

# 편심 환형관내 유동에 대한 수치 해석적 연구

우남섭\*†·서병택\*·배경수\*·황영규\*\*

## A numerical study on the flow in an eccentric annulus

Nam-Sub Woo, Byung-Taek Seo, Kyung-Su Bae, Young-Kyu Hwang

**Key Words:** Eccentric Annulus(편심 환형관), Helical Flow(나선유동), Wall shear stress(벽면전단 응력), Skin friction coefficient(표면마찰계수)

### Abstract

The present study concerns a computational study of fully developed laminar flow of a Newtonian fluid through an eccentric annulus with a combined bulk axial flow and inner cylinder rotation. This study considers the identical flow geometry as in the calculation of Escudier et al.<sup>(3)</sup> An unexpected feature of the calculations for eccentricity  $\epsilon > 0.7$  is the appearance of a second peak in the axial velocity, located in the narrowing gap. The distribution of the axial component of the surface shear stress has a maximum in the narrowing gap and a minimum in the widening gap.

<p>기호설명</p> <p><math>C_f</math> : 표면마찰계수</p> <p><math>dp/dz</math> : , [Pa/m]</p> <p><math>D_h</math> : , [m]</p> <p><math>e</math> : , [m]</p> <p><math>k</math> : 반경비, <math>R_i/R_o</math></p> <p><math>p</math> : , [Pa]</p> <p><math>R_i</math> : , [m]</p> <p><math>R_o</math> : , [m]</p> <p><math>Re</math> : 축방향 유동레이놀즈수</p> <p><math>Ta</math> : , <math>(\rho \omega / \mu)^2 R_i (R_o - R_i)^3</math></p> <p><math>v_z</math> : , [m/s]</p>	<p><math>U</math> : , [m/s]</p> <p>그리스 문자</p> <p><math>\mu</math> : 절대점성계수 [Pa s]</p> <p><math>\phi</math> : 안쪽축에 대한 회전각</p> <p><math>\epsilon</math> : 편심율, <math>e/(R_o - R_i)</math></p> <p><math>\rho</math> : 유체 밀도, [kg/m<sup>3</sup>]</p> <p><math>\nu</math> : 동점성계수, [m<sup>2</sup>/s]</p> <p><math>\tau_a</math> : 벽면 전단응력의 축방향 성분, [Pa]</p> <p><math>\omega</math> : 안쪽축의 회전 각속도</p>
---	---

### 1. 서 론

파이프나 환형관에서의 비뉴턴유체의 회전유동은 화학, 석유시추, 의료공정 등의 여러 공학적 응용 때문에 많은 관심을 받아왔다. 특히 유정의 굴착작업은 많은 진동과 유동 교란을 발생시키며 낮은 축회전수에서 작동된다. 이러한 굴착 기술

---

† 논문발표자의 소속  
 E-mail : nswoo@skku.edu  
 TEL : (031)290-7499 FAX : (031)290-5849  
 \* 성균관대 기계공학과 대학원  
 \*\* 성균관대 기계공학부

의 중요한 관심사로는 굴착 벽면에서의 안정성 문제, 굴착 잔재물의 효과적인 제거와 드릴 비트의 냉각문제를 들 수 있다. 굴착 이수는 드릴 파이프와 케이싱 사이를 이동하면서 굴착 잔재물을 지상으로 운반한다. 이러한 굴착 이수로는 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체 모두 사용되지만 특히 비뉴턴 유체의 shear-thinning 유체가 많이 사용된다.

