

고온 초전도 선재개발 및 기업화 방안

유재무

한국기계연구원 재료기술연구부

1. 머리말

1986년 산화물계 고온 초전도체가 발견되기 전까지 알려져 있던 많은 초전도물질들은 값이 매우 비싼 액체헬륨을 이용해서 온도를 10K이하로 낮추어야만 초전도 상태를 얻을 수 있었다. 따라서 당시까지는 초전도체의 대량적 상용화를 기대할 수 없었다. 그러나 1986년 이후 현재까지 La-Ba-Cu-O[1], Y-Ba-Cu-O[2], Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O[3], Tl-Ba-Ca-Cu-O[4]와 Hg-Ba-Cu-O[5] 계 등에서 초전도 전이온도가 액체질소의 비등점 (77K)보다 높은 값을 보여 액체헬륨을 냉매로 사용하는 기존의 NbTi, Nb₃Sn 등의 저온 금속 초전도체와 비교할 때, 저가인 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있게 되었고 이를 계기로 많은 실용화 연구가 진행되고 있다.

고온초전도 선재의 실용적인 가장 큰 장점은 일정온도 이하에서 일반적인 구리금속 선재보다 같은 단면적에서 전기저항 없이 수백배 이상의 큰 전류를 흘릴수 있는 높은 임계전류밀도를 가지고 있다는 점이다. 간단한 예로 1 cm²의 단면적을 갖는 고온 초전도체로 된 도선을 이상적으로 제작할 수 있다면 그것은 직류 전류에 대하여 전기 저항이 전혀 없이 약 1,000,000A를 흘릴 수 있다. 이것을 이용하면 에너지 소모가 없는 전력장치를 만들 수 있을 뿐만 아니라 작은 부피로 훨씬 큰 전력을 운용하는 전력기기를 만들 수 있다. 현재 상용되고 있는 구리선은 자체의 고유전기저항에 의한 열발생으로 인하여 흘릴 수 있는 최대전류가 제한을 받는다. 냉각수가 흐르는 튜브형으로 생긴 구리선을 사용할 경우 적정전류는 1 cm²의 단위면적당 고작 수백 암페어이다. 이러한 이유로 과거에 구리전선을 사용하여서는 만들 수 없었던 여러 가지 전력응용기기를 고온 초전도 선재를 이용하면 실용화 할 수 있다.

따라서, 1988년 임계온도가 110K 이상인 BSCCO (Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O)계 산

화물 초전도체가 발견된 이후 실용화의 측면에서 고온초전도 선재 및 이를 이용한 전력 응용기기 개발에 미국, 일본, 유럽 등지에서는 막대한 연구개발 노력을 하고 있다. 고온 초전도 선재 및 응용기술은 에너지효율을 극대화 할 수 있는 대규모 전력응용기기의 기본재료 및 기반기술로 활용되어져 대용량 송전선 (>3,000A), 산업체 용 motor (>3,000hp), 변압기 (>30MVA), 발전기, 한류기, MRI용 자석 등에서 막대한 에너지 절감을 가져올 것으로 기대된다. 이러한 전력 응용기기들이 경쟁력을 갖으려면 용량 및 성능을 좌우하는 고특성의 고온초전도 선재가 우선적으로 개발되어야만 한다. 특히 상품화를 위해서는 고온초전도 선재의 가격이 지금보다 훨씬 더 낮아져야만 된다. 본문에서는 최근 초전도 전력응용분야에서 도체로 사용되어지고 있는 고온 초전도 BSCCO 2223 선재의 세계적 연구현황을 그간에 소개된 문헌과 자료 등을 통하여 살펴보고 실용화 방안 및 국내에서의 기업화 방안 등을 언급하고자 한다.

