금속계 초전도선의 응용

하동우
한국전기연구원
초전도응용연구그룹 책임연구원

1. 서 론

현재 에너지 분야, 수송 분야 그리고 기초연구 분야 등에 있어서 고성능 초전도 마그네트 개발이 진행되고 있다. 의료, 화학 관련에서는 이미 초전도 마그네트를 이용한 자기공명 영상 단층 촬영장치(MRI)와 핵자기공명 스펙트로미터(NMR)가 상업용으로 생산되고 있다[1]. 에너지 관련에서는 핵융합이나 에너지저장, 초전도발전기 등이 있고 수송 관련으로는 자기부상 열차와 전자추진선 등이 있다. 한편 고 에너지 물리학의 분야에서는 입자가속기의 건설이 추진되고 있는데, 여기서도 초전도 마그네트가 사용된다. 이처럼 초전도 마그네트가 다양한 분야에서 이용되고 있거나 실용화를 위한 개발이 추진되고 있는 이유로는

(1) 전력손실이 적고,

(2) 정상적으로 높은 자장을 발생시킬 수 있으며,

(3) 전류밀도를 높여서 소형화가 가능하다는 이점이 있기 때문이다[2].

이와 같이 다양한 용도의 초전도 마그네트에 사용되는 초전도 선재도 여러 가지 조건을 만족시키기 위해 다양하게 연구 개발되어 왔다[3].

초전도 상태는 *임계온도*(T_c) 이하의 극저온에서만 실현되므로 초전도 상태를 유지하기 위해 액체 헬륨과 같은 극저온 냉매를 이용하여 온도를 유지시키기 위한 사용 조건 때문에 큰 제한이 있다. 액체 질소 온도 이상에서 초전도 상태가 유지되는 고온초전도 물질들이 발견되면서 초전도 기술에 대한 기대가 높아졌지만 고온초전도체를 초전도 마그네트에 사용하는 재료로서는 극복해야 할 기술적 과제가 많이 있다. 가장 큰 문제점으로서 산화물 초전도체들이 세라믹 고유의 취성을 지니고 있으며 또한 초전도 전류가 결정구조의 방향에 따라 큰 변화를 가지는 결정 구조의 이방성을 들 수가 있다. 그래서 현재 PIT(Powder-In-Tube) 공정에 의한 Bi-계 초전도체 테이프와 다층 박막 공정의 Y-계 초전도체 테이프 선재를 제조하는 연구를 수행하고 있으나 선재의 길이가 짧고, 가격이 고가이며, 안정화 재료의 적절한 선택 등 아직 해결해야 할 문제들을 극복하기 위한 연구가 추진 중인 상태이다.

근래에는 극저온 냉동기의 발달로 금속계 초전도선의 응용 분야가 확대될 것으로 전망하고 있다. 즉 액체헬륨의 액화 온도인 4.2 K 이하까지 냉각이 가능하여 기화하는 헬륨 가스의 재응축이 가능하게 되었으며 또한 냉동기의 효율도 향상하고 있어 초전도 시스템의 냉각을 용이하도록 도와 과거에 비해 응용의 범위를 넓힐 수 있게 되었다.

이와 같이 초전도 응용 시스템의 개발 현황에 비추

어 볼 때 저렴하면서도 장선의 도체 생산이 가능하고 또한 무엇보다 대전류 통전이 가능한 금속계 초전도 선을 개발하고 그 응용 범위를 넓혀 나가는 것이 우리에게도 필요한 시점이 되었다. 따라서 본고에서는 금속계 초전도 선의 응용 분야와 그 용도에 따른 초전도 선의 특징을 살펴보고자 한다.

