

굴착유체의 Slim Hole 환형관 내 유동특성에 관한 연구

서 병 택, 우 남 섭, 황 영 규*

성균관대학교 기계공학과 대학원, *성균관대학교 기계공학부

A Study on the Flow of Drilling Fluids in Slim hole Annuli

Byung-Taek Seo, Nam-Sub Woo*, Young-Kyu Hwang*

Graduated School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received July 15, 2005; revision received March 13, 2006)

ABSTRACT: The paper concerns an experimental study of fully developed laminar flow of a Newtonian and non-Newtonian liquid in concentric annuli with combined bulk axial flow and inner cylinder rotation. Pressure losses and skin friction coefficients have been measured for Newtonian fluid, water and non-Newtonian fluids, 0.2% aqueous of sodium carboxymethyl cellulose (CMC) and 5% bentonite solutions, when the inner cylinder rotates at the speed of 0~500 rpm. The influences of rotation, radius ratio and working fluid on the annular flow field are investigated. And the new correlations among the skin friction coefficient, the Reynolds number and the Rossby number are presented with reasonable limits of accuracy in laminar flow regime.

Key words: Slim hole annulus(소구경 환형관), Skin friction coefficient(표면마찰계수), Radius ratio(반경비), Rossby number(로스비수)

기 호 설 명

그리스 문자

C_f : 표면마찰계수
 D_h : 수력직경, $2(R_o - R_i)$
 dp/dz : 축방향 압력손실 [Pa/m]
 Re : 축방향 유동 레이놀즈수,
 $Re = \overline{v_z}^{2-n} D_h^n / \nu$
 R_i : 안쪽 축 반경 [m]
 R_o : 바깥 실린더 반경 [m]
 Ro : 로스비수, $Ro = 2\overline{v_z} / \omega R_i$
 v_z : 축방향 유속 [m/s]

η : 반경비, R_i/R_o
 μ : 절대점성계수 [Pa·s]
 ν : 동점성계수 [m²/s]
 ρ : 유체밀도 [kg/m³]

1. 서 론

환형관 유동은 두 원형관 사이의 공간을 유체가 통과하는 유동으로 안쪽 축이 회전하는 경우 유체요소들은 나선형 궤적으로 환형관을 통과한다. 이러한 유동을 헬리컬 유동이라고 하는데, 유체의 회전에 의한 Coriolis 힘이나 원심력에 의해 와(vortex)가 발생되면서 회전이 없는 유동의 경우보다 복잡한 유동형태를 보인다. 따라서 산업

† Corresponding author

Tel.: +82-31-290-7437; fax: +82-31-290-5889

E-mail address: ykhwang@skku.edu

체에서 사용되는 회전식 기계들에서 발생하는 유동현상을 이해하기 위해서는 회전유동 특성에 관한 고찰이 필요하다.

특히, 안쪽 축이 회전하며 바깥 케이싱의 안정성이 요구되는 유정이나 가스정의 굴착작업은 많은 진동과 교란을 발생시키며 벽면에서의 전단응력, 마찰에 의한 압력손실 등이 발생한다. 안쪽 축이 회전하는 환형관 유동에 영향을 미치는 주요 인자는 환형관의 기하학적 형상, 축 간의 간극 및 편심, 안쪽 축의 회전속도, 작동유체의 물성 등이 있으며 이러한 인자들에 의한 유동특성은 규명되어야 할 중요한 문제들이다.

1988년 Pearson⁽¹⁾의 보고에 의하면 매년 만개 정도의 가스정 및 유정의 굴착에 약 10^6 m^3 정도의 굴착유체가 사용되고 있다. 굴착작업을 수행하는 동안 굴착유체는 지표면의 굴착탱크에서 드릴 샤프트를 통하여 샤프트 끝단의 회전하는 노즐을 통하여 분출되고 드릴 샤프트와 케이싱 사이의 공간을 통하여 굴착잔재물과 함께 지표면으로 이송된다.

