

임계전류밀도 변화에 따른 고온초전도 코일의 자화손실 추정

김영일*, 이지영*, 이세연*, 박상호*, 김우석*, 이지광**, 최경달*
 한국산업기술대*, 우석대**

The magnetization loss estimation of HTS coil according to the change in critical current density

Yungil Kim*, Ji-Young Lee*, Seyeon Lee*, Sang Ho Park*, Woo-Seok Kim*, Ji-Kwang Lee**, Kyeongdal Choi*
 Korea Polytechnic University*, Woosuk University**

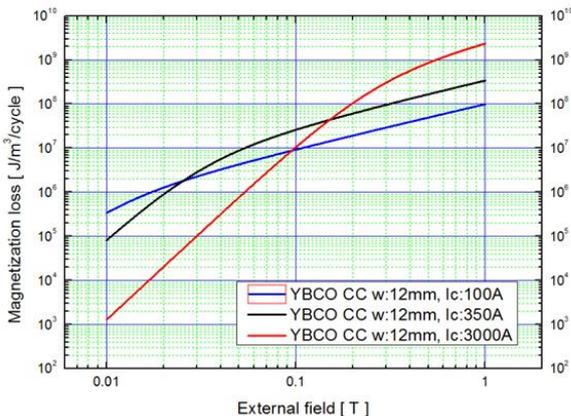
Abstract - 최근에 개발되고 있는 2세대 고온초전도 선재는 77.3 K의 액화질소보다 높은 임계온도를 가진다. 응용기기의 특성에 따라 액화질소 온도 이하의 다양한 온도 범위에서 운전되고 있다. 이러한 운전 온도의 차이는 초전도 선재의 임계전류 차이를 가져오고, 높아진 임계전류는 시스템의 안정도 측면에서 장점을 가지는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 다양한 운전 온도 조건에 따른 임계전류에 의한 교류손실 측면의 연구를 진행하였다. 다양한 초전도 권선 형태에서의 임계온도에 따른 교류손실 특성을 수치해석을 통해 확인하고, 시스템의 안정성 향상에 필요한 운전온도에 대한 기본적인 특성 연구를 수행하였다.

1. 서 론

최근의 초전도 기기는 2세대 고온초전도 선재를 이용한 개발이 주로 이루어지고 있다. 고온초전도 선재의 경우 과거 저온초전도 선재와 달리 액화질소 온도 이상의 높은 임계온도를 가지고 있다. 초전도 선재의 특성상 낮은 운전온도에서 높은 임계전류 특성을 보이므로 응용기기의 적용에 있어 운전온도의 설정을 통한 초전도 선재 사용량의 감소 및 전류 측면의 안정성을 높이는 것이 가능하다. 최근의 응용기기들은 냉매를 이용한 침지 냉각방식 이외에 극저온 냉동기를 활용하여 저온초전도체를 적용했을 때 보다 시스템 개발 시 운전온도 설정의 범위가 다양하다는 장점이 있다.

초전도 변압기나 초전도 에너지 저장 장치와 같은 교류환경에서 동작하거나 충-방전이 이루어지는 초전도 기기의 경우 액화질소 온도 보다 낮은 65 K의 온도에서 운전하여 시스템의 안정성을 높이는 형태로 설계 및 운전되고 있다. 이러한 낮은 온도의 운전 조건은 초전도 선재의 임계전류 마진을 높여주어 시스템의 안정성을 높일 수 있는 방법이지만, 임계전류가 달라지는 경우 교류손실의 차이가 발생하는 것으로 알려져 있다.

그림 1에 임계전류에 따른 초전도 선재에서의 외부인가 수직방향 자기장에 의한 교류손실 특성을 나타내었다. 그림에서와 같이 100, 300, 3500 A의 임계전류를 가지는 각각의 초전도 도체에 동일한 외부 인가 자기장이 인가되는 조건에서, 각각 다른 형태의 교류손실 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 임계전류 특성을 높이기 위한 운전온도의 변화가 시스템의 임계전류를 증가시키지만 교류손실의 증가 혹은 감소를 가져올 수 있음을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 임계전류 차이에 따른 교류손실 특성 파악을 위한 연구를 진행하였다.[1]-[2]



〈그림 1〉 초전도 선재의 임계전류에 따른 외부인가자기장-자화손실 특성

2. 본 론

2.1 초전도체의 교류손실

초전도체의 경우 직류 자기장 및 전류 환경에서는 0 저항 특성을 보이지만, 교류 자기장 환경 및 교류 운전전류가 흐르는 시스템의 경우 교류손실이 발생한다. 이러한 교류손실은 초전도 기기를 교류 시스템에 적용하는 데 걸림돌이 되며, 냉각 시스템의 부하로 작용하여 시스템의 효율을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 이러한 교류손실은 교류 시스템이 아니더라도 전류의 충전, 방전 시의 전류, 자기장의 변화에 의해서도 발생되기 때문에 시스템의 안정적인 설계 및 운전을 위해서는 교류손실의 정확한 예측 및 특성에 대한 명확한 이해가 선행되어야 한다.

