

과냉 액체질소 내에서 순간적 열확산 실험

Thermal diffusion experiment of impulsive heat in subcooled liquid nitrogen

최진혁*, 하찬준*, 변정주**, 장호명***, 김호민#, 고태국##

J.H. Choi*, J.C. Ha*, J.J. Byun**,
H.M. Chang***, H.M. Kim#, T.K. Ko##

Abstract: Transient heat transfer caused by an impulsive heating in subcooled liquid nitrogen is investigated experimentally. This study is part of our ongoing efforts directed to a stable cryogenic cooling system for superconducting fault current limiters (SFCL). A thin heater attached by epoxy on one surface of a GFRP plate is immersed in liquid-nitrogen bath at temperatures between 77 K and 65 K. A strong heat flux up to 150 W/cm² is generated for 100 ms, and the temperature of the heater surface is measured as a function of time. The behavior of bubbles on the heating surface can be explained by comparing the measured temperature history for vertical and two horizontal (up and down) orientations. It is concluded that the subcooling of liquid nitrogen below 70 K is very effective in suppressing bubbles, resulting in better thermal protection and faster recovery from an impulsive heat.

Key Words: Heat transfer, Subcooled liquid nitrogen, Impulsive heat, Fault current limiter.

1. 서 론

고온 초전도체 전력기기 중에서 가장 실용화에 가까운 기기중 하나가 초전도한류기이다. 본 연구팀이 개발 중인 저항형 한류기는 사고 시 초전도체의 퀘칭 현상을 이용하므로, 짧은 사고시간 동안 초전도체의 열적 및 기계적 보호, 그리고 사고 후 신속한 정상상태로의 전환이 매우 중요하다[1-5]. 이 연구는 21C 프론티어 사업 차세대 초전도응용기술 개발사업의 지원으로 수행되었으며, (벌크재료) 저항형 한류기와 무유도 권선형 한류기의 냉각시스템에 동시에 활용될 수 있다.

대기압, 65 K 상태의 과냉 액체질소를 이용한 냉각기술은 초전도 전력기기에 매우 많은 장점이 있다. 질소

의 대기압 포화온도인 77 K에 비교하면, 고온초전도체의 임계 전류밀도는 65 K에서 매우 크기 때문에 훨씬 적은 재료로 동일한 기능을 수행할 수 있으며 시스템의 소형화가 가능하다[6]. 또 과냉액체 상태에서는 내·외부의 열부하로 인해 기포의 생성이 억제될 수 있으므로, 전기 절연 면에서 월등히 유리하며 초전도체의 과다한 온도 상승도 막을 수 있다.

고온초전도 전력기기를 위한 과냉 액체질소 시스템에 대한 연구는 지난 7-8년간 여러 곳에서 진행되고 있다. 초기에는 진공펌프를 이용한 감압냉각 방식으로 과냉액체를 생성하고, 극저온 액체 펌프를 이용한 순환방식도 시도되었다. 이제는 극저온냉동기를 이용하여 액체질소의 재공급 없이 연속 냉각이 가능하게 되었으며, 액체의 활발한 자연대류를 이용하여 매우 균일하고 효율적인 냉각이 실현되었다[7]. 원하는 정상상태를 유지할 수 있는 초전도 한류기의 극저온 냉각기술이 이제 보편화된 반면에, 짧은 사고 시 순간적인 열확산의 현상에 대한 연구는 거의 없는 편이다. 과냉액체 내의 가열표면에 대한 풀비 등 관계식은 존재하지만[8], 이 관계식들은 모두 정상상태에 대한 식이므로 한류기의 사고 시에 직접 적용하기가 어렵다. 일반적으로 사고시의 발열시간은 100 ms 정도로 대단히 짧으므로, 증발된 기체가 기포를 형성하여 표면에서 이탈되는 비등 현상을 기대하기 어렵기 때문이다.

이 논문은 초전도 한류기의 사고 시 냉각문제를 다루는 연구의 첫 번째 단계로, 과냉 액체질소 내에서 순간적인 열확산 실험을 다루고 있다. 특히 대단히 짧은 시간 동안의 과도 열전달 현상을 좀 더 정확히 이해하기 위해 실제 사고 시와 유사한 실험 조건에서의 온도변화를 직접 측정하였다. 이 결과는 사고 시 최고 도달온도와 회복시간을 예상하는데 초점을 맞추고 있다.

