

흰불이 수직냉각관 주위의 상변화물질에서 응고열전달에 관한 연구

A study on heat transfer during solidification of phase change material on a finned vertical cooling tube

정 석 주* · 송 하 진**
Suk-Choo Chung · Ha-Jin Song

ABSTRACT

Experiments were performed to study solidification of phase change material on a finned vertical tube when either conduction in the solid or natural convection in a liquid controls the heat transfer.

The liquid was housed in a cylindrical containment vessel whose surface was maintained at a uniform, time-invariant temperature during a data run, and the solidification occurred at a finned and unfinned vertical tube positioned along the axis of the vessel.

The phase change material(PCM) employed in this experiment is 99 percent pure n-Octacosan paraffin($C_{28}H_{58}$).

For conduction-controlled and convection-controlled solidification, the enhancement of the solidified mass rate due to finning is great when the solidified layer is thin and decreases as the layer grows thicker.

It is studied that the latent energy(E_{λ}) is the largest contributor to the total extracted energy($E_{\lambda} + E_{s1} + E_{s2}$) and the total extracted energy rate at a finned vertical tube is greater than that at a unfinned vertical tube.

1. 서 론

최근에 들어서 우리나라와 같이 에너지 부존자원이 거의 없는 국가에서는 태양열, 지열, 풍력, 조력 등과 같은 대체에너지 이용기술의 개발, 불

규칙한 전력 수요로 인한 잉여전력의 효과적인 사용과 산업체의 폐열회수 등의 필요성이 대두됨에 따라 에너지의 효율적인 이용에 대한 기술개발이 절실히 요구되고 있다. 이러한 필요성에 대한 연구과제 중의 하나로 열에너지 저장시스템에서 에

* 서울산업대학교 기계설계학과

** 대림전문대학

너지 저장 밀도가 큰 축열 장치의 개발이 우선적으로 해결해야될 중요한 문제이다. 이러한 축열 장치에서 사용되는 열에너지 저장방법 중 지금까지 알려진 대표적인 방법은 단상의 축열매질로 사용하는 현열 이용형 축열방법과 상변화물질(phase change material) 약칭, PCM)을 축열매질로 사용하는 잠열 이용형 축열방법이 있다^{1,2)}.

이 중에서 상변화를 동반하는 잠열 이용형 축열 방법은 상변화물질의 단위체적당 효율이 좋기 때문에 많이 사용되고 있으며 이것에 대한 열전달 현상에 관한 연구는 원관³⁾, 평판⁴⁾, 구⁵⁾ 등의 여러가지 기하학적 형상에 있어서 상변화물질의 초기온도 조건의 변화, 용기벽면온도의 변화 등의 인자(parameter)에 대하여 수행해왔고, 근간의 연구동향은 실험적 방법과 해석적 방법을 병행한 연구⁶⁾들이 시도되고 있다.

본 연구에서는 전열면적을 크게하기 위하여 수직원관에 환을 부착하고 이것을 온도가 일정한 외벽을 열원으로하는 용기내에 상변화물질을 충전하고 여기에 환불이 냉각관을 삽입하였을때 냉각관 주위에 형성된 응고층의 질량, 두께, 응고에너지를 구하고 이들을 환이 부착되지 않는 수직냉각관 주위에 형성된 응고층의 질량, 두께 및 응고에너지와 비교, 분석하여 잠열 이용형 축열장치 내에서 발생하는 열전달 현상을 규명하고자 한다.

본 연구의 해석결과들은 에너지 관련분야에서 축열장치에 대한 효율을 증대시키고 심야전력 또는 태양열을 이용하는 축열장치의 형상 및 크기를 결정하는 설계자료와 금속의 주조과정에서 발생하는 열전도 문제에 응용등 실질적인 축열장치의 설계에 적용할 수 있는 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험장치의 주요부분은 항온조, 상변화물질이 담긴 용기, 응고가 발생하는 냉각관, 저온수와의 온도 공급장치(pump), 온도 조절장치(thermo-controller), 온도 측정장치(data-logger) 및 기타 측정계기로 구성되며 그 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

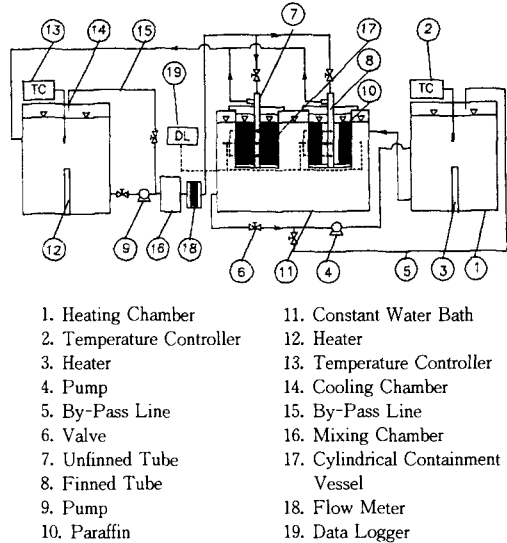


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

응고가 발생하는 냉각관을 중심으로 왼쪽 부분은 냉각관에 공급되는 저온수의 공급 및 조절장치이며 오른쪽 부분은 용기에 담겨있는 액상 상변화물질의 초기온도를 조절하기 위한 온수를 만들어 공급하는 장치이다.

