

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 18, No. 3, 1998

## 고집적 태양광 집속기의 새로운 광학적 설계 및 개발

황우성, 조일식, 주문창, L. P. Bulat, 양윤섭

한국에너지기술연구소

### A New Optical Design and Construction for the High Concentration of Solar Energy

U. S. Whang, Y. S. Cho, M. C. Choo, L. P. Bulat, Y. S. Yang

*Korea Institute of Energy Research*

#### Abstract

The present solar energy concentrator is a 2-dimensional system that incorporates with a tubular absorber. A new design theory is developed on the basis of the generalized edge-ray principle. The result shows the increase of concentration ratio for the same acceptance angle as the basic CPC by a factor of  $C_{\text{new}} = C_{\text{CPC}} \{1 + (d/\pi r) \sin^2 \theta_c\}$ . For example, if  $\theta_c = 30^\circ$ , the new design offers the concentration of 2.0~2.72, whereas  $C_{\text{CPC}} = 2$ . The new system also provide a thin and light-weight design.

### 1. 서 론

평판형 집열기는 그 용도가 대부분 온수용으로 사용되고 있다. 또한 한국에서의 년 평균 일사량은 약  $400\text{W/m}^2$  ( $344\text{ kcal/m}^2\text{-hr}$ ) 로써 평판형만을 이용하여 난방용으로 응용하기에는 여러가지의 기술적, 구조적 및 경제적인 문제가 따르게 된다. 난방용 또는 열기관으로 사용하자면 물의 온도를 많이 높여야 효율적인 운용이 될 수 있다 ( $>100^\circ\text{C}$ ). 온도를 올리기 위하여서는 집속기 (Concentrator)를 사용하여야 하며, 사용하고자 하는 온도가 높을수록 집속비(Concentration ratio)는 높아진다. 집속기는 여러 가지 형태가 있으나, R. Winston(1966, 1974)이 제창한 CPC (Compound Parabolic Concentrator)가 이상적인 집속기로 평가 되었다. 그 이후 수 많은 개발연구가 계속되어 오고 있으며, 또한 그 구조형태도 다양하다. CPC는 일반 포물면형 반사기, Fresnel 렌즈, 또는 V-Troughs와 같은 집속기 보다는 집속력이 높다(예: 포물면경 보다는 3~4배속). 그러나 반사면의 면적이 입사면의 개구면적보다 많이 큰 것과 집속기 자체가 너무 두꺼운 것이 단점이다. 이러한 문제는 부분적으로 해결되어 있으나, 결과적으로 이론상의 극대 집속비에 도달하지 못하고 있다.

집속기의 구조는 필요에 따라 2차원적 또는 3차원적 모형으로 구분되는데, 3차원적 집속기는 태양추적형이나, 2차원적 집속기는 일반적으로 비추적형으로 선호하고 있다. 비추적형인 집속기는 집속비가 2 이하이어야 평판형과 같이 고정된 위치에서 사용할 수 있다(완전한 비추적형의 집속비는 약 1.7). 그러나 계절에 따른 위치조정만을 허용한다면, 사용하고자 하는 집속비에 따라 조정회수를 정할 수 있다. 예를들면, 하루 7~8시간동안 집열하려면 집속비가 10(한계입사각 =  $5.7^\circ$ )인 경우 연간 83회, 집속비가 8.8 (한계입사각 =  $6.5^\circ$ )인 경우 연간 25회 위치 조절만 하면 된다. 집속기

는 산란광도 집속시킬수 있으며, 대략 집속비에 역비례한다. 원통형 흡열관의 사용은 여러가지면에서 사용에 편리한 점이 있다. 즉 원통형 흡열관을 사용하면 집속기의 후면에서의 열손실을 줄일 수 있고(구조에 따라서는 후면 열손실은 전혀 없음), 또한 관을 통하여 흐르는 열 전도 매체인 액체의 온도를 직접 높일수 있다.

