

平板形 太陽熱集熱器의 最適하니콤 크기에 關한 研究

An Experimental Study on Optimum Honeycomb Sizes of a Flat - Plate Solar Collector

김 태 진* 김 종 보**
T.J. Kim J.B. Kim

ABSTRACT

To suppress the natural convection within enclosure spacing it has been shown theoretically and experimentally that the introduction of cell walls will effectively raise the critical Rayleigh number by providing more shear surfaces within the fluid.

For a solar collector, a useful solar thermal converter requires effective control of heat losses. It has been reported that the natural convection can be suppressed and the heat performances of the solar collector increased by placing thin, poorly conducting material honeycomb between the absorber plate and the coverglass.

The heat performances were measured and compared directly throughout the simultaneous installation of two solar collectors, one with honeycomb structures fabricated from thin polycarbonate sheet and the other without honeycomb structures. Various tilt angles of 30, 45 and 60 deg. from the horizontal and the honeycomb sizes (W×H) of 10×10, 10×20 and 10×40 mm were utilized in the present investigation.

It is found that the larger the tilt angle are, the greater the heat losses are, and that the smaller the honeycomb size is, the larger suppression effect of heat losses are. Especially, at tilt angles of 30 degree, the heat use ratio of solar collector with the honeycomb sizes of 10×10 mm improved approximately 29.5% more than that without honeycomb structures.

NOMENCLATURE

Ac : absorber plate area, m²

A_H : aspect ratio, (A_H = $\frac{H}{L}$)
A_w : horizontal aspect ratio, (A_w = $\frac{W}{L}$)
Ca : specific heat of air, Kcal/kg°C
C_w : specific heat of water, Kcal/kg°C
E : heat use ratio, Q_{use}/Q_{total}

* 일진전기 (주) 기술연구소

** 正會員 : 인하대학교 기계공학과

- g : gravity constant, 9.80665 m/s^2
- Gr : Grashof number $Gr = g \cdot \beta \cdot (T_p - T_c) \cdot L^3 / \nu^2$
- H : length of honeycomb cell, m
- H_T : instantaneous intensity of the solar radiation, $\text{Kcal/m sec } ^\circ\text{C}$
- K : conductivity of air, $\text{Kcal/m sec } ^\circ\text{C}$
- L : height of honeycomb cell, m
- m : mass flow ratio of water, kg/sec
- Nu : Nusselt number, $Nu = U L / K$
- Pr : Prandtl number, $Pr = \mu Ca / K$
- Q_{loss} : heat loss quality, $\text{Kcal/m sec } ^\circ\text{C}$
- Q_{use} : useful heat energy, $\text{Kcal/m sec } ^\circ\text{C}$
- Q_{total} : total heat energy, $\text{Kcal/m sec } ^\circ\text{C}$
- Ra : Rayleigh number, $Ra = \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot Ca \cdot L^3 \cdot \Delta T / (\mu K)$
- t : thickness of honeycomb cell, m
- T_a : mean temperature of the air, $^\circ\text{C}$
- T_c : mean temperature of the coverglass, $^\circ\text{C}$
- T_i : mean temperature of the inlet water, $^\circ\text{C}$
- T_o : mean temperature of the outlet water, $^\circ\text{C}$
- T_p : mean temperature of the absorber pate, $^\circ\text{C}$
- U : overall heat transfer coefficient, $\text{Kcal/m sec } ^\circ\text{C}$
- W : width of honeycomb cell, m

GREEK LETTER

- β : volume coefficient of expansion for air, $1/^\circ\text{C}$
- ΔT : temperature difference between the T_p and T_c , $^\circ\text{C}$
- θ : solar collector tilt angle, deg
- μ : dynamic viscosity of air, Kcal/ m sec
- ν : Kinematic viscosity of air, m^2/sec
- α : absorptivity
- τ : transmissivity
- ρ : density of air, Kcal/m^3

1. 緒 論

最近 代替에너지源으로서 脚光을 받고 있는 태양에너지는 여러 分野 즉 建物の 冷暖房, 溫水 給湯, 太陽電池, 太陽熱發電 등에 利用되고 있으며 이들의 效果的인 利用을 위한 꾸준한 研究가 國內外的으로 활발히 進行되고 있다. 그런데 太陽熱을 熱에너지로 最大한 利用하기 위해서는 集熱裝置인 集熱器의 性能을 높이는 것이 最大관심사이다.

太陽熱集熱器에서 가장 基本이 되는 研究 中의 하나는 集熱板과 덮개 유리사이의 密閉空間 內에서 發生하는 自然對流 熱損失 現象을 究明하는 것이다.

Hottel¹⁾ 등은 平板形 太陽熱 集熱器에서 外部로 放出되는 熱損失을 實驗的으로 調查하여 熱損失 抑制 必要性을 主張하였다. Hollands²⁾³⁾ 은 水平集熱器에서 密閉된 空氣層內에 Honeycomb을 設置하면 臨界 $Ra(Rac)$ 를 높일 수 있어 對流現象을 抑制할 수 있다고 하였다.

Charters⁴⁾ 등은 流動可視化技法 (Flow Visualization Technique)을 使用하여 水平集熱器內에 Honeycomb 設置는 停止層의 安定性을 더욱 더 높여주고 傾斜진 集熱器內에서는 流體가 停止狀態에 있지 않고 끊임없이 流動하여 항상 集熱板과 유리 덮개 사이의 溫度 差에서 오는 自然對流가 發生함을 밝혔다. Cane⁵⁾ 등은 水平集熱器內에 Honeycomb을 設置할 때 Rac 보다 작은 Ra 範圍에서는 自然對流 抑制 效果가 대단히 크며 傾斜集熱器內의 Honeycomb 設置는 對流運動을 緩和시키며 形狀比 (Aspect ratio)가 增加할수록 熱損失量이 增加함을 보여 주었다. Arnold⁶⁾ 등은 直四角形 Honeycomb을 設置하였을 경우 $10^3 < Ra < 10^6$ 範圍에서는 形狀比와 傾斜角이 增加 함에 따라 Nu 즉 熱損失量이 增加한다는 것을 發表하였다. Mayer⁷⁾ 등은 干涉技法 (Interfero-

metric Technique)에 의하여 直四角形 Honeycomb에서 形狀比가 4보다 작은 경우 熱損失係數는 形狀比의 函數이며 특히 形狀比가 1과 2사이에 있을 때 가장 높은 熱傳達係數를 갖음을 밝혔다. Linthorst⁸⁾ 등은 Honeycomb 形狀比(H/L) 1以上에서 1次的 2次流動이 發生하고 Ra가 增加함에 따라 cell中心에서도 部加的 2次流動이 생겨 더 많은 熱損失이 나타남을 流動可視化技法을 통해 알아냈다.

以上과 같이 集熱板과 유리덮개사이의 密閉空間에서 發生하는 熱損失中 가장 큰 損失은 自然對流에 依한 熱損失이다. 따라서 이 熱損失을 抑制하기 위해 密閉空間內에 Honeycomb을 設置하면 集熱器의 性能이 向上된다는 것이 밝혀졌다.

本 研究에서는 Honeycomb을 갖은 集熱器와 갖지 않은 集熱器를 同時에 設置하여 同一한 大氣條件下에서 Honeycomb이 集熱器 效率를 얼마나 增加시키는지 보려 한다. 또한 Honeycomb 크기(W×H: 10×10, 10×20, 10×40 mm)와 水平面과의 傾斜角(30°, 45°, 60°)에 따른 熱損失 抑制效果를 究明하고자 한다.

2. 理論解析

集熱器로부터 外部로 放出되는 熱損失은 集熱板과 유리덮개사이의 自然對流에 依한 損失, 集熱器 周圍로의 熱輻射 損失, 集熱器의 側面과 後面을 통한 熱傳導 損失등으로 크게 分類할 수 있다. 그런데 熱輻射 損失은 集熱板과 유리덮개사이의 溫度差가 크지 않기 때문에 無視할 수 있고 集熱器 側面 및 後面의 熱傳導에 依한 熱損失도 充分히 斷熱시켰으므로 無視할 수 있다. 그러므로 熱損失에 가장 重要한 影響을 미치는 것은 集熱板과 유리덮개사이의 密閉空間內의 空氣流動에 依한 自然對流 熱損失이다. 한편 太陽熱輻射 에너지는 다음과 같은 方程式을 갖는다.

$$Q_{total} = Q_{use} + Q_{loss} \dots\dots\dots (1)$$

여기서

單位時間當 集熱板으로부터 얻는 에너지의 總量

$$Q_{total} = A_c H_T \tau \alpha \dots\dots\dots (2)$$

單位時間當 集熱板으로부터 얻는 有用한 에너지의 量

$$Q_{use} = \dot{m} C_w (T_o - T_i) \dots (3)$$

單位時間當 集熱板으로부터 放出되는 總熱損失 量

$$Q_{loss} = A_c U (T_p - T_a) \dots\dots\dots (4)$$

따라서 熱利用率(Heat Use Ratio) 혹은 熱吸收率을 E라 할때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E = \frac{Q_{use}}{Q_{total}} = \frac{\dot{m} C_w (T_o - T_i)}{A_c H_T \tau \alpha} \dots (5)$$

3. 實驗裝置 및 實驗方法

3.1 實驗裝置

Fig.1은 本 實驗裝置의 寫眞이다.

