

단층원통형 고온초전도도체의 교류손실 특성

AC Loss Characteristics of a Single-layered Cylindrical High Temperature Superconductor

마용호¹, 이주영¹, 류경우^{1,a}, 손승호², 황시돌²
(YongHu Ma¹, ZhuYong Li¹, KyungWoo Ryu^{1,a}, SongHo Sohn², and SiDol Hwang²)

Abstract

The AC loss is an important issue in the design of the high temperature superconductor (HTS) power cables and fault current limiters. In these applications, a cylindrical HTS conductor is often used. In commercialization of these apparatuses, AC loss is a critical factor but not elucidated completely because of complexities in its measurement, e.g. non-uniform current distribution and phase difference between currents flowing in an individual HTS tape. We have prepared two cylindrical conductors composed of a Bi-2223 tape with different critical current density. In this paper, the AC loss characteristics of the conductors have been experimentally investigated and numerically analyzed. The result show that the measured losses for two conductors are not dependent on both arrangements and contact positions of a voltage lead. This implies that most of loss flux is only in the conductors. The loss for the Bi-2223 conductor with low critical current density is in good agreement with the calculated loss from Monoblock model, whereas the loss measured for the Bi-2223 conductor with high critical current density doesn't coincide with the loss calculated from the Monoblock model. The measured loss is also different from numerically calculated one based on the polygon model especially in low transport current.

Key Words : AC loss, High and low critical current density Bi-2223 tape,
Cylindrical high temperature superconductor, Uniform current distribution

1. 서론

고온초전도선재 기술의 진보에 힘입어 전력분야 응용연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 고온초전도선재를 이용한 원통형 고온초전도도체는 전력케이블뿐만 아니라 한류기 등 여러 분야에 적용되고 있다. 이와 같은 케이블 및 한류기의 상용화에 있어서 교류손실은 경제성측면에서 커다란 걸림돌이 되고 있으며, 이들의 교류손실에 대한 정확하

측정법과 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 교류손실의 측정법에는 열적인 방법과 전기적 방법이 있는데, 특히 전기적 방법을 이용한 교류손실 평가에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으며 결과 상당한 진보를 가져왔다[3].

대전류용량 원통형 고온초전도도체의 경우 제작과정에서의 열화, 고온초전도선재간의 불균일한 전류분포 및 서로 다른 위상차 그리고 고온초전도선재의 배열 등 많은 복잡한 문제로 인하여 교류손실의 평가 및 해석이 매우 난해하다[4,5]. 따라서 본 연구에서는 전류밀도가 상이한 고온초전도선재를 사용하여 이들을 원통형의 구조물 위에 직선으로 배열한 단층원통형 고온초전도도체를 제작하였으며, 이들에 대한 교류손실을 실험적으로 조사하였고, 그 결과를 이론적 및 수치해석적 방법을 이용하여 비교·검토하였다.

1. 전남대학교 전기공학과
(광주시 북구 용봉동 300)
2. 한국전력공사 전력연구원
a. Corresponding Author : kwryu@chonnam.ac.kr
접수일자 : 2007. 5. 16
1차 심사 : 2007. 6. 14
심사완료 : 2007. 6. 22

표 1. 단층원통형 도체의 사양.
Table 1. Specifications of the single-layered cylindrical conductors.

도체 A	Bi-2223/Ag/Stainless	27%/43%/30%
	테이프의 폭과 두께	3.9 mm × 0.3 mm
	코아영역의 폭과 두께	3.7 mm × 0.26 mm
	필라멘트의 수	37
	n-value	11.5
	포머의 직경	11.9 mm
도체 B	Bi-2223/Ag/Stainless	38%/40%/22%
	테이프의 폭과 두께	4.1 mm × 0.3 mm
	코아영역의 폭과 두께	3.9 mm × 0.15 mm
	필라멘트의 수	55
	n-value	10.8
	포머의 직경	12.6 mm
테이프의 수		10
임계전류 (77K)		1175 A

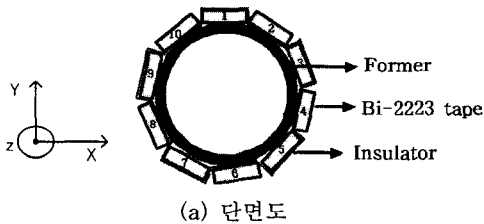


그림 1. 단층원통형 도체의 단면도 및 샘플사진.
Fig. 1. Cross-sectional view and photograph of the single-layered cylindrical superconductor.

