

고온초전도 마그네트 제작을 위한 접합 방법에 관한 연구

박해용*, 손명환**, 심기덕**, 김석호**, 배준한**, 이연용** 박민원*, 유인근*
국립창원대학교*, 한국전기연구원**

A study on joint method for fabricating HTS magnet

Hae-Yong Park*, Myung-Hwan Sohn**, Ki-deok Sim**, Seokho Kim**, Jun Han Bae**, Eon-Yong Lee**, MinWon Park*, In-Keun Yu*

Changwon National University*, Korea Electrotechnology Research Institute**

Abstract - 고온초전도체를 코일형태로 제작할 경우 코일사이 접합저항의 크기는 운전전류 및 전체시스템의 안정도를 결정할 때 중요한 부분을 차지한다. 특히 극저온 냉동기를 이용한 전도냉각 시스템의 경우는 액체냉매를 이용한 냉각시스템보다 더욱 중요하게 접합저항에 의한 열 손실이 고려 되어야한다. 현재 저자들은 전도냉각형 2T 마그네트를 제작하고 있다. 권선에 사용된 도체는 Sumitomo Electric Industries, Ltd(SEI) DI-BSSCO H type이다. 이 도체는 stabilizer가 없는 기계적으로 매우 약한 도체이다. 본 논문에선 stabilizer가 없는 도체로 권선된 코일의 경우 발생 할 수 있는 문제점에 대해 나타내었고 안정된 접합을 위해 고려되어야 할 사항에 대해 논의하고자한다.

1. 서 론

초전도현상을 발견한 이후로 초전도기술을 전력 및 산업분야에 응용하고자하는 노력들이 선진국을 비롯한 세계 곳곳에서 활발히 연구되어 지고 있다. 고온초전도체는 부서지기 쉬운 금속산화물 세라믹의 고유한 특성을 가지기 때문에 대부분의 상용화된 고온초전도 도체는 금속피복체를 가진 테이프 형태로 제조된다. 테이프 형태의 도체는 측면으로 구부러질 경우 내부의 손상에 의해 초전도 특성의 열화가 생겨 전류용량이 저하되므로 기존의 구리 또는 저온 초전도 도체처럼 자유롭게 권선할 수가 없다. 그래서 고안된 방법이 팬케이크권선법인데, 초전도마그네트를 제작하는데 널리 적용된다. 고온초전도 팬케이크 코일을 제작하는데 장선의 도체가 필요하고 이 경우 반드시 접합부분이 발생한다. 이 접합은 초전도접합이 가장 이상적이지만, 열처리를 해야 하는 어려움이 있기 때문에 다심 도체에서는 거의 불가능하다. 일반적으로 부트(butt), 랩(lap), 스킵(scarf) 그리고 모타이즈(mortise)가 널리 사용된다[1,3]. 그리고 고온초전도 도체를 조각내어 병렬(parallel)구조로 접합 하는 방법이 있다. 그러나 초전도체간의 접합이 있으면 접합사이 초전도체가 아닌 금속피복체와 솔더에 의해 반드시 저항이 발생하게 된다. 높은 접합 저항을 나타내는 접합부는 전류 통전시 높은 줄열을 발생 시킨다. 특히 액체질소를 이용한 냉각방식에 비해 열적 안정성이 떨어지는 전도냉각방식인 경우 접합 부분의 저항을 줄이는 것은 매우 중요하다[2]. 본 논문에선 현재 제작하고 있는 전도냉각형 2T 마그네트의 코일사이 접합저항이 수 마이크로 옴 단위의 높은 저항이 측정되는 문제점이 발생 했고 그에 따른 원인 분석과 해결 방법에 대해 논의 하고자 한다. 제작에 사용된 도체는 Sumitomo DI-BSSCO H type 이고 총 8개의 더블팬케이크 코일을 적용 하여 7개의 코일사이 접합이 필요하게 된다. <표 1>에 권선된 도체의 사양을 나타내었다.

