

Coated Conductor의 굽힘변형에 따른 임계전류 및 교류손실 특성

Critical current and AC loss characteristic
of Coated Conductor under bending김해준^{1*}, 심기덕¹, 김석호¹, 조전욱¹, 장현만², 이수길²Haejoon Kim^{1*}, Kideok Sim¹, Seokho Kim¹, Jeonwook Cho¹, H.M Jang², S.K Lee²

Abstract : Constructions of coated conductor which is differently from Bi-2223 is comprised multiple coatings on a base material or substrate and designed to achieve the highest degree of alignment possibility of the atoms in the superconductor material. In this study, we are measured and analyzed degradations of critical current according to diameter. In addition to study the effects of bending strain, we observed the AC loss of coated conductor and carried out analytical study for relation between I_c degradation and AC loss as well. The measurement of AC loss and numerical calculation was carried out based on Norris theory to compare with experimental results. The relationship between critical current and AC loss of HTS tapes with partial deformation by mechanical stress was studied. These results will amount the most important basis data in the of HTS cable, magnet, etc that winding work is required.

Key Words: AC loss, Critical Current, Mechanical Load.

1. 서 론

최근 임계전류가 높고 기계적 특성이 크게 개선되고 자장특성이 우수한 Coated Conductor(YBCO CC)가 개발됨에 따라 이를 응용한 고온초전도 전력기기를 개발하기 위한 연구가 더욱 활발해지고 있다. 특히 YBCO CC의 경우 기존의 Bi-2223 tape에 비해 자장특성이 매우 우수하여 SMES, 변압기 등 magnet을 이용한 초전도 전력기에 많이 응용될 것이다.

이러한 YBCO CC를 전력기에 응용하고자 할 경우 교류손실은 가장 큰 장애의 하나가 된다. 초전도를 이용하는 목적은 보통 소형 경량화와 효율 향상이 되는데, 교류 손실이 크다면 효율 향상이라는 목적을 달성할 수 없게 된다.

이와 같이 고온 초전도 케이블을 비롯한 초전도 전력기기의 상용화에 앞서 이들의 경제성 및 효율에 크게 영향을 미치는 YBCO CC의 교류손실에 대한 실

험 데이터의 구축 및 이해는 그 어떤 요소기술보다도 먼저 선행되어야 할 중요한 과제이다[1].

또한 초전도 전력기기 제작 시 많은 수의 롤러를 통해 장력이 설정되므로 굽힘 변형 횟수에 따른 임계전류의 저하특성 연구가 더욱 중요하게 요구되고 있다. 또한 각 tape는 Bending이나 Tension과 같은 stress가 동반됨으로 임계전류의 저하를 초래함과 동시에 반복적인 냉각에 의해 임계전류가 저하하는 특성을 보인다. 이러한 특성은 초전도 tape를 다루는 사람이라면 누구나 예상할 수 있는 문제점이지만, 쉽게 간과해서는 안 될 부분이다[2].

본 연구에서는 현재 판매중인 2가지의 YBCO CC의 bending에 따른 임계전류 저하 특성 및 그에 따른 교류손실을 측정 분석하였다. 따라서 본 연구를 통해 고온 초전도 전력기기의 제작에 있어서 중요한 기초 데이터가 될 것으로 사료된다.

2. 실험장치 및 실험 방법

표 1에서는 본 연구에 사용된 YBCO CC의 사양을 나타내었다. 기존의 1세대 초전도 도체인 Bi-2223 tape에 비해 두께가 작아졌기 때문에 기계적인 특성은 향상된 것으로 보인다. 두께가 작아지면 bending시 neutral axis를 중심으로 초전도층이 받는 tension이 워낙 작기 때문에 bending에 대한 기계적 특성이 우수하다[3].

Table 1. Specifications of coated conductors.

Specification	A	B
Width [mm]	4.27	4
Thickness [mm]	0.18	0.095
Min. Bend Diameter [mm]	30	11
Max. Rated Tensile Stress (RT)	150MPa	550MPa
Max. Rated Tensile Strain (77K)	0.3%	0.4%
Max. Rated Tensile wire tension(RT)	11.6kg	20kg
Critical Current	70	100

상온과 극저온의 온도차에 의한 damage가 발생할 우려가 있기 때문에 thermal cycle에 대한 실험을 먼저 진행하였다. Thermal cycle에 대한 임계전류의 저하가 나타나지 않았으므로, 하나의 sample로 곡률 반경을 줄여가면서 실험을 하였다.