환형관 유동에 대한 많은 연구가 수행되어 왔는데 Nouri와 Whitelaw<sup>(1)</sup>는 동심 환형관에서의 회전유동에 대한 연구를 수행하여 축방향의 임계 레이놀즈수는 회전 레이놀즈수와 편심율이 증가할수록 감소함을 밝혔다. Escudier와 Gouldson<sup>(2,3)</sup>은 모든 유동영역에서 축회전수 증가에 따라 마찰계수가 증가하며, 축방향 레이놀즈수가 증가하면 축방향 유동의 불안정성이 감소함을 발견하였다. Gravas<sup>(4)</sup> 등은 축방향 유동이 존재하는 다양한 반경비의 환형관 유동에 대하여 유동 불안정성에 대한 연구를 수행하여 축방향 유동이 유동장을 안정화시키며 그것으로 인하여 Taylor 와의 발생이 지연됨을 확인하였다.

최근 편심 환형관에서의 회전유동에 대한 연구가 주목받고 있는데 아직까지는 상당히 제한된 영역에 대한 연구에 한정되어 있다. Meuric 등<sup>(5)</sup>은 편심 회전 환형관에서 뉴턴 유체와 비뉴턴 점탄성 유체를 사용하여 수치해석적 연구를 수행하였고 Escudier 등<sup>(3)</sup>도 이 경우에 대한 연구를 수행하고 이에 관련된 연구를 종합적으로 정리하였는데 그들은 작동유체로 비탄성 shear-thinning power law 유체를 사용하였다.

현재 굴착작업시 직접적인 굴착경비 뿐만 아니라 드릴링 유체 및 굴착물의 이송에 필요한 소요 동력까지 포함한 전체 굴착소요경비는 굴착경, 굴착벽면과 드릴링 축간의 간극면적에 비례하기 때문에 굴착경의 간극이 작은 slim hole 굴착 공법이 많이 적용되고 있는데 기존의 굴착 공법에서의 반경비는 대략 0.5 정도인데 비하여 slim hole 굴착 공법에서의 반경비는 0.8 이상이다. 이러한 굴착작업시 굴착 벽면의 안정성을 위한 굴착 유체의 적절한 제어는 상당히 중요한 문제이다. 특히 최근 많이 적용되는 방향전환 굴착공법에서는 필연적으로 편심의 문제가 발생하는데 이러한 경우에 벽면 안정성의 문제는 더욱 중요해진다<sup>(6)</sup>.

따라서 본 연구에서는 수치해석적 연구를 통하

여 편심 환형관 내에서의 유동특성을 파악하고자 한다. 작동유체는 뉴턴유체인 물을 사용하였고, 축방향으로 완전히 발달된 유동장에 대하여 축방향 유속과 안쪽축의 회전에 의한 환형관내 축방향 유속과 압력 분포의 변화에 따른 벽면 전단력의 분포를 해석하였다. 이로부터 유량과 안쪽축의 회전 및 편심비 변화에 따른 환형관내 유동특성을 파악하였으며 이를 실험 결과와 비교 검증하였다.

## 2. 수치해석

본 연구에서는 완전 발달된 비압축성 층류유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 유한체적법을 바탕으로하는 상용코드(CFD-ACE ver. 6.1) : 사용하여 해석하였고 지배방정식은 다음과 같은 연속방정식과 모멘텀 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{u}(\nabla \cdot \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

윗 식에서  $\mathbf{u}$ ,  $\rho$ ,  $\nu$ ,  $p$ 는 각각 유체의 속도, 밀도, 동점성계수, 압력을 의미한다.

유동이 완전히 발달할 수 있도록( $126 \times D_h$ ) 축방향 길이를 계산한 경우, 환형관 입구에서의 경계 조건은 일정 유속을 주었고, 출구는 대기압 조건을 주었다. 또한 격자수의 크기에 따른 PC의 계산속도 문제를 해결하기 위해서 fully developed periodic 조건을 적용한 격자계를 구성한 경우는 출구 조건의 periodic 조건으로 대체된다. 두 경우 모두 안쪽과 바깥쪽 벽면에서는 no-slip 조건을 적용하였다.

