

Study of Energy Margin and Operating Current Margin of KSTAR Cable-In-Conduit Conductor

H. J. Lee*, Y. K. Oh, W. C. Kim, S. H. Park, H. C. Kim, K. Kim

National Fusion Research Center, Daejeon, Korea

Received

KSTAR 초전도 자석의 운전 안정성에 대한 연구

이현정*, 오영국, 김웅채, 박수환, 김형찬, 김기만

National Fusion Research Center, Daejeon, Korea

Abstract

Since the margins for the minimum quench energy and for the operating current in the superconducting magnet determine the operating regime of the magnet, a thermal stability analysis for the KSTAR superconducting magnet system is performed using 1-D Gandalf code. The result shows that the minimum quench energy is about 500 mJ/cc and the operating current margin is about 70 %. These values are larger than those of the KSTAR design criteria and the KSTAR superconducting magnet system can be operated stably under various experimental environments.

Keywords: superconducting magnet, stability, minimum quench energy, CICC

1. Introduction

강제 유동 냉각을 하는 CICC(Cable in Conduit Conductor)의 안정성 해석과 Quench 특성에 관한 연구는 1980년대부터 Seeber [1]에 의해 많은 연구가 진행되었으며, 그 후 CICC내부의 선재들과 헬륨의 온도는 같고 내부에서 발생된 열은 헬륨의 대류에 의해 전달되는 1-D 분석이 Dresner, Shajii, Marinuzzi Bottura [2-7]등에 의해 이루어져 왔다.

CICC의 안정성 해석 중 Minimum Quench Energy(MQE)의 분석은 초전도 코일로 만들어진 토카막 장치의 안정적 운전과 운전 한계를 예측할 수 있는 하나의 지표가 되며, 여기에서는 MQE 분석을 통하여 KSTAR 초전도 코일의 운전 에너지 마진을 결정하고 초기 시나리오에 환경에 따른 운전 전류 마진을 분석 하였다.

2. Analysis of Operating Stability

KSTAR(Korea Superconductor Tokamak Advanced Research) 장치에 장착된 초전도 코일은 Nb₃Sn

*Corresponding author. Fax : +82 42 870 1699
e-mail : yaeban@nfric.re.kr

선재로 제작된 CICC로 만든 TF(Toroidal Field) 코일과 PF1~5 UL(Poloidal Field)코일, NbTi 선재로 제작된 CICC로 만든 PF6, 7UL 코일의 두 종류가 있으며, Fig. 1은 코일의 장착된 위치를 보여준다.

KSTAR에 사용된 CICC는 Fig. 2와 같이 크게 대전류를 흘리기 위한 초전도 선재, 안정제 역할의 구리선재, 코일의 냉각과 발생된 열의 제거를 위한 초임계 헬륨이 흐르는 공간(Void Fraction)과 이 모든 것을 감싸는 도관(Jacket)으로 구성된다.

초전도 선재로 제작된 CICC는 토카막 운전 중 선재의 운동, 구조 또는 절연 재료의 균열,

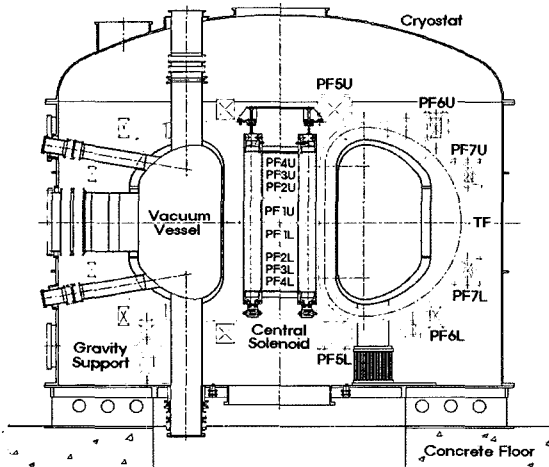


Fig. 1. KSTAR Coil Assembly.

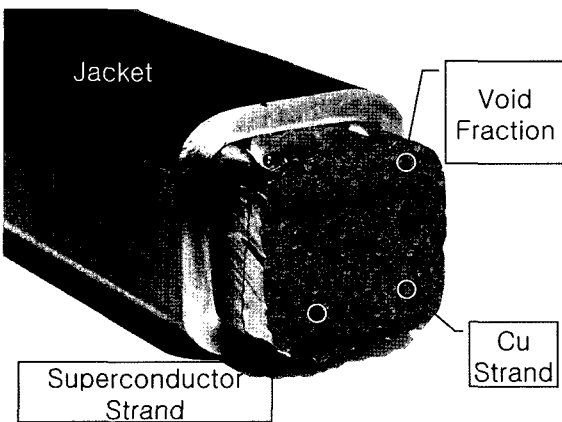


Fig. 2. View of CICC for KSTAR coils.

