국내 저온용 집열기의 열성능 특성

김정배*, 이순명**, 윤응상***, 이진국****, 주문창*****, 백남춘******

*국립충주대학교, 에너지시스템공학과(jeongbae_kim@cjnu.ac.kr), **한국에너지기술연구원, 태양열연구센터(smlee@kier.re.kr), ***(yoon@kier.re.kr), ****(jklee@kier.re.kr), *****(mcjoo@kier.re.kr), ******(baek@kier.re.kr)

Thermal Characteristics of Domestic Solar Collector for Low-Temperature Applications

Kim, Jeongbae*, Rhie, Soon-Myeong**, Yoon, Eung-Sang***, Lee, Jin-Kook****, Joo, Moon-Chang*****, Baek, Nam-Choon******

*Energy System Engineering Dept., ChungJu National University, jeongbae_kim@cjnu.ac.kr), **Solar Thermal Research Center, KIER(smlee@kier.re.kr), ***(yoon@kier.re.kr), ****(jklee@kier.re.kr), *****(mcjoo@kier.re.kr), ******(baek@kier.re.kr)

Abstract

This study shows the results on thermal performance test with domestic solar collector for low-temperature applications using KS, then reveals the efficiency difference between KS and EN standard. Using the test results, this study presents the status of thermal performance with domestic solar collector including flat-plate, single evacuated, and double evacuated (with mirror or U-tube) solar collector.

Keywords : 평판형 집열기(Flat-plate solar collector), 단일진공관(Single evacuated tubular solar collector), 이중진공관(Double evacuated tubular solar collector), 유튜브(U-tube), 효율(Efficiency), 열성능(Thermal performance)

기 호 설 명

G_T : 일사량 (W/m^2)
F_R : 집열기 열제거 계수 (-)
T_a : 주위온도 (K)
T_i : 지관 입구 평균온도 (K)
T_m : 집열기 입출구 산술평균 온도 (K)
T_o : 지관 출구 평균온도 (K)
ΔT : 지관 입출구 온도차 (K)

U_L : 집열기 열손실계수 (W/m^2K)
α : 집열기 흡수율 (-)
τ : 집열기 투과율 (-)
η : 집열기 효율 (-)

1. 서 론

저온 영역에 주로 적용되는 태양열 집열기는 평판형, 단일진공관, 반사판을 가진 이중진공관, 그리고 U튜브를 가진 이중진공관 집열기로 나눌 수 있다. 이러한 다양한 형태의 집열기에 대하여 성능 시험이 수행되어졌고, 이의 결과를 집열기의 효율을 중심으로 하여 제시하고자 한다.

성능 시험 방법은 KS 기준에 따라서 수행되었으며, KS와 EN의 집열기 효율 표시 방법의 차이를 나타낼 수 있도록 따로 효율식을 제시하였다.

본 논문에서 제시되는 성능 시험 결과들은 국내에서 시판되고 있는 집열기로 한정되어 질 것이다.

2. 태양열 집열기 효율 표시 방법

태양열 집열기의 효율은 KS 기준에 의해 식(1)과 같이 집열기 입구에서의 유체 온도, 주위 온도, 그리고 일사량으로 이루어진 종속변수로서 표시되어 진다.

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L\left(\frac{T_i - T_a}{G_T}\right) \quad (1)$$

집열기 성능 시험은 투과면적(Aperture area)의 크기에 따라 결정되는 유량 (집열기 단위 투과면적당 0.02 kg/s)으로 고정한 상태에서 수행되어 지므로, 집열기 입구에서의 유체 온도에 따라 얻어진 열량과 그 순간의 태양열 일사량에 의한 최대 가능 열전달량의 비로서 나타나게 된다. 이렇게 얻어진 입구 온도에 따른 효율 결과를 그래프 상에 표시하고, 표시된 결과를 이용하여 수식화하여 식(1)의 형태로 나타내게 된다.

