

수치해석기법을 이용한 고온태양열 흡수기의 열성능 분석

김태준*, 오상준, 이진규, 서태범**

*인하대학교 대학원 기계공학과(ktjkorea@gmail.com), **인하대학교 기계공학과(seotb@inha.ac.kr),

Computational Heat Transfer Analysis of High Temperature Solar Receiver

Kim, Taejun*, Oh, sangjune, Lee, jingyu, Seo Taebeom**

*Dept. of Mechanical Eng, Graduate School, Inha University(ktjkorea@gmail.com),

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

Abstract

This study focus on verification of the thermal efficiency of volumetric receiver with $5kW_{th}$ Dish-type solar thermal system. Spiral flow path shaped on receiver and working fluid(steam) flow along the this flow path. Porous material for radiation-thermal conversion used in former researches are substituted with the stainless steel wall installed along the spiral shaped flow path. Numerical analysis for the flow path and temperature distributions are carried out. Numerical results are compared with experimental data. Using the numerical model, the heat transfer characteristics of spiral type receiver for dish-type solar thermal systems are known and the thermal performance of the receiver can be estimated.

Keywords : 접시형 태양열 흡수기 시스템 (Dish-type solar receiver system),
전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics), 나선형 흡수기 (Spiral type receiver)

기 호 설 명

t	: time, s
x_i	: cartesian coordinate
u_i	: absolute fluid velocity component in direction x_i , m/s
p	: piezo metric pressure, N/m ²
ρ	: density, kg/m ³
τ_{ij}	: stress tensor components, N/m ²
S_m	: mass source, kg
S_i	: momentum source components, kg1 m/s
F_{hj}	: diffusional energy flux in direction x_j
S_h	: energy source
H	: total enthalpy, kJ/kg
h	: static enthalpy, kJ/kg

1. 서 론

현재 세계적인 태양열 고 집광 관련 기술은 기술적인 면에서 매우 빠른 성장기에 있으며 고온태양열을 발전이나 화학반응에 이용하고자 하는 연구가 국제적으로 다양하게 이루어져 오고 있다. 이러한 고온 태양열 고집광 기술에는 대표적으로 접시(Dish)형 태양열 시스템과 솔라타워(Solar tower)형 태양열 시스템이 있다. 이중 접시형의 태양열 집광 기술은 중·소 규모 단위의 독립적인 태양열 이용시스템을 구성할 수 있는 장점이 있어서 더욱 주목받고 있는 추세이다. 따라서 접시형 태양열 집광 시스템의 효율을 좌우하는 흡수기의 역할은 매우 크다.

흡수기에 대한 선행 연구로서, 흡수기와 흡수기 주위의 자연대류 열전달 실험과 수치 해석에 대한 연구⁽¹⁾⁻⁽³⁾를 참고 하였다. Sirbar and kraabel⁽⁴⁾는 입방체 흡수기 연구에 대한 실험결과를 기본으로 한 태양열 흡수기의 대류 열전달에 대한 간단한 모델을 만들었다. Mc.Donald⁽⁵⁾는 흡수기입구의 크기와 표면온도, 그리고 각도를 혼합, 반영하여 원통형 형상의 원추대 흡수기를 수정했다. Dehghan

과 Behnia⁽⁶⁾는 불연속적으로 가열된 흡수기 안에서 만들어진 자연대류와 전도 그리고 복사열전달을 수치해석과 실험으로 해석하였다. 이렇게 수치해석과 실험에서 나온 결과의 비교 및 대조를 통하여 복사열전달의 영향을 받은 유체의 흐름과 열전달 현상에 대해서 비교적 정확한 예측을 할 수 있었다.

본 연구에서는 자체 제작한 흡수기의 형상중 하나인 spiral type의 태양열 흡수기에 대한 성능 실험을 수행하였으며 온도 분포 및 유동분포와 실험 시 발생하는 현상에 대해서 실험 및 수치모델을 이용하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

연구에 사용된 접시형 고온 태양열 시스템은 반사경, spiral type 흡수기, 자동추적장치로 구성되어있다. 태양열 집열기의 총 용량은 5kW_{th}이며 지면으로부터 중심까지 거리는 1.83m이고, 최대높이는 4.11m이다. 사용된 거울의 반사율은 95%이상이고, 반사경의 직경은 3.2m이고, 초점은 2m이며, 두께가 1mm인 포물면 거울을 10개 사용하였다.



