

고온초전도체의 DC 전압 - 전류 특성

DC Voltage-Current Characteristics of a High Temperature Superconducting Conductor

류경우*, 이주영**, 마용호**, 최병주***, 박권배#, 오일성#

Ryu Kyung Woo*, Li Zhu Yong**, Ma Yong hu**, Choi Byoung Ju**,
Park Kwon Bae#, Oh Il Sung#

Abstract: A high temperature superconductor (HTS) has been developed for power applications such as power cables, fault current limiters and superconducting magnetic energy storage devices. For such applications it is required to understand the DC voltage-current characteristic of the HTS, which is important in analyzing AC loss and flux flow loss quantitatively. In this work, we have experimentally investigated influence of several factors, e.g. critical current density, degradation and AC external magnetic field, on the DC voltage-current characteristic. The measured results have been discussed in engineering application point of view.

Key Words: AC external magnetic field, critical current density, DC voltage-current characteristic, degradation.

1. 서 론

최근 고온초전도선재 기술의 진보에 힘입어 운전전류밀도가 구리선재의 ~100배 이상이면서 동시에 시스템 제작을 위해 필수인 수 km의 선재가 가능해 짐에 따라 이들 선재를 이용한 60 Hz의 전력기기(지중케이블, 동기기, 변압기, 환류기) 및 직류의 고온초전도에너지저장장치(HTS-SMES)의 상용화가 시도되고 있다.

이들 시스템의 상용화에 있어서 그 무엇보다도 중요한 것은 저온운전(77 K이하)이 필수인 초전도시스템에서 냉동기가 지닌 본질적인 단점들 즉 낮은 효율, 성능대비 지나치게 큰 사이즈 및 고비용임을 고려하면 고온초전도선재의 응용에서 발생하는 실제 손실이 그 자체로서는 작다고 할지라도 상용화에는 커다란 걸림돌이 되고 있는 실정이다.

이와 같은 고온초전도선재에서 발생하는 손실은 구리선재에서 발생하는 전기적인 것과는 달리 자기적인 것으로서 교류응용(전력기기)의 경우는 히스테리시스 손실, 직류응용(HTS-SMES)의 경우는 자속유동

(flux-flow) 손실로 각각 알려져 있다[1]. 이들 자기적 손실에 대한 정량적 해석을 위해서는 고온초전도선재가 지니고 있는 실제의 전압 - 전류 특성이 매우 중요하다[2-3].

일반적으로 실험을 통해 측정된 고온초전도체(Bi-2223, Bi-2212, YBCO)의 DC 전압 - 전류 특성은 다음과 같은 거듭제곱의 법칙(power law)에 의해 비교적 잘 기술되는 것으로 알려져 있다.

$$\frac{E}{E_c} = \gamma \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \tag{1}$$

여기서 E 및 E_c 는 고온초전도선재의 측정된 전계 및 임계전계(10^{-4} V/m)를, J 및 J_c 는 전류밀도 및 임계전류밀도를, γ 및 n 은 각각 계수 및 지수(이하 n -값이라 함)를 나타낸다. 특히 식(1)에서 n -값이 1로 되는 경우는 일반적으로 잘 알려진 옴의 법칙과 동일한 외형임을, 그리고 무한히 큰 값으로 되는 경우는 저온초전도체(NbTi, Nb₃Sn)의 실제 측정된 DC 전압 - 전류 특성을 잘 묘사하는 임계상태모델(CSM)로 됨을 볼 수 있다[4].

이상에서 언급한 바와 같이 고온초전도선재의 교류 및 직류 응용에서 매우 중요한 DC 전압 - 전류 특성에 크게 영향을 미칠 것으로 사료되는 선재 길이방향의 불균일성(HTS의 본질적 문제), 임계전류밀도, 특히 시스템 제작시 빈번히 발생할 수 있는 특성열화(HTS의 본질적 문제) 및 직·교류의 외부자장에 대해 실험적으로 조사하였으며, 특히 시스템 응용의 관점에서 그 결과에 대해 분석·검토를 하였다.

