

논문 21-1-15

경사 외부자장에 대한 600 kJ급 SMES용 HTS도체의 DC V-I 특성

DC V-I Characteristics of a High Temperature Superconductor for a 600 kJ Superconducting Magnetic Energy Storage Device in an Oblique External Magnetic Field

이주영¹, 마용호¹, 류경우^{1,a}, 최세용², 김해종³
(ZhuYong Li¹, YongHu Ma¹, KyungWoo Ryu^{1,a}, SeYong Choi², and HaeJong Kim³)

Abstract

We are developing a small-sized high temperature superconducting magnetic energy storage (HTS-SMES) magnet with the nominal storage capacity of 600 kJ, which provides electric power with high quality to sensitive electric loads. Critical current and N-value of a high temperature superconductor with large current, which was selected for the development of the 600 kJ HTS-SMES magnet, were investigated in various oblique external magnetic fields. Based on the critical current and N-value measured for the short sample conductor, we discussed the DC V - I characteristic of a model coil fabricated with the same conductor of 500 m. The results show that the measured critical current and N-value of the conductor for parallel field are constant in external magnetic fields less than about 0.2 T. However, for oblique fields, its critical current and N-value abruptly decrease in all external magnetic fields. Moreover, the measured critical current of the model coil well agrees with the numerically calculated one based on the DC V - I characteristic measured for the short sample conductor. This suggest that losses and critical currents for an HTS-SMES magnet made up of a high temperature superconductor with anisotropic characteristic are predictable from the data of a short sample conductor.

Key Words : DC voltage-current characteristics, HTS-SMES, Large current HTS-conductor, Oblique magnetic field, Model coil

1. 서론

임계온도가 약 100 K 정도로 높아 시스템응용에서 매우 안정한 특징을 지닌 고온초전도(HTS)도체인 Bi-2223도체와 YBCO도체가 개발되어 상업적으로 판매되고 있으나, 대표적인 저온초전도(LTS)도체인 NbTi-초전도선과 경제성측면에서 비

교하여 매우 고가이며, 또한 고온초전도도체의 외부자장이 인가되면 임계전류밀도가 감소하는 단점으로 인하여 현재까지도 상용화가 어려운 실정이다. 그러나 HTS도체 기술의 진보에 힘입어 기술적 측면에서는 NbTi-초전도선으로 제작되는 초전도에너지저장(SMES)장치의 전형적인 운전전류밀도인 약 100 A/mm²에 대등한 수준으로[1,2], 수백 kJ급 이상의 HTS-SMES장치에 관한 연구개발이 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서도 600 kJ급의 HTS-SMES장치를 제작하여 그 특성평가를 목적으로 하여 현재 장치를 개발 중에 있다.

600 kJ급 HTS-SMES장치개발에서 임의방향의 경사자장에 대한 HTS도체의 임계전류 및 N-value 특성은 SMES장치의 임계전류, 자속유동저항 및

1. 전남대학교 공과대학 전기공학과
(광주시 북구 용봉동 300)
2. National Institute for Materials Science, Japan
3. 한국전기연구원 초전도응용연구사업팀
a. Corresponding Author : kwryu@chonnam.ac.kr
접수일자: 2007. 9. 10
1차 심사: 2007. 12. 4
심사완료: 2007. 12. 18

충·방전시 불가피하게 발생하는 교류손실 등의 특성해석에서 대단히 중요한 데이터이지만 HTS도체의 커다란 이방성 등으로 인하여 이들에 대한 연구결과는 충분하지 못한 실정이다[3]. 따라서 본 연구에서는 600 kJ급 HTS-SMES장치 제작을 위해 선정된 대전류용량 도체를 사용하여 짧은 샘플을 제작하여, SMES장치 특성해석에서 중요한 HTS도체의 DC V-I특성을 조사하였다. 또한 측정된 이들 결과에 근거하여 약 500 m의 동일한 도체로 제작된 소형코일에 대한 DC V-I특성을 분석·검토하였다.

2. 실험 샘플 및 방법

그림 1에는 600 kJ급 HTS-SMES장치에서 HTS도체가 경험하는 자장에 대한 개략도를 나타내었으며, 도체 면에 θ 도로 인가된 외부자장은 도체면에 수직한 성분(B_{\perp})과 수평한 성분(B_{\parallel})으로 구성됨을 볼 수 있다.