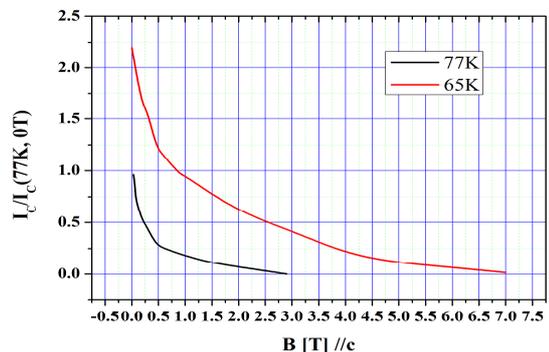
본 논문에서는 모델 코일의 교류손실을 계산하기 위해서 Brandt와 Indenbom의 strip 모델을 사용하였으며, 식 1에 표시하였다. 식의 K는 초전도 선재의 형상계수, B_c 는 임계침투 자기장, β_{\perp} 는 B/B_c 의 비율을 나타낸다. 식 1을 통해 얻어지는 손실값은 [W/m]의 단위를 갖는다.[3]

$$P_{\perp} = K \frac{4\pi a^2 f}{\mu_0} B_c B_{\perp} \left[\frac{2}{\beta_{\perp}} \ln(\cosh \beta_{\perp}) - \tanh \beta_{\perp} \right] \quad \text{식 1}$$

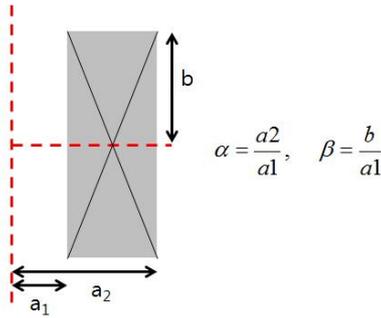
2.2 해석 모델 선정 및 교류손실 해석

해석 모델의 선정을 위해 운전온도가 다른 두 가지를 조건으로 선택하였고, 서브-쿨링을 통한 운전온도가 65 K이 주로 사용되기 때문에 액화질소를 사용한 운전온도 77 K과 65 K를 선정하였다. 그림 2에 77 K, 65 K에서의 초전도 선재의 외부인가 수직자기장에 대한 임계전류 특성을 나타내었다.[4]

고온초전도 코일의 형태에 따른 교류손실의 계산을 위해서 상용 수치해석 프로그램을 사용하였다. 모델 코일의 형상은 α , β 로 결정되며, 각각의 값에 따라 독립적인 전류밀도가 적용되어 계산된다. 그림 3에 α , β 에 따른 모델 코일의 형상을 나타내었다. α 가 커질수록 팬케이크 형태로 코일 직경이 커지는 모델이고, β 가 커질수록 슬래노이드 형태의 코일로서 높이가 높아지는 형상을 갖는다. 모델 코일의 내경은 0.05 [m]로 고정하였고, α 는 2에서 1 단위로 5까지, β 는 1에서 1 단위로 5까지 설정하였다. 모델 코일의 자화손실계산 식에 적용할 선재의 I_c 는 300, @ (77 K), 660 A (@65 K)이다. 각 모델 코일의 I_{OP} 는 그림 2에서의 임계전류 비율과 모델코일의 자석상수 함수를 참고하여 결정하였고, 각 모델 코일의 계산된 손실 값의 단위는 [W]이다. 계산된 손실 계산 결과값은 동일 모델일 때, 77 K에서의 손실값 대비 65 K에서의 손실값 비율로 확인하여 특성을 파악한다.



〈그림 2〉 77K, 65K 에서의 초전도 선재의 외부인가 수직자기장에 대한 임계전류 특성

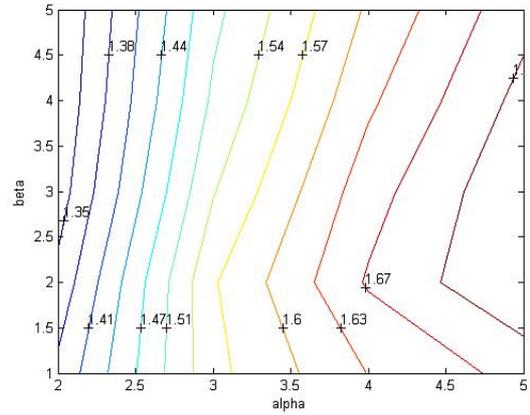


<그림 3> 모델 코일의 α , β 에 따른 형상

2.3 교류손실 계산 결과

해석모델의 경우 α , β 의 차이에 따라 코일의 직경이 커지는 방향과 높이가 높아지는 방향으로 정해진다. 이는 코일의 턴 수와 적층의 수가 많아지는 방향으로서 절대적인 손실의 값은 커지는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4에 α , β 에 따른 77 K 운전온도에서의 교류손실 해석 결과를 나타내었다. 계산 결과 α , β 의 증가에 따라 교류손실의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 해석 모델의 특성상 α , β 의 증가는 초전도 코일의 크기 증가를 가져오므로 동일한 운전 조건에서 초전도 선재 사용량의 증가에서 기인한 교류손실의 증가로 판단할 수 있다.