2. Nb-Ti 초전도선의 제조 및 응용

초전도 마그네트를 구성하는 초전도 선재에는 높은 T_c 이외에도 상부임계자장 (H_{c2})이 높고, 임계전류밀도 (J_c)가 높은 것이 요구된다. 이외에도 장선으로 길게 제조하려면 가공성이 좋아야 한다. 표 1에는 대표적인 금속계 초전도체의 임계온도와 상부임계자장 특성을 나타내었다[1]. Nb-Zr 초전도체가 먼저 발견되기는 하였지만 실제 실용화 된 것은 Nb-Ti 초전도체이며, Nb-Ti 초전도 선은 합금이므로 가공성이 우수하며 임계전류밀도 값이 높아 현재 가장 널리 사용되고 있다. 하지만 합금계 초전도체는 상부임계자장 값이 낮기 때문에 고자장용 초전도 기기에의 응용에는 제한을 받아 특수한 경우 9 T까지 자장 발생에도 사용하지만 일반적으로 약 7 T 정도의 자장을 발생시키는 마그네트에 사용한다. 이보다 더 높은 자장이 요구되는 응용기기를 위해서는 비록 고유의 취성을 지니고 있으나 금속간 화합물계 초전도 선을 사용하여야 한다. 화합물계 초전도체들 중 상용화된 물질은 가공성이 우수하고 초전도 층 합성이 용이한 Nb_3Sn이 있다. Nb_3Sn초전도체는 Nb_3Al, Nb_3Ge, V_3Si, V_3Ga와 같은 A15형 화합물 초전도체의 하나로서 17 T의 고자장용으로 널리 응용되고 있다[3].

표 1. 대표적인 금속계 초전도체의 임계온도(Tc)와 상부임계자장(Hc2) 특성.

재료	결정상	T_c (K)	Hc_2 (4.2K)
Nb-Ti	bcc합금	9.5	11.5
Nb-Zr	"	10.8	10.5
Nb3Sn	A15 화합물	18.0	21.5
V3Ga	"	15.2	22
Nb3Ge	"	23	37
Nb3(Al, Ge)	"	20.7	41

현재 NbTi 초전도 선은 자기공명 단층촬영장치(MRI), 핵자기 공명장치(NMR), 입자가속기용 및 고자장 마그네트의 자장이 낮은 부분인 외부 코일 제작에 활용되고 있으며 가장 활용 범위가 넓다. Nb3Sn 초전도 선은 주로 고자장이 요구되는 핵융합용, 고자장 NMR 및 이화학용 고자장 마그네트의 내부 코일 제작에 활용되고 있다. 최근에는 극저온 냉동기의 발달로 Nb-Ti 초전도체보다 임계온도가 높은 장점을 이용하여 무헬륨 초전도 마그네트에의 응용이 많아질 것으로 전망된다.

그림 1에는 Nb-Ti 초전도 선의 대표적인 제조 공정을 나타내고 있다. 다심선의 Nb-Ti 초전도 선을 제조하기 위해 우선 구리(Cu) 튜브에 Nb-Ti 봉을 넣어 Nb-Ti/Cu 단심선을 제조한 다음 이를 다발로 하여 Cu 캔에 넣고 인발 및 신선에 의해 다심선을 제조한다. Cu를 외피로 사용하는 이유는 가공성을 용이하게 할뿐 아니라 과도전류나 다른 요인에 의해 Nb-Ti 필라멘트에서의 초전도 현상이 파괴되어 상전도로 전이하는 퀜치가 발생하였을 때 초전도 필라멘트의 냉각을 도우는 안정화재 역할을 하기 위한 것이다. MRI 마그네트와 같이 절대 퀜치가 발생하지 않아야 하는 마그네트에 사용하는 초전도 선을 위해서는 초전도 선의 안정화가 중요하며, 안정화재의 비율을 높이기 위해 초전도 선의 단면에서의 동비(구리 면적/초전도체 면적)를 크게 설계를 하게 된다. 이때 초전도 선은 단심선을 다발로하여 다심선을 가공하지 않고 구리 봉재에 구멍을 뚫어 Nb-Ti 봉재를 넣어 가공하는 방법으로 도체를 만들게 된다. 그림 2에는 한국전기연구원에

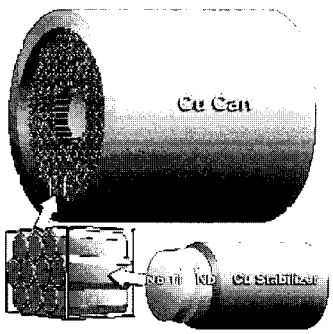


그림 1. Nb-Ti 초전도 선의 제조 공정.

