

# 부력의 영향을 포함한 점탄성 유체의 열전달에 관한 수치해석

## Numerical Analysis on Heat Transfer of Viscoelastic Fluid including Buoyancy Effect

손창현<sup>1)</sup>, 안성태, 장재환<sup>2)</sup>

C. H. Sohn, S. T. Ahn, J. H. Jang

The present numerical study investigates flow characters and heat transfer enhancement by the viscoelastic-driven secondary flow and buoyancy effect in a 2:1 rectangular duct. Three versions of thermal boundary conditions involving difference combination of heated walls and adiabatic walls are analyzed in this study. The Reiner-Rivlin model is adopted as a viscoelastic fluid model to simulate the secondary flow and temperature-dependent viscosity model is used. Calculated Nusselt numbers are very good agreement with experimental results for reported viscoelastic fluids. It is found that the heat transfer enhancement is mainly caused by the viscoelastic-driven secondary flow and buoyancy-induced secondary flow play a role of promoting this effect.

### 1. 서론

비뉴턴 점탄성 유체는 석유화학 제품, 제약 및 식품산업에의 광범위한 응용뿐만 아니라 압력 손실의 감소와 비원형관 층류유동에서의 큰 열전달 향상으로 많은 관심을 받고 있다.

Hartnett<sup>(1,2)</sup>은 2:1 덕트 내부의 층류유동에서 Separan 수용액(AP-273)과 Carbopol-934 수용액 등의 점탄성 비뉴턴 유체(viscoelastic non-Newtonian fluid)가 물에 비해 국소 누셀 수가 200~300% 증가함을 보고하였다. Hartnett등은 직사각형 덕트에서 점탄성 비뉴턴 유체의 열전달 증가 현상은 유체의 탄성(elasticity)에 의한 수직 응력 성분의 차이로 생긴 이차유동(secondary flow) 때문이라고 설명하였다. 또한 Hartnett등<sup>(3)</sup>은 직사각형 덕트의 하부에 일정한 열유속을 가해줌으로써 부력이 발생하는 경우 Separan이 물에 비해 300%이상 증가한 국소 누셀 수를 가짐을 보였다. Gao<sup>(4)</sup>는 Reiner-Rivlin 모델을 점탄성 비뉴턴 유체의 수직응력차를 구하는 식으로 사용하여 직사각형 덕트에서 점탄성 유체의 이차유동의 존재를 수치 해석적으로 확인하고, 이차 수직응력 계수 값의 증가에 따라 열전달 성능이 향상함을 보였다. Jung<sup>(5)</sup>등은 Reiner-Rivlin 모델에서의 이차 수직응력 계수 값을 실험에 근거한 값을 사용하여 열전달 성능을 계산하였을 때 열전달 성능이 상당히 향상되었으나 이차유동 만으로는 실험의 누셀 수와 차이를 보여주고 있어 이차유동 외의 다른 열전달 향상 메카니즘이 있는 것으로 보고하였다.

Shin<sup>(6,7)</sup>등은 온도에 의존적인 점도 모델을 사용하여 비뉴턴 유체의 열전달 향상의 주원인이 Hartnett등이 설명하는 이차유동에 의한 원인 보다 고온 부근에서의 점도 감소로 인한 속도 증가에 의해 열전달이 향상한다고 주장하였다. 그리고 Separan AP-273 유체의 열전달 해석 결과, 온도에 의존적이지 않은 유체에 비해 70~200%의 열전달 향상 결과를 발표하였다. 이에 비해 Chang<sup>(8)</sup>등은 온도에 의존적인 점도 모델을 Shin과는 다른 모델을 사용하여 계산하였으며 Shin의 결과와는 달리 계산된 누셀 수가 실험에 비해 상당히 낮은 값으로 구해졌다.

이상과 같이 최근 점탄성 비뉴턴 유체의 열전달 향상의 원인을 밝히기 위한 많은 연구가 수행되고 있으나, 유체의 탄성에 의한 이차유동과 온도에 의존적인 점도와 함께 덕트의 하부벽이 가열되는 경우 부력에 의한 이차유동이 어떻게 관여하는지에 관한 연구가 없었다. 본 연구의 목적은 균일한 열유속을 덕트의 상부, 하부 그리고 상하부에 동시에 가해주는 세 가지 조건에 대하여 온도 의존적인 점도의 영향, 부력의 영향 그리고 점탄성에 의한 이차유동 모두를 한꺼번에 고려하였을 때의 유동 현상과 열전달 현상에 미치는 영향을 수치적으로 분석 고찰하고자 한다.

### 2. 지배방정식 및 수치 기법

Fig. 1은 하부벽만을 가열하는 경우의 기하학적 형상과 경계조건을 나타낸 개략도이다.

