

국내 저온초전도 선재 연구 개발 동향

황덕영
케이.에이.티.(주) 기술연구소

1. 서론

1911년 네덜란드 Leiden 대학의 H.K. Onnes가 금속을 극저온으로 냉각시키면 전기저항이 없어지는 초전도 현상을 발견한 이후[1], 1930년대에 납이나 비스무스 계열의 금속 합금은 순수 금속과는 달리 자기장을 가하여도 초전도성이 비교적 완만하게 사라지는 현상이 발견되었다. 이와 같은 제 2종 초전도체의 발견[2]에 힘입어 기술적인 응용을 위하여 많은 합금과 화합물들의 초전도성에 대한 연구가 진행되었고, 1954년에 Nb계열의 금속 화합물 Nb₃Sn, 1961년에 이원 합금 NbTi가 발견되었다[3][4]. 그 후, 초전도 자석이 개발되고 일부 입자가속기의 실용화와 더불어 저온 초전도선재의 제조기술은 큰 진전을 이루었다.

저온 초전도체(NbTi와 Nb₃Sn) 선재를 제조하는 나라는 세계적으로 아주 드물고, 일본의 Hitachi, Jastech, Furukawa, 유럽의 Bruker-EAS, 미국의 OST, Luvata, 중국의 WST가 있으며, 한국에서는 케이에이티(KAT)가 유일하게 Nb₃Sn 선재를 제조하여, 현재 프랑스에 건설중인 국제핵융합실험로(ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor)에 공급하고 있으며, 또한 최근에는 NbTi 선재를 개발 완료하여 MRI용 마그넷에 적용, 양산 단계에 있다. 실제로 저온초전도 선재는 제조 개발비가 많이 들고

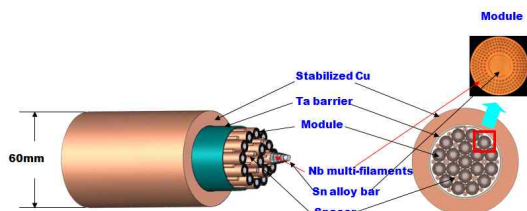


그림 1. Nb₃Sn 초전도 선재의 단면 구조.

제조기술이 복잡하며 다양한 공정으로 이루어져 있어 쉽게 접근하기 어려운 것이 현실이다.

본 논고에서는 대표적인 저온 초전도체인 Nb₃Sn과 NbTi 선재의 국내 연구 개발 성과 및 향후 연구개발 방향에 대해 요약·기술하였다.

2. Nb₃Sn 초전도 선재의 개발 동향

Nb₃Sn 선재는 실용적인 초전도 선재로 가장 먼저 개발되었으나 NbTi에 비해 상대적으로 가공성이 열악하고 선재 가격이 비싸며 취성으로 인해 마그넷을 제작하는데 많은 어려움이 있기 때문에 NbTi 선재 보다 늦게 상용화 되었다. 하지만 기존 NbTi 초전도 특성의 한계치를 뛰어넘는 우수한 초전도특성(T_c=15~18 K, H_{c2}(4.2 K)=20~26T)은 NbTi의 대체 초전도 재료로 인식되고 있고 산업 분야 보다는 주로 고 에너지 물리학과 같은 과학 분야에 적용되고 있다. 실용화 초기에는 미국의 GE, IGC등에 의하여 표면확산법을 이용한 테이프 형태의 응용이 많았으나[5] 브론즈법이나 내부확산법에 의해 상용화된 이래 그림 1과 같은 다심의 초전도 필라멘트와 안정화재(보통 무산소동) 매트릭스로 구성되어 있는 다심복합선재 형태로 개발 되었다.

표 1. Nb₃Sn 제조공정 종류.

