

전류분포가 3본-도체의 교류손실 특성에 미치는 영향

정재훈, 류경우
전남대학교

Influence of Current Distributions on AC Loss Characteristics in a 3-conductor

Jae-Hoon Jung, Kyung-Woo Ryu
Chonnam National University

iamjong@hotmail.com

Abstract - AC loss is an important issue in the design of high- T_c superconducting power cables which consist of a number of Bi-2223 tapes wound on a former. In the cables, the tapes have different critical currents intrinsically. And they are electrically connected to each other and current leads. These make loss measurements considerably complex, especially for short samples of laboratory size. So special cautions are required in the positioning of voltage leads for measuring the true loss voltage. In this work we have prepared a conductor composed of three Bi-2223 tapes with different critical currents. The ac loss characteristics in the conductor have experimentally investigated. The loss tests indicate that the ac loss is dependent on arrangements of voltage leads but not on their contact positions. The measured losses in the conductor also agree well with the sum of the transport losses measured in each Bi-2223 tape.

1. 서 론

다수 본의 초전도테이프로 구성되는 초전도전력케이블에서 발생하는 교류손실은 케이블의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 냉동기 비용의 증가를 초래하여 기존 구리도체케이블과의 가격경쟁에서 경제성을 저하시키는 주된 요인으로 작용한다. 따라서 초전도케이블의 상용화를 위해서는 먼저 교류손실에 대한 충분한 이해와 더불어 정확한 평가가 선행되어야 한다. 그러나 초전도체의 교류손실은 기존 철심의 히스테리시스손실과 같이 자기적인 손실인 관계로 정확하게 측정하기가 대단히 어렵다[1]-[3].

따라서, 본 논문에서는 다수 본의 초전도테이프로 구성되는 전력케이블의 교류손실에 대한 연구에 앞서 전력케이블의 형상과는 다소 상이하지만, 초전도테이프의 본 수가 적어 평가결과에 대한 분석이 용이한 점에 착안하여 3본의 Bi-2223

초전도테이프로 구성되는 샘플(이하 3본-도체)을 제작하였으며, 이에 대한 교류손실 평가기술 및 교류손실 특성을 조사하였다.

2. 실험 샘플 및 방법

표 1에는 3본-도체 제작에 사용된 Bi-2223테이프의 주요 사양을, 그림 1에는 제작된 3본-도체 샘플을 각각 나타내었다.

특히 3본-도체 샘플의 제작 시, 케이블 제작에 실제로 사용되고 있는 Bi-2223테이프는 본질적으로 불균일한 임계전류특성을 지니고 있다는 점에 착안하여 임계전류가 수 십%정도 상이한 테이프들을 사용하였으며, 3본-도체 도중에서 발생할 수 있는 인접한 테이프사이의 전류 재분배에 의한 영향을 배제하기 위하여 테이프 사이는 전기적으로 완전히 절연하였다.

또한 전압리드의 접촉위치 및 배열이 3본-도체의 임계전류특성 및 교류손실특성 평가에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 전압리드를 각각의 테이프의 중심선 상에 납땜하여 부착시켰으며, 테이프의 표면에서 수직 한 방향으로 0 mm(0 mm 리드), 5 mm(5 mm 리드) 및 10 mm(10 mm 리드) 떨어진 사각형 형상의 전압리드(center-rectangle lead)를 배열하였다. 이 때 전압리드의 납땜부사이의 거리는 모두 500 mm로 동일하게 하였다.

그림 2에는 3본-도체의 교류손실특성 평가에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내었으며, 실험은 액체질소 온도(77 K)에서 하였다. 그림 2에서 1000 A_{rms}, 7 V_{rms} (DC~200 Hz) 전원을 함수발생기로

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 유·무	무

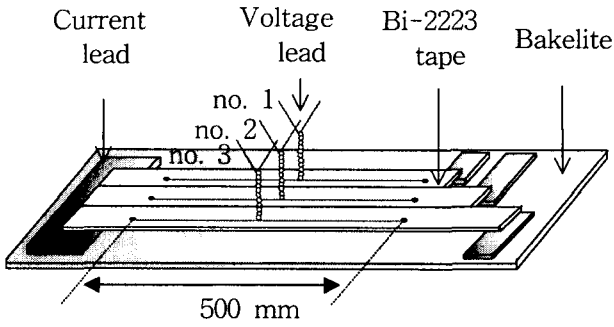


Fig. 1. Schematic of the 3-conductor sample.

