

## Slab 모델을 이용한 HTS AC 손실의 계산

최 세용, 주 진호\*, 류 경우\*\*, 나 완수  
 성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학부, \*성균관대학교 금속재료공학부, \*\*전남대학교 전기공학과

### AC Loss Calculation in High Temperature Superconductors Using Slab model.

Seyong Choi, Jin-ho Joo\*, Kyung-Woo Ryu\*\*, Wansoo Nah  
 Sung Kyun Kwan Univ. Electrical and Computer Eng.

\*Sung Kyun Kwan Univ. Metallurgical Eng. , \*\*Chonnam Univ. Electrical Eng.

conny1@nature.skku.ac.kr

**Abstract** - In this paper, we calculate the AC Loss in the superconducting slab carrying ac transport current. Magnetic diffusion equation for computation of the electric field and current distribution are based on Maxwell's equations and non-linear constitutive equation. The E-J characteristics of superconductor are applied to computation. We will present the result of the high-temperature superconductor case comparison with the slab of low temperature superconductor.

#### 1. 서 론

초전도체는 특유의 영 저항성으로 인해 여러 분야에서 전기적인 응용이 기대되며, 많은 영역에서 활발한 연구가 이루어지고 있다. 하지만 전력용 송전선, 마그네트, 변압기, 발전기와 같이 전기적으로 응용되기 위해서는 직류 뿐만 아니라 교류에서의 사용이 필수적이다. 직류에서의 무 손실성에 비해서, 초전도체는 교류로 운전되거나 교류 자계하에 노출될 때는 이른바 AC 손실이라고 불리는 손실을 가지게 된다. 교류 하에서의 손실은 초전도체가 응용되는데 있어서 여러 가지 문제점을 시사하며, 손실량의 정량적인 예측이 가능하다면 설계 단계에서 손실을 최소화할 수 있을 것이다.

초전도체에서 발생하는 AC 손실은 크게 교류 통전전류에 기인한 자기 자계 손실과, 외부에서 인가되는 교류 자계에 의한 자화 손실, 그리고 교류 통전 전류와 외부 교류 자계가 복합적으로 일어나는 형태의 손실의 경우로 나눌 수 있다. 교류 자계에 노출됨으로써 발생하는 자화 손실은 오랜 기간 동안 해석적으로 정리되어 왔으나 통전 전류에 의한 손실은 Norris의 해석식 이후에

수치적인 해석이 활발하게 이루어지고 있다. 본 논문에서는 초전도 슬랩 모델에서 교류 통전 전류에 의한 AC 손실을 비 선형적인 특성을 적용하여 수치적으로 계산하였다. 손실을 일으키는 초전도체를 슬랩 모델로 가정하여 교류 전류의 통전시 슬랩 내부에서의 자계 및 전류 분포를 저온 초전도의 경우와 고온 초전도의 경우로 나누어 계산하고 이를 통해 손실량을 계산하였다.

#### 2. 임계 상태 모델

초전도체에서의 AC 손실은 임계 상태 모델(critical state model)로 연구가 이루어져 왔다. [1] Bean에 의해서 최초로 제안된 임계 상태 모델은 2종 초전도체의 자화에 관련된 해석에 기본적인 개념으로 손실의 계산에 응용되어 왔다. [2] Bean 모델은 그림 1의 (a)에서와 같은  $E(J)$  곡선에 의해서 특징지어지고 그래프의 형태상 고온 초전도 분야에의 적용은 다소 힘들지만 계산의 편의성을 위해 널리 사용되어 왔다. 이후 많은 연구자들에 의해서 Bean 모델은 좀더 일반화되고 있고, 좀더 보편적이고 근사화된 임계 상태 모델이 제안되고 있다. 그 대표적인 형태가 Kim 등에 의해서 제안된 모델이며 기존의 Bean 모델의 경우에 비해 자계와 임계 전류 밀도와의 의존성을 부가하여 좀더 정확한 해석을 위한 기반을 제공하였다. [2] 그림 1의 (b)와 같은 모델은 상전도 상태로의 전이 이후 발생하는 저항률을 고려 한 것으로 기존의 모델들에 비해서 다소 현실적이라 할 수 있다. 그림 1-(c)는 Power law을 이용한 모델이다. 이 식은 기존의 모델들 보다 더욱 사실적으로 초전도의 특징을 잘 표현하고 있으며 다음 수식으로 설명된다. [3]

$$E = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

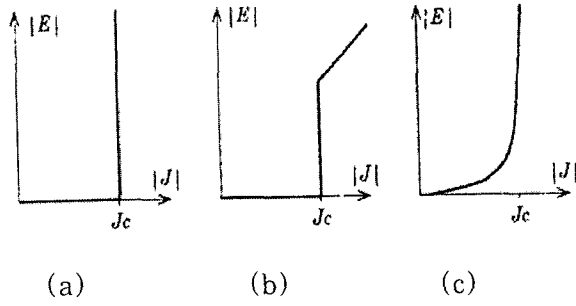


Fig.1. (a) Bean's model,  
 (b) its generalization  
 (c) approximation by power law

