

〈논 문〉

## 거칠기 위치에 따른 이중관 내의 난류유동

안 수 환\* · 김 경 천\*\*

(1996년 10월 1일 접수)

### Turbulent Flow in Annuli Depending on the Position of Roughness

Ahn, S. W. and Kim, K. C.

**Key Words :** Turbulent Flow(난류유동), Concentric Annuli(이중동심관), Surface Roughness(표면거칠기), Skewness(비대칭도), Flatness(편평도)

#### Abstract

This paper presents the results of a detailed experimental examination of fully developed asymmetric flows between annular tubes with square-ribbed surface roughness. The main emphasis of the research has been on establishing the turbulence structure, particularly in the central region of the channel where the two dissimilar wall flows interact. Measurements have included profiles of time mean velocities, turbulence intensities, turbulent shear stresses, triple velocity correlations, skewness, and flatness. The region of greatest interaction is characterized by strong diffusional transport of turbulent shear stress and kinetic energy from rough toward the smooth wall region, giving rise to an appreciable separation between the planes of zero shear stresses depending on positions of roughness on the walls.

———— 기호설명 ————		$\hat{v}$	: 반경방향 속도변동의 rms, $(\overline{v^2})^{0.5}$
De	: 등가직경, $2(R_2-R_1)$	x	: 축방향 거리
e	: 거칠기 높이	y	: 내관외면에서의 반경방향 거리
F	: 편평도 (flatness)	$\alpha$	: 내외반경비, $R_1/R_2$
P	: 거칠기 피치	$\tau_{wo}$	: 외관 내벽면의 전단응력
r	: 반경방향거리		
R	: 반경	하첨자	
S	: 비대칭도(skewness)	1	: 내관외벽
u	: 축방향 시간평균속도	2	: 외관내벽
$u_{\tau o}$	: 외관 내벽면의 마찰속도, $\sqrt{\frac{\tau_{wo}}{\rho}}$	u	: 축 방향성분
$\hat{u}$	: 축방향 속도변동의 rms, $(\overline{u^2})^{0.5}$	v	: 반경 방향성분
$\overline{uv}$	: 난류전단응력	max	: 최대
$\overline{u^2v}$ , $\overline{uv^2}$ , $\overline{v^3}$	: 난류 3차 상관관계(난류 에너지확산 성분)		

#### 1. 서 론

난류전단류의 난류구조에 관한 실험은 대부분 비  
교적 간단한 유동에 대해 행하여 왔다. 예를 들면,

\*경상대학교 해양과학대학 기관공학과

\*\*부산대학교 공과대학 생산기계공학과

채널 내부 유동에 관해 많은 연구자들은 원형 관과 평행 평판의 대칭 채널의 유동에 대한 난류 측정을 행하였다.<sup>(1,2)</sup> 최근까지도 복잡한 형태의 채널에 대한 연구가 충분히 이루어지지 않고 있다. 그 이유는 난류 유동의 특성을 쉽게 파악할 수 있는 원형 관이나 평행 평판의 유동에 주로 관심을 보여 왔기 때문이다. 그러나 많은 경우의 채널 유동은 벽면에 비대칭적으로 거칠기가 설치되거나 굴곡형 채널 혹은 이중관인 경우는 대칭적 유동이 아닌 복잡한 비대칭 유동 특성을 가진다. 그러므로 대칭 유동에 대한 실험자료로부터 구한 수학적 난류모델을 이용하여 복잡한 비대칭 유동을 예측하는 것은 양벽면측의 유동특성이 서로다르기 때문에 다소 무리가 있을 것이라 기대된다. 그러므로 복잡한 비대칭 채널 유동의 난류 구조를 철저히 실험적으로 조사하는 것이 바람직하다고 사료된다. 최근에 이러한 비대칭 채널 유동에 관한 연구는 Yang & Ebadian<sup>(3)</sup>과 Youn et al.<sup>(4)</sup> 등이 행한 바 있다. Yang & Ebadian<sup>(3)</sup>은 Sparrow et al.<sup>(5)</sup>의 실험을 근거로 굴곡된 매끈한 이중관내의 유동 특성을 이론적으로 해석하여 와류발생량, 마찰계수 등을 굴곡 정도와 반경 비에 대한 영향을 직선의 매끈한 이중관의 결과와 비교 검토하였고, Youn et al.<sup>(4)</sup>는 Webb et al.<sup>(6)</sup>의 실험을 이용하여 사각 채널에서 한측 벽에만 거칠기를 설치한 경우의 유동에서 압력강하의 예측에 관한 수치해석적 연구를 하였다. 그는 주로 등가직경에 대한 거칠기 높이의 비와 거칠기 높이에 대한 피치의 비에 관하여 마찰계수의 영향을 조사하여 여러형상비에 따른 마찰계수표를 제시한 바 있다. 그리고 Hanjalic & Launder<sup>(7)</sup>는 한측벽에만 거칠기피치/높이의 비가 10인 사각돌출형 거칠기구조를 가진 평행평판채널의 유동에 대해 X-형 열선 풍속계를 사용하여 광범위하게 난류구조를 조사하였다. 국내에서는 김내현 등<sup>(8)</sup>과 이규정<sup>(9)</sup> 등이 원관과 이중관에서의 거칠기효과를 연구한 바 있다. 채널 내부 중심 부근에서의 유동에서는 양벽면 영역간의 강한 상호작용이 존재하기 때문에 채널 내부의 유동 특징은 전단응력이 0인 지점이 최대속도 지점보다 매끈한 벽면 측으로 이동하여 두 점이 일치하지 않는다는 것이다. 이러한 현상은 Lawn<sup>(10)</sup>에 의해서 조사된 바 있다. 완전히 발달된 영역에서 최대속도와 전단응력이 0인 지점이 일치하지 않는 것은 일부의 유동장 영역에서는 평균(mean)속도 구배에 대해 레이놀즈응력이 작용하여 발생하는