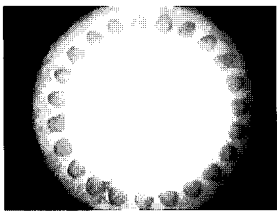


그림 2. MRI용 Nb-Ti 초전도 선의 단면.

서 제작한 MRI에 사용되었던 24심의 Nb-Ti 초전도 선의 단면으로서, 한국전기연구원과 넥상스 코리아가 공동으로 개발하였다. 필라멘트의 수는 24심이며 동비는 약 7 정도로 완전 안정화 도체로 설계하였다. MRI에 사용되는 이러한 단면 구조를 가지는 Nb-Ti 초전도 선이 현재 세계적으로 가장 높은 시장 점유율을 가지고 있다.

그리고 대전류 통전을 위해서는 동비를 낮추고 필라멘트의 수를 늘리는 설계를 하게 되는데, 그림 3에서는 일반적으로 많이 쓰이는 도체의 단면을 나타내고 있다. 그림 3(a)는 37심 도체로서 동비는 약 3 정도이며 원형 또는 각형의 도체로 제조하여 사용을 한다. 각형의 도체로 마그네트를 제작하게 되면 도체 간의 틈을 줄일 수가 있으며 또한 로렌츠 힘에 의한 코일에서의 도체의 이탈을 좀 더 억제할 수 있는 장점이 있다. 이러한 Nb-Ti 초전도 선은 NMR, 단결정 성장장치, 이화학용 초전도 마그네트 등에 사용되고 있다.

도체의 통전 전류를 증가시키기 위해 한 가닥의 도체 내에 초전도체의 분율을 증가시킬 수도 있을 뿐 아

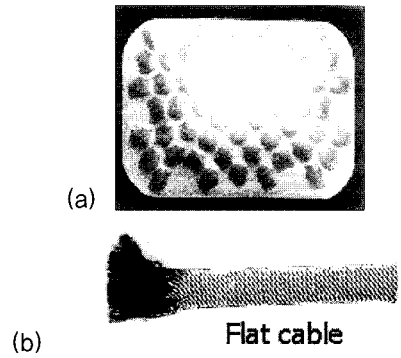


그림 3. MRI용 Nb-Ti 초전도 선의 단면
(a) 37심 초전도 선, (b)flat cable.

니라 이들 도체를 다발로 연선하여 케이블로 제조함으로써 목적을 달성할 수 있다. 그림 3(b)는 플랫 케이블 또는 러더퍼드 케이블이라 불리는 케이블의 끝의 구리 시스를 녹여내어 필라멘트가 드러난 상태를 보이고 있다. 플랫 케이블은 현재 입자가속기용 코일, 에너지저장장치(SMES) 등에 주로 활용되고 있다.

3. Nb_3Sn 초전도선의 제조 및 응용

Nb_3Sn 초전도 선재는 브론즈법에 의해 상용화된 이래 여러 가지 제조 공정이 소개되었다. 그림 4에 대표적인 Nb_3Sn 초전도 선의 제조 공정을 나타내었다[5]. 브론즈법은 기지금속인 청동과 Nb 필라멘트를 복합체로 가공한 다음 열처리에 의해 청동의 Sn이 Nb로 확산하여 Nb_3Sn 층을 형성하는 방법이다. 이 방법은 가공성이 우수하기 때문에 극세다심선재를 용이하게 제조할 수 있으며 선재의 교류손실 값이 낮다는 이점이 있는 반면에 Sn양이 Cu에서 고용도가 14wt%로 제