임계전류의 저하특성을 측정하기 위해 그림 1과 같이 상온에서 각 bending diameter에 따라 굽히고, 그림 2에서와 같이 다시 펴서 직선 상태에서 임계전류 및

¹정 회 원 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

²비 회 원 : LS전선

*교신저자 : hibaree@hanmail.net

원고접수 : 2008년 01월 10일

심사완료 : 2008년 06월 16일

게재확정 : 2008년 06월 16일

교류손실을 측정하였다. 상온에서 초전도 tape에 각각 3kg의 Tension을 가한 상태로 유지하고, Bending Diameter는 60~10[mm]로 변화시키면서, 각 step별 임계전류 저하 특성 및 교류손실의 변화를 측정하였다.

임계전류 및 교류손실 측정 시 그림 3에서와 같이 IDX AC/DC power supply(30Hz~1kHz) 전원장치와 DAQ Board를 사용하여 데이터를 수집하였다. 교류손실은 cancel coil의 위치를 조정함으로써 초전도체 자체의 inductance에 의한 전압과 자장의 영향을 cancel coil로 상쇄시켜 저항성분만을 측정하였다.

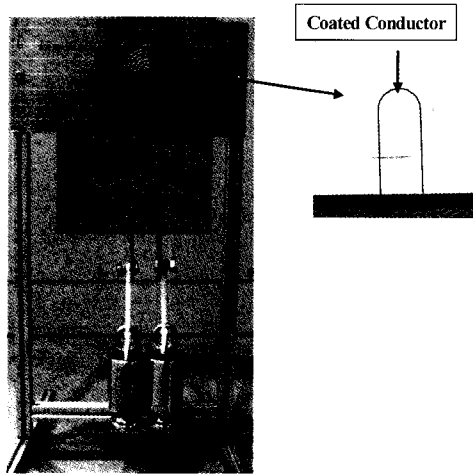


Fig. 1. Mechanical bending device of YBCO CC.

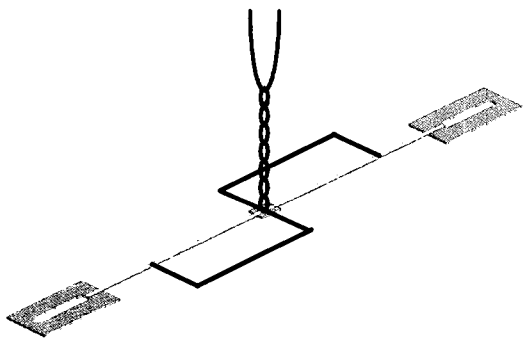


Fig. 2. Arrangement of voltage tab for measured self-field loss.

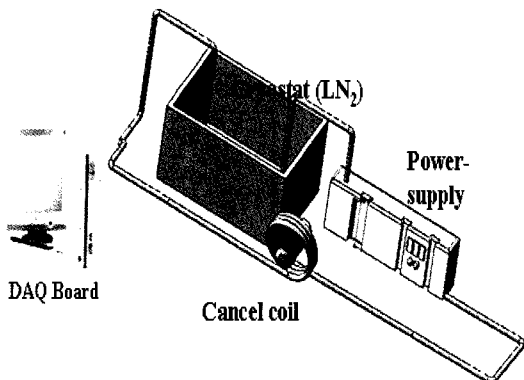


Fig. 3. Measurement system of I_c and AC loss.

3. 실험결과

3.1. Coated conductor의 bending에 따른 임계전류 저하 특성

그림 4에서는 Sample A와 B의 임계전류를 측정하였다. Sample A의 임계전류는 74[A], B의 경우는 101[A]가 측정되었다. 그림 5에서는 bending에 따른 임계전류 특성을 나타내었다. bending diameter를 10mm까지 bending을 하여도 임계전류는 거의 저하되지 않았다. 이것은 두 YBCO CC가 매우 얇아서 bending시 neutral axis를 중심으로 초전도층이 받는 힘이 워낙 작기 때문에 임계전류는 저하되지 않는다고 사료된다.

