

모델 고온초전도케이블의 교류손실 평가기술에 관한 연구

마용호*, 류경우*, 손송호**, 황시돌**
전남대학교*, 한국전력연구원**

A Study on AC Loss Evaluation Technique of a High-Tc Superconducting Model Cable

Y.H. Ma*, K. Ryu*, S.H. Sohn**, S.D Hwang**
CNU*, KEPRI**

Abstract - 다수본의 고온초전도테이프로 구성되는 전력케이블에서 발생되는 교류손실은 초전도전력케이블의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 냉동기비용 증가 및 시스템사이즈의 증가를 초래하여 기존 케이블(구리도체)과의 가격경쟁에서 경제성을 저하시키는 주된 요인으로 작용하기 때문에 이의 상용화에 앞서 교류손실에 대한 정확한 규명이 되어야 한다. 그러나 다수본으로 구성되는 초전도케이블의 교류손실은 상이한 임계전류, 상이한 전류분포 및 인접한 테이프에 흐르는 위상이 상이한 전류 및 전압리드의 형상 등의 영향 때문에 매우 복잡하다. 이와 같은 교류손실 평가와 관련된 문제들을 규명하기 위해 실제 전력케이블을 모의한 단척 모델케이블을 제작하여 이에 대한 교류손실 평가기술을 개발하였다.

1. 서론

다수본의 Bi-2223고온(초전도체)테이프로 구성되는 초전도전력케이블에서 발생되는 교류손실은 초전도전력케이블의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 냉동기비용 증가 및 시스템사이즈의 증가를 초래하여 기존 케이블(구리도체)과의 가격경쟁에서 경제성을 저하시키는 주된 요인으로 작용하기 때문에 이의 상용화에 앞서 교류손실에 대한 정확한 규명이 되어야 한다. 그러나 다수본으로 구성되는 초전도 전력케이블의 교류손실은 상이한 임계전류, 전압리드의 형상, 상이한 전류분포 및 인접한 테이프에 흐르는 위상이 상이한 전류 등의 영향 때문에 매우 난해하다. 이와 같이 복잡한 교류손실 평가와 관련된 문제들을 규명하기 위해 가장 기초단계의 연구이면서도 복잡한 현상을 밝히는데 무엇보다도 중요할 것으로 사료되는 1본의 Bi-2223테이프에만 전류를 흘렸을 때 발생되는 교류손실에 근거하여 실제 전력케이블을 모의한 단척 모델케이블에 대한 교류손실태성 및 평가기술을 개발하였다[1].

2. 실험 샘플 및 방법

다수본의 Bi-2223테이프로 구성되는 단척의 모델케이블의 교류손실 특성을 조사하기 위하여 제작한 샘플을

표 1. Bi-2223테이프의 주요사양
Table 1. Specifications of a Bi-2223 tape.

항 목	특 성
사이즈	3.1 mm × 0.17 mm
Bi-2223/Ag/Ag합금	38 %/40 %/22 %
필라멘트 수	55
트위스트 유무	무

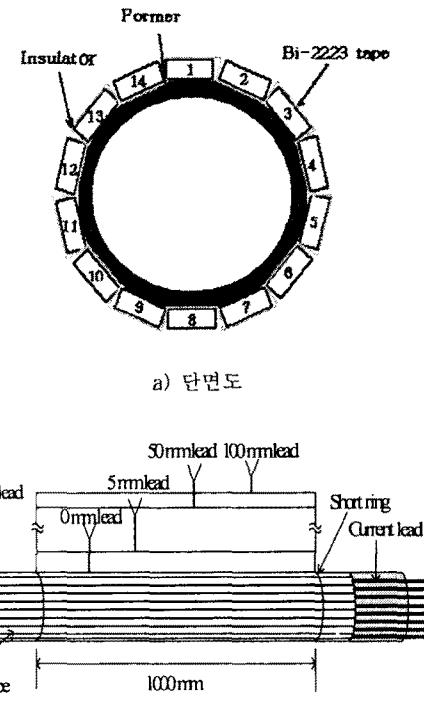


그림 1. 모델케이블: 테이프 접촉방식.

그림 1에, 그리고 모델케이블 제작에 사용된 Bi-2223 테이프의 주요 사양을 표 1에 각각 나타내었다. 또한 본 연구의 특성 평가기술 개발을 목적으로 제작된 모델케이블의 교류손실 평가에는 그 동안의 많은 예비 실험결과에 근거하여 Bi-2223테이프 중앙에 부착시킨 전압리드인 그림 1의 테이프 접촉방식을 채택하였다.

3. 실험 결과 및 검토

단척 모델케이블의 교류손실 평가 시, 통전전류의 범위는 표 1 Bi-2223테이프의 전형적인 임계전류가 72 A인 점에 근거하여 72 A에 테이프의 본 수 즉 14를 곱한 1000 A와 이 값의 40%인 400 A사이로 하여 교류손실을 조사하였다.

