

내·외벽에 거칠기가 있는 이중동심관 유동에 대한 실험적 연구

Experimental Investigation on the Flow in Concentric Annuli with Both Rough Walls

안 수 환*, 정 양 범**, 김 경 천***
S. W. Ahn, Y. B. Jung, K. C. Kim

Key words : Concentric Annuli(이중동심관), Fully Developed Flow(충분히 발전된 유동), Roughness Effect(거칠기 효과), Wall Shear Stress(벽면 전단응력), Pressure-drop Coefficient(압력강하계수)

Abstract

Fully developed turbulent flow through three concentric annuli with both the rough inner and outer walls was experimentally investigated for a Reynolds number range $Re=15,000-85,000$. Measurements were made of the pressure drop, the positions of zero shear stress and maximum velocity, and the velocity distributions in annuli of radius ratios, $a=0.26, 0.4$ and 0.56 , respectively. The experimental results showed that the positions of zero shear stress and maximum velocity were only weakly dependent on the Reynolds number. It was also found that the position of zero shear stress was not coincident with that of maximum velocity. Furthermore, the former was influenced more sensitively than the latter on the square-ribbed roughness along the axial direction.

기 호 설 명

De : 등가직경, $2(r_0-r_i)$

P : 거칠기 피치

p : 정압

r : 반경방향거리

r_i : 내관 외반경

r_m : 최대속도의 반경방향거리

r_o : 외관 내반경

r_{r0} : 전단응력이 0인 반경방향거리

u : 축방향의 시간평균속도

$u'v'$: 레이놀즈 전단응력

u_{rms} : 축방향 속도변동 rms, $(\overline{u^2})^{0.5}$

v_{rms} : 반경방향 속도변동 rms, $(\overline{v^2})^{0.5}$

x : 축방향 거리

α : 내·외 반경비, r_i/r_o

β : 전단응력이 0인 무차원지점, r_{r0}/r_o

$\hat{\beta}$: 최대속도의 무차원 지점, r_m/r_o

ϵ : 거칠기 높이

ρ : 밀도

ν : 동점성계수

τ : 전단응력

τ_{wo} : 외관 내벽면의 전단응력

τ_{wi} : 내관 외벽면의 전단응력

* 정희원, 경상대학교 수산대학 기관과
** 정희원, 부산대학교 생산기계공학과 박사후 과정
*** 정희원, 부산대학교 기계기술연구소
유체공학연구부, 부산대학교 생산기계공학과

1. 서 론

이중관내의 유동은 에너지 관련 사업이나 유체 기계 등에서 흔히 볼 수 있는 현상으로 열교환기, 보일러 등 많은 열전달기기는 대류열전달을 향상시키기 위하여 다양한 인공 표면거칠기 요소들을 채택하고 있다. 유동의 벽면에 표면거칠기를 설치할 경우 열전달율을 증가시키게 되지만 유동에서 생기는 높은 난류 때문에 압력손실도 증가시키게 된다. 따라서 단위 펌프동력에 대한 열전달은 향상되지 않을 수도 있으며, 이와같은 유동현상을 명확히 규명할 필요가 있다. 그러나 충분히 발달된 내부 유동의 난류 구조 해석은 비교적 간단한 유동인 원관이나 평행평판내의 난류 유동에 관한 실험적 결과에 기초를 두고 있다. 이러한 평행 평판이나 원관 내부의 유동은 대칭적인 속도형상을 이루고 있으며, 전단응력이 영인 지점과 최대속도 지점이 일치하게 된다. 일반적으로 관찰되는 실제의 내부유동은 대부분 매우 복잡한 경계조건을 갖는 비대칭적 속도형상을 이루고 있으며 전단 응력이 0인 지점과 최대속도 지점이 일치하지 않는 것이 보통이다. 이러한 비대칭 속도 형상은 전단응력이 영인 지점을 기준으로 난류 유동의 길이척도와 난류운동 에너지가 서로다른 두 유동영역간의 상호작용에 의해 형성되며, 따라서 난류전달현상도 대칭유동의 난류현상과도 다르게 나타나게 된다.

비대칭 내부유동을 연구하기에 가장 간단하고 적합한 형상은 매끈한 벽을 가지는 이중동심관내의 유동이다. 충분히 발달된 이중관내의 유동은 비대칭 속도형상을 가지며 일반적으로 이중관에 대한 내·외관의 직경비가 작을수록 비대칭성은 증가하게 된다. 이러한 이중관내의 유동에 대하여 압력강하와 속도분포 등의 특성에 대한 많은 실험적 연구들이 진행되어 왔다.

