

## 나노유체를 이용한 평판형 태양열 집열기의 효율에 관한 연구<sup>§</sup>

이 승 현\* · 장 석 필\*\*

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

### Study on Efficiency of Flat-Plate Solar Collector Using Nanofluids

Seung-Hyun Lee\* and Seok Pil Jang\*\*

\* School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.

(Received January 10, 2013 ; Revised July 10, 2013 ; Accepted July 15, 2013)

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

**초록:** 본 논문에서는 나노유체를 사용한 평판형 집열기의 효율을 예측하기 위한 이론적인 연구를 수행하였다. 평판형 태양열 집열기 내부의 온도분포에 관한 해석적 해를 구하기 위해 무차원화된 2 차원 열 확산방정식을 풀었으며, 이 과정에서 흡광계수와 복사강도는 파장에 독립적이라고 가정하였다. 이렇게 주어진 식을 바탕으로, 물-기반 단일벽 탄소나노혼 나노유체를 작동유체로 사용할 경우 나노입자의 부피비, 열손실의 크기, 집열기의 높이에 따른 무차원 온도분포를 파악해 보았다. 마지막으로 나노유체 기반 평판형 집열기의 효율을 예측해 본 결과 일정 형상조건 이내에서 나노유체 태양열 집열기가 기존 집열기 보다 높은 효율을 가질 수 있음을 파악하였다.

**Abstract:** An analytical study is conducted to assess the efficiency of a flat-plate solar collector using nanofluids. The nondimensionalized 2D heat diffusion equation is solved by assuming a wavelength-independent extinction coefficient and intensity to obtain the analytical solution of the temperature distribution in the flat-plate solar collector. The dimensionless temperature distribution is investigated as functions of the volume fraction of the nanofluids, magnitude of heat loss, and collector's depth based on the analytical solution when using water-based single-walled carbon nanohorn (SWCNH) nanofluids as a working fluid. Finally, the efficiency of the flat-plate solar collector using the nanofluids is predicted and compared with that of the conventional solar collector. The results indicate that the efficiency of the nanofluid solar collector is better than that of the conventional solar collector under specific geometrical conditions.

- 기호설명 -

$c$  : 진공 속 빛의 속도(m/s)

$c_p$  : 비열(J/kgK)

$G$  : Green 함수

$G_s$  : 입사 복사량(W/m<sup>2</sup>)

$I$  : 복사강도(W/m<sup>2</sup>)

$H$  : 집열기의 높이 (m)

$h$  : 플랑크상수

$h_{HL}$  : 열손실 대류열 전달계수(W/m<sup>2</sup>K)

$K$  : 흡광계수(m<sup>-1</sup>)

$K_a$  : 흡수계수(굴절률의 허수부)

$k_b$  : 볼츠만 상수

$k_c$  : 열전도도(W/mK)

$L$  : 집열기의 길이 (m)

$Nu$  : 열손실 Nusselt 수

$T$  : 온도(°C)

$Pe$  : Peclet 수

$Pr$  : Prandtl 수

$\dot{q}'''$  : 단위체적당 열 발생률(W/m<sup>3</sup>)

$Re$  : Reynolds 수

$S$  : 지구대기에 의한 감쇠상수 (0.73)

$U$  : 유체속도(m/s)

$Y_n$  : 고유함수

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012.

11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, [spjang@kau.ac.kr](mailto:spjang@kau.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

그리스문자

$\alpha_n$  : 고유치

$\Omega$  : 입체각(solid angle)

$\rho$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

- $\lambda$  : 파장(mm)  
 $\eta$  : 집열기의 효율  
 $\theta$  : 무차원 온도차  
 $\xi$  : Green 함수의 source 위치

