

【 論 文 】

벌집형 소형 태양열 저장수조의 열저장층  
내의 온도변화에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Temperature Variation in Heat Storage  
Zone in the Honeycomb-covered Small Saltless Solar Pond

박 이 동\* 황 성 일\*\* 한 동 균\*\*  
Ee-Tong Pak Sung-Il Hwang Dong-Kyun Hahn

ABSTRACT

This paper dealt with an experiments on temperature variation in the heat storage zone due to change of vertical location (height) of sink diffuser and flow extraction in small saltless solar pond (0.5x0.5x1.0M), and the honeycomb device for this experimental purpose consisted of one-tired, sealed, and air filled by honeycomb panels.

As results of experiments,

- 1) The storage zone was formed under lower region below the honeycomb device.
- 2) The higher vertical location of sink diffuser was placed, the more mixing phenomenon increased in the pond at steady flow extraction.
- 3) The more flow extraction increased, the more mixing phenomenon decreased at constant heat exchanger and variable flow extraction.

NOMENCLATURE

Ra : Rayleigh Number  $\left[ \frac{g\beta D^3 \Delta T \rho^2 C_p}{\mu k} \right]$

Gr : Grashof Number  $\left[ \frac{g\beta \Delta T D^3}{\nu^2} \right]$

Pr : Prandtl Number  $\left[ \frac{\mu C_p}{k} \right]$

g : acceleration of gravity (m<sup>2</sup>/sec)

T<sub>L</sub> : Temperature of the lower plate (°K)

T<sub>u</sub> : Temperature of the upper plate (°k)

ΔT : Temperature difference between upper plate and lower plate (°k)

C : Specific heat of air (kcal/kg.°k)

K : Conductivity of air (kcal/sec.m.°k)

D : Height of honeycomb cell (mm)

W : Width of honeycomb cell (mm)

a : Wave number

x : Measured length from left end (m)

y : Measured height from bottom of the pond (m)

\* 정회원 : 성균관대학교 기계공학과

\*\* 정회원 : 성균관대학교 기계공학과 대학원

- $T_{x,y}$  : Measured temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{in}$  : Inlet temperature into the source diffuser ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_{\infty}$  : Mean peak temperature in the pond ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\beta$  : Coefficient of volumetric expansion of air (k)
- $\mu$  : Dynamic viscosity of air (kg/m.sec)
- $\rho$  : Density of air (kg/m<sup>3</sup>)
- $\eta$  : Characteristic height (y/L)
- $\epsilon$  : Characteristic length (x/L)
- $\theta$  : normalized temperature  $\left[ \frac{T_{x,y} - T_{in}}{T_{\infty} - T_{in}} \right]$

## 1. 서 론

1970년대 이후 재생 불가능한 에너지원인 화석연료의 한정성으로 인하여 오늘날 대체 에너지의 요구가 더욱 증대되고 있다.

특히 태양 에너지는 환경에 오염을 주지 않을 뿐만 아니라, 무한정의 에너지를 얻을수 있다는 이점 때문에 최근에 가장 각광을 받는 대체 에너지중의 하나로서 많은 연구가 진행되고 있다. 1) 2)

이러한 태양 에너지의 이용에는 기술적인 한계성이 존재하나, 일반적으로 응용이 쉬운 주택의 냉난방, 온수 급탕, 태양열 발전, 태양 연못등에 이용되고 있다. 3)

여기서, 태양 연못은 염도 구배를 이용한 태양 연못과 소금을 용해하지 않은 무염도 태양 연못으로 구별된다. 전자는 소금 농도 구배에 의해 저장조의 중간에 안정층을 형성하여, 그 하부에 열 저장층을 형성하고, 후자는 벌집형 집열기를 저장조 수면에 설치하여 벌집형 집열기의 내부 공기 특성으로 인하여 야기되는 안정층을 이용하여 그 하부에 열저장층을 형성하는 것이다. 4) 5)

염도구배 태양 연못은 태양열 저장조의 가장 진보된 실험 장치이지만, 다음과 같은 단점

이 존재한다.

1) 낮은 농도의 소금물은 농축된 소금물을 얻기에 오랜 시간이 걸린다.

2) 소금물이 누설되거나 넘쳐 흐르는 경우 농작물은 물론 주변의 지역적인 피해를 초래한다.

3) 염도 구배층은 소금의 확산을 막고, 수력학적 안정을 보장할 수 있도록 주기적으로 농도구배가 유지되도록 해야 한다.

4) 농도 구배가 붕괴되지 않는 범위내에서 에너지를 추출해야 한다.

5) 높은 소금 함유량은 재질을 부식케하며, 대규모 저장조에서 증발에 의한 물손실이 크다.

