

## 내부 확산법으로 제조한 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선의 세선화에 의한 유연성 조사

하동우, 오상수, 이남진, 하홍수, 권영길, 류강식, 백흥구\*  
한국전기연구원 초전도응용연구그룹, \*연세대학교 금속공학과

### Effect of wire diameters on superconducting and mechanical properties of internal tin processed Nb<sub>3</sub>Sn wires

D. W. Ha, S. S. Oh, N. J. Lee, H. S. Ha, Y. K. Kwon, K. S. Ryu, H. K. Baik\*  
Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon.

\*Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University.

dwha@keri.re.kr

**Abstract** - Internal tin processed Nb<sub>3</sub>Sn wires of intermediated worked state of were took from Mitsubishi and fabricated with various diameters ranging from 0.76 mm to 0.2 mm. These specimens were heat-treated at 460 °C for 70 h and at 570 °C for 100h to form bronze and at 700 °C for 100h to form Nb<sub>3</sub>Sn compound. Bending strain  $I_c$  s of the wires were measured with various bending diameters ranging from flat to 76 mm. In order to investigate the sensitivity for strain, small diameters of wires were strain  $I_c$  at 6 T, 4.2 K.

There were no breakage decrease during cold working to 0.2 mm of diameter and no decrease  $J_c$  to the diameter of 0.3 mm. The values of bending strain  $I_c$  of 0.2 m and 0.3 mm diameters of the wires were not decreased at 76 mm of bending diameter.

#### 1. 서 론

초전도 마그네트의 제작에 있어 10 T 이상의 고 자장이 요구될 때는 주로 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선을 사용하게 된다. Nb<sub>3</sub>Sn은 A15의 금속간 화합물로서 취성(brittleness)을 지니고 있는데, 청동기 금속 내의 Nb<sub>3</sub>Sn 필라멘트는 등축 변형에 대해 단지 1 % 정도 밖에 견디지 못하는데, 약 0.5 %의 변형에서도 임계전류 값의 감소를 나타내고 있다[1]. 이러한 약간의 변형에도 특성 저하를 나타내기 때문에 대부분의 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선의 응용을 위해서는 먼저 초전도 선을 마그네트로 권선을 마친 다음 열처리에 의해 Nb<sub>3</sub>Sn 층을 형성시키는 wind then react 공정이 사용되고 있다. 만약에 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선을 열처리를 마친 다음 마그네트로 만드는 react then wind

공정으로 활용할 수 있다면 선재의 절연, 보빈의 재질, 선재를 다루는 일 등 마그네트 제작 공정에 있어 여러 가지 제약이 사라지게 된다. 실제로 react then wind 공정을 응용하기 위한 연구가 진행되어 왔으며[2]-[3], 이를 위해서는 Nb<sub>3</sub>Sn 층의 두께를 얇게 하여 초전도 선의 유연성을 확보하여야 한다.

즉 반경  $r$ 인 초전도 선에 반경  $R$ 의 굽힘 변형이 작용할 때, 선재 바깥 부분의 공칭 변형( $e_{om}$ )은 다음과 같이 표시된다.

$$e_{om} = r/(r+R), \text{ 만약에 } R \gg r \text{ 조건이라면}$$

$$e_{om} = r/R \text{ 로 표시할 수 있다.}$$

일반적으로 대형 시스템에서의 도체의 직경 또는 두께는 10 - 50 mm 정도이며[4]-[5], 허용 변형을 0.5로 가정할 때 최소 굽힘 직경은 2 - 10 m 정도가 되어 react then wind 공정을 응용하기에는 너무 크게 된다.

본 연구에서는 내부 확산법으로 제조한 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선의 직경을 작게 가공함으로써 열처리 후 Nb<sub>3</sub>Sn 층의 두께를 줄여 유연성을 향상시키고자 하였다. 내부확산법 공정으로 제조한 초전도 선의 경우, 중간 연화 열처리를 하지 않아도 되므로 세선 가공 공정이 간단하다는 장점이 있다. 그리고 세선화에 의해 초전도 선의 유연성이 확보된다면 이들 선재를 연선하여 케이블로 제조하게 되면 대전류 통전도 가능하기 때문이다.