본 연구에서는 집속비가 3이하인 2차원적 집속기(고정위치의 비추적형)의 제작을 고려하였으며, 온수 및 난방용으로 응용할수 있는 장치이다. 본 집속기의 기본 원리는 열전발전, 열기관등에 응용할수 있는 고온 집속기 개발에 직접 응용할 수 있다.

### 2. CPC의 기본원리

2차원 CPC의 기하학적 원리는 Fig. 1에서 보여 주는 바와 같이 반사곡면의 축 AA'이 초점 F를 회전중심으로 하여 시스템 축 NN'으로 부터 각도  $\theta_c$ 만큼 왼쪽 방향으로 기울어 진 오른쪽에 있는 포물면과, 시스템 축 NN'에 대칭인 왼쪽에

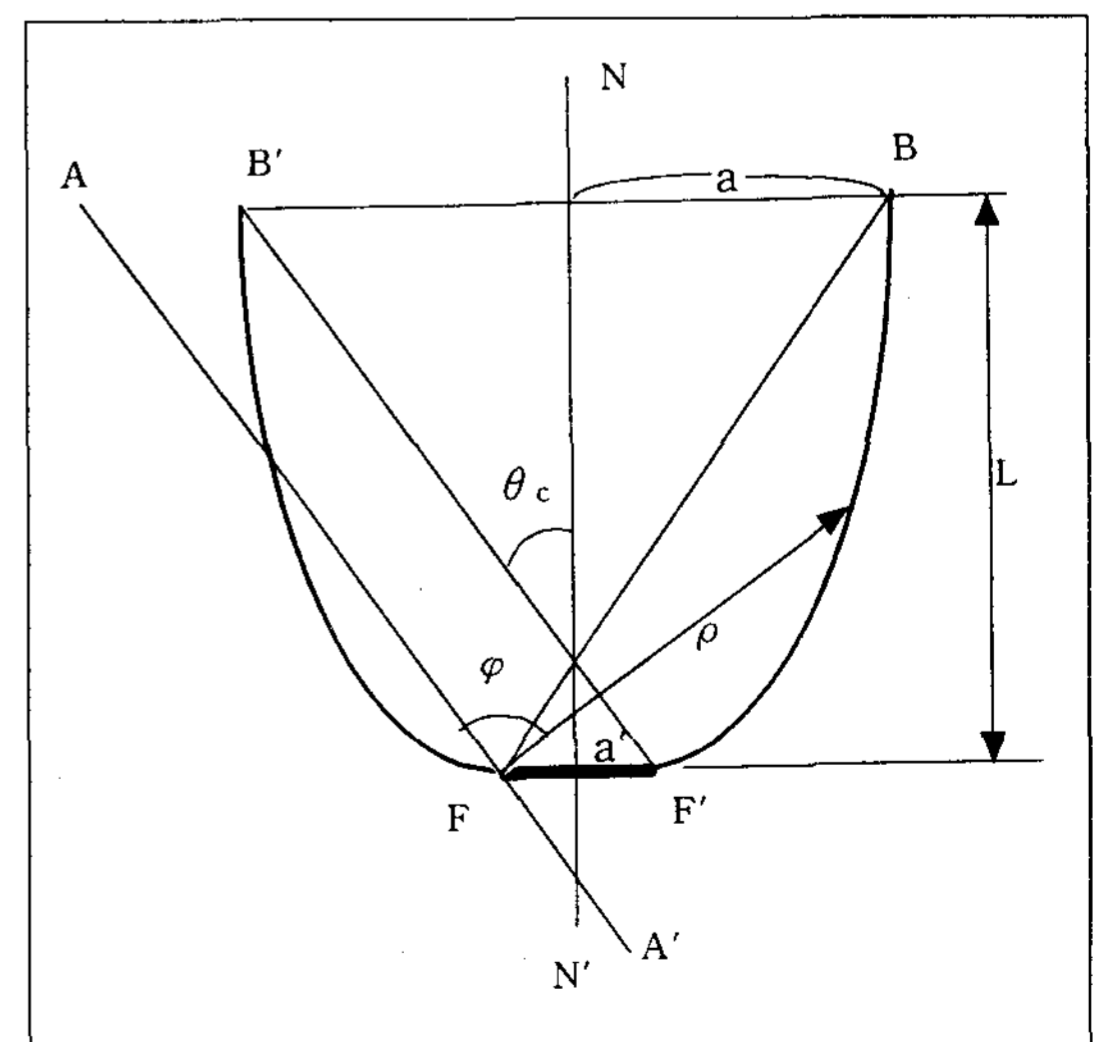


Fig. 1. 기본 CPC

있는 포물면으로 구성되어 있다. 왼편 포물면의 초점 F'은 오른편 포물면 위에 놓이게 되어 있으며, 이 면의 축은 점 F'를 지나는 BF와 평행한 선이다. 두 초점을 연결하는 선 FF'은 출구구경(Exit aperture) 또는 평면 흡열판(Flat absorber)의 폭이 되고, BB'은 입사구경(Entrance aperture) 또는 입사면의 폭이다. 상단점(B와 B')에서의 접선은 시스템 축 NN'과 평행하다. CPC의 광학적 특성은 입사각이  $\pm \theta_c$  범위 이내에 들어오는 모든 광선은 반사면에서 반사된 후 흡열판에 도달하여 균일하게 분포되며, 반면에 이 각도보다 더 큰 각으로 입사하는 모든 광선은 반사면에서 반사된 후 다시 입사면 밖으로 되돌아 가게 된다. 이러한 CPC의 특성은 열역학적 한계에 이르는 특성을 가지며, 따라서 주어진 입사각에 대해서 최대의 집속비를 갖게 된다. 이때의 입사각  $\theta_c$ 를 한계입사각(Acceptance angle)이라고 한다. 