

삼성 초전도 시험설비 외부자장 발생용 자석의 주 코일 안정성 해석

윤천석, 王秋良, 김기만, 방성근, 김상보, 박현기, 김명규, 최현정
 삼성종합기술원, 에너지Lab.

Stability Analysis of Main Coil for Background Magnet in SSTF (Samsung Superconducting Test Facility)

C.S. Yoon, Q. Wang, K. Kim, S. Baang, S. Kim, H. Park, M. Kim, and H. Choi
 Energy Lab., Samsung Advanced Institute of Technology

csyoon@venus.sait.samsung.co.kr

Abstract - The mission of SSTF is test of superconducting cables for KSTAR magnets. To make realistic environment for superconductor in SSTF, background magnets are required. Cable-in-conduit conductors (CICC) are widely used for large scale superconducting magnets such as ITER and KSTAR. Main design criteria for conductor of superconducting magnets are stability, operating margin and cable cooling requirement, caused by peak field and the gradient of fields with respect to time, in system. ZEROEDEE which used energy balance method, is applied for the calculation of stability. To increase conductor performance, three different strands, such as HP-I, HP-II, and HP-III, are tested. The present configuration of CICC is used for main coils of background magnet in SSTF and Central Solenoid coils of KSTAR magnets.

1. 서 론

KSTAR에 사용될 초전도자석 시험을 위하여 준비되고 있는 SSTF는 삼성종합기술원 (대전)에 2000년 가을에 완성될 예정이다. 시험될 초전도자석은 14개의 원형 Poloidal Field (PF) 코일과 16개의 D자형 Toroidal Field (TF) 코일이며, short sample, model 코일, full-scale 코일 등의 성능시험을 예정하고 있다. 또, 실제상황 모사를 위하여, Fig. 1의 SSTF 외부자장 발생용 Background Magnet의 설계를 Russia [1]와 공동수행하고 있으며, Main 코일의 CICC는 KSTAR Central Solenoid (CS) 코일의 Conductor를 사용하였고, 그 Conductor는 forced-flow cooled 방식이며, 소선 (strand), 초임계헬륨 (supercritical helium), conduit(jacket) 등으로 구성된다. 강제냉각방식 CICC의 기본적인 연구분야는 정확한 안정성 해석과 Quench 특성

으로, 많은 연구가 수행되었고, 또 현재 진행 중이다.

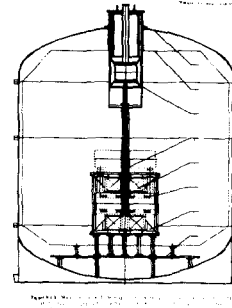


Fig. 1. Main cryostat with the superconducting magnet in SSTF

Conductor에 disturbance가 발생하여 초전도상태로 회복되면 안정성을 갖으며, 초전도-상전도-초전도의 짧은 시간 cycle을 통하여 천이과정이 존재하며, disturbance가 conductor의 특성한계를 넘으면 상전도로의 천이 과정은 일어날 수 없으며 quench가 시작된다. CICC 설계시 고려하는 2가지는 stability margin과 cryogenic condition이며, 비가역적인 상전도상태를 유발하는 최소 disturbance energy, quench 발생시 최대헬륨압력, 유량, conductor 온도 등의 결정이 필수적이다. 서로 다른 time scale로 인하여 안정성과 quench 해석을 같은 수치 모델에서 취급하는 것은 비효율적임으로, 본 연구에서는 0차원 energy balance model의 ZEROEDEE [3]를 사용하여, 다양한 Nb₃Sn 선재인 HP-I,II,III 및 operating current, initial temperature, void fraction, field, pulse duration을 변수로 안정성해석에 관한 parametric study를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 선재특성

