

안쪽축이 회전하는 환형관내 천이 유동 연구

황 영 규*·김 영 주**

An Study on the Transitional Flows in a Concentric Annulus with Rotating Inner Cylinder

Young-Kyu Hwang and Young-Ju Kim

Key Words: Transitional flow(천이유동), Concentric annulus(동심 환형관), non-Newtonian fluid(비뉴튼 유체), Rotating flow(회전유동), Helical flow(나선유동). Skin-friction coefficient(표면마찰계수)

Abstract

This experimental study concerns the characteristics of a transitional flow in a concentric annulus with a diameter ratio of 0.52, whose outer cylinder is stationary and inner one rotating. The pressure losses and skin-friction coefficients have been measured for the fully developed flow of a 0.2 % aqueous solution of sodium carbomethyl cellulose (CMC) at a 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 numbers with the skin-friction coefficients, in the laminar and transitional flow regimes. The occurrence of transition has been checked by the gradient change of pressure losses and skin-friction coefficient with respect to the Reynolds numbers. The increasing rate of skin-friction coefficient due to the rotation is uniform for laminar flow regime, whereas it is suddenly reduced for transitional flow regime and, then, it is gradually declined for turbulent flow regime. Consequently, the critical(axial-flow) Reynolds number decrease as the rotational speed increases. Thus, the rotation of inner cylinder promotes the early occurrence of transition due to the onset of Taylor vortices.

	기호설명		
C_f	관마찰계수	R_o	바깥쪽 실린더 반경, (mm)
dp/dz	축방향 압력 손실, (Pa/m)	Re	축방향 유동 레이놀즈수, $\overline{v_z} D_h / \nu$
D_h	등가수력직경, (mm)	Re_c	임계 레이놀즈 수
h	수두, (mm)	v_z	축방향 유동 속도, (m/s)
p	압력, (Pa)	Δz	탭 사이의 거리, (mm)
R_i	안쪽축 반경, (mm)		
		Greek Symbols	
		η	반경비, R_i/R_o
		θ	경사마노메타의 경사각도
		μ	절대점성계수, (pa·s)
		ρ	유체 밀도, (kg/m ³)

* 성균관대학교 기계공학부

** 성균관대학교 대학원 기계공학과

Subscripts

c	임계값
h	등가 수력 직경

Superscript

-	평균값
---	-----

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 규명되었으며, 그 후 비선형 이론을 적용하여 Taylor 수와 안정성관계를 Stuart⁽²⁾와 Diprima⁽³⁾가 밝혔다. 또한, 바깥쪽 축이 회전할 때는 상대적으로 유동이 안정하여 축방향으로의 임계회전레이놀즈수 Re_c 는 안쪽축이 회전할 때 값보다 크고, 압력손실이 적다는 것이 밝혀졌다.⁽⁴⁻⁶⁾ Nakabayashi등⁽⁷⁾, Nouri등⁽⁸⁾, Nouri와 Whitelaw⁽⁹⁾는 축방향으로의 임계 레이놀즈(Re_c)수는 회전 레이놀즈(Re_w)수와 편심율이 증가할수록 감소함을 발견하였다.

굴착작업시 직접적인 굴착경비 뿐만 아니라 드릴링 유체 및 굴착물의 이송에 필요한 소요 동력까지 포함한 전체 굴착소요경비는 굴착경(borehole), 굴착 벽면과 드릴링 축간의 간극면적에 비례하기 때문에, 굴착경과 간극이 작은 Slim-Hole Drilling 기법이 요구된다.⁽¹⁰⁾ 이 기법의 채택시 굴착벽면과 드릴 회전축간의 간격이 커서 굴착경이 큰 기존의 굴착작업에 비해 소요 에너지 절감뿐만 아니라, 부차적으로 파괴적 진동 감소에 의한 굴착작업 안전성 증대, 환경오염 극소화를 도모하여 전반적으로 50%이상의 소요에너지 및 경비절감 효과를 가져온다.

