

안쪽축이 회전하는 환형관내 비뉴턴유체 유동 연구

김영주¹⁾, 우남섭¹⁾, 황영규²⁾

Flow of Non-Newtonian Fluids in an Annulus with Rotation of the Inner Cylinder

Young-Ju Kim, Nam-Sub Woo and Young-Kyu Hwang

Abstract. This experimental study concerns the characteristics of a helical flow in a concentric annulus with a diameter ratio of 0.52, whose outer cylinder is stationary and inner one is rotating. The pressure losses and skin friction coefficients have been measured for the fully developed flow of Non-Newtonian fluid, aqueous solution of sodium carbomethyl cellulose (CMC) and bentonite with inner cylinder rotational speed of 0~400 rpm. Also, the visualization of helical flows has been performed to observe the unstable waves. The results of present study reveal the relation of the Reynolds number Re and Rossby number Ro with respect to the skin friction coefficients. In somehow, they show the existence of flow instability mechanism. The pressure losses increase as the rotational speed increases, but the gradient of pressure losses decreases as the Reynolds number increases in the regime of transition and turbulence. And the increase of flow disturbance by Taylor vortex in a concentric annulus with rotating inner cylinder results in the decrease of the critical Reynolds number with the increase of skin friction coefficient.

KeyWords: Concentric-Annulus Flow, Slim-Hole Drilling, Non-Newtonian Fluid

초 록. 본 연구는 안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더는 정지해있는 반경비가 0.52이고 30° 경사진 동심 환형관내의 헬리컬 유동 특성에 관한 것이다. 비뉴턴 유체인 CMC 수용액과 벤토나이트 수용액을 사용하여 안쪽축이 0~400rpm으로 회전할 때 축방향 유동을 완전히 발달시킨 후 축방향 압력손실값을 측정하였다. 또한, 헬리컬 유동의 가시화는 불안정한 파를 관찰하기 위해 수행되었다. 현재 연구 결과는 표면마찰계수에 대해 로스비수(Ro)와 레이놀즈수(Re)의 관계를 나타내었다. 또한, 그 결과들은 유동 불안정성 메커니즘의 존재를 보인다. 축회전수가 증가함에 따라 압력손실이 증가하지만, 그 증가폭은 천이 및 난류영역에서는 레이놀즈수가 증가할수록 감소하며, 회전의 영향으로 유동교란이 증진되어 천이가 촉진된다. 또, 이런 유동교란의 증진은 표면마찰계수값의 증가와 함께 임계 레이놀즈수(Re_c)를 작게 만든다.

핵심어: 동심 환형관 유동, 소구경 굴착, 비뉴턴 유체

1. 서 론

회전식 기계들은 회전부가 있고 이를 보호하는 케이싱부로 구성되어 있으며, 이것은 안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 환형관의 형태로 단순화시킬 수 있다. 안쪽축이 회전할 때 환형관 내를 통과하는 유동에 관한 연구는 저널 베어링의 윤활문제에서 직접 응용되고, 회전 튜브 열 교환기, 유정의 굴착작업, 지반분야의 소구경 지하굴착 등에 적용될 수 있다. 또한 화학적

혼합 시스템, 콘덴서, 최신 연소 시스템, 냉각 시스템, 혈액 산화기 등의 넓은 적용성으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다.

안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 환형관 내에서의 유동은 축회전수가 증가할수록 원심력에 의한 Taylor 와의 발생으로 유동교란이 증진되고 유동장에 많은 영향을 미친다는 사실이 Taylor¹⁾에 의해서 처음으로 규명되었으며, 그 후 비선형이론을 적용하여 Taylor수와 유동 안정성과의 관계를 Stuart²⁾와 Diprima³⁾가 밝혔다. 또한, 바깥쪽 축이 회전할 때는 상대적으로 유동이 안정하여 축방향으로의 임계레이놀즈수는 안쪽축이 회전할 때의 값보다 크고 압력손실이 적다는 것이 밝혀졌다⁴⁾. Nouri와 Whitelaw⁵⁾는 임계레이놀즈

¹⁾성균관대학교 기계공학과 대학원

²⁾성균관대학교 기계공학부

접수일: 2002년 10월 23일

심사 완료일: 2002년 12월 10일

수는 회전레이놀즈수(Re_m)와 편심률이 증가할수록 감소함을 밝혔다.

