

# 실용 고온 초전도테이프의 교류손실 특성

김현준\*, 허대행\*, 조영호\*, 류경우\*, 최병주\*\*  
\*전남대학교, \*\*서라벌대학

## AC Loss Characteristics of Technical High-T<sub>c</sub> Superconducting Tapes

Hyun-Jun Kim\*, Dae-Haing Huh\*, Young-Ho Jo\*, Kyung-Woo Ryu\*, Byung-Ju Choi\*\*  
\*Chonnam National University, \*\*Sorabol College

hjoonk77@moiza.chonnam.ac.kr

**Abstract** - The magnetization and self-field losses of the four technical high-T<sub>c</sub> superconducting tapes have been investigated experimentally. The results show that the magnetization losses for parallel or perpendicular fields can be well predicted from the slab model or the strip model for a filamentary region. However the magnetization losses for longitudinal fields can be rather predicted by the slab model for a decoupled filament. The self-field losses are well explained by the Norris ellipse model.

### 1. 서 론

제2종 초전도체(실용 초전도체)에 자장이 인가되면 자속이 초전도체 내부로 침투하게 된다. 특히 교류자장이 인가되는 경우는 초전도체의 내부자장도 시간에 따라 변하게 되어 전장이 유도됨( $\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$ )과 동시에 Bean이론에 의하면 초전도체의 내부에는 임계전류밀도( $J_c$ )의 크기를 갖는 차폐전류가 흘러  $\vec{E} \cdot \vec{J}_c$ 와 같은 손실이 발생하게 된다. 초전도체의 이와 같은 손실은 기존 전력기기의 필수 소재인 철심에서처럼 비가역적인 자기적 특성으로 인한 히스테리시스 손실로서 앞서 언급한 외부 교류자장에 의해서 뿐만 아니라 초전도체에 흐르는 교류전류(이하 통전전류)에 의해서도 발생된다. 또한 외부 교류자장에 의한 손실을 자화손실, 통전전류 만에 의한 손실을 자기자계손실, 외부 교류자장 아래서 통전전류에 의한 손실을 통전손실이라 한다.

뿐만 아니라 이와 같은 초전도체의 손실을 저감시키기 위하여 적용된 초전도체의 극세필라멘트화는 구조적 측면에서 필라멘트들을 상전도체인 모재와 복합화시킬 수밖에 없고, 이와 같은 복합 초전도도체에 교류자장이 인가되면 상전도체에서는 와전류에 의한 와류손실이 발생하게 되며, 또한 와류손실과는 다른 형태 즉 초전도필라멘트와 상전도체로 구성되는 전기회로에 흐르는 결합전류에 의해 결합손실이 추가적으로 발생하

게 된다. 상전도체에서 발생하는 이들 와류손실 및 결합손실과 초전도체에서 발생하는 히스테리시스손실을 총칭하여 초전도도체의 교류손실이라 한다.

현재로서 전력기기 응용이 가능한 유일한 실용 고온초전도도체인 Bi-2223테이프의 경우, 필라멘트가 외형적으로는 분리되어 있으나 전자기적으로 서로 결합된 결과, 상전도체에서 발생하는 와류손실 및 결합손실보다 초전도체에서 발생하는 히스테리시스손실이 지배적이다. 따라서 본 논문에서는 서로 다른 메이커에서 제작되고 있는 Bi-2223테이프들(이하 tape A, B, C, D)에 대하여 자화손실 및 자기자계손실을 실험적으로 조사하여, 이들 결과를 비교·검토를 하였다.

### 2. 교류손실 이론

#### 2.1 자화손실

대표적인 실용 고온초전도도체인 Bi-2223테이프에 외부 시변 자장이 인가될 때 발생하는 자화손실은 Bean이론(초전도체 내부에 흐르는 차폐전류밀도의 크기는 반드시 임계전류밀도 또는 0)으로 비교적 잘 설명되고 있으며, 이는 또한 외부 자장의 인가 방향에 매우 의존하는 특징을 지닌다. 특히 초전도체의 형상이 비교적 간단한 경우에 한해서는 자화손실을 해석적으로 간단히 계산할 수 있다.

