

상이한 층간전류분포에서 원통형 다층 도체의 교류손실

이주영\*, 류경우\*, 오승열\*\*, 황시돌\*\*  
 전남대학교\*, 한전 전력연구원\*\*

AC Loss of a Cylindrical Multilayer conductor for various layer current distribution

Z. Li\*, K. Ryu\*, S.R. Oh\*\*, S.D. Hwang\*\*  
 Chonnam National University\*, KEPRI\*\*

**Abstract** - 10분의 선재로 각각 구성되는 내층과 외층을 지니는 2층 원통형 도체를 제작하여 그에 대한 교류손실을 측정하기 위하여, 각 층에 전압리드(inner-lead, outer-lead)들을 부착하였으며, 이로부터 픽업된 층 전압과 층 전류로부터 각 층의 손실을 평가하였다. 그 결과를 요약하면, 외층 전류가 내층의 1/2임에도 불구하고 내·외층의 손실은 거의 일치하였다. 또한 내·외층의 전류가 일치한 경우에도 외층 손실은 내층보다 대단히 크다. 이들 결과는 외층은 내층 전류로부터 발생되는 외부 자장하에 있어 외층의 자장이 증가된 것으로 사료된다.

다양한 층간 전류분포에 대하여 도체의 교류손실(AC loss)을 실험적으로 조사하기 위하여, 외층 전류( $i_o$ )와 내층 전류( $i_i$ )의 비를 층 전류 분포 파라미터( $\gamma$ )로 정의하였다.  $\gamma$ 가 "+" 부호이면 층 전류들은 동일 방향임을 의미하고,  $\gamma$ 가 "-" 부호이면 그들의 방향이 반대임을 의미한다.

1. 서 론

다수분의 고온초전도(HTS) 선재를 이용하여 제작되는 수 kA급 원통형의 HTS도체는 전력케이블뿐만 아니라 한류기 등 여러 전력분야에 적용되고 있다. 이러한 케이블 및 한류기의 상용화에 있어서 교류손실은 경제성 측면에서 커다란 걸림돌이 되고 있으며, 이들의 교류손실에 대한 정확한 측정법과 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 전력기에 사용되는 HTS도체는 기기의 사이즈를 줄이기 위하여 다층으로 전류의 대용량화를 하는데, 정확한 교류손실을 평가하려면 많은 연구가 필요하다 [1].

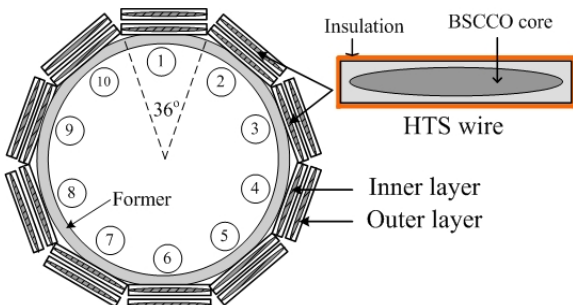
본 연구에서는 내층과 외층으로 구성되는 2층의 원통형 도체를 제작하여 각 층에 전압리드를 납땜하여 그들의 표면을 따라서 각각 배열하였으며, 이들을 통하여 각 층 및 층 손실을 평가하였다.

2. 실험 샘플 및 방법

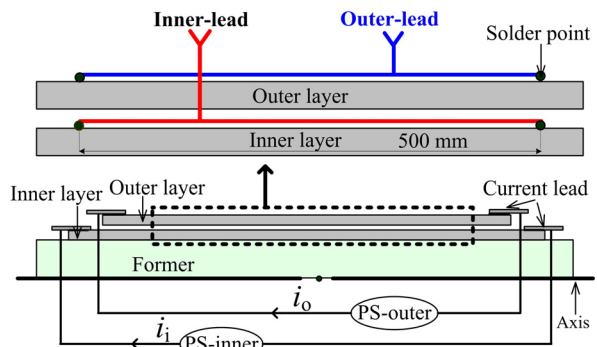
그림 1에는 10분의 절연된 BSCCO 선재들을 원형의 구조물위에 직선으로 각각 배열한 내층(inner layer)과 외층(outer layer)으로 구성되는 2층 원통형 도체의 단면도를 나타내었다. 사용된 선재의 임계전류는 77 K에서 125 A이고, 폭과 두께는 각각 4.1 mm와 0.3 mm이다.

그림 2에는 2층 도체에 부착된 전압리드 (voltage-lead)와 실험장치도를 나타내었다. 그림 2에서 보는 바와 같이, inner-lead와 outer-lead는 내·외층의 선재에 각각 납땜하여, 그들의 표면을 따라서 배열하였다. 이들의 전압탭간 거리는 500 mm이다.