굴착작업시 직접적인 굴착경비뿐만 아니라 드릴링 유체 및 굴착물의 이송에 필요한 소요 동력까지 포함한 전체 굴착소요 경비는 굴착경(borehole), 굴착 벽면과 드릴링 축간의 간극면적에 비례하기 때문에 굴착경과 간극이 작은 Slim-Hole Drilling 기법이 요구된다⁶⁾. 이 기법의 채택시 굴착벽면과 드릴 회전축간의 간격이 작아서 굴착경이 큰 기존의 굴착작업에 비해 소요 에너지 절감뿐만 아니라, 부차적으로 파괴적인 진동감소에 의한 굴착작업 안전성 증대, 환경오염 극소화를 도모하여 전반적으로 50% 이상의 소요에너지 및 경비절감의 효과를 가져온다.

안쪽축이 회전하지 않는다면 환형관내 유동은 두 무한한 동축의 유동장과 일정한 압력구배 하에서의 이상적 유동으로 간주되며, 환형관 내에서의 중력은 안쪽축을 따라서 1차원 선형유동으로 가정할 수 있다. 또한 안쪽축이 회전하는 경우, 환형관 내 유동은 정상상태에서 유동장내 임의의 유체 입자는 일정한 축 압력구배(dp/dz), 중력 및 안쪽축이 회전함에 따른 전단응력의 영향에 의존적인 일정한 피치의 원통형 헬리컬 유동이 된다.

본 연구는 Slim-Hole Drilling 작업시 발생하는 헬리컬 유동에 관한 기초적 연구로서 굴착벽면에서 상대적으로 증대되는 전단응력, 굴착물 및 드릴링 유체의 이송에 필요한 헬리컬 유동형태를 규명하고자 한다. 이러한 연구결과는 Slim-Hole Drilling을 적절한 허용범위 내에서 제어하는데 필수적인 정보이다.

환형관 내에서의 압력손실은 안쪽축과 벽면사이의 간극, 축의 회전속도, 편심비에 의해 크게 영향을 받는다. 특히, 굴착 안전성을 고려하여 1000 rpm이하의 적절한 축회전수로 작동되어질 경우 환형관 간극이 비교적 작은 환형관에서의 드릴링 유체유동은 헬리컬 유동특성을 갖는다. 그러므로 헬리컬 유동형태는 굴착경(borehole)내의 유동장을 규명하는데 아주 효과적이다.

따라서, 본 연구는 유정의 굴착작업에서의 드릴링 유체유동에 대한 모델을 안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 환형관의 형태로 단순화하여 헬리컬 유동 형태를 실험과 유동가시화를 통하여 구체적으로 연구하고자 한다.

작동유체는 비뉴튼 유체인 0.2% CMC 수용액(Aqueous solution of sodium Carbomethyl cellulose)과 5% 벤토나이트 수용액을 사용하였고 완전히 발달된 유동장에 대하여 축방향으로의 레이놀즈수 $Re=100\sim 25000$ 인 영역에서 안쪽 축을 0~400 rpm으로 회전시킬 경우의 압

력손실값과 마찰계수 등을 측정하였다. 이로부터 유량과 회전수 변화에 따른 유동 천이와 함께 환형관 내 층류, 천이, 난류영역의 압력손실 특성을 파악하였다. 또한 Taylor와를 가시화하여 축회전수 및 레이놀즈수에 따른 와의 파장 변화를 파악하였다.

2. 관련 이론

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.

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

표면마찰계수식은 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. 위 식에서 본 연구에 관련된 변수들은 $D_h = 18.4 \times 10^{-3} \text{m}$, $R_o = 19.2 \times 10^{-3} \text{m}$, $\eta = 0.52$ 이고 레이놀즈수와 로스비수를 정의하면 다음과 같다. $Re = \rho \bar{v}_z^{(2-n)} D_h^n / \nu$, $Ro = 2\bar{v}_z / \omega R_i$, 여기서 D_h 는 수력직경, R_o 는 바깥실린더 반경, R_i 는 안쪽축 반경을 나타내며, η , ρ , n , ν , ω 는 각각 반경비, 작동유체의 밀도, 유동지수, 동점성계수 및 안쪽축의 각속도를 나타낸다.

