

## 자장방향이 적층 Bi-2223도체의 자화손실에 미치는 영향

### Effect of Field Orientation on Magnetization Loss in a Stacked Bi-2223 Conductor

류 경우, 김 현준

(Ryu Kyung Woo and Kim Hyun Jun)

#### Abstract

The ac loss is an important issue in the design of high- $T_c$  superconducting power devices such as transformers and cables. In these devices many Bi-2223 tapes are closely stacked together and exposed to alternating magnetic fields that can have different orientations with respect to a tape. In such arrangement the magnetization loss is influenced by the screening current induced in adjacent tapes and thus different from that in a single tape. This stacking effect was experimentally investigated by measuring the magnetization loss in a stack, which consists of a number of tapes. First the magnetization loss in the single tape was measured in order to confirm the reliability of the loss data measured in the stack. The results for the single tape coincide well with the loss characteristics described in other previous works. For the stack in parallel and longitudinal magnetic fields the measured loss is independent of both the number of tapes and stacking type. The longitudinal magnetization loss is well explained rather by the slab model for decoupled filaments. For the tall stack in perpendicular field the measured loss at low fields is greatly decreased, compared to the loss of the single tape. However the loss at high fields is unaffected. These loss behaviors in the tall stack are well described by the slab model for full coupling.

**Key Words** : Longitudinal magnetic field, Magnetization loss, Parallel magnetic field,  
Perpendicular magnetic field, Stacked Bi-2223 conductor

#### 1. 서 론

최근 상용화에 성공한 Bi-2223테이프는 77 K 및 자기자계에서 공학적 임계전류밀도가 약 100 A/mm<sup>2</sup>급으로 전력 케이블 및 변압기 등에 응용할 정도로 충분히 전류밀도가 높아, 프로토타입의 고온초전도 전력기기에 응용되고 있다. 이와 같은 60 Hz의 고온초전도 전력기기의 설계·제작에 있어서

무엇보다도 중요한 문제는 초전도체에서 발생하는 교류손실로서, 이는 전류물 통해서 초전도체에 공급되는 통전손실과 외부자장으로부터 초전도체에 공급되는 자화손실로 구분할 수 있다. 국내의 경우, 지금까지는 이들 두 종류의 교류손실에 대한 연구는 1본의 Bi-2223테이프에만 국한되어 왔다 [1-3]. 그러나 케이블 및 변압기 시스템에서 Bi-2223테이프는 테이프 단독으로 사용되기보다는 다수본의 Bi-2223테이프를 적층한 구조(이하 적층 Bi-2223도체)로 응용되고 있다. 이와 같은 적층 Bi-2223도체의 경우에 있어서는 인접한 테이프와의 자기적 상호작용에 의해 그 통전손실특성은 1본 테이프의 손실보다 상당히 커지는 것으로 알려

전남대학교 공과대학 전기공학과  
(광주광역시 북구 용봉동 300,  
Fax : 062-530-1749  
Corresponding Author : kwryu@chonnam.ac.kr)  
2002년 8월 28일 접수, 2002년 9월 24일 최종 심사완료

져 있다[4]. 통전손실특성뿐만 아니라 적층 Bi-2223 도체의 자화손실특성 또한 인접한 테이프에 흐르는 차폐전류사이의 상호작용에 의해 1본 테이프의 자화손실특성과 상이해지는 것으로 알려져 있다 [5]. 따라서 본 연구에서는 Bi-2223테이프의 전력 케이블 및 변압기 등의 응용에 앞서 먼저 1본 Bi-2223테이프에 수직·수평방향의 자장을 인가할 때 자화손실특성을 조사하였다. 또한 실제 응용 상황을 고려하여 적층 Bi-2223도체에 수직, 수평 및 종방향의 자장을 인가할 때 자화손실특성을 조사하였으며, 이들을 1본 테이프특성과 비교·검토하였다.

