

# 뉴턴 및 비뉴턴 유체의 헬리컬 유동에 관한 연구

우남섭\*†·서병택\*·배경수\*·황영규\*\*

## Helical flow of Newtonian and non-Newtonian fluid in an annulus

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

**Key Words:** Eccentric Annulus(편심 환형관), Helical Flow(나선유동), Radius ratio(반경비), Skin friction coefficient(표면마찰계수)

### Abstract

The present study concerns a experimental study of fully developed laminar flow of a Newtonian and non-Newtonian fluid through a concentric annulus with a combined bulk axial flow and inner cylinder rotation for the various radius ratio. This study shows the fundamental difference between Newtonian and non-Newtonian fluid flow in an annulus for various radius ratio.

### 기호설명

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| $C_f$ : 표면마찰계수                                     | $U$ : , [m/s]                        |
| $dp/dz$ : , [Pa/m]                                 | 그리스 문자                               |
| $D_h$ : , [m]                                      |                                      |
| $e$ : , [m]  |                                      |
| $k$ : 반경비, $R_i/R_o$                               | $\mu$ : 절대점성계수 [Pa s]                |
| $p$ : , [Pa]                                       | $\varepsilon$ : 편심율, $e/(R_o-R_i)$   |
| $R_i$ : , [m]                                      | $\rho$ : 유체 밀도, [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $R_o$ : , [m]                                      | $\nu$ : 동점성계수, [m <sup>2</sup> /s]   |
| $Re$ : 축방향 유동레이놀즈수                                 | $\omega$ : 안쪽축의 회전 각속도               |
| $Ta$ : , $(\rho \omega / \mu)^2 R_i (R_o - R_i)^3$ |                                      |
| $v_z$ : , [m/s]                                    |                                      |

### 1. 서론

천연자원 중 가장 중요한 석유, 가스의 경우 시추 및 개발 과정에서 손실되는 에너지의 양은 상당하다. 이렇게 손실되는 에너지를 줄이는 것은 새로운 대규모의 유전을 발견하는 것만큼이나 중요하며 전 세계의 유전에서 회수율을 1%만 증가시킨다면 전 세계가 약 2~3년간 사용할 수 있

---

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

---

는 원유의 양이 된다. 따라서 시추과정에서의 회수율의 증가와 소요에너지 절감이 당연히 중요화두로 떠오르게 된다. 또한, 시추과정에서의 경비 절감은 물론이고 환경오염의 극소화도 배제할 수 없으며, 시추작업의 경제성과 효율성을 향상시켜야 한다. 이러한 목적을 제대로 구현할 수 있는 시추 기법이 slim hole 시추 기법이다.

이 시추 기법은 굴착면 바깥지름의 직경을 50% 이상 감소시켜 굴착 경비 절감과 굴착 이수 등에 의한 환경오염을 극소화시키기 위하여 고안된 것으로 시추에 있어서 굴착공의 바깥쪽 케이싱과 안쪽 드릴 샤프트의 간극을 최소화한 것이다. 하지만 slim hole 시추 기법은 기존의 석유 시추 기법과 비교해 많은 유체공학적 차이점들을 가지고 있다. 이러한 차이점들이 slim hole 시추 기법의 넓은 응용성을 제한하는 중요한 요소들이다. 즉, slim hole 에서의 작은 직경과 간극으로 인하여 안쪽 드릴샤프트의 속도가 빨라져야 하고 좁은 간극으로 이수가 흘러가야 하기 때문에 기존 시추 (conventional drilling)에서는 볼 수 없었던 유체공학적 효과들이 나타나며 따라서 굴착 이수의 특성이 아주 중요하게 된다. 이러한 주요한 여러 특징은 기본적인 유체역학 방정식에서 굴착 정수학 연구에 절대적으로 필요하다.

환형관 유동에 대한 연구는 1900년대 초 Taylor<sup>(1)</sup>에 의해 처음으로 수행되어 현재에도 많은 연구가 진행되고 있으며 slim hole 굴착 기법에 대한 연구는 미국석유학회(SPE)를 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다. 최근 편심 환형관에서의 회전유동에 대한 연구가 주목받고 있는데 아직까지는 상당히 제한된 영역에 대한 연구에 한정되어 있다. Meuric 등<sup>(2)</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.

기존의 굴착 공법에서의 반경비는 대략 0.5 정도인데 비하여 slim hole 굴착 공법에서의 반경비는 0.8 이상이다. 이러한 굴착작업 시 굴착 벽면의 안정성을 위한 굴착 유체의 적절한 제어는 상당히 중요한 문제이다. 특히 최근 많이 적용되는 방향전환 굴착공법에서는 필연적으로 편심의 문

제가 발생하는데 이러한 경우에 벽면 안정성의 문제는 더욱 중요해진다<sup>(4)-(6)</sup>.