Fig. 2는 상변화가 일어나는 용기 및 냉각관에 대한 상세도로써 왼쪽 부분은 용기내의 액상 상변화물질에 냉각관을 삽입하기 전의 그림이고 오른쪽 부분은 냉각관을 삽입하여 일정시간이 경과한 상태의 그림이다.

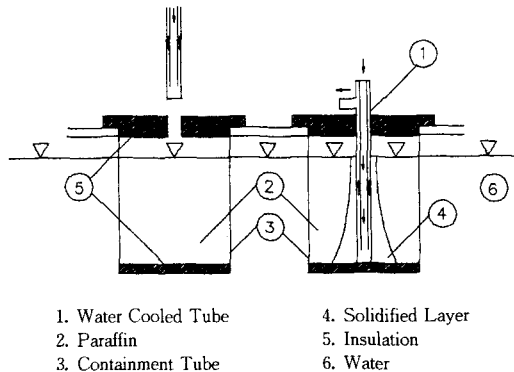


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus
Left hand side; preparatory stage an experiment
Right hand side; a data run in progress

상변화물질이 담긴 용기는 두께가 얇은 스테인레스(stainless)를 사용하여 외경 15cm, 높이 20cm로 제작하였으며 흰이 없는 냉각관과 흰불이 냉각관은 모두 외경 2.55cm, 두께 0.2cm로 하였고 내관의 외경은 1.6cm로 하였다. 흰불이 냉각관은 4개의 수직원(2×12×0.13cm)을 관의 외표면에 흰들의 사이각이 90도가 되도록 고정하였다. 또한 냉각관은 필요에 따라 즉시 이동이 가능하도록 지지대를 설치하여 매 실험때마다 시험부위를 채취하여 응고량 및 응고층의 두께를 측정, 관찰할 수 있도록 하였으며 특히 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관이 동일한 유량 및 온도조건에서 동시에 삽입, 제거될 수 있는 장치로 제작하였다.

용기내 상변화물질의 온도 측정용 열전대는 냉각관의 밑 바닥으로부터 2cm, 6cm, 8cm되는 위치에 각각 1개씩 설치하였고 냉각관의 밑바닥으로부터 6cm되는 위치에 냉각관의 표면으로부터 반경 방향으로 0.2cm, 0.4cm, 0.6cm, 1cm, 2cm 및 3cm의 위치에 각각 1개씩 설치하여 고상 및 액상 상변화물질의 온도를 측정하였다.

2.2 실험 방법

본 실험에서 사용된 상변화물질은 용융온도가 61.4°C인 시약용 n-옥타코산 파라핀(C₂₈H₅₈)(일본 Shiyu pure chemical사 제품)을 사용하였으며 이의 물성치는 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Thermophysical properties of paraffin(C₂₈H₅₈)

Properties	Value	Properties	Value
C _{sol} (KJ/kg°C)	2.0	C _{liq} (KJ/kg°C)	2.3
λ (KJ/kg)	163.7	K _{sol} (KW/m°C)	1.6×10 ⁻¹
ρ _{sol} (kg/m ³)	780	α _{sol} (m ² /s)	1.0×10 ⁻⁷

냉각관에 유입되는 유량은 6.5//min.으로 일정하게 유지하였고 실험조건은 상변화물질의 초기 온도(T_i)가 61.4°C이고 냉각관의 벽면온도(T_w)를 31.4°C, 46.4°C 및 56.4°C로 한 조건과 상변화물질의 초기 온도(T_i)가 76.4°C, 81.4°C이고 냉각관의 벽면온도(T_w)를 31.4°C, 46.4°C 및 56.4°C로 한 조건으로 분류하여 동일온도조건인 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관에 대하여 응고실험을 행하였다.

실험에 앞서 밀폐용기와 그속에 든 액상 상변화물질이 열적인 평행상태에 도달되도록 하기 위하

여 밀폐용기에 액상 상변화물질을 넣은 후 약 2시간 동안 유지시켰고 액상 상변화물질의 열적인 평형 상태를 온도측정장치(data-logger)로 확인하였다. 열적인 평형상태가 확인되면 냉각관을 액상 상변화물질에 넣고 각각의 실험조건에서 5, 15, 30, 60, 90, 120, 180 및 240분이 경과할 때마다 액상 상변화물질로부터 냉각관을 끌어내어 고정 한 후 냉각관에 붙어있는 응고된 상변화물질을 냉각관으로 부터 분리, 채취하였다. 채취된 표본은 정확도 0.1인 디지털 질량측정기로 질량을 측정하였고 vernier calipers로 응고층의 두께를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 원통형용기 내에 충전된 액상 상변화물질에 동일온도 조건의 흰불이 냉각관과 흰이 없는 냉각관을 삽입하였을때 흰불이 냉각관 주위에 형성된 고상 상변화물질의 응고량, 응고층의 두께 및 응고 에너지 등을 흰을 부착하지 않은 냉각관에서의 결과와 비교, 분석하였다.

