

KSTAR 초전도자석용 Nb₃Sn 선재 특성 연구

최현전, 김기만, 김용진, 방성근, 윤천석, 이재용, 김명규, 이상일, 백설희
삼성종합기술원

이형철, 최창호
한국기초과학지원연구소

오상수, 하동우
한국전기연구소

Study on Characteristics of the Nb₃Sn Strand for KSTAR Superconducting Magnets

H. Choi, K. M. Kim, Y. J. Kim, S. Baang, C. S. Yoon, J. Yee, M. K. Kim, S. I. Lee,
S. H. Baik

Samsung Advanced Institute of Technology

H. C. Ri, C. H. Choi
Korea Basic Science Institute

S. S. Oh, D. W. Ha
Korea Electrotechnology Research Institute

hjchoi@venus.sait.samsung.co.kr

Abstract - The characteristics of Nb₃Sn strands which will be used for the KSTAR superconducting magnets have been investigated. The physics requirements for the KSTAR operation demands the two conditions, high non-Cu critical current density and low hysteresis loss, which seem to be contradictory to each other. It is recent that superconductor manufacturers, IGC and Mitsubishi, have succeeded in the production of the strand which satisfies the ITER HP-1 and HP-2 conditions at the same time. It has been determined that this type of strand, so-called HP-3, will be used for the KSTAR magnets and its properties, critical current density and hysteresis loss investigated by the several institutes are presented here. On the basis of the round robin tests for many strand samples under various conditions, the final specifications will be optimized and the vendor will be selected.

1. 서 론

KSTAR 토카막의 운전 모드는 TF 자석의 경우, 최대 발생 자장 8T, 최대 인입 전류 40kA를 요구하며 또한 이와 동시에 PF 자석의 교류 운전 모드는 매우 높은 자장의 시간변화를

을 요구하고 있다.[1,2] 따라서 이러한 운전 조건을 만족시키기 위해서는 사용되는 초전도선재의 임계전류가 상당히 높아야하는 동시에 교류손실을 최대한 낮추어야 한다. 이 두 가지 조건은 상호 배치되는 것으로 기존의 고에너지 실험용 가속기에 사용되는 초전도 선재로는 이 조건들을 만족시킬 수 없다. ITER의 CS model coil의 경우 bronze 공법으로 제작한 Nb₃Sn 선재의 AC loss를 상당히 낮출 수 있었으며[3], 최근에 들어와 internal tin 공법을 사용하여 임계전류를 증가시키면서 한편으로는 bronze 공법 선재의 그것보다 AC loss가 결코 높지 않은 선재를 생산할 수 있게 되었다.[4] 따라서 ITER의 HP-1, HP-2 선재의 사양을 동시에 만족시키는 즉, 임계전류밀도 J_c가 외부 자장 12T에서 700 A/mm² 이상이며 hysteresis 손실 Q_n가 ±3T 주기에서 200 mJ/cc 이하인 새로운 HP-3 선재가 생산되기 시작하였다. 이러한 고임계전류, 저교류손실을 지닌 Nb₃Sn HP-3 선재의 생산에 따라 KSTAR 초전도자석에 기존의 HP-1 선재 대신 HP-3 선재를 사용하기로 결정하게 되었다.

여기서는 미국의 Intermagnetics General Corporation Advanced Superconductors (IGC-AS)와 일본의 미쓰비시 전기에서 최근에 제작된 HP-3 선재의 내부구조와 여러 가지 전자기적 특성들을 측정, 비교 분석하고자 한다.