따라서 본 연구에서는 다양한 반경비의 환형관에 대한 실험적 연구를 통하여 환형관 내에서의 유동특성을 파악하고자 한다. 작동유체는 뉴턴유체인 물을 사용하였고, 축방향으로 완전히 발달된 유동장에 대하여 축방향 유속과 안쪽축의 회전 및 반경비 변화에 대한 환형관내 유동특성을 파악하였다. 이로부터 유량과 안쪽축의 회전 및 반경비 변화에 따른 환형관내 유동특성을 파악하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

바깥쪽 실린더는 내부 유동을 관찰할 수 있는 투명한 아크릴 재질로 제작하였고, 안쪽축은 직경이 30mm인 스테인레스 강재 연마봉을 사용하였고 개략적인 실험장치를 Fig. 1에 도시하였다. 축 방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 시험부(test section) 까지의 길이를 수력직경의 116 배 이상이 되도록 하여 1.7m로 제작 하였다. 안쪽축이 회전할 때 생기는 편심도는  $\pm 0.1\text{mm}$  이내이며 차압을 측정하기 위해 시험부의 길이 방향으로 0.5m 간격으로 2개의 압력 탭을 설치하였다. 압력 탭 내부 hole의 직경은 0.5mm인 정압 탭을 사용하였다. 유동의 안정적인 발달을 위하여 환형관의 입구 부분에서도 유동이 2 방향으로 유입되도록 하였으며 또한 실험장치 윗부분에서 부압이 발생하는 것을 방지하기 위해서 출구를 3 방향으로 하여 유체가 방해받지 않고 빠져나갈 수 있도록 제작하였다. 바깥쪽 실린더는 교체가 가능하도록 설계하였으며, 바깥 실린더의 직경을 여러 가지로 제작하여 반경비 변화를 줄 수 있도록 제작하였다.

80ℓ의 용적을 가지는 수조로부터 작동유체를 공급하는 마그네틱 펌프는 온양정 9m일 때 최대 80LPM( $\ell/\text{min}$ )의 용량을 갖고, 펌프와 유량계 사이의 압력을 일정하게 유지하기 위해서 서지탱크를 설치하였다. 안쪽 축은 1,500 rpm 까지 회전이 가능한 모터(A.C. motor)를 사용하여 회전시키고, 회전수는 근접스위치와 연결된 회전속도계를 통하여 측정하였으며, 모터의 회전수는 인버터에서 제어한다. 유량은 2~80LPM의 측정범위를 갖고 정확도가 0.5% 이내로 보정된 마그네틱 유량계를

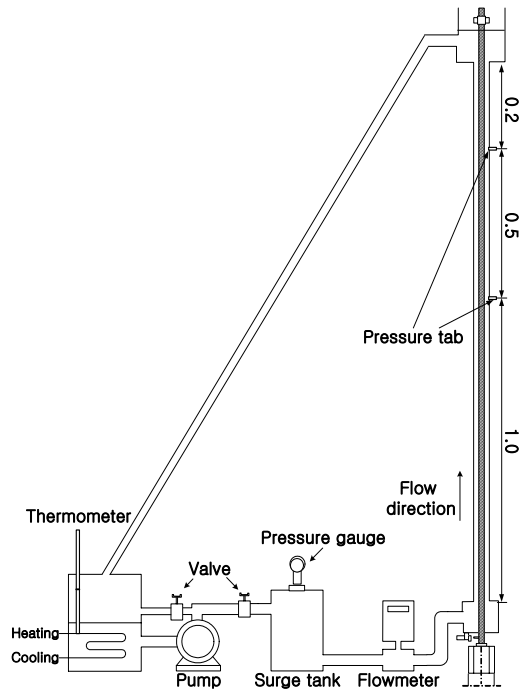


Fig. 1 Experimental apparatus

사용하여 측정하였다. 작동 유체의 온도는 디지털 멀티미터를 사용하여 측정하였다.

