

Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 기계적 특성 평가

Evaluation of mechanical properties of Bi-2223/Ag HTS tapes

하홍수*, 이동훈*, 양주생*, 최정규*, 윤진국*, 김상철**, 하동우*, 오상수*, 권영길*

H.S. Ha*, D.H. Lee*, J.S. Yang*, J.K. Choi*, J.K. Yun*, S.C. Kim**, D.W. Ha*, S.S. Oh*, Y.K. Kwon*

Abstract: Evaluation of the mechanical properties of Bi-2223/Ag HTS tapes was carried out by the tension and bending tests. Most of the Bi-2223/Ag tapes retained critical current up to 10 kgf/mm² axial tension stress, and 0.2% tension strain at room temperature. Applied tension strain exceeding 0.3% in superconducting tapes at 77 K leaded to rapid degradation of the critical current. It was observed that the more filaments, the better axial tension property at 77 K, self-field. The influence of bending strain on critical current degradation was revealed to be less sensitive for Bi-2223/Ag HTS tapes with a more number of filaments and higher silver ratio.

Key Words: Bi-2223/Ag tape, tension, edge-wise bending, stress

1. 서 론

실용화에 가장 근접한 Bi-2223/Ag 고온초전도체는 PIT법으로 대부분이 테이프형태의 선재로 제조되어 다양한 초전도 응용기기 개발분야에 이용되고 있다[1]. 하지만 세라믹인 고온초전도체는 특유의 취약함으로 인해 변형이나 취급에 많은 어려움이 따른다. 이러한 문제점은 세라믹 초전도체와 은튜브를 복합화 함으로서 일부 완화시킬 수 있으며, 특히 다심 선재의 경우 필라멘트들을 bundling하는 은튜브를 Mg, Mn, Cu, Ni, Pd 등의 원소를 합금화 할 경우 보다 큰 기계적 특성을 얻을 수 있다[2]. 또한 초전도 선재는 단심보다는 다심으로 제조할 경우, 보다 양호한 기계적 특성을 얻을 수 있다[3]. Katagiri[4]와 Vasanthamohan[5] 등은 초전도 선재의 다심화, 피복재의 합금화 등으로 인한 특성 변화를 정량적으로 평가하여 상온 및 77 K에서의 인장 및 굽힘에 따른 특성 변화를 관찰하였다.

본 논문에서는 당 연구원에서 제조된 19 ~ 85심 선재와 현재 판매되고 있는 ASC사 및 NST사의 선재를 이용하여 온도, 단면형상에 따른 다양한 기계적 특성을 비교 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 초전도 선재 제조

독일의 Merck사로부터 열처리 후 Bi-2223상을 생성할 수 있는 전구체 분말을 구매하여 순은튜브에 충진한 후 인발 가공하여 최종적으로 육각형상의 필라멘트를 제조하였다. 제조된 필라멘트는 기하학적인 구조상 19, 37, 55, 85 심으로 다발(bundling)을 만들어 다심용 투브에 적층한 후 가공하였다. 이때 다심용 투브는 Mg 또는 Mn을 첨가한 은합금으로 제조된 것이다. 이후 인발, 신선, 압연 공정을 거쳐 테이프 형상으로 만든 다음 소결 열처리하였다. 다시 초전도상의 배향성 향상을 위한 중간압연을 행한 후 최종 소결 열처리를 하여 초신도 선재를 제조하였다.

2.2. 기계적 특성 평가

자체 세조한 KERI 선재, 시판중인 NST, ASC 선재를 상온에서 1 Ton 용량의 인장시험기를 이용하여 표점거리 50 mm, 인장속도 3 mm/min, 0 ~ 20 kgf/mm²의 인장응력으로 인장시험을 행하였다. 인장 시험 후 변형된 부분을 4단자법으로 임계전류를 측정하여 변형전 측정된 임계전류와 비교하였다. 극저온에서의 인장변형에 따른 임계전류 변화를 관찰하기 위하여 필라멘트 수가 19 ~ 55개인 초전도 선재를 이용하여 77 K에서 측정하였으며 인장 및 압축변형을 인가할 수 있는 U-사형 치구를 이용하였다.

