

# 제2세대 고온초전도 선재의 전기-기계적 특성 연구 동향

글 \_ 신형섭, 마를론 데디카토리아  
안동대학교

## 1. 서론

2세대 고온초전도 선재인 희토류 바륨 구리 산화물 (REBCO)계 코팅도체(coated conductor: CC)는 테이프 형태로 높은 임계전류( $I_c$ ), 양호한 자장 특성 그리고 우수한 기계적 특성을 나타내고 있다. 최근 이러한 높은 임계전류밀도( $J_c$ )를 갖는 km급 장선 CC 테이프가 개발되어, 초전도 케이블, 전력저장시스템(SMES), 모터/발전기, 초전도 마그네트 그리고 광범위한 고자장 응용 분야에서 기대를 모으고 있다.<sup>1,2)</sup>

초전도 응용기기 대부분에서는 코일(coils)이 주요 요소 기술이다. CC 테이프는 코일로 제조, 냉각 및 운전하는 동안 여러 가지 형태의 기계적 응력/변형률 (stress/strain)을 받게 된다. 예를 들면 송전 케이블의 경우, 기본적으로 굽힘응력/변형률이 포머에 CC 테이프를 감을 때 발생

하게 되고, 권선시 인장응력/변형률이, 케이블 설치 및 냉각 과정에서는 열응력이 CC 테이프에 작용하게 된다. 특히 코일형태 권선에서는 테이프의 벤딩(bending)이 불가피하다. 또한 권선한 테이프와 인접 재료들 사이 열팽창계수의 차로 인해 극저온으로 냉각시 CC 테이프에 열변형률을 발생시키게 된다. 또한 코일에 통전이 이루어지면 거대한 로렌츠력이 발생하여 CC 테이프는 큰 후프 응력(hoop stress)을 받게 되고, 이에 따라 도체의 전송능력 저하를 가져오게 된다. 즉 초전도체는 냉각시 그리고 작동시 발생하는 로렌츠력에 의해 벤딩시 굽힘변형과 다른 형태의 변형률을 발생시키게 된다. 이때 도체에 야기된 변형률 크기에 따라서 초전도체의 임계전류에 큰 저하를 일으키게 된다. 가해진 변형률 값이 도체에 허용된 비가역적 변형률 임계치( $\epsilon_{ir}$ )를 초과하여 작용하게 되면, 초전도체가 갖는 전송능력은 회복하지 않고 비가역적으

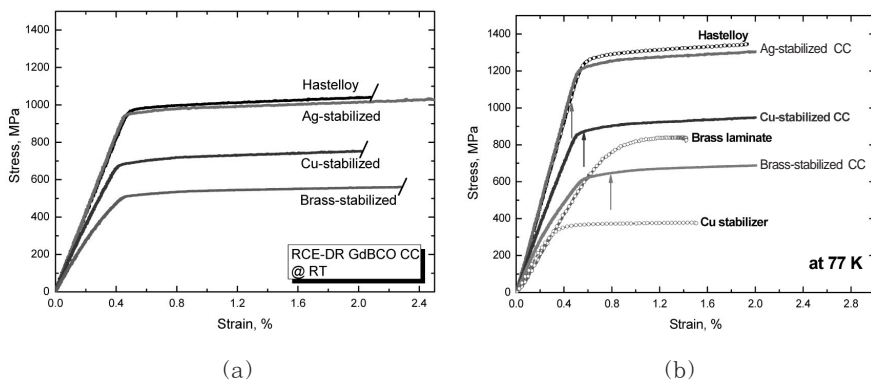


Fig. 1. Stress-strain curves (a) at RT and (b) 77 K for Hastelloy, Ag-stabilized, Cu-stabilized and brass laminated GdBCO CC tape samples.

로 감소하게 된다. 따라서 코일의 설계과정에는 변형률 효과(strain effect)로 불리는 초전도체 임계전류( $I_c$ )의 변형률 의존성에 대한 이해가 필요하고, 코일에 사용된 도체의 변형률 상태를 예측할 수 있는 설계 능력이 필요하다. 실제 초전도 응용 기기에서 CC 테이프의 성능을 보장하기 위해서는 이러한 전기-기계적 특성 (electro-mechanical property: EMP) 평가가 필수적이며, 이는 기기 설계에서 수행해야 할 가장 중요한 일의 하나이다.

본 해설에서는 산화물계 초전도체인 REBCO CC 테이프의 기계적 및 전기-기계적 특성에 관해서 국내개발 RCE-DR 공정 CC 테이프 도체를 중심으로 최근의 연구 성과를 소개하고자 한다. 복합재료로서 기계적 특성인 선재의 응력-변형률 특성에 대하여 기술하고, 전기적 특성( $I_c$ )의 변형률 의존성에 대하여 가역, 비가역 범위에서 거동과 자장효과에 대하여 살펴보았다. 특히 자장하 임계전류의 변형률효과 평가 결과를 바탕으로 향후 예상되는 3G 초전도체 개발에 반영하기 위한 방안을 제시하고자 하였다. 또한 코일응용에서 성능확보 측면에서 신뢰성 과제인 CC 선재의 층간 박리 문제와 접합 요소기술에 대하여 기술하였다.

