

# 전산유체역학을 이용한 직접 접촉식 히트파이프의 응축부 형상에 따른 성능비교

고요한\*, 강경문\*, 서태범\*

\*인하대학교 대학원 기계공학과(resydeort@hotmail.com), \*\*인하대학교 기계공학과(seotb@inha.ac.kr)

## Performance Comparison on the Condenser Shapes of Direct Contact Heat Pipe using CFD

Ko, Jo-han\*, Kang, Kyung-Mun\*, Seo, Tae-Beom\*\*

\*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University(johansko@gmail.com),

\*\*Dept. of Mechanical Eng., Inha University(seotb@inha.ac.kr)

### Abstract

---

The purpose of this study is to compare the different shapes of condenser of the direct contact heat transfer from the heat pipe condenser to the receiving water using CFD. The heat transfer from the working fluid of the heat pipe to receiving fluid flows through the manifold is one of the important part in evacuated solar collector system. The retrenchment of the thermal resistance between the heat pipe and the manifold could increase the thermal performances of the whole system. Recently, direct heat transfer from the heat pipe condenser wall to the receiving water was suggested and accompanied experiments were achieved. This experiment shows the better performances of the direct contact heat transfer analogically. Preceding calculations are carried out for the performance comparison: mesh dependence test, discretization method test and equation model test. with these preceding tests, 4 different shapes of condenser are compared and each case were set up for the same heat flux at the condenser wall. The calculation result shows that the efficiency of the extended surface condenser shape is 10% higher then the that of the others.

Keywords : 열성능(Thermal performance), 히트파이프(heat pipe), 응축부(condenser), 매니폴더(manifolder), 전산 유체역학(CFD)

---

### 기 호 설 명

$T_I$  : Inlet temperature [°C]  
 $T_O$  : Outlet temperature [°C]  
 $\dot{m}$  : Mass flow rate [kg/s]

$A_{condwall}$  : Condenser wall area [m<sup>2</sup>]  
 $C_p$  : Specific heat [KJ/kg · °C]  
 $\dot{q}$  : Heat transfer rate [W/m<sup>2</sup>]  
 $\eta$  : Efficiency [%]

## 1. 서 론

전세계적으로 화석 연료를 대체할 수 있는 대체에너지에 연구 개발에 대한 관심이 증대되고 있다. 대체 에너지원은 지열, 풍력, 조력 등이 될 수 있으나, 아직까지 가장 용이하게 접근할 수 있는 것은 태양열이라 할 수 있다. 태양열을 이용한 에너지 시스템들은 기존의 연료를 대체할 수 있어 매우 경쟁력이 있는 분야로 평가받고 있다.

태양열 발전은 집열 온도에 따라 저온용(100℃ 이하), 중온용(100~300℃), 고온용(300℃ 이상)으로 세분화된다.<sup>1)</sup>

주거생활에서 에너지소모가 가장 많은 것이 난방 및 급탕이다. 이 가운데 급탕에너지의 전부 또는 일부를 대체하기 위해 중·저온 태양열 발전이 급속히 이루어지고 있다.

태양열을 이용한 중·저온 발전에서는 히트파이프를 이용한 열전달 효과를 극대화하려는 노력이 진행중이다. 내부의 밀폐공간에서 순환하는 작동유체가 연속적으로 액체-증기간의 상변화를 수행할 때 동반하는 잠열을 이용한다는 점에서 큰 장점을 지닌다. 즉, 히트파이프는 열전달 효율을 향상시키는 것은 물론 장비 및 장치의 획기적인 소형화 및 경량화가 가능하다는 장점이 있다. 이것은 히트파이프가 작동에 별도의 동력원을 필요로 하지 않으며 그 자체가 어느 정도의 하중을 견딜 수 있는 구조물로서 역할을 할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 재래의 열전달 기기에 필요했던 부가적 중량과 부피를 감소시킬 수 있다는 사실에 기인한다.

히트파이프를 이용한 진공관형 태양열 집열장치의 성능을 결정하는 주요 요인중 하나는 히트파이프 응축부의 작동유체의 열을 매니폴더를 지나는 열매체로 얼마나 잘 이송도 록 하느냐 하는 것이다.

기존에 널리 사용되는 방식은 히트파이프 응축부와 매니폴더가 서로 분리된 모듈로 존재하였다. 이 때 응축부 내부의 작동유체에

서 매니폴더를 지나는 열매체로 열이 전달되는 과정에 커다란 접촉열저항으로 인한 손실이 있었다.

