

안쪽축이 회전하는 환형관내 유동연구

김영주* · 우남섭* · 권혁정* · 황영규**

A Study on the Flows in a Concentric Annulus with rotating inner cylinder

Young-Ju Kim*, Nam-Sub Woo*, Hyuk-Jung Kwon* and Young-Kyu Hwang**

Key words : Helical Flow(헬리컬 유동), Concentric Annulus(동심환형부), Pressure Loss(압력손실), Skin-Friction Coefficient(표면마찰계수)

Abstract

The present experimental and numerical investigations are performed for the characteristics of transitional flow in a concentric annulus with a diameter ratio of 0.52, whose outer cylinder is stationary and inner one rotating. The flow field of an annulus has been numerically solved using a finite volume method. The pressure losses and Skin-friction coefficients have been measured for the fully developed flow of water and 0.2% aqueous solution of sodium carboxymethyl cellulose (CMC), respectively at inner cylinder rotational speed of 0~600 rpm. The transitional flow has been examined by the measurement of pressure losses to reveal the relation of the Reynolds and Rossby numbers with the skin-friction coefficients. The occurrence of transition has been checked by the gradient changes of pressure losses and skin-friction coefficients with respect to the Reynolds numbers. Consequently the critical(axial-flow) Reynolds number decreases as the rotational speed increases. Thus, the rotation of inner cylinder promotes the early occurrence of transition due to the onset of Taylor vortices.

1. 서 론

환형관내에서의 유동은 축회전수가 증가할수록 원심력에 의한 Taylor 와의 발생으로 유동교란이 증진되고 유동장에 많은 영향을 미친다. 환형관내 유동에 대해 Taylor^[1]는 점성유체에 대해 선형이론을 적용하여 회전유동의 안정성 연구를 수행하였으며, Strart^[2]와 Diprima^[3]는 비선형이론을 적용하여 Taylor 수와 안정성관계를 파악하였다. 또한, Yamada^[4]는 바깥쪽 실린더가 회전할 경우 상대적으로 유동이 안정하여 축방향으로의 임계레이놀즈수(Re_c)는 안쪽축이 회전할 때보다 크고 압력손실이 적다는 것을 밝혀냈으며, Park 등^[5]은 뉴턴유체와 비뉴턴 유체의 특성을 비교하였으며, 층류영역에서의 압력손실과 속도 분포는 동심실린더 점도계에 의해 측정된 성질을 근거로한 이론과 일치하고 비뉴턴 유체의 천이영역은 뉴턴유체의 천이영역보다 좁다는 것을 확인하였다.

환형관내에서의 압력손실은 안쪽축과 벽면사이의 간극, 축의 회전속도, 반경비, 편심비에 의한 영향이 크게 나타나며 환형관내에서 드릴링유체의 유동은 천이영역에서의 헬리컬 유동 특성을 갖는다.^[6]

본 연구는 드릴링 유체 유동에 대한 모형을 단순화하여 유정의 굴착작업시 발생하는 진동, 유동교란, 마찰에 의한 압력손실 등의 문제점을 해결하기 위해 회전하는 안쪽축과 고정된 바깥쪽 실린더 사이의 유동특성을 파악하였다. 이러한 결과는 굴착작업시 공내 압력, 벽면의 전단응력 등을 허용범위 내에서 제어하는데 중요한 정보가 된다.

2. 관련이론

2.1 동심환형관의 마찰계수

실험을 통해 임의의 두 지점에서 측정된 수두차에 의해 구한 압력손실은 다음과 같이 나타낸다.^[7]

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

여기서, r , ρ_{cels} , θ , h , Δz 각각 작동유체의 밀도, 사염화탄소의 밀도, 마노미터의 각도, 수두차, 탭 사이의 거리이다. 표면마찰계수는 압력손실값을 이용하여 구할 수 있으며 다음과 같이 나타낸다.

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

여기서, $D_h=2(R_o-R_i)$ 는 수력직경이며 본 연구에 관련된 변수들은 $D_h=18.4 \times 10^{-3}m$, $R_o=19.2 \times 10^{-3}m$, $h=0.52$ 이다.

