

Transport Loss Characteristics of a Bi-2223 Tape in External AC Magnetic Fields

柳 兪 佑* · 金 稔 完** · 車 貴 守***
(Kyung-Woo Ryu · Chang-Wan Kim · Guee-Soo Cha)

Abstract - The transport loss of a Bi-2223 tape exposed to external magnetic fields was investigated. The results show that the transport loss is independent on voltage lead arrangements in case the magnetization loss is compensated. A serious increase of the transport loss due to external AC magnetic fields is observed. The loss is described well by dynamic resistance loss in relatively high fields, but another mechanism than the dynamic resistance must be responsible for the increase of the loss in low fields. The transport loss is also dependent strongly on the orientation of the external fields.

Key Words : Transport loss, Magnetization loss, Dynamic resistance loss, External AC magnetic field.

1. 서 론

1980년 중반 고온 초전도체가 최초로 발견된 이후 급속한 기술 발전에 힘입어 최근에는 수백 미터의 장척 Bi-2223테이프에서조차도 임계전류밀도가 약 100 A/mm²(77 K, 자기자장에서)로 그 응용이 충분히 가능한 단계에 도달하였다. 예를 들면, 전력수송밀도가 높은 도심의 부하밀집 지역에 응용이 가능할 것으로 예상되는 초전도 전력케이블과 기존의 구리전선을 사용한 변압기와 비교하여 소형·경량화가 가능할 것으로 예상되는 초전도 변압기 등을 들 수 있다. 이와 같은 초전도 전력응용의 상용화에 앞서 이들의 경제성 및 효율에 크게 영향을 미치는 Bi-2223테이프의 교류손실에 대한 실험 데이터의 구축 및 이해는 그 어떤 요소기술보다도 먼저 선행되어야 할 중요한 과제이다.

초전도도체의 교류손실에는 크게 도체 자체에 흐르는 교류전류에 의해 발생하는 교류손실(이하에서 통전손실)과 외부로부터 초전도도체에 인가되는 교류자장에 의해 발생하는 교류손실(이하에서 자화손실)로 분류되며, 초전도도체의 전력응용 환경에 따라서 주된 교류손실이 통전손실이 되기도 하고 자화손실이 되기도 한다. 특히 초전도 전력케이블에서 주된 교류손실로 예상되는 통전손실에 영향을 미치는 중요한 인자로서는 Bi-2223테이프의 종횡비 및 필라멘트 트위스트의 피치 등과 같은 내적 인자와 외부자장 및 전압리드의 배열 등

과 같은 외적 요인을 들 수 있으며, 특히 외적 인자의 영향이 더 큰 것으로 알려져 있다[1]-[3]. 따라서 본 연구에서는 초전도 전력응용에서 실제 상황을 고려한 Bi-2223테이프의 통전손실에 대한 데이터를 구축하였고, 중요한 외적 인자인 외부자장이 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향에 대하여 조사하였으며, 마지막으로 전압리드의 배열이 통전손실의 측정에 미치는 영향을 조사함으로써 정확한 통전손실 평가방법을 확립하였다.

2. 실 험

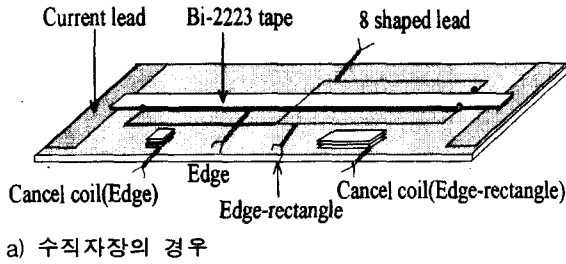
2.1 실험 샘플

Bi-2223테이프의 통전손실 측정에 사용된 초전도도체의 주요한 사양을 표 1에 나타내었다. 그림 1의 a)에는 수직자장에 대한 통전손실을 측정하기 위해 제작된 샘플을 나타내었다. 먼저 전압리드의 배열이 통전손실에 미치는 영향을 조사하기 위해서 3 종류의 전압리드를 장착하였으며, 전압리드의 뿔납 부사이의 길이는 100 mm로 모두 동일하게 하였다. 먼저 두 종류의 전압리드를 테이프 가장자리 선상의 동일한 위치에 납땀한 후, 하나는 가장자리 선을 따라 배열(이하edge리드)로

