

안쪽축이 회전하는 환형관내 헬리컬 유동장의 실험적연구

황영규* · 김영주**

Experimental study on the helical flow field in a concentric annulus with rotating inner cylinders

Young-Kyu Hwang and Young-Ju Kim

Key Words: Transitional Flow(천이유동), Concentric Annulus(동심환형관), Helical Flow(나선유동), Rotating Flow(회전유동), Skin-friction Coefficient(표면마찰계수), Glycerine-water Solution(글리세린 수용액), Rossby Number(로스비수)

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 drops and skin-friction coefficients have been measured for the fully developed flow of water and that of glycerine-water solution (44%) at a inner cylinder rotational speed of 0~600 rpm, respectively. The transitional flow have been examined by the measurement of pressure drops and the visualization of flow field, to reveal the relation of the Reynolds and Rossby numbers with the skin-friction coefficients and to understand the flow instability mechanism. The present results show that the skin-friction coefficients have the significant relation with the Rossby numbers, only for laminar regime. The occurrence of transition has been checked by the gradient changes of pressure drops and skin-friction coefficients 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, is gradually declined for turbulent flow regime. 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 excitation of Taylor vortices.

1. 서론

안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 환형관 내에서의 유동은 축 회전수가 증가할수록 원심력에 의한 Taylor 와의 발생으로 유동교란이 증진되고 유동장에 많은 영향을 미친다는 것은 처음 Taylor⁽¹⁾에 의해 밝혀졌으며, 그 후 비선형이론을 적용하여 Taylor 수와 안정성관계를 Stuart⁽²⁾

와 Diprima⁽³⁾가 밝혔다. 이후 임계 Taylor 수는 축 방향 레이놀즈 수(Re)가 특정값에 이를 때까지는 증가하다가 Re 가 그 이후부터 점차 감소해 0으로 수렴하고,⁽⁴⁾ 바깥쪽 축이 회전할 때의 임계 회전 레이놀즈 수는 안쪽 축이 회전할 때의 Re 보다 크다는 것을 밝혔다.⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾ 그리고 Nakabayashi 등⁽⁷⁾, Nouri 등⁽⁸⁾은 축방향으로의 임계 레이놀즈 (Re_c)수는 회전 레이놀즈(Re_ω)수와 편심율이 증가할수록 감소함을 보였다.

굴착작업시 굴착소요경비는(즉, 직접적인 굴착 경비 뿐만아니라 Drilling Fluid 및 굴착물의 이송에 필요한 소요 동력까지 포함한 전체경비) 굴착시 벽면과 드릴링 축간의 간극면적에 비례하기

* 성균관대학교 기계공학부

** 성균관대학교 대학원

때문에, 간극이 작은 Slim-Hole Drilling 기법이 요구된다. 이 기법 채택시 굴착벽면과 드릴 회전축 간의 간격이 큰 기존의 굴착작업에 비해 소요 에너지 절감 뿐만아니라, 부차적으로 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 유동의 안정성에 관한 연구로서 굴착벽면에서 상대적으로 증대되는 전단응력, 굴착물 및 Drilling Fluid의 이송에 필요한 헬리컬 유동형태를 규명하고 이들을 적절한 허용범위 내에서 제어하고자 한다. 환형관 내에서의 압력강하는 안쪽축과 벽면 사이의 간극, 축의 회전속도, 편심비에 의해 크게 영향을 받는다. 특히 굴착 안전성을 고려하여 1000rpm 이하의 적절한 축회전수로 작동되어질 경우 축과 실린더사이의 간극이 비교적 작은 굴착작업은 천이영역에서의 헬리컬 유동 특성을 갖는다.

따라서 본 연구에서는 유정의 굴착작업에 대한 모형을 단순화시켜 적용한 안쪽축이 회전하고 바깥쪽 실린더가 고정된 실험 장치를 사용하였다. 작동유체는 뉴턴 유체인 물과 글리세린 수용액을 작동유체로 택하였고, 축방향으로 완전히 발달된 유동장에 대하여 $Re=300\sim 10500$ 인 영역에서 안쪽축을 0~600 rpm으로 회전할 경우의 압력 강하값과 마찰계수 등을 측정하여 유량과 회전수 변화에 따른 환형관내 천이 영역에서의 유동특성을 파악하였다. 또한 회전에 의한 영향으로 발생되는 Taylor 와를 가시화하고 환형관내 유동장에서 측정된 실험결과와 비교하였다.

