

등축 유로 장착 이중 태양열 진공관의 열적 특성에 관한 수치해석적 연구

현 준호¹⁾, 박 윤철²⁾, 천 원기³⁾, 이 상진⁴⁾

A Numerical Study on the Thermal Characteristics of Double Skin Vacuum Tubes with Coaxial Fluid Conduit

Junho Hyun, Youncheol Park, Wongee Chun, Sangjin Lee

Key words : 태양에너지(Solar energy), 이중진공관(All-glass vacuum tube), 등축 유로(Coaxial fluid conduit), 시뮬레이션(Simulation)

Abstract : A numerical study has been carried out for a solar water heater, which consists of double skin solar vacuum tubes. Water is heated as it flows through the coaxial fluid conduit inserted in each tube. The space between the exterior of the fluid conduit and the glass tube is filled with antifreeze solution. This is to facilitate heat transfer from the solar heated absorber surface to water and to prevent the functional problems due to freezing in frigid weather conditions. A one-dimensional steady state model is fully described which will be used to develop three-dimensional model using STAR-CD. These models could be used efficiently in designing double skin solar collector tubes with different geometrical parameters other than those considered in the present analysis. Results show a good agreement when compared with other experimental data demonstrating the reliability of the one-dimensional model employed.

Nomenclature

subscripts

α : 흡수율
 β : 체적팽창계수(1/K)
 τ : 방사율
 τ : 투과율
 C_p : 정압비열 (J/kgK)
 \dot{m} : 질량유량 (kg/s)
 P : 표면적 (m²)
 $Seff$: 튜브 1개의당 유효일사량(W/m²)
 U_L : 열손실계수 (W/m²°C)
 h : 대류열전달계수 (W/m²°C)
 T : 온도 (°C)

$l, 2, 3$: regional parameters
 i, in : 내부
 o, out : 외부
 B : 선형
 L, R : left, right

-
- 1) 제주대학교
E-mail : juneho@cheju.ac.kr
Tel : (064)758-3640 Fax : (064)787-9276
 - 2) 제주대학교
E-mail : ycpark@cheju.ac.kr
Tel : (064)754-3626 Fax : (064)787-9276
 - 3) 제주대학교
E-mail : wgchun@cheju.ac.kr
Tel : (064)754-3646 Fax : (064)787-9276
 - 4) 한양대학교
E-mail : sjl@ihanyang.ac.kr
Tel : (031)400-5278 Fax : (064)418-0153

1. 서론

국내 대체에너지의 활용은 약 90% 이상이 공장 또는 대형 소각장에서 쓰레기와 폐기물 등을 태워 얻은 열원을 이용하여 온수를 만들거나 또는 난방 등에 집중되어 있으며 세계적으로 개발에 역점을 두고 있는 풍력, 태양열, 수소에너지 등과는 거리가 멀다. 대체에너지 개발 및 활용도에서 OECD 가입국 중 최하위권에 머물고 있는 우리나라는 대체에너지의 개발을 통한 에너지 자립도를 획기적으로 높이지 않는 한 멀지 않은 장래에 에너지 후진국으로 전락할 위험에 처한 상황이 있다. 국제 유가가 치솟기 시작한 최근에는 태양에너지 개발 등에 더욱 박차를 가하고 있는 것이 세계적인 추세이다. 태양에너지의 활용은 태양열을 그대로 난방 또는 온수용으로 사용하거나 태양광을 받아 전기를 만들어 내는 두 가지 방식이 있다. 본 연구에서는 전자에 중점을 둔 보다 효율적인 태양열 집열시스템의 최적 설계를 위한 초기 단계로 이중진공관형 태양열 집열기의 효율을 3차원적 수치해법으로 해석하였다. Eberlein¹⁾은 공기를 작동유체로한 진공관형 태양열 집열기의 열성능을 1차원적으로 해석하였고, Yadav²⁾는 평판형 집열기와 원통형 집열기가 통합된 형태의 모델에 대한 1차원 비정상 상태의 성능해석을 수행하였다. 이중진공관형 집열튜브로 구성된 태양열시스템의 집열 효율을 극대화 할 수 있는 모델을 개발하기 위해서는 집열시스템의 마찰 저항 감소와 열성능 제고를 위한 모듈의 최적배열과 축열조로부터 차가운 열매체가 집열 튜브 내로 흐를수록 태양열 집열 효과가 커지므로 이에 대한 이론적 분석(3) 등이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 먼저 단일의 이중진공관형 태양열 집열튜브에 대한 열성능 분석을 수행하고 이를 바탕으로 시스템 전체에 대한 열성능을 예측하고자 한다. 따라서 태양열 집열튜브의 선형화된 1차원 모델을 이용하여 정상상태에서의 집열튜브 열성능을 예측하고 이를 바탕으로 신뢰성 있는 3차원 모델을 개발하여 최적의 설계인자들을 도출하고자 한다.

