

축방향 피로하중에 의한 Bi-2223 복합 초전도선재의 전기-기계적 특성

신형섭¹, 존 안 디존², 김기현¹, 오상수², 하동우²
¹ 안동대학교, ² 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

Electro-mechanical properties in Bi-2223 superconducting composite tape due to axial fatigue loading

Hyung-Seop Shin¹, John Ryan C. Dizon², Ki-Hyun Kim¹, Sang Soo Oh² and Dong-Woo Ha²
¹ Andong National University, ² Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

For practical applications, the evaluation of reliability or endurance of HTS conductors is necessary. The mechanical properties and the critical current, I_c , of multifilamentary Bi-2223 superconducting tapes, externally reinforced with stainless steel foils, subjected to high cycle fatigue loading in the longitudinal direction were investigated at 77K. The S-N curves were obtained and its transport property was evaluated with the increase of repeated cycles at different stress amplitudes. The effect of the stress ratio, R, on the I_c degradation behavior under fatigue loading was also examined considering the practical application situation of HTS tapes. Microstructure observation was conducted in order to understand the I_c degradation mechanism in fatigued Bi-2223 tapes.

Key Words : Bi-2223, axial fatigue, stress ratio, electrical fatigue limit

1. 서 론

HTS선재는 코일, 모터, 전력 케이블, 마그넷과 같은 응용 분야에서 사용할 때 여러 가지 형태의 응력이나 변형률을 받게 된다. Ag 시스재인 BSCCO계 초전도 테이프에서 초전도 특성의 응력/변형률 효과와 임계전류의 허용 변형률은 초전도 장치 설계시 그 중요성으로 인해 이미 많은 연구가 보고되었다[1-4]. HTS선재에서 I_c 열화 메카니즘은 초전도 필라멘트에 균열형성에 기인한다고 잘 알려졌다. 일반적으로 BSCCO계 초전도 테이프에서 I_c 저하의 개시는 초전도 필라멘트에서 크랙의 개시로 인해 발생하고, 변형률증가에 따른 연속적인 크랙의 성장으로 인해 I_c 열화특성을 나타낸다. 다심 필라멘트의 도입, 스테인리스강 박판이나 합금 시스재의 채용으로 BSCCO계 초전도 테이프의 기계적 특성 및 임계전류 밀도와 임계 허용 변형률의 향상을 가져올 수 있었다[6,7].

초전도 선재를 사용한 장치의 사용 기간 동안 구성 요소는 주기적인 열 사이클링(thermal cycling), 코일 전류 변화로 인한 로렌츠력이나 모터 구동시 원심력의 교번으로 인해 반복하중을 받

게 된다. 따라서 고온초전도 테이프를 마그넷, 전력 이송 케이블, 모터와 같은 실용적인 초전도 장치에 적용하기 위해서는 전기-기계적인 신뢰성 평가가 필요하다. 비록 Bi-2223테이프의 기계적 특성 평가는 앞서 많이 보고되어 왔으나, 피로하중하에서 초전도 테이프의 전기-기계적 특성에 대한 정보나 데이터는 부족한 실정이다[8-11]. 따라서 BSCCO계 초전도 테이프의 피로거동은 초전도 장치의 설계, 특히 신뢰성 평가에서 매우 중요하다.

본 연구에서, 고 사이클의 피로하중을 받는 스테인리스강 박판으로 외부 보강한 다심 Bi-2223 초전도 테이프의 임계전류에 대한 기계적 특성을 77K에서 평가하였다. 특히 피로하중하에서 Bi-2223테이프의 전기적 특성에 대한 응력비의 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 스테인리스강 박판으로 테이프의 양면을 적층 보강한 시판의 다심 Bi-2223선재(laminated wire; AMSC사)를 공시재로 사용하였다. 테이프는 PIT법으로 제조되었고, 양면에 납땀을

로 스테인리스강 박판으로 보강되었다.

