

[논문] 태양에너지

Solar Energy

Vol. 20, No. 3, 2000

접시형 태양열 집광시스템용 흡수기의 열손실 해석

류시열*, 서태범**, 강용혁***

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

*** 한국에너지기술연구소

An Analysis of Heat Losses from Receivers for a Multifaceted Parabolic Solar Collector

S.Y.Ryu*, T.B.Seo**, Y.H.Kang***

* Department of Mechanical Engineering, Graduate School, In-ha University

** Department of Mechanical Engineering, In-ha University

*** Korea Institute of Energy Research

Abstract

Heat losses from receivers for a dish-type solar energy collecting system are numerically investigated. The analytical method for predicting conductive heat loss from a cavity receiver is used. The Stine and McDonald Model is used to estimate convective heat loss. Two kinds of techniques for the radiation analysis 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 cavity 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. Based on the heat loss analysis, the performance of two different receivers for multifaceted parabolic solar collectors with several flat facets can be estimated, and the optimal facet size is obtained.

기 호 설 명

A_o	: 흡수기 외부 표면적 [m^2]
A_p	: 반사경의 수평면에 대한 투상 면적 [m^2]
A_r	: 흡수기 입구면의 면적 [m^2]
A_w	: 흡수기 내부 표면적 [m^2]
d	: 흡수기 입구 직경 [m]
E_{bj}	: 영역 j에서 흡수기 내부 표면에 흡수되는 복사량 [W/m^2]
F_{i-j}	: 영역 i에서 j로의 형태계수(view factor)
G_{bn}	: 직달입사량 [W/m^2]
I	: 복사강도 [$W/m^2 \cdot sr$]
k	: 단열재의 열전도율 [$W/m \cdot K$]
L	: 흡수기의 평균 직경 [m]
l	: 단열재의 평균 두께 [m]
T_a	: 대기 온도 [K]
T_w	: 흡수기 내부 표면의 평균 온도 [K]
δ	: 중심광(central ray)과 이루는 각 [rad]
ε_j	: 흡수기 내부 영역 j에서의 방사율
ρ	: 반사경의 반사율
σ	: 가우시안 분포의 표준편차 [rad]
ϕ	: 수평면을 기준으로한 흡수기 각도 [rad]
Ω	: 입체각 (solid angle)

1. 서 론

일반적으로 산업용 공정열이나 전력을 생산하기 위해 접시형 태양열 시스템이 이용되고 있으며, 세계적으로 이에 대한 많은 연구가 진행 중에 있다. 지금까지 성공적으로 개발된 집광형 집열기로는 미국 Solar Total Energy Project(STEP)에 의해 제작된 7m 직경의 단일 접시로 이루어진 집열기¹⁾ 및 호주 White Cliffs에 설치된 약 2300개의 $100 \times 100\text{mm}$ 의 조각 거울로 포물선형 반사판을 형성한 집열기²⁾ 등을 들 수 있다. 단일 접시로 반사판을 만드는 경우는 많은 태양열을 초점에 집광시킬 수 있는 장점이 있으나, 제작상의

기술적인 문제 및 반사경의 표면오차가 증가하는 문제점이 있다. 반면, 여러 개의 조각 거울을 이용하여 반사경을 형성하는 경우는 반사경의 표면 오차를 줄이고 높은 반사율을 얻을 수 있으나, 조각 거울의 크기가 커지면 반사된 태양 복사열이 초점에 맞지 않는 문제점이 있다. 이러한 시스템에서 적절한 조각 거울의 선택은 반사경의 제작 및 시스템 효율에 매우 큰 영향을 미치나, 아직까지 조각 거울의 크기에 따른 연구는 매우 미흡한 실정에 있다.

흡수기의 형상을 최적화 시키기 위해서는 흡수기에서 발생하는 전반적인 열손실에 대한 예측이 필요하다. 전도에 의한 열손실은 대류 및 복사에 의한 열손실에 비해 매우 작은 크기를 가지며, 따라서 간단한 분석적 방법(analytical method)을 이용할 수 있다. 대류 열손실에 대해서는 지금까지 서로 다른 흡수기 형상 및 작동환경에 대하여 몇 가지 다른 형태의 실험식들이 제시되었다. LeQuere와 Penot, 그리고 Mirenayat³⁾는 두 개의 크기가 다른 정육면체 흡수기에 대하여 작동온도 및 각도의 변화를 고려하여 연구를 수행하였다. 그리고, 1985년에는 Koenig와 Marvin⁴⁾이 제안한 실험식을 이용 Harris와 Lenz⁵⁾가 원통형 흡수기에 적용하여 대류 열손실을 예측하였으며, 이후 Stine과 McDonald⁶⁾는 Siebers와 Kraabel⁷⁾이 제안했던 실험식을 보완하여 새로운 실험식을 제안하였다. 이러한 explicit model 외에 Clausing⁸⁾은 흡수기 각도에 따른 내부 공기의 유동 특성을 고려하여 implicit model을 제안했다. 그러나, 이러한 각각의 모델들은 비교적 특정한 형태의 흡수기와 특정한 작동 조건에 대해서만 대류열손실을 잘 예측하는 경향이 있다. 따라서, 각 모델들의 특성을 잘 파악한 후에 설계하고자 하는 시스템에 적절한 모델을 선택해야 하는 어려움이 있다.

흡수기에서의 복사 열손실은 크게 흡수기 내부 표면 방사(surface emittance)에 의한 열손실과 반사경에서 반사된 태양 복사열이 흡수기 내부 표

면의 반사에 의해 다시 외부로 나가서 생기는 손실로 나눌 수 있다. 대부분의 연구에서, 내부 표면 방사(emission)에 의한 복사 손실은 근사적인 방법으로 고려되고 있지만²⁾, 내부 표면 반사(reflection)에 의한 복사 손실은 거의 고려되지 않던가 아니면 매우 간략한 방법으로 다뤄지고 있다. 따라서, 지금까지의 복사 손실 해석은 정량적으로 그리 정확한 편이 아니라고 판단된다.

본 연구에서는 많은 수의 조각 거울로 이루어진 포물선 형태의 반사판을 사용하는 태양열 집광 시스템(multifaceted parabolic dish collecting system)용 흡수기에서의 열손실을 해석하고자 한다. 대류 열손실을 예측하기 위해서 Stine과 McDonald 모델을 이용하였으며, 흡수기 내부 표면에서의 방사와 반사에 의한 복사 손실을 해석하기 위해 Net Radiation Method⁹⁾와 Monte-Carlo Method^{9),10)}을 이용하였다. 이러한, 열손실 모델링을 통해 두 가지 형상의 흡수기에 대하여 열효율을 조사함으로서 조각 거울의 크기 및 흡수기 형상에 따른 열성능 특성을 조사하였다.

2. 열손실 모델링

집열기 효율(=작동 유체가 얻은 태양 복사량/반사경에 떨어지는 총 태양 복사량)은 정상 상태(steady state)에서 다음과 같이 표현될 수 있으며,²⁾

$$\eta = \eta_R \cdot \rho \quad (1)$$

여기서, 흡수기 효율(=작동 유체가 얻은 태양 복사량/반사경에서 반사된 총 태양 복사량) η_R 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_R = 1 - \frac{Q_L}{G_{bn} \cdot A_p \cdot \rho} \quad (2)$$

식 (2)에서 Q_L 은 흡수기에 의한 총 열손실을 의미하며, 이러한 흡수기 효율을 계산하기 위해선 흡수기에서 발생하는 각 열손실의 해석뿐만 아니라 흡수기 입구로 들어오는 태양 복사량을 알아야 한다.

2.1 초점면에서 태양 복사열 분포

복사강도의 정의로부터 식(3)과 같은 계산을 통해 임의의 점에서의 태양 복사열에 의한 열유속을 알 수 있다.

$$q = \int \int I \cos \theta d\Omega \quad (3)$$

또한, 태양의 광원은 일정 크기의 원판 모양이므로 태양으로부터 오는 복사열은 cone ray를 띤다. 이러한 cone ray는 일반적으로 가우시안 분포 특성을 갖고 있으며, 태양으로부터 오는 복사강도 분포를 원가우시안으로 가정하면 복사강도 분포 함수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹¹⁾

$$f = \frac{I}{G_{bn}} = \frac{R}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right), \text{ at } \delta \leq n\sigma \quad (4)$$

$$f = \frac{I}{G_{bn}} = 0, \text{ at } \delta > n\sigma$$

여기서, $R = \rho / (1 - \exp(-n^2/2))$ 이다.

