

고 자장용 Nb₃Sn 초전도체의 제조기술 및 응용 기술해설 2

Fabrication technology and application of Nb₃Sn superconductor for high magnetic field

오상수*, 류강식*

(Sang-Soo Oh, Kang-Sik Ryu)

Key Words(중요용어) : High magnetic field(고 자장), Nb₃Sn superconductor (Nb₃Sn 초전도체), Bronze method(브론즈법), Hybrid magnet(하이브리드 전자석), Nuclear fusion reactor coil(핵융합로용 코일)

1. 서 론

초전도체가 갖고 있는 가장 중요한 성질인 전기 저항 제로의 특성을 이용하면 일반 구리선 보다 수백배 이상의 대전류를 초전도선재에서 손실없이 흘릴 수 있고 이러한 초전도선재로서 마그네트를 만들면 철의 포화자계에 제한을 받지 않고 대공간에서 강한 자장을 발생시킬 수 있다. 초전도선재는 현재 9 Tesla 이하의 자장발생에는 Nb-Ti 합금계의 초전도선이 사용되고 있으나 일반적으로 10 Tesla 이상의 고자장 발생에는 화합물계의 Nb₃Sn 초전도선이 대표적으로 사용되고 있다. 화합물계의 초전도선재를 이용한 이러한 고자장 발생 기술은 핵융합로용 토로이달코일, SMES, 초전도 전력기기, NMR기기, 자기분리기 등의 주로 에너지, 물성, 환경, 수송등의 각 분야에 핵심 기술로서 활용될 것으로 기대된다.

초전도체는 세가지 초전도특성치 즉, 임계전류(I_c), 임계온도(T_c), 임계자장(H_c) 이하에서 초전도상태를 나타내며 어느 하나의 특성치에서 임계치 이상이 되면 상전도상태로 전이한다. 실용상 현재 사용되고 있는 초전도체는 대부분 제 2종 초전도체로 하부임계자장(H_{c1}) 이상에서 외부 자속선이 초전도체 내부에 침입하기 시작하나 상부임계자장(H_{c2})까지는 혼합상태하에서 초전도상태를 유지할 수 있고 그 외부 자장이 H_{c2} 이상이 되면 초전도상태는 깨어지고 상전도상태로 된다. 따라서 초전도선재를 이용하여 발생시킬 수 있는 자장의 한계는 초전도체의 H_{c2}에 비례하고 H_{c2}는 초전도체 자체의 물리적 성질등에 의존하는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 화합물계 초전도선재의 초전도특성중 임계전류밀도(J_c)는 고자장 마그네트 응용에 있어서 가장 중요한 요소라 할 수 있는데 제조방법에 따라 그 값이 크게 달라진다. 제3원소첨가²⁾ 혹은 열처리

방법개선³⁾ 등에 의하여 요소적 편년력을 향상시키거나 결정립 조직을 미세하게 제어하여 고자장에서 임계전류밀도를 증가시키는 연구가 많이 행하여져 왔다.

Nb₃Sn은 Nb-Ti합금 다음으로 사용 실적이 많은 대표적인 초전도체의 하나로 A15형 결정구조를 갖고 있으며 T_c가 18K로 Nb-Ti 초전도체의 9.5K에 비하여 높으며 실용적인 초전도선재로는 가장 먼저 개발되었으나 가공성이 나쁘기 때문에 NbTi 초전도선보다 늦게 실용화되었다. A15형 화합물계 초전도체로는 Nb₃Sn 이외에도 V₃Ga등이 고자장 임계전류밀도 특성이 우수한 것으로 보고되고 있으나 V, Ga의 원료가 비싸서 사용 실적은 그다지 많지 않다. H_{c2}가 높은 재료로서 Nb₃Al 화합물초전도체와 BSCCO 산화물초전도체 등에서 최근에 선제화 연구가 활발하게 진행되어 고자장 발생 마그네트로 실용화하기 위한 연구가 이루어지고 있으나 아직은 상업화 수준의 선제 제조기술이 확립되어 있지 않고 개발 단계에 있다고 할 수 있다. 특히 BSCCO 산화물로 만든 초전도선재는 임계전류밀도 및 기계적특성 향상과 자계 비가역특성을 어떻게 개선하느냐가 실용화의 중요한 관건이라 할 수 있다.

복합초전도선재 가공후 열처리에 의하여 생성되는 Nb₃Sn 초전도체는 화합물 특유의 취성으로 인하여 마그네트 제작시 상당히 주의를 요하고 극저온으로 냉각시에 선제 구성 요소들 간의 열수축차이에 의하여 잔류응력이 초전도체에 작용하기 때문에 임계전류 특성을 저하시키는 원인으로 작용한다. 또한 Nb₃Sn 초전도마그네트 여자시 발생하는 강자장에 의하여 선제에는 hoop 응력이 작용하므로 이에 대한 대책도 기술적으로 고려되어야 한다.

본 고에서는 Nb₃Sn 초전도선재의 대표적인 제

조 방법 및 원리 그리고 고자장마그네트 설계시 중요한 요소인 Nb₃Sn의 자장중 초전도특성 및 기계적특성 등에 대하여 고찰하고자 한다. 또한 Nb₃Sn 초전도선재의 응용 분야로서 몇가지 대표적인 예를 들어 현재 세계적으로 활발하게 진행되고 있는 선진국의 고자장 초전도마그네트와 관련된 연구 개발 동향을 소개하고자 한다.

