

동 안정화 Nb-Ti 초전도 선재의 제조 및 그 전자기 특성

Fabrication of Cu Stabilized Nb-Ti Superconducting Wire and Their Electro-magnetic Properties

오상수*, 하동우*, 한태희*, 권영길*, 손명환*, 류강식*

S.S. Oh, D.W. Ha, T.H. Han, Y.K. Kwon, M.H. Sohn, K.S. Ryu

요 약

무산소(OFHC)동을 안정화 모재로한 Cu/Nb-Ti 빌렛트(billet)를 제작한 다음 간접 열간 방식의 압출에 의해 얻어진 봉재를 인발한 후 신선과 열처리를 반복하여 단심 및 다심 Nb-Ti 초전도 선재를 제조하였다. 가공 조직을 조사한 결과, 단심 선재의 경우 Nb-Ti 심의 단면이 균일하게 가공된 것을 확인하였으며, 다심선재의 경우는 신선가공에 의하여 다소 불균질한 필라멘트(filament)부분이 관찰되었다. 4.2K, 자장하에서 4단자법으로 직선형 단척 시료의 임계전류밀도를 측정하여 가공 열처리 조건에 따른 임계전류밀도의 자장특성을 조사하였는데 열처리시간을 길게하고 가공도를 높인 시료일수록 자장하의 임계전류밀도가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 4.2K, 5T 자장하에서 각각 $4 \times 10^5 \text{A/cm}^2$ 및 $2 \times 10^5 \text{A/cm}^2$ 의 임계전류밀도를 나타내는 Nb-Ti 단심 및 다심 초전도선재를 제작 할 수 있었다.

Abstract

After making the Cu/Nb-Ti composite billets with stabilizer of OFHC Cu matrix, single and multi Nb-Ti superconducting wires were fabricated by processes of indirect hot extrusion and repeated cycle of drawing and heat-treatment. Due to their structure observation, it was confirmed that the Cu/Nb-Ti composite wire was cold worked homogeneously for single filament wire, while some inhomogenous region was observed for the filament of multi filament wire. Critical currents for short straight samples processed various thermomechanical treatments were measured by using 4-terminal method in magnetic fields at 4.2K. According to this, it was confirmed that the critical current density was improved for the sample heavily cold worked and heat-treated for long time. Consequently, We could fabricate single and multi Nb-Ti superconducting wire with critical current densities of $4 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ and $2 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, respectively at 5T, 4.2K.

* : 한국전기연구소 초전도연구실

接受日字: 1993年 5月 19日

1. 서론

현재 세계적으로 상용화되어 초전도 응용 기기의 코일재료로서 쓰이고 있는 금속계 초전도체는 대표적으로 합금계의 Nb-Ti와 금속간 화합물계의 Nb₃Sn의 두가지를 들 수 있다. Nb-Ti초전도체는 상부임계자계치(H_{C2})가 10 T이하이므로 주로 저자장하에서의 응용에 사용되고 있고 전류 형태별로 보면 직류 응용에는 자기부상열차, 자기추진선의 초전도 자석을 들 수 있는데 일본에서는 실용화의 연구가 거의 완성단계에 접어들었다고 할 수 있다. 이 이외에도 직류 응용에는 1983년 부터 상용화에 성공하고 있는 초전도 핵자기 공명 단층 촬영장치(MRI-CT)^{1),2)}를 들 수 있는데 현재 미국의 IGC, GE 일본의 Toshiba, Hitachi 및 영국의 Oxford사등에서 첨단 고 부가가치의료진단용 제품으로 생산되어 그 보급이 확대되고 있다. 또한 펄스(pulse)적인 응용에는 핵융합로의 포로이달 코일³⁾, 초전도에너지 저장장치(SMES)를 들 수 있고 각각 플라즈마 응용연구 및 계통안정화용⁴⁾의 시스템화 연구가 일본, 미국등에서 활발히 진행되고 있다. Nb-Ti초전도체를 상용주파수의 교류에서 발전기, 한류기, 변압기등의 전력계통기기의 초전도화에 이용하려는 연구도 프랑스의 Alstom사가 초극세 다심 교류용 Nb-Ti 초전도선재의 개발에 성공한 이 후 일본, 미국등에서 활발히 진행되고 있다. 한편 H_{C2}가 24 T 정도인 Nb₃Sn은 주로 고자장 발생용 초전도 자석⁵⁾의 코일재료로서 널리 사용되고 있으며 Nb-Ti코일과의 하이브리드(hybrid)화로 물성 측정 실험용 고자장 초전도 자석이 상용화되고 있다.

일반적으로 전기기기를 초전도화하면 다음과 같은 잇점을 얻을수 있다.

- 무손실 대전류
- 고자계 발생
- 대공간 자계 발생
- 영구전류

한편, 전력 및 전기기기 분야에 초전도 기술을 응용하기 위해서는 사용 용도에 따

른 초전도 자석을 설계 및 제작하여야하고 이를 위해서는 초전도선의 사용이 필수적으로 요구된다고 할 수 있다. 또한 초전도기기의 특성향상을 위해서는 초전도선재의 초전도 특성 개선 및 균질한 가공상태가 요구되며 교류 응용에 있어서는 교류손실의 최소화가 필수적으로 요구된다고 할 수 있다.