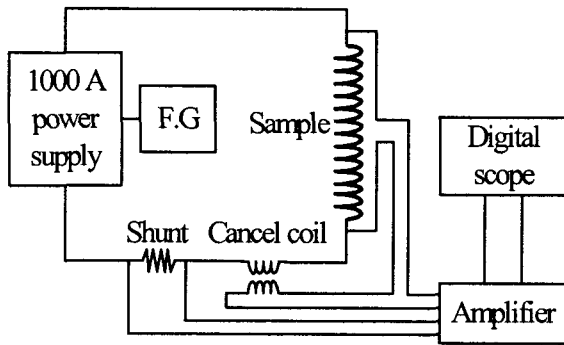


Fig. 2. Experimental setup.

제어하여 직류 및 정현파 교류 전류를 샘플에 인가하였다.

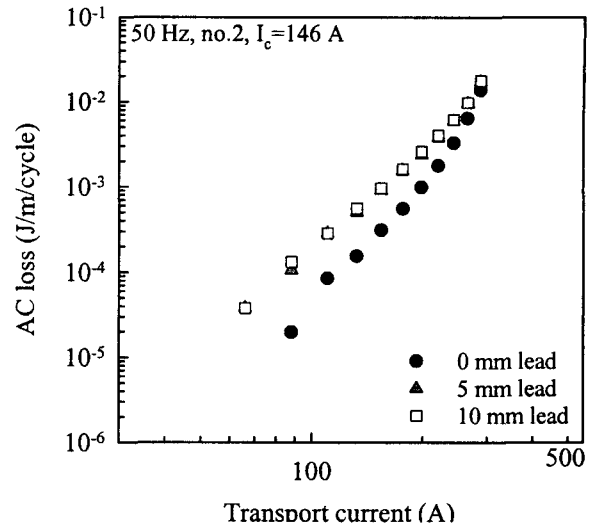
교류손실 평가 시, 각각의 전압리드에 발생되는 유도성 전압은 상쇄코일을 이용하여 충분히 상쇄시켰고, Bi-2223테이프에 흐르는 전류를 균일 또는 불균일하게 강제적으로 제어하기 위하여 외부 리액터를 사용하였다. 또한 교류손실 측정에서는 일반적으로 널리 이용되고 있는 전기적 방법을 채택하였으며, 전기적 방법에 의한 단위 길이 및 1주기에 대한 교류손실(Q) (J/m/cycle)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \oint_T i(t)v(t)dt/l \quad (1)$$

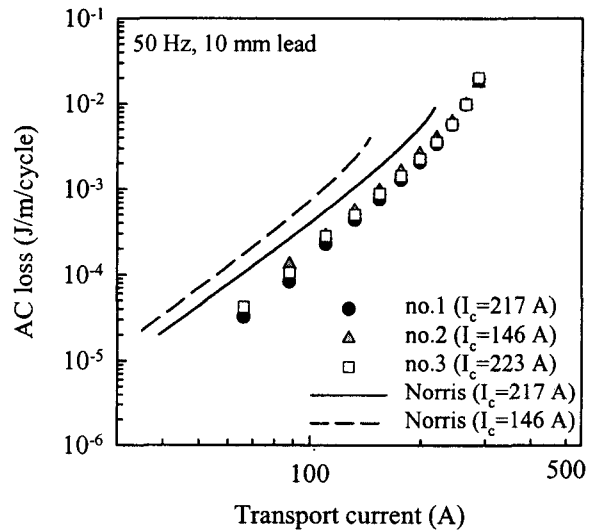
여기서 T 는 정현파 교류전류의 주기, $i(t)$ 는 샘플 전류, $v(t)$ 및 l 은 그림 1에 나타낸 전압리드의 전압 및 납땀부 사이의 거리를 각각 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3에는 각 테이프에 균일하게 전류가 흐를 경우, 전압리드의 배열 및 접촉위치를 달리했을 때 3분-도체에 대하여 측정된 교류손실을 나타내었다. 그림 3 a)에서 ●, ▲ 및 ■는 테이프 no.2에 납땀된 전압리드를 테이프의 표면으로부터 0 mm, 5 mm 및 10 mm로 높이를 각각 다르게 하였을 때 측정된 교류손실을 나타낸다. 그림 3 b)에서 ●, ▲ 및 ■는 10 mm리드에 대하여 전압



a) 전압리드 배열의 영향



b) 전압리드 접촉위치의 영향

Fig. 3. Voltage lead's arrangement and contact position dependence of the AC losses in the 3-conductor: uniform current distribution.

