

<論 文>

Honeycomb을 이용한 太陽熱 集熱器의 熱効率 增大에 관한 研究

金 鍾 輔* · 朴 永 七**

(1983年 6月 15日 接受)

A Study on Increasing Thermal Performance of Solar Collector by Utilizing Honeycomb Structures

Jong Bo Kim and Young Chil Park

Abstract

In the present study, improvement of the solar collector performance by utilizing honeycomb structures is being investigated.

Installation of honeycomb structures inside of the collector induces the suppression of would-be natural convection phenomena within the collector enclosure spacing. It also minimizes infrared radiation heat loss from the collector absorber plate to the surrounding.

Experiments have been carried out a collector with 40×20mm rectangular honeycombs, 20×20mm square honeycombs and without honeycombs. The results are presented for the three cases for comparisons. The collector model has been installed at various tilt angle from 15° to 60° measured from the ground. The influence of the tilt angle to the heat performance of the collector is also presented.

記 號 說 明

A_a : 集熱板 有效 面積, m^2
 A : 斷面 形狀比, $A=W/L$
 A_H : 評價 斷面 形狀比, $A_H=H/L$
 C_{pa} : 空氣比熱, $kJ/kg \cdot ^\circ C$
 C_{pw} : 水比熱, $kJ/kg \cdot ^\circ C$
 g : 重力 加速度, $9.8m/s^2$
 Gr : Grashof 數
 H : Honeycomb 세로길이, m
 K_a : 空氣 熱傳導率, $W/m \cdot ^\circ C$

L : Honeycomb 높이, m
 m : 물의 質量流速, kg/s
 Nu : Nusselt 數
 Pr : Prandtl 數
 Q : 集熱板을 통한 放出熱量, kJ
 R_a : Rayleigh 數
 t : Honeycomb 두께, m
 T_c : Coverglass 平均溫度, $^\circ C$
 T_p : 集熱板 平均溫度, $^\circ C$
 U : 熱貫流係數, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
 V_w : 물의 體積流量, m^3/s
 W : Honeycomb 가로길이, m
 β : 空氣 體積膨脹係數, $1/K$
 ΔT_1 : 集熱板과 coverglass의 平均溫度 差, $^\circ C$

* 正會員, 仁荷大學校 機械工學科

** 仁荷大學校 機械工學科

ΔT_2 : 集熱器 入口와 出口의 물의 溫度差, °C

μ_a : 空氣 動粘性係數, kg/m·s

ρ_a : 空氣密度, kg/m³

ρ_w : 물密度, kg/m³

1. 緒 論

太陽熱을 이용한 住宅의 冬·暖房, 溫水供給에서 사용되는 平板式 太陽熱 集熱器의 效率增大에 관한 研究는 全 太陽熱 利用裝置의 實用性 與否가 決定되는 중요한 문제로서, 최근들어 광목 할 만한 進展을 가져왔다.

太陽으로 부터 到達되는 에너지의 量은 人爲의인 方法에 의하여 調節될 수 있는 것이 아니며, 따라서 集熱器의 效率를 向上시킬 수 있는 方法은 集熱板이 最大의 熱에너지를 吸收할 수 있는 構造를 가져야 하며, 또한 吸收된 에너지가 다시 外部로 放出되는 것을 最大限으로 抑制시켜야 한다. 集熱板에서 吸收된 에너지가 다시 外部로 放出되는 것 중에서 coverglass와 集熱板 사이의 공기층에서 發生하는 對流現象은 集熱器가 傾斜지고, 集熱板과 外氣 間의 比較的 큰 溫度差에 의하여 상당히 活潑한 自然對流을 形成하게 되며 이 自然對流에 의한 熱損失은 外部로 放出되는 熱에너지의 상당한 부분을 차지하게 된다.^{1,2)}

Coverglass와 集熱板 사이에 設置된 honeycomb은 이와 같은 對流現象을 抑制시킴으로서 自然對流에 의한 熱損失을 減少시키며, 또한 honeycomb은 太陽光線에 대해서는 투명하고, 比較的 긴 波長을 갖는 再輻射波에 대해서는 불투명하므로 集熱板에서의 再輻射도 抑制시켜, 集熱器의 熱效率 增大에 크게 寄與하는 것으로 알려져 있다.

