

## 다단 유체통로를 가진 현열축열조의 열역학 제 2 법칙에 의한 효율성 해석

이        근        식  
기    계    공    학    과  
(1985. 9. 30. 접수)

### 〈요 약〉

다단 유체통로를 가진 현열축열조의 효율해석이 열역학 제2법칙에 바탕을 둔 생성 엔트로피 개념을 도입하여 수치해석을 통하여 이루어졌다.

생성엔트로피 개념을 도입함으로써 현열축열조의 설계 매개변수들과 새로 정의된 효율들과의 직접적인 관계가 제시되었으며, 효율적인 축열을 하기 위한 매개변수들의 범위가 본 계산범위내에서 제시되었다. 아울러 기존의 제1법칙에 일각한 효율들과도 비교되었다.

## Effectiveness of Sensible Heat Storage Unit with Multi-flow Channels by the 2nd Law of Thermodynamics

Lee, Geun-Sik  
Dept. of Mech Engineering  
(Received September 30, 1985)

### 〈Abstract〉

The numerical analysis for the effectiveness of a sensible heat storage unit with multi-flow channels of working fluid is presented.

The irreversibility concept(entropy generation) by the 2nd Law of thermodynamics establishes a relationship between design parameters(e.g. Biot number, Ntu, heat capacity ratio, aspect ratio and the difference between fluid inlet temperature and initial one of heat storage unit) and the usefulwork wasted due to finite temperature difference in heat storage process.

This paper presents the conditions for more effective sensible heat storage method according to the variation of heat storage design parameters and compares the new efficiency based on entropy generation with the traditional one based on the 1st Law of Thermodynamics.

### 〈기 호〉

- |  |   |
|--|---|
| <p><math>a</math>: (<math>=hL/\dot{m}_f C_f</math>), Number of Transfer Units,<br/>Ntu</p> <p><math>B_i</math>: Biot 수</p> <p><math>C</math>: 정압비열</p> | <p><math>d_f</math>: 유체 통로높이의 1/2</p> <p><math>d_s</math>: 저장매체 Cell 높이의 1/2</p> <p><math>F</math>: normalized entropy generation</p> <p><math>F_0</math>: (<math>=\alpha t/L^2 = \varepsilon \cdot \tau</math>), Fourier number</p> <p><math>h</math>: 대류열전달 계수</p> <p><math>I</math>: (<math>=T_0 S_{gen}</math>), 비가역성</p> <p><math>k</math>: 저장매체의 열전도율</p> |
|--|---|

$L$ : 축열조의 길이

$\dot{m}_f$ : 작동유체의 질량유량

$P_1$ :  $(=L/d_s)$ , 종횡비

$Q$ : 저장 매체에 저장된 축열량

$\dot{Q}_e(t)$ : 축열조 출구에서 외부로의 열전달량

$\dot{S}_{gen}$ : Entropy 순생산율

$S_{gen}$ : 생성 엔트로피

$S_{gen}^*$ :  $= \frac{S_{gen}}{m_f C_f t}$  무차원화된 생성 Entropy

$t$ : 시간

$t^*$ : 유속판 변할때 실제단위축열시간(III-7 및 fig. 12에 적용),  $(=\tau/U^*)$

$T$ :  $(=(T_s - T_0)/(T_f - T_0))$ , 무차원화된 저장매체의 온도

$T_1$ : 작동유체의 입구 절대 온도

$T_0$ : 초기 절대온도

$T_f$ : 저장매체의 절대온도

$T_s$ : 작동유체의 절대온도

$T_{out}$ : 작동유체의 출구온도

$U$ : 작동유체의 속도

$U^*$ :  $(=U/U_{ref})$ , 속도비

$V$ : 저장매체의 체적

$W_{max}$ : 작동유체가 할 수 있는 최대일

$x, y, z$ : 공간좌표

$X, Y$ :  $(=x/L, y/d_s)$  무차원화된 공간좌표

$\alpha$ :  $(=k/\rho C_s)$ , 열확산율

$\epsilon$ :  $(\alpha=UL)$ , modified Fourier number

$\eta$ : 비가역성에 대한 실제축열량의 비

$\eta_1$ : 최대축열량에 대한 실제축열량의 비

$\eta_2$ : 유체의 임출구 총 enthalpy 변화에 대한 실제 저장열량의 비

$\theta$ :  $(=(T_f - T_0)/(T_s - T_0))$ , 무차원화된 작동유체의 온도

$\lambda$ :  $(=m_f C_f / m C_s = \rho_f C_f d_f / \rho C_s d_s)$ , 저장매체에 대한 작동유체의 열용량 비

$\rho$ : 밀도

$\tau$ :  $(=Ut/L)$ , 무차원화된 시간

상첨자

0: 前시간(old time)

하첨자

$f$ : 작동유체

$s$ : 저장매체

ref: reference state

## I. 서 론

축열시스템은 에너지의 수요와 공급간의 시간적 인격차를 충족시켜 주는 장치로서 많은 사람들이 이에 대한 관심을 가져왔으며 또 많은 연구도 진행되어왔다.

그런데 1970년대 후반까지만 하더라도 축열시스템의 효율 및 성능분석은 주로 열역학 제1법칙에 바탕을 둔 축열조의 시간, 공간에 따른 온도분포든지, 축열량만을 가지고 해석하여 왔다.<sup>(3,9,10)</sup>

그러나 에너지의 합리적, 효율적 이용이라는 측면에서 보면 축열시스템의 경우도 공급한 에너지에 대하여 저장된 에너지만을 가지고 효율이 좋다, 나쁘다, 등으로 판단할 것이 아니라 외부로의 열손실 및 비가역과정에 의한 손실이 작아서 열에너지의 질적 저하가 되도록 적은상태에서 축열될 때 축열생산이 우수하다고 평가되어야 하겠다.

A. Bejan 은 열교환기, 유체유동, 저온장치 등의 성능분석에 비가역성을 다양하게 적용하였다.<sup>(11, 2,3,4,5)</sup> 국내에서도 비가역성을 고려한 논문 및 책들이 노승탁<sup>(11,12,13)</sup>등에 의하여 발표되기 시작했다.

축열시스템에 생성엔트로피 개념을 도입한 연구로는 Adrian Bejan<sup>(14)</sup>에 의해 시도되었으며, 국내에서도 원성필 이근석<sup>(6)</sup>에 의해 상변화 쪽에 도입되었다. 그러나 A. Bejan 이 다룬 현열축열조는 제시된 model 이 너무나 단순하여 열역학적 정량만 얻을 수 있을 뿐 실제축열조의 성능비특성 적용하기에는 구체적인 자료가 불충분하였다.

