

# 1세대 선재와 2세대 선재의 혼합 적층에 따른 자화손실 특성

## Magnetization loss of Hybrid Multi-Stacked wire made of 1G wires and 2G wires

임형우<sup>1</sup>, 이용석<sup>2</sup>, 차귀수<sup>1,\*</sup>, 이희준<sup>1</sup>

H. Lim<sup>1</sup>, Y. Lee<sup>2</sup>, G. Cha<sup>1,\*</sup>, and H. Lee<sup>1</sup>

**Abstract:** Superconducting electric power devices need to stack HTS wires to increase the current carrying capacity. Uniform multi-stacked wires(UMS) which were made of the same HTS wires have been used. This paper shows the magnetization loss of hybrid multi-stacked(HMS) wire made of BSCCO wires and YBCO wires. Five HMS wires, YB(YBCO-BSCCO), YYBB, YBYB, YBBY and BYYB, were made and tested. Magnetization losses of each UMS wire were compared with corresponding HMS wire. Test results show that magnetization losses per unit length of HMS wire are between the corresponding UMS BSCCO wire and HMS YBCO wire below critical magnetic field. Above the critical magnetic field, magnetization losses of HMS wires are larger than that of corresponding both UMS wires.

**Key Words:** AC loss, HMS, Magnetization loss, Stack wire, UMS.

### 1. 서 론

최근에 들어 에너지 효율이 높고 친환경적인 초전도 전력기에 대한 관심이 늘어나고 있다. 초전도체나 초전도 선재를 사용한 기기로는 초전도 변압기, 초전도 한류기, 초전도 발전기 및 초전도 전동기 등이 있으며, 다양한 전력기들에 대한 연구와 필요성이 제시되고 있다[1-2]. 그중에서도 초전도 변압기는 부피가 작고 무게가 작아서 많은 연구가 진행 되었으나 큰 교류 손실이 발생한다는 단점이 있다[3]. 이러한 손실은 초전도체에 교번 자장이 가해짐으로 인해 발생하며 전력기를 설계 할 경우 반드시 선행 연구되어야 할 부분이다.

본 논문에서는 새롭게 개발된 YBCO선재에 외부 자장이 가해졌을 때 발생하는 자화손실을 실험적으로 확인하였으며, 전류 용량 증가를 위한 방법으로 제시되고 있는 적층선재의 특성을 알아보기 위하여 2세대선재(YBCO선재)의 적층과 1세대선재(BSCCO선재)들의 적층시 발생하는 자화손실에 대하여 연구하였다.

또한 전류 용량이 다르나 선재의 폭이 같은 BSCCO 선재와 혼합하여 적층했을 경우 발생하는 자화에 의한 전기적 특성을 연구하였다. 이러한 이유는 YBCO선재의 경우 외부자장이 가해져도 임계전류 감소가 적다는 장점이 있고 본 실험에서 사용한 BSCCO선재의 경우 YBCO선재보다 임계전류 감소가 높았다. 실험에 사용한 BSCCO선재의 임계전류가 YBCO선재보다 높기 때문에 이들을 혼합 적층하였을 경우 전류 용량을 유지시키면서 손실을 저감시킬 수 있는 찾기 위해 혼합 적층의 방법을 시행하였으며, 이때 발생하는 자화손실 특성을 자장의 세기에 따라 20mT 영역을 낮은 자장영역(Low level magnet field), 100mT 영역을 높은 자장영역(High level magnet field)으로 구분하여 비교하였다.

### 2. 실험 방법

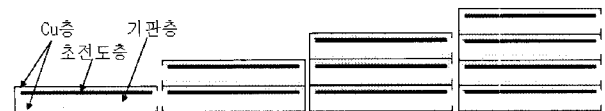
#### 2.1. 선재의 적층

Fig. 1은 BSCCO선재의 적층 그림이며, Fig. 2는 YBCO선재의 face-to-face 방법을 사용한 적층을 나타낸 그림이다. 적층의 방법에는 앞의 방법 이외에도 edge-to-edge 적층 방법이 있으나, 이러한 경우 폭이 많이 커지므로 손실값이 더욱 증가한다[4]. 따라서 본 실험에서는 face-to-face 방법을 사용하였다. 선재와 선재 사이에는 절연을 하지 않았다. 실험시 외부자장을 가하게 되면 자기 차폐 전류가 발생하여 외부자장과 자기 차폐 전류에 의해 로렌츠 힘이 발생한다. 그로 인하여 선재들이 흔들리거나 위치가 바뀌게 되므로, 선재들을 테이프로 고정시켰다.



a)Single wire b)2Stack wire c)3Stack wire d)4Stack wire

Fig. 1. Stacking of BSCCO Wire.



a)Single wire b)2Stack wire c)3Stack wire d)4Stack wire

Fig. 2. Stacking of YBCO wire.

