

NbTi 초전도 선의 접합 조건 변화에 따른 임계전류 특성 향상 연구

하동우*, 심기덕, 장현만, 하홍수, 오상수, 권영길, 류강식
한국전기연구소 초전도응용연구그룹

Improvement of superconducting joint between NbTi filamentary wires

D. W. Ha*, K. D. Sim, H. M. Jang, H. S. Ha, S. S. Oh, Y. K. Kwon, K. S. Ryu
Applied Superconductivity Group, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - NbTi/Cu superconducting wires were joined by 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. The thickness of sleeves and dimples were changed to get optimal factor for high I_c of joint. Critical current of the joint with additional NbTi filaments and 1.7 mm thickness of dimple was 450 A at 4.2K, 0.5T.

1. 서 론

자기공명단층촬영장치(MRI)와 같은 초전도 응용 시스템은 영구전류 모드의 운전이 가능하다는 특징이 있다. 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 조인트의 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, 본 연구소에서 개발하고 있는 1 T용 MRI에서는 약 170 A, 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] 이전의 연구를 통해 Cu/NbTi sleeve를 사용한 초전도 조인트에서 저항은 만족시켰지만 임계전류는 0.5 T에서 170 A 정도의 값을 얻을 수 있었다. [4]

1.5 T 급 MRI를 개발하기 위해서는 초전도 조인트의 I_c 를 향상시킬 필요가 있어, 본 연구에서는 접합하고자 하는 NbTi 초전도 필라멘트와는 별개로 NbTi 필라멘트를 추가로 사용하는 접합 공정을 사용하였으며 또한 프레스 시 sleeve 및 dimple의 두께를 변화시키면서 기존의 접합부의 I_c 보다 높은 값을 가지는 조건을 찾고자 하였다.

2. 실험

NbTi 초전도 조인트에 사용된 초전도선 및 Cu/NbTi sleeve의 사양은 표 1과 같다. MRI용 초전도 선의 지지금속은 무산소동(OF)이었으며 PCS용 선

의 지지금속은 CuNi 합금이었다. Cu/NbTi sleeve는 일종의 NbTi 단심선이였다.

조인트 작업을 수행하기 위해 먼저 Cu/NbTi sleeve의 NbTi core 내에 홀이 위치하도록 드릴 작업을 하여 직경 2.0 mm의 홀 가공을 행하였다. Sleeve는 탈지 및 산 세척을 하였는데, Cu를 위해서는 질산용액으로, NbTi를 위해서는 HF 용액으로 세척을 하였다. 그리고 각각의 NbTi 초전도 선재는 바니쉬 절연층을 제거한 다음 질산용액으로 Cu 또는 CuNi 지지금속을 제거하여 NbTi 필라멘트만 남겼다. 그리고 여분의 NbTi 필라멘트를 위해서 MRI용 및 PCS용 선재를 같은 방법으로 필라멘트만 남겼다.

세척한 선재의 필라멘트를 sleeve의 홀에 넣고 프레스를 사용하여 sleeve를 눌러 필라멘트를 접합시켰다. 이때 압착은 2 단계로 진행하였는데, 처음에는 편평한 금형을 사용하여 전체적으로 균일하게 압착하였으며 두 번째는 상·하 2 개 모두 \cap -형으로 된 금형 사이에 sleeve를 넣고 압착하여 sleeve에는 상·하로 \cap -형의 dimple이 생기도록 하였다. dimple을 만들게 되면 이 부분에서의 필라멘트의 접합이 용이하게 이루어지기 때문이었다. 이때 sleeve 및 dimple의 두께를 변화시키면서 조인트를 제조하였다.