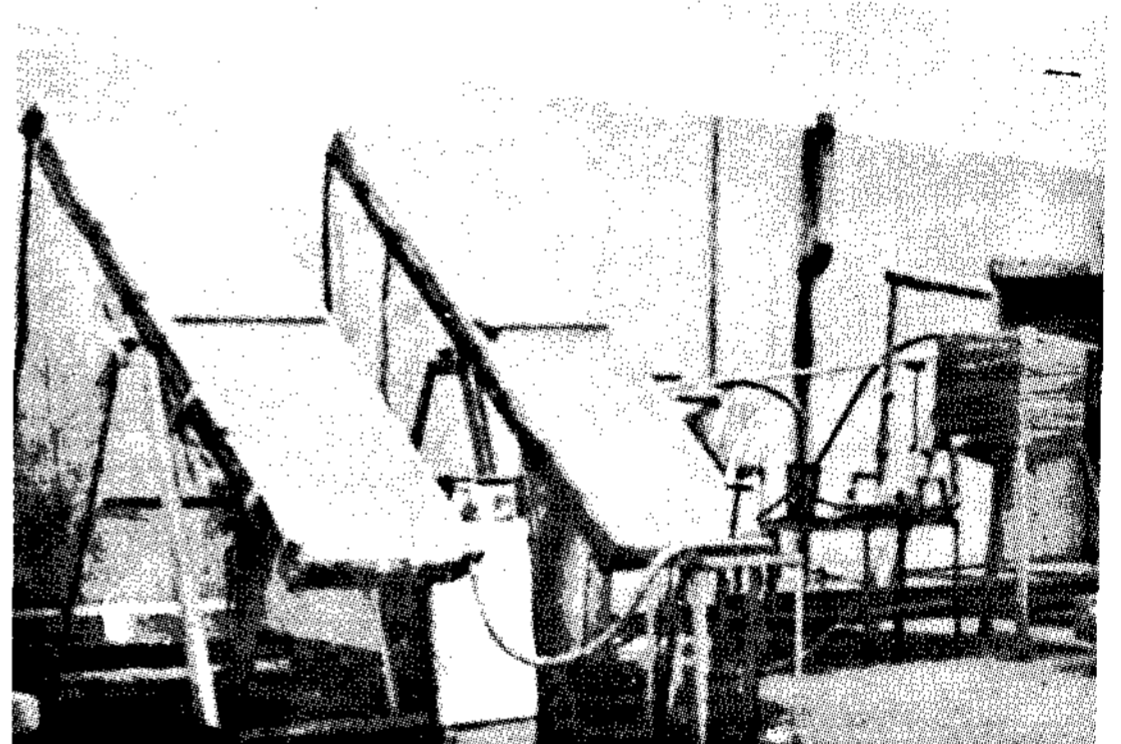
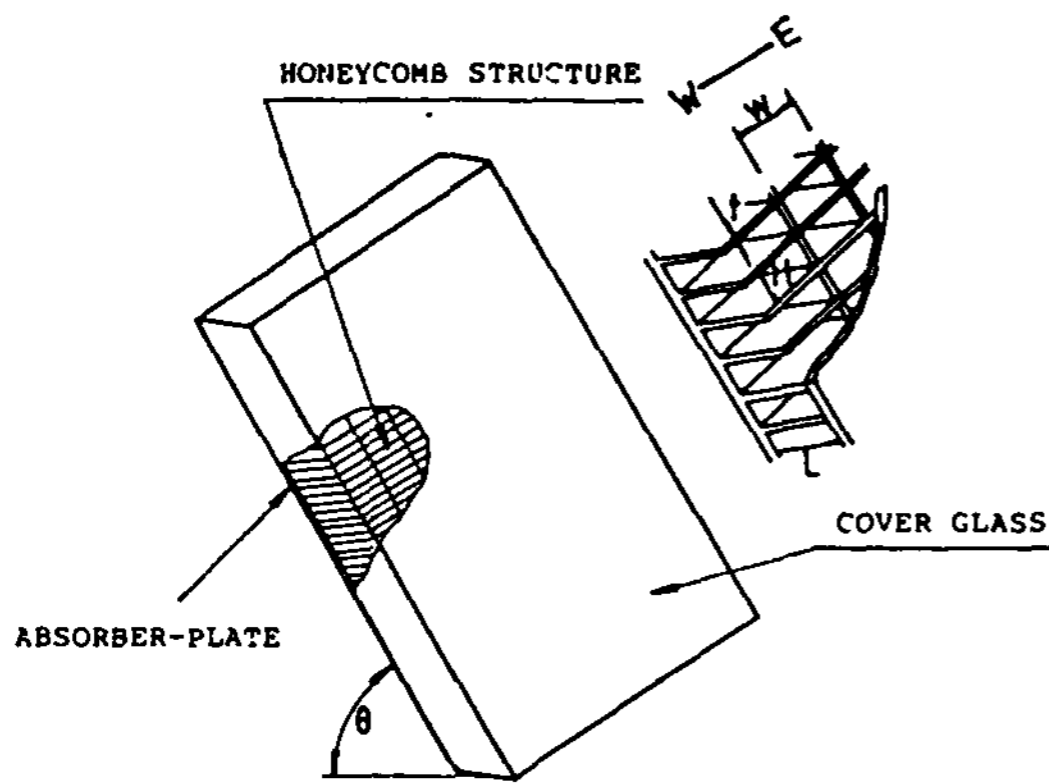


Fig. 1 Photograph of the Experimental apparatus

本 實驗에서 使用된 太陽熱 集熱器(三星SFC 390, 900×2700×95 mm)는 仁荷大學校 第二工學館 5層屋上에 設置하였으며 太陽光線의 強度를 測定하기 위하여 Pyranometer(EPLAB, U.S.A)를 使用하였다. 集熱器 側面과 後面으로 放出되는 熱을 防止하기 위해 100 mm 두께의 유리섬유와 50 mm 두께의 Styroform을 設置하여 傳導에 依한 熱損失을 最大한 抑制하였다.



No	TYPE	L	H	W	t	A _H = H/L	A _w = W/L
1	SQUARE CELL	28	10	10	0.5	0.357	0.357
2	RECTANGULAR CELL	28	20	10	0.5	0.774	0.357
		28	40	10	0.5	1.429	0.357

Fig. 2 The Structure of Honeycomb in a Solar Collector

集熱器 溫度, 덮개유리 溫度, 管出入口 溫度 및 大氣溫度를 測定하기 위해 熱電對 ($\phi = 0.3 \text{ mm}$, C-C type) 가 使用되었다. 이때 溫度測定 및 日射量 測定은 DATA LOGGER (FLUKE 2240 C, JAPAN) 을 使用하였다. 本 實驗에 使用된 Honeycomb 모양과 치수는 Fig.2와 같다. Honeycomb 材質은 熱傳導度가 $0.000795 \text{ Kcal/m}\cdot\text{sec}\cdot\text{C}$ 이며 두께가 0.5 mm 이고 透明한 Polycarbonate 를 使用하였으며 주기적으로 교차하도록 設置하였다.

3.2 實驗方法

本 實驗은 1986年 4月末에서 5月까지 風速이 약 $3 \sim 4 \text{ m/s}$ 이고 快淸한 날을 擇해 午前 10時便에서 16時便까지 실시했으며 集熱器를 흐르는 流量은 $1.2 \text{ l/m}^2 \cdot \text{min}$ 으로 一定하다.

Honeycomb 을 갖은 集熱器와 갖지 않은 集熱器는 각각 워엄기어를 통해 傾斜角度를 조절했으며 Pyranometer 는 集熱器 Coverglass 위에 設置하여 傾斜角에 따른 日射量을 測定하였다.

4. 實驗 結果 및 考察

Fig.3~ Fig.11은 Honeycomb 을 갖은 集熱器와 갖지 않은 集熱器를 同時에 設置하였을 때 Honeycomb 크기와 角度에 따른 時間變化에 의한 集熱器內의 入·出口溫度와 大氣溫度 및 太陽熱 輻射強度를 나타낸 그림이다. 密閉된 傾斜空間에서 熱損失의 대부분을 차지하는 自然對流은 다음과 같은 3가지로 大別할 수 있다. 첫째가 Topheavy Instability 로 因한 Bernard-Cell Type Flow Pattern 이고 둘째로 加熱되는 傾斜진 集熱板을 따라 上昇한 後 덮개유리를 따라 下降하는 Longitudinal Motion이며 셋째로는 Bernard cell 의 일종인 浮力에 의한 2次流動 (Secondary Motion) 이다. Honeycomb 크기 및 傾斜角에 따라 이러한 流動을 서로 干涉하여 複合적으로 나타난다.

