

## Bi-2212 초전도 테이프에서 임계전류의 응력/변형을 특성에 미치는 외부강화의 영향

### Effect of External Reinforcement on Stress/Strain Characteristics of Critical Current in Ag Alloy Sheathed Bi-2212 Superconducting Tapes

신형섭\*, K. Katagiri\*\*

Hyung-Seop Shin\* and Kazumune Katagiri\*\*

**Abstract** : Stress/strain dependencies of the critical current  $I_c$  in AgMgNi sheathed multifilamentary Bi(2212) superconducting tapes were evaluated at 77K, 0T. The external reinforcement was accomplished by soldering Ag-Mg tapes to single side or both sides of the sample. With the external reinforcement, the strength of tapes increased but  $I_c$  decreased. The  $I_c$  degradation characteristic according to the external reinforcement was improved markedly in terms of the stress although it appeared less remarkable on the basis of the strain. Effects of external reinforcement were discussed in a viewpoint of monitoring sensitivity of cracking in superconducting filaments by considering n-value representing the transport behavior of the current. It is closely associated with the location of them relative to the voltage-monitoring region in the tape.

**Key Words** : Bi-2212, sheath alloying, stress/strain effect, critical current, external reinforcement, n-value

## 1. 서 론

Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> (Bi-2212) 고온 초전도체(HTS)는 높은 임계전류 및 높은 상부임계역을 나타내기 때문에 고자장 초전도 마그네트용으로 사용이 기대되고 있다. 최근의 선재가공기술과 냉동공학분야의 진보는 Ag합금/Bi-2212선재의 실용화 가능성을 한층 증대시켜 주고 있다.

산화물초전도 테이프의  $I_c$ 는, 일반적인 화합물초전도체와 달리, 탄성역내에서는 거의 일정한 값을 나타내지만 비가역 변형률한계( $\epsilon_{irr}$ ) 이상의 변형으로 인해 기계적 손상을 받게 되면 급격하게 저하하는 거동을 나타낸다. 따라서 테이프가공이나 마그네트의 운전시 외력의 작용에 의해 야기되는  $I_c$ 의 저하를 효과적으로 억제하는 것이 초전도체의 실용화를 위한 중요한 과제라고 할 수 있다.

이러한 초전도체를 마그네트에 적용하게 되면 여러 가지 형태의 응력 또는 변형을 받게 된다. 먼저 냉와 인딩부에 후프응력(인장변형률)을 발생시키게 된다. 각시는 열수축율의 차에 따른 압축변형률을 발생시키고, 초전도 마그네트의 작동시 걸리는 큰 전자기력은 한편 반응처리후 코일 와인딩하는 과정에서 선재에는 기계적 인장변형률이 발생하게 된다. 산화물 초전도체에 기계적 손상이 발생하게 되면 임계전류는 비가역적으로 저하하게 된다. 통상 산화물초전도 테이프나 선재는 Ag를 시-스재로 하여 만들어지고 있다. 그간 외력에 의해 발생하는 열화를 억제하고  $I_c$ 의 응력/변형률 특성을 개선하기 위하여, 코어구조의 변경과 Ag시-스재의 합금처리 등을 통한 내부강화법[1]과 초전도선재 외부에 보강재를 첨가하는 외부 강화법 등에 관해 많은 연구가 진행되어오고 있다[2]. 특히 최근에는 외부 강화 방식을 채용한 마그네트가 개발되어서 이에 따른 특성평가 등 연구가 필요하다[3].

한편 산화물초전도체의 임계전류에 미치는 응력/변형률 의존성의 평가는 필라멘트에서 크랙킹의 모니터링이 중요하다. 이러한 측면에서 HTS선재의 기계적특성 및 임계전류의 측정표준 작성을 위한 연구 및 국제적 활동도 활발하여 진행되어 오고 있다[4].