## 2. 자화손실 이론

정현파적으로 변하는 시변자장이 제2종 초전도체에 인가되면 초전도체에는 차폐전류가 흘러 반자성특성이 나타난다. 이와 같은 시변자장에 의해 자속이 초전도체 내부에서 운동을 하게되면 비가역적인 자기적 특성 때문에 초전도체에는 히스테리시스성의 손실이 발생하게된다. 이와 같은 초전도체의 자기적 특성을 잘 설명하는 간단하면서도 가장 널리 쓰이고 있는 이론으로서는 Bean이론을 들 수 있으며, 이의 중요한 개념은 초전도체 내부에 흐르는 차폐전류밀도의 크기는 0 또는 초전도체의 고유한 특성인 임계전류밀도로 반드시 둘 중 하나가 되어야한다는 것이다[6]. 그리고 초전도체의 기하학적 형상이 비교적 간단한 경우에 한해서 외부자장에 의해서 발생하는 초전도체의 자화손실은 해석적으로 계산될 수 있으며, 특히 무한히 넓은 평판형 초전도체(이하 slab)의 면에 평행하게 인가한 외부자장에 의해 발생하는 초전도체 단위체적 당 slab의 자화손실(Q)은 식(1)(이하 slab모델)과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$Q = \frac{2B_m^3}{3\mu_0 B_p} : B_p > B_m,$$

$$Q = \frac{2B_p B_m}{\mu_0} \left( 1 - \frac{2B_p}{3B_m} \right) : B_p < B_m,$$

$$B_p = \mu_0 J_c a \quad (T) \quad (1)$$

여기서  $B_m$ 은 외부자장의 진폭을,  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율을,  $B_p$ 는 완전침투자장을,  $J_c$ 는 자기자계에서 임계전류밀도를,  $a$ 는 slab두께의 1/2를

각각 나타낸다. 또한 두께가 얇은 띠형 초전도체(이하 strip)의 폭에 수직하게 인가된 외부자장에 의해 발생하는 초전도체 단위체적 당 strip의 자화손실(Q)은 식(2)(이하 strip모델)과 같이 나타낼 수 있다[6].

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

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

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. 특히 비교적 큰 외부자장에 대해서는 식(2)은 다시 식(3)과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$Q = B_m J_c w \quad (3)$$

식(3)에 의한 자화손실은 비교적 큰 외부자장( $B_m \gg B_p$ )을 slab의 면에 평행하게 인가할 때 자화손실(식(1)의 근사 값)보다  $w/2a$ 배만큼 큰 것을 알 수 있다. 이는 고온초전도선재의 전형적인 형상인 테이프형상의 경우, 본질적으로 종횡비(테이프 폭/테이프 두께)가 크기 때문에 테이프의 면에 수직한 자장에 의해 발생하는 자화손실은 평행한 자장에 의한 자화손실보다 대략 종횡비만큼 큰 수밖에 없음을 의미한다. 따라서 테이프형상으로 밖에 고온초전도선재를 제작할 수밖에 없는 경우에는 테이프형상의 초전도체의 폭과 두께를 가능한 한 작게 해서 자화손실을 저감시키지 못하면 기존 구리도체와의 가격 및 효율 경쟁에서 불리하게 될 가능성도 배제할 수 없을 것이다.

## 3. 실험 샘플 및 방법

실험에 사용된 Bi-2223테이프의 사양을 표1에, 이들 테이프를 다수 본 적층시켜 완성된 두 종류의 Bi-2223도체 샘플을 그림 1에 각각 나타내었다. 표1에서 Bi-2223테이프 단면에서 필라멘트들이 배열된 영역을 코아(core)로 정의하였다. 또한 그림 1에서 테이프의 폭 방향 면이 서로 닿도록 적층시킨 샘플을 F형-도체(face-to-face)로, 두께 방향 면

이 서로 당도록 배열시킨 샘플을 E형-도체(edge-to-edge)로 각각 정의하였으며, 테이프를 적층시킬 때 두께 70  $\mu\text{m}$ 인 Kapton테이프를 사용하여 테이프사이를 절연시켜 테이프사이의 전기적 결합은 완전히 차단하였다. 또한 F형-도체의 경우는 Bi-2223테이프의 길이를 50 mm로 충분히 길게 하였고, E형-도체의 경우는 테이프를 길이 방향으

로 약 6 mm씩 절단한 후 적층하였으며, 각각의 도체에서 픽업코일은 참고문헌 [3]을 참조하여 도체 주위에 배열하였다

그림 1에서와 같이 준비된 샘플의 자화손실특성을 평가하기 위해 사용된 실험장치를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 외부자장 발생용 철심자석(공극이 45 mm  $\times$  175 mm  $\times$  10 mm, 자석상수는 10.7 mT/A)을 여자하기 위해서는 30 A, 50 V 전원을 사용하였으며, 역극성으로 접속된 픽업코일 및 상쇄코일 양단의 전압을 자속계(fluxmeter)로 적분하여 자화곡선을 측정하였다. 또한 샘플의 자화손실과는 전혀 무관한 자석으로부터 인가되는 외부자장 및 이와 동상인 자화(M)의 성분은 액체 질소 중에서 상쇄코일을 이용하여 상쇄시켰으며(이를 저온상쇄법) [3], 모든 실험은 77 K에서 수행되었다

표 1. Bi-2223테이프의 파라미터.

