

시변자장 영향에 따른 Bi-2223/Ag 선재의 통전 특성에 대한 연구

Research on a transport characteristic of Bi-2223/Ag superconducting tapes with time-varying magnetic field

최석진*, 이상진**, 김해준***, 심기덕***, 조전욱***

S.J. Choi*, S.J. Lee**, H.J. Kim***, K.D. Sim***, J.W. Cho***

Abstract: For electric power applications of Bi-2223/Ag superconducting tapes, a transport characteristic is important issue. A transport characteristic is strongly depends on the magnitude and direction of external time-varying magnetic field. To verify a effect of external magnetic field, we manufactured a prototype magnet and obtained transport characteristics with respect to the magnitude, the direction and the frequency of external magnetic field. The data acquired in this paper will be used as a source for the study of HTS electric power applications which is supposed to carry on.

Key Words: Bi-2223/Ag superconducting tapes, external magnetic field, transport characteristic.

1. 서 론

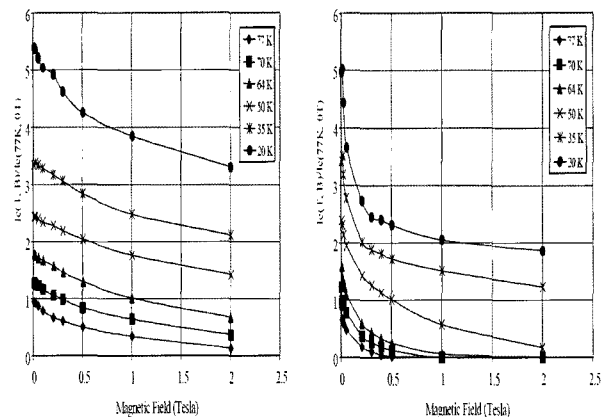
초전도체는 전기장 및 자장 그리고 온도에 의해 영향을 받으며 이는 초전도체 고유의 임계특성으로써 초전도체의 재료적 특성을 결정하는 주요요인이 된다. 초전도 전력응용을 위해서 초전도체는 선재로써 가공되는데, 현재 가장 널리 응용되고 있는 고온초전도 선재는 분말충진법으로 제작된 선재를 들 수 있다. 일반적으로 이 선재는 Bi계 고온 초전도체와 은피복재로 구성된다[1]. Bi계 초전도체는 고유의 자기적 취약성과 테이프형 초전도 선재가 갖는 형상적 문제로 인하여 외부 인가 자장에 대한 의존성을 갖게 된다. 즉, 고온 초전도체에 외부에서 자장이 인가되면, 고온 초전도체의 임계전류는 감소한다. 이러한 영향은 고온 초전도체를 이용하여 제작한 초전도 기기의 성능 저하를 가져오거나 심한 경우에는 켄치 현상이 일어날 수도 있다. 초전도 전력케이블은 Bi-2223 물질로 만들어진 도체를 이용하며, 구리케이블과 비교해서 보다 큰 양의 전류 및 에너지를 손실없이 전송할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이러한 경우는 DC 송전에서는 가능하고, AC를 송전하는 경우에는 필연적으로 손실이 발생한다. compact한 초전도 전력케이블의 실용화를 위해 외부 교류 자장에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[2]. 본 연구에서는 외부 인가 자장이 고온 초전도선재에 미치

는 영향을 알아보기 위하여, 선재에 인가되는 자장의 방향과 크기, 주파수를 변화시켜 가며 실험을 하였다.

