㈜서남의 초전도 사업 현황

이 헌 주, 장 철 영
㈜서 남

1. 서남의 역사

㈜서남은 고온초전도 제품의 상용화에 기여하는 것을 목적으로 2004년 11월에 설립되었다. 회사 이름도 이를 반영하여 Superconductor, Nano and Advanced Materials의 머리글자를 따서 SuNAM(서남, 瑞藍)이라고 지었다. 설립 초기부터 프런티어사업에서 서울대학교가 담당하던 2세대 선재의 template인 IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)-MgO 개발에 힘을 보태었고, 2007년 6월부터는 프런티어 사업 3단계의 Coated Conductor 개발 세부과제에 정식으로 참여하여 동시증발법에 기반한 초전도층 제조 공정을 비롯한 금속기판 및 완충층에 이르는 2세대 선재의 전체 단위공정을 확보하게 되었다.

프런티어 사업의 성과를 바탕으로 2008년 대형국가연구개발실용화사업에 선정되어 투자를 유치하였으며 2009년 초에 처음으로 pilot 생산설비를 안양공장에 설치하였다. 프런티어사업을 통해 개발한 초전도층 증착공정(EDDC, Evaporation on Drum in Dual Chamber)의 한계를 극복하고 장선재를 연속적으로 생산하기 위한 연구가 지속적으로 이루어져서 RCE-DR(Reacctive Co-evaporation - Deposition and Reaction)이라는 독자적인 공정을 개발하였으며 2010년 가을에는 현재의 안성공장에 자리잡게 되었다.(그림 1)

그림 1. ㈜서남 안성공장.

2. 서남의 기술

2세대 고온초전도 선재는 금속기판의 전해연마에서부터 완충층, 초전도층, 보호층 증착 등 전기화학 및 진공증착의 다양한 기술들이 이용된다.(그림 2) 각 단위공정의 최적화 기술은 프런티어 사업을 통해 개발하였으며 reel-to-reel 방식의 연속생산에 적용하기 위해 각 공정의 속도를 최소 360 m/hr(4 mm 폭 기준) 이상으로 일치시켰다. 생산의 전 공정을 in-line화하는 것이 최종 목표이지만 현재는 Al_2O_3 / Y_2O_3 / IBAD-MgO / Epi-MgO / $LaMnO_3$ 의 모든 완충층은 in-line화시켜(그림 3) 공정시간을 단축하였으며, 대기중에 노출되는 시간을 줄여 횡방향 인장에 의한 벗겨짐 현상(delamination)의 완화를 이루었다.

㈜서남은 해외 업체에 비해 2세대 선재 생산에 뒤늦게 나서기는 했으나, 시작 단계에서부터 우수한 선재를 생산할 수 있을 뿐만 아니라 양산으로의 확장성이 뛰어나며 빠른 생산속도와 낮은 원가를 구현할 수 있는 초전도

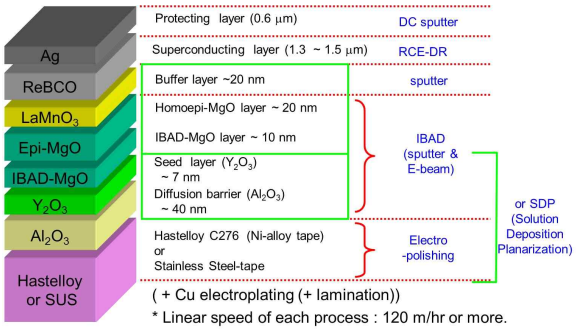

그림 2. 서남 선재의 구조 및 증착법.

그림 3. ㈜서남의 in-line 완충층 증착장비. 6개의 증착장비가 있고, 왼쪽 및 오른쪽 끝은 reel chamber이다.

층 증착공정을 깊이 고민하여 선택하였다. 동시증발법이 이러한 조건을 충족시키는 방법이라는 결론에 도달하였으며 이것은 서남만의 생각이 아니라 여러 전문가들이 이에 동의하고 있다.[1] KAIST 및 전기연구원과 함께 개발한 EDDC 방법은 동시증발법의 장점에 대한 확신을 주었으나 장선재의 연속 생산에는 적합하지가 않았기에 전기연구원 및 서울대와 함께 RCE-DR이라는 공정을 개발하였다.[2] 이 방법은 ReBCO 초전도체의 상평형도 상에 존재하는 액상성분의 도움을 받아 초전도상이 형성되기 때문에[3] 원래 의도했던 연속공정을 매우 빠른 속도로 진행시킬 수 있어 생산속도 측면에서 또 한번의 도약을 가져다 주었다. 그림 4는 약 1 km 길이 선재의 임계전류 특성이다. 평균 임계전류는 770 A(12 mm 폭)이고 978 m 길이에서 표준편차는 2.5%이다. 이러한 결과는 현재 시점(2014년 7월)으로 세계최고 수준이며, 미국과 일본에 비해서 후발주자로 출발한 서남이 단기간에 이룩한 자랑스러운 결과가 아닐 수 없다.