Brighton¹⁾은 속도분포와 최대속도 지점을 단일 피토포관과 이중 피토포관으로 측정 하였으며, 난류강도와 전단응력 분포를 열선풍속계로 측정하여 최대속도 지점과 전단응력이 0인 지점이 거의 일치한다고 하였다. 그러나 전단응력 분포에 대한 실험 데이터가 불규칙하게 분포하여 그의 실험결과는 정확성이 미흡했다. Brighton & Jones²⁾ 등은 4가지 경우의 반경비에 대하여 이중관내의 유동현상을 3

방향 난류강도의 측정을 통하여 연구 하였으며, Kjellstrom & Hedburg³⁾ 등은 비대칭 유동에 대하여 최대속도 지점과 전단응력이 영인 지점이 일치하지 않는다고 최초로 주장 하였고, 이러한 현상을 내벽에 거칠기가 있는 이중관에서 실험으로 증명 하였다. Durst⁴⁾는 이중관내의 난류유동현상을 실험적으로 연구 하였으나, 그들은 축, 반경방향의 난류강도만 측정하고 반경방향의 전단응력은 측정 하지 않았다. Lawn & Elliott⁵⁾ 등은 3가지 반경비의 경우에 대해 열선풍속계를 이용하여 측정한 난류 특성을 발표 하였으며, 또한 그들은 매끈한 이중관에서도 최대속도 지점과 전단응력이 0인 지점이 일치하지 않으며, 전단응력이 0인 지점이 내벽쪽으로 더 가깝게 위치한다고 하였다. Rehme⁶⁾도 압력강하, 전단응력이 0인 지점 및 최대속도 지점 등을 측정하여 전단응력이 0인 지점과 최대속도지점이 일치하지 않음을 보였다. 그러나, 이들 연구들은 양측 모두 매끈하거나 한쪽면에 부분적인 거칠기를 가진 이중관에 대해 취급 하였으며, 전체적으로 거칠기를 이중관에 설치한 경우의 연구는 매우 드문 실정이다. 안수환등은 전체적으로 거칠기가 내관 외벽에 있는 이중관⁷⁾과 외관내벽에 있는 이중관⁸⁾에서 거칠기의 위치와 형상에 따라서 이중관내의 속도와 열전달 특성이 매끈한 이중관에 비해 더욱 복잡하게 나타난다고 보고 하였고, 김경천등⁹⁾은 외측내벽에 거칠기가 설치된 이중관의 난류특성을 측정한 바 있다.

본 연구에서는 내관 외벽 및 외관 내벽에 전체적으로 동일한 거칠기를 Fig.1과 같이 거칠기 피치

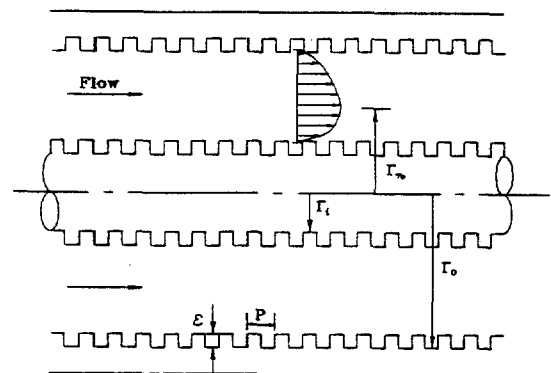


Fig.1 Details of roughness.

(P)/높이(ϵ)=2가 되도록 설치하여 3가지 경우의 반경비($\alpha=0.26, 0.4, 0.56$)에 대해 압력강하, 벽면 전단응력, 전단응력이 0인 지점, 최대속도 지점 및 속도분포 등을 측정 분석하여 사각돌출형 거칠기가 이중관내의 유동현상에 미치는 영향을 평가 하고자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 이중동심관 유동발생장치의 개략도가 Fig.2에 나와있다. 실험장치의 전체길이는 약 6.1m이며, 공기는 흡입식 송풍기(0.8kW, 3400rpm A/C motor)에 의해서 공기여과기를 통해 벨마우스 수축부를 거쳐서 시험부(test section)로 유입된다. 벨마우스 부분은 최소내경 97mm, 최대내경 170mm로 주철로 제작 되었으며 사용된 송풍기의 제원은 수두 520mmAq, 유량 9m³/min이다.

