

## 열 - 염분 이중확산계에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on the Double Diffusive Thermohaline System

박 회 용\* , 임 경 빈\*\*  
( Pak, Hi Yong ) ( Lim, Kyung Bin )

#### ABSTRACT

In this study, an experimental double diffusive thermohaline system heated from below was constructed and the phenomena of each layer developed in the system were observed. The experiment was performed with the initial salt concentration gradient of  $-436.2\text{kg/m}^4$  and the net heat flux of approximately  $176\text{ w/m}^2$ . An electroconductivity-temperature probe was made and used for the measurements of salt concentration.

As the result of this study, it was found that the salt concentration decreased in the bottom mixed layer and increased in the top mixed layer during the experiment while the salt concentration gradient in the diffusive layer unchanged. It was also found that the interfacial boundary layers were due largely to variations in salt concentration rather than temperature.

#### 1. 서 론

이중확산계란 어떤 매질속에 두가지 확산원 ( diffusing agents )이 존재하면서 각각의 구배에 따라 확산이 일어나는 계를 말한다. 흔히 볼 수 있는 이중확산계에는 열-염분 이중확산계가 있는데 태양연못 ( solar pond )을 특별한 예로 들 수 있다.

태양연못안에는 염분과 열이 각각 다른 구배를 가지면서 확산현상을 나타내고 이 안에는 다섯개의 층이 존재하는데 상, 하부혼합층, 중간 확산층 및 이들 층을 구별하는 두개의 접촉 경계층으로 구성된다.

소금물이 들어있는 연못에 태양열이 도달하면 태양광선가운데 장파장성분은 공기와 접촉

하고 있는 액체표면층에 흡수되고 단파장성분은 연못바닥에 흡수되어 하부혼합층안의 온도가 상승되지만 소금으로인한 밀도차에 의하여 대류억제 작용이 일어나 고온의 유체가 하부에 머물게 됨으로써 열을 축적할 수 있다.

1970년대의 석유과동과 화석연료의 부족으로 인하여 대체에너지 개발의 일환으로 태양연못에 대한 관심이 점차 높아지고 있다.

태양에너지를 동력화하기 위한 방법으로 농도구배를 갖는 태양연못을 사용하려는 생각은 1902년에 Medve 호수에서의 불안정한 온도분포를 연구하여 농도구배를 갖는 인공호수가 태양에너지 집열에 이용될 수 있음을 제안한 Von Kalecsinsky에 의하여 시작되었다. <sup>1,2)</sup> Pinkus <sup>3)</sup>는 농도구배를 갖는 인공태양연못의 구상을 처음으로 제안하였고, Tabor <sup>4)</sup>는 농도구배를 이용한 태양에너지 집열에 관심을 갖고

\* 正會員 : 한양대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 正會員 : 한양대학교 대학원 기계공학과

태양연못의 동력원으로서의 이용가능성에 관하여 연구하였다. Weinberger<sup>(5)</sup>는 태양연못의 거동을 모델화하여 이론적으로 해석하였고, Nielson<sup>(6)</sup>은 태양연못안에서 하부대류층의 온도를 최대 65°C까지 얻을 수 있음을 연구하였다.

초기에 등온이고 소금으로 성층된 유체가 아래에서 가열될 때 농도구배와 온도구배가 동시에 존재하는 복잡한 현상때문에 태양연못에 대한 많은 연구에도 불구하고 아직도 열-염분이 중확산현상에 대한 이해는 부족한 실정이고 특히, 태양연못을 구성하는 각 층의 거동에 대하여는 아직도 연구되어야 할 부분이 대단히 많다.

본 연구에서는 하부가열식 실험용 열-염분이 중확산계를 제작하여 상부 및 하부대류층의 성장율과 접촉경계층 및 확산층에서의 온도 및 농도분포를 측정하였다. 소금물의 농도측정을 위하여 4개의 전극을 사용한 전기전도도-온도 탐침을 제작하여 사용하였다.

## 2. 실험

### 2-1 실험용기

소금물이 들어있는 용기에 태양광선이 직접 도달하여 열-염분이 중확산계가 형성된 뒤에 각층의 거동을 실험실에서 연구하려면 태양광선과 스펙트럼이 동일한 인공광원을 실험실안에 설치하여야 하는 어려움이 있다. 그러나 앞에 언급한 바와같이 실제의 태양연못에서는 태양광선의 단파장성분이 연못바닥을 가열하여 바닥으로부터 들어오는 열로 인하여 하부대류층이 형성되기 때문에 이 연구에서는 하부가열식 용기를 제작하여 실험하였다. 실험용기의 크기는 580 × 580 × 580 mm로 하였고 구조는 Fig. 1과 같다. 용기의 바닥은 6 mm 두께의 알루미늄판으로 하였고 4개의 측면은 10 mm 두께의 아크릴 판으로