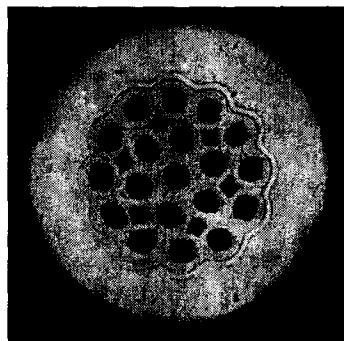
2. HP-3 선재의 특성

선재의 특성을 결정짓는 요소는 다음과 같은 여러 요소, 즉 1. 합금 구성과 그 비율, 2 Sn

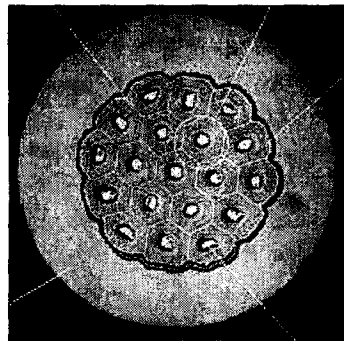
의 양, 3. 확산 방지막의 종류, 두께, 위치, 4. subelement의 설계와 개수, 5. spacer의 유무, 6. 안정화 구리의 양, 7. 열처리 조건 등에 의해 결정된다.[3] 여기서 HP-3 선재의 내부 구조를 살펴보고 그 전기적 특성 측정 결과를 나타내고자 한다.

2.1 선재의 내부 구조

Fig.1.은 일반적인 HP-3 Nb₃Sn 선재의 단면 사진이다. 이 사진에서 볼 수 있듯이 HP-3 선재의 내부구조는 HP-1의 그것과 기본적으로 유사하다. 그 구조를 살펴보면 19개 혹은 그 이상의 Sn-Ti core를 둘러싸고 있는 Nb filament로 이루어진 subelement가 Ta 확산 방지막으로 싸여져 안정화 무산소동(Copper Stabilizer) 내부에 자리잡고 있다. HP-3 선재에서는 HP-1에서보다 더 얇은 확산방지막을 설치하여 전류가 흐르는 Non-Cu 면적을 크게 하면서 순 Ta 확산막을 사용하면서도 가공 조건을 최적화 시켜 임계전류치를 향상시킴과 동시에 교류 손실치를 낮추었다.[5]



(a)



(b)

Fig. 1. Cross-sectional view of HP-3 Nb₃Sn strands manufactured by (a)IGC and (b)Mitsubishi

Fig. 1에서 보듯이 IGC사의 HP-3선재는 subelement들 사이에 총 6개의 Sn spacer를 삽입하여 임계전류를 높이고자 하였다. 이로 인하여 기존의 HP-1 선재의 일반적인 열처리 방법에 없었던 460 °C에서 유지시키는 단계를 추가하여 Sn의 확산을 증가시켰다. 미쓰비시사의 선재의 구조는 HP-1의 그것과 거의 동일함을 알 수 있다. 단, subelement 하나에 포함된

Nb filament의 개수를 비교해보았을 때 미쓰비시 선재가 400개 정도로써 IGC 선재의 192개보다 많다. 이것으로 미루어보아 상대적으로 미쓰비시 선재의 임계전류치가 높으리라 예상할 수 있다. 미쓰비시 선재의 또 다른 특징은 제공된 시료 중 하나(아래 Table. 1의 시료 MITS_C)의 확산 방지막으로 순 Ta이 아닌 Ta/Nb 합금을 사용하였다는 점이다.[6]

2.2 선재의 전기적 특성

초전도 선재의 여러 전기적 특성은 임계전류 밀도, 교류손실치, 잔류저항비로 결정 지워진다. 여기서는 임계전류밀도와 교류손실을 일으키는 가장 중요한 요인인 hysteresis 손실을 측정하였다.

2.2.1 임계전류 J_c

IGC와 미쓰비시에서 제작된 선재의 임계전류 밀도 측정 결과를 Table 1.에 나타내었다. 여기서 시료 명은 제작 회사와 봉재 종류를 나타낸 것으로 예를 들어 IGC43은 IGC에서 제작된 43번 봉재 시료이며 MITS_A는 미쓰비시 A번 봉재에서 추출된 시료를 뜻한다. IGC 시료 중 43번 봉재시료 data는 IGC사에서 세 가지 상이한 열처리(#A, #B, #C)를 하여 측정한 결과이며 나머지 45~51번 시료는 삼성종합기술원에서 열처리하여 측정한 결과이다. 미쓰비시 시료의 경우 A, B, C 세 가지 봉재로부터 추출된 시료들을 삼성종합기술원과 미쓰비시에서 독립적으로 측정하였으며 시료명의 끝에 SAIT가 있는 data가 삼성종합기술원에서 측정한 결과이며 나머지 MITS_A, _B, _C의 data는 미쓰비시에서 측정한 결과이다.

