

## REBCO 고온초전도선재의 최근 연구 개발 동향

오 상 수  
한국전기연구원

### 1. 서 론

1990년대 초 진공증착법을 이용하여 금속기판과 산화물층으로 이루어진 IBAD(Ion Beam Assisted Deposition) 템플릿 위에 에피성장(epitaxial growth)시킨 YBCO 막으로 이루어진 고온초전도 박막선재가 첫 선을 보이면서 2세대 고온초전도선재 (2G 선재) 개발이 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. PIT(Power In Tube)법으로 초전도결정을 한축(c-axis)으로만 배향시킨 BSCCO선재에 비하여 2G 선재에서는 배향기판을 이용하여 양축(a/b, c-axis)으로 초전도체 결정이 배향되도록 REBCO 초전도막이 만들어진다.

고도의 양축 배향기술로 만든 REBCO 막을 이용하면 1 mm<sup>2</sup> 단면적에 수백만 암페어의 임계전류를 흘릴 수 있다. 이러한 2G 선재는 BSCCO계의 1G 선재에 비하여 자장중에서의 임계전류특성도 우수할 뿐만 아니라 하스텔로이나 스테인레스강 같은 고강도합금기판의 사용으로 선재 길이방향으로의 기계적 인장강도가 높은 것도 장점이라고 할 수 있다.

REBCO 2G 선재는 물리적, 화학적인 다양한 방법으로 제조할 수 있으며 몇몇 제조업체들에서는 이미 km급 piece length의 2G 선재도 생산할 수 있는 기반이 확립되었다.

고자장특성을 더욱 향상시키기 위하여 최근에는 Y이 Gd, Sm등으로 대체되는 경우도 있으며, 자속선 고정을 위하여 나노공학적 기법으로 핀닝센터를 형성시키고 제어하는 기술이 많이 개발되고 있다.

국내에서의 REBCO 2G 선재의 연구개발은 미국, 일본보다 거의 10년 늦게 시작되었다. 2001년부터 시작된 국책 프로젝트인 DAPAS 프론티어 연구개발 사업으로 안정적인 연구비가 지원되면서 산학연 구도의 효율적인 연구가 수행되었다. 사업 초기에는 다양한 공정들이 시도되었으나, 실용화 관점에서 최종적으로 IBAD-MgO기판 공정과 동시증

발(Reactive Co-Evaporation, RCE)법에 의한 초전도층 증착공정이 채택되었고 참여 연구자들의 열정적이고 집중적인 노력의 결과로 선진국에 비하여 늦게 시작하였고 10년이라는 비교적 짧은 연구 기간에도 불구하고 세계적 수준의 많은 연구 성과들을 달성하였다.

REBCO 2G선재는 기술 단계로 볼 때 실험실 검증단계에서 pilot 생산단계로 이미 넘어갔다고 볼 수 있으며, 상용화를 위하여 새로운 시장을 개척해야하는 시점이라고 할 수 있다. 범용적으로 모든 용도에 사용할 수 있는 구조와 사양을 갖춘 초전도선재라는 것이 존재하지 않기 때문에 2G 선재도 응용기별로 기술적인 요구특성과 경제성 등에 따라 맞춤형으로 제조되어야 한다. REBCO 2G 선재의 응용은 크게 전력케이블 분야와 코일 분야로 나눌 수 있다. 액체질소 온도에서 사용되고 자장 영향이 거의 없는 초전도전력케이블이 2G선재에 대한 기술적 요구사항 측면에서 상대적으로 유리하기 때문에 실제 전력계통에 적용하기 위한 고온초전도 케이블 프로젝트들이 국내외적으로 많이 이루어지고 있다.

한편 고온초전도코일의 응용에서는 2G 선재가 테이프 면에 걸린 수직 방향 인장력에 취약하다는 약점이 보고되었고, 이로 인하여 특히 에폭시 함침 구조의 코일을 제작할 때 다층 구조의 고유한 선재구조에서 박리(de-lamination)가 발생하기 쉬운 문제가 보고되었으나 코일 제작 방법 등의 개선으로 해결하고자 하는 시도도 이루어지고 있다.

