

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 25, No. 1, 2005

진공관형 태양열 집열기의 집열관 형상에 따른 태양 복사 에너지 흡수량의 변화

서태범*, 강희동**, 김 용***

*인하대학교 기계공학과(seotb@inha.ac.kr), **인하대학교 대학원 기계공학과(princaps38@hanmail.net),
***인하대학교 대학원 기계공학과(kimyong1012@hotmail.com)

Absorbing Rate of Solar Irradiation on Glass Evacuated Tube Collectors Depending on the Absorbing Tube Shape

Seo, Tae-beom*, Kang, Hee-Dong**, Kim, Yong***

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

**Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University(princaps38@hanmail.net),

***Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Inha University(kimyong1012@hotmail.com)

Abstract

The absorbing rate of solar irradiation on the surface of an absorbing tube in a glass evacuated solar collector is numerically investigated. Four different shapes of the absorbing tubes are considered, and the absorbed solar irradiation on the surface is calculated for several distances between the absorbing tubes and the incidence angle of solar beam radiation. From the calculation, it is known that the absorbing rate of solar irradiation on the tube surfaces depends upon the shape and the arrangement of absorbing tube and the incidence angle.

Keywords : 진공관형 집열기(Evacuated tubular collector), 일사량(Solar radiation), 집열관(Absorbing tube)

기 호 설 명

q : heat flux(W/m²)
I : insolation(W/m²)

k_T : 청명도
F : energy absorption rate
D : diameter
 L_f : the length of fin

Q : solar energy(W/m)

1. 서 론

우리나라는 1970년대 이후 산업화의 과정을 통하여 엄청난 경제발전을 이룩해오고 있지만, 이에 대한 부작용으로 막대한 양의 에너지를 소비하고 있고 해마다 그 소비가 증가하고 있다. 현재 국내에서 소비되고 있는 모든 에너지의 97% 이상이 해외로부터 수입되고 있으며, 이러한 에너지 자원의 수입을 위해 사용되고 있는 돈이 총수입액의 1/5에 이르고 있다.

따라서 가능한 한 많은 양의 대체에너지 활용이 정부를 중심으로 추진되고 있다. 현재 많은 종류의 대체에너지가 활용되고 있고, 이 중에서 태양열에너지의 활용이 큰 부분을 차지하고 있다. 태양열에너지를 활용하기 위해 다양한 형태의 수집장치들이 사용되고 있으며, 이 중에서 진공관형 집열기는 진공관 내부에 집열관을 설치하여 태양열에너지를 얻는 방법으로 가정용 및 산업용으로 활용하기에 매우 적절한 방법 중 하나이다. 진공관형 태양열 집열기는 선택 흡수 코팅과 흡수기 부분의 진공 기술을 통해 80°C이상의 중·고온의 작동 온도에서 평판형 집열기에 비해 높은 효율을 얻을 수 있다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 진공관형 태양열 집열기의 열손실은 평판형 집열기에 비해 상당히 적기 때문에, 이에 대한 연구는 주로 집열기의 각 요소의 개선을 통한 성능 향상에 초점이 맞추어져 왔다. 그러나 집열기의 성능이 태양열을 직접 받아 흡수하는 집열관 형상에 상당한 영향을 받는다는 사실이 여러 연구^(2,3)에서 밝혀졌다. 특히, He Zinian⁽³⁾의 연구에서는 평판 형상과 반원 형상의 흡수기의 성능을 비교한 결과 반원 형상의 집열 능력이 평판 형상에 비해 15.9%가 뛰어난 것을 밝혔다. 그러나, 아직까지 집열관의 다양한 형태에 대해 집열기의 성능을 비교 분석한 연구는 그리 많지 않은 편이다. 또한, 직달일사 각도, 산란일사,

인접한 집열관으로부터의 간섭 등 다양한 설계인자들에 대한 자세한 연구가 부족한 편이다.