2. Nb₃Sn 초전도선재의 제조기술

우수한 성능의 고자장용 초전도마그네트를 공업적으로 제작하기 위해서는 다음과 같은 조건²⁾들이 초전도선재에 필요하다.

- (1) 사용자장에서 높은 J_c를 갖을 것
- (2) 안정한 특성의 장척선재가 만들어 질 것
- (3) 열처리의 온도, 시간이 공업적인 경제성이 있을 것
- (4) 사용자장, 전류에 있어서 충분한 강도와 耐歪 특성을 갖을 것

위와 같은 조건을 만족시키기 위한 Nb₃Sn 초전도선재 제조에는 여러가지 방법들이 개발되어 실용화되고 있으나 브론즈법이 대표적이라고 할 수 있다. 브론즈법은 브론즈 합금(Cu-Sn)과 Nb 금속과의 확산반응을 이용하여 Nb₃Sn을 생성시키는 방법으로 복합가공성이 좋고 Nb와 Sn이 단독으로 반응하는 경우보다 낮은 온도 영역(800℃~600℃)에서 Nb₃Sn 생성이 가능하다는 잇점이 있다. 이러한 낮은 온도에서의 Nb₃Sn생성은 커널달보이드를 작게 분산시키고 Nb₃Sn자체의 결정립도 작게 할 수 있다. 브론즈법에 의하여 Nb₃Sn과 같은 A15형 화합물 초전도체를 생성시킬 때 되도록이면 결정립을 미세화시키는 조건에서 열처리하는 것이 J_c의 향상에 기여한다고 할 수 있다. 외부에서 자속선이 침입한 상태의 화합물초전도체내에 결정입계와 같은 결함(pinning center)에서 자속선을 움직일려고 하는 Lorentz힘에 대항하는 자속선 핀닝력이 작용한다. 결정립을 미세화 시키면 pinning center의 밀도가 증가하여 결과적으로 전체의 핀닝력이 증가하고 J_c도 비례하여 향상되므로 화합물초전도체의 생성 및 성장시 조직을 미세하게 제어하기 위한 제조기술 연구가 많이 행하여져 왔다.^{4,5,6)}

그림 1에 브론즈법에 의한 Nb₃Sn선재의 제조공법⁷⁾을 나타낸다. 우선 Cu-(11~14)wt%Sn 브론즈 합금을 용해하여 만든다. 이 브론즈 잉고트에 드릴로서 구멍을 뚫고 Nb봉을 삽입하여 밀봉한 다음 복합 빌렛으로 한다. 이 빌렛을 압출한 후 신선기

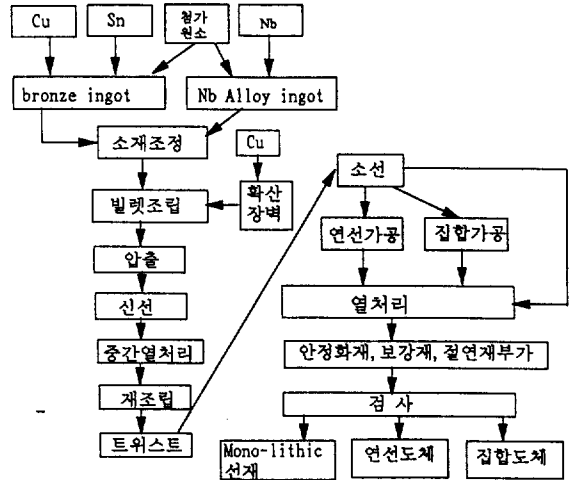


그림 1. 브론즈법에 의한 Nb₃Sn도체의 제조공정
Fig. 1. Fabrication process of Nb₃Sn conductor by bronze method.

로서 가공한다. 이때 브론즈가 가공경화에 의하여 단단해지므로 500~600℃에서 소둔할 필요가 있다. 통상 Nb₃Sn선재는 20%이상의 체적율의 안정화동을 복합화할 필요가 있는데 여기서 단지 동과 복합화하는 것은 열처리시에 안정화동이 브론즈에 의하여 오염되어 버리기 때문(Sn원자의 확산으로)에 확산 방지를 위하여 Nb와 브론즈와의 복합소선을 묶어 Nb나 Ta등의 확산 barrier를 매개로 하여 안정화동과의 복합빌렛을 제작하여 다시 압출 및 신선가공을 거쳐 트위스트 가공한 후 모노리식 선재가 만들어진다. 목적에 따라서 최종선재를 연선가공하든지, 다량의 안정화재, 보강재, 절연재등을 결합시켜 도체로 만드는 경우도 있다. Nb₃Sn을 생성하기 위한 열처리는 온도가 600~700℃이고 100~200시간이다.

브론즈법을 이용하면 브론즈중의 Sn양은 650℃ 근방에서 고용한이 있고 이것을 넘으면 취약한 금속간 화합물이 석출하여 실온에서 복합가공이 곤란하게 된다. 따라서 브론즈법은 Nb와 반응해서 얻을 수 있는 Sn양의 제한과 가공경화에 의한 가공한계가 결점이다.

Sn양이 제한되는 문제는 다음과 같은 제조조건으로 나타나 그 극복이 기술적인 과제이다.

- (1) Nb와 브론즈사이의 확산반응에 의하여 성장하는 Nb₃Sn층의 두께는 반응초기에는 시간의 평방근에 비례하지만 반응후기에는 Sn양이 부족하여 성장이 늦어진다.
- (2) Nb₃Sn층의 성장은 Nb₃Sn층 혹은 그 입계를

통하여 확산하는 Sn양에 크게 의존한다.

