

Transient Thermal Behaviors of Melt Processed Superconductors with Artificial Holes During the Cooling in Liquid Nitrogen

G. E. Jang^{*,a}, H. J. Lee^b, C. J. Kim^b, Y. H. Han^c, T. H. Sung^c

^a Chungbuk National University, Cheongju, Korea

^b Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

^c Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, Korea

(Received 10 August 2009; accepted 28 September 2009)

액체질소 냉각 시 임의의 홀을 가진 초전도체의 열응력 해석

장건익^{*,a}, 이호진^b, 김찬중^b, 한영희^c, 성태현^c

Abstract

Temperature distributions and thermal stresses were calculated and analyzed to investigate the effect of the artificial holes to the transient behaviors of the superconductors which was cooled in liquid nitrogen. Three dimensional finite element method was used to calculate the transient temperature and thermal stresses in the superconductors. The cooling speed of the superconductors with holes is faster than those without holes. Because the thermal stresses calculated in the superconductors can be relaxed by the distributed holes, the volume of the peak tensile stress decreases during the cooling in liquid nitrogen. If optimal metal, which can maintain the relaxation of thermal stresses, is used to fill and reinforce the artificial holes, the probability of failure of the superconductors may be decreased by the decrease of volume of peak tensile stress.

Keywords : YBCO, stress distribution, hole, simulation

I. Introduction

Top-seed melt-growth 법(TSMG)으로 제작된 벌크 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 초전도체는 pseudo-single crystal 형태로 oxygen formation과 gas trap으로 많은

void가 존재하여 부서지기 쉬운 성질을 가지고 있으며 oxygen annealing 시 상의 변형으로 인한 crack의 발생으로 기계적 특성을 악화시킨다.

특히 초전도체를 응용한 전력기기들은 액체 질소나 액체헬륨의 저온에서 높은 자기장이나 급격한 온도 변화에 따라 특히 crack과 void에 응력집중 현상이 발생하여 YBCO 초전도체 특성을 저하시키거나 초전도체 물질의 파괴를 야

*Corresponding author. Fax : +82 43 271 3222

e-mail : gejang@chungbuk.ac.kr

기시킨다. 이러한 특성을 보완하기 위하여 현재 YBCO의 crack이나 void에 resin, Ag 등을 보강하여 기계적 특성을 향상시킨 연구사례들이 발표되고 있다 [1-5]. 하지만 관련 연구는 보강을 통한 기계적이나 자기적 특성 변화에 집중되어 있으며 냉각과정에서 초전도체에 전달되는 열응력에 관한 연구사례는 전무한 상태이다.

본 연구에서는 YBCO 초전도체에 인위적인 홀의 가공 전, 후 그리고 열전도 특성이 탁월한 Ag를 홀에 함침하였다고 가정 시 냉각 과정에서의 온도에 따른 열유동과 응력 분포를 시뮬레이션을 통하여 분석하고 이에 따른 초전도 벌크의 특성을 평가하고자 하였다.

II. Experiment

본 연구는 ABACUS에 의한 FEM 프로그램을 이용하여 40 mm x 40 mm x 17 mm 크기의 YBCO 초전도체에 직경 1.5 mm 크기에 9개의 홀을 가공하였다고 가정하여 가공 전, 후 그리고 은(silver)를 함침하였을 때의 벌크 시편 내의 온도분포 및 응력분포를 예측하였다. 시뮬레이션에 사용된 YBCO 벌크의 기본 물성은 Table 1에 도시하였다.

Table 1. Basic properties of YBCO.

Density	4.82x10 ⁻⁶ (kg/mm ³)	Poisson ratio	0.3
Flexural strength	70 MPa	Thermal expansion coefficient	13x10 ⁻⁶ /°C
Specific heat	170 (J/kg°C)	Young's modulus	23 GPa
Thermal Conductivity	0.003 (W/mm°C)	YBCO size	40mm x40mm x17mm

실험 시 좌우대칭성을 고려하여 1/4 모델을 사용하였으며 YBCO 소재의 아랫면에서 두께 방향의 변형을 제한하였다. 또한 소재의 중앙

에서 3개의 축 방향 변형을 제한하여 모델의 병진운동을 제한하였으며 소재의 아랫면은 구조물에 부착, 액체질소에 의한 냉각이 되지 않으며 단일 경계조건으로 가정하였다. 냉각 과정은 소재 외부에 -196 °C의 용액이 있고 소재의 초기온도를 20 °C로 가정하여 소재의 표면에서 convection에 의해 열이 전달되는 것으로 가정하였다.

