

<論 文>

난류 이중동심관 유동에 미치는 표면거칠기 효과

김경천* · 안수환** · 정양범***

(1994년 11월 7일 접수)

Effect of Surface Roughness on Turbulent Concentric Annular Flows

Kyung Chun Kim, Soo Whan Ahn and Yang Beom Jung

Key Words : Turbulent Flow(난류유동), Concentric Annuli(이중동심관), Eddy Diffusivity(와확산계수), Roughness(거칠기), Friction Factor(마찰계수)

Abstract

The structure of turbulence of fully developed flow through three concentric annuli with both rough inner and outer walls was investigated experimentally for Reynolds number range $Re=15000-93000$. Turbulence intensities were measured in three (u, v, w) directions, and turbulence shear stresses in annuli of radius ratios $\alpha=0.26, 0.4$ and 0.56 , respectively. The result showed that the structure of turbulence for these asymmetric flows was not the same as that for the annulus with smooth walls. The velocity fluctuations of all three components (u, v and w -directions) showed little discernible variation with Reynolds numbers, but became apparent with the influence of radius ratio (α). The experimental results for an annulus with the roughened outer wall and a smooth annulus were shown in the figures as a reference. The eddy diffusivities and friction factors were also presented and discussed.

기 호 설 명

De : 등가직경, $2(R_o - R_i)$

p : 정압, 거칠기 피치

r : 반경방향거리

R_i : 내관 외반경

R_m : 최대속도지점인 반경방향거리

R_o : 외관 내반경

R_{r0} : 전단응력이 0인 반경방향거리

u : 축방향의 시간평균속도

$u_{\tau i}$: 내관 외벽면의 마찰속도, $\sqrt{\frac{\tau_{wi}}{\rho}}$

$u_{\tau o}$: 외관 내벽면의 마찰속도, $\sqrt{\frac{\tau_{wo}}{\rho}}$

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

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

w_{rms} : 방위방향 속도변동의 rms, $(\overline{w'^2})^{0.5}$

x : 축방향거리

y : 내관외면에서의 반경방향거리

α : 내외반경비, R_i/R_o

β : 전단응력이 0인 무차원지점, $\frac{R_{r0}}{R_o}$

β^* : 무차원 최대속도지점인 반경방향거리, R_m/R_o

ϵ : 거칠기높이

ϵ_M : 와확산계수

ν : 동점성계수

ρ : 밀도

$\overline{\rho u' v'}$: 레이놀즈 전단응력

τ : 전단응력

τ_{wi} : 내관 외벽면의 전단응력

*정회원, 부산대학교, 생산기계공학과, 기계기술연구소

**정회원, 경상대학교 기관공학과

***정회원, 한국중공업(주) 기술연구소

τ_{wo} : 외관 내벽면의 전단응력

1. 서론

충분히 발전된 채널의 내부유동의 난류유동구조 해석은 원관이나 평행평판내의 난류유동에 관한 실험적 결과에 거의 기초를 두고 있다. 이러한 채널 유동은 대부분 매우 복잡한 경계조건을 갖기 때문에 비대칭적 속도형상을 이룬다. 이들 비대칭 속도형상은 난류유동의 크기와 난류에너지가 다른 두 유동영역(전단응력이 0인 지점의 내외)의 상호작용에 의해 형성된다. 비대칭의 내부유동 연구중에 가장 간단한 비원형(non-circular type) 유동 채널은 매끈한 벽의 이중동심관이다. 이러한 이중관은 비대칭 속도형상을 만들며 일반적으로 이중관의 내외관의 비가 작을수록 비대칭성이 증가한다. 이러한 이중관에 대해 압력강하와 속도분포에 관해 많은 실험적 연구를 하여왔다.^(1,2) 이들의 연구는 전단응력이 0인 지점과 최대속도지점의 불일치, 미소한 반경을 가지는 이중관의 내측에는 무차원 속도형상이 벽법칙에 위배됨을 연구하였다. 이중동심관의 유동에 대해 많은 실험적 연구가 있었지만 난류강도의 분포, 난류운동에너지에 관해서는 드문 실정이다. Brighton⁽³⁾과 Brighton and Jones⁽¹¹⁾가 처음으로 4개 반경비의 이중관에 대해 3방향 난류강도에 관한 실험결과를 발표하였다. 그리고, Kjellström & Hedburg⁽⁴⁾는 위와 동일한 이중관에서 실험적으로 난류를 연구하였으나 그들은 축, 반경방향의 난류강도와 반경방향의 전단응력만 측정하였다. 또한 Lawn and Elliott⁽⁵⁾는 3가지 반경비의 경우에 대해 측정한 난류특성을 발표하였다. Rehme⁽²⁾은 매우 높은 비대칭 속도분포를 가지는 매우 작은 반경비에 대해서 취급을 한 반면에 Kjellström & Hedburg⁽⁴⁾는 비교적 비대칭성이 적은 속도분포를 갖는 $\alpha=0.446$ 에 대해 실험적으로 연구하였다. 그리고 Satake and Kawamura⁽⁶⁾는 Rehme⁽²⁾의 실험결과를 이론적으로 해석하였다. Lawn and Elliott⁽⁵⁾는 내관 지지대가 속도와 난류특성에 강하게 영향을 미치고 Brighton⁽³⁾은 전단응력이 0인 지점에서 최대속도를 갖는다는 가정은 옳지 않음을 증명하였다. 그러나, 이들 연구들은 양측 모두 매끈하거나 부분적인 거칠기를 가진 이중관에 대해 취급하였다.