국내외적으로 2G 선재로 고온초전도코일을 제작하려는 많은 시도들이 있었다. 최근 2G 선재만을 이용하여 No-Insulation기법으로 26 테스라의 고자장을 발생시키는 고온초전도코일이 (주)서남에서 개발되었고 미국의 NHMFL에서 코일의 특성 평가가 최근 성공적으로 이루어졌다[1,2].

그러나 2G 선재의 많은 장점들에도 불구하고

하고 아직 대규모적으로 고온초전도기기 개발이 이루어지지 못하고 있다. 이는 기술적으로 2G 선재에서 해결해야 하는 문제들이 존재하고 있다는 것을 의미하며, 2G 선재의 대량 공급을 위해서는 무엇보다 가장 문제가 되는 비싼 가격을 시급히 해결해야 할 것으로 본다.

고온초전도기기를 상용화하려는 유저 입장에서는 2G 선재의 향후 가격 추이를 파악하는 것이 중요한 일이지만, 이를 정확히 예측하기가 쉽지 않다. 안정적인 대량의 수요 없이는 선재 제조업체에서 자발적으로 가격을 크게 낮추기도 어렵고, 가격이 현재와 같이 비싸다면 2G 초전도기기의 상용화도 어렵다고 할 수 있다. 이러한 문제가 계란과 닭 중에 무엇이 우선이냐는 질문처럼 쉽지 않은 과제임에는 틀림없지만, 새로운 혁신공정을 도입하고 성능을 향상시켜서 성능대비 제조 비용을 낮추는 노력이 지속되어야 한다. 최근 미국, 일본, 유럽뿐만 아니라 한국, 중국, 러시아 등에서도 2G 선재를 생산하는 많은 회사들이 설립되었으며 본격적으로 연구용 2G 선재를 판매하고 있는 회사들도 늘어나고 있다.

본고에서는 최근 수년 사이에 국제 워크숍이나 학회 등에서 발표된 자료와 국제학술지의 연구결과들을 참조해서 주요 국가들의 REBCO 2G 선재 연구개발 동향을 개괄적으로 소개하고 제조 업체들의 최근 기술 동향을 살펴보고자 한다. 또한 2G 선재의 실용화 관점에서 해결해야 되는 여러 가지 이슈들에 대해서도 정리하고 분석하는 기회를 갖고자 한다.

## 2. 선재 제조사들의 공정 기술과 특성

현재 세계적으로 많은 업체들이 2G 선재를 개발하고 있으며, 상업적 생산도 일부 이루어지고 있다. Fig. 1에서 보이는 것처럼 미국, 일본 업체들보다 늦게 2G 선재 개발에 뛰어들어 (주)서남이 짧은 기간에 실용화의 중요한 지표인 임계전류와 장선 길이 ( $I_c \times L$ ) 파라미터에서 세계 최고수준에 도달한 것은 의미가 크다고 생각한다.

Table 1에 각 선재 제조사들의 제조 방법과 구성 물질을 비교하여 나타냈다.

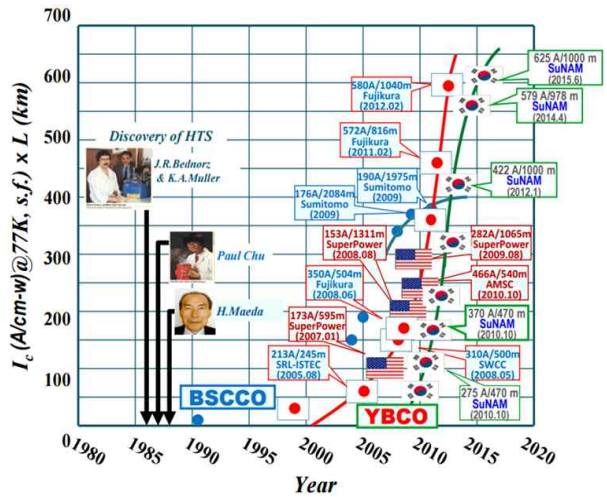


Fig. 1. Chronological change of  $I_c$  and length parameters for 2G wire in US, Japan and Korea (presented by Dr. Izumi).

