

## 진공관형 집열기 히트파이프 접촉방식에 따른 집열성능 비교

윤지훈\*, 정인국\*, 이종섭\*\*, 정경택\*\*\*, 서정세#

### Comparison of Collecting Performance according to Contact Types of Heatpipe in Vacuum Tube Type Solar Collector

Ji-Hun Yun\*, In-Guk Jeong\*, Chung-Seob Yi\*\*, Kyung-Teak Chung\*\*\*, Jeong-Se Suh#

(Received 4 October 2011; received in revised form 18 November 2011; accepted 6 December 2011)

#### ABSTRACT

In this study, it was compared collecting performance according to contact types between heatpipe and manifold of vacuum tube type solar collector. Between two types, direct contact type is better in collecting performance. On the other hand, Indirect type have advantage in maintenance. In the result of numerical analysis, As the temperature of heatpipe and flow rate of working fluid increased, difference of outlet mean temperature of two types became large. Also, it could be confirmed, as contact resistance between heatpipe and copper tube in indirect type increased, the difference increased too. Useful data in selection and design in vacuum tube type solar collector were proposed by the results of numerical analysis.

**Key Words** : Solar Collector(집열기), Heatpipe(히트파이프), Manifold(분기관), Contact type(접촉방식), Contact Resistance(접촉저항)

#### 1. 서 론

에너지 수요의 급증은 주요에너지 공급원인 화석에너지의 고갈 위기와 화석에너지의 사용에 따른 환경오염의 문제를 야기하고 있으며, 환경보존과 에너지원의 효율적인 이용을 위해 기존의 화석에너지 시스템을 환경 친화적인 에너지 활용 시스템으로 대체하고 전환하는 다양한 방법들이 시도되고 있다. 이러한 관점에서 청정한 무공해 에너지이며 양에 있어서도

무한한 태양열의 활용 및 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일부는 이미 실용화되어 사용되고 있다. 그러나 태양열에너지는 비교적 에너지 밀도가 낮고 기상조건에 따른 공급에너지의 불균일성으로 사용에 있어서 제약조건을 가지고 있기 때문에 그 사용조건에 적합한 효율적인 집열시스템의 개발이 필요하다<sup>[1]</sup>.

한편, 산업공정열 분야에 주로 적용되는 진공관형 집열기의 경우 태양으로부터의 열을 히트파이프를 이용하여 작동유체에 전달하는 구조를 가지고 있고, 이러한 집열시스템의 개발에 핵심기술 중에 하나가 분기관(manifold) 설계기술이라고 할 수 있다. 작동유체에 열을 전달하는 과정에서 최대 열저항이 분기관에서 나타나는 것이다. 따라서, 효과적인 분기관 열교환기 설계는 집열기의 열효율과 직결되는 매우 중요한

\* 경상대학교 대학원

\*\* 경상대학교 BK21(첨단기계항공)

\*\*\* 한국 승강기대학

# 교신저자 : 경상대학교 기계항공공학부, ERI(공학연구원)

E-mail : jssuh@gnu.ac.kr

핵심기술이다.

이러한 진공관형 집열기는 열을 효과적으로 전달하기 위하여 히트파이프가 설치되는데, 히트파이프의 접촉방식에 따라 직접식(Direct contact type)과 간접식(Indirect contact type)으로 나눌 수 있다. 직접식은 히트파이프가 작동유체와 직접적으로 열교환을 하는 구조이며 집열효율이 높은 장점을 가지고 있다. 반면 간접식의 경우 히트파이프가 분기관 내부의 구리 격벽에 설치되고, 구리 격벽의 전도를 거쳐 작동유체로 열이 전달되어 직접식보다 집열효율이 떨어지지만 작동유체의 누수 방지나 유지·보수의 면에 있어서 상당히 유리하다.

본 연구에서는 진공관형 집열기의 히트파이프 접촉 방식에 따른 집열성능을 CFD 해석으로 분석하여 효율적인 집열시스템 개발에 있어 유용한 설계 데이터를 확보하고자 하였다.



