

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.7.599>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

나노유체 특성에 따른 히트파이프 성능해석

임 승 민*†

* 국방과학연구소 6기술연구본부

Theoretical Analysis of Heat Pipe Thermal Performance According to Nanofluid Properties

Seung Min Lim**

* The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development

(Received March 18, 2015 ; Revised April 29, 2015 ; Accepted May 6, 2015)

Key Words: Nanofluid(나노유체), Nano Particle(나노입자), Heat Pipe(히트파이프), Heat Transfer(열전도), Capillary Limit(모세압 한계), Al₂O₃(산화알루미늄), CuO(산화구리), Aggregation(응집도)

초록: 본 연구에서는 나노유체의 유동학 특성을 반영한 히트파이프 열적특성을 연구하였다. Al₂O₃와 CuO 나노입자를 적용한 나노유체를 작동유체로 하여 나노입자 부피비와 응집도에 대한 히트파이프 성능을 확인하였다. 나노입자의 부피비와 응집도가 증가할수록 점성과 열전도도는 증가하는 것으로 나타났다. 두 인자는 히트파이프 성능에 영향을 주었다. 나노입자응집이 없는 경우에는 나노입자의 부피비 증가가 모세관압력한계 성능을 향상시켰지만 응집도가 증가하면 입자부피비가 증가해도 모세관압력한계가 감소했다. 그리고 나노입자의 열전도도, 부피비, 응집도에 대한 히트파이프 열저항을 분석하였다. 히트파이프의 투과율이 높을수록 최대열수송량은 입자부피비에 미치는 영향이 컸으며 3차원 그래프를 통해 워 특성에 대한 최적화된 나노입자부피비를 확인하였다.

Abstract: In this study, we theoretically investigate the thermal performances of heat pipes that have different nano-fluid properties. Two different types of nano-particles have been used: Al₂O₃ and CuO. The thermal performances of the heat pipes are observed for varying nano-particle aggregations and volume fractions. Both the viscosity and the conductivity increase as the volume fraction and the aggregation increase, respectively. Increasing the volume fraction helps increase the capillary limit in the well-dispersed condition. Whereas, the capillary limit is decreased under the aggregate condition, when the volume fraction increases. The dependence of the heat pipe thermal resistance on the volume fraction, aggregation, and conductivity of the nano-particles is analyzed. The maximum thermal transfer of the heat pipe is highly dependent on the volume fraction because of the high permeability of the heat pipe. For the proposed heat pipe, the optimum volume fraction of the nano-particle can be seen through 3D graphics.

1. 서론

히트파이프는 이상(two phase)유동 열전달을 이용한 열 수송 및 관리를 위한 기기로서 많은 연구가 진행되어 왔다. 열전달 효율이 우수하고 간결한 히트파이프는 컴퓨터 CPU 냉각기에서 우주추진원자로까지 다양한 엔지니어링 시스템에

적용되고 있다.

히트파이프는 밀폐용기와 내부 다공성구조물(워, wick)로 구성된 단일기기이며 가열부, 단열구간 그리고 응축부로 구성되어진다. 가열부에서 증발한 증기는 압력분포로 내부통로를 통해 단열구간을 지나 응축부로 이동한다. 응축부에서는 응축된 액체가 워에서 발생하는 모세관압력으로 가열부로 이동되는 피동형 열수송기기이다. 히트파이프의 열수송 한계점은 작동유체와 워 형태에

† Corresponding Author, lims@add.re.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

의해 정해지는데 히트파이프 성능을 향상시키기 위한 설계 중 워의 형태와 작동유체 변화에 대한 열수송한계 연구가 많이 진행되어왔다.

최근 나노기술의 발달은 고성능 열전달기기에 대한 새로운 매커니즘을 적용할 수 있는 기회를 제공하여 열수송 능력을 향상시키는 많은 연구결과가 나오고 있다. 나노유체를 작동유체로 사용하여 기존의 유체보다 열전달 특성을 향상시켜 고성능 열수송을 할 수 있게 되었기 때문이다.

나노유체란 기준유체(base fluid)에 나노입자(nano-particle)를 분산, 부유시킨 유체를 가리킨다. 과거 입자의 크기가 μm 단위에서는 입자의 침전, 응집성(aggregation), 큰 입자로 인한 마모, 막힘 등 많은 문제점들이 있었으나 최근 입자를 nm 까지 제조할 수 있는 기술과 응집제어연구로 침전 및 응집정도가 많이 개선되어 나노유체에 대한 열전달 특성연구가 많이 이루어지고 있다.

히트파이프의 열 수송한계를 개선하기 위해 나노유체를 작동유체로 사용하는 연구도 최근 활발히 진행되고 있다. 금, 은, 산화구리, 티타늄, 다이아몬드 등 다양한 재질과 크기의 입자를 이용해 나노유체를 만들어 열적특성에 대한 많은 실험적 연구가 수행되었다. Naphon⁽¹⁾은 티타늄-에탄올과 티타늄-물 나노유체를 적용하여 히트파이프의 열적특성이 향상되는 결과를 보였다. Tsai⁽²⁾는 나노입자 크기가 히트파이프 열적특성에 미치는 영향을 연구하여 성능향상을 실험적으로 보였으며, Shafahi⁽³⁾은 TiO_2 , CuO 와 Al_2O_3 의 나노입자 층에 대한 특성을 모델링하여 히트파이프 열전달 특성을 수학적으로 해석하였다.