2.1.1 임계온도

Nb₃Sn의 임계온도 (Critical Temperature) 값은 T_c(B)의 선형근사식 [4] 을 사용하면

$$T_c = T_{c0} \left(1 - \frac{b}{b_{c20}}\right) \quad (1)$$

T_{c0}는 자장이 0일 때 임계온도이고, B_{c20}은 절대 온도 0에서 임계자장으로, 초전도 filament에 작용하는 longitudinal strain의 함수이다.

$$T_{c0} = T_{c0M} (1 - a|\epsilon|^{1.7})^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$B_{c20} = B_{c20M} (1 - a|\epsilon|^{1.7}) \quad (3)$$

T_{c0M}, B_{c20M} 은 각각 T_{c0}, B_{c20} 의 strain free filament의 값으로, Nb₃Sn의 값들은 Table 1 에서 찾을 수 있다. 또, a의 값은 strain ε의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$a = \begin{cases} 1250 & \text{for } \epsilon > 0 (\text{traction}) \\ 900 & \text{for } \epsilon < 0 (\text{compression}) \end{cases} \quad (4)$$

2.1.2 임계전류밀도

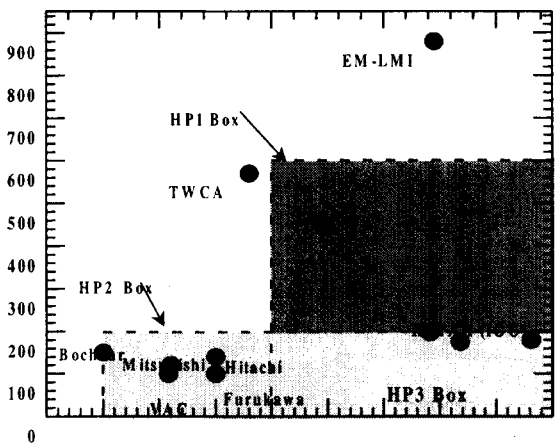
Nb₃Sn의 임계전류밀도 (Critical Current Density)는 다음과 같은 온도와 자장의 함수로 표현된다.

$$J_c = C_0 \frac{1}{\sqrt{bB_{c2}}} (1-b)^2 (1-t^2)^2 \quad (5)$$

$$t = \frac{T}{T_{c0}}, b = \frac{B}{B_{c2}} \quad (6)$$

$$B_{c2} = B_{c20} (1-t^2) (1 - \frac{1}{3}t) \quad (7)$$

또, 물성과 형상에 관련된 계수 C₀는 Nb₃Sn의 특별한 값이고, 초전도체와 non-copper의 단면 비와도 관련된 값이다. Fig. 2는 Nb₃Sn 선재들의 12T 자장하에서 임계전류밀도와 hysteresis 손실의 상관관계를 나타낸 것으로 HP-I,II,III의 데이터를 볼 수 있다 [5].



Critical current density. A/mm²@12T, 0.1μV/cm, 4.2K

Fig. 2. Critical current density at 12T vs. hysteresis loss measured at 5K, ±3T

Table 1. Performance Coefficients for Nb₃Sn [6]

Nb ₃ Sn	B _{c20M}	T _{c0M}	C ₀
	(T)	(K)	(A-T/mm ²)
ITER HP-I	28	18	11,600
ITER HP-II	28	18	9,064
ITER HP-III	28	18	12,400

2.2 Stability Analysis

2.2.1 Analysis Model

본 S/W는 conductor의 stability margin을 계산하는 tool로써, parametric study에 유용하다. Local energy balance method를 기본으로 하여 conductor를 0차원 모델로 가정하였다. 전형적인 conductor의 형상은 Fig. 3과 같으며, 헬륨, 소선, conduit등을 lumped model로 근사화한 후 single DOF (degree of freedom)로 변환하여 상호 열전달되는 현상을 고려하였다. 원리적으로 헬륨이 통과하는 단면은 cable bundle과 중앙에 위치한 냉각구멍으로 나뉘지만, 두 곳의 온도는 같다고 가정하였기 때문에, 헬륨이 통과하는 단면적은 1개의 값으로 입력된다.

