

다수의 접합경계를 갖는 Nb₃Sn 케이블 접합부의 직류 저항 특성

논문
13-2-13

DC Performance of Nb₃Sn Cable Joints with multi-interfaces

이호진*, 김기백*, 연제욱**, 홍계원*, 김기만***

(Ho-Jin Lee*, Ki-Baik Kim*, Je-Uk Yeon**, Gye-Won Hong*, Kee-Man Kim***)

Abstract

The joints with multi-interfaces was expected to have low DC resistance compared with those with single interface. The small size joint specimens joined with Nb₃Sn sub-cables were fabricated to investigate the DC performance in the range of 0 to 600A transport current without external magnetic field. The joints with multi-interfaces have a few n-Ohm resistance, which is much lower than that of single lap joint. Because the interfaces between sub-cables of multi-interfaced joint are more complicated than those of single-interfaced joint, the soldering condition between sub-cables is very effective on the joint DC resistance.

Key Words(중요용어) : multi-interfaced joint(다수의 접합경계를 갖는 접합부), Sub-cable, DC resistance(직류저항), strand-to-strand joint, Lap joint

1. 서 론

초전도 자석의 코일과 코일, 혹은 코일과 전원장치를 전기적으로 연결하는 도체 접합은 초전도 자석 연구에 매우 중요한 분야이다. Nb₃Sn 초전도 케이블의 경우 수 백개의 소선(strand) 들로 구성되어 있으며, 하나의 소선 또한 많은 세심들로 구성되어 있으므로 접합부에서의 전류 흐름을 예상하기 어렵다. 접합부는 전기저항이 작고, 외부 자기장에 대하여 교류 손실 양이 적으면서, 외부 자기력에 견딜 수 있는 충분한 기계적 강도를 가져야 한다[1]. 직류 접합 저항을 줄이기 위해서는 도체 접합부의 접촉 면적을 크게 하고 전도성이 좋은 접합 재를 사용하며, 교류손실을 줄이기 위해서는 전도성이 큰 재료의 사용용 제

한하거나 외부 자기장의 변화가 적은 곳에 접합부를 위치시키는 방법을 사용한다.

자석의 접합부가 큰 접합 저항을 가지고 있으면, 운전 중 Joule 열이 발생되어 접합부의 특성을 저하시킨다. 도체와 접합부는 서로 직렬 연결되므로 자석의 케이블 도체가 높은 임계전류 값을 가진다 해도, 접합부의 전기저항이 커지면 도체 사양보다 낮은 전류로 자석을 운전할 수밖에 없으므로 자석 본래의 설계용량을 얻을 수 없다. 이처럼 자석의 접합부는 매우 중요한 설계 및 연구 대상이며, 운전 전류가 큰 대규모 자석 장치의 경우 중요성은 더욱 커진다[2].

접합부의 형태는 전기 전도도가 좋은 재료의 슬리브(sleeve)를 이용하는 랩(lap) 접합방법, 케이블의 소선과 소선 혹은 sub-케이블과 sub-케이블을 슬리브 없이 직접 접합하는 방법, 그리고 도체 간 확산접합(diffusion bonding)을 이용하는 맞대기(butt) 접합과 같은 여러 가지 방법들이 사용되고 있다. 최근, 외부 자기장이 급격히 변하는 자석의 접합부는 구리와 같은 전기 전도도가 큰 매체 사용을 줄이고, 소선과 소선 또는 sub-케이블과 sub-케이블 단위로 직접 접합시킴으로써 교류 손실을 줄이고 접합 전기 저항도 줄이는 방법을 고려하고 있다. 이와 같이

* : 한국원자력연구소 기능성재료분야
(대전 광역시 유성구 덕진동 150, Fax : 042-862-5496 E-mail : hjlee1@nanum.kaeri.re.kr)

** : 충북대학교 전기전자공학과

*** : 삼성전자 기반기술연구소 에너지 Lab.

1999년 11월 16일 접수, 2000년 1월 24일 심사완료

sub-케이블 혹은 소선 단위의 다수 접합 경계를 갖는 접합방법은 케이블 전체가 하나의 접합 면을 갖는 기존 랩 접합방법과 비교할 때, 접합저항을 줄일 수 있는 방법으로 생각되고 있다[3] [4] [5].

