

나노유체 기반 평판형 태양열 집열기의 효율에 관한 이론적인 연구

이승현*, 김현진**, 장석필***

*한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과(shlee7@kau.ac.kr),
 **한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과(hjkim80@kau.ac.kr),
 ***한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부(spjang@kau.ac.kr)

Theoretical Investigation on the Efficiency of Nanofluid-based Flat-Plate Solar Collector

Seung-Hyun Lee*, Hyun-Jin Kim**, Seok Pil Jang***

*Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace Univ.(shlee7@kau.ac.kr),
 **Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace Univ.(hjkim80@kau.ac.kr),
 ***School of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace Univ.(spjang@kau.ac.kr)

Abstract

Recently, the nanofluid which is stably dispersing or suspending of nanoparticles in the conventional heat transfer fluids (HTF) such as water and ethylene glycol has attracted significant interests as a solar thermal energy absorbing medium because they have excellent absorption and thermophysical properties compared to the typical HTF. In the present study, the efficiency of nanofluid-based flat-plate solar collector is analytically evaluated using the theoretical model of energy balance equation. The theoretical model considers the incoming solar radiation as a volumetric heat generation and the water-based single wall carbon nanohorn(SWCNH) nanofluid is used as a solar energy absorbing medium. Finally, the efficiency of nanofluid-based collector is calculated according to the volume fraction of SWCNH using the analytical solution.

Keywords : 나노유체(Nanofluid), 태양열 집열기 (Flat-plate Solar Collector), 단일벽 탄소나노혼(Single Wall Carbon Nanohorn, SWCNH)

	기 호 설 명	K_a	: 흡수계수(굴절률의 허수부)
		T	: 온도(K)
		\bar{q}'''	: 단위체적당 열 발생률(W/m ³)
		그 리 스 어	
c_p	: 비열 (J/kgK)	θ	: 무차원 온도차
G_s	: 입상 복사량(W/m ²)	λ	: 파장(μm)
H	: 집열기의 높이	η	: 집열기의 효율
L	: 집열기의 길이		
K	: 흡광계수(m ⁻¹)		

1. 서론

최근 고유가 및 화석연료 고갈, 지구온난화 등 에너지, 환경에 대한 전반적인 문제로 인해 신재생에너지에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

특히, 태양에너지는 환경에 무해할 뿐만 아니라 지구상에서 이용할 수 있는 어떠한 형태의 에너지보다 풍부한 에너지를 가지고 있기 때문에 [1] 차세대 에너지원으로서 예전부터 큰 주목을 받아왔다. 그러나 낮은 에너지 밀도로 인해 태양에너지를 효율적으로 모으고 전환할 수 있는 기술의 발전이 무엇보다 필요하다.

태양열의 경우, 온수 공급, 건물 냉난방, 전기 생산 등 다양한 분야에 사용될 수 있으며 [2] 태양열 시스템은 사용온도 및 목적에 따라 여러 가지 형태로 나뉘게 된다. 그 중 본 연구에서는, 평판형 집열기의 효율에 대한 연구를 수행하였다.

평판형 집열기는 저온형 태양열시스템으로서 가정의 온수공급용으로 적합하며 구조가 간단하고 저렴한 장점이 있다. 하지만 기존의 평판형 집열기는 블랙크롬으로 코팅된 흡수판에서 태양열을 흡수한 뒤 작동유체로 다시 전달해야 때문에 열 손실이 발생하게 되고 이러한 이유 때문에 평판형 집열기는 효율을 크게 높이는데 한계를 가지고 있었다. 따라서 최근에는 작동유체에 직접 태양열을 저장하는 직접 흡수식 집열기(Direct Absorption Solar Collector, DASC)가 주목 받고 있다. [3]

DASC의 개념은 태양열 흡수기의 디자인을 간략화하기 위해 1970년도부터 제시되었던 개념으로서 [4] 중, 저온 영역에서는 검은색의 India Ink[4]를 사용하였고, 고온 영역에서는 Micro Carbon 입자 [5]를 사용하여 기존 집열기에 비해 효율을 크게 증가시킨 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 India Ink와 같은 유기잉크의 경우 빛과 열에 의해 열화(degradation)되기 때문에 고온용에는 적합