一般的으로 Honeycomb 은 密閉空間內에서 自然對流을 抑制하여 集熱器 入·出口의 溫度差를 높이는 傾向을 나타내나 Fig.10 과 Fig.11 은 오히려 Honeycomb 을 갖지 않은 集熱器가 더 높은 溫度差를 보였다. 그 까닭은 Honeycomb 크기 $10 \times 40 \text{ mm}$ 에서는 $10 \times 10 \text{ mm}$ 나 $10 \times 20 \text{ mm}$ 에서는 나타나지 않았던 1次的 Secondary Motion 이 側壁에서 發生하였고

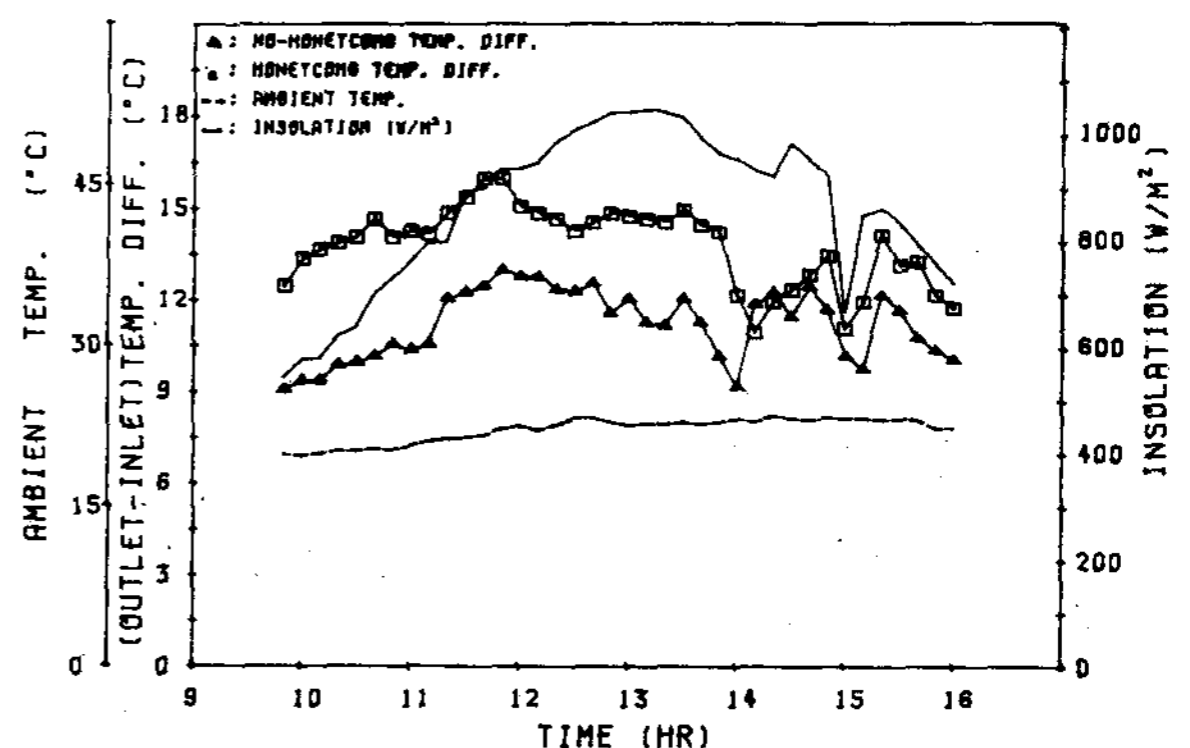


Fig. 3 Temperature Difference vs. Insolation Data 10x10 Honeycomb and No-Honeycomb at 30 Deg.

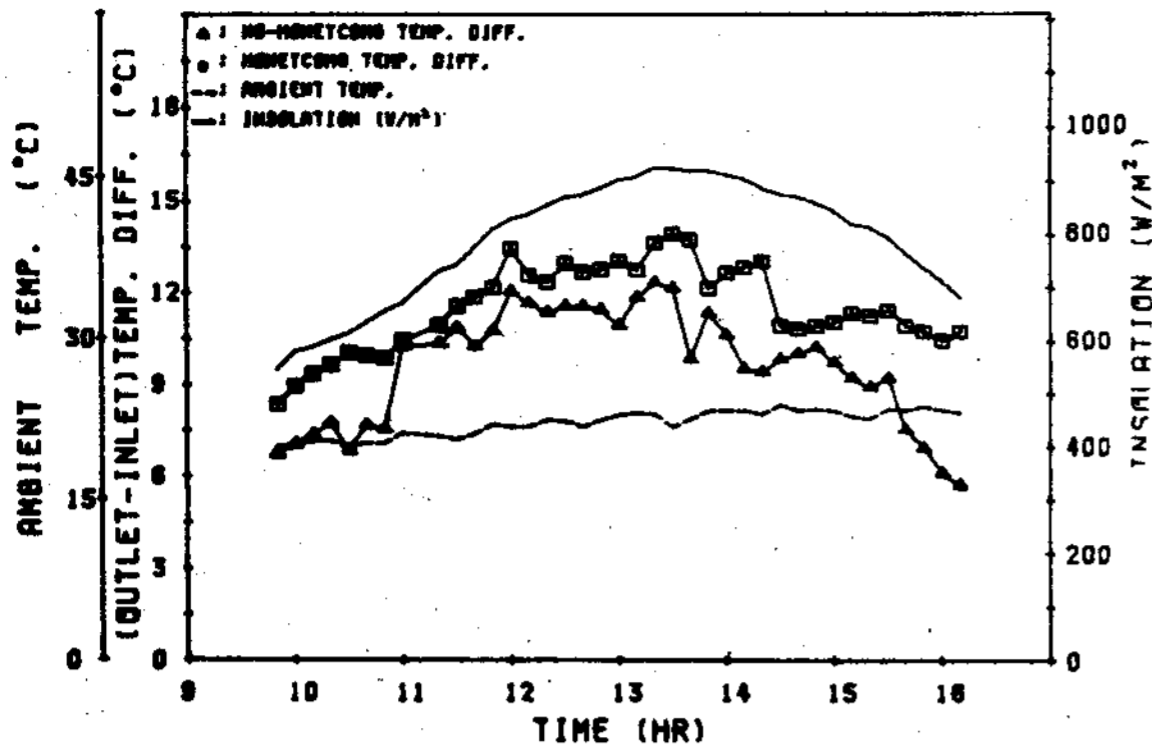


Fig. 4 Temperature Difference vs. Insolation Data 10x10 Honeycomb and No-Honeycomb at 45 Deg.

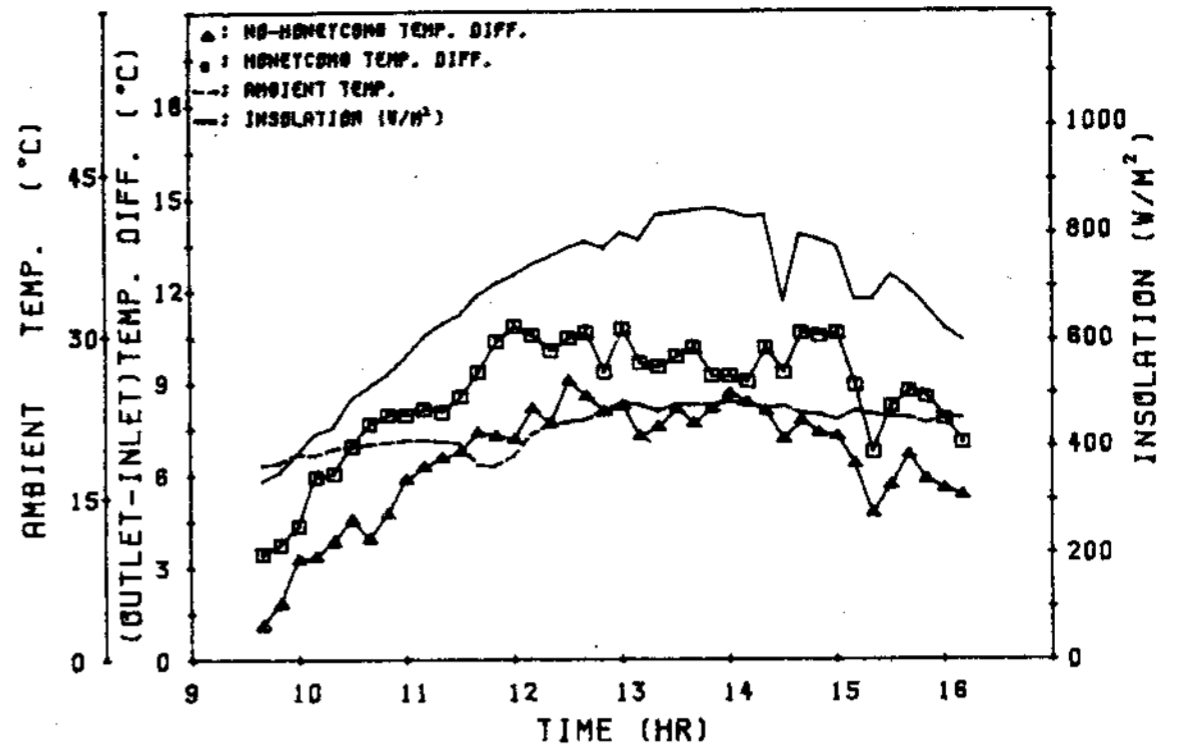


Fig. 5 Temperature Difference vs. Insolation Data 10x10 Honeycomb and No-Honeycomb at 60 Deg.

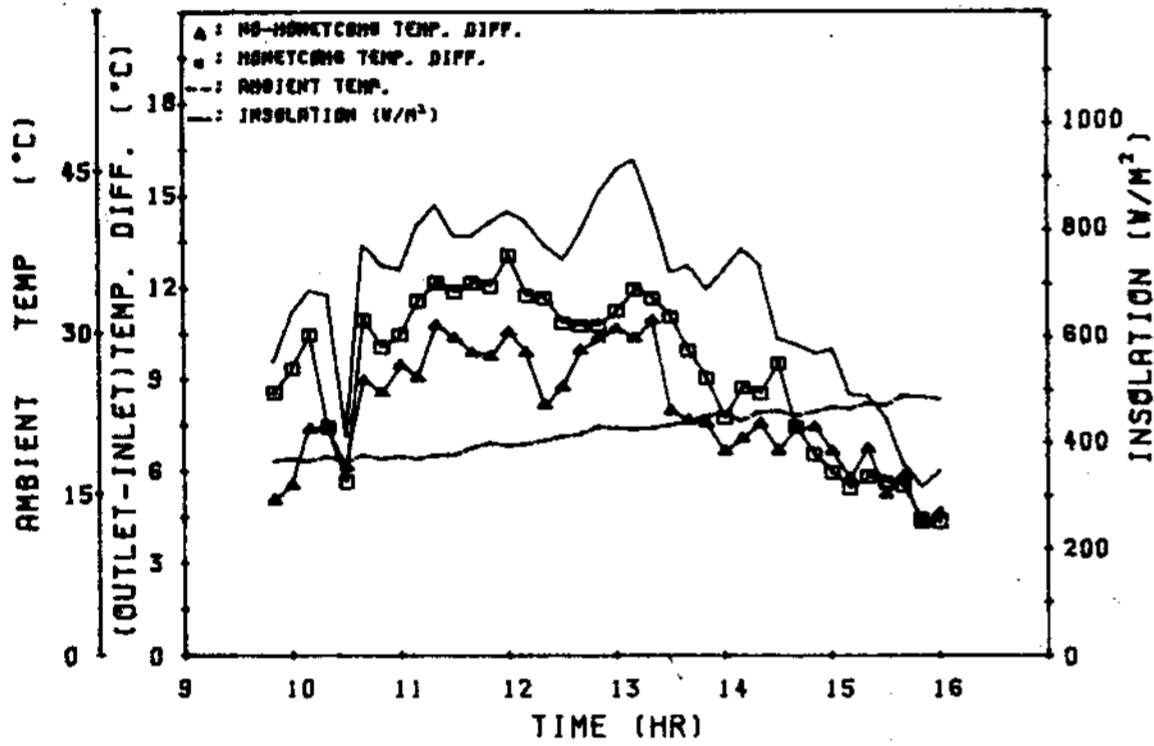


Fig. 6 Temperature Difference vs. Insolation Data 10x20 Honeycomb and No-Honeycomb at 30 Deg.