나노유체는 입자의 전하나 인력으로 응집되며 일반적으로 DLVO이론에 따르면 음의전하를 띠는 입자 간에는 먼 거리까지 작용하는 정전반발력과 짧은 거리에서 더 큰 반델발스 인력(van der Waals attractive)의 힘의 균형으로 설명된다. 입자 간에 이 두 힘의 합력으로 최대반발력을 보이는 에너지 장벽을 열 운동을 통해 극복하고 입자 간 거리가 더 가까워지면 입자에 인력이 작용해 응집이 되는 것이다. 이런 응집을 제어하기 위한 방법으로는 이온이나 PH를 조절하거나, 입자표면장식의 변화, 계면활성제 적용 등 여러 가지가 있으나 완전히 해결하기는 한계가 있다.

나노입자 응집정도에 따라서 열전도 및 점성 특성이 달라진다. 나노입자 부피비가 2% 이상일 경우

shear thinning 형태를 가지며⁽⁴⁾ 온도가 높을 경우는 Newtonian flow, 온도가 낮으면 shear thinning을 특성을 가지는 연구결과도 있다.⁽⁵⁾ Keblinski⁽⁶⁾은 나노입자 크기와 집성체(cluster)가 열전도도에 큰 영향을 주는 인자임을 확인하였다. 즉, 나노입자의 유동학(rheology)은 나노유체의 점성 및 열전도도에 큰 영향을 주며 이는 히트파이프 성능인 열수송한계와 열저항을 결정하는 중요한 인자이다. 하지만 나노유체의 유동학특성에 의한 히트파이프 성능에 대한 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 이론적 해석을 통해 나노유체를 작동유체로 하여 입자응집도와 입자농도가 히트파이프 열적특성에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

2. 히트파이프 해석 모델

2.1 히트파이프

본 연구에 사용된 히트파이프의 재질과 워의 재질은 동일하게 구리로 하였고 워 형태는 소결워, 작동유체는 나노유체를 적용하였다. 총길이 60cm에서 가열부 10cm, 응축부 20cm로 설정하였고 히트파이프의 상세한 재원은 Table 1에 나타낸 것과 같다.

Fig. 1은 작동온도에 대한 5가지 한계곡선을 나타낸 것으로 모세관 압력한계(capillary limit)가 대부분의 작동온도 범위에서 가장 지배적임을 알 수 있다. 점성한계(viscous limit)는 가열부에서 응축부의 증기압력이 점성력에 의한 압력손실을 이

Table 1 Specification of heat pipes

히트파이프 재원		값
Material		Copper
Working Fluid		Nanofluid
Pipe Outside Diameter(d)		1.5 cm
Wall Thickness(t)		0.08 cm
Length of Evaporator(L_e)		10 cm
Length of Adiabatic(L_a)		30 cm
Length of Condenser(L_c)		20 cm
Sintered	Wick Thickness	0.1 cm
	Sintered Diameter	0.01 cm
	Porosity(ϵ)	0.58
Tilt Angle		-10°

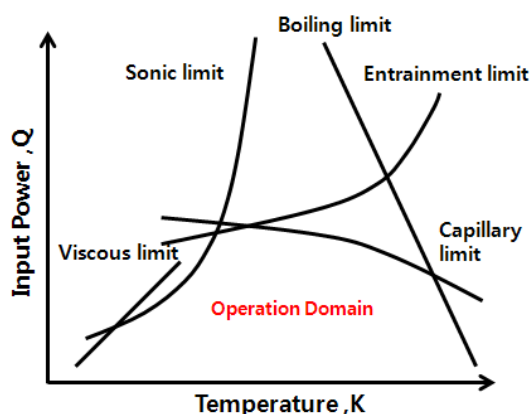


Fig. 1 Limit curve of the heat pipe

가지 못할 경우 한계에 도달하며, 음속한계(sonic limit)는 증기유속이 가열부 출구부분에서 음속에 도달하여 임계유동 발생으로 증기유속은 더 이상 증가하지 못해 열유입이 증가해도 일정한 질량흐름으로 한계에 도달한다. 비등한계(boiling limit)는 가열부 밖에서는 핵비등상태를 넘어 막비등이 발생하게 되어 응축액이 유입되지 못해서 발생하고, 비산한계(entainment limit)는 증기와 액체의 표면에서 마찰에 의한 전단응력이 발생하고 이것은 응축액이 가열부로 유입을 막아서 발생한다.

그리고 가장 큰 영향을 미치는 모세관압력한계는 식 (1)에서 나타난 것과 같이 분자인 모세압과 작동 유체의 증력에 대한 힘과 분모인 증기마찰과 액체 마찰의 합으로 구성되어 있다. 관성효과와 점성에 의해 생기는 압력손실은 증기마찰계수와 액체 마찰 계수에 기인하는데 유동경로상 압력손실이 최대 모세관 압력보다 크게 되어 응축된 작동유체가 가열부로 도달하지 못하면 가열부에서는 비등이 지속적으로 일어난다. 따라서 마름현상이 생기게 되어 더 이상 열수송이 일어나지 않게 된다.

$$Q_c \leq \frac{\frac{2\sigma}{r_{ce}} - \rho_l g (d_v \cos \Psi + L_{eff} \sin \Psi)}{\left(\frac{C f_v Re_v \mu_v}{2r_{hv}^2 A_v \rho_v \lambda} + \frac{\mu_l}{KA_w \lambda \rho_l} \right) L_{eff}} \quad (1)$$