2.2 작동유체의 특성

비뉴튼 유체는 전단응력과 전단률 사이에 비선형적인 관계를 나타내며 본 연구에서 사용한 유체는 유동지수 n 이 1보다 작은 경우로 다음과 같은 power law model 관계식이 적용된다⁷⁾.

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

power law model에 관계된 겔보기점도 μ_a 를 n 의 함수로 표현하면 다음과 같다.

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

본 실험에서는 작동유체로 0.2% CMC 수용액과 5% 벤토나이트 수용액을 사용하였으며 점도값은 Brook-

field사의 DV-III⁺로 측정하였다. 이로부터 0.2% CMC 수용액과 5% 벤토나이트 수용액 모두 비뉴턴 유체의 power law model 특성을 나타낸다⁸⁾.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 도시하였다. 실험 장치를 구성하는 부분은 크게 실린더부, 지지대, 유량 공급 및 회전부와 유량, 압력손실값, 온도 등을 측정하는 측정부로 구성되어 있다.

바깥쪽 실린더는 직경이 38.4 mm인 청동 파이프를 사용하였고, 안쪽축은 회전부와 고정부로 나누어 회전부는 직경이 20 mm인 스테인레스 강재 연마봉을 사용하고 비회전부는 축방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 시험부(Test section)로부터 하단부의 회전하지 않는 축의 길이를 2.32 m($126 \times D_h$)로 하였고 직경이 20 mm인 스테인레스 파이프안에 직경 15 mm인 스테인레스 강재 연마봉을 삽입하였다. 길이가 1.5 m인 회전축과 고정축 안에 들어가는 회전부를 연결하여 제작하였고, 축의 회전에 의한 진동과 편심을 막기 위해 회전하지 않는 파이프의 하단부분과 중간부분, 상단부의 회전축과 연결되는 부분 등 3곳에 커넥터를 설치하였다.

안쪽축이 회전할 때 생기는 편심도는 ± 0.1 mm 이내이며 차압을 측정하기 위해 시험부의 길이 방향으로 0.1 m 간격으로 2개의 압력탭을 설치하였으며 가시화 실험을 하기위한 0.6 m의 간격을 아랫방향으로 두고 0.1 m 간격으로 2개의 압력탭을 설치하였다. 또한 장치

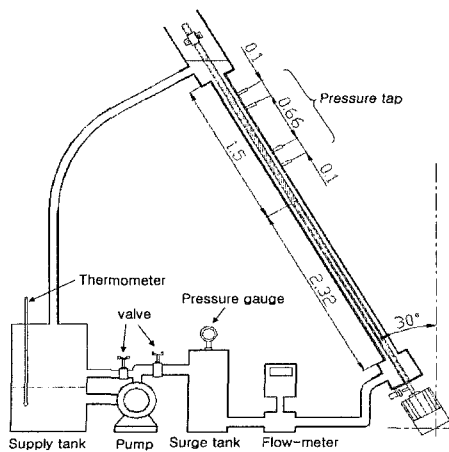


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

윗부분에 부압이 발생하는 것을 방지하기 위해서 직경이 60 mm인 고압호수를 사용하여 연결하였다.

80 l의 용적을 가지는 수조로부터 작동유체를 공급하는 마그네틱 펌프는 온양정 9 m일 때 최대 80 LPM의 용량을 갖는다. 안쪽축은 1500 rpm까지 회전이 가능한 모터(A.C. motor)를 사용하여 회전시키고, 회전수는 근접스위치와 연결된 회전속도계(tachometer)를 통하여 알 수 있으며 모터의 회전수는 인버터에서 제어한다.

유량은 2~300 LPM의 측정 범위를 갖고 정확도가 0.2% 이내로 보정된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다.