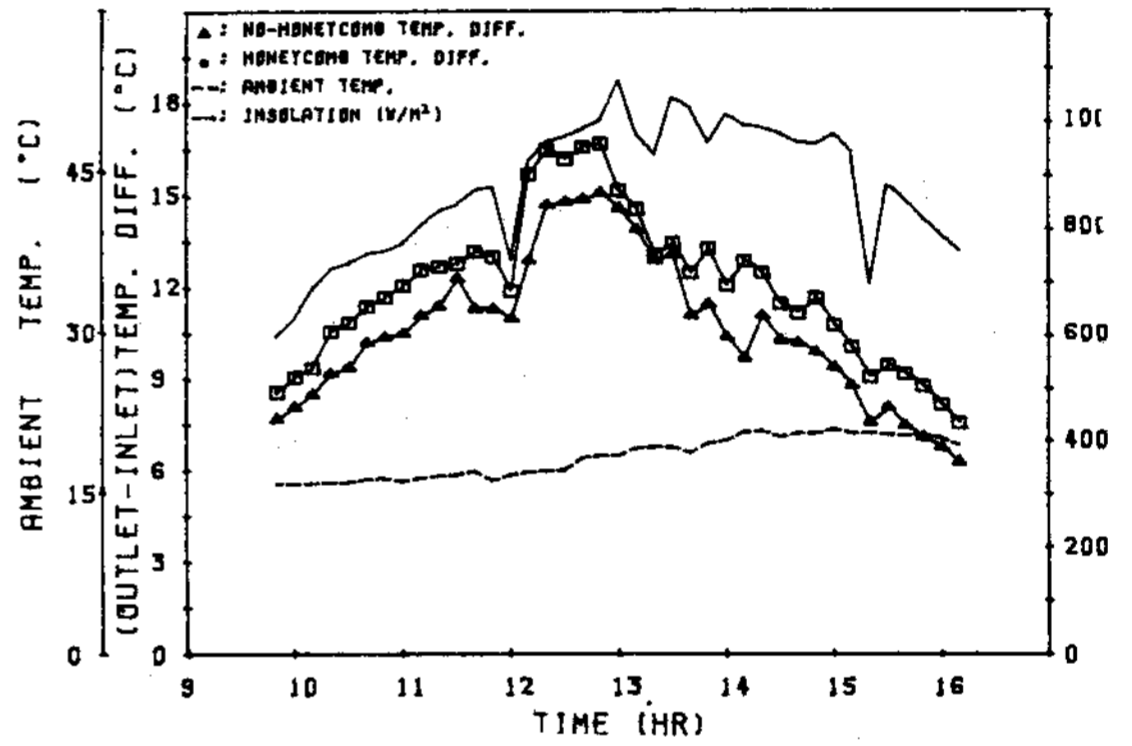


Fig. 7 Temperature Difference vs. Insolation Data 10x20 Honeycomb and No-Honeycomb at 45 Deg.

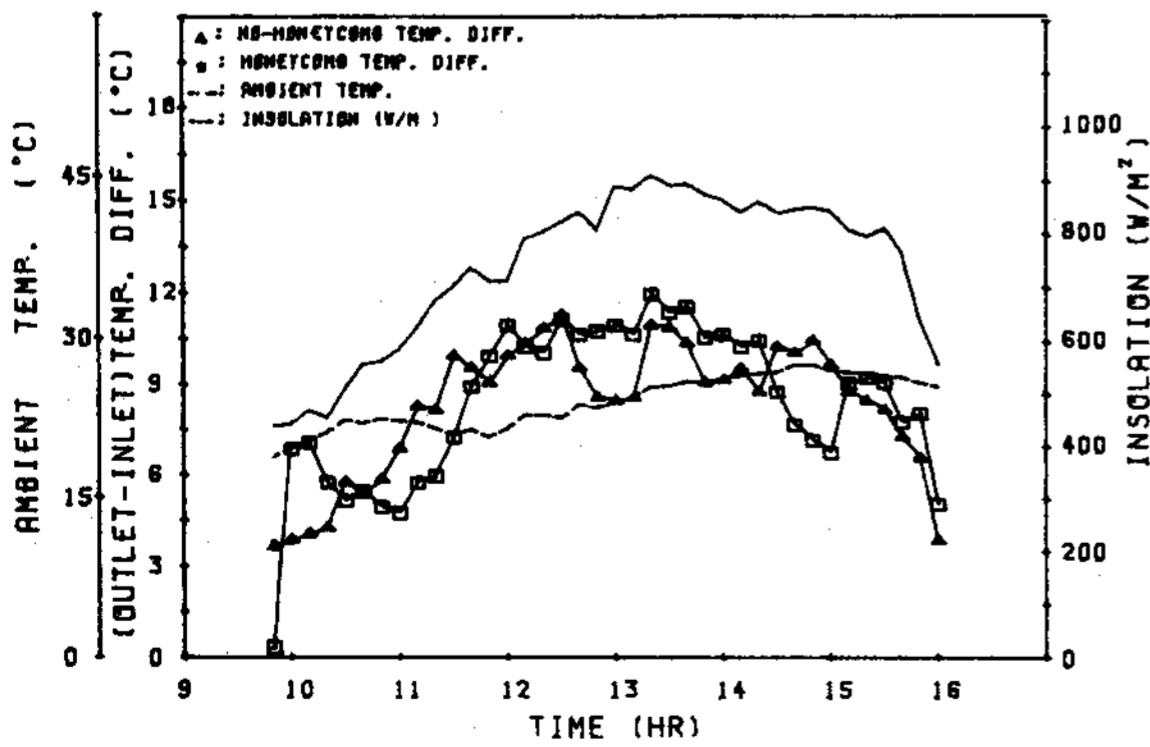


Fig. 8 Temperature Difference vs. Insolation Data 10x20 Honeycomb and No-Honeycomb at 60 Deg.

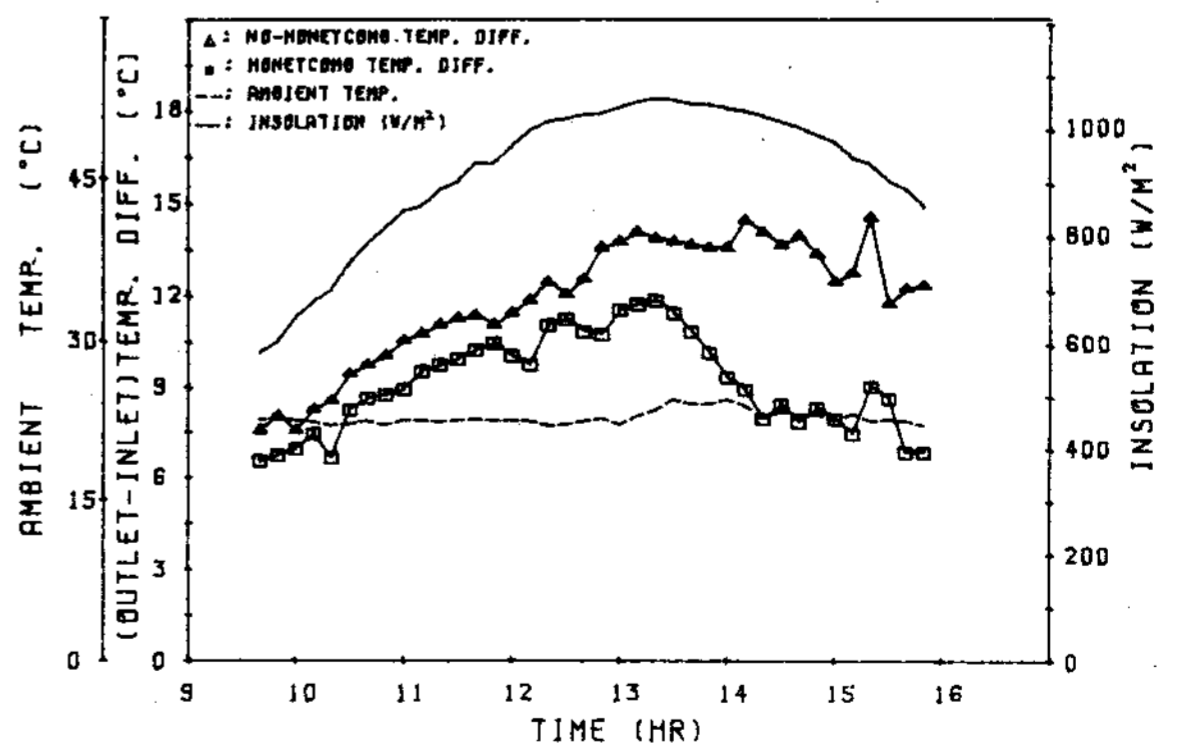


Fig. 9 Temperature Difference vs. Insolation Data 10x40 Honeycomb and No-Honeycomb at 30 Deg.