2. 실험 샘플 및 방법

본 실험에 사용된 고온초전도체의 주요사항을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 Tape A는 임계전류밀도는 작지만 선재 길이방향의 임계전류 특성이 비교적 균일할 뿐만 아니라 기계적 특성이 우수한 반면, Tape B의 경우는 반대로 임계전류밀도는 매우 크지만 기계적 취약성으로 인한 특성 열화가 심한 고온 초전도 선재이다. 마지막으로 Bulk tube는 재료(Bi-2212)가 상기 두 고온초전도체와 다르고, 형상도 원통형의 실린더로 상이할 뿐만 아니라 벌크재료의 본질적인 한계 때문에 임계전류밀도가 동일 조건에서 Tape B의 약 십분의 일 정도로 매우 낮다. 또한 이는 MFCL(Matrix Fault Current Limiter)시스템을 위해 개발된 대용량(66 K 운전에서 450 kVA)의 실제 한류소자이다[5].

* 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과 부교수
 ** 학 생 회 원 : 전남대학교 전기공학과 대학원생
 *** 정 회 원 : 서라벌대학 고속전기철도과 부교수
 # 정 회 원 : LS 산전 전력연구소
 원고접수 : 2006년 7월 28일
 심사완료 : 2006년 9월 7일

Table 1. Specification of a high temperature superconductor.

Tape A	Bi-2223/모재 폭 × 두께 필라멘트의 수 임계전류	27 %/73 % 3.9 mm × 0.3 mm 37 24 A (77K/self-field)
Tape B	Bi-2223/모재 폭 × 두께 필라멘트의 수 임계전류	38 %/62 % 3.1 mm × 0.17 mm 55 76 A (77K/self-field)
Bulk tube	Bi-2212/모재 외직경 × 내직 경 길이 임계전류	100 %/0 % 25 mm × 21.8 mm 170 mm 1495 A (77K/self-field)

Fig. 1에는 Table 1의 고온초전도체의 DC 전압 - 전류 특성을 측정하기 위해 사용한 실험장치의 개략도를 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 장치는 크게 외부자장 발생용 자석 전원 (30 A/50 V, DC ~ 1 kHz), 실험 샘플용 전원 (1500 A/20 V, DC ~ 1 kHz), 철심형 자석 (자석상수는 10.7 mT/A, 공극은 45 mm × 175 mm × 10 mm), 샘플 및 계측기로 구성되어 있다. 또한 자석 및 샘플에 흐르는 전류를 측정하기 위해서는 션트, 직류 통전시 고온초전도체 샘플에 부착된 전압리드(양단사이의 길이는 170 mm)의 전압을 측정하기 위해서는 나노볼트미터를 각각 사용하였다. 특히 교류 외부자장 아래서 DC 전압 - 전류 특성을 측정하기 위하여 8자형의 전압리드를 사용함으로써 외부 교류자장에 의해 전압리드에 유도되는 불필요한 노이즈 전압이 자체적으로 상쇄될 수 있도록 하였으며 [6], 모든 실험은 액체질소 온도 (77 K)에서 하였다.

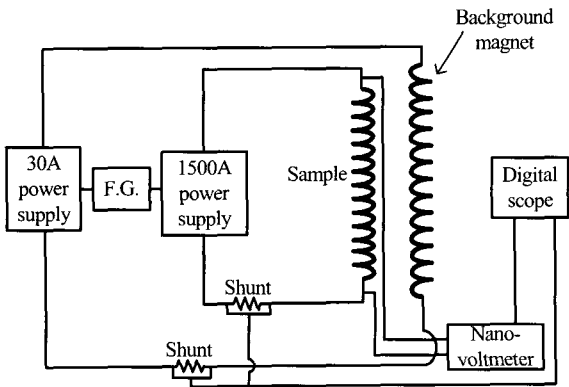


Fig. 1. Experimental setup.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 자기자계에 대한 특성

식(1)에서 보는 바와 같이 고온초전도체의 DC 전압 - 전류 특성을 결정하는 주요한 파라미터로서는 γ , n -값 및 J_c (본 연구에서 선재의 경우는 공학적 임계전류밀도)를 들 수 있고, 특히 γ 및 n -값의 경우는 동일한 샘플이라 할지라도 측정된 전계 데이터의 구간에

따라서도 상이해 질 수 있다. 따라서 이들 전계 구간이 γ 및 n -값에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 또한 저온초전도체와는 달리 고온초전도체는 재료의 본질적 문제로 인한 선재 길이 방향의 불균일성은 불가피하기 때문에 이들 인자가 n -값에 미치는 영향에 대해서도 조사하여 Fig.2 에 각각 나타내었다. Fig. 2의 a)에서 \bullet 는 표 1의 Tape A에 대해 측정된 DC 전압 - 전류 특성을, 실선, 1점-파선 및 점선은 상이한 3가지의 전계(E/E_c) 구간 데이터를 식(1)으로 fitting한 결과 각각 나타낸다. 그리고 b)에서는 임계전류는 a)와 동일함에도 불구하고 선재 길이 방향의 특성이 불균일한 샘플에 대한 실험 결과(\bullet) 및 식(1)로 fitting한 결과(실선)를 나타낸다.

