

# PTC 태양열 난방시스템의 성능특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Performance Characteristics of PTC Solar Heating System

최성식(컴퓨터응용설계과)

Seong-Sik Choi(Dept. of Computer Aided Design)

Key Words : parabolic through collector(집광형 집열기), concentrating ratio(집광비), solar heating system(태양열 난방시스템), thermal storage tank(축열조), collecting efficiency(집열효율)

ABSTRACT : The PTC solar heating system is studied experimentally for the performance characteristics. This system is composed of PTC(Parabolic Through Collector) with a concentrating ratio of 42, thermal storage tank with an aspect ratio of 3 and solar tracking system with an accepting light sensor. The objective of this study is to develop a PTC solar heating system for low and medium temperature application such as solar heating and hot water system. The results of the study are as follows: the collecting efficiency of PTC for normal day was about 40~45%, and the total PTC solar heating system efficiency was about 20~25%.

### 기 호 설 명

$C_p$  : 열매체유 정압비열[kJ/kg $^{\circ}$ C]

$G$  : 흡열관내 열매체유 중량[kg]

$I_a$  : 반사판에 조사된 일사량[W]

$\dot{m}$  : 열교환기 순환유량[kg/s]

$Q$  : 열교환기 순환유량[l/min]

$Q_c$  : 집열용량[W]

$Q_{th,s}$  : 축열용량[W]

$T_i$  : 흡열관내 열매체유 초기온도[ $^{\circ}$ C]

$T_l$  : 흡열관내 열매체유 최종온도[ $^{\circ}$ C]

$t$  : 1회 집열시간[sec]

### 그리스 문자

$\eta$  : 시스템효율, see equation(5)

$\eta_c$  : 집열효율, see equation(2)

$\eta_{th,s}$  : 축열효율, see equation(3)

### 1. 서 론

경제규모의 확대와 생활수준의 향상에 따라 에너지 수요가 급증하고 있다. 또한, 에너지 공급의 대부분을 차지하는 화석연료의 사용으로 인한 환경오염은 위험수위를 넘어서고 있

다. 전체 에너지 수요의 대부분을 수입에 의존하는 국내의 상황은 앞으로 그 심각성이 더해질 것으로 전망된다.

그 동안 국내에서는 정부주도 하에 ‘에너지 이용 합리화법’, ‘대체에너지 개발 촉진법’, ‘대체에너지 기술개발 기본계획’ 및 ‘청정에너지 기술개발 기본계획’ 등을 통하여 에너지 절약과 태양에너지의 효과적 이용을 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>(1)~(5)</sup>

그러나 태양에너지 이용에는 낮은 에너지 밀도로 인한 집열장치와 변환장치가 필요하다. 따라서 여러 장치의 생산 및 판매 가격의 고가화, 장치의 수명, 유지 및 보수 문제로 인하여 그 동안 폭넓게 이용되지 못했다. 이러한 문제점들을 효과적으로 보완하고 태양열 이용의 극대화를 위해서는 고효율 집열성능을 가지며 중·고온의 열에너지를 집열할 수 있는 집광형 집열기의 개발이 절실히 요구되고 있다.<sup>(6)~(8)</sup>

PTC 태양열 난방시스템 연구의 최종목표는 PTC로 태양열을 집열하여 실내를 난방할 수 있는 기술확립 및 PTC 태양열 난방시스템의 기초설계자료를 제시하여 무한 청정에너지인 태양 에너지를 이용함으로써 에너지이용의 경제성을 높이고 화석연료 공급의 한계성 및 환경오염문제를 해결하는 데 기여하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 무한 청정에너지인 태양열을 이용한 난방시스템 개발에 관한 기초적인 실험연구로서 PTC로 난방에 이용가능한 축열량을 얻을 수 있는지 알아보았다. 태양열 난방시스템은 태양추적기, 집광비가 약 42인 선-촛점 PTC(Parabolic Through Collector) 및 집열된 열을 저장할 수 있는 형상비(높이/직경)가 3인 축열조로 구성하였다.