전체적으로 거칠기를 이중관에 설치한 경우의 연

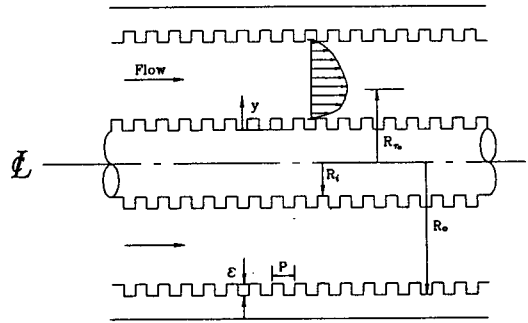


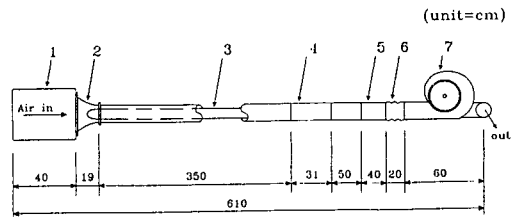
Fig. 1 Idealized model

구는 안수환 등⁽⁷⁾에 의하여 내관의외면에 거칠기가 있는 경우에 대하여 연구하여 거칠기 피치(P)/거칠기 높이(ϵ)에 따른 속도와 열전달 특성이 매끈한 이중관의 결과와 비교하여 유리한 거칠기 요소를 암시하였다. 그리고 김경천 등⁽⁸⁾은 외관내벽에만 거칠기를 설치하여 반경비에 따른 난류특성을 측정하여 매끈한 이중관 및 원관과 비교하였고 안수환 등⁽⁹⁾은 김경천 등⁽⁸⁾이 행한 난류유동의 실험을 기초로 하여 속도와 열전달 특성을 연구한 바 있다. 그래서 본 연구는 내외관벽에 전체적으로 Fig. 1과 같이 거칠기를 설치하여 3개의 반경비($\alpha=0.26, 0.4$, 그리고 0.56)에 대해 3(u, v, w)방향의 난류 특성을 측정하고 마찰속도 등으로 무차원화하여 외관내벽에 거칠기가 있는 경우⁽⁸⁾와 비교하여 난류모델 개발을 위한 기본자료를 축적하고자 한다.

2. 실험적 연구

2.1 실험장치

실험에 사용한 동심관 유동발생장치의 개략도가 Fig. 2에 나와 있다. 실험장치의 전체길이는 약 6.1 meter 이다. Table 1에서 보는 바와 같이 시험부



- 1. Air filter
- 2. Bell mouth
- 3. Core tube
- 4. Test section
- 5. Straightener
- 6. Flexible tube
- 7. Blower

Fig. 2 Schematics of experimental setup

Table 1 Essential dimensions (unit : mm)

	O. D.	I. D.	Material	$\alpha(R_i/R_o)$	De
Outer tube	117.6	97	Al-alloy	.	.
Core tube	25.4	23.8	Acryl	0.26	71.8
	38.4	36.7		0.4	58.4
	54	52		0.56	43

에는 내부직경이 97 mm 인 바깥쪽 튜브 내면에 거칠기를 설치하였고, 외부직경이 각각 25 mm, 39.2 mm, 54 mm인 매끈한 내관으로 구성되었으며, 외관에 대한 내관의 위치, 압력강하 그리고 시험부의 여러 횡단부에서 속도장, 난류특성을 측정할 수 있도록 지름 3 mm의 구멍들을 측방향으로 가공하였다. 외관의 재질은 알루미늄 합금이며 주조로 관을 1 m인 직경 4 μ 의 텅스텐 X형 열선 프로브와 정온도형열선풍속계(C. T. A., TSI model 1054A)를 사용하였고, 측정된 속도성분은 범용 파형분석기(D-6000 model 611, Data Precision Inc.)를 사용하여 개인용 컴퓨터(IBM-PC 486)로 온라인 측정하였다. 열선의 교정은 매 측정전에 동심관 입구영역의 균일흐름 영역에서 직경 4 mm, 길이 350 mm 의 피토포관과 디지털 마이크로마노미터(Model FC 012)를 사용하여 수행하였고 얻어진 교정데이터는 컴퓨터에 내장된 look-up table 형식의 교정 프로그램에 자동적으로 입력되어 교정관계식이 형성된다. C.T. A. 브릿지에서 나오는 출력은 5 kHz low-pass filter를 거쳐 aliasing을 방지하고 범용파형 분석기에 장착된 14-bit A/D converter와 Sample and Holder에 의해 동시에 디지털값으로 표본되며 디지털 데이터는 block floating point 방식으로, 범용 파형분석기에 연결된 데이터 레코더(Model 681)를 통해 디스켓에 기록하였다. 이때 표본율은 Niquist 표본주기에 해당하는 초당 10,000개로 하였으며, 일회 표본수는 4,096개로 최대 적분시간 척도의 약 20배가 넘지만 측정오차를 줄이기 위한 측정점당 10회를 표본하여 Ensemble 평균을 취했다. Kline and Mcklintock⁽⁶⁾의 20 : 1 odds 방식으로 분석된 불확실성은 평균유속의 경우 최대 2% 이내이며, 난류강도 및 난류전단응력의 경우는 최대 5%, 그리고 와확산계수의 경우는 최대 15% 정도로 평가되었다.