## 2. 초전도 선재의 기계적 특성

2G REBCO CC 선재는 금속기판에 여러 완충층(buffer layers)과 초전도층을 증착하고 Ag-및 Cu-안정화층(stabilizer)을 입힌 다층 복합재료로 구성되어 있다. 이에 따라, 복합선재의 기계적 특성은 방향에 따른 현저한 이방성을 나타내고, 응력-변형률 특성은 주로 금속기판의 특성에 의해 결정된다. 기판재료는 초전도층을 배향시키는 공정에 따라서 2가지 방법이 있다. 하나는 무배향금속 기판상에 배향 중간층을 성장시키는 방법인 IBAD법의 경우, Ni기 내열합금인 Hastelloy C-276과 스텐레스강(STS310S)이 주로 사용되고 있다. 다른 하나는 금속기판 자체를 압연집합조직으로 배향시킨 후 그 위에 중간층을 배향시키는 방법인 RABiTS이 있는데, 이 경우 Ni-W합금이 기판재료로 주로 사용되고 있다. 따라서 이들 CC 선재의 기계적 특성평가와 관련된 연구가 많이 진행

되어 오고 있다. Fig. 1은 국내에서 개발된 Hastelloy 기판 IBAD/ICE-DR 공정으로 제작한 GdBCO CC 선재와 기판재료 및 외부 안정화 보강 선재의 응력-변형률 특성을 나타내고 있다. (a)는 상온, (b)는 77 K에서 측정된 결과이다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 CC 선재의 응력-변형률 특성은 기판의 특성에 의해 결정되는데, IBAD 용 기판의 경우 높은 항복응력을 나타내는 것을 알 수 있다.

## 3. 임계전류( $I_c$ )의 변형률/응력 특성

### 3.1. CC 도체의 $I_c$ 의 변형률효과

REBCO CC 테이프에 대하여 임계전류( $I_c$ )의 가역적 변형률 효과가 알려져 있다. 탄성변형에 해당하는 가역 변형영역에서,  $I_c$ 의 변형률 의존성은 순수하게 초전도층에 발생한 고유 변형률(intrinsic strain)을 사용하여, Ekin 식,  $I_c/I_{cmax} = 1 - a(\epsilon_{applied} - \epsilon_{@I_{cpeak}})^b$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 a와 b는  $I_c$  거동을 나타내는 상수이고,  $\epsilon_{@I_{cpeak}}$ 는  $I_c$  피크 위치에 해당하는 변형률 값을 나타낸다.  $I_c$ 의 가역적 거동은 어떤 한계 변형률 이하에서 나타나고, 이 가역적 한계를 넘어서 변형률이 증가하면  $I_c$ 가 급격히 저하하는 비가역적 거동을 나타낸다.<sup>3)</sup> 초전도체에 가해진 변형률이 제거된 후에도 더 이상  $I_c$ 가 원래로 회복되지 않는 변형률 한도를 비가역적 변형률 한계(irreversible strain limit,  $\epsilon_{irr}$ )로 정의하고 있다.<sup>3,4)</sup> CC 테이프에서  $I_c$ 의 현저한 비가역적 저하는 초전도 코팅박막 본래의 취성에 의한 균열에 기인한다는 것이 널리 알려져 있다. 따라서, 초전도기기 설계에 있어서 초전도체 박막에 균열이 발생하기 직전까지의 최대 변형률을 평가하는 것은 중요하고 필요하다.<sup>5-7)</sup>

고온 초전도체에서 임계전류밀도와 자속고정 강도에 변형률의 가역적 효과를 일으키는 것은 임계온도( $T_c$ )의 일축방향 압력의존성과 관계가 있다고 알려져 있다. Van der Laan 등은, 1G BSCCO 테이프의 경우, 임계전류밀도와 자속고정에 미치는 가역적 변형률 효과가 임계온도의 압력의존성에 의해 전적으로 야기된다는 것을 보여 주었다.<sup>8)</sup> 2G 코팅도체의 경우, 가역적 변형률 효과에 미치는 결정립 및 결정립 경계의 기여도 이와 유사하다고 할 수 있다.<sup>9)</sup>

이와 관련하여 Osamura 등은 YBCO CC 테이프에서 잔류변형률과 변형률 거동의 해석을 통해,  $I_c$ 의 가역적 변형률 한계는 선재의 미소항복 한계와 일치하고, 나아가 임계전류의 변형률에 따른 비가역적 저하는 도체의 거시적 항복에 관련되어 있다는 것을 보고하였다.<sup>10)</sup> 미시적 및 거시적 항복 사이의 경계가  $I_c$ 의 비가역 변형률 한계에 해당한다고 제시하였다. 이와 같이 CC 테이프에서  $I_c$ 의 가역적/비가역적 거동 기구를 밝히기 위해 많은 연구와 노력이 진행되고 있다. 그 일환으로 양자빔을 사용한 고정도 회절법으로 국부적인 변형률을 측정하고 있다.

### 3.2. 외부보강이 CC 테이프 $I_c$ 의 변형률효과에 미치는 영향

한편, Ag-안정화 된 CC 시료의 경우,  $I_c$ 의 비가역적 변형률 한계( $\epsilon_{ir}$ )는 Cu나 스테인레스강과 같은 안정화제의 추가로 현저하게 향상시킬 수 있고, 그 개선은 채택하는 안정화제의 재질에 의존하였다.<sup>11,12)</sup> 주로, 기관이 전체 CC 초전도 복합재 전체 테이프의 기계적 거동에 영향을 미쳤다.<sup>13)</sup> 스테인레스강 박판으로 보강한 CC 테이프는 Ag 안정화된 경우와 비교하여 두 배의  $\epsilon_{ir}$  값을 나타내었다.<sup>12)</sup> 뿔납을 사용하여 CC 테이프의 양쪽에 금속박판을 외부에서 적층하면 인장, 좌굴 및 비틀림 하중에 대한 CC 테이프의 저항을 향상시키게 된다. 안정화/적층에 따른 임계전류의 비가역변형률한계 및 상당 응력의 향상이 REBCO CC 및 BSCCO 테이프 선재에서 보고되어 있다.<sup>14)</sup> CC 테이프 개발의 초창기부터 Cu 안정화제의 도금이 채택되어 CC 테이프 전체의 열적 및 전기적 안정성을 향상시키면서 초전도 코팅막을 보호해 주었다. 따라서, Cheggour 등의 보고에서 알 수 있듯이, Cu 안정화층은 또한 축방향 변형률에 대한 CC 테이프의 허용변형률(tolerance strain) 값을 향상시킨다.<sup>11)</sup> 그러나, CC 테이프에서 Cu 안정제의 효과는 균열개시가 일어나는  $\epsilon_{ir}$ 의 향상이 주로 열팽창계수(CTE)의 차이에 기인한 것이 아니고, 균열발생 지연 작용을 하는 Cu 안정제의 인성효과(toughening effect)로 간주될 수도 있다는 측면에서 이에 대한 추가연구가 필요하다.

