

고자장 마그네트용 Nb₃Sn 초전도선재

하 동 우

한국전기연구원 초전도응용연구그룹

1. 서 론

현재 에너지 분야, 수송분야 그리고 기초 연구 분야 등에 있어서 고성능 초전도마그네트 개발이 진행되고 있다. 에너지 관련에서는 핵융합이나 에너지저장, 초전도발전기 등이 있고 수송관련으로는 자기부상열차와 전자추진선 등이 있다. 한편 고 에너지 물리학의 분야에 있어서는 입자가속기의 건설을 진행하고 있는데, 여기서도 초전도 마그네트가 사용된다. 이 외에도 의료, 화학 관련에서는 이미 초전도 마그네트를 이용한 자기공명 영상 단층 촬영장치(MRI)와 핵자기공명 스펙트로미터(NMR)가 상업용으로 생산되고 있다¹⁾. 이처럼 초전도마그네트가 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 때문이다²⁾. 이와 같이 다양한 용도의 초전도 마그네트에 사용되는 초전도 선재도 여러 가지 조건을 만족시키기 위해 다양하게 연구 개발되어 왔다³⁾.

1954년에 B. T. Matthias가 순수한 원소가 아닌 Nb₃Sn 화합물이 고자계에서도 초전도성을 유지하는 것을 발견한 이래 1985년까지 많은 종류의 금속계 초전도체가 개발되었다¹⁾. 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 결정 구조의 방향에 따라 큰 변화

를 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 통전 전류(I_c) 값이 낮고 선재 길이가 짧아 아직 상용화가 되지 않고 있다.

초전도마그네트를 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 나타내었다¹⁾. Nb-Ti 초전도 선은 합금이므로 가공성이 우수하며 임계전류밀도 값이 높아 현재 가장 널리 사용되고 있다. 하지만 합금계 초전도체는 상부임계자장 값이 낮아 고자장용 초전도 기기에의 응용에는 제한을 받아 약 7 T 정도의 자장 값이 한계이다. 이보다 더 높은 자장이 요구되는 응용 기기를 위해서는 비록 고유의 취성을 지니고 있으나 금속간 화합물계 초전도 선을 사용하여야 한다. 화합물계 초전도체들 중 상용화된 물질은 가공성이 우수하고 초전도 층 합성이 용이한 Nb₃Sn이 있다. Nb₃Sn 초전도체는 Nb₃Al, Nb₃Ge, V₃Si, V₃Ga와 같은 A15형 화합물 초전도체의 하나로서 7 T ~ 17 T의 고자장용으로 널리 응용되고 있다³⁾.

표 1. 대표적인 금속계 초전도체의 임계온도(T_c)와 상부임계자장(H_{c2}) 특성.

재료	결정상	T _c (K)	H _{c2} (4.2K)
Nb-Ti	bcc합금	9.5	11.5
Nb-Zr	"	10.8	10.5
Nb ₃ Sn	A15 화합물	18.0	21.5
V ₃ Ga	"	15.2	22
Nb ₃ Ge	"	23	37
Nb ₃ (Al, Ge)	"	20.7	41

본 논문에서는 Nb₃Sn 초전도 선을 필요로 하는 초전도 응용 시스템에 대해 주로 언급하고자 하였는데, 특히 핵융합용 초전도 선과 고자장 NMR용 초전도 선의 응용에 대해 살펴보하고자 하였다.

2. Nb₃Sn 초전도체의 특성

여러 가지의 A15 화합물 초전도체 중 Nb₃Sn 초전도체가 상용화가 된 이유는 상온 상에서의 Nb₃Sn 형성의 용이성으로 설명이 된다. 그림 2에 A15형 화합물 초전도체의 Cu-A-B 3원계 상태도의 종류를 나타내었다⁴⁾. 브론즈법에 의해 제조가 가능한 Nb₃Sn, V₃Ga의 경우 Cu-V-Ga의 상태도는 그림 1(a)의 형에 속하여 Cu의 α-고용체와 공존하는 상은 A15상 (A₃B)이 된다. Cu-V-Si, Cu-V-Ge의 상태도는 (b)형에 속하는데, 이 경우 α-고용체는 A15상과 동시에 A₅B₃의 σ상과도 공존하고 있다. 실제로 V/Cu-Si 또는 V/Cu-Ge의 복합체를 가공열처리 하면 V₃Si, V₃Ge의 A15상이 생성되나 그것과 함께 V₅Si₃, V₅Ge₃의 σ상이 두껍게 생성되기 때문에 선재 전체에 흐르는 통전 전류 값은 대단히 작아지게 된다. 그리고 Cu-Nb-Ge, Cu-Nb-Ga 등의 상태도는 (c) 또는 (d) 형에 속하여 이 경