리드의 접촉위치를 테이프 no.1, no.2 및 no.3으로 각각 다르게 하였을 때 측정된 3분-도체의 교류손실을 나타낸다. 이 때 도체 표면으로부터 전압리드의 높이는 1분 테이프의 자기자계손실 측정 시에 보편적으로 채택되고 있는 전압리드 형상을 참조하여 10 mm로 하였다[1]. 또한 그림 3 b)에서 I_c 는 도체를 구성하는 테이프 no.1, no.2 및 no.3에 납땀한 전압리드의 전압과 도체의 전류 특성으로부터 결정되는 3분-도체의 임계전류를 나타내며, 실선 및 점선은 3분-도체를 폭이 9.3 mm(테이프 폭의 3배)인 1분의 Bi-2223테이프로 가상하여 측정된 3분-도체의 임계전류를 타원형 Norris식에 대입하여 계산된 손실을 나타낸다[2]-[4].

그림 3에서 균일 전류분포일 경우, 그림 3 a)

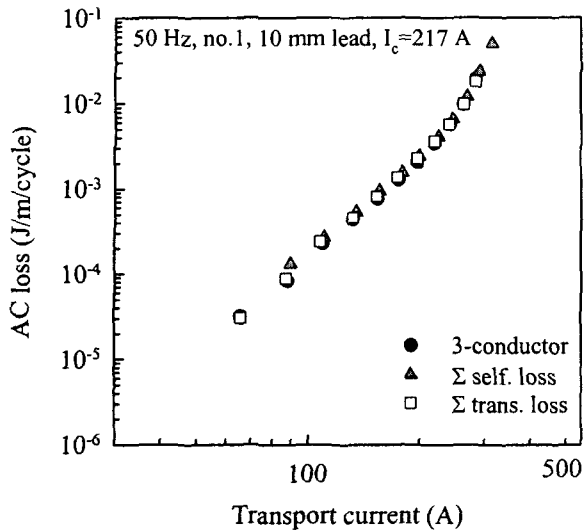


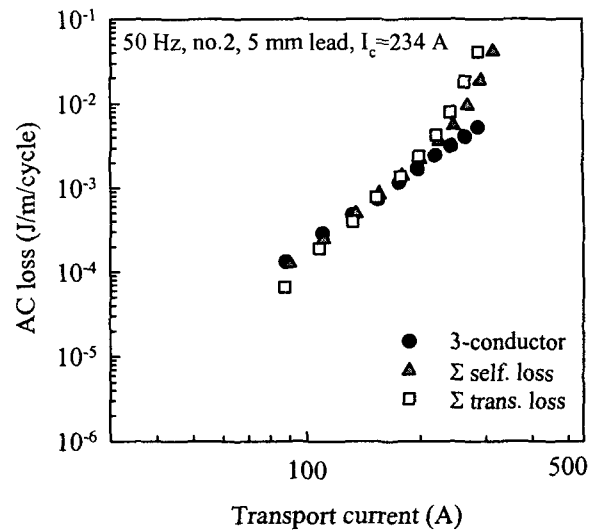
Fig. 4. AC losses in the 3-conductor: uniform current distribution.

에서 보는 바와 같이 3분-도체의 교류손실은 1분 Bi-2223테이프와 마찬가지로 전압리드의 배열에 매우 의존하지만, 도체의 표면으로부터 전압리드의 높이가 5 mm 이상이 되면 손실은 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 포화되는 것을 볼 수 있다.

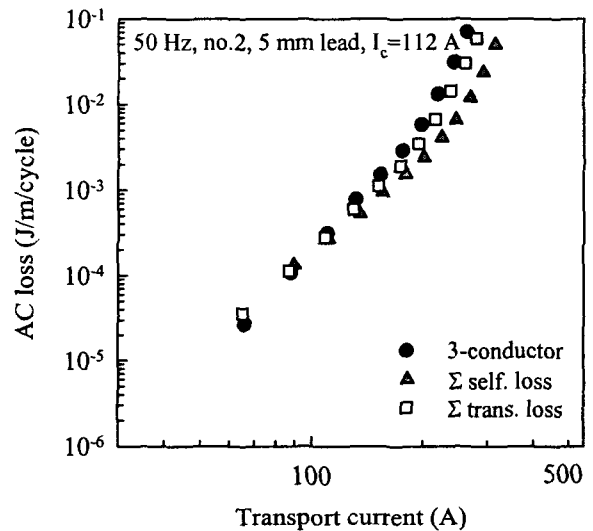
그리고 그림 3 b)로부터 Bi-2223테이프의 임계 전류가 약 40 % 정도 상이한 테이프로 제작된 3분-도체의 임계전류는 전압리드의 접촉위치에 따라 상당히 달라지는 반면 측정된 교류손실은 전압리드의 접촉위치에 무관하게 일정한 것을 볼 수 있다. 또한 측정된 교류손실은 3분-도체를 폭이 9.3 mm인 1분 테이프로 가상하여 계산된 결과보다 상당히 작은 것을 볼 수 있으며, 이는 3분-도체를 등가인 1분 테이프로 취급하는 것은 무리임을 의미한다.