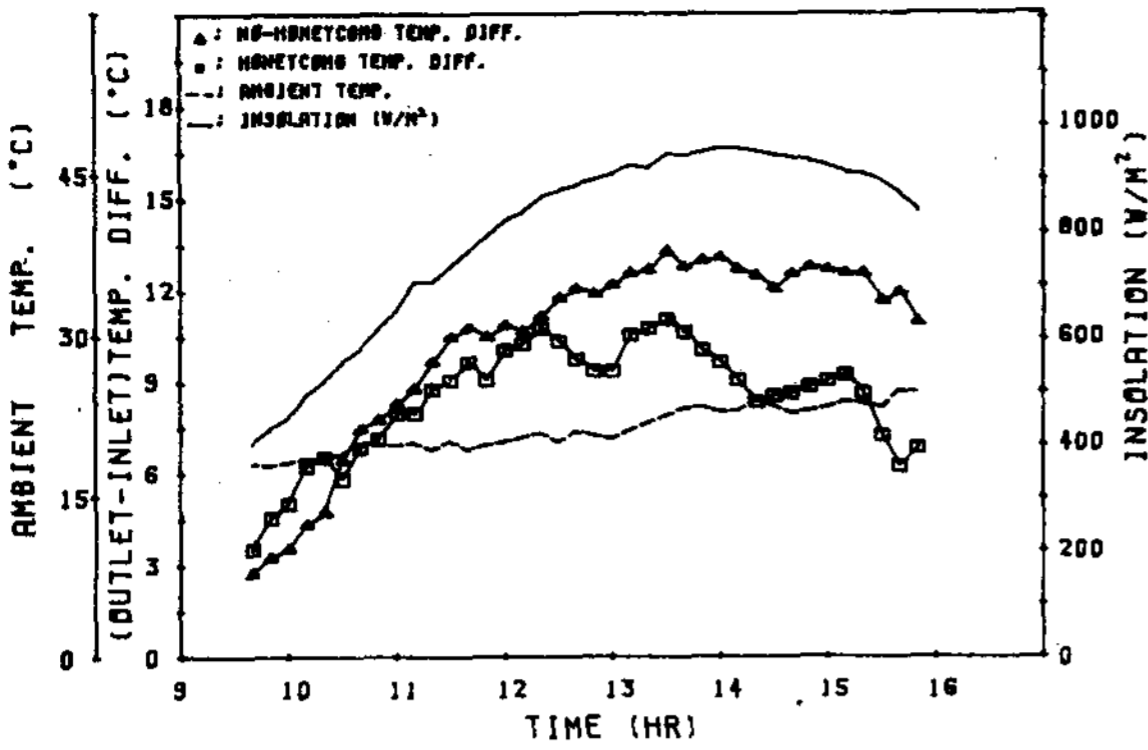


Fig. 10 Temperature Difference vs. Insolation Data 10x40 Honeycomb and No-Honeycomb at 45 Deg.

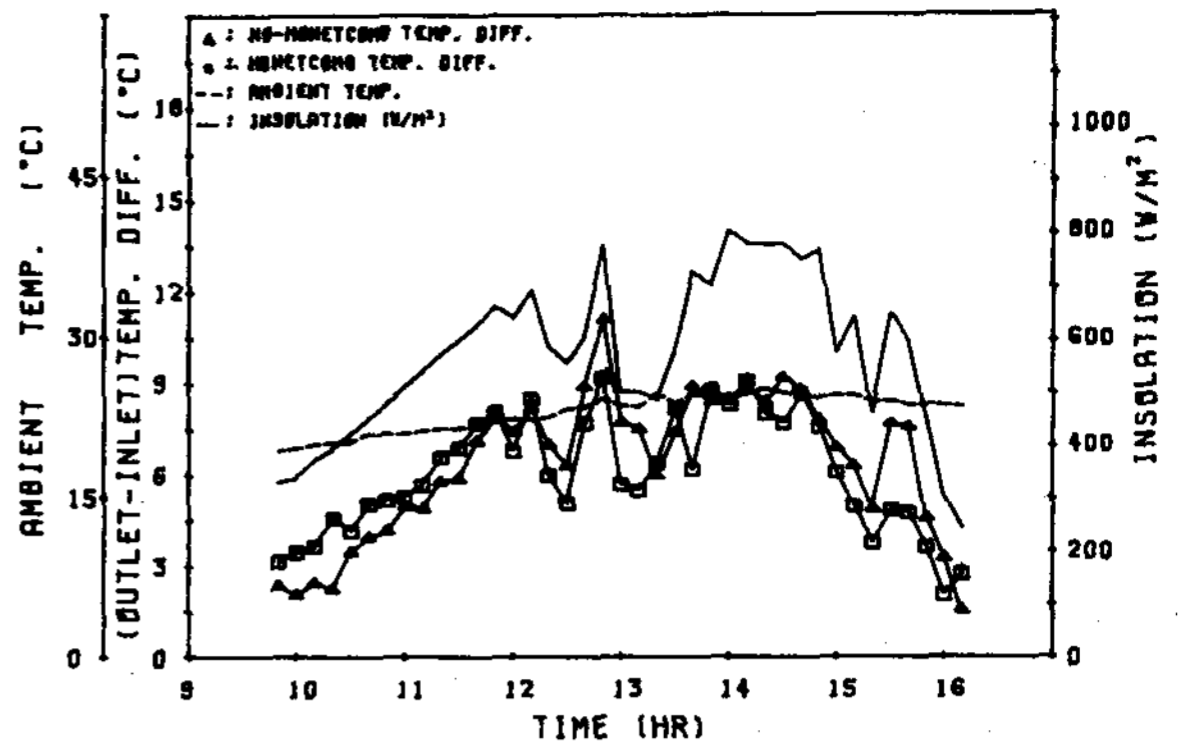


Fig. 11 Temperature Difference vs. Insolation Data 10x40 Honeycomb and No-Honeycomb at 60 Deg.

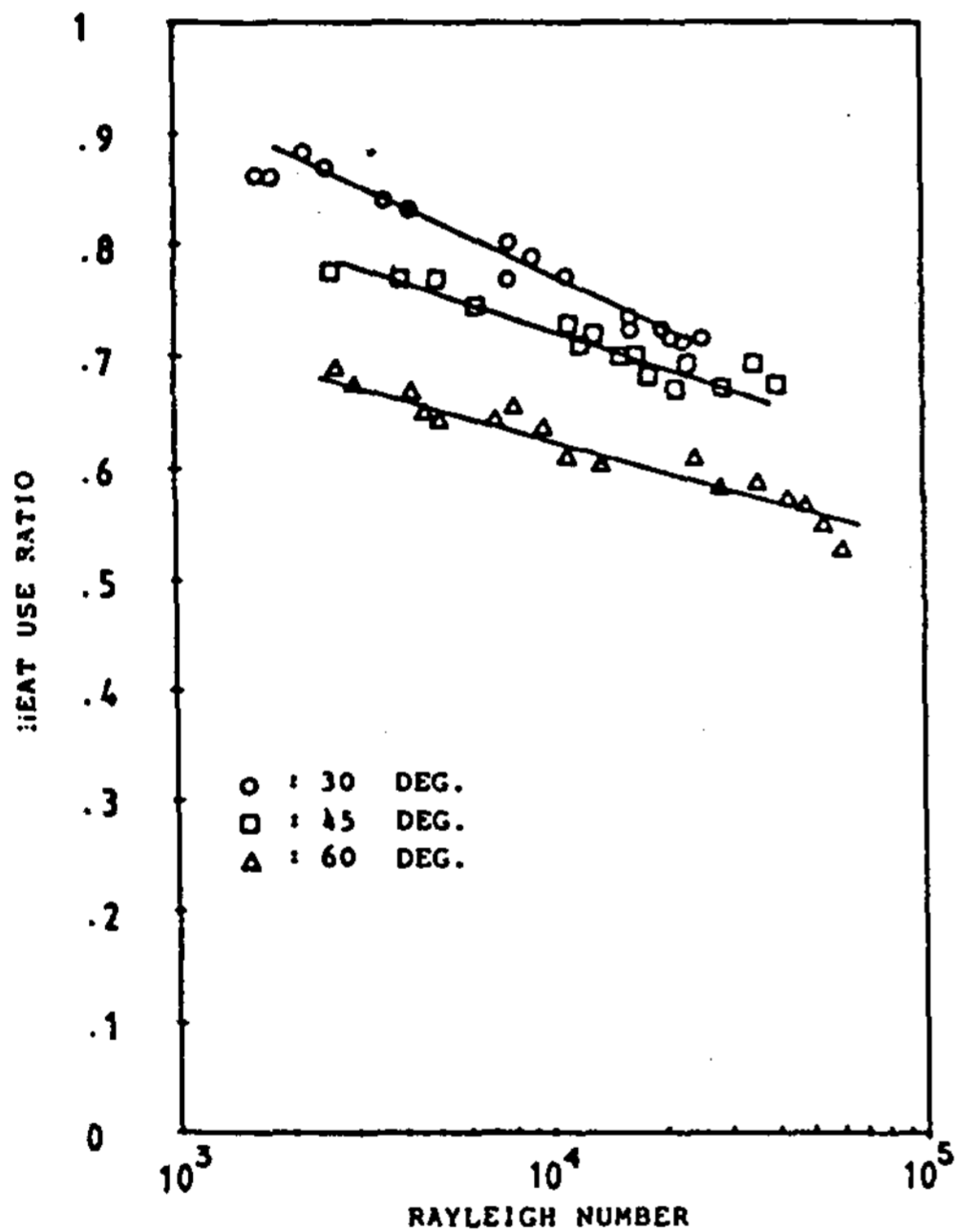


Fig. 12 Experimental Results in terms of Heat use Ratio versus Rayleigh number for 10x20mm Honeycomb.