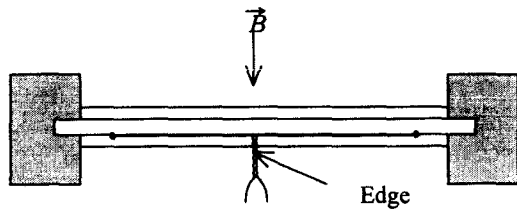
표 1 Bi-2223테이프 사양
Table 1 Specifications of a Bi-2223 tape

항 목	특 성
사이즈	3.5 mm × 0.3 mm
Bi-2223/AgMgNi	25/75
필라멘트의 수	37
트위스트 피치	∞

* 正 會 員 : 全南大 電氣工學科 助敎授 · 工博
 ** 正 會 員 : 全南大 電氣工學科 碩士課程
 *** 正 會 員 : 順天鄉大 情報技術工學部 敎授 · 工博
 接受日字 : 2001年 4月 12日
 最終完了 : 2001年 5月 16日



a) 수직자장의 경우



b) 수평자장의 경우.

그림 1 샘플의 개략도

Fig.1. Schematic of the samples.

하였고, 다른 하나는 가장자리 선으로부터 약 5 mm(테이프 폭의 약 3/2배) 떨어진 사각 루프형태(이하 edge-rectangle리드)로 배열하였다. 마지막으로 통전손실 평가에서 측정 에러로 작용하는 외부자장 및 외부자장에 의해 유도되는 자화에 의한 전압이 자체적으로 상쇄되는 구조로 되어 있어 별도의 상쇄코일을 필요로 하지 않는 장점 때문에 외부자장 하에서 통전손실을 측정하는데 일반적으로 사용되고 있는 8자 형태의 리드(이하 8자형리드)를 장착하였다[4]. 반면 edge리드 및 edge-rectangle리드의 경우는 외부자장에 의해서 유도되는 전압을 상쇄시키기 위해서 그림 1의 a)에서와 같은 상쇄코일을 장착하였다. 또한 그림 1의 b)에는 수평 자장용 샘플을 나타내었으며, edge리드의 구조적인 특징 때문에 외부자장에 의해서 edge리드 자체에 유도되는 전압의 영향은 무시될 수 있을 정도로 작아 8자형리드에서처럼 별도의 상쇄코일을 필요로 하지 않는 장점 때문에 edge리드로 하였다[5].

2.2 실험 방법

그림 2에는 외부자장이 인가된 상태에서 Bi-2223테이프의 통전손실을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 나타내었다. 그림 2에서 외부자장을 발생시키기 위해서 30 A, 50 V전원(DC - 1 kHz)을 2채널 함수발생기로 제어하여 철심형 자석에 직류 및 정현파의 교류 전류를 인가하였으며, 자석상수는 25 mT/A이고 공극은 45 mm × 100 mm × 8 mm이다. 또한 Bi-2223테이프를 통전시키기 위해서 300 A, 20 V전원(DC - 1 kHz)을 동일한 함수발생기로 제어하여 직류 및 정현파의 교류 전류를 인가하였으며, 자석 및 샘플에 흐르는 전류를 측정하기 위해서는 션트를 사용했다. 션트 및 그림 1의 샘플에 장착된 전압리드로부터 나오는 신호는 절연엠프를 통해 스크오프에서 기록하였다.

Bi-2223테이프의 통전손실을 측정하는데 널리 이용되고 있는 전기적 방법에는 직접법과 락인엠프법이 있는데[6], 본 연구에서는 직접법을 이용하여 통전손실을 측정하였으며, 테이프 단위길이 및 1 주기에 대한 통전손실(Q)은 식 (1)으로

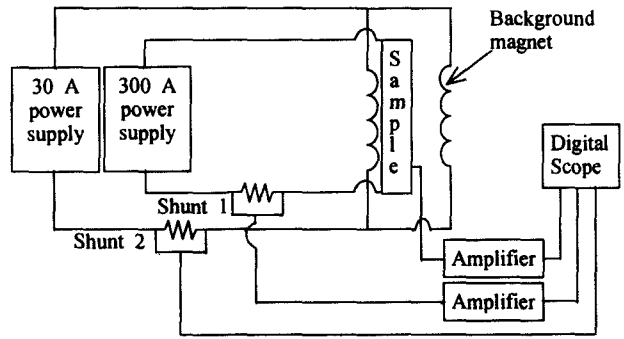


그림 2 실험장치의 개략도

Fig.2. Schematic arrangement of the test apparatus.