Fig. 1 Vacuum tube type solar collector



Fig. 2 Manifold in vacuum tube type solar collector

## 2. 해석 모델 및 방법

### 2.1 해석모델

진공관형 집열기의 분기관은 Fig. 3과 같이 작동유체가 흐르는 헤드부에 분기관이 있고, 이 분기관에 히트파이프가 설치되는 구조를 가지고 있다. 여기서 분기관은 히트파이프와 작동유체 사이의 전열면을 크게 하여 열전달 효율을 극대화하기 위한 것이다.

본 해석에 적용된 분기관은 16개의 분기관에 히트파이프가 설치되며, 알루미늄 재질의 외벽 내를 작동유체인 물이 흐르는 방식이다. 외부는 단열되어 있으며, 히트파이프의 재질은 구리(비열: 386 J/kg·K, 열전도율: 398W/m·K)이다.

Fig. 3에 나타난 직접식 분기관은 격벽이 없이 히트파이프가 작동유체와 직접적으로 접촉하여 열교환이 일어나는 구조이다.

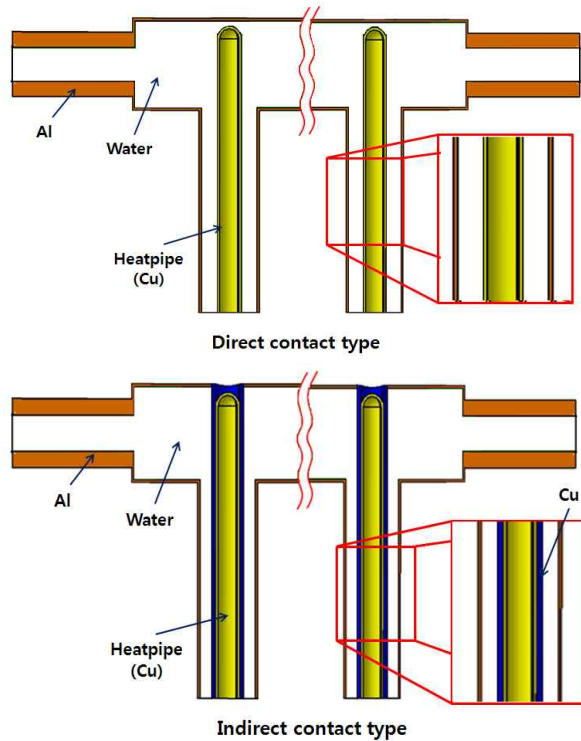


Fig. 3 Inner structure of direct and indirect contact type manifold

**Table 1 Measurement of the principal part**

Principal part	Dimension
Width of collector (lineal distance from inlet to outlet)	1080mm
Diameter of inlet	13mm
Diameter of outlet	13mm
Diameter of flow path in header	33mm
Length of manifold	85mm
Diameter of heatpipe	10mm
Thickness of heat pipe	2mm
Thickness of copper tube	2mm

이 방식은 히트파이프를 통하여 전달된 열이 작동 유체와 직접적으로 열교환을 하기 때문에 집열성능이 우수하지만, 온도변화에 따른 열변형에 의하여 히트파이프와 외부벽면 사이에 틈이 생겨 작동유체가 누설될 가능성이 있다.

반면 간접식 분기관은 내부에 구리격벽이 설치되고, 구리격벽 안으로 히트파이프가 들어가는 구조이다. 분기관과 구리격벽은 일체형이기 때문에 누수방지에 유리하지만, 구리격벽의 열저항에 의하여 집열성능이 떨어진다.

특히 직접식에서 히트파이프와 구리 튜브 사이에 접촉 열저항이 존재하고, 이 부분이 오염되어 접촉열저항이 커질 경우 집열효율은 더욱 떨어질 것이다. 또한 구리격벽의 두께는 열전달에 큰 영향을 줄 것이라 판단된다. 본 실험에서는 구리 격벽의 두께를 2mm로 설정하였고 그 외에 분기관의 주요부 치수를 Table 1에 나타내었다.

