

(주)서남의 2세대 고온초전도 장선재 제조기술 현황과 상용화 전망

글 _ 문승현
(주)서남

1. 서론

20세기까지 산업화 과정이 일단락되고, 21세기 지식정보화의 새로운 시대가 열리고 있는 시점에서, 기존 반도체 기술 및 국가 기반 기술은 시장 확대에 의한 새로운 요구와 그에 따르는 효율성의 감소로 인해 이미 포화되었거나, 포화가 예상되고 있다. 따라서 우리나라를 비롯한 선진국은 각각의 미래핵심 연구 과제를 선정하여 지속적인 연구 개발을 수행중이고, 특히 고효율 에너지 기술, 우주 과학, 건강, 환경오염 방지 등의 경제적 파급 효과가 크고, 공공성이 매우 강한 차세대 기술 개발에 중점을 두고 있다.

현재 보급되어 있는 구리선은 자체의 고유전기저항에 의한 열 발생으로 인하여 흘릴 수 있는 최대전류가 제한을 받는다. 일반적인 전력케이블에 사용되는 구리선의 경우 발열 문제없이 흘릴 수 있는 전류는 1 mm²의 단위 면적당 3 A 미만에 불과하다. 고온초전도선재의 실용적인 가장 큰 장점은 일정온도 이하에서 구리 선재와 비교하면 같은 단면적에서 전력 손실 없이 수 백 배 이상의 큰 전류를 흘릴 수 있는 높은 임계전류밀도를 가지고 있다는 점이다. 이것을 이용하면 에너지 손실이 없는 전력 기기를 만들 수 있을 뿐만 아니라 작은 부피로 훨씬 큰 전력을 운용하는 전력기기를 만들 수 있다. 초전도 선재 개발에 있어 상용화에 요구되는 특징은 임계전류가 500 A/cm-width 이상이고, 기계적 강도가 우수하여야 하며, 1 km 이상의 장선화가 가능 하여야 한다. 또한 초전도 선재의 상용화 여부는 일정 수준의 특성을 유지함과 동시에 비스무스 산화물 계열의 1세대 초전도 선이나 구리

선과 비교하여 가격이 낮아야만 기존의 기기를 초전도 선재로 대체 할 수 있다.

이와 같이 기존 구리선 기술의 한계를 넘어 설 수 있는 2세대 초전도 선재, coated conductor(CC)의 개발은 초전도 산업화 기술 확보차원의 초전도 관련 기반 기술로서 선행되어야 할 핵심 기술이다. 또한 초전도 선재의 개발은 많은 공정기술과 평가기술이 요구되고, 여타의 기반산업으로의 파급효과가 큰 기간 기술이다. 고온 초전도 선재의 초전도층은 MOCVD (미국 SuperPower, 일본 Chubu Electric Power Company), MOD (AMSC, 일본 SRL, 일본 SWCC, 프랑스 Nexans), PLD (일본 SRL-NCCC, 미국 Los Alamos 국립연구소, 일본 Fujikura, 독일 Bruke), co-evaporation (독일 THEVA, 이태리 Edison, 한국 전기연구원) 등의 공정으로 제조되고 있으나, 현재 양산기술을 보유한 회사는 전 세계적으로 미국의 American Superconductor (NASDAQ 등록)와 SuperPower 등 두개 회사 뿐이며 국내 유일의 초전도 선재 생산 기업인 (주)서남에서 개발한 공정은 상기 회사들의 공정에 비해 생산속도와 원가 면에서 앞서 있다.

2. 본론

2.1. (주)서남의 고온초전도 선재 생산 공정

고온초전도 선재의 생산을 위해 설립된 벤처기업인 (주)서남은 GdBa₂Cu₃O_{7.8} (GdBCO) 초전도 선재를 제조할 수 있는 파이롯트 라인을 구축하였으며 현재 1 km 급 수준의 고온초전도 선재를 생산할 수 있는 기술을 확보하였다. (주)서남에서 생산중인 고온초전도 선재의 모식도를