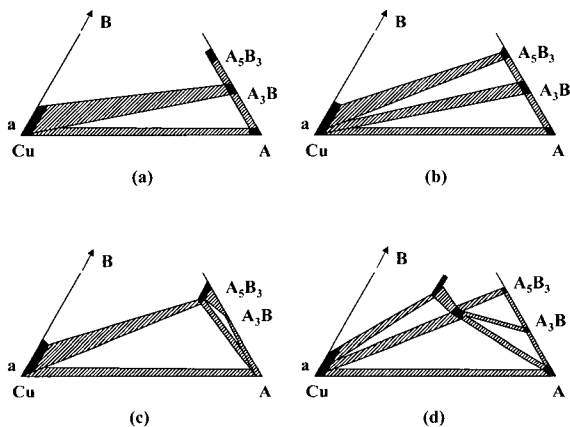


그림 1. A15형 화합물 초전도체의 Cu-A-B 3원계 상태도의 종류 A: Nb, V, Ta B: Sn, Ga, Ge, Si

- (a) Cu-Nb-Sn, Cu-V-Ga,
- (b) Cu-V-Si, Cu-V-Ge,
- (c) Cu-Nb-Ge, Cu-Nb-Al,
- (d) Cu-Nb-Al, Cu-Nb-Ga

우 저온에서의 확산경로는 A15상을 완전히 비켜가게 되기 때문에 Cu 합금을 이용한 브론즈법에 의한 Nb₃Ge, Nb₃Al, Nb₃Ga 등을 생성시키는 것은 불가능하다. 이들의 Nb-B(Ge, Al, Ga) 상태도의 특징은 1)포정반응에서 형성되고, 2) 주위에 정방정계상과 bcc 상이 있고, 3)고용범위에는 큰 온도 의존성이 있고 저온에서는 Nb 측으로 기준이 벗어나 있고, 4)화학양론조성은 고온에서, 포정반응 또는 공정반응의 선상에 위치하고 있다. 그리고 A15 화합물 중 Nb₃Ge는 임계온도가 23K로서 가장 높지만 3 : 1의 조성은 평형상태에서는 얻어지지 않는다. 그래서 급랭하여 과포화한 벌크 상태로 또는 스퍼터(sputter) 박막 공정에 의해서만 임계온도가 23K가 되는 초전도체를 만들 수 있다. Nb₃Al은 3:1 조성은 1940℃의 높은 온도에서 안정하므로 고온에서 급랭한 준안정화 상태의 시료를 923K에서 7 주 동안 열처리하여 장범위 규칙도를 증가시켜 Tc가 19.1K이 되는 초전도체를 제조할 수 있다. 이러한 이유로 인해 Cu 합금과 Nb 또는 V 계면에서의 확산에 의해 초전도체를 만들 수 있는 재료는 제한되며 특히 Nb₃Sn은 V₃Ga에 비해 초전도 특성과 가공성이 우수하므로 이 재료만이 상용화되었다.

Nb₃Sn 초전도 선재는 브론즈법에 의해 상용화된 이래 여러 가지 제조 공정이 소개되었다. 그림 2에 대표적인 Nb₃Sn 초전도 선의 제조 공정을 나타내었다⁵⁾. 브론즈법은 기지금속인 청동과 Nb 필라멘트를 복합체로 가공한 다음 열처리에 의해 청동의 Sn이 Nb로 확산하여 Nb₃Sn 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 제한을 받아 Nb₃Sn 화합물층의 두께를 크게 생성시킬 수가 없어서 임계전류(I_c)에 제한이 있고 선재 가공 동안 청동의 가공경화가 크기 때문에 최종형상에 도달하는 데까지 중간열처리 과정을 여러 번 거쳐야하는 단점이 있다⁶⁾.