굴착유체는 일반적으로 비뉴턴 유체의 특성을 가지며 굴착잔재물의 이송과 시추공 내 압력을 조절하는 역할을 수행한다. 굴착잔재물의 이송을 고려할 때 굴착이수의 속도는 약 0.5 m/s 정도가 적당한 것으로 알려져 있는데 이는 비뉴턴 유체의 경우 레이놀즈수 2,000 이하의 층류 유동영역에 해당된다. 층류 유동은 벽면과의 작은 속도구배로 인해 벽면 전단응력을 감소시키기 때문에 유정의 안정성 측면에서도 유리하다.

최근 slim hole 시추기법은 기존의 시추기법에 비해 굴착공의 바깥 직경을 50% 이상 감소시켜 소요 동력절감뿐만 아니라 굴착유체의 사용량을 줄임으로써 환경오염 또한 감소시킬 수 있는 시추기법이다. Slim hole 환형관에서는 작은 직경과 간극으로 인하여 안쪽 축의 회전속도가 빨라져야 하고 좁은 간극으로 이수가 통과해야 하기 때문에 기존 시추기법에서는 중요하게 고려되지 않았던 유체공학 현상들이 나타나며 굴착이수의 특성이 중요해진다.⁽²⁾

환형관 유동에 대한 연구는 20세기 초 Taylor에 의해 처음으로 수행되었으며 최근에는 Nouri and Whitelaw,⁽³⁾ Escudier and Gouldson⁽⁴⁾ 등이 동심 및 편심 환형관 유동에 대한 연구를 수행하였고, Richard and Othmen⁽⁵⁾은 벤토나이트 수용

액을 이용하여 환형관 내 유동특성을 연구한 바 있다. 또한 국내에서는 Hwang and Kim⁽⁶⁾이 반경비 0.52의 환형관에서 다양한 유체에 대한 연구를 수행하였지만 아직까지 반경비 0.8 이상의 slim hole 환형관 유동에 대한 연구는 발표되지 않고 있다.

본 연구에서는 slim hole 시추작업을 모사한 실험장치를 이용하여 반경비 0.52, 0.8, 0.9의 환형관에서 작동유체와 안쪽 축의 회전에 대한 축방향 압력손실, 표면마찰계수의 변화와 같은 slim hole 환형관 내 유동특성을 파악하고자 한다.

2. 관련 이론

2.1 환형관 내 유동 마찰계수

실험적 표면마찰계수값은 임의의 두 지점에서 측정된 축방향 압력차이를 식(1)에 대입하여 단위길이당 압력손실을 구한 후 식(2)에 대입하여 표면마찰계수를 계산한다.

$$\frac{dp}{dz} = \frac{gh(\rho_{ccl4} - \rho)}{\Delta z} \quad (1)$$

여기서, g 는 중력가속도, h 는 마노미터의 수두, Δz 는 압력탭 사이의 거리, ρ_{ccl4} 및 ρ 는 사염화탄소와 작동유체의 밀도를 각각 나타낸다. 표면마찰계수를 구하는 식은 다음과 같다.

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

여기서, $D_h (= 2(R_o - R_i))$ 는 수력직경이고, \bar{v} 는 축방향 평균 유속이다.

2.2 작동유체의 특성

비뉴턴 유체는 전단응력과 전단율이 비선형적인 관계를 가지며 본 연구에서 사용한 비뉴턴 유체는 유동거동지수(flow behavior index) n 이 1보다 작은 경우로 다음과 같은 power law 모델 관계식이 적용된다.

$$\tau = K\gamma^n \quad (3)$$

유동거동지수 n 은 뉴턴 유체에서 벗어남의 정도를 나타내는 값이고, 상수점도(consistency factor) K 는 유체의 점도에 관계된 값이다. 뉴턴 유체인 물의 경우 n 값은 1, K 값은 1 cP이다.

본 실험에서는 작동유체로 물과 0.2% CMC 및 5% 벤토나이트 수용액을 사용하였으며 점도는 Brookfield사의 DV-III[†] 점도계로 측정하였다.