조인트의 I_c 를 측정하기 위해 sleeve를 20mm x 30mm의 동판에 납땀으로 붙인 후 직경 80 mm의 시료 홀더에 감아 액체 헬륨에서 자장을 균화시키면서 측정할 수 있도록 하였다. 이때 전압 단자간 거리는 20 cm가 되도록 하였다. 그리고 조인트의 dimple 부분의 필라멘트 상태를 확인하기 위해 단면을 광학현미경을 통해 분석을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

Cu/NbTi sleeve에 28심+28심 또는 28심+54심(PCS용) - 2 가닥의 선재를 넣고 압착하여 dimple의 두께를 변화시키면서 조인트를 제조하였다. 그림 1에서는 2 가닥의 선재를 넣은 경우와 3 가닥의 선재를 넣은 경우를 보여주고 있다. 그림 2에서는 2 가닥의 선재를 넣은 선재의 dimple 두께를 달리했을 때의 I_c 결과를 나타내고 있다. MRI용 28심+28심의 sleeve의 경우, dimple의 두께가 작을수록 I_c 값이 높았다. 이것은 두께가 얇을수록 필라멘트간의 접합이 잘 이루어졌다고 사

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

종 류	외경 (mm)	필라멘트	
		직경	수
MRI wire	1.0	50 μ m	28
PCS wire	1.0	90 μ m	54
Cu/NbTi	5.0	4.0 mm (NbTi 직경)	2.0 mm (hole 직경)

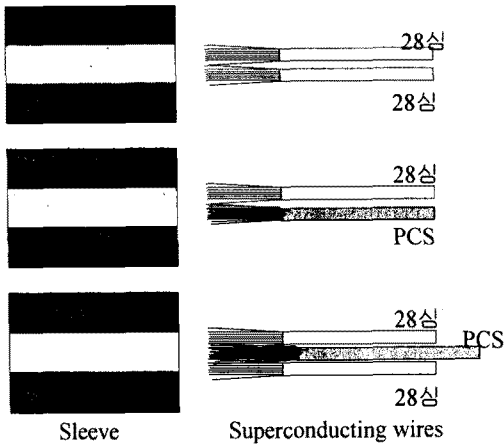


Fig. 1. Schematic diagram of 3 types of superconducting joint process

료되었다. 그리고 28심 선과 PCS용 54심의 sleeve에서는 훨씬 높은 I_c 값을 나타내었는데, 0.5 T에서 350A의 임계전류 값을 나타내었다. 28+28심과 28+54심의 차이는 초전도 선의 한 가닥이 차이가 난다는 것이다. 즉 28심 필라멘트에 비해 54심 필라멘트가 수가 많을 뿐 아니라 필라멘트의 직경도 90 μ m로 굵었다. 이것은 sleeve의 홀 내부를 필라멘트로 채울수록 유리하다는 것을 의미할 수도 있었다. 그래서 28+28심에 비해 28+54심의 I_c 값이 훨씬 높게 나타날 수가 있었다.

또한 그림 3에서는 28+54심 sleeve의 dimple 부분의 단면을 보여주고 있다. 필라멘트간의 접합이 비교적 잘 이루어져있으나 필라멘트 사이의 공극도 어느 정도 존재하고 있음을 알 수 있었다. sleeve 내의 필라멘트의 수도 늘리고 dimple의 최적 두께를 조사하기 위하여 그림 1의 아래 부분의 개략도처럼 3 가닥의 선재를 넣어 조인트 공정을 수행하고자 하였다.

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.

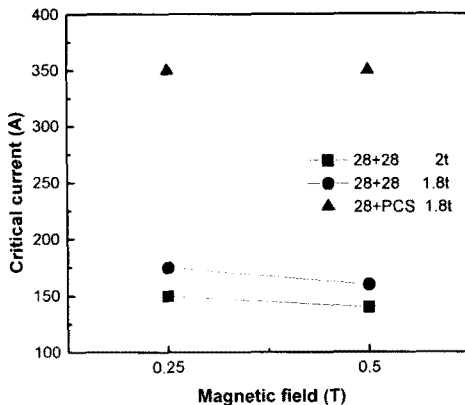


Fig. 2. I_c versus magnetic field curves of joint with 2 superconducting wires

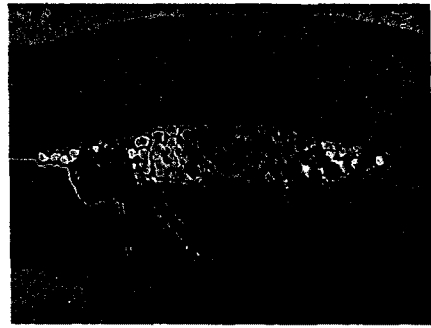


Fig. 3. Cross-section of dimple of joint with 2 superconducting wires.