식(3)과 (4)로부터 집광비(concentration ratio)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.¹¹⁾

$$Cr = \frac{q}{G_{bn}} = \int \int f \cos \theta d\Omega \quad (5)$$

식(5)를 이용하여 초점면에서 적절한 점들을 선택함으로서 집광비 분포를 알 수 있으며, 이로부터 반사경에서 반사된 태양 복사열이 흡수기 입구로 들어오는 총 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{IN} = G_{bn} \times \int_{A_r} Cr dA_r \quad (6)$$

2.2 열손실 해석 모델

일반적으로 집광형 집열기의 흡수기에서는 단열면을 통한 전도 손실 및 흡수기 입구를 통한 대류 및 복사 손실 등이 일어나며, 이러한 열손실의 적절한 예측은 흡수기의 설계 및 집열기를 최적화 시키는데 매우 중요하다.

본 연구에서는 흡수기에서 발생하는 열손실을 다음과 같이 다섯 종류로 구분하였다.

- 1) 반사경에서 반사된 태양 복사열이 흡수기 주위로 유출됨으로서 생기는 손실.(spillage loss)
- 2) 흡수기 단열재를 통한 전도 열손실.
- 3) 흡수기 입구를 통한 대류 열손실.
- 4) 고온의 흡수기 내부 표면 방사에 의한 복사 열손실.(radiative heat loss due to surface emission)
- 5) 흡수기 입구로 들어온 태양 복사열이 반사되어 다시 외부로 나감으로서 생기는 복사 열손실.(radiative heat loss due to surface reflection)

이밖에 반사경에 흡수기의 그림자가 짐으로서 생기는 손실이 있으나, 본 연구의 대상 집열기(그림 4, 5)에서는 이러한 효과가 없으므로 여기선 고려치 않았다.

2.2.1 태양 복사열이 흡수기 주위로의 유출에 의한 손실.

유출 손실은 반사경에서 반사된 태양 복사열이 초점에 모이지 않음으로서 생기며, 이는 집열기가 태양을 추적하면서 생기는 오차, 반사경 표면 오차 및 반사경 형상에 의해 좌우된다. 이 가운데 추적 오차 및 표면 오차에 의한 영향은 식 (4)에서 σ 값을 보정해 줌으로서 고려될 수 있으나, 본 연구에선 반사경 형상 변화에 따른 영향만 고

려하였다. 이러한 유출 손실은 식 (6)에 의해 계산된 Q_{IN} 으로부터 다음과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$Q_{OUT} = G_{bn} \cdot A_p \cdot \rho - Q_{IN} \quad (7)$$

2.2.2 전도에 의한 열손실.

Kaushika²⁾는 호주 White Cliffs의 태양열 흡수기에 대해서 전도 손실을 예측시 다음과 같은식을 이용하였다.

$$Q_{KL} = \frac{1}{\frac{1}{A_o h} + \frac{\ell}{k\sqrt{A_o A_w}}} (T_w - T_a) \quad (8)$$

이 식을 이용하기 위해서는 흡수기 외부 표면에서의 평균 대류 열전달 계수를 알아야 하는데, 본 연구에서는 Hilpert가 제안한 실린더 주위의 외부 유동에 관한 실험식을 이용하였다.¹²⁾

2.2.3 대류에 의한 열손실.

지금까지 제시된 대표적인 모델 중 적절한 모델을 선택하기 위하여 기존 흡수기 중 그 형상 및 작동 온도가 본 흡수기(그림 6)와 유사한 STEP(Solar Total Energy Project)의 흡수기에서 작동 온도 149°C와 204°C에서의 실험값과 지금까지 제시된 모델로부터 얻은 계산값을 비교한 결과 STEP 흡수기에 대하여 비교적 정확히 대류 손실을 예측하고 있는 모델은 Clausing 모델과 Stine & McDonald 모델임을 알았다.^{11), 13)} 그러나, Clausing 모델은 흡수기의 각도에 따른 대류 손실 현상을 물리적으로 이해하는데는 도움을 주지만 복잡한 흡수기에 대하여 적용하는데는 많은 어려운 점을 안고 있어 본 연구에서는 Stine과 McDonald 모델을 이용하여 대류 손실을 예측하였다.

Stine과 McDonald⁶⁾는 Siebers와 Kraabel이

제안했던 실험식을 개선하여 흡수기 입구의 크기 및 흡수기의 각도의 변화를 고려하여 다음과 같은 실험식을 제안했다.

$$Nu_L = 0.088 \ Gr_L^{1/3} \left(\frac{T_w}{T_a} \right)^{0.18} \times (\cos \phi)^{2.47} \times \left(\frac{d}{L} \right)^s \quad (9)$$

여기서, s 는 $1.12-0.98d/L$ 이다. 이로부터 흡수기 각도 ϕ 에 대하여 적분함으로서 흡수기 내부 공기의 평균 대류 열전달 계수를 구할 수 있으며, 뉴톤의 냉각 법칙을 이용하여 흡수기에서 대류에 의한 총 열손실을 구할 수 있다.

2.2.4 흡수기 내부 표면 방사에 의한 복사 손실.

본 연구에선 흡수기가 고온에서 작동함으로서 생기는 흡수기 내부 표면 방사에 의한 복사 손실을 계산하기 위해 Net Radiation Method⁹⁾를 사용하였다.

흡수기 안쪽 면을 확산회표면(diffuse gray surface)으로 가정하고 밀폐 공간 내에 n 개의 영역(zone)으로 분할함으로서 각 표면간의 복사에 의한 열교환은 에너지 보존으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁹⁾

$$\sum_{j=1}^n \left[\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \left(\frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right) F_{i-j} \right] q_j = \sum_{j=1}^n [\delta_{ij} - F_{i-j}] E_{bj} \quad (10)$$

따라서, 흡수기 내에서 각 영역에서 온도 및 방사율을 알면, 식 (10)을 이용하여 각 영역에서 복사에 의한 열전달율을 알 수 있다. 여기서, 흡수기 내부에 관한 온도 분포는 입구에서 출구까지 선형적으로 변한다고 가정하고 계산하였다.

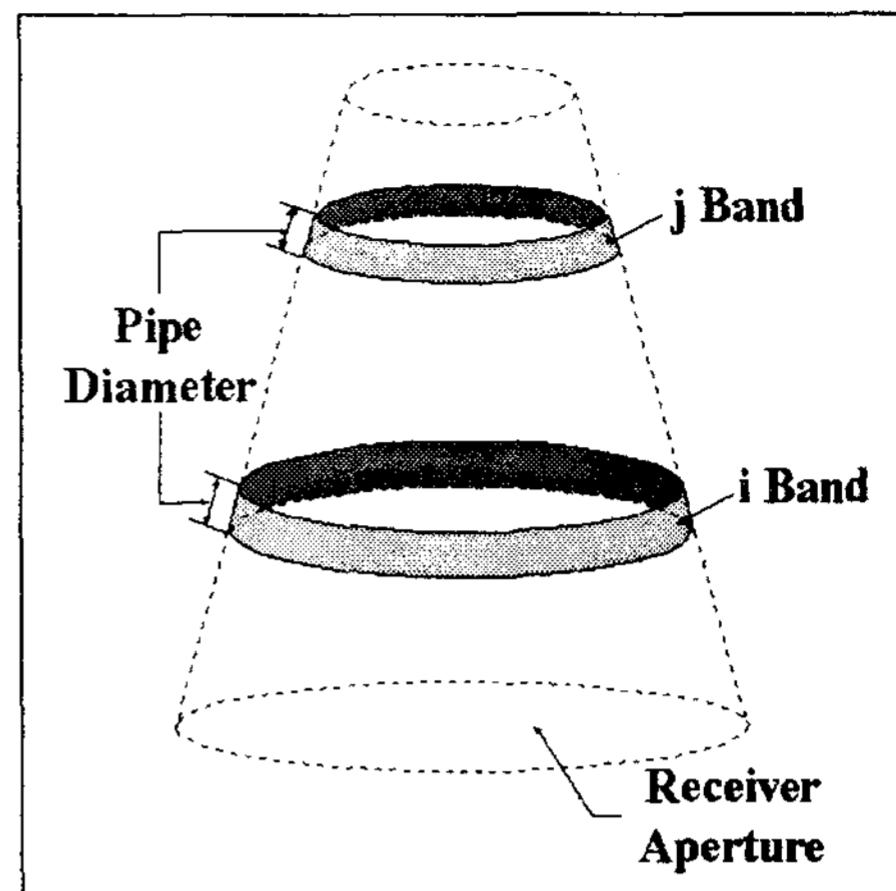


Fig. 1. Conical receiver internal zones¹³⁾

흡수기 입구를 통한 복사에 의한 열손실을 계산하기 위하여 흡수기 입구를 하나의 영역으로 보았으며, 흡수기 단면을 기준으로 파이프 링 하나를 하나의 영역으로 나누었다.(그림 1) 이러한 영역이 밀폐공간 내에 n 개의 영역이 있으면, 각 영역간의 형태계수(view factor)는 n^2 개가 존재한다. 본 연구에서는 동축선상의 평행원판들 사이의 형태계수 식 (9)으로부터 각각의 형태계수를 계산하였다.