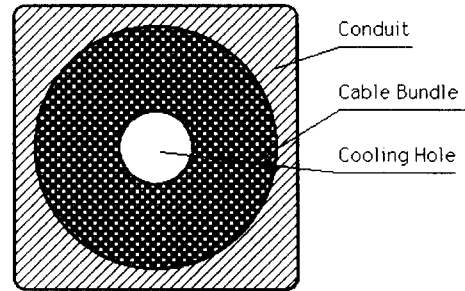


Fig. 3. General geometry of a conductor in ZERO DEE

소선, jacket, 헬륨의 지배방정식은

$$A_{st} C_{st} \frac{dT_{st}}{dt} = \dot{q}_{st} + \dot{q}_{joule} - p_{st,he} h_{st,he} (T_{st} - T_{he}) - p_{st,ja} h_{st,ja} (T_{st} - T_{ja}) \quad (8)$$

$$A_{ja} C_{ja} \frac{dT_{ja}}{dt} = -p_{ja,he} h_{ja,he} (T_{ja} - T_{he}) - p_{st,ja} h_{st,ja} (T_{ja} - T_{st}) \quad (9)$$

$$A_{he} C_{he} \frac{dT_{he}}{dt} = \dot{q}_{ja} + p_{st,he} h_{st,he} (T_{st} - T_{he}) + p_{ja,he} h_{ja,he} (T_{ja} - T_{he}) \quad (10)$$

하첨자 st, ja, he은 conductor의 strand, jacket, helium, A, C는 3가지 구성요소의 단면적, 비열을 각각 나타낸다. 그 구성요소들은,

각각의 wetted surface, p 의 표면에서 대류열 전달 계수, h를 통하여 열적으로 결합 되어있다. 열전달 계수의 정의로부터

$$h_{st,he} = h_{he} \quad (11)$$

$$h_{ja,he} = \frac{h_{ja}h_{he}}{h_{ja} + h_{he}} \quad (12)$$

$$h_{st,ja} = \frac{h_{ja}h_{co}}{h_{ja} + h_{co}} \quad (13)$$

구할 수 있으며, 헬륨의 열전달계수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$h_{he} = \max(h_{Ks}, h_{Kt}) \quad (14)$$

$$h_{Kt} = \frac{h_K h_t}{h_K + h_t} \quad (15)$$

$$h_{Ks} = \frac{h_K h_{ss}}{h_K + h_{ss}} \quad (16)$$

$$h_K = 200(T_{st} + T_{he})(T_{st}^2 + T_{he}^2) \quad (17)$$

여기서 K는 헬륨의 열전도도, ρ는 헬륨의 밀도, C_p는 정압비열, h_{ss}는 사용자가 정의하는 정상상태 열전달계수이다. 소선과 jacket의 열접촉은 실험식으로 표현되며

$$h_{ja} = \frac{2K_{ss}}{t_{ss}} \quad (18)$$

$$h_{co} = 1000 \quad (19)$$

여기서, K_{ss}와 t_{ss}는 각각 스테인레스 스틸의 열전도도와 jacket의 두께이다.

2.2.2 Solution Method

초기에너지 입력이 진행되는 동안 소선의 \ddot{q}_{st} 또는 jacket의 \ddot{q}_{ja} 로 변환되어 conductor가 상전도상태로 천이된다. 지배방정식 (8),(9),(10)은 implicit, linearized, 무조건 안정한 1차 정확도 (first order accurate) 를 갖는 algorithm으로 해를 구한다. 또, 해의 최대변화 한계를 기본으로 하는 adaptive time step을 사용한다.

