

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 27, No. 1, 2007

반사경 배치와 흡수기 형상에 따른 접시형 고온 태양열 시스템 성능비교

마대성*, 김용*, 서태범**

*한국인하대학교 기계공학과 대학원, **인하대학교 기계공학부대학교 대학원

Performance Comparison of Dish Solar Collector With Mirror Arrays & Receiver Shapes

Ma, Dae-Sung*, Kim, Yong*, Seo, Tae-Beom**

*Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Inha University(seotb@inha.ac.kr),

**Dept. of Mechanical Engineering, Inha University(bp-mds@hanmail.net)

Abstract

In order to analyze the performance comparison of dish solar collector with mirror arrays and receiver shapes, the radiative heat flux distribution inside the cavity receiver is numerically investigated. The solar irradiation reflected by dish solar collector is traced using the Monte-Carlo method. Five different dish solar collectors and three different cavity receivers are considered. A parabolic-shaped perfect mirror of which diameter is 1.5 m is considered as a reference dish solar collector and four different arrays of twelve identical parabolic-shaped mirror facets of which diameter are 0.4 m are used. Their reflecting areas, which are 1.5 m², are the same. Three different cavity receiver shapes are dome, conical, and cylindrical. In addition, the radiative properties of the concentrating surfaces can vary the thermal performance of the cavity receiver so that variation of the surface reflectivity of each mirror is considered. Based on the calculation, the design information of dish solar collector for producing the electric power can be obtained. The results show that the dome type has the best performance in receiver shapes and the 2AND4 INLINE has the best performance in mirror arrays except perfect mirror.

Keywords : 태양열 집열기(Solar dish concentrator), 공동형 흡수기(Cavity receiver)

기 호 설 명

Q	: 복사 열량 [W]
N	: 입자 개수
q	: 열유속 [W/m^2]
Ar	: 반사경 면적 [m^2]
Ω	: 입체각 [sr]
I	: 복사강도 [W/m^2]
ρ	: 반사율

1. 서 론

최근 유가의 급등과 더불어 신재생에너지는 환경친화적인 청정에너지로서 기후변화협약과 화석에너지 고갈에 대한 적극적인 대응방안으로 관심을 모으고 있다. 현재 정부의 국내 신재생에너지 보급 목표는 2006년 에너지소비량의 3%, 2011년 5%로 설정하고 있으며, 이를 위해 기술개발, 보급정책 및 지원제도 개선 등 다양한 활동을 펼치고 있다.¹⁾

태양열 발전은 저온용($100^{\circ}C$ 이하), 중온용($100\sim 300^{\circ}C$), 고온용($300^{\circ}C$ 이상)의 3가지로 크게 분류할 수 있다. 이들 중 중·고온 이용 분야인 집광형 집열기는 집광 형태의 기하학적 구조에 따라 진공관형, PTC(parabolic Trough concentrator)형이나 CPC(Compound Parabolic Concentrator)형, 접시형, Solar Tower형으로 나눌 수 있다.²⁾

현재 태양열 고집광 관련 기술은 매우 빠른 성장기에 있으며 향후 중장기적인 관점에서 태양열 이용의 극대화를 달성하기 위해서는 보다 새로운 개념의 고효율 집광기술 개발과 설계, 그리고 이용기술의 최적화가 필요하다. 이런 고효율 고집광 기술의 대표적인 것이 바로 접시형 고온 태양열 시스템이다.³⁾

일반적으로 산업용 공정열이나 전력을 생산하기 위해 접시형 고온 태양열 시스템이 이용되고 있으며, 세계적으로 이에 대한 많은 연구가 진행 중에 있다. 지금까지 성공적으로 개발된 접시형

고온 태양열 시스템으로는 미국 Solar Total Energy Project(STEP)에 의해 제작된 7m 직경의 단일 접시로 이루어진 집열기 및 호주 White Cliffs에 설치된 약 2300개의 100×100 mm의 조각 거울로 포물선형 반사판으로 형성된 집열기등을 들 수 있다.⁴⁾

국내 연구사례는 한국 에너지기술연구원에서 접시형 고온 태양열 시스템 KIERDISH I, KIERDISH II를 개발 및 설치·운영하고 있으며, 설계 및 제작 기술을 확보하고 있다. 하지만, 반사경 배치 및 흡수기 형상에 따른 열유속 분포에 대한 연구는 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 접시형 고온 태양열 시스템의 반사경 배치 및 흡수기 형상에 따른 시스템의 열성능 변화를 분석하고자 한다. 이를 위해 4가지의 반사경 배치 형태와 3가지 흡수기 형상이 제안되었다. 각각의 서로 다른 반사경 배치와 흡수기 형상에 대해 통계적인 방법으로 복사 열전달을 해석하여 흡수기 내부에서의 복사 열유속 분포를 계산하고자 한다. 계산 결과로부터 각각의 경우에 대한 흡수기의 열성능을 분석하며 성능이 가장 우수한 반사경 배치 및 흡수기 형상 조합을 찾고자 한다.

실제 접시형 고온 태양열 시스템에서 흡수기의 성능을 계산하고자 할 경우 복사 손실뿐만 아니라 대류 손실도 고려해야 한다. 그런데, 대류 손실은 개구부의 면적이 클수록, 내부 표면적이 클수록 증가한다. 한편 복사손실은 개구부 면적이 클수록, 내부 표면적이 작을수록 증가한다. 따라서 흡수기 성능은 이 두 가지 손실을 모두 고려해야 정확하게 예측할 수 있으나 본 연구에서는 복사 열전달만을 고려하기로 한다. 대류 손실에 대한 연구는 추후 계획 중이다.

2. 모델링

2.1 초점면 열유속 분포 모델링

계산을 수행하기에 앞서 기준이 되는 반사경 배

치는 단일접시(perfect mirror)⁴⁾로 정하였다. 그림 1은 단일접시로 구성된 고온 태양열 집열기를 보여주고 있다. 개구부 직경은 2.81 m이고, 반사경의 표면은 포물면이다. 흡수기의 위치는 반사경의 초점 위치인 1.5 m 지점에 위치한다.

반사경 배치에 따른 접시형 고온 태양열 시스템의 성능 변화를 알아보기 위해 Catia(Dassault systems)을 사용하여 그림 2와 같이 전체 개구부 면적이 단일 접시와 동일한 4가지의 반사경 배치를 모델링하였다. 각각의 반사경 배치는 12개의 동일한 거울을 사용하였고, 반사경의 표면은 포물면이 되도록 하였다. 각 반사경의 직경은 0.4 m이고, 초점거리는 1.5 m이다. 흡수기의 상대적 위치는 모두 반사경의 초점거리인 1.5 m 지점에 위치한다.⁵⁾

그림 3는 반사경의 미소면적 dA_r 과 초점면의 임의의 점 P사이의 관계를 나타낸 것이다. 복사강도의 정의로부터 식(1)와 같은 계산을 통해 임의의 점 P에서의 태양 복사열에 의한 열유속을 알 수 있다.

$$q = \int d\Omega I \cos \theta \quad (1)$$

여기서, 입체각(solid angle)은 다음과 같이 표현된다.

$$d\Omega = \frac{dA_r \cos \theta_r}{\rho^2} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 표면의 반사율이다.

초점면의 열유속 분포를 보기 위해서 표면이 흑체 성질을 가지는 원형판을 초점면에 위치시켰다. 그리고 인천지역의 한해 평균 직달 일사량인 4.4~4.8 kWh/m²⁶⁾, 연평균 일조시간 2337.2 hr/year(769.94 W/m², 500,000 ray)의 태양광을 반사경에 입사시켰다. 또한, 모든 태양빛이 반사경 개구부를 향해 수직으로 입사하도록 하였다.

