

안쪽축이 회전하는 환형관내 천이유동 연구

A Study on the Transitional Flow in a Concentric Annulus with Rotation Inner Cylinder

김영주[†] (성균관대학교 기계공학과 대학원)

황영규 (성균관대학교 기계공학부)

우남섭 (성균관대학교 기계공학과 대학원)

권혁정 (성균관대학교 기계공학과 대학원)

1. 서론

회전식 기계들은 회전부가 있고 이를 보호하는 케이싱부로 구성되어 있으며, 이것은 안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 환형관의 형태로 단순화시킬 수 있다.

안쪽축이 회전할 때 환형관 내를 통과하는 유동에 관한 연구는 저널 베어링의 윤활문제에서 직접 응용되고, 회전 튜브 열 교환기, 유정의 굴착작업, Micro-tunnelling 등에 적용되어 왔다. 또한 화학적 혼합 시스템, 콘덴서, 최신 연소 시스템, 냉각 시스템, 혈액 산화기 등의 넓은 적용성으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다.

안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 환형관 내에서의 유동은 축회전수가 증가할수록 원심력에 의한 Taylor와의 발생으로 유동교란이 증진되고 유동장에 많은 영향을 미친다는 사실이 Taylor⁽¹⁾에 의해서 처음으로 규명되었으며, 그 후 비선형이론을 적용하여 Taylor 수와 안정성과의 관계를 Stuart⁽²⁾와 Diprima⁽³⁾가 밝혔다. 또한, 바깥쪽 축이 회전할 때는 상대적으로 유동이 안정하여 축방향으로의 임계레이놀즈수(Re_c)는 안쪽축이 회전할 때의 값보다 크고 압력손실이 적다는 것이 밝혀졌다.⁽⁴⁾ Nouri와 Whitelaw⁽⁵⁾는 임계레이놀즈수(Re_c)는 회전레이놀즈수(Re_w)와 편심률이 증가할수록 감소함을 발견하였다.

굴착작업시 직접적인 굴착경비뿐만 아니라 드릴링 유체 및 굴착물의 이송에 필요한 소요 동력까지 포함한 전체 굴착소요 경비는 굴착경(borehole), 굴착 벽면과 드릴링 축간의 간극면적에 비례하기 때문에 굴착경과 간극이 작은 Slim-Hole Drilling 기법이 요구된다.⁽⁶⁾ 이 기법의 채택시 굴착 벽면과 드릴 회전축간의 간격이 커서 굴착경이 큰 기존의 굴착작업에 비해 소요 에너지 절감뿐만 아니라, 부차적으로 파괴적인 진동감소에 의한 굴착작업 안전성 증대, 환경오염 극소화를 도모하여 전반적으로 50% 이상의 소요에너지 및 경비절감의 효과를 가져온다.

시추작업의 경제성을 향상시키는 가장 효과적인 방법은 bit에 노출되는 굴착단면을 최대화시킴으로써 굴착능률을 높이는 것이다. 이는 bit의 최대 활동을 위해 굴착면으로부터 생성되는 암편들을 신속히 제거하여 깨끗한 굴착단면을 유지시킴으로써 달성될 수 있다.⁽⁷⁾

안쪽축이 회전하지 않는다면 환형관 내 유동은 두 무한한 동축의 유동장과 일정한 압력구배 하에서 이상적 유동으로 간주되며, 환형관 내에서의 중력은 안쪽축을 따라서 1차원 선형유동으로 가정할 수 있다. 또한 안쪽축이 회전하는 경우, 환형관 내 유동은 정상상태에서 유동장내 임의의 유체 입자는 일정한 축 압력구배(dp/dz), 중력 및 안쪽축이 회전함에 따른 전단응력의 영향에 의존적인 일정한 피치의 원통형 헬리컬 유동이다.

본 연구는 Slim-Hole Drilling 작업시 발생하는 헬리컬 유동에 관한 기초적 연구로서 굴착벽면에서 상대적으로 증대되는 전단응력, 굴착물 및 드릴링 유체의 이송에 필요한 헬리컬 유동형태를 규명하고자 한다. 이러한 연구결과는 Slim-Hole Drilling을 적절한 허용범위 내에서 제어하는데 필수적인 정보이다.

