

고온 초전도도체의 교류손실 측정 결과

류경우, 김창완, 한형주  
전남대학교

Test Results of AC Losses in a High Tc Superconductor

Kyung-Woo Ryu, Chang-Wan Kim, Hyung-Ju Han  
Chonnam National Univ.

**Abstract** - 현 단계에서도 임계전류밀도가 약 100 A/mm<sup>2</sup>로 충분히 높아 전력분야 응용이 기대되는 Bi-2223테이프에 대한 교류손실을 초전도 전력기기의 실제 상황을 고려하여 측정하였다. 중요한 평가 결과로서는 먼저 통전손실 특성은 외부 교류자장의 세기뿐만 아니라 방향에 따라서도 매우 상이하였으며, 비교적 외부자장이 큰 경우는 동저항손실 메카니즘이, 작은 경우는 그 외의 또 다른 손실 메카니즘이 지배적이었다. 또한 수평자장에 대한 자화손실 특성은 코아 모델로부터 계산된 손실과 비교적 잘 일치하였다. 따라서 자화손실은 히스테리시스손실 메카니즘이 지배적이라 할 수 있으며, 측정된 자화손실은 저온 초전도체에서는 볼 수 없었던 약한 주파수 의존성을 보였을 뿐만 아니라 외부자장의 세기에 따라서도 주파수 의존 특성이 상이하였다.

1. 서 론

교류 초전도시스템에 응용되는 초전도선재의 교류손실에는 초전도필라멘트 내의 자속운동에 기인하는 히스테리시스손실 및 동저항손실(dynamic resistance loss)과 초전도필라멘트 사이의 모재를 통해 흐르는 전류에 의한 결합손실이 그 주된 손실이며, 초전도선재에 흐르는 교류전류에 의한 손실을 통전손실, 외부 교류자장에 의한 손실을 자화손실이라 한다. 이와 같은 손실은 교류 초전도시스템의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 손실을 냉각시키기 위해 본질적으로 효율이 낮은 저온냉동기의 도입을 초래하여 초전도시스템의 경제성을 떨어뜨리는 주요한 요인으로 작용한다. 따라서 초전도시스템 응용에 앞서 먼저 운전 온도가 높아 효율이 비교적 좋은 저온질소냉동기의 사용이 가능한 장점을 지닌 고온 초전도체에 대한 손실 연구를 통해 상기의 손실을 중 응용에서 중요한 손실이 무엇인지를 밝혀야하며, 또한 시스템의 효율 및 경제성 향상을 위한 이들 손실의 저감법 등에 대한 연구가 선행되어야한다. 따라서 본 연구에서는 실제 응용 상황을 고려하여 현 단계에서도 임계전류밀도가 약 100 A/mm<sup>2</sup>로 충분히 높아 전력분야 응용이 기대되는 Bi-2223테이프의 통전손실 및 자화손실을 평가하였으며, 측정된 교류손실에 대한 이론적 검토를 통해 이들을 저감할 수 있는 대책에 대하여 논하였다.

2. 실험 결과

2.1 통전손실

그림 1에는 테이프 폭에 수직한 방향으로 외부자장이 인가된 경우 측정된 직류 전압 - 전류 특성을 나타내었다. 그림 1의 결과에서 보는 바와 같이 외부 교류자장이 커짐에 따라서 직류 전압도 급격하게 증가하며 외부자장이 0인 경우 전압 - 전류 특성곡선의 형상과 전혀 상이한 경향을 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 동일한 세기의 외부자장(예를 들면 B=50 mT)에 대해서라 할지라도 교류자장의 경우가 직류에 비해 수십 배 정도까지 직류 전압이 큰 것을 볼 수 있다. 반면 교류자장이 인가된 경우

직류 전압 - 전류 특성곡선은 달리 직류자장(B=50 mT)이 인가된 경우는 외부자장이 0인 경우 전압 - 전류 특성곡선을 좌측으로 평행 이동시킨 곡선과 유사함을 볼 수 있다. 이는 외부 직류 자장에 의하여 Bi-2223테이프의 임계전류가 감소한 결과로 사려된다.