<sup>1</sup>정 회 원 : 순천향대학교 정보기술공학부

<sup>2</sup>학생회원 : 순천향대학교 정보기술공학부

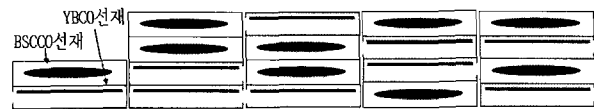
\*교신저자 : gsoocha@sch.ac.kr

원고접수 : 2007년 1월 4일

심사완료 : 2007년 3월 19일

Fig. 3은 혼합 적층을 한 방법의 그림이다. Fig. 3에서 a)는 YBCO-BSCCO선재의 적층 그림이며, b)는 YBCO선재 두 개와 BSCCO선재 두 개를 이용하여 적층한 그림이다. 이와 같이 적층의 방법을 달리하여 외부자장에 의한 손실을 측정하였다. 외부자장에 의한 측정 회로는 측정하고자하는 샘플에 외부에서 교류자장을 인가하여야하므로 교류자장 인가용 전자석이 필요하고 샘플에서 발생하는 자화에 의한 손실을 측정하기 위하여 픽업 코일과 상쇄 코일이 필요하다. 본 논문에서는 측정을 위해 Linked-Pickup-Coil 방법을 사용하였다. 이와 같은 방법 외에도 자화손실 측정 방법에는 Saddle-Shape-Coil, Rectangular-Coil을 사용하여 측정하는 방법도 있다[5-6].

Table 1은 본 실험에 사용한 BSCCO선재와 YBCO 선재의 사양이다.



a)Y-B b)YYBB c)YBBY d)BYYB e)YBYB

Fig. 3. HMS of YBCO wire and BSCCO wire.

Table 1. Specifications of BSCCO wire and YBCO wire.

YBCO wire		BSCCO wire	
전체 두께	0.21mm	전체 두께	0.2mm
전체 폭	4.1mm	전체 폭	4.4mm
모재	Ag Alloy	구리층 두께	50μm*2
임계전류	130A(at 77K)	기판층 두께	75μm
		초전도층 두께	1μm
		임계전류	80A(at77K)

2.2. 실험방법

Fig. 4는 본 실험에 사용한 회로 구성이며 자화손실 측정을 위한 회로도이다. 픽업코일과 상쇄코일은 지름이 50μm인 에나멜선을 사용하였으며, 각각1000턴을 감아서 사용하였다. 외부자장이 인가되는 경우에 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부자장의 합성에 의해 나타나므로 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기 위해 픽업코일과 동일한 턴수의 상쇄코일을 픽업코일에 연결해 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시킨다. 초전도선재의 샘플은 픽업코일 내부에 위치한다. 고온초전도선재의 자화손실은 균일한 외부자장을 고온초전도선재의 샘플에 인가할 때 발생하는 에너지의 유출입으로부터 얻을 수 있으므로 1주기 동안 자화손실은 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

식(1)에서,  $\vec{E}$  은 샘플을 따라 발생된 전계,  $\vec{H}$  는 외부 인가자계의 세기이다.

$$Q_m = \oint_s \vec{E} \times \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

식(1)을 측정된 전압과 전류 신호로부터 고온초전도선재의 1주기 동안, 단위체적에서 발생하는 자화손실로 표현하면 식(2)을 구할 수 있다.

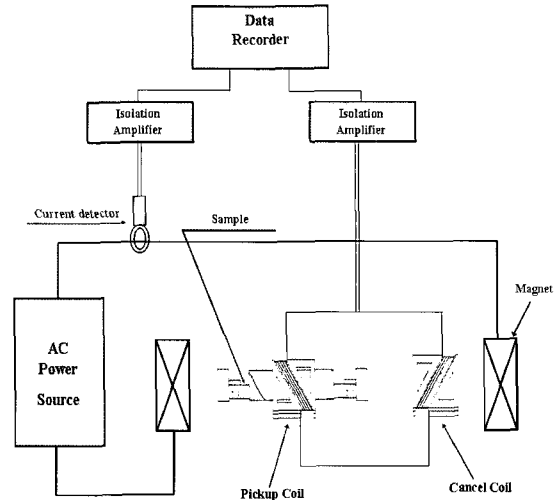


Fig. 4. Measurement circuit of magnetization loss.

$$Q_m = \frac{C_{pu}k}{V_s} \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (2)$$

위의 식(2)에서,  $k$  는 자장인가용 코일자석의 자석상수이고,  $C_{pu}$ 는 픽업코일 보정상수,  $V_s$ 는 샘플의 체적이다.

