

Development of ITER TF Cable-in-Conduit Conductors and Their Characteristics

Hyoung Chan Kim^{*,a}, Dong Keun Oh^a, Su-Hyeon Park^a, Keeman Kim^a, P. Bruzzone^b

^a National Fusion Research Institute, Daejeon 305-333, Korea

^b EPFL-CRPP, Fusion Technology, 5232-Villigen PSI, Switzerland

(Received 8 March 2009; revised 3 April 2009; accepted 7 April 2009)

ITER TF 초전도 도체 개발과 특성

김형찬^{*,a}, 오동근^a, 박수현^a, 김기만^a, P. Bruzzone^b

Abstract

As a participant taking part in the ITER TF conductor R&D program, we developed two toroidal field conductors with variations of conduit thickness resulting in the different void fraction of the conductors. The estimated void fractions of the conductors are 31% and 33%. In this paper we present the details of the TF conductor development and performance test results of them carried out by the measurement of current sharing temperature under cyclic loading. Regarding the conductor development, the internal-Sn-processed Nb₃Sn strand characteristics, strand cabling, twist pitch and characteristics of the conduit materials are presented. For the understanding of the conductor design and performance, the conductor test results are presented and the effect of the conductor design parameters such as void fraction and twist pitch is discussed based on the results.

Keywords : Cable-in-conduit conductor, Internal-Sn Nb₃Sn, Current sharing temperature, Void fraction

I. 서 론

초전도체를 둘러싸는 도관(conduit) 내에서 내부적으로 냉각되는 관내 연선 도체(CICC, cable-in-conduit conductor) 형태의 초전도 도체가 1975년에 제시된 이후 주로 대규모 초전도 자석 개발을

위해서 여러 형태의 초전도 도체가 개발되고 연구되었다. 현재 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor, 국제열핵융합실험로) 초전도 도체에서 볼 수 있는 바와 같은 중앙 헬륨 냉각 통로와 케이블 공간이 통해있는 구조의 초전도 도체는 1979년에 제안되었다. 여러 단계의 선재 케이블로 구성된 초전도 도체는 높은 자기장 발생에 필요한 대용량의 전류를 흘릴 수 있으며, 선재들이 비교적 작은 전기저항으로 연결되어 있어

*Corresponding author. Tel : +82 42 870 1931

Fax : +82 42 870 1939, e-mail : chankim@nfri.re.kr

도체 내 전류 분포의 불균일성과 국소적 가열 현상에 대해서도 높은 안정성을 보인다 [1].

ITER 초전도 자석용 도체는 사용되는 Nb₃Sn 선재의 특성과 도체의 크기에서 비롯되는 기술적 과제들을 던져주고 있다. Nb₃Sn은 NbTi보다 임계온도, 임계자장, 임계전류밀도가 높아 고자기장 초전도 자석을 제작할 수 있으나 반응 후 권선(React-and-Wind) 방법을 사용할 수 없으며 열처리 및 전자기력에 의한 변형 효과 등으로 인해 개발 및 제작에 있어 이에 대한 기술적 고려가 필요하다. ITER 초전도 자석 개발 프로그램의 일환으로 수행된 ITER TF(toroidal field) 모델 코일 및 도체 시험 결과는 전자기력에 의한 수직방향의 부하가 예상보다 도체의 초전도 성능저하에 심각한 영향을 미침을 보여주었다 [2-3]. 수직 전자기력에 의해 초전도 도체의 임계전류 및 임계온도(T_{cs})가 감소하는 전자기적 저하현상(BI degradation)이라고 불리는 이러한 성능저하 현상을 해석하고 규명하기 위해 여러 가지 도체 해석 모델 개발과 적용을 비롯한 노력이 경주되었다 [4-5]. 2006년에는 ITER TF 도체의 설계 변경이 이루어졌고 이를 바탕으로 ITER 참가국들간에 TF 도체 개발과 시험이 수행되었다.