이중동심관은 관 전체에 대하여 내부직경이 97mm인 바깥쪽 튜브 내면과 외부직경이 각각 25.5mm, 38.5mm, 54.5mm인 내관의 외면에 동일한 거칠기를 설치하여 구성 하였으며, 외관에 대한 내관의 위치, 압력강하 그리고 시험부의 여러 횡단부에서 속도장, 난류특성을 측정할 수 있도록 지름 3mm의 구멍들을 축방향으로 가공하였다. 외관의 재질은 알루미늄 합금이며 주조로 관을 제작 하였고 외관내면의 표면조도 제작은 특수 바이트를 사용

하여 선반으로서 Fig.1과 같이 외관내면에 높이(ϵ) 1.5mm, 폭 1.5mm, 피치(P) 3mm의 $P/\epsilon=2$ 인 정사각형 홈의 거칠기가 형성 되도록 가공 하였다. 알루미늄 합금관의 전체길이는 4m이며, 50cm씩 8개를 플랜지로 연결하였다. 내관의 재질은 비교적 가공이 쉬운 아크릴로 하였으며, 거칠기는 외관과 같은 크기로 제작 하였다. 측정부는 측정의 편의를 위해 재질을 투명한 아크릴로 선택 하였으며, 채널 입구에서 3.75m 떨어진 곳에 위치하여 측정 하였다. 측정 센서의 이송은 특별 제작된 이송기구를 이용하였다. 내관의 지지는 내관을 반경방향으로 위치조절이 가능한 3점 이동장치에 의해 3지점에서 지지되도록 하였으며, 시험부의 조립시 내관의 정확한 장착을 위해 외관에 대한 내관의 동심상태를 다이알게이지로 점검하였다. 내관의 처짐에 의한 편심은 무시할 수 있을 정도로 작았으며, 최소직경의 내관을 장착했을 경우 최대의 편심량으 0.5% 정도였다.

2.2 측정 및 데이터 처리

본 실험에서 중점을 두는 측정및 분석대상은 충분히 발전된 동심관 내부유동에서 채널길이에 따른 압력강하, 속도형상, 속도기울기 형상, 난류 전단응력 등의 측정이다.

정압 측정은 전기식 압력변환기(KMS Baraton pressure transducer)로 측정 하였으며, 압력변환기의 보정(calibration)은 주기적으로 마이크로마노미터(FCO 12-2)로 점검하였다. 압력변환기의 오차

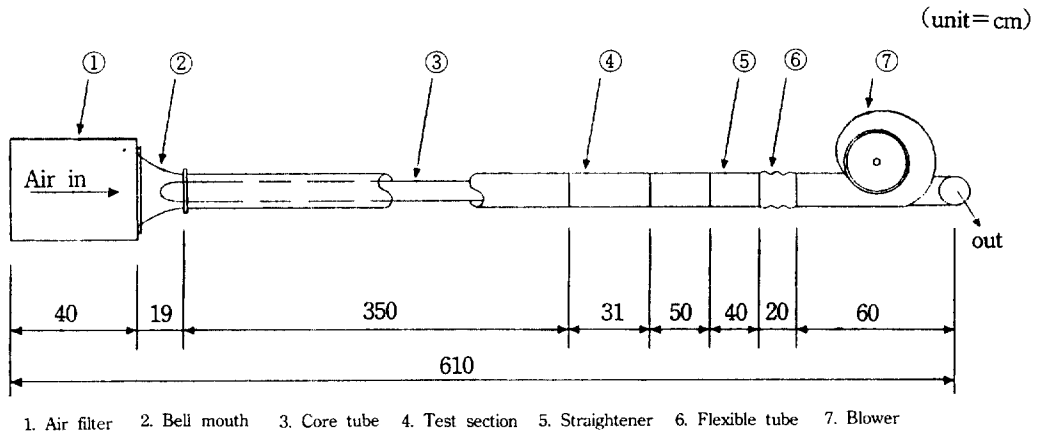


Fig.2 Schematic diagram of experimental setup.

범위는 측정범위(full scale : 10torr) 기준 0.1% 이내이며, 압력측정치 불확실성(uncertainty)은 0.5% 수준으로 분석되었다. 유량측정용 오리피스에 시험부에서 측정된 속도형상을 수치적분법에 의하여 보정 하였다. 압력 강하 데이터는 송풍기 용량을 제한을 받는 레이놀즈수 범위 안에서 얻었고 측정하기 전 최소한 30분 동안 정상상태를 유지시켰다.