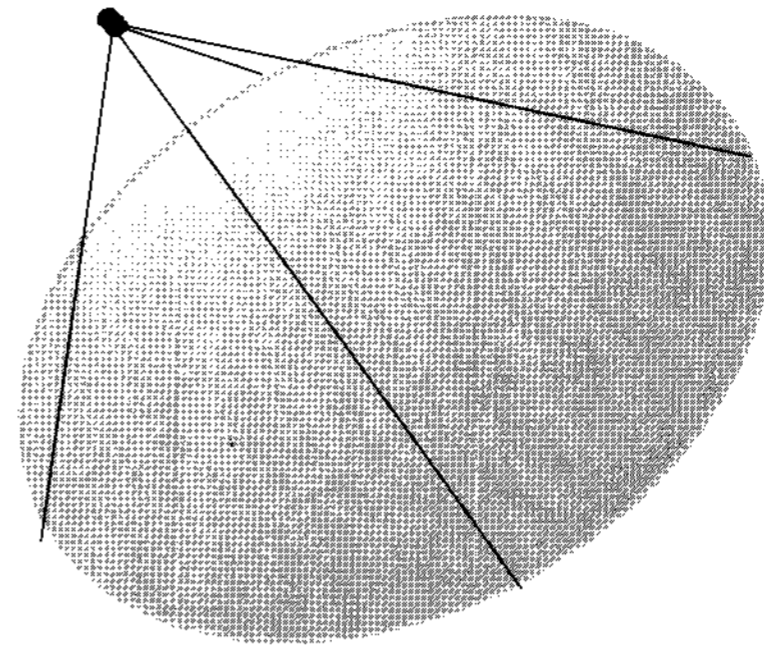


그림 1. Array of mirror (Case I : Perfect mirror)

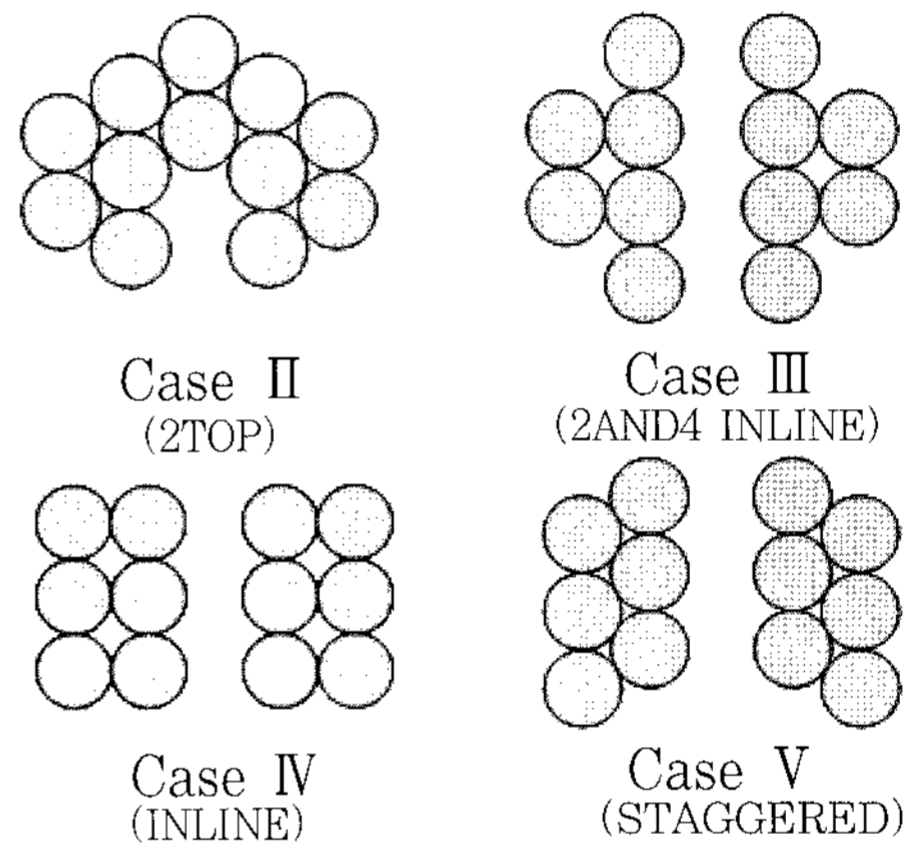


그림 2. Array of mirrors(Case II~V)⁵⁾

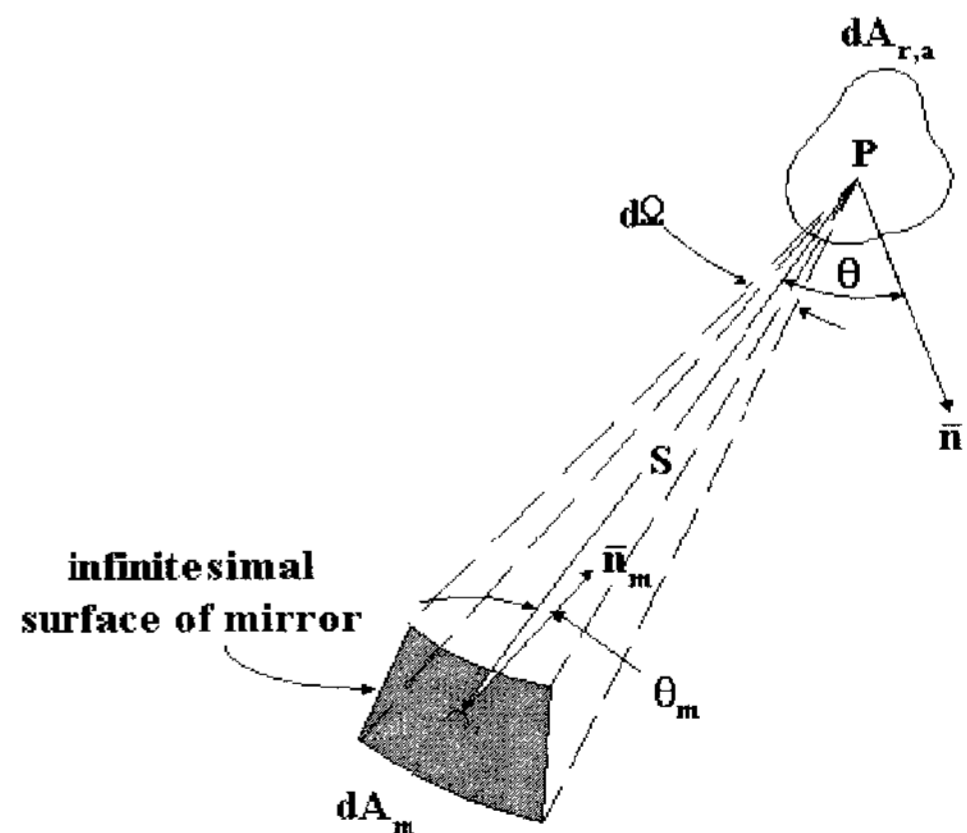


그림 3. Geometric relationships between two infinitesimal surfaces

2.2 흡수기 내부 열유속 분포 모델링

고온 태양열 집열기 복사 열전달 및 흡수기 내부의 태양열 복사를 모델링하기 위해 Monte Carlo Method⁴⁾를 사용하는 광학 해석 프로그램인 TracePro를 사용하였다. Monte Carlo Method는 초기에 광원에서 난수(Random number)를 생성시켜 반사경에 균일한 광자다발(Photon bundle)을 분포시켰다. 반사경은 광자다발을 정반사(specular reflector) 시키므로 반사경의 형상에 따라 반사된 광자다발의 진행방향을 알 수 있다. 이렇게 반사된 광자다발은 흡수기 입구로 들어와 내부 표면에 부딪힌 후 흡수 또는 반사된다. 이러한 Ray Tracing은 광자다발이 흡수기 표면에 흡수되거나 흡수기 개구부로 빠져나갈 때까지 반복된다. 이러한 과정을 충분히 많은 광자다발을 이용하여 반복 계산함으로써, 확률적으로 실제와 근사한 값을 구할 수 있다. 이때 N개의 태양광이 흡수기 안으로 들어와서 이 가운데 흡수기 내부 표면에 흡수된 개수를 N_a 라고 하면, 흡수기 내부 표면의 반사에 의한 복사 손실 값은 다음과 같은 식(3)으로 나타낼 수 있다.⁴⁾

$$Q_{RL} = Q_{IN} \frac{N - N_a}{N} \quad (3)$$

흡수기 형상 변화에 따른 접시형 고온 태양열 시스템의 성능 변화도 알아보기 위해, 그림 4과 같은 3가지 모양을 제안하였다. 각 흡수기 모두 폭이 160 mm이고, 높이가 170 mm로 동일하다. 또한 각 흡수기의 개구부(aperture) 직경도 0.15 m로 동일하다.

앞서 제안한 개구부 면적, 초점거리가 같은 5가지 반사경의 배치 및 표면특성에 따른 흡수기 내부에서의 열유속 분포 형태와 크기를 비교할 것이다. 또한, 제안한 각 흡수기 형상 및 표면특성에 따른 흡수기 내부 열유속 분포 형태 및 흡수기 성능도 비교하고자 한다.

