

# 물-미립자 현탁액의 난류 열전달 향상에 관한 수치해석적 연구

정 세 훈\* · 손 창 현\*\*

## Numerical Study about Heat Transfer Enhancement of Water-Microparticles Suspension

S. H. Jung C. H. Sohn

**Key words** : Microparticle(고체입자), Non-Newtonian fluid(비뉴턴유체), Shear rate(전단율), Turbulence(난류), Eddy thermal conductivity(와열전도율), Heat transfer enhancement(열전달향상)

### Abstract

The present numerical study investigates heat transfer enhancement mechanism for suspensions of polystyrene particles in water. Numerical simulations were done for turbulent hydrodynamic fully developed flows in a circular duct with constant wall heat flux. The experimental results of microparticle suspensions show 25-45% heat transfer enhancement over those of water. The present numerical results show the main parameter for the heat transfer enhancement of microparticle suspension in a circular duct is the change of velocity profile by the non-Newtonian fluid behavior.

### 기호설명

C : 비열  
Gz : 그래츠 수  
K : 벽법칙 상수  
k : 난류 에너지  
n : 벽법칙 지수  
p : 압력  
Pr : 프란틀 수

r : 반지름방향 좌표  
R : 관 반지름  
Re : 레이놀즈 수  
Nux : 누셀 수  
T : 온도  
 $v_r$  : r 방향 유속  
 $v_\theta$  :  $\theta$ 방향 유속  
 $v_z$  : z 방향 유속  
y : 평판 중심에서 거리

\* 경북대학교 대학원(원고접수일 : 99년 8월)

\*\* 경북대학교 기계공학부

z : 입구에서 거리방향 좌표

그리스 문자

$\gamma$  : 전단율

$\epsilon$  : 난류 소산율

$\rho$  : 밀도

$\mu$  : 점도

$\mu_c$  : 난류 겉보기 점도

하첨자

ave : 평균값

### 1. 서 론

열전달 향상에 관한 관심은 에너지 이용의 효율성과 열교환기의 성능 향상을 위해서 오래 전부터 다양하게 연구되어 왔다. 최근 미립 피복(micro-capsulation)시킨 상변환 물질을 이용한 현탁액(suspension)은 큰 열용량과 상변화때의 잠열 및 그에 따른 열전달율의 향상등으로 열전달 매체로 많은 관심을 받고 있다. 그런데 상변환 물질을 포함한 현탁액에 관한 열전달 특성에 관한 연구는 상변환으로 인해 그 열전달 특성을 분석하기 힘든 것으로 알려져 있으며, 이에 따라 상변환을 수반하지 않은 경우의 고체 미립자가 물에 혼합된 현탁액의 열전달 특성을 실험적으로 많이 연구하였다.

Ahuja<sup>1)</sup>는 염화나트륨으로 비중을 조정한 폴리스티렌 수용액의 층류 유동 열전달에 대한 실험을 하였으며, 50~100 $\mu\text{m}$  폴리스티렌을 첨가함에 따라 유효열전도 계수의 증가가 2~3배 증가하여 열전달 성능의 향상을 보여 주었다. Kofanov<sup>2)</sup>는 분필가루, 석탄, 모래 등 매우 다양한 고체 미립자를 첨가물로 사용해서 실험을 하였고, 고체 첨가물을 사용했을 때의 누셀 수를 고체 첨가물의 농도, 밀도비, 비열비, 내부관경과 첨가 미립자의 직경비의 관계를 포함하는 일반적인 식을 유도하였다. Park<sup>3)</sup> 등은 난류 영역인  $10^4 < \text{Re} < 10^5$ ,  $5.6 < \text{Pr} < 10.7$ 의 범위에서 13nm와 27nm의 입자크기로  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ 를 포함하는 수용액의 유동과 열전달을 실험하였다. 그 결과 이상혼합물을 사용했을 때 추가적인 동력이 필요 없이 열전달 향상이 이루

어 졌으며  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  수용액을 사용했을 때는 60%,  $\text{TiO}_2$  수용액을 사용했을 때는 30%의 열전달 향상이 있음을 보고하였다. 최근 장<sup>4,5)</sup>등이 물과 폴리스티리렌(polystyrene) 미립자를 혼합한 현탁액으로 난류 열전달 특성을 실험하여 열전달 향상원인으로 미립자를 포함한 현탁액의 전단율 증가에 따른 유효 열전도율의 증가를 그 원인으로 설명하였고, Kofanov<sup>2)</sup> 방식으로 Dittus-Boelter식에 열전도율의 증가비를 포함한 수정식을 보고하였다.

