

고온 초전도모델전력케이블의 교류손실 특성

김 창완, 정 재훈, 류 경우, 최 병주\*  
전남대학교, \*서라벌대학

Characteristics of AC Loss in a High-T<sub>c</sub> Model Power Cable

Chang-Wan Kim, Jae-Hoon Jung, Kyung-Woo Ryu, Byung-Ju Choi\*  
Chonnam National Univ., \*Sorabol college

**Abstract** - 다수의 Bi-2223테이프를 구성된 고온 초전도모델전력케이블의 통전손실을 조사하였다. 전력케이블의 임계전류는 각각 테이프의 임계전류가 유사하다 할지라도 전류리드-테이프사이의 접촉저항으로부터 기인하는 불균일 전류분포 때문에 전압리드의 접촉위치에 의존하였으며, 전력케이블의 통전손실은 전압리드의 접촉위치 및 전류의 주파수에 무관하였다. 따라서 전력케이블의 통전손실은 케이블의 상이한 임계전류에 영향을 받지 않으며, 전류의 주파수는 각각 테이프에 흐르는 전류분포에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

1. 서 론

최근 전력수요의 지속적인 증가와 집중화에 따른 도심지에 적용하기에 가장 이상적인 지중 송전방식으로서 고온 초전도전력케이블에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Bi-2223테이프를 사용한 고온 초전도전력케이블의 특징으로서서는 기존의 전력케이블보다 3 ~ 5배정도 많은 전력의 수송이 가능하며, 전력전송효율 또한 기존보다 높고(기존의 경우 손실이 약 8 %인 반면 초전도의 경우는 약 0.5 %), 소형·경량화 및 환경 친화적 특성 등의 장점을 들 수 있다.

이상의 장점에도 불구하고 초전도전력케이블에서 발생하는 교류손실은 케이블의 효율을 저하시킴으로서 초전도 시스템의 경제성을 떨어뜨리는 주된 요인으로 작용한다. 따라서 초전도전력케이블의 교류손실 평가 및 이 손실 저감법에 대한 연구는 필수적이라 하겠다.

본 연구에서는 실제 상황을 모의하기 위해 고온 초전도모델전력케이블을 제작하여 통전손실 특성을 조사하였다.

2. 실험 샘플 및 실험 방법

2.1 실험 샘플

전력케이블처럼 다수본의 고온 초전도테이프를 구성되는 도체에서 초전도테이프에 흐르는 전류분포 특성을 조사하기 위해 준비한 샘플을 그림 1에, 그리고 샘플 제작에 사용된 고온 초전도테이프의 사양을 표 1에 각각 나타내었다. 그림 1의 샘플은 5본이 Bi-2223테이프(길이 550 mm)를 백크라이트판 위에 평행하게 배열시킨 후 전류리드에 접속하였으며, 이때 전압탭 사이의 길이는 500 mm로 동일하게 하여 각각의 Bi-2223테이프에 부착시켰다. 또한 각각의 전압리드사이의 전위를 등전위로

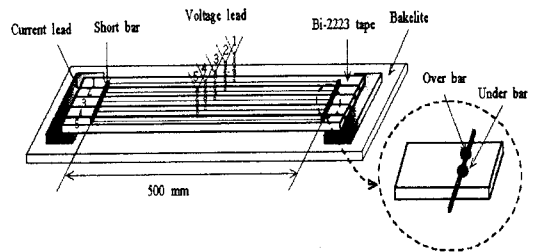
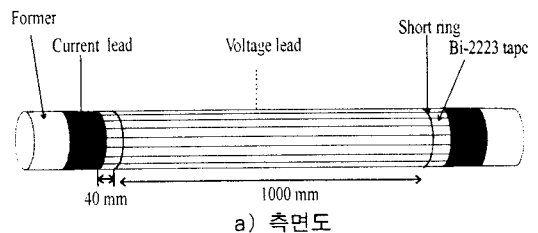


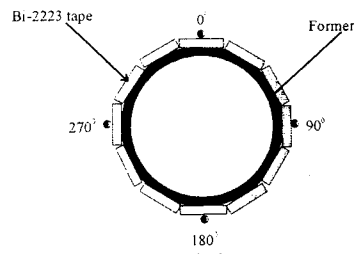
그림 1. 5본-도체

만들기 위하여 단락바(short bar)를 장착하였고, 동일한 Bi-2223테이프라 할지라도 전압리드의 접촉위치에 따른 영향을 조사하기 위해 그림 1에서 확대된 그림과 같이 단락바의 위(이하 over bar) 또는 아래(이하 under bar)에 전압리드를 접속시켰다.