2. 실험장치

Fig. 1은 순간적인 열확산 실험 장치의 개략도이다. 1단 GM냉동기(Cryomech사 모델 AL60)는 극저온 용기 상판에 장착하였고, 냉동기 콜드헤드와 가깝게 위치할 수 있도록 약 35 L 액체질소 버킷을 설치하였다. 원형의 구리 확장판(두께: 5 mm, 지름: 25 cm)을 콜드헤드에 접합하였고 그 사이에 냉동기의 용량을 조절할 수 있도록 박판 히터(Minco사 모델 HK5562)를 예폭시로 부착하였다.

Fig. 2는 77 K의 포화액체 상태에서 65 K 101 kPa 상태에 도달하는 냉각과정을 나타내고 있다. 용기를 밀폐하고 냉동기를 가동하여 약 13시간 정도가 경과한

* 학생회원 : 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 학사과정
 ** 정 회 원 : 홍익대학교 과학기술연구소 연구원
 *** 정 회 원 : 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 교수
 # 정 회 원 : LS산전 전력연구소 연구원
 ## 정 회 원 : 연세대학교 전기·전자공학부 교수
 원고접수 : 2005년 9월 16일
 심사완료 : 2006년 1월 31일

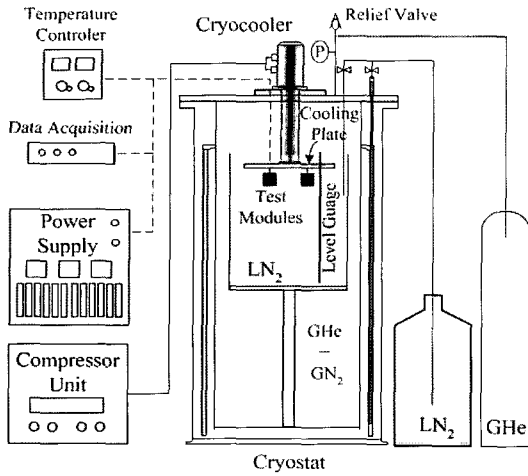


Fig. 1. Schematic overview of experimental apparatus.

후에 65 K에 도달하면, 대기압의 과냉 상태를 이루기 위해 기체헬륨을 주입하고 온도조절용 히터를 이용하여 정상상태를 유지하였다. 액체질소의 온도는 확장판과 자연대류에 의해서 공간적으로 매우 균일하였고, 테스트 모듈은 확장판으로부터 매달아 약 5 cm 하부의 액체질소 공간에 위치하였다.

두 가지 종류의 테스트 모듈을 준비하였는데 Fig. 3(a)와 같이 직사각형 모양의 GFRP 판(40 mm x 37 mm, 두께: 3 mm)에 정사각형 모양의 박판 히터(Minco 사 모델 HK5583)를 에폭시를 이용하여 부착하였고 온도센서(E형 열전대)는 GFRP의 반대쪽에 작은 구멍(지름: 2.0 mm)을 통해 히터 밑 중앙부분에 연결시켰다. 기포의 영향을 확인하기 위해 Fig. 3(b)와 같이 세 가지 방향(수직, 수평위, 수평아래)에 대해 실험을 수행했다. 두 번째 테스트 모듈은 같은 히터를 두 개의 GFRP 판에 샌드위치 형상으로 붙여서 제작하였다. 이 모듈은 기본적으로 면대칭이라고 할 수 있으므로, 온도 센서는 히터의 한쪽 부분에만 설치하였으며 두 가지 방향(수직, 수평)에 대해서 실험하였다.

