

Calculation of DC resistance of strand-to-strand joints for KSTAR

Ho-Jin Lee*, Hyun-Il Nam¹, Ki-Baik Kim, Gye-Won Hong²

Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon, Korea

¹ *Chungbuk National University, Cheongju, Korea*

² *Korea Polytechnic University*

Received 20 August 2001

KSTAR 용 소선-소선 접합부의 직류저항 계산

이호진*, 남현일¹, 김기백, 홍계원²

Abstract

Since the strand-to-strand type joint for CICC (Cable-In-Conduit Conductor) is small in size and has low DC resistance, it is expected to be useful type for a superconducting magnet system which had a compact structure like the KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) coil system. The DC resistance is changed according to the distribution patterns of strands in cables connected together in the joint. A commercial code was used for the calculation of the DC resistance. With the decrease of outer diameter of the joint, which means the increase of strand volume fraction in the joint, the calculated DC resistance decrease rapidly and non-linearly. The variation of resistance depends mainly on the volume fraction of solder which has higher resistivity than copper. The resistance decrease inversely with the increase of the length of the joint. The resistance increase with increase of number of triplets in each stack contacted with that of another terminal cable. In case of the strand-to-strand joint that has 62mm of outer diameter, 52mm of inner diameter, 100mm of overlap length, and four triplets in each stack, the calculated DC resistance is less than 1 n-Ohm.

Keywords : superconducting magnet, strand-to-strand joint, calculation of DC resistance

I. 서론

대규모 초전도자석을 전자기적으로 연결하는 접합부는 자석계통에서 취약한 부분이 되지 않도록 설계 및 제작되어야 한다. 접합부

는 작은 직류저항과 적은 교류손실을 가져야 하며, 기 계적으로 충분한 강도를 가져야 한다[1]. 접합부의 직류저항이 큰 경우 운전 중 발생하는 줄(joule) 열에 의해 접합부 소선들이 초전도성을 잃어버리게 되며, 이 현상이 자석 전체에 전파됨으로써 자석 계통의 심각한 파손을 일으키게 할 수 있다. 따라서 교류손실을 고려하는 한도 내에서 작은 직류저항

*Corresponding author. Fax : +82 42 862 5496

e-mail: hjee1@kaeri.re.kr

을 갖도록 접합부를 설계 제작해야 한다.

핵융합용 자석이나 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) 장치와 같은 대규모 초전도자석에는 도관케이블 도체 (CICC: Cable-in-Conduit Conductors) 를 사용하여 통전 전류를 크게 하고 도체의 냉각을 쉽게 한다. 도관케이블 도체는 스테인레스 스틸 혹은 Incoly 와 같은 금속재료로 도관 (conduit) 을 만들고, 내부에 케이블을 넣은 후 소성가공 및 용접작업으로 제작된다[2]. 도관케이블 도체 중 고 자장, 대 전류 초전도자석에 주로 사용되는 Nb₃Sn 도관케이블 도체는 열처리 후 소선이 기계적으로 취약해지고, 많은 소선들이 접합부에서 무작위적으로 서로 접촉되므로 단심 선재 접합 방법과는 다른 특성을 갖는다. 도관케이블 도체 접합은 접합부를 지지하기 위한 구조물의 재료 및 형상, 그리고 소선들의 분포 형태에 따라 직류저항 및 교류손실과 같은 접합 특성이 변화하게 된다.

Fig. 1(a) 와 같은 랩(lap) 접합부는 케이블 전체가 서로 길이 방향으로 겹쳐 연결된 형태로서 초전도 케이블 접합에 많이 사용되고 있으며, 초전도 자석들의 형태나 운전 조건 등을 고려하여 수정 변형 시킨 여러 가지 발전

된 랩 접합 방법들이 보고되고 있다[3,4]. KSTAR 용 초전도자석은 치밀한 (compact) 구조 때문에 접합부 설치의 공간이 협소하므로 작으면서도 충분한 접합 특성을 나타낼 수 있는 접합 방법이 필요하다[5]. 따라서, 작은 직류저항과 적은 교류손실을 가지면서 크기가 작은 Fig. 1(b) 와 같은 소선-소선 (strand-to-strand) 접합 방법이 제시되었다. [6,7].