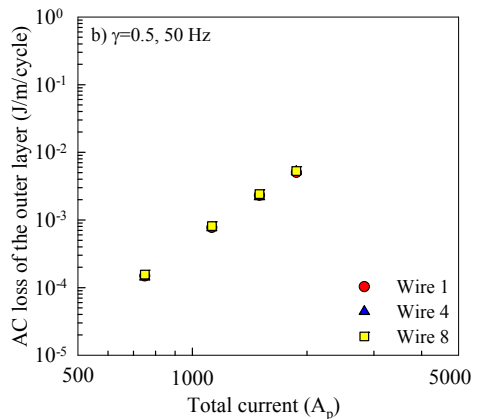
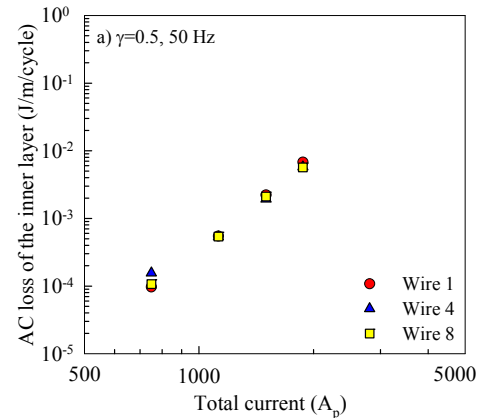
2층 도체의 교류손실 측정 시, 내·외층은 각각 독립적인 전원(PS-inner, PS-outer)으로 통전하였고, 내·외층 전류( $i_i, i_o$ )의 위상은 항상 일치시켰다. 또한 각 층에 있는 선재들에 흐르는 전류들의 크기와 위상을 동일하게 하기 위하여, 각 층의 10개의 선재들은 직렬로 연결하였다. 모든 실험은 액체질소 온도인 77 K에서 진행되었다.