난류 운동에너지가 (-)가 된다. 즉, 난류 에너지가 평균 유동 운동으로 손실된다. 이러한 현상 때문에 두 지점들이 불일치하는 유동에서의 난류 운동에너지 평형에 관해 특별한 관심을 가지게 하였다. 본 연구자의 선행연구<sup>(11)</sup>에서는 외벽측에만 거칠기가 설치된 이중관내의 난류강도, 난류에너지를 조사한 바 있다. 본 연구에서 사용한 채널 구조의 모델은 직경 비가 0.56인 경우에서 완전히 발달된 영역의 이중동심관에서 양측 모두 매끈한 벽의 이중관, 거칠기 피치 대 높이의 비가 2인 사각돌출형 거칠기를 내관 외벽, 외관 내벽, 그리고 양측 모두에 각각 설치한 이중관의 4가지 경우이며 측정은 속도 분포, 난류전단응력, 난류강도, 난류3차상관관계, 비대칭도(skewness), 편평도(flatness)이다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

각 경우에 대한 시험 부의 제원은 Table 1과 같으며 거칠기의 높이와 폭은 1.5 mm가 되도록 선반 가공하였다. Case (c)와 Case (d)의 외관은 거칠기 가공의 어려움 때문에 50 cm길이를 나누고 내경 97 mm, 외경 117.6 mm가 되도록 알루미늄 합금을 주물로 제작하여 프렌지로 연결하였다. 그리고 Case (b)와 Case (d)의 내관은 거칠기 제작이 용이한 아크릴 튜브를, 그 이외의 매끈한 관은 모두 동관을 사용했다. 시험부는 이중관의 전체 길이 4.3 m에서 완전히 발달된 영역에 해당하는 채널 입구로부터 3.75 m 떨어진 지점에 위치한다. 동심관은 내관을 반경 방향으로 위치 조절이 가능한 3점이동장치로 조절하였고 내관의 편심정도는 다이알게이지로 외관 둘레에 120° 간격으로 설치된 구멍을 통해 측정했고 모든 경우에서 최대오차는 0.5 mm 이내였다. 측방향길이에 따른 정압을 조사하기 위해 0.4 mm 직경의 구멍을 채널 전체에 17곳을 설치하여 채널 길이에 따른 각 구멍간의 차압으로 측정하였다. 이때 차압의 측정은 전기식 압력 변환기(MKS Baraton pressure transducer)로 하였으며 압력변환기의 보정(calibration)은 주기적으로 마이크로마노메터로 점검하였다. 압력 변환기의 오차 범위는 측정 범위(full scale : 10 torr)기준으로 0.1% 이내이며, 압력 측정치의 불확실성은 0.5% 정도로 분석되었다.