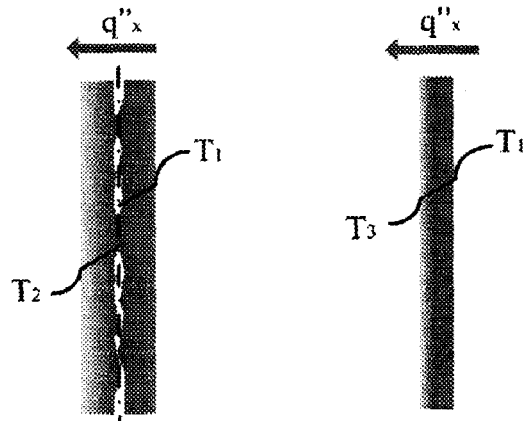


그림 1. metal to metal 접촉식 응축부와 직접 접촉식 응축부에서의 열전달

주홍진 등은 “태양열 집열기용 히트파이프 응축부 형상 변화에 따른 열성능 연구”에서 히트파이프 응축부와 매니폴더 사이의 metal to metal 열전달에서 나타나는 접촉 열저항을 줄이기 위한 방법으로 매니폴더를 지나는 열매체와 히트파이프의 응축부가 직접 접촉하는 형태의 “직관형 히트파이프”를 제안하였다.<sup>2)</sup>

주홍진 등의 논문에서 언급된 “직관형”이라는 단어는 기존의 “확관형” 응축부에 대비되는 단어로 사용되었기 때문에 본 논문에서는 “직관형”이라는 단어 대신에 “직접 접촉식”이라는 단어를 사용하고자 한다.

본 연구에서는 직접 접촉식 응축부를 이용한 히트파이프에서 응축부 형상을 달리하였을 때 응축부에서 매니폴더 내부의 열매체로 열전달 효율 변화를 CFD를 이용하여 비교하였다.

## 2. 직접 접촉식 응축부를 지닌 히트파이프.

본 연구에서 해석하고자 하는 직접 접촉식 응축부와 기존의 metal to metal 접촉식 응축부가 그림 1에 개략적으로 나타나 있다.

그림 2에서는 본 연구에서 비교한 직접 접촉식 응축부의 형상에 대해 나타내었다.

응축부형상은 좌측에서부터 순서대로, 다음과 같다.

- a) 실험 성능비교를 위한 비교 기준 형상 : 높이 10 cm, 직경 1cm, 두께 1mm.
- b) a)에 판형 핀을 세로로 부착
- c) a)에 나선선 모양의 핀을 부착
- d) b), c)와 동일한 넓이를 갖는 확장형 응축부에 대한 형상 : 두께 1mm.

비교기준이 되는 a)형상을 제외한 b), c), d)형상에서는 부착된 핀 면적과 확장된 응축부 표면을 계산하여 수열매체와의 접촉면적을 동일하게 하도록 하였다.

집열기의 효율은 흡수표면 전체에 걸친 일사량과 실제 열전달률의 비이며 태양열 집열기의 효율은 KS 기준에 의해 식(1) 과 같이 집열기 입구에서의 유체 온도, 주위 온도, 그리고 일사량으로 이루어진 종속변수로서 표시되어 진다.<sup>3),4)</sup>

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A_s I_T} = \frac{F_R [I_T(\alpha) - U_L(T_i - T_a)]}{I_T} = F_R(\alpha) - F_R U_L \left( \frac{T_i - T_a}{I_T} \right)$$

본 논문에서 응축부 매니폴더 사이의 효율은 응축부 벽면에서 공급된 총 열량과 수열매체가 받은 열량의 비로 다음과 같이 계산하였다.

$$\eta = \frac{dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_{condull} \times q}$$

### 2.1 수치해석기법

형상에 대한 모델링은 DesignModeler를 이용하였고, Gambit 버전 2.3.16과 Tgrid 버전

4.0.16을 이용하여 정렬격자와 비정렬격자가 혼합된 격자를 형성하였다. 열유체유동을 해석하기 위해서는 범용 전산유체 코드인 Fluent사의 Fluent 6.3.26 버전을 사용하였다.