측정한 레이놀즈수 범위는 등가직경 ($D_e=2(R_o$

$-R_i)$ 기준으로 약 15,000 에서 93,000 이었다. 실험장치 주위의 온도와 압력은 매 운전 시작전에 기록하였으며 종료시 다시 측정한 후 그 차이를 확인하였고, 최대오차가 2% 이내에 드는 경우의 데이터를 선택하였다. 모든 측정은 건물의 주동력 공급에서 생기는 교란을 없애기 위해 밤 늦게만 실시하였으며, 열선 풍속계는 측정하기 전에 기기의 Drift 오차를 최소한으로 줄이기 위해 C.T.A.를 4 시간 이상 작동시켰다. 유량측정용 오리피스는 시험부에서 측정된 속도형상을 수치적분에 의하여 보정 하였다. 압력강하 데이터는 송풍기 용량의 제한을 받는 레이놀즈수 범위 안에서 얻었고 측정하기 전 최소한 30분 동안 정상상태를 유지시켰다. 제작하였고 외관내면의 표면조도 제작은 특수 바이트를 사용하여 선반으로서 Fig. 1과 같이 외관내면에 높이(ϵ) 1.5 mm, 폭 1.5 mm, 피치(P) 3 mm 의 $P/\epsilon=2$ 인 정사각형홈의 거칠기가 형성되도록 가공하였다. 알루미늄 합금관의 전체길이는 4 m이며, 50 cm 씩 8개를 플랜지로 연결하였고, 내관은 아크릴재료를 사용하였으며 외관내면과 동일한 거칠기구조로 각 α 에 대해 80 cm씩 5개를 선반으로 제작하여 연결하였다. 측정부는 측정의 편의를 위해 재질을 투명한 아크릴로 선택하였고, 채널입구에서부터 3.75 m 떨어진 곳에 위치한다. 측정장치 이송은 특별제작된 이송기구를 이용하였다. 이 기구에 의해서 프로브(probe)의 상대적 반경방향 변위는 전기접촉법으로 0.025 mm 이내로 측정되었다. 내관의 지지는 내관을 반경방향으로 위치조절이 가능한 3점 이동장치에 의해 세지점에서 지지되도록 하였다. 시험부의 조립시 내관의 정확한 장착을 위해 외관에 대한 내관의 동심상태를 다이알게이지로 점검하였다. 대부분의 경우 튜브의 처짐에 의한 편심은 무시할 수 있었으며, 최소직경의 내관을 장착했을 경우 최대의 편심량은 1.4 % 정도였다. 공기는 맨끝 부분에 위치하고 있는 송풍기(0.8 kw, 3400 RPM A/C motor)에 의해서 공기여과기를 통해 벨마우스 수축부를 거쳐서 시험부(test section)로 유입된다. 벨마우스 부분은 최소내경 97 mm, 최대내경 170 mm이 되도록 주철로 제작되었으며 사용된 송풍기의 제원은 수두 520 mmAq, 유량 9 m³/min 이다.

2.2 실험방법

작동유체는 실험장치의 경제성과 물성치에 관한

정보를 쉽게 알 수 있다는 잇점을 고려하여 대기 상태의 공기를 선택하였다. 본 실험에서 중점을 두는 측정 및 분석대상은 충분히 발달된 동심관 내부 유동에서 채널길이에 따른 정압강하, 속도형상, 속도기울기 형상, 와확산계수, 난류 전단응력들의 측정이다. 정압은 전기식 압력변환기(MKS Baraton pressure transducer)로 측정하였으며 압력변환기의 보정(calibration)은 주기적으로 마이크로마노미터로 점검하였다. 또한 압력변환기의 오차범위는 측정범위(full scale : 10 torr) 기준 0.1% 이내이며, 압력측정치의 불확실성(uncertainty)은 0.5% 수준으로 분석되었다. 평균유속의 측정은 피토크를 사용하였으며, 각종 난류량의 측정은 측정부 길이