3. 실험 및 수치해석 방법

3.1 실험방법

안쪽축은 직경이 20mm인 스테인레스 연마봉을 사용하였으며 바깥쪽 실린더는 직경이 38.4mm인 청동 파이프를 사용하였다. 안쪽축은 회전부와 유동을 발달시키기 위한 비회전부로 나누어 제작하였다. 이러한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 길이가 1.5m인 회전축과 2.32m($126D_h$)의 비회전부

* 성균관대학교 기계공학부 대학원, kjjp@nature.skku.ac.kr

** 성균관대학교 기계공학부, ykhwang@yurim.skku.ac.kr

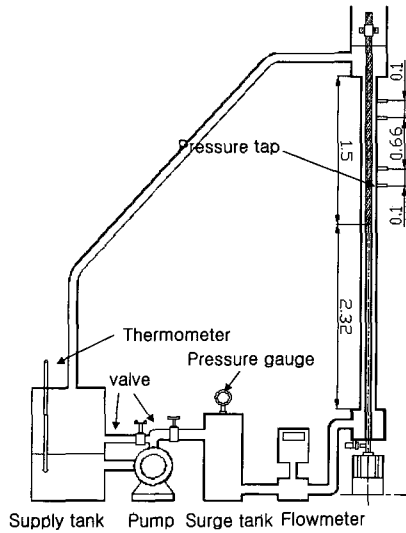


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

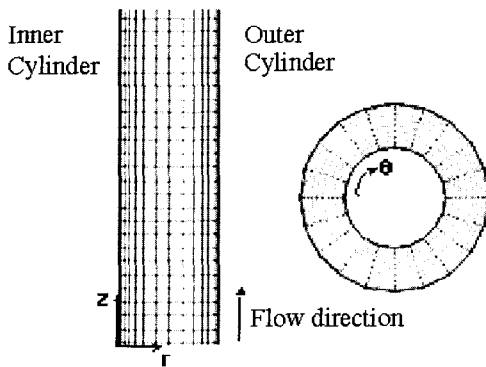


Fig. 2 Computational Grid

의 고정축 내에 들어가는 17mm 회전축을 플렉시블 커플링을 사용하여 연결하였고, 축의 회전에 의한 진동과 편심을 방지하기 위해 고정축의 상단부와 회전축의 하단부에 커넥터를 설치하였다. 회전축이 회전할 때 발생하는 편심도는 $\pm 0.1\text{mm}$ 이내이며 차압을 측정하기 위해 시험부의 길이방향으로 0.1m 간격으로 2개의 압력 탭을 설치하였으며 가시화 실험을 하기 위한 0.6m의 간격을 아래방향으로 두고 0.1m의 간격으로 2개의 압력 탭을 설치하였다.^[8]

80lpm(l/min)의 용량을 갖는 마그네틱 펌프를 사용하여 작동유체를 순환시켰으며, 일정한 용량을 공급하기 위해서 서지탱크를 설치하였다. 안쪽축은 A.C. motor를 사용하여 회전시키고 회전수는 근접스위치와 연결된 회전속도계(tachometer)를 사용하여 측정하였으며 모터의 회전수는 인버터를 사용하여 제어하였다. 유량은 정확도가 0.5% 이내로 보정된 디지털 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다.

3.2 수치해석

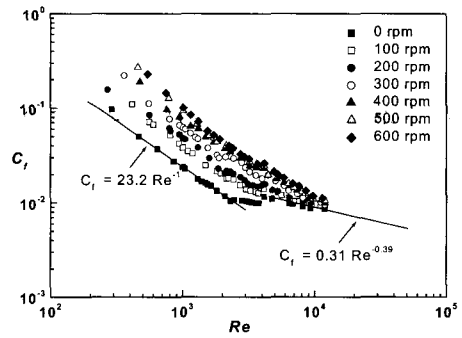
본 연구에서는 3차원, 비압축성 유체에 대하여 수치해석을 수행하였고 지배방정식은 다음과 같은 연속방정식과 운동량 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

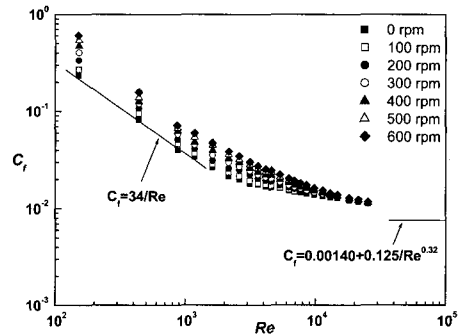
$$u(\nabla \cdot u) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u \quad (4)$$

Table 1 Variation of Re_c with respect to N and Ro

N (rpm)	water		CMC 0.2%	
	Ro	Re_c	Ro	Re_c
0	∞	2300	∞	2000
100	1.83	2170	4.29	1900
200	0.89	2100	2.06	1700
300	0.53	1900	1.00	1600
400	0.37	1730	0.94	1500
500	0.27	1590	0.72	1400
600	0.21	1500	0.53	1300