3.2 실험 방법

- ① 펌프의 전원을 연결하기 전에 우회 밸브(bypass valve)와 출구쪽 밸브를 완전히 개방하고, 출구쪽 밸브를 닫았다. 펌프의 작동이 정상적으로 되는 것을 확인한 후, 우회 밸브와 챔버 입구 밸브를 조절하여 챔버에 물을 공급한다.
- ② 챔버에 유체가 충분히 채워질 수 있도록 하고, 차압 측정을 위하여 경사마노미터와 탭 사이 튜브 안을 완전히 작동유체로 채운다. 마그네틱 유량계는 유량 공급부에 물이 차 있을 때에 작동시켜야 하며, 실험이 끝난 후 작동유체를 빼기전에 꺼야 한다.
- ③ 유량이 거의 2 LPM인 상태에서 경사마노미터 안에 있는 유체(CCl_4)의 수두값을 일치시키고, 우회 밸브와 출구 밸브를 조절하여 유량을 조절하면서 인버터와 회전속도계의 전원을 켜다.
- ④ 정상상태에서의 유량 및 압력 손실값을 측정하기 위해 유량 및 경사마노미터의 수두값이 일정해질 때까지 기다린 후, 수조의 온도를 멀티미터를 사용하여 측정하고 유량계의 유량과 경사마노미터의 차압을 측정한다.
- ⑤ 안쪽축이 회전할 때 생기는 교란의 영향을 감소시키기 위해 측 회전수를 일정하게 하고 정상상태가 될 때까지 기다린 후 유량, 차압, 온도 등을 측정한 후 유량을 변화시키면서 ④번의 과정을 반복한다.

4. 실험 결과

4.1 환형관내 유동 특성

지름비(η)가 0.52인 환형관 내에서 내경 38.4 mm인 바깥 실린더는 고정되어있으며 축경 20 mm인 안쪽축이 0~400 rpm으로 회전하는 30° 경사진 환형관에서 실험을 수행하였다. 먼저 작동유체의 특성을 살펴보면, 0.2% CMC 수용액의 경우 점도는 물의 약 5배, 5% 벤

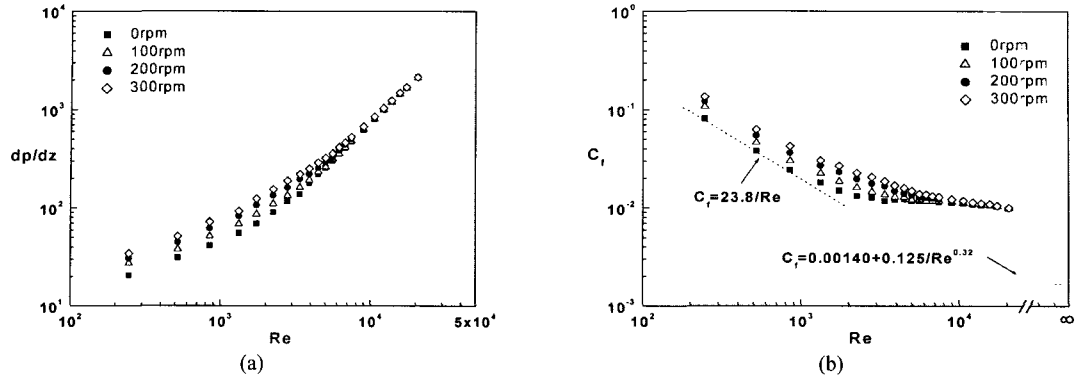


Fig. 2. Pressure losses and skin friction coefficients of 0.2% CMC solution as a function of Re at 0~300 rpm.