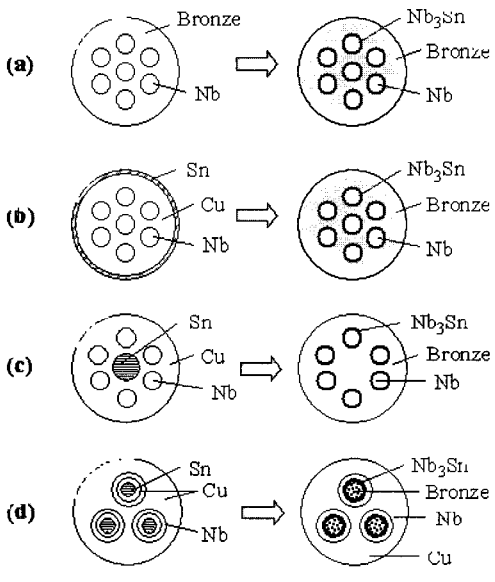


그림 4. 대표적인 Nb3Sn 초전도 선의 제조 공정
(a) 브론즈법 (b) 외부확산법
(c) 내부확산법 (d) 튜브법.

한을 받아 Nb_3Sn 화합물층의 두께를 크게 생성시킬

수가 없어서 임계전류(I_c)에 제한이 있고 신선 가공 동안 청동의 가공경화가 크기 때문에 최종형상에 도달하는 데까지 중간열처리 과정을 여러 번 거쳐야하는 단점이 있다[4].

가공 경화 현상을 극복하기 위해 Cu 기지 금속에 Nb 필라멘트를 넣은 다음 바깥에 Sn을 입힌 순금속 상태의 복합체로 만들어 가공경화 현상을 피하고자 한 외부확산법이 먼저 제안되었다. 하지만 이 방법으로는 외부의 Sn 때문에 단선이 쉽게 발생하여 선재 직경을 최소화하는데 제한이 있었다. 그래서 외부확산법을 개선한 내부확산법과 튜브법 등이 개발되었다[4]. 튜브법은 Cu 모재 중에 미리 Sn혹은 Cu-Sn합금과 결합된 Nb봉을 삽입하고 최종형상까지 가공하여 열처리하는 공정이다. 이 방법으로는 높은 임계전류 값을 얻을 수 있지만 큰 교류손실 값과 선재의 길이를 길게 하지 못하는 단점이 있다[3]. 내부확산법(Internal Tin Mothed)은 Cu모재의 중앙에 Sn이 위치하도록 하고, 그 주위로 Nb 필라멘트를 삽입하고 최종형상까지 가공하여 열처리하여 만드는 방법이다. 이 방법은 청동의 Sn 용해도에 의해 Sn의 양이 제한되어지는 브론즈법에 비해 Nb와 Sn의 양을 늘림으로써 Non-Cu영역에서 임계전류밀도(J_c)를 높일 수 있고 중간 열처리 과정이 필요 없고 제조비가 저렴하며 각 성분의 조성이 균일하고 가공성이 우수한 장점이 있다. 또한 Nb 필라멘트의 직경을 가늘게 하여 다심으로 제조한다면 브론즈법으로 만든 초전도 선만큼 교류손실 값을 줄일 수도 있다.

현재 브론즈법에 의한 Nb_3Sn 초전도 선은 가장 널리 사용되고 있으며 특히 NMR 마그네트의 영구전류 스위치(PCS)를 위한 초전도 접합을 위해서는 브론즈법으로 제조한 선재가 반드시 필요한 실정이다. 그리고 대전류 통전이 중요한 조건인 핵융합용 초전도 선을 위해서는 내부확산법에 의한 Nb_3Sn 초전도 선의 개발이 최근에 집중적으로 이루어지고 있다.