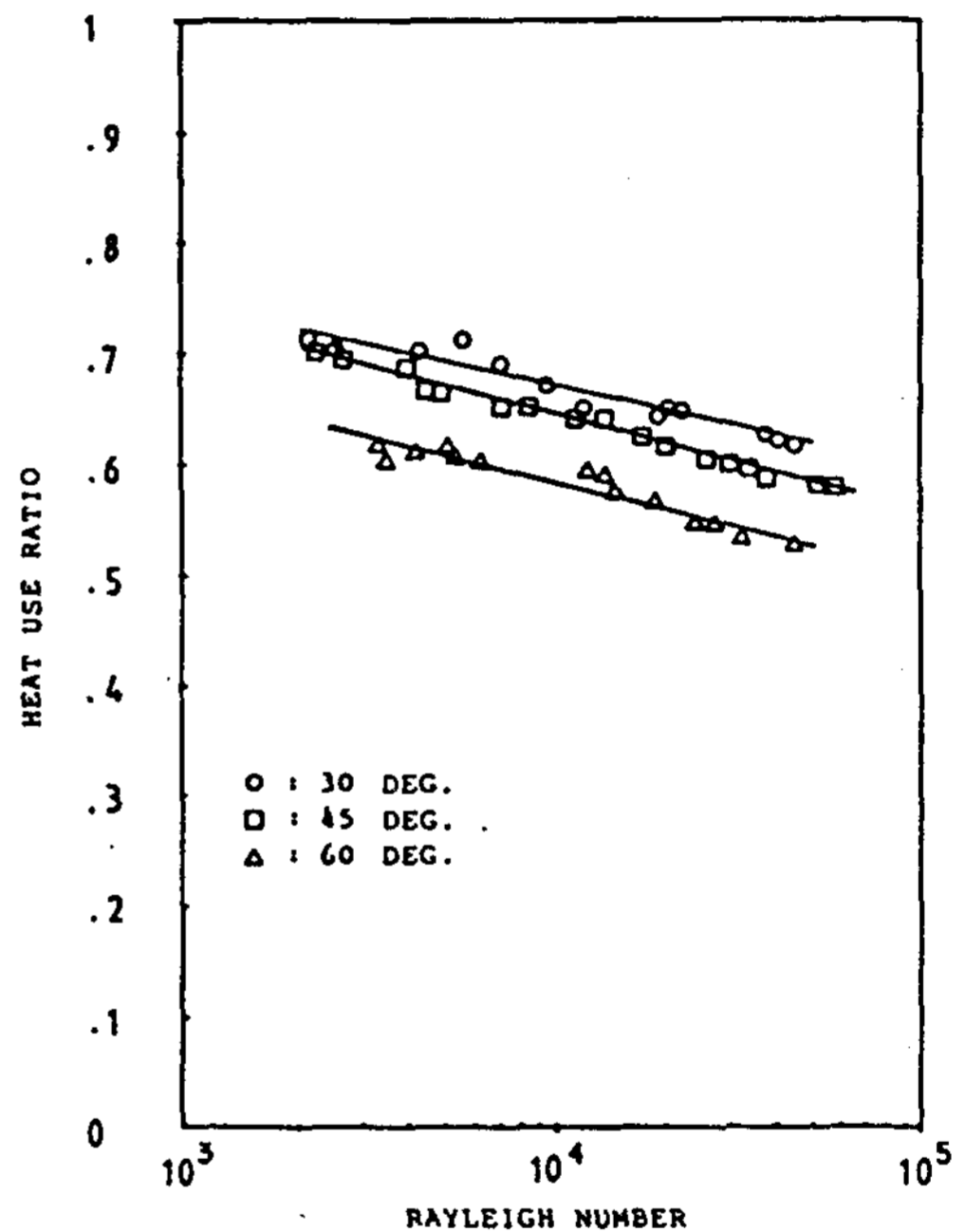


Fig. 13 Experimental Results in terms of Heat Use Ratio versus Rayleigh number for 10x20mm Honeycomb.

오후 1시경이후 ($Ra > 2 \times 10^4$) 부터는 Cell 中心에서도 部加的 Secondary Motion이 생겨 自然對流를 促進시켜 낮은 溫度差를 낸것으로 思料된다.

Fig.12 ~ Fig.15 은 傾斜角의 影響을 알아 보기 위해 Ra 에 대한 熱利用率 (Q_{use}/Q_{total})

을 갖은 集熱器에서는 傾斜角이 增加할수록 낮은 熱利用을 갖음을 알 수 있다. 이와 같은 結果는 낮은 傾斜角에서는 주로 Bernard Cell type flow 이 이루어지나 傾斜角이 增加할수록 加熱面을 따라 發生하는 Longitudinal Motion 이 압도적으로 지배한다고 思料된다.

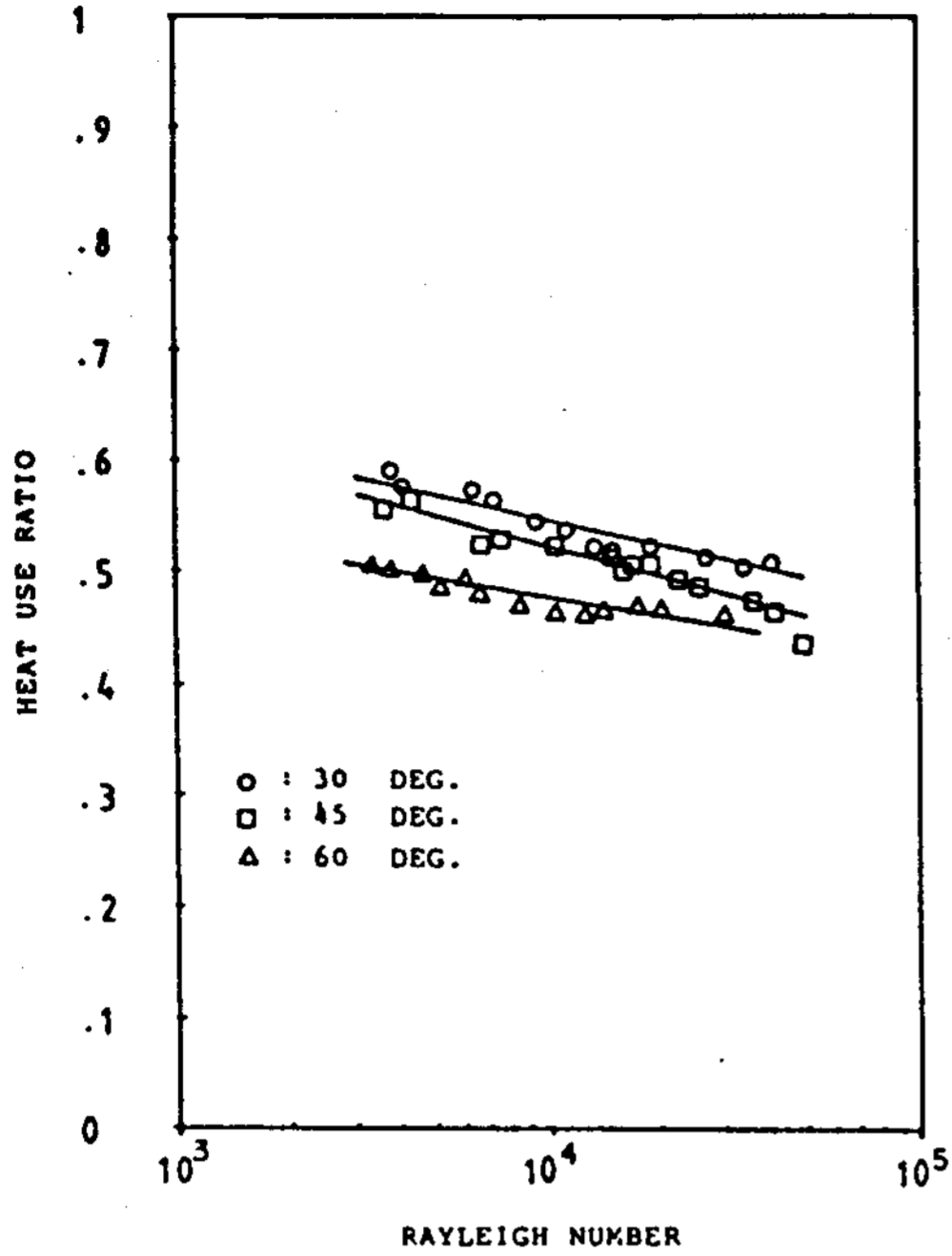


Fig. 14 Experimental Results in terms of Heat use Ratio versus Rayleigh number for 10x40mm Honeycomb