Fig. 1(a) 에서 보듯이 랩 접합부는 전기전도도가 좋은 구리와 같은 재질을 이용하여 슬리브 (sleeve) 를 만들고 이 안에 케이블 전체를 넣어 압착 (compaction) 한다. 이 과정을 통해 소선들 사이의 간격을 줄이고, 열처리 후 접합 과정 중 케이블의 손상을 방지하며, 일정한 공극 부피 분율 (void volume fraction) 을 얻을 수 있다. 열처리 후 납땜 작업은 슬리브와 슬리브를 연결시키기 위해 수행되므로, 직류 저항을 감소시키기 위해 접촉면적을 증가 시키는 방법에는 한계가 있다.

소선-소선 접합부는 슬리브를 사용하지 않고 양쪽 단말부의 소선과 소선들 사이에서 접합이 일어나도록 함으로써 접촉면적을 넓힐 수 있다. 실제로는 작업 조건을 고려하여 일정한 갯수의 소선들을 묶은 소선 다발들 사이에서 전류가 전달 되도록 한다. 소선 다발들 사이의 넓은 접촉 면적으로 인해 작은 접합 저항을 얻을 수 있으므로 접합부의 길이를 줄일 수 있으며, 접합부의 크기가 작아지므로 교류손실 또한 줄일 수 있다. 열처리 후 취약해지는 Nb₃Sn 소선 케이블을 접합하는 경우 소선의 손상을 방지하기 위해 Fig. 1(b) 와 같이 유연성이 있는 연결 초전도도체 (jumper) 를 사용해야 하므로 한 개의 접합 위치에 두 개의 소선-소선 접합부가 필요하다.

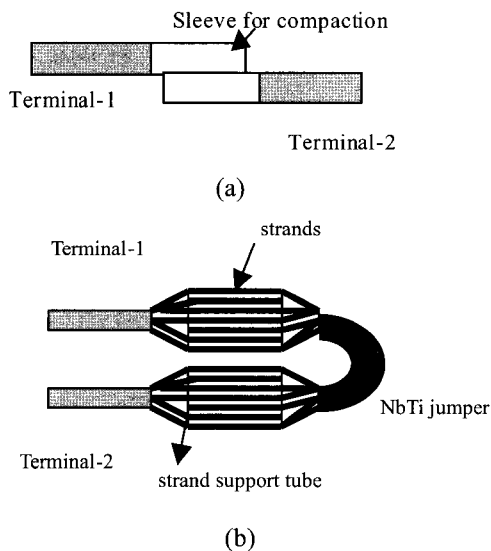


Fig. 1. Schematic drawings (a) lap joint (b) two strand-to-strand joints for joining of Nb₃Sn cables.

II. KSTAR 용 소선-소선 접합부

KSTAR 용 TF(Toroidal Field) 코일의 케이블은 0.78 mm 직경을 갖는 486 개의 소선이 꼬여있는 형태이며, 접합부에서는 두 개의 케이블에서 나온 총 972 개의 소선들이 서로 연결된다[5]. Nb₃Sn 케이블은 열처리 후 기계적으로 취약해지므로 Fig. 1(b) 와 같이 유연한 NbTi 도관케이블 도체를 제작하여 두개

의 Nb₃Sn 케이블을 서로 연결시킨다. 케이블 손상을 방지하기 위해 Nb₃Sn 도관케이블의 단말부 작업은 열처리 전에 미리 수행되어야 한다.

단말부 작업은 금속도관 및 랩 (wrap) 을 벗기고, 꼬인 케이블을 삼-연선 (triplet) 단계 까지 풀어낸다. 삼-연선은 세 개의 소선이 서로 꼬여있는 케이블 연선의 기본 단계이다. KSTAR 접합에서는 작업성을 고려하여 소선과 소선들의 연결이 아닌 삼-연선과 삼-연선들의 연결로 구성된다. 네 개의 삼-연선들은 Fig.2 와 같은 소선 지지튜브 위에 원주방향으로 9° 씩 간격으로 가지런히 정렬된다. 열처리 후 연결 케이블의 삼-연선들을 끼워넣을 공간을 확보하기 위해 스테인레스 스틸 스페이서 (spacer) 를 미리 끼워 넣는다. 열처리 후 스페이서를 제거하면서 그 공간에 NbTi 삼연선 네 개씩을 끼워넣은 후 스틸 밴드로 조이면서 납땜하여 소선들을 접합한다[6].

KSTAR 자석은 Nb₃Sn 케이블을 사용하여 한 개의 접합 위치에서 두개의 소선-소선 접합부를 가지므로 랩 접합부와 직류저항을 비교하는 경우 두개의 소선-소선 접합부의 직류저항과 그 값을 비교해야 한다.

