

Fin 이 부착된 PCM 축열조의 효율성 분석

이 근 식·원 성 필
 기계공학과
 (1985. 4. 30 접수)

〈요 약〉

Fig.1 과 같이 PCM(Phase Change Material)蓄熱 System 内の 熱傳達을 증가시킬 目的으로 PCM 內에 얇은 금속 fin 을 설치한 것을 model로 하여 蓄熱單位의 길이와 폭, fin 두께 및 벽면온도의 변화에 대한 效率的인 蓄熱條件을 熱力學第一法則과 第二法則을 適用하여 提示하였다.

Effectiveness of A Thermal Energy Storage System Using a PCM with Fins

Lee, Geun-Sik and Won, Sung-Pil
 Dept. of Mech. Engineering
 (Received April 30, 1985)

〈Abstract〉

A thermal energy storage system using a PCM with fins is shown in Fig.1. Fins are set up to increase the heat transfer rate within a PCM. Effective storage constraints have been presented by applying the first and the second law of thermodynamics when various parameters, e.g., the length and width of the storage unit, the thickness of the fin, and the wall temperature, are changed.

〈記 號〉			
A	축열단위의 표면적	L	축열단위의 길이
a	축열단위의 단면적	\vec{n}	표면의 수직벡터
c_p	PCM의 비열	P_1	H/L
c_{pf}	Fin의 비열	P_2	W/H
F	Melt Fraction	Q	실제의 열전달율
H	축열단위의 폭	Q	실제의 열전달량
h	enthalpy	Q_{rev}	가역적인 열전달량
h_{SL}	PCM의 용해열	Ste	Stefan 수, $c_p(T_w - T_{sat})/h_{SL}$
h_{sat}^*	포화액체상태의 enthalpy	S	주변길이(arc length along perimeter)
I_{rr}	비가역성, $Q_{rev} - Q$	S_{sys}	System의 entropy
k	PCM의 열전도계수	ΔS_{sys}	System의 entropy 변화량
k_f	Fin의 열전도계수	\dot{S}_{gen}	entropy 생성율
		ΔS_{gen}	entropy 생성량
		t	시간
		T	PCM의 온도

T_f	Fin의 온도
T_{sat}	포화온도
T_w	벽면온도
V	축열단위의 체적
V_f	Fin의 체적
W	Fin의 두께
W_{rev}	가역기관의 일, $Q_{rev} - Q$
x, y	공간좌표
X, Y	무차원화된 공간좌표
ρ	PCM의 밀도
ρ_f	Fin의 밀도
α	PCM의 열확산율, $k/\rho c_p$
α_f	Fin의 열확산율, $k_f/\rho_f c_{pf}$
τ	무차원화된 시간, $\alpha t/L^2$
θ	무차원화된 enthalpy, $\frac{1}{\rho a} \int_a^{\infty} \rho \frac{h_{sat}^* - h}{h_{SL}} da$
ϕ	무차원화된 온도, $c_p(T - T_{sat})/h_{SL}$
η	Q/I_{rr}
상부첨자	
o	前시간(old time)의 값
하부첨자	
i, j	공간격자점

1. 序 論

석유과동이 일어난 1973년 이래로 많은 나라에서는 에너지절약이나 에너지의 효율적인 이용에 대한 관심이 높아져 많은 연구가 진행되고 있다.

에너지의 효율적 이용의 관점에서 볼 때 축열이라는 것은 독립된 한 분야를 차지한다고 볼 수 있다. 축열 system에는 현열(sensible heat)을 이용하는 것과 PCM을 사용하여 잠열(latent heat)을 이용하는 것으로 크게 두 가지로 나눌 수가 있으며 서로 장단점을 가지고 있다.

잠열을 이용하는 system은 system의 크기를 적게 할 수 있다는 장점이 있으나 열전도도가 좋지 않다는 단점을 가지고 있다. 따라서 PCM내의 열전달을 증가시키는 방법의 하나로 Fig.1과 같이 얇은 금속 fin을 PCM내에 설치한 것을 model로 하여 효율적인 축열조건을 제시하고자 하는 것이 이 논문의 목적이다.

PCM 축열 system의 성능분석은 함교문헌 [1]~[5] 등에 나타나 있다. 특히 Humphrey [4]는 본 논문의 model과 같은 model을 이용하여 효율적인

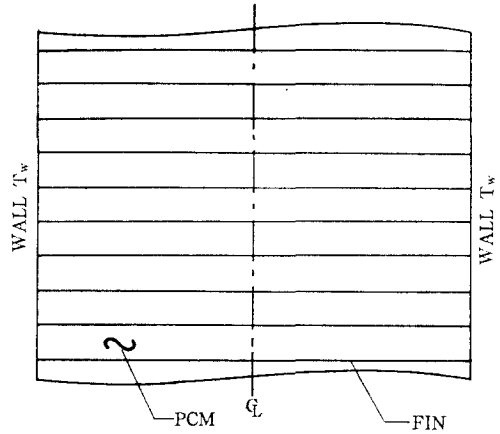


Fig.1 Schematic Diagram of the Thermal Energy Storage System Using A PCM with Fins.

