

강제순환 방식의 공기가열식 태양열 집열기의 성능분석에 관한 수치해석 연구

박형수¹, 김철호^{2*}

¹서울과학기술대학교 나노 IT디자인융합대학원, ²서울과학기술대학교 공과대학 기계자동차공학과

A Numerical Study on the Performance Analysis of a Solar Air Heating System with Forced Circulation Method

Hyeong-Su Park¹, Chul-Ho Kim^{2*}

¹Nano.IT Fusion Program, Graduate School of Nano IT Design Fusion, Seoul National Univ. of Science & Technology,

²Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology

요약 태양열 에너지를 이용하여 단순한 형태의 공기가열식 집열기를 이용하여 공기를 가열하고 이를 활용하여 생활공간의 난방문제를 해결하기 위한 장치를 개발하는데 목적을 두고 진행되고 있다. 현 시점에서 연구는 모델로 개발한 공기가열식 태양열에너지 집열기의 크기 변화에 따른 가용한 에너지의 량을 이론적으로 산출해 보고 이를 통해 개발 시스템의 가능성을 판단하고자 한다.

본 연구에서는 공기가열식 태양열 집열기의 공기가열성능을 판단하기 위하여, 특정 크기의 태양열 집열기에 일정한 일사량을 투과하였을 때, 모델 집열기 내부에서의 열전달 특성변화와 이를 통해 생산되는 공기의 온도(°C)와 생산량(kg/h)을, 유한체적법(Finite Volume Method)을 적용한 범용 열유동해석(CFD) 프로그램인 영국 CHAM사의 PHOENICS(1)를 이용하여, 분석한 결과를 구하였다. 분석한 결과에서 알 수 있듯이 집열기의 크기가 (1.2m × 1.1m × 0.19m)의 집열기에서 알루미늄으로 제작하는 내경 0.1m의 공기 가열관을 이용하여 가열할 수 있는 공기의 온도는 약 40.5°C이며 이때 생산되는 공기의 생산량은 약 161m³/h으로 산출되었다. 본 모델장치는 충분히 태양의 열에너지를 이용하여 실내공간의 온도를 인간이 활동하기에 적합한 활동의 환경을 유지하는데 활용할 수 있다고 판단된다.

Abstract The aim of this study was to develop a device for solving the heating problem of living space using heated air, utilizing a simple air heater type collector for solar energy. At the present time, this study assessed the possibility of a development system through theoretical calculations for the amount of available energy according to the size change of the air-heated solar energy collector.

To produce and supply hot water using the heat energy of the sun, hot water at 100°C or less was produced using a flat or vacuum tube type collector. The purpose of this study was to research the air heating type solar collector that utilizes heating energy with heating air above 75°C, by designing and manufacturing an air piping type solar collector that is a simpler type than a conventional solar collector system. The analysis results were obtained for the generated air temperature (°C) and the production of air (kg/h) to determine the performance of air heating by an air-heated solar collector according to the heat transfer characteristics in the collector of the model when a specified amount of heat flux was dropped into a solar collector of a certain size using PHOENICS, which is a heat flow analysis program applying the Finite Volume Method. From the analysis result, the temperature of the air obtained was approximately 40.5°C, which could be heated using an air heating tube with an inner diameter of 0.1m made of aluminum in a collector with a size of 1.2m × 1.1m × 0.19m. The production of air was approximately 161 m³/h. This device can be applied to maintain a suitable environment for human activity using the heat energy of the sun.

Keywords : Natural Circulation, Numerical Study, Solar air Heating System, Finite Volume Method, Rectangular Grid

본 논문은 2016년 서울과학기술대학교 교내 연구비 지원 사업에 의해 수행된 연구 과제

*Corresponding Author : Chul-Ho Kim (Seoul National University of Science & Technology)

Tel: +82-10-5219-6304 email: hokim@seoultech.ac.kr

Received December 5, 2016

Revised (1st January 4, 2017, 2nd February 3, 2017)

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

1. 서론

지구온난화와 더불어 대기환경보존의 문제는 21세기 인류가 해결해야 될 중요한 과제로 자리 잡았다. 이러한 문제의 해결을 위해 친환경에너지의 개발과 확보는 전 세계적으로 중요한 부분이다.