외부에너지 입력으로 인한 계의 진행은 quench 또는 recovery로 분류되며, 그 구분은 다음과 같다

- recovery if $t > \tau_q$ and $\ddot{q}_{ext} = 0$ and $T_i \leq T_{cs}$
- quench if $t > \tau_q$ and $\ddot{q}_{ext} = 0$ and $(T_i > T_{cs} \text{ or } \frac{dT_i}{dt} > 0)$

여기서, τ_q 는 가열시간, \ddot{q}_{ext} 는 전체외부가 열, T_{cs} 는 current sharing temperature, $\frac{dT_i}{dt}$ 는 요소 i의 온도 T에 관한 시간미분량이다. Fig. 4는 ZERODEE의 stability margin을 구하는 flow

chart로, 본 S/W는 복잡한 해석을 위하여 preliminary tool로 유용하게 사용된다.

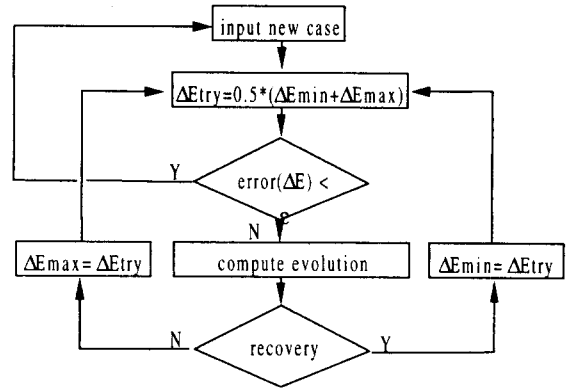


Fig. 4. Schematic flow diagram for stability margin search in ZERODEE

2.2.3 Results & Discussions

본 계산에 사용된 Background Magnet 주 코일의 CICC는 KSTAR CS 코일의 제원과 동일하며 그 값들은 Table 2에 표시되어 있다 [1].

Table 2. Conductor parameters & operating conditions

Parameter	Units	Value
Conductor		Nb ₃ Sn
Conduit		Incoloy908
Cu/Noncu		1.5:1
Aconduit	mm ²	175.6
Dstrand	mm	0.78
nstrands		360
ncustrands		120
hconduit	mm	22.3
wconduit	mm	22.3
tconduit	mm	2.4
Acu	mm ²	126
Anoncu	mm ²	45.8
Ahecond	mm ²	111.4
nτ (B=0)		60
RRR		100
Pin	atm	6
Tin	K	4.5
Iop,max	kA	26.5
Bmax	T	7.8

ZERODEE로 계산할 수 있는 energy margin과 관련된 변수는 초전도면적, 구리면적, 헬륨면적, 정상상태의 열전달계수, strain, 구리의 RRR, 자기장의 세기, 작동전류, pulse duration, 초기압력, 초기온도 등이다. 본 논문의 parametric study는

작동전류, 초기온도, 헬륨의 면적과 관련된 void fraction, 자기장의 세기, pulse duration을 변수로 HP-I,II,III의 선재에 관하여 수행하였다.

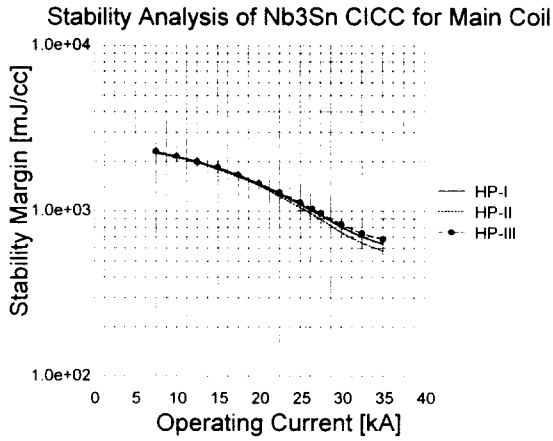


Fig. 5. Operating current vs. stability margin

Fig. 5는 operating current와 stability margin과의 관계를 나타내며, 작동전류 26.5 kA 시, HP-III,II,I에 따라 각각 1020, 1000, 960 mJ/cc의 stability margin을 갖는다. 이 margin은 KSTAR Magnet의 설계시 고려했던 $E_{headroom}$, E_{margin} 의 값이 각각 600, 300 mJ/cc 이므로 충분히 확보됨을 알 수 있다. 또, AC 손실은 고려하지 않고 임계전류밀도만을 보면 HP-III > HP-I > HP-II의 순서로, 곡선의 경향은 물리적인 타당성을 갖는다. 작동전류가 증가하면 stability margin은 감소함을 볼 수 있다.

