

## 고체 질소를 이용한 극저온 냉동의 해석 및 실험

### Analysis and Experiment on Cryogenic Refrigeration Using Solid Nitrogen

변정주\*, 이윤숙\*, 장호명\*\*

J.J. Byun\*, Y.S Lee\*, H.M. Chang\*\*

**Abstract** : The thermal characteristics of solid nitrogen are investigated by experiment and analysis for the purpose of evaluating its feasibility as a cooling medium for HTS (high Tc superconductor) magnets. A cryostat to refrigerate a liquid-nitrogen container well below its freezing temperature with a 2-stage GM cryocooler is designed and constructed. The spatial distribution of temperature is measured as a function of time during the freezing and melting processes, from which the thermal diffusivity of solid nitrogen can be approximately calculated. The freezing process is formulated and solved by the integral method with an assumption of phase equilibrium at the solid-liquid interface and the analytical results are compared with the experimental observation. It may be concluded that the thermal diffusion in solid phase is much slower than that in liquid and the degree of super-saturation is quite severe in the solidification of nitrogen.

**Key Words** : solid nitrogen, thermal diffusivity, super-saturation, HTS(high Tc superconductor), cryocooler

#### 기 호 설 명

$A, B, \dots, I$	온도분포식의 계수
$c$	비열 [J/kg-K]
$h_{if}$	용해(응고) 잠열 [J/kg]
$k$	열전도도 [W/m-K]
$r$	고체질소 응고 높이 [m]
$T$	온도 [K]
$T_m$	용해(응고) 온도 [K]
$T_b$	비등온도 [K]
$T_w$	바닥벽 온도 [K]
$t$	시간 [sec]
$x$	바닥면에서 축방향 거리 [m]

#### 그리스 문자

$\alpha$	열확산율 [ $m^2/sec$ ]
$\delta$	온도 관통깊이 [m]
$\rho$	밀도 [ $kg/m^3$ ]
$\xi$	고체-액체 경계면에서 거리 [m]

#### 하첨자

$f$	액체
$i$	고체

### 1. 서 론

고온초전도체는 초전도 임계온도가 77 K보다 높기 때문에 값싸고 편리한 액체질소를 이용하여 냉각이 가능하다. 그러나 강력한 자기장을 필요로 하는 초전도 마그네트에 있어서는 더욱 큰 전류밀도를 수용해야 하므로, 많은 경우에 액체질소온도보다 낮은 온도에서의 운전이 필요하다.

그림 1은 주요 극저온 유체의 상태량을 도식적으로 나타내고 있다. [1] 액체상이 존재하는 영역은 이론적으로 삼중점(triple point) 온도와 임계점(critical point) 온도 사이에 가능하나, 임계점 근처에서는 액체의 증발 잠열(latent heat)이 매우 작고 삼중점 근처에서는 대기압 이하의 진공상태를 유지해야 하므로 효과적인 액체냉각을 수행할 수 없다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 50 K 근처에서는 어떠한 순수물질도 액체상으로 존재하지 않으며, 실제로 30~60 K의 냉각이 필요한 초전도 시스템에서 액체냉각은 매우 어려우므로, 다른 냉각방식을 채택해야 한다. [2]

이러한 온도영역의 냉각매체로 고체질소를 이용한 냉동방법이 최근에 제안되었다. [3-5] 질소는 고체상에서 상당히 큰 비열을 가지고 있으므로, 지속적인 냉열을 공급하지 않고 장시간 운전이 가능할 것으로 예측되고 있다.

고체질소를 냉각매체로 사용한 예는 미국 항공우주국(NASA)의 지원으로 차세대 허블 천체망원경에 사용되는 근적외선카메라(NICMOS)의 냉각시스템을 들 수 있다. [6-7] 이 시스템에서 질소는 액체헬륨의 배관을 통하여 약 58 K까지 냉각하였고, 외부에서의 열유입을 최소화하여 추가적인 냉동없이 약 1개월간 연속운전을 수행한 것으로 보고되었다. 그리고 구 소련에서는 극저온을 이용한 고진공생성(cryopumping)에 고체질소를 이용한 사례도 있으며 [8], 최근에 일본 연구팀에서는 고체질소를 작게 파쇄하여 액체질소와 혼합하여 유동화한(fluidized) 슬러지질소(slush nitrogen)로 송전 케이블을 냉각하기 위한 연구도 수행하고 있다. [9]