먼저 인가 자장(정현파)의 방향이 무한히 넓은 평판형 초전도체(이하 slab)의 면에 평행한 경우, slab에서 발생하는 자화손실( $Q$  J/m<sup>3</sup>·cycle)은 식(1)(이하 slab모델)과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$Q = \frac{2B_m^3}{3\mu_0 B_p} ; B_p > B_m$$
$$Q = \frac{2B_p B_m}{\mu_0} \left(1 - \frac{2B_p}{3B_m}\right) ; B_p < B_m$$
$$B_p = \mu_0 J_c a \quad (T) \quad (1)$$

여기서  $B_m$ 은 외부자장의 진폭을,  $\mu_0$ 는자유공간의 투자율을,  $B_p$ 는 완전침투자장을,  $J_c$ 는 임계전

류밀도를, 2a는 slab의 두께를 각각 나타낸다.

또한 인가 자장(정현파)의 방향이 얇은 띠형 초전도체(이하 strip)의 폭에 수직인 경우, strip에서 발생하는 자화손실( $Q J/m^3 \cdot cycle$ )은 식(2)(이하 strip모델)과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$Q = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \frac{\pi w}{2\beta d} \left( \frac{2}{\beta} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta \right)$$

$$\beta = \frac{B_m}{B_{ch}}; \quad B_{ch} = \frac{\mu_0 J_c d}{\pi} \quad (2)$$

여기서  $w$ 는 strip의 폭을,  $d$ 는 strip의 두께를 각각 나타내며,  $B_{ch}$ 는 특성자장(characteristic field)을, 나머지 문자에 대한 정의는 식(1)에서와 동일하다.

## 2.2 자기자계손실

외부 자장을 인가하지 않은 상태 즉 초전도도체에 통전전류(정현파)만을 흘린 상태에서 발생하는 손실인 자기자계손실도 앞 절의 자화손실과 마찬가지로 초전도체의 형상이 비교적 간단한 경우에 한해서는 해석적으로 간단히 계산할 수 있으며, 초전도체의 단면 형상이 타원형인 경우 자기자계손실( $Q_{self} J/m \cdot cycle$ )은 식(3)(이하 Norris ellipse모델)과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$Q_{self} = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left( \left(1 - \frac{I_p}{I_c}\right) \ln\left(1 - \frac{I_p}{I_c}\right) + \frac{(2 - I_p/I_c)I_p}{2I_c} \right) \quad (3)$$

여기서  $\mu_0$ 는 진공중의 투자율을,  $I_c$ 는 자기자계 아래서 초전도도체의 임계전류를,  $I_p$ 는 정현파 통전전류의 피크치를 각각 나타낸다.

## 3. 실험 방법

본 연구에 사용된 Bi-2223테이프(non-twisted)들의 사양을 표1에 나타내었다.

먼저 표1의 실용 Bi-2223테이프들에 대한 자화손실 평가를 위해서는 참고문헌[1]의 실험장치를 이용하였고, 실험 샘플의 길이는 참고문헌[3]에 근거하여 50 mm로 절단한 후 이에 픽업코일을 배열하여 자화(단위체적 당 자기쌍극자모멘트:  $M A/m$ )를 측정하였으며, 측정된 자화로부터 초전도도체에서 발생하는 자화손실( $Q J/m^3 \cdot cycle$ )은 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \oint \mu_0 M dH \quad (4)$$

여기서  $\mu_0$ 는 진공중의 투자율을,  $H$ 는 외부 인가 자장(정현파)의 세기를 각각 나타낸다.

Table 1. Specifications of the four technical Bi-2223 tapes

종 류	사 이 즈
Tape A	tape: 3.9 mm×0.30 mm
	core: 3.7 mm×0.25 mm
Tape B	tape: 4.1 mm×0.21 mm
	core: 3.9 mm×0.15 mm
Tape C	tape: 3.1 mm×0.17 mm
	core: 3.0 mm×0.11 mm
Tape D	tape: 3.0 mm×0.15 mm
	core: 2.7 mm×0.13 mm

특히 자화의 측정 시, 외부자장(H)에 의해 유도되는 불필요한 전압은 상쇄코일로 충분히 상쇄시켰다.

