

태양열 발전용 스크롤 방식 스테리링엔진 흡수기 특성 연구

서호영*, 김종규**, 이상남***, 강용혁****

*한국에너지기술연구원(gameover@kier.re.kr), **한국에너지기술연구원(rnokim@kier.re.kr),
한국에너지기술연구원(snlee@kier.re.kr), *한국에너지기술연구원(yhkang@kier.re.kr)

Study on the Characteristics of Scroll type Stirling Engine Receiver for Solar Thermal Power

Seo, Ho-Young*, Kim, Jong-Kyu**, Lee, Sang-Nam***, Kang, Youg-Heack****

*Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(gameover@kier.re.kr),
**Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(rnokim@kier.re.kr),
***Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(snlee@kier.re.kr)
****Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(yhkang@kier.re.kr)

Abstract

This paper describes the characteristics of scroll type stirling engine receiver. Scroll type stirling engine operated scroll compressor and expander instead of piston. Pass dimension of the receiver was 14(W)×14(H) mm and total pass length was 5,049 mm. External dimension of the receiver was 300×300 mm. The experimental facility consisted of parabolic dish concentrator, compressor to supply air, triplex air filter, and flowmeter. In this study, basic experimental conditions were set at a inlet pressure of 5 bar and volume flow rate of 25 m³/hr.

As a result, air temperature in receiver at each measuring position of point 1, 2, 3 were 241 °C, 465 °C and 542 °C respectively at inlet pressure of 5.5 bar and volume flow rate of 24.6 m³/hr. As DNI increasing, heat transfer coefficient of the receiver changed from 695 W/m²K to 827 W/m²K. Average heat transfer coefficient of receiver in the experiment was 798 W/m²K. In addition, receiver efficiency became about 83 %.

Keywords : 태양열(Solar thermal), 접시형 집열기(Parabolic dish concentrator), 스테리링엔진(Stirling engine), 스크롤(Scroll), 흡수기(Receiver), 열전달(Heat transfer)

기 호 설 명

A_{dish}	: 접시형 집열기 면적 (m ²)	T_i	: 흡수기 입구온도 (°C)
C_p	: 비열 (kJ/kg K)	T_o	: 흡수기 출구온도 (°C)
D_i	: 흡수기 유로직경 (mm)	η_{dish}	: 접시형 집열기 효율 (%)
h	: 열전달계수 (W/m ² K)	η_r	: 흡수기 효율 (%)
k	: 열전도율 (W/m K)	DNI	: 직달일사량 (W/m ²)
\dot{m}	: 유량 (kg/s)	Nu	: 누셀트수
Q_i	: 집열기 집광열 (kW)	Pr	: 프란틀수
Q_o	: 흡수기 흡수열 (kW)	Re	: 레이놀즈수

1. 서 론

국내 태양열 발전에 관한 연구는 1970년대 말부터 시작하여 최근까지 다양한 분야에 걸쳐 연구가 진행되고 있다. 특히 고온의 태양열을 이용한 활용¹⁾은 1994년부터 본격적으로 시작하여 구유형(Parabolic trough) 집광기술, 접시형(Parabolic dish) 집광기술의 개발 및 태양열 발전을 실증하고 최근 대규모 타워형 발전(Power tower) 등 최신의 기술들을 개발 중에 있다. 이 중 접시형 집광기술을 이용하여 태양광을 집광하고 스테링엔진(Stirling engine)을 활용한 태양열 발전은 많은 개발을 통해 상업화를 추진하고 있다.

접시형 태양열 발전 시스템은 태양을 자동으로 추적하는 접시 모양의 반사판이 태양광을 한곳으로 집광시키고 이 초점부에 모여진 열을 이용하여 스테링엔진을 구동시켜 전기를 생산하는 소규모 분산형 발전의 한 형태이다. 전기를 생산하는 스테링엔진은 스테링 사이클을 이용한 외연기관으로 연료를 태워서 발생하는 열을 이용하여 작동하는 내연기관과 달리 외부에 열을 받아 작동하는 기관이다. 이는 외부의 열을 이용하는데 있어 태양열을 활용할 수 있다는 점에 큰 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 접시형 태양열 발전 시스템에 활용되는 10 kW급 스테링엔진에 장착되는 스크롤(Scroll) 방식 스테링엔진 흡수기를 개발하기 위하여 실험장치를 구성하였고 이에 따른 흡수기의 특성에 관하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구는 기존의 피스톤을 이용하여 구동하는 방식이 아닌 스크롤을 이용하여 구동하는 스테링엔진의 태양열 흡수기에 관한 개발이다. 이를 위해 다음과 같은 실험장치를 구축하여 흡수기를 실험하였다.