일반적으로 Nb-Ti초전도체를 초전도자석의 코일재료로서 이용하기 위하여는 우선 안정화재를 포함한 복합선재로의 형태가 갖추어 져야 하며 초전도 자석의 용도 및 안정화도를 고려한 동비(동면적/초전도체의 단면적) 및 Nb-Ti 필라멘트 수 및 크기, 트위스트 피치(twist pitch)등의 설계가 필요하다. 그리고 Nb-Ti합금의 임계전류밀도를 사용수준에 맞도록 초전도선재를 제조하기 위하여는 제조공정에 있어서 가공 및 열처리를 적절하게 하여 Nb-Ti 초전도체의 미세조직을 제어^{6),7)}하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 직류용 초전도 자석에 사용되는 Cu/Nb-Ti 초전도 복합선재를 개발하기 위한 연구단계 실험으로서 단심 및 다심형태의 Nb-Ti 초전도선재를 제조하여 조직을 관찰하고 자장하에서의 전자기특성을 조사하였으며 가공 열처리조건이 자장하의 임계전류밀도에 미치는 영향등에 관해서도 조사하였다.

2. 실험 방법

안정화재로 사용할 OFHC 동봉을 드릴 가공하여 단심 및 다심(24 심)형태의 Cu 빌렛트를 만들고 미국 Teledyne SC사의 Nb-47 wt% Ti 합금봉을 구입하여 탈지, 산세척, 건조후에 그림 1에 나타난 가공 열처리 흐름도에 의거하여 초전도선재를 제조하였다. 우선 Ar gas 분위기의 glove box에서 Cu/Nb-Ti 복합 빌렛트를 조립하고 몸통과 양 뚜껑의 이음새 부분을 고진공하에서 전자빔 용접하였다. 이렇게 만들어진 빌렛트의 사양은 표 1에 정리하여 나타냈다. 장척의 초전도선재의 제조 공정에 있어서 가

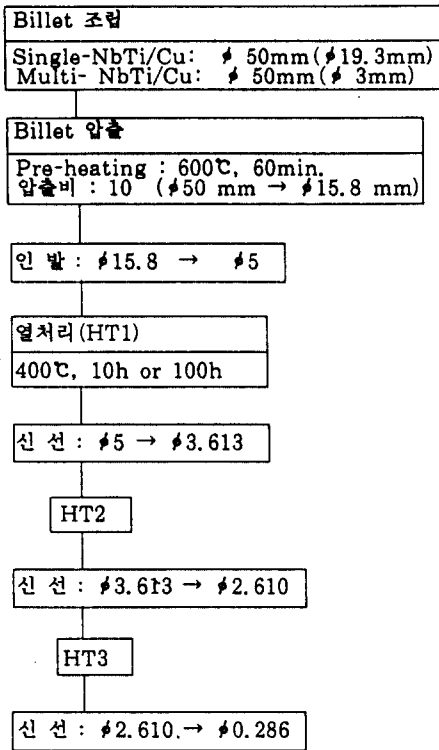


그림 1. 초전도체 제조시의 가공 및 열처리 공정도
 Fig. 1 Flow chart of cold working and heat-treatment for fabrication of superconducting wire

장 중요한 압출은 본 연구실 보유의 600ton 간접 압출기를 사용하였는데 전기로에서 600°C, 60분간 빌렛트를 예열한 후에 압출비가 10이 되도록 콘테나 온도 500°C에서 열간 압출하여 φ 15.8mm의 Cu/Nb-Ti봉재를 얻었다. 이 압출 봉재를 draw bench로서 φ 5mm까지 인발한 후에 Ar gas 분위기 하의 전기로에서 400°C 온도, 10h, 100h 열처리하고 단면감소율 15%로 φ 3.613 mm까지 신선한 후 다시 같은 조건에서 2차 열처리를 행하고 φ 2.610 mm까지 재 신선한 시료를 최종적으로 3차 열처리를 하고 나서 소정의 직경까지 신선가공을 행하였다.

자장하의 임계전류 측정에는 4만 자법으로 행하였는데 본 연구실에서 보유한 4.2 K, 자장하의 임계전류 측정시스템을 이용하였다. 그 구성도를 그림 2에 나타냈다. 직류전

표 1. 설계 제작된 Cu/Nb-Ti 복합 빌렛트의 사양

Table 1 Specifications of the Cu/Nb-Ti composite billet which was designed and fabricated in this study.

