

<論 文>

태양연못안의 각 층의 거동에 관한 연구

박 희 용* · 임 경 빈**

(1986년 12월 18일 접수)

A Study on the Behaviors of Several Layers in a Solar Pond

Hi Yong Pak and Kyung Bin Lim

Key Words: Solar Pond(태양연못), Double Diffusive Thermohaline System(이중확산 열-염분계), Mixed Layer(혼합층), Diffusive Layer(확산층), Salt Concentration(소금농도)

Abstract

The behaviors of layers developed in a solar pond were studied by experimental and analytical methods.

An experimental solar pond heated from below was constructed and operated at the net heat fluxes of 110 and 160W/m² and at the initial salt concentration gradients of 18.2, 27.3 and 36.4% /m. The thicknesses, growth rates, temperature and salt concentration in the top and the bottom mixed layers, the diffusive layer and the upper and the lower interfacial boundary layers were measured. The shadowgraph technique was used in order to observe all layer formation and an electroconductivity-temperature probe consisting of four electrodes was fabricated and used in measuring the salt concentration.

Based on the experimental results, a model for the solar pond was developed and the governing equations and the assumptions were established. The governing equations were solved by the numerical method. The calculated results obtained from the analysis were compared with the experimental results.

기 호 설 명

C_0 : 정적 비열
 g : 중력가속도
 H : 계높이
 k : 열전도계수
 K : 용기 상수

q'' : 단위 바닥면적당 정미열유속
 S : 소금농도
 t : 시간
 T : 온도
 Z : 수직방향좌표
 β : 체적팽창계수
 Δ : 경계층사이의 온도 혹은 농도차
 δ : 높이

* 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

ρ : 밀도

하침자

avg : 평균값

b : 하부혼합층

d : 확산층

p : 열의 침투

t : 상부혼합층

w : 실험용기의 벽면

1. 서 론

태양연못이란 자연 또는 인공연못에 아랫방향으로 갈수록 소금의 농도구배를 크게 만들어 태양으로 부터의 복사에너지가 하부에 도달하여 하부유체의 온도가 상승하여도 소금농도구배에 의한 대류억제작용으로 고온의 유체를 하부에 머물게 하여 다량의 에너지가 축열되는 것을 이용한 장치이다. 이러한 태양연못을 인공적으로 만들어 태양열을 이용하려는 생각은 처음 이스라엘에서 시작하여 1970 년대의 석유에너지 파동 이후 세계각국의 여러학자들에 의하여 많은 연구의 대상이 되고 있다^(1,2).

태양연못의 소금성층된 유체가 아래에서 가열될 때 계 내에서는 온도구배와 농도구배가 동시에 존재한다. 이와같이 열과 소금의 확산에 의하여 특징지어지는 계를 이중확산 열-염분계(double diffusive thermohaline system)라 한다. 태양연못과 같은 이중확산 열-염분계에 대하여 동력원으로서의 이용가능성⁽³⁻⁵⁾과 태양연못을 구성하는 상·하부혼합층, 상·하부경계층 및 확산층에 관련된 각 층의 거동에 대한 현상을 규명하고자 많은 연구⁽⁶⁻¹⁰⁾가 수행되어 왔지만 온도구배와 농도구배가 동시에 존재하는 복잡성 때문에 이 현상에 대한 완전한 규명은 아직 얻지 못하고 있다. 특히 다량의 에너지를 축열하기 위하여는 태양연못을 구성하는 상하부혼합층과 확산층을 안정하게 유지시키는 것이 중요하기 때문에 이를 입증하기 위하여는 열유속과 초기의 소금농도구배에 따른 혼합층의 성장률 및 상·하부경계층의 거동에 대한 정확한 실험이 요구된다. 또한 이중확산 열-염분계의 거동을 묘사하는 해석적 연구는 전체계의 과도현상 때문에 아직도 태양연못에 응용하기에는 불충분한 실정이다.

본 연구에서는 하부가열식 실험용 태양연못을 제작하여 열유속과 초기의 소금농도구배를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 측정된 각 층안

의 온도와 소금농도구배 및 하부혼합층의 성장률 등을 바탕으로 지배방정식과 가정을 세운뒤 이들 방정식을 풀어 실험데이터와 비교하였다.

2. 실 험

2.1 실험장치 및 측정방법

본 연구를 위하여 제작한 실험용 태양연못의 구조는 Fig. 1과 같다. 실험용기측판의 3면은 강화유리(600mm×600mm×10mm)를 사용하였고 한쪽면은 용액을 추출하기 위한 구멍을 뚫기 위하여 보통유리를 사용하였으며 외부를 스테인리스강으로 지지하였고 소금물이 새는 것을 방지하기 위하여 실리콘 고무로 안쪽면을 접착하였다. 실험용기바닥은 열전도성이 우수한 알루미늄판(620mm×600mm×6mm)으로 만들었으며 가열기는 운모판에 니크롬선을 감아 총저항이 48.5Ω이 되도록 하여 가열기양면에 운모판을 깔았다. 실험용기 측면으로의 열손실을 감소시키기 위하여 50mm 두께의 스티로폼(styrofoam)을 사용하였고 앞면과 뒷면에는 새도우 그래프(shadowgraph)로 각 층의 위치와 두께를 관찰하기 위하여 550mm×560mm 크기의 스티로폼 움창틀을 만들었으며 실험용기 윗부분은 유리뚜껑을 덮어 소금물의 증발 및 열손실을 감소시켰다. 가열기

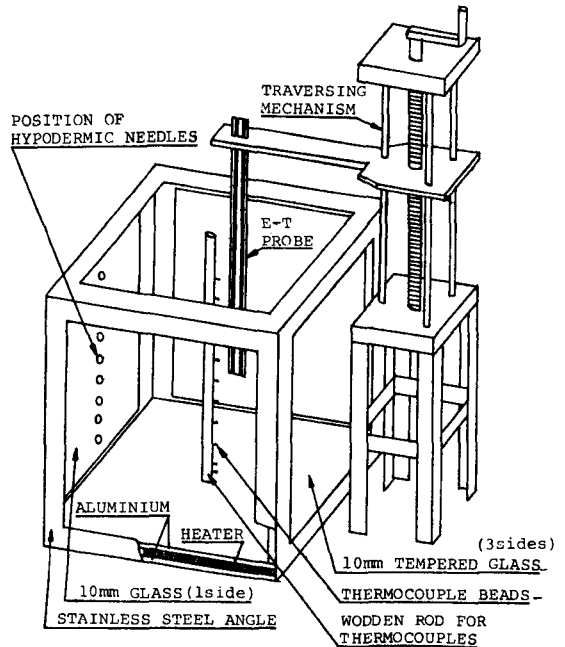


Fig. 1 Sketch of the experimental solar pond

하부로의 열손실을 감소시키기 위하여 50mm 두께의 이소핑크(isopink)를 알루미늄판 밑에 위치시켰으며 변압기로 가열기의 입력전압을 조절하여 열유속을 조정하였다.