(3) Nb₃Sn층의 근방에 Sn농도가 저하하면 화학양론조성의 Nb₃Sn층이 형성하기 어렵게 된다.

이와 같은 브론즈법이 문제점을 해결하기 위하여 다음과 같은 여러가지 방법들이 개발되고 있다. 그 중에서 첨가 원소에 의한 브론즈법의 개량은 복합가공성의 개선, 결정립 미세화, 확산 반응촉진, 기본특성(임계온도, 임계자계등)의 개선을 목적으로 연구가 행하여 졌으며 Ti을 제3원소로 선정하여 브론즈 matrix 혹은 Nb층의 양쪽에 제3원소를 첨가한 방법이 실용화되고 있다. Ti첨가는 T_c 및 H_{c2}를 향상시켜 강자장에 있어서 J_c가 향상되는 효과가 나타났다. 가공 공정의 개량으로서 브론즈법의 결점인 Cu의 低Sn固溶度, 높은 브론즈비율, 브론즈의 가공경화에 의한 중간소둔 필요성 등의 세가지 점을 개량할 목적으로 그림 2에 나타난 각종

제조법⁷⁾이 개발되고 있다.

(a) 내부확산법 : Cu matrix에 미리 Nb와 Sn을 삽입하고 중간소둔없이 최종형상으로 가공하여 열처리시에 내부로 부터 Sn을 Cu중에 확산시켜서 브론즈로 하고 이 브론즈와 Nb를 반응시켜서 Nb₃Sn을 생성하는 방법이다.

(b) 튜브법 : Cu 모재중에 미리 Sn을 삽입한 Nb 튜브를 넣고 중간소둔없이 최종형상까지 가공하여 Nb튜브내에서 확산반응을 일으켜 튜브의 내측에 Nb₃Sn층을 생성시키는 방법이다.

(c) 외부확산법 : Cu모재중에 여러개의 Nb심을 넣고 중간소둔없이 세선화하고 外周에 Sn을 도금한 후 가열하여 외부로 부터 Sn을 확산시켜서 Cu모재를 브론즈로 바꾸고 이것을 Nb와 반응시켜 Nb₃Sn을 생성하는 방법이다.

(d) 固液반응법 : Nb모재중에 여러개의 농도가 낮은 Cu-Sn합금봉을 넣고 Cu外皮를 복합하여 중간소둔없이 최종형상까지 가공한 후 열처리를 행하여 Nb₃Sn을 생성하는 방법으로 생성온도에서 Cu-Sn합금은 액상이다.

(e) Jelly Roll 법 : mesh상의 Nb板과 Cu-Sn합금판을 합쳐서 jelly roll상으로 감은 복합체를 필요에 따라서 Cu등의 안정화재와 함께 최종형상까지 가공한 후 확산반응온도로 가열하여 Nb와 브론즈를 반응시켜 mesh상으로 Nb₃Sn을 생성시키는 방법이다.

브론즈법 또는 개량브론즈법에 의하여 제조되는 모노리식 선재는 wind & react(W&R) 방식에 의하여 마그네트로 제작되는 경우가 많다. 이 경우 전기절연은 내열성을 위하여 fiber glass布가 일반적으로 사용된다. 도체 형상으로는 丸線과 平角線이 있으며 안정화등의 배치로서 선재의 내측에 있는 선재와 외측에 복합시키는 두가지 경우가 있다.

대표적인 丸線은 직경이 1mm정도, filament 직경 5μm, bronze matrix와 Nb심의 비율이 3~4정도에서 10T의 임계전류는 300A 정도이다.

평각선은 일반적으로 단면적이 환선보다 크고 2~12mm²정도이며 filament갯수도 많은것이 특징이다.

그림 3은 각종 제조법에 의한 Nb₃Sn선재의 임계전류밀도를 비교한 것⁷⁾으로 공업적으로 생산되는 제품의 경우는 J_c 레벨이 그림의 사선친 부분에 나타내듯이 다소 떨어진다. 그림 3에서 알 수 있듯이 10 T이상의 고자장에서 J_c는 제조법에 크게 의존하는 것을 알 수 있다. 브론즈법에 의하여 제조된 선재는 filament사이에 bronze matrix가 개재

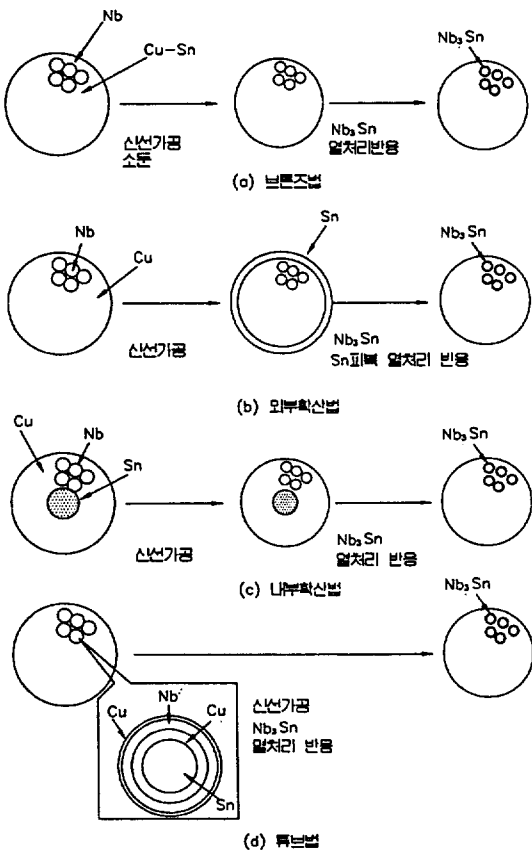


그림 2. Nb₃Sn초전도선재, 도체제조를 위한 브론즈법과 개량브론즈법

Fig. 2. Bronze method and modified bronze method for fabrication of Nb₃Sn superconducting wire and conductor.