#### 2. 실 험

현재 한국형 초전도 핵융합로(KSTAR)에 사용되는 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선은 내부확산법 공정으로 제조하고 있으며, 본 실험에 사용된 초전도 선은 Mitsubishi사에서 제조한 것이었다. KSTAR 용으로는 Nb<sub>3</sub>Sn 선을 직경 0.764 mm 까지 가공하고 있는데, 본 실험을 위하여 직경 0.203 mm까지 신선 가공하였다. 직경 0.764 mm에서 0.203 mm 범위의 크기를 가지는 몇 가지 선재를 직선 상태 및 표준 시료용으로 맨드렐에

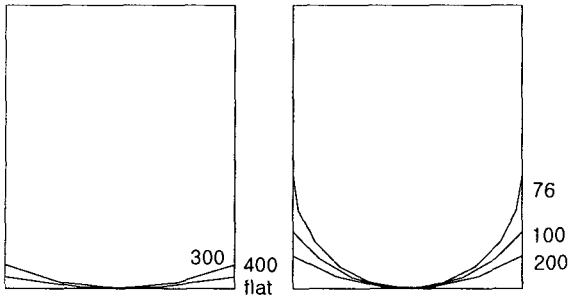


Fig. 1. Schematic layout of bending strain  $I_c$  holders.

감아 열처리를 하였다. 열처리의 조건은  $460^\circ\text{C}$ 에서 70 시간,  $570^\circ\text{C}$ 에서 100 시간 열처리를 하여 청동이 형성되도록 하였으며,  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  반응을 위하여  $700^\circ\text{C}$ 에서 100 시간 열처리를 하였으며, 이때의 분위기는 진공이었다. 굽힘 변형에 따른 초전도 선의 임계전류( $I_c$ ) 측정을 위해 시료 홀더의 곡률을 변화시켰는데, 직선 상태에서부터 곡률 직경이 76 mm까지 다단계가 되도록 제작하였다. 그림 1에 곡률 변화에 따른  $I_c$  측정을 위한 시료 홀더의 도면을 나타내었다. 시료의 임계전류 측정은 4.2K, 6T의 조건에서 곡률을 변화시키면서 측정하였다. 그리고 선재 방향으로의 변형에 따른 임계전류도 측정하였는데, 그림 2에서 보이고 있는 strain  $I_c$  측정 장비를 사용하였다. 또한 주사전자 현미경(SEM)과 광학 현미경을 사용하여 세션 선재의 미세조직을 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

내부확산법에 의한  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  초전도 선의 세션화 가공에 있어 가장 중요한 것은 Ta barrier를 비롯하여 Nb 필라멘트의 파단이 없어야 하는 것이다. 특히 Ta는 가공성이 좋지 않으며 선재의

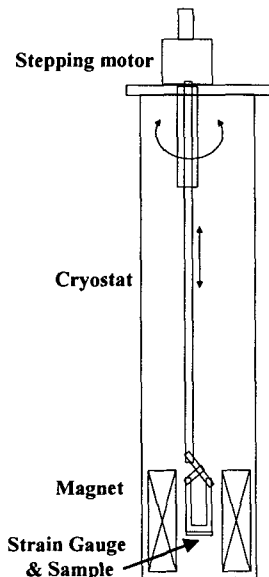


Fig. 2. Schematic layout of strain  $I_c$  Measurement.