다음으로 자기자계손실 평가를 위해서는 참고문헌[4]의 실험장치를 이용하였고, 실험 샘플의 길이는 측정 결과에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 1500 mm로 절단한 후 이에 전압리드(edge-rectangle형)를 부착하여 교류 통전전류에 의한 손실전압( $v$ )를 측정하였으며, 측정된 손실전압으로부터 초전도도체에서 발생하는 자기자계손실( $Q_{self} J/m \cdot cycle$ )은 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

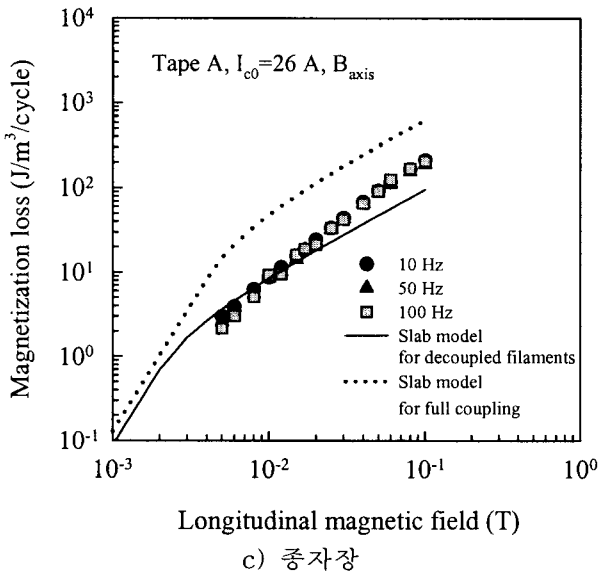
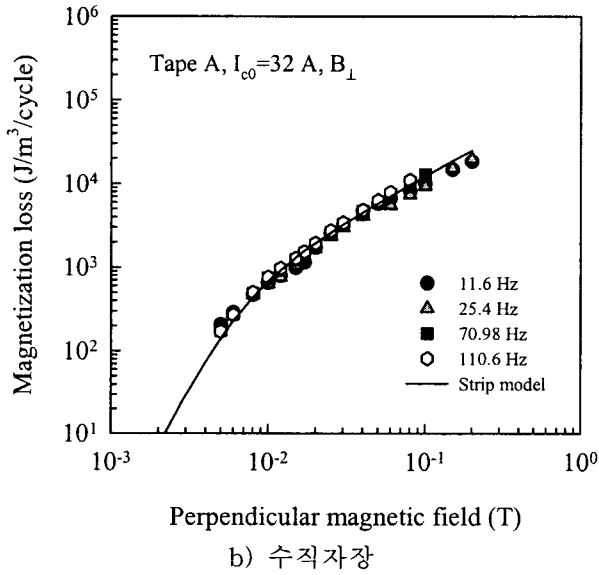
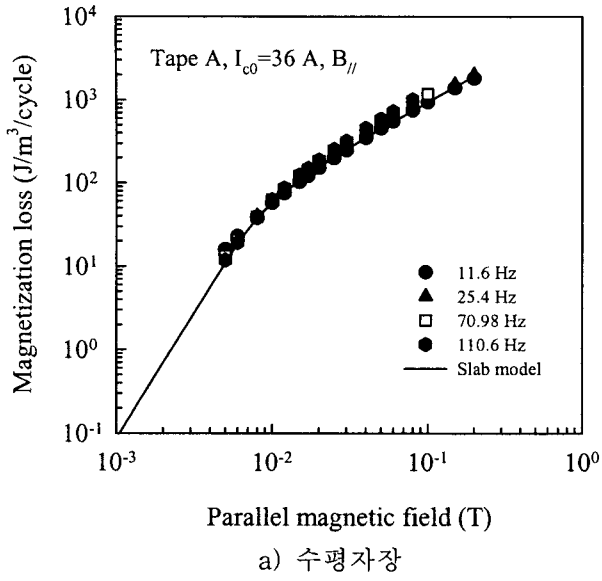
$$Q_{self} = \oint i v d t / l \quad (5)$$

여기서  $i$ 는 통전전류(정현파)를,  $l$ 은 전압리드 양단 사이의 길이를 각각 나타낸다. 또한 자화손실의 측정 시와 마찬가지로 통전전류와 90도 위상이 상이한 불필요한 전압은 상쇄코일로 충분히 상쇄시켰으며, 본 연구에서 모든 실험은 77 K(액체질소)에서 하였다.