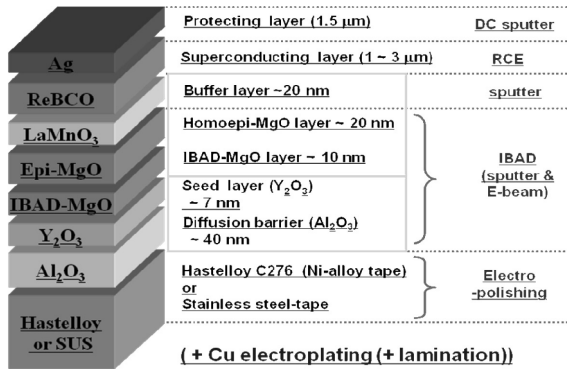


Fig. 1. (주)서남의 2세대 고온초전도 선재의 구조

Fig. 1에서 나타내었다. 특히, 하스텔로이나 스테인레스 강 금속 기판 위에 여러 개의 완충층을 증착하고 고속 (~360 m/h, 4 mm 폭 기준)으로 GdBCO 초전도상을 연속으로 형성할 수 있는 RCE-DR (Reactive Co-evaporation Deposition & Reaction) 기술을 세계에서 최초로 개발하여 2011년에 920 m 길이의 GdBCO 초전도 선재를 제조하여 액체질소온도에서의 최저 임계전류값 355 A/cm를 달성하였다($I_c \times L = 326,600 \text{ A} \cdot \text{m}$). (Fig. 2 참조)

RCE-DR 공정은 기존의 초전도 선재 생산 방법과 차별되는 방법으로 비정질의 금속 물질을 E-beam evaporation 법으로 증착시킨 후 특수하게 제작된 열처리로를 이용하여 결정화가 잘 이루어진 초전도 선재가 생산될 수 있게 만든 획기적인 초전도 선재 제작법으로, 공정의 개략적인 모습을 Fig. 3에 나타내었다. 이 때 증착된 비정질 막은 Fig. 4에 나타난 상평형도를 바탕으로 화살표와 같은

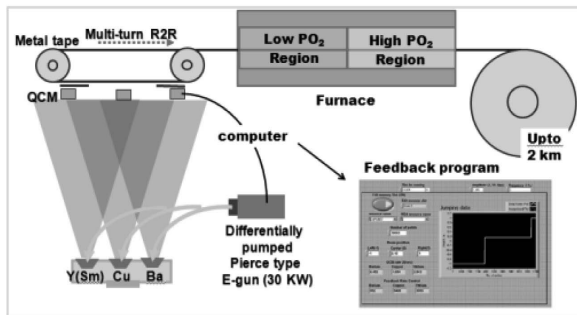


Fig. 3. RCE-DR 공정의 개략도.

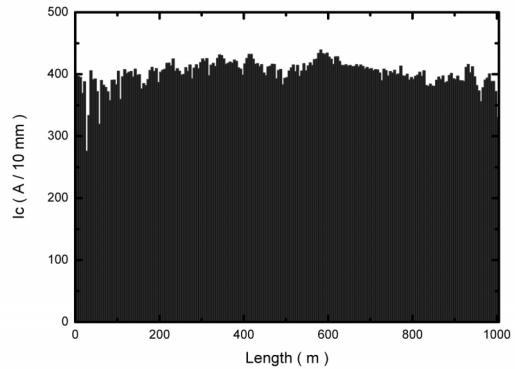


Fig. 2. (주)서남에서 생산된 고온초전도 선재의 I_c 측정 결과. 1005m에서 275 A/cm, 920 m 기준으로 355 A/cm 달성.

경로를 따라 열처리되어 초전도막으로 성장하게 된다.¹⁾

서론에서 언급했듯이 초전도 선재의 응용 범위가 넓어지기 위해서는 임계전류특성 향상이 필수적 요소이다. Fig. 5는 RCE-DR 공정으로 제작된 초전도 선재의 I_c 측정 결과이다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 RCE-DR 공정으로 생산된 초전도 선재의 임계전류특성은 900 A/12 mm로 이미 세계 최고 수준에 도달해 있다. 하지만, 실제 전기, 전력기기 계통의 응용에서는 자기장 하에서의 임계전류 값이 중요한 요소이다. 전세계적으로 많은 그룹들이 초전도 상 내부에 2차상의 크기, 형상 및 분포를 제어하여 자속고정점의 역할을 극대화시켜 자기장 하에서의 고임계전류를 얻으려 하고 있다. 하지만 아직 장선에서의 연구 보고는 많지 않은 상황이며, 특히 RCE-DR 공정에는 공정속도가

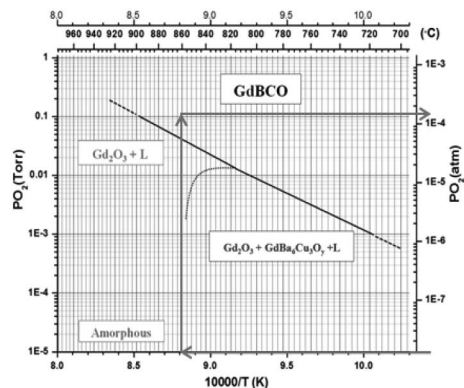


Fig. 4. 초전도체의 상평형도 및 RCE-DR 공정에서 이용되는 경로.