이상과 같은 결함을 해결하기 위해 소금이 용해되지 않은 물을 사용한 태양 연못을 고려하게 되었다. 적은 밀도차에 의해 일어나는 자연 대류에 의한 열 손실을 방지하기 위하여 물리적 장치인 벌집형 집열기 (Honeycomb Device)를 사용하게 되었다. 따라서 본실험은 벌집형 집열기를 사용한 무염도 태양 연못에 End to End 방식을 채택하여 소형 저장조 내에서 추출 디퓨저의 위치등을 변화시켰을 때 열 저장층의 형성과 온도 분포를 조사하였고, 안정 지배변수인 Rayleigh Number를 사용하여 벌집형 집열기의 내부 공기층에서 안정성 여부를 확인하였다.

## 2. 열적 안정성

무염도 태양 연못은 저장조 내부에 안정층이 형성되지 않으므로, 안정층을 형성할수 있는 장치로서 벌집형 집열기를 저장조의 수면에 설치하여, 벌집형 집열기 하부에 열저장층을 형성하게 한다. 그러므로 벌집형 집열기 내부 공기층의 안정층 형성 여부가 열저장층 형성 여부를 결정하게 된다.

따라서, 벌집형 집열기의 안정 지배변수로서 부력과 점성력의 비로 정의되는 Rayleigh Number를 적용하여 벌집형 집열기 내부의 안정성 여부를 조사하였다.

본 실험에서 측정된 집열판과 덮개판의 온도를 각각  $T_L$ ,  $T_U$ 라고 하면 Rayleigh Number는 다음식으로 표현된다.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{9\beta D^3 \Delta T \rho^2 C_p}{\mu k}$$

$$Gr = \frac{9\beta \Delta T D^3}{\nu^2}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

K.G.T. Hollands<sup>6)</sup>는 Aspect Ratio의 함수로 표현되는 Wave Number ( $a = \pi\sqrt{5}(w/d)$ )에 따른 Rayleigh Number로서 안정과 불안정을 판단했는데, Aspect Ratio( $w/d$ ) 4.05 즉, Wave Number  $a = 28.45$ 인 경우 안정한계 Rayleigh Number는  $7 \times 10^5$ 이었다. 본 연구에서도 이 값을 안정 기준 값으로 채택하였다.

### 3. 실험 장치 및 절차

#### 3-1 실험 장치

실험장치의 대략적인 개요도는 Fig.1과 같다.

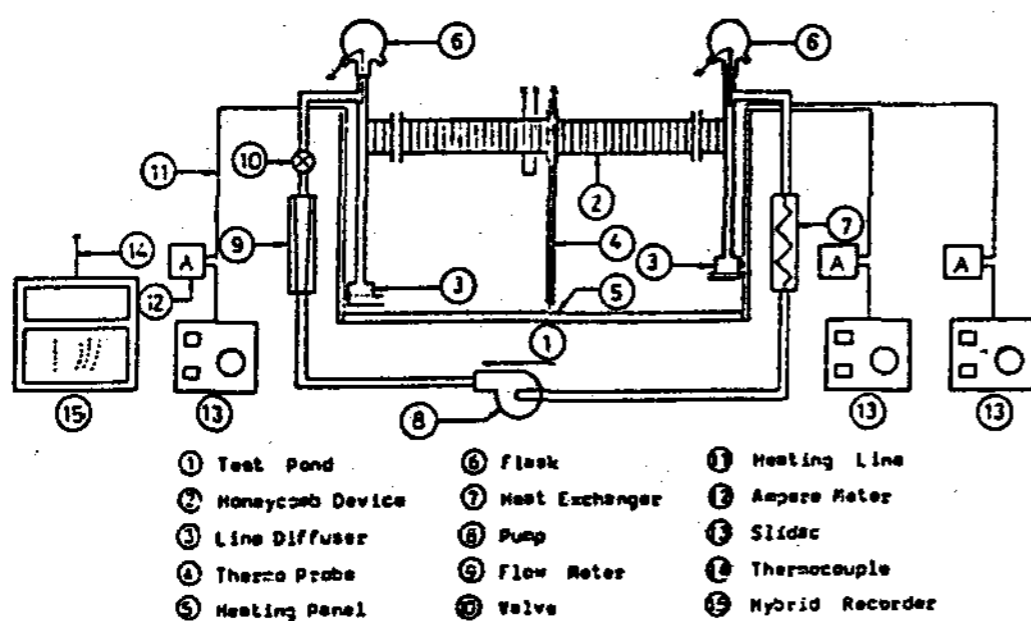


Fig.1 Schematics of experiment

저장조는 높이 0.5 m, 폭 0.5 m, 길이 1.0 m인 직육면체로 구성되어 있으며 8 mm 두께의 안전 강화 유리로 제작하였다. 저장조의 밑면은 SUS 304 스테인레스 판을 사용하였고 스테인레스 판위에 두께 5 m, 폭 0.45 m, 길이 0.95 m인 알루미늄판 가장 자리에 직경 3 mm의 구멍을 3 mm 간격으로 뚫어 그 사이에 피복된 니크롬선을 감아 가열장치로 사용하였다.

