

YBCO Coated Conductor를 위한 Cube texture Ni-W 합금 기판의 제작 및 특성평가

김규태¹, 임준형¹, 장석현¹, 김정호¹, 주진호¹, 김호진¹
지봉기², 전병혁², 김찬중², 하홍수³, 송규정³, 박 찬³, 신형섭⁴

성균관대학교 신소재공학과¹, 한국원자력연구소 원자력재료 기술개발팀²
한국전기연구원 초전도응용연구그룹³, 안동대학교 기계공학과⁴

Development of cube textured Ni-W alloy substrates for YBCO coated conductor

K. T. Kim¹, J. H. Lim¹, S. H. Jang¹, J. H. Kim¹, J. Joo¹, H. J. Kim¹,
B. K. Ji², B-H. Jun², C-J. Kim², H. S. Ha³, K. J. Song³, C. Park³, H. S. Sin⁴
The School of Metallurgical and Materials Eng., SungKyunKwan University¹
Nuclear Material Development Team, Korea Atomic Energy Research Institute²
Applied Superconductivity Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute³
The School of Mechanical Eng., Andong National University⁴

jinho@skku.ac.kr

Abstract - We fabricated Ni and Ni-W alloys for use as a substrate in YBCO coated conductor applications and evaluated the effect of W in Ni on texture, microstructure and surface morphology, and hardness of substrate. Pure Ni, Ni-2 at.%W, and Ni-5at.%W alloy substrates were prepared by plasma arc melting, cold rolling, and the recrystallization heat treatment at various temperature (700- 1300°C). It was observed that Ni-W alloy substrates had stronger cube texture and maintained it at higher annealing temperature, compared to pure Ni substrate: The full-width at half- maximums of in-plane texture was 13.40° for Ni substrate and 4.42°-5.57° for Ni-W substrate annealed at 1000°C. In addition, it was observed that the Ni-W substrate had smaller grain size, shallower boundary depth, and higher hardness, compared to those of pure Ni substrate,

1. 서 론

YBCO 박막선재는 높은 임계전류밀도를 가지고 큰 자장 하에서도 임계전류밀도의 감소가 크지 않은 장점을 가지고 있어 많은 연구가 이루어지고 있다[1]. 박막선재의 기판 제조방법에 대한 연구 또한 활발하게 이루어지고 있는데 이들 중 RABiTS 법은 장선으로의 제조가 용이하고 높은 재현성을 얻을 수 있는 가장 경제적인 기판 제조 방법들 중 하나이다. 최근 RABiTS 법으로 만든

760 m 길이의 Ni 합금 기판으로 제조한 박막선재의 임계전류밀도가 77K에서 최대 0.6×10^5 A/cm²를 가지는 연구가 보고되었다[2].

FCC 계열의 금속인 Ni은 가공성이 우수하고 압연과 재결정을 통해 cube 집합조직을 형성하여 박막선재용 기판재료로 널리 이용되고 있다. 그러나 재결정 열처리 후 낮은 강도와 심한 grooving 현상때문에 Ni-W, Ni-Cr, Ni-Mo, Ni-Cu 등의 합금 기판제조에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[2-3]. 이들 중 Ni-W 합금 기판으로 제조된 박막선재는 가장 높은 임계전류밀도 값을 가지며 고온에서의 열적 안정성 또한 우수한 것으로 보고되고 있다[4]. 그러나 W 함량에 따른 Ni의 미세조직과 재결정 집합조직, 열적 기계적 특성에 대한 체계적인 연구가 진행되지 못하였다.

본 연구에서는 PAM(plasma arc melting) 법으로 제조한 초기시편을 냉간압연과 재결정 열처리하여 pure Ni과 Ni 합금 기판을 제조하였으며, W의 함량에 따른 Ni 기판의 집합조직과 기계적특성 및 표면특성을 미세조직의 변화를 통해 평가하였다.