YBCO CC는 Bi-2223 tape와 비교하여 다른 구조로 되어있다. Bi-2223 tape는 Multi-filament 결합으로 bending시에 꼬여있는 각 filament에 조금씩 damage가 가해지며, 이로 인해 임계전류가 조금씩 감소하면서 어느 순간 filament 결합이 모두 어긋나면서 임계전류는 급격히 감소하는 특성을 보인다. 그림 6과 같이 적층형 구조를 갖는 YBCO CC는 Nickel-tungsten alloy substrate, Yttrium-Oxide, Yttrium-stabilized Zirconia, Ceria, YBCO superconductor와 Silver layer로 구성되어있다. 따라서 초전도층인 약 1 μ m의 두께를 가지는 YBCO layer가 어긋날 경우 초전도성을 완전히 잃어버리는 특성이 나타날 것으로 사료된다.

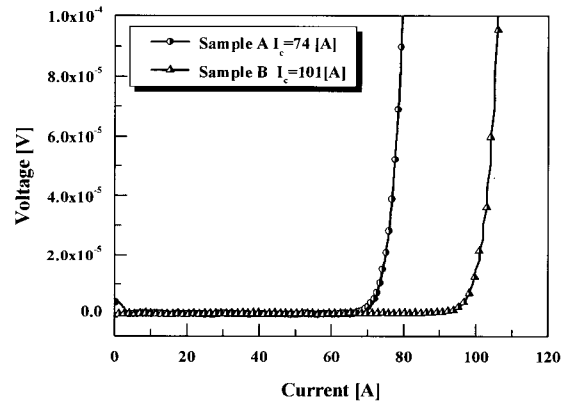


Fig. 4. Critical current of sample A and B.

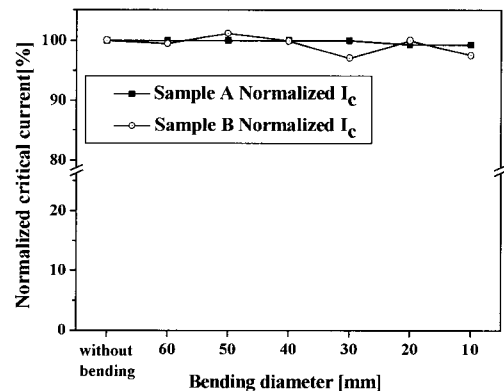


Fig. 5. I_c degradation of coated conductor with bending diameter.

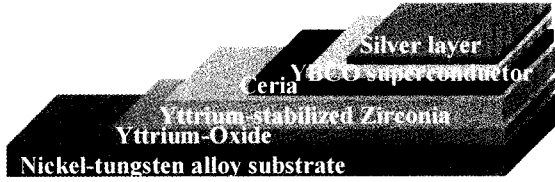
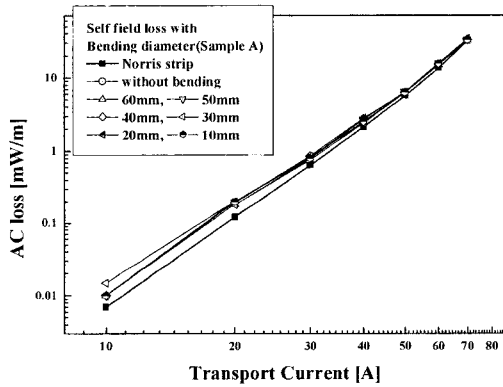


Fig. 6. Composed of coated conductor.

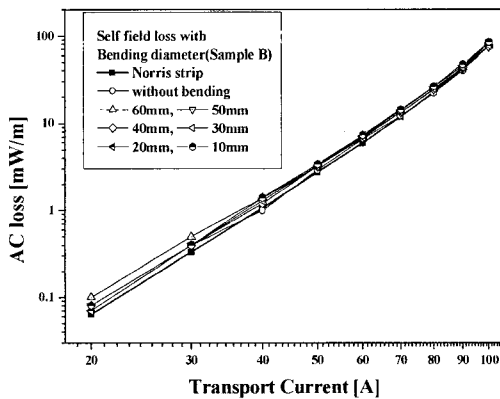
3.2. Coated conductor의 bending에 따른 교류손실 특성

그림 7에서는 sample A와 B의 bending diameter에 따른 self-field loss를 나타내었다. Bending에 따라서 임계전류저하가 나타나지 않았으므로, 교류손실은 크게 변화하지 않았다.