따라서 본 연구에서는 4개의 서로 다른 집열관 형상에 대해 진공관형 집열기가 얻을 수 있는 태양복사에너지의 양을 계산하고자 한다. 그리고, 집열관 직경, 집열관과 집열관 사이의 거리, 태양의 고도 등의 변화에 따른 에너지 흡수량의 변화를 계산하여 이중진공관형 집열기 설계의 기초 자료를 확보하고자 한다.

2. 태양에너지 흡수량 계산

2.1 계산 모델

계산에 사용된 집열기는 모두 10개의 집열관으로 구성되어 있다고 가정하였으며, 각 집열관의 단면 형상은 그림 1에 나타내었다. 각 유리관의 중심 사이의 거리는 67mm로 가정하였으며, 유리관의 내경은 38mm, 외경은 42mm로 가정하였다.

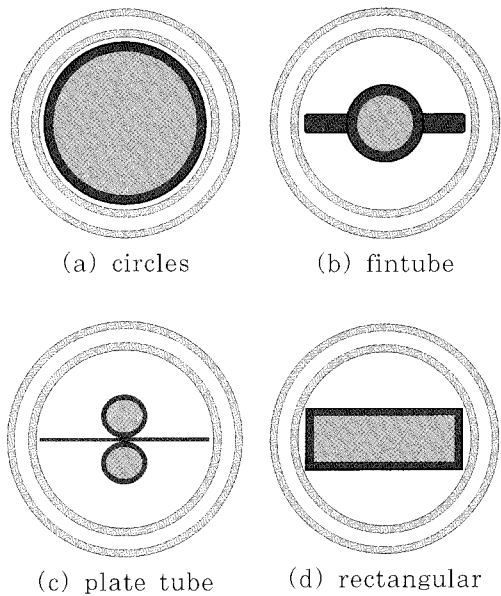


그림 1. 집열관의 단면도

첫 번째 형상은 일반적으로 사용되는 유리관에

꼭 차는 크기의 원 관이고, 두 번째 형상은 원 관의 양 옆으로 fin을 단 형상이다. 세 번째 형상은 관과 관 사이에 평판 fin을 단 형상이며, 네 번째 형상은 사각형 모양의 덕트이다. 계산에 사용된 내부 집열관의 길이 및 재질은 표 1에 나타내었다.

표 1. 집열관의 재질 및 형상길이(단위: mm)

재질	(a)	(b)	(c)	(d)
	구리			
외경(폭)	33.8	19.05	12.7	30.44
fin(높이)	.	7.375	33.8	13.7
길이	1000	1000	1000	1000

2.2 계산 방법

2.2.1 일사량의 계산

조덕기 등⁽⁴⁾은 지리산 일대의 두 지역의 일사량을 측정하였다. 따라서 여기에서는 조덕기 등⁽⁴⁾이 측정한 값을 최대값이 1000W/m²이 되도록 수정하여 얻은 식을 계산에 이용하였으며, 식(1)과 같다.

$$q = 1000 - 0.01813 \times \angle - 0.07158 \times \angle^2 + 0.001331 \times \angle^3 - 1.8505 \times 10^{-5} \times \angle^4 \quad (1)$$

여기에서 q 는 일사량(W/m²)이며, \angle 은 12시의 고도를 0°로 6시의 고도를 90°로 나타낸 태양의 고도[°]이다.

2.2.2 산란 복사에너지의 계산

태양열 집열기는 태양으로부터 직접 오는 직달 일사와 대기나 기타 주변의 물체에 의한 산란 일사를 흡수함으로써 에너지를 얻게 된다. 따라서 직달 일사량뿐만 아니라 산란 일사량을 정확히 아는 것이 전체 성능을 예측하는데 매우 중요하다.

태양광은 대기권 내의 여러 작용을 겪으면서 지표면에 도달하게 된다. 따라서 대기권 내의 많은 조건에 따라서 일사량이 크게 변하게 된다. 맑은

날은 흐린 날보다 많은 일사량을 얻을 수 있으며, 흐리거나 비나 눈이 오는 날은 맑은 날에 비해 현격한 일사량의 감소 현상을 가져오게 된다. 따라서 이때 대기권 밖의 일사와 실제 일사량의 비인 청명도를 사용하며, 식(2)와 같다.