1) 경북대학교 기계공학부 (702-701, 대구광역시 북구 산격동 1370번지)

2) 경북대학교 기계공학부 대학원

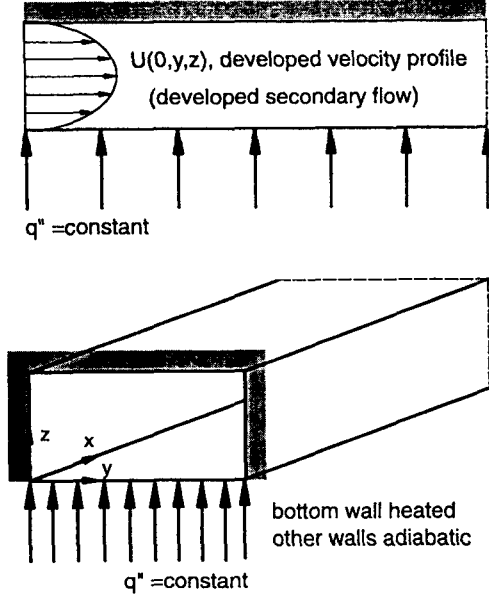


Fig. 1 Physical configurations for hydraulic and thermal boundary conditions of case 2 (heated bottom wall)

수력학적 경계조건으로는 직사각형 덕트 입구에서 완전 발달된 유동을 주고, 출구에서는 유동 방향에 대해  $\partial u/\partial x = 0$ 의 조건을 적용하였으며, 모든 벽면에 대해서는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다. 열 경계조건으로는 덕트의 입구 온도는  $T_i$ 로 균일하게 주어지고 출구에서는  $\partial^2 T/\partial x^2 = 0$ 의 조건을 적용하였다. 그리고, 직사각형 덕트의 상부벽(top wall)이 가열되는 경우(case 1), 하부벽(bottom wall)이 가열되는 경우(case 2), 상부벽 및 하부벽이 동시에 가열되는 경우(case 3)의 세 가지 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 가열되는 벽면에는 덕트의 축 방향으로 균일한 열유속(heat flux)이 가해지고, 나머지 벽면들은 단열(adiabatic)되어 있는 경우에 대하여 해석하였다.

지배방정식은 3차원 정상상태, 비압축성, 층류유동으로써, 점도는 온도 및 전단율의 함수이며 나머지 물성치는 상수로 가정하였다. 부력의 영향은 Boussinesque 가정을 사용하였으며 무차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(u_i u_k)}{\partial x_k} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re^+} \left( \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} \right) + b \frac{Gr^*}{(Re^+)^2} T \quad (2)$$

$$\frac{\partial(T u_i)}{\partial x_i} = \frac{1}{Pr^+ Re^+} \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

식 (2)에서 우변 마지막 항은 부력항을 나타내며,  $b$ 는  $x$ 와  $y$ 방향에 대해서는 0의 값을 가지고  $z$ 방향의 운동량 방정식에 대해서는 1의 값을 가진다. 그리고 무차원 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$x = \frac{\bar{x}}{D_h}, \quad u = \frac{\bar{u}}{U_{avg}}, \quad P = \frac{\bar{P} - \bar{P}_{ref}}{\rho_{ref} U_{avg}^2}, \quad \rho = \frac{\bar{\rho}}{\rho_{ref}},$$

$$\eta = \frac{\bar{U}_{avg}^{1-n}}{K \bar{D}_h^{1-n}} \bar{\eta}, \quad k = \frac{\bar{k}}{k_{ref}}, \quad T = \frac{\bar{T} - \bar{T}_i}{q'' \bar{D}_h / k_{ref}},$$

$$Re^+ = \frac{\bar{\rho}_{ref} \bar{D}_h^n \bar{U}_{avg}^{2-n}}{K}, \quad (4)$$

$$Pr^+ = \frac{K \bar{C}_{ref}}{k_{ref}} \left( \frac{\bar{D}_h}{U_{avg}} \right)^{1-n}, \quad Gr^* = \frac{\bar{g} \bar{\beta} q'' \bar{D}_h^4}{k_{ref} \nu_{ref}^2}$$

무차원 전단율은 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \left[ 2 \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

본 연구에서 사용한 온도와 전단율에 의존적인 점도는 Carreau 모델에 온도의 영향을 고려한 점도 모델을 사용하여 계산해 주었으며 점도 모델은 아래와 같다.

$$\frac{\eta(\gamma, T) - \eta_\infty}{\eta_{0ref} 10^{(\xi T) - \eta_\infty}} = [1 + (De 10^{(\xi T) \gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (6)$$

위 식에서  $De$ 는 데보라 수이고  $\xi$ 는  $\eta$ 대  $T$ 의 기울기를 나타내며,  $\xi$ 는 시간 상수(time constant)에 대한 온도 의존도를 나타내는 상수이다. Separan 수용액의 경우  $De$ 는 100,  $\xi$ 는 -8.35,  $\xi$ 는 -14.9의 값을 적용하였고 멱법칙(power law) 지수  $n$ 은 Shin이 사용한 온도의 함수로 주었다. 그런데 식 (6)의 온도 의존 점도 모델은 온도가 크게 증가하면 점도가 0의 값으로 접근하여 비 물리적인 값을 가지게 된다.

