

제2세대 고온초전도 선재 기술개발 현황 및 전망

박민원

차세대초전도응용기술개발사업단 기술팀장

1. 서론

전력기기에 반드시 들어가야 할 핵심적인 재료는 전기를 흘릴 수 있는 선재이고, 초전도 전력기기에 반드시 들어가야 할 핵심적인 재료는 초전도 선재이다. 그러나, 초전도 선재(고온초전도 선재일 경우)는 극저온 상태에서만 초전도현상을 유지할 수 있으므로, 초전도 전력기기의 핵심적 부품은 기존의 전력기기와는 달리, 초전도 선재 외에 극저온 냉동기가 하나 더 포함되게 된다.

초전도 전력기기의 상용화를 위한 중요한 Factors는 상용화를 위한 신뢰성 기술개발 외에 상용화 가능한 경제성 확보에 있다. 경제성 확보 측면에서만 가지고 생각한다면, 초전도 선재의 가격(현, 1세대 Bi-2223 PIT 선재의 경우 : 200\$/kAm)과 극저온 냉동기의 가격(현, 스테링 냉동기 1kW급일 경우 : 100\$/W)이 초전도 전력기기의 전면적 상용화를 위해서는 현재 수준보다 많게는 5배 이상 내려가야 한다. “닭이 먼저인가? 달걀이 먼저인가?”를 생각하기는 아직까지는 사치인지 모르겠지만, 극저온 냉동기의 가격은 초전도 전력기기의 보급이 보다 확산되지 않는 이상, 드라마틱한 가격하락은 쉽게 이야기 할 수 없다고 본다. 그러면, 역시 초전도 전력기기의 상용화의 핵심 열쇠는 우선적인 초전도선재의 고성능화 및 저Cost화이겠다. 기 상용화를 이루었다고 판단되는 제1세대 초전도 선재(Bi-2223 PIT wire)를 포함하여 고온초전도 선재는 크게 제1세대 선재와 제2세대 선재(Coated Conductor wire)로 나뉘어진다. 그 중, 고성능화 및 저Cost화 측면에서 그림 1과 같이 비교이상의 우위를 점하고 있는 제2세대 선재에서 최근 상징적인 연구결과들이 발표되고 있으며, 우려되었던 Use-friendly 한 초전도 선재의 현실화가 가까워지고 있다는 느낌을 주고 있다. 본고에서는 그에 대한 기술개발 동향을 언급하고 몇몇 되지 않는 속제도 던져 보도록 한다.

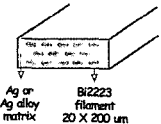
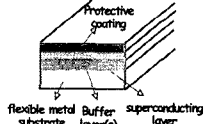
1st generation wire Bi-2223 PIT	2nd generation wire Coated Conductor
<ul style="list-style-type: none"> > commercial level of development > high field applications limited to $T < 30K$ > Km lengths with reproducible peaperties > High cost 	<ul style="list-style-type: none"> > early development (scale-up issue) > enabling properties for operation at LNE > Upto 30m length demonstrated > Unproved economics
AMSC, Innot, Trithor, etc. $J_c = 74 \text{ kA/cm}^2$ (short), 40 kA/cm^2 (long) $I_c = 120 \text{ A}$ $J_c = 23 \text{ kA/cm}^2$ (short), 15 kA/cm^2 (100m)	JSC, ORNL, LANL, ANL, AMSC, Sumitomo, Fujikura, etc. $J_c > 4 \text{ MA/cm}^2$ (short), 0.87 MA/cm^2 (1m), 0.8 MA/cm^2 (30m) $I_c = 150 \text{ A}$ (8cm), 122 A/cm (1m), 40 A (30m) $J_c = 53 \text{ kA/cm}^2$ (short)
	

그림 1. 제1세대 선재와 제2세대 선재 (전기 연구원 박찬박사 제공)

2. 현실화 되는 제2세대 초전도 선재

제1세대 고온초전도 선재를 개발 중이고, 현재 판매를 실시하고 있는 회사는 미국(AMSC사), 독일(VAC사, Trithor사), 일본(Sumitomo사), 중국(InnoST사) 등 전세계적으로 약 6~7개사가 존재하고 있으나, 그림 1에서도 표시되

