

## 태양열 온수시스템 배관 최적설계

신정철

우송정보대학 기계자동차설비계열

(2013년 6월 4일 접수, 2013년 8월 14일 수정, 2013년 8월 14일 채택)

### Optimized Design of Piping Array in Solar Hot Water System

J. C. Shin

School of Mechanical and Automotive Engineering, Woosong College

(Received 4 June 2013, Revised 14 August 2013, Accepted 14 August 2013)

#### 요 약

Abstract - A simple method for balancing flow rates in arrays of parallel connected flat plate solar collectors has been developed. The method is based on a computer program which solves for the flow rate through each of the collectors in a reverse return plumbed array. The analysis uses conventional "K-value" techniques and assumes the effects of density variations within the system to be negligible. It has been found that by appropriately sizing the inlet and outlet manifolds, flow maldistribution can be nearly eliminated without resorting to expensive or complicated balancing techniques.

**Key words** : solar heat collector, piping array, collector efficiency, balanced piping flow, solar hot water system

#### 1. 서 론

집열기의 효율에 영향을 미치는 요인은 많이 있지만 그 중에서도 열매체가 열을 이동하고 전달하는 제 기능을 효과적으로 수행하고 있는지는 중요한 요인이다. 즉 열매체가 집열기를 통해 흐르는 방식에 따라 효율에 많은 영향을 미친다. 유체가 몇 개의 지류를 형성하며 흐르게 될 때 그 흐름은 적절히 균형을 이루고 있는지 혹은 적절하지 못한 유동률로 인해 어떤 흐름은 과열되었는지 등은 효율에 직접적인 영향을 준다. 평판형 액체식 집열기에서는 그림 1에 요약된 것과 같이 기본적으로 4개의 설계방식이 가능하다.

그림 a)는 parallel flow reverse return(PFRR) 방식이며 집열기 및 시스템 설계에 거의 문제가 없다.

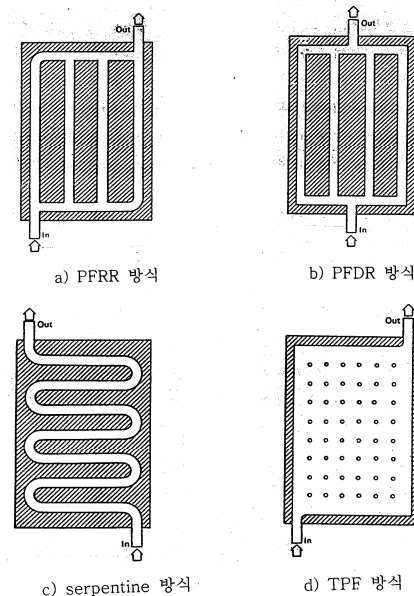


Fig. 1. 평판형 집열기의 도관 설계방식

†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

유체가 흐르는 각 통로의 길이가 일정하므로 유체는 서로 평행인 도관 내에서 거의 균형을 유지하며 동일한 유동률로 흐르게 된다. 집열기에서는 큰 흐름을 작은 흐름으로 나누어 병렬방식으로 흐르게 하는 것이 큰 흐름 그 자체를 그대로 직렬방식으로 흐르게 하는 것 보다 유리하다. 그 이유는 직렬방식이 유체 흐름에 저항이 클 뿐만 아니라 온도가 높아지므로 열 손실도 커지기 때문이다.

그림 b)는 parallel flow direct return(PFDR) 방식이며 PFRR 방식보다 못하다. 그 이유는 유체입구와 유체출구가 일직선상에 있게 되면 도관 내부의 유체 흐름이 심각한 불균형상태가 되어 효율이 낮아진다. 그림 c)는 직렬방식의 serpentine 형태로서 특히 효율에 관계없이 고온을 필요로 하는 경우를 제외하고는 바람직하지 않은 설계방식이다. 그림 d)는 total panel flow(TPF) 방식으로서 유체의 균형있는 흐름과 탁월한 열전달의 장점이 있으나 매우 주의깊은 설계 및 제작이 필요하다. 본 연구에서는 대량생산 및 보급의 관점에서 생산공장의 설계와 연계하여 그림 a)의 parallel flow reverse return(PFRR) 방식을 채택하였다.

