냉동기운전 고온초전도코일의 안정성평가기준에 관한 연구

石山敦士, 淸水智史, 김 석범, 한 경희
와세다대학, 와세다대학, 초전도공학연구소, 명지대학교

A study on stability criterion for cryocooler-operating HTS coils

Atsushi Ishiyama, Satoshi Shimizu, SeokBeom Kim, KyungHee Han
Waseda Univ., Waseda Univ., STR-ISTEC, Myungji Univ.

Abstract - In this paper, the stability criterion for cryocooler-cooled high-temperature superconducting (HTS) coils is discussed. We choose the current, Itr at which "thermal runaway" occurs, as a stability criterion and adopt the relationship between the cooling power of GM cryocooler and the heat generation in coil system to evaluate Itr. We also investigate the transient behavior during a quench process in HTS coils by a newly developed FEM computer program.

1. 서 론

고온초전도(HTS)코일은 종래의 금속계초전도(Low-temperature superconducting; LTS)코일에 비하여 운전온도를 넓게 설정할 수 있다는 장점 때문에 GM냉동기등을 이용한 전도냉각방식 HTS코일의 시험제작연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근에는 MRI 또는 SMES 등의 구체적인 응용연구가 진행중이다. 종래의 냉동기운전 LTS코일의 경우에는 "임계전류마진 안정화"에 준하는 설계를 해왔었다[1]. 이에 비해, 현재까지 권선의 n값이 적은 HTS코일은 통전상태에 있어서 항상 전압(저항)이 발생하므로 "저항이 제로인 초전도코일"이라기보다는 "저항이 작은 상전도코일"이라고 생각하는 것이 타당하다고 사료된다. 또한 냉동기운전의 경우, 냉동기의 냉동능력, 코일내의 발열, 냉동기와 코일간의 열적접합상태등을 포함한 시스템전체의 열적거동을 고려한 안정화 설계기준의 확립이 필요하다고 사료되어 본 논문에서는 냉동기 전도냉각운전의 HTS코일에 관한 안정성평가에 대하여 검토한 결과를 서술한다.

2. 본 론

2.1 LTS코일과 HTS코일

냉동기를 사용한 전도냉각방식의 LTS/HTS 코일의 퀜치특성을 비교하면 표1과 같다. 표1에 의하여 액체 헬륨 등의 냉매가 없는 상태에서의 LTS코일은 일단 전류분류가 발생하면 초전도상태로 복귀하기 어렵기 때문에 [임계전류 마진 안정화]에 준하는 안정화설계를 하고 있다. 한편, HTS코일의 경우는 상기한 바와 같이 냉동기의 냉동능력, 코일시스템의 전체 열부하와의 열평형에 준하는 안정성평가기준에 의한 안정화설계가 이루어져야 한다고 생각된다. 따라서 본 논문에서는 열평형이 붕괴되어 최종적으로 열폭주(thermal runaway)에 달하는 전류(열폭주전류;Itr)를 안정성평가기준의 지표로 제안한다. LTS코일의 경우, [임계전류 마진 안정화]를 기준으로 어느 정도 마진을 취할 것인가가 과제인 것과 마찬가지로 HTS코일은 기준으로써 선택한 Itr에 대하여 어느 정도의 마진이 적절한가를 정하는 것이 시스템설계 최적화의

표 1 LTS/HTS 코일의 특성비교

	LTS coil	HTS coil
퀜치과정	요란등에 의해 국소적인 상전도부가 발생, 전파, 파급	코일전체의 온도가 상승 최종적으로 열폭주
온도마진	수 K	수십 K
최소퀜치에너지	수 mJ	수십 J
n 값	크다	작다
부하율(It/Ic)	< 1	특별히 의미없음
분류영역	좁다	넓다

과제라고 사료된다. 상기의 개념을 바탕으로 HTS코일 시스템의 열평형에 근거한 퀜치특성에 관하여 평가, 검토하고자한다.