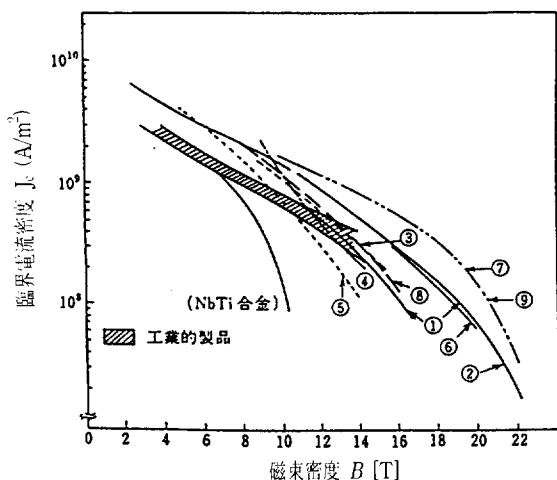


그림 3. 각종 제조방법에 의한 Nb₃Sn 초전도선재의 임계전류밀도특성(그림안의 번호 ①: 브론즈법, ②: MJR법, ③: 내부Sn 확산법, ④: 외부Sn 확산법, ⑤: In situ법, ⑥: 분말법, ⑦: 침투법, ⑧: 고-액 확산법, ⑨: 튜브법)

Fig. 3. The critical current density characteristics of Nb₃Sn superconducting wires fabricated with various methods (①: Bronze method, ②: MJR method, ③: Internal Sn diffusion method, ④: External Sn diffusion method, ⑤: In situ method, ⑥: Powder method, ⑦: Infiltration method, ⑧: Solid-liquid diffusion method, ⑨: Tube method).

되어 있기 때문에 선재의 J_c가 브론즈 점적율에 의하여 크게 좌우된다. J_c의 최고치는 튜브법과 침투법에 의하여 얻어지고 있다. 브론즈법에서 브론즈의 점적율이 높으면 화학양론에 가까운 Nb₃Sn상이 생성되지만 Nb₃Sn이 단면적은 작고 선재의 J_c는 낮다. 반대로 점적율을 낮게하면 화학양론에서 벗어난 Nb₃Sn상이 많이 생겨 초전도자체의 J_c는 낮게된다. 이러한 것을 개선하기 위하여 앞에서도 서술하였듯이 각종 제 3원소를 첨가하는 연구가 시도되었고 Ti 1.5 at%등의 첨가에 의하여 H₂가 3.5 T정도 향상되는 것이 가능하게 되었다. 대표적으로 Cu-8at%Sn-0.35at%Ti의 bronze matrix를 사용한 선재에서 J_c = 4×10⁸ A/cm²(4.2 K, 15 T)가 보고되었다.

3. Nb₃Sn의 기계적 특성

Nb₃Sn 초전도선재는 화합물 특유의 취성으로

인하여 외부 응력에 약하고 마그네트 제작 및 여자시 여러 형태의 응력이 초전도선재에 적용하게 된다. 초전도선재 제조중의 초전도체에 걸리는 힘은 코일의 종류, 선재의 형상, 냉각 방식등에 따라 다르지만 초전도선재 및 코일의 제조공정에서 받는 변형이나 열처리에 의하여 초전도체에는 최종적으로 인장, 압축, 굽힘등의 응력이 남게 된다. 또한 초전도선재는 열적 거동이 다른 재료로서 구성되어 있어 열처리 온도로 부터 극저온으로 냉각할 때 열수축율의 차이에 의하여 응력이 내부에 발생한다. Nb₃Sn 복합선재에서는 표 1에 나타난 각 재료의 열수축량의 관계로 부터 Nb₃Sn층에는 압축 응력이 작용하고 이 응력은 매트릭스와 필라멘트의 체적 비율 및 각각의 기계적 강도로 부터 영향을 받는다.

표 1. Bronze, Cu, Nb₃Sn, Nb의 4.2K에서의 특성치

Table 1. The properties of bronze, Cu, Nb₃Sn and Nb at 4.2K.

구성요소	ε [%] (1000-4.2K)	E [GPa]
bronze	-1.66	100
Cu	-1.62	100
Nb ₃ Sn	-0.72	165
Nb	-0.68	103

마그네트를 여자하면 선재에 로렌츠힘이 발생하고 초전도코일에 후-프응력이 작용한다. 이 후-프응력은 통상적인 코일에서는 선재의 길이 방향에 인장응력으로서 작용한다. 이 인장응력(σ)은 전류밀도(J)와 자장(B), 코일 반경(R)과 σ = kJBR의 관계에 있다. 고자장 마그네트에서 σ는 상당히 크다. 예를 들면 10 T의 J_c가 10⁸ A/m²의 도체를 사용할때 반경 2m의 코일을 제작하면 구속을 받지 않은 상태의 선재에 작용하는 σ는 10 T에서 대강 1600 MPa에 달한다. 이 힘이 초전도선재 제조시에 생긴 잔류응력과 부가적으로 작용하여 초전도 성능을 현저하게 저하시킬 가능성이 있다. 그리고 초전도선재에 꾸부러짐이나 비틀림과 같은 형상의 불규칙성이 있으면 후-프응력의 작용도 단순한 인장응력과 다른 양상을 보이게 된다. 또한 펄스자장중에 놓인 초전도 선재에는 반복응력이 작용하기 때문에 재료의 피로가 문제가 된다.