자석 운전 조건에서 초전도 도체의 성능과 사용된 Nb₃Sn 선재 특성과의 상관관계 및 케이블링 사양(cabling pattern)과 공극율(void fraction) 등의 도체 설계 변수들의 효과를 평가하고 이해하는 것이 안정적으로 동작하는 초전도 자석용 도체를 개발하기 위한 기술적 바탕이 된다. 한국은 ITER TF 초전도 도체 개발 프로그램에 참가하여 두 개의 TF 도체(KOTF)를 개발하였으며, 스위스 CRPP 연구소의 SULTAN 초전도 도체 시험 시설에서 성능 시험을 수행하였다. 케이블을 감싸는 도관(jacketing tube)의 두께를 두 가지로 변화시켜 공극율이 다른 두 개의 도체를 제작하였다. 다른 도체 설계 변수는 같게 유지하면서 공극율이 다른 초전도 도체의 특성을 비교함으로써 도체 성능에 대한 공극율의 효과를 직접적으로 비교 분석할 수 있다. 본 논문에서는 KOTF 초전도 도체 개발과 SULTAN 시험 결과를 바탕으로 도체 특성 분석결과를 제시한다.

II. KOTF 도체의 사양과 제작

1. Nb₃Sn 초전도 선재 특성

내부 확산법으로 생산된(Internal-Sn processed) Nb₃Sn 선재(Kiswire Advanced Technology, Korea)가 KOTF 초전도 도체 시편 제작에 사용되었다. 선재의 직경은 0.82 mm이며 트위스트 피치(twist pitch)는 오른나사 방향으로 15 mm이다. 12 T, 4.2 K에서 측정된 선재의 임계전류밀도는 899 A/mm²이며 n-값(n-value)은 33이다. 측정된 선재의 임계전류밀도는 같은 열처리 조건으로 SULTAN 도체 시편과 함께 열처리한 선재 시편의 임계전류 특성과 일치한다 [6]. Fig. 1은 4.2 K에서 측정된 SULTAN 선재 시편의 자기장에 따른 임계전류 특성이다. 4.2 K, ±3 T 자기장에서 측정된 이력 손실(Q_h, hysteresis loss)은 772 mJ/cc이며 잔류저항비(RRR, residual resistivity ratio)는 126이다. 선재의 단면적 비로 계산한 Cu/non-Cu 비는 0.97이다. 자기장, 온도 및 스트레인에 따른 임계전류밀도 특성과 열처리 전후에서의 선재 단면은 [7]에 기술되어 있다.

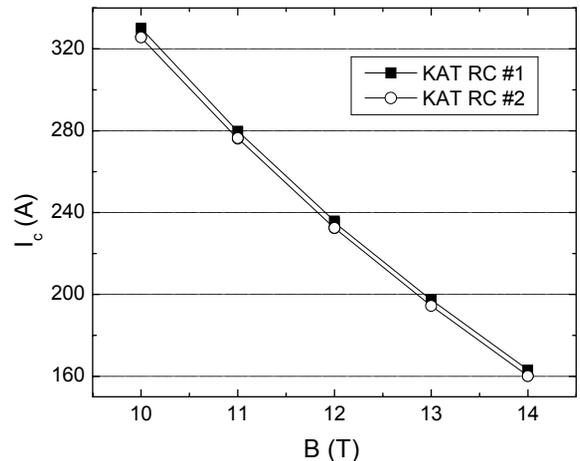


Fig. 1. Critical current characteristics of the KOTF Nb₃Sn witness strands.

2. KOTF 도체의 케이블링

KOTF 도체의 케이블링은 ITER TF 기본 설계의 케이블링 사양에 따라 다음과 같이 5 단계로

이루어졌다. [(2SC+1Cu)×3×5×5+Cu core]×6, 3×4 Cu core [8]. 도체 제작에 사용된 Cu 선재는 8 mm 직경의 무산소동(OFHC, oxygen free high conductivity Cu) 빌렛(billet)으로부터 뽑아서 생산되었으며 Nb₃Sn 선재와 같이 표면에 2 μm 두께로 Cr 층이 도금되었다. Cu 선재의 직경은 0.82 mm이며 측정된 잔류저항비는 438이다.

