

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 20, No. 4, 2000

## 태양열 이용 냉난방 공조시스템 중 공기식 집열기의 집열효율에 관한 연구

김보철\*, 신현준\*\*, 최광환, 금종수\*\*\*

\*, \*\* 한국건설기술연구원 건축연구부

\*\*\*부경대학교 냉동공조공학과

## Study on the Collector Efficiency of an Air Heater in a Solar Air Conditioning System

B. C. Kim\*, H. J. Shin\*\*, K. H. Choi, J. S. Kum\*\*\*

\*, \*\* *Korea Institute of Construction Technology, Building Research Div.*

\*\*\* *Dept. of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Pukyong National University*

### Abstract

The suggested year round solar air conditioning system has been developed for cooling and heating. In particular, this system focused on cooling and dehumidification and it could reduce a peak time owing to the use of air conditioners in summer.

This study was performed to find out how much heating loads could be saved and furthermore whether this suggested system would be possible to do heating without a switch of system in real situations.

Through model house experiments, the following conclusions were obtained.

- 1) The collector efficiency was 36% at maximum, but more improved structure of suggested collector could increase its efficiency.
- 2) The temperature of outlet air was about 30°C and it could reduce heating loads.
- 3) Measured temperature and calculated one agreed well within  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ .

## 기 호 설 명

- $A_c$  : Collecting area[m<sup>2</sup>]
- $C_p$  : Specific heat [J/kg°C]
- $F'$  : Collector efficiency factor[-]
- $F_R$  : Heat removal factor[-]
- $G_T$  : Incident solar radiation[W/m<sup>2</sup>]
- $I_{DN}$  : Incident beam solar radiation[W/m<sup>2</sup>]
- $I_{HOL}$  : Total solar radiation[W/m<sup>2</sup>]
- $I_o$  : Extraterrestrial solar radiation[W/m<sup>2</sup>]
- $\dot{m}$  : Mass flow rate of air[kg/s]
- $Q_U$  : Actual useful energy gain[W]
- $S$  : Solar radiation absorbed into plate[W/m<sup>2</sup>]
- $T_a$  : Ambient temperature[°C]
- $T_i$  : Inlet air temperature[°C]
- $T_o$  : Outlet air temperature[°C]
- $U_L$  : Overall heat loss coefficient[W/m<sup>2</sup>°C]
- $\tau$  : Cover transmittance[-]
- $\alpha$  : Plate absorptance[-]
- $\eta$  : Collector efficiency[%]

### 1. 연구 목적

평판형 태양열 집열기는 주로 급탕 및 냉난방용으로 개발되어져 왔으며, 집열효율을 정확하게 예측하기 위한 많은 연구가 수행되어져 오고 있다.

본 연구자들에 의해 개발된 태양열 공조시스템은 계절에 따라 냉방 및 제습, 그리고 난방을 행하는 전천후 냉난방 공조 시스템으로 여름철 공조기 사용으로 인하여 발생하는 전력 침투 현상(peak time)을 경감하기 위하여 제습 및 냉방을 담당하는 데 주된 비중을 두고 있다.

제안 시스템은 그림 1과 같이 재생기, 전열교환기, 건조저장탱크, 현열교환기로 구성되어져 있으며 재생기는 전열교환기에서 제습, 냉각과정을 거쳐 흡수포텐셜(absorption potential)이 낮아진 LiCl용액을 태양열에 의해 가열된 재생면으로 유

