

냉동기운전 고온초전도코일의 안정성평가기준에 관한 연구

論 文

50C-7-1

A Study on Stability Criterion for Cryocooler Operating HTS Coils

石山敦士* · 金錫範** · 韓慶熙***

(Atsushi Ishiyama · Seok-Beom Kim · Kyung-Hee Han)

Abstract - We investigated the stability of cryocooler-cooled high-temperature superconducting (HTS) coils by using a computer program based on FEM. In this study, the current at which "thermal runaway" occurs, which depends on the relationship between the cooling power of the cryocooler and the heat generation in HTS coils, was adopted as a stability criterion of cryocooler operating HTS coils. It was shown that cryocooler-cooled HTS coil was stable in operating current above the critical current from the numerical analysis results by HTS model coil. And also, if we efficiently remove the heat generation from HTS coils by optimizing heat drain, the ramp-rate limitation can be mitigated because the effect of AC loss by the current rise was too small. Furthermore, in the case of pulsed operation; the HTS model coil is ramped from zero to the peak value in one second and back to zero current in one second, such as the operation of SMES device, the peak value of operating current is 1.5-2 times greater than that of the thermal runaway current.

Key Words : HTS coils, GM cryocooler, FEM analysis, stability criterion, thermal runaway current

1. 서 론

고온 초전도 (HTS)코일은 비교적 높은 임계온도(Bi-2223: 100K 이상, Y계: 90K 이상)로 인해 종래의 저온 초전도 (LTS)코일에 비해 운전온도를 넓게 설정할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 한편 km급의 선재제작이 가능하게되어 선재의 응용연구가 활발히 이루어지고 있는 Bi-2223, 2212/Ag 선재는, 액체질소 온도에서의 자장중 임계전류밀도 (Jc-B) 특성은 열악 하지만 20-30K 부근에서 Jc-B특성이 급격히 향상되어지는 특성을 나타내고있다. 상기의 이유로 현재 GM냉동기등을 이용한 전도냉각방식의 HTS코일의 시험제작 연구가 활발히 이루어지고 있다. 종래의 냉동기를 이용한 전도냉각운전 LTS코일의 경우, "임계전류마진 안정화 설계 기준"에 준하는 코일 설계를 해 왔었다[1]. 이에 비해, 권선 선재의 n값이 작은 HTS코일의 경우, 통전상태에 있어서 항상 전압(저항)이 발생하므로 "저항이 제로인 초전도코일" 이라기 보다는 "저항이 작은 상전도코일"이라고 생각하는 것이 타당하다고 사료된다. 또한 냉동기에 의한 전도냉각운전의 경우, 냉동기의 냉동능력, 코일내의 발열, 냉동기와 코일간의 열적 적합상태등을 포함한 시스템전체의 열적거동을 고려한 안정화 설계기준의 확립이 필요하다

다고 사료된다. 본 연구는 냉동기를 이용한 전도냉각운전의 HTS코일에 관한 안정성평가에 관한 기준을 확립하고자 수행 되어진 연구로써 유한요소법에 근거한 수치해석을 통하여 검토하였다. 수치해석은 고온 초전도선재 및 코일의 상전도전과 특성에 관한 실험결과와의 비교검토를 통해 높은 신뢰성이 확인된 컴퓨터 프로그램을 사용하여 수행하였다[2,3].

2. LTS 및 HTS코일의 비교

냉동기를 사용한 전도냉각방식의 LTS 및 HTS코일의 토크특성을 비교한 것을 표 1에 나타내었다. 표 1에 의하여 액체 헬륨등의 냉매가 없는 상태에서의 LTS코일의 경우, 교란등의 원인으로 일단 코일내에 전류분류 (초전도부분의 임계전류를 초과하는 통전전류가 안정화제에 분류하는 현상)가 발생하면 코일이 초전도상태로 복귀하기가 거의 불가능하기[4] 때문에 "임계전류 마진 안정화"에 준하는 안정화 설계를 해야만 한다. 한편, HTS코일의 경우는 표 1에 나타난 것과 같이 LTS코일과 상이한 토크특성을 가지고 있으므로 냉동기의 냉동능력과 코일시스템 전체의 열적 부하와의 열평형에 근거하는 안정성평가기준에 의해 안정화설계가 이루어져야 한다고 생각된다. 따라서 본 논문에서는 열평형이 붕괴되어 최종적으로 코일전체가 열폭주(thermal runaway) [5,6]에 달하는 전류 (열폭주전류; Itr)를 안정성평가기준의 지표로 제안한다. LTS코일의 경우, "임계전류 마진 안정화"를 기준으로 어느 정도 마진을 취할 것인가가 과제인 것과 마찬가지로 HTS코일의 경우는 기준으로써 선택한 Itr에 대하여 어느 정도의 마진이 적절한가를 정하는 것이 시스템설

* 非 會 員 : 와세다大 電氣電子情報工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 서울大 電氣 · 컴퓨터工學部 契約助教授 · 工博

*** 正 會 員 : 明知大 電氣情報制御工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 12月 15日

最終完了 : 2001年 6月 1日

계 최적화의 과제라고 사료된다. 상기의 개념을 바탕으로 HTS코일시스템의 열평형에 근거한 켄치특성에 관하여 평가, 검토하고자 한다.