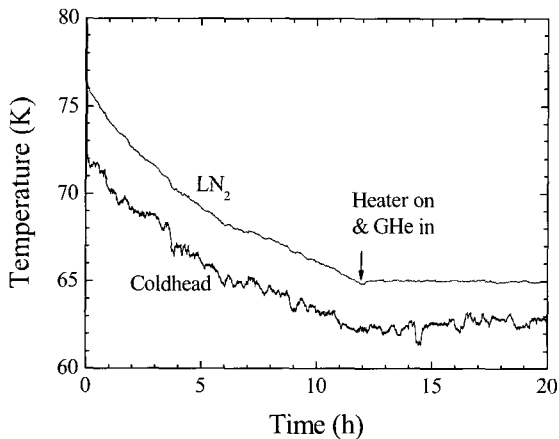
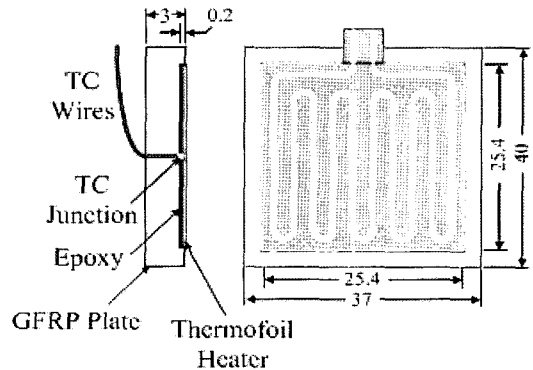
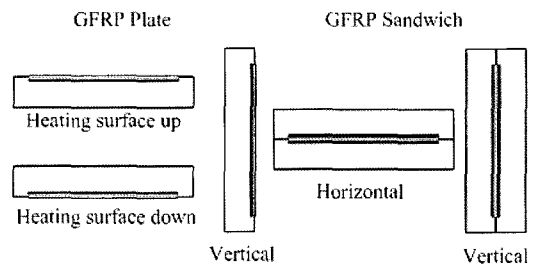


Fig. 2. Typical cool-down history to 65 K by a GM cryocooler.

실제 초전도환류기의 사고 시 열확산을 근사적으로 모사하기 위하여 정밀한 교류 전원공급기(Pacific Power Smart Source사 모델 TM 360-AMX)를 이용하여 100 ms 동안 히터에 전원을 공급하였다. Fig. 4는 $V_{rms} = 90 V, f = 60 Hz$ 으로 설정된 실험에 대한 전압변화를 측정 한 예이다. 박판 히터의 가열량은 전체 면적에 대해 매우 균일하고, 전열체의 비저항은 $400^{\circ}C$ 이하에서는 온도에 따라 변화하지 않으므로, 이 열확산 문제는 기본적인 1차원이며 시간에 대한 가열량은 계산함수로 간주할 수 있다. 이 실험에서 면적당 발열량의 범위는 $10 \sim 150 W/cm^2$ 이다. 온도 센서는 E형 열전대(크롬-텅스텐: Omega 사 모델 5TC-TT-36AWG)와 실리콘 다이오우드를 동시에 이용하였고, GM냉동기의 콜드헤드, 테스트 모듈, 액체질소 수위 측정을 위한 레벨게이지의 여러 곳에서 온도를 측정하였다. 63~77 K 범위에서 이 열전대의 정확성은 $\pm 30 mK$ 이다. 냉동기의 온도에는 실리콘 다이오우드를 부착하여 측정하였고, 몇 개의 테스트 모듈에는 열전대와 실리콘 다이오우드를 나란히 설치하여 순간적인 발열 시 온도 변화를 동시에 측정하였다. 테스트 모듈의 온도는 두 가지의 온도센서에 대해 거의 비슷한 값으로 측정되었지만, 열전대의 응답시간이 더욱 짧게 측정이 되어 이후의 모든 실험 자료는 열전대에 의한 측정결과를 제시



(a) Dimensions of test module. (unit: mm)



(b) Orientations of test modules.

Fig. 3. Schematic of test modules: GFRP plate attached by Thermfoil heater and temperature sensor.