축열조건을 제시하였으나 Melt Time(상변화 종료시의 시간)이나 Melt Fraction만을 고려한 것으로 결국 열역학 제 1법칙에 입각한 축열조건을 제시한 것으로 볼 수 있다. 그러나 효율적인 축열이라는 것은 가역성을 고려한 열역학 제 2법칙을 적용해야만 보다 확실하게 말할 수 있을 것으로 보여진다. 열역학제 2법칙을 적용한 논문 [6], [7]도 있으나 이것은 현열을 이용한 system에 대한 것으로 PCM 축열 system에 적용한 논문은 없다.

따라서 본 논문에서는 Fig.1과 같은 model에 열역학 제 1, 2법칙을 동시에 적용하여 효율적인 축열조건을 확실히 제시하고자 한다. 해석방법은 enthalpy model [1]을 이용한 수치해석방법을 사용하였다.

II. 解 析

수 커민이 서로 같은 온도로 일정하게 유지되며 얇은 금속 fin이 부착된 일정한 PCM 축열 system을 Fig.1에서 보이고 있다. 이 system의 해석은 Fig.2와 같은 기본적인 cell에 기초하며 대칭성에 의해 이 cell의 절반만 고려하면 된다.

이론적인 해석을 수행하는 데에는 문제의 단순화를 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

(1) PCM의 처음상태는 고화된 고체상태이며 fin도 PCM과 같은 온도로 유지된다.

(2) enthalpy를 제외한 다른 물성값은 일정하다.

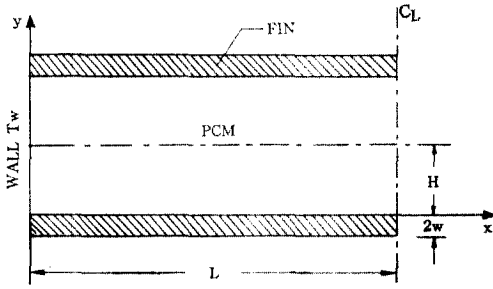


Fig. 2 A Typical Cell of the System for Analysis.

③ z 방향의 end effect를 무시하여 2차원으로 생각한다.

④ fin의 두께는 충분히 얇아 어떤 시간에서의 fin의 온도분포는 x 만의 함수다.

1. 基本方程式

cell의 PCM에 대한 기본방정식은 enthalpy model을 사용하면

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho h dV = \int_A k \nabla T \cdot \vec{n} dA \quad (1)$$

이 된다. 식 (1)은 3차원에 대한 것이므로 2차원인 본 문제에서는

$$\frac{d}{dt} \int_S \rho h da = \int_S k \nabla T \cdot \vec{n} ds \quad (2)$$

가 된다. 그리고 fin에 대한 기본방정식은 임의의 미분량 dx 에 대해서 에너지 평형을 유도하면

$$\alpha_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{k}{k_f W} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (3)$$

이 된다. 식 (2)와 (3)을 일반적인 경우에 적용하기 위해 무차원화 하면 다음의 식 (4)와 (5)가 된다.

$$\frac{a}{L^2} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \int_S \nabla \phi \cdot \vec{n} ds \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = c_1 \frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + c_2 \left(\frac{\partial \phi}{\partial Y} \right)_{Y=0} \quad (5)$$

여기서

$$\tau = \frac{\alpha t}{L^2}, \quad \theta = \frac{1}{\rho a} \int_0^{\rho} \frac{h_{sat} - h}{h_{SL}} da,$$

$$\phi = \frac{c_p(T - T_{sat})}{h_{SL}}, \quad X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{H},$$

$$c_1 = \frac{\alpha_f}{\alpha}, \quad c_2 = \frac{\rho c_p}{\rho_f c_{pf}} \frac{1}{P_1 P_2}, \quad P_1 = \frac{H}{L},$$

$$P_2 = \frac{W}{H}$$

이다. 그리고 θ 와 ϕ 에 대하여 다음의 관계식이 성립한다.

$$\tau = 0, \quad \theta = 1 \quad (6)$$

$$0 \leq \theta \leq 1, \quad \phi = 0 \quad (7)$$

$$\theta < 0, \quad \phi = -\theta \quad (8)$$

2. 基本方程式의 差分化

식 (4)와 (5)에 대한 차분방정식을 얻기 위하여 시간에 대해서는 안정성을 고려하여 pure implicit scheme을 적용하고 식 (4)가 격분식이므로 control volume formulation 방법을 적용한다.

Fig. 3과 같이 X 방향으로 등간격 ΔX 로 m 등분하고 Y 방향으로 등간격 ΔY 로 n 등분하면 하나의 미소사각형이 미소검사체적이 되며 각각의 변이나 꼭지점 및 내부의 미소검사체적에서 열유동 조건이 각각 다르기 때문에 다음과 같은 차분방정식을 얻게 된다.

$$2 \leq i \leq m, \quad 2 \leq j \leq n$$

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j}^n + (A+B)\phi_{i,j} - \frac{A}{2}(\phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j}) - \frac{B}{2}(\phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1}) \quad (9)$$

$$2 \leq i \leq m, \quad j = n+1$$

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j}^n + (A+B)\phi_{i,j} - \frac{A}{2}(\phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j}) - B\phi_{i,j-1} \quad (10)$$

$$i = m+1, \quad j = n+1$$

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j}^n + (A+B)\phi_{i,j} - A\phi_{i-1,j} - B\phi_{i,j-1} \quad (11)$$

$$i = m+1, \quad 2 \leq j \leq n$$

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j}^n + (A+B)\phi_{i,j} - A\phi_{i-1,j} - \frac{B}{2}(\phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1}) \quad (12)$$