표 1 냉동기 전도냉각 LTS/HTS 코일의 켄치 특성 비교
Table 1 Comparison of quench characteristics of LTS/HTS coils with a conduction cooling system by a cryocooler

	LTS coil	HTS coil
켄치과정	요란동에 의해 국소적인 상전도부가 발생, 전과, 과급	코일전체의 온도가 상승 최종적으로 열폭주
온도마진	수 K	수십 K
최소켄치에너지	수 mJ	수십 J
n 값	크다	작다
부하율(I_t/I_c)	< 1	특별히 의미없음
분류영역	좁다	넓다
상전도전파속도	수 백 m/s	수 cm/s

3. 전도냉각운전 HTS코일의 켄치특성 (정상상태)

우선 미국의 ASC사가 시험제작하여 실험한 HTS코일의 냉각, 여자실험 결과를 참고로 냉동기에 의한 전도냉각 운전 HTS코일시스템의 열적거동에 대하여 고찰 하고자 한다[7]. 상기코일은 초전도 에너지저장장치 (SMES)용코일의 개발을 목적으로 제작된 코일으로써 코일권선은 Bi-2223/Ag 선재를 사용하였고 구체적인 코일사양은 ID=370mm, OD=438mm, height=98mm이다. 운전전류 100A, 축적에너지 5kJ이고 25K에서 25W의 냉각능력을 가지고 있는 GM냉동기로 냉각되었다. 코일온도는 초기냉각으로부터 약 12시간 후에 22K에 달했다.

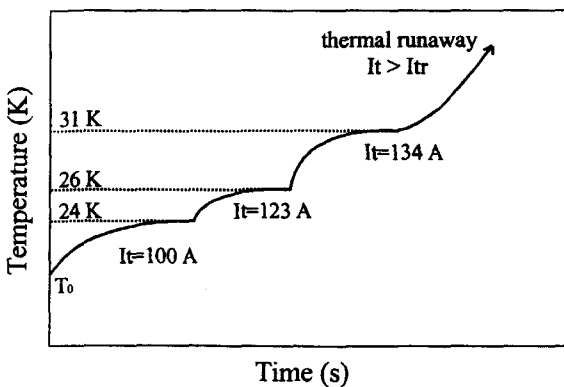


그림 1 운전전류가 100A로부터 123A, 134A로 상승되었을 때의 냉동기 냉각 HTS코일온도의 모식도
Fig. 1 Schematic view of the cryocooler-cooled HTS coil temperature as the operating current is ramped from 100A to 123A and than to 134A

그림 1은, 상기 코일에 100A, 123A, 134A의 전류를 순

서적으로 상승 시켰을 때의 코일의 온도변화를 모식적으로 나타낸다. 시간축의 숫자기입을 생략하였으나 각 전류를 상승시킨 후 열평형상태에 달하기까지는 1-2시간이상 소요되었고 열평형상태에서의 코일내의 온도차는 1-2K정도로 균일한 온도분포를 나타내었다. 134A의 전류에 의해 코일의 온도가 급격하게 상승하여 켄치된다고 가정한다. 본 연구에서는 이러한 상태 (코일의 온도가 급격히 상승하여 켄치되는 상태)를 열폭주상태로 규정하고 열폭주상태에 이르게 하는 전류를 열폭주전류로 규정한다.

이상의 HTS코일의 여자시험중의 열적거동에 관하여 그림 2를 사용하여 고찰하고자한다. 그림 2는 각 온도에 대한 냉동기의 냉각능력과 코일 내의 발열과의 관계를 모식적으로 나타낸 것이다. HTS코일은 n값이 작고 전류분류상태의 온도영역이 넓으므로 그림 2에 나타낸 것과 같은 발열곡선을 나타낸다[8]. 각 통전전류에 있어서 코일온도가 어떤 일정온도에 고정 된다는 것은 냉동기에 의한 냉각능력과 코일내의 발열이 그 온도에서 평형을 이루는 것을 의미한다. 따라서 열평형 온도는 그림 2에서의 냉각능력곡선과 코일내 발열곡선의 교점이라고 할 수 있다. 우선 초기 냉각평형 온도 (T_0)에서 100A를 통전했을 경우를 고찰하면 코일온도는 코일발열곡선 ($I_t=100A$)과 냉각능력곡선과의 교점 a까지 상승하여 그 온도에서 열평형을 이룬다 (24K). 123A로 통전 전류를 증가시키면 점 b에서 열평형을 이루고 (26K) 냉각 곡선과 발열곡선이 접하는 전류 (134A, I_{tr}) 이상의 통전전류 (134A 이상)에서는 교점이 존재하지 않으므로 발열이 냉각능력을 상회하여 코일은 열폭주에 달하게된다. 또한, 그림 2로부터 30K 이상의 냉각능력곡선과 각 전류에 의한 발열곡선의 교점이 횡축의 온도에 대한 열폭주전류임을 알 수 있다 (점c, d, e).