4. 최근의 금속계 초전도 선의 개발 현황

현재 세계적으로 가장 적극적으로 연구를 수행하고 있는 초전도 시스템 분야로는 핵융합 발전과 초고자장 NMR이라고 할 수 있다. 이 두 분야는 장래 인류의 에너지 문제와 의료 기술의 발달로 삶의 질을 향상시킬 수 있는 열쇠이기도 하다. 따라서 이 두 분야에 적용할 수 있는 초전도 선을 개발하여야만 이들 시스템의 개발을 성공할 수 있기 때문에 가장 주목을 받고 있는 연구 분야이므로 살펴보고자 한다.

4.1 핵융합용 초전도 선

미래의 에너지 해결을 위한 중요한 원천기술로 환경 문제를 유발하지 않는 국제핵융합실험로개발사업(ITER)이 미국, 유럽연합, 일본, 러시아 등 선진국을 중심으로 추진되고 있다[5-7]. 한국도 2003년 6월에 이 사업에 참여하기로 결정한 이후 본격적인 공동 연구를 위하여 준비 중에 있다. 연구핵융합 장치용 초전도 코일은 고자장 상태에서 운전하기 때문에 TF(Toroidal Field) 및 CS(Central Solenoid) 코일용으로 Nb_3Sn 초전도 선이 사용되고 있다. 그리고 강한 전자력이 작용하는 강자장 하에서 대전류를 안정하게 흘려야 하는 핵융합 마그네트용 도체를 위하여 초전도 소선 다발을 집합 연선하여 이를 고강도 금속관에 넣은 형태의 도체인 관내연선(CICC; Cable In Conduit Conductor)형 도체가 주로 사용된다[8-10]. 한국형 초전도 토카막 핵융합 장치(KSTAR; Korea Superconducting Tokamak Advanced Researcher device)에서도 TF 및 CS 코일에는 Nb_3Sn CIC도체가, 외부 Outer Ring 코일에는 Nb-Ti CICC도체가 사용될 예정이다[11]. 그림 5에서는 한국형 초전도 토카막 핵융합 장치의 초전도 마그네트와 CICC도체 그리고 열처리 전의 내부확산법에 의한 Nb_3Sn 초전도 선의 단면을 보이고 있다. 핵융합용 Nb_3Sn 초전도 선의 외부에는 안정화 동(Cu)이 있으며 Nb_3Sn 확산반응동안 Sn의안정화 동으로의 확산을 막기 위한 Ta 장벽이 내부를 둘러싸고 있으며 내부에는 Nb 필라멘트와 Sn core 그리고 Cu 기지금속으로 구성되어 있음을 알 수 있다. KSTAR용 Nb_3Sn CICC도체에 사용되는 소선은 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)의 사양인 고임계전류밀도형과 저교류손실형의 사양을 모두 만족하는 HP-3 등급으로서 4.2 K, 12 T의 조건에서 non-Cu J_c가 750 A/㎟ 이상이어야 하며, 4.2 K, ±3 T 조건에서 교류손실 값은 250 mJ/cc 이하여야 하는데, 이러한 사양을 만족시키기 위해서는 높은 임계전류밀도를 확보하면서 중간열처리 공

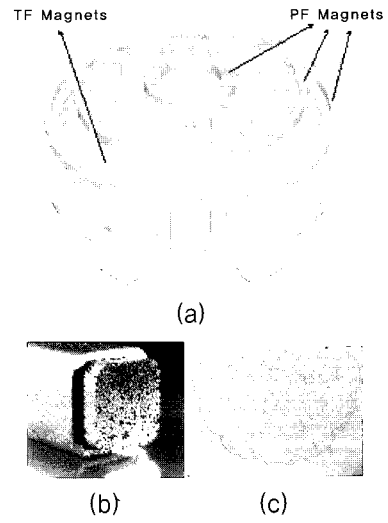


그림 5. 한국형 초전도 토카막 핵융합 장치의 초전도 마그네트(a)와 CICC도체(b), 도체의 단면(c).