제조 공정	Bronze route	Internal-Sn diffusion	Powder-In-Tube
Billet 단면 구조			
Nb ₃ Sn 형성	Cu-Sn브론즈의 Nb용과와 확산반응	Nb용과 Sn 코어와의 확산반응	Nb 필라와 Sn 파우더간의 확산반응
장점	- 장선화에 가장 유리함 (C>5 km) - 작은 유효필라멘트 직경 (<20 μm) - 우수한 길이방향 균일성 - PCS모드에 적합	- 중자장에서 높은 Jc - 중간이닝 없음(경제적) - 장선화 가능	- 매우 높은 Sn함량으로 높은 Jc 값
단점	- 단면적소 50%이하 중간 이닝일시로 비경제적 - 중-저자장 영역에서 낮은 Jc	- 필라멘트 유효직경이 큼 - 브론즈법보다 선재 길이 방향 균일성 나쁨. - PCS모드에 적합하지 않음	- 기계적특성이 나쁨 - 큰 유효필라멘트 직경 - 초기 NbSn ₂ 분말사용으로 경제성 나쁨
선재회사	Furukawa, Jastec, Hitachi, Bruker-EAS, Supercon	OST, Luvata, KAT	Supercon, Bruker-EAS

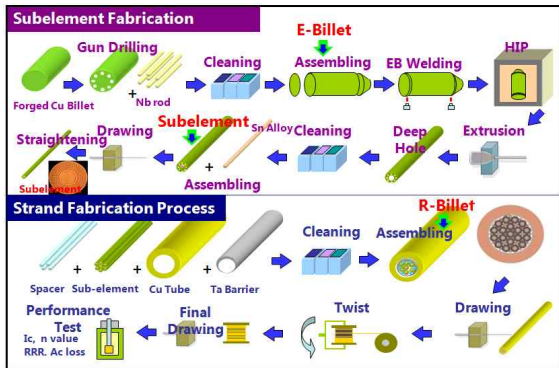


그림 2. Nb₃Sn 초전도 선재의 제조과정.

KAT에서 제조하는 Nb₃Sn 선재는 Ta/Cu 내에 19개의 sub-element와 30개의 Sn 합금으로 구성된 Sn spacer를 배치한 선재로서, 선재 내부에 총 3420개의 Nb 필라멘트가 있으며, 선재의 최종 직경을 0.8 mm로 하였을 때 필라멘트의 직경은 약 5 μm이다. Nb₃Sn 선재를 제조하는 방식에는 브론즈법, 내부확산법, PIT법 외에 외부확산법, 튜브법, MJR (Modified Jelly-Roll) 등이 있으며, KAT에서는 높은 임계전류밀도를 나타내는데 유리한 방식인 내부확산법을 채택하여 선재를 제조하고 있다(표 1).

그림 2에서 보는 바와 같이, 내부확산법에 의한 제조공정은 건드릴 공정에 의해 Cu 빌렛에 홀가공을 한 후 Nb 봉재를 삽입하여 빌렛을 제조한 후, 압출 공정에 의해 모노 필라멘트를 제조한 후, 인발 공정에 의해 Sn core로 구성된 sub-element 제조한다. 이 sub-element를 Sn spacer와 함께 베리어 층 역할을 수행하는 Ta tube 및 안정화층 역할을 수행하는 Cu tube에 다발로 적층하여 restacking billet을 조립한다. 조립된 빌렛을 중간 열처리 없이 최종 선경까지 인발 공정으로 냉간가공 한 뒤 Cr 도금으로 절연하고 고온의 열처리를 통해 선재 내부 Sn과 Nb를 반응시켜 Nb₃Sn 상을 형성 시킨다.

Nb₃Sn 초전도 선재의 대표적인 응용분야는 고자장이 필요한 핵융합 장치용 초전도 코일, NMR, 최근에는 입자 가속기용 고자장 마그넷(HL-LHC, FCC)등이 있다. 표 2에는 국가별 ITER용 Nb₃Sn 공급현황을 나타내었다. ITER 마그넷 시스템에는 480톤의 TF 마그넷용과 140톤의 CS 마그넷용 Nb₃Sn 관내연선(CICC; Cable In Conduit Conductor)선재가 사용 되었고

미국의 Luvata와 OST, 유럽의 Bruker-EAS, 러시아의 ChMP, 일본의 Hitachi와 Jastec, 중국의 WST, 한국의 KAT에서 초전도 선재를 제조, 공급하였다 [6]. 현재 KAT는 ITER TF 코일용 Nb₃Sn 선재 480톤 중 약 20 %인 95톤(760 m 도체 19개, 415 m 도체 8개)을 공급완료 하였고 CS 코일용 선재 44톤을 공급 중에 있다.

