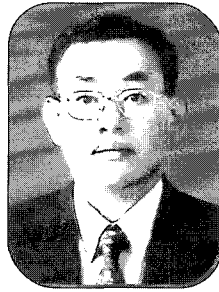


차세대 초전도 선재 연구개발 동향



이상헌
선문대
전자정보통신공학부 교수

1. 서론

초전도 재료는 선재의 형태로 가공하면 송전선이나, 변압기, 발전기 및 전력 저장장치와 같이 전력 응용의 효율을 극대화시킬 수 있는 재료로서 널리 활용되고 있다. 1987년 개발된 고온 산화물 초전도체는 액체 질소의 비등점인 77 K 이상에서 초전도 현상을 나타내어 초전도 현상의 응용에 대한 기대를 고조시켜 이에 대한 연구 개발을 더욱 향상시키고 있다. 초전도 선재에 관한 연구는 주로 PIT(Powder in Tube)공정을 이용한 Ag/Bi 2223 선재가 우수한 전기적 특성과 가공의 우수성으로 인하여 개발되어 왔다. 그러나 Ag/Bi 2223 선재는 강한 자기장 하에서 통전 특성이 현저하게 저하 되는 결점이 있다. 이에 비하여 Y를 비롯한 $REBa_2Cu_3O_x$ (RE 123, RE는 Y, Sm, Nd 등의 희토류 원소)계 초전도체는 77 K 부근에서의 높은 전기적 특성과 높은 자기장 하에서도 통전 능력의 저하가 적어 RE계가 실용화되어 액체 질소 온도에서 동작이 가능한 선재가 개발된다면 경제성이 예상되는 초전도 기기로의 응용이 대폭적으로 확대 될 충분한 가능성이 있다. 최근 일본의 Fujikura와 미국의 Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 등의 국립 연구기관에서 차세대 초전도 선재에 관한 괄목 할만 한 연구 결과가 잇달아 발표 되었다.

일본의 Fujikura 전선에서는 Ni 금속 기판에 물리적 증착 방법으로 YBaCuO 박막 선재를 개발 하였고, 미국의 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)에서 Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate (RABiTS)라는 집합조직을 형성 시킨 금속 기판이 개발되어 연속적인 가공의 가능성이 확인되었다.

이 RE123계 선재는 초전도상의 결정방위가 3차원으로 정렬된 단결정상을 이루고 있다. 기본적인 구조는 금속 등의 모재위에 결정 배향성 및 모재로부터의 반응을 억제하는 Blocking Barrier로서의 기능을 갖춘 중간 Buffer층을 경유하여 RE123을 적층한 박막 테이프 구조를 이루고 있다. 현재, 전류 유송기능을 향상시키기 위하여 필수적인 초전도층의 결정 배향성을 제어할 수 있는 금속모재 기판 자체를 배향시키는 원천 기술이 개발 되었고, 고강도의 금속 기판위에 배향성 있는 중간Buffer층을 합성할 수 있는 주목할 만한 기술이 개발 되었다. 특히 차세대 선재로서 상용화의 단계로 이행되기 위해서는 박막 선재의 제조 속도의 향상과 초전도 특성의 균일성을 확보하는 기술은 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 또한 선재 총면적에 관한 전류 밀도 Je값의 향상도 앞으로 상용화를 추진하기 위하여 극복하여야 할 중요한 과제이다. 그림 1에 현재까지 발표된 차세대 선재의 구조를 모식적으로 나타낸다.