종류	billet 직경(mm)	Nb-Ti 직경(mm)	Nb-Ti rod 수	Cu/Sc ratio(등비)
단심	50	19.3	1	5.7
다심	50	3	24	10.57

원 공급기(DS)는 최대 1000 A까지 전류를 흘릴수 있으며 0.5~3 A/sec의 sweep rate 범위에서 시료에 전류를 통전시켰다. 시료의 길이방향에 대하여 수직으로 정자장의 외부자장을 인가하였는데 7 T까지 발생시킬수 있는 Nb-Ti 초전도 자석(SM)을 사용하였다. 3 cm 길이로 절단한 시료를 자체 제작한 GFRP제 시료홀더에 6개를 직선형태로 납땀한 후 자석에 삽입하였다. 전압단자 거리는 1cm로 하였으며 전류 통전후 초전도체에서 발생하는 전압은 nano-voltmeter로서 측정하였고 임계전류(I_c)는 1 μV/cm에서의 전류치를 택하였다. 임계전류 밀도(J_c)는 I_c를 시료중의 초전도체인 Nb-Ti의 단면적으로 나눈 값을 택하였다. Data sampling은 GPIB 시스템을 이용하여 PC-

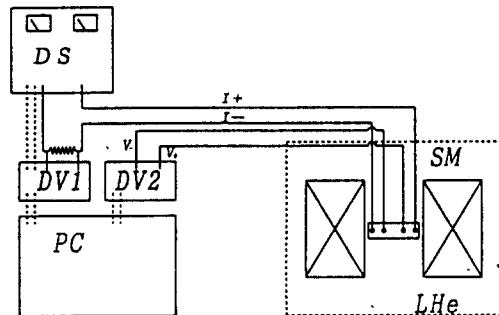


그림 2. 4.2K, 자장하에서의 임계전류 측정 개략도
 Fig. 2 Block diagram of critical current measurement in magnetic fields at 4.2K.

486 컴퓨터로서 자동 제어하였다. 측정후의

시료는 적당한 크기로 절단하여 수지에 마운팅한 후에 습식연마하여 광학현미경으로 단면조직을 관찰하였다. Nb-Ti 필라멘트의 미세조직을 관찰하기 위하여 동 부분을 HNO₃으로 녹혀내고 Au 코팅한 후에 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 전자빔 용접후의 복합 단심 Cu/Nb-Ti 빌렛의 전체외관(a)과 간접 열간압출후의 상태를 나타내는 외관(b) 및 횡단면(c)을 나타내고 있는데 (c)그림의 Nb-Ti 코어부의 가공흐름 사진에서 보는 바와 같이 metal flow가 균일하게 일어나 양호하게 가공된 것을 알 수 있었고 간접방식에 의하여 성공적으로 Cu/Nb-Ti 복합빌렛을 압출할 수 있었다.

그림 4는 최종적으로 가공된 단심선재(φ 0.538 mm)의 수직단면도를 나타내고 있는데 압출-인발-신선공정에 의하여 복합선재가 가공되어 나가는 상태에서 Nb-Ti 필라멘트단면(중앙의 검은 부분)의 진원도 상태가 균일하게 유지되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

그림 5는 400℃, 10h 열처리-가공으로 제조한 단심선재(선재외경 : φ 0.665 mm)의 4.2 K, 각 자장하에서의 전류-전압 특성을 나타내고 있다.

전류치가 높아져 초전도상태에서 상전도상태로 전이할 때 임계전류가 작게 나타나는 고자장하에서는 flux flow에 의한 연속적인 저항 전이(resistive transition)을 보이고 있으나 임계전류치가 크게 나타나는 저자장에서는 flux jump에 의한 quench현상이 나타나고 있다. 초전도체의 flux jump 안정화이론에 의하면 flux jump가 일어나는 필라멘트의 임계직경, w는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$w \leq \sqrt{10^9 f_i C^v \Delta T_c / J_c} \quad (1)$$

$$\Delta T_c = J_c / (-dJ_c/dT)$$

$$0.6 \leq f_i \leq 0.9$$

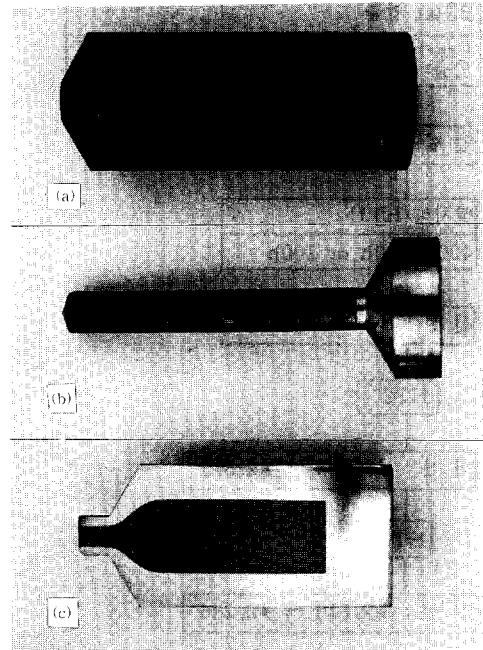


그림 3. 제작된 빌렛의 압출전의 외관과 압출시의 외관 및 단면
(a)전자빔 용접후의 빌렛
(b)압출된 상태
(c)압출중의 빌렛의 단면도

Fig. 3 Configurations and cross sectional view of billet before or on extrusion.