평균유속의 측정은 피토크를 사용하였으며, 전단응력의 측정은 측정부길이 1mm, 직경 4 μ m 인 텅스텐 X형 열선프로우브와 정온도형 열선풍속계(C.T.A., TSI Model 1054 A)를 사용하였다. 이때, X형 열선 프로우브의 신호는 정온도형 열선풍속계에 의해 검출되어 범용 파형분석기(D-6000Model 611, Data Precision Inc.)내의 연산기를 통하여 디지털(digital) 신호로 전환된 후, GPIB 카드로 D6000과 연결된 컴퓨터의 하드 디스크에 온라인으로 저장된다. 각 측정 지점에 대한 자료의 추출 간격은 100 μ s이며, 1회 측정당 4096개의 자료를 10번씩 측정하여 ensemble 평균을 취하였다. 또한 측정신호의 분석은 오프라인 프로그램에 의해 수행 하였다.

X형 열선프로우브의 교정은 매 측정전에 TSI 모델 1125 calibrator를 이용하여 수행 하였고, 얻어진 교정 데이터는 컴퓨터에 내장된 Look-up Table 형식으로 구성된 교정 프로그램에 입력되어 교정 관계식이 형성되도록 하였다. 측정된 레이놀즈수 범위는 등가직경($De=2(r_0-r_1)$) 기준으로 약 15,000에서 85,000이었다. 실험장치 주위의 온도와 압력은 매 운전 시작전에 기록 하였으며, 종료시 다시 측정 후 그 차이를 확인하여 최대오차가 2% 이내에 드는 경우의 데이터를 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력강하 및 벽면 전단응력

충분히 발전된 영역의 결정은 동심관의 길이에 대한 정압강하를 측정하여 dp/dx 가 일정한 영역을 얻은 후 평균유속을 측정하여 더 이상 변화가 없는 부분으로 판정하였다. 본 실험에서는 채널입구에서 1.28m 위치부터는 모든 반경비의 경우에 대해 충분히 발전된 영역으로 평가되었으며, 압력기울기

(dp/dx)의 값들은 충분히 발전된 영역에서 측 방향으로 5지점에서 얻은 각각의 dp/dx 값들 평균하여 구하였다.

압력강하계수 λ 는 식 (1)로 정의 되며,⁷⁾ 위와 같이 측정된 결과로부터 구한 압력강하계수를 레이놀즈수의 함수로 하여 Fig.3에 나타내었다.

$$\lambda = \frac{dp/dx}{0.5\rho_a u_m^2 / De} \tag{1}$$

여기서 De 는 등가직경($=2(r_0-r_1)$), \bar{u}_m 은 측정단면에 대하여 질량유량을 기준으로 계산한 평균속도, ρ_a 는 공기밀도이다.

그림에서 보는 바와 같이 압력강하계수는 동일한 레이놀즈수에서 반경비 a 가 증가 할수록 크게 나타나며, 반경비가 작은 영역에서 반경비의 변화에 따라 λ 의 값이 더 많이 변화 한다고 볼 수 있다. 이 결과는 기존의 매끈한 이중관 연구에서 반경비가 클수록, 또 이중관보다는 평행평관의 경우 λ 의 값이 증가하는 것과 일치한다. 또한 동일한 반경비에 대하여 레이놀즈수가 증가할 경우 λ 의 값은 레이놀즈수가 약 30,000정도 되는곳을 기준으로 감소하다가 다시 증가되는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 원관이나 매끈한 이중관에서 레이놀즈수가 증가하면 λ 가 선형적으로 감소하는 경우와는 아주 다른 결과이다. 이와같은 현상은 레이놀즈수가 약 30,000정도 되는 곳에서 거칠기 흡속의 재순환이 가장 활발하여 유체의 마찰손실을 최소화

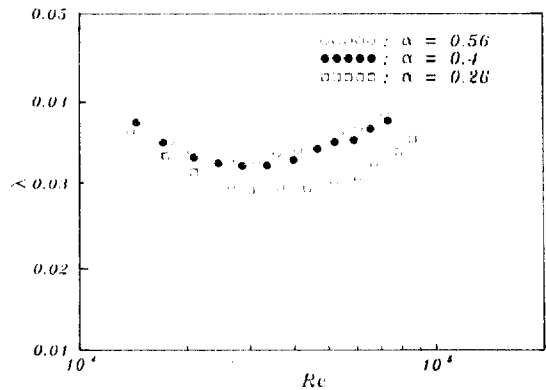


Fig.3 Pressure-drop coefficient vs. Reynolds number.

