

고자장 MRI 마그네트를 위한 NbTi 초전도 접합 공정 연구

하동우, 오상수, 하홍수, 이남진, 고락길, 권영길, 류강식
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

Study on NbTi superconducting joint process for high field MRI magnet

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

dwha@keri.re.kr

Abstract - NbTi/Cu superconducting wires were jointed inserting the NbTi filaments into Cu/NbTi sleeve and pressing it. When the NbTi filaments were inserted into Cu/NbTi sleeve, additional NbTi filaments were inserted together to increase the numbers of filaments in the hole of sleeve. Critical current of the joint of 28 filaments wires with 1.7 mm thickness of dimple was 450 A at 4.2K, 0.5T. I_c of the joint of 54 filaments wires with 2.0 mm thickness of dimple was 600 A at 4.2K, 2T. It is possible to manufacture MRI magnet by using these results.

임계전류 값이 요구된다. 이전의 연구를 통해 Cu/NbTi sleeve를 사용한 초전도 조인트에서 4.2K, 0.5 T에서 170 A의 임계전류 값을 얻으므로 1.0 T 급 MRI를 제작할 수 있도록 하였다. [4]

4 T 급 MRI 마그네트를 개발하기 위해서는 사용되는 초전도 선의 종류가 달라질 뿐 아니라 고자장에서 높은 전류 값이 요구되는 훨씬 가혹한 조건에서 초전도 조인트의 I_c 를 향상시켜야 한다. 따라서 본 연구에서는 저자장 MRI용 마그네트 초전도 접합 기술을 기초로 하여 동비가 낮은 새로운 초전도 선을 이용하여 초전도 접합 공정을 조사하여 접합부에서의 임계전류 값을 향상시키고자 하였다.

1. 서 론

자기공명단층촬영장치(MRI)와 같은 초전도 응용 시스템에서는 영구전류 모드 운전이 필요하다. 즉 초전도 선의 저항이 없으므로 초전도 코일에 흐르는 전류가 감소하지 않으면서 영구히 유지할 수 있다는 것이다. 하지만 영구전류모드로 운전하기 위해서는 초전도 선과의 접합 및 초전도 선과 영구전류 스위치(PCS)의 초전도 선과의 접합이 필수적이다. 접합부에서는 조인트 저항이 존재하게 되는데, 이 값은 전류 감소 요인을 결정짓게 되며 이 값에 의해 자장의 균일성이 결정된다. 이러한 접합부의 조인트 저항 특성에 따라 초전도 마그네트의 자장 감소 특성이 결정되며 이것이 전체 시스템의 품질을 좌우하게 된다. NbTi 초전도 선을 사용한 MRI에 적용하기 위해서는 접합부의 저항이 $10^{-13} \sim 10^{-14} \Omega$ 이하가 되어야 초전도 마그네트의 안정성이 유지될 수 있다.[1, 2] 또한 초전도 조인트의 임계전류(I_c) 값도 중요한데, 일반적으로 1.5 T용 MRI에서는 약 230 A의 운전 전류 값을 가지기 때문에 초전도 조인트의 I_c 는 0.5 T에서 250 A 이상이 되어야 조건을 만족시킬 수 있다.[3] 또한 4 T의 고자장 MRI를 위해서는 1.5 T 마그네트에 비해 더 높은 자장에서 더 높은

2. 실 험

초전도 접합을 위해서는 NbTi/Cu의 초전도 슬리브를 준비하여야 한다. 이를 위하여 NbTi 단심선 공정으로 초전도 접합용 슬리브를 제조하였다. 본원에서 보유하고 있는 압출기를 사용하기 위해 빌렛의 직경을 80 mm ϕ 로 하여 초전도 빌렛을 설계하였다. 그림 1에 NbTi 단심 빌렛의 도면을 나타내었다. NbTi core의 직경은 39 mm ϕ 였으며 압출기 컨테이너의 크기에 맞추어 빌렛의 길이를 정하였다.