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

여기서 I 는 실제 지면에서 받는 일사량이고, I_0 는 대기권 밖에서의 일사량이다. 본 연구에서는 청명도를 서울시의 평균값인 0.65로 고정하였다.

이 청명도를 이용하여 실제 산란을 통해 얻을 수 있는 태양에너지의 양은 식(3)과 같다.⁽⁵⁾

$$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 \quad \text{for } 0.22 \leq k_T \leq 0.80 \quad (3)$$

여기서 I_d 는 산란을 통해 얻을 수 있는 에너지량이며, I 는 이때의 일사량이다.

2.2.3 태양복사에너지의 계산

태양광과 집열관 표면과의 직접접촉을 통한 복사 에너지의 흡수량 계산의 관 표면과 수직인 방향과 태양고도와 각의 코사인(cosine) 값을 누적하여 계산하였다. 표 2를 통하여 실제 계산에 사용된 식들을 나열하였으며, 계산을 위해 사용한 개략도를 그림 2를 통해 나타내었다. 이때 유리관의 투과율은 0.91로 가정하였으며, 집열관의 흡수율은 0.93으로 가정하여 계산하였다. 그림 2에서 ν , ν_2, ν_3 는 직달일사가 도달하는 부분이 관에서 차지하는 각도를 나타내는 것이다.

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 형상의 변화에 따른 에너지 흡수량

그림 3은 태양의 고도의 변화에 따른 형상별 에

너지 흡수량을 그림으로 표현한 것이다. 그림 3에서 보는 것처럼 (c) plate tube가 가장 많은 양의 복사 에너지를 흡수하는 것을 알 수 있다. 이는 다른 형상에 비해 산란을 통한 열흡수 면적이 7~40% 더 크기 때문이다. (a) circles의 일사량은 일정한 각도까지는 일사량의 변화는 일사량의 감소비와 같이 감소한다. 하지만 그 이후의 각도에서는 그림자의 영향으로 산란을 통해 흡수되는 양이 증가하면서 점차 작은 값을 갖게 된다.

(b) fin tube의 경우 그림자가 태양이 비치는 반대편 fin을 모두 가리기까지의 구간과 다음 집열관의 하부 표면에 도달하기까지의 구간, 그리고 그림자가 다음 집열관의 하부표면을 모두 덮고 fin을 덮을 때까지의 구간, 관이 모두 덮일 때까지의 구간으로 구분해서 계산하였다. 우선 첫 번째 구간인 그림자가 fin까지 생기지 않는 구간의 경우 한쪽 fin이 가려지기 때문에 (a)에 비해 감소 폭이 크다. 하지만 두 번째 구간의 경우는 하부표면도 직접적인 태양광을 통한 열의 흡수가 발생하기 때문에 다소 증가하는 효과를 보여준다. 세 번째, 네 번째 구간은 태양을 통한 집열 면적이 줄어들고 점차 산란으로 인한 열의 흡수가 발생하여 열의 흡수가 줄어든다.

(c) plate tube의 경우 fin tube와 마찬가지로 네 구간으로 나누어 생각할 수 있는데, 첫 번째는 다음 집열관의 하부관의 표면에 빛이 도달할 때까지의 구간이고, 두 번째 구간은 빛이 다음관의 fin에 도달할 때까지의 구간이다. 세 번째 구간은 다음관의 상부관의 표면에 도달할 때까지의 구간이고, 네 번째 구간은 상부관을 그림자가 모두 가릴 때까지의 구간이다. 첫 번째 구간의 경우 빛이 드는 반대방향의 fin에 드리워지는 그림자로 인해 감소하고, 두 번째 구간은 하부관 표면에 빛이 도달하면서 다소 증가하나 산란으로 인해 열을 받는 면적이 크기 때문에 증가폭이 매우 작아 감소폭이 작다. 세 번째 구간의 경우 다음관의 fin에 도달하는 빛이 감소하면서 줄어들며, 네 번째 구간은 관

에 도달하는 빛이 줄어들면서 감소한다.