이러한 CPC를 구상함에 있어 중요한 광학적 요구조건은 한계입사각  $+\theta_c$  또는  $-\theta_c$ 로 입사하는 모든 광선은 반사면에서 단 한번 반사된 후 광의 수차원리에 관계없이 모두 출구구경의 끝단 (점 F 또는 F')에 도달하여야 한다는 "끝단광선의 (행방에 대한) 원리"(Edge-ray principle)이다. 포물면은 이러한 특수조건을 만족시키는 수학적 곡면중에 하나이며, 따라서 기본 CPC의 원리에 합당한 곡면이다. 이러한 특성의 결과를 수식으로 요약하면

$$\rho = 2f/(1-\cos \varphi) \quad (1)$$

$$C_{cpc} = 1/\sin \theta_c \quad (2)$$

$$f = a'*(1+\sin \theta_c) \quad (3)$$

$$a' = a*\sin \theta_c \quad (4)$$

$$H = (a+a')/\tan \theta_c \quad (5)$$

로 주어지며, 여기에  $\rho = FP$ 로써 극좌표각  $\varphi$ 의 함수로 표현된 포물면의 궤적이고,  $C_{cpc}$ 는 CPC의 기하학적 집속비(Geometrical concentration

ratio)로서 입사구경과 출구구경의 면적의 비율로 정의하며,  $f$ 는 포물면의 초점거리,  $2a'$ 은 흡열판의 폭,  $2a$ 는 입사구경의 폭, 그리고  $H$ 는 집속기의 두께이다.

원통형 흡열관을 사용할 때의 CPC이론은 "연장된 끝단광선"(Extended edge-ray) 원리를 적용한다. 즉, 한계입사각으로 들어오는 모든 광선은 반사면에서 한번 반사된 후 모두 흡열면에 접선으로 만난다. 또한 한계입사각 이내로 들어오는 입사광선은 모두 흡열면에 분포된다. 이러한 조건을 만족시키는 곡면은 흡열관의 단면인 원을 중심으로 한 신개선(Involute) 곡면이다.