2. 실험 샘플 및 방법

단층원통형 고온초전도도체의 교류손실 특성을 조사하기 위하여 임계전류밀도(∼20 A/mm² 및 ∼100 A/mm²)가 상이한 Bi-2223테이프를 사용하여 원통형의 구조물 위에 배열한 두 가지 도체 샘플 도체 A와 도체 B를 제작하였으며, 그 주요사양을 표 1에 나타내었다.

그림 1에는 표 1의 사양에 따라 제작된 단층원통형 고온초전도도체 샘플에 대한 단면도 및 사진을 각각 나타내었다. 그림 1(a)는 샘플의 단면도로 10본의 테이프를 구조물위에 배열한 형상을 보여주며, 테이프 간을 절연함으로써 전류분류를 방지

하였으며, 또한 인접한 테이프간의 갭(gap)이 교류손실 특성에 크게 영향을 미치기 때문에 테이프사이의 갭을 가능한 한 0이 되도록 하였다[5].

단층원통형 고온초전도도체의 교류손실을 측정함에 있어서 본 실험에서는 1500 A/10 V 전원을 사용하였으며, 도체를 구성하는 각각의 테이프에 흐르는 전류의 크기와 위상을 정확하게 일치시키기 위해서 외부에 리액터를 사용하였다[4]. 또한 교류손실은 각각의 Bi-2223테이프에 부착된 전압리드 양단의 전압과 도체에 흐르는 전류로부터 구하였으며, 이때 전압리드의 길이는 500 mm로 충분히 길게 하여 평가하였다. 본 연구에서 모든 실험은 액체질소 온도인 77 K에서 하였다.

3. 수치해석모델링

단층원통형 고온초전도도체는 원통형구조물 위에 배열 되어 있지만 실제로는 그림 1(a)와 같이 다각형의 형상으로 배열되어 있다고 생각해도 좋으며, 이에 대한 교류손실 해석을 위해서는 2차원적인 모델링이 가능하며, 그 지배방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

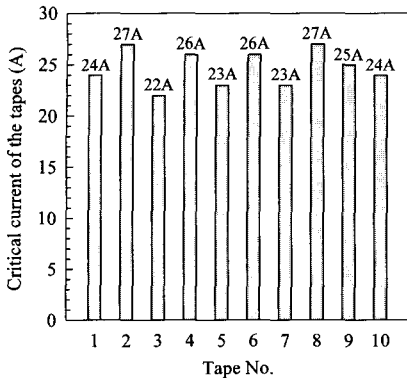
$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu_0} (\nabla A_z) = -\sigma(E_z) [\nabla V]_z - \sigma(E_z) \frac{\partial A_z}{\partial t}, \quad (1)$$

여기서 μ_0 는 자유공간의 투자율, A_z 는 z방향의 자위 벡터자기포텐셜, $\sigma(E_z)$ 는 초전도체의 전도도, V 는 스칼라전위를 각각 나타내며, 상기 식(1)의 수치해석에 대한 상세사항은 참고문헌 [6]에 설명되어 있다. 또한 수치해석에 사용된 각종 초전도특성 파라미터들은 표 1에 요약하여 나타내었다.

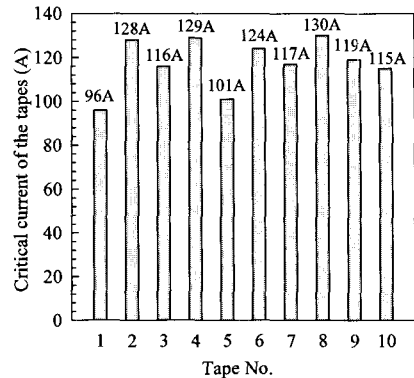
초전도체의 전도도는 전압 - 전류 특성 즉 실험적 결과로부터 구해질 수 있고, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma(E_z) = \frac{\frac{1-n}{E_z^n} J_c}{\frac{1}{E_c^n}}, \quad (2)$$