하지 못하다는 단점을 가지고 있다. [6] 또한 Carbon 입자의 경우 Micro 단위의 크기로 인해 작동유체에 안정적으로 분산이 되지 못하고 쉽게 가라앉는 단점이 있었다. [3] 따라서 최근에는 나노유체를 활용하여 DASC에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. [3, 6, 7] 나노유체란 기존의 물이나 에틸렌 글리콜과 같은 열전달용 작동 유체에 나노크기의 금속 혹은 비금속 입자를 분산시켜 만든 유체로서 뛰어난 열적 물성치로 인해 열전달 분야에서 많은 주목을 받고 있다. [8] 또한 뛰어난 광 흡수 특성으로 인해 광화학분야에서도 크게 주목받고 있다. [6]

나노유체를 DASC의 작동유체로 사용할 경우, Organic Ink 처럼 열화되지 않고 작은 입자 크기로 인해 오랜 시간 작동유체에 부유할 수 있게 된다. 또한 유체 이송관을 막거나(clogging) 쉽게 퇴적되지(fouling effect) 않는다는 것도 큰 장점이다. [3]

하지만 기존의 논문들을 살펴보면, 광학적 특성을 연구한 결과[7]를 바탕으로 평판형 집열기 같은 적용분야에서 실질적으로 효율을 평가해본 경우는 없었다.

따라서 본 논문에서는 물-기반 단일벽 탄소나노혼(Single Wall Carbon Nanohorn, SWCNH)의 흡광계수값[7]을 이용하여, 평판형 집열기의 효율을 얼마나 높일 수 있는지 이론적인 방법으로 평가해 보았다.

2. 이론적 접근

이론적인 접근 방법은 기본적으로 Veeraragavan et al. [9]의 접근 방법을 따르고 있으나, 식을 간략화하기 위해 흡광계수를 파장에 독립된 변수로 두어 간략화된 단위체적당 열 발생률 프로파일을 구하였다.

2.1 지배방정식 및 경계조건

평판형 집열기의 개략도는 그림 1과 같다.

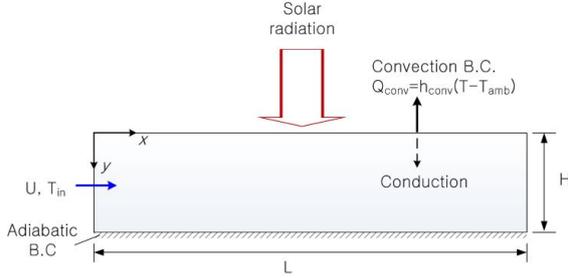


그림 1. 나노유체기반 평판형 태양열 흡수기의 개략도

태양에서 방사되는 열을 단위체적당 열 발생률(volumetric heat generation)로 가정하였을 때 지배방정식은 다음식과 같다.

$$\rho U c_p \frac{\partial T}{\partial x} = k_c \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dot{q}'''(y) \quad (1)$$

여기서 c_p, k_c, \dot{q}''' , T, U, ρ 는 각각 비열, 열전도도, 단위체적당 열발생률 온도, 속도, 체적이다. 그리고 경계조건은 다음과 같다.

$$T|_{x=0} = T_{in} \quad (2.a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = 0 \quad (2.b)$$

$$k_c \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_E (T_{y=0} - T_{amb}) \quad (2.c)$$

여기서 $h_{in}, H, T_{in}, T_{amb}$ 는 각각 대류열전달 계수, 채널의 높이, 입구온도($x=0$), 외기 온도이다. 이식을 무차원화 해주기 위해 다음과 같은 무차원 계수를 도입한다.

$$\bar{y} = \frac{y}{H}; \bar{x} = \frac{x}{L}; Pe = Re Pr = \frac{\rho U c_p H}{k_c}; \theta = \frac{k_c (T - T_{in})}{G_s H}; \bar{q}''' = \frac{\dot{q}'''(y)}{G_s} \quad (3)$$

$$N_E = \frac{h_E H}{k_c}; \theta_{amb} = \frac{k_c (T_{amb} - T_{in})}{G_s H}$$

여기서, G_s, Pe, Pr, Re, θ 는 각각 Peclet 수, Reynold 수, Prandlt 수, 입사 복사량 ($1,000 \text{W/m}^2 = 1 \text{Sun}$), 무차원 온도이다. 주어진 무차원수를 바탕으로 지배방정식과 경계조건을 무차원화 해주면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{y}^2} + \bar{q}'''(\bar{y}) \quad (4)$$

$$\theta|_{\bar{x}=0} = 0 \quad (5.a)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} \Big|_{\bar{y}=1} = 0 \quad (5.b)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} \Big|_{\bar{y}=0} = Nu_E (\theta_{y=0} - \theta_{amb}) \quad (5.c)$$

여기서 θ_{amb} 은 0으로 한다. 즉 입구의 온도와 외기의 온도가 같다.