2.2 전도냉각운전 HTS코일의 퀜치특성(정상상태)

우선 미국의 ASC사가 시험제작하여 실험한 HTS코일의 냉각, 여자결과[2]를 참고로 냉동기전도냉각 HTS코일시스템의 열적거동에 대하여 고찰 하고자 한다. 상기 코일은 SMES용코일의 개발을 목적으로 제작되었다. 코일권선은 Bi-2223/Ag선재로 구성되어져 (ID=370mm, OD=438mm, height=98mm) 운전전류 100A, 축적에너지 5kJ로 GM냉동기(25W at 25K)에 의해 냉각된다. 약12시간의 초기냉각에 의하여 22K 부근에서 열평형상태가 되었다. 그림1은, 상기 코일에 100A, 123A, 134A, >134A 순으로 전류를 상승 시켰을 때의 온도변화를 나타낸다. 시간축의 숫자기입을 생략하였으나 각 전류를 상승시킨 후 열평형상태에 달하기까지는 1~2시간이상 소요되고 열평형상태에서의 코일내의 온도차는 1~2K정도이다. 코일은 134A이상의 전류를 통전하면 최종적으로 열폭주한다.

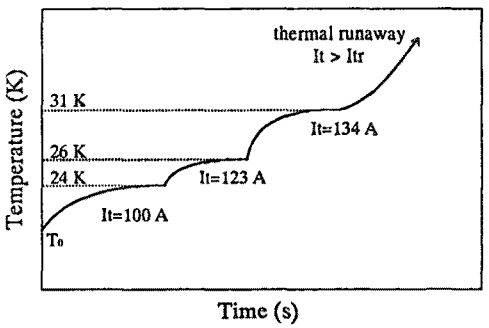

그림 1 HTS코일의 통전전류 증가에 의한 온도변화

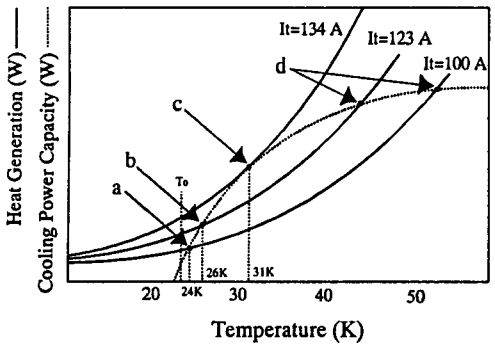

그림 2 냉동기 냉각능력과 코일의 발열곡선

이상의 여자시험중의 열적거동에 관하여 그림2를 사용하여 고찰하고자한다. 그림2는 각 온도에 대한 냉동기의 냉동능력과 코일 내의 발열과의 관계를 모식적으로 나타낸 것이다. HTS코일은 n값이 작고 전류분류상태의 온도영역이 넓으므로 그림2에 나타낸 것과 같은 발열곡선을 나타낸다[3]. 각 통전전류가 어떤 온도에서 일정하게 되다는 것은 냉동기에 의한 냉동능력과 코일발열이 그 온도에서 평형을 이루는 것을 의미한다. 따라서 평형점(온도)은 그림2의 냉동능력곡선과 발열곡선의 교점이 된다. 우선 초기 냉각평형 온도(T_0)에서 100A를 통전했을 경우를 고찰하면 코일온도는 코일발열곡선(It=100A)과 냉동능력곡선과의 교점A까지 상승하여 그 온도에서 열평형을 이룬다(24K). 123A로 통전전류를 증가시키면 점B에서 열평형을 이루고(26K) 냉각곡선과 발열곡선이 접하는 전류(134A, Itr) 이상에서는 교점이 존재하지 않으므로 발열이 냉각을 상회하여 열폭주에 달하게되고 온도는 31K에 달했다.

상기한 바와 같이 냉동기 전도냉각 HTS코일의 경우, 열적거동이 상당히 완만하게 이루어지므로 코일이 최종적으로 퀜치할 것인가 복귀할 것인가에 대한 평가(본 논문에서는 최종적으로 열폭주에 달하는 전류 Itr을 평가기준으로 했다)는 정상상태에서의 냉동기의 냉동능력과 코일발열과의 관계를 이용하여 평가할 수 있다고 사료된다. 다만 실제시스템에 있어서 [냉동기 냉각능력곡선]은 냉동기의 냉동능력으로부터 전류리드에 의한 열침입, 복사열, 코일의 열적접촉에 의한 열저항등의 영향을 제외한 것이 된다.

