

태양열 집열기 효율곡선에 대한 연구

신정철

우송정보대학 기계자동차설비학부

(2014년 8월 18일 접수, 2014년 9월 10일 수정, 2014년 9월 16일 채택)

The Study of The Collector Efficiency Curve

J. C. Shin

School of Mechanical and Automotive Engineering, Woosong College

(Received 18 August 2014, Revised 10 September 2014, Accepted 16 September 2014)

Abstract

Abstract - In the solar heat collection system, we can determine how the collector will perform under specific conditions from the efficiency curve. By understanding the basic principles which govern the operation, designers can maximize the output from the collector. Absorptance, transmission and the total heat transfer coefficient were introduced to induce this efficiency curve. Designers who can make use of the implicit information on the curve in this report will generate systems which obtain the best return from their client's investment.

Key words : solar heat collection system, flat plate collector, collector efficiency, absorption rate, transmission rate, collector efficiency correction factor

주요어 : 태양열 집열장치, 평판형 집열기, 집열기 효율, 흡수율, 투과율, 집열기 효율 수정계수

1. 서 론

효율이란 용어는 잘 알려진 단어이다. 경제전문가, 사업가, 기술자 등 여러 사람들이 생산된 제품의 입력에 대한 출력이 얼마나 높은지 제품 성능을 계산할 수 있는 척도로 사용된다. 입력과 출력은 여러 운전 상태에 따라 변하는 값이다. 예를 들어 제품이 건강 보험계획이라면 입력은 들어오는 보험료가 될 것이고 출력은 나가는 각종 혜택이 될 것이다. 1달러가 지출된다면 1달러 이상이 들어와야 하므로 당연히 효율은 1보다 작다. 차액은 인건비 및 관리유지비 명목으로 지출될 것이다. 이러한 계획의 효율은 조직, 정책, 인사, 경제상황 등에 따라 달라질 수 있다. 외부 여건이나 내부 특수성으로 인해 효율은 달라질 수 있는 것이다. 태양열 집열기의 경우 태양복사에너지가 입력

이고 유용하게 사용되는 에너지가 출력이 된다. 집열기의 효율을 η 라 하면

$$\eta = \frac{\text{Useable output energy}}{\text{Solar energy input}} \quad (1)$$

2. 태양열 집열기

자연적이든 인공적이든 우리 주위의 대부분은 태양에너지 흡수기가 될 수 있다. 예를 들어 나무는 자연적인 흡수기이며 태양에너지를 우리가 유용하게 태워서 사용할 수 있는 목재를 생산한다. 광전지는 인공적인 집열기이며 유용한 전기를 생산한다. 일반적으로 자연적 태양빛은 태양열 에너지로 변환시켜 많이 사용된다. 검은색 세단을 몰고 다니는 사람들은 차를 주차했을 때 이러한 태양열 변환을 잘 알고 있을 것이다. 결과적으로 태양열장치가 주택 난방이나 온수 생산을 위하여 개발되어 있다. Fig. 1은 건물 자체가 태양열 집열기인 태양열 주택을 보여주고 있다.

[†]To whom corresponding should be addressed.
Woosong College 226-2, Jayang-dong, Dong-gu, Daejeon, Korea.
300-715
Tel : 042-629-6411 E-mail : jcsin@wst.ac.kr