Fig. 2의 a)에서 보는 바와 같이 임계전류밀도가 낮아 비교적 균일한 임계전류 특성을 지닌 Tape A의 DC 전압 - 전류 특성 인자인 n -값은 전계 구간에 관계없이 ~ 10 으로 일정함을 볼 수 있다. 물론 γ 는 전계 구간에 관계없이 모두 1.0이었다. 또한 b)의 결과로부터 n -값은 Fig. 2 a)와 비교하여 $\sim 30\%$ 정도 감소하지만, 길이 방향의 불균일성에도 불구하고 γ 는 0.97로 전형적인 샘플의 경우(1.0)와 거의 동일함을 알 수 있다.

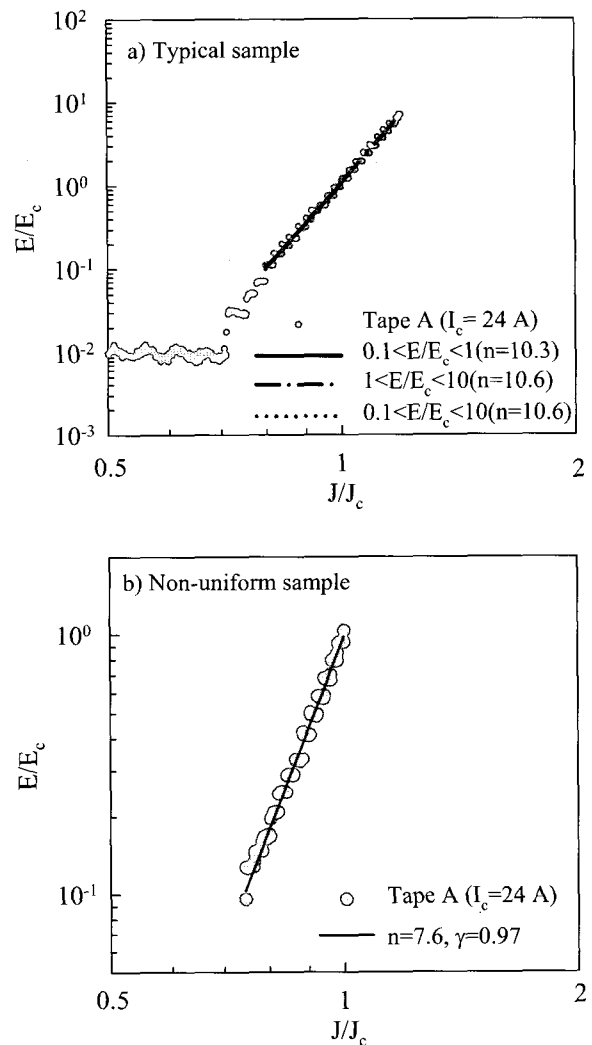


Fig. 2. Normalized electric field vs. current density of the Tape A at self-field.

Table 1에서 보는 바와 같이 자기자계에서 임계전류 밀도가 10배정도 차이가 나는 Tape B 및 Bulk tube 샘플에 대하여 동일 전계 구간에서 조사한 DC 전압 - 전류 특성을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 ● 및 ▲는 측정된 DC 전압 - 전류 특성을, 실선 및 점선은 식(1)으로부터 fitting한 결과를 각각 나타낸다.

Fig. 3에서 보는 바는 바와 같이 Table 1의 고온초전도체 중, 임계전류밀도가 가장 낮으며 모재(matrix)를 전혀 사용하지 않은 Bulk tube의 γ 는 임계전류밀도가 ~1.5배인 Tape A와 동일한 반면 n -값은 전형적인 Tape A 샘플과 비교해서는 다소 감소하지만, Bulk tube와 Tape A는 거의 동일한 DC 전압 - 전류 특성(즉 γ , n -값 및 J_c)을 보임을 알 수 있다. 그러나 임계전류밀도가 ~10배 큰 Tape B의 경우, γ 는 임계전류 밀도의 차이에도 불구하고 Bulk tube와 유사한 반면 특히 n -값은 Bulk tube보다 무려 ~2.5배정도 까지 크게 증가함을 볼 수 있다.