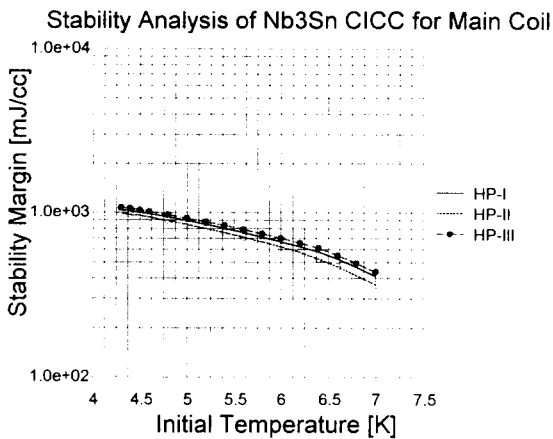


Fig. 6. Initial temperature vs. stability margin

Fig. 6은 헬륨의 초기온도와 stability margin의 관계를 나타내며, 초기온도가 높을수록 stability margin은 감소한다. 초기온도가 4.5 K 일 때, stability margin은 1020 mJ/cc 이므로 설계시 고려하였던 값 보다 충분함을 알 수 있다. Fig. 7은 헬륨의 면적으로부터 void fraction (α)을 유추하여 그 영향을 고찰하였다.

$$\alpha = \frac{A_{he}}{A_{noncu} + A_{cu} + A_{he}} \quad (20)$$

void fraction이 증가함에 따라 헬륨이 흐를 수 있는 단면적이 증가하며, 그에 따라 열전달이 활발히 일어남으로 stability margin은 증가한다. 센서류를 제외한 순수 void fraction은 39%임으로, 그 때의 stability margin은 1020 mJ/cc 임을 알 수 있다.