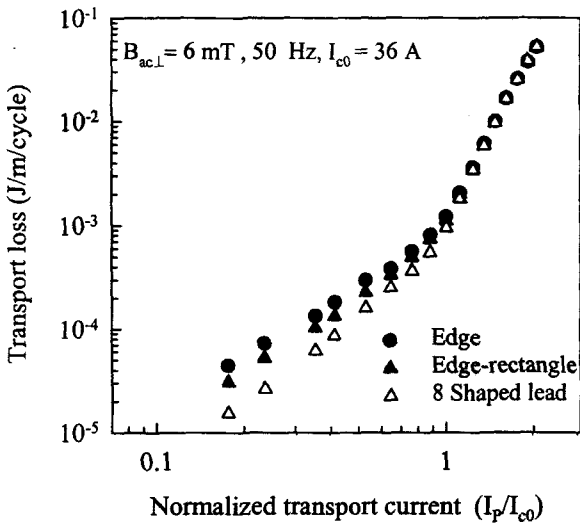
나타낼 수 있다.

$$Q = \int_0^T i(t)v(t)dt/l \quad (1)$$

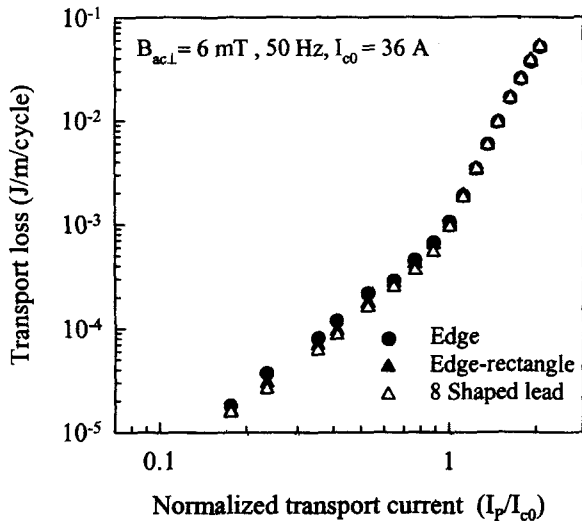
여기서 T는 정현파 전류의 주기를, i(t)는 테이프의 전류, v(t) 및 l은 전압리드의 납땀사이의 전압 및 길이를 각각 나타낸다. 또한 모든 실험은 액체질소 내 즉 77 K에서 하였다.

3. 실험 결과 및 검토

그림 3에는 Bi-2223테이프 면에 수직인 방향의 외부 교류자장을 인가한 경우, 전압리드의 배열이 통전손실에 미치는 영향에 대해 조사한 결과를 나타내었다. 그림 3의 a)는 외부 교류자장에 의해서 발생하는 자화손실을 보상하지 않은 경우의 실험결과를, 그림 3의 b)는 이를 보정한 경우의 결과를 각각 나타내었으며, 이 때 외부자장의 주파수 및 진폭은 각각 50 Hz 및 6 mT이었고, 자기자장에서 Bi-2223테이프의 임계전류(I₀)는 36 A이었다. 그림 3의 a)로부터 보는 바와 같이 edge리드 및 edge-rectangle리드에 대하여 측정된 통전손실은 다소간의 차이는 있지만 비교적 잘 일치하는 반면 2.1절에서 언급한 바와 같이 외부자장에 의한 자화손실이 자체적으로 상쇄되는 특징을 지닌 8자형리드의 경우는 임계전류 하에서 edge리드 및 edge-rectangle리드의 실험결과보다 작음을 볼 수 있다. 이로부터 외부자장에 의한 자화손실의 보상 여부는 Bi-2223테이프의 통전손실에 크게 영향을 미칠 수 있으며 따라서 자체적으로 외부자장에 의한 자화손실이 보상되지 않는 두 전압리드에 대하여 이를 보상하여 측정된 통전손실을 그림 3의 b)에 나타내었다. 그림 3의 b) 결과에서 보는 바와 같이 외부자장에 의한 자화손실을 상쇄시켜주기만 하면 전압리드의 배열에 관계없이 즉 edge리드, edge-rectangle리드 및 8자형리드에 무관하게 동일한 측정결과를 보임을 알 수 있다. 특히 edge리드의 경우는 edge-rectangle리드의 경우와 비교하여 테이프폭에 수평인 외부 교류자장 및 자기자장에 의하여 전압리드에 유도되는 전압이 작아 상쇄코일을 사용하지 않고도 통전손실을 정확하게 측정하는데 문제점이 없는 장점 때문에 이하의 실험에서는 edge리드를 사용하여 통전손실을 측정하였으며, 모든 실험에서 외부자장에 의한 자화손실은 모두 보상을 하였다.