Hollands^{3,4)}, Arnold^{5,6)}, Buchberg⁷⁾ 등은 각각 正4角形, 直4角形, 圓形斷面の honeycomb을 이용한 實驗에서, 自然對流에 의한 熱損失을 減少시키기 위한 honeycomb cell의 斷面길이와 높이의 比로 定義되는 斷面 形狀比($A=W/L$)의 最適値가 存在 함을 提示하였으며, Smart⁸⁾, Cane⁹⁾ 등은 [正4角形, 直4角形, 6角形] 斷面の honeycomb의 自然對流 抑制 效果를 比較하여, 正4角形 斷面の honeycomb이 自然對流을 抑制시키는 效果가 가장 크다는 것을 發表하였다.

그러나 從來의 研究는 自然對流에 의한 熱傳達만을 考慮한 모델을 중심으로 實驗하여 실제 集熱器에 適用될 수 있는 honeycomb의 斷面形狀 및 斷面 形狀比의 最適値를 提示하는데만 局限되어 왔으므로 실제 使用되고 있는 集熱器에 honeycomb을 設置하였을 경우에

는 複合的인 熱傳達 現象으로 因하여 提示된 結果들이 精確히 一致되기란 어려울 것으로 생각된다.

本 研究는 國內에서 使用되고 있는 既存 太陽熱 集熱器에 40×20mm 斷面の 直4角形 honeycomb과 20×20mm 斷面の 正4角形 honeycomb을 設置하여 加熱된 물로 集熱器의 集熱板을 加熱시켜 集熱板을 통해 放出되는 熱損失量을 測定, 比較 함으로서 honeycomb이 실제 集熱器에 미치는 熱損失 抑制 效果를 究明하고 이것이 集熱器의 熱效率 增大에 미치는 影響을 研究 檢討하고 있다.

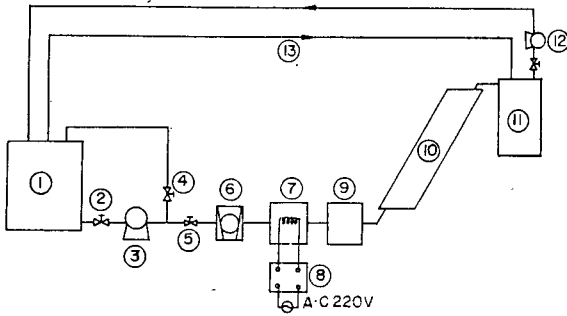
2. 實驗裝置 및 實驗方法

2.1. 實驗裝置

Fig. 1은 本 實驗에서 使用한 實驗裝置의 개략도이다. 一定한 水位를 갖는 貯水槽①에서 pump③을 통하여 送出된 물을 吸入밸브②, 流量調節밸브⑥, by-pass 밸브④에 의하여 適正流量으로 調節시킨 후 流量計⑤(Schutte & Koerting Co. M66-50637, U.S.A)에 의하여 測定하고 加熱槽⑦에서 加熱시킨후 集熱器⑩의 入口로 流入시켰다. 實驗에 使用한 集熱器는 既存 國內에서 使用되고 있는 900×2700×95mm의 平板式 集熱器이며, 傾斜角에 대한 影響을 調査하기 위하여 集熱器 支持臺 側面에 設置된 warm gear로 集熱器의 傾斜角을 調節하였다.