그러나, EN 기준에서는 집열기의 획득 열량이 입구온도가 높을수록 획득 열량의 비선형성이 증가하게 되므로 이를 고려하여 효율을 나타내고자 하였다. 또한, EN 기준에서는 식(1)과 달리 아래의 식(2)와 같이 집열기 입출구에서의 평균 온도를 이용하여 효율을 온도차의 이차식의 형태로 나타내고 있다.

$$\eta = a_0 - a_1\left(\frac{T_m - T_a}{G_T}\right) - a_2\left[\frac{(T_m - T_a)^2}{G_T}\right] \quad (2)$$

여기서, $T_m = \frac{T_o + T_i}{2}$

3. 태양열 집열기 성능 시험 결과

본 연구에서 평가된 집열기의 수는 평판형이 9개 회사의 12개 모델이며, 단일 진공관은 3개 회사의 3개 모델이었고, 반사판 이중진공관은 4개 회사의 4개 모델이었으며, 그리고 U튜브 이중진공관은 1개 회사 1개 모델이었다. 따라서, 본 논문의 결과에는 U튜브 이중진공관의 결과가 부족하여 제외하였다.

3.1 집열기 형태별 효율 특성

모델별 집열기 성능시험 결과를 각 집열기 형태별로 평균하여 그림 1에 표시하였다. 널리 알려진 바대로 낮은 온도 영역에서는 진공관형 집열기 보다는 평판형이 대체적으로 효율이 높음을 알 수 있다. 다만, 단일진공관형 집열기는 0.01 이상의 변수 영역에 대해 평판형 보다 우수한 효율 특성을 보여주고 있다. 전체적으로는 단일진공관 집열기가 집열효율이 가장 높게 나타나고 있다.

집열기 형태별로 평균값은 식 (1)에 근거한 KS 기준에 따라 얻어진 것으로 다음의 표 1과 같이 나타난다.

이와 함께, KS 기준에 의한 위의 값들을

식 (2)와 같이 EN 기준으로 표시할 경우에는 아래의 표 2와 같이 나타난다.

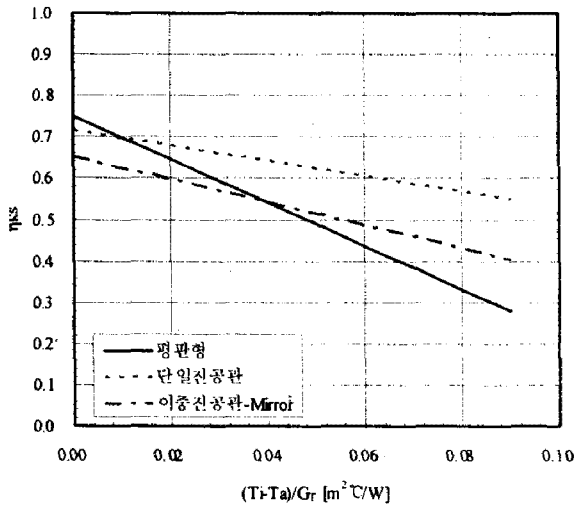

그림 1. 집열기 형태별 평균 효율 특성

표 1. 집열기 형태별 평균 효율식의 계수

항목	평판형	단일진공관	반사판 이중진공관
$F_R(\tau\alpha)$	0.751 ±0.055	0.718 ±0.010	0.652 ±0.069
F_RU_L	5.238 ±0.627	1.859 ±0.843	2.735 ±1.265

실제 입구 온도별로 실험으로부터 얻어진 결과를 직접 이용하여 식 (2)의 형태로 수식을 적용하여 얻어진 것이다.

표 2. 집열기 형태별 EN 기준으로의 효율식 계수

항목	평판형	단일진공관	반사판 이중진공관
a_0	0.771±0.058	0.721±0.007	0.664±0.078
a_1	5.091±0.611	1.483±0.758	2.829±1.996
a_2	0.0048 ±0.0071	0.0055 ±0.0047	-0.0005 ±0.0126

3.2 집열기 형태별 세부 시험 결과

먼저, 각 집열기 모델별 투과면적과 단위 투과체 면적당 유량을 그림 2에 나타내었는데, 태양열 집열기 성능시험시의 기준 유량인 단위면적당 0.02kg/s에서 최대 ±3.0% 이내로 잘 제어되었음을 알 수 있다.

