

수평자장에 대한 Bi-2223테이프의 자화손실 특성

論 文

50B-4-2

Magnetization Loss Characteristics of a Bi-2223 Tape in Parallel Magnetic Fields

柳 旻 佑* · 韓 亨 周** · 崔 炳 柱*** · 羅 浣 洙§ · 朱 鎮 皓§§

(Kyung-Woo Ryu · Hyung-Ju Han · Byung-Ju Choi · Wan-Soo Nah · Jin-Ho Joo)

Abstract - Magnetization losses of a Bi-2223 tape in magnetic fields parallel to the tape surface were measured by a room temperature cancellation and a cryogenic temperature cancellation. The results indicate that the same loss data are observed for both methods. The magnetization losses are hysteretic because the measured losses agree well with calculated ones based on a critical state model. In the full field penetration cases the magnetization losses increase with the frequency but in the partial field penetration cases the influence of the frequency is opposite.

Key Words : Magnetization curve, Magnetization loss, Hysteresis loss, Parallel magnetic field, Room temperature cancellation, Cryogenic temperature cancellation.

1. 서 론

교류 초전도시스템에 응용되는 초전도선재의 교류손실에는 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, 외부교류자장에 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 저온절소냉동기의 사용이 가능한 장점을 지닌 고온 초전도체에 대한 손실 연구를 통해 상기의 손실들 중 중요한 손실이 무엇인지를 밝혀야 하며, 또한 시스템의 효율 및 경제성 향상을 위하여 이들 손실의 저감법 등에 대한 연구가 선행되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 상기의 손실 중 고온 초전도테이프의 자화손실 측정과 관련된 기본적인 제반 문제들을 검토·분석하였으며, 이를 바탕으로 측정된 Bi-2223테이프의 자화손실 특성에 대한 분석 및 이론적 검토를 하였다.

2. 실험 샘플 및 방법

2.1 실험 샘플

실험에 사용된 Bi-2223테이프의 사양을 표1에, 이들의 자화손실을 측정하기 위해 설치한 픽업코일의 배열을 그림1에 각각 나타내었다. 표1의 사양은 3개의 Bi-2223테이프 샘플에 대한 단면을 조사한 결과를 바탕으로 작성된 사양으로, 테이프 및 코아의 경우는 두께가 그리고 필라멘트의 경우는 두께 및 폭의 이산도가 특히 큰 것을 볼 수 있고, 이와 같이 이산도가 큰 테이프 파라미터를 사용하는 이론 계산에서는 특히 주의가 요구된다. 또한 일반적으로 픽업코일을 사용하여 자화손실을 측정하는데 있어서는 픽업코일의 배열 및 샘플 길이에 따라 측정된 손실이 상이하다고 알려져 있으며[1]-[2], 본 측정에서는 샘플 길이는 50 mm로 하였고, 픽업코일의 배열은 그림1과 같은 2차원적인 배열을 사용하였다.

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

항 목	특 성
테이프 사이즈(mm ²)	3.5 × 0.25~0.33
코아 사이즈(mm ²)	3.3 × 0.22~0.30
필라멘트 사이즈(μm ²)	180~420 × 15~55
Bi-2223/AgMgNi	25/75
필라멘트 수	37
필라멘트의 트위스트 피치	∞

* 正 會 員 : 全南大 電氣工學科 助教授 · 工博

** 準 會 員 : 全南大 電氣工學科 碩士課程

*** 正 會 員 : 徐羅伐大 電氣電子電算學部 助教授 · 工博

§ 正 會 員 : 成均館大 電氣電子컴퓨터工學部 副教授 · 工博

§§ 正 會 員 : 成均館大 金屬材料工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2001年 3月 6日

最終完了 : 2001年 3月 28日

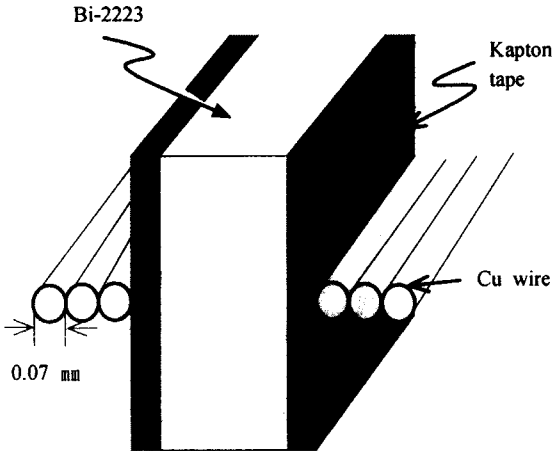


그림 1 픽업코일의 배열.
Fig. 1. Arrangement of a pick-up coil.