환형관 내에서의 압력손실은 안쪽축과 벽면사이의 간극, 축의 회전속도, 편심비에 의해 크게 영향을 받는다. 특히, 굴착 안전성을 고려하여 1000rpm 이하의 적절한 축회전수로 작동되어질 경우 환형관 간극이 비교적 작은 환형관에서의 드릴링 유체유동은 천이영역에서의 헬리컬 유동특성을

갖는다. 그러므로, 헬리컬 유동형태는 시추공 (borehole)내의 유동장을 규명하는데 아주 효과적이다.

따라서, 본 연구는 유정의 굴착작업에서의 드릴링 유체유동에 대한 모델을 안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 환형관의 형태로 단순화하여 헬리컬 유동형태를 실험과 유동가시화를 통하여 구체적으로 연구하고자 한다.

작동유체는 비뉴턴 유체인 CMC 수용액 (Aqueous solution of sodium Carbomethyl cellulose)을 사용하였고, 완전히 발달된 유동장에 대하여 축방향으로의 레이놀즈수 $Re=100\sim 25,000$ 인 영역에서 안쪽 축을 $0\sim 600\text{rpm}$ 으로 회전시킬 경우의 압력손실값과 마찰계수 등을 측정하였다. 이로부터 유량과 회전수 변화에 따른 유동 천이와 함께 환형관 내 층류, 천이, 난류영역의 압력손실 특성을 파악하였다. 또한 Taylor와를 가시화하여 축회전수 및 레이놀즈수에 따른 와의 파장 변화를 파악하였다.

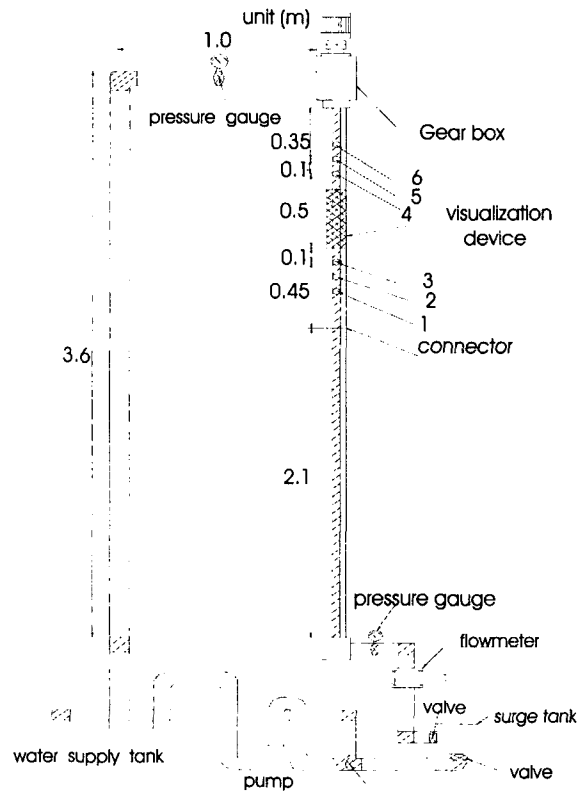


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험장치를 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 축방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 시험부(Test section)로부터 하단부의 회전하지 않는 축의 길이를 2.1m($116 \times D_h$)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.

회전축이 회전할 때 생기는 편심도는 $\pm 0.1\text{mm}$ 이내이며 차압을 측정하기 위해 시험부의 길이 방향으로 0.1m간격으로 3개의 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 l의 용적을 가지는 수조로부터 작동유체를 공급하는 magnetic pump는 온양정 9m일 때 최대 80 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 2~300 lpm의 측정 범위를 갖고 정확도가 0.2% 이내로 calibration된 magnetic 유량계를 사용하여 측정하였다. 작동 유체의 온도는 디지털 멀티미터를 사용하여 측정하였다.

