

고온 초전도모델전력케이블의 사고전류 특성

김창완, 정재훈, 류경우, 차귀수\*  
전남대학교, \*순천향대학교

Fault Current Characteristics of a High-T<sub>c</sub> Model Power Cable

Chang-Wan Kim, Jae-Hoon Jung, Kyung-Woo Ryu, Guee-Soo Cha\*  
Chonnam National Univ., \*Soonchunhyang Univ.

**Abstract** - A Bi-2223 tape has been developed for power applications such as power cables or transformers working at liquid nitrogen temperature. For such applications it is required to understand fault current characteristics of the Bi-2223 tape.

In this paper, we report fault current characteristics using two types of samples, straight sample and pancake coil sample. It was found that the fault current characteristics of the Bi-2223 tape are depend on electrical insulations and fault durations strongly. Also it was shown that the fault current characteristics in the insulated straight sample are similar to those in the pancake sample with a conductor insulation. Finally, it was shown that the pancake sample with a layer insulation has better characteristics than that with a conductor insulation for fault currents.

1. 서 론

고온 초전도케이블은 항상 전력계통과 연계하여 정상 상태에서는 정격전류로 운전되지만, 사고 시에는 수십 배에 이르는 대단히 큰 과도전류가 흐르게 된다. 따라서, 본 연구에서는 비교적 낮은 자장 하에서 운전되는 전력케이블의 상용화를 위하여 장치의 구조를 모의하여 직선형 샘플과 팬케이크형 샘플을 제작하였으며, 각각의 샘플에 대한 임계전류, 전기절연 방식, 사고 지속시간 및 모재 등이 사고전류 특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

2. 실험 샘플 및 방법

고온 초전도모델전력케이블에 사용된 Bi-2223 테이프의 대표적인 모재로서 사용되고 있는 Ag 및 합금에

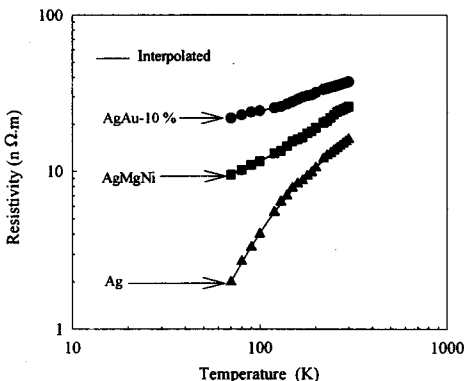


그림 1. 모재의 저항률 - 온도 특성.

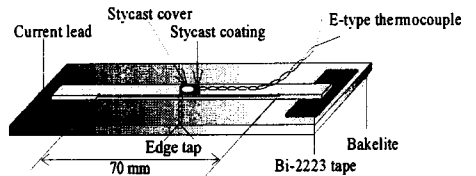
대한 저항률 - 온도 특성을 그림 1에 나타내었다[1].

그림 1로부터, 모재의 저항률은 보통금속의 저항특성처럼 온도가 증가함에 따라 커지며, 순수 Ag 모재의 경우가 합금 모재보다 저항률의 온도 의존성이 더 크다는 것을 알 수 있다.

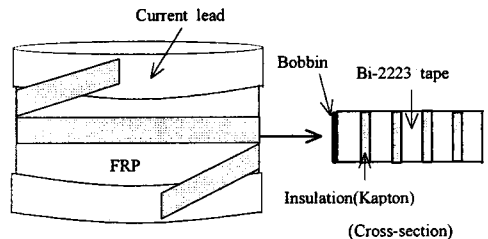
그림 2 a)는 전력케이블의 구조를 모의한 직선형 샘플을 나타낸다. 직선형 샘플은 43 mm(폭)×169 mm(길이)×3 mm(두께)인 베크라이트판 위에 Bi-2223 테이프를 일직선상으로 배치하고, 양단에 설치한 전류리드와 납땜한 구조로 하였다. 또한 그림 2 a)와 동일한 샘플에 0.05 mm(두께)×10 mm(폭)의 Kapton 테이프를 절연하여 전력케이블에서 Bi-2223 테이프가 경험하게 되는 유사한 구조를 갖는 절연된 직선형 샘플을 제작하였다.