먼저, Bi-2223테이프의 단순 인장과 고 사이클 피로시험은 유압 만능재료시험기(Instron 8516, Load cell capacity : 5kN)를 사용하였다. 시험편의 전체 길이와 시료 홀더간의 게이지부 길이(gage length)는 각각 80mm와 40mm이다. 시험편의 양단을 Fig. 1에 나타난 것과 같이 상부와 하부 홀더에 고정하였다. 상부 홀더는 로드셀에 부착하였고, 하부 홀더는 시험장비의 액츄에이터에 연결된 하중 프레임의 고정부에 부착하였다. 77K에서 실험시, 시험편을 포함한 홀더는 약 10분에 걸쳐서 77K까지 서서히 냉각하였다. 냉각에 의해 발생한 시험편의 열수축은 하부 시료 홀더와 고정부 간에 유격을 두어 해소하였다.

Bi-2223테이프의 단순 인장시험은 램 속도(ram rate) 1mm/min으로 수행하였다. 피로시험시 최대 응력 레벨은 항복응력 기준으로 $0.65 \sim 0.98\sigma_y$ 의 범위로 하였다. 피로 실험은 상온과 77K에서 일정 응력 진폭으로 하였다. 응력비, R의 영향을 조사하였다. 본 연구에서 적용한 응력비는 0.1과 0.5이다. 주파수는 10Hz이지만 1~100사이클까지는 1Hz로 하였다. 피로시험시 I_c 를 측정하기 위해서 시료와 홀더 사이에 전기적 절연을 위해 GFRP판을 삽입하였다.

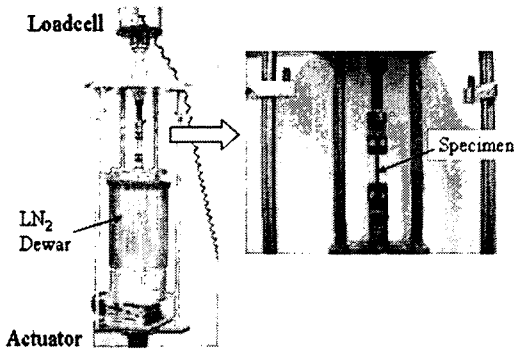


Fig. 1. Photos of apparatus and fixtures for tensile and fatigue tests of HTS tapes at RT and 77K.

I-V선도는 4단자법을 사용하여 77K에서 1 μ V/cm 전기장 기준으로 측정하였다. 전압단자는 시료의 중앙부 20mm에 걸쳐서 부착하였다. 피로시험시 I_c 는 10, 100, 1,000, 10,000등 반복 사이클 수에서 멈추어, 평균응력값에서 측정하였고, 하중을 부가하지 않은 I_{c0} 로 무차원화하였다. I-V선도로부터 $V=cI^n$ 관계식을 사용하여 n-값을 0.2~0.5 μ V

/cm영역에서 얻어진 데이터 값을 $\log V - \log I$ 함수로 변환시킨 후, 이 사이의 직선구간을 선형 피팅으로 구하였다. 반복 사이클수에 대하여 구한 n-값의 거동은 피로하중하에서 Bi-2223테이프에서 발생한 손상의 거동을 간접적으로 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 스테인리스강으로 외부 보강된 다심 필라멘트 Bi-2223테이프의 상온과 77K에서 인장시험 결과 얻어진 응력-변형률선도를 나타내고 있다. 이 선도로부터 영률, 항복강도(0.2% offset)를 구할 수 있다. 77K에서 외부 보강된 Bi-2223테이프는 현저한 강화를 나타내, 항복강도가 상온에서 360MPa인 것이 77K에서 460MPa로 증가하였다.

단순 인장시험을 통해 얻은 외부 보강된 Bi-2223테이프의 임계전류 열화거동을 살펴보면, 임계비가역변형률 $\epsilon_{irr}=0.48\%$ 와 임계비가역응력 $\sigma_{irr}=340$ MPa를 나타내었다.