\* 학생회원 : 홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과

\*\* 정 회원 : 홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과

원고접수 : 2001년 10월 19일

심사완료 : 2001년 11월 07일

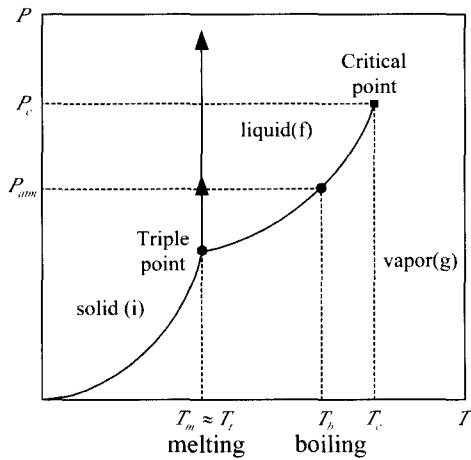
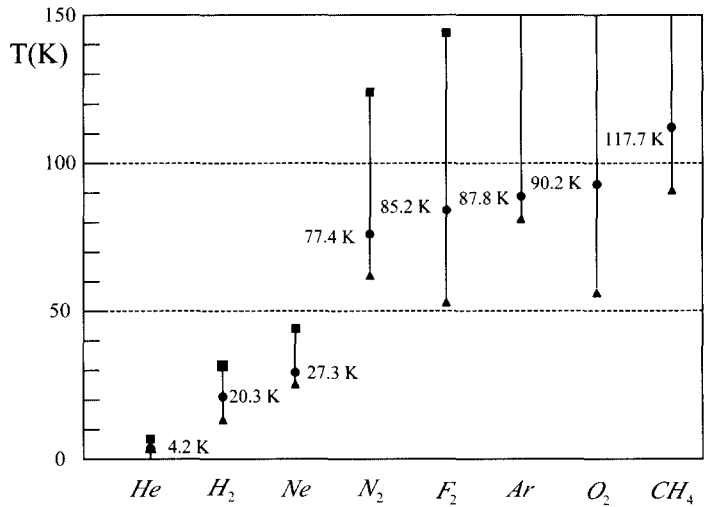


그림 1. 주요 극저온유체의 액체온도 영역.

Fig. 1. Temperature range of liquid for some cryogenic fluids.



부분적인 고체질소의 응용사례에도 불구하고, 고체질소의 열물리 상태량이나 액체-고체 상변화(phase change)에 대한 자료는 매우 부족한 현실이다. 저자들이 알고 있는 한, 고체질소의 열전도율(thermal conductivity)이나 열확산율(thermal diffusivity)과 같은 전달 상태량은 전혀 보고된 바 없고, 응고과정에서의 과포화(super-saturation) 여부에 대한 현상도 잘 알려져 있지 않다.

이 논문에서는 최근에 고온초전도 시스템의 냉각매체로 제안된 고체질소의 특성을 파악하기 위하여, 질소의 응고 및 용융에 대한 실험과 해석을 시도하였다. 이를 위하여 2단형 극저온냉동기로 액체질소 용기의 질소의 응고온도인 약 63.3 K이하로 냉각하여 응고시킨 후, 용해하는 과정동안 온도분포를 측정하는 실험을 수행한다. 측정된 온도는 열전달 해석을 통해 열확산에 관한 상태량을 근사적으로 계산하며, 액체-고체 경계면에서 상평형을 가정한 해석모델과 비교하여 과포화의 여부에 대한 검증을 시도하였다. 이 논문의 결과는 고체질소로 냉각되는 초전도 시스템의 열적 안정성을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치 및 과정

실험장치는 그림 2에 나타낸 바와 같이, 크게 질소 용기, 극저온냉동기, 단열부로 구성된다. 질소용기는 그림 3과 같은 원통형이며 뒷면에는 중심과 편심에 액체의 공급 및 배기, 그리고 용기의 내부온도 측정을 위한 두 개의 튜브가 연결되어 있다. 용기와 튜브의 재질은 모두 스테인레스강이며 모두 서로 용접하여 제작하였다. 튜브는 실험장치의 상판에 연결되는데, 액체질소 주입시 상판과 진공용기 사이의 O-ring의 냉각을 막고 용기로의 열전도를 줄이기 위해 약 20 cm 정도의 높이로 돌출된 소위 stand-off를 설치하였다.

질소용기 내 여러 위치에서의 온도를 측정하기 위해 그림 3과 같이 1.5 cm 간격으로 온도센서를 위치하였다. 온도센서는 극저온용 실리콘 다이오드(Lakeshore Model DT-470-SD)를 사용하였고, 정확한 측방향 위치를 위하여 G-10 FRP봉(지름 4 mm)에 온도센서를 부착하였다. 질소용기의 측방향으

로 1차원 온도분포를 확인하기 위하여 원통의 중심과 편심에서의 온도를 동시에 측정하였다.