## 2. 효율관계식 정립

PTC 태양열 난방시스템의 열성능 평가를 위하여 실험변수로서 열매체의 흡열관 공급온도와 순환유량을 설정하였다. 실험변수들의 변화에 따라 흡열관에서 획득된 집열량을 계산하여 일사량에 대한 PTC 집열기의 집열효율과 축열조와 열교환 되어 저장되는 축열효율을 도출하였다. 이러한 집열효율과 축열효율을 가지고 PTC 태양열 난방시스템 전체효율을 구하였다.

실험결과 분석에 사용된 흡열관의 집열용량, 집열효율, 축열용량, 축열효율 및 시스템 전체효율 계산식은 다음과 같다.

### 2.1 집열효율

작동매체를 계속 순환시키면서 흡열관 입·출구 온도차 및 열매체유 순환유량을 가지고 집열용량을 계산해야 되지만 흡열관의 길이가 짧기 때문에 흡열관 입·출구 밸브를 막고 일정시간 동안 태양열을 집열한 후 흡열관 내에 있는 열매체유의 온도상승 및 중량으로 집열용량을 계산하였으며 식은 다음과 같다.

$$Q_c = \frac{G \cdot C_p \cdot (T_l - T_i)}{t} \quad (1)$$

흡열관 내의 열매체유 초기온도와 최종온도는 흡열관 입·출구 밸브 개폐 직전에 흡열관 내의 3개 측정점에서 측정한 온도를 평균해서 사용하였다. 또한, 반사판에서 흡열관으로 조사된 태양열 중 대기로 손실되는 열량은 일사량계로 측정한 반사판 단위면적에 대한 직달일사량과 계산된 집열용량과의 차로 추정하였다. 그리고, 열매체유 순환실험이 아닌 일정 단속실험에서 흡열관 내의 온도상승에 따른 열매체유 팽창을 흡수하기 위하여 흡열관 말단에 염화비닐관을

설치하였다.

반사판에 조사된 PTC 집광형 집열기의 집열 효율은 일사량계로 측정된 일사량에 대한 흡열관에서 집열한 집열용량으로 계산하였으며 식은 다음과 같다.

$$\eta_c = \frac{Q_c}{I_a} \quad (2)$$

## 2.2 축열효율

흡열관에서 집열된 열에너지가 단위시간동안에 열교환기를 통하여 축열조에 얼마만큼 저장되었는가를 나타내는 것으로 집열용량에 대한 축열용량으로 정의하며 식은 다음과 같다.

$$\eta_{th,s} = \frac{Q_{th,s}}{Q_c} \quad (3)$$

위의 식에서 축열용량은 열교환기 입·출구 온도와 열매체유 순환유량을 가지고 다음과 같이 계산하였다.

$$Q_{th,s} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (4)$$

## 2.3 시스템효율

PTC 태양열 난방시스템의 전체성능을 평가할 수 있는 시스템 효율은 반사판에 조사된 일사량에 대한 축열조에 저장된 축열용량의 비로 정의할 수 있으며 식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{Q_{th,s}}{I_a} \quad (5)$$

또한 시스템 효율  $\eta$  는 다음과 같이 집열효율과 축열효율의 곱으로도 표시할 수 있다.

$$\eta_c \cdot \eta_{th,s} = \frac{Q_c}{I_a} \cdot \frac{Q_{th,s}}{Q_c} = \frac{Q_{th,s}}{I_a} = \eta$$

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

본 연구의 주요 실험장치로는 국내에서 생산 가능한 스테인레스스틸(SUS304)로 된 반사판(2,200×4,800 mm), 동관에 특수 코팅된 흡열관(직경 34 mm, 길이 4,800 mm), 태양광을 따라가면서 집열할 수 있는 추적장치, 그리고 집열한 열을 성층 저장할 수 있는 축열조로 구성된다. 전체 실험장치의 개략도가 Fig. 1에 나와 있다.