0.1~0.4% CMC 수용액을 이용하여 실험을 수행한 결과 n 값은 0.9에서 0.56까지 감소하였고, 표면마찰계수와 유량의 관계를 분석한 결과 유체의 저항의 감소는 0.2% CMC 수용액에서 가장 크게 발생하였다. 이는 Pinho and Whitelaw⁽⁷⁾의 결과와도 일치하는 결과이고 따라서 power law 유체의 특성을 가장 잘 나타내는 0.2% CMC 수용액과 실제 굴착이수로 사용되는 벤토나이트 수용액을 이용하여 유동특성을 분석하였다.

Power law 모델을 적용하였을 때 0.2% CMC 수용액의 n 값은 0.87, K 값은 6.5 cP를 나타내었고, 5% 벤토나이트 수용액의 n 값은 0.78, K 값은 14.8 cP로 측정되었다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

반경비가 0.52인 환형관의 경우 바깥쪽 실린더는 직경이 38.4 mm인 황동 파이프를 사용하였고, 안쪽 축은 외경이 20 mm인 스테인레스 봉을 사용하였다. 반경비가 0.8과 0.9인 경우는 좁은 간극과 진동의 문제로 실험장치를 새로 제작하였고 개략도를 Fig. 1에 도시하였다.

바깥 실린더는 교체가 가능하도록 제작하여 반경비를 변화시켜 가면서 실험을 수행할 수 있도록 하였다. 축방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위하여 환형관 시험부로부터 하단까지의 축방향 길이를 1 m ($126 D_h$)로 하였다. 안쪽 축이 회전할 때 생기는 편심도는 ± 0.1 mm 이내이며 축방향 압력손실을 측정하기 위하여 축방향 0.53 m 간격으로 2개의 압력 탭을 설치하였다.

80 L의 용적을 가지는 수조로부터 작동유체를 공급하는 마그네틱 펌프는 온양정 9 m일 때 최대 80 LPM(L/min)의 용량을 갖고, 펌프와 유량계 사이의 압력을 일정하게 유지하기 위해서 서지탱크를 설치하였다. 안쪽 축은 1,000 rpm까지 회전이

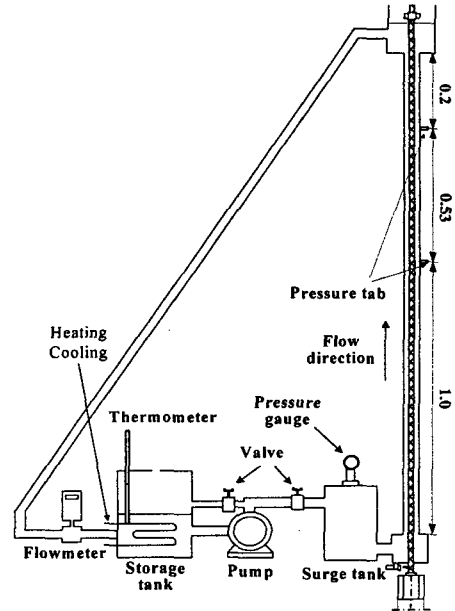


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus; All dimensions in m.

가능한 모터를 사용하여 회전시키고, 회전수는 근접 스위치와 연결된 회전속도계를 통하여 측정하였으며, 모터의 회전수는 인버터에서 제어하였다. 유량은 1~60 LPM의 측정범위를 갖고 정확도가 0.5% 이내로 보정된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다.

3.2 실험방법

비뉴턴 유체의 실험에 있어서는 Pinho and Whitelaw⁽⁷⁾가 밝힌 일정시간의 유동 후 발생하는 비뉴턴 유체의 감성(degradation)효과를 고려하여 1회의 실험을 수행하는 데 6시간을 초과하지 않았다. 벤토나이트 분말의 경우는 완전히 수화시키기 위하여 실험 전에 6일 동안 혼합하였다.