실험에서 온도측정을 위하여 T형 열전대를 사용하였다. 실험용기바닥의 온도를 측정하기 위하여 바닥에 5개의 열전대열점을 부착하였고, 각 층의 고정위치에서 온도를 측정하기 위하여 실리콘 고무를 표면에 바른 나무봉에 12개의 열전대열점을 부착하여 중앙에 설치하였다. 또한 고정설치한 열전대열점 사이의 온도측정을 위하여 전기전도도-온도탐침에 열전대를 설치하여 상하로 이동하면서 측정하였고 측면 스티로폼의 안팎과 바닥면 이소핑크의 상, 중, 하부에 각각 5곳의 열점을 설치하여 측면과 바닥면의 열손실을 구하였으며 열전대를 통하여 나타난 온도는 디지털 온도계(DAKEAT RIKEN 사, TR 2721 A 형)를 사용하여 측정하였다.

소금농도측정은 일정한 양의 소금액을 직접추출하여 용액을 담은 비이커의 증발 전후의 증량을 측정하여 계산하는 증량분석법과 얇은 경계층사이의 농도측정을 위한 전기전도도-온도탐침(electroconductivity-temperature probe : 이하 E-T 탐침이라 칭함)을 같이 사용하였다. E-T 탐침은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 4개의 전극으로 구성되어 있으며 온도를 측정하기 위하여 전극 1과 4의 내부에 열전대를 설치하였다.

전극 1과 4에 일정한 전류 I 가 흐를 때 전극 2와 3에서 측정된 전위차 E 는 관계식 $E=KI\rho$ 에 의하여 비저항 ρ 에 비례하므로, 실험으로부터 전위차 E 와 비저항 ρ 의 관계식을 구하면 측정용액의 전위차를 구하여 비저항을 구할 수 있고 소금물에 대한 비저항, 농도 및 온도사이의 관계자료⁽¹¹⁾로부터 용액의 농도를 구할 수 있다. 전극 1과 4에 일정한 전류를 유지시키기 위하여 정전류장치를 만들었고 전극 2와 3사이의 미소한 전위차를 위하여 게인 (gain)100의 오실

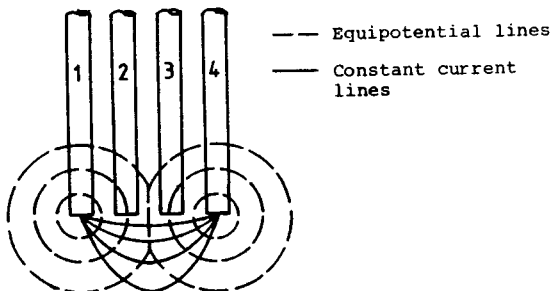


Fig. 2 Theory of E-T probe

로스코프 동력 증폭기(oscilloscope power amplifier)를 사용하였으며 E-T 탐침을 일정 위치에 고정시키기 위하여 E-T 탐침이송장치를 제작하여 사용하였다. 또한 실험에서 나타나는 각 층의 위치, 경계층사이의 두께 및 층안에 발생하는 유동현상을 관찰하기 위하여 새도우그래프 장치를 설치하여 사용하였다. 실험을 시작하기전 실험용기안에 소금의 농도구배가 선형이 되도록 하기 위하여 증류수에 소금을 용해시켜 농도가 각기 다른 용액을 만들어 하부에서 농도가 짙은 층으로부터 얇은층의 순으로 6개층으로 나누어 하부에서부터 차례로 채웠다. 실험을 시작할 때 급격한 가열로 인한 과도현상을 방지하기 위하여 열유속을 계단식으로 증가시켜 최대열유속에 도달하도록 하였다.

2.2 실험결과 및 고찰

하부가열식 실험용 태양연못의 가열열유속을 결정하기 위하여 우리나라의 일사량자료⁽¹²⁾를 조사하여 본결과 최대일사량은 제주지방이 약 $390\text{W}/\text{m}^2$ 이었다. 이 일사량이 본 연구의 태양연못용기와 같이 소금용액깊이가 55cm 정도에 흡수되는 양은 Rabl 등⁽⁴⁾에 따르면 $390\text{W}/\text{m}^2$ 의 약 45%인 $175\text{W}/\text{m}^2$ 이다. 그러므로 가열기의 아랫면을 통한 열손실을 고려하여 본 연구의 실험에서는 입력열유속을 250 및 $170\text{W}/\text{m}^2$ 으로 하였고 소금물의 초기농도구배는 상온에서 소금물의 포화농도를 고려하여 36.4, 27.3 및 18.2%/m로 하였으며 배회의 실험은 가열을 시작한 날부터 상·하부경계층이 합치되는 날까지 수행하였다. 가열기로부터 실험용기안으로 들어간 정미열유속은 하부혼합층의 내부에서 변화, 하부혼합층의 측면벽을 통한 열손실 및 확산층으로의 전도열손실간의 열평형식을 세우고 정미열유속을 제외한 나머지 항들을 측정하여 구하였다. 실험을 수행하는 동안 매일의 실험값을 사용하여 계산한 결과에 따르면 입력열유속이 $250\text{W}/\text{m}^2$ 일 때 정미열유속은 $\pm 8\%$ 범위 안에서 평균 $160\text{W}/\text{m}^2$ 으로 나타났고 입력열유속이 $170\text{W}/\text{m}^2$ 일 때의 정미열유속은 $\pm 6\%$ 범위 안에서 평균 $110\text{W}/\text{m}^2$ 으로 나타났다.

