

태양열에 의한 냉방 및 난방시스템의 성능향상 (Ⅲ)[†]

— 성층화계수의 예측을 위한 1차원 해석모델의 개발 —

The Improvement of the Performance of Solar Cooling and Heating Systems (Ⅲ)

— Development of One Dimensional Analytic Model for the Evaluation of Stratification Coefficients —

유재경*, 노승탁**, 이준식**, 정석호**
J. K. Yoo, S. T. Ro, J. S. Lee, S. H. Chung

ABSTRACT

A one dimensional analytic model for the prediction of the stratification coefficient of a liquid-based solar heating system is developed. The stratification coefficient, K_s , is defined as the ratio of the actual useful energy gain to the energy gain that would be achieved if there were no thermal stratification in the storage tank. Previous studies incorporated only collector-side effects, but in this study both the collector and load-side effects are included for the overall performance evaluation.

기 호 설 명

〈로마문자〉

a : 축열조의 변경
 A_c : 축열조의 단면적
 A_s : 축열조의 총면적
 B : 단위시간당 부하
 C_n : 유체순환비
 C_s : 유체의 비열
 E : 열교환기효율
 F_R : 시스템열제거계수
 H : 축열조의 높이
 k : 유체의 열전도율
 K_s : 성층화계수
 M : 전도대류열전달비
 \dot{m}_c : 집열기측 질량유속

\dot{m}_L : 부하측 질량유속
 P : 단위면적 단위시간당 에너지흡수율 혹은 축열조 접수길이
 R : 질량유속비 (\dot{m}_L/\dot{m}_c)
 t : 시간
 t_s : 집열기 작동시간
 T : 온도
 T_i : 축열조 출구의 유체온도
 T_{LR} : 부하측 유입유체온도
 T_m : 집열기 최고온도
 T_s : 축열조 평균온도
 T_{top} : 축열조 최고 높이의 유체온도
 T_∞ : 축열조 주위의 온도
 U_L : 집열기와 대기 사이의 총열전달계수
 U_S : 축열조와 대기 사이의 총열전달계수
 X : 축방향의 좌표

[†] 이 논문은 1986년도 문교부 자유과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

* 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

<회람문자>

- α : 열확산 계수
- β : 유체의 체적팽창계수
- ν : 동점성 계수
- ψ : 무차원 온도
- ρ : 유체의 밀도
- τ : 무차원 시간
- θ : 무차원 온도
- ζ : 무차원 좌표

<하첨자>

- s : 축열조에 관한 양
- 1 : 집열기루프에 관한 양
- 2 : 부하루프에 관한 양

1. 서 론

태양열에 의한 냉난방에 있어서 집열기루프 및 부하루프에서의 질량유입이 있는 축열조의 온도 성층화는 전체 시스템의 성능에 대단히 큰 영향을 미친다.

축열조의 열적 성층화에 관한 수학적인 해석은 Close¹⁾에 의해 처음으로 이루어졌다. 그 후 계산시간을 줄이기 위하여 간단한 1차원 모델을 이용한 TRNSYS²⁾ 등이 사용되었다. 이러한 수치적인 방법에 대하여 완전 성층화를 가정한 1차원 해석해가 Phillips³⁾, Den-Braven⁴⁾ 등에 의해 제안되었다.

Phillips 등은 축열조의 성층화현상과 시스템의 순간적인 성능을 예측하는 이론적인 모델을 제시하였다. 그 결과 축열조가 완전히 혼합된 상태에서 얻어지는 에너지와 성층화가 이루어졌을 때의 에너지의 비로써 성층화 계수라는 개념을 제시하였다. 그리하여 해석적인 방법으로서 성층화계수가 두 개의 무차원 변수, E 와 M 에 의해 결정됨을 알아냈다.

또한 질량, 운동량, 에너지의 보존방정식의 해를 구하여 더욱 실제에 가까운 해석을 하려는 연구도 있었다. Miller⁵⁾, Hess⁶⁾ 등은 유선함수 와도 방법으로 벽전도 효과를 고려한 해석을 하였으며, Cabli⁷⁾, Guo⁸⁾ 등은 2차원 유선함수-와도방법으로 축열, 방열 해석을 하

였다. 그러나 이러한 방법은 경계조건 설정의 난점으로 인하여 일반적인 수치해석보다 효과적이지 못하다고 알려졌다. Hyun⁹⁾은 바닥으로부터의 질량유입이 있을 경우, 성층화 과정이 단축된다는 이론을 수치해석적으로 입증하였으며, 바닥으로부터의 질량유입량을 적절히 조절함으로써 대단히 안정된 성층화 유체를 만들 수 있었다.