다수본의 Bi-2223테이프를 구성되는 모델전력케이블의 통전손실 특성을 조사하기 위하여 제작한 샘플을 그림 2의 a)에 나타내었다. 전력케이블의 통전손실연구에 빈번히 사용되는 전압리드를 살펴보면 임의의 테이프 중앙에 점 접촉시킨(point contact to tape)구조의 전압리드가 있고, 전류리드-테이프의 접속(joint)부에 점 접촉시킨(point contact to joint)구조의 전압리드 및 전류리드로부터 충분히 떨어진 곳에 단락링(short ring)을 접속시킨(ring contact)구조의 전압리드를 들 수 있



a) 측면도



b) 단면도

그림 2. 모델전력케이블

표 1 Bi-2223테이프의 사양

항 목	특 성
사이즈	3.9 mm×0.3 mm
Bi-2223/Ag/AgMgNi	27 %/43 %/30 %
필라멘트수	37
트위스트 유·무	무

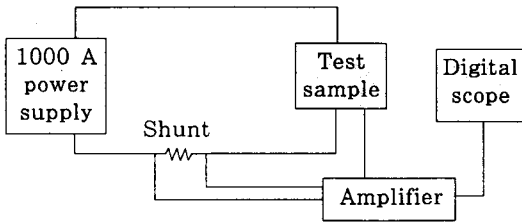


그림 3. 실험장치의 개략도.

다[1-3]. 본 연구의 모델전력케이블의 통전손실을 측정하기 위하여 단락링 구조의 전압리드를 채택하였다.

모델전력케이블의 구조재로서는 직경이 16 mm인 FRP(길이 1170 mm)를 사용하였으며, 단락링사이의 길이를 1000 mm로 한 14본의 Bi-2223테이프를 구조재 위에 평행하게 배열시킨 후 전류리드에 접속하였다. 이때 전압리드는 단락링위에 접촉한 후 테이프 면의 중앙선을 따라 배열시켰으며, 인접 테이프 사이의 갭은 약 0.2 mm이하가 되도록 하였다. 또한 전압리드의 접촉위치가 모델전력케이블의 통전손실에 미치는 영향을 조사하기 위해 그림 2. b)에서와 같이 케이블의 원주방향으로 0°, 90°, 180°, 및 270° 위치에 전압리드를 장착시켰다.

## 2.2 실험 방법

그림 2의 샘플에 대한 통전손실을 조사하기 위해 사용된 실험장치의 개략도를 그림 3에 나타내었다. 전원으로서는 1000 A, 10 V(5Hz~1kHz)전원을 사용하여 정현파의 교류 전류를 샘플에 인가하여 통전손실을 측정하였다. 이때 샘플에 흐르는 전류는 셉트를 사용하여 측정하였으며, 각각의 전압리드 및 셉트로부터 측정되는 전압신호는 증폭기를 통해 디지털 스코프에 기록하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

그림 4에는 5본-도체의 제작에 사용된 다섯 본의 테이프에 대한 직류 전압-전류 특성으로부터 측정된 각각의 Bi-2223테이프에 대해 측정된 임계전류는 테이프번호 1번(평균 임계전류보다 약 10%정도 작음)을 제외하고는 비교적 동일한 임계전류 값을 가지고 있음을 볼 수 있다.

그림 5에는 5본-도체에 장착한 다양한 전압리드에 대한 직류 전압-전류 특성으로부터 측정된 5본-도체의 임계전류를 나타낸다. 그림 1에서와 같이 각각의 테이프에서 단락바 아래에 접촉시킨 전압리드로부터 측정된 임계

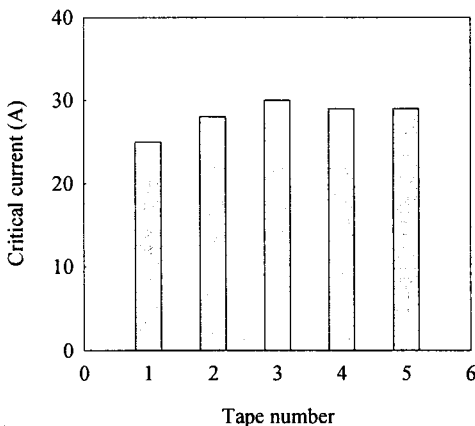


그림 4. 각 Bi-2223테이프의 임계전류(5본-도체).

