

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 4, 2007

5kW_t급 접시형 태양열 집열기의 설계 및 예비 성능실험

서주현*, 마대성*, 김용*, 서태범**, 한귀영***

*인하대학교 대학원 기계공학과(senseseo@hotmail.com), **인하대학교 기계공학부(seotb@inha.ac.kr),

***성균관대학교 화학공학과(gyhan@skku.ac.kr)

Design and Preliminary Performance Test for 5kW_t Dish Solar Collector

Seo, Joo-Hyun*, Ma, Dae-Sung*, Kim, Yong*, Seo, Tae-Beom**, Han, Gui-Young***

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

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

***Dept. of Chemical Eng., Sungkyunkwan University(gyhan@skku.ac.kr)

Abstract

The 5kW_t dish solar collector is designed and the preliminary performance test for this is carried out. The diameter of the parabolic dish is 3.2 m, and its focal length is 2 m. It consists of 10 small reflectors which have their own curvatures, and the effective reflecting area is 5.9 m², and the rim angle of the dish is 43.85°. The reflectivity of reflectors is 0.95, and the thermal capacity of the system is about 5 kW thermal. The aperture diameter of the cylindrical-shape receiver which is made of stainless steel is 100 mm, and the height is 210 mm. A quartz window is installed at the receiver aperture to minimize the convective heat loss and prevent air leakage. In order to increase the heat transfer area, porous materials (nickel-alloy) are inserted into the receiver. Air flows into the upper part of the receiver which is the opposite side of the aperture. After the air flows through the inside of the receiver, that goes out of the receiver through 3 exits which are located near the aperture. The volumetric flow rates of air are varied from 600 to 1200 L/min. The results show that the system efficiency and receiver efficiency increase as the volume flow rate increases.

Keywords : Dish solar collector(접시형 태양열 집열기), Reflector(반사경), Air Receiver(공기식 흡수기), Receiver efficiency(흡수기 효율), System efficiency(시스템 효율)

접수일자 : 2007년 11월 7일, 심사완료일자:2007년 11월 29일

교신저자 : 서태범(seotb@inha.ac.kr)

기 호 설 명

- ET : equation of time
- m : mass flow [kg/s]
- Cp : specific heat of ambient air [J/kg·°C]
- T_{air,i} : temperature of a receiver inlet air [°C]
- T_{air,o} : temperature of a receiver outlet air [°C]
- η : system efficiency
- P_{mirror} : radiative power from the sun to mirror [W]
- DNI : direct normal insolation [W/m²]
- A_{mirror} : mirror area [m²]

1. 서 론

전 세계적으로 화석 연료를 대체할 수 있는 대체 에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 우리나라의 경우에도 정부를 중심으로 대체에너지 활용에 대한 많은 노력을 기울이고 있으며, 현재 많은 종류의 대체에너지가 활용되고 있다.¹⁾

태양열을 이용한 에너지 시스템들은 기존의 연료를 대체할 다양한 신·재생에너지 분야 중에서 매우 경쟁력이 있는 분야로 평가받고 있다. 일반적으로 태양에너지의 이용 분야는 집열 온도에 따라 저온용, 중온용, 고온용으로 세분화된다.²⁾ 그 중에서 고온 태양열 집열 시스템은 500~1000°C의 온도를 얻을 수 있어 태양열 발전 및 산업 공정 열 등에 널리 보급되어 활용되고 있다. 이러한 고온 태양열 집열 시스템 중의 하나가 본 연구에서 실험한 Dish형 태양열 집열기 시스템이다.³⁾

Dish형 태양열 집열기 시스템은 미국에서 가장 활발하게 연구가 진행되어 이미 상용 운전을 하고 있으며, 독일, 일본, 호주, 프랑스 등에서도 매우 활발한 연구가 진행되고 있다.²⁾ 국내의 경우에는 1996년 12월부터 국내에서 처음으로 접시형 태양열 집열기 시스템 개발에 착수하여 접시형 고온 태양열 시스템 KIERDISH I, KIERDISH II를 개발 및 설치·운전하고 있다.⁴⁾ 그러나 아직까지 국내의 접시형 태양열 집열기 시스템에 대한 연구

는 개발 단계에 있다.⁵⁾

따라서 본 연구에서는 5kW급 접시형 태양열 집광기와 공기식 흡수기로 이루어진 실제 접시형 태양열 집열기 시스템에 대한 설계 및 제작을 수행하고, 이에 대한 예비실험을 수행하였다. 이를 통해 다양한 작동 조건 및 흡수기 형상 변화에 따른 접시형 태양열 집열기의 효율을 비교·분석하기 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 태양열 집광기 및 흡수기 설계

(1) 태양열 집광기 설계

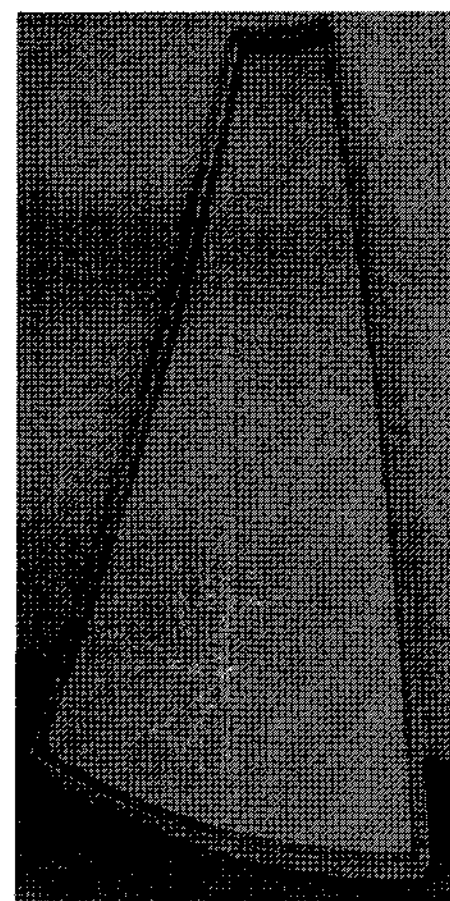
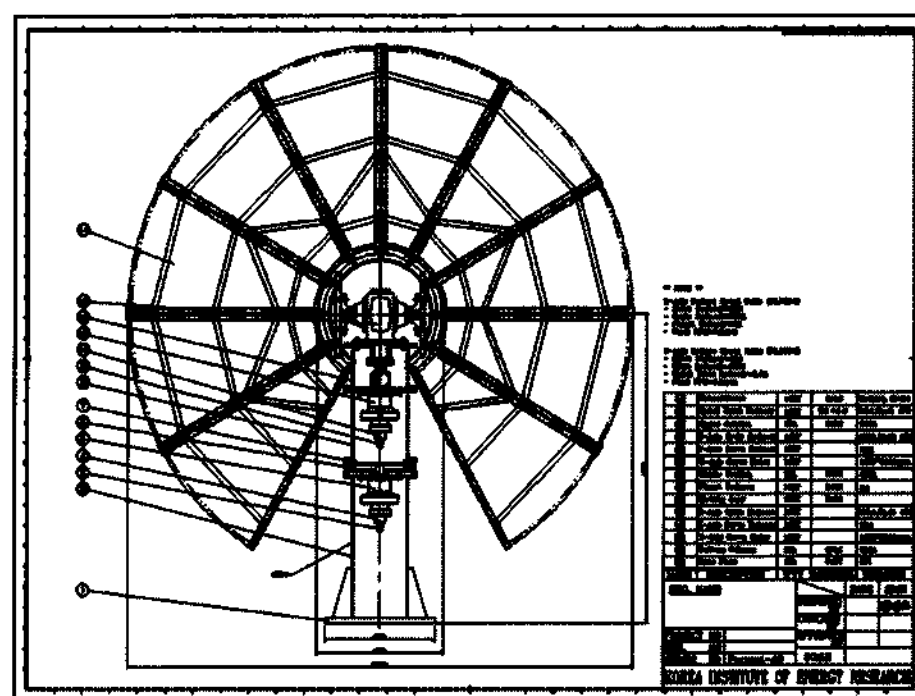