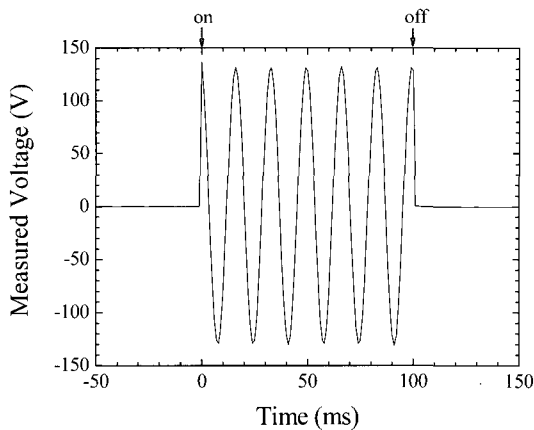


Fig. 4. An example of measured voltage across the heater. ($V_{rms} = 90 \text{ V}$ and $f = 60 \text{ Hz}$)

하였다. 테스트 모듈의 온도는 고속 자료 획득장치 (National Instrument사 모델 DAQ Pad-6015)를 이용하여 1 ms마다 측정하여 저장하였다. 측정의 재현성을 위하여 같은 조건에서 10번의 실험 데이터를 측정하여 비교하였다. 온도가 급격히 상승하는 발열 기간 동안에는 실험별 측정온도의 편차가 0.1 K 이내로 대단히 작았으며, 온도가 다시 하강하는 회복 기간에는 실험별로 약간(수 K정도)의 차이가 관찰되었다. 이 편차는 주로 77 K의 포화액체에서 관찰되었는데, 뒤에 기술하는 바와 같이 기포 거동이 완전히 균일하지 않기 때문이며, 온도 측정의 재현성은 매우 우수하다고 할 수 있다. 그리고 액체질소의 수위와 온도의 균일성을 확인하기 위해 GFRP봉을 수직으로 매달아 3개의 열전대를 붙여 측정을 하였다.

3. 결과 및 토론

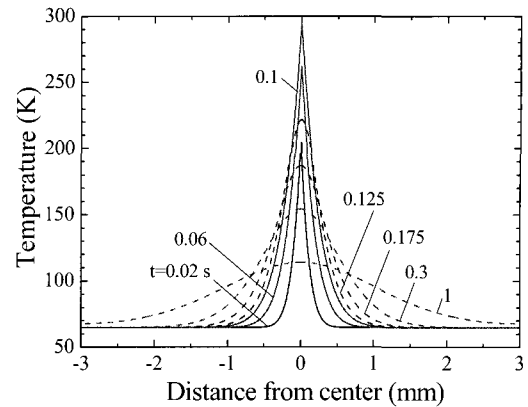
3.1. GFRP 샌드위치

실험의 결과는 먼저 65 K의 과냉 액체질소에서 GFRP 샌드위치에 대해 먼저 제시한다. 이 경우에는 히터의 발열 에너지가 양쪽의 GFRP판을 통해서 액체질소로 전달되는데, 두께 3 mm의 GFRP를 통과하는 열침투 시간이 3초 이상이기 때문에, 이 시간 동안은 단순히 과도 열전도의 문제로 간주할 수 있기 때문이다. 1차원 과도 열전도 문제는 수치적인 방법으로 매우 정확한 해를 구할 수 있으므로, 실험적인 측정 온도와 해석적인 수치해를 먼저 비교해 보았다.

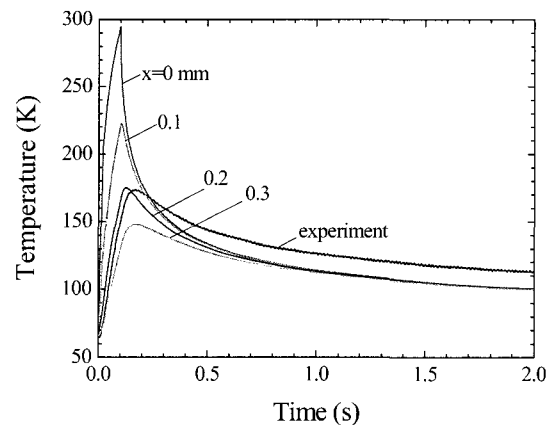
식 (1)은 1차원 과도 열전도 방정식

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

인데, 여기서 ρ , C , k 는 각각 GFRP의 밀도, 비열, 열전도율이며 온도의 함수이다. Fig. 5(a)는 중앙 표면($x=0$)에서 $0 < t < 0.1 \text{ s}$ 동안 100 W/cm^2 의 평면 발열에 대해 계산된 온도 분포를 보여주고 있다. 수치적 해법으로는 Crank-Nicolson 방법을 이용하였고[9] 표면에서 대류의 영향은 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 실제로 계산된 시간 동안의 열침투 깊이가 3 mm보다 작으며, 그래프에서 $x = \pm 3 \text{ mm}$ 에서의 대류의 영향이 매우 작음을



(a) Calculated temperature distributions



(b) Calculated and measured temperature history

Fig. 5. Calculated and measured temperatures of GFRP sandwich for 100 W/cm^2 at 65 K.