본 연구에서는 완전성층화를 가정한 1차원 해석해를 유도하고 이를 유한차분방법의 수치해와 비교하여 1차원해석의 타당성을 검증하였다. 또한 질량유입에 따른 유동이 축열조 내부의 성층화 과정에 어떻게 영향을 미치며, 이들 질량유입량의 크기, 이들의 비에 의한 유동장, 온도장의 시간에 따른 변화를 알아 보았다. 한편 1차원해석에서 유도된 몇가지 무차원 변수들이 전체의 축열조의 성층화와 성능에 어떻게 영향을 미치는지를 고찰하였다.

2. 해석적 연구

본 연구에서의 태양열 냉난방시스템은 다음과 같다.

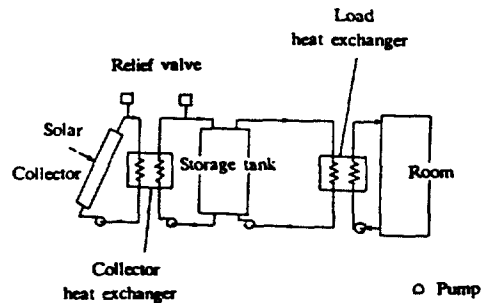


Fig.1 Schematic diagram of solar system

입구, 출구를 가지는 축열조에 있어서 에너지 균형은 다음과 같다.¹⁾

$$MC_S \frac{dT_S}{dt} = Q_U - Q_L - U_S A_S (T_S - T_\infty) \dots (1)$$

여기서 Q_U 는 잘 알려진 Hottel, Whiller, Bliss model로써 표현된다.¹⁰⁾

$$Q_U = F_R' A [P - U_L (T_i - T_\infty)] \dots (2)$$

$$Q_L = \dot{m}_L C_S [T_{top} - T_{LR}] \dots\dots\dots (3)$$

축열조의 성층화 정도를 나타내는 방법으로 서 Phillips에 의해 소개된 시스템 성층화계수가 있다. 즉 성층화계수 K_s 는 실제로 얻을 수 있는 에너지와 축열조 내부에 열적인 성층화가 존재하지 않을 때의 에너지의 비이다.

$$K_{S1} = \frac{F_R' A [P - U_L (T_i - T_\infty)]}{F_R' A [P - U_L (T_S - T_\infty)]} \dots\dots\dots (4)$$

동일한 개념으로 부하루프가 존재할 경우 이 때의 성층화계수를 다음과 같이 정의한다.

$$K_{S2} = \frac{\dot{m}_L C_S [T_{top} - T_{LR}]}{\dot{m}_L C_S [T_S - T_{LR}]} \dots\dots\dots (5)$$

2.1 해석적 모델 (Analytic model)

축열조 높이를 H , 윗 부분에서부터의 위치를 X 라하고, 1차원 유동으로 가정하면, 탱크 내부의 온도분포 $T(X, t)$ 는 다음의 편미분 방정식으로 표시한다.

$$\frac{MC_S}{H} \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{m}_C C_S \frac{\partial T}{\partial X} - \dot{m}_L C_S \frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} \left(k A_C \frac{\partial T}{\partial X} \right) - P U_S (T - T_\infty) \dots\dots\dots (6)$$

일반적으로 축열조는 충분히 단열되어 있으므로 윗 식의 마지막 항은 무시될 수 있다. 따라서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{MC_S}{H} \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{m}_C C_S \frac{\partial T}{\partial X} - \dot{m}_L C_S \frac{\partial T}{\partial X} = k A_C \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \dots\dots\dots (7)$$

이 방정식이 만족해야 할 경계조건은 다음과 같다.

$$-k A_C \frac{\partial T}{\partial X} (0, t) = \dot{m}_C C_S [E(T_m - T(H, t)) - (T(0, t) - T(H, t))] \dots\dots\dots (8)$$

$$-k A_C \frac{\partial T}{\partial X} (H, t) = \dot{m}_L C_S [T_{LR} - T(H, t)] \dots\dots\dots (9)$$

