

Bi-2223테이프의 자기자계 손실저감에 관한 연구

조영호*, 류경우*, 최병주**, 황시돌***
 전남대학교, 서라벌대학, 한전 전력연구원

Study on Self-field Loss Reduction in a Bi-2223 Tape

Young-Ho Jo, Kyung-Woo Ryu, Byoung-Ju Choi, Si-Dole Hwang***
 Chonnam National University, Sorabol College, Kepri

Abstract - 다수분의 Bi-2223테이프로 구성되는 도체의 자기자계손실에 대한 검토를 하였으며, 그 주요 결과를 보면 자기자계손실은 도체를 구성하는 테이프의 임계 전류밀도가 커짐에 따라서 증가한다. 또한 테이프의 코어가 전자기적으로 분리되어 있는 경우 도체의 자기자계 손실은 테이프의 임계전류에 무관한 반면 결합되어 있는 경우는 테이프의 임계전류가 커짐에 따라서 도체의 자기자계손실도 증가할 것으로 예상된다.

1. 서 론

본질적으로 기계적 특성이 좋지 않은 산화물계열의 고온초전도체로도 최근 수 km길이의 선재로 제작이 가능해져 전력분야응용에 실제로 적용을 할 수 있는 고온초전도테이프가 현재 생산되고 있으며, 그 대표적인 선재로서 Bi-2223테이프를 들 수 있다. 그러나 1분의 Bi-2223테이프에 흘릴 수 있는 전류는 약 100 A정도로 전류용량이 수백 A이상을 요구하는 전력기에 그대로 응용하기가 어렵다. 따라서 수백 A이상의 전류용량을 지닌 도체를 만들기 위해서는 다수분의 Bi-2223테이프를 병렬로 한 도체를 사용할 수밖에 없다.

이와 같은 도체를 60 Hz의 교류 전력분야에 사용하게 되면 도체에는 교류손실이라고 불리는 자기적 손실이 필연적으로 수반되며, 이는 초전도전력기의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 냉동기용량을 증가시켜 기존 구리도체의 경쟁을 어렵게 만드는 주된 요인으로 작용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 다수분의 Bi-2223테이프 구성되는 도체에 교류전류(외부자장은 제로)만 흐를 때 발생하는 교류손실(이하 도체의 자기자계손실)에 대해 이론 및 실험적인 연구를 하였으며, 그 결과에 근거하여 도체의 자기자계손실을 저감시키기 위한 방법에 대해서도 검토를 하였다.

2. 손실관련 이론 및 실험 샘플

먼저 도체의 자기자계손실 평가를 위한 기준(이하 평가표준)으로서는 식(1)과 같이 정의되는 평가표준(y)을 사용하기로 한다.

$$y = \frac{\text{도체}(1m)\text{의 자기자계손실}}{\text{도체 전류}} \quad (J/m/cycle/A) \quad (1)$$

또한 도체의 자기자계손실은 도체를 구성하는 1분 테이프의 자기자계손실(Q (J/m/cycle))에 단순히 분수를 곱한 손실과 같고(1), 도체의 전류는 1분 테이프의 전류 피크치(I_p)에 단순히 분수를 곱한 전류와 같다(균일 전류분포)고 가정하면 식(1)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \frac{Q}{I_p} \quad (2)$$

식(2)에서 보는 바와 같이 도체의 자기자계손실을 평가하기 위해서는 결국 도체를 구성하는 테이프의 자기자계손실을 평가함으로써 가능해지고, 따라서 본 논문에서는 1분 Bi-2223테이프에 대해 측정된 자기자계손실에 근거하여 도체의 자기자계손실을 저감하기 위한 방법을 검토하기로 한다.