서론에서도 언급한 바와 같이 고온초전도체는 재료 본질적인 문제 때문에 상온 - 저온 사이의 반복적인 열 사이클, 시스템 제작 시 사소한 부주의 및 한류기에서와 같이 사고시 정격운전전류의 10배 이상의 매우 큰 사고 전류에 의한 가혹한 자기력 등에 의하여 특히 Table 1의 Tape B처럼 임계전류밀도가 큰 경우는 그 특성열화가 매우 쉽게 발생된다. 이와 같은 임계전류 특성열화가 고온초전도체의 DC 전압 - 전류 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 Table 1의 Tape B에 반복적인 열 사이클을 인위적으로 인가한 후(열화이전과 비교해 임계전류는 ~30% 감소), 측정된 전압 - 전류 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 또한 열화 이전 특성과 비교·검토를 위해 전형적인 Tape B에 대한 특성도 함께 나타내었으며, Fig. 4에서 기호(●, ▲) 및 선(실선, 점선)은 Fig. 3에서와 동일하다.

Fig. 4에서 보는 바는 바와 같이 인위적으로 열화시킨 Tape B의 γ 는 임계전류의 열화 이전보다 ~1.5배 정도까지 증가하지만, 손실의 정량적 해석에서 자주 사용되고 있는 값인 1.0에 가까움을 알 수 있다. 그러나 n -값은 임계전류 열화 이전의 무려 1/5정도까지 크게 감소하며, 고온초전도체의 고유한 특성인 불균일성 및 임계전류밀도보다도 외적인 열화에 의한 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다.

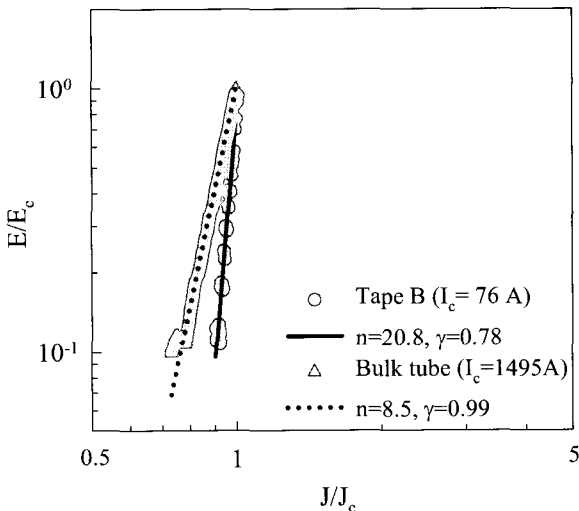


Fig. 3. Critical current density dependence of the DC voltage-current characteristic at self-field.

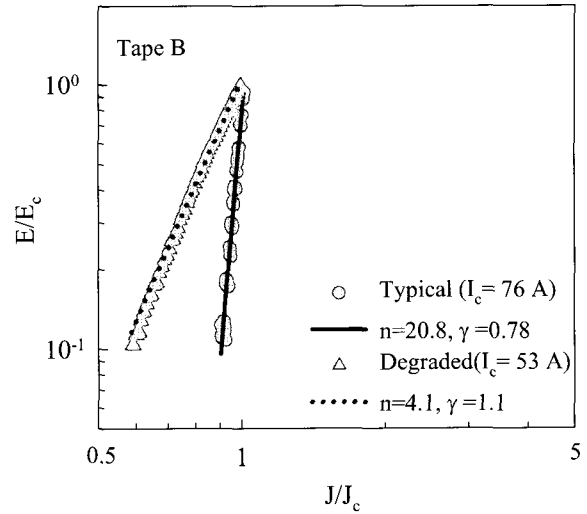


Fig. 4. Degradation dependence of the DC voltage-current characteristic at self-field.

3.2 외부자계에 대한 특성

이상에서 검토한 고온초전도체의 DC 전압 - 전류 특성에 영향을 미치는 인자들을 요약해 보면 크게는 재료 내적 요인(선재 길이 방향의 불균일성 및 자기자계에서 임계전류밀도)과 외적 요인(열화)으로 나눌 수 있다.

