

고온 초전도체 팬케이크 코일의 켄치 해석

Quench Analysis in HTS Pancake Coil

박차식^{1*}, 안태길¹, 박경우², 김도형³, 차귀수⁴, 서정식⁵C.S. Park^{1*}, T.K. Ahn¹, K.W. Park², D.H. Kim³, G.S. Cha⁴, J.S. Seo⁵

Abstract: The thermal characteristics of quench propagation is a crucial problem for the stability of the superconductor. The objective of this study is to simulate the quench propagation with the variation of disturbance energy in Bi-2223/Ag HTS pancake coil. In this analysis, the temperature-time trace of a point away from heater was calculated under conditions of different quench energy. The critical disturbance energy between quench propagation and quench recovering was calculated. In addition, the minimum quench energy with different transport currents was obtained through the present simulation. These results are significant to the application of HTS.

Key Words: HTS(high temperature superconductor), quench, MQE(minimum quench energy), Bi-2223/Ag superconducting tape.

1. 서 론

고온초전도체(High Temperature Superconductor, HTS)란 대기압 상태에서 액체질소의 포화온도인 77K 이상의 임계온도를 갖는 초전도체를 말한다. 고온초전도체는 초전도체와 주위에 금·은 등의 전기비저항이 작은 금속이 안정화재료로서 적층되는 구조를 가진다. 초전도체는 외부적 교란(disturbance)이나 내부적 결함 등의 이유로 교란에너지가 발생하면 초전도 성질을 잃고 전류분할 상태가 발생할 수 있다. 전류분할 상태가 되면 안정체로 전류가 흘러 줄(Joule) 열이 발생하게 된다. 이때 발생하게 되는 줄 열이 냉각되는 양보다 적으면 초전도체는 초전도 성질을 회복하여 안정한 상태가 되지만, 그렇지 못한 경우에는 지속적인 온도상승으로 인해 초전도 성질을 잃어버리게 된다. 이러한 국부적인 온도상승으로 초전도체의 초전도성을 파괴시킬 수 있는데 이러한 현상을 켄치(quench)라고 한다. 따라서, 전류분할에 의해 발생하는 초전도체의 발열 및 열적 거동에 대한 연구는 초전도체의 안정성 해석에 있어서 중요한 요소이다.

S.G. Jeong와 S.Y. Seol은 초전도체와 안정체의 물성치를 구분하여 고온 초전도체 테이프 형상에 대하여 이차원 열전달 방정식을 세우고 길이·폭, 길이·두께 방향으로 각각 2차원 해석을 수행하였다[1]. P.J. Masson 등은 초전도 코일의 다중층구조 물성치를 등가전기회로 모델로 고려하였고 온도에 따른 비선형적인 열전도율을 고려하여 3차원 해석을 수행하였다[2]. W. Xia 등은 유한요소법을 이용하여 초전도체가 켄치에 도달하는 교란의 최소에너지(MQE, Minimum Quench Energy)를 계산하였다[3]. J.D. Lee 등은 실험을 통하여 고온초전도체의 이송전류량 변화에 따른 켄치특성을 분석하였다[4]. 그러나, 기존의 연구에서는 고온 초전도체 선재의 기본 형상인 테이프 형상에 대해서만 안정성과 켄치특성을 해석하였고, 실제 초전도체의 장을 높이기 위하여 선재를 권선한 팬케이크의 형상에 대해서는 기존의 해석 방법으로는 해석수행 시간이 오래걸리고, 열물성치의 비선형성을 고려하면 해석결과 수렴에 어려움이 따른다.

본 연구에서는 상용툴인 ANSYS사의 Multiphysics를 이용하여 Bi-2223/Ag의 고온 초전도체 테이프의 권선한 팬케이크 형상의 교란에 따라 켄치특성을 해석하였다. 해석모델에서는 켄치발생을 위하여 교란에너지 공급량과 이송전류량을 변화시키면서 초전도 코일의 열적 거동 특성을 분석하였다. 본 연구의 해석결과를 바탕으로 고온초전도체 안정성 실험을 위한 실험장치를 제작할 예정이다.