서남에서는 초전도 선재를 이용한 자석도 제작하였는데 200 mm의 상온 보어에 중심자장이 4 T인 전도냉각 방식의 자석을 제작하였으며[4] 이를 당사가 생산하고 있는 선재의 자장하 임계전류 특성을 측정하는 데 이용하고 있다.

3. 서남의 생산 및 영업 활동

서남에서 생산하는 선재의 종류를 표 1에 나타내었다. 기본적으로 4 mm와 12 mm 폭의 선재를 생산하고 있으나 그 이외의 폭에 대해서도 주문생산이 가능하다. 임계전류는 150 A(4 mm 폭), 단위길이는 100 m가 기본사양이지만 200 A, 300 m도 공급이 가능하다. 기판은 Hastelloy와 STS 310S 두 가지 종류가 있으며 보호층은 은까지만 입힌 것, 구리도금이 추가된 것, 황동혹은 STS 라미네이션 된 것 등이 있다. 또한 Kapton 절연도 가능하며 주문자의 요구에 맞춰 코일을 권선하여 판매하는 것도 가능하다. 또한 초전도 전류리드도 제작하고 있다.

모든 출고제품에는 그림 4와 유사한, 길이에 따른 임계전류 값을 나타내는 성적서가

Model	AN	CN	LB/LS	K
Description	Silver(+Cu…) Dry coating	Copper Wet Coating	Brass/ Stainless steel Lamination	Polyimide tape(+) Insulation
Substrate	Hastelloy or Non-magnetic Stainless Steel			
Width [mm]	Commercial : 4 mm, 12 mm. Special Order : 2 ~ 10 mm multi width is available			
Thickness [mm]	HAS : 0.06~0.07 SS* : 0.11~0.12	HAS : 0.09~0.11 SS* : 0.14~0.16	HAS : 0.18~0.22 SS* : 0.23~0.27	+ 0.1
Final Process	Silver Sputter	Copper Plating	Brass or SS* Lamination	Wrapping
Piece Length	Above 100 m , 200 m , 300 m + without Splice			
Min. Ic @ 77 k S.F.	(100) / 150 / 200 A + @ 4 mm (300 / 400) / 500 / 600 / 700 A + @ 12 mm			

표 1. 서남의 제품 목록.

첨부된다. 그 외에도 Q.C. 과정에서는 홀효과를 이용한 임계전류 측정, AFM을 이용한

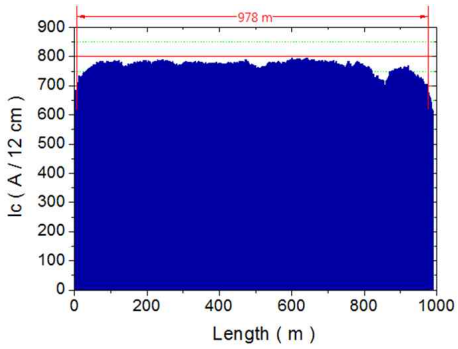

그림 4. 약 1 km 길이 선재의 길이에 따른 임계전류.

을 이용한 표면거칠기 확인, X-ray 회절분석기를 이용한 결정성 측정을 통해 각 공정 단계별로 수율을 최대화하기 위해 노력하고 있다. 인라인화가 계속 진행됨에 따라 각 단위공정을 마친 시료를 채취하여 측정하는 것이 어려워지고 또한 공정속도를 저하시키기 때문에 인라인 측정장비를 계속 생산장비에 추가시키고 있으며, 최근에는 IBAD 공정에서 RHEED(Reflection High Energy Electron Diffraction) 패턴을 자동으로 분석하여 이온소스를 조절하는 장치와 초전도체의 색상을 감지하여 Gd, Ba, Cu의 증착률을 피드백할 수 있는 장치를 추가하였다.[5] 향후 X-ray 회절분석기 등을 인라인장비에 추가 투입하여 품질을 향상시키고 수율을 높이는 작업을 계속할 것이다.

생산공정이 안정화되고 수율이 일정수준

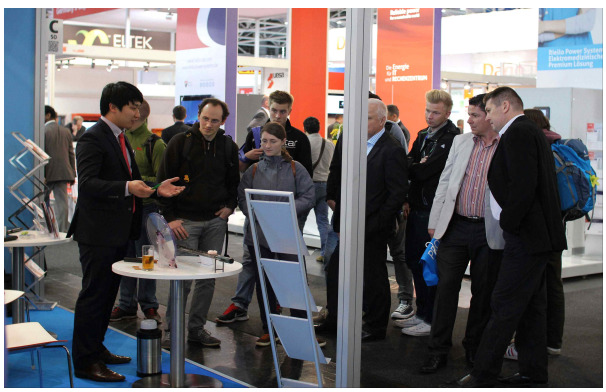

그림 5. 2014년 하노버메세 산업박람회의 서남 부스.