2. 본 론

2.1. 실험 방법

실험은 외부 인가자장이 없을 때, 임계전류가 130A이며, 0.4(Thickness)×4.45(Width)(mm)의 사양을 가지는 고온 초전도 선재를 사용하였다. 선재에 직류 자장이 외부에서 인가되었을 때의 임계전류 변화는 Fig. 1과 같다. 고온 초전도 선재에 외부에서 자장을 인가하기 위하여 홀더와 prototype magnet을 제작하였다. Prototype magnet의 사양을 결정하기 위하여 전자장 해석 프로그램인 opera-3d를 사용하여 전자장 해석을 수행하였다[3]. Fig. 2는 prototype magnet의 전자장 해석모습이다. 이렇게 제작된 prototype magnet은 Fig. 3과 같이 조립하게 된다. 고온 초전도 선재는 마지막에 조립되는 홀더에 위치하게 되며, 전압을 측정하기 위하여 고온 초전도 선재에 7cm의 간격의 전압탭을 부착하였다. 전압탭과 선재 사이의 저항을 줄이기 위하여, 전압탭은 선재위에 soldering을 하여 부착하였으며, 외부자장 및 외부자장에 의해 유도되는 자장에 의한 전압이 자체적으로 상쇄되는 구조로 되어 있는 8자 형태의 리드를 사용하였다[2]. 홀더는 실험 진행 중 반복되는 질소 내와 상온사이의 온도변화에 의해 발생하는 선재의 변형의 가능성을 최소화할 수 있도록 제작되었다. 고온 초전도 선재가 위치한 홀더는 외부인가



(a) in parallel direction. (b) in perpendicular direction.

Fig. 1. The variation of critical current with respect to external DC magnetic field - AMSC spec.

* 정 회 원 : 위덕대학교 산학협력단 연구원
 ** 정 회 원 : 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수
 *** 정 회 원 : 한국전기연구원 위축연구원
 원고접수 : 2006년 8월 7일
 심사완료 : 2006년 9월 25일

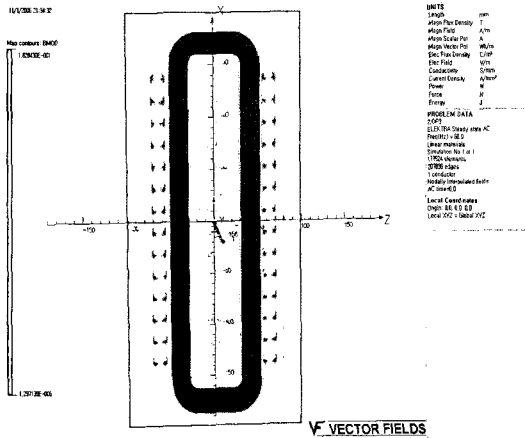


Fig. 2. Magnetic field distribution of prototype magnet.

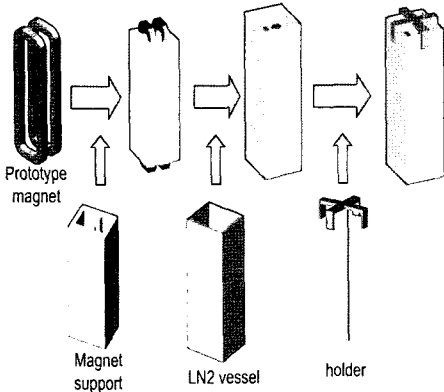


Fig. 3. Experimental equipment.

자장의 방향을 가변할 수 있도록 회전이 용이하게 제작하였다. 실험은 자장 0~400 gauss, 전류 0~140 A, 그리고 선재에 인가되는 자장의 방향을 변화시켜가며 전압 측정을 하였다. 외부에서 인가되는 자장의 주파수에 대한 영향도 알아보기 위하여, 주파수를 변화시켜 실험을 수행하였다.

2.2. 실험 결과

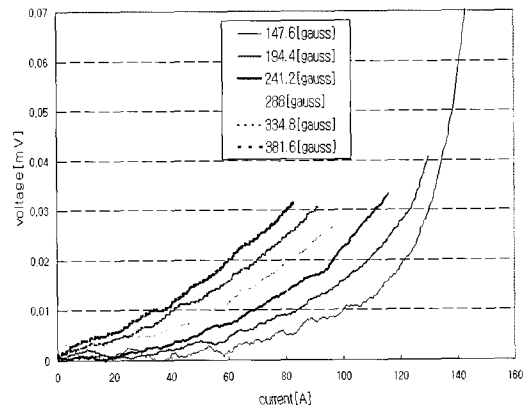
실험은 외부 인가 자장의 주파수가 60 Hz일 때와 200 Hz일 때로 나누고, 그 각각에 대해 선재가 받는 자장의 크기와 방향에 따른 임계 전류를 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