3.1 응고 에너지의 산출

실험결과와 비교, 검토시 각종 무차원수를 사용하였으며, 그중에서 Stefan수는 현열과 잠열의 비로 정의되고 그 의미는 열저장의 특성을 나타낸다. 두개의 Stefan수 즉 고상 Stefan수와 액상 Stefan수는 다음과 같이 정의된다.

$$Ste_S = C_S(T_m - T_w) / \lambda \dots\dots\dots (1)$$

$$Ste_L = C_L(T_i - T_m) / \lambda \dots\dots\dots (2)$$

여기서 T_m, T_w, T_i는 각각 상변화물질의 용융 온도, 냉각관의 벽면온도, 초기 액상 상변화물질의 온도이며 T_m-T_w는 벽면과냉도를 나타내고 T_i-T_m은 초기과열도를 나타낸다.

벽면과냉도(T_m-T_w)를 5°C, 15°C, 30°C로 변화시키고 초기과열도(T_i-T_m)를 0°C, 15°C, 20°C로 하였을 경우, 각각의 고상 Stefan수 및 액상 Stefan수는 아래 Table 2와 같다.

Table 2 Temperature differences and associated Stefan numbers

T _m -T _w	Ste _S	T _i -T _m	Ste _L
5°C	0.061	0°C	0
15°C	0.183	15°C	0.211
30°C	0.366	20°C	0.281

또한, Fourier수는 물체의 크기와 어떤 주어진 시간 t 동안 그 물체 안으로 온도가 침투된 깊이의 비로 정의되며 아래 식과 같다.

$$F_o = \alpha_s t / R_w^2 \dots\dots\dots (3)$$

여기서 α_s 는 고상 상변화물질에서 열확산 계수이고 R_w 은 냉각관의 반지름이다.

상변화물질의 응고과정중 용융 상변화물질로부터 방열된 에너지는 다음과 같은 식들로 표현된다.

상변화물질의 초기 온도를 용융온도와 같게 하였을 경우, 응고된 상변화물질을 M 이라고 하면 이때 방출되는 잠열에 의한 에너지 E_λ 는

$$E_\lambda = \lambda M \dots\dots\dots (4)$$

용기 내 액상 상변화물질이 초기과열도가 존재하지 않는 경우의 응고될 수 있는 최대응고질량을 M_T , 초기과열도가 존재하는 경우의 응고될 수 있는 최대응고질량을 M_T' 라 하면 이 상변화물질이 모두 응고되었을때 방출되는 잠열에 의한 에너지 $E_{\lambda \max}$ 는

$$E_{\lambda \max} = \lambda M_T (M_T') \dots\dots\dots (5)$$

고상 상변화물질의 비열이 일정하다고 하면 응고된 상변화물질이 용융온도 이하로 냉각될때 방출되는 현열 에너지 E_{s1} 은

$$E_{s1} = MC_s (T_m - T_{bs}) \dots\dots\dots (6)$$

여기서, C_s 는 고상 상변화물질의 비열, T_m 은 상변화물질의 용융온도이고 T_{bs} 은 응고된 상변화물질의 질량평균온도로 다음과 같이 계산된다.

$$T_{bs} = \int_{R_w}^{r_m} T(r) \rho_s 2\pi r dr / \int_{R_w}^{r_m} \rho_s 2\pi r dr \dots\dots\dots (7)$$

여기서 온도 $T(r)$ 은 반경 r 의 함수이다. R_w , r_m 은 각각 냉각관의 반경과 용기의 중심선으로 부터 상경계면까지의 거리이고, ρ_s 는 고상 상변화물질의 밀도이다.

상변화물질의 초기 온도가 용융온도 T_m 와 동일할때 상변화물질에서 방열되는 총 에너지 E_T 는

$$E_T = E_\lambda + E_{s1} \dots\dots\dots (8)$$

액상 상변화물질의 초기온도가 용융온도보다 높은 경우에는 초기온도 T_i 에서 상변화물질이 용융온도 T_m 까지 냉각될때 방열되는 에너지 E_{s2} 를 고려할 수 있으므로 다음과 같이 계산된다.

$$E_{s2} = M \int_{T_m}^{T_i} C_L dT \dots\dots\dots (9)$$

여기서 C_L 은 액상 상변화물질의 비열이다.

일정시간이 경과 후 고상이된 상변화물질로 부터 방출되는 총 에너지 E_T 는

$$E_T = E_\lambda + E_{s1} + E_{s2} \dots\dots\dots (10)$$

와 같이 된다.