표 1에는 HTS-SMES 제작을 위해 선정된 도체의 주요사양 및 본 연구에서 제작된 코일에 대하여 측정된 주요 파라미터를 각각 나타내었다.

그림 1에서 보는 바와 같이 도체에 인가된 경사 자장아래서 HTS도체 응용에서 중요한 DC V-I 특성을 조사하기 위하여 FRP판 위에 HTS도체를 고정하고 전압탭사이의 거리가 80 mm인 도체샘플을 준비하였다. 이 때 표 1에서 보는 바와 같이 선정

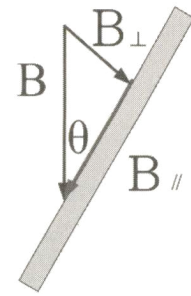


그림 1. HTS-SMES에서 도체에 인가되는 자장에 대한 개략도.

Fig. 1. Schematic of applied magnetic fields in an HTS-SMES.

된 HTS도체의 커다란 임계전류(280 A)와 외부자장사이에서 발생하는 자기력에 대하여 기계적 변형이 일어나지 못하도록 충분히 FRP판을 보강하여, 실험 중에 발생하는 외부자장의 각도오차를 최소화시켰다. 이 도체샘플에 대한 연구결과를 입증하기 위하여 동일한 HTS도체 약 500 m를 사용하여 팬케이크형상의 소형코일을 제작하여[4], 이들에 대한 DC V-I특성을 실험적으로 조사하였다.

HTS도체에 대한 DC V-I특성 중, 주요한 파라미터로서는 임계전류 및 N-value를 들 수 있으며, N-value는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$\frac{E}{E_c} = \left(\frac{J}{J_c}\right)^N \quad (1)$$

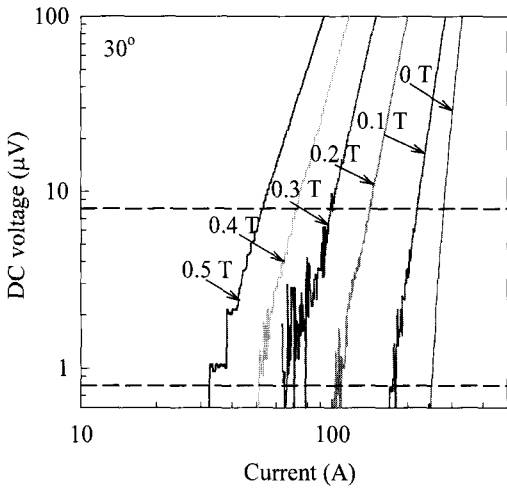
여기서 E 및 E_c 는 도체의 측정된 전계 및 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 를, J 및 J_c 는 측정된 전류밀도 및 임계전류밀도를, 그리고 N 은 N-value로 불리우는 DC V-I곡선의 지수를 각각 나타낸다.

외부자장아래서 도체샘플의 DC V-I곡선을 측정함에 있어서 먼저 자석상수가 25 mT/A이고, 공극이 100 mm(length)×45 mm(width)×8 mm(height)인 철심형의 background-자석을 사용하였으며, 자석을 여자하기 위하여 30 A/50 V-전원을 사용하였다. 그리고 도체샘플에 직류전류를 흘리기 위해서는 600 A/8 V-전원을 사용하였고, 도체샘플에 부착된 전압탭의 양단전압은 nano-voltmeter로 측정하였다. 또한 도체샘플 및 소형코일 평가는 액체 질소 온도(77 K)에서 하였다.

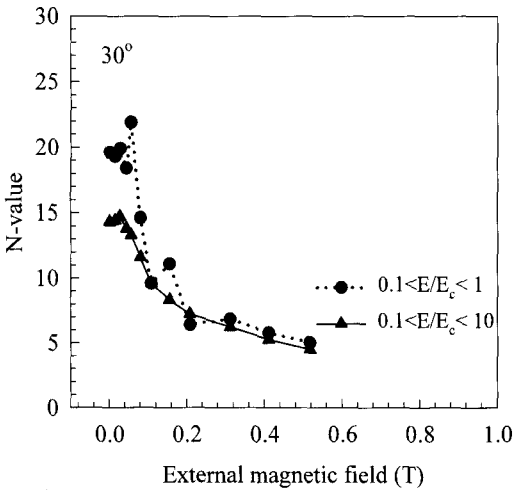
표 1. 도체 및 코일의 주요사양.