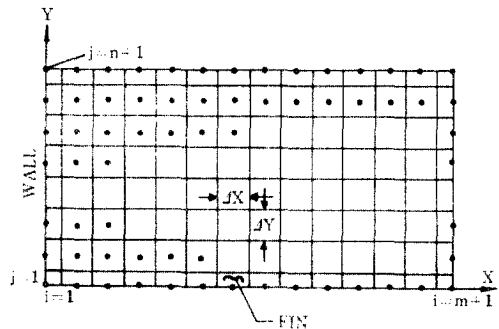


Fig. 3 Node Points Arrangement.

$$2 \leq i \leq m, j=1$$

$$\phi_{i,j}(1+2C+7D) - \phi_{i,j}^2 + C(\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j}) + 8D\phi_{i,j+1} - D\phi_{i,j+2} \quad (13)$$

$$i=m+1, j=1$$

$$\phi_{i,j}(1+2C+14D) - \phi_{i,j}^2 + 2c\phi_{i-1,j} + 16D\phi_{i,j+1} - 2D\phi_{i,j+2} \quad (14)$$

여기서

$$A = \frac{2\Delta\tau}{(\Delta X)^2}, \quad B = \frac{2\Delta\tau}{\tau(P_1\Delta Y)^2}, \quad C = c_1 \frac{\Delta\tau}{(\Delta X)^2}$$

$$D = c_2 \frac{\Delta\tau}{6\Delta Y^2}$$

이다. 위의 차분방정식은 Prime-750 computer를 사용하여 Gauss-Seidel Iteration 방법으로 계산하였으며 수렴조건은 $\Delta\tau$, ΔX 및 ΔY 값을 변화시켜 가며 stability test를 해본 결과

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta X(P_1\Delta Y)} \leq 0.3 \quad (15)$$

가 됨을 알 수 있었다.

3. Entropy 生成 및 蓄熱性能

축열성능의 비교에는 일반적으로 Melt Fraction 혹은 Melt Time 등이 주로 사용되나 이것은 열역학제 1법칙에 의존한 것이라 볼 수 있다. 따라서 열역학제 2법칙에 입각한 축열성능에 관한 관계식을 유도하는 것이 가역성 및 효율성에 대한 확실한 비교를 할 수 있을 것이다.

우선 본 문제에서 벽면의 온도가 T_w 로 일정하다는 것을 Fig. 4(a)와 같이 PCM과 fin으로 구성된 system이 온도가 T_w 인 무한한 source와 직접 접촉하여 열교환을 한다고 생각할 수 있으며 source와 system 사이의 온도차에 의한 irreversibility가 존재하고 비정상상태이므로 열역학제 2법칙을 적용하면

$$\frac{\partial S_{sys}}{\partial t} \geq \frac{\dot{Q}}{T_w} \quad (16)$$

을 얻으며 entropy 생성률 S_{gen} 은

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\partial S_{sys}}{\partial t} - \frac{\dot{Q}}{T_w} \geq 0 \quad (17)$$

이 된다. 따라서 어떤시간 동안의 entropy 생성변화량 ΔS_{gen} 은

$$\Delta S_{gen} = \Delta S_{sys} - \frac{Q}{T_w} = 0 \quad (18)$$

이 된다. 여기서 $Q = \int_0^t \dot{Q} dt$ 이다.

다음으로 Fig. 4(b)와 같이 source와 system 사

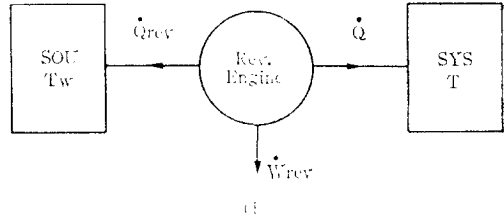
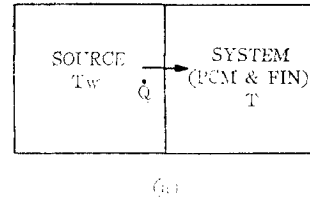


Fig. 4. Schematic Diagram for Applying the 2nd Law of Thermodynamics.

이에 가역기관을 설치하여 가역적으로 열이 전달된다고 가정하면 이때의 entropy 생성변화량 $\Delta S_{gen,rev}$ 은

$$\Delta S_{gen,rev} = \Delta S_{sys} - \frac{Q_{rev}}{T_w} = 0 \quad (19)$$

가 된다. 따라서 system(a)와 (b)사이의 비가역성 I_{rr} 은 가역기관의 일 W_{rev} 과 같으며

$$I_{rr} = W_{rev} - Q_{rev} - Q \quad (20)$$

이 된다.