또한 1분 Bi-2223테이프의 자기자계손실을 이론적으로 검토하는 데는 테이프 단면에 분포된 초전도필라멘트들이 전자기적으로 서로 결합되어 있어 필라멘트가 분포되어있는 영역(이하 코아)을 하나의 타원형 초전도 코아로 보는 모델(Norris's ellipse 또는 식(3))이 측정된 손실과 비교적 잘 일치하기 때문에 보편적으로 채택되고 있다(2).

$$Q = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left(\left(1 - \frac{I_p}{I_c}\right) \ln\left(1 - \frac{I_p}{I_c}\right) + \frac{(2 - I_p/I_c)I_p}{2I_c} \right) \quad (J/m/cycle) \quad (3)$$

여기서 I_c는 1분 테이프의 임계전류, I_p는 식(2)에서와 동일하다.

표 1에는 실험에 사용된 Bi-2223테이프의 주요 사양을 나타내었으며, 특히 본 논문에서는 테이프의 임계전류가 상이하면서 동시에 동일한 임계전류밀도를 지닌 1분 테이프를 제작하기 위하여 표 1의 ASC-n1테이프 2분 또는 3분을 동일 평면상에서 횡 방향으로 배열시켜 ASC-n2테이프 및 ASC-n3테이프를 각각 제작하였고, 이 때 테이프사이에는 절연테이프인 Kapton을 이용하여 절연을 시켰다. 또한 이들 두 테이프의 자기자계손실에 대한 이론적 검토를 위한 계산 모델을 ASC-n1테이프에 대한 계산 모델과 함께 그림 1에 나타내었으며, ASC-n2테이프 및 ASC-n3테이프의 경우는 그 구조적인 특성상 2개 또는 3개의 코아가 전자기적으로 결합된 것으로 보는 coupling 모델과 서로 분리된 것으로 보는 decoupling 모델로 나누어 생각할 수 있다.

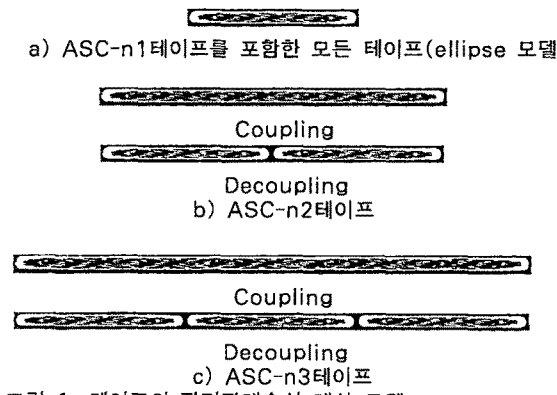


그림 1. 테이프의 자기자계손실 계산 모델.

표 1 Bi-2223테이프의 주요 사양

제작사	사이즈	중량비 (테이프)
BICC	3.9 mm×0.30 mm	13
NST	3.0 mm×0.15 mm	20
ASC-w	4.1 mm×0.21 mm	20
ASC-n1	3.1 mm×0.17 mm	18
ASC-n2	6.2 mm×0.17 mm	36
ASC-n3	9.3 mm×0.17 mm	55

3. 실험 결과 및 검토

그림 2에는 임계전류밀도가 상이한 Bi-2223테이프에 대하여 측정된 식(1)의 평가표준으로 나타낸 도체의 자기자계손실을 나타내었다. 그림 2에서 x -축은 단위법(per-unit)으로 표시한 도체 전류이며, 이는 식(4)과 같이 정의된다.

$$\text{per-unit conductor current} \equiv \frac{I_c}{I_n} \quad (4)$$

여기서 I_c 는 도체의 실제 전류 피크치를, I_n 는 정격전류 피크치를 각각 나타낸다. 또한 그림 2에서 임계전류 밀도(J_c)는 Bi-2223테이프의 임계전류를 테이프 단면적으로 나눈 밀도를 나타내며, 각각의 실선은 그림 1 a)에서 보는 바와 같이 다수분의 초전도필라멘트가 전자기적으로 서로 결합된 결과, 하나의 초전도 코아로 가정하여 계산한 자기자계손실 즉 식(3)으로부터 계산된 손실을 나타낸다.

