

Bi-2223/Ag 고온초전도선 개발 동향



하동우
한국전기연구원
초전도응용연구그룹
선임연구원

1. 서론

고온 초전도선은 전력기기분야, 과학 및 산업용 초전도 마그네트 분야 등 초전도 응용 기술의 실용화를 위한 가장 중요한 핵심 소재로서 세계적으로 활발하게 연구 개발이 이루어지고 있다. 초전도 시스템의 실용화를 위해서는 초전도 선의 임계전류밀도, 교류손실과 같은 초전도 특성이 향상되어야 기존 시스템과의 경쟁력을 확보할 수 있으며, 또한 권선 및 시스템의 운전 동안 대전류에 의한 전자기력을 견딜 수 있는 기계적인 강도를 필요로 한다. 현재까지 고온초전도 선의 개발 과정에서 Bi₂Sr₂CaCu₃O_x 산화물로 PIT법으로 제조한 것을 제1세대 초전도선, YBaCu₃O_x 산화물로 박막 코팅 프로세스를 이용하여 만든 것을 제2세대 초전도선이라고 부르고 있으며 제조기술 및 특성에 있어서 서로 간 장단점을 갖고 있다. PIT법이란 powder-in-tube 공정을 말하는데 즉, 은(Ag) 튜브 내에 Bi(Pb):Sr:Ca:Cu 산화물의 비율이 2:2:2:3인 하소분말을 충전하고 이를 인발 및 신성 공정에 의해 직경을 줄인 다음 이들 다발을 다시 은 또는 은 합금 튜브에 다심선으로 가공한 다음 압연과 소결 열처리 공정에 의해 테이프 형태의 Bi-2223/Ag 고온초전도

선을 만드는 것이다.

고온초전도선의 실용화를 위해서는 임계전류밀도, J_c가 높아야 하는데, 특히 자장 하에서도 그 특성을 유지하여야 한다. 하지만 Bi-2223/Ag 선은 액체질소온도에서 자장 중 임계전류 값의 감소가 크기 때문에 응용 분야에 따라서는 자장이 증가할 때 J_c가 크게 떨어지지 않는 30 K이하의 온도조건에서 동작시키는 설계가 이루어지고 있다. 이러한 자장에 대한 낮은 I_c 특성을 극복하기 위하여 새롭게 시도되고 있는 것이 Y-계 초전도체를 박막 코팅기술을 이용하는 2세대 초전도선이며, 이를 coated conductor라고도 한다. Y-계 2세대 초전도선은 결정입자가 2축 결정방향으로 배향되어 있기 때문에 결정입계에서의 weak-link에 의한 전류감소가 크게 개선되어, 압연에 의한 1축 결정방향으로 배향된 Bi-계 초전도선보다 수십 배 높은 임계전류밀도의 특성을 나타낸다. 그리고 Bi-계보다 Y-계 자체가 자장 변화에 대한 우수한 임계전류밀도 특성을 가지고 있기도 하다. 또한 2세대 초전도 선은 Ni 합금 또는 스테인레스와 같은 금속을 기관재료로 사용하기 때문에 은을 사용하는 Bi-계 초전도선에 비해 가격적인 면과 기계적 강도 면에서 유리한 위치에 있으므로 차세대 초전도선으로 각광을 받고 있다.

하지만 현재로서는 짧은 시료에서만 성공적인 결과를 얻고 있으며, 실제 초전도기에 응용하기 위한 길이가 긴 장선은 연구 단계에 있으며 또한 고가의 제조 장비를 사용하기 때문에 수 m의 짧은 초전도선도 Bi-계 초전도선에 비해 지나치게 비싸기 때문에 실제 시스템에 응용하기에는 더 기다려야 하는 형편이다.

