

## 반사경 배치 및 흡수기 형상에 따른 접시형 태양열 집열기의 열손실 해석

서 주 현<sup>†</sup>, 마 대 성, 김 용, 강 용 혁\*, 서 태 범\*\*

인하대학교 대학원 기계공학과, \*한국에너지기술연구원 태양열 수력연구센터, \*\*인하대학교 기계공학부

### Analysis of Heat Loss with Mirror Array and Receiver Shapes on the Dish Solar Collector

Joo-Hyun Seo<sup>†</sup>, Dae-Sung Ma, Yong Kim, Yong-Heack Kang\*, Tae-Beom Seo\*\*

*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

*\*Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea*

*\*\*Dept. of Mechanical Eng., Inha University, Incheon 402-751, Korea*

*(Received May 10, 2007; revision received November 26, 2007)*

**ABSTRACT:** The radiative heat loss from a receiver of a dish solar collector is numerically investigated. The dish solar collector considered in this paper consists of a receiver and multi-faceted mirrors. In order to investigate the performance comparison of dish solar collectors, six different mirror arrays and four different receivers are considered. A parabolic-shaped perfect mirror of which diameter is 1.40 m is considered as the reference for the mirror arrays. The other mirror arrays which consist of twelve identical parabolic-shaped mirror facets of which diameter are 0.405 m are suggested for comparison. Their reflecting areas, which are 1.545 m<sup>2</sup>, are the same. Four different receiver shapes are a conical, a dome, a cylindrical, and a unicorn type. The radiative properties of the mirror surfaces and the receiver surfaces may vary the thermal performance of the dish solar collector so that various surface properties are considered. In order to calculate the radiative heat loss in the receiver, two kinds of methods are used. The Net Radiation Method that is based on the radiation heat balance on the surface is used to calculate the radiation heat transfer rate from the inside surface of the receiver to the environment. The Monte-Carlo Method that is the statistical approach is adopted to predict the radiation heat transfer rate from the reflector to the receiver. The collector efficiency is defined as the results of the optical efficiency and the receiver efficiency. Based on the calculation, the unicorn type has the best performance in receiver shapes and the STAR has the best performance in mirror arrays except the perfect mirror.

**Key words:** Dish solar collector(접시형 태양열 집열기), Mirror array(반사경 배치), Receiver shape (흡수기 형상), Radiative property(복사 물성치)

---

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-32-874-7327; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: senseseo@hotmail.com

## 기 호 설 명

$A_r$	: 반사경의 면적 [ $m^2$ ]
$E_{bj}$	: j 면의 흑체 방사량 [ $W/m^2$ ]
$F_{i-j}$	: i 면과 j 면의 view factor
$I$	: 복사 강도 [ $W/m^2$ ]
$N$	: 광자의 개수
$P_a$	: 흡수기 개구부로 들어오는 태양 복사량 [W]
$P_{loss}$	: 흡수기의 모든 손실량 [W]
$P_{mirror}$	: 전체 반사경으로 들어오는 태양 복사량 [W]
$Q_{RL}$	: 복사 열손실 [W]
$Q_{IN}$	: 흡수기내의 복사 열손실 [W]
$q$	: 열유속 [ $W/m^2$ ]

## 그리스 문자

$\delta_{ij}$	: 크로네커 델타
$\epsilon_j$	: j 면의 표면 방사율
$\rho$	: 반사율

## 1. 서 론

한국은 미래에 사용될 대체에너지로 석유, 석탄, 원자력, 천연가스가 아닌 에너지로 11개 분야를 지정(대체에너지개발 및 이용·보급촉진법 제2조)하였으며 이를 세분하여 보면 재생에너지(8개분야: 태양열, 태양광발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지), 신에너지(3개분야: 연료전지, 석탄액화·가스화, 수소에너지)로 구분하고 있다.<sup>(1)</sup>

