

Electromagnetic Behavior of High- T_c Superconductors under the Quench state

D.-C. Chung*, H.-S. Choi⁺, J.-S. Hwang**, K.-W. Yun[#], B.-S. Han[#]

* Div. of Information, Communication and Computer Eng. Woosuk University, Chonbuk, Korea

+ Power System Lab. Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, Korea

** Dept. of Electrical Eng., Damyang College, Damyang, Chonnam, Korea

Dept. of Electrical Eng., Chonbuk Nat'l University, Chonju, Chonbuk, Korea

Received 20 August 2001

퀸치상태 하에서 고온초전도체의 전자기학적 거동

정동철, 최효상, 황종선, 윤기웅, 한병성

Abstract

In this paper we analyzed the electromagnetic behavior of high- T_c superconductor under the quench state using finite element method. Poisson equation was used in finite element analysis as a governing equation and was solved using algebra equation using Galerkin method. We first investigated the electromagnetic behavior of U-type superconductor. Finally we applied our analysis techniques to 5.5 kVA meander-line superconducting fault current limiters (SFCL) which are currently developed by many power -system researcher in the world. Meshes of 14,600 elements were used in analysis of this SFCL. Analysis results show that the distribution of current density was concentrated to inner curvature in meander-line type-superconductors and maximum current density 14.61 A/m^2 and also maximum Joule heat was $6,420 \text{ W/m}^3$. We concluded that this meander line-type SFCL was not pertinet for uniform electromagnetic field distribution .

Keywords : SFCL, Finte Element Method, Meander line, Electromagnetic behavior

I. 서 론

액체질소 비등점 77 K 이상에서 고온초전도체가 발견된 이래 고온초전도 물질은 디지털 소자, 마이크로파 소자를 비롯한 전자소자와 초전도 전류제한기, 초전도 전력 케이블, 초전도 발전기, 전동기와 같은 전력 응용에 급속한 파급효과를 가져왔다 [1].

전자소자의 경우 이미 위성통신 및 이동통신용 수동소자가 개발 또는 완성단계에 놓여 있으며 최종적으로 냉각패키지 문제를 해결하면 실제 통신 시스템에 투입이 가능할 정도로 놀라운 발전을 거두었다 [2].

고온초전도체의 낮은 표면 저항을 이용하는 전력응용의 경우 140 kVA 급 초전도 한류기의 시험이 성공적으로 끝나고 배전급 송전선로 투입을 목전에 두고 있다. 또한 초전도 발전기와 초전도 변압기 및 전동기에 관한 연구도 매우 활기차게 전개되고 있다 [3].

*Corresponding author. Fax : +82 63 290 1453

e-mail : dchung@woosuk.ac.kr.

이러한 시점에서 고온초전도물질로 제작된 전력응용소자의 절연파괴 문제는 새롭게 대두되는 해결과제 중의 하나로 부상하고 있다. 주지하다시피 고온초전도 물질은 높은 임계전류 밀도를 가지고 있어 많은 전류를 흘려보낼 수 있는 반면 높은 전압을 인가할 경우 전력 응용 기기의 구조나 형태에 따라 매우 높은 절연 차단 특성을 필요로 한다. 따라서 고온초전도체의 정상 상태 및 퀀치 상태에 있어서 전자장 해석은 필수적이다.

본 논문에서는 고온초전도체의 퀀치 상태 전자장 해석을 유한요소법을 이용해서 모델링하고 그 특성을 현재 국내외에서 활발히 연구되고 있는 5.5 kVA급 전류 제한기에 적용시켜 보았으며 그 결과를 도식적으로 제시하였다 [4, 5]. 본 논문에서 제시한 전자장 해석은 전류 제한기 뿐만 아니라 초전도 발전기, 전동기와 여타의 초전도 전력응용 소자에도 유용하게 사용될 수 있으리라고 판단된다.