2.2.5 흡수기 내부 표면의 반사에 의한 복사 손실.

Dome형 흡수기(그림 6 (b))는 Conical형 흡수기(그림 6 (a))에 비해서 내부 표면적이 크므로 전도 및 대류 그리고 내부 표면의 방사에 의한 복사 손실은 크나 들어오는 태양 복사열을 가둘 수 있는 능력이 커 흡수기 내부 표면의 반사에 의한 복사 손실은 줄일 수 있는 장점이 있다. 따라서, Dome형 흡수기를 사용하기 위해서는 흡수기 내부 표면적 증가에 의한 추가적인 열손실의 증가에 비해 표면에서 반사된 태양 복사열의 재흡수 능력에 의한 열손실의 감소가 커야 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 흡수기의 재흡수 능력을 계산하기 위해서 몬테카를로 방법^{9,10)}을

이용하였다. 흡수기 내부 표면은 확산 반사 (diffuse reflection) 한다고 가정하였으며, 내부 파이프의 굴곡은 무시하였다. 일반적으로 공기는 복사에 관계하지 않는 매질(nonparticipating medium)이므로 ray tracing은 photon bundle이 흡수기 표면에 흡수되든지, 아니면 흡수기 입구로 빠져나갈 때까지 계속하게 된다.(그림 2) 이러한 과정을 충분히 많은 photon bundle에 대해 반복 계산함으로서 확률적으로 실제와 근사한 값을 구 할 수 있다. 즉, N 개의 photon bundle을 반사경의 지표면에 대한 투상면에서 생성시켰을 때 흡수기 내부 표면에 흡수된 개수를 N_a 라 하면, 흡수기의 내부 표면의 반사에 의한 복사 손실 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{RL} = Q_{IN} \frac{N - N_a}{N} \quad (11)$$

이러한 몬테카를로 방법은 정확한 복사 열전달량을 구할 수 있는 반면, 확률적으로 그 해를 계산하므로 생성시키는 photon bundle의 수에 따라 해가 바뀌게 된다. 그림 3은 $100 \times 100\text{mm}$

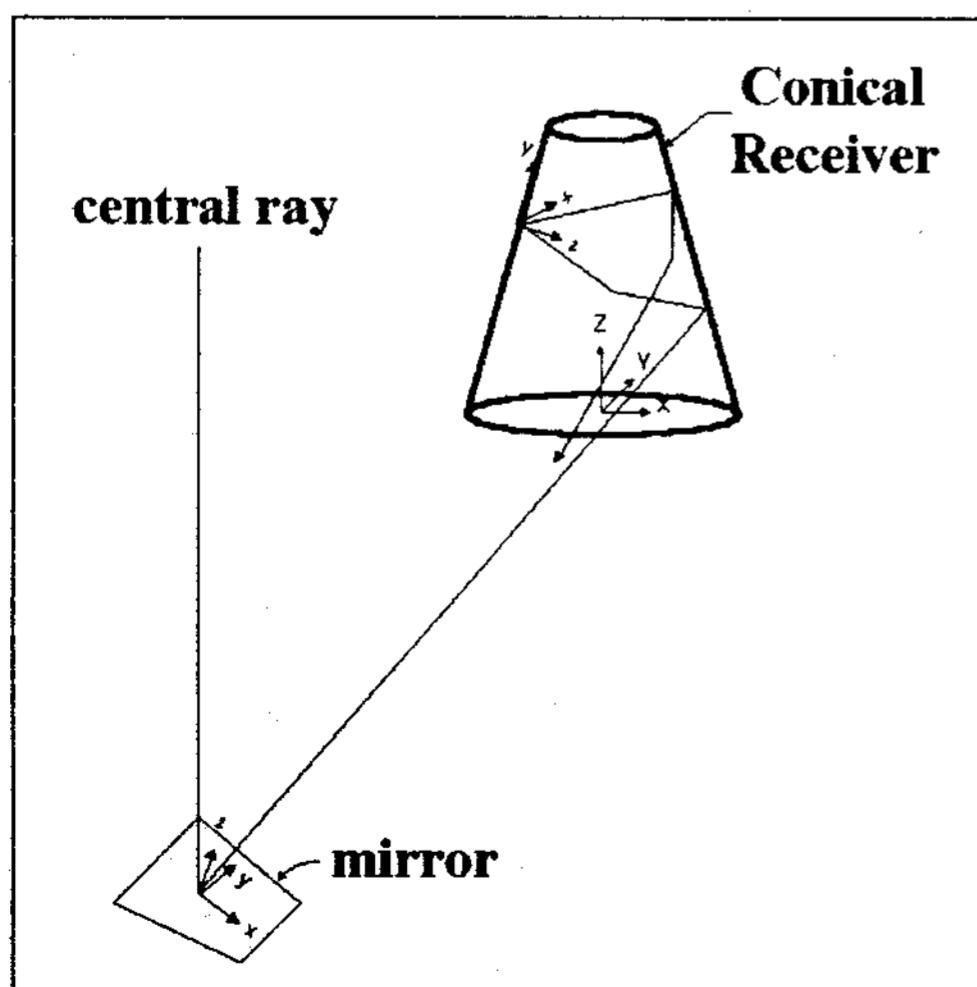


Fig. 2. Locus of an energy particle reflected from a reflector

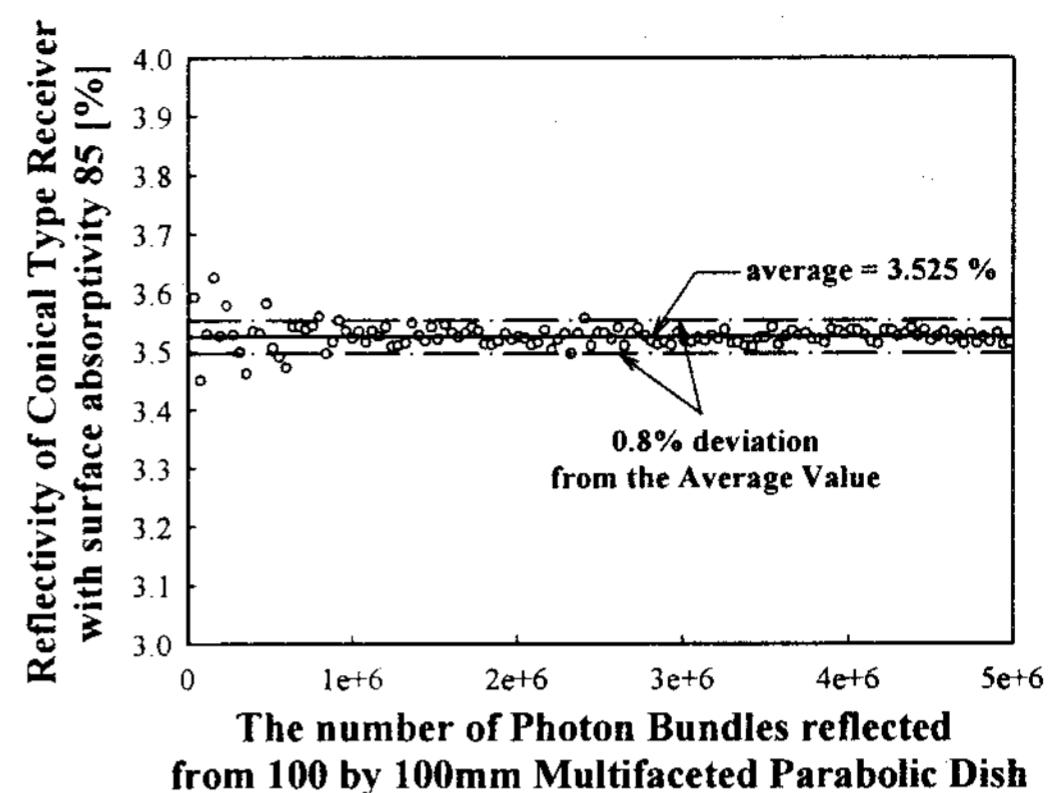


Fig. 3. Convergence of Monte Carlo method for $100 \times 100\text{mm}$ facets and conical type receiver system

Multifaceted Parabolic Dish형 반사경에서 photon bundle의 생성 개수를 증가시켜가며 태양 복사열에 대한 Conical형 흡수기의 재반사율 ($(N - N_a)/N \times 100$)을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 반사경에서 약 250만개 이상의 photon bundle을 생성시켰을 때 그 편차가 0.8% 미만으로 떨어짐을 알 수 있으며, 본 연구에선 모든 경우에 있어서 300만개에서 600만개까지의 데이터를 산술 평균함으로 흡수기의 재반사율을 결정하였다.