이 중 태양열을 이용한 발전시스템은 화석연료를 대체할 신재생에너지 중에서도 가장 가격 경쟁력이 있는 분야중의 하나로 기대되고 있다. 태양열 발전을 하기 위해서는 고집광 시스템이 필수적이며, 이러한 고집광 시스템 중의 하나가 접시형 태양열 집열기이다.<sup>(2)</sup> 접시형 태양열 집열기는 포물면을 갖는 접시형 반사경과 반사경의 초점에 위치와 흡수기로 구성되어 있다. 이러한 접시형 태양열 집열기는 태양 추적 장치를 부착하여 1000℃ 이상의 고온을 얻어 신소재 합성에 사용하거나 Stirling Engine(내부 가스의 팽창, 수축으로 움직이는 엔진)을 가동하여 태양열 발전을 할 수 있다. 미국 California의 Kramer Junction에는 Luz사가 세운 태양열 발전소가 집광식 집열

기로 전 세계의 태양 에너지에서 생산한 전기의 90% 이상인 350 MW를 발전한다.<sup>(3)</sup>

이러한 포물면 모양의 접시형 태양열 집열기는 반사경 배치 및 흡수기 형상에 따라 집광효율 및 열손실량이 크게 변화하기 때문에 접시형 태양열 집열기 설계의 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 접시형 태양열 집열기의 반사경 배치 및 흡수기 형상에 따른 시스템의 열효율 변화를 분석하고자 한다. 이를 위해 6가지 반사경 배치, 4가지의 흡수기 형상을 제안하였다. 앞서 언급한 것처럼 접시형 태양열 집열기의 작동온도는 1000℃ 이상이지만, 실제 흡수기 내부의 표면온도는 전체 흡수기의 표면온도를 평균 내어서 구하기 때문에 흡수기 내부 표면온도를 300℃, 400℃, 500℃로 변화를 주었다. 또한, 표면 흡수율을 0.85로 정하여 열손실을 예측하였다. 계산 결과로부터 각각의 경우에 대한 집열기의 효율을 분석하며 성능이 가장 우수한 반사경 배치 및 흡수기 형상 조합을 찾고자 한다.

## 2. 열손실 해석 모델링

## 2.1 해석 모델

계산을 수행하기에 앞서 기준이 되는 반사경 배치는 단일접시(perfect mirror)<sup>(4)</sup>로 정하였다. Fig. 1은 단일접시로 구성된 접시형 태양열 집열기를 보여주고 있다. 개구부 직경은 1.40m이고, 반사경의 표면은 포물면이다. 흡수기의 위치는 반사경의 초점 위치인 1.5m 지점에 위치한다.

반사경 배치에 따른 접시형 태양열 집열기의 성능 변화를 알아보기 위해 3D 모델링 프로그램인 Catia(Dassault systems)를 사용하여 Fig. 2와 같이 전체 개구부 면적이 단일 접시와 동일한 5

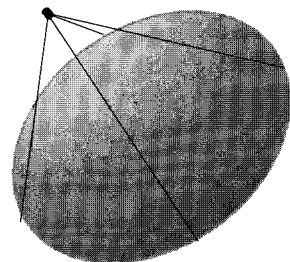


Fig. 1 Mirror array(Case I : Perfect mirror).<sup>(5)</sup>

가지의 조각거울 반사경 배치를 모델링하였다. 각각의 조각거울 반사경 배치는 12개의 동일한 거울을 사용하였고, 반사경의 표면은 포물면이 되도록 하였다.<sup>(5)</sup> 각 반사경의 직경은 0.405 m이고, 초점거리는 1.5 m이다. 흡수기의 상대적 위치는 모두 반사경의 초점거리인 1.5 m 지점에 위치한다.