2.3 수치해석에 의한 검증

본 절에서는 유한요소법에 근거한 수치해석을 통하여 상술한 내용을 검증하고자한다. 코일권선은 Bi-2223/Ag 선재로 상전도전이, 전파특성측정실험에 사용한 선재이다. 코일권선은 초전도선재와 절연용 캅톤테이프(13 μm), 전자력보강용 SUS테이프(50 μm)로 구성된다. 수치해석은 선재단면을 균일하다고 가정하여 2차원(선재 길

$$E_{sc} = E_c\left(\frac{I_{sc}}{I_c}\right)^n \qquad (1)$$

$$E_{Ag} = \rho_{Ag}\frac{I_{Ag}}{A_{Ag}} \qquad (2)$$

$$I_t = I_{sc} + I_{Ag} \qquad (3)$$

$$(I_{sc})^n + \frac{\rho_{Ag}\times(Ic)^n}{E_c\times A_{Ag}}(I_{sc}-I_t) = 0 \qquad (4)$$

$$G_j = EJ = \rho_{Ag}J_{Ag}(J_{sc}+\alpha J_{Ag})/(1+\alpha)\ [W/m^3] \qquad (5)$$

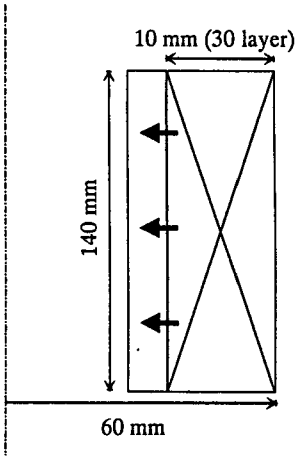

그림 3 HTS코일 해석모델의 단면개념도

이방향과 두께방향) 유한요소법을 사용하였다. 계산에는 일반적으로 사용되고있는 열평형방정식이 사용되었다[4].

실제의 LTS선재와 HTS선재의 큰 차이점은 전류분류후에 초전도체에 통전되는 전류 Isc에서 기인된다. 따라서 본 절에서는 E-J특성에 근거한 n 값을 이용하여 초전도체내의 전기저항을 가정하여 다음과 같이 Isc 및 self-Joule발열량 G_j를 구했다. 초전도체내의 전계를 Esc, 안정화재 은(Ag)내의 전계, 전류, 저항율, 단면적을 각각 E_{Ag}, I_{Ag}, ρ_{Ag}, A_{Ag}라고 하면 초전도체와 은내의 전계는 식(1), (2)과 같이 나타낼 수 있다. 초전도체와 은 양자의 전계다 동등하다고 하면 식(3)을 이용하여 Isc를 구할 수 있다. 한편 전류분류영역에서의 발열량을 G_j , 은비를 α, 초전도체와 은내의 전류밀도를 $J_{sc}(=I_{sc}/A_{sc})$, $J_{Ag}(=I_{Ag}/A_{Ag})$라고하면 식(5)에 의해서 발열량을 구할 수 있다.

코일에는 2T의 외부자계가 코일의 z축 방향으로 균일하게 인가된다고 가정하였다. 코일의 냉각은 그림3에 나타낸 것과 같이 모델코일의 보빈을 통하여 냉동기의 콜드헤드에 접촉되어 있다고 가정했고 그 외의 부분은 단열상태로 하였다. 모델코일의 냉동기 냉동능력과 발열과의 관계를 그림4에 나타낸다. 여기서 발열은 초전도체내의 자속유동(flux flow)에 의한 Joule발열만을 고려했다. 냉동기로써는 1단 및 2단 구성의 GM냉동기를 가정하여 두 종류의 냉동능력에 대하여 고찰하였다.

그림4에 의하여 1단 냉동기 사용시의 열폭주전류Itr은 130A와 140A사이에 존재한다는 것을 알 수 있다. 정확한 Itr를 산정하기 위하여 130A와 140A사이의 통전전류에 관한 수치해석결과를 그림5에 나타내었다. 그림5의 온도는 권선 중앙부의 온도를 나타낸다. 실선은 초기온도 20K에서의 결과로, 130A는 약 21K에서 열평형을 이루고 135A는 24K 부근에서 열평형에 달하고 있으나 800초를 넘는 상당히 긴 시간이 걸린다. 그리고 136A의 경우에는 명확하게 열폭주를 하고 있으므로 열폭주전류는 135A와 136A사이에 존재하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 코일 권선내의 온도차는 2K이하였다. 그림5의 점선은 초기온도 24K에서 130A를 통전했을 때의 온도변화를 나타낸 것으로 이 온도에서는 발열보다 냉각능력이 상회하므로 초기온도 20K의 경우와 마찬가지로 21K까지 저하하여 열평형을 이룬다. 수치계산으로부터 얻어진 각 온도에서의 열폭주전류와 Ic/Itr을 그림6과 7에 나타낸다. 가정한 냉동기의 냉동능력을 고려하였을 경우, 초기온도가 높을수록 임계전류보다 열폭주전류가 증가한다. 따라서 냉동기를 사용하여 20K이상에서 운전할 경우에는 임계전류보다 높은 전류를 통전 하여도 안전하게

운전 가능하다는 것이 판명되었다. 또한 그림2, 4의 평가곡선에 준하는 안정성평가기준에 관한 타당성이 수치해석결과에 의하여 검증되었다고 사료된다.