본 연구에서는 다단 유체통로물 가진 현열 축열조에서 Biot 수, 유체와 저장매체간의 열용량비, 기하학적 형상, 입구유체온도와 초기 저장매체의 온도(외부온도)와의 차, Ntu, 유속을 변화시켜가면서 제1법칙에 의한 효율과 제2법칙에 의한 비가역성을 고려한 효율을 서로 비교 분석됨으로써 생성엔트로피 개념을 도입한 현열축열시스템의 최적 설계에 대한 기초자료를 제시하는데 중점을 두었다.

## II. 해 석

Fig. 1에 다단 유체통로물 가진 현열축열조가 제시되어 있다.

해석은 대칭성을 고려하여 Fig. 2와 같이 저장매

체와 작동유체의 각각의 반만을 해석하면 되겠다.

해석을 위한 기본적인 가정은 다음과 같다.

(1) 작동유체와 저장매체의 초기온도는 외부온도와 같으며 일정하다.

(2) Z 방향의 end effect 는 무시하며 단위길이에 가정하여 2차원 온도분포로 가정한다.

(3) 유체의 통로높이는 길이에 비해 충분히 작아서 작동유체의 온도분포를 1차원으로 생각한다.

(4) 작동유체와 저장매체의 물성치들은 일정하다.

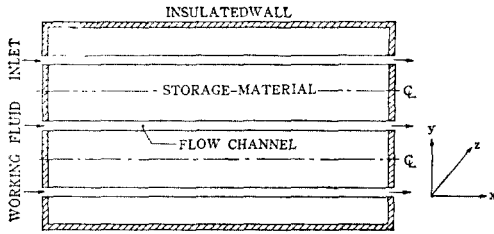


Fig. 1 Schematic diagram of Sensible Heat Storage Unit.

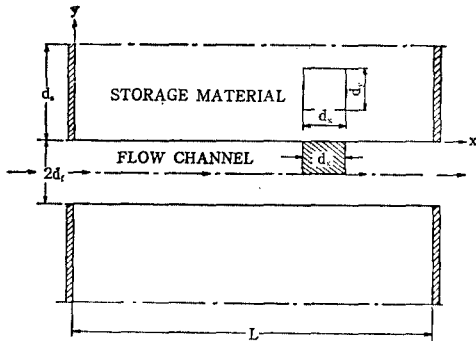


Fig. 2. Mathematical model for analysis

1. 지배방정식과 초기 및 경계조건

Fig. 2에 제시된 미소요소에 에너지 평형을 취하면 지배방정식과 초기 및 경계조건은 다음과 같이 된다.

저장매체 :

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \quad (1)$$

작동유체 :

$$(\rho C d)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\dot{m}_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - h(T_f - T_{s, y=0}) \quad (2)$$

초기조건 :

$$t=0, T_f = T_s = T_0$$

경계조건 :

$$x=0, T_f = T_i$$

$$y=0, -k \frac{\partial T_s}{\partial y} \Big|_{y=0} = h(T_f - T_{s, y=0})$$

$$y=d_s, \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0$$

$$x=0, \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$$

$$x=L, \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$$

지배방정식과 초기 및 경계조건에 무차원 변수 및 parameter 를 도입하여 무차원화하면 다음과 같이 된다.

저장매체 :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \varepsilon \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + P_1 \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \quad (3)$$

작동유체 :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -\frac{\partial \theta}{\partial X} - a(\theta - T_{y=0}) \quad (4)$$

초기조건

$$\tau=0, T = \theta = 0 \quad (5)$$

경계조건

$$\tau > 0, X=0, T_f = 1 \quad (6)$$

$$Y=0, -\frac{\partial T}{\partial Y} = B_1(\theta - T_{y=0}) \quad (7)$$

$$Y=1, \frac{\partial T}{\partial Y} = 0 \quad (8)$$

$$X=0, \frac{\partial T}{\partial X} = 0 \quad (9)$$

$$X=1, \frac{\partial T}{\partial X} = 0 \quad (10)$$

여기서

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{d_s}, \tau = \frac{U t}{L}, \varepsilon = \frac{\alpha}{UL},$$

$$a = \frac{hL}{\dot{m}_f C_f}, B_1 = \frac{hd_s}{k}, \lambda = \frac{\dot{m}_f C_f}{\dot{m}_s C_s}$$

$$P_1 = \frac{L}{d_s}, \theta = \frac{T_f - T_0}{T_i - T_0}, T = \frac{T_s - T_0}{T_i - T_0}$$

이다. 따라서

$$T = T(X, Y, \tau; a, B_1, \lambda, \varepsilon, P_1) \quad (11)$$

$$\theta = \theta(X, \tau; a, B_1, \lambda, \varepsilon, P_1) \quad (12)$$

의 변수 및 parameter 의 함수로 되며, 이들 a, B<sub>1</sub>, λ, ε, P<sub>1</sub> 5개의 parameter 는

$$\varepsilon = a \cdot \lambda / (B_1 \cdot P_1^2) \quad (13)$$

의 관계식이 성립되어 4개의 parameter 를 잡을 수

있겠다.

## 2. 지배방정식의 차분화

식(3)과 (4)에 대하여 시간에 대한 안정성을 고려하여 pure implicit scheme 을 사용하였다.

Fig. 3에 제시된 바와 같이  $X$  방향으로 등간격  $\Delta X$  로  $m$  등분하고  $Y$  방향으로 등간격  $\Delta Y$  로  $n$  등분하여 내부, 변, 및 꼭지점에 대하여 열유동 조건을 고려하면 다음과 같은 차분방정식이 얻어진다.

$$i=1, j=1$$

$$T_{11}=(T_{11}^0+A_3T_{21}+A_4T_{12}+B\cdot\theta_1)/A_5 \quad (14)$$

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

$$T_{1j}=(A_3T_{2j}+A_2(T_{1j+1}+T_{1j-1})+T_{1j}^0)/A_5 \quad (15)$$

$$i=1, j=n+1$$

$$T_{1,n+1}=(T_{1,n+1}^0+A_3T_{2,n+1}+A_4T_{1,n})/A_5 \quad (16)$$

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

$$T_{i,1}=(T_{i,1}^0+A_1(T_{i+1,1}+T_{i-1,1})+A_4T_{i,2}+B\theta_i)/A_6 \quad (17)$$

$$T_{i,j}=(T_{i,j}^0+A_1(T_{i+1,j}+T_{i-1,j})+A_2(T_{i,j+1}+T_{i,j-1}))/A_5 \quad (18)$$