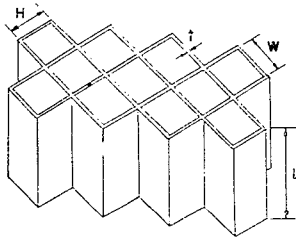
集熱器로 流入된 加熱된 물은 集熱器로 通過하는 동안 集熱板을 加熱시키며, 이때 集熱器의 後面 및 側面을 통해 發生하는 傳達 및 기타 熱損失을 抑制시키기 위해 集熱器 周圍는 두께 100mm의 glass wool(32kg/m³)로 斷熱시켜 加熱된 물이 集熱器를 通過하는 동안 放出되는 熱량이 集熱器의 集熱板을 통해서만 放出되는 것으로 간주할 수 있도록 하였다. 集熱板과 coverglass의 溫度를 測定하기 위하여 集熱板에 22개의 $\phi 0.3$ mm C-C 熱電對와 coverglass에 5개의 熱電對를 設置하였고 流入되는 물 및 集熱板의 溫度를 定常狀態에서 測定하기 위하여 ice junction과 記錄計(CHINO EH 100-06, JAPAN)를 使用하여 溫度變化를 確認하였다.

Fig. 2는 本 實驗에서 使用한 honeycomb의 모양 및 規格이며, honeycomb은 두께 1mm의 아크릴로 製作하였고 honeycomb의 斷面 形狀比 A 는 honeycomb cell의 가로 길이와 높이의 比($A=W/L$)로 定義하였으며 評價 斷面 形狀比 A_H 는 세로 길이와 높이의 比($A_H=H/L$)로 定義하였다.



- ① Constant head tank
- ② Suction valve
- ③ Pump
- ④ By-pass valve
- ⑤ Discharge valve
- ⑥ Flow meter
- ⑦ Heating tank
- ⑧ Thermostat
- ⑨ Mixing chamber
- ⑩ Solar collector
- ⑪ Reservoir tank
- ⑫ Pump
- ⑬ Over flow line

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



No.	TYPE	L (mm)	H (mm)	W (mm)	t (mm)	A=W/L	A _H =H/L
1	SQUARE CELL	26	20	20	1	0.71	0.71
2	RECTANGULAR CELL	23	20	40	1	1.43	0.71

Fig. 2 Honeycomb structures

2.2. 實驗方法

實用되고 있는 既存 平板式 集熱器에 對流抑制 效果를 갖는 honeycomb을 Fig. 3 과 같이 設置한 경우와 設置하지 않은 경우에 대한 熱損失量을 比較, 檢討하기 위하여, 集熱器 入口에서 물의 溫度를 thermostat에 의하여 調節되는 加熱槽로 30°C에서 85°C까지 5°C씩 增加시켜 集熱器 入口로 流入시켰다. Honeycomb의 材質인 아크릴(PAMA)은 열전도율이 0.042W/m°C인 絕緣體를 使用하였다.

集熱板을 통하여 放出되는 熱損失量을 測定하기 위하여 2~3時間이 經過된 후 記錄計에 나타난 溫度變化가 定常狀態를 維持할때 入口, 出口의 물의 溫度, 流量 및 集熱板의 溫度, coverglass의 溫度를 測定하

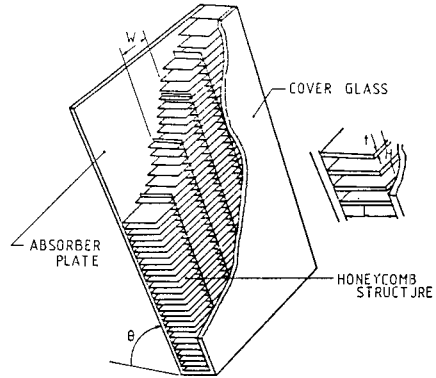


Fig. 3 Structure of honeycomb solar collector
 集熱器는 水平面에 대해서 15°, 30°, 45°, 60°로 각각 傾斜지게 設置하여 傾斜角의 變化에 대한 影響을 調査하였다.