## 2. 집열기 배열 방식

태양열 온수시스템에서 여러 개의 평판형 집열기를 배치하는 경우 집열기 배열은 직경이 일정한 입구 모관과 출구 모관 사이에 병렬로 배치하는 것이 일반화 되어 있다. 이러한 집열기 배열은 2가지 방법이 있는데 하나는 직접회수방식(그림 2)으로서 각 유로마다 마찰저항이 서로 다르기 때문에 유량분배가 불균등하게 된다. 또 하나는 역회수방식(그림 3)으로서 언뜻 보기에는 각 유로의 길이가 똑 같기 때문에 유량이 균등하게 분배되어 질 것으로 생각된다. 그러나 자세히 관찰해 보면 중심부분 집열기의 유량은 양쪽 끝에 있는 집열기의 유량보다 크게 되어 유량불균형이 생기게 됨을 알 수 있다. 역회수방식에서 이러한 유량불균형에 대한 결론은 참고문헌 1에 자세히 나타나 있다.

만일 유량불균형이 심해지면 집열기관 중에 유량이 적은 부분은 온도가 높아지고 열손실이 상대적으로 커지게 되어 열효율이 떨어지게 된다. 극단적인 경우에는 집열시스템 성능이 최대 20% 이상 떨어지는 결과를 가져올 수 있다. 평균유량보다 더 많은 유

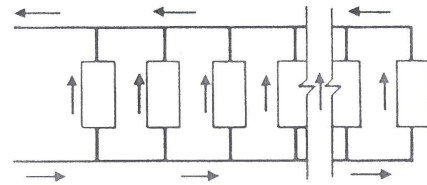


Fig. 2. 평판형 집열기의 도관 설계방식

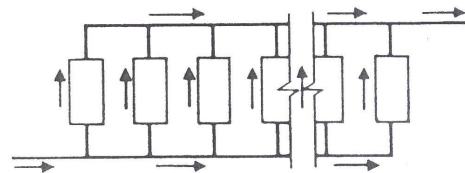


Fig. 3. 역회수 배열방식

량이 흐르는 집열관은 약간 높은 효율을 유지하게 되나 유량불균형으로 인한 집열기배열 전체효율손실을 보상할 수는 없다. 집열기 경사에 따른 집열기 경사에 따른 자연대류에 의한 부력효과도 작으나 유량 불균형을 줄이는 방향으로 작용하지만 집열관의 개수가 많은 강제순환식 대용량시스템의 경우 이러한 자연대류효과는 매우 미미하다. 병렬로 연결된 집열기 배열에서 유량 균형을 위한 유량조절밸브를 사용하는 방법이 많이 알려져 왔다. 이러한 경우 매우 효과적으로 생각되지만 시공비가 비싸고 시간과 작업량이 많아지게 된다. 또 다른 방법으로는 입구 및 출구모관에 테이퍼진 관을 사용하는 경우, 오리피스를 사용하는 경우를 생각할 수 있다. 그러나 이러한 기술에 대한 연구 분석결과는 거의 찾아 보기 힘들다. 그러므로 본 연구의 목적은 현재 제기되고 있는 유량불균형 문제를 복잡한 방법 대신에 간단하고 기본적인 법칙을 사용하여 쉽게 해결할 수 있는 단순해법을 찾고자 함이다.

## 3. 해석방법

여기서 제시되는 집열기 배열은 역회수배관에서만 적용되는 이론이다. 이러한 배열방식은 유량불균형을 감소시키는 단순하고 비용이 적게 드는 배관방식이다. 이러한 분야에 대한 과거의 연구는 크게 2가지로 분류된다. 첫째는 연속적인 열의 유입과 손실이 집열기배열 입구 및 출구모관에서 이루어진다는 가정하에 분석되는 방법이다(참고문헌 2). 둘째는 유한갯

수의 집열기 또는 집열기 입출구 연결관내 유체시스템을 해석하는 방법이다(참고문헌 1). 본 해석에서는 실제 유동현상을 더욱 정확하게 예측하는 2번째 방법을 선택하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 j번째 집열기를 생각해 보자.