본 연구는 태양열에너지를 이용하여 상온의 공기를 가열하고 이를 생활공간의 난방 및 온수공급을 위한 방안으로 태양열 공기가열식 집열기를 개발하는데 연구의 목적을 두고 있다.

현재까지는 태양의 열에너지를 활용하여 온수를 생산, 공급하기 위해 평판형 혹은 진공관형 집열기를 이용하여 100°C이하의 온수를 생산하여왔다. 그러나 본 연구에서는 기존의 태양열 집열방식보다 단순한 형태의 공기 배관형 집열기를 설계, 제작하여 상온의 공기를 75°C 이상으로 가열하고 이를 생활공간의 난방에너지로 활용하는 공기가열식 태양열 집열기의 연구 개발을 목적으로 두고 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 공기가열식 태양열 집열기의 에너지변환 효율은 60%이상으로 기대되며 집열기 효율이 최대 85%정도인 기존의 평판형 혹은 진공관형 장치에 비해 공학적 효율측면에서는 낮으나 집열장치의 생산원가 측면에서는 30%이하로 제작이 가능하므로 경제적인 측면에서는 약 3.5배의 효과가 있다고 판단된다. 또한 본 장치를 통해 생산가능한 공기의 온도는 75°C이상이며 생산되는 공기의 온도 역시 일상에서 사용가능한 40°C이상이므로 충분히 생활에 활용가치가 있다고 판단된다. 이러한 측면에서 공기가열식 태양열 집열기는 에너지의 효율적 이용과 난방 까지 동시에 해결할 수 있는 경제적 에너지회수 장치라고 판단된다.

본 연구에서는 현재 개발하고자 하는 공기가열식 태양열 집열기의 공기가열성능을 판단하기 위한 기초 연구로 특정 크기의 태양열 집열기에 일정한 일사량(Heat Flux, kW/m²)을 투하하였을 때 모델 집열기 내부에서의 열전달 특성변화와 이를 통해 생산되는 공기의 온도(°C)와 생산량(kg/h)을 범용 열유동해석 프로그램인 영국 CHAM사의 PHOENICS(1)를 이용하여 분석하였다.

2. 해석연구의 조건

2.1 해석연구를 위한 모델 집열기의 제원

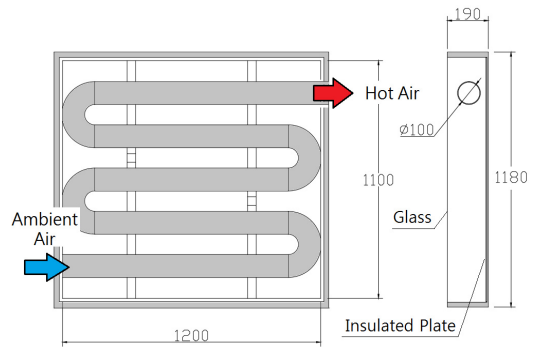


Fig. 1. Geometry of the model solar heater collector.

본 연구에서 사용한 모델 공기가열식 태양열 집열기의 형상제원은 높이 1.1m, 폭 1.2m 그리고 두께 0.19m이며 평판형 집열기로 내부에는 내경 100mm인 알루미늄 관으로 두께가 3mm이며 5개의 관이 직렬로 연결되어 있다. 집열기의 밀폐된 내부는 상온의 공기로 채워져 있으며 전면은 태양열을 집열하기 위해 투명 유리로 되어 있으며 후면과 측면은 단열 처리된 벽면으로 구성되어 있다.

2.2 수치해석 연구기법

공기가열식 평판형 집열기에 태양의 복사에너지가 입사되면 집열기 내부에 설치된 관의 표면과 내부의 공기 온도가 상승하게 되며 이로 인해 집열기 관 내부의 압력 상승으로 관 내부에 상승기류가 형성되어 공기의 자연대류 현상이 발생하게 된다. 이러한 집열기 내부에서의 공기의 자연대류 유동현상을 수치해석 적으로 묘사하기 위해 유한체적법(Finite Volume Method)을 적용한 범용 CFD코드인 영국 CHAM사의 PHOENICS (ver. 2014) (2)를 사용하였다. 해석 경계조건의 단순화를 위해 집열기의 외부는 열에너지의 출입이 없는 단열 조건으로 가정하였으며, 관 내부 공기의 유동장은 다음과 같이 정의하였다.