2.2.1 교류 자장(60 Hz)이 외부에서 인가되었을 때 전압특성과 임계전류

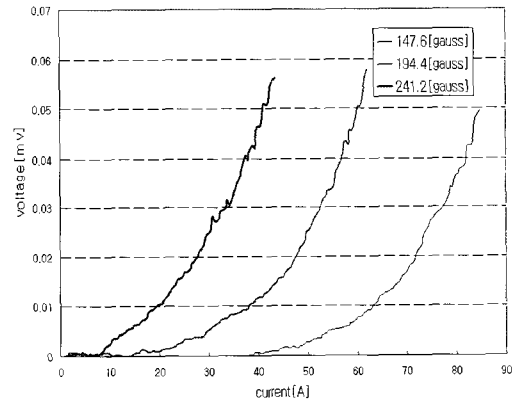
선재가 받는 자장의 방향과 크기를 변화시키며, 전압을 측정하였으며 그 실험 결과는 Fig. 4와 같다. 외부에서 교류 자장을 인가하는 경우, Fig. 1에서의 직류 자장을 인가하는 경우보다 훨씬 큰 임계전류의 저하를 보인다. Fig. 4는 인가하는 교류자장의 방향에 따른 전압특성을 나타낸 것이며, Fig. 4의 결과를 이용하여 방향에 따른 임계전류 변화를 나타낸 것이 Fig. 5이다. 임계전류는 초전도 선재 양단의 전압이 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 일 때를 기준으로 정하였다. 고온 초전도 선재의 면에 수평 자장이 가해졌을 때(0°)의 결과를 보면, 선재에 가해지는 수평방향의 자장이 100 Gauss일 때, 자장의 영향이 없을 때 측정된 임계전류의 21%가 감소하였으며, 선재에 가해지는 수평방향의 자장이 200 Gauss일 때는 자장의 영향이 없을 때 측정된 임계전류의 46%가 감소

하였다. 고온 초전도 선재의 면에 수직자장이 가해졌을 때(90°)의 결과를 보면, 선재에 가해지는 수직방향의 자장이 100 Gauss일 때, 자장의 영향이 없을 때 측정된 임계전류의 40%가 감소하였으며, 선재에 가해지는 수평방향의 자장이 200 Gauss일 때는 자장의 영향이 없을 때 측정된 임계전류의 83%가 감소하였다.

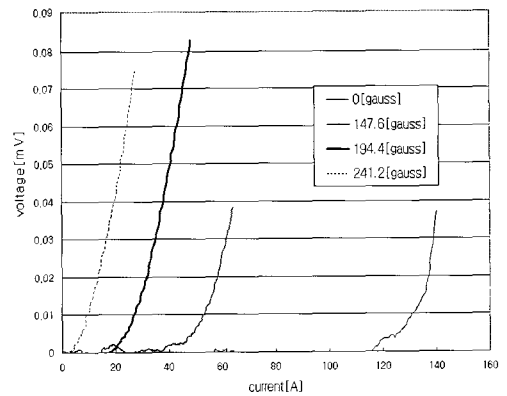
고온 초전도 선재의 면에 수평방향의 자장보다 수직방향의 자장이 가해졌을 때 훨씬 더 큰 임계전류 저하를 가져온다. 고온 초전도 선재를 이용하여 제작한 고온초전도 기기에는 수직방향의 자장이 수평방향의 자장보다 더 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 30°, 60°의 각도로 200 Gauss의 자장이 선재에 가해지는 경우에는 자장의 영향이 없을 때 측정된 임계전류와 비교하여 각각 58%, 73%가 감소하였다.



(a) 0° direction.



(b) 45° direction.



(c) 90° direction.

Fig. 4. Voltage characteristic with respect to the direction of external AC magnetic field(60 Hz).