Table 1. Parameters.

Symbol	Meaning
A [m ²]	Area of the superconducting composite
A_{Cu} [m ²]	Area of the copper matrix
I [A]	Operating current
I_c [A]	Critical current of the superconducting composite
J_c [A/m ²]	Critical current density
k [W/mK]	Longitudinal thermal conductivity of the composite matrix at the bath temperature
k_{Cu} [W/mK]	Longitudinal thermal conductivity of the copper matrix at the bath temperature
MQE [J]	Minimum quench energy
S [J/m ³ K]	Volumetric heat capacity of the composite at the bath temperature
T_b [K]	Bath temperature, 4.2 K
T_c [K]	Critical temperature of the superconducting composite
T_{cs} [K]	Current-sharing threshold temperature
X	Copper to superconductor ratio (Cu/nonCu ratio)
m	Copper matrix resistivity.

교류손실에 의해 국부적 온도 상승 일어나며, 지속적인 열의 축적은 CICC내 상전도 영역을 확산시켜 Quench가 진행되고 더 이상 토카막 운전을 할 수 없는 상황이 된다.

여기에서 CICC 내부에서 발생된 열은 식(1)에 표시된 L. Dresner [8,9]에 의한 방법을 채택하였으며, CICC 내부에서 발생된 열과 헬륨의 열교환은 Bottura에 의해 개발된 1차원 CICC 열수력 분석 코드인 Gandalf를 이용하여 운전 에너지 마진인 MQE를 계산 하였다.

$$MQE = \frac{\pi S A \sqrt{k} (T_c - T_b)^{1.5} (1 - I / I_c) \left(\frac{T_{cs}}{T_b} \right)^{1.5}}{(I_c / A_{Cu}) \sqrt{\rho} \sqrt{I / I_c}} \quad (1)$$

Table 1은 식(1)에 필요한 물리량을 나타낸 것이다.

2.1. Input Parameter for Stability Analysis

KSTAR용 초전도 코일은 TF 코일 16개 PF1~7UL 코일 14개 총 30개의 초전도 코일로 이

Table 2. Parameters of Coils.

Parameters	CS Coil				PF Coil			TF Coil
	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	
Superconductor	Nb3Sn	Nb3Sn	Nb3Sn	Nb3Sn	Nb3Sn	NbTi	NbTi	Nb3Sn
Conduit	Incoloy 908	Incoloy 908	Incoloy 908	Incoloy 908	Incoloy 908	STS 316LN	STS 316LN	Incoloy 908
Number of coils	2	2	2	2	2	2	2	16
Number of turns per coil	180	144	72	108	208	128	72	56
Number of pancakes per coil	20	16	8	12	16	16	12	8
Number of turns per pancake	9	9	9	9	13	8	6	7
CICC length per coil[m]	652	516	258	387	1,404	2,487	1,689	610
Number of cooling channels per coil	10	8	4	6	8	8	6	4

루어져 있으며 각 코일의 특성은 Table 2에 나타나 있다.

운전환경에 따른 CICC의 안정성 분석을 위하여 Nb₃Sn 선재를 사용한 코일 중 교류운전을 하는 PF1~5UL 코일과 직류 운전을 하는

TF 코일, 교류 운전을 하지만 NbTi을 사용한 PF 6, 7 코일의 3가지 경우로 분류하고, PF1~5UL 코일은 10개 코일이 서로 다른 운전 환경에서 운전 되기 때문에 이 중 다른 코일들의 영향을 가장 많이 받으며, AC Loss가 가장 큰 PF1의 운전 조건을 적용한 Nb₃Sn 코일을 A라고 하고 16개의 TF 코일은 한가지 운전 조건을 가지고 있기 때문에 이 운전 조건의 Nb₃Sn 코일을 B, 마지막으로 PF 7코일의 운전조건을 적용한 NbTi 코일을 C로 정하고 각 운전 조건에 따른 에너지마진을 분석하였으며, 토카막 운전 중 발생하는 플라즈마의 Disruption과 같은 일시적인 영향은 고려 되지 않았다.

Table 3은 A, B, C 코일의 도체 사양을 나타낸 것이며, Table 4는 분류된 3가지 종류의 운전 환경을 나타낸 것이다. 이 두 가지는 Gandalf 계산을 위한 입력 조건이 된다.

Table 3. Parameters of Conductors.