(d) rectangular의 경우 두 구간으로 나눌 수 있다. 첫 번째 구간은 그림자가 다음관의 세로면의 표면에 도달하는 구간이고, 두 번째 구간은 세로면을 다 가릴 때까지의 구간이다. 첫 번째 구간에서는 빛이 세로로 들어오면서 직접 접촉을 통한 열의 흡수가 증가하다가 감소한다. 하지만 산란을 통한 면적이 제법 크기 때문에 감소하는 경향을 띄게 된다. 두 번째 구간은 산란을 통한 열흡수가 크게 되어 점차 더 크게 감소하게 된다.

표 3은 오후 12시부터 오후 6시까지 6시간 동안의 얻을 수 있는 에너지의 양을 각 형상별로 계산한 것이다. (a) circles의 값을 기준으로 하였을 때, (b) fin tube의 경우 12.9% 보다 적은 양의 흡수를 보였으며, (c) plate tube의 경우 22.5%의 열의 흡수의 증가를 보였다. (d) rectangular의 경우 11.8%의 열 흡수의 감소현상을 보였다. 이를 통해 (c) plate tube가 네 개의 형상 중 가장 열 흡수 효과가 가장 큰 것을 알 수가 있다.

표 3. 6시간 동안의 형상별 에너지 흡수량

Shape	Heat(KJ/m)	Q/Q _{circle} (%)
circles	6980.7	100
fin tube	6080.5	87.1
plate tube	8552.7	122.5
rectangular	6155.2	88.2