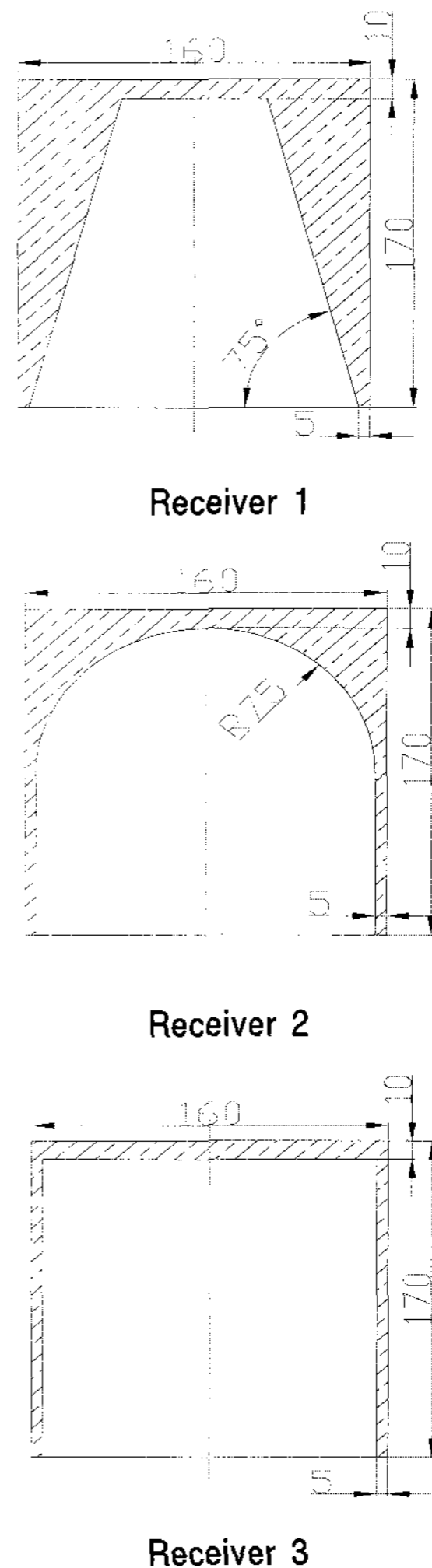


그림 4. Receiver shape4)

3. 결과 및 고찰

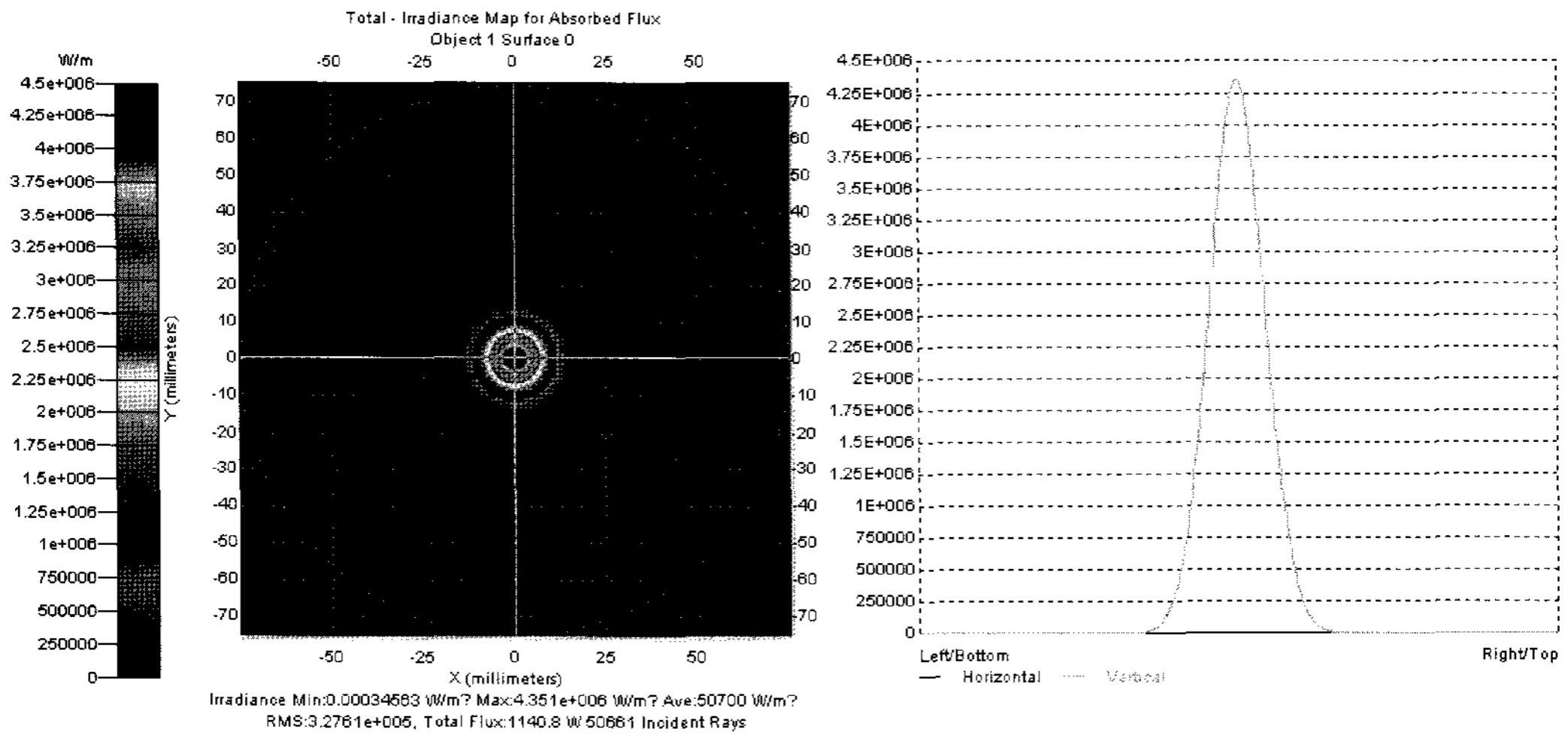
3.1 초점면 열유속 분포

반사경 배치에 따른 초점영역에서 열유속 분포 모습을 그림 5에서 보여주고 있다. 이 때 반사경 표면 특성은 반사율(Total hemispherical reflectivity) 0.9, 흡수율(Total hemispherical absorptivity) 0.1이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 각 반사경의 배치 특성에 따라서 초점면에 서로 다른 열유속 분포가 나타나는 것을 볼 수 있다. Case

