

고온초전도 적층선재에서의 층간 거리에 따른 자화손실

최명섭, 박명진, 차귀수, 이지광*
순천향대학교, *우석대학교

Magnetization Losses of the HTS Stacked Tapes at Various Gap between Tapes

M. S. Choi, M. J. Park, G. Cha, J. K. Lee*
Soonchunhyang University, Woosuk University*

cmssuper@hotmail.com

Abstract - Rise of the current level at power applications, such as, transformer, motor and power cable, need for using stacked HTS tapes.

In this paper, we measured losses of the stacked HTS tapes. Three different types of the stacks which were made of 2 tapes, 3 tapes and 4 tapes, were tested Perpendicular magnetic field was applied to the HTS stacks as the external magnetic field. Effects of the gap between HTS tapes were examined

1. 서 론

최근 들어 초전도 선재를 이용한 전력기기들이 대용량화되고 있다. 이에 따라 대 전류를 흘려줄 필요성이 있다. HTS 테이프는 전류밀도를 극대화하기 위한 직사각형의 얇은 테이프와 같은 모양을 하고 있다. 대용량 초전도 변압기의 경우는 솔레노이드, 팬케이크 형태로 권선하며 많은 전류를 흐르게 하기 위해 HTS 테이프를 적층하여 사용한다.[1] 또한 권선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자계는 권선내의 각각의 테이프에 외부인가 자계로 작용하여 자화손실을 발생시킨다.[2]-[4]

이는 개개의 초전도 선재에서 발생하는 자기 자계에 의한 손실보다는 외부자계에 의한 자화손실이 매우 크고, 외부자계중 권선을 구성하는 테이프에 대한 수직방향 성분 자계에 의해 발생하는 자화손실이 수평방향 성분 자계에 의한 손실보다 매우 크다. 임계전류 및 자기자계 손실과 유사하게 적층선재에 대한 자화손실은 단일선재의 경우와는 다른 특성을 보인다. 이는 초전도체가 가지는 차폐효과의 영향이라고 볼 수 있다.

본 논문은 초전도 전력기기 제작에 있어 발생할 수 있는 외부자장이 수직으로 HTS선재에 가해질 때 선재의 절연여부와 절연간격에 따른 자화손실의 변화를 측정하고, 단일선재의 손실과 비교하여 차폐효과가 어느 정도 발생하는지에 대해 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

고온초전도선재에 자장이 인가되면 초전도체에서 인가된 외부자장에 반하는 자장이 발생되어 초전도체에 히스테리시스성 손실을 발생시키며 이 손실을 자화손실이라고 한다. 고온초전도선재 샘플에서 발생하는 자장을 측정하기 위해 샘플 주변에 픽업코일을 감아 이때 발생하는 자장을 측정하고, 인가된 외부자장을 상쇄시키기 위해 상쇄코일을 사용하였다. 이때에 픽업코일에 유기되는 전압 e 는 다음과 같다.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad [1]$$

여기서 N 은 픽업코일의 권선수이다. 또한 외부자장 인가용 코일에서 발생하는 자장을 측정하기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$H = \frac{1}{\mu_0} \times K \times I_{자석} \quad [2]$$

여기서 K 는 자석상수[T/A]이고, $I_{자석}$ 은 외부자장 인가용 코일에 흐르는 전류[A]이다.

자화손실은 H 의 변화에 따른 B 의 값을 1주기 동안 적분하면 다음 식과 같다.

$$W = \int_0^T B dH \quad [3]$$

고온초전도 선재에서 발생하는 자화손실밀도를 측정하기 위해서는 선재에 자장을 인가해 주어야하며 이를 측정할 픽업코일이 필요하다. 본 실험에는 고온 초전도 선재가 위치하는 곳에서 일정한 자장을 인가해 주기 위해 공극의 길이가 40(mm)인 레이스트랙형의 코일을 사용하였으며, 사용된 레이스트랙형 코일의 자석상수는 3.651×10^{-3} [T/A] 이다. 고온초전도 선재에서 발생하는 자장을 측정하기 위해 각각 10턴의 픽업코일과 상쇄코일을 사용하였다. 그림 1은 실험을 위한 회로도이다. 픽업코일과 상쇄코일을 연결하여 외부자장을 상쇄시킨 후 픽업코일에서 발생하는

유기전압신호를 자속계에 입력하여 적분하면 자화곡선을 측정할 수 있다.

