

금속 절연 초전도 코일의 과전류 특성 해석

조전욱*, 심기덕*
한국전기연구원*

Analysis on the over current characteristics of metal insulated HTS coil

Jeonwook Cho*, Kideok Sim*
Korea Electrotechnology Research Institute*

Abstract - 초전도 코일의 안정성(stability)을 향상시키기 방법으로 초전도 자석의 턴(turn) 사이의 절연을 없애는 무절연 코일(no-insulation coil) 및 금속 테이프를 같이 권선하는 금속절연 코일(metal insulation coil)이 제안되어 활발히 연구되고 있다[1]. 본 논문에서는 고온초전도 코일의 열적, 전기적 메카니즘을 분석하기 위한 FEM 모델을 제시하고, 이를 사용하여 퀘치 시 고온 초전도 코일의 안정성 향상 정도를 해석한다.

1. 서 론

최근 들어 2세대 고온초전도 선재를 적용한 초전도 자석의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 2세대 고온초전도 선재의 퀘치(quench) 진과 속도가 상당히 느린 관계로[2], 퀘치를 검출한 후 자석을 보호하기 위한 일련의 유효한 기술적 기법의 개발에 어려움을 겪고 있다. ‘퀘치의 검출 후 보호’라는 사후적(事後的) 방법과는 달리 권선 사이에 금속을 권선하여 코일 자체의 안정성을 향상시키는 방법이 연구되고 있다.

그러나 권선 사이의 분산적이고 연속적인 저항의 연결, 퀘치 시 초전도 선재의 비선형적인 저항변화 및 퀘치 영역을 우회하는 전류 패턴의 복잡성 등으로 관련 메카니즘을 정확히 예측하기가 어렵다. 본 논문에서는 2세대 고온초전도 선재의 온도상승 및 전류 분류 패턴을 해석할 수 있는 FEM 모델을 만들고 이것을 확장하여 코일 형태에 적용함으로써 무절연 코일 및 금속절연 코일의 과전류특성을 해석한다.[3]

2. 본 론

2.1 초전도 선재의 과전류 특성

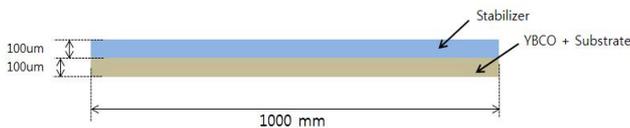
2.1.1 해석 모델

초전도 선재의 해석에 적용되는 지배방정식은 수식 1의 maxwell equation과 수식 2의 열전달 방정식의 결합으로 이루어진다. 여기에서 E 는 전계, I 는 전위, J 는 전류밀도 그리고 ρ 는 재료의 비저항이다. 또한 수식 2에서 K 는 열전도도, Q 는 발열량, C 는 냉각 열속(heat flux) 그리고 C_p 는 재료의 비열, T 는 온도이다.

$$E = -\nabla V, E = \rho J \quad \text{<수식 1>}$$

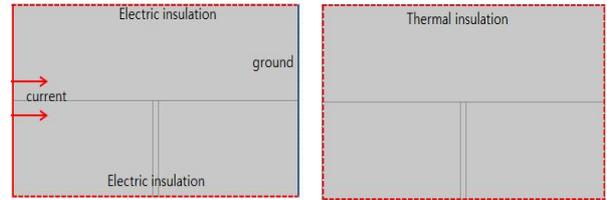
$$k \frac{dT}{dx} + Q + C = \rho C_p \frac{dT}{dt} \quad \text{<수식 2>}$$

해석 모델은 강한 비선형 문제의 풀이에 적합한 것으로 알려진 COMSOL™을 사용하여 구성하였다. 그림 1은 초전도 선재의 해석을 위한 모델의 개략도를 보여준다. 초전도 선재(YBCO)와 안정화재(stabilizer)의 두께는 모두 100 μm로 하였으며 선재의 길이는 1 m를 가졌다.



<그림 1> 초전도 선재 해석모델의 개략도

그림 2는 해석모델의 경계조건을 보여준다. 전류는 선재의 왼쪽 단에서 오른쪽 단으로 흐르며, 선재의 상부와 하부는 전기절연으로 설정한다. 전도냉각 상태에서 단시간의 열적변화는 단열조건으로 보아도 무방하므로 선재의 외각면을 단열조건(thermal insulation)으로 설정하였다.



