

PCM 을 사용한 蓄熱시스템의 最適蓄熱時間에 關한 研究

元 聖 弼 · 李 泰 煥*

機 械 工 學 科

(1985. 9. 23. 접수)

〈要 約〉

Fig.1과 같은 PCM 蓄熱시스템에 대해서, 시스템의 길이,水路의 폭 및 유량 등의 조건이 변화함에 따라 蓄熱性能을 나타내는 변수인 η_I 과 η_{II} 에 어떠한 영향이 미치는가를 비교하여 효율적인 축열조건을 數值的方法을 사용하여 제시하였으며, 축열시스템의 설계시에 중요한 변수라 할 수 있는 最適蓄熱時間과 $\eta_{II\max}$ 값에 대한 關係式을水路内の 유동이 層流일 경우 다음과 같이 각각 제시하였다.

$$\theta_{opt} = 0.22342 \beta^{1.357} \lambda^{-1.981}$$

$$\eta_{II\max} = 39.542 \exp[\ln \beta(0.650 - 0.133 \ln \beta)], \%$$

A Study on Optimum Charging Time of a Thermal Energy Storage System Using a PCM

Won, Sung-Pil · Lee Tae-Hwan

Dept. of Mech. Engineering

(Recived September 23, 1985)

〈Abstract〉

A thermal energy storage system using a PCM is shown in Fig.1. It has been examined by the numerical method how storage parameters, η_I and η_{II} , are changed as the length of the system, the width of the channel, the mass flow rate, etc., are varied. After generalizing various results, effective storage conditions have been presented. The relations with regard to optimum charging time and $\eta_{II\max}$, essential for designing a thermal storage system, have been presented when the flow within the channel is laminar, respectively, as follows:

$$\theta_{opt} = 0.22342 \beta^{1.357} \lambda^{-1.981}$$

$$\eta_{II\max} = 39.542 \exp[\ln \beta(0.650 - 0.133 \ln \beta)], \%$$

〈記 號〉

A 수로의 단면적
Bi Biot 수, hW/k
c_p PCM의 비열
c_{p,f} 유체의 비열

d 수로의 폭
D_H 수력직경, $4A/P$
F 상변화율(melt fraction)
h 열전달계수
h_{SL} PCM의 융해열
k PCM의 열전도계수
k_f 유체의 열전도계수

* 現代重工業 新박해양연구소연구원.

- L 축열시스템의 길이
- \dot{m}_f 유체의 질량유량
- Nu_{D_H} Nusselt 수, hD_H/k_f
- P 수로의 접촉길이(perimeter)
- Pr Prandtl 수
- Q 식(12)로 정의됨
- Q_{max} 식(13)으로 정의됨
- Q_{ava} 식(14)로 정의됨
- Re_{D_H} Reynolds 수
- S 무차원화된 상변화단의 위치
- Ste Stefan 수, $c_p(t_{fi}-t_{sat})/h_{SL}$
- t PCM의 온도
- t_{sat} PCM의 포화온도
- \bar{t} 내상인 PCM의 평균온도
- t_f 유체의 온도
- t_{fi} 유체의 입구온도
- T 무차원화된 PCM의 온도
- T_f 무차원화된 유체의 온도
- V PCM의 체적
- W PCM의 폭
- x, y 공간좌표
- X, Y 무차원화된 공간좌표
- ρ PCM의 밀도
- ρ_f 유체의 밀도
- α PCM의 열확산계수, $k/\rho c_p$
- λ 무차원변수, $\rho c_p W / \rho_f c_{pf} d$
- β 무차원변수, $hL/\dot{m}_f c_{pf}$
- δ 상변화단의 위치
- τ 시간
- θ 무차원화된 시간, $\alpha\tau/W^2$
- θ_{opt} 무차원화된 최적축열시간
- η_I 식(15)로 정의되는 변수
- η_{II} 식(16)으로 정의되는 변수
- $\eta_{II_{max}}$ θ_{opt} 에서의 η_{II} 의 값
- 上部첨자
- o 前時間의 값
- 下部첨자
- i, j 공간격자점

