

비함침 초전도마그네트의 과도안정성

金 錫範[○] 石山敦士 韓 慶熙*
 早稲田大学 理工学研究科 電気電子情報工学科
 *明知大学校 工科大学 電気工学科

Transient Stability in Dry-winding Superconducting Magnets

SeokBeom Kim Atsushi Ishiyama KyungHee Han*
 Dept. Electrical Electronics and Computer Engineering, Waseda University
 *Dept. Electrical Engineering, Myong Ji University

ABSTRACT

In dry-winding(unfilled) superconducting magnets, the behavior of liquid helium occupying the extremely small void space within the winding is contributed as a primary factor for transient stability of magnets. Therefore, numerical experiments have been carried out concerning the influences of transient heat transfer of liquid helium occupying the void space in the winding and thermal properties of insulation at the conductor surface on the transient stability of magnets, by using three-dimensional finite element method(FEM). In this paper, we are going to consider three different cases for heat transfer characteristics of liquid helium to observe the influences of the rest of liquid helium in void space within the winding on the transient stability.

1. 서론

초전도 진선에 있어서, 핵침재로써 사용되고 있는 에폭시수지의 박리, 파쇄등과 전자력에 의한 도체의 움직임등과 같은 기계적 요란(擾亂)이 초전도마그네트에 있어서 불안정성의 중요한 요인이다. 이러한 요란에 의해서 발생한 출열은 마그네트내에서 3 차원적으로 확산된다. 이와같은 과도적 요란에 의한 초전도마그네트의 과도안정성을 수치적으로 해석하기 위해서는 3차원 고찰이 불가피하다. 따라서, MRI, MRS, 자기부상용 마그네트, 가속기용 마그네트와 같은 고자계마그네트에 사용되는 밀권초전도진선을 대상으로 3차원 비선형 과도 유한요소법을 사용하여 수치적으로 검토하였다[1]. 이 수치해석 결과의 일부는 실험에 의하여 겸증되었다[2].

따라서, 본 논문에서는, 비함침 초전도마그네트의 진선내에 미소한 요란이 국부적으로 발생하였을 경우, 진선사이의 매우 작은 공간에 존재하는 액체헬륨의 과도적 등특성과 절연피복의 열전도 특성이 비함침 초전도마그네트의 과도안정성에 미치는 영향에 대해서 검토했다. 또한, 도체움직임에 의한 요란발생을 억제하고, 외부요란에 의한 안정성을 향상시키기 위하여, 절연피복의 표면에 코팅을 했을 경우에 대해서도 수치적으로 검토했다.

2. 해석

2.1 해석모델과 3차원 유한요소법

3차원 유한요소법(FEM)해석에 사용한 밀권 초전도마그네트의 진선부 모델 단면을 그림1에 나타내었다. 해석모델은 도체금속부(NbTi/Cu복합다심선)와 절연피복부, 진선사이의 공간으로 구성되어 있다. 진선사이의 공간에는 핵침 초전도마그네트일 경우에는 에폭시 수지가, 비함침일 경우에는 액체헬륨으로 채워져 있다. 요란으로서는 프렉스 점프, 복사열흡수등과 같은 내부요란과 에폭시 수지의 박리, 도체움직임과 도체간 마찰등의 외부

요란을 고려하였다. 이러한 요란들은 과도적인 것으로 생각하여, 선재길이방향의 공간적 길이 0.5mm에 걸쳐서 균등하게 0.1ms동안 투입하였다. 도체직경은 1mm, 절연피복의 두께는 0.03mm, 통전전류는 200A, 외부자계는 8T이다. 해석에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\gamma(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = (\nabla \cdot (k \nabla T)) + Q_j(T, B) + Q_d(t) \quad (1)$$

여기서, γ , c , k 는 온도의존 함수인 밀도, 비열, 열전도율이고 Q_j 는 복합도체의 출열, Q_d 는 열요란이다.