가공 경화 현상을 극복하기 위해 Cu 기지 금속에 Nb 필라멘트를 넣은 다음 바깥에 Sn을 입힌 순금속 상태의 복합체로 만들어 가공경화 현상을 피하고자 한 외부확산법이

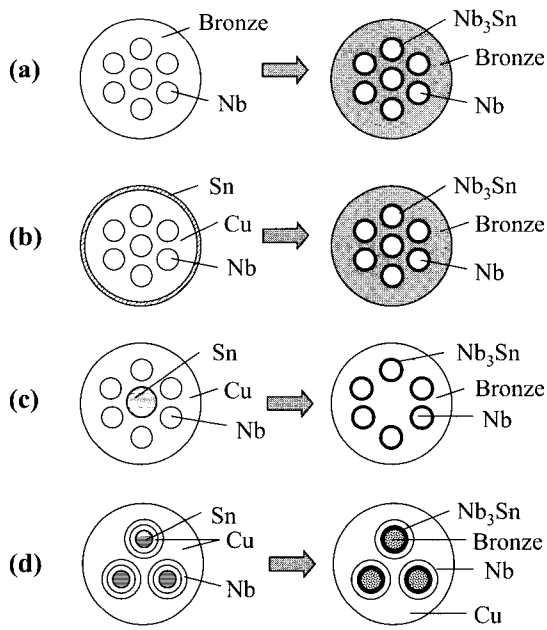


그림 2. 대표적인 Nb₃Sn 초전도 선의 제조 공정.

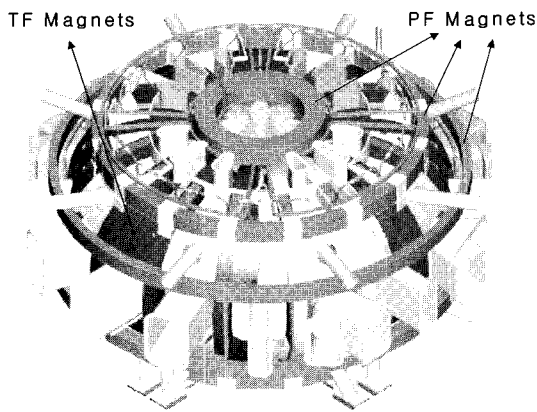
- (a) 브론즈법 (b) 외부확산법
- (c) 내부확산법 (d) 튜브법

먼저 제안되었다. 하지만 이 방법으로는 외부의 Sn 때문에 단선이 쉽게 발생하여 선재 직경을 최소화하는데 제한이 있었다. 그래서 외부확산법을 개선한 내부확산법과 튜브법 등이 개발되었다^{6~9)}. 튜브법은 Cu 모재 중에 미리 Sn 혹은 Cu-Sn 합금과 결합된 Nb 봉을 삽입하고 최종형상까지 가공하여 열처리하는 공정이다. 이 방법으로는 높은 임계전류 값을 얻을 수 있지만 큰 교류손실 값과 선재의 길이를 길게 하지 못하는 단점이 있다³⁾. 내부확산법 (internal tin)은 Cu 모재에 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 늘임으로써 Non-Cu 영역에서 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.

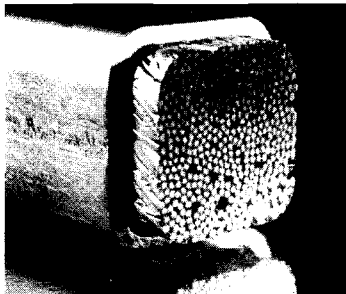
현재 브론즈법에 의한 Nb₃Sn 초전도 선은 가장 널리 사용되고 있으며 특히 NMR 자기네트의 영구전류스위치 (PCS)를 위한 초전도 집합을 위해서는 브론즈법으로 제조한 선재가 반드시 필요한 실정이다. 그리고 대전류 통전이 중요한 조건인 핵융합용 초전도 선을 위해서는 내부확산법에 의한 Nb₃Sn 초전도 선의 개발이 최근에 집중적으로 이루어지고 있다.