2.2 실험 방법

① 펌프의 전원을 연결하기 전에 우회 밸브(bypass valve)와 출구쪽 밸브를 완전히 개방하고,

Table 1 Variation of Re_c with respect to N and Ro

N (rpm)	CMC 0.1%		CMC 0.2%		CMC 0.3%		CMC 0.4%	
	Ro	Re_c	Ro	Re_c	Ro	Re_c	Ro	Re_c
0	∞	2350	∞	2300	∞	2280	∞	2250
100	3.39	2150	4.54	2050	6.21	2000	6.70	1980
200	1.59	2000	2.14	1900	2.94	1850	3.16	1800
300	1.01	1900	1.39	1830	1.90	1780	2.04	1720
400	0.71	1780	0.98	1700	1.36	1650	1.47	1600
500	0.53	1630	0.74	1580	1.02	1520	1.13	1480
600	0.43	1550	0.58	1450	0.81	1400	0.89	1340

출구쪽 밸브를 닫았다. 펌프의 작동이 정상적으로 되는 것을 확인한 후, 우회 밸브와 Chamber 입구 밸브를 조절하여 Chamber에 물을 공급한다.

② Chamber에 유체가 충분히 채워질 수 있도록 하고, 차압 측정을 위하여 경사마노미터와 탭 사이 튜브 안을 완전히 작동유체로 채운다. magnetic 유량계는 유량 공급부에 물이 차 있을 때 작동시켜야 하며, 실험이 끝난 후 작동유체를 빼기 전에 꺼야 한다.

③ 유량이 거의 2 lpm인 상태에서 경사마노미터 안에 있는 유체(CCl_4)의 수두값을 일치시키고, 우회 밸브와 출구 밸브를 조절하여 유량을 조절하면서 인버터(Inverter)와 회전속도계(Tachometer)의 전원을 켜다.

④ 정상상태에서의 유량 및 압력 손실값을 측정하기 위해 유량 및 경사마노미터의 수두값이 일정해질 때까지 기다린 후, 수조의 온도를 멀티미터를 사용하여 측정하고 유량계의 유량과 경사마노미터의 차압을 측정한다.

⑤ 안쪽축이 회전할 때 생기는 교란의 영향을 감소시키기 위해 측 회전수를 일정하게 하고 정상상태가 될 때까지 기다린 후 유량, 차압, 온도 등을 측정한 후 유량을 변화시키면서 ④번의 과정을 반복한다.

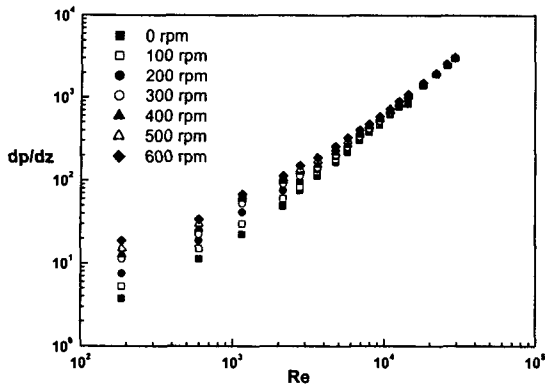
3. 실험 결과

본 실험에서, 내경 38.4mm인 바깥 실린더는 고정되어있으며, 축경 20mm인 안쪽축이 0~600rpm으로 회전하여 반지름비(η)가 0.52인 환형관 내에서 0.1%~0.4% CMC 수용액을 작동유체로 하여 축방향 유량이 2~80lpm ($100 < Re < 25000$ 구간)을 가질 때 측정한 압력손실(dp/dz)구배를 Figs. 2(a), 3(a)에 나타내었고, 마노미터에서 측정한 압력손실값을 이용하여 구한 표면마찰계수값(C_f)을 Figs. 2(b), 3(b)에 나타내었다.

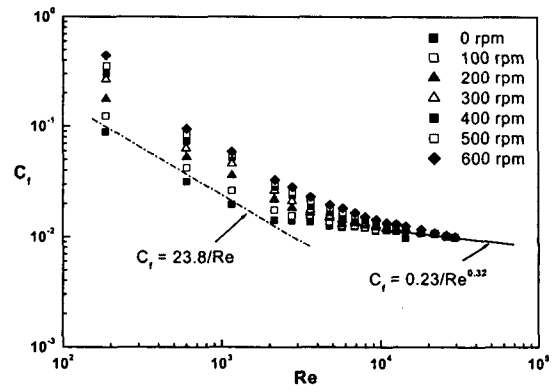
또한, 층류와 난류구간을 구분하기 위한 회전수 증가에 따른 임계레이놀즈수(Re_c)의 변화를 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 축회전이 압력손실에 끼치는 영향을 고려하고자 로스비수(Ro)를 고려하였다. 동일 축회전수 일지라도 로스비수(Ro)의 영향으로 작동유체의 CMC 성분이 증가할수록 임계레이놀즈수(Re_c)는 점차 감소함을 알 수 있었다 (Table 1 참조).