냉동기는 소형 2단형 GM냉동기(CTI Model M22)이며, 냉동부와 헬륨을 압축하는 압축기로 구성되어 있다. 냉동기의 제1단은 복사열유입을 줄이기 위한 복사절드(radiation shield)를 냉각하며, 제2단은 액체질소 용기를 냉각한다. 냉동기 제2단과 질소용기의 바닥면은 1.5 mm두께의 구리판으로 연결하였다. 탈착이 가능하면서 접촉면적을 최대화하기 위해, 용기 바닥과 구리판은 8개의 볼트로 체결하였으며, 냉동기 제2단과 구리판도 4개의 볼트로 체결하였다.

열유입을 최소화하기 위한 단열은 진공, 복사절드, 다층단열재(MLI)로 이루어진다. 진공펌프는 진공용기 하부에 연결되어 실험과정 동안 펌핑을 계속한다. 구리판으로 제작된 복사절드는 그림 2와 같이 냉동기의 1단이 냉각하며 질소용기 전체와 연결튜브의 중간부분까지를 포함하고, 그 크기를 작게하여 복사 열전달을 최소화한다.

다층단열재는 질소용기의 외부와 복사절드의 외부에 각각 10겹, 30겹 이상 감았다. 그밖에 질소용기에 연결된 튜브를 통한 전도 열유입량은 충분한 길이로 미량으로 확인할 수 있었으며, 온도센서의 도선에 의한 전도는 전선자체의 단면적에 대한 길이의 비를 최대화하기 위해 그림 3과 같이 G-10 FRP 봉에 나선형으로 감아 열전도를 최대한 줄이려고 노력하였다.

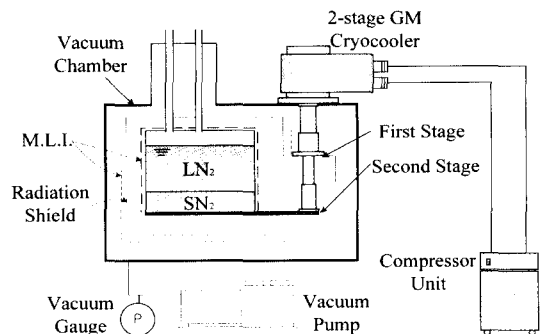


그림 2. 2단 GM 극저온냉동기를 이용한 질소 응고 실험장치.

Fig. 2. Experimental apparatus for solidification of nitrogen by a two-stage GM cryocooler.

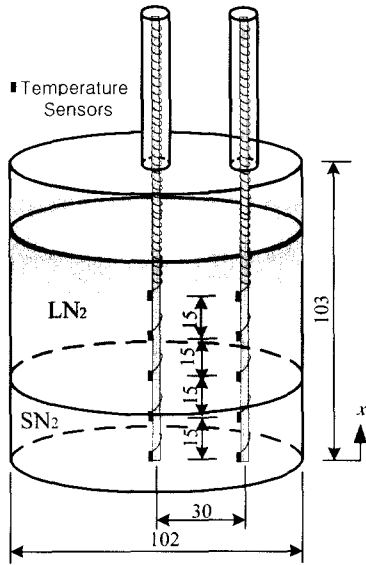


그림 3. 질소용기의 형상 및 온도센서 위치. (단위: mm)

Fig. 3. Shape of nitrogen container and location of temperature sensors. (unit: mm)

실험 과정은 다음과 같다. 진공펌프를 가동하여 2 mTorr 이하의 압력에 도달하면, 냉동기를 가동시키고 액체질소를 용기에 가득 주입한다. 액체질소의 증발을 줄이기 위해 온도센서가 부착된 G-10 FRP 봉을 외부에서 액체질소로 예냉시킨 후, 용기 내에 위치시킨다. 용기 바닥면의 온도가 질소의 응고온도보다 충분히 낮은 온도에 도달할 때까지 냉동기를 가동하여 냉각을 계속한다. 용기 내 각 위치의 최저온도에서 거의 정상 상태에 도달하면, 냉동기의 가동을 중지하고 진공을 유지한 채로, 고체질소가 완전히 용해되고 액체의 비등온도에 도달하게 한다. 이 냉각과 가열의 전체 과정 동안 온도의 변화를 측정한다.

**2.2. 온도 측정 결과**

그림 4는 각 위치에서의 온도센서로 측정 한 온도의 변화를 시간의 함수로 나타내고 있다. 축방향 좌표인 x는 가장 낮은 온도인 바닥면에서부터의 거리를 나타낸다.