In Summary

- MFC with BSCCO-2223 is the Queen of HTS wire
 - Commercial Performance Today
 - Commercial Price/Performance on Near-Term Horizon
 - Additional Cost Reductions and Performance Increases Anticipated
- CCC with YBCO-123 is the King of HTS wire
 - Potential for significantly lower \$/kAm vis-à-vis MFC
 - Making steady progress
 - Years from proof of commercial potential
- MgB₂ - potential low-cost conductor, limited applications if viability proven

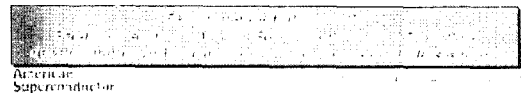


그림 2. AMSC사의 제1세대 고온초전도 선재와 제2세대 고온초전도 선재의 비교자료 (DOE 2002 Wire Development Workshop, St. Petersburg, FL, 22 Jan 2002)

어 있듯이 제2세대 고온초전도 선재의 개발

제2세대 고온초전도 선재 특징

이 성능 면에서 급속도로 제1세대 고온초전도 선재를 압박하고 있다는 느낌을 받을 수 있다. 반면, 제1세대 고온초전도 선재 개발회사는 실리콘 반도체와 화합물 반도체의 경우를 비교하면서 제1세대 선재의 상용화 측면에서의 강점을 적극적으로 부각시키기도 했다. (그림 2 참조) 하지만, 제2세대 고온초전도 선재를 중점적으로 개발연구하고 있는 몇몇 기업 또는 연구소, 대학에서는 2007년을 전후하여 제2세대 고온초전도 선재가 제1세대 고온초전도 선재를 가격 및 성능측면에서 역전시킨다고 역설하고 있으며 관련된 자료들을 종합 분석한 차세대초전도 응용기술개발사업단(이하, CAST)이 작성한 Graph를 보더라도 시기의 문제이지, 제2세대 고온초전도 선재의 Crossover는 다가올 자명한 사실로 받아들여지고 있다. 그에 대한 CAST의 분석 결과표는 그림 3과 같다. (분석결과에 대한 기초자료는 3장에서 자세히 설명됨.)

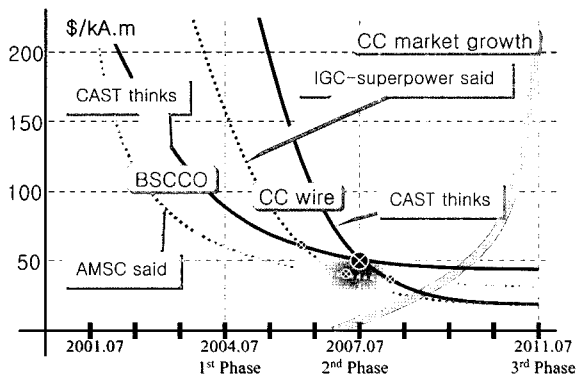


그림 3. 제2세대 고온초전도 선재의 가격 및 성능 향상 연도별 예측 (차세대초전도 응용기술개발사업단 제공)

결국, 제2세대 고온초전도 선재의 역전가능성을 강하게 부정한 대표적인 제1세대 고온초전도 선재 개발회사 AMSC사도 제2세대 고온초전도 선재의 상용화 가능성을 긍정하는 보고를 ISIS 2002를 통해서 그림 4와 같이 발표하게 된다.

3. 제2세대 고온 초전도 선재 개발 기관별 최근 동향

제2세대 고온초전도 선재가 현실화 되어가고 있다는 내용을 두서없이 막연하게 설명하기 보다는 개발 기관별 최근 동향을 분류해 보

는 것도 의미 있는 작업이라고 생각된다.