- 3차원 층류유동(3-dimensional Laminar Flow)
- 비압축성 정상유동(Incompressible Steady Flow)

검사체적 내의 비압축성 층류유동장 해석을 위해 3차원 Navier-stoke방정식⁽³⁾을 풀었으며 유동해석의 수렴성 판단을 위해 각 변수들의 계산 잉여율(Residual fraction)이 10⁻³%이하로 떨어질 때까지 충분히 반복적

으로 계산하였다. 온도의 변화를 예측하기 위해서 에너지 방정식을 풀었으며, 비압축성, 난류 유동장의 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

- 연속방정식(Continuity Equation),

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial y_j} + \frac{\partial U_k}{\partial z_k} = 0 \quad (1)$$

- 운동량방정식(Momentum Equation),

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] - g_i \quad (2)$$

2.3 수치해석 연구를 위한 격자생성

해석 공간에서의 격자생성을 위해 CAD-to-CFD 격자 생성법(Grid Generation Method)⁽⁴⁾를 이용하였다. 범용CAD 프로그램인 Pro-Engineer(Ver. 5.0)를 이용하여 평판형 집열기 모델의 3차원 형상을 만들고 이 CAD파일을 해석 공간인 수치해석 도메인(Numerical Domain)으로 불러와 직각 좌표계 상에서 정방격자(Rectangular Grid)를 생성하여 해석을 위한 격자 파일을 생성하였다.

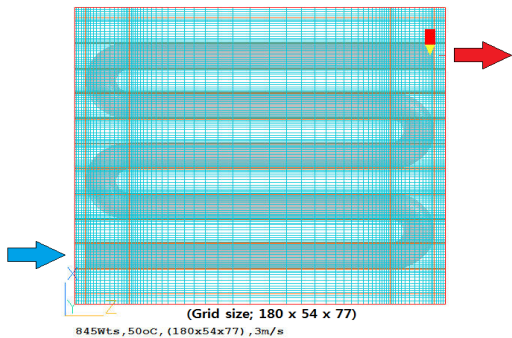


Fig. 2. A typical numerical grid of the model solar air heater, (180x54x77)

Fig. 2는 평판형 집열기의 수치격자계를 보여준다. 검사체적 내에서의 해석 격자의 크기는 격자 시험을 거쳐 최종적으로 결정된 격자(180 x 54 x 77)로 약 75만개의 격자로 형성하였다.

2.4 수치해석의 초기 및 경계조건

유동장 내에서 속도와 압력의 값을 산출하기 위해

SIMPLE알고리즘⁽⁵⁾을 적용하였으며 난류운동방정식(Standard turbulent model)의 대류항(Convection term) 계산을 위해 하이브리드(Hybrid scheme)⁽⁵⁾을 사용하였다. 공기의 가열관인 알루미늄 파이프는 표면 절대조도가 0.0015mm로 조도의 영향이 거의 없을 것으로 판단되어 관 내부의 유로 저항은 무시하였으며 Heat Flux가 평판형 집열기에 균일하게 유지된다고 가정하였다. 공기 가열관의 토출구에 송풍기를 이용하여 강제 송풍을 한다고 가정하여 풍속을 0 ~ 6m/s, 총 5단계로 나누어 변화를 시켰다.

해석을 위한 경계 및 초기 조건은,

- outlet1 : 대기압 조건($P_{out} = 101325 Pa$)
- outlet2 : 속도경계 조건($V_{air} = 0 \sim 6 m/s$)
- Solar air heater : 20°C Aluminum Pipe
- Working fluid : 20°C Air
- Heat flux : 845w/m²
- Wall : adiabatic condition
- Gravity : -9.8m/s²

3. 해석결과의 분석

3.1 입·출구 유속의 정성적 분석

Fig. 3은 Heat flux의 크기가 845w/m²에서 토출구의 강제풍속이 3m/s일때의 관내 풍속분포를 보여준다. 출구의 평균풍속이 2.73m/s이며 입구 평균풍속은 2.98m/s로 산출되었다. 이는 관내부에서의 마찰에 의한 유동손실이 있음을 의미한다.