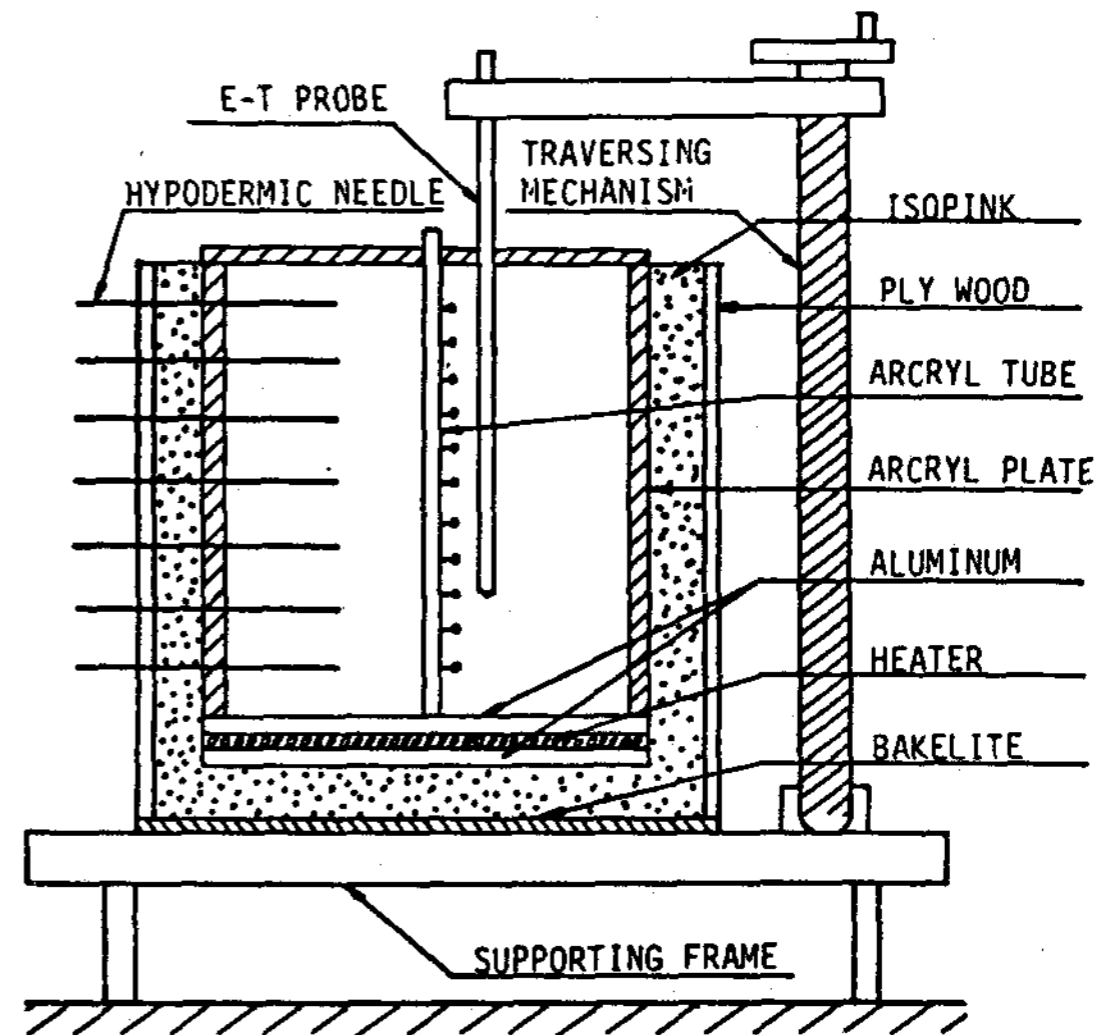


Fig. 1. Side view of test container.

로 하였다. 각 판사이의 기밀을 유지하기 위하여 홈을 만들어 끼우고 45 mm 간격으로 지름 5 mm의 보울트로 조였으며 실험도중 소금물의 누설을 방지하기 위하여 각 이음부의 내부에 silicon rubber로 접착하였다. 용기의 바닥면 아래 설치한 가열기는 550 × 580 mm 크기의 운모판에 20 mm 간격으로 니크롬선을 감아 총저항이 48.5 ohms 이 되도록 하였고 가열기 아래에 다시 6 mm 두께의 알루미늄판을 깔았다. 또한 가열기와 알루미늄판 사이의 절연을 위하여 가열기의 양면에 운모판을 깔았다. 이와같이 만든 가열기를 이용하여 110 Volts에서 얻을 수 있는 최대 열유속은 782 W/m<sup>2</sup>이고 변압기를 사용하여 가열기에 들어가는 전압을 변화시켜 계에 들어가는 열유속을 조정하였다. 실험을 수행하는 동안 소금물의 증발로 인한 열손실을 억제하기 위하여 아크릴판으로 용기의 뚜껑을 만들었다. 실험용기의 측면 및 가열기의 하부를 통한 열손실을 감소하기 위하여 Fig. 1에서 보듯이 측면은 30 mm 두께의 Isopink 단열재와 3 mm 두께의 합판을 사용하고 바닥에는 50 mm 두께의 Isopink와 3 mm 두께의 베크라이트판을 장치의 지지대위에 설치하였다.

## 2-2 측정장치

실험에서 모든 온도는 지름 0.5 mm의 Type T 열전대와 Digital Thermometer (Daketa Riken 회사, Model TR2721A)를 사용하여 측정하였다. 용기바닥면 온도분포를 구하기 위하여 중앙점을 포함하여 다섯 위치에 열전대의 열점을 설치하였고 용기의 측면과 바닥면을 통한 열손실을 구하기 위하여 측면 Isopink의 안팎과 바닥면 Isopink의 상하부에 각각 5 곳의 열점을 설치하였다. Fig. 1에서 보는 바와같이 실험용기의 중앙에 지름 10 mm의 아크릴튜브를 설치하고 튜브속으로 열전대를 삽입하여 50 mm 간격으로 12개의 열전대 열점을 설치하였다.

