

# 동심이중관내 나노유체의 자연대류열전달에 관한 수치적 연구

최 훈 기,\* 박 재 훈, 유 근 중

창원대학교 기계공학부

## NUMERICAL STUDY ON NATURAL CONVECTION HEAT TRANSFER IN A NANOFUID FILLED CONCENTRIC ANNULUS

H.K. Choi,\* J.H. Park and G.J. Yoo

Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National Univ.

*In the present study, the homogeneous model is used to simulate the natural convection heat transfer of the CuO-water nanofluid in a concentric annular enclosure. Simulations have been carried while the Rayleigh number ranges from  $10^3$  to  $10^6$ , solid volume fraction ranges from 0.01 to 0.04 and the radius ratio varies between 0.1 and 0.7. Results are presented in the form of streamlines, isotherm patterns and averaged Nusselt numbers for different values of solid volume fraction, radius ratio of the annulus and Rayleigh numbers. The results show that by decreasing the radius ratio and/or increasing the Rayleigh number, the averaged Nusselt number increases. Also the heat transfer rate increases as increased solid volume fractions.*

**Key Words :** 나노유체(Nanofluid), 자연대류(Natural Convection), 동심이중관(Concentric Annulus), 대류열전달계수(Convective Heat Transfer Coefficient), 입자체적농도(Particle Volume Concentration), 반경비(Radius Ratio), Rayleigh Number(Ra)

### 1. 서 론

대류열전달율을 증가시키는 방법으로는 열교환장치의 표면적 확대, 유체유동 속도증가, 경계조건 및 유체의 물성치 변화 등 다양한 방법이 있다. 이들 중 열전도도가 낮은 물이나 오일에 나노입자크기의 열전도도가 큰 금속 또는 금속산화물을 섞어 사용하면 열전달 성능을 향상시킬 수 있다.

Eastman et al.[1]과 Lee et al.[2]에 의하면 열전도도가 우수한 금속 또는 금속산화물 입자들을 액체에 섞어 강제대류 유동을 발생시키면 입자의 농도가 증가할수록 열전달 성능이 획기적으로 향상됨을 보였다. 하지만 자연대류는 강제대류에 비하여 유동의 강도가 현저히 낮으므로 자연대류 유동에서 나노유체의 열전달이 향상되는지, 또는 저하되는지 에 대한 많은 논쟁이 있어 왔다. Khanafer et al.[3]은 수치적 방법으로 케비티 내부의 자연대류 열전달 특성을 구하였는데 나노입자

농도가 증가할수록 Nusselt 수가 증가함을 보였다. 하지만 Rashmi et al.[4]은 수치적 연구에서 Rayleigh수가 증가하면 나노유체의 열전달이 증가하나 나노유체의 입자농도가 증가할수록 Nusselt수는 감소됨을 보였다. 이러한 결과는 앞서 말한 대부분의 수치적 연구결과들과는 상반되는 것이다. Choi et al.[5]은 이러한 논쟁의 원인이 이전의 수치적 연구에서 Nusselt 수를 실험적 연구와 다르게 정의하였기 때문이라고 규명하였다. 자연대류의 나노유체 열전달에 대한 대부분의 문헌에서는 열전달 특성을 Nusselt 수로 표현하였다. Nusselt 수는 대류열전달계수 뿐만 아니라 유체의 열전도도의 크기도 중요한 요소가 된다. 많은 연구문헌에서는 대부분 기본유체의 열전도도를 사용한 Nusselt 수에서는 나노입자 농도가 증가하면 Nusselt 수가 증가함을 보였다. 하지만 Rashmi et al.[4]과 같이 나노유체의 열전도도를 사용한 경우나노입자 농도가 증가하면 Nusselt 수에서는 오히려 감소함을 보였다. 따라서 나노유체의 열전달 특성을 표현하는 데는 Nusselt 수의 정의에 따라 경향이 달라지므로 오히려 대류열전달계수의 크기로 비교함이 더 바람직하다고 판단된다.

지금까지 수행된 자연대류열전달은 케비티나 원형관의 내부유동에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있다. 하지만 동심

Received: April 29, 2016, Revised: September 9, 2016,

Accepted: September 9, 2016.