## 2.2 해석방법

히트파이프 접촉방식에 따른 집열성능을 해석하기 위하여 상용 Solver인 Star-CCM+를 사용하였다. 계산 격자는 다면체 격자를 사용하여 생성한 결과 약 70만 개의 격자가 생성되었다. 지배방정식은 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하였으며, 연속 방정식, 에너지 방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식 그리고 난류운동량 소산 방정식이 함께 계산되었다.

Table 2는 해석에 적용된 경계조건을 나타낸 것이다. 접촉저항의 경우 진공계면에서 접촉압력이 100kN/m<sup>2</sup>

**Table 2 Boundary conditions**

Ambient temp.(°C)		20
Inflow	Temp.(°C)	20
	Flow rate on inlet(kg/s)	0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005
Temp. of heatpipe(°C)		60, 70, 80, 90, 100
Pressure on outlet		Atmospheric pressure
Contact resistance (m <sup>2</sup> ·K/W)		0.001, 0.0015, 0.002, 0.0025, 0.003

일 때 구리 소재간의 접촉면에서의 접촉저항을 적용한 것이다<sup>[2]</sup>. 변수로는 Table 2와 같이 유입유량, 히트파이프 온도, 접촉저항을 설정하였고, 변수들의 변화에 따라 각 분기관 출구 평균온도를 이용하여 집열성능을 비교하였다.

## 3. 해석 결과 및 토의

본 연구에서는 히트파이프 접촉방식에 따라 직접식과 간접식으로 분류하고, 여러 가지 작동환경에서 두 가지 방식의 집열성능 차이를 비교하고자 하였다. 또한 집열성능을 나타내는 지표로 분기관의 출구 평균 온도를 이용하였다.

### 3.1 분기관 내부 온도분포

유입유량 0.003kg/s, 히트파이프 온도 80°C, 간접식에서의 접촉저항 0.002m<sup>2</sup>·K/W인 경우 접촉방식에 따른 분기관 내부 열유동 해석을 수행한 결과 Fig. 3과 같은 온도분포를 확인할 수 있었다.

직접식의 경우 히트파이프에서 발생하는 열이 거의 손실없이 물로 전달되었다. 헤드부분에는 저온으로 유입되는 물에 의해 온도가 높지 않지만 분기관부에서는 히트파이프와 거의 동일한 온도분포를 나타내었다. 반면 직접식의 경우 히트파이프에서 발생하는 열이 물로 충분히 전달되지 못하는 것을 확인할 수 있다. 특히 히트파이프와 구리격벽의 온도차이가 큰 것으로 보아 접촉저항에 의한 열손실이 큰 것으로 판단된다.

또한 두 경우 모두 분기관 부분에 열이 적체되어

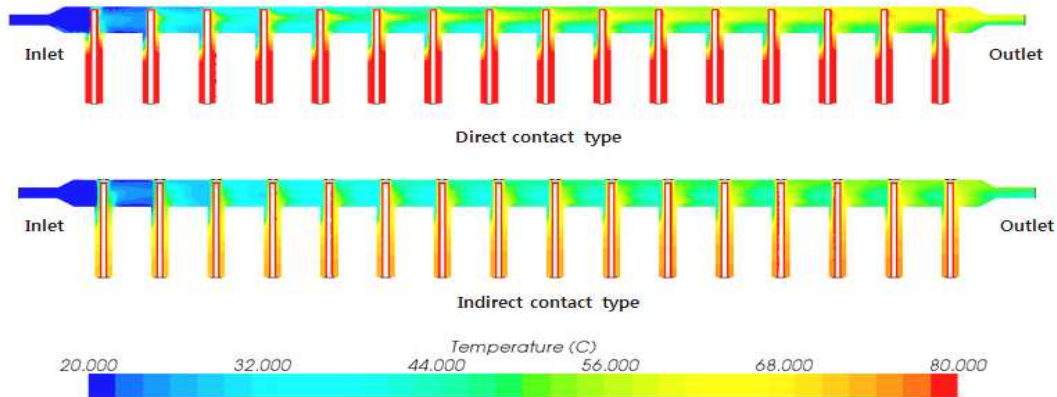


Fig. 4 Temperature distributions in each type of manifolds(inlet flow rate: 0.003kg/s, temp. of heatpipe: 80℃, contact resistance: 0.002m<sup>2</sup> · K/W)