본 연구에서 수행한 6회의 실험에서의 초기온도, 하부혼합층의 최고온도 및 이들 두 온도의 차이 그리고 가열을 시작한 날부터 합치되는 날까지의 기간을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와같이 정미열유속과 초기소금농도구배가 가장 큰 실험 1에서 하부혼합층의 상승온도가 48.9°C 로 가장 크게 나타났고 정미열유속이 일정한 경우에는 초기소금농도구배가 클수록 상승온도는 크게 나타남을 알 수 있다. 그러므로

Table 1 Initial and maximum temperatures of bottom mixed layer

Exp. number	Heat flux input (W/m ²)	Net heat flux (W/m ²)	$\left(\frac{ds}{dz}\right)_{init.}$ (%/m)	T _{max} (°C)	T _{init.} (°C)	$\frac{T_{max}-T_{init.}}{T_{init.}}$ (°C)	Duration of Exp. (days)
1	250	160	36.4	68.4	19.5	48.9	23
2	250	160	27.3	65.3	18.0	47.3	18
3	250	160	18.2	68.5	27.0	41.5	11
4	170	110	36.4	58.6	20.4	38.2	39
5	170	110	27.3	61.1	23.0	38.1	25
6	170	110	18.2	57.4	25.0	32.4	18

실제 태양연못을 작동하는데 있어서 최대온도를 얻기 위하여는 가능한 최대농도구배를 유지시켜 주어야 함을 알 수 있다.

6회의 실험을 수행한 결과 온도분포의 경향은 매 실험에서 비슷하게 나타났기 때문에 실험 5의 경우를 택하여 각 층의 온도분포를 시간에 따라 나타내면 Fig. 3과 같다. 그림에서 보듯이 하부혼합층은 가열이 시작한 다음날부터 나타났고 상부혼합층은 4일째 되는 날 열기둥(thermal plume)이 표면에 도달하면서 나타나기 시작하였다. 상·하부혼합층의 온도는 층이 성장하면서 증가하다가 14일이 경과된 이후부터는 하부혼합층의 온도가 감소하기 시작하였는데 이는 확산층의 두께가 감소하면서 단열효과가 줄어들어 확산층으로의 열손실이 증가하기 때문이다. 확산층의 온도분포는 높이에 따라 2차함수적으로 나타났고 하부혼합층의 온

도가 최대에 도달한 이후부터는 확산층의 두께가 줄어들면서 선형적인 분포에 가까워졌으나 대체로 2차함수적이라고 할 수 있다. 상·하부혼합층이 계속적으로 성장함에 따라 25일째 되는 날 확산층이 없어졌고 이후에 상·하부경계층은 합치되어 뒤섞임없이 계속 윗 방향으로 이동하였다.

농도분포 역시 온도분포에서와 같이 실험 5의 결과를 나타내면 Fig. 4와 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 상·하부혼합층의 성장율을 뚜렷이 볼 수 있고 혼합층이 성장함에 따라 하부혼합층의 농도는 감소하고 상부혼합층의 농도는 증가하였다. 확산층의 농도분포는 온도가 2차함수 형태임에 비하여 거의 선형적으로 일정하였고 12일이 경과한 후부터는 농도구배가 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 확산층의 두께가 얇아진 21일째날에 상·하부혼합층의 농도차는 같은 날의

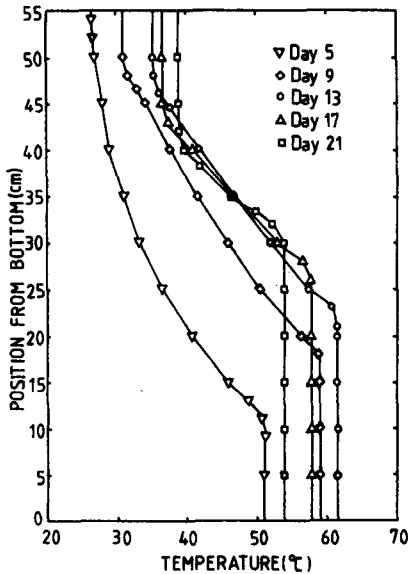


Fig. 3 Vertical temperature distribution for experiment 5

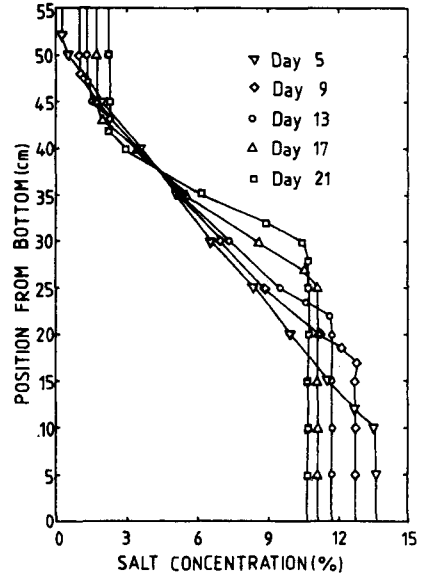


Fig. 4 Vertical salt concentration distribution for experiment 5

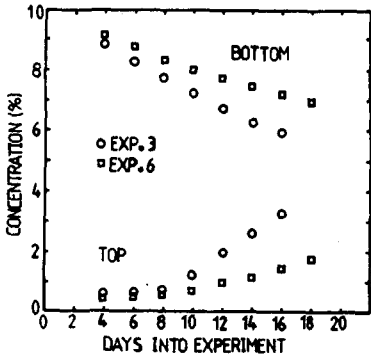


Fig. 5 Measured salt concentration in bottom and top mixed layers as a function of time at initial salt concentration gradient of 18.2%/m

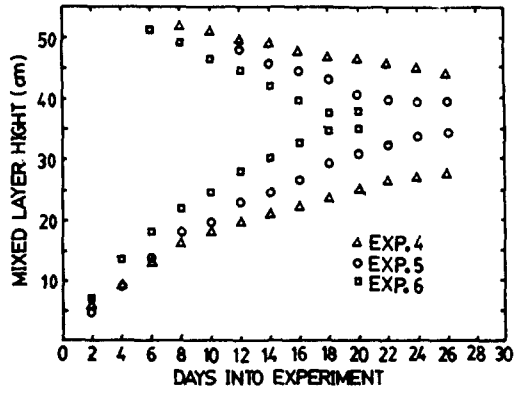
온도차에 비하여 큰 차이가 나타났고 이것은 상·하부 경계층이 뒤섞임없이 계속 상승하는 원인이라 생각된다.