2.2 실험 방법

Bi-2223테이프의 자화손실 측정에 사용된 실험장치를 그림 2에 나타내었다. 그림2에서 30 A, 50 V 전원(DC - 1 kHz)을 함수발생기로 제어하여 외부자장 발생을 위한 철심자석에 정현파의 전류를 인가하였으며, 자석상수는 25 mT/A, 공극은 45 mm×100 mm×8 mm, 자석 사이즈는 133 mm×100 mm×186 mm이다. 그림1의 실험 샘플을 자석의 공극에 배치하여 수평방향의 자장을 Bi-2223테이프에 인가하고, 식(1)에서 보는 바와 같이 자화곡선을 측정하는데 불필요한 외부자장은 공심형 상쇄코일을 이용하여 상온 상태에서 상쇄시켰다(이하에서 상온상쇄법(room temperature cancellation)이라 함).

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \tag{1}$$

여기서 $\mu_0 H$ 는 외부자속밀도, $\mu_0 M$ 은 외부자장에 의해 유도된 자속밀도를 각각 나타내며, 상쇄코일을 역극성으로 하여 직렬로 픽업코일에 접속한 후 이들 두 코일 양단에 유도되는 전압을 자속계(또는 적분기라 함; 10 - 5000 Hz)에 입력시킴으로서 단위체적 당 자기쌍극자모멘트로 정의되는 자화(M: magnetization)를 측정하여 Bi-2223테이프의 자화곡선을 최종적으로 얻었다. 또한 자속계로부터 측정된 자화 신호는 왜형파로서 주파수 영역에서 다양한 스펙트럼 패턴을 가지지만 스펙트럼 분석 결과 정현파의 외부자장과 동일한 주파수인 기본파 성분이 지배적이었으며, 무시할 수 있을 정도의 기수 고조파 성분도 포함되어있었다. 또한 기본파 성분의 자화 신호는 식(2)와 같이 외부자장과 동상인 성분과 90도 위상인 성분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$M = M_0 + j M_{90} \tag{2}$$

여기서 M_0 는 외부자장과 동상인 성분을, M_{90} 는 외부자장과 90도 위상 차가 나는 성분을 각각 나타내었으며, 동상 성분에 의한 자화 곡선은 히스테리시스 루프를 형성하지 못하기 때문에 루프의 면적이 0로 되며, 이는 자화손실에는 영향을 미치지 못하는 성분임을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 액체

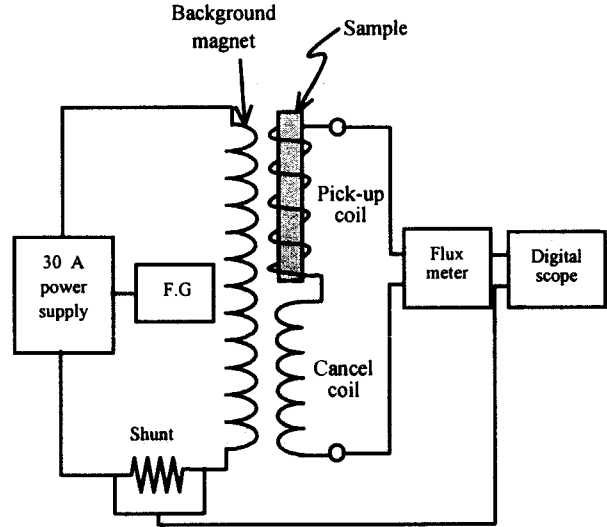


그림 2 실험 장치.
Fig. 2. Experimental set-up.

질소 온도에서 픽업 및 상쇄코일 양단에서 검출되는 자화 신호 중 외부자장과 동상 성분을 상쇄시켜서 얻어지는 자화곡선으로부터 자화손실을 실험적으로 측정하였으며(이하에서 저온상쇄법(cryogenic temperature cancellation)이라 함), 그 결과를 상온상쇄법으로부터 측정된 자화손실과 비교·검토도 하였다. 또한 각각의 실험법으로부터 얻어진 자화곡선의 면적은 수치적분을 이용하여 계산하였다.