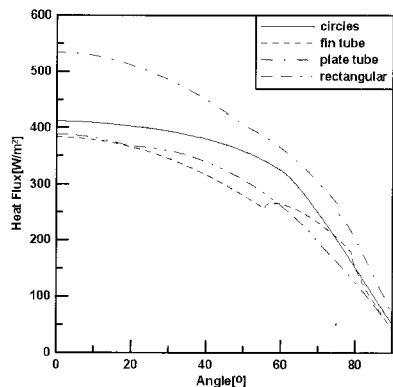


그림 3. 형상변화에 따른 에너지 흡수량

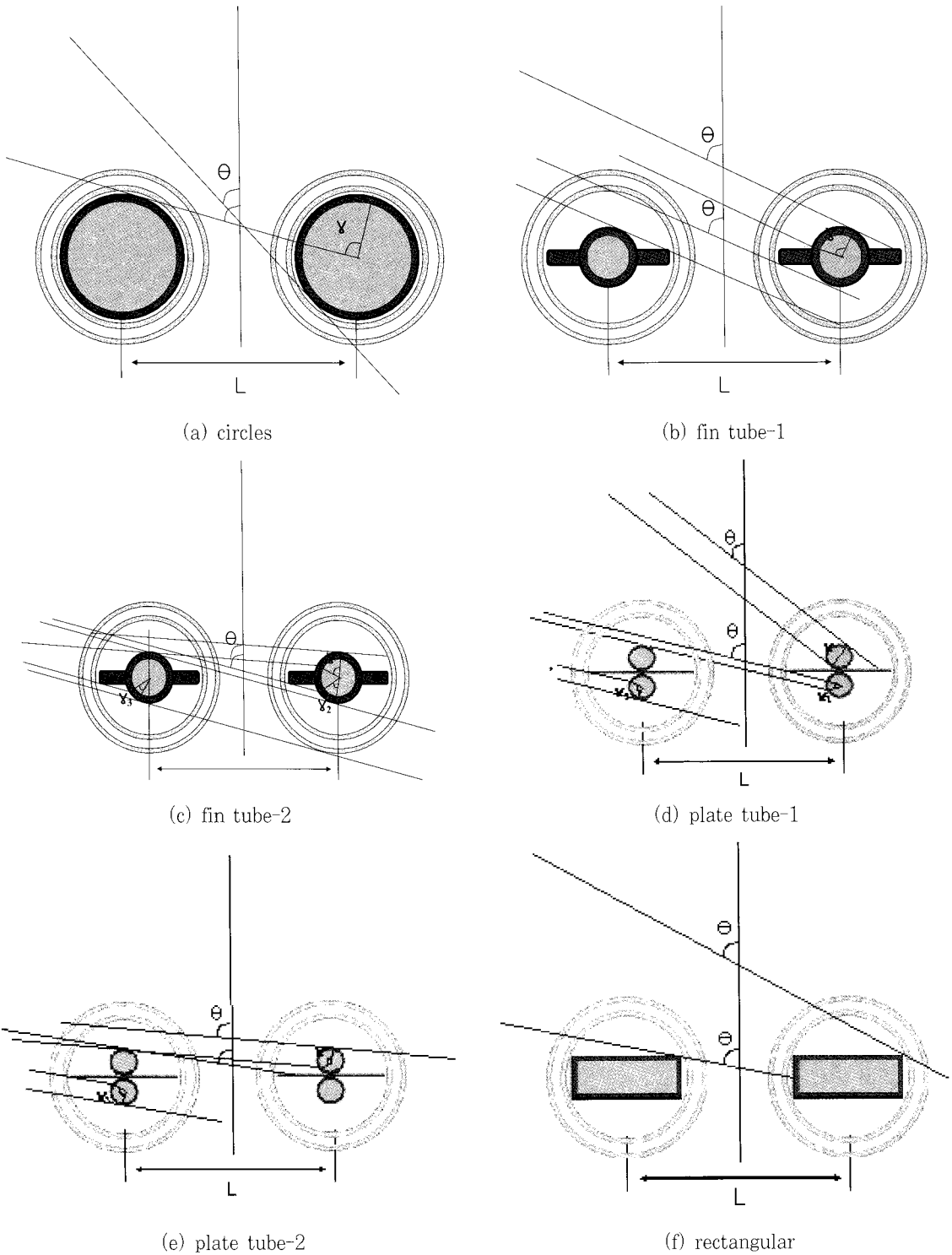


그림 2. 계산을 위한 개략도

3.2 집열관의 직경과 fin의 길이의 변화에 따른 흡수에너지 양의 변화

그림 4는 형상(b)에 대하여 집열관 직경의 변화와 fin의 길이의 변화에 따른 열 흡수량의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 집열관 직경의 증가는 열흡수의 증가를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 집열관 직경이 커질 경우 fin의 길이는 감소하지만, 집열관 직경 변화가 집열 면적에 미치는 영향이 fin 길이 변화에 의한 영향보다 크기 때문이다. 이는 fin의 길이가 0이라고 할 수 있는 circle 형상과 fin tube 형상의 비교를 통해 좀 더 명확하게 알 수 있다. 또한, 집열관의 간격을 일정하게 유지한 상태에서 집열관의 직경을 증가시키면 인접한 집열관의 영향을 빨리 받게 됨을 그림으로부터 알 수 있으며, 그 영향이 훨씬 더 오랫동안 작용하고 있다는 것을 알 수 있다.

표 4는 직경의 증가를 통해 얻을 수 있는 열에너지의 양을 나타낸 것으로 11mm를 기준으로 비교하였다. 직경이 4mm씩 증가함에 따라 5%에서 9.2%까지 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 직경의 증가에 따라 표면적이 5.0에서 8.0%까지 증가하기 때문이다. 표면적의 증가로 인해 태양광의 직접 접촉을 통한 열흡수의 증가가 더 커지기 때문에 직경이 증가하면서 면적의 증가율은 감소하는데 비해 열 흡수의 증가율은 증가한다.

그림 5는 형상(c)에 대하여 직경의 변화에 따른 열 흡수량의 변화를 보여주고 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이, 앞에서와 마찬가지로 직경의 증가는 열 흡수의 증가를 나타낸다. 이 또한 집열 면적의 증가 때문이다.

표 5는 (c)의 직경 변화에 따른 6시간 동안의 열흡수량을 표로 나타낸 것이다. 직경이 3mm씩 증가함에 따라 약 13%씩 증가하는 것을 알 수 있다.