- (a)billet after electron beam welding,
- (b)configuration of billet at extrusion,
- (c)cross sectional view of billet at extrusion.

여기서 C^v는 초전도체의 체적비열(J cm⁻³K⁻¹)이고 f_i는 안정화 해석 모델의 가정에 의존하는 계수이다. (1)식의 우항 변수들에서 보는것 처럼 초전도체의 안정화도를 증가시키기 위해서는 초전도체의 체적비열

을 크게 하든가 J_c 의 온도의존성을 개선하든가, J_c 를 감소시키는 방법을 택하여야 한다. 그림 5에서와 같이 초전도체 Nb-Ti 필라멘트 직경이 ϕ 0.258mm인 시료에서 외부 자장의 고 저에 따라 전이 형상이 달라지는

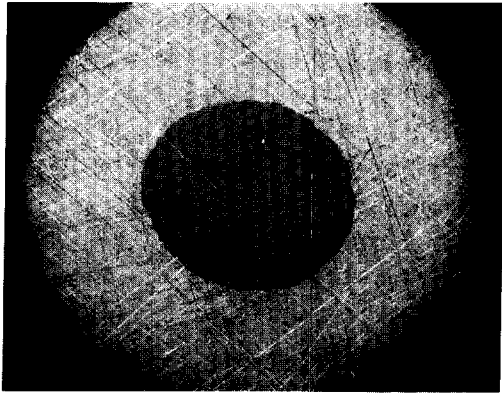


그림 4. 최종적으로 가공된 단심 선재 (ϕ 0.586mm)의 단면도

Fig. 4 Cross sectional view of single filament wire(ϕ 0.586mm)finally cold worked.

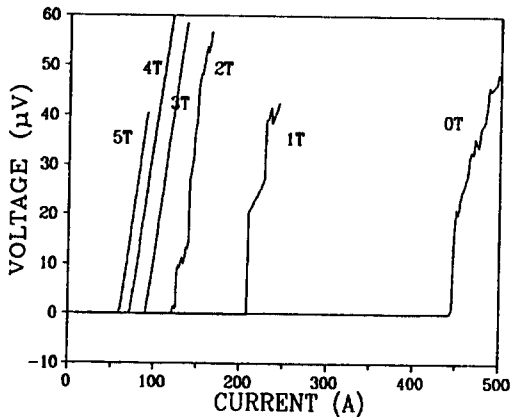


그림 5 단심 선재(ϕ 0.665mm)의 4.2K에서의 전류-전압 특성

Fig. 5 Current-voltage characteristic of single filament wire(ϕ 0.665mm)

것은 자장의 영향에 의한 J_c 값의 변화에 그 원인이 있는 것으로 해석할 수 있고 Nb-Ti 필라멘트의 직경을 감소시킴으로써 flux jump stability를 높일 수 있다고 생각할 수 있다.

그림 6은 선재 최종 외경이 서로 다른 2개의 단심 시료를 같은 시간 100 h 혹은 10 h 열처리하여 임계전류밀도의 자장의존성을 조사한 결과를 나타낸 것이다. 외경이 가는 ϕ 0.538mm시료 쪽이 열처리 시간에 관계없이 전체 자장 범위에서 높은 J_c 를 나타내고 있고 100시간 동안 열처리한 시료가 그 경향이 더욱 큰 것을 알 수 있다. 또한 외부 자장이 낮을수록 선재 외경으로 본 가공률에 의한 J_c 증가 비율이 더 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과에서 처럼 가늘게 가공한 시료일수록 가공률의 증가에 의하여 J_c 가 향상되는 것을 알 수 있고, 100시간 열처리한 ϕ 0.538mm시료에서는 5T의 자장에서 4×10^5 A/cm²의 상당히 높은 J_c 를 나타내고 있다.

그림 7은 외경이 서로 다른 6개의 24심 시료의 J_c 의 자장의존성을 나타낸 것이다. 자장을 인가하지 않은 경우에는 외경이 작을 수록 J_c 가 그것에 비례하여 높아지는 것

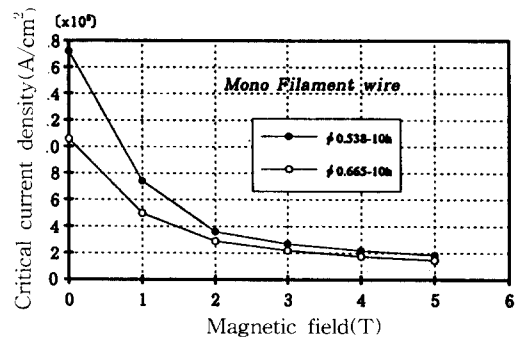


그림 6. 단심 선재(ϕ 0.665mm, ϕ 0.538mm)들의 임계전류밀도의 자장의존성

- (a) 100 h 열처리한 시료
- (b) 10 h 열처리한 시료

Fig. 6 Magnetic field dependence of critical current density for single filament wires(ϕ 0.665mm, ϕ 0.538mm).

- (a) specimens heat treated for 100 h,
- (b) specimens heated-treated for 10 h.

