

태양열 발전용 스텔링엔진 흡수기 특성연구

김종규, 이상남, 강용혁

한국에너지기술연구원(mokim@kier.re.kr), (snlee@kier.re.kr), (yhkang@kier.re.kr)

Study of Stirling Engine Receiver for Solar Thermal Power

Kim, Jong-Kyu, Lee, Sang-Nam, Kang, Yong-Heack

Advanced Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research
(mokim@kier.re.kr), (snlee@kier.re.kr), (yhkang@kier.re.kr)

Abstract

Stirling engine for solar thermal power is an essential part of Dish-Stirling system which generates electricity by using direct normal irradiation and will go into commercialization in near future. For the Stirling engine used in this study is Solo 161 model the capacity of which is 10 kWe and was already used for the Dish-Stirling system of KIER in Jinhae. The receiver of Stirling engine absorbs concentrated solar radiation and transfer it to working fluid of Hydrogen. The working condition of stirling engine is high temperature and high pressure to make high efficiency. Therefore the receiver should stand against high temperature of above 800 °C and high pressure of max. 150 bar with good performance of heat transfer. The receiver is composed of 78 Inconel tubes of 1/8" with thickness of 0.71 mm and two reservoirs which is connected with two cylinders..

In order to know the characteristics of heat transfer of Stirling engine receiver, simulation on the heat transfer of the receiver of Solo 161 is conducted by using CFD code of Fluent. The heat flux on the receiver surface has a shape of Gaussian distribution so, it is necessary to simulate a whole receiver. However, It is difficult and time consuming to simulate the whole receiver that one tube with different heat flux conditions are considered in this study.

From the simulation results, heat transfer characteristics of receiver are observed and tube wall and fluid temperature and heat transfer coefficient are obtained and compared with the calculated results from Dittus-Boelter's correlation.

Keywords : 스텔링엔진(Stirling engine), 흡수기(Receiver), 태양열 발전(Solar Thermal Power), 열전달 관계식(Heat transfer correlation)

1. 서 론

태양열 발전은 태양열을 집광하여 얻은 고온의 열을 이용하는 발전방식으로 대규모 발전과 분산발전으로 나눌 수 있다.

대규모 태양열 발전의 경우 고온의 열을 이용하여 증기를 발생시킨 후 증기터빈을 구동하는 랭킨사이클 형식이 있으며, 태양열을 이용하여 공기의 온도를 높인 뒤 가스터빈을 구동하는 브레이튼 사이클 형식이 있다. 분산발전의 경우 Dish-Stirling 발전시스템으로 접시형 집광시스템(Dish type concentrator)과 외연기관인 스텔링엔진(Stirling engine)을 이용하여 발전하는 방식으로 한국에너지기술연구원이 제작한 Dish-Stirling 발전시스템은 그림 1과 같다.

Dish-stirling 형식 발전방식은 접시형 집광시스템이 2축 구동으로 태양의 위치를 추적하여 접시에 도달하는 직달일사량을 한 곳에 모으면 이렇게 집광된 복사에너지를 스텔링엔진의 열원으로 이용하게 된다. 스텔링엔진은 외연기관으로서 스텔링엔진의 흡수기(Receiver)에서 외부의 열원을 흡수하고 이를 엔진 내부에 전달하게 된다. 스텔링엔진의 경우 군사용 등에서 상용화되어 사용되고 있으나 태양열 발전의 경우 현재 상업화 진입단계에 있으며 용량으로는 9 - 25 kWe급이 있다.

본 연구의 대상인 스텔링엔진은 독일의 Solo 161 모델을 사용하였는데, 이 엔진은 EuroDish 및 WGA 집광시스템과 연계하여 그 성능이 검증되어진 엔진으로 V형의 2개의 실린더 엔진 구동 장치에 의해 전력을 생산하며 용량은 10 kWe급이다. 작동유체로는 수소, 헬륨 모두 가능하나 국내 Dish-Stirling 발전시스템 운전시 수소를 사용하였다.