a) 보상이 되지 않은 경우.



b) 보상된 경우.

그림 3 통전손실 - 정규화된 통전전류

Fig.3. Transport loss vs. normalized transport current.

그림 4에는 테이프폭에 수직한 방향으로 외부자장이 인가된 경우 측정된 직류 전압 - 전류 특성을 나타내었다. 그림 4의 결과에서 보는 바와 같이 외부 교류자장이 커짐에 따라서 직류 전압도 급격하게 증가하며 외부자장이 0(B=0 mT)인 경우 전압 - 전류 특성곡선의 형상과 전혀 상이한 경향을 갖는 것을 볼 수 있으며, 또한 동일한 세기의 외부자장(예를 들면 B=50 mT)에 대해서라 할지라도 교류 외부자장의 경우가 직류에 비해 수십 배 정도까지 직류 전압이 큰 것을 볼 수 있다. 반면 교류 자장이 인가된 경우 직류 전압 - 전류 특성 곡선과는 달리 외부 직류자장(B=50 mT)이 인가된 경우는 외부자장이 0인 경우 전압 - 전류 특성곡선을 좌측으로 평행 이동시킨 곡선과 유사함을 볼 수 있다. 이는 외부 직류자장에 의하여 Bi-2223테이프의 임계전류가 감소한 결과로 사려 된다.

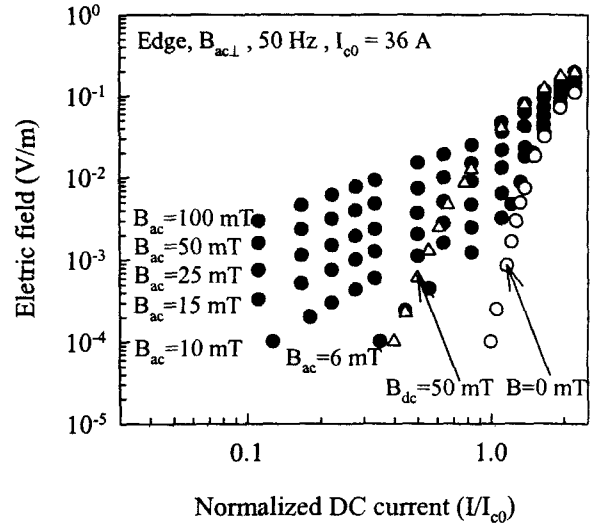


그림 4 상이한 수직자장에 대한 직류 전압 - 전류 특성

Fig.4. DC voltage-current characteristics for several perpendicular fields.