따라서 어느 기간 동안 초전도 시스템을 연구하기 위해서는 장선화가 가능한 Bi-2223/Ag 고온초전도선을 사용하여야 하는 것은 불가피하다. 또한 Bi-계 초전도선에서처럼 필라멘트의 다심화 및 트위스팅 공정과 같은 교류손실을 줄이기 위한 대책이 아직은 2세대 초전도 선에서는 확립이 되어있지 않기 때문에 이를 해결하기 위한 시간도 필요한 실정이다. 따라서 미국, 유럽을 비롯한 세계 각국에서 Bi-2223/Ag 초전도선의 제조 및 판매를 위한 회사들이 생겨나고 있으며 서로가 경쟁을 하면서 특성 향상이 계속 이루어지고 있다.

본 테마에서는 초전도 응용기에 사용하기 위해 고온초전도선에 요구되는 특성과 Bi-2223/Ag 초전도선재의 제조기술의 특징과 기술적으로 문제가 되고 있는 부분들에 대해서 고찰하기로 한다. 또한 미국, 일본 등의 선진국에서 이루어지고 있는 최근 연구동향을 분석하여 향후 국내 연구개발에 지침으로 삼고자 한다.

2. 초전도 기기에서 요구하는 초전도선의 특성

표 1에 정리한 것과 같이 초전도선 개발에서 중요한 기본적인 항목별 요구사항을 간략하게 살펴보기로 한다. 임계전류밀도는 실용적으로 가장 중요한 파라메타이고 기기 설계에 있어서는 임계전류 값을 선재의 전체 단면적으로 나눈 공칭임계전류밀도 J_c 가 주로 사용된다. J_c 의 향상을 위해서는 J_c 를 높이는 것이 요구되나 J_c 향상에는 한계가 있기 때문에 초전도체의 면적비율 filling factor %를 높이는 공정이 요구된다. 초전도선의 사용온도는 최종적으로는 응용기기의 경제성에 직결되는 사항으로 액체질소온도에서 사용하는 것이 가장 바람직하나

표 1. 선재 개발에 중요한 기본 요구조건.

Requirement	Goal
Critical current density (J_c)	↑
Operating temperature	↗
Mechanical strength	↑
Long length wire	↗
Fabrication cost	↓

기기에서 요구되는 운전조건을 만족시키기 위해서 전력케이블 이외에는 대부분의 기기는 온도를 30 K 이하로 내려서 사용한다. Bi-2223선의 경우 선재 조건에 따라 다소 달라지나 일반적으로 액체질소 77 K에서 보다 20 K에서는 자기자장 기준으로 5배 이상 임계전류가 향상된다. 그리고 초전도선으로 감은 코일에 전류를 인가하면 선에는 전자력이 작용하기 때문에 기계적 강도를 가능한 높이지 않으면 고자장이 발생되거나 크기가 대형인 초전도코일에는 사용할 수가 없다. 그리고 산화물 자체가 기계적으로 취약하기 때문에 이를 보강할 수 있는 초전도선 구조와 공정 개발이 필요하다고 할 수 있다. 초전도기기가 대형화될수록 piece length가 긴 선이 요구된다. 초전도선은 일반 구리선과 같이 쉽게 제조 공정에서 서로 이을 수 없기 때문에 가능한 선을 길게 제조할 수 있어야 한다. 또한 장선화 여부는 초전도선 가격에도 크게 영향을 주기 때문에 공정 선택에 있어서 중요한 요소라고 할 수 있다. 상용화를 위해서는 초전도선의 특성과 함께 무시할 수 없는 요소가 바로 가격이다. 결국 고온초전도선이 상용화되기 위해서는 저온초전도선이나 구리선과 비교하여 가격이 저렴해야 기존의 기기를 고온초전도기기로 대체할 수 있는 것이다.

표 2는 초전도선을 개발하는데 있어서 미국 DOE가 상용화를 전제로 하여 각 기기별로 요구되는 사양과 특성치를 정리하여 나타낸 것이다. 각 응용기기별로 요구되는 선의 특성이 다르다. 예를 들어 초전도 전력케이블의 경우, 케이블 권선 구조에서 발생하는 자기자장이 낮기 때문에 액체질소 중의 고온초전도선 I_c 가 40 A정도에서도 응용이 가능하다는 보고이다. 또한 송전케이블의 경우는 요구 가격대가 최고 100 \$/kA·m로 평가되고 있어 그만큼

표 1. 미국 DOE에서 상용화를 전제로 하여 각 기기별로 요구되는 초전도선의 사양과 특성치.