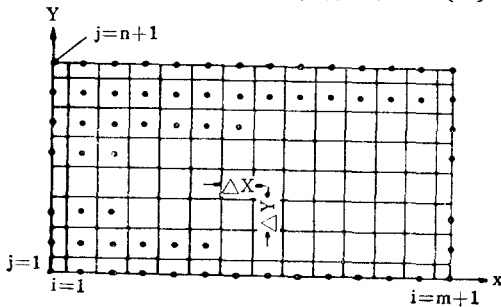


Fig. 3 Node Points Arrangement

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

$$T_{i,n+1}=(T_{i,n+1}^0+A_1(T_{i+1,n+1}+T_{i-1,n+1})+A_4T_{i,n})/A_5 \quad (19)$$

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

$$T_{m+1,1}=(T_{m+1,1}^0+A_3T_{m,1}+A_4T_{m+1,2}+B\theta_{m+1})/A_6 \quad (20)$$

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

$$T_{m+1,j}=(T_{m+1,j}^0+A_3T_{m,j}+A_2(T_{m+1,j+1}+T_{m+1,j-1}))/A_5 \quad (21)$$

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

$$T_{m+1,n+1}=(T_{m+1,n+1}^0+A_3T_{m,n+1}+A_4T_{m+1,n})/A_5 \quad (22)$$

working fluid ( $2 \leq j \leq m+1$ )

$$\theta_i=(\theta_i^0+B_2\theta_{i-1}+B_3T_{1i})/B_5 \quad (23)$$

여기서

$$A_1=\frac{\varepsilon \Delta \tau}{(\Delta X)^2}, A_2=P_1^2 \frac{\varepsilon \Delta \tau}{(\Delta Y)^2},$$

$$A_3=2A_1, A_4=2A_2, A_5=1+A_3+A_4,$$

$$B=2P_1^2 \varepsilon B_i \frac{\Delta \tau}{\Delta Y}, A_6=A_5+B,$$

$$B_2=\Delta \tau / \Delta X, B_3=a \Delta \tau, B_4=2B_2,$$

$$B_5=1+B_2+B_3$$

이다. 위의 차분방정식들은 Gauss-Seidal Iteration 방법으로 계산되었으며, 수렴조건으로는 Stability test 결과,

$$\frac{a \cdot \lambda \cdot \Delta \tau}{B_i \cdot \Delta X \cdot (\Delta Y / P_1)} \leq 0.1 \quad (24)$$

의 관계식이 제시되었다.

## 3. 생성 entropy 와 축열성능

축열성능의 비교에는 현열축열의 경우 최대축열량에 대한 실제축열량이나 작동유체의 출입구 enthalpy 변화에 대한 실제 축열량의 비가 흔히 사용되어 왔다. 그러나 이들 열역학 제1법칙에 의한 축열효율들로서는 작동유체가 외부에 할 수 있는 최대일 중 얼마만한 양이 축열로 사용되며, 유용에너지의 소실이 그 중 얼마나 되느냐를 판단할 수 없다. 예를 들면 Rankine cycle에서 condenser로 버리는 열량은 방대하지만 Energy의 질이 낮아서 효율적인 이용은 어렵다. 따라서 효율적인 축열성능을 제시하려면 비가역성 혹은 생성 entropy의 개념이 축열방면에도 도입되는 것이 바람직하다고 하겠다.

Fig. 4에 제시된 Schematic diagram에서 압력강하에 의한 비가역성을 무시할 수 있는 작동 유체일 때 생성율은

$$\begin{aligned} \dot{S}_{gen} = & \frac{d}{dt} \int_V \rho_s C_s \ln \frac{T_s}{T_0} dV - \int_0^L \frac{h(T_f - T_s)}{T_f} dx \\ & + \frac{d}{dt} \int_0^L \rho_f C_f d_f \ln \frac{T_f}{T_0} dV + \dot{m}_f C_f \ln \frac{T_0}{T_i} \\ & + \int_0^L \frac{h(T_f - T_s)}{T_s} dx \\ & + \frac{\dot{m}_f C_f (T_{out} - T_0)}{T_0} \end{aligned} \quad (25)$$

이 된다. 축열초기부터 축열시간  $t$ 까지 총생성 entropy는 (25)식을 0에서부터  $t$ 까지 적분하면 구해지며 다음과 같다.

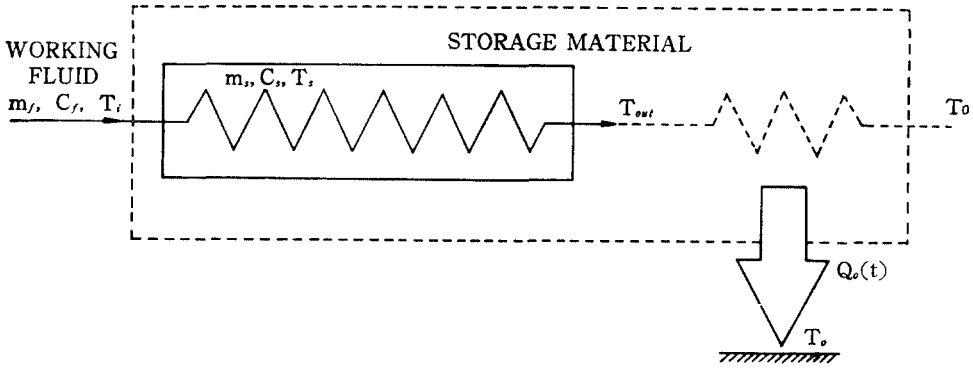


Fig. 4 Schematic diagram of Sensible heat storage system for entropy generation analysis.

$$\begin{aligned}
 S_{gen} = & \int_V \rho_f C_f \ln \frac{T_f}{T_o} dV \\
 & + \int_0^t \int_0^L \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_f} \right) h (T_f - T_s) dx dt \\
 & + \int_0^t \rho_f C_f d_f \ln \frac{T_f}{T_o} dx + \int_0^t \dot{m}_f C_f \ln \frac{T_o}{T_i} dt \\
 & + \int_0^t \frac{\dot{m}_f C_f (T_{out} - T_o)}{T_o} dt \quad (26)
 \end{aligned}$$

여기서 첫항은 저장매체내의 온도구배에 의한 entropy 변화률, 둘째항은 저장매체와 작동유체사이의 유한한 온도차에 의한 entropy 변화률, 셋째항은 작동유체내의 온도구배에 의한 entropy 변화률, 넷째항은 입구에서 출구까지 작동유체의 출입에 의한 entropy 변화률, 그리고 마지막 항은 외부 온도  $T_o$ 에 열전달에 의한 entropy 변화률 표시한다.