흡수기 형상 변화 및 흡수율 변화에 따른 접시형 태양열 집열기의 성능 변화도 알아보기 위해, Fig. 3과 같은 4가지 모양을 제안하였다. 각 흡수기 모두 폭이 160 mm이고, 높이가 170 mm로 동일하다. 또한 각 흡수기의 개구부(aperture) 직경은 0.15 m로 동일하다. 또한 인천 지역의 한해 평균 일사량인 769.9 W/m<sup>2</sup>인 조건을 사용하였다.

2.2 광학 모델

접시형 태양열 집열기의 복사 열전달을 모델링하기 위해 Monte Carlo Method<sup>(4)</sup>를 기반으로 하는 광학 해석프로그램인 TracePro를 사용하였다. 또한 Monte Carlo Method<sup>(4)</sup>란 우연현상의 경과를, 난수를 써서 수치적·모형적으로 실현시켜 그것을 관찰함으로써 문제의 근사해를 얻는 방법을 말한다. 본 연구에서는 통계적인 방법으로 실제 복사 현상을 시뮬레이션함으로써 확률적으로 복

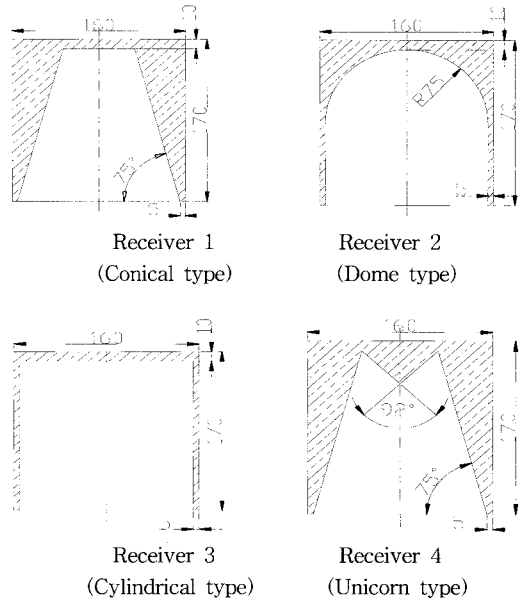


Fig. 3 Receiver shapes(Receiver 1~4).<sup>(5)</sup>

사 열전달 값을 구하였다. 초기에 광원에서 난수(Random number)를 생성시켜 반사경에 균일한 광자다발(Photon bundle)을 분포하도록 하였다. 반사경은 광자다발을 정반사(Specular reflector) 시키므로 반사경의 형상에 따라 반사된 광자다발의 진행방향을 알 수 있다. 반사경의 복사 물성치를 고려하기 위해 반사율(Total hemispherical reflectivity)은 0.9로 정하였으며, 계산을 통해 반사경으로 입사하는 태양복사량과 흡수기 개구부로 들어오는 집광된 태양복사량을 구할 수 있었다. 광학적 효율의 정의는 식(1)과 같다.<sup>(6)</sup>

$$Optical\ efficiency = \frac{P_a}{P_{mirror}} \quad (1)$$

$P_a$ 는 흡수기 개구부로 들어오는 집광된 태양복사량이며,  $P_{mirror}$ 는 전체 반사경으로 들어오는 태양복사량이다.