Table. 1. Critical current density of HP-3 strands measured at 4.2K, 0.1 μV/cm

Sample	J _c (A/mm ² at 4.2K)				
	8T	9T	10T	11T	12T
IGC43(#A)	-	1333	1143	982	841
IGC43(#B)	-	1384	1184	1009	868
IGC43(#C)	-	-	1280	1093	931
IGC45	1419	1223	1053	904	769
IGC46	1422	1225	1054	904	791
IGC47_2	1394	1198	1027	-	758
IGC48	1435	1231	1061	911	780
IGC51	1511	1311	1134	954	836
MITS_A_SAIT	1630	1376	1152	959	797
MITS_B_SAIT	1836	1543	1290	1077	888
MITS_C_SAIT	1865	1575	1325	1105	915
MITS_A	-	-	-	-	804
MITS_B	-	-	-	-	889
MITS_C	-	-	-	-	882

측정 결과를 살펴보았을 때, 모든 시료들의 임계전류밀도가 외부 자장 12T, 4.2K에서 750 A/mm² 이상으로 나타나 KSTAR 선재가 요구하는 사양을 모두 만족시킨다. 특히 IGC사의 선재들 중 봉재 43번 시료가 다른 IGC 선재보다 상대적으로 높은 임계전류밀도값을 가졌으며, 같은 시료라 할지라도 열처리에 방법에 따라 10% 정도의 차이를 보임을 알 수 있다. 미쓰비시 선재 시료의 임계전류치는 삼성종합기술원에서의 측정 결과와 미쓰비시 측정치가 잘 부합함을 보여 준다. 특히 시료 MITS_B, C는 12T에서 880A/mm² 이상의 높은 임계전류밀도를 가지고 있어 IGC43번 시료와 함께 KSTAR 초전도자석용 선재로 적합함을 알 수 있다.

Fig. 2에 임계전류밀도값을 외부에서 가해진 자장의 함수로 나타내었다. 여기서 IGC 시료끼리, 미쓰비시 시료끼리의 data를 비교해 보았을 때 선재내부에 포함되었던 internal Sn의 양 변화에 따른 flux jump는 보이지 않는다.

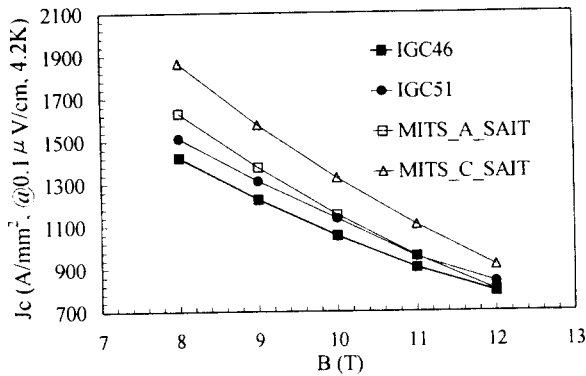


Fig. 2. Critical current density vs. applied field of the samples.