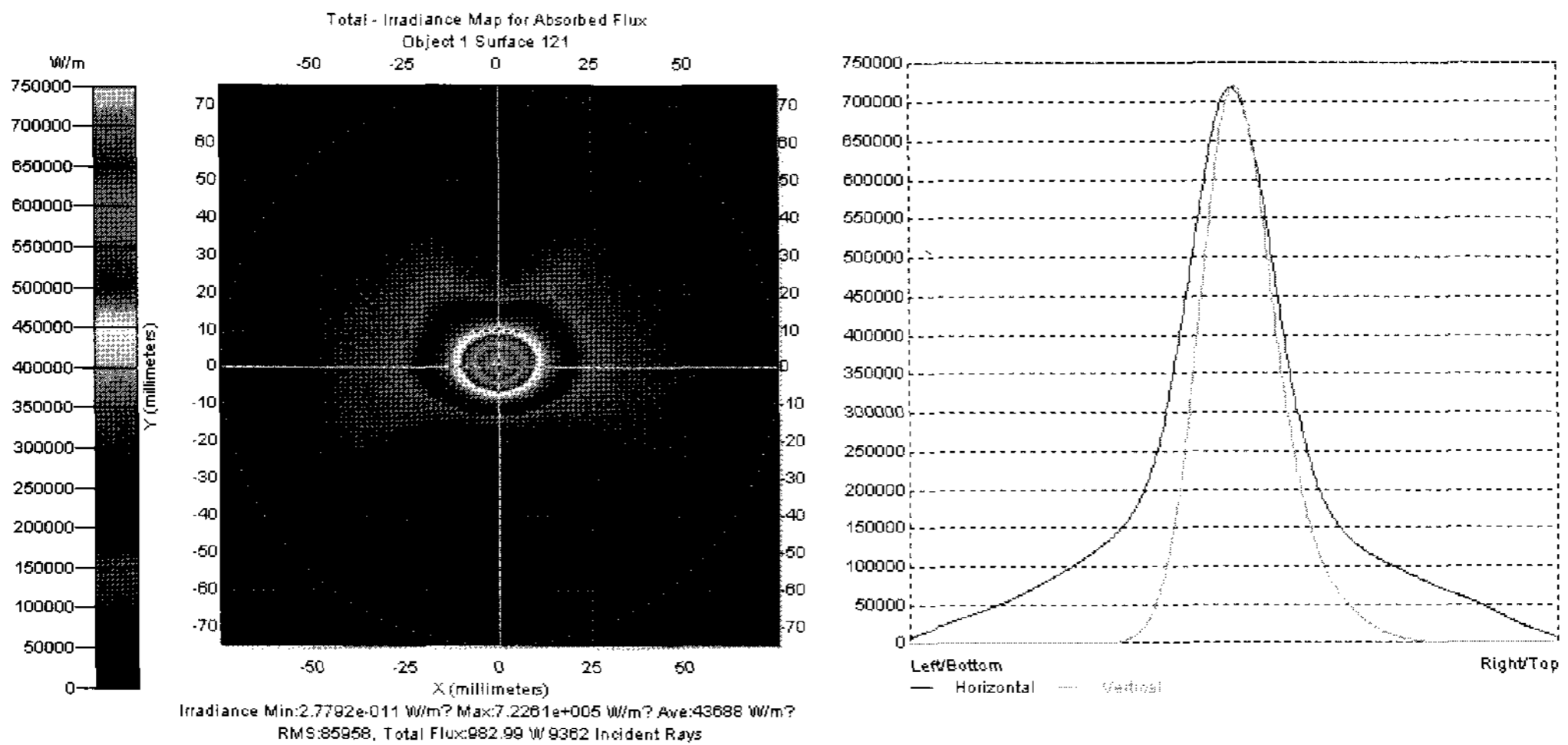
I의 경우 가장 조밀하게 열유속이 분포하는 것을 알 수 있었고, Case III, IV, V는 비교적 넓은 영역에 열유속이 분포하는 것을 알 수 있었다. Case II의 경우는 비교적 양호한 집광 분포를 보여 주었다. 실제 접시형 고온 태양열 시스템에서는 반사경 배치에 따라 초점면에서의 열유속 분포가 다르므로, 흡수기 개구부 직경이 서로 달라져야 한다. 하

지만, 본 연구에서는 비교를 위한 기준으로 흡수기 개구부 직경을 동일하게 결정 하였다.

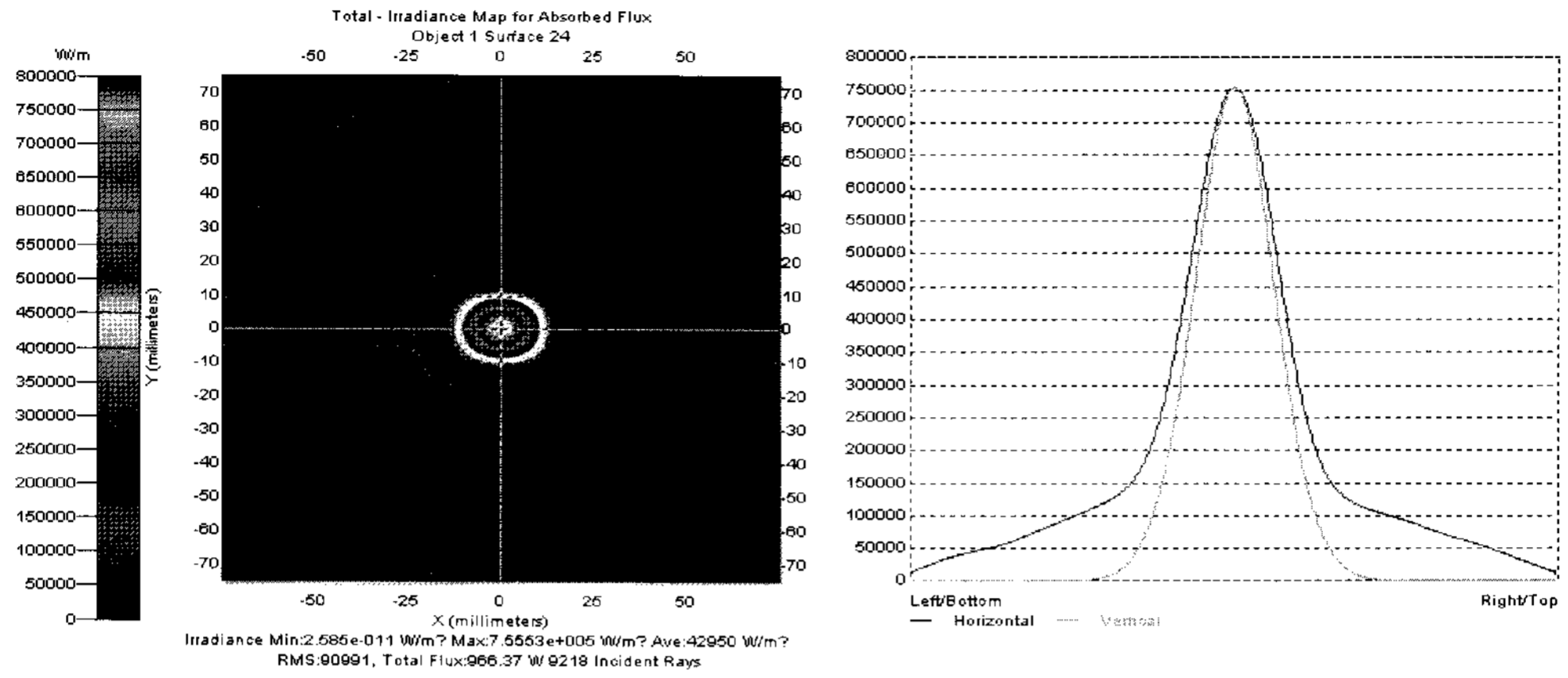
일반적인 흡수기 설계 시 흑체에 도달하는 태양 복사량의 90% 이상을 흡수 할 수 있는 흑체의 직경과 동일하게 흡수기 개구부 직경을 정한다.⁷⁾ 따라서, 그림 5의 결과를 통해 흡수기의 개구부 직경을 0.15m로 정하였다.