그림 1. 조각 거울 형상



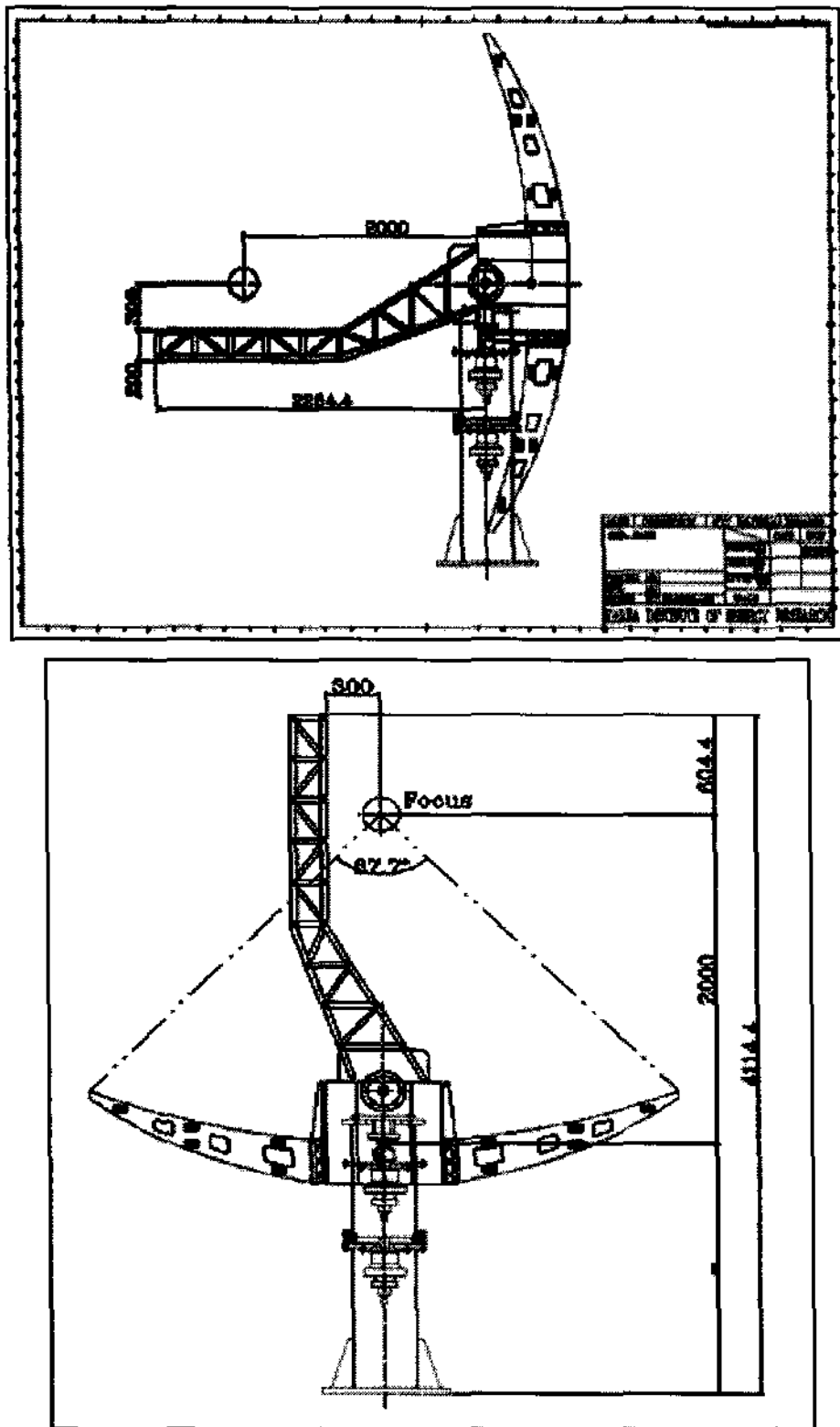


그림 2. 태양열 집광기 설계도

태양열 집광기의 총용량은 5 kW_t이며, 그림 1과 같은 포물선형 반사경 10개를 사용하였다. 그림 2는 태양열 집광기 설계도이고 이에 대한 재원은 표 1과 같다

표 1. 태양열 집광기 재원

| 재원 | 실제 사양 |
|--------------|--------------------|
| 지면에서 중심까지 거리 | 1.83 m |
| 최대높이 | 4.11 m |
| 거울 반사율 | 95% 이상 |
| 거울 직경 | 3.2 m |
| 초점 거리 | 2 m |
| 거울 총면적 | 5.90m ² |
| rim angle | 43.85° |

기존 연구에서 거울 전체의 직경이 3 m일 때 이론적 초점 거리가 2.20 m이므로, 초점 거리를 2

m로 설계하였다.⁶⁾ 모든 거울의 초점은 흡수기의 개구부 중심과 일치한다.

(2) 흡수기 설계

본 연구에서는 접시형 태양열 집열기의 흡수기로 공기를 작동유체로 사용하는 공기식 흡수기를 제안하였다. 공기식 흡수기는 수증기를 작동 유체로 사용하는 경우에 비해 낮은 압력에서 사용할 수 있고, 작동 유체를 보다 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 이 밖에 흡수기에서의 부식을 줄일 수 있으며, 상대적으로 높은 열유속과 출구 온도를 얻을 수 있기 때문에 집열 면적을 줄일 수 있으므로 설치비용을 줄일 수 있다.⁷⁾

그림 3은 흡수기 내부 단면이다. 태양열 집열기의 초점지역 플럭스 분포에 의해 흡수기의 입구는 태양복사열을 90% 이상 흡수할 수 있도록 100 mm로 정하였다.⁴⁾ 또한, 흡수기의 모든 재질은 고온에 견딜 수 있는 SUS 306로 제작하였다.