Matias가 CCA2014에서 각 선재 제조사들을 생산량으로 구분하여 3개 그룹으로 분류 [3]하였는데, 이 표에서도 그의 발표 내용을 인용하여 2G 제조업체를 선두그룹, 제2그룹과 연구개발그룹의 3종류로 분류하였다. Table 1에서 알 수 있듯이 대부분의 회사들이 배향기판을 제조하는 공정으로 IBAD공정을 많이 채택하고 있으며, 선두그룹에서는 초전도층 코팅에 상대적으로 대량생산이 용이한 MOD, MOCVD, RCE 공정을 채택하고 있다.

한편 제2그룹에 속한 회사들은 모두 PLD 공정을 채택하고 있다. 이 PLD 방법은 일반적으로 다른 공정에 비하여 비교적 안정적으로 초전도층의 높은  $J_c$  성능을 구현할 수 있지만, 선두그룹의 채택한 공정들보다 대량으로 장선을 생산해야 하는 2G 선재의 상용화 측면에서는 상대적으로 불리하다고 할 수 있다.

구리 안정화층을 입히는 방법으로는 대부분의 회사들에서 전기도금법을 이용하고 있으며, IBAD용 금속기판으로 하스텔로이뿐만 아니고 최근 가격이 싼 스테인레스강을 기판재료로 이용한 생산도 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 기존의 미국, 일본, 유럽, 한국뿐만 아니고 중국과 러시아에서도 PLD공정으로 2G선재를 상용화하기 위한 회사들이 설립되었으며 세계적으로 2G

Table 1. Fabrication process of 2G HTS wire makers in the world.

Manufacturer	Process Template/HTS	Substrate	Cu stabilizer	HTS material
<b>&lt;Top group&gt;</b>				
AMSC	RABiTS/MOD	Ni-W	laminated	YBCO
SuNAM	IBAD/RCE	Hastelloy(SS)	electroplated	GdBCO
Superpower	IBAD/MOCVD	Hastelloy	electroplated	GdYBCO
<b>&lt;2<sup>nd</sup> group&gt;</b>				
Bruker-HTS	ABAD/PLD	SS	electroplated	YBCO
Fujikura	IBAD/PLD	Hastelloy	laminated	GdBCO
SuperOx	IBAD/PLD	Hastelloy	electroplated	YBCO
<b>&lt;R&amp;D group&gt;</b>				
Theva	ISD/RCE	Hastelloy	electroplated	GdBCO
Deutsche Nanoschicht	RABiTS/MOD	Ni-W	electroplated	YBCO
STI	IBAD/RCE	Hastelloy(SS)	-	YBCO
Shanghai Supercond.	IBAD/PLD	Hastelloy	electroplated	YBCO

Table 2. Comparison of piece length and properties for major manufacturer's 2G HTS wire.

Manufacturer	Maximum length capability	I <sub>c</sub> (77K, sf) @4mm-w	J <sub>e</sub> (77 K, sf)	σ <sub>irr, Irreversible stress</sub> (77 K, sf)
AMSC	> 500 m	100 A	123 A/mm <sup>2</sup>	~ 200 MPa
SuNAM	> 1,000 m	200 A	445 A/mm <sup>2</sup>	740 - 750 MPa
Superpower	> 1,000 m	150 A	225 A/mm <sup>2</sup>	800 - 820 MPa
Bruker-HTS	~ 300 m	135 A	87 A/mm <sup>2</sup>	660 - 670 MPa
Fujikura	> 1,000 m	165 A	350 A/mm <sup>2</sup>	690 - 700 MPa
SuperOx	> 500 m	100 A	305 A/mm <sup>2</sup>	740 - 760 MPa

선재 벤처기업들이 계속 늘어나는 추세이다. 주요 2G 선재회사들의 선재 제조 길이 (piece length)와 전기적 및 기계적 특성을 Table2에서 비교하여 나타냈다. AMSC사를 제외한 다른 회사들의 공학적 전류밀도 (Engineering current density), J<sub>e</sub>와 비가역 응력 (irreversible stress), σ<sub>irr</sub> 값은 Barth가 최근에 보고한 데이터를 인용[4]하였다.

km급으로 2G 선재를 생산한 실적이 있는 회사는 3개사로 서남, Superpower, Fujikura이며, STI를 비롯한 여러 후발 업체들에서도 km급 선재 생산을 계획하고 있다. 77 K, self-field(sf)조건에서의 임계전류와 J<sub>e</sub>특성 면에서 한국의 서남 선재