해석의 일반화를 위하여 다음과 같은 무차원 변수들을 도입한다.

$$C_n = \frac{(\dot{m}_C - \dot{m}_L) C_S t_S}{M C_S} \dots\dots\dots (10)$$

$$M = \frac{k A_C}{(\dot{m}_C - \dot{m}_L) C_S H}, \quad M_1 = \frac{k A_C}{\dot{m}_C C_S H}$$

$$M_2 = \frac{k A_C}{\dot{m}_L C_S H} \dots\dots\dots (11)$$

$$E = \frac{F_R' A U_L}{\dot{m}_C C_S}, \quad R = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_C} \dots\dots\dots (12)$$

$$\tau = \frac{t}{t_S}, \quad \zeta = \frac{X}{H} \dots\dots\dots (13)$$

여기서 C_n 은 축열조내의 전 유체가 시스템 내를 순환하는 횟수이며, M 은 축열조내 유체의 전도열전달과 대류열전달의 비이다. 그리고 E 는 집열기 열교환기루프의 효율이며, R 은 부하루프와 집열기루프의 질량유속의 비이고, τ, ζ 는 각각 무차원시간 및 거리이다.

위 무차원변수들을 도입하면 식(7)을 다음과 같이 무차원화하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{C_n} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial T}{\partial \zeta} - M \frac{\partial^2 T}{\partial \zeta^2} = 0 \dots\dots\dots (14)$$

위 방정식의 무차원된 경계조건은 다음과 같다.

$$T(0, \tau) - M_1 \frac{\partial T}{\partial \zeta} (0, \tau) - (1 - E) T(1, \tau) = E T_m(\tau) \dots\dots\dots (15)$$

$$T(1, \tau) - T(0, \tau) + M_2 \frac{\partial T}{\partial \zeta} (1, \tau) + \frac{B}{\dot{m}_L C_S} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

지배방정식이 선형이므로 $T(\zeta, \tau)$ 는 집열기루프만을 고려한 $T_1(\zeta, \tau)$ 과, 부하루프만을 고려한 $T_2(\zeta, \tau)$ 로부터 중첩의 원리(Principle of superposition)를 이용해서 구한다.

위의 중첩의 원리를 Fig. 2에 나타내었다. $T_1(\zeta, \tau)$ 에 대한 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{C_n} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} + \frac{\partial T_1}{\partial \zeta} - M \frac{\partial^2 T_1}{\partial \zeta^2} = 0 \dots\dots\dots (17)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial \zeta} (1, \tau) = 0 \dots\dots\dots (18)$$

$$T_1(0, \tau) - M_1 \frac{\partial T_1}{\partial \zeta} (0, \tau) - (1 - E) T_1(1, \tau) = E T_m \dots\dots\dots (19)$$

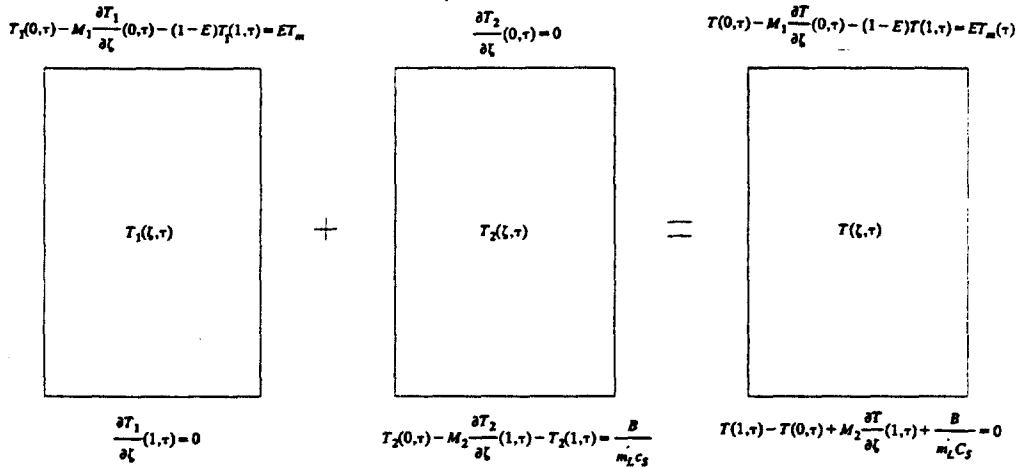


Fig. 2 Superposition boundary condition

해의 형태는 다음과 같이 가정한다.