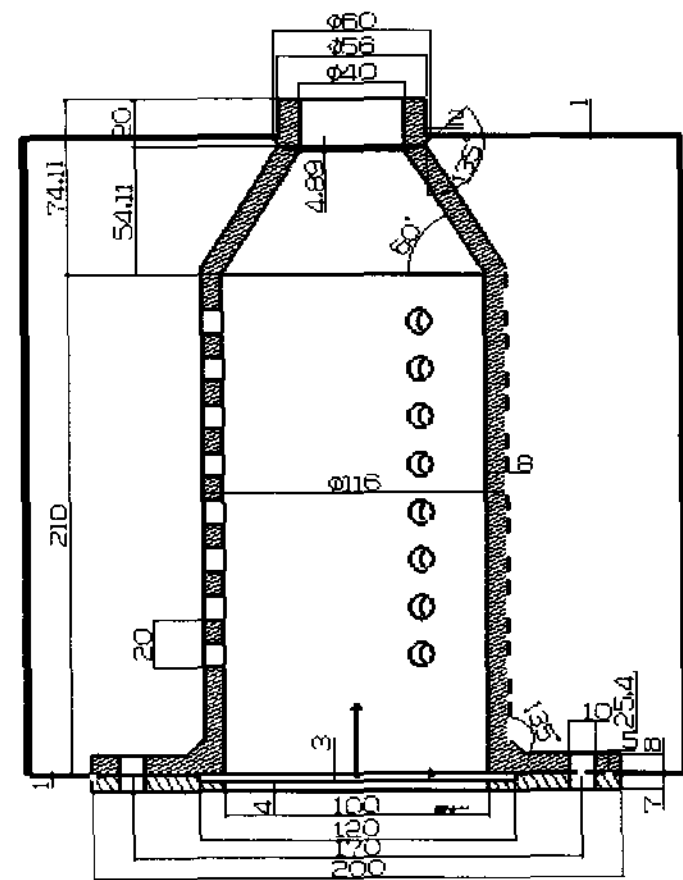


그림 3. 흡수기 내부 단면

그림 4에서와 같이 1번에 위치한 흡수기 입구로 공기가 유입되어 2번으로 표시된 세 방향으로 나간다. 3번으로 표시된 흡수기 안쪽에 다공성 물질이 채워져 있으며 석영유리는 4번 위치에 설치되어 있다.

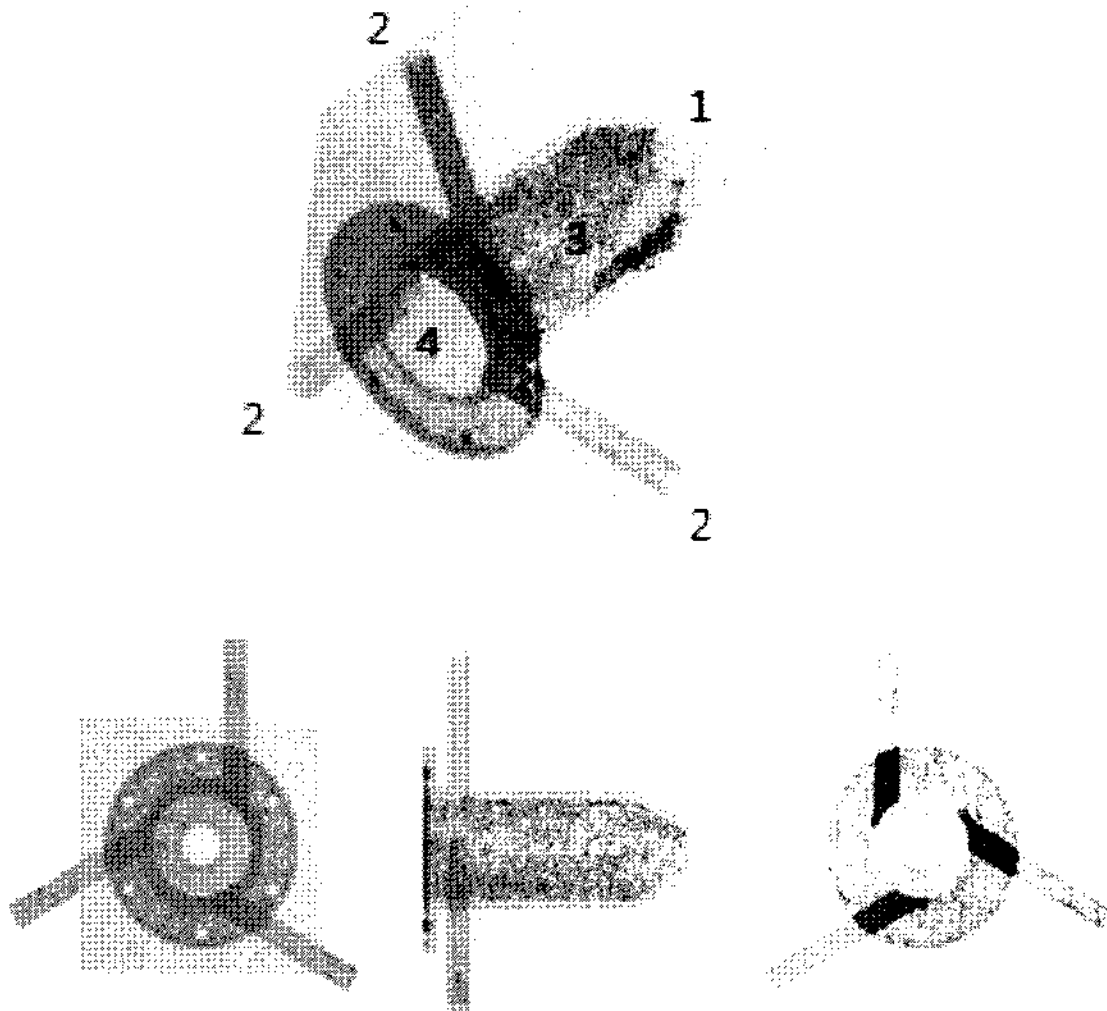


그림 4. 흡수기 형상

2.2 실험장치

(1) 접시형 태양열 집열기

본 연구에서 사용된 접시형 태양열 집열기는 그림 5, 6과 같다. 현재 인천 송도신도시에 설치되어 가동 중이다.