채널 길이에 따른 정압의 변화와 시간평균속도

Table 1 Essential dimensions

unit : mm

	Tube	O.D.	I.D.	Material	$a = (R_1/R_2)$	$De = 2(R_2 - R_1)$
Case (a)	Outer	113	97	Copper	0.56	43
	Inner	54	52	Copper		
Case (b)	Outer	113	97	Copper		
	Inner	54	51	Acryl		
Case (c)	Outer	117	97	Al-alloy		
	Inner	54	52	Copper		
Case (d)	Outer	117	97	Al-alloy		
	Inner	54	51	Acryl		

분포를 측정하여 완전히 발달된 영역을 판단하였다. 본 연구에서는 모든 경우에서 입구로부터 2.8 m 이후에는 완전히 발달된 영역임을 알 수 있었다. 작동 유체는 경제적이고 물성치가 잘 알려진 공기를 사용하였다. 공기는 채널 길이 끝 부분에서 0.8 kW의 교류 모터에 의해서 작동되는 원심 송풍기에 의해 시험부로 유입되었고 유량은 송풍기 출구에 설치된 유량 조절용 밸브에 의하여 조절하였으며 작동 유체의 최대 레이놀즈수는 4개 경우 모두 65,000 이상이 되었다.

측정장치로는 4 μ의 텅스텐 X형 정온도식 열선 풍속계 (C. T. A., TSI Model 1054 A)와 범용파형분석기 (D-6000 Model 611, Data Precision Inc.)를 사용했다. 열선풍속계의 교정에는 직경 4 mm 길이 350 mm의 피토투관과 디지털마이크로미터 (FCO-12)를 사용했으며, 난류 신호의 측정에는 IBM-PC/586에 의하여 온라인으로 수행되었다. 이때 C. T. A 브리지에서 나오는 두출력은 5 kHz low-pass filter를 거쳐 어리어징 (aliasing)을 방지하고 범용파형분석기에 장착된 14-bit A/D Converter와 Sample and Holder에 의해 동시에 디지털 값으로 표본되며 디지털 데이터는 블록프로그래밍포인트 (Block Floating Point) 방식으로 범용파형분석기에 연결된 데이터 레코더 (Model 681)를 통해 디스켓에 기록하였다. 이때 표본 율은 Niquist 표본 주기에 해당하는 초당 10,000개로 하였으며 일회 표본수는 4096개로 최대 적분 시간 척도의 약 20배가 넘지만 측정 오차를 줄이기 위해 한 측정점 당 열 번을 표본하여 앙상블 (ensemble) 평균을 취했다. 측정된 난류 신호의 분석은 오프라인 프로그램에 의해 실

시되었다. 실험은 온도 변화가 적고 주동력 공급에서 생기는 교란을 없애기 위해서 밤에만 실시했으며 실험장치 주위의 온도와 압력은 매 운전 시작 전에 기록하였으며 종료시 다시 측정한 후 그 차이를 확인하였고, 최대 오차가 2% 이내로 드는 경우의 자료를 선택하였다. 측정하기 전에 기기의 드리프트 (drift) 오차를 최소한으로 줄이기 위해 C. T. A. 를 4시간 이상 작동시켰다. 유량 측정용 오리피스는 시험부에 측정된 속도 형상을 수직 적분에 의하여 보정하였고, 압력강하 데이터는 송풍기 용량의 제한을 받는 레이놀즈수 범위 안에서 얻었고 측정하기 전에 최소한 30분 동안 정상상태를 유지시켰다. 불확실성은 난류강도와 난류전단응력의 경우는 최대 5% 이내로 평가되었다. 측정 장치의 이송은 특별 제작된 이송 기구를 사용하였고 이 기구에 의해서 프로부의 상대적 반경방향 변위는 전기 접측법으로 0.025 mm 이내로 측정되었다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 Fig. 1에서 처럼 직경비 ( $a$ )=0.56, 거칠기 피치 대 높이의 비=2인 사각 돌출형 거칠기 구조를 가진 이중 동심 관내에서 거칠기 위치에 따른 시간평균속도 분포를 x형 열선 풍속계로 측정 한 값을 나타낸다. 여기서 레이놀즈수는 평균속도 (bulk velocity)와 등가직경 (equivalent diameter)으로 정의 하였다. 속도 형상은 거칠기 위치에 따라 매우 비대칭적으로 변화하였다. 특히 거칠기가 외관 내벽에 설치된 Case (c)에서 비대칭 정도가 가장 컸다. 이는 이중관의 곡률효과로 최대속도 지