그림. 1 접시형 태양열 흡수기 (전면)

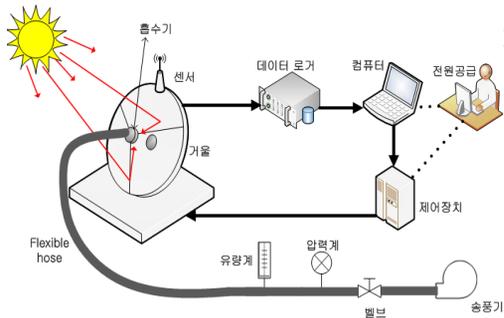


그림. 2 접시형 태양열 집열기 및 시스템 개략도

그림.3은 Spiral type 흡수기의 후면 형상이다. Spiral type 흡수기는 다른 흡수기에 비해 내구성이 뛰어나며, 또한 다른 흡수기보다 형상이 간단하여 생산이 쉽고, 상대적으로 생산비용이 낮다. 흡수기의 외부 재질은 고온에 견딜 수 있는 SUS 306으로 제작하였으며 흡수기의 입구는 태양 복사열을 90% 이상을 흡수할 수 있도록 100mm로 정하였다.⁽⁷⁾ 또한 흡수기의 대류 열손실을 최대한으로 줄이기 위해 흡수기를 감싸는 흡수기 외형 입구에 그림.4와 같은 석영 재질의 창(quartz window)을 설치하여 외기의 출입을 단절했다. 수증기가 유입되는 흡수기 입구에는 유연성 및 고온에 견디는 재질의 배관이 필요하기 때문에 $-200^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 에서도 견딜 수 있는 SUS 304재질의 flexible tube를 사용하였다.



그림. 3 Spiral type 흡수기 형상



그림. 4 석영 유리(quartz glass)

2.2 실험방법

본 실험에서는 송도에 설치된 Dish의 정확한 집광플렉스를 측정하기 위해서 Mapping 실험을 하였다. 또한, 하루의 일사량 측정이 시스템의 전체 효율을 구하는 부분에 있어서 매우 중요한 인자이기 때문에, 고온 태양열 집열기의 정남쪽에 일사량계를 설치하여 일출 시간부터 일몰 시간까지의 일사량 또한 측정하였다. 태양열 집열기 안에 설치된 흡수기에는 많은 양의 열량을 전달할 수 있는 수증기가 작동매체로 사용되었다. 나선형의 구조에 의해 흡수기 개구부의 가장자리에서 시작되는 작동매체가 유동을 따라 나선형으로 흐르면서 열전달을 일으킨다. 접시형 고온 태양열 집열기의 성능을 분석하기 위해서는 흡수기의 입구 및 출구의 온도 측정이 매우 중요하다. 따라서 흡수기의 입구와 출구 쪽에 K-type 열전대를 흡수기의 위에 동서남북 방향으로 위치마다 설치하여 흡수기 내부의 온도분포를 구하였다.

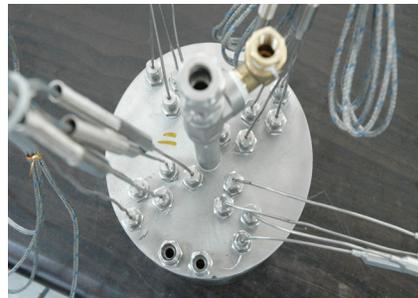


그림. 5 흡수기내에 삽입된 열전대

3. 수치해석 방법

CFD해석은 상용코드인 STAR-CCM+ Version 3.02를 이용하여 수행하였다. 흡수기 내부의 유동 및 열전달 성능해석은 지배방정식 simultaneous solution에 기초한다. 흡수기 내부의 지배방정식은 다음과 같다.