본 연구는 Slim-Hole Drilling 작업시 발생하는 헬리컬 유동에 관한 기초적 연구로서 굴착벽면에서 상대적으로 증대되는 전단응력, 굴착물 및 드릴링 유체의 이송에 필요한 헬리컬 유동형태를

규명하고자한다. 이러한 연구결과는 Slim-Hole Drilling을 적절한 허용범위 내에서 제어하는데 필수적인 정보들이다.

환형관 내에서의 압력손실은 안쪽축과 벽면사이의 간극, 축의 회전속도, 편심비에 의해 크게 영향을 받는다. 특히, 굴착 안전성을 고려하여 1000rpm 이하의 적절한 축회전수로 작동되어질 경우 환형부 간극이 비교적 작은 굴착작업은 천이영역에서의 헬리컬 유동 특성을 갖는다.

따라서 본 연구에서는 굴착작업에 대한 모형을 단순화시켜 적용한 안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 실험 장치를 사용하였다. 작동유체는 비뉴턴 유체인 0.2% CMC(0.2% aqueous solution of sodium carbomethyl cellulose) 수용액을 작동유체로 택하였고, 축방향으로 완전히 발달된 유동장에 대하여 $Re=500\sim 5200$ 인 영역에서 안쪽축을 $0\sim 600$ rpm으로 회전할 경우의 압력 손실값과 마찰계수 등을 측정하였다. 이로부터 유량과 회전수 변화에 따른 환형관내 천이 영역에서의 압력손실을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험장치 높이가 3.6m이고, Fig.1에 도시하였다. 실험 장치를 구성하는 부분은 크게 실린더부, 지지대, 유량 공급 및 회전부와 유량, 압력손실값, 온도 등을 측정하는 측정 부분으로 구성되어 있다.

바깥쪽 실린더는 직경이 38.4mm 인 청동 파이프를 사용하였고, 안쪽축은 회전부와 고정부로 나누어 회전부는 직경이 20mm인 스테인레스 강재 연마봉을 사용하고 비회전부는 축 방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 시험부(Test section)로부터 상단부의 회전하지 않는 축의 길이를 2.32m($116 \times D_h$)로 직경이 20mm인 스테인레스 파이프안에 직경 15mm인 스테인레스 강재 연마봉을 삽입하였다. 길이가 1.5m인 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.

Unit : m

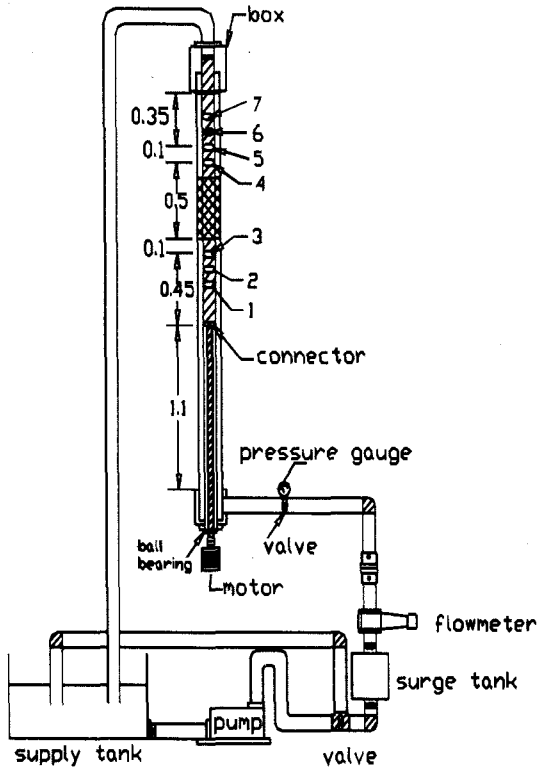


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

회전축이 회전할 때 생기는 편심도는 $\pm 0.1\text{mm}$ 이내이며 차압을 측정하기 위해 시험부의 길이 방향으로 0.1m간격으로 2개의 wall tab을 설치하였으며 가시화 실험을 하기 위한 0.6m의 간격을 아랫 방향으로 두고 0.1m간격으로 3개의 wall tab을 설치하였다. 또한 장치 윗 부분에 부압이 발생하는 것을 방지하기 위해서 직경이 60mm인 고압호수를 사용하였다.

