

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 23, No. 3, 2003

진공관식 태양열 집열 튜브의 열성능 비교 분석

현준호*, 천원기**

* 제주대학교 공과대학 에너지공학과 대학원,

** 제주대학교 공과대학 에너지공학과(wgchun@cheju.ac.kr)

A Comparative Analysis on the Thermal Performance of Solar Vacuum Collector Tubes

Hyun, June-Ho*, Chun, Won-Gee**

* Graduate School, Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Cheju Nat'l University

** Corresponding Author, Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Cheju Nat'l University

Abstract

This study deals with the collection of solar energy and its storage in evacuated tubular collector systems for different types of header design, flow passage and heat transfer devices. In order to elicit the most efficient combination of header design, flow passage, heat transfer hardware and operating conditions, a series of tests were done for the four different types of solar collectors utilizing vacuum tubes. The systems studied here either has the evacuated collector tubes with a metal cap on one end or the all-glass evacuated solar collector tubes. These evacuated tubular collectors are known to be more efficient than the flat-plate ones in both direct and diffuse solar radiation. Test results show that the system comprised of the all-glass evacuated tubes with U-shaped copper pipes inside outperforms the other configurations. Especially, a rolled copper sheet tightly placed along the inner surface of each inner tube enhances heat transfer between the heated collector surface and the water contained in the U-shaped copper pipe.

Keywords : 태양열 온수 급탕(Solar water heating), 진공관(Evacuated tubes), 열성능(Thermal performance)

기 호 설 명

Q_w : 집열 에너지(kcal/hr)

A_c : 집열 면적(m^2)

I_t : 집열면 일사량($kcal/hr \cdot m^2$)

τ : 유리관 투과율

- α : 흡열판 흡수율
- Q_L : 총괄 열손실
- U_L : 총괄열손실계수 ($kcal/hr \cdot m^2 \cdot ^\circ C$)
- \bar{t}_p : 흡수판 표면의 평균 온도 ($^\circ C$)
- t_a : 외기 온도 ($^\circ C$)
- t_i : 집열기 입구의 열매체 온도 ($^\circ C$)
- F_R : 집열 효율 수정 계수
- G : 집열매체의 유량
- C_p : 열매체의 비열
- t_o : 집열기 출구의 열매체 온도

1. 서 론

그 동안 태양열 이용 및 보급 분야의 실용화 측면에서 온수·급탕에 이용·보급된 태양열 집열기의 최대 과제는 열에너지를 최소의 비용으로 얻는 것이다. 세계 각국에서는 여러 가지 고효율 태양열 집열기와 요소 기술들의 개발을 위해 많은 연구를 진행 중에 있다. 특히 중·고온 이용을 위한 태양열 집열 기술 분야에서 고 효율화는 집광형에서와 같이 반사경을 부착하여 태양 복사광을 선(line-focus), 혹은 점(point-focus)에 모으는 방법과 태양열 집열기에 진공기술이 투입되어 집열판으로 흡수된 열 손실을 줄이는 방법으로 크게 나누어서 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 온수 급탕을 위한 태양열 이용에 있어 진공관식 태양열 집열기의 효용성에 관한 내용으로 현재 시중에 시판되고 있는 여러 형태의 태양열 집열기들을 비교 분석하고 이들의 기술적인 문제, 특히 집열장치와 열에너지 저장장치(축열장치)와의 결합형태에 따른 축열성능을 분석함으로써 최적의 결합방법을 찾아 효율을 증대함은 물론 내구성 증진에도 기여하는데 그 궁극적인 목적이 있다.

우선, 본 논문에 비교된 진공관식 태양열 집열

기의 구조를 살펴보면, 이중관 삽입 형태, U자관 형, 히트 파이프 삽입 형태 등의 세 가지 유형이 있다. 이들은 모두 펌프를 이용한 강제순환(forced circulation)형태의 가압식으로 '차온 제어기'를 이용하여 강제유동을 제어하도록 되어 있다. 본 연구에서는 이 세 가지 형태의 결합방식이 어떠한 특징을 가지며 집열면적에 따라 어떠한 열성능을 나타내는지 비교 분석하였다. 특히, 이러한 실험은 현재 중국, 독일 등 여러 나라에서 연구되고 있는 진공관식 태양열 집열기 중에서 all-glass solar vacuum collector의 기술을 바탕으로한 집열기와 축열조의 최적의 기기적 결합 형태를 분석하여, 국내 시장에서의 all-glass solar evacuated(vacuum) tube collector의 개발과 열성능 및 내구성 향상 측면에서 가장 열성능이 뛰어나고 경제적인 부담도 줄일 수 있는 안정되고 효율적인 모델 개발에 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 이론적 고찰

태양열 집열기는 태양복사 에너지를 집열하여 이용하기 위한 장치로서 그 이용 목적과 적용 온도에 따라 여러 가지의 형태를 갖으며, 일반적으로 평판형, 진공관형, 집광형 등으로 분류할 수 있다. 진공관형 태양열 집열기는 투명도가 좋은 하나 혹은 두 개의 유리 튜브로 제작된 다수의 집열 튜브로 구성되어 있다. 전자의 경우("단일 진공관식"이라고도 함)는 단일 진공 튜브 내에 히트 파이프나 그 밖의 다른 형태의 열전달 장치를 삽입하여 집열된 태양열에 의해 열매체가 효율적으로 가열될 수 있도록 설계되어 있다. 한편, 후자의 경우("이중 진공관식"이라고도 함 - 이중으로 진공 처리된 것이 아니라 두 개의 유리 튜브가 집열 튜브의 제작에 이용된 것을 지칭함)는 크기가 서로 다른 두 개의 유리 튜브 이용하여 만든 것으로서 두 유리 튜브 사이의 공간을 진공 처리하고

특히 안쪽 유리 튜브의 외측 면이 광학적 선택흡수성(low emittance, high absorptance)을 갖도록 제작한다. 이 경우도 히트 파이프나 "U"자형 금속관을 안쪽 유리 튜브 내에 설치하여 태양열을 이용한 열매체의 가열이 용이하도록 되어 있다.