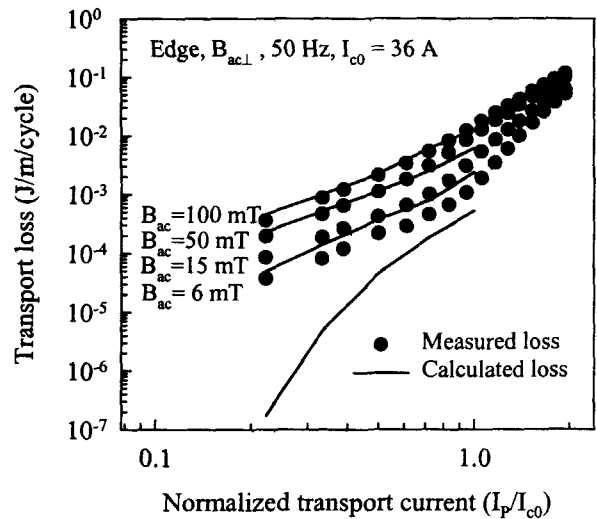


그림 5 상이한 수직자장에 대한 통전손실

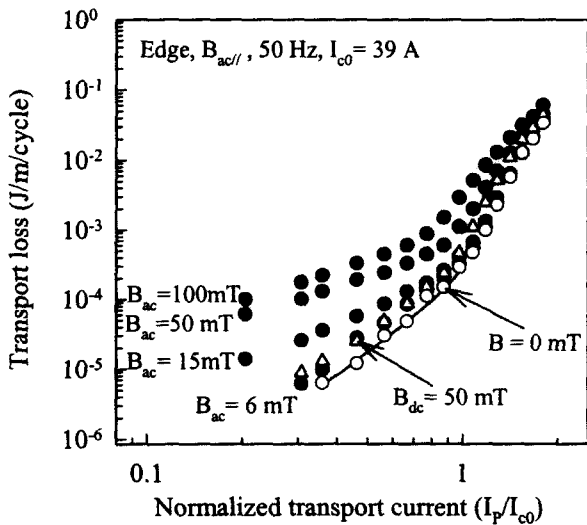
Fig.5. Transport losses for various perpendicular fields.

그림 5에는 그림 4에서와 동일한 외부자장을 인가한 상태에서 측정된 통전손실을 나타내었다. 그림 5의 결과로부터 Bi-2223테이프의 통전손실은 그림 4의 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 검토했으며, 외부 교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 단위길이 및 1 주기 당 동저항손실(Q_{dyn})은 식(2)과 같이 나타낼 수 있다[7].

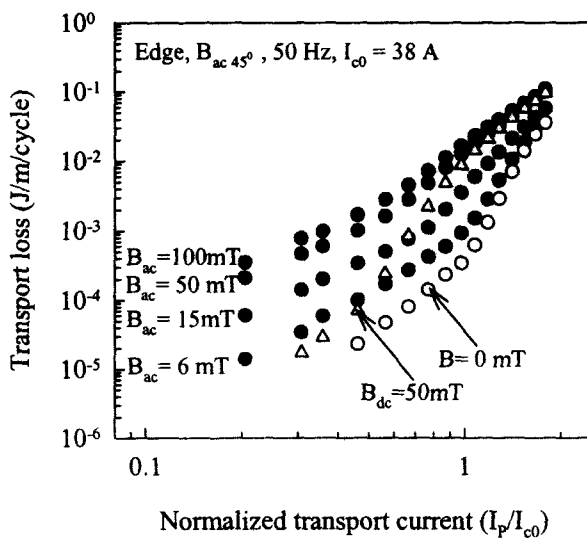
$$Q_{dyn}(B) = \int_0^T [E_B(i) - E_{B=0}(i)] i dt \quad (2)$$

여기서 B는 외부 교류자장을, T는 통전전류의 주기율, E_b 및

$E_{B=0}$ 는 임의의 교류자장 B 및 $B=0$ 인 경우 단위길이 당 Bi-2223테이프의 직류 전압을, 그리고 i 는 통전전류를 각각 나타낸다. 그림 5에는 식(2) 및 그림 4의 동일한 외부 교류자장 아래서 측정된 Bi-2223테이프의 직류 전압 - 전류 특성으로부터 계산된 Bi-2223테이프의 동저항손실을 실선으로 나타내었다. 그림 5의 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.



a) 수평자장의 경우.



b) 45° 경사자장의 경우.

그림 6 수평 및 45° 경사 자장에 대한 통전손실
Fig.5. Transport losses for various field directions.