본 자화손실 측정에 사용된 실험장치의 노이즈를 검토한 결과 상온에서 자속계의 입력단을 단락시켰을 때 자속계의 출력단 노이즈는 약 5 mV_r였고, 그림2의 실험장치에서 가장 큰 노이즈를 발생시킬 것으로 예상되는 전원의 주 스위치를 닫은 상태에서도 자속계의 노이즈 레벨은 약 5 mV_r로 변화가 없었으며, 자화손실 측정 시 가장 작은 자속계의 출력신호는 약 20 mV_r였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림3에는 수평 및 수직방향의 외부자장에 대하여 측정된 Bi-2223테이프의 임계전류 특성을 나타내었으며, I_{c0} 는 자기자장에서 임계전류를 의미한다. 그림3의 결과에서 Bi-2223테이프의 임계전류(1 μ V/cm 기준)는 외부자장의 세기뿐만 아니라 방향에 대해서도 대단히 크게 영향을 받음을 볼 수 있다.

그림4에는 50 Hz의 수평방향 자장에 대하여 상온상쇄법으로 측정된 Bi-2223테이프의 전형적인 자화곡선을 나타내었으며, 이들은 픽업코일의 평균자화곡선으로 표시하였다. 그림4의 결과에서 보는 바와 같이 외부자장이 작은 경우($H_m=6000$ A/m, $B_m=7.5$ mT) 자화자속밀도($-\mu_0 M$)는 외부자장이 증가해도 포화되지 않고 최대 자장의 세기인 6000 A/m까지 계속 증가하는 반면 외부자장이 큰 경우($H_m=80000$ A/m, $B_m=100$ mT)는 약 10000 A/m에서 포화되는 것을 볼 수 있고, 이와 같은 자화특성은 저온 초전도체의 이론적 연구에 자주 사용되고 있는 임계상태모델($0 \leq J \leq J_c$ 인 경우는 $E=0$, $J \geq J_c$ 인 경우는 $E = \rho_r (J - J_c)$, ρ_r 는 자속유동저항률)로부터 계산된 자화곡선과 그 형상이 매우 유사한 것을 볼 수 있다[3].

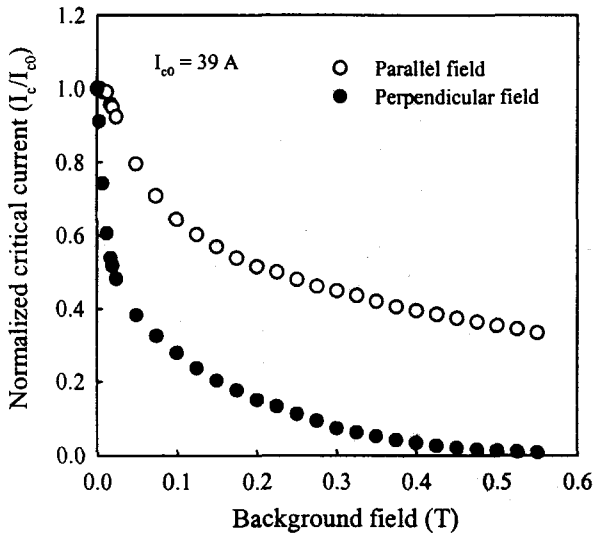


그림 3 임계전류의 외부자장 의존성.
Fig. 3. Field dependence of the critical currents for different field directions.

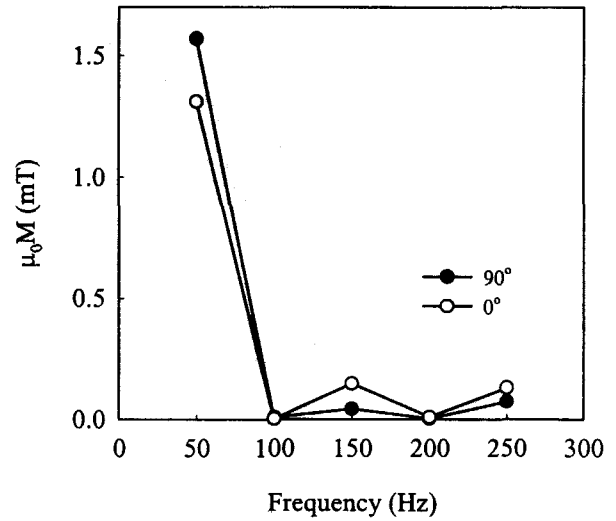


그림 5 상온상쇄법에 의한 자화자속밀도 신호의 스펙트럼.
Fig. 5. Spectrum of the magnetization signal by a room temperature cancellation at 100 mT.