5 단계로 이루어지는 도체 케이블의 트위스트 피치는 41.5±0.5 mm, 80±1 mm, 125±2 mm, 240±3 mm, 450±10 mm이며 중앙 Cu 심(3×4 core)의 트위스트 피치는 41.5±0.5 mm, 81±1 mm이다. 4 단계 케이블 후 형성되는 서브-케이블(sub-cable)의 50 % 면적을 원시계 방향으로 감싸면서 폭 15 mm, 0.05 mm 두께의 316L 테이프를 사용하여 서브-케이블 감싸기를 하였다. 5단계 케이블 후에는 폭 40 mm, 0.08 mm 두께의 316L 테이프를 사용하여 원시계 방향으로 35 %의 면적이 겹쳐지도록 케이블 감싸기를 하였다. TF 초전도 도체의 중앙 He 냉각 통로의 역할을 하는 중앙 나선 통로(central spiral)는 30 % 면적이 뚫려있는 원시계방향으로 꼬여진 나선형 도관의 구조로 되어있다. 316L로 이루어진 중앙 나선 통로의 외경은 9 mm이며 내경은 8 mm이다.

케이블링 작업은 다단압축회전기(2-roll multi-stage motor-driven roller system, Nexans Korea)를 이용하여 이루어졌으며, 최적의 케이블링 조건을

찾기 위해 Cu 선재를 이용한 여러 번의 시험 케이블링이 수행되었다. 5 단계의 꼬임 케이블링을 거친 케이블은 316LN 도관으로 밀어 넣어진 후 압축되어 최종 도체의 외경을 이루게 된다. 도체의 직경은 43.7 mm(±0.1 mm)이며 도체 케이블링 사양을 Table 1에 정리하였다.

3. 도체 도관 재료의 특성

316LN(POSCO Specialty Steel, Korea) 이 도체의 외부 도관 재질로 사용되었다. 외경은 46.5 mm로 같지만 1.6 mm와 1.9 mm 두께의 두 가지 도관은 내부의 선재 케이블과 함께 압축 회전을 지나면서 압축되어 43.7 mm 외경의 도체로 제작된다. 중앙 He 냉각 통로와 도관 내경 사이의 케이블 공간에 형성되는 공극(local void)은 도관 두께에 따라 차이가 나게 되며 계산된 공극율은 1.6 mm 두께와 1.9 mm 두께의 도관에서 각각 33 %와 31 %이다. 공극율은 초전도 도체의 성능에 영향을 미치는 주요한 도체 설계 변수이므로, 공극율이 다른 도체의 초전도 특성을 시험하고 분석하는 것이 본 연구의 주요 목적이다. Fig. 2는 두 가지 KOTF 도체의 단면적을 보여준다.

대규모 초전도 자석 운전시 작용하는 높은 전자기력을 고려하면 초전도 도체가 작동하는 극저온에서도 취성(brittleness)이 없이 높은 기계적 강도를 유지하는 것이 도관의 주요한 재료 특성적

Table 1. Conductor Cabling Specifications.

Jacketed Conductor	KOTF(L)	KOTF(R)
Cabling patterns	[(2SC+1Cu)×3×5×5 + central core]×6 Central core: Cu 3×4	
Twist pitch (mm)	41.5±0.5 mm, 80±1 mm, 125±2 mm, 240±3 mm, 450±10 mm Central core: 41.5±0.5 mm, 81±1 mm	
Cable wrap	40 mm × 0.08 mm, 35 % overlapped, left hand, 316L	
Sub-cable wrap	15 mm × 0.05 mm, 50 % open surface, left hand, 316L	
Central spiral	ID 7 mm × OD 9 mm, 30 % open surface, left hand, 316L	
Jacket material	316LN	
Conductor diameter	43.7 mm (±0.1 mm)	
Jacket thickness & inside diameter	1.6 mm, 40.5 mm (±0.1 mm)	1.9 mm, 39.9 mm (±0.1 mm)
Void fraction (estimation)	33 %	31 %

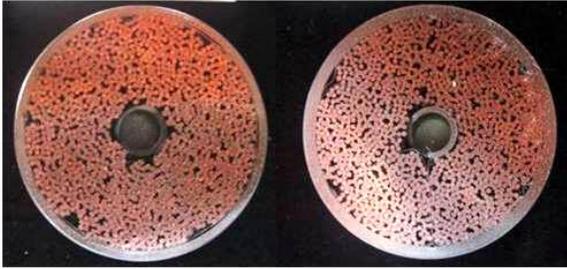


Fig. 2. Cross sectional view of the two KOTF conductors. The estimated void fraction and the conduit tube thickness of the left leg are 33%, 1.6 mm and those of the right leg are 31%, 1.9 mm.