을 알 수 있었다. 외부 자장이 인가되면 각 자장에서의 J_c 가 무 자장하에서의 경향과 다소 달라지고 있으나 외경이 작은 ϕ 0.345mm, ϕ 0.286mm 시료에서 외경이 큰 시료보다 J_c 가 향상된 것을 알 수 있다. 그러나 24심 선재의 경우 자장하에서의 J_c 가 선재 외경으로 본 가공률과 정확하게는 비례관계를 보이지 않고 다소 무질서한 경향을 나타내는 것에 대한 원인은 아직 확실하지 않다. Chritchlow등도 선재외경(ϕ 2.25mm~ ϕ 0.50mm)을 변화시켜 다심 Cu/Nb-Ti 선재의 J_c 의 자장의존성을 조사하였으나 J_c 가 선재 외경이 작아질수록 그 것에 대응하여 증가하는 경향을 나타내는 결과를 보고⁹⁾하고 있다. Hillmann도 선재외경(ϕ 0.6mm~ ϕ 0.25mm)이 다른 60심 Cu/Nb-Ti

질수록 가공에 의한 Nb-Ti 필라멘트의 불균질성이 상대적으로 크게 나타날 수 있으므로 이런 원인에 의하여 J_c 와 선재 외경치의 역비례 관계에서 다소 벗어나는 결과가 나올 수 있다고 생각할 수 있다.

자장중에 있는 제2종 초전도체 전류를 흘리면 초전도체내의 양자화자속선에 Lorentz 힘이 작용하여 양자화자속선이 움직일려고 한다. 양자화 자속선이 이동하면 유도 기전력이 생기고 양자화자속의 중심의 상전도핵에서 상전도 전자가 운동하여 에너지 산일(dissipation)을 일으켜 전기저항을 생기게 한다¹¹⁾. 재료내의 결함이 양자화자속의 움직임을 저지하면 유도기전력은 생기지 않고 따라서 전류가 흘러도 손실은 생기지 않는다. 이와 같은 작용을 flux pinning이라 말하고 작용하는 결함(전위, 석출물, 보이드)을 pinning center라 한다. 일반적으로 Nb-Ti 합금에 흐르는 초전도 전류는 Nb-Ti중의 상전도 석출물이나 전위망의 cell조직등에 자속선이 pinning되는 것에 의하여 무손실인 채로 흐르게 된다. Nb-Ti나 Nb₃Sn과 같은 실용적 제 2종 초전도체의 임계전류 밀도(J_c)는 pinning force density, $F_p(N/m^3)$ 에 직접적으로 비례한다($J_c = F_p/B$). J_c 를 향상시키기 위해서는 자속선 하나에 작용하는 elementary pinning force와 자속선과 결함의 상호 작용수(pin density)를 증가 시키는게 필요하게 된다. 최근 여러 연구자들에 의하여 Nb-Ti의 미세조직이 투과전자현미경(TEM)¹²⁾이나 X선 및 중성자선 소각산란법(SAX, SAN)^{13),14)}으로 해석되어 졌으며, 그 보고에 의하면 Nb-Ti 합금초전도체에 있어서는 β 상 Nb-Ti고용체에 석출된 미세한 α -Ti상이 가장 우선적인 pinning center가 되는것으로 밝혀지고 있다. 가공 열처리에 의한 Nb-Ti의 미세조직의 변화를 Lee등은 그림 8과 같이 도식적으로 보고¹⁵⁾하고 있다. (a)는 초기 열처리 전의 β -Nb-Ti상의 조직을 나타내고 있다. 가공후 1차 열처리하면 결정입계면 및 입계삼중점에서 α -Ti상이 석출하여 분포한 상태를 그림 (b)는 보여주고 있다. 그림 (c)는

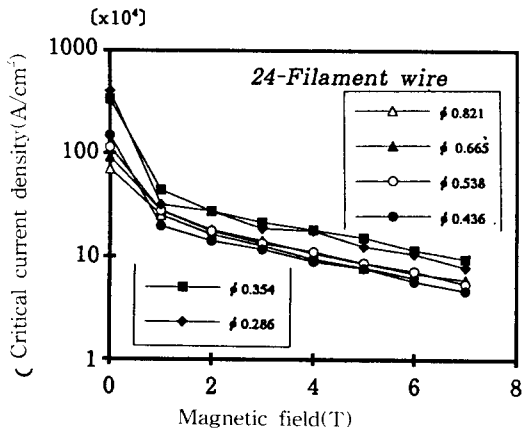


그림 7. 직경이 다른 다심 선재들의 임계 전류밀도의 자장의존성.

Fig. 7 Magnetic field dependence of critical current density for multi-filament specimens with various diameters.