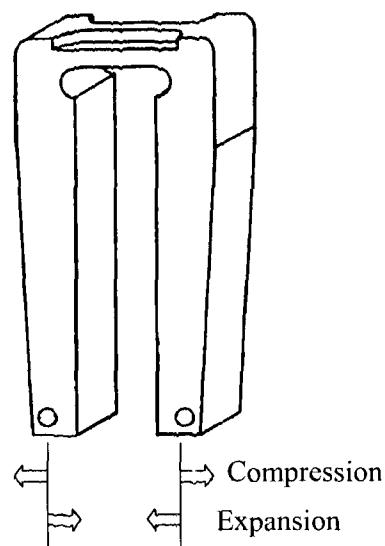


그림 1. 인장 변형 및 폭방향 굽힘용 U-자형 치구

Fig. 1. U-shape sample holder to apply axial strain and edge-wise bending.

* 정회원: 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

** 정회원: 벡상스코리아 기술연구소

원고접수: 2002년 4월 15일

심사완료: 2002년 4월 30일

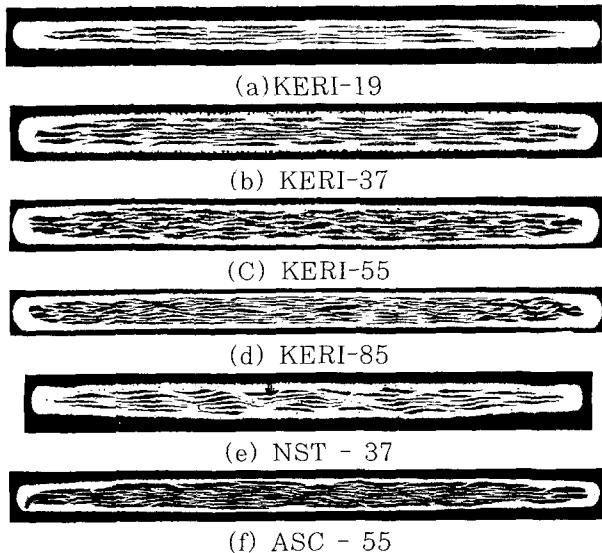


그림 2. 다양한 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 단면
Fig. 2. Cross-section of various Bi-2223/Ag HTS tapes

본 U-자형 치구의 중요한 특징으로는 상온이 아닌 극저온 중에서 *In-situ* 법으로 시료에 인장 및 압축변형을 주면서 임계전류 측정이 가능하고, 또한 인장과 압축변형을 한번에 가할 수 있다. 그리고 0.01%이하의 미세 변형률(ε)인가가 가능하여 보다 정밀한 측정이 가능하며 치구의 양끝을 압축 및 팽창하여 도체에 변형을 인가하는 방식이다[6]. 본 치구의 변형률을 측정은 스트레인 케이지를 이용하여 측정하였으며 U-자형 치구의 개략적인 형상을 그림 1에 나타내었다.

본 실험에서는 초전도 선재의 인장 변형 특성과 함께 굽힘 변형 특성을 평가하고자 하였으며 직경 80 ~ 20 mm의 원통치구를 이용하여 표면원주를 따라 선재를 굽힘으로서 응력을 인가하여 임계전류 변화를 측정하였다. 굽힘 변형률은 선재 두께에 의존하므로 본 실험에서는 다양한 두께의 선재를 상온에서 변형시킨 후 측정하였다. 그리고 초전도 선재 두께 방향의 굽힘이 아닌 선재 폭방향 굽힘(Edge-wise bending)에 따른 특성도 함께 고려하여 극저온에서 측정하였다.

3. 결과 및 토의

제조된 고온초전도 선재의 단면을 그림 2에 외국선재와 함께 나타내었다. ASC사 선재의 경우, 필라멘트의 aspect ratio(폭/두께)가 크고 충진률(40 %이상)이 높음을 알 수 있었다.

상온인장 후 임계전류를 측정하여 인장이전의 임계전류와 비교하여 그림 3과 4에 나타내었다. ASC사 선재의 경우 기계적 특성이 매우 낮음을 알 수 있었으며, 따라서 ASC사는 SUS tape을 선재 양쪽 면에 접합한 고강도 선재를 최근 시판하고 있다. NST사 선재의 경우 Ag-Mg 합금을 다심용 시스로 사용하여 10 kgf/mm² 까지는 거의 임계전류저하가 나타나지 않았다. KERI-55와 85 선재의 경우 Ag-Mn 합금 시스를 사용하여 인장 변형률에 대한 특성도 ASC사 선재에 비해 두배 이상의 높게 나타났으며, 또한 16 kgf/mm² 이상의 항복강도를 나타내었다. KERI선재의 경우 약 13 kgf/mm² 이상의 인장강도에서 서서히 임계전류가 저하하는 것을 알 수 있었는데 이것은 초전도 코어 내

부에 선재 길이에 수직한 방향으로 미세한 균열이 발생하여 전류 통전경로를 제한하기 때문인 것으로 사료된다. 상온인장 강도는 초전도선재를 이용한 마그네트 또는 케이블 원선시 매우 중요한 기초 자료로 이용될 수 있다.