80 l 의 용적을 가지는 수조로부터 작동유체를 공급하는 기어 펌프는 온양정 9m일 때 최대 60 LPM(ℓ/min) 의 용량을 갖는다. 안쪽축은 1500 rpm까지 회전이 가능한 모터(D.C motor)를 사용하여 회전시키고, 회전수는 근접스위치와 연결된 회전속도계(tachometer)를 통하여 알 수 있으며 모터의 회전수는 인버터(inverter)에서 제어한다.

유량은 2~90 LPM의 측정 범위를 갖고 정확도가 0.5% 이내로 보정된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다. 작동 유체의 온도는 디지털 멀티미터를 사용하여 측정하였다.

2.2 실험 방법

㉠ 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 Chamber 입구 밸브를 조절하여 Chamber에 물을 공급한다.

㉡ Chamber에 유체가 충분히 채워질 수 있도록 하고, 차압 측정을 위하여 마노메타와 탭 사이 튜브 안을 완전히 작동유체로 채운다. 마그네틱 유량계는 유량 공급부에 물이 차 있을 때에 작동시켜야 하며, 실험이 끝난 후 작동유체를 빼기 전에 꺼야 한다.

㉢ 유량이 거의 6 LPM인 상태에서 경사마노메타 안에 있는 유체(CCl_4)의 수두값을 일치시키고, 우회 밸브와 출구 밸브를 조절하여 유량을 조절하면서 인버터(Inverter)와 회전속도계(Tachometer)의 전원을 켜는다.

㉣ 정상상태에서의 유량 및 압력 손실값을 측정하기 위해 유량 및 경사마노메타의 수두값이 일정해질 때까지 기다린 후, 수조의 온도를 멀티미터를 사용하여 측정하고 유량계의 유량과 경사마노메타 차압을 측정한다.

㉤ 안쪽축이 회전할 때 생기는 교란의 영향을 감소하기 위해 측 회전수를 일정하게 하고 정상상태가 될 때까지 기다린 후 유량, 차압, 온도 등을 측정한 후 유량을 변화시킨 후 ㉣번의 과정을 반복한다.

㉥ 펌프의 영향으로 인해 수조의 온도가 증가하므로 유량을 변화시킬 때마다 온도를 측정해야 하며 유량은 2~90 LPM까지 측정이 가능한 calibration된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정한다.

2.3 물성치 측정

일반적으로 유체는 뉴턴과 비뉴턴으로 나눌 수 있으며 뉴턴 유체는 shear rate에 따른 점도값은 항상 일정하다고 하였다. 그러나 실제로는 이에 어긋나는 경우를 볼 수 있는데 이와 같이 뉴턴의 가정에 위배되는 성질을 갖는 유체를 비뉴턴 유

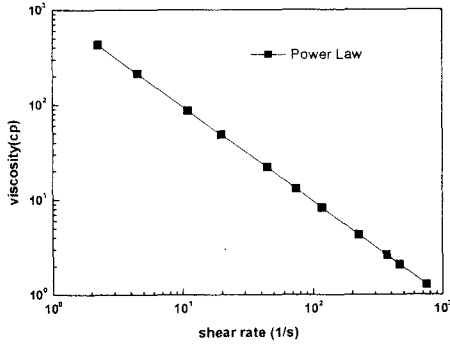


Fig. 2 Measurement of the viscosity of 0.2% CMC using power law model.