## 1. 서 론

태양열에너지를 흡수하기 위한 집열기의 형태는 사용온도 및 조건에 따라 다양하게 존재하며, 그 중 평판형 집열기는 가정용 온수급탕과 같은 저온용에 적합한 집열기이다. 또한 평판형 집열기는 간단한 구조와 저렴한 가격, 그리고 간편한 유지보수 등의 장점을 가지고 있다. 기존의 평판형 집열기는, 블랙 크롬으로 코팅된 흡수관에서 태양열을 흡수한 뒤 이를 다시 열교환 작동유체로 전달하는 2 단계 열전달 과정을 거친다. 이러한 2 단계 열전달 과정은 높은 열 손실을 야기시켜 기존 집열기의 효율을 크게 향상시키는데 한계를 가지고 있었다.<sup>(1)</sup> 이를 해결하기 위해 제시된 방법이 작동유체에 직접 태양열을 흡수하는 직접 흡수식 집열기 (Direct Absorption Solar Collector, DASC) 이다.<sup>(1)</sup> 그러나 물이나 thermal-oil 같이 기존 집열기에서 사용되던 열교환 작동유체들은 열 수송특성은 좋으나 태양열 흡수특성이 매우 낮기 때문에, 태양열을 직접 흡수하기 위해서는 기본유체의 태양열 흡수율을 높이기 위한 첨가물이 필요하게 되었다. 그래서 기존 연구자들은 중, 저온 영역에서 검은색의 India Ink<sup>(2)</sup>를 사용하였고, 고온 영역에서는 Micro Carbon 입자<sup>(3)</sup>를 사용하여 광학적 흡수특성을 높이고자 하였다. 하지만 India Ink 와 같은 유기잉크의 경우 고온에서 빛과 열에 의해 쉽게 열화 (degradation)되어 고온에서 적합하지 못하다는 단점을 가지고 있었다.<sup>(4)</sup> Micro 크기의 Carbon 입자의 경우 작동유체에 안정적으로 분산이 되지 못하고 쉽게 가라앉아 펌프를 막거나(clogging) 파이프에 축적되어 (Fouling effect) 요구되는 펌핑과워를 높이는 단점을 가지고 있었다.<sup>(1)</sup>

하지만 최근 나노기술의 발달과 함께 나노유체에 대한 연구가 활발히 진행되면서, 이를 DASC 에 적용하기 위한 연구가 주목 받기 시작하였다.<sup>(1,4,5)</sup> 나노유체란 기존의 물이나 에틸렌 글리콜과 같은 열전달용 작동 유체에 나노크기의 금속 혹은 비금속 입자를 분산시켜 만든 유체로서 뛰어난 분산특성과 열적 물성치로 인해 열전달 분야에서 많은 주목을 받고 있다.<sup>(6)</sup> 나노유체를 DASC 의 작동유체로 사용할 경우, 작은 입자 크기로 인해 쉽게 가라앉거나 퇴적되지 않아 기존의 분산안정성 문제를 해결할 수 있다. 또한 Organic Ink 처럼 쉽게

열화되지도 않아 고온의 집열기에도 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 나노유체 태양열 집열기에 관한 기본연구로서 평판형 태양열 집열기의 효율을 평가하기 위한 이론적인 연구를 수행해 보았다. 이를 위해 본 연구에서는 평판형 집열기의 온도분포에 관한 기존 이론적인 모델<sup>(7)</sup>을 단순화시킨 해석적인 해를 구하였으며, 이를 바탕으로 물-기반 단일벽 탄소나노혼(Single Wall Carbon Nanohorn, SWCNH)<sup>(5)</sup> 나노유체를 사용할 경우 부피비, 외부 열손실양, 집열기 높이에 따라 집열기 내부 온도 분포가 어떻게 변하는지 파악해 보았다. 또한 기존 평판형 집열기의 효율과 비교하여 나노유체 태양열 집열기의 적용 가능성에 대해서도 모색해 보았다.

## 2. 이론적 연구

### 2.1 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서 이론적으로 해석하고자 하는 평판형 집열기 내부의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 태양에서 방사되는 열을 집열기 내부에서 발생하는 단위체적당 열 발생률(volumetric heat generation)로 모사한다면 지배 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서  $c_p$ ,  $k_c$ ,  $\dot{q}'''$ ,  $T$ ,  $U$ ,  $\rho$  는 각각 비열, 유체의 열전도도, 단위체적당 열발생률, 온도, 유체속도, 유체의 밀도이다. 경계조건은 다음과 같다.