$$\Delta P_i = K_i \frac{\rho V^2}{2g_c} = K_i \frac{(\dot{m})^2}{2\rho g_c A^2} \quad (1)$$

- 여기서  $\Delta P_i$  = 요소 i를 통한 압력강하
- $K_i$  = 요소 i의 압력손실계수
- $\rho$  = 열전달매체의 밀도
- $V$  = 유체평균속도
- $\dot{m}$  = 요소 i의 질량유량
- $A$  = 요소 i의 유로면적
- $g_c$  = 단위환산계수

위에서 사용한 K값은 참고문헌 3에서 발췌된 실험 데이터값을 사용하였다. 직관, 티, 곡관 등 부속기기 압력손실값은 참고문헌 3, 4, 5를 참조하였고 이들 값 중 평균값으로 선택하여 계산하였다. 태양열 온수 시스템의 운전시 이러한 배관부속기기에 의한 압력손실의 영향은 미미하였고 따라서 본 해석결과에 큰 변화는 주지 못하였다. 루프 내 손실 압력은 경로에 관계없이 일정하므로 전기회로논리를 사용하여 루프 j에 대한 지배방정식은 아래와 같다.

루프 j :

$$\dot{m}_{c_j}^2 R_{c_j} + \dot{m}_{t_j}^2 R_{t_j} - \dot{m}_{c(j+1)}^2 R_{c(j+1)} - \dot{m}_{b_j}^2 R_{b_j} = 0 \quad (2)$$

또한 입구 및 출구모관의 각 노드(연결점)에서 연속방정식을 적용하면

입구노드 :

$$B_j: \dot{m}_{b(j-1)} - \dot{m}_{c_j} - \dot{m}_{b_j} = 0 \quad (3)$$

출구노드 :

$$T_j: \dot{m}_{t(j-1)} + \dot{m}_{c_j} - \dot{m}_{t_j} = 0 \quad (4)$$

여기서  $R = \frac{1}{2\rho g_c} \sum_i \frac{K_i}{A_i^2}$

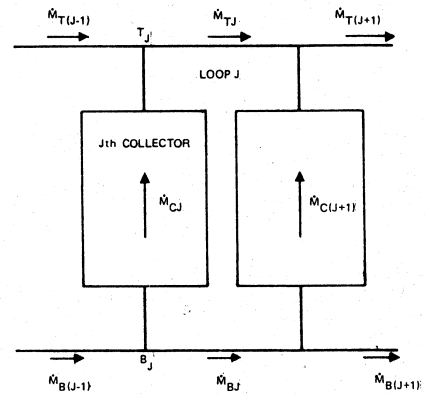


Fig. 4. 역환수 배열방식

상기한 수치적 모델을 각 유로에 대하여 반복적으로 계산하는 컴퓨터 프로그램이 개발되었다. 해는 시스템내 모든 유로의 압력강하가 서로 같아지고 연속방정식이 만족되었을 때의 유량값으로 정하였다. 개발된 프로그램은 각각의 집열기를 통한 유량값을 계산할 뿐 만 아니라 정상유량상태에서의 집열기효율을 근거로 하여 각 집열기에 대한 상대적효율을 계산한다. 이러한 부분에 대한 해석은 참고문헌 5에 나온 평판형 집열기성능방정식을 이용하였다.

#### 4. 결과

아래와 같은 입력변수를 바꾸어 가면서 여러 차례의 컴퓨터계산이 수행되었다.

- (1) 집열기내 압력강하량
- (2) 집열기 입출구 연결관 직경
- (3) 집열기배열 입출구모관 직경
- (4) 집열기 통과유량
- (5) 집열기 개수

집열기 압력강하 = 0.7 KPa (0.1 psi)  
 집열기 유량 = 1.9 L/min (0.5 gpm)  
 집열기 간격 = 0.9 m (3 ft)

계산 결과 아래와 같은 일반적인 결론이 얻어졌다.

- (1) 집열기내 압력강하가 일정한 경우, 집열기 개수가 많거나 집열기배열 입출구모관 직경이 작을수록 유량불균형현상은 심해진다.