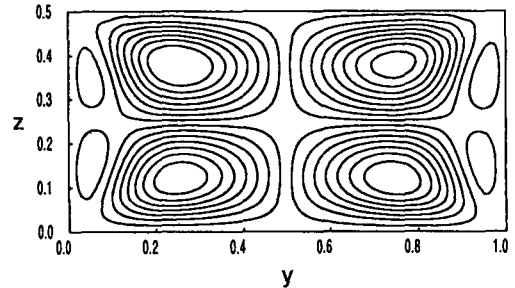


Fig. 2 Input secondary flow pattern in 2:1 rectangular duct of Separan solution ( $\alpha_2 = 0.0031$ )

한편, 이차 수직 응력차에 의해 발생하는 이차유동은 Gao와 Hartnett<sup>(4)</sup>이 사용한 Reiner-Rivlin 모델을 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\tau_{ij} = \eta \dot{\gamma}_{ij} + \alpha_2 \dot{\gamma}_{ik} \dot{\gamma}_{kj} \quad (7)$$

여기서 무차원 이차 수직응력 계수  $\alpha_2$ 는 다음과 같다.

$$\alpha_2 = \frac{Re^+}{D_h^2 \rho_{ref}} \bar{\alpha}_2 \quad (8)$$

Fig. 2는  $\alpha_2 = 0.0031$ 을 사용했을 때의 완전 발달된 이차유동장을 보여주고 있으며, 계산 영역의 덕트 입구조건으로 사용하였다.

수치 기법으로는 Patankar<sup>(9)</sup>에 의해 제안된 SIMPLE 알고리즘에서 압력 보정식(pressure correction equation)을 수정한 SIMPLE-C 알고리즘을 채택하였다. 대류항(convection term)에 대해서는 Hayase 등<sup>(10)</sup>에 의해 제안된 QUICK scheme으로 이산화(discretization)하여 경계면에서도 3차의 정확도를 가지도록 처리하였다. 수렴 조건은 이차유동장의 크기가 주유동장 크기의  $10^{-3}$  정도이므로 이차유동의 정확도를 최소한 0.1%의 범위 안에 두기 위해  $|\phi^{(n)max} - \phi^{(n-1)max}| < 10^{-6}$  을 사용하였다. 수치 계산의 격자계로는 2:1 덕트에서의 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체의 엄밀해와 비교한 결과<sup>(11)</sup>, 계산의 정확도를 만족시킬 수 있는  $41 \times 41$  격자를 덕트 단면에서 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 이차유동의 변화

Fig. 3에서 Fig. 5까지는 주유동이 진행함에 따른 이차유동의 변화를 덕트의 오른쪽 단면에서의 이차유동 유선(streamline)으로 나타내었다. Fig. 3에서의 Case 1은 상부벽만이 가열되는 경우이며, 따라서 부력의 영향을 무시할 수 있다. 상부벽 근처의 온도 증가에 의한 점도의 감소로 상부의 이차유동 셀이 속도가 증가하여 하부벽 방향으로 확장하여, 열적으로 완전 발달된 거리  $x=0.04$ 인 지점에 이르러서는 하나의 이차유동 셀을 형성함을 알 수 있다. Fig. 4에서 case 2는 하부벽에 열유속이 가해지는 경우이며, 하부의 이차유동 셀이 상부벽 쪽으로 확대되어 열적으로 완전 발달된  $x=0.02$ 인 지점에서 하나의 셀로 합쳐진다. 상부벽이 가열되는 경우와는 달리 하부벽이 가열되는 경우에는 하부벽 근처에서의 온도에 의존적인 점도 감소의 영향과 부력에 의한 이차유동의 가세로 셀 형상의

변화가 더욱 빨리 진행되어 보다 짧은 축방향 거리에서 열적으로 완전 발달됨을 알 수 있다.