<표 1> Sumitomo DI-BSSCO H type (Bare wire)

lc (77K, self field)	145 A
Average Thickness, Kapton Insulated	0.28 mm
Average Width	4.3 mm
Critical Wire Tension	10 Kg
Critical Tensile Strength	150 MPa
Critical Tensile Strain	0.2 %
Critical Double Bend Diameter	70 mm

2. 본 론

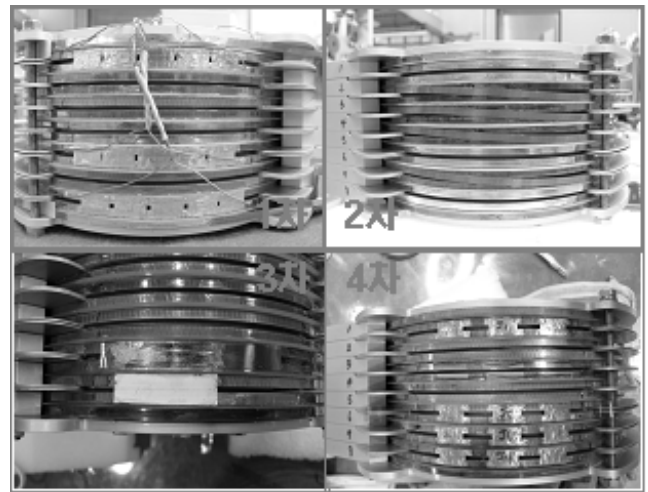
2.1 적용된 접합 방법

2T 마그네트 제작을 위해 4번에 걸쳐 적용된 접합방법과 사용된 도체를 <표 2>에 나타내었다. 1차 접합은 Sumitomo DI-BSSCO high

strength type을 이용하여 병렬구조 접합으로 4조각 5묶음으로 전체 20개 조각으로 접합 하였고, 2차 접합은 AMSC 4 ply 도체를 이용하여 랩(lap)접합을 하였다. 그리고 3차 접합은 폭(width) 12 mm인 SuperPower 2G 이용하여 40 mm 한 조각으로 접합하였다. 마지막으로 4차 접합은 1차 접합과 동일한 방법이고 개수는 4조각씩 3묶음으로 전체 12개 조각으로 접합되었다. 솔더로는 인듐비스무스(InBi)를 사용하였고 220~250 °C의 온도에서 접합 하였다. <그림 1>에 각 접합된 사진을 나타내었다.

<표 2> 적용 접합 방법

	1차 접합	2차 접합	3차 접합	4차 접합
접합 방법	parallel	lap	lap	parallel
접합 도체	Bi-2223	Bi-2223	YBCO	Bi-2223
접합 길이	86 mm	100 mm	40 mm	52 mm
Stabilizer	Bare	Brass	Bare	Bare
제조회사	SEI	AMSC	SuperPower	SEI



<그림 1> 2T 마그네트에 적용된 1~4차 접합 사진

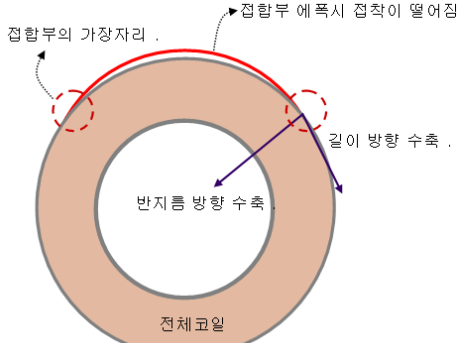
2.2 1~3차 접합 결과와 원인 분석

1~3차 접합결과 측정된 저항을 <표 3>에 나타내었다. 측정은 액체질소에서 측정 하였다. 각 측정된 저항은 1차 접합의 몇 곳을 제외하고는 모두 마이크로 옴 단위의 큰 저항을 나타낸다. 접합부의 저항성분인 은(Ag)저항과 솔더인 인듐비스무스(InBi)의 저항에 비해 매우 큰 저항이 측정되었다. 측정 후 접합부를 벗겨 내어 확인한 결과 접합부의 가장자리 도체 표면에서 미세한 크랙(crack)이 발견 되었다. 이것은 초전도 필라멘트(filament)에도 기계적 손상이 있다는 증거로 높은 접합저항의 원인으로 판단 할 수 있다.