요구조건이 된다. Nb₃Sn 초전도 도체는 제작 과정에서 Nb₃Sn 초전도 상이 형성되는 온도인 650 °C에서 100 시간에서 200 시간 정도 유지하는 열처리 과정을 거친다. 316LN과 같은 스테인레스 강은 500 °C ~ 800 °C 온도에서 탄소가 그레인 경계 (grain boundary) 로 석출되어 Cr 등과 결합하여 저온에서 취성을 유발하는 카바이드(carbide)를 형성할 수 있으므로 재료의 탄소 함량을 0.02 % 미만으로 하고 저온에서 충분한 강도를 얻기 위해 질소 함량은 0.14 % ~ 0.18 %로 유지하였다. 도관 재료의 기계적 강도는 인장 시험 방법으로 상온 (ASTM A370)과 4.2 K (ASTM E1450)에서 측정하였다. 인장 시험 시편은 도체 제작에 사용된 316LN 도관으로부터 전기방전 방법으로 절단되어 준비되었으며, 저온 시험을 위하여 MTS Alliance RT/100 인장 시험기에 He 용기(cryostat)가 설치되었다.

Fig. 3은 4.2 K에서 측정한 두 가지 도관 시편의 인장시험 결과이다. 도관 시험 시편의 열처리에는 Nb₃Sn 선재와 같은 조건으로 전기로 속에서 수행되었다. 압축(compaction) 후에는 압축 과정중의 가공경화 효과로 인해 항복강도와 인장강도가 모두 증가하였음을 볼 수 있다. 반면에 열처리에 의해서는 강도가 다소 감소한 것을 볼 수 있는데 이는 재료 내 그레인 크기의 증가에 의한 것으로 보인다. 열처리 과정중에 카바이드 형성 원소의 그레인 경계로의 석출로 인하여 경화 현상은 발생하지 않았다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3에 보인 1.9 mm 두께 도관 시편에서 열처리에 의한

항복강도의 감소율은 4.3 %이다. 상온 및 4.2 K에서 측정한 네 가지 도관 시편들의 인장시험 결과가 Table 2에 정리되어 있다. 측정한 시편 모두 4.2 K에서의 항복강도가 TF 도체 요구 조건인 950 MPa [9] 이상인 것을 확인할 수 있다. 인장 시험 결과에서 또 한가지 주목할 만한 점은 시편들의 4.2 K 연신율이 요구 조건인 30%보다 훨씬 큰 38%에서 51%에 이르는 특성을 보인다.

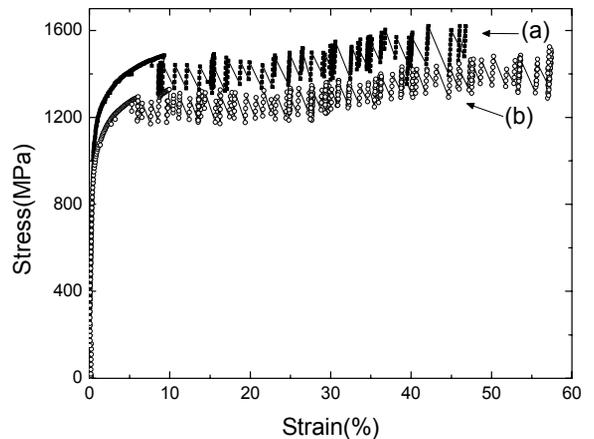


Fig. 3. Tensile test result of KOTF conduit specimens measured at 4.2 K. From top to bottom, (a) compacted and heat treated, 1.9 mm thickness, (b) uncompacted and heat treated, 1.6 mm thickness.