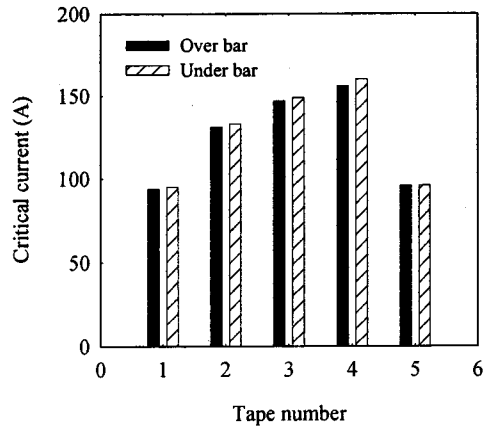


그림 5. 전압리드의 접촉위치에 따른 5본-도체의 임계전류.

전류를 (under bar), 단락바 위에 접촉시킨 전압리드로부터 측정된 임계전류를 (over bar)로 나타내었다. 그림 5의 결과로부터 테이프번호만 동일하면 전압리드의 접촉위치 즉, 단락바의 위·아래에 관계없이 5본-도체의 임계전류는 동일함을 볼 수 있다. 또한 그림 4에서 보는 바와 같이 Bi-2223테이프의 임계전류가 거의 동일함에도 불구하고 테이프번호에 따라서 5본-도체의 임계전류는 최대 약 2배정도 차이가 나는 것을 볼 수 있고, 마지막으로 등전위 목적으로 사용한 단락바는 전혀 그 기능을 발휘하지 못하는 것을 알 수 있다. 그림 5에서와 같이 5본-도체의 임계전류가 상이한 원인으로는 각각의 Bi-2223테이프와 전류리드의 접속부에서 발생하는 접속저항(joint resistance)의 상이에 기인하는 것으로 사료된다[4].

그림 6에는 모델전력케이블의 통전손실 측정 시, 그 신뢰성을 검토하기 위해 직접법 및 FFT법으로부터 측정된 손실 결과를 나타내었다. 그림 6에서 전압리드는 그림 2 b)의 0° 위치에 전압리드를 접촉시켜 측정된 결과로서, 임계전류의 55%의 경우 손실전압은 25  $\mu$ V (50 Hz)이며, 이때 1000 A, 10 V 전원으로로부터 발생되는 노이즈는 10  $\mu$ V(60 Hz)이었다. 이는 직접법을 사용하는 경우 대단히 큰 노이즈접압이 상대적으로 작은 신호전압에 포함되기 때문에 측정의 신뢰도에 영향을 줄 가능성이 커, 60 Hz 노이즈를 완전히 배제시킬 수 있는 FFT법과 비교하였다. 그림 6의 결과로부터 직접법과 FFT법에 의한 측정 결과는 잘 일치함을 볼 수 있고, 이는 직접법으로 측정된 통전손실을 신뢰할 수 있음

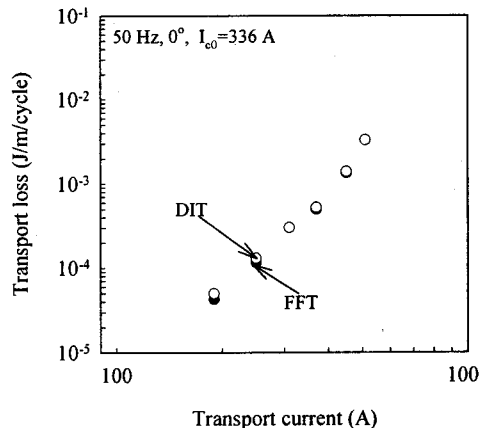
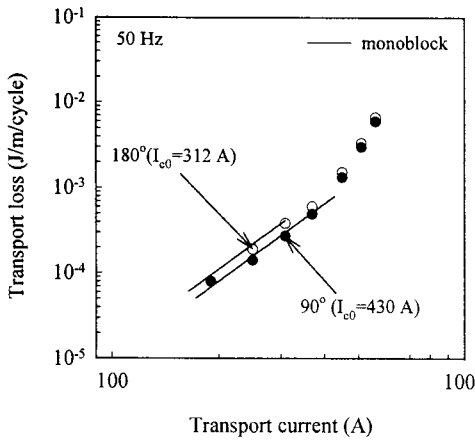


그림 6. DIT법 및 FFT법에 따른 모델전력케이블의 통전손실.