환형관 유동장의 해석에 사용된 격자계의 단면을 Fig. 1에 도시하였다. 환형관의 체원은 수치해석의 검증을 위하여 Escudier 등<sup>(3)</sup>의 연구에서와 같은 환형관을 사용하였지만 축방향 레이놀즈수는 10배 증가시켜 좀더 현실적인 유동을 모사하였다. 두 해석방법에서 모두 반경방향과 회전방향에 각각 40, 128개의 격자점을 주었다.

본 연구에 관련된 주요 변수는 레이놀즈수( $Re$ )와, 테일러수( $Ta$ )이고,  $Re=1050$ 에서  $Ta=25000$ 까지의 범위에서 연구를 수행하였으며, 반경비( $k$ )는 0.5로 일정한 조건에서 편심비 0.2, 0.5, 0.7의 경우에 대한 유동을 비교하였다.

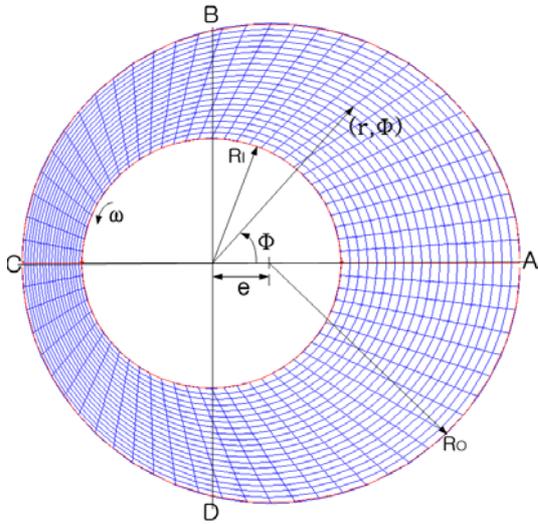


Fig. 1 Annulus geometry and computational Grid

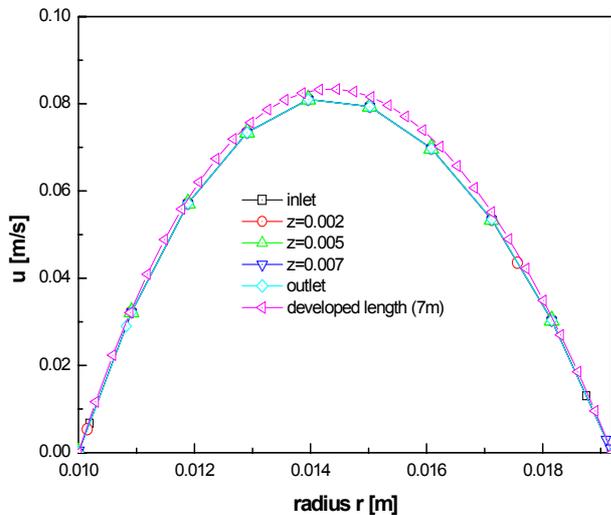


Fig. 2 Comparison of axial velocity of periodic and fully developed condition for  $Re=1006$  and  $Ta=0$