접합부의 180° 위치에 운모 판을 설치하여 원주방향의 맴돌이 전류 (eddy current) 를 차단시킴으로써 교류손실을 감소시킨다.

소선-소선 접합부는 케이블을 압착하는 슬리브가 없으므로 접합부내에서 소선의 부피 분율을 정확히 조절하기 어려울 뿐만 아니라, 일정한 소선들의 분포 형태를 얻기 어렵다. 따라서 불 규칙적인 접합 변수에 대하여 충분히 작은 직류저항을 얻을 수 있는 지를 확인

하기 위해 모델링을 통한 직류저항 범위를 계산 및 확인 하는 과정이 필요하다.

III. 직류저항 계산을 위한 모델링

소선-소선 접합부의 설계변수 및 제작변수에 따른 직류저항의 변화를 계산하기 위해 상용 ANSYS 코드를 사용하였다. 3 차원 전기-열 해석 요소 (element) 를 선택하여 접합부의 직류저항을 계산하였다[8]. 접합부 임의 단면에서 삼-연선들의 단면형상은 세 개의 소선이 길이 방향으로 서로 꼬여 있어 일정하지 않으나, 본 연구에서는 접합부 길이 방향으로 일정한 형상을 갖는 연속체로 가정하였다. 삼-연선 중 두 개는 초전도 소선이며, 한 개는 구리 소선이므로 삼-연선 물성은 구리와 초전도체의 면적 비로 계산하여 Table 1 의 삼연선의 비 저항을 얻었다. 삼-연선은 갯수가 많고, 형상이 복잡하여 모델링이 어려우므로 같은 면적을 갖는 사각 단면의 도체로 가정하였다. 계산에 사용된 재료의 물성은 Table 1 과 같다. ANSYS 의 경우 통전 전류에 따른 선재의 비저항의 변화를 고려하기 어려우므로 소선들이 항상 초전도성을 유지하는 것으로 가정하였으며, 초전도체의 비저항은 구리나 혹은 납에 비해 매우 작게 가정하여 초전도체에 의한 전압강하를 거의 무시할 수 있도록 하였다.

계산 영역은 접합부 전체의 1/4 에 해당하는 영역을 사용하였으며, 삼-연선은 계산 영역 내에서 규칙적으로 분포되도록 하였다. 접합부의 내경을 결정하는 Cu-10Ni 소선 지지

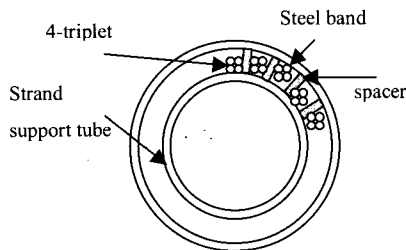


Fig. 2. Arrangement of triples in each slot composed of stainless steel spacers before heat treatment.

Table 1. Resistivity of joint materials at 4K[9]

Materials	Resistivity (Ohm-mm) at 4K
Tripлет	
Axial direction	0.2×10^{-13}
Radial direction	14.2×10^{-8}
Copper (RRR=100)	17×10^{-8}
Solder (Sn50Pb50)	6.0×10^{-6}
Cu-10Ni	167×10^{-6}

브는 Table 1 과 같이 구리나 땀납에 비해 비저항이 크며, 전류 흐름에 영향을 주지 않는 위치에 있으므로 모델링에 고려하지 않았다.

삼-연선들을 일정하게 분포 시키기 위해 케이블의 162 개 삼-연선 중 160 개의 삼-연선이 해석영역에 분포되었다고 가정하였다. 두개의 단말부 사이에서 전류가 땀납을 거쳐 흐르도록 양쪽 단말부에 일정한 전압 차가 발생하도록 경계조건을 주었다. 또한, 전체 통전 전류 40 KA 가 삼-연선들의 위치 및 조건에 따라 재 분배될 수 있도록 하였다. 접합부의 직류저항은 식 1 과 같이 접합부에서 시간당 발생하는 줄 (joule) 열을 통전 전류의 제곱으로 나누어 계산하였다.

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (1)$$

여기서 R 은 접합부 양단의 직류저항, P 는 시간당 발생 joule 열, I 는 통전 전류이다. 본 해석에서 외부 자기장은 영향을 고려하지 않았다.