### 3.3. $I_c$ 의 굽힘 및 축방향 인장변형 특성

코팅도체는 강력한 자장하에서도 높은 임계전류밀도( $J_c$ )를 갖는 관계로 고자장 자석 응용분야에 활용될 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 초전도 자석 코일 권선시 선재의 굽힘변형은 불가피하다. 따라서 코팅도체의 굽힘 허용치는 가장 기본적인 전기-기계적 특성의 하나로서 많은 그룹에 의해 평가되어 오고 있다.<sup>15-17)</sup> Fig. 2는 굽힘 변형을 받는 Cu 안정화 CC 도체의  $I_c$  응답성을 보여준다. RCE-DR 및 MOCVD 공정으로 제조된 Cu 안정화 GdBCO CC 테이프는 굽힘직경 12 mm까지 가역적  $I_c$  거동을 나타내었다. 이때 두께가 얇은 코팅박막은 굽힘 변형에 대해 높은 허용치를 나타내었다. 굽힘변형하  $I_c$ 의 거동은 코팅막에 걸리는 초기 변형률 상태에 따라 인장축 또는 압축축 영역에 피크 값을 나타내지만, 그 값이 LTS 선재와는 달리 전적으로 잔류변형률의 크기에 따라 결정되지는 않는 것이 CC 도체의 특징이다. 또한 박막의 굽힘변형률 특성은 기관 소재의 특성에 의존한다.

GdBCO CC 테이프의  $I_c$ 에 미치는 고유 변형률 효과는 사용한 제조 공정 및 기관 재질에 무관하며 Fig. 3에 보인 바와 같이 거의 유사한 변형률 의존성 감도를 나타내는 것을 알 수 있다. 이 의존성을 멱법칙(power law) 함수  $I_c/I_{cmax} = 1 - a(\epsilon_b - \epsilon_{@I_{cpeak}})^2$ 를 사용하여 피팅할 수 있다. 여기서  $a$ 는  $I_c$ 의 변형률 민감도(strain sensitivity)를 나타내고, 멱법칙 함수의 지수가 2를 벗어나는 값을 갖는다는 보고도 있다. GdBCO CC 테이프의 경우, RCE-

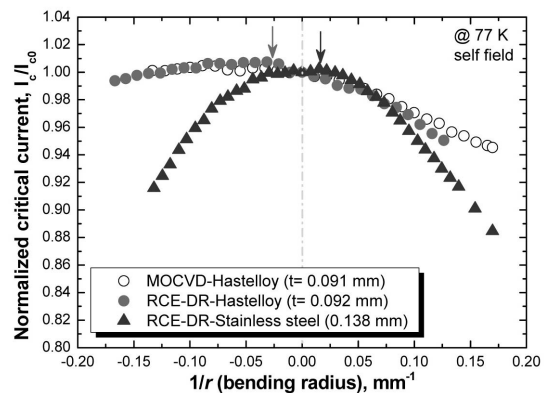


Fig. 2. Normalized critical current as a function of  $1/r$  in GdBCO CC tapes at 77 K under self-field.

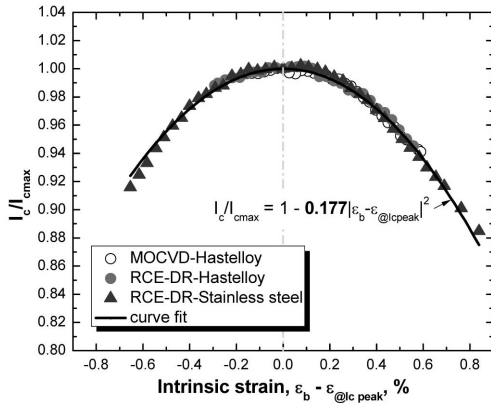


Fig. 3.  $I_c$  normalized by the maximum  $I_c$  value,  $I_c/I_{cmax}$  as function of intrinsic bending strain,  $\epsilon_b - \epsilon_{c@Icpeak}$  in GdBCO CC tapes at 77 K under self-field.

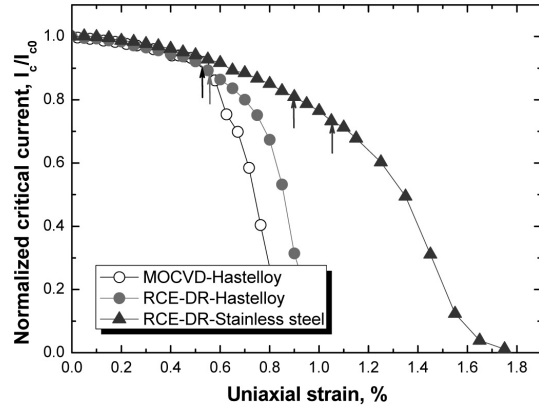


Fig. 4.  $I_c/I_{c0} - \epsilon_{ten}$  relations in GdBCO CC tapes with different substrate at 77 K and under self-field.