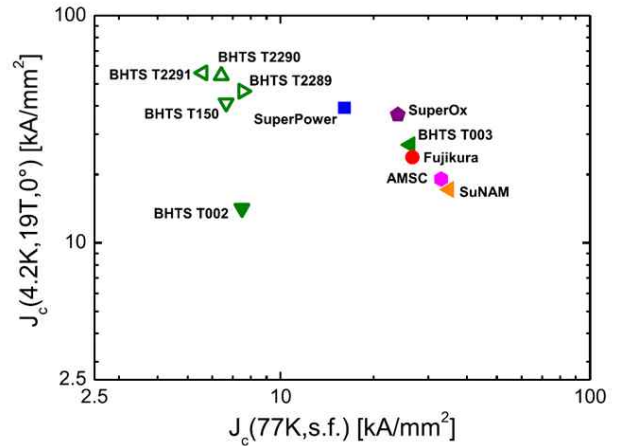


Fig. 2. J<sub>c</sub> of the REBCO layers measured at 4.2 K, 19 T, θ = 0° versus J<sub>c</sub> of the same layers measured at 77 K, self-field for six different manufacturers [5].

가 가장 우수한 성능을 나타내고 있다. 기계적 특성은 Ni-W합금을 기판으로 사용하는 AMSC선재가 상대적으로 낮은 값을 보이는 것을 알 수 있다.

한편 Senatore 등은 주요 업체들에서 제조한 2G 선재들의 임계전류밀도특성을 77 K와 4.2 K 고자장에서 측정하여 비교분석 [5]하였으며, 그 결과를 Fig.2에 나타냈다. 앞서도 언급하였듯이 서남 선재의 77 K J<sub>c</sub> 특성이 상대적으로 가장 우수한 결과를 보이고 있으나 4.2 K, 19 T 조건에서는 Bruker - HTS와 Superpower사의 선재가 더 높은 J<sub>c</sub> 값을 보이고 있다. 최근 고자장에서의 자속선 핀닝 특성을 향상시키는 연구개발이 활발하게 이루어지고 있고 PLD와 MOCVD공정으로 만든 2G선재에서는 우수한 결과들이 많이 보고되었으나, RCE공정에서는 아직 효과적인 인공핀닝센터(APC) 형성기술이 보고되지 않았다. 4.2 K 온도에서 초고자장 발생용 초전도마그네트를 REBCO선재로 제작하려는 시도[2]들이 이루어지고 있기 때문에 극저온에서의 고자장 핀닝특성을 더욱 향상시키기 위한 연구개발도 계속 추진되어야 할 것으로 본다.

### 3. 주요 국가들의 연구개발 최근 동향

2G선재의 상용화를 위한 미국에서의 연

구개발은 주로 DOE 지원으로 이루어지고 있다. 최근 종료된 대표적인 프로젝트는 ARPA-E REACT이며 이 프로젝트는 휴스턴대학과 BNL 두 기관에서 동시에 수행되었다. 사업목표는 초전도풍력발전기의 상용화에 걸림돌인 2G선재의 성능대비가격을 대폭 낮추는 것이다. 휴스턴대는 Superpower사와 협력하고 있으며 Zr을 최대 25%까지 첨가하여 APC의 밀도를 크게 증가시켰다. 그 결과 30 K, 3 T조건에서 Jc값이 20.1 MA/cm<sup>2</sup>에 이를 정도로 자장 중에서의 높은 Jc특성을 달성하는데 성공하였다.

한편 BNL의 Li 그룹은 입자가속기의 irradiation기술을 AMSC선재에 적용하여 핀닝 특성을 높이는 연구를 하고 있으며 30 K, 1.5 T 조건에서의 개발목표인 Ic : 1600 A/cm-w를 상회하는 결과를 달성한 것으로 발표하였다[6]. 2G선재 분야에서 대표적인 선도회사인 Superpower사는 현재 500 m급 선재를 판매하고 있으며 연간 1,000 km 생산규모를 확보하고 있는 것으로 보고되었다[7].