Parameters	PF1~5 (A)	TF coil (B)	PF6, PF7 (C)
Superconductor	Nb3Sn	Nb3Sn	NbTi
Strands diameter [mm]	0.78±0.001	0.78±0.001	0.78±0.001
J _c at 4.2 K [A/mm]	>730(@12T)	>730(@12T)	>2700(@5T)
Thickness of	0.001	0.001	0.001
Cr plating [mm]	±0.0005	±0.0005	±0.0005
n-value	>20	>20	>25
AC loss (±3T) [mJ/cc]	<250	<250	<200
RRR	>100	>100	>100
Cu/Non-Cu ratio	1.5±0.15	1.5±0.15	2.8±0.28
Number of strand	360	486	360
Conduit size [mm]	22.3	25.65	22.3
Conduit thickness [mm]	2.41	2.86	2.41
A _{conduit} [mm ²]	175.6	244.6	175.6
A _{non-Cu} [mm ²]	45.9	61.9	30.2
A _{Cu} [mm ²]	126.1	170.3	141.8
A _{helium} [mm ²]	112.1	142.6	112.1
Void fraction [%]	37.5(32.6)	36.5(32.1)	37.5(32.6)
Temperature margin [K]	>2	>2	>1

Table 4. Input parameters for Gandalf code.

Parameter	A	B	C
Peak field [T]	7.8	7.2	2.4
Operating cCurrent(I _{op}) [kA]	20	35	20
Inlet temperature [K]	4.5	4.5	4.5
Helium pressure [Pa]	5×10 ⁵	5×10 ⁵	5×10 ⁵
Helium mass flow [kg/s]	3×10 ⁻³	3×10 ⁻³	3×10 ⁻³
Cooling channel length [m]	175.3	151.5	281.2

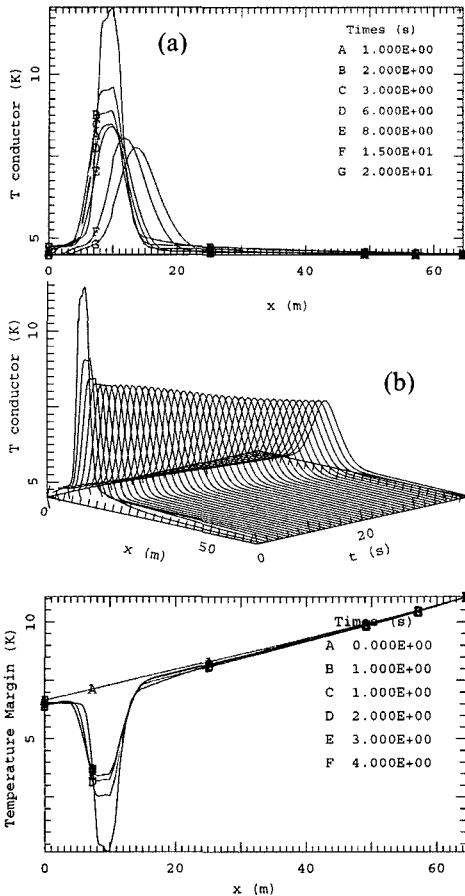


Fig. 3. Recovery phenomenon of the coil A. Decrease of heat flux along the CICC length and time history at $Q = 554 \text{ mJ/cm}^3$ (a) Conductor temperature (b) 3-D plot of conductor temperature and time (c) temperature margin.

2.2. Results of Minimum Quench Energy Analysis

운전 에너지 마진을 분석하기 위하여 A, B, C로 분류된 CICC에 1초 동안 열을 가한 후 시간에 따른 헬륨의 온도변화로 운전 안정성을 분석 하였다.

2.2.1. MQE Analysis of the Coil A

Fig. 3은 CICC에 $Q = 554 \text{ mJ/cm}^3$ 의 열을 가했을 때 시간에 따른 온도와 온도마진을 나타낸 것으로 CICC의 온도가 일시적으로 15 K이상으로 올라가는 값다가 1초 내에 10 K 이하로 떨어