C : 상수, r_{ce} : 유효모세관 반경, f_v : 증기전달마찰계수, r_{hv} : 증기수력반경, ρ_v : 증기밀도, ρ_l : 액체 밀도, λ : 증기잠열, A_v : 증기통로단면적, μ_v : 증기 점성, μ_l : 액체점성, A_w : 워 단면적, Ψ : 경사각, σ : 표면장력, d_v : 증기직경, L_{eff} : 평균유효길이, ΔP_c : 최대 모세관압력, T_v : 증기온도, r_{hv} : 수력반지름, Re : 레이놀즈수 K : 투과율

열저항 역시 히트파이프 성능에 영향을 주는 주요인자이며 열저항을 최소화되게 설계한다. 열저항이 커지면 열수송 능력이 감소되기 때문이다. 정해진 히트파이프 형상채원에서 나노유체는 유효열전도도를 향상시켜 열저항을 줄여준다.

따라서 히트파이프에 나노유체를 적용 시 모세관압력한계와 열저항을 동시에 고려하여 성능을 개선할 수 있다. 나노입자의 응집성과 부피비는 나노유체의 밀도, 점성, 열전도도를 변화하게 하여 최대 모세관 압력한계와 열저항에 영향을 줄 것이다.

나노유체의 특성이 히트파이프에 미치는 영향을 분석하기 위해 소결워의 입자와 두께는 일정한 값으로 설정하여 나노입자 부피비와 응집도가 히트파이프 성능에 미치는 영향 분석했다. 그리고 응집성이 일정할 때 소결워의 입자크기를 변화시켜 모세압과 투과율의 변화가 나노입자 농도 변화에 미치는 영향에 대해 열적 성능해석을 하였다.

2.2 나노유체 특성

나노유체는 기존의 유체에 나노입자를 분산, 부유시켰기 때문에 나노유체특성은 나노입자특성에 기인한다. 따라서 나노입자의 재질과 부피비에 따라서 나노유체의 열적특성이 달라진다. 특히 히트파이프 열전달 특성에서 중요한 값은 나노유체의 밀도, 점성과 열전도도이다.

나노유체의 밀도와 점성은 히트파이프 압력강하에 큰 영향을 주어 열전달 특성을 결정한다. 나노유체의 부피비에 의해 밀도가 달라지며 이론적, 실험적으로 확인된 식 (2)를 적용하였다.

$$\rho_{nf} = \rho_{np} \phi + (1 - \phi) \rho_{bf} \quad (2)$$

ρ_{nf} : 나노유체의 밀도, ρ_{np} : 나노입자의 밀도, ρ_{bf} : 물의 밀도, ϕ : 나노입자의 부피비

나노유체의 점성에 대한 다양한 모델이 존재하며 일반적으로는 식 (3)의 Brinkman's 상관식이 적용된다.⁽⁷⁾ 하지만 Brinkman 상관식은 나노입자가 견고한 구형태의 입자일 경우 성립하는 식으로 나노입자의 응집(aggregation)체가 없다는 이상적인 가정하의 식이며 나노입자의 부피비가 4% 이하일 때 적용가능하다.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - \phi^{2.5})} \quad (3)$$

일반적으로는 나노입자의 경우는 완벽한 구형태이나 나노입자들이 서로 응집한 형태로 부유하기 때문에 새로운 모델이 필요하다. Chen은 Krieger-Dougherty 상관식을 개선하여 나노입자의 응집정도를 반영한 나노유체점성모델을 제시하였는데 아래 식 (4)와 같다.⁽⁸⁾

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{\left[1 - \left(\frac{\phi_a}{\phi_m}\right)\right]^{2.5\phi_m}} \quad (4)$$

$$\phi_a = \phi \left(\frac{r_a}{r}\right)^{3-D} \quad (5)$$

μ_{nf} : 나노유체점성 μ_{bf} : 기준유체점성 ϕ_m : 최대입자부피비 r_a : 응집 반경 r : 입자반경 D : 프랙탈 인덱스, ϕ_a =응집 부피비,

Fig. 2는 응집체를 개념적으로 나타낸 그림이다. D 는 나노입자의 응집정도, 입자크기 및 형태에 결정되는 인덱스 값으로 실험적으로 정해진다. 구형태의 나노유체에서는 1.6에서 2.4 정도로 보며 일반적으로는 1.8, ϕ_m 는 0.605를 적용한다.^(9,10) 응집도는 r_a/r 로 정의할 수 있다. 동일한 응집도를 갖더라도 인덱스 값이 변하면 나노입자가 응집된 응집체(cluster) 내부의 입자의 면적이 달라지기 때문에 점성과 열전도도 영향을 받을 수 있으며 본 연구에서는 인덱스 값을 1.8로 하여 균일한 응집체들로 가정하고 해석하였다.

열전도도는 Hamilton-Crosser 상관식을 개선하여 응집도 부피비를 반영하였다.⁽¹¹⁾ 나노입자형태는 구형태로 가정하였다. n 은 경험적으로 실험에서 나온 형상계수(shape factor)로 $n = 3/\psi$ 로 나타내어지며 구로 가정하면 $\psi = 1$ 으로 나타낼 수 있다. 입자는 구형태($n=3$)로 가정하고 본 연구에서는 응집체의 열전도도를 나노입자의 열전도도로 가정하고 해석하였으며 식 (6)과 같이 나타내어진다.