디퓨저는 유입과 유출 다기관을 저장조 폭에 대하여 균등하게 분포되도록 하였으며, 65 × 470 mm인 두 평판 사이에 두 개의 Distribution Pipe로 부터 다기관을 통하여 물을 유입과 유출을 하도록 하였다. 디퓨저를 채택한 방법은 End-to-End 방식이며, 유입은 저장조 저면으로부터 1.8 cm에 고정시키고, 유출은 저면으로부터 7.1, 18, 27 cm로 변화시키도록 제작하였다. 벌집형 집열기와 냉각 장치는 Fig.2, Fig.3에서 보여주고 있다. 벌집형 집열기의 재질은 아크릴 (Polymetyl Methacryl)로서 투명도 0.96, 열전도 계수 0.042 w/m °C이다. 그 크기는 폭 450 mm, 높이 81

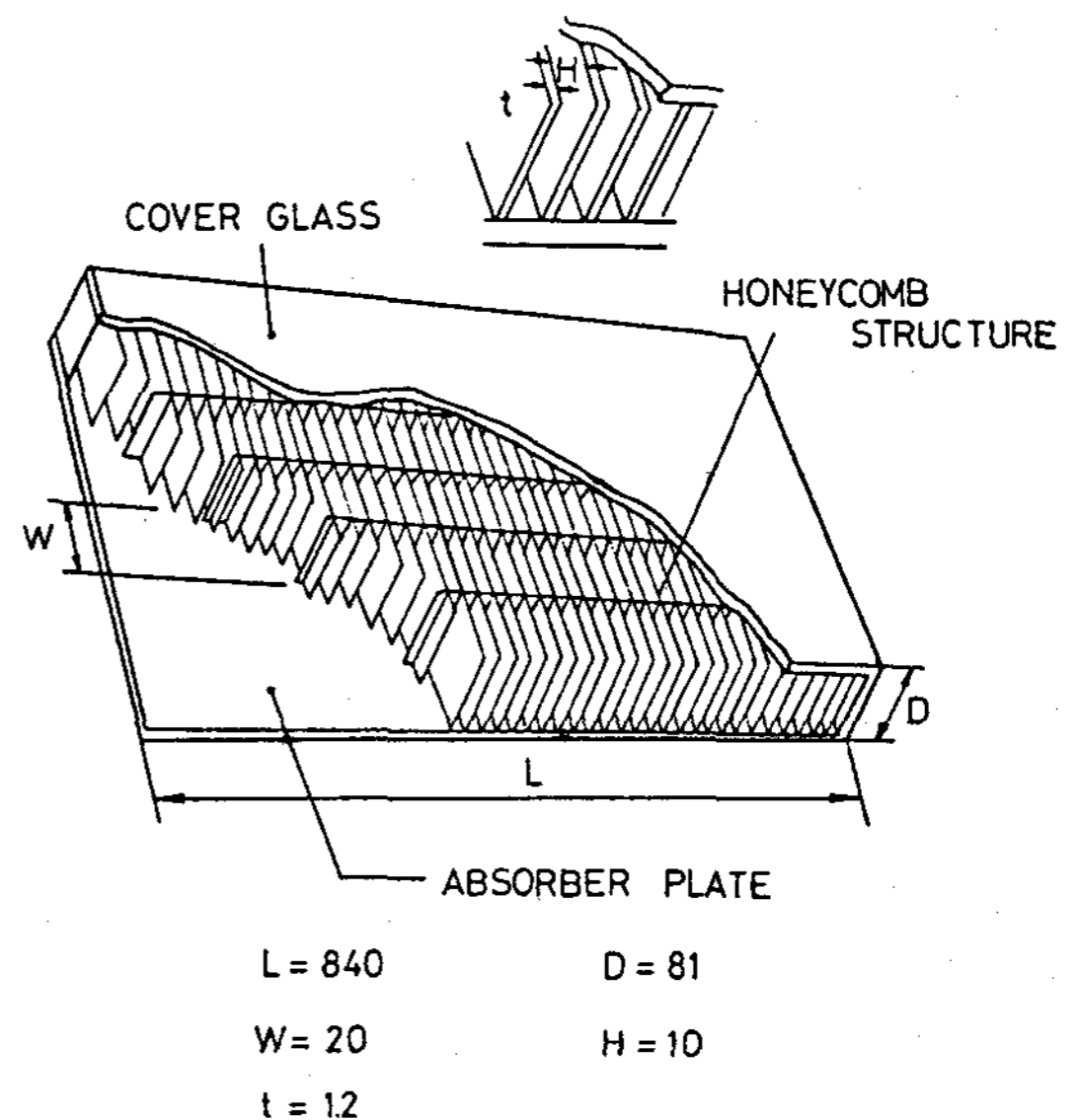


Fig.2 Structure of honeycomb solar collector

mm, 길이 840 mm 이며 Cell 단면적은 200 mm 이다.