외적 요인의 또 다른 하나인 외부자장은 서론에서 언급한 60 Hz의 전력기기(지중케이블, 동기기, 변압기, 한류기) 응용뿐만 아니라 직류응용(HTS-SMES)에서도 고온초전도체가 불가피하게 경험하게 되는 것으로, 실제 응용 측면에서 매우 중요한 인자이다.

먼저 냉각매질을 전혀 사용하지 않기 때문에 운전·유지 측면에서 매우 편리한 전도냉각형의 HTS-SMES의 경우, 고온초전도체는 수 Tesla의 높은 외부자장을 경험을 하게 되며, 시스템 제작 시 사소한 부주의 등에 의한 DC 전압 - 전류 특성의 열화는 커다란 자속 유동손실($EJ(W/m^3)$, 여기서 E 및 J 는 식(1)에서와 동일)을 발생시켜 HTS-SMES를 불안정(thermal run-away)하게 만들거나[1], 종종 과도한 열에 의한 국부적 소손(burn-out)을 야기하기까지 한다. 이와 같은 DC 외부자장이 고온초전도체의 전압 - 전류 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 1의 자석(background magnet)을 이용하여, Tape B의 면에 수직한 방향으로 DC 외부자장을 인가한 상태에서 측정된 전압 - 전류 특성을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 ●, ▲ 및 ■는 0 mT, 5 mT 및 100 mT에서 측정된 DC 전압 - 전류 특성을, 실선, 1점-파선 및 점선은 식(1)로부터 fitting한 결과를 각각 나타낸다.

Fig. 5에서 보는 바는 바와 같이 Tape B의 γ 는 DC 외부자장이 커짐에 따라서 증가(100 mT의 경우는 0 mT의 ~ 1.5배)하지만, 자속유동손실 및 교류손실에 대한 정량적 해석에서 자주 사용되고 있는 값인 1.0에 가까움을 알 수 있다. 그러나 n -값은 본 실험에서 사용된 최대 자장(100 mT)인 비교적 낮은 자장에서도 0 mT에서 n -값의 ~ 1/2정도까지 감소함을 볼 수 있다.

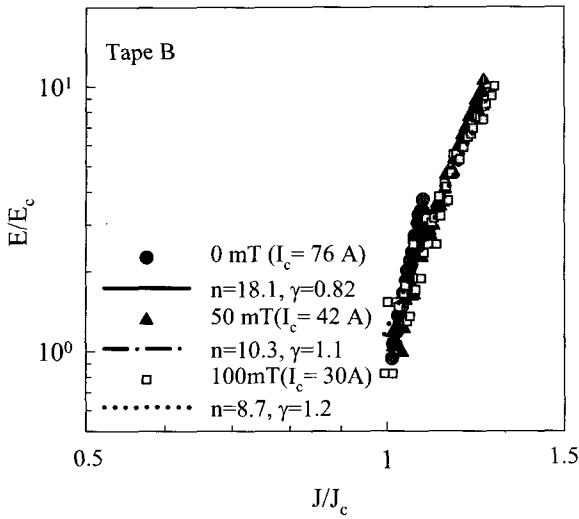


Fig. 5. Normalized electric field vs. current density of the Tape B in DC external magnetic fields perpendicular to the tape plane.

60 Hz의 응용 중 하나인 지중케이블의 경우, 3상의 통전도체를 하나의 단열파이프 내에 수납한 3상-일괄형이 일반적이다. 이와 같은 구조에서는 비록 통전도체와 동축구조로 된 차폐도체(통전전류와의 유도작용에 의해 차폐도체에는 반대방향의 전류가 흐름)를 설치하여도 차폐도체의 자기인덕턴스와 통전 - 차폐도체사이의 상호인덕턴스가 완전히 일치하지 않기 때문에 100% 차폐는 실제로 불가능하다. 따라서 각각의 통전도체를 구성하는 고온초전도체는 인접한 도체에 의해 발생하는 낮은 AC 자장을 불가피하게 경험하게 된다.

또한 한류기의 경우도 3상의 한류소자 다수(송·배전급의 경우 수백 개정도)를 하나의 소형의 저온용기에 수납해야 하기 때문에 한류소자사이의 거리를 많이 떨어져 배열할 수 없고, 따라서 인접한 소자의 교류전류에 의해 발생하는 AC 자장의 영향은 지중케이블과 마찬가지로 불가피하게 된다.