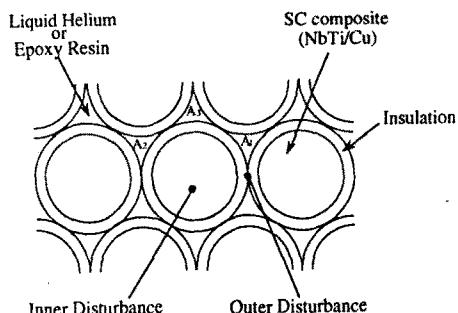


Fig.1 Cross-section of winding model for analysis

2.2 진선사이의 미소공간에 존재하는 액체헬륨의 과도특성

비함침 초전도마그네트의 진선사이의 미소공간에 존재하는 액체헬륨의 과도 열전달 특성을 C.Schmidt氏의臨界限界モデル[3]에 기초하여 식(2)와 같이 가정하였다.

$$q = h (T_s - T_{bath}) \quad (2)$$

여기서, q 는 도체내부에서 외부로의 열유속, h 는 액체헬륨의 열전달 계수, T_s 는 도체의 표면온도, T_{bath} 는 운전온도인 4.2K이다. 식 (2)에서 q 의 적분치가 제한치를 넘었을 경우, 절연피복부의 요소에 접하고 있는 액체헬륨은 核沸騰狀態에서 膜沸騰狀態로 상태전이 한다고 가정하였다. 각 상태에서의 열전달계수 h 는 식(3)과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} \text{核沸騰狀態: } & 10000 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \text{膜沸騰狀態: } & 500 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned} \quad (3)$$

또한, 미소공간에 존재하는 액체헬름의 과도안정성에 미치는 영향을 자세히 고찰하기 위하여, 액체헬름의 상태전이에 관하여 다음과 같은 3가지의 가정을 설정하였다.

case A : 액체헬름에 접하고 있는 도체표면의 각요소의 온도에 의해서 요소별로 상태전이

case B : 액체헬름에 접하고 있는 도체표면의 요소중, 한개의 요소라도 상태전이 했을 경우, 그 영향으로 인하여 주위의 모든 액체헬름이 상태전이

case C : 상태전이를 고려하지 않고 $h = 3000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 일정

2.3 절연피복의 열전도 특성

본 수치해석에서, 각 구성재료의 전자기적, 열적특성에 관해서는 온도와 자체에 관한 비선형성을 고려하였다. 그중, 절연피복의 열전도율은 다음 식으로 주어진다.

$$k = \alpha (9.494 \times 10^{-4}T + 7.10 \times 10^{-2}) \text{ W/mK} \quad (4)$$

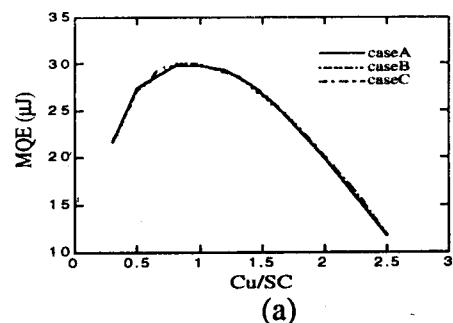
여기서, T 는 온도, α 는 절연피복의 열전도율의 영향을 검토하기 위하여 도입한 계수이며, 괄호안의 값은 일반적으로 사용되고 있는 애플리 수지의 열전도율을 근사화 시킨 값이다. 절연피복과 타영역의 경계상에서의 열저항은 식 (4)에 포함되어 있다고 가정하였다.

3. 해석결과

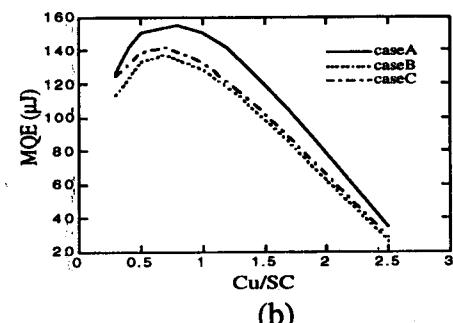
3.1 권선사이의 액체헬름의 영향

액체헬름이 액체상태에서 기체상태로 전이할 경우, 체적이 수백배로 증가하여 주위의 헬름까지 상태전이시킨다는 보고가 있다. 이러한 상전이가 발생했을 경우, 특히, 외부요란에 있어서 요란발생과 동시에 액체헬름으로부터의 냉각효과를 얻을 수 없게 되어 case A와 같은 가정은 타당하지 않게 된다. 따라서, 본 논문에서는 상술한 case B, C에 관해서도 수치해석하여 비교, 검토하였다.