- 實驗에 使用된 既存 太陽熱 集熱器 사양—
- 型 號 : 三星 SFC-390
- 長 이 : 2,520mm
- 幅 : 850mm
- 水管의 數 : 7
- 水管의 外徑 : 10.73mm
- 水管의 內徑 : 9.53mm
- 集熱板 材質 : 알루미늄(Aluminium)
- 集熱板 두께 : 1mm

3. 實驗結果 및 考察

3.1. Rayleigh 數, Nusselt 數의 定義

測定된 集熱板의 溫度와 coverglass의 溫度를 각각 算術平均하여 集熱板의 代表溫度 T_p , coverglass의 代表溫度 T_c 를 定하였으며 T_p 와 T_c 의 差 ΔT_1 으로부터 Rayleigh 數는 다음 式으로 表示된다.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{\rho_a^2 g \beta C_{pa} L^3 \Delta T_1}{\mu_a K_a} \tag{1}$$

Gr : Grashof 數 ; $Gr = \rho_a^2 g \beta \Delta T_1 L^3 / \mu_a^2$

Pr : Prandtl 數 ; $Pr = C_{pa} \rho_a / K_a$

集熱板으로 부터의 輻射熱傳達에 의한 熱損失을 集熱板의 낮은 溫度때문에 큰 影響을 주지 못하며 平板 사이의 空氣의 熱傳導率도 매우 적으므로 集熱器로부터 外部로 放出되는 熱損失量은 集熱板과 coverglass 사이의 自然對流 熱傳達에 의한 熱損失이 가장 큰 影響을 미치고 있으며, 다음과 같이 熱貫流係數(overall heat transfer coefficient) U 를 使用하여 測定된 물의 入口, 出口의 溫度差 ΔT_2 로부터 集熱板을 통하여 放

出되는 熱損失量 Q 는 다음 式으로 表示된다.

$$Q = \dot{m} C_{p,w} \Delta T_2 = \rho_w V_w C_{p,w} \Delta T_2 = U A_a \Delta T_1$$

$$\therefore U = \frac{\rho_w V_w C_{p,w} \Delta T_2}{A_a \Delta T_1}$$

따라서 Nusselt 數는 다음과 같다.

$$Nu = \frac{U \cdot L}{K_a} = \frac{\rho_w V_w C_{p,w} \Delta T_2 L}{K_a A_a \Delta T_1} \quad (2)$$

3.2. 傾斜角이 集熱器의 熱損失에 미치는 效果

Fig. 4는 honeycomb 을 設置하지 않은 경우, Fig. 5는 直4角形 斷面의 honeycomb 을 設置한 경우, Fig. 6은 正4角形 斷面의 honeycomb 을 設置한 경우에 대하여 式 (1), (2)로부터 計算된 結果를 각각 나타낸 것이다. Figs. 4, 5, 6에서와 같이 Rayleigh 數 및 傾斜角 θ 가 增加함에 따라 Nusselt 數는 增加하며, 이 結果들은 Arnold⁹⁾, Cane⁹⁾ 등의 實驗結果와 同一한 傾向을 갖는다. 傾斜진 密閉空間 内部에서 熱傳達에 直接 關係되는 空氣의 流動은 Fig. 7과 같이 top heavy type instability 로 因해 發生되는 Bernard-cell type flow pattern¹⁰⁾과 傾斜진 集熱板을 따라 上昇한 후 coverglass 를 따라 下降하는 longitudinal motion 으로 大別될 수 있다. Arnold⁹⁾ 등에 의하면 傾斜角이 45° 이하에서 發生하는 熱傳達は 대부분 Bernard-cell type flow pattern 에 의한 것이며, 傾斜角이 增加함에 따라 longitudinal motion 이 점차 增加하고, 이런 2種類의 空氣流動은 자기 獨立의으로 存在하며, 서로 겹쳐질 수 없는 것이다. Honeycomb 을 設置하지 않은 경우, 傾斜角이 增加함에 따라 Nusselt 數는 增加하나 傾斜角이 45° 에서 60° 로 增加할 경우 그 增加率은 減少하고, 이것은 45° 이하에서 熱傳達の 대부분을 支配하던 Bernard-cell type flow pattern 이 점차 消滅되고 longitudinal motion 에 의한 熱傳達이 形成되는 過程에서 나타나는 現象으로