스텔링엔진 흡수기의 경우 1,000-1,500 정도로 집광된 높은 태양복사에너지가 흡수기 표면에 도달하므로 이를 효과적으로 흡수하여 엔진으로 열을 전달해야 하며 고온고압의

운전조건에서 구조적으로 안전해야 한다. 따라서 스텔링엔진 본체에 대한 연구개발과 더불어 외연기관으로서 열원인 태양열을 전달하기 위한 흡수기 연구가 병행하여야 한다. 이를 위하여 사용화를 앞둔 Solo 161엔진의 흡수기에 대한 연구를 진행하여 흡수기의 특징에 대해 기술보고자 한다.

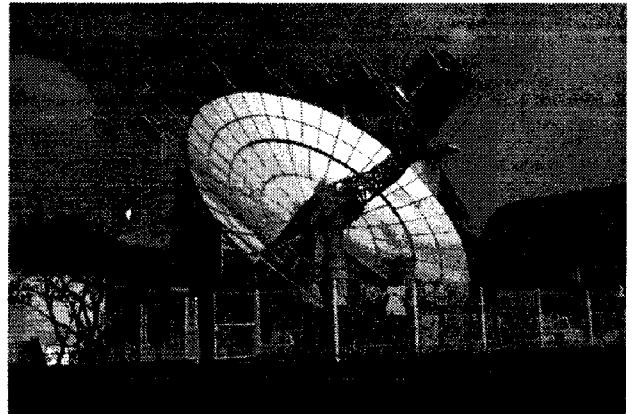


그림 1. Dish-stirling 발전시스템

2. Dish-Stirling 발전 실험

2.1 Solo 161 엔진 흡수기

Solo 161 엔진 흡수기는 그림 2와 같으며 1/8" 관 78개가 좌우 흡수기 레저버(Reservoir)에 2열로 연결되어 있고 V자 형태의 관이 위아래 각각 39개가 위치한다¹⁾. 따라서 흡수기 좌우에는 관이 겹치는 영역이 존재하고 중심부에는 겹치는 영역이 없이 원형과 같은 형태의 관 배열이 이루어진다. 이와 같이 하여 흡수기는 직경 약 245 mm 정도의 면적을 나타내고 있다. 흡수기를 구성하는 관에 대한 치수는 표 1에 나타내었다.

표 1 관 치수

| 항목 | 단위 | 치수 |
|----|----|--------|
| 외경 | mm | 3.175 |
| 내경 | mm | 1.7526 |
| 길이 | mm | 351 |

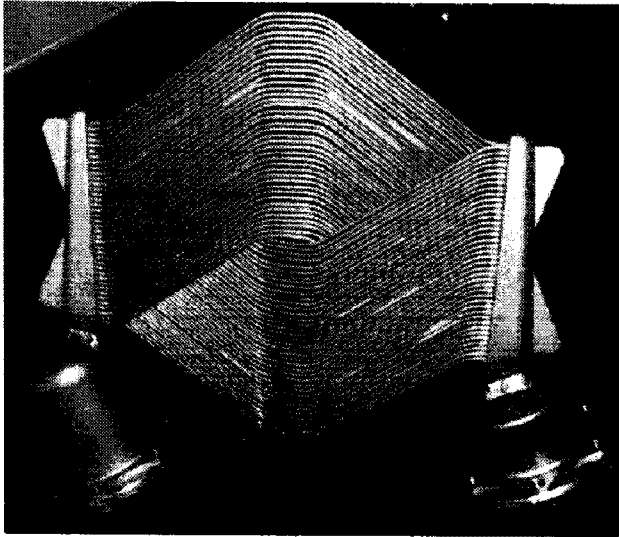


그림 2. Solo 161 엔진 흡수기

2.2 Dish-stirling 운전

한국에너지기술연구원에서는 접시형 태양열 집열시스템과 Solo 161 스텐링엔진을 이용하여 태양열 발전 실증실험을 수행하였다. 이때 작동유체로 수소를 사용하였으며 운전 압력은 약 80 bar, 흡수기 입구온도는 500 °C 였으며 직달일사량은 약 810 W/m²을 나타내었다. 접시형 집광시스템의 경우 집열면적이 42 m²으로 반사효율, 집광효율 및 열전달 효율 등을 고려할 때 약 25.3 kW의 열량이 스텐링엔진 흡수기로 전달된다²⁾.