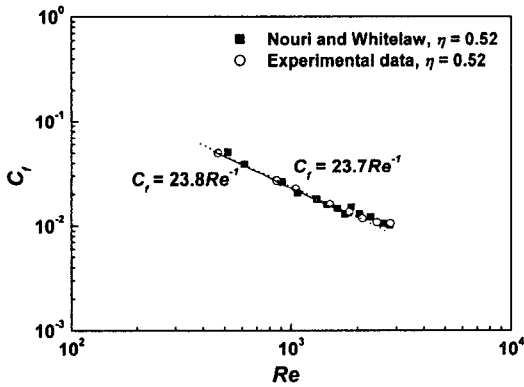
실험은 뉴턴 및 비뉴턴 유체에 대하여 동일한 방법으로 수행하였다. 펌프를 가동시킨 상태에서 바이패스 밸브를 이용하여 유량을 조절하였고 동시에 안쪽 축을 회전시키면서 유동이 안정화된 상태에서 축방향 압력손실값을 측정하였다. 실험을 진행하면서 관내 마찰과 펌프의 작동에 의해서 수온이 상승하게 되는데 항온조를 이용하여 유체의 온도를 최대한 일정하게 유지하였다.

4. 실험결과 및 고찰

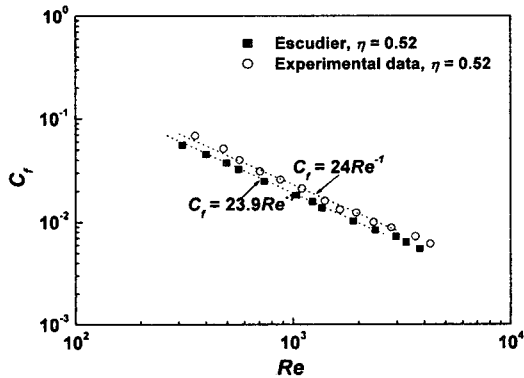
4.1 실험결과

반경비 0.52의 환형관에서 비회전시의 축방향 레이놀즈수에 대한 표면마찰계수의 관계를 Nouri and Whitelaw,⁽³⁾ Escudier and Gouldson⁽⁴⁾의 실험결과와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다.

물의 경우 Fig. 2(a)에 보이는 바와 같이 비회전시의 표면마찰계수와 레이놀즈수의 관계에 대한 Nouri and Whitelaw의 실험식과 본 실험의 결과는 잘 일치한다. 비뉴턴 유체인 0.2% CMC 수용액에서는 Escudier의 실험결과와 본 실험의 결과가 1%의 오차범위로 일치하였다. 물에 비하여 오차가 증가하는데 그 이유는 CMC 성분의 차이 때문인 것으로 사료된다.



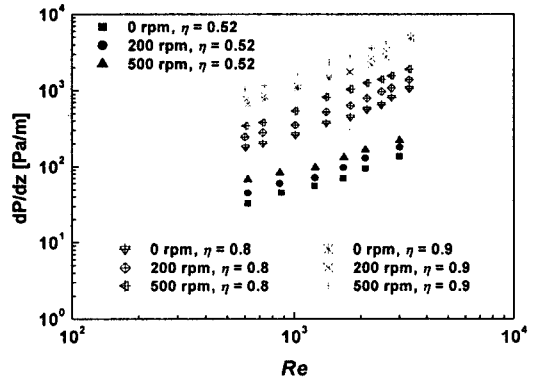
(a) Water



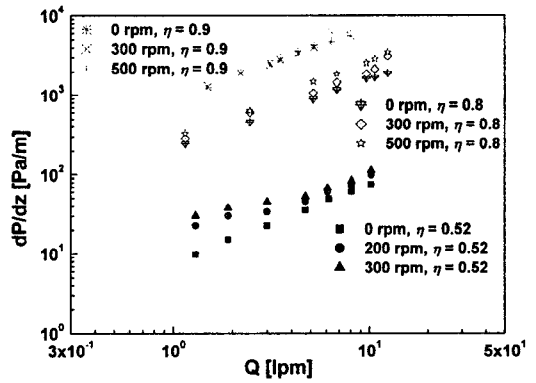
(b) 0.2% CMC solution

Fig. 2 Comparison of experimental data for water and 0.2% CMC solution at 0rpm.