위에서 유도한 system의 entropy 생성 변화량 ΔS_{gen} 과 비가역성 I_{rr} 도 축열성능의 비교에 이용할 수 있는 변수이기는 하지만 ΔS_{gen} 과 I_{rr} 값이 작다고 해서 보다 가역적이라는 것은 사실이나 보다 효율적이라고는 꼭 짐어 말할 수 없다. 왜냐하면 실제의 system에는 저장해야할 에너지가 있는 것이며 아무리 가역적이라도 저장할 에너지를 다 저장하지 못한다면 가치가 없는 것이라 볼 수 있기 때문이다. 따라서 위에서 유도한 관계식을 이용하여 보다 확실한 물리적 의미를 갖는 새로운 변수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{Q}{I_{rr}} \quad (21)$$

여기서 η 는 system의 비가역성에 대한 실제 저장된 에너지의 상대적인 비이며 η 값이 클수록 system의 축열은 보다 효율적이라고 할 수 있다.

앞에서 사용한 기호를 사용하면 ΔS_{sys} 과 Q 는 다음과 같이 각각 표현된다.

$$\Delta S_{s,s} = \frac{\rho V F h_{SL}}{T_{sat}} + \int_V \rho c_p \ln \frac{T}{T_{sat}} dV + \int_{V_f} \rho_f c_{pf} \ln \frac{T_{sat}}{T_f} dV_f \quad (22)$$

$$Q = \rho V F h_{SL} + \int_V \rho c_p (T - T_{sat}) dV + \int_{V_f} \rho_f c_{pf} (T_f - T_{sat}) dV_f \quad (23)$$

III. 結果 및 考察

수치해는 Table 1에 나타나 있는 물성값을 사용하여 P_1 , P_2 및 Ste 수를 변화시켜가며 얻었으며 축열성능에 대한 변수로서 Melt Time, $\Delta S_{s,s}$ 및 η 값을 계산하여 서로 비교하였다. 한편 entropy 생성변화량을 계산하기 위하여 축열조의 길이 L 은 어떤 계산에서나 0.2m로 취하였다.

Table 1. Properties of PCM and Fin.

PCM(η -Octadecane, 97% Pure)	
T_{sat}	= 28°C
ρ	= 777kg/m ³
c_p	= 2,660J/kg°K
k	= 0.149W/m°K
h_{SL}	= 241,360J/kg
FIN(Aluminum, Pure)	
ρ_f	= 2,712.6kg/m ³
c_{pf}	= 960J/kg°K
k_f	= 179.962W/m°K

1. Ste 수의 變化에 對한 結果

P_1 과 P_2 를 $\frac{1}{4}$ 과 $\frac{1}{50}$ 로 각각 고정시키고 Ste 수를 0.1, 0.2 및 0.5로 변화시켜 가며 얻은 결과가 Fig. 5와 Table 2에 나타나 있다.

Fig. 5는 Melt Time에 대한 결과로서 Ste 수가 클수록 Melt Time은 현저히 감소되며 단위시간당 보다 많은 열을 저장할 수 있음을 알 수 있는데 이것은 벽면온도가 커지므로 당연한 결과라 볼 수 있다. 그러나 $\Delta S_{s,s}$ 과 η 값이 나타나 있는 Table 2를 보면 Ste 수가 클수록 $\Delta S_{s,s}$ 은 현저하게 커지며 비가역적으로 열이 전달됨을 알 수 있고 이것은 벽면의 온도가 높아짐에 따라 온도차에 의한 비가역성이 커지기 때문으로 볼 수 있다. 한편 상대적 변수인 η 값은 작아지므로 비가역성의 증가에 비해 실제

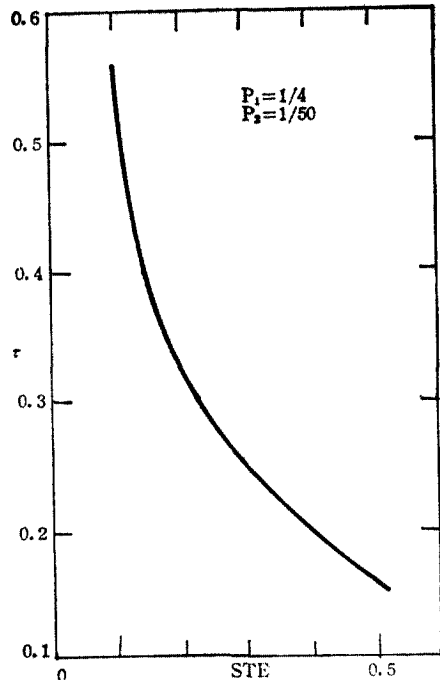


Fig. 5. Variation of Melt Time to Various Stefan Numbers when $P_1=1/4$ and $P_2=1/50$

Table 2. Variation of $\Delta S_{s,s}$ and η to Various Stefan Numbers when $P_1=1/4$ and $P_2=1/50$

$L = 0.2m$
 $P_1 = 1/4$
 $P_2 = 1/50$

Ste	ORDER OF η	$\Delta S_{s,s} (J/kg°K)$		
		2(hours)	4	6
0.1	33	2.18	3.60	4.92
0.2	17	6.44	10.39	13.90
0.5	7	26.13	42.19	55.72

저장되는 열의 증가가 상대적으로 작음을 알 수 있어 효율적인 축열이 안된다고 볼 수 있다. 결국 Ste 수가 작을수록 보다 가역적, 효율적으로 축열된다고 말할 수 있다.