흡수기를 통과하는 수소의 질량유량은 엔진 팽창부 실린더 체적만큼의 가스량이 피스톤 회전수(rpm)에 의하여 통과하는 량에 따라 결정된다고 할 수 있다. 실험결과에 의하면 엔진의 회전수는 1819 rpm 이고 팽창부 실린더 체적은 0.00016 m³ 이다. 따라서 흡수기 입구온도 500 °C를 기준으로 하면 수소의 질량유량은 0.0112 kg/s이고 흡수기 78개 관에서의 유속이 동일하다고 가정하면 각 관에서의 유속은 24.3 m/s가 된다.

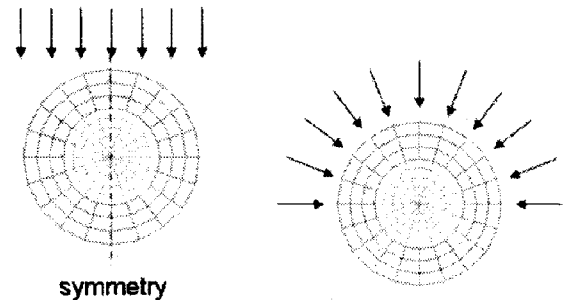
3. 흡수기 해석

흡수기 해석을 위하여 Fluent 6.2를 사용하

였으며 흡수기 한개의 관을 직선으로 모델링하였다. 이때 유동의 대칭성을 고려하여 그림 3과 같이 3차원 대칭형으로 O-type 격자를 이용 관를 포함하여 격자를 생성하였다.

실제 흡수기의 각 관은 앞의 Dish-Stirling 운전 조건에 따라 그림 4(a)와 같이 관의 외경 폭 만큼 532.8 kW/m²의 열유속을 받게 된다. 따라서 관 원주방향 위치에 따라 받는 열유속이 다르게 되는데 본 해석에서는 전체 열량이 동일한 조건에서 그림 4(b)와 같이 관 외벽 원주방향으로 339.2 kW/m²의 동일한 열유속이 되도록 변경하였다.

본 해석에서는 관의 외벽에 경계조건을 주어 고체인 관과 관내 유체에서의 열전달을 동시에 계산하였다. 난류계산을 위하여 standard k-ε방정식을 사용하였으며 열전달 계산을 위하여 500 °C 부터의 수소의 물성치⁴⁾를 표 2와 같이 온도의 함수로 나타내었다.



(a) 실제 열유속 분포 (b) 계산상의 열유속 분포
그림 3. 관 외벽 열유속 분포

표 2. 수소 물성치 함수

| 물성치 | 단위 | 함수 |
|------|-------------------|---|
| 밀도 | kg/m ³ | -0.002403T+4.2915 |
| 비열 | J/kgK | 0.0016T ² -1.4263T+14871 |
| 열전도도 | W/mK | 0.0005T+0.03169 |
| 점도 | kg/ms | 1.43×10 ⁻⁸ T+6.07×10 ⁻⁶ |