하고, 그 외의 레이놀즈수 구간에서는 축방향 유동유체가 흡속 유체와의 상호작용으로 마찰저항을 증가시키기 때문으로 판단된다.

한편, 충분히 발달된 영역에서 운동량보존 방정식을 적용하면 이중 동심관 내·외 벽면 사이의 전단응력 분포를 공식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{dp}{dx} \left(\frac{r^2 - r_{i0}^2}{2} \right) \frac{1}{r}, \quad r_{i0} \leq r \leq r_o \quad (2)$$

$$\tau = -\frac{dp}{dx} \left(\frac{r_{o0}^2 - r^2}{2} \right) \frac{1}{r}, \quad r_i \leq r \leq r_{o0} \quad (3)$$

여기서 r_{o0} 는 전단응력이 0인 지점, r_i , r_o 는 각각 내관외벽의 반경, 외관내벽의 반경이다. 충분히 발달된 영역(채널 입구에서 1.28m 이후)에서 동심관 길이에 대한 정압강하의 측정으로부터 구한 dp/dx 값과 열선풍속계로 측정된 난류전단응력의 값이 0인 지점(r_{i0})을 위의 식 (2), (3)에 대입시키고 r 대신 r_o 와 r_i 를 각각 대입시키면 벽면 전단응력 τ_{wo} 와 τ_{wi} 를 얻을 수 있다. 위와같은 방법으로 구한 동심관 내·외벽의 벽면 전단응력의 크기를 레이놀즈수의 함수로 Fig4에 나타 내었다. 그림에서 알 수 있듯이 직경비 α 가 커질수록 양벽면의 전단응력의 동일한 레이놀즈수에서 전반적으로 증가하는 현상을 보이고 있는데, 이는 직경비가 클 수록 틈새가 좁아져서 벽면의 거칠기효과가 안쪽으로 더욱 잘 전달되기 때문으로 보인다. 또한 내벽의 거칠기효과가 안쪽으로 더욱 잘 전달되기 때문으로 보인다. 또한 내벽의 전단응력이 외벽의 전단응력보다 큰 값을 보이고 있으며, 이러한 결과는 외벽에만 거칠기를 주었을 경우 외벽의 전단응력이 내벽의 전단응력보다 크게 나타나는 것과는 반대 현상이다. 이와 같은 결과는 외벽은 거칠기 내벽이 매끈한 경우와는 달리 내·외벽 모두 동일한 거칠기를 주었기 때문에 전단응력이 0인 지점이 외벽에만 거칠기가 있는 경우보다 외측으로 기울어져 공식(3)에 의해 내벽면의 전단응력이 커진다고 판단된다.

3.2 평균속도분포

평균속도장은 3가지 경우의 반경비 α 에 대하여

레이놀즈수를 3가지($Re=21000, 35000, 54000$)로 변화 시키면서 채널입구에서 거리 $x=3.75m$ 인 단면에서 측정하였다.

Fig5(a)에는 레이놀즈수 54,000에서 반경비 α 의 변화에 대하여 최고속도로 무차원화한 평균속도분포를 나타 내었다. 전체적으로 최대속도 지점을 기준으로 비대칭 현상이 나타나고, 반경비가 작을 수록 비대칭 현상이 강해짐을 볼 수 있으며, 이러한 결과는 매끈한 이중관이 경우에서도 잘 나타나는 현상이다. 또한, 반경비가 작을수록 최고속도 지점을 기준으로 편평한 경향을 나타내게 되며, 이는 반경비가 작을수록 내·외관의 간격이 넓어서 거칠기 효과에 의한 와 확산의 전체 유동장에 미치는

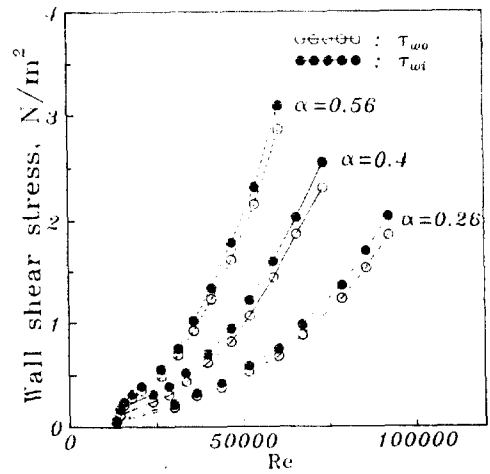


Fig.4 Wall shear stress vs. Reynolds number.