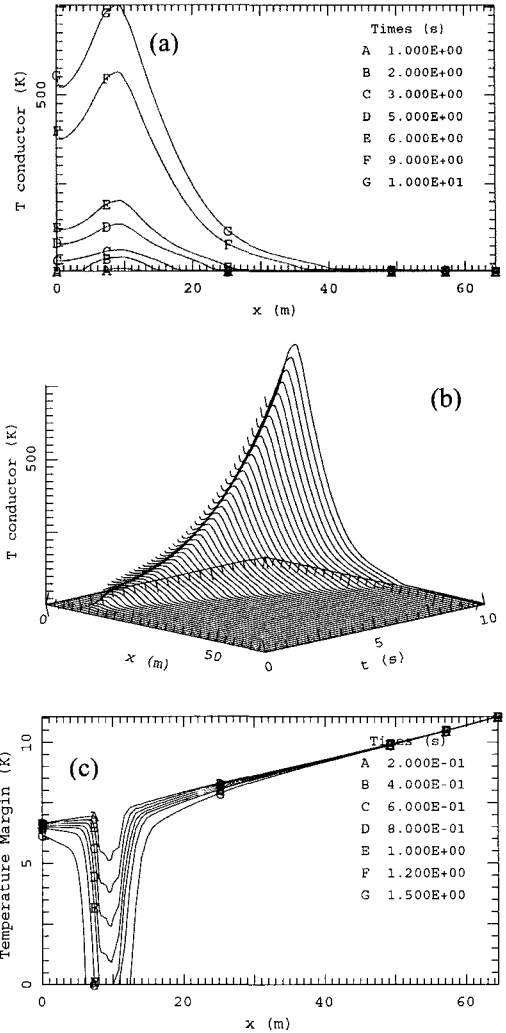


Fig. 4. Quenching phenomenon of the coil A. Evolution of heat flux along the CICC length and time history at $Q = 555 \text{ mJ/cm}^3$ (a) Conductor temperature (b) 3-D plot of conductor temperature and time (c) temperature margin.

어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 초전도 선재가 일시적으로 상전도 상태가 되면서 온도가 올라가고 전류는 CICC내부의 안정제인 구리 선재로 흐르게 된다. 이때 초전도 선재 주변의 초임계헬륨에 의해 Nb₃Sn 선재는 상전도 상태에서 다시 초전도 상태로 회복된다.

0 T, 0 kA 일 때 Nb₃Sn 선재의 T_{cs}(Current Sharing Temperature) = 19.8 K 이며, 7.8 T, 20 kA

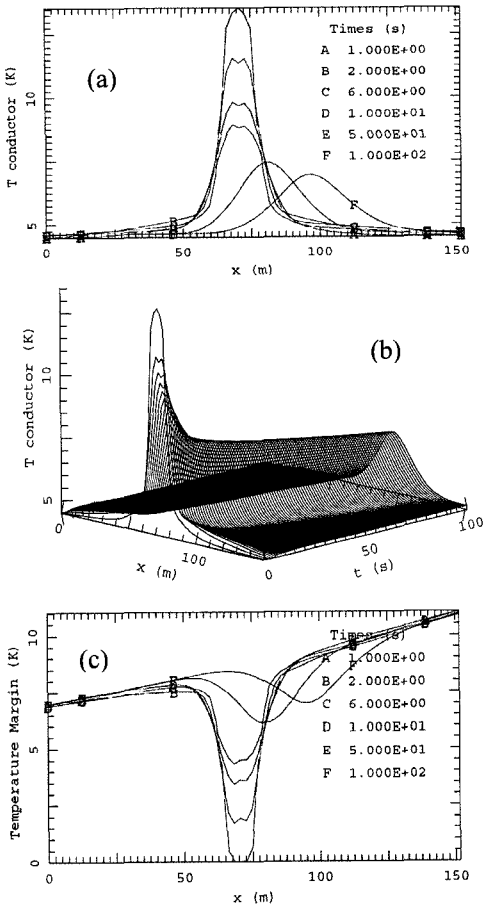


Fig. 5. Recovery phenomenon of the coil B. Decrease of heat flux along the CICC length and time history at $Q = 484 \text{ mJ/cm}^3$ (a) Conductor temperature (b) 3-D plot of conductor temperature and time (c) temperature margin.

일 때 $T_{cs} \approx 11 \text{ K}$ 이므로 $= 554 \text{ mJ/cm}^3$ 의 열이 발생되더라도 초임계 헬륨의 냉각에 의해 초전도 상태로 충분히 회복 가능하지만 554 mJ/cm^3 이상의 열이 유입되면 Fig. 4에서 보는 바와 같이 CICC의 온도 마진이 점점 줄어들어 1.2초 후에는 온도 마진이 0이 되고 Quench가 진행되어 초전도 상이 회복 되지 않는다. 이러한 초전도상이 회복되지 않는 시점의 열량을 MQE라고 하며 A 코일의 MQE = 554 mJ/cm^3 가 된다.