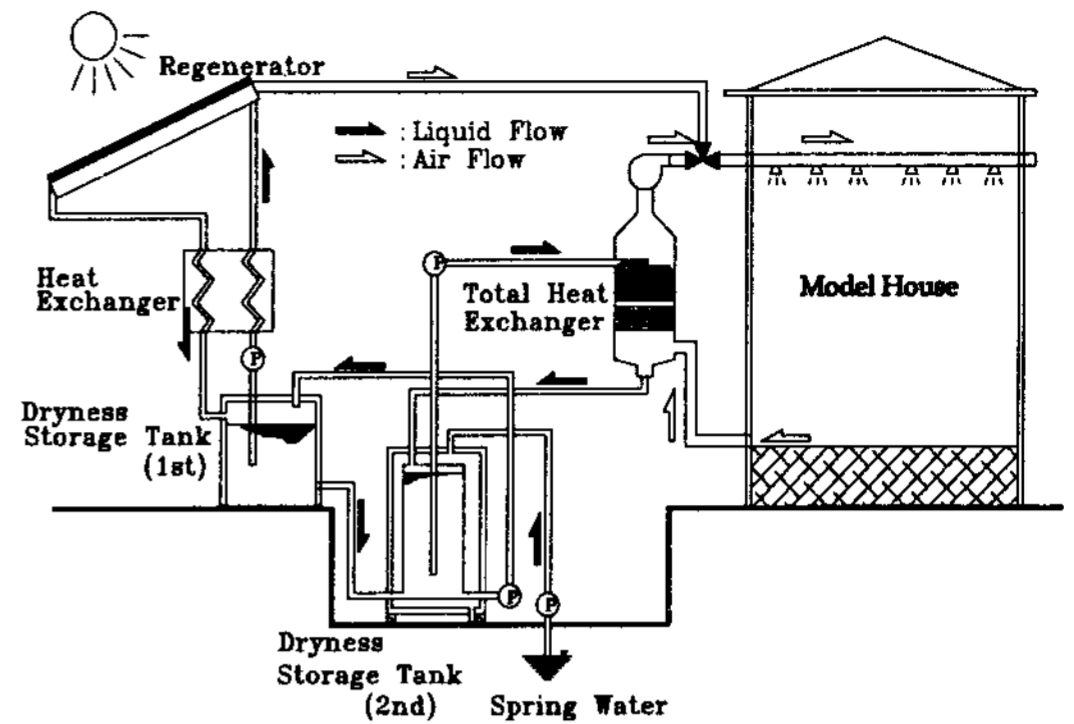


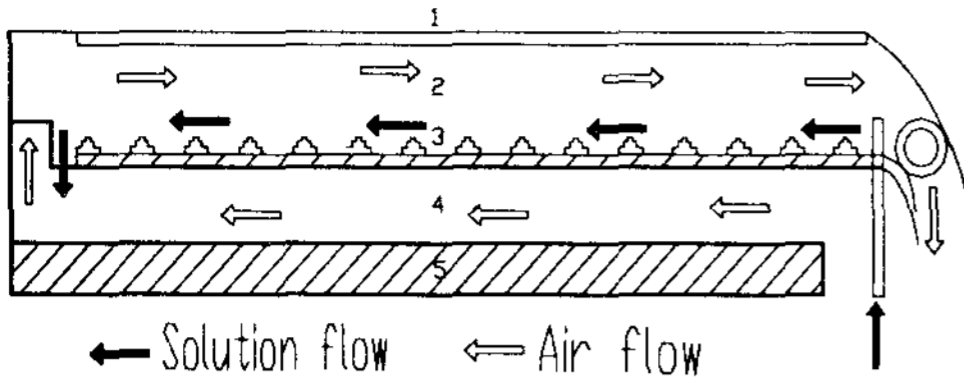
Fig. 1. The schematic of a solar air-conditioning system

하시켜 저농도의 LiCl용액속의 수분을 증발시켜 상실된 흡수포텐셜을 회복시키는 역할을 한다.<sup>1)</sup>

본 연구는 제안 시스템이 하계에 냉방 및 제습용으로 주로 사용되었던 재생기(regenerator)를 장치의 절환 없이 하나의 시스템으로 동계의 난방부하를 어느 정도 경감할 수 있는가를 파악하기 위하여 재생기의 동계 집열성능을 파악하고자 하는데 그 목적이 있다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

본 연구는 하계의 냉방과는 달리 동계 난방에 있어서 집열기의 동계 집열효율을 파악하고자 하는데 그 목적이 있다. 따라서 열손실을 최대한 줄이면서 집열기내의 열거동을 관찰하기 위하여 그림 2와 같은 구조를 취하였다. 본 실험은 겨울철 차가운 외기를 재생기로 직접 유입시켜 가열하는 공기가열기(air heater)의 형태를 취하고 있으며 집열기에서 가열된 공기를 송풍팬으로 실내로 공급하고, 실내공기를 다시 집열기로 보내어 가열하는 형태이다. 집열기의 크기는 가로 1.2m × 세로 1.2m이며, 재질은 열전도율이 높은 알루미늄으로 만들어져 있다. 또한 집열면에 일사 흡수율을 최대한으로 높이고 방사율을 낮추기 위하



- 1. double pane glass(16mm)
- 2. air space (50mm)
- 3. trickling surface (18mm)
- 4. air duct space (50mm)
- 5. insulation material( isopink 30mm)

Fig. 2. Cross section of a collector

여 집열기의 집열면을 선택 흡수막( $\epsilon = 0.5$ )으로 처리를 하였다. 그리고 외기에 의한 대류열손실을 줄이기 위한 투과체로 두께가 16mm인 복층유리가 사용되었으며, 유입공기가 효과적으로 가열되어 원활하게 지나가도록 집열면과 하부 유리면 사이의 공기층 높이를 50mm로 하였다.

한편, 집열기에서 가열된 열이 집열기의 양쪽 측면과 하부로 빠져나가는 것을 방지하기 위하여 단열재로써 집열기의 양쪽 측면과 하부에 단열재를 부착하였다. 그리고 집열기의 배기 덕트에 송풍팬을 설치하여 가열된 공기를 대상실로 유입하였다.

사진 1에 태양열 공조시스템 모델하우스의 전경을 나타내고 있다.