이 온도는 용기 내부의 중심에서의 온도인데, 편심에서의 온도는 같은 축방향 위치(x)에서의 중심온도보다 약 0.2~0.5 K 정도 높게 측정되었다. 이 결과는 용기 내부에서의 반경방향의 온도구배(temperature gradient)가 축방향 온도구배에 비해 매우 작은 것을 의미하며, 따라서 전 과정을 통하여 축방향 1차원 열전도가 지배적임을 확인할 수 있다. 중심보다 바깥쪽의 온도가 높게 측정되는 이유는 용기의 바깥벽에 전달되는 복사열전달 때문이다. 그러나 복사열과 다층단열재의 효과적인 단열로 그 크기가 크지 않으며, 용기의 벽이 축방향으로 열전달을 촉진하는 효과가 반경방향 열전도를 줄인 결과로 판단된다.

용기바닥면(x=0)의 온도는 냉각이 시작된 후 약 1시간 30분이 경과하여 응고온도에 도달하였으며, 약 6시간 후에는 x = 3 cm에서까지 응고온도에 도달하였다. 냉각은 약 8시간 30분 동안 수행하였고, 냉동기를 정지한 후, 3시간 30분 정도 경과하여 용기 내의 모든 위치에서 비등온도에 도달하였다. 냉각과정에서는 각 위치의 온도가 매끈한 곡선을 형성하였지만, 가열과정에는 응고된 고체질소가 녹는 약 64 K 근처에서 상당한 시간 동안 머물러 있다가 온도가 상승하

는 현상을 관찰할 수 있다.

이러한 현상은 액체질소가 냉각과정에서 응고온도 이하에 도달하여도 곧 고체로 상변화하지 않고 과포화(super-saturation) 상태로 당분간 유지되다가 이후 서서히 고체로 결정화되기 때문이라고 설명할 수 있다. 일반적으로 이러한 과포화는 응고에 필요한 조핵(nucleation)작용이 충분하지 못하기 때문으로 알려져 있다. 여기에 관해서는 다음절의 응고해석의 결과에서 좀 더 언급하기로 한다.

반면에 가열과정에서는 명확한 고체-액체의 상변화가 이루어짐을 확인할 수 있으며, 따라서 본 실험에서의 최저온도의 시점(냉각시작 약 8시간 30분 후)에서는 하부에 최소 3 cm이상의 고체가 생성되었음을 의미한다. 그리고 가열 과정에서는 바닥면(x=0)의 온도가 내부보다 약간 먼저 상승하는 현상도 관찰할 수 있는데, 이는 상온의 외부와 시스템 구조상 연결되어 있는 냉동기로부터의 전도 열유입과 용기 바닥면에 전달되는 복사열 때문이다.

**2.3. 국소해석 및 열확산율**

용기 내에서 질소의 온도변화는 기본적으로 1차원 과도 열전도 방정식으로 결정된다. 따라서 온도의 시간에 따른 변화와 공간적 분포를 국소해석(local analysis)하면 실험 결과를 이용하여 근사적인 열확산율을 계산할 수 있다. 열전도율의 온도에 따른 변화를 무시하면, 단상(single phase)에서 1차원 과도 전도방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

식(1)에서 시간과 공간에 대한 두 도함수를 이산화(discrete) 자료를 이용하여 수치적으로 계산하면

$$\frac{\partial T_i^j}{\partial t} \approx \frac{-T_i^{j+2} + 8T_i^{j+1} - 8T_i^{j-1} + T_i^{j-2}}{12 \times \Delta t} \tag{2}$$

$$\frac{\partial^2 T_i^j}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i+1}^j + T_{i-1}^j - 2 \times T_i^j}{\Delta x^2} \tag{3}$$

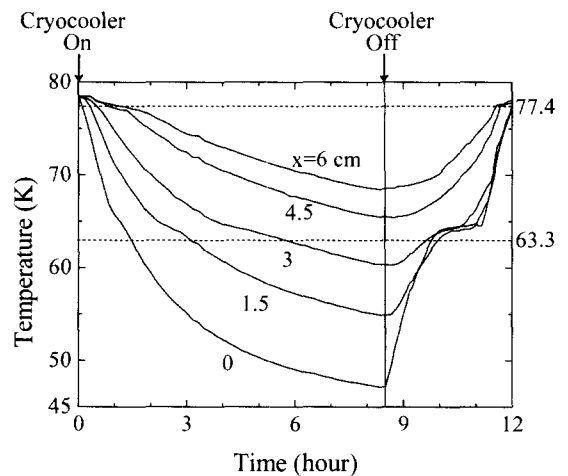


그림 4. 시간에 따른 질소의 측정온도 변화.

Fig. 4. Measured temperature history of nitrogen.