### 3. 수치해석 결과

#### 3.1 수치해석 검증

실제 유정의 굴착 등의 문제에서 환형관의 편심 현상은 흔한 일이다. 따라서 본 연구에서는 일정한 반경비에서 편심비의 변화에 대한 유동을

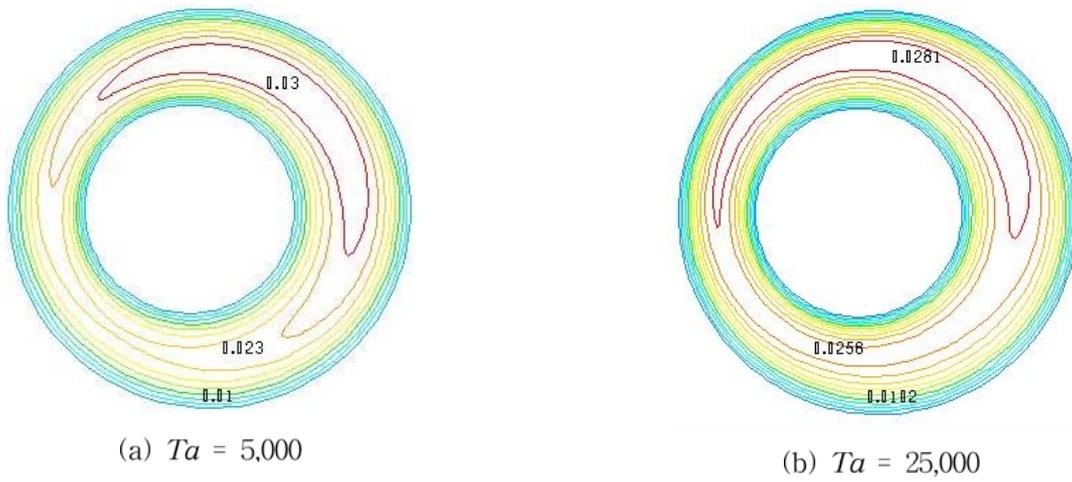
고찰하고자 하였다. 편심 환형관에서 안쪽축의 회전수가 증가하면 회전방향으로 간극이 좁아지는 부분에서 접선방향의 유속이 방해를 받으므로 2차유동 등이 발생하게 되는데 이로 인해 계산의 수렴성이 나빠진다. 이러한 계산상의 어려움으로 인해 축방향 유량, 편심, 안쪽축의 회전을 모두 고려하는 유동에 대한 연구는 많지 않다. 이때 periodic 조건은 관심 있는 부분에 상대적으로 격자를 조밀하게 줄 수 있어 수렴성을 향상시키고 빠른 시간 안에 결과를 확인할 수 있었다. 그리고 관심부분에 격자를 많이 주었기 때문에 유동의 정밀한 관측을 할 수 있어 유리하다. Periodic 조건과 유동을 완전히 발달시키기 위해 축방향 길이를 계산한 경우( $126 \cdot D_h$ )의 축방향 속도분포를 Fig. 2에 나타내었다. 모든 경우에서 일치하는 속도분포를 얻었다. 또한, 일반 파이프 유동에서 축방향 속도는 bulk velocity의 1.5배인데 본 연구에서는 정량적으로 비교하여 Fig. 2에서 bulk velocity  $u=0.055\text{m/s}$ 일 때 축방향 속도가  $0.083\text{m/s}$ 임을 알 수 있었다.

#### 3.2 수치해석 결과

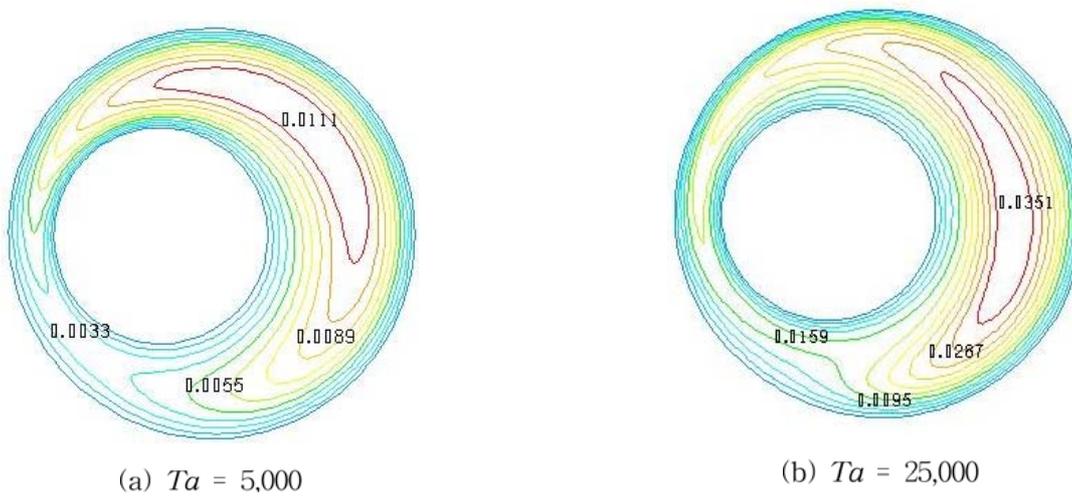
일정한 축방향 유속에서 테일러수 및 편심비 변화에 따른 축방향 유속의 변화를 Figs. 3-5에 나타내었다. 이 경우들에 대한 환형관의 제원은 Escudier 등<sup>(3)</sup>이 계산한 경우와 동일한 제원을 사용하였으나 ( $R_o=55\text{mm}$ , 관경비  $k=0.5$ ) 축방향 레이놀즈수는 10배 크게 하였다( $Re=1050$ ).