그림 2의 결과로부터 도체의 자기자계손실은 이를 구성하는 1본 테이프의 임계전류밀도가 커짐에 따라 증가하며, 그림 1 a)의 ellipse 모델로부터 계산된 자기자계손실과도 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 3에는 테이프의 임계전류밀도는 동일하지만 임계전류가 상이한 그림 1의 ASC-n1테이프, ASC-n2테이프 및 ASC-n3테이프에 대해 측정된 도체의 자기자계손실을 나타내었다. 그리고 그림 2의 결과에서 보는 바와 같이 1본 Bi-2223테이프의 경우, 다수분의 초전도 필라멘트가 전자기적으로 서로 결합된 결과, 하나의 초전도 코아로 가정하여 계산된 자기자계손실과 측정된 손

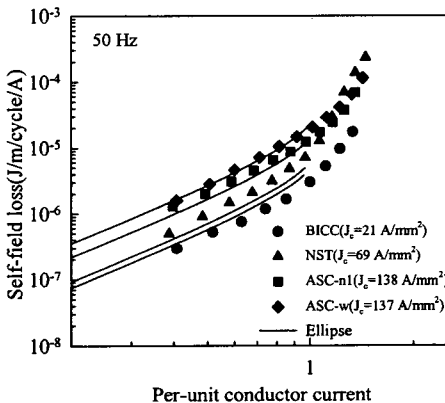


그림 2. 도체 자기자계손실: 임계전류밀도 영향.

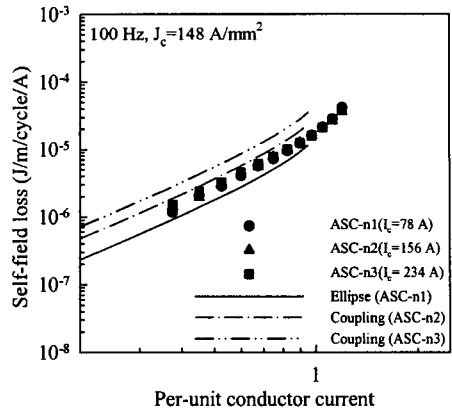


그림 3. 도체 자기자계손실: 임계전류 영향.

실이 잘 일치하는 사실에 근거하여 각각의 테이프에 대한 그림 1의 ellipse 모델 및 coupling 모델로부터 계산된 손실을 실선, 1점-파선 및 2점-파선으로 그림 3에 함께 나타내었다.

그림 3의 결과로부터 측정된 도체의 자기자계손실은 테이프의 임계전류 크기에 관계없이 일정함을 볼 수 있다. 반면 ASC-n2테이프 및 ASC-n3테이프의 경우, 그림 1 b) 및 c)의 coupling 모델로부터 계산된 자기자계손실은 테이프의 임계전류가 커짐에 따라서 함께 증가하는 것을 볼 수 있고, 또한 계산된 도체의 자기자계손실은 측정된 손실과는 상이한 것도 알 수 있다.

그림 4에는 그림 3의 결과에 대한 원인 규명을 목적으로 표 1의 ASC-n1테이프, ASC-n2테이프 및 ASC-n3테이프에 대하여 측정된 자기자계손실을 나타내었다. 그림 4에서 접선은 그림 1 a), b) 및 c)의 ellipse 모델 및 coupling 모델로부터 계산된 자기자계손실, 실선은 2개(ASC-n2테이프) 또는 3개(ASC-n3테이프)의 코아가 전자기적으로 서로 분리된 것을 가정한 decoupling 모델로부터 계산된 손실을 각각 나타낸다.

그림 4의 결과로부터 임계전류밀도는 동일하지만 임계전류가 상이한 테이프에 대하여 측정된 자기자계손실은 coupling 모델로부터 계산된 자기자계손실보다는 각각의 코아가 전자기적으로 분리된 것으로 가정한 decoupling 모델로부터 계산된 손실과 더욱 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 ASC-n2테이프 및 ASC-n3테이프의 경우는 임계전류가 동일한 2본(ASC-n2테이프) 또는 3본(ASC-n3테이프)의 ASC-n1테이프를 이용하여 제작된 테이프로서 앞서 언급한 바와 같이 이들 테이프의 제작 시, 테이프사이를 절연테이프인 Kapton으로 절연시킨 결과, 각각의 코아가 Kapton에 의해 전자기적으로 분리될 수 있어, 따라서 coupling 모델로부터 계산된 자기자계손실보다는 decoupling 모델로부터 계산된 손실과 더욱 잘 일치하게 된 것으로 설명될 수 있다.