DR 및 MOCVD 공정으로 제작된 시료에서 얻어진 변형을 민감도 값이 0.177로 Sugano 등에 의해 보고된 같은 GdBCO 박막 결정방향성을 갖는 PLD 공정 시료에서의  $a=0.199$ 와 거의 유사하다.<sup>18)</sup> GdBCO CC 테이프에  $I_c$ 의 고유 변형을 민감도는 Sugano 등과 van der Laan 등에 의한 보고와 같이 GdBCO 코팅박막의 결정 방향에 의존한다.<sup>18,19)</sup> RCE-DR 및 MOCVD 처리된 GdBCO CC 시료는 테이프 길이방향과 나란한 결정방향성을 가지고 있어서 유사한 변형을 민감도를 나타낸 이유일 것이다. 이 결과로부터 굽힘변형에 의한  $I_c$ 의 고유 변형률효과는 사용된 제조 공정 및 기판 재료에는 크게 의존하지 않는다는 것을 알 수 있다.

CC 테이프의 축방향 인장하에서, 현재 상업적으로 사용 가능한 선재는 대체로 양호한 기계적 특성과  $\epsilon_{ir}$  값을 나타내었다. Table 1은 축방향 인장하에서 몇몇 코팅도체의  $\epsilon_{ir}$  값을 보여준다. Fig. 4는 GdBCO CC 테이프에서  $I_c$ 의 변형을 의존성을 보여준다. Hastelloy 기판을 갖는 RCE-DR 및 MOCVD-GdBCO CC 테이프는 Fig. 4에 화살표로 각각 표시한 바와 같이 0.55%와 0.52%로 거의 유사한  $\epsilon_{ir}$  값을 나타내었고, 이후 급격한  $I_c$  저하를 나타내었다. 한편, 스테인레스강 기판 RCE-DR GdBCO CC 테이프는 0.90-1.05% 범위의  $\epsilon_{ir}$  을 나타내었고, 이후에도 서서히  $I_c$ 가 저하하는 거동을 볼 수 있다. Hastelloy 기판 CC 시료의 경우, 굽힘하에서  $I_c/I_{cmax}$ 의 고유변형률에 대

한 거동은 축방향 인장하 거동과 잘 일치하였다. 그러나, 스테인레스강 기판 CC 샘플의 경우, 축방향 인장하에서는 1.05%까지 보다 큰  $\epsilon_{ir}$  값을 나타내는데도 불구하고, 훨씬 큰 변형을 민감도를 나타내었다.

따라서 기판 소재로 스테인리스강을 채택하면 보다 큰 비가역 변형을 한계치를 얻을 수 있다는 점에서 변형을 민감도의 추가적인 개선만 이루어지면, 스테인레스강 소재를 CC 테이프 기판으로 채택하는데 유리하다고 할 수 있다. 결과적으로, 기판재료의 특성이 Cu-안정화 GdBCO CC 테이프의 기계적 및 전기-기계적 특성에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

### 3.4. CC 도체의 자장하에서 임계전류의 변형률 효과

이들 CC 테이프는 자기자장 뿐만 아니라 외부 자장하에서도  $I_c$ 의 양호한 내 변형률 특성을 나타내었다<sup>20)</sup>. 자장하에서 측정을 위해, 여러가지 시험 장치 또는 치수가 개발되었고, Walter 스프링, CuBe 굽힘 장치 그리고 인장-

Table 1. Irreversible Strain Limit at Self Field for CC Tapes Depending on Substrate Materials, Deposition Process for Superconducting Layer and Cross Sectional Architecture

Substrate	Deposition process	Irreversible strain
Hastelloy	RCE-DR	<sup>a</sup> 0.45%, <sup>b</sup> 0.55%, <sup>c</sup> 0.70-0.80%
	EDDC	<sup>b</sup> 0.50%
	MOCVD	<sup>b</sup> 0.52%
	PLD	<sup>a</sup> 0.44
Stainless steel	RCE-DR	<sup>b</sup> 0.9-1.05%, <sup>c</sup> 1.05%

<sup>a</sup>Ag-stabilized, <sup>b</sup>Cu-stabilized, <sup>c</sup>Brass-laminated

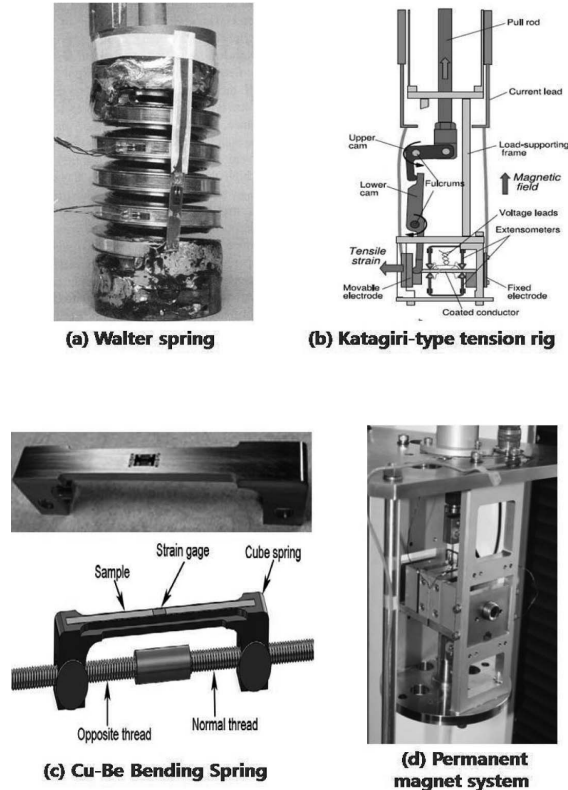


Fig. 5. EMP evaluation devices for HTS tapes under magnetic field (a) Walter spring (b) Katagiri-type tension rig (c) Cu-Be bending spring, and (d) permanent magnet system developed at ANU.