Table 2. Mechanical Strength of the Conduit Materials measured at room temperature and 4.2 K.

Specimen	Thickness (mm)	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	Elongation (%)
At Room Temperature				
Compacted	1.6	550	730	38.8
	1.9	570	761	43.6
Compacted & Heat Treated	1.6	470	727	41
	1.9	480	746	43.2
At 4.2 K				
Compacted	1.6	1160	1650	38
	1.9	1170	1663	51
Compacted & Heat Treated	1.6	1050	1594	42
	1.9	1120	1620	42

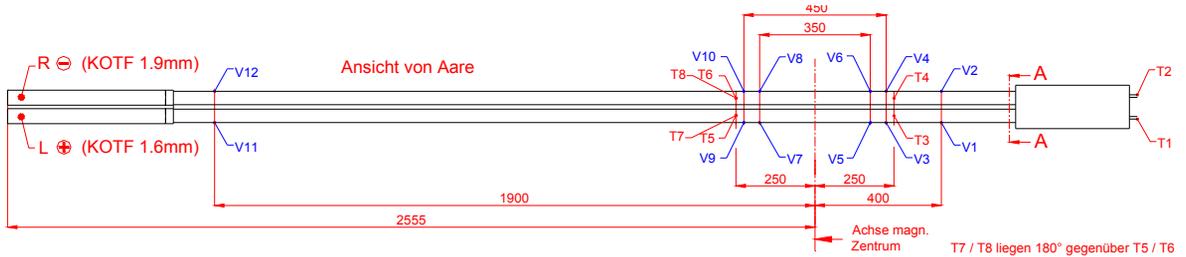


Fig. 4. The layout and the instrumentation scheme of the two KOTF conductor test specimens.

4. 열처리

KOTF 도체에 적용된 열처리 조건은, 210 °C에서 50 시간, 340 °C에서 25 시간, 450 °C에서 25 시간, 575 °C에서 100 시간, 650 °C에서 100 시간을 유지한 후 상온까지 자연 냉각하였다. 온도 변화율은 5 °C/h를 유지하였으며 진공 열처리로에서 시편에 고순도 Ar을 흘려주면서 진행하였다. 650 °C에서 100 시간 동안만 유지함으로써 Nb₃Sn 선재의 Cr 층이 선재 내부로 확산되는 것을 억제하여 초전도 선재의 안정성을 향상시키고자 하였다.

III. 도체 시험 결과

도체 성능 시험은 1000 번까지의 반복된 전자기적 부하를 가하면서 초전도 도체 시편의 전류 공유온도 T_{cs} (current sharing temperature) 를 측정 평가하는 것으로 이루어지며, 스위스 CRPP 연구소의 SULTAN 도체 시험 시설에서 수행되었다. TF 초전도 자석 운전 조건에서의 도체 특성을 평가하기 위해 10.78 T의 외부 자기장을 가하고 68 kA의 전류를 3.6 m 길이의 도체 시편에 흘리면서 T_{cs} 측정이 이루어진다. 공극율이 작은 도체(계산값 31 %)는 오른쪽 시편(KOTF_R)으로, 공극율이 큰 도체(계산값 33 %)는 왼쪽 시편(KOTF_L)으로 설치되었으며 He이 도체 내 케이블 공간으로 충분히 흐르게 하기 위해 중앙 He 냉각 통로는 막은 상태로 실험을 진행하였다. 전압 측정 단자와 온도 센서는 외부 자기장이 최대가 되는 영역 내에 도체 외부 도관 표면에 부착되었다. SULTAN 시험 시설에서 최대 자기장이 균일한 영역은 58 cm 정도이다. T_{cs} 측정은 도체 내로 주입되는 He