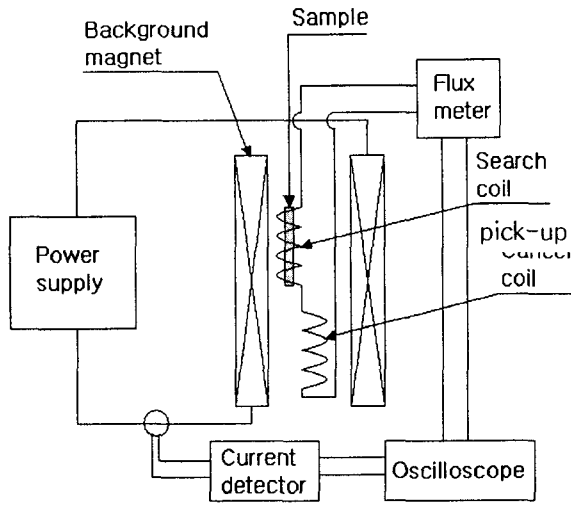


Fig. 1. AC loss measurement set-up

그림 2는 외부자계 인가용 레이스트랙코일의 위치에 따른 자장 분포를 나타내고 있다. 본 실험에서 사용된 고온초전도선재의 샘플길이는 44[mm]이다. 레이스트랙 코일에 인가된 전류가 5[A]일 때 중심에서의 자장이 37[mT], 중심에서 3[cm] 떨어진 위치에서도 동일한 37[mT]로 측정됐다. 실험에 사용된 샘플의 길이가 44[mm]임을 고려할 때 샘플전체에 대해 균일한 자장이 고온 초전도 선재의 샘플에 가해짐을 알 수 있다.

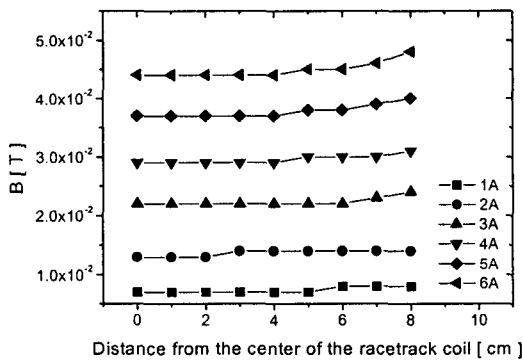


Fig. 2. Current and the generated field of the background magnet

그림 3은 픽업코일과 고온초전도선재를 적층한 단면도이다. 단일선재부터 2개의 선재를 적층하여 샘플을 제작하고, 같은 방법으로 3개의 선재, 4개의 선재를 적층하여 각각의 절연간격에 따른 수직방향의 자화손실밀도를 측정하였다. 수직방향의 자화손실밀도의 변화를 확인하기 위해 절연을 하지 않은 경우와 두께가 50[μm]인 캡톤테이프를 이용해 절연한 경우, 두께가 230[μm]인 복합절연테이프를 이용해 절연간격을 조정하면서

측정하였다. 표 1은 실험에서 사용된 고온 초전도 테이프의 사양을 나타내고 있다.

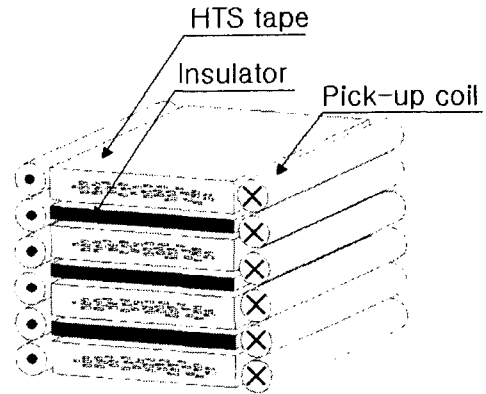


Fig. 3. Cross-section of stacked HTS tape and pick-up coil

Table 1. Specifications of the HTS tape

항 목	특 성
조 성	Bi-2223
폭	4.1(±0.2)mm
두께	0.203(±0.02)mm
Je	>12kA/cm ²
Ic	120A

그림 4는 측정에 사용된 적층 샘플과 상쇄코일, 픽업코일로서 캡톤테이프로 절연한 모양이다. 픽업코일과 상쇄코일은 각각 10턴이고 코일의 두께는 0.12[mm]이다.