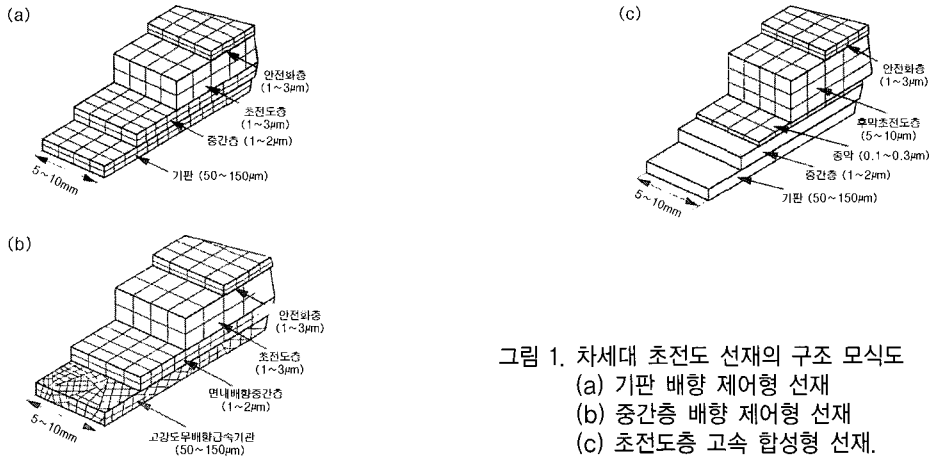
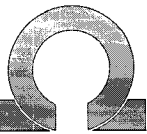


그림 1. 차세대 초전도 선재의 구조 모식도
 (a) 기판 배향 제어형 선재
 (b) 중간층 배향 제어형 선재
 (c) 초전도층 고속 합성형 선재.

2. 차세대 선재의 연구 개발

기판 배향성 제어형 선재(그림 1(a))는 모재가 되는 금속기판의 결정을 일 방향으로 정렬함으로써 그 위에 적층 하는 초전도층을 3차원으로 배향 시키는 구조를 갖는다. 이 구조는 서론에서도 언급한 RABiTS법에 의한 기술이며, 초전도층과 반응성이 적은 Ag계, Ni 또는 Ni-Cr alloy를 적용하여 개발이 진행 되고 있

다. 금속 기판을 배향시키기 위하여 압연과 열처리를 적용한 입방체 집합조직 제법이 주로 활용 되고 있다.

중간층 배향 제어형 선재(그림 1(b))는 무배향성 고강도 금속 기판위에 중간층을 3차원적으로 배향 시켜 그 위에 초전도층의 결정성을 제어 하는 선재를 일컫는다. 중간층을 배향 시키는 기술로는 IBAD (Ion Beam Assisted Deposition)법과 ISD (Inclined Substrate Deposition)법을 거론 할 수 있다. 이 기술은

표 1. 차세대 초전도 선재의 개발 과제.

	기판재료	중간층	초전도층	Key Process	목표
기판 배향 제어형 선재	Ni, Ag, Ni-Cr, Ni-V, Ni기 합금 등	사용하지 않음 NiO MgO BaZrO ₃ YSZ CeO ₂ 등	Y-123 Sm-123 Nd-123 등	압연/열처리 표면연마 표면자기산화 중간층합성 Sc층의 성막 Jc 평가	길이 10~100m 급 기판두께 ≤100μm 제작속도 10 m/h Jc ≥10 ⁵ ~10 ⁶ A/cm ² (77K)
중간층 배향 제어형 선재	다결정 Hastelloy Ni기 합금 등	YSZ CeO ₂ MgO 등	Y-123 Sm-123 Nd-123 등	기판연마 IBAD법 Sc층 성막 Jc 평가	길이 100~1000m 급 기판두께 ≤100μm 제작속도 1m/h Jc ≥10 ⁴ ~10 ⁵ A/cm ²
초전도층 고속 합성형 선재	Ni Ag Ni기 합금 등	사용하지 않음 MgO YSZ NiO BaZrO ₃ 등	Y-123 Yb-123 Sm-123 Nd-123 등	기판연마 중간층 합성 평균균질종막 MOD법 LPE법 e-beam법 Jc 평가	길이 1~10m 급 기판두께 ≤100μm 초전도층두께 ≥ 5μm Jc ≥10 ⁵ ~10 ⁶ A/cm ² (77K)