출구쪽으로 나가지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 전 열면적을 넓히기 위하여 분기관을 설치하였지만 이 부분에 열이 적체된 것이다. 만약 헤드부분으로 흐르는 유동을 발생시켜 열이 이동한다면 집열효율이 훨씬 증가할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 입구로부터 떨어진 거리에 따른 단면 평균 온도이며, 이는 분기관이 없는 헤드부의 단면 평균 온도를 의미한다. 그림을 통하여 입구에서는 20℃로 같았던 온도가 히트파이프를 거치면서 직접식이 간접식에 비하여 크게 증가하여 출구에서는 약 10℃ 정도 차이로 직접식의 집열효율이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

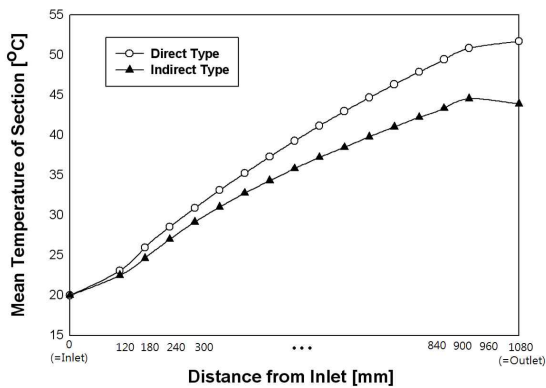


Fig. 5 Comparison of mean temperature on cross section according to distance from inlet

특히 마지막 히트파이프를 지난 후에도 직접식의 경우 온도가 상승하였지만 직접식의 경우 오히려 온도가 감소하는 현상을 확인할 수 있었다.

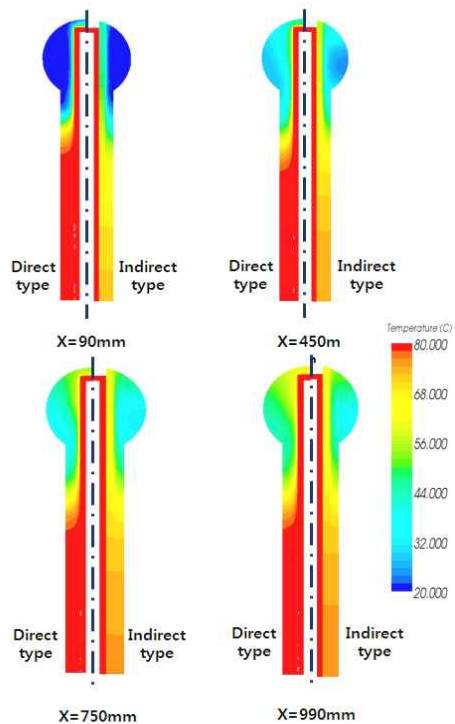


Fig. 6 Temperature distributions on section of header including heatpipe according to distance from inlet(X)

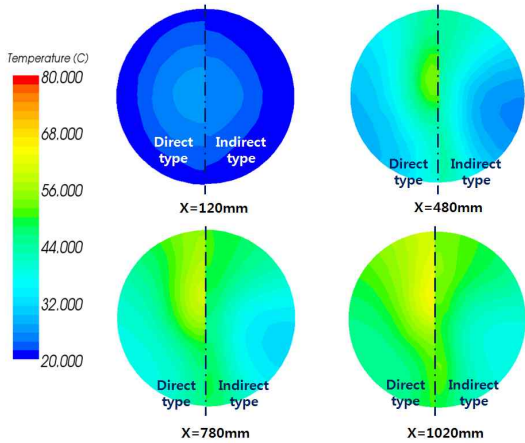


Fig. 7 Temperature distributions on section of header without heatpipe according to distance from inlet(X)