먼저 케이블의 제작과정에서 뿐만 아니라 특성평가 실험에서 피할 수 없는 반복적인 열사이클(thermal cycle: 상온에서 저온, 다시 저온에서 상온)에 의해 발생되는

Bi-2223테이프의 임계전류 열화에 대한 정보를 조사하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 단척 모델케이블에서 Bi-2223테이프의 임계전류는 매우 불균일함을 볼 수 있고, 표 1 Bi-2223테이프의 전형적인 임계전류인 72 A를 기준으로 해 볼 때 심한 경우 (Tape No.8)는 약 80%까지 Bi-2223테이프의 임계전류 열화가 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 단척 모델케이블의 교류손실 평가 시, 통전전류의 범위로 선정한 400 A ~ 1000 A사이의 전류에 대해서 특히 Tape No.8 ($I_c=12$ A), No.10 ($I_c=20$ A), No.12 ($I_c=29$ A) 및 No.13 ($I_c=16$ A)은 이미 자신의 고유한 임계전류보다 큰 전류가 흐르게 되어 초전도상태가 아닌 상전도 상태임을 알 수 있다. 이러한 사실은 본 실험을 위해 제작된 단척 모델케이블의 경우 더 이상 원통형의 초전도체가 아닌 즉 전자기적으로 축-대칭이 아닌 초전도도체임을 의미한다. 이러한 사실에 착안하여 전압리드의 배열이 단척 모델케이블의 교류손실에 미치는 영향에 대하여 먼저 조사를 하였다.

그림 3에는 그림 1의 단척 모델케이블 샘플에서 보는 바와 같이 Tape No.3에 테이프 표면으로부터 높이가 상이한 0 mm lead, 5 mm lead, 50 mm lead, 및 100 mm lead를 부착한 경우에 대하여 측정한 교류손실을 나타내었다. 그림 3에서 ●는 Tape No.3 중앙에 점 접촉하여 테이프 표면을 따라 배열한 전압리드, ▲는 테이프 표면으로부터 수직방향으로 5 mm 떨어져 배열한 전압리드, 그리고 ■ 및 ◆는 표면으로부터 각각 50 mm 및 100 mm

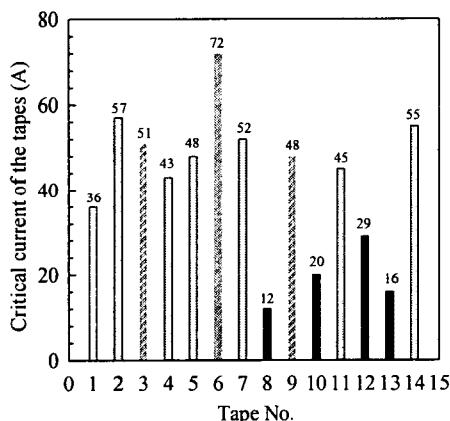


그림 2. 모델케이블에서 Bi-2223테이프의 임계전류 특성.

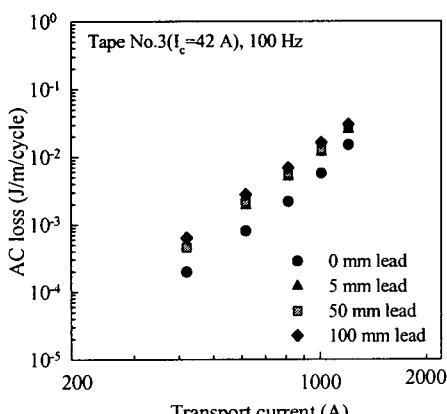
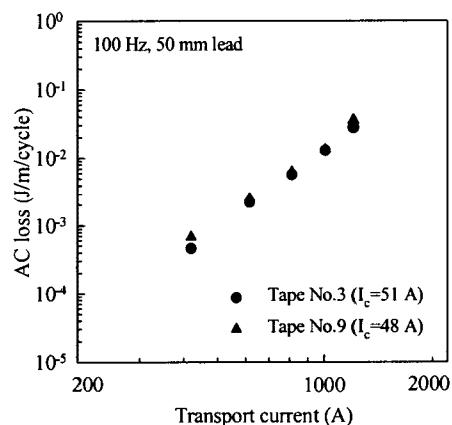


그림 3. 모델케이블의 교류손실: 배열 의존성.