농도측정은 두가지 방법을 사용하였다. 첫번째는 가장 기본적이고 간단한 방법인 중량측정법인데 Fig. 1에서와 같이 용기의 측면에 소금물 추출용 주사바늘을 10 곳에 고정시켜 놓고 용액을 추출하여 증발진후에 중량을 Analytical Balance (Sartorius 회사, Model 2842)로 측정하여 계산하였다. 그러나 이 방법은 이미 고정되어 있는 위치에서의 농도만 측정할 수 있기 때문에 임의의 위치에서의 농도를 측정하기 위하여 전기전도도-온도 탐침 (electroconductivity temperature probe, E-T probe)과 이 탐침의 이송장치를 제작하여 사용하였다. 이 탐침의 구조는 Fig. 2에서 보는 바와같이 4개의 전극으로 되어있는데 전

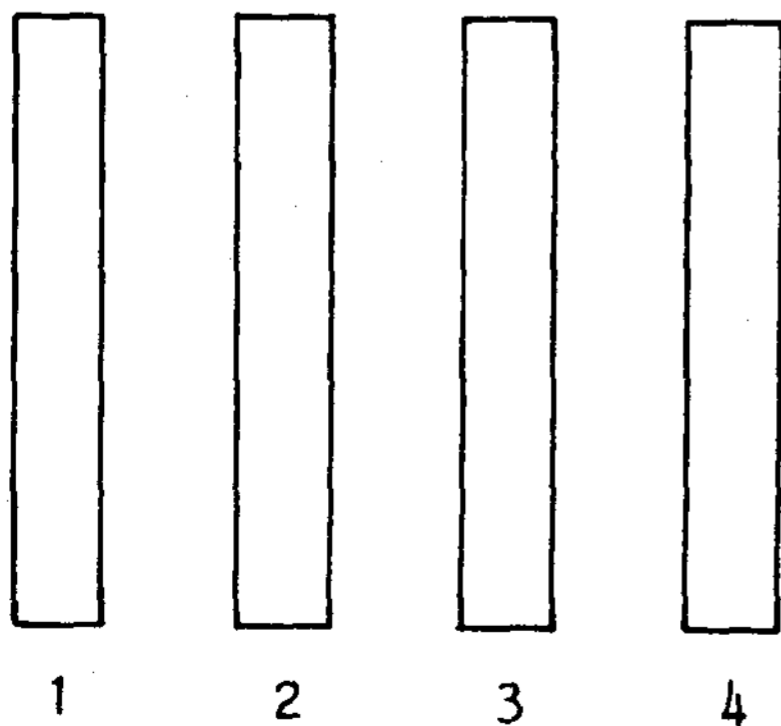


Fig. 2. Electroconductivity-temperature probe.

극 1 과 4 (전류전극)에 일정한 전류를 흐르게 하고 전극 2와 3 (전압전극)사이의 전위차를 측정하여 관계식  $E=KI\rho$ 를 이용하는 방법이다.<sup>(7)</sup> 이 식에서  $I$ 는 전류(mA),  $E$ 는 전압(mV),  $\rho$ 는 비저항( $\Omega\text{-cm}$ )이고  $K$ 는 용기 상수이다. 이 관계식에서 일단 비저항이 측정되면 Saline Water Office의 자료<sup>(8)</sup>를 이용하여 소금물에 대한 비저항, 농도 및 온도의 관계자료로 부터 농도를 구할 수 있다. 전극 1 과 4는 스테인레스튜브로 만들었고 각 튜브속으로 열전대를 설치하여 온도와 함께 측정할 수 있도록 하였다. 전극 2와 3은 스테인레스철드선을 사용하여 유리관에 넣어 만들었다. 전극 2와 3사이의 전위차는 Digital Storage Oscilloscope (Kikusui 회사, Model DSS 6521)로 측정하였다.

농도 및 온도측정을 위하여 전기전도도-온도 탐침을 이송할 때 탐침의 움직임으로 인하여 소금물의 불필요한 요동이나 혼합유동을 방지하고 또한 탐침을 일정기간 동일위치에 고정시키기 위하여 나사식이송장치를 특별히 제작하여 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

## 3-1 초기농도구배와 정미열유속

열-염분 이중확산용기안에 아래로 갈수록 소금물의 농도가 높아지도록 농도구배를 일정하게 소금물을 채워 넣은 뒤에 가열을 하였다. 이때 초기농도구배는 정미가열량과 더불어 각 층의 발달에 영향을 미칠 수 있는 요소이기 때문에 실험을 하기전에 결정을 해 주어야 한다. 이 연구에서는 용기바닥면 근방의 농도가 20%, 용액의 표면에서의 농도가 1% 되도록 선택하였는데 이 때 농도구배를  $kg/m^3/m$  단위로 환산하면  $-436.2 kg/m^3$ 이 된다. 소금물 주입시 층과 층사이의 혼합유동을 최소화하기 위

하여 0.2 mm 두께의 알루미늄판에 10 mm 간격으로 지름 0.2 mm의 구멍을 뚫고 그 위에 10 mm 두께의 스폰지를 얹은 뒤 다시 그 위에 10 mm 간격으로 지름 0.2 mm의 구멍이 뚫린 알루미늄판을 덮어 소금물주입판을 만들어 사용하였다. 증류수를 사용하여 농도가 최고 20%에서 최하 1%가 되도록 농도 1% 차이의 각종 소금용액을 만든 뒤 하루에 약 35.7ℓ씩 5일에 걸쳐서 서서히 주입판을 통하여 주입하였는데 용기내의 소금용액의 높이는 550 mm가 되도록 하였다. 주입 후 소금의 확산에 의하여 선형의 농도구배가 유지되도록 7일간 평온을 유지하였다.