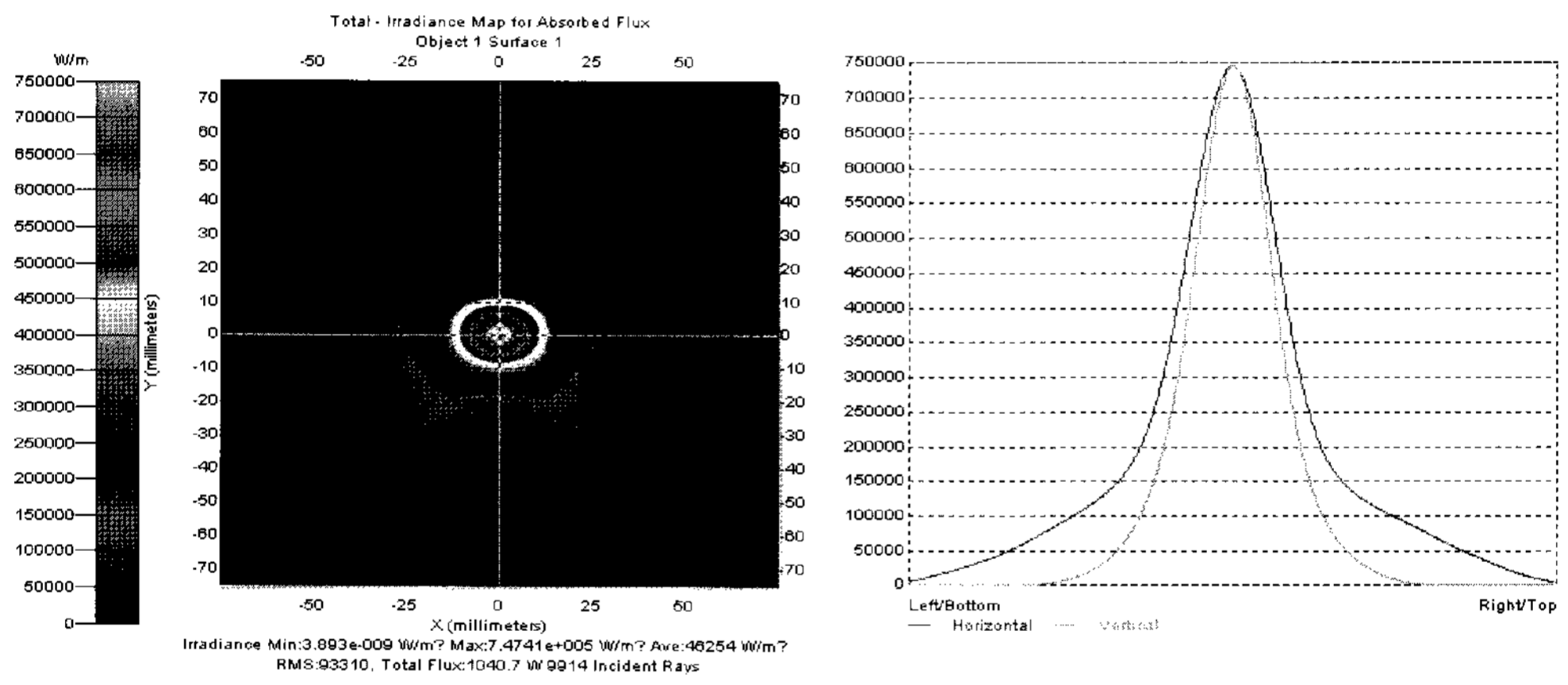
(a) Case I



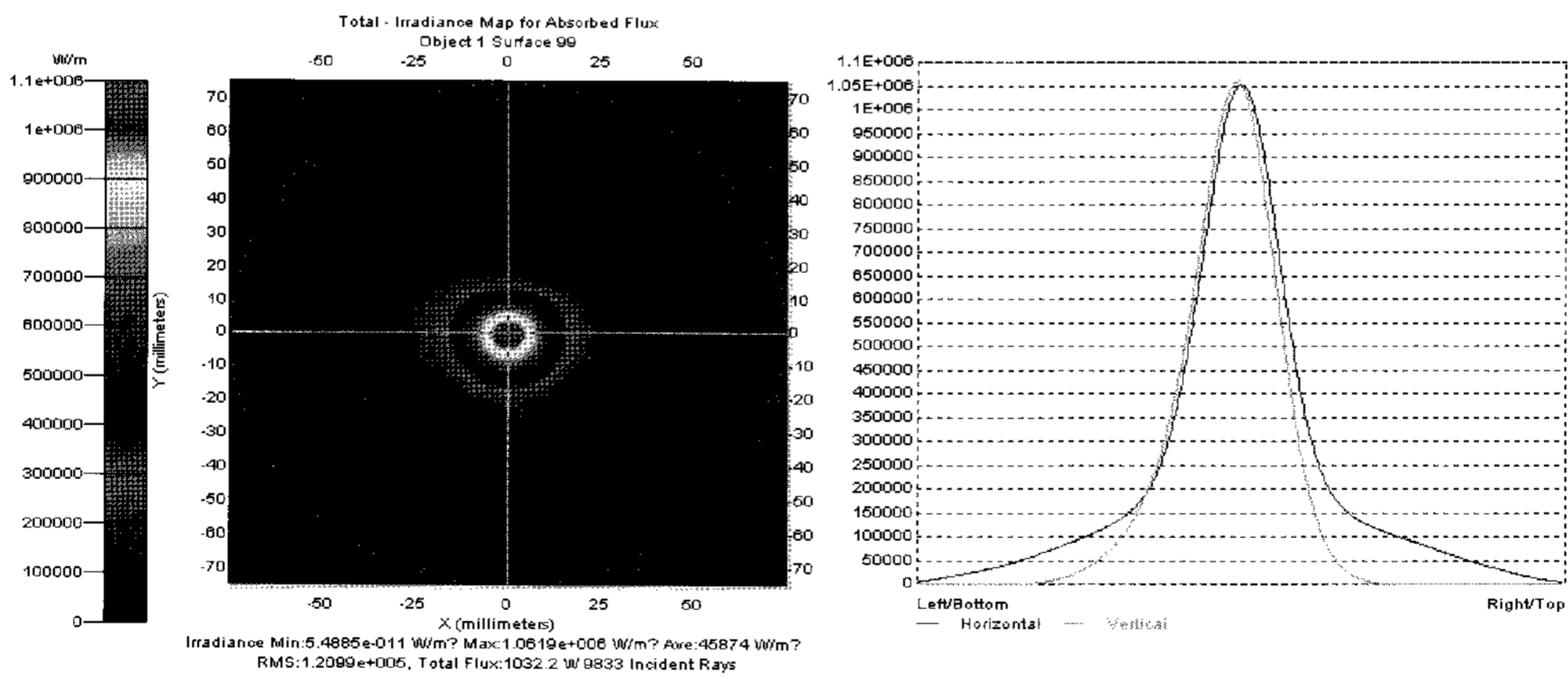
(b) Case II



(c) Case III



(d) Case IV



(e) Case V

그림 5. Distribution of heat flux(Case I~V)

3.2 반사율 변화 결과

그림 6은 흡수기의 표면 특성을 일정하게 하고 반사경의 반사율을 변화시키면서 흡수기에 흡수되는 에너지의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 전체 흡수된 에너지는 반사율의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 제안한 반사경 배치 중 전체 흡수된 에너지가 가장 많은 반사경 배치는 Case I 이고, 가장 적은 반사경 배치는 Case IV이다. Case I은 연구에 앞서 가장 좋은 성능을 보일 것으로 예상되었다. 따라서 Case I을 제외하면 Case III이 전체 흡수된 에너지가 가장 많다는 것을 그림 6으로부터 알 수 있다.

또한, 반사경의 반사율 변화에 따른 전체 흡수된 에너지 변화의 기울기는 모든 반사경 배치에서 동일하다. 이 결과를 통해 반사경의 반사율이 변하면 전체 시스템의 성능도 선형적으로 변함을 알 수 있다. 이 사실은 반사율 변화가 전체 시스템의 성능을 변화시키는 주요 인자로서 작용할 수 있음을 알려준다.

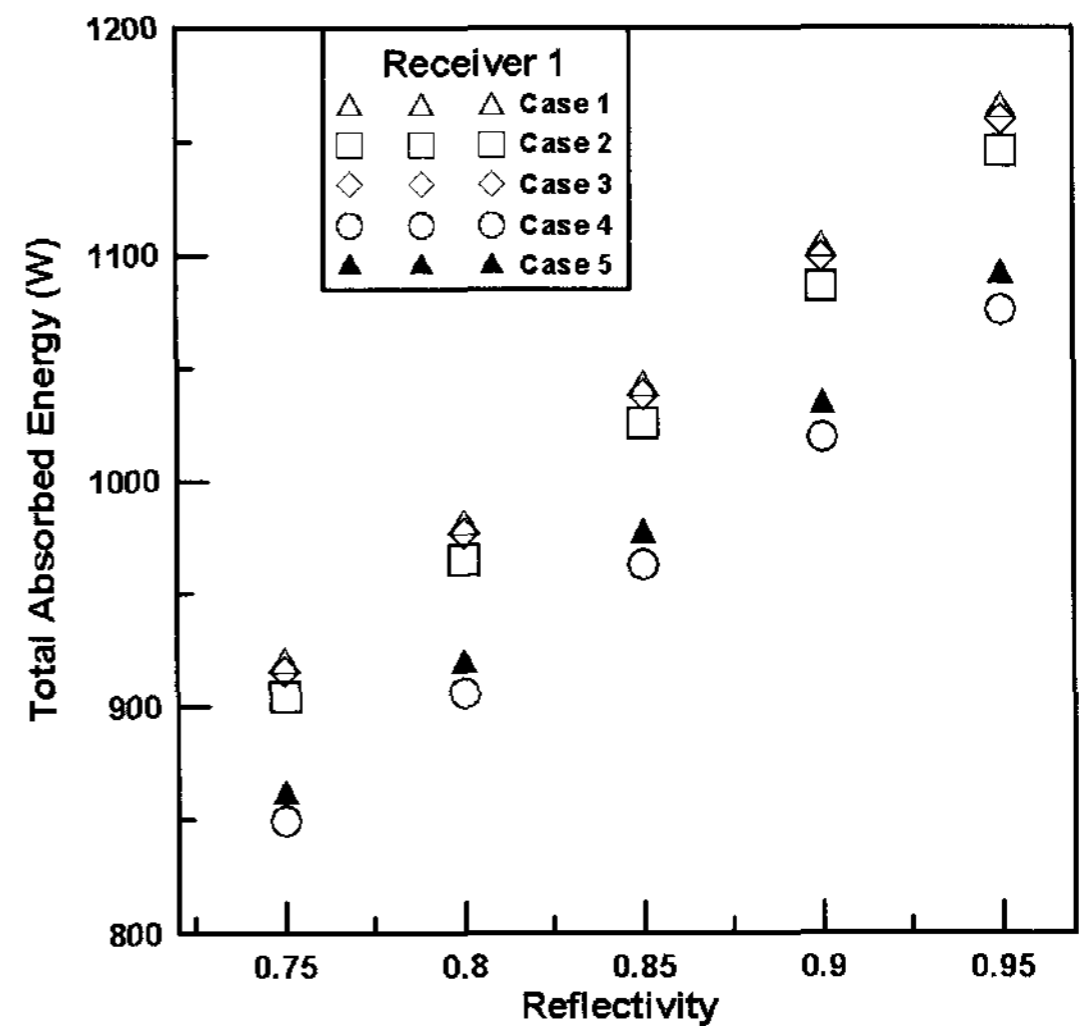
반사경 배치 및 반사율 변화에 따른 결과를 표 1~3에 정리하였다. 연구에 앞서 Case I은 단일접시이므로 가장 높은 성능을 보일 것으로 예상하였다. 예상과 결과가 일치함을 표 1~3으로부터 확인할 수 있다. 두 번째로 높은 성능을 보인 반사경 배치는 Case III이다. 수치를 비교해 보면 Case I과의 차이가 2% 내로 매우 작은 것을 알 수 있다.

