

## 나선형 Former의 직경에 따른 YBCO Coated Conductor의 사고전류 통전특성 분석

### Study on Transport Current Properties on YBCO Coated Conductor according to Aspect of Spiral Former Diameter

김민주<sup>1</sup>, 두호익<sup>1,a</sup>, 두승규<sup>2</sup>, 김용진<sup>1</sup>, 이동혁<sup>1</sup>, 한병성<sup>1</sup>

(Min-Ju Kim<sup>1</sup>, Ho-Ik Du<sup>1,a</sup>, Seung-Gyu Doo<sup>2</sup>, Yong-Jin Kim<sup>1</sup>, Dong-Hyeok Lee<sup>1</sup>, and Byung-Sung Han<sup>1</sup>)

#### Abstract

YBCO coated conductor is named by second generation superconductor tapes. It is different with first generation superconductor tapes. YBCO coated conductor's specific difference with Bi-2223/Ag tape is more strong mechanical durability. This is important role to apply to superconducting machines. For mechanical transforming of YBCO coated conductors, we are using the well designed former. The merit of transformation is several. First, we vary the superconducting characteristics according to mechanical stress. Second, we reduce the volume of superconductor, so we achieve reducing the volume of superconducting machines. On this study, we experiment the transporting current characteristics of one types YBCO coated conductor. YBCO coated conductor with  $I_c$  of 70 A and voltage grade of 0.6 V/cm were connected to spiral former to conduct current application test.

**Key Words** : Superconductor, YBCO coated conductor, Former

#### 1. 서론

고온초전도 선재의 지속적인 연구는 초전도 대 전력기기로의 응용에 매우 큰 역할을 하고 있다. 대표적으로 고온초전도선재가 응용되는 분야는 초전도케이블, 모터, 변압기, 전류제한기 등이 있다. 고온 초전도 선재의 큰 갈래로는 PIT 공법으로 제조되는 Bi계의 1세대 선재와 유연성 있는 금속 기판위에 박막형태로 증착시켜 제조되는 YBCO Coated Conductor(이하 YBCO CC)의 2세대 선재가 있다. Bi계 선재는 YBCO CC 선재에 비해 전류밀도를 높게 사용할 수 있다는 장점이 있으나 YBCO CC에 비해 가공이 어렵고 가격도 비싸고

고자장하 취약점까지 지니고 있어 여러 대전력기기로 응용이 어렵다. YBCO CC는 제작특성상 초전도박막층 위로 안정화 층을 가지게 되는데 안정화제의 재료에 따라 선재의 특성이 상이하게 나타나므로[1-3] 여러 응용분야에 적용하기 용이하다. 본 연구에서는 초전도 전류제한기의 전류제한 소자를 제작하는 것을 목표로 하므로 2세대 고온초전도 선재에서 안정화제의 비저항이 큰 Stainless steel을 안정화제로 갖는 YBCO CC를 선정하여 사고전류통전시험을 진행하였다. 이를 바탕으로 최적의 전류제한 조건을 갖는 소자형상을 찾고자 한다.

#### 2. 실험

YBCO CC가 bending 스트레스로 인한 임계전류의 변화[4]가 있다는 점에 착안하여 총 6개의 시료를 제작하였다. YBCO CC의 임계전류의 특성 저하가 없는 최소 곡률반경을 사전에 제조사(American Super Conductor)로부터 데이터를 제공 받았다.

1. 전북대학교 전기전자컴퓨터공학부 전기공학과  
(전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14)  
2. 한전전력연구원 녹색성장연구소  
a. Corresponding Author : dudoc@chonbuk.ac.kr  
접수일자 : 2009. 8. 21  
1차 심사 : 2009. 11. 12  
심사완료 : 2009. 11. 23

표 1. YBCO CC 선재 사양.

Table 1. Spec of YBCO CC.