I. 序 論

태양열과 같은 間歇的인 에너지源을 이용하는 熱裝置에는 축열시스템이 필수적인 것이 된다. 축열

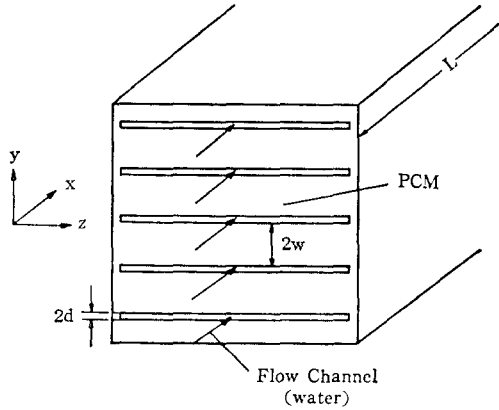


Fig. 1. Schematic Diagram of the Thermal Energy Storage System Using a PCM

시스템에는 顯熱(sensible heat)을 이용하는 것과 潛熱(latent heat)을 이용하는 것이 있는데 태양열과 같은 底級에너지(low level energy)에 대한 축열시스템으로는 잠열을 이용하는 것이 유리하다.

에너지의 효율적인 이용의 관점에서 볼 때 일차적으로 축열시스템을 효율적으로 만드는 것이 중요하며, 어떤 시스템이 있다면 중요한 변수로서 最適蓄熱時間을 뽑을 수 있다. Benjan[1]과 Schmidt [2]는 약간은 서로 다르지만 단순화한 현열축열시스템의 최적 축열시간에 대한 고찰을 하였으나 잠열을 이용하는 시스템에 대한 논문은 찾아볼 수 없다. 이것은 해석하는 데 있어서의 복잡성과 단순화시킬 수 없는 단점때문으로 생각된다.

따라서 본 연구의 목적은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 相變化物質(Phase Change Material, 略語 PCM)内の 납작한 水路內를 作動流體인 물이 흐르며 열교환이 이루어지는 기본적인 축열시스템에 대한 simulation과 有用에너지(available energy) 개념을 적용하여 최적축열시간을 구하는 데 있다. 이와같은 시스템에 대하여는 엄밀해(exact solution)를 얻을 수 없기 때문에 수치적방법을 사용하였다.

II. 解 析

Fig. 1과 같은 축열시스템을 해석하기 위해서는 대칭성을 고려해야하며 따라서 Fig. 2에서 보이고 있는 부분만을 대상으로 하면 된다.

이론적인 해석은 다음과 같은 가정하에서 이루어

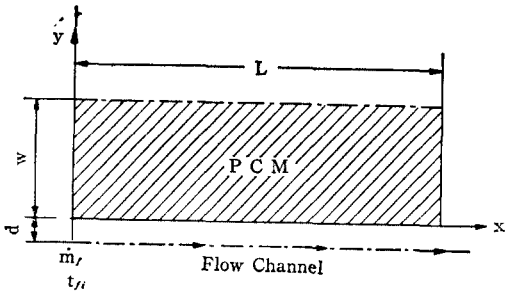


Fig. 2. A Typical Cell of the System for Analysis.

진다.

- 1) PCM의 초기상태는 포화고체상태이다.
- 2) 각각의 수로에는 온도가 t_{fi} 인 물이 유량 \dot{m}_f 로 계속해서 균일하게 공급된다.
- 3) 온도변화의 폭이 크지 않으므로 모든 물성값은 일정하다.
- 4) z 방향의 end effect 는 무시한다.
- 5) 수로의 길이 L이 PCM의 폭 W에 비해 훨씬 크고 PCM 자체의 열전도도가 좋지 않으므로 PCM 내에서 x 방향의 열전도는 무시한다.
- 6) 수로면 자체의 열저항은 무시한다.
- 7) 수로면과 작동유체사이의 열전달계수 h는 다음의 식으로 계산한다.

$$\text{층류: } Nu_{D_H} = 3.65 + \frac{0.068(D_H/L)Re_{D_H}Pr}{1 + 0.04[(D_H/L)Re_{D_H}Pr]^{2/3}} \quad (1)$$

$$\text{난류: } Nu_{D_H} = 0.036 Re_{D_H}^{0.8} Pr^{1/3} (D_H/L)^{0.058} \quad (2)$$

1. 支配方程式

위에서 언급한 가정하에서 PCM에 대한 지배방정식은

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \quad (3)$$

이 되고 수로를 흐르는 유체에 대한 지배방정식은 z 방향의 단위길이에 대해서

$$\rho_f c_{Pf} d \frac{\partial t_f}{\partial \tau} = -\dot{m}_f c_{Pf} \frac{\partial t_f}{\partial x} - h(t_f - t_{y=0}) \quad (4)$$

