

환형관내 비뉴턴유체의 회전유동에 관한 연구

김영주* · 우남섭* · 서병택* · 황영규†

Flow of non-Newtonian fluid in a concentric annulus with rotation

Young Ju Kim, Nam Sub Woo, Byung Taek Seo and Young Kyu Hwang

Key Words: Transitional Flow(천이유동), Concentric Annulus(동심환형관), Helical Flow(나선유동), Rotating Flow(회전유동), Pressure loss(압력손실)

Abstract

This experimental study concerns the characteristics of vortex flow in a concentric annulus with a diameter ratio of 0.52, whose outer cylinder is stationary and inner one is rotating. Pressure losses and skin-friction coefficients have been measured for fully developed flow of bentonite-water solution(5%) when the inner cylinder rotates at the speed of 0~400rpm. The results of present study reveal the relation of the bulk flow Reynolds number Re and Rossby number Ro with respect to the skin friction coefficients. The effect of rotation on the skin friction coefficient is significantly dependent on the flow regime. In all flow regime, the skin friction coefficient is increased by the inner cylinder rotation. The critical (bulk flow) Reynolds number Re_c decreases as the rotational speed increases. Thus, the rotation of the inner cylinder promotes the onset of transition due to the excitation of Taylor vortices.

	기호설명	p	압력, (Pa)
		R_i	안쪽축 반경, (mm)
		R_o	바깥쪽 실린더 반경, (mm)
C_f	관마찰계수	Re	축방향 유동레이놀즈수
dp/dz	축방향 압력 손실, (Pa/m)	Re_c	임계레이놀즈수
D_h	등가수력직경, (mm)	Ro	로스비수
h	수두, (mm)	v_z	축방향 유동 속도, (m/s)
k	유체의 고유물성치($N \cdot s^n/m^2$)	Δz	탭 사이의 거리, (mm)

† 성균관대학교 기계공학부

E-mail : ykhwang@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7437 FAX : (031)290-5849

* 성균관대학교 대학원

Greek Symbols

η	반경비, (R_i/R_o)
θ	경사마노메타의 경사각도
μ	절대점성계수, (pa · s)

μ_a	걸보기점도
ρ	유체 밀도, (kg/m^3)

1. 서론

안쪽 실린더가 회전하는 환형관내 유동에 대해 Rayleigh는 비점성 유체라는 가정아래 최초로 회전유동의 안정성에 대한 연구를 하였으며, Taylor⁽¹⁾는 점성 유체에 대하여 선형이론을 적용하여 회전 유동의 안정성에 대한 연구를 수행하였다. 이후 이를 기초로 하여 환형관내의 유동과 안정성 그리고 열전달 해석 등에 대한 다양한 연구들이 이루어졌다. Nouri와Whitelaw⁽²⁾는 축방향 임계 레이놀즈수(Re_c)는 회전 레이놀즈수(Re_w)와 편심율이 증가할수록 감소함을 발견하였다. Escudier와 Gouldson⁽³⁾은 모든 유동영역에서 축회전수가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하며, 모든 유체에서 레이놀즈수가 증가하면서 축방향 속도의 불안정성이 점차 감소함을 발견하였다. Wereley 등⁽⁴⁾은 PIV를 이용하여 환형관내 유동의 속도분포, 축방향 레이놀즈수와 Taylor vortex의 관계를 측정하였다. 하지만 Wereley의 실험은 낮은 회전속도, 저유량의 영역이었다.

환형관 형태의 유동은 회전하는 전기기계에서의 냉각문제, 유정 굴착작업에서의 유동, 지하 소구경 굴착에서의 유동 문제 등 여러 분야에서 발견할 수 있다. 특히 유정의 굴착작업은 많은 진동과 유동 교란을 발생시키며 낮은 축회전수로 작동되어진다. 따라서 케이싱 내를 통과하는 유동은 천이 영역에서의 유동 특성을 가지며 축방향 유동과 회전이 존재하는 천이 영역에서의 유동 특성 문제는 굴착작업시 야기되는 중요한 문제이다.