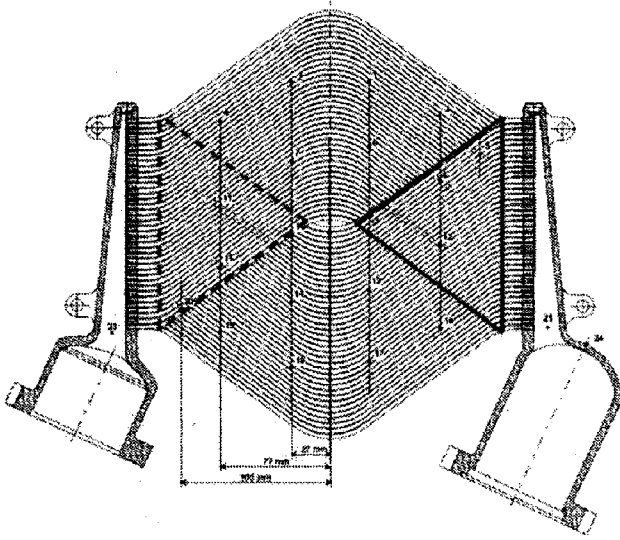


그림 4. Solo 161 흡수기 열전달 영역

그림 4의 좌우에 점선 및 실선으로 삼각형을 나타내었다. 좌측 점선의 삼각형은 흡수기 하부 관들이 흡수기 상부 관들에 의해 가려지는 영역이고 오른쪽 삼각형 영역은 하부 관들에 의해 상부 관들이 가려지는 영역을 나타낸 것이다. 즉 삼각형 모양으로 가려지는 영역은 흡수기에서 태양복사에너지를 받지 못하는 영역으로 계산상에서 제외되는 부분이다. 따라서 각 관에 대한 계산에서 열전달 면적이 달라지게 되며 이를 고려하기 위하여 전체 관 길이에서 열유속이 도달하지 못하는 부분은 단일조건으로 처리하였다.

표 1에서 관의 길이를 351 mm로 하였고 이를 10등분으로 나눠 각각의 영역에 경계조건을 설정하였다. 평균 열유속, 339.2 kW/m²이 흡수기 전면에서 고루 도달한다고 가정하면 실제 흡수기 직경인 245 mm내에 78개의 관이 겹치는 영역 없이 존재하여야 하고 이때 각 관의 길이는 약 192 mm이다. 이는 모델링 된 351 mm 길이 관의 55% 정도를 평균 열유속 339.2 kW/m²이 그림 4(b)와 같은 열유속 분포를 가진다고 할 수 있다. 이 경우가 흡수기

관들의 평균적인 열전달 조건이라 할 수 있다. 그러나 실제 열유속 분포는 중심부의 열유속이 높은 가우시안 분포를 나타내고 있다. 따라서 흡수기 중심부의 경우 평균 보다 높은 열유속이 작은 열전달 면적에 도달한다고 할 수 있고 이와 반대로 흡수기 중심부와 먼 외곽은 열전달 면적은 증가하지만 열유속이 줄어든다고 할 수 있다. 표 3에 흡수기 전체적으로 동일 열량이 분포하기 위한 해석조건인 열유속 및 열전달 길이를 나타내었다.

표 3. 해석 조건

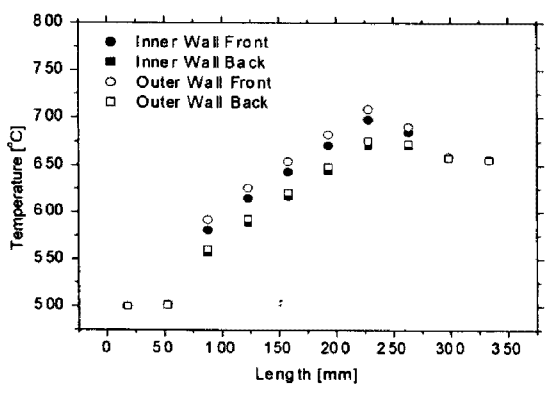
| 조건 | 열유속 (kW/m ²) | 열전달 길이 (mm) |
|--------|-----------------------------|----------------|
| 흡수기 평균 | 339.2 | 192 |
| 흡수기 중심 | 618.6 | 105 |
| 흡수기 외곽 | 265.1 | 246 |