2. 모델링

2.1. 해석 가정

고온초전도체의 켄치해석을 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 하였다. 초전도체 선재의 단면은 초전도체, 안정체, 그리고 에폭시의 복합 물질로 구성되어 있다. 본 연구에서는 초전도체 선재를 구성하는 각 물질의 물성치와 구성물질이 단면에서 차지하는 비율을 고려하여 단면에 따라 균일한(homogeneous) 재질로 가정하였다[5]. 이러한 방법은 복잡한 팬케이크 형상에 대하여 해석시간을 단축시키고, 단면의 각 축 방향에 따라 온도의 다른 물성치를 수식화하여 입력이 가능하도록 한다. 초전도체의 냉각을 위하여 액체질소를 사용하는 것으로 가정하여 주위 온도는 77K로 설정하였고, 자기장에 의한 영향은 고려하지 않았다. 해석을 수행하기 위해 고려한 기본 지배방정식은 식(1)과 같다. 여기서 Q 는 이송전류에 의해 선재에서 줄열이 발생할 때의 열에너지이고, Q_{ext} 는 켄치해석을 위하여 임의로 외부에서 공급하는 교란에너지이다. 일반적으로 실험에서는 켄치를 발생시키기 위하여 코일내에 히터를 삽입하여 외부로부터 교란에너지를 공급한다. 본 해석에서는 팬케이크 코일에 47 x 5 mm 크기의 히터가 설치된 것으로 가정하여 입력값을 40,000 -

¹정 회 원 : 호서대 자동차공학과

²정 회 원 : 호서대 기계공학과

³학생회원 : 호서대 메카트로닉스학과 대학원

⁴정 회 원 : 순천향대 전기통신시스템공학과

⁵학생회원 : 고려대 기계공학과 대학원

*교신저자 : cspark@hoseo.edu

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 08월 13일

게재확정 : 2009년 08월 14일

발00,000 W/m²으로 주어 9.4 - 23.5 W의 열량을 공급하는 것으로 가정하였다. Q_{dis}는 초전도체의 안정화를 위하여 공급되는 액체질소와 초전도 코일의 자연대류에 의한 열교환량이다. 액체질소의 자연대류W의 열값은 기존의 연구에 의해 많이 수행되었는데, 일반적으로 Nusselt수와 Rayleigh수에 의해 영향을 받는다[6, 7]. 따라서, 자연대류의 열값은 경계조건에 따라 변하므로 문헌을 참고하여 값을 계산해 보면 200 - 600 W/m²K를 나타내는데, 본 연구에서는 면 = 410 W/m²K으로 가정하였다. 초전도체 선재 단면을 균일한 상태의 재질로 가정하였지만, 축방향에 따라 단면을 구성하는 물질의 구성 분포는 상이하다. 따라서 축방향 단면에 따른 열전달 계수값을 식(2)와 같이 다르게 적용하였다. k₁, k₂, k₃는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 코일의 각 축에 따른 열전도도의 방향을 나타낸다. 출열에 의한 값 Q_j는 식(3)과 식(4)를 이용하여 전기비저항값에 대한 온도함수로 나타내어 계산하였다.

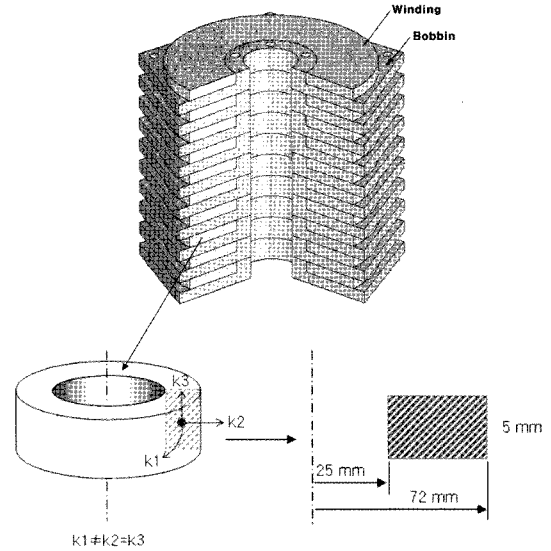


Fig. 1. Geometry of HTS pancake coil.