전자빔 용접을 한 빌렛을 전기로에서 예열한 다음 열간 압출을 하였다. 빌렛 상태에서 압출 후 봉에서 단면적 감소가 균일하게 이루어진 것을 확인한 후 동비를 줄이기 위해 shaving 가공을 하였다. 그림 2에 압출한 초전도 복합체의 shaving 가공 조건을 나타내었다. Cu 면적비가 50%가 되도록 하기 위해 초기에 외경 30 mm ϕ 의 봉을 가공에 절삭 가공에 의해 20 mm ϕ 로 줄였다. 그리고 6.1 mm ϕ 까지 가공한 다음 α -상 석출을 위해 390 $^{\circ}\text{C}$ 에서 100 h 동안 열처리하였다. 그리고 대변 길이가 4.78 mm인 육각 다이를 사용하여 단면이 육각 형태로 가공하였다.

슬리브의 길이는 20 mm로 하였으며 드릴 가공에 의해 1.8 mm ϕ 의 구멍을 뚫었다. 그리고 슬

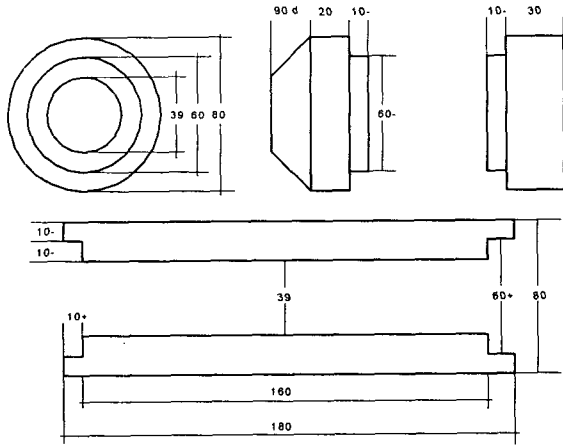


Fig. 1. Schematic layout of NbTi/Cu billet for superconducting joint sleeve.

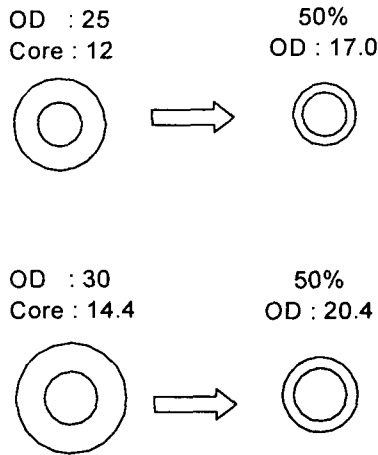


Fig. 2. Shaving condition of NbTi/Cu rods after extruded.

리브를 탈지 및 산세에 의해 접합 작업을 할 수 있도록 준비하였다.

초전도 접합에 사용된 초전도 선을 표 1에 나타내었다. 1.5 T 및 4.0 T 급 MRI용 초전도 선을 사용하였으며 영구전류 스위치(PCS)용 선의 사양도 함께 나타내었다.

Fig. 3은 1.5 T MRI용 28심 초전도선과 4.0 T용 54심 초전도선의 단면을 각각 나타내었다

Table. 1. Specification of MRI and PCS wires and sleeve.

종 류	외경 (mm)	동비	필라멘트	
			직경	수
1.5 T MRI wire	1.0	6.8	50 μm	28
4.0 T MRI wire	1.2 x 0.75	1.3	95 μm	54
PCS wire	1.0	1.3	90 μm	54

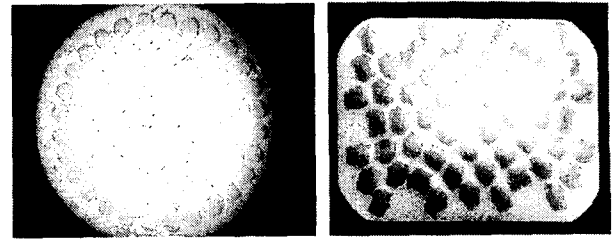


Fig. 3. Cross section of 28 filaments(a) and 54 filaments(b) NbTi wires.