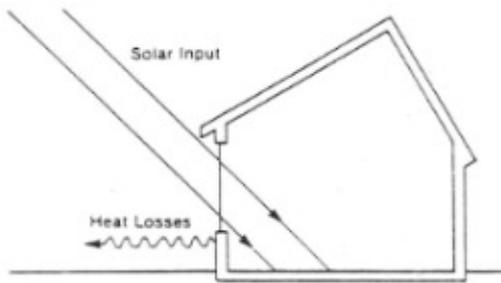


Fig. 1. Simplified diagram of a house used as a solar collector

남쪽으로 향하는 유리판을 통하여 태양빛을 흡수함에 의하여 주택 내부의 표면은 빛이 열로 변하는 일종의 변환기가 된다. 발생된 열은 거주자들이 쾌락한 온도로 유지될 수 있도록 사용된다. 발생열을 주택이 직접 받아서 사용하므로 태양열 에너지를 즉시 열로 바꾸어 사용하는 효율이 높은 방법이다. 한 곳에서 열을 발생하여 다른 곳으로 열을 옮길 필요가 없다. 그러나 만일 물이 가열되어 샤워나 세탁 또는 산업용으로 온수를 사용할 경우 온수가 한 곳에만 있을 필요는 없다. 이런 경우 태양열 에너지로 가열된 온수는 필요한 곳으로 이동되어야 한다.¹⁾

태양열 집열기는 태양빛을 열로 변환하는 장치이다. 가장 간단한 구조는 평평하고 검은 판이 햇빛에 직각으로 놓인 형태이다. 태양열 에너지에 의해 발생된 열을 흡수하는 액체가 평판 위를 흐른다. Fig. 2에 보는 바와 같이 태양열 집열기 내 열을 받은 액체는 온도가 상승한다.²⁾

3. 집열기 효율

모든 열기관의 입력은 출력보다 항상 크며 따라서 Fig. 2의 집열기 효율은 항상 1보다 작다. 즉 액체가 받은 열에너지는 집열판이 받은 태양열 에너지보다 작다. 상기한 건강보험계획이 손실이 가지듯이 집열판에서도 손실이 생긴다. 집열기의 따뜻한 표면은 대류와 복사의 형태로 대기 중으로 열을 잃어버린다. 대류 열손실은 온도차로 인해 생기며 복사열손실은 모든 물체와 마찬가지로 집열판에서 방사열이 방출된다.

두 표면, 즉 하늘과 집열판 사이에서 복사에너지를 주고 받으나 하늘이 더욱 차갑기 때문에 집열판에서 나가는 에너지가 더 많다. 교환되는 순손실은 “복사 열손실”이 된다. 즉

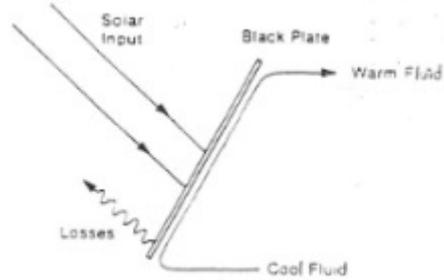


Fig. 2. A simple flat plate solar collector

$$\text{가용열} = \text{흡수태양열} - \text{열손실} \quad (2)$$

집열기 효율을 계산하기 위해서는 가용열을 태양 복사열로 나누어야 하므로 α 를 흡수태양열/태양복사열이라 하면³⁾

$$\eta = \alpha - \frac{\text{losses}}{\text{incident solar}} \quad (3)$$

여기서 α 를 태양복사에너지의 흡수율이라 하며 재질 표면의 특성으로서 재질 내부와는 상관이 없다. 검은색 표면은 약 0.9~0.98 정도의 흡수율을 가진다. α 가 커지면 집열기 효율은 증가하며 만일 열손실이 0이라면 효율은 α 값이 된다. 따라서 이 값은 효율을 증가시키기 위하여 집열기에 의해 얻어질 수 있는 매우 중요한 값이다. 식 (4)의 오른쪽 둘째항의 열손실 값은 일반적으로 흡열판 온도(T_p)와 외기온도(T_a)의 차에 비례하는 값이다. 즉

$$\text{열손실} = U_L \times (T_p - T_a) \quad (4)$$

식 (5)에서 상수 U_L 은 대류와 복사가 합해진 값으로서 단위면적당 총열전달계수라 한다. 단위면적당 태양복사열을 H 라 하면 집열기 효율 η 는

$$\eta = \alpha - \frac{U_L(T_p - T_a)}{H} \quad (5)$$

$U_L(T_p - T_a)$ 값이 H 보다 작을수록 효율은 최대값인 α 값과 거의 같아진다. 명백히 H 값에 관계없이 T_p 가 T_a 와 거의 같으면 집열기 효율이 최대값을 가진다. 즉 집열판 온도와 외기온도가 거의 같을 때 집열

