

전류용량이 단층원통형 고온초전도도체의 교류손실 특성에 미치는 영향

마용호\*, 이주영\*, 류경우\*, 임지현\*\*, 손승호\*\*, 황시돌\*\*  
 전남대학교\*, 한전전력연구원\*\*

Influence of Current capacity on AC Loss Characteristic in Single-layered Cylindrical High Temperature Superconductor

Y. H. Ma\*, Z. Y. Li\*, K. Ryu\*, J. H. Lim\*\*, S. H. Sohn\*\*, S. D. Hwang\*\*  
 Chonnam National University\*, KEPRI\*\*

**Abstract** - 초전도전력케이블에서 교류손실은 케이블의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 냉동기비용 증가로 인한 기존 케이블과의 가격경쟁에서 경제성을 저하시키는 주된 요인으로 작용하기 때문에 이의 상용화에 앞서 교류손실에 대한 정확한 규명이 되어야 한다. 그러나 다수분으로 구성되는 단층원통형의 고온초전도전력케이블에서 교류손실을 올바르게 평가하는 것은 테이프의 상이한 임계전류, 전압리드의 배열, 전류분포의 불균일성 및 인접한 테이프에 흐르는 전류위상 상이 등 복잡한 영향인자 때문에 매우 난해하다. 본 연구에서는 고온초전도전력케이블과 같은 단층원통형 고온초전도도체를 제작하여 실험적으로 교류손실 특성을 규명하였고, 또한 전류용량이 교류손실 특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 결과 원통형 고온초전도도체에서 교류손실 특성은 전류용량보다는 임계전류밀도에 더 의존하였다.

사용하여 전류용량이 상이한 단층원통형 고온초전도도체를 제작되었으며, 이러한 도체의 교류손실을 실험적으로 조사하였고, 그 결과를 이론적 및 수치해석적 방법을 이용하여 비교 검토하였다.

2. 실험 샘플 및 방법

전류용량이 단층원통형 고온초전도도체의 교류손실 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 먼저 임계전류가 서로 다른 Bi-2223테이프를 사용하여 원통형구조물 위에 직선적으로 배열한 세 가지 단층원통형 고온초전도도체 A, B, C를 제작하였으며, 그 주요사양을 표 1에 나타내었다. 그림 1은 제작된 단층원통형 고온초전도도체의 단면도, 개략도 및 사진이다. 단층원통형 고온초전도도체 A, B, C는 전부 10본의 Bi-2223테이프 구성되었으며 테이프 간의 절연함으로써 전류분류를 방지하였고, 또한 인접한 테이프간의 갭(gap)이 교류손실 특성에 미치는 영향을 고려하여 테이프사이의 갭을 가능한 한 0이 되게 하였다.

단층원통형 고온초전도도체의 교류손실을 측정함에 있어서 본 실험에서는 도체를 구성하는 각각의 테이프에 흐르는 전류의 크기 및 위상을 정확하게 일치시키기 위하여 외부에 리액터를 사용하였고 교류손실은 각각의 Bi-2223테이프에 부착된 전압리드 양단의 전압과 도체에 흐르는 전류로부터 구하였으며, 이때 전압리드의 길이는 500 mm로 충분히 길게 하여 평가하였고 모든 실험은 액체질소 온도인 77K에서 하였다.

3. 수치해석모델링

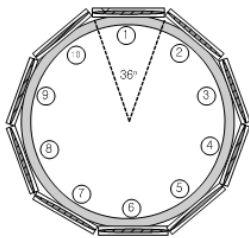
단층원통형 고온초전도도체에서 10본의 Bi-2223테이프는 원통형구조물 위에 배열 되어 있어 실체는 그림 1 a)와 같이 다각형의 형상으로 배열되어 있다. 이에 대한 교류손실 해석을 위해서는 2차원적인 모델링이 가능하며, 그 지배방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

<표 1> 단층원통형 고온초전도도체의 사양.