2. P_2 값의 變化에 對한 結果

Ste 수를 0.2로 P_1 값을 $\frac{1}{4}$ 로 고정시키고 fin 두께와 축열단위의 폭의 비인 P_2 값을 $\frac{1}{12.5}$, $\frac{1}{50}$

및 $\frac{1}{100}$ 로 변화시켜 가며 얻은 결과가 Fig. 6, Fig. 7 및 Table 3에 나타나 있다.

우선 Fig. 6는 Melt Time에 대한 결과로서 P_2 값이 클수록 즉 fin 두께가 커질수록 Melt Time이 감소하는데 이것은 fin이 두꺼워짐에 따라 열용량이 커지며 따라서 fin을 통한 열전달이 보다 원활하게 이루어지기 때문으로 볼 수 있다. 그러나 Table 3에 나타나 있는 ΔS_{gen} 값을 보면 fin 두께가 얇아질수록 보다 가역적임을 알 수 있는데 이것은 fin이 얇아짐에 따라 fin의 열용량이 작아지므로 fin과 PCM과의 온도차가 작아지기 때문이며 fin

이 무한히 얇아지면 PCM 온도와 같아지게 되어 fin이 없는 경우라고 생각해도 된다. 결국 1차원으로 열이 전달될 때 즉 온도차에 의한 비가역성의 요인인 점속면적이 작으므로 가장 가역적임을 유추할 수 있다.

Fig. 7은 F 값에 대한 η 값의 변화가 나타나 있으며 fin이 두꺼워질수록 보다 효율적으로 저장된다고 볼 수 있다. 한편 F 값의 증가에 대한 τ 값은 처음에는 감소하다가 F 값이 0.2~0.4 사이에서 최저 값을 나타낸 후 현저히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 즉 처음에는 I_{rr} 값의 증가율이 Q 값의 증가율보다 커지다가 급격히 작아진다고 생각할 수 있는데 이것은 초기에는 열전달이 벽면을 통하여 주로 이루어지다가 fin에 의해서 열전달이 원활하게 이루어지면서 Q 값의 증가가 I_{rr} 값의 증가보다 상

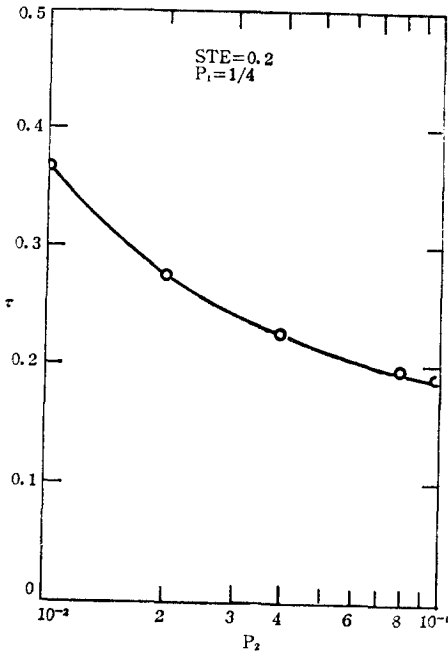


Fig. 6. Variation of Melt Time to Various P_2 values when $Ste=0.2$ and $P_1=1/4$.

Table 3. Variation of ΔS_{gen} to Various P_2 Values when $Ste=0.2$ and $P_1=1/4$
 $Ste=0.2$
 $L=0.2m$
 $P_1=1/4$

P_2	$\Delta S_{gen}(J/kg^\circ K)$		
	2(hours)	4	6
1/12.5	6.51	11.00	14.85
1/50	6.44	10.37	13.90
1/100	6.13	9.49	12.61

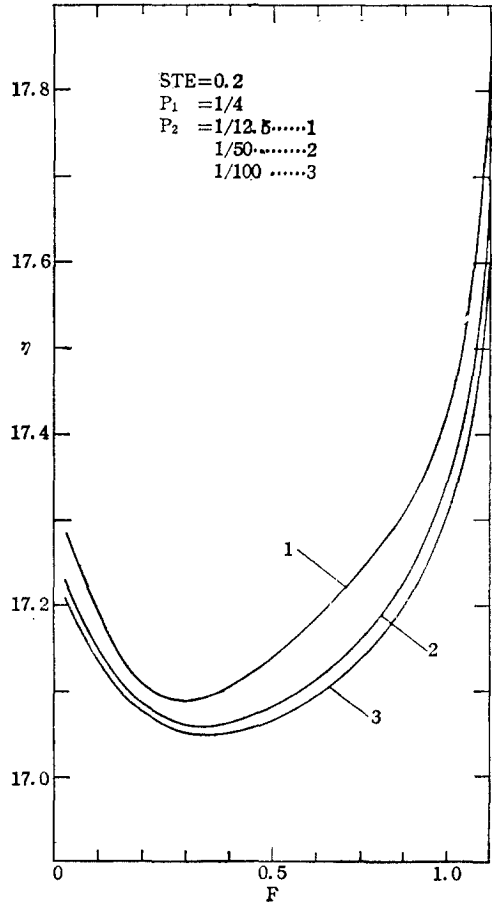


Fig. 7. η vs. F to Various P_2 Values when $Ste=0.2$ and $F_1=1/4$

대적으로 커진다고 생각할 수 있을 것이다. 결국 F 값이 0.5 이상에서 fin의 설치효과가 두드러지게 나타나며 F 값을 system 설계시에 constraint로 준다면 0.5이상으로 해야 함을 알 수 있다.