Table 1. Specifications of the conductor and coil.

Conductor	Width	4.57 mm
	Thickness	0.77 mm
	Bi-2223/Ag/Solder/Brass Critical current @ 77 K	28/42/5/25 (%) 280 A
Coil	Inner diameter	500 mm
	Outer diameter	698 mm
	Height	15.4 mm
	Total number of turns	262 turns
	Inductance	69 mH
	Critical current @ 77 K	123 A
	Stored energy	522 J



(a) DC V-I곡선



(b) N-value의 전계구간 의존성

그림 2. 30도 경사자장에서 HTS도체의 DC V-I 특성.

Fig. 2. DC V-I characteristics of the HTS conductor in the oblique magnetic field of 30 degree.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 1에서와 같이 $\theta=30$ 도인 다양한 크기의 경사자장을 HTS도체에 인가하여 측정된 전형적인 DC 전압-전류 및 다른 전계구간에 대해 계산된 N-value를 그림 2에 각각 나타내었다. 그림 2(a)에서 전압은 도체샘플의 HTS도체에 부착된 80 mm의 전압탭사이에서 측정된 전압을 나타낸다. 또한

그림 2(a)의 DC 전압-전류로부터 식(1)의 N-value를 결정하기 위해서는 먼저 전계구간이 정의되어야 하며, 그림 2(b)에는 N-value정의에 일반적으로 사용되는 구간인 $0.1 < E/E_c < 1$ 뿐만 아니라 본 연구에서 제안된 전계구간인 $0.1 < E/E_c < 10$ 에 대한 N-value를 각각 나타낸다[4].

그림 2(a)에서 보는 바와 같이 고온초전도체의 임계전류 정의에 일반적으로 사용되는 전압인 $8 \mu\text{V}$ ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$)부근에서 측정된 전압 신호는 비교적 양호한 반면, 이의 10%인 $0.8 \mu\text{V}$ 부근에 가까워지면서 전압 신호에 대한 노이즈의 영향이 큰 것을 볼 수 있다. 또한 그림 2(b)로부터 전계구간이 $0.1 < E/E_c < 1$ 인 경우 측정된 N-value는 모든 자장영역에서 불규칙적으로 감소하는 반면, 제안된 전계구간 $0.1 < E/E_c < 10$ 인 경우는 외부자장이 증가함에 따라서 안정적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 2(a)에서 언급한바와 같은 노이즈에 의한 영향으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 N-value를 정의함에 있어서 요구되는 전계구간은 $0.1 < E/E_c < 10$ 을 사용하였다.

그림 3에서는 그림 2에서처럼 $\theta=0$ 도(수평자장) 및 90 도(수직자장)인 다양한 크기의 외부자장을 HTS도체에 인가하여 측정된 DC 전압 - 전류 데이터로부터 결정되는 HTS도체의 임계전류 및 식(1)으로부터 계산된 N-value의 외부자장 의존성을 각각 나타내었다. 그림 3에서 심벌은 실험결과를, 실선은 이들 실험결과를 보간한 함수(interpolated function)로부터 계산된 계산치를 각각 나타내며, 도체의 임계전류 및 N-value에 대한 보간함수(f)는 식(2)와같이 지수함수로 나타낼 수 있다.

$$f(B) = \kappa + a \exp^{-\beta B} + \gamma \exp^{-\delta B} + \epsilon \exp^{-\eta B} \quad (2)$$

여기서 f는 임계전류 또는 N-value에 대한 보간함수를, B는 수평방향 또는 수직방향 자장의 크기를, 그리고 $\kappa, a, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \eta$ 는 실험결과 데이터를 보간한 함수(f)의 계수로서 $\theta=0$ 도와 90 도 및 임계전류(I_c)와 N-value(N)에 대하여 표 2에 각각 나타내었다.

표 2. 보간함수의 계수.