현재 굴착작업시 직접적인 굴착경비 뿐만 아니라 드릴링 유체 및 굴착물의 이송에 필요한 소요 동력까지 포함한 전체 굴착소요경비는 굴착경, 굴착벽면과 드릴링 축간의 간극면적에 비례하기 때문에, 굴착경과 간극이 작은 Slim-Hole 굴착 기법이 요구된다. 이 굴착작업시 효율을 증대시키기 위해서는 적절한 유체의 이송속도를 제어하는 것이 필요하다. 특히 방향전환으로 인해 굴착 경이 기울어지면 이 문제는 더욱 중요해진다. 그

리고 벽면 근처에서의 유체의 속도구배와 압력을 제어하여 벽면의 안정성을 확보하는 것도 중요한 문제가 된다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 굴착작업에 대한 모형을 단순화한 실험 장치를 사용하여 실제 굴착작업에서 발생할 수 있는 경로변화에 따른 안정성을 파악하고자 하였으며 이를 위해서 수직 및 30° 경사진 환형관 실험장치에서 환형관의 각도 및 유량의 변화가 유동의 형태, 압력강하값 등에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

실험의 작동유체는 비뉴턴 유체인 5% 벤토나이트 수용액을 사용하였고, 축방향으로 완전히 발달된 유동장에 대하여 $Re=500\sim 11000$ 인 영역에서 안쪽축을 0~400rpm으로 회전시킬 경우의 압력손실값과 마찰계수 등을 측정하였다. 이로부터 유량과 회전수 변화에 따른 환형관내 천이영역에서의 유동특성을 파악하였다.

2. 관련이론

2.1 환형관 내부 유동의 마찰계수

실험적 표면마찰계수값은 임의의 두 지점에서 측정한 수두값을 식(1)에 대입하여 단위길이당 압력손실을 구한 후 마찰계수식 (2)에 대입하여 구한다.

$$\frac{dp}{dz} = \frac{gh \sin \theta (\rho_{ccl_4} - \rho)}{\Delta z} \quad (1)$$

표면마찰계수 식은 다음과 같다.

$$C_f = \frac{dp}{dz} \cdot \frac{D_h}{2\rho v_z^2} \quad (2)$$

여기서, $D_h = 2(R_o - R_i)$ 이다. 윗 식에서 본 연구에 관련된 변수들은 $D_h = 18.4 \times 10^{-3} m$, $R_o = 19.2 \times 10^{-3} m$, $\eta = 0.52$ 이고 레이놀즈수와 로스비수를 정의하면 다음과 같다.

$$Re = \rho \overline{v_z}^{(2-n)} D_h^n / \nu, \quad Ro = 2 \overline{v_z} / \omega R_i$$

2.2 작동유체의 특성

비뉴턴 유체는 전단응력과 전단률 사이에 비선

형적인 관계를 나타내며 본 연구에서 사용한 유체는 $n < 1$ 인 경우로 다음과 같은 power law 관계식이 적용된다.⁽⁶⁾

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

power law 에 관계된 겉보기점도 μ_a 를 n 의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\mu_a = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

본 실험에서는 작동유체로 5% 벤토나이트 수용액을 사용하였으며 점도값은 Brookfield사의 DV-III+로 측정하였다. 이로부터 5% 벤토나이트 수용액 비뉴턴 유체의 power law 특성을 나타낼 수 있었다⁽⁷⁾.