3. 시스템 형태 및 작동 환경

본 연구에서는 현재 한국에너지기술연구소 (KIER)에서 설치·실험 중인 집광형 시스템(그림 4)에서 반사경의 형태를 Multifaceted Parabolic Dish형으로 대체한 그림 5와 같은 시스템을 대상으로 하였다. 전체 반사경의 구조는 초점 길이 3m, rim 각이 약 45° 인 포물선형으로 이전 시스템과 같다. 그러나, 그림 5에서 알 수 있듯이 직경 1m의 원형 거울 대신에 양변의 길이가 같은 정사각형 모양의 평평한 조각 거울로

포물선 형태의 접시면을 채운 반사경을 이용하였다. 이 때 사용된 조각 거울은 양변의 길이가 각각 100, 150, 200, 250, 300mm인 다섯 가지의 정사각형이다.

또한, 표 1은 반사경의 형태를 요약한 것으로 기존 반사경에 비해 반사경에서의 빈공간이 적기 때문에 기하학적 집광비(A_p/A_r)가 약 67%~70% 큰 것을 알 수 있다.

흡수기의 형상은 기존 흡수기를 이용하였으며, 그 형태는 그림 6과 같이 Conical형 흡수기와

Dome형 흡수기로 되어있다. 흡수기 입구 반경은 180mm이고, 전체 외관은 직경 460mm, 높이 450mm의 원통 모양이다. 흡수기의 내부 표면적은 Conical형과 Dome형이 각각 0.35m^2 , 0.45m^2 으로서, Dome형의 흡수기가 약 29% 크다.

본 연구에서는 각 시스템에 따른 열적 특성 및 효율을 정량적으로 비교하기 위하여 몇 가지 가정을 하였으며, 이를 표 2에 나타내었다. 여기서 날씨 데이터는 우리나라 여건을 고려하여 가정하였다.

Table 1. Summary of reflecting surfaces

	Mirror Type	Number of Mirrors	Projection Area of Mirrors [m^2]	Geometric Cr (A_p/A_r)
KIER mirrors	parabolic dish of 1m dia. and 3m focal length	15	11.33	111.3
Multi-faceted mirrors	100 by 100mm flat facet	2038	19.28	189.4
	150 by 150mm flat facet	904	19.18	188.4
	200 by 200mm flat facet	510	19.09	187.5
	250 by 250mm flat facet	326	18.98	186.5
	300 by 300mm flat facet	227	18.87	185.4

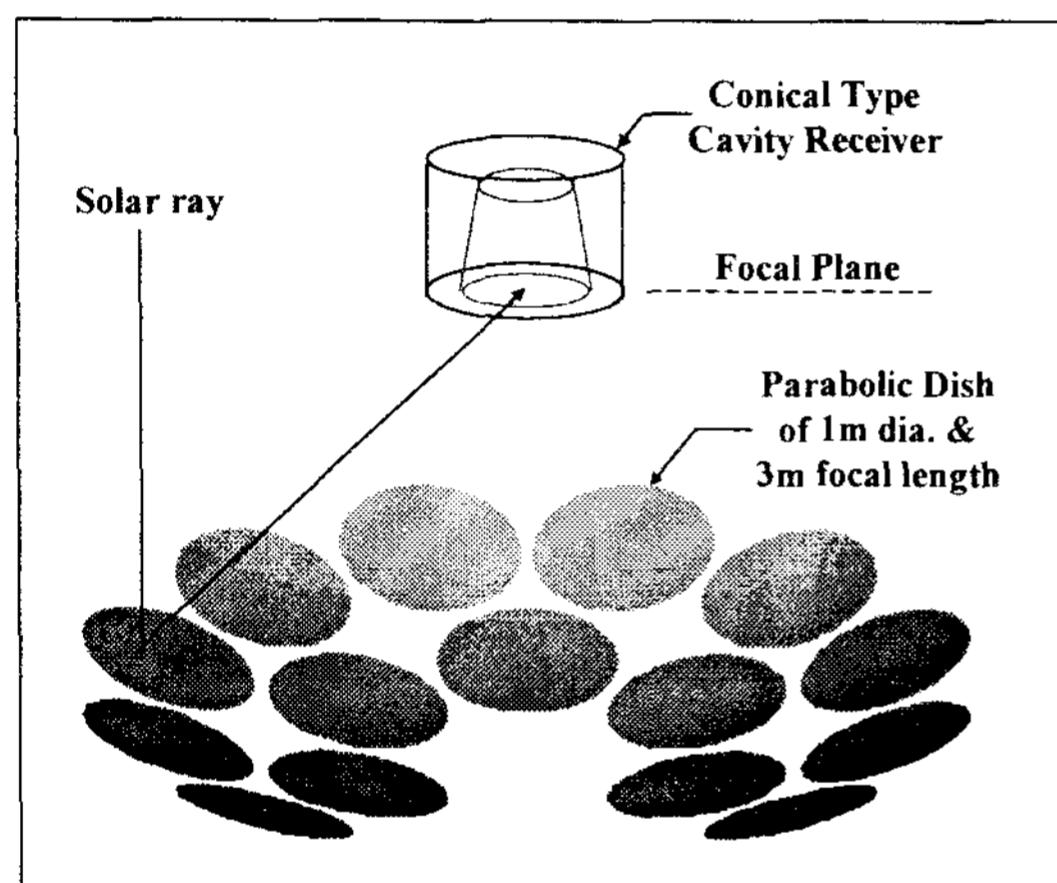


Fig. 4. The parabolic dish type collector at the Korea Institute of Energy Research

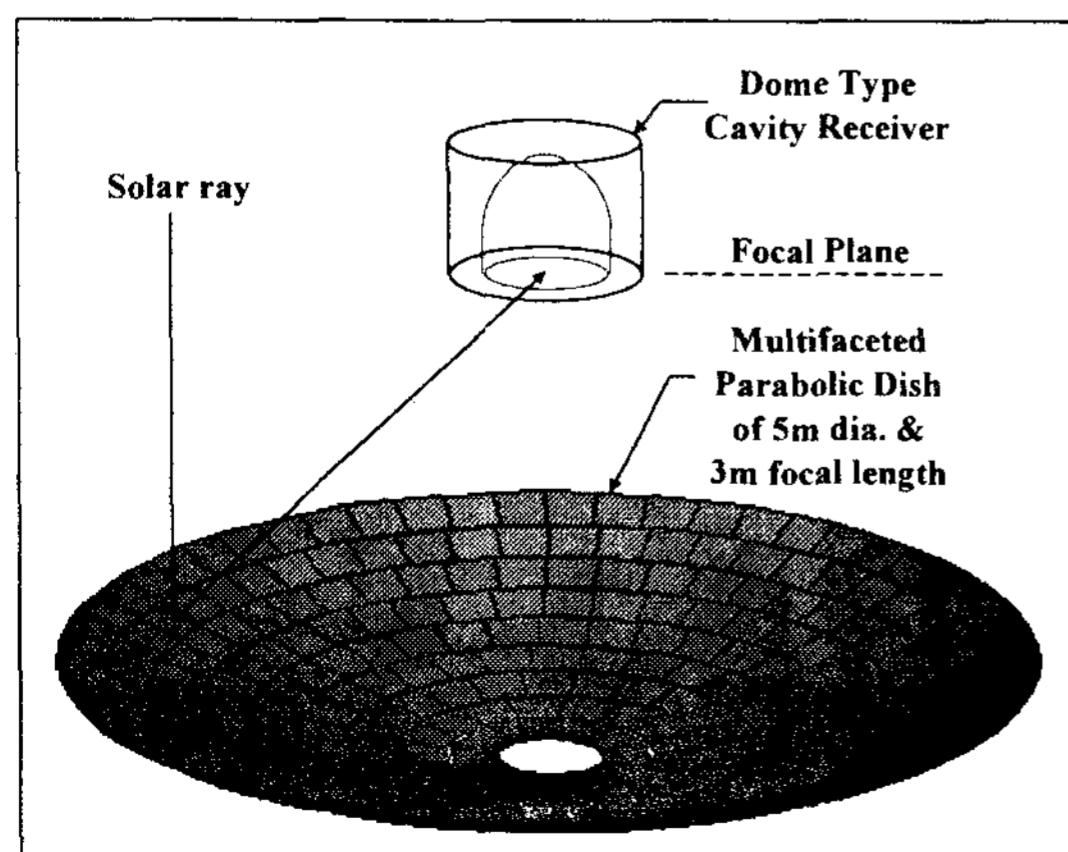
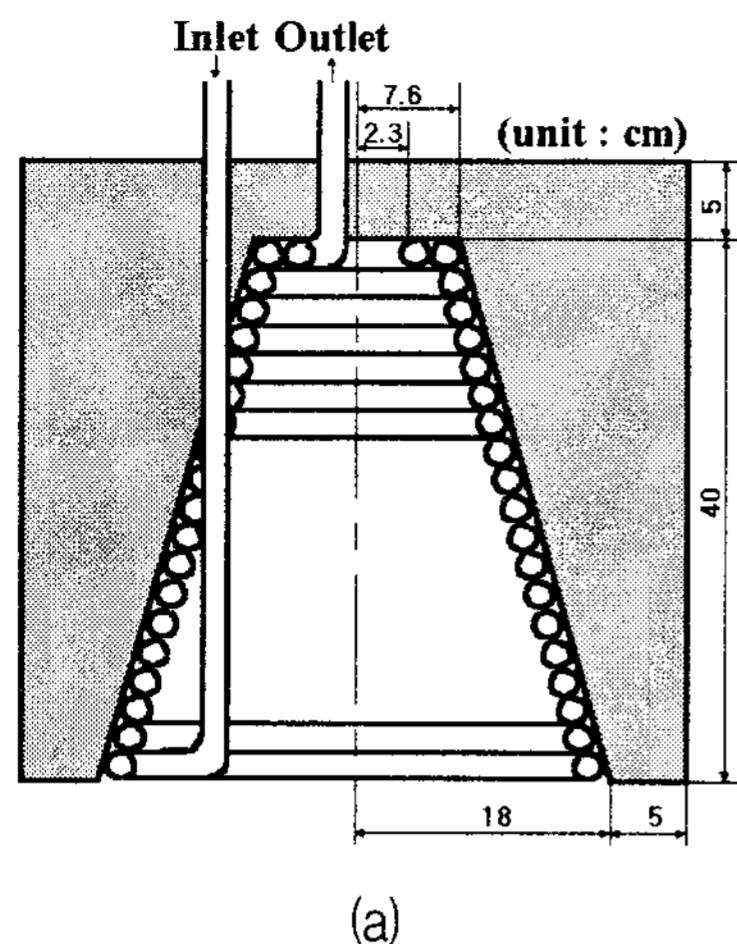