### 3. 새 모형의 구조 및 이론

본 시스템은 Fig. 2에서 보여주고 있는바와 같이, 두 개의 반사경과 원통형 흡열관(Tubular absorber)으로 구성되어 있다. 모형의 우측 반사 곡면은 CPC와 같이 축이 경사진 포물면(Compound parabola)과, 이 곡면의 하부는 점 T에서 부터 복합형 파선(擺線: Compound cycloid) 곡면으로 흡열관의 하단 중심점 G까지 이어지는 복합곡면으로 구성되어 있다. 포물곡면 (BT)의 축(AA')은 점 S를 회전중심으로 하여 시스템 축 LL'과 각  $\theta_c$ 만큼 시계의 역회전 방향으로 기울어져 있다. 흡열관의 표면은 끝단 반사광선(BS)과 점 S에서 접하여 있다. 흡열관의 중심점은 끝단광선을 따라 거리  $d$ 만큼 이동되어 있다. 시스템축 LL'은 흡열관의 중심 C점을 통과하며, 전체 반사면은 이 시스템축에 대하여 대칭으로 구성되어 있다.

CPC의 한계입사각  $\theta_c$ 로 축 AA'과 평행하게 입사구경 BB''으로 들어오는 모든 광선 중 포물면 BT에서 반사하는 광선은 초점에 모이게 된다. 파선 반사면인 TG면에 입사된 광선은 Snell의 법칙에 따라 반사되어 흡열관 표면에 도달하게