YBCO Coated Conductor(Stainless Steel)	
제조사	American Super Conductor
안정화층 재료	Stainless Steel
안정화층 / 도금층 기판층 두께	20 $\mu\text{m}$ / Ag 2 $\mu\text{m}$ / Ni 50 $\mu\text{m}$
임계전류/온도	70 A (1 $\mu\text{N}/\text{cm}$ at 70 K) / 90 K
전압등급	0.6 V /cm at 300 K
저항	3.7 m $\Omega$ at 300 K
폭 / 두께	4.4 mm / 0.2 mm

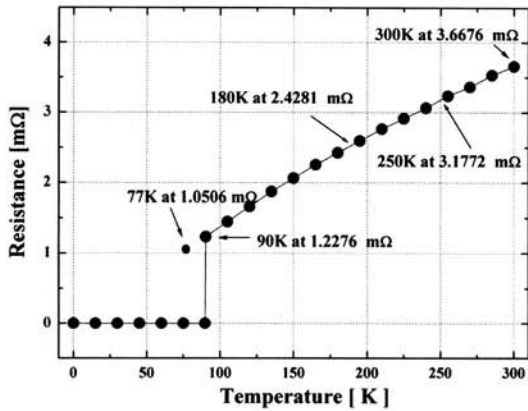


그림 1. YBCO CC 선재의 임계온도에 따른 저항 특성 곡선.

Fig. 1. Resistance characteristics curve by temperature tape.

나선형 형태로 권선할 수 있게 포머를 선정하고 포머의 직경을 순차적으로 25%씩 증가시켜 200% 까지 5개의 샘플을 제작하였다. bending 스트레스가 전혀 없는 샘플과 비교하기 위해 직선형태의 샘플을 추가 제작하였다. 본 실험에 사용한 선재의 사양을 표 1에 나타내었다. YBCO CC는 니켈금속 기판 위에 YBCO 초전도 층을 박막형태로 증착하여 제조된 것으로 폭은 4.4 mm, 전압등급 0.6 V/cm이며 임계전류 및 임계온도는 각각 70 A와 90 K이다. 그림 1은 YBCO CC의 온도에 따른 저항 곡선이다. 선재는 임계온도 이하에서 저항이 없다가 임계온도 이상이 되면서 급격하게 저항이 증가되는 것을 볼 수 있다. 90 K의 온도를 기준으로 저항은 1.2276 m $\Omega$ /cm이며 250 K 에서는 3.1772

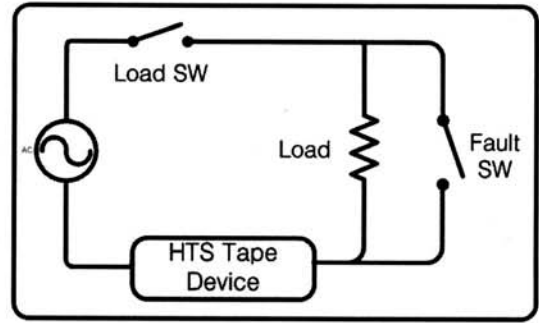


그림 2. 실험장치 구성도.

Fig. 2. Schematic diagram of experimental circuit.

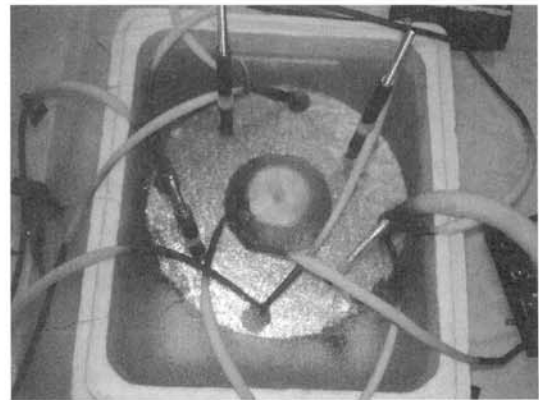
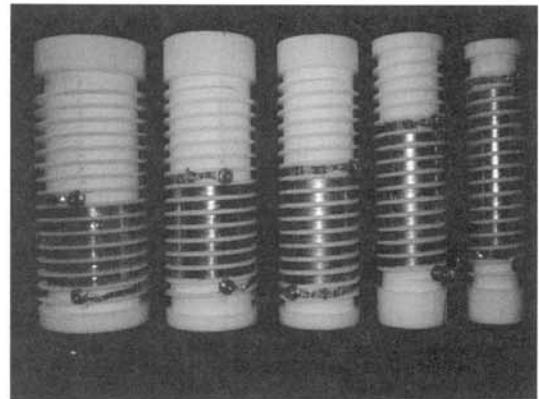


그림 3. 소자의 실제 결선.

Fig. 3. Actual combining the circuit.

mΩ/cm의 저항이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 데이터를 통해 고온초전도 선재에 발생하는 저항 값에 상응하는 선재의 온도를 추정할 수 있다[5].