그림 2에는 그림 1에서와 동일한 외부자장을 인가한 상태에서 측정된 통전손실을 나타내었다. 그림 2의 결과로부터 Bi-2223테이프의 통전손실은 그림 1의 직류 전압과 마찬가지로 외부 교류자장이 증가함에 따라 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 동저항손실(dynamic resistance loss)이라 불리는 손실기구(loss mechanism)에 의하여 자주 검토되며, 외부 교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 단위길이 및 1 주기 당 동저항손실(Q<sub>dyn</sub>)은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$Q_{dyn}(B) = \int_0^T [E_B(i) - E_{B=0}(i)] i dt \quad (1)$$

여기서 B는 외부 교류자장을, T는 통전전류의 주기를, E<sub>B</sub> 및 E<sub>B=0</sub>는 임의의 교류자장 B 및 B=0인 경우 단위 길이 당 Bi-2223테이프의 직류 전압을, 그리고 i는 통전전류를 각각 나타낸다. 그림 2에는 식(1) 및 그림 1의 동일한 외부 교류자장 아래서 측정된 Bi-2223테이프의 직류 전압 - 전류 특성으로부터 계산된 Bi-2223테이프의 동저항손실을 실선으로 나타내었다. 그림 2의 결과로부터 보는 바와 같이 약 15 mT 이상의 외부자장에 대해서는 측정된 통전손실과 계산된 동저항손실이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있고, 이는 비교적 큰 외부자장에 대한 Bi-2223테이프의 통전손실은 동저항손실기구가 주된 기구임을 암시하고 있다. 반면 15 mT이하의 비교적 작은 외부자장(예를 들면 6 mT)에 대해서는 측정된 통전손실이 계산된 동저항손실보다 대단히 큰 것을 볼 수 있고, 이는 작은 외부자장 영역에서의 Bi-2223테이프의 통전손실은 동저항손실 이외의 또 다른 손실기구가 주된 것을 암시하고 있다.

그림 3에는 외부 교류자장의 방향이 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과를 나타내었다. 그림 3의 결과로부터 보는 바와 같이 테이프 폭에 수평한 외부자장에 대한 통전손실이 가장 작은 것을 알 수 있고, 테이프 폭과 외부자장이 이루는 각이 45 도 또는 90 도로 증가함에 따라서 통전손실도 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 이는 Bi-2223테이프를 초전도 전력응용에 이용하는 경우 외부 교류자장에 의한 통전손실의 급격한 증가를 방지하기 위해서는 가능한 한 외부자장 방향을 테이프 폭에 평행한 방향으로 인가되도록 초전도 전력기기를 설계·제작해야함을 암시하고 있다.

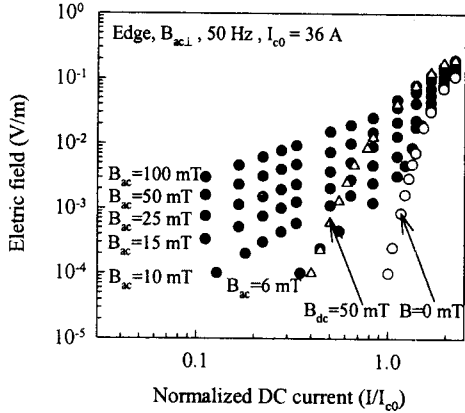


그림 1 수직자장에 대한 직류 전압 - 전류 특성  
Fig.1. DC voltage-current characteristics for several perpendicular fields.

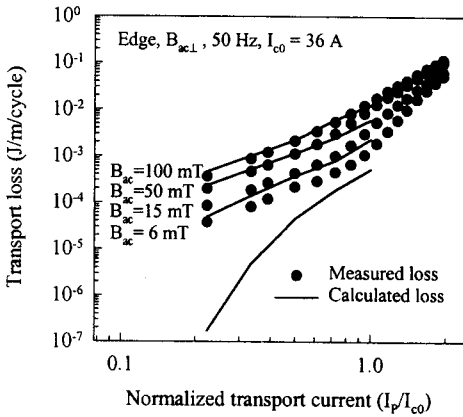


그림 2 수직자장에 대한 통전손실  
Fig.2. Transport losses for various perpendicular fields.

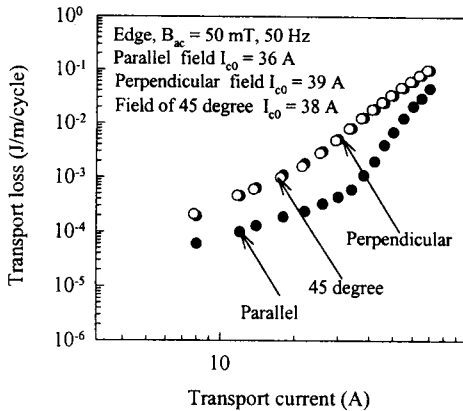


그림 3 자장 방향에 대한 통전손실  
Fig.3. Transport losses for different field orientations.