보강제로 선정된 은의 경우 열전도율이 매우 크고 충분한 연성을 가지고 있으며 저온에서 안정하므로 임의의 홀에 함침할 경우 냉각 및 구조적인 면에서 최적의 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상하였다. 전산해석에 사용된 모델은 1.5 mm 직경에 9개의 홀을 가진 소재의 경우와 동일하며, 단지 홀을 은으로 채운 것으로 모사하였으며 은과 벌크 시편이 완벽하게 접합되어 있는 것으로 가정하였다. 모델링에 사용된 은의 물성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Basic properties of silver.

Density	10.5x10 ⁻⁶ (kg/mm ³)	Poisson ratio	0.37
Yield strength	54 MPa	Thermal expansion coefficient	19x10 ⁻⁶ /°C
Specific heat	235 (J/kg°C)	Young's modulus	83 GPa
Thermal conductivity	0.429 (W/mmK)	Elongation and tensile strength	0.25 : 125 MPa

III. Result and discussion

Fig. 1은 20 mm x 20 mm x 17 mm 크기의 YBCO 초전도체를 냉각 전, 후에 나타난 열 및 응력 분포에 관한 시뮬레이션 결과이다. Fig. 1(a)는 meshing 작업 결과를 보여주며 Fig. 1(b)는 냉각 시작 후 0.9 초 경과한 시편의 온도분포를 보여주고 있다. 홀을 가공하기 전의 시편은 표면에서부터 일정한 두께로 벌크 내부로

냉각이 진행되고 있음을 확인 할 수 있으며 홀을 가공한 시편의 경우 홀이 없는 경우의 양상과 달리 홀 안으로 액체질소가 침투하여 냉각 효과가 향상되고 있는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 1(c)는 Fig. 1(b)와 같은 온도분포, 즉 냉각 시작 후 0.9초 경과 뒤 최대 주응력(max principal stress)분포를 나타내고 있다. 홀 가공 전 벌크의 냉각되는 표면 중앙 부분에서 가장 큰 인장응력이 작용하는 것을 알 수 있다. 홀을 가공한 벌크의 경우 최대 주응력을 나타내는 영역이 줄어들어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 냉각 시 형성된 응력이 홀에서 해소되어 상대적으로 그 면적이 줄어들어 있는 것으로 해석된다.

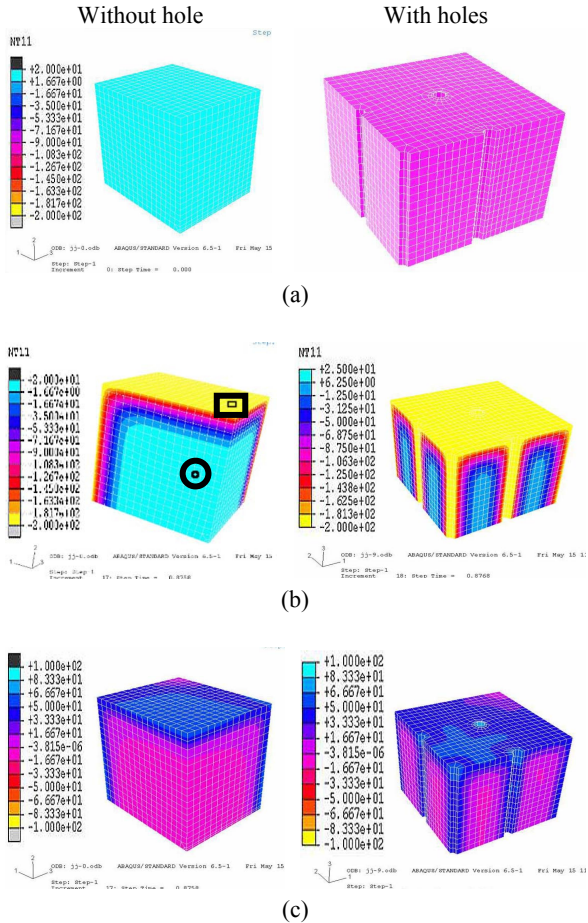


Fig. 1. The simulation results taken on the YBCO with holes and without holes; (a) 3-D meshing of 1/4 model, (b) temperature distribution and (c) stress distribution

Fig. 2(a)는 냉각 후 약 1초 후의 YBCO 벌크의 온도분포를 보이고 있다. 그림에서 보듯이 홀을 채운 은의 열전달 속도가 빨라 YBCO 벌크보다 빠르게 냉각되고 있는 것을 볼 수 있다. 같은 시간의 벌크 표면에서의 최대 주응력의 분포를 보면 Fig. 2(b)에서 보듯이 홀이 있는 경우처럼 응력이 은으로 채운 홀 근처에서 약간 해소되는 양상을 보이고 있다.

