

Hard bending시 Bi-2223 초전도테이프의 임계전류 열화 거동

The I_c degradation behavior in Bi-2223 superconducting tapes during hard bending

신형섭*, 최수용**, 고동균**, 하홍수***, 하동우***, 오상수***

H. S. Shin*, S. Y. Choi**, D. K. Ko**, H. S. Ha***, D. W. Ha***, S. S. Oh***

Abstract : Influences of bending strain on the critical current (I_c) were investigated in Bi-2223 superconducting tapes at 77K. The effect of bending mode on the I_c degradation behavior was discussed in viewpoints of test procedure, n -value and damage morphology. Especially, in this paper, we reported the I_c behavior in Ag alloy/Bi-2223 multifilamentary superconducting tapes under bending occurred within a width plane of the tape which was called as a hard bending. The I_c degradation under hard bending appeared significantly as compared with that under easy bending. The n -value decreased slightly with the increase in bending strain under the hard bending.

Key Words : Bi-2223 superconducting tape, critical current, hard bending, easy bending.

1. 서 론

Bi-계 산화물 초전도체의 제작기술과 냉동공학의 급속한 발전은 HTS선재의 고자장 마그네트 및 전력기기 적용 대한 기대를 높여 오고 있다. 이러한 마그네트 응용시, 선재는 여러 가지 형태의 응력 또는 변형을 받게 된다[1]. 즉, 와인딩부에서 후프 응력(인장변형), 냉각시 열수축률 차에 따른 압축 변형, 그리고 선재의 와인딩 과정에서 발생하는 굽힘변형 등을 들 수 있다. 특히, 와인딩 과정에서 초전도테이프가 받는 두께방향의 굽힘변형과 관련하여, 지금까지 임계전류의 저하에 미치는 굽힘변형률 효과와 최소굽힘 작업 반경 등에 관한 연구가 주로 진행되어 오고 있다[2, 3]. 그러나, 코일이나 케이블, 그리고 마그네트와 같은 전력 기기 응용분야에서는, 초전도선재의 두께방향 굽힘 외에도 폭 방향의 굽힘변형도 받게 된다[4,5]. 따라서, 종래에 주로 수행 되어온 두께방향 굽힘변형(이하 easy bending이라 부름)이 임계전류에 미치는 영향에 대한 조사와 더불어 초전도 선재의 폭 방향 굽힘변형(이하 hard bending이라 부름)이 임계전류의 저하에 미치는 영향에 대한 연구 또한 고온초전도테이프의 실용화를 위해서 필요하다.

본 연구에서는 Bi-2223 초전도선재의 임계전류에 미

치는 굽힘변형률 효과를 조사하여, 굽힘 모드에 따른 영향을 비교 검토하였다. 이러한 연구결과는 HTS테이프의 고자장 마그네트 및 전력 응용기기에의 적용시 시스템설계 및 제작을 위한 중요한 데이터를 제공한다.

2. 실험 방법

2.1. 시험편

본 연구에서 사용한 고온초전도테이프는 한국전기연구원(KERI)에서 PIT방법으로 제작한 Ag alloy/Bi-2223 다심 선재로, 37개의 필라멘트로 구성되어 있다. Fig. 1은 Bi-2223 테이프의 단면을 나타낸 것이며, Table 1은 실험에 사용된 초전도테이프의 특성치를 나타낸 값이다.

2.2. 굽힘 실험

Bi-2223 테이프의 hard bending시험법은 굽힘모멘트가 테이프의 폭 방향에 대하여 작용되도록 한 기존의 두께방향 굽힘(thickness-wise bending) 즉 easy bending의 경우와는 달리, 테이프의 두께방향을 축으로 하여 단면의 폭 방향에 걸쳐서 굽힘 (width-wise bending)을 가하는 것이다.



1mm

Fig. 1. Cross-sectional view of Bi-2223 superconducting tape.

Table 1. Properties of superconducting tape.

Sample	Sample size (mm)	Filament No.	I_c at 77K S.F [A]
Bi-2223/Ag alloy	3.7 x 0.3	37	34

Fig. 2는 위에서 언급한 두 가지 종류의 굽힘 모드로 인해 테이프 단면내에 발생하는 변형률 분포를 나타낸 것이다. Bi-2223테이프의 굽힘 실험에는 FRP(G10)재료 제작한 각 공칭 변형률에 대응하는 다른 곡률반경을 갖는 시료홀더를 사용하였다. 굽힘모드별 시료홀더의 모식도와 시료의 치부과정을 Fig. 3에 나타내고 있다.

