

### 다수본 고온초전도도체의 통전손실 특성

마용호\*, 이주영\*, 류경우\*, 손승호\*\*, 황시돌\*\*  
 전남대학교\*, 한국전력연구원\*\*

### AC loss Characteristics of a Multi-tape High temperature Superconductor

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

**Abstract** - 다수본의 Bi-2223테이프를 구성되는 초전도전력케이블에서 발생하는 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 다수본으로 구성되는 고온초전도전력케이블의 교류손실을 올바르게 평가하는 것은 테이프의 상이한 임계전류, 전압리드의 배열, 전류분포의 불균일성 및 인접한 테이프에 흐르는 전류위상 상이 등 복잡한 영향인자 때문에 매우 난해하다. 이와 같은 교류손실 평가와 관련된 복잡한 문제들을 규명하기 위해 다수본의 고온초전도도체 샘플을 제작하였으며 그 손실 특성을 실험적으로 조사 및 검토 하였다. 그 결과 다수본 고온초전도도체의 측정된 교류손실은 Monoblock모델 이론값 및 다각형모델에 근거한 수치해석 결과와도 상이함을 알 수 있다.

#### 1. 서 론

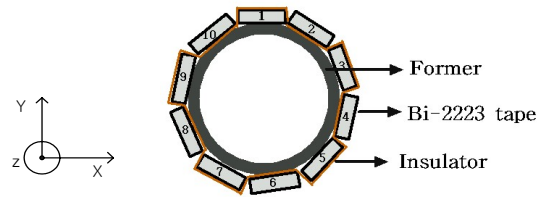
고온초전도선 기술의 진보에 힘입어 전력분야응용연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 고온초전도선재를 이용한 다수본의 고온초전도도체는 전력케이블뿐만 아니라 한류기 등 여러 분야에 적용되고 있다. 이와 같은 케이블 및 한류기의 상용화에 있어서 교류손실은 경제성 측면에서 커다란 걸림돌이 되고 있으며, 이들의 교류손실에 대한 정확한 측정법과 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대전류용량 다수본의 고온초전도도체의 경우 제작과정에서의 열화, 고온초전도선재간의 불균일한 전류분포 및 서로 다른 위상차 그리고 고온초전도선재의 배열 등 많은 복잡한 문제로 인하여 교류손실의 평가 및 해석이 매우 난해하다.

따라서 본 연구에서는 전력케이블 및 한류기에 많이 쓰이는 다수본의 Bi-2223테이프를 원통형의 구조물위에 배열한 다수본의 고온초전도도체를 제작하였으며, 이러한 도체의 교류손실을 실험적으로 조사하였고, 그 결과를 이론적 및 수치해석적 방법을 이용하여 비교 검토 하였다.

#### 2. 실험 샘플 및 방법

다수본 고온초전도도체의 교류손실 특성을 조사하기 위하여 Bi-2223 테이프를 사용하여 원통형구조물 위에 직선적으로 배열하여 다수본 고온초전도도체를 제작하였으며, 그 주요사양을 표 1에 나타내었다. 그림 1은 제작된 다수본 고온초전도도체의 샘플에 대한 단면도이다. 다수본 고온초전도도체의 샘플은 10본으로 구성되었으며 테이프 간을 절연함으로써 전류분류를 방지하였고, 또한 인접한 테이프간의 갭(gap)이 교류손실 특성에 미치는 영향을 고려하여 테이프사이의 갭을 가능한 한 0이 되게 하였다.

다수본의 고온초전도도체의 교류손실을 측정함에 있어서 본 실험에서는 1500A/10V 전원을 사용하였으며, 도체를 구성하는 각각에 테이프에



<그림 1> 다수본 고온초전도도체의 단면.

흐르는 전류의 크기 및 위상을 정확하게 일치시키기 위하여 외부에 리액터를 사용하였다. 교류손실은 각각의 Bi-2223테이프에 부착된 전압리드 양단의 전압과 다수본의 고온초전도도체에 흐르는 전류로부터 구하였으며, 이때 전압리드의 길이는 500 mm로 충분히 길게 하여 평가하였다. 본 연구에서 모든 실험은 액체질소 온도인 77K에서 하였다.

#### 3. 수치해석모델링

다수본 고온초전도도체는 원통형구조물 위에 배열 되어 있지만 실제로는 그림 1과 같이 다각형의 형상으로 배열되어 있다. 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  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율,  $A_z$ 는 z방향의 자위 벡터자기포텐셜,  $\sigma(E_z)$ 는 초전도도체의 전도도,  $V$ 는 스칼라전위를 각각 나타내며, 상식 (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.