냉각장치는 저장조로부터 나온 작동 유체를 냉각시키는 장치로 비교적 단순한 동심 원통형의 형태이며 길이 800 mm, 내경 3/4 inch인 P.V.C. 관을 외측의 관으로 하고, 그 내부에 작동 유체의 관로인 내경 10.3 mm의 동관을 설치하였다.

계측 장치로서 온도 측정은 별집형 집열기의 유입 디퓨저에서 수평으로 5 cm 떨어진 지점, 저장조 중심부, 유출 디퓨저로부터 수평으로 5 cm 떨어진 지점에서 저장조 내로 3개의 구멍을 뚫고, Thermocouple을 삽입하여 저장조 저면에서 2.0 cm 떨어진 지점으로부터 3.0 cm 등간격으로 Thermoprobe를 움직이면서 Hybrid Recorder를 통하여 온도를 측정하였다. 이때 별집형 집열기의 내부는 공기가 새지 않도록 밀봉에 유의하였다.

### 3.2 실험 절차

1. 저장조 저면에서 47.5 cm 높이에 고정된 별집형 집열기와 반정도 물에 잠기도록 저장조 안에 물을 넣고 520 watt의 가열장치를 이용하여 저장조 내의 물이 50°C를 유지할 때 까지 가열한다.

2. 펌프를 가동시켜 저장조 내의 물을 순환시킬 때 열교환기의 냉각수 양은 열평형이 될 수 있도록 조절하고, 게이트 밸브를 이용하여 유동율을 조절한다.

3. 순환되는 유량을 0.05, 0.10, 0.15,

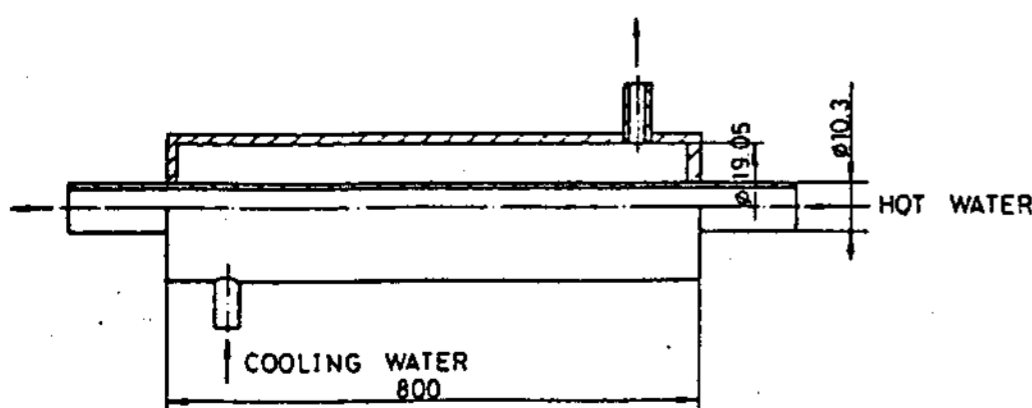


Fig. 3 Heat exchanger

0.20 (m<sup>3</sup>/h)인 4 단계로 변화시키면서 온도를 측정하여 온도변화를 조사하고, 유출 디퓨저의 위치를 7.1 cm, 18 cm, 27 cm인 3 단계를 변화시키면서 위의 절차를 반복 수행하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

유입디퓨저가 수조저면으로 부터 1.8 cm, 추출디퓨저가 수조저면으로 부터 18 cm일때, 유량을 단계적으로 변화시키면 다음과 같다.

추출유량이 0.10 m<sup>3</sup>/h 일때 무차원 온도분포는 Fig.4 와 같다.

수조높이가 5 cm - 17 cm 사이에서 유입디퓨저, 수조중심부, 추출디퓨저부근에서 무차원 온도분포는 0.84-0.86, 0.86-0.88, 0.86-0.88이며, 수조높이 17 cm 이상에서는 0.89-0.93, 0.89-1.0, 0.95-1.0으로서 유입디퓨저와 추출디퓨저 부근에서 약간의 온도차를 보여준다.

추출유량이 0.15 m<sup>3</sup>/h일때 무차원 온도분포는 Fig.5 와 같다.