2.2.2 Hysteresis 손실

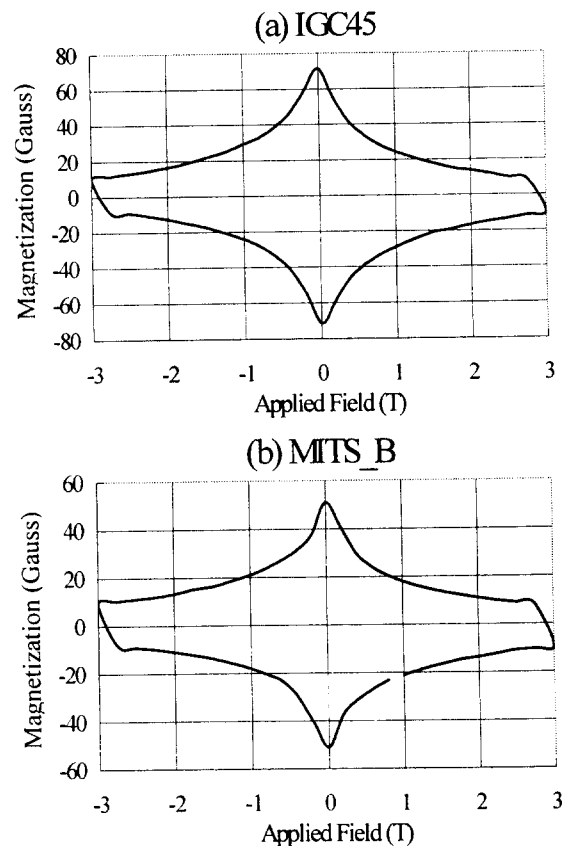
시료들의 hysteresis 손실을 외부 온도 5K, 외부자장 ±3T 변화 주기에서 측정하였으며 다음 Table 2에 나타내었다. 전체적인 시료들의 손실 평균은 220 mJ/cc 정도로 HP-3 사양이 요구하는 200 mJ/cc 보다 약 10%정도 초과한다. hysteresis 손실 측면에서도 IGC43번 시료와 MITS_B, MITS_C 시료들이 우수한 성능을 보여 주었다. 다른 IGC 시료들의 손실값 분포가 일정치 않은 점은 앞으로 해결되어야 할 과제이다.

미쓰비시 선재 시료 B, C의 hysteresis 손실을 보았을 때 미쓰비시 측정치와 삼성의 측정치의 그 크기 순서가 바뀌었음을 볼 수 있다. 미쓰비시 측정값은 C의 손실이 B보다 월등히 크나, 삼성의 측정 결과는 값 차이는 그리 크지 않으나 그 반대의 결과이다. 앞에서 언급하였듯이 C 시료는 확산방지막에 Nb 성분이 포함되어 있기 때문에 상대적으로 hysteresis 손실이 크리라 예상할 수 있어 우리의 측정 결과와 배치된다. Fig. 3에 나타난 시료들의 hysteresis 곡선

을 살펴보면 시료 C의 hysteresis 손실이 저 자장에서 B의 그것보다 높음을 알 수 있다. 즉 저 자장에서는 C의 손실이 크나 전체적인 ±3T 주기에서는 B의 그것이 더욱 커졌다. 이는 확산방지막에 포함된 Nb 성분이 저 자장에서 손실을 키운 것으로 생각되어진다. 미쓰비시 시료에 대한 집중적인 분석과 여러 시료에 대한 측정이 요구되는 부분이다.

Table. 2 Hysteresis loss of HP-3 strands measured at 5K, ±3T

Sample	Q _h (mJ/cc)
IGC43(#A)	198
IGC43(#B)	175
IGC43(#C)	180
IGC45	295
IGC46	166
IGC47_2	254
IGC48	254
IGC51	257
MITS_A_SAIT	223
MITS_B_SAIT	217
MITS_C_SAIT	188
MITS_A	247
MITS_B	167
MITS_C	256