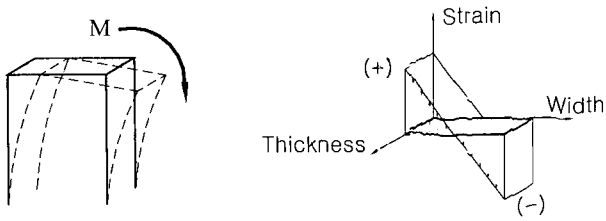
* 정 회 원 : 안동대학교 기계공학과

** 학생회원 : 안동대학교 대학원 기계공학과 석사과정

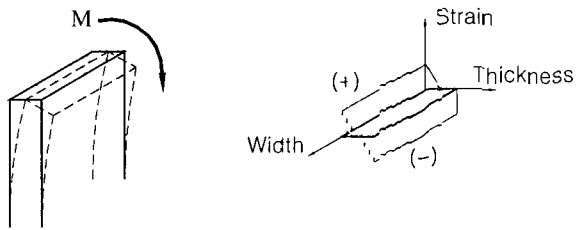
*** 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

원고접수 : 2002년 03월 30일

심사완료 : 2002년 05월 20일



(a) hard bending



(b) easy bending

Fig. 2. Bending modes and corresponding strain distributions in the cross-section of HTS tape.

시료에 가해진 변형률은 중립축으로 단부까지의 거리에 대한 테이프 중립축의 곡률반경의 비에 의해 결정되는데, 이들 공칭변형률을 얻기 위한 굽힘모드별 각각의 시료홀더의 곡률반경이 Table 2에 주어져 있다. 이때 발생한, 최대 굽힘변형률은 식(1)과 같이 주어진다.

$$\epsilon = \frac{w}{2r + w} \times 100(\%) \quad (\text{for hard bending}) \quad (1)$$

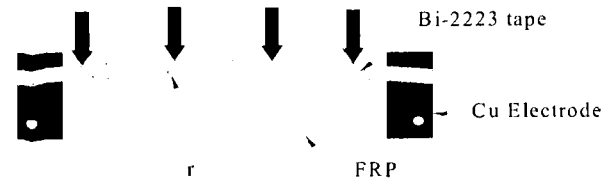
$$\epsilon = \frac{t}{2r + t} \times 100(\%) \quad (\text{for easy bending})$$

여기서, r은 시료홀더의 반경, w와 t는 Bi-2223 테이프의 폭과 두께를 나타낸다. 동일한 공칭 응력을 얻기 위하여 easy bending의 경우 훨씬 곡률이 큰 시료홀더를 사용하여야 한다는 것을 알 수 있다.

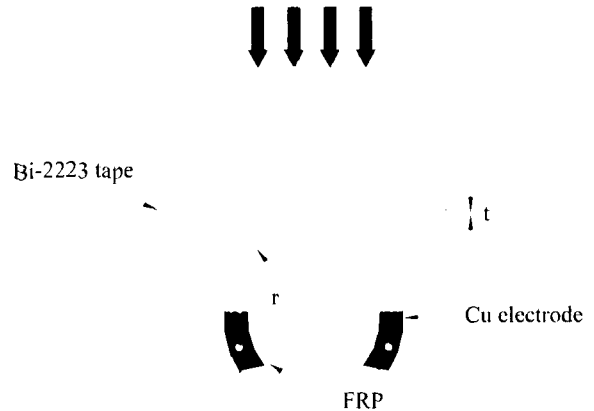
Fig. 4는 굽힘시험에 사용된 시료 홀더의 사진을 나타낸다. HTS선재의 경우, I_c 측정을 위해서는 시료홀더에 시료 치부시 주의가 요구된다. 특히 hard bending의 경우 $w/t \approx 10$ 으로 커서, 시료홀더에 시료의 부착시 예상되는 좌굴을 방지하기 위해 시료의 좌단을 홀더에 먼저 고정한 후 원통형 복재물러를 사용하여 국부적인 좌굴이 발생하지 않도록 홀더를 회전시켜 가면서 시료를 홀더에 접촉시켜 납땜 부착하였다.