유입디퓨저 부근의 경우 무차원 온도분포는 0.23-0.86 사이에 분포되나, 수조높이 2 cm에

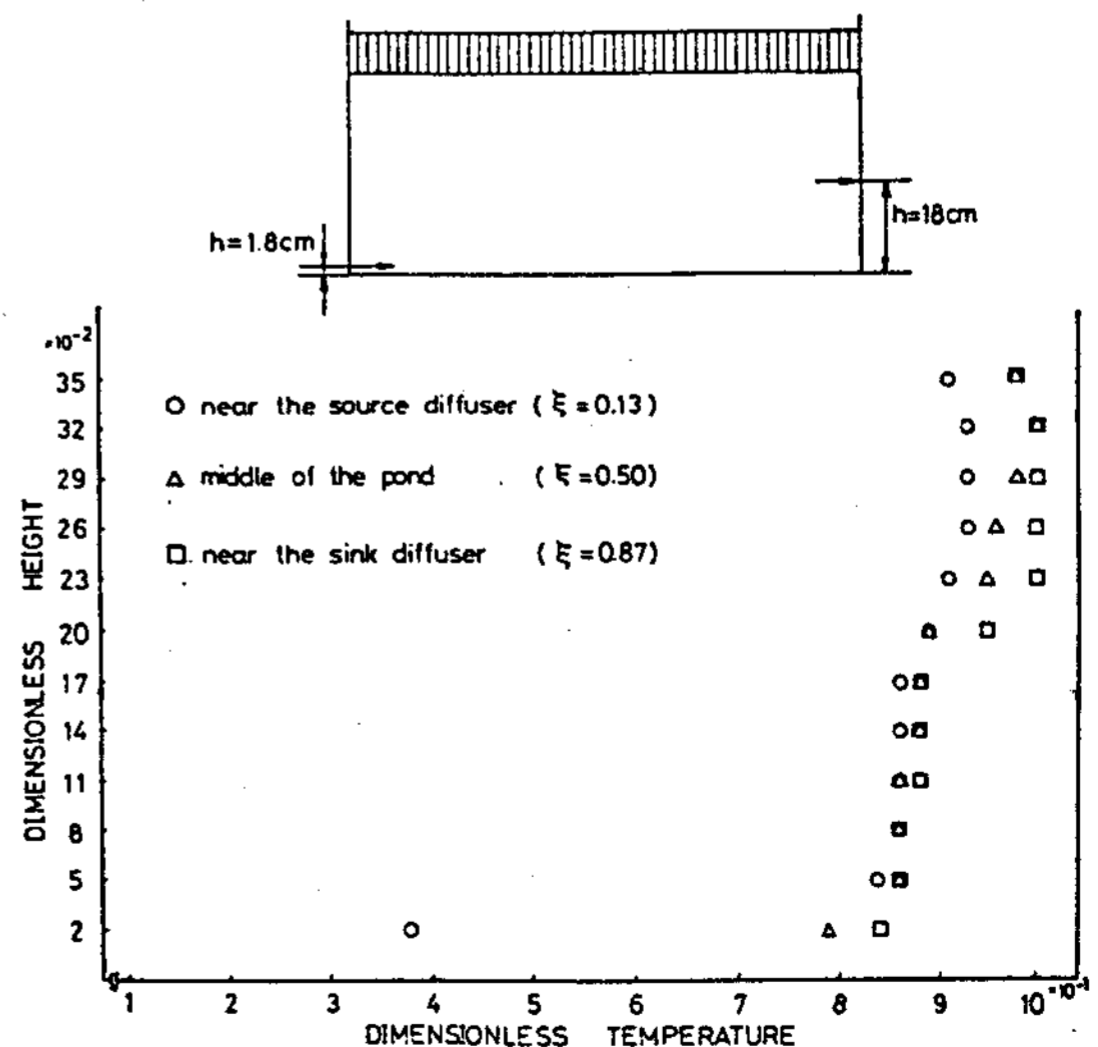


Fig. 4 Dimensionless temperature profile with 0.10 m<sup>3</sup>/h of water flow rate