2. 고온초전도 BSCCO 2223 선재의 국외 연구개발 동향

최근 2000년 9월 ASC (Applied Superconductivity Conference) 학회에 발표된 일본 Sumitomo 사의 연구결과를 보면 길이 300m급에서 임계전류 (I_c) 가 97A, 임계전류밀도가 34,400A/cm² 인 고특성 선재를 개발하였다. 특히 길이 1.9km 가 넘는 장선재에서 I_c가 57A, J_c가 30,000A/cm²이상으로 그동안 km급 장선재에서 길이가 길어질수록 I_c 및 J_c가 급격히 떨어지는 문제점 등을 많이 극복한 것으로 사료되어 대규모 양산화가 임박한 것으로 보인다. 동 학회에 발표된 독일 Siemens/Vacuum-Schmelze 의 연구결과를 보면 길이 200~400m급에서 I_c~60A, J_c~21,000

A/cm²인 선재를 제조하여 고온초전도 송전선 개발등에 사용된다. 한편 American Super-conductor Corp. (ASC)의 2000년 2월 M²S-HTSC 학회에 발표한 결과를 보면 17km의 선재에 걸쳐 균일한 engineering critical current density (J_e)값 14,000 A/cm²(J_c>40,000A/cm²)을 갖는 고특성 BSCCO 2223선재 및 35μm층의 스테인레스 스틸 강화층을 테이프 양쪽에 첨가하여 J_e값은 33% 줄었지만 77K에서 400MPa의 인장응력과 0.5%의 인장변형율을 견디는 선재를 개발하였다. 표 1에 BSCCO 2223 선재분야의 국외 선두그룹들의 최근 연구개발 결과들을 종합 정리하였다.

ASC사는 개발된 선재를 이용하여 2001년 중순까지 Detroit 도심부 송배전 실계통 line에 적용한다고 발표하였고 이에 따라 올해 7월 1일 까지 고온 초전도 선재 29km를 Pirelli Cable사에 제공할 예정이다. 또한 ASC사는 2002년까지 BSCCO 고온 초전도 선재의 생산라인을 연간 10,000km 수준으로 증설한다고 발표하여 BSCCO 고온 초전도 선재의 본격적인 상용화를 알리고 있다. ASC사는 현재 시판되고 있는 고온 초전도 선재 중에 최고특성인 임계전류 100A인 선재를 kilo-amp meter당 \$300에 시판하고 있다.

표 1. 국외 선두그룹들의 고온초전도 BSCCO 2223 선재의 연구개발 결과들(2000. 9월기준)

회사명	길이 (m)	임계전류 I _c (A)	임계 전류밀도 J _c (A/cm ²)	공학적 임계전류밀도 J _e (A/cm ²)
ASC	300	100	40,000	14,000
Sumitomo	300	97	34,400	10,300
	924	74	33,900	8,100
	1,623	63	31,300	-
	1,906	57	30,000	-
NST	1,000	38	30,000	-
Siemens/Vacuum-Schmelze	200 ~400	60	21,000	7,000

이 가격은 1998년의 kilo-amp meter당

1000\$ 과 비교하면 1/3 수준으로 떨어진 것으로 현재 임계전류 (I_c)가 100A 이상인 고특성 선재를 meter당 30\$에 시판하고 있으며 2003년 경에는 현재의 1/3 수준으로 가격이 훨씬 저렴해져서 고온초전도 선재의 상품화가 가능하며 대규모 시장을 형성할 가능성이 한층 높아지고 있다. 표 2에 현재 시판중인 BSCCO 2223 tape의 사양과 가격을 나타내었고, 그림 1 과 표 3에 각각 BSCCO 2223 선재의 제조회사 및 년도별 임계전류의 증가 추이를 나타내었다. 임계전류특성이 매년 지속적으로 향상되어지고 있고 최근 ASC사의 경우 2배 이상 임계전류값이 향상되어 실용화에 밝은 전망을 보여주고 있다.