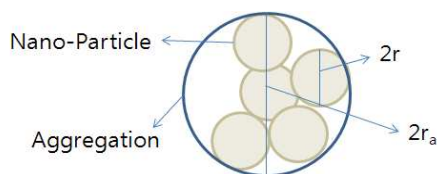


Fig. 2 Schematic of a nano-particle aggregation

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \left[\frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)(k_{bf} - k_{np})\phi_a}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + (k_{bf} - k_{np})\phi_a} \right] \quad (6)$$

따라서 히트파이프의 유효열전도도는 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$k_{eff} = k_{nf} \left[\frac{(k_{nf} + k_w) - (\epsilon - 1)(k_{nf} - k_w)}{(k_{nf} + k_w) + (\epsilon - 1)(k_{nf} - k_w)} \right] \quad (7)$$

k_{np} :나노입자 열전도도, k_{nf} :나노유체 열전도도, k_w :워 열전도도, k_{eff} :유효열전도도, μ_{bf} :기준유체, μ_{nf} :나노유체 점성, ϵ :워 다공성도, n :형상계수

히트파이프 열전달 한계에 영향을 주는 다른 인자는 열저항이며 열저항이 작으면 열 수송량이 증가한다. 따라서 히트파이프의 유효열전도를 나타내는 식 (7)에서 나노유체의 열전도도가 증가하면 히트파이프의 유효열전도도 증가하여 열저항을 감소시킬 수 있다.

히트파이프에서 가열부, 응축부에서 이상(Two phase)유동의 의한 열전달계수는 작아서 무시할 수 있으며 표면온도에 대한 것은 N. Zhu가 적용한 식을 사용하였다.⁽¹²⁾ 식 (8)은 히트파이프 전체 열저항을 표현한다.

$$\left[\frac{T_{wall} - T_b}{Q} \right] = \left(\frac{1}{2\pi L_c} \left[\left(\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_{wall}} + \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_v}\right)}{k_{eff}} \right) \left(1 + \frac{L_c}{L_e} \right) + \frac{1}{hr_o} \right] \right) \quad (8)$$

r_i : 히트파이프 내부반지름, r_v : 증기통류 반지름, r_o : 히트파이프 외부반지름, L_c : 응축부길이, L_e : 열부길이, h : 응축부표면 대류열전달 계수, k_{wall} : 히트파이프 용기 열전도도, Q : 유입열량, T_b : 응축부 외부온도

본 연구에서는 r_a/r 비를 1, 2, 3, 4 로 Al_2O_3 와 CuO 나노입자의 응집도와 부피비 변화에 따른 히트파이프 열적특성을 이론적으로 해석하였다. 아래의 Table 2는 상기의 나노유체의 특성을 요약한 것이다.

Table 2 Properties of the nano-particles

	Density (kg/m ³)	Conductivity (W/mK)
Al ₂ O ₃	3880	42
CuO	6510	20

Table 3 Input parameter of nano-particles

	Volume Fraction	Aggregation ratio
Nano-Particle	0 ~ 0.1	1 ~ 4

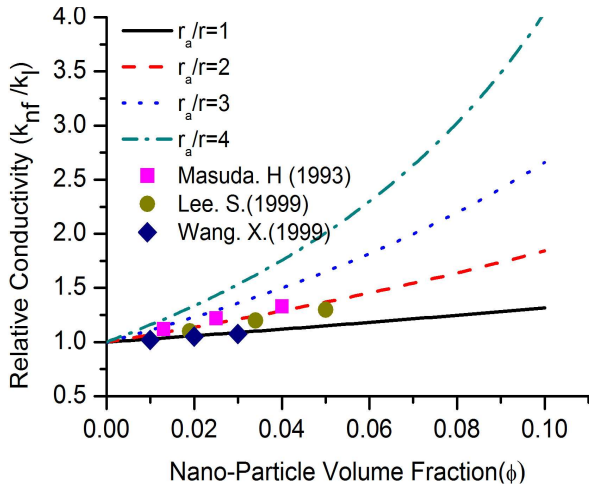


Fig. 3 Relative conductivity of Al₂O₃ + water

3. 해석 결과

3.1 나노입자 부피비에 따른 나노유체 특성

나노유체의 열전도도와 점성은 히트파이프의 열적특성에 큰 영향을 준다. 나노유체의 열전도도는 나노입자의 열전도도와 나노입자의 부피비에 대한 함수이다. 그리고 나노유체의 점성은 작동유체의 점성과 나노입자의 부피비에 기인하므로 이들과 나노유체의 특성에 대한 분석이 필요하다.

아래 Table 3에서와 같이 나노입자(Al₂O₃)의 부피비와 응집도에 대한 상대적인 열전도도와 점성을 Fig. 3와 Fig. 4에 나타내었다. 온도는 355 K이며 나노입자의 부피비는 0~10 %이며 응집도는 1~4 범위에서 해석했다.

상기의 상관식으로 얻은 곡선은 이전의 실험값과 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.^(13~17)

입자의 부피비와 점성에 대한 많은 연구 결과가 있으며 이를 바탕으로 다양한 점성모델이 개발되었다. 본 연구에서는 점성에 응집도를 반영한 모델식 (4)을 적용하여 점성에 대한 값을 Fig. 4와 같이 나타내었다.

부피비가 증가할수록 상대점성이 증가하며 응집도가 커질수록 증가폭이 급격해지는 것을 알 수 있다.