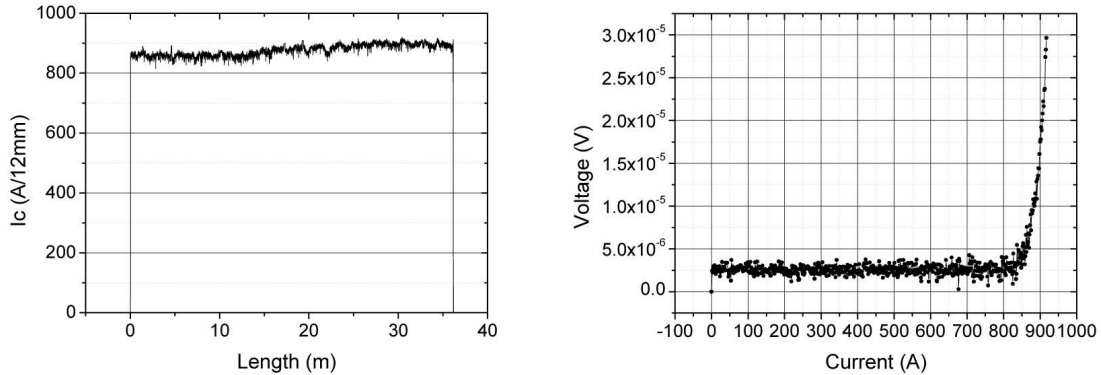


Fig. 5. RCE-DR 공정으로 생산된 초전도 선재의 길이에 따른 임계전류 분포 및 I-V Curve.

매우 빠른 대신 아직까지 효과적인 나노피닝점을 도입하지 못한 실정이다. 따라서 이에 대한 추가적 연구를 통하여 고자장하에서의 초전도 전류 수송특성을 개선하는 일이 필수적이라 할 수 있다. 또한 REBCO 초전도체의 근본적 물성에 의해 c축과 평행한 방향의 피닝특성을 극대화한 것이 중요한 요소인데, 현재까지 c축 평행한 nanorod 형태의 자속고정점은 PLD 및 MOCVD 공정에 한정되어 있다. 대면적 공정에 적합하여 가격적 측면에 유리한 MOD 공정 및 새로 개발된 RCE 공정에서의 nanorod 형태의 자속고정점 도입은 현재의 고온초전도 선재의 특성을 한 단계 발전시키는 중요한 연구가 될 것이며, 이와 관련하여 정부의 꾸준한 지원이 필요한 실정이다.

2.2. 고온초전도 선재 시장

2세대 고온초전도 선재는 1세대 선재에 비해 고자장하에서도 통전 특성의 저하가 크지 않으므로 송배전용 케이블뿐만 아니라, 변압기, 모터, 한류기 등의 외부 자장이 크게 인가되는 전력기기에 응용이 가능하다. 현재 초전도 관련 제품 중 가장 큰 시장을 형성하고 있는 것은 MRI로 Conectus(유럽초전도산업협회)에 따르면 2011년 약 35억 유로의 규모이다. MRI에 사용되는 초전도 자석은 현재 거의 대부분이 NbTi나 Nb₃Sn 등 저온초전도 선재가 사용되고 있으나 임계온도가 낮아 냉각비용이 많이 소요되어 점차 고온초전도 선재로 바뀔 것으로 전망되고

있다.

임계온도가 77 K 이상인 고온초전도체가 출현함에 따라 기존의 저온초전도체로는 접근이 불가능하였던 전력기기의 영역에서도 초전도체의 사용이 가능해졌으며 2010년에는 고온초전도 전력기기 시장이 2천3백만 달러에 불과하지만 2015년에는 8.9억 달러로 매년 2배 이상의 높은 성장이 예상되고 있다²⁾.

기존 저온초전도 자석 시장을 잠식하고, 전력기기 시장에서 구리도체를 대신한 초전도 전력기기를 가능케 하는 것 외에도, 고온초전도 선재가 양산 공급이 된다면 기존에는 생각하기 힘들었던 신규시장의 창출이 예상되며 이의 시장규모는 가늠하기 어렵다. 일례로 10 MW급의 해상풍력발전의 경우 고온초전도 선재를 사용할 경우 영구자석이나 구리도체를 이용한 발전기에 비해 무게가 1/3 정도로 줄어들며, 이는 설치비용이 전체의 1/3 이상을 차지하는 해상풍력의 특성상 매우 유리하다. "Offshore Wind Report" (Emerging Energy Research)의 해상풍력 전망치를 토대로 고온초전도 선재의 수요를 추정해 보면 2020년 약 1.6억 달러로 예상하고 있다. 이상과 같이 고온초전도 선재 시장은 크게 전력기기용, 초전도 자석용,