기 효율이 최대가 됨을 알 수 있다. 만일 효율이 0이라면 가용열이 0이라는 것이며 태양빛을 받고 있는 집열판에 액체가 흐르지 않는 경우가 될 것이다. 태양복사에너지가 저장되지 않는 한 $\eta = 0$ 이라면

$$\frac{U_L(T_p - T_a)}{H} = \alpha \tag{6}$$

이 되며 이것은 흡수된 에너지가 모두 대기 중으로 방출됨을 의미한다. 식 (5)에서 α, U_L, H, T_a 는 고정된 값이나 T_p 는 변하는 값이다. 식 (6)의 왼쪽 항이 양수가 되기 위해서는 집열판 온도가 외기 온도보다 커야 한다. 태양빛을 받고 있는 집열판의 온도, T_p 는 식 (6)을 만족시킬 때까지만 올라가며 그 이상은 오르지 않는다. 이것을 “전온”이라 하며 여름철 외기 온도가 27°C라면 식 (6)에 의한 전온은 약 71°C가 된다.

4. 투명 덮개

투명덮개가 없는 단순한 검은 집열판은 여름철 수영장에서 효율적으로 사용될 수 있다. 왜냐하면 여름철 외기온도와 집열판의 온도차는 거의 없기 때문이다. 그러나 가정용 온수 생산을 위한 집열판의 온도와 외기 온도의 차이는 56°C 이상이 될 수 있다. 예를 들면 맑은 겨울 온도는 약 -7°C이고 온수의 희망온도는 60°C라 하면 U_L 이 매우 중요한 값이 된다.

식 (5)로 부터 집열판을 바꾸는 것은 오직 α 와 U_L 만 변한다는 것과 같다. α 는 0.9에서 1.0 사이의 값이기 때문에 α 를 높이는 것은 거의 효과가 없고 α 를 고정시키고 U_L 을 줄이는 것이 효과적일 것이다. 즉 완전 투명한 보호덮개가 필수적이다. Fig. 3은 덮개가 있는 집열판을 보여준다. 덮개에 의해 외기와 차단되었을 때 집열판의 총열전달계수, U_L 은 최소값을 가진다. 실제로 투과율, τ 가 1인 완전 투명한 재료는 존재하지 않는다. 유리나 플라스틱은 태양복사 에너지의 대부분을 통과시킨다($\tau = 0.8 \sim 0.95$). 특히 파장이 긴 광선, 즉 적외선(IR)은 거의 통과시키지 않고($\tau=0.05\sim 0.2$) 흡수한다. 따라서

$$\frac{\text{absorbed energy}}{\text{incident energy}} = \tau\alpha \tag{7}$$

여기서 $\tau\alpha$ 를 “유효투과흡수율적”이라 하고 $\overline{\tau\alpha}$ 로

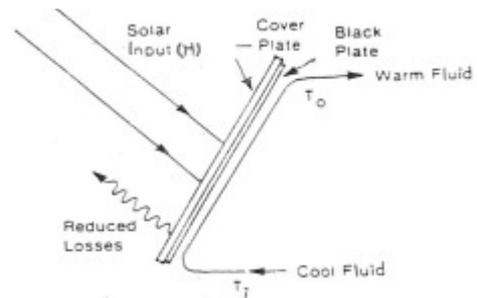


Fig. 3. A single cover flat plate solar collector

표시한다. 식 (3)으로부터 유도된 집열기 효율은

$$\eta = \overline{\tau\alpha} - \frac{U_L(T_p - T_a)}{H} \tag{8}$$

윗 식은 사실상 식 (5)와 크게 다르지 않다. 열손실은 외기와 흡열판 온도차에 비례함을 알 수 있다. 또한 최대열효율은 $\overline{\tau\alpha}$ 임을 알 수 있고 U_L 이 작을수록 좋다. 식 (8)은 여러 겹의 투명덮개를 사용하여도 성립된다.