2.1 스크롤 방식 스테링엔진

스테링 엔진은 여러 방식이 존재하나 본 연구에서는 스크롤 방식의 스테링엔진 개발에 활용되는 태양열 흡수기를 개발하는 것이다. 스크롤 방식의 스테링엔진은 기존의 피스톤²⁾을 사용하는 것이 아닌 스크롤이 압축과 팽창과정을 스크롤 압축기와 팽창기가 담당한다. 그림 1은 스크롤 방식 스테링엔진의 기본적인 흐름도를 나타내고 있다. 스크롤 압축기와 팽창기, 구동 및 발전을 담당하는 제너레이터(Generator)가 하나의 축으로 연결되어 있다. 스크롤 압축기와 팽창기는 그림 2와 같이 고정부와 선회부를 가지고 있으며 10 kW의 전력을 생산하기 위한 압축부와 팽창부의 설계조건은 표 1과 같다.

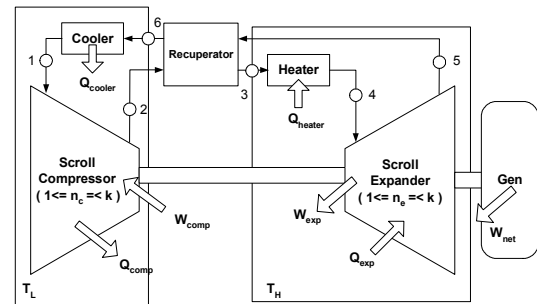


그림 1. 스크롤 방식 스테링엔진 개념도

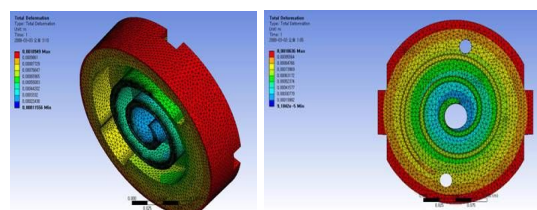


그림 2. 스크롤 압축기 및 팽창기

표. 1 스크롤 압축기 및 팽창기 설계조건

Specification	Compressor	Expander
Inlet pressure (bar)	57	25
Outlet pressure (bar)	26	6
Temperature (°C)	700	40

2.2 스테어링엔진 흡수기

흡수기는 집광된 태양열을 스테어링엔진의 작동유체로 열을 전달해 주는 장치이다. 일반적으로 접시형 집열기로부터 스테어링엔진 흡수기로 전달되는 열유속의 분포는 가우시안³⁾ 분포를 보이는데, 중심부의 열유속이 높고 밖으로 갈수록 낮아진다. 이러한 집광 특징을 고려하여 2가지 흡수기 설계 기준을 설정하였다. 첫째, 흡수기 표면 중앙 집중형 열유속 분포에 따른 흡수기 중앙부 표면의 온도 증가가 예상되므로 흡수기 중심부로 작동유체가 유입되는 형태가 되어야 한다. 둘째, 작동유체의 압력손실을 고려하여 직경이 작은 여러 관을 연결하는 방식이 아닌 일정 크기 이상의 유로가 형성된 형태의 흡수기 형태가 되어야 한다. 또한 유로가 크에 따라 발생하는 열전달 저하 현상을 방지하기 위해 핀(Fin)의 역할을 하는 내부 구조를 갖추어야 할 것이다. 따라서 위와 같은 조건을 만족하기 위하여 블록에 절삭 등의 방식으로 유로를 형성하고 유로사이에 벽면을 편역할로 사용할 수 있는 방식으로 흡수기를 고안하였다. 그림 3은 흡수기의 형상을 보여주고 있다. 흡수기의 크기는 가로와 세로가 각각 300 mm의 정사각형이며 흡수기 내부는 가로와 세로가 각각 14 mm인 하나의 유로가 나선형으로 파여져 있고 유로사이의 벽면두께는 1 mm이다. 앞판과 뒷판은 브레이징(Brazing)을 하여 흡수기가 밀폐되도록 하였다. 또한 흡수기내의 공기온도를 측정하기 위하여 흡수기 중앙으로부터 45 mm 간격으로 열전대를 삽입하였다(Point 1, 2, 3). 표 2는 흡수기의 크기를 나타내고 있다.