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = s_m$$

Momentum equation

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i$$

Energy equation

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho H u_i + F_{h,i} - u_i \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial t} + s_i + s_h$$

$$H = \frac{1}{2} u_i u_i + h$$

흡수기 내부 복사열전달 해석에는 DTRM (Discrete transfer method)가 사용되었다. DTRM은 복사열전달 해석 영역내의 한 표면에서 다른 표면까지의 대표적인 beam을 추적하면서 계산을 수행하는 방법이다.⁽⁸⁾ 난류해석모델로는 K-ε모델을 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 spiral type 흡수기의 열전달 특성을 수치해석을 이용하여 계산했다. 실제 흡수기의 형상과 흡수기 작동상태 결과를 수치해석 결과와 비교 분석하여 수치해석에 대하여 타당성에 대해 검토하였다.

일사량 측정과 mapping 실험을 통해 그림.6, 그림.7과 같은 결과를 얻었다. 그림.6은 흡수기 입구에서의 플럭스 값을 나타낸 그래프이다. 시간이 지남에 따라서 플럭스 값이 감소

하는 경향을 보이는 이유는 태양의 고도가 낮아지기 때문이다. 그림.7은 흡수기 입구로 들어오는 열유속의 분포를 나타내는 그림이다. 전체적으로 초점이 상당 부분 한 곳으로 모이는 Gaussian Distribution을 보이고 있다. 흡수기 개구부 표면에 집광되는 열유속 분포를 측정된 결과 일사량은 706W/m²이고 최대 집광플럭스는 0.406 MW/m²이다. 이 데이터들을 기초로 하여 흡수기 입구 형상을 설계하였다.

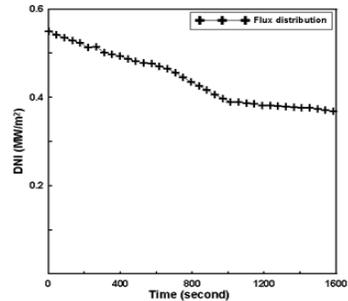


그림. 6 Heat flux rate of receiver aperture

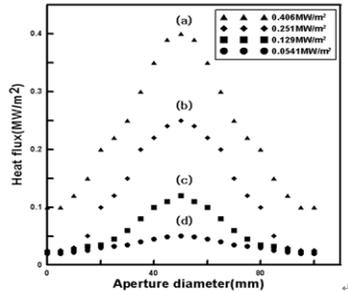


그림. 7 Distribution of the heat flux on the aperture surface

그림. 8과 그림. 9는 spiral type 흡수기 외부 온도분포와 유동분포를 수치해석 한 결과이다. 그림. 8의 온도분포를 보면 흡수기 전면의 우측부와 외부에서는 1200K 이상의 높은 온도분포를 나타내고 있고 그림. 9의 유동분포 결과에서는 작동매체가 spiral type 흡수기의 유로를 거치면서 복잡한 유동을 일으키고 있음을 알 수 있어 결과적으로 spiral type 흡수기가 다른 흡수기와 비슷한 반응

온도와 보다 많은 거주시간을 가지고 있음을 보여주고 있다.

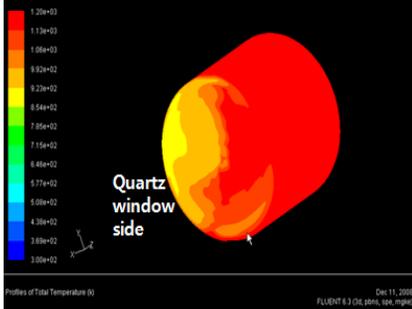


그림. 8 흡수기의 온도분포(측면)

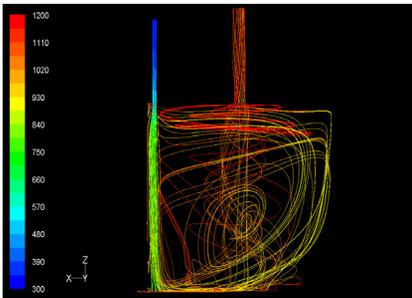


그림. 9 spiral type 흡수기 유동분포(측면)

그림. 10은 흡수기 전면부에 대한 온도분포 시뮬레이션 결과이고, 그림. 11은 실제 실험에 사용된 spiral type 반응기 전면부의 파손된 quartz window 모습이다. 시뮬레이션 결과를 보면 그림 상에서 좌측과 우측의 온도차가 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 그림. 12에서와 같이 투입된 작동매체가 quartz window에 국부적으로 부딪혀서 quartz window가 부분 냉각 되기 때문이다. 이러한 결과로 인해서 quartz window 상에서의 불균일한 온도분포가 발생하게 되고 그림. 11과 같이 quartz window내에서 crack이 발생해 quartz window가 손상이 되는 현상이 발생한다. 그림. 10에서의 온도 contour line이 그림. 11의 균열형상과 일치함을 볼 수 있으며 이를 통해 quartz window 표면에서의 국부적인 온도차가 quartz window 균열의 원인임을 알 수 있다.