Table 1. Parameters of a Bi-2223 tape.

조성	Bi-2223(27%)/Ag(43%) /AgMgNi(30%)
테이프폭 $\times$ 두께	3.9 $\times$ 0.29 mm <sup>2</sup>
코아폭 $\times$ 두께	3.7 $\times$ 0.25 mm <sup>2</sup>
필라멘트폭 $\times$ 두께	295 $\times$ 35 $\mu\text{m}^2$
트위스트피치	$\infty$
필라멘트 수	37

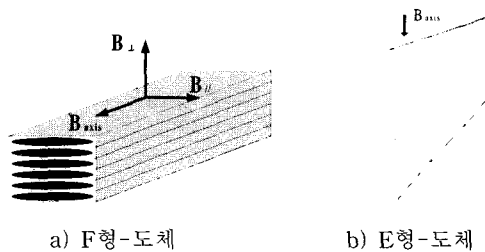


그림 1. Bi-2223도체 샘플.

Fig. 1. Bi-2223 conductor sample.

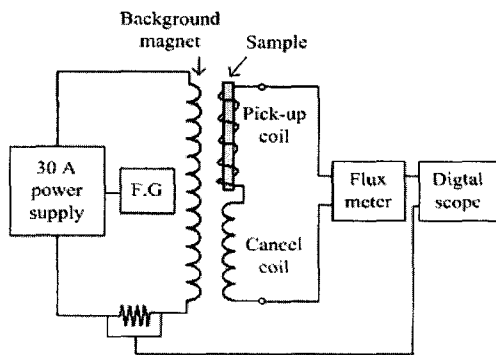
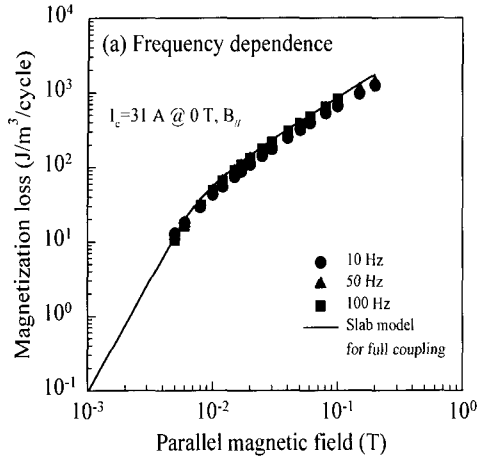


그림 2. 실험장치.

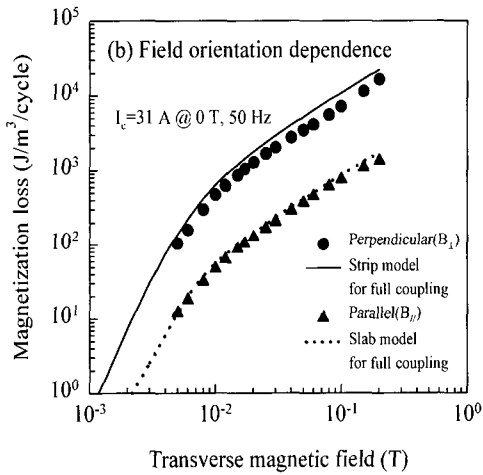
Fig. 2. Experimental setup.