2.3 열전달 모델 : 표면 반사에 의한 복사 열손실

반사경에 의해 집광된 태양복사는 흡수기 입구로 들어와 내부 표면에 부딪힌 후 흡수 또는 반사된다. 이러한 Ray tracing은 광자다발이 흡수

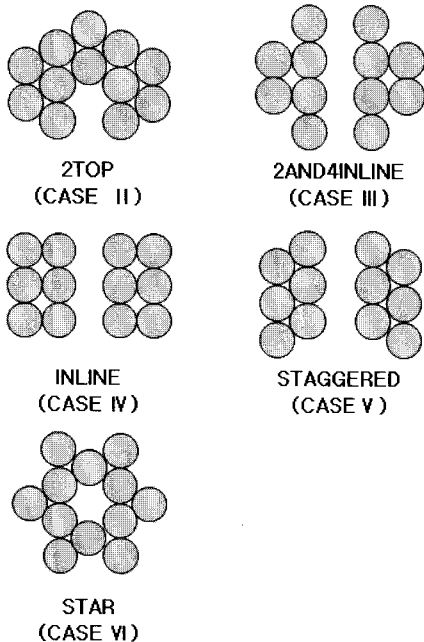


Fig. 2 Mirror arrays(Case II ~ VI).<sup>(5)</sup>

기 표면에 흡수되거나 흡수기 개구부로 빠져나갈 때까지 반복된다. 이러한 과정을 충분히 많은 광자다발을 이용하여 반복 계산함으로써, 확률적으로 실제와 근사한 값을 구할 수 있다. 이 때  $N$ 개의 태양광이 흡수기 안으로 들어와서 이 가운데 흡수기 내부 표면에 흡수된 개수를  $N_a$ 라고 하면, 흡수기 내부 표면의 반사에 의한 복사 손실은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$Q_{RL} = Q_{IN} \frac{N - N_a}{N} \quad (2)$$

흡수기 내부 표면의 흡수율(Total hemispherical absorptivity)은 0.85인 경우를 고려하였으며, 식(2)를 통해 흡수기 내부 표면 반사로 인한 복사 손실을 계산할 수 있다.

#### 2.4 열전달 모델 : 표면 방사에 의한 복사 열손실

접시형 태양열 집열기에 사용되는 흡수기는 고온에서 작동한다. 따라서 흡수기의 내부 표면 방사에 의한 복사 손실은 전체 시스템 성능에 영향을 미치는 중요한 요소이므로, 전체 시스템 성능 평가 시 흡수기의 내부 표면 방사에 의한 복사 손실을 고려해야 한다.

따라서 흡수기 형상, 내부 표면 온도 및 내부 표면 흡수율 변화에 따른 흡수기의 내부 표면 방사에 의한 복사 손실을 계산하였다. 흡수기 내부 표면을 회체(Gray body)로 가정하고, 흡수율의 변화도 고려하였으며, 방사율은 흡수율과 동일하다는 조건을 사용하였다.

흡수기 내부의 태양열 복사를 모델링하기 위해 Net Radiation Method를 사용하였다. 밀폐 공간 내부를  $n$ 개의 영역으로 분할함으로써 각 표면간의 복사에 의한 열교환은 에너지 보존으로부터 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$\sum_{j=1}^n \left[ \frac{\delta_{ij}}{\epsilon_j} - \left( \frac{1}{\epsilon_j} - 1 \right) F_{i-j} \right] q_j = \sum_{j=1}^n [\delta_{ij} - F_{i-j}] E_{bj} \quad (3)$$

흡수기 내부 면에 대해 온도 및 방사율을 알면 식(3)에 의해 각 면에서의 복사에 의한 열전달을 계산 할수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 광학 효율

Fig. 4는 동일한 일사량 조건에서 반사경의 반사율이 0.9일 때의 광학 효율 변화를 반사경 배치에 따라 나타내었다. 광학 효율은 식(1)을 통해 계산된다. 실제 반사경 위에 도달하는 일사량은 모든 배치에 대해 동일하나, 반사경 배치에 따라 흡수기 개구부에 도달하는 집광량은 달라진다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 Case I이 90%로서 가장 높은 광학적 효율을 보였으며, Case IV는 81%로서 가장 낮은 광학적 효율을 보였다. 또한, 본문에서 제안한 반사경 배치인 Case VI은 88%로서 두 번째로 높은 광학적 효율을 보여주었으며, 조각거울 반사경 배치 중 가장 높은 성능을 보여주었다. 최대값과 최소값을 비교하면 약 9%의 차이를 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 최적 반사경 배치가 전체 시스템 성능에 미치는 주요 인자로 작용할 수 있음을 확인하였다.