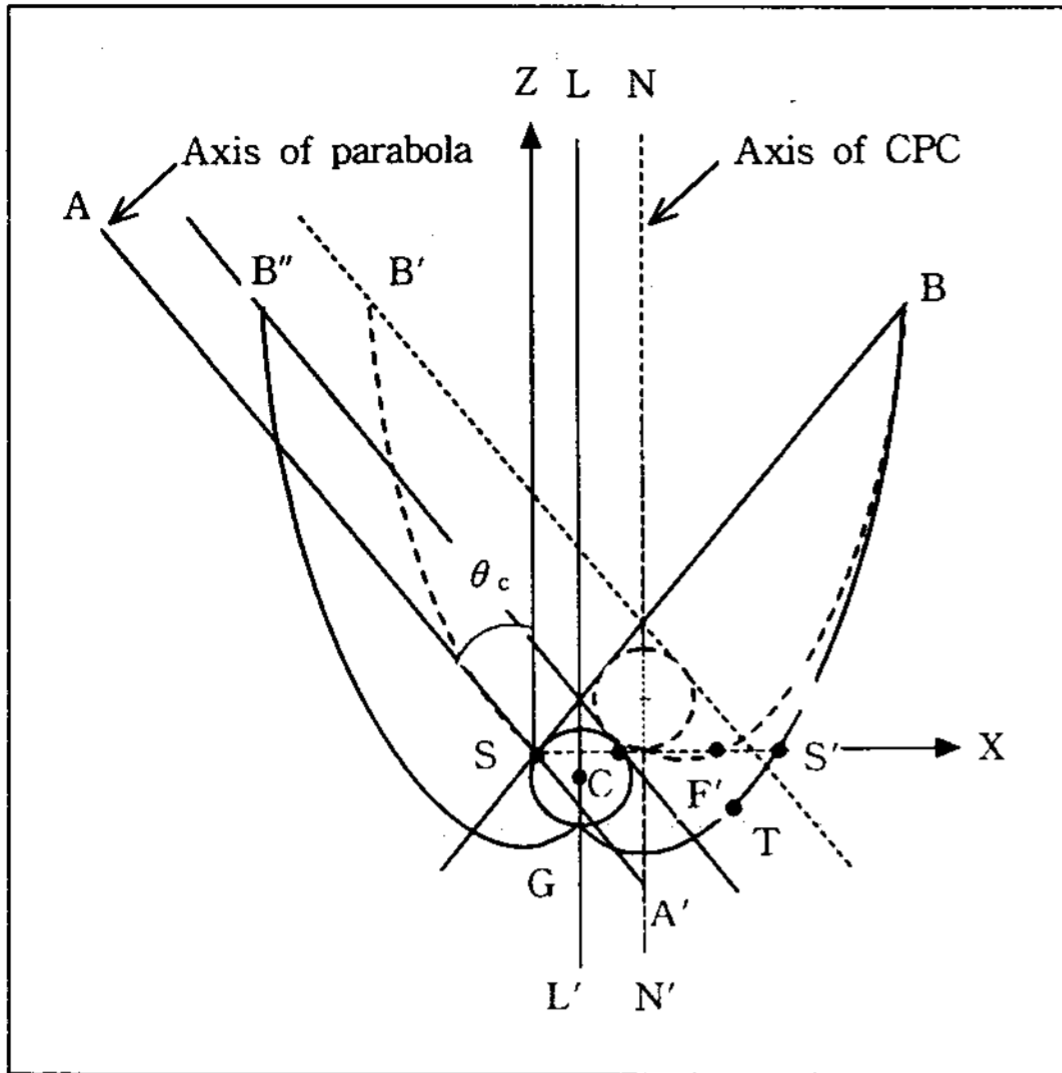


Fig. 2. 새로 고안된 집속기의 구조 및 원리

된다. 시스템 축 LL'과 평행하게 입사구경으로 들어오는 모든 광선은 전체 반사면에서 또한 Snell의 법칙에 따라 반사되어 모두 흡열관 표면에 분포 된다. 따라서, 입사각이  $\pm \theta_c$  이내로 입사구경으로 들어오는 모든 광선은 직접, 또는 반사면에서 한번 또는 그 이상의 반사후 모두 흡열관에 도달하게 된다. 이와같이 흡열관에 도달한 태양 방사선은 흡열관의 흡수계수에 따라 흡수되는 에너지량이 결정된다.  $\theta_c$ 보다 더 큰 각도로 입사하는 광선의 대부분은 반사면에서 반사된 후 재 반사되어 집열기 밖으로 되 돌아 나아가게 된다. 그러므로 각  $\theta_c$ 는 집열기가 입사구경으로 들어오는 태양방사선을 받아들여 흡열관으로 전달할수 있는 최대의 값이 된다. 본 집속기의 기하학적 특성에 따라  $\theta_c$ 보다 큰 입사각으로 들어오는 방사선이 흡열관에 직접 또는 반사후 도달할 수 있는 경우가 있으나 소량이므로 주된 고려대상은 아니다.

본 모형의 포물면은 Fig. 2에 표시한 좌표계에서 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$z = \{-\cos \theta_c(x \sin \theta - 2f) - 2\sqrt{f(f - x \sin \theta)}\} / \sin^2 \theta_c \quad (6)$$

여기에,  $\theta_c$ 는 상술한 바와 같이 시스템이 허용하는 최대 입사각으로써 사용하고자 하는 CPC의 집속비에 의하여 결정된다.  $f$ 는 포물면의 초점거리로써 상기 식 (3)으로 주어지며,  $2a'$ 은 흡열면의 표면적으로써 반경이  $r$ 인 흡열관의 단면만을 고려하여 볼때는 다음식으로 주어진다.

$$2a' = 2\pi r \quad (7)$$

포물면과 흡열관을 연결하는 곡면은 복합곡선형 반사면을 선택하였으며 다음과 같은 변수 방정식으로 표현할수 있다.

$$x = (a+c)\sin \psi - a \sin[(a+c)\psi/a] + r \cos \theta \quad (8)$$

$$z = -(a+c)\cos \psi - a \cos[(a+c)\psi/a] - r \sin \theta \quad (9)$$

여기에,  $\psi$ 는 점 G에서부터 흡열관의 원둘레를 따라 재는 각도이고,  $c$ 는 흡열관의 크기에 따라 정해야 할 상수 또는 변수이며,  $a$ 와  $\psi$ 는 두 반사곡면이 맞나는 점 T에서 연속적으로 연결되도록 조절하여야 할 상수이다. 입사한계각 범위내로 입사하는 모든 광선(특히 시스템축과 평행하게 입사하는 광선)이 반사된후 시스템 밖으로 나가지 않도록, 광행로의 추적(Ray-tracing)의 결과에 따라 모든 변수들을 동시에 조절하여야 한다. 반사된 모든 빛은 가급적 균일하게 흡열관 표면에 분포되어야 한다. 물론 최대의 태양방사 에너지를 흡수할 수 있도록 흡열관은 선택적인 박막(Selective Coating)처리도 하여야 한다.