본 연구에서는, AgMg테이프를 외부보강한 AgMg-Ni/Bi-2212 초전도 테이프선재에 대하여 77 K에서 인장시험을 실시하여 임계전류  $I_c$ 의 응력/변형률 의존성을 조사하였다. 특히 외부보강에 따른 임계전류측정에 미치는 응력/변형률효과와 n값의 거동에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시험재료

시료는 PIT법으로 제조하였고, Ag/Ag-0.25 wt.% Mg-0.125 wt.%Ni합금을 시-스재로 한 54심 Bi-2212 초전도 테이프(Mitsubishi전선)이다. 시료 치수는 w4.8xt0.3xl40 mm 이고, 구성요소간 체적비는 Ag합금/Ag/SC=45/35/30이다. 테이프선재 단면 양상을 Fig. 1에 나타내고 있다.

한편 외부 보강에 따른 영향을 평가하기 위하여, 두께가 0.1mm인 Ag-0.5 wt.%Mg합금 테이프를 시료의 단면 또는 양면에 납땀하여 부착하였다. 인장시험에는 Fig. 2에 보인 바와 같은 인장시험장치를 사용하였고, 그 장치 및 실험방법의 상세는 아래와 같다. 먼저 테이프 시험편①을 장치 본체 및 부하용 레버②에 부착되어 있는 2개의 Cu단자에 납땀에 의해 장착하고, 부하용 레버②의 작용점에서 선재에 축방향

\* 정 회 원 : 안동대 기계공학부

\*\* 비 회 원 : 일본 Iwate Univ. 기계공학과

원고접수 : 2001년 04월 25일

심사완료 : 2001년 05월 23일

으로 인장하중을 가하는 구조로 되어 있다. 장치의 부하용량은 500 N이다. 응력은 시험편 단면적으로 하중을 나누어 구한다. 이때 Ic에 미치는 자계의 영향을 고려하여 자계에 대하여 수직으로 시험편을 위치시켰다.

길이는 18 mm이고, 그 중앙부에 5 mm 간격의 전압 단자를 설치하였다. Ic는 4단자법을 사용하여 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전기장기준으로 구하였다. 이때 전압 V는 초전도상태에서 상전도상태로 천이구간에서 측정된 전

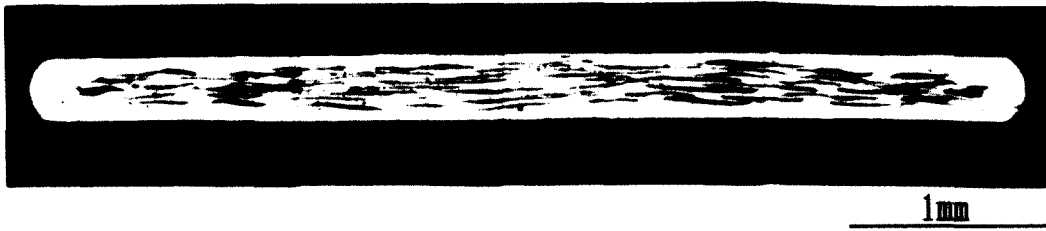


그림 1. AgMgNi/Bi-2212 초전도테이프의 단면  
Fig. 1. Cross-sectional view of AgMgNi/Bi-2212 superconducting tape.

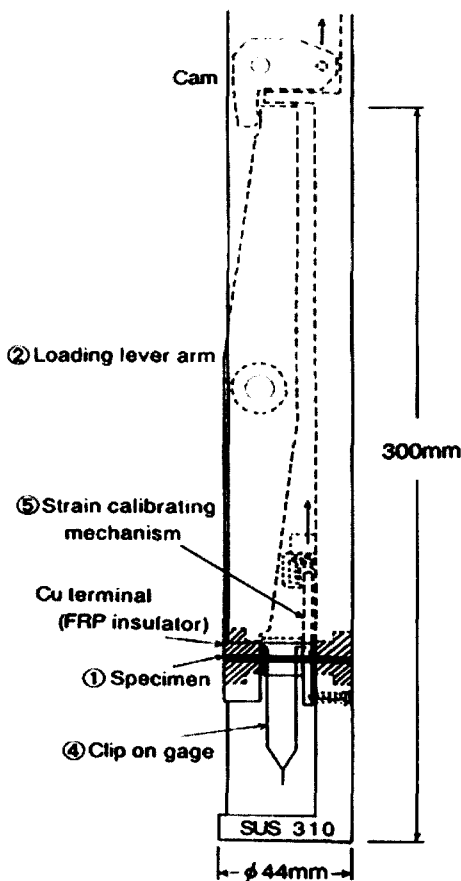


그림 2. 초전도테이프의 인장시험용 장치의 모식도  
Fig. 2. Schematics of apparatus for tensile testing of superconducting tapes