비합침 권선의 내부 및 외부요란에 대한, 안정화 재료인 등의 면적비의 과도 안정성 평가기준으로 세탁한 최소 편차에너지 (MQE)와의 관계를 그림2에 나타내었다. 내부요란의 경우, case A, B, C가 거의 일치하는 결과를 얻었다. 이것은, 열전도율이 상당히 낮은 절연피복의 존재로 인하여 내부에서 발생한 요란에 의한 편차미각에 액체헬름의 냉각효과가 거의 기여하지 못하기 때문이다. 한편, 외부요란인 경우에는 case A, C, B순의 결과가 얻어졌다. 본 해석에서 case A가 냉각조건이 가장 좋은 상태이고 case B가 가장 나쁜 상태이다. 실제의 현상은 이 두 가정의 사이에서 일어난다고 예상된다. 외부요란의 경우, 발생한 요란은 액체헬름과 직접적으로 접하고 있기 때문에 헬름으로부터의 냉각효과가 과도안정성에 영향을 끼쳐서 위와 같은 결과가 얻어졌다. 그러나, case A, B의 정량적 차는 약 20% 정도이므로 MQE를 평가기준으로 했을 경우, case A, B에 의한 영향은 그다지 크지 않다. 이와 같은 case A, B의 정량적 차는 그림 3으로부터 알 수 있다. 그림 3은 MQE 및 MPE에 상당하는 면적을 투입했을 때 액체헬름이 핵비동상태에서 막비동상태로 전이한 요소의 면적을 나타낸 것이다. 그림 3에서 MPE는 편차하지 않는 최대 허용에너지로써 MQE보다 약간 작은 작은 크기의 에너지이다. case A의 경우는 도체의 온도상승과 함께 상태전이하는 면적이 점차적으로 증가하여 즐열과 냉각효과와의 대소관계에 의해 3ms 후 급격하게 증가한다. 반면, case B의 경우는 요란투입과 거의 동시에 (0.02ms)에 요란부분의 권선사이의 공간에 있는 헬름전체가 상태전이 하고, 3 단계적으로 증가한다(그림1에 상당). 따라서, case B는 액체헬름으로부터의 냉각효과를 얻기 어려워 상술한 MQE의 차가 발생하였다.

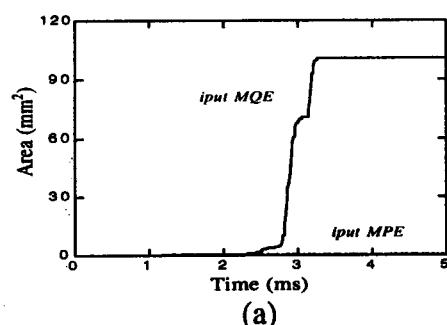


(a)

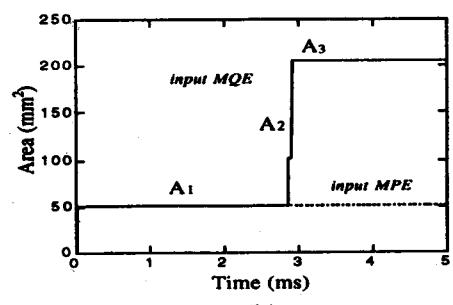


(b)

Fig.2 Cu/SC vs. MQE for caseA, B and C in dry-winding
(a) inner disturbance, (b) outer disturbance



(a)



(b)

Fig.3 Time variation of area transited from nucleate-boiling state to film-boiling state for dry-winding and outer disturbance (a)caseA, (b)caseB

3.2 절연피복의 열전도율의 영향

초전도마그네트의 안정성에 있어서는 도체부뿐만 아니라 절연피복부의 열특성에 의한 영향도 크게 작용한다고 사료된다. 그러나 이러한 특성에 관한 물성데이터는 충분하지 못한 것이 현재 실정이다. 따라서 본 해석에서는 절연피복의 열전도율을 변화시켜 수치적으로 해석하여 그영향에 대하여 검토하였다.

비합침권선의 내부 및 외부요란에 관한 해석결과를 그림 4에 나타내었다. 내부요란의 경우, 열전도계수가 20까지는 계수의 증가와 함께 MQE도 증가한다. 이것은 계수의 증가와 함께 도체내부에서 발생한 열이 도체외부로 빠르게 확산되어, 헬륨에 의한 냉각효과가 증가하기 때문이다. 그러나 계수가 30이상에서는 헬륨의 막비등상태로의 전이를 초래하여 냉각효과를 악화시켜 MQE는 감소하게 된다. 외부요란의 경우, 열전도계수가 작은 범위에서는 절연피복이 도체내부로의 열침입에 대한 차폐역할을 하여 큰 MQE를 얻게 되나, 계수가 증가함에 따라 이러한 효과가 작아져 MQE는 감소하게 된다.