3. 결 론

냉동기 전도냉각의 HTS코일의 안정성평가기준에 관하여 유한요소법에 근거한 수치계산을 통하여 검토, 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 냉동기의 냉동능력과 코일의 발열관계를 나타내는 곡선에 근거한 HTS코일의 열적거동에 관하여 표현, 평가하였다.

(2) 수치계산에 의하여 HTS코일의 과도적 열적거동을 평가하여 상기의 평가곡선이 가지는 의미를 해석, 평가의 타당성을 검증했다.

(3) 안정성평가기준으로써 열폭주전류 Itr을 제안하여 Itr 값을 정상상태의 열평형을 이루는 상기의 평가곡선을 이용하여 계산할 수 있다는 것을 증명하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Y. Iwasa, "A critical current-margin design for high performance magnet stability", *Cryogenics* 18, pp. 705-714, 1979

[2] S. S. Kalsi et al.,c "HTS SMES magnet design and test results", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 7, No. 2, pp. 971-974, 1997

[3] S.B. Kim, A. Ishiyama, H. Otaka, S. Nomura, "Normal-zone propagation properties in Bi-2223/Ag superconducting multifilament tapes", *Cryogenics*, Vol. 38, No. 8, pp.823-831, 1998

[4] S. Shimizu, A. Ishiyama, S.B. Kim, "Quench propagation properties in HTS pan-cake coil", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 9, No. 2, pp. 1077-1080, 1999

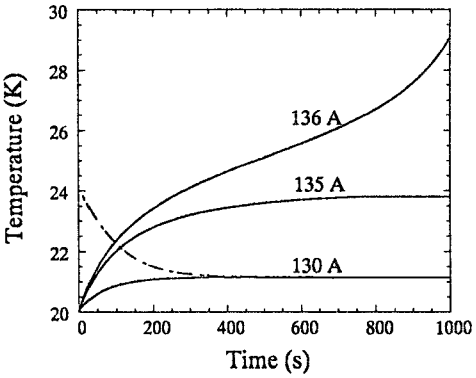

그림 5 HTS모델코일 중앙부의 온도변화의 수치계산결과

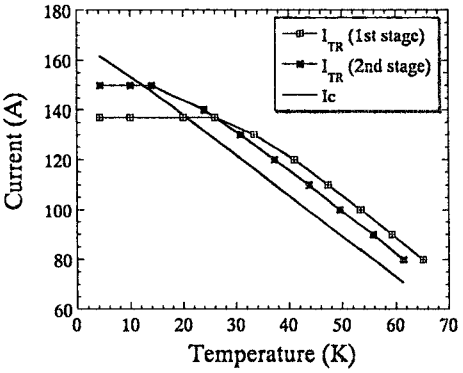

그림 6 HTS모델코일에 대한 각 온도에서의 열폭주전류의 수치계산결과

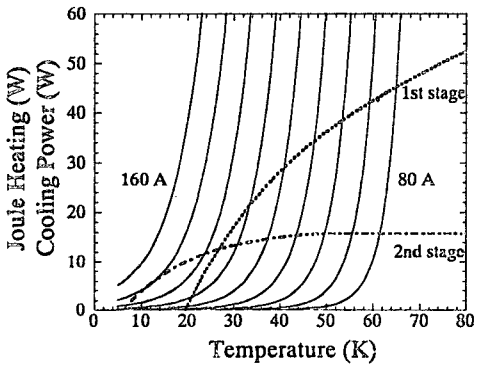

그림 4 HTS모델코일의 발열곡선과 냉동능력

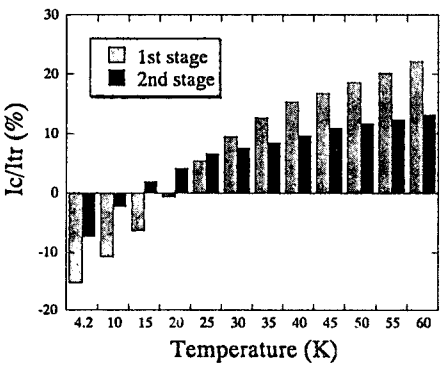

그림 7 HTS모델코일의 각 온도에서의 Ic/Itr (그림 6과 동일)