3.2 응고량

Fig. 3, 4, 5는 초기 과열도를 나타내는 액상 Stefan수가 0이고, 벽면과냉도를 의미하는 고상 Stefan수가 0.061, 0.183, 0.366일 경우, 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관 표면에서 발생하는 응고량의 무차원값(M/M_T)을 시간의 무차원 함수($F_o Ste_s \times 10^2$)로 나타낸 것이다.

여기서 시간 변수로서 $F_o Ste_s$ 을 사용한 것은 상변화를 동반하는 열전도 이론에 의한 것으로 이 무차원 수에 사용된 물성치들은 고상 상변화물질의 용융온도에서 계산된 값이다. Fig. 3, 4, 5 각각의 그림에서 나타난 바와 같이 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관에서 응고초기(응고시간 15분정도)의 응고질량은 시간이 경과함에 따라 급격히 증가하나 그 후에는 거의 선형적으로 증가하고 있다. 이러한 응고질량의 증가 경향을 나타내는 주된 이유는 첫째, 초기 과열도를 나타내는 액상 Stefan수가 0이 되기 때문이며 둘째, 응고과정시 고상 상변화물질에서 서릿발 같은 수지상의 결정(고상 상변화물질과 같은 물질)이 생성되기 때문인데 이것은 액상 상변화물질과 고상 상변화물질이 접촉하는 경계면적(전열면적)을 확대시키므로 응고가 촉진되어 응고질량을 크게하기 때문이라고 생각된다.

흰불이 냉각관에서 응고질량은 흰을 부착하지 않은 냉각관에서의 응고질량율보다 크게 나타났으며 시간이 경과함에 따라서 두 냉각관에서의 응고질량율의 차이는 점점 증가하였고 응고시간 60분 경과시에 흰불이 냉각관에서의 응고질량율이 흰을 부착하지 않은 냉각관에서의 응고질량율보다 각각 156%(Fig. 3), 129%(Fig. 4), 104%(Fig. 5)로 향상되었다.

응고시간 60분이 경과할때 고상 Stefan수가 0.061(Fig. 3), 0.183(Fig. 4), 0.366(Fig. 5)로 증가할수록 흰불이 냉각관에서 응고질량율의 값이 Fig. 4는 Fig. 3보다 39% 증가했고, Fig. 5는 Fig. 4보다 47% 증가했다. 흰을 부착하지 않은 냉각관에서는 Fig. 4는 Fig. 3보다 56% 증가하고

Fig. 5는 Fig. 4보다 64% 증가했다. 따라서 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관에서의 응고성장율은 고상 Stefan수가 증가할수록 크게 나타났다. 또한 각각의 그림에서 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관에서의 응고질량비 (M_f/M_{uf})는 응고시간 약 10분 전후까지는 응고질량비 (M_f/M_{uf})의 값이 대체로 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관에서의 단면적비 ($A_f/A_{uf}=3$)보다 크게 나타나나 시간이 경과할수록 작게 나타났다.

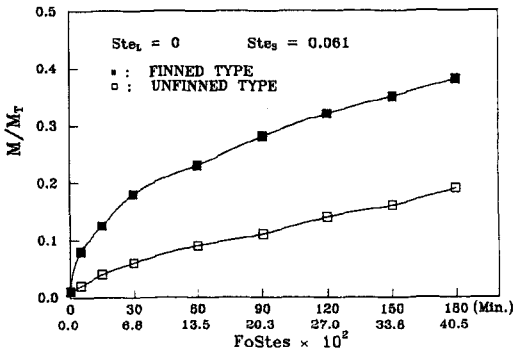


Fig. 3 Timewise variations of solidified mass at the finned tube and unfinned tube; $Ste_L=0$, $Ste_S=0.061$

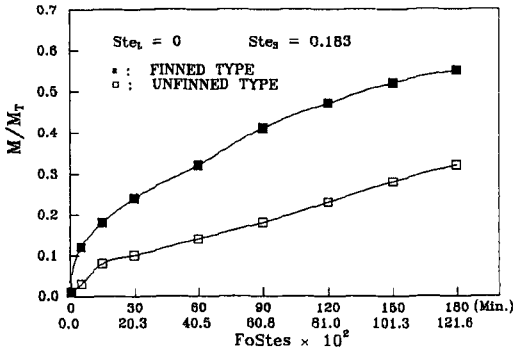


Fig. 4 Timewise variations of solidified mass at the finned tube and unfinned tube; $Ste_L=0$, $Ste_S=0.183$

Fig. 6은 고상 Stefan수가 0.061, 0.183, 0.366이고 액상 Stefan수가 0일 경우, 시간경과에 따른 응고질량을 나타낸 것으로 고상 Stefan수의 각각의 실험조건으로 부터 얻어진 응고질량의 실험값들을 최소자승법으로 구한 해를 흰불이 냉각관과

흰을 부착하지 않은 냉각관에 대하여 실선으로 그림에 표시하였고 그 실험값은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