표 3에는 KAT에서 ITER용 Nb₃Sn 선재의 종류에 따른 사양을 나타내었다. Nb₃Sn 선재의 임계전류는 250A(@12T, 4.2K) 이상이고 Qh값은 TF coil용은 600mJ/cc이하고 CS coil용은 500mJ/cc이하이다.

최근 유럽 입자 물리 연구소(CERN)에서는 발견된 새로운 희스입자에 대한 실험을 위해 Luminosity 향상을 목표로 High-Luminosity LHC(HL-LHC)프로젝트와 기존의 원형 가속기 LHC의 4배 큰 규모로 업그레이드 하는 프로젝트 Future Circular Collider(FCC)를 기획, 진행하고 있다. 그림 3에 입자 가속기용 고자장 마그넷에 요구되는 Nb₃Sn 선재의 임계전류밀도

표 2. ITER용 Nb₃Sn 공급현황.

구분	공급국가	Japan	Korea (KAT)	EU	RF	US	China	Total
TF	공급량 (tons)	120	95	95	95	40	35	480
	점유율 (%)	25	20	20	20	8	7	100
CS	공급량 (tons)	96	44	-	-	-	-	140
	점유율 (%)	69	31	-	-	-	-	100
합계(tons)		216	139	95	95	40	35	620

표 3. ITER용 Nb₃Sn 선재 사양.

	TF strand	CS strand
Min. Piece length	1,000m	1,000m
Cr-plated strand Dia.	0.82 ±0.005mm	0.82 ±0.005mm
Twist pitch	15 ±2mm	15 ±2mm
Twist direction	Right hand	Right hand
Cr plating thickness	2.0 + 0/-1μm	2.0 + 0/-1μm
Cu-Non Cu ratio	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1
RRR	>100	>100
Min. Critical current	Ic ≥ 250A	Ic ≥ 250A
n-value	> 20	> 20
Max. Hysteresis loss	< 600 mJ/cc	< 500 mJ/cc

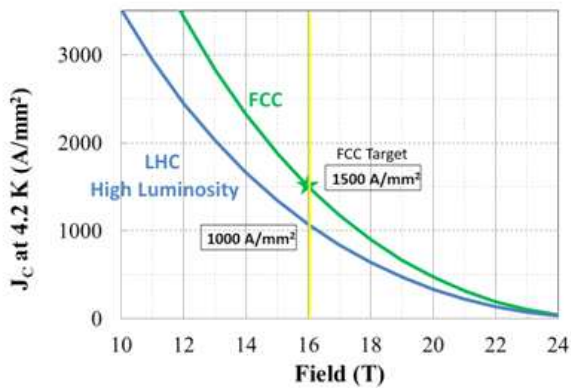


그림 3. Hi-luminosity LHC와 FCC에 요구되는 Nb₃Sn의 임계전류밀도 특성.

특성을 나타내었고 이를 만족할 수 있는 제조 방법으론 현재 OST사의 RRP(Restacked Rod Process) 내부확산법과 Bruker-EAS사의 PIT법이 유일하다. OST와 Bruker-EAS는 각각 80 μm, 0.88 mm의 필라멘트, 선재 외경에 12 T, 4.2 K에서 3300 A/mm²와 40~50 μm, 1.25 mm의 필라멘트, 선재 외경에 12 T, 4.2 K에서 2700 A/mm²의 사양과 임계전류밀도 특성을 보이는 선재를 개발하였다[7]. FCC에 사용될 선재로는 Nb₃Sn이 유력시 되고 있으며, 16 T의 높은 자장을 만들기 위해서는 높은 임계전류밀도가 필수적으로 요구되고 있다. 현재 마그넷 설계 결과를 토대로 CERN에서 요구하는 선재의 임계전류 사양은 1,500 A/mm²@16 T으로 ITER선재와 비교하여 2.5배 높은 사양이고 FCC의 제작에 소요되는 선재량은 약 6000톤이다. 이러한 요구에 대응하여 KAT에서는 선재의 초전도 특성을 향상시키기 위한 연구개발을 진행 중이고, CERN과의 협력 관계를 구축하여 개발에 박차를 가하고 있다. 임계 전류 밀도 향상을 위해서 가장 중요한 부분은 제한된 초전도 영역 내에 Nb와 Sn의 비율을 최적화시키고, 도핑 물질을 적절히 제어하여 확산 속도 및 피닝 효과를 극대화 하는 것이며 이에 초점을 맞추어 개발을 진행하고 있다.