와 같다.[11] 여기에서 상침자와 하침자는 각각 시

간 및 축방향 길이에 대한 이산화 절점(grid point)를 나타낸다. 시간에 대한 1차 미분항은 전후 4개의 값에 의한 중심 유한차분으로, 길이에 관한 2차 미분항을 3개의 값을 이용한 중심 유한차분을 이용하였다.

표 1은 측정온도 값들을 이용하여 식(2)와 (3)으로 계산한 액체와 고체의 열확산율을 다른 문헌의 기존자료와 비교해서 나타내고 있다. 이 실험용기의 조건하에서, 액체영역의 열확산도는 1.92~2.10 (10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s)로, 고체영역의 열확산도는 1.56~1.75 (10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s)로 각각 계산되었다. 순수한 액체질소의 상태량은 NIST의 자료[10]를 이용하면 0.837 (10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s)로 계산되는데, 실험의 측정값이 2배 이상 큰 값을 나타내고 있다. 이 결과는 실험장치에서 온도센서의 축방향으로 정확히 위치시키기 위해 큰 열확산율(9×10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s)을 갖는 G-10 FRP봉과 센서용 도선이 열확산을 증가시켰기 때문으로 생각된다. 고체질소의 열확산에 대한 기존의 자료는 찾을 수 없으나, 같은 조건의 액체질소와 비교하여 볼 때, 약 74~92%정도에 머물고 있다. 따라서 실험값으로 계산된 열확산도를 순수한 고체질소의 정량적인 열확산도로 판단할 수는 없으나, 60 K 근처의 고체는 액체보다 작은 열확산도를 갖고 있음은 명백하다.

### 3. 적분법에 의한 응고해석

실험장치와 같이 1차원 진도에 의해 액체질소가 냉각되고 고체로 응고되는 과정은 적분법(integration method) 의한 근사해석이 가능하다. 이 해석에서는 바닥벽면(x=0)의 온도가 주어졌을 때, 고체-액체의 경계면에서 상평형이 이루어진다는 가정하에 질소의 온도분포를 결정한다. 이 온도분포는 실험에서의 측정온도와 비교하여 응고과정에서의 과포화 여부를 고찰할 수 있다. 해석모델은 바닥 벽면의 온도가 질소의 응고온도보다 높은 경우의 액체 과냉 영역과 더 낮은 경우의 응고영역으로 나누어 수행해야 한다.

#### 3.1. 액체 과냉 영역

냉각과정에서 용기 바닥면 온도가 질소의 응고온도에 이르기 전까지는 액체만 존재하는 영역으로 액체가

과냉되는(subcooled) 과정이다. 이 과정동안 액체의 1차원 온도는 열확산 방정식으로 결정된다.

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \alpha_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \quad (4)$$

그림 5(a)와 같이 냉각이 진행됨에 따라 액체의 온도 관통깊이(penetration depth)가 증가한다. 이는 점성유체의 경계층(boundary layer)두께와 유사한 근사적 개념으로 적분법을 이용하여 구할 수 있다. [12] 축방향의 온도분포는 적어도 3개의 경계조건을 만족해야 하므로 아래와 같이 2차식으로 가정한다.

$$T_f(x, t) = A(t)x^2 + B(t)x + C(t) \quad (5)$$

식(5)의 세 계수는 다음의 경계조건을 사용하여 결정한다.

$$\begin{aligned} T(0, t) &= T_w(t), & T(\delta(t), t) &= T_b, \\ \frac{\partial T(\delta(t), t)}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서  $\delta$ 는 온도 관통깊이다. 따라서 식(5)의 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A(t) &= \frac{T_w(t) - T_b}{\delta^2(t)} \\ B(t) &= -2 \frac{T_w(t) - T_b}{\delta(t)} \\ C(t) &= T_w(t) \end{aligned} \quad (7)$$

식(5)와 (7)을 지배방정식인 식(4)에 대입하여 x=0에서  $\delta$ 까지 적분하면 과냉액체 영역의 관통깊이에 대한 미분방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{6\alpha_f}{\delta(t)} - \frac{\delta(t)}{T_w(t) - T_b} \frac{dT_w}{dt} \quad (8)$$

표.1 액체 및 고체 질소의 상태량에 대한 기존자료 및 측정값.