Fig. 4. Pick-up coil, cancel coil and staked HTS tape sample.

3. 실험 결과

표2는 인가된 외부자장의 값이 125[mT]일 때, 단일선재의 손실 값을 1로 하여 2, 3, 4적층 선재의 손실밀도값의 변화를 나타내었다. 비절연인 경우 고온초전도선재를 절연층 없이 적층한 것이다. 50[μm]절연테이프의 경우 캡톤테이프 1겹을 사

용하여 2, 3, 4적층을 한 것이다. 그리고 230(μm) 절연테이프는 복합절연테이프를 이용하여 4 적층 선재만 절연간격을 조정하며 측정하였다. 즉 4적층-A는 230(μm) 간격으로 절연하고 4적층-B는 450(μm)로 절연한 것이며 4적층-C는 690(μm)의 간격으로 절연한 것이다.

Table 2. Normalized losses in samples

B _{ext} [mT]	정규화된 자화손실밀도			
	비 절 연			
	단일선재	2적층	3적층	4적층
20	0.06	0.027	0.019	0.012
80	0.637	0.471	0.410	0.305
125	1	0.843	0.833	0.682
50 μm 절연테이프				
20	0.06	0.029	0.019	0.013
80	0.637	0.502	0.407	0.34
125	1	0.898	0.805	0.747
230 μm 절연테이프				
	단일선재	4적층-A	4적층-B	4적층-C
20	0.06	0.014	0.018	0.022
80	0.637	0.337	0.419	0.48
125	1	0.687	0.801	0.897

그림 5는 비 절연일 때 적층에 따른 수직방향 외부자장에 대한 자화손실밀도를 나타낸 그림이다. 적층된 선재 사이를 절연하지 않았을 때에 적층에 따른 수직방향 외부자장에 대한 정규화된 자화손실밀도를 나타내고 있다.

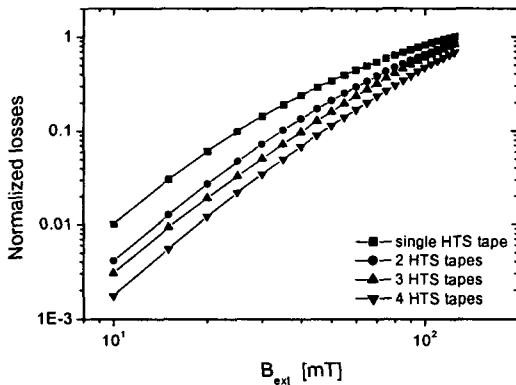


Fig. 5. Normalized losses in non-insulated samples.

낮은 자장 영역에서 단일선재와 각 적층선재 간의 자화손실밀도가 큰 폭의 변화를 보이고 있다. 이는 낮은 자장영역 안에서는 고온초전도선재의 적층의 수를 증가시킴에 따라 차폐효과가 높게 나타나기 때문이다. 또한 자장이 높은 영역에서도 마찬가지로 자화손실밀도가 줄어들었지만 차폐효과가 감소하여 변화의 폭이 작아짐을 알 수 있다.

비절연 적층과 캡톤테이프를 사용한 고온초전도선재에서 수직방향의 외부자장에 따라 발생하는 자화손실밀도 비교를 그림 6에 나타내었다. 그림 6과 표 2의 값에서 보듯이 동일한 적층선재의 경우에 있어서는 20(mT) 일 때 비 절연과 캡톤테이프 절연에 대한 손실비의 값이 2, 3, 4적층에 대하여 각각 0.027, 0.019, 0.012, 0.029, 0.019, 0.013이었다. 캡톤테이프를 사용 할 때 약간 증가하였으나 그 변화의 폭이 매우 작으므로 무시할 수 있을 정도이다.

