

안쪽축이 회전하는 경사진 환형관내 비뉴턴 유체의 헬리컬 유동 연구

김영주¹⁾ · 우남섭¹⁾ · 황영규²⁾

1. 서론

안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 환형부 내에서의 유동은 축회전수가 증가할수록 원심력에 의한 Taylor 와의 발생으로 유동교란이 증진되고 유동장에 많은 영향을 미친다는 것은 처음 Taylor⁽¹⁾에 의해 규명되었다. Nouri와Whitelaw⁽²⁾는 축방향으로의 임계 레이놀즈(Re_c)수는 회전 레이놀즈(Re_w)수와 편심율이 증가할수록 감소함을 발견하였다. Escudier와 Gorlison⁽³⁾은 모든 유동영역에서 축회전수가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하며, 모든유체에서 레이놀즈수가 증가하면서 축방향 속도의 불안정성이 점차 감소함을 발견하였다. 현재 굴착작업에서는 굴착소요경비를 감소시키기 위해 Slim-Hole Drilling 기법을 많이 사용한다. 이 굴착작업시 효율을 증대시키기 위해서는 적절한 유체의 이송속도를 제어하는 것이 필요하다.⁽⁴⁾ 이는 압편이 borehole에 쌓이게 되면 Stuck pipe 문제가 발생하기 때문이다.

본 연구는 Slim-Hole Drilling 작업시 굴착공 내의 유동에 관한 기초적 연구로서 드릴링 유체의 이송에 필요한 유동의 특성을 규명하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 굴착작업에 대한 모형을 단순화한 실험 장치를 사용하여 실제 굴착작업에서 발생할수 있는 경로변화에 따른 안정성을 파악하고자 하였으며 이를 위해서 수직 환형관을 이용한 실험과 60°로 경사진 환형관을 비교실험하여 각도의 변화가 압력강하값에 어떤 영향을 미치는지 규명하고자 하였다. 작동유체는 비뉴턴 유체인 CMC(0.2% aqueous solution of sodium carboxymethyl cellulose)수용액을 사용하였고, 축방향으로 완전히 발달된 유동장에 대하여 $Re=10$ 0~20000인 영역에서 안쪽축을 0~300rpm으로 회전할 경우의압력 손실값과 마찰계수 등을 측정하였다. 이로부터 유량과 회전수 변화에 따른 환형관내 천이 영역에서의 유동특성을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 실험장치의 높이는 4m이며, Fig.1에 도시하였다. 실험 장치를 구성하는 부분은 크게 실린더부, 유량 공급부, 회전축, 압력손실값 등을 측정하는 측정 부분으로 구성되어 있다. 본 실험은 수평방향과 60°로 방향을 변화시켜0~300rpm의 회전영역에서 측정하였으며 각 회전수 에서 2~70LPM으로 유량을 변화시켜 정압탭 사이 압력차이를 경사마노미터를 이용하여 측정하였다.

3. 실험 결과

반지름비(η)가 0.52인 수직 및 경사진 환형관 내에서 0.2% CMC 수용액을 작동유체로 하

주요어: 천이유동, 동심환형관, 나선유동, 표면마찰계수

1) 성균관대학교 기계공학과 대학원

2) 성균관대학교 기계공학부

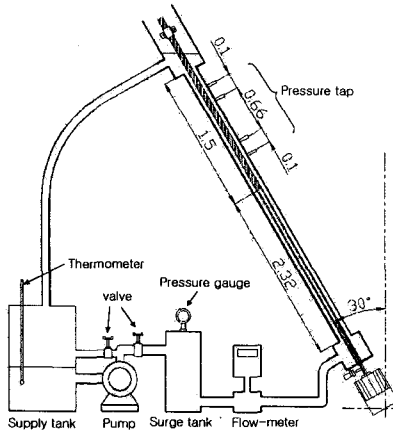


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus (m)

여 $100 < Re < 20000$ 구간에서 표면마찰계수값(C_f)은 마노미터에서 측정된 압력손실값(dp/dz)을 이용하여 구할 수 있었으며 회전수가 0~300rpm에서의 $Re-C_f$ 관계는 dp/dz 를 이용하여 구하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 비회전시의 층류영역에서는 유량이 증가함에 따라 마찰계수값이 평행하게 감소하다가 수직인 경우, $Re=2350$ 부근에서 구배가 변하는 것을 볼 수 있었고 축회전수가 100~300rpm으로 증가하면서 각각 $Re=2100$, $Re=1900$, $Re=1850$ 부근에서 구배가 변하는 것을 확인할 수 있었다. 60° 로 기울인 경우에는 유량이 증가함에 따라 평행하게 감소하다가 $Re=2200$ 부근에서 구배가 변하는 것을 볼 수 있었고 100~300rpm으로 회전수가 증가하면서 각각 $Re=1950$, $Re=1800$, $Re=1750$ 부근에서 구배가 변하는 것을 확인할 수 있었다. 축회전수가 100~300rpm으로 회전수가 증가 할 경우 천이가 시작되는 점부터 $Re < 5000$ 까지의 구간에서 비회전시에 대한 표면마찰계수값은 수직의 경우 17~27%로 증가하였고, 60° 의 12~38%의 증가율을 보였다.

본 연구에서는 축회전이 압력손실에 끼치는 영향을 고려하기 위해 로스비수(Ro)를 $C_f Re$ 와 비교하여 나타내었으며 수직과 경사진 각각의 경우에 대해서 Fig. 3에 도시하였다. 두 경우 모두 Ro 가 증가하면 C_f 값은 비회전시의 이론값으로 수렴해 가는 경향을 보여준다.