(26)식을 무차원화하면

$$\begin{aligned}
 S_{gen}^* = & \frac{S_{gen}}{\dot{m}_f C_f t} = \frac{1}{\tau} \left\{ \frac{1}{\lambda} \int_V \ln \frac{T_f}{T_o} dV^* \right. \\
 & + \int_0^1 \ln \frac{T_f}{T_o} dX \\
 & + a \int_0^{\tau} \int_0^1 \left( \frac{T_f}{T_s} + \frac{T_s}{T_f} - 2 \right) dx d\tau \\
 & \left. + \int_0^{\tau} \left( \frac{T_{out}}{T_o} - 1 \right) d\tau \right\} + \ln \frac{T_o}{T_i} \quad (27)
 \end{aligned}$$

가 되며  $V^* = V / (Ld_s)$ 를 표시한다. (27)식을 살펴보면

$$S_{gen}^* = S_{gen}^* \left( T_s, T_f, \tau; a, \lambda, \frac{T_i - T_o}{T_o} \right) \quad (28)$$

임을 알 수 있고, (11)식 및 (12)식으로부터

$$S_{gen}^* = S_{gen}^* \left( \tau; a, B_i, \lambda, P_1, \frac{T_i - T_o}{T_o}, \varepsilon \right) \quad (29)$$

이 되고  $S_{gen}^*$ 는  $(T_i - T_o) / T_o$ 와 design parameter

인  $a, B_i, \lambda, P_1$ 에 의존됨을 알 수 있다.

(27)식의 무차원 생성 entropy를 표준화시키기 위해 여기서 2가지 양을 도입하자. 하나는 비가역성으로 정의되는

$$I = T_o S_{gen} \quad (30)$$

이고, 다른 하나는 축열초기에 온도  $T_i$ 인 작동유체가 외부온도  $T_o$ 로 낮아졌을 때 할 수 있는 최대 일인

$$W_{max} = \dot{m}_f t (\Phi_i - \Phi_o) \quad (31)$$

이며

$$\Phi = u + pv + T_o s \quad (32)$$

로 정의되는 specific availability 이고  $u$ 는 specific internal energy이며  $p$ 는 압력,  $v$ 는 specific volume 그리고  $s$ 는 specific entropy이다. (32)식을 (31)식에 대입하여

$$W_{max} = \dot{m}_f C_f T_o t \left[ \frac{(T_i - T_o)}{T_o} - \ln \frac{T_i}{T_o} \right] \quad (33)$$

이 얻어진다.

한편 저장매체에 저장된 축열량은

$$Q = \int_V \rho_s C_s (T_s - T_o) dV \quad (34)$$

가 된다.

이제 종래에 일반적으로 사용되어 왔던 열역학 제 1법칙에 의한 축열효율과 본 논문에서 사용하는 열역학 제 2법칙에 입각한 비가역성을 도입한 축열효율 및 성능과 비교하기 위해 아래의 몇가지 양들을 정의한다.

$$\eta_1 = \frac{Q}{\dot{m}_f C_f (T_i - T_o)} = \int_V T dV^* \quad (35)$$

는 최대축열량에 대한 실제축열량의 비로 정의된다.

$$\eta_2 = \frac{Q}{\dot{m}_f C_f (T_i - T_0) t} = \frac{\eta_1}{\lambda \tau} \quad (36)$$

은 유체의 입출구 총 enthalpy 변화에 대한 저장열량의 비로 정의된다.

$$F = \frac{I}{W_{\max}} \quad (37)$$

에 (27)식, (30)식, (33)식을 대입하면

$$F = \frac{S_{\text{gen}}^*}{(T_i - T_0)/T_0 - \ln \frac{T_i}{T_0}} \quad (38)$$

이 되며, 작동유체가 할 수 있는 최대의 일에 대한 축열과정 동안에 생긴 비가역성의 비로 즉, normalized dimensionless irreversibility로 정의된다. (1,14,15,16,17) 마지막으로

$$\eta = \frac{Q}{I} \quad (39)$$

에 (27)식, (30)식, (34)식을 대입하여

$$\eta = \frac{\eta_2 (T_i/T_0 - 1)}{S_{\text{gen}}^*} \quad (40)$$

로 되며 축열과정 동안의 비가역성에 대한 실제저장열량을 표시한다. (6)

### III. 결과 및 고찰

작동유체는 물, 저장매체는 구리, 종횡비는 10, 입구와 외부와의 온도차는 30°C를 기준으로 하여 무차원 고정 parameter들을 정하였으며, (7) 이들 기준치를 사용하여 II-1의 (13)식에 의한 4개의 parameter와  $T_0/T_i$  중에서 1개의 parameter만을 변화시키고 나머지를 고정시켜 다음의 graph(Fig. 5~Fig. 13)들을 얻었다.

#### 1. $F, \eta, \eta_1, \eta_2$ 의 $\tau$ 에 대한 거동

Fig. 5에서 5개의 parameter  $a, \lambda, B_i, P_i, T_0/T_i$ 가 고정되었을 때  $F, \eta, \eta_1, \eta_2$ 의  $\tau$ 에 대한 graph가 주어져 있다.

$F$ 는 최소점을,  $\eta$ 는 최대점을 가지며  $\eta_2$ 는 최대점을 가지나 그 증감이 둔하므로 판별하기 힘들며,  $\eta_1$ 은 단조증가한다.

$F$ 가 최소값을 가질 때의  $\tau$ 와  $\eta$ 가 최대값을 가질 때의  $\tau$ 는 두 값이 거의 같으나,  $\eta_2$ 가 최대값을 가질 때의  $\tau$ 값은 그 보다 훨씬 크다. 따라서 제1법칙만을 고려한  $\eta_1$ 이나  $\eta_2$ 의 경향과 제2법칙에 바탕을 둔  $F$ 나  $\eta$ 의 경향과는 다르다는 것을 알 수 있다.

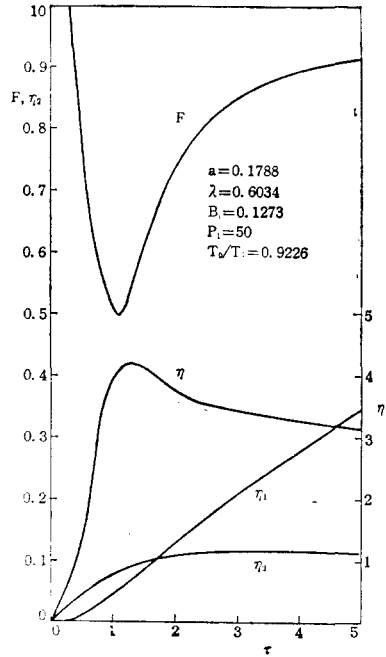


Fig. 5  $F, \eta, \eta_1$  and  $\eta_2$  behavior vs.  $\tau$ .

