

## 대전류 통전을 위한 YBCO CC 적층선재의 자화손실 특성

## Characteristics of the Magnetization Loss in Stacked YBCO Coated Conductors for Large Current Application

이지광<sup>1</sup>, 임형우<sup>2</sup>, 차귀수<sup>2,\*</sup>Ji-kwang Lee<sup>1</sup>, Hyung-Woo Lim<sup>2</sup>, Gueesoo Cha<sup>2,\*</sup>

**Abstract:** For large power applications, multi-stacked tape should be used because single tape is limited in flowing demanded current capacity. Besides, insulation between layers is needed for safe operation because high voltages are generated in those applications. In this study, considering those situations which mentioned above, we measure the magnetization loss in several multi-stacked tape samples having the different insulation thicknesses and various packing numbers of tape by external magnetic field having various incidence angles.

**Key Words:** YBCO CC, magnetization loss, stacked conductor, insulation thickness, arbitrary direction magnetic field.

## 1. 서 론

임계전류밀도가 높고 자장이 인가되어도 전류밀도가 감소하는 정도가 적은 2세대 초전도선을 개발하기 위한 연구가 미국과 일본 등에서 진행되고 있고, 국내에서도 한국전기연구원 등에서 개발을 진행 중이다. YBCO CC는 초전도 선재를 제작하는 방식에 따라 차이는 있지만 1세대 초전도선에 비해서 10배 이상의 전류 용량을 가지고 있으며, 외부에서 자장이 인가되었을 때의 전류밀도 감소도 1/5 이하이기 때문에 상용화되면 1세대 초전도선을 완전히 대체할 것으로 예상하고 있다. 그러나, 현재까지 개발된 YBCO CC는 수직 자장에 의한 자화손실이 BSCCO 선재에 비해 작지 않아 이를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근의 국제연구동향에서는 저손실 YBCO CC 개발 가능성이 높은 것으로 예측되고 있다.

최근에 국내·외적으로 시작된 초전도를 이용한 대전력 기기 개발 연구들의 경우를 보면 전압, 전류가 수십 [kV] 이상의 고전압 및 수백 [A] 이상의 대전류의 환경이 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 고전압의 경우 요구되는 절연 층의 두께가 크게 되고, 대전류의 경우에는 현재의 초전도 테이프를 1본의 단일선재로는 필요한 전류를 통전시킬 수 없으므로 테이프를 적층하여 사용하게 된다. 적층선재에서의 임계전류와 전송전류 손실 및

자화손실 등의 교류손실은 단일선재의 경우와는 다른 특성을 보이는데 이는 적층선재를 구성하는 인접 초전도 테이프들에 의한 자장차폐 효과에 의한 영향 때문인 것으로 보인다. 즉, 한 테이프선재에서의 손실은 인접 선재들의 차폐전류(screening current)들에 의한 자장(차폐자장, screening field)에 의해 영향을 받는다[1].

전력기기 응용을 위해서는 초전도 테이프를 권선하여 사용하게 되는 데 단일선재를 이용하여 권선했다 할지라도 권선내의 테이프들은 결국 적층된 형태로 나타나게 되고, 사용되는 전압에 따라 테이프 사이의 층간, 턴 간 절연을 위한 이격 거리가 필요하게 되어 비절연의 형태로 테이프를 바로 접촉시킨 경우보다는 오히려 층 간, 턴 간 절연물의 두께에 따라 테이프간 거리가 결정되는 경우가 실제상황에 더 가깝다고 할 수 있다. 따라서 적층선재의 층간 절연, 이격거리 및 적층 방법에 따른 자화손실에 대한 정확한 특성 파악은 앞으로의 전력응용 기기개발에서 필수적인 사항이라 할 수 있다.