실험시 정미열유속을 결정하기 위하여 우리나라 각 지방의 일사량을 조사한 결과<sup>(9)</sup> 년 평균 일사량은 48내지 240 W/m<sup>2</sup>이었다. 제작한 실험장치의 구조로 보아 과도한 과열로 인하여 아크릴판의 변형이나 성질변화를 방지하기 위하여 변압기로 가열기의 전압을 조절하여 입력열유속을 250 W/m<sup>2</sup>으로 제한하였다. 그러나 정미열유속은 용기의 측면과 바닥면을 통한 열손실을 빼준 값이 되어야 한다. 용기의 측면과 바닥면을 통한 열손실을 계산하기 위하여 용기제작시 측면의 Isopink 양쪽면과 바닥면을 통한 열손실을 계산하기 위하여 용기제작시 측면의 Isopink 양쪽면과 바닥면 Isopink 판 위, 아래면 각각에 5군데씩 열전대의 열점을 고정시켜 두었고 실험을 하는 동안 이들 열점의 온도를 계속하여 측정하여 측정된 결과 가열기를 작동시킨 5일째 부터는 정상상태를 나타내었다. 정상상태에 도달한 뒤 정미열유속은 약 176 W/m<sup>2</sup>으로 나타났으며 이는 부산지방의 년평균일사량에 해당하는 값이다. 실험이 계속되는 동안 정미열유속 값은 약간씩 변화였지만 ±5%의 범위 안에서 176 W/m<sup>2</sup>의 평균열유속을 나타내었다.

### 3-2 온도분포

정미열유속이 정상상태값에 도달되기 까지의 처음 5일동안 용기중앙에 고정설치한 열전대

로 측정된 온도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 고정설치한 열전대의 열점사이의 간격은 50 mm이고 매일 1회씩 측정하였다. 하부대류층은 가열을 시작한 다음날 부터 나타났으며, 5일째

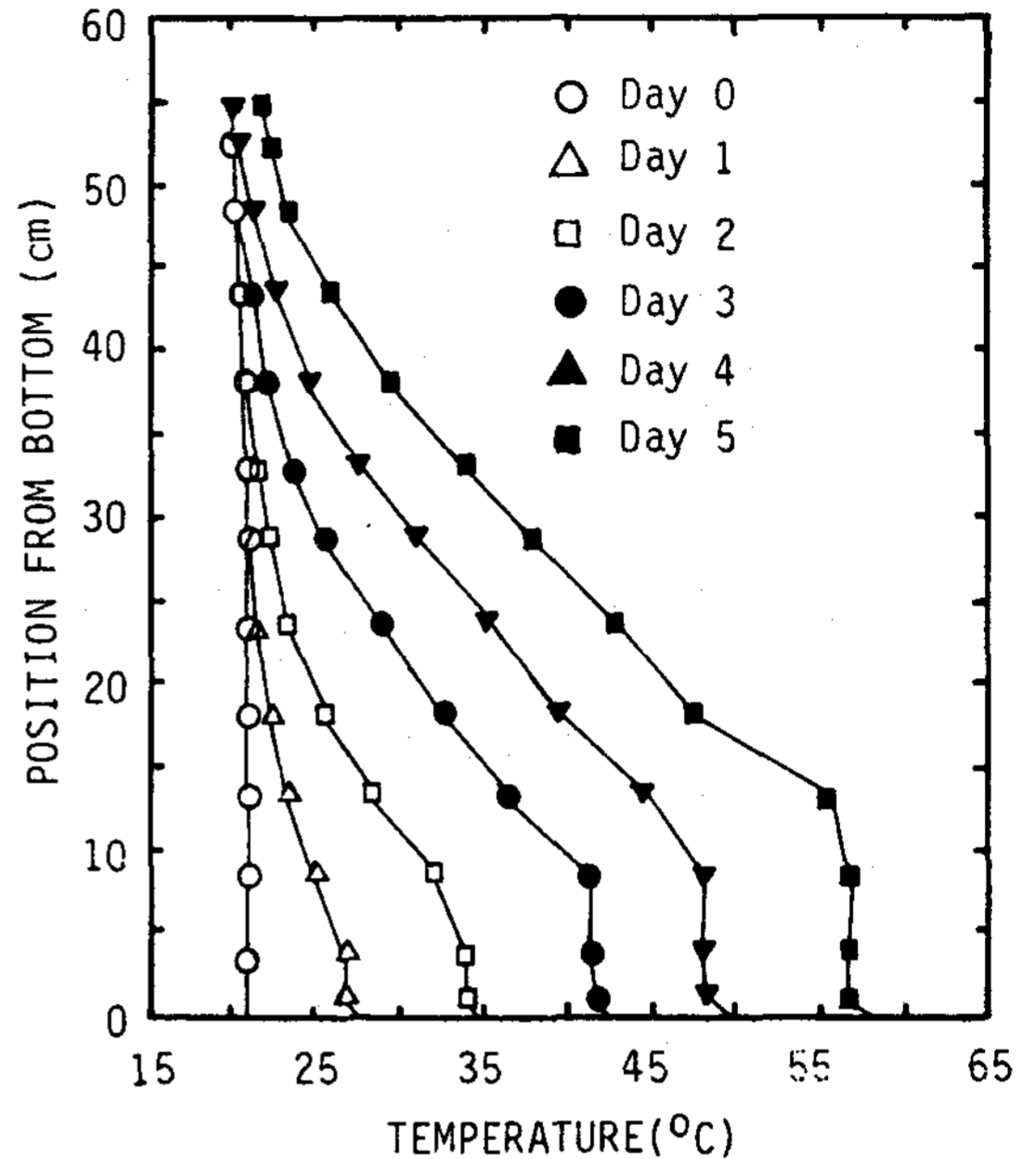


Fig. 3. Temperature distribution for first 5 days.

되는날 열기둥(thermal plume)이 표면에 도달되어 상부대류층이 생기기 시작하였다. 하부대류층의 내부에너지는 확산층으로의 전도열손실과 측면벽으로의 열손실보다 가열기의 정미열유속이 더 크므로 증가하였고, 상부대류층의 내부에너지도 표면에서의 열손실 및 측면벽으로의 열손실보다 확산층으로 부터의 전도열전달이 더 크므로 증가하였다고 볼 수 있다. 열기둥이 표면에 도달된 6일째날부터 실험용기 내부의 정확한 온도 및 농도분포측정을 위하여 전기전도도-온도 탐침을 사용하였다. 6일째날로부터 하부대류층의 온도강하가 계속됨이 확실한 12째날 사이에 대표적인 날의 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 온도분포로부터 상부 및 하부대류층의 두께의 증가를 명백히 볼 수 있다. 하부대류층의 온도는 10째날에 최대에 달하였는데 이 때 하부대류층의 온도는 68.3

제날의 결과를 선택하여 Fig.5에 나타내었다.