그림 4는 3 가닥의 선재를 sleeve에 넣고 2 단계의 압착 공정을 거친 다음 여분의 한 선재의 필라멘트를 잘라내는 절차를 나타내고 있다. 이 공정에 있어 2 가닥의 선재는 MRI용 28+28심을 기준으로 하여 28심 또는 PCS용 54심 선재를 첨가하였다. 이와 같이 2 차에 걸친 프레스에 의해 초전도 접합을 완성하였다.

3. 결과 및 고찰

1.5 T 급 28심 초전도 선을 사용하여 초전도 접합한 시료에서의 결과를 그림 5에 나타내었다. 28+28+28심과 28+28+54심 sleeve의 dimple 두께를 달리했을 때의 I_c 값의 변화를 나타내고 있다. 자장의 변화는 0.5 T에서 1.0T의 범위에서 측정하였는데 이것은 1.5T급 MRI를 고려하였기 때문이었다. 어느 경우에서도 dimple의 두께가 2.0mm보다는 1.7mm에서 I_c 가 높게 나타났다. 그리고 여분의 선재로 MRI용 28심 선재보다는 PCS용 54심 선재에서 더 높게 나타났다. 하지만 dimple의 두께가 1.7mm에서는 +28심 경우와 +54심의 I_c 차이는 크게 나타나지 않았다. 그리고 기존의 2 가닥의 선재를

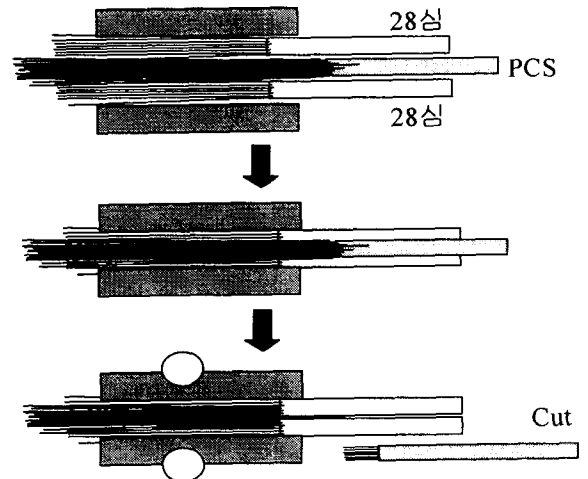


Fig. 4. Procedure of superconducting joint process with additional filaments.

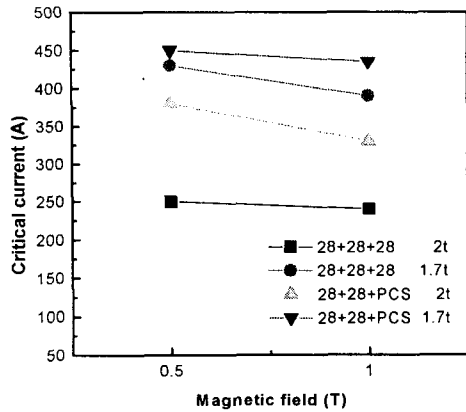


Fig. 5. I_c versus magnetic field curves of joint with 28 filaments NbTi wires.

사용한 조인트에 비해서는 I_c 값이 훨씬 증가하였음을 알 수 있었다. 28+28+54심 1.7mm의 담플 두께에서는 0.5 T에서 450A의 I_c 를 얻었다. 그리고 가장 결과가 나쁜 +28심, 2.0mm 경우에도 250 A 이상의 결과를 얻을 수 있었다. 1.5 T급 MRI용 조인트는 0.5 T에서 250 A 이상의 I_c 가 요구되는데, 이러한 결과는 1.5 T 급 초전도 조인트의 요구조건을 충분히 만족시킬 수 있는 확신을 얻을 수 있었다.

4T 급의 54심 초전도 선을 사용하여서도 상기와 같은 방법으로 초전도 접합을 하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 4.2 K, 2 T에서 600 A, 4 T에서 420 A 이상의 임계전류 값은 현재 설계하고 있는 4 T 마그네트의 요건을 만족시킬 수 있음을 알았다.