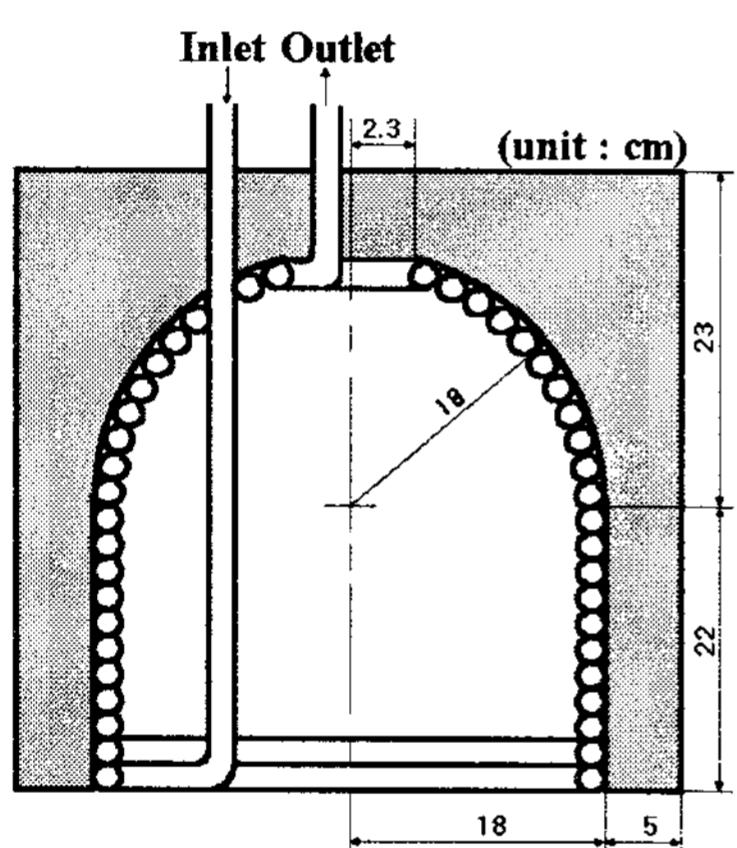
Fig. 5. The multifaceted parabolic dish type collector with 250×250mm flat facets

Table 2. Assumptions for quantitative analysis

For the mirrors	Reflectivity	0.85
For the cavity receiver	Thermal conductivity of the insulation(Glass Fiber)	0.046 W/m · K
	Absorptivity of the inner surfaces	0.85
Solar Input	Solar beam irradiance received for normal incidence on the reflectors	800 W/m ²
	standard deviation of gaussian distribution(σ)	0.267°
Weather	Ambient temperature	25 °C
	Wind velocity	3.5 m/s



(a)



(b)

Fig. 6. The geometry of receivers (a) Conical type, (b) Dome type¹³⁾

4. 결과 및 고찰

그림 7은 식(5)를 이용하여 구한 초점면에서의 집광비 분포를 나타낸 것이다. 예상대로 조각 거울의 크기가 $100 \times 100\text{mm}$ 일 때 가장 집광도가 높게 나왔으며, 중앙에서 1445로 가장 높다가 외곽으로 갈수록 급격히 감소하여 초점에서 약 110mm 떨어진 지점부터는 0이 된다. 조각 거울의 크기에 따른 집광비 분포의 경향성을 보면 그

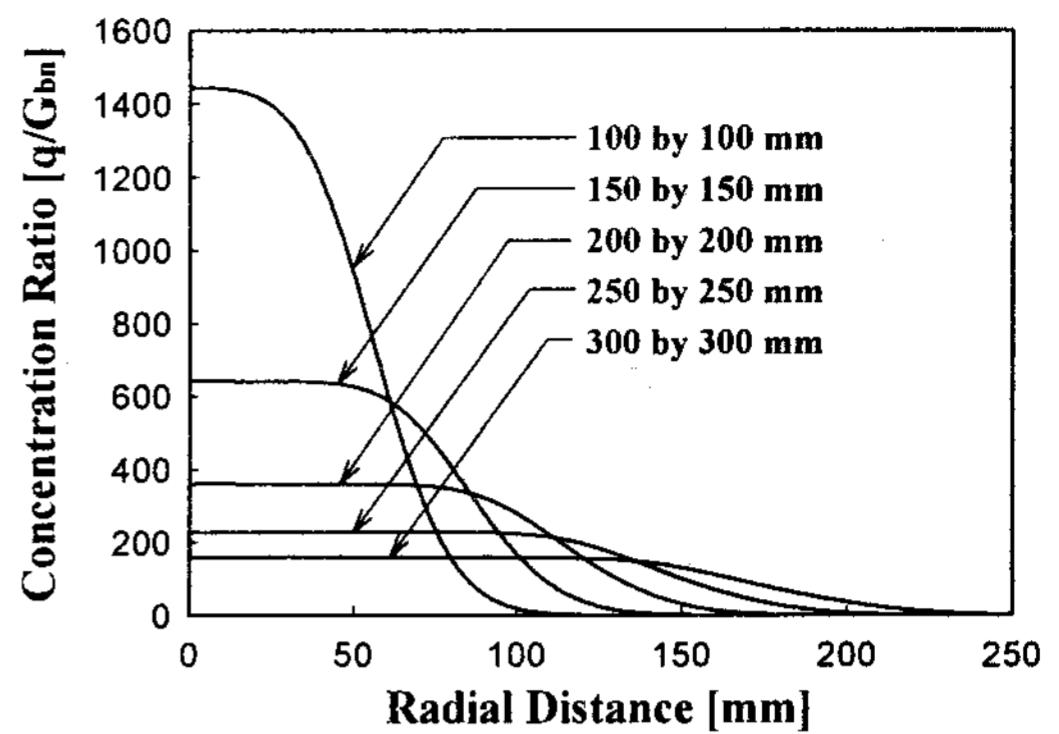
Fig. 7. The distribution of the local concentration ratio on the focal plane for a solar half angle 0.267°

Table 3. The reflectivity for incoming solar radiation

Receiver Type Mirror Type	Conical [%]	Dome [%]
100 by 100 mm	3.525	2.871
150 by 150 mm	3.743	2.993
200 by 200 mm	4.066	3.185
250 by 250 mm	4.503	3.465
300 by 300 mm	4.804	3.624

크기가 커질수록 반사경에서 반사된 태양 복사열이 초점에 맞지 않아 중앙에서의 최고점은 감소하며 옆으로 퍼져 나감을 알 수 있다. 이런 경향성은 $300 \times 300\text{mm}$ 일 때는 반경 150mm 내에 집광비가 160으로 평평하게 퍼지게 됨을 알 수 있다. 또한, $200 \times 200\text{mm}$ 부터는 흡수기 반경 180mm 밖으로 약간의 태양 복사열의 유출이 생기고, 그 크기는 조각 거울의 크기가 커질수록 급격히 증가하게 된다.