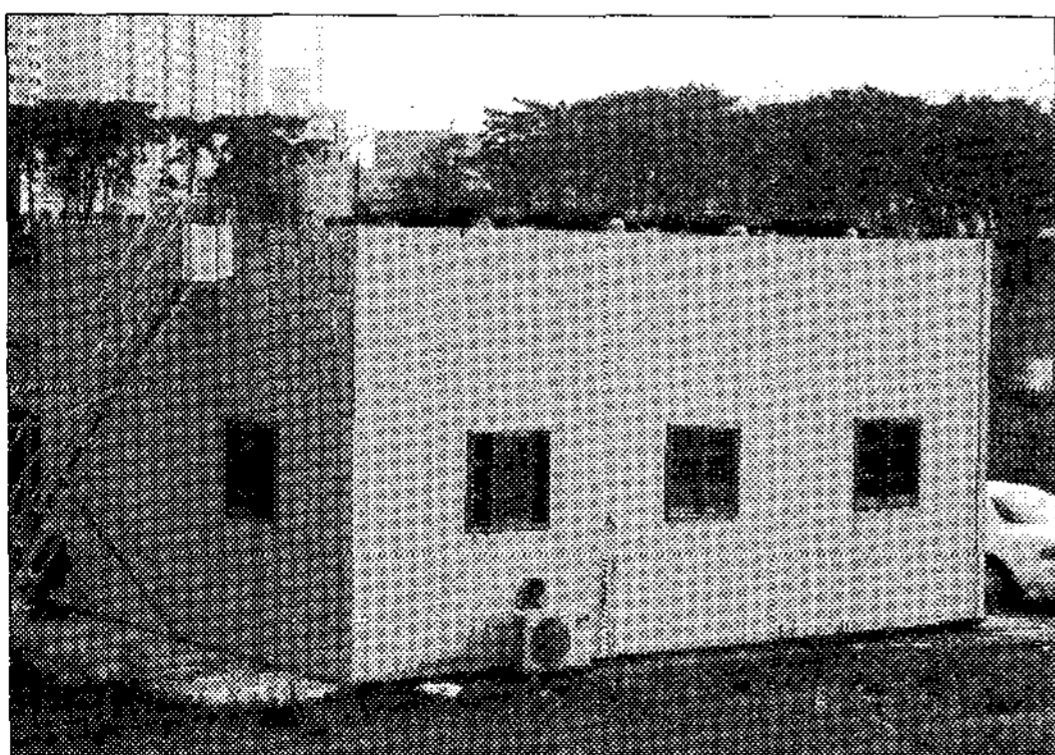


Photo. 1. General view of a model house

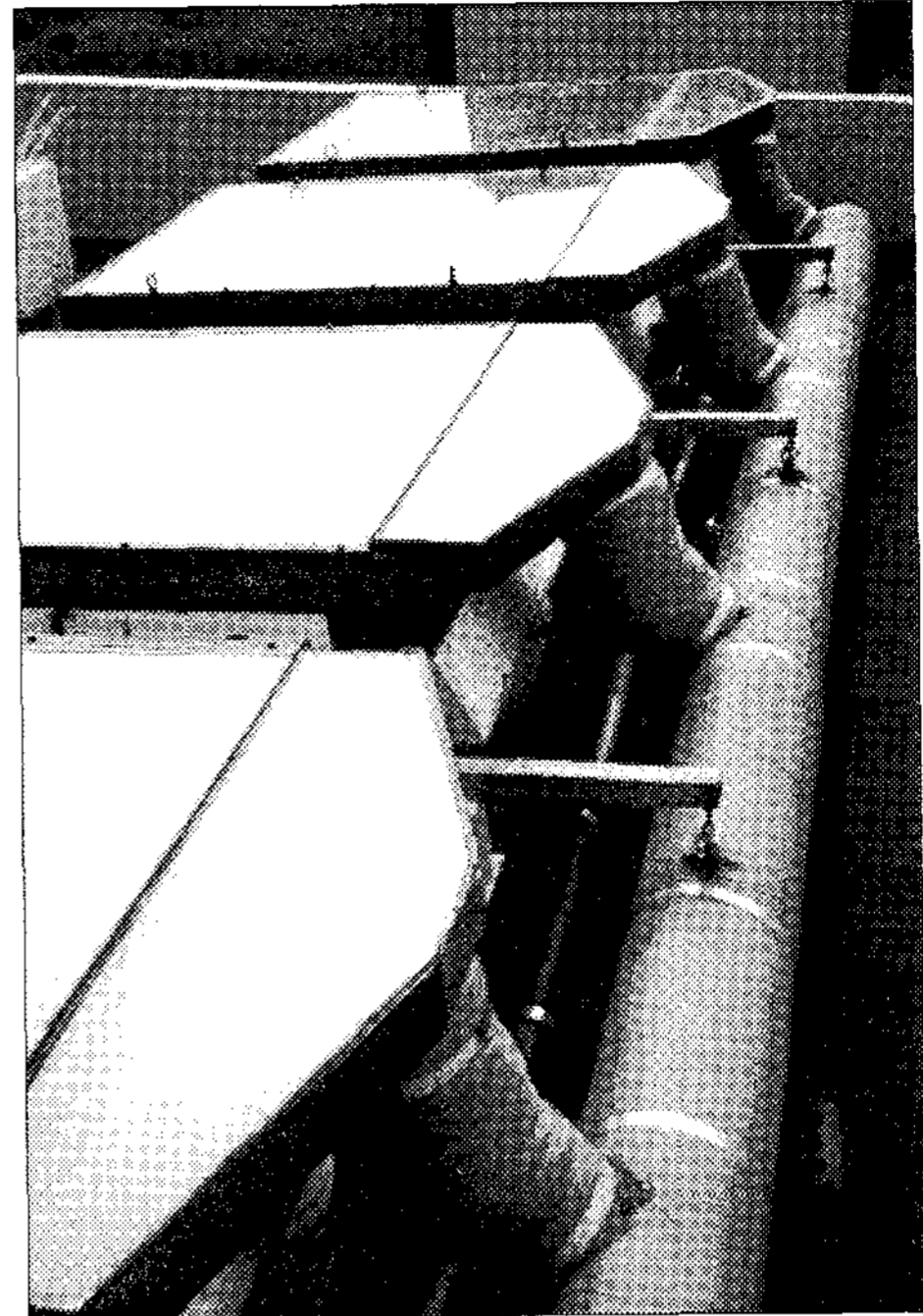


Photo. 2. Regenerators set up on the rooftop of a model house

일반적으로 실험 대상지역인 부산 지방의 경우, 동계에 최대의 일사량을 흡수할 수 있는 집열기의 경사각은 40~45° 이지만, 본 연구에서는 하계에 집열면으로 용액을 유하시키기 때문에 집열기의 각도가 높아질수록 유속상승으로 인하여 용액의 온도상승에 불리하다.