체라고 하면 이에는 bingham, ostwald, power law model 등이 있다.

본 실험에서 사용된 물성치는 0.2% CMC 수용액을 사용하였으며 점도값은 Brookfield사의 DV-III로 측정하였다. 이로부터 0.2% CMC 수용액은 비뉴턴 유체의 Power Law model 특성이 나타남을 알 수 있었다(Fig. 2 참조).

3. 실험 결과

3.1 비회전 및 회전시 층류 및 천이 영역에서의 유동특성

반지름비(η)가 0.52인 환형관 내에서 0.2% CMC 수용액을 작동유체로 하여 $700 < Re < 8000$ 구간에서 안쪽축이 0 ~ 600 rpm 회전하였을 경우, 축방향 유동레이놀즈수(Re)에 대한 압력 손실값(dp/dz)을 Fig. 3에 나타내었다.

축방향 유동레이놀즈수(Re)가 증가함에 따라 압력손실값은 증가하였으며 비회전시 $Re=2300$ 부근에서 압력손실 구배가 변하고, 100rpm 시의 압력손실 선도에서 $Re=2100$ 부근에서 구배가 변화하는 것을 볼 수 있다. 이처럼 압력손실 선도 구배가 변하는 점을 천이영역의 시작으로 간주하였다.

또한 300, 600rpm으로 회전할 경우 $Re=1960$, $Re=1650$ 부근에서 압력손실 구배가 변화함을 나타내고 있으며, 회전수가 증가할수록 축방향 임계레이놀즈수(Re_c)가 점차 작아짐을 알 수 있다.

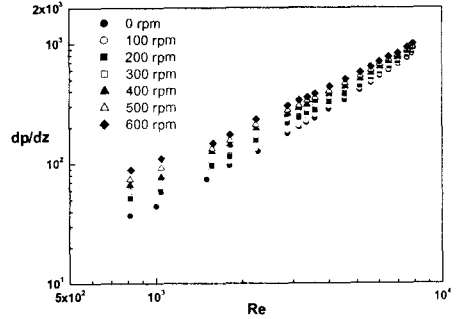


Fig. 3 Pressure loss of 0.2% CMC as a function of Reynolds number at 0~600 rpm.

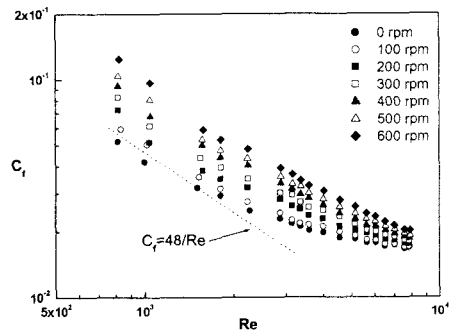


Fig. 4 Skin friction coefficient of 0.2% CMC water solution as a function of Reynolds number at 0~600 rpm.

축회전수가 100~600rpm으로 회전수가 증가 할 경우 천이가 시작되는 점부터 $Re < 5000$ 까지의 구간에서 비회전시에 대한 압력손실값은 19~60%로 증가하였다.

특히, 뉴턴유체인 44% 글리세린 수용액에서 300, 600rpm으로 회전할 때 층류영역 안에서 압력손실값의 구배가 $Re=840$, $Re=1140$ 부근에서 변화함을 보였지만 비뉴턴유체인 0.2% CMC 수용액은 유동학적인 특성 때문에 측정하기 곤란하였다. 표면 마찰계수값(C_f)은 마노메타에서 측정 한 압력 손실값을 이용하여 구할 수 있었으며 회전수가 0~600rpm인 $Re-C_f$ 를 Fig. 4에 나타내었다.