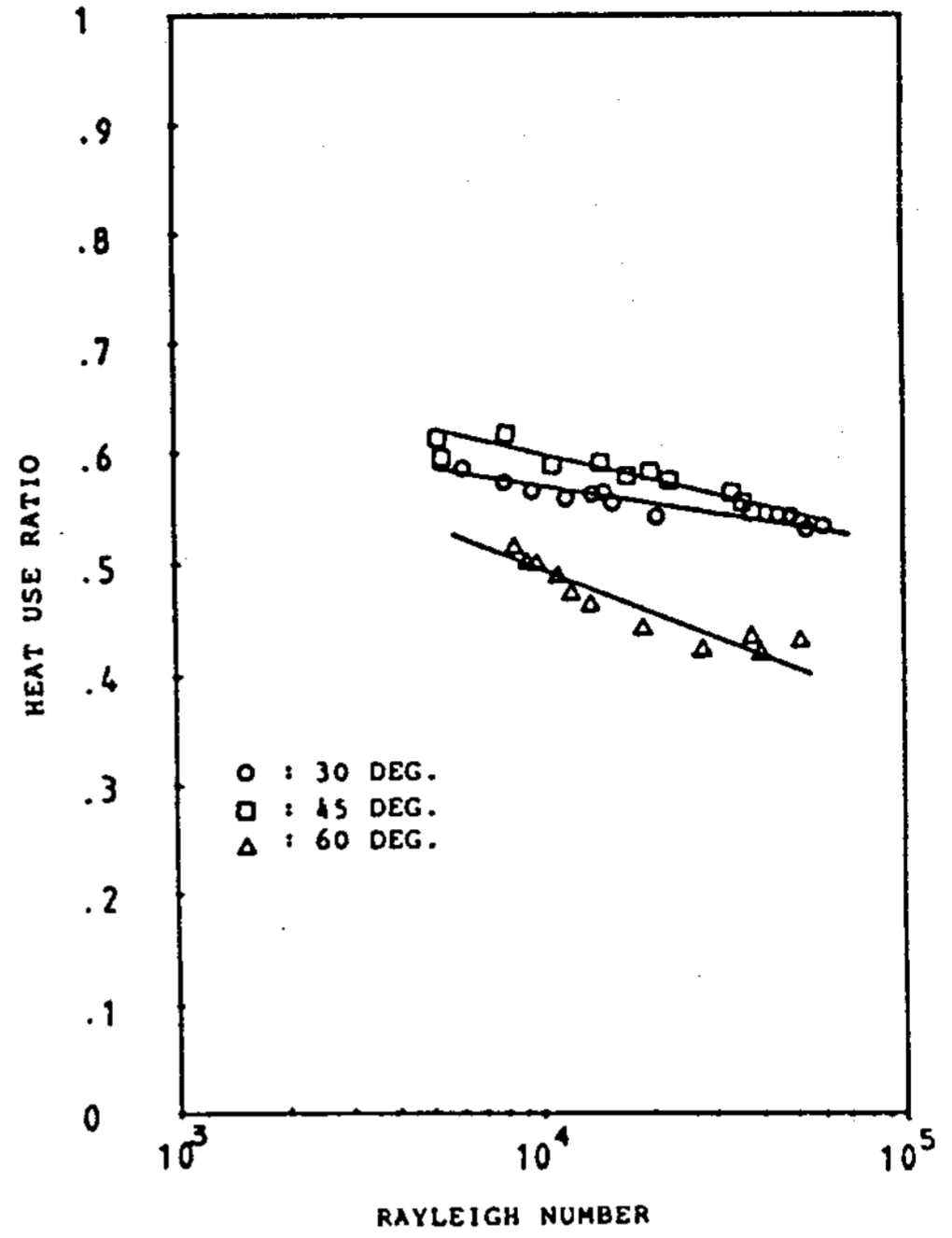


Fig. 15 Experimental Results in terms of Heat Use Ratio versus Rayleigh number for No-Honeycomb

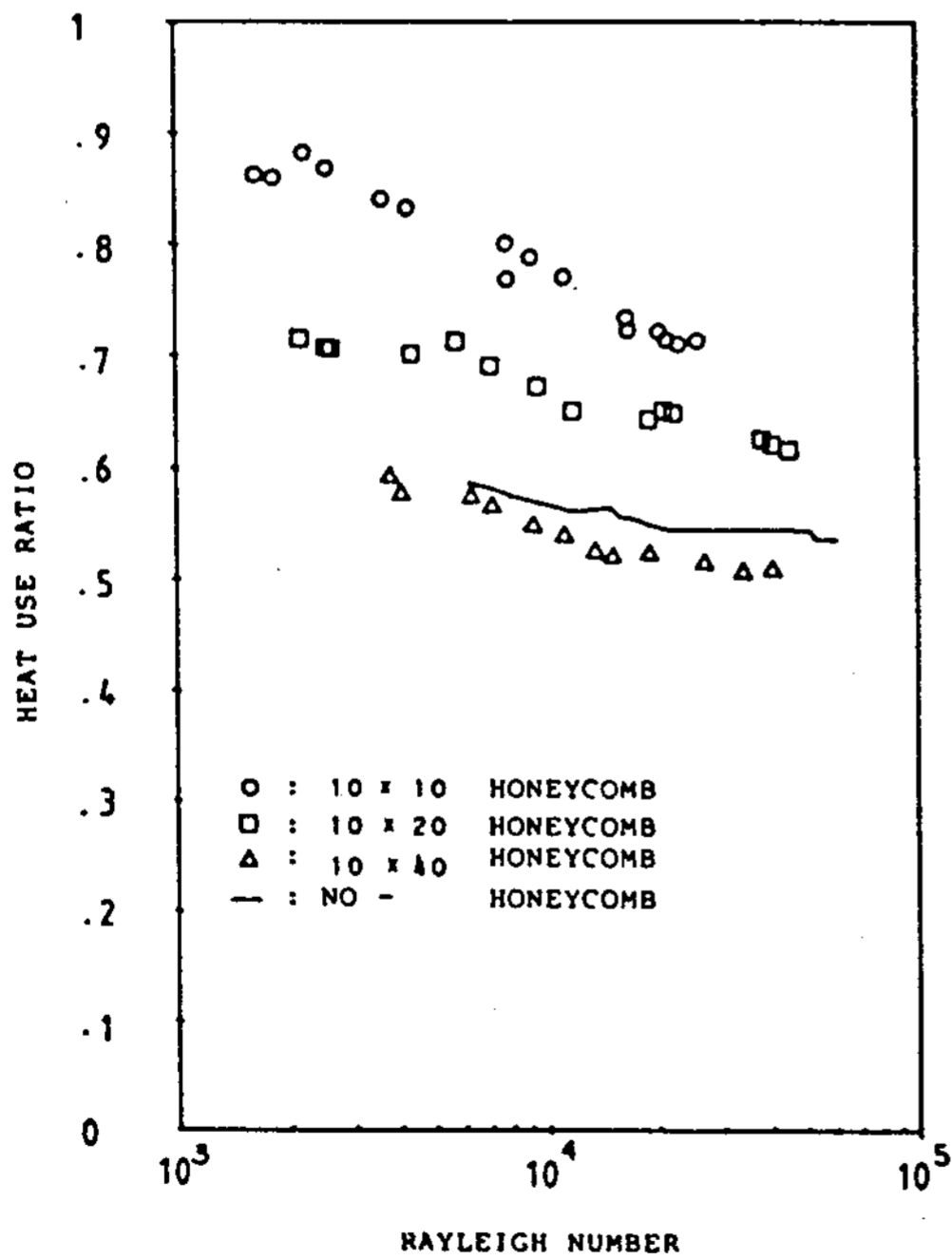


Fig. 16 Experimental Results in terms of Heat Use Ratio versus Rayleigh number at 30°

