

# 전력기기에서 고전류밀도 Bi-2223테이프

류경우\*, 최병주\*\*, 성기철, 류강식  
\*전남대학교, \*\*서라벌대학, \*\*한국전기연구원

## High Current Density Bi-2223 Tapes in Electrotechnical devices

Kyung-Woo Ryu\*, Byoung-Ju Choi\*\*, Ki-Chul Seong\*\*\*, Kang-Sik Ryu\*\*\*  
\*Chonnam National University, \*\*Sorabol College, \*\*\*KERI

kwryu@chonnam.ac.kr

**Abstract** - High current density Bi-2223 tapes have recently become commercially available. There are some important characteristics of the tapes, e.g. critical current, ac loss, fault current characteristics, for an application such as a power cable or a power transformer. They have been investigated experimentally and discussed in this paper.

### 1. 서 론

초전도 도체가 기존 구리 도체를 대신하여 전력 기기에 응용되기 위해서는 높은 운전전류밀도에 의한 소형·경량화뿐만 아니라 손실 저감에 따른 고효율의 장점 또한 갖추어야 한다. 특히 교류 응용 전력 기기에서 초전도 시스템이 구리 도체 시스템보다 고효율의 장점을 가지기 위해서는 도체에서 발생하는 교류손실에 각별히 유의해야 한다.

구리 도체를 사용한 기존 전력 기기의 도체손실은 바로 구리의 저항성 손실인 반면, 초전도 전력 기기의 경우는 교류손실 외에도 냉각에 필요한 냉동기의 효율까지 고려한 유효손실로 평가되어야 한다. 따라서 4.2 K 냉동기를 사용하는 저온 초전도 시스템은 매우 낮은 냉동기 효율 때문에 그 상용화는 교류손실이 전혀 발생하지 않는 직류 시스템에만 국한되어 왔다. 그러나 고온 초전도 시스템의 냉각에 사용되는 77 K 냉동기의 성능은 저온 초전도 시스템의 4.2 K 냉동기보다 약 50배 우수한 결과, 고온 초전도 도체를 사용한 60 Hz 전력 기기의 상용화가 크게 기대되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 최근 상품화에 성공한 약 100 A/mm<sup>2</sup>급의 높은 임계전류밀도를 가진 Bi-2223 테이프를 60 Hz 전력기기에 응용하기 앞서 검토되어야 할 임계전류밀도특성, 교류손실 특성 및 사고전류특성에 대해 평가하였다.

### 2. 실험 방법 및 샘플

Table 1. Specifications of the Bi-2223 tape.

항 목		특 성
테이프	폭 × 두께	4.1 mm × 0.21 m
	조성	Bi-2223/Ag/AgMg (38%/40%/22%)
필라멘트	폭 × 두께	150~300 μm × 7~15 μm
	영역의 폭 × 두께	3.9mm × 0.15mm
	수	55
	트위스트피치	∞

전기적 특성 평가에 사용된 Bi-2223 테이프의 사양을 표 1에 나타내었다. Bi-2223 테이프의 임계전류밀도특성 평가를 위해 샘플이 자석의 공극에서 회전할 수 있는 구조로 하였다[1]. 테이프에 흐르는 교류전류에 의해 발생하는 자기자계손실 특성을 평가하기 위해 전압리드의 접촉 및 배열의 영향을 고려하였으며[2], 또한 테이프에 인가되는 외부자장에 의해 발생하는 자화손실특성을 평가하기 위해 픽업코일의 배열 및 샘플사이드의 영향을 고려하였다[3]. Bi-2223 테이프에 큰 과임계전류가 과도적으로 흐를 때의 사고전류특성 평가를 위해서 계통의 사고전류를 모의한 지속시간 1~10 사이클의 60 Hz 교류전류를 샘플에 인가하였다[4].

### 3. 실험 결과 및 고찰

외부자장에 대한 Bi-2223 테이프의 임계전류 밀도특성을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서, 임계전류밀도는 자기자장에서 측정된 임계전류 ( $I_{c0}=139$  A)를 표 1의 테이프 단면적으로 나눈 밀도를, ●, ▲ 및 ■는 테이프면에 평행한 자장, 45도 경사진 자장 및 수직인 자장을 인가했을 때 측정된 임계전류밀도를 각각 나타낸다.