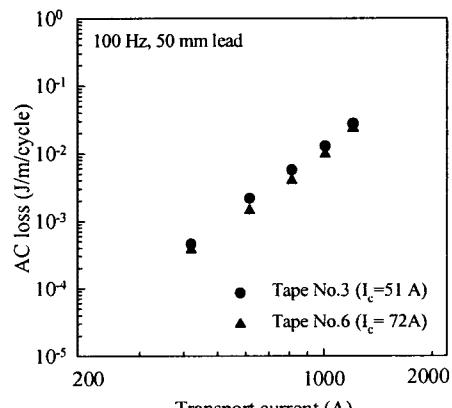
떨어져 배열한 전압리드로부터 측정된 교류손실을 나타낸다.

그림 3의 결과로부터 측정된 단척 모델케이블의 교류손실은 단일 Bi-2223테이프의 자기자계손실에서와 마찬가지로 전압리드의 배열에 상당히 의존하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 앞서 지적한바와 같이 본 실험의 통전전류 범위에서 특히 Tape No.8, No.10, No.12 및 No.13은 더 이상 초전도상태가 아닌 결과, 단척 모델케이블의 손실자속이 원통형의 초전도체 안에서만 존재하지 않고 도체 외부로 빠져 나온 결과로 설명될 수 있다. 따라서 본 연구에서 제작된 모델케이블처럼 고온초전도 테이프의 임계전류 열화가 매우 불균일한 단척 고온초전도케이블의 교류손실 평가 시는 특히 전압리드의 배열에도 주의를 해야 함을 알 수 있다.

그림 4에는 접촉위치가 상이한 전압리드에 대해 측정한 단척 모델케이블의 교류손실 특성을 나타내었다. 그림 4에서 전압리드의 배열은 그림 3의 전압리드의 배열의 존성 및 고온초전도케이블의 실제 절연두께 (전력케이블의 정격전압에 의존)를 고려하여 테이프 표면으로부터 50 mm 떨어진 전압리드 (50 mm lead)를 사용하였으며, 또한 비교·분석을 위한 기준 테이프로서는 그림 2의 실험결과로부터 보는 바와 같이 임계전류의 열화가 매우 심한 Tape No.8, No.10, No.12 및 No.13을 제외한



a) Bi-2223테이프의 임계전류가 유사한 경우



b) Bi-2223테이프의 임계전류가 상이한 경우

그림 4. 모델케이블의 교류손실: 접촉위치 의존성.

Bi-2223테이프들의 평균 임계전류에 해당하는 Tape No.3 ($I_c=51$ A)로 하였다. 그림 4 a)의 경우는 기준 테이프와 임계전류가 유사하면서도 비교적 멀리 떨어진 Tape No.9 ($I_c=48$ A)에 대해 측정된 교류손실파의 비교 결과를, 그림 4 b)에는 임계전류가 기준 테이프보다 약 1.4배 큰 Tape No.6 ($I_c=72$ A)에 대해 측정된 교류손실파의 비교 결과를 각각 나타내었다.

그림 4 a)에서 보는 바와 같이 전압리드의 접촉위치가 상이함에도 불구하고 측정된 교류손실은 거의 동일함을 볼 수 있으며, 이는 임계전류가 유사한 Bi-2223테이프로 구성된 단척 모델케이블의 경우는 그림 1의 테이프 접촉 방식으로도 교류손실을 유일한 값으로 정의 가능함을 의미한다. 반면 그림 4 b)에서처럼 단척 모델케이블을 구성하는 테이프의 임계전류가 점점 불균일(기준 테이프 대비 140 %)해짐에 따라 측정된 교류손실도 20 %정도 상이해짐을 볼 수 있다.

4. 결 론

이상의 길이가 1~2 m인 단척의 모델 고온초전도케이블의 교류손실 평가기술에 대해 요약해 보면 각각의 고온초전도테이프에 흐르는 전류의 크기가 균일하고 이를 위상이 동일할 때, 임계전류가 유사한 고온초전도테

이프로 구성된 케이블의 경우는 그림 1의 테이프 접촉방식으로도 전압리드의 접촉위치에 무관하게 유일한 값의 교류손실을 얻을 수 있다 (물론 전압리드의 배열에도 무관함 [2]).

반면 이런 경우를 제외한 모든 모델 케이블에 있어서는 유일한 값의 교류손실을 얻을 수 없으며, 측정된 교류손실도 전압리드의 접촉위치 뿐만 아니라 배열에도 의존하게 되어 다른 방식의 평가기술에 대한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조영호, 마용호, 류경우, 최병주, 황시돌, “인접 HTS테이프 가 Bi-2223테이프의 자기자계손실 특성에 미치는 영향”, 2004년도 한국초전도·저온공학회 학술대회논문집, 무주, 10 월 20~22, pp162~164, 2004.
- [2] 류경우, 정재훈, 황시돌, 김석환, “전압리드의 배치가 단층 고온초전도 모델케이블의 교류손실 측정에 미치는 영향”, 대한전기학회논문지, 51B권, 12호, pp.670~675, 2002.