서론에서 언급한 바와 같이 Bi-2223테이프의 전력응용 중 상용화가 가장 빠를 것으로 기대되는 초전도 전력케이블 및 변압기에서 Bi-2223테이프가 경험하는 외부자장의 방향은 전력케이블의 경우는 테이프 폭에 수평한 자장성분이 주된 방향인 반면 변압기의 경우는 변압기 권선의 중앙부에 위치한 Bi-2223테이프는 전력케이블의 경우와 동일하게 테이프 폭에 수평한 성분이 주된 방향이 되지만 양쪽 가장 자리로 갈수록 약 45 도의 경사자장으로부터 테이프 폭에 수직인 방향의 자장을 경험하게 되는 등 매우 복잡하다. 따라서 실제의 초전도 전력케이블 및 변압기의 설계·제작에 있어서 중요한 길잡이가 될 수 있는 Bi-2223테이프 면에 수평한 자장 및 45 도의 경사자장이 인가된 경우 측정된 통전손실을 그림 6의 a), b)에 각각 나타내었다. 또한 외부자장을 인가하지 않은 상태에서 Bi-2223테이프에 교류 통전전류만을 흘릴 경우 테이프에서 발생하는 통전손실을 자기자계손실이라 하며, 타원형 단면을 갖는 Bi-2223테이프의 단위길이 및 1 주기 당 자기자계손실(Q_{self})은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$Q_{self} = \frac{\mu_0 I_{c0}^2}{\pi} \left(\left(1 - \frac{I_p}{I_{c0}}\right) \ln\left(1 - \frac{I_p}{I_{c0}}\right) + \frac{(2 - I_p/I_{c0}) I_p}{2 I_{c0}} \right) \quad (3)$$

여기서 μ_0 는 진공중의 투자율을, I_{c0} 는 자기자장 아래서 테이프의 임계전류를, I_p 는 정현파 교류 통전전류의 피크치를 각각 나타낸다. 그림 6의 a)에는 식(3)으로부터 계산된 Bi-2223테이프의 자기자계손실을 실선으로 나타내었다. 그림 6의 a)의 결과로부터 보는 바와 같이 외부자장이 인가되지 않은 상태($B=0$ T)에서 측정된 Bi-2223테이프의 통전손실은 계산된 자기자계손실과 잘 일치하는 것을 알 수 있고, 이는 Bi-2223테이프의 자기자계손실은 히스테리시스손실기구가 주된 손실기구임을 암시하고 있다. 또한 그림 6의 결과로부터 동일한 외부자장의 세기(예를 들면 $B=50$ mT)라 할 지라도 Bi-2223테이프의 통전손실은 외부자장

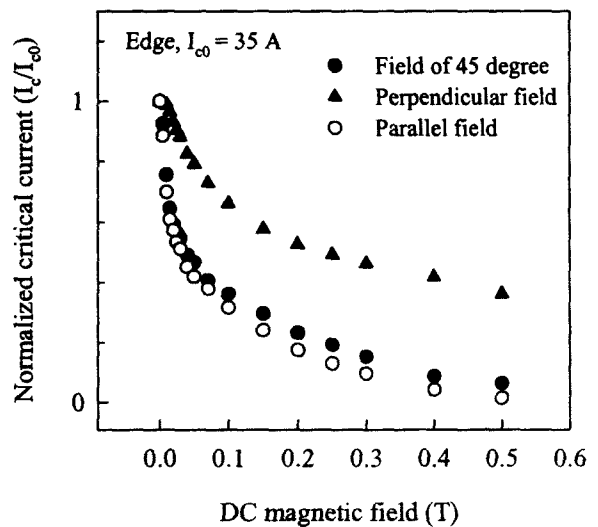


그림 7 임계전류의 외부자장 의존성.

Fig. 7. Field dependence of the critical currents for different field directions.

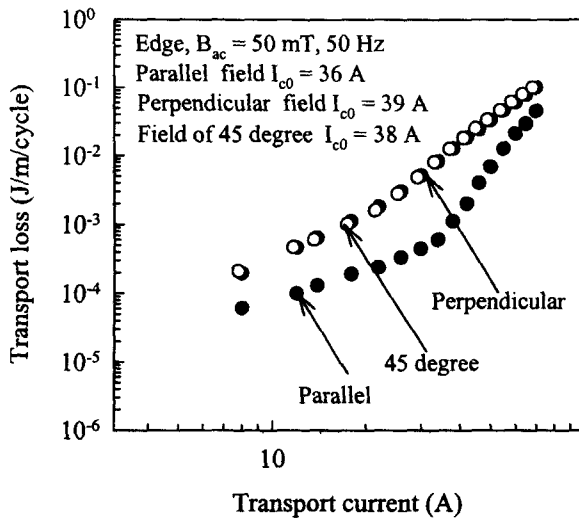


그림 8 상이한 자장 방향에 대한 통전손실
Fig.8. Transport losses for different field orientations.