2. 이론 및 수치해석

2.1 해석 대상

Fig.1은 제주계간 단지에 설치되어 있는 50 모듈 태양열 집열 시스템을 것이다. 태양열 집열 시스템의 기본적인 작동 개념은 Fig. 2에 나타나 있

다. 시스템의 구성은 크게 집열 모듈, 축열조 그리고 제어부로 구성되어 있다. 집열 튜브내에 있는 부동액은 태양의 복사열에 의해 가열되고 부동액에 흡수된 열은 순차적으로 금속파이프로 전도되어 결국 내부유동관 내의 물로 전달된다. 모터에 의해 강제 순환되는 물은 집열기에서 얻은 열을 축열조로 전달하는 매개체 역할을 한 후 다시 집열튜브 속으로 유입되게 된다. 축열조의 용량은 3001이고, 직경 및 길이는 각각 0.5m 와 1.53m 이다. 유리 집열튜브의 외경 및 내경은 각각 58mm 와 47mm이고, 길이 및 두께는 각각 1.8m와 1.8mm이다. 태양열 집열부는 여러 개의 집열 모듈로 구성되어 있고 한 개의 집열 모듈은 18개의 집열튜브로 구성되어 있다. Fig.3은 본 연구의 해석 대상인 단일 집열튜브를 나타낸 것이다.



Fig.1 Cheju seasonal storage system with 50 modules of double skin solar collectors.

최적효율의 태양열 집열 시스템을 얻기 위해서는 집열시스템의 마찰 저항 감소와 열성능 제고를 위한 모듈의 최적배열, 축열조로부터 차가운 열매체가 집열 튜브 내로 흐를수록 태양열 집열 효과가 커지므로 이에 대한 이론적 분석 등이 필요하다. 이를 위해서는 먼저 하나의 이중진공관형 태양열 집열튜브에 대한 열성능 분석이 필수적이어야 한다. Fig. 4는 이중진공관형 태양열 집열튜브의 열적 기본원리를 열저항 네트워크를 이용하여 나타낸 것이다. 대기에서 복사와 대류에 의해 태양열 집열튜브로 유입되는 열에너지는 Fig.4와 같은 프로세스를 통하여 최종적으로 이중관 내부로 흐르는 물에 전달되게 된다.

이중진공관형 태양열 집열모듈의 열성능 해석을 3차원으로 수행하기에 앞서 선행연구에 대한 1차원 선형화 모델 해석을 수행하고 이를 통하여 해석에 대한 신뢰성을 확보하였다. 또한 실제의 태양열 집열튜브와 같이 부동액 층을 포함시켜 작

동유체의 온도변화를 보다 정확하게 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 3차원 해석에 대한 결과를 어느 정도 예측함과 동시에 태양열 집열시스템의 효율을 보다 명확히 예측하고자 하였다.

2.2 집열 튜브에 대한 열해석

태양열 집열튜브의 선형화된 1차원 모델에 대한 온도분포를 정상상태로 구하고 이를 STAR-CD(4)를 이용한 3차원 해석 결과와 비교하여 예측된 결과의 신뢰성을 확보하고자 한다. 따라서 본 연구는 다음과 같은 순서로 해석을 수행하였다.