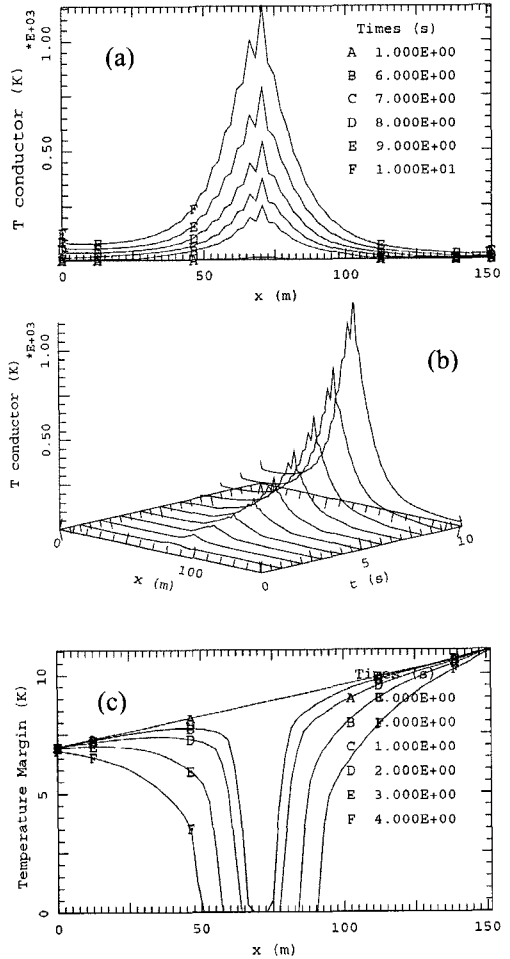


Fig. 6. Quenching phenomenon of the coil B. Evolution of heat flux along the CICC length and time history at $Q = 485 \text{ mJ/cm}^3$ (a) Conductor temperature (b) 3-D plot of conductor temperature and time (c) temperature margin.

2.2.2. MQE Analysis of the Coil B

Fig. 5와 Fig. 6은 B 코일을 분석한 결과로써 TF 코일은 PF1~5코일과 같은 Nb_3Sn 초전도 선재를 사용하여 제작되었기 때문에 비슷한 경향을 보이며, Fig. 5에서 보는 바와 같이 $Q = 484 \text{ mJ/cm}^3$ 의 열을 가했을 때 CICC의 온도가 일시적으로 17 K 이상까지 올라가지만 시간이 지남에 따라 헬륨의 냉각에 의해 CICC의 온도는 내려 가고 온도 마진은 올라가게 되어 초전도 상태가 회복 되는 것을 볼 수 있다.

CICC내부로 흘러주는 초임계 헬륨은 열용량이 매우 높고 상변화에 의한 영향을 피하기 위해 압력을 높여 초임계 헬륨상태를 유지 시켜 주시 때문에 헬륨의 냉각을 초과 하지 않는 범위 내에서 흡수된 열은 헬륨의 유동 속도에 따라 서서히 CICC를 빠져 나가게 된다.

그러나 Fig. 6에서와 같이 485 mJ/cm^3 의 열을 CICC에 가하면 상전도 영역이 확산 되고 T_{cs} 이상으로 온도가 올라가게 되면 초임계 헬륨의 냉각을 초과하게 된다. 이 경우 헬륨의 냉각에 의한 효과는 무시되며 높아진 온도에 의해 초임계 헬륨은 기체가 되어 상전도 영역의 확산을 가속화시킨다. 이것은 Fig. 6의 두 번째 그래프와 같이 5초 후에 급격히 Quench가 진행되는 것을 볼 수 있다.

이것으로 B 코일의 $\text{MQE} = 484 \text{ mJ/cm}^3$ 인 것을 알 수 있다. 비록 A 코일과 같은 재료로 만들어져 있지만 운전환경과 냉각길이가 서로 다르며, Table 3에서 보는 바와 같이 CICC내 초전도 선재와 구리 선재의 양이 서로 달라서 각각 다른 운전 에너지 마진을 가진다.

2.2.3. MQE Analysis of the Coil C

Fig. 7과 8은 PF7 코일의 분석 결과를 나타낸 것으로, Fig. 7은 CICC에 $Q=526 \text{ mJ/cm}^3$ 의 열량을 주었을 때 시간에 따른 CICC의 온도와 온도 마진을 나타낸 것이다.

C 코일은 NbTi 선재로 제작 되어 Nb_3Sn 으로 제작된 CICC에 비하여 상대적은 낮은 $T_{cs} \approx 8.6 \text{ K} (@ 2.4 \text{ T}, 20 \text{ kA})$ 값을 가지며, Nb_3Sn 선재를 사용한 CICC의 온도 변화와 다른 현상을 보인다. Fig. 7의 두 번째 그래프는 시간에 따른 CICC의 온도 변화를 나타낸 것으로 Nb_3Sn 으로 제작된 CICC에 비해 시간이 지나더라도 온도가 떨어 지지 않고 유지 되는 것을 볼 수 있다.