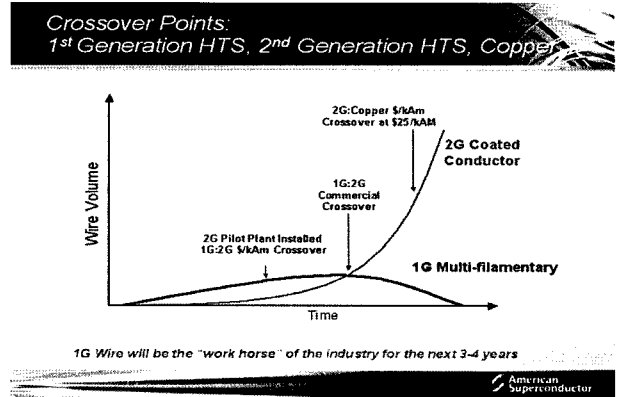


그림 4. ISIS 2002 동경, AMSC사의 발표자료 중 (AMSC사 발표자료 인용)

가. American Superconductor사(이하, AMSC사)

AMSC사는 자타가 인정하는 고온초전도 선재관련 전문기업이다. 지난해 12월부터 새로 건립한 세계 최초의 상용화 HTS 선재 plant (그림5 참조)에서 제1세대 고온초전도 선재를 판매/공급하기 시작하였으며, 2003년 1/4분기 주문량도 450km에 달하는 것으로 자체 보고되고 있다. 1987년도 MIT대학 연구그룹을 중심으로 회사가 결성된 이후, 눈에 띄는 성과를 발표하지 못하다가 2년전 임계전류 100A를 넘는 제1세대 초전도 선재를 상용화 한 것을 시작으로 공격적인 경영전략으로 소형 SMES를 상용화 시키는 것과 함께 제2세대 초전도 선재분야에서도 MOD-TFA법을 이용한 10m 길이에서 임계전류 107A 달성을 지난해 11월 발표(그림 6 참조)한 이래, 올해 4월에는 임계전류 184A의 성과를 발표하였다.(그림 7 참조)



그림 5. 세계최초의 상용화 HTS 선재 plant (AMSC사 Devens공장)를 뒤로한 필자

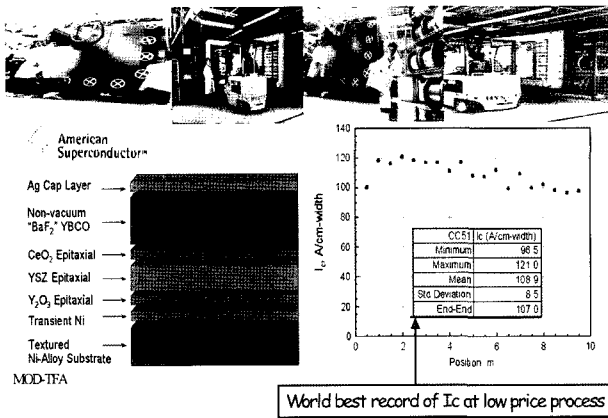


그림 6 MOD-TFT법을 이용한 10m길이의 임계전류 107A/cm 달성결과 (미국 AMSC사 자료 인용)

금년 5월에는 제2세대 선재를 Ultera(덴마크 NKT사와 미국 Southwire사의 초전도전력케이블을 위한 Joint Venture 기업)사에 최초로 출하하였다. Ultera사는 최전도 전력케이블의 주요부분에 있어 다심 HTS 케이블 도체의 제조, 시험을 ORNL과 공동으로 실시하고 있다. Ultera-ORNL 팀은 액체질소침전시에 110A의 통전능력을 가지는 30piece의 1.5m 와이어를 발주하였는데, 이에 AMSC사는 10m길이의 와이어를 제작하여 소정의 길이로 절단하고 공급하였는데, Rod의 통전능력은 10m 길이에 184A라고 AMSC사는 발표하였으나, 평균 통전능력은 150A 정도인 것으로 Ultera-ORNL 팀은 측정하였다고 한다.