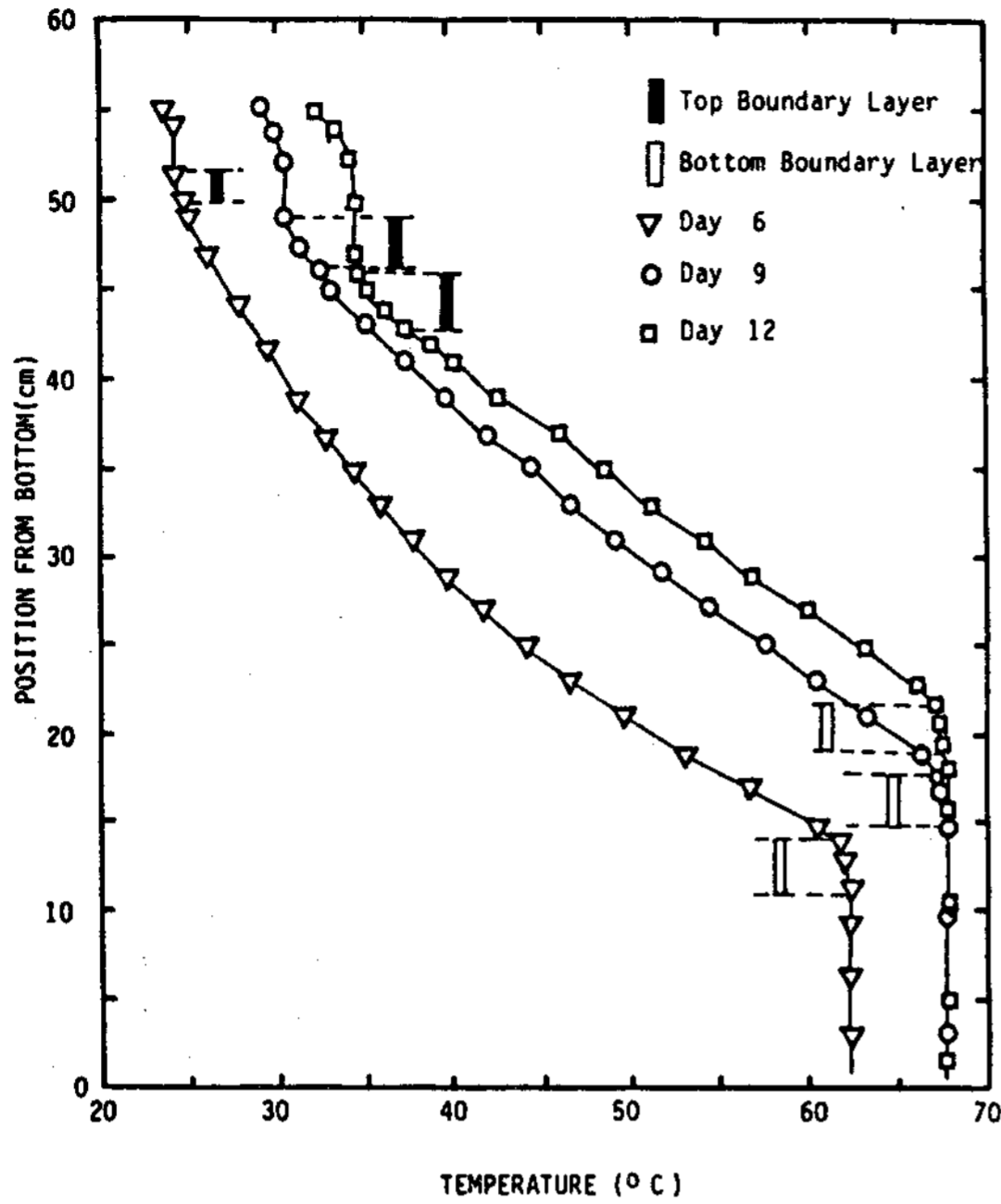


Fig. 4. Temperature distribution for day 6, 9, and 12.

°C였고 상부 및 하부대류층 사이의 온도차는 약 37°C이었다. 즉 가운데 확산층의 훌륭한 단열 효과로 인하여 충분한 에너지 축열효과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 대류층과 확산층사이의 불규칙한 온도분포를 나타내는 구역은 각각 상, 하부의 접촉경계층을 나타내며 이들 구역을 Fig. 4에 줄 (band)로 표시하였다. 하부대류층의 온도가 10일을 기점으로 서서히 떨어지기 시작 하였는데 이는 확산층의 두께의 감소로 인하여 단열효과가 감소하면서 확산층으로의 열손실이 증가함으로써 발생 하였다고 볼 수 있다. 또 이로 인하여 상부대류층의 온도는 12일째까지 계속 증가하였다. 이와같이 하부대류층의 온도가 일단 최대에 도달한 후 서서히 떨어지는 현상은 계속되어 결국은 하부대류층과 상부대류층이 발달되어 확산층은 파괴됨을 확인 하였다.