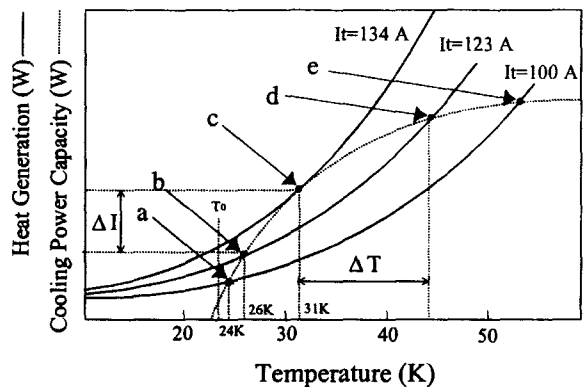


그림 2 냉동기의 냉각능력과 HTS코일내의 발열과의 관계
Fig. 2 Relation of cooling power of cryocooler and heat generation in HTS coil

상기의 고찰결과로부터 냉동기 전도냉각운전의 HTS코일의 경우, 열적거동이 상당히 완만하게 이루어지므로 코일이 최종적으로 켄치될 것인가 초전도상태로 복귀할 것인가에 대한 평가는 정상상태에서의 냉동기의 냉각능력과 코일발열과의 관계를 이용하여 평가할 수 있다고 사료된다. 따라서 상기의 관계로부터 코일이 열폭주에 달하는 전류 I_{tr} 을 전

도냉각운전 HTS코일의 안정성평가기준의 지표로 제안한다. 단, 실제시스템에 있어서의 “냉동기 냉각능력곡선”은 냉동기의 냉각능력으로부터 전류리드에 의한 열침입, 복사열, 코일의 열적접촉에 의한 열저항등의 영향을 제외한 것이 된다. 또한 그림 2로부터 HTS코일의 온도마진과 전류마진에 관한 평가가 가능하다. 예를 들어 통전전류 123A의 경우, 점 b의 온도를 운전온도라고 가정하면 점 d의 온도와 점 b의 온도와의 차가 온도마진이라고 생각할 수 있다. 마찬가지로 점 b와 점 c의 차를 전류마진이라고 생각할 수 있다. 그리고 실제의 HTS코일 운전의 경우, 전류·자계변화에 의한 손실, 권선부의 자계분포 (선재가 경험하는 자계의 크기와 방향), weak point 또는 냉각상태에 의한 국부적인 초전도특성의 저하에 관한 영향등을 고려한 설계를 해야한다고 생각된다. 이에 비해 온도마진은 운전중 교란등에 의해 코일의 온도가 상승했을 경우를 가정한 것으로 온도상승이 ΔT를 초과하면 발열곡선이 냉각능력곡선을 초과하여 열폭주에 달하게 된다. ΔI 및 ΔT는 상술한 평가곡선으로부터 계산하는 것이 가능하나 실제 코일의 최적설계를 위해서는 과도상태에서의 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 HTS모델코일을 대상으로 유한요소법에 근거한 수치해석을 통하여 과도상태에서의 코일특성에 관하여 검토하고자 한다.

4. 전도냉각운전 HTS코일의 쿨치특성 (과도상태)

전 절에서는, 냉동기 전도냉각운전 HTS코일의 안정성평가기준으로써 열폭주전류 I_{tr}를 제안하여 정상상태에서의 냉동기의 냉각능력과 코일내의 발열과의 열평형에 관하여 고찰 검토하여 제안한 열폭주전류에 의한 평가가 가능하다는 것을 나타내었다. 본 절에서는 열폭주전류에 대하여 코일의 운전전류를 어떻게 설정할 것인가에 관해서 검토하기 위하여 HTS코일의 과도특성에 초점을 두고 검토하고자 한다.

본 절에서는 유한요소법에 근거한 수치해석을 통하여 상술한 내용을 검증하고자한다. 수치해석은 그림 3에 나타난 것과 같은 모델코일을 대상으로 수행되어졌다. 모델코일의 권선선재는 Bi-2223/Ag 테이프선재로 코일권선은 초전도선재와 절연용 kapton테이프 (13μm), 전자력보강용 SUS테이프 (50μm)로 구성된다. 수치해석은 2차원 (선재 길이방향과 두께방향) 유한요소법을 사용하였고 지배방정식으로서는 일반적으로 초전도 응용기기해석에 사용되는 열평형방정식을 사용하였다[2,3].

실제의 LTS선재와 HTS선재의 큰 차이점은 전류분류개시 후에 초전도체에 통전되는 전류 I_{sc}에서 기인된다. 따라서 본 절에서는 E-J특성에 근거한 n 값을 이용하여 초전도체내의 전기저항을 가정하여 다음과 같이 I_{sc} 및 self-Joule 발열량 G_J를 구했다.