<표 3> 1~3차 접합저항

$\mu\Omega$	Joint1	Joint2	Joint3	Joint4	Joint5	Joint6	Joint7
1차	0.196	0.169	0.864	1.06	1.23	1.80	3.56
2차	4.49	2.79	3.11	3.22	7.17	3.24	1.79
3차	1.15	2.56	1.13	1.58	2.28	1.28	1.43

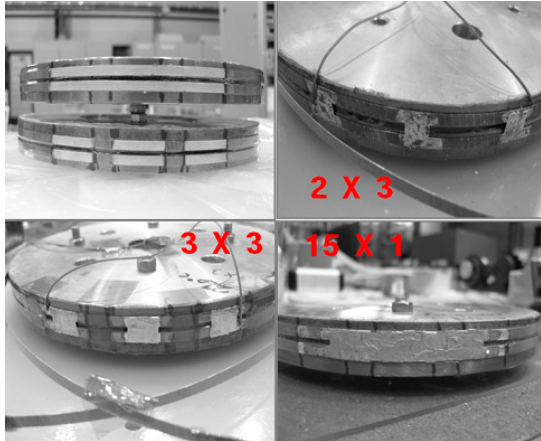
제작에 사용된 도체는 stabilizer가 없는 기계적으로 매우 약한 도체이다. Stabilizer는 초전도체가 퀘칭(quench)이 발생했을 때 전류를 분류시켜 도체를 보호하는 역할뿐 아니라 열팽창과 수축에 의해 발생하는 기계적 응력(stress)에 대한 강도를 높여주는 역할도 한다. 따라서 손상의 원인으로 접합할 때 높은 접합온도에 의해 접합되는 바깥쪽 층과 안쪽 층의 에폭시(epoxy)접착이 떨어지고, 접합부의 도체는 열팽창을 한 후 액체질소 속에서 다시 수축하게 되고 전체 코일도 <그림 2>에서 보듯이 반지름 방향과 길이 방향으로 수축한다. 이때 에폭시접착이 떨어진 접합부의 가장자리는 전체 코일과의 열수축률 차이에 의해 가장 큰 힘을 받는 것으로 판단된다.



<그림 2> 접합부의 기계적 손상을 나타내는 개념도

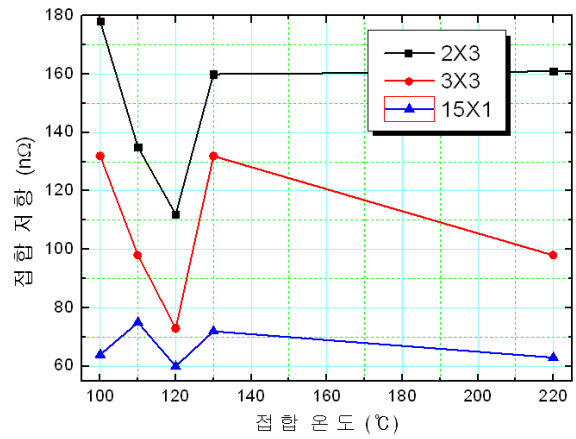
2.3 접합온도와 접합개수에 따른 접합저항 측정

높은 접합저항의 문제점으로 접합온도와 기계적으로 약한 도체의 특성에 있다고 할 수 있다. 4차 접합을 하기 전 온도에 따른 접합저항의 영향을 알아보기 위해서 권선된 도체와 동일한 도체를 이용하여 지름 180 mm의 원판을 한 턴을 감아 접합온도와 접합개수에 대한 접합저항을 측정 하였다. <그림 3>에 측정에 사용된 시편의 사진을 나타내었다.