초전도전력기기는 일반적으로 초전도선재를 권선한 코일형태로 사용되며, 코일 여자 시 코일을 구성하는 각 초전도선재에는 여러 방향의 자장이 발생하고, 이러한 임의 방향의 자장은 외부 인가 자장처럼 작용하여 코일 각 부분에서 자화손실을 발생시킨다[2-3]. 특히, 초전도선재의 넓은 면에 수직으로 가해지는 자장이 코일 전체의 교류손실을 주도하게 되므로[4], 이러한 수직자장에 의한 초전도선재의 자화손실을 예측하고 가능한 수직자장을 줄일 수 있는 코일구조 설계는 초전도 전력기기 설계의 중요한 고려사항이라 할 수 있다. 본 논문에서는 YBCO CC 단일선재, 2적층, 3적층, 4적층선재 샘플에 대해 외부자장이 샘플의 넓은 면에 45°, 60°, 90°(수직)방향으로 인가될 경우의 자화손실을 측정하였다. 또한, 전력기기 응용시 사용 전압, 전류에 따라 결정되는 테이프 간 이격거리, 적층 테이프 개수의 변화에 따른 자화손실에 대한 측정실험을 통해 적층선재 사용에 대한 가이드 라인을 제시할 것이다.

## 2. 자화손실 측정방법

Table 1은 실험에 사용한 단일 YBCO CC의 사양과 실험 샘플 중 4적층선재의 단면을 보여준다. 금속층인 Ag의 두께는 1.2 $\mu$ m이고 YBCO 층은 1 $\mu$ m, 완충층 2.04 $\mu$ m이며 기판층 60 $\mu$ m이다. YBCO Coated Conductor의 폭은 8mm로 가로대 세로의 비율이 8000 : 1로 매우 크다. 단일 YBCO CC의 임계전류는 77K, self-field에서 166A로 측정되었다.

<sup>1</sup>정 회 원 : 우석대 전기전자공학과<sup>2</sup>정 회 원 : 순천향대 정보기술공학부

\*교신저자 : gssoocha@sch.ac.kr

원고접수 : 2007년 1월 4일

심사완료 : 2007년 2월 13일

Table 1. Specification of YBCO CC and stacked conductor samples.

YBCO CC	Ag층	1.2μm
	YBCO층	1μm
	완충층	2.04μm
	기판층	60μm
	Ic(77K,self field)	166A
적층샘플	적층개수	절연갭
	단일(single)	
	2(2-stacked)	No, 400μm
	3(3-stacked)	No, 400μm
	4(4-stacked)	No, 400μm

고온초전도선재의 자화손실은 균일한 외부자장을 고온초전도선재의 샘플에 인가할 때 발생하는 에너지의 유출입으로부터 얻을 수 있으므로 1주기 당, 단위길이당 자화손실은 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$Q_m = \oint_s \vec{E} \times \vec{H} ds \quad (1)$$

여기서,  $\vec{E}$  은 샘플을 따라 발생된 전계,  $\vec{H}$  는 외부인가자계의 세기이다. 식(1)을 측정된 전압, 전류 신호를 이용하여 고온초전도선재의 1주기 당, 단위체적당 자화손실로 표현하면 식(2)를 얻을 수 있다.

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

여기서,  $k$  는 자장인가용 코일자석의 단위전류당 발생 자속밀도를 나타내는 자석상수이고,  $C_{pu}$  는 픽업코일 보정상수,  $V_s$  는 샘플의 체적이다.

Fig. 1은 YBCO CC 4선을 적층한 4적층선재와 적층선재에서 YBCO CC사이의 절연을 위한 절연거리를 2적층선재의 경우에 대해 개념적으로 보여주는 단면도이다. CC사이의 절연거리는 본 논문에서는 고전압 응용을 위한 기초연구로서 400μm로 가정하여 샘플을 제작하였으며, Fig. 1에서 보는 것처럼 한 개의 CC선 두께의 약 6배 정도에 해당한다. 이 경우 자화손실이 발생하는 초전도체인 YBCO층 사이의 실제적 거리는 약 460μm 정도이다.

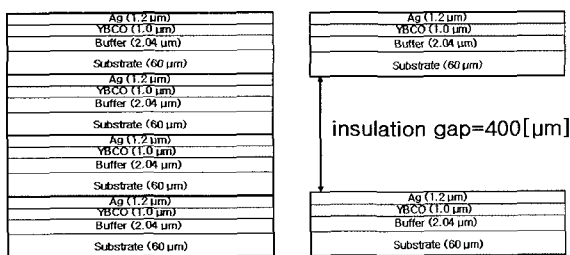


Fig. 1. Conceptual cross-sectional view of YBCO 4-stacked conductors and insulation gap between YBCO CC conductors.