$$T_1(\zeta, \tau) = T_m - \psi(\zeta) [T_m - T_S(\tau)] \dots\dots (20)$$

여기서 평균온도 T_s 는 다음과 같이 정의된다.

$$T_S(\tau) = \int_0^1 T(\zeta, \tau) d\zeta \dots\dots\dots (21)$$

식(17)을 ζ 에 관하여 0에서 1까지 적분하여 정리하면 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{1}{C_n} \frac{dT_s}{d\tau} = E\psi(1) (T_m - T_s) \dots\dots\dots (22)$$

식(20)과 식(22)를 식(17)에 대입하면 다음과 같다.

$$E\psi(1) (T_m - T_s) + M \frac{d^2\psi}{d\zeta^2} (T_m - T_s) = \frac{1}{C_n} (\psi - 1) \frac{dT_m}{d\tau} \dots\dots\dots (23)$$

대부분의 경우 C_n 은 매우 큰 값을 나타내므로, 식(23)의 오른쪽 항은 무시될 수 있다. 이를 정리하면 다음과 같은 상미분 방정식이 된다.

$$M \frac{\partial^2 \psi}{\partial \zeta^2} - \frac{d\psi}{d\zeta} + \left[E\psi(1) + (M - M_1) \frac{d\psi}{d\zeta}(0) \right] = 0 \dots\dots\dots (24)$$

$$\frac{d\psi}{d\zeta}(1) = 0 \dots\dots\dots (25)$$

$$-M_1 \frac{d\psi}{d\zeta}(0) + \psi(0) = (1 - E)\psi(1) \dots\dots (26)$$

성층화계수의 정의에서부터 $K_{s1} = \psi(1)$ 임을 알 수 있다.

성층화계수 $K_{s1}(E, M)$ 은 다음 방정식의 근이 된다.

$$2(1 - E) \beta e^\alpha + e^{-\beta} [(\alpha - \beta) - M_1(\alpha^2 - \beta^2)] - e^\beta [(\alpha + \beta) - M_1(\alpha^2 - \beta^2)] = 0 \dots\dots\dots (27)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{1 - (M - M_1)}{2M} \dots\dots\dots (28)$$

$$\beta = \frac{(1 - (M - M_1) - 4EMK_{s1})^{1/2}}{2M} \dots\dots\dots (29)$$

만일 M 이 매우 작다면, 위 식(27)은 다음과 같이 된다.

$$K_{s1} = \frac{\ln \frac{1}{(1 - E)}}{\left[1 + M \ln \frac{1}{(1 - E)} \right] E} \dots\dots\dots (30)$$

$T_2(\zeta, \tau)$ 에 관한 해의 형태를 다음과 같이 가정한다.

$$T_2(\zeta, \tau) = T_{LR} - \phi(\zeta) [T_{LR} - T_S(\tau)] \dots\dots (31)$$

다음과 같은 지배방정식과 경계조건이 얻어진다.

$$\frac{1}{C_n} \frac{\partial T_2}{\partial \tau} + \frac{\partial T_2}{\partial \zeta} - M \frac{\partial^2 T_2}{\partial \zeta^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (32)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \zeta}(0, \tau) = 0 \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$T_2(0, \tau) - M_2 \frac{\partial T_2}{\partial \zeta}(1, \tau) - T_2(1, \tau) = \frac{B}{\dot{m}_L C_S} \quad \dots\dots\dots (34)$$

이 식들을 정리하면 다음과 같은 미분방정식이 얻어진다.

$$M \frac{\partial^2 \psi}{\partial \zeta^2} - \frac{d\psi}{d\zeta} - \left\{ \psi(0) - \left(\frac{1}{M_2} + \frac{1}{M} \right) \psi(1) \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$\frac{d\psi}{d\zeta}(0) = 0 \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$M_2 \frac{d\psi}{d\zeta}(1) = -\psi(1) \quad \dots\dots\dots (37)$$