지금까지의 연구결과에서 미립자를 포함한 현탁액의 열전달 향상원인으로 미립자에 의한 미세 대류(micro-convection)로 유효 열전도율이 증가하여 대류 열전달을 향상시켰다는 주장<sup>6)</sup>과 미립자의 첨가로 인한 비뉴턴성 점도 특성으로 벽 부근에서의 속도 구배의 증가로 열전달이 향상된다는 주장이 있다. 본 연구에서는 수치적인 방법으로 장 4,5)등이 수행한 실험조건과 같게하여 위에서 언급한 두가지 서로 다른 열전달 향상기구중 어느 것이 열전달 향상의 주된 기구(mechanism)인지를 규명하고자 한다.

### 2. 지배 방정식 및 경계조건

#### 2.1 지배 방정식

Fig. 1은 본 연구의 개략도와 경계조건을 나타내고 있다. 열 경계조건은 관의 외부벽에서 일정한 열유속이 가해지고, 수력학적인 경계 조건으로 입구 조건은 완전히 발달된 유동을 주었으며 출구 조건으로는  $du/dx=0$ 를 주었다.

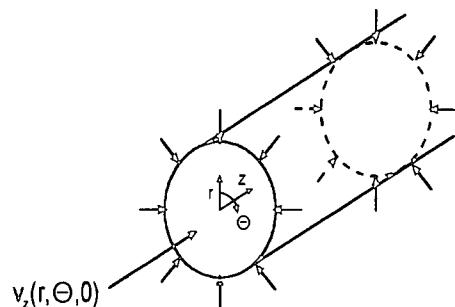


Fig. 1 Hydrodynamic and Thermal boundary conditions

정상상태, 비압축성, 난류유동으로써 부력의 영향은 무시하여  $\theta$ 방향의 도함수는 영으로 가정하였고, 실험에 사용한 입자의 평균 직경이  $700\mu\text{m}$ 로 매우 작기 때문에 입자가 유동에는 영향을 주지 않는 것으로 가정하였다. 사용한 원주 좌표에서의 지배 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (rv_z v_z) \right] = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\rho v_\theta^2}{r} + \mu \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) \right) \quad (2)$$

$$\rho \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_z v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (rv_z v_z) \right] = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] \quad (3)$$

$$\rho \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (rv_z T) \right] = -\frac{\mu}{Pr} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_z}{\partial r} \right) \right] \quad (4)$$

여기서  $\mu = \mu_0 + \mu_t$ 이다.

난류 모델은 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

$$\rho \left( v_r \frac{\partial k}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\mu_t}{C_k} r \frac{\partial k}{\partial r} \right) + G - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\rho \left( v_r \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\mu_t}{C_\epsilon} r \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad (7)$$

여기서  $C_\mu = 0.09$ 이며,  $G$ 는 난류 운동 에너지 생성항을 나타내고 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \mu_t \left\{ 2.0 \left[ \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v_z^2}{\partial r} \right) \right\} \quad (8)$$

난류유동의 벽면부근 계산을 위해 (9)식과 같은 벽법칙을 사용하였다.

$$\frac{v_z}{v_\tau} = \frac{1}{x} \ln(y^+ E) \quad (9)$$

$$y^+ = \frac{y v_\tau}{\nu}, v_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$E = 9.7, \kappa = 0.42$$

여기서  $y$ 는 벽면에서 부터의 거리이다.

### 2.2 비뉴턴 유체의 점도 모델

비뉴턴 유체의 점도는 뉴턴 유체와는 달리 전단율의 함수로 (10)식의 멱법칙 모델을 사용하였다.

$$\mu = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (10)$$

여기서  $n$ 은 멱법칙 지수이며  $n=1.0$ 일 때 뉴턴 유체가 되어 점도는 상수가 된다.