Transport current (A)

그림 7. 전압리드의 접촉위치에 따른 모델전력케이블의 통전손실.

을 의미한다.

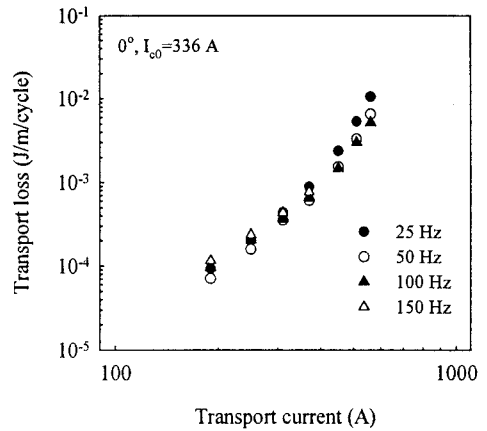
그림 7에는 전압리드의 접촉위치가 모델전력케이블의 통전손실 특성에 미치는 영향에 대해 조사한 결과를 나타내었다. 그림 2의 b)에서와 같이 4 종류의 전압리드를 케이블의 원주방향으로 0°, 90°, 180° 및 270°의 위치에 접촉한 후, 테이프의 면을 따라 배열시킨 전압리드에 대한 측정 결과이다. 그림 7에서 모델전력케이블의 통전손실은 0°, 90°, 180° 및 270° 위치에 접촉한 전압리드로부터 측정된 손실이 서로 동일하여 그림 7에는 90° 및 180°의 위치에 접촉시킨 전압리드에 대한 결과만 나타내었으며, 이들 전압리드에서 측정된 각각의 임계전류는 312 A 및 430 A였다. 그림 7의 결과로부터 모델전력 케이블의 통전손실은 전압리드의 접촉위치와 무관함을 볼 수 있었고, 이는 모델전력케이블의 통전손실이 케이블의 상이한 임계전류에 의존하지 않음을 의미한다.

그림 8에는 전류의 주파수가 모델케이블의 통전손실에 미치는 영향에 대해서 조사한 결과이다. 그림 8에서 전압리드는 그림 2의 b)에서 0°인 위치에 전압리드를 접촉시킨 결과이다. 그림 8의 결과로부터 모델전력케이블에서 측정된 교류손실은 주파수에 무관함을 볼 수 있으며, 이는 각각 테이프에 흐르는 전류의 분포는 주파수에 영향을 받지 않음을 의미한다.

### 3. 결 론

이상의 조사 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모델전력케이블의 임계전류는 각각 테이프의 임계전류가 동일하다 할지라도 전압리드의 접촉위치에 따라 대단히 의존한다. 이의 주된 원인으로서 전류리드-테이프 사이의 접속저항을 들 수 있다.



Transport current (A)

그림 8. 주파수에 따른 모델전력케이블의 통전손실.

- 2) 모델전력케이블의 통전손실은 전압리드의 접촉위치에 무관하였다. 즉 케이블의 임계전류가 달라져도 통전손실에는 그다지 영향을 주지 못한다.
- 3) 모델전력케이블의 통전손실은 주파수에 무관하였다. 즉, 각 테이프의 전류분포는 주파수에 대해 영향을 받지 않음을 의미한다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구  
(과제번호 : 2000-2-30200-002-3) 지원  
으로 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] C.M.Friend, D.M. Spiller, L.Le Lay, S.A. Awan, T.P. Beales, "Using electrical measurements to determine the self-field AC losses of cable models," *Physica C*, pp. 187-196, 1998.
- [2] A. Kühle, C. Traeholt, S. Krüger Olsen, C. Rasmussen, and O. Tonnesen, "Measuring AC-loss in high temperature superconducting cable-conductors using four probe methods," *IEEE Trans Appl. Supercon.*, vol. 9, no. 2, 1999.
- [3] G.Coletta, L. Gherardi, F. Gómory, "Application of electrical and calorimetric methods to the AC loss characterization of cable conductors," *IEEE Trans Appl. Supercon.*, vol. 9, no. 2, 1999.
- [4] S. Krüger Olsen, C. Treholt, A. Kühle, O. Tonnesen, M. Däumling and J. Ostergaard, "Loss and inductance investigation a 4-layer superconducting prototype cable conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 9, pp. 833~836, 1999.