압축 굽힘부가 시험장치가 여기에 속한다. Fig. 5는 세계 각국의 여러 연구그룹에서 보고된 HTS 테이프의 전기-기계적 특성 평가를 위해 개발된 장치를 보여준다. 초전도체/테이프의 자장하 변형률효과 연구는 이러한 여러 형태의 장치를 사용하여 집중적으로 조사되고 있고 저자 그룹에서 개발한 한 쌍의 영구자석을 사용한 낮은 자장하의 측정장치를 Fig. 5(d)에 나타내었다<sup>21)</sup>. 그러나 아직까지 자기 및 외부 자장하에서 HTS 테이프의 EMP 평가에 대한 표준시험 방법은 존재하지 않는 상태이다.

$I_c$ 의 자장 의존성은 시료에 따라서 크게 의존하는 관계로 대부분의 개발된 초전도선재에 대하여 측정하는 첫 번째 특성치이기 하다. 여러 다른 공정으로 제작된 REBCO CC 테이프에 대한  $I_c/I_{c0}$ 의 자장 의존성을 Fig. 6에 나타내었다.  $I_c/I_{c0}$ 는 3T까지 자장이 증가함에 따라서 90% 이상까지 저하하였고, EDDC-SmBCO CC 테이프

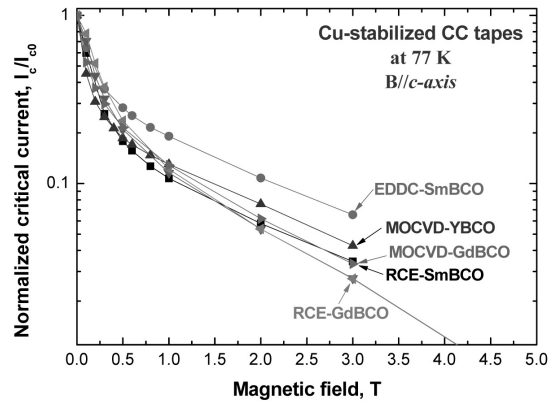


Fig. 6. Magnetic field dependence of  $I_c$  in different coated conductor tapes evaluated at 77 K and under B//c-axis.

는 다른 경우보다 나은 내자장 특성을 나타내었다. 또한 다른 공정으로 처리한 SmBCO 및 GdBCO CC 테이프는 다른  $I_c$ 의 자장 의존성을 나타내었다. 자장에 따른  $I_c$ 의 거동은 초전도층의 종류뿐만 아니라 제조공정도 의존하였다. Fig. 6에 나타낸 모든 샘플은 인공 피닝점을 갖지 않아서,  $I_c$ 의 자장 의존성 차이는 자연피닝 점으로 작용하는 미세구조와 결합의 차이에 기인하는 것과 같다. RCE-DR GdBCO CC 테이프의 경우, Hastelloy와 스테인리스강 기판 두 시료 모두에서 거의 유사한  $J_c$ -B 관계가 관찰되었다<sup>22)</sup>. RCE-DR GdBCO CC 테이프에서  $J_c$ 의 자장 의존성은 Cu-안정화제 및 Brass 적층재 모두에서 적용된 기판 소재에 무관하게 나타났다. 이것은 RCE-DR 공정에서 사용된 유사한 증착조건이 유사한 미세구조를 만들어 그것이 자속피닝 특성을 결정하게 되었다는 것으로부터 유추할 수 있다. 또한 일부 보고에서, 피닝력의 변형률의존성은 자장하  $I_c$ -변형률 의존성과 유사하다는 것을 나타내었다.  $F_{p,max}$ 와 마찬가지로 비가역자장( $B_{irr}$ )도 변형률에 약간 영향을 받았다.

Fig. 7은 Hastelloy 기판 YBCO 및 SmBCO CC 테이프의 자장하  $I_c/I_{c0}$ -변형률 관계를 보여주고 있다. RCE-DR SmBCO CC 테이프의 경우, YBCO CC의 경우와 다른  $I_c/I_{c0}$  거동을 나타내었다. YBCO CC 테이프의 경우, 자장하에서  $I_c$  피크가 옮겨가는 흥미로운 거동이 관찰되었다. 즉 축방향 인장하에서 SmBCO CC 테이프는  $I_c$  피크를

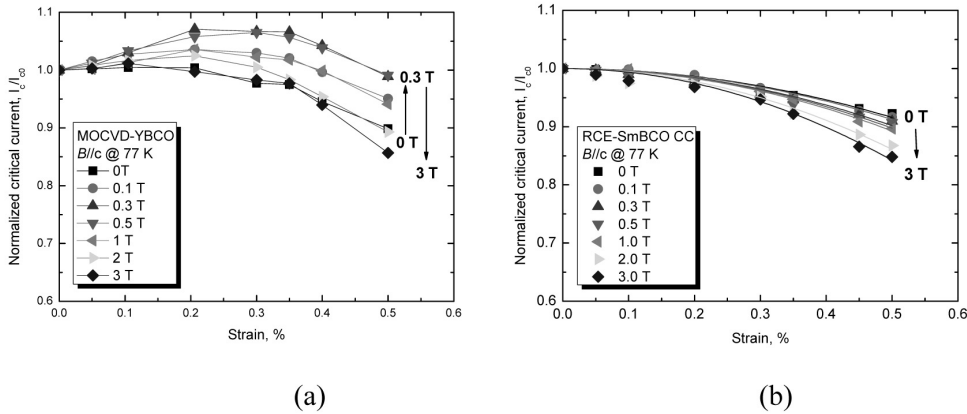


Fig. 7. Strain response of  $I_c/I_{c0}$  under magnetic field in Cu-stabilized (a) MOCVD-YBCO CC and (b) RCE-DR SmBCO CC tapes with Hastelloy substrate at 77 K.