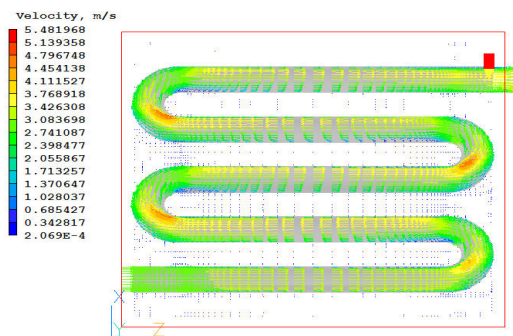


Fig. 3. Velocity distribution in a air tube of the model solar air heater.

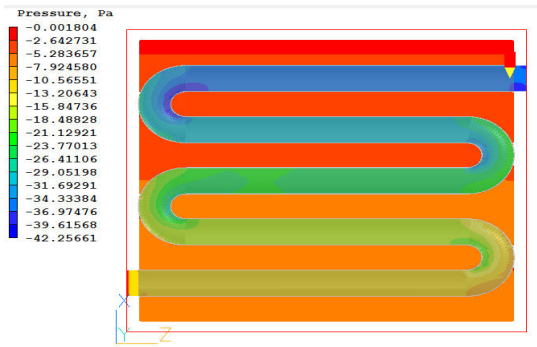


Fig. 4. Pressure distribution in a air tube of the model solar air heater.

Fig. 4는 집열기 관내부에서의 압력분포를 보여준다. 입구에서의 평균압력은 -10.67Pa 이며 출구에서의 평균 압력은 -37.07Pa 로 차압이 -26.40Pa 정도로 나타났다. 이는 공기의 유동을 유도하는 에너지원이 된다.

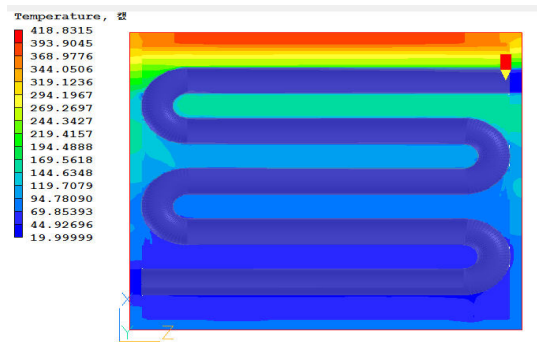


Fig. 5. Temperature distribution in a air tube of the model solar air heater.

Fig. 5는 공기 관 내부에서의 온도분포를 보여준다. 관내부의 공기온도는 $20.1^{\circ}\text{C} \sim 51.9^{\circ}\text{C}$ 범위를 보여준다. 즉 출구에서의 공기 온도가 약 26.4°C 정도 상승한다는 사실을 알 수 있다.

3.2 입·출구 유속의 정량적 분석

Fig. 6은 관 토출구에서의 강제 공기토출속도의 변화에 따른 공기유량의 배출량 변화를 보여준다.

본 장치를 통해 생산되는 따뜻한 공기의 생산량은 토출속도가 6m/s 에서 $16\text{m}^3/\text{h}$ 의 온기가 생산됨을 알 수 있다.

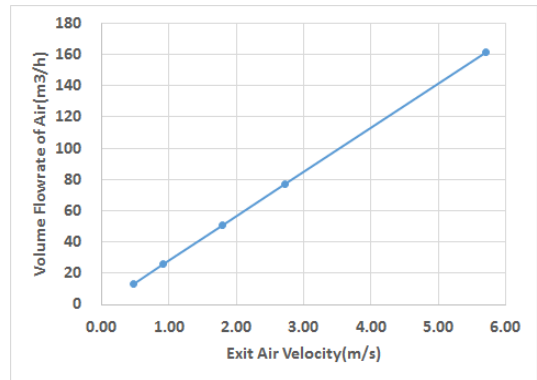


Fig. 6. Variation of the air volume flowrate with the exit air velocity.