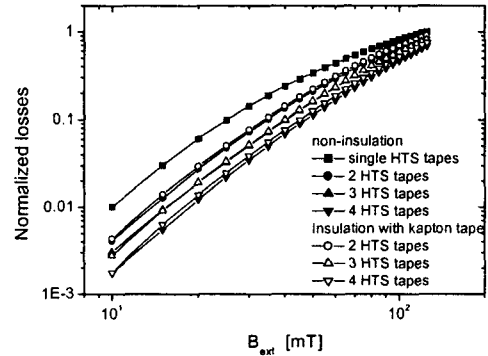


Fig. 6. Normalized losses in kapton-insulated samples

그림 7은 단일선재에 대하여 절연 간격의 변화에 따른 4적층선재의 정규화된 자화손실밀도의 비를 나타낸 그림이다. 표2에 나타내었듯이 고온초전도선재의 적층선재의 샘플에 인가된 외부자장이 125(mT) 일 때 4적층 A, B, C의 정규화된 손실 값이 0.687, 0.801, 0.897로 비절연 일 때와 캡톤테이프 절연일 때의 값에 비해 두드러지게 증가했음을 알 수 있다. 이는 적층선재의 절연간격이 증가할 수록 고온초전도선재의 자장 차폐의 효과가 감소하여 손실이 증가함을 나타낸다.

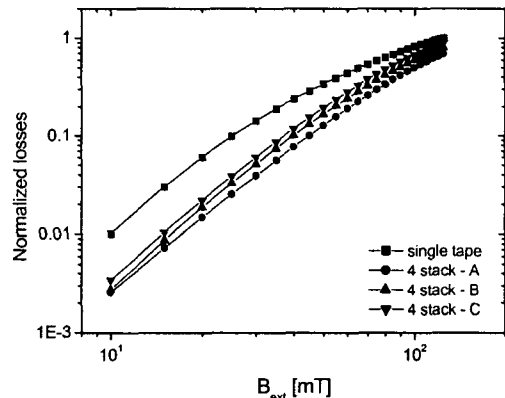


Fig. 7. Normalized losses in insulation with Polyvinyl-insulated sample

4. 결 론

본 논문에서는 고온초전도선재를 비절연, 캡톤테이프, 복합절연테이프를 사용하여 수직방향

외부자장에 대한 고온초전도선재의 샘플에서 발생하는 자화손실밀도를 측정하였다. 동일한 외부자장에 대하여 2, 3, 4적층선재는 단일선재에서의 손실보다 작은 값을 가졌으며 그 순서는 단일선재, 2적층, 3적층, 4적층 순으로 나타났다. 또한 비절연과 캡톤테이프를 이용한 절연에서는 그 손실비의 차이가 적어 무시할 수 있을 정도이며, 복합절연테이프를 사용하여 고온초전도선재의 절연간격을 크게 함에 따라 손실이 점점 증가함을 알 수 있었다. 이는 고온초전도선재의 자장차폐효과가 고온초전도선재의 절연간격이 증가함에 따라 낮아지고, 또한 외부에서 인가된 자장의 값이 커짐에 따라 낮아짐을 알 수 있었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] M Polak, P U Sak, J. Pitel and L. Jansak, "Comparison of Solenoidal and Pancake Model Windings for a Superconducting Transformer", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.1478-1481, 2001.
- [2] S. Spreafico and L. Gherardi, "The Effect of Self-field on Current Capacity in Bi-2223 Composite Strands", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.2159-2162, 1999.
- [3] 심정욱, 이희준, 차귀수, 이지광, 한송엽, "고온초전도선재의 자화손실 측정", 대한전기학회논문지, Vol.48B, No.4, pp.182-186, 1999.
- [4] Stefania Farinon et al., "Shielding and Losses in Multifilamentary Tapes Exposed to Perpendicular AC Magnetic Fields," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.2776-2779, 2001.