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

$$k_c \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_{HL} (T_{y=0} - T_{amb}) \quad (2b)$$

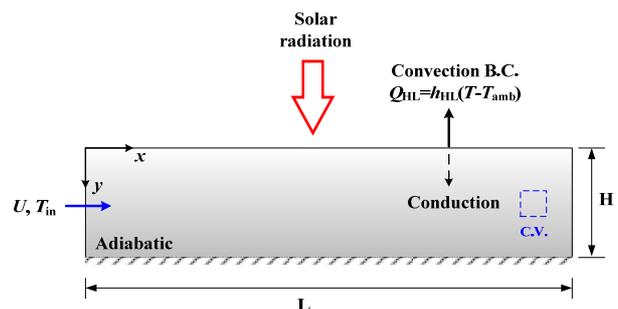


Fig. 1 Schematic of a flat-plate solar collector

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=H} = 0 \quad (2c)$$

여기서  $h_{HL}$ ,  $H$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{amb}$  는 각각 열손실 대류열전달 계수, 채널의 높이, 입구온도(at  $x=0$ ), 외기온도이다. 이식을 무차원화 해주기 위해 다음과 같은 무차원 계수를 도입하였다.

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{y}{H}; \quad \bar{x} = \frac{x}{PeH}; \quad Pe = Re Pr = \frac{\rho U c_p H}{k_c} \\ \theta &= \frac{k_c(T - T_{in})}{G_s H}; \quad \bar{q}''' = \frac{\dot{q}'''(y)H}{G_s}; \\ Nu &= \frac{h_{HL}H}{k_c}; \quad \theta_{amb} = \frac{k_c(T_{amb} - T_{in})}{G_s H} \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

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

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

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

여기서 계산의 간략화를 위해  $\theta_{amb}$  는 0 으로 두었다. 즉 집열기 입구와 외기의 온도를 같게 둔 것으로서, 이때 집열기 외부로의 열전달이 가장 작기 때문에 집열기로서의 효율이 가장 좋은 조건이 된다.

### 2.2 단위체적당 열발생률

여기서  $\dot{q}'''(y)$  는 단위체적당 열발생률로서 태양으로부터 입사된 복사에너지량을 모사한 것이기 때문에 이 값을 구하기 위해서는 다음과 같은 복사전달방정식(Radiative Transport Equation, RTE)을 이용해야 한다.

$$\frac{\partial I_\lambda}{\partial y} = -K_\lambda I_\lambda \quad (6)$$

여기서  $K$ ,  $I$  는 각각 흡광계수(spectral extinction coefficient), 복사강도(intensity) 이며 하첨자의

$\lambda$  는파장(wavelength)이다. 식 (6)과 같이 주어진 복사강도에 관한 식은 미분방정식이므로 해는 다음과 같은 지수함수로 표현할 수 있다.

$$I_\lambda(y) = I_{0,\lambda} e^{-K_\lambda y} \quad (7)$$

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

$$I_{0,\lambda} = S\Omega \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda k_B T_{sun}) - 1]} \quad (8)$$

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

$$\dot{q}'''(y) = -\frac{d}{dy} \int_0^\infty I_\lambda(y) d\lambda = -\frac{d}{dy} \int_0^\infty I_{0,\lambda} e^{-K_\lambda y} d\lambda \quad (9)$$

여기서 복사강도와 흡광계수는 기본적으로 파장에 관한 함수이므로 식 (9)를 계산하기 위해서는 수치적인 방법을 전 파장영역에 대해 적분해 주어야 한다. 하지만 본 연구에서는 간략히 해석적 해를 구하기 위해 흡광계수와 복사강도를 파장에 무관한 상수값으로 가정하였고, 그에 따라 단위체적당 열발생률을 다음과 같은 식으로 표현해 줄 수 있다.

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

여기서

$$\int_0^\infty I_{0,\lambda} d\lambda = G_s = 1,000W / m^2$$

이 식을 무차원해 해주면 최종적으로 다음과 같은 단위체적당 무차원 열 발생률식을 얻게 된다.

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

### 2.3 무차원 온도분포에 관한 해석적 해

무차원화된 지배방정식 식 (4)는 열확산방정식(heat diffusion equation)의 형태로서 정상, 2 차원 비제차 편미분방정식 (steady, 2-dimensional non-homogeneous partial equation)이다. 이러한 식 (4)의 해석적 해를 구하기 위해서는 제차 부분과 비제차

부분의 해를 각각 구한 후, 두 해를 합쳐 일반해를 구해야 한다. 여기서 제차 부분의 해는 변수분리를 통하여 구하고, 비제차 부분의 해는 Green 함수를 이용하여 구하였다. 결과식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\theta = \theta_h + \theta_p$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha_n^2 \bar{y}} Y_n(\bar{y}) + \int_0^1 G(\bar{y}, \xi) \bar{q}''(\xi) d\xi \quad (12)$$