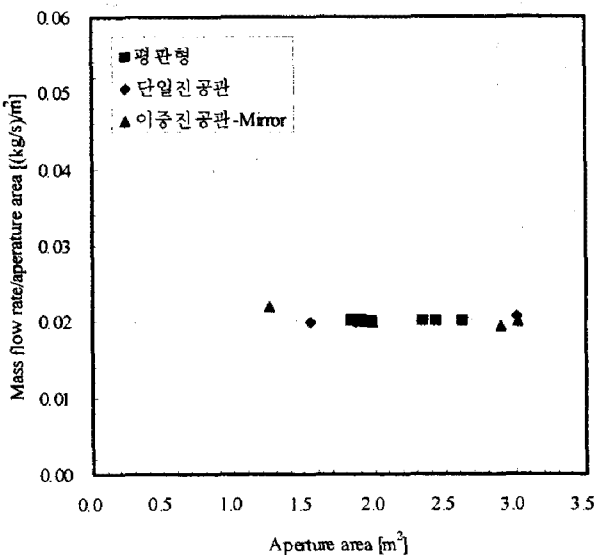

그림 2. 집열기 투과면적과 시험 적용 유량

시험에 이용된 집열기들의 투과체 면적은 약 1.3에서 3.0m^{2}의 집열기 면적을 가지고 있다.

시험된 집열기들의 모델별 $F_R(\tau\alpha)$은 표 1에서와 같이 평균적으로는 평판형이 제일 높고, 다음으로 단일진공관이 그리고 반사판 이중진공관이 제일 낮게 나타난다. F_RU_L의 경우는 평판형이 제일 높고, 다음으로 반사판 이중진공관이 그리고 단일진공관이 제일 낮음을 알 수 있다. 이러한 경향은 각각의 모델들에 대한 결과를 그림 3에 표시한 것처럼 나타난다.

본 시험에 적용된 모든 집열기들이 동일한 집열기 면적과 유량에서 검토된 것이 아니므로, $F_R(\tau\alpha)$와 F_RU_L을 집열기 투과면적과 유량으로 나누어서 면적과 유량과의 관계를 살펴보고자 하였다.

그림 4와 5에서와 같이 집열기 투과면적과 면적당 $F_R(\tau\alpha)$와 F_RU_L은 어떤 경향을 보여주지 못하고 있음을 알 수 있다. 이와 함께, 집열기 시험시 적용된 열매체 유량과 유량당 $F_R(\tau\alpha)$와 F_RU_L을 그림 6과 7에 나타내었다.