의 온도를 올려 도체 시편의 온도를 올리면서 설치된 측정 단자 사이의 전압을 측정하면서 이루어지며 T_{cs} 의 판별기준으로는 10 μ V/m을 적용하였다. 전압 측정은 계단식으로 온도를 상승시키면서 온도 상승시 발생하는 과도 전압(transient voltage) 과 온도가 안정화된 후 이루어졌다. 도체 시편의 온도를 약 0.1 K 간격으로 계단식으로 상승시키면 시편의 전압 단자에서 측정되는 전압 신호는 온도가 변화하는 동안 증가하였다가 평형 상태로 되돌아오는 양상을 보인다 [6]. Fig. 4는 KOTF 도체 시편의 구조와 측정 단자 및 센서의 부착위치를 보여준다. SULTAN 시험 시편 준비와 측정 방법에 대해서는 [6, 10]과 그 속에 있는 참고문헌 에서 찾아볼 수 있다.

Fig. 5에는 반복적인 전자기 부하에 대한 T_{cs} 측정결과가 나와있다. T_{cs} 이하에서 KOTF_L 도체 시편에 전류를 가할 때 관측되는 전압 변화는 T_{cs} 측정에 필요한 전압 신호가 아니기 때문에 KOTF_L 시편의 T_{cs} 는 초기 전압(offset voltage)을 빼고 결정되었으며, T_{cs} 측정의 정밀도는 ± 0.1 K 이하라고 판단된다 [6]. 공극율이 다른 두 도체 시편의 초기 T_{cs} 는 서로 크게 차이가 나지 않으며 둘 다 5.7 K 이상이다. 하지만 반복적인 전자기 부하에 대하여 두 도체 시편은 다른 거동을 보인다. 공극율이 큰 KOTF_L 시편은 반복적인 전자기 부하에 대하여 분명한 T_{cs} 저하 현상을 보이며 600 회 이상에서는 T_{cs} 가 5.5 K 부근으로 수렴하는 양상을 보이는 반면 공극율이 작은 KOTF_R 시편은 1000 회까지의 부하에도 T_{cs} 가 거의 저하되지 않는 특징을 보인다. KOTF_R 시편의 경우에는 1000 회까지의 부하 실험 후 상온까지 온도를 올렸다가 다시 냉각한 후 측정한 T_{cs} 가 5.7 K

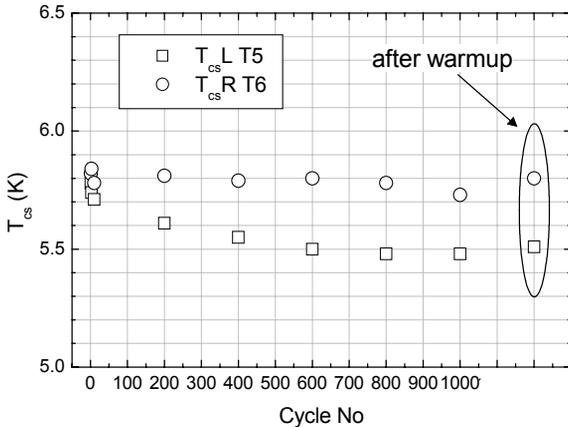


Fig. 5. T_{cs} evaluation results at several stages between cyclic loads. The left leg(T_{csLT5}) is 33 % void fraction sample and right leg(T_{csRT6}) is 31 % void fraction sample.

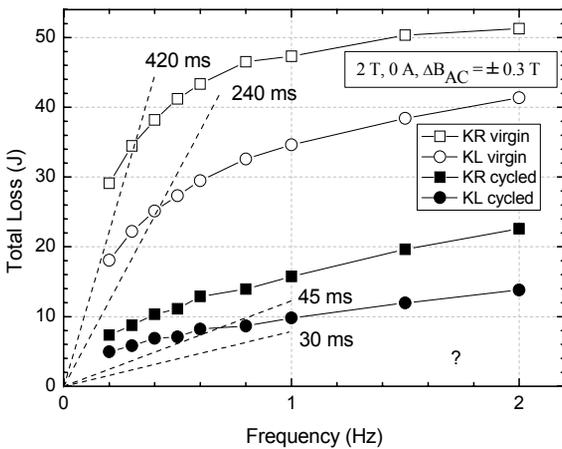


Fig. 6. AC loss measurement result of KOTF samples before and after cycling load. DC background field was 2 T and ± 0.3 T alternating field was applied for the measurement.