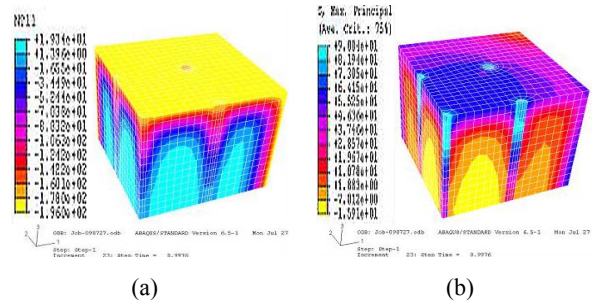
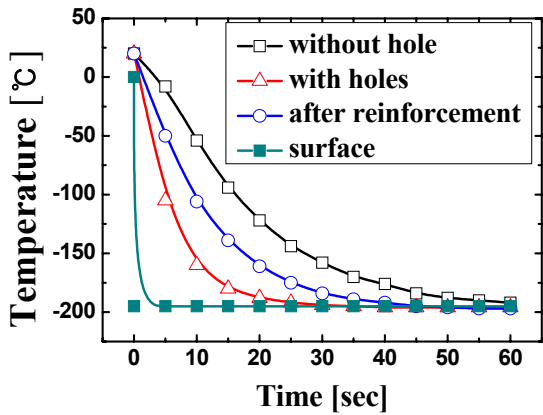


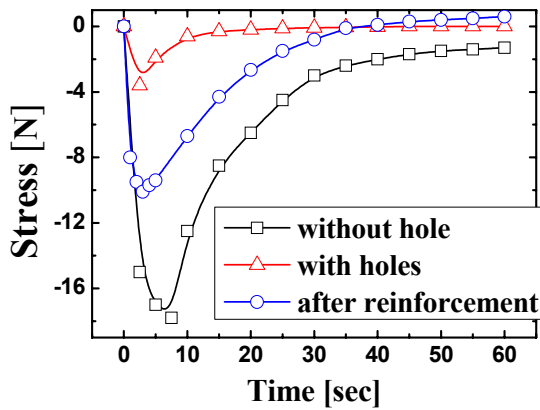
Fig. 2. The simulation results taken on the YBCO reinforced by Ag after cooling ; (a) temperature distribution and (b) stress distribution.

Fig. 3(a)는 Fig. 1(b)의 원형으로 표시된 위치 (o 위치 : 40 mm x 40 mm x 17 mm 시편의 경우 소재의 1/2 두께에서 가운데로 부터 가로 0 mm, 세로 5 mm 떨어진 위치)와 소재의 표면 (Fig. 1(b)의 사각형 표시 : 40 mm x 40 mm x 17 mm 시편의 경우 소재 윗 표면의 가운데에서 가로 5 mm, 세로 5 mm 떨어진 위치)에서의 시간에 따른 온도변화를 나타낸다. YBCO 벌크의 표면은 액체질소에 노출 되자마자 급격하게 -196 °C로 냉각되는 것을 확인 할 수 있다. 반면에 원형 표시가 된 위치의 시편의 경우 온도는 거의 1분이 되어서 -190 °C 정도에 이르며, 홀을 가공하기 전에 비해 홀 가공 후 빠르게 냉각하고 있는 것을 알 수 있다. 즉 홀을 가공하는 경우 홀 내부로 액체질소의 유입으로 인해 소재가 빠르게 냉각된다고 할 수 있다. Ag를 함유한 경우와 홀 가공 전, 후를 비교하였을 경우 두 가지 경우에 비해 중간 정도의 냉각 속도를 가지고 있는 것을 확인 할 수 있다.

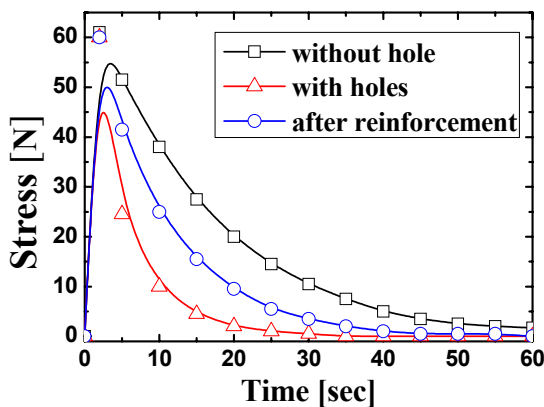
원형으로 표시된 위치에서의 최대 주응력 성분의 변화는 Fig. 3(b)에 나타내었다. 홀 가공 전 최대 주응력은 약 -20 MPa의 압축응력을 받은 후 전체가 동일한 온도로 냉각되면 최대 주



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Temperature and thermal stress distribution of YBCO as a function of time under cooling; (a) internal temperature variation, (b) internal stress variation (circle), (d) stress variation at surface (square).