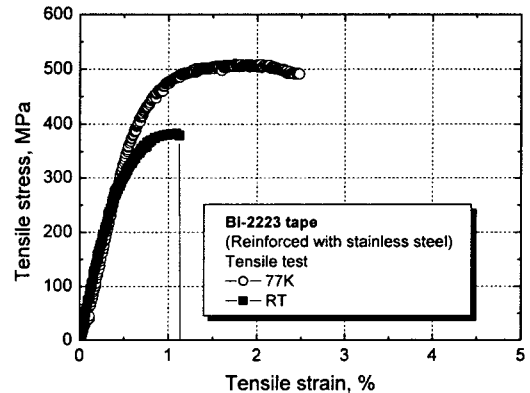


Fig. 2. Tensile stress-strain curves of stainless steel reinforced Bi-2223 tapes at RT and 77K.

외부 보강된 Bi-2223테이프의 S-N선도를 얻기 위해, 상온과 77K에서 R=0.1로 일정 응력 진폭에서 피로시험을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 시험편의 피로수명 $4 \times 10^4 \sim 10^6$ cycles 범위에서 일부 분산을 나타내지만, 구조용 재료의 경우와 유사한 비교적 양호한 S-N선도를 두 온도에서 얻을 수 있었다. 거의 모든 시험편은 홀더와의 접촉부나 접촉부 근처에서 파단되었다. 이것은 피로시험 중 시험편과 홀더와의 접촉 손상으로 시험편 파단이 일어났다고 생각된다.

77K에서 항복강도 $0.65\sigma_y$ 에 상당하는 300MPa에서 시험편은 10^6 cycles까지 파단되지 않았다. 따라

서 10^6 cycles로 정의한 외부 보강된 Bi-2223 테이프의 기계적 피로한도(mechanical fatigue limit)는 77K에서 약 320MPa, 상온에서 약 220MPa로 높다. 반면에 R=0.5의 경우, $0.98\sigma_y$ 의 높은 응력레벨에도 불구하고 10^6 사이클까지 파단되지 않았다. 따라서 의미있는 S-N 선도는 R=0.1의 경우와 동일한 최대 응력 범위에서 얻을 수 없었다.

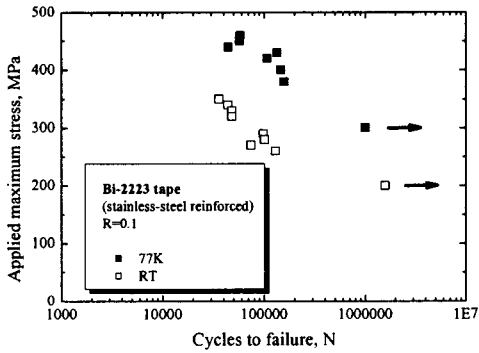
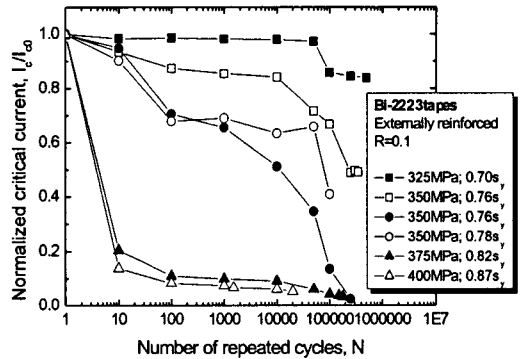


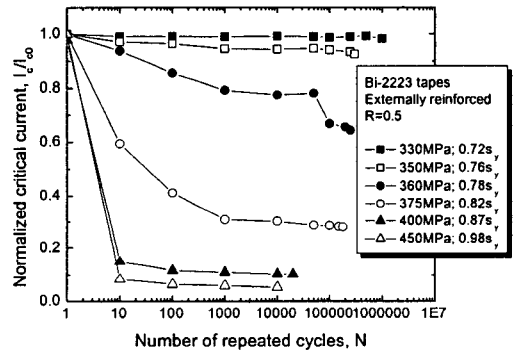
Fig. 3. S-N curves of externally reinforced Bi-2223 tapes obtained at R=0.1