Table 2. Bending radius of sample holder

Nominal strain(%)	Bending radius of holder, r(mm)	
	Hard bending	Easy bending
0	∞	∞
0.2	998	67.5
0.4	498	34
0.5	398	-
0.6	331	22.5
0.8	248	16.5
1.0	198	13.5



(a) For hard bending



(b) For easy bending

Fig. 3. Schematics diagram of sample holders for hard and easy bending tests of Bi-2223 tape.

한편, easy bending의 경우, 시료부착시 Fig. 4 (b)에 보인 바와 같이 상부홀더커버로 시료를 하부홀더에 대고 가볍게 눌러 굽힘변형을 가한 상태에서 좌단으로부터 시료를 납땜 부착하여 부가적인 손상발생을 억제하고자 하였다.

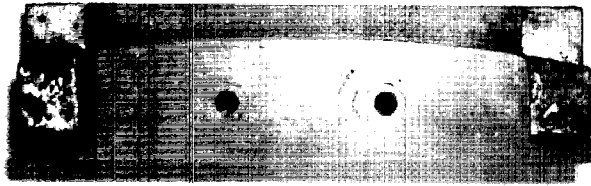
한편, 본 시험법으로 변형률효과를 얻기 위해서는 다른 곡률반경을 갖는 시료홀더를 사용해야 하는 관계로, Bi-2223테이프의 I_c 측정은 두 가지 방법으로 수행하였다. 그것은 (1) 단일시험편을 각 홀더에 연속적으로 부착하여 변형률을 증가시키면서 각 단계에서 I_c 를 측정하는 단일시험편(single specimen)법과 (2) 각 공칭변형률의 홀더마다 치너재를 사용한 복수시험편(multiple specimen)법이다. 시료의 전류단자간 게이지부 길이는 70mm, 그 중앙부에 30mm간격의 전압단자를 설치하였다. I_c 값은 4단자법을 사용하여 $1 \mu V/cm$ 전기장 기준으로 측정하였다. 이때, 발생하는 전압 V는 초전도상태에서 상전도 상태로의 천이구간에서 측정하였다. 통상 전압은 전류 I의 함수로 나타내, 식(2)의 관계를 갖는다.

$$V =: cI^n \quad (2)$$

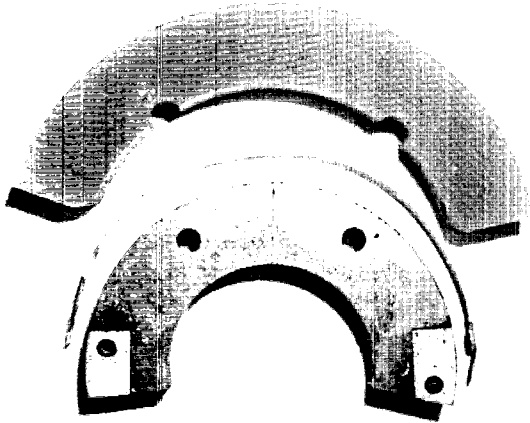
여기서, V는 발생전압, I는 부가전류, 그리고 c는 상수 값을 나타낸다. n값은 $0.2 \sim 5 \mu V/cm$ 영역에서 $\log V$ 와 $\log I$ 사이 직선구간에 대한 선형피팅으로 구하였다. 이렇게 구한 n값의 거동은 테이프 선재에 균열진전에 대한 간접적인 추정을 가능하게 한다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 Bi-2223 초전도테이프의 굽힘 시험을 통해 얻어진 $I_c/I_{c0}-\epsilon$ 관계를 나타낸 것이다. 각 굽힘 변형률 조건에서 얻어진 I_c 를 77K, $\epsilon=0\%$ 인 경우의 임계전류 I_{c0} 로 나누어서 무차원화하여 나타내었다. 시험에 사용된 Bi-2223테이프의 I_{c0} 값은 32~34 A의 범위를 나타내었다. Hard bending과 easy bending 시험의 경우, 모든 굽힘 변형률이 증가함에 따라 임계



(a) For hard bending ($\epsilon=0.93\%$)



(b) For easy bending ($\epsilon=0.66\%$)

Fig. 4. Appearances of the sample holder used in bending test of Bi-2223 tape.