(주: Je: A/cm², @77 K, self field, 가격: \$/kA·m, 교류손실: mW/A·m)

응용 기기	고온초전도선재의 상용화 요구 조건									
	Je	가격	저항 (T)	동작 온도 (K)	Ic (A)	교류 손실	균질 반경 (m)	변형률 (%)	선재 길이 (m)	
한류기	1,000 - 10,000	10 - 30	0.3 - 3	40 - 65	100	0.4	0.15 - 0.05	0.2 - 0.4	200 - 1,000	
모터	10,000	10	4	>25	300	NA	0.05	0.2 - 0.3	1,000	
송전 케이블	1,000 - 10,000	10 - 100	<0.2	>65	>30	0.15	0.01	>0.4	100 - 1,000	
변압기	1,000 - 10,000	5 - 20	0.15	20 - 65	200	0.25	0.1 - 0.2	0.1	250 - 3,000	
발전기 (1C MVA)	1,000	10	4 - 5	20 - 65	100 - 200	NA	0.1	<0.2	500 - 1,000	
고자장 마그네트	1,000 - 100,000	1 - 5	>20	4.2 - 65	300 - 500	NA	0.01	0.5	500 - 1,000	
자기분리	100	10	2 - 3	77	500	NA	0.5	0.2	1,000	

선재 가격이 다소 높더라도 수요측면에서 필요성이 크기 때문에 상용화 가능성이 높은 것으로 해석할 수 있다. 한류기, 송전케이블, 변압기 등의 교류기기 응용의 경우는 Je도 높아야 하지만 교류손실 저감이 중요하다. 따라서 기기의 동작전류가 커질수록 교류손실도 비례하여 증가하는 경향이 있기 때문에 교류기기에서는 Ic가 높은 선재를 사용하는 것이 반드시 바람직하다고는 말할 수 없다. 표 2에서 고자장 마그네트 응용의 경우는 선재의 Je 요구 특성치가 가장 높고 가격 부담도 1.5 \$/kA·m로 가장 크게 보고 되고 있다. 이것은 현재의 선재가격이 약 \$160-250/kA·m인 것을 고려하면 현실적으로 고온초전도선만으로 고자장 마그네트를 제작하는 것은 경제성이 없다는 것을 의미한다. 현재로서는 1 GHz NMR마그네트 구조에서 알 수 있듯이 Nb-Ti 나 Nb₃Sn과 같은 저온초전도 코일과 복합구조를 갖는 마그네트에서 최내층 코일만 고온초전도코일로 제작하기 때문에 고온초전도선은 고자장 마그네트 분야에서 당분간 제한적으로 사용될 수 밖에 없다고 본다.

3. PIT법에 의한 Bi-2223선재 제조기술

PIT법이 고온초전도선재 제조에 사용된 것은 1987년부터 많은 연구자들이 이 방법을 이용하여

Bi-2223선재를 제조하고 특성을 향상시키기 위하여 부단한 노력[1,2,3,4,5]을 하였다. PIT 공정의 개략도를 그림 1에 나타냈다. 선재제조 공정은 크게 전구체 분말제조공정, 가공 및 열처리 공정으로 나눌 수 있으며 분말 특성에 따라 공정조건이 달라지기 때문에 균질한 전구체 분말을 사용하는 중요하다. Bi-2223선재는 Bi-2212 초전도상과 Ca:PbO₃, CuO, (Sr,Ca)_{1-x}Cu_{2-x}O 상으로 이루어진 전구체 분말의 고상 반응에 의하여 만들어지기 때문에 미세조직을 관찰하면 많은 공극과 불순물상이 관찰되기도 하며 주로 전구체 분말을 취급하는 과정에서 들어온 탄소 원자는 결정입계에 편석하여 전류를 제한하기 때문에 전구체 분말에서 탄소 함유량을 낮추는 것이 최종 제조되는 Bi-2223선의 Ic 특성에 크게 좌우된다.