여기서,

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

$$G(\xi, \bar{y}) = \begin{cases} \bar{y} + \frac{1}{Nu} (\bar{y} < \xi) \\ \xi + \frac{1}{Nu} (\bar{y} > \xi) \end{cases}$$

$$A_n = \frac{-\int_0^1 \left[ \int_0^1 G(\bar{y}, \xi) \bar{q}''(\xi) d\xi \right] Y_n(\bar{y}) d\bar{y}}{\int_0^1 Y_n^2(\bar{y}) d\bar{y}}$$

여기서,  $G(\bar{y}, \xi)$ ,  $Y_n$ ,  $\alpha_n$ ,  $\xi$  는 각각 Green 함수, 고유함수(Eigen function), 고유치(Eigen value), Green 함수에 사용된 source 의 위치이다. 여기서  $\bar{y}=0$  인 지점에서 태양열이 입사되므로, source 의 위치는  $\xi=0$  으로 선정하였다. 이제 식 (12)에 식 (11)을 대입 한 후, 긴 풀이과정을 거치면 다음과 같이 대수적으로 주어지는 간략화된 해를 얻을 수가 있다.

$$\int_0^1 G(\xi, \bar{y}) \bar{q}''(\xi) d\xi = \int_0^1 \left( \frac{1}{Nu} + \xi \right) (HK e^{-KH\xi}) d\xi$$

$$= \frac{1}{HK} - \frac{HK+1}{HK \exp(HK)} - \frac{1/\exp(HK)-1}{Nu}$$

$$A_n = \frac{(\sin^2(\alpha_n)) [Nu(1 - \exp(HK)) + HK(1 + Nu - \exp(HK))]}{HKNu\alpha_n \exp\left(HK \left[ \frac{\sin(2\alpha_n)}{4\alpha_n} + \frac{1}{2} \right]\right)}$$

여기서 상수값  $\alpha_n$ ,  $A_n$  은 열손실의 크기에 따라 달라지는 값으로서,  $Nu=10$  인 경우에 대해서 Table 1 에 정리해 보았다. 사용된 n 값은 제차해의 이전값과 이후값의 차이가 0.1% 이하로 차이가 나는 45 까지의 값을 사용하였다.

Table 1 Eigen values ( $\alpha_n$ ) and constant ( $A_n$ ) at  $Nu=10$

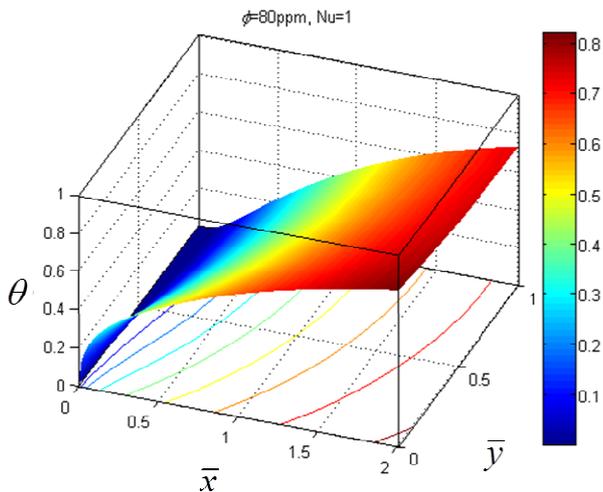
n	$\alpha_n$	$A_n$
1	1.430	-4.68E-02
2	4.310	-1.35E-02
3	7.230	-6.39E-03
4	10.20	-3.43E-03
5	13.21	-1.99E-03
6	16.26	-1.23E-03
7	19.33	-8.02E-04
8	22.41	-5.46E-04
9	25.51	-3.87E-04
10	28.61	-2.82E-04
11	31.72	-2.12E-04
12	34.84	-1.63E-04
13	37.96	-1.27E-04
14	41.08	-1.02E-04
15	44.20	-8.22E-05
16	47.33	-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