브론즈법으로 제조한 Nb₃Sn복합선재는 bronze, Cu, Nb₃Sn, Nb등의 구성요소로 이루어져 있고 Nb₃Sn 복합도체가 4.2 K로 냉각될 때, 각 구성요

소는 Nb₃Sn의 생성온도 약 1000K로 부터의 온도 감소의 이력을 경험하게 된다. 이 때 각 구성요소는 서로 다른 열수축률 모이므로 각 구성요소에는 잔류응력이 존재하게 되고 Nb₃Sn초전도체에는 압축응력이 작용하게 된다. 마그네트 제작시 선재에 미리 인장응력을 가하면 냉각에 의한 잔류 압축응력이 어느 정도 해소되기 때문에 초전도특성은 그만큼 회복된다.

그림 4에서 보이는 것처럼 Nb₃Sn선재에 인장응력을 가하면서 임계전류를 측정하면 작은 변형에 대해서 I_c는 우선 상승하고 외부로 부터의 응력이 열수축차에 의한 압축응력을 해소하는 $\epsilon = \epsilon_m$ 에서 피크에 달한다⁹⁾. 그 후 I_c는 감소해 가지만 $\epsilon = \epsilon_{irrev}$ 에 달하기까지는 외부응력을 제거하면 완전하게 회복한다. 임의의 지점까지 I_c- ϵ 관계는 가역적이라 할 수 있다. 그림에서 ○기호의 데이터는 일축 변형에 대한 I_c의 측정치를 나타낸다. + 기호의 데이터는 무 응력 상태에서의 I_c를 나타낸다. 그림 4에서 도체를 A점까지 변형시킨후 인장응력을 제거하면 시편은 무 응력 곡선상의 A' 점으로 회복된다. 이 점에서 이러한 효과는 가역적이다. 도체를 다시 B점 까지 변형시킨후 응력을 제거하면 가역적으로 B'점 까지 회복된다. 이러한 것을 C점 까지 계속한다. 이 지점의 변형에서 응력을 제거하면 C'에서 임계전류의 비가역적인 저하현상이 일어난다. 여기서 임계전류는 원래의 I_c- ϵ 곡선 이하로 떨어진다. 그림 4에서 점 B를 넘으면 I_c- ϵ 특성에서 더 이상 가역현상이 일어나지 않는다. 그리고 이러한 임계점을 비가역변형 점(irreversible strain point)라고 한다. 이 변형이 중요한 의미는 시편의 어느 부위에서 filament의 파단이 발생하기 시작했다는 것이다. 초전도 마그네트 선재를 이용할 때 특성 회복은 ϵ_{irrev} 까지는 가능하나 이 임계치를 넘으면 영구적인 저하가 일어난다는 것이다. 다시 말하면 ϵ_{irrev} 는 높을 수록 좋다. ϵ_{irrev} 는 일반적으로 ϵ_0 의 0.4%~0.7%범위에 있다. In situ Nb₃Sn의 경우는 1%를 넘는 것으로 보고되고 있다.

4. 응용 분야

최근에 Nb₃Sn 초전도체를 초극세다심화하여 교류용 전력기기에 응용하려는 연구가 많이 진행되고 있지만 아직은 코일형태에서 Nb-Ti에 비하여 교류손실치가 크기 때문에 고 T_c 및 고자장 발생이라는 Nb₃Sn의 장점을 활용시키는 측면에서 아직 실용화에는 못 미치고 있다. 현재로서 Nb₃Sn초전

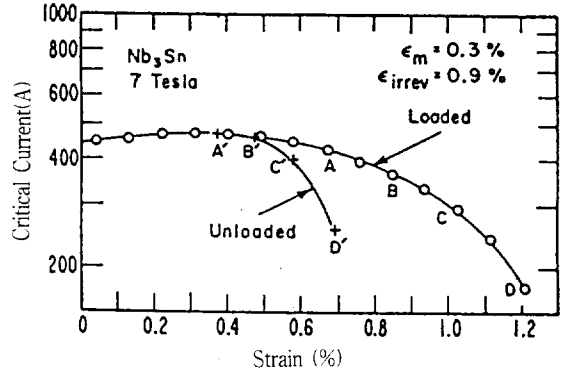


그림 4. Nb₃Sn선재의 임계전류의 strain의존성
Fig. 4. The strain dependence of critical current for the Nb₃Sn superconducting wire.