Fig. 4(a), (b)는 외부 보강된 Bi-2223 테이프에서의 각 최대 응력레벨에서 반복 사이클 수의 함수로 I_c 저하 거동을 나타낸 것이다. (a)는 R=0.1 (b)는 R=0.5에 대한 결과이다. 먼저 R=0.1의 경우, 77K에서 외부 보강된 Bi-2223 테이프의 피로시험시 가한 최대 응력레벨은 $0.98\sigma_y$ 이고, 계속해서 3~10%씩 감소시키면서 피로시험을 실시하였다.

피로 시험은 I_c 가 급격히 감소하였거나, Bi-2223 테이프의 전기적 피로한도를 즉, 95% I_c 를 유지하는 경우는 10^6 사이클에서 종료하였다. 최대 응력레벨이 $0.8\sigma_y$ 이상의 피로시험에서는 10cycles에서조차 20%까지의 I_c 의 현저한 저하를 나타내었다. $0.78\sigma_y$ 이하의 응력레벨에서 I_c 는 반복수의 증가에 따라 서서히 감소하였다. $0.75\sim 0.78\sigma_y$ 의 범위에서는 작용한 응력의 작은 변화에도 $10^3\sim 10^5$ cycles 범위에서 I_c 저하 거동의 큰 변화를 나타내었다. 그러나 작용한 최대 응력이 $0.70\sigma_y$ 까지 감소하면, I_c 는 10^5 cycle까지 I_c 저하 없이 거의 일정한 값을 유지하였으나, 이후 반복수가 더욱 증가함에 따라 서서히 감소하기 시작했다. 최대 응력레벨이 $0.65\sigma_y$ 와 같거나 그 이하일 경우 10^6 cycles까지 I_c 저하는 일어나지 않았다. 즉, I_c 저하는 5%이하로, 이 응력은 전기적 피로한도(electrical fatigue limit)에 대응한다.



(a) at R=0.1



(b) at R=0.5

Fig. 4. I_c/I_{c0} - N relationship of externally reinforced Bi-2223 tapes

외부 보강된 Bi-2223 테이프는 반복수 수의 증가에 따라 유사한 I_c 저하 거동을 나타냈으나, 이 경우 전기적 피로한도는 R=0.1의 경우와 비교해 약 25MPa 증가하였다. 이것은 Bi-2223 테이프가 테이프의 길이 방향을 따라 인장-인장 피로 하중을 받을 경우, R=0.1에서 고 사이클 피로 시험을 통해 평가된 전기-기계적 피로한도가 외부 보강된 Bi-2223 테이프의 I_c 저하 거동에 R의 영향을 고려하여야 할 경우, 보수적 설계 데이터를 제공한다는 것을 나타낸다. 따라서 설계 목적으로 사용할 경우, 외부 보강된 Bi-2223 테이프에 작용할 수 있는 최대 인장 응력은 전기적으로도 허용할 수 있는 응력이어야 한다. 따라서 전기적 피로한도는 10^6 cycles, 95% I_c 유지에 대해, R=0.1에서 320MPa, R=0.5에서 350MPa로 각각 제한된다.

n-값은 Fig. 4에서 나타난 최대 응력레벨에서 측정된 I-V 선도로부터 유도되었다. Fig. 5은 R=0.1

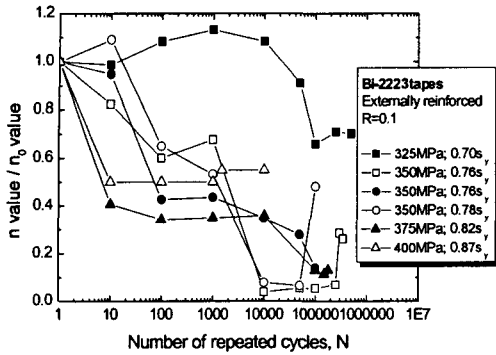


Fig.5 Normalized n-value - N relationship in Bi-2223 tapes at R=0.1.