Table 1. 시장의 요구에 따른 초전도 선재 가격 책정한계

Metric	Today	Customer requirement
Price	\$400/kA · m	<\$100/kA · m For Commercial market entry (small market)
		<\$ 50/kA · m For medium commercial market
		<\$ 25/kA · m For large commercial market

Table 2 생산성 향상에 따른 생산단가의 하락 (4 mm폭 기준)

생산량 (m/h)	Run time/week (h)	연간 생산량 (km)	연간 장비 감가상각비 (M\$)	인건비 (M\$)	(감가상각비 + 인건비)/length	
					(\$/m)	(\$/kA·m)
50	60	150	1.5	1.5	20	100
100	100	500	2	2	8	40
500	60	1,500	2	2	2.7	13.3
3,000	100	15,000	4	4	0.53	2.7

해상 풍력발전기용으로 나눌 수 있으며, 각각의 시장을 추정하고 이를 합하면 2020년 약 12억불에 달할 것으로 예상된다.

2.3. 고온초전도 선재 상용화

현재 전 세계적으로 초전도 선재 연구개발이 양산단계에 와있고, 최근에 일본, 미국, 유럽 등에서 성능 향상 및 저가 공정에 대한 R&D가 지속적으로 이루어지고 있으나 현재의 생산단가(\$ 400 / kA · m)를 적용하면 1 km의 송전용 케이블에 사용되는 초전도 선재 300 km의 가격은 1,200만 달러이며, 이는 일반적인 프로젝트 비용보다 많아서 초전도응용기기의 초기시장 창출에 장애요인으로 작용하고 있다.

이러한 이유로 초전도 선재의 성능 향상 및 고속/광폭 공정 개발을 통해 구리선과 경쟁이 가능한 \$25 /kA · m (100 A 급 선재의 경우 \$2.5/meter) 이하로 가격을 낮춘다면, 초전도 선재 시장을 선점할 수 있을 뿐 아니라 초전도 전력기기의 가격인하로 인한 시장의 확대로 이어지는 선순환 고리를 만들게 되어 향후 지속적인 매출 및 이익의 창출이 가능할 것으로 판단하고 있다 (Table 1 참조). (주)서남에서는 광폭화 증착장비를 2015년까지 개발하여 시간당 생산량을 3000 미터 이상으로 하는 것을 목표로 하고 있으며, 이를 통해 고성능, 저가의 고온초전도 선재 생산을 이루기 위해 지속적으로 노력하고 있다 (Table 2 참조).

3. 결론

(주)서남에서 개발한 RCE-DR 공정은 현재 미국 및 일본 등지에서 사용하고 있는 다른 공정(예: MOCVD, MOD, PLD 등)들과 비교하였을 때 세계 최고의 초전도 선재 제작 속도를 가지고 있으며, 초전도 선재의 특성과 제작 단가 또한 세계최고수준이다. 또한 장선에서도 결함 없이 고임계전류값을 갖는 선재를 제조함으로써 향후 초전도 선재 시장에서 최고의 우위를 점할 수 있을 것으로 자부하고 있다. 하지만, 여느 초기 시장 진입제품과 마찬가지로 초전도 기기 및 초전도 선재의 성능의 우위가 명백함에도 불구하고 “가격이 낮아야 수요가 생긴다” vs. “수요(생산)가 늘어야 가격이 낮아진다”는 전형적인 쳇바퀴에 빠져 있다. 정부의 선제적 지원을 통한 양산 기술의 확보로 초전도 선재의 원가를 획기적으로 줄이게 되면, 우리 산업은 쳇바퀴에서 빠져나와 고속성장으로 달려갈 수 있을 것이다.

참고문헌

1. S. I. Yoo, “The High Rate Conversion Mechanism of GdBCO Coated Conductors by a New High Throughput Process, RCE-DR,” Invited talk in 2011 MRS spring meeting, Apr. 25-29, 2011, San Fransisco, USA.
2. BCC Research, “Superconductors: Technologies and Global Markets,” website-[http:// www.bccresearch.com /pressroom/report/code/AVM066C](http://www.bccresearch.com/pressroom/report/code/AVM066C).

문승현



- 1987년 서울대학교 물리학과 학사
- 1989년 서울대학교 물리학과 이학석사
- 1994년 서울대학교 물리학과 이학박사
- 1994 ~ 2002년 LG전자기술원 책임연구원
- 2002 ~ 2006년 서울대학교 재료공학부 BK 계약 교수, 초빙교수
- 2004년 ~ 현재 (주)서남 대표