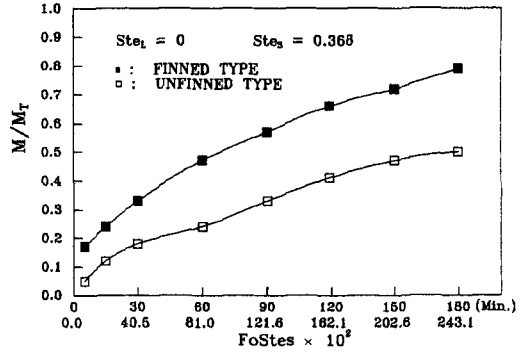


Fig. 5 Timewise variations of solidified mass at the finned tube and unfinned tube; $Ste_L=0$, $Ste_S=0.366$

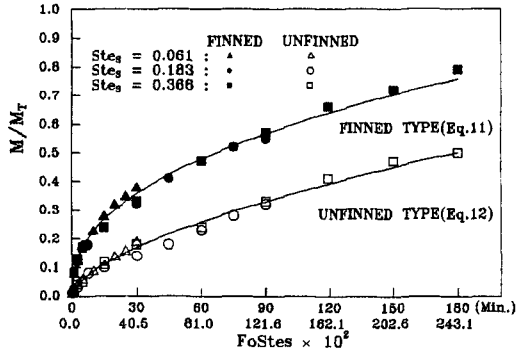


Fig. 6 Comparison of finned tube and unfinned tube for solidified mass; $Ste_L=0$, $Ste_S=0.061$, 0.183 , 0.366

① 흰불이 냉각관의 경우

$$M/M_T = C(Ste_S Fo \times 10^2)^n \dots\dots\dots (11)$$

($C=0.0746$, $n=0.42$)

② 흰을 부착하지 않은 냉각관의 경우

$$M/M_T = C(Ste_S Fo \times 10^2)^n \dots\dots\dots (12)$$

($C=0.0179$, $n=0.61$)

다음은 액상 상변화물질의 초기과열도가 존재하는 경우(초기 액상 상변화물질이 상변화물질의 용융온도보다 높은 경우)로서 고상 Stefan수가 각각 0.183, 0.366이고 액상 Stefan수가 0.211일 경우, 시간 경과에 따른 응고량을 Fig. 7, 8에 각각 나타내었다. 여기서 초기 과열도가 존재하는 경우의

최대응고질량(M_T')은 초기 과열도가 존재하지 않는 경우의 최대응고질량(M_T)의 1/5.6배이다. Fig. 7, 8에서 나타난 바와같이 응고질량율의 분포는 응고초기에는 급격히 증가하나 일정시간이 경과하면 더이상 증가하지 않는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상을 나타내는 주된 이유는 첫째, 초기 과열도가 존재하기 때문이며 둘째, 자연대류가 발생함으로써 자연대류에 의한 유동이 응고층을 감소시키기 때문이라고 생각된다.

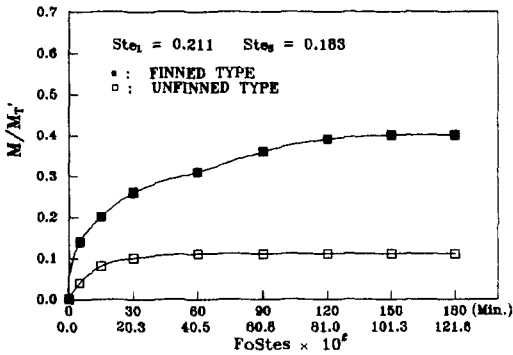


Fig. 7 Timewise variations of solidified mass at the finned tube and unfinned tube; $Ste_L=0.211$, $Ste_S=0.183$

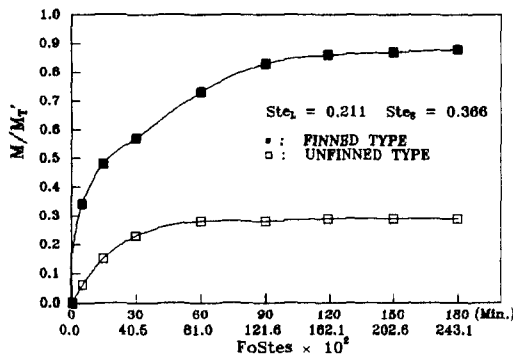


Fig. 8 Timewise variations of solidified mass at the finned tube and unfinned tube; $Ste_L=0.211$, $Ste_S=0.366$

Fig. 7, 8에서도 응고시간 60분이 경과할때 흰불이 냉각관에서 응고질량율의 값이 흰을 부착하지 않은 냉각관에서 보다 각각 200%, 157% 정도로 증가했다.

