

고온초전도 마그넷 적용을 위한 YBCO Coated Conductor의 곡률 접합방법 연구

A Study on a Splice Method of YBCO Coated Conductors with Curvature for HTS Magnet Application

김형준¹, 조현철², 장기성², 양민규², 안민철³, 고태국^{4*}

Hyung Jun Kim¹, Hyun Chul Jo², Ki Sung Chang², Min Kyu Yang², Min Cheol Ahn³, Tae Kuk Ko^{4*}

Abstract: In the case of designing superconducting power apparatuses using the second generation high temperature superconducting wire, it is necessary to have a tape-splicing technique to achieve low splice resistance between coated conductor (CC) tapes. In this paper, an experimental splice method between YBCO CC tapes is proposed for a coil application. Splices were performed with a 37Pb-63Sn solder. YBCO samples were fabricated with various pressures and cooling rates. Joint resistances of the spliced samples of jointed YBCO CC tapes were measured and evaluated from V-I curves. In addition, optical micrographs were obtained to analyze the cross sectional microstructure of jointed samples.

Key words: curvature, joint resistance, splice method, YBCO Coated Conductor.

1. 서 론

최근 발전기, 변압기, 한류기 등의 초전도 전력 기기에 대한 2세대 고온초전도 선재 적용 연구가 활발하다 [1]. 특히, 복잡한 변형단백질 구조 등을 분석할 수 있는 Nuclear Magnetic Resonance (NMR)의 고온 초전도 마그넷 삽입 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 하지만 고온 초전도 마그넷에는 장선의 초전도 선재가 필요한데, 고온 임계전류 분포를 갖는 장선의 선재 구입이 쉽지 않다. 그렇기 때문에 낮은 접합 저항을 얻을 수 있는 접합 기술에 대한 연구가 필수이다. 현재 고온 초전도 선재 중 YBCO Coated Conductor (CC)가 고온 초전도 마그넷 응용에 비교적 적합한 것으로 알려져 있다. BSCCO 선재에 비해 외부 자장에 영향을 덜 받고, 임계 전류가 유지되는 최소 임계 곡률 직경이 우수하기 때문이다 [2].

본 논문에서는 SuperPower 사(社)의 SCS4050 선재에 대해서 5 cm 접합을 실시하였다. NMR용 자석에 삽입하는 고온초전도 코일은 곡률이 있는 권선이 이루어지게 된다. 따라서 접합 부위도 곡률이 나타나는데, 향후 제작할 고온초전도 코일에 적용하기 위해서 곡률 접합기를 고안하여 접합을 수행하였다. 접합 시 두 선재가 받는 압력과 냉각조건을 변화시키면서 나타난 접합 결과들을 바탕으로 각 특성을 비교하였고 최적 조건을 찾아보았다. 접합된 샘플의 특성, 즉 접합 저항과 임계 전류 값은 V-I 곡선을 이용해 파악하였다. 또한 접합된 곳의 단면 미세구조를 파악하기 위해 주사(走査) 전자현미경을 사용하였다.

2. 본 론

2.1. 접합 선재 준비

본 논문에서 사용된 yttrium기반의 YBCO Coated Conductor (CC)는 SuperPower 사(社)에서 생산한 "SCS4050"이다. 이 제품은 선재의 폭은 4 mm이고 Hastelloy로 이루어진 금속 모재의 두께는 50 μm인데, 선재의 하단부터 금속 모재, 절연 역할을 하는 완충층, HTS YBCO층, 온층 순으로 증착이 되어 있고 마지막으로 copper stabilizer가 여러 층들을 외부에서 감싸고 있는 구조이다. 각 층에 대한 자세한 정보는 Table 1에 수록하였다.

Fig. 1에서와 같이 SCS4050 선재를 접합할 때 YBCO 층이 최대한 가까이 하도록 확인 후 방향을 정렬했다. 77 K 상태에서 초전도 층으로 흐르는 전류의 이동 거리가 최소가 되도록 마주 보게 해야 하는데, 선재의 단면을 보면 YBCO 층이 비대칭이므로 초전도 층을 파악하지 않고 접합 시 접합 저항이 증가되는 우려가 있기 때문이다 [2].

2.2. 고안된 가열기기를 이용한 선재의 접합 과정

접합 시 사용한 솔더는 37Pb-63Sn이다. 183.1 °C의 융점을 가진 Pb-Sn 솔더는 용융되어 선재의 YBCO 층에 열손상을 주지 않으면서 접합이 가능하게 한다.