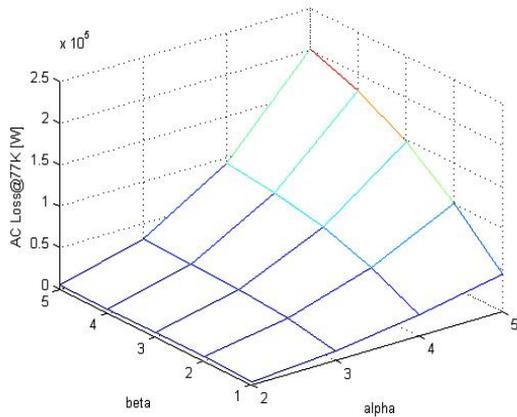
그림 5에는 동일한 α , β 조건을 갖는 모델 코일에 대한 65 K 운전 온도에서의 계산 결과를 나타내었다. 77 K 운전 온도에서의 교류손실과 비교하면 동일한 운전 전류에서 더 높은 교류손실을 가지는 것으로 확인되었고, 이러한 교류손실의 증가는 임계전류의 증가가 전류 측면에서의 마진을 높이는 것과는 다르게 교류 손실의 측면에서는 시스템의 안정성을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있음을 보여주고 있다.



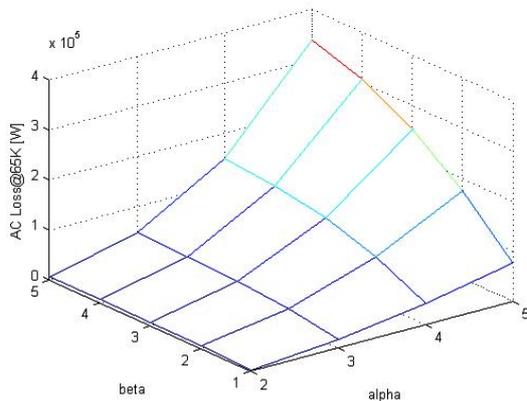
<그림 5> α , β 에 따른 77 K에서의 모델 코일 손실값에 대한 65 K에서의 손실값 비율 분포

그림 5에 식 (2)를 이용하여 운전온도에 따른 교류손실의 비를 나타내었다. 손실 비율은 α , β 에 따라 분포되고 α 보다는 β 의 증가로 인한 두 운전 온도에 따른 손실값의 차이가 적어짐을 확인할 수 있었다. 이는 β 가 커질수록 높이가 높은 솔레노이드 형태를 나타내며, 65 K뿐 만 아니라 더 낮은 온도에서의 손실값 계산과 모델 코일 형상에 대한 설정에 고려해야 할 것으로 판단된다.

$$\text{Loss Ratio} = \frac{\text{Magnetization Loss (@65 K)}}{\text{Magnetization Loss (@77 K)}} \quad \text{식 2}$$



<그림 4> 77 K의 운전온도를 갖는 모델 코일의 α , β 형상에 따른 교류손실값 분포



<그림 4> 65 K의 운전온도를 갖는 모델 코일의 α , β 형상에 따른 교류손실값 분포

3. 결 론

본 논문에서는 다양한 운전범위에서 사용이 가능한 고온초전도 선재의 운전 온도에 따른 교류손실 측면의 연구로서, 고온초전도 코일에서의 임계전류 차이로 인한 교류손실 특성에 대한 계산 및 해석을 진행하였다. α , β 를 가변하여 다양한 코일의 형태를 선정하고, 운전 온도 차이에 따른 교류손실의 계산을 진행하였다. 77 K과 65 K에서의 손실값을 확인하였고 α , β 에 따른 손실 발생 정도의 차이는 다르지만, 65 K에서의 손실 발생 가능성이 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 77 K의 운전 온도로 설계된 초전도 전력기기를 서브-쿨링을 통한 65 K에서의 운전 시, 교류손실 발생이 시스템의 안정성 저하를 야기할 수 있음을 고려해야 한다. 또한 운전 온도에 따른 임계전류와 더불어 코일의 α , β 의 형상에 따른 교류손실 값의 특성을 고려해야 한다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2014R1A1A2058788)

[참 고 문 헌]

- [1] Woo-Seok Kim, Song-Yop Hahn, Kyeong-Dal Choi, Hyeong-Gil Joo, and Kye-Won Hong, "Design of a 1 MVA High Tc Superconducting Transformer", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 13, NO. 2, 2003
- [2] Woo-Seok Kim, Sang-Yeop Kwak, Ji-Kwang Lee, Kyeong-Dal Choi, Hyun-Kyo Jung, Ki-Chul Seong, and Song-yop Hahn, "Design of HTS Magnets for a 600 kJ SMES", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 16, NO. 2, 2006
- [3] Ernst Helmut Brandt, Mikhail Indenbom, "Type-II superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field", Physical Rev.B, Vol.48 No.17, 12893, 1993
- [4] SuperPower-inc homepage. [Online]. Available: http://www.superpower-inc.com/system/files/SP_2G+Wire+Spec+Sheet_2014_web_v1_0.pdf