극저온 하에서 초전도 선재는 통전시 전자력에 의한 hoop stress 또는 열응력에 의한 변형을 받을 수 있으며 이러한 변형 특성을 정량화 하고자 U자형 치구를 이용하여 극저온에서 측정하였다. 그림 5에 외국선재와 비교한 결과를 나타내었으며 그림 6이 초전도 필라멘트 수에 따른 선재의 변형 특성을 나타내었다. 상온인장특성과 유사한 결과로서 필라멘트 수가 증가 할수록 변형률에 대한 임계전류 특성도 향상되었다. 이것은 개수가 증가할수록 필라멘트가 미세해지고 은 시스와 접촉 면적이 증가하여 인장 변형에 따른 선재 전체의 기계적 특성이 향상되기 때문이다[7]. 외국선재의 경우, 필라멘트 개수가 1,296인 선재를 제조하여 0.7%변형률까지 임계전류의 저하가 없는 것으로 보고하고 있다.

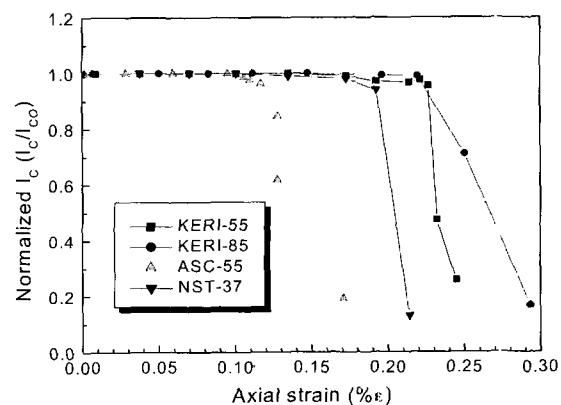


그림 3. Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 임계전류에 대한 상온인장 변형률의 의존성.

Fig. 3. Room temperature strain dependence of the normalized critical current for Bi-2223/Ag tapes.

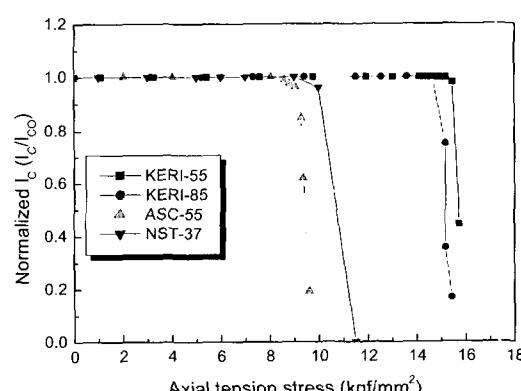


그림 4. Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 임계전류에 대한 인장 응력의 의존성.

Fig. 4. Stress dependence of the normalized critical current for Bi-2223/Ag tapes.

각 선재에 대한 선재 두께 방향으로 상온굽힘변형을 측정한 결과 필라멘트수 의존성은 비교적 낮았으며 대신 초전도체의 비율이 높은 ASC사 선재의 경우 굽힘변형에 대해 매우 취약하였다. 이것은 초전도 선재단면에서 초전도체가 차지하는 비율이 높아질수록 이웃하는 필라멘트간 간격이 좁아져 bridging이 나타날 확률이 높아지며 결국은 단심과 같은 거동을 나타내는 것으로 이해할 수 있다. 그림 7에 비교 결과를 나타내었으며, 실제로 ASC사에서 판매되고 있는 선재도 임계전류가 95%까지 유지되는 굽힘직경이 70 mm로 나타나고 있다.

고온 초전도 케이블을 굽힘변형시키면 포머에 나선으로 권선된 초전도 선재는 두께 방향 굽힘변형뿐만 아니라 선재 폭방향으로도 굽힘변형이 일어난다[8]. 이 때의 변형을 edge-wise bending이라고 하며 솔레노이드 마그네트 권선시에도 마그네트 양쪽 끝 부분에서 테이프선재가 다음 층으로 넘어갈 때에도 선재폭/마그네트원주 만큼의 폭방향 굽힘이 일어난다. 폭방향 굽힘에 대해서도 선재는 취약하여 적은 변형에도 임계전류는 저하한다.