나타내지 않고 YBCO CC의 경우와는 대조적으로 변형률과 더불어  $I_c/I_{c0}$ 의 단순 감소를 나타내었다.<sup>23)</sup> 한편,  $J_c$  또는  $I_c$ 의 이러한 거동은 낮은 자장하에서는 변형률 의존 피닝기구, 즉 결정입계에서 Abrikosov-Josephson vortices 피닝기구, 높은 자장하에서는 Abrikosov vortices의 피닝 기구에 기인하였다는 보고도 있다.<sup>24)</sup>  $I_c$ 에 미치는 자장의 영향은 결정입계, 결합과 같은 미세구조의 특성에 의존한다는 측면에서,  $I_c$ 의 변형률효과도 이러한 기구에 관련이 있는 것으로 제안되고 있다. 따라서 달리 제조된 SmBCO CC 테이프에서  $I_c$  피크의 존재 또는 비존재는 사용된 박막 제조공정에 기인하였다고 할 수 있다. RCE-DR SmBCO의 경우, 코팅막 증착 및 반응과정 동안 액상에서 고상으로 천이를 겪지만, EDDC-SmBCO 시료의 경우는 기관의 집합조직의 에피택셜 성장에 의해 처리되었기 때문에, EDDC-SmBCO 샘플의 기관 층내 결정방향성이 직접적으로 초전도 층에 반영되었다고 할 수 있다. 따라서 EDDC-SmBCO CC 테이프에서, 결정입계의 특성 또는 밀도에 따라 Josephson vortices에 기인하여 자장하에서 관측된  $I_c$  피크 및 천이와 같은 현상을 나타내었다고 할 수 있다. 그러나 RCE-DR SmBCO CC 샘플의 경우, 비교적 약한 조셉슨 볼텍스의 형성으로 인해 변형률 부가시 뿐만 아니라 자장하에서도  $I_c$  피크는 발생하지 않았다. 그러나 Brass층의 외부보강은 변형률효과에 작지만 변화를 가져왔다.<sup>25)</sup> 따라서 현재까지 코팅도체(CC)의 자장하  $I_c$ 의 변형률 의존성을 특징지을 수 있는

기구의 명확한 설명까지 도달하지 못한 실정이다.

#### 4. 초전도 기기 응용시 REBCO CC 도체 성능의 신뢰성 과제

##### 4.1. CC 테이프의 층간 박리

앞 절에서 언급한 바와 같이, 코팅도체는 1G HTS 및 LTS 선재와 비교하여 700 MPa 이상 훨씬 큰 축방향 인장응력과 굽힘변형 허용치를 나타내고 있다.<sup>2,3,26)</sup> 이러한 CC 도체가 갖는 특성을 활용하면, 초전도 코일의 전류밀도를 크게 증가시킬 수 있고, 더 작고 컴팩트한 기기(코일) 제작이 가능하다.<sup>27)</sup> 그러나 복합체 구조의 CC 테이프는 내구도에 있어서도 현저한 이방성을 나타내, 횡방향으로는 훨씬 낮은 수십 MPa의 내응력 한계와 층간박리로 인해  $I_c$ 의 현저한 저하를 나타내었다. Takematsu 등은 에폭시 함침한 YBCO CC 더블 팬케이크 코일이 CC테이프의 층간박리 때문에 코일성능에 있어서 상당한 저하를 보여 주었다고 보고하였다.<sup>28)</sup> CC 테이프의 박리는 과도한 횡방향 응력에 기인하였다고 설명하고 있다. 에폭시 경화 및 극저온으로 생각하는 동안 누적된 횡방향(방사형)응력이 선재의 횡방향 내강도를 초과하였고, 결과적으로 현저한  $I_c$  저하를 초래하였다. 일부 상업적 이용이 가능한 CC 테이프는 이미 40-100 MPa의 횡방향 강도를 갖도록 개선이 이루어지고 있다고 하지만, CC 테이프의 박리강도는 여전히 편차가 크다.<sup>29)</sup> 코팅도체는 여러 층의

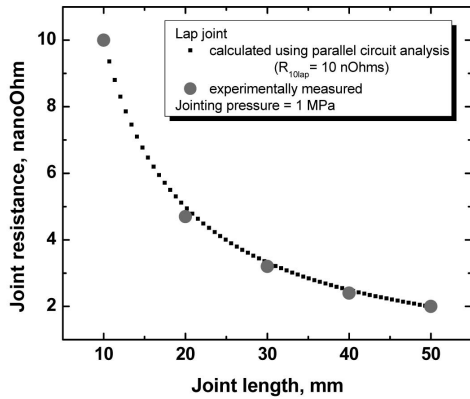


Fig. 8. Experimentally measured and estimated resistance across the lap-jointed Cu-stabilized MOCVD-YBCO CC tapes<sup>34)</sup>.

후속 증착에 의해 제조되었는데 불구하고, 박리강도 평가를 접착한 랩 구조로 모델링하여 평가하고 있는 실정이다. 이 경우, 만약 어떤 한 층에서 박리나 파괴가 일어나면, CC 테이프의 성능은 결과적으로 저하하게 된다.<sup>28)</sup> 접착한 조인트 부의 평가시 통상적인 응력 형태는 인장, 전단, 벽개(cleavage) 및 필(peel) 응력을 포함한 평가가 수행되고 있다. 벽개 및 필 강도는 인장강도보다 훨씬 낮아서, 실제 환경을 나타내기 어려워 바람직하지 않고, 접착제 본드 조합 설계에서는 피해야 하는 구조이다.