#### 4. 실험 결과 및 검토

그림 3에는 전류를 흘리지 않은 상태에서 측정된 1본 Bi-2223테이프의 자화손실특성을 나타내었다. 그림 1에서와 같이 테이프 면에 수평한 자장을 인가한 경우에 대한 자화손실의 주파수 의존성을 나타낸 그림 3 a)에서 ●, ▲ 및 ■는 외부자장의 주파수를 10 Hz, 50 Hz 및 100 Hz로 하였을 때 측정된 자화손실을, 실선은 slab모델로부터 계산된 자화손실을 각각 나타내었다. 그림 3 a)에서 자화손실 계산 시 중요한 파라미터인 slab 두께는 표 1의 코아 두께를, 임계전류밀도는 측정된 임계전류를 코아 단면적으로 나눈 값을 각각 사용하였다. 그림 3 a)으로부터 Bi-2223테이프의 자화손실특성은 주파수에 의존하지 않으며, slab모델로부터 계산된 손실과도 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 Bi-2223테이프의 자화손실은 히스테리시스손실 메카니즘이 지배적임과 외형적으로는 분리된 것처럼 보이는 필라멘트들이 전기적으로는 완전히 결합되어 있음을 의미한다. 그리고 그림 3 b)에서 ● 및 ▲는 외부자장이 수직 및 수평인 경우 측정된 자화손실을, 실선은 strip모델로부터 계산된 자화손실을, 점선은 slab모델로부터 계산된 자화손실을 각각 나타내었다. 그림 3 b)에서 특히 strip모델로부터 손실을 계산할 때 중요한 파라미터인 strip의 두께 및 폭은 1본 테이프의 코아의 두께 및 폭을 각각 사용하였다. 그림 3 b)으로부터 수직자장에 대해 측정된 자화손실이 수평자장에 대해 측정된



a) 주파수 의존성



b) 자장방향 의존성

그림 3. 1본 Bi-2223테이프의 자화손실.

Fig. 3. Magnetization losses in the Bi-2223 tape.

손실보다 약 10 배 정도 큰 것을 볼 수 있다.

그림 4에는 그림 1 a)에서 보는 바와 같이 15본의 Bi-2223테이프를 적층시켜 완성된 F형-도체에 종자장을 인가한 경우, 자화손실의 주파수 의존성을 나타내었다. 그림 4에서 ●, ▲ 및 ■는 종자장의 주파수를 10 Hz, 50 Hz 및 100 Hz로 하였을 때 측정된 자화손실을, 실선은 slab모델로부터 계산된 자화손실을 각각 나타내며, 자화손실 계산 시 중요한 파라미터인 slab 두께는 표 1의 필라멘트 두께를, 임계전류밀도는 측정된 임계전류를 필라멘트의

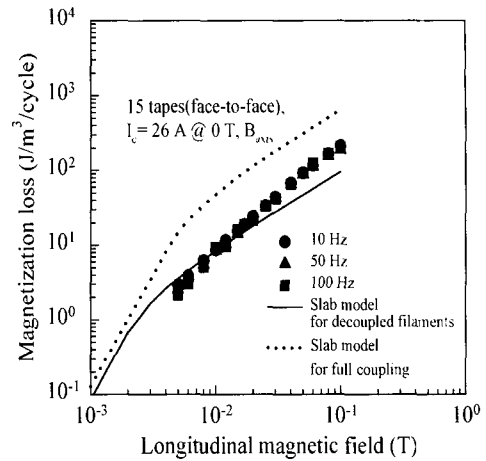
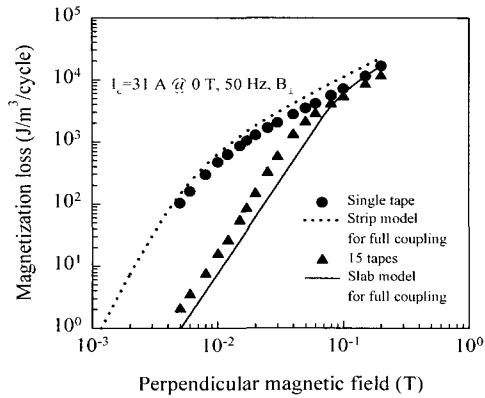


그림 4. 적층 Bi-2223도체에서 종자장에 대한 자화손실의 주파수 의존성.

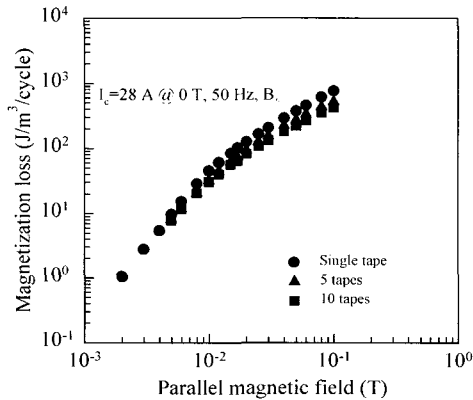
Fig. 4. Frequency dependence of the magnetization losses for longitudinal fields in the stacked Bi-2223 conductor.