도선재는 고자장 발생용으로 주로 사용되고 있으며 일반 연구용으로 10~15 Tesla 자장 발생용의 고자장 초전도마그네트가 선진국의 여러 기업들에 의하여 제작, 판매되고 있다. Nb₃Sn을 이용한 고자장마그네트 응용기술로서 현재 상용화에 성공한 분야는 NMR(핵자기공명분석장치)이라 할 수 있다. 현재 11~14 Tesla급의 고자장 NMR이 시판되고 있고 초전도마그네트의 발생자계가 강 할수록 흡수 피-크간의 주파수차가 넓어져서 분해능이 향상되므로⁹⁾ 앞으로 고성능 Nb₃Sn초전도선재를 이용한 고자장 NMR개발이 가속되리라 본다. 고자장 NMR 마그네트의 경우는 내측에 Nb₃Sn, 외측에 Nb-Ti코일이 배치되어 있고 자장안정도 및 균일성 차원에서 영구전류모-드로 운전되기 때문에 Nb-Ti선재와 Nb₃Sn초전도선재를 자체감소가 발생하지 않도록 접촉하는 기술¹⁰⁾이 중요하다.

최근에 Ti를 제3원소로 첨가하여 고자장특성을 향상시킨 대용량(Nb,Ti)₃Sn 도체를 이용한 초전도 마그네트가 연구용으로 개발되어 20 Tesla의 자장 발생에 성공하고 있다¹¹⁾. 일본 NRIM에서는 초전도기술을 이용하여 대구경 공간에서 고자장을 발생시키고 각종 성능평가시험을 목적으로 4분할형의 다중 구조 초전도마그네트를 제작 하고 있다. 여기서 최외층 코일은 대전류 통전을 목적으로 소선을 연선하여 하우징한 4각 구조로 되어 있고 안정화재로는 구리보다 헬륨온도에서 비저항이 작은 알루미늄을 사용하여 상전도시의 저항을 작게하여 안정도를 향상시켰다. 중층코일 도체로는 브론즈법으로 제작한 (Nb,Ti)₃Sn을 초전도체로 하는 모노리스 선재를 열처리한 후 권선을 하였는데 형상이 방성을 고려하여 6mm×3mm각선으로 strain의 저

감과 대전류화를 기하고 점적율을 크게하여 기계적 불안정성을 개선하였다. 영국의 Oxford사에서는 (Nb,Ti)₃Sn도체를 이용하여 20 Tesla급의 초전도마그네트를 상용화하는데 성공하고 있으며 저자들의 그룹에서도 현재 18 Tesla이상의 자장을 발생시킬 수 있는 고자장용 초전도마그네트 개발에 착수하고 있다. 고자장 발생용의 내충코일로서는 튜브법으로 제조한 (Nb,Ti₃Sn) 도체를 사용할 계획으로 이 도체는 18 Tesla에서 600 A의 대전류를 흘릴 수 있는 것으로 확인되고 있다. 브론즈법으로 만든 Nb₃Sn선재에 비하여 Sn농도를 크게 할 수 있으므로 화합물층의 두께를 크게 할 수 있어 대전류 통전에 적합한 특성을 갖고 있다.

현재 세계적으로 초고자장을 발생시킬 수 있는 하이브리드 마그네트 개발이 미국, 일본, 프랑스등에서 활발하게 이루어지고 있다. 하이브리드 마그네트란 초전도마그네트와 상전도마그네트를 결합시켜서 고자장을 발생시키는 것으로 초전도마그네트만으로 발생시킬 수 있는 자장의 한계치(H_{c2})이상으로 자장을 발생시킬 수 있는 특징이 있다.

표 2에 30 Tesla이상의 하이브리드 마그네트를 계획분까지 표함시켜 요약¹²⁾하여 나타냈다. 이들 마그네트는 축적에너지가 상당히 크고 켄치가 발생하지 않도록 안정성을 충분히 고려한 설계를 하고 있으며 초전도체 면적보다 안정화제 면적의 비가 큰 것이 특징이다. 여기서도 고자장발생용으로는 Ti첨가의 Nb₃Sn도체를 사용하고 있으며 초유동헬륨중에서 사용하는 것에 의하여 4.2K 헬륨온도에서 보다 1.5 Tesla이상의 자장을 더 발생시킬 수 있다. 세계 최고수준의 자장 45 Tesla 발생을 계획하고 있는 NHMFL에서는 외층의 초전도코일에 Cable in Conduit(CIC)형 Ti첨가 Nb₃Sn도체를 사용하고 1.8K의 초유동헬륨으로 냉각할 것을 제안하고 있다. 여기서 사용되는 CIC도체는 Nb₃Sn이 안정화제 표면에 코팅된 소선을 만든후에 燃線 집합하여 SUS conduit안에 삽입하면서 연속적으로 금속관을 용접하고 단면이 사각 형태로 압연하여 성형시키는 공정으로 제조하고 있다.

CIC도체는 SUS conduit안으로 냉매를 강제로 흘러주는 방식으로 초전도체가 직접 헬륨에 접촉되므로 안정성이 우수한 것으로 알려져 있다. NHMFL의 45 T 마그네트에는 상전도코일 외층에 2층의 Nb₃Sn초전도 코일이 있는데 표 3에 나타낸 두가지 형태의 CIC도체가 사용되고 있다.

21세기의 새로운 에너지원으로 기대되고 있는 핵융합로의 개발연구가 구, 미, 일에서는 활발하게

표 2. 30 Tesla이상의 하이브리드 마그네트 사양

Table 2. Specifications of hybrid magnet with magnetic field over 30 Tesla.