직경이 작아질수록 두께가 얇아지는데 이때 Ta 이 찢어지게 되면 확산반응 동안 Sn의 유출로 인해 초전도 선으로서 사용할 수가 없게 된다. 따라서 세션으로 가공 후 선재의 각 요소가 균일하게 가공되었는지를 조사하는 것이 중요하다. 그래서 직경이 다른 각 선재의 단면을 광학현미경을 이용하여 분석한 결과를 표 1에 나타내었다.  $0.768\text{ mm } \phi$  선을 기준으로 계산치와 실제 측정치를 비교하였다. 두 값이 대체적으로 비슷하였으며 실제 값이 약간 적게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 안정화 동을 제거하여 Ta barrier를 조사해 보았을 때 barrier의 결함은 발견되지 않았다.

직경 다른 각 선의 자장 변화에 따른 임계전류 변화 값을 측정하기 위해 맨드렐에 감아  $700^\circ\text{C}$ 에서 100 시간 열처리한 표준 시료를 사용하였다. 6T에서 12T까지 자장을 변화시키면서 임계전류를 측정하여 임계전류밀도 ( $J_c$ ) 값을 그림 3에 나타내었다. 직경이  $0.3\text{ mm } \phi$ 까지는  $J_c$ 의 감소가 작았으나  $0.2\text{ mm } \phi$ 에서는  $J_c$ 의 감소가 크게 나타났는데 약 1/2 정도로 줄어들었다. 이러한 점으로 미루어  $0.2\text{ mm } \phi$ 의 선재에서는 비록 광학현미경에서는 관찰되지 않았으나 Nb 필라멘트의 단선이나 Ta barrier의 가공 불균일성이 발생하였을 것이라고 추측되었다.

Table 1. Specifications of Nb filaments and Ta barriers of  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  wires after drawing.

Wire dia. (mm)	Real		Calculation	
	Nb filament dia. ( $\mu\text{m}$ )	Ta barrier thickness ( $\mu\text{m}$ )	Nb filament dia. ( $\mu\text{m}$ )	Ta barrier thickness ( $\mu\text{m}$ )
0.768	2.98	6.46	2.98	6.46
0.486	2.62	3.73	1.90	4.11
0.302	1.12	2.22	1.18	2.55
0.203	0.73	1.22	0.79	1.72

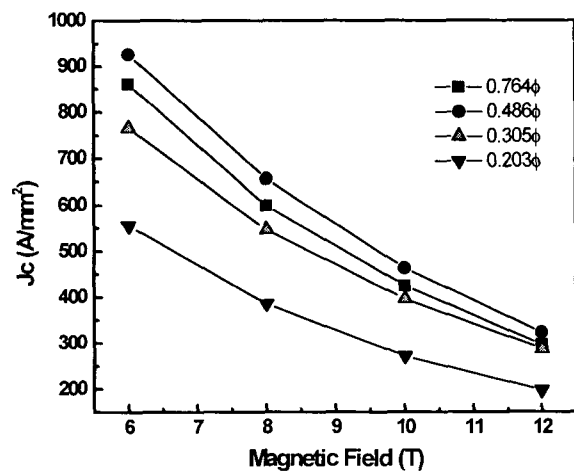


Fig. 3. The variation of  $J_c$  with the magnetic field for the mandrel wound wires with different diameters after heat treatment at  $700^\circ\text{C}$  for 100h.

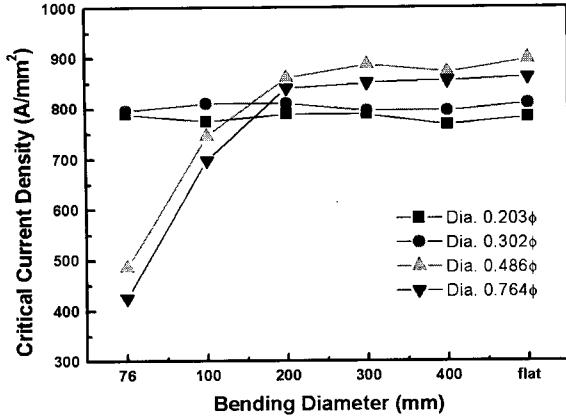


Fig. 4. The variation of  $J_c$  at 6T, 4.2 K with the bending diameter for the wires after heat treatment at 700 °C for 100 h.