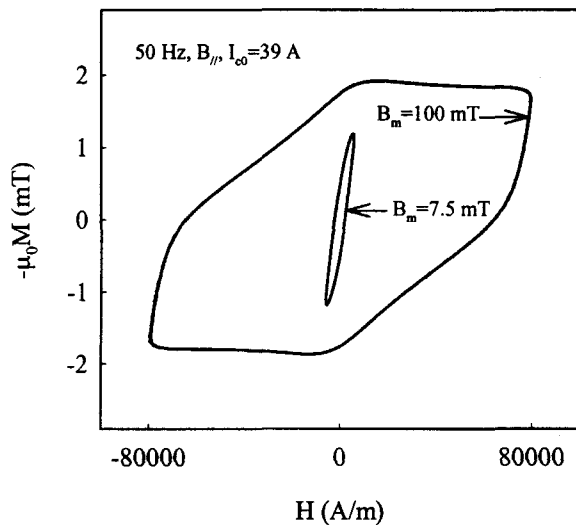


그림 4 상온상쇄법에 의한 자화곡선.
Fig. 4. Magnetization curves by a room temperature cancellation at 50 Hz.

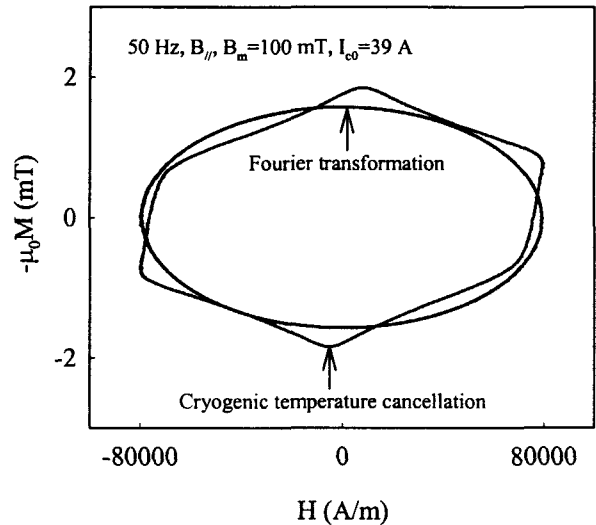


그림 6 저온상쇄법에 의한 자화곡선.
Fig. 6. Magnetization curves by a cryogenic temperature cancellation at 50 Hz.

그림5에는 그림4에서 상온상쇄법으로 얻어진 외부자장이 100 mT인 경우의 자화곡선에 대하여 자화자속밀도(μ_0M) 신호를 푸리에변환을 시킨 결과를 나타내었다. 그림5의 결과로부터 자화자속밀도 신호에는 기수 고조파 성분이 다소 포함되어 있지만 기본파 성분이 지배적임을 알 수 있고, 기본파 성분 중 외부자장과 동상인 성분(○)과 90도 위상 차가 나는 성분(●)의 비는 약 1:1.2로서 두 성분의 크기가 거의 비슷함을 볼 수 있다.

그림6에는 외부자장이 100 mT인 경우에 대하여 식(2)의 자화(M) 중 외부자장과 동상인 성분(M_0)을 상쇄시켜 얻어진 즉 저온상쇄법으로 측정된 자화곡선을 나타내었으며, 그림5의 푸리에변환에 의해 계산된 자화곡선도 함께 나타내었다. 그림6의 결과로부터 푸리에변환에 의해 계산된 자화곡선은 저