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

$$E_{Ag} = \rho_{Ag} \frac{I_{Ag}}{A_{Ag}} \tag{2}$$

$$I_t = I_{sc} + I_{Ag} \tag{3}$$

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

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

초전도체내의 전계를 E_{sc}, 안정화 은피복재(Ag)내의 전계, 전류, 저항률, 단면적을 각각 E_{Ag}, I_{Ag}, ρ_{Ag}, A_{Ag}라고 하면 초전도체와 은피복재안의 전계는 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다. 초전도체와 은피복재 양자의 전계가 동등하다고 하면 식(3)을 이용하여 I_{sc}를 구할 수 있다. 한편 전류분류영역에서의 발열량을 G_J, 은비율 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 그림 3에 나타난 것과 같이 모델코일의 보빈을 통하여 냉동기의 콜드헤드에 접촉되어 있다고 가정했고 그 외의 부분은 단열상태로 하였다.

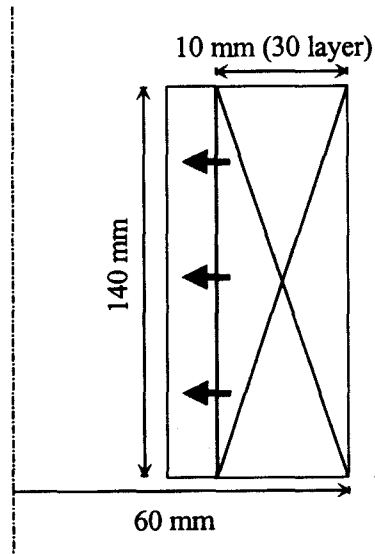


그림 3 수치해석에 사용된 HTS모델코일의 단면도
Fig. 3 Cross-sectional view of HTS model coil for numerical analysis

4.1 냉각능력과 열폭주전류

모델코일의 냉동기 냉각능력과 발열과의 관계를 그림 4에 나타낸다. 단, 발열은 초전도체내의 자속유동(flux flow)에 의한 Joule발열만을 고려했다. 냉동기로서는 1단 및 2단 구성의 GM냉동기를 가정하여 두 종류의 냉각능력에 대하여 고찰하였다.

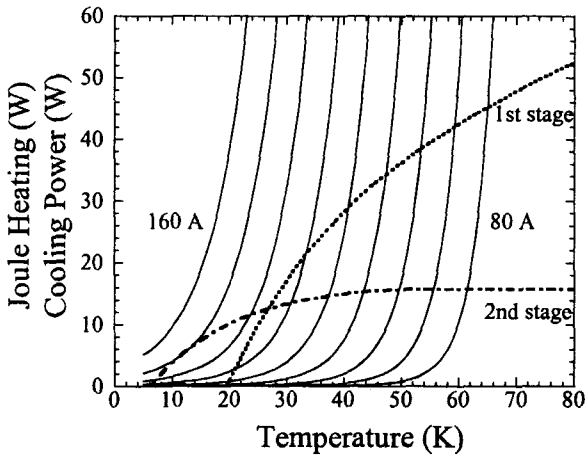


그림 4 운전전류에 대한 HTS모델코일의 발열 (실선)과 1단, 2단 냉동기의 냉각능력(점선과 일점쇄선)
 Fig. 4 Heat generation in HTS model coil at various operating currents (solid lines) and cooling powers of 1st and 2nd stage cryocoolers (dotted and dashed lines)

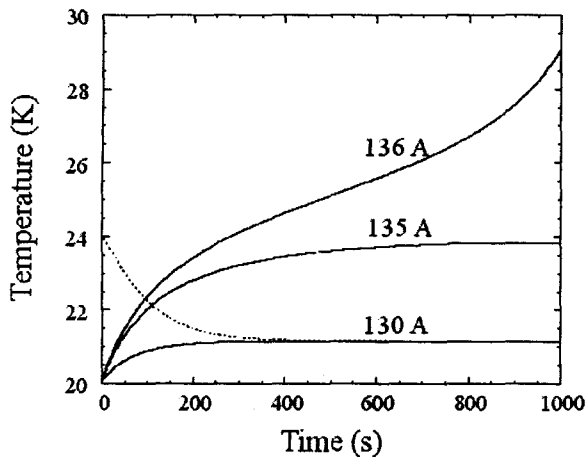


그림 5 운전전류에 대한 HTS모델코일 중앙부의 온도 (점선은 초기온도 24K, 운전전류 130A에서 코일온도)
 Fig. 5 Temperature profiles at center of HTS model coil at various operating currents (where the dotted line shows the coil temperature at the initial temperature, 24K and the operating current, 130A)

그림 4에 의하여 1단 냉동기 사용시의 열폭주전류 I_{TR} 은 130A와 140A사이에 존재한다는 것을 알 수 있다. 정확한 I_{TR} 를 산정하기 위하여 130A와 140A사이의 통전전류에 관한 수치해석결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 온도는 권선 중앙부의 온도를 나타낸다. 실선은 초기운전온도 20K에서의 결과로, 130A의 경우 약 21K에서 열평형을 이루고