이상으로 올라간 이후에는 영업활동을 강화하였으며 특히 해외영업에 힘을 쏟았다. '12년 ASC와 '13년 MT등 해외학회에서 전시를 하였으며 세계 최대의 산업 박람회인 Hannover Messe 를 '13년과 '14년 연속으로 참가하여 초전도관련 'Superconducting City' 특별관의 부스 운영을 통하여 경쟁업체 및 잠재고객들에게는 서남 선재의 우수성을 알리는 동시에 참여업체들과 공동으로 초전도 기반 기술의 기존 산업으로의 확산 및 신규 산업분야 창출을 위해서 노력하고 있다.(그림 5).

지금까지 서남에서는 국내 30개 기관, 해외 12개 국가 39개 기관 등에 총 100 km (4 mm 폭 환산)이상의 선재를 공급하였으며, 2012년부터 일본, 미국, 유럽 각국 및 러시아, 중국 등에도 판매를 확대하고 있다.

우리나라는 '87년 고온초전도 발견 이후 물성연구에서도 세계수준에 뒤처지지 않고 꾸준히 발전해 왔으며, 고온 초전도 선재와 전력기기 분야에서도 프런티어 사업을 발판으로 하여 연구개발 및 실증 단계에서 케이블 등 몇몇 분야에서는 세계 최고 수준을 지속적으로 유지하고 있다. 단적으로 지난 '12년에 개최된 ASC에서 발표된 Power Applications 분야 논문 252개중 약 1/3에 해당되는 80편의 논문이 국내연구자들이 발표한 것이다.[6] 이러한 이유로 국내의 초전도 선재 시장은 경제규모 대비 매우 큰 상황이다. 그러나 서남은 국내시장에 안주하지 않고 적극적으로 해외시장을 개척하고 있으며 해외 A사와는 한류기용 선재의 장기 공급계약을 맺었으며, B사와는 제품 및 장비 공급계약을 체결하였다.*) 또한 해외 대리점 관련해서도 이미 러시아와 대리점 계약을 체결하였으며, 세계 최대시장 중의 하나인 중국도 조만간 대리점 계약을 마무리 지을 예정이다. 올해 말까지 일본, 미국 및 유럽의 대리점 계약이 마무리되면 내년부터 이들 대리점을 통한 매출이 전체 매출의 50 % 정도가 될 것으로 예상된다.

서남은 현재 세계 최고 성능의 선재를 제작하는 회사이지만 초전도시장이 대규모로 형성되지 않으면 최고 성능의 선재가 의미가

*) 비밀유지협약에 의해 이름을 밝힐 수 없음을 양해 바랍니다.

없다는 것을 자각하고, 국내외를 가리지 않고 대형 초전도 프로젝트 개발에도 힘쓰고 있다. 이를 위해서 각계각층의 전문가들을 영입하고, 중국, 러시아 등 선재 기반기술이 비교적 취약한 나라를 중심으로 당사와 MOU 체결 등을 진행하고 있으며, 더 나아가 이들 국가의 대형 초전도 프로젝트에 참여하게 될 것이다.

4. 서남의 미래

고온초전도체가 세라믹이라는 한계를 극복하고, 비록 단면이 테잎 형태이기는 하지만, 선재로 가공되기 시작하고, 1세대 선재의 생산원가 절감의 근본적 한계인 은을 적게 사용하는 2세대 선재가 출현하면서 관련 종사자들은 초전도기기의 시대가 성큼 다가올 것으로 기대하였으며 전력회사등 예상수요자들에게 장밋빛 전망을 전파하였다. 그러나 2세대선재의 성능, 생산량(수급), 가격 등 모든 면에서 예상을 하회하는 실적을 보이자 기기개발자, 수요자, 연구지원기관(정부 등) 모두의 외면을 받게 되었다. 10년에 가까운 시간 동안, 선재의 원활한 공급이 기기의 활발한 개발로, 기기의 선재 수요가 다시 선재의 가격하락으로 이어지는 선순환 고리를 만들어 내는 데 실패한 것이다.