한쪽 벽면만을 가열하는 경우에는 이차유동 셀이 유동이 진행함에 따라 하나의 셀로 합쳐지는 것과는 달리, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 상부벽과 하부벽이 모두 가열되는 경우에 있어서는 이차유동의 변화가 다르게 나타난다. 온도에 의존적인 점도는 상부벽 근처와 하부벽 근처에서 동시에 이차유동 속도를 증가시켜 유동 셀을 확장시키지만, 하부벽 근처에서 발생한 부력에 의한 이차유동이 가세하여 덕트 하부의 이차유동 셀이 더욱 확대된다. 이후 주유동의 진행에 따라 이차유동 셀의 미세한 변화가 일어나지만,  $x=0.01$ 인 지점에 이르러서는 거의 확정된 이차유동 셀이 나타나게 된다. 따라서 상하부벽이 모두 가열되는 경우에서는 앞의 두 가지 경우보다 더욱 빠르게 열적으로 완전 발달함을 알 수 있다.

#### 3.2 주유동의 변화

점탄성 유체의 이차 수직응력차에 의한 이차유동과 부력에 의한 이차유동이 모두 존재하는 Case 2의 하부벽이 가열되는 경우에 대하여 주유동의 변화를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6(a)는  $y=0.5$ 인 지점에서, (b)는 측면 벽쪽에서  $y=0.1$  떨어진 단면에 대하여  $z$ 축에 따른 무차원화된 주유동 속도분포를 보여주고 있다.  $x$ 축 방향으로 유동이 진행하면서 덕트의 중간 단면에서의 속도는 감소하고 측면벽 근처에서의 속도는 증가하여 전체적으로는 주유동의 최대 속도를 나타내는 지점의 위치가 하부벽 쪽으로 움직이고 있음을 볼 수 있다. 이는 균일한 열유속이 가해지는 하부벽에 의한 유체의 온도 증가가 덕트의 중간 부분보다 측면벽 쪽이 더 크고, 측면벽 쪽 온도의 증가로 점도가 감소하여 벽면 쪽 속도가 증가하였으며 질량 보존의 개념에 의해 상대적으로 점도의 감소가 덜한 덕트의 중간 부분에서는 속도가 감소되었음으로 설명할 수 있다.

Fig. 7(a)는 덕트 높이의 3/4 지점에서, (b)는 덕트 높이의 1/4 단면에 대하여  $y$ 축에 따른 무차원화된 주유동 방향 속도값을 보여주고 있다. Fig. 7(a)의 상부벽에 가까운 단면에서는 유동 방향으로 진행하면서 유동의 선단이 잘려 나가는 듯한 형상을 보이며 속도가 감소하고 있으며, Fig. 7(b)의 하부벽에 가까운 단면에서는 속도가 증가하면서 양 측면벽 쪽으로 팽창되고 있다. 이는 Fig. 6에서 설명한 온도에 의존적인 점도 변화 때문이라 생각되며, 하부벽면 쪽의 온도가 상부 벽면보다 높아 속도가 증가한 것으로 설명할 수 있다.

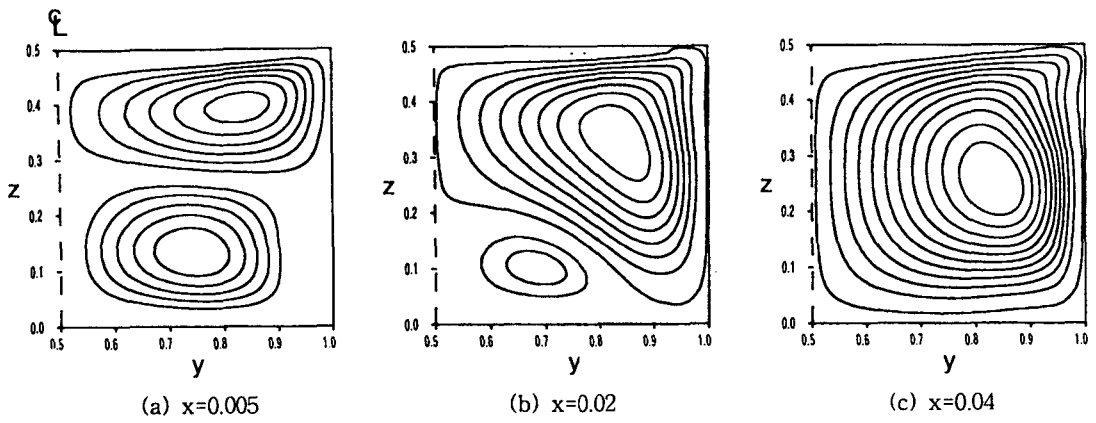


Fig. 3 Development of secondary flow pattern along the dimensionless axial direction of case 1 (heated top wall)