Fig. 2는 자화손실 측정을 위한 회로도를 보여준다. 샘플은 픽업코일 내부에 위치하며, 외부자장이 인가되는 경우에 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부자장과의 합성에 의해 나타나므로 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기 위해 픽업코일과 동일한 턴 수의 캔슬코일을 픽업코일에 연결해 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시킨다. 자장인가용 자석 내에서 샘플이 위치하는 픽업코일과 캔슬코일이 포함된 영역의 자장균일도는 99% 이상으로 측정되었다. Fig. 3은 비절연 및 층간거리 400[μm]인 4적층선재에 외부자장이 선재의 넓은 면에 대해 임의의 각도를 가지고 인가될 때 인가자장의 수직, 수평성분을 나타낸 것이다.  $B_{ex}$ 는 외부인가자장,  $B_{ex,\perp}$ 는 수직자장성분,  $B_{ex,\parallel}$ 는 수평자장성분으로서 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$B_{ex} = B_m \sin \omega t$$

$$B_{ex,\perp} = B_{ex} \sin \theta \quad (3)$$

$$B_{ex,\parallel} = B_{ex} \cos \theta$$

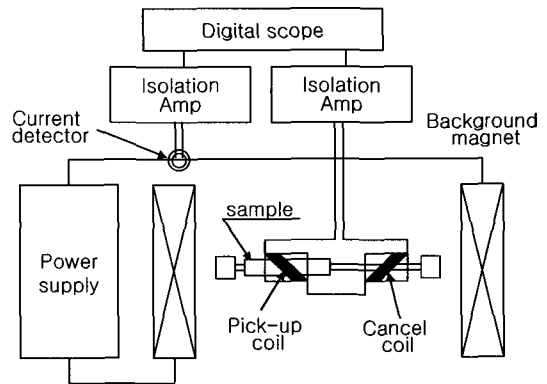


Fig. 2. Experimental circuit for magnetization loss measurement.

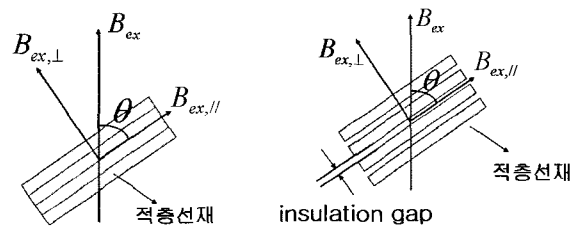


Fig. 3. Perpendicular and parallel field component of applied external magnetic field in non-insulation and 400[μm] insulation 4-stacked YBCO CC conductors.

### 3. 측정결과 및 분석

YBCO CC 적층선재에 대해 외부인가자장의 방향 및 절연을 위한 CC간 이격거리의 자화손실에 대한 영향을 살펴보기 위해 외부자장 입사각도별로 비절연 및

절연의 경우에 대해 자화손실을 측정하고 크기 관계를 살펴보았다.

Fig. 4는 YBCO CC 단일 및 4적층선재에 대해 외부 인가자장의 입사각도가  $\theta=90^\circ$ (수직),  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  일 때 CC 사이의 비절연,  $400\mu\text{m}$  절연에 따른 자화손실 측정 결과를 보여준다. 입사각도에 대해서는 수직에 가까울수록, 절연거리에 대해서는 비절연보다는 절연거리가 있을 때 자화손실밀도(단위체적당 자화손실)가 증가함을 알 수 있으며, 이는 자화손실이 수직자장에 의해 주도되고 단일 CC 사이의 이격거리가 있으면 자장차폐 효과가 감소하여 자화손실이 증가함을 보여주는 것이다.

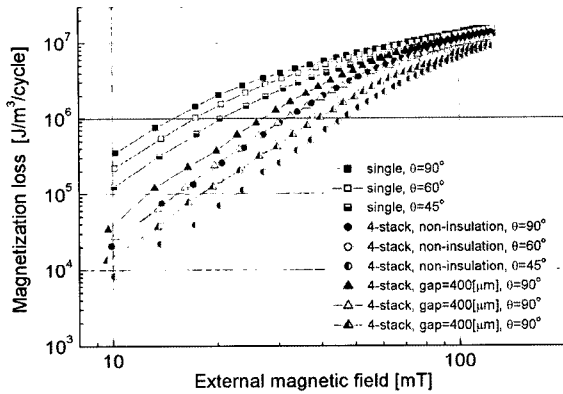


Fig. 4. Measured magnetization loss in YBCO CC single and 4-stacked conductor having several inclined external field( $\theta=90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ ) and different insulation gaps.