알 수 있다. 처음의 0.1 s 동안 $x = 0$ 에서의 날카로운 선단 모양은 좌우 대칭으로 점차 확산되어 가는 형상이다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 계산된 온도 분포를 이용하여, $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3 \text{ mm}$ 에서의 온도 변화를 시간의 함수로 나타내었고, 여기에 실험의 측정온도도 함께 보여주고 있다. 실험의 조건도 100 ms 동안 100 W/cm^2 의 발열에 의한 결과이며, 실제로 방향(수직 및 수평)에 상관없이 동일한 결과를 얻었다.

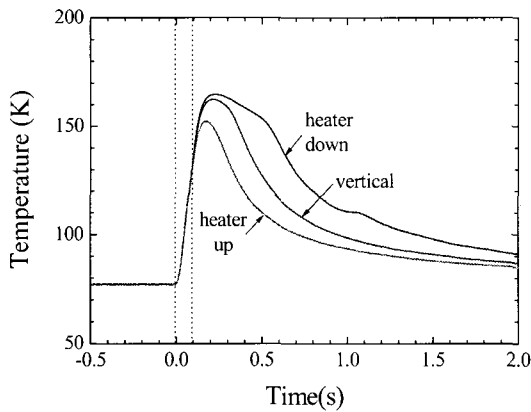
측정된 온도는 약 $t = 0.15 \text{ s}$ 에서 최고 온도가 173 K 까지 올라간 후, 열확산에 의해 점차 떨어졌는데, 이온도가 계산에 의한 $x=0$ 에서의 최고온도에 비하여 매우 낮으며, 오히려 $x=0.2 \text{ mm}$ 에서 계산된 온도와 비슷한 것을 알 수 있다. 이 현상은 온도 센서와 히터 사이의 거리에 밀접한 관계에 있다고 판단된다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이, 히터의 두께는 약 0.2mm(즉, 중앙에서 0.1 mm)이고 열전대의 접점도 지름이 약 0.2 mm인 구형으로 간주할 수 있다. 그렇다면 온도 센서인 열전대의 접점이 히터에 가까이 접촉하고 있다고 하더라도, 우리는 중심 면에서 대략 0.2 mm 떨어진 위치의 온도를 측정하고 있다고 본다면 매우 이 비교는 매우 논리적이라고 할 수 있다. 따라서 아래 제시하는 온도 자료에서 히터의 실제 최대온도는 측정된 것보

다 더 높을 수 있음을 알 수 있다.

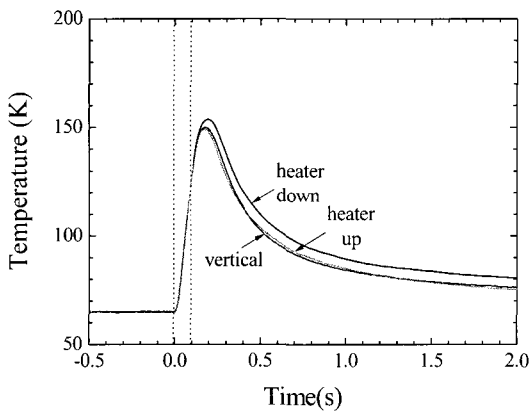
3.2. 발열 표면의 방향

Fig. 6(a)는 77 K의 포화 액체질소에서 100 W/cm²의 발열을 주었을 때, 세 방향의 GFRP판의 온도변화를 하나의 그래프에 나타내었다. 발열시간 동안 온도 상승의 그래프는 표면의 방향에 상관없이 동일함을 알 수 있다. 그러나 최대 도달온도는 수평 위, 수직, 수평 아래의 순으로 높아지며, 회복 시간도 같은 순서로 짧은 것을 알 수 있다.