따라서 과거에 여러 차례의 실험을 통하여 경사각을 5°, 방위는 정남을 향하도록 하였다. 그리고 동계에도 실험장치의 큰 하중으로 인한, 장치 변동의 어려움으로 하계의 최적 경사각인 5°를 그대로 고정하여 실험을 행하였다.<sup>2)</sup>

사진 2는 실험동 옥상에 설치된 4대의 재생기를 나타내고 있으며 집열기의 동계 집열효율을 정확히 산정하기 위하여 인위적으로 댐퍼 개폐도를 조작하여 집열기 입구로 외기를 간헐적으로 혼입하여 실험하였다.

### 3. 상부 열손실 계수와 집열효율

본 연구에 사용된 공기식 태양열 집열기의 집열효율은 ASHREA 93~97 standard에 기준하여 계산하였다. 집열효율계산을 위한 추정식은 식 (1)과 같다.

$$\eta = \frac{Q_u}{(A_c \cdot G_T)} \quad (1)$$

여기에서  $Q_u$ 는 집열기에서의 최대 유효에너지 획득에 열제거인자  $F_R$ 을 곱한 것으로 식 (2)와 같다.<sup>3)</sup>

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (2)$$

집열 효율을 구하는 계산 순서도는 그림 3과 같다.

#### 3.1 입사 일사량 계산

실험에서 얻은 일사량은 전천일사계로써 측정 한 수평면 전천 일사량이며, 실제로 계산에서 필요로 하는 값은 경사면에 대한 입사 일사량이다. 따라서 경사면으로 입사해 들어오는 일사량을 구

하기 위하여 먼저 직산분리(直散分離)수법을 이용하여 전천 일사량을 천공 일사량과 직달 일사량으로 분리한 후, 집열면으로 입사·흡수되는 일사량을 구하였다. 직산분리 수법에는 몇 가지가 있지만, 본 연구에서는 Udagawa와 Kimura가 제안한 식 (3), (4)을 사용하였다.<sup>4)</sup>

$$I_{DN} = (-0.43 + 1.43K_{Tt})I_0 \quad (K_{Tt} \geq K_{TtC}) \quad (3)$$

$$I_{DN} = (2.277 - 1.258 \sinh + 0.2396 \sin^2 h) \times K_{Tt}^3 I_0 \quad (K_{Tt} \leq K_{TtC}) \quad (4)$$

여기에서

$$K_{Tt} = \frac{I_{HOL}}{I_0 \sinh}$$

$$K_{TtC} = 0.5163 + 0.333 \sinh + 0.00803 \sin^2 h$$

한편, 실제로 구하고자 하는 일사량은 투과체인 복층유리를 통과하여 집열면에 입사되는 일사량이다. 따라서 본 계산에 있어서는 복층유리의 투과율 계산을 병행, 집열면에 입사되는 일사량을 최종적으로 구하였다.

#### 3.2 집열기 상부열손실 계수 계산

공기식 태양열 집열기로부터의 총괄열손실 계수  $U_L$ 은 집열면 상부로의 열손실 계수  $U_t$ , 집열면 하부로의 열손실 계수  $U_b$ , 측면으로의 열손실 계수  $U_e$ 로 구분하며, 이 중  $U_e$ 는 단열이 양호한 집열기에서는 보통 무시한다.<sup>3)</sup>

한편 집열기의 상부, 하부, 측면에서 발생하는 총 열손실중에서도 상부열손실은 가장 지배적인 요소이다. 상부 열손실 계수  $U_t$ 를 열저항으로 분류하면, 집열기의 상부 커버(cover)인 유리 외 기와의 열저항  $R_1$ , 상부 커버와 하부 커버, 즉 유리면 사이의 열저항  $R_2$ , 하부 커버와 집열판