부하에 따른 시험편의 변형률 측정에는 두 장의 저온용 스트레인게이지를 첨부한 고 컴플라이언스를 갖는 클립게이지④를 사용하였다. 클립게이지의 감도는 온도와 자계에 따라서 출력에 차가 예상되므로, 시험편을 시험장치에 장착한 상태에서 클립게이지의 자계 및 온도효과 보정이 가능한 구조⑤로 되어 있다. 이때 변형률의 측정 정도는 0.05% 이내이다. 77 K, 0 T의 조건에서 응력-변형률 선도 및 Ic의 인장응력/변형률 의존성을 조사하였다. 시료의 게이지

류 I의 함수로서  $V = cIn$ 의 관계로부터 근사적으로 구하였다. 여기서 c는 상수이고, 전압발생구간의 지수 n값 (n-value)은 0.2-2.0  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 와 0.2-5.0  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 두 전압범위에서 log V와 log I사이 직선구간의 피팅으로 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Bi-2212테이프 선재의 기계적 특성

Fig. 3은 AgMgNi/Bi-2212테이프의 77 K에서 구한 응력-변형률선도를 나타낸다. 외부보강 여부에 관계없이, 거의 같은 탄성계수( $E = 36 \text{ GPa}$ )를 나타내었다. 외부보강을 하지 않은 초전도 테이프의 경우, 항복을 일으킨 후 현저한 변형을 가져오면서 낮은 가공경화 거동을 나타내었다. 이때 항복응력은 118 MPa이었다. 한편 AgMg테이프를 외부보강을 한 경우, 단면만 보강한 경우는 250 MPa를 넘어서면서 항복이 일어났지만 양면을 보강한 경우는 300 MPa까지 거의 선형적 변형거동을 나타내, Ag-Mg테이프의 외부보강량이 증가할수록 선재의 기계적특성은 현저히 증가하였다. 이 경우 장치의 부하용량관계로 더 이상의 변형에 관한 데이터는 얻을 수 없었다.

#### 3.2 Ic의 응력/변형률 의존성에 미치는 외부보강의 효과

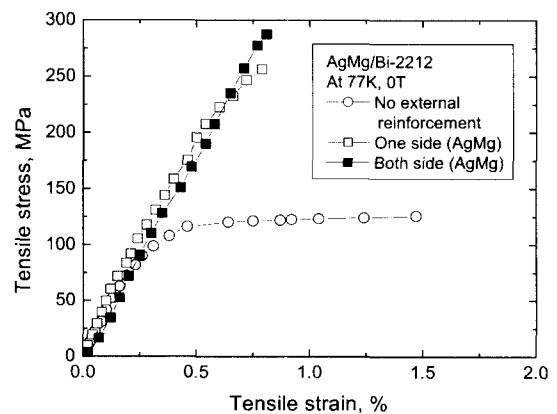


그림 3. 77 K, 0 T에서 AgMgNi/Bi-2212초전도 테이프의 응력-변형률선도  
Fig. 3. Stress-strain curves of AgMgNi/Bi-2212 superconducting tapes at 77 K and 0 T.

Fig. 4는 77 K에서 AgMgNi/Bi-2212 테이프에 대한  $I_c$ 의 변형률 의존성에 미치는 외부보강의 영향을 나타내고 있다. 여기서  $I_{c0}$ 는 변형을 가하기 전의 임계전류값이다. 산화물초전도체의 가역 변형률한계 (reversible strain limit)는 화합물계 초전도체와는 달리 명확히 정의하는 것이 곤란하여,  $I_c$ 가  $I_c/I_{c0}=0.9$ 까지 저하하는 경우에 해당하는 실제적인 변형률을 허용변형률,  $\epsilon_{irr}$  ( $\uparrow$ 로 표시)으로 사용하였다. 측정된 값들을 Table 1에 나타내었다.