- (2) 집열기 개수와 집열기배열 입출구모관 직경이 일정한 경우, 집열기내 압력강하가 크면 클수록 유량불균형현상은 줄어든다.
- (3) 일반적인 집열시스템의 운전 중 대부분의 경우에 대해서 집열기내 압력강하와 집열기배열 입출구모관 직경이 일정한 경우 집열기 입출구 연결관 직경과 집열기 통과 유량에 의한 영향은 미미하다.

그림 5는 현재 대부분의 태양열업체에서 사용하고 있는 집열기배열시스템에 대하여 균형유량이 통과하는 배열상태와 불균형유량이 형성되는 배열상태의 2가지 경우에 대한 컴퓨터 해석결과를 보여주고 있다. 여기서 균형유량상태란 여러 집열기배열상태중에서 각 집열기 통과 유량이 전체 집열기의 평균유량의 95% 이내에 있는 집열기배열상태를 말한다.

집열기배열 입출구모관 직경의 변화에 따라 각 배열의 유량불균등현상이 매우 심화되고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 여러 경우의 집열기배열상태에 대한 균형유량과 불균형유량의 상대적 집열효율을 보여주고 있다. 본 연구의 이론적인 해석에서는 집열기배열 입출구모관 직경의 증가에 따른 초기 투자비 증가가 집열효율 향상에 따른 비용감소와의 상관관계를 분석하는 문제에 대해서는 다루지 않고 있다. 이러한 이론적인 결과를 산업현장에 실제로 적용시키기 위해서는 집열기배열 입출구모관 직경을 얼마까지 증가시킬 수 있는지 최적의 모관 직경을 선택하기 위한 경제성 분석이 필요하다고 생각된다.

컴퓨터계산 결과 2가지 중요한 사항이 관찰되었다. 첫 번째는 그림 7에서 보는 바와 같이 주어진 집열기 배열상태에서 균형유량을 위한 집열기배열 입출구모관 직경은 압력손실계수(집열기와 티손실 포함)와 배열내 집열기 개수로부터 구해질 수 있다.

$$\text{집열기 간격} = 1 \text{ m (3 ft)}$$

여기서 압력손실계수, C는 단순히 유량을 집열기 및 티부분에서의 압력손실량의 제곱근으로 나눈 값을 말한다. 일반적인 대부분의 집열기배열시스템에서 티부분에서의 압력손실은 집열기내 압력손실보다 매우 작아서 무시될 수 있다. 따라서 압력손실계수는 집열기내 압력강하량만 사용한 값으로 계산해도 무방하다는 결론이 나온다. 그림 7에 보이는 곡선의 결과를

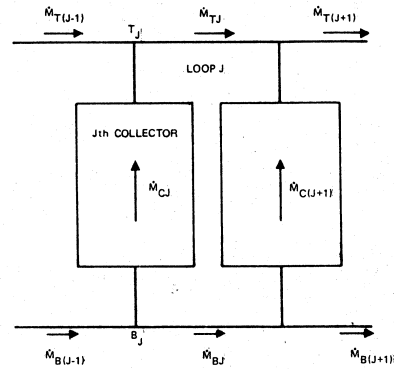


Fig. 5. 균형유량상태와 비균형유량상태에서 집열기의 상대적 유량

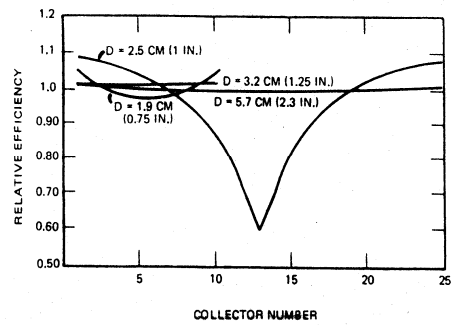


Fig. 6. 균형유량상태와 비균형유량상태에서 집열기의 상대적 집열효율(그림 5의 유량 기준)