또한, 몬테카를로 방법을 이용하여 계산한 흡수기 내부 표면 반사에 의해 흡수기 입구로 들어온 태양 복사열이 다시 외부로 나갈 확률의 변화를 조각 거울의 크기 및 흡수기의 형상에 따라 표 3에 정리하였다.

전반적으로 Conical형 흡수기보다 Dome형 흡수기일 때 재반사에 의한 복사 열손실이 낮으며, 그 이유는 내부 표면적이 Dome형 흡수기가 Conical형에 비해 약 29% 크므로(즉, 공동모양에 가깝기 때문에) 태양 복사열이 흡수기 내부에서 반사되더라도 다시 흡수될 확률이 높기 때문이다. 두 흡수기 모두 반사경의 조각 거울 크기가 커지면 반사율이 증가하는 경향성이 있다. 이는 조각 거울의 크기가 크면 흡수기 내부 표면에 photon bundle이 처음으로 부딪힐 때 흡수기 입구면 근처에 부딪히는 경우가 많아지고, 이 면으로부터 확산반사하게 되면 흡수기 입구와의 형태계수가 증가하여 바깥으로 나갈 확률이 커지기 때문이다.

그림 7에서 알 수 있듯이 태양 복사열의 유출 손실이 거의 없으면서 조각 거울의 크기를 최대로 하는 것은 $200 \times 200\text{mm}$ 임을 알 수 있다. 표 4는 이 때의 각 흡수기에서의 열손실 데이터를 나타낸 것이며, 그림 8은 이를 작동 온도에 따라 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 전도에 의한 손실 및 $200 \times 200\text{mm}$ 조각 거울 반사경에서의 유출 손실은 매우 작으므로 전체 흡수기 효

율에는 큰 영향을 안 준다.

표 4 및 그림 8(a)를 보면 전반적인 작동 온도에서 태양 복사열의 재반사에 의한 복사 손실이 주되게 작용하며, 이 크기는 기존 KIER 흡수기에서의 데이터¹³⁾ 282W에 비해서 크게 증가한 것이다. 그 이유는 기존 시스템에선 Conical형 흡수기에 대한 태양 복사열의 재반사율이 3.660%로 현 데이터(표 3) 4.066%에 비하여 그 차이가 비교적 작지만 흡수기 안으로 들어오는 태양 복사열의 크기가 이전 시스템에서 7.7kW에서 약 12.9kW로 증가함으로서 이들을 서로 곱한 재반사에 의한 손실은 크게 증가하게 된다. 이 손실은 작동 온도에 따라 무관하므로 작동 온도가 증가함에 따라 일정한 값을 보이나, 대류 및 표면 방사에 의한 복사 손실이 온도가 증가함에 따라 증가하여 작동 온도가 200°C 에선 총손실이 947W 까지 증가하게 된다.

그림 8(b)에서 Dome형 흡수기는 Conical형 흡수기에 비해서 내부 표면적이 크므로 대류 및 흡수기 내부 표면 방사에 의한 복사 손실은 평균적으로 각각 29.0%, 38.4% 증가한 반면, 태양 복사

Table 4. Predicted receiver heat loss data for $200 \times 200\text{mm}$ multifaceted parabolic concentrator

Receiver Type	Working Temp.[°C]	Spillage Loss [W]	Conductive Heat Loss [W]	Convective Heat Loss [W]	Radiative Heat Loss [W]		Total Heat Loss [W]
					Surface Emission	Surface Reflection	
Conical	100	12	17	62	52	527	670
	125	12	23	92	73	527	727
	150	12	29	126	99	527	793
	175	12	35	162	130	527	866
	200	12	41	201	166	527	947
Dome	100	12	28	80	70	413	603
	125	12	38	119	100	413	682
	150	12	47	162	137	413	771
	175	12	57	209	182	413	873
	200	12	66	259	236	413	986

열에 대한 흡수기 재반사에 의한 손실은 21.6%로 감소하였다. 또한, 흡수기 입구 크기는 두 개의 흡수기가 서로 같으므로 유출 손실은 12W로 일정하며, 단열면을 통한 전도 손실은 단열면의 평균 두께가 Dome형 흡수기가 작으므로 Conical형 흡수기에 비해서 평균적으로 약 63.2% 증가한 것

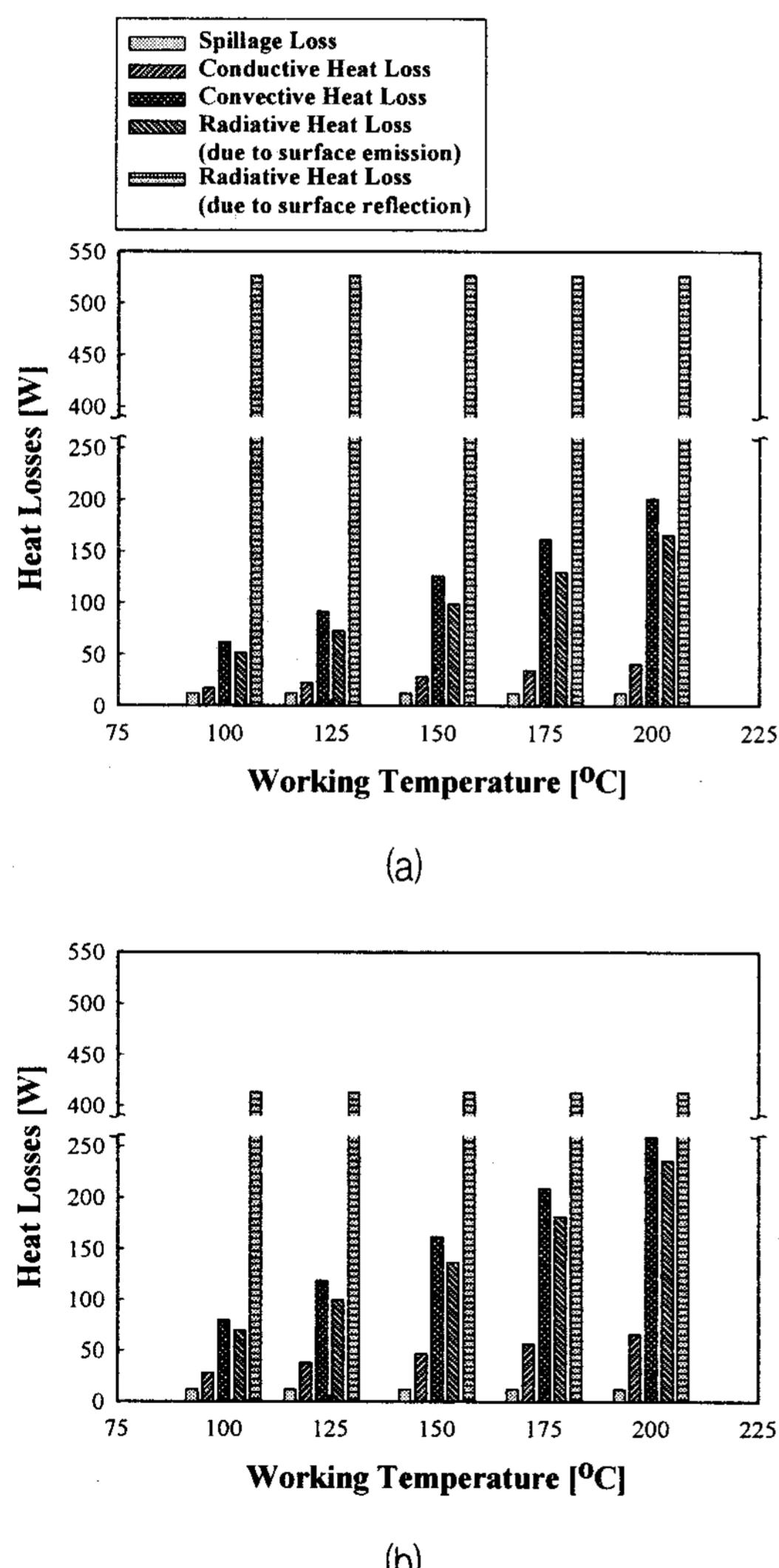


Fig. 8. Magnitude of heat losses for $200 \times 200\text{mm}$ multifaceted parabolic concentrator (a) Conical type receiver (b) Dome type receiver

으로 나타났다.