가속기나 핵융합장치와 같은 대형 마그네트에 적용하기 위한 대전류 케이블형 초전도 도체 개발도 세계적으로 많이 이루어지고 있다. 그 중에서 특히 ACT (Advanced Conductor Technologies)에서 개발하고 있는 Conductor on round core(CORC)가 최근 주목을 받고 있다. ACT의 Lann 그룹은 최근 논문에서 기존의 50 μm보다 더 얇은 38 μm두께의 금속기판을 사용한 Superpower사의

2G선재로 전체 케이블 직경을 7.5 mm에서 6 mm로 줄이고 이에 따라 Je값이 4.2 K, 20 T조건에서 기존의 114 A/mm<sup>2</sup>보다 두 배 정도 향상된 216 A/mm<sup>2</sup>을 달성하였다고 보고[8]하였다.

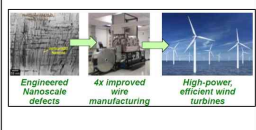
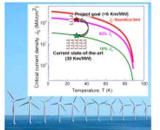
일본은 ISTECS-SRL 주도로 진행하였던 2G선재 개발 국제프로젝트가 수년전에 대부분 종료되고 지금은 주로 2G선재를 응용하기 위한 연구개발로 방향이 바뀌고 있다. 그중에서 HTS MRI를 개발하는 연구는 2013년부터 시작한 경제산업성 지원의 “고온초전도코일기반기술개발프로젝트”에서 수행되고 있으며 이 프로젝트에서 최근 Mitsubishi 전기는 전도냉각방식의 3 T MRI 미니모델코일을 제작하였고 이를 이용하여 마우스 태아를 화상처리하는데 성공하였다고 보고하였다.

영구전류모드 운전의 NMR, MRI마그네트 제작에서 극저저항 혹은 초전도접속 기술의 확보는 중요한 핵심사항이라고 할 수 있다. 특히 산화물계의 REBCO선재에서 지금까지 초전도접속에 기술적 어려움이 있었으나, 국내의 이해근 교수그룹에 이어 일본의 Tohoku대학과 Furukawa 전공에서도 공동으로 수행한 연구에서 REBCO 2G선재를 이용한 초전도코일과 영구전류스위치를 초전도접속하여 20 K온도에서 100 A의 영구전류 운전에 최근 성공하였고, 0.35 T의 자기장을 10시간 유지시키는 영구전류 운전을 확인하였다고 발표[9]하였다. 제작한 초전도코일의 발생 자장을 시간대별로 측정한 감쇄곡선에서의 직선 기울기로부터 접합저항 값은 2.5 × 10<sup>-12</sup> Ω으로 계산되었다.

한편 2G선재의 성능향상 연구는 일부 대학에서 꾸준히 이루어지고 있으며, 그 중 나고야대의 Yoshida그룹에서는 최근 저온 성장기술(LTG)를 이용하여 SmBCO 박막내에서 BHO 나노로드를 형성시키고 그것의 밀도를 크게 증가시킴으로서 자속선 핀닝특성을 향상시킬 수 있다는 결과를 보고하였다[10].

2G 선재의 대형 프로젝트 추진 면에서 유럽은 미국, 일본, 한국보다 늦게 시작하였으며, 수년전에 착수한 대형 프로젝트인 EUROTAPES에서는 나노공학을 적용한 선재개발, 성능 향상, 고 throughput 공

Table 3. Status of ARPA-E REACT project in US.

프로젝트 명	ARPA-E REACT(Advanced Research Projects Agency-E-Rare Earth Alternatives in Critical Technologies)	
프로젝트 기간	2012.01.01 - 2015.06.30	2012.01.01 - 2016.03.31
총 연구비	\$4,036,375	\$2,553,064
주관기관(책임자)	휴스턴 대학(Prof. V. Selvamanickam)	BNL (Dr. Qiang Li)
참여기관	SupePower, NREL, TECO-Westinghouse, Tai-Yang-Research	AMSC
사업 목표	선재가격을 4배 줄여서 10 MW급 초전도풍력발전기를 상용화시키기 위하여 선재의 성능을 30 K, 2.5 T기준으로 4배 이상 향상	초전도풍력발전기용 고성능 선재 개발 (Superconducting Wires for Direct-Drive Wind Generators)
	- 임계전류 @ 30 K, 2.5 T (A/12mm) : 3,000 - 선재 가격 (\$/kA-m) : 36 - 10 MW발전기 선재소요량 (m) : 16,250 - 10 MW발전기 선재 총가격 (M\$) : 1.75	- 임계전류 : 1600 A/cm-w
추진 전략	 <p>Engineered Nanoscale defects → 4x improved wire manufacturing → High-power, efficient wind turbines</p>	