2. 실험 방법

Pure Ni, Ni-2, 5at.%W 합금 주조체를 1×10^{-3} torr의 감압분위기에서 Plasma Arc Melting법으로 제조하였다. 균일한 변형이 되도록 1축 인장력을 가한 상태에서 98.75%의 가공율로 압연한 테이프의 최종 두께와 폭은 각각 100 μ m와 20 mm였다. 압연된 테이프는 700~1300°C 범

위로 0.5 torr Ar-4% H_2 분위기에서 유지시간 30분으로 재결정 열처리하였다.

기판의 집합조직은 X-선 회절기(BRUKER-AXS, D8 DISCOVER)를 이용하여 극점으로 분석하였다. X-선 회절에는 파장이 1.5406 Å인 Cu- α 1선을 사용하였으며, ω 는 0~70°, ϕ 는 0~360°범위에서 5° 간격으로 측정하였다. 미세조직은 광학현미경으로 관찰하였으며 표면조도는 atomic force microscopy(APEM-1000)을 이용하여 분석하였다. 표면조도와 thermal grooving은 grain boundary의 triple junction을 포함하는 100×100 μm^2 범위에 대해 평가하였다. 기계적 강도는 경도측정기(MVK-H2)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 토의

그림 1에 압연된 기판과 열처리 된 기판에 대한 (111) pole-figure를 나타내었다. 압연된 기판의 집합조직은 Ni과 Ni 합금이 서로 상이하게 나타났다. Pure Ni 기판은 대부분의 전형적인 brass deformation texture와 함께 약간의 다른 texture component가 존재하였다. 이와는 반대로 Ni 합금 기판은 대칭성이 우수한 brass deformation texture를 나타내었다. 이러한 집합조직은 가공된 fcc 금속에서 전형적으로 관찰되며 열처리 후 cube 집합조직으로 잘 변화될 수 있는 것으로 알려져 있다. Ni-W 기판이 Ni 기판에 비해 더 강하고 우수한 대칭성의 texture를 가지는 것은 W의 첨가로 인해 적층결합에너지를 감소시키는 현상과 연관이 있는 것으로 추측된다.

그림 1(d)~(i)는 800°C와 1000°C에서 열처리된 기판의 (111) pole-figure이다. Pure Ni 기판은 800°C에서 cube 집합조직을 형성하였으며 반가폭은 13.4°로 측정되었다. Ni 기판의 cube 집합조직은 700~900°C 범위에서 안정하게 유지되었으나, 1000°C에서는 {221} <221> twin component가 형성되었고, 온도가 증가할수록 더 강하게 발달하였다. Ni-W 기판의 경우는 800°C에서 Ni-2%W과 Ni-5%W의 in-plane 반가폭이 각각 5.57°, 4.42°로 Ni 기판보다 상대적으로 집합도가 우수한 것으로 평가되었다. Ni-2%W 기판의 경우는 1300°C까지, Ni-5%W의 경우는 1200°C까지 pure Ni 보다 상대적으로 더 높은 온도까지 cube 집합조직이 유지되었다. 이는 W의 첨가가 cube 집합조직의 형성을 향상시키고 집합조직의 열적 안전성을 높이기 때문으로 생각된다. 1300°C에서 열처리 한 Ni-5%W 기판에서 관찰된 twin component(그림 1(i))는 미세조직과 함께 설명할 것이다.

그림 2는 열처리된 Ni과 Ni 합금 기판의 미세조직 사진이다. 1000°C에서 열처리된 Pure Ni, Ni-2%W, Ni-5%W 기판의 결정립 크기는 각각