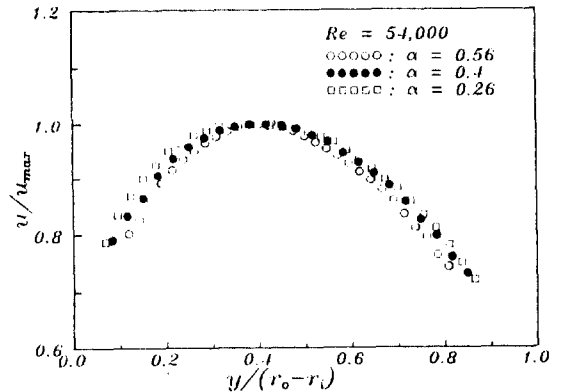


Fig.5 (a) Mean velocity profile with the variations of α at $Re=54,000$.

영향이 상대적으로 적은 것으로 여겨진다.

Fig.5(b)에는 축방향으로 같은 위치에서 반경비에 따라 레이놀즈수의 변화에 대한 평균속도분포를 보여주고 있다. 실험장치의 구조상 충분히 넓은 범위의 레이놀즈수에 걸쳐서 측정 할 수는 없지만 본 실험의 레이놀즈수 구간에서는 반경비가 같을 경우 속도분포는 레이놀즈수에 의존되는 경향이 아주 약하며, 레이놀즈수가 높을수록 편평해지는 현상을 보이고 있다. 그러나 반경비의 변화에 의한 결과와 비교하면 그 정도는 아주 작다.

3.3 최대속도 및 전단응력이 0인 지점

Fig.6에는 전단응력이 0이 되는 위치를 알기 위하여 반경비 a 및 레이놀즈수의 변화에 대하여 u - v 상관계수 분포를 원관 사이의 간격으로 무차원한 좌표에 나타내고 있다. 전단응력이 0이 되는 위치는 각각의 반경비에 대하여 레이놀즈수의 변화에 대하여는 거의 비슷한 값으로 나타나고 있으며, 반경비가 작아질 경우 내관 방향으로 향하는 경향이 나타난다. 특히 반경비 $a=0.4, 0.26$ 사이에서는 비적 크게 변하고 있다. 최대속도 지점은 이중 피도관에 의하여 구하였으며, Fig.7에는 시간평균속도 분포를 4차 polynomial에 의한 근사식을 1차 미분하여 구한 속도 기울기의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 최대속도의 위치도 전단응력이 0인 위치와 비슷한 경향으로 변하고 있다. 일반적으로 동일형상의 난류내부유동에서 평균유속이 증가할수록 벽면근처와 최대속도지점 간의 속도차가 크므로 높은 레이놀즈수에서 속도기울기 값이 급한 경사를 이루지만 본 연구의 실험범위에서는 뚜렷한 차이를 볼 수 없었다. 한편, 최대속도와 전단응력이 0이 되는 위치를 비교하기 위하여 Fig.8에 반경비 및 레이놀즈수의 변화에 대하여 최대속도 및 전단응력이 0이 되는 위치를 동시에 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 반경비에 대하여 두 지점이 레이놀즈수에는 크게 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있었다. 그러나 반경비의 변화에 대하여는 상당한 영향을 받고 있으며, 반경비가 작을수록 두 위치 모두 내관 방향으로 당겨지게 된다. 본 실험의 경우 특이한 결과는 반경비 $a=0.26$ 인 경우는 전단응력이 0인 위치가 최대속도 지점보다 내관 방향에 위치 하지만,

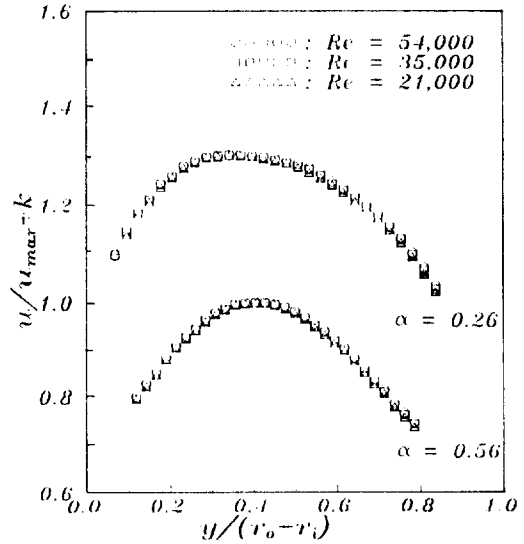


Fig.5 (b) Mean velocity profile with the variations of α and Re.