그러나 2세대 선재가 가지는 가능성은 결코 무시할 수 있는 것이 아니기에 실증연구들은 꾸준히 진행되고 있으며 서남을 비롯한 각국 선재업체들의 꾸준한 노력으로 임계전류 등 특성 및 단위길이 등이 지속적으로 개선되고 있다. 서남에서는 시장의 니즈에 맞게 꾸준한 제품개발을 하고 있으며 향후 5년 이내에 다음과 같은 목표를 달성하고자 한다; i) 임계전류 400 A 이상(77 K, s.f., 4 mm), ii) 자장하 임계전류 400 A 이상(20 K, 10 T), iii) 단위길이 2 km 이상. 또한 선재의 가격을 현재의 약 $150/kAm에서 $50/kAm 이하로 낮출 계획이다. 이를 위해서는 현재의 12 mm 폭 공정으로는 가능하지 않기 때문에 120 mm 이상의 폭을 처리할 수 있는 공정 및 장비를 개발할 것이다.

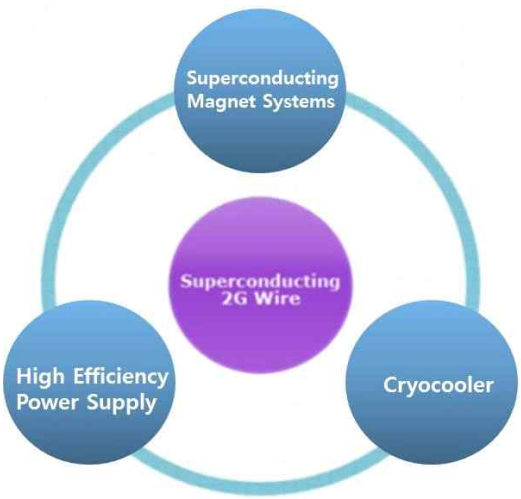

그림 6. 서남의 사업영역.

서남의 향후 목표는 세계 최고의 2G HTS 선재 제작 기술을 기반으로, 세계 최고의 초전도 관련 기술을 제공하는 회사로 성장해가는 것이다. '09년 첫 매출을 기록한 이래로 매년 80%의 연평균 성장율을 기록하고 있으며, '15년에는 100억원의 매출을 목표로 하고 있다

초전도 코일은 모터, 발전기, 일부 한류기, 변압기 등의 전력기기와 유도가열기, 자기분리기, 결정성장장치 등 산업용 기기, NMR, MRI등 바이오-의료 기기에 모두 사용되는 중요한 부품이다. 당사는 설립 초기부터 초전도 선재 개발 외에 이를 바탕으로 한 초전도 자석 및 코일개발을 추진하였으며 앞서 기술한 대로 4 T 자석을 이미 개발하였고 코일을 권선하여 판매를 하고 있다. 또한 초전도를 구현하기 위해서는 냉각이 필수적인데 당사는 기계연구원이 주관하는 4 kW 스털링 냉동기 개발에 참여기업으로써 역할을 하고 있으며 그림 6에서 보듯이 초전도 응용에 필요한 기반기술들을 모두 확보한 초전도 토탈솔루션 제공을 지향하고 있다.

서남은 올해 창사 10년을 맞는다. 올해를 제2 도약의 해로 만들기 위한 각오를 다지고 있으며 "전기 에너지의 새로운 패러다임 디자이너"라는 비전을 가지고(그림 7) 새로운 10년을 준비하고 있다.

그림 7. 서남의 비전과 핵심가치.

참고문헌

〔1〕 Vladimir Matias et al., "YBCO Superconductor Wire based on IBAD-Textured Templates and RCE of YBCO: Process Economics", Physics Procedia, 36, 1440-1444 (2012).

〔2〕 Jae-Hun Lee et al., "RCE-DR, a novel process for coated conductor fabrication with high performance ", Supercond. Sci. Technol., 27, 044018 (2014).

〔3〕 Jung-Woo Lee et al., "Stability phase diagram of $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ in low oxygen pressures", J. Alloys Compounds, 602, 78-86 (2014).

〔4〕 Sangwon Yoon et at., "Fabrication and Characterization of 4-T/203 mm RT Bore 2G HTS Magnet With No-Insulation Method", IEEE Trans. Appl. Supercond. 24, 4602904 (2014).

〔5〕 Jae-Hun Lee et al., "Vision Inspection Methods for Uniformity Enhancement in Long Length 2G HTS Wire Production", Accepted for Publication, IEEE Trans. Appl. Supercond., DOI:10.1109/TASC.2014.2333812 (2014).

〔6〕 Xavier Obradors, "High current superconductors: overcoming the materials challenges to achieve power applications", Plenary Talk, EUCAS 2013, Genova, Italy, http://eurotapes.eu/component/docman/doc_download/256-plenary-eucas-2013-ppt?Itemid=

저자이력

이헌주(李憲周)
1999년 서울대학교 물리학과 박사, 1999-2005년 LG전자 기술원 책임연구원, 2005-현재 ㈜서남 연구소장.

장철영(張徹榮)
경북대학교 공학석사, 동대학원 박사 수료, ㈜서남 영업마케팅 그룹장.