표 6은 집열량이 가장 많은 (c) plate tube에 대해 일반적으로 발생할 수 있는 일정한 집열기 설치 면적에 대한 집열관 개수의 변화 즉, 집열관

사이의 거리 변화가 미치는 영향을 나타내고 있다. 이를 위해서 일정한 면적(폭 670mm)안에서 관의 중심사이의 거리의 변화에 따른 열 흡수량의 변화를 알아보았다. 표에서 알 수 있듯이 관사이의 거리가 증가함에 따라 집열량이 감소하고 있다. 이는 관사이의 거리가 변함에 따라 동일한 면적에서 관의 개수가 변하게 되며, 이러한 변화에서 집열 면적이 변하게 된다. 관사이의 거리의 증가는 관의 개수의 감소를 의미하고, 관의 개수의 감소는 집열 면적의 감소를 의미한다. 이러한 집열 면적의 감소로 인해 집열량이 점차 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 이 때 집열관 사이의 중심 거리가 작다면 입사각 변화에 따른 이웃 집열관에 의한 그림자 효과가 중심 거리가 큰 경우보다 더 커지지만 이보다는 집열관 개수 증가로 인한 집열량 증가가 크다는 것을 알 수 있다.

표 4. 직경의 변화에 따른 6시간 동안의 열 흡수량의 변화

Diameter(mm)	Heat(KJ/m)	Q/Q ₁₁ (%)
11	5495.3	100
15	5769.8	105.0
19	6076.5	110.6
23	6427.5	117.0
27	6840.4	124.5
31	7349.8	133.7

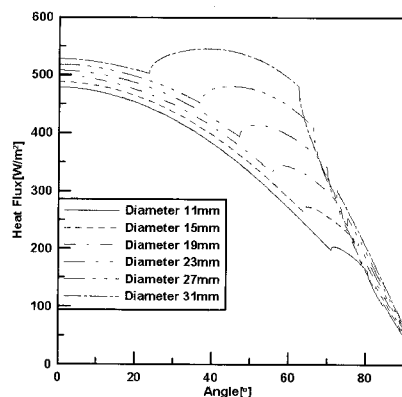


그림 4. 직경의 변화에 따른 열 흡수량의 변화

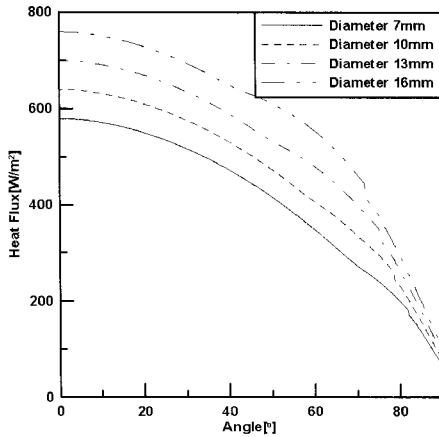


그림 5. 직경의 변화에 따른 열 흡수량의 변화

표 5. 직경의 변화에 따른 6시간 동안의 열 흡수량의 변화

Diameter (mm)	Insolation (KJ/m)	Q/Q ₇ (%)
7	6813.6	100
10	7719.4	113.3
13	8646.7	127.0
16	9597.2	140.9

표 6. 관의 중심사이 거리의 변화에 따른 6시간 동안의 열 흡수량의 변화

Distance (mm)	Number of Pipes	Insolation (KJ/m)	Q/Q ₈₇ (%)
42	15	12813.4	149.2
50	13	11142.9	129.8
67	10	8585.7	100
80	8	6869.4	80.0
90	7	6009.7	70.0

4. 결 론

집열관의 형상에 따른 집열기 전체의 열흡수량을 계산해 본 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 4가지 형상에 대한 집열량을 비교해 본 결과 가장 많은 열량의 흡수를 얻을 수 있는 형상은 plate를 관과 관 사이에 넣은 형상이었다. 이는 다른 형상에 비해 넓은 집열

면적을 갖고 있으며, 산관을 통한 열 흡수 능력이 다른 형상에 비해 매우 우수하여 나타나는 결과이다.