그림 1로부터, Bi-2223 테이프의 임계전류밀

도는 자장의 크기뿐만 아니라 인가되는 방향에 따라서도 매우 상이한 이방성을 나타내는 것

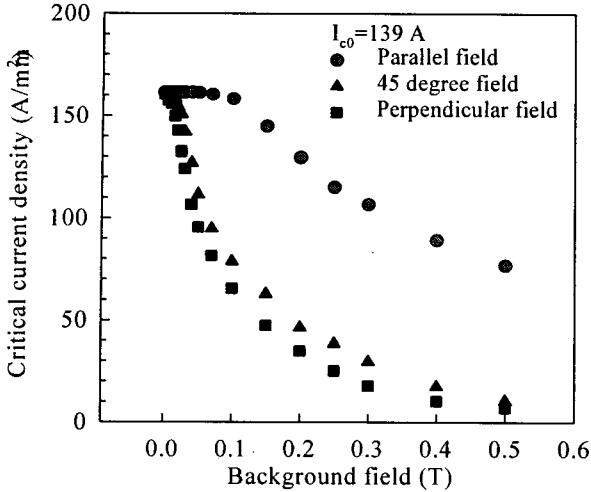


Fig. 1. Critical current density of the Bi-2223 tape vs. background field.

을 볼 수 있다. 테이프 면에 평행한 자장에 대한 임계전류밀도 의존성은 저온초전도선재의 특성과 비슷하게 비교적 적은 반면, 45도 경사자장만 되어도 수직자장인 경우와 거의 동일한 정도의 큰 의존성을 볼 수 있다. 따라서 케이블 및 변압기 등과 같은 전력기기에서는 테이프에 인가되는 외부자장의 방향을 가능한 한 테이프 면에 평행한 방향이 되도록 설계해야 함을 알 수 있다.

77 K에서의 허용교류손실과 Bi-2223 테이프의 교류손실을 비교 평가하기 위하여, 외부자장을 인가하지 않은 상태에서 Bi-2223 테이프에 흘린 전류에 대한 자기자계손실과 전류를 흘리지 않은 상태에서 Bi-2223 테이프 면에 평행한 방향으로 인가한 자장에 대한 자화손실에 대하여 테이프 단위길이 당의 손실로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2 a)에서, ▲는 60 Hz AC 전류에서 측정된 자기자계손실을, 실선은 초전도도체의 단위길이, 단위전류(피크치) 당 허용될 수 있는 손실  $0.5 \text{ mW}/A_p \cdot \text{m}$ 에 통전전류의 크기를 고려한 허용교류손실을 나타낸다. 또한, 그림 2 b)에서, ■는 외부자장의 주파수가 60 Hz일 때 측정된 자화손실특성을 나타낸다.

냉동기 효율을 고려한 초전도 전력기기의 유효교류손실 ( $P_{eff}$ )은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{eff} = \frac{P_{SC}}{COP} \quad (\text{W}/A_p \cdot \text{m}) \quad (1)$$

여기서  $P_{SC}$ 는 저온에서 초전도도체의 단위길이, 단위전류(피크치) 당 발생하는 총 교류손실을,  $COP$ (coefficient of performance)는 냉동기의 성능계수를 나타낸다. 본 논문에서는 고온 초전도도체의 허용교류손실 검토 기준으로서 기존의 구리도체 케이블에서 발생하는 저항성손실, 즉 약  $10 \text{ mW}/A_p \cdot \text{m}$ 으로 하였으며, 냉동기의 성능계수

는 고온 초전도 도체의 운전온도를 77 K로 가정하여 0.05로 하였다. 따라서, 고온 초전도 전력기기가 기존 구리도체 전력기기와 비교하여 효율면에서 장점을 가지기 위해서는 77 K에서 초전도도체의 단위길이, 단위전류 당 총 교류손실( $P_{SC}$ )은 식 (1)로부터  $0.5 \text{ mW}/A_p \cdot \text{m}$ 보다 최소한 작아야하며, 본 논문에서는 이를 고온 초전도도체의 허용교류손실로 하여 검토하였다.