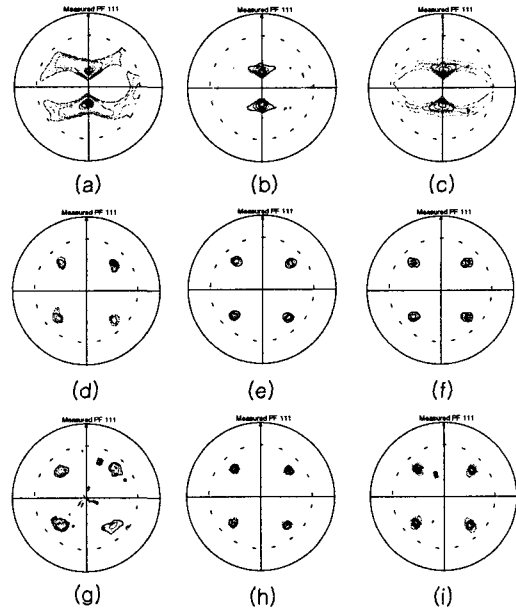


Fig. 1. (111) pole-figures of (a)~(c) rolled and (d)~(i) annealed tape; (a) Ni, (b) Ni-2at.%W, (c) Ni-5at.%W, (d) Ni(800°C), (e) Ni-2at.%W(800°C), (f) Ni-5at.%W(800°C), (g) Ni(1000°C), (h) Ni-2at.%W(1300°C), (i) Ni-5at.%W(1300°C)

94.98 μm , 32.15 μm , 20.24 μm 로 측정되었다. W 원자는 Ni 기지 금속의 결정립계에 우선적으로 편석되어 결정립계를 강화시키며, 결정립의 성장을 억제시키므로 W 함량의 증가에 따라, 결정립의 크기가 감소한 것으로 생각된다. 그러나,

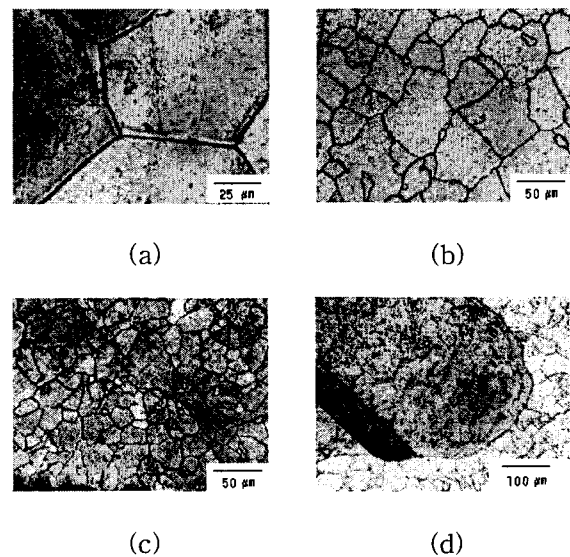


Fig. 2. Optical micrographs of (a) pure Ni, (b) Ni-2at.%W, (c) Ni-5at.%W annealed at 1000°C and (d) Ni-5at.%W at 1300°C

그림 2(d)에서와 같이 1300°C의 Ni-5%W 기판에서는 abnormal grain growth가 관찰되었다. FCC 금속의 경우 {221}⟨221⟩ twin 집합조직은 abnormal grain growth와 twin의 형성으로 나타나지만 Ni-5%W 기판의 경우 다수의 twin이 관찰되지는 않았기 때문에 그림 1(i)의 twin texture component는 abnormal grain growth에 의한 것으로 판단된다.

그림 3은 1200°C Pure Ni과 Ni-5%W 기판의 AFM image이다. 측정영역 전체의 RMS 값은 Ni-2%W 기판이 23.6 nm로 pure Ni(70.5 nm)보다 우수하였다. 결정립계의 깊이는 Ni-2%W 기판이 68.0 nm로 pure Ni(240.7 nm) 기판에 비해 3.5배 작은 것으로 측정되었다. 이는 서술한바와 같이 결정립계에 편석된 W 원자가 결정립계를 강화시키며, 이로 인해 thermal grooving이 크게 억제되기 때문인 것으로 사료된다.

기계적 특성을 평가하기 위해 Ni과 Ni 합금 기판의 경도를 측정하였다(그림 4). Pure Ni 기판은 800~1200°C까지 73.4에서 67.2로 온도가 증가함에 따라 경도값이 감소하였다. 같은 온도 범위에서 Ni-2%W는 108.9~104.3, Ni-5%W는 166.8~155.5로 W 함량에 따라 크게 증가하였다. 이러한 경도값의 증가는 고용강화 또는 미세조직에서 나타난 결정립 미세화 강화에 의한 것으로 생각된다.