3. 결과 및 고찰

3.1 최대속도와 전단응력이 0인 지점

완전히 발달된 영역의 결정은 채널길이에 대한 정압강하를 측정하여 dp/dx (압력기울기)가 일정한 영역에서 평균유속을 측정하여 더 이상 변화가 없는 부분으로 판정하였다. x (channel 길이)=1.28 m에서 부터는 모든 반경비의 경우에 대해 충분히 발달된 영역으로 취급하였다. 매끈한 원관이나 평행 평판내부에서는 전단응력이 0인 지점 과 최대속도 지점이 일치하나 이중관과 같은 비대칭류에서는 두 지점이 일치하지 않는 복잡한 내부유동이라는 것은 잘 알려져 있다. 특히 거칠기가 설치된 이중관에서는 더욱 복잡한 유동이 되리라 판단되어 최대속도 지점과 전단응력이 0인 지점을 비교하는데 특별한 관심을 가지고 국부유동 기구(mechanism)를 상세히 조사하였다. Fig. 3은 최대속도지점과 전단응력이 0인 지점의 변화를 보여준다. 비교를 위하여 양측모두 매끈한 이중관의 경우^(10,11)와 외측에만 거칠기가 있는 경우⁽⁸⁾를 표시하였다. 비교를 위해 양측 모두 매끈한 이중관의 Kays and Leung 실험식,⁽¹⁰⁾ $(\beta^* \cdot \alpha)/(1-\beta^*) = a^{0.343}$ 에 의해 계산된 최대속도지점과 Quarmby⁽¹¹⁾의 실험식, $(\beta \cdot \alpha)/(1-\beta) = a^{0.366}$ 에 의한 전단응력이 0인 지점, 그리고 외관내벽에만 거칠기가 있는 실험결과⁽⁸⁾들을 Fig. 3에 나타내었다.

$\alpha=0.4$ 에 있어서 양측 모두 거칠기가 있는 경우, 외관내벽에만 거칠기가 있는 경우, 그리고 양측 모두 매끈한 경우를 비교하면 전단응력이 0인 지점의 위치는 양측 모두 거칠기가 있는 경우, 최

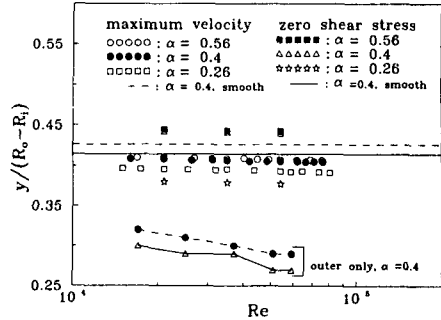


Fig. 3 Maximum velocity positions versus zero shear stress positions

대속도 지점은 양측 모두 매끈한 경우가 가장 외관 측에 위치하였고 외관내벽에만 거칠기가 있는 경우에는 전단응력이 0인 지점과 최대속도지점 모두 가장 내벽면측에 위치하였다. 이는 동일한 내외관의 간격에서 거칠기 위치에 따른 변화를 보여주며 전단응력이 0인 지점이 최대속도지점보다 거칠기에 의한 와확산의 영향을 더 많이 받기 때문이라고 사료된다. 양측 모두 거칠기가 있는 이중관에서 $\alpha=0.26, 0.4$ 그리고 0.56 의 경우를 보면 $\alpha=0.4$ 와 0.56 에서는 전단응력이 0인 지점이 최대속도지점보다 외측에 위치하는데 그 이유는 α 가 커질수록 2차원 평행평판에 가까워져 대칭유동에 접근하여 거칠기효과가 전 유동장에 전달되어 대규모 와가 형성되기 때문이라 판단된다. α 가 감소할수록 최대속도지점과 전단응력이 0인 지점의 위치가 내벽쪽으로 가까워지는 것은 α 가 작을수록 비대칭성이 증가한다는 종래의 주장과 일치한다.

3.2 마찰계수

각 벽면의 전단응력은 dp/dx (압력기울기) 값들은 5 지점간에서 얻은 각 dp/dx 들의 직선 기울기들의 평균값과 힘의 평형이 되는 열선 풍속계에 의해 측정된 전단응력이 0인 지점으로 아래의 전단응력공식에 의해 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{dp}{dx} \left(\frac{r^2 - R_{ro}^2}{2} \right) \frac{1}{r}, \quad R_{ro} \leq r \leq R_o \quad (1)$$

$$\tau = -\frac{dp}{dx} \left(\frac{R_{ro}^2 - r^2}{2} \right) \frac{1}{r}, \quad R_i \leq r \leq R_{ro} \quad (2)$$

여기서, R_{ro} 는 전단응력이 0인 지점, R_i 는 내관의 벽의반경, R_o 는 외관내벽의 반경으로서 시험부의 구조를 도식적으로 Fig. 1에 나타내었다. 위 식(1)

과 (2)에서 r 대신 R_o 와 R_i 를 대입하여 얻어진 각벽면의 전단응력 τ_{wi} 와 τ_{wo} 를 아래의 공식에 대입하면 내외측 마찰계수 f_i 과 f_o 는 아래의 공식에 의하여 구해진다.

$$f_i = \frac{\tau_{wi}}{0.5\rho U_b^2} \quad (3)$$

$$f_o = \frac{\tau_{wo}}{0.5\rho U_b^2} \quad (4)$$

그리고 평균마찰계수 f 는 아래와 같다.