Fig. 2는 곡률 접합 장치의 실사진이다. 구리로 된 가열기기는 직경 150 mm의 곡률을 갖도록 고안하였다. 이는 추후 제작될 고온초전도 자석의 특성을 반영한 것이다. 안정된 온도 전달을 위하여 총 6개의 히터를 사용하였다. 온도 조절 장치에 장착된 온도 조절기는 총 3개인데, 각각의 온도 조절기는 2개의 히터를 thermo couple과 연동하면서 피드백 제어된다. 온도 센서는 총 3개로써 선재에 가해지는 고온 온도 분포를 확인하기

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정

²정 회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

³정 회원 : 군산대 공과대학 전기공학과 전임강사

⁴정 회원 : 연세대 공과대학 전기전자공학과 교수

*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2009년 09월 24일

심사완료 : 2010년 02월 17일

게재확정 : 2010년 02월 17일

Table 1. Specification of the YBCO CC (at 77K).

Surround Copper Stabilizer (SCS) 4050				
	Material	Thickness	Width	Resistivity
HTS	YBCO	1 μm	4 mm	0 Ωm
Substrate	Hastelloy®C-276	50 μm	4 mm	125 $\mu\Omega\text{cm}$
Stabilizer	Copper	40 μm	4 mm	6 n Ωm
Total Wire Thickness	0.1 mm			
Minimum I_c	> 80 A			
Critical Bend Diameter	11 mm			

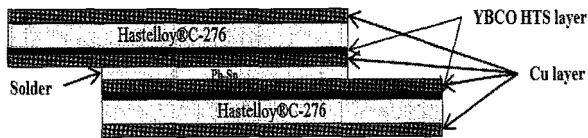


Fig. 1. Schematic of transverse cross section of the sample jointed on both HTS sides.

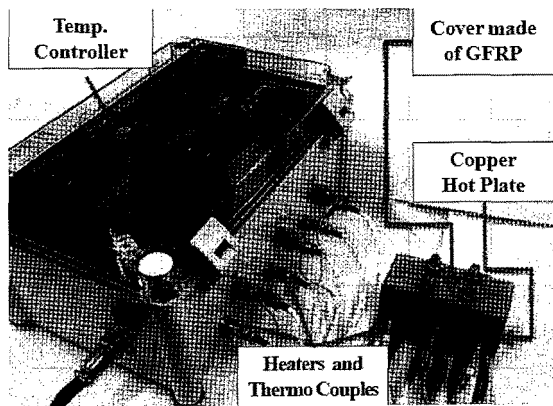
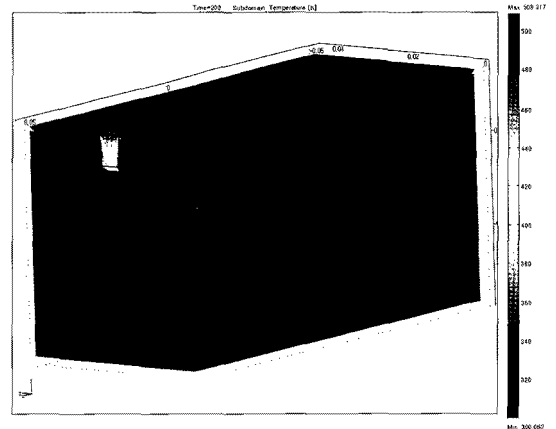


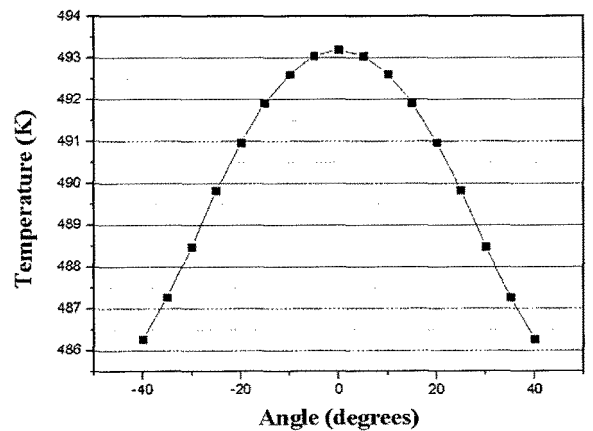
Fig. 2. The splicing system; temperature controller, copper hot plate and GFRP cover.