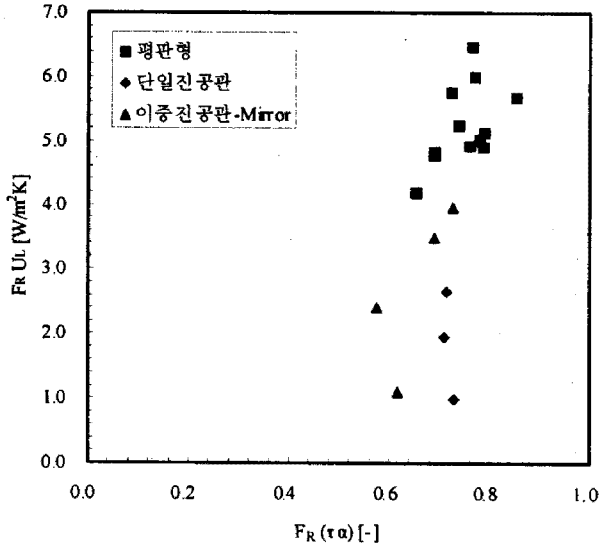

그림 3. 집열기 모델별 $F_R(\tau\alpha)$와 F_RU_L

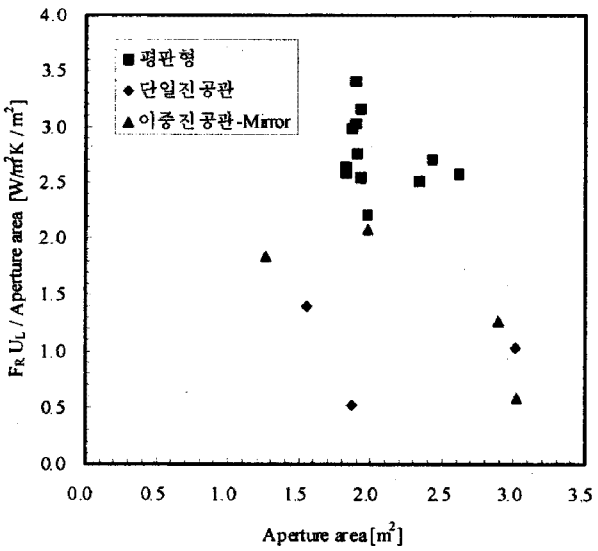

그림 5. 집열기 면적과 면적당 F_RU_L

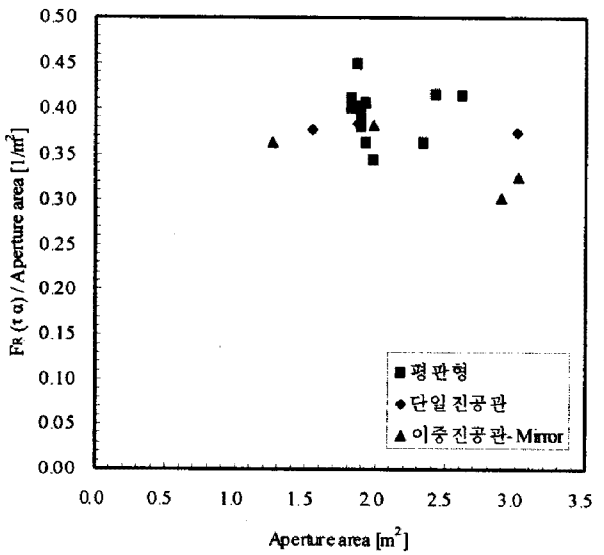

그림 4. 집열기 면적과 면적당 $F_R(\tau\alpha)$

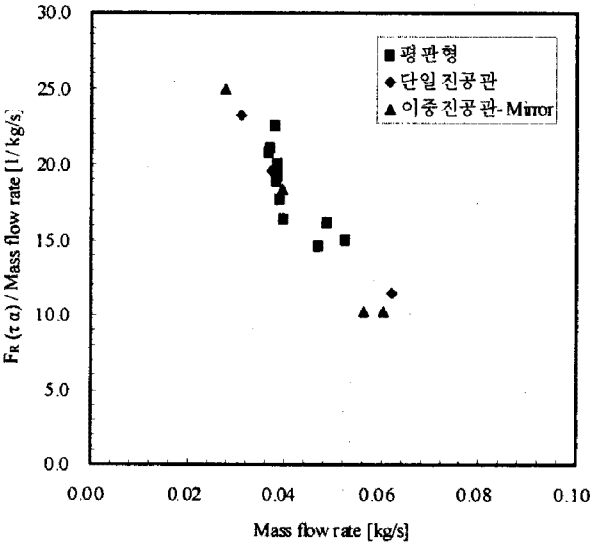

그림 6. 성능시험시 유량과 단위유량당 $F_R(\tau\alpha)$

그림에서와 같이 단위유량당 $F_R(\tau\alpha)$의 값이 유량이 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 특성을 보여주고 있는데, 이는 F_R의 값이 열매체 유량에 크게 관계되는 특성에 의해서 나타나는 것으로 판단된다.

일일 일사량이 5000kcal 인 경우에, 집열기에 의한 일일 유용한 획득 열량을 각 집열기별로 계산하였다.

먼저, 일일 일사량이 5000kcal 인 경우에 획득열량과 $F_R(\tau\alpha)$와 F_RU_L의 관계를 그림 8과 9에 나타내었다.

그림 8에서와 같이 획득열량과 두드러지게 관계를 보여주는 것이 $F_R(\tau\alpha)$임을 알 수 있는데, $F_R(\tau\alpha)$가 증가함에 따라서 획득열량도 증가한다.

동일한 $F_R(\tau\alpha)$의 값에서도 평판형 보다는

진공관 집열기들이 더욱 많은 열량을 획득할 수 있음을 보여주고 있다.