2.3 실험장치의 구성

스크롤 방식 스테어링엔진 흡수기에 대한 특성 분석을 위한 실험장치를 그림 4와 같이 구성하였다. 그림 4와 같이 흡수기에 태양열을 집광하는 설비로는 40 kW급 고정형 Dish 집광시스템을 이용하였으며 성능측정을 위한 열교환용 공기는 왕복동식 공기압축기를

사용하여 공급하였다. 압축공기의 토출압력을 조정하여 흡수기내에 유입되도록 하기 위해 압력조정기를 설치하였으며 압축공기에 포함되어 있는 습기, 분진, 오일 성분 등을 제거하기 위하여 공기필터를 3중으로 설치하였다. 흡수기의 성능분석을 위한 공기배관의 입·출구 온도 및 압력은 K-Type 열전대와 압력센서를 각각 설치하였으며 흡수기에 유입되는 공기량을 측정하기 위하여 유량계를 설치하였다.



그림 3. 흡수기(좌)와 흡수기 내부 유로(우)

표. 2 흡수기 크기

Specification	Value
Total size (mm)	300 × 300
Pass size (mm)	14(W) × 14(H)
The number of pass	1 pass
Total pass length (mm)	5,049
Front/Back Thickness (mm)	5 / 5

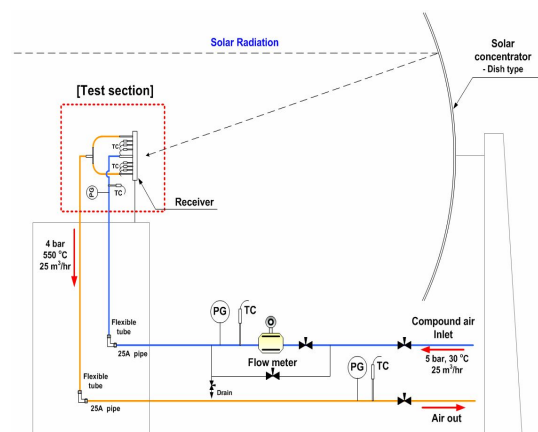


그림 4. 실험장치 대략도

2.4 실험방법 및 조건

실험에 앞서 흡수기로 전달되는 열량은 일사량, 반사율 등에 따라 다르므로 흡수기의 성능을 파악하기 위하여 흡수기에 도달하는 열량을 측정하였다. 그러나 흡수기 표면의 열유속은 균일한 분포를 나타내지 않으므로 태양광이 집광되는 부분에 타겟(Target)과 라디오메타(Radiometer)를 설치하고 이를 CCD 카메라로 촬영하여 측정된 열유속과 촬영된 이미지의 레벨과의 연관 관계를 통하여 흡수기에 집광되는 열유속을 산출하였다.

실험은 처음부터 태양광을 강하게 집광하면 흡수기의 변형 및 파괴를 가져올 수 있기 때문에 고정형 Dish 집광시스템의 블라인드를 조절하여 열유속을 조절함으로써 열충격을 최소로 줄였다. 압축공기의 토출압력은 5 bar, 유량은 25 m³/hr로 설정하였다. 열교환을 마친 공기는 대기중으로 방출시켰다. 표 3은 실험조건을 보여준다.

표. 3 흡수기 실험조건

Specification	Value
Working fluid	Air
Inlet temperature (°C)	30
Inlet pressure (bar)	5
Volume flow rate (m ³ /hr)	25
Average velocity (m/s)	68

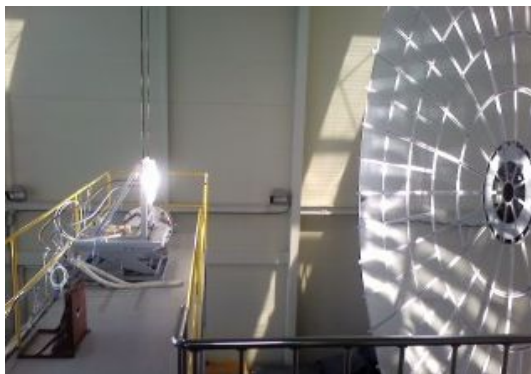


그림 5. 흡수기 실험

3. 실험결과 및 고찰

실험의 결과에 앞서 투입된 직달 일사량은 492~890 W/m²로 일사량 변화는 그림 6과 같다. 전반적으로 800 W/m²가 넘는 일사량을 보이고 있다. 그림 5는 흡수기 실험을 하는 모습으로 흡수기에 빛이 집광되어 있는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 시간에 따른 흡수기 입구 및 각 지점의 공기 온도를 보여준다. 흡수기를 통과하는 공기의 평균온도차는 입구에서 Point 1까지는 202 °C, Point 1에서 2까지는 224 °C, Point 2에서 출구부근인 3까지는 77 °C로 열유속이 높은 중앙부 공기 온도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며 출구부 공기의 평균온도는 542 °C이다.