이와 같은 교류 전력기기에서처럼 AC 외부자장아래서 고온초전도체를 응용하게 되는 경우는 고온초전도체에 DC 전류가 흐름에도 불구하고 교류 통전시의 자기자계손실의 수십 배에서 수백 배 정도까지 큰 통전손실이 발생하는 것이 잘 알려져 있다[6]. 비교적 큰 AC 외부자장에서 발생하는 통전손실은 동저항(dynamic resistance)으로 잘 설명되고 있는 반면 특히 낮은 AC 외부자장(~10 mT이하)에 의해 발생하는 통전손실은 동저항으로는 전혀 설명되지 못하고 있는 실정이며 현재까지도 불명확하다.

이와 같이 낮은 AC 외부자장이 고온초전도체의 전압 - 전류 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 1의 자석에 교류전류를 흘려, Table 1의 Tape B의 면에 수직인 방향으로 50 Hz의 AC 외부자장(5 mT_{peak})을 인가한 상태에서 측정된 DC 전압 - 전류 특성을 Fig. 6에 나타내었다. 또한 동일 크기의 DC 외부자장에 대한 특성과 비교·검토를 위해 5 mT의 DC 외부자장을 인가하여 측정된 특성도 함께 나타내었다.

Fig. 6에서 ● 및 ▲는 DC 및 AC 외부자장에 대해 측정된 전압 - 전류 특성을, 실선, 1점-파선(구간 1<E/E_c<10) 및 점선(구간 10<E/E_c<1000)은 식(1)으로

부터 fitting한 결과를 각각 나타낸다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 DC 외부자장(5 mT)에 대한 Tape B의 γ 및 n -값은 Fig. 5의 0 mT에서의 결과와 거의 동일하며, 이는 고온초전도체의 DC 전압 - 전류 특성(즉 γ , n -값 및 J_c)은 낮은 DC 외부자장에 의해서는 별로 영향을 받지 않음을 의미한다. 반면 동일 크기의 AC 외부자장에 대한 DC 전압 - 전류 특성은 지금까지의 조사결과(즉 자기자계 및 DC 외부자장에 대한 특성)와는 달리 운전전류밀도(J/J_c)의 구간에 따라서 매우 상이한 DC 전압 - 전류 특성(즉 운전전류밀도가 작은 구간에서 γ 및 n -값은 각각 74 및 3.0, 큰 구간에서는 1079 및 8.1)을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

또한 AC 외부자장에 대한 n -값은 외부자장의 크기가 5 mT로 매우 작음에도 불구하고, DC 외부자장이 100 mT인 경우의 n -값(8.7)보다도 작은 것을 볼 수 있다. 특히 AC 외부자장에 대한 γ 는 지금까지의 결과(γ 는 ~1.0)와 비교하여 수십 배에서 ~1000배정도까지 커지는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 앞서 지적한 바와 같이 동저항에 의해 설명이 불가능했던 즉 낮은 AC 외부자장 아래서 발생하는 고온초전도체의 큰 통전손실은 Fig. 6에서와 같은 AC 외부자장아래서 나타나는 DC 전압 - 전류 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

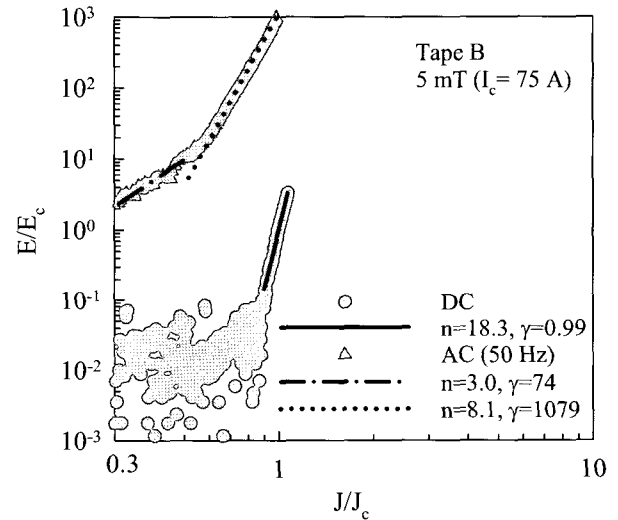


Fig. 6. Normalized electric field vs. current density of the Tape B in low AC external magnetic field perpendicular to the tape plane.