Fig. 5는 YBCO CC 단일선재, 2, 3, 4적층선재에 대해 수직방향 자장인가시의 자화손실 측정결과를 비교하여 나타낸 결과이다. BSCCO 테이프 선재에서와 마찬가지로 적층 개수가 증가할수록 적층에 의한 자기차폐 영향에 의한 손실밀도 감소 효과가 커짐을 알 수 있으며, 그래프에서 손실 증가 패턴이 변하는(기울기가 변하는) 외부 인가자장의 크기, 즉 완전침투자장은 적층개수 증가에 따라 커지고, 비절연 보다는 절연거리가 있을 때 더 커짐을 확인할 수 있다. 단일선재의 수직방향의 외부자장이 인가되는 경우 약 20mT 정도에서 자화손실 곡선의 기울기가 변화하는 것을 볼 수 있다. 이때는 초전도 선재의 전 면적을 통해 차폐전류가 흐르고 있음을 나타내며 초전도선재 내부에 자장이 완전히 침투하는 시점이기도 하다. 이 자장을 완전침투자장(full penetration field)라고 한다. 적층의 효과는 초전도체의 반자성 특성으로 이러한 완전침투자장의 크기를 증가시키는 역할을 하게 된다. 적층 수가 많을 때, 그리고 비절연 보다는 절연거리가 있을 때 이러한 현상은 두드러지게 나타난다. 차폐효과와 관련하여 적층선재의 안쪽에 위치한 선재들은 바깥쪽에 위치한 선재들 보다 같은 외부자장이 인가되더라도 각각의 선재에서는 더욱 작은 영역에서 차폐전류가 흐르게 되어 선재내부에 전류밀도 분포가 0인 영역이 더욱 커지게 되어 상대적으로 자화손실의 크기가 감소하게 된다. 이러한 자장차폐의 효과는 외부인가자장이 커질수록 감소한다. 즉, Fig. 5에서 외부인가자장의 크기가 증가함에 따라 단일선재에 대한 각각의 적층선재의 자화손실밀도의 비율이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 6, Fig. 7은 각각 인가자장의 입사각도가  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  일 경우의 자화손실 측정결과를 비교하여 나타낸 결과이다. Fig. 5의 수직자장인가의 경우와 유사한 경향

의 자화손실 발생패턴을 갖지만, 동일한 외부인가자장에 대해 입사각도가 작을수록 단일선재에 대한 적층선재의 자화손실밀도 비율이 더 크음을 알 수 있다.

Fig. 5 ~ Fig. 7의 결과에서 2적층선재의 경우에는 축간절연거리 유무가 자화손실에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있는데, 이는 적층선재의 층과 층 사이에 있는 CC선이 없으므로 자장차폐효과가 크게 나타나지 않기 때문으로 생각된다.

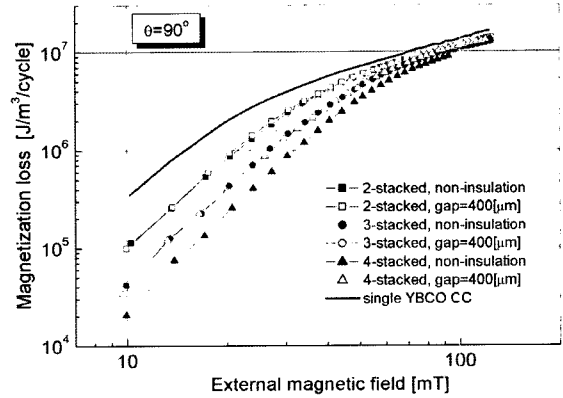


Fig. 5. Measured perpendicular magnetization loss in YBCO CC single and 2, 3, 4-stacked conductors having different insulation gaps( $\theta=90^\circ$ ).