5. 열매체 유동의 영향

실제로 집열판 온도, T_p 는 일정하지 않으며 열매체 입구온도와 출구온도는 다르고 계속 변할 수 있으므로 효율값은 계속 변하게 된다. 또한 T_p 의 측정은 쉬운 일이 아니므로 입구온도 T_i 또는 출구온도를 T_o 를 사용하는 것이 편리하다. 이러한 열매체 유동의 영향을 고려하여 T_p 대신에 흡열판 입구온도, T_i 를 사용하여 식 (8)을 수정하면

$$\eta = F_R [\overline{\tau\alpha} - U_L(\frac{T_i - T_a}{H})] \tag{9}$$

여기서 F_R 을 집열기 수정계수라 한다. F_R 는 열매체의 종류, 유량, 접촉면의 형상 등에 따라 값이 달라진다. 윗 식에서 최대효율은 T_i 가 T_a 와 같을 때이며 $\eta_{\max} = F_R \overline{\tau\alpha}$ 가 된다. $\eta = 0$ 일 때

$$\overline{\tau\alpha} = U_L(\frac{T_i - T_a}{H}) \tag{10}$$

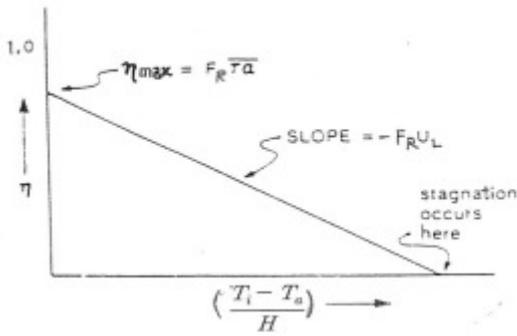


Fig. 4. The collector efficiency curve

F_R 은 전온, T_s 에 영향을 받지 않는다. T_s 는 외기와 집열관 사이에 열교환이 없을 때의 온도이므로 T_i 를 T_s 로 대체하여 정리하면

$$T_s = H \frac{\tau \alpha}{U_L} + T_a \quad (11)$$

6. 효율곡선

식 (9)의 효율은 Fig. 4와 같이 직선으로 보여진다. 직선의 경사값은 $-F_R U_L$ 이 된다. 수평축과 만나는 점의 온도가 전온이 된다. $(T_i - T_a)/H$ 가 작을수록 효율은 증가한다. 설계자는 T_i , T_a , H 중 T_i 만을 조절할 수 있다.

태양열 집열시스템에서 집열기 설계가 핵심이며 다른 부속기기에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다. Fig. 5는 두 개의 직선을 보여준다.

Curve A는 저렴한 단막용접 집열관으로서 복막용접인 Curve B보다 더 큰 최대효율을 가진다. 또한 Curve A는 Curve B보다 경사도가 크므로 $F_R U_L$ 값이 크다. $(T_i - T_a)/H$ 가 0.25보다 작으면 A형 집열기는 항상 B형 집열기보다 효율이 크다. $(T_i - T_a)/H$ 가 0.25보다 크면 B형이 항상 A형보다 효율이 좋다. 사실상 A형은 $(T_i - T_a)/H$ 가 0.6보다 크면 효율이 0이나 B형은 $(T_i - T_a)/H$ 가 1.0이 될 때까지 효율이 존재한다.

$(T_i - T_a)/H$ 값이 예상되는 운전상태가 주어지면 가장 이상적인 집열기 형태를 선정할 수 있게 된다. 예를 들어 $(T_i - T_a)/H$ 가 0.1인 경우 A형의 효율은 0.75가 되고 B형은 0.63이므로 A형을 선택하게 될 것이다.