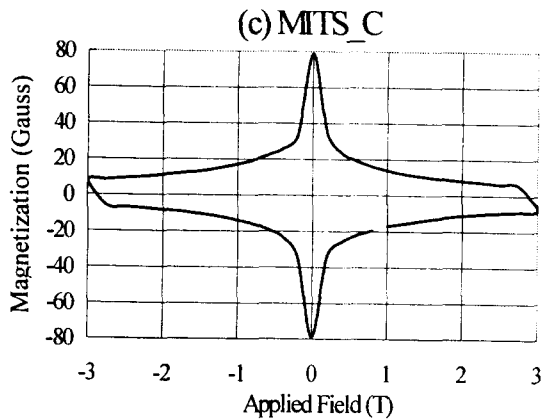


Fig. 3. Hysteresis loss curves for (a) IGC43, (b) MITS_B and (c) MITS_C

Fig. 4는 측정된 선재들의 12T 자장에서의 임계전류밀도와 hysteresis 손실의 상관관계를 나타낸 것이다. HP-1, HP2의 요구사양을 점선으로 나타내었으며 ITER Central Solenoid 자석에 사용된 선재들의 data를 타원으로 함께 표시하였다.[7] 이 그림에서 알 수 있듯이 측정된 IGC, 미쓰비시 선재들이 HP-1과 HP2 사양을 공통으로 만족시키는 고임계전류밀도, 저손실의 HP-3 요구 조건을 충족시킴을 알 수 있다.

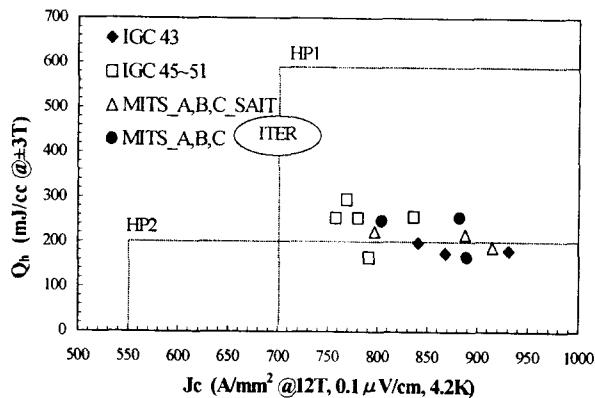


Fig. 4. Critical current density at 12T vs. hysteresis loss measured at 5K, $\pm 3T$

3. 결 론

KSTAR 초전도 자석에 사용될 Nb₃Sn 선재의 구조와 그 특성을 연구하였다. IGC사와 미쓰비시 전기에서 새로이 개발, 제작된 선재 시료들을 대상으로 하여 그 내부 구조를 살펴보았으며, 임계전류밀도 및 hysteresis 손실을 측정하여 비교하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 KSTAR 초전도 선재 사양이 요구하는 12T, 4.2K에서의 임계전류밀도 700 A/mm² 이상, $\pm 3T$ 에서의 hysteresis 손실이 200mJ/cc 정도인 새로운 HP-3 사양을 만족시키는 결과를 얻었다. 단, 선재 시료간의 측정치의 차이점은 앞으로 더 많은 시료들을 대상으로 한 실험을 요구하는 것으로 나타났다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국기초과학지원연구소, "KSTAR TSER Documents", 1997
- [2] Joel Schulz, "New PF and TF systems and Facility Requirements, Rev. 3", KSTAR-USMIT-JHS-012998-01, 1998
- [3] T. Pyon and E. Gregory, "Niobium-Tin for Fusion, high Energy Physics and Other Applications", Applied Superconductivity 1998, To be published
- [4] E. Gregory, Egulko and T. Pyon, "Some Factors Affecting the Use of Internal-Tin Nb₃Sn for High Field Dipole Magnet and Fusion Application", Applied Superconductivity 1997, IOP Conference Series No.158, EUCAS, vol.2, pp.1661, 1997
- [5] 삼선전자(주)기반기술연구소, "차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발 사업 초전도 자석 계통 개발" 1단계 연구보고서, 1998
- [6] Kunihiko Egawa, Mitsubishi Electric Corporation, Private communications.
- [7] K. Egawa et al., "Manufacture of Nb₃Sn Strands for ITER by the Internal-Tin Diffusion Process", ICEC16, Part3, pp.1731, 1997