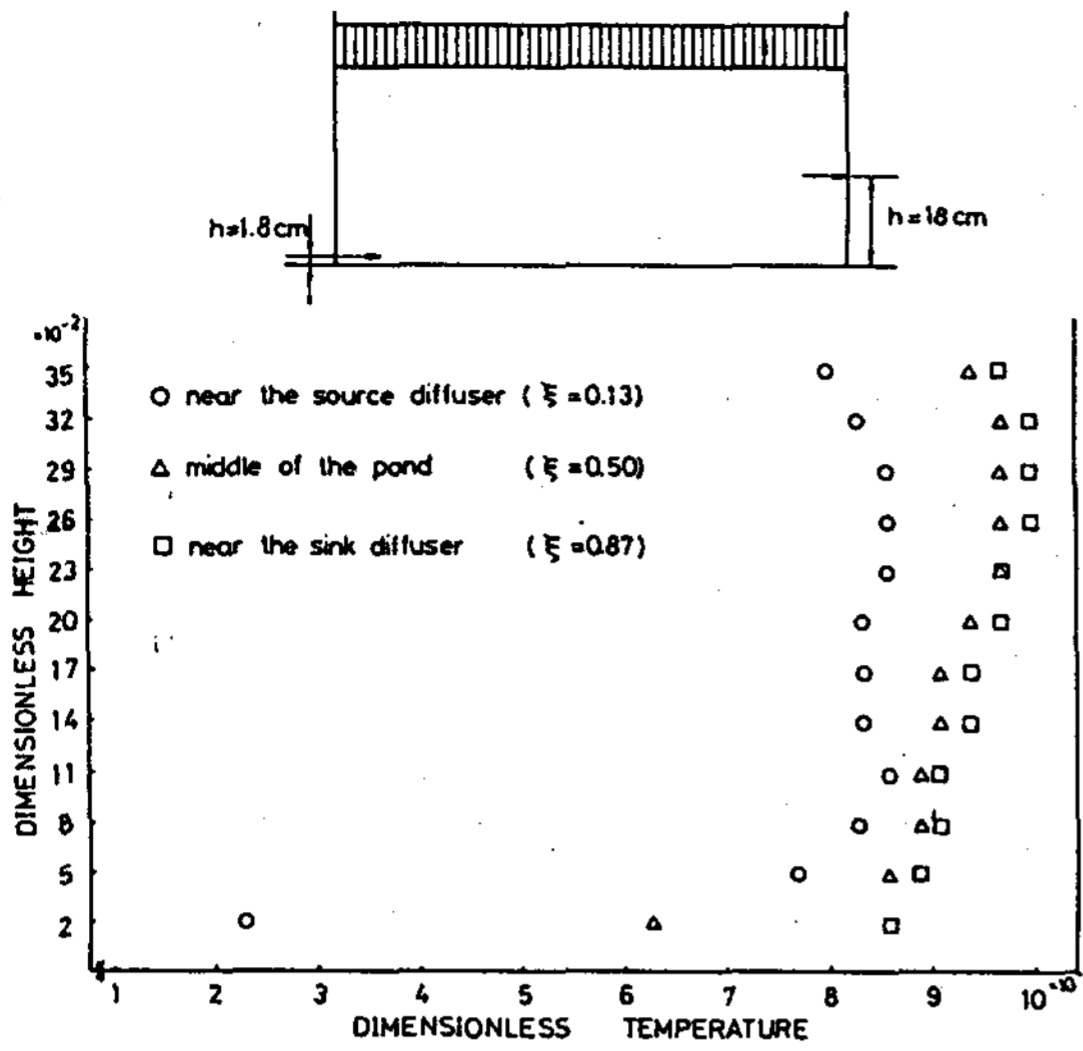


Fig. 5 Dimensionless temperature profile with 0.15 m<sup>3</sup>/h of water flow rate

