

## MRI용 NbTi 초전도선재 제조 및 초전도 특성 평가

하동우, 오상수, 류강식, 한일용\*, 이종건\*  
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, \* 대성전선 기술연구소

### Fabrication and Characterization of NbTi Superconducting wire for MRI

D. W. Ha, S. S. Oh, K. S. Ryu, I. Y. Han\*, C. K. Lee\*  
KERI, Applied Superconductivity Lab., \* Daesung Cable Co. LTD, Research Lab..

**Abstract** - The MRI Magnet is a most practical application of NbTi superconductor. In this paper, we present the main research results on superconducting wires for MRI magnet which we have developed. Cu/NbTi superconducting wires were fabricated by repeat of cold working and heat-treating process after that billets were extruded. We investigated the relation of superconductivities of wires and heat treatment condition. The correlation between cross section shape of wires and work inhomogeneity of NbTi rods was investigated by microscopic observation. The more repeatation number of cold working and heat-treating process, the higher critical current is achieved.

#### 1. 서 론

동일한 자장을 발생시키는 마그네트의 소형화를 위해서는 초전도선의 임계전류밀도를 높이는 것이 필요하다. 또한 인체에 사용되는 MRI의 특성상 MRI용 초전도 마그네트는 높은 수준의 안정화도가 요구되며, 이러한 목적을 위하여 초전도선재에 있어 초전도체 면적에 대한 안정화재 면적의 비율(동비)을 높이는 것이 필요하다.<sup>1)</sup> MRI용 초전도선의 경우는 일반적으로 동비가 7 ~ 10 정도로 완전 안정화 초전도선을 목적으로 설계를 하여야 한다. 초전도선을 제조할 때 가공-열처리 조건을 어떻게 최적화하여 임계전류밀도를 높일 수 있을 것인가 하는 문제가 중요하다. 과포화 고용상태의 NbTi 합금에 시효석출 열처리에 의해 Ti-rich 상인  $\alpha$  상을 균일하게 석출시키게 되면 초전도 matrix인 NbTi 내부에 비초전도상인  $\alpha$  상이 분산하여 초전도체 내의 자속을 고정시키는 역할을 하는 pinning 점이 되어 임계전류밀도를 향상시키게 된다.<sup>2)</sup> 또한 이러한 석출물을 가공에 의해 형상을 변화시키게 되면 초전도와 비초전도의 계면이 증가하게 되어 초전도 특성이 더욱 향상된다. 그래서 본 논문에서는 빌렛

을 압출한 다음 선선 가공중 열처리 온도 및 시간을 변화시켜서 제조한 선재의 임계전류밀도를 평가하였다. 또한 초전도선재의 열처리 동안 Cu와 NbTi 필라멘트의 계면에서 발생하기 쉬운  $Ti_2Cu$  금속간화합물의 발생 기구에 대해서도 조사하였다.

#### 2. 실험

MRI 초전도선재 제조의 첫 공정인 빌렛의 압출을 위한 빌렛의 규격은  $\phi 50$ , 길이 160 cm였고, 직경 3 mm의 NbTi 봉을 빌렛의 원주상으로 24개를 배치한 형태로 제작하였다. 그래서 구멍이 뚫린 Cu 빌렛에 필라멘트인 NbTi 봉재를 삽입하게 되면 초전도 복합 빌렛을 이루게 되는 것이다. NbTi 봉재는 2 가지 방법으로 제조되었는데, 한가지는 NbTi 단심 빌렛을 압출, 인발 가공에 의해 적절한 직경의 선재까지 만든 다음 선재의 피복재인 Cu를 제거하여 빌렛용 봉재로 사용하였으며 다른 경우는 직경 7 mm 인 NbTi 봉재를 swaging 가공을 하여 원하는 크기까지 가공하여 빌렛용 봉재로 사용하였다.