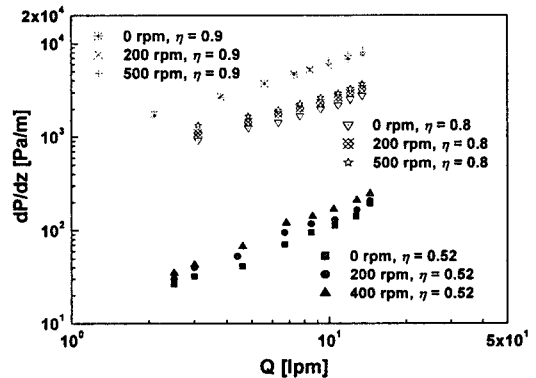
환형관 형상과 안쪽 축의 회전은 축방향 압력 손실에 큰 영향을 미치며, 특히 slim hole 환형관에서는 그 형상이 더욱 증대된다. 정확한 압력손실의 계산과 제어가 굴착작업의 안정성과 굴착벽



(a) Water



(b) 0.2% CMC solution



(c) 5% bentonite solution

Fig. 3 Relation of pressure loss with Re and flow rate at various rotational speed.

면의 보호에 필수적인 요소인데 slim hole에서는 이러한 작업이 더 어려워진다. 반경비와 작동유체의 변화에 대한 축방향 압력손실의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 유정의 시추작업에서는 굴착벽면에서 과도한 전단응력의 발생을 방지하기 위하여 굴착이수의 유동은 일반적으로 층류영역에 속하며 본 연구에서도 층류영역에 대한 실험만을 수행하였다.

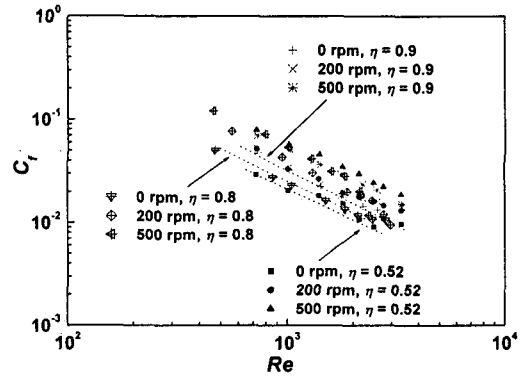
작동유체가 물인 Fig. 3(a)에서 축방향 압력손실은 반경비, 유량 및 안쪽 축의 회전이 증가할수록 증가한다. 안쪽 축의 회전이 0 rpm에서 500 rpm으로 증가할 경우 압력손실의 증가율은 반경비 0.52, 0.8, 0.9의 경우 각각 50%, 45%, 30%로 계산되었다. 반경비가 0.52에서 0.8로 증가할 경우 비회전시 압력손실의 증가는 80% 0.9일 경우는 95%까지 증가하였다. 안쪽 축의 회전은 굴착 잔재물의 이송에 도움이 되지만 회전수 증가에 따른 이러한 압력손실의 증가는 굴착 벽면의 제어에 중요한 변수가 된다.

비뉴턴 유체의 경우는 레이놀즈수의 정의가 뉴턴 유체인 물처럼 간단하지 않기 때문에 Fig. 3 (b)와 (c)에 보이는 바와 같이 유량변화에 대한 압력손실의 관계로 나타내었다. 작동유체가 0.2% CMC 및 5% 벤토나이트 수용액의 경우는 안쪽 축의 회전보다는 반경비의 변화가 축방향 압력손실에 큰 영향을 미친다. 0.2% CMC 수용액의 경우 각각의 반경비에 대해서 회전의 영향이 물에 비해 현저히 줄어드는데, 특히 반경비가 증가할수록 그 영향은 더 명확해진다. 반경비 0.9에서는 안쪽 축이 비회전시에서 500 rpm으로 증가할 경우 압력손실 증가율은 최대 13% 정도를 나타내었다. 5% 벤토나이트 수용액의 경우도 0.2% CMC 수용액과 비슷한 특성을 나타낸다. 두 비뉴턴 유체 모두 유동거동지수 n 값이 1보다 작은 전단연화 (shear thinning) 유체의 특성을 가지는데, 이러한 유체들의 유동특성은 n 값, K 값과 같은 유변학 변수들을 고려해서 비교되어야 한다.