비회전시의 경우 층류영역에서는 평행하게 감소하다가 $Re=2300$ 부근에서 구배가 변하는 것을

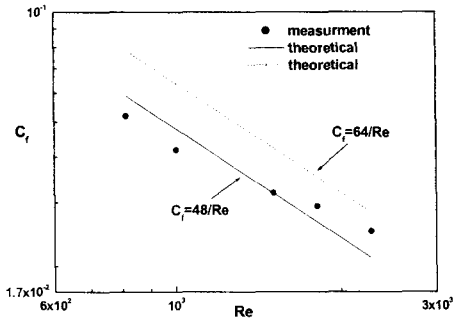


Fig. 5 Comparison of C_f with Nouri by present experiment for laminar region.

볼 수 있다. 100rpm 회전시 $Re < 2300$ 이하의 층류영역에서는 표면 마찰계수값 선도가 비회전시의 표면 마찰계수값 선도와 평행을 이루며 감소하다가 천이영역에서는 평행한 관계가 성립하지 않는 것을 볼 수 있다. 300, 600rpm으로 회전할 경우에도 100rpm의 경우와 같이 층류영역 구간에서 비회전시의 표면 마찰계수 선도와 평행을 이루며 감소하다가 $Re=1960$, $Re=1650$ 부근에서 표면마찰계수 선도의 구배가 변함을 알 수 있다.

축회전수가 100~600rpm으로 증가함에 따라 층류영역에서 표면마찰계수값은 16~58%의 증가율을 보였다.

층류영역에서의 비회전시 레이놀즈수와 마찰계수에 대한 관계식을 본 실험에서 측정된 값과 비교하여 Fig. 5 에 나타내었다.

3.2 환형관내 유동장의 가시화

축방향 유동이 없고 안쪽축이 100rpm으로 회전할 경우 작동유체 물을 사용한 경우를 Photo. 1 에 나타내었다. 축방향 유동이 없을 경우 40rpm까지는 회전에 의한 영향력이 작기 때문에 와가 생성되지 않지만, 50rpm 부터는 일정한 간격의 와가 생성되며 회전수 130rpm까지 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다. 100rpm으로 회전할 경우 한 쌍의 와 크기는 23.08mm로 나타난다.

150~170rpm의 구간에서는 와 간의 간격이 작아져서 구간을 명확하게 구분하기가 어렵지만, 크기가 21.5mm로 더 작아짐을 알 수 있었다.

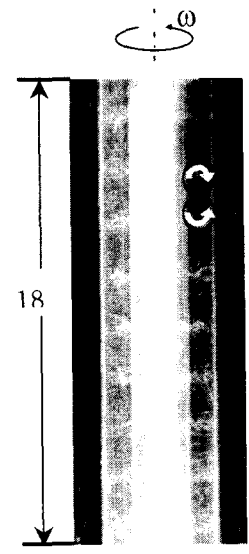


Photo.1 Taylor vortices with the inner cylinder rotating at 100 rpm ($Re=0$).

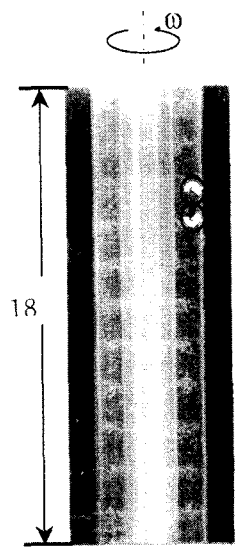


Photo.2 Taylor vortices with the inner cylinder rotating at 150 rpm ($Re=0$).

180~200rpm의 구간에서는 규칙성이 있는 와가 나타나지 않으며, 와 간의 간격이 좁아져 서로 얽혀서 구간을 구분하기가 어렵고 1~2개의 와가 생성됨을 확인하였다. 이처럼 축방향 유동이 없

을 경우에는 유동이 층류 → 층류+Taylor 와 → 난류+Taylor 와로 발달해 감을 알 수 있다.

축방향 레이놀드수(Re)가 400일 때 안쪽축의 회전 속도가 80rpm까지는 와가 생성되지 않으며 회전에 의한 영향력이 작기 때문에 나선형유동만이 나타난다.