PIT법에 의한 다심 선재의 가공에서 유의할 점은 무엇보다도 내부 필라멘트를 균일하게 가공하는 것이다. 필라멘트를 균일하게 가공하기 위해서는 전구체 분말의 입도, 충전밀도, 빌렛 구조, 인발다이스 각도, 압연롤의 직경, 단면 감소율 등과 같은 많은 요소들이 최적화되어야 된다. Han등[6]은 고온초전도선재의 압연시 필라멘트 소세징이 발생하는 원인을 분석하였다. 튜브내부의 분말이 임계밀도에 달하면 분말입자들 사이의 마찰력이 커져서 분말유동이 멈춘다. 길이 방향으로의 은의 자유도가 은이 분말에 작용하는 최대압력을 제한시켜 고밀도 분말영역으로 은을 유동시키고 테이프의 저밀도 영역에 달했을 때 은 시스는 다시 분말유동을 일으키게 함으로서 그림2와 같이 길이방향으로 반복적으로 소세징이 발생한다고 설명했다. 판상 구

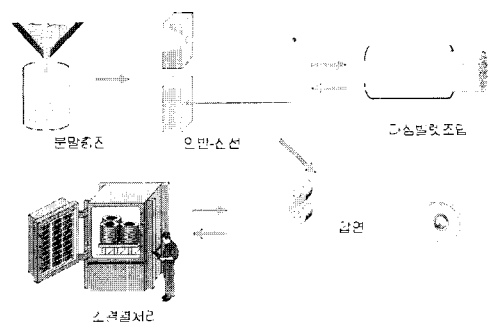


그림 1. PIT 공정에 의한 Bi-2223/Ag 초전도선의 제조 공정[7].

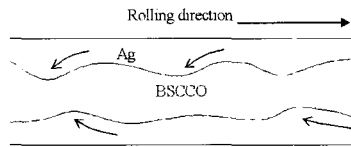


그림 2. 신선 공정에서 발생하는 초전도 필라멘트의 소세징 현상 모식도.

조의 2223상이 열처리 공정에서 2212상과 불순물 상들의 반응에 의하여 생성되거나 상세한 메카니즘에 대해서는 아직도 통일된 견해가 없고 intercalation 모델과 핵생성-성장 모델이 대표적으로 보고되고 있다. intercalation 모델은 고분해능 TEM을 이용한 미세구조 관찰기법으로 주로 행하여졌으며 소결 반응의 초기과정에서 Bi-2212 결정구조 층 사이로 Ca-Cu-O 층이 삽입되면서 Bi-2223상이 생성된다는 이론[8]이다. 한편 핵생성-성장이론은 XRD와 EDX 분석에 의해서 이루어 졌다. 소결 반응시 Bi,Pb-2212상이 Ca과 Pb농도의 증가로 용점저하가 일어나고 분해되면서 액상이 발생하는데, $(Sr, Ca)_{1-x}Cu_xO$ (AEC)상이 이 액상과 접촉하여 분해되어서 만든 과도적인 액상으로부터 Bi, Pb-2223상이 석출하여 성장한다는 것이다[9].

PIT공정의 열처리과정에서 Bi-2212가 주상인 전구체 분말이 Bi-2223초전도상으로 변하면서 많은 불순물 상들이 생성된다. 고온초전도체의 전류수송 메카니즘에서 percolative적인 전류 거동을 고려할 때 이러한 불순물상들을 최대한 미세하게 분산시키는 조직제어기술이 필요하다. 그리고 결정입계의 접촉 각도가 커지면 전류 제한 요소로 작용하기 때문에 가능한 판상 결정의 (a-b)면을 전류 통전 방향(테이프 표면에 대하여 평행하게)으로 배향화시키는 가공열처리 기술 개발이 임계전류밀도를 향상을 위하여 요구된다고 할 수 있다. 결정 배향은 가공과 열처리시에 일어나거나 가공에 의한 효과보다 열처리에 의한 효과가 큰 것으로 밝혀지고 있다 [10]. 그것은 그림 3에서 보는 바와 같이 판상의 2223결정이 성장할 때 c축 방향보다 (a-b)방향으로 성장속도가 빠른 것($v_{ab} \gg v_c$)과 관계가 있으며 필라멘트 내부의 결정들의 배치를 생각할 때 시스 표면과 평행하게 배열된 결정은 성장이 잘 되나 각도를 이루는 결정들은 성장이 다른 결정들에 의하여 제