### 3. 결과 및 토의

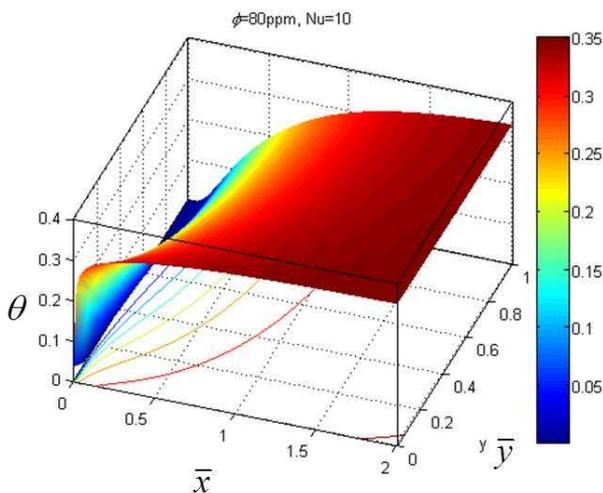
#### 3.1 무차원 온도분포

이제 주어진 해석해를 바탕으로 열손실 양에 따른 무차원 온도분포를 구해보면 Fig. 2 와 같다. 계산에 필요한 물-기반 SWCNH 흡광계수값은 문헌의 값<sup>(5)</sup>을 사용하였으며 물성치는 Table 2 에 정리하였다. 여기서 사용된 나노유체의 흡광계수값은 Lambert-Beer law 를 이용하여 상온, 정지상태에서 측정된 값이며, 집광기의 높이 H 는 1mm 로 선정하였다. Fig. 2(a)를 보면,  $\bar{y}=0$  인 지점에서 태양열이 입사되기 때문에 이 지점에서 가장 높은 온도를 나타내며, 깊이가 깊어질수록 즉,  $\bar{y}=1$  에 접근할수록 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 또한  $\bar{x}=0$  인 지점에서는 유체가 들어오는

부분이기 때문에  $\theta=0$  이며,  $\bar{x}$  가 커질수록 점점 일정값으로 수렴하여 정상상태에 도달하면  $\bar{y}$  방향으로 무차원 온도차값이 거의 일정함을 알 수 있다. Fig. 2 (a)와 (b)를 비교해보면, 무차원 열손실 계수(Nu)가 클수록 무차원 온도값이 전반적으로 낮고, 정상상태에 먼저 도달함을 알 수 있다. Fig. 3 은 나노입자의 부피비에 따른 무차원 온도형상을 나타낸 것으로서 부피비가 클수록 무차원 온도값이 커짐을 알 수 있으며, 이는 입자의 부피비에 비례해서 흡수되는 열량도 많아지기 때문이다. Fig. 4 는 집열기의 한 지점 ( $\bar{x}=2$ )에서 높이에 따른 무차원 온도값을 표현해 놓은 그래프이다. 여기서는 열손실량에 따라 두 가지 경향성이 나타남을 알 수 있는데, 열손실량이 작을 경우 깊이가 깊을수록 무차원 온도값이 상승하였지만, 열손실량이 클 경우 깊이가 깊어질수록 무차원 온도값이 상승하다가 일정 깊이 이상에서는 오히려 감소함을 알 수 있었다. 이는 깊이(H)가 깊어질수록 열발생량은 증가하지만 그와 동시에 무차원 온도분포의 분포값( $G_s H$ ) 또한 커지기 때문이다.



(a) Volume fraction=80ppm, Nu=1



(b) Volume fraction=80ppm, Nu=10

#### 3.2 평판형 집열기의 효율

이렇게 구한 온도분포를 바탕으로 평판형 집열기의 효율에 관한 식을 구해보면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

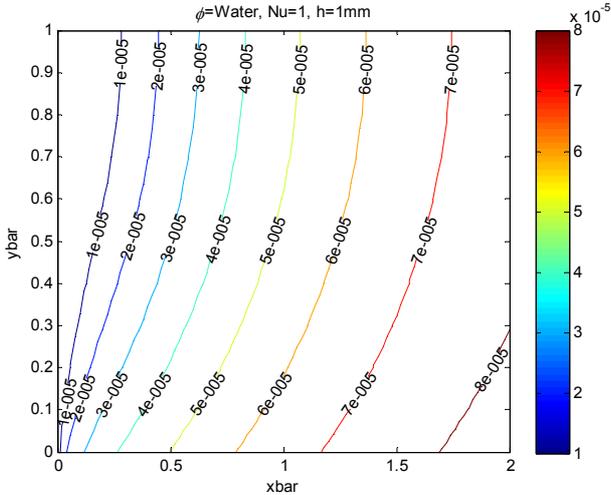
$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{AG_s} = \frac{\theta_{out}}{\bar{x}_{out}} \quad (13)$$