Fig. 5는 실험 3과 실험 6의 경우 상·하부혼합층에서의 농도변화를 나타낸 것이다.

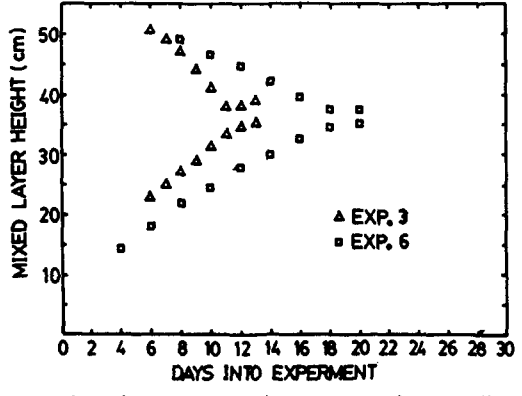
그림에서와 같이 하부혼합층의 농도는 시간이 증가함에 따라 하부혼합층이 성장하면서 감소하고 이와 반대로 상부혼합층의 농도는 증가하는 것을 볼 수 있으며 초기농도구배가 같은 경우 열유속이 큰 경우에 농도의 변화가 크게 증가함을 할 수 있다. 이는 열유속이 큰 경우 혼합층의 빠른 성장과 확산층의 온도구배가 더 크기 때문에 온도가 증가함에 따라 소금의 확산율이 증가하는 Soret 현상⁽¹³⁾ 때문이며 10일을 기점으로 상·하부혼합층의 소금농도변화율이 급격이 증가하는데 이것은 확산층두께의 감소로 온도구배와 농도구배가 크게 증가하여 윗방향으로의 소금확산이 증가하기 때문이라 생각된다.

Fig. 6은 (a)정미열유속이 일정한 때와 (b) 초기소금농도구배가 일정한 때 상·하부혼합층의 성장높이를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 혼합층은 열유속이 가장 크고 초기소금농도구배가 가장 작은 실험 3에서 가장 빠르게 성장하였고 열유속이 가장 작고 초기소금농도구배가 가장 큰 실험 4에서 혼합층이 가장 느리게 성장하였다. 또한 혼합층의 성장속도는 시간이 증가함에 따라 작아지는 것을 볼 수 있는데 이는 확산층의 두께가 점점 감소하면서 확산층내의 밀도구배가 크게 증가하여 혼합층의 성장을 억제하였기 때문이다.

태양열뿐만 아니라 에너지를 축열시키기 위하여는 확산층의 안정과 상·하부혼합층의 성장율에 절대적 영향을 미



(a) At constant net heat flux of 110W/m²



(b) At constant salt concentration gradient of 18.2%/m

Fig. 6 Measured bottom and top mixed layer heights as a function of time

치는 경계층에 대한 연구는 대단히 중요하다. Fig. 7에서는 shadowgraph와 E-T 탐침을 사용하여 상부경계층(upper interfacial boundary layer; UIBL)과 하부경계층(lower interfacial boundary layer; LIBL)의 온도와 소금농도분포를 측정 한 실험결과중 실험 5의 12일째날의 결과를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 온도분포는 상·하부경계층 모두에서 선형분포로 나타났으며 농도분포는 다소 불규칙하게 나타났지만 거의 선형에 가까운 분포임을 알 수 있다. 하부경계층의 농도구배는 상부경계층의 농도구배보다 다소 크게 나타났고 온도구배는 상·하부에서 거의 비슷하였으며 이러한 현상은 열유속이 크고 초기소금농도구배가 작은 실험 3에서 더욱 크게 나타났다. 또한 모든 실험에서 경계층의 온도차는 농도차에 비하여 작게 나타났는데 이는 열의 확산율이 소금의 확산율보다 훨씬 크기 때문이라 생각된다.

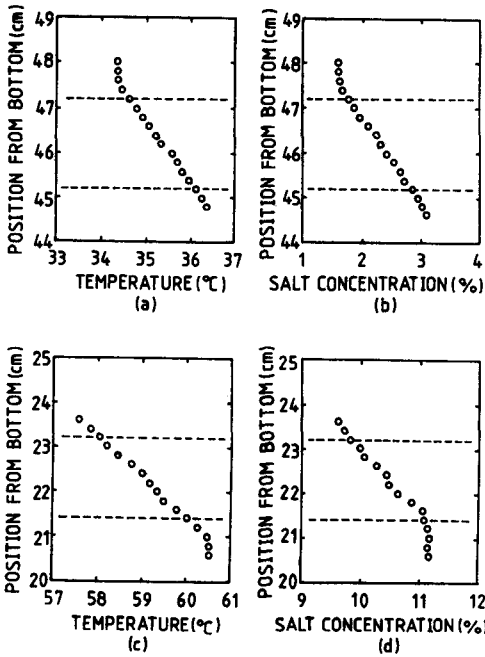


Fig. 7 (a) Temperature (b) Salt uncentration distribution in UIBL and (c) Temperature (d) Salt concentration distribution in LIBL, day twelve for experiment 5

실험을 수행하는 동안 상·하부경계층의 두께가 정미열유속과 초기소금농도구배에 따라 어떻게 변화하는가를 측정하여본 결과 모든 실험에서 경계층의 두께는 거의 일정한 값을 유지하였다. 모든 실험에 대한 상·하부경계층두께의 평균 값을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보는 바와같이 경계층의 평균 두께는 최소 1.78cm에서 최대 1.94cm로 변화하지만 정미열유속이나 초기소금농도구배에 따른 규칙성은 찾아볼 수 없음을 알 수 있으며 대체로 경계층의 두께는 정미열

Table 2 The average interfacial boundary layer thicknesses

Net heat flux (W/m ²)	160			110		
Initial salt concentration gradient (%/m)	36.4	27.3	18.2	36.4	27.3	18.2
Thickness of UIBL (cm)	1.92	1.89	1.94	1.88	1.85	1.87
Thickness of LIBL (cm)	1.80	1.78	1.83	1.82	1.86	1.83

유속이나 초기소금농도구배에 관계없이 일정함을 알 수 있다.