환형관 유동에서 머드의 속도분포는 가능한 균일하게 유지하는 것이 좋다. 속도분포는 환형관의 유동영역에 의존한다. 유동이 층류라면, 속도분포는 머드의 유연학적인 성질에 의존한다. 난류라면, 속도분포는 일정하게 되고 벽면 근처의 전단율과 전단응력은 너무 높아지고 따라서 압력손실이 중요해짐으로 이를 피하는 것이 중요하다. 다양한 머드 형태의 거동을 연구하기 위한 주요한 유연학적 모델은 newtonian, binghamian, oswaldian 3가지가 있다. 넓은 일정한 속도 영역을 얻기 위해선 binghamian 머드의 경우 항복값이 중요한 고려요소이고, oswaldian 머드이면 유연학적 거동지수가 중요한 고려사항이 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치

바깥쪽 실린더는 직경이 38.4mm인 구리(황동)파이프를 사용하였고, 안쪽축은 회전부와 고정부로 구성되어 있으며 개략적인 실험장치를 Fig. 1에 도시하였다. 회전부는 직경이 20mm인 스테인레스 강재 연마봉을 사용하고 비회전부는 축방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 시험부(test section)로부터 하단부의 회전하지 않는 축의 길이를 2.32m($116D_h$)로 직경이 20mm인 스테인레스 파이프안에 직경 17mm인 스테인레스 강재 연마봉을 삽입하였다. 길이가 1.5m인 회전축과

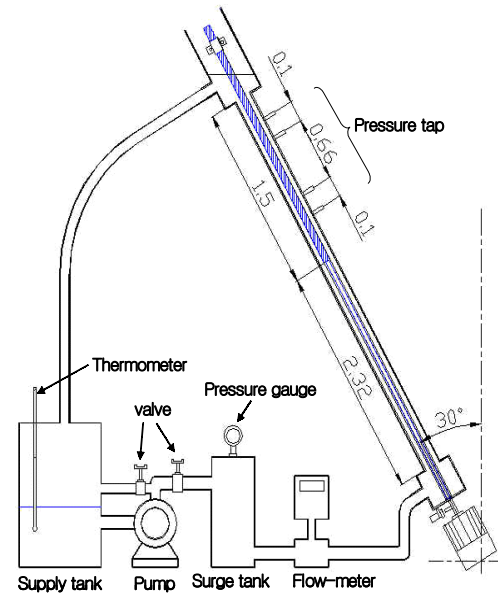


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus ; dimensions in (m)

고정축 안에 들어가는 회전부를 커플링으로 연결하였고, 축의 회전으로 인한 진동과 편심을 막기 위해 회전하지 않는 파이프의 하단부분과 중간부분, 상단부의 회전축과 연결되는 부분 등 3곳에 커넥터를 설치하였다. 회전축이 회전할 때 생기는 편심도는 $\pm 0.1\text{mm}$ 이내이며 차압을 측정하기 위해 시험부의 길이 방향으로 0.1m 간격으로 2개의 압력 탭을 설치하였으며, 가시화 실험을 하기 위한 0.6m의 간격을 아래방향으로 두고 0.1m 간격으로 2개의 압력 탭을 설치하였다. 또한 실험장치 윗부분에 부압이 발생하는 것을 방지하기 위해서 직경이 60mm인 고압호수를 사용하였다.

80ℓ의 용적을 가지는 수조로부터 작동유체를 공급하는 마그네틱 펌프는 온양정 9m일 때 최대 80LPM(ℓ/min)의 용량을 갖고, 펌프와 유량계 사이의 압력을 일정하게 유지하기 위해서 서지탱크를 설치하였다. 안쪽축은 1,500 rpm 까지 회전이 가능한 모터(A.C. motor)를 사용하여 회전시키고, 회전수는 근접스위치와 연결된 회전속도계(tachometer)를 통하여 알 수 있으며, 모터의 회전수는 인버터(inverter)에서 제어한다. 유량은 2~80LPM의 측정범위를 갖고 정확도가 0.5% 이내로 보정된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다. 작동 유체의 온도는 디지털 멀티미터를 사

용하여 측정하였다.

