

## PLD 및 MOD 법으로 제조된 2세대 HTS 선재의 전자기 특성

오상수\*, 황선역\*, 송규정\*, 강석일\*\*, 하동우\*, 고락길\*, 박찬\*

한국전기연구원, Oak Ridge National Laboratory\*\*

### Electromagnetic properties of HTS coated conductors fabricated by PLD and MOD

OH Sang-Soo, HWANG Sun-Yuk, SONG Kyu-Jeong, KANG Sukil, HA Dong-Woo, KO Rock-Kil, PARK Chan

Korea Electrotechnology Research Institute, Oak Ridge National Laboratory

#### Abstract

A lot of R&D efforts are being concentrated on the development of high performance HTS coated conductors(CC). Unlike the HTS Bi-2223 tape, a variety of processes have been tried to fabricate CC tapes. PLD and MOD are believed to be very effective methods, and high critical currents of long length CC tape have been reported. In this study, we prepared two kinds of YBCO CCs to evaluate electromagnetic property. One is YBCO tape deposited on IBAD template by PLD and the other is AMSC's MOD CC tape. Critical current ( $I_c$ ) in magnetic fields, its angular dependency, and  $n$ -value were measured and analyzed. Magnetic field property of  $I_c$  was appeared to be different due the fabrication process. MOD tape showed higher in-field property.  $n$ -value of both PLD and MOD tapes exponentially decreased with magnetic field. MOD tape showed higher  $n$ -value in whole magnetic fields.

**Key Words** : coated conductor, PLD, MOD, critical current, field dependency

#### 1. 서론

최근 세계적으로 고성능이면서 가격이 저렴한 다층구조의 2세대 고온초전도선재(coated conductor ; CC)를 개발하기 위한 연구 개발[1-6] 활발하게 이루어지고 있다. 초전도층을 입히는 여러 가지 제조 방법들 중에서 PLD(Pulsed laser Deposition)법에 의하여 가장 높은 값의  $J_c$ 를 갖는 CC가 보고[7]되고 있고, MOD[8-10]는 가장 비용이 낮은 제조방법으로 주목을 받고 있으며, AMSC사에서 최근 30m급의 고임계전류 선재를 개발하였고, 상용화를 위한 본격적인 연구개발에 나섰다. 이러한 CC선재를 실제, 전력기기에 적용하기 위해

서는 여러 가지 기본적인 특성을 평가해야 할 필요가 있으며, 그중에서 자장중 임계전류특성, 자장각도의존성등은 시스템 설계에서 중요한 파라메타이기 때문에 체계적인 데이터 확보가 필요하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 가장 대표적인 두 가지 방법들인 PLD, MOD법으로 제조된 CC선재를 이용하여 액체질소온도에서  $I_c$ 의 자장의존특성, 각도의존성 그리고 코일설계에서 중요한  $n$ 값 특성을 평가한 결과를 보고하고 제조방법의 차이에 의한 특성들이 어떻게 다르게 나타나는지 비교해보고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 크게 두 종류의 coated conductor (CC)를 준비하여 액체질소 온도에서 전자기적 특성을 평가하였다. 표 1에 측정에 사용한 시편의 제조방법과 YBCO층 두께, 그리고 77 K, 0T 자장 하에서의 임계전류밀도  $J_c$ 를 나타냈다. IP시리즈의 시편은 SS/YSZ/CeO<sub>2</sub>구조의 IBAD템플릿위에 YBCO층을 200nm, 700nm 두께로 각각 KERI,와 ORNL에서 PLD로 증착한 것이고, RM800-A시편은 최근 AMSC사에서 RABITS템플릿위에 MOD공정으로 두께 800nm의 YBCO를 입힌 것이다.

그림 1은 두 종류의 시편의 층 구조를 나타냈다. IP700-K와 IP200-O는 동일한 구조이나, CeO<sub>2</sub>완충층이 IP700-K쪽이 약간 두껍다. RM800-A는 neutral axis형 선재로 Ni-5wt%W기판과 동일한 70 $\mu$ m두께의 구리층 안정화재를 납땜하여 붙인 구조를 하고 있다.