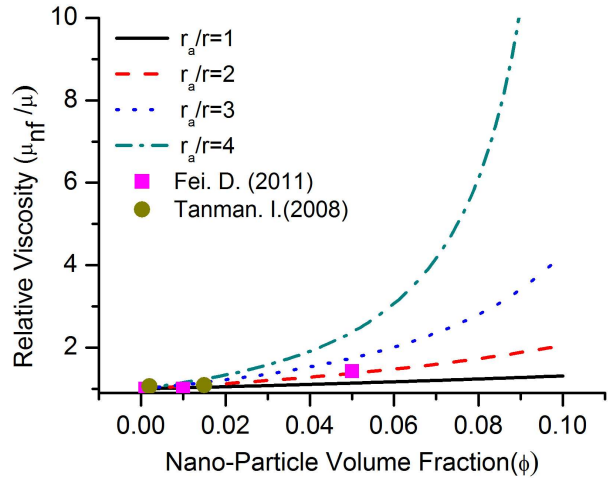


Fig. 4 Relative viscosity of Al₂O₃ + water

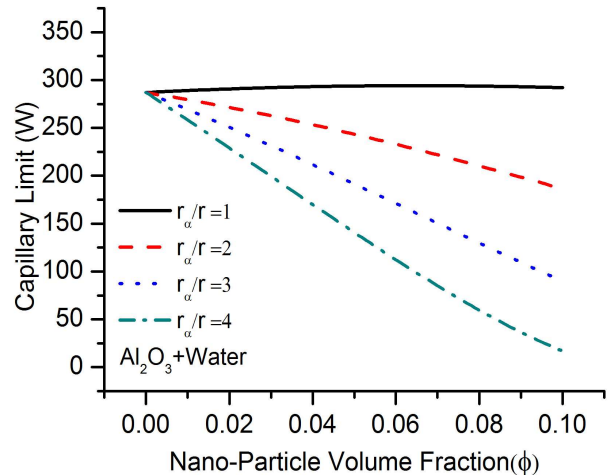


Fig. 5 Capillary limit of heat pipe with Al₂O₃

3.2 나노입자 부피비에 따른 히트파이프 특성

히트파이프에서 응축부의 작동유체는 모세관 압력의 힘과 중력의 힘으로 가열부까지 이동하는데 점성의 증가는 밖에서의 압력손실을 커지게 하여 열전달 한계에 빨리 도달하게 한다. 따라서 히트파이프의 모세관 압력한계와 상관있는 나노의 밀도와 점성에 대한 히트파이프 성능확인 필요하다.

Fig. 3에서 확인한 결과는 나노입자의 농도가 증가할수록 점성이 증가한다. 동시에 밀도도 증가하는데 밀도의 증가는 응축액이 밖을 지나는 유속을 감소시켜 전단응력을 낮춘다.⁽¹²⁾ 하지만 점성의 증가는 전단응력을 높이므로 밀도와 점성은 나노입자의 부피비와 응집성에 대한 최고 모세관압력한계를 결정하게 된다.

Fig. 5 는 Al₂O₃ 나노입자가의 응집도에 따라서 모

세관 압력한계를 나타낸 그래프이다. 모세관 압력한계 응집도가 1일 경우는 나노입자가 응집없이 아주 이상적으로 분산되었을 경우를 의미한다. 입자부피비가 증가하면 모세관 압력한계가 증가하는 것을 알 수 있다. 나노입자가 이상적으로 유체에 분산되었을 경우 나노입자 부피비의 증가는 점성의 증가보다 밀도에 더 큰 영향을 주는 것으로 확인되며 히트파이프 성능이 향상되는 것을 알 수 있다.

응집도가 2~4의 경우는 나노유체의 밀도는 동일한데 응집도가 커질수록 점성에 대한 값이 급격히 증가한다. 따라서 응축부의 작동유체가 워를 통해 가열부로 이동시 유체마찰증가로 압력손실이 커지며 부피비가 증가하여도 모세관한계는 감소하는 것을 확인하였다.

Fig. 6는 CuO 나노입자의 응집도와 부피비에 대한 히트파이프 성능을 나타낸 것이다. CuO + water 나노유체는 응집도가 1일 경우 나노입자의 농도가 증가 할수록 히트파이프 열수송 능력이 급격히 향상되는 것을 알 수 있으며 이는 Al₂O₃ + water 보다 더 높은 향상률을 보이고 있다. 모세관 압력한계 식 (1)을 보면 CuO는 Al₂O₃ 보다 2배 정도의 밀도 값을 가지기 때문에 워를 지날 경우 유체마찰손실이 적다.

따라서 모세관 압력한계가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. CuO +water는 나노입자의 응집도가 2의 경우에도 나노입자의 농도가 증가할 때 모세관 압력한계가 증가하다가 감소하는 것을 확인하였다.