100rpm으로 회전할 경우 어느 정도의 규칙성을 갖는 와가 생성된다. 이처럼 층류 영역에서 와가 생성되는 것으로 인해 층류 영역이 층류+Taylor 와 구간을 포함한다는 것을 확인하였다.

$Re=400$ 일 때 100rpm으로 회전할 경우 한 쌍의 와 크기는 28.15mm로 축방향 유동이 없을 경우 보다 더 증가함을 알 수 있다. 150rpm으로 회전하는 경우에는 축방향으로 유동이 없는 경우에 150rpm으로 회전할 때와 비슷한 유동형태를 나타내며 한 쌍의 와의 크기는 26.92mm이고 간격이 작은 복잡한 형태의 와가 생성된다. 200rpm으로 회전할 경우에는 축방향 유동이 없을 경우에 200rpm으로 회전할 경우와 비슷한 유동형태를 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서 회전속도, 유량, 작동유체가 압력 손실과 마찰계수에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 반지름비(η)가 0.52인 안쪽축이 회전하는 환형관 내에서의 천이 유동에 관한 특성을 실험에 의해 수행하고 분석하였다.

(1) 회전수가 증가할수록 축방향의 임계 레이놀드수는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 회전에 의한 유동교란이 증진되어 천이가 촉진됨을 확인하였다. 층류영역에서 뉴턴유체보다 비뉴턴유체가 회전에 의한 영향이 크게 나타남을 확인하였다.

(2) 환형관내에서 생성되는 한 쌍의 Taylor 와의 크기는 회전속도가 증가할수록 점차 감소하며 축방향 유량이 증가할수록 생성된 와의 크기는 증가한다. 층류 영역에서는 비회전시의 마찰계수선도와 회전시의 마찰계수선도가 평행하게 감소하다가 천이 영역에 들어서면서 평행하지 않게 감소하였고 회전속도가 증가할수록 마찰계수값은 증가한다.

1. Taylor, G. I., 1923, "Stability of a Viscous Fluid Contained Between Two Rotating Cylinders," *Phil. Trans. A*, Vol. 223, pp. 289~343.
2. Stuart, J. T., 1958, "On the Nonlinear Mechanics of Hydrodynamic Stability," *J. Fluid Mech.*, Vol. 4, pp. 1~21.
3. Diprima, R. C., 1960, "The Stability of a Viscous Fluid Between Rotating Cylinders with an Axial Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 366, pp. 621~631.
4. Yamada, Y., 1962, "Resistance of a Flow through an Annulus with an Inner Rotating Cylinder," *Bull. JSME*, Vol. 5, No. 18, pp. 302~310.
5. Yamada, Y., Nakabayashi, K. and Maeda, K., 1969, "Pressure Drop of the Flow through Eccentric Cylinder with Rotating Inner Cylinders," *Bull. JSME*, Vol. 12, No. 53, pp. 1032~1040.
6. Yamada, Y. and Watanabe, S., 1973, "Frictional Moment and Pressure Drop of the Flow through Co-Axial Cylinders with an Outer Rotating Cylinder," *Bull. JSME*, Vol. 16, No. 93, pp. 551~559.
7. Nakabayashi, K., Yamada, Y. and Seo, K., 1974, "Rotational and Axial through the Gap between Eccentric Cylinders of which the Outer One Rotates," *Bull. JSME*, Vol. 17, No. 114, pp. 1564~1571.
8. Nouri, J. M., Umur, H. and Whitelaw, J. H., 1993, "Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Concentric and Eccentric Annuli," *J. Fluid Mech.*, Vol. 253, pp. 617~641.
9. 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.
10. Delwiche, R. A., Stratabit, D. B. and Lejeune, M. W. D., 1992, "Slimhole Drilling Hydraulics," *SPE 24596* pp. 521~541.