그림 2 a)로부터, 테이프 임계전류의 약 60%(75 A)의 운전전류에서 Bi-2223 테이프의 자기자계손실은 허용교류손실(약  $4 \times 10^{-2} \text{ W}/\text{m}$ )에 육박하는 것을 볼 수 있다. 또한, Bi-2223 테이프를 전력기기에 응용할 경우, 앞의 자기자계손실 외에도 그림 2 b)의 자화손실이 추가적으로 발생하게 된다. 그림 2 b)에 나타난 바와 같이, 케이블(20 mT의 수평자장 인가) 및 변압기(200 mT의 수평 또는 수직자장 인가)에 응용할 경우, 자화손실은 각각 약  $7 \times 10^{-2} \text{ W}/\text{m}$  및  $4 \times 10^{-1} \text{ W}/\text{m}$ 이다. 이와 같은 자화손실은 운전 전류를 75 A로 할 때, 케이블의 경우는 자기자계손실의 1/6, 변압기의 경우는 10배정도 크다.

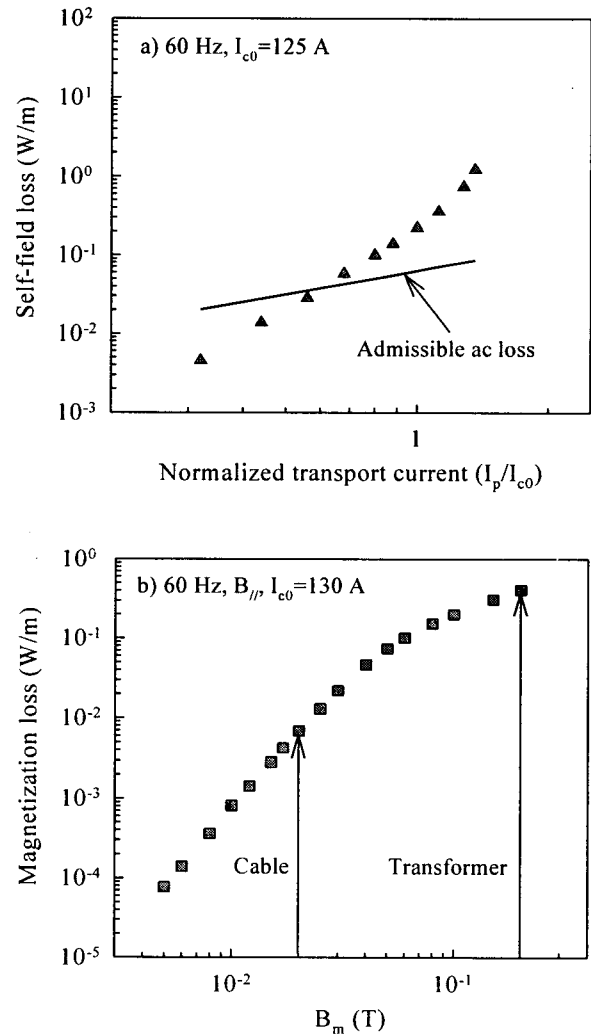


Fig. 2. AC loss of the Bi-2223 tape.

케이블의 경우 총 교류손실은 자기자계손실만을

고려해도 충분하다. 반면, 변압기의 총 교류손실은 이와는 반대로 자화손실만 고려하면 되지만 허용교류손실보다 10배정도 교류손실이 크게되어 기존 구리도체시스템과 효율 경쟁에서 뒤져 상용화에 큰 장애가 됨을 알 수 있다. 따라서, Bi-2223 테이프가 기존시스템에서 구리도체를 대신하기 위해서는 상용화에 앞서 교류손실을 저감할 수 있는 기술개발이 선행되어야 한다.

비절연 테이프에 흘린 과임계전류에 대한 Bi-2223 테이프의 최대온도상승·저항특성을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서, ●, ▲, ■ 및 ◆는 과임계전류의 지속시간을 각각 1, 3, 5 및 10 사이클로 하였을 때 측정된 테이프의 최대온도상승 및 저항을 각각 나타낸다.