유동장의 지배방정식은 UPWIND METHOD를 이용하여 공간차분을 하였으며 속도-압력의 연계는 SIMPLE 기법을 사용하였다. 정해진 유량 범위에서의 유속은 천이 영역 이하로 층류에 대해 정상상태로 해석하였고 연속방정식, 모멘텀방정식, 에너지방정식을 순차적으로 해석하여 수렴된 해를 얻는 segregated solver를 이용하였다.<sup>5)</sup>

### 2.2 매니폴더 및 응축부 모델링

해석의 기준이 되는 형상은 높이10cm \* 너비4cm의 직사각형 단면을 지닌 사각 관에 그림 2의 a) 형상이 5개가 10cm간격으로 있는 매니폴더의 수열매체가 지나는 유동장과 응축부의 고체 벽면이다.

수열매체가 첫 번째 응축부의 바깥쪽 면과 만나기전에 유동이 완전발달 되도록 하였고, 5개의 응축부를 모두 지난 후 출구로 부터의 영향을 받지 않도록 적절한 거리를 유지하였다.

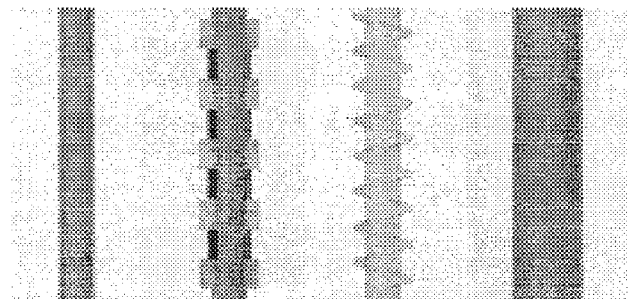


그림 2. 직접 접촉식 응축부 형상

응축부 재질은 STS304로 가정하여 물성치를 주었고 수열매체는 liquid water로 가정하였다.

국내에서 맑은 날 단위면적당 입사량은 평균 850W/m<sup>2</sup> 정도이며<sup>55)</sup>, 진공관형 태양열

집열기에서 작동유체가 입사된 태양복사에너지를 응축부로 전달하기까지의 효율은 일반적으로 0.78 이다.<sup>6)</sup>

따라서 응축부 내부 벽면에 모든 해석 케이스에 대해 동일하게  $600\text{W/m}^2$  의 heat flux를 주었으며, 매니폴더의 벽면부는 단열조건으로 하였다.

매니폴더와 응축부 형상에 대해 경사각은  $60^\circ$ 로, 유량은  $1.5\text{L/min}$ 으로 모든 케이스에 동일하게 적용 하였다.

### 3. 수치해석 결과

위의 조건을 바탕으로 해석한 결과는 다음과 같다.

#### 3.1 격자 의존도 평가

해석결과에 대한 격자 의존도를 평가하기 위하여 가장 간단한 a)형상에 대하여 격자 개수를 증가 시켜나가면서 해석 결과의 특정 값에 대한 수렴을 조사하였다.

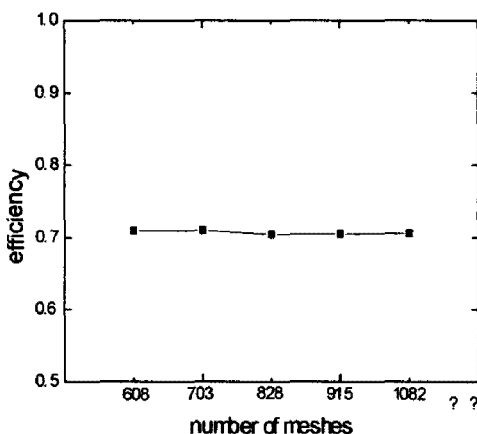


그림 3. 형상 a)에서 유량 $1.5\text{LPM}$ , width=4cm 일 때 격자 개수에 따른 효율변화

그림 3과 같이 2nd order upwind로 해석을 하였을 때, 격자 수가 가장 적은 608천개일 경우와 격자수를 1,082천개로 늘렸을 경우를 비교하면 상대 오차가 1% 이내 인 것을 확인할 수 있다. 따라서 형상 b), c), d)에 대해서

도 60만개 전후의 격자를 생성하고 2nd order upwind로 해석을 하면 상대적으로 빠른 수렴 시간에 비해 정확한 결과를 기대할 수 있다.

#### 3.2 수치해석 모델 비교

그림 4는 a)형상을 기준으로 하였을 때 수치해석에 적용된 차분기법에 따른 해석 결과를 비교한 것으로, 608천개의 격자에 대해서 1st order upwind와 2nd order upwind로 계산을 한 결과, 1082천개의 격자에 대해 2nd order upwind로 계산을 한 결과와 다시 608천개의 격자에 대해 3rd order MUSCL로 계산을 한 결과를 나타내었다.