\* Corresponding author, E-mail: hkchoi@changwon.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.3.001>

© KSCFE 2016

이중관내의 자연대류 열전달은 태양열 집열관, 냉동기의 증발기 및 응축기, 전자장비의 냉각장치, 열저장 장치 등 많은 공학적인 영역에서 응용되고 있으므로 매우 중요하다. 동심이중관내의 자연대류 열전달 특성에 관한 연구는 몇몇 연구가 보고되었다. Kuehn and Goldstein[6,7]은 동심 및 편심 이중관에 대한 자연대류열전달 현상을 실험과 이론적인 방법으로 구하였다. 특히 실험의 결과는 최근까지 수치해석의 타당성 검토하는데 많이 이용되고 있다. Glakpe et al.[8]과 Guj et al.[9]은 수치적 결과와 실험을 통한 결과를 비교하는 연구를 진행하였다. 나노입자의 농도가 증가할수록 자연대류열전달이 향상됨을 보였다.

동심이중관은 파이프 외벽과 내벽 사이에서의 유동이므로 일반 파이프유동보다도 벽의 영향을 더 많이 받는 기구학적인 형상을 가진다. 외벽과 내벽사이의 간극이 좁아질수록 유체점성의 영향을 더 받게 되어 자연대류의 열전달특성에 영향을 주게 된다. 따라서 본 연구에서는 Rayleigh 수, 나노입자의 체적농도 및 동심이중관의 내·외부 반지름의 비인 반경비를 변화시키며 수치해석을 수행하여 CuO-Water 나노유체의 동심이중관내 자연대류 열전달 특성을 구하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식

나노유체는 일반적으로 입자크기가 대개 100 nm이하이므로 나노입자들과 유체사이에 slip이 발생되지 않는 단일상(single phase) 및 입자와 유체사이의 열적인 평형이 이루어진다는 가정을 할 수 있다. 특히 Choi et al.[5]는 자연대류 열전달에서는 단일상모델을 적용하여도 2상모델과의 차이가 거의 없음을 밝혔다. 따라서 본 연구에서는 단일상모델의 질량보존 방정식, 운동량보존방정식 및 에너지보존방정식을 적용하였다. Rayleigh 수가  $10^6$  이하이므로 층류유동의 나노유체이며, 벽면 간 온도차이가 10도 이하이므로 부력항에 대하여 Boussinesq 근사법을 적용하였다. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu_{nf} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \beta_{nf} g (T - T_0) \quad (3)$$

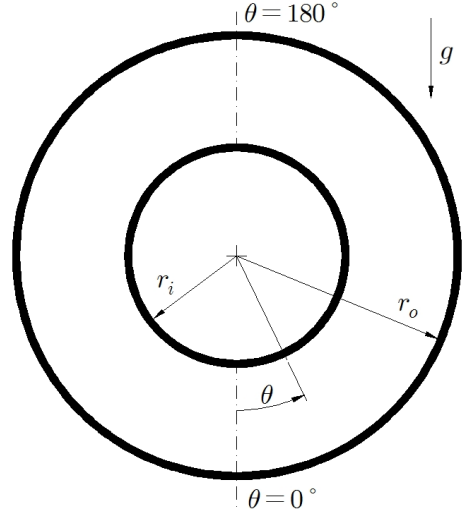


Fig. 1 Definition of numerical domain

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

여기서  $u$ ,  $v$ 는 속도,  $P$ 는 압력,  $T$ 는 온도를 나타내며 하첨자  $nf$ 는 나노유체의 물성치를 의미한다.

### 2.2 경계조건

지배방정식 (1)-(4)는 비선형 미분방정식으로 해를 구하기 위하여 적합한 경계조건이 필요로 한다. Fig. 1은 본 연구에서 이용된 동심이중관의 형상을 보여준다. 물은 기본유체로 설정하였고 산화구리(CuO)를 물에 혼합시킨 나노유체이며 파이프 외벽은 저온, 내벽은 고온의 일정한 온도조건을 부여하였다.

### 2.3 물성치

나노입자는 기본유체에 균일하게 분산되며, 유체는 단일상으로 간주하였고, 나노입자 및 기본유체(물)와 혼합된 나노유체의 물성치는 다음의 식들로부터 구하였다.

#### 1) 밀도

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (5)$$

#### 2) 비열

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho C_p)_f + \phi (\rho C_p)_p \quad (6)$$

#### 3) 점도

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (7)$$

4) 열전도도

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)} \quad (8)$$

위 식들에서  $\phi$ 는 나노입자 체적농도를 나타내고 하첨자 p는 나노입자, f는 기본유체, nf는 나노유체를 의미한다.