태양연못을 수치적으로 모델링하기 위하여는 경계층들의 온도구배와 농도구배의 값들을 아는 것이 중요하기 때문에 이들 구배의 절대값이 정미열유속과 초기소금농도구배에 따라 어떻게 변화하는가를 측정하여 본 결과 이들 구배의 값들도 정미열유속이나 초기소금농도구배변화에 따른 규칙성은 알 수 없었다. 따라서 Fig. 8에서는 경계층내의 온도구배와 소금농도구배 대신에 상·하부경계층을 확산층안에 포함시켰을 때의 온도구배와 소금농도구배에 대한 포함시키지 않을 경우의 확산층내의 온도구배 및 소금농도구배의 비를 하부대류층의 온도가 최대에 도달한 날을 기준으로 무차원화한 시간의 함수로 나타내었다. 그림에서 보듯이 온도와 소금농도구배의 비는 거의 1에 가까움을 알 수 있다. 다시 말하면 경계층에서의 온도구배나 소금농도구배를 따로 구하지 않고 경계층을 확산층에 포함시켜 전체적인 온도구배 및 소금농도구배를 사용할 수 있음을 실험적으로 입증한 것이라 생각된다.

혼합층의 성장은 하부로부터 가열로 생긴 열기둥이 확산층하부에서 혼합작용을 일으켜 확산층이 혼합층안으로 유입되는 현상이다. Turner⁽¹⁴⁾는 실험을 통하여 다음과 같은 혼합층성장물식을 제시하였다.

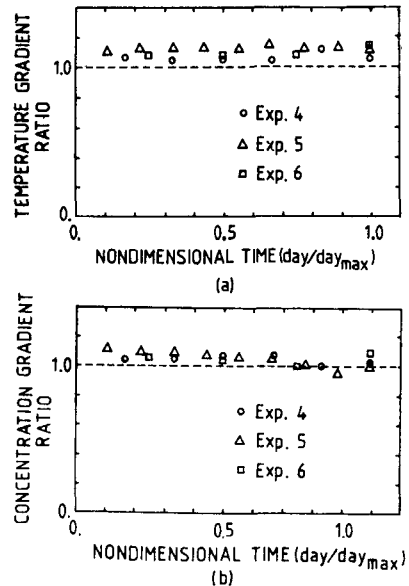


Fig. 8 Comparison of (a) Temperature (b) Salt concentration variation between diffusive layer including and excluding interfacial boundary layers

$$\frac{d\delta_b}{dt} = C U_{*,b} Ri_b^n \quad (1)$$

식 (1)에서 $U_{*,b}$ 는 경계층에 인접한 하부혼합층의 마찰속도이고 Ri_b 는 혼합층내의 난류영향에 의하여 계에 가하여지는 에너지율에 대한 부력에 의하여 계로부터 에너지가 제거되는 비율 나타내는 Richardson 수이며 C 와 n 은 실험으로 결정하여야 할 실험상수이다. 기존의 연구⁽¹⁰⁾에서 무시하였던 경계층에서 온도차이에 의한 밀도변화를 고려하여 Richardson 수를 써보면 식 (2)와 같고 마찰속도 $U_{*,b}$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ri_b = \frac{g \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_T \Delta S_{b-d} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_S \Delta T_{b-d}}{\rho_b U_{*,b}^2} \delta_b \quad (2)$$

$$U_{*,b} = \left(\frac{g \beta_s q_s'' \delta_b}{\rho_b C_{s,b}} \right)^{1/3} \quad (3)$$

본 연구에서 얻은 실험값으로 식 (2)와 (3)의 Richardson 수와 마찰속도의 값을 계산하여 종축을 $(d\delta_b/dt)/U_{*,b}$ 로 하고 횡축을 Ri_b 로 하여 로그-로그 그래프로 나타내면 Fig. 9와 같다.

Fig. 9에 나타난 실험자료를 최소자승법을 사용하여 나타내면 하부혼합층의 성장율식은 식 (4)와 같이 된다.

$$\frac{d\delta_b}{dt} = 0.052 U_{*,b} Ri_b^{-0.788} \quad (4)$$

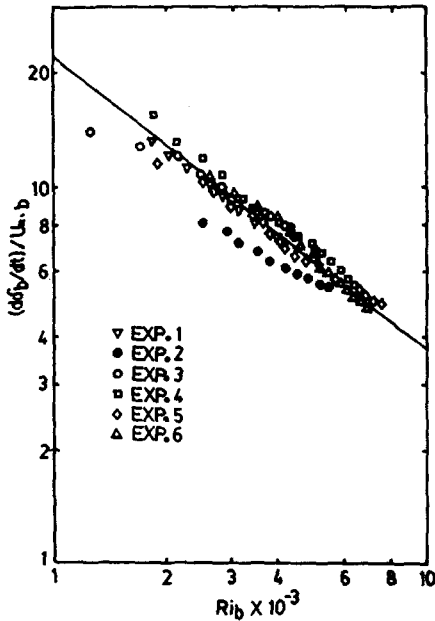


Fig. 9 Ratio of entrainment and friction velocities as a function of Richardson number

3. 이론 해석

3.1 모델과 가정

본 연구의 이중확산 열-염분계에 대한 수치적 모델은 하부에서 열유속이 계안으로 들어옴에 따라 열이 서서히 상부로 침투하면서 열침투깊이가 용액표면에 도달하기 전에는 하부혼합층과 확산층의 2층 모델이 되고 열침투깊이가 용액표면에 도달한 이후에는 용액 표면에서의 온도증가로 인한 증발 때문에 농도가 증가하여 열적으로 불안정하게 되는 등 여러가지 현상으로 인하여 상부혼합층, 확산층 및 하부혼합층의 3층 모델이 된다. Fig. 10에서는 열이 용액표면에 도달한 후 형성되는 3층 모델을 나타내었다.