변형률의 증가에 따른  $I_c$ 의 저하거동을 살펴보면, 먼저 외부보강하기 않은 경우는,  $\epsilon_{irr}=0.28\%$ 로, 변형률이 증가함에 따라서 임계전류는 급격하게 열화를 나타내었다. 여기서 허용변형률은 Fig. 3에 보인 응력-변형률선도에서 선형적 변형관계에서 벗어나기 시작하는 값에 해당하였고, 이때 초전도필라멘트에는 균열이 발생하기 시작하였고, 이로 인해 저하가 시작되었다고 추정할 수 있다. 또한 77K, 0T에서  $I_{c0}$ 는 15 A로, 4.2 K, 0.5 T에서 150 A 이상보다 현저히 작은 값을 나타내었다[5]. 시험온도가 선재의 임계온도와의 차가 작은 경우, 초전도필라멘트에 외력으로 인해 발생하는 균열의 감지감도(detecting sensitivity)는 온도차와 밀접한 관계가 있을 것으로 생각된다[5].

한편 외부보강을 한 경우, 보강량이 증가함에 따라서  $I_{c0}$ 값은 크게 저하하였다[1,6]. 통상 AgMg테이프 외부보강을 하게 되면 선재 단면적의 증가는 임계전류 밀도를 저하시키게 예상된다. 그러나 외부보강량이 증가함에 따라서  $\epsilon_{irr}$ 는 증가하였고, 또한  $I_c$ 의 열화정도도 완만하게 되었다. 결과적으로 외부보강은 초전도필라멘트에서 균열의 발생 및 진전을 지연시키게 되고, 그로 인해 허용변형률의 증가를 가져오게 된다. 이것은 외부 보강시 초전도체내에 야기된 잔류변형률의 증가에 기인한 것으로 생각된다[5]. 테이프의 양면을 보강한 경우,  $\epsilon_{irr}$ 의 측정결과로부터 추정된 잔류변형률은 약 0.4 %로 복합재의 복합법칙(mixture rule)에 따라 계산한 값(0.5 %)에 상당하는 것임을 알 수 있다. 그러나 Haken 등[6], Kitazawa 등[7]의 연구결과에 따르면, 0.6 %까지의 압축변형률에서 임계전류는 피크치의 80 %까지 선형적으로 저하하는 거동을 나타낸다고 알려져 있다. 그러나 본 시험결과에서는 낮은 변형률영역

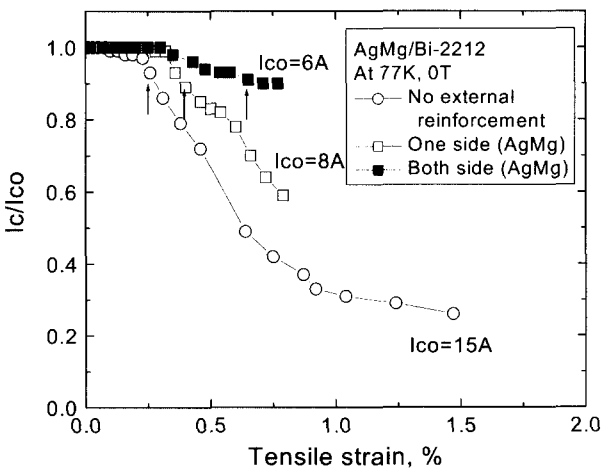


그림 4. 외부보강을 갖는 AgMgNi/Bi-2212 초전도 테이프의  $I_c/I_{c0}$ 에 미치는 변형률 의존성

Fig. 4. Strain dependence on  $I_c/I_{c0}$  in AgMgNi/Bi-2212 superconducting tapes with external reinforcement.

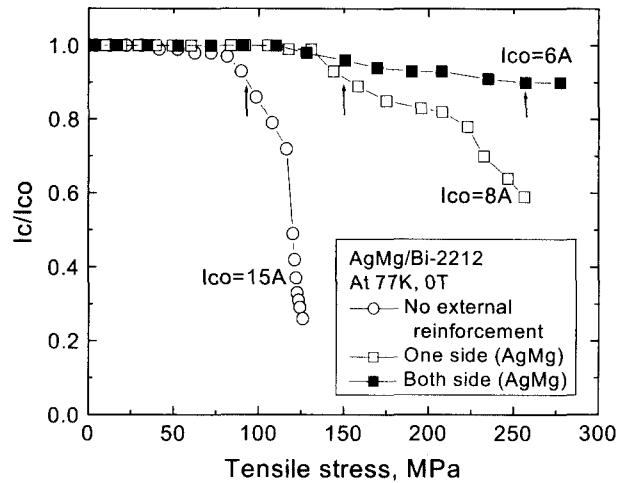


그림 5. 외부보강을 갖는 AgMgNi/Bi-2212 초전도 테이프의  $I_c/I_{c0}$ 에 미치는 응력의존성

Fig. 5. Stress dependence on  $I_c/I_{c0}$  in AgMgNi/Bi-2212 superconducting tapes with external reinforcement.