식 (5)에 표현된 밀도는 Pak and Choi[10]의 고전적인 상관식을, 식 (6)의 비열은 Maiga et al.[11]이 제시한 상관식을 적용하였다. 점성계수는 식 (7)과 같이 Brinkman[12]이 제시한 모델식을 사용하였으며, 열전도도는 식 (8)과 같은 Maxwell [13]이 제시한 모델식을 적용하였다. 기본유체는 물이며 상온 (20℃)상태를 기준으로 물성치를 설정하였다. 수치해석에 적용한 물과 나노입자인 CuO의 밀도( $\rho$ ), 비열(Cp), 열전도도(k), 점성계수( $\mu$ ) 그리고 열팽창계수( $\beta$ )를 Table 1에 나타내었다. CuO 나노입자가 혼합된 나노유체는 일반적으로 온도에 의존적이다. 하지만 점성계수나 열전도도에 대하여 나노입자의 체적농도( $\phi$ )가 1% 및 4% 등의 일부 제한적인 온도 상관관계식이 알려져 있지만 그 이외의 체적농도에서는 검증이 되지 않고 있는 실정이므로 본 연구에서는 온도와는 무관하다는 조건을 적용하였다.

2.4 무차원수

동심이중관에서의 자연대류열전달 특성을 표현하는데 적용할 수 있는 대표적인 무차원수는 Prandtl 수,  $Pr = C_p \mu / k_{nf}$ , Rayleigh Number 수,  $Ra = g\beta\Delta T r_h^3 / \alpha \nu$ . 반경비,  $\sigma = r_i / r_o$  등이 있다. 대류열전달 정도를 나타내는 무차원수인 국소Nusselt 수를 구하기 위하여 국소대류열전달계수(h)의 정의가 필요하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = \frac{-k_{nf} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_w}{T_H - T_C} \quad (9)$$

여기서 w는 벽면을 나타내며  $T_H$ 와  $T_C$ 는 내벽온도와 외벽온도를 의미한다.

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $C_p$ 는 비열,  $k$ 는 열전도도,  $\mu$ 는 점성계수,  $\beta$ 는 열팽창계수를 의미한다.

내부벽면 또는 외부벽면 둘레에서의 대류열전달계수의 평

Table 1 Thermo physical properties of water and nanoparticles

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.k]	$k$ [W/m.k]	$\mu$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	$\beta$ [1/K]
H <sub>2</sub> O	997	4179	0.613	$9.57 \times 10^{-4}$	$21 \times 10^{-4}$
CuO	6500	540	18	-	$0.85 \times 10^{-4}$

균값은 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\bar{h} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi h(\theta) d\theta \quad (10)$$

동심이중관은 내벽(하첨자 “ i ”)과 외벽(하첨자 “ o ”)으로 구성되어 있으므로 두 벽면의 평균대류열전달계수( $h_{avg}$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$h_{avg} = \frac{\bar{h}_i + \bar{h}_o}{2} \quad (11)$$

평균 Nusselt 수는 다음과 같은 2가지의 식으로 표현이 가능하다.

$$Nu_{avg} = \frac{h_{nf,avg} r_h}{k_f} \quad (12)$$

$$Nu_{nf,avg} = \frac{h_{nf,avg} r_h}{k_{nf}} \quad (13)$$

나노유체의 Nusselt 수에 대하여 대부분의 연구자들은 기본유체에 대하여 나노유체의 Nusselt 수의 변화정도를 구하기 위하여 식 (12)와 같이 기본유체의 열전도도를 기반으로 한 Nusselt 수를 사용하고 있다. 하지만 식 (1)-(4)와 같이 지배방정식의 모든 물성치는 나노유체 물성으로 표현하기 때문에 Rashmi et al.[4]와 Choi et al.[5]이 표현한 식 (13)과 같이 나노유체의 열전도도를 기반으로 한 Nusselt 수를 사용하는 경우도 있다.