#### 2. Biot 수의 변화

Fig. 6와 Fig. 7은  $B_i$  수가 변할 때  $F, \eta, \eta_2$ 의 거동이 어떻게 달라지는지를 보여주고 있다.

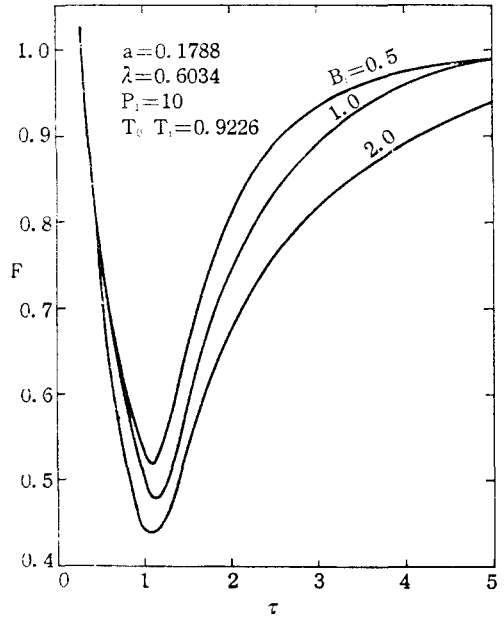


Fig. 6.  $F$  vs.  $\tau$  for various  $B_i$  values

3. 열용량비( $\lambda$ )의 변화

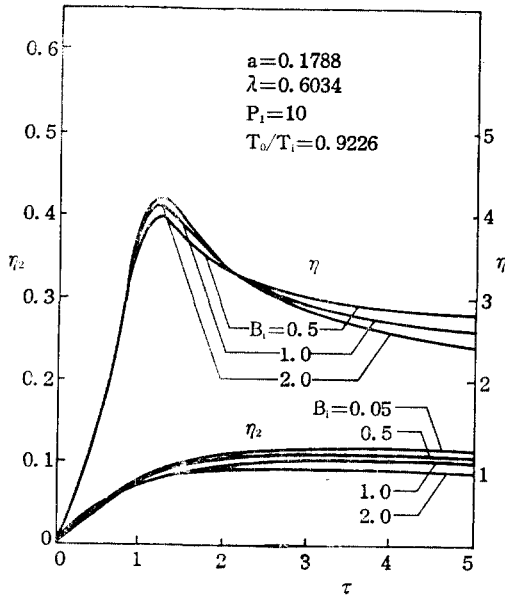


Fig. 7  $\eta$  and  $\eta_2$  vs.  $\tau$  for various  $B_i$  values.

먼저 Fig. 6에서  $F$ 가 최소값이 되는  $\tau$ 의 값은  $\tau=1.1\sim 1.15$ 로서  $B_i$  수에 관계없이 거의 일정하다. 그러나  $F$ 의 최소값은 계산범위내에서  $B_i$  수가 클수록 작다. 이것은 전도저항이 상대적으로 커진다는 의미보다는 오히려 대류저항이 상대적으로 작아져서 저장매체와 작동유체 사이의 온도차가 줄어들기 때문에 비가역성이 상대적으로 더 작아짐을 추정할 수 있다.

Fig. 7은  $\tau=2.1$ 을 경계로 하여  $\tau < 2.1$ 이 일 때는  $B_i$  수가 감소됨에 따라  $\eta$  값이 증가된다. 그리고  $B_i$  수가 작아짐에 따라  $\eta$  곡선이 완만하여짐을 알 수 있다.  $B_i$  수가 작아진다는 것은 대류저항에 비해 전도저항이 상대적으로 작아진다는 뜻이고, 따라서 축열초기에는  $B_i$  수가 작은 값이 큰 값에 비해 상대적으로 대류저항이 크기 때문에  $Q/I$ 가 작고,  $\tau \geq 2.1$ 의 영역에서는  $B_i$  수가 작은 값이 큰 값에 비해 저장매체 내부의 온도분포가 균일하게 되어  $Q/I$ 가 더 커지게 되겠다.

따라서 Fig. 6과 Fig. 7을 종합하면,  $\tau < 2.1$ 범위의 축열시는  $B_i$  수가 클수록 바람직 하겠고  $\tau \geq 2.1$  범위의 축열시는  $B_i$  수가 작을수록 효율적인 축열이 된다고 하겠다.

Fig. 8에서 먼저  $F$ ,  $\eta$ ,  $\eta_2$ 의  $\tau$ 에 대한 경향을 관찰하면  $\tau=1.1$ 부근에서  $F$  및  $\eta$ 는 최소점 및 최대점을 가지며  $\tau \geq 1.1$ 영역에서 그 증감율은 둔화된다. 또  $\eta_2$ 는 수치적인 값으로  $\tau=4$ 는 부근이 최대값으로 되어 있으나  $\tau=4$ 전후  $\eta_2$ 의 증감이 둔화하므로 판단하기 힘들다.

$\lambda$ 에 따른  $F$ 의 경향을 관찰하면  $\lambda$  값이 커질수록  $F$ 의 값이 작아질 것을 알 수 있는데 이것은  $\lambda$ 의 값이 커질수록 작동유체의 상대적인 열용량이 커지고 저장매체에 보다 천천히 열전달되기 때문에 가역적으로 열전달된다고 볼 수 있다.

$\lambda$ 에 따른  $\eta$ 의 경향을 살펴보면  $\lambda$  값이 증가함에 따라 비가역성보다는 축열량이 상대적으로 더 크게 증가하여  $\eta$ 의 값이 커짐을 볼 수 있다.

$\lambda$ 에 따른  $\eta_2$ 의 값은  $\lambda$ 가 증가함에 따라 저장매체의 열전달량은 상대적으로 작아지므로  $\eta_2$ 는 낮아짐을 알 수 있다.

$\lambda$  값의 변화 중에서 특히  $\lambda$ 를 1.0에서 0.1로 변화시킬 때 더 빠른 열전달로 인하여 생성 entropy

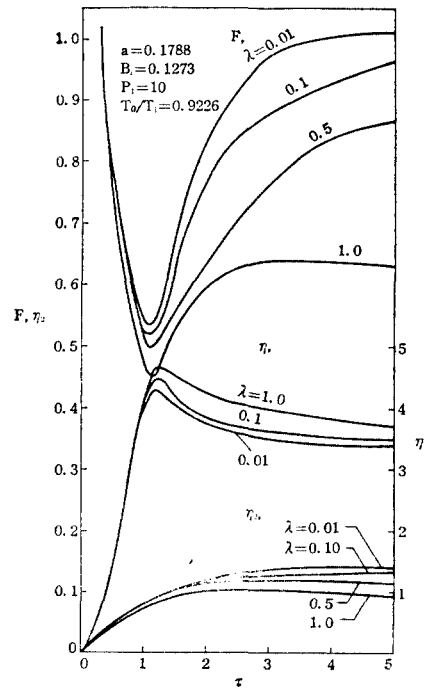


Fig. 8.  $F$ ,  $\eta$ , and  $\eta_2$  vs.  $\tau$  for various  $\lambda$  values

가 더 커지게 되어  $\eta$  가 급격히 떨어짐을 볼 수 있다. 따라서  $\lambda$ 의 값은  $0.1 \leq \lambda < 1.0$ 의 범위가 추천된다.