표 4에서의 총열손실을 보면, 작동 온도가 증가함에 따라 Conical형 흡수기는 670W에서 947W까지 커지고, Dome형 흡수기는 603W에서 986W까지 증가한다. 따라서, 저온 구간에선 Dome형 흡수기가, 고온 구간에선 Conical형 흡수기가 유리한 것을 알 수 있다. 이러한 결과가 나오는 이유는 흡수기 작동 온도가 저온일수록 태양 복사열에 대한 흡수기 반사에 의한 복사 손실이 다른 손실에 비해서 상대적으로 크게 작용하기 때문이다.

흡수기에 의한 다섯 가지 열손실 중 전도, 대류 열손실 및 흡수기 내부 표면 방사에 의한 복사 손실은 반사경의 형상과 무관하므로 조각 거울의 크기에 따라서 변화하지 않는다. 그럼 9는 각 facet 크기에 따라 유출 손실 및 태양 복사열에 대한 표면 반사에 의한 복사 손실을 그래프로 나타낸 것이다. 태양 복사열의 흡수기 주변으로의 유출 손실은 두 개의 흡수기가 같으므로 하나로 표시하였으며, 조각 거울 크기가 $200 \times 200\text{mm}$ 부터 나타남을 알 수 있다. 이 이상 크기가 증가하면 유출 손실은 매우 급격히 증가하여 facet 크기 $300 \times 300\text{mm}$ 에선 1717W까지 증가한다. 또한, 태양 복사열에 대한 재반사에 의한 복사 손실은 앞에서 언급한 바와 같이 흡수기 모양이 공동모

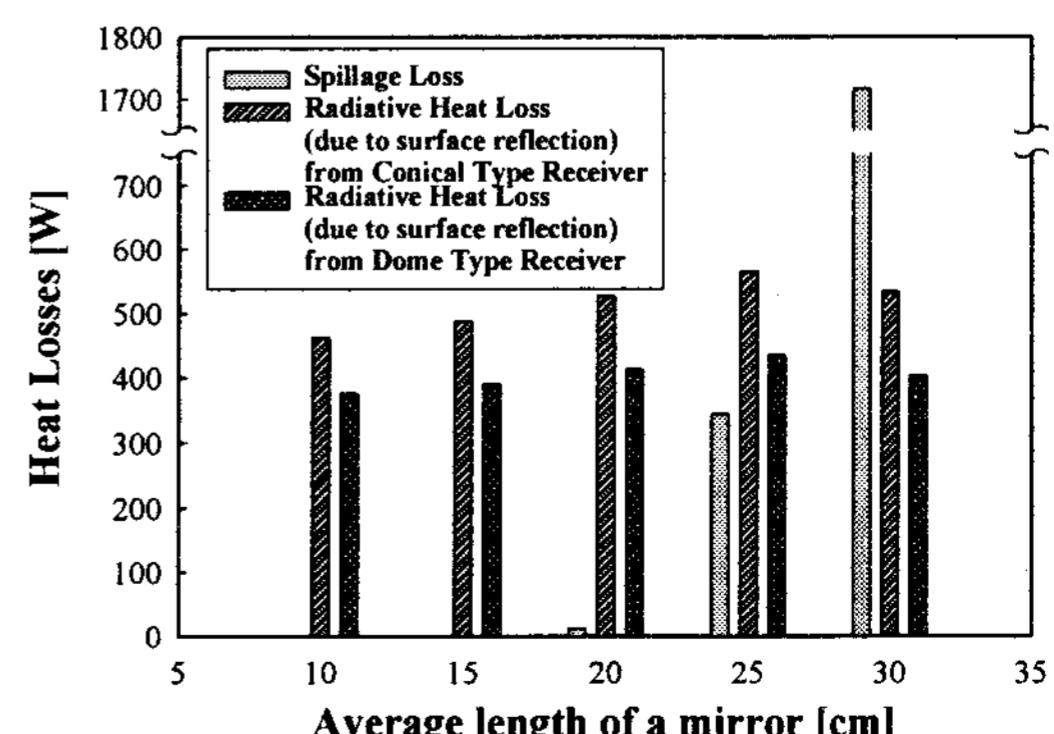


Fig. 9. Spillage and Radiative heat loss due to surface reflection for several flat facets

양에 가까운 Dome형 흡수기가 Conical형에 비해 적음을 알 수 있고, 조각 거울 크기에 따라 그 변화를 살펴보면, 거울 크기가 $250 \times 250\text{mm}$ 까지는 증가하다가 $300 \times 300\text{mm}$ 에선 낮아진다. 그 이유는 조각 거울 크기가 $300 \times 300\text{mm}$ 일 때는 태양 복사열에 대한 흡수기의 반사율은 증가하지만(표 3) 흡수기 주위로의 유출이 너무 심해 흡수기 입구로 들어오는 태양 복사열이 급격히 줄어 들음으로서 그 곱한 값이 감소하기 때문이다.

그림 10은 흡수기 작동 온도 100°C 와 200°C 에서 조각 거울 크기에 따른 흡수기 효율 및 열용량(작동 유체가 얻은 태양 복사열)을 각각의 흡수기에서 조사한 것이다. 전반적으로 조각 거울 크기 및 작동 온도에 따른 변화에 비하여 흡수기 형태에 따른 변화는 그리 크지 않으나, 전반적인 조각 거울 크기에 대해서 작동온도 100°C 일 때는 Dome형 흡수기가, 200°C 일 때는 Conical형 흡수기가 더 좋은 것을 알 수 있다. 작동온도 100°C 일 때를 살펴보면 흡수기 평균적으로 조각 거울 크기 $100 \times 100\text{mm}$ 일 때 약 95.6%의 효율로서 태양으로부터 12.5kW 의 복사열을 얻으며, 이러한 값은 facet 크기가 커짐에 따라 $200 \times 200\text{mm}$ 까지는 비교적 완만히 감소하다가 이후부터는 급격히 감소하여 $300 \times 300\text{mm}$ 에서는 효율 및 열용량이 각각 81.8%, 10.5kW 까지 감소한다. 이러한 이유

는 facet 크기가 $200 \times 200\text{mm}$ 보다 커지면 반사경에서 반사된 태양 복사열이 초점면에 집중되지 않고 주위로 많이 퍼짐으로서 흡수기 주위로의 유출 손실이 급격히 증가하기 때문이다. 반면, 작동 온도 200°C 일 때는 최고 약 93.1%의 흡수기 효율을 가지며, 태양으로부터 12.2kW 정도의 복사열을 흡수하는 것으로 예측되었다. 따라서, 본 시스템의 작동 온도의 범위에선 facet 크기가 $200 \times 200\text{mm}$ 가 가장 적합함을 알 수 있다.

그림 11은 기존 KIER 반사경과 $200 \times 200\text{mm}$ 조각 거울로 이루어진 반사경에서 흡수기 효율 및 열용량을 작동 온도에 따라 그래프로 비교한 것이다. 전반적으로 $200 \times 200\text{mm}$ facet으로 이루어진 반사경일 때가 기존 KIER 반사경 형태에 비해서 우수한 성능을 나타내는데, 이러한 이유는 조각 거울이 $200 \times 200\text{mm}$ 일 때는 수평면에 대한 반사경의 투상면적이 기존 반사경에 비해 약 68% 큼으로서 보다 많은 태양 복사열을 집광시키면서 흡수기 주위로의 유출 손실이 작기 때문이다. Dome형 흡수기에 있어서 작동온도가 100°C 일 때는 기존 반사경에서 흡수기 효율 보다 약 0.8% 크다가 작동온도가 증가함에 따라 그 편차는 커져 약 3.1%까지 증가하게 된다. 또한, 흡수기 열용량은 평균적으로 이전 반사경에 비해