77 K의 포화액체에 대해 이러한 현상은 기포의 거동과 밀접한 관계가 있다. GFRP판의 열침투 깊이는 t = 0.1 s 일 때 0.06 m이하이므로 모든 GFRP판에 대한 실험에서 히터가 부착된 가열표면에서만 기포가 생성될 수 있음은 매우 명백하다[10]. 가열표면이 수평 위인 경우가 수직이나 수평 아래의 경우보다 가장 기포가 빠져나가기 쉽기 때문에 가열면의 최대 도달온도가 가장 낮고 회복 시간도 가장 빠르다. 그러나 초기의 발열 시간(100 ms)은 표면에 기포가 생성되어 부력에 의해 이동하기에는 너무 짧은 시간이므로 표면의 방향



(a) 77 K



(b) 65 K

Fig 6. Measured temperature history of GFRP plates at different orientations for 100 W/cm².

에 상관없이 동일한 온도변화를 보인 것으로 판단된다. 가열면이 수평 아래인 경우의 온도 분포를 관찰하면, 기포의 이탈이 약 0.5초와 1초 사이에 이루어졌고, 수직과 수평 위인 경우에는 이보다 더 빨랐던 것으로 해석된다. 그리고 기존에 알려진 정상상태의 풀비등 상관관계식은 0.1초의 짧은 발열시간에 직접 적용할 수 없음도 매우 명백하다.

Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)와 동일한 조건이나 액체질소가 65 K의 과냉상태에서 실험한 온도 변화를 나타내고 있다. 이때의 온도 변화는 발열시간 뿐 아니라 회복시간까지도 방향에 따른 영향이 매우 작은 것을 알 수 있다. 이 결과는 가열 표면에서 기포의 생성이 매우 미약하거나 없었음을 의미하는 것이다. 즉, 과냉액체와 접하는 표면의 온도가 비등온도 이상으로 상승하면 표면에 액체가 증기로 상변화 할 수는 있으나, 이 증기가 기포로 형성되어 상부로 이동하지 못하고, 곧바로 다시 응축되었을 확률이 대단히 높다. 이 결과는 65 K의 과냉으로 인해 기포의 생성이 억제되고 있음을 보여주는 하나의 증거라고 할 수 있다. 또 77 K의 포화액체 상태에서는 초전도체 위치(상부, 하부, 측면 등)에 따라 사고 시 냉각 정도에 차이가 있지만, 65 K의 과냉액체 상태에서는 그 위치에 상관없이 균일한 냉각이 이루어지고 있음을 쉽게 예측할 수 있고, 이는 과냉액체 냉각의 또 다른 장점이라 할 수 있다.

3.3. 과냉액체의 온도

액체질소의 과냉도에 의한 영향을 살펴보기 위하여, 압력은 모두 1기압으로 유지하되 액체질소의 온도를 변화시키면서 동일한 실험을 반복하였다. Fig. 7은 수직의 GFRP판에 100 W/cm²의 발열을 주었을 때 온도 변화를 측정된 결과이다. 액체질소의 온도가 낮을수록 최대 도달온도도 낮고 회복시간도 빠름을 알 수 있다. 그러나 과냉도가 적은 74 K의 경우에는 과냉의 영향이 그리 크지 않고, 71 K, 68 K, 65 K인 경우들에 대해서는 과냉의 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 포화온도에서 3 K 정도의 과냉으로는 기포 생성억제의 결과로 설명되는 온도상승 저감과 회복시간 단축이라는 효과가 그리 크지 않고, 6 K 이상으로 액체를 과냉 했을때 그 효과가 크다고 할 수 있다. 물론 이

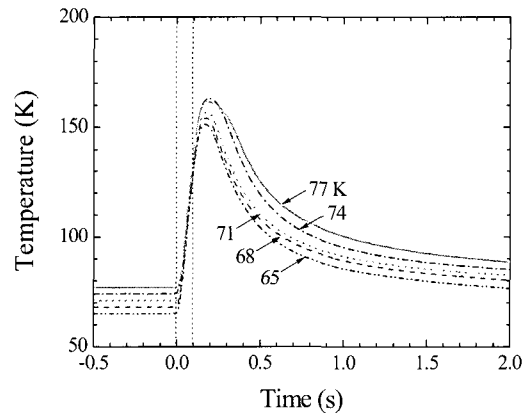


Fig. 7. Measured temperature history of vertical GFRP plate at different temperatures for 100 W/cm².