Table. 1 Existing and measured properties of liquid and solid nitrogen.

phase	Temp. (K)	Existing Data								Present Experiment
		[10]				[3]		[9]		
		<i>k</i>	$\rho$	<i>C<sub>p</sub></i>	$\alpha$	$\rho$	<i>C<sub>p</sub></i>	$\rho$	<i>C<sub>p</sub></i>	
liquid	77.4	0.134	810	2062	0.803	-	-	804	2066	-
	70.0 ~71.0	0.142 ~0.144	837 ~841	2041 ~2045	0.832 ~0.836	-	-	-	-	1.92~2.10
	63.3	0.150	865	1971	0.881	-	-	-	-	-
solid	59.0 ~60.0	-	-	-	-	840	1570	946	1691	1.56~1.75

Unit : *k*(W/m-K),  $\rho$ (kg/m<sup>3</sup>), *C<sub>p</sub>*(J/kg-K),  $\alpha$ (10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s)

$T_w(t)$ 가 주어지면, 식(8)은 4차 Runge-Kutta방법을 사용하여 수치적으로 계산한다. 이 수치해법은  $T_w$ 가 일정한 경우의 엄밀해[12]인

$$\delta = \sqrt{12\alpha_f t} \quad (9)$$

의 결과로 검증하였다.

### 3.2. 응고 영역

용기 바닥면의 온도가 질소의 응고온도 이하에 도달하면, 바닥 벽에 응고가 시작된다. 이 시간부터는 액체질소와 고체질소가 공존하게 되므로 2개의 구간으로 나누어 해석하여야 한다. 응고 영역에서 두 구간은 대체로 그림 5(b)와 같은 온도분포를 하는데, 두 구간에 대한 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq r(t) \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \alpha_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \quad r(t) \leq x \leq r(t) + \delta(t) \quad (11)$$

이 때 액체 영역의 온도 관통깊이는 고체의 응고 높이의 성장에 영향을 주고, 액체-고체의 경계면이 시간에

따라 이동하므로, 액체영역의 해석을 위해 축방향 좌표를 이동좌표계로 변환해야 편리하다.

$$\xi = x - r(t) \quad (12)$$

여기에서  $\xi$ 는 액체-고체 경계면에서 부터의 축방향 거리를 나타낸다. 변환된 이동좌표계에서의 액체구간 온도의 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \alpha_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial \xi^2} + \frac{\partial T_f}{\partial \xi} \frac{dr}{dt} \quad 0 \leq \xi \leq \delta(t) \quad (13)$$

식 (10)과 (13)에 대한 경계조건으로 다음의 6개 식을 사용한다.

$$T_i(x=0, t) = T_w$$

$$T_f(x=r(t), t) = T_f(\xi=0, t) = T_m$$

$$k_i \frac{\partial T_i}{\partial x}(x=r(t), t) - k_f \frac{\partial T_f}{\partial \xi}(\xi=0, t) = \rho_i h_{if} \frac{dr}{dt} \quad (14)$$

$$T_f(\xi=\delta(t), t) = T_b$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial \xi} = 0$$

식(14)의 두 번째와 세 번째 식은 액체-고체의 경계 면에서 상평형이 이루어지며, 고체와 액체를 통한 열유속(heat flux)의 차이에 의해 경계면의 이동속도가 결정된다. 고체와 액체 구간에 대한 온도분포는 각각 2차식으로 가정한다.

$$T_i(x, t) = D(t)x^2 + E(t)x + F(t) \quad (15)$$

$$T_f(\xi, t) = G(t)\xi^2 + H(t)\xi + I(t) \quad (16)$$

식(15)와 (16)의 6개 계수들은 식(14)의 6개 경계 조건에 의해 결정되는데, 온도 관통깊이  $\delta$ 와 고체의 응고 높이  $r$ 을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(t) = \frac{\rho_i h_{if}}{k_i r(t)} \frac{dr}{dt} - 2 \frac{k_f}{k_i} \frac{T_m - T_b}{\delta(t)r(t)} - \frac{T_m - T_w(t)}{r(t)^2}$$

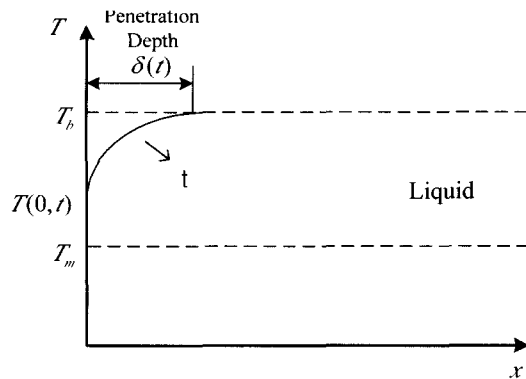
$$E(t) = -\frac{\rho_i h_{if}}{k_i} + 2 \frac{k_f}{k_i} \frac{T_m - T_b}{\delta(t)} + 2 \frac{T_m - T_w(t)}{r(t)} \quad (17)$$