2.1 집열 성능의 측정

집열 성능을 계산하는 관련식은 평판형의 그것과 기본적으로 동일하며 특히 이중 진공관식의 경우 집열면이 원형으로 되어 있어 이의 계산에 있어 투영 면적(projection area)의 개념을 적용한다. 이중 진공관식 집열기는 태양에너지를 전방위적으로 흡수할 수 있는 것이 다른 형태와 비교된다. 진공관식 태양열 집열 튜브를 근간으로 하는 태양열 집열기는 일반적으로 평판형에 비하여 대류(convection)에 의한 열손실이 상당히 작은 편이며 이는 가열 온도의 상승과 함께 평판형에 비해 양호한 집열 효율로써 나타난다. 다음은 태양열의 성능 측정과 관련된 여러 형태의 관계식을 정리한 것이다.

$$Q_w = A_c [I_t \tau \alpha - U_L (\bar{t}_p - t_a)] \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 보면 일사량과 관계된 $I_t \tau \alpha$ 값을 최대한으로 크게 하고, 흡수한 열에너지를 빼앗기지 않도록 총괄열손실계수와 관계된 $U_L (\bar{t}_p - t_a)$ 값을 최소로 줄일 수 있도록 집열기를 설계하는 것이 중요함을 알 수 있다.

All-glass solar vacuum collector의 집열기의 총괄열손실계수 U_L 는 튜브 내 물의 평균온도가 감소함에 따라 같이 감소하고 열손실은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q_L = U_L A_c (T_m - T_a) \quad (2)$$

일반적으로, 열손실계수는 $0.9 \text{ kcal/hr} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

를 넘지 않는다.

식(1)에서 집열효율수정계수 F_R 를 도입하고, 흡열관 평균온도 대신 보다 측정이 용이한 집열기 입구의 열매체 온도 및 외기 온도를 사용하면 아래와 같이 좀 더 간편한 형태로 표현된다.

$$Q_w = F_R A_c [I_t \tau \alpha - U_L (t_i - t_a)] \quad (3)$$

식 (3)을 태양열 집열 효율식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{Q_w}{I_t A_c} = F_R \tau \alpha - F_R U_L \frac{(t_i - t_a)}{I_t} \quad (4)$$

여기서 η 는 실제로 유용한 태양 집열량을 집열면에 조사되는 총열량으로 나눈 값으로 집열기의 효율을 말한다.

태양열 집열기의 성능은 일반적으로 실험에 의하여 구하며, 태양열 집열기를 통과하는 열전달 매체의 유량과, 집열기 입·출구의 온도차를 측정하면 된다.

$$Q_w = A_c G C_p (t_o - t_i) \quad (5)$$

식 (5)의 집열기 효율은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\eta = Q_w / A_c I_t = M C_p (t_o - t_i) / A_c I_t \quad (6)$$

3. 진공관식 태양열 집열기

본 연구에서는 단일 진공 유리 튜브(단일 진공관)에 직경이 서로 다른 금속제 관 2개를 삽입하여 냉수가 직경이 작은 내부관으로 유입되어 관의 하단부에 이르면 바깥쪽 관을 따라 흐르면서 태양열에 의해 데워지도록 이중 유로가 설계된 이중관 삽입형과 단일 진공 유리 튜브에 히트 파이프를

삽입하여 제작한 히트 파이프 삽입형, 그리고 이중 진공관(all-glass solar vacuum collector tube)에 U자형 유체 순환 파이프를 삽입하여 제작한 서로 다른 세 가지 형태의 진공관식 태양열 집열기를 대상으로 실험을 수행하였다.

3.1 단일 진공관식 집열기

그림 1 및 그림 2는 이중관 삽입형과 히트 파이프 삽입형의 2가지 경우의 단일 진공관식 태양열 집열기의 구조를 나타내고 있다.