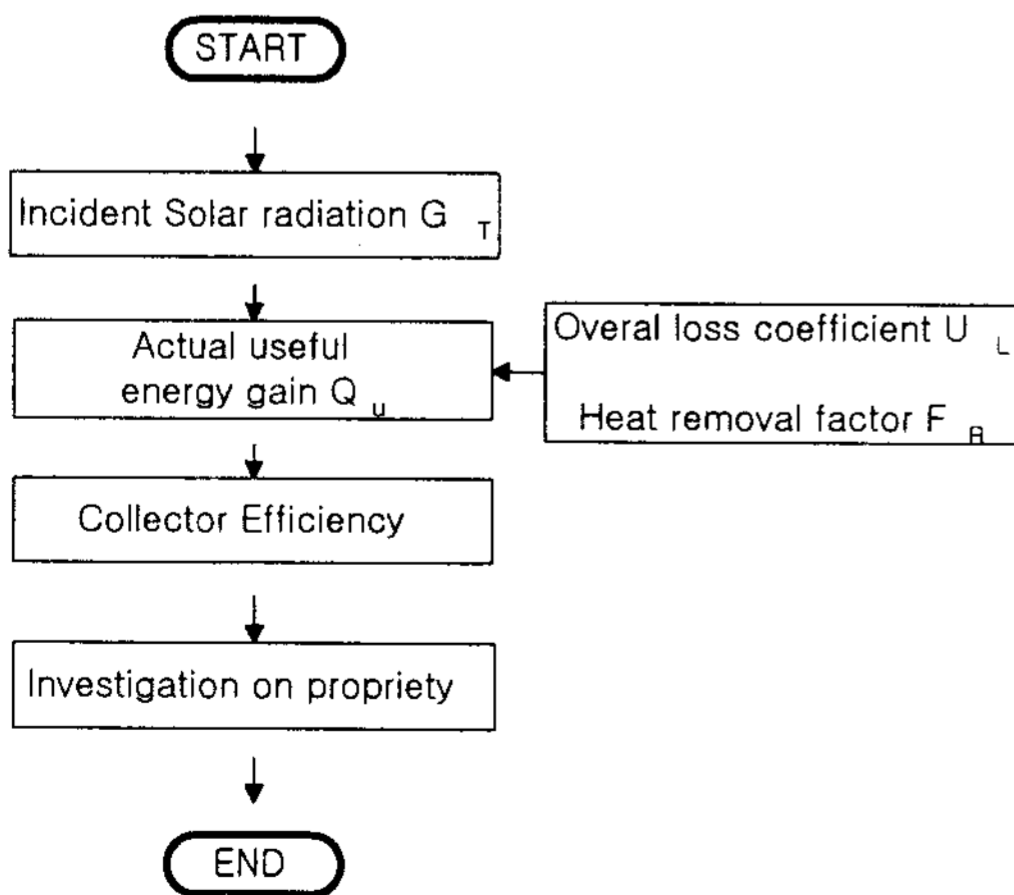


Fig. 3. The flowchart for calculation of collector efficiency

의 열저항  $R_3$ 로 분류할 수 있다. 한편, 집열기로부터 하부로의 열손실 계수  $U_b$ 는 집열기 하부에서 단열재로의 열저항  $R_4$ , 주위로의 열저항  $R_5$ 로 나눌 수 있지만 일반적으로  $R_5$ 는 0으로 간주한다. 현 시점에서는 상부열손실 계수를 구하는 과정이므로  $R_4$ 는 후술하는 총열손실계수  $U_b$ 의 계산시 사용된다. 따라서 집열기의 상부열손실 계수  $U_t$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (5)$$

한편, 재생면을 기준으로 열의 거동을 종합적인 열회로망(thermal network)으로 나타내면 그림 4와 같다.

본 공기식 태양열 집열기에 있어서의 상부열손실 계수를 구하는 계산 순서도는 그림 5와 같다.