로 표시된다. 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

$$\tau = 0, t = t_f = t_{sat}$$

$$\tau > 0, x = 0, t_f = t_{fi}$$

$$y = 0, h(t_f - t_{y=0}) = -k \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (4-1)$$

한편 液相과 固相사이의 경계면이 존재하므로 그 경계면에서의 조건은

$$\tau = 0, \delta = 0$$

$$\tau > 0, y = \delta, -k \frac{\partial t}{\partial y} = \rho h_{SL} \frac{\partial \delta}{\partial \tau} \quad (4-2)$$

이 되고 여기서 δ 는 상변화단의 위치로서 x와 τ 의 함수이다.

위의 식(1)과 (2), 초기 및 경계조건을 여러가지 무차원량을 사용하여 무차원화시키면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial \theta} = -\frac{\lambda Bi}{\beta} \frac{\partial T_f}{\partial X} - \lambda Bi(T_f - T_{Y=0}) \quad (6)$$

$$\theta = 0, T = T_f = 0, S = 0$$

$$\theta > 0, X = 0, T_f = 1$$

$$Y = 0, Bi(T_f - T_{Y=0}) = -\frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (6-1)$$

$$Y = 1, \frac{\partial T}{\partial Y} = 0$$

$$Y = S, -\frac{\partial T}{\partial Y} = \frac{1}{Ste} \frac{\partial S}{\partial \theta} \quad (6-2)$$

여기서

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{W}, \theta = \frac{\alpha \tau}{W^2}, T = \frac{t - t_{sat}}{t_{fi} - t_{sat}}$$

$$T_f = \frac{t_f - t_{sat}}{t_{fi} - t_{sat}}, S = \frac{\delta}{W}, \lambda = \frac{\rho c_p W}{\rho_f c_{Pf} d}$$

$$Bi = \frac{hW}{k}, \beta = \frac{hL}{\dot{m}_f c_{Pf}}, Ste = \frac{c_p(t_{fi} - t_{sat})}{h_{SL}}$$

이다.

2. 差分方程式

식(5)과 (6)에 대한 차분방정식은 시간에 대해서 fully implicit scheme을 사용하여 control volume formulation 방법으로 유도한다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 X 방향에 대해서 등간격으로 m 등분하고 Y 방향에 대해서 등간격으로 n 등분하여 임의의 i절에서의 상변화단이 격자점 $j=l$ 과 $j=l+1$ 사이에 있다면, PCM에 대한 차분방정식은

$$j=1, A_1 T_{i,j} - 2A_2 T_{i,j+1} = T_{i,j}^0 + A_3 T_{fi} \quad (7)$$

$$2 \leq j \leq l-1, -A_2 T_{i,j-1} + A_4 T_{i,j} - A_2 T_{i,j+1} = T_{i,j}^0 \quad (8)$$

$$j=l, -A_2 T_{i,j-1} + A_6 T_{i,j} = T_{i,j}^0 \quad (9)$$

이 되고 상변화단에서

$$j=l, S_i = S_i^0 - A_7 T_{i,j-1} + A_8 T_{i,j} \quad (10)$$

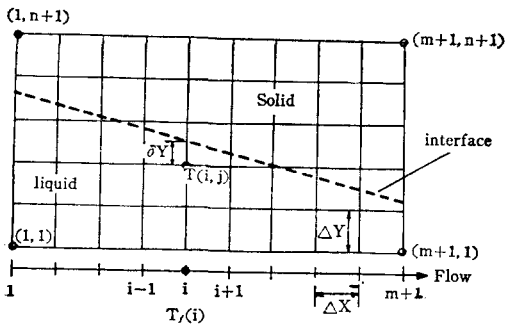


Fig. 3. Node Point Arrangement.

이 된다. 한편 유체에 대한 차분방정식은

$$-A_9 T_{f,i-1} + A_{10} T_{f,i} = T_{f,i} + A_{11} T_{s,i} \quad (11)$$

이 된다. 여기서 상부첨자 o 는 前時間에 대한 값을 나타내고

$$A_1 = 1 + \frac{2\Delta\theta}{(\Delta Y)^2} + \frac{2Bi\Delta\theta}{\Delta Y}, \quad A_2 = \frac{\Delta\theta}{(\Delta Y)^2},$$

$$A_3 = \frac{2Bi\Delta\theta}{\Delta Y}, \quad A_4 = 1 + \frac{2\Delta\theta}{(\Delta Y)^2},$$