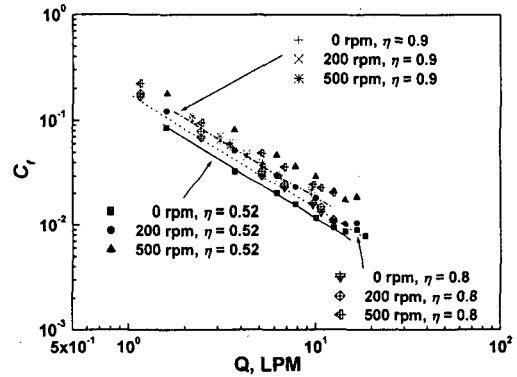
압력손실로부터 계산된 축방향 유동에 대한 표면마찰계수의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 파이프 유동에서와 마찬가지로 환형관 유동에서도 표면마찰계수와 축방향 유동레이놀즈수의 관계는 층류 유동의 경우 선형적으로 감소하는 특성을 보인다. 표면마찰계수는 유동 천이영역에서는 불규칙적으로 변화하다가 유동이 난류로 발달해 가면

유속과 벽면 조도의 영향을 함께 받으면서 일정하게 감소한다.

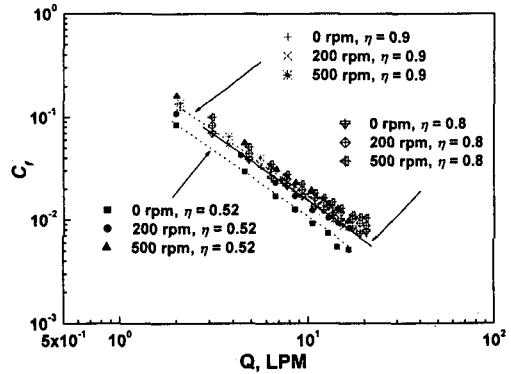
물의 경우 비회전시 표면마찰계수는 Fig. 4(a)에서와 같이 반경비가 증가할수록 증가하며, 회전



(a) Water



(b) 0.2% CMC solution



(c) 5% bentonite solution

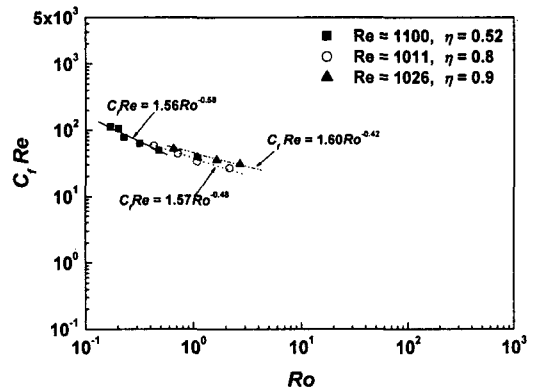
Fig. 4 Relation of skin friction coefficient with Re and flow rate at various rpm.