4. 중횡비의 변화

Fig. 9에서  $\tau$ 에 대한  $F$ ,  $\eta$ ,  $\eta_2$ 의 경향은 III-1, III-2, III-3과 같다.

$P_1$ 에 따른  $F$ 의 경향은  $P_1$ 이 작을수록  $F$ 의 값이 작아져서 비가역성이 작아지는 경향을 보여주고 있다.

$P_1$ 에 따른  $\eta$ 의 경향은  $P_1$ 이 작아질수록  $\eta$ 의 값이 커져서, 비가역성에 의한 entropy 생성이 보다 큰  $P_1$ 값에 비하여 상대적으로 적음을 알 수 있다.

$P_1$ 에 따른  $\eta_2$ 의 경향은  $P_1$ 이 커질수록  $\eta_2$ 의 값이 증가하는 데, 이는 축열조의 형상이 얇아질수록 비가역성이 커지나 축열량은 증가함을 말해준다. 그런데  $P_1$ 의 값이 10보다 크면  $\eta_2$ 의 증가율은 둔화됨을 관찰할 수 있다.

따라서 축열조의 중횡비( $P_1$ )를 10이상으로 하는 것은 축열량은 소폭으로 증가되는데 비하여 비가역 과정으로 인한 생성 entropy가 급격히 증가되어

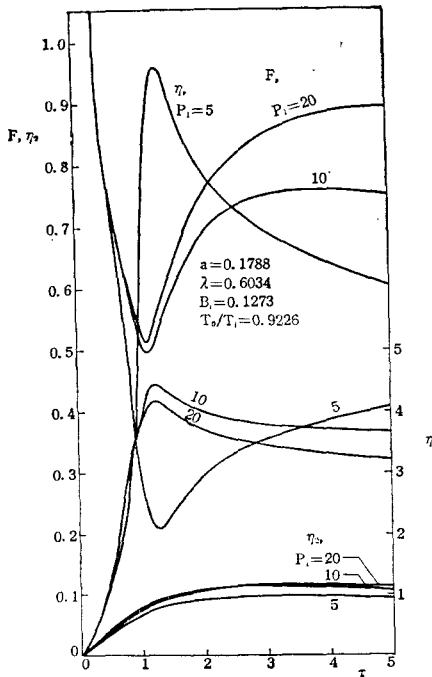


Fig. 9  $F$ ,  $\eta$ , and  $\eta_2$  vs.  $\tau$  for various  $P_1$  Values

바람직하지 못하며 본 계산범위에서는  $5 \leq P_1 \leq 10$ 의 범위가 추천된다. 이것은 참고문헌(6)의 결과와도 유사하다고 하겠다.

5. 입구온도와 초기축열온도(외부온도)의 변화

Fig. 10에  $T_0/T_1$ 가 변할 때  $F-\tau$ ,  $\eta-\tau$ ,  $\eta_2-\tau$ 의 곡선군이 제시되어 있다.

$F-\tau$  곡선군을 살펴보면 두 온도차가 커짐에 따라 ( $T_0/T_1$ 가 작아짐에 따라)  $F$ 의 최소점이  $\tau$ 가 작은 쪽으로 이동됨을 알 수 있는데 이로 미루어 보아 생성 entropy를 최소로 하는 시간을 system의 축열시간으로 잡는다면 입구온도와 외부온도와의 차가 클수록 축열시간을 짧게 하여 주는 것이 유용 Energy의 소산을 줄여주는 방법임을 제시해 준다.

그러나  $\eta-\tau$  곡선군을 보면  $\eta$ 의 최대점이  $\tau$ 에 따라서는 거의 변하지 않고 있음을 볼 수 있으나  $T_0/T_1 = 0.75$ 에서  $T_0/T_1 = 0.9226$ 으로 온도차가 작아짐에 따라  $T_0/T_1 = 0.5$ 에서  $T_0/T_1 = 0.75$ 로 될 때에 비하여 비가역성이 현저히 줄어들어  $\eta$  값이 현저하게 커짐을 알 수 있다.

이상에서  $T_0/T_1$ 를 0.75이상으로 하고, 온도차가 클수록 축열시간을 짧게 조절하는 것이 유용 energy의 손실을 효율적으로 줄이는 방법임을 제시하여 준다.

6.  $Ntu(a)$ 의 변화

Fig. 11은  $a$ 의 변화에 대해  $\eta-\tau$ ,  $F-\tau$  곡선의 변화를 보여주고 있다.

$F-\tau$  곡선군을 살펴보면  $a$ 가 커질수록  $F$ 의 최소점이 늦추어짐을 알 수 있는데 이것은 참고문헌(1)에 제시된 결과와 좋은 대조를 이루고 있다.  $\tau \leq 2$ 의 영역에서  $a$  값이 작을수록  $F$  값이 작아지는데 이것은  $a$  값이 작을수록 작동유체의 enthalpy 변화가 축열 초기에는 주로 작동유체의 내부 energy로 저장되어 저장 매체에 주는 열전달량이 작아져서 보다 가역적으로 열이 전달되기 때문에 생성 entropy가 보다 큰  $a$  값에 비해 작아지는 것으로 볼 수 있겠다.

또한  $F-\tau$  graph의 경향으로 보아 보다 큰 축열시간( $\tau \geq 3.5$ )에서의  $F$ 의 값은  $a$  값이 클수록  $F$  값이 작아져서 생성 entropy가 작아짐을 알 수 있는데 이것은 보다 큰 축열시간에서는  $a$  값이 커짐에 따라 비가역 요소인 작동유체와 저장매체사이의 유효한 온도차가 점차 줄어들어서 비가역성이 줄어들



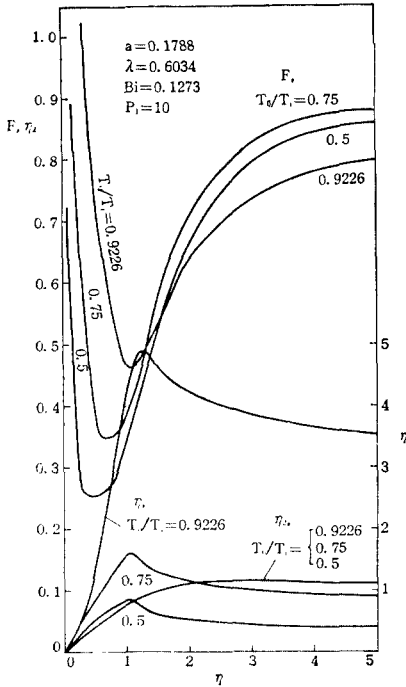


Fig. 10  $F$ ,  $\eta$ , and  $\eta_2$  for Various  $T_0/T_1$  Values.