### 2.3 비뉴턴 유체의 난류 모델

비뉴턴 유체의 점도를 (10)식으로 사용하면 비뉴턴 유체의 벽면 전단응력은 (11)식과 같다.

$$\tau_w = \mu \dot{\gamma}_w = K \left( \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial y} \right)_w^n \quad (11)$$

무차원 속도와 벽면에서의 거리는 (10)식을 (9)식에 대입하면 (12)식과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\bar{v}_z}{v_\tau} = \frac{\bar{v}_z}{v_\tau} \quad y^+ = \frac{y v_\tau^{(2-n)/n}}{(K/\rho)^{1/n}} \quad (12)$$

Edwards<sup>6,7)</sup>는 (12)식으로 표현한 무차원 속도와 벽면에서의 거리가 뉴턴 유체의 벽법칙을 만족함을 밝혔고, 점도를 식 (10)의 비뉴턴 유체의 점도를 사용한다면 뉴턴유체의 난류모델을 수정 없이 적용할 수 있음을 보고하였다. 그리고, 난류에서의 와 열전도율  $k_t$ (eddy conductivity)는 레이놀즈 상사로부터 다음과 같이 구해진다.

$$k_t = c \cdot \mu_t \quad (13)$$

여기서,  $c$ 는 유체의 비열이다.

### 3. 수치 해석 및 검증

본 연구에서는 다중격자 방법과 3차원으로 확장이 쉬운 Peric<sup>8)</sup>에 의해 제안된 집중 격자계를 사용하였으며, SIMPLE 알고리즘을 채택하였다. 벽면 부근에서의 격자를 밀집시키기 위해 격자 분포는

hyperbolic sin 함수를 사용하였고, 유동이 대칭이므로 중심선에 대칭조건을 주어 반쪽면만을 계산하였다. 수치 계산에 앞서 비뉴턴 층류 유동과 열전달 문제로 수치해석 프로그램의 검증을 하였다. 먼저 파이프에서 비뉴턴 층류의 완전 발달된 속도 구배를 Bird<sup>9)</sup>가 계산한 해석해와 비교해 보았으며, 이때 사용된 해석해는 식 (14)와 같다.

$$\frac{v_z}{v_{z,ave}} = \left( \frac{3n+1}{n+1} \right) \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{n+1/n} \right) \quad (14)$$

Fig. 2 은 식 (10)의 비뉴턴 역법칙 모델을 사용하여 n=0.7 일때의 수치계산결과와 해석해를 비교한 것으로 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

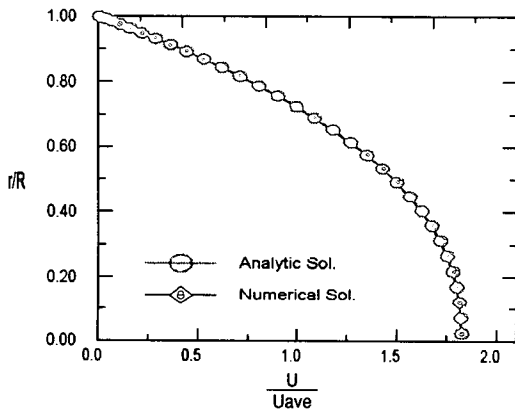


Fig. 2 Comparison of analytic solution and calculated velocity profile for non-Newtonian pipe flow (n=0.7)

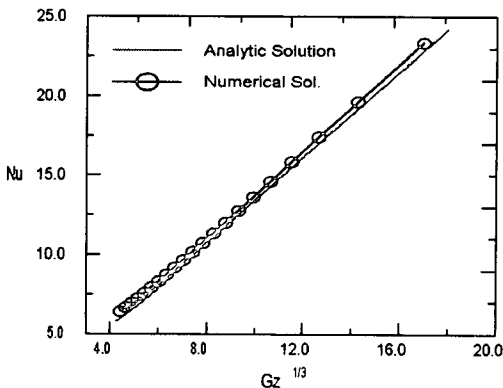


Fig. 3 Comparison of analytic solution and calculated Nusselt numbers for non-Newtonian pipe flow (n=0.7)

Fig. 3은 파이프에서 비뉴턴 층류 유동이 일정한 열유속을 받으며 흐를 때 열적 입구구간에서의 누셀 수와 그래츠 수를 Bird<sup>10)</sup>의 해석해 식(15)와 비교한 것이다.

$$Nu_x = 1.30[(3n+1)/4n]^{1/3} Gz^{1/3} \quad (15)$$

이 그림에서 Gz수가 큰 입구 영역에서 약간의 오차를 보이거나 열적으로 발달된 영역에서는 누셀 수가 해석해의 0.1% 내의 오차를 가지는 정확한 예측을 보이고 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 고체 미립자를 포함한 현탁액의 열전달 증가현상 원인을 규명하기 위해 장<sup>4,5)</sup>의 실험과 같은 물성치를 사용하여 수치해석을 수행하