Table 2. Coefficients of the interpolation function.

f		Coefficients						
		κ	a	β	γ	δ	ϵ	η
$\theta=0^\circ$	I_c	0	107	1.01	113	1.01	113	1.01
	N	7.40	6.30	5.02	4.55	5.01	3.83	5.02
$\theta=90^\circ$	I_c	-15.7	106	5.54	104	5.55	102	5.55
	N	1.93	4.35	6.69	4.27	6.69	4.17	6.66

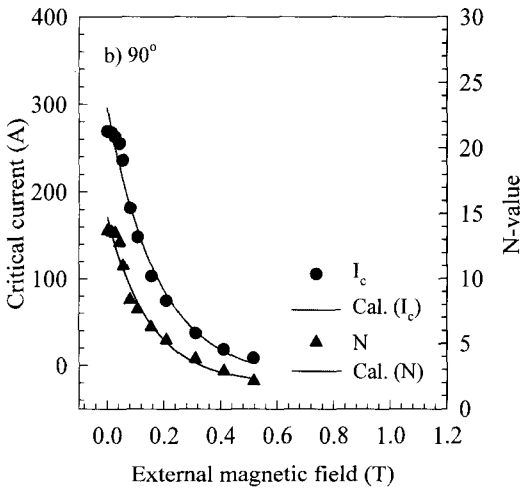
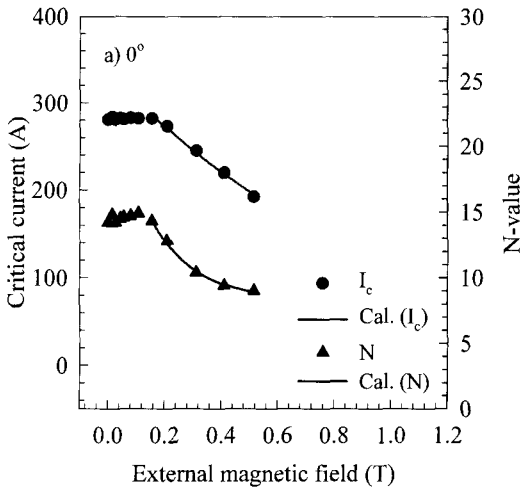


그림 3. 0도/90도 외부자장에서 HTS도체 임계전류 및 N-value의 자장의존성.

Fig. 3. Critical current and N-value of the HTS conductor in the magnetic fields of 0 degree and 90 degree.

그림 3(a)로부터 $\theta=0$ 도인 HTS도체 면에 수평한 외부자장을 인가하여 측정된 임계전류 및 N-value는 약 0.2 T까지는 외부자장에 관계없이 일정한 특성을 보이다가, 그 보다 큰 자장이 인가되면 자장이 커짐에 따라서 그 값이 감소하는 것을 알 수 있다. 반면, (b)에서는 $\theta=90$ 도인 HTS도체 면에 수직인 자장이 인가되는 경우는 전 외부자장 영역에서 측정된 임계전류 및 N-value가 자장이 커짐에 따라서 급격히 감소하는 특성을 볼 수 있다[4]. 또한 자장에 따라서 임계전류 및 N-value가 감소하는 영역에서는 외부자장의 각도에 관계없이 식(2)

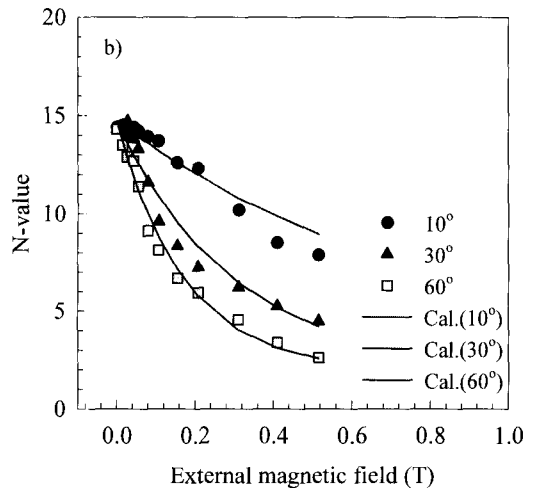
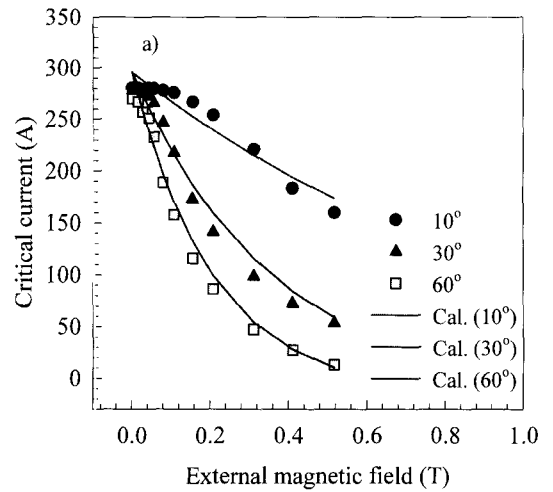


그림 4. 10도/30도/60도 경사자장에서 HTS도체 임계전류 및 N-value의 자장의존성.