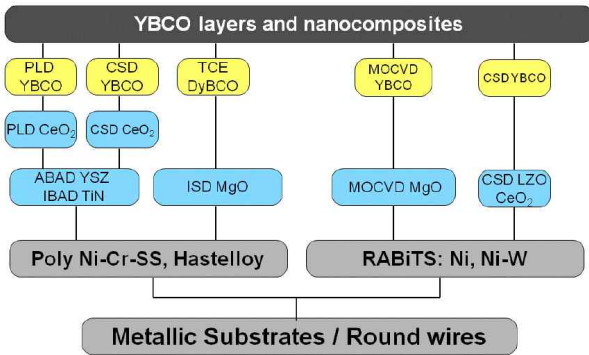


Fig. 3. Schema of the main coated conductor architectures being developed at present within Europe, including both those being investigated within EUROTAPES and by other industrial companies [10].

정에 의한 제조비용 절감, 고수율화를 위한 QC기술 등 다양한 기술 개발을 연구목표로 하고 있다. 이 EUROTAPES 프로젝트에는 많은 대학, 연구소, 기업들이 참여하고 있으며 Fig.3에서 볼 수 있듯이 2종류의 기판공정에서 출발하여 거의 모든 초전도층 공정기술을 개발하고 있다. 흥미로운 것은 아직 주목할 만한 결과 보고는 없으나, 원형 선재개발도 포함하고 있어서 앞으로 이 부분에 대한 연구 결과를 어떻게 제시할 수 있을 지 지켜볼 일이다.

유럽에서 가장 활발하게 2G 선재의 상용화 연구에 앞장서는 나라는 독일이며, Bruker-HTS, Theva, Deutsche Nanoschicht 3개회사들이 주도하고 있다. Deutsche Nanoschicht는 BASF의 투자를 받은 계열사로 비교적 늦게 2G 선재 개발에 뛰어들어, RABiTS기판에 All CSD법으로 제조한 YBCO 2G 선재에서 294 A/cm-w(77 K, sf) 수준의  $I_c$ 를 보고[7]하였다. 동시증발법 공정을 최초로 개발한 Theva는 최근 ISD-TCE (Thermal Co-Evaporation)기반의 pilot 생산설비를 구축하여 장선 개발에 집중하고 있으며, 공정의 완전자동화, 30 m/h이상의 공정속도, 인라인 품질관리, air-to-air 테이프 이동 등의 기술적 특징을 기반으로 하여 12 mm폭 기준으로 연간 150 km를 생산할 계획[7]이다.

중국과 러시아에서 최근에 각각 설립된 Shanghai superconductor와 SuperOx는

모두 IBAD-PLD 공정을 기반으로 YBCO 2G선재의 pilot 생산라인을 구축하였다. Shanghai superconductor는 2G 선재뿐만 아니라 제조공정에 사용되는 PVD장치들도 판매하는 영업을 하고 있다. 우리나라의 2G선재 연구는 DAPAS사업 이후에 (주)서남이 주관하는 KETEP프로젝트와 전기연구원 연구원이 수행하는 내부사업으로 수행되고 있다. Table 4는 KETEP프로젝트의 사업개요를 나타냈다. 최종적으로 DC리액터에 적용하기 위한 kA급  $I_c$ 성능(77 K, sf)의 REBCO선재를 개발하는 이 사업은 연구기간이 총 4년이며 (주)서남이 주관하고 연구소와 대학이 협력하여 기업을 지원하는 추진체제로 사업이 진행되고 있다.

Table 4. Outline of KETEP 2G wire project.