작동유체의 CMC 성분이 증가할수록 회전수 변화에 따른 압력손실값의 변화는 큰 차이를 보이지 않게 되는데, 이러한 이유는 CMC 성분이 증가할수록 점성이 증가하게 되며 이로 인해 같은 유량에서 회전수증가에 따른 압력손실값(dp/dz)의 변화가 현저하게 작아지기 때문이다 (Figs. 2, 3참조). 이러한 실험결과로부터 층류영역에서 레이놀즈수(Re) 변화에 따른 압력손실 및 표면마

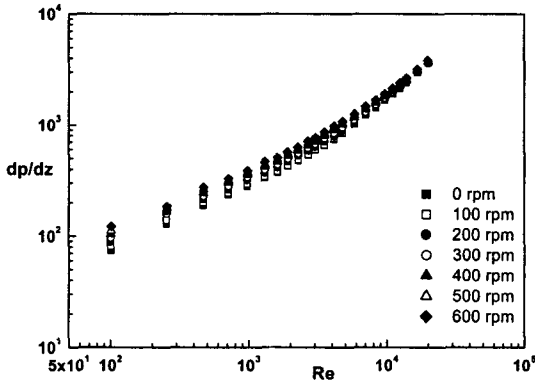


(a)

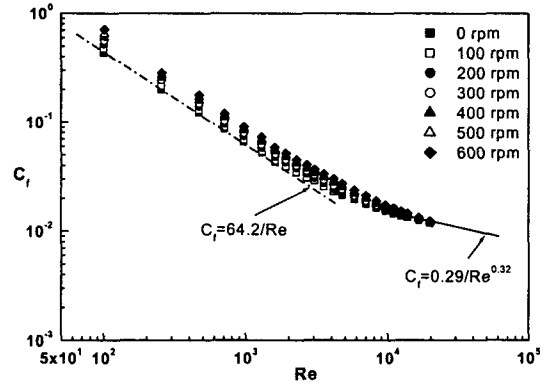


(b)

Fig. 2 Pressure losses and skin friction coefficients of 0.1% CMC solution as a function of Re at 0~600rpm



(a)



(b)

Fig. 3 Pressure losses and skin friction coefficients of 0.3% CMC solution as a function of Re at 0~600rpm

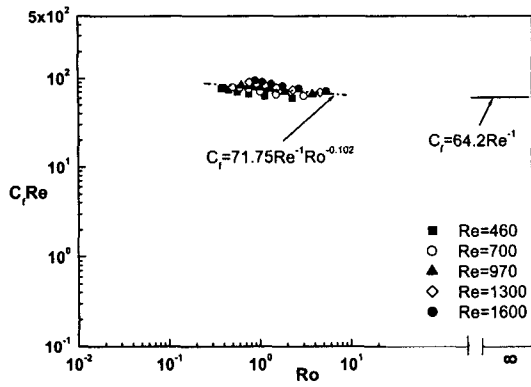
찰계수값(C_f)의 구배는 일정한 축회전수까지는 회전수에 비례하여 일정하게 증가하지만 300rpm부터는 회전수가 증가할수록 구배가 점차 가파르게 변함을 알 수 있다. 또한, 작동유체의 CMC 성분이 증가할수록 점성의 영향으로 압력손실값(dp/dz)과 마찰계수값(C_f)이 증가한다.

축회전수가 100~600rpm으로 회전수가 증가할 경우 천이가 시작되는 점부터 $Re < 5000$ 까지의 구간에서 비회전수에 대한 표면마찰계수값의 증가율을 살펴보면 CMC 0.1%의 경우 24%~66%의 증가율을 보였으며, 0.2%의 경우 10~48%의 증가율을 보였고, 0.3%의 경우 5%~30%의 증가율을 보였고, 0.4%의 경우 4%~26%의 증가율을 보였다.