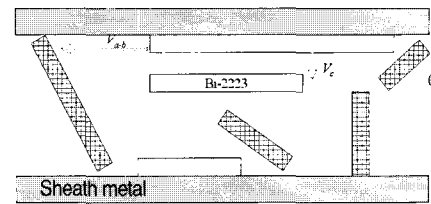


그림 3. 초전도 테이프 내에서 Bi-2223 결정의 성장 및 배열.

한을 받기 때문에 미세조직을 관찰하면 은시스와 접한 표면 부근의 결정배향성은 양호하고 내부로 들어갈수록 떨어지는 현상이 일어난다.

PIT선재 공정에서 J_c 향상을 위한 미세조직 제어 기술이 지금까지 많은 연구를 통하여 밝혀진 부분도 있지만 전력기기에서 요구되는 km급의 장선화를 위해서는 공정 변수들에 대한 고도의 품질관리가 이루어 져야 하며 전구체 분말에서 가공조건에 이르기까지 많은 공정요소들이 최적화되지 않으면 실제 상용화급의 전력기기 등에 사용할 수 있는 산화물계 초전도선재 제조가 불가능하다고 할 수 있다. 한편 기존에 사용하는 PIT선재의 시스 금속인 Ag는 항복강도가 낮기 때문에 기계적 응력이 크게 걸리면 취약한 산화물 초전도체가 파단되어 전류 특성이 크게 열화될 수 있다. 따라서 PIT선재의 기계적 강도를 높이기 위한 새로운 합금시스 개발이 요구된다고 할 수 있다.

4. Bi-2223선재의 개발 현황

가장 활발하게 PIT선재 공정을 상용화하기 위하여 투자하고 있는 회사는 미국 AMSC사로 최근에 150m급의 선재 제조 공정을 최적화하여 액체질소 온도, 자기자장하의 I_c 가 170A를 넘는 세계 최고수준의 Bi-2223 고온초전도선재를 개발하였으며 일반 제품으로는 200m 이상에서 120A 이상의 I_c 를 가지는 제품을 판매하고 있다. AMSC사 선재의 특징은 J_c 를 높일 있는 최적의 분말 및 가공기술로부터 초전도체 필라멘트의 충전율(filling factor)를 가공이 허용하는 범위 내에서 최대한 높였고, 기계적 강도를 높이기 위하여 은 시스 테이프의 양 표면에 30 μ m의 얇은 SUS 테이프를 연속적으로 샌드위치 구조로 남

땀하여 그림 4와 같은 일반 은 시스 선 보다 3배 이상이 되는 265 MPa의 높은 강도를 가지는 초전도선 개발에 성공하였다. 현재 AMSC사는 Bi-2223 선을 연간 20,000 km 규모로 생산 가능한 815평의 공장(EMG센터)을 2001년에 완공하여 50여명의 인력을 현재 연구개발과 생산에 투입하고 있다고 알려져 있다[11]. 하지만 고온초전도 케이블 및 모터 연구를 위한 각 연구 기관에 납품하는 기간으로 미루어 실제 생산량은 이에 미치지 못하는 것으로 보인다.