## 4. 실험 결과 및 검토

그림 1에는 통전전류를 흘리지 않은 상태에서 외부자장의 크기, 주파수 및 방향을 달리했을 때, tape A에 대하여 측정된 자화손실을 나타내었다. 그림 1에서 a)는 외부자장이 Bi-2223테이프의 폭에 평행하게 인가된 경우(이하 수평자장)이고, b)는 테이프 폭에 수직으로 인가된 경우(이하 수직자장)이며, c)는 외부자장이 테이프의 길이방향으로 평행하게 인가된 경우(이하 종자장) 측정된 자화손실을 각각 나타낸다.

그림 1로부터 측정된 모든 자화손실은 먼저 외부자장의 주파수에는 의존하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 수평 및 수직 자장에 대하여 측정된 자화손실은 표1에서 나타낸 바와 같이 Bi-2223테이프의 코어(초전도 필라멘트들이 배열되어 있는 영역으로 일명 필라멘트 영역이라고도 함)를 하나의 초전도체로 가정한 slab모델 및



strip모델로부터 계산된 자화손실과 비교적 잘 일치하는 반면 종자장에 대하여 측정된 자화손실은 테이프의 코어를 하나의 초전도체로 가정한 slab 모델로부터 계산된 결과(점선)보다는 필라멘트 하나 하나를 초전도체로 가정한 slab 모델로부터 계산된 결과(실선)와 더욱 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 실용 Bi-2223테이프들(non-twisted)은 수평 및 수직 자장에 대해서는 필라멘트 사이가 전자기적으로 결합되어 있음을 의미하고, 종자장에 대해서는 필라멘트 사이가 전자기적으로 분리되어 있음을 의미한다.

그림 2에는 외부자장의 방향이 수평 및 수직인 경우, 표1의 실용 Bi-2223테이프에 대하여 측정된 자화손실을 나타내었다.

그림 2로부터 외부자장의 방향에 관계없이 tape A에 대해 측정된 자화손실은 tape D와 유사한 반면, tape B의 자화손실은 tape C와 유사한 것을 볼 수 있다.

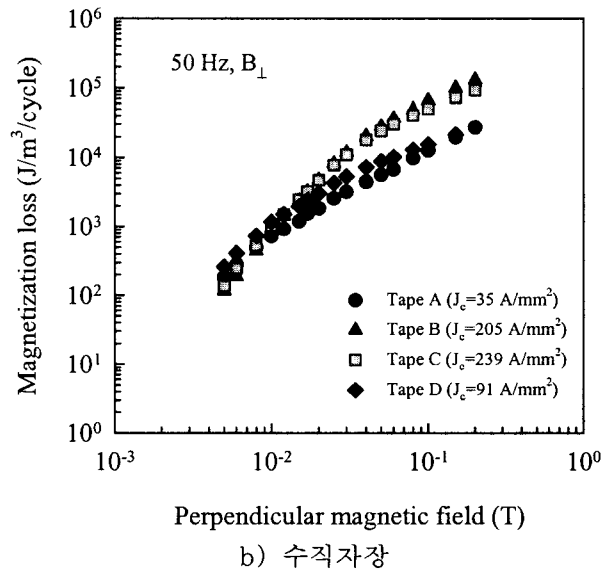
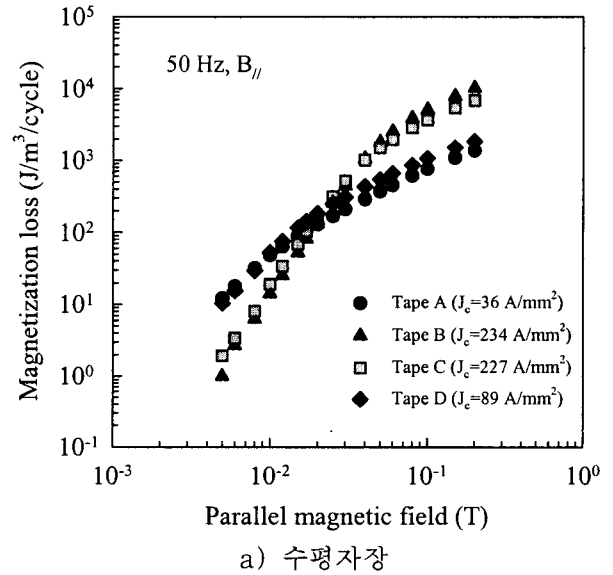


Fig. 1. Frequency dependence of the magnetization losses in the tape A.