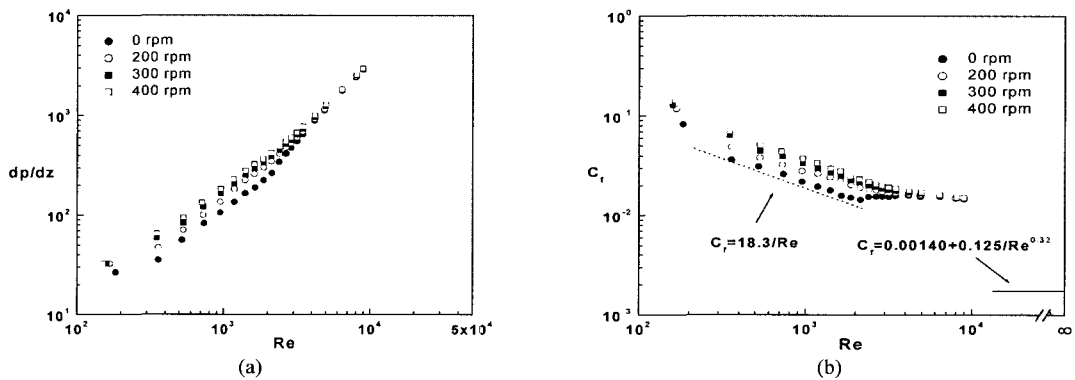


Fig. 3. Pressure losses and skin friction coefficients of 5% Bentonite solution as a function of Re at 0~400 rpm.

토나이트 수용액의 경우는 약 11배 정도를 나타내었다. 또한, CMC 수용액은 97%, 벤토나이트 수용액의 경우는 99%의 정확도로 각각 비뉴턴 유체의 power law model 특성을 나타내었다.

0.2% CMC 수용액과 5% 벤토나이트 수용액을 작동 유체로 하여 축방향 유량이 3~80 LPM ($100 < Re < 23000$)을 가질 때 측정된 압력손실구배를 Figs. 2(a), 3(a)에 나타내었고, 압력손실값을 이용하여 구한 표면 마찰계수값을 Figs. 2(b), 3(b)에 나타내었다.

축방향 레이놀즈수와 압력손실과의 관계를 나타낸 Fig. 2의 그래프에서 유량과 안쪽축의 회전수가 증가하면 압력손실값도 증가한다. 0.2% CMC 수용액과 5% 벤토나이트 수용액의 압력손실값을 비교해보면 동일 유량 및 회전수에서 벤토나이트 수용액의 압력손실값이 12~50% 크게 나타난다. Fig. 2(a) CMC 수용액의 경우를 보면 비회전의 경우 유량이 증가함에 따라 압력손실값은 평행하게 증가하다가 $Re=2200$ 부근에서 구배가 변하는 것을 볼 수 있었고 100~300 rpm으로 회전수가 증가하면서 각각 $Re=1950$, $Re=1800$, $Re=1750$

부근에서 구배가 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 회전수가 증가하면서 유동 교란이 증진되기 때문이다.

벤토나이트 수용액의 경우도(Fig. 2(b) 참조) CMC 수용액의 경우와 비슷한 경향을 나타내었다. 비회전의 경우 $Re=2100$ 부근에서 압력구배가 변화함을 확인하였고, 회전수가 증가할수록 구배가 변하는 레이놀즈수의 값이 작아지지만 정확하게 파악하기는 어렵고, 점근적으로 변해가는 것을 확인할 수 있었다.

유량이 증가하여 레이놀즈수가 10,000 이상이 되면 회전수에 상관없이 압력손실값이 일정해 짐을 알 수 있다. 0.2% CMC 수용액의 경우 오차범위는 5~33%, 5% 벤토나이트 수용액의 경우는 3~18% 였는데, 작동 유체의 온도 영향으로 오차가 크게 발생했다.

축방향 레이놀즈수와 표면마찰계수값과의 관계인 Fig. 3을 보면 유량 변화에 따른 바깥쪽 표면 마찰계수값의 변화를 알 수 있다. 표면 마찰계수값은 유량이 증가함에 따라 감소하고, 축회전수가 증가하면 표면 마찰계수값도 증가한다. 비회전시의 경우 CMC 수용액의 경우 $C_f = 23.8/Re$ 의 상관식으로, 벤토나이트 수용액의