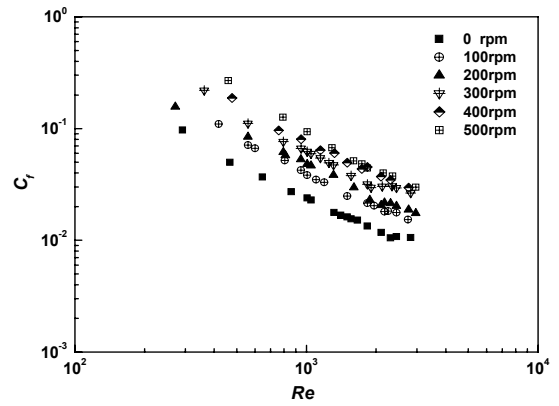
### 3. 실험 결과

#### 3.1 실험결과 검증

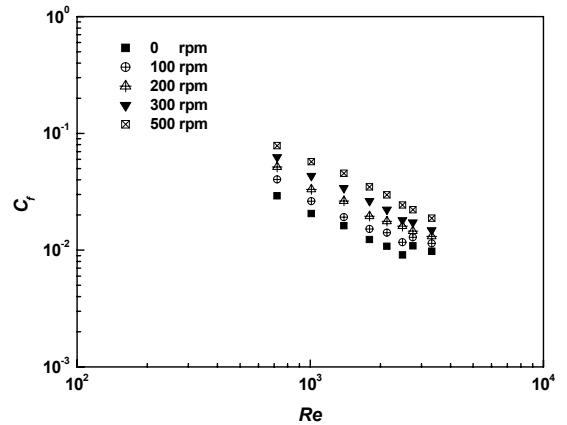
환형관 유동에서의 유동의 신뢰성에 대한 검증은 유체역학적으로 알려진 정량적 특성으로 파악할 수도 있지만, 기존 연구자들의 연구 결과와 비교하는 것이 정확한 검증이 될 것이다.

우선, 안쪽축이 회전하지 않는 비회전 유동의 경우 층류영역에서의 레이놀즈수와 표면마찰계수의 관계는 파이프 유동에서와 마찬가지로 직선적으로 감소하는 특성을 가진다. 따라서, 본 연구에서도 각각의 반경비에서 비회전의 경우에 대한 실험을 수행하여 레이놀즈수와 표면마찰계수의 관계식을 계산하였으며 이 결과를 기존 연구자의 결과와 비교하여 일치함을 확인하였다.

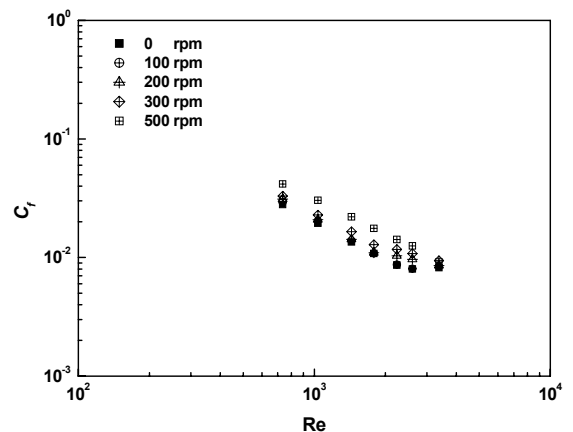
비회전 시 반경비 0.52의 경우  $C_f = 23.8/Re$ 의 관계식을 얻었으며 이는 Saha & London이 제시한 식과 정확히 일치하였다. 반경비가 더 증가하면 분자의 상수가 24에 접근하는데 본 연구의 경우 23.8에서 23.9의 값을 나타내었다.