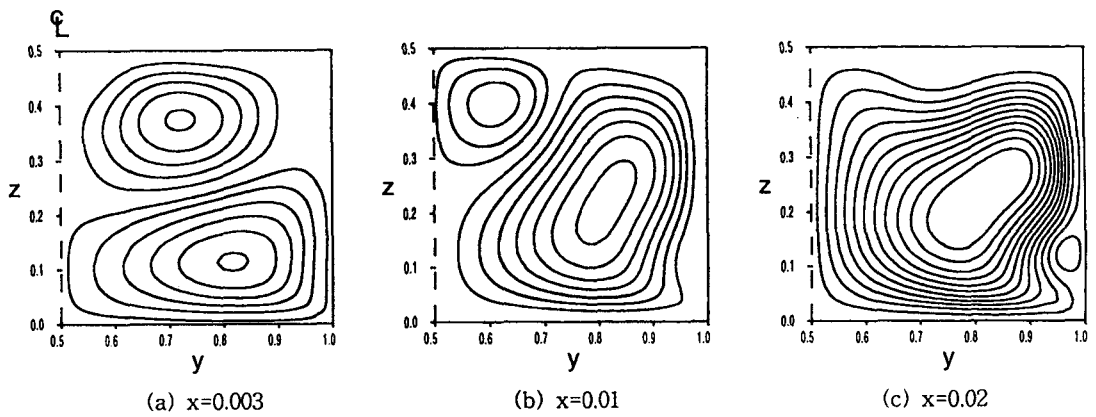


Fig. 4 Development of secondary flow pattern along the dimensionless axial direction of case 2 (heated bottom wall)

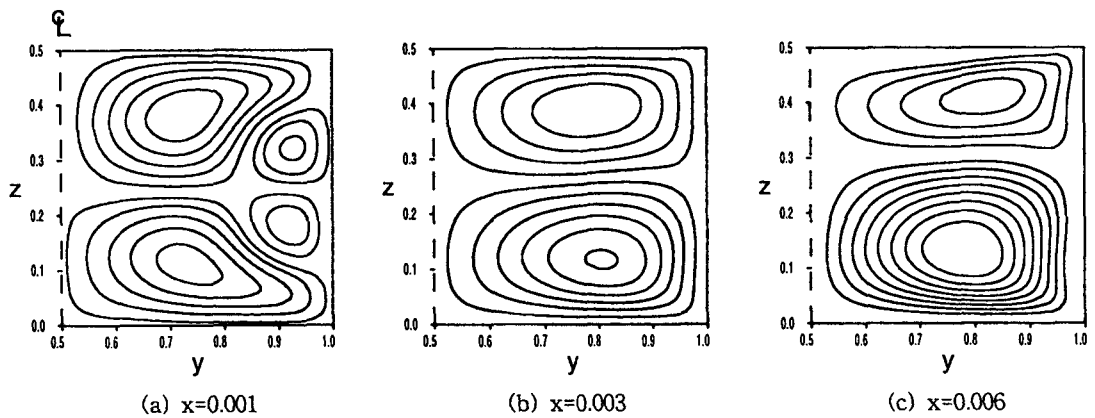
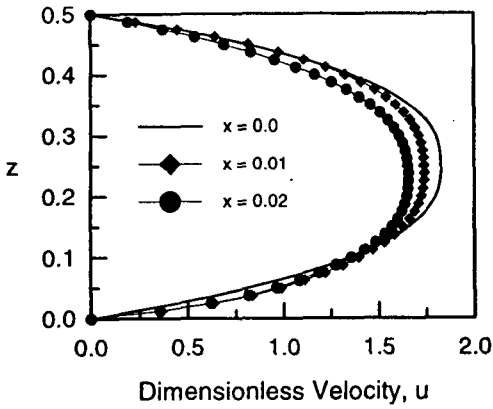
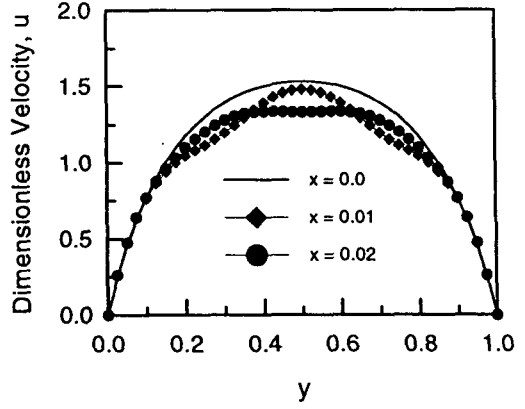