3.3 나노입자에 대한 히트파이프 열저항 특성

Fig. 7은 Al₂O₃ + water를 히트파이프 작동유체

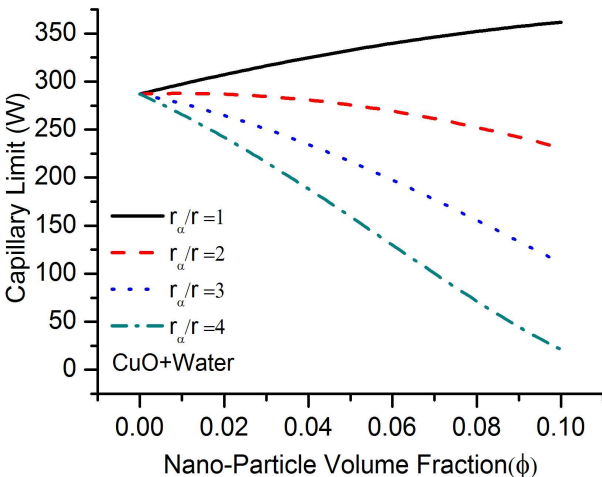


Fig. 6 Capillary limit of heat pipe with CuO

로 하여 나노입자의 부피비에 따른 표면온도 분포를 나타낸 것이다. 열유입량은 200 W이며 응축부 표면에서 315 K의 물이 대류열전달 계수가 1800 W/m² K 로 열전달 된다고 가정하였다. 또한 나노입자의 응집도는 1로 가정하였다.

Fig. 7은 나노입자의 부피비 증가에 따른 히트파이프 열전달 향상을 명백하게 보여주고 있다. 나노입자의 부피비가 커질수록 가열부와 응축부의 온도 차이가 줄어들어 열적성능향상을 보이고 있다. 4%의 나노입자 부피비 일 때 온도분포가 Al₂O₃, CuO 모두 대략 10% 정도 감소하는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 나노입자(Al₂O₃)의 부피비가 2%로 일정할 경우 응집도에 따른 히트파이프 표면온도분포를 나타낸 것이다. 응집도가 커지면 히트파이프 표면온도 분포가 감소하는 것을 알 수 있다.

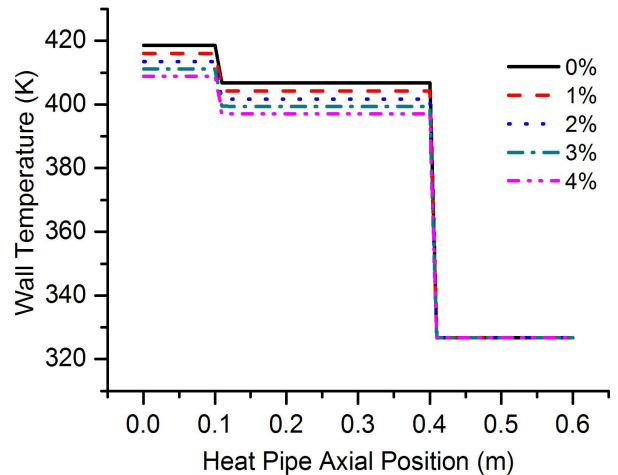


Fig. 7 Heat pipe temperature distribution for particle concentration

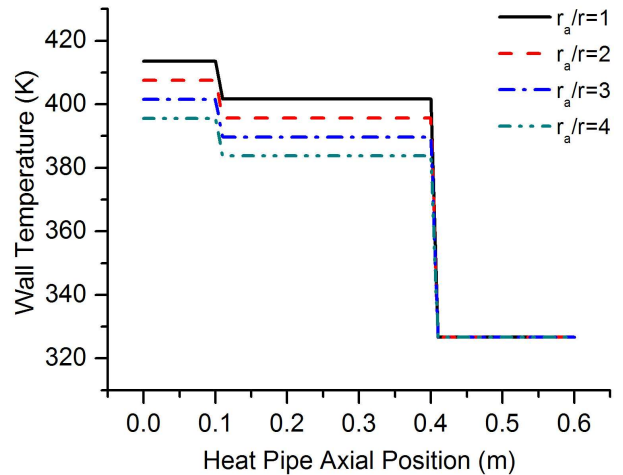


Fig. 8 Heat pipe temperature distribution for particle aggregation

Table 4 Thermal resistance of heat pipe for volume fraction and aggregation

	r_a/r	Volume Fraction			
		0.01	0.02	0.03	0.04
Al ₂ O ₃	1	0.7044	0.6792	0.652	0.6257
	2	0.6849	0.6375	0.5897	0.5434
	3	0.6661	0.599	0.5341	0.4737
	4	0.6479	0.5633	0.4847	0.4141
CuO	1	0.7054	0.6814	0.6560	0.6302
	2	0.6868	0.6415	0.5956	0.5510
	3	0.6689	0.6046	0.5421	0.4836
	4	0.6515	0.5703	0.4942	0.4254

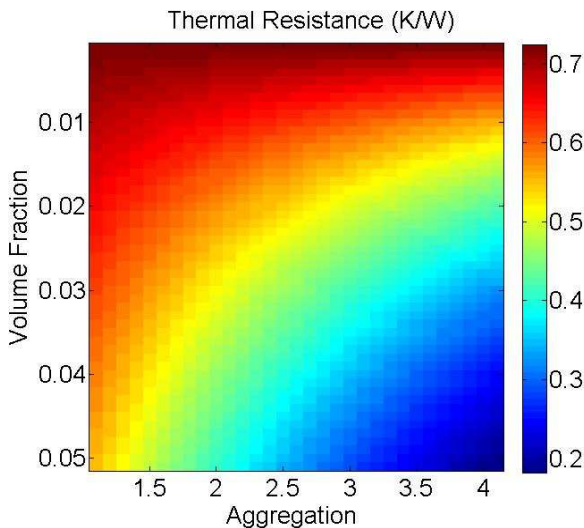


Fig. 9 Thermal resistance for particle concentration and aggregation

나노입자의 응집도가 커질수록 열전도계수가 증가하기 때문에 나노유체의 열전달계수 증가와 히트파이프 유효열전달계수 증가로 이어진다. 응집도가 2, 3, 4로 증가하면 가열부와 응축부의 표면온도차는 6.8%, 13.7%, 25.2% 감소하는 것을 확인 하였다. 즉 나노입자의 응집도 증가는 열저항 감소에는 긍정적인 효과를 보이고 있다.