4. 결과

4.1 층류 및 천이 영역에서의 유동 특성

작동유체의 특성을 살펴보면 5% 벤토나이트 수용액의 점도는 물의 약 11배 정도를 나타내었다. 또한, 벤토나이트 수용액의 경우는 99%의 정확도로 비뉴턴 유체의 power law 특성을 나타내었다.

축방향 유량이 존재하고 안쪽축이 회전하는 환형관 유동은 Couette 유동과 Poiseuille 유동의 성질을 함께 나타내며, 물을 작동유체로 하여 축방향 유량과 회전수 변화에 따른 유동의 안정성 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 축방향 레이놀즈수가 증가하거나 안쪽축의 회전속도가 증가하면 유동이 불안정해지면서 난류로 바뀌는 것을 볼 수 있다.

축방향 레이놀즈수 증가에 따른 표면마찰계수의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 수직의 경우 비회전시 $Re < 1600$ 구간의 층류영역에서의 마찰계수값은 이론 마찰계수값 $C_f = 20.5Re^{-1}$ 에 4.6% 오차로 근접함을 알 수 있다. 또한 200rpm으로 회전하였을 경우, $Re < 1500$ 구간의 층류영역에서의 마찰계수값은 비회전시 마찰계수값과 평행을 이루며 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 400rpm으로 회전하였을 경우에 대해서도 확

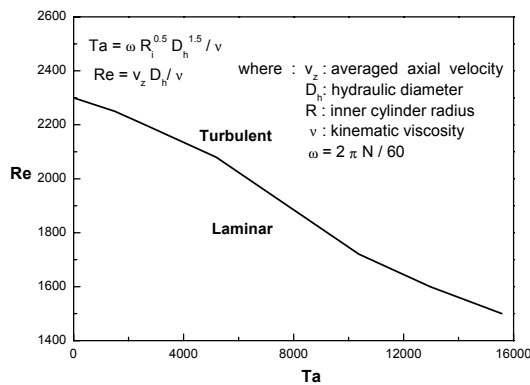
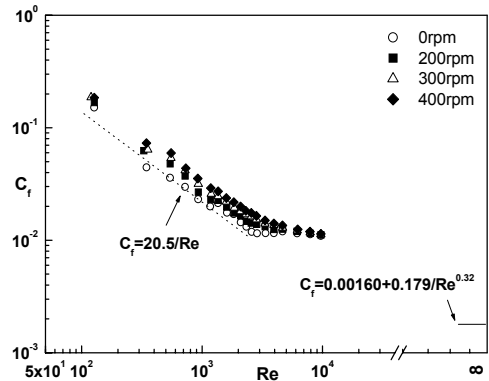
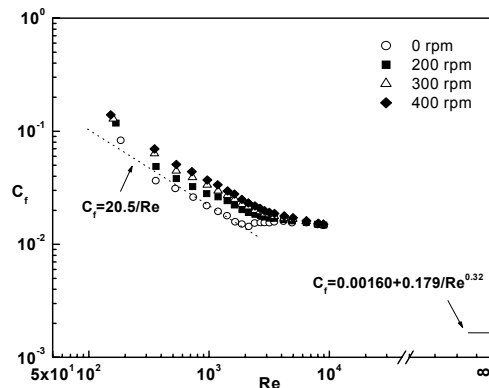


Fig. 2 Influence of rod rotation speed on transition between laminar and burbulent globalized flow regimes