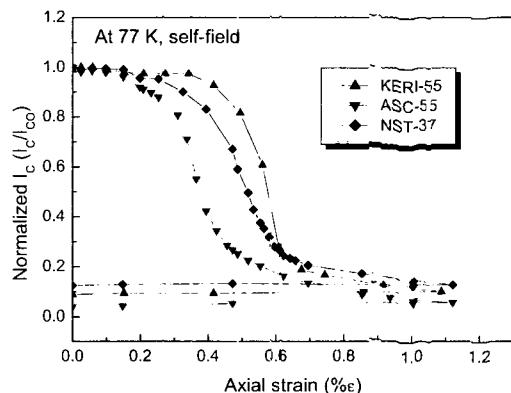


그림 5. 여러 가지 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 인장변형에 따른 임계전류 특성.

Fig. 5. Axial tension strain vs. normalized critical current of various Bi-2223/Ag tapes.

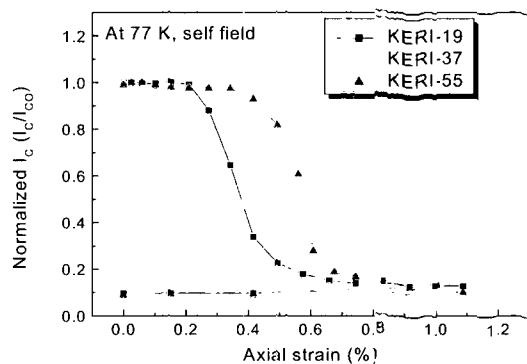


그림 6. 인장변형에 대한 임계전류 특성에 미치는 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 필라멘트 수.

Fig. 6. The effect of number of filaments on the axial strain-critical current of Bi-2223/Ag tapes.

그림 8에 나타낸 결과는 폭이 각각 4.0, 3.4, 3.6, 3.7 mm인 ASC, NST, KERI-55, 85 선재를 비교한 것이다. ASC사 선재의 경우 두께 방향 굽힘 특성처럼 굽기한 특성 저하를 나타내지는 않았지만 필라멘트 간 bridging과 필라멘트의 aspect ratio(폭/두께)가 커서 다른 선재에 비해 폭방향 굽힘에 대한 선재 특성 저하가 비교적 크게 나타났다. 변형에 의해 임계전류가 급격히 저하한 선재를 SEM으로 관찰 한 결과 그림 9와 같이 필라멘트용 은시스를 사이에 두고 필라멘트 간 균열이 전파되는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 균열은 초기에 여러 곳에서 미세한 균열로 발생하여 약간의 임계전류 저하를 일으키고 변형 응력이 증가할수록 점차 균열이 진행되어 이웃 필라멘트에 전파되며 이것으로 인해 급격한 임계전류 저하가 일어난다. Osamura 등은 그림 10과 같이 변형에 따른 초전도 선재의 균열 발생 및 전파단계를 나타내었다[9]. 초기 균열 발생[Stage I] 원인으로는 결정립 사이의 공극, 불순물, 초전도체와 은시스간의 불완전한 접촉면 등이 있으며 발생한 균열은 점차적으로 전파되며[Stage II] 결국 필라멘트 또는 선재 단면 전

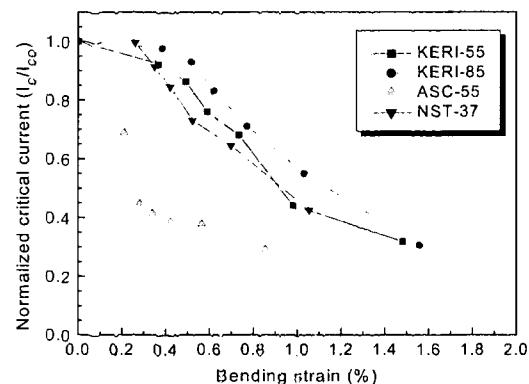


그림 7. 임계전류 특성에 미치는 굽힘변形의 영향

Fig. 7. The influence of bending strain on normalized critical current.