표 2. 현재 시판중인 BSCCO 2223 tape의 사양 및 가격 (2000.6.기준)

	ASC	BICC	NST
Spec.	sheath: Ag/metal alloy dimension: 4.1x0.203mm I _c : 100A J _c >40,000A/cm ² Fill factor: 0.31	sheath: Ag(Mg-Ni) dimension: 3.2x0.3mm I _c : >30A Fill factor: 0.25-0.30	sheath: Ag/metal alloy dimension: 3.26x0.276mm I _c : 38.4A J _c >30,000A/cm ²
Price	\$30/m	\$35/m	\$50/m

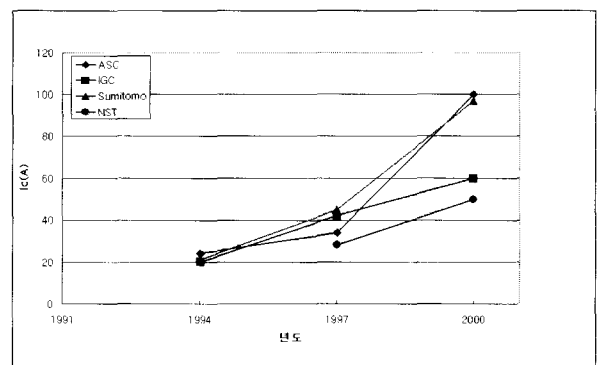


그림 1. BSCCO 고온 초전도 선재 제조 회사별 년도별 임계전류 증가상황

Sumitomo electric Corp.은 98년 이미 길이 1,000m급의 고전류도체 (High amperage conductor)의 임계전류 밀도값이 77K, 0T에서 30,000 A/cm²를 나타내는 고임계전류 선재를 개발하였고 같은해 길

전력기술 심포지엄 특집

표 3. HTS BSCCO tape의 제조회사 및 년도별 임계전류값 및 판매가격

	ASC	IGC	Sumitomo	NST	판매가격
1994년	24A	20A	21A	-	
1997년	34A	42A	45A	28A	1000\$/kA-m
2000년	100A	60A	97A	50A	300\$/kA-m
2003년					100\$/kA-m (ASC목표)

이 수 cm급이지만 임계전류밀도가 75,000 A/cm²급인 세계 최고특성의 BSCCO 2223 선재를 개발한바있다.

지난 1998년 ASC학회에서는 독일의 Siemens사가 길이 18km의 장선재를 개발하였고 덴마크의 NKT Research사의 선재분야의 벤처기업으로 새로이 설립된 Nordic Superconductor Technologies (NST)사가 길이 700m에서 $I_c \sim 30A$, $J_c \sim 24,000A/cm^2$, 길이 1300m에서는 $I_c \sim 28A$, $J_c \sim 23,300A/cm^2$ 급의 선재를 개발하였다. 현재는 $I_c \sim 50A$ 급의 BSCCO 고온 초전도 선재를 1m당 ~40\$의 고가로 시판중이다. 현재 BSCCO 2223 장선재분야에서는 앞서 언급한 선두그룹인 5개사의 벤처기업 또는 대기업과 미국의 Eurus, 영국의 BICC cable, 호주의 MM cable등이 선재의 특성에 따라 1m당 20~60\$의 고가로 판매중 이어서 향후 고 임계 전류밀도특성을 갖는 장선재가 훨씬 고부가가치를 가질 것으로 예상되고 있다.

현재까지 연구결과 및 개발 동향들을 분석해보면, 1991년 11월 벤처기업으로 NASDAQ에 상장된 미국의 ASC사가 최근 좋은 연구결과 및 성공적인 기업화를 보여주고 있다. Model case로서 ASC가 성공한 이유들을 분석해보면, 첫째 에너지성 (DOE)의 SPI 프로그램하에 여러 초전도 전력기기 개발팀들에 10년 가까이 선재공급처로서 참여하였다. 즉 장기적인 연구개발 프로그램하에 지속적인 특성향상과 인프라 구축이 가능하였다. 둘째 여러 초전도 전력기기 개발팀들과 프로젝트를 수행하면서 실수요자층의 요구에 맞는 선재를 개발할 수 있었고 특성향상과 더불어 대량생산을 통한 제조원가를 감소시켜 신규수요를 창출하고 있다. 셋째 재정적으로 주식시장에서 공격적인 R&D와 홍보로 투자

자들을 유치하여 자체적으로 충분한 현금을 보유하고있어 안정적이다.