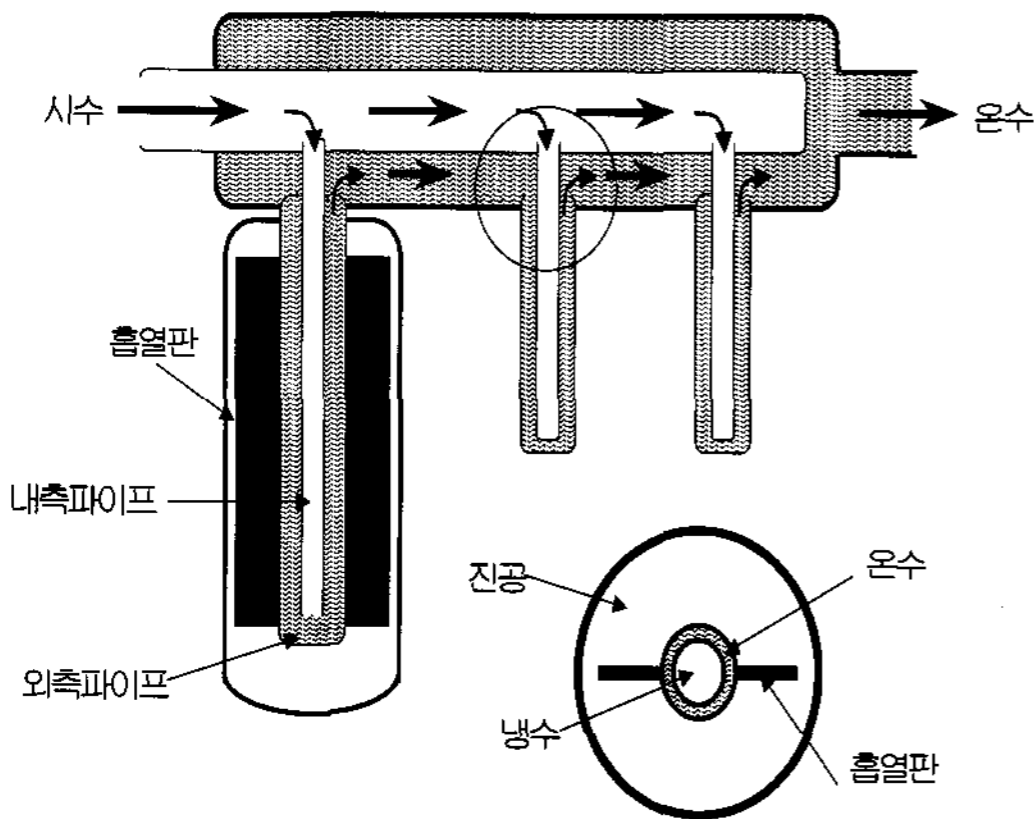


그림 1. Schematic of a single vacuum collector with dual pipe flow passage

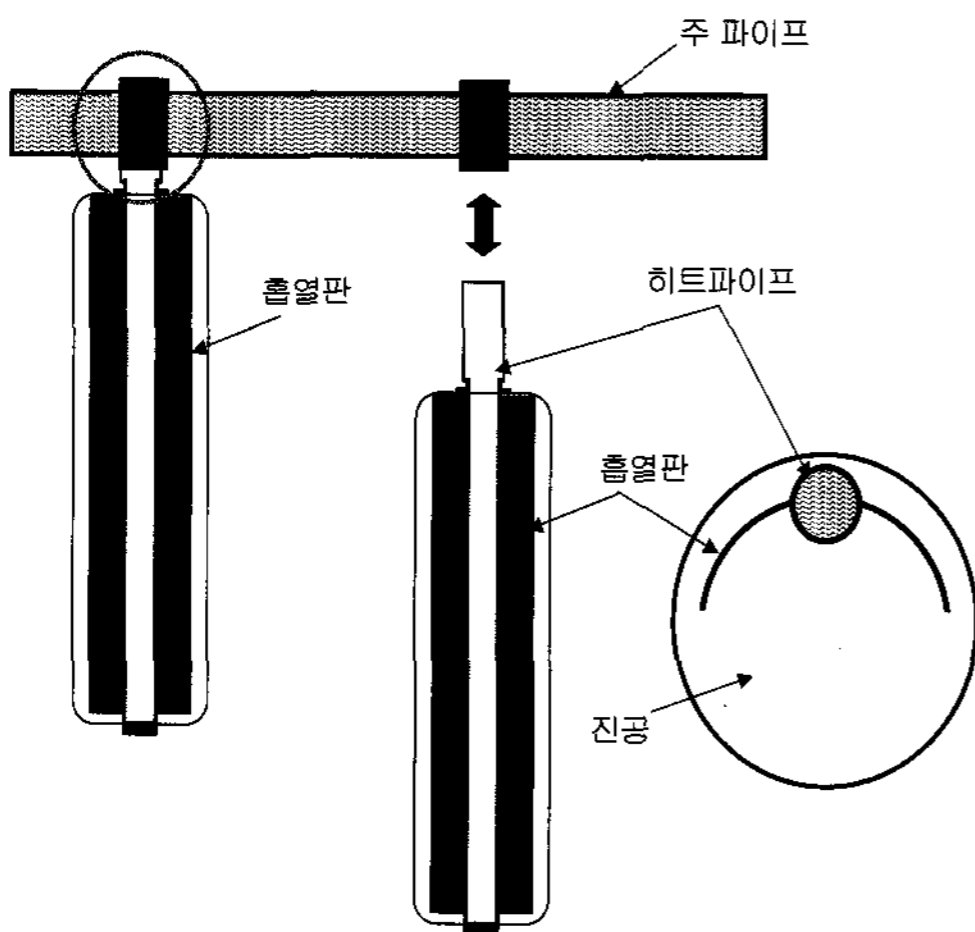


그림 2. Schematic of a single vacuum collector with heat pipe

3.2 이중 진공관식(완전유리식) 태양열 집열기

U자관이 삽입된 형태인 이중 진공관식 태양열 집열기의 특징은 집열기 전체를 유리로 제작하는 것이다. 그림 3는 이중 진공관에 U자관이 삽입되어 있는 형태를 나타낸 것이다. 이 그림에서는, 특히, 태양열의 열매체로의 전달을 용이하게 하기 위하여 U자관을 금속제의 fin이 감싸며 안쪽 유리 튜브의 내벽에 밀착되어 있는 것을 보여주고 있다.