$$f = \frac{R_o f_o + R_i f_i}{R_o + R_i} \quad (5)$$

Fig. 4는 거칠기형상에 따른 마찰계수의 변화에 대하여 나타내고 있다. 내외벽면 모두 동일한 거칠기 요소, 즉 거칠기 피치(P)/높이(ϵ)=2, 반경비(α)=0.4인 경우 거칠기 위치가 내외벽면 모두에 설치된 경우에서 마찰계수가 가장 컸고 내측에서만 거친 경우에 마찰계수가 가장 작았는데 이는 거칠기 요소의 설치위치에 따른 유체유동 영향의 차이에 기인된다고 사료된다. 마찰계수를 구하는 과정에서 특이한 현상은 반경비가 크다고 마찰계수 또한 반드시 크지는 않는다는 것이다. $\alpha=0.56$ 보다 $\alpha=0.4$ 일 때 마찰계수가 더욱 크게 나타나게 된다. 이는 공식 (3)과 (4)를 보면 마찰계수에 영향을 미치는 것은 평균속도 U_b 뿐이지만 Fig. 4에서는 레이놀즈수에 의하여 마찰계수를 나타내기 때문에 반경비(α)가 클수록 평균속도는 증가하지만 등가 직경(De)은 상대적으로 감소하기 때문이고, 일정한 레이놀즈수에 대한 평균속도분포는 α 의 함수로 나타나기 때문에 이를 정리함으로써 α 와 마찰계수

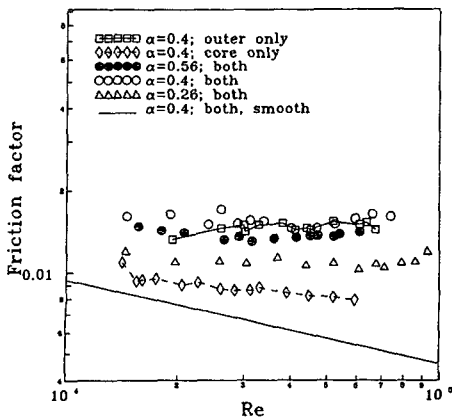


Fig. 4 Friction factor

의 상관관계를 함수화할 수 있을 것으로 보인다.

3.3 난류강도

본 연구는 3개의 직경비와 3개의 레이놀즈수에 있어서 외관내벽으로부터 내관외벽까지의 간격에서 측정된 난류강도들을 외벽면의 마찰속도($u_{\tau o} = \sqrt{\tau_{wo}/\rho}$)로 무차원화한 축(u), 반경(v), 그리고 방위(w)방향의 난류강도를 Figs. 5~7에 나타내었다.

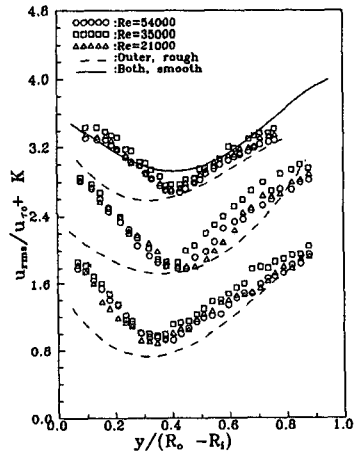


Fig. 5 Experimental results for axial turbulence intensity against distance : $\alpha=0.26(K=0)$; $\alpha=0.4(K=1)$; $\alpha=0.56(K=2)$. Solid line, Brighton & Jones' results⁽¹⁾ of smooth annulus; dashed line, Kim's results⁽⁶⁾ of annulus with the rough outer wall

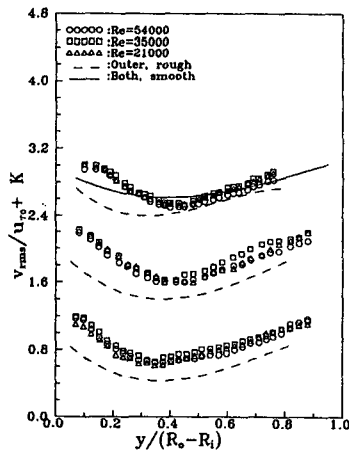


Fig. 6 Experimental results for radial turbulence intensity against distance : symbols as in Fig. 5

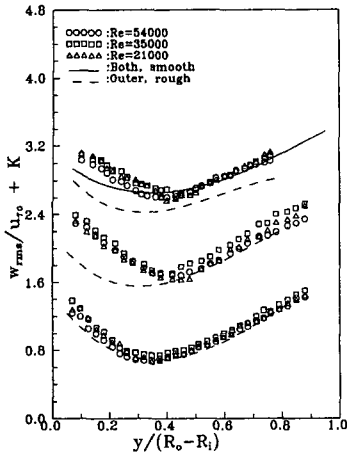


Fig. 7 Experimental results for azimuthal turbulence intensity against distance : symbols as in Fig. 5