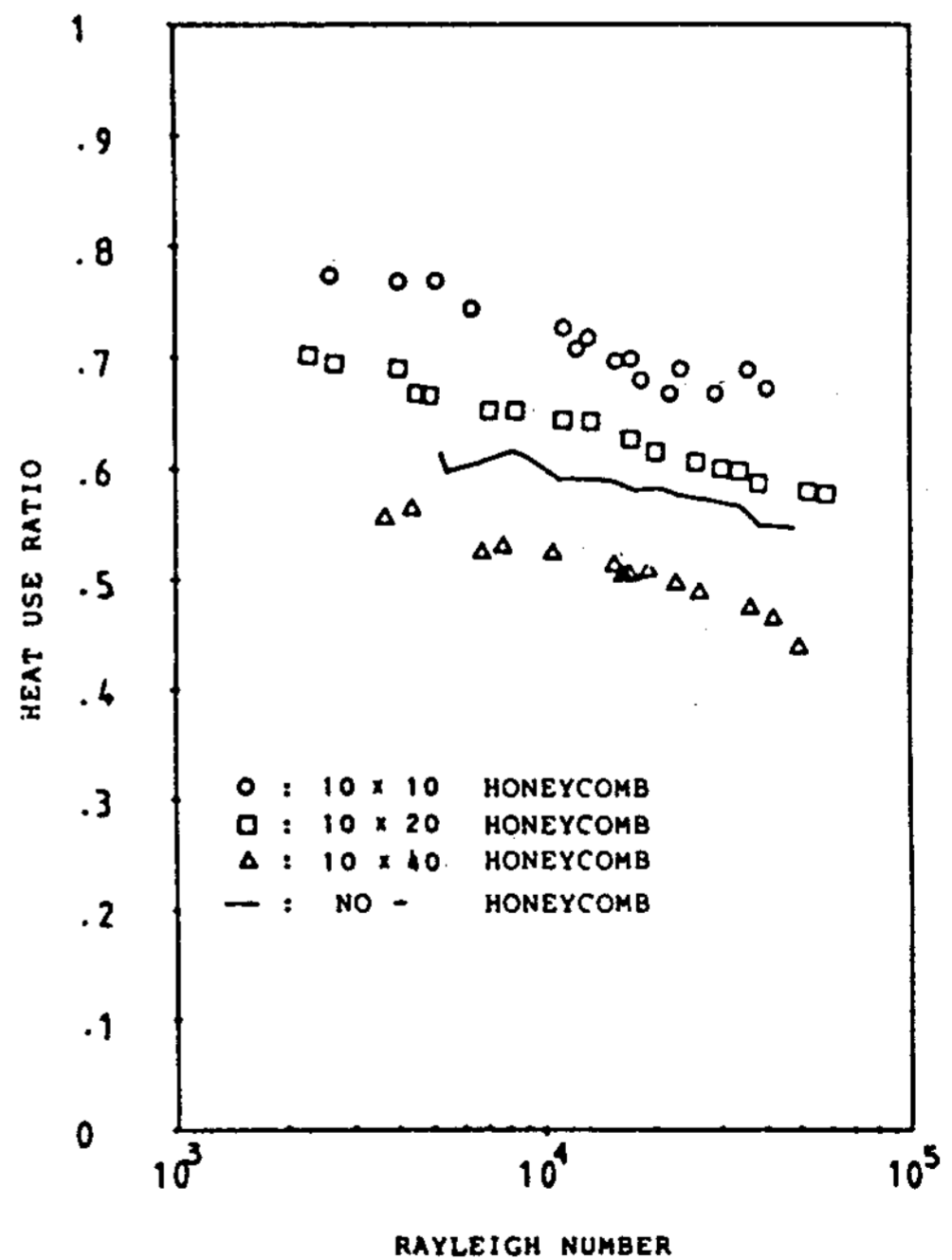


Fig. 17 Experimental Results in terms of Heat Use Ratio versus Rayleigh number at 45°

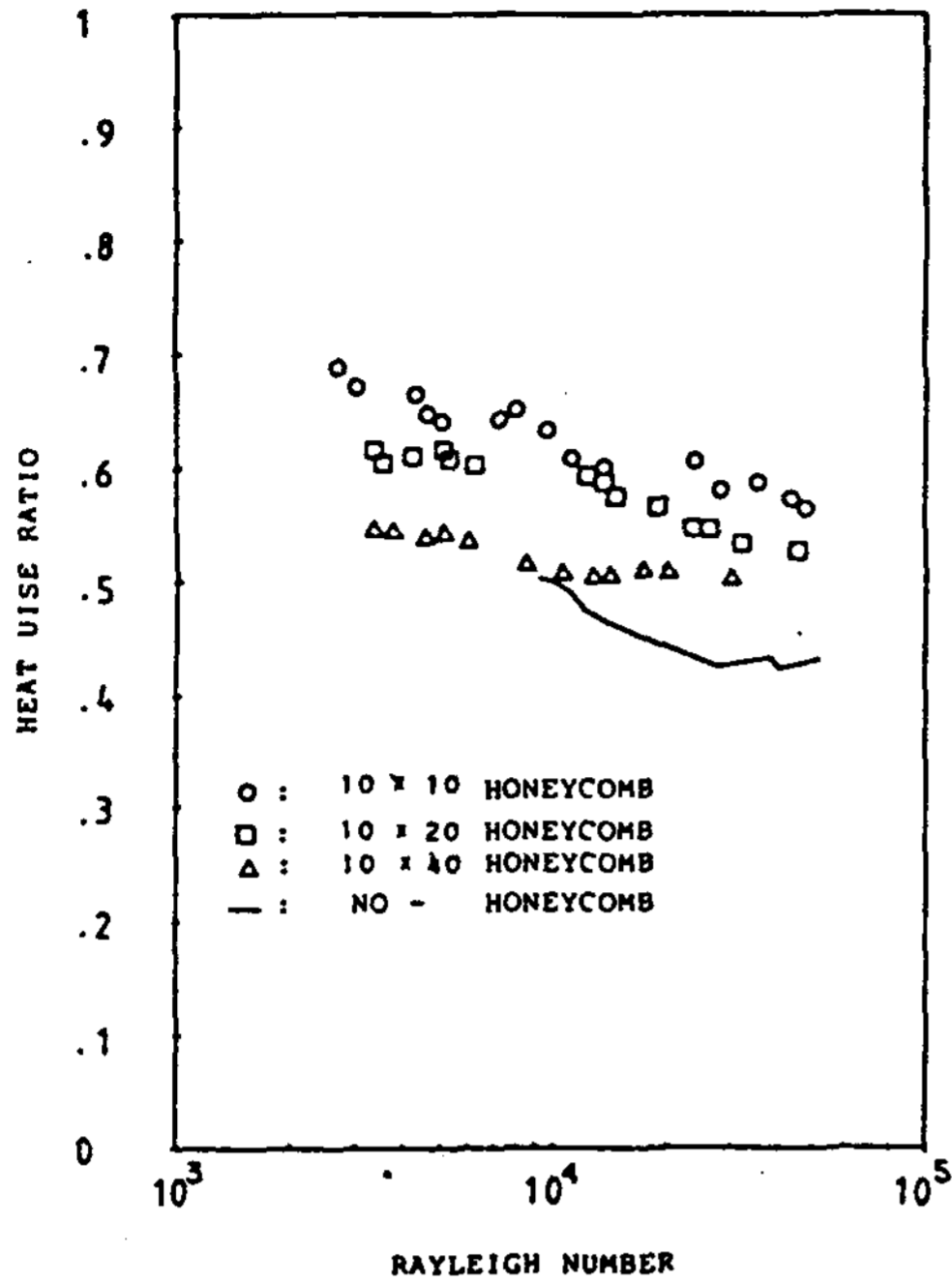


Fig. 18 Experimental Results in terms of Heat Use Ratio versus Rayleigh number at 60°

Honeycomb 을 갖지 않은 集熱器에서는 Fig. 15에서 45°가 30°, 60°보다 더 높은 熱利用率을 갖음을 알 수 있다.

Fig.16 ~ Fig.18 은 各 傾斜角에 대하여 Honeycomb 크기의 影響을 알아보기 위해 Ra 에 따른 熱利用率을 나타낸 그림이다. 全體적으로 Honeycomb 크기가 작을수록 熱利用率은 크며 10×40mm 보다는 Honeycomb 이 없는 集熱器가 더 높은 熱利用率을 갖음을 보였다.

10×40mm Honeycomb 集熱器에서는 base flow 와 같은 흐름 方向을 갖는 2차적 흐름 (Secondary flow)이 發生하여 Honeycomb 을 갖지 않은 集熱器보다 自然對流를 활발히 일으킴으로써 더 낮은 熱利用率을 갖는다고 思料된다.

5. 結 論

本 研究에서는 太陽熱 集熱器의 密閉空間內에

서 發生하는 自然對流에 依한 熱損失을 抑制하기 위해 Honeycomb 크기를 10×10mm, 10×20mm, 10×40mm로 갖은 경우와 갖지 않은 경우를 同時에 設置하여 傾斜角을 30°, 45°, 60°로 變化시켜 가면서 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. Honeycomb 크기가 작아질수록 熱利用率은 增加함을 보였다.
특히 10×10mm Honeycomb 인 경우 Honeycomb 을 갖지 않은 集熱器보다 30°에서는 29.5%, 45°에서는 18.5% 60°에서는 25.3% 熱利用率이 增加함을 보였다.
2. 傾斜角이 작을수록 熱利用率은 增加함을 보였다.
특히 30°인 경우 Honeycomb 을 갖지 않은 集熱器보다 10×10mm에서는 29.5% 10×20mm에서는 17.1% 增加하나 10×40mm에서는 오히려 0.7% 減少함을 보였다.
3. Honeycomb 을 갖지 않은 集熱器에서는 傾斜角 45°에서 熱利用率이 最大이며 60°에 대해서는 20.2%, 30°에 대해서는 4.3% 각각 增加한다.
4. Honeycomb이 없는 傾斜角 45°로 設置되어진 기존 太陽熱 集熱器에 10×10mm Honeycomb 크기를 갖고 傾斜角 30°로 변경시키면 熱利用率은 약 26.4% 增大시킬 수 있다.

REFERENCES

1. Hottel, H.C. and Woertz, D.B., "The Performance of Flat Plate Solar Heat Collectors," Trans. ASME, Vol. 64, 1942, pp. 91-104
2. Hollands, K.G.T., "Honeycomb Devices in Flat-Plate Solar Collector," Solar Energy,

- Vol. 9, No. 3, 1965, pp. 159-164.
3. Hollands, K.G.T., "Natural Convection in Horizontal Thin-Walled Honeycomb Panels," J. of Heat Transfer, Trans. ASME. Series C. Vol. 95, 1973, pp. 439-444.
 4. Charters, W.W.S. and Peterson, L.F., "Free Convection Suppression Using Honeycomb Cellular Materials," Solar Energy, Vol. 13, 1972, pp. 353-361
 5. Cane, R.L.D. and Hollands, K.G.T. and Raithy, G.D. and Unny, T.E., "Free Convection Heat Transfer across Inclined Honeycomb Panels," J. of Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 99, 1977, pp. 86-91.
 6. Arnold, J.N. and Catton, I. and Edwards, D.K. "Experimental Investigation of Natural Convection in Inclined Rectangular Regions of Differing Aspect Ratios," J. of Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 98, 1976, pp. 67-71.
 7. Meyer, B.A., Mittel, J.W., and El-Wakil, M.M., "Natural Convection Heat Transfer in Moderate Aspect Ratio Enclosure," ASME. J. of Heat Transfer, Vol. 101, 1979, pp. 655-659.
 8. Linthorst, S.J.M. and Schinkel, W.M.M. and Hoogendoorn, C.J., "Flow Structure with Natural Convection in Inclined Air Filled Enclosures," J. of Heat Transfer, Vol. 103, 1984, pp. 535-539.
 9. Park, S.Y., "The Influence of Honeycomb Sizes on Solar Collector Performance," Master's Thesis, Inha University, 1986.