### 3-3 소금농도분포

전기전도도-온도 탐침을 사용하여 측정된 소금의 농도분포를 실험 첫날과 6, 9, 및 12

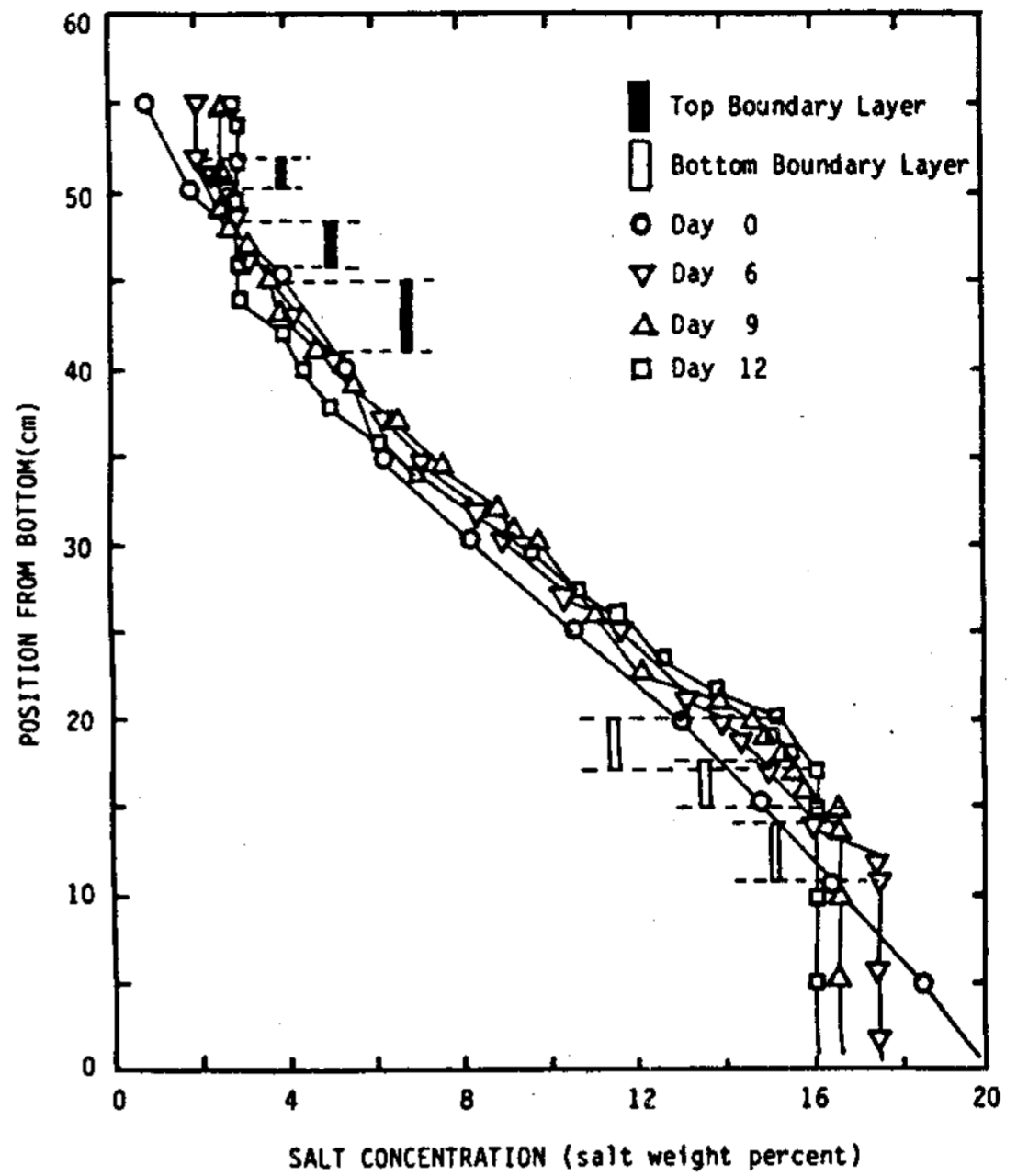


Fig. 5. Salt concentration distribution for day 0, 6, 9, and 12.

가열이 계속되는 동안 하부대류층의 농도는 감소하였고 상부대류층의 농도는 증가하였으나 확산층에서의 농도구배는 크게 변하지 않았으며 이와같은 현상은 실험을 수행하는 동안 계속 관찰 되었다. Fig. 5에서도 Fig. 4에서와 같이 대류층과 확산층사이의 불규칙적인 농도분포를 나타내는 상, 하부 접촉경계층을 줄 (band)로 나타내었다. 상, 하부 접촉경계층에서의 농도변화는 1내지 2%정도로서 커다란 반면, 9일째 날과 12일째 날의 상부 접촉경계층에서의 온도변화를 제외하고 온도변화는 0.5°C내외로 미소하였다. (Fig. 4) 이러한 현상은 소금물 용액에서 열의 확산율이 소금의 확산율보다 훨씬 크기때문에 접촉경계층내에서 온도변화는 작은 반면, 반대로 소금농도변화는 소금의 확산율이 혼합층의 성장율과 비교하여 작기때문에 크게 나타난다고 할 수 있다. 또한 Fig. 5에서 보는 바와같이 하부 접촉경계층의 두께는 약 3cm 정도로 일정하였으나 상부 접촉경계층의 두께는

시간에 따라 다소 증가함을 볼 수 있고, 확산층의 농도구배는 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. Fig. 6은 시간에 따른 상부 및 하부대류층의 높이를 나타낸다. 가열초기에 비교적 하부대류층의 성장율이 크며 시간에 따라 상부 및 하부대류층의 두께가 증가함을 알 수 있다. 따라