4. 결 론

YBCO coated conductor 제작을 위한 Ni과 Ni-W 합금기판을 제조하였다. Pure Ni 기판의 cube texture는 700~900°C 범위에서 안정하였고 온도가 증가함에 따라 집합도가 감소하였다. 반대로 Ni-W 합금 기판은 강한 cube texture를 1200°C까지 유지하였으며, 이는 W이 cube texture의 형성과 고온에서의 안정성을 향상시키기 때문인 것으로 생각된다. 또한 Ni-W 합금 기판은 pure Ni 기판에 비해 결정립의 크기가 더 작고 결정립계의 depth가 더 작았으며, 더 큰 경도값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 Ni 내에 존재하는 W의 존재가 결정립계를 강화시키고, 결정립 성장을 억제하며 기판의 열적 안정성을 높이기 때문인 것으로 사료된다.

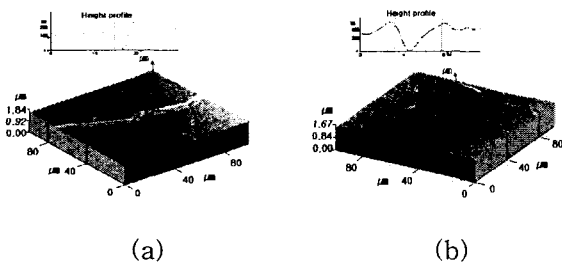


Fig. 3. AFM profiles of pure (a) Ni and (b) Ni-5at.%W annealed at 1200°C.

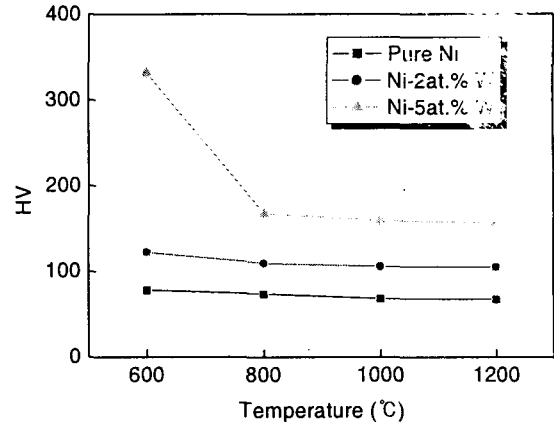


Fig. 4 Hardness versus temperature curves for Ni substrates.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. Goyal, D. P. Norton, J. D. Budai, M. Paranthaman, E. D. Specht, D. M. Kroeger, D. K. Christen, Q. He, B. Saffian, F. A. List, D. F. Lee, P. M. Martin, C. E. Klabunde, E. Hartfield, and V. K. Sikka, "High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of $YBa_2Cu_3O_x$ thick films on biaxially textured metals", *Applied Physics Letters*, 69, 1795, 1996.
- [2] R. I. Tomov, A. Kursumovic, M. Matoros, D-J Kang, B. A. Glowacki, and J. E. Evetts, "Pulsed laser deposition of epitaxial $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ /oxide multilayers onto textured NiFe₂ substrates for coated conductor applications", *Supercon. Sci. Technol.*, 15, 598, 2002.
- [3] B. De Boer, J. Eickemeyer, N. Reger, L. Fernandez G.-R., J. Richter, B. Holzapfel, L. Schultz, W. Prusseit and P. Berberich, "Cube textured nickel alloy tapes as substrates for $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ -coated conductors", *Acta materialia*, 49, 1421, 2001.
- [4] J. Eickemeyer, D. Selbmann, R. Opitx, B. De Boer, B. Holzapfel, L. Schultz and U. Miller, "Nickel-refractory metal substrate tapes with high cube texture stability", *Supercond. Sci. Technol.*, 14, 152, 2001.