3. P_1 값의 변화에 대한 결과

Ste 수가 0.2이고 P_2 값이 $\frac{1}{50}$ 일때 축열단위의 길이 L 에 대한 폭 H 의 비인 P_1 값의 변화에 대한 결과가 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 및 Table 4에 나타나 있다.

우선 Melt Time에 대한 Fig. 8을 보면 P_1 값이 작아질수록 Melt Time이 감소하나 상대적인 감소 폭은 작아지므로 P_1 값이 $\frac{1}{8}$ 보다 작아지면 Melt

Time에서의 이득은 별로 없다고 생각할 수 있는데 이것은 시간에 대한 F 값의 변화를 나타낸 Fig. 9을 보아도 명백하게 알 수 있다.

$\Delta S_{f,fin}$ 값의 비교를 나타낸 Table 4를 보면 P_1 값이 작을수록 비가역적임을 알 수 있다. 이것은 P_1 값이 작을수록 실제의 fin 두께는 얇아진다고 해도 (P_2 값이 $\frac{1}{50}$ 로 고정되어 있기 때문) 축열조의 단위체적당 접촉표면적의 값은 커지므로 비가역성의 요인이 증가하기 때문으로 볼 수 있다.

그리고 F 값에 대한 η 값의 변화를 보이는 Fig. 10을 보면 P_1 값이 $\frac{1}{8}$ 보다 큰 경우와 작은 경우가 서로 다른 경향을 보여주고 있다. $\frac{1}{8}$ 보다 큰 경우는 뚜렷하게 최저값을 가지며 P_1 값이 작아질수록 η 값

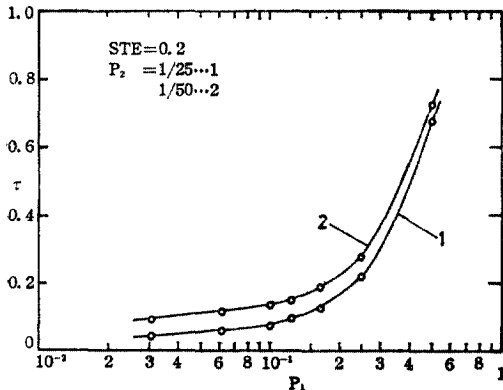


Fig. 8. Variation of Melt Time to Various P_1 Values When Ste=0.2 and $P_2=1/25, 1/50$

Table 4. Variation of $\Delta S_{f,fin}$ to Various P_1 Values when Ste=0.2 and $P_2=1/50$
Ste=0.2
L = 0.2m
 $P_2 = 1/50$

P_1	$\Delta S_{f,fin}(\text{J/kg}^\circ\text{K})$		
	2(hours)	4	6
1/2	4.78	7.60	10.14
1/4	6.44	10.37	13.90
1/8	10.05	15.87	21.43
1/10	11.24	17.89	23.33
1/12	12.48	19.25	24.39
1/16	14.64	21.44	26.53

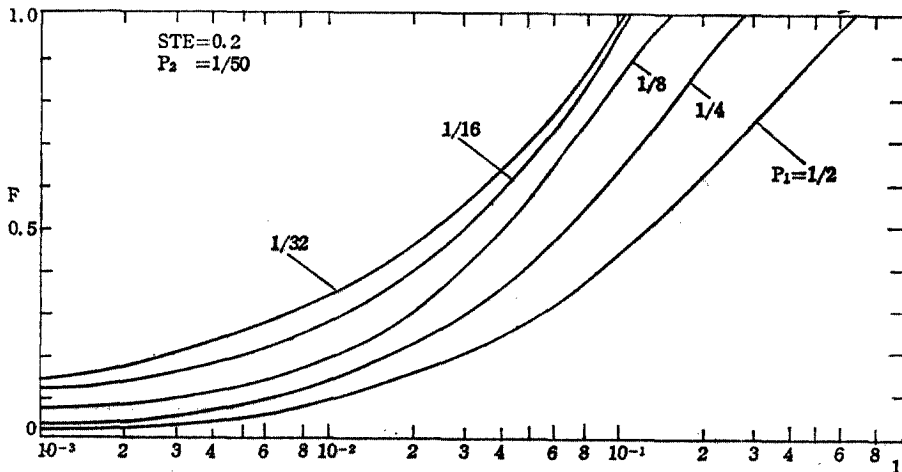


Fig. 9. Melt Fraction vs. τ to Various P_1 Values when Ste=0.2 and $P_2=1/50$.