온상쇄법으로 측정된 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림7에는 상온상쇄법과 저온상쇄법으로부터 얻어진 Bi-2223테이프의 자화손실을 나타내었으며, 특히 그림7에서 자화손실은 그림4의 픽업코일의 평균자화곡선과 표1의 테이프 사양으로부터 필라멘트영역(이하에서 코아라 함)의 점적율(filling factor)을 고려한 코아 단위체적 당의 자화손실로 나타내었다. 그림7의 결과에서 보는 바와 같이 상온상쇄법으로 측정된 자화손실은 저온상쇄법으로 얻어진 결과와 잘 일치함을 볼 수 있으며, 이 결과로부터 초전도체의 자화손실 측정에서 자화자속밀도 중 외부자장과 동상인 성분은 자화손실에는 아무런 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 따라서 자화

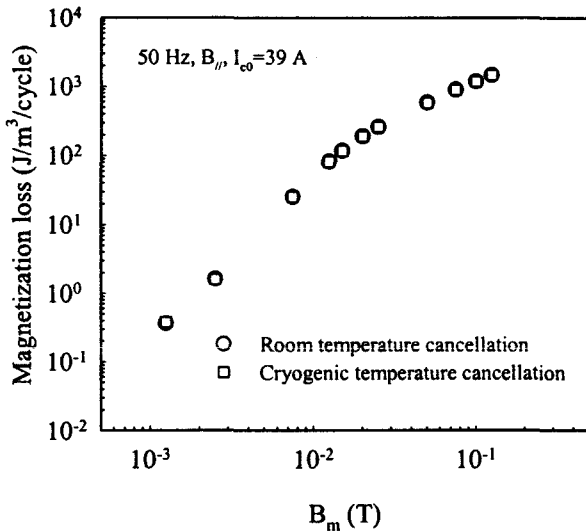


그림 7 상온상쇄법 및 저온상쇄법에 의한 자화손실.
 Fig. 7. Magnetization losses by a room temperature cancellation and a cryogenic temperature cancellation at 50 Hz.

손실 측정시 외부자장을 완벽하게 상쇄시키는 문제는 자화곡선의 형상에만 영향을 주고 자화손실에는 아무런 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

그림8에는 50Hz의 수평자장에 대하여 측정된 Bi-2223테이프의 자화손실 - 외부자장 사이의 관계를 나타내었으며, 그림8에서 단위 체적은 그림7에서와 마찬가지로 코아 체적으로 하였다. 또한 단위체적 당의 초전도체에서 발생하는 히스테리시스손실은 slab형과 같은 간단한 형상의 초전도체에 대해서는 임계상태모델로부터 쉽게 계산될 수 있으며, 그 결과물식(3)에 나타내었다[3].

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

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

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

여기서 B_m 은 외부자장의 피크 값, μ_0 는 진공 중의 투자율, B_p 는 완전침투자장, J_c 는 임계전류밀도, $2a$ 는 slab의 두께를 각각 나타낸다. 그림8에는 식(3)으로부터 계산된 자화손실을 실선, 점선 및 파선으로 각각 나타내었으며, 실선의 경우는 필라멘트영역 전체를 하나의 초전도slab으로(이하 코아 모델이라 함), 점선 및 파선의 경우는 표1에서 보는 바와 같이 필라멘트 두께의 이산도를 고려하여 초전도slab의 두께를 60 μm 및 20 μm 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 자기장에서 측정된 테이프 축 방향의 임계전류(그림3에서 $I_{c0} = 39$

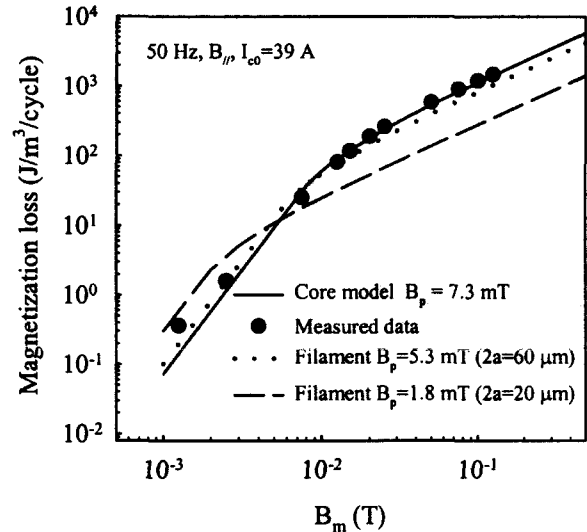


그림 8 자화손실의 외부자장 의존성.
 Fig. 8. Field dependence of the magnetization losses at 50 Hz.