본 논문에서는 이처럼 소선 혹은 sub-케이블 단위로 접합되는 접합부에서의 직류 전기 저항 특성을 조사하기 위해 다수의 접합 경계를 갖는 소형 접합부 시편들을 제작한 후 접합저항을 측정하였다[6]. 랩 접합 시편을 만들어 접합 저항을 측정한 후 위의 결과와 비교하였으며, 다층 랩 접합하는 방법을 제시하고 저항을 측정하였다. 실험에 사용된 시편들은 서로 비슷한 크기로 제작하였으며, 같은 통전 전류 범위, 그리고 같은 냉각 상태에서 접합 저항을 측정함으로써 제작 변수 및 형상에 따른 저항 변화를 서로 비교할 수 있도록 하였다.

2. 다수 접합 경계를 갖는 접합부

Sub-케이블 혹은 소선 단위의 접합 경계들을 갖는 접합방법은, 케이블 전체를 슬리브에 넣어 접합하는 기존 랩 접합방법에 비해 작은 저항을 가질 수 있다. 기존 랩 접합부는 케이블 전체를 한 개의 슬리브에 넣어 고정된 후, 슬리브 사이를 땀납(solder)을 사용하여 서로 접합시키는 방법으로써, 다수의 접합경계를 갖는 접합부와 비교할 때 케이블의 두께가 크므로, 즉 많은 수의 소선들 사이를 전류가 흘러야 하므로, 전류 흐름 거리가 멀어져 전압 강하가 커진다. 또한 접합 면이 상대적으로 작으므로 다수의 접합경계 접합부에 비해 저항이 클 것으로 예상된다.

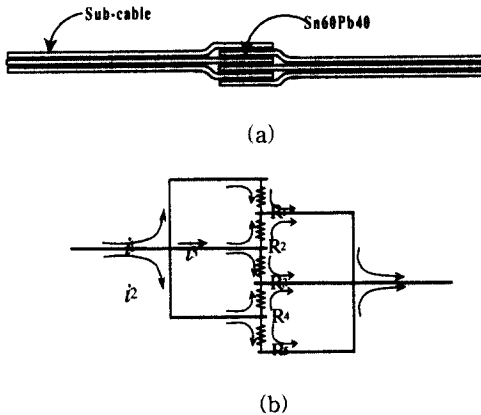


그림 1. 다층 랩 접합부의 개략도 및 등가 회로도
Fig. 1. Schematic drawing of multi-layer lap joint and its electric circuit.

다층 접합 랩 접합부는 그림 1-a과 같은 형태로 각각의 sub-케이블들을 각각의 슬리브에 넣어 고정된 뒤, 여러 층에서 서로 접촉하도록 접합하는 방법이다 [7]. 그림 1-b의 회로도 및 식 1에서 보듯이 각 슬리브 내부 저항과 접합 면에서의 저항을 합한 저항 R이 각 층에서 동일하다고 가정하는 경우, 전체 접합부에서의 전압 강하는 식 1에서와 같이 접합 면 수에 역 비례하여 R/5 정도의 저항을 갖는 것으로 계산된다.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R \quad (1-1)$$

$$Z_1 = R_1 = R, \quad Z_2 = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3} = \frac{R}{2},$$

$$Z_3 = \frac{R_4 \times R_5}{R_4 + R_5} = \frac{R}{2} \quad (1-2)$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} = \frac{5}{R}, \quad Z = \frac{R}{5} \quad (1-3)$$

여기서 R은 소선들 사이, 소선들과 구리 슬리브 사이, 슬리브, 그리고 납의 저항을 합한 저항, Z는 접합부 전체 저항, Z_i는 각각 분리된 도체에서의 저항을 나타낸다.