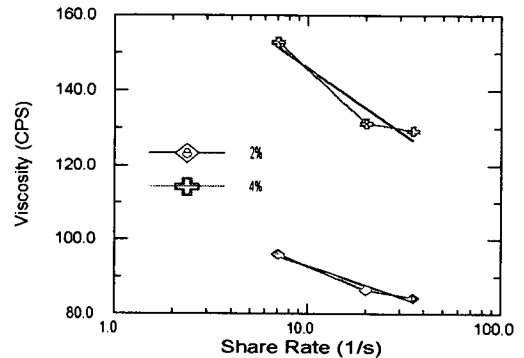


Fig. 4 Experimental viscosity of the suspensions vs. shear rate

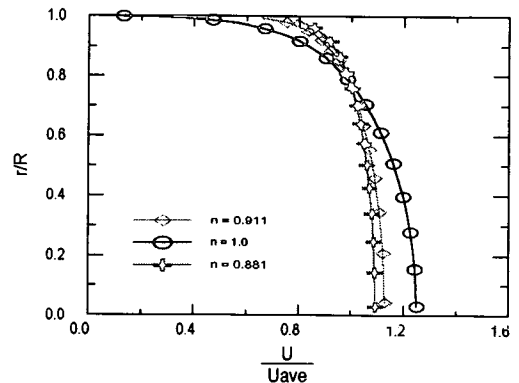


Fig. 5 Calculated velocity profile of non-Newtonian turbulent pipe flow

였다. Fig. 4는 폴리스티렌의 농도가 2%일 때와 4%일 때의 점도를 측정한 그래프이며 이 실험값을 바탕으로 최소자승법(least square method)을 사용하여 멱법칙 지수  $n$ 을 2%일 때 0.911, 4%일 때 0.881로 구하였다. 먼저  $n$  값의 변화에 따른 속도구배의 변화 그래프는 Fig. 5에 나타나 있다.  $n$  값이 낮아지면 낮아질수록 전단율이 높은 벽면에서의 속도가 증가하고 전단율이 낮은 중심부분의 속도는 낮아지는 경향을 보인다. 특히 벽면과 가장 가까운 격자에서의 유속이 급격하게 증가함을 보이고 있다.

Fig. 6은 멱법칙 지수  $n$ 이 0.881인 경우의 계산 결과를 식 (12)로 표시한 무차원 속도로 난류 대수식(logarithmic law)과 비교 한 것이다. 이 결과는 Edwards<sup>6,7)</sup>의 연구 결과에서 밝혔듯이 식 (12)로

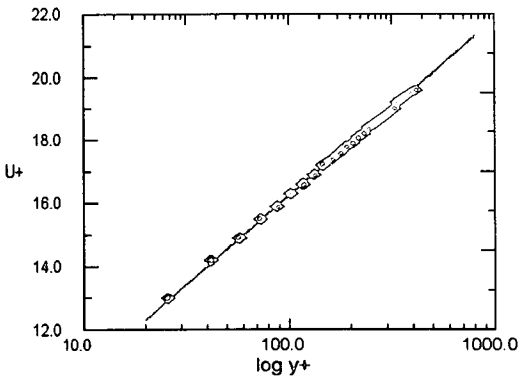


Fig. 6 Dimensionless velocity profile of Non-Newtonian turbulent pipe flow ( $m=0.881$ )