1st order 인 경우가 2nd order 이 경우보다 약 20% 정도 과도한 예측을 하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 2nd order upwind이상의 차분법으로 계산을 한 결과는 격자 개수나, 사용한 차분법에 무관하게 상대오차 1% 이내로 거의 비슷하게 나타났다.

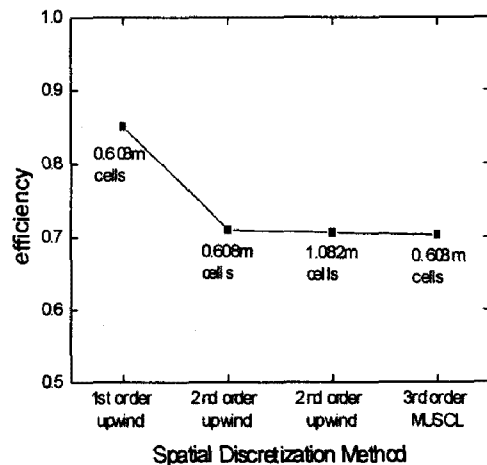


그림 4. 형상 a)에서 공간 차분법에 따른 효율변화 유량  $1.5\text{LPM}$ , width=4cm

#### 3.2 점성 모델에 따른 효율 변화

형상 b)와 c)의 경우 핀 주변에서 국부적으로 발생 가능한 요동의 영향을 잡아내기 위해서는 난류모델의 사용이 요구된다. 그림에서는 형상 a)에 대해 점성 모델을 바꾸어 해

석하였을 때의 효율변화를 나타내었다.

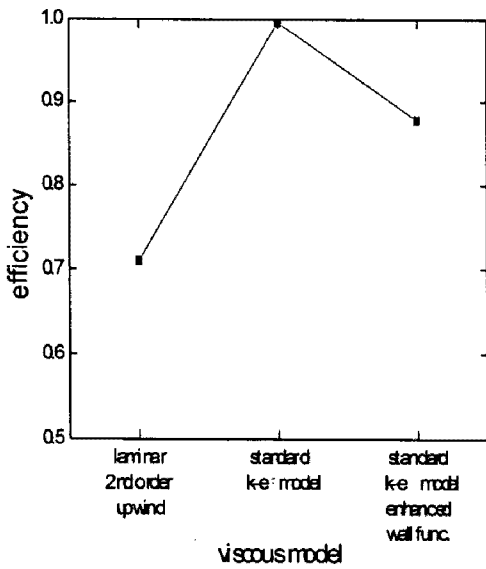


그림 5. 형상 a)에서 점성모델에 따른 효율변화  
유량 1.5LPM, width=4cm, 0.608m cells

그림에서와 같이 난류모델을 도입하였을 때의 효율이 층류의 경우보다 월등히 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 turbulent kinetic energy와 turbulent dissipation의 영향과, 벽면 근처의 boundary layer에서의 계산을 위해 k-ε model에서 사용하는 wall function으로 인해 실제보다 열전달 효과가 크게 계산되기 때문이다.

### 3.3 형상 변화에 따른 효율 변화

이상의 내용을 바탕으로 비교 대상인 형상 a), b), c), d)에 대하여 60만개 전후의 격자, 2nd order 이상의 공간차분법 그리고 난류모델 비교에 있어서는 standard k-ε model with enhanced wall function을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

각 형상에 따른 격자 수와 수치해석 모델은 표 1에 나타나 있다.

표 1. 형상별 격자 수와 격자 모양

형상	격자 수(천개) / 격자 모양
a)	608 / hexahedral
b)	1,533 / polyhedral
c)	2,481 / polyhedral
d)	541 / hexahedral

이상과 같이 해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

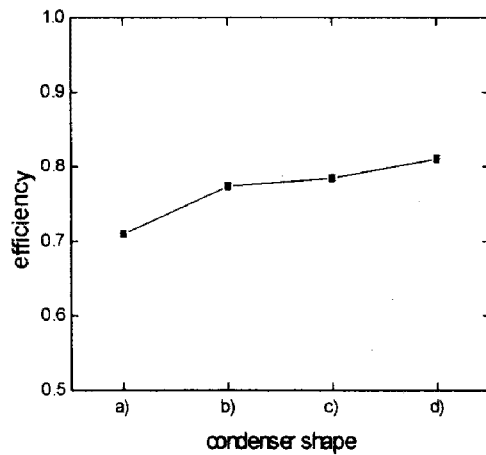


그림 6. 층류 모델을 이용하여 해석 하였을 때 형상변화에 따른 효율변화. 유량 1.5LPM, width=4cm.