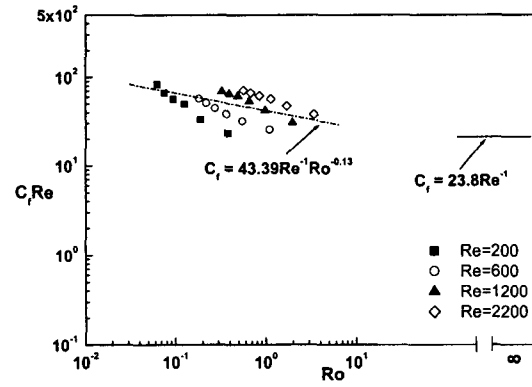
이 결과로 CMC 성분이 증가하면서 회전수 증가에 따른 표면마찰계수값의 증가율의 폭이 점차 감소해 감을 알 수 있다.

본 실험에서 제시한 회전수 변화에 따른 로스비수(Ro)의 변화를 살펴보면, Table 1에서 보듯이 CMC 성분이 증가하면서 로스비수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 축회전수가 마찰손실에 대해 미치는 영향이 점차 낮아짐을 의미한다.

층류영역에서 레이놀즈수(Re)를 변화시켜 가면서 얻은 축방향 유동에 대한 회전유동의 영향을

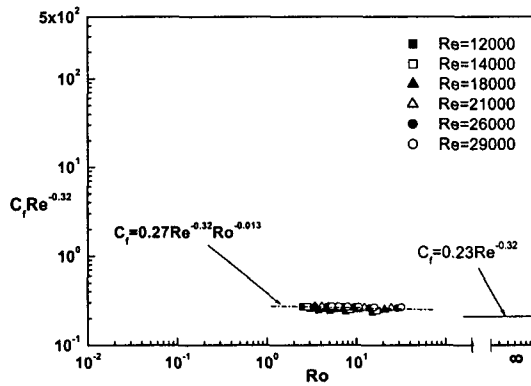


(a)

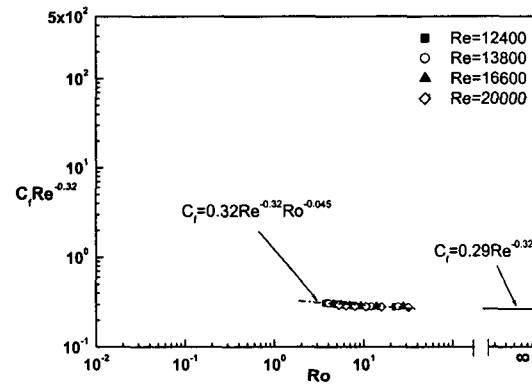


(b)

Fig. 4 Relation of $C_f Re$ with Ro for laminar flow in (a) 0.1% and (b) 0.3% CMC solution



(a)



(b)

Fig 5. Relation of $C_f Re^{0.32}$ with Ro for turbulent flow in (a) 0.1% and (b) 0.3% CMC solution

무차원수인 로스비수 (Ro)와 $C_f Re$ 의 관계로 Fig. 4에 나타내었는데, 작동유체가 CMC 0.1%인 그 그래프와 0.3% 그래프를 동일한 로스비수 (Ro)영역에서 비교해보면, CMC 0.1%일 때의 유량 변화에 따른 회전의 영향으로 $C_f Re$ 값의 차이가 CMC 0.3%일 때보다 크게 차이가 남을 알 수 있다. 이는 점성이 낮을 때는 유량을 변화시켰을 경우 회전에 의한 영향이 크게 나타나지만 점성이 높을 때는 회전에 의한 영향이 그리 크게 나타나지 않다는 것을 알 수 있으며, 기울기를 보더라도 이러한 사실을 알 수 있다.

이 결과로부터 Ro , C_f , Re 의 관계는 CMC 0.1%와 0.3%의 경우, 각각 다음 식으로 표현된다.

$$C_f Re = 43.39 Ro^{-0.13} \quad (1. a)$$

$$C_f Re = 71.75 Ro^{-0.102} \quad (1. b)$$

로스비수 (Ro)가 무한히 커지는 경우, 점근적으로 비회전시의 표면마찰계수값 (C_f)에 관한 식 ($C_f = 23.8 Re^{-1}$, $C_f = 64.2 Re^{-1}$)으로 수렴해 가는 경향을 갖는다.