정의 생략으로 가공공정이 용이한 내부확산법(Internal Tin Method)을 Nb_3Sn 초전도 소선의 제조공정으로 선택하게 되었다. 내부확산법은 초전도 선재 신선 가공 시 내부 모재가 순 구리(OFHC ; Oxygen Free High purity Copper)이기 때문에 가공경화를 해소하기 위한 연화처리가 필요 없고 Nb_3Sn 생성에 필요한 Sn의 양을 Cu-Sn브론즈의 고용한도 이상으로 첨가할 수 있어서 고임계전류밀도의 Nb_3Sn 선재를 제조하는데 적합하다고 할 수 있다[12]. Nb_3Sn 초전도 선재의 여러 제조 공정에 비해 내부확산법에 의한 개발이 늦게 시작하였지만 최근에 많은 발전이 진행되었으며 또한 앞으로 고자장, 대전류 통전이 요구되는 초전도 응용기기에 사용이 많이 될 것으로 전망된다[13].

KSTAR에서 요구하는 사양을 충족시킬 수 있는 선재를 제조할 수 있는 회사는 현재 세계적으로 IGC 와 MELCO 2개 업체만 있을 정도로 아직까지는 초전도 특성 향상을 위한 제조법 및 열처리에 의한 미세조직 제어와 같은 연구가 브론즈법에 비해서는 부족한 실정이었다. 한국전기연구원에서는 기초과학지원연구원과 넥상스 코리아와 함께 1997년부터 국내 최초로 내부확산법에 의한 Nb_3Sn 초전도 선의 제조와 특성 평가를 수행하였다. 그리고 ITER 사업에 필요한 Nb_3Sn 초전도 선을 한국에서도 일부분 공급하기 위하여 현재 KSTAR 연구에서의 선재 제조 기술을 바탕으로 고려제강과 한국기초과학지원원구원에서 Nb_3Sn 초전도 선의 제조 기술을 확보하기 위하여 노력하고 있다.

4.2 초고자장 NMR용 초전도 선

NMR 분광기가 갖는 특징적인 성능을 보면, 구조연구에 있어서 NMR 분광기는 X선 회절분광기와 상보적으로 시료를 파괴하지 않고 핵자기공명 현상을 이용하여 액체 상태인 시료 분자의 구조를 연구할 수 있는 최적의 장비이다. 저분자량에서부터 약 2만까지의 고분자량의 분자까지도 구조를 연구할 수 있다. 특히 자기장의 세기가 셀수록 분해능과 감도가 좋아지므로 약 14 T(600MHz)의 고자장 분광기는 분해능과 감도면에서 뛰어난 성능을 갖게 되어 생체고분자, 합성고분자 등의 분석에 유리하다.

NMR의 사용주파수를 결정짓는 초전도 마그네트의 발생자장은 사용되는 초전도선의 임계자장에 의해 결정되는데, Nb-Ti 초전도선을 사용해서 제작된 초전도 마그네트는 약 8 T 정도의 자장을 발생시킬 수 있고, 따라서 NbTi 초전도선 만을 사용할 경우는 약 340 MHz급의 NMR을 만들 수 있다.

Nb_3Sn 초전도선은 고주파 NMR용 초전도 마그네트 개발을 목표로 많은 연구개발이 이루어져 최근 괄목할 만한 성능향상을 이룩하였다. 현재 고자장급인 750 MHz대역이하의 NMR이 시판되고 있으며, 일반적으로 400 MHz급의 NMR이 가장 널리 보급되고 있다. 700 MHz이하의 중.저자장급의 NMR 마그네트의 국산화 개발을 위해서는 국내의 산업계에서 NMR용 NbTi 및 Nb_3Sn의 초전도선을 개발하는 것도 반드시 필요하다.