추적장치는 Fig. 1에서와 같이 PTC 반사판 표면에 광센서를 설치하여 조사된 빛의 세기에 따라 PTC 집광형 집열기 축을 감속기어로 조정한다. Fig. 2는 실험에 사용한 PTC 집광형 집열기 사진이다

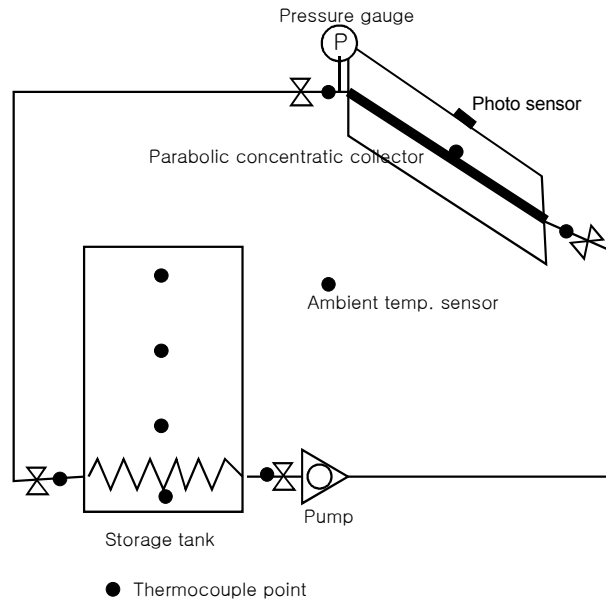


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.



Fig. 2 Photo of PTC experimental apparatus.

축열조는 효과적인 성층저장을 위하여 H/D가 3이 되도록 내경 500 mm, 높이 1540 mm이고 두께가 10 mm인 아크릴 원형탱크를 이용하였다.

축열조 내의 열교환을 위하여 직경 10 mm인 동관 6 m를 코일 형태로 축열조 내의 하단부에 설치하였다. 이 외에 부수적으로 각각의 주요 실험장치를 연결하여 작동매체가 순환할 수 있도록 해주는 배관, 펌프 및 실험장치가 올바르게 작동할 수 있도록 도와주는 각종 제어 스위치와 제어밸브가 있다. 작동유체로는 빙점이 낮은 에틸렌 글리콜을 물과 50 : 50으로 혼합하여 비등점을 높이고 빙점을 낮추어서 실험하였다.

### 3.2 측정장치

온도측정을 위하여 열전대(thermocouple)는 직경이 0.32mm인 T형을 사용하였다. 측정 데이터는 Data Acquisition(YOKOGAWA사)을 사용하여 On-Line으로 연결된 P.C.에 파일로 저장하였다. 일사량 측정은 PTC 중심측과 동일한 위치의 평면에 설치한 Pyranometer (PSP, The Eppley Laboratory)를 이용하였다.

온도측정은 열교환기 입·출구, 흡열관 입·출구와 중앙부, 축열조 상·중·하단 및 대기온

도를 측정하였다.

### 3.3 실험방법

PTC 집열기의 긴축을 동-서 방향으로 수평하게 고정시키고 반사판은 남-북 방향으로 회전하도록 하였다. 태양에너지를 충분히 집열할 수 있도록 정오를 기점으로 전후 3시간 동안 실험하였다. 실험은 평판형 집열기에서 실제 적용하고 있는 온도제어에 따른 밸브 자동개폐방법을 택하였다. 열교환기 입·출구 및 흡열관 입·출구 밸브 개폐는 흡열관의 온도가 90℃에 도달하는 시점으로 설정하였다. 실험방법은 다음과 같다.