135A는 24K 부근에서 열평형을 이루고 있으나 800초 이상의 상당한 긴 시간이 걸린다. 그리고 136A의 경우에는 명확하게 열폭주를 하고 있으므로 열폭주전류는 135A와 136A사이에 존재하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 상기의 계산결과 코일내의 온도차는 2K이하였다. 그림 5의 점선은 초기온도 24K에서 130A를 통전했을 때의 온도변화를 나타낸 것으로 이 온도에서는 발열보다 냉각능력이 상회하므로 코일온도는 저하하여 초기온도 20K의 경우와 동일한 21K에서 열평형을 이룬다. 수치계산으로부터 얻어진 각 온도에서의 열폭주전류를 그림 6에 나타낸다. 계산결과, 1단의 경우는 20K 이상에서 2단의 경우는 15K 이상에서 임계전류 이상의 열폭주전류가 계산되어졌고, 1단의 냉동능력이 2단의 냉동능력을 상회하는 25K 이상에서는 1단의 열폭주전류가 2단의 열폭주전류보다 커진다. 또한 그림 2, 4의 평가곡선에 준하는 안정성평가기준에 대한 타당성이 수치해석결과에 의하여 검증되었다.

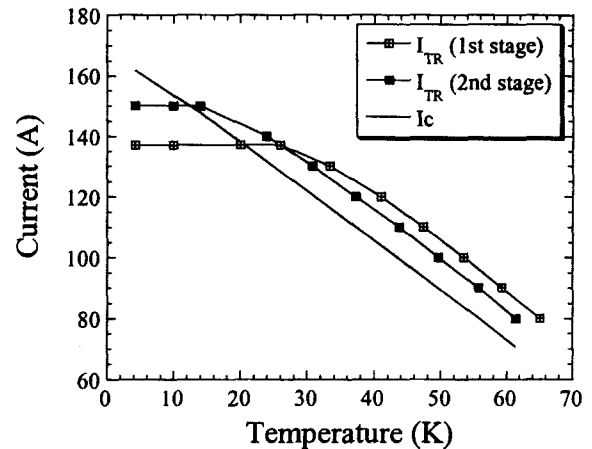


그림 6 온도에 관한 HTS모델코일의 임계전류와 열폭주전류의 계산
 Fig. 6 Critical currents and calculated thermal runaway currents of HTS model coil as a function of temperature

4.2 AC loss에 관한 영향

교류 초전도 응용기기의 문제점중에 하나인 교류손실 (AC loss)에 대하여 전술한 ASC사 SMES용 HTS코일의 AC loss가 5W이므로[7] 본 연구에서는 교류손실이 각 5, 20, 50W라고 가정하여 검토하였다. 각 경우에 있어서 통전전류는 1초만에 135A까지 상승시킨다고 가정하여 계산하였다. 가정한 각 교류손실에 대한 코일내의 온도변화결과를 그림 7에 나타내었다. 교류손실이 클수록 코일내의 발열도 커지므로 통전과 동시에 코일의 온도도 순간적으로 증가하게 된다. 그러나 최종적으로 코일이 열적 평형을 이루기 위하여 요구되는 긴 시간동안에 초기의 순간적인 온도상승에

관한 영향은 거의 없어진다. 따라서 코일과 냉동기와의 열 접촉을 최적화하여 발생열을 효과적으로 냉각시키고 코일내의 온도차를 최소화함으로써 LTS코일의 큰 과제중의 하나였던 여자속도의 제한이 대폭 완화되리라고 예상된다. 상기의 장점은 HTS코일의 커다란 쉐일포인트가 되리라고 생각된다.

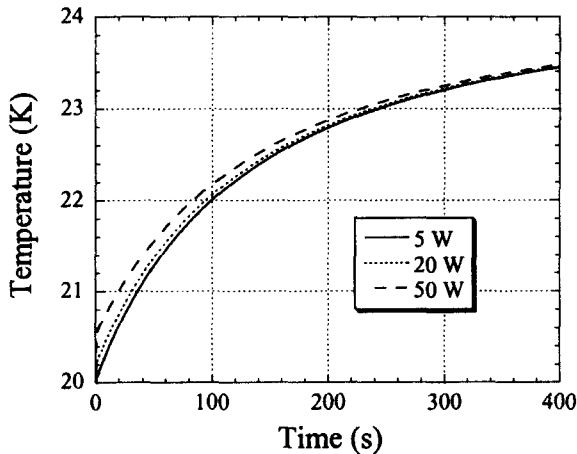


그림 7 1초만에 135A까지 운전전류를 증가시켰을 때의 교류손실효과 (교류손실은 각각 5, 20, 50W로 가정)
 Fig. 7 The effects of AC losses when operating currents rises up to 135A in one second (AC losses were assumed 5, 20, 50W)