IV. 결과 및 고찰

1. 접합부 압착의 영향

도체가 서로 겹쳐 접합되는 경우 직류저항은 식 2 와 같이 표현된다. 식 2 에 의하면 직류저항은 도체와 도체사이의 거리에 비례한다. 소선-소선 접합부를 반경방향으로 압착하는 경우, 즉 소선-소선 접합부의 외경을 줄이는 경우 소선과 소선 사이의 거리가 가까워지므로 접합저항이 감소될 것을 예상할 수 있다 [7].

$$R_{sl} = \frac{\rho_{sl} \delta_{sl}}{\alpha l_{sl}} \quad (2)$$

여기서 R_{sl} 는 직류저항, δ_{sl} 는 도체사이의 거리, α 는 도체의 폭, l_{sl} 는 도체가 겹쳐진 길이이다.

KSTAR 용 소선-소선 접합부의 내경은 소선 지지튜브로 고정되며, 외경은 납땀 과정 동안 충분히 압착되도록 해야 한다. 압착 정도의 차이에서 발생하는 직류저항의 변화를 예상하기 위해 여러 가지 소선 부피 분률에

대하여 직류 삼-연선으로 구성된 접합부의 경우 소선들의 부피 분률이 증가할수록 직류저항은 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다.

식 2 에서 보듯이 두개의 도체사이의 직류저항은 도체 사이의 거리에 선형적으로 변화하나, 소선-소선 접합부의 경우 많은 갯수의 소선들이 서로 관련되어 분포하고 있으며, 압착이 큰 경우 삼-연선들 사이의 직접적인 접촉이 발생하므로 소선들의 부피 분률 증가에 따라 직류저항은 Fig. 3 과 같은 비 선형적인 변화를 나타내는 것으로 예상된다.

계산 결과 접합부 압착을 통해 외경을 줄이는 경우 직류저항이 크게 감소하는 것을 알 수 있으므로 납땀 작업 중 접합부 외경을 조절할 수 있는 장비의 필요성을 예상할 수 있다.

Nb_3Sn 소선 케이블의 경우 열처리 후 기계적으로 취약해지므로 접합부의 외경을 압착하는데 한계가 있다. 실제 작업을 통해 외경 62 mm, 즉 소선 부피 분률이 54 % 인 경우 압착의 한계로 예상되며, 모델링의 경우 이 값에서 삼-연선들의 접촉이 발생하기 시작했다.

Fig. 3 에서 점선 곡선은 통전전류가 전체 삼-연선에 일정하게 분포되는 경우 직류저항의 변화이다. 양단의 전압을 일정하게 하여 계산한 결과와 비교할 때 거의 비슷한 결과를 얻었다. 이는 네 개의 삼-연선으로 구성된 단위 소선다발을 사용하는 접합부의 경우 양단

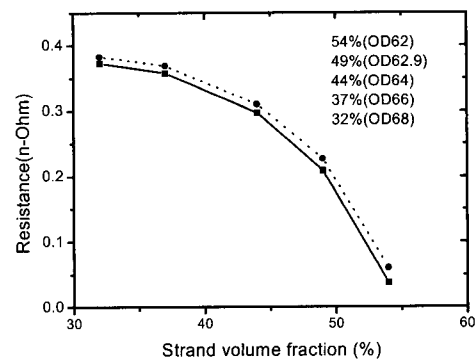


Fig. 3. Variation of calculated DC resistance of strand-to-strand joint with change of strand volume fraction in the joint (solid line : constant voltage drop, dotted line : constant current distribution).

에서 최소의 전압강하가 되도록 잘 배열되어 있음을 나타낸다.

Fig. 4 는 외경 62 mm, 내경 52 mm, 겹침길이 100 mm 그리고 네 개의 삼-연선으로 구성된 단위 소선 다발들을 갖는 접합부의 x 축 및 y 축의 단면 해석 영역에서 계산된 전압 분포를 나타낸 그림이다. 전압의 분포 형태가 단위 소선 다발의 분포 형상으로 원주 방향으로 일정하게 반복되는 것을 알 수 있다. 또한 삼-연선 길이방향으로 전압 분포가 일정한 형태를 나타내고 있는데 이것은 초전도체의 비저항이 매우 작아 소선 길이 방향으로 전압 강하가 발생하지 않고 단지 삼-연선과 삼-연선 사이의 납에서 주로 전압 강하가 발생하기 때문이다.