레이놀즈수와 로스비수를 정의하면, $Re = \rho \overline{v_z}^{2-n} D_h^n / \nu$, $Ro = 2 \overline{v_z} / \omega R_i$ 이다.

난류영역에서는 $Re \geq 10000$ 인 경우, 유량과 축회전수를 변화시켜가면서 얻은 압력손실에 관한 실험 자료로부터 축회전이 표면마찰계수(C_f)에 미치는 영향을 로스비수(Ro)와 $C_f \cdot Re^{0.32}$ 의 관계로 Fig. 5에 나타내었다.

난류영역에서는 회전에 의한 영향이 극히 적어 유량을 변화시켜도 마찰계수값(C_f)이 큰 차이를 보이지 않는다.

이 결과로부터 난류영역에서 Ro , C_f , $Re^{0.32}$ 의 관계는 0.1%와 0.3%의 경우, 각각 다음 식으로 표현된다.

$$C_f Re^{0.32} = 0.27 Ro^{-0.013} \quad (2. a)$$

$$C_f Re^{0.32} = 0.32 Ro^{-0.045} \quad (2. b)$$

로스비수(Ro)가 무한히 커지는 경우, 층류영역에서와 마찬가지로 점근적으로 비회전시의 마찰계수값(C_f)에 관한 식($C_f = 0.23 Re^{-0.32}$, $C_f = 0.29 Re^{-0.32}$)으로 수렴해 가는 경향을 갖는다.

4. 환형관 내 유동장의 가시화

축방향 유동이 없고 안쪽축이 100rpm, 150rpm으로 회전할 경우 작동유체로 물을 사용한 경우의 유동가시화를 Photo. 1에 나타내었다. 축방향 유동이 없을 경우 40rpm까지는 회전에 의한 영향이 작기 때문에 와가 생성되지 않지만, 50rpm부터는 일정한 간격의 와가 생성되며 회전수 130rpm까지 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다. 100rpm으로 회전할 경우 한 쌍의 와의 크기는 23.1mm로 나타난다.

150~170rpm의 구간에서는 와의 간격이 좁아져서 구간을 명확하게 구분할 수는 없지만, 크기가 21.5mm로 100rpm의 경우보다 더 작아짐을 알 수 있다.

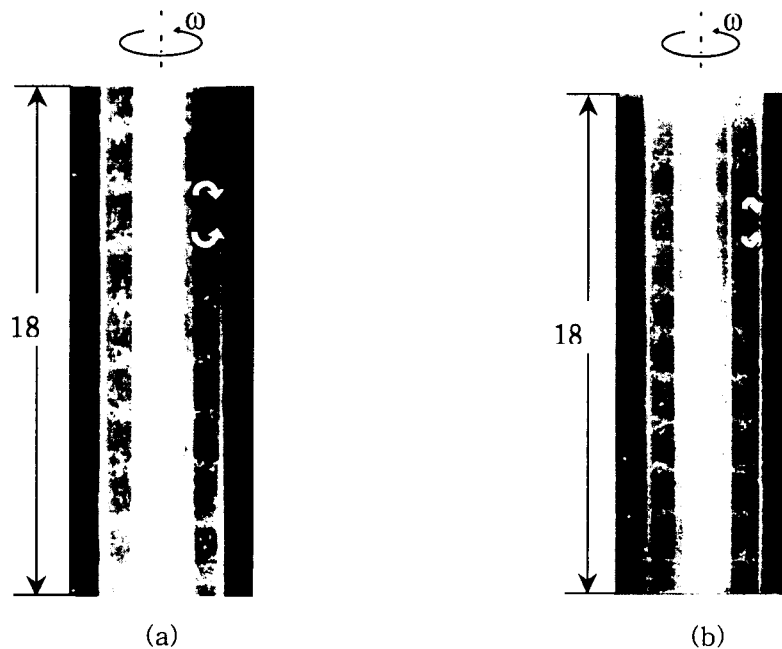


Photo. 1 Taylor vortices with the inner cylinder rotating at (a) 100rpm and (b) 150rpm ($Re=0$)

180~200rpm의 구간에서는 규칙성이 있는 와가 나타나지 않으며, 와의 간격이 좁아지고 서로 얽혀서 구간을 구분하기는 어렵고 1~2개의 와가 생성됨을 확인할 수 있었다.