3. NbTi 초전도 선재의 개발 동향

지금까지 개발된 저온 초전도 도체 중 NbTi는 가공성이 좋고 변형에 강하기 때문에 가장

많이 사용되어 왔다. NbTi 합금에서 Nb와 Ti는 서로 비슷한 원자 크기를 가지고 있고 넓은 조성 범위에서 용해되며, BCC구조의 β상이 임계온도 이하에서 제 2종 초전도체가 된다.

NbTi 선재의 제조방법은 압출방법과 RIT(Rod in Tube)방법으로 제조하는 모노 필라멘트와 건드릴 방법 혹은 모노 필라멘트를 다시 조립한 Restacking Billet를 인발 선선을 통해서 선재를 제조하는 멀티 필라멘트 공정으로 구분되고 있다. KAT에서는 그림 4와 같이 압출 및 인발 공정을 도입하여 모노 필라멘트를 제조한 후, 이것을 다시 조립한 Restacking Billet를 인발 선선을 통해서 NbTi 다심선재를 제조하고 있다.

NbTi 선재의 임계전류밀도는 냉간가공과 열처리에 의한 합금의 미세구조에 의해 결정되는데, 합금형태에서 가공 및 열처리 공정을 통하여 β-NbTi 미세조직 내에 α-티타늄을 형성시키고 제어한다(그림 5). NbTi 합금을 냉간가공 시 많은 전위를 발생시키고 적정의 열처리를 통해 결정립계에 HCP구조를 가지는 rich-α상의 티타늄을 석출시키며, 이 상전도 상태의 α상은 효과적인 자속양자 고정점이 된다. 한편 NbTi의 임계온도와 상부 임계자장값은 합금 조성비와 공정에 의해 결정되는데 티타늄의 양은 45~50 at. %이고 이 합금 조성비에서 9~9.2 K의 임계온도와



그림 4. NbTi 초전도 선재 제조과정.



그림 5. NbTi 제조과정동안 가공 및 열처리 공정을 통한 미세조직의 변화.



그림 6. MRI 마그넷용 WIC형 NbTi 선재.

14.5 T의 임계자장을 보여준다. 또한 α상을 형성시키기 위한 열처리 공정 시 Cu-Ti 화합물의 형성으로 인한 초전도 특성의 저하, 냉간가공 시 모듈의 불균일한 변형으로 인한 n-value 저하 및 단선이 발생하기 쉬운 등의 제조공정의 어려움이 있다.

NbTi 선재는 필라멘트 개수와 선재 설계에 따라 다양한 특성과 형태를 가지며, MRI에는 마그넷 운전 중 켄치 발생 시 열적 안정성이 높은 WIC(Wire In Channel)형 선재가 주로 적용되고 있다. WIC형 선재는 그림 6과 같이 Core wire와 Cu profile이 결합된 것으로 부식방지를 위해 WIC형 선재에 soldering 표면 코팅을 하고 최종적으로 절연 특성을 부여하기 위한 편조공정을 거쳐 제조된다.

초전도 선재 분야 중 유일하게 산업화된 분야는 의료기기용 MRI 마그넷이며, 현재 NbTi 선재가 적용되고 있다. MRI 생산은 Siemens 30%, GE 25%, Philips 20%, Toshiba 8%, Hitachi 7%, 중국을 비롯한 기타 제조사가 10%를 점유하고 있다. 이 제조사들은 초전도 마그넷을 자체 제작하고 있으며, 초전도 선재는 미국의 OST, 유럽의 EAS, Luvata, Hitachi 등이 공급하고 있다. 2020년 의료기기용 마그넷 세계 시장은 2.8조원 규모, 선재 시장은 4,200억 원/년 규모로 예측된다.



