

환형관내 회전유동에 관한 연구

김영주* 우남섭** 황영규*

*성균관대학교 기계공학부, **성균관대학교 대학원

A Study on the Rotating Flow in an Annulus

Y. J. Kim*, N. S. Woo** and Y. K. Hwang*

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

**Graduate School of Sungkyunkwan University

ABSTRACT

This study concerns the characteristics of helical flow in a concentric annulus with a diameter ratio of 0.52 and 0.9, whose outer cylinders are stationary and inner ones are rotating. Pressure losses and skin friction coefficients have been measured for fully developed flows of water and 0.2% aqueous of sodium carboxymethyl cellulose(CMC), respectively, when the inner cylinder rotates at the speed of 0~500rpm. The effect of rotation on the skin friction is significantly dependent on the flow regime. In all flow regimes, the skin friction coefficient is increased by the inner cylinder rotation. The change of skin friction coefficient corresponding to the variation of rotating speed is large for the laminar flow regime, whereas it becomes smaller as Re increases for the transitional flow regime and, then, it gradually approach to zero for the turbulent flow regime.

1. 서 론

안쪽 실린더가 회전하는 환형관내 유동에 대해 Rayleigh는 비점성 유체라는 가정아래 최초로 회전 유동의 안정성에 대한 연구를 하였으며, 이후 이를 기초로 하여 환형관내의 유동과 안정성 그리고 열전달 해석 등에 대한 다양한 연구들이 이루어졌다.

환형관에서 비뉴턴 유체의 축방향 유동문제는 Fredrickson과 Bird⁽¹⁾에 의해서 처음 연구되었다. 그들은 응력과 변형률 사이의 관계식으로부터 비뉴턴 유체의 속도장 해석을 수행하였다. 최근에는 Nouri와 Whitelaw⁽²⁾, Escudier와 Gouldson⁽³⁾ 등이 축방향 레이놀즈수에 대한 압력손실, 마찰계수 등의 관계에 대한 연구를 수행하였다.

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 방향 전환으로 인해 굴착경이 기울어지면 이 문제는 더욱 중요해진다. 그리고 벽면 근처에서의

유체의 속도구배와 압력을 제어하여 벽면의 안정성을 확보하는 것도 중요한 문제가 된다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 굴착작업에 대한 모형을 단순화한 실험 장치를 사용하여 실제 굴착작업에서 발생할 수 있는 경로변화에 따른 안정성을 파악하고자 하였으며 이를 위해서 환형관 실험장치에서 반경비 및 작동유체를 변화시켜 실험하여 각도 및 작동유체의 변화가 유동의 형태, 압력강하값 등에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

실험의 작동유체는 뉴튼 유체인 물과 비뉴튼 유체인 0.2% CMC 수용액을 사용하였고, 축방향으로 완전히 발달된 유동장에 대하여 $Re=500\sim20000$ 인 영역에서 안쪽축을 $0\sim500\text{rpm}$ 으로 회전시킬 경우의 압력손실값과 마찰계수 등을 측정하였다. 이로부터 유량과 회전수 변화에 따른 환형관내 천이 영역에서의 유동특성을 파악하였다.

2. 관련 이론

2-1 환형관내 유동 마찰계수

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

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

표면마찰계수 식은 다음과 같다.

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

여기서, 수력직경은 $D_h = 2(R_o - R_i)$ 이다. 위 식에서 반경비 0.52 및 0.9의 경우 모두 바깥 실린더의 내경은 38.4mm이다. 본 연구에 사용된 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

비뉴튼 유체는 전단응력과 전단률 사이에 비선형적인 관계를 나타내며 본 연구에서 사용한 유체는 $n < 1$ 인 경우로 다음과 같은 power law 관계식이 적용된다.⁽⁵⁾