그림 3에서 알 수 있는 바와 같이, 지속시간이 1사이클인 경우는 테이프 임계전류( $I_{c0}=126$  A)의 9배에 이르는 큰 과임계전류가 흘러도 Bi-2223 테이프의 최대온도상승은 거의 없다. 그러나 큰 과임계전류 영역에서 지속시간이 3, 5 및 10사이클로 길어짐에 따라서 최대온도상승은 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 10사이클의 과임계전류가 테이프에 흐르는 경우는 테이프 임계전류의 약 8배정도의 과임계전류에서 테이프의 최대온도상승이 급격히 증가하여, 결국에는 Bi-2223 테이프가 손상(이하 swelling 현상)되는 것을 볼 수 있었다. 이와 같은 결과는 임계전류밀도가 낮은 약  $20 \text{ A/mm}^2$ 급의 Bi-2223 테이프에서는 볼 수 없었던 현상이다[4]. 그리고 이와 같은 swelling 현상은 그림 1과 같이  $100 \text{ A/mm}^2$ 급의 임계전류밀도특성을 지닌 Bi-2223 테이프를 케이블 또는 변압기 등과 같은 시스템에 사용할 경우, 정격전류보다 수십 배 큰 사고전류가 단 1회만 흘러도 Bi-2223 테이프는 손상될 수 있음을 의미한다.

한편, 그림 3에서 보는 바와 같이 수 사이클

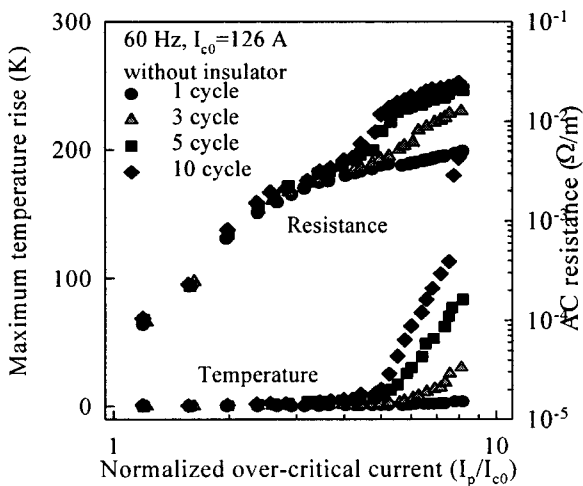


Fig. 3. Maximum temperature rise and resistance of the Bi-2223 tape vs. normalized over-critical current.

의 대단히 짧은 시간 동안 지속되는 순시 과전류임에도 불구하고 과임계전류가 임계전류보다 약 5배정도만 커져도 Bi-2223 테이프의 단위길이 당 저항이 약  $1 \times 10^{-2} \Omega/\text{m}$ 으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 저항특성을 가진 Bi-2223 테이프를 전력기기에 응용하게 되면 전력계통에서 사고전류를 제한하는데 크게 기여할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Bi-2223테이프의 임계전류밀도는 자장의 크기와 인가방향에 따라 매우 상이한 특성을 나타낸다. 따라서, 테이프면과 평행한 방향으로 외부자장이 작용하도록 설계되어야 한다.
- 2) 외부자장이 낮은 케이블의 교류손실은 자기자계손실이 지배적이며, 그 크기는 허용교류손실레벨로 결코 무시할 수 없다. 그러나 변압기는 자화손실이 자기자계손실보다 수십 배 크며, 최근 상용화에 성공한  $100 \text{ A/mm}^2$ 급의 Bi-2223 테이프로는 효율면에서 기존 변압기 시스템과 경쟁하는 것은 불가능하며, 교류손실 저감기술개발이 선행되어야 한다.
- 3) Bi-2223 테이프는 수 사이클 동안 지속되는 임계전류의 8배정도의 과도전류에 대해서도 손상(swelling 현상)된다. 이는 임계전류밀도특성이  $100 \text{ A/mm}^2$ 급보다 대단히 우수한 테이프가 개발된다 할지라도, 사고전류의 크기 및 지속시간에 따라서 테이프의 운전전류밀도는 제한 받게된다는 것을 의미한다.

본 연구는 21세기프론티어연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 류경우, 김창완, 차귀수, "교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 통전손실 특성," 전기학회논문지, 50B권 6호, pp. 290-294, 2001.
- [2] 류경우, 박권배, 차귀수, 최경달, 이지광, 한송엽 "장척 Bi-2223/AgMgNi테이프의 자기자계손실 특성," 전기학회논문지, 49B권 4호, pp. 240-244, 2000.
- [3] 류경우, 한형주, 최병주, 나완수, 주진호, "수평자장에 대한 Bi-2223테이프의 자화손실특성," 전기학회논문지, 50B권 4호, pp. 158-162, 2001.
- [4] 류경우, 최병주, 차귀수, "Bi-2223 테이프의 사고전류 특성," 초전도·저온공학학회논문지, 3권 1호, pp. 29-33, 2001.