Nb_3Sn 선재로 제작된 CICC는 외부 열에 의해 국소적으로 온도가 T_{cs} 이상으로 올라갈 경우 10^{-3} 초 내에 Quench가 진행되는 반면 NbTi 선재로 제작 되어진 CICC는 T_{cs} 이상 올라가더라도 Cu의 영향에 의해 Quench의 진행 속도가 느려 지는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서 보는 바

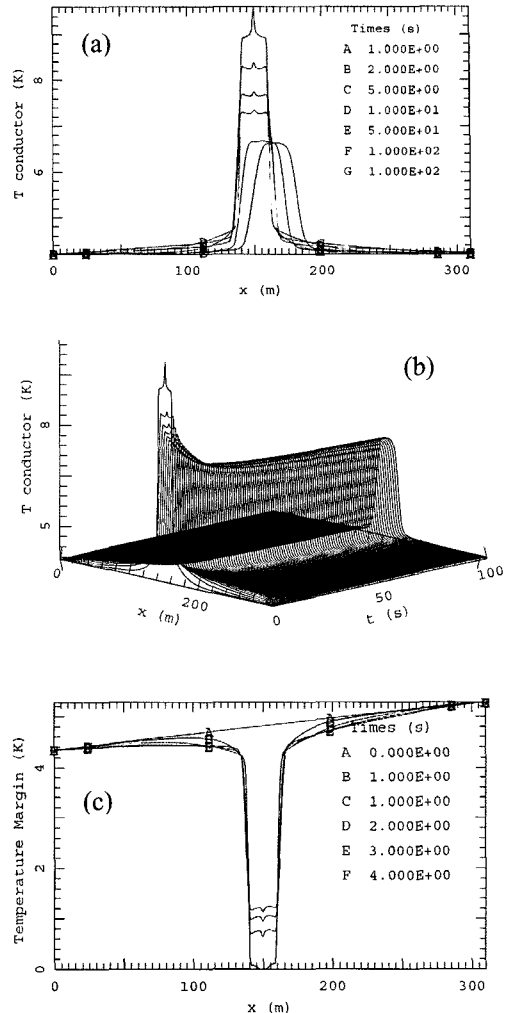


Fig. 7. Recovery phenomenon of the coil C. Decrease of heat flux along the CICC length and time history at $Q = 526 \text{ mJ/cm}^3$ (a) Conductor temperature (b) 3-D plot of conductor temperature and time (c) temperature margin.

와 같이 열에 의해 CICC의 온도가 T_{cs} 부근인 10 K까지 올라가 갔다가 주위의 Cu에 의해 온도가 다시 내려가고 전류의 흐름으로 인해 Cu의 온도가 상승하면서 다시 CICC 전체의 온도가 올라가 Quench가 진행되는 것을 볼 수 있다.

이것은 Quench시 초전도 선재가 상전도도가 되면서 저항이 증가하고 안정제인 Cu로 전류가 흐르면서 잠시 안정화 된 상태를 보인다.

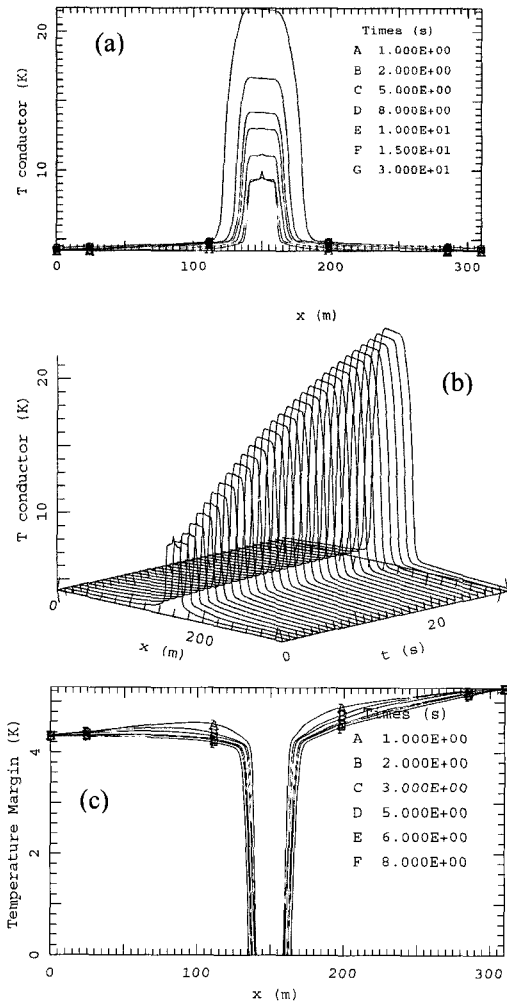


Fig. 8. Quenching phenomenon of the coil C. Evolution of heat flux along the CICC length and time history at $Q = 527 \text{ mJ/cm}^3$ (a) Conductor temperature (b) 3-D plot of conductor temperature and time (c) temperature margin.

그러나 수 초 내에 Cu에서 발생된 열에 의해 초전도 선재의 온도도가 올라가게 되어 Quench가 일어나게 되는 것이다.

Fig. 8은 CICC에 $Q=527 \text{ mJ/cm}^3$ 열을 주었을 때 CICC의 온도와 온도 마진을 나타낸 것이다.