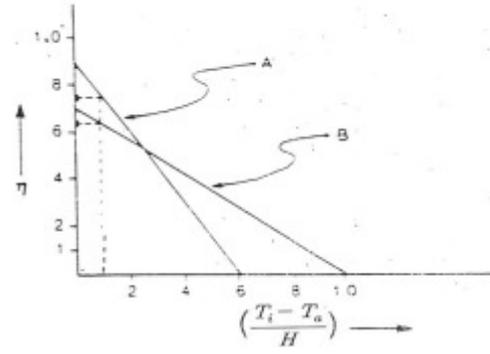


Fig. 5. Two typical collector curves

만일 가정용 온수를 생산하는 경우 $(T_i - T_a)$ 온도 범위는 대략 24°C~38°C이다. 따라서 $(T_i - T_a)/H$ 값은 대부분 0.25를 넘게 된다. 이러한 경우에는 B형을 선택하는 것이 좋을 것이다. 그러나 입구온도, T_i 는 태양열 집열시스템 전체기에 영향을 받으므로 설계자의 의도에 따라 집열기 형태의 선정은 달라질 수 있다.

Fig. 5의 결과는 여러 실험자, 또는 제조사 부품에 따라 조금씩 달라질 수는 있으나 대부분 집열기들의 표준은 될 수 있다고 생각된다. 여기서 일사량과 온도는 수시로 변할 수 있는 값임을 명심해야 한다.

어떤 주어진 환경에서 일시적 상태에서는 상기한 이론과 결과가 적용될 수 있으나 장기간 사용되는 태양열 집열시스템에서의 집열기 설계는 보다 복잡하고 구체적인 설계가 필요하다. 축열조의 크기, 열부하 시간, 시스템 제어 등의 상세설계는 컴퓨터코드 (TRNSIS, FCHART, SOLCOST)⁴⁾에 의한 설계가 필요할 것이다. Fig. 5에서 보듯이 $F_R \tau \alpha$ 와 $F_R U_L$ 은 집열기 특성으로서 컴퓨터코드의 입력변수로 사용되는 값이다. $F_R \tau \alpha$ 는 $(T_i - T_a)/H=0$ 일 때 η_{max} 의 값이고 A형 집열기의 경우, $F_R \tau \alpha=0.9$ 이다. 한편 $F_R U_L$ 는 직선의 경사도이며 A형 집열기의 경우, $(T_i - T_a)/H$ 가 0에서 0.6으로 증가할 때 효율은 0.9에서 0으로 떨어지므로 $F_R U_L=1.5W/m^2$ 이 된다. 마찬가지로 방법으로 B형 집열기의 경우, $F_R \tau \alpha=0.7$ 이고 $F_R U_L=0.7W/m^2$ 가 될 것이다.

7. 결론

태양열 집열시스템 설계에서 집열기 효율은 중요하며 어떤 주어진 운전상태에서 집열기 효율과 성능

을 알아보았다. 본 논문에서는 운전 시 집열 기본원리를 도입하여 집열기 효율곡선을 유도하고 분석하였으며 설계자가 최적의 집열기를 설계할 수 있는 정보를 제공하였다. 이로써 집열시스템 설계시 최소의 비용으로 최대의 효과를 낼 수 있으리라 예상된다. 집열기 효율에 대한 충분한 이해는 태양열 집열시스템 최적설계의 기본이 된다.

References

1. 신정철, “태양열 냉난방 기술”, 구민사, Aug 2003.
2. 한국태양에너지학회, “태양에너지 핸드북” 태림문화사, 1991.
3. 田中俊六 著 위용호 譯, “太陽熱冷煖房시스템”, 형제사, 1979.
4. 차중희 외 2인, “태양열 난방설계”, 교문사, Sep. 1981.