그림 2는 실험장치 구성도이다. Load Sw를 닫아 1Ω의 Load에 전원을 공급하여 정상상태 통전을 모의하고, Fault Sw를 닫아 단락사고를 모의하였다. YBCO 선재의 전압등급을 고려하여 인가전압은 10 V<sub>rms</sub>에서 45 V<sub>rms</sub> 범위 내에서 5 V<sub>rms</sub> 단위로 설정하였다. 또한, 기존 시험 회로 상에 사용되던 R<sub>in</sub> 저항을 제거하여 전원의 %Z 값만 갖는 사고전류를 선로 상에 통전시켰다. 사고 주기는 위상제어기를 통해 5주기로 설정하였다. 그림 3에 실제 시험샘플의 형태를 나타내었다. 포머 상에 권선한 YBCO CC의 길이는 100 cm이며 cm 당 전압등급을 고려할 때 본 연구에서 사용된 YBCO CC의 전압등급은 약 60 V/m가 된다. 나선형태로 제작된 포머는 극저온에서 안정성이 있고 전기적 절연이 뛰어난 테프론을 사용하였다. 내경은 우측부터 최소 곡률반경 직경인 25 Φ에서부터 32 Φ, 38 Φ, 44 Φ, 50 Φ이다. 직선형태의 포머는 베크라이트로 제작하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 저항 발생에 따른 온도 특성

초전도 전류제한소자는 사고전류 제한과 동시에 안정성이 확보되어야 한다. 이는 전류제한소자가 켄치 시 발생한 줄열에 의해 소손되지 않고 다시 초전도 특성을 회복하는 것을 의미한다. 전류제한소자의 완전켄치 시 도달 온도는 일반적으로 박막을 기준으로 할 때 약 250 K로 산정한다. 따라서, 본 연구에서 제작한 스테인레스를 안정화 층을 갖는 YBCO CC 전류제한소자 역시 250 K를 완전켄치 시 안전조건 온도로 보고 각 소자별 저항 증가에 따른 온도특성을 우선 고찰하였다. 그림 4, 5, 6, 7, 8은 나선형 포머 상에 직경별로 사고전류를 투입하였을 때, 임계온도인 90 K와 완전켄치 시 온도의 중간온도인 180 K, 그리고 완전켄치 시 온도로 결정한 250 K에서의 저항 발생 경향을 고찰한 결과이다. 저항 값에 따른 도달 온도는 전절에 제시한 그림 1에 의해서 환산 할 수 있다. 각 샘플의 직경 및 제시한 온도 영역에서 경향을 고찰해보면 미소한 차이는 존재하나 거의 동일한 특성을 보이고 있다. 또한, 그림 9의 직선형 포머 상에 권선한 경우에서도 같은 특성을 보이고 있다. 위의 결과로부터 최소곡률반경인 25 Φ를 이용하여 전류제한소자를 제작한다면 소자의 안정성 확보에는 문제가 없을 것으로 사료된다.

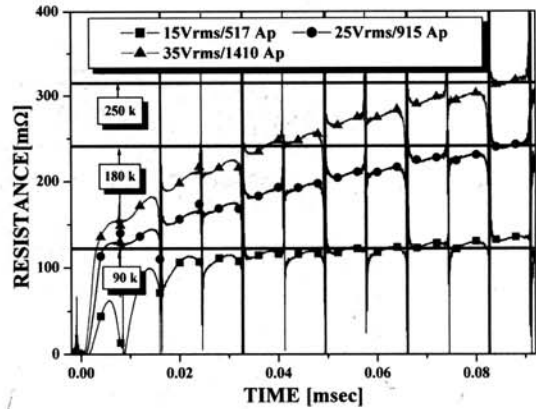


그림 4. 25 Φ former의 저항곡선.

Fig. 4. Resistance curves of 25 Φ former.

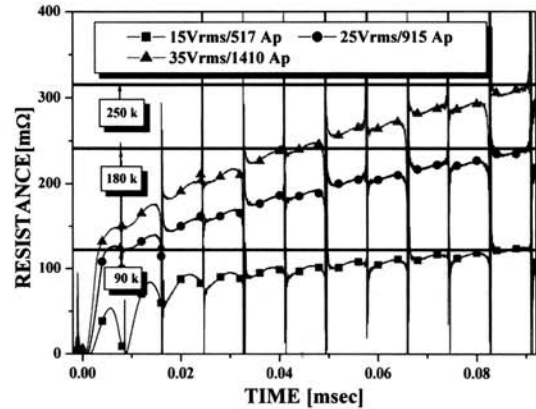


그림 5. 32 Φ former의 저항곡선.

Fig. 5. Resistance curves of 32 Φ former.