Fig. 6과 Fig. 7은 입구로부터의 거리에 따라 각각 히트파이프를 포함하고 있는 헤드부와 히트파이프가 없는 헤드부의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 유체의 흐름이 상대적으로 적은 분기관 부분에서는 높은 온도분포를 보였지만 유체의 흐름이 많은 헤드부분에는 상대적으로 낮은 온도분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 헤드부의 외곽보다는 중심부의 온도가 높은 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 유입유량에 따른 출구 평균온도

Fig. 8은 히트파이프 온도가 80℃, 간접식에서의 접촉저항이 0.002m<sup>2</sup>·K/W인 상태에서 유입유량을 0.001kg/s에서 0.005kg/s까지 변화시켰을 때, 각 접촉방식의 분기관 출구 평균온도를 비교한 것이다. 전체적으로 유입유량이 커질수록 열용량이 커져서 출구 평균온도는 감소하는 경향을 보였다.

유입유량이 0.001kg/s일 때 직접식과 간접식의 출구 평균온도는 각각 65℃와 60℃ 정도로 약 5℃ 차이를 보이던 것이 유입유량이 0.005kg/s로 증가하면 각각 48℃와 38℃ 정도로 약 10℃차이를 보였다. 즉, 유입유량이 증가할수록 직접식과 간접식의 출구 평균온도차가 커진 것이다.

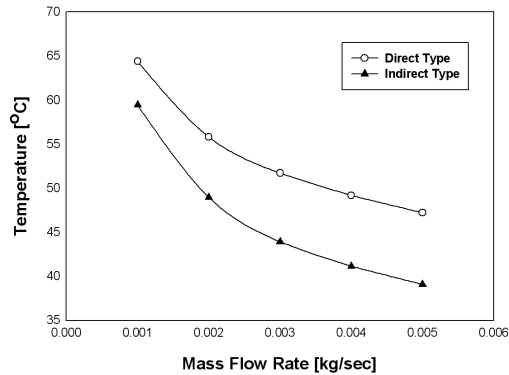


Fig. 8 Comparison of mean temperature on outlet according to inlet mass flow rate

따라서 유지·보수에 유리한 간접식 접촉방식의 집열기를 설계하고자 한다면 작동유체의 유량을 낮게 할수록 직접식과의 집열성능 차이를 줄일수 있을 것이라 판단된다.

### 3.3 히트파이프 온도에 따른 출구 평균온도

태양으로부터 흡수된 열은 히트파이프를 통하여 효과적으로 작동유체로 전달된다. 따라서 본 연구에서는 발열조건을 히트파이프 온도로 설정하였고, 히트파이프의 온도를 60℃에서부터 100℃까지 10℃ 간격으로 변화시켜 해석을 수행하였다. 이 때 유입유량은 0.003kg/s, 간접식에서의 접촉저항은 0.002m<sup>2</sup>·K/W로 설정하였다.

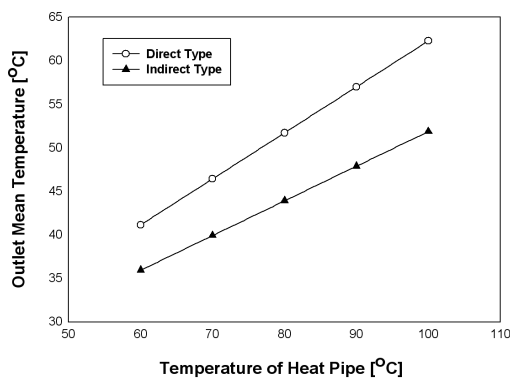


Fig. 9 Comparison of mean temperature on outlet according to temperature on heatpipe