II. 유한요소의 정식화

유한요소 수치해석은 다음과 같이 전체 영역 해석과 자계 영역 해석을 위한 Poisson 방정식에 기반한다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y}) = -\rho \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon \frac{\partial A}{\partial y}) = -J \quad (2)$$

이때 A와 ϕ 는 각각 벡터 자위와 스칼라 전위를 의미한다. 먼저 전체 영역의 계산을 위하여 가중 잔여법을 이용하여 방정식 (1)에 임의의 가중함수 W를 곱하고 전체 영역에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\int_{vol} \varepsilon \nabla^2 \phi W dv = 0 \quad (3)$$

여기서 (3)식을 부분적분하여 면적적분과 체

적적분으로 표현하면,

$$\int_{vol} \varepsilon \nabla \phi \cdot \nabla W dV - \int_s W \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial n} dS = 0 \quad (4)$$

이고 이때 (4)식에서 $\partial \phi / \partial n$ 은 전위 ϕ 에 대한 법선방향 1차 도함수 값을 나타낸다. Galerkin법을 이용하여 스칼라 전위와 동일한 가중함수 W를 도입하면

$$\phi = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) \phi_i \quad (5)$$

$$W = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) \quad (6)$$

이다. 여기서 $N_i(x, y)$ 는 형상함수이고 n은 유한요소 절점수를 나타낸다. 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 각 식의 gradient는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \phi = \sum_{i=1}^n (\frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y}) \phi_i \quad (7)$$

$$\nabla W = \sum_{i=1}^n (\frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y}) \quad (8)$$

경계조건이 적용되는 유한요소 정식화에서 식 (4)의 면적분은 기지의 상수값이고 보통 '0'으로 주어진다. 식 (5)에서 식 (8)까지를 식 (4)에 대입하고 전체 영역에 대한 체적 적분과 면적 적분을 각 유한 요소의 체적과 면에 대한 요소들의 합으로 나타낼 수 있으며 최종 시스템 행렬 방정식은 다음과 같다[6].

$$[S] \{\phi\} - [T] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial n} \right\} \quad (9)$$

여기서 [S]는 체적적분 항에서 계산된 계수 행렬이고 [T]는 면적적분항에서 계산된 행렬이

며 (9)식의 해를 구함으로서 전체 영역에서 전계 분포 및 자계분포를 구할 수 있다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig. 1은 퀘치상태에서 고온초전도체의 전자장 해석을 위한 mesh 분할도를 나타내고 있다. 해석에 사용된 고온초전도체의 크기는 선폭 1 mm, 선 간격 2 mm, 길이 12 mm의 갖는 U자형 초전도체로 하였다. 또한 곡면부에서 외부 곡면의 지름은 3 mm를 갖는 반원으로 모델링하였고 내부 곡면의 지름은 2 mm의 지름을 갖는 반원으로 모델링하였다. 전력 인가는 좌측 하단 141.4 V의 침두 전압과 60 Hz 주파수를 갖는 전압파를 인가하는 것으로 가정하였다.

전자장 해석을 mesh 분할은 최초 균등분할을 써서 초기 전계분포를 구한 다음 전계의 집중이 이루어지는 곡면부에 mesh를 집중시켜서 해석의 정확도 향상을 기했다. 전자장 해석을 위해 사용된 총 mesh 수는 3650개의 삼각형 변요소를 사용하였다.

Fig. 2는 Fig. 1로부터 최종적으로 계산된 U자형 고온초전도체의 전류 분포를 나타내는 것이

다. 전체적인 과정은 Fig. 1로부터 구한 전위분포 행렬에 다음식을 이용하여 전계분포 행렬을 구하였다.

$$E = Grad[V] = \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{a}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{a}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{a}_z \right) \cdot [V]$$

또한 전류밀도는 퀘치 상태 초전도체의 전도도와 각 삼각형 요소에서의 전계 행렬의 곱을 취함으로서 구할 수 있다.

Fig. 2로부터 전류밀도가 곡면부 안쪽에 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이때 곡면부 안쪽의 전류밀도는 2.361×10^{11} A/m²임을 나타내고 있으며 곡면부의 외부로는 전류밀도가 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 전류밀도의 집중의 Joule 열을 급속하게 발생시키며 특정 전압에서 초전도 선로가 용단되는 원인으로 작용할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 Fig. 1에 적용한 결과를 현재 국내외 연구진에 의해 활발하게 개발중인 5.5 kVA 급 한류기에 적용시킨 결과를 나타낸 것이다 [4]. 이때 적용 전압은 220 V로 하였고 퀘치 상태 초전도체의 저항은 20 Ω 으로 하였으며 주파수는 60 Hz로 가정하였다. 제시된 고온초전