에서 반복수의 함수로써 무차원화한 n-값을 나타낸다. 제하상태에서 측정한 n_0 -값은 시험편에 따라서 7과 25사이를 나타냈다. 반복수의 증가에 따라, 무차원화한 n-값은 Fig. 4(a)에서 나타난 I_c 저하 거동과 매우 잘 대응하였고, 작용한 응력레벨에 따라서 다르게 거동하였다. 이는 피로하중하에서 초전도 필라멘트의 손상 거동을 간접적으로 설명한다. $0.75 \sim 0.78\sigma_y$ 의 최대 응력 범위에서, n-값은 반복 사이클의 증가와 더불어 점차적으로 감소되었다. 이러한 경우, 초전도 필라멘트에 발생하는 크랙은 피로수명의 초기 단계에 황방향으로 개시되었고, 반복 사이클의 증가와 더불어 인접한 필라멘트 쪽으로 진전되었으며, 초전도 필라멘트 사이에서 생성된 갈라짐(delamination)에 의해 단면의 배불림(ballooning)이 발생한다. 이런 손상 진전은 반복된 사이클 증가로 인한 n-값의 뚜렷한 감소로 인해 Ag시스(theath)의 전류 분포에 의한 전압의 점진적인 증가에 기인한다. 피로하중하에서 이런 n-값 거동은 크랙의 진전이 응력집중과 n-값의 급격한 저하로 인해 테이프의 특정부분에서 발생하는 단순 인장 시험에 의한 Bi-2223테이프의 거동과 명확하게 구분된다.

4. 결론

1) 고 사이클 피로시험을 통해 외부 보강된 다심 Bi-2223테이프의 전기적 피로한도는 $R=0.1$ 의 경우 320MPa이고, $R=0.5$ 일 때, 350MPa이었다.

2) Bi-2223테이프는 피로하중하에서 I_c 저하 거동에 대한 응력비의 영향을 나타내, 응력비가 $R=0.1$ 에 대한 경우와 비교해 $R=0.5$ 일 경우 전기-기계적 피로한도가 증가하였다

3) 피로하중하에서 Bi-2223테이프의 n-값 거동은 반복 사이클의 증가에 따라 작용한 최대 응력에 의한 I_c/I_{c0} 의 거동과 유사하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌 (일부생략)

- [1] K. Osamura, M. Sugano, T. Wada, and S. Ochiai, "Mechanical properties of Ag/Bi2223 composite superconductors," *Adv. Cryo. Eng.*, vol. 46, pp. 639-645, 2000.
- [2] P. Skov-Harsen, Z. Han, and J. I. Bech, "Stresses and strains in multi-filament HTStapes," *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 9, 2617-2620, 1999. [3] B. ten Haken, H. H. ten Kate, and J. Tenbrink, "Compressive and tensile axial strain reduced critical currents in Bi-2212 conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 5, pp. 1298-1301, 1995.
- [4] H. S. Shin, and K. Katagiri, "Critical current degradation behaviour in Bi-2223 superconducting tapes under bending and torsion strains," *Supercond. Sci Tech.*, vol. 16, pp. 1012-1018, 2003.
- [5] J. W. Ekin, D. K. Finnemore, Q. 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 25T", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, pp. 858-860, 1992.
- [6] C. G. King, D. A. Grey, A. Mantone, K. G. Herd, and E. T. Laskaris, "Mechanical stabilization of BSSCO-2223 superconducting tapes," *IEEE Trans Appl. Supercond.* vol. 7, pp. 2046-2050, 1997.
- [7] H. S. Shin and K. Katagiri, "Influence of external reinforcement on stress /strain characteristics of critical current in Ag/BSSCO superconducting tapes," *Proc. Int. Workshop Mechano-Electromagnetic Property of Composite Superconductor*, Kobe, 2001, pp. 31-34.