<그림 3> 측정에 사용된 시편 사진

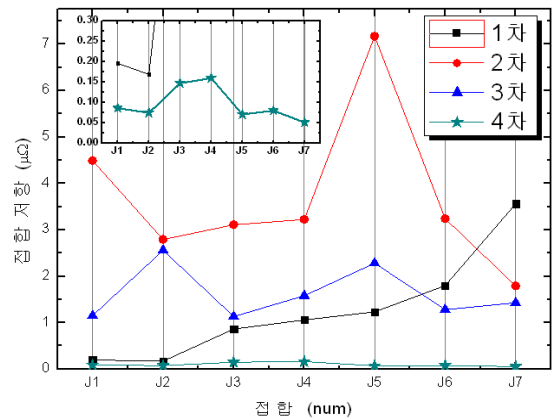
본 실험에서는 실제 접합된 조건과 비슷한 곡률을 주었지만 열팽창과 수축에 대한 변수는 고려되지 않았고 접합온도와 접합개수에 따른 접합저항을 측정하였다. <그림 4>의 측정결과에서 보면 솔더(InBi)의 녹는 점보다 적당히 높은 120 °C에서 접합 작업이 가장 효과적인 것으로 나타난다. 그러나 120 °C 보다 낮은 온도와 높은 온도에서 비슷한 접합저항을 나타내는 것으로 보아 측정에 사용된 접합 샘플의 온도범위에서는 접합온도가 접합저항에 반드시 영향을 준다고 판단되지는 않는다. 단순히 접합할 때 사용된 솔더의 양 즉 솔더의 두께와 접합면 상태의 미세한 차이에 의해 수십 나노 옴의 차이를 보인다고 판단된다. 접합할 때 솔더의 양 및 접합면의 상태가 동일하다 가정하면 병렬구조로 접합된 접합저항의 크기는 접합개수에 따른 선형적인 특성을 가진다. 즉, 한 개로 접합하는 경우 보다 2개로 접합하면 접합저항은 반으로 줄어들게 되고 3개로 접합 하면 1/3로 줄어든다. 따라서 측정된 접합저항의 크기에 기초하여 시스템이 만족하는 접합부 열손실면에서 안정된 접합개수를 예상할 수 있을 것이다. 4차 접합에서는 접합면에 받는 기계적응력(stress)의 분산과 접합할 수 있는 면적을 고려하여 4개씩 3류음(4x3)으로 접합하기로 한다[1].



<그림 4> 접합온도와 접합개수별 측정된 접합저항

2.4 4차 접합 결과

접합온도와 접합개수에 따라 측정된 접합저항의 결과를 바탕으로 하여 최대한 초전도체에 열을 가하지 않고 접합이 효과적이라 생각되는 120 °C를 접합온도로 선택하였고, 열팽창과 수축에 대한 기계적 강도를 보강하기 위해 접합 후 접합면과 코일사이 틈을 스타이캐스트(stycast)로 채웠다. <그림 5>에 1~4차 접합 후 측정된 결과를 비교하여 나타내었다.



<그림 5> 1~4차 접합저항 비교 그림

3. 결 론

Stabilizer가 없는 기계적으로 약한 도체로 권선된 코일의 접합에서 접합온도와 열팽창과 수축에 의한 초전도 필라멘트의 기계적 손상으로 높은 접합저항을 나타내는 문제점이 발생했고, 원인분석을 바탕으로 효과적인 접합온도와 스타이캐스트(stycast)를 이용한 접합부의 기계적 강도 보강으로 4차 접합에서 접합저항을 크게 줄일 수 있었다. 향후 전도냉각형 2T 마그네트 제작의 남은 부분으로 전류리드제작 및 저온용기(cryostat)와 결합작업을 수행해 나갈 것이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Myung-Hwan Sohn, "A Joining Method between HTS Double Pancake Coils", KIEE Trans, Dec, Vol, 55B, 2006
- [2] Kazufumi Tanaka, "Measurement of Joint Resistance of Bi-2223/Ag Tapes using One-turn Shorted Coil", IEEE Trans. NO. 11, March, Vol. 11, 2001
- [3] Dong Keun Park, "Analysis of a Joint Method Between Superconducting YBCO Coated Conductors", IEEE Trans, NO. 2, June, Vol. 17, 2007