따라서 다음 방정식을 만족시키는 α, β 에서 성장화계수 K_{s2} 를 구한다.

$$(\alpha + \beta) e^{-\alpha} + M_2(\alpha^2 - \beta^2) e^{-\alpha} = 0 \quad \dots\dots\dots (38)$$

부하측 루프에서 K_{s2} 는 다음과 같이 된다.

$$K_{s2} = \frac{R}{1-R} \quad \dots\dots\dots (39)$$

3. 1차원해석모델의 검증

이상에서 해석된 1차원해석모델을 검증하기 위하여 2차원 수치해석적인 연구를 하였다. 본 연구에서의 수치해석모델을 Fig.3에 나타내었다.

3.1 지배방정식

유체는 비압축성, 뉴우튼 유체이고 물성치는 온도에 따라 일정하며, 유동은 2차원, 층류로 가정한다. 온도변화에 따른 밀도 변화로 생기는 부력항에 Boussinesq 근사를 적용하면 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (40)$$

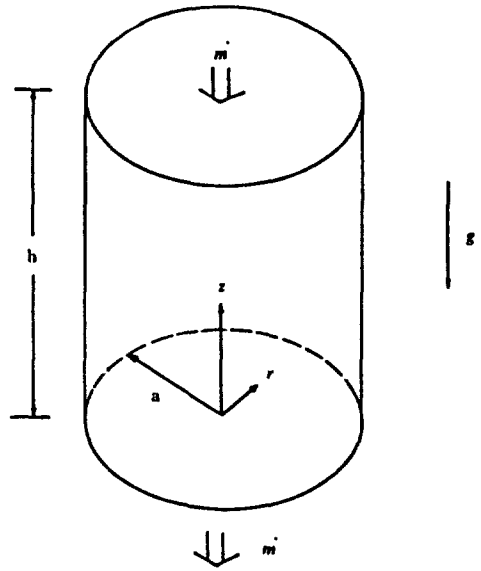


Fig.3 Schematic diagram of storage tank

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (42)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + g\beta(T-T_o) \right\} \quad \dots\dots\dots (43)$$

여기서, $\nu, \rho_o, \beta, \alpha$ 는 각각 유체의 동점성계수, 기준밀도, 체적열팽창계수 및 열확산계수이다.

3.2 계산방법

본 연구에서는 좌우 대칭되는 한 부분에 대하여 Fig.4에 나타낸 경계조건을 적용하여 비균일한 19×29 격자계에서 유한차분법으로 해석하였다.

유체의 입구 및 출구 부분에서 큰 속도 및 온도 구배를 해석하기 위하여 정밀한 격자계를 사용하였다. 속도에 대하여는 엇물림격자

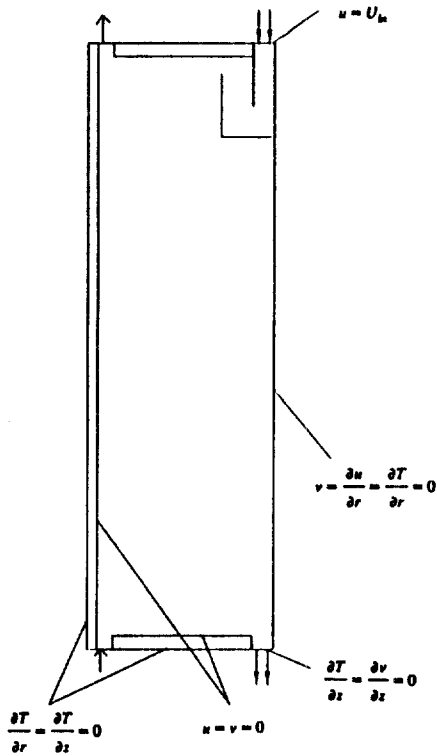


Fig. 4 Problem coordinates and boundary condition

계를 사용하였고, SIMPLE Algorithm으로 연속방정식을 만족시켰으며, 격자 경계면에서의 값은 Power-law Scheme으로 구하였다. 시간에 대한 차분은 Fully Implicit 방법을 써서 시간 진행량에 관계없이 수렴이 가능하게 하였다.