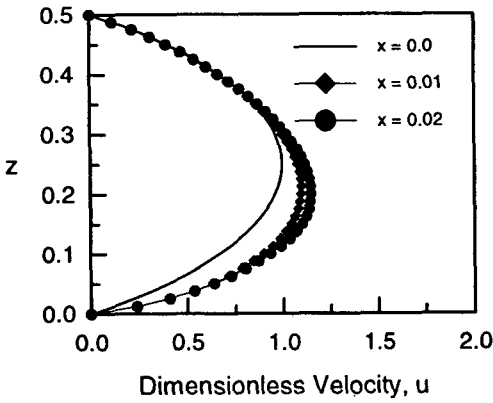
Fig. 5 Development of secondary flow pattern along the dimensionless axial direction of case 3 (heated top and bottom wall)



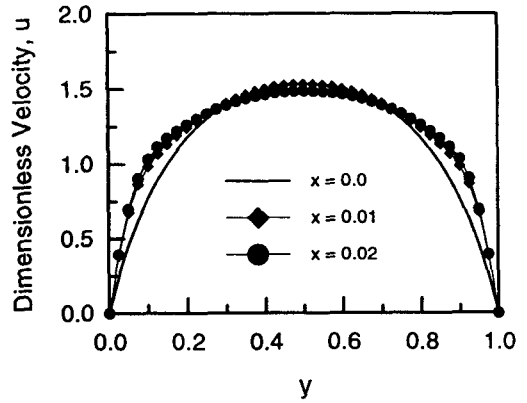
(a)  $y=0.5$  (mid-plane)



(a)  $z=0.375$  (plane near the top wall)



(b)  $y=0.1$  (plane near the side wall)



(b)  $z=0.125$  (plane near the bottom wall)

Fig. 6 Dimensionless axial velocity profiles along the vertical direction, case 2 (heated bottom wall)

Fig. 7 Dimensionless axial velocity profiles along the horizontal direction, case 2 (heated bottom wall)

### 3.3 열전달 향상

2:1 직사각형 덕트 내부 유동에서 점탄성 비뉴턴 유체인 Separan 수용액은 뉴턴 유체인 물에 비해 높은 열전달 성능을 가지며, 따라서 온도 분포도 다른 형상을 가지게 된다. 본 연구에서는 Separan 수용액의 비교 대상으로 물성치가 항상 일정한 유체(constant property fluid, CPF)를 선택하여 case 2의 하부벽이 가열되는 경우에 대하여 해석하였다. 이때 CPF는 밀도까지 상수로 취급하여 부력이 발생하지 않도록 하였다.

Fig. 8(a)는 CPF에 대하여, Fig. 8(b)는 Separan 수용액에 대하여 주유동 방향으로  $x=0.02$ 인 지점의 온도 분포를 나타낸다. 균일한 열유속이 가해지는 하부벽의 온도를 볼 때 본 연구의 대상인 Separan 수용액에 비해 CPF의 온도가 높으며, 이와는 반대로 상부벽의 온도는 Separan 수용액의

경우가 CPF의 경우보다 높음을 볼 수 있다. 또한 Separan 수용액의 경우에는 덕트의 하부벽 근처의 양 측면벽 쪽을 제외한 덕트의 전 단면에 걸쳐 대체로 균일한 온도 분포를 보이고 있다. 이는 Separan 수용액의 경우 이차유동이 하부벽 근처의 가열된 유체를 덕트의 전 단면으로 이송시켰기 때문으로 설명할 수 있으며, 이로부터 이차유동이 열전달 향상의 주요한 요인임을 알 수 있다.

Fig. 9는 case 2의 덕트의 하부벽이 가열되는 경우, 유동의 진행에 따른 하부벽의 온도와 벌크 온도의 차이,  $\Delta T_{wall-bulk}$ 를 보여주고 있다. 이때 온도의 차이가  $x$ 축과 평행해지는 지점이 열적으로 완전 발달된(thermally fully developed) 영역이며, Separan 수용액이 CPF보다 열적으로 빨리 완전 발달된 영역에 도달하고 있다. 또한 Separan 수용액의 경우 열적으로 완전 발달된 영역에 이르러서도 온도차가 CPF에 비해 작으므로 열전달이

Separan 수용액은 온도에 의존적인 점도와 점탄성 유체의 이차 수직응력차에 의한 이차유동, 그리고 부력에 의한 이차유동이 발생하여 유체의 물성치가 일정한 CPF에 비하여 국소 누셀 수가 증가하여 Hartnett의 실험치와 잘 일치하고 있다.

그러나 본 계산에 사용한 온도 의존적인 점도 모델을 사용하면 열적으로 완전 발달된 이후 주유동 방향으로 일정 거리를 지나면 누셀 수가 다시 증가하는 비 물리적인 현상을 보였다. 이는 본 연구에서 채택한 온도에 의존적인 점도 모델에서 온도가 계속해서 증가함에 따라 점도가 무한히 작은 값으로 떨어짐에 따른 것으로 생각되며 이와 같은 문제점을 수정한 새로운 온도 의존적 점도 모델의 제시가 요구된다.