이상의 그림 3 및 그림 4의 결과로부터 도체의 자기자계손실은 테이프의 코아가 전자기적으로 결합되어 있느냐 또는 분리되어 있느냐에 따라 상이해질 것으로 사료되며, 코아가 분리된 경우는 그림 3의 측정 결과에서 보는 바와 같이 테이프의 임계전류밀도만 동일하면 임계전류의 크기에 관계없이 일정한 반면 코아가 결합된 경우는, 그림 3의 계산 결과로부터 임계전류밀도가 동일하다 할지라도 테이프의 임계전류가 커질수록 도체의 자기자계손실은 증가할 것으로 사료된다.

4. 결 론

이상 다수분의 Bi-2223테이프로 구성되는 도체의 자기자계손실에 대한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 도체의 자기자계손실은 도체를 구성하는 테이프의 임계전류밀도가 커짐에 따라서 증가한다.
- 2) 테이프의 코어가 전자기적으로 분리되어 있는 경우 도체의 자기자계손실은 테이프의 임계전류에 무관한 반면 결합되어 있는 경우는 테이프의 임계전류가 커짐에 따라서 도체의 자기자계손실도 증가할 것으로 사료된다.

본 연구는 산업자원부와 한국전력공사의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정재훈, 류경우, "전류분포가 3분 도체의 교류손실 특성에 미치는 영향," 2003년도한국초전도·저온공학회학술대회는 문집, 부산, 2월 21-22, pp.7 10, 2003.
- [2] 김현준, 허대행, 조영호, 류경우, 최병주, "실용 고온초전도 테이프의 교류손실 특성," 2003년도한국초전도·저온공학회학술대회는문집, 부산, 2월 21-22, pp.11 14, 2003.

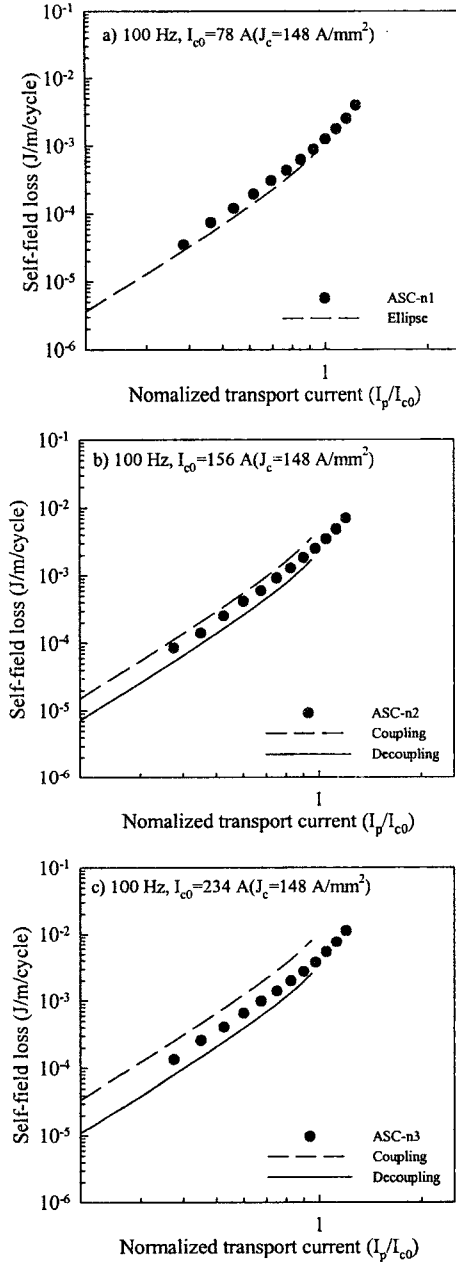


그림 4. 테이프의 자기자계손실 검토 결과: a) ASC-n1 이프, b) ASC-n2테이프, c) ASC-n3테이프.