- ① 1차원 선형화 모델을 이용하여 작동유체의 유량 및 흡수부의 흡수를 변화에 따른 집열 튜브출구에서의 수온 변화를 정상상태에서 예측
- ② 부동액층이 포함된 1차원 선형화 모델 해석
- ③ STAR-CD를 이용한 3차원 모델 해석

2.2.1 1차원 선형화 모델

Fig. 5는 1차원 선형화 모델을 열저항 네트워크를 이용하여 나타낸 것이다. 태양에너지 집열튜브의 열적 현상을 해석하는데 있어서 실제적인 현상을 기술하는 열평형 방정식은 집열튜브의 각부분에 대한 열저항 네트워크를 이용하였고 아래의 가정을 도입하여 단순화 하였다.

- ① 흡수표면의 안쪽과 바깥쪽온도는 같다.
- ②유리에서 흡수되는 태양에너지는 무시한다.
- ③흡수표면, 유리관표면 모두 회색체로 간주 (diffusely reflecting surface)
- ④ 모든 물성치는 길이 따라 변하지 않는다.
- ⑤ 흡수 표면에서 흡수되는 태양에너지는 표면에 균일하게 입사된다.

집열튜브 내부를 순환하는 작동유체는 공기이며 시스템 해석에 사용된 각 재질에 대한 열평형 방정식은 위에서 도입된 가정을 고려하여 식 (1) ~ (4)에 나타내었다. 해석에 사용된 각 재질의 물성치는 Eberlein의 논문¹⁾에 잘 나타나 있다.

Absorbing surface

$$\alpha r S_{eff} + U_L(T_a - T_3) + h_3(T_2 - T_3) + h_3(T_w - T_3) = 0 \quad (1)$$

Inside glass

$$h_2(T_2 - T_w) + h_{rw}(T_3 - T_w) + U_1(T_1 - T_w) = 0 \quad (2)$$

Inner flow of air

$$m \frac{dT_2}{dx} + h_3 P_3 (T_2 - T_3) + h_2 P_1 (T_2 - T_w) = 0 \quad (3)$$

(3)
Outer flow of air

$$- mc_p \frac{dT_1}{dx} + U_1 P_1 (T_1 - T_w) = 0 \quad (4)$$

여기서, T1: 내부유동온도, T2: 외부유동온도
T3: 흡수표면온도, Tw: 유동관표면온도, 그리고
고 Ta: 대기온도(30°C)를 가르킨다.

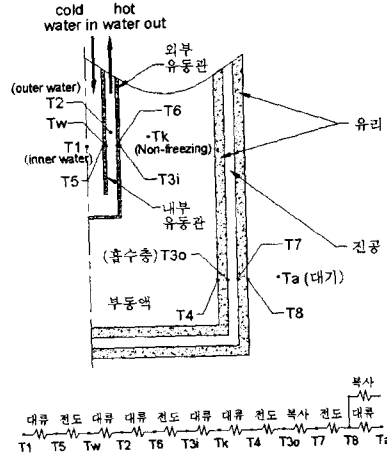


Fig. 4 이중진공관형 태양열 집열튜브의 열저항 네트워크

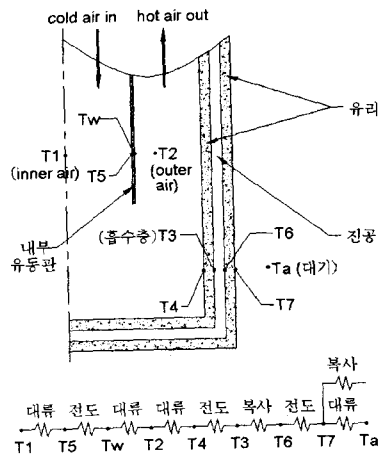


Fig. 5 1차원 선형화 모델의 열저항 네트워크

3. 결과 및 고찰

태양열 집열튜브의 열해석을 위해 본 연구에서 사용한 해석 프로그램의 검증은 Eberlein의 해석

결과를 이용하여 상호 비교하였다. Fig. 6은 정상상태 1차원 선형화 모델의 국부적인 온도변화를 Eberlein의 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 보다 자세한 내용은 Eberlein의 논문에 나타나 있으며 30°C로 집열튜브에 진입한 공기의 온도는 집열튜브 끝부분에서 약 3°C의 온도 차이를 보였고 외부유동관으로 진입하면서부터는 온도차가 조금씩 줄어들어 집열튜브 출구에서는 약 2°C의 온도차를 보였다. 이 온도차의 주요 원인은 계산에 사용된 집열튜브의 총 열손실 계수가 동일하지 않기 때문인 것으로 추정된다. Eberlein은 흡수층의 온도에 따라 총 열손실 계수를 달리 부여 하였지만 계산에 사용된 값은 정확히 명시하지 않았으므로 본 연구서는 정상상태로 수렴된 후의 총 열손실 계수를 사용하였다. 그러나 오차율 3.44% 이내로 만족할만한 결과를 얻었다.