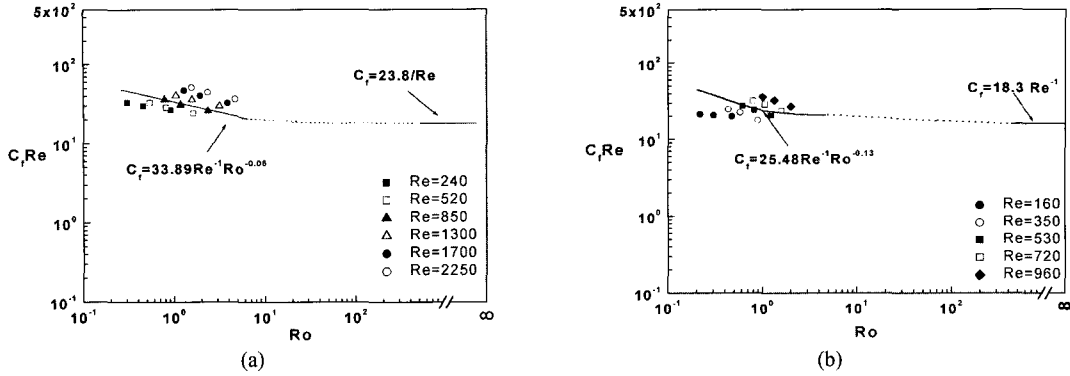


Fig. 4. Relation of $C_f Re$ with Ro for laminar flow in (a) 0.2% and CMC solution (b) 5% Bentonite solution.

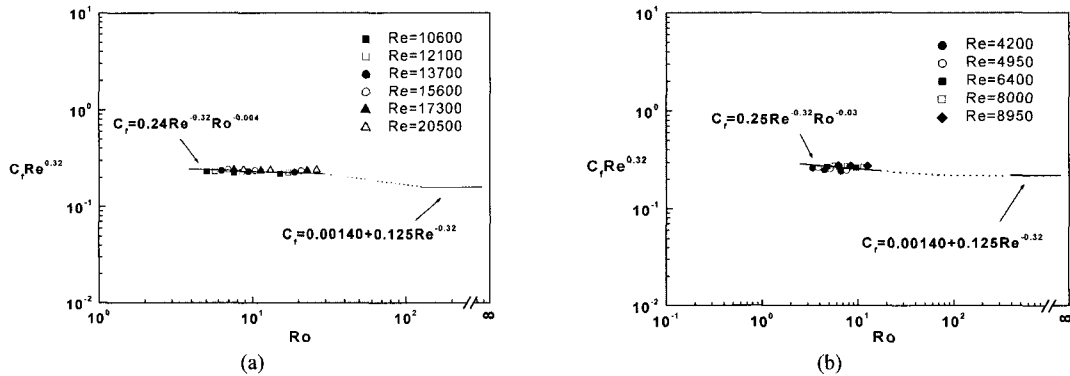


Fig. 5. Relation of $C_f Re^{0.32}$ with Ro for turbulent flow in (a) 0.2% and CMC solution (b) 5% Bentonite solution.

경우 $C_f = 18.3/Re$ 의 상관식으로 일치한다. 이 관계식은 층류영역에서 유량 증가에 따른 표면마찰계수의 감소율이 벤토나이트 수용액보다 CMC 수용액에서 더 크음을 의미한다. 또한 유량이 계속 증가하여 난류영역으로 가면 두 작동유체 모두 $C_f = 0.00140 + 0.125/Re^{0.32}$ 의 상관식으로 수렴해 간다⁹⁾.

안쪽축의 회전의 영향을 파악하기 위하여 회전레이놀즈수에 대한 축방향 레이놀즈수의 비인 로스비수를 도입하여, Ro 와 $C_f Re$ 와의 관계를 Figs. 4, 5에 나타내었다. 이 그림으로부터 CMC 수용액과 벤토나이트 수용액의 경우 층류 영역에서 Ro 와 $C_f Re$ 의 관계는 각각 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$C_f Re = 33.89 Ro^{-0.06} \quad (5. a)$$

$$C_f Re = 25.48 Ro^{-0.13} \quad (5. b)$$

위 두 상관식을 비교해보면 CMC 수용액의 계수가 더 큰데 이는 동일 조건에서 CMC 수용액의 표면마찰계수가 더 크음을 의미하며, 또한 로스비수의 계수가 더 큰 벤토나이트 수용액이 회전의 영향을 많이 받음을 의미하는 것이다.

토나이트 수용액이 회전의 영향을 많이 받음을 의미하는 것이다.