4. 해석 결과 및 고찰

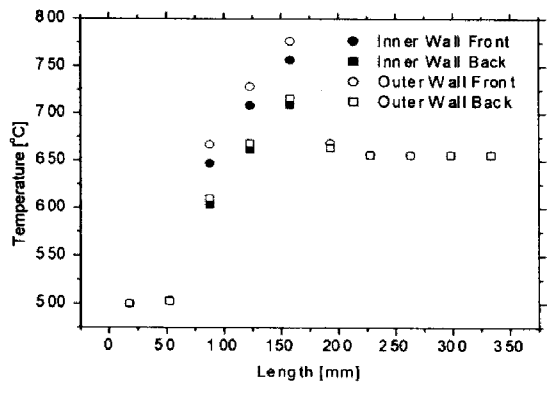
표 3과 같은 해석조건에서 그림 5 및 그림 6과 같은 벽면과 유체의 온도분포 결과가 나왔다. 흡수기 전면에만 열유속이 전해지므로 관 벽면온도는 그림 6과 같이 흡수기 전면부 온도와 후면부 온도로 나누어 결과를 표시하였다. 이때 관 전면부와 후면부의 온도차이는 흡수기 평균, 중심부, 외곽에서 각각 약 30 °C, 50 °C, 20 °C 정도 차이가 나는 것으로 나타났다.

유체 온도와 벽면온도의 분포는 그림 6에 나타내었는데, 동일한 열량을 기준으로 해석조건을 설정하였기 때문에 유체의 온도는 모두 출구에서 동일하게 계산되었으나 벽면온도의 경우 흡수기 중심부에서는 약 780 °C 정도이며 이는 흡수기 다른 영역의 벽면 최고온도와 비교하면 약 100 °C 정도 높다고 할 수 있다. 관 벽면과 유체의 온도 차이는 50 -

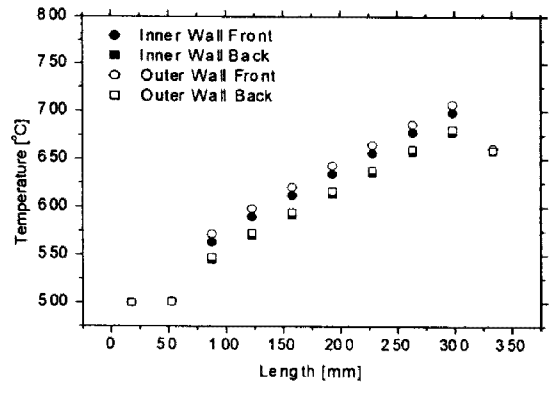
100 °C 정도 차이가 남을 알 수 있다. 그림 6을 보면 국부적으로는 흡수기 중심과 외곽의 벽면온도는 100 °C까지 차이가 나는 것으로 나타났다.