온도에 관한 초기조건은 축열조 주위의 공기와 같은 상온으로 하였으며, 입구에서의 경계조건은 온도가 미리 정하여졌다고 보았으며 탱크 중심부에서는 좌우대칭조건을 사용하였다. 그리고 아래 위 좌우 벽에서는 충분히 단열되었다고 가정하여 단열조건을 사용하였다. 속도에 관한 경계조건은 아래 위 왼쪽 벽에서는 점착조건을 이용하였고, 입구에서는 유체가 일정한 속도로 유입된다고 보았다. 역시 중심부에서는 대칭조건이 사용되었다.

수렴조건은 속도 구배 및 온도 구배가 큰 확산기 출구에서의 한점에서 모든 종속 변수의 변화가 종속변수의 10^{-3} 배 이하가 되도록 하

였다. 시간 증분은 0.1~3초까지 점진적으로 증가시켰다.

4. 결과 및 검토

수치계산상의 결과 중 대표적으로 질량유속 비 $R=0.08$ 인 경우에 대한 유선 및 등온선을 Fig.5에 나타내었다.

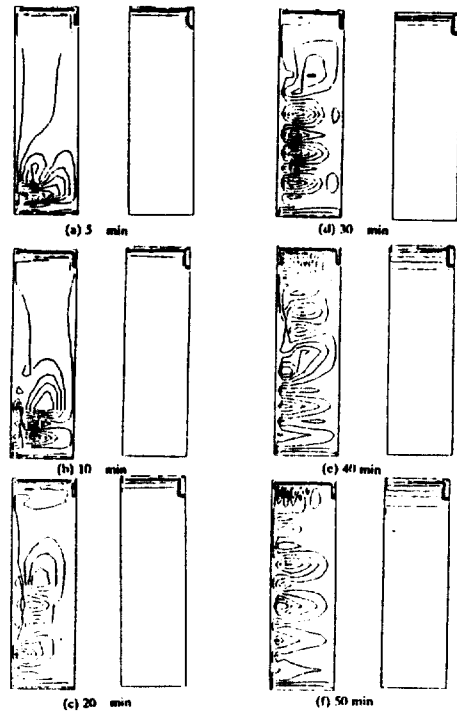


Fig. 5 Streamlines and isotherms for $R=0.08$

초기에는 확산기에서 나온 고온의 유체가 등온으로 채워진 이보다 낮은 온도의 유체에 의해 부력을 받아 윗면의 출구쪽으로 빠져나가고 나머지 대부분의 유체는 역방향의 부력을 이기며 아래면으로 이동하여 아래쪽의 1/3 되는 부분에서 부하쪽에서 들어오는 저온의 유체와 섞여 약 2개의 와류를 형성한다. 시간이 진행됨에 따라 아랫 부분에 생겼던 약한 와류들은 중심으로 이동하여 3~5개의 미약한 와류들이 아래 위를 제외한 전 평면에 존재하게 된다. 초기에 탱크 윗면에만 옆방향으로 성