$$A_5 = \frac{2\Delta\theta}{\Delta Y(\Delta Y + \delta Y)}, \quad A_6 = 1 + \frac{2\Delta\theta}{\Delta Y\delta Y},$$

$$A_7 = \frac{Ste\Delta\theta\delta Y}{\Delta Y(\Delta Y + \delta Y)}, \quad A_8 = \frac{Ste\Delta\theta(\Delta Y + \delta Y)}{\Delta Y\delta Y},$$

$$A_9 = \frac{\lambda Bi\Delta\theta}{\beta\Delta X}, \quad A_{10} = 1 + \lambda Bi\Delta\theta + \frac{\lambda Bi\Delta\theta}{\beta\Delta X},$$

$$A_{11} = \lambda Bi\Delta\theta.$$

이다.

3. 蓄熱性能의 表示

최적축열시간을 계산하기 위해서는 축열성능을 나타내는 어떤 변수를 유도해야 한다.

우선 어떤 시간 동안에 PCM내에 축열된 에너지 Q 는

$$Q = \rho V F h_{SL} + \rho V F (\bar{t} - t_{sat}) \quad (12)$$

로 표시되는 데 \bar{t} 는 액상인 PCM에 대한 평균온도이며 우변 첫번째항은 잠열에 의한 양, 둘째항은 현열에 의한 양을 각각 나타낸다. 그리고 PCM내에 최대한도로 저장할 수 있는 양 Q_{max} 는

$$Q_{max} = \rho V h_{SL} + \rho V (t_{fi} - t_{sat}) \quad (13)$$

으로 표시할 수 있다.

한편 어떤 시간 동안에 유체에서 얻을 수 있는 최대의 유용에너지 Q_{ava} 는

$$Q_{ava} = \dot{m}_f c_{pf} (t_{fi} - t_{sat}) \cdot \tau \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다. 위의 식 (12), (13) 및 (14)를

사용하여 축열성능을 나타내는 두개의 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_I = \frac{\text{heat stored}}{\text{maximum heat stored}} = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (15)$$

$$\eta_{II} = \frac{\text{heat stored}}{\text{available thermal energy in the fluid}} = \frac{Q}{Q_{ava}} \quad (16)$$

위의 식(15)과 (16)에서 알 수 있는 바와 같이 η_I 는 열역학 제 1법칙의 관점에서 생각한 것이고 η_{II} 는 열역학제 2법칙의 관점으로 생각한 것이라 볼 수 있다.

III. 結果 및 考察

지배방정식(식(5)와 (6))과 관계되는 경계조건을 보면 무차원변수인 Bi , λ , β 및 Ste 수로 표시되어 있어 그 값들이 모두 같은 경우는 같은 결과를 나타낸다고 볼 수 있다. 그러나 그와 같은 무차원변수들이 서로 독립적인 관계를 유지하고 있지 않으므로 시스템의 길이차원인 L , W 및 d 와 질량유량 \dot{m}_f , 유체의 입구온도 t_{fi} 등을 변화시켜가며 결과를 논의해야 한다. 그러나 유체의 입구온도는 결정되어 있다고 볼 수 있고 PCM의 폭 W 의 변화의 결과는 초기조건이 포화상태이므로 고려할 필요가 없어 결국 축열시스템의 길이 L , 수로의 폭 d 및 유량 \dot{m}_f 를 변화시켜가며 η_I 와 η_{II} 의 경향을 살펴보고 최적축열시간에 대한 관계식은 유도하고자 한다.

따라서 수치해는 PCM을 Table. 1과 같은 물성값을 갖는 η -Octadecane이라 생각하고 $t_{fi} = 37.07^\circ\text{C}$ ($Ste = 0.1$ 에 해당), $W = 0.05$ m에 대하여 다른 변수들을 변화시켜가며 얻었다.