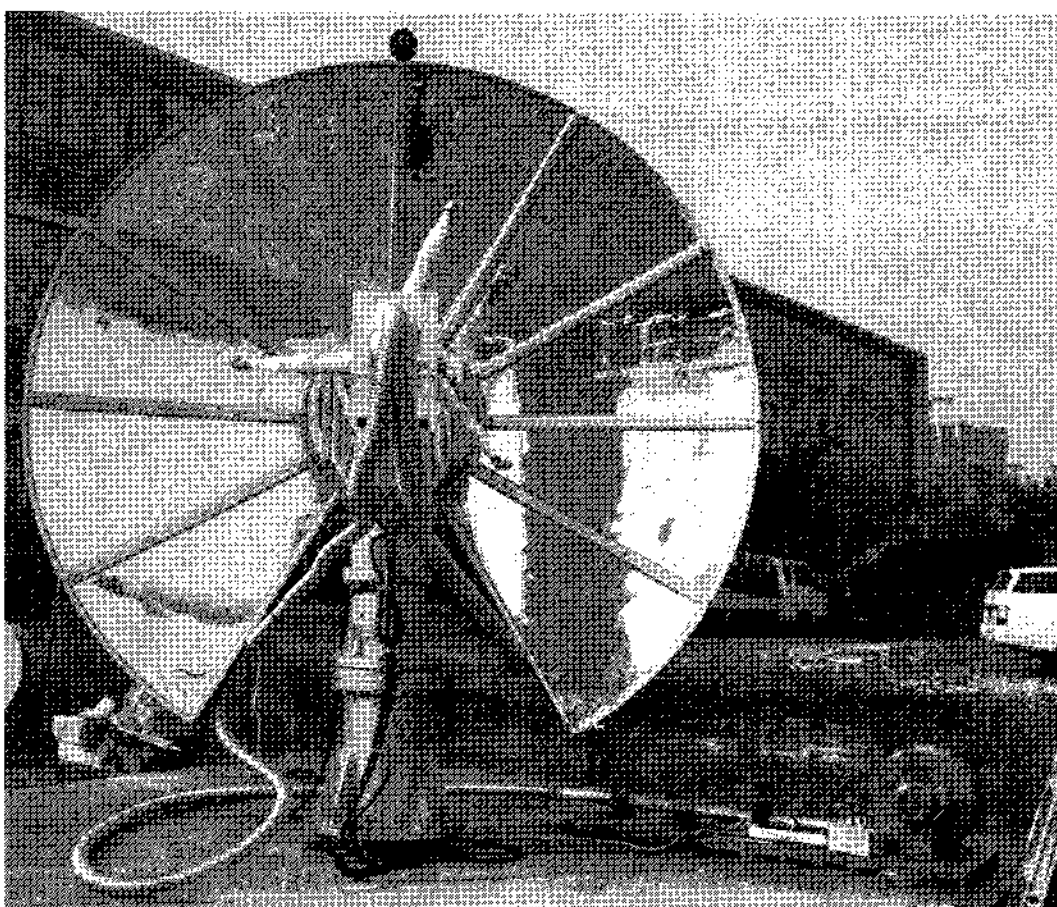


그림 5. 접시형 태양열 집열기(정면)

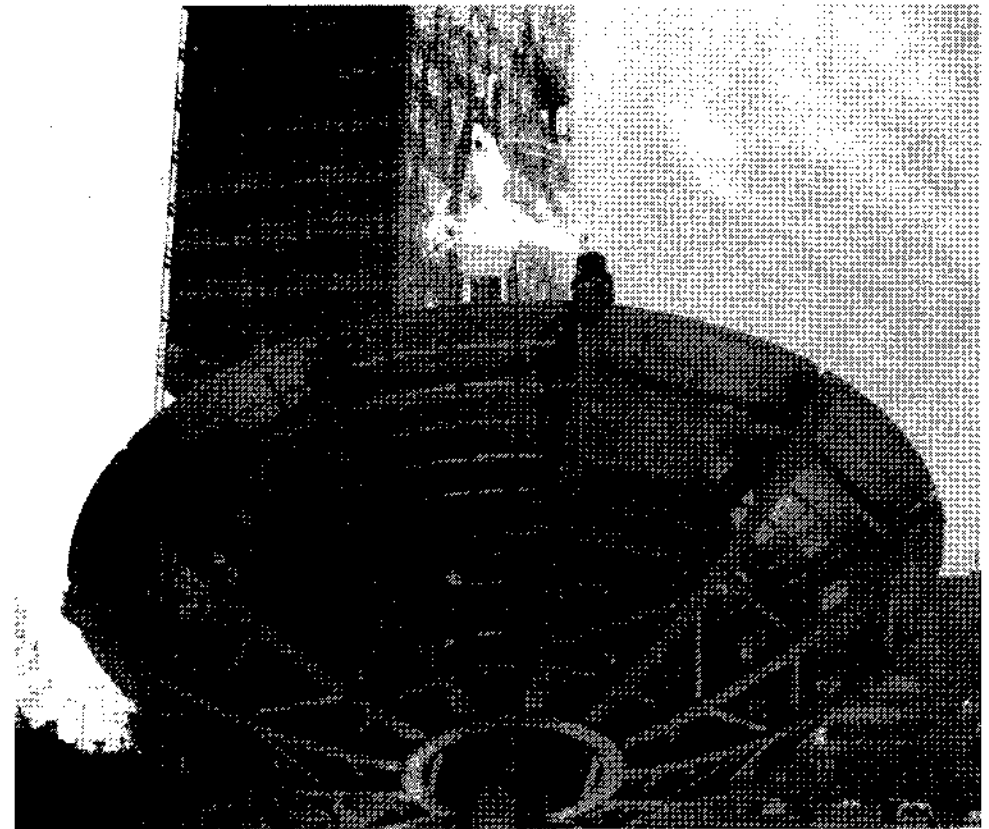


그림 6. 접시형 태양열 집열기(뒷면)

그림 7은 전체 시스템 개략도이다. 송풍기로 불어넣은 공기가 flexible hose를 통과하여 흡수기 안으로 들어간다. 또한, 접시형 태양열 집열기는 센서에 의해 태양을 추적하며, 수집된 데이터는 데이터 로거를 거쳐 컴퓨터에 저장된다. 시스템 앞 쪽에 위치한 실험실 내부에서 전원이 공급되며, 제어장치에 의해 전체 시스템이 구동된다.

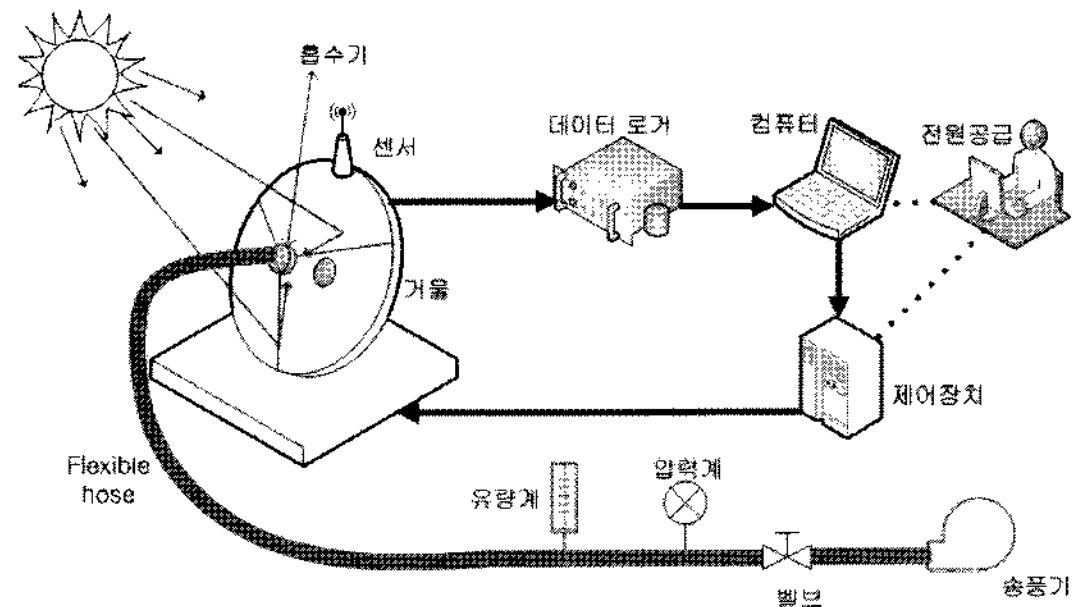


그림 7. 시스템 개략도

(2) 직달 일사량계

그림 8은 직달일사량을 측정하기 위해 사용한 직달 일사량계(pyreheliometer)이다. 센서는 NIP (Normal Incidence Pyreheliometer) 모델이며, 선형성은 $\pm 0.5\%$ ($1 \sim 1400\text{W/m}^2$)이고, 온도 의존성은 $\pm 1\%$ ($-20 \sim 40^\circ\text{C}$)이다. tracker는 태양을 자동으로 추적할 수 있는 ST-1모형을 사용하였

다. 본 기기는 1 축 제어를 하기 때문에, tracker의 고도각을 맞추기 위해 식 (1)을 사용하였다.