총 단면적으로 나눈 값을 각각 사용하였다. 그림 4로부터 Bi-2223도체의 종자장에 대한 자화손실특성도 1본 Bi-2223테이프와 마찬가지로 주파수에는 의존하지 않고, slab모델로부터 계산된 손실과도 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 테이프에서처럼 Bi 2223도체의 자화손실도 히스테리시스 손실 메커니즘이 지배적임을 의미한다. 그러나 필라멘트들은 1본 Bi-2223테이프의 경우와는 달리 전기적으로 완전히 분리되어 있음을 의미한다.

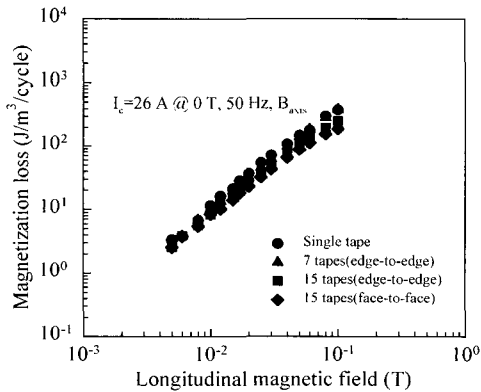
그림 5에는 그림 1에서와 같이 Bi 2223도체에 수직자장, 수평자장 및 종자장을 인가한 경우, 자화손실의 적층 본 수 의존성을 나타내었다. 그림 5 a)에서 ● 및 ▲는 1본 테이프 및 15본의 테이프를 그림 1 a)와 같이 적층시킨 F-형 도체에 수직자장을 인가하여 측정된 자화손실을, 실선 및 점선은 이들에 대하여 slab모델을 적용시켜 계산된 손실을, 그림 5 b)에서 ●, ▲ 및 ■는 1본 테이프, 5본 및 10본의 테이프를 그림 1 a)와 같이 적층시켜 완성된 F형-도체에 수평자장을 인가하여 측정된 자화손실을, 그림 5 c)에서 ●는 1본 테이프에 종자장을 인가하여 측정된 자화손실을, ▲ 및 ■는 7본 및 15본의 테이프를 그림 1 b)와 같이 적층시켜 완성된 E형-도체에 종자장을 인가하여 측정된 자화손실을, 그리고 ◆는 15본의 테이프를 그림 1 a)와



a) 수직자장



b) 수평자장



c) 종자장

그림 5. 적층 Bi-2223도체에서 자화손실의 적층 분수 의존성.

Fig. 5. Stacked tape number dependence of the magnetization losses in the stacked Bi-2223 conductor.

같이 적층시켜 완성된 F형-도체에 종자장을 인가하여 측정된 자화손실을 각각 나타낸다. 그림 5로부터 수직자장에 대한 적층 Bi-2223도체의 측정된 자화손실은 비교적 외부자장이 큰 영역에서는 1본 테이프의 손실과 거의 유사한 반면 비교적 외부자장이 작은 영역에서는 1본 테이프의 손실보다 대단히 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 적층 도체에 대해 측정된 자화손실은 slab모델로부터 계산된 자화손실과 비교적 잘 일치하는 것도 볼 수 있으며, 이는 높이가 높은 F형 적층 도체에 수직으로 인가되는 응용에서 자화손실을 예측하는데 slab모델이 유용함을 의미한다. 그리고 수평자장 및 종자장에 대한 적층 Bi-2223도체의 자화손실은 외부자장이 비교적 큰 영역에서는 물론 적층 분수가 많아짐에 따라 자화손실이 미미하게 감소하는 경향을 볼 수 있지만 전반적으로는 적층 분수에는 그다지 의존하지 않음을 볼 수 있다.

그림 6에는 그림 1 a)에서 보는 바와 같이 15본의 Bi-2223테이프를 적층시켜 완성된 F형-도체에서 자화손실의 자장방향 의존성을 나타내었다.

그림 6에서 ●, ▲ 및 ■는 F형-도체에 수직, 수평 및 종자장을 각각 인가하여 측정된 자화손실을 나타낸다. 그림 6으로부터 적층 Bi-2223도체의 자화손실은 1본 테이프의 자화손실특성과 마찬가지로 자장방향에 매우 의존하는 것을 볼 수 있다.