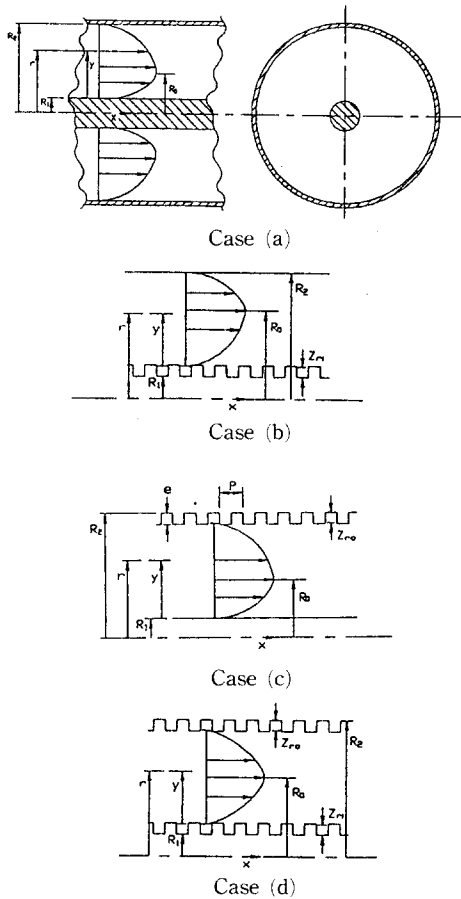


Fig. 1 Schematic view of idealized model

점이 내벽 측으로 쏠리는 경향이 있는데다가 외벽의 거칠기에서 발생하는 강한 운동량의 와확산 때문이라 판단된다. 난류에 해당하는 유동 영역에서는 거칠기 형태의 변화가 레이놀즈수의 변화보다 속도 형상의 비대칭 정도에 더 많은 영향을 주었음을 본 실험을 통해 알 수 있었다. 시간평균최대 속도 지점의 위치는 Fig. 5의 난류전단응력이 0인 지점과 비슷한 경향을 보인다. 그러나 Case (c)와 Case (a)에서 두 지점들의 위치의 차이가 가장 컸으며 Case (a)에서는 5%이었고 최대속도지점이 내벽측에 위치하였다. Case (c)에서는 최대속도지점의 위치가 6% 정도로 외벽측에 위치하였다. 모든 그림에서의 외벽면의 마찰속도들은 Case (a)는 0.93 m/s, Case (b)는 1.12 m/s, Case (c)는 1.69 m/s, 그리고 Case (d)는 1.38 m/s이었다. 매끈한 이중관의 경우인 Case (a)의 값에 대한 비교를 위

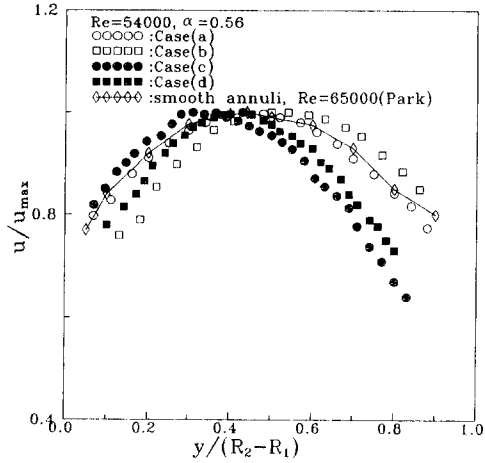


Fig. 2 Velocity distribution

하여 Park<sup>(12)</sup>의 결과를 포함하였다. 대체로 일치하나 외관 내벽근처에서 약간의 차이를 보인다. 이는 Park의 결과는 반경 방향의 변동속도 성분이 포함되는 피토티브로 측정했기 때문이라 사료된다. 양측 모두 거칠기가 설치된 Case (d)에서 속도 형상이 가장 뾰족하였고 매끈한 Case (a)에서 가장 평편한 모습을 보였다. 이는 벽면에 설치된 사각 돌출형 거칠기가 반경 방향으로 강하게 와확산시키므로 거칠기요소 근처에서는 축방향의 흐름이 방해되기 때문이라 사료된다. Case (a)에서는 대체로 속도 분포가 내벽 측으로 쏠리는 비대칭 성을 보이는 것은 외벽 면이 내벽 면보다 넓고 오목한 외관의 곡률효과 때문이고 직경 비가 작을수록, 즉 원형관에 가까울수록 비대칭 정도가 증가한다. Fig. 3은  $R_0=54000$ 과  $\alpha=0.56$ 에서의 축방향 성분 난류 강도의 거칠기 위치에 따른 변화를 도시하고 있다. 모든 값들은 외관 내벽면의 마찰속도와 내외관의 간격에 대한 내벽면에서부터의 거리로 무차원하여 표시하였다. 축방향성분의 난류강도( $\bar{u}$ )은 x형 열선 풍속계 프로브로부터 측정된 값들이다. 무차원 난류강도 형상은 레이놀즈수의 변화와는 거의 무관하였다.<sup>(11)</sup> 이는 레이놀즈수가 증가할수록 외벽면의 마찰속도도 거의 동일한 비율로 증가하기 때문이라 판단된다. Fig. 3의 축방향의 난류강도( $\bar{u}$ )와 Fig. 2의 값들을 비교하면 Fig. 2의 시간평균속도 성분이 작은 영역인 거친벽면 근처에서 축방향의 난류 강도 성분( $\bar{u}$ )이 증가하고 있다. 이는 사각돌출형 거칠기에 의한 벽면전단응력의 증가로 거친벽면 근처에서 시간 평균 속도 성분이 감소하지만 유