3. 핵융합용 Nb₃Sn 초전도선제

미래의 에너지 해결을 위한 중요한 원천 기술로 환경 문제를 유발하지 않는 핵융합 에너지 개발이 미국, 유럽연합, 일본 러시아 등 선진국을 중심으로 연구가 추진되고 있다^{10~12)}. 핵융합 장치용 초전도 코일은 고자장 상태에서 운전하기 때문에 TF(toroidal field) 및 CS(central solenoid) 코일용으로 Nb₃Sn 초전도 선이 사용되고 있다. 그리고 강한 전자력이 작용하는 강자장 하에서 대전류를 안정하게 흘려야 하는 핵융합 자기네트용 도체를 위하여 초전도 소선 다발을 집합 연선하여 이를 고강도 금속관에 넣은 형태의 도체인 관내연선(CICC; Cable In Conduit Conductor)형 도체가 주로 사용된다^{13~15)}. 한국형 초전도 토카막 핵융합 장치(KSTAR; Korea Superconducting Tokamak Advanced Researcher device)에서도 TF 및 CS 코일에는 Nb₃Sn CICC도체가, 외부 Outer Ring 코일에는 Nb-Ti CICC도체가 사용될 예정이다¹⁶⁾. 그림 3에서는 한국형 초전도 토카막 핵융합 장치의 초전도 자기네트와 CICC도체 그리고 486 가닥의 연선 공정을 나타내고 있다. KSTAR용 Nb₃Sn CICC도체에 사용되는 소선은 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)의 사양인 고임계전류밀도형과 저교류손실형의 사양을 모두 만족하는 HP-3 등급으로서 4.2K, 12 T의 조건에서 non-Cu J_c가 750 A/mm² 이상이어야 하며, 4.2 K, ±3 T 조건에서 교류손실 값은 250 mJ/cc 이하여야 하는데, 이러한 사양을 만족시키기 위해서는 높은 임계전류밀도를 확보하면서 중간 열처리 공정의 생략으로 가공공정이 용이한 내부확산법(internal tin method)을 Nb₃Sn



(a)



(b)

그림 3. 한국형 초전도 토카막 핵융합 장치의 초전도 마그네트(a)와 CICC도체(b).

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 Nb₃Sn 생성에 필요한 Sn의 양을 Cu-Sn브론즈의 고용한도 이상으로 첨가할 수 있어서 고임계전류밀도의 Nb₃Sn 선재를 제조하는데 적합하다고 할 수 있다¹⁷⁾. Nb₃Sn 초전도 선재의 여러 제조 공정에 비해 내부확산법에 의한 개발이 늦게 시작하였지만 최근에 많은 발전이 진행되었으며 또한 앞으로 고자장, 대전류 통전이 요구되는 초전도 응용기에 사용이 많이 될 것으로 전망된다^{18,19)}. KSTAR 연구의 초창기에는 KSTAR에서 요구하는 사양을 충족시킬 수 있는 선재를 제조할 수 있는 회사는 현재 세계적으로 IGC 와 MELCO 2개 업체만 있을 정도로 아직까지는 초전도 특성을 향상을 위한 제조법 및 열처리에 의한 미세조직 제

어와 같은 연구가 브론즈법에 비해서는 부족한 실정이었다.

본원에서는 기초과학지원연구원과 넥스스코리아와 함께 1997년부터 국내 최초로 내부확산법에 의한 Nb₃Sn 초전도 선의 제조와 특성 평가를 수행하였다. Nb₃Sn 초전도 선 개발과 관련하여 다음과 같은 연구 성과를 얻을 수 있었다.

내부확산법에 의한 초전도 선재의 제조에 있어 우선적으로 Cu 모재, Nb 봉재Sn core로 구성된 sub-element를 제조하는 기술을 보유하는 것이 매우 중요하며 이 과정에서 선재직경, 동비, 필라멘트 직경, 필라멘트간 거리, non-Cu 영역에서의 Nb필라멘트의 체적비 그리고 기지의 잔류 주석의 양 등을 고려하여 각 성분의 비율과 분포를 결정할 수 있는 빌렛 설계 능력과 빌렛의 제조 및 압출 과정에서의 여러 가지 민감한 기술을 확보하여야 한다²⁰⁾. 또한 sub-element를 적층한 복합재 상태의 초전도 선재의 가공에서는 Sn의 낮은 용점으로 인해 열간 가공이 불가능하기 때문에 복합재를 냉간 가공만으로 금속간의 결합이 이루어지도록 하여야 한다²⁰⁾. 그래서 표면의 오염을 방지하기 위해 표면처리와 조립공정 시 세심한 주의를 요한다. 그리고 열처리 과정에 있어 Cu-Sn 상을 형성하기 위한 저온 확산과정과 Nb₃Sn 상을 형성하기 위한 고온 확산과정을 이해하여야 한다.