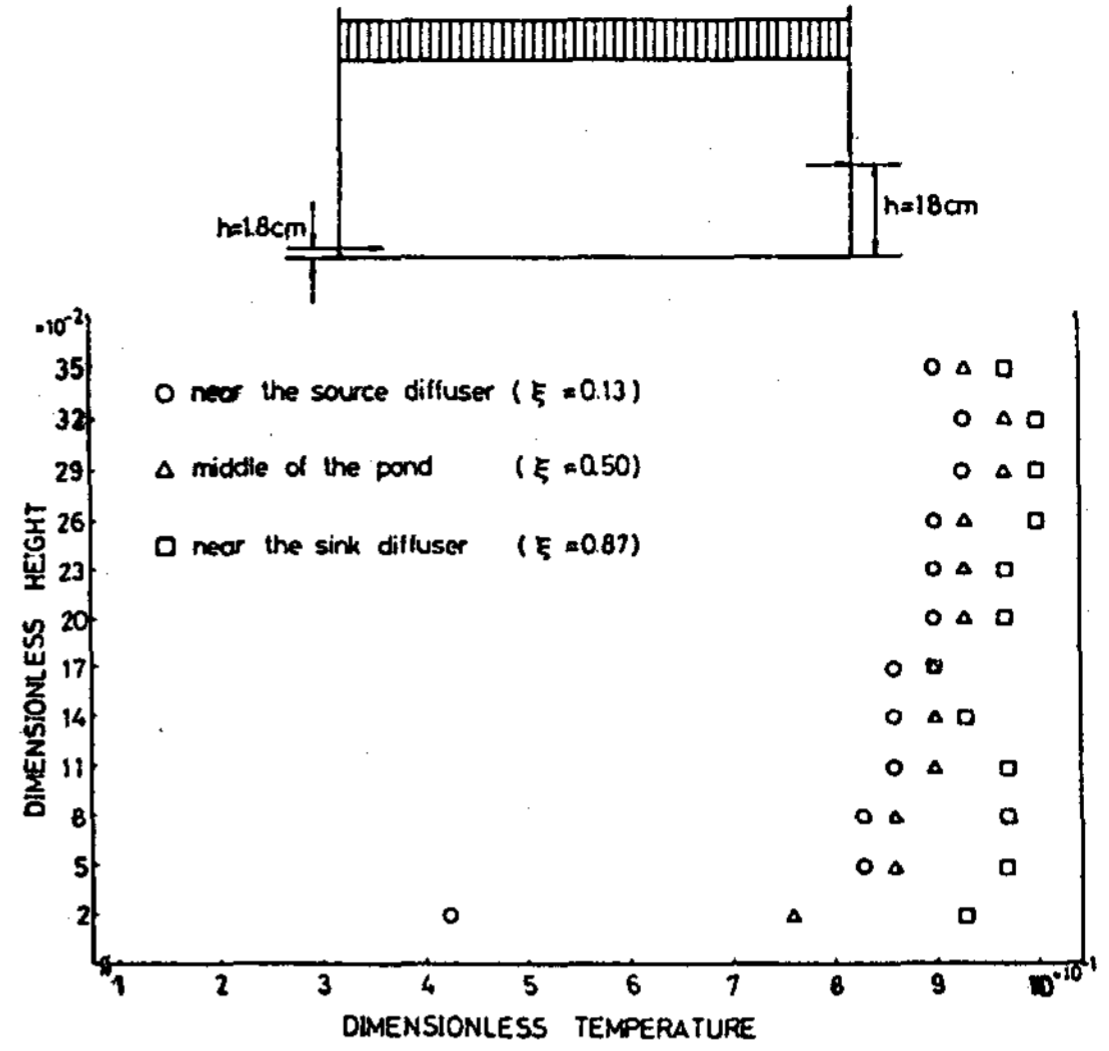


Fig. 6 Dimensionless temperature profile with 0.20 m<sup>3</sup>/h of water flow rate

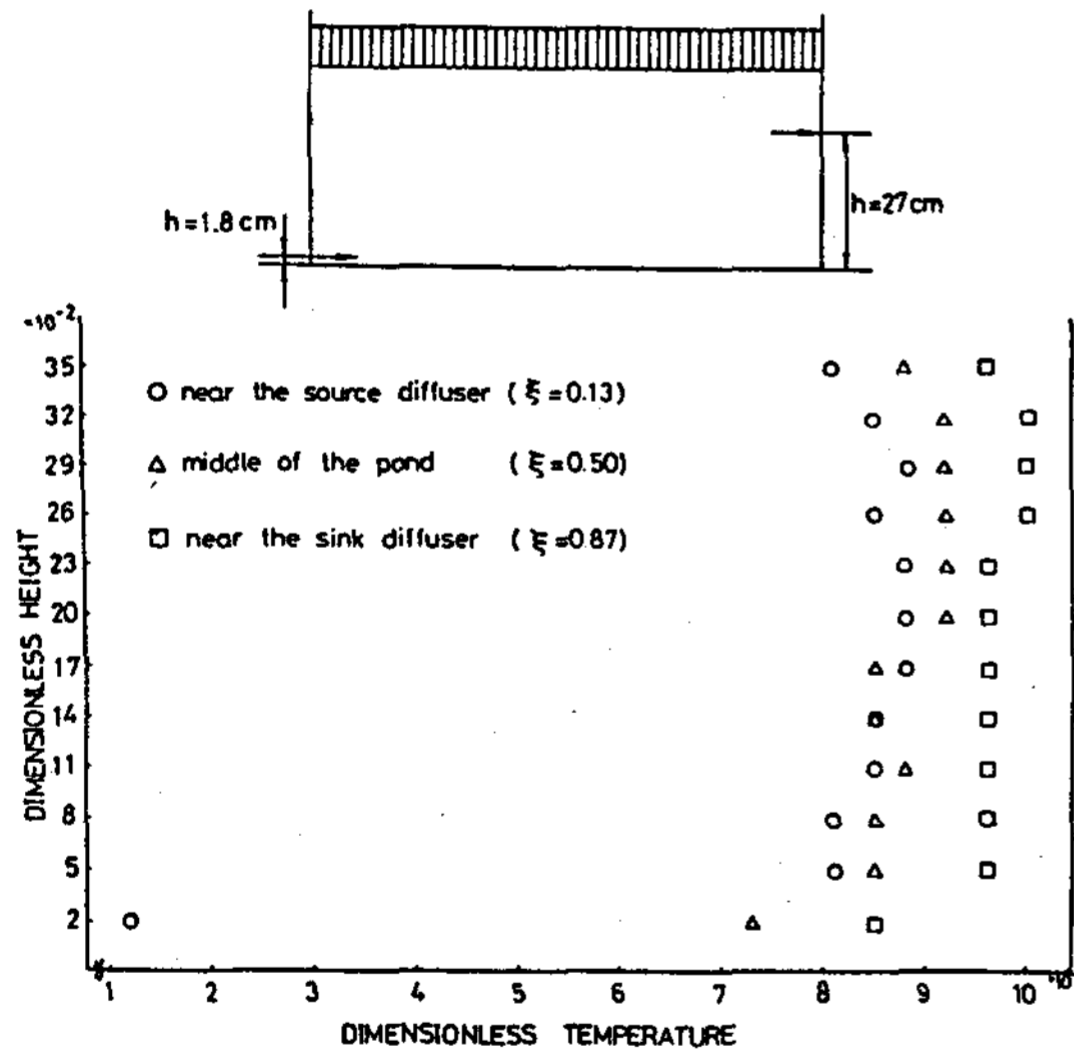


Fig. 7 Dimensionless temperature profile with 0.20 m<sup>3</sup>/h of water flow rate

