

태양열 집속기 설계 및 열 특성시험

(A New Solar Concentrator Design and Its Characteristics Measurements)

황우섭 / 양윤섭

한국에너지기술연구소, 태양열이용연구팀

대전시 유성구 장동 71-2(Email : yys@sun330.kier.re.kr)

Concentrators with concentration ratios between 1.2X-2.0X do not require sun-tracking or seasonal adjustments. Therefore, well designed such a system is more economical as well as obtainable much higher temperature (100-350°C) than a flat plate can achieve. In the present study, a 2X tubular concentrator is constructed and tested. The design was based on a new theory. The results of this preliminary study show that its efficiency is 60-70% at the operating temperature range of 80-100°C, and the U-value of $-3.0 \text{ W/m}^2\text{C}$.

1. 서론

CPC (Compound Parabolic Concentrator)에 대한 원리와 특성은 잘 알려져 있다. 지난 20여 년간 CPC에 대한 많은 연구가 있었으며, 최근에는 CPC의 다양한 응용으로 기본모형이 많이 변형되고 있다. 특히 고정 위치에서도 집속할 수 있는 저 집속비(<2X)의 2차원 CPC 응용은 경제적인 뿐만 아니라 가정용 또는 상업용으로 필요한 높은 온도(<180°C)를 생성해 낼 수 있으므로 이에 대한 연구 개발이 활발히 움직이고 있다.

본 연구에서는 기본 CPC의 이론을 확장시킨 새로운 개념적 디자인을 제작 시험하였다. 기본 2차원 CPC는 집속비(C_{cpc})와 한계입사각(θ_c) 사이에 다음 관계식으로 특성화 된다.

$$C_{cpc} = 1/\sin \theta_c \tag{1}$$

반면 본 연구의 디자인은 다음 관계식으로 특성되어 진다.

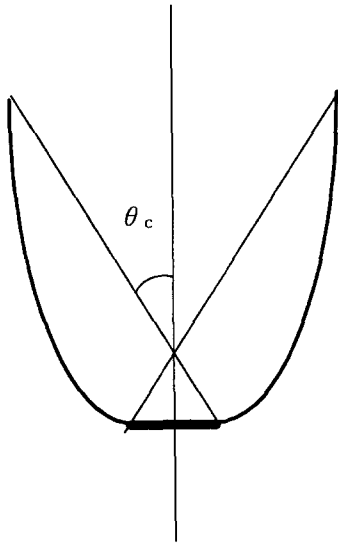
$$C_{new} = C_{cpc} \{1+(d/\pi r)\sin^2 \theta_c\} \tag{2}$$

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

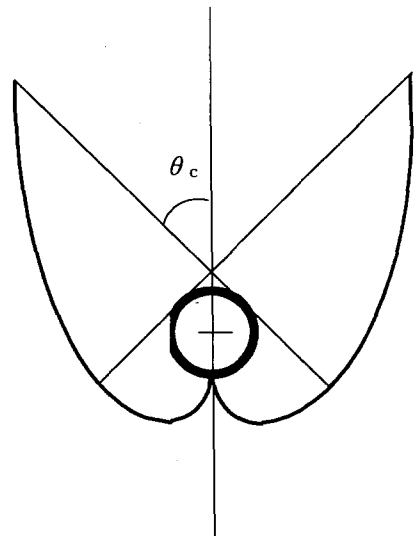
여기에 d는 반경 r인 흡열관 중심의 기본 CPC의 위치에서부터의 변위거리 이다. 결론적으로 동일한 한계입사각에 대하여 기본 CPC의 집속비를 증가 시킬 수 있다. 본 관계식은 저 집속비로 응용할 때 중요하나 $C_{cpc}>10$ 이상인 경우 집속비의 증가율은 < 6%로 중요한 의미를 갖지 않는다. 본 연구에서 개발한 집속기의 모형과 원리는 다음과 같다.