로스비수가 무한히 커지는 경우, 점근적으로 비회전시의 표면마찰계수값에 관한 식($C_f = 23.8 Re^{-1}$, $C_f = 18.3 Re^{-1}$)으로 수렴해 가는 경향을 갖는다.

난류영역에서는 $Re \geq 10000$ 인 경우, 유량과 축회전수를 변화시켜가면서 얻은 압력손실에 관한 실험자료로부터 축회전이 표면마찰계수에 미치는 영향을 로스비수와 $C_f \cdot Re^{0.32}$ 의 관계로 Fig. 5에 나타내었다.

난류영역에서는 회전에 의한 영향이 극히 적어 유량을 변화시켜도 마찰계수값이 큰 차이를 보이지 않는다. 이 결과로부터 난류영역에서 Ro , C_f , $Re^{0.32}$ 의 관계는 0.2% CMC 수용액과 5% 벤토나이트 수용액의 경우 각각 다음 식으로 표현된다.

$$C_f Re^{0.32} = 0.24 Ro^{-0.004} \quad (6. a)$$

$$C_f Re^{0.32} = 0.25 Ro^{-0.03} \quad (6. b)$$

로스비수가 무한히 커지는 경우, 층류영역에서와 마

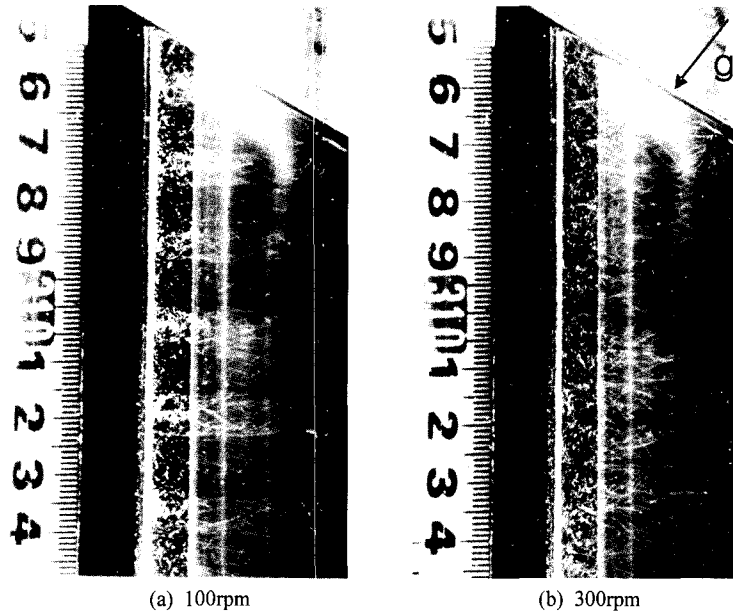


Photo. 1. Taylor vortices with the inner cylinder rotating at (a) 100rpm and (b) 300rpm ($Re = 0$, 30° inclined).

참가지로 점근적으로 비회전시의 마찰계수값에 관한 식 ($C_f = 0.00140 + 0.125/Re^{0.32}$)으로 수렴해 가는 경향을 갖는다.

4.2 환형관내 유동장의 가시화

축방향 유량이 없고 안쪽축이 100, 300 rpm으로 회전할 때, 작동유체로 물을 사용한 환형관내 유동 가시화를 photo. 1에 나타내었다. 축방향 유량이 없을 경우 50 rpm부터 일정한 간격의 Taylor와가 생성됨을 확인하였다.

100 rpm으로 회전할 경우 한 쌍의 와의 크기는 23 mm로 나타난다. 회전수가 빨라지면 와의 간격이 좁아지고, 300 rpm이상의 회전수에서는 규칙성있는 와가 생성되지 않으며 와 간의 간격이 좁아져 서로 얽혀서 구간을 구분하기가 어렵다. 또한 경사진 아래 면으로 가시화 입자가 침전되는 현상을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 반경비가 0.52이고, 30° 경사진 환형관에서 축회전수, 유량 및 작동유체의 변화에 따른 압력손실과 표면마찰계수의 유동 특성을 실험적으로 조사하였다.