- (2) fin tube와 같은 형상에서 직경의 증가는 표면적의 증가를 야기하여 보다 많은 양의 열 흡수가 가능하게 한다.
- (3) plate tube 또한 직경의 증가는 표면적의 증가를 야기하여 보다 많은 열흡수를 갖게 된다.
- (4) 일정한 간격에서 관의 거리의 증가를 통한 관의 개수의 감소는 집열기의 집열량의 감소를 의미한다.
- (5) 이와 같은 결과를 통해 직접 실험과의 비교 분석이 가능할 것으로 판단되며, 본 자료를 바탕으로 앞으로의 연구에 바탕이 될 만한 자료로의 활용을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호 : 2003-N-WA03-0-000-2003)

참 고 문 헌

1. G. L. Harding, Yin Zhiqiang and D. W. Mackey, Heat extraction efficiency of a concentric glass tubular evacuated collector, Solar Energy 35, No. 1, 1985, pp.71-79.
2. R. Perez, R. Seals, J. Anderson and D. Menicucci, Calculating solar radiation received by tubular collectors, Journal of Solar Energy Engineering 117, 1995, pp. 341-344.
3. He Zinian, Ge Hongchusan, Jiang Fulin and Li Wei, A comparison of optical

- performance between evacuated collector tubes with flat and semicylindric absorbers, Solar Energy 60, No. 2, 1997, pp.109-117.
4. 조덕기, 강용혁, 오정무, 고지대 일사량 특성분석에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 23, No. 3, 2003.
 5. J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, John Willey & Sons, 2nd Edition, 1991.
 6. L. J. Shah and S. Furbo, Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions, Applied energy, Vol. 57, Issue 4, 2004, pp. 371~395.
 7. 김용, 서태범, 강용혁, 진공관형 태양열 집열기의 열성능 해석, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 23, No. 2, 2003.

표 2. 계산에 사용된 식

$0 < \theta_1 \leq \arccos\left(\frac{D/2}{D/2 + L_f}\right)$ $F = \frac{\sum_{i=0}^{\gamma} \cos(i)}{\gamma}$	$\arccos\left(\frac{D/2}{D/2 + L_f}\right) < \theta_2 \leq \arccos\left(\frac{D/2}{L - D/2 - L_f}\right)$ $F = \frac{\sum_{i=0}^{\gamma} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} - \gamma_2} \cos(i)}{\gamma_2}$ $F_1 = \frac{\sum_{i=0}^{\gamma} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2} - \gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$\arccos\left(\frac{D/2}{L - D/2 - L_f}\right) < \theta_3 \leq \arccos\left(\frac{D/2}{L - D/2}\right)$ $F = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2} - \gamma} \cos(i)}{\gamma}$ $F_1 = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2} - \gamma_3} \cos(i)}{\gamma} + \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2} - \gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$\arccos\left(\frac{D/2}{L - D/2}\right) < \theta_4 \leq \frac{\pi}{2}$ $F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2} - \gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$
$Q = q \left[F \frac{D}{2} \gamma + (L_f + L_f') \cos\theta \right] NP$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[(2\pi - \gamma) \frac{D}{2} + (3L_f - L_f') \right] NF$	$Q = q \left[F_1 \frac{D}{2} (\gamma + \gamma_3) + L_f \cos\theta \right]$ $+ \left(F \frac{D}{2} \gamma + L_f' \cos\theta \right) (NP - 1)$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[(2\pi - \gamma - \gamma_3) + 3L_f \right]$ $+ ((2\pi - \gamma - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f) (NP - 1)$	$Q = q \left[F_1 (\gamma + \gamma_3) \frac{D}{2} + L_f \cos\theta + F \frac{D}{2} \gamma \right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[(2\pi - \gamma - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f \right]$ $+ ((2\pi - \gamma) \frac{D}{2} + 4L_f) (NP - 1)$	$Q = q \left[F_1 (\gamma + \gamma_3) \frac{D}{2} + L_f \cos\theta + F \frac{D}{2} \gamma \right]$ $+ q \frac{H}{H_0} \left[(2\pi - \gamma - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f \right]$ $+ ((2\pi - \gamma) \frac{D}{2} + 4L_f) (NP - 1)$
$0 \leq \theta_1 \leq \arccos\left(\frac{D}{L}\right)$ $F = \frac{2 \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$	$\arccos\left(\frac{D}{L}\right) < \theta_2 \leq \frac{\pi}{2}$ $(1) \gamma < \frac{\pi}{2}$ $F = \frac{\sum_{i=\frac{\pi}{2} - \gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$ $(2) \gamma \geq \frac{\pi}{2}$ $F = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i) + \sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2} - \gamma} \cos(i)}{\gamma}, F_1 = \frac{\sum_{i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\pi}$	$Q = q \left[F_1 \pi \frac{D}{2} + F (NP - 1) \right] \frac{H}{H_0} \left[\frac{\pi}{2} + (NP - 1)(2\pi - \gamma) \frac{D}{2} \right]$	