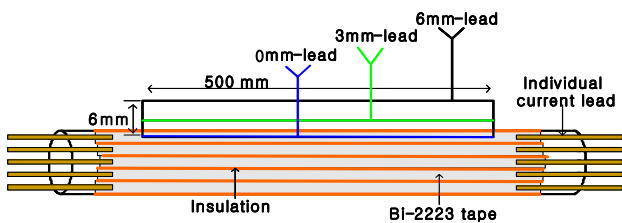
	Bi-2223/Ag/Solder/Brass	28%/42%/5%/25%
	테이프의 폭과 두께	4.39 mm× 0.7 mm
도체 A	코어영역의 폭과 두께	3.9 mm× 0.15 mm (twin core)
(High J <sub>c</sub> )	n-value	18
	포머의 직경	14.26 mm
	테이프의 수	10
	임계전류 (77K)	2650 A
	Bi-2223/Ag/Solder/Brass	38%/40%/22%
	테이프의 폭과 두께	4.1 mm× 0.3 mm
도체 B	코어영역의 폭과 두께	3.9 mm× 0.15 mm
(High J <sub>c</sub> )	필라멘트의 수	55
	n-value	10.8
	포머의 직경	12.6 mm
	테이프의 수	10
	임계전류 (77K)	1175 A
	Bi-2223/Ag/Ag alloy	27%/43%/30%
	테이프의 폭과 두께	3.9 mm× 0.3 mm
도체 C	코어영역의 폭과 두께	3.7 mm× 0.26 mm
(Low J <sub>c</sub> )	필라멘트의 수	37
	n-value	11.5
	포머의 직경	11.9 mm
	테이프의 수	10
	임계전류 (77K)	247 A

1. 서 론

고온초전도선재 기술의 진보에 힘입어 전력분야응용연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 다수분의 고온초전도선재를 이용한 원통형 고온초전도도체는 전력케이블뿐만 아니라 한류기 등 여러 분야에 적용되고 있다. 이와 같은 케이블 및 한류기의 상용화에 있어서 교류손실은 경제성 측면에서 커다란 걸림돌이 되고 있으며, 이들의 교류손실에 대한 정확한 측정법과 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전류용량이 큰 원통형의 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. 따라서 본 연구에서는 임계전류가 상이한 Bi-2223 테이프를



a) 단면도

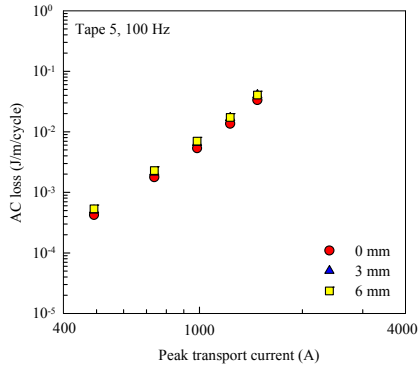


b) 개략도

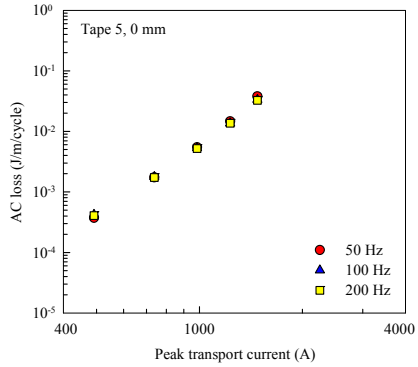


c) 사진

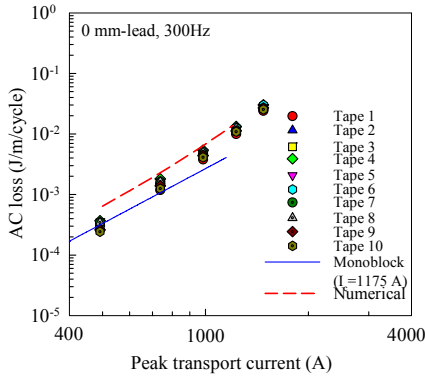
<그림 1> 단층원통형 고온초전도도체의 단면도, 개략도 및 사진



a) 전압리드 배열 의존성



b) 주파수 의존성



c) 접촉위치 의존성

〈그림 2〉 단층원통형 고온초전도도체 B에서 전압리드 배열, 주파수 및 접촉위치 의존성.