표 1. 인장시험 및 임계전류 측정결과

Table 1. Tensile test and  $I_c$  measurement results.

Sample	$I_{c0}$ (A)	$\epsilon_{irr}$ (%)	$\sigma_{irr}$ (MPa)	n-value*	
				0.2-2.0	0.2-5.0
Without reinforcement	15	0.28	94	5.5	4.8
With one side reinforcement	8	0.39	155	3.9	3.6
With both side reinforcement	6	0.71	257	3.5	3.2

\* represents mean value of index n obtained within a region up to  $\epsilon_{irr}$ .

에서  $I_c$ 의 저하가 거의 나타나지 않아서, 본 연구결과를 완전하게 설명하지는 못하고 있다.

$I_c$ 에 미치는 외부의 기계적 변형에 의한 영향은 통상 변형률로 평가되고 있다. 그러나 초전도체가 받는 응력은 모든 구성요소의 변형이 탄성범위내이면 병렬 모델의 복합법칙을 사용하여 계산이 가능하지만, 구성요소 중 일부가 소성상태로 되면 응력해석은 매우 복잡하게 된다. 한편 변형이 길이방향으로 균일하다면, 초전도체부의 변형률은 복합테이프의 변형률과 동일하다. 또한 변형률과 평균응력이 일대일로 대응한다면 변형률과 응력을 모두 사용할 수가 있다. 어떤 경우는 평균응력에 대한  $I_c$ 특성이 마그네트 설계측면에서 보다 편리한 경우도 있다.

$I_c/I_{c0}$ 의 응력 의존성을 Fig. 5에 나타내었다. 이때  $\sigma_{irr}$  ( $\uparrow$ 로 표시)는  $I_c/I_{c0}=0.90$ 까지 열화에 대응하는 응력값으로 정의하였다. 각각의 경우 구한 임계치를 Table 1에 나타내었다. AgMg테이프 외부보강한 경우,  $\sigma_{irr}$ 은 증가하였고, 보강량이 클수록 큰 응력값을 나타내었다. 이때 외부보강에 따른  $I_c$ 의 응력 의존성은 Fig. 4에 보인 변형률의존성보다 명확하게

나타났다. 또한 외부보강을 한 경우는 보강하지 않은 테이프재의 경우보다  $I_c$ 의 열화가 완만하게 일어났다. 이것은 외부보강을 하지 않은 경우와는 달리, 초전도체에 균열 발생후 보강재가 작용한 하중을 지지하게 되어 변형률집중 및 균열진전을 억제하였기 때문으로 생각된다.

보강재 테이프를 사용한 마그네트 와인딩시 발생하는 응력분포의 불균일성 및 마찰거동 등을 고려하면, 보강재 테이프를 초전도테이프에 납땜하는 것이 바람직하다[5]. 따라서 보강재 테이프에 요구되는 물리적 성질에는, 고강도 외에도 솔더링(soldering)의 용이성, 높은 전도도와 큰 선팽창계수가 포함된다.