편심비 0.2에서는 Fig. 3에서 보는 것과 같이 반시계 방향으로 회전하는 안쪽축에 대해서 간극이 좁아지는 부근으로 축방향 최대 유속의 위치가 이동한다. 테일러수가 증가하면 접선 방향 유속의 영향으로 축방향 유속이 감소하는 것을 볼 수 있으며 축방향 최대 유속의 위치가 회전 방향으로 더 이동하는 것을 볼 수 있다.

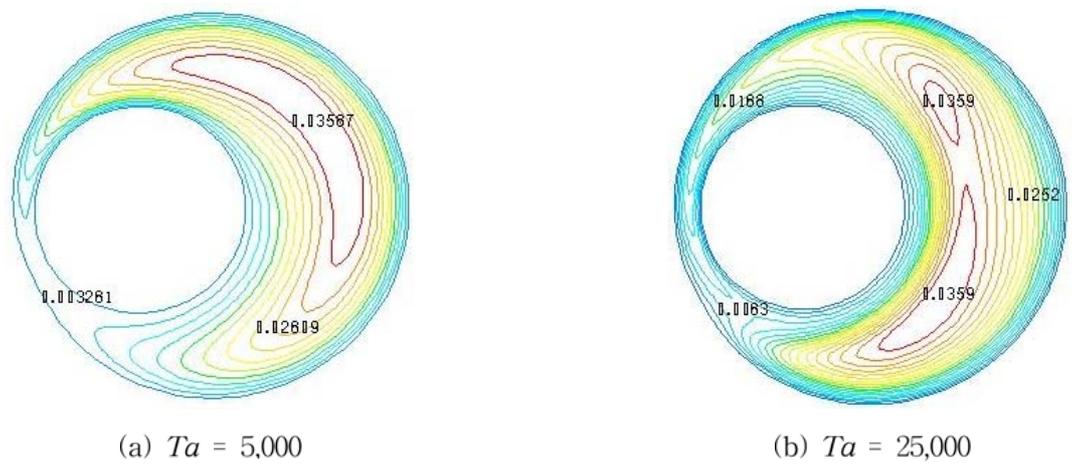
편심비 0.5의 경우에서의 유동형태를 Fig. 5에서 보여주고 있다.  $Ta=5,000$ 의 경우 편심비 0.2의 경우처럼 축방향 최대 유속이 간극이 좁은 쪽으로 이동하지만 테일러수가 더 증가하면 최대 유속의 위치가 반대로 간극이 넓은 쪽으로 이동하는 현상을 보인다. 이는 간극이 좁아지는 부분으로 회전하는 유동이 방해를 받으면서 접선 방향 유속이 바깥 벽면을 타고 반대 방향으로 재순환하기 때문인 것으로 사료된다.