2.2 열 발생률

여기서 단위체적당 열 열발생률은 태양으로부터 입사된 복사에너지량을 모사한 것이기 때문에 $\bar{q}'''(\bar{y})$ 의 식은 다음과 복사전달 방정식(radiative transport equation)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dI_\lambda}{dy} = -K_\lambda I_\lambda \quad (6)$$

여기서 $K_{e,\lambda}, I_\lambda$ 는 각각 흡광계수, 스펙트럼의 복사강도(spectral intensity)이다. 따라서 스펙트럼의 복사강도는 다음과 같은 지수함수로 표현할 수 있다.

$$I_\lambda(y) = I_{o,\lambda} e^{-K_\lambda y} \quad (7)$$

여기서 $I_{o,\lambda}$ 는 흡수기 표면($\bar{y}=0$)에 입사된 스펙트럼의 양이다. 이 값은 다음과 같이 Plank 분포로 표현할 수 있다.

$$I_{o,\lambda} = S \Omega \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda k_B T_{sun}) - 1]} \quad (8)$$

여기서 $c, h, k_B, S, T_{sun}, \lambda, \Omega$ 는 각각 진공속에서의 빛의 속도($c = 2.998 \times 10^8 \text{m/s}$), Plank 상수 ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$), Boltzmann 상수 ($k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$), 지구대기에 의한 감쇠상수(0.73), 태양의 온도(5,800K), 파장, 태양으로부터 바라본 지구의 입체각(solid angle, 6.8×10^{-5})이다. 따라서 단위체적당 열 열발생률은 다음과 같이 표현해 줄 수 있다.

$$\dot{q}'''(y) = -\frac{d}{dy} \int_0^\infty I_\lambda(y) d\lambda \quad (9)$$

식 (9)에서 식의 간단한 계산을 위해 흡광 계수가 파장에 무관한 상수값이라면 다음과 같이 표현해 줄 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{q}'''(y) &= \frac{-d(e^{-Ky})}{dy} \int_0^\infty I_{0,\lambda} d\lambda \quad (10) \\ &= G_s K e^{-Ky} \end{aligned}$$

이식을 무차원해 해주면 다음과 같은 간단한 식을 얻게 된다.

$$\bar{q}'''(y) = \frac{\dot{q}'''(y)H}{G_s} = HK e^{-KH\bar{y}} \quad (11)$$

2.3 해석적 해

지배방정식 (4)는 정상-2차원 비제차편미분방정식 (steady, 2-dimensional non-homogeneous partial equation)으로서 재차부분과 비제차부분을 나누어 해석적 해를 구해야 한다. 결과식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_{\text{hom}} + \theta_p \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha_n^2 \bar{y}} Y_n(\bar{y}) + \int_0^1 G(\bar{y}, \xi) \bar{q}'''(\xi) d\xi \end{aligned}$$

여기서,

$$Y_n(\bar{y}) = \frac{\cos(\alpha_n(\bar{y}-1))}{\sin \alpha_n}$$

$$\begin{aligned} G(\xi, \bar{y}) &= \begin{cases} \bar{y} + \frac{1}{N_E} & (\bar{y} < \xi) \\ \xi + \frac{1}{N_E} & (\bar{y} > \xi) \end{cases} \\ A_n &= \frac{-\int_0^1 \left[\int_0^1 G(\bar{y}, \xi) \bar{q}'''(\xi) d\xi \right] Y_n(\bar{y}) d\bar{y}}{\int_0^1 Y_n^2(\bar{y}) d\bar{y}} \end{aligned}$$

여기서, $G(\bar{y}, \xi)$, Y_n , α_n , ξ 는 Green 함수, 고유함수, 변수분리 후의 고유치, Green 함수에 사용된 source의 위치이다. 여기서는 $\bar{y}=0$ 에서 빛이 입사되므로, $\xi=0$ 로 선정을 하였다. 여기서 구한 상수 값 α_n, A_n 은 표 1에 정리하였다. 여기서 n 값은 재차해의 이전값과 이후값의 차이가 0.1% 이하로 차이가 나는 45까지의 값을 사용하였다.