그림 4에는 sub-element 빌렛의 압출한 단면을 보이고 있다. 핵융합 마그네트용 초전도 선재의 요구 조건인 내부확산법에 의한 Nb₃Sn 초전도 선재를 개발하기 위하여 빌렛의 설계 기술과 균일하고 단선이 없는 초

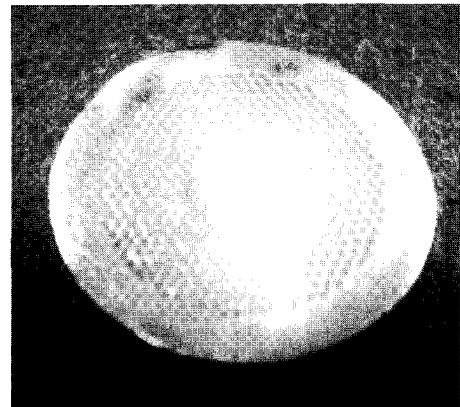


그림 4. 압출한 sub-element 빌렛의 단면

전도 선재를 가공할 수 있는 기술을 확보하여 그림4와 같은 균일한 빌렛을 가공할 수 있게 되었다.

내부 확산법에서는 Cu matrix에 원소를 첨가하면 가공성이 저하하게 되어 내부 확산법의 장점이 없어지게 되나, 최근에 내부 확산법에서도 Cu 모재에 Ge를 첨가하여 모재의 연성을 심하게 감소시키지 않으면서 J_c를 향상시킨 보고가 있었다²¹⁾. 하지만 이러한 보고들에서 J_c와 Ge 첨가량에 대한 연관성은 상세하게 밝혀지지는 않았다. 그리고 브론즈 법에서 Ge 첨가의 효과와 내부 확산법에서의 Ge 첨가 효과는 차이가 있을 수 있는데, 내부 확산법에서는 브론즈 형성이 진행되는 확산 반응이 필요하며 또한 이 반응 동안 액상이 존재하는 차이가 있다. 또한 Ge를 기지금속에 첨가함으로써 기지금속의 저항을 증가시켜 내부확산법의 약점인 교류손실 값을 줄일 수 있다³⁾. 본 연구에서는 Cu matrix에 Ge를 첨가하여 내부 확산법으로 Nb₃Sn 선재를 가공한 다음 열처리 온도를 변화시켜 임계전류와 미세조직 간의 관계를 조사하였다 또한 전자기적 특성 평가를 통하여 Ge 첨가로 내부확산법에 의한 초전도 선의 특성 향상의 가능성을 검토하였다.

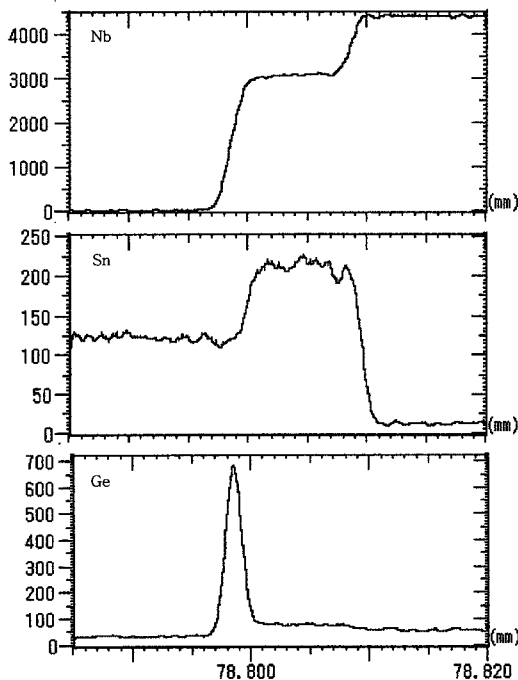


그림 5. 4 Cu-0.2wt% Ge 조성의 초전도 선을 720℃에서 240 시간 열처리 한 후의 EPMA 분석 결과.

그림 5는 EPMA를 사용하여 Cu-0.2wt% Ge 선재의 720℃에서 240 시간 열처리 후의 각 성분의 분포를 보이고 있다. Nb와Sn의 분포에서 어느 정도 일정한 값을 가지는 부분이 Nb₃Sn 금속간 화합물이며, Ge의 분포는 이러한 Nb₃Sn 화합물 층의 바깥부분 즉 청동 기지금속 부분에 축적이 되어 있음을 보였다. 그리고 Ge는 Nb₃Sn 층 내부로 확산하지 않고 있음을 보였다. 또한 Cu와 Sn이 반응하여 청동이 만들어지는 560℃의 저온 열처리 후에 EPMA로 분석했을 때에도 Ge의 편석이 확인되었다. 따라서 Ge의 편석 현상은 이미 청동을 형성하는 저온 열처리 과정에서도 발생하며 이후의 열처리에서 Sn의 이동을 방해하는 것이라고 고려할 수 있었다.