- (1) 오전 9시경 시스템 각부 온도측정점의 초기온도를 체크한 후 밸브 잠그고 실험을 시작한다.
- (2) 펌프를 정지시키고 흡열관의 온도가 90℃에 도달할 때까지의 시간을 체크한다.
- (3) 흡열관의 온도가 90℃에 도달하면 순환펌프를 작동시키고 동시에 열교환기 입·출구 및 흡열관 입·출구의 밸브를 개방한다. 이 때 각 측정점의 온도 및 시간을 기록한다.
- (4) 흡열관의 고온열매체와 축열조의 저온수가 열교환되는 동안 축열조 하단(열교환 코일 근처)에 위치한 측정점의 온도와 열교환기 입구온도가 같아지는 순간에 펌프를 정지하고 열교환기 입·출구 및 흡열관 입·출구의 밸브를 폐쇄한다. 이 때 각 측정점의 온도 및 시간을 기록한다.
- (5) 위의 (2)에서 (4)의 과정을 1회 실험으로 하여 오전 9시부터 오후 3시까지 반복 실험한다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 집열용량 및 집열효율 변화

Fig. 3은 1회 집열에 걸리는 시간 변화 곡선으로 시간이 정오를 지나 13시에 가까워질수록 일사량이 증가함에 따라 1회 집열에 걸리는 시간이 단축되는 것을 볼 수 있다. 열교환기를 순환하는 유량이 6 LPM으로 저유량인 경우 1회 실험 종료시 열교환기 입구 및 집열관 내의 온도가 약간 높은 상태에서 집열이 시작되기 때문에 집열에 걸리는 시간이 짧다.

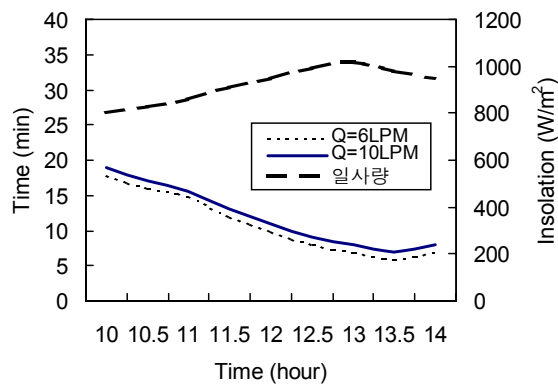


Fig. 3 Variation curve of reached time to collecting at once.

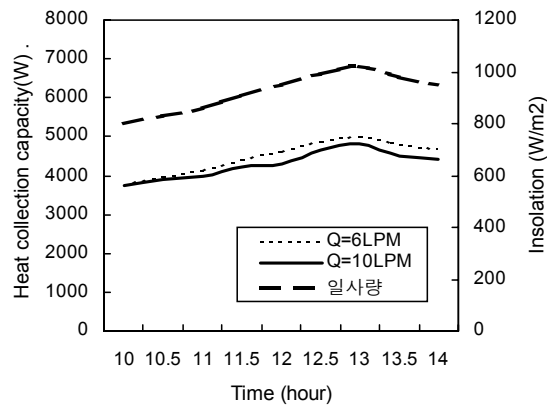


Fig. 4 Variation curve of heat collection capacity for PTC(at clear sky).

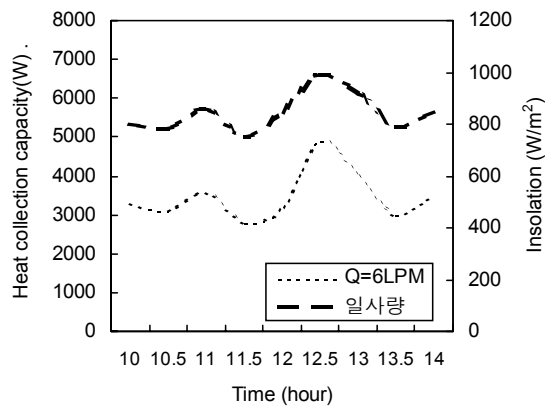


Fig. 5 Variation curve of heat collection capacity for PTC(at cloudy sky).

Fig. 4는 PTC에서 집열된 집열용량의 변화를 나타낸 곡선이다. 맑은날에 일사량이 일정하게 증가 또는 감소함에 따라 집열기에서 획득되는 에너지도 비례적으로 변함을 알 수 있다.