#### 4. 결론

본 연구는 온도에 의존적인 점도를 가지며 이차 수직 응력차에 의한 이차유동이 발생하는 점탄성 유체인 Separan 수용액에 대하여 균일한 열 유속을 2:1 직사각형 덕트의 상부벽과 하부벽, 그리고 상하부벽에 동시에 가해주는 세 가지 열적 경계조건에 대한 해석을 수행하여 부력에 의해 발생하는 추가적인 이차유동이 유동의 변화 및 열전달 향상에 미치는 영향을 연구하였다.

상부벽을 가열해 주는 경우는 부력의 영향이 무시되며 온도에 의존적인 점도의 감소로 인하여 상부벽면 쪽의 이차유동이 그 영역을 확대하여 열적 완전 발달 영역에서는 하나의 셀로 되었다. 하부벽만이 가열된 경우에는 부력의 영향과 함께 더욱 빨리 열적으로 완전 발달된 영역에 도달하며, 하부벽 쪽의 이차유동의 세기가 증가하여 하나의 셀로 합쳐진다. 상하부벽이 동시에 가열되는 경우는 상부벽보다 하부벽 쪽의 이차유동이 부력의 영향으로 크기가 증가하였지만 열적으로 완전 발달된 영역에서도 하나의 셀로 합쳐지지 않는다.

이러한 주유동과 이차유동의 변화에 의해 Separan은 유체의 물성치가 일정한 CPF에 비해 빠르게 열적으로 완전 발달된 영역에 도달하였으며, 세 가지 경우 모두 국소 누셀 수가 Hartnett의 실험치와 잘 일치하였다.

이상의 결과는 점탄성 유체의 이차 수직응력차에 의한 이차유동이 유체를 덕트의 전단면으로 이송하여 열전달을 향상시킨 것으로 해석된다. 부력에 의한 이차유동은 점탄성 유체의 이차유동에 가세하여 이차유동 세기를 증가시키고 유체의 이송을 촉진시킴으로서 열전달 향상의 요인이 된다.

#### 참고 문헌

(1) J. P. Hartnett and M. Kostic, 1985, "Heat Transfer

to a Viscoelastic Fluid in Laminar Flow through a Rectangular Channel", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, pp.1147~1155.

(2) J. P. Hartnett, 1991, "Viscoelastic Fluids : Experimental Challenges", *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, Thermodynamics*, Elsevier Science Publishing Company, pp.621~626.

(3) C. Xie and J. P. Hartnett, 1992, "Influence of Rheology on Laminar Heat Transfer to Viscoelastic Fluids in a Rectangular Channel", *American Chemical Society*, pp.727~732.

(4) S. X. Gao and J. P. Hartnett, 1996, "Heat Transfer Behavior of Reiner-Rivlin Fluids in Rectangular Ducts", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 6, pp.1317~1324.

(5) 정석호, 손창현, 신세현, 1998, "직사각형 덕트에서 Reiner-Rivlin 유체의 이차유동 및 열전달에 관한 수치 해석", *대한기계학회논문집(B)*, 제 22권, 제9호, pp.1208~1216.

(6) Sehyun Shin, Young I. Cho, William K. Gringrich and Wei Shyy, 1993, "Numerical Study of Laminar Heat Transfer with Temperature Dependent Fluid Viscosity in a 2:1 Rectangular Duct", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 18, pp.4365~4373.

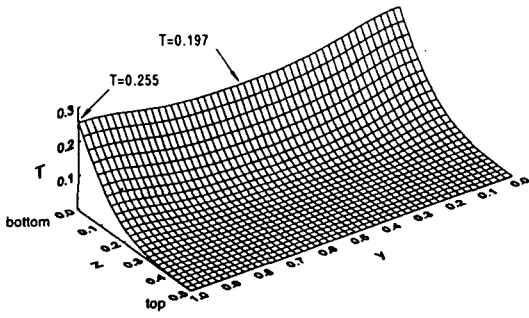
(7) Sehyun Shin, Young I. Cho, 1994, "Laminar Heat Transfer in a Rectangular Duct with a Non-Newtonian Fluid with Temperature Dependent Viscosity", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, Suppl. 1, pp.19~30.

(8) P. Y. Chang, F. C. Chou, C. W. Tung, 1998 "Heat Transfer Mechanism for Newtonian and Non-Newtonian Fluids in 2:1 Rectangular Ducts", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp.3841~3856.