Ro 에 대한 $C_f Re$ 값의 구배는 수직인 경우가 경사진 경우보다 더 크게 나타나는데, 이는

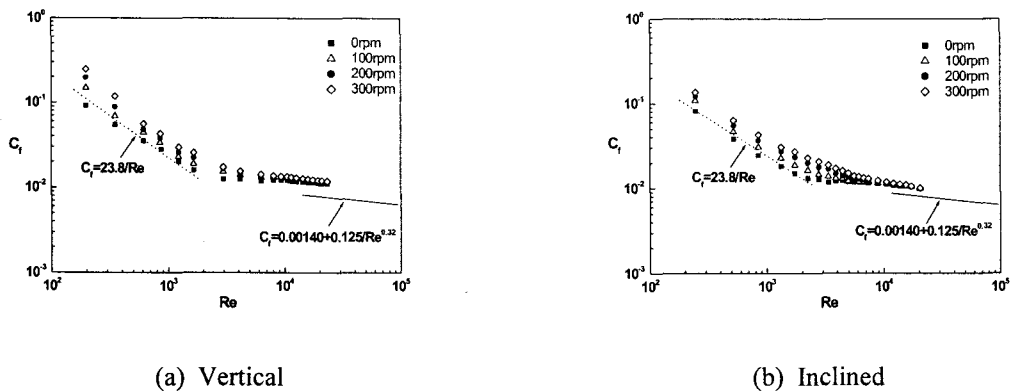


Fig. 2 Skin-friction coefficients of 0.2% CMC solution as a function of Re at 0~300rpm.

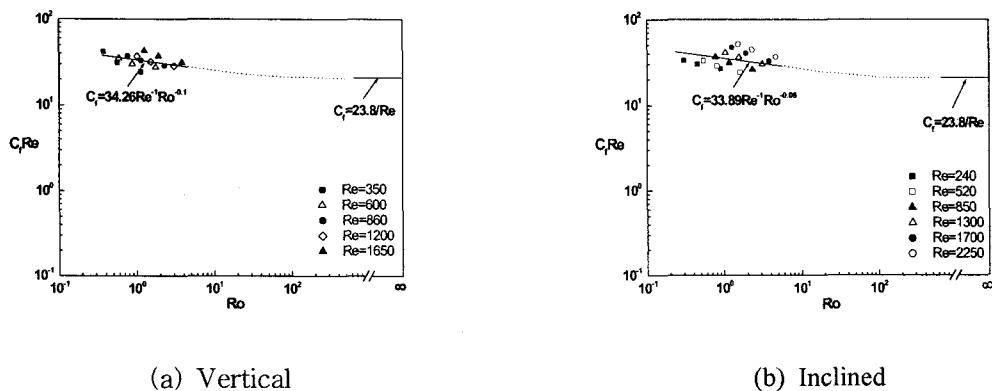


Fig. 3 Relation of $C_f Re$ with Ro for laminar flow in 0.2% CMC solution.

수직인 경우에서 축회전수가 압력강하값에 더 많은 영향을 미침을 의미한다. 이 결과로부터 Ro , $C_f Re$ 의 관계는 수직인 경우와 경사진 경우에 대해 각각 다음 식으로 표현된다.

$$C_f Re = 34.26 Ro^{-0.1} \quad (1. a)$$

$$C_f Re = 33.89 Ro^{-0.06} \quad (1. b)$$

4. 결론 및 고찰

본 연구에서 회전속도, 유량, 축의 경사가 압력손실과 마찰계수에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

(1) 축회전수의 증가에 따라 압력손실값이 증가하지만, 그 증가폭은 난류영역에서 Re 가 증가할수록 감소한다.

(2) 축회전수가 증가할수록 축방향의 입계 레이놀즈수는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

(3) 층류영역의 C_f 와 Re 및 Ro 의 관계에서 Ro 가 증가함에 따라 $C_f Re$ 의 기울기가 점진적으로 감소하여 비회전시의 C_f 값에 근접해 간다.

그러나, 난류영역에서는 $C_f Re^{0.32}$ 와 Ro 의 관계에서 축회전수 변화에 따른 압력강하값에 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 난류영역에서는 축회전수가 압력강하에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

(4) 층류영역에서는 수직인 경우가 경사진 경우에 비해 축회전수가 압력강하에 미치는 영향이 보다 큼을 알 수 있다. 난류영역의 경우는 경사에 의한 압력강하의 차이는 크게 나타나지 않는다.

본 실험에서는 축의 편심이나 진동을 고려하지 않았다. 그러나 경사실험의 경우 이를 완전히 제거하는 것이 불가능하기 때문에 실험오차가 발생했을 것이다. 그러므로 앞으로 보다 정밀한 실험이 요구되며, 추가적인 해석이 수행되어야 할 것이다.

본 실험은 수직과 60° 경사의 경우만 비교하였지만 보다 다양한 각도변화에 따른 환형관내 유동특성을 파악해야할 필요성이 있다.

참고문헌

- (1) Taylor, G. I., 1923, "Stability of a Viscous Fluid Contained Between Two Rotating Cylinders," *Phil. Trans. A*, Vol. 223, pp. 289~343.
- (2) 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.
- (3) 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
- (4) Aniekan W. I., 1980, "Drilled-cuttings Transport by Non-Newtonian Drilling Fluids through Inclined, Eccentric Annuli," The University of Tulsa, Canada.
- (5) 황영규, 김영주, 2000, "안쪽축이 회전하는 환형관내 헬리컬 유동장의 실험적 연구," *대한기계학회논문집B권*, Vol. 24, No. 6, pp.822~833.