표 1. 측정에 사용한 시편의 공정과 사양

Table 1. Fabrication process and specifications of specimen used for the test

Sample ID	Template process	YBCO process	Thickness of YBCO (nm)	$J_c$ (MA/cm <sup>2</sup> @77K, 0 T)
IP700-K	IBAD SS/YSZ/CeO <sub>2</sub>	PLD(KERI)	700	0.8
IP200-O	"	PLD(ORNL)	200	1.7
RM800-A	RABITS NiW/Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /YSZ/ CeO <sub>2</sub>	MOD(AMSC)	800	2.1

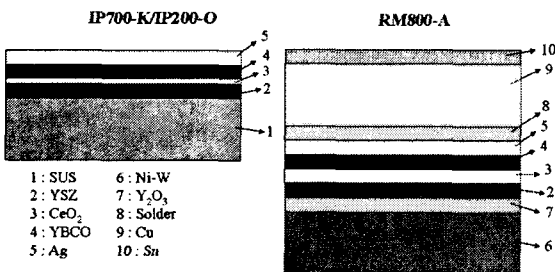


그림 1. coated conductor 시편의 구조

Fig. 1. Geometry of coated conductor specimen

자장중 임계전류측정은 4단자 통전법으로 액체질소 온도에서 행하였다. 자장은 Lakeshore제 전자석으로 시료의 넓은 표면에 수직(B//c) 방향으로 수평(B//ab)으로 각도를 변화시키면서 정자장을 인가하였다. 전류-전압측정시에 0.2 ~ 2  $\mu$ V 전압범위에서  $n$ 값을 계산하였다.  $I_c$ 측정 시에 3cm 길이의 시편을 그림 2의 시편홀더의 구리판과 FRP판 사이에 삽입하고, 나사를 돌려서 가압하여 전류를 흘릴 수 있게 하였고, 내부에 스프링이 내장된 포그핀을 전압탭으로 이용하여 중심부 5 mm간격에서 시편에서 발생한 전압을 기록하였다. 임계전류는 측정된 전류-전압 곡선에서 1 $\mu$ V/cm의 기준으로 구하였다.

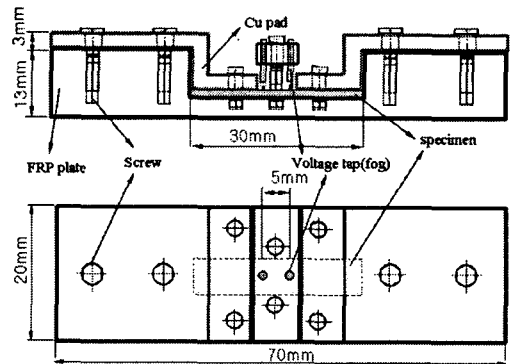


그림 2.  $I_c$ 측정용 시편 홀더의 개략 구조도

Fig. 2. Layout of specimen holder for  $I_c$  measurement

## 3. 결과 및 고찰

그림 3은 자장을 인가하면서 3종류의 CC선재의 임계전류밀도 변화를 측정된 결과를 나타냈다. 자장은 시료의 넓은 표면에 수직으로,  $c$ 축에 평행으로 0 ~ 0.5 T 범위에서 인가하였다. IP200-O시편의 경우는 저자장에서  $J_c$ 의 감소 폭이 크고, MOD법으로 만든 RM800-A시편은 상대적으로 저자장에서의  $J_c$  감소가 크게 개선된 것을 알 수 있다. 0.1 T에서도 IP700-K, IP200-O시편이 초기치에 비해 각각 75%와 55%의  $J_c$ 값을 나타낸 반면, RM800-A시편은 90%의  $J_c$ 값을 유지하고 있는 것으로 확인되었다. MOD공정으로 만든 RM800-A시편이 자장에 대한 핀닝특성이 높기 때문에 YBCO 초전도체내에 자속을 고정시키는 유효한 pinning

center가 있는 것으로 추정된다[8]. 동일한 구조를 하고 있는 두 개의 시편 IP700-K, IP200-O이 서로 다른 자장의존성을 보이는 것은 현재로서는 그 이유를 정확하게 알 수 없고 추후 연구가 필요한 것으로 생각된다.