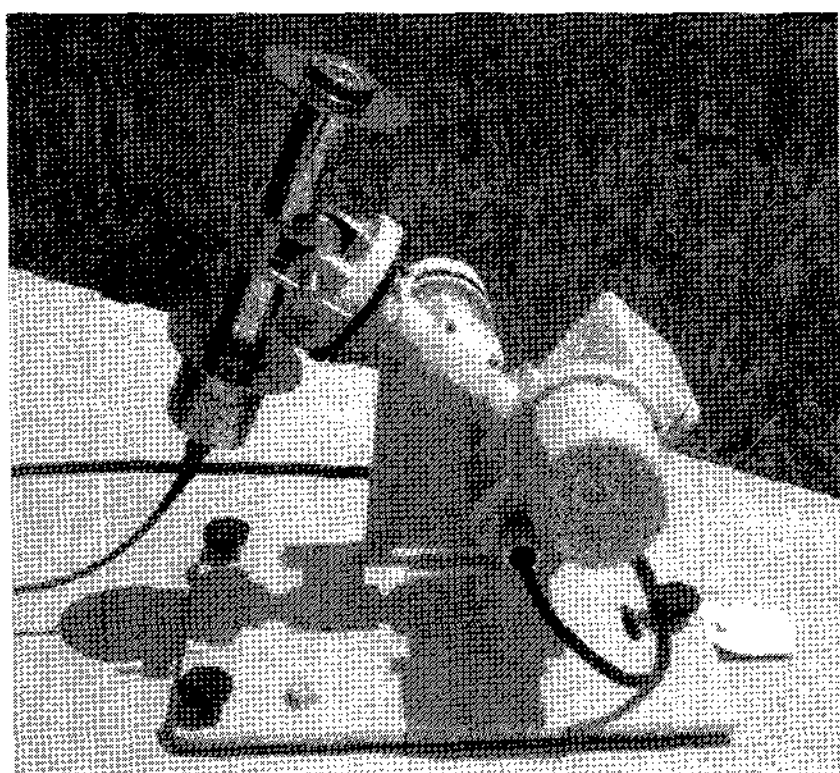


그림 8. 직달 일사량계(pyrheliometer)

$$ET = 229.18 \times (0.000075 + 0.001868 \times \cos D - 0.032077 \times \sin D - 0.014615 \times \cos 2D - 0.040849 \times \sin 2D) \quad (1)$$

여기서, $nD(365^\circ/365)$ 로 나타낸다. nD 는 일년 중 날짜이다. (즉, 2월 1일은 $nD = 32$)

(3) 태양센서

그림 9는 접시형 태양열 집열기 상단에 위치한 센서이다. 5개의 광센서(photodiode)를 사용하여 태양의 유무, 태양의 방위각 및 고도각 변화에 따른 태양의 위치를 판별하기 위한 센서이다.

센서 하우징 외부에 설치된 광센서 E는 태양이 일시적으로 구름에 가려있거나 또는 흐린 날씨를 판별하기 위한 것이며, 광센서 A와 B는 태양 방위각 변화에 따른 태양추적을, 광센서 C와 D는 태양 고도각 변화에 따른 태양추적을 수행하기 위한 것이다.

태양센서의 의한 태양추적은 광센서 E에 입사되는 태양빛의 세기(intensity)가 추적 조건에 적합할 경우, 태양추적용 광센서 A, B 및 C, D를 사용하여 추적을 수행하며, 태양이 일시적으로 구름에 가려 있거나 하는 경우와 같이 광센서 E로부터

생성되는 신호가 추적조건을 충족시키지 못할 경우, 시스템을 추적대기모드로 전환시켜 추적을 중지시킨다.⁸⁾

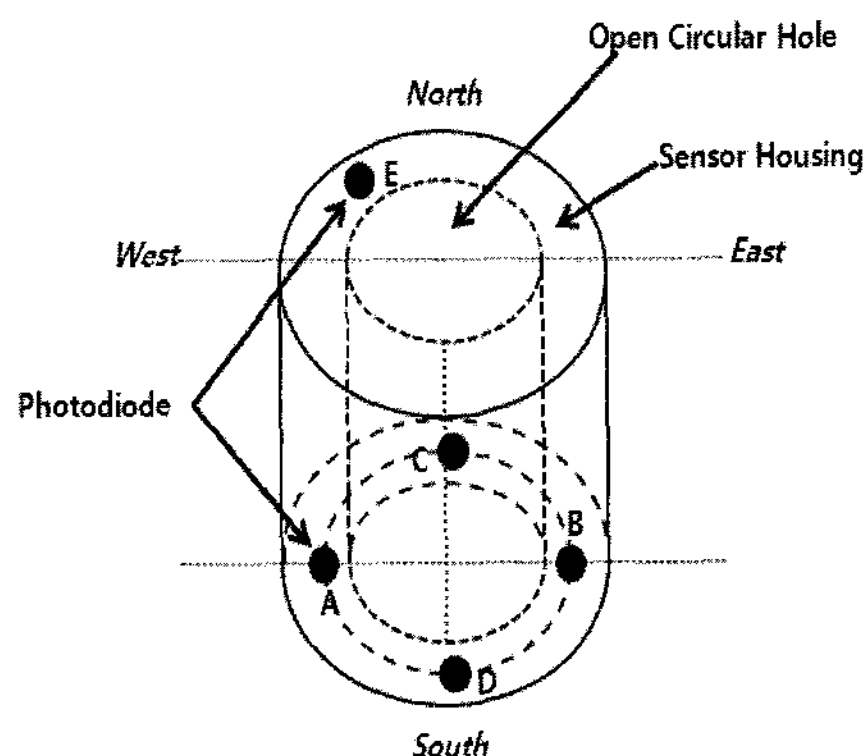


그림 9. 태양센서 구조⁷⁾

(4) 흡수기 외부 형상 및 다공성 물질

그림 10은 공기식 흡수기 외부 형상이다. 흡수기의 대류 열손실을 최대한으로 줄이기 위해 흡수기 입구에 투과율이 높고, 고온에서 견딜 수 있는 석영 유리(quartz glass)를 설치하였다. 그리고 흡수기 내부를 지나는 공기의 거주시간 및 열전달 면적을 최대한 늘리기 위해서 그림 11과 같이 니켈 합금으로 이루어진 다공성 물질(porous metal)을 채워 넣었으며, 흡수기 외부 출구를 단열하기 위해 세라믹 섬유(thermal ceramic fiber)를 사용하였다.