2.5 코드검증

본 연구에 사용된 해석 기법의 격자수 독립성 검증을 위해  $Ra = 10^4$ ,  $\sigma = 0.1$ ,  $\phi = 0.02$ 의 조건에서 2가지 격자수(반경방향 × 원주방향)에 대하여 해석을 수행하였다. 본 해석에서 적용한  $120 \times 180$ 의 격자수와 이 격자수보다 1.5배인  $180 \times 270$  격자수에 대한 Nusselt 수의 결과를 비교하였다. Nusselt 수 크기의 편차가 1%미만의 결과를 도출하여 격자수의 변화에 대한 의존성이 거의 없음이 확인되어  $120 \times 180$ 의 격자수를 적용할 수 있었다. 상용프로그램인 ANSYS FLUENT[14]를 이용하였으며, 적용된 차분법은 충류유동이므로 역승도식(power law scheme)을 사용했다. 나노유체의 단일상모델에 대한 타당성을 검증하기 위하여 Abu Nada et al.[15], Sheikhzadeh et al.[16] 및 Fallah et al.[17]의 수치해석 Nusselt 수와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 크기와 경향이 비교적 잘 일치하여 적용

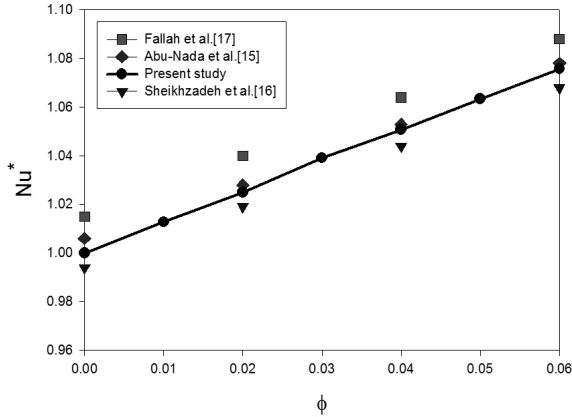


Fig. 2 Comparison of present study with numerical results

한 수치적 모델은 그 타당성이 입증됨을 볼 수 있다.

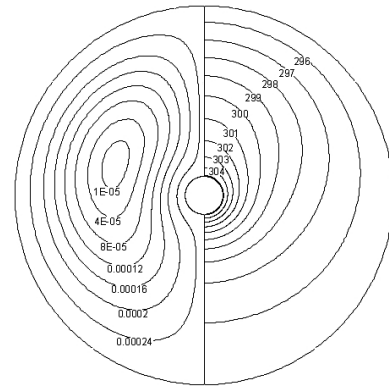
### 3. 결과 및 고찰

동심이중관 내부 CuO-Water 나노유체의 자연대류 열전달에 대하여 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 Rayleigh 수, 나노입자 체적농도 및 반경비가 될 것이다. 본 연구에서는 기반유체 Rayleigh 수( $Ra_f = 10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ ), 반경비( $\sigma = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ ) 그리고 CuO-나노입자의 체적농도( $\phi = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ ) 값을 변화시키면서 해석을 수행하여 열전달 특성을 구하였다.

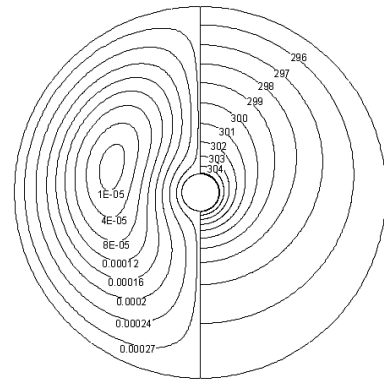
#### 3.1 유체유동장 및 온도분포

나노유체의 가장 중요한 열전달 특성은 열전도도가 기반유체보다 증가함으로 대류열전달 크기가 증가한다고 알려져 있다. 하지만 나노유체 점성의 관점에서는 기반유체보다 식 (7) 과 같이 나노입자에 의하여 점성이 기반유체보다 오히려 증가하며 이로 인하여 대류유동을 방해하는 특성이 나타나게 된다. 동심이중관에서는 내벽과 외벽사이로 유체가 흐르는 구조이기 때문에 그 간극이 좁아질수록 점성의 영향을 더 많이 받게 된다. 이런 관점에서 동심이중관에서의 반경비는 자연대류 열전달 특성을 규명하는데 아주 중요한 물리량이 된다.