슬리브 없이 sub-케이블 단위로 직접 접합되는 소선-소선(strand-to-strand : STS) 접합부 개략도는 그림 2-a와 같다. 튜브 형태의 소선 지지대(strand support) 위에 원주 방향으로 돌려가면서 sub-케이블 단위로 교대 배치 및 접합시킨다. 그림 2-a는 sub-케이블의 기본 접합 pattern을 나타내고 있으며, 그림과 같은 sub-케이블간의 분포 pattern이 3개 있는 접합부의 등가 회로도는 그림 2-b와 같이 표현될 수 있다. 계산 결과 저항은 식 2와 같이 접합 경계의 개수에 역 비례 하여 R/6로 감소되는 것을 알 수 있다.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R \quad (2-1)$$

$$Z_1 = \frac{R_6 \times R_1}{R_6 + R_1} = \frac{R}{2}, \quad Z_2 = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3} = \frac{R}{2},$$

$$Z_3 = \frac{R_4 \times R_5}{R_4 + R_5} = \frac{R}{2} \quad (2-2)$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} = \frac{6}{R}, \quad Z = \frac{R}{6} \quad (2-3)$$

회로도에서 보듯이 저항 배열이 대칭이므로 접합부의 도체에 고르게 전류가 분포됨을 알 수 있으며, 형태상 많은 sub-케이블 단위로 접합할 수 있으므로 접합부의 각 도선에 흐르는 전류는 더욱 고르게 분포될 수 있다.

이와 같이 sub-케이블 단위로 접합되는 접합부들은 회로도에서 보듯이 도체들이 접합부에서 병렬 연결되어 전류가 나뉘어 흐르게 되어 전체 접합저항이

다수의 접합경계를 갖는 Nb₃Sn 케이블 접합부의 직류 저항 특성……이호진, 김기백, 연제욱, 홍계원, 김기만

작아지는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 단층 랩 접합시편, 다층 랩 접합시편, 그리고 각각 다른 소선 개수를 갖는 sub-케이블 단위로 연결되는 소선-소선 접합시편을 만들어 직류 저항을 비교하였다.

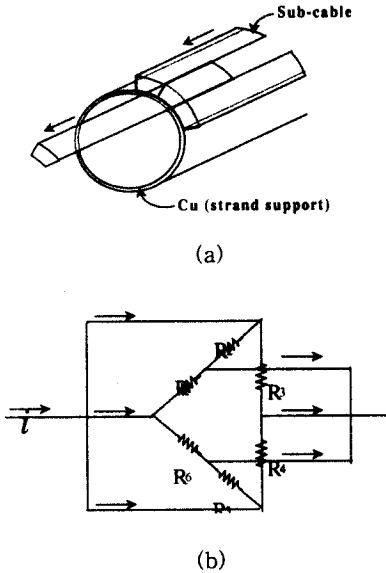


그림 2. 소선-소선(strand-to-strand) 접합의 개략도 및 등가 회로도

Fig. 2. Schematic drawing of strand-to-strand joint and its electric circuit

3. 시편 제작

접합부 시편들을 제작하기 위해 표 1과 같이 EM-LMI에서 제작된 상용의 Cable-In-Conduit (CIC) 도체 케이블을 사용하여 시편용 소형 CIC 도체를 제작하였다[8]. 144개의 strand를 갖는 사각 단면 자켓(jacket)의 모서리를 milling machine으로 절삭하여 자켓을 제거한 후, 최종 단계 꼬임(twisting) 케이블을 풀어 3×3×4의 sub-케이블을 축소 접합시편의 케이블로 사용하였다.

케이블을 구리 튜브 안에 넣은 후 인발 작업을 통해 구리 튜브를 외경 8.4 mm 까지 줄여 최종 약 45 %의 공극율(void volume fraction)을 갖는 CIC 도체를 제작하였다. 구리를 이용하여 자켓팅한 이유는 시험될 접합시편이 액체 헬륨 안에서 냉각되어 실험되므로 헬륨이 자켓 내부로 흐를 때 생기는 특성을 고려 할 필

요가 없으며, 자켓 외부에 전압 단자를 설치하는 경우 케이블과 자켓과의 전압 차이를 줄이기 위해서이다.