초기 과열도가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우를 비교하면 $M_T=5.6M_T'$ 의 관계가 있으므로

초기 과열도가 존재하는 경우($Ste_L=0.211, 0.281$)(Fig. 7, 8)는 초기 과열도가 존재하지 않는 경우($Ste_L=0$)(Fig. 3, 4, 5)보다 응고량이 작게 나타났다. 이와같은 현상은 고액 상경계면의 수지상의 결정과 자연대류의 발생에 기인하는 것으로 생각된다. 또한 응고량은 액상 Stefan수보다 고상 Stefan수에 의해 더 영향을 받는 것으로 나타났고 (Fig. 3, 4, 5, 7, 8) 흰불이 냉각관에서의 응고량은 흰을 부착하지 않은 냉각관에서 보다 크게 나타났다.

3.3 응고층의 두께

잠열 및 감열에 의한 열전달이 발생할 경우, 상 변화물질의 응고층이 얇을 때는 고상 상 변화물질의 열저항이 작으므로 응고층의 성장율이 크고 응고층이 두꺼워 질수록 응고층의 성장율은 작아진다. 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관

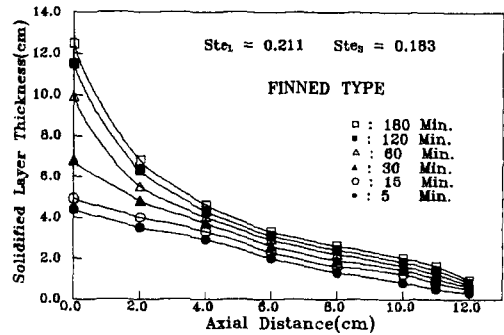


Fig. 9 Axial distributions of the solidified layer thickness at finned tube; $Ste_L=0.211$, $Ste_S=0.183$

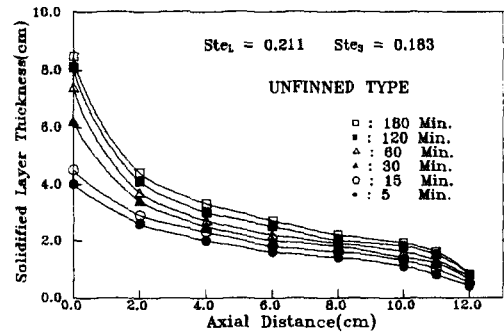


Fig. 10 Axial distributions of the solidified layer thickness at unfinned tube; $Ste_L=0.211$, $Ste_S=0.183$

에서 초기 과열도가 없는 경우의 응고층의 두께는 고상 상변화물질의 상부와 하부의 두께차가 거의 없으나 초기 과열도가 존재하는 경우의 두 냉각관에서는 자연대류 유동의 영향으로 액상 상변화물질에서 고·액 경계면을 따라 내려오는 운동량이 응고 성장율을 감소시키므로 충분한 시간이 경과 하더라도 응고층은 더이상 성장하지 않고 일정하게 유지된다. 이러한 현상은 고상 Stefan수가 0.183, 액상 Stefan수가 0.211일 경우 5, 15, 30, 60, 120, 180min.의 시간 경과에 따라서 흰불이 냉각관(Fig. 9)과 흰을 부착하지 않은 냉각관(Fig. 10)에서의 응고층 두께분포에 잘 나타나있다. 그림에서 나타난 바와같이 시간이 경과함에 따라 응고율이 감소하고 있으며 냉각관의 맨 위부분(측방향거리 12cm의 위치)에서는 응고초기에 이미 응고의 성장이 거의 정지되어 있음을 알 수 있다. Fig. 10의 흰불이 냉각관에서 응고층의 두께는 흰 사이의 중앙위치의 두께를 측정된 데이터로서 흰불이 냉각관에서 응고층의 성장율은 흰을 부착하지 않은 냉각관에서 응고층의 성장율보다 크게 향상됨을 나타내고 있다.

3.4 응고 에너지

본 절에서는 응고과정중 시간경과에 따른 각각의 액상 Stefan수와 고상 Stefan수의 조건에 대한 액상 상변화물질로부터 방출되는 각 에너지를 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관에 대하여 해석하였다.

Fig. 11, 12는 액상 Stefan수를 0으로 고정하고 고상 Stefan수를 0.366로 하였을 경우, 시간 경과에 따른 최대 방출 잠열에너지($E_{\lambda \max}$)에 대한 각 에너지의 성분비를 흰불이 냉각관(Fig. 11)과 흰을 부착하지 않은 냉각관(Fig. 12)에 대하여 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 보는 바와같이 고상 상변화물질에서 방출되는 현열 에너지 E_{s1} 값은 잠열 에너지 E_{λ} 에 비해 매우 작게 나타났으나, 시간이 경과함에 따라 증가하고 있다. Fig. 11과 Fig. 12를 비교하면 흰이 부착된 관으로 방출되는 총 에너지는 응고시간 60분 경과시 흰을 부착하지 않은 냉각관으로 방출되는 총 에너지보다 97% 향상된 것으로 나타나고 있다.