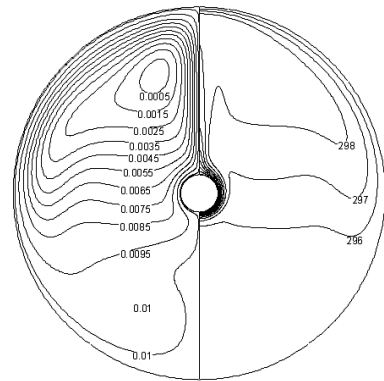
열전달 특성을 보다 세밀하게 관찰하기 위하여 등유선과 등온선 분포를 Fig. 3에 그려보았다. 반경비,  $\sigma = 0.1$ , Rayleigh 수,  $Ra = 10^3$ 의 값을 고정하고 나노입자의 농도 영향을 파악하기 위하여  $\phi = 0.0$ 인 Fig. 3(a)와  $\phi = 0.04$ 인 Fig. 3(b)에 등온선과 등유선의 분포를 나타내어 비교하였다. 동일한 Rayleigh 수와 반경비에 대하여 체적농도가 증가할수록 온도 경계층 두께가 얇아짐을 볼 수 있다. 이는 체적농도가 증가하



(a)  $Ra = 10^3, \phi = 0.0$



(b)  $Ra = 10^3, \phi = 0.04$



(c)  $Ra = 10^6, \phi = 0.04$

Fig. 3 Distribution of streamlines and isothermal lines for  $\sigma = 0.1$

면 입자들의 불규칙한 운동이 향상되어 열전달이 증가되기 때문이다.

Rayleigh 수의 영향을 규명하기 위하여 반경비,  $\sigma = 0.1$ , 나노입자의 농도,  $\phi = 0.04$ 를 고정하고  $Ra = 10^3$ 인 Fig. 3(b)와

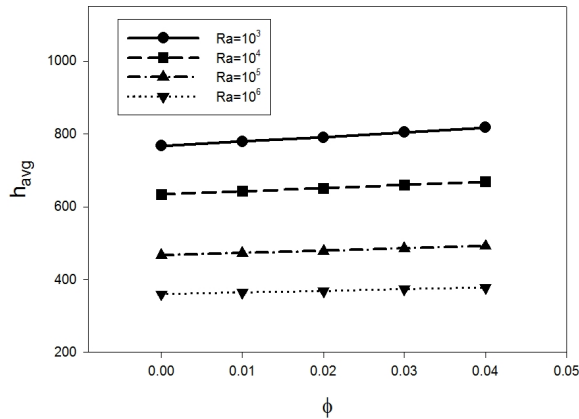


Fig. 4 Plots of the averaged heat transfer coefficient( $\sigma = 0.1$ )

$Ra = 10^6$ 인 Fig. 3(c)에 등유선과 등온선의 분포를 나타내어 비교하였다. Rayleigh 수가 작은  $Ra = 10^3$ 인 경우에는 유동의 형상이 단면의 상하에서 거의 대칭적인 유동을 하고 그 강도는 현저히 약화됨을 볼 수 있다. Rayleigh 수를 증가시킨  $Ra = 10^6$ 인 경우에는 유동의 최대점이 상부단면으로 이동하게 되고 유동의 강도도  $Ra = 10^3$ 인 경우에 비하여 훨씬 강하게 형성됨을 볼 수 있다. 아울러  $Ra$  수를 증가할수록 온도경계층은 더욱 얇아짐을 볼 수 있다. 그림에서 보듯이 나노유체의 자연대류에서는 유동의 강도와 온도경계층의 두께는 주어진 체적농도보다는  $Ra$  수의 영향을 더 크게 받음을 알 수 있다.

### 3.2 대류열전달 특성

Fig. 4는 식 (11)로 표현되는 동심이중관의 내벽과 외벽의 평균대류열전달계수를 나타낸 그림이다. Fig. 3에 알 수 있듯 동일한 나노입자 농도에 대하여 Rayleigh수가 증가할수록 부력이 강하게 형성되어 자연대류의 유동이 활발히 형성되고 열 경계층이 얇아짐으로 평균대류열전달계수도 현저히 증가함을 볼 수 있다. Rayleigh 수가 일정하고 나노입자의 체적농도가 증가하면 대류열전달계수는 점진적으로 증가함을 볼 수 있다. Rayleigh 수가 작은 경우에는 자연대류의 강도가 약하여 체적농도가 증가하더라도 대류열전달계수의 증가율이 미약함을 볼 수 있다. 하지만 Rayleigh 수가 큰 경우는 나노입자의 체적농도가 증가하면 대류열전달계수의 증가율이 향상됨을 볼 수 있다.