선재를 자장하에서 J_c 를 측정하여 그 결과를 보고¹⁰⁾하고 있으나 외경이 작은 ϕ 0.4mm이하의 시료들에서 자장하에서의 J_c 가 선재 외경치와 정확하게 역 비례관계는 보이지 않고 다소 경향이 무질서하게 나타나 본 실험의 결과와 어느정도 유사한 점이 관찰되고 있다. 추측컨대 선재 외경이 작아

부가적으로 가공 열처리를 실시하면 α -Ti상이 체적분율이 증가하고 가공방향과 평행하게 리본상으로 늘어나고 있는 것을 나타내고 있다. 가공율의 증가와 함께 Nb-Ti는 집합 조직으로 변화 하면서 α -Ti상이 크기 및 석출 입자들 사이의 간격도 sub band¹⁶⁾ 크기의 감소와 함께 줄어 든다고 보고 되고 있다. 본 실험의 결과에서 처럼 최종 열처리 후에 선재 외경이 작은 시료에서 J_c 가

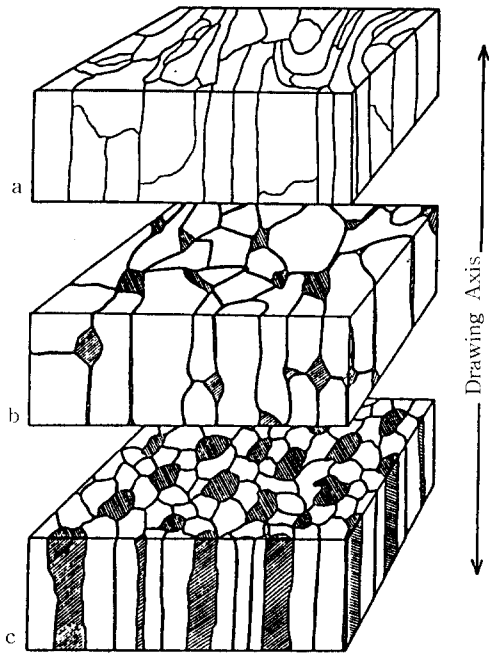


그림 8. Nb-Ti 초전도체의 가공열처리중의 미세조직 변화의 도식도

(a) 초기 열처리전, (b) 1차 열처리후, (c) 부가적인 가공열처리후

Fig. 8 Schematic diagram of variation of microstructure for Nb-Ti superconductor during thermo-mechanical treatment.

(a) before heat-treatment, (b) after first heat-treatment (c) after additional thermo-mechanical treatment.

높게 나타나는 것은 가공율의 증가에 의하여 자속선과 상호 작용하는 pinning center의 밀도(pin density)가 증가한 것과

elementary pinning force의 증가에 그 원인이 있다고 생각할 수 있다.

그림 9는 같은 조건(400°C, 100 h)에서 열처리하고 선재 최종 외경이 같은 단심과 24심 선재의 J_c 의 자장의존성을 조사한 결과를 나타내고 있다. 전 자장 범위에서 24심 시료의 J_c 가 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 같은 조건의 가공 및 열처리조건에서 제조했는데도 24심 시료에서 J_c 가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 초전도 다심 복합선재에 외부 자장이 가해지면 초전도 필라멘트들이 안정화 등 부분을 매개로 결합하고 차폐전류 루프가 구성됨으로서 기전력 발생의 원인이 되는데 이러한 결합전류를 빨리 감소시키기 위해서는, 즉 전류감쇠의 시정수, τ ($= L/R$)를 작게하기 위해서는 결합전류의 루프 면적을 작게하여 인덕턴스 L 을 감소 시키고 자장의 침입을 빨리 유도하는 것이 필요하므로 다심 초전도선재의 경우는 필라멘트를 일정한 피치로 꼬아야 한다. 이러한 트위스트처리를 한 다심 선재의 경우에도 외부 자장 변동속도에 따라 초전도체 내부의 자장 분포가 달라지게 된다.

초전도체간에 결합을 생기게 하는 자장 변동의 임계상승률(critical rise rate) H_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다¹⁷⁾.

$$H_c = \frac{8\rho w J_c}{\mu_0 l p^2} \quad (2)$$

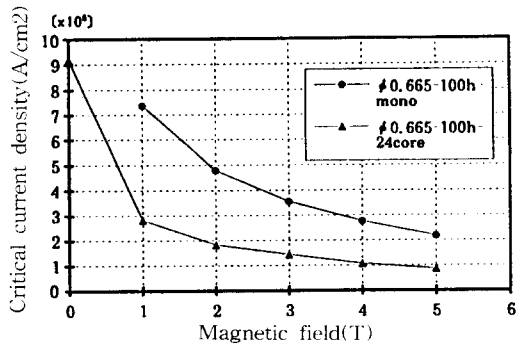


그림 9. 단심 및 다심선재의 임계전류 밀도의 자장의존성

Fig. 9 Magnetic field dependence of critical current density for single and multi filament wire.