하지만 28심 초전도 선과 54심 초전도 선 자체의 임계전류와 접합부에서의 임계전류와 비교할 때 특성이 감소함을 알 수가 있었다. 이것을 그림 7을 통하여 초전도 선의 임계전류와 그 접합부에서의 임계전류 변화를 나타내고 있다. 28심의 경우 접합부에서의 I_c 는 초전도 선의 I_c 에 비해 60% 수준에 도달하는 것으로 나타났지만 54심에서는 40% 정도로 값이 떨어졌음을 알 수 있었다.

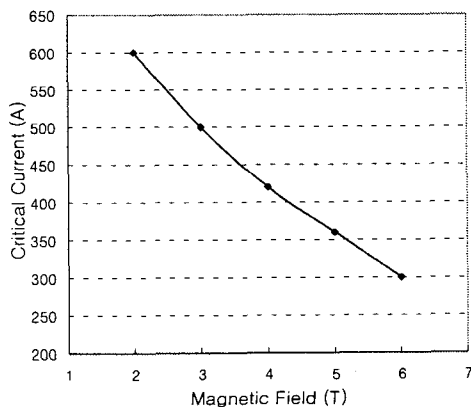


Fig. 6. I_c versus magnetic field curves of joint with 54 filaments NbTi wires.

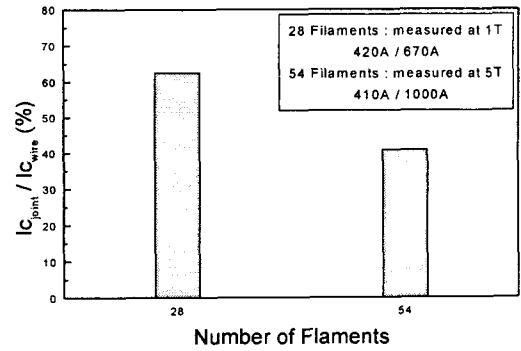


Fig. 7. Comparison of I_c of joint and wire at 28 and 54 filaments NbTi wires.

초전도 선의 접합 공정이 프레스에 의한 필라멘트의 물리적인 점 접촉만 이루어지므로 선재의 임계전류 값에 비례하여 접합부의 면적이 증가하지 않으므로, I_c 가 큰 선재일수록 상대적으로 접합부에서의 성능을 떨어지는 것으로 추측된다.

4. 결 론

NbTi 초전도 필라멘트 접합을 위해 Cu/NbTi sleeve에 접합하고자 하는 선재와 함께 별도의 NbTi 필라멘트를 추가로 사용하는 접합 공정에 의해 28심 NbTi 초전도선의 경우 4.2K, 0.5 T에서 450 A의 임계전류를 얻을 수 있었다. 또한 고자장용인 54심 NbTi 초전도선의 경우 4.2K, 2 T에서 600 A의 임계전류를 얻을 수 있었다. 따라서 1.5 T급 및 4.0 T급 MRI용 초전도 마그네트의 제작을 가능하게 하는 접합기술을 개발하였다.

프레스 공정에 의한 초전도 접합부의 성능은 초전도선의 I_c 값이 높을수록 접합부에서의 I_c 값은 상대적으로 낮았다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. J. Leupold and Y. Iwasa, "Superconducting joint between multifilamentary wires 1. Joint-making and joint results" Cryogenics, April, p215, 1976.
- [2] Y. Iwasa, "Superconducting joint between multifilamentary wires 2. Joint evaluation technique" Cryogenics, April, p217, 1976.
- [3] H.B. Jin et al., "A prototype 1.5 Tesla Superconducting MRI magnet for Head Scanning", MT-15 Proceedings, part two, p889-891, 1999.
- [4] 하동우 등, "NbTi 초전도 선의 접합 조건 변화에 따른 임계전류 특성 향상 연구", 대한전기학회 2000년 하계학술대회, C, p1521-1523.