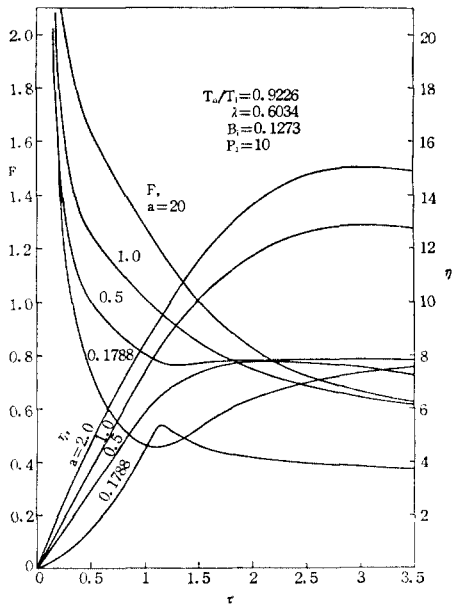


Fig. 11  $F$  and  $\eta$  vs.  $\tau$  for Various  $a$  Values.

을 짐작할 수 있으며 참고문헌(1)의 결과와도 일치한다.

$\eta-\tau$  곡선은  $a$  값이 증가할 때 최대값이 늦추어짐을 볼 수 있고 축열시간을 늘림에 따라 비가역성의 증가보다 축열량의 증가가 현저히 커짐을 볼 수 있다. 그리고  $a$  값을 거의 2배로 증가시키기에 따라  $\eta-\tau$  graph의 경향을 살펴보면  $a$  값이 커짐에 따라 축열량 증가에 따른 비가역성의 증가가 둔화됨을 알 수 있고 특히 축열시간이 길어짐에 따라 그 경향은 현저하다.

7. 작동유체의 속도( $U^*$ )에 따른 변화

Fig. 12은 실제축열조에 응용될 수 있는 결과로서 저장매체, 작동유체 각각의 열적, 유체역학적 property 및 기하학적 형상이 고정되고 작동유체의 속도만 변화될 때  $F-\tau$ ,  $\eta-\tau$ ,  $\eta_2-\tau$ 의 결과를 보여준다. 그러나 유속만 변화시키더라도  $B_i$  수와  $a$  (Ntu)도 함께 변화하므로 table 1에 유속에 따른  $B_i$  수,  $a$  값이 제시되어 있다. 여기서 물성치와 축열조의 크기, 입구온도와 외부온도차 그리고 고정된 값인  $\lambda$ ,  $P_1$ ,  $T_0/T_1$ 의 수치는 참고문헌(7)에서의 값

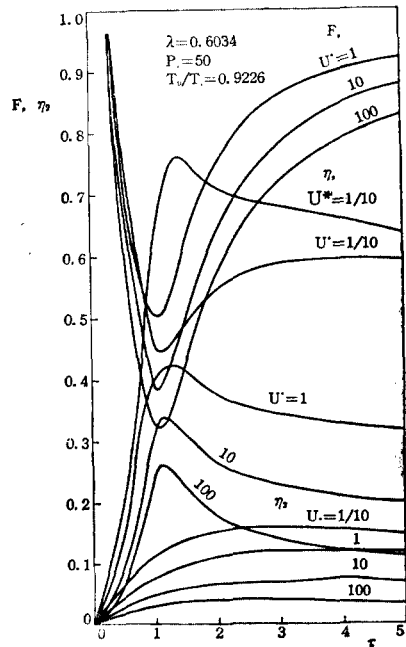


Fig. 12.  $F$ ,  $\eta$ , and  $\eta_2$  vs.  $\tau$  for the change of working fluid velocity.

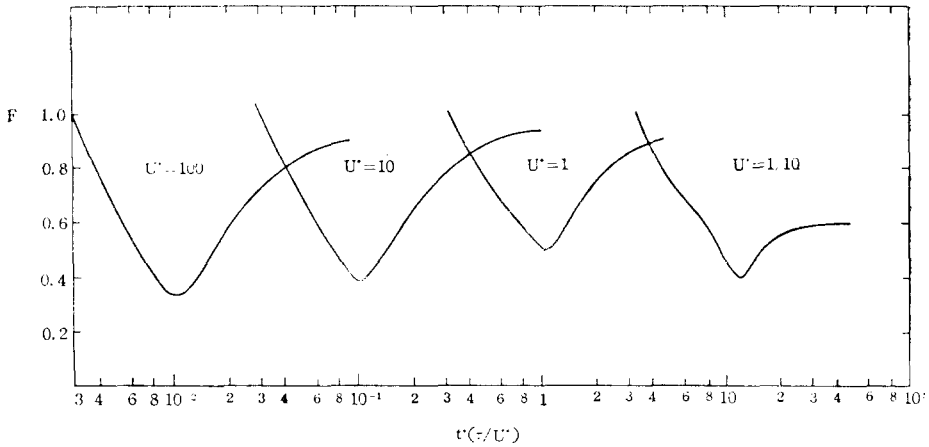


Fig. 13  $F$  vs.  $t^*$  for various velocities of working fluid when thermal properties and geometry are fixed.

Table 1. Variations of  $B_i$  and  $a$  values for various velocity ratios of working fluid.

| $U^*$ | $B_i$                   | $a$                     |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| 0.1   | $0.2018 \times 10^{-1}$ | 0.2833                  |
| 1     | 0.6034                  | 0.1788                  |
| 10    | 0.8032                  | 0.1128                  |
| 100   | $0.5068 \times 10$      | $0.7117 \times 10^{-1}$ |

을 사용하였으며  $B_i$  수,  $a$  는 각각  $\frac{B_i}{B_{i,ref}} = \left(\frac{U}{U_{ref}}\right)^m$ ,  $\frac{a}{a_{ref}} = \left(\frac{U}{U_{ref}}\right)^{m-1}$  의 관계식으로 쓸 수 있었고 Reynolds 수를 계산하여 층류일 때는  $m=0.6$ , 난류일 때는  $m=0.8$ 로 취하여 계산되었다.