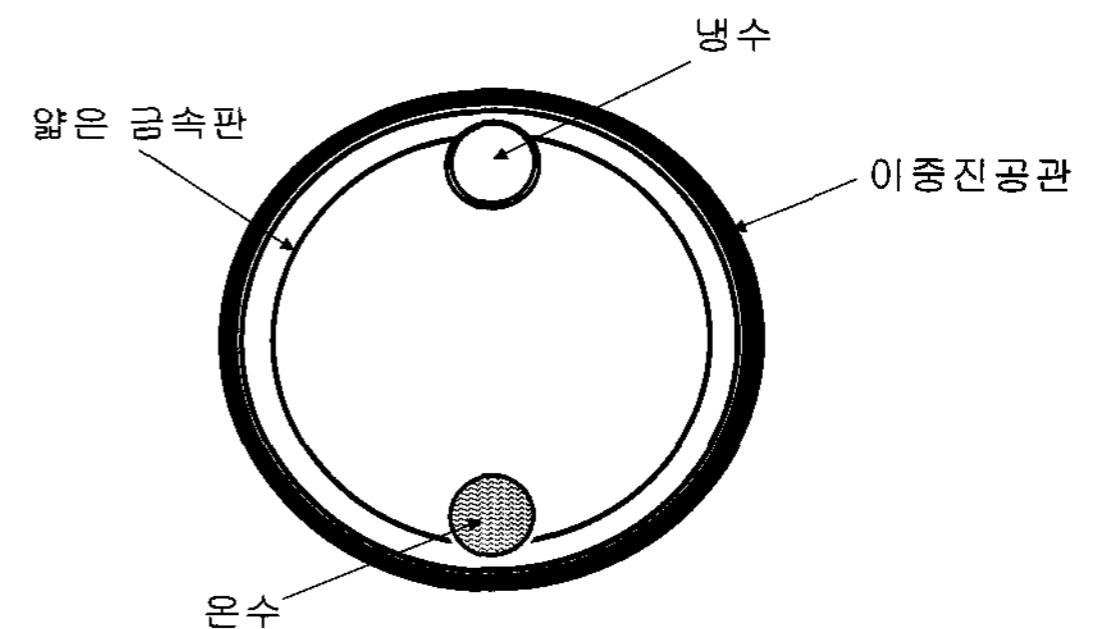
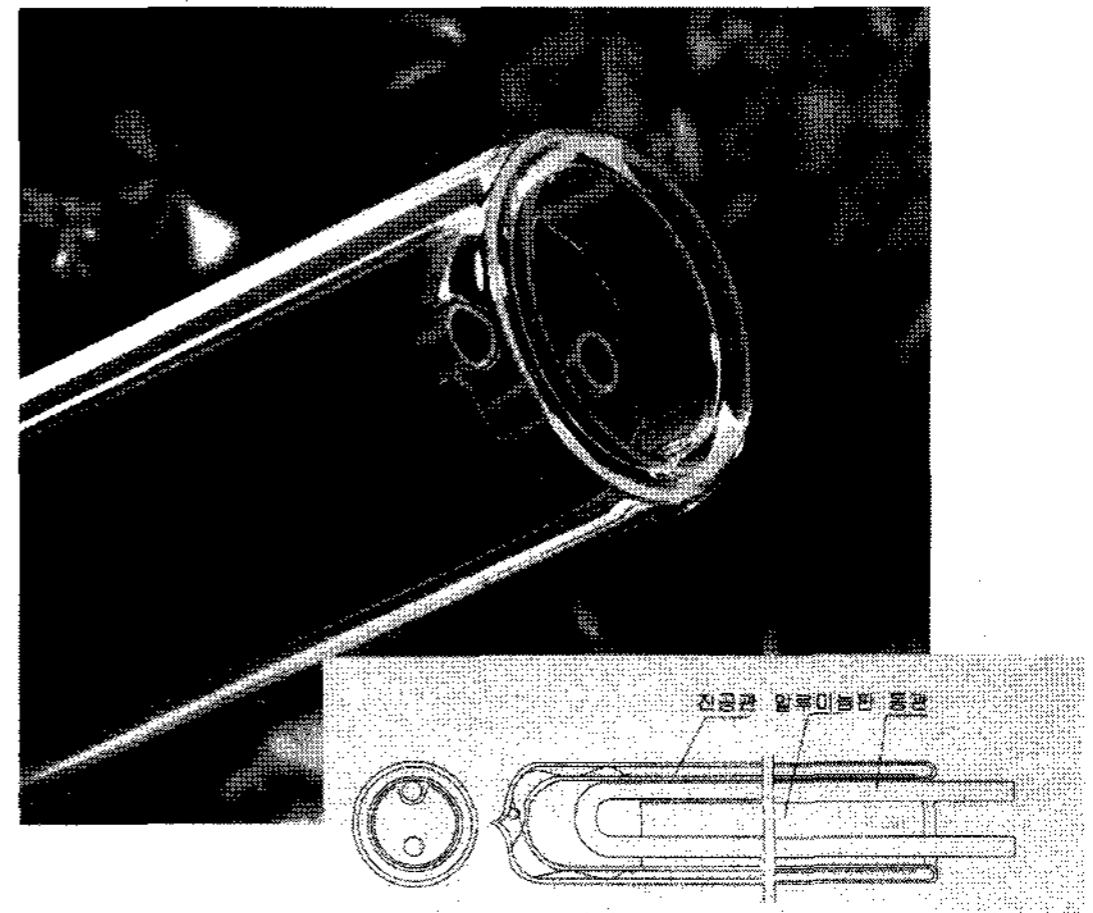


그림 3. All-glass solar vacuum collector tube with U-pipe and metallic fin inserted

4. 성능 실측

상기에서 소개한 여러 시스템에 대한 열성능 비교 실측을 위해 본 연구에서는 동일한 집열 면적

과 축열 용량을 기본 조건으로 고려하였으며 <표 1>은 집열기 형태별로 이를 정리하여 보여주고 있다. 집열기 관내 유량은 집열기 내부의 유로에 차있는 열매체의 양을 나타낸 것으로 5mm 이중관을 삽입한 단일 진공관식 태양열 집열 튜브가 가장 적은 양의 열매체 함유량을 보여주고 있다. 열매체는 물을 사용하였고 집열기와 축열조 사이를 순환 펌프에 의해 반복적으로 순환하도록 하였으며, 각 시스템의 펌프, 유량계, 차온제어기는 각각 동일한 것을 사용하였다. 그림 4는 실험 장치 구성의 한 예를 개략적으로 보여주고 있다.

이중 진공관식 태양열 집열기의 경우, 집열 튜브의 외경이 각각 58mm와 47mm 그리고 삽입된 U자관의 길이(1660mm, 1360mm)와 내경(10mm, 8mm)이 서로 다른 형태를 실측 대상으로 선정하였다. 그러나, 58mm 집열 튜브는 단순히 U자관이 삽입된 형태로 그림 3에서 보여주는 것과 같은 얇은 열전달 핀이 장착되지 않고 있다. U자관형과 Heat pipe 삽입형은 모두 지면과 40°의 경사각을 두고 정남향으로 설치되었다.