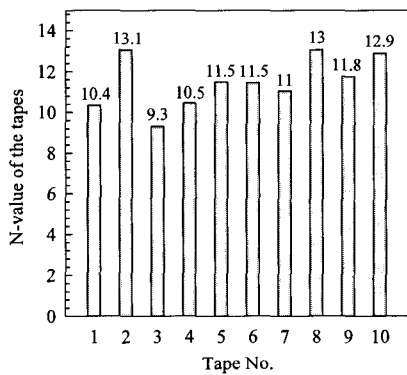
여기서 $\sigma(E_z)$ 는 전도도를, E_z 는 z-성분의 전계, E_c 는 임계전계 (1×10^{-4} V/m)를, J_c 는 임계전류 밀도를, n은 초전도체의 N-value를 각각 나타낸다. 또한 단층원통형 고온초전도도체의 단위 길이 당 교류손실은 Bi-2223테이프 단면 중, 각각의 코아영역에서 발생하는 교류손실을 합하여 계산하였다.



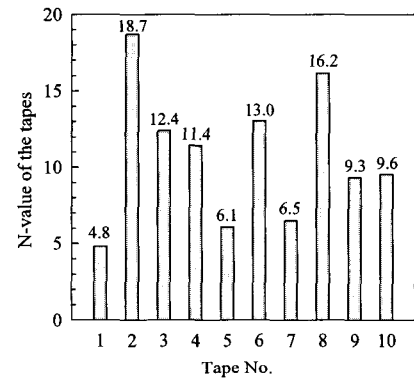
(a) 임계전류 특성



(a) 임계전류 특성



(b) N-value 특성



(b) N-value 특성

그림 2. 도체 A에서 Bi-2223테이프의 DC 특성.

Fig. 2. DC characteristics of the Bi-2223 tapes in the conductor A.

그림 3. 도체 B에서 Bi-2223테이프의 DC 특성.

Fig. 3. DC characteristics of the Bi-2223 tapes in the conductor B.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 2 및 그림 3에는 단층원통형 고온초전도도체의 교류손실에 대한 이론적 고찰에서 중요한 도체를 구성하는 각각의 Bi-2223테이프에 대하여 측정된 임계전류 및 N-value를 나타내었다.

그림 2(a) 및 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 도체를 구성하는 각각의 Bi-2223테이프의 임계전류는 테이프의 임계전류밀도에 관계없이 비교적 균일한 (도체 A의 임계전류 불균일정도는 15 %이내, 도체 B의 경우는 20 %이내) 반면, 낮은 임계전류밀도의 Bi-2223테이프를 구성한 단층원통형 도체 A의 경우 Bi-2223테이프의 N-value는 비교적 균일하지만 높은 임계전류밀도 특성을 지닌 Bi-2223테이프를 구성한 단층원통형 도체 B에 있어서 각

테이프의 N-value는 대단히 불균일한 것을 볼 수 있다. 따라서 각 테이프에 대해 측정된 그림 2 및 그림 3의 데이터를 평균하여 단층원통형 도체의 임계전류 및 N-value를 정의하였으며, 이들을 표 1에 각각 나타내었다.

그림 4에는 교류손실에 대한 올바른 평가방법을 정립하기 위하여 먼저 전압리드의 배열이 측정에 미치는 영향을 단층원통형 도체 A에 대하여 실험적으로 조사하였으며, 이를 위해 tape 1에 배열이 상이한 0 mm, 3 mm, 6 mm의 전압리드를 부착하였다.

그림 4로부터 측정된 교류손실은 전압리드의 배열에 무관하게 모두 동일하며, 이는 단층원통형 도체에 대한 교류손실을 측정하는데 있어서 어떠한 배열의 전압리드를 사용해도 좋을음을 의미한다.

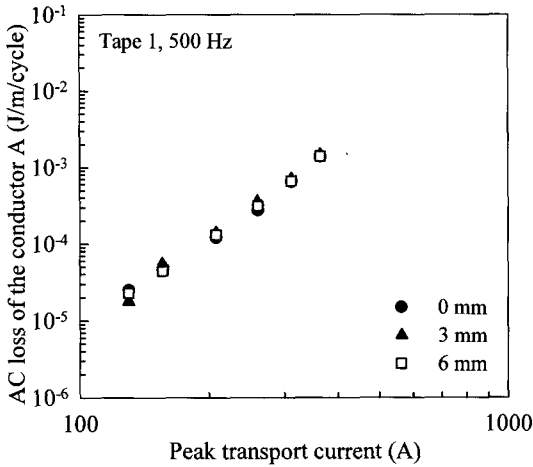


그림 4. 도체 A에서 교류손실의 전압리드 배열 의존성.