#### 3.2 열전달 모델 : 표면 반사에 의한 복사 열손실

Fig. 5는 흡수기 내부 표면 흡수율이 0.85일 때 흡수기 표면 반사에 의한 손실을 각 반사경 배치 및 흡수기 형상에 따라 나타내었다. Case I-Receiver 3 조합은 66.09 W로써 가장 많은 흡수기 표면 반사에 의한 손실을 보였으며, Case IV-

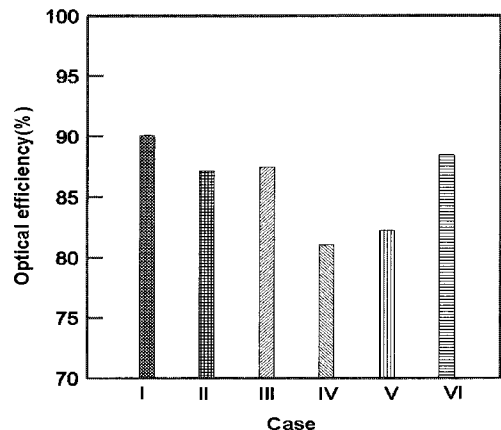


Fig. 4 Comparisons of the optical efficiency of dish solar collector with mirror arrays.

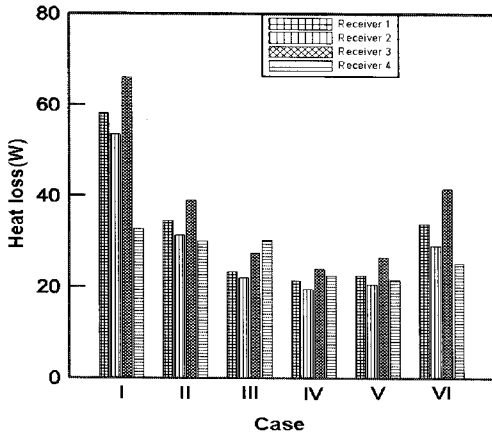


Fig. 5 Comparisons of radiative heat loss in receiver due to surface reflection with mirror arrays and receiver shapes.

Receiver 2 조합은 19.51 W로써 가장 적은 흡수기 표면 반사에 의한 손실을 보였다. 최대값과 최소값을 비교하면 약 46.58 W의 차이를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 각 Case 별로 평균값을 구하여서 흡수기 형상만을 고려하였을 경우 Receiver 3, Receiver 1, Receiver 2 그리고 Receiver 4의 순서로 흡수기 표면 반사에 의한 손실이 작아지는 것을 확인했다. 따라서 본 논문에서 제안한 Receiver 4가 가장 적은 열손실을 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3 열전달 모델 : 표면 방사에 의한 복사 열손실

Fig. 6은 흡수기 내부 표면을 회체(Gray body)로 가정하고, 흡수율을 0.85로 놓았을 때 흡수기 표면 방사에 의한 손실을 나타내었다. Fig. 6은 흡수기 내부 표면 온도를 300 °C, 400 °C, 500 °C로 변화를 주었으며, 4가지 형상의 흡수기를 비교하여 나타내었다. 계산을 통해 흡수기 내부 표면에서 일어나는 방사량과 흡수량을 계산하였으며, 방사량과 흡수량의 차이를 구하여 흡수기 표면 방사에 의한 손실을 구하였다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 흡수기 내부 표면 온도가 증가함에 따라 흡수기 표면 방사에 의한 손실이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 흡수기 내부 표면 방사에 의한 손실은 Receiver 3일 때 가장 많은 것으로 나타났다. 그 이유는 Table 1에서와 같이 흡수기 내부 표면적이 가장 크기 때문