표 1. 접합에 사용된 도체 및 소선의 물성

Table 1. Properties of the strand and conductor for joining

Strand		
Diameter	0.81 mm	
Superconducting Mat'l	Nb ₃ Sn(+Ti 1%)	
Non-Cu Critical Current Density at 12T, 4.2K	> 700 A/mm ²	
Non-copper Hysteresis Loss ±3 T	< 600 mJ/cc	
Manufacturer	EM-LMI	
Conductor	LMI supplied	Manufactured for test
Jacket Material	SS316LN	Copper
Number of strand	144(3×3×4)	36(3×3×4)
Sperconducting	112	28
Copper	32	8
Void Fraction	36 %	45 %
Outside Dimension	13.8×13.8mm	OD 8.4mm
Jacketing process	Drawing	

표 2. 열처리 조건

Table 2. Heat treatment recipe

25℃/hr heating	220℃ 175 시간 유지
50℃/hr heating	340℃ 96 시간 유지
75℃/hr heating	650℃ 180 시간 유지
100℃/hr cooling	
* 25cc/min argon supply	

접합부가 될 부분 소선들의 크롬 코팅(Cr coating)은 염산에 담구어 제거하였다. 또한 열처리 중 주석(Sn)이 용융되어 소선 끝단으로 누출되는 것을 방지하기 위해 GTAW 용접으로 소선들의 끝단을 용융 sealing 하였다. 실험에 사용될 여러 형상 및 조건의 접합부를 조립한 후, 움직이지 않도록 클램프로 고정된 상태에서 표 2와 같은 조건으로 argon 분위기에서 열처리하였다. 접합부 납땜은 Sn60Pb40 땜

납을 이용하여 열처리 후 수행하였다. 최종 시편의 개략적인 형태는 그림 3과 같다. 저온조(cryostat) 안에서 액체 헬륨으로 냉각한 후 저항을 측정해야 하므로 냉각 횟수를 줄이기 위해, 1개의 시편에 2개의 서로 다른 접합부를 제작 설치하여 한번 냉각으로 2개 접합부에 대한 저항 측정을 할 수 있도록 하였다.

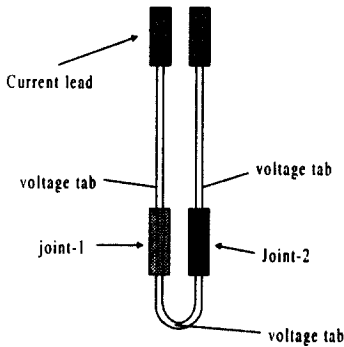


그림 3. 직류 저항 측정용 위한 시편 개략도
Fig. 3. Test specimen for measurement of DC resistance

4. 접합 시편의 종류

슬리브를 사용하지 않는 소선-소선 접합의 경우, 적은 개수의 소선들로 구성된 sub-케이블을 묶음 단위로 접합해야 많은 접합 경계 면들을 얻을 수 있으므로 작은 저항을 얻을 수 있으리라 예상할 수 있다. 이를 확인하기 위해 3개, 9개, 18개의 소선 갯수들을 접합 묶음 단위로 하는 소선-소선 접합 시편을 제작하였다. 또한 소선-소선 접합과 랩 접합과의 저항 차이를 확인하기 위해 랩 접합시편을 제작하였다. 랩 접합부의 소선들을 슬리브로 감싼 후 프레스로 눌러 소선들과 슬리브 사이의 접촉을 좋게 하였다. 이 접합 방법은 열처리 및 납땀 작업 중 소선들의 손상을 막을 수 있는 장점을 가진다. 랩 접합의 특성을 가지면서 소선-소선 접합과 같은 특성을 갖도록 하기 위해 9개의 소선들을 묶음 단위로 하여 각각의 sub-케이블들을 구리 슬리브로 고정된 후, 다층 접합되는 시편을 제작하였다. 슬리브 안 케이블의 소선들 사이의 납땀은 수행하지 않았다.