각 흡수기의 형상에 따라 최고 성능을 보인 Case I과 최저성능을 보인 Case IV를 비교하면, Case IV의 평균은 Case I의 평균의 약 92% 수준이다. 따라서 최적의 반사경 배치를 사용하면 약 10% 내의 전체 시스템 성능 향상에 기여할 것이다. 이를 통해 반사경 배치에 따른 전체 시스템의 성능 변화의 정도를 알 수 있다.

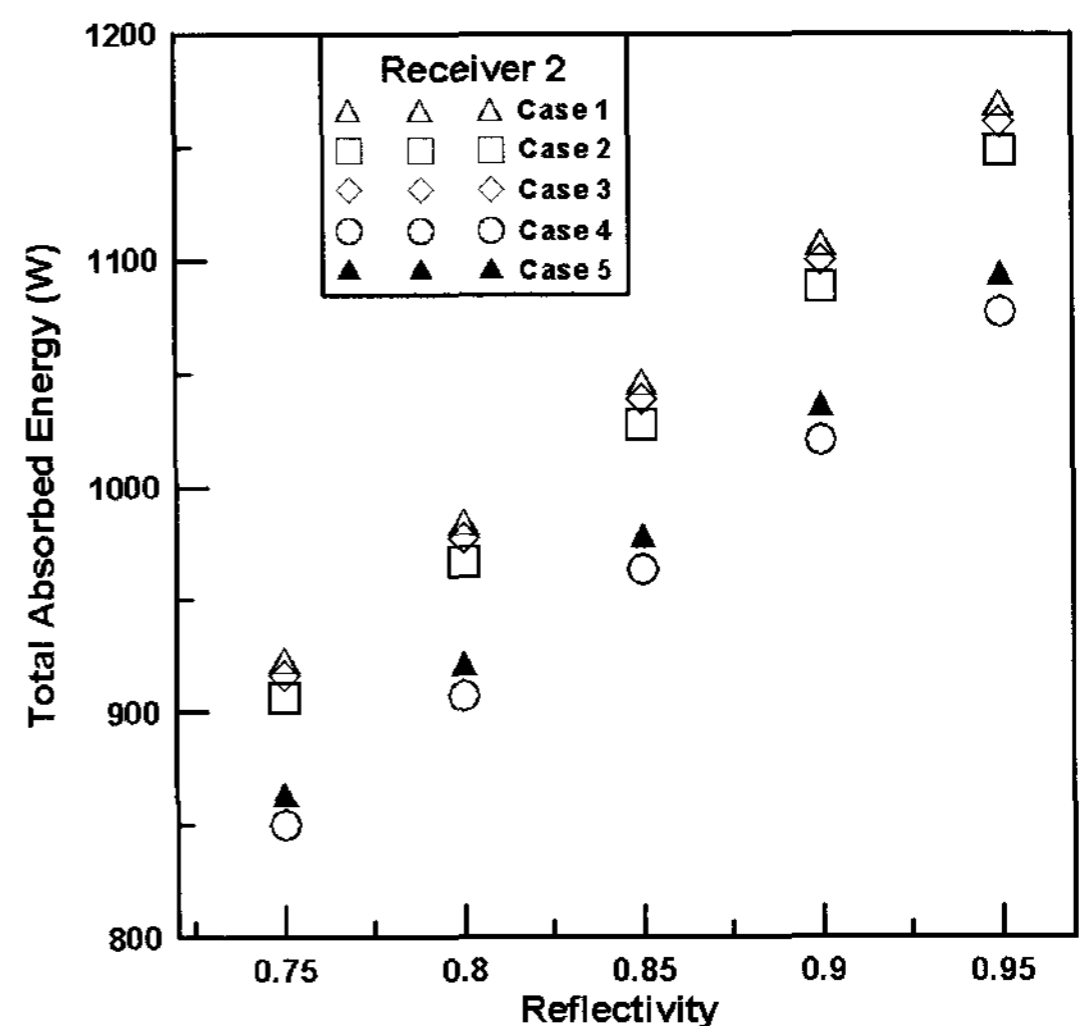
표 1~3에서 전체 흡수된 에너지의 최대값은 receiver 2(Case I)에서 반사율이 0.95인 경우

이고 최소값은 receiver 3(Case IV)에서 반사율 0.75인 경우이다. 따라서 약 28%의 성능 향상이 가능한 것으로 표 1~3은 알려주고 있다.

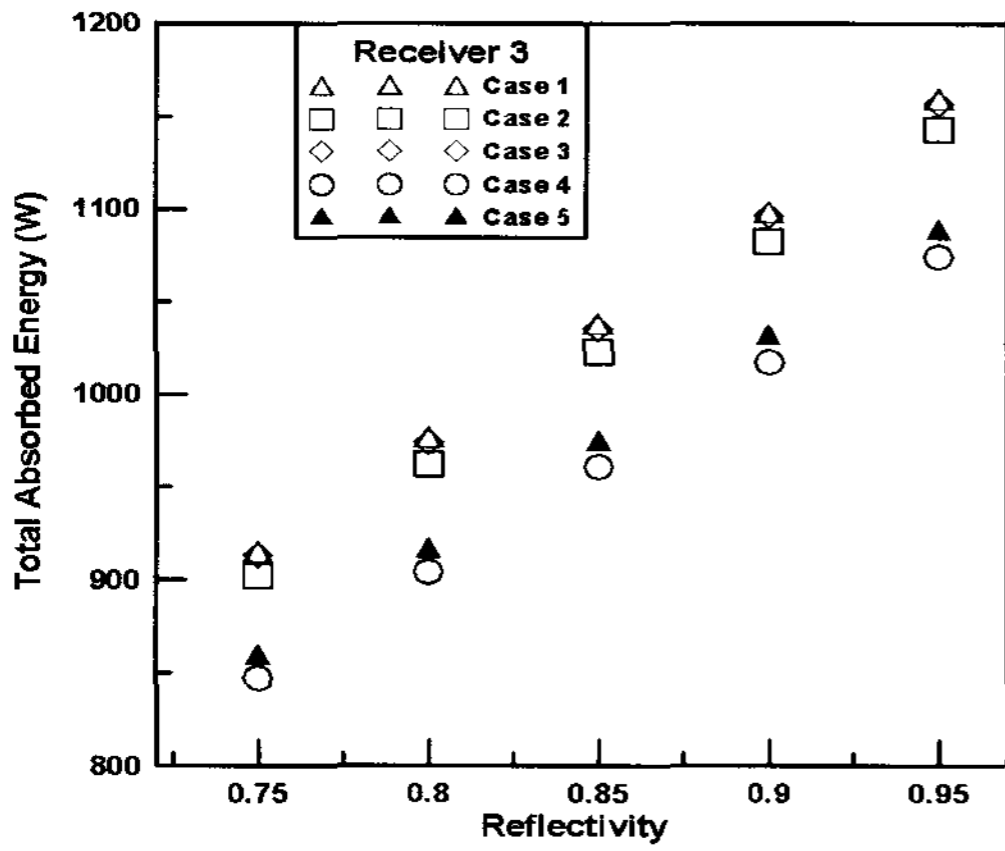
또한 각 흡수기 형상에 따른 흡수기의 성능 비교를 하면 표 1~3에서 볼 수 있듯이 receiver 2 - receiver 1 - receiver 3의 순서로 높은 성능을 보여준다.