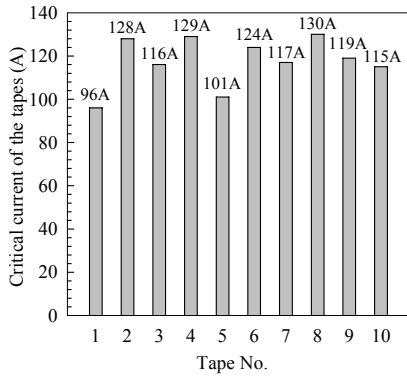
$$\sigma(E_z) = \frac{\frac{1-n}{E_z^n}}{\frac{1}{E_c^n}} J_c, \quad (2)$$

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

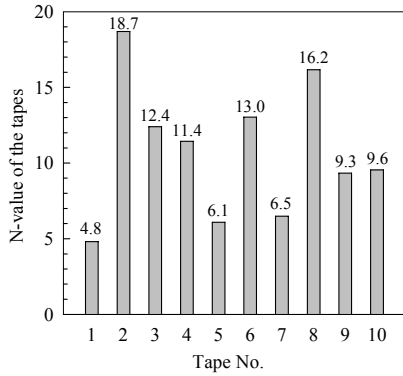
#### 4. 실험 결과 및 고찰

다수본 고온초전도도체의 교류손실을 측정하기 앞서 이러한 도체를 구성한 10본의 Bi-2223 테이프의 DC 특성을 조사하였으며 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 임계전류 및 N-value는 다수본의 고온초전도도체

Bi-2223/Ag/Stainless	38%/40%/22%
테이프의 폭과 두께	4.1 mm × 0.3 mm
코어영역의 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

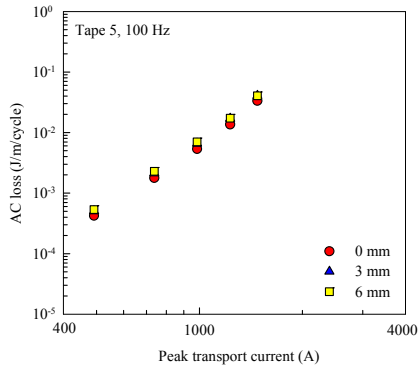


a) 임계전류 특성

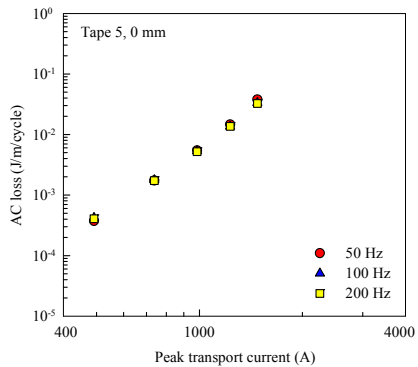


b) N-value 특성

<그림 2> 다수본 고온초전도도체에서 Bi-2223테이프의 DC 특성.



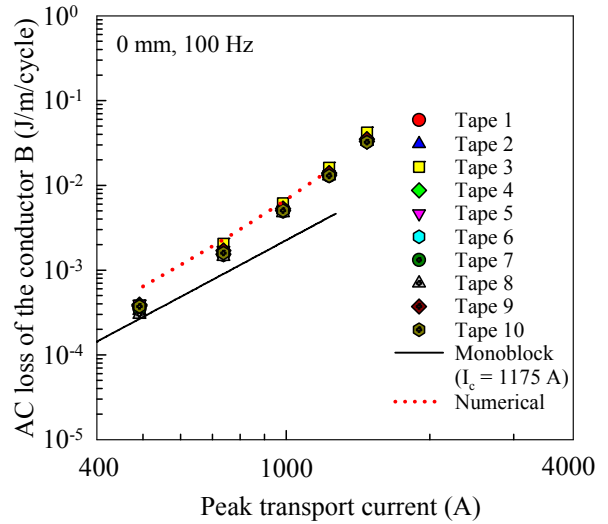
a) 교류손실의 전압리드 배열 의존성



a) 교류손실의 주파수 의존성

<그림 3> 다수본 고온초전도도체의 전압리드 배열 및 주파수 의존성.

그림 3은 다수본 고온초전도도체의 전압리드에 대한 배열 의존성 및 주파수 의존성을 나타낸다. 결과 측정된 다수본 고온초전도도체의 교류손실은 전압리드 배열 및 주파수의 변화에도 무관하게 일정하였다.



<그림 4> 다수본 고온초전도도체의 접촉위치 의존성.

그림 4에는 다수본 고온초전도도체의 접촉위치 의존성을 나타내었다. 그림 4에서 실선은 이상적인 원통형 도체의 교류손실에 대한 이론적 고찰에 자주 사용되는 Monoblock모델로부터 계산된 손실을, 점선은 그림 1에서와 같이 다각형모델에 근거한 수치해석적 방법으로부터 계산된 손실을 각각 나타낸다.

그림 4로부터 다수본 고온초전도도체의 측정된 교류손실은 전압리드의 접촉위치에 무관하게 거의 동일하며 또한 측정된 교류손실은 Monoblock모델로부터 계산된 손실 값 및 다각형모델에 근거한 수치해석 결과와도 일치하지 않다는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

실험결과에 대한 주요사항을 요약해 보면, 측정된 다수본 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.

다수본 고온초전도도체의 교류손실 특성은 Monoblock모델 이론값 및 다각형모델에 근거한 수치해석 결과와도 상이함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사합니다.

#### [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.