## 2.2 자화손실

그림 4에는 50Hz의 테이프 폭에 평행한 자장에 대하여 측정된 Bi-2223테이프의 자화손실 - 외부자장 사이의 관계를 나타내었다, 그림 4에서 단위 체적은 초전도 필라멘트가 존재하는 체적 즉 코아 체적으로 하였다. 또한 단위체적 당의 초전도체에서 발생하는 히스테리시스 손실은 slab형과 같은 간단한 형상의 초전도체에 대해서는 임계상태모델로부터 쉽게 계산될 수 있으며, 그 결과를 식(2)에 나타내었다[2].

$$Q_H = \frac{2B_m^3}{3\mu_0 B_p} \quad (\text{J/m}^3/\text{cycle}) \quad (2)$$

$$Q_H = \frac{2B_p B_m}{\mu_0} \left(1 - \frac{2B_p}{3B_m}\right) \quad (\text{J/m}^3/\text{cycle})$$

$$B_p = \mu_0 J_c a \quad (\text{T})$$

여기서  $B_m$ 은 외부자장의 피크치,  $\mu_0$ 는 진공 중의 투자율,  $B_p$ 는 완전침투자장,  $J_c$ 는 임계전류밀도,  $2a$ 는 slab의 두께를 각각 나타낸다. 그림 4에는 식(2)으로부터 계산된 자화손실을 실선, 파선 및 일점 파선으로 각각 나타내었으며, 실선의 경우는 필라멘트영역 전체를 하나의 초전도slab으로(이하 코아 모델이라 함), 파선 및 일점 파선의 경우는 필라멘트 두께의 이산도를 고려하여 초전도slab의 두께를  $60 \mu\text{m}$  및  $20 \mu\text{m}$ 로(이하 필라멘트 모델이라 함) 하여 계산한 결과를 각각 나타내었다. 또한 상기의 이론 계산에서 임계전류밀도는 외부자장이 테이프 축에 수직인 방향으로 인가되기 때문에 외부자장에 의한 차폐전류 즉 임계전류밀도의 방향은 일반적으로 테이프의 임계전류를 측정할 때 이용되는 자기자장에서 측정된 테이프 축 방향의 임계전류(자기자장에서 39 A)를 코아의 면적으로 나눈 임계전류밀도로 하였다.

그림 4의 결과로부터 완전침투자장보다 작은 외부자장에 대해서는 측정치와 계산치 사이의 약간의 차이는 있지만 전 영역에 걸쳐 코아 모델 및 초전도slab 두께를  $60 \mu\text{m}$ 로 한 필라멘트 모델로부터 계산된 자화손실과 측정치는 비교적 잘 일치하는 반면 초전도slab 두께를  $20 \mu\text{m}$ 로 한 필라멘트 모델로부터 계산된 자화손실은 측정치와 상당히 상이함을 알 수 있고, 이와 동일한 결과는 다수의 다른 연구결과에서도 볼 수 있다.

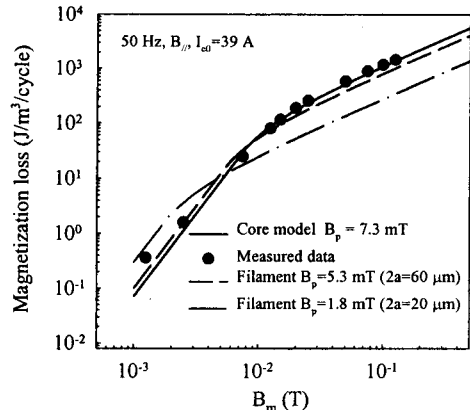


그림 4 자화손실의 외부자장 의존성.  
Fig.4. Field dependence of the magnetization losses at 50 Hz.

그림 5에는 상이한 주파수(10 Hz - 250 Hz)의 수평자장에 대하여 측정된 Bi-2223테이프의 자화손실 - 외부

### 3. 결 론

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 외부 교류자장 아래서 Bi-2223테이프의 통전손실은 외부자장의 세기가 커짐에 따라 대단히 증가하며, 비교적 고 자장인 경우는 동저항손실이 지배적인 손실기구인 반면 저 자장인 경우는 또 다른 손실 기구가 존재하는 것으로 사려된다.
- 2) 외부 교류자장 아래서 Bi-2223테이프의 통전손실은 외부자장의 방향에도 대단히 영향을 받으며, 테이프 폭에 수직한 자장인 경우 통전손실은 수평한 자장의 경우보다 약 10 배정도 큰 반면 45 도 경 사자장의 경우와는 거의 동일하였다.
- 3) 측정된 자화손실은 코아 모델로부터 계산된 손실과 비교적 잘 일치하였으며, 이는 측정된 자화손실은 히스테리시스손실이 지배적임을 의미한다.
- 4) 측정된 자화손실은 주파수에 의존하며, 이와 같은 특성은 기존의 임계상태모델로는 설명이 불가능하다. 따라서 저온 초전도체의 전압 - 전류 특성과 매우 상이한 고온 초전도체의 경우에 있어서는 새로운 모델(n-value 모델 또는 일반화된 임계상태 모델 등)이 제안되고있다.