Fig. 2. Magnetization losses of the four technical high- $T_c$  superconducting tapes.

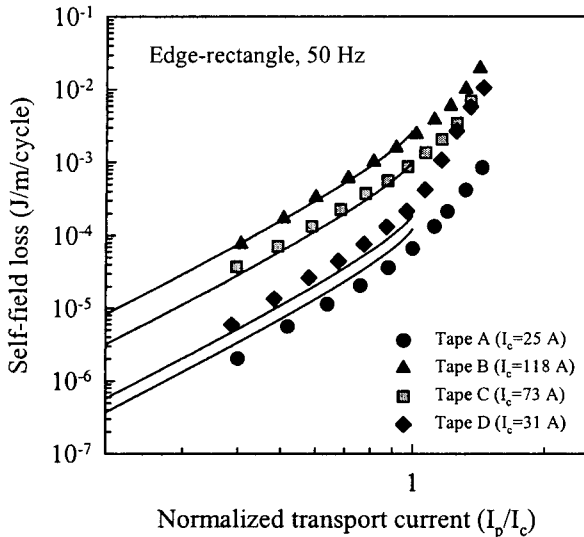


Fig. 3. Self-field losses of the four technical high- $T_c$  superconducting tapes.

이는 식(1) 및 식(2)에서 알 수 있는 바와 같이 Bi-2223테이프의 임계전류밀도 및 사이즈의 차이에 기인한다.

그림 3에는 표1의 실용 Bi-2223테이프에 대하여 측정된 자기자계손실을 나타내었다. 그림 3에서 실선은 각각의 Bi-2223테이프에 대하여 식(3)으로부터 계산된 자기자계손실을 나타낸다.

그림 3으로부터 모든 테이프에 대하여 측정된 자기자계손실은 식(3)의 Norris ellipse모델로부터 계산된 자기자계손실과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

이상의 실용 Bi-2223테이프에 대하여 측정된 자화손실 및 자기자계손실을 요약하면 다음과 같다. 모든 실용 Bi-2223테이프(non-twisted)에 대하여:

- 1) 수평 및 수직 자장에 대하여 측정된 자화손실은 코아를 하나의 초전도체로 가정한 slab모델 및 strip모델로부터 계산된 자화손실과 비교적 잘 일치하는 반면 종자장에 대하여 측정된 자화손실은 필라멘트를 하나의 초전도체로 가정한 slab모델로부터 계산된 자화손실과 비교적 잘 일치하였다.
- 2) 측정된 자기자계손실은 Norris ellipse모델로부터 계산된 자기자계손실과 비교적 잘 일치하였다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 류경우, 김현준, “자장방향이 적층 Bi-2223 도체의 자화손실에 미치는 영향”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 1호, pp.77-82, 2003.
- [2] K. Ryu, K.B. Park, G. Cha, “Effect of the neighboring tape’s ac currents on transport current loss of a Bi-2223 tape,” IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp.2220-2223, 2001.
- [3] Masahiro Sugimoto, Akio Kimura, Masanao Mimura Yasuzo Tanaka, Hideo Ishii, Schoichi Honjo, Yoshihiro Iwata, “Electromagnetic Interfilament Coupling of Silver-sheathed Bi-2223 Multifilamentary Tapes in Transverse AC Magnetic Fields,” *Physica C* 279, pp. 225-232, 1997.
- [4] 류경우, 박권배, 차귀수, 최경달, 이지광, 한송엽, “장척 Bi-2223/AgMgNi테이프의 자기자계손실 특성”, 전기학회논문지, 49B권, 4호, pp.240-245, 2000.