그림 2 b)는 변압기의 구조를 모의한 팬케이크형 샘플을 나타낸다. Bi-2223 테이프의 절연방식은 변압기의 권선구조에서 일반적으로 채택되고 있는 도체절연방식과 층간절연방식으로 채택하였고, 절연재료는 그림 2 a)와 동일한 Kapton 테이프를 사용하였다. 변압기 권선구조를 모의한 팬케이크형 샘플은 88 mm(직경)×60 mm(높이)인 원통형 FRP 보빈의 상단과 하단에 각각 부착한 폭 20 mm의 원통형 전류리드에 Bi-2223 테이프를 납땜한 구조이다.

사고전류 특성을 조사하기 위한 실험장치로써 전원은 300 A(20 V, DC ~1 kHz)이며, 실험 샘플에 흐르는 전류는 셉트를 사용하여 측정하였다. 쉉트로 인하여 발생하는 저항 성장을 측정하기 위한 전압 탭은 양단의 유도전압이 작아서 별도의 상채코일이 불필요한 edge 탭을 사용하였다(길이는 70 mm로 동일)(2~3).



a) 직선형 샘플



b) 팬케이크형 샘플

그림 2. 샘플개략도

### 3. 실험 결과 및 검토

#### 3.1 직선형 샘플의 사고전류 특성

##### 3.1.1. 전기절연의 영향

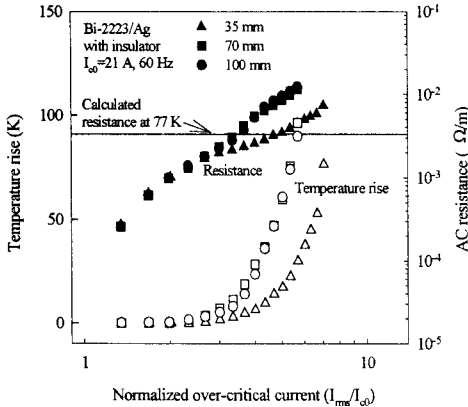


그림 3. 절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.

Bi-2223 테이프를 전력케이블에서 사용하는 경우, Bi-2223 테이프의 양면은 절연물 및 구조재(former)에 의해 액체질소와 직접적으로 접촉하지 못하는 구조적 특성을 고려하여 전기절연이 Bi-2223 테이프의 사고전류 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그림 2 a)의 직선형 샘플에 전압단자간 거리 70 mm는 같게 하고 절연부분의 길이만 35~100 mm로 달리하여, 60 Hz의 정상상태 교류전류를 흘렸을 때 테이프의 저항과 온도 특성을 그림 3에 나타내었다.

그림 3의 결과로부터, 절연 Bi-2223/Ag 테이프의 온도는 큰 과임계전류 영역에서 급격히 증가하고 있다. 그리고 절연길이가 전압 탭 사이의 길이인 70 mm보다 짧은 경우는 절연길이에 따른 영향이 큰 반면, 70 mm보다 긴 경우에는 그 영향이 적어 거의 동일한 온도특성을 보인다. 또한 절연 Bi-2223/Ag 테이프의 저항특성도 77 K에서의 Ag 저항률로부터 계산된 저항 값에 포화되지 않고, 과임계전류가 증가함에 따라서 계속하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 Bi-2223 테이프의 저항은 동일한 과임계전류라고 할지라도 온도상승이 큰 경우가 작은 경우보다 많이 증가하며, 이는 테이프의 온도상승에 따른 Ag 저항률의 증가에 기인하는 것으로 사료된다.

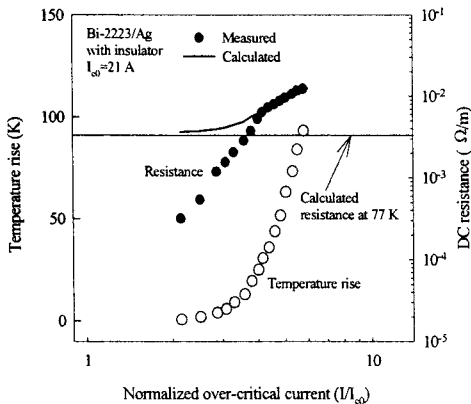


그림 4. 절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.

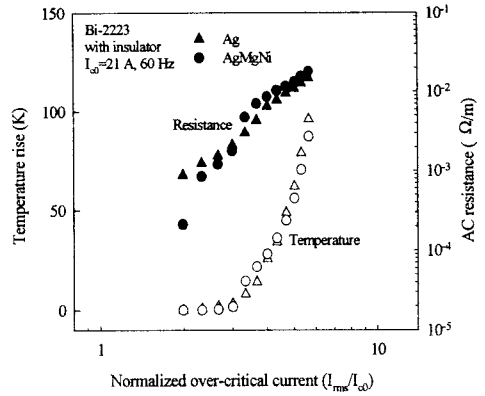


그림 5. 절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.