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k(T) \nabla T + Q_j + Q_{ext}(t) - Q_{dis} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot k(T) \nabla T = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_3 \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$R(T) = \rho(T) \frac{L}{A} \quad (3)$$

$$Q_j = I^2 R(T) \quad (4)$$

Table 1에서는 대표적으로 임계온도 106K에서의 선재 물성치값들을 나타내었다. 이 값을 기준으로 298K에서의 상온값과 일차식으로 선형화하여 전기비저항값과 열전도율값을 각각 온도변화에 따른 물성치 변화를 고려하였다. 고온초전도체의 켄치 확산 및 회복 특성 실험은 향후 실시하여 본 연구에서 실시한 해석값과 비교할 예정이다.

2.2. 선재 사양 및 형상

해석을 위한 고온초전도체의 형상은 Fig. 1과 같이 Bi-2223/Ag 재질의 폭 5 mm, 두께 0.285 mm, 그리고 전체 길이 25.4 m 테이프를 팬케이크 코일 형태로 감겨있는 선재가 적층되어 있는 구조에서 중앙부의 코일에 대하여 모델링을 수행하였다. 초전도체 해석에 있어서 구성물질의 물성치에 대한 고려는 해석결과 도출하는데 있어서 대단히 중요하다. 특히, 온도에 따른 전기비저항값과 열전도도에 대한 영향은 켄치의 확산 및 회복에 있어 큰 영향을 미친다. 본 연구에서 사용한 고온초전도체의 상태량은 기존 문헌으로부터 발췌한 실험값들을 사용하였다[8, 9]. 각각의 상태량 값들은 온도에 대한 그래프 또는 함수값들로 나타내어 지는데,

3. 해석 결과

고온 초전도체 팬케이크 형상의 켄치특성에 관한 열 해석을 위하여 교란에너지와 이송전류 변화에 따른 초전도 코일의 열전달 특성을 해석하였다. 해석 프로그램은 상용프로그램인 ANSYS사의 Multiphysics를 사용하였다. 형상 모델링은 ANSYS사의 Workbench를 사용하였고 Fig. 2와 같이 격자를 생성하였다. 해석을 위한 경계조건 및 초기조건은 다음과 같이 고려하였다. 고온초전도체 마그넷으로 사용할 때는 Fig. 2와 같은 팬케이크 형상을 적층하여 액체질소에 잠기게 되므로 모델링한 팬케이크 형상의 상부와 하부면은 단열된 것으로 고려하였다. 또한, 반경방향의 내측과 외측은 액체질소와 접촉되어 직접 열교환이 이루어지므로 대류열전달이 발생하는 것으로 고려하였다. 교란에너지는 팬케이크의 절단된 한 단면에서 부터 발생하는 것으로 하여 열전도가 양쪽으로 대칭적으로 전파되는 것으로 해석하였다. 교란에너지 공급시간은 외부 공급열

Table 1. Properties of Bi-2223/Ag tape at 106K.