이와 같은 현상은 축방향으로의 유동이 없고 회전유동만이 존재하는 경우에는 회전수가 증가하면서 Taylor와가 층류에서 난류형태로 발달해 간다는 것을 의미한다.

축방향 레이놀즈수(Re)가 400일 때 안쪽축의 회전수가 80rpm까지는 와가 생성되지 않으며, 회전에 의한 영향력이 작기 때문에 나선형유동만이 나타나며, 100rpm으로 회전할 경우 한 쌍의 와의 크기는 28.2mm로 축방향 유동이 없을 때보다 더 증가함을 알 수 있다. 이로 인해 층류영역에서 와가 생성됨에 따라 층류영역이 층류+Taylor와 구간을 포함한다는 것을 확인하였다.

150rpm으로 회전하는 경우에는 축방향 유동이 없는 경우에 150rpm으로 회전할 때와 비슷한 유동형태를 나타내며 한 쌍의 와의 크기는 26.9mm이고 간격이 작은 복잡한 형태의 와가 생성된다.

200rpm으로 회전할 경우에도 축방향 유동이 없을 경우에 200rpm으로 회전할 경우와 비슷한 유동형태를 나타낸다.

축방향 유동이 존재하는 경우, 축회전수 변화에 따른 한 쌍의 와의 크기에 관한 자료는 많지 않기 때문에 와의 크기 비교는 어렵지만 Becker와 Kaye⁽⁸⁾의 실험에서 보여준 축방향 유동이 없을 경우와 마찬가지로 회전수가 증가할수록 와의 크기는 점차 감소함을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서 회전속도, 유량, 작동유체가 변화함에 따라 압력손실과 마찰계수에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 반지름비(η)가 0.52인 안쪽축이 회전하는 환형관 내에서의 층류 및 난류 유동에 관한 특성을 실험에 의해 분석하였다.

(1) 축회전수가 증가함에 따라 압력손실이 증가하지만, 그 증가폭은 천이 및 난류영역에서는 Re 가 증가할수록 감소하며, 회전에 의한 영향으로 유동교란이 증진되어 천이가 촉진된다.

(2) 안쪽축이 회전하는 환형관 내 Taylor와로 인한 유동교란의 증진은 표면마찰계수값(C_f)의 증가와 함께 임계레이놀즈수(Re_c)를 작게 만든다.

(3) 표면마찰계수(C_f)와 레이놀즈수(Re) 및 로스비수(Ro)의 관계에서 로스비수가 증가할수록 $C_f Re$ 의 기울기가 점차 감소하여 비회전시의 표면마찰계수값에 근접해 간다. 또한 층류영역과 난류영역을 비교해 보면, 난류영역에서는 축회전수의 변화가 압력손실에 미치는 영향이 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다.

(4) 환형관 내에 생성되는 Taylor와의 크기는 회전속도가 증가할수록 점차 감소하며 축방향 유량이 증가할수록 생성된 와의 크기는 증가한다. 층류영역에서는 비회전시의 마찰계수선도와 회전시의 마찰계수선도가 평행하게 감소하다가 천이영역에 들어서면서 평행하지 않게 감소하였고 회전속도가 증가할수록 마찰계수값은 증가한다.

6. 후 기

본 논문은 두뇌한국21사업, 그리고 에너지관리공단의 지원하에 자원기술 학술진흥사업비에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

7. 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) Stuart, J. T., 1958, "On the Nonlinear Mechanics of Hydrodynamic Stability", *J. Fluid Mech.*, Vol. 4, pp. 1~22.
- (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) Nouri, J. M. and Whitelaw, J. H., 1994, "Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Concentric and Eccentric Annuli", *J. Fluids Eng.*, Vol. 116, pp. 821~827.
- (6) Delwiche, R. A., Stratabit, D. B. and Lejeune, M. W. D., 1992, "Slimhole Drilling Hydraulics", *SPE 24596*, pp.521~541.
- (7) Han, K. S., 1998, " The Rotating Effect of Drill Pipes on the Transient Length and Pressure Gradient in Drilling Operations", Seoul National University, Seoul, Korea.
- (8) Becker, K. M. and Kaye, J., 1962, "Measurements of Diabatic Flow in an Annulus with an Inner Rotating Cylinder", *J. Heat Transfer*, Vol. 84, pp. 97~105.