비교를 위해 김경천 등⁽⁸⁾에 의해 측정된 외관내벽에서만 거칠기가 있는 이중관의 경우와 Brighton and Jones⁽¹⁾에 의한 $\alpha=0.56, Re=93,000$ 인 매끈한 이중관의 난류강도의 값을 대시선(dashed line)과 실선으로 각각 표시하였다. 반경비($\alpha=R_i/R_o$)가 작을수록 난류강도의 최소값들이 내벽쪽으로 기울고 실제적 동심관내부에서의 전반적인 난류강도들의 분포는 α 가 작을수록 비대칭성이 심하게 나타나게 되며 내외관의 중심에서 내측에 놓인다. 난류강도가 최소지점에서 내측은 축(u), 반경(v), 그리고 방위(w)방향 모두 외벽에만 거칠기가 있는 경우⁽⁸⁾의 결과보다 크게 나타났다. 이는 Fig. 1과 같은 거칠기 형태가 난류운동에 강한 영향을 줄 수 있다. 축방향(u)의 무차원난류강도를 보면 전체적으로 외관벽에만 거칠기가 있는 경우보다 매우 큰 값을 보이는데 이는 외관벽에만 거칠기가 있는 경우보다 내벽면 거칠기로 인해 상대적으로 난류확산효과가 커지기 때문이라고 판단된다. 그리고 양측 모두 매끈한 경우와 유사하나 대체로 완만한 경향을 보인다. 외벽면 근처영역에서는 방위(w)방향의 난류강도는 전반적으로 축(u)방향의 난류강도 분포와 유사하고 내벽면 거칠기 영향을 작게 받아 $3(u, v, w)$ 방향의 난류강도중 가장 외관내벽면에만 거칠기가 있는 경우와 유사하다. $\alpha=0.56$ 에서 양측 모두 매끈한 경우의 v, w 방향 무차원난류강도는 거칠기가 있는 경우보다 매우 완만한 값을 가진다. 이는 난류강도 자체가 적고 전단응력이

0인 지점이 가장 외측에 있기 때문이라 판단된다.

최소난류강도 지점에서 외측에서는 동일한 거칠기구조를 가지고 있지만 u, v , 그리고 w 의 3방향 모두 외측에만 거친 경우보다 대체로 크게 나타났는데 그 이유는 외벽면 마찰속도의 값이 외관에만 거칠기가 있는 경우⁽⁸⁾에 비해 외벽면 마찰속도($u_{\tau o}$)가 상대적으로 작으며 와확산은 대체로 외측에만 거친 경우보다 대체로 크기 때문이라 사료된다. 최소난류강도 지점에서 외측은 마찰속도가 외측에만 거칠기가 있는 경우⁽⁸⁾보다 적은 것은 전단응력이 0인 지점의 위치가 외관내벽면에만 거칠기가 있는 경우보다 훨씬 외측으로 옮겨지기 때문이라 판단된다. u, v, w 방향 모두 α 가 클수록 무차원 난류강도의 값들이 무차원 거리에 변화가 적은 것은 α 가 클수록 외벽면 마찰속도가 증대되기 때문이라 판단된다. 그리고 $\alpha=0.56$ 에서 양측 모두 매끈한 경우의 결과는 대체로 양측 모두 거칠기가 있는 경우와 비슷하나 완만한 값을 가진다. 이는 거칠기효과에 의한 와확산의 차이로 판단된다.

3.4 난류운동에너지

난류운동에너지는 3방향의 난류강도의 합으로써 아래와 같다.

$$k^- = 0.5(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \tag{6}$$

Fig. 8는 난류운동에너지를 각각의 마찰속도제곱

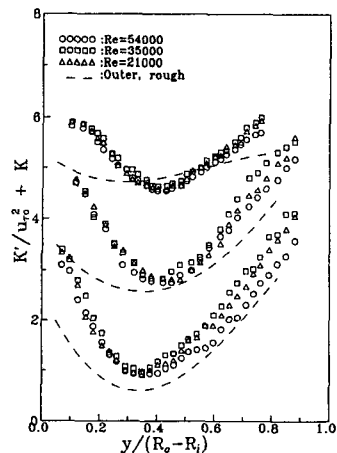


Fig. 8 Experimental results for kinetic energy of turbulence against distance : $\alpha=0.26(K=0)$; $\alpha=0.4(K=2)$; $\alpha=0.56(K=4)$. Other symbols as in Fig. 5

으로 나눈 값들을 보여주며 비교 대상으로는 외관 내벽에만 거칠기가 있는 경우를 대시선으로 나타내었다. 최소 난류운동에너지 지점에서 외측은 외측 벽에만 거칠기가 있는 결과보다 무차원 난류운동에너지가 컸고 특히 벽면에 가까울수록 차이가 큰 것은 벽면 마찰속도 값이 작기 때문이라고 여겨지며 내측에서는 반경비가 작을수록 무차원 난류 운동에너지가 외측벽에만 거친 경우보다 컸고, α 가 클수록 전단응력이 0인 지점근처에는 외벽면에만 거친 경우보다 작았고 벽면 근처에는 크게 나타났다. 이는 α 가 클수록 내외관의 간격이 좁아져서 내관 외면에 설치된 거칠기효과에 의한 와확산이 증가되는데에 기인되는 것으로 여겨진다. Fig. 8에서 나타나는 뚜렷한 현상은 α 가 커질수록 난류 운동에너지의 값이 조금씩 커지면서 직선형태로 변해가는 현상이다. 그 이유는 동심이중관의 내외관 간격이 줄어들면서 2차원 평행판 채널형태에 가까워지면서 거칠기 효과가 전 유동장에 전달되는 동시에 대규모 와(eddy)의 형성도 채널 전체 두께의 규모로 형성될 수 있기 때문이라 볼 수 있다.