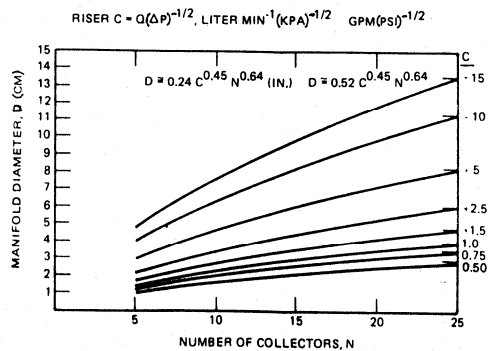


Fig. 7. 역환수배관방식의 균형유량을 위한 집열기 입출구모관 직경

쉽게 실무에 사용할 수 있도록 하는 공식이 아래와 같이 도출되었다.

$$D = 0.52 C^{0.45} N^{0.64} \quad (5)$$

$$[ D = 0.24 C^{0.45} N^{0.64} ]$$

여기서

D = 집열기배열 입출구모관 직경, cm [in]

C = 집열기 압력손실계수, L·min<sup>-1</sup>·kPa<sup>-0.5</sup> [gpm·psi<sup>-0.5</sup>]

N = 집열기배열내 집열기 개수

윗 식에서 계산된 파이프 직경은 이상적으로 계산된 값이므로 실제로 설계되는 파이프 직경과는 일치하지 않을 수 있다. 상기한 (5)식은 각 집열기의 간격이 0.9m일 경우에 유효한 식이며 만일 집열기 간격이 이 보다 큰 1.2m의 경우에는 약간 더 큰 모관의 직경이 요구된다. 또한 산업현장에 공급되는 파이프 직경은 KS규격제품에 따라야 하므로 계산결과치를 그대로 사용할 수 없다. 따라서 설계시 유량균등분배를 위하여 선택해야 할 모관의 직경은 (5)식에서 계산된 값보다 여유있는 KS규격제품의 직경이 될 것이다. 만일 상대적으로 압력강하량이 큰 집열기배열시스템의 경우 (5)식으로 계산된 집열기배열 입출구모관 직경은 집열기 입출구 연결관의 직경보다 작아질 수 있는데 이러한 경우에는 유량균등분배를 위하여 선택해야 할 모관의 직경은 최소한 집열기 연결관의 직경과 같도록 해야 한다. 또 다른 관찰은 집열기배열 모관의 압력손실을 집열기 압력손실(집열기, 연결관 및 티부분 손실 포함)로 나눈 값이 0.3을 넘지 않아야 집열기 통과 유량의 균등분배가 이루어진다는 점이다.

## 5. 결론

본 해석 결과 아래와 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 역환수배관방식의 태양열 집열기배열시스템에서 유량균등분배를 위한 주요설계변수는 집열기배열 입출구모관 직경과 집열기 압력손실계수이다.
- 2) 이러한 배관방식에서 집열기 유량균등분배를 이루기 위해서는 값비싸고 복잡한 기술 대신에 집열기 모관의 직경을 적절히 선택함에 의해서 해결될 수 있다. 집열기 간격이 0.9m일 때 유량균등분배를 위한 집열기배열 입출구모관 직

경,  $D = 0.52 C^{0.45} N^{0.64}$ 로 주어진다. 그러나 산업현장에서 실제로 선택해야 할 모관의 직경은 계산치보다 여유있는 약간 큰 KS규격의 파이프 직경이 선택되어야 할 것이다.

- 3) 역환수배관방식에서 유량균등분배를 위한 일반적인 제한사항으로서 집열기 배열 모관의 압력손실 대 집열기 압력손실의 비는 0.3을 넘지 말아야 한다.

## 참 고 문 헌

1. Davey, E.T. and Dunkle, R.V., "Flow Distribution in Solar Absorber Banks", Paper No. 4/35, Presented at International Solar Energy Society Conference, Melbourne, Australia, March 2-6, 1970
2. Lydon, R.T., Smiyh, R.P. and Barber, E.M.Jr., "A Method for Balancing Flow rates in Rows of Parallel Collectors" 1979
3. Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe, Engineering Division, Technical Paper No.410, Crane Co., 2009
4. Idelchik, I.E., Handbook of Hydraulic Resistance, AEC-TR-6630, 1994
5. Kreith, F. and Kreider, J.F., Principles of Solar Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, 2000.