표 1. Comparison of each collector

분 류	Heat pipe 삽입형	10mm U자관형	이중관 삽입형	8mm U자관형
진공관 외경 (mm)	98	58	102	47
연결형태	Heat pipe 삽입형	U자관 삽입형	이중관 삽입형	U자관 삽입형
집열기 관내 유량(l /개)	0.48	1.24	0.7	0.92
집열면적 (m^2)	0.85	0.85	0.85	0.85
축열조 용량 (l)	100	100	100	100

이중관 삽입 방식의 단일 진공관식 태양열 집열기인 경우는 집열기를 지면에서 80cm정도 올린 상태에서 수평으로 배열하였으며, 진공관 안에 있는 흡수판의 각도를 40°로 하여 다른 집열기의

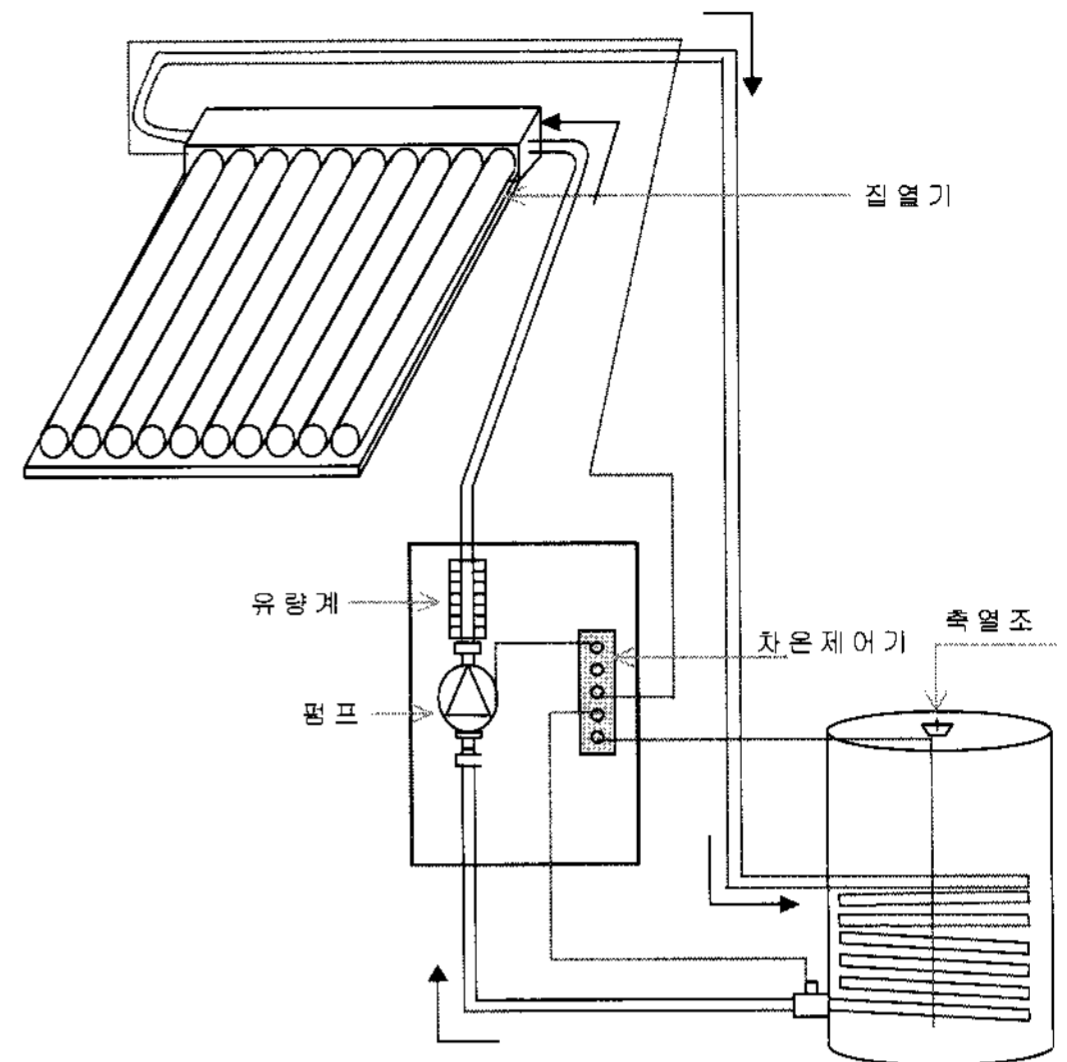


그림 4. Experimental apparatus

경사각과 동일하게 하였다.

펌프 작동시 흐르는 유량은 $2l/min$ 으로 하였고, 일사량 조건과 주변 공기온도를 같게 하기 위하여 동일한 시간에 동일한 장소에서 실험을 실시하였다. 펌프의 순환을 제어하기 위한 차온 제어 장치의 온도센서는 집열기와 축열조 출구에 설치되었으며 펌프의 작동과 정지를 위한 차온치로 각각 $12^{\circ}C$ 와 $4^{\circ}C$ 로 설정하였다.

5. 결과 및 고찰

그림 5와 그림 6은 상기의 조건에서 8mm U자관 삽입형과 이중관 삽입형 태양열 집열 시스템에 대한 10월중 옥외 실험(측정 시간 : 8시간, 일사량 최고치 : $920W/m^2$)을 수행한 결과를 보여주고 있다. 집열기의 입구와 출구의 온도, 축열조의 평균온도 그리고 주위의 공기의 온도 변화를 살펴볼 수 있으며, 이를 바탕으로 각 시스템의 전체적인 작동 상황을 파악할 수 있다. 그림 5를 살펴보면 태양열의 집열과 함께 집열기 입구와 출구의 온도가 상승하며 이에 따라 축열조의 평균 온도도 점점 높아짐을 알 수 있다. 축열조의 평균