Fig. 9는 나노입자(Al₂O₃)에 대한 입자부피비와 응집도와 히트파이프 열저항에 대한 그림이다. 입자농도가 증가할수록, 응집도가 증가할수록 히트파이프 열저항이 감소하는 것을 알 수 있다.

Table 4에 나노입자의 부피비와 응집도에 대한 열저항을 요약하였다. CuO의 열전도도가 Al₂O₃보다 작은 것을 고려하면 나노입자의 열전도도보다는 응집도가 히트파이프 열저항에 더 큰 영향을

Table 5 Input parameter for permeability and volume fraction

	Parameter
Volume Fraction	0 ~ 0.4
Aggregation Ratio	1.2
Heat pipe Permeability(m ²)	7.7e-13 ~ 1.9e-09

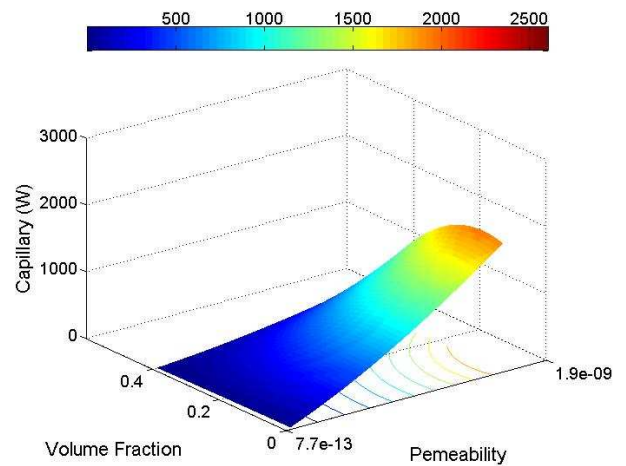


Fig. 10 The representation of heat pipe maximum heat transfer in terms of permeability and nano-particle(Al₂O₃) volume fraction

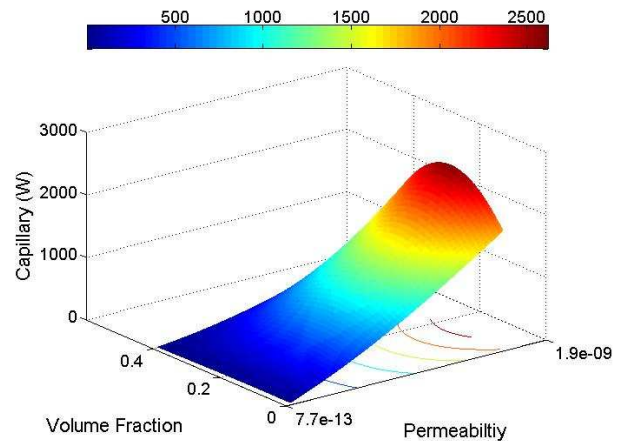


Fig. 11 The representation of heat pipe maximum heat transfer in terms of permeability and nano-particle(CuO) volume fraction

주는 인자임을 확인하였다.

3.4 나노입자 부피비와 히트파이프 투과율에 대한 히트파이프 열전달특성

열 이송인자를 크게 하기 위해 투과율을 크게 하면 모세관 압력이 작아진다. 두 인자는 서로 모세관 압력한계 결정에 반대되는 인자이다. 따라서 소결의

입자크기를 10 μm 에서 500 μm 까지 변화시켜 히트파이프 외의 투과율(permeability)을 증가시키고 모세압 감소 시 나노유체를 이용한 히트파이프의 외 특성을 분석하였다. 분석조건은 아래 Table 5와 같다. Fig. 10은 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{water}$ 을 작동유체로 한 결과이며 투과율이 낮을 경우 나노입자 부피비가 증가하여도 모세관 압력한계에는 큰 차이가 없으며 오히려 감소하는 경향을 알 수 있다. 투과율이 증가하여도 모세관압력한계는 지속적으로 감소한다. 하지만 투과율이 $1.9\text{e-}19 \text{ m}^2$ 정도에서는 나노입자의 부피비 증가하면 모세관 압력한계가 증가하다가 0.2에서 감소하는 것을 확인하였다.

Fig. 11은 $\text{CuO} + \text{water}$ 를 작동유체로 한 결과이다. Al_2O_3 와 다르게 투과율 상관없이 나노입자의 부피비가 증가하면 모세관 압력한계가 증가하는 것을 알 수 있다. 대략 부피비 0.16 이상에서 모세관압력한계가 감소하며 투과율이 증가할수록 나노입자 부피비에 의한 영향이 커지는 것을 확인하였다. Fig. 10, 11을 통해 나노입자의 부피비와 외 특성에 대한 최대화된 열 수송량을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 나노유체(Al_2O_3 , CuO)의 특성이 히트파이프 열적성능에 미치는 영향을 확인하였다. 나노유체의 점성과 열전도도는 나노입자의 특성에 기인하며 나노입자의 농도와 응집도가 큰 영향을 미친다.