자장 사이의 관계를 그림 5 a)에, 완전침투자장보다 작은 7.5 mT와 완전침투자장보다 큰 25 mT인 외부자장에 대한 자화손실 - 주파수 사이의 관계를 그림 5 b)에 각각 나타내었으며, 코아 모델로부터 계산된 자화손실을 측정치와의 비교를 위하여 실선으로 나타내었다.

그림 5 b)의 결과로부터 완전침투자장보다 큰 외부자장에 대해서는 주파수의 증가에 따라 측정된 자화손실도 비례하여 작지만 조금씩 커지는 반면 이보다 작은 외부자장에 대해서는 주파수의 증가에 따라 자화손실은 반비례하여 작아지는 것을 알 수 있고, 이와 동일한 결과를 다수의 다른 연구 결과에서도 볼 수 있다[4]. 또한 그림 5 a)에서 측정된 자화손실과 코아 모델로부터 계산된 손실은 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있고, 이는 그림 5 에서 측정된 자화손실은 히스테리시스손실임을 의미하지만 그림 5 b)에서와 같은 히스테리시스손실의 주파수 의존성은 기존의 저온 초전도체의 히스테리시스손실을 이론적으로 설명하는 데 보편적으로 사용되고 있는 임계상태모델로서는 설명할 수 없음을 알 수 있다. 따라서 저온 초전도체의 전압 - 전류특성과 매우 상이한 고온 초전도체의 경우에 있어서는 임계상태모델의 적용이 다소간 부적합하기 때문에 n-value 모델 또는 일반화된 임계상태모델(generalized critical state model) 등이

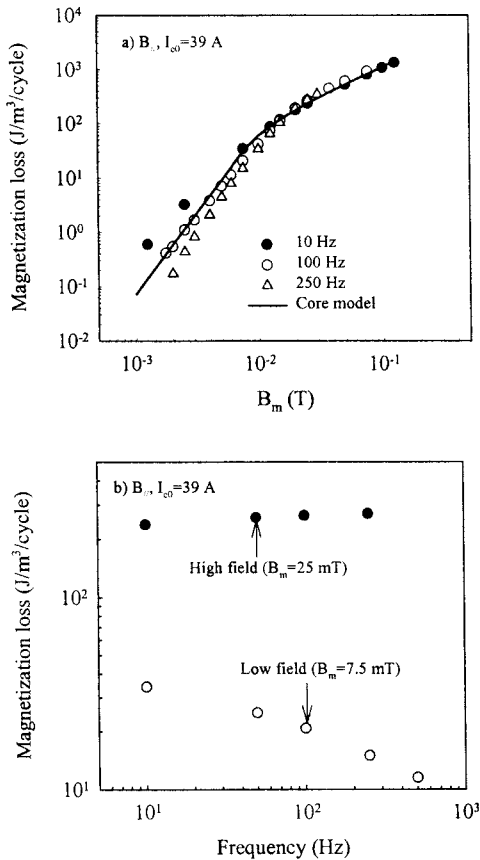


그림 5 자화손실의 주파수 의존성.  
Fig. 5. Frequency dependence of the magnetization losses.

제안되고 있으며, 이와 같은 모델로부터 계산된 자화손실은 그림 5 b)의 실험결과에서와 같은 히스테리시스손실의 주파수 의존성도 이론적으로도 잘 설명하고있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] 류경우, 최병주, "인접 교류전류가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 14권 3호, pp. 251 - 256, 2001.
- [2] 한형주, 류경우, 최병주, "수평자계가 Bi-2223테이프의 자화손실에 미치는 영향", 2001년도 한국초전도·저온공학회 학술대회논문집, pp. 185-188, 2001.
- [3] Masahiro Sugimoto, Akio Kimura, Masanao Mimura, Yasuzo Tanaka, Hideo Ishii, Shoichi Honjo, Yoshihiro Iwata, "Electromagnetic interfilament coupling of silver-sheathed Bi-2223 multifilamentary tapes in transverse AC magnetic fields," *Physica C*, pp. 225-232, 1997.
- [4] K. Yamafuji, T. Wakuda, T. Kiss, "Generalized critical state model in high-T<sub>c</sub> superconductors," *Cryogenics*, Vol.37, No. 8, pp. 421-430, 1997.