온도가 집열기에 공급되는 열매체(물)의 온도와 거의 근접하게 나타나는 것은 집열기 내의 잔류 유량이 축열조의 전체 용량에 비해 상대적으로 작은 데에서 기인하는 것으로 이는 다른 형태의 시스템에서도 관찰되었다. 또한, 집열기 내부의 열매체(물)의 흐름과 집열이 원활이 이루어져 그래프가 요동하는 일이 거의 없이 일정한 기울기를 가지고 변화하는 모습을 보여주고 있다. 이는 태양열의 조사와 함께 집열기 내부의 온도 상승이 차온 제어 조절 장치에 전달되어 유체의 순환이 순조롭게 진행됨을 나타내고 있다. 반면에, 그림 6의 이중관 삼입형 진공관식 태양열 집열기의 경우를 보면 그림 5와 대조적인 시스템 작동 상황을 연출하고 있다. 우선, 집열기 출구의 온도를 살펴보면 그 평균치는 태양열의 집열과 함께 증가하나 순간적으로는 비교적 큰 폭으로 요동치며 peak를 가지고 변화함을 알 수 있다. 이는 시스템에서 이중관 내에 상존하는 유량이 0.7ℓ로 다른 집열기에 비해 상대적으로 적어 온도 상승에 필요한 시간이 상당히 짧을 뿐 아니라, 이중관 삼입형의 구조와 설치 방법 등의 차별성에 기인한 것으로 보인다. U자관 삼입형의 경우와 달리 이중관 삼입형은 집열 튜브를 지면과 수평으로 설치하게 되며, 이로 인하여 헤더를 포함한 관로 내의 자연 대류에 의한 열전달은 매우 불량하며 차온 제어를 위해 집열기 출구에 설치된 더미스터가 감지하는 온도와 집열기 내부의 온도와는 상당한 차이가 존재한다. 더구나, 단일 진공관 내에 삼입된 이중관 뿐 아니라 헤더 자체도 이중관으로 되어 있어 온수관과 냉수관 사이의 열전달이 유발되며, 이로 인하여 더미스터가 감지하는 온도는 집열기 내부의 온도와 더 심한 차이를 유발할 수 있다. 비록 설정된 온도에 순환 펌프는 작동을 하지만, 실제 집열기 이중관에서의 온도는 설정된 온도보다 훨씬 높게 나타나는 것이다. 이러한 현상은 모든 집열기에서 관찰될 수 있지만 이중관 삼입형 진공관식 태양열 집열기의 경우에

더욱 현저하게 나타나고 있다. 큰 진폭의 온도 변화는 시스템 내부에 반복적인 열응력을 발생시켜 시스템 내구성을 약화시키며 결국 시스템의 장기간 사용에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서 고려한 이중관 삼입형의 경우, 헤더와의 연결 부위가 열응력의 발생으로 제일 먼저 누수가 발생하는 취약성을 보였으며 전체적으로도 U자관 삼입형에 비해 내구성이 다소 떨어지는 것으로 관찰되었다.

그림 7은 그림 6에서 나타난 집열기 출구 부분에서의 급격한 온도 변화를 더 짧은 시간 간격을 두고 관찰하기 위해 데이터 취득 시간을 분 단위로 초 단위로 바꿔 데이터를 취득한 결과를 나타내고 있는데 전술했듯이 순환 펌프의 작동과 함께 온도가 jump하는 현상을 관찰할 수 있다. 그러나, 이 그래프를 통하여 그림 6의 한 점 peak로 표시된 부분도 온도 특이점이 아니라 실제로는 급격하고 연속적인 온도 변화임을 알 수 있다. 그래프의 앞부분과 뒷부분의 완만한 온도 변화는 집열기로부터 뜨거운 유체가 헤더로 유입되기 전후의 상태를 나타내는 것으로서 상당히 빠른 헤더 내의 유체의 열응답성을 볼 수 있다.

한편, 10mm U자관 삼입형과 히트 파이프 삼입형은 이중관 삼입형 진공관식 태양열 집열기와 유사한 온도 변화를 보여주었으나, 집열기 내의 유체의 헤더에의 유입에 따른 온도 변화는 이중관형보다 훨씬 작게 나타났다. 이는 앞서도 언급했듯이 집열기가 수평과 경사지게 설치되어 밀도차에 의한 대류 현상으로 집열기 내부의 유체의 온도가 더미스터에 적지 않게 feedback 되었기 때문으로 판단된다. 또, 이중관 삼입형에 비해 온도 peak의 수가 작게 나타났는데, U자관 삼입형의 경우 관 내부의 열매체의 유량이 많아 열매체를 가열하는데 그만큼 시간이 많이 걸리기 때문으로 보인다. Heat pipe 삼입형의 경우는 직접적으로 헤더 내의 열매체를 집열기에서 데우지는 않지만, 히트 파이프의 응축 부

분이 삽입되어 있는 헤더의 직경이 크게 제작되어 열매체의 순환이 비교적 원활하게 이루어질 수 있었다.

그림 8은 각 집열기를 적용한 시스템의 축열조 내부의 평균온도를 나타낸 것이다. 동일한 집열 면적과 축열 용량에도 불구하고 보는 바와 같이 축열조의 평균 온도가 큰 차이를 보이는 것은 주어진 작동 조건이 모든 형태의 집열기에 최적의 운전 상태를 제공하지 않기 때문이다. 실제로 순환 유량을 3 l/min으로 증가시키면 10mm U자관 삽입형의 경우 8mm의 그것에는 미치지 못한다 할지라도 그 열성능이 획기적으로 개선됨을 관찰할 수 있었다. 따라서 진공관식 태양열 집열기의 경우, 최고의 열성능을 이루려면 그 집열기의 구조와 작동 특성에 걸맞는 최적의 운전 조건을 찾아 이를 적용하여야 할 것이다. 본 연구의 8mm U자관삽입형이 최고의 열성능을 보이는 것은 U자관을 감싸고 유리관 내부에 밀착되어 있는 금속fin의 효과를 확연히 보여주고 있다고 할 수 있다. <표 2>는 실험 결과 비교치를 표로 나타낸 것이다.