위하여 접합되는 부분에 최대한 근접 시켰다. 선재를 접합하는 부분은 구리로 된 가열기와 Glass Fiber-reinforced Plastics (GFRP)로 된 덮개로 구성되어 있다. 가열기는 히터에서 나오는 열을 접합 부분에 고르게 분포시키기 위하여 열전도도가 401 W/mK 인 순수 구리를 이용하였고 덮개는 솔더를 이용해 임시 접합 시킨 선재에 적당한 압력을 주기 위해 제작하였다. 덮개는 가열 기기에서 발생하는 열을 빼앗아 분산시키지 않음과 동시에 높은 열에도 견딜 수 있는, 그리고 반복되는 덮개의 탈착 과정에도 마모가 최소한으로 될 수 있는 GFRP로 제작되었다. 또한 선재 접합 시 임시 접합한 샘플의 위치를 최대한 움직이지 않게 하기 위함과 동시에 선재에 가해지는 열손실을 줄이기 위하여 가열기 중앙에 폭 5 mm, 깊이 5 mm의 골을 내었다. 덮개 부분에는 선재를 압력에 따라서 누르기 위해 볼트로 압력 조절이 가능하도록 하였고, 가열기 부분의 골에 위치할 임시 접합한 선재를 누르게 될 부분인 폭 5 mm, 깊이 5 mm의 돌출 부위가 있다.

Fig. 3의 (a)는 200초 후의 구리로 된 가열기와 GFRP로 된 덮개의 열 해석 결과이다. 해석은 초기의 주변 온도를 300 K로 가정하였고 공기에 노출된 면은 대류조건으로 설정한 후 수행하였다. Fig. 3의 (b)에서



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Thermal analysis of both the copper hot plate and the GFRP cover by finite element method (FEM), after 200 sec. (b) Temperature distribution with respect to angles on the jointed surface.

볼 수 있는 것과 같이 실제 선재가 접합되는 $\pm 10^\circ$ 부근에서의 균일한 온도 분포를 통하여 고안된 가열기의 히터로부터의 열전달이 효율적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

접합은 다음과 같이 이루어졌다. 적당량의 Pb-Sn 솔더를 도포한 두 선재를 YBCO 층이 서로 마주보도록 임시 접합한다. 가열기에 임시 접합한 선재를 올린 후 GFRP로 된 덮개로 눌러준다. 선재에 압력이 가해질 수 있도록 덮개를 볼트를 이용해 원하는 압력만큼 조여 준다.

본 실험에서는 압력과 냉각 속도 변화하면서 총 5회 반복하여 접합 특성을 비교하였다. 토크를 가하면 스트레스가 발생하는데, 이 때 받는 압력을 편의상 토크의 단위로 표기하였다. 압력은 0.5 N·m, 1.0 N·m, 1.5 N·m 그리고 2.0 N·m의 토크를 토크렌치를 이용하여 조절하였다. 또한 냉각 속도는 약 200 °C에서 부터 40-50 °C로 냉각이 완료될 때 까지 15분간 팬을 이용해 느리게 냉각하였고, 5분간 팬과 알코올을 이용하여 빠르게 냉각하였다.

2.3. 접합된 선재의 특성 측정

각각의 조건에 따른 접합된 선재의 V-I 곡선을 얻기 위하여 액체질소 상에서 4단자법을 사용하였다. V-I 곡선을 통해서 임계 전류를 파악하고, 식 (1)을 통해 접합 저항을 도출하였다.

$$V = R_j I + V_c \left(\frac{I}{I_c}\right)^n \quad (1)$$

R_j 는 $1.0 \mu\text{V}/\text{cm}$ 에서의 접합 저항, V 와 I 는 통전 전압과 전류, 그리고 V_c 는 $1.0 \mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준에 따라 $5 \mu\text{V}$ 로 결정하였다. I_c 는 V_c 에 도달했을 때의 전류이다. 그리고 n 은 재료에 따라 달라지는 index number이다. index number는 초전도체의 특성을 나타내어 주는 중요한 파라미터인데, 이상적인 초전도체일 경우 이 값은 무한대의 값을 나타낸다 [3].