2. 관련 이론

2.1 동심 환형관내 마찰계수

동심 환형관내 축방향 평균 속도식을 단위길이당 압력 강하 dp/dz 의 식으로 표현하면 다음 식(1)과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\bar{v}_z = \left(\frac{dp}{dz}\right) \frac{R_o^2}{8\mu} \left(\frac{1-\eta^4}{1-\eta^2} - \frac{1-\eta^2}{\ln(\frac{1}{\eta})}\right) \quad (1)$$

여기서, 반경비 $\eta = \frac{R_i}{R_o} = 0.52$ 이다.

표면마찰계수의 C_f 는 식(1)을 이용하면 다음 식(2)로 표현된다,

$$C_f = \left(\frac{dp}{dz}\right) \frac{D_h}{2\rho v_z^2} = \frac{23.7}{Re} \quad (2)$$

2.2 편심 환형관내 이론적 마찰계수

편심 환형관내 이론적 마찰계수값은 Yamada와 Watanabe⁽⁶⁾가 제시한 것으로서 편심비에 관한 이론식을 마찰계수식에 대입하여 식(3)과 같이 나타내었다.

$$C_f = \frac{23.7}{Re \left(1 + \frac{3}{2} m^2\right)} \quad (3)$$

여기서, m 은 편심비를 나타낸다.

2.3 실험적 마찰계수

실험적 마찰계수값은 임의의 두 지점에서 측정 한 수두값을 식 (4)에 대입하여 단위 길이당 차압을 구한 후 표면마찰계수식 (2)에 대입하여 구한다.

$$\frac{dp}{dz} = \frac{gh \sin \theta (\rho_{cch} - \rho)}{\Delta z} \quad (4)$$

여기서 Δz 는 차압을 측정 한 탭 사이 거리다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험장치는 크게 실린더부, 지지부, 유량공급 및 회전부와 유량, 압력강하, 온도 등을 측정하는 측정부등으로 구성되어 있으며, Fig. 1에 도시하였다. 바깥쪽 실린더는 직경이 38.4mm인 청동 파이프를 사용하였고, 안쪽축은 직경이 20mm인 스테인레스 강재 연마봉을 사용하였으며, 축방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 시험부로부터 상단부의 회전하지 않는 축의 길이를 2.32m(126 × D_h)로 하였다. 길이가 1.5m인 회전축과 비 회전부 사이에는 청동으로 제작한 베어링을 사용하여 연결하였고, 축의 회전에 의한 진동과 편심을 막기위해 회전하지 않는 축의 상단부와 중간부분, 상단부의 회전축과 연결되는 부분 등 3곳에 커넥터를 각각 설치하였다.

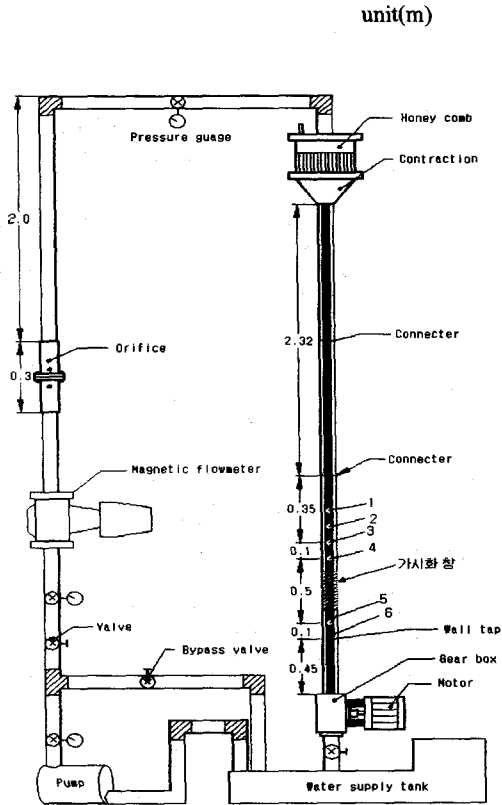


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

차압을 측정하기 위해 시험부의 길이 방향으로 0.1m 간격으로 4개의 압력측정용 탭을 설치하였으며, 가시화실험을 위해 0.5m의 간격을 아랫방향으로 두고 0.1m간격으로 2개의 압력측정용 탭을 설치하였다. 실린더와 회전부는 길이가 4m인 H형강을 사용하여 지지시켰고 H형강과 실린더는 구조용강재(SK40)를 사용하여 연결하였으며, 유량부는 SK30을 사용하여 연결하였다. 80ℓ의 용적을 갖는 수조로부터 작동유체를 공급하는 마그네틱 펌프는 온양정 9m일 때 최대 70LPM의 용량을 갖는다. 안쪽 축은 DC모터를 사용하여 회전시키고, 인버터에서 제어하였다.