실험에서 구한 결과를 토대로 다음과 같은 가정을 세웠다.

- (1) 높이방향으로 1차원 모델이다.
- (2) 경계층의 두께는 확산층의 두께에 포함시킨다.
- (3) 경계층을 통한 소금의 확산은 무시한다.
- (4) 혼합층내에서의 온도와 농도는 일정하다.
- (5) 열이 침투되기전의 유체의 온도는 대기온도이다.
- (6) 확산층내의 소금농도분포는 선형적으로 일정하고 온도분포는 2차식으로 나타낼 수 있다.
- (7) 하부혼합층의 성장율식은 식 (4)와 같다.

3.2 모델링

혼합층에서의 소금농도분포는 상·하부혼합층의 검사체적 t, b 에 성분보존법칙을 적용하고 가정 (3)을 이용하면 다음과 같다.

$$S_b(t) = S_{b,t} + \frac{1}{2} \cdot \frac{dS_d}{dz} \cdot \delta_b(t) \quad (5)$$

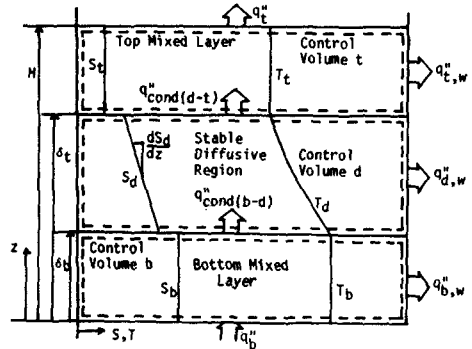


Fig. 10 Three-layer model

$$S_i(t) = -\frac{1}{2} \frac{dS_d}{dz} (H - \delta_i(t)) \quad (6)$$

확산층에서의 온도분포는 가정 (6)에 의하여 2차함수로 가정하여 경계조건을 이용하면 2층 모델에서는 식 (7), 3층 모델에서는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_d(z, t) = T_b(t) + 2\{T_\infty - T_b(t)\} \cdot \left(\frac{z - \delta_b}{\delta_p - \delta_b}\right) + \{T_b(t) - T_\infty\} \left(\frac{z - \delta_b}{\delta_p - \delta_b}\right)^2 \quad (7)$$

$$T_d(z, t) = T_b(t) + \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=\delta_b} \cdot (z - \delta_b) + \left\{ (T_i(t) - T_b(t) - \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=\delta_b} \cdot (\delta_i - \delta_b)) \right\} \left(\frac{z - \delta_b}{\delta_i - \delta_b}\right)^2 \quad (8)$$

혼합층에서의 온도분포는 상·하부혼합층의 검사체적 i, b 에 에너지보존법칙을 적용하고 밀도와 정적비열의 시간변화율을 고려하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{q_b'' - q_{b,w}'' + 2k_b \cdot \frac{(T_\infty - T_b)}{(\delta_p - \delta_b)} - \frac{1}{2} \delta_b \cdot \frac{dS_d}{dz} \cdot \frac{\partial \delta_b}{\partial t} \cdot \frac{\partial P_b}{\partial S_b}}{\delta_b \cdot (\partial P_b / \partial T_b)} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{-q_i'' - q_{i,w}'' - k_i \cdot \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=\delta_i} - \frac{1}{2} \frac{dS_d}{dz} \frac{\partial \delta_i}{\partial t} \frac{\partial P_i}{\partial S_i} (H - \delta_i)}{(H - \delta_i) (\partial P_i / \partial T_i)} \quad (10)$$

여기서 $P_b = \rho_b C_{v,b} T_b$ 이고 $P_i = \rho_i C_{v,i} T_i$ 이며 윗면열손실 q_i'' 는 용액표면과 덮개 사이의 복사열손실과 대류열손실을 나타내고 $q_{i,w}''$ 와 $q_{b,w}''$ 는 각 각 상·하부의 측면열손실을 나타낸다.

확산층의 검사체적 d 에 에너지보존법칙을 적용하고 검사체적의 내부에너지변화를 내부에너지 평균값의 변화로 가정하면 2층 모델에서의 열침투깊이 성장율은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \delta_p}{\partial t} = \left\{ -\frac{\partial \delta_b}{\partial t} P_{d,avx} + \frac{1}{2} (\delta_p - \delta_b) \frac{\partial P_{d,avx}}{\partial S_{d,avx}} \cdot \frac{dS_d}{dz} \cdot \frac{\partial \delta_b}{\partial t} + \frac{1}{3} (\delta_p - \delta_b) \cdot \frac{\partial P_{d,avx}}{\partial T_{d,avx}} \cdot \frac{\partial T_b}{\partial t} + 2k_b \cdot \frac{(T_\infty - T_b)}{(\delta_p - \delta_b)} + q_{d,w}'' + P_d \Big|_{z=\delta_b} \cdot \frac{\partial \delta_b}{\partial t} \right\} / \left\{ P_d \Big|_{z=\delta_p} - P_{d,avx} - \frac{1}{2} (\delta_p - \delta_b) \cdot \frac{\partial P_{d,avx}}{\partial S_{d,avx}} \cdot \frac{\partial S_d}{\partial z} \right\} \quad (11)$$

식 (11)에서

$$P_{d,avx} = \rho_d (S_{d,avx}, T_{d,avx}) C_{v,d} (S_{d,avx}, T_{d,avx}) T_{d,avx}$$

$$T_{d,avx} = \frac{1}{(\delta_p - \delta_b)} \int_{\delta_b}^{\delta_p} T_d(z, t) dz = \frac{1}{3} (T_b + 2T_\infty)$$

$$S_{d,avx} = \frac{1}{\delta_p - \delta_b} \int_{\delta_b}^{\delta_p} S_d dz = S_{b,i} + \frac{1}{2} \cdot \frac{dS_d}{dz} (\delta_b + \delta_p)$$