2. 연구배경

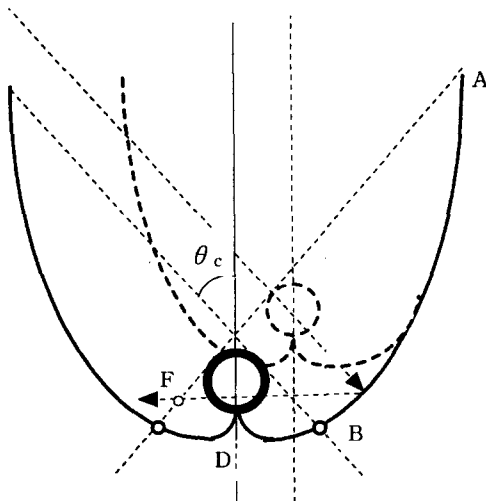
기본 CPC의 원리는 끝단광선(Edge-ray)원리에 근거를 둔 이론이며, 이 원리는 2차원 집속기인 경우 평면 흡열판과 원통형 흡열관을 기본으로 하는 2가지가 있다. 평면 흡열면일 경우에 본 원리의 핵심은 한계 입사각 θ_c 로 집속기의 개구면으로 들어오는 모든 광선은 흡열면의 끝단인 한 초점에 모두 모이고, 입사각 $(\pm\theta)$ 이 $|\theta| \leq \theta_c$ 인 범위로 들어오는 모든 입사광선은 흡열판에 균일하게 분포된다 [그림 1]. 원통형 흡열관을 사용할시의 원리는