3.5 전단응력

공식 (1)과 (2)로부터 벽면의 전단응력에 대한 임의의 거리에서의 전단응력비는 다음과 같다.

$$\frac{\tau}{\tau_{wi}} = \frac{\beta^2 - (r/R_o)^2}{\beta^2 - \alpha^2} \frac{\alpha}{(r/R_o)} \quad (7)$$

$$\frac{\tau}{\tau_{wo}} = \frac{(r/R_o)^2 - \beta^2}{1 - \beta^2} \frac{1}{(r/R_o)} \quad (8)$$

전단응력이 0이 되는 지점에서 양측이 서로 힘의 평형을 이루기 때문에 양측의 전단응력(τ)은 같으므로 식(4)를 식(5)로 나누면 내외벽면의 전단응력비는 다음과 같다.

$$\frac{\tau_{wo}}{\tau_{wi}} = \frac{(1 - \beta^2)\alpha}{\alpha^2 - \beta^2} \quad (9)$$

여기서, $\alpha(=R_i/R_o)$ 는 내외관 반경비, $\beta(=R_o/R_o)$ 는 전단응력이 0인 무차원 지점이다.

Fig. 9은 직경비(α)와 레이놀즈수에 따른 무차원 전단응력을 보여 준다. 외벽면에만 거칠기가 있는 경우는 대시선(dashed line)으로 나타내었고 Brigh ton and Jones⁽¹¹⁾에 의한 $\alpha=0.56$ 인 매끈한 이중관의 실험결과를 실선으로 비교를 위해 나타내었다. 최소난류강도 지점에서 내측에는 전단응력이 0인 지점의 상대적 위치가 내면쪽에 가까울수록 마찰속도

($u_{\tau o}$)가 증가하여 무차원 전단응력($\overline{u'v'}/u_{\tau o}^2$)의 절대치 크기는 거칠기가 외벽에 설치된 경우, 양측 모두 거칠기가 있는 경우, 그리고 양측 모두 매끈한 경우의 순이다.

모든 α 에서 전단응력이 0인 지점의 무차원 난류 전단응력은 0이기 때문에 그 지점에서는 동일하나 벽쪽으로 갈수록 전단응력의 절대치가 증가한다. 이는 벽면으로 갈수록 속도구배의 변화가 크기 때문이라 판단된다.

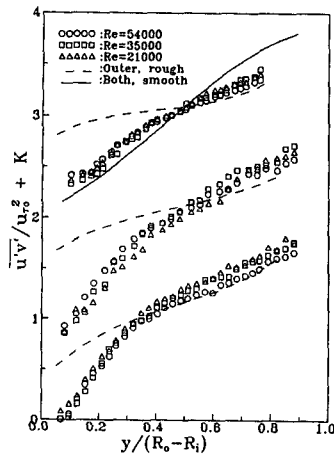


Fig. 9 Experimental results for radial shear stress against distance : $\alpha = 0.26(K=1)$; $\alpha = 0.4(K=2)$; $\alpha = 0.56(K=3)$. Other symbols as in Fig. 5

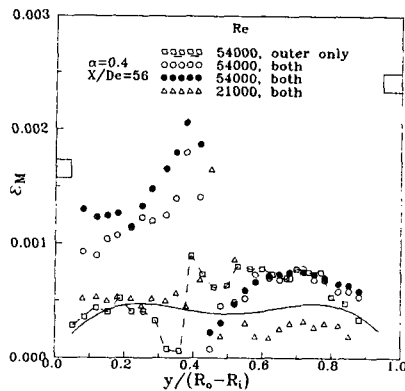


Fig. 10 Effects of Re and roughness on eddy diffusivity(open symbol, from Eq. (12) ; solid symbol, from Eq. (11) : Solid line, from Park's results⁽¹²⁾of smooth annulus of $\alpha=0.43$ and $Re=23000$

3.5 와확산계수, ϵ_M

충분히 발달된 영역에서의 운동량방정식은 아래와 같으며

$$\frac{\tau}{\rho} = (\nu + \epsilon_M) \frac{du}{dr} \quad (10)$$

공식 (10)을 유도하면 공식 (11)이 된다.

$$\epsilon_M = \frac{(\tau/\rho)}{du/dr} - \nu \quad (11)$$

반경방향의 와확산계수는 속도분포의 측정과 전단응력분포를 공식 (11)에 대입하여 구해지고, 또 다른 방법은 열선풍속계에서 측정된 레이놀즈응력 분포를 속도구배와 동점도로 나누어 아래와 같이 구해진다.

$$\epsilon_M = \overline{u'v'} / \frac{du}{dr} \quad (12)$$

위의 두 방법에 의해 얻어진 와확산계수를 Fig. 10에 나타내어 양측 모두 매끈한 이중관의 Park⁽¹²⁾의 실험결과를 비교할 수 있도록 하였다. 대체로 외관내벽에만 거칠기가 있는 경우⁽⁶⁾보다 내측에서는 와확산계수가 훨씬 컸으며 외측에서는 거의 일치하였다. 이는 거칠기에 의한 와확산의 크기는 내관 외벽에서 밖으로 퍼지는 효과가 외측에서 안으로 모아지는 효과보다 크기 때문이라 사료된다.