장 소	중심 자장 (Tesla)	bore size (mm)	초전도코일의 중심 자장 (Tesla)	초전도코일의 bore size (mm)	초전도코일의 축적 에너지 (MJ)
High-Field Magnet Lab., Univ. of Nijmegen	30.4	32	11	400	10.6
東北大學	30.7	32	12	360	10
HML-MPG/SNCI-CNRS,Grenoble	31.4	50	11	420	23.1
NRIM(1995년 open)	40	30	15	400	49
Nat'l High Magnetic Field Lab., Florida State Univ. (1995년 계획)	45	33	14	640	100
Francis Bitter Nat'l Magnetic Lab.,MIT	33.5	33	13	400	20.8

표 3. NHMFL 45T 마그네트에 사용된 CIC도체의 사양

Table 3. Specification of CIC conductor used in NHMFL-45T magnet.

	Type A	Type B
Nb ₃ Sn소선직경	0.43 mm	0.51 mm
부하특성	17T/11.0 kA	12.6T/11.0 kA
Conduit재질	Incoloy, SUS 316LN	SUS 316LN
Conduit두께	3.48mm	1.65mm
도체 size	13.7mm × 16.2mm	12.9mm × 15.3mm
소선수	525(5×5×3×7)	315(5×3×3×7)

표 4. 핵융합로용 코일에 사용된 Nb₃Sn도체의 사양

Table 4. Specifications of Nb₃Sn conductor used in nuclear fusion reactor coil.

	TMC	TRIAM-1M	T-15
임계전류	10 kA/10T	9.6 kA/11T	10 kA/8.5T
필라멘트직경	φ 4 μm	φ 4 μm	φ 4.5 μm
필라멘트갯수	78,116×6본	361×1,477본	14,461×11본
銅 비/bronze 비	4.5/2.5	1.9/2.5	30
트위스트핏치	37mm	320mm	30mm
도체형상	소선을 집합 연선하여 안정동에 housing	Monorithic 선재를 안정동에 housing	강제 냉각 도체 방식

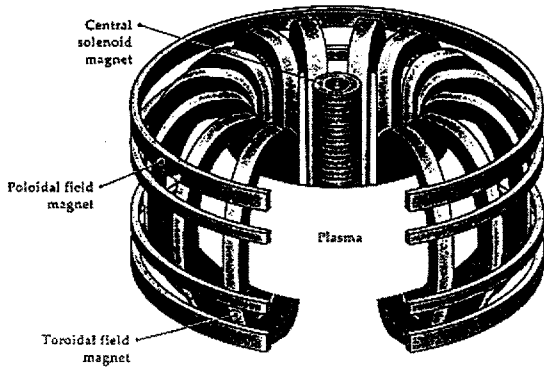


그림 5. Tokamak 핵융합로용 토로이달 코일의 개념도

Fig. 5. Schematic diagram of toroidal coil for tokamak nuclear fusion reactor.

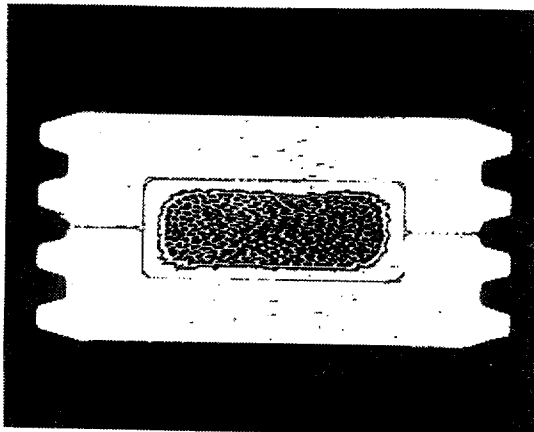


그림 6. Furukawa 전공에서 개발한 Cluster Back-Up 코일용 도체 단면

Fig. 6. The cross sectional view of CBU conductor developed by Furukawa Elec.

이루어지고 있다. 핵융합 반응이 일어나는 플라즈마 공간을 자장으로 가두는 방식에서 대표적인 토카마크형 장치에는 정상적인 자장을 발생시키기 위하여 그림 5에서 나타난 "D"자형의 토로이달 코일이 있으며 10 Tesla 이상의 강자계가 필요하기 때문에 Nb₃Sn 도체 개발이 많이 이루어지고 있다. 토로이달 코일은 자기자계에 의하여 발생하는 hoop 응력이 문제가 되므로 기계적 강도가 강한 강제냉각형 Nb₃Sn 도체가 많이 사용되고 있다. 표 4에 핵융합로 각 모델기에 사용된 Nb₃Sn 도체의 사양¹³⁾을 나타냈다. 10 kA의 대 임계전류를 흘릴 수 있는 대용량 도체로 동안정화재로 하우징을 하여

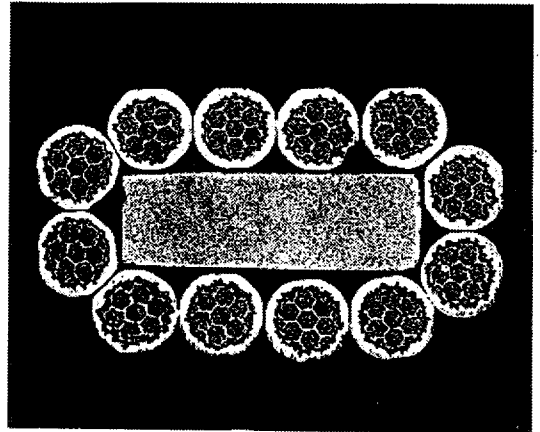


그림 7. Furukawa 전공에서 개발한 초전도발전기 계자코일용 Nb₃Sn 집합도체의 단면

Fig. 7. The cross sectional view of stranded Nb₃Sn conductor of field winding coil for superconducting generator developed by Furukawa Elec.