표 2. Results of experimental data and comparative performance

	8mm U자관형	10mm U자관형	이중관 삽입형	Heat pipe형
평균 일사량 (W/m ²)	72.52			
누적 일사량 (J/m ²)	17,643,019.57			
초기 Inlet온도(°C)	10.5	11.8	8.9	11.94
초기 축열조 평균 온도(°C)	10.89	11.9	8	11.9
축열조 용량 (l)	100			
최종 축열조 평균 온도(°C)	35.6	30.1	25.2	24
효율(%)	69.96	55.4	49.5	36.79

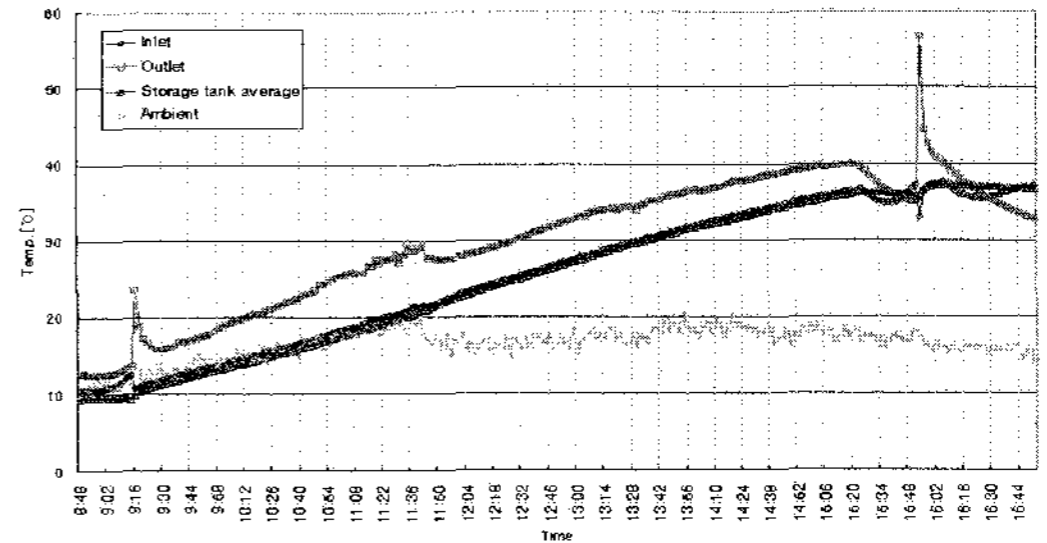


그림 5. Temperatures at the various locations of a 8mm U-pipe type

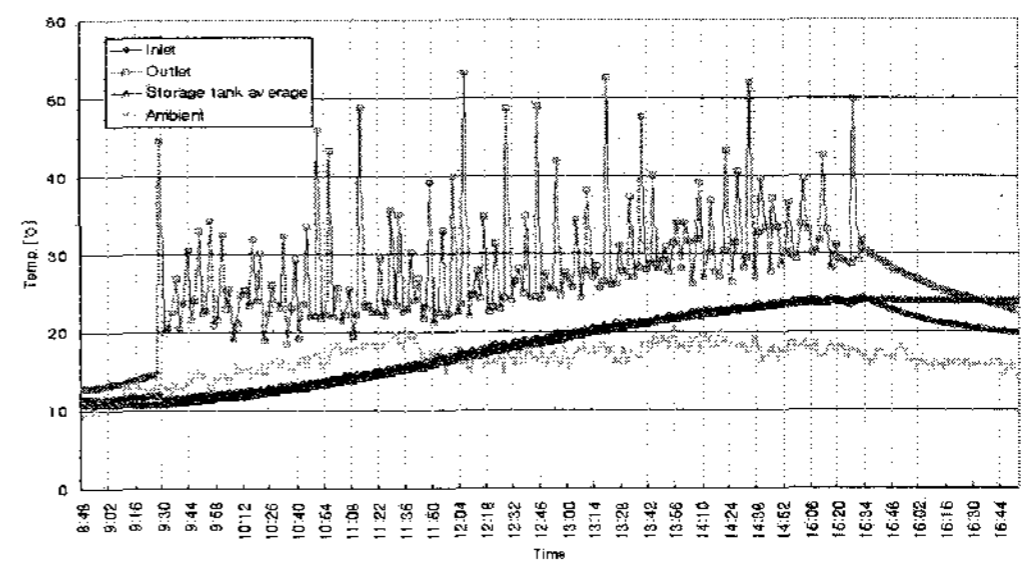


그림 6. Temperatures at the different locations of a single vacuum tube with a dual pipe flow passage