표 2에서 정리하여 나타냈듯이 AMSC사 이외에도 일본, 유럽, 독일, 중국의 회사에서 Bi-2223고온초전도선재를 판매하고 있다. 아직 AMSC사의 특성치보다는 낮은 값을 나타내지만 거의 근접하는 수준으로 향상하고 있는 추세이다. 독일의 EAS는 European Advanced Superconductors라는 회사로서 VAC로부터 독립하여 Bi-2223 초전도선을 판매하는 신생 기업이다 모기업인 VAC의 연구진 및 기술을 그대로 보유하고 있어, 초전도선의 특성도 우수한 편이다. 그리고 이미 그전에 독일의 Simens, Nexans, Merck등에서 연구자들이 모여 만든 Trithor라는 회사도 활발하게 활동을 하고 있다. 덴마크의 NST는 2002년에 미국 AMSC에 합병되었으며, 그전에 NST에서 Bi-2223 초전도선 개발에 핵심역할을 하였던 중국 청화대의 Z. Han 교수의 자문으로 중국에 InnoST 사를 설립하여 2000년부터 활발히 영업 활동을 하고 있다. 일본의 Sumitomo는 Bi-2223 초전도선 개발에 가장 오래된 기업으로서 짧은 선에서는 높은 특성을 얻고 있다고는 하나 연구 결과의 공개 및 판매에 있어서는 소극적이며, AMSC보다는 특성이 떨어지는 것으로 평가되고 있다. 일본의 Furugawa 전선에서 개발한 Bi-2223 초전도선의 Ic 값은 다른 회사에 비해 비교적 낮으나 최근 일본에서 이 회사의 선재를 사용하여 Super-ACE라는 프로젝트를 통해 고온초전도 케이블을 제작하여 3000 A의 통전 전류에서 약 1 W/m²이라는 세계에서 가장 우



그림 4. SUS 테이프를 양면에 납땜하여 붙인 AMSC사의 Bi-2223 초전도 테이프의 단면[7].

수한 교류손실치를 발표하였다. 이 외에도 호주의 Wollongong 대학의 S. X. Dou 교수 연구실을 중심으로 초전도선 제조 회사가 설립되어 있다.

미국에서는 또한 Bi-2223 초전도선 개발을 위하여 에너지성(DOE)의 WDG(Wire Development Group) 사업을 마련하여 AMSC를 주축으로 하여 아르곤, 로스알라모스 국립연구소와 위스콘신 대학이 함께 초전도 특성 향상을 위하여 2002년부터 4년간 연구 개발을 추진 중에 있다.

한편 국내에서는 정부 연구사업을 통하여 전기연구원과 기계연구원, 원자력연구소를 중심으로 PIT법에 의한 Bi-2223 은시스 고온초전도선을 개발하였으며 전구체 분말 합성기술, Jc 향상을 위한 가공 열처리기술, 은합금 시스 제조기술 등의 PIT공정을 확립하기 위한 기반 연구를 수행하였다. 국내에서 개발된 Bi-2223 PIT선재의 전체적인 특성치 수준은 선진국의 일류 회사 수준보다는 다소 떨어지나 2001년부터 과학기술부의 차세대 초전도 응용기술 개발사업단 주관으로 추진되고 있는 프론티어 과제를 통하여 비약적인 성과를 얻고 있다. 이러한 결과 중 그림 5는 전기연구원에서 개발한 1km 길이의 Bi-2223 초전도선을 보이고 있다. 77K, 자기자장 하에서 이 초전도선의 평균 임계전류는 50A로서 선진 외국의 초전도선 제조 회사와 거의 동일한 장선 가공 능력을 확보하였으며, 가까운 시일 내에 열처리 기술의 개발로 거의 동일한 수준으로 제조할 수 있을 것으로 예측한다. 이러한 예측을 할 수

표 2. Bi-2223 초전도선 제조 회사 현황.