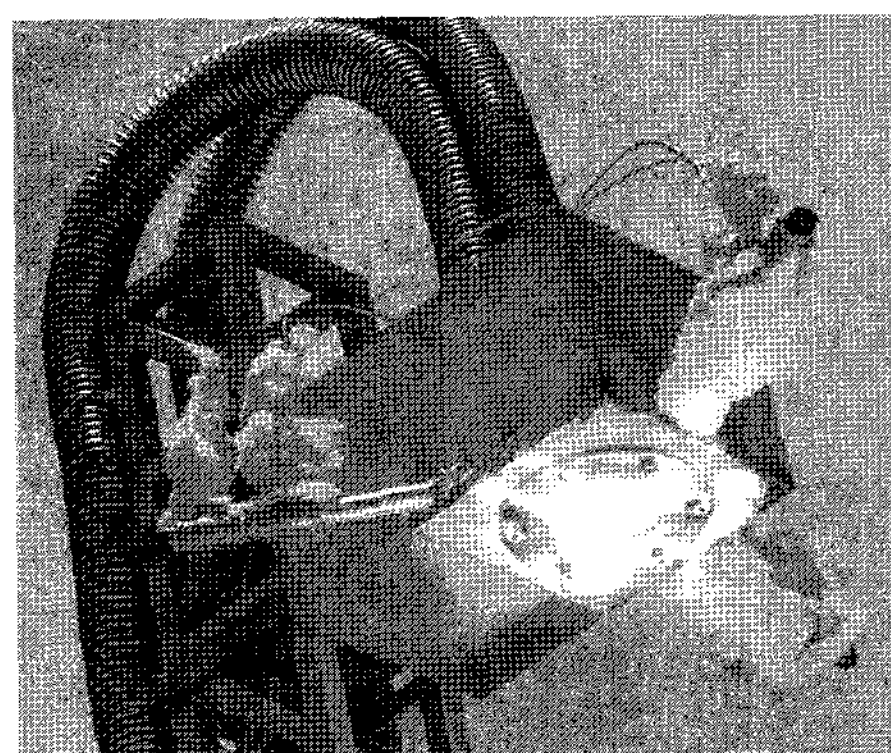


그림 10. 흡수기 외부 형상

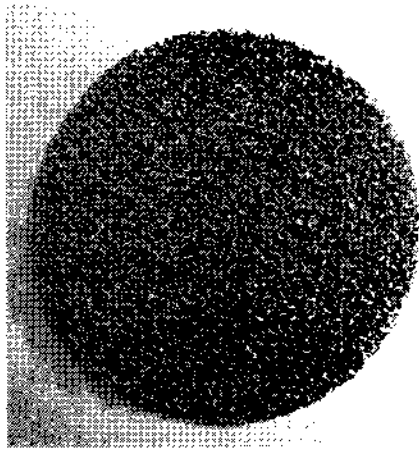


그림 11. 다공성 물질

(5) 기타 장치

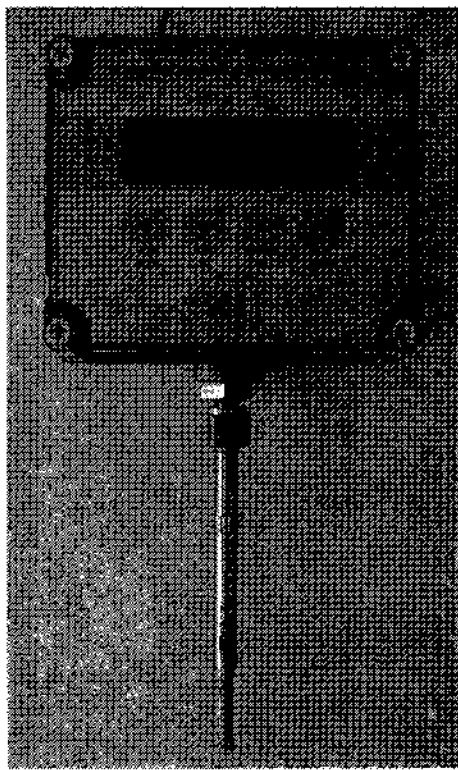


그림 12. 질량 유량계

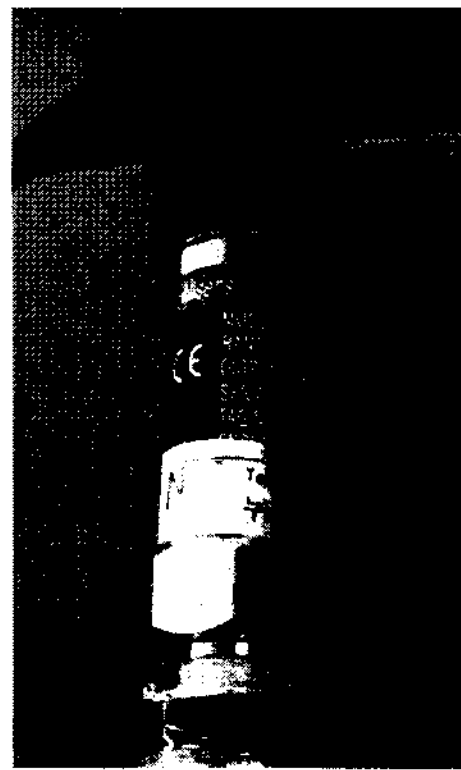


그림 13. 압력계

공기가 유입되는 흡수기 입구에는 유연성 및 고온에 견디는 재질의 배관이 필요하기 때문에 -200 ~ 800 °C에서도 견딜 수 있는 SUS 304 재질의 flexible hose를 사용하였다.

접시형 태양열 집열기에서 최대 효율을 구하기 위해서는 공기의 정확한 유량을 측정하는 것이 매우 중요하기 때문에 그림 12와 같은 0 ~ 300 kg/h의 범위를 측정할 수 있고, 정확도가 ±0.5%인 질량 유량계(Sage Metering, SIG - 05 - 06 - DC24 - AIR)를 설치하였다. 또한, 접시형 태양열 시스템의 경우 작동 유체의 온도 변화 범위가 매우 크기 때문에, 유량 범위에 따른 압력의 변화 역시 매우 중요하다. 따라서 그림 13과 같은 압력계(Allsensor, P201-H-003-B-G)를 설치하였다. 압력계의 정확도는 ±0.5%이며, 측정범위는 0 ~ 3 bar이다.

2.3 실험방법

본 실험에서는 접시형 태양열 집열기에 설치된 공기식 흡수기 안쪽으로 작동 유체인 공기를 송풍기로 불어넣었다. 다공성 물질(porous metal)로 채워진 흡수기 안쪽으로 유입된 공기는 흡수기를 통과한 후 출구를 통해 빠져나가게 된다. 흡수기 안쪽 공기 흐름을 와류로 만들기 위해 출구를 세 방향으로 제작하였다. 접시형 태양열 집열기의 성능을 분석하기 위해서는 흡수기의 입구 및 출구의 온도 측정이 매우 중요하다. 따라서 흡수기의 입구와 출구 쪽에 K-type 열전대를 각각 2개, 6개를 설치하여 입·출구 사이의 평균 온도차를 구하였다. 또한, 하루의 일사량 측정이 시스템의 전체 효율을 구하는 부분에 있어서 매우 중요하다. 따라서 앞서 언급한 직달 일사량계를 정남쪽에 위치시켜, 일출 시간부터 일몰 시간까지의 일사량을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과 처리

시스템의 효율은 식 (2)을 사용하여 구하였다.