소선-소선 접합은 선재들 사이에 이루어지는 접합이므로 접합부분이 랩 접합부에 비해 불 균일하므로 납땀시 납이 충분히 소선들 사이로 침투되지 못하는

경우가 생긴다. 케이블 사이로 납의 침투가 완전하지 못한 경우, 접합저항을 예상하기 위해 9개 소선들을 묶음 단위로 하는 소선-소선 접합부에서 1개의 sub-케이블에 의도적으로 불충분한 납을 침투시켰다. 각 시편들 단면에서의 sub-케이블 분포 pattern은 그림 4와 같으며, 각 접합부 접침 길이는 약 4cm가 되도록 하였다.

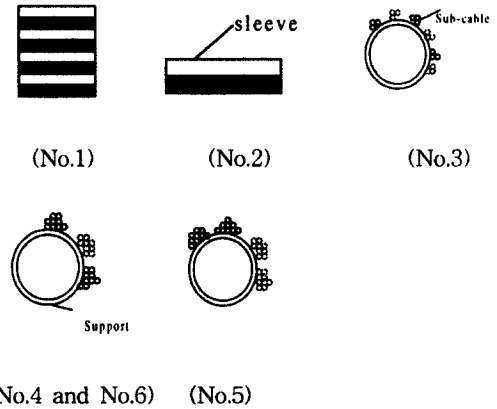


그림 4. 접합시편 단면의 sub-케이블 분포 pattern
(No.1) : 4-layer lap joint, (No.2) : single layer lap joint, (No.3) : 3 strand sub-cable joint, (No.4) : 9 strand sub-cable joint, (No.5) : 18 strand sub-cable joint, (No.6) : 9 strand sub-cable joint(lack of solder)
Fig. 4. Distribution pattern of sub-cables in the cross-section of the joint specimens.

5. 실험 결과 및 토의

소형 접합 시편들을 저온조에서 액체헬륨에 담겨 4.2 K로 냉각한 상태에서 외부 자기장 없이 일정한 전류를 단계적으로 흘리면서 접합부 양단에서의 전압 강하를 측정하여 접합부의 직류 전기저항을 측정하였다. 그림 5에서 보듯이 실험 구간의 전류영역에서 전류와 전압 강하 값은 비교적 직선적 관계를 가지고 있음을 알 수 있었다.

그림 5에서 linear fitting 하여 얻은 각 접합부의 직류 전기 저항은 표 3과 같다. 상온에서, 즉 초전도 체로 냉각되지 않은 상태에서의 저항은 표에서 보듯이 단층 랩 접합부를 제외하고는 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 표 3에서 볼 수 있듯이 다층 랩 접합부