(a)  $k=0.52$

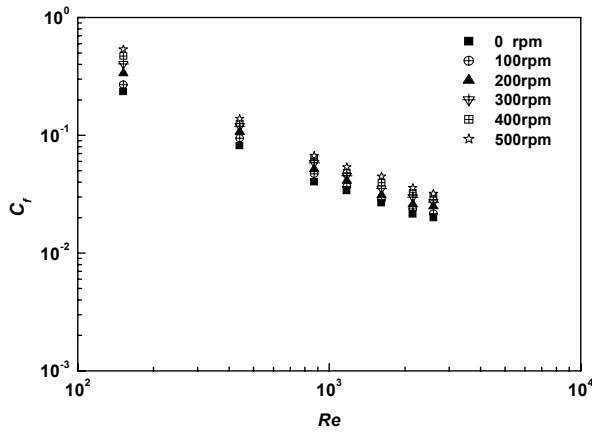


(b)  $k=0.8$

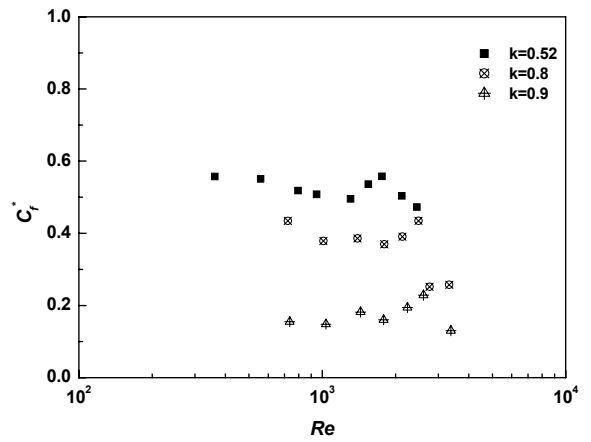


(c)  $k=0.9$

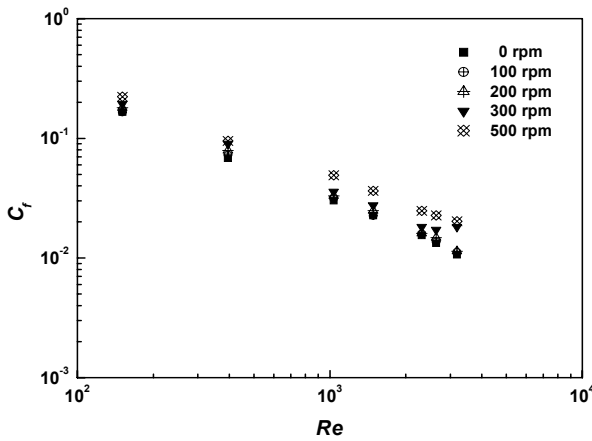
Fig. 2 Skin friction coefficient of water as a function of  $Re$  at various radius ratio



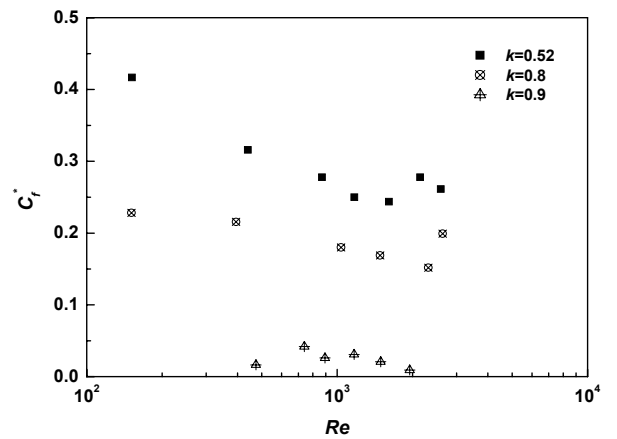
(a)  $k=0.52$



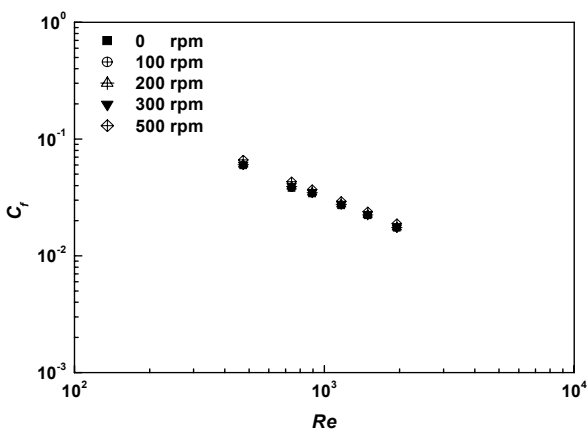
(a) water



(b)  $k=0.8$



(b) 0.2% CMC solution



(c)  $k=0.9$

**Fig. 3** Skin friction coefficient of 0.2% CMC as a function of  $Re$  at various radius ratio

**Fig. 4** Relative Skin friction coefficient of water and 0.2% CMC as a function of  $Re$  at 300 rpm

### 3.2 실험 결과

안쪽축이 회전하는 환형관 유동에 있어서 축방향 유동 및 안쪽축의 회전에 따른 유동의 변화를 살펴보기 위하여 레이놀즈수에 따른  $C_f$  변화를 Figs 2~4에서 나타내었다.