2.3. Operation Current Margin

2.3.1. Operating Current Margin of the Coil A

KSTAR 초전도 자석의 안정성 분석을 위하

여 각 분류에 따른 운전 전류 마진을 여러 가지 자기장 환경 하에서 계산하였다. 여기에서 자기장은 코일에 걸리는 최대 자기장을 의미한다. Fig. 9에서 보듯이 4 T, 6 T에서 토카막 운전 시 운전 온도가 $T_{op} = 5.5 \text{ K}$ 의 경우 초전도 자석은 90% 이상의 운전 전류 마진을 가진다.

6 T 이상이 자기장을 가하는 순간부터 운전 전류마진은 급격하게 떨어지기 시작하며 실제 KSTAR의 운전 환경하인 20 kA, 7.8 T에서 임계 전류대비 운전전류의 비가 0.28이므로 약 70%의 운전 마진을 가지며, 실제 운전 시 CICC내의 온도는 다양한 열의 발생에 의해 5.5 K를 넘을 것으로 보이며, 약 7 K까지 올라간다면 65%의 전류마진을 가지게 된다.

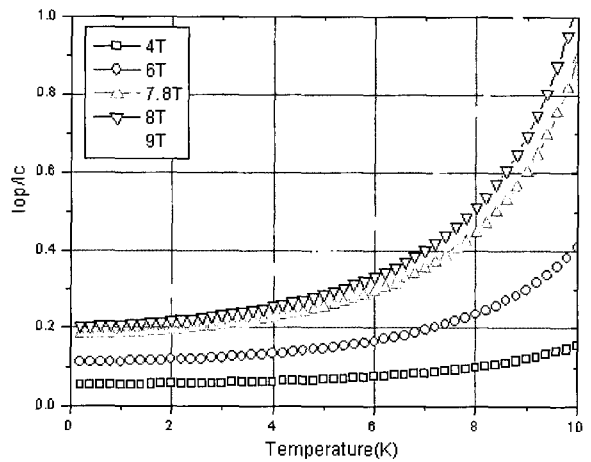


Fig. 9. Temperature dependence of I_{op}/I_c for the coil A at 4 T, 6 T, 7.8 T, 8 T and 9 T.

여기서 더 나아가 KSTAR의 운전전류를 높여 9 T에서 운전을 하게 된다면, 5.5 K 운전 시 55%의 운전 마진이 있지만 외부 환경에 의해 CICC의 온도가 7 K까지 온도가 상승 한다면, 40%의 운전 마진을 가지게 된다. CICC는 플라즈마의 Radiation이나 선재들의 운동에 의해 Quench가 일어날 수 있으므로, 초전도 자석의 AC Loss, Radiation, Joint 저항에 의한 온도 상승 등을 고려하여 약 30% 이상의 운전전류 마진을 가지는 것이 안전하다.

2.3.2. Operating Current Margin of the Coil B

TF 코일은 플라즈마의 전류를 올리는 작용을 하며, 높은 플라즈마 전류를 얻기 위하여 TF 코일 중심부의 자기장의 세기를 높여야 한다. KSTAR에서는 TF 코일에 35 kA의 전류를 흘릴 경우 코일에는 7.2 T의 자기장이 걸리며, 코일중심부에서는 3.5 T의 자기장이 걸린다. 이 조건에서 TF 코일은 약 60%의 운전 전류 마진을 가지고 있으며, 4.5 T의 자기장을 형성시키기 위해서 45 kA 전류를 흘릴 경우 코일에 걸리는 자기장은 9.2 T가 되기 때문에 30%의 운전 전류 마진을 가지게 된다.

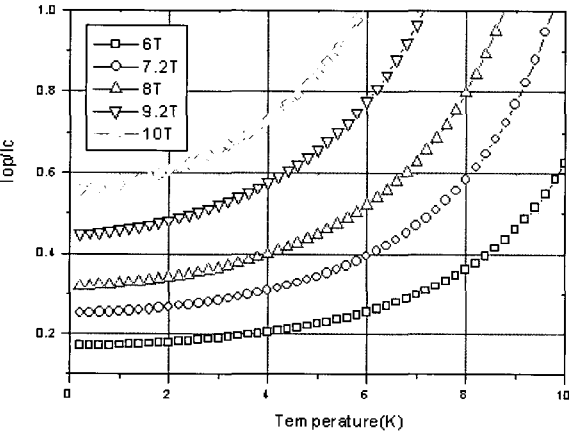


Fig. 10. Temperature dependence of I_{op}/I_c for B Coil at 6 T, 7.2 T, 8 T, 9.2 T and 10 T.