### 3.3 n-값의 변형률 의존성

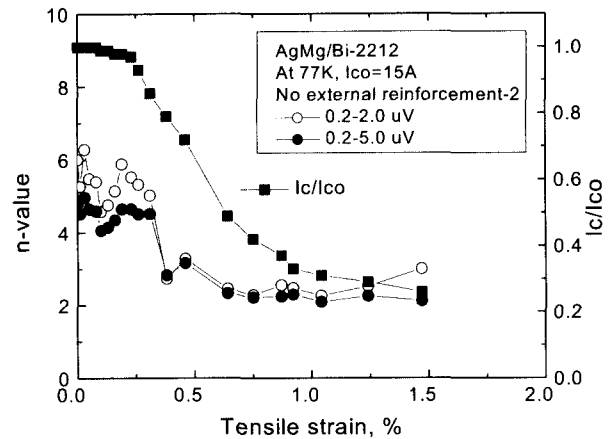
Fig. 6 (a)~(c)는 외부보강에 따른 n-값의 변형률 의존성을 나타내고 있다. 또한 임계전류의 변형률의존성과의 관련성을 검토하기 위하여  $I_c/I_{c0}$ 를 병기하였다. 전기장기준에 따라서  $I_c$ 측정에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 0.2-2.0  $\mu\text{V/cm}$ 와 0.2- 5.0  $\mu\text{V/cm}$ 의 두 전장범위에 걸쳐서 n값을 측정하였다. 그 값들을 Table 1에 나타내었다. 측정범위가 2  $\mu\text{V/cm}$ 까지의 경우가 5  $\mu\text{V/cm}$ 까지보다 다소 큰 값을 나타내었다. 또한 외부 보강량이 증가함에 따라서 n값도 저하를 나타내었다. 이것은 외부보강재를 통한 전류분류(current transfer)에 기인하였다[2]. 또한 n값과 앞서 언급한  $I_{c0}$ 사이에는 비례 관계에 있는 것을 알 수 있다[1, 8].

먼저 Fig. 6(a)에서 외부 보강을 하지 않은 경우,  $I_c$ 와 n값의 변형률특성은 잘 대응하고 있어서, 변형률이 증가에 따라서 임계전류가 저하하기 시작하면서 n값도 함께 저하하는 거동을 나타내었다. 따라서 초전도체에 균열발생 및 진전에 따른 약한 결합부의 존재를 의미하고 있다. 한편 (b)와 (c)의 Ag-Mg테이프로 보강한 경우는  $I_c$ 의 저하에도 불구하고 n값은 거의 일정한 값을 나타내었다. 이와 같이 외부보강을 한 초전도체의 경우는 (a)의 보강하지 않은 경우와는 달리 국부적인 변형률의 집중 없이 선재의 전구간에서 균일한 변형률을 나타내게 되었고, 이로 인해  $I_c$ 의 완만한 저하를 나타내는 반면 n값의 급격한 변화는 나타나지 않았다. 즉초전도체부에 국부적인 균열 발생시 시-스부로 전류분류에 따른 n값의 변화가 거의 나타나지 않았다고 생각된다. 한편 길이가 짧은 시료를 사용한 산화물초전도체에서  $I_c$ 의 응력/변형률 효과의 측정시, 균열발생부위와 전압단자의 위치와의 관계도 크게 영향을 미치게 되어, 향후 외부보강재에 대하여 이 경우를 포함한 n값의 변화 거동과 파단부위와의 관련성 검토가 필요하다.

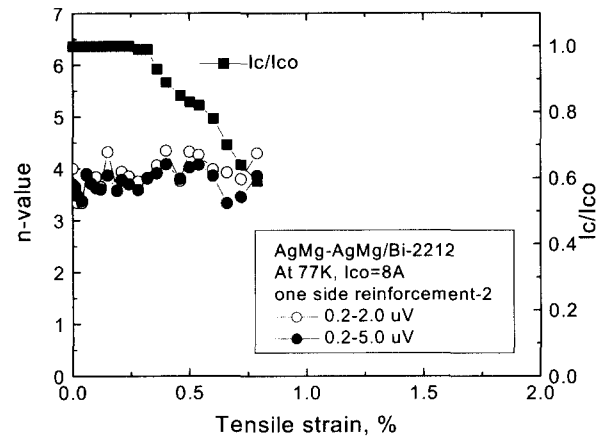
## 4. 결 론

- 1) 초전도테이프의 기계적 성질은 AgMg테이프의 외부보강에 의해 개선되었다.
- 2) AgMg테이프를 외부보강한 경우, 임계전류의 가역한계  $\epsilon_{irr}$  및  $\sigma_{irr}$ 은 증가하였고, 보강량이 클수록 그 정도는 증가하였다.
- 3)  $I_c$ 의 저하거동에 미치는 외부보강의 영향은 응력값에 대하여 보다 현저하게 나타났다. 이것은 외부보강이 없는 경우 테이프에서의 저하거동이 균열발생 후의 길이 방향을 따른 균일한 변형 여부에 무관하게 필라멘트의 크랙킹 응력에 의해 정의되었기 때문으로 생각된다.
- 4) 외부보강재의 경우,  $I_{c0}$  및 n값의 저하를 가져 왔다. 보강재의 경우는 외부보강하지 않은 경우와 달리,  $I_c$ 의 저하에 따른 n값의 변화는 거의 나타나지 않았다.