4. 결 론

이상의 실험결과에 대한 주요사항을 요약해 보면, 자기자계 및 DC 외부자장에 대한 고온초전도체의 γ 는 전계 구간, 선재 길이방향의 불균일성, 자기자계에서 임계전류밀도, 열화 및 DC 외부자장에 무관하게 자속유동손실 및 교류손실에 대한 정량적 해석에서 자주 사용되고 있는 값인 1.0에 근사함을 알 수 있다. 반면 고온초전도체의 n -값은 fitting에 사용된 전계 구간(0.1<E/E_c<10)에는 관계없이 거의 일정하지만, 선재 길이 방향의 불균일성, 임계전류밀도, 열화 및 DC 외부자장에 의존하며, 특히 열화에 의한 n -값의

감소가 가장 큰 것을 알 수 있다. 이는 직류모드로 운전되는 전도냉각 HTS-SMES의 안정한 최대 운전전류를 결정하는 매우 중요한 인자임을 암시한다.

또한 AC 외부자장에 대해서는 γ 및 n -값 모두 동일 크기의 DC 외부자장에 대한 결과와 완전히 다르며, 특히 γ 의 경우는 자속유동손실 및 교류손실에 대한 정량적 해석에서 자주 사용되고 있는 값(~ 1)과 비교하여 수십 배에서 $\sim 1,000$ 배 정도까지 커지는 것에 주의를 해야 하며, 이와 같은 특성은 낮은 AC 외부자장에서 발생하는 통전손실을 설명하는데 주요한 단서가 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Tasaki, T. Kuriyama, H. Inotsume, T. Okamura, H. Hayashi, M. Iwakuma, K. Funaki, "A stability of conduction-cooled HTS coil when direct-current is passed", 第69回 2003年度秋季低温工学·超伝導學會, 1B-a06, pp. 27, 2003.
- [2] S. Choi, W. Nah, J. Kim, D. Huh, K. Ryu, M. Sugano, T. Kiyoshi, M. Sohn, and Y. Kwon, "Magnetization loss of stacked Bi-2223/Ag tapes in external magnetic field," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 1607-1610, 2005.
- [3] S. Choi, W. Nah, J. H. Kim, J. Joo, Y. H. Jo, and K. Ryu, "AC transport current loss of horizontally attached Bi-2223/Ag tapes," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 14, no. 2, pp. 1894-1897, 2004.
- [4] Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, New York: Plenum Press, pp. 163-166, 1944.
- [5] X. Yuan, K. Tekletsadik, L. Kovalsky, J. Bock, F. Breuer, and S. Elschner, "Proof-of-Concept Prototype Test Results of a Superconducting Fault Current Limiter for Transmission-Level Applications," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 1982-1985, 2005.
- [6] 류경우, 최병주, "외부 교류자장이 Bi-2223테이프의 동저항 및 손실특성에 미치는 영향," 전기전자재료학회논문지, 18권, 5호, pp. 473-477, 2005.

저 자 소 개



류경우(柳炘佑)

1962년 2월 10일생. 1983년 인하대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공학박사). 1986년~1995년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원. 1996년~현재 전남대학교 전기공학과 부교수.



이주영(李柱永)

1982년 6월 10일생. 2005년 7월 중국연변대학 전자정보통신학과 졸업. 2005년 8월부터 현재까지 전남대학교 전기공학(석사과정).



마용호(馬勇虎)

1980년 6월 12일생. 2003년 7월 중국연변대학 전자정보통신학과 졸업. 2006년 2월 전남대학교 전기공학(공학석사). 2006년 3월부터 현재 전남대학교 전기공학과 박사과정.



최병주(崔炳柱)

1958년 12월 12일생. 1981년 영남대 전기공학과 졸업. 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 일본 Kyushu Univ. 공학연구과 졸업(공학박사). 1983년~1986년 현대중전기연구소연구원. 1986년~1996년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원. 1997~현재 서라벌대학 고속전기철도과 부교수.



박권배(朴權培)

1972년 11월 09일생, 1998년 전남대학교 유전공학과 졸업, 2000년 전남대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 현재 LS산전 전력연구소 선임연구원.



오일성(吳一成)

1960년 12월 22일생, 1986년 연세대학교 금속공학과 졸업, 1990년 미시간주립대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박), 현재 LS산전 전력연구소 책임연구원.