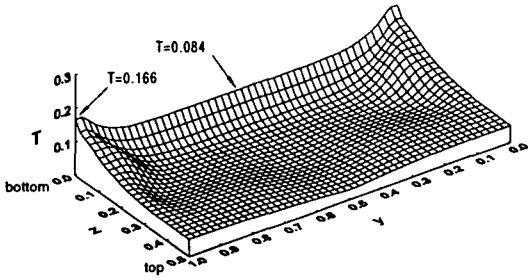
(9) S. V. Patankar, 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company.

(10) T. Hayase, J. A. C. Humphrey and R. Greif, 1992, "A Consistently Formulated QUICK Scheme for Fast and Stable Convergence Using Finite-Volume Iterative Calculation Procedures", *J. Computational Physics*, Vol. 98, pp.108~118.

(11) 김병석, 신세현, 손창현, 1997, "직사각형 덕트에서 전단율에 의존적인 열전도율을 갖는 비뉴턴 유체의 열전달 향상에 관한 수치적 연구", *대한기계학회논문집(B)*, 제 21권, 제6호, pp.773~778.



(a) Constant property fluid (CPF)



(b) Separan

Fig. 8 Dimensionless temperature at  $x=0.02$  in a cross-section of duct, case 2 (heated bottom wall)

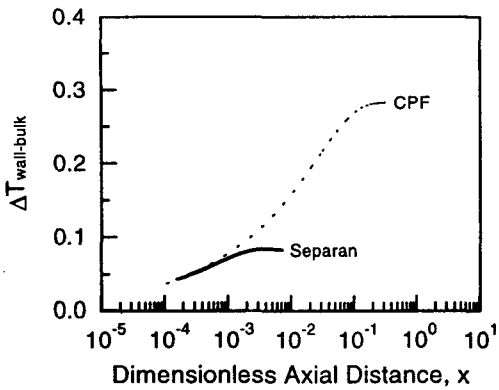
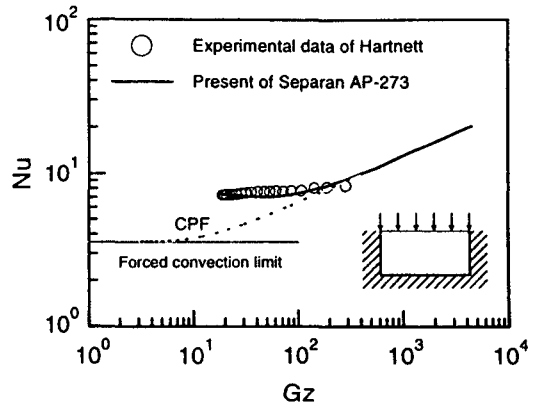
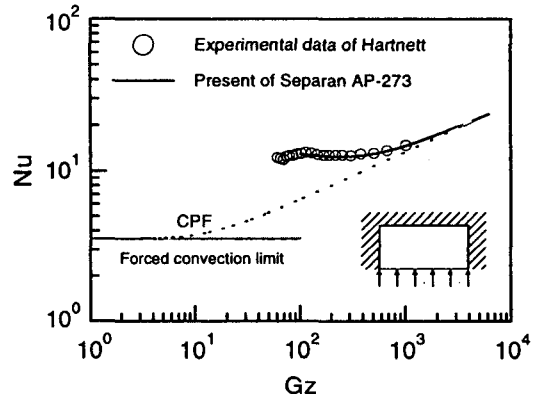


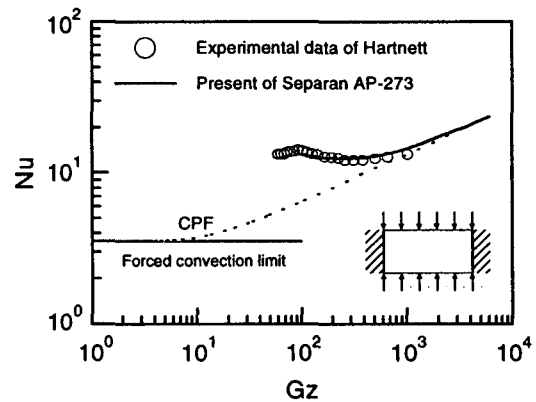
Fig. 9 temperature difference between wall and bulk along the dimensionless axial distance, case 2 (heated bottom wall)



(a) Top wall heated (case 1)



(b) Bottom wall heated (case 2)



(c) Top & bottom wall heated (case 3)

Fig. 10 The comparison of the present numerical results with experimental results in 2:1 rectangular duct

보다 활발히 일어남을 알 수 있다.

Fig. 10은 본 계산의 결과를 실험 결과와 비교하기 위하여 세 가지 열적 경계조건에 대해 동일한 레이리 수(Rayleigh number)의 Hartnett<sup>(3)</sup> 실험치와 비교하였다.