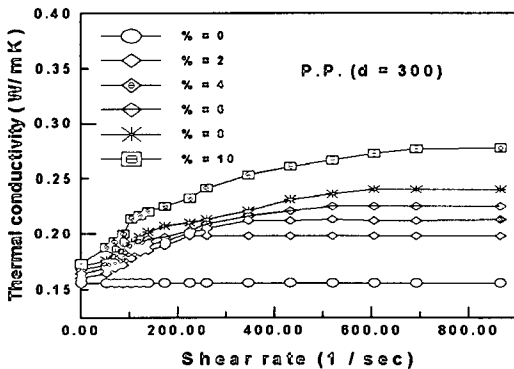


Fig. 7 Thermal conductivity of the suspensions vs. shear rate

표시한 무차원 속도를 사용하면 뉴턴 유체의 벽법칙을 수정 없이 비뉴턴 유체의 난류유동에 사용함을 알 수 있고 비뉴턴 유체의 수치해석 결과가 이론적인 난류속도 분포와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 장<sup>4)</sup>의 실험에 의한 고체 미립자의 농도 증가와 전단율에 따른 열전도율을 측정 한 실험이다. 이 실험결과를 살펴보면 고체 미립자의 농도 증가와 전단율 증가에 따라 열전도율이 증가하고 있지만 열전도율의 증가는 폴리스티렌의 농도가 10%일 때도 물에 비해 열전도율이 2배를 넘지 못함을 알 수 있다. 이에 비해 난류유동에서의 레이놀즈 상사에 의해 구한 와열전도율은 Fig. 8에서와 같이 20배에서 1200배의 증가를 보이고 있으며 이는 고체 미립자의 혼합으로 인한 미세대류 현상으

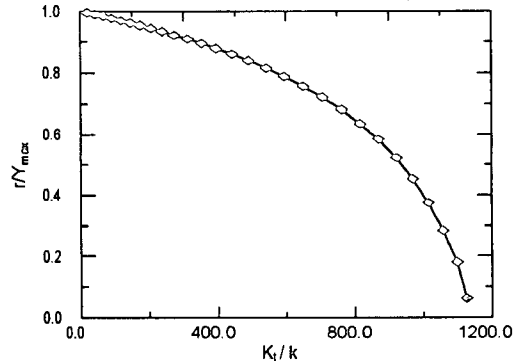


Fig. 8 Calculated eddy thermal conductivity of turbulent pipe flow at fully developed region ( $m=1.0$ )

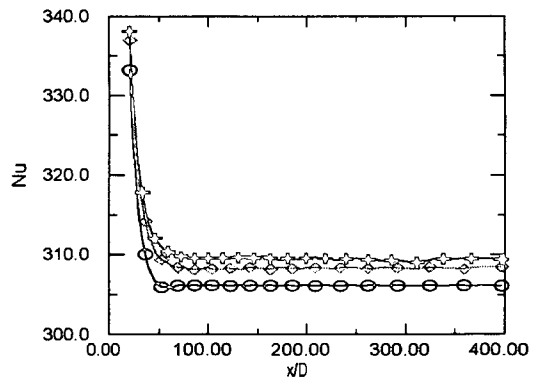


Fig. 9 Calculated Nusselt numbers of Newtonian turbulent pipe flow with different effective thermal conductivity ( $n=1.0$ )

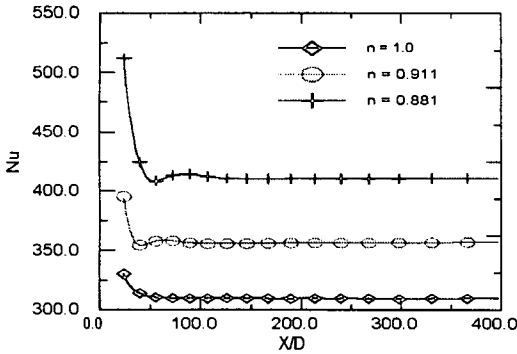


Fig. 10 Calculated Nusselt number of non-Newtonian turbulent pipe flow without considering the increment of effective thermal conductivity

로 열전도율이 증가되는 값에 비해 매우 큰값을 가진다.

Fig. 9는 고체 미립자를 혼합한 현탁액의 열전도율 증가만을 Fig. 7의 실험값으로부터 고려하여 뉴턴 유체로 가정하여 계산한 결과이다. 4%의 현탁액의 경우는 누셀수가 1.6%의 증가만을 가져와 실험치와는 25%정도의 매우 큰 차이를 보이고 있다.

Fig. 10은 고체 미립자의 혼합에 따른 유효 열전도율의 증가는 고려하지 않고 단지 현탁액의 비뉴턴성을 고려하여 비뉴턴 유체로 계산한 결과이다. 이 그림에서 Fig. 9의 열전도 향상만을 고려한 결과와는 달리 열적으로 완전 발달된 영역의 국소 누셀수가 매우 증가하여 실험치와 상당히 일치함을 알 수 있다.