유량은 6~60LPM의 측정 범위를 갖고 정확도가 0.5% 이내로 보정된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다. 작동 유체의 온도는 디지털 멀티미터를 사용하여 측정하였다. 또한 환형관내 유동장의 유동 가시화를 위해 길이가 330mm이고

직경이 38.4mm인 원통 유리관을 설치하였으며, 커넥터를 이용하여 바깥쪽 실린더와 연결하였다. 가시화 부분이 원통이기 때문에 굴절현상을 막기 위해 두께가 5mm인 유리상자를 설치하였으며 그 안에 물을 가득 채워 넣었다. 가시화에 사용된 입자는 직경이 0.5mm정도로 미세한 적색의 톱밥 가루를 사용하였다.

3.2 실험순서

펌프의 전원을 연결하기 전에 우회 밸브(bypass valve)는 완전히 개방하고, 출구쪽 밸브를 닫았다. 펌프의 작동이 정상적으로 되는 것을 확인한 후, 출구쪽 밸브를 조금 열어놓으면서 우회 밸브를 조절하여 하니콧에 작동유체를 공급하였다. 하니콧 안에 유체가 완전히 차 있는지를 확인하고, 차압 측정을 위한 마노메타와 탭 사이의 튜브 안을 완전히 작동유체로 채웠다. 마그네틱 유량계는 유량 공급부에 물을 채우고 동작시켰으며 정지시에는 역순이 되었다. 유량이 거의 0인 상태에서 경사마노메타 안의 유체(CCl₄)의 수두값을 일치시킨 후, 압력계의 지시계를 0으로 맞추면서 우회 밸브와 출구 밸브를 조절하여 유량을 조절하면서 인버터와 회전속도계의 전원을 켜다.

정상 상태에서의 유량 및 압력강하값을 측정하기 위해 유량 및 경사마노메타의 수두값이 일정해질 때까지 기다린 후, 수조의 온도를 멀티미터를 사용하여 측정하고 유량계의 유량과 경사 마노메타의 차압을 측정하였다. 안쪽 축이 회전할 때 생기는 교란의 영향을 줄이기 위해 축 회전수를 일정하게 하고 정상 상태가 될 때까지 기다린 후 유량, 차압, 온도 등을 측정한 후 유량을 변화시켜 위의 과정을 반복하였다. 펌프의 영향으로 인해 수조의 온도가 증가하므로 유량을 변화시킬 때마다 온도를 측정했다.

4. 실험결과

4.1 비회전, 회전시의 층류, 천이 및 난류 영역에서의 유동 특성

4.1.1 층류 영역에서의 유동 특성

반경비 (η) 0.52인 환형관내 층류영역에서의 유동특성을 고찰하기 위하여 작동유체로 물과 44%글리세린수용액을 고려하였다. 안쪽축이 0~

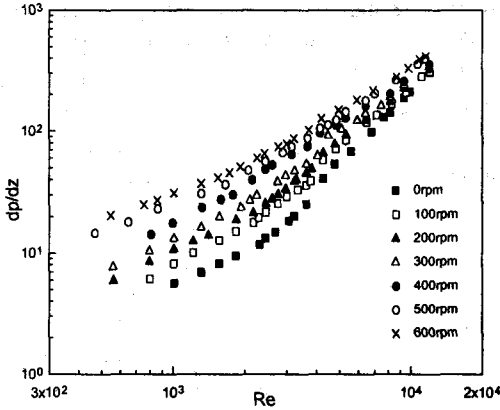


Fig. 2 Total dp/dz of water as a function of Re at 0~600rpm.

Table 1 Re_c of water.