<그림 2> 전기적 경계조건(a) 열적 경계조건(b)

운전전류 및 온도에 따라 변화하는 초전도체의 비저항은 수식 3과 같이 표현되며, 초전도 선재의 등가 저항은 수식 4와 같이 초전도체와 기판(substrate)의 병렬 저항으로 가정할 수 있다. 여기에서 ρ_{sc} 는 초전도체의 비저항, $E_c=1.0e-4$ [V/m], $J_c(T)$ 는 초전도체의 온도에 따른 임계전류 밀도, J 는 전류 밀도 그리고 n 은 초전도체의 index 값이다. 또한 ρ 는 초전도 선재의 등가 저항이며, ρ_{stab} 는 온도에 따라 변화하는 안정화재(hastelloy)의 비저항이다.

$$\rho_{sc} = \frac{E_c}{J_c(T)} \left(\frac{J}{J_c(T)} \right)^n [\Omega m] \quad \text{<수식 3>}$$

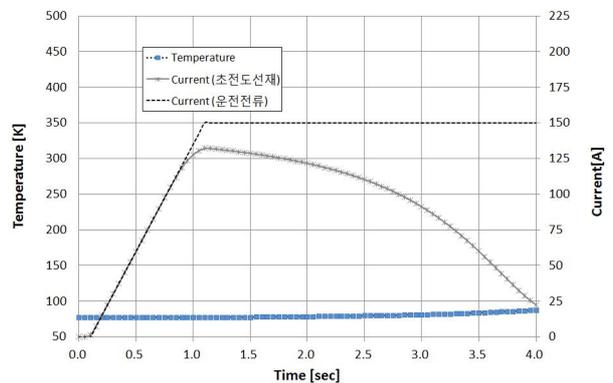
$$\rho = \frac{\rho_{sc} \rho_{stab}}{\rho_{sc} + \rho_{stab}} [\Omega m] \quad \text{<수식 4>}$$

2.1.2 해석 결과

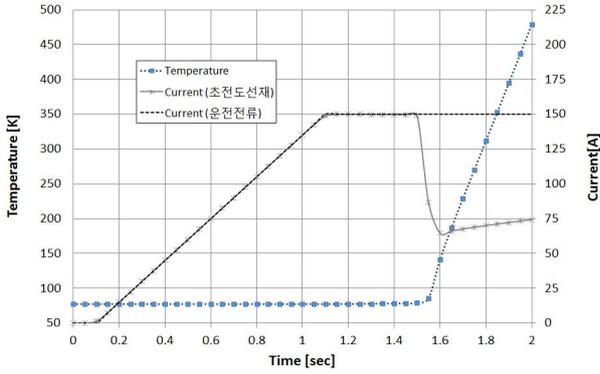
초전도 선재에 대한 특성 해석은 안정화재의 재질을 달리하는 두 가지 경우에 대해 수행하였다. 표1은 해석조건을 정리한 것이다.

<표 1> 초전도 선재 해석 조건

항목	Case 1	Case 2
안정화재 종류	Copper(RRR100)	SUS304
안정화재 두께	100 μm	
초전도선재임계전류	100A (@ 77.4K)	
운전전류	0A to 150A (1초간 선형증가)	
초기온도	77.4 K	



<그림 3> 구리를 안정화재로 사용한 경우에 대한 해석 결과



〈그림 4〉 SUS304를 안정화재로 사용한 경우에 대한 해석 결과

그림 3과 그림 4는 각각 구리를 안정화재로 사용한 경우(case 1)와 SUS304를 안정화재로 사용한 경우(case 2)에 대한 과전류 통전시 온도 상승과 전류 분류 특성을 보여 준다. Case 1의 경우 125A 근처에서 전류 분류가 발생하여 초전도선재로 흐르는 전류가 줄어들며, 이에 따라 초전도 선재의 온도 상승은 통전 후 4초경과 시점에 88 K 정도에 불과하다. 그러나 SUS304를 사용한 경우는 전류 분류가 발생하는 시점이 지연되며, 선재의 온도 상승은 통전 후 2초경과 시점에 470 K 이상으로 폭주(thermal run-away)한다.