전류는 저하하는 거동을 나타내었다. 특히, hard bending의 단일시험편 시험의 경우는 0.2%에서부터 I_c 저하가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 0.3%~0.4% 까지 거의 I_c 저하가 나타내지 않는 easy bending 및 인장변형률하의 거동과는 다르다는 것을 알 수 있다[2]. 한편 0.2%에서도 부가한 변형률을 제거한 후, I_c 값의 회복은 일어나지 않아 초전도부에 손상이 발생하였다는 것을 알 수 있다. 동일한 굽힘변형률에서, hard bending의 경우가 easy bending의 경우보다 낮은 임계전류를 나타내, 임계전류의 열화가 더 크게 일어났다는 것을 알 수 있다. 이때, $I_c/I_{c0}=0.9$ 을 기준으로 한 비가역 변형률 ϵ_{irr} 를 정의하면, Easy bending에 대해서는 $\epsilon_{irr}=0.45\%$ 인데 반하여, Hard bending에서는 $\epsilon_{irr}=0.2\% \sim 0.25\%$ 임을 알 수 있다. 따라서, Bi-2223테이프에서 선재의 가역 변형률범위는 선재의 굽힘방향에 따라 차이를 나타냈다. 이것은 단면내 초전도필라멘트의 분포형상에 따른 차와 hard bending 시의 큰 형상

비로 인해 굽힘시 예상되는 국부적인 좌굴손상 등에 기인하였다고 생각된다.

한편, 시험방법에 따른 차를 조사하기 위해 단일시험편(single specimen)과 복수시험편(multiple specimens)을 사용하였다. 그 결과, 임계전류의 저하거동에 미치는 영향을 비교하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, easy bending의 경우는 큰 차 없이 거의 동일한 I_c 의 저하거동을 나타내나, hard bending의 경우는 단일시험편법의 경우가 복수시험편법의 경우보다 다소 낮은 I_c 를 나타냈다. 이러한 hard bending시 임계전류 저하의 원인으로는 단일시험편법의 경우, 변형률을 증가시키기 위해서 각 홀더를 연속적으로 교체하여 수행하는 동안 굽힘상태에서 발생한 열사이클링(thermal cycling)에 의한 부가적 손상에 기인한 것으로 생각된다. 이것은 easy bending시 보다 더 큰 데이터의 분산을 초래하였다. 따라서, 단일시험편 사용시에도 위에서 언급한 열사이클링에 의한 손상누적 없이 연속적인 곡률변화가 가능한 굽힘변형 시험장치의 개발이 절실히 요구된다고 하겠다[2].

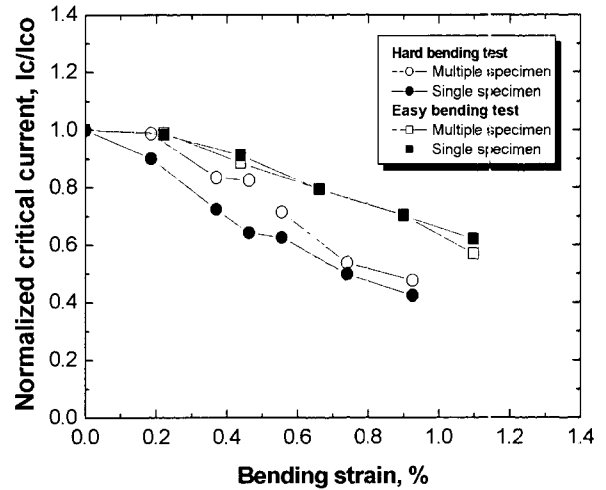


Fig. 5. $I_c/I_{c0}-\epsilon$ relation during hard and easy bending in Bi-2223 tapes at 77K.

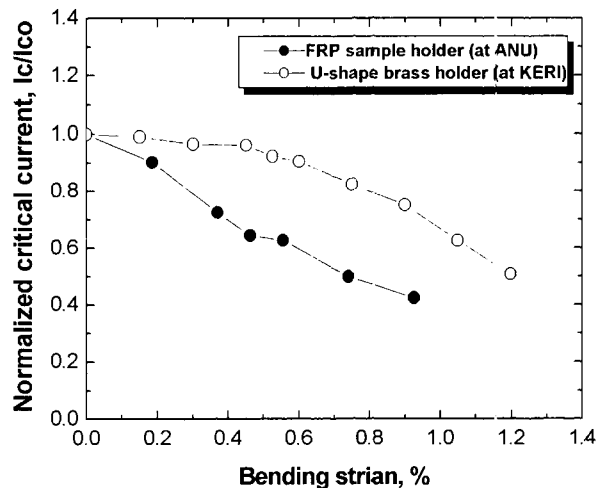


Fig. 6. Comparison of $I_c/I_{c0}-\epsilon$ relation obtained using different sample holders in Bi-2223 tapes during hard bending.