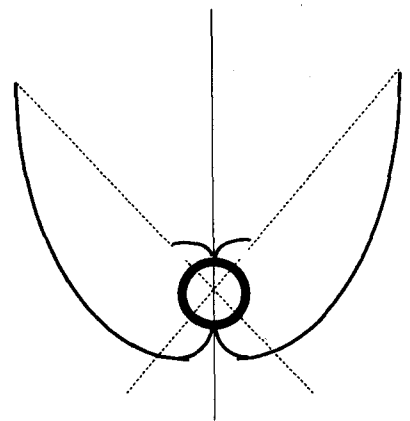
[그림 1] 기본 CPC



[그림 2] 신개선형 CPC



[그림 3] 새로운 CPC형 집속기



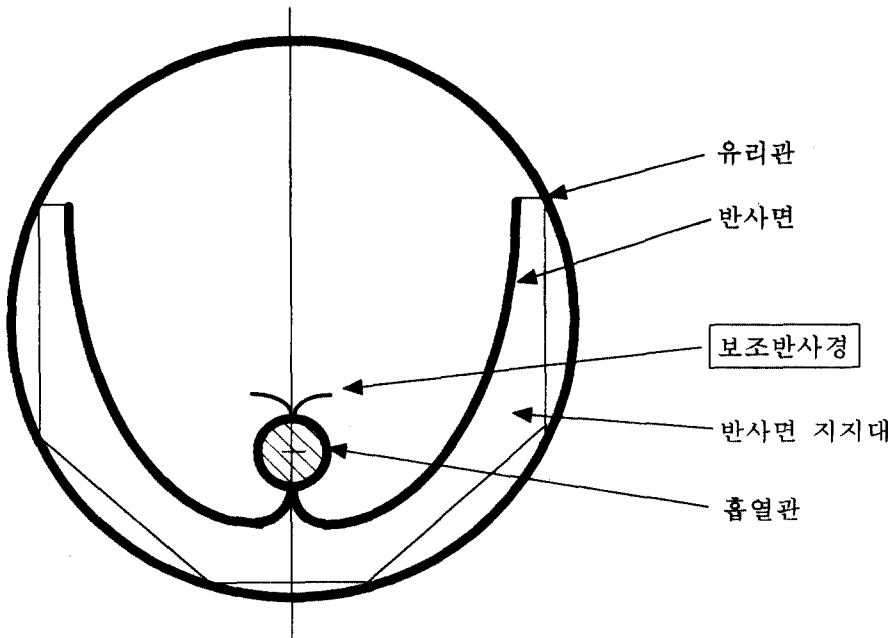
[그림 4] 보조 반사경을 고용한 집속기

연장된 끝단광선 원리(Extended edge-ray principle)로써 본 이론은 한계 입사각으로 개구면에 입사하는 모든 광선은 흡열판과 접선으로 만나게 되고 모두 흡열판의 표면에 균일하게 분포된다. 전자의 원리를 만족시키는 반사곡면은 한계 입사각 $\pm \theta_c$ 로 기울인 두 개의 포물면을 흡열면의 중점에서 수직인 축에 대하여 대칭으로 위치한 복합형 포물면이다. 후자의 경우 반사면은 2개의 서로 대칭으로 놓인 신개선(involute) 곡면으로 구성된다 [그림 2].

3. 본 연구에서 개발한 집속기의 구조 및 특성

[원리] : 신개선형 반사면을 가진 연장된 끝단광선의 이론을 변형시킨 원리이다[그림 3]. 본 원리는 한계입사각으로 개구면에 입사하는 광선중 반사면의 상단 부분(AB)에서 반사하는 모든 광선은 초점 F에 모이고 하단 부분(BD)에서 반사하는 모든 광선은 흡열면에 도달한다. 또한 입사각이 $|\theta| \leq \theta_c$ 인 범위로 들어오는 입사광선은 모두 흡열면에 도달한다. 이러한 조건을 만족시키는 반사곡면은 상단부분은 복합포물선형 곡면이고 하단부분은 일종의 심장형 곡면으로 이루어 질수 있다. 부가조건은 두 곡면이 만나는 점 B에서 각 곡면의 접선이 같아야 한다. 이러한 구조의 집속기를 신개선 곡면으로 이루어진 CPC와 비교하여 보면 (신개선 CPC는 [그림 3]에서 점선으로 표기된 모형), 동일한 한계입사각에 대하여 집속비를 식 (2)와 같이 증대시킬 수 있다. 또 다른 조건은 식 (2)가 허용하는 집속비를 사용할 때 한계입사각 이내에서 개구면에 입사하는 광선의 일 부분이 반사되어 밖으로 되돌아 나아 갈 경우가 있다. 이 때에는 제2의 보조 반사면을 고용하여야 한다. 이러한 구조는 [그림 4]에 흡열판의 중앙 상부에 표기 하였다. 이 경우 집속비는 보조 반사경이 입사광을 차단하는 만큼 줄어들게 된다.

[설계구조] : 본 새로운 디자인의 기본 설계[그림 5]는 2 개의 대칭으로 놓인 반사면과 흡



[그림 5] 새 모형의 집속기 구조

열관으로 구성되어 있으며, 이 집속기는 유리관 속에 놓여 있다. 반사면의 기하학적 구조는 복합포물면 (Compound Parabolic Surface)과 수정된 복합과선곡면(Modified Compound Cycloid Surface) 으로 구성되어 있다. 반사면은 두께가 0.4mm인 Stainless Steel 304를 사용 하였으며 반사면은 알미늄과 보호막 박막처리를 하였다. 본 반사면의 곡면은 여러개의 금형으로 지지되어 있다. 흡열관은 동관으로 Black chrome으로 선택적인 박막처리(도금)를 하였다. 본 시스템은 먼지 등 환경오염으로 부터 보호하고 동시에 집열기의 효율을 향상시키기 위하여 유리관 속에 넣었다. 유효 집속비는 2 이며, 사용한 흡열관의 직경은 12.7mm 이다. 집속기의 유효길이는 1m, 유효면적은 0.5m²이다. 또 하나의 구조는 보조반사경을 사용한 집속기이다. 보조 반사경은 그림에서 흡열면 상단에 표시 하였다. 본 논문에서는 보조반사경이 없는 경우만 고찰하기로 한다.