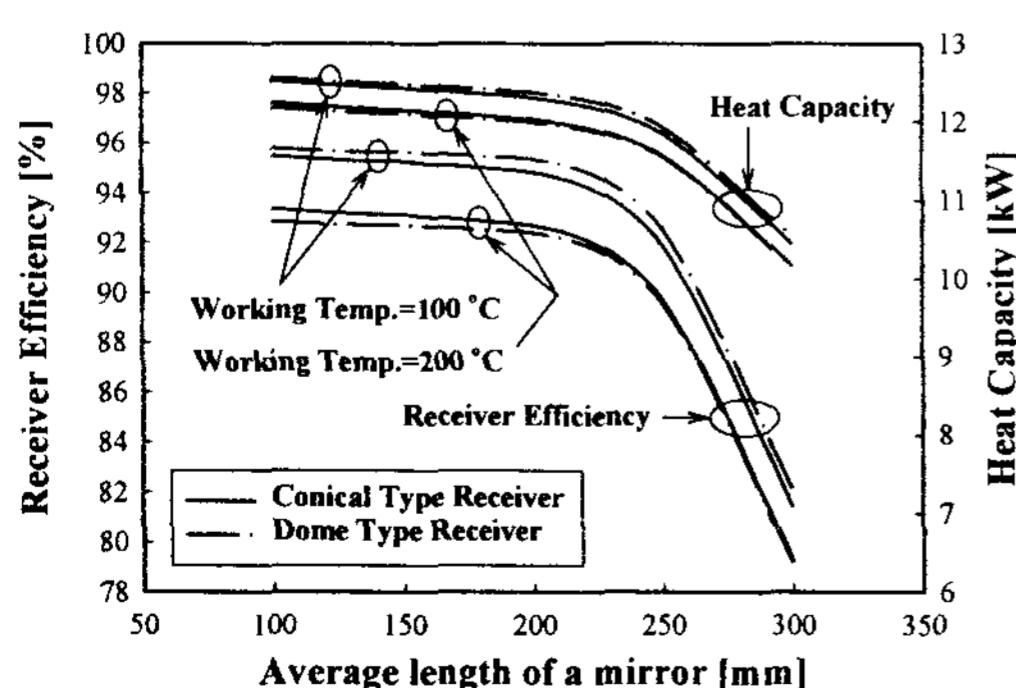


Fig. 10. Thermal efficiency and Heat capacity for Conical and Dome type receiver

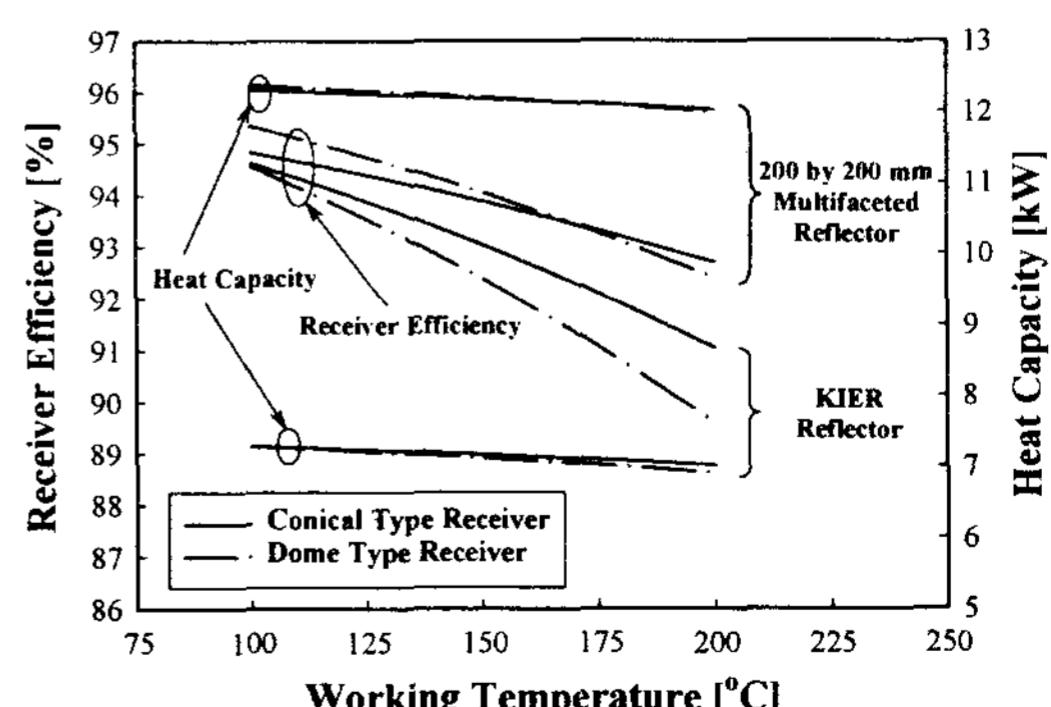


Fig. 11. Comparison of thermal efficiency for KIER reflector and $200 \times 200\text{mm}$ Multifaceted parabolic reflector system

약 71.6% 증가하였다. Conical형 흡수기에서 효율 및 태양열 흡수율이 이전 시스템에 비해 최고 각각 1.8%, 71.5% 증가하였다.

5. 결 론

본 연구에선 기존 한국에너지기술연구소 태양열 집광 시스템에서 반사경의 형상을 Multifaceted Parabolic Dish형으로 하였을 때 Conical형 및 Dome형 흡수기에서 열손실을 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 흡수기 입구면에서의 열유속 분포는 반사경의 조각 거울 크기에 따라 매우 크게 영향을 받으며, 그 크기가 $200 \times 200\text{mm}$ 이상부터는 흡수기 밖으로 유출되는 태양 복사열이 급격히 증가한다.
2. 조각 거울 크기에 따라 흡수기 효율 및 열용량을 조사한 결과 $200 \times 200\text{mm}$ 조각거울일 때 흡수기에서의 큰 열손실의 증가 없이 비교적 좋은 성능을 나타내었다. 이때 두 개의 흡수기에 대해서 평균적으로 효율 및 열용량은 저온 구간에선 각각 95.1%, 12.3kW에서 작동 온도가 증가함에 따라 감소하여, 200°C 일 때는 각각 약 92.5%, 12.0kW까지 떨어진다.
3. $200 \times 200\text{mm}$ 조각 거울일 때 흡수기 형상에 따른 총열손실을 살펴본 결과 저온 구간에선 Dome형이, 고온 구간에선 Conical형 흡수기가 유리함을 알 수 있었다.
4. 기존 KIER 반사경과 조각 거울 크기가 $200 \times 200\text{mm}$ 일 때 비교한 결과 현 시스템에 비해 흡수기 효율은 작동온도에 따라 Dome형 흡수기에 있어선 0.8~3.1%, Concial형의 경우 0.2~1.8% 증가하였다. 반면, 열용량은 평균적으로 70% 증가하였다.
5. 본 연구에선 반사경에서 반사된 복사강도

분포를 가장 이상적인 데이터를 이용하였으나, 집열기의 추적 오차 및 반사경의 표면 오차에 관한 실험 데이터가 나오면 보다 정확한 예측이 가능 할 것이다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 2000년도 대체에너지 연구 과제로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. G. McDonald, "Heat Loss from an Open Cavity, Sandia National Laboratories Report", SAND95-2939, 1995.
2. N. D. Kaushika, "Viability aspects of paraboloidal dish solar collector systems", Renewable Energy Vol.3, No.617, 1993, pp.787~793.
3. P. LeQuere, F. Penot and M. Mirenayat, "Experimental Study of Heat Loss through Natural Convection from an Isothermal Cubic Cavity", Sandia National Laboratories Report, SAND81-8014, 1981, pp.165~174.
4. A. A. Koenig and M. Marvin, "Convection Heat Loss Sensitivity in Open Cavity Solar Receivers", Final Report, DOE Contract No. EG77-C-04-3985, 1981.
5. J. A. Harris and T. G. Lenz, "Thermal Performance of Solar Concentrator/Cavity Receiver Systems", Solar Energy, Vol.34, No.2, 1985, pp.135~142.
6. W. B. Stine and C. G. McDonald, "Cavity Receiver Convective Heat Loss, Proceeding

- of the International Solar Energy Society Solar World Congress", Kobe, Japan, 1989, pp.1318~1322.
7. D. L. Siebers and J. S. Kraabel, "Estimating Convective Energy Losses from Solar Central Receivers", Sandia National Laboratories Report, SAND84-8717, 1984.
 8. A. M. Clausing, "Convective Losses from Cavity Solar Receivers-Comparisons between analytical Predictions and Experimental Results", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 105, 1983, pp.29~32.
 9. M. F. Modest, "Radiative Heat Transfer", McGraw Hill, 1993, p.193~209, p.790.
 10. W. J. Yang et al., "Advances in Heat Transfer", Vol.27, Academic Press, 1995.
 11. S. M. Jeter, "The Distribution of Concentrated Solar Radiation in Paraboloidal Collectors", Journal of Solar Energy Engineering, Vol.108, 1986, pp.219 ~225.
 12. F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th End. Wiley, 1996, p.368~371.
 13. S. Y. Ryu and T. B. Seo, "Estimation of Heat Losses from the Receivers for Solar Energy Collecting System of Korea Institute of Energy Research", Journal of Korea Society of Mechanical Engineers, Vol.14, No.11 (in press), 2000.