$$F(t) = T_w(t)$$

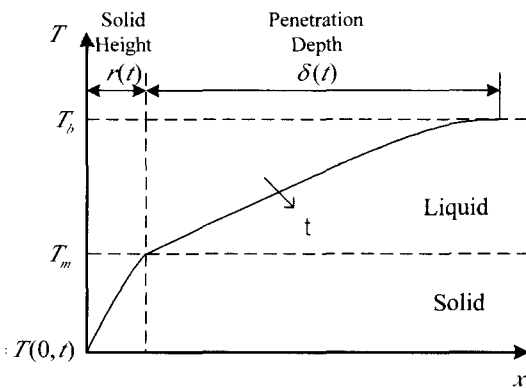
$$G(t) = \frac{T_m - T_b}{\delta^2(t)}$$

$$H(t) = -2 \frac{T_m - T_b}{\delta(t)}$$

$$I(t) = T_m$$



(a) Liquid subcooling ( $T_m < T_w < T_b$ )



(b) Solidification ( $T_w < T_m$ )

그림 5. 적분법에 의한 냉각 및 응고과정 해석 모델.  
Fig. 5. Analysis model of integral method cooling and solidification process.

위에서 구한 액체 및 고체 구간에서의 온도분포를 각각 영역의 지배방정식인 식 (10) 및 (13)에 대입한다. 그리고 고체영역은  $x=0$ 에서  $r$  까지 적분하고 액체영역은  $\xi=0$ 에서  $\delta$ 까지 적분하면, 두 미지 함수인

$r$ 과  $\delta$ 에 대한 연립 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{2\alpha_f}{\delta(t)} - \frac{1}{3} \frac{d\delta}{dt} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2r}{dt^2} = & -12 \frac{\alpha_i}{r(t)^2} \frac{dr}{dt} + 24 \frac{k_f}{k_i} \frac{\alpha_i(T_m - T_b)}{\rho_i h_{if} \delta(t) r(t)^2} \\ & + 12 \frac{k_i \alpha_i (T_m - T_w(t))}{\rho_i h_{if} r(t)^3} - \frac{2}{r(t)} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 \\ & + 4 \frac{k_f (T_m - T_b)}{\rho_i h_{if} \delta(t) r(t)} \frac{dr}{dt} - 2 \frac{k_f \alpha_i (T_m - T_b)}{\rho_i h_{if} \delta(t)^2} \frac{d\delta}{dt} \\ & - 2 \frac{k_i (T_m - T_w(t))}{\rho_i h_{if} r(t)^2} \frac{dr}{dt} + 2 \frac{k_i}{\rho_i h_{if} r(t)} \frac{dT_w}{dt} \quad (19) \end{aligned}$$

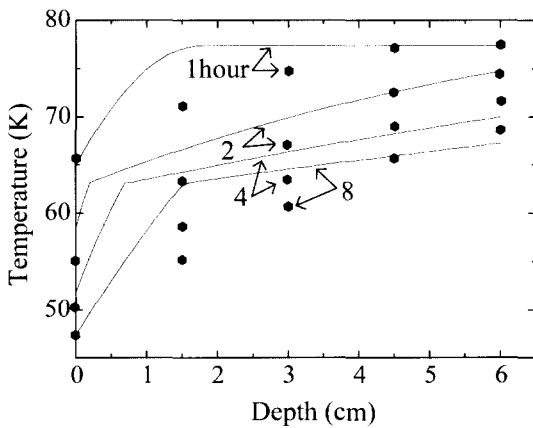


그림 6. 실험(점) 및 상평형 해석(곡선)에 의한 온도 분포의 비교.

Fig. 6. Comparison of temperature distributions for experiment(dots) and phase-equilibrium analysis (curves).

식 (18)과 (19)도 연립하여 4차 Runge-Kutta 방법으로 수치적분을 수행한다. 이 때의 초기조건은 앞 절에서 계산한 액체 과냉영역의 마지막 시간에서의  $\delta$ 값과  $r=0$ 을 이용한다.

### 3.3. 결과 및 토론

질소의 냉각 과정을 적분법에 의해 계산한 온도분포를 실험적 측정온도와 함께 그림 6에 나타내었다. 온도분포는 과냉영역(약 1시간 30분 이전)과 응고영역(약 1시간 30분 이후)으로 구분되어 서로 다른 모양을 갖고 있다. 액체영역에서는 단순히 관통깊이가 점점 증가하고 있으나, 액체-고체 경계면(약 63.3 K)에서는 상변화에 따른 두 온도분포 곡선의 기울기 차이가 확인될 수 있다. 이 계산에는 고체질소의 상태량이 필요한데, 기존의 자료가 없는 고체질소의 열확산율과 열전도율은 이 연구의 실험에서 측정된 값을 근사적으로 사용하였다.