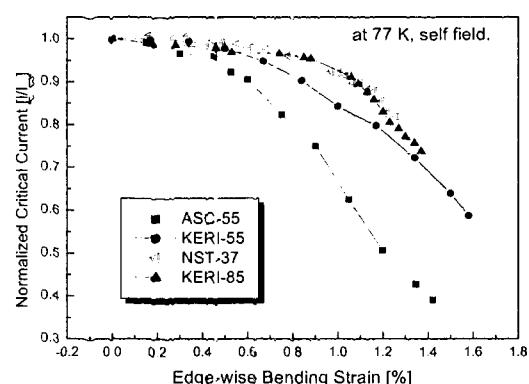


그림 8. 선재 폭방향 굽힘에 따른 임계전류 특성.

Fig. 8. The influence of edge-wise bending on normalized critical current property.

체를 파단하여 전류 통전이 불가능하게 된다[Stage III]. 따라서 초전도 선재의 균열발생원인을 제거하고

기계적 특성 향상을 위해서는 초전도 코아의 밀도를 증가시키고 이차상 등의 생성을 억제하고 온시스의 강도를 향상시킬 필요가 있다.

4. 결 론

외국의 대표적인 고온초전도 선재 제조사인 ASC사 및 NST사와 KERI에서 제조한 선재와 기계적 특

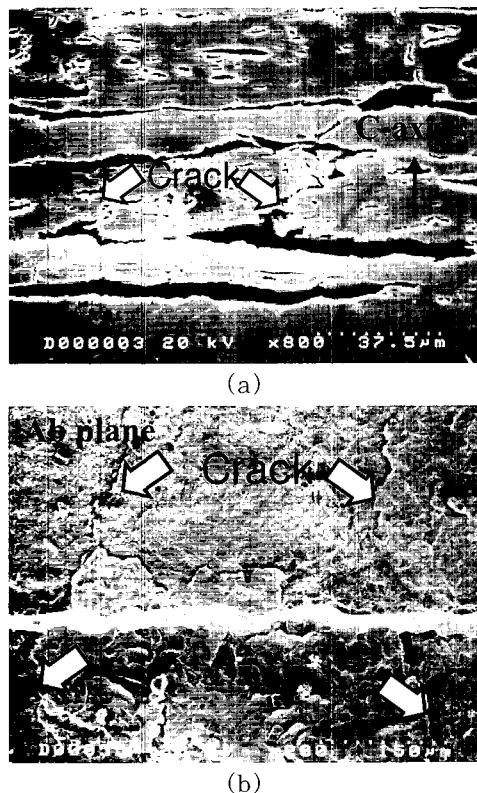


그림 9. 변형에 의해 균열이 발생한 고온 초전도 선재 단면. (a) c축에 평행, (b) ab 면.

Fig. 9. Crack propagated cross-section of Bi-2223/Ag tapes generated by deformation. (a) parallel to c-axis, (b) ab plane.

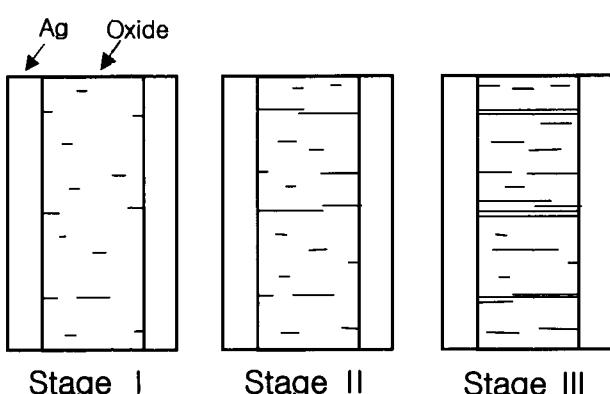


그림 10. 균열 생성 및 전파 양상에 대한 개략도[9].
Fig. 10. Schematic diagram of crack generation and propagation mode[9].

성을 비교 평가하였다. ASC사 선재는 약 90 MPa, NST사 선재의 경우 115 MPa의 인장강도를 나타내었다. 하지만 KERI-55, 85 선재의 경우 150 MPa 이상의 높은 인장강도를 나타내었으며 이것은 높은 Mn함금농도(0.5%이상)에 기인하는 것으로 사료된다.

상온굽힘 변형하였을 때 NST, KERI선재가 비교적 양호하여 직경 50 mm 까지 임계전류의 95 %를 유지하였다.

Edge-wise bending의 경우 변형이 증가할수록 임계전류 특성이 완만하게 저하하였으며 선재 폭에 따른 특성 변화는 거의 나타나지 않았다.