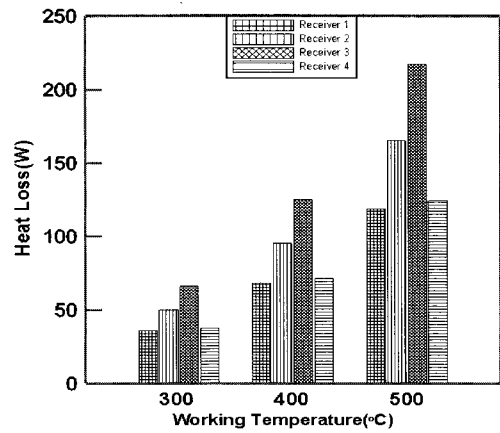


Fig. 6 Comparisons of the radiative heat loss in the receiver due to surface emission with working temperature and receiver shapes.

Table 1 Radiative heat loss due to surface emission

Receiver	Area(m <sup>2</sup> )	Heat loss(W)
1	0.0595	68.11
2	0.0754	94.87
3	0.0930	124.95
4	0.0615	71.34

에 그에 따른 방사에 의한 손실도 증가하기 때문이다. 이와 반대로 Receiver 1일 때, 내부 표면적이 가장 작기 때문에 흡수기 내부 표면 방사에 의한 손실도 가장 적게 나타난다. 이 결과로부터 흡수기 내부 표면 방사에 의한 손실은 흡수기 내부 표면적 및 흡수기 내부 표면온도에 비례함을 알았다. 흡수기 형상만을 고려하였을 경우 Receiver 1, Receiver 4, Receiver 2 그리고 Receiver 3의 순서로 흡수기 내부 표면적이 커짐에 따라 흡수기 내부 표면 방사 손실은 증가한다.

### 3.4 흡수기 효율

Fig. 7은 앞선 결과를 통해 흡수기 표면 온도 400 °C, 표면 흡수율 0.85일 때 흡수기 효율을 각 반사경 배치 및 흡수기 형상에 따라 나타내었다. 흡수기 효율의 정의는 식(4)와 같다.<sup>(6)</sup>

$$Receiver\ efficiency = \frac{P_a - P_{loss}}{P_a} \quad (4)$$

$P_a$ 는 흡수기 개구부로 들어오는 집광된 태양복사량이며,  $P_{loss}$ 는 흡수기의 모든 손실량이다. 열손실에는 대류, 복사, 전도에 의한 열손실이 있다. 이 논문에서는 복사 열손실 중에서 표면 반사, 방사에 의한 열손실을 고려하였다.

Case III-Receiver 1 조합이 87.2%로서 가장 높은 흡수기 효율을 보였으며, Case I-Receiver 3 조합은 75.2%로서 가장 낮은 흡수기 효율을 보였다. 최대값과 최소값을 비교하면 약 11.5%의 차이를 보였다. 따라서 흡수기 효율이 광학적 효율에 비해 전체 시스템 효율에 영향을 크게 미치는 것을 알 수 있었다. 흡수기 형상만을 고려하였을 경우에는 Receiver 1, Receiver 4, Receiver 2 그리고 Receiver 3의 순서로 흡수기 효율이 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.5 집열기 효율

Fig. 8은 앞선 결과를 통해 집열기 효율을 각 반사경 배치 및 흡수기 형상에 따라 나타내었다. 집열기 효율의 정의는 식(5)와 같다.<sup>(6)</sup>

$$\begin{aligned} \text{Collector efficiency} \\ = \text{Optical efficiency} \times \text{Receiver efficiency} \quad (5) \end{aligned}$$

Case VI-Receiver 4 조합은 76.6%로 가장 높은 집광효율을 보였으며, Case IV-Receiver 3 조합은 62%로 가장 낮은 집광효율을 보였다. 최대값과 최소값을 비교하면 약 15%의 차이를 보였다.