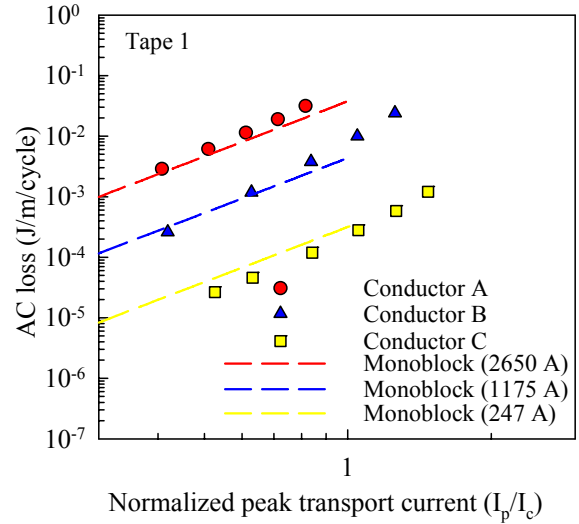
$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu_0} (\nabla A_z) = -\sigma(E_z) [\nabla V]_z - \sigma(E_z) \frac{\partial A_z}{\partial t}, \quad (1)$$

여기서  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율,  $A_z$ 는 z방향의 자위 벡터자기포텐셜,  $\sigma(E_z)$ 는 초전도도체의 전도도,  $V$ 는 스칼라전위를 각각 나타내며, 상기 식 (1)의 수치해석에 대한 상세사항은 참고문헌 [1]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.

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

여기서  $\sigma(E_z)$ 는 전도도를,  $E_z$ 는 z-성분의 전계를,  $E_c$ 는 임계전계 ( $1 \times 10^{-4}$  V/m)를,  $J_c$ 는 임계전류밀도를, n은 초전도체의 N-value를 각각



〈그림 3〉 단층원통형 고온초전도도체 A, B, C의 교류손실

나타낸다. 또한 단위 길이 당 교류손실은 Bi-2223테이프 단면 중, 각각의 코어영역에서 발생하는 교류손실을 합하여 계산하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 도체 B에 대한 전압리드 배열 의존성, 주파수 의존성 및 접촉위치 의존성을 나타낸다. 그림 2 a), b)로부터 측정된 단층원통형 고온초전도도체의 교류손실은 전압리드 배열 및 주파수의 변화에도 무관하게 일정함을 알 수 있다. 그림 2 c)에서 실선은 이상적인 원통형 도체의 교류손실에 대한 이론적 고찰에 자주 사용되는 Monoblock모델로부터 계산된 손실을, 점선은 그림 1 a)에서와 같이 다각형모델에 근거한 수치해석적 방법으로부터 계산된 손실을 각각 나타낸다[1]. 그림 2 c)로부터 단층원통형 고온초전도도체의 측정된 교류손실은 전압리드의 접촉 위치에 무관하게 거의 동일하며 또한 측정된 교류손실은 Monoblock모델로부터 계산된 손실값 및 다각형모델에 근거한 수치해석 결과와도 일치하지 않다는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 전류용량이 상이한 도체 A, B, C에 대한 교류손실을 각각 나타내었으며 Monoblock모델로부터 계산된 값과 비교하여 나타내었다. 표 1에서 알 수 있듯이 도체 A와 도체 B는 사실상 임계전류밀도가 비슷하며 도체 C에 비해 임계전류밀도가 매우 높다. 그림 3의 결과로부터 단층원통형 고온초전도도체의 교류손실은 Monoblock이론값에 어느 정도 근접하나 손실특성은 서로 다르다. 임계전류밀도가 높은 도체 A와 도체 B는 손실특성이 Monoblock모델로부터 계산된 이론값과는 서로 차이를 보이는 반면 임계전류밀도가 낮은 도체 C는 손실특성이 Monoblock이론값과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 단층원통형 고온초전도도체의 교류손실은 전류용량에는 무관하나 임계전류밀도에는 의존함을 알 수 있다.

### 4. 결 론

실험결과에 대한 주요사항을 요약해 보면, 측정된 단층원통형 고온초전도도체의 교류손실은 전압리드의 배열에 무관하게 일정하였으며, 이는 원통형도체의 경우 손실자속은 도체내부에 존재함을 의미한다. 또한 측정된 교류손실은 주파수 및 전압리드의 접촉위치의 변화에도 무관하게 일정하였으며, 이는 본 실험에서 평가된 교류손실의 신뢰성이 매우 우수함을 의미한다. 단층원통형 고온초전도도체의 교류손실 특성은 전류용량에는 의존하지 않으나 임계전류밀도에는 의존함을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부와 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

[1] 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 conductors," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol 14, no 2, pp.1894-1897, 2004.