Fig. 4. Critical current and N-value of the HTS conductor in the oblique magnetic fields of 10 degree, 30 degree, and 60 degree.

및 표 2의 계수로부터 계산된 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 4에는 $\theta=10$ 도, 30도, 60도인 경사자장을 HTS도체에 인가하여 측정된 임계전류 및 N-value의 외부자장 의존성을 각각 나타내었다.

그림 4에서 심벌은 실험결과를, 실선은 그림 1에서와 같이 도체에 인가된 경사자장을 도체 면에 수직인 성분과 수평한 성분으로 분해한 후, 수직 성분만을 식(2)에 대입하여 계산한 결과를 각각 나타낸다. 단 식(2)의 계산에서 계수는 표 2의 $\theta=90$ 도인 수직자장에 대한 것을 사용하였다.

그림 4로부터 경사자장에 대해 측정된 임계전류 및 N-value는 수직자장이 도체에 인가된 그림 3(b)의 경우와 같이 전 외부자장 영역에서 자장이 커짐에 따라서 감소하는 특성을 볼 수 있으며, 특히 HTS도체 면과 외부자장사이의 각(θ)이 커질수록 임계전류 및 N-value의 감소가 더욱 큰 것을 알 수 있다. 그리고 각각의 경사자장 (10° , 30° , 60°)에 대하여 수직성분의 자장만 고려하여 계산한 임계전류 및 N-value가 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 HTS도체 면과 외부자장이 이루는 각도(θ) 및 외부자장의 크기만 알면 수직성분과 수평성분으로 분해하여 그림 3과 같은 수평 및 수직 자장에 대한 실험결과에 대한 보간함수 식(2)으로부터 임의방향의 외부자장과 외부자장의 임의의 크기에 대한 도체의 임계전류 및 N-value를 예상할 수 있음을 의미한다.

이상의 80 mm 도체샘플에 대한 연구결과를 입증하기 위하여 약 500 m의 동일한 HTS도체로 제작된 팬케이크형상의 소형코일에 대하여 DC V-I 특성을 조사하였으며, 이를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 전압 측정을 위해서는 코일 양단에 부착된 전압탭을 사용하였다. 그림 5로부터 제작된 코일의 임계전류는 123 A임을 알 수 있다.

그림 5에서 측정된 코일의 임계전류를 계산하기 위해서는 앞서 언급한 바와 같이 코일 내부의 자장분포 계산이 선행되어야 하며, 이를 위해서는 상용의 전자장 응용해석프로그램인 COMSOL을 사용하였다. 그림 6에는 수치해석에 사용된 축대칭의 코일 단면 개략도 및 계산결과를 각각 나타내었다.

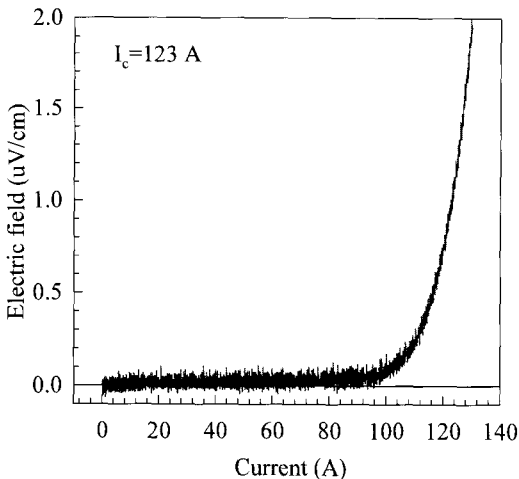
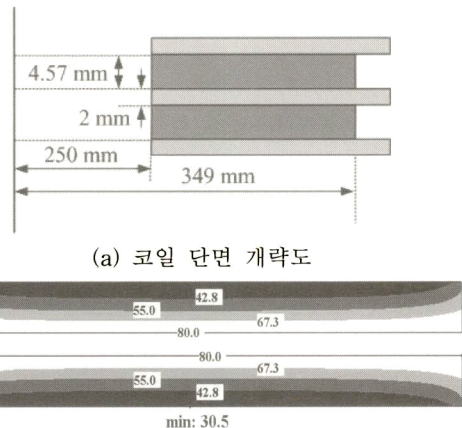


그림 5. 코일의 DC V-I특성.
Fig. 5. DC V-I characteristic of the coil.