의 영향은 반경비가 증가할수록 감소한다. 이는 반경비가 증가할수록 축방향 유속의 영향이 증가하면서 회전의 영향이 상대적으로 감소하기 때문이다. 비회전시 표면마찰계수와 레이놀즈수의 관계는 반경비 0.52의 경우 Fig. 2에서와 같이 $C_f = 23.8/Re$ 이며 반경비가 증가할수록 분자의 상수값이 24에 접근하게 된다. 0.2% CMC 및 5% 벤토나이트 수용액의 경우는 Fig. 3에서처럼 Fig. 4(b)와 (c)에 보이는 바와 같이 축방향 유량에 대한 표면마찰계수의 관계로 나타내었다. 물에서와 마찬가지로 두 비뉴턴 유체에서도 반경비가 증가할수록 표면마찰계수가 증가하지만 회전수 증가에 따른 표면마찰계수의 증가율은 작아진다. 결과적으로 동일한 반경비에 대해서 안쪽 축의 회전의 영향은 물에서 가장 크며 0.2% CMC 수용액과 5% 벤토나이트 수용액으로 가면서 점점 작아진다. 이는 전단연화 특성을 갖는 비뉴턴 유체들의 유동에 있어서 전단율이 증가할수록 유동에 대한 저항이 감소하는 현상 때문인데, 0.2% CMC 수용액에 비해 5% 벤토나이트 수용액에서 이러한 현상이 더 크게 나타난다.

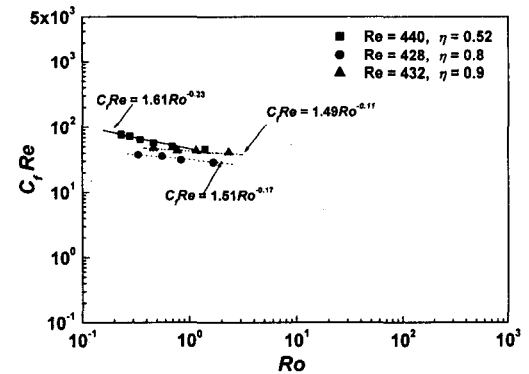
따라서 Hwang et al.⁽⁶⁾의 논문에서 보인 바와 같이 환형관 유동에서 축방향 유동과 안쪽 축의 회전이 동시에 존재하는 유동은 헬리컬 유동형태를 나타내고 이는 유정의 굴착작업시 잔재물의 이송에 효과적으로 작용하는 것으로 보고하였다. 결과적으로 반경비 0.8 이상의 slim hole 유동에서는 축방향 압력손실이 증가하기는 하지만, 안쪽 축의 회전은 표면마찰계수의 큰 변화 없이 헬리컬 유동을 형성시킬 수 있기 때문에 굴착잔재물의 이송에 유리하게 작용할 수 있다.

환형관 유동에서 축방향 유량과 안쪽 축의 회전에 의한 유동의 변화를 동시에 관찰하기 위해서 로스비수(Ro)를 고려하였다. 로스비수는 관성력(축방향 유량)에 대한 Coriolis 힘(안쪽 축의 회전)의 비를 나타내는 무차원수이다. 각 유체에 대하여 축방향 레이놀즈수와 표면마찰계수의 로스비수에 대한 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 세 유체와 반경비 변화에 대하여 특정한 레이놀즈수에서 $C_f Re - Ro$ 의 상관식을 구하였다. 세 유체에 대해서 유량이 가장 작은 경우의 실험에 대한 불확실도(uncertainty)는 $\pm 5\%$ 미만이었다. 관계식에서 로스비수 앞의 계수는 환형관 형상에 관계된 값이고, 로스비수 위의 지수는 안쪽 축의 회전의 영

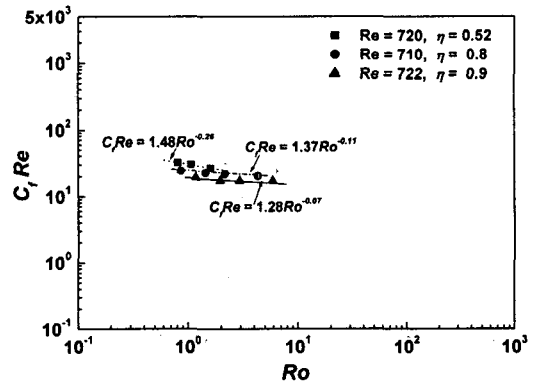
향을 나타내는 값이다. 즉, 로스비수 위의 지수가 클수록 회전의 영향이 크다는 것을 의미한다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 $C_f Re - Ro$ 의 관계식을 살펴보면 회전의 영향이 물, 0.2% CMC 수용액, 5



(a) Water



(b) 0.2% CMC solution



(c) 5% bentonite solution

Fig. 5 Relation of $C_f Re$ with Ro for laminar flow.