이러한 기계적 변형 및 응력에 따른 초전도 특성저하는 초전도 선재 단면 분석결과 다중 균열 생성 및 전파에 따른 것으로 초기 공극 또는 입계 등에서 생성된 균열이 전파되어 필라멘트를 파단시킨 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] P.Vase, R.Fluigiger, M. Leghissa, B. Glowacki "Current status of high-Tc wire" *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.13, R71-R84, 2000
- [2] K.Fisher, T. Fahr, U. Schlafer, C. Rodig, P. Trinks, M. Schubert, P. Verges, H. Klauss, "The influence of processing parameters and tensile stresses on the properties of Bi-2223 tapes with Ag and AgMn sheaths" *IEEE Trans. Appl. supercond.*, Vol.9, No.2, pp.2625-2628, 1999
- [3] M.T. Malachevsky, D.A.Esparrz, "Metal- ceramics interface response to bending and fatigue cycles in superconducting Ag-Bi2223 composites" *Physica C* Vol.324, pp153-160, 1999
- [4] K. Katagiri, H.S. Shin, Y. Shoji, N. Ebisawa, K. Watanabe, K. Noto, T. Okada, M. Hiraoka and S. Yuya, "Tensile strain/ transverse compressive stress dependence of critical current in Ag-sheathed Bi(2212) 7-core superconducting wires" *Cryogenics*, Vol. 36, pp491-494, 1996
- [5] N. Vasanthamohan, J.P. Singh and K.A. Lubke, "Strain tolerance of Ag-sheathed BSCCO(2223) superconductors with various geometrical configurations", *Supercon. Sci. Tech.*, Vol. 11, pp584-589, 1998
- [6] B. ten Haken, A. Godeke, H.J. Schuver and H.J.,ten Kate, "Descriptive model for the critical current as a function of axial strain in Bi-2212/Ag wires", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 32, No. 4, pp2720-2723, 1996
- [7] 하홍수, 오상수, 하동우, 심기덕, 김상철, 장현만, 권영길, 류강식, "Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 변형에 따른 임계전류 특성" *전기전자재료학회지*, V.14, pp.69-73, 2001
- [8] H.S.Ha, S.S.Oh, D.W.Ha, Y.K.Kwon, K.S.Ryu,

- "The influence of hard bending strain on Bi-2223/Ag tapes", *The abstract of 2001 Japan-Korea joint workshop*, V.1, pp.196, 2001
- [9] K.Osamura, K.Matsumoto, M.Sugano, "Stress-strain behavior and its correlation with superconducting properties in Ag/Bi2223 tapes" *the abstracts of 65th meeting on cryogenics and superconductivity*, Vol.1, pp.135, 2001

저자 소개



하홍수(河洪秀)

1969년 5월 21일 생, 1995년 성균관대 공대 금속공학과 졸업, 1997년 동 대학원 금속공학과 졸업(금속석사), 현재 한국전기연구원 초전도융용연구그룹 선임 연구원



이동훈(李東勳)

1974년 5월 2일 생, 1980년 경남대 물리과 졸업, 2001년 경남대 대학원 물리과 졸업(이학석사), 현재 한국전기연구원 위촉연구원



양주생(梁周生)

1975년 5월 26일 생, 2001년 경성대 공대 재료공학과 졸업, 현재 한국전기연구원 위촉연구원



최정규(崔正圭)

1975년 7월 28일 생, 2001년 경성대 공대 재료공학과 졸업, 2002년 동 대학원 재료공학과 석사과정, 현재 한국전기연구원 위촉연구원



유진국(尹鎮國)

1977년 9월 13일 생, 2002년 한림대 정보통신공학부 재학, 현재 한국전기연구원 위촉연구원



김상철(金相澈)

1971년 1월 17일 생, 1997년 부경대 공대 재료공학과 졸업, 1999년 부경대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 현재 넥상스 코리아 기술연구소 연구원



오상수(吳詳秀)

1950년 11월 1일 생, 1982년 경북대 공대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도융용연구그룹 책임연구원



하동우(河東雨)

1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대 공대 금속공학과 졸업, 1987년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대 대학원 금속공학과 졸업(공학박사), 1987년 ~ 현재 한국전기연구원 초전도융용연구그룹 선임연구원



권영길(權永吉)

1959년 7월 28일 생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1990년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1990년 ~ 1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구원 초전도융용연구그룹 그룹장