(a) vertical

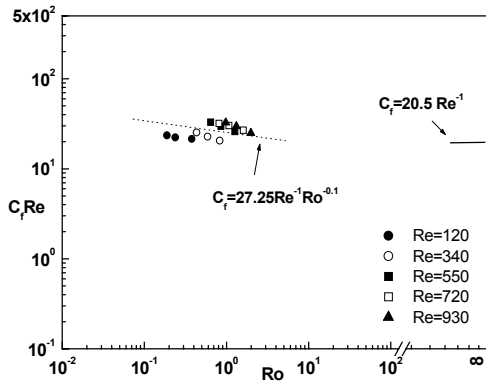


(b) 30° inclined

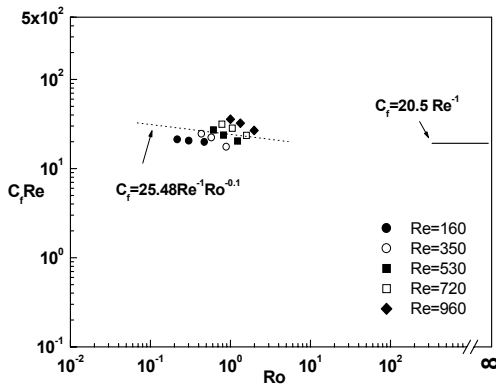
Fig. 3 Skin-friction coefficients of 5% bentonite solution as a function of Re at 0~400rpm

인할 수 있다. 또한 층류영역에서의 회전시 마찰계수값의 비회전시 마찰계수값에 대한 증가율은 회전수가 증가함에 따라 20~41%의 증가율을 보인다. 경사진 환형관의 경우 비회전시 $Re < 1500$ 구간의 층류영역에서의 마찰계수값은 수직 환형관과 마찬가지로 이론상의 마찰계수값에 4.9%의 오차로 근접하며, 층류영역에서의 회전시와 비회전시 마찰계수값은 18~34%의 증가율을 보인다.

축회전이 압력손실에 미치는 영향을 고려하기 위해 로스비수를 고려하여 Fig. 4에 나타내었으며 수직환형관의 경우 Ro , C_f , Re 의 관계식은 식 (5), 경사진 환형관의 경우는 식 (6)으로 각각 나타낼 수 있다.



(a) vertical



(b) 30° inclined

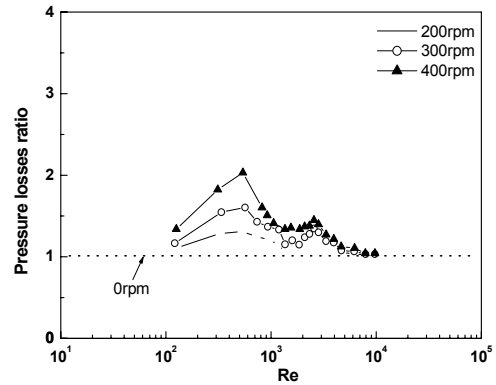
Fig. 4 Relation of $C_f Re$ with Ro for laminar flow in 5% Bentonite solution

$$C_f Re = 27.25 Ro^{-0.1} \quad (5)$$

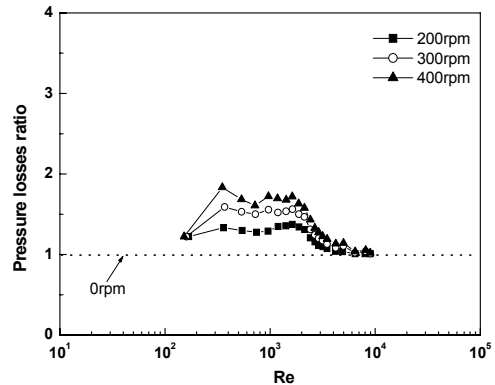
$$C_f Re = 25.48 Ro^{-0.1} \quad (6)$$

층류영역에서 로스비수가 무한히 증가하면 두 경우 모두 비회전시의 5% 이내의 오차 범위 안에서 접하는 실험관계식에 근접해 감을 예상할 수 있으며, 로스비수에 대한 $C_f Re$ 값은 수직 환형관인 경우에서 축회전수가 마찰계수값에 더 큰 영향을 미침을 의미한다.