A)를 코아의 면적으로 나눈 임계전류밀도로 하였다.

그림8의 결과로부터 완전침투자장보다 작은 외부자장에 대해서는 측정치와 계산치 사이의 약간의 차이는 있지만 전 영역에 걸쳐 코아 모델 및 초전도slab 두께를 60 μm 로 한 필라멘트 모델로부터 계산된 자화손실과 측정치는 비교적 잘 일치하는 반면 초전도slab 두께를 20 μm 로 한 필라멘트 모델로부터 계산된 자화손실은 측정치와 상당히 상이함을 알 수 있고, 이와 동일한 결과는 다수의 다른 연구결과에서도 볼 수 있다[2],[4].

그림9에는 상이한 주파수(10 Hz - 250 Hz)의 수평자장에 대하여 측정된 Bi-2223테이프의 자화손실 - 외부자장 사이의 관계를 그림9 a)에, 완전침투자장보다 작은 7.5 mT와 완전침투자장보다 큰 25 mT인 외부자장에 대한 자화손실 - 주파수 사이의 관계를 그림9 b)에 각각 나타내었으며, 코아 모델로부터 계산된 자화손실을 측정치와 비교하기 위하여 실선으로 나타내었다.

그림9 b)의 결과로부터 완전침투자장보다 큰 외부자장에 대해서는 주파수의 증가에 따라 측정된 자화손실도 비례하여 작지만 조금씩 커지는 반면 이보다 작은 외부자장에 대해서는 주파수의 증가에 따라 자화손실이 반비례하여 작아지는 것을 알 수 있고, 이와 동일한 결과를 다수의 다른 연구 결과에서도 볼 수 있다[5]-[7]. 또한 그림9 a)에서 측정된 자화손실과 코아 모델로부터 계산된 손실은 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있고, 이는 그림9에서 측정된 자화손실은 히스테리시스손실임을 의미하지만 그림9 b)에서와 같은 히스테리시스손실의 주파수 의존성은 기존의 저온초전도체의 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 다소 부적합하기 때문에 n-value모델 또는 일반화된 임계상태모델(generalized critical state model) 등이 제안되고 있으며, 이와 같은 모델로부터 계산된 자화손실은 그림9 b)의 실험결과

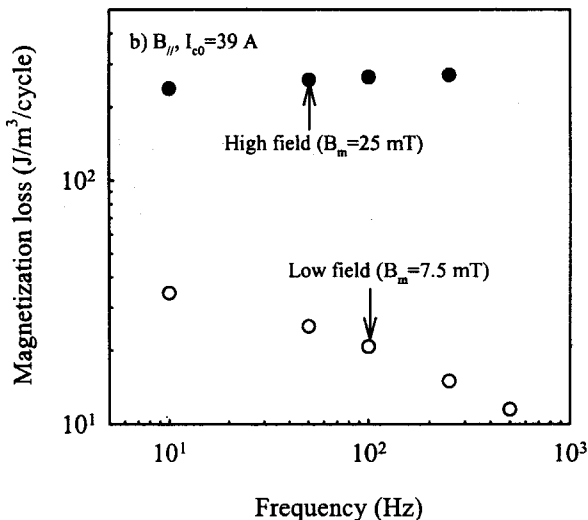
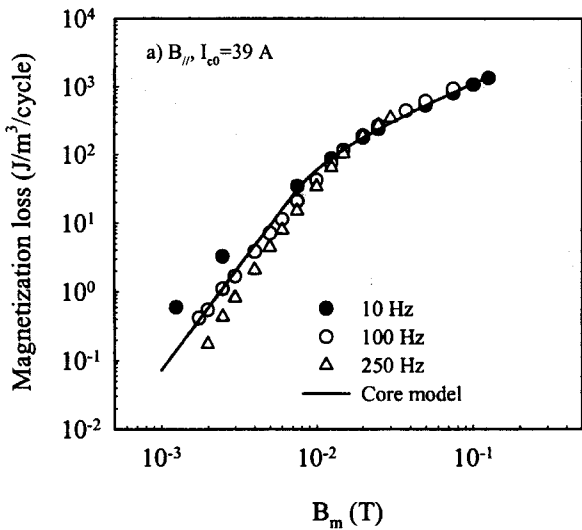


그림 9 자화손실의 주파수 의존성.
Fig. 9. Frequency dependence of the magnetization losses.