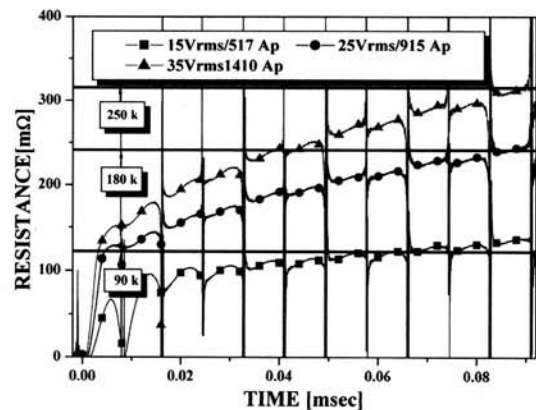


그림 6. 38 Φ former의 저항곡선.

Fig. 6. Resistance curves of 38 Φ former.

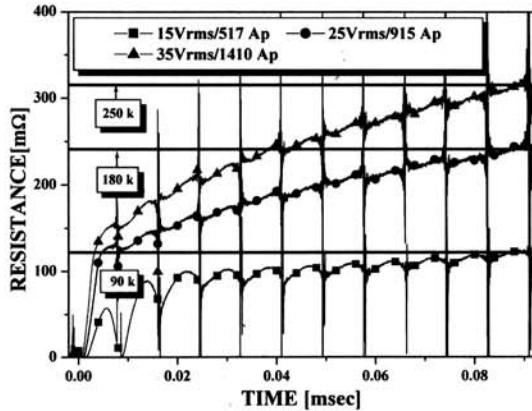


그림 7. 44 Φ former의 저항곡선.  
Fig. 7. Resistance curves of 44 Φ former.

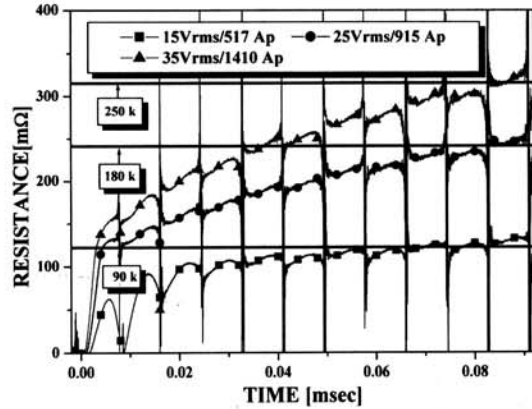


그림 8. 50 Φ former의 저항곡선.  
Fig. 8. Resistance curves of 50 Φ former.

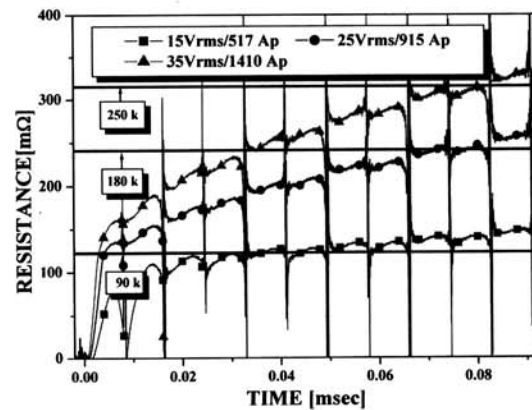


그림 9. 직선형 former의 저항곡선.  
Fig. 9. Resistance curves of flat type former.

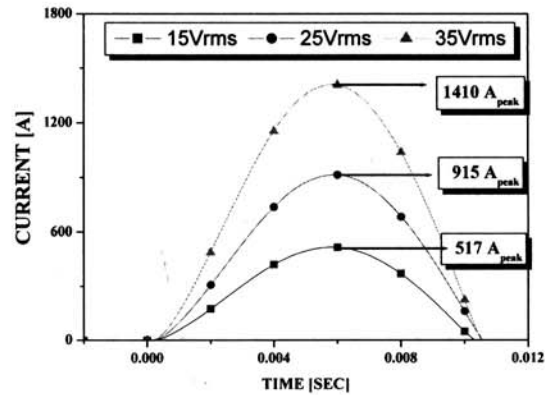


그림 10. 전원 전압에 첫 반주기 사고 전류.  
Fig. 10. Half-cycle fault current according to source voltage.