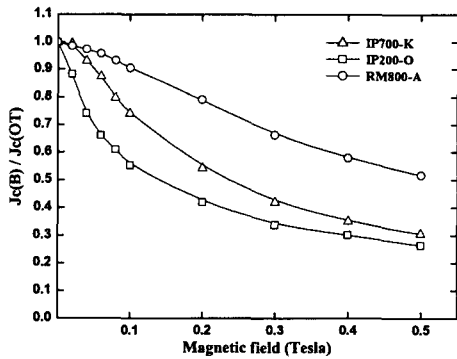


그림 3. CC선재의 임계전류밀도의 자장의존성  
Fig. 3. Field dependency of  $I_c$  for CC tape

그림 4에는 두종류 CC선재, IP700-K와 RM800-A의 표면에 인가하는 자장방향을 변화시키면서 임계전류를 측정할 결과를 나타냈다. 여기서 임계전류는 0.1 T, 0.5 T의 자장중에서 측정하였으며 B//c의 자장조건에서의  $I_c$ 로 규격화하여 각도의존성을 조사하였다. 잘 알려진 바와 같이 고온초전도체는 자기적 이방성을 갖고 있으며, B// ab 방향으로 각도가 커질수록  $I_c$ 가 연속적으로 증가하고 있다. 두 선재 모두, 0.1 T보다 자장이 높은 0.5 T에서 자기적 이방성의 파라메타인  $I_c(B//c)$ 와  $I_c(B//ab)$ 값의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 그 경향은 MOD로 제조한 RM800-A선재가 자장의 증가에 따른 이방성이 커지는 것으로 나타났다. 이와 같이 제조 방법에 따라서 자장중의 임계전류의 자기적 이방성이 다르게 나타나는 것을 본 측정을 통하여 확인할 수 있었다.

그림 5는  $V \propto I^n$ 의 전압 전류관계에서 구한 지수  $n$ 값의 자장의존성을 나타낸 것이다. 두 시편 모두 2차지수함수적으로 자장에 대하여 감소하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 고온초전도체의  $n$ 값은 저항 손실을 나타내는 파라메타로 급속게 초전도체에 비하여 큰 것이 문제가 되고 있다. 그러나 그림 5에서 알 수 있듯이 CC선재는 지금까지 보고

되고 있는 Bi-2223선재에 비하여 상대적으로 큰  $n$ 값을 나타내고 있으며, 이는 NMR과 같은 영구전류모드의 코일제작에 유리하다는 것을 의미한다. 두 시편의 비교에서는 전체 측정 자장범위에서 MOD법으로 만든 RM800-A가 높은  $n$ 값을 나타냈으며, 특히 0.1 T이하의 저자장에서 약 50% 이상으로 높은  $n$ 값을 보이는 것으로 확인되었다.