다수의 접합경계를 갖는 Nb₃Sn 케이블 접합부의 직류 저항 특성.....이호진, 김기백, 연제욱, 홍계원, 김기만

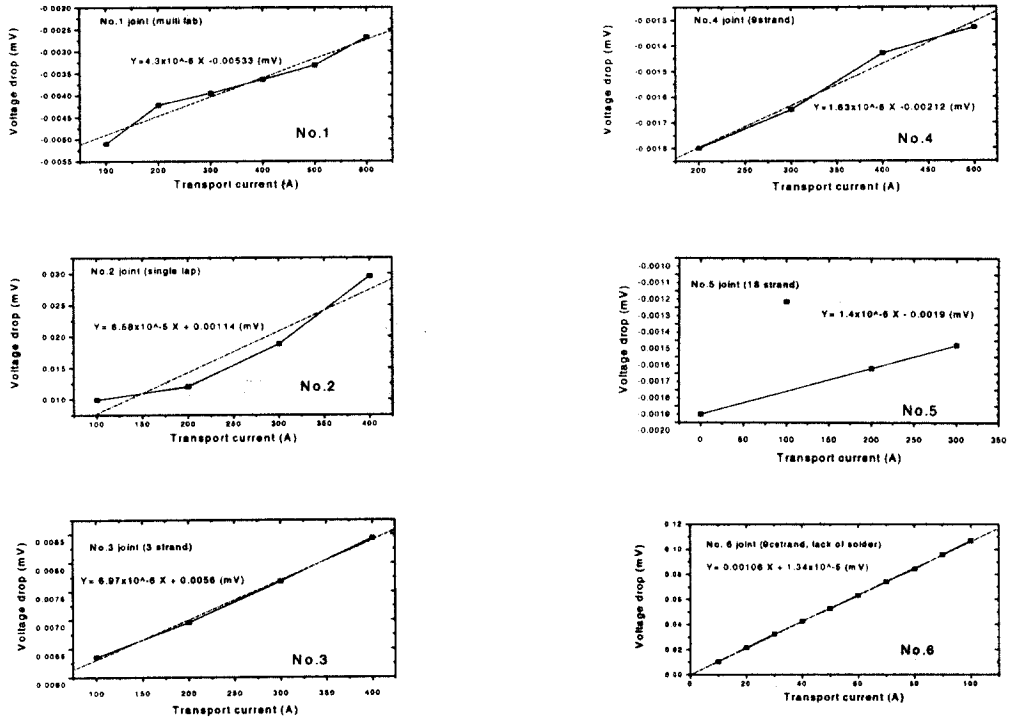


그림 5. No.1에서 No.6 시편에 대한 통전 전류에 대한 전압 강하 관계 곡선

Fig. 5. Transport current vs. Voltage drop relations of each joint specimen (from No.1 to No.6 specimens)

는 상온에서 단층 랩 접합부에 비해 약 1/2 정도의 저항 값을 가지고 있으나, 도체가 초전도성을 가지게 되면 전류의 흐름이 바뀌게 되어 약 1/10 정도의 저항 차이를 가지게 되는 것을 알 수 있다.

표 3. 각 접합시편의 직류저항 측정전
Table 3. Measurement of DC resistance for each joint

시 편	상온 (I=1-4A) mOhm	LHe (4K) nOhm	비고(크기)
No.1 : multilap	0.3637	4.3	8.5×40mm
No.2 : singlelap	0.6405	65.8	13.5×40mm
No.3 : 3strand	0.3429	6.97	40mm overlap
No.4 : 9strand	0.3593	1.63	40mm overlap
No.5 : 18strand	0.4039	1.4	38mm overlap
No.6 : 9strand (lack of solder)	0.3752	1000	40mm overlap

표 3의 결과를 보면 다수의 경계를 갖는 다층 랩 접합시편 및 소선-소선 접합부의 저항은 수 n-Ohm 정도의 값으로, 단층 랩 접합된 시편에 비해 크게 낮은 것을 확인할 수 있었다. 소선-소선 접합의 경우 sub-케이블을 구성하는 소선 개수가 증가함에 따라 예상과 달리 저항이 미소하게 감소하고 있다. 그림 6은 3개의 소선을 갖는 sub-케이블들이 서로 교대로 배열된 접합부 (No.3) 시편과, 9개 소선을 갖는 sub-케이블들이 서로 교대로 배열된 접합부 (No.4) 시편의 절단 면을 나타내고 있다.

그림에서 보듯이 No.3 접합 시편의 경우 케이블 층의 폭이 좁고 촘촘히 배열되어 있으므로 납이 충분히 침투하지 못하고 있다. 이에 비해 9개의 소선으로 구성된 sub-케이블을 갖는 접합부는 접합부의 폭이 크고 납이 침투할 수 있는 공간이 넓어 충분한 납이 침투된 것으로 보인다. No.3 시편의 절단면에서 보듯이 3개 소선들로 구성된 sub-케이블 들이 한 층으로 소선 지지용 튜브(strand support tube) 위에 얇게 배열되어 있으므로 전류의 흐름 단면적이 좁게

개의 소선을 sub-케이블로 하는 접합의 경우, 9개의 소선을 sub-케이블로 하는 접합부에 사용된 작은 직경의 소선 지지 튜브를 사용하고, 3개의 소선 sub-케이블을 두께 방향으로 같은 pattern으로 적층하여 충분한 두께로 접합하게 되면 접촉 경계 면적을 그대로 유지하면서, 전류 흐름 단면적도 넓힐 수 있으므로 작은 접합 저항을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