응력은 거의 0이 된다. 홀 가공 후 최대 주응력 변화는 최대 압축하중이 약 -3.6 MPa 정도로 홀 가공 전의 -20 MPa보다 적은 값을 나타내고 있다. 가공된 홀에 Ag를 함침하였을 경우에는 최대 압축하중이 약 -10 MPa 정도로 홀 가공 전 -20 MPa 보다는 적고 홀 가공 후 -3.6 MPa 보다는 큰 값을 보이고 있다. 홀을 채운 은과 벌크 시편 사이의 접합 상태에 따라서 다른 효과를 보일 것으로 예측할 수 있다. 홀에 은을 채우는 경우에는 홀이 없는 소재의 경우와 홀을 가공한 소재의 중간 정도 열적 기계적 특성을 나타내었다.

Fig. 3(c)는 Fig. 1(b)와 같이 냉각되는 소재의 표면(口위치)에서의 시간에 따른 최대 주응력의 변화를 나타내고 있는데 홀 가공 전 시편에서는 표면이 급격히 -196 °C로 냉각되므로 구조상 가장 위험한 부분이다. 냉각 초기에 약 60 MPa 정도의 인장응력이 작용한 후 점차 감소하게 된다. 시뮬레이션에 적용된 YBCO의 파괴하중이 약 70 MPa이므로 냉각 중 소재의 파괴가 발생하지는 않을 것으로 해석되었다. 홀 가공 후 최대 주응력 값은 약 55 MPa 정도로 홀 가공 전에 비해 약간 감소하였다. 또한 Ag를 함침한 경우의 최대 주응력은 약 60 MPa 정도로 홀이 없는 경우와 홀을 가공한 후의 중간값 정도를 나타내고 있으나 그 값의 변화는 그리 크지 않다.

위와 같은 시뮬레이션 결과로부터 홀 가공 후에 가공 전의 YBCO 벌크의 냉각속도가 향상되어 열적 응력 면에서는 응력이 약간 해소되는 경향을 보이는 것으로 예상된다. 또한 최대 응력을 나타내는 영역이 상대적으로 감소하게 되므로 냉각 시 열적인 응력에 의해 세라믹 소재가 파괴될 확률이 감소될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 실제 외부의 자기력이 가해지는 경우에는 홀을 가공한 경우 구조적으로 불리할 수 있으므로 홀을 다른 소재로 채움으로써 열적인 응력과 운전 중 외부하중을 모두 고려하는 최적 조건을 고려할 필요가 있다.

IV. Conclusion

YBCO 세라믹 소재에 관통구멍을 사용하는 경

우 홀이 없는 소재에 비해 냉각속도가 빠르게 진행되는 것을 알 수 있으며, 열적 응력 면에서는 응력이 약간 해소(release) 되는 경향을 보이는 것으로 예상된다. 또한 최대 응력을 나타내는 영역이 상대적으로 감소하게 되므로 냉각 시 열적인 응력에 의해 세라믹 소재가 파괴될 확률이 감소될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 실제 외부의 자기력이 가해지는 경우에는 홀이 있는 경우 구조적으로 불리할 수 있으므로 홀을 다른 소재로 채움으로써 냉각 시의 열적인 응력과 운전 중 외부하중을 모두 고려하는 최적의 조건을 고려할 필요가 있다. 관통구멍에 은을 채우는 경우에는 홀이 없는 소재 경우와 홀을 가지고 있는 소재 경우의 중간 정도의 열적 기계적 거동을 나타내었다. 이와 같은 결과로부터 초전도 소재에 적절한 개수의 관통구멍 가공하거나 혹은 적절한 재료로 관통구멍을 채움으로써 초전도 소재를 사용하는 환경에 적합하게 적용시킬 수 있음을 알 수 있다.

Acknowledgments

본 연구는 지식경제부 전력산업연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] M. Tomita, M. Murakami, K. Katagiri, "Reliability of mechanical properties for bulk superconductors with resin impregnation" *Physica C*, 378-381, 783-787 (2002).
- [2] M. Tomita, M. Murakami, "Effect of resin layer on the thermal stress of bulk superconductors", *Physica C*, 392-396, 493-498 (2003).
- [3] M. Tomita, M. Murakami, "High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K", *Nature*, 421, 517-520 (2003).
- [4] M. Murakami, M. Morita, K. Doi, K. Miyamoto, "A New Process with the Promise of High J_c in Oxide Superconductor", *Jpn. J. Appl. Phys.* 28, 1189-1194 (1989).
- [5] G. E. Jang, W. S. Oh, C. J. Kim, Y. H. Han, S. Y. Jung and T. H. Sung, "The effect of impregnation by resin and CNT compound on the mechanical and magnetic properties of YBCO superconductor", *Physica C*, 468, 1411-1414 (2008).