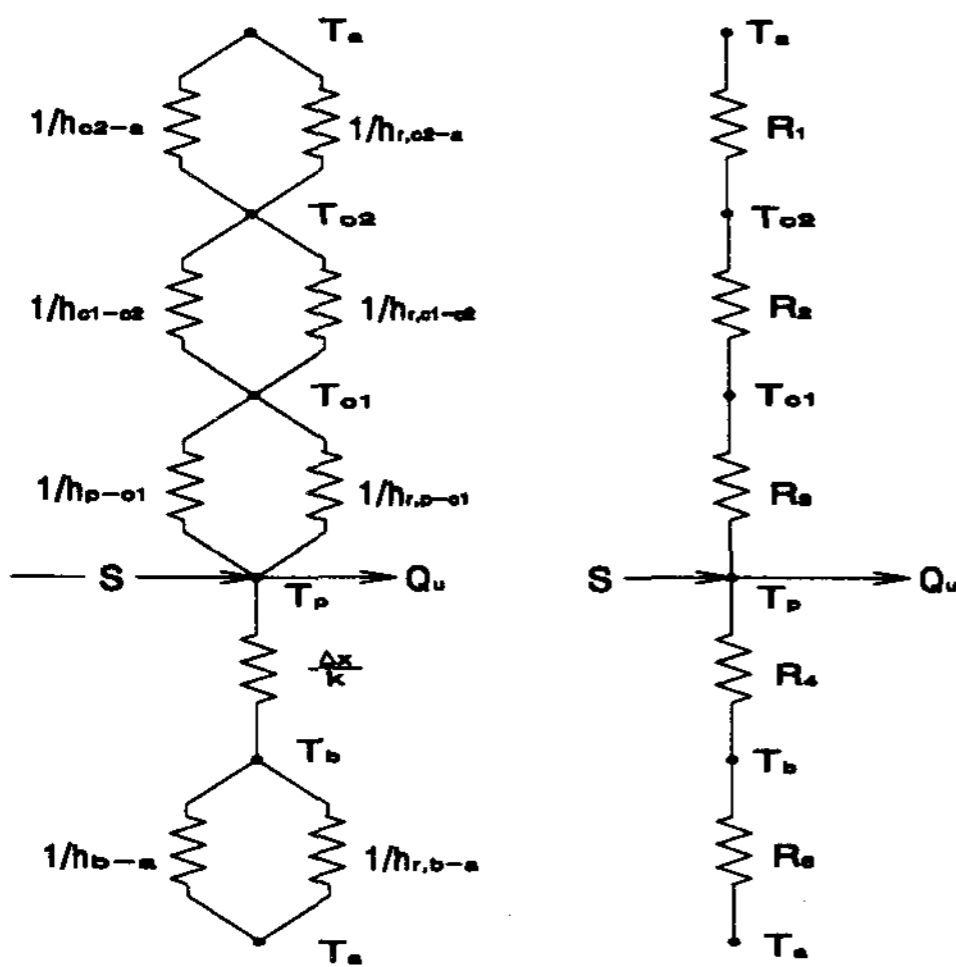


Fig. 4. Thermal network of a collector

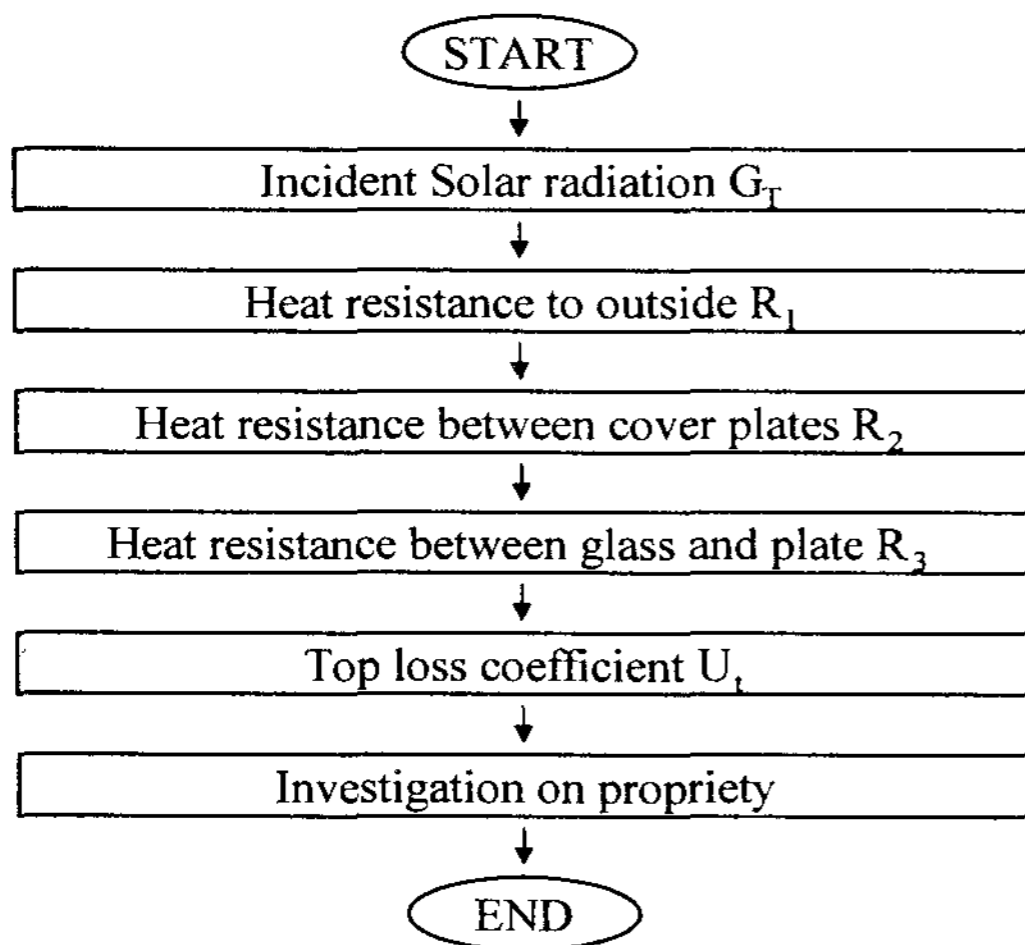


Fig. 5. Flowchart for calculation of the top loss coefficient

### 3.2.1 주위로의 열저항 $R_1$

유리면 상부와 외기와의 열저항  $R_1$ 은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c2-a}} \quad (6)$$

여기에서  $h_w$ 는 외기풍속에 의한 강제대류항을 나타내며 McAdams의 식을 사용하여 구하였다.<sup>3)</sup>

$$h_w = 5.7 + 3.8V \quad (7)$$

$h_{r,c2-a}$ 는 주위와의 복사 열손실을 나타내는 항이며, 계산에 사용한 유효하늘온도는 아래의 Swinbank의 식을 사용하여 구하였다.<sup>3)</sup>

$$T_s = 0.0552T_a^{1.5} \quad (8)$$

### 3.2.2 투과체에서의 열저항 $R_2$

집열판 상부에 설치한 커버, 즉 복층유리에서의 열저항  $R_2$ 는 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,c1-c2} + h_{r,c1-c2}} \quad (9)$$

여기에서  $h_{c,c1-c2}$ ,  $h_{r,c1-c2}$ 는 각각 유리면 사이에서의 대류, 복사성분을 나타내는 항이며, 자연대류항을 나타내는  $h_{c,c1-c2}$ 의 계산은 Buchbergs가 제안한 식을 사용하였다.<sup>5)</sup>

### 3.2.3 투과체와 집열판 사이의 열저항 $R_3$

투과체인 하부유리면과 집열판 사이에서의 열저항  $R_3$ 는 식(10)로 나타낼 수 있다.

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,p-cl} + h_{r,p-cl}} \quad (10)$$

여기에서  $h_{c,p-cl}$ ,  $h_{r,p-cl}$ 은 각각 하부 유리면과 집열면에서의 대류, 복사성분을 나타내는 항이다.

특히,  $h_{c,p-cl}$ 은 집열면과 하부유리면 사이의 공기층에서의 강제대류성분을 나타내는 항으로, 집열면에 4.5mm높이의 간섭막대(rib)가 집열면 폭 방향에 대해 10mm간격으로 배치되어 있기 때문에 표면 거칠기, 즉 간섭막대가 열전달 계수에 미치는 영향을 고려하지 않으면 계산의 정도가 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 Gnielinski식을 수정, Nu수를 계산하여 대류열전달 계수  $h_{c,p-cl}$ 를 구하였다.<sup>6)</sup>

### 3.3 집열기의 열제거 인자

집열기 열제거인자  $F_R$ 은 일반적으로 열교환기의 효율에 해당한다.  $F_R$ 은 최대 가능한 열전달에 대한 실제 열전달의 비로써 정의되며, 식 (12), 식 (13)과 같다.<sup>3)</sup>

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A_c[S - U_L(T_i - T_a)]} \quad (12)$$

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (13)$$

여기서,  $F'$ 는 집열기 효율인자이며,  $F_R$  항은 기존의 열교환기의 효율과 같고, 최대로 가능한 열전달에 대한 실제 열전달의 비로써 정의된다. 또한  $U_L$ 은 상부열손실계수  $U_t$ 에 집열기 하부에서 단열재로의 열저항  $R_4$ 를 고려한 총열손실계수이다.