이와 같은 결과로부터 고체 미립자에 의해 발생하는 열전도율의 증가에 비해 난류 유동에 의한 와 열전도율의 증가가 매우 커고, 난류 유동에서는 고체 미립자의 혼합에 따른 유효 열전도율 증가가 열전달 향상에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구는 고체 미립자를 포함하는 현탁액의 원형 관내 난류 유동에서의 열전달에 미치는 원인을 수치 해석적인 방법으로 규명하기 위하여 고체 미립자를 혼합한 현탁액의 열전도율 증가 값을 실험으로부터 사용하고 뉴턴 유체로 계산 결과와 현탁

액의 비뉴턴성을 고려한 계산결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 레이놀즈 상사에 의한 난류 열전도율의 경우 순수액의 층류유동의 열전도율에 비해 1000배 정도로 큰 값을 가지며, 고체 미립자의 혼합에 의해 발생하는 전도율의 증가는 상대적으로 매우 낮다.

(2) 고체 미립자를 혼합한 현탁액의 열전도율 증가를 고려한 수치계산에서 4%의 현탁액의 경우 1.6%의 Nu수 증가만을 가져와 실험치의 Nu 수와는 25% 정도의 큰 차이를 보이고 있다.

(3) 고체 미립자의 혼합에 의한 현탁액을 비뉴턴 유체로 고려하여 수치 계산한 결과는 실험치와 잘 일치하였다.

(4) 위의 결과를 종합해 볼 때 고체 미립자로 혼합한 현탁액의 열전달 향상 원인은 고체 미립자의 회전으로 인한 열전도 효과가 중요한 원인이 아니며 비뉴턴 유체의 특성인 멱법칙 지수 n의 변화에 따른 벽면에서의 속도 구배가 원인인 것으로 판단된다.

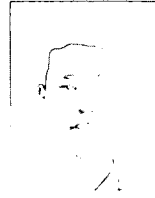
### 참고문헌

- (1) Ahuja, A. S., 1975, "Argumentation of Heat Transport in Laminar Flow of Polystyrene Suspensions. I. Experiments and Results," J. Applied Physics, Vol. 46, No. 8, pp. 3408~3416.
- (2) Kofanov, V. I., "Heat Transfer and Hydraulic Resistance in Flowing Liquid Suspensions in Piping," International Chemical Engineering, Vol. 19, pp. 539~543.
- (3) Park, B. C., Choi, S. H., Baek, B. J. and H. Masuda, "A Turbulent Friction and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Ultra-Macronized Metallic Particles," KSME Journal, Vol. 8, No. 3, pp. 314~324, 1994
- (4) 장 재훈, 1998, "고체 미립자를 포함하는 이상혼합물의 전단율에 의존적인 열전도율이 열전달 향상에 미치는 영향", 석사학위 논문, 경북대학교 대학원
- (5) 장 재훈, 신 세현, 손 창현, 1998, "물-미립자 현탁액의 난류 열전달 특성", 대한기계학회 1999년도 춘계 학술대회는논문집 B, pp. 35~40
- (6) M. F. Edwards, R. Smith, 1980, "The Turbulent

Flow of Non-Newtonian Fluids in The Absence of Anomalous Wall Effects" J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 7, pp. 77~90.

- (7) M. F. Edwards, R. Smith, 1980, "The Use of Eddy Viscosity Expressions for Predicting Velocity Profiles in Newtonian, Non-Newtonian and Drag-Reducing Turbulent Pipe Flow" J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 7, pp. 153 ~ 169.
- (8) M. Peric, R. Kessler, G. Scheuerer, 1988, "Comparison of Finite-Volume Numerical Methods with Staggered and Collocated Grids", Computer & Fluids, Vol. 16, No. 4, pp. 389~403.
- (9) R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, 1960, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Inc
- (10) R. B. Bird, R. C. Armstrong, O. Hassager, 1987, "Dynamics of Polymeric Liquids", John Wiley & Sons, Inc

저 자 소 개



**정세운 (鄭世雲)**

1973년 7월생, 1996년 영남대학교 기계공학과 졸업, 1999년 경북대학교 기계공학과 대학원 졸업 (석사), 1999년 ~ 현재 경북대학교 대학원 연구원



**손양원 (孫陽元)**

1961년 2월생, 1983년 경북대학교 기계공학과 졸업, 1985년 한국과학기술원 기계공학과 졸업 (석사), 1991년 동 대학원 졸업 (공학박사), 1991년~1994년 국방과학연구소 선임연구원, 개발 팀장, 1997년~1998년 영국 캠브리지대 방문교수, 1994년 ~ 현재 경북대학교 기계공학부 부교수, 당학회 회원