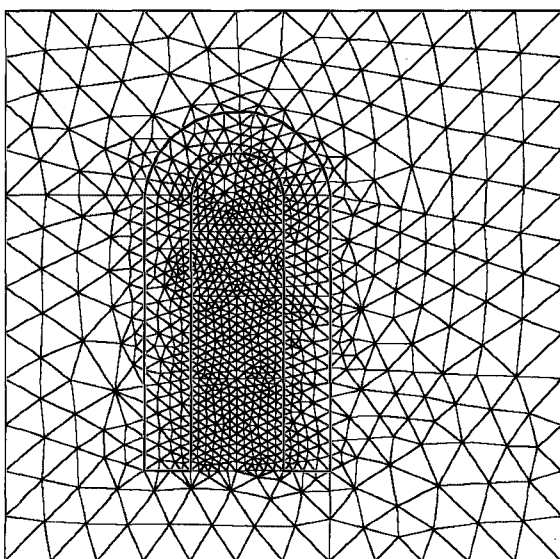


Fig. 1. Mesh patterns for electromagnetic analysis of high- T_c superconductors.

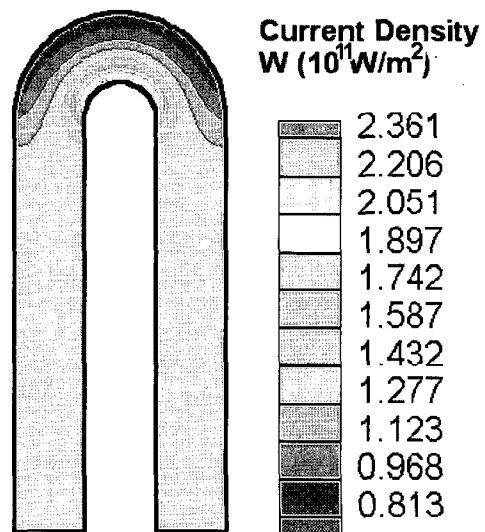


Fig. 2. Distribution of Current-density density of U-type high- T_c superconductors under the quench state.

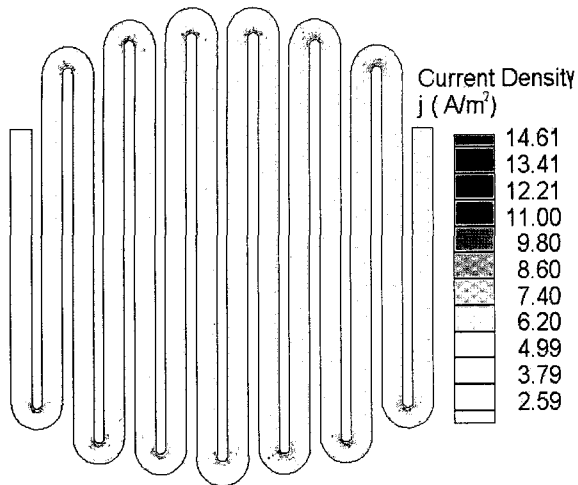


Fig. 3. Distribution of current density for superconducting fault current limiters under the quench state.

도 한류기의 meander line의 전체 길이는 42 mm였으며 각 선로간의 간격은 2 mm로 하였고 선폭 또한 2 mm로 모델링하였다. 또한 외부 곡면부의 직경은 6 mm로 내부 곡면부의 직경은 2 mm로 하였다. 전체적으로 14,600개의 삼각형 요소를 사용하였으며 Fig. 1의 경우와 마찬가지로 최초 균등분할하여 전계를 구한 다음 전계가 집중되는 곡면부에 삼각형 요소의 밀도를 증가시켜 해의 정확도를 향상시키고 직선 부분에서 삼각형 요소의 밀도를 감소시켜 계산시간을 줄일 수 있도록 하였다.