외부에서 인가되는 자장의 방향과 크기가 선재에 미치는 영향을 좀 더 정확하게 알아보기 위하여, 선재에 흘리는 전류를 고정시키고 전압을 측정하였다. 즉, 선재에 흘리는 전류를 45 A, 57.27 A로 고정시키고, 외부에서 인가되는 자장의 방향을 0°~90°까지 15° 간격으로 총 7번의 실험을 하였다. 선재에 흘리는 전류 45 A와 57.27 A는 각각 초전도 전력케이블의 통전층과 실드층에 흐르는 전류이며, 그 결과는 Fig. 6과 같다.[2]

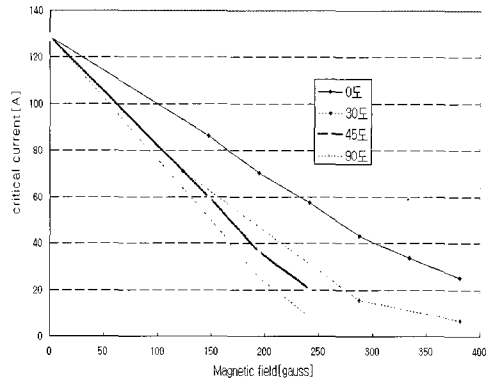
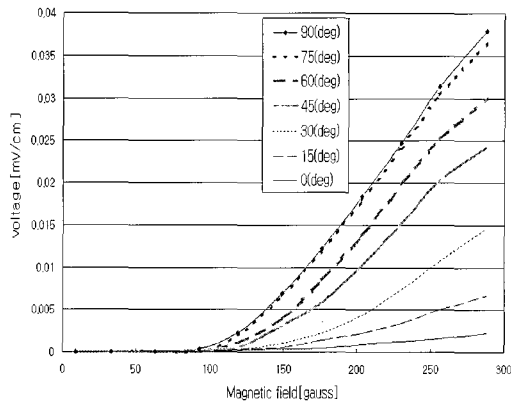
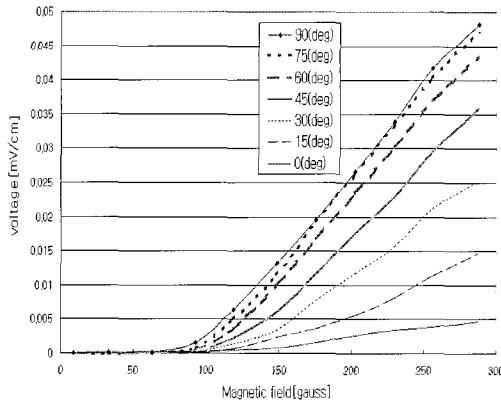


Fig. 5. The variation of critical current with respect to the direction external AC magnetic field.



(a) when transmission current(45A) was applied to the HTS tape.



(b) when shield current(57.27A) was applied to the HTS tape.

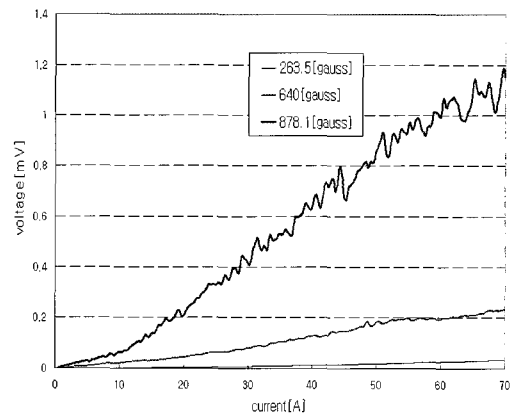
Fig. 6. Voltage characteristic with respect to external AC magnetic field.

외부에서 인가되는 자장의 크기가 클수록, 그리고 인가되는 자장의 방향이 수직에 가까워질수록 전압이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 통전전류(45 A)에서의 전압을 보면, 외부에서 인가되는 자장이 250 Gauss의 경우, 수직방향의 자장이 가해졌을 때 전압이 수평방향의 자장이 가해졌을 때의 전압보다 약 19배 더 큰 전압이 나타났다.