Fig. 5에서는 흐린 날에 실험한 것으로 일사량이 불규칙하게 변함에 따라 집열되는 에너지도 비례적으로 불규칙하게 변하고 획득된 에너지도 맑은 날에 비하여 낮게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 6은 열교환시 열매체유류의 순환유량을 6 LPM으로 하였을 때 1회 집열 시 집열관 공급 온도(초기온도) 변화에 따른 집열효율 변화를 나타낸 곡선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 집열관 초기온도에 상관없이 거의 일정한 집열효율을 나타내고 있으며 집열효율 값이 50%를 넘지 못하고 있다. 이것은 평판형 집열기와 비슷한 값으로 집열기는 평판형, 집광형에 상관없이 집열 효율 값에는 큰 차이가 없고 단지 열매체유의 온도를 저온, 중온, 고온으로 집열할 수 있는지의 문제인 것 같다.

#### 4.2 축열용량 및 축열효율 변화

Fig. 7은 열교환 시 펌프순환유량이 10 LPM일 때 시간에 따른 PTC 태양열 난방시스템의 축열조 온도변화를 나타낸 곡선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 시간이 지날수록 일사량이 증가하고, 탱크내의 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 일사량 변화는 정오를 지나 13시경에 최대  $1000 \text{ W/m}^2$  이상으로 기록되고 있으며 13시를 지나서는 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 일사량이 증가할수록 1회 집열에 걸리는 시간이 단축되어 집열된 열에너지를 축열탱크에 빠르게 저장하기 때문에 축열조 내의 온도가 완만하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 축열조가 열성층을 촉진할 수 있도록 제작되어 졌기 때문에 축열조 내의 상·하부의 온도차가 현격하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한, 시간이 흐를수록 축열조 내의 상·하부의 온도차가 더욱 심해지는 것을 볼 수 있는데 이것은 열교환기를 통하여 순환되는 열매체유의 온도가 증가하므로써 축열조 내의 상·하부 온도차에 의한 부력강도가 증가하여 열성층을 더욱 촉진하기 때문이다.

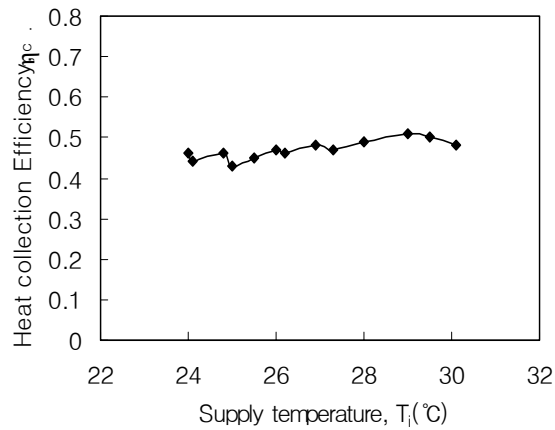


Fig. 6 Heat collection efficiency curve for Q=6 LPM.

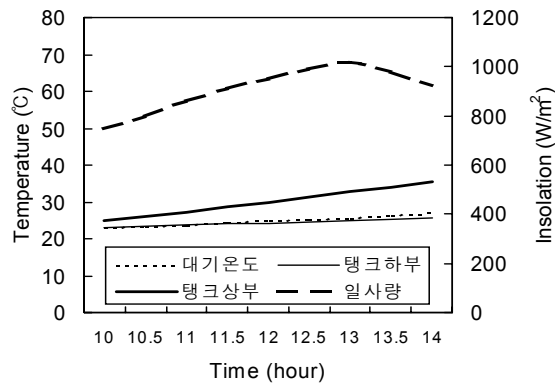


Fig. 7 Variation curve of thermal storage temperature for Q=10 LPM.