여기서  $\bar{x}_{out}$  은 집열기 출구 위치로서 집열기의 길이( $\bar{L}$ )에 해당한다. Fig. 5 는 부피비 80ppm 의 물-기반 SWCNH 나노유체를 사용할 경우, 집열기 길이에 따른 나노유체 평판형 집열기의 효율을 예측해 본 것이다. Fig. 5 에서 보이듯,  $\bar{x}$  값이 약 2.5 이하인 형상 조건에서 나노유체 평판형 집열기가 기존 평판형 집열기의 효율 ( $\eta = 75.4\%$  at

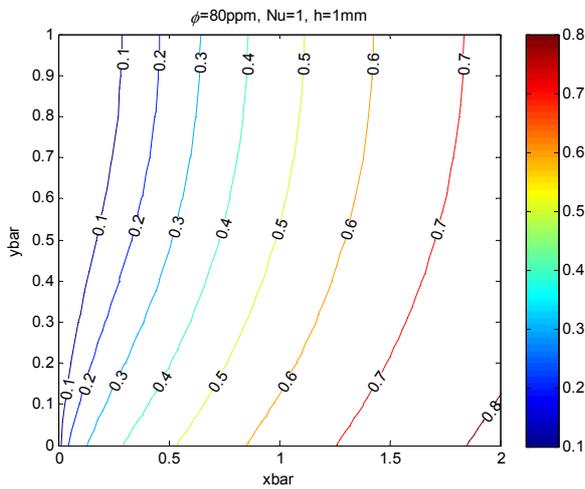
**Table 2** Extinction coefficient of water-based SWCNH nanofluids

부피비(ppm)	K (mm <sup>-1</sup> )
0 (water as a base fluid)	6.741E-05 ( $4\pi K_{water} / \lambda$ )
4	0.06513
8	0.11059
16	0.23798
40	0.58654
80	1.20708

**Fig. 2** Dimensionless temperature distribution with respect to the heat loss magnitude



(a) Volume fraction=0ppm,  $Nu=1$



(b) Volume fraction=80ppm,  $Nu=1$

Fig. 3 Dimensionless temperature profile with respect to the volume fraction

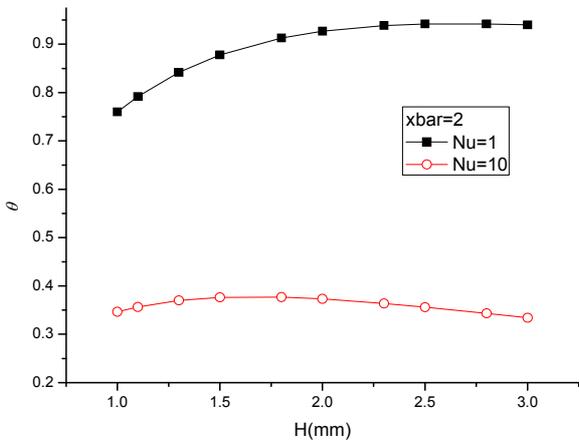


Fig. 4 Dimensionless temperature with respect to the collector height

$\theta_{amb} = 0$ )<sup>(8)</sup> 이상을 가짐을 알 수 있었다. 여기서 직선으로 표현한 집열기의 효율값은 무차원 길이