여기서 ρ , w , μ_0 , l_p 는 각각 안정화재의 비저항, 필라멘트의 직경, 진공에서의 투자율, 트위스트 피치 길이이다. $H \gg H_c$ 인 경우는 안정화재를 매개로 필라멘트간에 결합전류 루프가 구성되며 $H \ll H_c$ 인 경우, 안정화재에는 자장이 내부까지 완전히 침입하므로 차폐전류 루프는 초전도체 필라멘트 내부에 독립적으로 형성하게 된다. 본 실험에서처럼 필라멘트를 트위스트하지 않은 경우는 (2)식에서 l_p 가 무한대의 경우와 같으므로 외부 자장을 아무리 느리게 인가하여도 시료내에는 결합전류가 유도되어 기전력이 발생하므로 단심선재 보다 J_c 가 낮게 나타났다고 할 수 있다.

그림 10은 24심 선재의 동부분을 HNO_3 로 녹히내어 Nb-Ti 필라멘트 한개의 조직을 나타내는 SEM사진이다. 같은 선재의 경우에도 길이에 따라 (a)사진처럼 균일하게 가공되어 있는 부분이 있는가 하면 (b)사진에서와 같이 다소 불균일하게 가공되어 있는 곳도 관찰되고 있다. 가공상태가 다소 나쁜 (b)부분의 경우가 표면에 돌기모양의 것이 많이 관찰되고 있어 극세 선선 가공시 필라멘트의 균일성에 다소 나쁜 영향을 준 것으로 생각되어 진다. 또한 본 실험에서는 1회 선선시 한 개의 die를 사용하여 draw bench로 수동 선선하였기 때문에 선선장력 및 속도를 일정하게 제어 할 수 있는 연속선선기를 사용하면 극세선선에서도 필라멘트가 보다 균일하게 가공 될 수 있으리라 생각된다.

그림 11은 필라멘트조직을 더 확대하여 나타낸 사진이다. 돌기모양의 것이 더 뚜렷하게 관찰되고 있는데 이것은 복합빌렛트를 $600^\circ C$ 에서 1 시간 예열할 때 동과 Nb-Ti 합금중의 Ti이 상호 반응하여 생성된 화합물¹⁸⁾로 생각되어 진다. 이 화합물은 그림 11의 사진에서 보는바와 같이 크기가 $0.5\mu m$ 이하의 것에서 큰 것은 $2\mu m$ 이상의 것도 관찰되고 있다. 따라서 필라멘트 직경이 $2\mu m$ 이하가 되는 극세선을 제조하기 위해서는 화합물의 생성을 억제하기 위한 대책을 하지

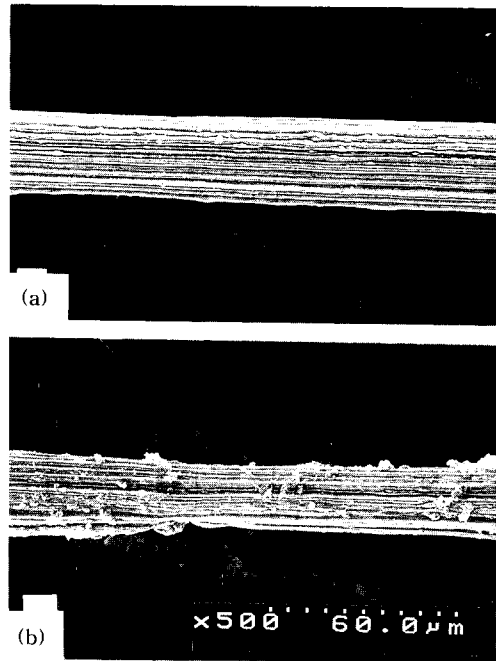


그림 10. 다심 선재중의 Nb-Ti filament의 주사전자현미경 사진
Fig. 10 SEM micrograph of Nb-Ti filament in multi filament wire



그림 11. 다심 선재중의 Nb-Ti filament의 미세조직 사진
Fig. 11 Photograph of microstructure of Nb-Ti filament in multi filament wire

않으면 가공중 단단한 이 화합물에 의하여 초전도선이 단선이 일어날 가능성이 있다고 할 수 있다.

5. 결론

OFHC동을 모재로 하고 Nb-Ti합금 rod를 복합화한 단심 및 다심 복합 빌렛트를 만들고 간접 열간압출, 인발 가공을 한 후 신선-열처리를 반복하여 직류용 동 안정화 Cu/Nb-Ti초전도 선재를 제작했다. 4.2 K, 자장하에서 임계전류를 측정하고 조직을 관찰하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 간접 열간 방식으로 압출하여 Nb-Ti단면의 진원도가 균질한 가공상태의 초전도복합선재를 제작 할 수 있었다.
2. 단심선재의 경우 외부 자장크기에 따라 상전도 전이 상태가 변화하였는데 임계전류가 작은 고자장에서는 flux flow에 의한 전이가 발생되며, 임계전류가 큰 저자장에서는 flux jump에 의한 quench 전류를 확인 할 수 있었다.
3. 가공률이 큰 선재일수록 그리고 같은 온도에서 열처리 시간을 길게 할수록 선재의 임계전류밀도가 향상되는 것을 알았다. 400℃에서 100시간 3회 열처리하여 4.2 K, 5 T의 J_c 가 직경 0.538mm의 단심 초전도 선재에서 $4 \times 10^5 A/cm^2$, 직경 0.354mm의 트윈스트랩은 다심 선재에서는 $2 \times 10^5 A/cm^2$ 정도의 높은 임계전류 밀도의 초전도선재를 제작할 수 있었다.