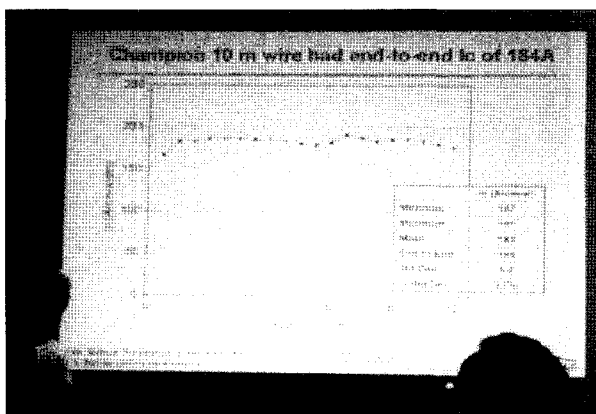


그림 7. AMSC사가 개발한 10m급 184A/cm의 제2세대 고온 초전도 선재 발표화면 (2003 DOE peer review의 발표화면을 촬영한 것 이라, 화질에 문제점이 있음을 양해 바랍니다.)

금년 7월15일 AMSC사는 또 한번 세계를 놀라게 하였다. 다름이 아니라, 기존 중국의 초전도 선재회사인 InnoST사를 뚫고 중국과학원(CAS ; Chinese Academy of Sciences)으로부터 30km의 초전도 선재를 수주 받은 것이다. 이와 같이 AMSC사는 기 판매되고 있는 제1세대 고온초전도 선재의 판매구역을 점점 확대시켜 나가고 있으며, 또한 제2세대 고온초전도 선재의 판매를 세계최초로 실시하는 등, 초전도 선재에서의 Microsoft사와 같은 위치를 더욱 강화시키고 있다.

단지, 우려되는 점은 AMSC사에서 개발된 제1세대 초전도 선재는 DC 응용기기에 초점을 맞추고 개발됨으로 선재의 강도가 너무 강하여 케이블의 경우 Pitch미세조절에 일부 무리가 있으며, 또한 AC loss의 정확한 DB가 없어(물론, 다른 회사 선재들이 AC Loss 관련 DB를 공표한 것은 아님.) AC 응용기기에 사용할 경우에는 보다 신중히 접근할 필요가 있다고 판단된다.

나. 일본 Sumitomo사

Sumitomo사는 전통적인 케이블 및 금속재료 관련 대기업이다. 제2세대 고온초전도 선재의 개발에 있어 미국과 일본의 가장 큰 차이점은 미국은 AMSC사와 같은 벤처회사 중심의 연구개발이라면 일본은 철저한 대기업 위주의 연구개발 추진이 돋보인다. 물론 Sumitomo사는 초전도 전력케이블 개발에 있어서도 세계최초의 100m, 삼상 Cold Dielectric 6.6kV급 초전도 전력케이블을 개발하는 등, 다양한 초전도 분야에서 눈부신 연구성과물을 산출하고 있다. 제1세대 선재 연구개발분야에서는 일부 AMSC사와 특허권 분쟁이 있어 몇몇 풀어야 할 문제가 남아 있었는데, 이부분도 매끄럽게 해결되었(물론, AMSC사측이 유리한 조건으로)다고 한다. 제2세대 고온초전도 선재에서는 기본적으로 ISD법을 이용하고 있으나, 연구결과물에 있어 현재까지는 눈에 띄는 결과를 도출하고 있지는 않다. 물론, 제2세대 고온초전도 선재 개발을 위한 활발한 연구는 지속적으로 하고 있으며, 미국의 IGC-Superpower사와 다양하게(전력케이블뿐만 아니라, 선재에서도) 접근하고 있는 것으로 파악된다.