나노유체에서의 Nusselt 수를 표현하는 방법은 식 (12)-(13)의 2가지 방법으로 표현된다. 일반적으로 나노입자의 농도가 증가하면 Fig. 5와 같이 나노유체의 열전도도 증가하게 된다. 입자의 체적농도가 증가하면 Fig. 4에서와 같이 대류열전달이 활성화 되어 대류열전달계수도 증가하게 된다. 하지만 대류열

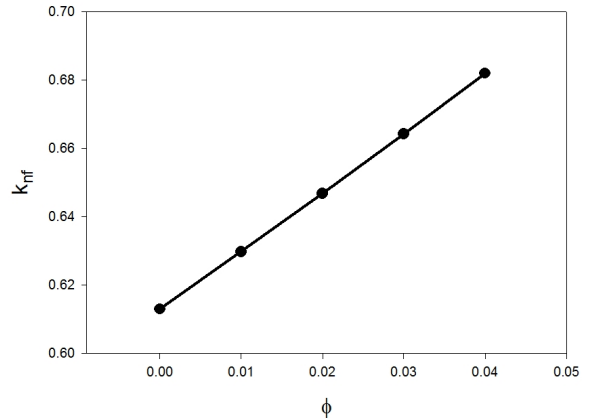


Fig. 5 Variation of thermal conductivity as the volume fraction

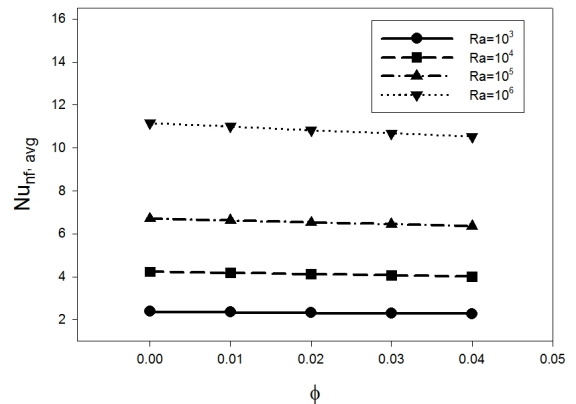


Fig. 6 Plots of the averaged Nusselt number based on Eq. (13)

전달계수의 증가율이 열전도도 증가율보다 적어져 Rashmi 등이 제시한 식 (13)과 같이 정의되는 Nusselt 수는 체적농도가 증가함에 따라 오히려 감소함을 볼 수 있다. Fig. 6는 내벽과 외벽에서의 평균 Nusselt 수를 나타낸 그림이다. 평균 Nusselt 수는 오히려 감소하게 되는데 이는 대류열전달계수의 증가율이 열전도도 증가율보다 적어지므로 나타나는 현상이자 대류열전달이 약화된 것이 아님을 알 수 있다. 이를 통하여 Nusselt 수의 정의는 식 (13)의 나노유체의 열전도도를 기준으로 하는 Nusselt 보다는 기반유체의 열전도도를 기준으로 표현한 식 (12)의 방법이 물리적으로 더 타당하다고 판단을 할 수 있다.

Fig. 6에서 본 바와 같이 나노입자의 체적농도와 Rayleigh 수는 대류열전달계수에 영향을 끼치는 중요한 물리량임을 알 수 있었다. 이러한 물리량은 평균 Nusselt 수도 비슷한 영향을 미치게 된다.

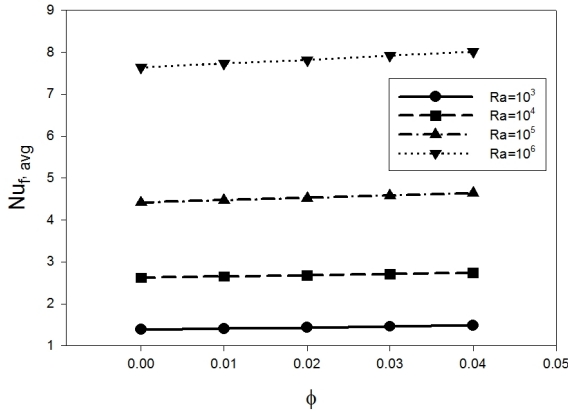
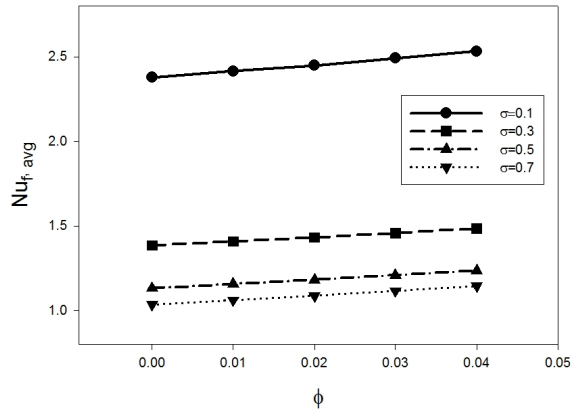