Electrical resistivity (Ω·m)	ρ	9×10 ⁻⁹
Thermal conductivity (W/m·K)	k1	400
	k2	0.025
	k3	0.025
Critical temperature (K)	Tc	106
Critical current (A)	Ic	120
Tape length (m)	L	25.4
Tape width (mm)	W	5
Tape thickness (mm)	t	0.285

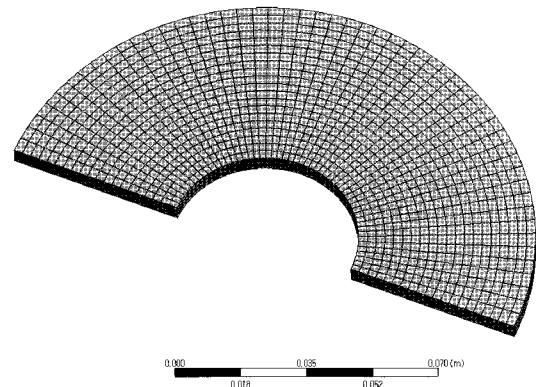


Fig. 2. Geometry modeling of HTS pancake coil.

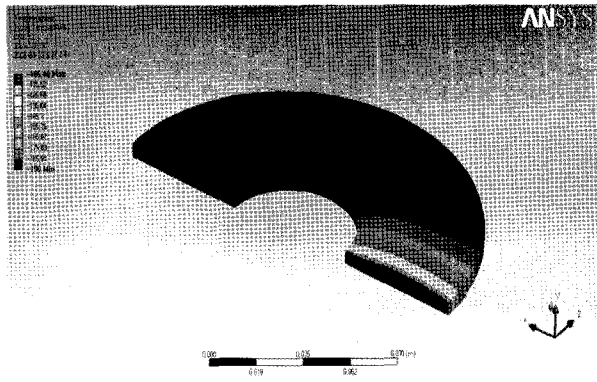


Fig. 3. Simulation result of HTS pancake coil.

량이 가장 적은 9.4 W에서 선재가 100K 부근에 도달한 시간 5초를 기준으로 선정하였다.

Fig. 3은 임계이송전류(120A)에 교란에너지 18.8 W를 주었을 때 고온 초전도체 팬케이크 형상에서 전파되고 있는 열유동 현상을 나타내고 있다. 교란에너지가 공급되는 팬케이크의 절단된 단면으로부터 열이 확산되었다. 열전파 속도와 전파되는 면적은 공급되는 교란에너지의 양에 따라 상이하게 나타났다. 즉, 교란에너지 공급되는 시간동안에 선재의 온도가 상승하면서 줄열이 발생하게 되는 조건이 되어 이것이 액체질소에 의한 냉각량보다 많게 되면 코일의 온도는 전체적으로 급격히 상승하였다.

Fig. 4는 교란에너지가 공급되는 단면에서 원주방향으로 15° 떨어진 단면의 중심에서 시간에 따른 온도변화를 나타낸다. 공급되는 교란에너지의 일정 열량은 5초동안 코일의 한 단면으로부터 공급되도록 하였다. 처음 5초간은 열량이 공급되므로 모든 조건에서 선재의 온도가 상승하였다. 교란에너지 공급을 중단하면 처음에는 선재의 온도는 낮아지지만 외부에서 공급된 에너지의 양에 따라 시간에 따른 선재의 온도변화는 다르게 나타났다. 즉, 교란에너지가 23.5 W를 공급한 경우에는 곧바로 선재 내부에서 급격히 줄열이 발생하여 선재의 온도가 급격히 상승하였다. 즉 초전도 코일에 퀘치의 확산이 발생하여 초전도성을 잃게됨을 나타내고 있다. 교란에너지가 18.8 W인 경우에는 교란에너지 공급 중단 후 일정시간 동안 온도를 유지하다가 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 초기에는 줄 발생열과 액체질소에 의한 냉각열량이 큰 차이가 없어 일정온도를 유지하다가 점차로 선재온도 상승에 따른 전기비저항값의 상승으로 인한 줄열의 증가로 인하여 퀘치가 확산되어 선재의 온도가 증가함을 나타내고 있다. 교란에너지가 14.1 W인 경우에는 외부에너지가 공급되는 동안에는 선재의 온도가 임계 온도 부근까지 도달하였으나 외부에너지 중단이후에는 바로 선재의 온도가 떨어지면서 퀘치 후 회복되었다. 교란에너지가 9.4 W에서는 교란에너지 공급량이 작아서 선재의 온도에는 큰 변화가 없이 액체질소의 분위기 온도에 곧바로 도달하였다.