마그네트의 안정성을 높인 것이 특징이라 할 수 있다.

최근에는 코카마크의 토로이달 코일 도체로서 Nb₃Al이 검토되고 있는데 그 이유로서는 12 Tesla 부근에서 임계전류밀도가 (Nb,Ti)₃Sn 도체와 비슷하면서 strain tolerance 특성이 더 우수하고 저 cost화가 가능하기 때문이다.

대용량 도체로서 응용되고 있는 Nb₃Sn 초전도 도체의 실제 형태를 살펴보기로 한다.

그림 6은 일본의 furukawa 전공에서 개발한 핵융합로용 CTC back up 코일용 Nb₃Sn 도체로서 모노리식 Nb₃Sn 선재가 Cu 안정화재에 연속적으로 납땜하여 제조된 것이다. soldering 한 부분에 void를 없애기 위하여 초음파 방식으로 납땜하였고 단면 5.3mm×11mm의 도체에서 3,300 A 이상의 I_c를 나타낸 것으로 보고되었다. 하우징의 좌우 표면은 헬륨의 냉각효과를 좋게하기 위하여 요철 가공을 한 것이 특징이다.

그림 7은 30 MVA급 초전도 동기발전기의 계자코일용으로 개발된 Nb₃Sn 도체의 단면을 나타낸 것이다. OFHC Cu로 안정화시킨 12개의 초전도소선이 SUS strip 주위에 집합 연선된 구조를 하고 있다. 이 도체는 단면이 1.1mm×2.2mm로 5 T에서 1000 A의 I_c를 나타내고 필라멘트 경은 6μm이다. 이 도체는 5 Tesla에서 동작되므로 고자장 특성보다는 임계온도가 Nb-Ti보다 높아 개발된 예이

다. 이 도체는 단면이 5.3mm×11mm로 10 T, 4.2°K에서 3,300 A의 I_c를 나타낸다.

5. 결 론

Nb₃Sn은 아직은 Nb-Ti에 비하여 상용화 실적이 많지 않지만 고성능 Nb₃Sn초전도 선재가 개발되면서 고자장을 필요로 하는 여러 분야에 앞으로 많이 응용되리라고 본다. 특히 핵융합로용의 토로이달 코일은 고자장용 초전도선재 제조기술이 필수적으로 요구되는 분야이고 앞으로 부하평균화용의 SMES 개발이 본격화 되면 토로이달 방식이 적합하기 때문에 유사한 기술의 연장선상에서 크게 활용되리라 본다. 또한 초전도전자추진선, 초전도발전기, MHD등과 같은 분야에 Nb₃Sn 초전도 마그네트기술이 응용되기 위해서는 saddle형의 dipole 마그네트 권선기술의 개발과 함께 고도의 안정성과 기계적특성이 요구되는 선재 개발이 필수적이라 할 수 있다. 국내에서는 아직 고자장용 Nb₃Sn초전도선재 개발 경험이 거의 전무하다고 할 수 있을 정도로 선진국에 비하여 기술 수준이 크게 뒤 떨어져 있다. Nb₃Sn등의 고자장용 화합물 초전도선재는 선재 자체로서도 부가가치가 높으며 이러한 초전도선재를 이용한 고자장 응용기술은 앞으로 에너지, 환경, 교통, 과학등의 여러 분야에서 필수적으로 사용될 것으로 기대되므로 장기적인 차원에서 선재 및 고자장 마그네트 기술에 대

한 연구 개발 투자가 있어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 超傳導材料 堂山昌男, 山本良一 編(東京大學出版)
- [2] 板本久樹의 : 古河電工時報 No. 87(1990).
- [3] Y. Yoshida et al. : Appl. Phys. Lett 27(1975) 632.
- [4] H. Sekine et al. : Appl. Phys. Lett 35(1979) 1462.
- [5] M. Suenaga et al. : J. Appl. Phys., 45(1974) 4049.
- [6] K. Kawaguchi, S.S. Oh, S. Ochiai, K. Osamura : J. Japan Inst. Metals, 52(1988) 886.
- [7] 초전도저온공학 핸드북 일본 저온공학협회 편 p.467
- [8] Superconductor Materials Science, S. Foner p.455
- [9] NMR입문, J.W.Akitt 著(東京化學同人譯)
- [10] J.E.C Williams et al. : IEEE Trans. Magn, MAG-25(1989)
- [11] 木吉 司 의 : 저온공학 28(1993) 29.
- [12] 일본전기학회기술보고, 제 534호, 일본전기학회 간
- [13] 高橋龍吉 : 신초전도재료연구회 제 20회 심포지움 보고서

저자소개

오상수



1959년 11월 1일생. 1982년 2월 경북대학 금속공학과 졸업. 1989년 3월 일본 京都대학 금속공학과 석사. 1992년 3월 일본 京都대학 금속공학과 박사. 1992년 4월-현재 한국전기연구소 초전도연구실 선임연구원.

류강식



1956년 8월 20일생. 1980년 2월 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1987년 8월 한양대학교 대학원 전기공학과(공박). 1988년 4월-현재 한국전기연구소 초전도연구실 실장.

■ 1995년도 9월호의 기술해설 제목과 저자는 다음과 같으니 많은 참조 바랍니다.

題 目	著 者	所 屬
DRAM 기술의 최신 기술 동향	유병근, 백종태, 유종선, 유형준	한국전자통신연구소
전자재료의 특성 분석	박인식	LG전선 광소자연구실