3층 모델의 경우, 확산안정층의 검사체적 d 에 에너지보존법칙을 적용하고 확산층의 내부에너지 변화율 평균내부에너지변화라 가정하면 확산층 하부의 온도구배에 대한 시간변화율은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=\delta_b} \right\} = \left\{ \frac{\partial \delta_i}{\partial t} P_d \Big|_{z=\delta_i} - P_d \Big|_{z=\delta_b} \cdot \frac{\partial \delta_b}{\partial t} + k_i \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=\delta_i} - k_b \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=\delta_b} - q_{d,w}'' - P_{d,avx} \left(\frac{\partial \delta_i}{\partial t} - \frac{\partial \delta_b}{\partial t} \right) - (\delta_i - \delta_b) \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \delta_b}{\partial t} + \frac{\partial \delta_i}{\partial t} \right) \frac{dS_d}{dz} \frac{\partial P_{d,avx}}{\partial S_{d,avx}} + \frac{\partial P_{d,avx}}{\partial T_{d,avx}} \left[\frac{1}{3} \left(2 \frac{\partial T_b}{\partial t} + \frac{\partial T_i}{\partial t} \right) + \frac{1}{6} \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=\delta_b} \left(\frac{\partial \delta_i}{\partial t} + \frac{\partial \delta_b}{\partial t} \right) \right] \right\} / \left\{ \frac{1}{6} (\delta_i - \delta_b)^2 \frac{\partial P_{d,avx}}{\partial T_{d,avx}} \right\} \quad (12)$$

여기서

$$T_{d,avx} = \frac{1}{(\delta_i - \delta_b)} \int_{\delta_b}^{\delta_i} T_d(z, t) dz = \frac{1}{3} (2T_b + T_i) + \frac{1}{6} \frac{\partial T_d}{\partial z} \Big|_{z=\delta_b}$$

$$S_{d,avx} = \frac{1}{(\delta_i - \delta_b)} \int_{\delta_b}^{\delta_i} S_d dz = S_{b,i} + \frac{1}{2} \frac{dS_d}{dz} (\delta_b + \delta_i)$$

본 연구에서 6번째. 실험에서 구한 상·하부혼합층의 성장율식은 다음과 같다.

$$\frac{d\delta_b}{dt} = 0.052 \left(g\beta_{T,b} \frac{q_i''}{\rho_b C_{v,b}} \delta_b \right)^{1/3} \left\{ \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial S} \Big|_{\tau} \Delta S_{d-i} \delta_b}{\delta_b (g\beta_{T,b} q_b'' \delta_b / \rho_b C_{v,b})^{2/3}} \right\}^{-0.788} \quad (13)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = -0.052 \left\{ g\beta_{T,i} \frac{q_i''}{\rho_i C_{v,i}} \cdot (H - \delta_i) \right\}^{1/3} \left\{ \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial S} \Big|_{\tau} \Delta S_{d-i} (H - \delta_i)}{\rho_i \{g\beta_{T,b} q_b'' (H - \delta_i) / \rho C_{v,i}\}^{2/3}} \right\}^{-0.788} \quad (14)$$

2층 모델일 때 식 (9), (11) 및 (13)으로부터 $T_b(t)$, $\delta_p(t)$ 및 $\delta_b(t)$ 를 구할 수 있고 이들 결과로부터 식 (5)와 (7)에서 $S_b(t)$ 와 $T_d(z, t)$ 를 구할 수 있으면, 또한 3층모델인 경우 식 (9), (10), (12)~(14)로부터 $T_b(t)$, $T_i(t)$, $\delta_b(t)$ 및 $\delta_i(t)$ 를 구할 수 있고 이로부터 $S_b(t)$, $S_i(t)$ 및 $T_d(z, t)$ 를 구할 수 있다. 이들 연립미분방정식들은 6계 Runge-Kutta 방법을 사용하여 해를

구하였고 모든 소금물의 물성치는 참고문헌 (11)의 자료를 사용하였다.

4. 계산치와 실험치의 비교

수치계산을 위하여 정미열유속과 초기소금농도구배는 실험조건과 같게하고 소금용액의 초기온도는 가열을 시작하기 직전의 용액의 온도로 하였다.

혼합층의 시간에 따른 온도변화는 6회의 실험중 대표적인 예로 실험 2와 5를 택하여 계산값과 실험값을 Fig. 11에 동시에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험값과 계산값은 실험전반에 걸쳐서 약간의 차이는 있으나 잘 일치함을 알 수 있다. 열침투깊이의 시간은 상부부혼합층이 형성되기 시작할 때의 시간이며 본 연구의 열침투깊이시간에 대한 계산값은 실험 2와 5에서 모두 실험값과 비교하여 1~2일의 차이가 나타나고 이는 Bergman⁽¹⁰⁾ 등의 수치모델에서의 계산값과 실험값의 차이인 4~5.5일에 비하여 훨씬 정확하게 나타났다. 이는 Bergman 등이 모델링 해석시 무시하였던 밀도와 정적비열의 시간변화율을 본 연구의 모델링 해석에서는 고려하였기 때문이라 생각된다.

Fig. 12에서는 실험 2와 5에 대하여 상·하부혼합층의 성장높이의 계산값과 실험값을 시간의 함수로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 상부혼합층 성장율의 계산값은 하부혼합층 성장율의 계산값에 비하여 실험값과 큰 차이가 나타남을 알 수 있으며 이는 상부혼합층의 성장율을 예측하는데 하부혼합층의 성장율식을 사용하였기 때문이라 생각된다.

실험 2와 5에 대한 상·하부혼합층의 소금농도를 계산값과 실험값을 시간에 따라 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 열유속이 더 큰 실험