**Fig. 3** Contours of axial velocity of water for  $Re=1050$  and eccentricity  $\varepsilon = 0.2$



**Fig. 4** Contours of axial velocity of water for  $Re=1050$  and eccentricity  $\varepsilon = 0.5$



**Fig. 5** Contours of axial velocity of water for  $Re=1050$  and eccentricity  $\varepsilon = 0.7$

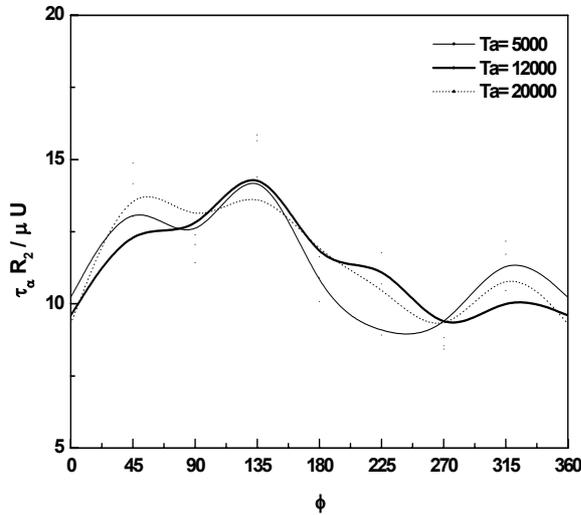


Fig. 6 Azimuthal distribution of the axial surface shear stress of water for  $Re=1050$   $\varepsilon=0.2$

편심비를 0.7로 더 증가 시키면 유동의 재순환 현상은 더욱 두드러지며  $Ta=50,000$ 에서는 축방향 최대 유속이 Fig. 5 (b) |서와 같이 두 곳에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 즉 최대 유속의 위치가 시계 방향으로 더 이동하며 또한 간극이 좁아지는 부근에서도 최대 유속이 발생한다. 이 현상은 Escudier 등<sup>(3)</sup>의 연구에서도 확인하였다.

유정의 굴착 공정에서는 바깥 벽면의 안정성이 주요 관심사 중의 하나인데 넓은 간극 부근의 바깥 벽면에 작용하는 전단응력의 주요 인자는 축방향 유속이다. 본 논문에서 나타내지는 않았지만 접선방향 전단응력은 최대값에 있어서 축방향 전단응력의 1/5 정도를 나타내었다. 편심비의 변화에 따른 유동 형태에서 보았듯이 축방향 최대 유속 위치의 변화는 벽면의 전단응력에 많은 영향을 미친다.

편심비와 테일러수의 변화에 따른 축방향 전단응력의 분포를 Figs. 6과 7에 나타내었다. 바깥 벽면에서의 전단응력은 뉴턴의 점성법칙으로부터 계산하였다.  $\phi$ 는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 반시계 방향으로의 회전각의 위치를 나타낸다. 우선 두 경우 모두 간극이 좁아지는 부근에서 축방향 최대 전단응력이 발생되고 넓어지는 부근에서 최소 전단응력이 발생된다. 편심비가 증가할수록

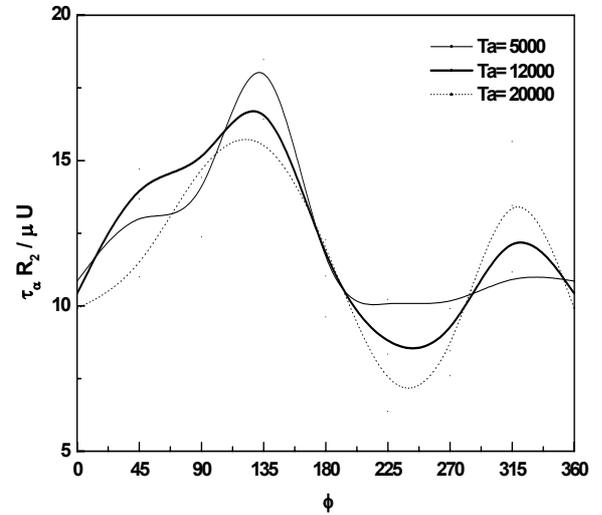


Fig. 7 Azimuthal distribution of the axial surface shear stress of water for  $Re=1050$   $\varepsilon=0.5$