여기서  $J$ 는 전류 밀도,  $E$ 는 전계를 나타내며,  $J_c$ 와  $E_c$ 는 임계 전류에서 결정되는 값들이다. 고온 초전도체일수록  $n$ 값은 점점 작아지고, 전류가 증가할수록 전압은 점차 완만한 곡선 형태를 나타낸다. 이때의  $n$ 을 index number 라고 하며 초전도체 내부의 전류 분포는  $n$ 값이 작아질수록 Bean 모델의 전류 분포 형태에서 멀어지게 된다. 본 논문에서는 식 (1)과 같은 초전도체의 비선형성을 나타내는  $E-J$  관계를 적용하여 문제를 해석하였다. 그리고 특수한 경우의 임계 상태 모델에 적용되는 기존의 해석적인 해와는 달리 수치적인 방법을 통해서 계의 분포를 계산하였으며, 계산 과정에서 초전도체의 비선형성이 적용되었다. 이들 계산 모델의 수식적인 관계는 맥스웰 방정식과 비 선형방정식에 기초한다.

### 3. 해석 모델 및 자기 확산 방정식

저주파 대역에서 운전되는 거시적인 관점에서의 전자계는 다음의 맥스웰 방정식과 보조 방정식에 의해서 묘사된다.[3]

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

또한 초전도체의 비선형적인 특징으로부터 식 (4)와 같은 선형적인 관계를 갖지 못하므로 식 (5)는 식 (1)로부터 도출할 수 있다.

$$\sigma(\mathbf{J}) = \frac{J^{n-1}}{J_c^n} \frac{1}{E_c} \quad (5)$$

해석 모델이 그림 2와 같이  $x$ 축으로 유한한 폭을 가지고  $yz$ 축에 평행한 전류가 흐르는 슬랩 모델이라면 식 (2)~(4)는 다음과 같은 확산 방정식으로 유도된다.

$$\nabla \cdot (\nabla H_x(y)) = \mu_0 \sigma(\mathbf{J}) \frac{\partial H_x(y)}{\partial t} \quad (6)$$

인가되는 통전 전류는 슬랩의 양쪽 단면에서 경계조건으로 입력 된다. 슬랩의 경계에서는

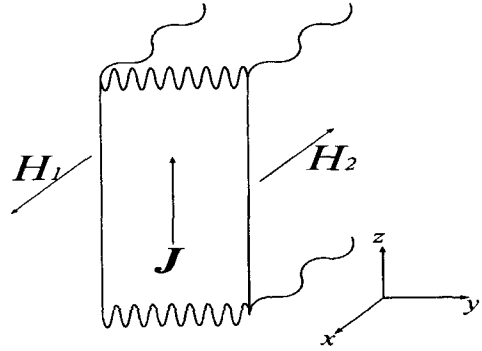


Fig. 2. Geometry of the slab model

$H_1(t) = -H_2(t)$ 의 관계를 갖고, Ampere's law에 의해서  $H_1(t) - H_2(t) = I(t)$ 이다.  $I(t)$ 는 단위 길이당의 전류로써 표현되며 [A/m]를 나타낸다.

식 (6)의 해들은 시간과 변위의 함수로써 이로부터 전계 및 전류밀도 분포를 계산할 수있으며, AC 손실은 슬랩의 단위 체적에서 주기당 에너지 손실 식으로 계산된다.

$$Q = \frac{1}{S} \int_0^T \int_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \, ds \, dt \quad (7)$$

### 4. 결 론

제안된 방법을 통해서 초전도 슬랩에서의 전계 및 전류 밀도 분포가 자기 확산 방정식을 통하여 수치적으로 계산하였다. 초전도체에서 비선형의 관계를 갖는  $E-J$ 의 특성은 비선형성이 다소 심해 해석에 적용하는데 있어 다소 어려움이 있으며, 본 논문의 해석 결과는 학술 대회를 통해 발표될 예정이다. 수치적인 계산법을 사용하면 해석적인 방법에 비해서 적용 범위에 있어서 일반화를 가지며, 2차원이나 3차원 해석으로 진행된다면 좀 더 일반적인 초전도체의 형상에 대해 손실의 예측이 가능할 것으로 사료된다. 본 논문에서 제안된 방법을 통하여 추후에 2차원으로 해석 영역의 범위를 넓혀갈 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Wilson, M.N., "Superconducting Magnets", Clarendon Press, Oxford, 1983
- [2] L. Prigozhin, "Analysis of Critical-state problems in Type II Superconductivity", IEEE Trans.on Appl. Supercon., Vol7, pp3866~3873, 1997
- [3] J.Passl, "Computation of AC losses in HTS", Physica C, 310 pp62~66, 1998