RPM	0	100	200	300	400	500	600
Re_c	2300	2170	2100	1900	1736	1597	1500

600rpm으로 회전하는 경우, Re 에 대한 압력강하의 관계를 Fig. 2에 도시하였으며 물을 작동유체로 하였다. Table 1은 물을 작동유체로 실험했을 경우 회전수 변화에 대한 Re_c 를 나타내고 있으며 이로부터 회전수가 증가할수록 Re_c 는 작아지는 경향을 알 수 있다.

글리세린 수용액(44%)에 대한 Re 변화에 따른 dp/dz 의 변화 및 C_f 값을 Fig. 3에 나타내었다. 이 실험은 Fig. 2보다 낮은 $500 < Re < 5000$ 구간에서 수행되었는데 그 이유는 유량이 같은 조건에서 글리세린이 물보다 점도가 4배정도 크기 때문이다. Fig. 3로부터 층류영역에서 층류+Taylor vortices가 발생하는 Re_{li} 값이 회전수가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있다. 그리고 작동유체가 물인 경우 table 1에서는 층류+taylor vortices의 데이터를 제시하지 않았는데 그이유는 점도가 작으므로 실험상의 난이점이 있기 때문이다. Table 2는 44% 글리세린 수용액을 작동유체로 실험했을 경우 회전수 변화에 대한 Re_c 와 Re_{li} 를 나타내었다. Fig. 4은 층류영역에서 Re 를 변화시켜가면서 얻은 축방향 유동에 대한 회전 유동의 영향을 나타내는 무차원수인 로스비수 (Ro)와 $C_f Re$ 의

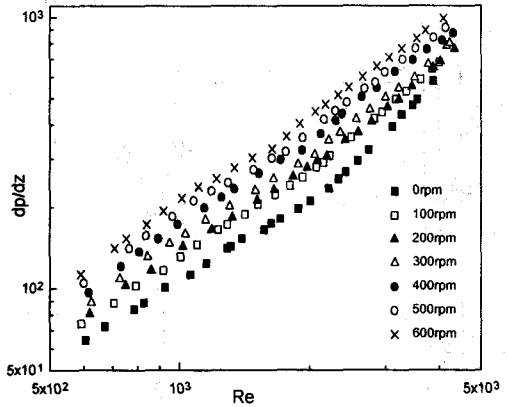


Fig. 3 Total dp/dz of glycerine-water solution as a function of Re at 0~600rpm.

Table 2 Re_c and Re_{li} of glycerine-water solution(44%)

RPM	0	100	200	300	400	500	600
Re_c	2300	2200	2130	2050	1917	1758	1636
Re_{li}				840	980	1075	1140

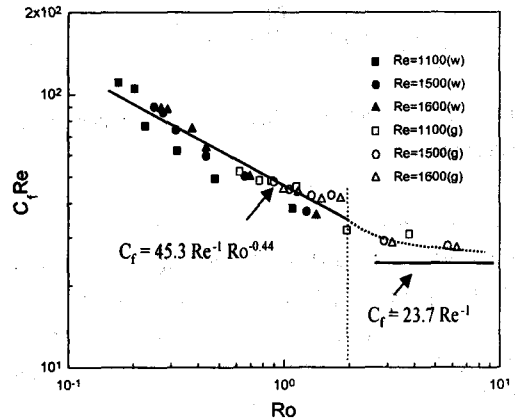


Fig. 4 Skin friction coefficient water and glycerine-water solution as a function of Rossby number for laminar flow.

관계를 나타낸다. 이 그림에서는 작동유체 물과 글리세린 수용액을 사용한 데이터를 함께 표시하였는데 그 이유는 물과 글리세린 수용액이 모두 뉴턴유체 특성을 갖는다고 판단했기 때문이다. 이 그림으로부터 회전유동과 $C_f Re$ 의 관계는 $Ro \leq 2$ 인 경우 $C_f = 45.3 Re^{-1} Ro^{-0.44}$ 로 표현 될

수 있었고, Ro 가 무한히 커지는 경우 점근적으로 $C_f = 23.7Re^{-1}$ 의 식으로부터 얻어지는 값과 일치하는 특성을 갖는다.