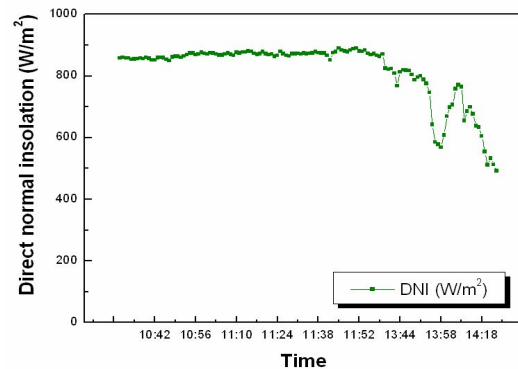


그림 6. 시간에 따른 직달일사량 분포도

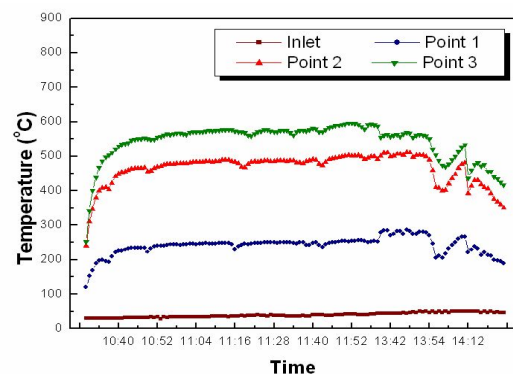


그림 7. 시간에 따른 흡수기 공기온도

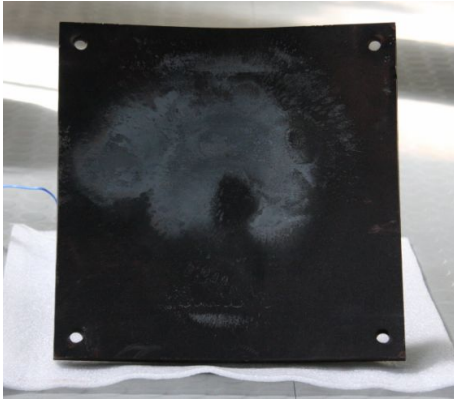


그림 8. 실험후 흡수기

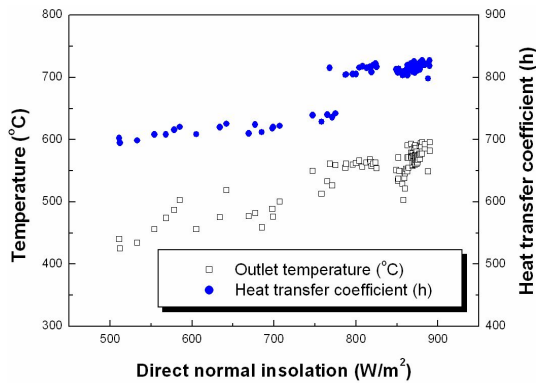


그림 9. 직달일사량에 따른 흡수기 출구온도와 열전달계수

그림 8은 실험을 마치고 난후의 흡수기 사진이다. 중앙부를 보면 높은 열유속으로 인해 코팅이 벗겨져 있는 것을 볼 수 있다.

흡수기의 성능을 알아보기 위하여 다음과 같은 과정을 수행하였다. 먼저 결과에 따른 레이놀즈수(Reynolds Number)와 프란틀수(Prandtl Number)를 구하였다. 열전달에 따른 물성치 변화가 크지 않을 때 비교적 정확한 결과를 보여주는 Dittus-Boelter 상관식⁴⁾에 의해 누셀트수(Nusselt Number)를 구하고 이에 따른 열전달계수를 구하였다. 식(1)은 Dittus-Boelter 상관식에 의한 누셀트수를 구하는 식이며, 식(2)는 열전달계수를 구하는 식이다.

$$Nu = \frac{hD_i}{k} = 0.0234 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (1)$$

$$h = 0.0234 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{k}{D_i} \quad (2)$$

직달 일사량에 따른 흡수기 출구온도와 열전달계수를 나타내는 그림 9를 보면 직달 일사량에 따른 열전달계수의 변화는 직달 일사량이 증가함에 따라 695 W/m²K에서 827 W/m²K로 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며 평균 열전달계수는 798 W/m²K로 산출되었다.