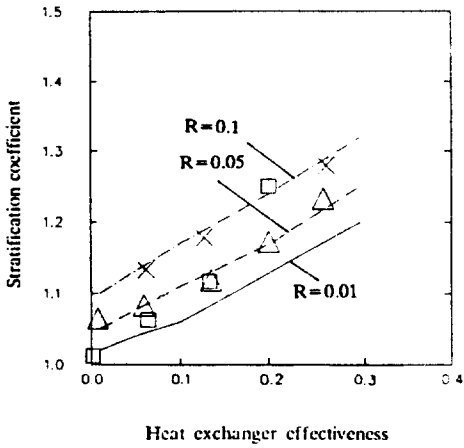


Fig. 6 Effect of effectiveness on stratification coefficient

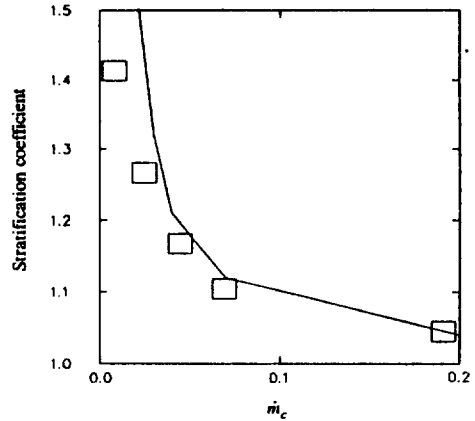


Fig. 8 Effect of \dot{m}_c on stratification coefficient

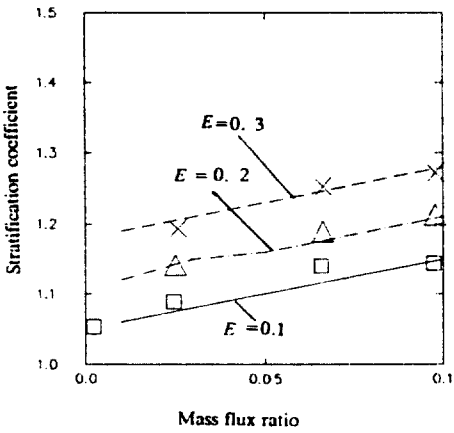


Fig. 7 Effect of mass flux ratio on stratification coefficient

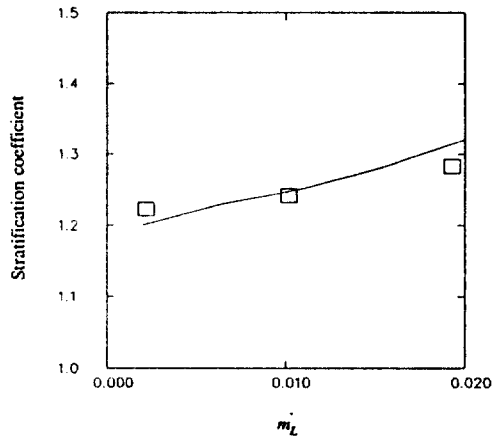


Fig. 9 Effect of \dot{m}_L on stratification coefficient

층화된 유체가 오랜 시간이 지남에 따라서 조금씩 아래로 이동하여 약 50분후에는 탱크 윗면 1/10 정도까지 고온의 유체가 차지하게 되어 가장 이상적인 성층화된 모양을 볼 수 있다. 이 경우의 온도장은 고온의 유체가 탱크 윗면으로 유입되고 윗면의 출구로 일부가 배출되며 아랫면으로 저온의 유체가 유입되고 다른 아랫면으로 빠져나가므로 대단히 안정된 성층화 된 현상이 일어났다.

Fig. 6, 7, 8, 9에는 수치해석과 이론해석으로 얻어진 성층화계수를 시스템상수인 E 와 R 의 변화에 따른 비교를 나타낸 것이다. 이론해석

에서는 식(4)와 식(5)에서 구해진 성층화계수의 중첩법에 의한 합으로써 구했고, 수치해석적으로는 해석된 온도장이 식(1)을 만족시키는 방법으로서 성층화계수를 예측하였다. 실선 및 점선은 1차원해석모델의 결과이고, 기호로 나타낸 것은 2차원 수치해석의 결과이다.

Fig. 6은 열교환기 효율 E 에 대한 성층화계수의 영향을 나타낸다. 질량유속비 R 이 커짐에 따라 성층화계수도 커져서 R 에 따른 성층화계수값이 거의 선형적으로 커져간다.

Fig. 7은 질량유속비 R 에 대한 결과이다.

성층화계수는 E 값이 커짐에 따라 증가함을 볼 수 있으나 Fig.8의 E 값에 따른 변화보다는 그 변화의 폭이 상당히 감소한 결과이다. 즉 성층화계수는 시스템상수 중 특히 E 값에 따라 좌우됨을 알 수 있다.

Fig.8에서는 입구의 유속 \dot{m}_c 가 성층화계수에 어떻게 영향을 미치는 지를 알 수 있다. 즉 \dot{m}_c 가 커지면 오히려 성층화가 파괴되어서 성층화계수가 감소함을 알 수 있다.

Fig.9에서는 부하측 질량유속 \dot{m}_L 의 성층화계수에 대한 영향을 알 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 부하의 질량유속이 커지면, 성층화계수는 완만히 증가함을 알 수 있다.

Fig.10은 질량유속비 R 의 변화에 따른 $r/a = 0.5$ 인 곳에서의 높이 방향의 온도분포를 나타낸다. $R = 0.08$ 인 경우에는 시간이 지남에 따라서 온도장이 반경방향으로 거의 일정하게 유지되어 비교적 안정된 모양을 보여주고 있다.