Fig. 13, 14는 액상 Stefan수를 0.211로 하고 고상 Stefan수를 0.366로 하였을 경우, 시간 경과에

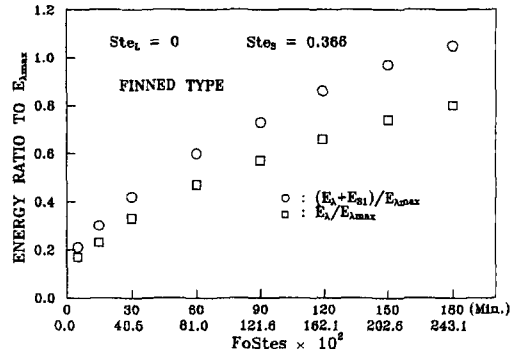


Fig. 11 Energy ratio to $E_{\lambda \max}$ for finned type; $Ste_L=0$ and $Ste_S=0.366$

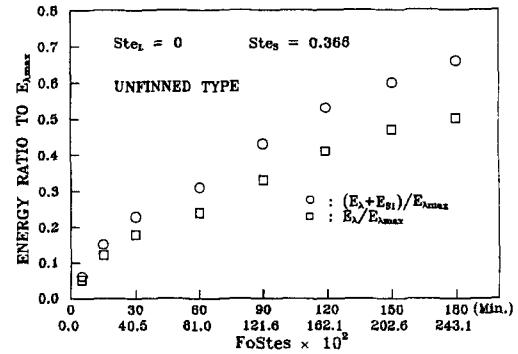


Fig. 12 Energy ratio to $E_{\lambda \max}$ for unfinned type; $Ste_L=0$ and $Ste_S=0.366$

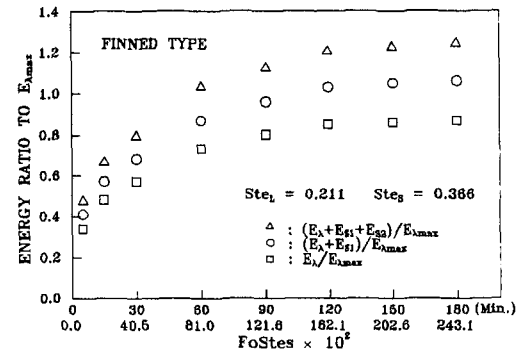


Fig. 13 Energy ratio to $E_{\lambda \max}$ for finned type; $Ste_L=0.211$ and $Ste_S=0.366$

따른 최대 방출 잠열에너지($E_{\lambda \max}$)에 대한 각 에너지의 성분비를 흰불이 냉각관(Fig. 13)과 흰을 부착하지 않은 냉각관(Fig. 14)에 대하여 나타낸 것으로 고상 상변화물질에서 방출되는 에너지 E_{s1}

과 일정시간 경과 후 응고된 액상 상변화물질에서 방출되는 에너지 E_{s2} 의 값은 E_{λ} 값에 비하여 작게 나타났고 시간이 경과함에 따라 점점 증가하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 13과 Fig. 14를 비교하면 흰이 부착된 관에서 방출되는 총 에너지는 응고 시간 60분 경과시 흰을 부착하지 않는 냉각관에서 방출되는 총 에너지보다 168% 향상된 것으로 나타났다. 이와같이 초기 과열도가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 있어서 흰불이 냉각관으로 방출되는 총 에너지와 흰을 부착지 않은 냉각관으로 방출하는 총 에너지를 비교하면 초기 과열도가 존재하는 경우(168%)가 존재하지 않는 경우(97%)보다 73%높게 나타나고 있다. 이러한 이유는 과열도가 존재함으로써 자연대류가 발생하고 자연대류는 흰불이 냉각관에서보다 흰을 부착하지 않은 냉각관에서 더 큰 영향을 주기 때문이라고 생각된다.

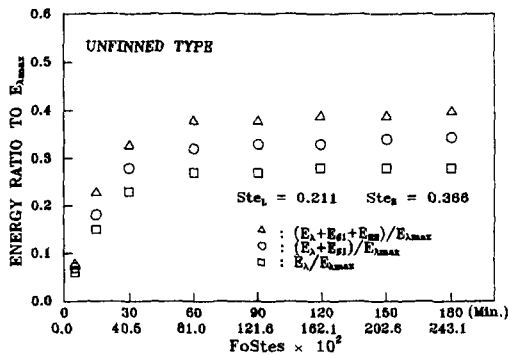


Fig. 14 Energy ratio to $E_{\lambda, \max}$ for unfinned type; $Ste_L=0.211$ and $Ste_S=0.366$

4. 결 론

본 실험에서는 상변화물질이 채워진 용기의 외벽을 등온조건으로한 상변화물질 내의 흰불이 냉각관 주위에서 발생하는 응고층의 질량, 두께 및 응고 에너지를 계산하여 동일 조건의 흰을 부착하지 않은 냉각관 주위에서 발생하는 응고층의 질량, 두께 및 응고 에너지와 비교, 검토하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초기 과열도가 존재하는 경우($Ste_L=0.211, 0.281$)는 초기 과열도가 존재하지 않는 경우($Ste_L=0$)보다 응고량이 작게 나타났으며 총

응고량은 액상 Stefan수보다 고상 Stefan수에 의해 더 영향을 받는 것으로 나타났고 흰불이 냉각관에서의 응고량은 흰을 부착하지 않은 냉각관에서 보다 크게 나타났다.

흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관에서 고상 Stefan수의 각각의 실험조건으로부터 얻어진 응고질량율(M/M_T)과 무차원시간($FoSte_S$)과의 관계식이 다음과 같이 구해졌다.

① 흰불이 냉각관의 경우
 $M/M_T = C(Ste_S Fo \times 10^2)^n$
 ($C=0.0746, n=0.42$)

② 흰을 부착하지 않은 냉각관의 경우
 $M/M_T = C(Ste_S Fo \times 10^2)^n$
 ($C=0.0179, n=0.61$)

- 2) 초기 과열도가 없는 경우에 흰불이 냉각관과 흰을 부착하지 않은 냉각관에서의 응고층의 두께는 고상 상변화물질의 상부와 하부의 두께차가 거의 없으나 초기 과열도가 존재하는 경우의 두 냉각관에서는 자연대류 유동의 영향으로 고상 상변화물질의 상부에서의 응고성장율은 하부에서의 응고 성장율보다 빨리 응고종료에 도달했다.

- 3) 응고에 대한 총 에너지는 잠열 에너지가 대부분을 차지하고 흰불이 냉각관으로 방출되는 총 에너지는 흰을 부착하지 않은 냉각관으로 방출되는 총 에너지 보다 높게 나타났으며 그 영향은 초기 과열도가 존재하는 경우가 존재하지 않은 경우보다 크게 나타났다.

기 호 설 명

- A_f : Surface area of finned tube
- A_{uf} : Surface area of unfinned tube
- C_L : Specific heat of PCM at the liquid phase
- C_S : Specific heat of PCM at the solid phase
- E_{λ} : Latent energy extracted
- $E_{\lambda, \max}$: Maximum latent energy extracted
- E_{s1} : Sensible energy extracted from sub-cooled solid
- E_{s2} : Sensible energy extracted from liquid which solidified
- E_T : Total energy extracted, $E_{\lambda, \max} + E_{s1} + E_{s2}$

H : Height of containment
 K_s : Thermal conductivity of solid phase
M : Solidified mass
 M_f : Solidified mass on finned tube
 M_T : Maxium solidified mass
(Conduction-controlled solidification)
 M_T' : Maxium solidified mass
(Convection-controlled solidification)
 M_{uf} : Solidified mass on unfinned tube
 R_w : Radius of tube
 T_s : Temperature of solid
 T_l : Temperature of liquid
t : Time
 T_i : Initial temperature
 T_m : Melting temperature
 T_w : Wall temperature
[회람문자]
 α_s : Thermal diffusivity of solid phase
 λ : Latent heat per unit mass
 ρ_s : Density of solid
[약 어]
PCM : Phase Change Material
[무차원수]
 Ste_L : Stefan number(Liquid), $C_L(T_l - T_m) / \lambda$
 Ste_S : Stefan number(Solid), $C_S(T_m - T_w) / \lambda$
 Fo : Fourier number, $\alpha_s t / R_w^2$

참 고 문 헌

1) 임장순, 손화승, 황태인, 이채문, 최국광, 상변화 물질을 사용한 축열조에서의 열전달, 한국 태양에너지 학회지, 제9권, 1호, pp. 53~61, 1989.
2) 梁取美智雄, 増田降司, 顯熱蓄熱材の熱特性と空調機 應用, 冷凍, 第59卷, 第60號, pp. 25~30, 昭和 59年.
3) 임장순, 이채문, 김준근, 조남철, 김일겸, 수평원관 내에서의 내향용융 및 응고열전달 실험, 공기조화·냉동공학회지, 제1권, 4호, pp. 319~329, 1989.
4) N. Ranachandran, Y. Jalurid and J. P. Gupta, Thermal and Fluid Flow in One-Dimensional Solidification, Letters in Heat & Mass Transfer, Vol. 8, pp. 69~77, 1981.
5) F. E. Moore and Y. Bayzzitoglu, Melting within a Spherical Closure, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 19~23, 1982.
6) H. Rieger and Beer, The Melting Process of Ice Inside a Horizontal Cylinder; Effect of Density Anomaly, Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 166~173, 1986.
7) B. Kahori and S. Ramadhyni, Studies on Heat Transfer from a Vertical Cylinder with or without Fins Embedded in a Solid Phase Change Medium, Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 44~51, 1985.
8) 송하진, 김영중, 오수철, 임장순, 원통형 용기내의 상변화물질에서 응고 열전달에 관한 연구(경사각 변화의 영향), 공기조화·냉동공학회지, 제6권, 3호, pp. 182~192, 1994.