4.3 Weak point에 관한 영향

실제의 HTS코일에 있어서는 전술한 것과 같이 전류·자계변화에 의한 손실, 권선부의 자계분포 (선재가 경험하는 자계의 크기와 방향), weak point 또는 냉각상태에 의한 국부적인 초전도특성의 저하에 관한 영향등을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 절에서는 모델코일의 극히 일부분의 (코일 중앙부의 선재길이방향의 길이 2mm) 임계전류가 그 외의 부분의 임계전류에 비하여 반감 (0.5Ic)하였다고 가정했을 경우에 대해서 수치계산하였다. 상기의 가정은 현재 제작되고 있는 HTS선재의 문제점중의 하나인 선재 임계전류의 저하에 상당하는 것으로써 코일내의 일부분에 임계전류의 저하에 의한 발열이 발생한 것을 시사한다. 계산결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 130A와 135A의 임계전류저하의 경우를 일점쇄선으로 나타내었다. 135A의 경우, 1400초가 경과해도 열평형상태에 달하지 못하고 열폭주를 할 가능성이 있다. 그러나 소형 모델코일을 대상으로한 본 연구에 있어서는 상기의 가정하에 계산한 결과 극소부분의 임계전류저하에 관한 영향은 그다지 크지 못하다는 것을 시사하였다.

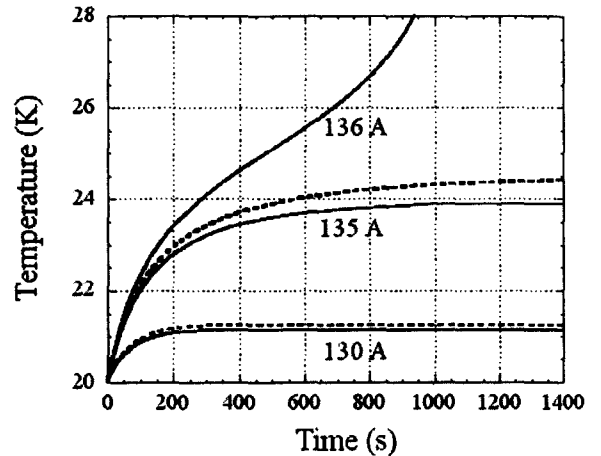


그림 8 운전전류에 대한 HTS모델코일의 온도상승 (실선)과 weak point를 시뮬레이션하기 위하여 임계전류를 반으로 줄였을 경우의 코일온도 (점선)
 Fig. 8 Temperature rise of the HTS model coil at various operating currents (solid lines). And the coil temperature in the case of reducing to the half of critical current to simulate the weak point

4.4 교란에 관한 영향

초전도 코일내에 발생하는 몇가지의 교란중 예측하기가 가장 곤란한 전자력등에 의한 기계적교란을 가정할 경우, 교란시간은 일반적으로 1ms 이하의 비교적 짧은 시간내에 발생하게된다. HTS코일의 경우 코일내의 열적거동이 대단히 완만하게 이루어지고, 온도마진 또한 크고, 고온영역에서는 열용량도 커지므로 최종적으로 코일이 켄치하는 교란열량은 LTS코일에 비하여 10^3-10^4 정도 크다[8]. 더욱이 본 연구의 모델코일이 135A 통전에 의해 열적평형을 이룬 상태에서 5ms의 열적교란에 대하여 55J의 대단히 큰 최소켄치에너지 (MQE)가 계산되어졌다. 따라서 기계적으로 파괴 될 정도의 교란이 발생하지 않는한 교란에 의해 코일이 회복불능의 상태까지 진전하지 않으리라고 예상된다.

4.5 펄스 운전시의 켄치특성

계통 안정화용 SMES에서는 1펄스 (勵磁, 減磁 각 1초) 운전이 예상된다. 이러한 펄스운전을 할 경우에는 상술한 열폭주전류 이상의 전류가 통전 가능하다고 예상할 수 있다. 따라서 본 절에서는 상기의 모델코일의 열폭주전류를 135A로 하여 펄스통전에 관한 수치계산을 수행하였다. 수치계산은 열폭주전류 135A의 1.5, 2.0, 3.0배의 1펄스 피크전류 (여자, 감자 각 1초로 2초간 통전)와 전류변화에 따른 교류손실로써 각각 5W, 20W의 경우에 대해서 수행하였다. 계산결과, 교류손실에 의한 발열의 영향은 거의 없었고 열폭주전류의 2배의 통전전류에 대해서도 코일은 최종적으로 초기상태로 복귀하였다 (그림 9). 그리고 3배의 통전전류에 대해서는 減磁가 끝나기 전에 온도가 급격히 상승하여 코일은

켄치되었다 (그림 10). 이상의 결과로부터 HTS코일을 1펄스 운전 했을 경우는 코일이 켄치되는 통전전류의 한계치가 존재하지만 열폭주전류 이상의 전류가 통전 가능하다는 것을 시사하였다. 또한 통전에 의하여 상승되어진 코일온도가 초기상태 (본 계산에서는 20K)로 복귀하는 시간은 $2.0 \times I_{tr}$ 통전일 경우 200초, $1.5 \times I_{tr}$ 통전일 경우 60초 정도였다. 이러한 초기상태로의 복귀시간을 단축하기 위해서는 코일설제시에 코일과 냉동기와의 열적접합을 최적화 할 필요가 있다. 또한 다수의 펄스통전에 대해서도 계산한 결과 5펄스통전의 경우 $2.0 \times I_{tr}$ 의 통전전류에 대하여 4번째 펄스전류시 코일이 켄치하여 1펄스에 비교하여 켄치전류가 작다는 것을 알 수 있었다.