4.2 환형관내 유동장의 가시화

4.2.1 축방향 유동이 없을 경우

축방향 유동이 없는 Fig. 5(a)은 안쪽실린더가 100rpm으로 회전할 경우의 유동장 가시화 사진이다. 100rpm으로 회전할 경우의 유동장 가시화 사진이다. 축방향 유동이 없을 경우 40rpm까지는 회전에 의한 영향력이 작기 때문에 와가 생성되지 않지만, 50rpm부터는 일정한 간격의 와가 생성되며 회전수 130rpm까지 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다. 이때, 100rpm으로 회전할 경우 한 쌍의 와의 크기는 23.08mm로 나타난다. 회전수가 증가하여 150~170rpm의 구간에서는 와 간의 간격이 작아지며 구간을 명확하게 구분하기가 어렵지만, 크기가 약 21.5mm임을 알 수 있었다. 회전수가 더욱 증가하여 180~200rpm의 구간에서는 규칙성이 있는 와가 나타나지 않으며, 와 간의 간격이 좁아져서 서로 얽혀서 구간을 구분하기가 어렵다. 이와 같은 현상은 축방향 유동이 없고 회전유동만 존재하는 경우에는 회전수가 증가함에 따라서 Taylor 와가 층류에서 난류형태로 발달해 감을 의미한다. 안쪽축과 바깥쪽 실린더와의 간극이 작을 경우, 회전수 변화에 따른 와 크기의 변화를 이론적으로 해석한 식⁽⁹⁾ $\Delta\lambda = R_i(116.8/Re_w)$ 에서 구한 한 쌍의 와 크기와 유동시화로 측정된 크기를 비교하였다. 그 결과 100rpm에서 150rpm으로 회전속도가 증가하면 이론식으로 구한 와 크기는 약 23%감소하였고, 가시화로 측정된 와 크기는 약 6.87% 감소하였으며 이는 Prandtl의 이론식은 환형관내 간극이 $d_1/d_2 > 0.8$ 인 경우에 구한 이론식이므로 본 연구에서는 간극이 $d_1/d_2 = 0.52$ 인 경우와 비교 실험했다. 이로부터 실린더 사이의 간극이 작을수록 와 크기는 회전의 영향을 크게 받는다는 것을 확인하였다.

4.2.2 축방향 유동이 있을 경우

Re 가 400일 때 안쪽축의 회전 속도가 80rpm까지는 와가 생성되지 않으며 회전에 의한 영향력이 작기 때문에 나선형 유동만이 나타난다.

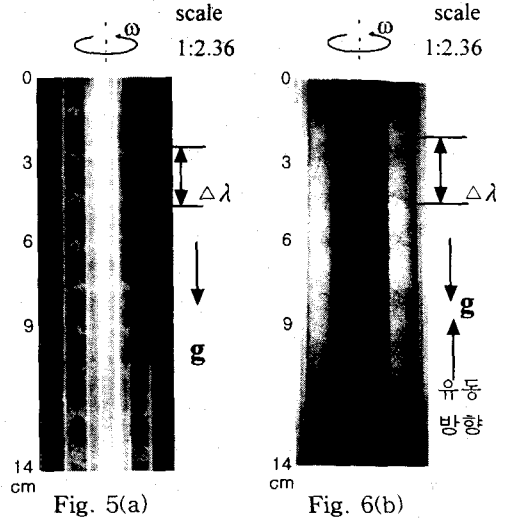


Fig. 5(a) Taylor vortices with the inner cylinder rotating 100 rpm ($Re=0$)

Fig. 6(b) Taylor vortices with the inner cylinder rotating 100 rpm ($Re=400$)

100rpm으로 회전할 경우 어느 정도의 규칙성을 갖는 와가 생성된다. 이와 같은 결과로부터 층류 영역에 층류+Taylor 와가 발생하는 특정한 Re 의 존재를 확인할 수 있다. Fig. 6(b)은 $Re=400$ 일 100rpm으로 회전할 경우의 사진이며, 한 쌍의 와 간의 크기는 28.15mm로 축방향 유동이 없을 경우보다 증가함을 알 수 있다. 150~200 rpm으로 회전하는 경우에는 축방향으로 유동이 없는 경우에 150~200 rpm으로 회전할 때와 비슷한 유동형태를 나타내며, 한 쌍의 와 크기는 26.92mm이고 간격이 작은 복잡한 형태의 와가 생성된다.