선형 개발 선재 기술로서 대형 설비와 연구개발 프로그램 등이 집중적으로 투입되고 있다. 초전도층의 성막으로는 일반적으로 laser 증착이 주로 활용되고 있는 관계로 인하여 성막 속도가 매우 느리고 후막 화에 따른 초전도 막의 두께가 현저하게 감소하므로 기판 두께에 따른 전류밀도 J_c 가 저하 되는 단점이 있다. 이러한 결점을 극복하기 위해서는 기판의 두께를 얇게 하며 동시에 우수한 초전도 특성을 갖는 두터운 초전도층을 고속으로 합성하여야 한다. 초전도층 고속 합성 선재 (그림 1(c))는 고상법과 액상법을 중심으로 초전도층을 고속으로 합성하기 위한 제조 기술에 바탕을 둔 선재 제조 프로세스를 말한다. 고상법으로서는 유기산염 열분해법등의 도포법과 전자 빔 증착법이 있다. 이 방법들은 비정질상태의 활성 전구체막을 면내 배향 기판위에 선택적으로 성막하며, 열처리를 통하여 전구체의 결정을 배향 시킨 초전도층 제조 기술이다. 최근 미국에서는 불소가 첨가된 전구체 막으로부터 초전도층을 합성하기 위한 기술이 주목되고 있다. 한편 액상법으로는 액상 에피택살(LPE : Liquid Phase Epitaxy)법이 주로 거론되고 있다. LPE법은 열평형 상태에 가까운 상태이며, Ba-Cu-O 용액으로부터 결정을 형성 하는 방법을 일컫으며, 기상법과 비교하여 성막온도가 높은 단점이 있으나, 고속화, 후막 화에 있어서 매우 유용한 기술이다.

3. 차세대 선재의 연구 성과

현재, Ni배향기판의 자기 표면 산화층을 중간층으로 하여 그 위에 초전도층을 적층하는 기술과 Ag 기판 및 Hastelloy 등의 고강도 기판을 이용하여 LPE법으로 초전도층을 성막 하는 기술이 개발 되고 있다. Ni 배향기판의 표면위에 NiO 자기표면 산화 막을 균일하게 제작하여 중간층을 설치하여 적층하는 기술을 일반적으로 SOE(Surface Oxide Epitaxy)법이라고 한다. 이 기술은 RABiTS법에 의하여 Ni 산화 막의 생성을 억제 하면서 중간층을 성막 하는 공정에 적용되고 있다. NiO위에 Laser증착법으로 초전도층을 적층한 테이프에서 10^8 A/cm²를 넘는 J_c 를 얻을 수 있다. Ag기판은 Y 123와의 반응성이 적은 관계로 그 위에 직접 초전도층을 coating하는 프로세스가 가능하다.

그러나 용점이 낮아지므로 900 °C부근에서의 LPE법을 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. BaF의 첨가와 Ba-Cu-O용액 중에 Ag를 포화시키는 공정을 선택함으로써 프로세스의 저온화가 달성되며, Ag기판위에 LPE법으로 YBaCuO 박막화가 완성 되었다. 한편 고강도의 Hastelloy 기판 위에 YBaCuO 박막 선재를 Coating 하는 프로세스도 시도 되고 있다. Hastelloy

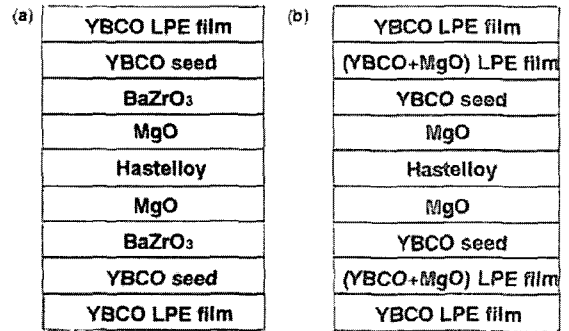


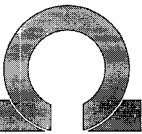
그림 2. LPE법에 적용하는 중간층 구조

- (a) 2종 중간층에 의해 반응을 억제하여 Y123막을 형성
- (b) M해를 포화시킨 용액으로부터 Y123 phase를 형성한 후, Ba-Cu-O 용액으로부터 Y-123막을 형성.

는 Ba-Cu-O 용액과의 반응성이 현저하므로 중간 buffer층을 도입하여 반응성을 차단할 필요가 있다. 그림 2에 현재까지 발표된 유효한 중간 buffer층의 구조를 나타낸다.