* 본 연구는 생산기술발전 5개년 계획에 의거 제조업 경쟁력 강화를 위한 한국전력공사 지원금에 의한 것이다.

참 고 문 헌

- 1) J. Alcorch, Y.H. Hsu, R.L. Creedon and J.R. Purcell, "A prototype 0.5 tesla whole body imaging magnet system", IEEE Trans on Mag., Vol.24 p. 1280(1988).
- 2) M.F. Murphy, "Superconducting magnets for whole body magnetic resonance imaging", IEEE Trans on Mag., Vol.25

- p. 1755(1989).
- 3) T.Morikawa et al., 核融合における超伝導マグネットシステム, 三菱電氣 技報 Vol.25 p.434(1991).
- 4) Y.Mitani, K.Tsuji, Y.Murakami, "An overserver constructed from reduced-order power system model and application to power system stabilization by superconducting magnetic energy storage", T. IEE Japan Vol. 111-B p. 434(1991).
- 5) H.Sakamoto et al., "Nb₃Sn compound superconductors for use in high-field magnets", Furukawa Review Vol.9 p. 12(1991).
- 6) L.Chengren, D.C. Larbalestier, "Development of high critical current densities in niobium 46.5 wt% titanium", Cryogenics Vol. 27 p. 171(1987).
- 7) R. Taillard et al., "Effects of heat-treatments and of processing parameters on the microstructure of multifilamentary Nb-46.5 wt% Ti superconductors", : Adv.Cryo.Eng.,Vol.36 p.303 (1990).
- 8) E.W. Collings, "Applied Superconductivity", Vol.2 Plenum Press, New York, p.220(1980).
- 9) P.R.Chritchlow, E.Gregory, B.Zeitlin, Cryogenics Feb. p.3 (1971).
- 10) S.Foner, "Superconductor Materials Science" Plenum Press, New York, p.322(1981).
- 11) 김영철, 정대영 역, "기초초전도물리학 (Introduction to Superconductivity) 겐지사,(1992).
- 12) A.W.West and D.C.Larbalestier, "Microstructural changes produced in a multifilamentary Nb-Ti composite by coldwork and heat treatment", Metall Trans., Vol 321 p.1871(1984).
- 13) K.Osamura, E.Matsubara, T.Miyatani, Y.Murakami, T. Horiuchi and

- Y.Monju, "Effect of cold working on precipitation behavior in superconducting Ti-Nb Alloys", Philos.Mag., Vol.A42 p.575(1980).
- 14) K.Osamura, H.Tsunekawa, Y.Monju and T.Horiuchi, "Influence of microstructure on the superconducting property in Ti-Nb-Ta-Zr quaternary alloy" in Proc. Int. Cryo.Materials Conf., ed. by K.Tachikawa and A.Clark, Butterworths, London, p.53 (1982).
- 15) P.J. Lee, J.C. Mckinnell and D.C. Larbalestier, "Proc. of Int. Symp. on New Development in Applied Superconductivity", Osaka, Japan, Oct. p. 357 (1988).
- 16) 松本要, 實用及び先進超伝導材料における磁束ピンニング制御に関する研究 박사학위논문 1991. Kyoto University, Japan.
- 17) 일본 전기학회통신교육회 편, "초전도공학", 1990.
- 18) D.C. Larbalestier, P.J. Lee and R.W. Samuel, "The growth of intermetallic compounds at a copper-niobium-titanium interface", Adv. Cryo. Eng. Vol. 32 p. 715(1986).

著者紹介



오상수
1959년 11월 1일생. 1982년 2월 경북대학교 금속공학과 졸업. 1989년 3월 일본 京都 대학 금속공학과 석사. 1992년 3월 일본 京都 대학 금속공학과 박사과정 졸업. 1992년 4월~현재 한국전기연구소 초전도연구실 선임연구원.



손명환
1963년 4월 21일생. 1986년 2월 부산대학교 물리학과 졸업. 1988년 2월 부산대학교 대학원 물리학과 석사. 1988년 2월~현재 한국전기연구소 초전도연구실 연구원.



하동우
1962년 7월 12일생. 1985년 2월 경북대학교 금속공학과 졸업. 1987년 2월 경북대학교 금속공학과 석사. 1987년 2월~현재 한국전기연구소 초전도연구실 선임연구원.



권영길
1959년 7월 28일생. 1982년 2월 부산대학교 기계공학과 졸업. 1982년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 석사. 1990년 8월 부산대학교 대학원 기계공학과 박사과정 졸업. 1992년 2월~현재 한국전기연구소 초전도연구실 선임연구원.



구원.

한태희
1964년 7월 20일생. 1991년 2월 전북대학교 금속공학과 졸업. 1991년~현재 전북대학교 전기공학과 석사과정. 1992년 9월~현재 한국전기연구소 초전도연구실 위촉연구원.



실장.

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