서 외부자계가 없는 동일 조건에서 Bi-2223/AgMgNi테이프와 Bi-2223/Ag테이프의 임계전류는 21 A로 동일한 조건에서 실험한 결과이다. 그림 7의 결과로부터 77 K에서 Ag 및 AgMgNi의 저항률은 4 및 10 nΩ·m로 AgMgNi의 저항률이 Ag보다 약 2배정도 크지만 온도상승 및 저항 특성은 거의 비슷함을 알 수 있다.

그림 8에는 Bi-2223테이프를 전력기에 응용할 경우 반드시 전기적으로 절연된 상태로 사용됨을 고려한 과도 효과를 조사하기 위하여 절연 Ag모재의 테이프에 흐르는 과도 전류의 인가시간을 달리한 상태에서 전류를 흘렸을 때 측정된 교류저항 및 온도상승을 각각 나타내었다.

그림 8 및 그림 5의 결과로부터 테이프의 온도상승만 없으면 절연 유·무에 관계없이 교류과도 상태에서 저항은 인가시간에 무관하게 비절연 테이프의 교류정상 상태에서의 저항과 동일한 반면 교류정상 상태에서 온도상승 및 저항 특성은 절연 유·무에 대단히 큰 영향을 받는다. 즉 절연의 경우 온도상승 및 저항이 비절연과 비교해 대단히 증가함을 알 수 있다.

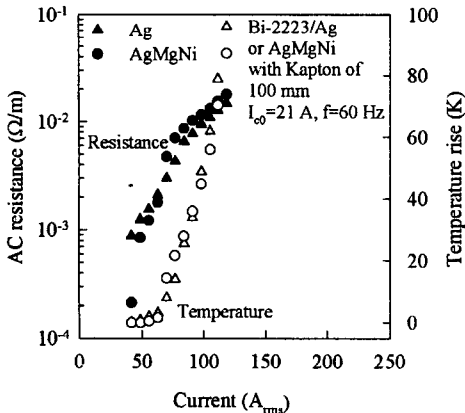


그림 7. 교류저항 및 온도상승 - 전류 관계: 모재 효과.

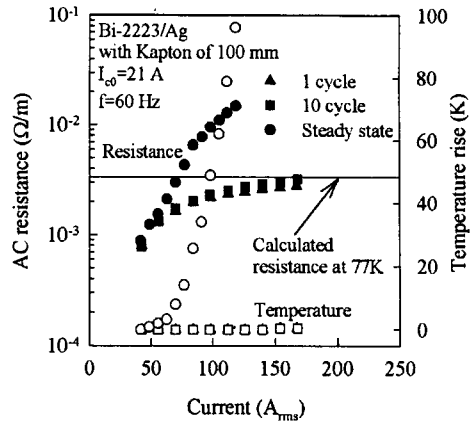


그림 8. 교류저항 및 온도상승 - 전류 관계: 전기절연을 고려한 과도 효과.

#### 4. 결론

- 1) 작은 과임계전류에서는 외부자계의 증가에 따라 저항이 증가하는 반면 큰 과임계전류에서는 외부자계에 무관하게 일정하다.
- 2) 작은 과임계전류에서는 교류저항이 직류저항보다 큰 반면 큰 과임계전류에서는 직·교류 및 주파수에 무관하게 동일하다.
- 3) 절연 길이가 저항 측정용 전압탭의 길이보다 길어지기만 하면 테이프의 온도상승 및 저항은 절연 길이에 무관하게 동일하다. 또한 온도상승이 일어나기 전까지의 비교적 작은 과임계전류에서 절연 테이프의 저항은 비절연 테이프와 동일한 저항 특성을 보이는 반면 큰 과임계전류에서 절연 테이프의 저항은 비절연 테이프보다 매우 크고, 이는 온도상승에 의한 Ag모재의 저항 상승에 기인한다.
- 4) Ag모재 및 AgMgNi모재의 저항률이 상이함에도 불구하고 임계전류만 동일하면 테이프의 온도상승 및 저항은 거의 동일하다.
- 5) 테이프의 교류과도 상태에서 온도상승 및 저항은 과임계전류의 인가시간 및 절연 유·무에 관계없이 비절연 교류정상 상태에서의 특성과 동일한 반면 교류정상 상태에서 온도상승 및 저항은 절연 유·무에 따라 크게 영향을 받는다.

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었다

#### [참고 문헌]

- [1] 박권배, 이성수, 류 경우, 이지광, 차귀수, "Bi-2223테이프의 과임계전류 특성," 2000년도한국초전도·저온공학회 학술대회는논문집, pp. 128-129, 2000.
- [2] Y. Iwasa, E.J. McNiff, R.H. Bellis and K. Sato, "Magnetoresistivity of silver over temperature range 4.2 - 159K," Cryogenics, vol.33, pp. 836-837, 1993.