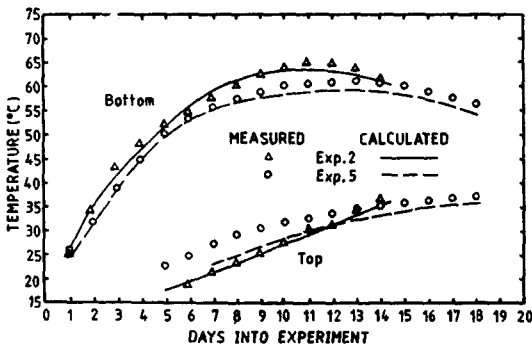


Fig. 11 Calculated and measured mixed layer temperatures

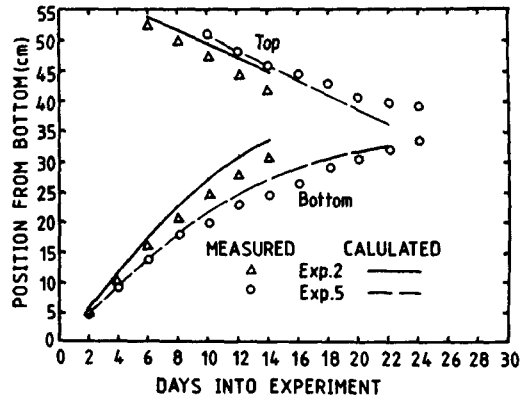


Fig. 12 Calculated and measured mixed layer heights

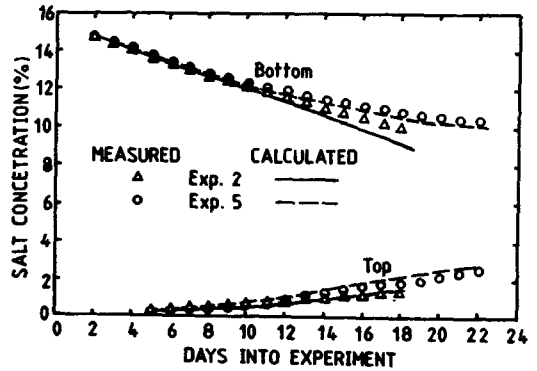


Fig. 13 Calculated and measured mixed layer salt concentrations

2에서의 계산값보다 열유속이 작은 실험 5의 계산값이 실험값보다 더 잘 일치함을 볼 수 있다. 이러한 현상은 소금농도는 높이의 함수이므로 혼합층성장율이 실험 5에서 보다 실험 2에서의 계산값이 실험값과 비교하여 크게 예측되었기 때문이다.

이상에서 살펴본 바와같이 본 연구의 모델링해석에서 계산값들을 실험값과 비교하여 본 결과 각 층의 시간에 따른 온도분포와 소금농도분포 및 성장높이 등은 매우 잘 일치함을 볼 수 있었다. 이는 실험을 통하여 직접 확인한 결과들을 토대로하여 가정을 세웠고 또한 기존의 모델링 연구에서 무시하였던 시간에 따른 밀도와 정적비열의 변화를 고려하였기 때문이라 생각된다.

5. 결 론

하부가열식 태양열못장치를 제작하여 정미열유속을

110 내지 160W/m²의 범위로 하고 초기소금농도구배를 18.2 내지 36.4%/m의 범위로 하여 실험을 수행하고 실험에서 측정된 결과들을 토대로 한 가정을 이용하여 모델링해석을 한 이 연구의 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 확산층내의 온도분포는 층의 두께가 매우 얇아지는 경우를 제외하고는 대체로 높이에 따라 2차함수적으로 나타나고 소금농도분포는 높이에 따라 선형적으로 나타나며 소금농도구배는 일정한 값을 유지하다가 시간이 지남에 따라 증가한다.

(2) 하부혼합층의 성장율은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\delta_b}{dt} = 0.052 U_{*,b} Ri_b^{-0.788}$$

(3) 상·하부경계층의 두께는 정미열유속과 초기소금농도구배에 무관하게 대략 일정한 값을 유지하고 이들 경계층내의 온도 및 소금농도의 분포는 높이에 따라 거의 선형으로 나타난다.

(4) 하부혼합층의 온도가 최고온도에 도달할 때까지는 상·하부경계층내의 온도와 소금농도구배는 따로 구별하지 않고 경계층을 확산층에 포함시켜 온도와 소금농도구배를 고려하여도 된다.

(5) 본 연구의 태양연못에 대한 모델링 해석의 결과는 실험결과와 잘 일치하였고 태양연못안의 각 층의 거동을 예측하는데에 이용될 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 1984년도 후반기 연구지원에 의하여 이루어졌으며 동재단의 관계제위에게 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

- (1) Kooi, C.F., "The Steady State Salt Gradient Solar Pond", *Solar Energy*, Vol. 23, pp. 37~45, 1979
- (2) Zangrando, F. and H.C. Bryant, "A Salt Gradient Solar Pond", *Solar Age*, Vol. 3, pp. 21~36, 1978
- (3) Tabor, H., "Large Area Solar Collectors for Power Production", *Solar Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 189~194, 1963
- (4) Rabl, A., and Nielsen, C.E., "Solar Ponds for Space Heating", *Solar Energy*, Vol. 17, pp. 1~12, 1975
- (5) Weinberger, H., "The Physics of the Solar Pond", *Solar Energy*, Vol. 8, No. 2, pp. 45~56, 1964
- (6) Mancini, T.R., Loehrke, R.I., and Haberstroh, R.D., "Experiments in Layered Natural Convection of Heat and Salt", ASME Paper 76-ht-45, 1976
- (7) Turner, J.S., "The Behavior of a Stable Salinity Gradient Heated from Below", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 33, pp. 183~200, 1968
- (8) Poplawsky, C.J., Incropera, F.P., and Viskanta, R., "Mixed Layer Development in a Double-Diffusive, Thermohaline System", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 103, pp. 351~359, 1981
- (9) Marmorino, G.O., and Caldwell, D.R., "Heat and Salt Transport Through a Diffusive Thermohaline Interface", *Deep-Sea Research*, Vol. 23, pp. 59~67, 1976
- (10) Bergman, T.L., Incropera, F.P., and Viskanta, R., "A Multi-Layer Model for Mixing Layer Development in a Double-Diffusive Thermohaline System Heated from Below", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 25, No. 9, pp. 1411~1418, 1982
- (11) Saline Water Conversion Engineering Data Book, Office of Saline Water, U.S. Dept. of Interior, 1965
- (12) KSCP-B-1021, "태양열 냉난방 및 급탕시스템기술기준", 공업진흥청, 1979
- (13) Rothmeyer, M., "The Soret Effect and Salt-Gradient Solar Ponds", *Solar Energy*, Vol. 25, pp. 567~568, 1980
- (14) Turner, J.S., "The Influence of Molecular Diffusivity on Turbulent Entrainment Across a Density Interface", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 33, pp. 639~656, 1968