(a) Receiver 1



(b) Receiver 2



(c) Receiver 3

그림 6. Total absorbed energy with reflectivity (Receiver 1~3)

표 1. Absorbed energy in receiver 1(그림 6)

	Case I	Case II	Case III	Case IV	Case V
0.75	920.10	904.66	915.75	849.29	860.95
0.8	981.49	964.97	976.80	905.91	918.34
0.85	1042.89	1025.29	1037.85	962.53	975.74
0.9	1104.30	1085.60	1098.90	1019.15	1033.14
0.95	1165.71	1145.91	1159.95	1075.76	1090.54

Unit : W

표 2. Absorbed energy in receiver 2(그림 6)

	Case I	Case II	Case III	Case IV	Case V
0.75	922.98	906.55	916.37	850.35	862.13
0.8	984.51	966.99	977.46	907.04	919.60
0.85	1046.05	1027.43	1038.55	963.73	977.08
0.9	1107.59	1087.86	1099.64	1020.42	1034.5
0.95	1169.13	1148.30	1160.74	1077.11	1092.03

Unit : W

표 3. Absorbed energy in receiver 3(그림. 6)

	Case I	Case II	Case III	Case IV	Case V
0.75	915.44	902.03	913.38	847.71	858.58
0.8	976.52	962.17	974.28	904.23	915.82
0.85	1037.61	1022.30	1035.17	960.74	973.06
0.9	1098.71	1082.44	1096.06	1017.26	1030.30
0.95	1159.81	1142.57	1156.95	1073.77	1087.54

Unit : W

3.3 흡수율 변화 결과

그림 7은 반사경의 표면 특성을 일정하게 하고 흡수기의 흡수율을 변화시키면서 전체 흡수된 에너지의 변화를 그래프로 나타내었다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 전체 흡수된 에너지는 흡수율이 증가함에 따라 점진적으로 증가함을 알 수 있다. 흡수율이 증가할수록 전체 흡수된 에너지의 증가량은 점점 둔화되는 것을 알 수 있다.

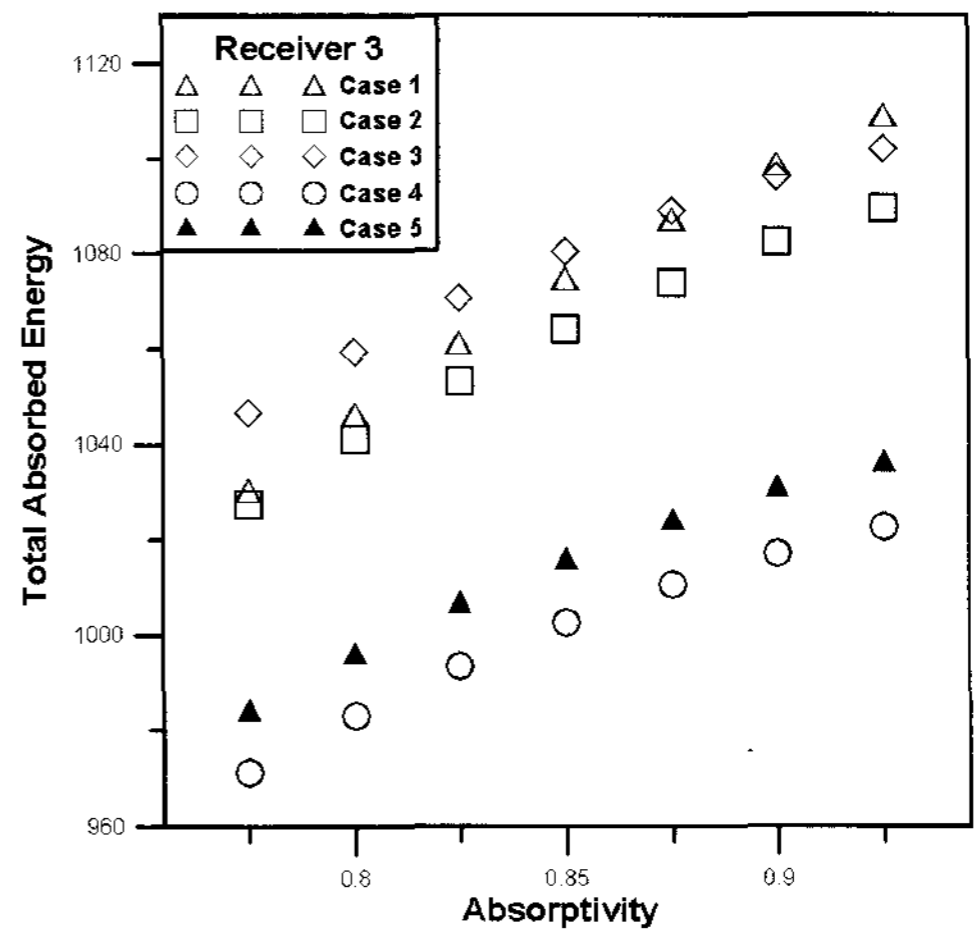
또한, Case I의 경우 흡수율 변화에 따른 전체 흡수된 에너지의 증가율이 다른 4가지 경우 보다 크다. 그림에서 볼 수 있듯이 흡수율이 0.85이하인 경우 Case III이 가장 높은 성능을 보였고, 흡수율이 0.875 이상인 경우 Case I이 가장 높은 성능을 보였다. 따라서 다른 경우 보다 Case I의 경우 흡수율이 증가함에 따라 전체 시스템의 성능은 다른 경우보다 급격히 증가 할 것이다.

반사경 배치 및 흡수기 내부 표면의 흡수율 변화에 따른 결과를 표 4~6에 정리하였다. 연구에 앞서 Case I이 가장 높은 성능을 보일 것으로 예상하였다. 하지만 예상과 결과가 일치하지 않음을 표 4~6으로부터 확인할 수 있다. 낮은 흡수율에서는 Case III이 가장 높은 성능을 보였고, 높은 흡수율에서는 Case I이 가장 높은 성능을 보였다. 이 사실은 다음과 같이 해석할 수 있다. 높 흡수율인 경우에는 재반사에 의한 영향이 적다. 따라서 초점면에서 작아 재반사에 의한 영향을 적게 받는 Case I이 더 높은 성능을 보였다. 하지만 낮은 흡수율에서는 재반사에 의한 영향이 증가한다. 따라서 초점면에서 넓어 재반사에 의한 영향을 크게 받는 Case III이 더 높은 성능을 보였다. 수치를 비교해 보면 약 1% 정도로 차이가 매우 작은 것을 알 수 있다.

각 흡수기의 형상에 따라 최고 성능을 보인 Case I의 평균과 최저 성능을 보인 Case IV의 평균을 비교하면, 흡수율 0.775에서 약 6.4% 차이를 보였지만, 흡수율 0.925에서 약 8.2%의 차이를 보였다. 이를 통해 흡수율이 증가하게 되

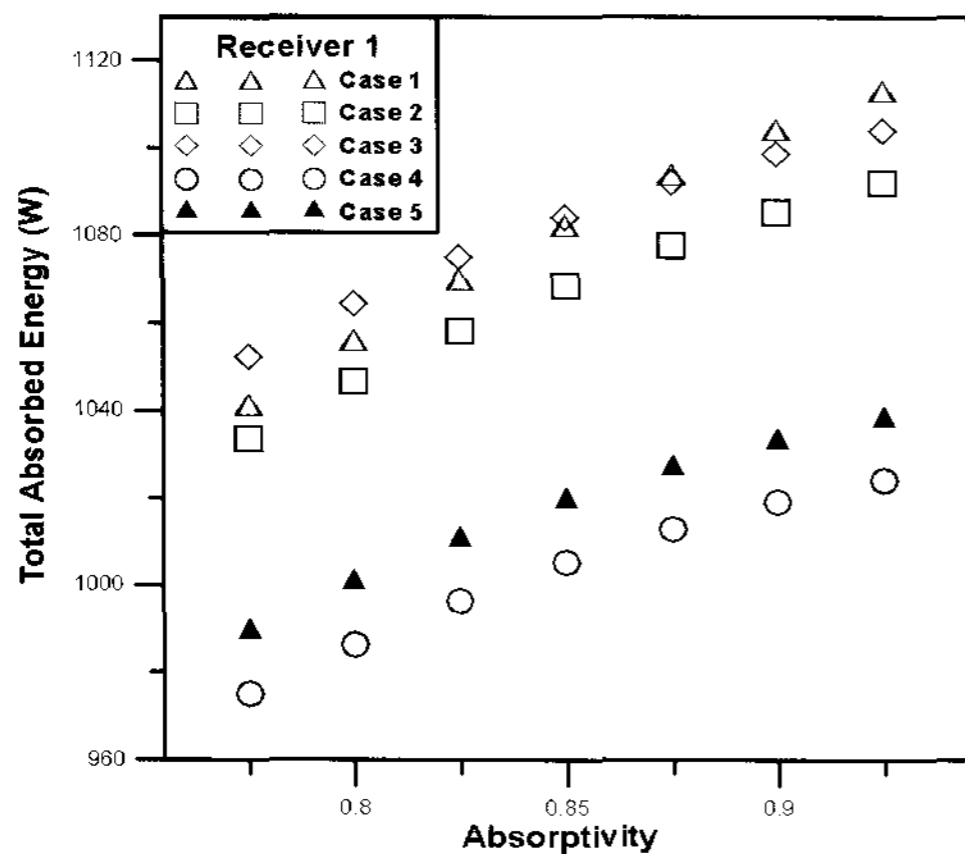
면 반사경 배치에 따라 성능차이가 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 흡수기 성능이 높아질수록 최적 반사경 배치가 매우 중요함을 알 수 있다.