MRI와 마찬가지로 NMR 마그네트에서도 정밀한 균등자장이 필요하며 이를 위해 각각의 초전도 코일간에 저항이 없이 연결할 수 있는 초전도 접합기술이 필요하다. 예를 들어 900 MHz 초전도 마그네트의 제작에는 NbTi코일과 Nb_3Sn코일간의 접속기술을 개발하여야하며, 자장감쇄를 고려하여 고분해능 NMR의 경우에는 코일간의 접합저항이 10^{-11} Ω이하여야만 되며, 900 MHz이상의 고자장 NMR의 경우에는 Nb_3Sn -

Nb_3Sn, NbTi - Nb_3Sn, NbTi - NbTi와 같은 여러 가지 초전도 코일간의 접합기술을 개발하여야한다. 이와 같이 초전도 접합이 매우 중요하기 때문에 NMR용 Nb_3Sn 초전도 선은 브론즈법으로 제조한 선을 주로 사용하고 있다. 즉 Nb 필라멘트의 접합이 브론즈법의 선이 내부확산법의 선보다 용이하기 때문이다.

그리고 최근에는 모든 생체 고분자의 구조를 분석하기 위하여 더욱 뛰어난 해상력을 가진 1 GHz 급 고자장 NMR 개발이 세계 적으로 활발히 추진되고 있는데, 그림 6은 일본 NRIM에서 개발한 920 MHz급 NMR용 초전도 마그네트의 구조와 여기에 사용된 금속계 초전도 선의 단면을 보이고 있다[14]. 통상 NbTi 코일을 외층 코일로 하고, Nb_3Sn 코일을 내층 코일로 사용하는 하이브리드형이 일반적으로 사용되고 있으며, 이 경우 발생시킬 수 있는 최대자장은 1.8 K정도의 초유동 헬륨을 사용하는 경우 약 21 T 내외이며, 4.2 K의 포화 액체헬륨을 사용할 경우에는 18 T까지 사용할 수 있다. 그리고 Nb_3Sn 코일내부에 임계자장이 더욱 높은 산화물 초전도선을 사용하여 insert coil로 사용하여 23.5 T의 자장을 발생시켜 1 GHz급 NMR 마그네트를 개발하기 위한 연구가 미국, 일본 그리고 유럽을 중심으로 활발히 수행되고 있다. 하지만 영구전류 모드를 위한 초전도 접합이 금속계 선재에서는 가능하나, 세라믹계 고온 초전도 선에서는 아직 적합한 수준의 저항과 통전 전류를 만족시키지 못하고 있다.

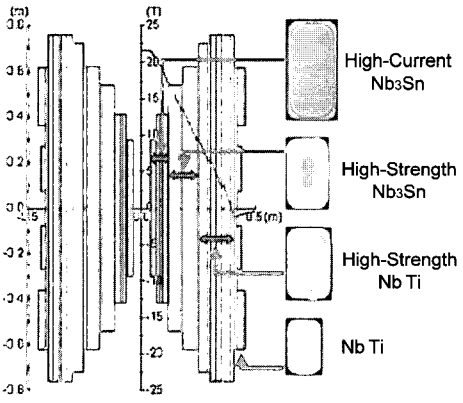


그림 6. 일본 NRIM의 920 MHz급 NMR용 초전도 마그네트의 구조 및 사용 도체.

따라서 1 GHz 급 NMR을 위해서는 Nb_3Al 또는 고온초전도 선에서의 초전도 접합 기술이 개발되어야만 한다.

금속계 초전도 선의 발전에 있어 Nb-Ti 초전도 선의 경우, 임계전류 값이나 대전류 통전을 위한 케이블링 기술 그리고 초전도 접합 기술 등이 어느 정도 초전도 시스템에 적용할 만큼 발전을 하였다. 이에 비해 Nb_3Sn 초전도 선의 경우, 아직도 임계전류를 향상시킬 수 있는 여지가 많고 대전류 통전을 위한 CICC 기술 등이 발전하고 있는 추세이다.