(a)



(b)

Fig. 3 Skin-friction coefficients of (a)water and (b)0.2% CMC solution as a function of Re at 0~600rpm

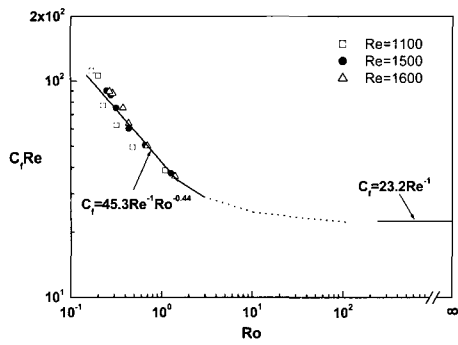
위 지배방정식은 수학적으로 이산화하기 편리하고 수렴성이 좋아 유동장 해석에 많이 사용되는 유한체적법(FVM)을 사용하였고, 대류항의 이산화는 1계 상류도식(Upwind Scheme)을 사용하였다. 수치해석에 사용된 격자계를 Fig. 2에 간단히 나타내었다.

본 연구에서는 기존의 물을 이용한 실험조건과 동일한 조건에 대하여 수치해석을 수행하였으며 회전수 변화에 따른 압력손실과 속도장을 계산하였다. 경계조건은 입구유동이 축방향과 평행하게 유입한다고 가정하였고, 출구는 일정압력 조건(Neumann boundary condition)으로 가정하였다.

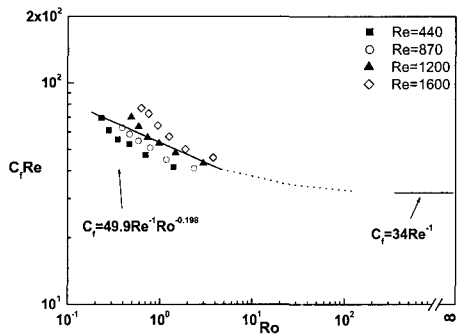
4. 실험 및 수치해석 결과

4.1 실험 결과

드릴링 유체 유동에 대한 모형을 단순화한 반지름비(h)가 0.52인 환형관내에서 물과 0.2% CMC 수용액을 사용하여 레이놀즈수 $100 < Re < 25000$ 구간에서 측정된 압력손실값을 이용하여 표면마찰계수를 구하였으며 Fig. 3에 나타내었다.



(a)



(b)

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

비회전시의 경우 층류영역에서는 일정한 구배로 감소하다가 물의 경우 $Re=2300$ 부근에서 구배가 변하고, 0.2%의 경우 $Re=2000$ 부근에서 구배가 변하는 것을 볼 수 있으며, 이렇게 구배가 변하는 점을 임계레이놀즈수로 정의하여 층류와 난류를 구분하였다. 축회전수가 증가할수록 유동의 천이점이 점차 짧아짐을 알 수 있다(Table 1 참조). 축회전수가 100~600rpm으로 증가할 경우 천이가 시작되는 점부터 $Re<5000$ 부근까지의 구간에서 비회전시에 대한 표면마찰계수값은 물의 경우 40~76%, 0.2% CMC수용액의 경우 10~48%의 증가율을 보였다.

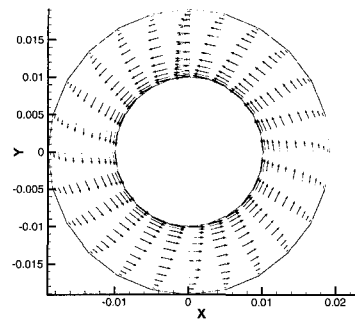
본 연구에서는 축회전이 압력손실에 미치는 영향을 알아보기 위해 축방향 유동에 대한 회전유동의 영향을 나타내는 무차원수인 로스비수 ($Ro = 2\bar{v}_z / \omega R_1$)와 $C_f Re$ 의 관계를 고려하였다. 로스비수가 증가하면 마찰계수값은 비회전시의 이론값으로 수렴해 가는 경향을 보인다. 동일 축회전수 일지라도 물보다 0.2% CMC수용액의 경우가 축회전수의 마찰손실에 대한 영향이 낮게 나타난다(Fig. 4 참조).

비뉴턴유체인 0.2% CMC수용액의 경우 비회전시의 마찰계수는 비뉴턴유체의 유변학적 성질에 의해 뉴턴유체의 이론 마찰계수($C_f = 23.2/Re$)와 차이가 남을 알 수 있다.