그림 6에서는 순 Cu 및 0.2wt% Ge 초전도 선에서의 4.2K, ±3 T 범위에서의 교류손실의 값을 나타내고 있다. 기지금속에 Ge를 첨가함으로써 열처리 초기 단계에서 이미 Ge가 Nb₃Sn 계면에 편석되어 저항 증가 효과가 더욱 뚜렷하게 나타나서 교류손실을 약 60% 정도 줄일 수 있었다. 이런

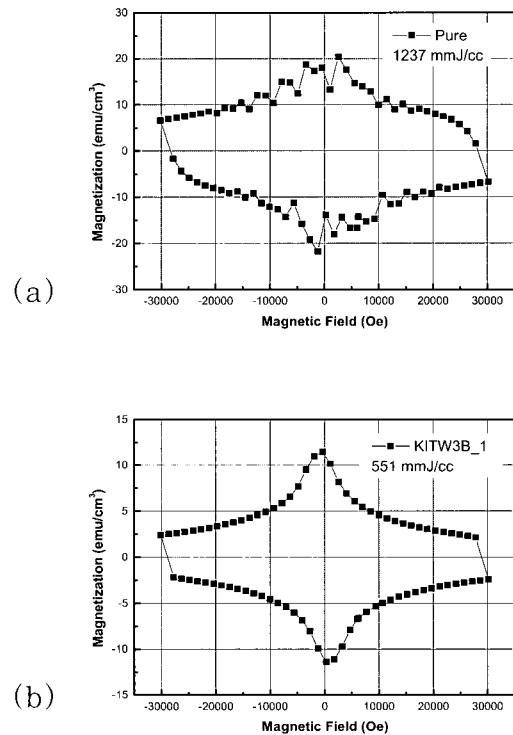


그림 6. 순 Cu 및 0.2wt% Ge 초전도 선에서의 교류손실.

결과를 토대로 내부확산법의 약점인 교류손실의 감소를 줄일 수 있는 연구를 지속적으로 수행한다면 펄스로 운전하는 초전도 토카막 마그네트의 열손실을 줄일 수 있을 것으로 예상된다^{22,23)}.

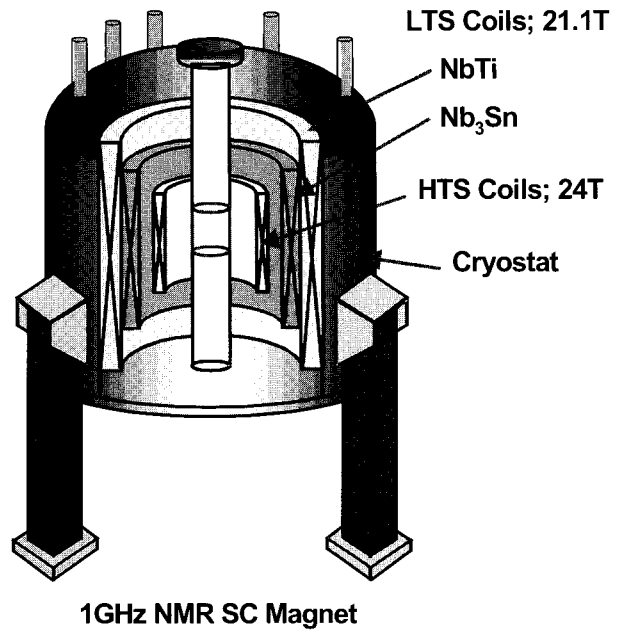
4. NMR용 Nb₃Sn 초전도선재

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 14T (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 결정되고, 현재 사용되는 초전도선은 크게 금속계, 화합물계, 산화물계로 나눌 수 있는데, 금속계 초전도선의 대표적으로 NbTi선을 들 수 있고, 임계자장이 9.3T 정도로서 이 초전도선을 사용해서 제작된 초전도 마그네트는 약 8 T 정도의 자장을 발생시킬 수 있고, 따라서 NbTi 초전도선 만을 사용할 경우는 약 340MHz급의 NMR을 만들 수 있다.