의 방향에 관계없이 교류 외부자장이 인가되는 경우가 직류 외부자장이 인가되는 경우보다 매우 큰 것을 볼 수 있다. 마지막으로 그림 6의 결과에서 동일한 직류 외부자장(B_a=50 mT)에 대한 Bi-2223테이프의 통전손실이 외부자장의 방향이 테이프 폭에 수평한 방향에서 수직인 방향으로 변해 감에 따라 그 영향이 크지는 않지만 증가하는 것을 볼 수 있고 이는 그림 7에 나타낸 Bi-2223테이프의 임계전류가 외부자장의 방향이 수직에 가까워짐에 따라 급격히 감소하기 때문으로 사려된다.

그림 8에는 외부 교류자장의 방향이 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과를 나타내었다. 그림 8의 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 통전손실은 급격히 증가하는 것을 알 수 있고, 따라서 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.

4. 결 론

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 교류 외부자장 아래서 Bi-2223테이프의 통전손실은 외부자장에 의한 자화손실이 보상되기만 하면 전압리드의 배열에 무관하게 동일한 실험결과를 얻었다.

- 2) 교류 외부자장 아래서 Bi-2223테이프의 통전손실은 교류 외부자장의 세기가 커짐에 따라 대단히 증가하며, 비교적 고 자장인 경우는 동저항손실이 지배적인 손실기구인 반면 저 자장인 경우는 또 다른 손실기구가 존재하는 것으로 사려된다.

- 3) 교류 외부자장 아래서 Bi-2223테이프의 통전손실은 교류 외부자장의 방향에도 대단히 영향을 받으며, 테이프 폭에 수직인 자장인 경우 통전손실은 수평한 자장의 경우보다 약 10 배정도 큰 반면 45 도 경사자장의 경우와는 거의 동일하였다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] 류경우, 박권배, 차귀수, 최경달, 이지광, 한송엽, "장척 Bi-2223테이프의 자기자계손실 특성," 전기학회논문지, 49B권 4호, pp. 240-245, 2000.
- [2] M. Cizek, A.M. Campbell, B.A. Glowacki, "The effect of potential contact position on AC loss measurements in superconducting BSCCO tape," *Physica C*, pp. 203-208, 1994.
- [3] 류 경우, 최병주, "인접 교류전류가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향," 전기전자재료학회논문지, Vol. 14, No. 3, pp. 251-256, 2001.
- [4] J.J. Rabbers, B. ten Haken, H.H.J. ten Kate, "Measuring transport current loss of BSCCO/Ag tapes exposed to external AC magnetic field," *Physica C*, pp. 101-105, 1998.
- [5] 박권배, 류경우, 최병주, "전압리드 및 테이프 배열이 Bi-2223테이프의 자기자계손실에 미치는 영향," 초전도·저온공학회논문집, pp. 58-59, 2000.
- [6] N. Amemiya, K. Miyamoto, S. Murasawa, H. Mukai, and K. Ohmatsu, "Finite element analysis of AC transport current and / or exposed to DC or AC external magnetic field," *Physica C*, 1998.
- [7] J.J. Rabbers, B. ten Haken, F. Gómory, H.H.J. ten Kate, "Self-field loss of BSCCO/Ag tape in external AC magnetic field," *Physica C*, pp. 1-5, 1998.

저 자 소 개



류 경 우 (柳 炅 佑)

1962년 2월 10일 생. 1983년 인하대 전기 공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공박). 1986년~1995년 한국전기연구소 초전

도응용연구사업팀 선임연구원. 1996년~현재 전남대 전기공학과 조교수.

Tel : 062-530-1748, Fax : 062-530-1749

E-mail : kwryu@chonnam.ac.kr



차 귀 수 (車 貴 守)

1956년 7월 18일 생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박), 1991년 영국 Bath 대학 방문교수. 현재 순천향대 정보기술공

학부 교수.

Tel : 041-530-1334, Fax : 041-530-1333

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr



김 창 완 (金 昶 完)

1974년 3월 24일 생. 1999년 조선대 전기 공학과 졸업. 1999년~현재 전남대학교 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 062-530-0748, Fax : 062-530-1749

E-mail: u9997029@chonnam.ac.kr