그림 8에서는 sample A와 B의 self-field loss를 비교하였다. 입력전류가 작을 때 특히 sample A에서는 Norris 계산값과 측정값의 차이가 조금 나타났다. 이것은 YBCO CC의 substrate로 강자성체인 Ni-W(Ni과 텅스텐 5% 합금)를 사용하기 때문에 입력 전류가 낮을 때에는 substrate의 자화손실(Ferro-magnetic field)의 영향이 크기 때문에 이론식과 차이가 나타나는 것으로 사료 된다[4-7].



(a) Sample A의 bending에 따른 교류손실



(b) Sample B의 bending에 따른 교류손실

Fig. 7. Self-field loss of coated conductor with various bending diameter.

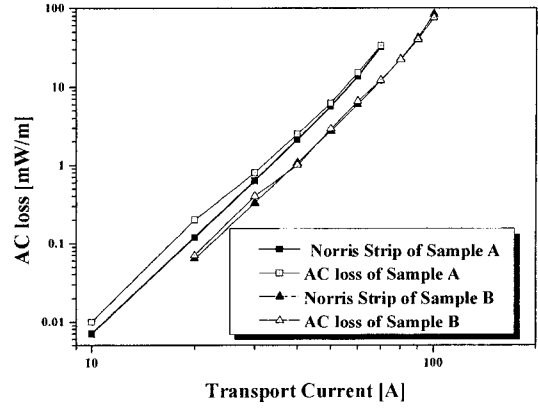


Fig. 8. Self-field loss of sample A and B.

4. 결 론

본 연구에서는 2가지 종류의 YBCO C.C의 bending에 따른 임계전류 및 self-field loss를 측정, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

① YBCO C.C는 두께가 Bi-2223 tape에 비하여 얇기 때문에 bending 특성이 우수하다. 이것은 bending 시 neutral axis를 중심으로 초전도층이 받는 힘이 매우 작기 때문으로 사료된다.

② 임계전류가 저하되지 않으면, self-field loss 역시 변화가 없다.

현재 판매중인 2가지 YBCO C.C를 상온에서 bending diameter 10mm까지 굽힘변형을 일으켜도 임계전류 및 교류손실의 변화는 전혀 없었다. 따라서 YBCO C.C는 초전도 전력기기 제작 시 반드시 필요한 권선작업에 있어서의 롤러 크기를 자유롭게 선정할 수 있는 큰 장점을 가질 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S.W.Kim, et al, "Transport Current Loss and Ic Degradation of HTS Tapes under Mechanical Load," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.14, No.2, pp1110~1113, June, 2004.
- [2] Hae-Joon Kim, et al, "AC loss characteristics of Bi-2223 HTS tapes under bending," Physica C Vol. 445-448, pp768~771, July, 2006.
- [3] H. Suzuki et al, "AC losses in multifilamentary Bi-2223Ag tapes subjected to bending strains," Physica C Vol. 426-431, pp1333~1338, July, 2005.
- [4] R. C. Duckworth et al, "Substrate and Stabilization Effects on the Transport AC Losses in YBCO Coated Conductors," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol 15, No. 2, pp. 1583~1586, 2005.
- [5] O. Tsukamoto et al. "Transport current losses

in HoBaCuO-123 coated conductors with a Ni-alloy substrate.” Phys C, Vol. 426-431 pp. 1290~1294, 2005.

- [6] 김석환, 한송엽, “초전도 공학 개론,” 대영사, 2004년.
- [7] Gianni, L et al. “Transport AC Losses in YBCO Coated Conductors,” IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol 16, No. 2, pp. 147~149, 2006.

저 자 소 개



김해준(金海儻)
1977년 2월 19일생, 2000년 영남대학교 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2003~2008년 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 위촉연구원, 현재 대한전선.



심기덕(沈基德)
1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 선임연구원.



김석호(金錫鎬)
1975년 3월 2일생, 1997년 KAIST 기계공학과 졸업, 1999년 동 대학원 졸업(공학석사), 2005년 동 대학원 졸업(공학박사), 2005년~현재 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 선임연구원.



조전욱(趙全旭)
1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 책임연구원.



장현만(張鉉萬)
1971년 5월 21일생, 1997년 경상대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 2001년 2월 경상대학교 전기전자공학과 졸업(박사), 2002년 9월 Kyoto 대학 전기공학과 Post Doc, 2002년 9월~현재 LS전선(주) 중앙연구소 선임연구원.



이수길(李秀吉)
1970년 2월 2일생, 1992년 광운대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 공학박사 수료, 1996년~현재 LS전선(주) 중앙연구소 수석연구원.