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{air,o} - T_{air,i})}{P_{mirror}} = \frac{\dot{m}c_p(T_{air,o} - T_{air,i})}{DNI \times A_{mirror}} \quad (2)$$

3.2 실험결과 분석

그림 14~16은 시간에 따른 일사량과 공기식 흡수기의 입·출구 공기 온도 변화를 나타내었다. 일사량이 일정하게 측정되다가 값이 떨어지는 경우에 흡수기 출구의 온도도 떨어지는 것을 알 수 있다. 일사량이 일정하게 측정되지 못한 이유에는 여러 가지가 있겠지만 구름으로 인한 태양복사의 산란이 가장 큰 이유이다. 따라서 이 실험에서 가장 중요한 요소는 일정한 일사량 조건을 얻는 것이다. 그림 14~16의 그래프 모두 입구 온도는 일정하지만 출구 온도는 DNI에 비해 늦게 반응한

다. 다시 말해 출구온도의 변화는 DNI의 변화를 완벽히 따라가지 못한다. 그 이유는 흡수기 내부의 온도가 태양 복사열에 의해 상승함에 따른 단열 효과에 의해서 내부 온도가 일정 시간 동안 유지되기 때문이다.

표 2는 유량변화에 따른 시스템의 평균 효율을 구한 표이다. 유량이 증가할수록, 시스템의 평균 효율이 증가하는 것을 알 수 있다.

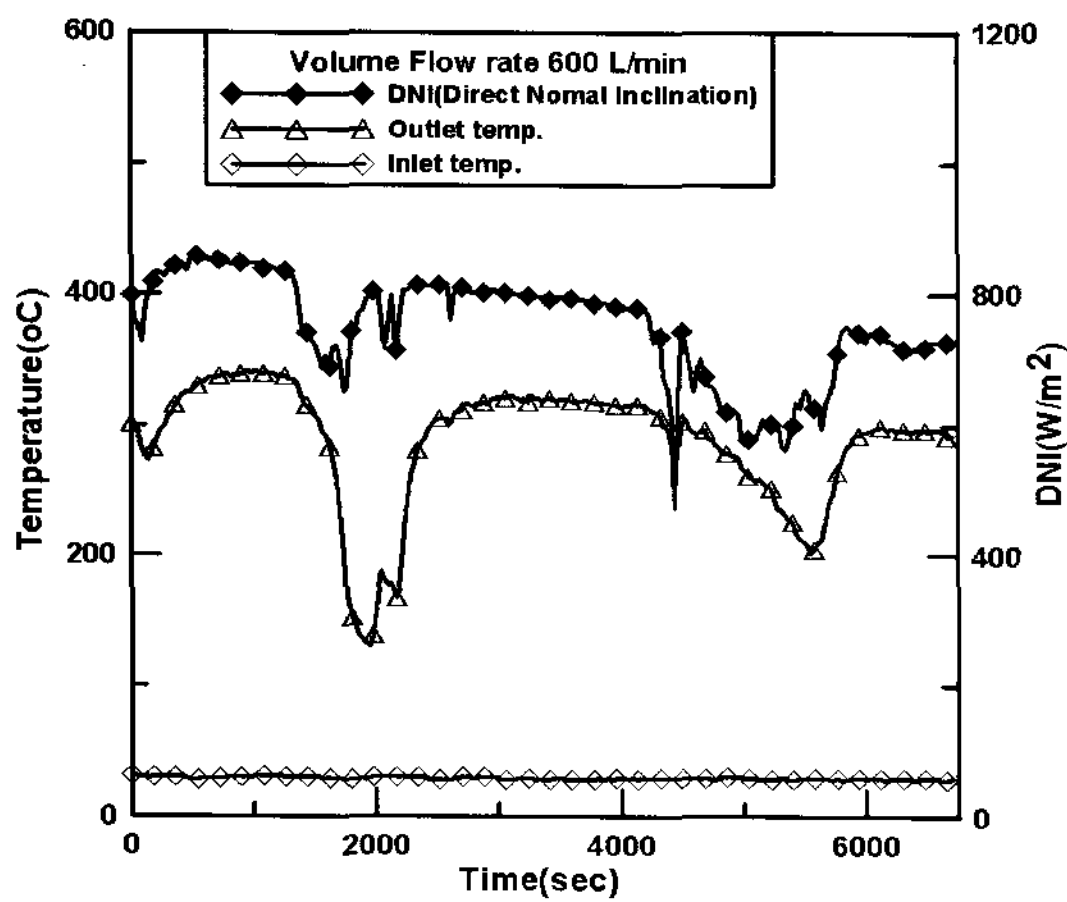


그림 14. 흡수기 입·출구 공기 온도변화 (유량=600 L/min)

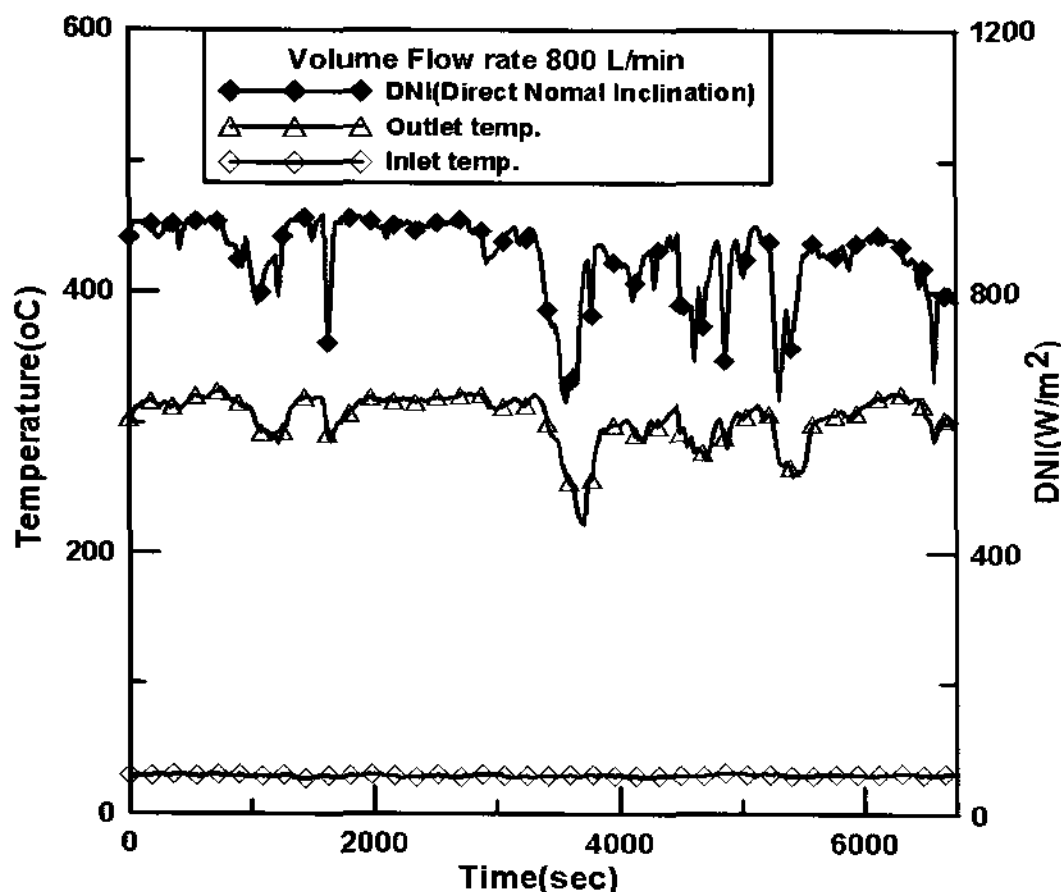


그림 15. 흡수기 입·출구 공기 온도변화 (유량=800 L/min)