Fig. 5는 이송전류값과 퀘치발생에 필요한 외부에너지와의 관계를 나타낸다. 여기서, x축은 임계전류에 대한 이송전류의 비를 나타내고, y축은 퀘치발생에 필요한 최소에너지(minimum quench energy)를 나타내고 있다. 이송전류의 값이 감소할수록 퀘치발생을 위하여 필요한 최소에너지량은 증가하는 경향을 나타낸다. 즉 이송전류값이 40% 감소했을 때 퀘치발생을 위해 요구되는 에너지량은 60% 증가하였다. 이것은 이송전류값 감소에 따른 줄열의 발생이 감소하기 때문이다. 또한, 이송전류값이 증가할수록 더 작은 교란에너지량으로도

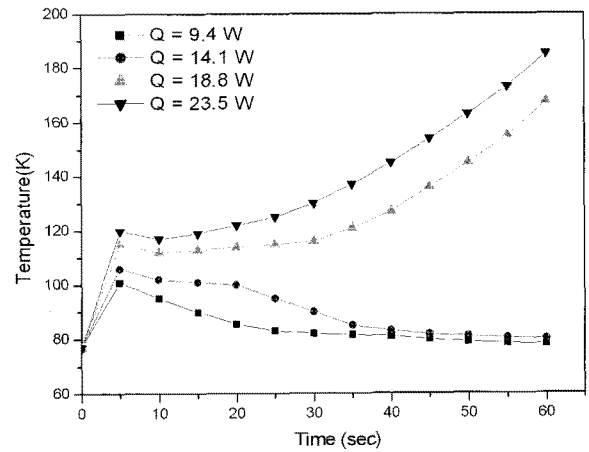


Fig. 4. Temperature distribution of HTS pancake coil with the variation of disturbance energy.

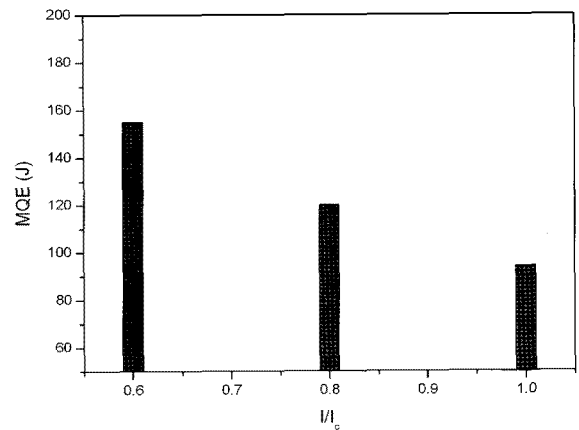


Fig. 5. Minimum quench energy of HTS pancake coil with the variation of transport currents.

선재가 쉽게 초전도성을 잃게 되므로 초전도체의 안정성 확보를 위해서는 극저온냉동기나 액체질소의 냉각시스템 용량이 더 커져야 함을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 Bi-2223/Ag 고온 초전도체 테이프의 안정성해석을 위하여 팬케이크 형상으로 된 초전도 코일에 대하여 시뮬레이션을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