다. 일본 ISTECSRL 및 Fujikura사 최초로 IBAD-YSZ를 이용한 완충층을 개발

제2세대 고온초전도 신재 특집

한 곳은 일본 ISTECS-SRL 연구소이다. 물론, 현재는 YSZ의 증착속도에 대한 문제점으로 IBAD-GZO를 이용한 완충층 개발에 집중하고 있다. 알려진 바로는 IBAD-GZO는 IBAD-YSZ보다 증착속도에서는 두배, YBCO를 올렸을 시의 J_c 면에서도 2배이상 향상시킨다고 자국의 매체를 통해 발표하고 있다. 올해 초, 발표에 의하면, ISTECS-SRL과 후지쿠라, JFCC 공동연구에서 IBAD-GZO 기판위에 PLD법으로 CeO₂층을 증착한 결과 배향도 25도(GZO막)에서 단 1분에 10도, 6분 증착에 5.6도가 되었다. 10-13도의 IBAD-GZO를 사용하게 되면, 최종도달배향도가 2.4도인 단결정 수준도 가능하다고 한다. 그 위에 PLD법으로 YBCO를 증착한 결과 4.4MA/cm²을 기록하는 등, 놀라운 연구결과물들을 연이어 발표하고 있다. 가장 최근의 뉴스에 의하면, Fujikura사에는 IBAD/PLD법을 이용한 제2세대 초전도 선재를 길이에서는 100m, 임계전류에 있어서는 30A/cm에 이르는 연구결과를 발표하였고, ISTECS-SRL에 새로 설치된 IBAD-GZO를 포함한 장비를 3개월동안 운전한 결과 20m 길이에 임계전류 100A/cm에 이르는 결과를 발표하였다.

라. 미국 IGC-Superpower사

미국 내 고온초전도 선재의 거대한 산맥에는 여러 봉우리가 있지만, 그 중에서도 제2세대 고온초전도 선재면에서는 AMSC사와 자웅을 겨룰 수 있는 곳이 IGC-Superpower사이다. IGC사의 자회사로서 본사의 막대한 자금 지원과 함께, CRADA를 통한 강한 미국 National Lab.의 기술지원을 이어받아 최근 들어 Remarkable한 결과들을 양산하고 있다. IGC-Superpower사는 기관면에서는 IBAD와 RABiTS를 같이 채용하고 있으며, YBCO증착은 PLD법과 MOCVD법을 같이 개발 중에 있다. 올해 초 10m급에서 임계전류 100A/cm의 연구결과를 발표하고 짧은 기간에 대비하여 놀라운 연구결과라고 주위를 놀라게 한것도 부족하여 며칠전 2003 DOE peer review에서는 18m에 임계전류 111A/cm라는 연구결과를 발표하였다.

이것은 AMSC사의 10m길이에 임계전류 184A/cm를 다시 뛰어 넘는 연구결과이며, 특히 YBCO증착을 MOCVD법(비교적 저가공정으로 인식되고 있음.)을 이용하였다는 점에서

도 고무적인 연구결과이다. Yurek(AMSC사 사장)과 Pellegrino(IGC-Superpower사 사장)의 일전은 현재 Pellegrino의 우세로 진행되고 있다. 물론, 쉽게 승부를 판가름하기에는 힘들 것 같고, 앞으로 3년 정도(?)는 지켜봐야 겠다.

4. 뜨거운 개발경쟁

위에서 설명한 바와 같이 제2세대 고온초전도 선재의 개발 경쟁은 대학을 제외한 초전도 선재 개발회사를 중심으로 검토해 보면 현재, 3개사가 뜨거운 개발 경쟁의 소용돌이 속에 있다고 볼 수 있다. 그 경쟁의 중심에 있는 개발회사는 일본의 ISTECS-SRL과 Fujikura사, 미국의 AMSC사와 IGC-Superpower사이다. 일본의 Fujikura사는 지난해 10월, 길이 46m에서 임계전류 74A/cm의 선재를 발표하여 초전도 관련 연구자들을 놀라게 한 후, 올해 7월에는 비록 임계전류는 낮지만, 100m급의 선재(임계전류 30A/cm)를 발표하여 다시 한번 귀를 기울이게 만들었다. 미국의 AMSC사는 지난해 10m급에서 107A/cm의 선재를 발표하고 올해 4월에는 10m급 184A/cm의 선재를 발표하였다. 단지, 거의 일년이 지난 지금에도 보다 길어진 선재를 발표하지 못한다는 점에서 다소 주춤하고 있다고 할 수 있겠다.