그림 4는 절연 Bi-2223/Ag 테이프의 저항특성에 미치는 온도의 영향을 정량적으로 검토하기 위하여 조사한 실험결과로서, 절연길이가 100 mm인 직선형 샘플에 정상상태 직류전류를 흘렸을 때 저항 및 온도 특성을 나타낸다. 그림 4에서 가시선과 굵은실선은 77 K에서의 Ag 저항률 즉 2.7 nΩ·m, 각각의 과임계전류에 대하여 측정된 테이프 온도, 그림 1의 Ag의 저항률 - 온도 특성으로부터 계산된 저항을 각각 나타낸다.

그림 4의 결과로부터, 과임계전류가 작아 온도상승이 작은 영역에서 측정된 저항은 계산저항과 차이를 보이고 있으나, 테이프의 온도가 Bi-2223의 임계온도 즉 110 K보다 커지는 영역에서는 이들 두 값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

##### 3.1.2. 모재의 영향

절연 길이가 100 mm이며 모재의 재질이 상이한 절연 Bi-2223 테이프에 60 Hz의 정상상태 교류전류를 흘렸을 때 테이프의 온도 및 저항 특성을 그림 5에 나타낸다.

그림 5의 결과로부터, 모재가 상이한 Bi-2223 테이프의 온도특성이 유사하며, 그림 1에서 보는 바와 같이 AgMgNi 합금의 저항률이 순수 Ag의 저항률보다 대단히 큼에도 불구하고 테이프의 저항특성도 온도 특성과 마찬가지로 서로 유사함을 알 수 있다.

##### 3.1.3. 사고지속 시간의 영향

전력용용 장치에서는 사고전류가 일반적으로 수 사이클 동안 흐르는 대단히 과도적인 현상이다.

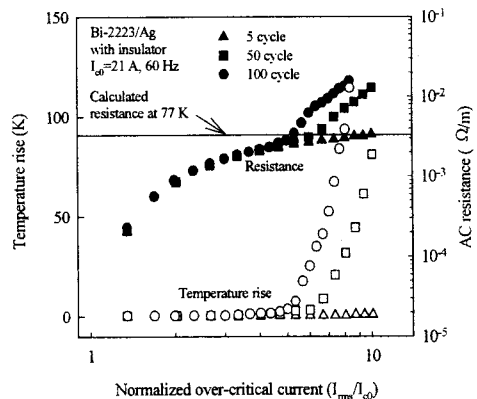


그림 6. 절연 직선형 샘플의 온도상승·저항 - 과임계전류 관계.

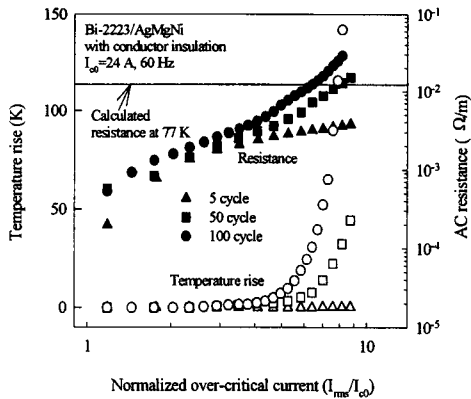


그림 7. 도체 절연 팬케이크형 샘플의 온도 상승 · 저항 - 과임계전류 관계.

하지만 전력계통의 사고 시 사고전류를 끊어주는 차단기의 불안정한 운전 등을 감안하여 사고 지속시간이 Bi-2223 테이프의 사고전류 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

그림 6은 절연길이가 100 mm인 절연 Bi-2223/Ag 테이프에 60 Hz의 과도상태 전류의 지속시간을 5~100 사이클까지 변화시켰을 때 테이프의 저항과 온도 특성을 나타낸다.

그림 6의 결과로부터, 사고전류의 지속시간이 수 사이클인 경우는 절연 Bi-2223/Ag 테이프의 온도상승이 일어나지 않아 단선으로부터 안전함을 알 수 있다. 그러나 지속시간이 증가함에 따라서 절연 Bi-2223/Ag 테이프의 온도가 급격히 증가한다. 절연 Bi-2223/Ag 테이프에서 저항은 테이프의 온도가 상승하지 않은 경우는 과임계전류가 증가하여도 77 K에서의 Ag 저항률로부터 계산된 저항 값에 포화되는 반면, 사고 지속시간이 길어져서 테이프의 온도가 상승하는 경우는 이의 영향 때문에 테이프의 저항도 증가하는 것을 나타낸다.