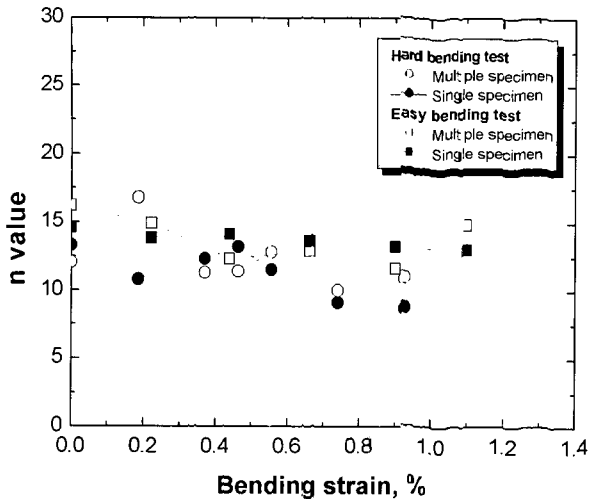


Fig. 7. Relation between n value and bending strain for hard bending and easy bending modes.

Fig.6은 Bi-2223테이프에 hard bending시 본 실험에서 사용한 GFRP제 시료홀더와는 달리, 한국전기연구원에서 U-형 밴딩 홀더로 실험한 경우(6)의 I_c 저하거동을 비교한 것이다. 이때, 시료는 황동제 U형 홀더에 납땜으로 부착되었다. $I_c/I_{c0} = 0.9$ 에서 정의한 비가역 변형률, $\epsilon_{irr} = 0.25$ (ANU), $\epsilon_{irr} = 0.6$ (KERI)로 U형 홀더를 사용한 경우가 약 0.4%정도 더 큰 허용변형률을 나타내고 있다. 이러한 변형률 정도의 차이는 먼저 황동제 U형 시료홀더와 시료 테이프의 납땜 후 77K까지 냉각시 열팽창계수의 차에 의해 시료에 발생하는 pre-strain이 큰 압축변형률을 나타내(3), 이것이 U형 홀더를 사용한 경우가 FRP시료홀더를 사용한 경우에 비해 허용 변형률 값의 상승을 가져왔고(3), 또한 변형률 값을 달리한 일련의 시료 홀더를 사용한 경우는, 연속적인 굽힘변형률의 변화가 가능한 U형 홀더와는 달리, holder 교체시 시험편에 가해지는 열사이클링에 의한 손상누적에 의한 임계전류의 저하도 영향을 미쳤다고 생각된다.

한편, n 값은 초전도선재에 손상 등의 발생에 의해서 일어나는 전류의 분류거동 등을 나타내게 된다. I-V특성곡선으로부터 식(2)을 사용하여 전이영역에서의 n값을 구하였다. Fig. 7은 굽힘 변형률의 증가에 따른 n값의 변화를 나타낸 것이다. 굽힘모드의 차에도 불구하고 n값은 크게 저하를 나타내지 않았다. 이것은 굽힘 변형률의 증가에 따른 n값의 거동은 변형률이 증가하더라도 변형률의 분포가 테이프의 단면내에서 선형적으로 변하기 때문에 손상의 발생은 단면의 끝단부근에만 걸쳐서 균일하게 발생하였기 때문이다. 이것은 균열이 특정한 곳에서 발생하여 변형률이 증가함에 따라서 집중 응력 등에 의해서 단면내로 성장하며 그곳에서 단락을 가져오는 인장변형률 시험의 경우에서의 n값의 거동과는 크게 다르다(7). 또한 다소의 분산을 나타내고 있으나, hard bending과 easy bending에 따라 n값의 거동은 다소의 차를 나타내었다. Easy bending의 경우, 굽힘 변형률이 증가하여도 거의 저하를 나타내지 않는데 반하여, Hard bending의 경우는 변형률이 증가함에 따라 다소의 분산을 나타내지만 서서히 감소하는 거동을 나타내었다. 또한 동일한 변형률 값에서도 hard bending의 경우가 easy bending인 경우보다 다소 낮은 값을 나타내었다. 이

것은 Fig. 5에 보인 I_c - ϵ 의 거동과도 어느 정도 잘 대응하고 있다.