이들 구조는 MgO가 Ba-Cu-O용액에 대하여 불활성인 특성에 주목하여 도출된 구조로서, 프로세스 전체의 고속화를 기대할 수 있으며, 이 결과로 LPE법에 의한 장선재 연구가 급속히 시도 되고 있다.

차세대 초전도 선재의 개발에 관한 연구는 본격적으로 추진되고 있으며, 상용화에 가능한 장선재를 얻기 위해서는 극복하여야할 많은 과제가 놓여 있다. 향후 Y 123 뿐 아니라 Nd 123 또는 Sm 123선재도 시야에 넣어 장선화를 추진하는 시도도 계속적으로 추진될 예정이며, 기초기술을 더욱 숙성하여 초전도 선재에 장래 수요가 급증할 것으로 예상되는 전력 시장을 담당하는 총아로서 성장을 거듭하기를 기대해 본다.



참고 문헌

[1] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Trong, P. H. Hor, R. L. Gao, I. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, "Superconductivity at 91K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O system", Phys. Rev. Lett., Vol. 58, No. 9, p.908, 1989.

[2] A. Goyal, D. P. Norton, J. D. Budai, M. Paranthaman, E. D. Spect, D. M. Kroeger, D. K. Christen, F. A. List, D. F. Lee, P. M. Martin, C. E. Kelabunde, E. Hatfield, and V. K. Sikka, "High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of YBCO thick films on biaxially textured metals", Appl. Phys. Lett, Vol. 69, p.1795, 1996.

[3] Q. He, D. K. Christen, J. D. Budai, E. D. Spect, D. F. Lee, A. Goyal, D. P. Norton, M. Paranthaman, F. A. List, and D. M. Kroeger, P. M. Martin, "Deposition of biaxially-oriented metal and oxide buffer-layer films on textured Ni tapes : new substrate for high-current, high-temperature superconductors", Physica C, Vol. 275, p.155, 1997.

[4] M. Paranthaman, A. Goyal, F. A. List, E. D. Spect, D. F. Lee, P. M. Martin, Q. He, D. K. Christen, D. P. Norton, J. D. Budai, and D. M. Kroeger, "Growth of biaxially textured buffer-layer on rolled Ni substrates by electron beam evaporation", Physica C, Vol. 275, p. 266, 1997.

[5] E. D. Spect, A. Goyal, D. F. Lee, F. A. List, D. M. Kroeger, M. Paranthaman, R. K. Williams, and D, K. Christen, "Cube textured nickel substrate for high temperature superconductor" , Supercon. Sci. Technol., Vol. 11, p. 945, 1998.

[6] C. Park, D. P. Norton, D. K. Christen, D. T. Verebelyu, R. Feenstra, J. D. Budai, D. F. Lee, A. Goyal, E. D. Spect, D. M. Kroeger, M. Paranthaman, "Long length fabrication of YBCO on RABiTS using pulsed laser

deposition", ASC 98 Conference, Palm Desert, CA, USA, Sep.13-18, 1998.

[7] M. Makita, S. Hanada and O. Izumi, "Recrystallization in cold-rolled pure nickel", Acta Metal, Vol. 36. No.2, p. 403, 1988.

[8] Y. Iijima, K. Onabe, N. Futaki, N. Tanabe, N. Sdakada, and O. Kohno, "Structural and transport properties biaxially aligned YBCO films on polycrystalline Ni-based alloy with Ion-beam-modified buffer layer", J. Appl. Phys., Vol. 74, No.3, p. 1905, 1993.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 이상현

◆ 학력

- 1989년 일본 TOKAI Univ. 전자공학과 공학사
- 1991년 일본 TOKAI Univ. 전자공학과 공학석사
- 1994년 일본 TOKAI Univ. 전자공학과 공학박사

◆ 경력

- 1994년 - 1997년 일본 東京 電機대 연구교수
- 1995년 - 1997년 일본 통산성 초전도공학연구소
주임연구원
- 1997년 - 현재 선문대 전자정보통신공학부 교수