1. 수로폭의 변화에 대한 결과

Fig. 4는 d 의 변화에 대한 η_I 와 η_{II} 값의 결과를 보여주고 있다. 수로폭이 커질수록 즉 λ 값이 작아

Table 1. Properties of n-Octadecane, 97% pure

t_{sat}	28°C
ρ	777kg/m^3
c_p	$2660\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$
k	$0.149\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$
h_{SL}	241360J/kg

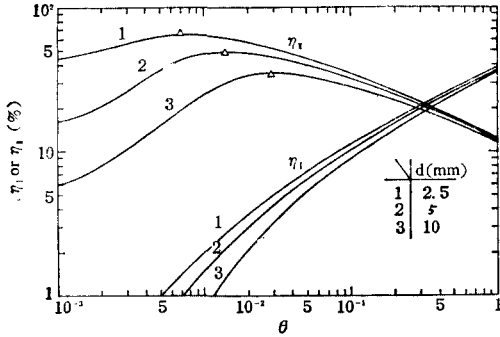


Fig. 4 η_I and η_{II} to Various d Values When $Ste=0.1$, $L=4$ m, and $\dot{m}_f=0.1$ kg/sec

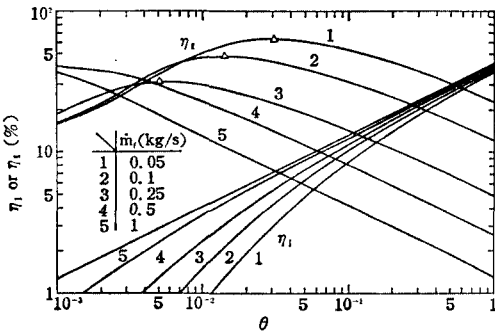


Fig. 5 η_I and η_{II} to Various \dot{m}_f Values When $Ste=0.1$, $L=4$ m, and $d=0.005$ m

질수록 η_I 과 η_{II} 값이 전반적으로 작아진다. 그림중에 Δ 표시는 η_{II} 값이 최대가 되는 점이며, 바로 그 점이 최적축열시간을 나타낸다고 볼 수 있고 d 가 커질수록 커짐을 알 수 있다. 결국 λ 값이 커질수록 효율적인 축열이 가능하다고 생각된다.

2. 유량의 변화에 대한 결과

Fig. 5는 \dot{m}_f 의 변화에 대한 결과를 보여주고 있다. 그림을 보면 η_{II} 의 경향은 곡선 1, 2, 3과 4, 5가 서로 다름을 알 수 있다. 곡선 1, 2 및 3은 최대 값을 가지는데 반해 곡선 4와 5는 처음부터 감소하는 경향을 나타낸다. Re 수를 비교해 보면 곡선 1, 2, 3은 층류영역에 속하고 곡선 4, 5는 난류영역에 속한다. 결국 본 시스템에서는 난류유동이 되면 효율적인 축열을 기대할 수 없다. η_I 값은 \dot{m}_f 가 작아질수록 즉 β 값이 커질수록 작아지나 $\theta=0.1$ 이상의 시간에서는 거의 차이가 없고 η_{II} 값은 β 값이 커질수록 커지고, 최적축열시간도 커진다. 따라서 λ 값

이 일정할때 β 값이 커질수록 효율적인 축열이 가능하다고 볼 수 있다.

3. 축열시스템의 길이변화에 대한 결과

Fig. 6은 L 의 변화에 대한 결과를 나타내고 있다. η_I 값은 L 이 커짐에 따라 즉 β 값이 커질수록 전반적으로 작아지나 $\theta=0.1$ 이상의 시간에서는 거의 차이가 없고, η_{II} 값은 전반적으로 커지며 최적축열 시간도 커져 효율적인 축열이 가능하다.

층류일 경우 L 과 \dot{m}_f 의 관계는 서로 독립적인 관계가 아님을 식(1)과 무차원 변수 β 의 정의로부터 유추할 수 있고 Fig. 5와 Fig. 6으로서 확인할 수 있다. 즉 어떤 기준이 되는 L, \dot{m}_f 값에서 L 을 2배, 4배로 증가시키는 경우와 \dot{m}_f 를 $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ 로 감소시키는 경우가 서로 같은 결과를 각각 얻는다. 이로써 층류일 경우의 독립변수는 (\dot{m}_f, L, d) 가 아니라 (\dot{m}_f, d) 나 (L, d) 가 됨을 알 수 있다.

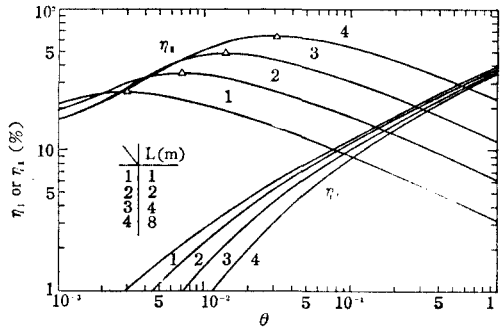


Fig. 6. η_I and η_{II} to Various L Values When $Ste=0.1$, $d=0.005$ m, and $\dot{m}_f=0.1$ kg/sec

4. 최적축열시간에 대한 관계식

앞에서 저술한 바와 같이 본 시스템에서는 난류유동이 되면 효율적인 축열을 기대할 수 없다. 따라서 층류일 경우의 최적축열시간 θ_{opt} 에 대한 관계식을 유도하고자 한다.