축방향 유동과 회전이 함께 존재하는 경우에 대해 축회전수 변화에 따른 한 쌍의 와 크기에 관한 자료는 많지 않기 때문에 와의 크기 비교는 어렵지만 Becker와 Kaye⁽¹⁰⁾의 실험에서 보여준 축방향 유동이 없을 경우와 마찬가지로 회전수가 증가할수록 와의 크기는 점차 감소함을 확인하였다.

5. 고찰 및 결론

본 연구에서는 작동조건의 변화에 따라 압력강하 특성 및 마찰계수 변화 특성을 알아보았다.

회전수 증가에 따라 압력강하값이 증가하며, 안쪽축이 비회전인 경우에 비해 회전시 마찰계수값의 증가율은 천이 및 난류영역에 대하여 Re 가 증가할수록 감소함을 알 수 있었다. 또한, 회전 유동에서의 Re_c 의 값은 회전수가 증가함에 따라 점차 작아짐을 알 수 있었다.

물에서는 뚜렷이 나타나지 않았던 층류영역의 특정 Re 에서 압력강하 기울기가 변화하는 층류+Taylor 와의 구간이 글리세린 수용액에서 나타남을 알 수 있었다. 이는 층류에서 회전에 의해 와 유동이 발생함을 의미한다. 또한, 안쪽축이 회전할 때 환형관내 유동은 원심력의 작용으로 인하여 Taylor 와가 발생하며, 이러한 와의 발달과 유동 교란의 증진은 C_f 값의 증가와 천이 발생을 앞당기는 요인으로 작용한다. 그리고 비회전에 대한 회전시 마찰계수값의 증가율은 층류영역에서는 일정하며, 천이 영역에서는 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 층류 영역에서 회전유동과 $C_f Re$ 관계는 $Ro \leq 2$ 인 경우 $C_f = 45.3Re^{-1} Ro^{-0.44}$ 로 표현될 수 있었고, Ro 가 무한히 큰 경우는 $C_f = 23.7Re^{-1}$ 의 식으로부터 얻어지는 값과 일치하는 특성을 알 수 있었다. 유동가시화는 축 방향 유동이 없을 때, 축회전수가 50~130rpm 인 경우 뚜렷한 Taylor 와를 볼 수 있었고, 축 방향 유동이 있는 경우 $Re = 400$ 일 경우에도 100rpm으로 회전시 Taylor 와를 관찰할 수 있었다. 또한, 회전수가 증가할수록 와의 크기는 감소함을 실험과 이론식을 통하여 확인할 수 있었다. 이처럼 층류 영역내에서도 회전으로 인한 Taylor 와가 발생하여 유동장에 영향을 미치며, 회전속도가 증가할수록 층류+Taylor 와 구간이 점차 증가한다. 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 C_f 값은 증가한다.

참고문헌

- (1) G. I. Taylor, 1923, "Stability of a Viscous Fluid Contained Between Two Rotating Cylinders," *Phil. Trans. A*, Vol. 223, pp. 289~343.
- (2) J. T. Stuart, 1958, "On the Nonlinear Mechanics of Hydrodynamic Stability," *J. Fluid Mech.*, Vol. 4, pp. 1~21.
- (3) R. C. Diprima, 1960, "The Stability of a Viscous Fluid Between Rotating Cylinders with an Axial Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 366 pp. 621~631.
- (4) Y. Yamada, 1962, "Resistance of a Flow through an Annulus with an Inner Rotating Cylinder," *Bull. JSME*, Vol. 5, No. 18, pp. 302~310.
- (5) Y. Yamada, K. Nakabayashi, and K. Maeda, 1969, "Pressure Drop of the Flow through Eccentric Cylinder with Rotating Inner Cylinders," *Bull. JSME*, Vol. 12, No. 53, pp. 1032~1040.
- (6) Y. Yamada and S. Watanabe, 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) K. Nakabayashi, Y. Yamada and K. Seo, 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) J. M. Nouri, H. Umur, and J. H. Whitelaw, 1993, "Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Concentric and Eccentric Annuli," *J. Fluid Mech.*, Vol. 253, pp. 617~641.
- (9) A. Ogawa, 1993, *Vortex Flow*, CRC Press Inc., pp. 169~192.
- (10) K. M. Becker and J. Kaye, 1962, "Measurements of Diabatic Flow in an Annulus With an Inner Rotating Cylinder," *J. Heat Transfer*, Vol. 84, pp. 97~105.