나노유체의 열전도도는 Hamilton-Crosser 상관식을 개선하여 계산하였고 점성은 Krieger-Dougherty 상관식을 개선한 Chen 상관식을 적용하여 나노유체 특성에 대한 히트파이프 성능을 해석하였다.

히트파이프에서 모세관압력한계는 나노유체의 밀도와 점성에 영향을 받으며 나노입자의 응집도가 1일 경우 부피가 증가 할수록 열전달 특성도 증가하는 것을 알 수 있었다. 하지만 응집도가 증가하면 shear thinning 형태를 보이는 나노유체의 특성에 의해 히트파이프 성능이 급격히 감소되었다.

히트파이프의 열저항은 나노입자의 부피비가 증가하면 감소하여 열특성이 향상되는 것을 알 수 있었으며 나노입자의 열전도도보다는 나노입자 응집도에 의한 영향이 컸다. Al_2O_3 와 CuO 에 대한 차이는 미미했다.

히트파이프 외 투과율이 큰 경우에는 최대 열 수송량은 나노입자의 부피비에 의한 영향이 컸으며 입자농도가 증가하면 열전달 특성이 증가하다 감소해 나노입자의 최적 부피비를 도출할 수 있었다.

본 연구결과는 나노입자를 이용한 히트파이프 성능연구 뿐 만 아니라, 히트파이프 실험결과와의 비교, 나노유체를 이용한 열전달 실험 및 수치해석 연구결과와 비교분석을 위한 연구자료로 활용성이 클 것으로 본다.

참고문헌

(References)

- (1) Naphon, P., Assadamongkol, P. and Borirak, T., 2008, "Experimental Investigation of Titanium Nanofluids on the Heat Pipe Thermal Efficiency," *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 10, pp. 1316~1319.
- (2) Tsai, C. Y., Chien, H. T., Ding, P. P., Chan, B., Luh, T. Y. and Chen, P. H., 2004, "Effect of Structural Character of Gold Nanoparticles in Nanofluid on Heat Pipe Thermal Performance," *Materials Letters*, Vol. 58, No. 9, pp. 1461~1465.
- (3) Shafahi, M., Bianco, V., Vafai, K. and Mancam, O., 2010, "An Investigation of the Thermal Performance of Cylindrical Heat Pipes Using Nanofluids," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 1-3, pp. 376~383.
- (4) Chen, H. S., Ding, Y. L., Lapkin, A. and Fan, X., 2009, "Rheological Behaviour of Ethylene Glycol-Titanate Nanotube Nanofluids," *J. Nanopart Res.* Vol. 11, No. 6, pp. 1513~1520.
- (5) Nguyen, C. T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N. B. and Mare, T., 2007, "Temperature and Particles Size Dependent Viscosity Data for Water-Based Nanofluid-Hysteresis Phenomenon," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 28, No. 6, pp. 1492~1506.
- (6) Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. and Eastman, J. A., 2002, "Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-Sized Particles(nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, No. 4, pp. 855~863.
- (7) Brinkman, H. C., 1952, "The Viscosity of

- Concentrated Suspensions and Solutions,” *J. Chem. Phys.*, Vol. 20, No. 4, pp. 571~571.
- (8) Chen, H., 2009, “Predicting Thermal Conductivity of Liquid Suspensions of Nanoparticles(Nanofluids) Based on Rheology,” *Particleology*, Vol. 7, No. 2, pp. 151~157.
- (9) Prasher, R., Song, D. and Wang, J., 2006a, “Measurements of Nanofluid Viscosity and Its Implications for Thermal Applications,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 89, No. 13, pp. 133108-1-3.
- (10) Prasher, R., Phelan, P. and Bhattacharya, P., 2006b, “Effect of Aggregation Kinetics on Thermal Conductivity of Nanoscales Colloidal Solutions(Nanofluid),” *Nano Lett.*, Vol. 6, No. 7, pp. 1529~1534.
- (11) Periyasamy, M. K., Jegadeesan, K., Rengasamy, T., Seshachalam, S. and Sivan, S., 2015, “Review on Nanofluids Theoretical Thermal Conductivity Models,” *Engineering Journal*, Vol. 19, No. 1, pp. 67~83.
- (12) Zhu, N. and Vafai, K., 1999, “Analysis of Cylindrical Heat Pipes Incorporating the Effects of Liquid-Vapor Coupling and Non-Darcian Transport-A Closed form Solution,” *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 42, No. 18, pp. 3405~3418.
- (13) Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K. and Hishinuma, N., 1993, “Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra Fine Particles,” *Netsu. Bussei.*, Vol. 7, No. 4, pp. 227~233.
- (14) Lee, S., Choi, S., Li, S. and Esatman J. A., 1999, “Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing oxide Nanoparticles,” *J. HEAT transfer*, Vol. 121, No. 2, pp.280~289.
- (15) Wang, X., Xu, X. and Choi, S., 1999, “Thermal Conductivity of Nanoparticle Fluid Mixture,” *J. Thermophys. Heat Trans.*, Vol. 13, No. 4, pp. 474~480.
- (16) Fei, D., Dingtina, K. and Alexandru, C., 2011, “Viscosity Affected by Nanoparticle Aggregation in Al₂O₃ Water Nanofluids,” *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 248~253.
- (17) Tanman, I., Turgut, A., chirtoc, M., Schuchmann, H. P. and Tanvaman, S., 2008, “Experimental Investigation of Viscosity and Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized Ceramic Particle,” *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 99~103.