축방향 전단응력의 변화폭이 크게 나타난다. 편심비 0.5의 경우 축방향 최대 전단응력은 작은 테일러수에서 큰 값을 나타낸다. 간극이 넓어지는 부근에서 발생하는 최소 전단응력은 큰 테일러수에서 나타나는데 이는 Figs. 3-5에서 보이듯이 테일러수의 변화에 따른 축방향 최대 유속의 발생 위치가 변화하고 따라서 간극이 좁은 부근에서의 축방향 유속이 변한다. 즉 편심비가 증가하면 간극이 좁은 부근에서는 축방향 유속이 감소하는데 안쪽축의 회전은 비회전의 경우에 비하여 이 부근에서 축방향 유속을 증대시키는 효과에 기인하는 것이다. 편심비 0.2의 경우는 편심비 0.5의 경우에 비해서 이러한 차이들을 명확하게 구분하기가 어렵다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 편심환형관 회전유동에 대한 전산 해석을 수행하였다. 뉴턴유체인 물을 이용하였고 완전 발달된 비압축성 층류유동에 대한 결과는 다음과 같다.

층류 유동의 완전 발달 조건을 만족시키기 위해 환형관의 축방향 길이를 충분히 길게하여 계산한 결과와 periodic 조건의 계산 결과가 잘 일

치함을 확인하였다. 또한 기존 Escudier 등<sup>(3)</sup>의 연구 결과와 비교하여 수치해석인 신뢰성을 검증하였다.

편심 환형관 유동에서는 테일러수의 변화에 따라 축방향 최대 유속의 위치가 변화하며 테일러수가 더 증가하면 간극이 좁아지는 부근에서의 유동 방해와 2차 유동의 발생 등으로 바깥 벽면을 따른 유체의 재순환 현상이 발생하여 축방향 최대 유속은 반대로 시계방향으로 이동하며 특히, 높은 편심비( $\varepsilon=0.7$ )에서는 테일러수가 증가하면 축방향 최대 유속이 두 부근에서 발생하는 현상을 관찰하였다.

바깥 벽면에서의 축방향 전단응력 분포는 간극이 좁아지는 부분에서 최대이고 넓어지는 부분에서 가장 작았다. 편심비가 증가하면 전단응력의 변화의 폭이 증가하였다. 편심비 0.5의 경우 축방향 최대 전단응력은 작은 테일러수에서 큰 값을 나타낸다. 또한, 간극이 넓어지는 부근에서 발생하는 최소 전단응력은 큰 테일러수에서 나타난다.

## 후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- (1) Nouri, J. M. and Whitelaw, J. H., 1994, Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in concentric annulus with rotation of the inner cylinder, *J. Fluids Eng.*, Vol.116, pp. 821-827.
- (2) Escudier M. P. and Gouldson I. W., 1995, Concentric Annular Flow with Centerbody Rotation of a Newtonian and a Shear-thinning Liquid, *J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 16, No. 3, pp. 156-162.
- (3) Escudier, M. P., Gouldson, I. W., Oliveira, P. J., Pinho, F. T., 2000, Effects of inner cylinder rotation on laminar flow of a Newtonian fluid through an eccentric annulus, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. Vol. 21, pp.92-103.

- (4) Gravas, N. and Martin. B. W., 1978, Instability of Viscous Axial Flow in Annuli Having a Rotating Inner Cylinder, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 86, pp. 385-394.
- (5) Meuric, O. F. J., Wakeman, R. J., Chiu, T. W., Fisher, K. A., 1998, "Numerical flow simulation of viscoplastic fluids in annuli", *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 76 (February), pp.27-40.
- (6) Aniekan W. I., 1980, Drilled-cuttings Transport by Non-Newtonian Drilling Fluids through Inclined, Eccentric Annuli, The University of Tulsa, Canada.