내부확산법에 의한  $Nb_3Sn$  초전도 선의 직경의 변화에 따른 굽힘 변형  $J_c$ 를 측정하기 위하여 직선 상태에서부터 직경이 76 mm까지 6 단계로 변화시킬 수 있는 시료 홀더에 직선 상태로 열처리한 선재를 부착시키고 4 단자법으로 임계전류를 측정하였다. 이때 외부 자장은 6 T로 고정하였으며, 온도는 4.2 K였다. 이 결과를 그림 4에 나타내었는데, 선재의 직경이 0.486mm  $\phi$  이상에서는 굽힘 직경이 200 mm 이하에서는 급격히 감소함을 보였다. 하지만 초전도 선의 직경이 0.302 mm  $\phi$  이하에서는 굽힘 변형의 직경이 76 mm까지의 값이 거의 감소하지 않음을 나타내었다. 따라서 0.302 mm 이하의 선재를 react then wind 공정에 사용하게 되면 마그네트 보빈의 직경을 80 mm 이하로 줄일 수 있다는 것이다. 그리고 허용 변형을 0.5로 가정하여 앞의 식  $e_{om} = r/R$ 을 사용하게 되면, 0.3 mm  $\phi$ 의 초전도 선은 보빈 직경이 60 mm까지, 0.2 mm  $\phi$  선은 보빈의 직경이 40 mm까지도 가능하다는 것이다. 실험결과와 계산 값과 비교해 볼 때 대체적으로 잘 일치하고 있으며, 세선에서의 유연성 확보로 react then wind 공정의 가능성을 보여주고 있다. 특히 내부확산법으로 제조한 선재는 중간 열처리가 필요하지 않고 다른 공정으로 제조한 선재보다 임계전류밀도가 높다는 장점을 가지고 있다. 따라서 내부확산법에 의한  $Nb_3Sn$  초전도선을 세선화하여 초전도 특성이 감소하지 않으면서 유연성을 가질 수 있게 된다면 그 응용 범위가 더욱 넓어지게 될 것이다. 그리고 세선 선재를 연선하여 다발로 사용하게 되면 더 큰 전류도 흘릴 수 있다.

하지만 초전도 선이 가늘어질수록 임계전류밀도가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 원인은 내부 Nb 필라멘트의 단선이나 Ta barrier의 찢어지는 현상이 원인이 될 수 있다. 물론 이 선재는 세선용으로 설계된 것이 아니기 때문에 특성이 감소될 수 있는 요인이 있으나 Nb 필라멘트의 직경과 Ta barrier의 두께를 더 두껍게 설

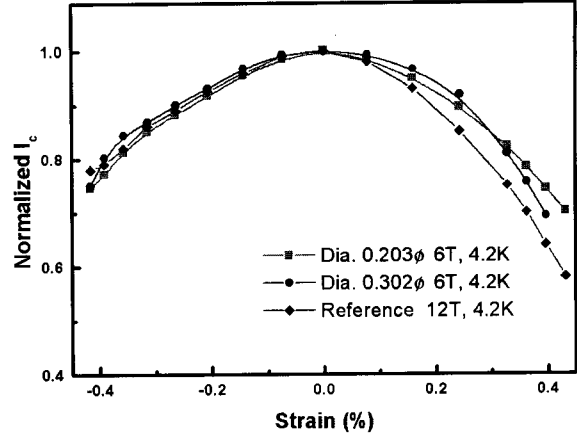


Fig. 5. The variation of  $J_c$  at 6T, 4.2 K with strain diameter for 0.203 and 0.302 mm  $\phi$  of the wires after heat treatment at 700 °C for 100 h.

계한다면 특성이 향상될 것이다.