따라서, Bi-2223테이프의 초전도체에 굽힘 변형률에 의한 국부적인 균열 발생시는 Ag 시-스부로 전류분류에 따른 임계전류의 완만한 저하가 n값의 이러한 변화를 가져왔다고 생각된다. 이것을 확인하기 위해서 데이터의 축척 및 필라멘트부분의 관찰을 통한 확인이 필요하다.

4. 결 론

- (1) Hard bending시 Ag합금/Bi-2223 초전도 다심 테이프의 임계전류의 저하거동에는 굽힘모드에 따른 영향이 크게 나타나, easy bending시 보다 낮은 굽힘 변형률에서부터 저하하는 거동을 나타내었다. Ag alloy/Bi-2223테이프의 한계 굽힘 변형률값은 hard bending시는 $\epsilon_{irr} = 0.25$, easy bending시는 $\epsilon_{irr} = 0.45$ 를 나타내었다.
- (2) Ag alloy/Bi-2223 초전도 다심 테이프에서 굽힘 변형률의 증가에 따른 n값의 거동은 인장시험시와는 달리 변형률의 증가에도 불구하고 큰 변화를 나타내지 않았다. 그러나 hard bending 시는 easy bending시 보다 다소 큰 저하를 나타내 I_c - ϵ 거동과 유사하였다.
- (3) Bi-2223테이프의 굽힘변형률 영향 시험에서, hard bending시는 단일 시험편을 사용한 경우가 복수 시험편을 사용한 경우보다 다소 낮은 값을 나타냈다. 이것은 단일시험편범위에서 연속적인 홀더 교체시 굽힘 상태의 시험편에 가해지는 열사이클링에 의한 기계적 손상누적에 의한 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발사업단의 연구비지원에 의해 수행되었다. 아울러, 임계전류 측정실험에 많은 자문과 도움을 주신 한국전기연구원 초전도응용그룹 관계자에게 깊이 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Osamura, M. Sugano, T. Wada and S. Ochiai, Mechanical properties of Ag/Bi2223 composite superconductors, Adv. Cryo. Eng. Materials, Vol.46, pp.639-645(2000).
- [2] W. Goldacker, S. I. Schlachter, R. Nast et al. Bending strain investigations on BSCCO(2223) tapes at 77K applying a new bending technique. Proc. Int. Workshop on Mechano-electromagnetic property of composite superconductors, pp. 21-25 (2001).
- [3] H. Kitaguchi, K. Itoh, T. Takeuchi, K. Togano, H. Wada, Strain effect in Bi-based oxide/Ag superconducting tape. IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 11 pp. 3058-3061 (2001).
- [4] J. X. Jin, S. X. Dou, H. K. Liu, T. Hardono, C. Cook and C. Grantham, Critical

current degradation caused by winding process of Bi-2223/Ag HTS wire in the form of a coil, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. No. 9 pp.138-141 (2001).

- [5] P. Skov-Harsen, Z. Han and J. I. Bech, stresses and strains in multi-filament HTS tapes, IEEE trans. Applied Superconductivity, Vol. No.2 pp.2617-2620 (1999).
- [6] Hoong-soo Ha, Sang-soo Oh, Doong-woo, Ha, Kyu-Jeong Song. The influence of hard bending strain on the properties of Bi-2212/Ag HTS tapes. 한국초전도 저온공학회논문집. 3권 1호. pp.6-10 (2001).
- [7] 신형섭, K. Katagiri. Bi-2212 초전도테이프에서 입계전류의 응력/변형률 특성에 미치는 외부강화의 영향. 한국초전도 저온공학회논문집. 3권 1호. pp.6-10 (2001).

저 자 소 개



신형섭 (申亨燮)

1959년 03월 27일생, 1981년 경북대 공대 기계공학과 졸업, 1991년 토호쿠 대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 안동대학교 공과대학 기계공학부 부교수



최수용 (崔秀鎔)

1974년 11월 10일생, 1997년 안동대학교 기계공학과 졸업, 현재 안동대학교 대학원 기계공학과 석사과정



고동균 (高東均)

1977년 01월 04일생, 2002년 안동대학교 기계공학과 졸업, 현재 안동대학교 대학원 기계공학과 석사과정



하홍수 (河洪秀)

1969년 5월 21일 생, 1995년 성균관대 공대 금속공학과 졸업, 1997년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



하동우 (河東雨)

1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대 공대 금속공학과 졸업, 1987년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대 대학원 금속공학과 졸업(공학박사), 1987년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



오상수 (吳詳秀)

1959년 11월 1일 생, 1982년 경북대 공대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원