### 3.4 집열기의 집열효율

본 연구에서 구하고자 하는 집열효율은 순시값으로 입사 일사량에 대한, 같은 시간대의 실제 유효에너지의 비로써 나타내며, 식 (14), 식 (15)와 같다.<sup>3)</sup>

$$\eta = \frac{Q_u}{(A_c \cdot G_T)} \quad (14)$$

$$\eta = F_R \left[ \tau\alpha - U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right] \quad (15)$$

### 3.5 계산의 타당성 검토

공기식 태양열 집열기의 상부 열손실 계수의 계산 정도를 검토하기 위하여 실제 측정된 출구 공기온도와 계산에 의한 출구 공기온도를 비교하였다. 집열기를 빠져 나오는 출구 공기 온도는 식 (16)을 이용하여 계산할 수 있다.<sup>3)7)</sup>

$$T_o = T_i + \frac{Q_u}{\dot{m}C_p} \quad (16)$$

## 4. 결과 및 고찰

그림 6은 99년 1월 21일의 실험 결과를 나타내고 있으며, 그림 7은 본 공기식 집열기의 동계 집열효율을 나타내고 있다.

그림을 보아 알 수 있듯이 본 공기식 집열기의 출구 공기온도는 최대 30°C 정도였으며 이 공기를 실내로 취출하였을 경우 최대 27°C가 얻어짐을 알 수 있었다.

또한 본 공기식 집열기의 동계 집열효율은 최대 약 30~35% 정도였다. 이는 기존의 독립된 형태의 집열기의 집열효율에 비하면 다소 뒤지나, 본 재생기/집열기가 여름의 냉방 및 제습에 주된 비중을 두고 있다는 점을 고려한다면 본 시스템으로 장치의 절환없이 냉방은 물론 난방용으로도 확장이 가능하다는 사실을 확인할 수 있었다.

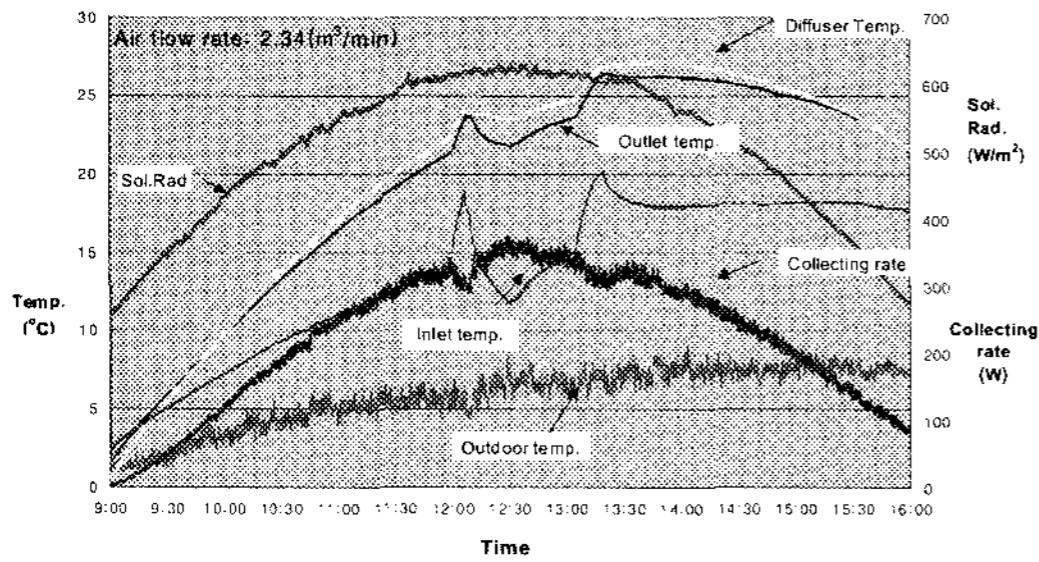


Fig. 6. Experimental results of the regenerator (1999. 1.21)

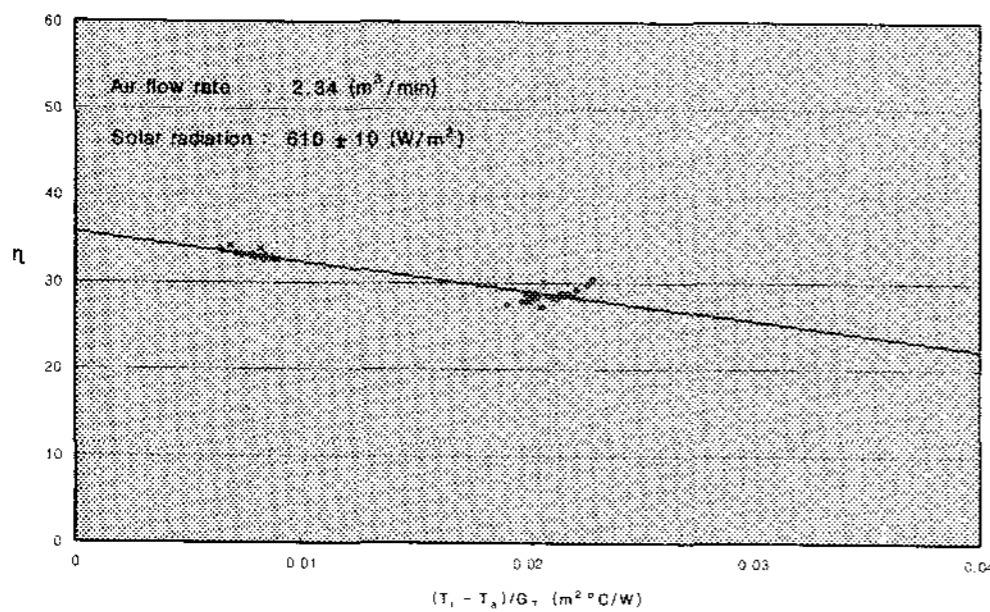


Fig. 7. Collector efficiency(1999. 1.21)