3. 결과 및 토의

주어진 이론적 해석해를 바탕으로 무차원 온도분포를 살펴보면 그림 2와 같다. 계산에 필요한 흡광계수는 표2에 정리하였다. 또한 여기서 집광기의 높이 H는 1mm로 선정하였다. $\bar{y}=0$ 인 지점에서 태양열이 입사되기 때문에 가장 높은 온도차를 나타내며, 깊이가 깊어질수록 즉, $\bar{y}=1$ 에 접근할수록 온도차

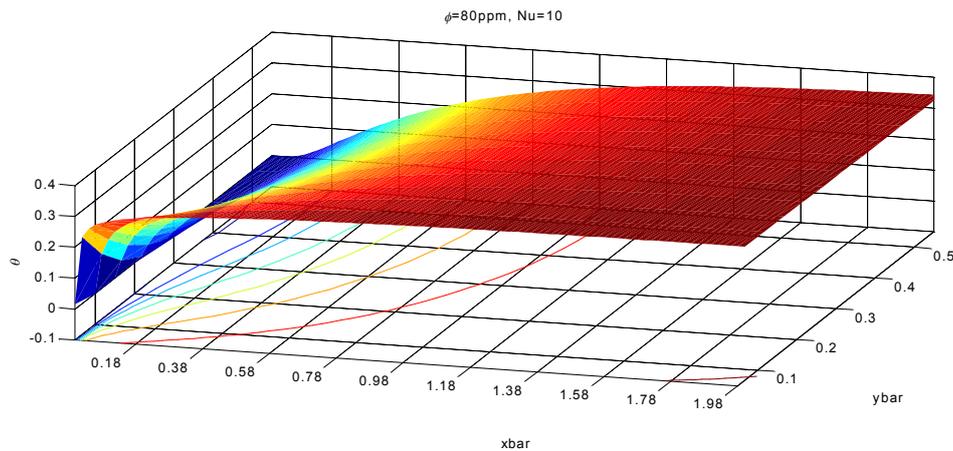


그림 2. 무차원 온도분포($\phi=80\text{ppm}$, $Nu_E=10$)

작아짐을 알 수 있다. 또한 $\bar{x}=0$ 인 지점에서는 유체가 들어오기 때문에 $\theta=0$ 이고 \bar{x} 가 커질수록 유체는 정상상태에 도달하여 \bar{y} 방향으로 거의 변화가 없는 것을 확인할 수가 있다. 이렇게 구한 온도분포를 바탕으로 평판형 집열기의 효율은 다음과 같은 무차원값으로 표현해줄 수 있다.

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{AG_s} = \frac{\theta_{out}}{\bar{x}_{out}} \quad (13)$$

여기서 \bar{x}_{out} 는 집열기 출구(\bar{L})로서 여기서는 \bar{x} 에 따라 거의 변화가 없는 $\bar{x}_{out}=2$ 지점으로 결정하였고 그 때의 무차원 온도값을 이용하여 효율을 계산하였다. 식(13)을 바탕으로 나노유체의 부피비에 따른 효율을 계산해본 결과가 그림3에 표현되어 있다. 그림 3에서 보이듯 SWCNH 나노유체의 부피비가 증가함에 따라 집열기의 효율이 급격히 좋아지는 것을 볼 수 있다. 여기서 부피비 0은 기본 유체인 물을 의미하고 이때의 효율은 거의 0에 가까운 것을 알 수 있다. 또한 Nusselt 수에 따른 변화를 살펴보면 Nusselt 수가 클수록 효율이 떨어지는 것을 알 수 있다. Nusselt 수는 집열기 표면에 대류에 의한 영향을 평가할 수 있는 지표로서 Nusselt수가 크다는 것은 외부로의 열 손실이 크게 발생한다는 것으로서 본 논문의 결과가 물리적으로 타당함을 알 수 있다.