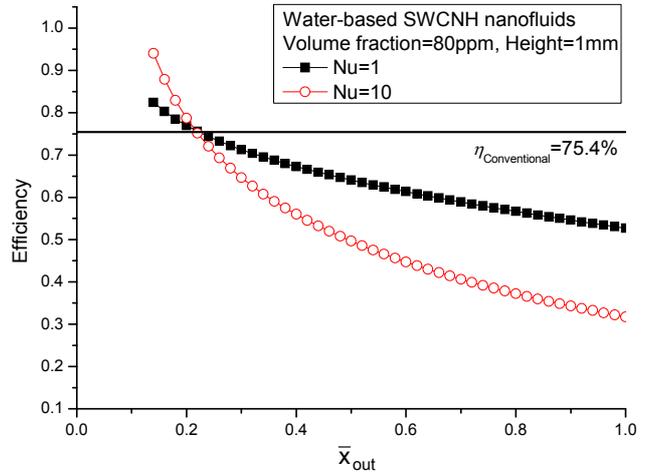


Fig. 5 Efficiency of nanofluid-based flat-plate solar collector

에 무관하다는 의미가 아닌 단순 비교값으로서 표현하였다. 또한 열손실 Nusselt 수에 따른 영향을 살펴보면 열손실 Nusselt 수가 클수록 집열기의 효율이 전반적으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 하지만  $\bar{x} < 2.5$  인 영역에서는 열손실 Nusselt 수가 클수록 더 높은 효율을 가짐을 알 수 있었는데 이는 무차원 온도분포 부분에서 언급하였듯, 열손실 Nusselt 수가 클수록 빨리 정상상태에 다다르기 때문인 것으로 파악된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 평판형 태양열 집열기 내부를 모사한 무차원화된 2D 열확산방정식 (heat diffusion equation)을 파장(wavelength)에 독립적인 조건을 가정하여, 무차원 온도분포에 관한 간략화된 해석적 해를 구하였다. 이를 바탕으로 SWCNH 나노유체를 작동유체로 사용할 경우 열손실량과 부피비, 집열기의 높이에 따른 무차원 온도분포 변화를 파악해 보았다. 결과를 살펴보면, 열손실량이 클수록 집열기 전반의 무차원 온도값이 감소하였으며, 열손실이 적은 경우보다 빠르게 정상상태에 도달함을 알 수 있었다. 또한 SWCNH 입자의 부피비가 커질수록 흡수하는 열량이 많아져 집열기 내부의 전반적인 무차원 온도값이 높아짐을 알 수 있었다. 또한 집열기의 높이에 따른 영향을 살펴본 결과, 열손실량에 따라 두 가지 경향성을 나타냈다. 열손실량이 작을 경우 깊이가 깊을수록 무차원 온도값이 상승하였고, 열손실량이 큰 경우 깊이가 깊어질수록 무차원 온도값이 상승하다가 일정 깊이 이상에서는 오히려 감소함을 알 수 있었

다. 마지막으로 부피비 80ppm 의 물-기반 SWCNH 나노유체를 사용할 경우 집열기 길이에 따른 효율을 예측해 본 결과, 일정 형상조건 이내에서 나노유체 평판형 집열기가 기존 평판형 집열기 이상의 효율을 가질 수 있음을 알 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0013579).

### 참고문헌

- (1) Otanic, T.P., Phelan, P.E., Prasher, R.S., Rosengarten, G. and Taylor, R. A., 2010, "Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector," *J. Renewable Sustainable Energy*, Vol. 2, p. 033102.
- (2) Minardi, J.E. and Chuang, H.N., 1975, "Performance of a 'Black' Liquid Flat-plate Solar Collector," *Sol. Energy*, Vol. 17, pp. 179~183.
- (3) Bertocchi, R., Karni, J. and Kribus, A., 2004, "Experimental Evaluation of a Non-isothermal High Temperature Solar Particle Receiver," *Energy*, Vol. 29, pp. 687~700.
- (4) Sani, E., Barison, S., Pagura, C., Mercatelli, L., Sansoni, P., Fontani, D., Jafrancesco, D. and Francini F., 2010, "Carbon Nanohorn-based Nanofluids as Direct Sunlight Absorbers," *Opt. Express*, Vol. 18, pp. 5179~5187.
- (5) Mercatelli, L., Sani, E., Zaccanti, G., Martelli, F., Di Ninni P., Barison, S., Pagura, C., Agresti F. and Jafrancesco, D., 2011, "Absorption and Scattering Properties of Carbon Nanohorn-based Nanofluids for Direct Sunlight Absorbers," *Nanoscale Res. Lett.*, Vol. 6, p. 282.
- (6) Lee, J.-H., Lee, S.-H., Choi, C.J., Jang, S.P. and Choi, S.U.S., 2010, "A Review of Thermal Conductivity Data, Mechanisms and Models for Nanofluids," *Int. J. Micro-Nano Scale Transport*, Vol. 1, pp. 269~322.
- (7) Veeraragavan, A., Lenert, A., Yilbas, B., Al-Dini, S., and Wang, E. N., 2012, "Analytical Model for the Design of Volumetric Solar Flow Receivers," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 556~564.
- (8) Streed, E. R., Hill, J. E., Thomas, W. C., Dawson, A. G. and Wood, B. D., "Results and Analysis of a Round Robin Test Program for Liquid-heating Flat-plate Solar Collectors," *Sol. Energy*, Vol. 22, pp. 235~249.