이상인 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 초전도 도체내의 공극율을 작게 하여 좀 더 조밀하게 케이블된 도체가 도체에 작용하는 전자기부하에 더 견고하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 전자기 부하 실험 전후에서 측정된 두 도체 시편의 교류손실 특성이다. 교류손실은 2 T의 배경 자기장에서 시편에 ± 0.3 T 진폭의 교류 자기장을 0.2 Hz에서 2 Hz까지 진동수로 가하면서

He 열량법으로 측정되었다. KOTF_L 시편의 교류손실이 KOTF_R 시편의 교류손실보다 작은 것을 관찰할 수 있으며 전자기 부하 실험 후의 교류손실은 부하 실험 전에 비해 상당히 감소하였음을 볼 수 있다. 공극율이 작은 도체 시편의 교류손실이 더 큰 것은 도체 내 선재간 결합손실(inter-strand coupling loss)의 증가에 의한 것으로 설명할 수 있다. 부하 실험 수 현저히 감소한 교류손실은 반복된 전자기 부하 후 도체 내 선재간의 마찰이 감소하였음을 말 해준다. SULTAN 시험조건에서 작용하는 로렌츠 힘의 크기를 고려하면, 반복된 전자기 부하에서 선재들이 로렌츠 힘의 방향으로 밀착되는 현상을 이해할 수 있다. 이상의 교류손실 측정 결과는 좀 더 치밀한 케이블 구조의 초전도 도체가 전자기 부하에 대해 더 견고한 특성을 보인다는 T_{cs} 측정결과를 확인시켜준다고 할 수 있다.

IV. 논 의

서론에서 제시한 바와 같이 공극율이 다른 두 가지 KOTF 도체의 동작 특성을 확인하고 비교 분석하는 것이 본 연구의 주요 목표중의 하나이다. 지금까지 초전도 도체의 특성과 성능에 대한 많은 연구가 도체를 구성하는 선재의 특성 및 선재와 도체 간의 상관관계에 집중되었음을 고려하면, 본 연구 결과는 공극율과 트위스트 피치 같은 도체 설계변수의 역할과 중요성을 보여준다고 할 수 있다. 유럽에서 제작한 초기 트위스트 피치를 두 배 이상 늘린 TFPRO2 도체 시편의 시험결과에서 보여주는 현저하게 향상된 도체의 동작특성을 함께 고려하면 [11], 초기에 과도하게 꼬이지 않은 케이블이 전자기 부하에 의해 선재에 가해지는 스트레인과 Nb_3Sn 선재의 파단 현상을 완화시킨다는 것을 알 수 있다.

한가지 더 KOTF 도체에서 주목할 점은 T_{cs} 이상에서 온도를 계단식으로 상승시킬 때 관찰되는 상이한 과도 전압 특성이다. T_{cs} 이상에서 He 주입 온도를 계단식으로 높일 경우 공극율이 작은 도체 시편에서 더 두드러진 과도 전압 발생이 관

찰된다. T_{cs} 이상에서는 도체 내 선재들 간에 전류 공유 현상이 일어나고 있기 때문에, 두드러지게 발생하는 과도 전압 발생은 초전도 도체의 안정성이 한계점에 접근하고 있다는 것을 나타낸다고도 볼 수 있다. 이러한 현상은 도체 내 케이블 사이의 감소된 He 냉각 통로가 원인이 될 수 있으므로, 감소된 공극율은 전자기 부하에 대한 안정성과 열수력학적(thermo-hydraulic) 안정성에 대해 상이한 효과를 제공한다고도 볼 수 있다. 실제 TF 초전도 자석 운전에서는 중앙 He 냉각 통로가 SULTAN 시험에서와 같이 막혀있지 않고 작동하므로, 감소된 공극율에 의해 케이블 공간에서 감소된 He 흐름은 중앙 He 냉각 통로에 의해 보완될 것이다. 2007년 변경된 ITER TF 도체 기준 설계에 이런 점이 반영되어 중앙 He 냉각 통로의 외경/내경이 10 mm/8 mm로 확장되었다.