현재 선진국에서는 해당 기술분야에서 길이 1km 이상의 장선화 공정은 개발되어 있고 생산단가를 낮추기 위한 연구가 활발히 진행중이다. 따라서 국내에서도 본격적으로 BSCCO 고온 초전도 선재의 제조가격 감소를 위한 은 피복재 대체 재료 연구 및 임계전류특성을 좌우하는 고특성 초전도분말제조 기술개발에 많은 연구가 수행되어져야할 것이다.

3. 고온초전도 BSCCO 선재의 상품화를 위한 연구방안

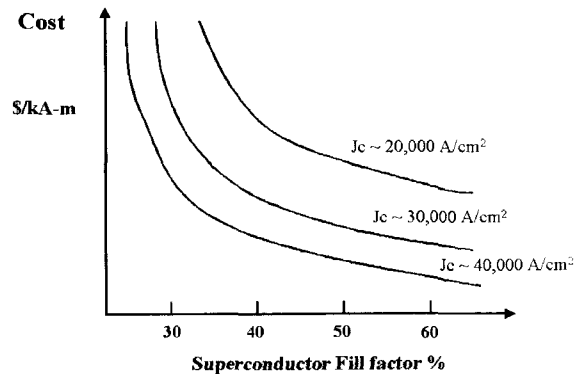


그림 2. 임계전류밀도와 초전도체 충전율이 제조가격에 미치는 영향

현재 고온초전도 BSCCO 2223 선재는 앞서 언급한바와 같이 미국, 일본, 유럽등의 벤처기업 또는 대기업등이 표2와 같은 사양 및 가격으로 판매중에 있다. 따라서 실용화 및 상품화에 초점을 맞춰서 연구목표를 BSCCO 선재의 상업화가 가능한 수준인 <30\$/kA-m로하여, BSCCO 고온 초전도 선재의 제조가격 감소를 위한 초전도분말 충전율을 증대, 은 피복재 대체 재료 연구 및 임계전류밀도(J_c) 향상을 좌우하는 고특성 초전도 분말제조 등에 연구개발 노력이 집중되어져야하며, 대량생산을 위해서 단계별로 기업에 핵심기술 이전 및 기업화가 이루어져야 될것으로 생각된다.

특히 상품화를 위해서는 선재의 가격이 지금보다 더 낮아져야만 된다. 제조가격은 그림 2와 같이 임계전류밀도 및 초전도체 충전율에 의해 크게 영향을 받는다. 즉 임계전류밀도와 충전율이 높을수록 제조가격을 크게 줄일 수 있다. 또한 피복재로 사용되는

은 금속의 분율 최소화 및 초전도체와 반응성이 없어 대체가능한 경제성있는 피복재료를 개발 할수있다면 제조원가는 현저하게 감소 되어질수있을 것이다. 제조원가중 가장 큰 비중 (>85%)을 차지하는 은 금속의 가격 대비 성능 (Cost/Performance)을 최근 (2000. 9) ASC사의 고온초전도 선재를 기준으로 계산해보면: Tape dimension: 4.1 x 0.2mm, $I_c = 100A$, ~40% HTS fill factor, Ag cost = \$0.153/g, \Rightarrow Ag C/P = \$7.9/kA-m 정도로 현재 ASC가 선재를 \$300/kA-m 에 판매하는 것은 상당한 고부가가치를 누리고 있다. 따라서 특성 및 충진을 향상이 향후 그림3과 같이 된다면 Ag C/P 가 ~\$3/kA-m 정도로 낮아져서 대량생산시 판매가 <\$30/kA-m 가능하여 현재보다 1/10로 감소하면 대규모의 신규 수요를 창출할 수 있어 상품화가 가능하리라 사료된다.