표 4~6에서 전체 흡수된 에너지의 최대값은 receiver 2(Case 1)에서 흡수율이 0.925인 경우이고 최소값은 receiver 3(Case IV)에서 흡수율 0.775인 경우이다. 따라서 약 13%의 성능 향상이 가능한 것으로 표 4~6은 알려주고 있다. 또한 각 흡수기 형상에 따른 흡수기의 성능을 비교하면 표 4~6에서 볼 수 있듯이 receiver 2 - receiver 1 - receiver 3의 순서로 높은 성능을 보여준다.



(c) Receiver 3

그림. 7 Total absorbed energy with absorptivity (Receiver 1~3)

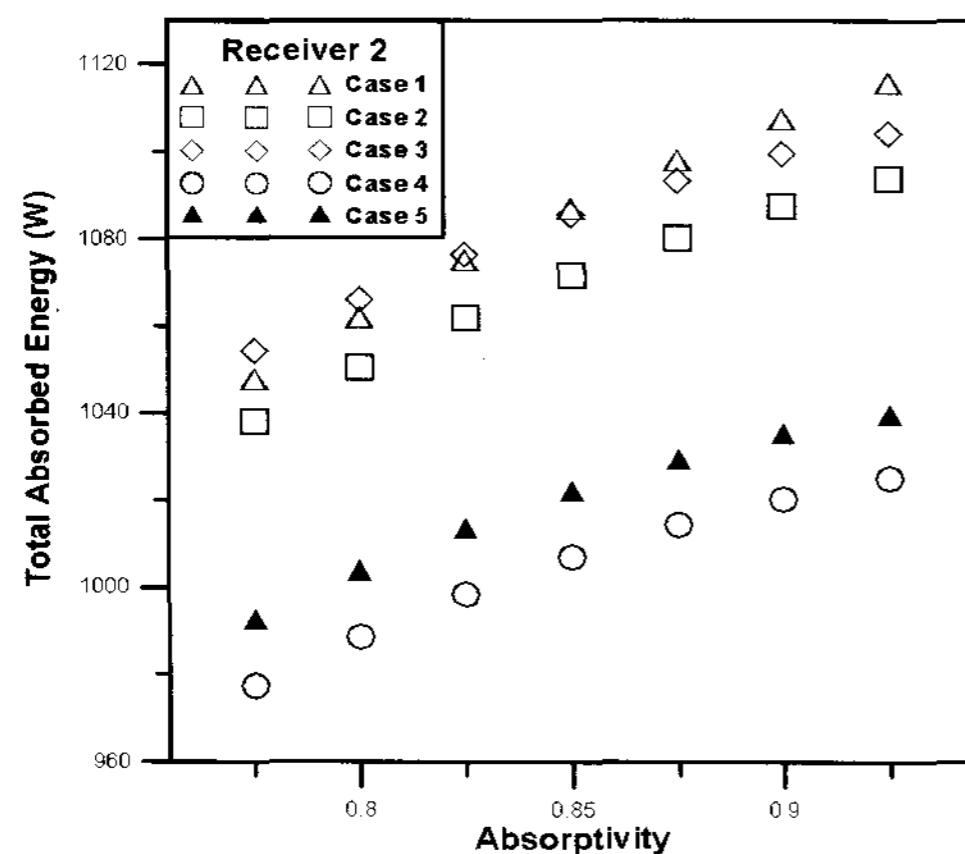


(a) Receiver 1

표 4. Absorbed energy in receiver 1(그림 7)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
0.775	1041.37	1033.73	1052.34	975.04	989.27
0.8	1056.29	1046.66	1064.39	986.38	1000.62
0.825	1070.05	1058.31	1075.07	996.46	1010.68
0.85	1082.63	1068.68	1084.38	1007.09	1019.45
0.875	1094.05	1077.78	1092.33	1012.84	1026.94
0.9	1104.30	1085.60	1098.90	1019.15	1033.14
0.925	1113.39	1092.15	1104.11	1024.20	1038.06

Unit : W



(b) Receiver 2

표 5. Absorbed energy in receiver 2(그림 7))

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
0.775	1047.75	1038.12	1054.43	977.51	992.01
0.8	1062.15	1050.69	1066.25	988.64	1003.13
0.825	1075.33	1061.95	1076.68	998.50	1012.95
0.85	1087.30	1071.89	1085.73	1007.09	1021.45
0.875	1098.05	1080.54	1093.38	1014.39	1028.66
0.9	1107.59	1087.87	1099.65	1020.43	1034.56
0.925	1115.92	1093.89	1104.53	1025.18	1039.15

Unit : W

표 6. Absorbed energy in receiver 3(그림 7)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
0.775	1030.54	1027.61	1046.84	971.38	983.77
0.8	1046.35	1041.04	1059.34	983.02	995.573
0.825	1061.08	1053.24	1070.52	993.43	1006.13
0.85	1074.71	1064.21	1080.36	1002.6	1015.43
0.875	1087.26	1073.94	1088.88	1010.5	1023.49
0.9	1098.71	1082.44	1096.07	1017.3	1030.31
0.925	1109.08	1089.71	1101.92	1022.7	1035.87

Unit : W

4. 결론

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

- (1) 반사경의 반사율 증가에 따라 전체 흡수된 에너지는 선형적으로 증가하였다.
- (2) 흡수기 내부표면의 흡수율 증가에 따라 전체 흡수된 에너지는 점차적으로 증가하였다.
- (3) 제안된 흡수기 형상 중 가장 높은 성능을 보인 흡수기는 Receiver 2(Dome type) 이다.
- (4) 제안된 반사경 배치 중 가장 높은 성능을 보인 반사경 배치는 Case I이다. Case 1(Perfect Mirror)를 제외하고는 Case III이 가장 최적 반사경 배치였고, Case IV는 가장 적은 에너지를 집광하므로 최저 성능을 보였다.
- (5) 제안된 구성 중 최적 시스템 구성은 반사경을 Case I으로 배치하고 흡수기는 receiver 2를 사용할 때라는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호: 005-N-SO14-P-01-0-000)

참 고 문 헌

1. Shin, U. C., An Experimental Study on the Solar Hot Water Heating System for the Dormitory of University, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 2, pp.103-109, 2006.
2. Ryu, S. Y., An Analysis of Heat Losses from a Receiver for a Dish-Type Solar Energy Collecting System, Inha University, Incheon, Korea, 1999.
3. Kang, M. C., Flux Density Distribution of the Dish Solar Concentrator (KIERDISH), Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 24, No. 4,, pp.11-18 2004.
4. Ryu, S. Y., An Analysis of Heat Losses from Receivers for a Multifaceted Parabolic Solar Collector, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 20, No.3, pp. 61-73, 2000.
5. Thomas, R. M., Analysis and Design of Two Stretched - Membrane Parabolic Dish Concentrators, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 113, pp. 180-187 ,1991.
6. Jo, D. K., A Survey of Direct Normal Insolation Resources for the Construction of Solar Thermal Power Generation Sites in Korea, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25 No. 1, pp. 11-18, 2005.
7. Johnston, G., Focal Region Measurements of the 20 m² Tiled Dish at the Australian National University, Solar Energy, Vol. 63, No. 2, pp. 117 - 124, 1998.