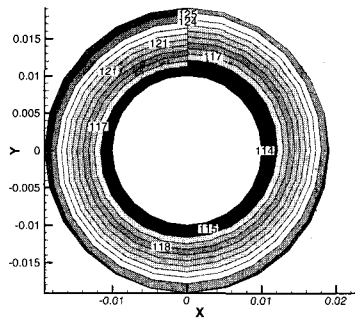
난류영역에서는 축회전수의 변화가 압력손실에 미치는 영향이 작아지며, 완전 난류가 되면 난류식에 근접함을 알 수 있다. 이는 난류영역에서는 축회전수의 변화가 압력손실에 미치는 영향이 아주 미비함을 의미한다.

4.2 수치해석 결과

실험과 동일한 환형관내에서 뉴턴유체인 물을 작동유체로 하여 층류영역인 $500 < Re < 2500$ 구간에서의 속도 및 압력분포

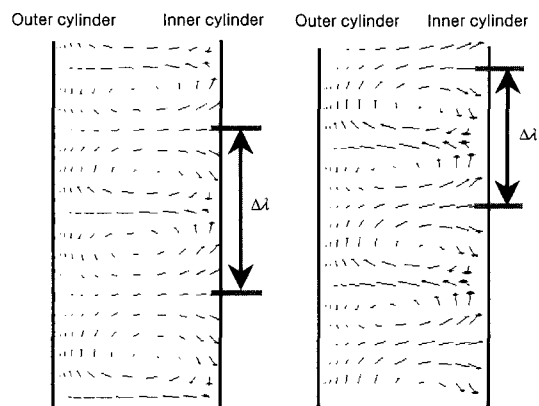


(a) Velocity vectors



(b) Pressure contours

Fig. 5 Flow characteristics at 100rpm

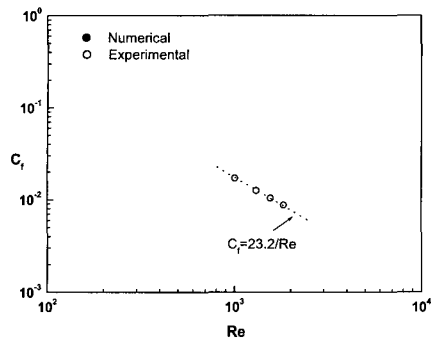


(a) 100rpm ($Re = 18$) (b) 300rpm ($Re = 18$)

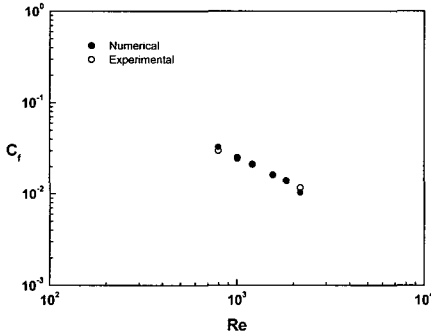
Fig. 6 Results velocity vectors of the flow used for particle tracking studies; note the location of the vortex

를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 $r-\theta$ 평면에서의 속도분포를 나타내며 안쪽축이 회전하므로 속도벡터는 안쪽에서 최대가 되고 바깥쪽으로 갈수록 작아짐을 알 수 있다. 압력장은 외벽으로 갈수록 증가한다. 축방향 유동이 존재하고 회전수가 100, 300rpm인 경우의 $r-z$ 평면에서의 유동장을 Fig. 6에 나타내었다. 이는 가시화를 통해 확인한 유동 형태와 동일하게 한 쌍의 Taylor 와가 서로 반대방향으로 회전하는 형태를 보임을 알 수 있다.^[8] 동일한 유량에서 축회전수가 증가할수록 파장은 작아짐을 확인하였고 실험을 통해서 이를 확인하였다. 안쪽축이 회전할 때 Taylor 와는 원심력에 의해 발생하므로 Taylor 와의 발달은 압력손실과 마찰계수값을 증가시키는 요인으로 작용한다.