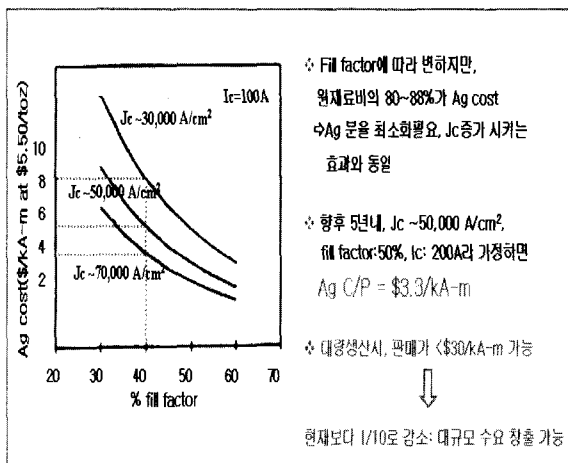


그림 3. 특성 및 충진을 향상에 따른 은 금속의 가격 대비 성능도

3. 맺는말

국내에서의 기업화는 기술 성격상, 기술 진입 장벽이 높은 편이어서 외국 선두 그룹의 기술 도입이 어려워 대기업이 단기간 대규모 투자로 양산화가 어려울 것으로 예상된다. 또한 특성 향상 및 가격 경쟁력을 위한 지속적인 연구개발이 필요하여 미국의 ASC사와 같이 기술력위주의 전문 벤처기업 또는 대기업에서 분사된 벤처기업형이 적합할 것으로 사료된다. 앞서 언급하였듯이 미국의 ASC사는 에너지성 (DOE) 의 SPI 프로그

램하에 선재 공급처로서 역할을 하면서 10년동안 창업 보육기 (incubation time)를 거치면서 성공적으로 기업화하였다.

따라서 국내에서도 미국의 DOE가 ASC사를 육성하듯이 초기에는 정책적인 지원이 필요할 것으로 사료되어진다. 국가 대형과제에 선재공급처로서 참여를 하게 하여 여러 응용기기 개발 팀의 요구에 단계별로 적극적으로 대처할 수 있어야 할 것이다. 즉 응용기기 사양 (길이, 특성,...)에 맞는 선재를 개발할 수 있어야 하며, 사용자가 필요 (가격, 특성)에 의해 국내 선재를 구매하게 되도록 하여야 할 것이다. 이와같은 보육기 (incubation time)를 성공적으로 거치면서, 특성 및 가격경쟁력 (길이 > 1km, 가격 < 30\$/kA-m)을 보유한다면 대규모의 신규수요를 창출할 수 있어서 성공적인 기업화가 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] J.G. Bednorz and K. A. Muller, Z. Phys. B64, 189 (1986).
- [2] M.K. Wu, J. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, U. Q. Wang and C.W. Chu, Phys. Rev. Lett. 58, 908 (1987).
- [3] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano, Jpn. J. Appl. Phys. 27, L209 (1988).
- [4] Z. Z. Sheng and A. M. Herman, Nature, 332, 138 (1988).
- [5] S. N. Putilin et al., Nature, 362, 226 (1993).

저자이력



유재무

'83 - '87 연세대학교 금속공학과 (학사), '87-'90 미국 Michigan 주립대 재료공학과 (석사), '90-'94 미국 Michigan 주립대 재료공학과 (박사), '94 미국 Michigan 주립대 재료공학과 Research Associate, '96 일본 금속재료 기술연구소(NRIM) STA Fellow, '94-현재 한국기계연구원 선임연구원