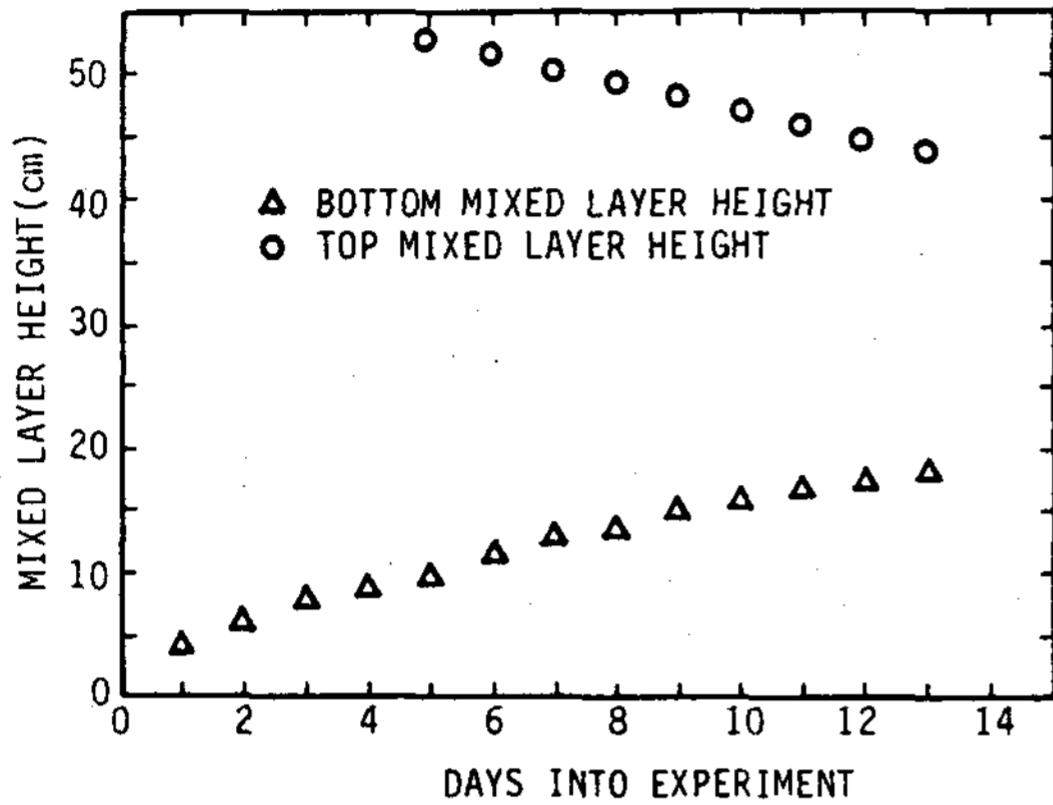


Fig. 6. Bottom and top mixed layer heights as function of time.

서 확산층의 두께가 서서히 줄어들면서 확산층의 단열효과는 감소함을 알 수 있다. Fig.7은 시간에 따른 상부 및 하부대류층의 온도를 나타낸다. 하부대류층의 온도는 10째날 최대에

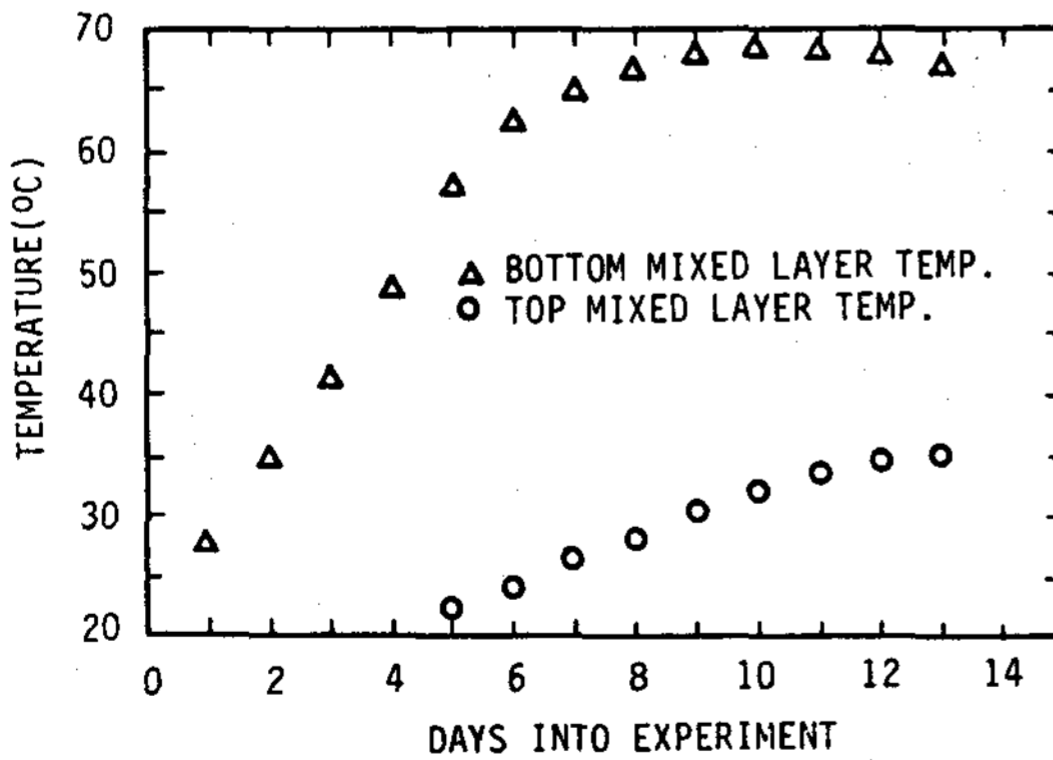


Fig. 7. Temperature in bottom and top mixed layers as function of time.