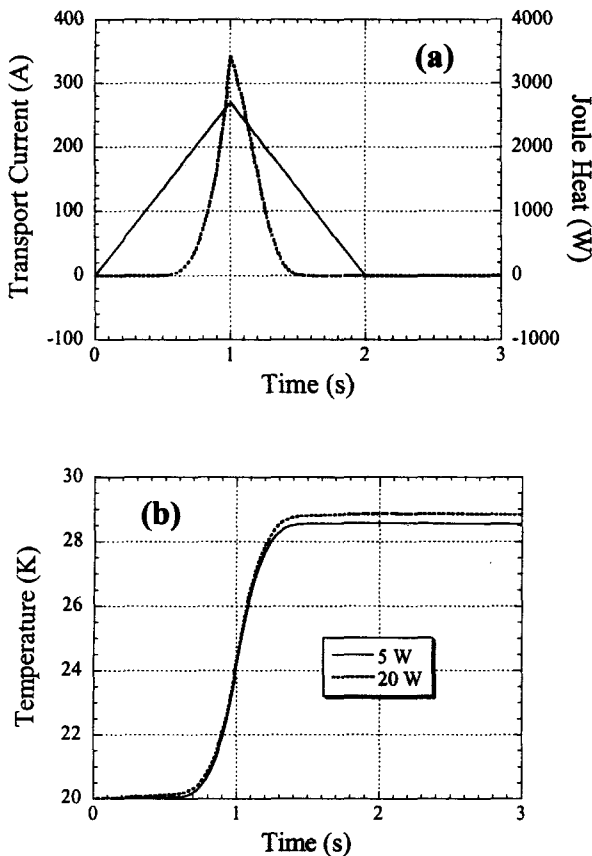


그림 9 (a) 피크 값이 열폭주전류의 2배인 1펄스전류 운전 에 의한 HTS모델코일의 발열, 그림에서 실선은 전 류 점선은 발열, (b) 1펄스전류 운전시의 교류손실 (5W, 20W)에 대한 HTS모델코일의 온도상승

Fig. 9 (a) Joule heat generation of HTS model coil for 1 pulsed current operating which the peak of operating current is twice greater than that of thermal runaway current, where solid line is current and dotted line is heat generation. (b) temperature rise of HTS model coil at various AC losses (5W, 20W) for 1 pulsed current operating same as (a)

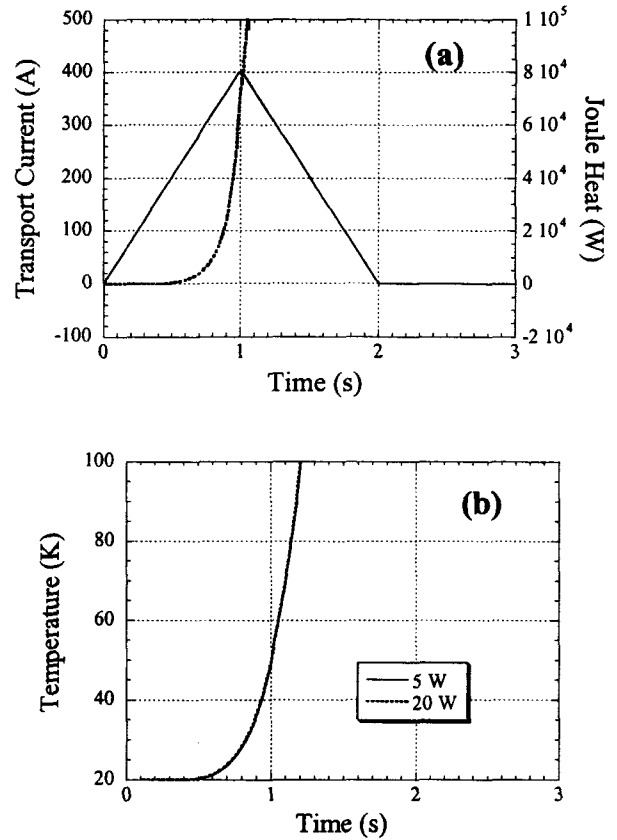


그림 10 (a) 피크 값이 열폭주전류의 3배인 1펄스전류 운전에 의한 HTS모델코일의 발열, 그림에서 실선은 전 류 점선은 발열, (b) 1펄스전류 운전시의 교류손실 (5W, 20W)에 대한 HTS모델코일의 온도상승