Fig. 5는 BSCCO선재와 YBCO선재의 2적층을 했을 경우 발생하는 자화손실과 BSCCO선재 한 가닥과 YBCO선재 1가닥을 결합하여 만든 혼합적층 선재에서 단위체적당 발생하는 자화손실을 비교한 것이다. 그림에서 YBCO 2적층 선재가 단위 체적당 발생하는 자화손실 결과가 크며, BSCCO선재가 체적당 발생하는 자화손실값이 작았다. 또한 혼합 적층한 선재의 단위체적당 자화손실 결과는 낮은 자장의 영역에서는 BSCCO선재보다 작았으며 높은 자장의 영역에서는 BSCCO선재보다 크고 YBCO선재보다는 작았다.

Fig. 6은 YBCO선재를 적층해가면서 측정한 자화손실이다. 이 그림에서 잘 나타나 있듯이 적층 수가 증가할수록 단위 체적당의 자화손실이 낮은 자장의 영역에서는 감소하고 있고 높은 자장의 영역으로 갈수록 적층수가 많은 것이 손실값이 높아지고 있는 것이 잘 나타나 있다.

이와 같이 역전되는 현상이 일어나는 것은 초전도 선재의 적층 수가 증가할수록 완전침투가 일어나는 영역이 고자장의 영역으로 이동해가고 있다.

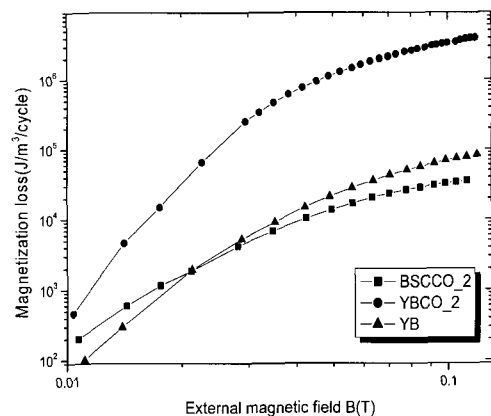


Fig. 5. Magnetization losses of Y-B HMS wire and 2stacked of BSCCO wire and YBCO wire.

Fig. 7은 BSCCO선재의 적층수에 따른 체적당의 자화손실을 나타낸 그림이다. 이 그림에서도 역시 Fig 6과 같이 적층수가 증가할수록 자장의 완전침투 영역이 높은 자장영역으로 이동해 가고 있으므로, 높은 자장의 영역에서는 역전 현상이 일어나 적층수가 많은 선재가 체적당의 자화에 의한 손실이 증가하고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7의 결과로부터 적층 수가 증가할수록 선재의 완전침투 영역이 높은 자장의 영역으로 이동하므로 응용 전력기기의 자장영역을 고려하여 적층한다면 효율적인 적층을 할 수 있을 것이다.

Fig. 8은 혼합 적층한 선재들만의 체적당 자화손실을 측정된 결과이다. 사각형 기호의 선재만 YBCO선재 1가닥과 BSCCO선재 1가닥을 이용하여 적층을 한 것이고,

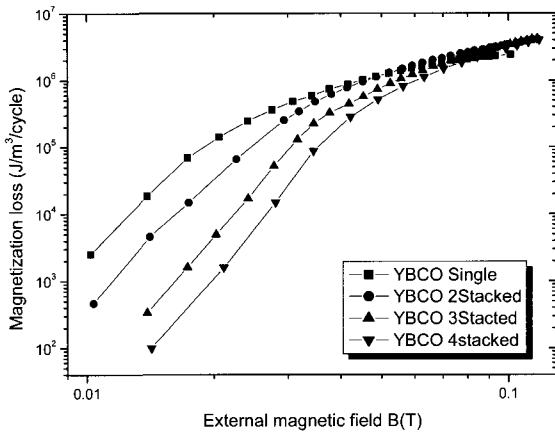


Fig. 6. Magnetization losses of YBCO wire at different number of stack.