흡수기의 효율⁵⁾은 태양광이 집광된 열량과 흡수기의 작동유체인 공기가 얻은 열량의 비로 구하였다. 태양광이 집광된 열량은 식(3)과 같이 직달 일사량에 고정형 Dish의 면적과 집광효율로 얻을 수 있다. 고정형 Dish의 면적은 52.7 m², 반사판의 반사율 등이 포함된 집광 효율은 약 64%이다. 식(4)는 흡수기의 작동유체가 얻은 열량을 구하는 식이다.

$$Q_i = DNI A_{dish} \eta_{dish} \quad (3)$$

$$Q_o = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (4)$$

$$\eta_r = \frac{Q_o}{Q_i} \times 100 \quad (5)$$

그림 10은 직달 일사량에 따른 흡수기 출구온도와 흡수기의 효율이다. 600 W/m² 이하의 낮은 일사량에서는 흡수기 효율이 약 90% 이상으로 나타나고 있으며 직달 일사량이 높아짐에 따라 효율이 감소되는 것을 볼 수 있는데 이는 흡수기내의 공기 온도가 증가함에 따라 공기의 유속이 증가하고 또한 흡수기에서의 열손실에 의한 것으로 보인다. 전체적으로 흡수기의 평균 효율은 약 83%로 산출되었다. 본 실험에서 흡수기 주위는 단

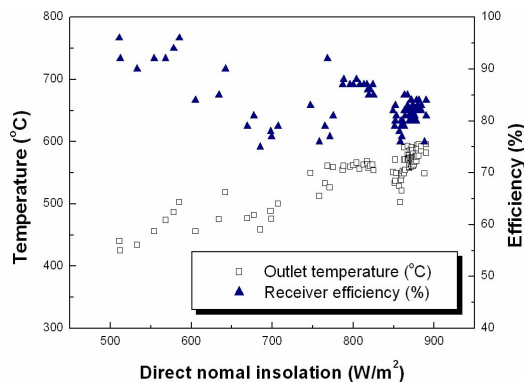


그림 10. 직달일사량에 따른 흡수기 출구온도와 효율

표. 4 흡수기 실험결과

Specification	Value
DNI (W/m^2)	492-890
Volume flow rate (m^3/hr)	24.6
In/Outlet pressure (bar)	5.5 / 5.1
Point 1/2/3 air temperature ($^{\circ}C$)	241/465/542
Nu	260.3
h (W/m^2K)	798
Efficiency (%)	83

열을 하지 않은 개방된 상태에서 실험을 실시하였는데 흡수기 주위에 단열을 실시하고 집광 효율을 보다 정밀하게 산출한다면 더 높은 흡수기 효율을 얻을 수 있으리라고 본다. 표 4는 실험에 따른 결과를 보여준다.

4. 결론

본 연구는 스크롤 방식 스티어링엔진 흡수기의 특성을 알아보기 흡수기를 제작하고 실험 장치를 구성하여 실험을 실시하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 흡수기의 입구 압력은 5.5 bar, 유량은 $24.6 m^3/hr$, 직달 일사량이 $492 W/m^2$ 에서 $890 W/m^2$ 로 변할 때, 흡수기의 공기 평균 온도는 중앙부로부터 $241^{\circ}C$, $465^{\circ}C$, $542^{\circ}C$ 로 나타났다.
- (2) 직달 일사량에 따른 흡수기의 열전달계수는 $695 W/m^2K$ 부터 $827 W/m^2K$ 까지

선형적으로 증가하며 평균 열전달계수는 $798 W/m^2K$ 로 나타났다.

- (3) 흡수기의 효율은 태양이 집광된 열량과 흡수기를 통과하는 공기가 얻은 열량의 비로 평균 효율은 약 83 %로 나타났다.

참고 문헌

1. 강용혁, 태양열 발전시스템의 종류 및 기술동향, 대한설비공학회, 설비저널 제33권 제10호, 2004, pp. 34-44.
2. D.G. Thombare, S.K Verma Technological development in the Stirling cycle engine, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006.
3. 한국에너지기술연구원, Dish형 집광시스템 이용 태양열발전 실증연구(최종보고서), 산업자원부, 2006.
4. Adrian Bejan, Allan D. Kraus, Heat Transfer Handbook, Wiley, 2003.
5. 배명환, 강상율, 9 kW 출력용 태양열 스티어링엔진 발전시스템의 설계와 성능예측, 대한기계학회 2003년도 춘계학술대회논문집, 2003, pp. 2198-2204.
6. Bancha Kongteagool, Somchai Wongwises, Performance of low-temperature differential Stirling engines, Renewable Energy 32, 2007, pp. 547-566.
7. K.S Reddy, N. Sendhil K umar, An improved cavity receiver of solar dish concentrator, Solar Energy 83, 2009, pp. 1884-1892.