그림 4에는 각 테이프에 균일하게 전류가 흐를 경우, 3분-도체의 측정된 교류손실에 대한 분석 결과를 요약하여 나타내었다. 그림 4에서 ●는 3분-도체의 no.1 테이프에 납땜된 10 mm 리드에서 측정된 교류손실을, ▲ 및 ■는 3분-도체를 구성하는 각 Bi-2223테이프에 대하여 측정된 자기자계손실(측정하고자하는 테이프만 통전한 상태에서 측정된 손실로 정의) 및 통전손실(인접한 테이프를 통전한 상태에서 측정된 손실로 정의)을 각각 합한 손실을 나타낸다.

그림 4에서 균일 전류분포일 경우, 3분-도체의 교류손실은 도체를 구성하는 각 테이프에 대하여 측정된 자기자계손실 또는 통전손실을 합한 손실과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 3분-도체의 교류손실은 그림 3 b)의 결과에서 보는 바와 같이 3분-도체를 등가인 1분 테이프로 보는 것보다는 인접한 테이프의 교류전류에 의한 영향을 거의 무시할 수 있는 독립된 1분 Bi-2223테이프들의 집합으로 보는 것이 더욱 타당함을 의미한다.



a) 전류 불균일도 파라미터(γ)=1.58



b) 전류 불균일도 파라미터(γ)=0.67

Fig. 5. AC losses in the 3-conductor: nonuniform current distribution.

그림 5에는 각 테이프에 불균일한 전류가 흐를 경우, 3분-도체의 측정된 교류손실에 대한 분석 결과를 요약하여 나타내었다. 그림 5 a)는 전류 불균일도 파라미터를 1.58로 한 경우 측정된 교류손실을 나타내는 반면, 그림 5 b)는 전류 불균일도 파라미터를 0.67로 한 경우 실험결과를 나타낸다[5]. 그림 5에서 각각의 경우에 대하여 ●는 3분-도체의 no.2 테이프에 납땜된 5 mm 리드에서 측정된 교류손실을, ▲ 및 ■는 그림 4에서와 같이 3분-도체를 구성하는 각 Bi-2223테이프에 대하여 측정된 자기자계손실 및 통전손실을 각각 합한 손실을 나타낸다.

그림 5에서 불균일 전류분포일 경우, 도체의 임계전류보다 작은 전류영역에서 3분-도체의 교류손실은 전류 불균일도 파라미터에 의존하지 않고, 균일 전류분포인 그림 4과 마찬가지로 3분-

도체를 구성하는 각 테이프에 대하여 측정된 자기자계손실 또는 통전손실을 합한 손실과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 도체의 임계전류보다 큰 전류영역에서는 균일 전류분포인 그림 4와는 달리 전류 불균일도 파라미터에 따라서 측정된 3본-도체의 교류손실과 각 테이프의 자기자계손실 또는 통전손실의 합과의 상관관계가 상이해지는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 3본의 Bi-2223테이프로 제작된 도체에 대한 교류손실 평가기술 및 교류손실특성을 실험적으로 조사하였으며, 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 다수 본의 Bi-2223테이프로 제작된 도체의 교류손실은 1본 테이프에서처럼 전압리드의 배열에 대단히 의존한다.

2) 반면, 전압리드의 접촉위치에는 그다지 의존하지 않는다.

3) 측정된 교류손실은 임계전류특성과 달리 전류불균일 파라미터에 무관하게 도체의 임계전류보다 작은 전류영역에서는 도체를 구성하는 각 테이프의 자기자계손실 또는 통전손실 합과 비교적 잘 일치한다.

[감사의 글]

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 류경우, 박권배, 차귀수, 최경달, 이지광, 한송엽, "장척 Bi-2223테이프의 자기자계손실 특성," 전기학회논문지, 49B권, 4호, p.240, 2000.
- [2] 류경우, 최병주, "인접 교류전류가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p.251, 2001.
- [3] K. Ryu, K.B. Park, G. Cha, "Effect of the neighboring tape's ac currents on transport current loss of a Bi-2223 tape," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, p.2220, 2001.
- [4] 류경우, 김창완, 차귀수, "외부교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 통전손실 특성", 대한전기학회논문지, 50B권, 6호, p.290, 2001.
- [5] 정재훈, 조영호, 허대행, 류경우, "전류분포가 3본-도체의 임계전류 특성에 미치는 영향", 2003년도 한국초전도·저온공학회학술대회논문집, 부산, 2월