Company	Je(77K,sf) A/cm ²	Ic(77K,sf) A/cm ²	Max stress MPa
AMSC			
Bare	15,200	130	75
Laminated	10,400	130	265
Sumitomo	9,000	80	150
InnoST			
Short	9,000	90	100
long	7,000	70	100
EAS			
Short	10,000	100	120
long	8,000	80	120
Trithor	6,000	60	110
Furukawa	5,000	50	120

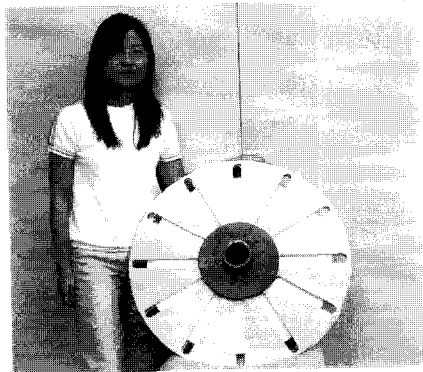


그림 5. 전기연구원에서 개발한 1km 길이의 Bi-2223 초전도선.

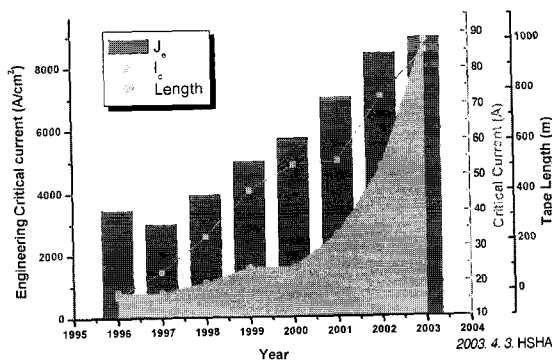


그림 6. 지난 수년간 전기연구원에서 개발한 Bi-2223 초전도선의 특성.

있는 근거로 그림 6에 전기연구원에서 최근까지 개발하였던 Bi-2223 초전도선의 J_e 및 I_c 특성을 나타내었다. 현재 짧은 선에서 90A의 I_c 값을 얻고 있으며, 이를 장선에 적용하게 되면 2004년 중에 70A 이상의 I_c 값을 얻을 것이라고 전망할 수 있기 때문이다.

5. 결론

Bi-2223 초전도선은 송전케이블 분야에 우선적으로 상용화될 가능성이 높은 것으로 전망된다. 앞으로 지속적인 연구개발에 의해 임계전류가 200A를 넘는 선재도 출현할 가능성이 있고, J_e 면에서는 유리하기 때문에 coated conductor와 결합적으로 사용될 가능성이 있다. 대량생산이 본격적으로 시작되었으며, 최근에 수십 m의 선재에서 150\$/kA·m의

가격까지도 제시되어, 선재가격은 계속 떨어지리라 본다. 국내에서도 업체 참여에 의한 상용화연구가 본격적으로 시작되어 머지않아 500m급의 선재가 시판될 가능성이 높다고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] P. Vase, R. Flukiger, M. Llehissa, and B. Glowacki, *Supercond. Sci. & Technol.* Vol. 13, p. 71, 2000.
- [2] J. Clerk Maxwell, A. P. Malozemoff, W. Carter, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 9, p. 2469, 1999.
- [3] L. Marsur, et al., Proc. of ICMC conference, Montreal, Canada 1999
- [4] J. L. Reeves, E. E. Hellstom, V. Irizarry, and B. Lehnorff, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 9, p. 1836, 1999.
- [5] A. Jeremie and R. Flukiger, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 30, p. 1883, 1994.
- [6] Z. Han, P. Skov-Hansen, and T. Freltoft, *Supercond. Sci & Technol*, Vol. 10, p. 371, 1997.
- [7] AMSC homepage (<http://www.amsuper.com>)
- [8] Y. L. Wang, et al., *Appl. Phys. Lett.* Vol. 69, p. 580, 1996.
- [9] J-C. Grivel and R. Flukiger, *Supercond. Sci. & Sci.*, Vol. 9, p. 555, 1996.
- [10] N. Merchant, J. Suo, and V. A. Maroni, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 65, p. 1039, 1994.
- [11] Private communication by Dr. L. Masur, 2002.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명: 하동우

❖ 학력

- 1985년 경북대 금속공학과 공학사
- 1987년 경북대 대학원 금속공학과 공학석사
- 2001년 연세대 대학원 금속공학과 공학박사

❖ 경력

- 1987년 - 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원