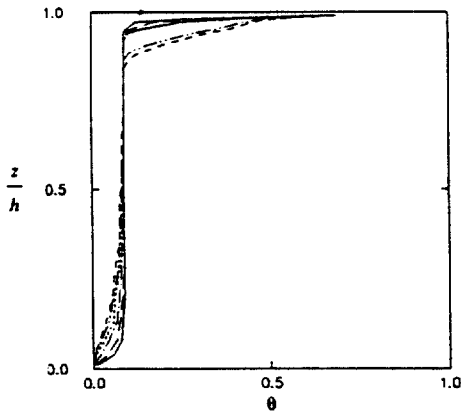


Fig.10 Temperature profiles along $r/a = 0.5$ for $R = 0.08$

Times are (a) — 5.0 min (b) - - - 10.0 min
(c) - · - · 20.0 min (d) · · · · 30.0 min
(e) - · - · 40.0 min (f) - - - 50.0 min

Fig.6~9에 나타난 수치해석의 결과는 이론적 예측과 비교하여 상당히 유사한 결과를 얻었다. 다만 Fig.6 및 7에서 질량유속비 R 이 아주 작은 경우, 이론해석과 수치계산상의 오차가 크게 벌어졌다. 이는 주로 높은 유입질

량유속으로 인하여 전반적으로 유동이 교란되어, 수치계산상의 예측이 1차원적인 해석을 만족시키지 못했기 때문이라 생각된다. Fig.8에서도 이론해석상의 유입유속이 커지면 성층화계수가 감소한다는 예측이 수치계산상에서도 잘 나타남을 알 수 있다. Fig.9의 부하측 질량유속의 성층화계수에 대한 영향에서도 두 가지 해석의 결과가 잘 일치됨을 알 수 있다.

5. 결 론

축열조의 유동 및 열전달 특성과 성층화과정에 대하여 이론해석하고 수치적으로 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 질량유속비 R 이 작을수록 유입유동에 의한 교란으로 성층화과정에 도움이 되지 못했다. 질량유속비 R 이 적절할 때 온도장의 성층화와 유동의 안정을 가져왔다.
2. 열교환기효율 E 가 클수록 성층화계수는 급격히 증가함을 알 수 있었다.
3. 성능예측에 있어서 이론해석에 의해 구해진 성층화계수는 수치해석의 결과와 비교하여 비교적 잘 일치했다.

후 기

이 연구는 문교부 자유과제 학술연구조성비에 의하여 이루어진 것이며 이에 관해 지원을 해주신 문교부에 감사사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Close, D.J., 1967 A Design Approach for Solar Processes, *Solar Energy*, Vol.11, pp.112-122.
2. Klein, S.A. et al., 1984, TRNSYS, a Transient Simulation Program, *Engineering Experiment Station Report #38*, University of Wisconsin, Madison.
3. Phillips, W.F. and Dave, R.N., 1982, Effects of Stratification on the Performance of

- Liquid-Based Solar Heating Systems, *Solar Energy*, Vol.29, No.2, pp.111-120.
4. DenBraven, K., 1986, An Analytic Model of Stratification for Liquid-Based Solar Systems, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.108, pp.105-108.
 5. Miller, C.W., 1977, Effects of a Conducting Wall on a Stratified Fluid in a Cylinder, *Heat Transfer and Thermal Control Systems, Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol.60, pp.190-208.
 6. Hess, C.F., 1982, An Experimental and Numerical Study on the Effect of the Wall in a Thermocline-Type Cylindrical Enclosure -I, *Solar Energy*, Vol.28, pp.145-152.
 7. Cabell, A., 1977, Storage Tanks-A Numerical Experiment, *Solar Energy*, Vol.19, pp.45-54.
 8. Guo, K.L. and Wu, S.T., 1985, Numerical Study of Flow and Temperature Stratification in a Liquid Thermal Storage Tank, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.107, pp.15-20.
 9. Hyun, J.M., 1986, Adjustment of a Thermally-stratified Fluid in a Container with Vertical Through-flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.29, no.10, pp.1487-1493.
 10. Hottel, H.C. and Whiller, A., 1955, Evaluation of Flat-plate Solar Heat Collectors, *Proceedings of Conference on the Use of Solar Energy*, Vol.2, p.74, University of Arizona, Tucson.