두 결과는 정량적으로 약간의 차이를 보이고 있으나, 이는 해석의 단순화 조건이 실험의 조건과 차이가 있고 또 물질의 상태량에 대한 자료가 충분하지 않기 때문으로 판단된다. 반면에 정성적인 측면에서 좀 더 중요한 점을 관찰할 수 있다. 실험적으로 측정된 온도분포를 상평형 해석의 결과와 비교해 보면, 응고온도 이상의 온도와 이하의 온도에서 커다란 기울기의 차이를 볼 수 없다. 이 결과는 질소가 응고온도 이하로 냉

각이 되어도 상당한 기간동안 고체로 상변화가 이루어지지 않는, 소위 과포화(super-saturation) 상태의 액체로 존재함을 의미하며, 이는 2.2절의 설명과도 잘 일치하는 부분이다. 실제 과포화의 정도를 온도로 정확히 판별하기는 어려우나 대체로 약 10K 이상이라고 추론할 수 있다.

## 4. 결 론

이 논문에서는 질소의 응고 및 용해과정에 대한 실험을 통해 고체질소의 열물리 상태량을 살펴보고, 상평형을 가정한 적분법에 의한 근사적 응고해석을 수행하였다. 측정된 온도분포를 분석한 결과 60 K 근처의 고체질소의 열확산 속도는 액체질소보다 약 74~92% 정도로 매우 느리다는 결론에 도달하였다. 또한 대기압 응고온도인 63.3 K에서 질소가 모두 고체로 상변화 된다는 가정 하에 계산된 온도분포를 실험에서 측정된 온도분포와 비교하여, 냉각과정에 명백한 과포화 현상이 나타났음을 알 수 있었다. 이러한 고체질소의 열적 특성은 고온초전도 시스템의 냉각매체로 덜 유용한 면으로 판단되며, 따라서 그 열적 안정성에 매우 세심한 주의가 필요하다고 할 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단의 2000년 선도연구자 지원 과제(2000-041-E00101)의 연구 결과이며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] R.F. Barren, "Cryogenic Systems," 2nd ed., Oxford University Press, New York, pp.43-56, 1985.
- [2] 장호명, "New Cooling Techniques of High Tc Superconducting Systems," Proc. of the Korean Superconductivity Society Meeting, Yong Pyung, August, 1999.
- [3] 이해근, "고온 초전도 전자기 마그넷을 위한 새로운 개념의 냉각 시스템," 초전도와 저온공학, 제2권, 제2호, pp.27-36, 2000.
- [4] 오상수 등, "고화질소 냉각형 고온초전도마그넷 개발(I)," 2000년도 한국초전도 저온공학회 학술대회 논문집, pp.19-22, 2000.
- [5] 극저온 냉동 및 응용기술 세미나, IIR 한국위원회 A1분과/공기조화냉동공학회 극저온분과 공동개최, KIST, 2000.
- [6] R.L. Oonk, "Design of the solid nitrogen dewars for the near-infrared camera and multi-object spectrometer," Advances in Cryogenic Engineering, Vol.37, pp.1385-1391, 1992.
- [7] C.D. Miller, "Development of the Long-Lifetime Solid Nitrogen Dewar for NICMOS," Advances in Cryogenic Engineering, Vol.43, pp.927-933, 1998.
- [8] M.P., Larin, "Ultrahigh Cryovacuum

Systems Cooled by Solid Nitrogen," Soviet Physics - Technical Physics, Vol.30, No.3, pp.269-279, 1995.

[9] H. Yanagi et al., "Study on A Cable-Cooling by Slush Nitrogen", Korea-Japan Joint Workshop on Applied Superconductivity and Cryogenics, p.31, 2000.

[10] D.G. Friend, "NIST Thermophysical Properties of Pure Fluids," NIST Standard 12, US Department of Commerce, 1992.

[11] S.C. Chapra and R.P. Canale, "Numerical Methods for Engineers," 3rd ed., McGraw-Hill, Boston, MA, pp.629-632, 1998.

[12] V.S. Arpaci, "Conduction Heat Transfer," Addison-Wesley, Reading, MA, pp.73-90, 1966.

지 자 소 개



**변정주(邊庭周)**

1976년 11월 16일생, 2002년 홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과 졸업 예정



**이윤숙(李允淑)**

1978년 5월 1일생, 2002년 홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과 졸업 예정



**장호명(張鎬明)**

1960년 9월 21일생, 1983년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1984년 University of Michigan 기계공학과 졸업(공학석사), 1988년 M.I.T 기계공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 홍익대학교 기계·시스템 디자인공학과 교수