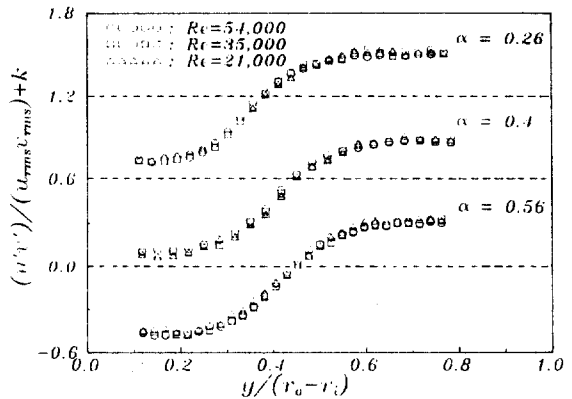


Fig.6 Distribution of u - v correlation coefficient.

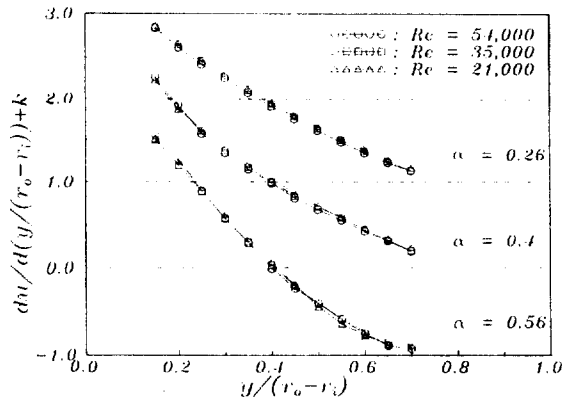


Fig.7 Distribution of velocity gradient.

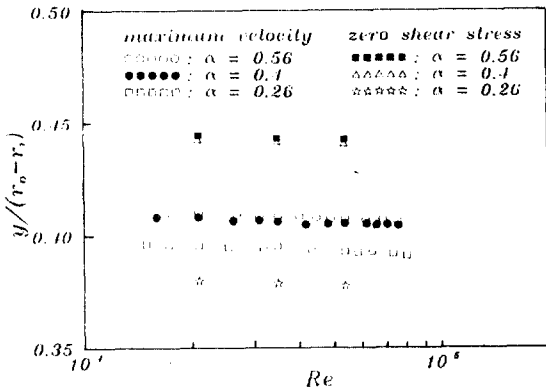


Fig.8 Experimental values of the positions at zero shear stress and maximum velocity.

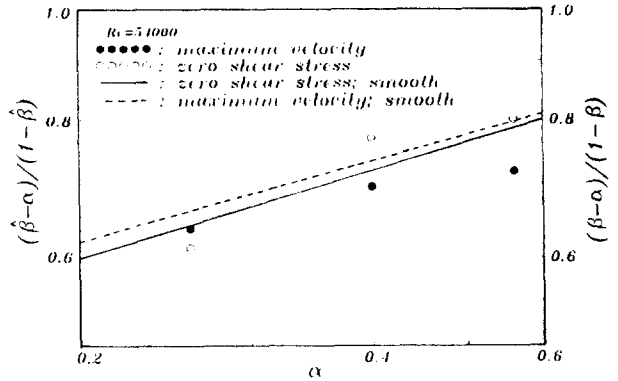


Fig.9 Positions of zero shear stress and maximum velocity versus radius ratio(α).

$\alpha=0.4, 0.56$ 일 경우 전단응력이 0인 위치가 최대속도 위치보다 오히려 외벽쪽에 나타나는 결과를 보이고 있다. 이와같은 결과는 기존의 매끈한 이중관이나 외측에만 거칠기가 있는 이중관의 실험 결과들에서 전단응력이 0인 위치가 최대속도 위치보다 내벽에 가깝게 분포하는 것과는 상당히 다른 결과이며, 내·외벽 모두 거칠기가 있을 경우 $\alpha=0.26$ 과 0.4 사이에서 두 위치가 일치하는 반경비가 존재 할 것으로 판단 할 수 있다. 따라서 양면 모두에 거칠기를 주었을 경우 거칠기의 효과는 속도분포에도 나타나지만, 전단응력의 분포에 더 많이 작용된다고 볼 수 있다.