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

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

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

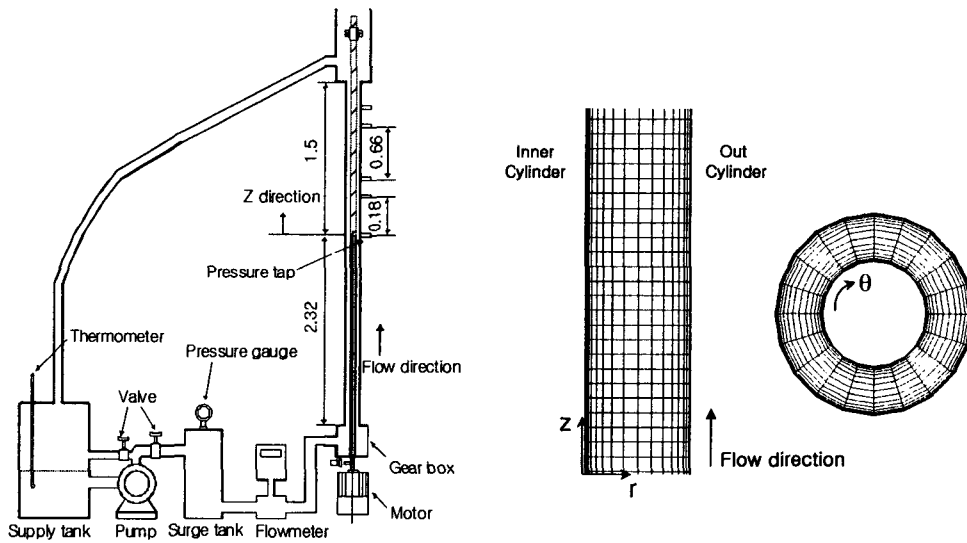
본 실험에서는 작동유체로 물과 0.2% CMC 수용액이트 수용액을 사용하였으며 점도값은 Brookfield사의 DV-III+로 측정하였다. 이로부터 0.2% CMC 수용액은 비뉴튼 유체의 power law 특성을 나타냄을 알 수 있었다.⁽⁶⁾

3. 실험 및 수치해석

3-1 실험 장치

바깥쪽 실린더는 직경이 38.4mm인 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 $2.32m(126D_h)$ 로 직경이 20mm인 스테인레스 파이프안에 직경 17mm인 스테인레스 강재 연마봉을 삽입하였다. 길이

가 1.5m인 회전축과 고정축 안에 들어가는 회전부를 커플링으로 연결 하였고, 축의 회전에 의한 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 운양정 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 1~60LPM의 측정범위를 갖고 정확도가 0.5% 이내로 보정된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다.



(a) Experimental apparatus

(b) Computational grid.

Fig. 1. Experimental apparatus and computational grid.

3-2 수치해석

본 연구에서는 3차원, 비압축성 유체에 대하여 수치해석 상용코드인 CFD-ACE를 사용하여 해석하였고 지배방정식은 다음과 같은 연속방정식과 모멘텀 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{u}(\nabla \cdot \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (6)$$

윗 식에서 \mathbf{u} , ρ , ν , p 는 각각 유체의 속도, 밀도, 동점성계수, 압력을 의미한다. 위 지배방정식은 수학적으로 이산화하기가 편리하고 수렴성이 좋아 유체 유동장 해석에 많이 사용되는 유한체적법(finite volume method)을 사용하였다. 대류항의 이산화는 1계 상류도식(upwind differencing scheme)을 사용하였다.

본 환형관 유동장의 해석에 사용된 격자계를 Fig. 1에 간단히 도시하였다. 축방향으로 200

개의 격자점을, 반경방향과 회전방향에 대해서는 똑같이 11개씩의 격자점을 주었고, 특히 반경방향은 양쪽 벽면으로 조밀하게 주었다.

본 연구에서는 기존의 물을 이용한 실험 조건과 똑같은 경우에 대하여 수치해석적으로 연구를 진행하였다. 본 연구에 관련된 변수들은 $R_i = 10\text{mm}$, $R_o = 19.2\text{mm}$, 축방향 길이 $z = 1.5\text{m}$ 이다. 레이놀즈수와 축방향 회전수를 변화시키면서 압력손실값(dp/dz)을 계산하였고, 그 결과를 비교하였다. 수치해석시 경계조건은 입구 유동은 유체가 축방향과 평행하게 유입하도록 가정하였고, 출구는 일정압력 조건을 주었다.

4. 실험 및 수치해석 결과

4-1 실험 결과

작동유체의 특성을 살펴보면, 0.2% CMC 수용액의 경우 점도는 물의 약 5배를 나타내었다. 또한, CMC 수용액은 97%의 정확도로 비뉴턴 유체의 power law model 특성을 나타내었다.

안쪽축이 0~500rpm으로 회전하는 수직 환형관에서 반경비 0.52와 0.9의 경우, 축방향 유량 1~60LPM ($300 \leq Re \leq 20000$)의 유동영역에서 실험을 수행하였다.

물의 경우, 레이놀즈수에 대한 표면마찰계수의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 반경비 0.9에서 반경비 0.52의 압력손실보다 10배 정도 증가하였다. 비회전시 층류영역에서의 마찰계수는 반경비 0.52와 비교할 때 구배는 같은 경향을 나타내고 있지만 표면마찰계수는 반경비 0.52의 경우가 0.9의 경우보다 2~3배 컸다. 반경비 0.52의 경우, 비회전시의 평균 표면마찰계수 변화에 대한 상관식은 Shah & London이⁽⁷⁾ 제시한 $C_f = 23.8/Re$ 식과 일치함을 알 수 있다. 반면, 반경비 0.9의 경우 비회전시 표면마찰계수 상관식은 $C_f = 11/Re$ 로 표현된다.