Fig. 4. Voltage lead's arrangement dependence of the AC losses in the conductor A.

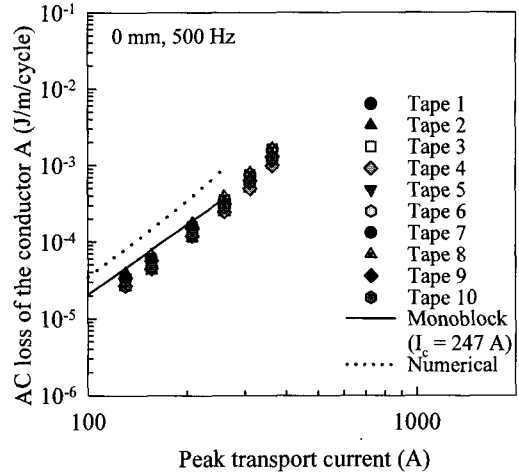


그림 6. 도체 A에서 교류손실의 접촉위치 의존성.

Fig. 6. AC loss vs. peak transport current for different contact positions in the conductor A.

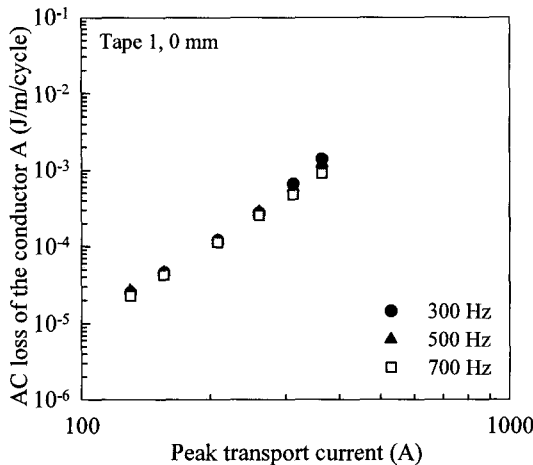


그림 5. 도체 A에서 교류손실의 주파수 의존성.

Fig. 5. Frequency dependence of the AC losses in the conductor A.

그림 5에는 임계전류밀도가 낮은 Bi-2223테이프 로 구성된 단층원통형 도체 A의 측정된 교류손실에 대한 주파수 의존성을 나타낸다.

그림 5로부터 측정된 교류손실은 주파수에 무관하게 모두 동일하며, 이는 단층원통형 도체에 대한 교류손실은 히스테리시스 손실이라는 것을 알 수 있다.

그림 6에는 임계전류밀도가 낮은 Bi-2223테이프 로 구성된 단층원통형 도체 A의 측정된 교류손실에 대한 전압리드의 접촉위치 의존성을 나타낸다. 그림 6에서 실선은 이상적인 원통형 도체의 교류손실에 대한 이론적 고찰에 자주 사용되는 Monoblock모델로부터 계산된 손실을, 점선은 그림 1(a)에서와 같이 다각형모델에 근거하여 수치해석적 방법으로부터 계산된 손실을 각각 나타낸다. 또한 Monoblock모델 이론식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$Q = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi \delta^2} ((1 - \delta\beta) \ln(1 - \delta\beta) + \delta\beta(1 - \delta\beta/2)), \quad (3)$$

$$\delta = 1 - (R_i/R_o)^2, \quad \beta = I_p/I_c, \quad (4)$$

여기서 I_c 는 원통형 도체의 임계전류, R_i 와 R_o 는 도체의 내반경 및 외반경, I_p 는 도체에 흐르고 있는 전류의 피크치를 각각 나타내며, 계산에 사용된 R_i 와 R_o 그리고 I_c 는 표 1에 나타내었다.

그림 6으로부터 단층원통형 도체 A의 측정된 교류손실은 전압리드의 접촉위치에 무관하게 거의 동일하다. 또한 측정된 교류손실은 Monoblock모델로부터 계산된 손실 값과 비교적 잘 일치하는 반면, 다각형 모델에 근거한 수치해석 결과와는 일치하지 않는 것을 볼 수 있다.