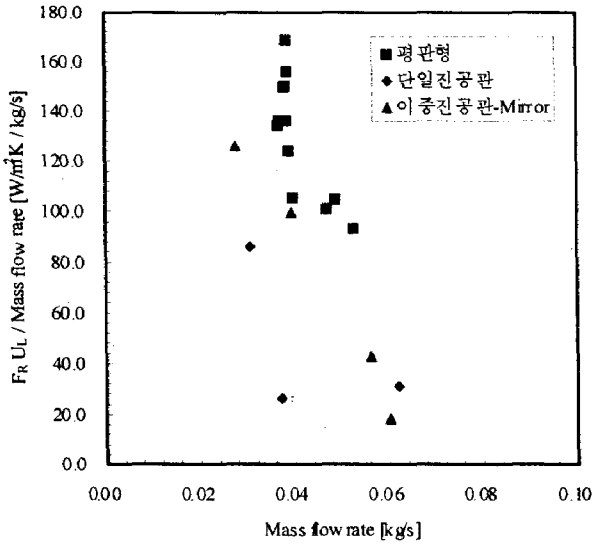

그림 7. 성능시험시 유량과 단위유량당 F_RU_L

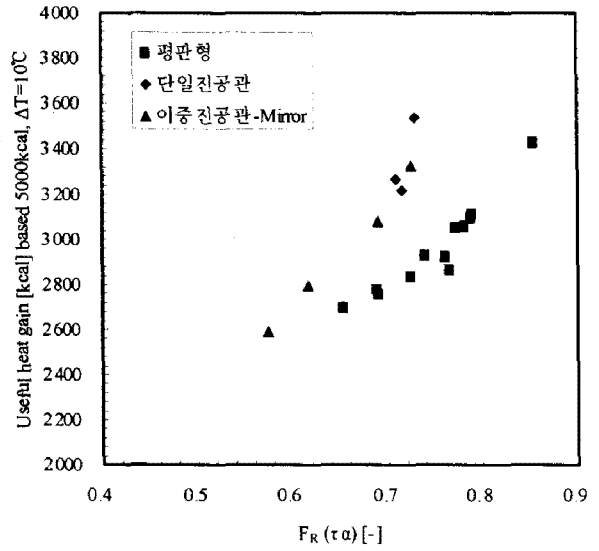

그림 8. $F_R(\tau\alpha)$와 5000kcal에서의 획득열량의 관계

이러한 일일 일사량이 5000kcal 인 경우에서의 경향들에 대해서는 깊이 있는 검토가 필요할 것으로 판단되며, 이론적인 해석과 함께 실험을 병행한다면 명확한 근거를 제시할 수 있을 것이다.

마지막으로, 획득열량과 집열기의 투과면적과 성능시험시 단위집열기 면적당 유량을 0.02kg/s로 유지하기 위해 적용된 유량과의 관계를 파악하고자 하였다.