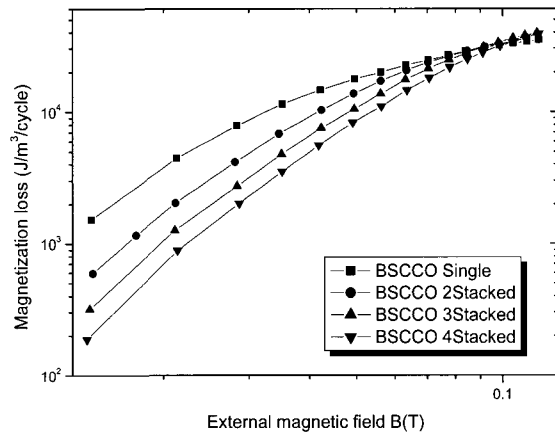


Fig. 7. Magnetization losses of BSCCO wire at different number of stack.

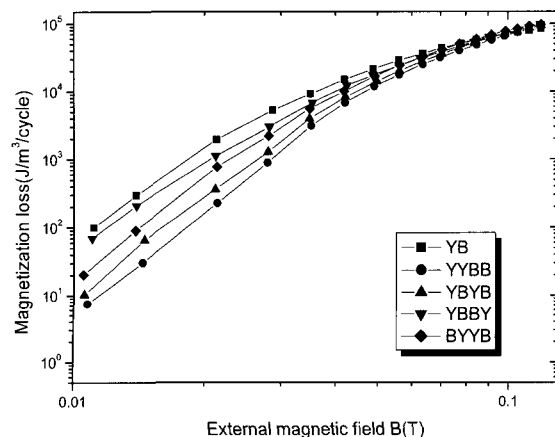


Fig. 8. Magnetization losses of HMS wire.

다른 기호들은 모두 두 가닥을 이용하여 적층을 한 것이다. 이 그림에서 Y-B선재는 낮은 자장에서 손실이 다른 혼합적층선재보다 크고 높은 자장으로 갈수록 손실이 작아졌다. 적층 방법에 따라 손실이 달라지는 것은 외부자장의 차폐정도에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 9는 같은 종류의 선재를 적층한 UMS선재와 BSCCO선재와 YBCO선재를 혼합하여 적층한 HMS 선재의 체적당 발생하는 자화손실 결과이다. 이 그림에서 낮은 자장의 영역에서는 YBCO 4적층을 한 선재가 체적당 발생하는 손실이 작지만 높은 자장의 영역으로 올라갈수록 급격히 손실이 증가하고 있다.

그와 반대로 BSCCO 4적층을 한 선재는 낮은 자장의 영역에서는 손실이 크지만 높은 자장의 영역에서는 체적당의 손실이 작아지고 있다. 또한 혼합 적층을 한 선재의 경우 낮은 자장의 영역과 높은 자장의 영역에서 YBCO 4적층 선재와 BSCCO 4적층 선재의 사이의 값을 나타내고 있다. 그중에서도 낮은 자장의 영역에서 YYBB와 같이 혼합 적층한 선재와 YBYB와 같이 혼합한 선재가 손실값이 작았다.

Fig. 10은 Fig. 9의 결과를 단위 길이당의 손실값으로 환산한 결과이며, 낮은 자장에서는 YBCO 4적층 선재가 단위 길이당의 손실이 가장 작았으며, 다음으로 YYBB의 혼합적층, YBYB의 혼합적층 순으로 손실값이 작았다.

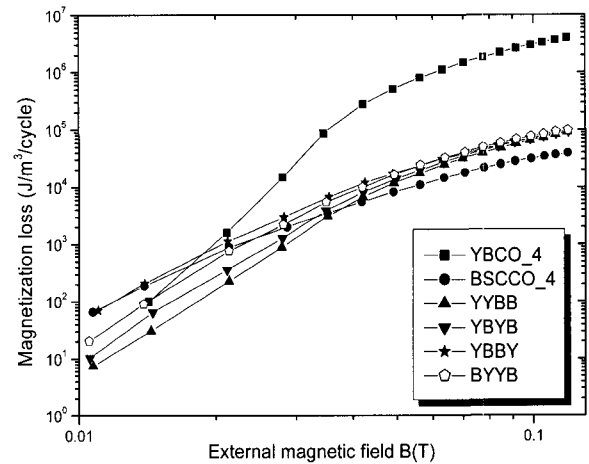


Fig. 9. Magnetization losses per unit volume of UMS wire and HMS wire.