4. 성능측정 및 분석

본 실험에 의 한 여러 측정치를 기준으로하여 집속기의 제반 변수를 <표 1>에 열거하였다. <표 2, 3, 4>에 본 실험의 분석에 필요한 일사량을 기재하였다.

<표 1>: 집열기의 변수 요약

변수	기호	계산방법	값	비고
집속비	C_{new}	초기값	2.2	
유효집속비	C	측정	2.0	
설계한계입사각	θ_c	$\theta_c = 1/\sin(1/C)$	30°	
90%투과 한계각	θ_{\perp}	측정	28°	
년간 위치조정		계산	0 (고정)	
유리관투과율	τ_{cover}	측정	0.90	
반사도	ρ	측정	0.90	
평균반사수	$\langle n \rangle$	계산	1.14	
집속기투과율	τ_{cpc}	계산	88%	
흡수율	α	측정	0.94	
광학효율($\leq \theta_c$)	$\eta_{o,cpc}$	계산	0.77	
산란광보정	γ	계산	0.88-0.92	
광학효율 (반구면일사량)	$\eta_{o,C}$	계산	0.68-0.71	
효율($\Delta T=0$)	$F\eta_o$	측정(맑은날)	0.70-0.75	
열손실계수	U	측정	3.0W/m ² °C	
효율적 열손실계수	FU	측정	2.7W/m ² °C	
열적광학적 정체변수	U/η_o	측정	4.5W/m ² °C	
경과반응시간	T	측정	-100sec	

<표 2> 맑은 날 일사량 [1997 .5. 1.]

시간	전일사량 $I_h[W/m^2]$	수직일사량 $I_n[W/m^2]$	산란광 $I_d[W/m^2]$	I_d/I_h
11:00	803	771	127	.158
12:00	885	753	149	.150
13:00	926	786	137	.152
14:00	887	773	135	.165
15:00	783	738	129	.160
평균	857	764	135	.157

<표 3> 약간 구름낀날 일사량[1998.9.3.]

시간	전일사량 $I_h[W/m^2]$	수직일사량 $I_n[W/m^2]$	산란광 $I_d[W/m^2]$	I_d/I_h
11:00	697	559	127	.234
12:00	786	581	223	.284
13:00	794	668	147	.185
14:00	790	684	143	.181
15:00	660	564	158	.239
평균	745	611	159	.178

<표 4> 일사량[1998. 11.4]:

시간	전일사량 $I_h[W/m^2]$	수직일사량 $I_n[W/m^2]$	산란광 $I_d[W/m^2]$	I_d/I_h
11:00	520	853	47	.055
12:00	579	900	42	.047
13:00	607	925	36	.039
14:00	552	888	38	.043
15:00	441	832	34	.041
평균	540	880	39	.045

5. 결론

본 실험의 결과는 집속비가 2X인 비진공 집속기이나 집열관의 온도가 120℃에 도달 할 수 있고 액체의 온도가 포화상태에 이르는 시간은 약 100초이다. 현재의 실험 결과는 비교적 높은 열손실을 보여주고 있으나, 흡열관을 연결하는 연결관 등 제반 열손실에 대한 보안을 하면 약 150℃의 온도 상승도 가능하며 또한 본 집속기의 고온에서의 효율도 높일수 있다고 본다. 앞으로 기본 CPC와 본 고안의 특성을 비교할수 있는 실험하고자 한다. 본 고안의 이론적 특성은 기본 CPC의 여러 가지 제한 점을 해소할 수 있으며 광학적 성능 또한 높일 수 있는 고안이다. 2X CPC형의 제반 집속기는 태양 비추적형일 뿐만 아니라 계절에 따른 위치 조정도 필요하지 않으므로 일반 평면 집열기와 같이 고정 위치에서 운영할 수 있으며, 동시에 높은 온도(180℃)를 구할 수 있다. 따라서 평면 집열기보다는 더욱 경제적으로 개발할 수 있는 가능성이 많이 있을 것으로 보여진다.

참고문헌

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).