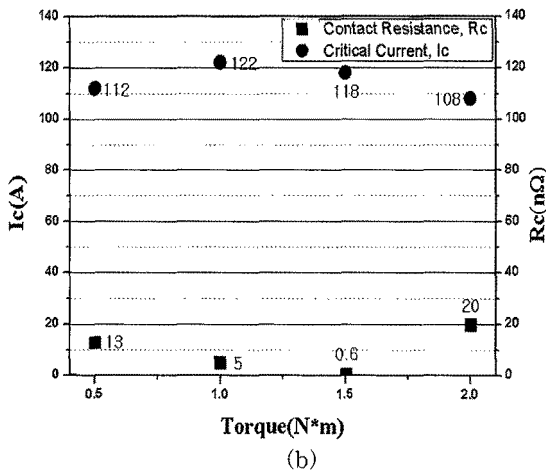
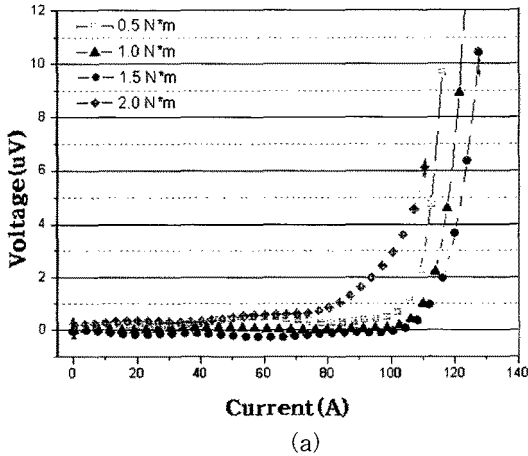


Fig. 4. (a) $V-I$ curve of jointed samples under various pressures with slowly cooling (b) The characteristics of the jointed samples under various pressures with slowly cooling.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 접합 특성의 측정

접합 저항과 임계 전류는 $V-I$ 곡선으로부터 측정 및 계산되었다. 접합 저항은 $V-I$ 곡선의 기울기에서, 임계 전류는 전압 값이 $1.0 \mu\text{V}/\text{cm}$ 에 대응되는 전류 값으로부터 도출하였다.

본 곡률 접합기를 통한 선재의 접합은 단일 선재 특성과 비교하였을 때에 선재의 특성이 매우 우수하다. 기존 hot plate나 soldering iron을 사용한 접합, 그리고 copper stabilizer 층에 존재하는 저항을 없애기 위한 Stabilizer를 제거한 후의 접합은 접합 시 초전도 층에 손상을 주었을 뿐만 아니라 접합부 전면에 고른 압력을

주지 못했기 때문에 I_c 가 감소함은 물론 매우 높은 접합 저항을 나타내었다 [4].

3.2. 느린 냉각 속도에 따른 압력 변화 접합 특성

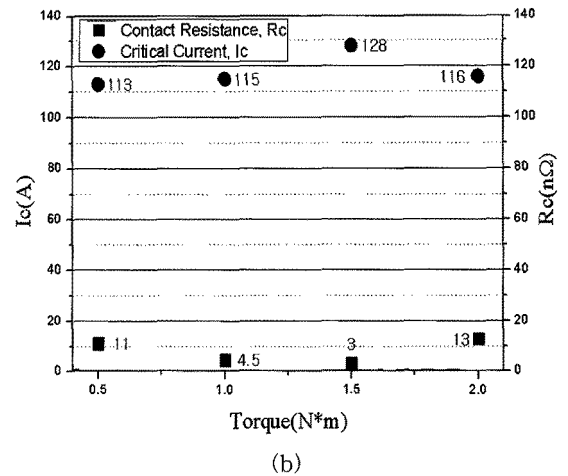
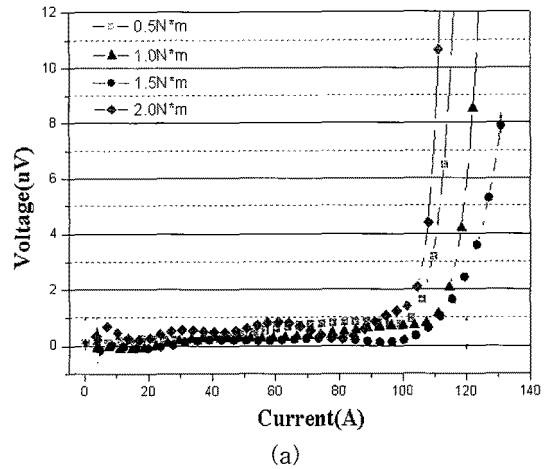


Fig. 5. (a) $V-I$ curve of jointed samples under various pressures with quickly cooling (b) The characteristics of the jointed samples under various pressures with quickly cooling.