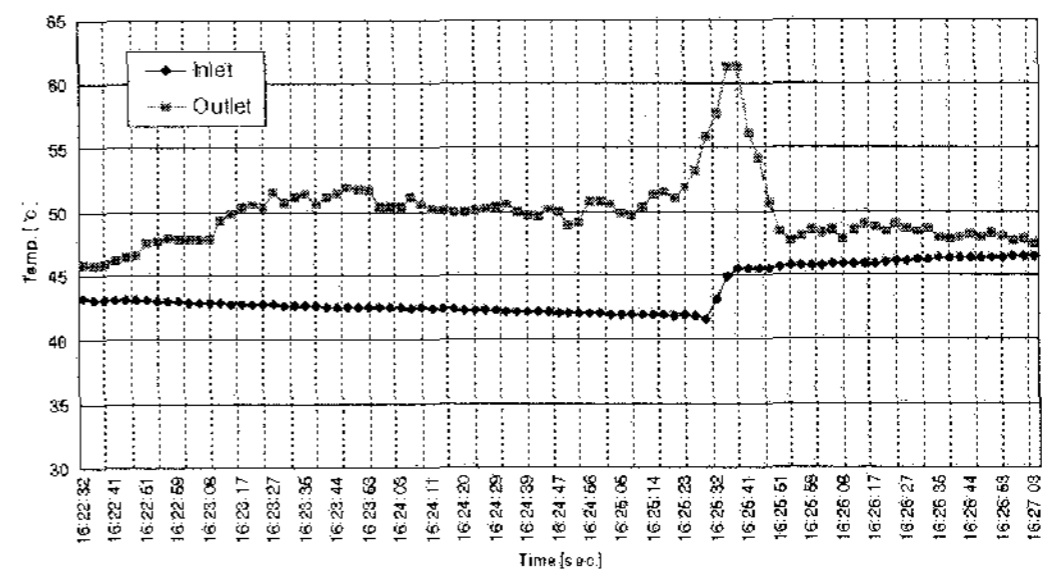


그림 7. Temperature measurements at the collector inlet and outlet at different times (measured with 10 sec interval)

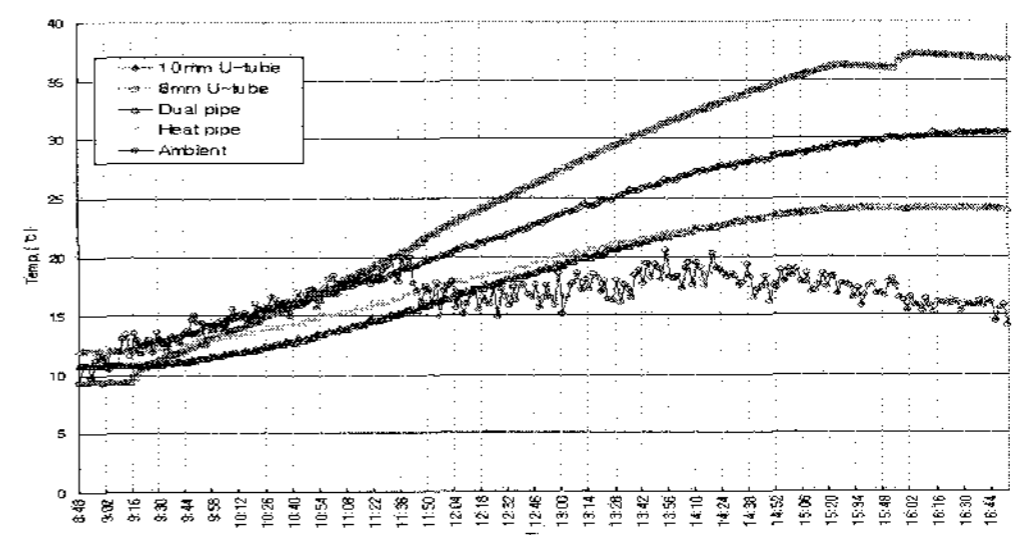


그림 8. Average storage tank temperatures for different systems

6. 결 론

본 연구는 현재 보급되고 있는 진공관식 태양열 온수급탕 시스템의 집열기 내부에 설치되어 있는 다양한 열전달 장치가 집열기의 전체적인 열성능에 미치는 영향을 분석하고 아울러 이를 바탕으로 평판형과는 전혀 다른 진공관식 태양열 집열기의 열적 및 유체역학적 특성에 대한 이해를 제고하고자 수행되었다. 특히, 최적의 운전 조건은 시스템 성능을 극대화하며 이는 집열기의 구조적 특성에 따라 다르게 나타남을 알 수 있었다.

동일한 조건(집열면적, 축열조 용량, 유량, 일사량, 동일 장소 등)에서 서로 다른 네 가지 형태의 진공관식 태양열 집열기를 실측한 결과, 8mm U자관 삽입형 이중 진공관식 태양열 집열기를 적용한 시스템의 효율이 약 70%로 가장 우수하게 나타났다. 이는 다른 형태의 집열기보다 약 15~20% 높은 값으로 진공관식 태양열 집열기의 구조적 및 최적의 작동 특성을 파악하는데 제시하는 바가 크다고 하겠다. 이중관 삽입형 단일 진공관식 태양열 집열기의 경우, 집열기 내에서의 빠른 열매체의 온도 상승은 좋으나 온도의 변화 폭이 최대 30°C에 이르러 상당한 열적 응력을 발생시킬 수 있는 가능성이 상존하는 것으로 나타났다. 또한, 구조적으로도 관내에 또 다른 관이 삽입되어 있는 유로의 형태는 열매체의 원활한 흐름을 저해하며 이로 인하여 타 집열기의 경우보다 유로의 마찰 저항이 상대적으로 크고 그만큼 더 많은 펌프력을 필요로 하는 것으로 파악됐다. 그리고

무엇보다 단일 진공관의 경우 금속과 유리의 완벽한 접합이라는 기술적인 문제를 완벽하게 해결해야 하는 난제를 안고 있다.

후 기

본 연구는 에너지 관리공단(KEMCO) 학술진흥 사업의 지원을 받아 수행되었으며 관련 제위께 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. A. A. Mason and J. H. Davidson, "Measured Performance and Modeling of an Evacuated-Tube, Integral-Collector-Storage Solar Water Heater", *Transactions of the ASME*, Vol. 117, pp.225~229, 1995.
2. HE Zinian, Ge Hongchuan, Jiang Fulin and Li Wei, "A Comparison of Optical Performance between Evacuated Collector Tubes with Flat and Semi-cylindrical Absorbers", *Solar Energy*, Vol. 60(2), pp. 113~116, 1997.
3. 강용혁 등, "태양열 온수 급탕 시스템 성능 표준화", 한국에너지기술연구소, KIER-991423, 1999.
4. Wu Jinfa, Zou Huaisong, Zhang Jian and Fang Jun, "Experiments of All-Glass Evacuated Tubular Collect with U-Tube and Al Fin Manifold and Embodiment", *ISES 1997 Solar World Congress*, Vol. 2, pp. 77~85, 1997.