#### 4.2. CC 테이프의 접합 저항 저감 기술

한편, 2G CC 테이프를 사용한 솔레노이드 및 더블 팬 케이크 코일을 제작하는데 있어서, 낮은 접합부 저항을 갖는 CC의 양호한 접합기술이 필요하다. 이때 납땜접합기술이 자석 성능을 지배하기 때문에 권선코일 제작에서 매우 중요하다. 이때 접합부 또한 굽힘 및 축방향 인장의 기계적 변형에 대한 내 응력을 가지는 것이 필요하다. 높은 접합 저항은 국부적인 발열에 의한 켄칭을 일으켜서 자석의 성능저하를 가져오게 된다. 저자 그룹은 접착부에 1 MPa의 균일 가압방식을 채택하여 10 nanoΩ/cm의 낮은 접합저항을 갖는 CC 테이프의 실용 납땜 접합부를 개발하였고, 접합부가 단일 테이프와 비교할 수 있는 전기-기계적 특성을 보였다<sup>30-32)</sup> Fig. 8은 CC 테이프의 랩 구조(lap structure) 접합부 길이와 저항의 관계를 보여준다. 병렬회로 원리를 사용하여, 접합

부 저항은,  $R_{10N} = R_{10}/N$ 의 공식으로 추정할 수 있고, 이때  $R_{10}$ 과  $N$ 은 각각 10 mm 랩 접합부의 접합저항과 접합부 길이의 10 mm 랩 길이의 배수를 의미한다. 겹치기 및 맞대기 접합부 해석을 사용하여, 코일에서 허용되는 접합부 저항을 설계 평가할 수 있게 되었다. 4 mm 폭 혹은 10 mm 폭을 갖는 통상의 표준 CC 테이프에 대하여, 병렬/브리지 접합부의 전체 저항은 공식,  $R_J = (cR_{10lap})/N$ 을 사용하여 추정할 수 있다. 여기서  $R_{10lap}$ 과  $N$ 은 각각 10 mm 랩 접합부의 저항과 브리지의 배수이다. 그리고 4 mm 폭에 대하여  $c=5$ , 10 mm 폭 CC 테이프에 대해서는  $c=2$ 를 갖는다. 이 식은 랩 접합부의 병렬회로 해석을 통해 유도되었다.<sup>32)</sup>

#### 5. 결론

우수한 전송 특성을 갖는 산화물계 REBCO CC 복합 선재의 임계전류에 미치는 기계적 및 전기-기계적 특성을 자기자장 및 외부자장하에서 평가였고, 고자장하에서 다양한 CC 선재에 대하여  $I_c$ 의 변형률효과를 조사하여 초전도응용기기의 설계 데이터를 제공하고자 하였다. 또한 CC 테이프의 고자장 기기 응용시 신뢰성 문제로서 제기되고 있는 층간박리 및 접합부 저항 저감기술에 대하여 고찰하였다. 이러한 CC 테이프의 전기-기계적 특성의 평가기술 확립은 기기 설계를 위한 데이터 확보 측면 뿐만 아니라 향후 고성능 3G 고온초전도선재의 개발에 있어서도 고려되어야 할 중요한 인자이다.

#### 참고문헌

1. M. Iwakuma, Y. Hase, T. Satou, A. Tamioka, M. Konno, Y. Iijima, T. Saitoh, Y. Yamada, T. Izumi, and Y. Shiohara, "Production and Test of a REBCO Superconducting Synchronous Motor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19** [3] 1648-51 (2009).
2. D. W. Hazelton, V. Selvamanickam, J. M. Duval, D. C. Larbalestier, W. D. Markiewicz, H. W. Weijers, and R. L. Holtz, "Recent Developments in 2G HTS Coil Technology," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19** [3] 2218-22 (2009).