레이놀즈수가 증가할수록 속도 기울기 증가보다 전단응력의 증가가 더 크기 때문에, 와확산계수가 증가함을 알 수 있다. 최대속도지점과 전단응력이 0인 지점이 일치하지 않는 본 연구의 모델과 같은 경우에 그 두 지점 사이에서는 (-)값의 와확산 계수가 된다. (-)값의 와확산 계수는 물리적으로 옳지 않기 때문에 공식 (11)와 (12)의 모델은 앞으로 계속 연구를 통해 위 조건에 적합한 모델을 얻을 수 있도록 함이 바람직하다.

4. 결 론

내외벽면에 사각형 표면거칠기가 있는 이중 동심관내 유동의 난류구조를 내외직경비(α)와 레이놀즈수의 변화에 관해 실험적으로 연구하였고 외측내벽에만 거칠기가 있는 경우와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 등가직경 기준의 레이놀즈수가 동일한 경우 내외직경비가 0.4에서 마찰계수가 가장 큰 흥미 있

는 현상을 발견하였으며 마찰계수를 구하는 공식에서 평균속도는 직경비의 함수이기 때문에 직경비와 마찰계수의 상관관계를 나타낼 수 있음을 보여준다.

(2) 전단응력이 0인 지점은 최대속도지점에 비해 $\alpha=0.56$ 과 0.4에서는 외측에, $\alpha=0.26$ 에서는 내측에 위치하여 최대 속도지점보다 전단응력이 0인 지점이 0인 지점이 거칠기효과의 영향을 많이 받음을 알 수 있었다.

(3) 최소 난류강도지점에서 지점으로부터 내측에서는 u , v , 그리고 w 방향 모두의 난류강도가 내관의벽의 거칠기 영향을 강하게 받아서 외관 내벽에만 거칠기가 있는 경우보다 난류강도가 크게 나타났다. 와확산계수 또한 훨씬 컸다.

(4) 외측에서는 마찰속도의 상대적 감소로 외측 내벽에서만 거칠기가 있는 경우보다 무차원 난류강도는 컸지만 와확산계수는 거의 일치하였다.

참고문헌

- (1) Brighton, J. A. and Jones, J. B., 1964, "Fully-Developed Turbulent Flow in Annuli," *J. Basic Engng*, D86, pp. 835.
- (2) Rehme, K., 1974, "Turbulent Flow in Smooth Concentric Annuli with Small Radius Ratios," *J. Fluid Mech.*, Vol. 64, pp. 263.
- (3) Brighton, J. B., 1963, "The Structure of Fully Developed Turbulent Flow in Annuli," Ph. D. Thesis, Purdue University.
- (4) Kjellström, B. and Hedburg, S., 1966, "On Shear Stress Distributions for Flow in Smooth or Partially Rough Annuli," *AB Atomenergi, Studsvik, Rep.* AE-243.
- (5) Lawn, C. J. and Elliott, C. J., 1971, "Fully Developed Turbulent Flow through Concentric Annuli," *C. E. G. B., Rep.* RD/B/N/1878.
- (6) S. I. Satake, H. Kawamura, 1993, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in Concentric Annuli with a Thin Inner Rod," 9th Symposium on "Turbulent Shear Flow," Kyoto, Japan, August, 5.5.1-5.5.6.
- (7) 안수환, 이윤표, 김경천, 1993, "사각돌출형 표면거칠기가 있는 이중동심관내의 난류유동과 열전달," 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호,

- pp. 1294~1303.
- (8) 김경천, 안수환, 이병규, 1994, "사각형 거칠기가 있는 이중동심관내의 난류구조", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제9호, pp. 1330~1339.
- (9) 안수환, 김경천, 이윤표, 1994, "사각형 거칠기가 있는 동심이중관 내의 완전히 발달된 난류 유동과 열전달," 대한기계학회논문집, 제18권, 4호, pp. 1072~1080.
- (10) Kays, W. M. and Leung, E. Y., 1963, "Heat Transfer in Annular Passages-Hydro dynamically Developed Turbulent Flow with Arbitrarily Prescribed Heat Flux," *International J. Heat Mass Transfer*, Vol. 6, pp. 537.
- (11) Quarmby, A., 1967, "An Experimental Study of Turbulent Flow through Concentric Annuli," *International J. Mech. Sci.*, Vol. 9, pp. 205.
- (12) Park, S. D., 1971, "Developing Turbulent Flow in Concentric Annuli ; An Analytical and Experimental Study," Ph. D. Thesis, Dept. of Mech. Eng., University of Ottawa.