초전도 선을 세선으로 가공하였을 때 선의 길이 방향으로의 인장력과 수축력이 작용할 때의 임계전류 특성의 변화를 관찰하기 위해 strain  $I_c$  측정 장비를 사용하여 값을 측정하였다. 외부 자장은 6 T였으며 온도는 4.2 K였다. 측정한 선의 직경은 0.3, 0.2 mm  $\phi$ 이었으며 변형 양은  $\pm 0.4\%$ 였다. 그리고 기존 선재와 비교하기 위하여 12 T에서 측정한 선재의 결과를 그림 5에 나타내었다. 각각의 선재의 최대 임계전류 값을 1로 하여 계산하였을 때의 결과를 나타내었다. 선재의 직경이 작아졌어도 변형에 따른  $I_c$ 의 변화는 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 그리고  $Nb_3Sn$  선재의 경우 0.2%의 변형에서 최대 임계전류 값을 가지므로 권선 과정에서의 인장력이 초전도 특성에 더 유리하게 작용할 수 있으므로 이와 관련한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 여겨진다.

그림 6에는 0.2 mm  $\phi$ 까지 가공한 내부확산법에 의한  $Nb_3Sn$  초전도 선의 단면을 주사전자현미경으로 관찰한 것을 보이고 있다. Nb 필라멘트들이 매우 근접하여있는 것이 보였으며 Ta barrier도 어느 정도 두께를 가지고 있으나 어떤

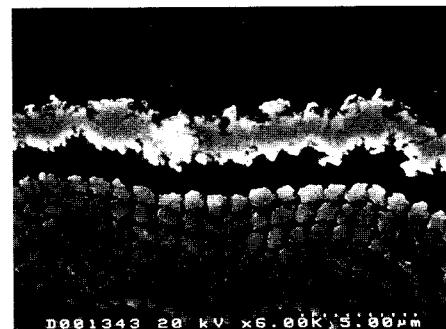


Fig. 6. SEM-photographs of internal tin processed  $Nb_3Sn$  wires with 0.20 mm  $\phi$  after finished drawing.

부분은 두께가 얇은 곳도 관찰되었다. 선의 몇 부분을 현미경으로 관찰하였을 때 필라멘트가 단선되거나 Ta barrier가 찢어진 부분은 없었지만 그림 3에서와 같이 특성이 낮게 나타나는 결과로 미루어 어느 부분에선가는 가공의 불균일성이 존재할 것으로 생각되었다.

그림 7에서는 직경이 0.76, 0.48, 0.30 그리고 0.2 mm  $\phi$ 인 Nb<sub>3</sub>Sn 선재를 700 °C에서 100 시간 열처리 한 후의 주사전자현미경으로 관찰한 것을 보이고 있다. 초전도 선이 가늘수록 열처리 후 Nb 필라멘트의 접합 현상이 심해지는 것을 알 수 있었다. 하지만 Nb 필라멘트가 접합이 되었더라도 Nb<sub>3</sub>Sn 층이 충분히 만들어 진다면 심각하게 나쁜 영향은 주지 않는다. 그렇지만 Nb 필라멘트의 접합이 bronze를 형성하는 과정에서 발생한다면 필라멘트의 접합이 추후 Sn의 확산을 방해하여 Nb<sub>3</sub>Sn 층이 충분히 반응하지 못할 가능성은 있었다. 따라서 이러한 관계를 규명하기 위한 추가적인 연구가 수행되어야 할 필요가 있었다.

#### 4. 결 론

내부확산법에 의한 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선을 0.2 mm  $\phi$ 까지 단선 없이 세선으로 가공할 수 있었으며 미세조직 분석을 통하여 심각한 결함은 발견할 수가 없었다. 그리고 0.3 mm  $\phi$ 의 선에서는 임계전류밀도의 감소가 작았으며 0.2 mm  $\phi$ 의 선에서는 감소 값이 증가하였다.