2.2 금속 절연 코일의 과전류 특성

2.2.1 해석 모델

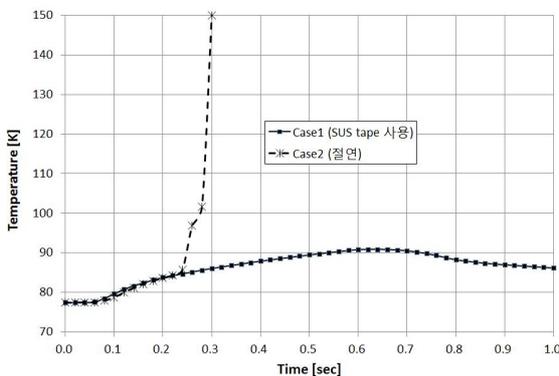
초전도 선재의 해석에 사용된 FEM 모델을 확장하여 초전도 코일 형상에 대한 모델을 구성하였다. 초전도 선재 사이에 SUS 304 tape을 권선하는 경우와 권선 사이를 절연하는 경우에 대해 비교하였다. 90 A의 온전전류를 흘리는 도중에 히터를 인가하여 켄치를 유도 하였다. 이때 켄치 영역에서의 전류 분류를 해석하였으며 이에 따른 초전도 코일의 온도 및 전압 상승 결과를 비교하였다. 표 2에 해석조건을 정리하였다.

〈표 2〉 금속 절연 코일의 해석 조건

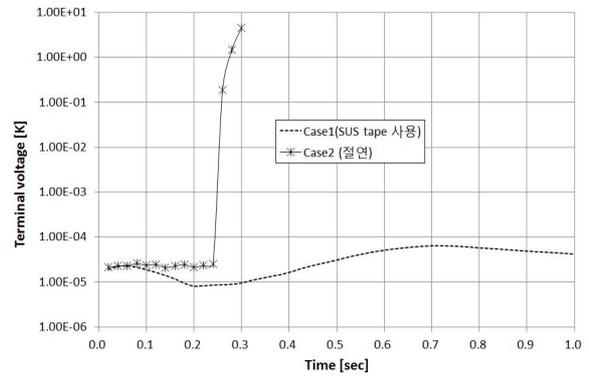
항목	Case 1	Case 2
권선간 절연재	SUS 304 tape	절연 (비저항: case1×10,000)
권선간 절연 두께		100 μ m
초전도선재 두께		100 μ m
코일 내반경		50 mm
코일 턴수		10 turn
히터 위치		5번째 turn
히터 열량		3W (0.1초-0.6, 0.5초간 인가)
초전도선재임계전류		100A (@ 77.4K)
온전전류		90A
초기온도		77.4 K

2.2.2 해석 결과

그림 5는 켄치 시 온도상승 결과이다. 절연된 코일(case 2)의 경우 히터 인가 후 0.15초 시점에 온도가 급격히 상승한다. 그러나 금속 절연된 코일(case 1)은 온도 상승폭이 case 2에 비해 현저히 작을 뿐만 아니라, 히터가 꺼진 후 온도는 다시 회복된다.



〈그림 5〉 켄치 시 온도 상승 비교



〈그림 6〉 켄치 시 전압 상승 비교

그림 6은 전압 상승 결과를 비교한 것이다. 온도 상승 결과와 유사하게 절연 코일에서 급격한 상승을 보인다. 이것은 절연 코일의 경우 초전도 선재에 켄치가 발생하더라도 인접한 권선으로 전류를 우회시키지 못하기 때문으로, 이 경우 초전도 선재의 국부적인 위치에 지속적으로 열이 발생하여 결국 초전도 선재가 소손되게 된다. 그러나 금속 절연 코일의 경우는 전류를 우회시킬 수 있는 경로가 충분하기 때문에 상대적으로 낮은 온도 상승과 전압상승 특성을 보인다.

3. 결 론

2세대 고온 초전도 선재의 통전 특성 해석을 위한 FEM 모델을 구성하여 선재의 안정화재의 종류에 따른 과전류 특성을 해석하였다.

초전도 코일의 통전 특성 해석을 위한 FEM 모델을 구성하였으며, 금속절연코일과 절연코일의 과전류 특성을 비교하였다. 이를 통해 금속절연코일이 절연코일에 비해 현저히 뛰어난 안정성을 갖는 것을 해석적으로 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Sukjin Choi, "A Study on the No Insulation Winding Method of the HTS Coil", IEEE transactions on applied superconductivity, v.22 no.3, pp.4904004 - 4904004, 2012
- [2] Sumption, M D, "Thermal diffusion and quench propagation in YBCO pancake coils wound with ZnO and Mylar insulations", Superconductor science & technology, v.23 no.7, pp.075004, 2010
- [3] Seungyong Hahn, "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation", IEEE transactions on applied superconductivity, v.21 no.3 pt.2, pp.1592 - 1595, 2011