본 집속기의 집속비는 Fig. 2의 기하학적 관계에서 다음 관계식을 도출할수 있다.

입사면 단면의 폭:

$$LB = 2[(a+a') - r \cos \theta_c] \quad (10)$$

흡열관의 단위 표면적:

$$A' = 2\pi r = (2a') \quad (11)$$

집속비:

$$C_{new} = LB/2a' = C_{cpc} * [1 + (d/\pi r) \sin^2 \theta_c] \quad (12)$$

$$C_{new, max} = C_{cpc} * [1 + \sin \theta_c * (1 - \cos \theta_c / \pi)] \quad (13)$$

그러므로 새로 고안한 집속기의 최대 집속비는  $[1 + \sin \theta_c * (1 - \cos \theta_c / \pi)]$  만큼 증가하게 된다. 즉  $\theta_c = 30^\circ$  인 경우,  $C_{cpc} = 2$  이나  $C_{new} = 2.7$  로써  $C_{new}/C_{cpc} = 1.36$  의 증가를 볼수 있다. 최대의 집속비를 사용할 경우 광의 유출이 생길때에는 제2의 반사경을 흡열면 위에 사용하여야 한다. 그러나 집속비를 줄이므로써 제2의 반사경은 사용하지 않아도 된다. Table 1에 집속비의 증가율을 보여 준다.

Table 1. 본 집속기의 집속비 증가율  
[흡열관 반경  $r = 6.35\text{mm}$ 인 경우]

$\theta_c$	$C_{cpc}$	$C_{new}$			증가율(%) [ $=(C_{new}-C_{cpc})/C_{cpc}$ ]		
		d=1	d=r	$C_{max}$	d=1	d=r	$C_{max}$
60	1.15	1.20	1.43	2.00	3.76	23.87	72.82
45	1.41	1.45	1.64	2.19	2.51	15.92	54.80
30	2.22	2.03	2.16	2.72	1.25	7.96	36.22
19.5	3.00	3.02	3.11	3.70	0.56	3.54	23.33
11.5	5.00	5.01	5.06	5.69	0.20	1.27	13.76
5.7	10.00	10.01	10.03	10.68	0.05	0.32	6.83

#### 4. 광행로 추적 (Ray-tracing)

반사면의 대표점 P를 선택하였을 때, 이 점에서의 입사광선을  $\underline{s}$ , 반사광선을  $\underline{s}'$ , 그리고 단위 법선을  $\underline{n}$ 이라고 하면, 스넬 (Snell)의 반사법칙에 의해서 다음 관계식이 성립한다.

$$\underline{s} \cdot \underline{n} = \underline{s}' \cdot \underline{n} \quad (14)$$

$$(\underline{s} \times \underline{s}') \cdot \underline{n} = 0 \quad (15)$$

$$\underline{n} = (\underline{s} + \underline{s}') / \sqrt{2 + 2\underline{s} \cdot \underline{s}'} \quad (16)$$

$$\underline{s}' = -\underline{s} + 2(\underline{s} \cdot \underline{n})\underline{n} \quad (17)$$

여기에  $\underline{s}$ ,  $\underline{s}'$ ,  $\underline{n}$ 는 모두 벡터양이며,  $\underline{n}$ 의 향 (sense)은 반사곡면의 내부방향이다. 2차원적 반사형 집속기 모형에서는 2차원적 광행로의 추적으로 충분한 해석을 할수 있다. 즉 Fig. 2에 표기한 바와 같은 좌표계(y축이 여물통의 길이)에서 입사광선이나 반사광선의 y축 방향의 해석은 필요치 않다. 벡터  $\underline{s}$ ,  $\underline{s}'$ ,  $\underline{n}$ 의 방향여현을 각각  $(s_x, s_y, s_z)$ ,  $(s'_x, s'_y, s'_z)$ ,  $(n_x, n_y, n_z)$ 로 표기하면 xz-평면상에서의 입사각 ( $\theta$ )과 반사각 ( $\theta'$ )은

$$\cos \theta = (\underline{s} \cdot \underline{n} - s_y s_z) / \sqrt{\{(1 - s_y^2)(1 - n_y^2)\}} \quad (17)$$

$$\cos \theta' = (\underline{s}' \cdot \underline{n} - s'_y s_z) / \sqrt{\{(1 - s'^2_y)(1 - n_y^2)\}} \quad (18)$$