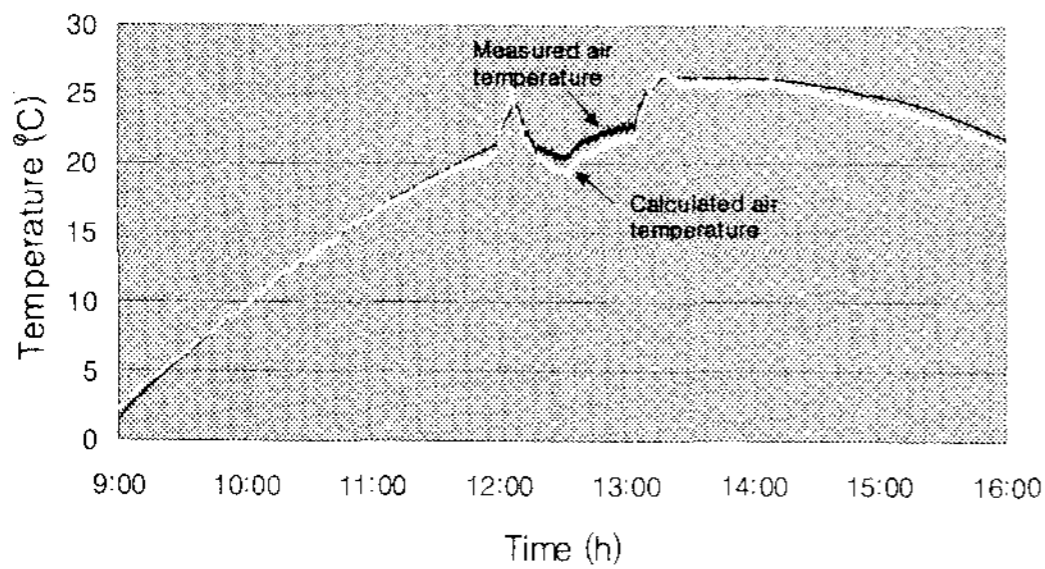


Fig. 8. Comparison of outlet air temperature in collector(1999.1.21)

또한 계산의 결과를 검증하기 위하여 실제로 측정된 집열기의 출구공기 온도와 계산상의 출구 공기 온도를 그림 8에 나타내었다.

실측치와 계산치 사이에는 최대  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  정도의 차이가 있으나, 전체적으로 측정치와 계산치가 일치하는 경향을 보여주고 있다.

## 5. 결 론

장치의 절환이 없는 하나의 시스템 즉, 하계에는 재생기로 동계에는 집열기로 사용하는 태양열 이용 냉난방 공조 시스템 중 집열기의 동계 실험 (1998.11.20~1999.2.20)을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 공기식 집열기의 출구 공기온은 최대  $30^{\circ}\text{C}$  정도로 단순한 난방전용 시스템의 효율에 비하면 다소 낮았다.
2. 본 공기식 집열기의 동계 집열효율은 약 30~35%였다.
3. 계산에 의한 집열기의 출구공기온도와 실제로 측정된 출구공기온도의 온도차가 최대  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  정도 밖에 나지 않아 집열효율의 계산이 타당함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지 자원 기술 지원 센터의 연구비 지원(연구과제 고유번호: 961A201316AG1)에 의해 이루어졌으며 이에 감사를 드리며 참여해 주신 (주)삼성물산과 (주)신성이엔지의 협조에도 감사를 드립니다. 또한 장치의 제작, 실험에 헌신을 다해준 (주)한일MEC의 노은호君과 (주)현대통상의 정경환君에게도 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. K. H. Choi, "Research on open cycle solar absorption system for low temperature dehumidifying and drying", Doctor paper, 1993.
2. 김보철, 김경철, 금종수, 최광환, "태양열 이용

- 제습장치중 재생기 최적 경사각에 관한 연구”, 공기조화 냉동공학회 부산·경남지부 추계학술발표대회 논문집, 1996, pp.37~42.
3. J. A. Duffie, W. A. Beckman, “Solar engineering of thermal processes”, A Wiley-Interscience Publication, 1991.
  4. 宇田川 光弘 著, 琴鐘洙, 金成完 編譯, “PC를 이용한 空氣調和計算法”, 技文堂, 1993.
  5. Buchberg. H., “Circuit Analysis Applied to Solar House Heating”, Trans. of Conf. on Use of Solar Energy-The Scientific Basis, Vol.3, Thermal Processes, Part 2, 1955.
  6. A. F. Mills, “HEAT AND MASS TRANSFER”, IRWIN, 1995.
  7. T. Munner and M. Hawas, “Calculation of the top loss coefficient by the network method and applications to solar collectors”, Solar energy, Vol.6, No.10, 1981, pp.971~981.