그림 5에서는 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 사용한 조인트에 비해서는 I_c 값이 훨씬 증가하였음을 알 수 있었다. 28+28+54심의 1.7mm의 dimple 두께에서는 0.5 T에서 450A의 I_c 를 얻을 수 있었다. 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 T급 초전도 조인트의 요구조건을 충분히 만족시킬 수 있는 확신을 얻을 수 있었다.

그림 6에서는 3 가닥의 선재를 사용하여 조인트한 sleeve의 dimple 부의 단면을 보이고 있다. 그림 3에 비해 필라멘트간의 접합이 더 잘 이루어져 있는 것을 보이고 있다. I_c 결과와 비교해 볼 때 sleeve 내의 필라멘트간의 접합이 I_c 특성을 결정지을 만큼 중요한 것으로 여겨진다. 즉 여분의 필라멘트들이 목적하는 2 가닥의 선재의 필라멘트간의 접합 면적이 증가되도록 도우며 필라멘트간의 공극을 메워주는 역할을 하게 되는 것으로 생각된다.

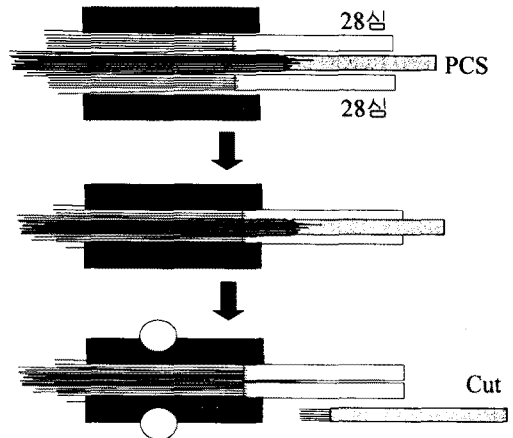


Fig. 4. Procedure of superconducting joint process with additional filaments.

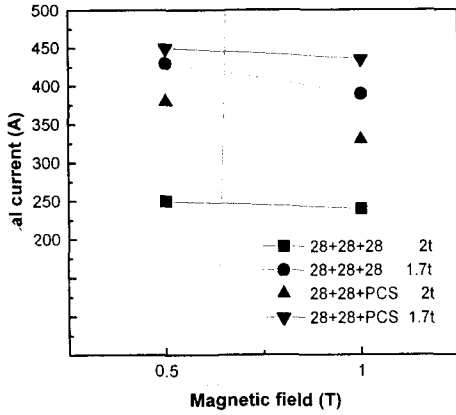


Fig. 3. I_c versus magnetic field curves of the joint with 3 superconducting wires.

초전도 조인트에 있어 sleeve의 NbTi 외벽보편트간의 접합이 더 중요하다는 것도 알 수 있었다. 이러한 이유로는 2차 압착 후 sleeve의 탄성인해 바깥 방향으로 약간 팽창하는 점이 고 있었다. 이러한 현상이 그림 4에서도 나타나, 따라서 초전도 조인트의 특성을 향상시키는 sleeve 홀 내의 필라멘트의 집적도를 높인 접합의 두께를 가급적 얇게 하여 필라멘트간격을 향상시키는 것이 중요하다는 것을 알 수

3. 결 론

초전도 필라멘트 집합을 위해 Cu/NbTi 접합하고자 하는 선재와 함께 별도의 NbTi 추가로 사용하는 접합 공정에 의해 4.2K, 450 A의 임계전류를 얻을 수 있었다. 이러한 기존의 접합부에 비해 3 배 이상의 임계전류를 얻는 결과였다.

본 연구에 사용한 조인트 공정을 개발함으로써 1.5 T 초전도 마그네트의 제작을 가능하게 하였다.



Fig. 4. Cross-section of dimple of joint with 3 superconducting wires.

(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] S.S. Oh et al., "Superconducting joint between the superconducting wires and evaluation of its resistance", *MT-15 Proceedings*, part two, p1500-1503, 1999.