에서와 같은 히스테리시스손실의 주파수 의존성도 이론적으로도 잘 설명하고 있다[5].

4. 결론

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 측정된 자화손실은 상온상쇄법과 저온상쇄법에 무관하게 동일하였다

- 2) 측정된 자화손실은 코아 모델로부터 계산된 손실과 비교적 잘 일치하였으며, 이는 측정된 자화손실은 히스테리시스손실이 지배적임을 의미한다.
- 3) 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 임계상태모델 등)이 제안되고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제번호 : 2000-2-30200-002-3) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Kengo Miyamoto, Naoyuki Amemiya, Nobuya Banno, Masayasu Torii, Eiki Hatasa, Eiji Mizushima, Tomoyuki Nakagawa, "Measurement and FEM Analysis of Magnetization Loss in HTS Tapes," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*. Vol. 9, No. 2, pp. 770-773, 1999.
- [2] 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
- [3] Yukikazu Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, New York and London, pp. 280-283, 1994.
- [4] 심정욱, 이희준, 차귀수, 이지광, 한송엽, "고온초전도선재의 자화손실 측정," 전기학회논문지, 48B권 4호, pp. 182-186, 1999.
- [5] K. Yamafuji, T. Wakuda, T. Kiss, "Generalized critical state model in high- T_c superconductors," *Cryogenics*, Vol.37, No. 8, pp. 421-430, 1997.
- [6] Naoyuki Amemiya, Osami Tsukamoto, Masayasu Torii, Marian Ciszek, Hideo Kawasaki, Eiji Mizushima, Sadato Ishii, "Filament Decoupling and Magnetization Loss of Multifilamentary Bi2223 Superconducting Tapes," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*. Vol. 10, No. 1. pp. 1204-1207, 2000.
- [7] Nobuya Banno, Naoyuki Amemiya, Akihiko Mihoichi, Marian Ciszek, "Penetration Loss in BSCCO Tapes without Transport Current," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*. Vol. 9, No. 2, pp. 2565-2568, 1999.

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

도용용연구사업팀 선임연구원. 1996년~현재 전남대 전기공 학과 조교수.

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

E-mail : kwryu@chonnam.ac.kr



나 완 수 (羅 浣 洙)

1962년 6월 14일 생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공 학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공 학과 졸업(공박). 1991년~1993년 미국 Superconducting Super Collider lab. Guest Collaborator. 1991년~1995년 한국

전기연구소 초전도용용연구사업팀 선임연구원. 1995년~현재 성균관대 전기전자 컴퓨터 공학부 부교수

Tel : 031-290-7136, Fax : 031-290-7179

E-mail : Wsnah@yurim.skku.ac.kr



한 형 주 (韓 亨 周)

1974년 12월 1일 생. 2000년 호남대 전기 공학과 졸업. 2000년~현재 전남대 대학원 전기공학과 석사과정

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

E-mail: u0020495@chonnam.ac.kr



주 진 호 (朱 鎭 皓)

1961년 12월 6일 생. 1984년 성균관대 금속 공학과 졸업. 1986년 웨인 주립대 금속공학 과 졸업(석사). 1993년 미국 일리노이공대 금속재료공학과 졸업(공박). 1995년 동 대 학원 연구원 및 아르곤 국립연구소 객원연 구원. 1995년~현재 성균관대 금속재료공학

부 부교수

Tel : 031-290-7358, Fax : 031-290-7371

E-mail : jinho@skku.ac.kr



최 병 주 (崔 炳 柱)

1958년 12월 12일 생. 1981년 영남대 전기공 학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸 업(석사). 1996년 일본 Kyushu Univ.(九州 大學) 공학연구과 졸업(공박). 1983년~1986 년 현대중전기연구소 연구원. 1986년~1996

년 한국전기연구소 전력기기연구부, 초전도용용연구사업팀 선 임연구원. 1997년~현재 서라벌대 전기전자전산계열 조교수

Tel : 054-770-3703, Fax : 054-741-5429

E-mail : bjchoi@sorabol.ac.kr