소선들의 묶음 단위로 하여 접합하는 경우, 넓은 접촉 경계 면적을 얻을 수 있으므로 작은 저항을 얻을 수 있으나, 접합 면이 넓고 불 균일하므로 완벽한 납땜이 수행되지 못하는 경우 도리어 저항이 증가할 수 있다. 이와 같은 결과는 시편 No.6의 경우, 즉 납땜이 충분히 이루어지지 않은 시편의 경우, 1000 n-Ohm의 매우 높은 값을 보이고 있는 것으로 추론될 수 있다. 납땜이 충분히 이루어지지 않은 경우 같은 형태의 시편이라도 매우 높은 값을 나타내므로 납땜의 정도가 접합 저항의 매우 중요한 인자임을 알 수 있다. 따라서 표 3에서 볼 수 있는 다수 접합 경계를 갖는 접합 시편들 사이의 저항 차이는 접합 형태뿐만 아니라 납땜의 정도 차이에서도 기인한 것으로 생각 할 수 있다.

6. 결 론

Sub-케이블 단위의 다수 접합 경계를 갖는 Nb₃Sn 초전도 케이블 소형 시편을 제작하여 형상에 따른 접합부의 직류저항 특성을 조사하였다. Sub-케이블 단위로 접합되는 경우 수 n-Ohm 정도의 접합 저항을 얻었으며, 이 값은 단층 랩 접합에 비해 매우 작은 값을 확인할 수 있었다. 3개의 소선 단위로 접합된 시편의 경우 전류 흐름 단면적이 상대적으로 작고 납땜 작업성이 좋지 않아, 9개 소선 단위 접합시편에 비해 접합 저항이 다소 높게 측정되었다. 이 결과로부터 접합부의 형상과 납땜의 조건이 접합부의 저항에 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 수행하는 KSTAR project의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. P. Bruzzone, et al., "Design and R&D Results of the Joints for the ITER Conductor", Transactions on Applied Superconductivity,

그림 6. No.3, No.4 시편의 절단면(소선 직경 0.81 mm). (a) 3 소선 sub-케이블 접합, (b) 9 strand sub-케이블 접합

Fig. 6. Cross-section of No.3 and No.4 joints. Strand diameter is 0.81mm. (a) 3 strand sub-cable joint, (b) 9 strand sub-cable joint.

형성되고, 납이 불 충분하게 케이블 사이에 침투되는 경우 전류의 흐름 길(path)이 적어 그 만큼 저항이 증가한 것으로 생각된다. 이와 같은 결과를 볼 때, 3

다수의 접합경계를 갖는 Nb₃Sn 케이블 접합부의 직류 저항 특성.....이호진, 김기백, 연제욱, 홍계원, 김기만

- Vol. 7, No. 2, pp. 461-464, June 1997.
2. Nicolai N. Martovetsky, "Analysis of Losses in ITER Joint in a Varying Parallel Field", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 266-269, June 1997.
 3. C. Y. Gung, et al., "Design and Manufacture of the US-ITER Pre Prototype Joint Sample", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 469-472, June 1997.
 4. Y. Nunoya, et al., "Development of 46 kA layer to layer joint for ITER-CS Model Coil", ICEC16/ICMC proceedings, pp. 775-778.
 5. "Fabrication of 40 kA Superconducting Sample-Under-Test For Samsung", Final Report, Plasma Science and Fusion Center, MIT, 1998.
 6. O. Herbelot, et al., "Superconducting Cable Joint Resistance", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, pp. 1850-1853, March 1991.
 7. 이호진 외, "Nb₃Sn 초전도 CICC의 sub-cable to sub-cable 접합 및 접합저항 측정", 99 연도 한국초전도 저온공학회 학술대회, pp. 89-92, 1999.
 8. "차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발 사업, 초전도 자석계통 개발" 삼성 전자(주) 기반기술연구소 1단계 연구보고서, 과학기술부, pp. 227-229, 1998.