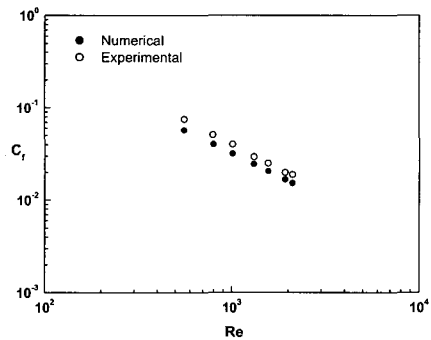
회전시 축방향 레이놀즈수가 증가함에 따라 표면마찰계수값은 실험과 수치해석 모두 감소하는 경향을 보인다. 물을 이용한 수치해석 결과값과 실험값의 차이를 Fig. 7에 나타내



(a) 0 rpm



(b) 100 rpm



(c) 300 rpm

Fig. 7 Skin friction coefficients of water as a function of Re in a laminar region

었다. 비회전시 수치해석값과 실험값이 거의 일치하는 경향을 보였으며, 회전수가 증가할수록 수치해석값과 실험값의 차이가 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 회전수가 증가함에 따라 진동 및 편심 등의 실험적 오차가 증가하기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 반경비 0.52인 환형관에서 축회전수, 유량, 작동유체 등의 변화에 따른 압력손실 및 표면마찰계수 변화와 특성을 살펴보았다.

(1) 축방향 레이놀즈수가 증가함에 따라 표면마찰계수값은 감소함을 확인하였으며 뉴턴유체인 물은 천이점이 비교적 구분

하기 쉬운 반면, 비뉴턴유체인 0.2%CMC 수용액은 유변학적 인 성질 때문에 천이점을 명확하게 구분하기가 어려웠다. 또한 층류영역에서 회전수가 증가할수록 마찰계수는 증가하며 난류로 갈수록 회전의 영향이 크지 않아 거의 일정해지는 경향은 뉴턴유체와 비뉴턴유체 모두에서 나타난다.

(2) 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 임계레이놀즈수는 선행연구자들에 의해서 밝혀졌듯이 뉴턴유체보다 비뉴턴유체의 임계레이놀즈수(천이점)가 작다는 것을 확인하였다(Table 1 참조).

(3) 환형관내에서 안쪽축이 회전하면 원심력의 작용에 의해서 발생하는 Taylor 와로 인한 유동교란의 증진은 축회전수가 증가할수록 표면마찰계수의 증가와 함께 임계레이놀즈수를 감소시킨다.

(4) 실험과 수치해석에서 회전수가 증가하면 표면마찰계수값도 증가하는 경향을 알 수 있으며, 회전수를 증가시키면서 측정된 표면마찰계수값을 수치해석값과 비교해 보면 층류영역에서 회전수가 증가할수록 실험값과 수치해석값의 차이가 증가하는데, 이는 실험에서 축회전수가 증가하면서 진동 및 편심 등에 의해 발생하는 실험오차에 의한 것으로 사료된다.

(5) 수치해석을 통해 확인한 유동 형태는 한 쌍의 Taylor 와가 서로 반대방향으로 회전하는 형태를 보임을 알 수 있었고, 동일한 유량에서 축회전수가 증가할수록 파장은 작아짐을 확인하였다.

후 기

본 논문은 두뇌한국21사업(BK21) 그리고 에너지관리공단의 지원하에 자원기술 학술진흥사업비에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Taylor, G. I., "Stability of a Viscous Fluid Contained Between Two Rotating Cylinder," *Phil. Trans., A*, Vol. 223, (1923), pp. 289-343.
- [2] Stuart, J. T., "On the Nonlinear Mechanics of Hydrodynamic Stability," *J. Fluid Mech.*, Vol. 4, (1958), pp. 1-21.
- [3] Diprima, R. C., "The Stability of a Viscous Fluid Between Rotating Cylinders with an Axial Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 366, (1960), pp. 621-631.
- [4] Yamada, Y., "Resistance of a Flow through an Annulus with an Inner Rotating Cylinder," *Bull. JSME*, Vol. 5 No. 18, (1962)pp. 302-310.
- [5] Park, J. T. and Morrow, T. B., "Pipe flow Measurements of a Transparent Non-Newtonian Slurry," *J. of Fluids Eng.*, Vol. 111, (1989), pp. 331-336.
- [6] Delwiche, R. A., Stratabit, D. B., and Lejeune, M. W. D., "Slim-hole Drilling Hydraulics," *Society of Petroleum Engineers Inc.*, SPE 24596, (1992), pp. 521-541
- [7] 김영주, 황영규, "안쪽축이 회전하는 환형관내 비뉴턴 유체의 천이유동 연구," *한국자원공학회지*, Vol. 39, No. 2, (2002), pp. 139-145.
- [8] 김영주, 황영규, "안쪽축이 회전하는 환형관내 헬리컬 유동장의 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B권*, 제 24권 제 6호, (2000), pp. 822-833.