천이난류영역에서는 회전에 의한 영향이 극히 적어 유량을 변화시켜도 마찰계수값이 큰 차이를 보이지 않으며 완전난류에서는 축회전수의 변화가 압력손실에 미치는 영향이 상대적으로 작아진다. 완전난류영역에서 축회전수의 변화는 물성치에 대한 영향이 거의 없고 관의 상대조도와 유량이 유동에 영향을 미친다. 따라서 로스비수가



(a) vertical



(b) 30° inclined

Fig. 5 The evolution of pressure losses ratio for 5% bentonite solution (Pressure losses with rpm/pressure losses rpm=0 at the same flow rate)

무한히 커지는 경우 점근적으로 비회전시 마찰계수값의 관계식으로 수렴해 가는 경향을 갖는다.

축회전수 변화에 따른 압력손실값의 비를 Fig. 5에 나타내었다. 수직환형관의 경우 층류영역에서는 축회전이 증가할수록 압력손실은 증가하여 수직 환형관은 300rpm으로 회전할 경우 비회전시보다 약 2.1배의 압력손실값을 나타내었다. 난류영역으로 갈수록 회전의 영향이 거의 무시되어 비회전시 압력손실값과 일치해 압력손실값의 비가 1에 가까워진다. 경사진 환형관의 경우는 축회전이 증가할수록 1.8배의 압력강하값을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 반경비 0.52인 수직 및 30° 경사진 환형관에서 비뉴턴 유체인 5% 벤토나이트 수용액을 사용하여 축회전수, 유량의 변화에 따른 압력손실과 표면 마찰계수의 변화 특성을 실험적으로 조사하였다.

5% 벤토나이트 수용액은 비뉴턴 유체의 power law 특성을 나타내었다. 5% 벤토나이트 수용액도 뉴턴유체와 마찬가지로 축방향 레이놀즈수가 증가함에 따라 압력손실은 증가하는 경향을 볼 수 있다. 축방향 임계레이놀즈수는 유변학적인 특성 때문에 뉴턴유체에 비하여 정확하게 구분하기가 쉽지 않았다. 층류 영역에서 회전수가 증가함에 따라 벤토나이트 수용액의 마찰계수 증가폭은 물의 경우에 비해 커진다. 난류 영역으로 갈수록 회전의 영향이 미치지 못하므로 증가폭은 거의 같아짐을 알 수 있다.

미끄럼 층류영역은 항상 입자 미끄럼 속도의 낮은 값을 제공하며, 대개 층류유동은 난류유동보다 더 나은 수송을 제공한다. 그러나 경사진 환형관의 경우는 수직인 것보다 입자 슬립속도의 축방향 성분의 중요성은 감소한다. 따라서 수직 환형관의 층류유동의 장점은 경사각이 증가하면 의미가 없다. 이는 경사진 환형관이 수직 환형관보다 난류가 촉진됨을 의미한다.

후 기

본 논문은 에너지관리공단의 지원하에 자원기술 학술진흥사업비(2001-R-RD03-P-02)에 의해 수행되었으며 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Taylor, G. I., 1923, "Stability of a viscous fluid contained between two rotating cylinder," *Phil. Trans. A*, Vol. 223, pp. 28~343.
- (2) 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.

- (3) Escudier M. P. and Gouldson I. W., 1995, "Concentric Annular Flow with Cente-body Rotation of a Newtonian and a Shear-thinning Liquid," *J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 16, No. 3, pp.156~162
- (4) Wereley, S. T. and Lueptow, R. M., 1998, "Spatio-temporal character of non-wavy and wavy Taylor-Couette flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 364, pp. 59~80.
- (5) Aniekan W. I., 1980, "Drilled-cuttings Transport by Non-Newtonian Drilling Fluids through Inclined, Eccentric Annuli," The University of Tulsa, Canada.
- (6) Wilkinson M. A., 1960, "Non-Newtonian Fluids, Fluid Mechanics, Mixing and Heat Transfer," Pergamon press.
- (7) Hwang, Y. K. and Kim, Y. J., 2002, "Helical Flow Study on non-Newtonian Fluid in an Inclined Annulus with Rotating Inner Cylinder," *Proc. of the KSME 2002*, pp. 1944-1949