### 3.2 팬케이크형 샘플의 사고전류 특성

도체절연 팬케이크형 샘플에 과도상태 교류전류를 흘렸을 때 테이프의 저항 및 온도특성을 그림 7에 나타낸다.

그림 7의 결과로부터, 수 사이클의 사고전류에 대한 도체절연 팬케이크형 샘플의 온도상승은 거의 없어 테이프는 단선으로부터 안전한 반면, 사고 지속시간이 길어질수록 온도는 급격히 상승하는 경향을 나타내고 있고, 이는 도체절연 방식의 고유한 냉각특성과 직접 관련이 있음을 암시한다. 또한 저항특성도 온도특성과 마찬가지로 사고 지속시간이 길어질수록 급격히 증가하는 경향을 보인다.

충간 절연 팬케이크형 샘플에 대한 테이프의 저항 및 온도특성을 그림 8에 나타낸다.

그림 8의 결과로부터, 충간절연 팬케이크형 샘플도 도체절연샘플과 마찬가지로 수 사이클의 사고전류에 대해서는 온도상승이 없어 테이프는 단선으로부터 안전함을 알 수 있다. 특히 그림 6의 절연 직선형샘플과 그림 7의 도체절연 팬케이크형 샘플에 대한 실험결과와 비교하여 이들의 저항과 온도보다는 충간절연 샘플에서 테이프의 저항 및 온도가 작은 것을 나타낸다.

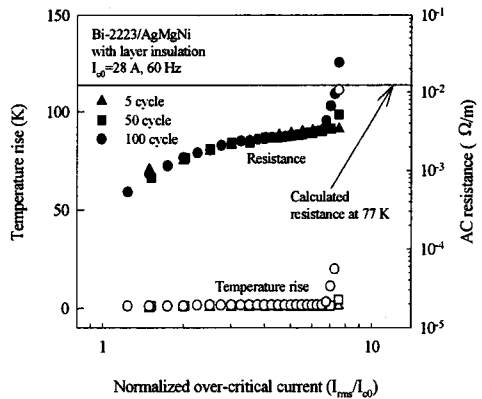


그림 8. 충간 절연 팬케이크형 샘플의 온도 상승 · 저항 - 과임계전류 관계.

따라서, 팬케이크형 샘플 중에서는 충간절연방식이 도체절연방식보다 사고전류에 대해서는 더욱 안전하다고 할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 고온 초전도케이블의 전력응용에 앞서 반드시 선행되어야 하는 사고전류특성에 미치는 전기절연방식 및 사고지속시간의 영향에 대하여 실험적으로 조사하였으며, 주요연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 사고전류 특성은 테이프의 절연방식 및 사고지속시간에는 크게 영향을 받는다.
- 2) 전력케이블의 구조를 모의한 절연 직선형 샘플과 변압기구조를 모의한 도체절연 팬케이크형 샘플의 사고전류 특성은 유사하였다. 이는 Bi-2223 테이프를 절연하는 방식이 서로 유사하기 때문으로 사료된다.
- 3) 팬케이크형 샘플 중에서도 충간절연방식이 도체절연방식보다 사고전류특성이 우수하였다. 이는 충간절연방식의 냉각특성이 도체절연방식보다 우수한 결과에 기인하는 것으로 사료된다.
- 4) Bi-2223 테이프의 온도가 임계온도(110 K)보다 높아지거나 또는 충분히 큰 과임계전류에 의해 완전히 상전도 상태로 전이가 일어나면 모재의 저항률 - 온도 관계로부터 계산된 저항과 측정치는 잘 일치한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Y.Iwasa, E.J. McNiff, R.H. Bellis and K. Sato, "Magnetoresistivity of silver over temperature range 4.2 - 159 K," Cryogenics, vol.33, pp. 836-837, 1993.
- [2] 박권배, 이성수, 류경우, 이지광, 차귀수, "Bi-2223 테이프의 과임계전류 특성," 2000년도한국초전도·저온공학회학술대회논문집, pp. 128-129, 2000.
- [3] 이성수, 박권배, 류경우, 차귀수, "Bi-2223 테이프의 사고전류 특성," 2000년도 대한전기학회학술대회논문집, pp. 804-805, 2000.