### 3.2 포머의 직경에 고장전류의 피크와 켄치타임

나선형 포머의 직경별 저항경향을 통해 얻은 결과를 바탕으로 90 K, 180 K, 250 K에서의 첫 반주기 동안의 제한전류와 켄치 발생 시간을 고찰하여 25 Φ 포머의 전류제한 성능을 고찰해보고자 한다. 그림 10은 90 K, 180 K, 250 K의 온도에 이르게 한 전압별 첫 주기 인가전류 값을 나타낸 결과이다. 본 연구의 시험회로도를 설명하면서 언급하였듯이 전원에서 발생된 사고전류를 소자에만 통전시키기 위하여  $R_{in}$  제거한 상태에서 전원의 %Z 값만을 이용해 발생시킨 사고전류는 15 V<sub>rms</sub>에서 517 A<sub>peak</sub>이고, 25 V<sub>rms</sub>에서 915 A<sub>peak</sub>, 35 V<sub>rms</sub>에서 1410 A<sub>peak</sub>이다. 위의 3가지 사고전류를 25 Φ에서 200%까지 직경을 증가시킨 나선형 포머와 직선형 포머에 권선한 초전도 소자에 통전시킨 후 첫 반주기 동안의 제한전류 피크 값을 그림 11, 12, 13에 나타내었다. 임계온도(90 K), 임계온도와 완전 켄치 시 온도의 중간 값(180 K), 완전켄치 시 온도(250 K)에서 동일하게 25 Φ가 초기 전류제한 성능이 우수한 것으로 평가되었다. 그림 14의 전압별 켄치 발생 시간에서도 25 Φ가 가장 빨리 켄치 발생이 이루어지는 것으로 확인되었다. 그러나 켄치 발생 시간을 나타낸 그림 14에서 임계온도(90 K)에 이르게 한 15 V<sub>rms</sub>에서는 180 K와 250 K의 경향과 조금은 다른 경향을 보이고 있다. 이는 소자 전체에 켄치가 완전히 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다. 본 장에서 시험한 첫 주기 전류제한 값과 켄치 발생 시간을 고찰한 결과에서도 25 Φ의 직경을 갖는 포머에 권선한 소자에서 가장 우수한 전류제한 성능을 갖는 것을 확인하였다.

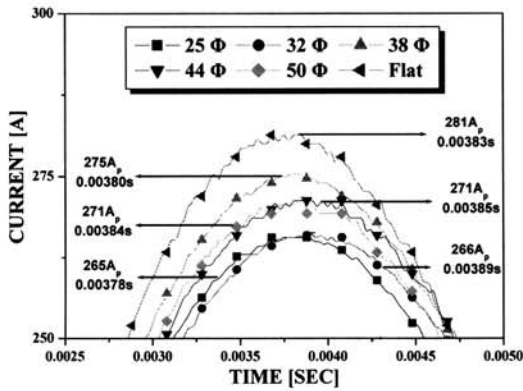


그림 11. 15 V<sub>rms</sub> 사고 시 첫 반주기 제한 전류.  
Fig. 11. Half-cycle limiting current of 15 V<sub>rms</sub>.

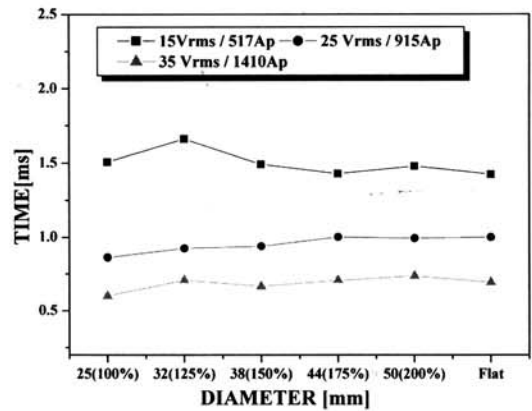


그림 14. 전원 전압에 따른 켄치의 발생시간.  
Fig. 14. Quench time according to source voltage.

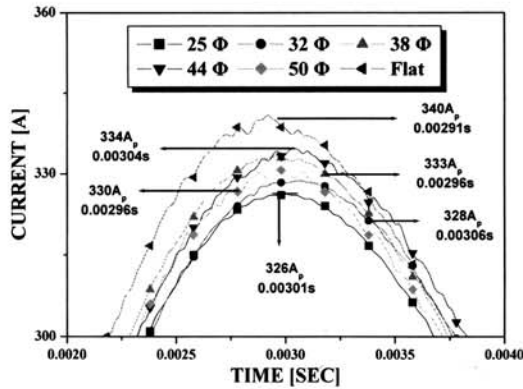


그림 12. 25 V<sub>rms</sub> 사고 시 첫 반주기 제한 전류.  
Fig. 12. Half-cycle limiting current of 25 V<sub>rms</sub>.