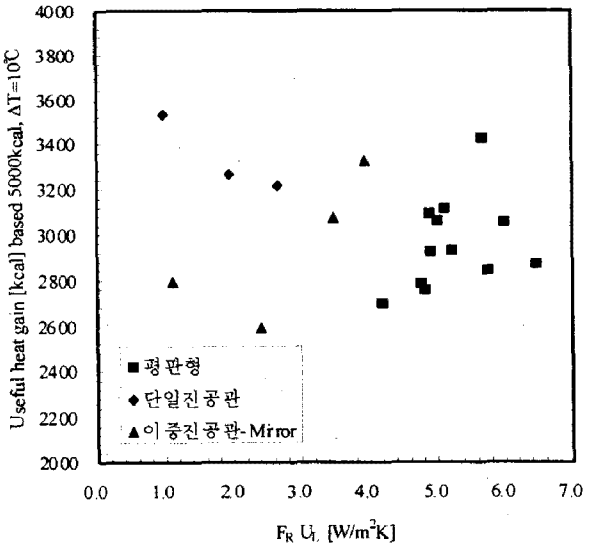

그림 9. F_RU_L과 5000kcal에서의 획득열량의 관계

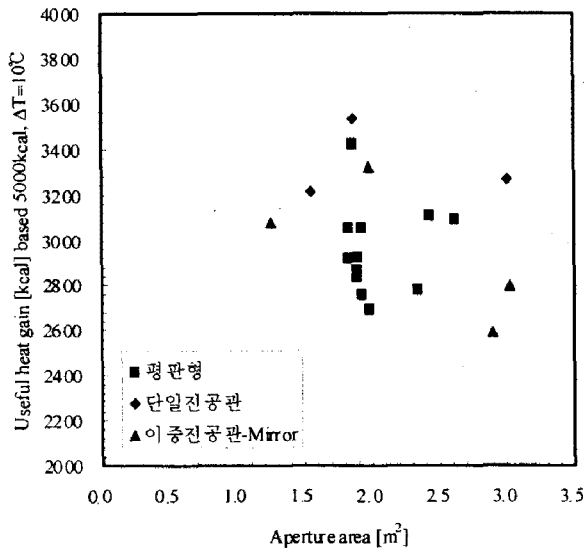

그림 10. 집열기 투과면적과 집열기 획득열량의 관계

그림 10과 11에서와 같이 명확한 관계를 보여주지 못하고 있다. 물론 평판형 집열기를 제외하고는 결과의 숫자가 부족하여 나타나는 것으로 판단할 수도 있다. 좀 더 많은 다양한 집열기에 대한 시험이 수행된다면, 업체나 여러 전문가들에게 좋은 결과를 정리하여 제시할 수 있을 것이다.

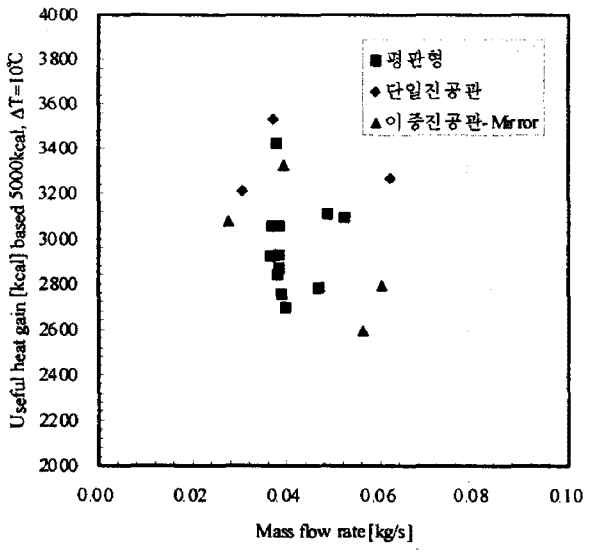

그림 11. 성능시험시 유량과 집열기 획득열량의 관계

4. 결론

태양열 집열기의 성능은 열량을 획득한다는 측면에서 매우 중요하다. 이러한 집열기의 성능 특성을 국내에서 검토된 집열기에 대하여 평판형 9개 회사의 12개 모델, 단일진공관 3개 회사 3개 모델, 반사판 이중진공관 4개 회사 4개 모델의 성능시험 결과를 정리하여 본 논문에서 제시하였다.

(1) 낮은 온도에서는 평판형 집열기의 효율이 우수하지만, 대체적으로는 진공관형 집열기의 효율이 우수함을 알 수 있었다.

(2) KS 기준과 EN 기준에 의한 효율 표시방법과의 차이를 보여주었고, 실제 결과로서의 차이를 제시하였다.

(3) 단위면적과 단위유량에 따른 집열기 효율계수들의 특성을 제시하였는데, 유량에 대한 관계가 가장 명확하게 제시되었다.

(4) 5000kcal의 일일 일사량 조건에서 획득가능한 열량을 집열기별로 유량, 투과면적, $F_R(\tau\alpha)$, 및 $F_R U_L$와의 관계로서 제시하였다.

(5) 명확한 관계 규명을 위한 이론적 혹은 실험적인 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있었고, 좀 더 많은 집열기 성능시험 결과가 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 태양열 집열기 성능시험을 위한 KS 기준, KS Standard #9806-3
2. John A. Duffie and William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 1980.
3. DIN Standard #4795
4. Cooper, P. I., and Dunkle, R. V., 1981, "A Non-linear Flat-plate Collector Model,", Solar Energy, Vol. 26, pp. 133-140
5. EN Standard #12975
6. ISO Standard #9806-1
7. Marschall, E., and Adams, G., 1978, "The Efficiency of Solar Flat-plate Collectors," Solar Energy, Vol. 20, pp. 413-414