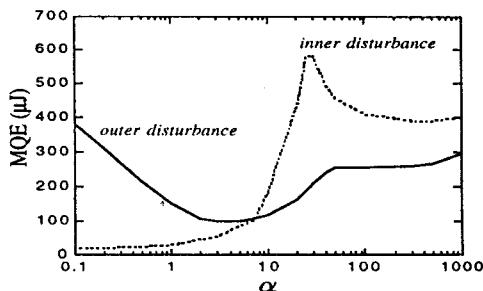


Fig.4 Thermal conductivity coefficient of insulation, α vs. MQE in dry-winding

3.3 銅피복에 의한 과도안정성의 향상

초전도마그네트의 불안정성의 가장 큰 원인은 전자력에 의한 도체의 움직임과 같은 기계적요란이다. 이러한 외부요란에 대한 대응책으로써 절연피복의 외측에 銅을 피복한 것으로 가정하여 수치해석하였다.

그림 5는 해석에 사용한 銅피복도체에 의한 밀진초전도권선의 단면도이다. 銅피복의 두께는 0.03mm이고, 해석조건은 그림 1과 같다. 그림 6은 銅피복의 유무에 의한 내부, 외부요란에 대한 해석결과이다. 그림 6으로부터 양 요란에 대하여 銅피복이 있는 경우가 MQE가 크게 됨을 알 수 있다. 특히, 외부요란에 대해서는 거의 2배의 결과가 얻었다.

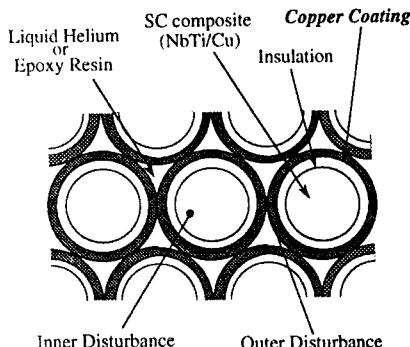


Fig.5 Cross-section of winding model for analysis with copper-coating

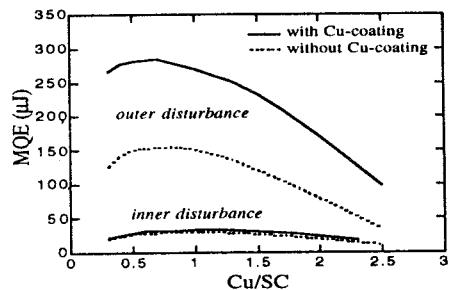


Fig.6 Cu/SC vs. MQE for copper-coating and non-coating in dry-winding

4. 결론

수치해석결과를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 비합침 밀진 초전도권선의 과도안정성을 MQE를 평가기준으로 채택했을 경우, 권선사이의 미소공간에 존재하는 액체헬륨의 과도열전달특성에 대하여 유의할 필요가 있다.
- 2) 비합침 권선의 절연피복의 열전달특성이 변화할 경우, 절연피복의 열전도율에 의한 열확산과 액체헬륨의 과도열전달특성에 의한 냉각효과와의 상관관계에 의하여 권선내의 승온현상과 과도안정성이 크게 변화한다.
- 3) 절연피복의 외측에 銅피복을 함으로써, 권선의 과도안정성(특히, 외부요란의 경우)을 크게 향상시킬 수 있었고, 도체의 움직임등에 의한 외부요란 발생 자체를 억제할 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

- 1) A. Ishiyama, S.B. Kim et al: "Permissible disturbance energies in filled and unfilled high-performance superconducting magnets", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, No.4 p2483(1993)
- 2) K. Takeuchi and Y. Iwasa: "Energy margins in a dry-winding superconducting test coil", *Cryogenics*, vol.35, p.455(1995)
- 3) C.Schmidt: "Transient Heat Transfer into a Closed Small Volume of Liquid or Supercritical Helium", *Cryogenics*, vol. 28, pp585~598(1988)