금속계 화합물계 초전도선의 대표적인 것으로서는 Nb₃Sn 초전도선을 들 수 있고, 특히 Nb₃Sn 초전도선은 고주파 NMR용 초전도 마그네트 개발을 목표로 많은 연구개발이 이루어져 최근 괄목할 만한 성능향상을 이룩하였다. 현재 고자장급인 750MHz대역 이하의 NMR이 시판되고 있으며, 일반적으로 400MHz급의 NMR이 가장 널리 보급되고 있다. 700MHz이하의 중·저자장급의 NMR마그네트의 국산화 개발을 위하여는 국내의 산업계에서 NMR용 NbTi 및 Nb₃Sn의 초전도선을 개발하는 것도 반드시 필요하다.

그리고 최근에는 모든 생체 고분자의 구조를 분석하기 위하여 더욱 뛰어난 해상력을 가진 1 GHz 급 고자장 NMR 개발이 세계



1GHz NMR SC Magnet
그림 7. 1 GHz급 NMR용 초전도 마그네트의 구조.

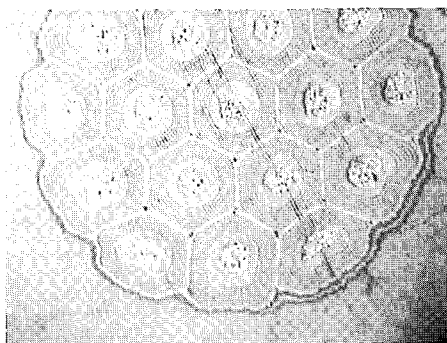
적으로 활발히 추진되고 있는데, 그림 7은 1 GHz급 NMR용 초전도 마그네트의 구조를 보이고 있다. 통상 NbTi 코일을 외층 코일로 하고, Nb₃Sn 코일을 내층 코일로 사용하는 하이브리드형이 일반적으로 사용되고 있으며, 이 경우 발생시킬 수 있는 최대자장은 1.8K정도의 초유동헬륨을 사용하는 경우 약 21 T 내외이며, 4.2K의 포화 액체헬륨을 사용할 경우에는 18 T까지 사용할 수 있다. 그리고 Nb₃Sn 코일내부에 임계자장이 더욱 높은 산화물 초전도선을 사용하여 insert coil로 사용하여 23.5T의 자장을 발생시켜 1GHz급 NMR 마그네트로 사용할 수 있다^{24~26)}.

MRI와 마찬가지로 NMR 마그네트에서도 정밀한 균등자장이 필요하며 이를 위해 각각의 초전도 코일간에 저항이 없이 연결할 수 있는 초전도 접합기술이 필요하다. 예를 들어 900MHz 초전도 마그네트의 제작에는 NbTi코일과 Nb₃Sn코일간의 접속기술을 개발하여야 하며, 자장감쇄를 고려하여 고분해능 NMR의 경우에는 코일간의 접합저항이 10⁻¹¹Ω이하여야만 되며, 900MHz이상의 고자장 NMR의 경우에는 Nb₃Sn - Nb₃Sn, NbTi - Nb₃Sn, NbTi - NbTi와 같은 여러 가지 초전도 코일간의 접합기술을 개발하여야 한다. 이와 같이 초전도 접합이 매우 중

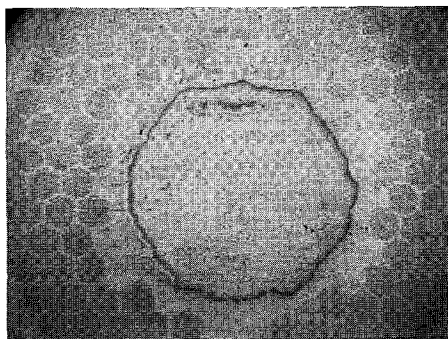
요하기 때문에 NMR용 Nb₃Sn 초전도 선은 브론즈법으로 제조한 선을 주로 사용하고 있다. 즉 Nb 필라멘트의 접합이 브론즈법의 선이 내부확산법의 선보다 용이하기 때문이다.