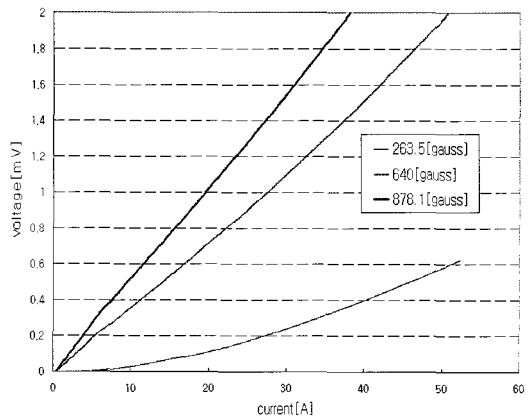
2.2.2 교류 자장(200 Hz)이 외부에서 인가되었을 때 전압특성과 임계전류

주파수에 대한 영향을 알아보기 위하여, 200 Hz의 주파수를 가진 교류자장을 외부에서 인가하고 2.2.1 절의 실험과정을 반복하였다. 그 실험결과는 Fig. 7과 같다. 선재에 수평방향의 자장 263 Gauss가 가해졌을 때, 자장의 영향이 없을 때 측정된 임계전류의 78%가 감소하였으며, 수직방향의 자장 263 Gauss가 가해졌을 때, 자장의 영향이 없을 때 측정된 임계전류의 95%가 감소하였다. 주파수가 200 Hz로 커짐에 따라 60 Hz와 비교하여 임계전류가 크게 감소하였음을 알 수 있다.

Fig. 8은 주파수에 따른 임계전류의 변화를 나타낸 것이다. 200 Hz의 경우 외부 자장을 증가시킴에 따라 매우 급격하게 임계전류가 감소하였기 때문에, Fig. 5와 같은 자장의 방향에 따른 임계전류 변화 데이터를 얻기가 힘들었다. 고온 초전도 선재에 가해지는 자장과 초전도 선재의 각도가 90°에 가까워질수록, 그리고 가해지는 자장의 주파수가 높아질수록 선재의 임계전류가 크게 저하되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 0° direction.



(b) 90° direction.

Fig. 7. Voltage characteristic with respect to the direction of external AC magnetic field(200Hz).

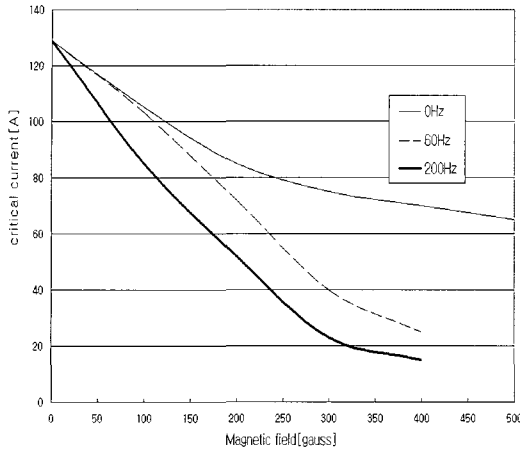


Fig. 8. The variation of critical current with respect to frequency(parallel direction).

3. 결 론

본 논문에서는 외부에서 교류자장이 가해졌을 때, 고온 초전도 선재의 임계전류 변화를 알아보았다. 외부 인가 자장의 크기를 0~400 Gauss, 선재가 받는 자장의 각도를 0~90°까지 변화시키며 통전특성을 조사하였다. 또한 주파수를 바꾸어 실험을 하여 주파수에 대한 영향도 파악할 수 있었다. 수평방향의 자장보다 수직방향의 자장이 선재의 임계전류에 큰 영향을 끼쳤으며, 주파수가 커짐에 따라 임계전류도 크게 저하되었다. 고온 초전도 전력기기의 주변 환경에 의한 고주파 자장의 유입이나 전력기기 자체적으로 만들어지는 자장에 의한 영향 등의 분석에 이 실험을 통해 얻은 데이터를 기초자료로 활용할 수 있을 것이며, 또한 초전도 전력기기의 설계에 그 결과를 응용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] "Critical current degradation caused by winding process of Bi-2223/Ag HTS wire in the form of a coil", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, 2001.
- [2] "송전급 초전도 전력케이블 Pilot기 개발", 한국전기연구원, 차세대 초전도 응용기술 개발 사업, 2004.
- [3] Vectorfields, "OPERA-3d Reference Manual", Vectorfields, v9.0, 2003.

저 자 소 개



최석진(崔錫鎭)

1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 위덕대학교 산학협력단 연구원.



이상진(李相鎭)

1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수.



김해준(金海鵞)

1977년 2월 19일생, 2000년 영남대학교 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 위촉연구원.



심기덕(沈基德)

1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 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 초전도응용연구그룹 책임연구원.