과제명	스마트그리드용 전력기기의 고효율화를 위한 kA급 고온초전도 도체 개발
최종목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>임계전류 <math>\geq 1000</math>A/cm, 균일도 <math>\geq 96\%</math>, 길이 1km 고온초전도 선재 개발</li> <li>고자장 하 임계전류 1000A/cm 고온초전도 선재 개발 (@ 20K, 10T)</li> <li>대용량 적중도체 <math>\geq 1800</math>A/cm 개발</li> <li>고자장 하 임계전류 측정용 장치 개발</li> <li>400mH, 1500A 초전도 DC 리액터 개발</li> </ul>
연구기간 및 예산	4년(2013.06.01. ~ 2017.05.31. ), 131억 (정부 91억 + 민간 40억) 3차년도(2015.06.01. ~ 2016.05.31. ), 32억 (정부 22억 + 민간 10억)
주관기관	(주)서남
참여기관	한국전기연구원, 서울대학교, 안동대학교, 포항산업과학연구원, 창원대학교

사업 주관기관인 (주)서남은 본 과제에서 RCE-DR공정을 최적화하여 12 mm폭 GdBCO선재에서 임계전류 1,050 A(77 K, sf)를 달성하였으며 이는 세계 최고 수준이라고 할 수 있다.

최근 한국전력 주도로 경기도의 신갈-홍덕 1.1 km 전력계통 구간에 23 kV급 AC초전도전력케이블을 설치하는 사업이 진행 중이다. 케이블 제작을 위하여 150 km의 선재가 소요될 것으로 분석되었으며, 이 사업에 (주)서남에서 생산한 GdBCO 2G선재가 사용될 것으로 보인다.

#### 4. 상용화를 위한 향후 과제들

2G선재는 다른 종류의 초전도선재에 비

하여 기술적으로 많은 장점들이 있음에도 불구하고 아직도 실질적인 양산 단계로 진입하지 못하고 있는 것은 수요에 대한 불확실성 때문에 2G 선재 제조업체 입장에서 양산설비를 구축하기 위한 투자를 확대하기가 어려운 부분도 있다고 본다. 또한 기술적으로 2G 선재의 생산에는 공정단계가 많고 품질 관리가 까다롭기 때문에 생산수율의 안정화가 어렵고, 따라서 제조비용을 절감시키기가 쉽지 않은 것이 문제점으로 지적된다. 생산 공정단계에 적용이 가능한 효율적인 인라인 QC기술의 확보와 throughput 공정의 확보가 상용화에서는 무엇보다 중요해지고 있다.

초전도마그네트가 고자장화되고 대형화될수록 전자력이 커지면서 2G 선재를 사용하는 경우, 특히 테이프 면에 수직방향으로 측정 편차도 크면서 평균적으로 낮은 수직인장응력에 대한 우려가 존재한다. 다층구조의 선재에서 발생하기 쉬운 de-lamination에 대한 대책으로 구조 보완과 재료 개선이 필요하다고 본다.

결정을 양축으로 고도로 배향시키는 진공증착기술을 생산 공정에 적용하다보니 특히 장선재에서  $I_c$ 특성의 균일성이 문제가 되고 있다. 기판 단계에서부터 표면 결함을 완전하게 제어하지 못하면 초전도층 내부에도 그로부터 기인한 결함들이 발생하게 된다. 장선재의  $I_c$ 를 측정할 때 전압탭의 측정 구간을 크게 설정하면 내부에 존재하는 결함을 정확하게 파악하지 못하는 상황이 벌어질 수 있다. 다른 초전도 선재와 달리 2G선재의 임계전류는 장선재 전체를 가능한 짧은 구간으로 끊어서  $I_c$ 의 분포를 측정해야하는 이유가 여기에 있으며, 따라서 이에 대한 표준화의 필요성이 크다고 할 수 있다. 최근에 홀센서를 연속으로 스캔하여 테이프의 길이방향으로 전체 단면의  $I_c$  분포를 효과적으로 볼 수 있는 방법들도 개발[11]되고 있어서 이를 인라인으로 적용할 수 있으면 품질관리에 큰 도움이 되리라고 생각한다.

NMR이나 MRI와 같은 정밀자장을 발생시키는 초전도마그네트에 2G선재를 적용하기 위해서는 단면 사이즈의 정확성을 크게 개선해야한다. 대부분의 업체에서

전기도금으로 구리 안정화층을 입히고 있으나 선재 단면의 두께와 폭이 정밀하게 제어되지 않으면 이를 이용해서 만든 코일의 발생 자장의 균일성은 실제 설계값보다 크게 저하하게 된다. 따라서 구리 전기도금이후에 후가공으로 초전도박막에 손상을 주지 않는 범위에서 단면사이즈를 제어할 수 있는 가공방법도 고려해 볼 필요가 있다.