결과가 모든 경우에 대해 필요한 과냉 온도로 일반화할 수는 없겠지만, 초전도 한류기의 사고 시 충분한 과냉의 효과를 위해 70 K 이하로의 냉각이 요구된다고 할 수 있다.

3.4. 발열의 크기

고온초전도체의 번 아웃 온도는 초전도한류기의 설계에 영향을 주는 또 다른 결정적인 요소이다. 이 실험을 통해 정확한 번 아웃 온도를 얻는 것이 쉽지 않다. 그러나 실험에서 히터의 발열량과 측정된 최고 온도 사이의 상호관계를 살펴보는 것은 매우 유용한 일이다.

Fig. 8(a)는 65K의 과냉 액체질소에 담겨진 GFRP 판에 여러 값의 발열량을 주었을 때 측정된 온도변화를 보여주고 있다. Fig. 8(b)는 측정된 최고 온도와 발열 종료시점 ($t = 0.1$)에서의 온도를 발열량의 함수로 나타내었다. 발열 강도가 클수록 최고온도는 거의 선형적으로 상승하였으나 두 온도 사이의 차이는 점점 더 증가함을 알 수 있다. 즉, 발열량이 작은 경우에는 측정된 최고 온도가 발열 종료 직후에 나타나지만, 발열양이 클수록 더 늦게 최고 온도에 도달하였다는 뜻이다. 따라서 발열 강도가 클수록 히터의 실제 최고 온도는 선형함수보다 더 가파르게 증가할 수 있음을 의미한다고 하겠다. 물리적으로 이러한 현상은, 순간적인 발열이 클수록 표면 근처에 있는 액체의 증발을 증가시킬 것이고, 짧은 사고 시간 동안 기포로 빠져나가

거나 재응축되기 이전의 증기가 표면에 막을 형성하여 열확산을 제한하기 때문으로 해석되고 있다.

4. 결 론

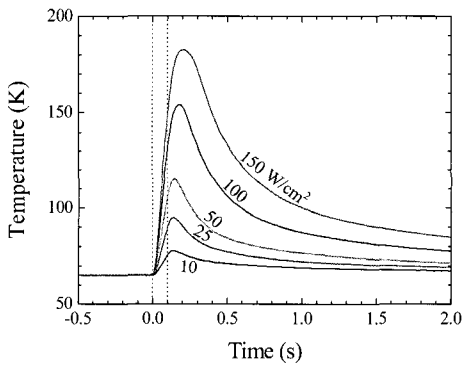
초전도한류기 냉각시스템 설계를 위한 기초연구의 일환으로 과냉 액체질소 내에서 순간적 열확산에 대한 실험을 수행하였고, 다양한 조건에서 온도변화를 관찰하여 새롭고 유용한 결론에 도달하였다. 첫째, 한류기의 사고 시 발열 시간인 약 100 ms은 표면에 생성될 수 있는 증기가 기포로 이동하기에는 너무 짧은 시간이며, 따라서 이 시간 동안의 온도상승은 사실상 표면의 방향에 무관하다. 둘째, 순간적 열에 의한 회복시간은 표면에서 생성되거나 재응축되는 기포 거동에 따라 민감한 반응을 보인다. 셋째, 77 K의 포화상태보다 과냉액체 상태로 냉각될 경우, 최고 도달온도가 더 낮고 회복시간도 더 빠르며 표면의 방향에 상관없이 냉각되는 장점이 있다. 넷째, 이러한 과냉의 장점을 안전하게 확보하기 위해서는 70 K 이하의 과냉이 필요하다. 다섯째, 과냉액체 내에서 순간적 발열에 의한 최고온도는 발열강도에 따라 매우 급격하게 증가할 수 있다.