반경비 0.52, 0.2% CMC 수용액의 경우 비회전 시 $Re = 2000$ 부근에서 천이가 발생함을 확인하였고, 안쪽 축의 회전수가 증가할수록 천이가 발생하는 레이놀즈수가 감소하여 600 rpm으로 회전 시 약 1300 정도의 값을 가진다. 이 경우의 표면마찰계수와 레이놀즈수의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 비회전시 층류영역 ($Re < 2000$)에서의 마찰계수값은 이론마찰계수식 $C_f = 23.8/Re$ ⁽⁸⁾ 에는 일치하지 않으며 실험을 통하여 $C_f = 34/Re$ 의 마찰계수식을 얻었다.

층류 영역에서 비회전 시에 대한 회전 시 마찰계수값의 변화는 안쪽축의 회전수가 100~600 rpm으로 증가해 감에 따라 10~48%의 증가율을 보인다.

반면 반경의 0.92의 경우를 보면 반경비 0.52보다 다양한 실험을 하지는 못했지만 반경비 변화에 대한 유동특성의 변화는 파악할 수 있다. 압력손실값은 반경비 0.9의 경우가 0.52보

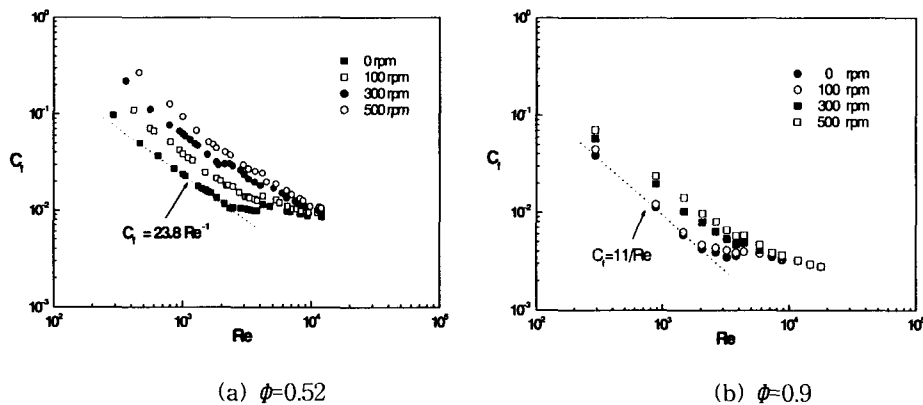


Fig. 2. Skin friction coefficient of water as a function of Re at 0~500rpm.

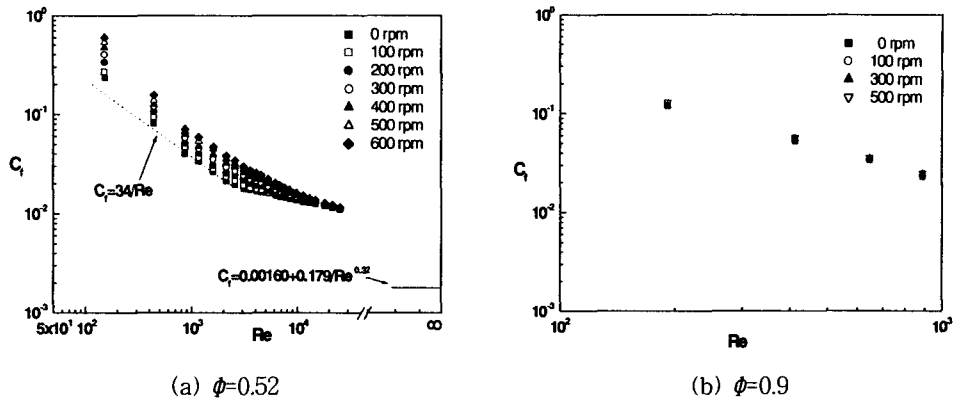


Fig. 3. Skin friction coefficients of 0.2% CMC solution as a function of Re at 0~500rpm.

다 3~5배 컸지만 표면마찰계수는 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 표면마찰계수가 압력손실 뿐만 아니라 수력직경과 축방향 유속의 영향도 크게 받기 때문이다.