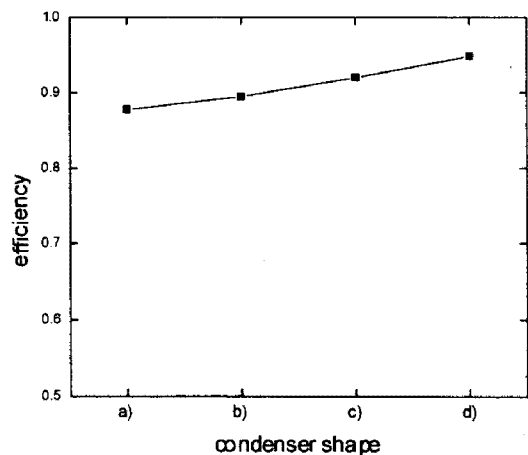


그림 7. standard k-ε with enhanced wall function model을 이용하여 해석을 하였을 때의 효율 변화. 유량 1.5LPM, width=4cm.

표 2. 형상별 점성모델에 대한 효율값

형상	층류모델 효율	k-ε wall func. 모델 효율
a)	0.70963	0.87734
b)	0.77316	0.89456
c)	0.78422	0.92046
d)	0.81044	0.94830

즉, 형상 a)에 비해 응축부 표면을 확장시킨 b), c), d)형상에서의 효율이 층류모델을 이용한 계산에서는 7~10%, 난류모델을 이용한 경우에는 2~7% 향상됨을 확인하였다.

핀을 부착한 b), c)형상에서 핀 주변의 요동을 고려하여 난류모델인 k-ε 모델을 사용하였고, standard k-ε 모델에서는 벽면근처의 열전달이 실제보다 과도하게 나타나므로 enhanced wall function을 이용하였다.

표면의 넓이가 동일한 b), c), d) 형상에서는 직관형 응축부에 핀을 부착한 b), c)형상보다는 확관형 응축부의 형상인 d)가 효율이 2~3%높게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 매니폴더 내부에서 히트파이프의 응축부와 수열매체 사이에서 일어나는 열전달을 형상을 달리하면서 해석을 수행하였다. 해석에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 해석 형상에 대해, 격자수 약 60만개 이상, 공간 차분법 2nd order upwind 이상의 고차 차분기법에 대하여 해석한 결과는 계산결과 값이 거의 일치하였다.
- (2) 점성모델을 변화시켜 효율해석을 한 결과, 층류모델을 사용하였을 경우보다 난류모델을 이용하여 계산을 하였을 때 효율이 월등히 높게 계산되었다.
- (3) 응축부의 형상을 바꾸어 가면서 해석을 수행한 결과, 층류모델과 난류모델을 이용하여 해석한 두가지 경우 모두, 수열매체와 접촉면적이 동일하다면 핀이 달린 응축부 형상보다는 매끈한 원통형 모양의 확관형 응축부가 가장 좋은 효율을 보이

는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 응축부 내부의 유동현상을 무시하고 응축부 전체 벽면에서 동일한 열량이 나오는 것으로 가정하였다. 따라서 직관형인 형상 b), c)와 확관형이 d)형상에 대해 100% 완전한 비교가 이루어 졌다고 생각하기 어렵다. 이에 대한 수정 및 보완적업이 추후 진행될 예정이다. 또한 형상별 수열매체의 최적 유량과 최적 작동온도에 대한 해석이 추가적으로 이루어질 것이다.

#### 참고 문헌

1. D Mills, Advances in Solar Thermal Electricity Technology, Solar Energy, Vol. 76, pp. 19-31, 2004
2. 주홍진, 김종보, 곽희열. 태양열 집열기용 히트파이프 응축부 형상 변화에 따른 열성능 연구. 한국태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집.
3. 정원복, 정의국, 장혁, 부준홍, 곽희열. 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프 개발 연구. 한국태양에너지학회 추계학술발표대회논문집.
4. 부준홍, 정원복, 곽희열. 확관 응축부를 갖는 진공관형 태양열 집열기용 히트파이프 성능 비교 연구. 한국태양에너지학회 논문집 Vol. 22, No. 4, 2002.
5. Fluent 6.3.26 Users Guide. Fluent Inc.
6. 최은용, 김용, 서태범. 이중진공관형 태양열 집열기의 집열관 내부형상과 운전조건이 성능변화에 미치는 영향. 한국태양에너지학회 논문집. Vol. 25, No.1 2005