$0 \leq \theta_1 \leq \frac{\pi}{2} - 2\text{atan}\left(\frac{D/2}{L_f}\right)$	$\frac{\pi}{2} - 2\text{atan}\left(\frac{D/2}{L_f}\right) < \theta_2 \leq \frac{\pi}{2} - 2\text{atan}\left(\frac{D/2}{L-L_f}\right)$	$\frac{\pi}{2} - 2\text{atan}\left(\frac{D/2}{L-L_f}\right) < \theta_3 \leq \text{acos}\left(\frac{D}{L}\right)$	$\text{acos}\left(\frac{D}{L}\right) < \theta_4 \leq \frac{\pi}{2}$
$F = \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^2 \cos(i)}{\pi}$	$F = \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^2 \cos(i)}{\pi} + \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_2}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_2}$	$F = \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^2 \cos(i)}{\pi}$	$F = \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma}$
$F_1 = \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^2 \cos(i)}{\pi}$	$F_1 = \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^2 \cos(i)}{\pi} + \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$F_1 = \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^2 \cos(i)}{\pi} + \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$	$F_1 = \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^2 \cos(i)}{\pi} + \frac{\frac{\pi}{2} \sum_{i=\frac{\pi}{2}-\gamma_3}^{\frac{\pi}{2}} \cos(i)}{\gamma_3}$
$Q = q[F \frac{D}{2} \pi + (L_f + L_f'') \cos\theta] NP$	$Q = q[F_1 \frac{D}{2} (\pi + \gamma_3) + L_f \cos\theta + (F \frac{D}{2} (\pi + \gamma_2) + L_f \cos\theta)(NP-1)]$	$Q = q[F_1 (\pi + \gamma_3) \frac{D}{2} + L_f' c\theta + (F \frac{D}{2} \pi + L_f'' \cos\theta)(NP-1)]$	$Q = q[(F_1 \frac{D}{2} (\pi + \gamma_3) + L_f \cos\theta) + (F \frac{D}{2} \gamma)(NP-1)]$
$+ q \frac{H}{H_0} [3\pi \frac{D}{2} + 4L_f - L_f' - L_f''] NP$	$+ q \frac{H}{H_0} [(3\pi - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f + ((3\pi - \gamma_2) \frac{D}{2} + 3L_f)(NP-1)]$	$+ q \frac{H}{H_0} [(3\pi - \gamma_3) \frac{D}{2} + 4L_f - L_f' + (3\pi \frac{D}{2} + 4L_f - L_f'')(NP-1)]$	$+ q \frac{H}{H_0} [(3\pi - \gamma_3) \frac{D}{2} + 3L_f] + ((4\pi - \gamma) \frac{D}{2} + 4L_f)(NP-1)]$
$0 \leq \theta_1 \leq \text{atan}\left(\frac{L-W}{H}\right)$			
$F = w \cos\theta + h \sin\theta$			
$Q = q(F + \frac{H}{H_0}) NP$			

* if $\cos\theta \leq \frac{H}{H_0}$, $\cos\theta \leftarrow \frac{H}{H_0}$. NP: Number of Pipes.