Fig. 3 에서 보듯이 접합부 외경이 68 mm 인 경우에 약 0.36 n-Ohm 정도의 값을 얻을 수 있었으며, 두 개의 소선-소선 접합부를 갖는 Nb₃Sn 케이블 접합의 경우 이 값의 두 배에 해당하는 직류저항도 1 n-Ohm 이하인 것을 알 수 있다. 물론 여기에서 삼-연선과 삼-연선들 사이는 완벽한 납땜이 이루어져야 한다는 모델링 가정을 만족해야만 한다. Shahin 의 실험 결과에 의하면 소선들이 무작위로 분포되어 있는 두개의 소선-소선 접합부의 직류저항은 약 0.35 n-Ohm 이었다[6]. 이 결과와 Fig. 3 의 계산 결과를 비교하는 경우

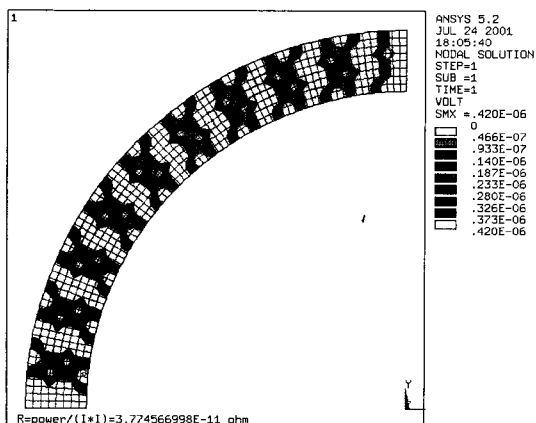


Fig. 4. Calculated voltage distribution on the cross section of the joint. (inner diameter 52 mm, outer diameter 62 mm, four triplet stack, and joint length 100 mm)

비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

2. 접합부 길이의 영향

식 2 에 의하면 접합부에서 도체의 겹쳐진 길이가 증가할수록 직류저항은 역함수 형태로 감소된다. 내경 52 mm, 그리고 네 개의 삼-연선으로 구성된 소선 다발로 접합되는 소선-소선 접합부에서 소선의 겹쳐진 길이, 즉 접합부 길이에 따른 직류저항의 변화를 외경 62 mm, 그리고 외경 66 mm 인 경우에 대하여 Fig. 5 에 나타내었다.

그림에서 보듯이 접합부 길이가 증가할수록 직류저항은 역함수 형태로 감소하였다. 외경이 62 mm 인 경우 접합부 길이를 60 mm 까지 줄여도 0.1 n-Ohm 이하의 저항 값을 보였으나, 66 mm 외경의 경우 60 mm 의 접합부 길이에서 약 0.6 n-Ohm 였으며, 이 경우 두개의 접합부로 구성되는 Nb₃Sn 접합의 경우 1 n-Ohm 이상의 값을 나타낼 것으로 예상된다. 작은 직류저항을 얻기 위해 접합부의 길이를 크게 하는 경우 접합부의 크기가 커져 교류손실이 커지게 되므로 압착 작업으로 접합부의 외경을 줄이는 것이 작은 직류저항을 얻기 위해 중요한 요소임을 알 수 있다. Fig. 5 의 결과로부터, 소선 사이의 납땜이 불충분하게 침투되는 경우에도 작은 외경의 접합부가 직류저항 면에서 상대적으로 높은 안전도를 가지고 있음을 예상할 수 있다.

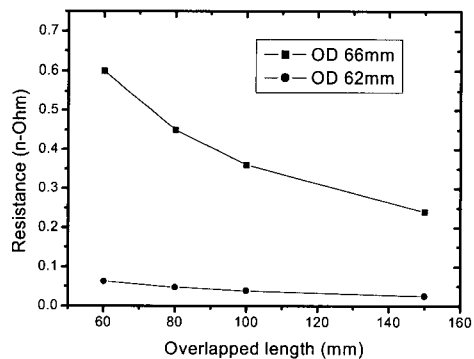


Fig. 5. Variation of calculated DC resistance of the strand-to-strand joint with change of the joint lengths.

3. 이웃하는 소선 다발의 삼-연선 갯수 영향

소선-소선 접합부의 직류저항 및 작업성을 고려하여 여러 개의 삼-연선들로 구성된 소선 다발들 사이에서 전류가 흐르도록 한다. 소선-소선 접합부에서 이웃하는 소선 다발의 삼-연선 갯수가 증가하게 되면 작업면에서는 유리하나, 도체 사이의 전류 흐름 거리가 증가하여 직류저항이 증가할 것으로 예상된다.