이송전류량을 일정하게 하고 외부에너지량을 변화시키면서 선재의 열전달 특성을 분석하였다. 초기에 외부에너지가 공급되면 선재의 온도가 상승하였으나 외부에너지 공급이 중단되면 초기에 공급된 외부에너지량에 따라 선재의 온도변화는 다르게 나타났다. 초기 공급된 외부에너지량에 의해 선재의 온도변화로 줄열이 충분히 발생한 조건이 되면 퀘치확산이 발생하였다. 퀘치가 확산되면 선재의 온도는 급격히 상승하였고, 회복이 되면 액체질소 분위기 온도로 수렴하였다. 이송전류값의 변화에 따른 교란에너지 공급량의 변화는 이송전류값이 감소할수록 퀘치에 도달하기 위한 교란에너지는 급격히 증가하였다. 이는 이송전류값 감소에 따른 줄열발생이 감소하였기 때문으로 판단된다. 향후 시뮬레이션 검증에 의한 실험을 통하여 해석의 타당성을 검증할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2007-000-10499-0) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S.G. Jeong, S.Y. Seol, "The stability analysis of high-temperature superconductor tape", Proceedings of the KSME 2000 Fall Annual Conference, pp. 186-191, 2000.
- [2] P.J. Masson, V.R. Rouault, G. Hoffmann, C.A. Luongo, "Development of quench propagation models for coated conductors", IEEE, 3F03, 2007.
- [3] B. Zhi-ming, W. Xia, W. Chun-li, W. Jin-xing, "Quench propagation properties analysis of high temperature superconductors using finite element method", Physica C 436, pp. 99-102, 2006.
- [4] J.D. Lee, H.M. Kim, S.K. Baik, E.Y. Lee, Y.K. Kwon, "Investigation of thermal quench characteristic in the HTS Bi-2223 racetrack coil", IEEE Trans. on applied superconductivity, Vol. 18(2), pp. 1267-1270, 2008.
- [5] J. Lehtonen, R. Mikkonen, J. Paasi, "Effective thermal conductivity in HTS coils", Cryogenics 40, pp. 245-249, 2000.
- [6] H.M. Chang, M.J. Kim, J.W. Sim, B.W. Lee, I.S. Oh, "A compact cryocooling system with sub-cooled liquid nitrogen for small HTS magnets", IEEE Trans. on applied superconductivity, Vol. 18(2), pp. 1479-1482, 2008.
- [7] M. Belmedani, A. Begacem, R. Rebiai, "Analysis of natural in liquid nitrogen under storage conditions", Journal of applied sciences, Vol. 8(14), 2008.
- [8] M.D. Salve, P. Ferracin, R. Gerboni, G. Ruscica, "Experimental current-voltage characteristics of Bi2223/Ag tapes and BSCCO current leads", Physica C.341-348, pp. 1929-1930, 2000.
- [9] S. Castellazzi, M.R. Cimberle, C. Ferdeghini, E. Giannini, G. Grasso, "Thermal conductivity of a BSCCO(2223) c-oriented tape: a discussion on the origin of the peak", Physica C273, pp. 314-322, 1997.

저 자 소 개



박차식(朴次植)
1971년 9월 1일생, 1995년 고려대 기계공학과 졸업, 1997년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2007년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 호서대학교 자동차공학과 전임강사.



안태길(安泰吉)
1962년 12월 10일생, 1985년 서울대 기계공학과 졸업, 1987년 한국과학기술원 생산공학과(공학석사), 한국과학기술원 기계공학과(공학박사), 현재 호서대학교 자동차공학과 교수.



박경우(朴庚佑)
1961년 2월 11일생, 1985년 한양대 기계공학과 졸업, 1990년 동 대학원 기계공학과(공학석사), 1995년 동 대학원 기계공학과(공학박사), 현재 호서대학교 기계공학과 교수.



김도형(金度亨)
1981년 6월 26생, 2007년 호서대 공대 기계설계학과 졸업, 현재 동 대학원 메카트로닉스학과 석사과정.



차귀수(車貴守)
1956년 7월 18일생, 1978년 서울대 공업교육학과 졸업, 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 순천향대학교 정보기술공학부 교수.



서정식(徐廷植)
1972년 9월 17일생, 1995년 고려대 기계공학과 졸업, 1997년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 기계공학과 박사과정.