반면, IGC-Superpower사는 지난해까지만 해도 1m 길이의 선재에서만 높은 임계전류 결과를 보고하면서 AMSC사에 뒤지고 있지 않은가 하는 불안감을 안겨주었으나, 올해 2003 DOE peer review를 통해서 통쾌한(IGC-Superpower사 측면에서 본다면) 역전 결과(18m, 111A/cm)를 발표하였다. 뜨거운 경

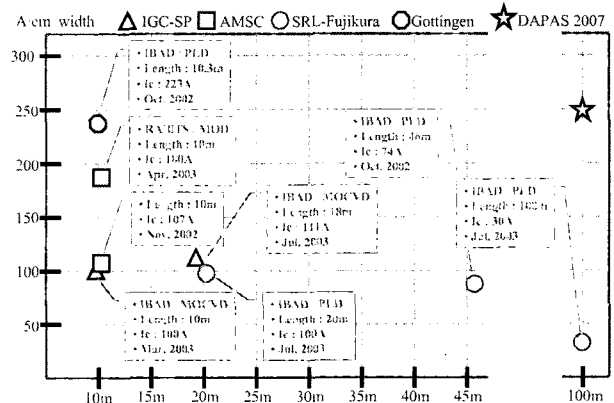


그림 8. 제2세대 고온 초전도 선재의 뜨거운 경쟁의 현장 (차세대초전도응용기술개발사업)

단 제공)

쟁의 흐름을 그림으로 표현하면 다음 그림 8과 같다.

5. 우리는 무엇을 준비하여야 하는가?

한국에서의 본격적 제2세대 초전도 선재의 연구개발이 시작된 것은 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업 중의 하나인 차세대초전도응용기술개발사업(이하, DAPAS)이 시작된 이후라고 할 수 있다. 2001년 9월 연구개발이 시작되어 현재, 2년의 기간이 지났다. 개발 초기 Substrate부분에서는 RABiTS를 개발과제로 추진하였으며, Buffer층 및 YBCO층 증착에는 PLD법 및 MOCVD법을 개발과제로 추진하였고, 소규모로 MOD법에 의한 YBCO층 증착연구도 지속 추진되었었다. 2002년 이후, 제2세대 고온초전도 선재의 급속한 국제변화에 능동적으로 대처하기 위해 추가적으로 2003년 하반기부터 IBAD textured template 연구개발을 추가하였으며, DAPAS 시작초기 설정된 연구개발목표로는 국제동향을 리드할 수 없다고 판단, 각 연구자들의 목소리를 하나로 모아 새로운 연구개발목표를 재설정하기도 하였다. 미국, 일본과 비교해서는 약 15년이 뒤진 연구개발이지만, 국외에서 활동 중이던 한국국적의 연구진들이 속속 국내에 자리를 잡고, 선택과 집중을 통한 System적인 연구개발환경의 뒷받침 등이 차근차근 이루어지고 있는 지금을 생각해 본다면, 충분히 2007년경으로 예측되고 있고 제2세대 초전도선재의 상용화 시점에 한국도 하나의 점을 찍을 수 있다고 판단된다.

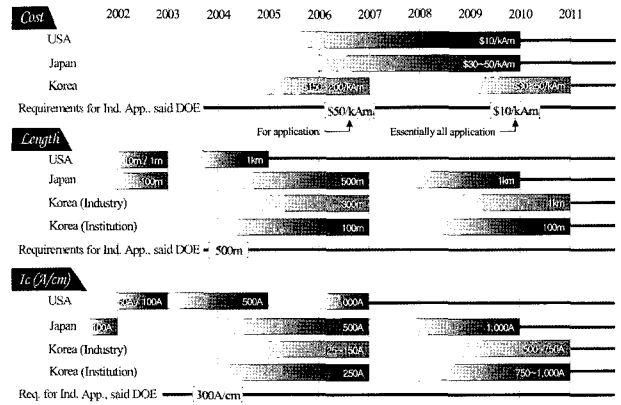


그림 9 한국, 미국, 일본의 제2세대 고온초전도 선재 기술개발 전망 (차세대초전도응용기술개발사업단 제공)

마지막으로 그림 9는 한국, 미국, 일본의 제2세대 고온초전도 선재 기술개발목표를 요약한 그림이다. 본그림이 전망이 아닌 현실로 다가올 것이라 확신하며 본고의 페이지를 더 이상 넘리지 않도록 한다.

저자이력



박민원
 1970년 2월 12일생, 1997년 창원대학교 졸업(공학사), 2000년 일본오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 동대학원 졸업(공학박사), 현재 차세대초전도응용기술개발사업단 기술팀장