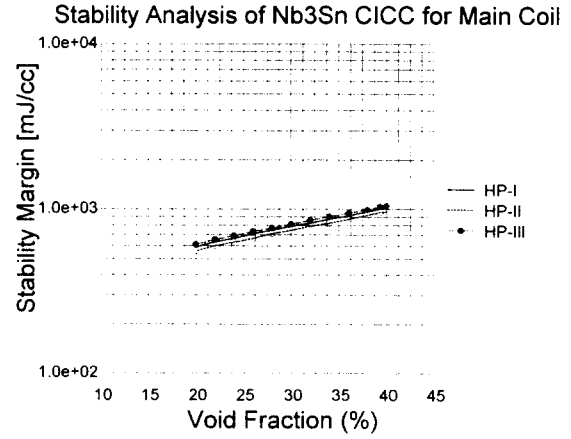


Fig. 7 Void fraction vs. stability margin

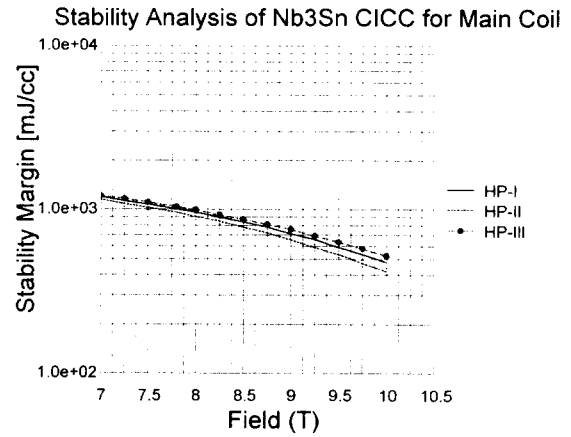


Fig. 8. Field vs. stability margin

Fig. 8은 자기장의 세기와 stability margin과의 관계로, 자기장의 크기가 증가함에 따라, stability margin이 감소함을 보여주며, 다른 Fig. 들과 마찬가지로 stability margin 이 HP-III > HP-II > HP-I의 경향을 나타낸다. 본 모델에서는 정상상태의 field 만을 고려하였지만 실제에서는 field 가 시간에 따라 변화한다. 따라서, dB/dt의 영향을 고려하기 위하여, 정상 operating field인 7.8 T 보다 큰 9 T에서 stability margin은 770 mJ/cc이므로 설계치의 값보다 충분함을 알 수 있다. Fig. 9는 pulse duration과 stability margin과의 관계를 나타내며, 곡선은 40-50 ms에서 제일 작은 stability margin을 갖고, 40 ms 이하부

터. 또, 50 ms 이상부터 증가하는 것을 볼 수 있다. 기준값인 60 ms에서 1020 mJ/cc의 stability margin을 갖고 있음을 알 수 있다

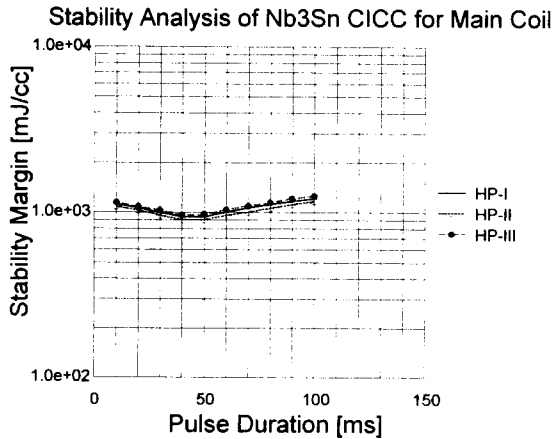


Fig. 9. Pulse duration vs. stability margin

3. 결론 및 향후과제

0차원 energy balance method을 근간으로, 복잡한 문제의 안정성 해석에 preliminary tool로 유용한 ZERODEE를 사용하여, KSTAR CS 코일의 CICC와 같은 제원을 갖고 있는, SSTF Background magnet main coil CICC의 안정성 해석을 수행하였다. HP-I, II, III 선재의 특성과 operating current, 초기온도, 헬륨단면적을 고려한 void fraction, field, pulse duration을 변수로 stability margin에 관련된 parametric study를 수행하였다. 그 결과는 물리적으로 타당하였으며, KSTAR 설계시 고려하였던 $E_{headroom}$, E_{margin} 보다 충분히 큼을 알 수 있었다.

향후 Opticon으로 conductor의 최적화 설계를, Gandalf로 quench analysis를 수행 할 예정이다. 나아가 transient 한 dB/dt를 고려하기 위하여 operation scenario를 포함할 수 있는 MIT의 PFTRADE와 TOKSCPF/HETER3D를 이용하여 자석전체의 열수력해석을 수행해야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 KSTAR 초전도자석 Project의 세부 과제로 수행되었으며 관계자들에게 감사를 표한다.

{참 고 문 헌}

- [1] Cryomagnet-SAIT, Preliminary Design Report of SSTF Magnets, December 20, 1999
- [2] C. Marinucci, "A numerical model for

the analysis of stability and quench characteristics of forced-flow cooled superconductors", Cryogenic, pp 579-586, November 1983

[3] CryoSoft, ZERODEE manual, version 1.1, March 1997

[4] P.A. Hudson, F.C. Yin, H. Jones, "The critical current density of filamentary Nb₃Sn as a function of temperature and magnetic field", IEEE Trans. Mag., 19, 3, pp 903-906, 1983

[5] Eric Gregory, Private Communications, IGC, November 1998

[6] SAIT, KSTAR Magnet System Review, T13&14-22, August 1999