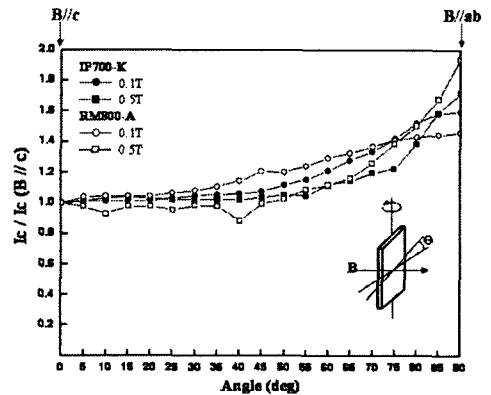


그림 4. CC선재의 임계전류 각도의존성  
Fig. 4. Angular dependency of  $I_c$  for CC tape

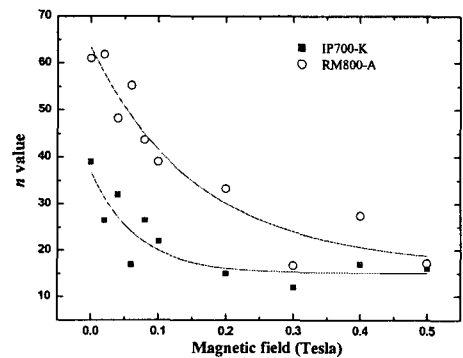


그림 5.  $n$ 값의 자장의존성  
Fig. 4. Field dependency of  $n$  value for CC tape

#### 4. 결론

IBAD와 RABiTS 공정으로 만든 서로 다른 템플릿위에 각각 PLD와 MOD법으로 만든 YBCO-CC 선재의 전자기적특성을 조사하였다. 본 실험에서는 MOD선재의 자장중  $I_c$ 가 상대적으로 우수한 것

으로 나타났다. 0.2 T의 평행자장(B//c)하에서 MOD선재는 30이상의 높은  $n$ 값을 나타내어 영구 전류코일에 적용하는 것이 유리하다고 판단된다. 그러나, MOD선재의 경우 PLD선재에 비하여 자장의 각도의존성면에서는  $I_c$ 의 이방성이 자장이 높을수록 커지는 것을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] M.Parans Paranthaman and T. Izumi, "High-performance YBCO-Coated Superconductor Wires", MRS Bulletin, Vol.29, No.8 p.533, 2004.
- [2] Y. Shiohara, "Progress and future prospect of R&D on coated conductors in Japan", Physica C: Superconductivity, Volumes 412-414, Part 1, October 2004, Pages 1-9
- [3] Paul N.Arendt and Stephen R.Foltyn, "Biaxially Textured IBAD-MgO Templates for YBCO-Coated Conductors", MRS Bulletin, Vol.29, No.8 p.543, 2004.
- [4] Y. Iijima, K. Kakimoto, Y. Sutoh, S. Ajimura and T. Saitoh, "Development of 100-m long Y-123 coated conductors processed by IBAD/PLD method", Physica C: Superconductivity, Volumes 412-414, Part 2, October 2004, Pages 801-806
- [5] Amit Goyal, M.Parans Paranthman, and U.Schoop, "The RABiTS Approach : Using Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrates for High-Performance YBCO Superconductors", MRS Bulletin, Vol.29, No.8 p.552, 2004
- [6] Y.Iijima, K.Kakimoto, Y.Yamada, T.Izumi, T.Saitoh and Y.Shiohara, "Research and Development of Biaxially Textured IBAD-GZO Templates for Coated Superconductors", MRS Bulletin, Vol.29, No.8 p.564, 2004
- [7] A.Usoskin and H.Freyhardt, "YBCO-Coated Conductors Manufactured by High-Rate Pulsed Laser Deposition", MRS Bulletin, Vol.29, No.8 p.583, 2004
- [8] M.W.Rupich, D.T.Verebelyi, W.Zhang, T.Kodenkandath, and Z. Li, "Metalorganic Deposition of YBCO Films for Second-Generation High-Temperature Superconductor Wires", MRS Bulletin, Vol.29, No.8 p.572, 2004
- [9] Yoshitaka Tokunaga, Tetsuji Honjo, Teruo Izumi, Yuh Shiohara, Yasuhiro Iijima, Takashi Saitoh, Tomotaka Goto, Atsuya Yoshinaka and Akimasa Yajima, "Advanced TFA-MOD process of high critical current YBCO films for coated conductors", Cryogenics, Volume 44, Issue 11, November 2004, Pages 817-822
- [10] Teruo Izumi, Yoshitaka Tokunaga, Hiroshi Fuji, Ryo Teranishi, Junko Matsuda, Sigenobu Asada, Tetsuji Honjo, Yuh Shiohara, Takemi Muroga, Seiki Miyata et al., "Progress in development of coated conductors by TFA - MOD processing", Physica C: Superconductivity, Volumes 412-414, Part 2, October 2004, Pages 885-889