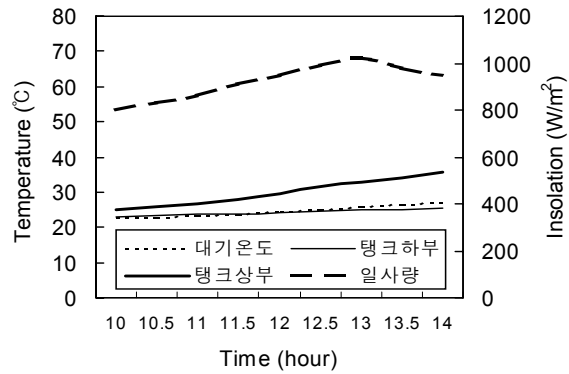


Fig. 8 Variation curve of thermal storage temperature for Q=6 LPM.

Fig. 8은 펌프순환유량을 6 LPM의 저유량으로 열교환시켰을 때 시간에 따른 PTC 태양열 난방시스템의 축열조 온도변화 곡선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 저유량으로 열교환시킨 경우의 탱크 내의 온도가 약간 높게 나타났다. 이는 고온의 열매체유와 탱크 내의 저온의 냉수 사이에 탱크 내에서 열교환 되는 시간이 오래 걸리므로 배관라인에서의 불필요한 열손실을 최소화할 수 있기 때문이다. 또한, 이것은 본 시스템의 실험방법에 따른 하나의 특징으로 저유량으로 집열관을 순환하면서 열교환되는 순간에 약간의 열에너지가 집열되어 축열조로 전달되었기 때문인 것으로 보인다.

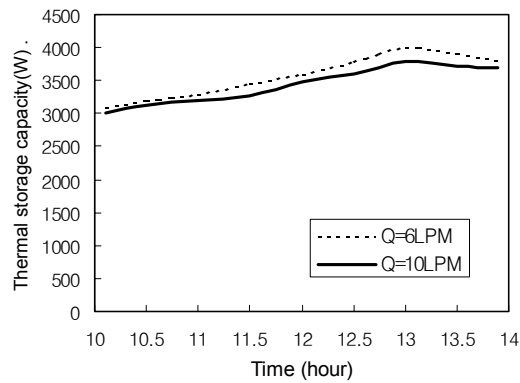


Fig. 9 Variation curve of thermal storage capacity according to time.



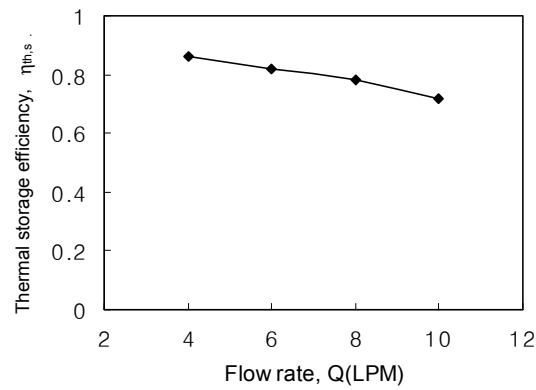


Fig. 10 Variation curve of thermal storage efficiency according to flow rate.

Fig. 9는 PTC 집광형 집열기에서 집열된 열에너지를 열교환기를 통하여 축열조에 저장시킬 때 시간에 따른 축열용량 변화를 나타낸 곡선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 열매체유가 저유량으로 순환하는 경우의 축열용량이 약간 높게 나타나고 있으며 일사량이 풍부한 13시 전후로 가장 높게 나타났다. 이는 본 실험의 특성상 집열과 축열을 반복적으로 수행할 때 집열된 열에너지가 열교환기를 통하여 축열조에 축열되는 동안 집열관에서 약간의 열에너지가 집열되어 축열조에 전달되기 때문인 것 같다.

Fig. 10은 열교환 시 열매체유 순환유량 변화에 따른 축열효율의 변화를 나타낸 곡선이다. 순환유량이 클수록 축열용량이 상대적으로 감소하기 때문에 축열효율이 감소한다.