한편, 반경비의 변화에 대하여 최대속도 및 전단응력이 0인 위치와 변화정도를 보기 위하여 Fig.9에 레이놀즈수 54,000일 경우 반경비에 따른 두 위치의 변화를 나타 내었으며, 다른 실험결과와 비교를 위하여 최대속도 위치에 대하여는 $\hat{s}^* = (\hat{\beta} - \alpha) / (1 - \hat{\beta})$ 전단응력이 0인 위치에 대하여는 $s^* = (\beta - \alpha) / (1 - \beta)$ 로 나타 내었다. Rehme⁶⁾ 그리고 Kays과 Leung¹⁰⁾ 등의 실험결과에 의하면 매끈한 이중관의 경우 전단응력이 0인 지점과 최대속도 위치의 변화는 $s^* = \alpha$ 와 같이 근사 시킬 수 있다고 하였으며, 이때 전단응력이 0인 위치의 경우⁶⁾ $n=0.386$, 최대속도 위치의 경우¹⁰⁾ $n=0.343$ 정도였다. 본 실험의 경우 반경비의 변화 범위가 작으며, $\alpha=0.26, 0.4$ 사이에서 전단응력이 0인 위치가 많이 변하고 있기 때문에 정확한 비교는 힘들다고 판단되며, 반경비 α 가 더 작은 경우 및 $\alpha=0.26, 0.4$ 사

이의 범위에서도 실험을 행하였다면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각 된다.

4. 결 론

내·외관의 벽에 각각 동일한 형상의 사각형 표면거칠기가 있는 이중동심관내의 유동현상에 대하여 직경비와 레이놀즈수의 변화를 주면서 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 등가직경 기준의 레이놀즈수가 동일한 경우 내·외 직경비 α 가 커질수록 벽면전단응력이 증가하며, 내벽의 전단응력이 외벽의 값과 비교하여 더 크게 나타난다.
- 2) 압력강하계수 λ 는 직경비가 같은 경우 Re 수가 증가할 경우 감소 하다가 다시 증가하는 경향을 보이며, 또한 동일한 Re 수에서 직경비가 클 수록 더 크게 된다.
- 3) 최대속도 지점과 전단응력이 0인 지점은 직경비가 같은 경우 Re 수에는 크게 영향을 받지 않으며, 직경비가 커질수록 내벽에서 멀어지는 현상을 보인다. 또한 전단응력이 0인 지점은 직경비 $\alpha=0.26$ 인 경우 매끈한 이중관이나 외벽에 거칠기를 준 경우에서처럼 최대속도 지점보다 내측에 위치하지만, $\alpha=0.4, 0.56$ 인 경우에는 오히려 외측에 위치하게 되어, 두 위치가 일치하는 직경비가 존재 하리라 판단된다.
- 4) 최대속도 지점과 전단응력이 0인 지점의 변화로 보아 거칠기 효과는 속도분포보다 전단응력의

분포에 더 큰 영향을 준다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Brighton, J.B., 1963, "The Structure of Fully Developed Turbulent Flow in Annuli", Ph.D. Thesis, Purdue University.
2. Brighton, J.A. and Jones, J.B., 1964, "Fully-Developed Turbulent Flow in Annuli", J. Basic Engng, D86, pp.835.
3. Kjellström, B. and Hedburg, S., 1966, "On Shear Stress Distributions for Flow in Smooth or Partially Rough Annuli", AB Atomenergi, Studsvik, Rep. AE-243.
4. Durst, F., 1968, "On Turbulent Flow through Annular Passages with Smooth and Rough Core", M. Sc. Thesis, Imperial College.
5. Lawn, C.J. and Elliott, C.J., 1971, "Fully Developed Turbulent Flow through Concentric Annuli", C.E. G.B., Rep. RD/B/N/1978.
6. Rehme, K., 1974, "Turbulent Flow in Smooth Concentric Annuli with Small Radius Ratios", J. Fluid Mech. Vol.64, pp.263.
7. 안수환, 이윤표, 김경천, 1993, "사각돌출형 표면거칠기가 있는 이중동심관내의 난류유동과 열전달", 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp.1294-1303.
8. 안수환, 김경천, 이윤표, 1994 "사각돌출형 거칠기가 있는 동심이중관내의 완전히 발달된 난류유동과 열전달", 대한기계학회논문집, 제18권, 제4호, pp.1072-1080.
9. 김경천, 안수환, 이병규, "사각돌출형 거칠기가 있는 이중동심관내 유동의 난류구조", 대한기계학회논문집, 제18권, 제9호, pp.2443-2453.
10. Kays, W.M. & Leung, E.Y. 1963, "Heat Transfer in Annular Passages Hydrodynamically Developed Turbulent Flow with Arbitrarily Prescribed Heat Flux", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.6, pp.537.