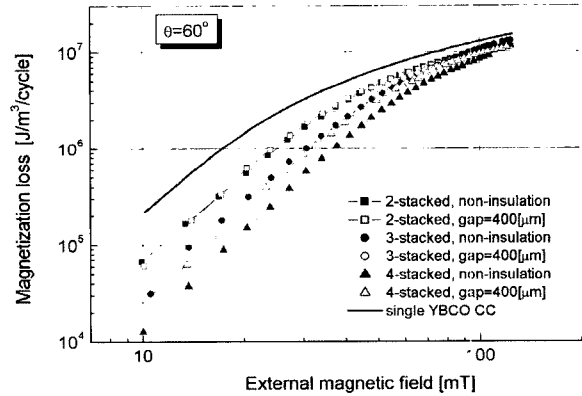


Fig. 6. Measured magnetization loss in YBCO CC single and 2, 3, 4-stacked conductors having different insulation gaps( $\theta=60^\circ$ ).

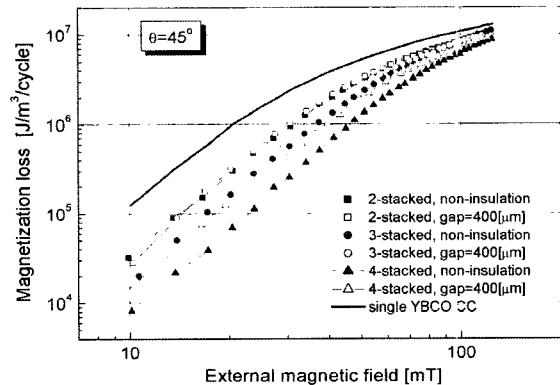


Fig. 7. Measured magnetization loss in YBCO CC single and 2,3,4-stacked conductors having different insulation gaps( $\theta=45^\circ$ ).

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 외부자장이 인가되는 입사 각도가 각각 90°, 60°, 45° 인 경우의 2, 3, 4적층선재에 대해 측정된 자화손실(Fig. 5 ~ Fig. 7)을 단위체적당의 자기저장에너지밀도로 나누어 표현한 식(4)의 정규화된 자화손실을 나타낸다.

$$\text{Normalized magnetization loss} = \frac{\text{Measured magnetization loss}}{B_m^2 / 2\mu_0} \quad (4)$$

식(4)와 같이 표현된 정규화손실은 loss factor의 개념으로 생각할 수 있으며, 앞의 Fig. 5 ~ Fig. 7의 그래프에서 손실증가 패턴이 변하는 외부자장의 크기를 쉽게 판별할 수 있다. Fig. 8 ~ Fig. 10에서 그래프들의 극대점에 해당하는 외부자장의 크기는 Fig. 5 ~ Fig. 7의 그래프들에서 손실증가의 기울기가 변하는 외부자장의 크기를 의미하며, 이는 각 실험샘플들에서 적층선재의 완전침투자장을 나타낸다고 할 수 있다. 입사각도에 대해서는 입사각이 작을수록, 절연거리에 대해서는 이격거리가 작을수록, 적층개수에 대해서는 적층수가 많을수록 완전침투자장의 크기는 증가하는 것을 볼 수 있다.

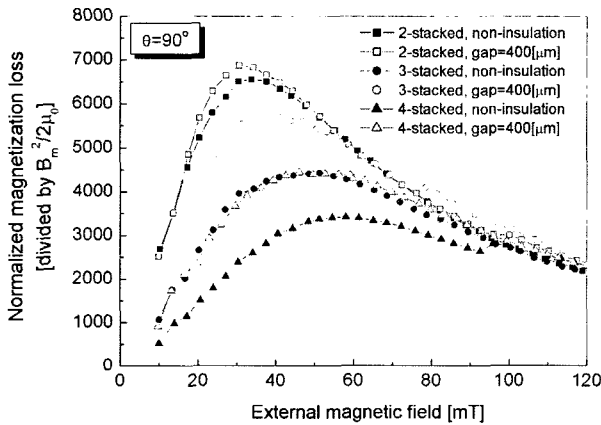


Fig. 8. Normalized value divided by  $B_m^2/2\mu_0$  of measured perpendicular magnetization loss shown in Fig. 5.