- 1) 0.2% CMC 수용액과 5% 벤토나이트 수용액은 모두 비뉴턴 유체의 power law model 특성을 나타내었다.
- 2) 비뉴턴 유체의 경우도 뉴턴 유체의 경우처럼 축회전수의 증가에 따라 압력손실값이 증가하지만, 그 증가폭은 레이놀즈수가 증가할수록 감소한다. 또한, 축회전수가 증가할수록 축방향의 임계 레이놀즈수는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) CMC 수용액과 벤토나이트 수용액을 비교해보면 벤토나이트 수용액의 점도가 CMC 수용액의 2배 정도이고, 비뉴턴 유체의 유변학적 특성 때문에 동일 조건에서 압력손실값은 벤토나이트 수용액이 CMC 수용액보다 12~50% 크며, 층류영역에서는 0.2% CMC 수용액이 5% 벤토나이트 수용액보다 회전의 영향을 적게 받는다.
- 4) 안쪽축이 100 rpm으로 회전할 경우 한 쌍의 Taylor와가 연속적으로 생성되지만 300rpm 이상으로 증가하면 Taylor와를 관찰할 수 없었고, 환형관의 아랫부분으로 가시화 입자가 침전되는 현상을 관찰하였다.

다양한 반경비 및 작동유체에 대한 연구가 수행되어야 하지만 실험상의 어려움으로 데이터의 획득이 어렵다. 향후 정밀한 실험장치 및 수치해석을 통해서 부족한 부분을 보충하여 좀더 다양한 연구를 수행할 계획이다.

사 사

본 논문은 에너지관리공단 지원하에 에너지기술 학술진흥사업비(과제번호: 2001-R-RD03-P-02)에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

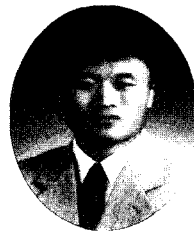
1. Taylor, G. I., 1923, Stability of a Viscous Fluid Contained Between Two Rotating Cylinders, *Pill. Trans. A*, 223, 289-343.
2. Stuart, J. T., 1958, On the Nonlinear Mechanics of Hydrodynamic Stability, *J. Fluid Mech.*, 4, 1-22.
3. Diprima, R. C., 1960, The Stability of a Viscous Fluid Between Rotating Cylinders with an Axial Flow, *J. Fluid Mech.*, 366, 621-631.
4. Yamada, Y., 1962, Resistance of a Flow through an Annulus with an Inner Rotating Cylinder, *Bull. JSME*, 5.18, 302-310.
5. Nouri, J. M. and J. H. Whitelaw, 1994, Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Concentric and Eccentric Annuli, *J. Fluids Eng.*, 116, 821-827.
6. Delwiche, R. A., D. B. Stratabit and M. W. D. Lejeune, 1992, Slimhole Drilling Hydraulics, *SPE 24596*, 521-541.
7. Wilkinson M. A., 1960, Non-Newtonian Fluids, Fluid Mechanics, Mixing and Heat Transfer, Pergamon press.
8. Hwang, Y. K. and Y. J. Kim, 2002, Helical Flow Study on Non-Newtonian Fluid in an Inclined Annulus with Rotating Inner Cylinder, *Proc. of the KSME 2002*, 1944-1949.
9. Metzner, A. B., and J. C. Reed, 1955, Flow of Non-Newtonian Fluids Correlation of the Laminar, Transition, and Turbulent flow Region, *J. of AICHE*, 1.4, 434-440.



김영주

1999년 성균관대학교 기계공학과
공학석사

Tel: 031-290-7499
E-mail: kyjp@mail.skku.ac.kr
현재 성균관대학교 기계공학과 박사과정



우남섭

1999년 성균관대학교 기계공학과
공학석사

Tel: 031-290-7499
E-mail: nswoo@mail.skku.ac.kr
현재 성균관대학교 기계공학과 박사과정



황영규

1977년 성균관대학교 기계공학과 공학사
1981년 Univ. of Wisconsin at Madison
기계공학과 공학석사
1984년 State Univ. of New York at
Buffalo 기계공학과 공학박사

Tel: 031-290-7437
E-mail: ykhwang@yurim.skku.ac.kr
현재 성균관대학교 기계공학부 교수