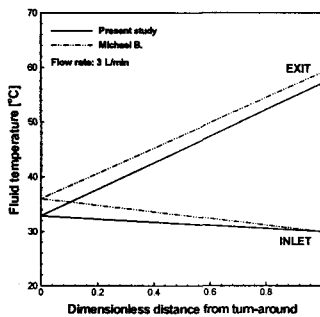


Fig. 6 태양열 집열튜브 내의 공기온도분포

본 연구에서는 1차원 선형화 모델에 부동액을 포함시켜 실제의 집열튜브와 같은 조건에서 작동유체(물)의 온도변화를 예측하였다. Fig. 7는 초기 온도 10°C로 집열튜브 내를 흐르는 작동유체의 유량을 변경하였을 때의 수온변화를 나타낸 것이다. 유속이 가장 빠른 4 l/min의 경우는 물의 온도가 약 17.81°C로 집열튜브를 돌아 나오며 3 l/min, 2 l/min 그리고 1 l/min는 각각 약 20.42°C, 25.6°C 그리고 40.83°C로 돌아 나와 유속이 낮을수록 충분한 열교환을 하여 고온의 물을 얻을 수 있었다. 또한 집열튜브에서의 반환점, 즉 내부유동관의 출구에서의 수온은 유속이 빠를 경우 집열튜브의 출구온도에 비하여 상대적으로 낮고, 유속이 느릴 경우는 집열튜브의 출구온도에 비하여 상대적으로 높게 나타났다. 여기서 유량이 1 l/min와 2 l/min인 경

우를 비교해 보면 1 l/min인 경우 내부유동관의 출구온도가 집열튜브의 출구온도보다 오히려 높게 나타났다. 이는 집열튜브 내의 작동유체가 어느 일정 유량 이하로 흐르게 되면 내부유동관 출구의 온도가 집열튜브 출구의 온도보다 더 높게 나타나는 임계점이 존재함을 나타내고 있는 것이다.

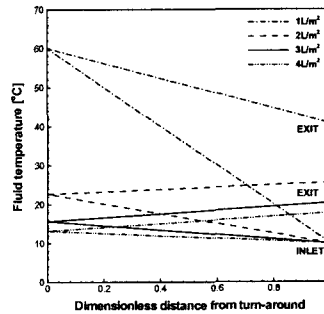


Fig. 7 유량변화에 따른 집열튜브 내의 수온변화

4. 결론

본 연구에서는 등축유로를 장착한 all-glass solar vacuum tube의 열성능 예측을 위하여 선형화된 1차원 모델에 대한 온도분포를 정상상태에서 구하였다. 공기를 작동유체로 사용한 Eberlein의 결과와 비교하여 오차율 3.44% 이내로 1차원 선형화 모델의 신뢰도를 확보하였다. 본 연구에서 사용한 1차원 선형화 모델의 경우는 유량이 약 1.7 l/min일 때 집열튜브 출구에서 약 28.5°C의 수온을 가지는 임계점이 있음을 알 수 있었고, 흡수층의 흡수율 변화로 집열튜브 내의 작동유체(물)는 선형적인 온도상승을 나타냈다.

References

- [1] Eberlein MB. Analysis and performance predictions of evacuated tubular solar collectors using air as the working fluid, MS Thesis, 1976.
- [2] Yaday YP. Transient analytical solution of a solar still integrated with a tubular solar energy collector ; Solar Energy, 1998.
- [3] Beckmann RA., Duffie BD. Solar Thermal Engineering, 1980.
- [4] STAR-CD Ver.3.15Manual, Computational Fluid Dynamics Ltd., 2000.