그림 7. 국내·외 마그넷 시장 규모.

MRI용 초전도 마그넷의 핵심 부품은 NbTi 선재로 마그넷 제조비용의 높은 비중을 차지하기 때문에 마그넷의 가격 경쟁력을 확보하기 위해서는 선재의 국산화가 반드시 필요하다. 또한 MRI용 마그넷 시장이 보급형인 1.5 T 마그넷에서 3.0 T 마그넷으로 시장이 변해감에 따라 임계전류 특성이 향상된 NbTi 선재가 요구되고 있다. 선재 소요량도 1.5 T 마그넷에 비해 4배정도 증가하기 때문에 결국 선재 특성이 저하되면 가격 경쟁력이 떨어지게 되므로 3.0 T 마그넷에 적용될 수 있는 NbTi 선재 개발이 필요하다.

KAT에서는 2014년부터 정부에서 지원하는 국책과제를 실시하여 NbTi 제조 기술 개발과 관련된 연구를 통하여 현재 해외 경쟁사들과 동등한 수준의 NbTi 선재를 자체 개발하였고 3.0 T 마그넷에 요구되는 NbTi 선재 개발을 진행하고 있으며, 사업화를 진행 중인



그림 8. 국내·외 마그넷용 초전도 선재 시장 규모.

표 4. MRI 마그넷용 NbTi 선재 사양.

	1.5T 마그넷	3.0T 마그넷
Ic(@7T, 4.2K)	500A	600A
n-vlaue	>30	> 30
선재중량(kg)	900	3,100

표 5. NbTi 선재 개발 현황.

	KAT	O사	L사
Wire dia(Φ)	0.92	0.82	0.81
Cu/Sc	1.2	0.82	0.95
Ic(A@7T, 4.2K)	485	519	488
n-vlaue	36	39	45
Jc(A/mm ²)	1620	1850	1790

MRI용 마그넷에 적용하여 제품을 출시할 예정이다.

그 밖에 NMR 및 입자 가속기 시장은 상시적으로 형성되어 있는 것이 아니라 대부분 국제 공동 연구 프로젝트 형태로 형성되어 한번에 많은 양의 선재가 요구되고 있다.

이와 같이 저온 초전도체가 가지는 장점을 이용한 다양한 초전도 기기의 발전과 더불어 저온 초전도 선재의 기술 개발은 이루어져 왔고 향후 저온 초전도 선재의 시장 규모 및 수요 증가와 더 높은 특성의 선재가 요구 되므로 국내에서도 저온 초전도 선재에 대한 꾸준한 연구개발이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

[1] R. Simon and A. Smith, superconductors: Conquering Technology's New Frontier, New York, NY: Plenum Press, p. 61 ff., 1988
[2] A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," Soviet phys. JETP, Vol. 5 No. 6, pp. 1174-1182, 1957
[3] B. T. Matthias, T. H. Geballe, S. Geller and E. Corenzwit, "Superconductivity of Nb₃Sn," phys. Rev., Vol. 95 No. 6, p. 1435, 1954

[4] J. K. Hulm and R. D. Blaugher, "Superconducting solid solution alloys of the transition elements," Phys. Rev., Vol. 123 No. 5, pp. 1569-1580, 1961
[5] M. G. Benz, G. E. Research. & Development Center Report No. 66-C-004, 1966
[6] A. Devred, I. Backbier, D. Bessette, G. Bevilard, M. Gardner, C. Jong, F. Lillaz, N. Mitchell, G. Romano and A. Vostner, "Challenges and Status of ITER Conductor Production," Supercond. Sci. Technol., Vol. 27, No. 4, 2014
[7] A. Ballarino, L. Bottura, "Targets for R&D on Nb₃Sn conductor for High Energy Physics," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, No.3, JUNE 2015

저자이력



황덕영 (黃德榮)
2005~2009년 한양대학교 금속재료공학과 박사, 현재 KAT (주) 기술연구소 연구소장