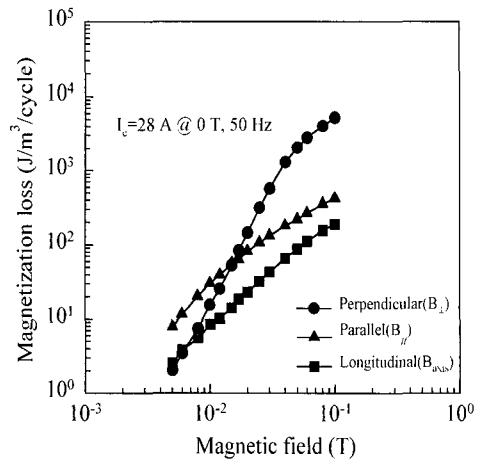


그림 6. 적층 Bi-2223도체에서 자화손실의 자장방향 의존성.

Fig. 6. Field orientation dependence of the magnetization losses in the stacked Bi-2223 conductor.

그러나 1본 테이프의 자화손실은 전 외부자장 영역에 걸쳐 수직자장에 대한 손실, 수평자장에 대한 손실 및 종자장에 대한 손실 순서로 작아지는 반면 적층 Bi-2223도체에 대해 측정된 자화손실은 특히 비교적 외부자장이 작은 영역에서 수직자장에 대한 손실이 수평자장에 대한 손실보다 작아져 거의 종자장에 대한 손실 수준으로 작아지는 것을 볼 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 Bi-2223테이프의 케이블 및 변압기 등의 응용에 앞서 응용시스템에서 Bi-2223테이프의 실제 상황을 고려하여 제작된 적층 Bi-2223도체 샘플에 대한 자화손실특성을 조사·검토하였으며, 중요한 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 1본 Bi-2223 테이프의 자화손실특성은 외부자장의 방향에는 대단히 의존하며, 수직자장에 대한 자화손실이 수평자장에 대한 자화손실보다 약 10 배 이상 크다. 또한 측정된 자화손실은 테이프의 코아플 slab 또는 strip으로 본 slab모델 및 strip모델로부터 계산된 자화손실과 비교적 잘 일치한다.
2. 적층 Bi-2223도체의 자화손실특성은 수평 및 종자장이 인가되는 경우는 1본 Bi-2223테이프의 자화손실특성과 거의 유사한 반면 수직자장이 인가되는 경우는 1본 Bi-2223테이프의 자화손실특성과는 매우 달리 특히 외부자장이 작은 영역에서 수직자장에 대한 자화손실이 수평자장에 대한 손실 보다 오히려 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한 실험결과와의 이론적 비교·검토 결과로부터 케이블 및 변압기 등과 같이 수십 본의 Bi-2223테이프를 적층시킨 구조로 된 응용시스템에서 자화손실을 예측하는데 있어서 수평자장이 인가되는 경우는 1본 테이프에 대한 slab모델을, 수직자장이 인가되는 경우는 적층 도체 자체를 하나의 slab으로 본 slab모델을 적용해도 타당할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의

해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] 류경우, 박권배, 차귀수, 최경달, 이시광, 한송엽, "장척 Bi-2223/AgMgNi테이프의 자기자계손실 특성", 전기학회논문지, 49B권, 4호, p. 240, 2000.
- [2] 류경우, 김창완, 차귀수, "외부교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 통전손실 특성", 전기학회논문지, 50B권, 6호, p. 290, 2001.
- [3] 류경우, 한형주, 최병주, 나완수, 주진호, "수평자장에 대한 Bi-2223테이프의 자화손실 특성", 전기학회논문지, 50B권, 4호, p. 158, 2001.
- [4] K. Ryu, K. B. Park, and G. Cha, "Effect of the neighboring tape's AC currents on transport current loss of a Bi 2223 tape", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol. 11, No. 1, p. 2220, 2001.
- [5] M. P. Oomen, J. J. Rabbers, B. T. Haken, J. Rieger, and M. Leghissa, "Magnetization loss in stacks of high-Tc superconducting tapes in a perpendicular magnetic field," Physica C, Vol. 361, p. 144, 2001.
- [6] E. H. Brandt and M. Indenbom, "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field", Physical Review B, Vol. 48, p. 12893, 1993.