4-2 수치해석 결과

축방향 유동속도가 0.055m/s인 경우의 뉴턴과 비뉴턴 유체의 축방향 및 θ 방향 속도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 비뉴턴 유체에서 유동지수값 n 은 0.75, 점도는 13cP인 물성치를 사용하였다. 뉴턴과 비뉴턴 유체의 축방향속도분포를 보면, 비뉴턴 유체의 경우는 비회전과 회전시를 비교할 때 회전시가 비회전시보다 축방향속도가 크게 나타나고 또한, 회전수가 증가할수록 축방향 최대속도의 위치가 안쪽축 방향으로 이동함을 볼 수 있다. 뉴턴 유체의 경우는 회전시보다 비회전시 경우에 축방향속도가 크게 나타남을 Fig. 4에 나타내었다. 이러한 현상은 비뉴턴 유체의 유변학적 특성으로 뉴턴 유체와 반대의 경향을 나타내는 것이다. 접선방향의 속도분포를 보면 회전수가 증가할수록 안쪽벽면에서 속도구배가 크게 나타나고 바깥쪽 벽면으로 갈수록 감소하였고, 뉴턴과 비뉴턴 유체를 비교하여 보면 같은 회전수에서 뉴턴 유체가 안쪽벽면에서 속도구배가 큼을 알 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 뉴턴 유체는 비뉴턴 유체보다 회전의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 회전에 의해 발생하는 바깥쪽 벽면에서의 전단응력도 물의 경우가 큼을 알 수 있다.

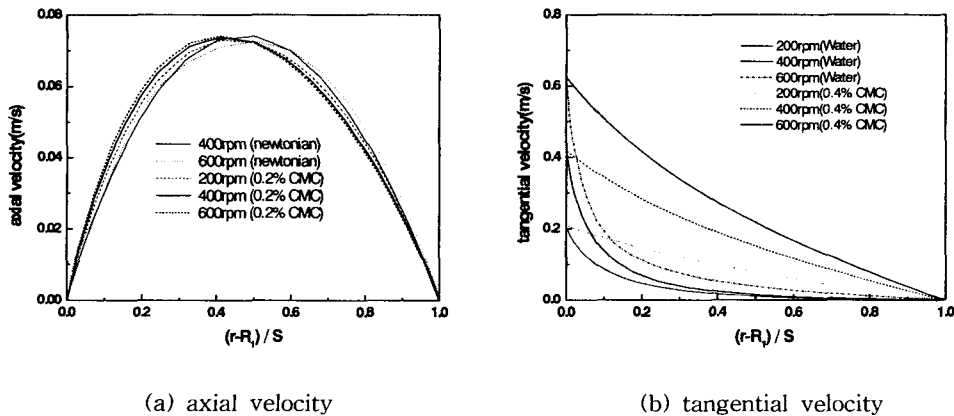


Fig. 4. Rotating flow velocities of the Newtonian and non-Newtonian fluid with axial and tangential velocity

5. 결론

본 연구에서는 반경비 0.52 및 0.9인 수직 환형관에서 축회전수, 유량 및 작동유체의 변화에 따른 압력손실과 표면 마찰계수의 변화 특성을 실험 및 수치해석으로 연구하였다. 반경비가 0.52이고 작동유체가 물인 경우 비회전시 표면마찰계수 상관식은 Shah & London⁽⁷⁾이 제시한 상관식 $C_f=23.8/Re$ 과 일치하였다.

0.2% CMC 수용액에서 반경비가 0.52인 경우에 비하여 0.9인 경우 압력손실이 3~5배 정도 높게 나타나지만 표면마찰계수는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 마찰계수가 압력손실은 물론 환형관의 직경과 축방향 유속에 관계되기 때문이다.

수치해석 연구를 통하여 안쪽축의 회전수 변화에 대한 비뉴턴 유체의 축방향 유동은 회전수가 증가할수록 최대속도의 위치가 안쪽으로 이동함을 확인하였고, θ 방향 속도분포를 보면 물의 경우가 비뉴턴 유체의 경우보다 회전에 의한 속도구배가 크게 나타났다.

6. 후기

이 논문은 2003년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

7. 참고문헌

1. Fredrickson, A. G., Helical Flow of an Annular Mass of Visco-elastic Fluid, *Chem. Eng. Science*, Vol. 11, pp. 252~259, 1960.
2. Nouri, J. M. and Whitelaw, J. H., 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, 1994.
3. Escudier, M. P. and Gouldson, I. W., 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, 1995.
4. Delwiche, R. A., Lejeune, M. W. D. and Stratabit, D. B., Slimhole Drilling Hydraulics, *Society of Petroleum Engineers Inc.*, SPE 24596, pp. 521~541, 1992.
5. Wilkinson M. A., 1960, Non-Newtonian Fluids, Fluid Mechanics, Mixing and Heat Transfer, Pergamon press.
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 2002, pp. 1944~1949.
7. Shah, R. K. and London, A. L., Laminar Flow Forced Convection in Ducts, *Academic Press New York*, 1978.
8. Nouri, J. M., Umur, H. and Whitelaw, J. H., Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Concentric and Eccentric Annuli, *J. Fluid Mech.*, Vol. 253, pp.617~641, 1993.