3. J. Ekin, "Experimental Techniques for Low-temperature Measurements," Oxford University Press Inc., New York, 2006.
4. J. Yoo and D. Youm, "Tensile Stress Effects on Critical Current Densities of Coated Conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, **14** 109 (2001).
5. J. W. Ekin, D. K. Finnemore, Qiang Li, J. Tenbrink, and W. Carter, "Effect of Axial Strain on the Critical Current of Ag-sheathed Bi-based Superconductors in Magnetic Fields up to 25 T," *Appl. Phys. Lett.*, **61** 858-60 (1992).
6. B. ten Haken, H. H. J. ten Kate, and J. ten Brink, "Compressive and Tensile Axial Strain Reduced Critical Currents in Bi-2212 Conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **5** 1298 (1995).
7. M. Sugano, K. Osamura, W. Prusseit, R. Semerad, K. Itoh, and T. Kiyoshi, "Tensile Fracture Behaviour of RE-123 Coated Conductors Induced by Discontinuous Yielding in Hastelloy C-276 Substrate," *Supercond. Sci. Technol.*, **18** S344 (2005).
8. D. C. van der Laan, J. F. Douglas, C. C. Clickner, T. C. Stauffer, L. F. Goodrich, and H. J. N. van Eck, "Evidence that the Reversible Strain Effect on Critical Current Density and Flux Pinning in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> Tapes is Caused Entirely by the Pressure Dependence of Critical Temperature," *Supercond. Sci. Technol.*, **24** 032001 (2011).
9. D. C. van der Laan, T. J. Haugan, P. N. Barnes, D. Abraimov, F. Kametani, D.C. Larbalestier, and M. W. Rupich, "The Effect of Strain on Grains and Grain Boundaries in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7.8</sub>," *Supercond. Sci. Technol.*, **23** 014004 (2010).
10. K. Osamura, M. Sugano, S. Machiya, H. Adachi, M. Sato, S. Ochiai, and A. Otto, "Reversibility of Micro-yielding and Critical Current in a YBCO-coated Conductor Caused by Uniaxial Tensile Load," *Supercond. Sci. Technol.*, **20** S211-S216 (2007).
11. N. Cheggour, J. W. Ekin, Y.-Y. Xie, V. Selvamanickam, C. L. H. Thieme, and D. T. Verebelyi, "Enhancement of the Irreversible Axial-strain Limit of Y-Ba-Cu-O-coated Conductors with the Addition of a Cu Layer," *Appl. Phys. Lett.*, **87** [21] 212505 (2005).
12. H. S. Shin, K. H. Kim, J. R. C. Dizon, T. Y. Kim, R. K. Ko, and S. S. Oh, "The Strain Effect on the Critical Current in YBCO Coated Conductors with Different Stabilizing Layer," *Supercond. Sci. Technol.*, **18** S364-S368 (2005).
13. M. J. Dedicatoria and H. S. Shin, "Analysis on Stress/strain Tolerances of I<sub>c</sub> in Externally Laminated GdBCO Coated Conductor Tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, to be published (2013).
14. K. Osamura, S. Machiya, H. Suzuki, S. Ochiai, H. Ayai, K. Hayashi, and K. Sato, "Improvement of Reversible Strain Limit for Critical Current of DI-BSCCO Due to Lamination Technique," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19** 3026 (2009).
15. C. Park, D. P. Norton, J. D. Budai, D. K. Christen, D. Verebelyi, R. Feenstra, D. F. Lee, A. Goyal, D. M. Kroeger, and M. Paranthaman, "Bend Strain Tolerance of Critical Currents for YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> Films Deposited on Rolled-textured (001)Ni," *Appl. Phys. Lett.*, **73** 1904 (1998).
16. H. S. Shin, J. R. C. Dizon, R. Bonifacio, T. H. Kim, H. S. Ha, and S. S. Oh, "Bending Strain Effects on the Critical Current in Cu-stabilized IBAD/EDDC Processed SmBCO Coated Conductor Tape," *Physica C*, **468** 1702-705 (2008).
17. H. S. Shin, M. J. Dedicatoria, J. R. C. Dizon, H. S. Ha, and S. S. Oh, "Bending Strain Characteristics of Critical Current in REBCO CC Tapes in Different Modes," *Physica C*, **469** 1467-71 (2009).
18. M. Sugano, S. Machiya, H. Oguro, M. Sato, T. Koganezawa, T. Watanabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, T. Izumi, and T. Saitoh, "The Effect of the 2D Internal Strain State on the Critical Current in GdBCO Coated Conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, **25** 054014 (2012).
19. D. C. van der Laan, D. Abraimov, A. A. Polyanskii, D. C. Larbalestier, J. F. Douglas, R. Semerad, and M. Bauer, "Anisotropic In-plane Reversible Strain Effect in Y<sub>0.5</sub>Gd<sub>0.5</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7.8</sub> Coated Conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, **24** 115010 (2011).
20. D. C. Van der Laan and J. W. Ekin, "Large Intrinsic Effect of Axial Strain on the Critical Current of High-temperature Superconductors for Electric Power Applications," *Appl. Phys. Lett.*, **90** 052506 (2007).
21. H. S. Shin, M. J. Dedicatoria, H. S. Kim, N. J. Lee, and S. S. Oh, "Measurement System for Strain Effect on I<sub>c</sub> in Coated Conductor Tapes at 77 K under Magnetic Field Using a Pair of Permanent Magnets," *Physica C*, **471** 1058-61 (2011).
22. H. S. Shin and M. J. Dedicatoria, S. Awaji, and K. Watanabe, "Characteristic Strain Response of I<sub>c</sub> in



- SmBCO Coated Conductor Tapes under Magnetic Field at 77 K," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **22** 6600404 (2012).
24. Guverich A and Cooley L D, "Anisotropic Flux Pinning in a Network of Planar Defects," *Phys. Rev. B*, **50** 13563 (1994).
25. H. S. Shin and M. J. Dedicatoria, "Variation of the Strain Effect on the Critical Current Due to External Lamination in REBCO Coated Conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, **25** 054013 (2012).
26. H. W. Weijers, U. P. Trociewitz, W. D. Markiewicz, J. Jiang, D. Myers, E. E. Hellstrom, A. Xu, J. Jaroszynski, P. Noyes, Y. Viouchkov, and D. C. Larbalestier, "High Field Magnets with HTS Conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20** 576-82 (2010).
27. A. Otsuka and T. Kiyoshi, "High-field Magnet Design under Constant Hoop Stress," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **18** 1529 (2008).
28. T. Takematsu, R. Hu, T. Takato, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti et. al., "Degradation of the Performance of a YBCO-coated Conductor Double Pancake Coil Due to Epoxy Impregnation," *Physica C*, **470** 674-77 (2010).
29. H. Jeong, H. Park, S. Kim, M. Park, I-K Yu, S. Lee et. al., "Delamination Characteristics of Coated Conductor for Conduction Cooled HTS Coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **22** 7700804 (2012).
30. H. S. Shin et al., "Bending Strain Characteristics of the Transport Property in Lap-jointed Coated Conductor Tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19** [3] 2991 (2010).
31. H. S. Shin, M. J. Dedicatoria, and S. S. Oh, "Critical Current Degradation Behavior in Lap-jointed Coated Conductor Tapes with IBAD Substrate under Uniaxial Tension," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20** [3] 1447-50 (2010).
32. H. S. Shin and M. J. Dedicatoria, "Comparison of the Bending Strain Effect on Transport Property in Lap and Butt-jointed Coated Conductor Tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20** [3] 1541-44 (2010).

### 신형섭



- 1981년 경북대학교 기계공학과 학사
- 1991년 일본 토호쿠대학교 기계공학과 박사
- 1995년-현재 안동대학교 기계설계공학과 교수
- 2011년-현재 한국초전도저온공학회 편집위원장
- 2012년 대한기계학회 재료 및 파괴부문 회장

### 마를론 데디카토리아



- 2006년 필리핀 RMTU 기계공학과 학사
- 2010년 안동대학교 기계설계공학과 석사
- 2013년 안동대학교 기계설계공학과 박사
- 현재 필리핀 RMTU 기계공학과 강사