서 0.23, 5 cm에서 0.77로 갑자기 증가하는 현상을 보여주며, 그 이상에서는 완만한 증가 혹은 감소현상을 보여준다. 수조중심부, 추출디퓨저 부근에서는 0.63-0.97, 0.86-1.0사이엔 분포하며, 추출디퓨저 부근의 경우는 수조 중심부, 유입 디퓨저부근에서의 온도분포 영역이 감

소되었음을 볼 수가 있다.

추출디퓨저의 위치가 18 cm일 때 무차원 온도 분포는 Fig. 6과 같다.

유입디퓨저 부근에서 무차원 온도분포는 0.45 ~ 0.93이고, 수조높이가 2 cm ~ 5 cm사이에서 증가폭은 추출유량이 0.15 m<sup>3</sup>/h인 경우와 거의 비슷했다. 수조중심부, 추출디퓨저 부근에서는 0.76~0.97, 0.93~1.0이며, 추출유량이 0.15 m<sup>3</sup>/h인 경우보다 온도분포 영역이 감소되었다.

유입디퓨저가 수조저면으로 부터 1.8 cm, 추출 유량이 0.2 m<sup>3</sup>/h일 때, 추출디퓨저를 수조저면으로 부터 단계적으로 변화시키면 다음과 같다.

추출디퓨저의 위치가 27 cm일 때 무차원 온도분포는 Fig. 7과 같다.

유입디퓨저, 수조중심부, 추출디퓨저 부근에서 무차원 온도 분포는 0.12~0.88, 0.73~0.92, 0.85~1.0이며, 수조높이 5 cm 이상에서 무차원 온도분포가 전반적으로 0.81~1.0이다.

이상에서 추출유량이 증가함에 따라 유입구부근, 중심부 부근에서의 온도분포는 거의 비슷한것을 볼 수가 있고, 추출부근에서 무차원 온

도분포는 약간 증가함을 보여주고 있다.

이는 추출유량이 증가할때 유입속도가 증가되고, 수조내부 전체에서 주위유체로의 ENT-RAINMENT를 억제하여 혼합을 감소시키기 때문이다. 추출디퓨저의 위치가 수조저면으로 부터 증가할때 무차원 온도분포는 감소하는 것을 보여주며, 18 cm 이상에서는 수조내부의 혼합으로 인하여 열 확산이 빨리 진행되는 것을 알 수가 있다.

그리고, 추출유량과 추출디퓨저의 위치를 변화시키면서 각 경우의 안정 지배변수인 RAYLEIGH NUMBER의 값은 314168.74-323244.33 사이의 값으로 안정 기준값보다 상당히 작다.

## 5. 결 론

이상의 실험결과로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 실험수조에서 벌집형 집열기 하부는 축열층을 형성하였다.
- 2) 추출유량이 일정하고, 추출디퓨저의 높이가 수조저면으로 부터 증가함에 따라 수조내부에서 혼합현상이 증가하여 주위유체로의 열확산이 빨리 진행되었다.
- 3) 추출디퓨저의 높이를 일정하게 하고, 추출

유량을 증가시킴에 따라 수조내부 전체에 걸쳐 혼합현상이 감소하여 주위 유체로의 열확산이 느리게 진행되었다.

## REFERENCES

1. A. Rabl and C.E. Nielsene, "Solar Ponds for Space Heating", Solar Energy, Vol. 17, pp. 1-12, 1975.
2. C.E. Nielsene, "Experience with a Prototype Solar Pond for Space Heating", I.S.E.S. Meeting, Winnipeg, Canada, 1976.
3. Y.F. Wang and A. Akbarzadeh, "Parametric Study on Solar Ponds", Solar Energy, Vol. 30, pp.555-562, 1983.
4. Federicea Zangrando, "Heat and Mass Extraction from Solar Ponds: Analysis of a Laboratory Facility", SERI, TR-1569, April, 1982.
5. Yogesh Jaluria, "Heat Rejection and Energy Extraction within Solar Ponds" SERI, RR-1393, February, 1982.
6. K.G.T. Hollands, "Honeycomb Devices in Flat-plate Solar Collectors", Solar Energy, vol.9, pp. 159-164. 1965.