Fig. 10 (a) Joule heat generation of HTS model coil for 1 pulsed current operating which the peak of operating current is three times greater than that of thermal runaway current, where solid line is current and dotted line is heat generation. (b) temperature rise of HTS model coil at various AC losses (5W, 20W) for 1 pulsed current operating same as (a)

5. 결 론

본 논문에서는 현재 초전도 응용기기로써 시험제작 연구가 활발하게 진행중인 냉동기 전도냉각 HTS코일의 최적설계를 위한 안정성평가기준에 관하여 2차원 유한요소법에 근거한 수치계산을 통해 검토 연구하였다. 냉동기 전도냉각 HTS코일의 안정성평가기준으로써 코일의 열평형이 붕괴되어 최종적으로 코일이 열폭주에 달하는 열폭주전류를 제안하여 냉동기에 의한 냉각능력과 코일내의 발열과의 관계로부터 열폭주전류 및 통전전류에 대한 전류마진과 온도마진을 계산할 수 있었다. 수행되어진 수치계산결과, 냉동기에 의해 전도냉각운전되는 HTS코일의 열폭주전류는 일반적으로 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 로 평가되는 임계전류보다 크므로 임계전류이하

로 운전되는 LTS코일에 비하여 통전전류에 의한 운전효율을 대폭 높일 수 있다. 더욱이 펄스전류 통전이 예상되는 SMES용 코일의 경우는 임계전류의 2배에 가까운 전류 통전이 가능하다. 또한, 코일의 여자시에 동반되는 교류손실에 대한 영향이 적으므로 여자속도 제한이 대폭 완화되었다. 본 연구에서 수행되어진 기본적인 검토는 소형 HTS코일을 예로 한 것으로써 코일내의 온도분포는 수 K 이내였다. 본 논문에서 제안한 안정성평가기준이 적용 가능하다면 LTS코일에 비해 HTS코일의 열적안정화 설계가 간단하게 되리라고 생각된다. 그러기 위해서는 각종 크기와 형상의 코일 시스템에 있어서도 코일내의 온도차가 커지지 않도록 열적접합을 효과적으로하여 효과적인 냉각의 실현이 필요하다.

참 고 문 헌

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

[2] S. B. Kim and A. Ishiyama, "Transient stability analysis in Bi-2223/Ag superconducting tapes," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 7, No. 2, pp. 203-206, 1997.

[3] S. Shimizu, A. Ishiyama and S.B. Kim, "Quench propagation properties in HTS pancake coil," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 9, No. 2, pp. 1077-1080, 1999.

[4] Kazuo Watanabe, "Liquid helium-free superconducting magnets," *일본 저온공학*, Vol. 34, No. 5, pp. 179-187, 1999.

[5] V. S. Vysotsky et al., "Thermal quench study in HTSC pancake coil," *Cryogenics* 40, pp. 9-17, 2000

[6] J. W. Lue, M. S. Lubell, D. Azid, J. M. Campbel and R.E. Schwall "Quench in a high-temperature superconducting tape and pancake coil," *Cryogenics* 36. No. 5, pp. 379-389, 1996.

[7] S. S. Kalsi et al., "HTS SMES magnet design and test results," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 7, No. 2, pp. 971-976, 1997.

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

저 자 소 개



이시야마 아쓰시 (石山敦士)

1954년 7월14일 생. 1977년 와세다대학 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 졸업(공학박). 1979년부터 와세다대학 전기공학과 助手, 전임강사, 조교수를 거쳐 1991년 동 대학 교수. 1986년~1988년 MIT 객원연구원. 일본 저온공학협회, 전기학회, 생체자기학회, IEEE 회원.
Tel : +81-3-5286-3376, Fax : +81-3-3208-9337
E-mail : atsushi@mn.waseda.ac.jp



김 석 범 (金錫範)

1962년 6월 24일 생. 1989년 명지대 전기공학과 졸업. 1994년 와세다대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 졸업(공학박). 1996년~1998년 와세다대학 이공학부 助手. 1998년~2001년 일본 (재) 국제초전도산업기술연구센터(ISTEC) 초전도공학연구소(SRL) 주임연구원. 2000년~현재 기초전력공학공동연구소 초빙연구원 및 와세다대학 이공학종합연구센터 객원연구원. 현재 서울대 전기·컴퓨터공학부 계약조교수
Tel : 02-880-1764, Fax : 02-882-4657
E-mail : sbkim@ee.snu.ac.kr



한 경 희 (韓慶熙)

1943년 4월 9일 생. 1967년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1985~1986년 대한전기학회 편수위원. 1993~1994년 대한전기학회 전력전자연구회 간사장. 현재 명지대 전기정보제어공학부 교수.
Tel : 031-330-6359, Fax : 031-321-0112
E-mail : hkh@wh.mju.ac.kr