(a) 코일 단면 개략도
(b) 코일 전류 111 A에서 권선부내 임계전류밀도
그림 6. 코일의 개략도 및 수치해석 결과.
Fig. 6. Schematic and numerical result of the coil.

그림 6(b)의 임계전류밀도 계산에서는 짧은 도체샘플에 대한 그림 4의 경사자장에 대한 결과에 근거하여 도체 면과 외부자장사이의 각도 θ 가 10° 도 이상인 경우는 각 점에서 계산된 자장의 수직 성분 및 표 2에서 $\theta=90^\circ$ 에 대한 계수를 식(2)에 대입하여 코일내에서 HTS도체의 임계전류밀도를 계산하였다. 반면 θ 가 10° 보다 작은 경우는 각 점에서 계산된 자장의 수평성분 및 표 2에서 $\theta=0^\circ$ 에 대한 계수를 식(2)에 대입하여 코일내에서 HTS도체의 임계전류밀도를 계산하였다.

그림 6(b)에서 코일 권선부내에서의 임계전류밀도 분포로부터 보는 바와 같이 권선부 높이의 1/2로 되는 중앙면(mid-plane)부근에서 계산된 임계전류밀도는 80.0 A/mm^2 로서 그림 5에서 측정된 코일 전류밀도인 35.0 A/mm^2 에 비해 대단히 큰 반면, 이 면으로부터 상하로 멀어 질수록 계산된 코일 전류밀도는 작아져 권선부 상하부 면의 중앙부면에서 최소 임계전류밀도가 30.5 A/mm^2 로, 측정된 코일 전류밀도인 35.0 A/mm^2 의 약 90%로 양자가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

600 kJ HTS-SMES장치 제작을 위해 선정된 대전류용량 도체샘플 및 소형코일을 제작하여 SMES장치 운전에서 중요한 장치의 임계전류, 자속유동손실 및 교류손실 특성해석을 위해서 필수적인 HTS도체의 DC V-I특성을 실험적으로 조사하였으

며, 이들 결과를 제작된 소형코일에 적용하여 분석·검토하였다.

그 중요 결과를 요약하면 수평자장에 대해 측정된 HTS도체의 임계전류 및 N-value는 약 0.2 T까지는 외부자장에 관계없이 일정한 반면 θ 가 10도보다 큰 경사자장에 대해서는 전 외부자장 영역에서 이들 특성이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 짧은 도체샘플에 대한 연구결과에 근거하여 계산한 코일의 임계전류는 측정치와 잘 일치하였으며, 이는 HTS-SMES장치 내에서 임의 방향의 경사자장에 대한 도체의 임계전류 및 N-value는 짧은 도체샘플의 수평 및 수직 자장에 대한 DC V-I특성만으로도 예상할 수 있음을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 전남대학교 연구년 교수연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] K. Ryu, H. J. Kim, K. C. Seong, J. W. Cho, S. W. Kim, Y. K. Kwon, and K. S. Ryu, "Recovery current characteristics of a kA class conductor for a superconducting magnetic energy storage device", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 12, No. 1, p. 796, 2002.
- [2] H. J. Kim, K. C. Seong, J. W. Cho, S. W. Kim, Y. K. Kwon, and K. Ryu, "Fabrication and test of a superconducting coil for smes systems", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, p. 1863, 2003.
- [3] M. A. Young, J. A. Demko, M. J. Gouge, M. O. Pace, J. W. Lue, and R. Grabovickic, "Measurements of the performance of BSCCO HTS tape under magnetic fields with a cryocooled test rig", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, p. 2964, 2003.
- [4] 이호진, 김원주, 김기백, 권선철, 홍계원, "Bi-2223 테이프 선재를 이용한 고온 초전도자석 제조 및 특성연구", *전기전자재료학회논문지*, 12권, 7호, p. 657, 1999.
- [5] Y. Iwasa, *Case Studies in Superconducting Magnets*. New York: Plenum Press, p. 306, 1994.