도달하였고, 10일을 기점으로 서서히 감소하였다. 상부대류층의 온도는 13째 날까지 계속 증가하였으나 12일째날을 기준으로 그 증가율이 감소되기 시작하였는데 이는 온도의 상승으로 인한 증발에 의한 표면열손실의 증가에 기

인 한다고 생각된다. 상승대류층의 온도는 증가하고 하부대류층의 온도는 감소함으로써 서서히 두 대류층사이의 온도차가 줄어들어 에너지 축열효과가 감소되었다. Fig. 8은 시간에 따른 상부 및 하부대류층의 소금농도를 나타낸다. 하부대류층의 농도는 감소하고 상부

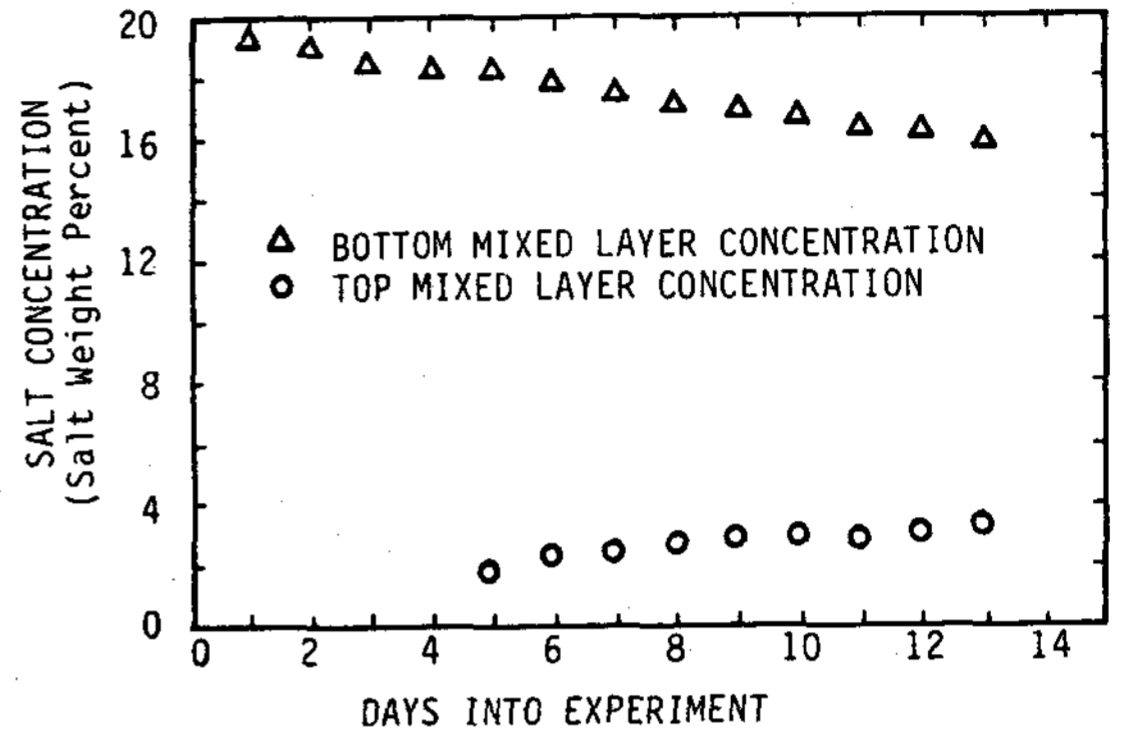


Fig. 8. Salt concentration in bottom and top mixed layers as function of time.

대류층의 농도는 증가하여 두 대류층이 점차 혼합되어가는 경향을 보여준다. 일반적으로 균질 용액에서는 용기내의 전체용액이 대류에 의하여 완전히 혼합되어 하부대류층의 역할을 할 것이나 초기농도구배를 갖는 이 실험에서는 하부대류층의 성장이 상당히 억제됨을 알 수 있는데 이는 초기농도구배가 하부대류층의 성장에 크게 영향을 줄 수 있음을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

초기에 일정한 소금농도구배를 갖는 하부가 열식 실험용 열-염분 이중확산계를 작동하여 온도 및 농도분포를 측정하여 본 연구의 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시간이 증가함에 따라 하부대류층의 농도는 감소하고 상부대류층의 농도는 증가하는 반면에 확산층의 농도구배는 크게 변화하지 않는다.

(2) 점축경계층이 존재하는 것은 온도변화보다는 농도변화에 의한 현상이라 볼 수 있다.



(3) 초기농도구배가  $-436.2 \text{ kg/m}^4$  이고 정미 열유속이 약  $176 \text{ W/m}^2$  일 때 하부대류층은 10 일 후에 최고온도  $68.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 에 도달하고 이후 서서히 감소한다.

#### 후 기

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

#### REFERENCES

1. Tabor, H., "Review Article Solar Ponds," Solar Energy, Vol. 27, No. 3, pp. 181-194, 1981.
2. Zangrando, F. and H.C. Bryant, "A Salt Gradient Solar Pond," Solar Age, Vol. 3, pp. 21-36, 1978.
3. Pinkus A., "The Performance of an Experimental Solar Pond at the Dead Sea," The Negev Institute for Arid Zone Research, Beer Sheba, Israel 1961.
4. Tabor, H., "Large Area Solar Collectors for Power Production," Solar Energy, Vol. 7, No. 4, pp. 189-194, 1963.
5. Weinberger, H., "The physics of Solar Pond," Solar Energy, Vol. 8, No. 2, pp. 45-56, 1964.
6. Nielson, C.E., "Operation of a Small Salt Gradient Solar pond," Abstract from Proc. AS-ISES, 1975.
7. 이주성, 전기화학, 제 3 장, 보성문화사, 1982.
8. Saline Water Conversion Engineering Data Book, Office of Saline Water, U.S. Dept. of Interior, 1965.
9. 노재식, "일사량"; 태양에너지 연구소 보고서 SERI-ED 8003.