본 실험에서의 I_c 는 Fig. 4에서 확인할 수 있는 것처럼 느린 냉각상태에서 두 선재가 받는 압력을 변화시키면서 총 5회 반복 실험하여 도출한 평균값과 비교해보았을 때에 선재 제작사에서 보증하는 단일 선재의 최소 I_c 인 80 A에 비해 높았고, 접합 저항은 수 nΩ 정도로 매우 낮았다. 이는 히터에서 온 가열기기로의 열이 솔더가 도포된 선재에 균등하게 분포하였고 열에 강하고 열전달이 거의 없는 GFRP 물질로 된 덮개 부분이 적당한 압력을 선재에 가했기 때문이다.

가열기에 놓여 있는 임시 접합된 선재를 곡률이 존재하도록 누르기 위해서는 압력을 줄 수 있는 부분이 필요하다. 고안된 가열 기기에서는 볼트를 조이는 토크 렌치를 이용해서 원하는 압력을 줄 수 있었다. 솔더가 용융되는 온도에 도달하면 팬을 이용하여 냉각 시켰다. 상온에서 자연 냉각시킬 경우 40-50 °C가 되는 지점까지 약 60분이 소요되었지만, 팬을 이용했을 경우 약 15분이 소요되었다. 그 후 덮개를 제거하고 접합된 선재의 특성을 측정하였다. Fig. 4.에서와 같이 1.0 N·m과 1.5 N·m의 토크를 가했을 경우 가장 이상적인 결과를 얻을 수 있었다. 0.5 N·m의 경우 다른 토크 조건에 비해 좋지 않은 특성을 나타냈는데, 선재 사이에 작용하

는 불충분한 토크로 인하여 접합면 전 부분에 걸쳐 신뢰성 있는 접합이 이루어지지 않았기 때문이다. 과도한 토크가 접합면에 가해진 경우 균일하게 증착된 선재의 YBCO 층이 깨어짐으로 인한 불균일한 면으로 전환되면서 다른 조건들과 비교했을 때 우수한 특성을 보이지는 못했다.

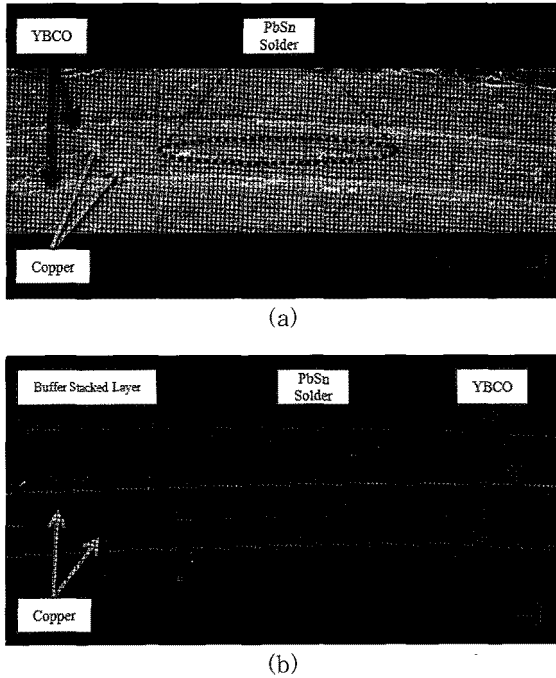


Fig. 6. Optical micrographs of transverse cross section of the jointed samples with curvature; (a) well jointed sample, (b) jointed sample with non even pressure.

3.3. 빠른 냉각 속도에 따른 압력 변화 접합 특성

Pb-Sn 솔더는 용융점에서 선재 간 접합이 이루어진 후 접합 부위 경화를 위한 냉각 속도에 따라서 접합 정도가 다르다. 이는 결국 통전 시 이동하는 전자들의 경로에 영향을 주어 빠른 냉각의 경우 접합 저항이 증가하고 임계 전류는 떨어질 것이라는 예상을 가능하게 한다. 임시 접합된 선재가 준비되면 덮개를 이용하여 가열기에 접촉 시켰다. 솔더의 용융점에 도달하면 팬과 알코올을 이용하여 가열기기를 40-50 °C가 되도록 5분간 냉각 시켰다. 그 후 덮개를 제거하고 접합된 선재의 특성을 측정하였다. Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼 빠른 냉각을 이용하여 압력을 변화시키며 5회 반복한 실험의 평균값과 비교하였을 때에 1.0 N·m과 1.5 N·m의 토크를 가했을 때 접합 저항과 임계 전류가 양호한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 토크가 미약하거나 과도했을 경우에는 접합 특성이 저하되었다.