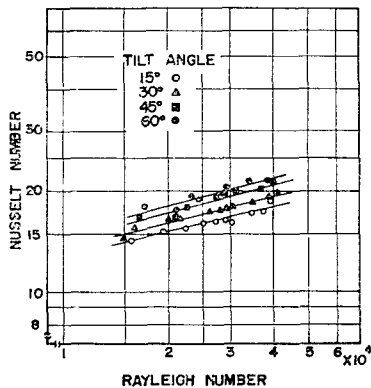


Fig. 4 Experimental results for flat-plate no-honeycomb solar collector

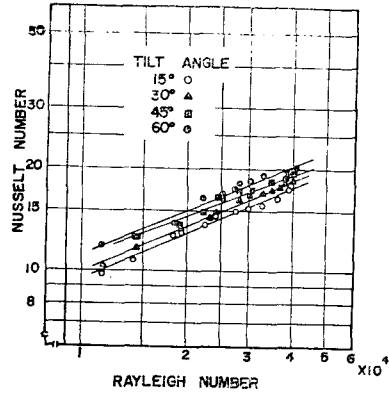


Fig. 5 Experimental results for rectangular, 40x20mm, honeycomb solar collector

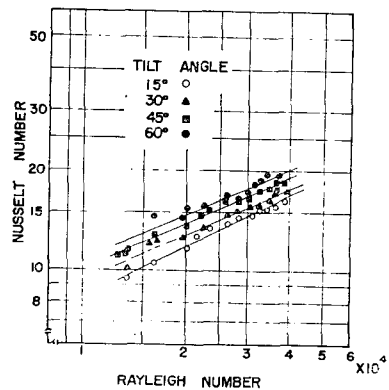
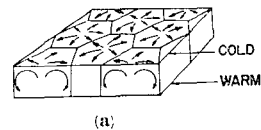
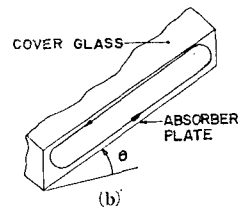


Fig. 6 Experimental results for square, 20x20mm, honeycomb solar collector



(a)



(b)

(a) Bernard cell flow pattern
(b) Longitudinal free convection along inclined plate

Fig. 7 Two components of free convection flow motion in enclosed air layer heated from below

생각된다. Honeycomb 을 設置한 경우에는 longitudinal motion 의 發達이 honeycomb 에 의하여 抑制되며 그

結果로 인해, 위에서 말及된 現象은 honeycomb을 設置하지 않은 경우보다 큰 傾斜角에서 나타날 것으로 생각되며, 따라서 honeycomb을 設置한 경우에는 傾斜角이 45°에서 60°로 增加할때 Nusselt數의 增加率이 減少하는 傾向은 本 實驗範圍 內에는 나타나지 않았다.

3.3. Honeycomb 構造物이 集熱器의 熱效率에 미치는 效果

Fig. 8, Fig. 9는 集熱器의 傾斜角에 대하여, honeycomb의 有無에 대한 Rayleigh數와 Nusselt數 間의 關係를 圖示한 것이다. Fig. 8과 9에서 알 수 있는 바와 같이, honeycomb을 設置하지 않을 경우에 比하여 honeycomb을 設置한 경우가 同一한 Rayleigh數에 대해 작은 Nusselt數를 가진다. Honeycomb을 設置하지 않은 경우, Rayleigh數의 增加에 대한 Nusselt數의 增加는 honeycomb을 設置한 경우의 增加率보다 적으며 이것은 Hollands⁴⁾, Charters等¹¹⁾이 提示한 結果와 같이 honeycomb 內部에서 낮은 Rayleigh數에서 top heavy type instability에 의해 形成된 空氣의 流動은 Rayleigh數가 增加함에 따라 급격히 honeycomb cell全體를 채우게 되며, 따라서 Rayleigh數의 增加에 대한 Nusselt數는 급격히 增加하여, honeycomb을 設置하지 않은 경우의 Nusselt數에 接近하는 現象으로부터 起因된 것으로서 생각된다.