5. 결 론

국내에서의 초전도체에 관한 연구는 고온초전도체가 발견된 이후인 1987년부터 정부주도에 의한 연구가 이루어져 왔다. 그 당시 연구의 분위기는 이미 금속계 초전도 선의 제조 기술은 선진국에 비해 비교할 수 없을 정도로 미미하였기 때문에 금속계 초전도체를 연구하여 선진국을 뒤따라가기 보다는 거의 비슷한 수준에 있는 새로운 고온초전도체로의 연구에 진입하여야한다는 의견이 대부분이었다. 하지만 고온초전도체 고유의 취약한 성질을 극복하는 것이 아직까지도 쉬워 보이지는 않으며, 계속 지속적인 연구가 필요한 실정이다.

그 사이에 국내에서는 MRI용 초전도 마그네트, SMES, 초전도 발전기 등이 한국전기연구원의 주도로 연구를 수행하였으며 KSTAR 사업이 한국기초과학지원연구원에서 수행하고 있다. 또한 기업에서 NMR 및 단결정성장장치 연구를 수행하고 있기도 하다. 이러한 분야에서의 연구는 금속계 초전도 선재의 개발에도 많은 기여를 하여 Nb-Ti 및 Nb_3Sn 초전도 선의 제조 기술을 어느 정도 확보하고 있는 상태라고 평가할 수 있다.

따라서 국내에서도 기존 확보하고 있는 금속계 초전도 선의 제조 기술을 활용하여, 세계적으로 주목을 하고 있는 초전도 시스템과 관련한 금속계 초전도 선의 개발을 위하여 노력함으로써 선진국 수준의 초전도 선재 제조 기술을 우리도 함께 공유할 수 있을 것이다.

참고 문헌

[1] 山村 昌, et al., 超傳導工學, 일본電氣學會, p. 233, 1988.

[2] A. C. Rose-innes and E. H. Rhoderick, Introduction to Superconductivity, Pergamon Press, 1976.

[3] 長村光造, 超傳導材料, 米田出版, 2000.

[4] S. Foner and B. B. Schwartz, Superconductor Materials Science, Chapter 4, p. 201, 1981.

[5] D. Montgomery, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 3, p. 134, 1997.

[6] S. Shimamoto, Cryogenics, Vol. 25, p. 604, 1985.

[7] S. S. Shen, L. Dresner, M. S. Lubell, J. W. Lue, J. N. Luton, T. J. McManamy, C. T. Wilson, and R. E. Wintenberg, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 24, No. 2, p. 783, 1988.

[8] V. Sytnikov, I. Peshkov, A. Taran, P. Dolgosheev, Y. Ipatov, A. Rychagov, G. Svalov, and V. Mitrohin, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, p. 1364, 1997.

[9] N. Koizumi, Y. Takahashi, and H. Tsuji, Cryogenics, Vol. 36, No. 9, p. 649, 1996.

[10] H. Nakajima, et al., MT-15 Proceedings, part 1, p. 361, 1998.

[11] J. H. Schulz, KSTAR Design description Document, KSTAR Magnet System Review, T13&14, 1999.

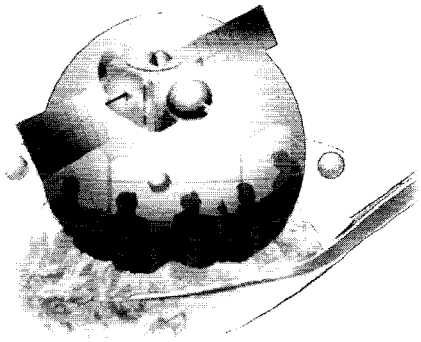
[12] 低溫工學會編, 超傳導、低溫工學 Handbook, Ohm press, 1993.

[13] P. J. Lee, J. R. Ruess, and D. C. Labalestier, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, p. 1516, 1997.

[14] S. Sato, NRIM Seminar Report, 2003.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 하동우

◈ 학력
- 1985년 경북대 금속공학과 공학사
- 1987년 경북대 금속공학과 공학석사
- 2001년 연세대 금속공학과 공학박사
- Post Doc. Fellow at National High Magnetic Field Laboratory, Florida State Univ., USA.

◈ 경력
- 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원