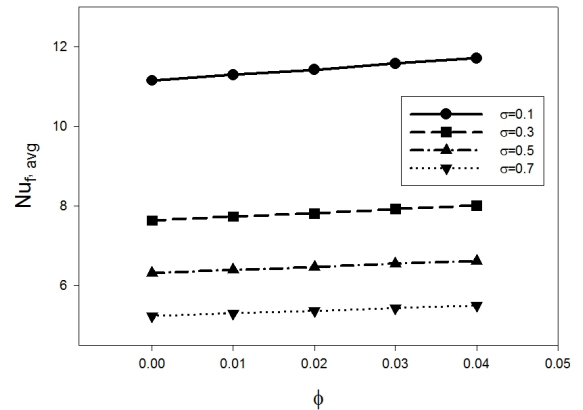
Fig. 7 Variation in the averaged Nusselt number with the nanoparticle volume fraction and Rayleigh number ( $\sigma = 0.3$ )

Fig. 7은 반경비  $\sigma = 0.3$ 인 경우에 대하여 나노입자 체적농도와 Rayleigh 수의 변화에 따른 평균 Nusselt 수의 크기를 나타낸 그림이다. 이때의 Nusselt 수는 식 (12)에서 정의한 기반 유체의 열전도도를 기준으로 한 값이다. 그림에서와 같이 Rayleigh 수가  $Ra_f = 10^3$ 인 경우에는 체적농도의 증가에 비하여 평균 Nusselt 수는 증가하지만 증가율은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. Rayleigh 수가 큰  $Ra_f = 10^6$ 인 경우는 체적농도의 증가에 따른 평균 Nusselt 수의 증가율도  $Ra_f = 10^3$ 인 경우보다는 훨씬 커짐을 볼 수 있다. 동일한 체적농도에 대하여 Rayleigh 수를 변화시키면서 평균 Nusselt 수 크기의 변화를 구하였다. 그림에서와 같이 동일한 체적농도에서 Rayleigh 수가 증가하면 평균 Nusselt 수는 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 동심이중관내 나노유체의 자연대류 열전달은 나노입자의 체적농도보다는 Rayleigh 수의 영향이 훨씬 지배적임을 알 수 있다.

동심이중관에서 자연대류 특성에 큰 영향을 주는 물리량이 나노입자의 체적농도, Rayleigh 수뿐만 아니라 반경비도 아주 중요한 역할을 한다. Fig. 8은 동심이중관의 반경비 변화에 따른 평균 Nusselt 수를 나타낸 그림이다. 동일한 Rayleigh 수와 나노입자의 체적농도에 대하여 반경비를 증가시키면 평균 Nusselt 수가 감소함을 볼 수 있다.  $\sigma = 0.1$ 인 경우에 비하여 반경비가 큰  $\sigma = 0.3, 0.5, 0.7$ 에서 평균 Nusselt 수의 절대값은 현저히 작아진다. Rayleigh 수가  $Ra_f = 10^3$ 인 경우에는 자연대류의 유동강도가 약하므로 반경비가 큰  $\sigma = 0.5$ 와  $\sigma = 0.7$ 에서의 평균 Nusselt 수는 거의 비슷한 크기를 가진다. Rayleigh 수가  $Ra_f = 10^6$ 인 경우는 자연대류의 강도가 강해지므로 평균 Nusselt 수의 절대값은 현저히 증가하게 됨을 볼 수 있다. 아울러 반경비가 작은  $\sigma = 0.1$ 에서 가장 큰 값을 가지게 되며 반경비가  $\sigma = 0.3, 0.5, 0.7$ 로 증가하면 벽면의 점성



(a)  $Ra = 10^3$



(b)  $Ra = 10^6$

Fig. 8 Variation in the averaged Nusselt number with the nanoparticle volume fraction and radius ratio