Fig. 9는 히트파이프 온도변화에 따른 분기관 출구 평균온도를 나타낸 것이다. 히트파이프의 온도가 높아질수록 분기관 출구 평균온도도 선형적으로 증가하였다. 히트파이프의 온도가 60℃일 때 출구 평균온도는 직접식과 간접식이 각각 41℃, 35℃ 정도인 것으로 나타났고, 히트파이프의 온도가 100℃일 때는 각각 63℃, 51℃로 나타났다. 즉, 히트파이프의 온도가 60℃일 때 6℃ 정도의 출구 평균온도 차이를 보이던 것이 히트파이프 온도가 100℃로 증가하면서 그 차이도 12℃ 정도로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 간접식 접촉방식의 집열기를 설계하고자 한다면 히트파이프의 온도가 낮을수록 직접식과의 집열성능 차이를 줄일 수 있을 것이라 판단된다.

### 3.4 접촉저항에 따른 출구 평균온도

간접식 접촉방식의 경우 구리 튜브와 히트파이프 사이에서 불가피하게 접촉저항이 발생하고, 이는 직접식과의 집열성능 차이에 결정적인 영향을 주는 인자라 할 수 있다. 따라서 간접식 접촉방식의 분기관을 설계하고자 한다면 접촉저항에 따른 집열성능 변화에 대한 분석이 반드시 수행되어야 한다.

Fig. 10은 유입유량이 0.003kg/s이고 히트파이프 온도가 80℃인 경우 접촉저항의 변화에 따른 간접식의 분기관 출구 평균온도를 나타낸 것이다. 동일한 조건에서 직접식의 경우 약 57℃의 출구 평균온도를 보였다.

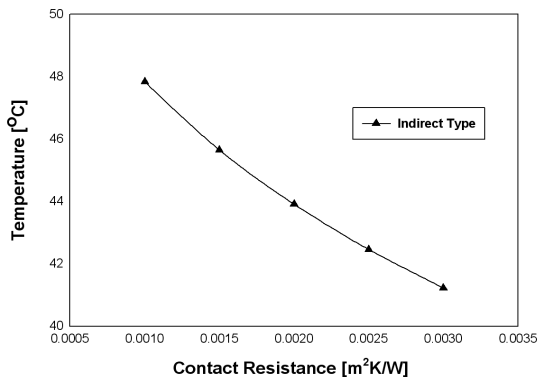


Fig. 10 Change of mean temperature on outlet according to contact resistance in indirect contact type

그림을 통하여 확인할 수 있듯이 구리 튜브와 히트파이프 사이의 접촉저항이 0.001m<sup>2</sup>·K/W에서 0.003m<sup>2</sup>·K/W로 증가할수록 간접식 분기관 출구 평균온도는 약 7℃ 정도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 동일한 조건에서 직접식의 경우 출구 평균온도가 약 57℃임을 감안하면 적게는 9℃에서 많게는 16℃의 온도 차이를 나타내었다. 따라서 접촉저항을 줄이는 것이 직접식과의 집열성능 차이를 줄이는 데 유리할 것이라 판단된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 진공관형 집열기 분기관의 히트파이프 접촉방식에 따른 집열성능을 수치해석적 방법으로 비교하였다. 그 결과, 분기관으로의 유입유량이 낮고, 히트파이프 온도가 낮을수록 직접식과 간접식 분기관의 출구 평균온도 차이가 적을 것으로 예상되었다. 또한 간접식의 구리 튜브와 히트파이프 사이에 존재하는 접촉저항을 줄이는 것이 직접식과의 집열성능 차이를 줄이는데 유리한 것을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) Suh, J. S., Yi, C. S., Yoon, J. H., "Analysis of Thermal Performance of Solar Hot-Water and Heating System with Baffle Storage Tank", Journal of the SAREK, Vol. 22, No. 11, pp. 805-811, 2010.
- 2) Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, "Introduction to Heat Transfer, Fifth Edition", Wiley, p. 113, 2007.
- 3) Park, Y. H., Jung, E. G., Boo, J. H., "A Numerical Study on the Heat Transfer Characteristics of a Solar Thermal Receiver with High-temperature Heat Pipes", Proceeding of the KSME 2007 Fall Annual Meeting, pp. 71-76, 2007.