(a) 흡수기 평균

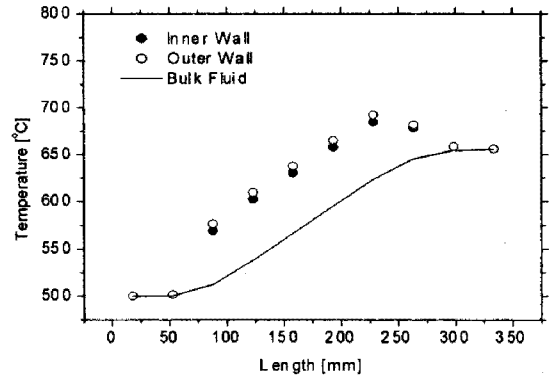


(b) 흡수기 중심

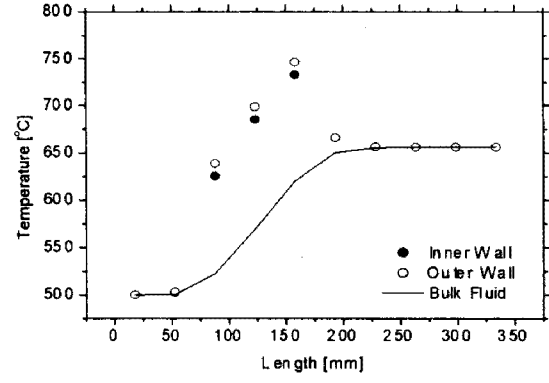


(c) 흡수기 외곽

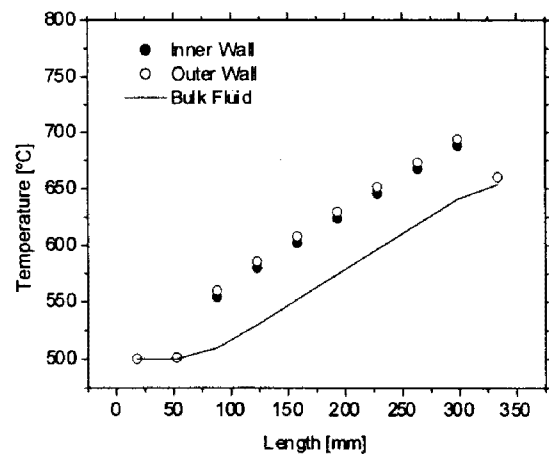
그림 5. 흡수기 관 내벽, 외벽 온도 분포



(a) 흡수기 평균



(b) 흡수기 중심



(c) 흡수기 외측

그림 6 흡수기 관 벽 및 유체 온도 분포

흡수기 평균 관내 Re, Pr 수는 각각 5,700과 0.6이고 이때 Gr수는 약 600 정도로 강제

대류에 의한 열전달의 영향이 지배적이다. 이에 Dittus-Boelter 열전달 관계식³⁾인 $0.0243Re^{0.8}Pr^{0.4}$ 를 이용하여 Nu수 및 열전달 계수를 구하여 이를 수치해석 결과와 비교하여 그림 7에 나타내었다. Dittus-Boelter 관계식을 이용한 열전달 계수는 수치해석 결과와 비교하여 $\pm 6\%$ 범위 내에 있으며 이는 Dittus-Boelter 관계식을 이용하여 스테링엔진 흡수기의 열전달을 예측할 수 있다고 하겠다.

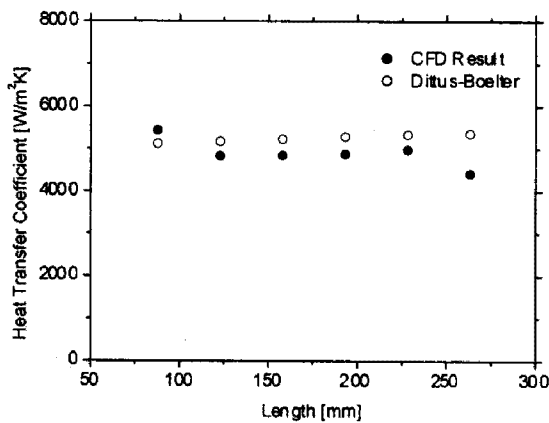


그림 7. 수치해석과 Dittus-Boelter 관계식을 이용한 열전달 계수 비교

5. 결론

본 논문에서는 수치해석 프로그램을 이용하여 Dish-Stirling 태양열 발전시스템의 스테링엔진 흡수기에 대한 열전달특성에 대하여 연구하였다.

(1) 흡수기에 도달하는 열유속 분포가 가우시안 분포를 가지고 있으므로 흡수기 중심부의 경우 높은 열유속으로 인하여 열전달 면적을 줄이고 흡수기 외곽의 경우 열유속이 낮으므로 열전달 면적을 늘려야 전체 흡수기의 열적 균형을 맞출 수 있다.

(2) 흡수기 관 벽면온도는 유체의 온도 보다 $50 - 100\text{ }^\circ\text{C}$ 정도 높으며 벽벽의 온도 또한 전면부의 온도가 후면부의 온도 보다 위치 별로 다르게 $20 -$

$50\text{ }^\circ\text{C}$ 정도 높게 나타났다.

(3) 수치해석과 열전달 관계식을 이용한 열전달 계수를 비교한 결과 Dittus-Boelter 상관식을 이용하여 흡수기의 열전달계수를 계산할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 연구비지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

1. Service and Operator's Manual for the SOLO 161 Solar Stirling Unit, SOLO Stirling GmbH, 2006. 7
2. 산업자원부, Dish형 집광시스템 이용 태양열발전 실증연구, 2006. 9
3. Winterton, R.H.S., Technical Notes: Where did the Dittus and Boelter equation come from?, Int. J. Heat Mass Transfer 41, 809-810, 1998.
4. NIST Reference Fluid Thermodynamics and Transport Properties-REFPROP, NIST Standard Reference Database 23, Ver. 6.0, 1998.