2.3.3. Operating Current Margin of the Coil C

PF6, PF7 코일은 토카막의 가장 외각에 존재하여 외부 자기장의 영향을 많이 받지 않지만, 플라즈마의 위치를 조정하기 위하여 전류의 변화가 자유로워야 한다. 전류의 양이 많지 않지만 빠른 전류 변화와 냉각 길이가 다른 코일들에 비하여 길기 때문에 운전온도를 다른 코일들에 비하여 높게 잡아야 한다. 운전 온도를 6.0 K로 잡는다면 PF7은 80%이상의 운전 전류 마진을 가지게 된다. 하지만 NbTi 선재로 제작된 CICC는 T_{cs} 가 낮기 때문에 온도 마진은 2 K 미만이 된다. 운전 전류 마진은 높지만 온도 마진이 낮기 때문에 운전 온도에 의해 초전도

자석 운전 영역의 제한을 받게 된다.

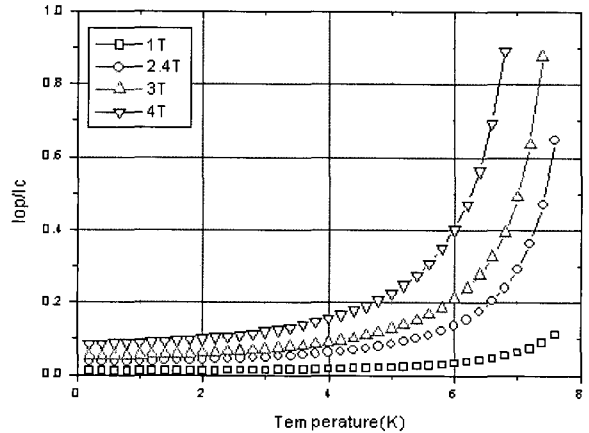


Fig. 11. Temperature dependence of I_{op}/I_c for C Coil at 1 T, 2.4 T, 3 T and 4 T.

3. Result of analysis and conclusion

1차원 CICC 분석 코드인 Gandalf를 이용하여 Nb₃Sn과 NbTi 선재로 제작된 코일의 Minimum Quench Energy와 운전 전류 마진을 계산하였으며, Table 5는 계산한 결과결과 나타낸 것이다.

Table 5. Results of the Analysis.

Parameter	A	B	C
Operating Temp. [K]	5.5	5.5	6
Temperature Margin [K]	5.5	5	2.2
Operating Current Margin [%]	73	63	82
Minimum Quench Energy [mJ/cm ³]	554	485	526

Nb₃Sn 선재로 만들어진 A 코일의 MQE는 554 mJ/cm³, B 코일은 485 mJ/cm³이며, NbTi 선재로 만들어진 C 코일은 526 mJ/cm³으로 계산되었다. A 코일의 운전 전류 마진은 약 70%, B 코일은 약 40%이고 C 코일은 약 80%의 마진을 가지는 것으로 계산되었다.

Nb₃Sn과 NbTi 선재로 제작된 KSTAR용 CICC의 높은 에너지 마진과 운전 전류 마진은 토카

막 중심 자기장을 높일 수 있으며, 다양한 플라즈마 실험을 할 수 있다. KSTAR의 에너지마진은 ITER의 200 mJ/cm^3 [10], EAST의 $300\sim 400 \text{ mJ/cm}^3$ [11]에 비하여 높다. 이것은 토카막의 안정적인 운전이 가능하며 초전도 코일에 대전류를 장시간 흘릴 수 있어 다양한 장점을 가진다.

Acknowledgments

This work is supported by the Korean Ministry of Science and Technology under the KSTAR project contract.

References

- [1] Seeber, B. Handbook of Applied Superconductivity, IOP Publishing Ltd., (1998)
- [2] Dresner, L., Propagation of normal zones in composite superconductors, Cryogenics 16, pp 675~681, (1976)
- [3] Dresner, L., Thermal expulsion of helium from a quench cable-in-conduit-conductor, Proceeding 9th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, pp 618~621, (1981)
- [4] Marinucci, C., A numerical model for the analysis of stability and quench forced-flow cooled superconductors, Cryogenics 23, pp 579~586, (1983)
- [5] Shajii, A., Rreidberg J. P., Quench in superconducting magnets II. Analytic solution, Journal of Applied Physics 76, pp 3159~3171, (1995)
- [6] Bottura, L., Quench analysis of superconducting magnets. A numerical study, PhD thesis, University of Wales, (1991)
- [7] Bottura, L., and Zienkiewicz O.C., Quench analysis of large superconducting magnets. Part I: model description, Cryogenics 32, no. 7, pp 659-667, 1992.
- [8] K. Yoda, H. Yoshimura. And M. Morita, IEEE Trans. Magn. Vol. 27, No3, pp3466~3467~(1991)
- [9] L.Dresner, "Quench energies of potted magnets" IEEE Trans. Magn., Vol. 21, No2, 392-395, (1985)
- [10] ITER Final Design Report (2001)
- [11] EAST Design Description, CICC Design 2.11. pdf (2003)