빌렛 세척은 NbTi 봉재와 기지금속인 Cu 빌렛을 구분하여 탈지처리, 산세척, 린스를 행하였다. 빌렛 조립 후에  $10^{-5}$  Torr의 진공 상태에서 몸체와 뚜껑을 전자빔 용접을 하고 600 °C에서 1 시간 예열한 후 간접압출 방식으로 압출하여  $\phi 15.8$ mm의 봉재로 가공하였다. 복합 봉재는 draw bench 및 block drawing machine을 이용하여  $\phi 5.0$ mm의 선재까지 가공한 다음 열처리를 한 후 다시 선선가공하여 가공-열처리를 반복하여 최종 선재 직경이  $\phi 1.0$ mm가 되도록 가공하였다.

열처리 온도는 390 °C에서 일정하게 하고 열처리 시간은 100 시간으로 하였는데, 열처리 후 선재의 단면적을 감소시켜서 가공-열처리의 반복회수 및 가공율이 임계전류에 미치는 영향을 조사하였다.

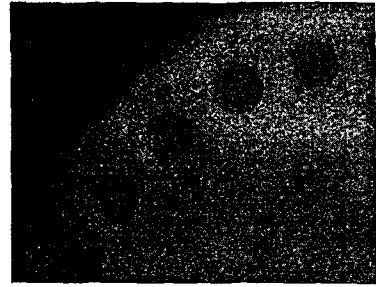
임계전류는 선재를 직경 40 mm의 보빈에 감아

전압단자 간 거리를 20 cm가 되게 하여 4 단자법으로 4.2 K에서 측정하였다. 외부자장은 초전도 마그네트를 이용하여 시료의 수직 방향으로 6 테슬라 (T)까지 인가하였다. 또한 초전도선재의 미세조직을 관찰하기 위해 광학 및 전자 현미경을 사용하였다.

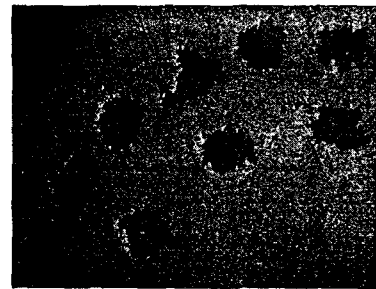
### 3. 결과 및 고찰

초전도 빌렛의 제조 공정에 있어 NbTi 봉재의 가공상태에 따른 최종 선재에서의 필라멘트의 형상 변화를 조사하기 위해 빌렛용 봉재를 위해 단심선으로 신선 후 NbTi core 만을 사용하는 조건과 NbTi 봉재를 swaging 가공한 두가지 조건으로 필라멘트용 NbTi를 준비하였다. 그림 1은 필라멘트의 가공조건에 따른 최종 선재에서의 필라멘트의 형상 변화를 보여주고 있다. 단심선으로 신선 후 NbTi 보다 무른 Cu와의 복합체에서의 인발·신선가공에서는 가공 동안 불균일하게 변형되었던 NbTi 표면 부분이 Cu matrix 내로 파괴 들어가면서 변형이 진행되어 최종 선재에서는 필라멘트의 단면이 마치 구름과 같은 형상이 되어 버렸다. 필라멘트가 이처럼 불균일하게 변형이 된다는 것은 선재의 길이 방향으로도 필라멘트의 sausageing 현상이 나타나며 열처리 과정 동안 Ti와 Cu 간의 금속간 화합물의 생성도 용이하게 되어 초전도 특성이 저하되는 원인이 된다. 이러한 점은 주사전자현미경을 통해 swaging한 NbTi 필라멘트 표면에서 Ti와 Cu 간의 금속간 화합물 이 많이 발생하였음을 확인하였고 임계전류 또한 낮게 나타남을 알 수 있었다.