층류일때 독립변수는 (\dot{m}_f, d) 나 (L, d) 가 됨을 앞에서 언급한바 있거니와 무차원수인 Bi, λ 및 β 의 관계를 자세히 살펴보면 어떤 λ 와 β 값에 대해서 Bi 값은 오직 하나만 존재한다. 따라서 λ 와 β 값에 대한 변화만을 고려하면 된다. 여기서 λ 와 β 의 물리적인 의미를 잠시 살펴보면 λ 는 축열물질과 작동유체사이의 열용량비이며 β 는 열교환기의 NTU와 비슷한 형태로서 작동유체가 전달하는 에너지에 대한 저장되는 에너지의 비라고 할 수 있다.

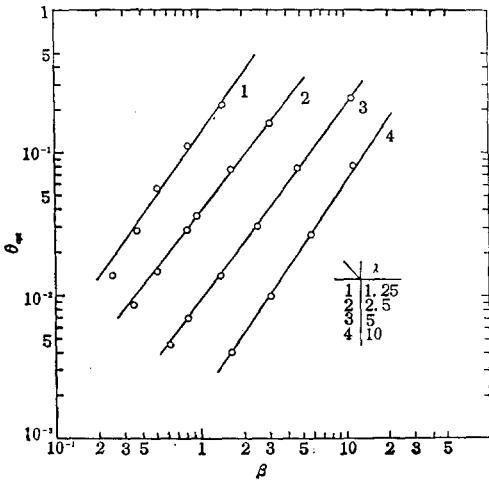


Fig. 7. θ_{opt} vs. β to Various λ Values When $Ste=0.1$.

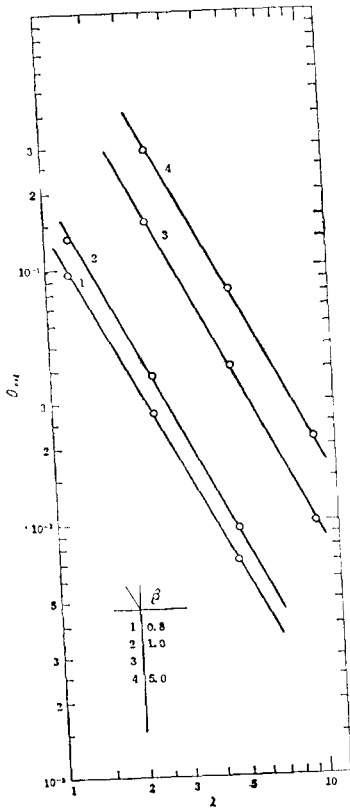


Fig. 8. θ_{opt} vs. λ to Various β Values When $Ste=0.1$.

Fig. 7.은 λ 값이 1.25, 2.5, 5 및 10으로 각각 고정될 때 β 값의 변화에 대한 θ_{opt} 값의 변화가 Log-Log 선도에 나타나 있다. $\log \beta$ 와 $\log \theta_{opt}$ 의 관계가 선형적이며 그 기울기가 1.357이다. 따라서 θ_{opt} 값은 $\beta^{1.357}$ 에 비례한다. Fig. 8은 β 값이 0.8, 1, 3 및 5로 고정될 때 λ 변화에 대한 θ_{opt} 의 변화가 Log-Log 선도에 나타나 있으며 서로의 관계가 선형적이며 그 기울기가 -1.981 이 된다. 그러므로 $\theta_{opt} = a\beta^{1.357} \lambda^{-1.981}$ 인 관계를 얻게 되고 최소자승법에 의해 a 값을 구하면 그 관계식이

$$\theta_{opt} = 0.22342 \beta^{1.357} \lambda^{-1.981} \quad (17)$$

로 표시되며 실제계산과의 오차는 5% 미만이다. 이 식이 유도된 범위는 $1 \leq \lambda \leq 10$ 이고 $0.1 \leq \beta \leq 20$ 이나 paraffin 류의 축열물질은 사용하는 보통의 시스템의 거의 모든 작동 조건을 포함한다 볼 수 있고, Ste 수가 변한다 해도 같은 λ, β 값이면 똑같은 관계식을 얻을 수 있음을 식(6-2), (12), (14) 및 (16)으로 예측할 수 있어 종류인 경우는 모두 적용이 가능하다.