直4角形 斷面의 honeycomb과 正4角形 斷面의 對流抑制 效果는 傾斜角 θ 가 增加함에 따라 그 差는 점차 減少하고 이것은 傾斜角이 增加함에 따라 Bernard-cell type flow pattern은 점차 減少하며, longitudinal motion에 의한 空氣流動이 熱傳達 現象을 支配하게 됨으로서, 同一한 評價 斷面 形狀比를 갖는 直4角形, 正4角形 斷面의 honeycomb cell 內部에서 發生하는 空氣의 流動形態가 같아짐으로 因하여 나타나는 現象으로 생각되며, 이 結果는 Smart等⁵⁾의 結果와 같은 傾向을 보여 주었다.

國內에서 使用되고 있는 既存 太陽熱 集熱器의 경우 그 傾斜角은 45°이며¹⁾, Fig. 9으로부터, 直4角形 斷面의 honeycomb을 設置하였을 경우 honeycomb을 設置하지 않은 경우에 比하여 平均 11.2%, 正4角形 斷面의 honeycomb을 使用한 경우 19.6%의 熱損失이 減少된다. 이것은 既存 太陽熱 集熱器가 常用範圍內에서 日射量 698kcal/m²·h 일때 流量 1l/m²·min. 으로 얻을 수 있는 入口, 出口의 溫度差가 5.5°C 인데 比해^{1,12)}, 直4角形, 正4角形 斷面의 honeycomb을 設置하였을 경우에는 얻을 수 있는 入口, 出口의 溫度差가 각각

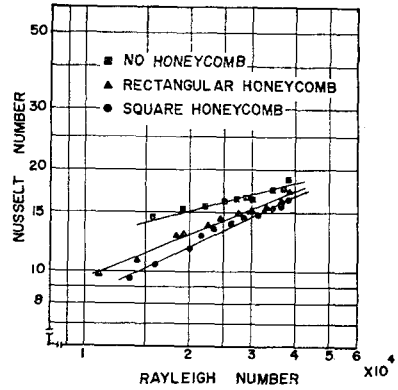


Fig. 8 Comparisons of experimental results of the solar collector at $\theta=15$

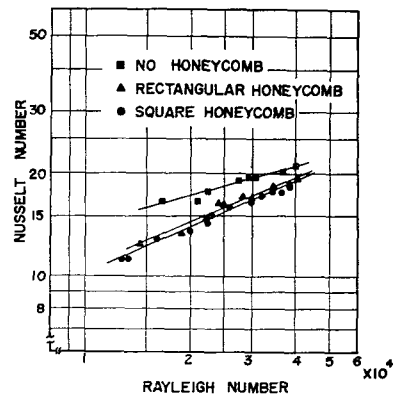


Fig. 9 Comparisons of experimental results of the solar collector at $\theta=45$

6.1°C, 6.5°C에 該當되는 것이다.

따라서 直4角形, 正4角形 斷面의 honeycomb은 太陽熱 集熱器의 熱效率을 既存 47.3%¹⁾로부터 52.4%, 56.2%로 增大시킬 수 있을 것으로 思料된다.