% 벤토나이트 수용액으로 갈수록 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이를 로수비수의 관점에서 살펴보면 물의 로수비수가 비뉴턴 유체의 로수비수보다 작기 때문이다. 또한, 동일한 유체에서 반경비 변화에 대하여 유도된 상관식을 살펴보면 반경비가 증가할수록 회전의 영향이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 반경비 0.52, 0.8 및 0.9인 수직 환형관에서 축회전수, 유량 및 작동유체의 변화에 따른 압력손실과 표면마찰계수의 변화 등의 slim hole 환형관 내 유동특성을 고찰하였다. 실험결과 분석에 따른 주요 결론은 다음과 같다.

뉴턴 및 비뉴턴유체 모두 반경비, 축회전수, 축방향 유량이 증가할수록 축방향 압력손실은 증가하였다.

0.2% CMC 수용액의 압력손실 변화도 물의 경우와 비슷하지만, 물에 비하여 축방향 압력손실이 증가한다. 또한 동일한 축방향 유량에 대하여 반경비와 안쪽 축의 회전이 증가할수록 표면마찰계수의 증가율은 감소한다. 이는 전단연화유체의 유동에 있어서 유속이 증가할수록 유동에 대한 전단응력이 감소하기 때문이다. 5% 벤토나이트 수용액의 경우도 0.2% CMC 수용액과 유사한 유동특성을 보이지만, 0.2% CMC 수용액에 비해 축방향 압력손실은 크다. 이는 5% 벤토나이트 수용액의 상수점도 K 값의 증가가 주요 원인이다.

유체의 제어에 있어 중요한 변수인 축방향 압력손실은 반경비가 증가할수록 급격하게 증가하였으며 표면마찰계수도 증가한다. 또한 안쪽 축의 회전은 압력손실과 표면마찰계수를 증가시키지만 반경비가 증가할수록 회전에 대한 표면마찰계수의 증가율은 작아져 굴착잔재물 이송에 효과적인 헬리컬 유동의 형성에 유리하다.

후 기

이 논문은 2005년도 두뇌한국21사업과 에너지

관리공단의 에너지기술 학술진흥사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Pearson, J. R. A., 1988, Rheological principles and measurements applied to the problems of drilling and completing oil wells, Proceeding of the Xth International Congress on Rheology, Sydney, Vol. 1, pp. 73-78.
2. Delwiche, R. A., Lejeune, M. W. D. and Stratabit, D. B., 1992, Slimhole Drilling Hydraulics, Society of Petroleum Engineers Inc., SPE 24596, pp. 521-541.
3. Nouri, J. M. and Whitelaw, J. H., 1994, Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in a concentric annulus with rotation of the inner cylinder, J. Fluids Eng., Vol. 116, pp. 821-827.
4. Escudier, M. P. and Gouldson, I. W., 1995, Concentric annular flow with centerbody rotation of a Newtonian and a shear-thinning liquid, Int. J. Heat and Fluid Flow., Vol. 16, pp. 156-162.
5. Richard, E. W. and Othmen, A.-R., 1970, Helical Flow of Bentonite Slurries, SPE 3108.
6. 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, pp. 1944-1949.
7. Pinho, F. T. and Whitelaw, J. H., 1990, Flow of non-Newtonian fluids in a pipe, Int. J. of Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 34, pp. 129-144.
8. Shah, R. K. and London, A. L., 1978, Laminar Flow Forced Convection in Ducts, Academic Press, New York.
9. Dodge, D. W. and Metzner, A. B., 1959, Turbulent flow of non-Newtonian system, J. Am. Inst. Chem. Eng., Vol. 5, No. 2, pp. 198-204.