그림 8에 핵융합용 마그네트와 NMR용 마그네트에 사용되는 Nb₃Sn 초전도 선의 단면을 보이고 있다. 그림 8(a)의 핵융합용 Nb₃Sn 초전도 선의 외부에는 안정화 동(Cu)이 있으며 Nb₃Sn 확산반응동안 Sn의 안정화 동으로의 확산을 막기 위한 Ta 장벽이 내부를 둘러싸고 있으며 내부에는 Nb 필라멘트와 Sn core 그리고 Cu 기지금속으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 반면에 그림 8(b)의 NMR용 Nb₃Sn 초전도 선의 단면을 보면 가운데 부분에 안정화 동과 외부에 Nb 필라멘트와 청동 기지금속으로 이루어져 있다.

일반적으로 Nb₃Sn 초전도 접합을 위해서는 청동 기지금속을 제거한 다음 두 가닥 선에서의 Nb 필라멘트를 합친 다음 청동 슬리브에 넣은 다음 압착하여 필라멘트의 물리



(a)



(b)

그림 8. 핵융합용(a) 및 NMR용(b) 마그네트에 사용되는 Nb₃Sn 초전도선재.

적인 접합이 이루어지도록 한다. 이후에 열처리에 의해 청동 슬리브의 Sn이 확산하여 서로 접합하고 있는 Nb 필라멘트표면에서부터 Nb₃Sn 층이 생성되도록 한다. 따라서 이와 같은 작업이 이루어지기 위해서는 기지금속이 청동 합금이어야 하며 Nb 필라멘트가 쉽게 노출될 수 있는 구조로 제조하여야 한다. 이와 같이 각각의 시스템의 특성 및 용도에 맞게 제조된 Nb₃Sn 초전도 선을 사용하고 있다.

참고문헌

- [1] 山村 昌 et al., 超傳導工學, 電氣學會, 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] J. D. Livingston, IEEE Trans. Mag. MAG-14, 611 (1978).
- [5] M. Suenaga, W. B. Sampson and T. S. Luhman, IEEE Trans. on Mag., MAG-17, no. 1, 646 (1981)
- [6] S. Foner and B. B. Schwartz, Superconductor Materials Science, Chapter 4, 201 (1981)
- [7] W. A. Fietz, C. D. Henning and R. M. Scanlan, IEEE Trans. on Magnetics, MAG-11 299 (1975)
- [8] R. Randall, J. Wong, D. W. Dies, B. J. Shaw and M. R. David, IEEE Trans. MAG-11 291 (1975)
- [9] R. Flukiger et al., IEEE Trans. on Magnetics, MAG-15 689(1979)
- [10] D. Montgomery, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 7(3), 134 (1997)
- [11] S. Shimamoto, Cryogenics, 25, 604 (1985)
- [12] 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, 24(2), 783 (1988)
- [13] V. Sytnikov, I. Peshkov, A. Taran, P. Dolgosheev, Y. Ipatov, A. Rychagov, G. Svalov, V. Mitrohin, IEEE Trans. on

Applied Superconductivity, 7(2), 1364 (1997)

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

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

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

[17] 低溫工學會編, 超傳導·低溫工學 Handbook, Ohm press (1993)

[18] P. J. Lee, J. R. Ruess and D. C. Labalestier, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 7(2), 1516 (1997)

[19] E. gregory, E. Gulko and T. Pyon, Adv. Cryo. Eng. (material), 44, 903 (1998)

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

[21] T. Pyon and E. Gregory, IEEE Trans. on Applied Supercon., 5(2), 1760 (1995)

[22] D. W. Ha S. S. Oh, H. S. Ha Y. K. kwon, IEEE Trans. on Applied Supercon., Vol. 11, No. 1, p. 3565 (2001)

[23] D. W. Ha, S. S. Oh, H. S. Ha Y. K. kwon, submitted to Physica C (2002)

[24] T. Kiyoshi, A. Sato, H. Wada, A. Hayashi, Y. Kawate, IEEE Trans. on Applied Supercon., Vol. 9, No. 2, p. 559 (1999)

[25] T. Miyazaki, Y. Murakami, T. Hase, M. Shimada, IEEE Trans. on Applied Supercon., Vol. 9, No. 2, p. 2505 (1999)

[26] W. D. Markiewicz, I. R. Dixon, Y. M. Eyssa, J. Schwartz, C. A. Swenson, IEEE Trans. on Applied Supercon., Vol. 32, No. 4, p. 2586(1996)

저자이력



하동우(河東雨)

1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대 공대 금속공학과 졸업, 1987년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대 대학원 금속공학과 졸업(공학박사), 1987년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원