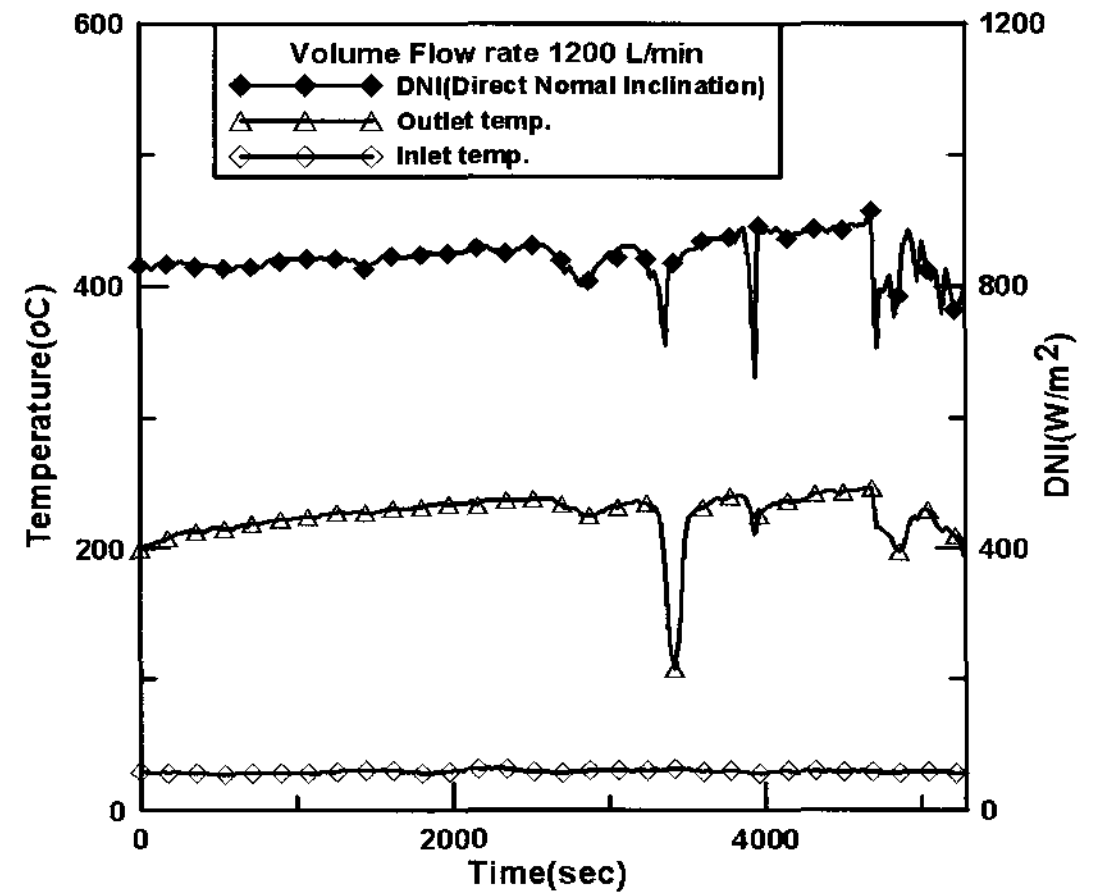


그림 16. 흡수기 입·출구 공기 온도변화 (유량=1200 L/min)

표 2. 유량 변화에 따른 시스템 평균 효율 변화

| 유량 (L/min) | 효율 (%) |
|------------|--------|
| 600 | 81.25 |
| 800 | 85.05 |
| 1200 | 92.58 |

4. 결론

본 연구에서는 실험을 통해 접시형 태양열 집열기 시스템의 설계 및 예비 실험을 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 열용량 5kW급의 접시형 태양열 집열기 시스템을 실제 제작, 시험 운전하였다.
- (2) 작동 유체인 공기의 유량이 증가함에 따라 작동 유체의 온도 변화폭이 작아진다.
- (3) 공기의 유량이 증가함에 따라 시스템 전체 효율이 좋아진다.
- (4) 일사량이 증가함에 따라 흡수기 출구 공기의 온도도 증가한다.

접시형 태양열 집열기의 실험을 할 경우에는 날씨의 청명도가 매우 중요한 인자로 작용하게 된다. 따라서 청명한 날씨 조건 하에서 장시간 실험을 실시하여 측정하는 것이 정확한 시스템의 효율을 구하는 데 효과적이다.

후 기

본 과제(결과물)는 산업자원부 출연금으로 수행한 최우수실험실사업(과제번호 : 005-N-SO14-P-01-0-000)의 연구결과입니다

참 고 문 헌

1. 산업자원부, 에너지정책 성과분석 및 향후 전략에 관한 보고서, 산업자원부, 2006.5.
2. D. Mills, Advances in solar thermal electricity technology, Solar Energy, Vol. 76, pp. 19-31, 2004.
3. S. T. Hyun, W. G. Chun, Y. H. Kang, H. G. Yoon, C. K. Yoo, Experimental Study on Flux Distributions Produced by Dish Solar Reflector, Proceedings of the Korean Solar Energy Society, pp. 53-59, 2001.
4. Y. H. Kang, H. Y. Kwak, H. K. Yoon, C. K. Yoo, D. G. Lee, M. C. Kang, H. S. Yoon, Flux Distribution of The Dish Concentrator, Proceedings of the Korean Solar Energy Society, pp. 127-133, 1999.
5. 강용혁, 김진수, 이상남, 윤환기, 유창균, 김종규, 조덕기, 10kWe 급 Dish-Stirling 태양열 발전시스템 실증연구, 태양에너지학회지, Vol. 5, No. 3, pp. 9-17, 2006.
6. S. T. Hyun, Y. H. Kang, H. G. Yoon, C. K. Yoo, M. C. Kang, An Experimental Study on the Characteristics of Flux Density Distributions in the Focal Region of a Solar Concentrator, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 22, No. 3, pp. 31-37, 2002.
7. European Commission, European Research on Concentrated Solar Thermal Energy, pp. 1-39, 2004.
8. Y. C. Park, Y. H. Kang, A study on the development of two axes sun tracking system for the parabolic dish concentrator, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 19, No. 4, pp. 81-91, 1999.