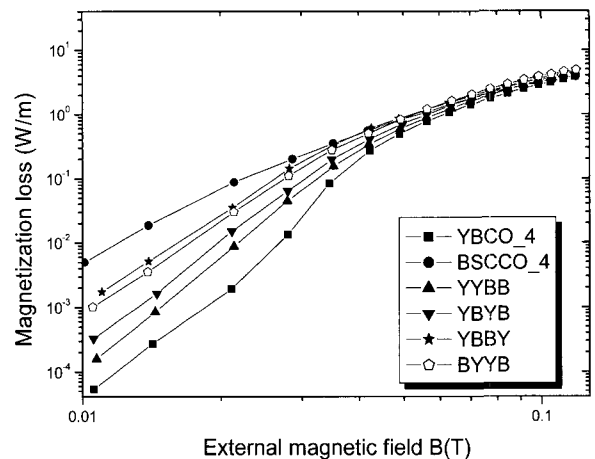


Fig. 10. Magnetization losses per unit length of UMS wire and HMS wire.

Fig. 11은 Fig. 10의 결과를 YBCO 4적층 선재를 기준으로, 각각 비율로 나타낸 것이다. 이 그림에서 20mT 부분의 낮은 자장 영역대에서 BSCCO 4적층 선재가 HMS 4적층 선재들보다 자화손실이 큰 것이 잘 나타나 있으며, 높은 자장의 영역에서는 BSCCO 4적층 선재나 다른 HMS선재들보다 BYYB선재의 손실이 크게 나타났다.

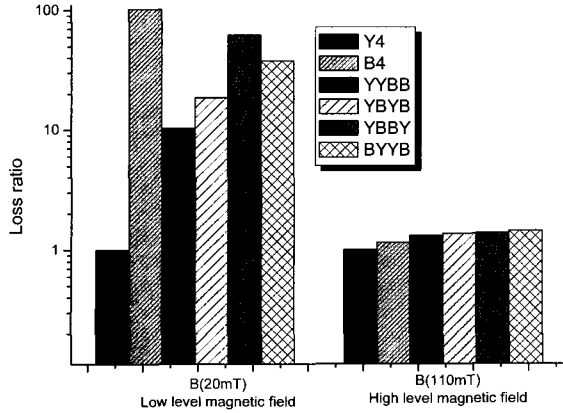


Fig. 11. Loss ratio of low level magnetic field and high magnetic field.

### 3. 결 론

본 논문에서는 BSCCO 선재와 2세대 선재를 혼합적층 하였을 경우 발생하는 자화손실을 측정하여 혼합하지 않은 적층선재와 비교하였다. 단위 체적 및 단위 길이로 비교해 보았을 경우 혼합 선재들은 대부분 YBCO선재만을 이용한 적층과 BSCCO선재만을 적층하였을 경우 발생하는 손실 영역 사이에 있었다. 단위 길이당의 손실로 보았을 경우 자기차폐의 효과가 YBCO선재만을 이용하였을 경우 가장 좋아서 손실이 적다고 말할 수 있고 혼합적층의 경우 YYBB와 YBYB의 적층이 손실 측면에서 유리하다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

[1] C. S. Weber, et al., "Design and Operational Testing of a 5/10-MVA HTS Utility Power Transformer," IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 15, No. 2, pp. 2210-2213, 2005.

[2] G. Snitchler, B. Gamble, and S. S. Kalsi, "The performance of a 5MW high temperature superconductor ship propulsion motor," IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 15, No. 2, pp. 2206-2209, 2005.

[3] J. J. Rabbers, B. ten Haken, and H. H. ten Kate, "Advanced AC loss measurement methods for high-temperature superconducting tapes," Review of Scientific Instruments, Vol. 72, No. 5, pp. 2365-2373, 2001.

[4] K. H. Muller, "Ac losses in stacks and arrays of YBCO/Hastelloy and monofilamentary Bi2223/Ag tapes," Physica C 312, pp. 149-167, 1999.

[5] M. Iwakuma, et al., "AC Loss Properties of YBCO Superconducting Tapes Exposed to External AC magnetic Field," IEEE Trans. on Appl. Super., Vol. 15, No. 2, pp. 1562-1565, 2005.

[6] Z. Jiang, and N. Amemiya, "An experimental method for AC loss measurement of high Tc superconductors," Supercon. Sci. Technol., Vol. 17, pp. 371-379, 2004.

[7] M. P. Oomen, J. J. Rabbers, B. ten Haken, J. Rieger and M. Leghissa, "Magnetization loss in stacks of high-Tc superconducting tapes in perpendicular magnetic field," Physica C. 361, pp. 144-148, 2001.

### 저 자 소 개



임형우(林炯佑)  
1972년 1월 18일생, 2000년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).



이용석(李鎔奭)  
1982년 5월 25일생, 2006년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업, 현재 동대학원 석사과정.



차귀수(車貴守)  
1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대공업 교육학과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 교수.



이희준(李喜俊)  
1969년 5월 15일 생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 순천향대학교 계약교수.