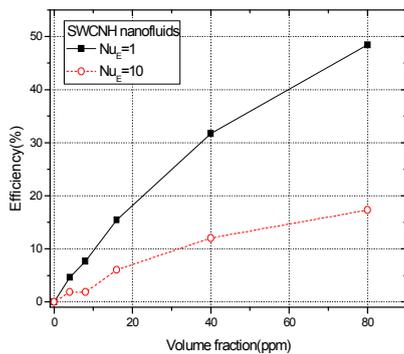


그림 3. 부피비와 Nu_E에 따른 평판형 집열기의 효율

표 1. 고유값 α_n 과 상수 A_n

n	α_n	A_n
1	1.43	-4.68E-02
2	4.31	-1.35E-02
3	7.23	-6.39E-03
4	10.20	-3.43E-03
5	13.21	-1.99E-03
6	16.26	-1.23E-03
7	19.33	-8.02E-04
8	22.41	-5.46E-04
9	25.51	-3.87E-04
10	28.61	-2.82E-04
11	31.72	-2.12E-04
12	34.84	-1.63E-04
13	37.96	-1.27E-04
14	41.08	-1.02E-04
15	44.20	-8.22E-05
16	47.33	-6.74E-05
17	50.46	-5.59E-05
18	53.59	-4.69E-05
19	56.72	-3.97E-05
20	59.86	-3.39E-05
21	62.99	-2.92E-05
22	66.12	-2.53E-05
23	69.26	-2.21E-05
24	72.39	-1.94E-05
25	75.53	-1.71E-05
26	78.67	-1.51E-05
27	81.80	-1.35E-05
28	84.94	-1.21E-05
29	88.08	-1.08E-05
30	91.22	-9.75E-06
31	94.35	-8.82E-06
32	97.49	-8.00E-06
33	100.63	-7.28E-06
34	103.77	-6.64E-06
35	106.91	-6.08E-06
36	110.05	-5.58E-06
37	116.32	-4.73E-06
38	119.46	-4.36E-06
39	122.60	-4.04E-06
40	125.74	-3.75E-06
41	128.88	-3.48E-06
42	132.02	-3.24E-06
43	135.16	-3.02E-06
44	138.30	-2.82E-06
45	141.44	-2.64E-06

표 2. 물과 SWCNH 나노유체의 흡광계수 [5]

부피비(ppm)	K [mm ⁻¹]
0 (Base fluid)	6.741E-05 ($4\pi K_a/\lambda$)
4	0.06513
8	0.11059
16	0.23798
40	0.58654
80	1.20708

5. 결 론

본 논문에서는 실험적으로 주어진 흡광계수값과 해석적 방법을 통해 평판형 집열기의 효율을 평가하는 방법론을 제시하였고 결론은 다음과 같다.

- (1) 열전달 해석을 위한 지배방정식에서 복사 열전달량은 단위체적당 열 발생률로 가정하였다.
- (2) 단위 체적당 열 발생량의 프로파일은 상수의 흡광계수로 가정하여 간단한 형태의 함수형태로 제시하였다.
- (3) 주어진 지배방정식은 변수분리를 통해 해석적으로 해를 구하였고, 그림 2에서 각 위치에 따른 무차원 온도분포가 구해져있다.
- (4) 주어진 온도분포를 바탕으로 집열기의 효율을 계산하여 그림 3에 표현하였고, 나노유체의 부피비가 증가할수록 효율이 점점 증가함을 알 수 있었다.
- (5) 본 논문의 방법론을 이용한다면 실험적으로 측정된 흡광계수를 이용하여 실질적인 집열기의 효율을 예측하는데 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20110013579).

참 고 문 헌

1. Lewis, N.S.. Toward Cost-Effective Solar Energy Use, *Science*, Vol. 315, pp. 798-801, 2007.
2. Thirugnanasambandam, M. et al., A Review of Solar Thermal Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 312-322, 2010.
3. Otonari, T.P. et al., Nanofluid-based Direct Absorption Solar Collector, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 2, p. 033102, 2010.
4. Minardi, J.E., Chuang, H.N., Performance of a 'Black' Liquid Flat-plate Solar Collector, *Solar Energy*, Vol. 17, pp. 179-183, 1975.
5. Bertocchi, R. et al., Experimental Evaluation of a Non-isothermal High Temperature Solar Particle Receiver, *Energy*, Vol. 29, pp. 687 - 700, 2004.
6. Sani, E. et al. Carbon Nanohorn-based Nanofluids as Direct Sunlight Absorbers, *Optics Express*, Vol. 18, pp. 5179-5187, 2010.
7. Mercatelli, L. et al., Absorption and Scattering Properties of Carbon Nanohorn-based Nanofluids for Direct Sunlight Absorbers, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, pp. 282, 2011.
8. Lee, J.-H. et al., A Review of Thermal Conductivity Data, Mechanisms and Models for Nanofluids, *International Journal of Micro-Nano Scale Transport*, Vol. 1, pp. 269-322, 2010.
9. Veeraragavan, A., et al. Analytical Model for the Design of Volumetric Solar Flow Receivers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 556-564, 2012.