〈그림 1〉 2층 원통형 도체의 단면도



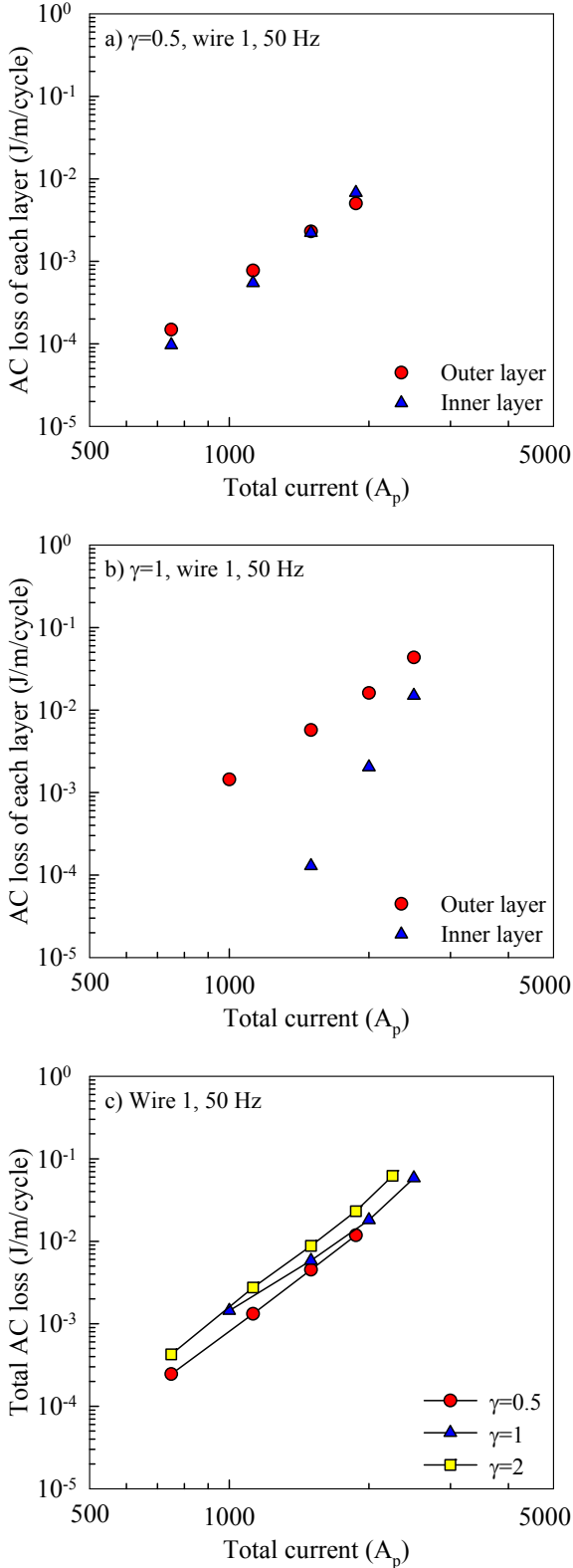
〈그림 2〉 전압리드의 배열 및 실험장치도



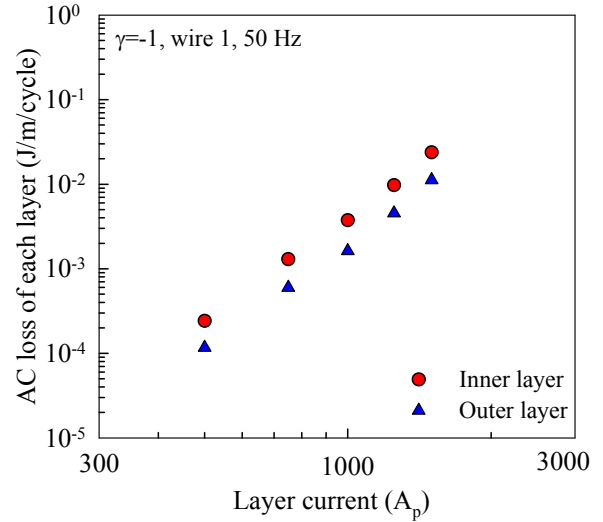
〈그림 3〉 내·외층 교류손실의 접촉위치 의존성

### 3. 실험 결과 및 검토

Fig. 3에는 층 전류와 층 손실전압 (loss voltage)으로부터 측정된 내·외층의 교류손실에 대한 전압리드의 접촉위치 의존성을  $\gamma=0.5$ 에 대하여 각각 조사하였다. 그 결과, 측정된 층 손실은 전압리드의 접촉위치에 무관하다. 이는 내·외층 선재들의 손실 전압은 각각 일치함을 의미한다. 이 결론은 다양한 층 전류 분포에 대해서도 성립하였다. 따라서 내·외층의 손실은 각 층에 있는 10분 선재들의 손실 합과 일치하게 된다 [1].



<그림 4> 다양한 층 전류 분포에서 내·외층 및 총 손실



<그림 5> 같은 크기 반대 방향의 내·외층의 전류에 대하여 측정된 교류손실

그림 4에는 내·외층의 교류손실 분포와 층 손실을 다양한 층 전류 분포에 대하여 나타내었다. 그림 4a에서 보는 바와 같이,  $\gamma=0.5$ 에서 외층 전류는 내층 전류의 절반임에도 불구하고, 각 층의 손실은 거의 일치한다. Fig. 4b의  $\gamma=1$ 에서 두 층에 동일한 크기의 전류가 흐르면, 그림 4a와는 달리 외층 손실은 내층보다 대단히 크다. 이들 결과는 외층은 내층 전류로부터 발생하는 외부 자장하에 있어 외층의 자장이 증가된 것으로 사료된다 [2]. 그림 4c에서 보는 바와 같이, 2층 도체의 층 손실은 층간 전류 분포를  $\gamma=0.5$ , 2로 크게 변화하여도 균일 층전류분포 ( $\gamma=1$ )와 비교하면 그 차이가 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

그림 5에는 실제 초전도케이블의 차폐층 (shield)을 모의하여 내·외층에 크기는 같지만 방향이 서로 반대인 전류( $\gamma=-1$ )를 흘리는 경우에 대하여, 측정된 각 층의 손실을 나타내었다 [3]. 그림 5에서 보는 바와 같이, 그림 4a와 4b와는 달리, 외층의 손실은 내층보다 1/2정도 적은 것을 알 수 있다 [3]. 이는 외층의 자장은 반대방향의 내층 전류에 의하여 상쇄된 것으로 사료된다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 내·외층으로 구성되는 2층 원통형 도체를 제작하여, 각 층의 손실 전압을 측정할 수 있는 inner-lead와 outer-lead를 부착하여, 이들로부터 층 손실을 다양한 층 전류 분포에 대하여 측정하였다.

그 결과를 요약하면, 외층 전류가 내층의 1/2임에도 불구하고 내·외층의 손실은 거의 동일하였고, 내·외층의 전류가 일치하면, 외층 손실은 내층보다 대단히 크다. 이들 결과는 외층은 내층 전류로부터 발생하는 외부 자장하에 있어 외층의 자장이 증가된 것으로 설명이 가능하게 된다. 뿐만 아니라 내·외층에 크기가 같고 방향이 반대인 전류를 흘리는 경우, 내층 손실이 외층보다 오히려 더 크다.

### 감사의 글

이 논문은 지식경제부와 한국전력공사의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Z. Li, K. Ryu, S. Hwang, G. Cha, H. Song, Physica C Physica C, accepted for publication, 2011.
- [2] K. Ryu, H. Song, H. Kim, K. Seong, IEEE Trans. Appl. Supercond. 16 (2006) 1011.
- [3] Z. Li, K. Ryu, S. Fukui, S. Hwang, G. Cha, IEEE Trans. Appl. Supercond. accepted for publication, 2011.