Fig. 7은 공기관의 토출속도 변화에 따른 공기의 온도 변화를 보여준다. 관의 강제토출속도가 6m/s 일 때 토출 공기의 온도는 최대 40.5°C 까지 상승함을 알 수 있다.

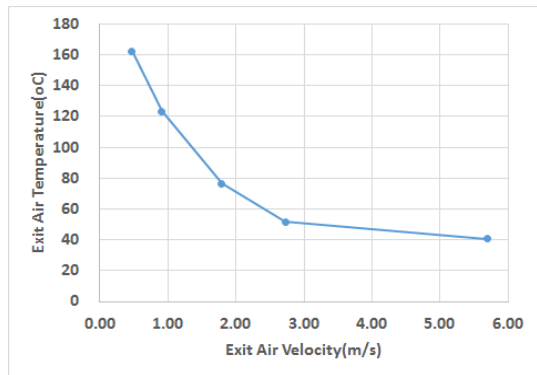


Fig. 7. Variation of the air temperature with the exit air velocity.

4. 해석결과의 분석

본 연구에서는 태양열 에너지를 이용하여 단순한 형태의 공기가열식 집열기를 이용하여 공기를 가열하고 이를 활용하여 생활공간의 난방문제를 위한 장치를 개발하는데 목적을 두고 진행되고 있다. 현 단계의 연구에서는 모델로 개발한 공기가열식 태양열에너지 집열기의 크기 변화에 따른 가용한 에너지의 양을 이론적으로 산출해 보고 이를 통해 개발 시스템의 가능성을 판단하고자 하였다.

수치해석 결과에서 알 수 있듯이 집열기의 크기가 (1.2m x 1.1m x 0.19m)의 집열기에서 알루미늄으로 제작하는 내경 0.1m의 공기 가열관을 이용하여 가열할 수 있는 공기의 온도는 약 40.5°C이며 이때 생산되는 공기의 생산량은 약 161m³/h으로 산출되었다.

본 모델장치는 충분히 태양의 열에너지를 이용하여 실내공간의 온도를 인간이 활동하기에 적합한 활동의 환경을 유지하는데 활용할 수 있다고 판단되었다.

후후 진행연구는 모델 제작을 통해 본 해석연구의 결과를 검증하고 실형상 가열기를 개발하는데 활용하게 될 것이다.

References

- [1] Weiss, Werner, Irene Bergmann, and R. Stelzer, "Solar heat worldwide," 2010.
- [2] CHAM, PHOENICS Technical Report (TR/326), Concentration Heat And Momentum Limited, 2011.
- [3] Yakhot. V. and Smith. L.M., "The Renormalization Group, Three-Expansion and Derivation of Turbulence Models," J. of SCI. Computer, Vol. 1, No. 3, 1986.
- [4] Kim, Jae Hwi, "Vehicle Chassis," Jung Won Sa, p. 448, 1994.
- [5] Douglas, J. F., Fluid Mechanics, Prentice Hall, pp. 406-447, 2001.

박 형 수(Hyeong-Su Park)

[정회원]



- 2012년 2월 : 서울과학기술대학 자동차공학과 (공학석사)
- 2016년 8월 : 서울과학기술대학 나노·IT융합프로그램(공학박사수료)
- 2000년 2월 ~ 2012년 2월 : 나래손해사정(주)
- 2012년 3월 ~ 2015년 12월 : 서정대학교 겸임교수
- 2016년 3월 ~ 현재 : 여주대학교 겸임교수

<관심분야>

나노유체, 열유체학, 자동차공학, 자동차배출가스

김 철 호(Chul-Ho Kim)

[정회원]



- 1982년 2월 : 인하대학교 공과대학 항공공학과 (공학석사)
- 1995년 7월 : The University of New South Wales, 기계생산공학부 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 공과대학 기계자동차공학과
- 1986년 9월 ~ 1996년 2월 : LG전자 중앙연구소 책임연구원
- 1983년 2월 ~ 1986년 7월 : 육군3사관학교 공학부 기계공학과 전임강사

<관심분야>

내연기관설계, 전산유체공학, 가스터빈, 유체기계