## 5. 맺음말

지금까지 2G 선재를 상용화하기 위한 각국의 개발동향을 살펴보았다.  $I_c \times L$ 지표면에서 미국, 일본, 한국 3개 국가가 주도하는 2G선재 개발 구도가 새로운 업체들이 세계적으로 많이 참여하면서 외견상으로는 최근 경쟁이 심해지는 현상이 벌어지고 있다. 아직 본격적인 시장진입이 이루어지 않는 상황에서는 상생을 위한 협력도 필요하며, 2G선재를 사용하는 유저그룹과의 긴밀한 소통과 협의가 무엇보다 중요하다고 본다. 연구용이긴 하지만 고자장마그네트 개발에 2G선재를 사용하는 사례가 최근 늘어나고 있다. 2G선재는 구조적으로나 재료적으로 기존의 저온초전도선재에 비하여 많이 다르기 때문에 마그네트나 초전도전력기기 등에 사용하였을 때 저온초전도마그네트와는 다른 예상하지 못한 결과가 나올 수도 있다. 따라서 가능하면 코일이던 케이블이던 다양한 조건으로 프로토타입을 많이 만들어 보고 문제점을 분석하여 새로운 설계에 반영하는 과정이 필요하다고 본다. 초전도기기의 개발을 통하여 2G 선재의 유저그룹에서 확보한 데이터를 선재 개발그룹과 공유하여, 서로 긴밀하게 실질적으로 협의하는 기회가 더 많아져야 발전할 수 있다. 선재 개발 차원에서도 근본적으로는 기계적특성과 고자장특성을 더욱 향상시켜야하고 불균일성과 높은 제조원가 등의 문제도 해결해야하기 때문에 중요한 기술적 과제들에 대해서는 산학연 협력구도로 선택과 집중에 의한 연구개발이 당분간 필요하다고 본다.

참고문헌

- [1] S. Yoon, K. J. Kim, K. Cheon, H. Lee, S. Hahn, S.-H. Moon, "26T 35mm all-GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> multi-width noinsulation superconducting magnet" Supercond. Sci. Technol. 29 04LT04 (2016).
- [2] David Larbalestier, Presented at "Ultrahigh Field NMR and MRI: Science at the Crossroads" November 12-13, 2015.
- [3] V. Matias, CCA Intl. Workshop, Dec.2014, Jeju
- [4] C. Barth et al., "Electro-Mechanical Properties of REBCO Coated Conductors from various Industrial Manufacturers at 77K, self-field and 4.2 K, 19 T", Supercond. Sci. & Tech. 28, 045011, 2015.
- [5] C. Senatore et al., Field and temperature scaling of the critical current density in commercial REBCO coated conductors", Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) p. 014002.
- [6] Q. Li, CCA Intl. Workshop, Dec.2014, Jeju
- [7] T. Puig, Plenary presentation PL7 given at EUCAS 2015; Lyon, France, September 6 - 10, 2015.
- [8] D C van der Laan et al., "Engineering current density in excess of 200Amm<sup>-2</sup> at 20T in CORC® magnet cables containing RE-Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> tapes with 38μm thick substrates", Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 124001.
- [9] New release by Furukawa Electric. web site([http://www.furukawa.co.jp/en/release/2016/kenkai\\_160427.html](http://www.furukawa.co.jp/en/release/2016/kenkai_160427.html)), April 27, 2016
- [10] S. Miura et al., "Vortex pinning at low temperature under high magnetic field in SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> superconducting films with high number density and small size of BaHfO<sub>3</sub> nano-rods", Sci. & Tech. 28 (2015) p.114006, .
- [11] X. Obradors and T. Puig, "Coated conductors for power applications: materials challenges", Supercond. Sci. Technol. 27 (2014) p.044003
- [12] T. Kiss, CCA Intl. Workshop, Dec.2014, Jeju

저자이력



오상수(吳詳秀)  
1983년 경북대 금속공학과,  
1992년 Kyoto대 대학원(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 책임연구원.