Fig. 6 에서 보듯이 각 소선 다발의 삼-연선 갯수가 증가할수록 직류저항이 거의 선형적으로 증가하였다. KSTAR 자석의 경우 U-자형 연결 케이블의 삼-연선들을 Nb₃Sn 케이블의 소선 다발 사이에 끼워넣을 때, 이웃하는 소선 다발 사이에 정확히 평행하게 배열시키는 것이 필요하다. 즉, 같은 케이블에서 나온 삼-연선들이 서로 뭉쳐서 배열되는 경우 전류 흐름 거리가 증가하여 원하는 직류저항보다 높은 직류저항을 얻을 수 있다.

Fig. 6 에서 보듯이 접합부 외경이 66 mm 인 경우, 즉 접합부의 케이블 압착이 충분하지 않은 경우, 외경이 62 mm 인 경우에 비해 접합저항이 크게 계산되었다. 압착 장비를 사용하여 접합부 외경을 줄여 삼-연선 사이의 간격을 줄이는 경우, 접합 작업 중 발생할 수 있는 소선 다발들의 불 균일한 배열, 즉 같은 케이블의 소선들이 서로 뭉치는 경우에 발생할 수 있는 직류저항의 증가를 줄일 수 있다.

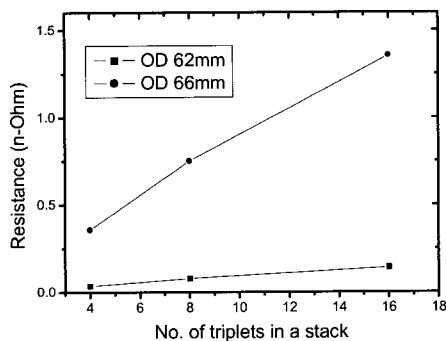


Fig. 6. Variation of calculated DC resistance with change of the number of the triplets in each strand stack.

V. 결론

소선-소선 접합부는 접합부의 소선 혹은 삼-연선들의 분포 형상에 따라 직류저항이 변화한다. 상용 전산코드를 이용하여 접합부의 외경, 접합부의 길이, 그리고 소선 다발의 삼-연선 갯수에 따른 직류저항의 변화를 계산하였다. 외경이 감소하는 경우, 즉 접합부내의 소선의 부피 분률이 증가하는 경우 직류저항은 비 선형적으로 급격히 감소하는 경향을 보였다. 접합부의 길이가 증가할수록 역함수 형태로 직류 저항이 감소하였으며, 서로 이웃하는 소선 다발들의 삼-연선 갯수가 증가할수록 거의 선형적으로 저항이 증가하였다. 접합부의 외경이 62 mm, 내경이 52 mm, 접합부 길이가 100 mm, 그리고 소선 다발의 삼-연선 개수가 네 개인 소선-소선 접합부의 직류 저항은 1 n-Ohm 이하의 값으로 계산되었으며, 이 계산 값은 보고된 실험 값과 비교적 잘 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 KSTAR 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] P. Bruzzone, et al., "Design and R&D Results of the joints for the ITER conductor", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, 461-464 (June 1997)
- [2] M.N. Wilson, Superconducting Magnet, Clarendon Press Oxford, 306-309 (1983)
- [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, 469-472, (June 1997)
- [4] D. Ciazynski, et al., "Results of the European Study on Conductor Joints for ITER Coils", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.32, No.4, 2332-2335, (July 1996)
- [5] KSTAR Magnet System Review, Samsung Advanced Institute of Technology, T13S14-3~T13S14-9 (August 25-17 1999)
- [6] S. Pourrahimi, et al., Fabrication of 40 KA

- Superconducting Sample-Under-Test For Samsung,
Final report, Plasma Science and Fusion Center, 3-17
(1998)
- [7] Ho Jin Lee, et al., “ DC performance of Nb₃Sn Cable
Joints with multi-interfaces”, J. of Korean Institute of
Electrical and Electronic Material Engineers, Vol.13,
No.2, 170-176 (2000)
- [8] Ansys User’s Manual, Rev.5.0, Vol. III, Element, 4-
371~4-374 (1992)
- [9] Y. Iwasa, Case studies in Superconducting Magnets,
267 (1994)