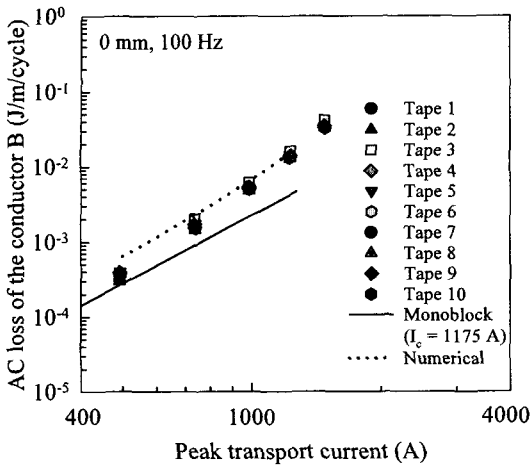


그림 7. 도체 B에서 교류손실의 접촉위치 의존성.
 Fig. 7. AC loss vs. peak transport current for different contact positions in the conductor B.

그림 7에는 그림 6에서 Bi-2223테이프보다 임계전류밀도가 약 5배정도 큰 Bi-2223테이프로 구성된 단층원통형 도체 B의 측정된 교류손실에 대한 전압리드의 접촉위치 의존성을 나타낸다. 그림 7에서 실선 및 점선은 그림 6에서와 동일하다.

그림 7에서 보는 바와 같이 측정된 교류손실은 그림 6에서처럼 전압리드의 접촉위치에 의존하지 않으나, 임계전류밀도가 5배정도 큰 단층원통형 도체 B에 대하여 측정된 교류손실은 그림 6과는 달리 Monoblock모델 이론값 및 다각형모델에 근거한 수치해석으로부터 계산된 손실과도 일치하지 않는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 임계전류밀도가 상이한 다수 본의 Bi-2223테이프를 사용하여 대전류용량 단층원통형 고온초전도도체를 제작하였으며, 이들에 대한 교류손실 특성을 실험적으로 조사하였으며, 또한 측정된 실험결과에 대하여 이론적으로 검토 및 고찰을 하였다.

그 주요결과를 요약하면 임계전류밀도가 낮은 단층원통형 도체 A의 측정된 교류손실은 Monoblock 모델 이론값과 비교적 잘 일치하는 반면 임계전류밀도가 높은 단층원통형 도체 B의 측정된 교류손

실은 Monoblock모델 이론값 및 다각형모델에 근거한 수치해석 결과와도 상이함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 류경우, 최병주, "인접교류전류가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p. 251, 2001.
- [2] 류경우, 마용호, "코일형 한류소자의 교류손실 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 4호, p. 370, 2005.
- [3] R. C. Duckworth, M. J. Gouge, J. Caughman, J. W. Lue, J. A. Demko, J. Tolbert, C. L. H. Thieme, and D. T. Verebelyi, "On the effect of NiW on the inductance and AC loss of HTS cables", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, p. 1578, 2005.
- [4] K. Ryu, S. D. Hwang, S. W. Kim, and S. Hahn, "Influence of tape's critical currents and current distributions on ac loss measurement in a multi-tape conductor", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, p. 1611, 2005.
- [5] R. Inada, Y. Nakamura, A. Oota, T. Fukunaga, and P. X. Zhuang, "Effect of wire arrangements on AC transport losses in cylindrical conductors composed of Ag-sheathed Bi-2223 tapes", Physica C, Vol. 412-414, p. 1148, 2004.
- [6] S. Choi, W. Nah, J. H. Kim, J. Joo, Y. H. Jo, and K. Ryu, "AC transport current loss of horizontally attached Bi-2223/Ag tapes", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, p. 1894, 2004.
- [7] 조영호, "모델고온초전도케이블의 교류손실 평가기술에 관한 연구", 전남대학교 2005년 석사학위 졸업논문, 2005.
- [8] C. M. Friend, D. M. Spiller, L. Le Lay, S. A. Awan, and T. P. Beales, "Using electrical measurements to determine the self-field ac losses of cable models", Physica C, Vol. 309, p. 187, 1998.