이 전반적으로 작아지나 $\frac{1}{8}$ 보다 작은 경우는 최저값은 나타나지 않고 처음부터 η 값이 증가하며 P_1 값이 작을수록 일반적으로 η 값이 커지는 경향을 보여주고 있다. 이런 경향을 확실하게 살펴보기 위하여 실제의 축열시간에 대해서 η 값의 경향을 나타낸 Fig. 11을 보면 6시간까지의 축열시간에 대해서 P_1 값이 $\frac{1}{2}$ 과 $\frac{1}{4}$ 인 경우는 η 값이 감소하는 영역에 속하며 $\frac{1}{8}$ 인 경우는 최저값 부근의 영역에 속하고 $\frac{1}{8}$ 보다 작은 경우에는 증가하는 영역에 속하게 된다. 여기에서 하나의 문제점에 부딪치게 된다. 축열시간이 2시간, 4시간 및 6시간으로 각각 주어졌을 경우 그때의 η 값이 가장 큰 P_1 값을 취하여 2시간일 때는 $\frac{1}{2}$ 로 4시간일 때도 $\frac{1}{2}$ 로 6시간일 때는

$\frac{1}{16}$ 로 해야 보다 효율적인가 하는 문제이다. 물론 η 값이 가장 큰 P_1 값이기는 하지만 η 값 자체보다는 경향을 더 중요시해야 될 것 같아 보인다. 다시 말해서 $\frac{1}{2}$ 이나 $\frac{1}{4}$ 인 경우는 열이 비효율적으로 저장되는 영역에 속하는 것이기 때문에 비가역성 I_{rr} 값의 증가율이 실제로 저장되는 열 Q 값의 증가율에 비해 크므로 바람직하지 못하다고 생각할 수 있다. 결국 P_1 값이 $\frac{1}{8}$ 보다 작아야만 fin 의 설치효과가 빨리 나타나고 I_{rr} 값에 비해 Q 값의 증가가 상대적으로 커지므로 바람직하다고 생각된다. P_2 값이 $\frac{1}{25}$ 로 고정될 때 P_1 값의 변화에 대한 η 값의 시간에 대한 변화인 Fig. 12와 실제의 fin 두께가 0.5mm로 고정될때의 P_1 값의 변화에 대한 η 값의 변화인 Fig. 13을 보아도 P_1 값이 $\frac{1}{8}$ 인 경우를 경계로 위에서 언급한 경향을 보여주고 같은 결과를 유추해낼 수 있다.

이상의 결과로서 system 설계 시에 P_1 값에 대해 다음과 같은 결론을 유도해낼 수 있다. P_1 값이 작을수록 Melt Time은 작아지나 $\frac{1}{8}$ 이상이 되면 Melt Time에서의 이득은 아주 작고, η 값은 증가하는 경향을 보여주나 ΔS_{gen} 값은 커진다. 따라서

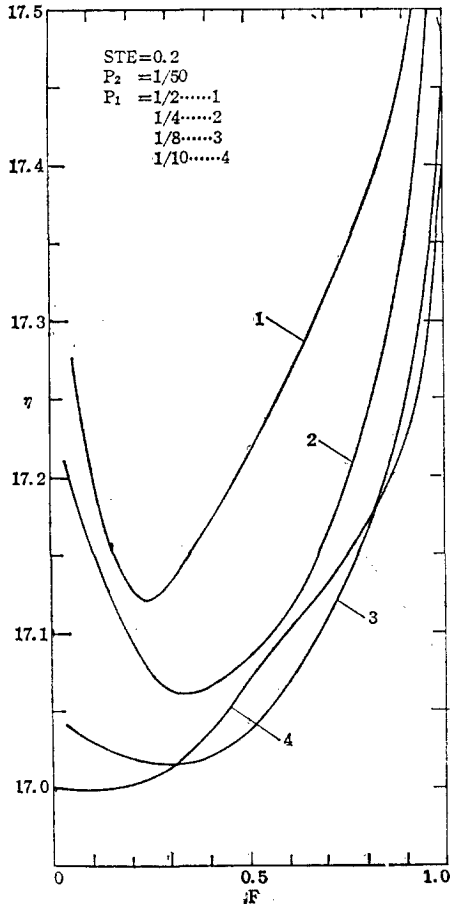


Fig. 10. η vs. F to Various P_1 Values when $Ste=0.2$ and $P_2=1/50$

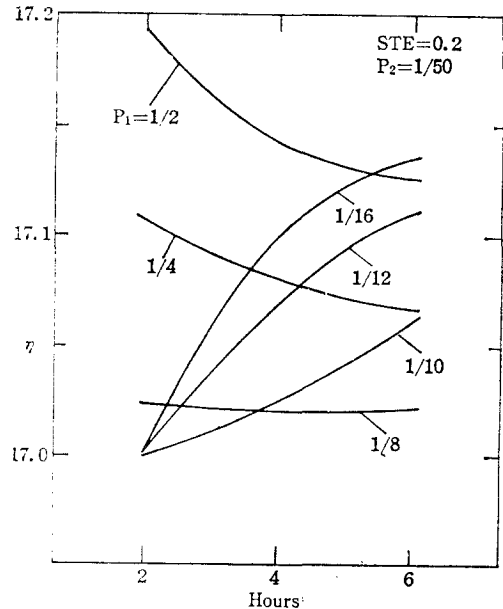


Fig. 11 η vs. τ to Various P_1 Values when $Ste=0.2$ and $P_2=1/50$

종합해볼 때 P_1 값을 $\frac{1}{8}$ 이나 $\frac{1}{10}$ 로하는 것이 3가지 변수 즉 Melt Time, η 및 $\Delta S_{s,m}$ 값을 고르게 만족시킨다고 볼 수 있다.