으로 주어진다.  $n_y = 0$ 인 경우  $\theta = -\theta'$ 으로 귀결되며 스넬의 법칙을 만족한다. 대표점 P(x,z)를 지나는 법선과 z-축 사이의 각도  $\omega$ 는 다음식에 의하여 결정할 수 있다.

$$\omega = \tan^{-1}[-1/(dz/dx)] - \theta_c \quad (\text{포물면 부분}) \quad (19)$$

$$\omega = \tan^{-1}[-1/(dz/dx)] \quad (\text{파선곡면 부분}) \quad (20)$$

초기 입사광선의 입사각이 주어지고 입사점 P의 위치가 주어지면 상기식을 이용하여 반사광선의 방향과 주어진 평면(또는 선, 흡열관 표면)상에서의 위치 또는 분포밀도 등을 찾아 볼수 있다. 입사점 P의 간격은 좁을수록(< 1mm) 정확한 반사광의 행적을 추적할 수 있다.

#### 5. 결 론

본 태양열 집속기의 디자인 개념은 CPC와 동일한 한계입사각( $\theta_c$ )과 흡열관의 크기(r)에 대하여 기본 CPC의 이론을 바탕으로 하나 집속비를 증가 시킴으로써 CPC의 이상론을 변형시켰다. 본 디자인은 집속비가 작을수록 증가율이 커짐을 보여 주고 있다. 집속기의 높이를 절단하여 사용

할때도 같은 집속비에 대하여 높이를 더욱 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다. 본 집속기의 효율은 구조상 기본 CPC와 거의 동일하며, 산란광의 수광도도 CPC보다 본 집속기의 입사 개구면이 증가로 더 많은 양을 집속할수 있다. 본 고안의 모형은 한국에너지기술연구소에서 제작 및 시험 중이다.

### 참 고 문 헌

1. R. Winston, "Light Collection within the Framework of Geometrical Optics", JOSA **60**, No.2, 245~247 (1970).
2. R. Winston, "Principles of Solar Concentrators of A Novel Design", Solar Energy **16**, 89~95(1974).
3. A. Rabl, "Optical and Thermal Properties of Compound Parabolic Concentrators", Solar Energy **18**, 497~511(1976).
4. A. Rabl, et al, "Practical Design Considerations for CPC Solar Collectors", Solar Energy **22**, 373~381(1979).
5. D. P. Grimmer, "A Comparison of Compound Parabolic and Simple Parabolic Concentrating Solar Collectors", Solar Energy **22**, 21~25(1979).
6. J. F. Kreider, "First -order design variables for concentrating solar collectors", Opt. Eng. **18**, No. 4, 414~419(1979).

# A New Optical Design and Construction for the High Concentration of Solar Energy

U. S. Whang, Y. S. Cho, M. C. Choo, L. P. Bulat, Y. S. Yang

*Korea Institute of Energy Research*

## Abstract

The present solar energy concentrator is a 2-dimensional system that incorporates with a tubular absorber. A new design theory is developed on the basis of the generalized edge-ray principle. The result shows the increase of concentration ratio for the same acceptance angle as the basic CPC by a factor of  $C_{\text{new}} = C_{\text{CPC}} \{1 + (d/\pi r) \sin^2 \theta_C\}$ . For example, if  $\theta_C = 30^\circ$ , the new design offers the concentration of 2.0~2.72, whereas  $C_{\text{CPC}} = 2$ . The new system also provide a thin and light-weight design.