먼저  $F-\tau$ 의 graph를 관찰하면  $F$ 가 최소가 되는  $\tau$ 의 값은  $U^*$ 의 값에 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났다. 그러나 주의해야 할 점은 실제의 시간  $t = \frac{L}{U} \tau$ 이므로 속도가  $\frac{1}{10}$ , 10, 100 배 됨에 따라  $F$ 의 최소값에 해당되는 실제시간( $t$ )은 10,  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{100}$ 로 되어 축열조 설계시 축열시간을 유용 energy의 손실을 최소로 하는 시간으로 정한다면 유속이 클수록 축열시간이 짧아야 함을 알 수 있다.

Fig. 13는 위의 사실을 확인하기 위해  $F-t^*(t^* = \tau/U^*)$ 의 graph를 그린 것이다. 동일한 축열시간에 대하여 비교하면  $U^*$ 값이 작을수록 보다 가역적인 열전달이 되어 생성 entropy가 작아졌다.

$F-\tau$ 와  $\eta-\tau$ 곡선의 경향에서  $U^*=0.1$ 에서  $F$ 의 값이 현저하게 작아지므로 ( $\eta$ 의 값이 현저하게 커지므로) 유속은 주어진  $\lambda, P_1, T_0/T_i$ 의 값에 대하여 효율적인 축열을 하기 위해서는  $0.1 \leq U^* \leq 1$ 의 범위가 추천된다.

### Ⅶ. 결 론

다단 유체통로를 가진 현열축열조에서 Biot 수, 열용량비, 총회비, 입구와 초기온도(외부온도)차, Ntu 그리고 작동유체의 속도를 변화시켜 제1법칙에 의한 축열량과 제2법칙에 의한 비가역성을 고려한 효율을 수치해석을 통하여 분석한 결과 본 연구의 계산범위내에서 다음의 결론을 얻었다.

(1) Ntu를 제외한 효율적인 축열조건은 다음과 같이 제시되었다.

$$\text{Biot 수} \begin{cases} \tau < 2.1: \text{Biot 수가 클수록 좋다.} \\ \tau \geq 2.1: \text{Biot 수가 작을수록 좋다.} \end{cases}$$

열용량비( $\lambda$ );  $0.1 \leq \lambda < 1.0$

총회비( $P_1$ );  $5 \leq P_1 \leq 10$

입구, 외부온도비( $T_0/T_i$ );  $T_0/T_i \geq 0.75$

유속비( $U^*$ );  $0.1 \leq U^* \leq 1$

(2) Ntu( $a$ )는  $\tau > 2$ 일 때는 Ntu가 적을수록,  $\tau \geq 3$ 일 때는 Ntu가 클수록 비가역성이 작아졌다. 그러나 비가역성에 대한 축열량은 Ntu가 커질수록 증가하였다. 이 비가역성은 A. Bejan<sup>(1)</sup>이 제시했던 결과와 비교할 때 좋은 대조(A. Bejan<sup>(1)</sup>은 본

결론(2)중  $\tau \geq 3$ 인 경우만 일치함, 즉 Ntu가 클수록 비가역성이 작아진다)가 되겠다.

(3) 따라서 효율적, 합리적인 축열효율로는  $F$  혹은  $\eta$ 가 사용되는 것이 바람직하다, 또 앞의 (1)~(3)의 결론은 본 계산범위에서 주어졌으며 강조되는 설계조건이 달라진다면 그 경향은 비슷하겠으나 추천되는 parameter들의 값 및 그 범위가 달라질 수도 있겠다.

(4) 본 연구를 통하여 효율적인 축열시스템을 설계하기 위한 기초자료가 제시되었으며 아울러 비가역성을 고려한 현열 축열조의 최적설계를 위한 자료로 이용되리라 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. Bejan, A., "Two Thermodynamic Optima in the Design of Sensible Heat Units for Energy Storage," ASME J. of Heat transfer, Vol. 100, pp. 708—712, 1978.
2. Schultz, W. and Bejan, A., "Exergy Conservation in Parallel Thermal Insulation Systems," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, pp. 335—340, 1983.
3. Bejan, A. and Smith, J.L. Jr, "Thermodynamic Optimization of Mechanical Supports for Cryogenic apparatus," Cryogenics, March, pp. 158—163, 1974.
4. Bejan, A., "General Criterion for Rating Heat Exchanger Performance," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 655—658, 1978.
5. Bejan, A., Entropy Generation through Heat and Fluid Flow, Wiley, 1982.
6. Won, Sungpil and Lee, Geunsik, "Effectiveness of a Thermal Energy Storage System Using a PCM with Fins," UOU Report, Vol. 16, No. 2, 1985.
7. Lee, Geunsik, "Perturbation Analysis of the Axial Conduction Effect of the Transient Temperature Distribution in the sensible Heat storage Unit," MS Thesis of S.N.U., 1982.
8. Schmidt, F.W., Szego, J., and Laananen, D.H., "Design Optimization of a single Fluid, solid sensible Heat Storage Unit," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 99, pp. 174—179, 1977.
9. Schmidt, F.W., Szego, J., "Transient Response of Solid Sensible Heat Thermal Storage Units-Single Fluid," ASME J. of Heat Transfer, August, pp. 471—477, 1976.
10. Griggs, E.I., Pitts, D.R., and Humphries, W.R., "Transient Analysis of a phase Change Material," ASME J. of Heat Transfer 74-WA/MT-21, pp. 1—9, 1974.
11. 노승탁, "열역학의 기본법칙과 에너지의 효율적 이용 (II)," 대한기계학회지, 제23권 1호 pp. 30—36, 1983
12. 노승탁, "열역학의 기본법칙의 재공식화", 대한기계학회지, 제23권 5호, pp. 335—343, 1983.
13. 정평식, 김성진, 노승탁, "열전달에 의한 비가역성을 고려한 열기관 사이클 해석", 대한기계학회 1983년 추계학술대회 초록집, pp. 270—273, 1983.
14. Ahern, J.E., The Exergy Method of Energy Systems Analysis, John Wiley & Sons, 1980.
15. Van Wylen, G.V. and Sonntag, R.E., Fundamentals of classical Thermodynamics, Wiley, 1976.
16. Cravalho, E.G. and Smith, J.L. Jr. Engineering Thermodynamics, Pitman, 1981.
17. Zemansky, M.W., Dittman, R.H., Heat and Thermodynamics, McGraw-Hill, 1981.
18. Rosenberg, D.U., Methods for the Numerical Solution of Partial Differential Equations, Elsevier, 1969.
19. Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, 1980.