Figure 2는 반경비가 각각 0.52, 0.8, 0.9인 환형관에서 작동유체로 물이 흐르는 경우의 레이놀즈수에 따른 표면마찰계수의 변화를 나타내었다. 실험은 실제 굴착을 고려하여 층류영역에 대하여 실시하였다. 우선 기본적인 사항들을 검토해보면 유동 천이의 발생은 세 경우 모두 레이놀즈수 2,300 부근에서 발생하는 것을 표면마찰계수의

구배 변화를 통해서 확인할 수 있다. 축방향 유동과 축이 회전이 존재하는 이러한 유동은 일반적인 유동보다 훨씬 복잡한 유동 형태 및 유동 영역을 가진다. 예를 들면 축회전에 따른 Taylor 와의 발생으로 유동영역이 여러 부분으로 나뉜다. 본 연구에서 자세하게 제시하지는 않았지만 현재 수치해석 연구를 병행하면서 이 부분에 대한 연구를 보완하고 있다. 표면마찰계수는 층류 영역에서 레이놀즈수에 대하여 직선적으로 변화하며 천이와 난류영역으로 가면서는 복잡하게 변화하게 된다. 표면마찰계수는 안쪽축의 회전이 증가할수록 증가하는 현상을 보이며, 반경비가 증가할수록 동일 레이놀즈수에서 표면마찰계수는 회전의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 즉, 그림에서도 확인할 수 있듯이 회전수에 대한 변화의 폭이 감소함을 확인할 수 있다. 하지만 동일 레이놀즈수에서 표면마찰계수의 값은 거의 비슷하다. 이것은 반경비가 증가하면 커질수록 축방향 압력손실도 같이 증가하지만 축방향 유속 또한 증가하므로 표면마찰계수값은 거의 비슷하게 나타난다.

Figure 3은 반경비 0.52, 0.8, 0.9에서 0.2% CMC 수용액에 대한 레이놀즈수에 대한 표면마찰계수의 변화를 나타낸 그림이다. Figure 2의 물의 경우와 여러 가지 동일한 현상들을 관찰할 수 있다. 즉, 이 경우도 반경비가 증가할수록 표면마찰계수값을 비교해볼 때 회전의 영향이 작아지는 것으로 나타났다. 하지만 압력손실은 반경비가 커질수록 크게 나타났고, Figs. 2, 3에서 표면마찰계수값은 물에 비해 0.2% CMC 수용액의 경우가 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 반경비의 증가와 안쪽축의 회전수 증가에 따른 표면마찰계수의 변화를 살펴보면, 각각의 반경비에 대하여 0.2% CMC 수용액에서 회전의 영향이 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 반경비가 0.9의 경우는 표면마찰계수에 대한 회전의 영향이 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

이를 좀더 정량적으로 관찰하기 위해서 Fig. 4에 비회전시에 대한 회전의 표면마찰계수의 증가를 나타내었다. 모든 경우에서 반경비가 증가할수록 회전의 영향이 작아짐을 확인할 수 있다. 물의 경우 반경비 0.52, 0.8, 0.9에 대하여 각각 증가의 폭이 50%, 40%, 20% 정도임을 알 수 있다. 0.2% CMC 수용액의 경우는 각각의 반경비에

대한 증가가 25%, 20%, 5% 정도로 물의 경우에 비하여 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 여러 반경비의 동심 환형관 회전유동에 대한 실험적 해석을 수행하였다. 뉴턴 유체인 물과 비뉴턴 유체인 0.2% CMC 수용액을 이용하였고 완전 발달된 비압축성 층류유동에 대한 결과는 다음과 같다.

동심 환형관 유동에서 축방향 유속 및 안쪽축의 회전수 변화에 대한 표면마찰계수의 변화는 물과 CMC 수용액 모두 반경비가 증가할수록 안쪽축의 회전의 영향이 감소함을 보인다. 실험에서 측정된 축방향 압력손실값은 같은 경우에 대하여 물보다 CMC 수용액에서 더 크게 측정되었으며, 반경비가 증가할수록 즉, 환형관 간극이 작아질수록 증가하였다. 하지만 표면마찰계수를 계산하는데 있어서 분모에 축방향 유속이 존재하기 때문에 이 영향이 크게 나타난다.

#### 후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

- (1) Taylor, G. I., 1923, Stability of a Viscous Fluid Contained Between Two Rotating Cylinder, Phil. Trans., A. Vol. 223, pp. 289-343.
- (2) 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.
- (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) Aniekan W. I., 1980, Drilled-cuttings Transport by Non-Newtonian Drilling Fluids through

- Inclined, Eccentric Annuli, The University of Tulsa, Canada.
- (5) Deliche, R. A., Lejeune, M. W. D., Mawet, P. F. and Roland, V., 1992, Slimhole Drilling Hydraulics, Society of Petroleum Engineers Inc., SPE 24596, pp. 527-541.
- (6) Hall, C. R., and Ramos. Jr., 1992, Development and Evaluation of Slimhole Technology as a Method of Reducing Drilling Costs for Horizontal Wells, Society of Petroleum Engineers Inc., SPE 24610, pp. 681-691.
- (7) 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.
- (8) 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.