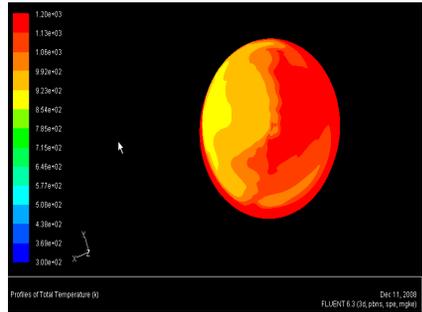


그림. 10 흡수기 온도분포(전면)



그림. 11 파손된 quartz window

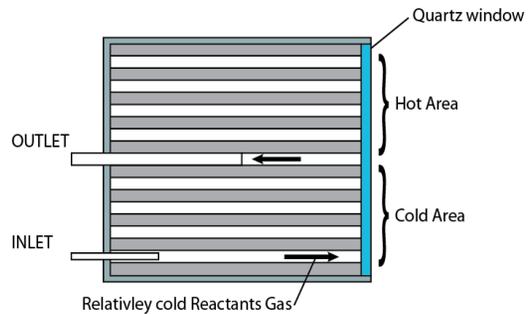


그림. 12 spiral type 흡수기 단면

5. 결론

본 논문에서는 상용화된 CFD 프로그램을 이용하여 spiral type 태양열 집열기 형상에 대해 온도분포 및 유동분포를 시뮬레이션 하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

(1)Spiral type의 유로를 사용함으로써 흡수기내에서의 작동유체의 거주시간을 증가

시켰다.

(2)작동유체가 quartz window의 표면온도를 국부적으로 급격히 떨어뜨리며 이런 현상이 quartz window의 균열의 원인이 된다.

(3)다공성 물질을 사용하지 않고 baffle(spiral 유로)을 사용하여 압력강하를 낮추었다.

추후연구에는 본 연구의 실험 및 수치해석 결과를 바탕으로 하여 반응기에 대한 연구를 진행하여 화학반응기의 제작에 필요한 해석 및 설계기술 확보를 위한 연구를 진행하고자 한다.

heat transfer in a discretely heated open cavity, ASME J. Heat Transfer vol 118, pp.56 - 64, 1996

7. S. T. Hyun, et al., An experimental study on the characteristic of flux density distribution in the focal region of a solar concentrator, Journal of the Korean Solar Society, Vol. 22, No. 3, 2002

8. P.S. Cumber, Improvements to the discrete transfer method of calculating radiative heat transfer. Heat Mass Transfer, pp.2215-2258, 1995

참 고 문 헌

1. S. Yasuaki, K. Fujimura, T. Kunugi, N. Akino, Natural convection in a hemispherical enclosure heated from below, Heat Mass Transfer 37, pp.1605 - 1617, 1999.
2. J.M. Khubeiz, E. Radziemska, W.M. Lewandowski, Natural convective heat transfer from an isothermal horizontal hemispherical cavity, Appl. Energy 73 ,pp.261 - 275, 2002.
3. W.M. Lewandowski, P. Kubski, J.M. Khubeiz, H. Bieszk, T. Wilczewski, S. Szymanski, Theoretical and experimental study of natural convection heat transfer from isothermal hemisphere, Heat Mass Transfer 40, pp.101 - 109, 1997.
4. D.L. Siebers, J.S. Kraabel, Estimating convective energy losses from solar central receivers, Sandia Laboratory Report, SAND 84-8717, 1984
5. C.G. McDonald, Heat loss from an open cavity, Sandia Laboratory Report, SAND 95-2939, 1995.
6. A.A. Dehghan, M. Behnia, Combined natural convection - conduction and radiation