이상에서 살펴본 TF 도체 시험결과와 관련하여 TEMLOP(Transverse Electro-Magnetic Load Optimization) 도체 해석 모델의 해석 결과를 주목할 만하다 [5]. 2007년 SULTAN 시험결과는 ITER 형 도체에서 케이블링 피치를 길게하여 선재에 작용하는 스트레인을 분산시키고 도체 내 공극율을 줄임으로써 수직 전자기 부하에 대해 도체 성능 향상 효과가 있다는 TEMLOP 모델 해석과 일치하는 방향으로 나왔다고 볼 수 있다.

V. 결론

KOTF 도체의 사양과 시험 결과에 대해서 상술하였다. 도체 개발과 관련해서는 내부 확산법으로 제작된 Nb_3Sn 선재의 특성, 선재 케이블 과정과 사양, 외부 도관의 재료 특성 및 열처리 공정에 대해 기술하였다. T_{cs} 측정을 통한 도체 시험 결과는 공극율과 같은 도체 설계 변수의 최적화가 전자기 부하에 대한 초전도 도체의 성능 향상에 효과적임을 보여주었다. 공극율이 큰 도체 시편은 반복되는 부하에 대해 T_{cs} 저하 현상을 보이는 반면 공극율이 작은 도체 시편은 시험 조건에서 비교적 안정적인 운전 특성을 보여주었다. 전기적 특성과 기계적 특성 및 열유체역학적 특성이 결

합되어 거동이 결정되는 초전도 도체의 복합적 특성을 고려하면, 도체 시험과 함께 도체의 특성을 해석할 수 있는 효과적인 분석 모델의 결합이 초전도 도체 설계와 개발에 있어서 앞으로 추진해야 할 방향이라고 판단된다.

감사의 말

본 연구는 대한민국 교육과학기술부의 국제핵융합실험로 공동개발사업의 지원으로 이루어졌습니다.

References

- [1] L. Dresner, "Twenty years of cable-in-conduit conductors: 1975-1995", J. of Fusion Energy, vol. 14, pp. 3-12 (1995).
- [2] N. Mitchell, "Summary, assessment and implications of the ITER model coil test results", Fusion Engineering and Design, vol. 66-68, pp. 971-993 (2003).
- [3] P. Bruzzone et al., "Test results of two ITER TF conductor short samples using high current density Nb_3Sn strands", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, pp. 1370-1373 (2007).
- [4] N. Mitchell, "Operating strain effects in Nb_3Sn cable-in-conduit", Supercond. Sci. Tech., vol. 18, pp. 396-404 (2005).
- [5] A. Nijhuis, Y. Ilyin, "Transverse load optimization in Nb_3Sn CICC design; influence of cabling, void fraction and strand stiffness", Supercond. Sci. Tech., vol. 19, pp. 945-962 (2006).
- [6] P. Bruzzone, B. Stepanov, R. Wesche, E. Salpietro, A. Vostner, K. Okuno, T. Isono, Y. Takahashi, Hyoung Chan Kim, Keeman Kim, A. K. Shikov, V. E. Sytnikov, "Results of a new generation of ITER TF conductor samples in SULTAN", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, pp. 459-462 (2008).
- [7] S. Oh, C. Lee, H. Choi, K. Moon, K. Kim, J. Kim, P.-Y. Park, "A variable temperature Walter spiral

- probe for the critical current measurement of superconducting strands”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, pp. 1063-1066 (2008).
- [8] ITER Final Design Report, Jan. 2004, ITER IT Design Description Document.
- [9] “Specification and performance database for steel jackets for Nb₃Sn conductors”, ITER Design Description Document, Jul. (2005)
- [10] A. M. Fuchs, B. Blau, P. Bruzzone, G. Vecsey, M. Vogel, “Facility status and results on ITER full-size conductor tests in SULTAN”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 11, pp. 2022-2025 (2001).
- [11] P. Bruzzone et al., “Test results of two European ITER TF conductor samples in SULTAN”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, pp. 1088-1091 (2008).