단심선으로 신선 후 NbTi core 만을 사용한 (a)에서는 필라멘트의 단면이 초기 상태인 원형을 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. 하지만 NbTi 봉재를 swaging 가공한 (b)의 경우에는 필라멘트의 단면 형상이 매끈한 원형이 아니라 매우 불균일하게 변형되어 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 다음과 같이 설명할 수 있다. 단심선으로 가공한 NbTi의 경우는 봉재의 단면적이 감소되는 가공이 동축상으로 균일하게 변형되었기 때문에 NbTi/Cu 복합체의 가공에서도 계속 균일하게 변형되었다. 그러나 swaging 가공한 NbTi의 경우는 표면적으로는 원형이나 가공시 회전하는 다이에 의해 불균일하게 변형되었기 때문에 NbTi 보다 무른 Cu와의 복합체에서의 인발·신선가공에서는 가공 동안 불균일하게 변형되었던 NbTi 표면 부분이 Cu matrix 내로 파괴 들어가면서 변형이 진행되어 최종 선재에서는 필라멘트의 단면이 마치 구름과 같은 형상이 되어 버렸다. 필라멘트가 이처럼 불균일하게 변형이 된다는 것은 선재의 길이 방향으로도 필라멘트의 sausageing 현상이 나타나며 열처리 과정 동안 Ti와 Cu 간의 금속간 화합물의 생성도 용이하게 되어 초전도 특성이 저하되는 원인이 된다.



(a)



(b)

그림 1 필라멘트의 가공조건에 따른 최종 선재에서의 필라멘트의 형상 변화 (a) 단심선으로 가공 후 재충진 (b) swaging 가공후 충전

이들 선재에서 자장의 변화에 따른 임계전류를 조사하였는데, 4.2K에서 측정한 결과를 그림 2에 나타내었다. 미세조직의 결과에서는 swaging한 NbTi 필라멘트에서 불균일한 단면 형상 때문에 단심선으로 제조한 경우보다 초전도 특성이 낮을 것으로 추측되었으나 반대의 결과를 얻었다. 또한 열처리를 3번 반복한 경우에는 오히려 임계전류치가 더 낮게 나타났다.

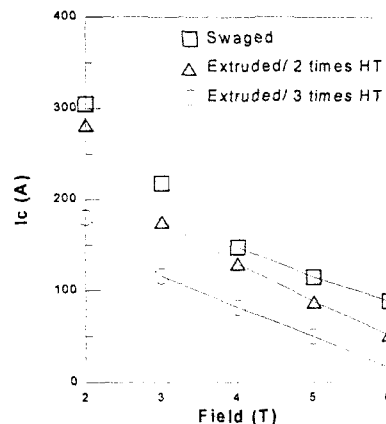
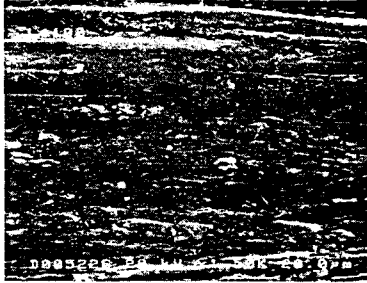


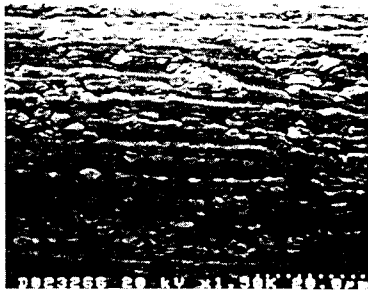
그림 2. Swaging 및 단심선으로 가공한 NbTi를 사용하여 제조한 초전도 선재에서의 임계전류의 자장에 따른 변화.

이러한 원인을 찾기위해 초전도선재의 필라멘트

를 분석하고자 하였는데, 그림 3은 초전도선재의 Cu 부분을 제거한 다음 NbTi 필라멘트만을 주사전자현미경을 통해 표면을 조사한 것을 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 3. 빌렛 제조시 NbTi 봉재의 가공방법을 달리한 초전도선재에서의 필라멘트 표면의 주사전자현미경 분석 (a) swaged, (b) extruded filament.