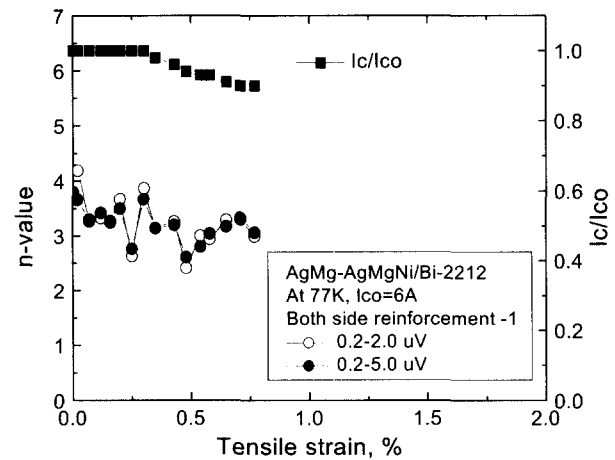
## 후 기



(a) 보강재가 없는 경우  
(a) Without reinforcement



(b) 한쪽면 보강의 경우  
(b) With one side reinforcement



(c) 양쪽면 보강의 경우  
(c) With both side reinforcement

그림 6. Bi-2212 초전도 테이프에서  $I_c/I_{c0}$  및 n-값에 미치는 인장변형률 의존성

Fig. 6. Tensile strain dependence of both  $I_c/I_{c0}$  and the n-value in Bi-2212 superconducting tapes.

임계전류 측정은 일본 Iwate 대학의 실험설비를 이용하여 수행되었기에 감사를 드립니다. 본 연구의 일부는 BK21(지역대학육성사업)의 일환으로 수행되었습니다.



**K. Katagiri(片桐一宗)**

1970년 오사카대학 대학원 박사과정 졸업(공학박사) 현재 일본 이와테대학 공학부 기계공학과 교수

**참고문헌**

- [1] H. S. Shin and K. Katagiri, Influence of Stress/Strain on Transport Critical Current Measurement for HTSC, in Advances in Superconductivity XI, edited by N. Koshizuka and S. Tajima (Springer-Verlag, Tokyo, 1999) pp. 1479-1484.
- [2] K. Katagiri, K. Kasaba et al, Stress/Strain Dependencies of Critical Current in Cu-Ag Externally Reinforced Ag-Zr/Bi-2212 Superconducting Tapes, Cryogenics, Vol. 39, pp. 453-458, 2000
- [3] K. W. Lay, K. G. Herd, C. King, Adv. Cryog. Eng., Vol. 42, pp. 985-991 (1996)
- [4] A Working Plan for Round Robin Test of Bending Stress effect Measurements, VAMAS TWA 16-Subgroup, private communicate, 2001
- [5] K. Katagiri, H. S. Shin et al, Evaluation of Stress/Strain Dependencies of Critical Current in Ag-Mg-Ni Sheathed Bi(2212) Superconducting Tapes, in Advances in Superconductivity XII, edited by N. Koshizuka and S. Tajima (Springer-Verlag, Tokyo) pp. 649-651, 2000
- [6] B. ten Haken and H. ten Kate, Compressive and Tensile Axial Strain Reduced Critical Currents in Bi-2212 Conductors, IEEE Trans., Vol. 5, pp.1298-1301, 1995
- [7] H. Kitaguchi, T. Takeuchi, et al, Strain Effect in Bi-2212/Ag PAIR Processed Tapes, in Advances in Superconductivity XI, edited by N. Koshizuka and S. Tajima (Springer-Verlag, Tokyo, 2000) pp. 651-653 1995
- [8] K. Noto et al, in Advances in Superconductivity, X(ISS'97) Gifu, pp. 1437-1439.

**저자소개**



**신형섭(申亨燮)**

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