0.2 mm  $\phi$ 와 0.3 mm  $\phi$ 의 초전도 선에서는 굽힘 직경이 76 mm에서도 임계전류의 변화가 거의 없었다.

0.3 mm  $\phi$  이하의 초전도 선에서는 유연성이 증가하여 금속간화합물인 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선의 react then wind 공정의 활용 가능성을 보여 주었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] J.W.Ekin, "Metallurgy of continuous filamentary A15 superconductors," in Superconductor Material Science, Plenum Press, New York, pp.468-472, 1981.
- [2] M.J Leupold, "A 42cm bore superconducting coil using pre-reacted Nb<sub>3</sub>Sn," Cryogenics, Vol.24, No.24, pp.1413-1417, 1988.
- [3] S. Pourrachimi, K. DeMoranville, "development of composite flexible Nb<sub>3</sub>Sn cables suitable for the react then wind approach" IEEE Trans. on Appl. Supercon. Vol.7, No.2, pp.816-819, 1997.
- [4] J.R.Miller, et al, "An over view of the 45-T hybrid magnet system for the new

national high magnetic field laboratory," IEEE Trans. on Magn., Vol. 30, No.4, pp. 1563-1571, 1984.

[5] N.Mitchell et al., "Conductor design for the ITER toroidal and poloidal magnet systems," IEEE Trans. on Magn., Vol. 30, No. 4, pp.1602-1605, 1994.

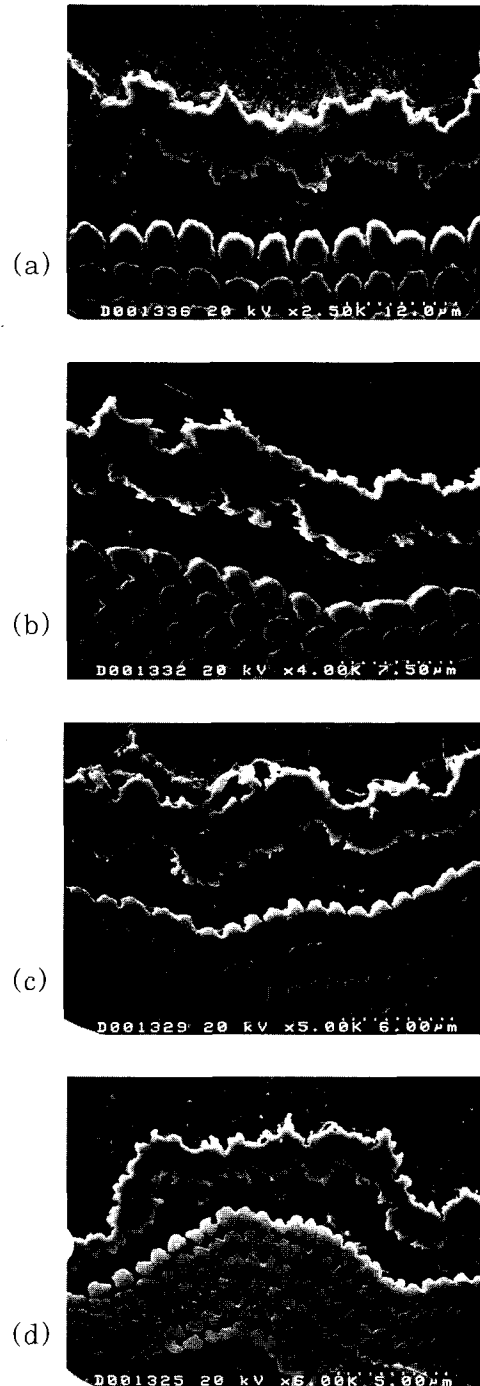


Fig. 7. SEM-photographs of internal tin processed Nb<sub>3</sub>Sn wires with 0.76 mm  $\phi$  (a), 0.48 mm  $\phi$  (b), 0.30 mm  $\phi$  (c) and 0.20 mm  $\phi$  (d) after heat treated at 700 °C for 100 h.