그림의 분석 결과, swaging한 필라멘트보다 단심선으로 가공한 필라멘트의 표면에서  $Ti_2Cu$  금속간화합물이 더크고 많이 생성된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 원인으로서는 단심선으로 가공하기 위해서는 열간압출을 하여야 하는데 이때  $600^\circ C$ 의 고온에서 예열동안 금속간 화합물이 생성되었다고 여겨진다. 즉 최종 도체가 얻어지는데 있어 2 번의 열간압출 공정과 석출열처리 공정이 수행되었으므로 화합물이 생성될 조건이 충분하였다. swaging의 경우 NbTi 봉재가 냉간가공에 의해서만 소성가공이 되었으므로 최종 도체가 얻어지는데 있어 1 번의 열간압출 공정과 석출열처리 공정이 수행되었으므로 복합체의 신선가공 동안 불균일한 변형에 의해 이 역시 금속간화합물의 생성을 용이하게할 기회를 제공하고 있으나 화합물의 생성이 적게된 것으로 미루어 화합물의 생성을 억제하기 위해서는 가급적 열간압출을 피하는 조건을 선택할 필요가 있다고 판단된다.

swaging한 필라멘트를 사용한 36심 초전도 선재에 있어 표 1에서 처럼 가공-열처리 조건을 달리했을 때의 임계전류 변화를 그림 4에 나타내었다.

표 1 36심 초전도 선재의 가공-열처리 조건 (열처리 온도  $390^\circ C$ 로 동일)

선재	1차 열처리		2차 열처리		3차 열처리	
	직경 (mm)	시간 (h)	직경 (mm)	시간 (h)	직경 (mm)	시간 (h)
L	5	100				
M	5	100	4.25	100		
N	5	100	4.25	100	3.61	50

그림 4는 100 시간 동안 열처리를 반복한 선의 결과로 열처리의 반복횟수가 높아질수록 임계전류 밀도도 비례하여 향상되는 것을 알 수 있고 열처리 동안 시간을 길게 할수록 임계전류밀도가 증가하는 것이 확인되었다. NbTi 기지금속 내에서 자속의 pinning 역할을 하는 Ti-rich 상의 석출열처리가 약  $400^\circ C$ 라는 비교적 낮은 온도에서 이루어 지기 때문에 임계전류를 향상시키기 위해서는 장시간의 열처리 시간과 3번 이상의 반복횟수가 필요함을 알았다. 가공-열처리 공정을 통해 50 시간 열처리를 3번 반복한 선재의  $I_c$ 는 210 A 이상, 100 시간 열처리를 3번 반복한 선재에  $I_c$ 는 270 A 이상을 얻을 수 있었다.

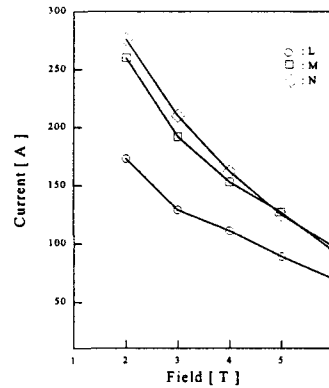


그림 4 열처리 시간을 100 시간 반복한 선재의 임계전류의 변화

### 3. 결론

4.2 K, 2 T의 자장 분위기에서 최고 360 A의  $I_c$  값을 갖는 MRI 용 초전도선재를 개발하였다.

필라멘트의 균일한 가공을 위한 최적의 조건을 확립하였으며 열간압출공정은 금속간화합물의 생성을 촉진하므로 가급적 피할 수 있는 제조공정이 필요하다.

### [참고문헌]

- [1] S. Foner, B. B. Schwartz : Superconductor Material Science, Plenum Press, 275, 1981.
- [2] D.C.Larbalestier et. al : IEEE, Mag., Vol.MAG-21, No. 2, March, 269, 1985.