Fig. 3은 계산된 초전도 사고 전류 제한기의 전류밀도 분포를 제시한 것이다. Fig. 2에서의 경우와 마찬가지로 사고 전류 제한기에서의 전류밀도 분포는 주로 내부 곡면부에 집중되고 있음을 알 수 있다. 이때 곡면부에 분포한 전류밀도의 최고치는 14.61 A/m²이며 곡면부의 외곽부로는 전류 밀도가 급격히 감소하고 있다. 이러한 결과로부터 현재의 meander line 형태의 저항형 사고 전류 제한기는 균등한 전계분포를 이룰 수 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3으로부터 계산된 Joule 열 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3의 경우와 마찬가지로 Joule 열 분포는 주로 내부 곡면부에 집중되고 있다. 이러한 현상은 일정한 저항을 가지는 퀘치 상태에서 내부 곡면부에 전류밀도가

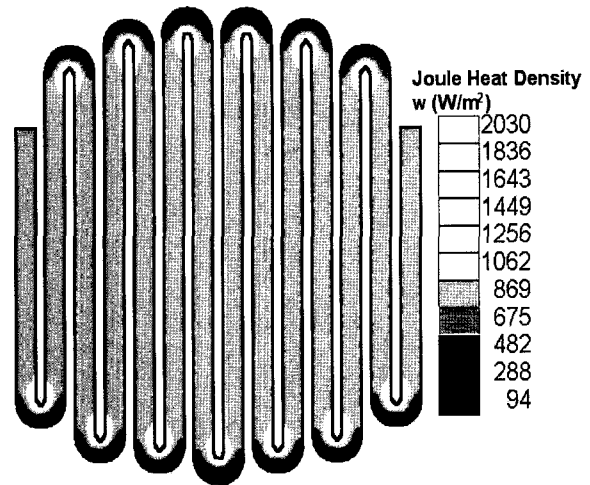


Fig. 4. Distribution of Joule heat for superconducting fault current limiters under the quench state.

집중되기 때문에 나타나는 자연스러운 현상으로 이해될 수 있다. 이때 곡면부에 분포하고 있는 Joule 열의 최고치는 6420 W/m³으로서 과도한 전압이 걸릴 경우 이 부분에서 사고전류 제한기의 용단이 일어날 것으로 예측하는 것이 가능하다.

이상과 같은 전계 분포 해석 및 Joule 열 분포 특성으로부터 다음과 같은 결과를 추정할 수 있다.

첫째, 현재까지 제작되고 있는 meander line 형태의 사고 전류 제한기의 경우 내부 곡면부에 전계가 집중됨으로서 균등한 전계분포를 이룰 수 없다.

둘째, 특정 지역에서의 전계의 집중은 전류 밀도의 집중으로 이어지며 이는 국부적 열 발생의 원인이 된다.

셋째, 따라서 현재와 같은 형태와는 다른 새로운 형태의 저항형 한류기 구조에 관한 연구가 후행되어야 한다.

넷째, 가장 안정적인 전계 분포를 갖는 형태는 직선 형태가 될 수 있으나 이는 고온초전도 박막을 효율적으로 사용할 수 없다는 문제점을 가지고 있다.

다섯째, 이상과 같은 경우를 고려한다면 동일한 곡률을 갖는 나선형 형태 등의 사고 전류 제한기 형태가 모색되어야 한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 유한요소법 알고리즘을 이용하여 고온초전도체의 켈치 하에서 전계 분포 및 전류 밀도 분포, Joule 열 분포등을 분석하였다. 또한 이러한 모델링을 현재 활발하게 운용 중인 5 kVA급 meander line 형태 사고전류 제한기에 적용하여 전계 분포와 전류 밀도분포 및 Joule 열 분포를 계산하였다. 계산된 결과로부터 현재의 meander line 형태의 사고 전류 제한기의 전계 분포가 매우 불균일함을 보였다.

References

- [1] 김준환, 이강환, “전력계통 고장전류 증대와 대처방안”, 전기 저널, vol. 5, pp. 24 ~ 31, (1998).
- [2] E. Leung, "Surge protection for power grids", IEEE Spectrum, vol. 34, no. 7, pp. 26 ~ 30, (1997).
- [3] 임성훈 외, “용융성장시 서냉시간과 후열처리시간에 따른 임계특성”, 전기전자재료학회논문지 11권 8호 pp.327-333, (1998).
- [4] Hyo-Sang Choi et.al, “Operating properties of superconducting fault current limiters based on YBCO thin films”, Cryogenics vol. 41, pp.163-167, (2001).
- [5] B. Gromoll, et. al., "Resistive fault current limiters with YBCO films - 100 KVA functional model", IEEE Trans., Appl. Supercond. vol. 9, no. 2, pp. 656 ~ 659, (1999).
- [6] S. Caorsi, D. Moreno and F. Sidoti, “ Theoretical and numerical treatment of surface integrals involving the free space Green’s function,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 41, no. 9, pp.1296-1301, (1993).