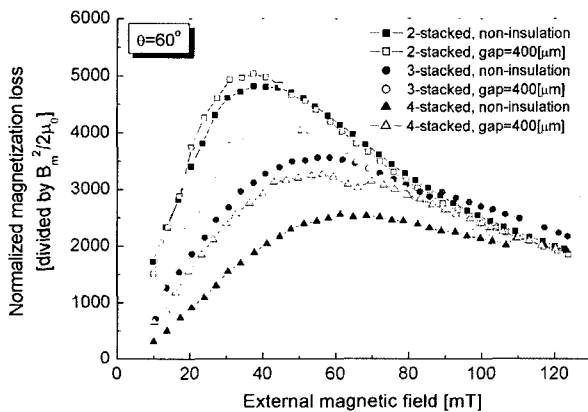


Fig. 9. Normalized value divided by  $B_m^2/2\mu_0$  of measured magnetization loss shown in Fig. 5.

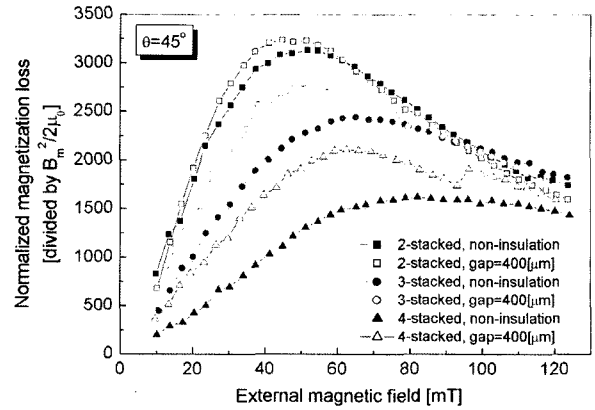


Fig. 10. Normalized value divided by  $B_m^2/2\mu_0$  of measured magnetization loss shown in Fig. 7.

#### 4. 결 론

YBCO CC 단일선재, 적층선재에 대해 적층개수, 외부인가자장의 방향, 적층선재의 층간 절연에 따른 자화손실을 측정하고 비교 분석하였다. 측정결과 적층개수가 증가할수록 초전도체의 반자성특성에 의한 자장차폐효과가 커져서 발생 자화손실밀도가 감소하였다. 외부인가자장의 입사각도에 대해서는 수직에 가까울수록 자화손실이 증가하며, 적층선재에서 YBCO CC 사이의 층간절연 갭이 있는 경우가 비절연의 경우보다 자장차폐효과가 감소하므로 자화손실이 증가함을 알 수 있었다. 2적층선재의 경우에는 층간 갭의 크기가 자화손실 증감에 별 영향을 주지 않으나, 3적층 이상의 경우에는 자화손실 증감효과가 나타남을 알 수 있었다. 이 논문의 자화손실 측정결과를 초전도 전력기기에서 손실 저감 초전도 코일구조 설계에 유용한 자료로서 활용될 수 있다.

#### 감사의 글

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

#### 참 고 문 헌

- [1] M. P. Oomen, J. J. Rabbers, B. ten Haken, J. Rieger and M. Leghissa, "Magnetization loss in stacks of high-  $T_c$  superconducting tapes in perpendicular magnetic field," Physica C. 361, pp. 144-148, 2001.
- [2] Y. Fukuda, K. Toyota, K. Kajikawa, M. Iwakuma, and K. Funaki, "Field angle dependence of ac losses in stacked Bi-2223 Ag-sheathed tapes," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 3610-3613, June 2003.

- [3] T. Chiba, Q. Li, S. P. Ashworth, and M. Suenaga, "Angular dependence of ac losses at power frequencies for a stack of Bi-2223/Ag tapes," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, pp. 2143-2146, June 1999.
- [4] 이지광, 임형우, 박명진, 차귀수, "BSCCO Tape 선재와 YBCO CC의 외부자장 각도에 따른 자화손실 특성비교," 전기학회논문지, 54B권 12호, pp. 586-591, 2005.

저 자 소 개



이지광(李志光)  
1966년 6월 1일생. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 우석대학교 전기전자공학과 부교수.



임형우(林炯佑)  
1972년 1월 18일생. 2000년 순천향대학교 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 동대학원 정보기술공학부 박사.



차귀수(車貴守)  
1956년 7월 8일생. 1978 서울대 공대 공업교육학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 순천향대 정보기술공학부 교수.