한편 θ_{opt} 값에서의 η_{II} 값은 최대치인 $\eta_{II_{max}}$ 가 되며 $\eta_{II_{max}}$ 값의 β 에 대한 결과가 Log-Log 선도로 Fig. 9에 나타나 있다. 그림을 보면 λ 값에 관계없이 $\log \beta$ 와 $\log \eta_{II_{max}}$ 의 관계가 포물선형태가 된다. 따라서 $\ln \eta_{II_{max}} = a + b \ln \beta + c (\ln \beta)^2$ 이라 생각하고 최소자승법을 적용하여 계수 a, b, c 값을 구하면 그 관계식이

$$\eta_{II_{max}} = 39.542 \exp[\ln \beta (0.650 - 0.133 \ln \beta)], \% \quad (18)$$

이 되며 실제계산과의 오차는 2% 미만이다. 이 식도 Ste 수의 변화에 관계없이 적용이 가능하므로 식(17)과 (18)은 시스템설계의 Simulation에 대한 중요한 관계식이라 할 수 있다.

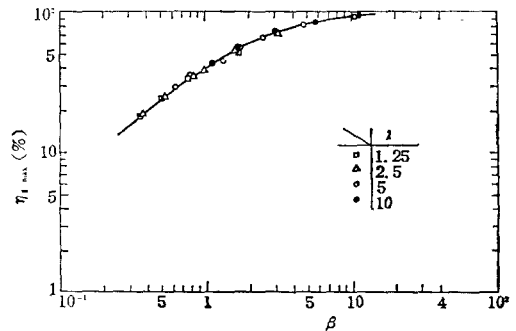


Fig. 9. $\eta_{II_{max}}$ vs. β to Various λ Values When $Ste=0.1$

IV. 結 論

이상과 같은 결과 및 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1) 시스템의 차원인 길이 L 과 수로폭 d 에 대해서 L 이 길어지거나 d 가 커짐에 따라 즉 β 가 커지거나 λ 가 작아짐에 따라 보다 효율적인 축열이 가능하다.

2) 수로를 흐르는 유체의 유량이 적을수록 효율적인 축열이 가능하다. 이것은 전체시스템의 총유량은 결정되어 있다고 볼 수 있으므로 수로의 수를 늘릴수록 유리하다는 것을 의미한다.

3) 시스템설계시의 simulation 에 중요한 최적축열시간과 η_{max} 에 대한 관계식이 종류일때 식(17) 과 (18)로 각각 주어진다.

결론적으로 잠열을 이용하는 축열시스템의 최적축열시간에 대해서 어떤 관계식을 얻을 수 있음을 보여주었고, 특히 그 식이 시스템의 형상비에 해당되는 무차원수 λ 와 전달되는 에너지에 대한 저장되는 에너지의 비를 나타낸다고 볼 수 있는 무차원수 β 에 관해서 지수형태로 표시됨을 제시한 것이 본 연구의 수확이라 하겠다.

References

1. 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.
2. Schmidt, F.W., Szego, J., and Laananen, D.H., "Design Optimization of a Single Fluid, Solid Sensible Heat Storage Unit," J. Heat Transfer, ASME, Vol.99, pp.174—179, 1977.
3. Schmidt, F.W. and Szego, J., "Transient Response of Solid Sensible Heat Thermal Storage Units-Single Fluid," J. Heat Transfer, ASME, Vol.98, pp.471—479, 1976.
4. 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.
5. Schmidt, F.W. and Willmott, A.J., Thermal Energy Storage and Regeneration, McGraw-Hill, 1981.
6. Bejan, A., Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow, Wiley, 1982.
7. Eckert, E.R.G. and Drake, JR., R.M., Analysis of Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, 1972.
8. Moore, D.F., Thermodynamic Principles of Energy Degrading, Macmillan, 1981.
9. Wilson, D.G., Solomon, A.D., and Boggs, P.T., Moving Boundary Problems, Academic Press, 1978.
10. Wylen, G.J.V. and Sonntag, R.E., Fundamental of Classical Thermodynamics, Wiley, 1976.