영향으로 평균 Nusselt 수의 크기는 감소함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

- (1) 나노입자의 체적농도가 증가하면 대류열전달계수는 증가하므로 Nusselt 수에 대한 정의는 식 (12)와 같이 기반 유체의 열전도도를 기반으로 정의하는 것이 더 타당하다고 판단된다.
- (2) 동심이중관내 나노유체의 자연대류에서 나노유체 입자의 체적농도 및 Rayleigh 수가 커지면 유동의 강도는 증가하고 온도경계층은 더욱 얇아지게 되며 이로 인하여 평균 Nusselt 수도 증가하게 된다.
- (3) 반경비가 증가하게 되면 벽면의 점성영향으로 동일한 입자의 체적농도 및 Rayleigh 수에 대하여 평균 Nusselt 수의 크기는 감소하게 된다.

## 후 기

본 논문은 창원대학교 2015-2016년 연구비 지원으로 작성되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- [1] 2001, Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W. and Thompson, L.J., "Anomalous Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles," *Appl Phys. Lett.*, Vol.78, No.6, pp.718-720.
- [2] 1999, Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S. and Eastman, J.A., "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *Journal of Heat Transfer*, Vol.121, pp.280-289.
- [3] 2003, Khanafer, K., Vafai, K. and Lightstone, M., "Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.46, pp.3639-3653.
- [4] 2011, Rashmi, W., Ismail, A.F., Khalid, M. and Faridah, Y., "Cfd Studies on Natural Convection Heat Transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluids," *Heat and mass transfer*, Vol.47, No.10, pp.1301-1310.
- [5] 2013, Choi, S.K., Kim, S.O. and Lee, T.H., "Computation of Laminar Natural Convection of Nanofluid Using Buongiorno's Nonhomogeneous Model," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.18, No.4, pp.25-34.
- [6] 1976, Kuehn, T.H. and Goldstein, R.J., "An Experimental and Theoretical Study of Natural Convection in the Annulus between Horizontal Concentric Cylinders," *Journal of Fluid mechanics*, Vol.74, No.04, pp.695-719.
- [7] 1980, Kuehn, T.H. and Goldstein, R.J., "A Parametric Study of Prandtl Number and Diameter Ratio Effects on Natural Convection Heat Transfer in Horizontal Cylindrical Annuli," *Journal of Heat Transfer*, Vol.102, No.4, pp.768-770.
- [8] 1986, Glakpe, E.K., Watkins Jr, C.B. and Cannon, J.N., "Constant Heat Flux Solutions for Natural Convection between Concentric and Eccentric Horizontal Cylinders," *Numerical Heat Transfer*, Vol.10, No.3, pp.279-295.
- [9] 1992, Guj, G., Iannetta, S. and Moretti, G., "Experimental Analysis of Thermal Fields in Horizontally Eccentric Cylindrical Annuli," *Experiments in fluids*, Vol.12, No.6, pp.385-393.
- [10] 1998, Pak, B.C. and Choi, Y.I., "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles," *Exp. Heat Transf.*, Vol.1, pp.151-170.
- [11] 2005, Maiga, S.E.B., Palm, S.J., Nguyen, C.T., Roy, G. and Galanis, N., "Heat Transfer Enhancement by Using Nanofluids in Forced Convection Flows," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.26, No.4, pp.530-546.
- [12] 1952, Brinkman, H.C., "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions," *J. Chern. Phys.*, Vol.20, pp.571-581.
- [13] 1904, Maxwell, J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism, *Oxford University Press*, Cambridge.
- [14] 2014, *Fluent 14.5 User Manual*, Fluent Incorporated.
- [15] 2008, Abu-Nada, E., Masoud, Z. and Hijazi, A., "Natural Convection Heat Transfer Enhancement in Horizontal Concentric Annuli Using Nanofluids," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.35, No.5, pp.657-665.
- [16] 2013, Sheikhzadeh, G.A., Arbaban, M. and Mehrabian, M.A., "Laminar Natural Convection of Cu-water Nanofluid in Concentric Annuli with Radial Fins Attached to the Inner Cylinder," *Heat and Mass Transfer*, Vol.49, No.3, pp.391-403.
- [17] 2015, Fallah, K., Ghaderi, A., Zadeh, N.S. and Borghei, M.H., "Simulation of natural convection heat transfer using nanofluid in a concentric annulus," *Thermal Science*, Issue.00, pp.78-89.