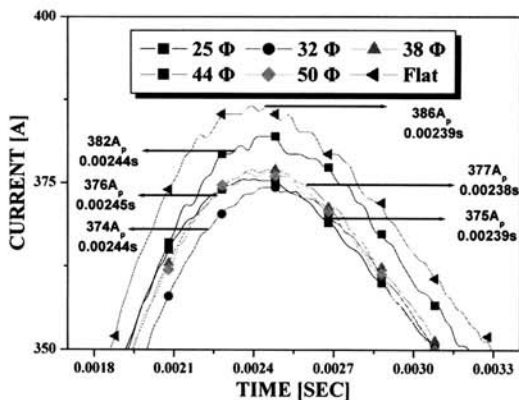


그림 13. 35 V<sub>rms</sub> 사고 시 첫 반주기 제한 전류.  
Fig. 13. Half-cycle limiting current of 35 V<sub>rms</sub>.

#### 4. 결론

본 연구에서는 stainless steel을 안정화 층으로 사용하는 YBCO coated conductor를 이용하여 전류제한소자를 하였다. 이를 위해 나선형 형태의 포머를 제작하였다. 시험에 사용된 샘플은 YBCO coated conductor의 제조사로부터 제공받은 최소 곡률 반경 25 Φ를 기준으로 200%까지 증가시킨 나선형 포머 5종과 직선형 포머 1종에 해당 시험용 YBCO coated conductor를 권선하였다. 우선, 6 종류의 포머에 권선한 선재에 과전류를 동일조건에서 통전시켜 각각의 선재에서 발생한 저항 및 이에 따른 온도 특성을 90 K, 180 K, 250 K에서 고찰하였다. 시험결과에 따르면 전체 선재의 저항 증가 경향 및 온도 상승은 거의 동일하게 나타났으며, 이를 근거로 25 Φ의 곡률 반경을 갖는 선재를 이용하여 전류제한소자를 제작하는 것이 안정성 부분에서 문제가 없는 것으로 판단하였다. 위의 결과를 바탕으로 25 Φ의 곡률 반경을 갖는 포머에 권선한 선재가 다른 곡률 반경을 갖는 포머에 권선한 선재보다 우수한 전류제한 성능을 갖는 것을 검증하기 위해 동일한 조건에서 과전류를 통전시켜 첫 반주기 동안의 전류제한 값과 켄치 발생시간을 고찰하였다. 결과로부터 25 Φ의 곡률 반경을 갖는 포머에 권선한 선재에서 가장 우수한 전류제한 성능을 갖고 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 스테인레스를 안정화 층으로 갖는 YBCO CC의 경우 최소곡률 반경을 갖는 포머를 이용하여 전류제한소자를 제작하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 향후 실계통 적용을 위한

용량증대 문제도 추가 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2007년도 교육과학기술부의 재원으로 한국 학술진흥재단(KRF-2007-521-D00177)의 지원 받아 수행된 연구임.

### 참고 문헌

- [1] 두호익, 김민주, 박충렬, 두승규, 김용진, 한병성, "안정화 층을 갖는 YBCO coated conductor와 BSCCO 선재의 결합이 과전류 통전 특성에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 21권, 10호, p. 950, 2008.
- [2] A. Ishiyama, H. Ueda, T. Ando, H. Naka, S. Bamba, and Y. Shiohara, "A criterion for determining stabilizer thickness of YBCO coated conductors based on coil protection", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, p. 2430, 2007.
- [3] H.-I. Du, S.-W. Yim, B.-J. Choi, B.-H. Choi, S.-G. Doo, B.-S. Han, Y.-H. Han, and T.-H. Sung, "Study on over-current characteristics of HTS tape by stabilizing material", Physica C, Vol. 468, p. 1706, 2008.
- [4] A. Kataoka, O. Tsukamoto, S. Sekizawa, Y. Kawano, N. Kashima, S. Nagaya, Y. Iijima, and T. Saitoh, "AC transport current loss characteristics of YBCO coated conductors subjected to bending strains", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, p. 3171, 2007.
- [5] H.-I. Du, M.-J. kim, S.-G. Doo, Y.-J. Kim, and B.-S. Han, "Resistance increase behavior of HTS wire with stabilizer layer on applied over-current", Trans. Electr. Electron. Mater., Vol. 10, No. 2, p. 62, 2009.