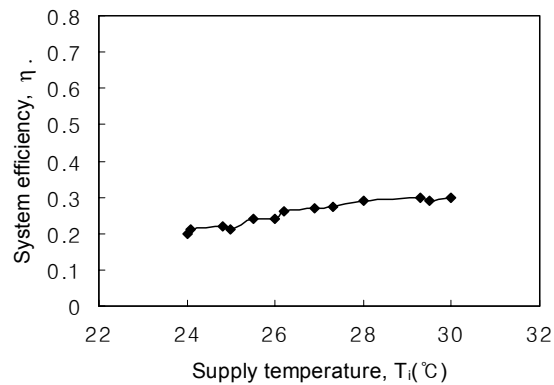


Fig. 11 Variation curve of system efficiency according to supply temperature.

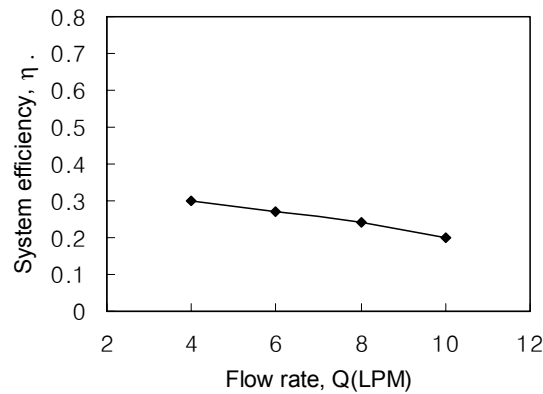


Fig. 12 Variation curve of system efficiency according to flow rate.

#### 4.3 시스템효율 변화

Fig. 11과 Fig. 12는 PTC 태양열 난방시스템 전체의 효율을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 집열관에 공급되어 1회 집열할 때 집열관 내 열매체유를 초기온도를 형성하는 공급온도  $T_i$ 가 높을수록 또 열교환 시 열매체유의 순환유량이 저유량일수록 시스템효율이 높다.

### 5. 결 론

본 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 집열한 후 열교환기를 통하여 순환하는 열매체유의 순환유량이 저유량일수록 집열에 걸리는 시간이 짧았다.
- (2) 일사량이 일정하게 증가 또는 감소함에 따라 집열기에서 획득하는 열에너지도 비례적으로 변함을 알 수 있었다.
- (3) 집열관 초기온도에 상관없이 거의 일정한 집열효율을 나타냈고 집열효율이 50%를 넘지 못했다. 이것은 평판형 집열기와 비슷한 값으로 집열기는 평판형이든 집광형이든 상관없이 집열효율에는 큰 차이가 없다.
- (4) 열매체유의 순환유량이 클수록 열교환 시 집열관에서 집열되는 열에너지가 상대적으로 감소하기 때문에 축열효율이 감소한다.
- (5) 집열관에 공급되어 1회 집열할 때 집열관 내 열매체유의 초기온도를 형성하는 공급온도  $T_i$ 가 높을수록 또, 열교환 시 열매체유의 순환유량이 저유량일수록 시스템효율이 높다.

#### 참고문헌

- (1) H. P. Garg, S. C. Mullic and A. K. Bharagava, 1985, "Solar Thermal Energy Storage", D. Reidel Publishing Company, pp. 82~128.
- (2) T. D. Brumleve, 1974, "Sensible Heat Storage in Liquids", Sandia Lab. Energy Report, SLL-73-0263.
- (3) S. Kakac, E. Paykoc, Y. Yener, 1989, "Energy Storage System", Kluwer Academy Publishers, pp.

129~161.

- (4) 박이동, 1992, "태양열의 성층축열과 주택이용에 관한 연구", 동력자원부 연구 보고서, 901A301 - 345AG.
- (5) B. J. Sliwinski, A. R. Mech and T. S. Shih, 1978, "Stratification in Thermal Storage during Charging", Proceedings of the 6th International Heat Transfer Conference, Toronto, Vol. 4, pp. 149~154.
- (6) H. P. Garg, 1987, "Advances in Solar Energy Technology : Vol. 1 Collection and Storage Systems", D. Reidel Publishing Company.
- (7) 한국에너지기술연구소, 1996, "중·고온 집광 시스템 개발 및 응용", KIER-966403.
- (8) 한국 태양에너지 학회, 1991, "태양 에너지 핸드북".