4. 結 論

實驗 및 計算의 結果를 檢討하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 集熱器의 傾斜角 θ 및 Rayleigh數가 增加함에 따라 Nusselt數는 增加하며 實驗結果는 傾斜角 15°~60°範圍에서 $Nu=CR^N$ 으로 表示되며 각각의 경우에 대한 實驗常數 C 및 N을 Table 1에 정리하였다.
2. 正4角形 斷面의 honeycomb은 直4角形 斷面의 honeycomb에 比하여 自然對流에 의한 熱損失을 抑制시키는 效果가 優秀하며, 傾斜角이 增加함에 따라 그 差는 減少한다.
3. 傾斜角 45°로 設置되는 既存 太陽熱 集熱器에 直

4 角形 斷面의 honeycomb, 正 4 角形 斷面의 honeycomb 을 設置하였을 경우 既存 集熱器에 比하여 각각 11.2%, 19.6%의 熱損失이 減少하며, 따라서 honeycomb 의 使用으로 태양熱 集熱器의 熱效率의 실질적인 向上을 기대할 수 있다.

Table 1 Experimental values of C and N for empirical correlation

$Nu = cRa^n$				
Type	Dimension	Tilt angle	C	N
No-honeycomb	900 × 2700 × 28 mm	15°	1.247	0.253
		30°	1.238	0.260
		45°	1.009	0.287
		60°	1.079	0.283
Rectangular honeycomb	40 × 20 × 28 mm	15°	0.159	0.443
		30°	0.139	0.461
		45°	0.185	0.439
		60°	0.230	0.422
Square-honeycomb	20 × 20 × 28 mm	15°	0.076	0.509
		30°	0.130	0.465
		45°	0.151	0.456
		60°	0.175	0.448

後 記

本 研究는 한국과학재단의 정작 연구비에 의한 研究結果이며 당국에 깊은 謝意를 表합니다.

參 考 文 獻

- (1) 삼성전자공업주식회사 태양 Energy 사업부, “三星 太陽熱 集熱器,” SEC-80.4 B4ZF(S), 1980.
- (2) Hottel, H.C. and Woertz, D.B., “The performance of flat-plate solar heat collectors”, Trans. ASME, vol. 64, 1942, pp.91-104.
- (3) Hollands, K.G.T., “Honeycomb devices in flat-plate solar collectors”, Solar Energy, vol. 9, No. 3, 1965, pp.159-161.
- (4) Hollands, K.G.T., “Natural convection in horizontal thinwalled honeycomb panels”, J. of Heat

Transfer, Trans. ASME, Vol. 95, Nov. 1973, pp.439-444.

- (5) 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.
- (6) Arnold, J.N. and Catton, I. and Edwards, D.K., “Effect of tilt and horizontal aspect ratio on natural convection in a rectangular honeycomb”, J. of Heat Transfer, Trans. ASME. Vol. 99, 1977, pp.120-122.
- (7) Buchberg, H. and Edwards, D.K., “Design considerations for solar collectors with cylindrical glass honeycomb, Solar Energy, Vol. 18, 1976, pp.193-203.
- (8) Smart, D.R. and Hollands, K.G.T. and Raithby, C.D., “Free convection heat transfer across rectangular celled diathermanous honeycombs”, J. of Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 102, Feb., 1980, pp.75-80.
- (9) Cane, R.L.D. and Hollands, K.G.T. and Raithby, 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.
- (10) E.R.G. Eckert, et al, “Analysis of heat and mass transfer”, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1972, pp.536-537.
- (11) Charters, W. W. S. and Peterson, L.F., “Free convection suppression using honeycomb cellular materials”, Solar Energy, Vol. 13, 1972, pp.353-361.
- (12) 한국동력자원연구소; 연구보고서, “태양에너지 이용기기 성능시험 기술개발 및 태양에너지 자원 조사 평가”, 1982, pp.31-34, pp.151-152.
- (13) Meyer, B.A. and Mitchell, J. W. and El-Wakil, M.M., “Natural convection heat transfer in moderate aspect ratio enclosures”, J. of Heat Transfer, Trans. ASME, Vol. 101, 1979, pp.655-659.
- (14) Blaga. A., “Use of plastics in solar energy application”, Solar Energy, Vol. 21, 1978, pp.331-338.