접합 후 빠르게 냉각한 실험 결과를 느리게 냉각한 실험 결과와 비교하였을 때 냉각 속도에 따른 접합된 선재의 특성 변화는 미약하였다. 단, 지금까지의 결과를 미루어 보아 접합 특성은 느리게 또는 빠르게 냉각하는 것과의 상관관계는 매우 적고, 최적의 접합 특성을 얻기 위해서는 접합 시 선재에 적절한 압력을 가해야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

3.4. 주사(走査) 전자 현미경 분석

접합된 선재의 특성을 명확히 하기 위해서 주사(走査) 전자 현미경을 사용하여 접합 부분의 미세 구조를

살펴보았다. Fig. 6에서 볼 수 있는 곡률은 150 mm의 곡률 직경을 가진 가열기기를 이용하여 접합하였기 때문에 나타났다. Fig. 6의 (a)는 1.0 N·m과 1.5 N·m의 토크를 가했을 때문에 YBCO 층을 마주보게 하여 copper stabilizer 층을 Pb-Sn 솔더로 접합한 부분이 매우 균일하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 6의 (b)는 충분하지 않은 토크로 인해 선재의 완충층 부분이 들떠있는 상태로 접합이 된 모습이다.

본 논문에서 제시한 양호한 접합 결과는 곡률이 있음에도 불구하고 GFRP 덮개로 임시 접합된 선재 사이에 알맞은 압력이 가해졌기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 YBCO CC를 이용하여 겹쳐진 형태의 접합을 시도하였다. 접합은 고안된 150 mm의 곡률 직경을 가진 가열기기를 사용하여 이루어졌다. 압력과 냉각 속도를 변화시키면서 접합을 수행한 결과 1.0 N·m와 1.5 N·m의 토크를 인가한 샘플이 가장 좋은 접합 특성을 나타내었고, 냉각속도는 접합 특성에 거의 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 접합한 선재는 수 n Ω의 접합 저항을 나타내었고, 접합 하지 않은 일반 단일 선재와 비교 하였을 때에 접합을 했음에도 불구하고 임계 전류 값이 전혀 감소하지 않고 오히려 비슷하거나 증가하였다. 이 결과는 임시 결속된 선재 전 부분에 고른 열을 주는 가열기에 삽입된 히터의 적절한 위치와 내열성 및 내구성, 그리고 낮은 열전도성을 갖는 GFRP 덮개의 특성 및 이를 이용한 선재에 대한 적절한 압력의 인가가 있기에 가능하였다.

더 우수한 접합 특성을 도출하기 위해서는 선재 간 도포하는 솔더 양의 계량화와 다양한 토크를 적용시킬 수 있는 가열기기를 고안하여 실험 해 볼 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (R0A-2007-000-20063-0)

참 고 문 헌

- [1] G. Papst, B. B. Gamble, A. J. Rodenbush, and R. Schottler, "Development of synchronous motors and generators with HTS field windings," Supercon. Sci. Technol., vol. 10, pp. 924 - 926, 1997.
- [2] D. K. Park, M. C. Ahn, H. M. Kim, H. G. Lee, K. S. Chang, S. J. Lee, S. E. Yang, and T. K. Ko, "Analysis of a joint method between superconducting YBCO coated conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2, pp. 3266 - 3269, Jun. 2007.
- [3] Yukikazu Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets," Springer Press, p. 370, 2009.
- [4] K. S. Chang, H. K. Kim, D. K. Park, T. K. Ko, M. C. Ahn, D. H. Ha, J. B. Song, S. J. Lee, H. M. Kim, and H. G. Lee, "Joint Characteristics of

YBCO Coated Conductor by Removing a Metallic Stabilizer" IEEE Transaction on Appl. Superconduct., vol. 18, No. 2, pp. 1220-1224, June, 2008.



양민규(梁民圭)

1976년 7월 12일생, 2004년 고려대학교 공과대학 물리학과 졸업, 2006년 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 공학석사, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.

저 자 소 개



김형준(金炯駿)

1983년 7월 16일생, 2009년 인하대학교 공과대학 정보통신공학과 졸업, 현재 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정.



조현철(趙賢哲)

1979년 11월 30일생, 2007년 동국대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2009년 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 공학석사, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



장기성(張基盛)

1981년 9월 23일생, 2005년 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 졸업, 2007년 동 대학원 공학석사, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 공학석사, 2006년 동 대학원 공학박사, 2007-2009년 MIT FBML Post-doc., 현재 군산대학교 전기공학과 전임강사.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 회장.