감사의 글

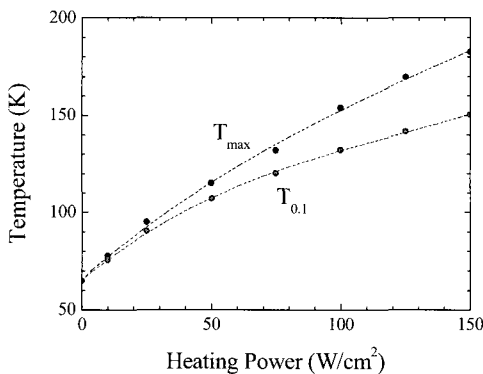
본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행 되었으며, 전원공급기를 지원해 주신 홍익대학교 신소재공학과 노재상 교수님과 실험 부품의 제작을 도와주신 (주)덕성의 진홍범 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Wolsky, A.M., Cooling for future power sector equipment incorporating ceramic superconductors. Argonne National Laboratory Report, April 2002. (available from : <http://www.iaea.org/tech/scond/scond>.)
- [2] Yazawa, T., et al., "66kV-Class Superconducting Fault Current Limiter Magnet-Subcooled Nitrogen Cryostat.", Advances in International Cryogenic Engineering 19, edited by G. G. Bague and P. Seyfert, pp.261-264, 2002.
- [3] Ohtani, Y., Yazawa, T., Kuriyama, T., Nomura, S., Ohkuma, T., Hobara, N., Takahashi, Y. and Inoue, K., "Subcooled Nitrogen Cryostat for 66kV/750A Superconducting Fault Current Limiter Magnet", Advances in Cryogenic Engineering 49A, edited by J. Waynert et al., pp.867-874, 2004.
- [4] Kang, H., Kim, H.J., Bae, D.K., Ahn, M.C. and Ko, T.K., "고온초전도 응용기기용 과냉질소 냉각시스템의 냉각특성", 한국초전도 저온공학회 논문지 6권1호, pp.38-42, 2005.
- [5] Kang, H., Ahn, M.C., Kim, H.J., Chang, H.M. and Ko, T.K., "6.6 kV-200A급 HTS 한류기 DC Reactor용 과냉질소 냉각시스템의 개발", 한국초전도저온공학회 03 추계학술대회 논문집, pp.171-175, 2003.



(a) Temperature history.



(b) Temperatures at peak and at 0.1 s.

Fig. 8. Measured temperature of vertical GFRP plate at 65 K for different heating powers.

- [6] 최연석, 장호명, Steven W. Van Sciver, "HTS변압기의 액체질소 과냉을 위한 구리판의 설계", 한국초전도.저온공학회 03 학술대회 논문집, pp.291-294, 2003.
- [7] Choi, Y.S., Van Sciver, S.W. and Chang, H.M., "Natural Convection of Subcooled Liquid Nitrogen in a Vertical Cavity.", Advances in Cryogenic Engineering 49B, edited by J. Waynert et al., pp.1091-1098, 2004.
- [8] Barron, R.F., Cryogenic Heat Transfer, Taylor & Francis, Philadelphia, pp.160-172, 1999.
- [9] Chupra, S.C. and Canale, R.P., Numerical Methods for Engineers McGraw-Hill, pp.849-852, 2002.
- [10] Arpaci, V.S., Conduction Heat Transfer, Addison-Wesley, London, pp.76-83, 1966.

저 자 소 개



최진혁(崔珍赫)
1980년 10월 07일생 2006년 홍익대 공대 기계공학과 졸업, 현 삼성전자 정보통신총괄 무선사업부.



하찬준(河贊峻)
1979년 3월 22일생 2006년 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 졸업, 현 엘지필립스.



변정주 (邊庭周)
1976년 11월 16일생, 2002년 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 졸업, 2004년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 홍익대학 과학기술연구소 연구원.



장호명(張鎬明)
1960년 9월21일생, 1983년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1984년 University of Michigan M.S.E 졸업(공학석사), 1988년 M.I.T 졸업(공학박사), 현재 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 교수 및 F.S.U. NHMFL 객원교수.



김호민(金鎬民)
1970년 8월 23일생, 1995년 제주대학교 전기공학과 졸업, 1998년 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 박사 졸업 후 현재 LG산전 전력연구소 선임연구원.



고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Unive. Dept. of EEAP 석사 졸업(M.SC), 1986년 Case Western Reserve Unive. Dept. of EEAP 박사 졸업(Ph.D), 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.