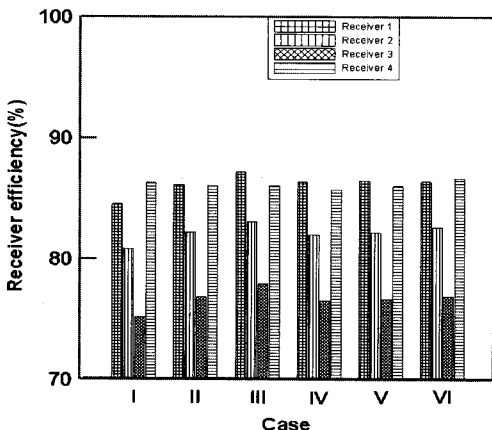


Fig. 7 Comparisons of the receiver efficiency with mirror arrays and receiver shapes.

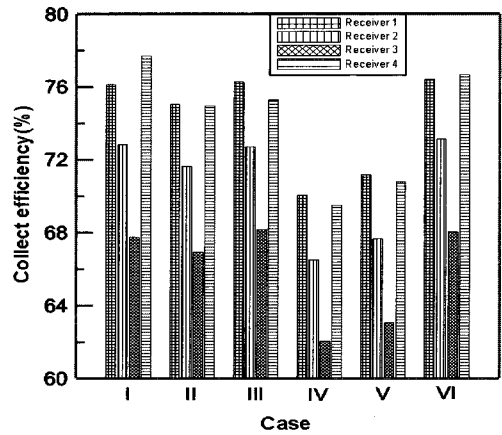


Fig. 8 Comparisons of the dish solar collector efficiencies with mirror arrays and receiver shapes.

다. 따라서 반사경 배치 및 흡수기 형상의 선택이 전체 시스템 성능에 미치는 영향의 정도를 알 수 있었다. 각 Case 별로 평균값을 구하여서 흡수기 형상만을 고려하였을 경우에는 Receiver 4, Receiver 1, Receiver 2 그리고 Receiver 3의 순서로 집열기 효율이 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 수치 해석적으로 접시형 태양열 집열기 시스템에 대한 성능해석을 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 광학적 효율은 Case I(perfect mirror)을 제외하면 조각거울 반사경 배치 중 본 논문에서 제안한 반사경 배치인 Case VI(star)가 가장 높은 광학적 효율을 보여주었다.

(2) 반사경 배치 및 흡수기 형상에 따라 흡수기 표면 반사에 의한 손실을 계산하였다.

(3) 흡수기 내부 표면적 및 온도 증가에 따라 흡수기 내부 표면 방사에 의한 손실이 증가한다.

(4) 제안된 구성 중 최적 시스템 구성은 Case I(perfect mirror)을 제외하면 본 연구에서 제안한 Case VI(star)로 배치하고 흡수기는 Receiver 4(unicorn type)를 사용할 때라는 것을 알 수 있다.

실제 접시형 태양열 집열기에서 흡수기의 성능을 계산하고자 할 경우 복사 손실뿐만 아니라 대

류 손실도 고려해야 한다. 본 연구에서는 복사 열전달만을 고려하기로 한다. 대류 손실에 대한 연구는 추후 계획 중이다.

## 후 기

본 과제(결과물)는 산업자원부 출연금으로 수행한 최우수실험실사업(과제번호:005-N-SO14-P-01-0-000)의 연구결과입니다.

## 참고문헌

1. Korea Technology Transfer Center, 2003, Alternative Energy.
2. Kang, M. C., 2004, Flux density distribution of the dish solar concentrator (KIER-DISH), Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 24, No. 4, pp. 11-18.
3. Kim, J. S., 2003, Alternative energy, Korea Institute of Science and Technology.
4. Ryu, S. Y., 1999, An analysis of heat losses from a receiver for a dish-type solar energy collecting system, M.D. Thesis, Inha University, Incheon, Korea.
5. Thomas, R. M., 1991, Analysis and design of two stretched-membrane parabolic dish concentrators, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 113, pp. 180-187.
6. Goodman, J. H., 1994, A spherical dish concentrator for process heat, American Solar Energy Society 1994 Annual Conference SOLAR 94.