Ⅳ. 結 論

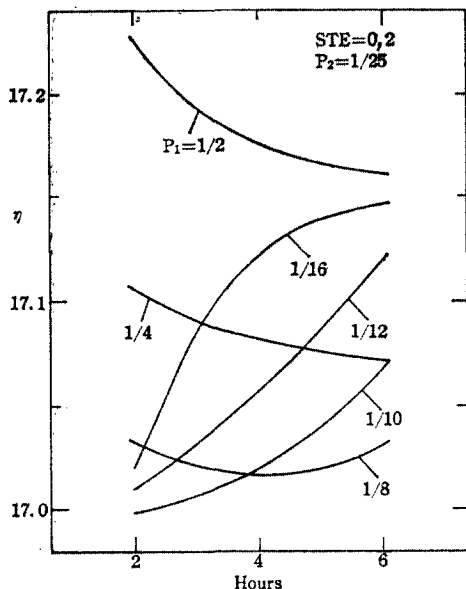


Fig. 12 η vs. τ to Various P_1 Values when Ste=0.2 and $P_2=1/25$

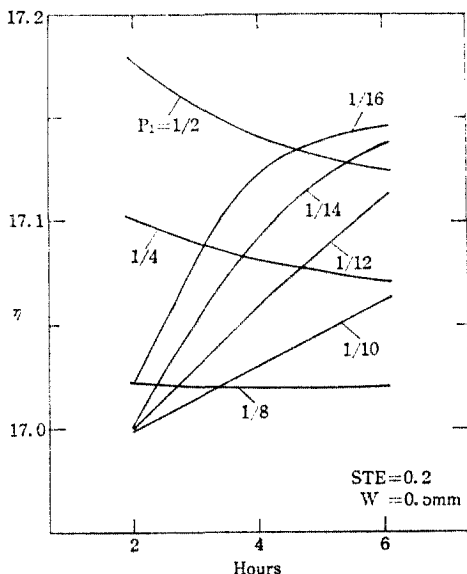


Fig. 13 η vs. τ to Various P_1 Values when Ste =0.2 and $W=0.5mm$

이상에서 나타난 결과를 종합해 보면 PCM 축열 system 설계시의 축열성능에 대하여 다음과 같은 결론에 도달하게 된다.

- ① Ste 수는 작을수록 효율적인 축열이 가능하다.
 - ② P_2 값은 클수록 효율적인 축열이 가능하다.
 - ③ P_1 값은 작거나 크다고 해서 좋은 것은 아니며 보통 $\frac{1}{8}$ 정도가 3가지 변수 즉 Melt Time, $\Delta S_{s,m}$ 및 η 를 고르게 만족시키므로 바람직하다고 볼 수 있다.
 - ④ 축열시간은 F 값이 0.5 이상으로 되는 시간을 취해야만 효율적인 축열이 가능하다.
- 위의 결론은 참고문헌 [4]의 결론인 P_1 값과 P_2 값이 작을수록 축열성능이 좋다는 것과는 다르므로 보다 확실하다고 할 수 있으므로 어떤 system의 효율성분석은 열역학적 제 2법칙을 적용해야 보다 확실한 비교를 할 수 있음을 보여준다.

〈後 記〉

본 연구는 蔚山大學校의 연구활동비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 대하여 감사한다.

Refereces

1. Shamsunder, N. and Sparrow, E.M., "Analysis of Multidimensional Conduction Phase Change Via the Enthalpy Medel," J. Heat Transfer, ASME, Vol.97, pp.333-340, 1975.
2. Griggs, E.I., Pitts, D.R., and Humphries, W.R., "Transient Analysis of a Thermal Storage Unit Involving a Phase Change Material," J. Heat Transfer, ASME, 74-WA/HT-21, pp.1-9, 1974.
3. Godfrey, R.D. and Mumma, S.A., "Thermal Performance of Paraffin Phase Change Materials Dispersed in a Concrete Mortar Filler Matrix," J. Heat Transfer, ASME, 76-WA/HT-33, pp.2-4, 1976.
4. Henze, R.H. and Humphrey, J.A.C., "Enhanced Heat Conduction in Phase-Change Thermal Energy Storage Devices," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.24, pp.459-474, 1981.

5. Won, Sungpil, "A Study on Heat Transfer in a Thermal Storage System Using a PCM," UIT Report, Vol.13, No.1, pp.1-11, 1982.
6. Schmidt, F.W., Szego, J., and Laananen, D.H., "Design Optimization of a Single Fluid, Solid Sensible Heat Storage Unit," J. Heat Transfer, Vol.99, pp.174-179, 1977.
7. Bejan, A., "Two Thermodynamic Optima in the Design of Sensible Heat Units for Energy Storage," J. Heat Transfer, ASME, Vol.100, pp.708-712, 1978.
8. Wilson, D.G., Solomon, A.D., and Boggs, P.T., Moving Boundary Problems, Academic Press, 1978.
9. Schmidt, F.W. and Willmott, A.J., Thermal Energy Storage and Regeneration, McGraw-Hill, 1981.
10. Bejan, A., Entropy Generation through Heat and Fluid Flow, Wiley, 1982.
11. Moore, D.F., Thermodynamic Principles of Energy Degrading, Macmillan, 1981.
12. Wylen, G.J.V. and Sonntag, R.E., Fundamentals of Classical Thermodynamics, Wiley, 1976.