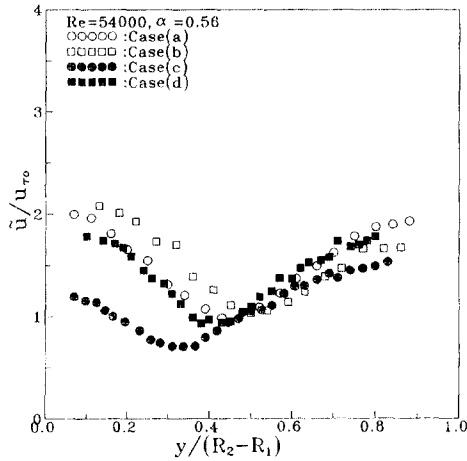


Fig. 3 Distribution of turbulence intensities in axial direction

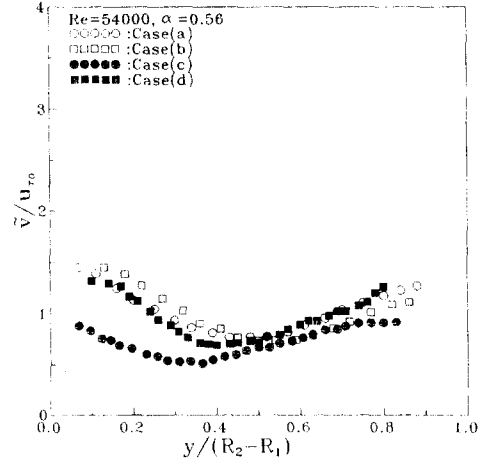


Fig. 4 Distribution of turbulence intensities in radial direction

동 방향에 대한 거칠기 돌출부의 영향으로 난류강도를 촉진시키기 때문이라 판단된다. Fig. 3의 무차원 난류강도 값은 내벽 면 근처에서는 Case (b)의 값이 가장 크고 Case (c)가 가장 작다. 이는 모든 경우에 대해 외관 내벽면의 마찰 속도로 무차원하였기 때문이라 판단된다. Fig. 4는 반경 방향의 무차원 난류강도( $\bar{v}$ )을 나타낸다. 채널에서의 축방향 변동속도성분은 시간평균속도의 0.13배 정도가 되며<sup>(13)</sup> 반경방향 변동속도성분은 벽면의 영향에 따라 크게 좌우되어 반경방향 시간평균속도의 값보다 클 때가 많았다. 그러나 반경방향 시간평균속도 값은 축방향 시간평균속도에 비해 무시할 수 있을 정도로 작았다. 본 연구 모델에서는 시간평균속도에 비례하는 축방향 변동속도성분이 벽면에 의한 확산효과에 크게 좌우되는 반경방향 속도변동성분보다 훨씬 컸음을 알 수 있었다. 대체로 반경방향 난류강도의 경향은 축방향의 난류 강도와 유사하다. 최소 난류강도 지점으로부터 내측에서는 축과 반경방향 모두의 난류강도가 내관 외벽의 거칠기 영향을 강하게 받아서 외관 내벽에만 거칠기가 있는 경우보다 난류강도가 크게 나타났다. Fig. 5는 거칠기 위치에 따른 난류전단응력의 변화를 나타낸다. 전단응력이 0인 지점의 위치는 세로축의 0로부터 결정된다. 거칠기 위치의 영향으로 Case (c)가 가장 내측에, Case (b)가 가장 외측에 전단응력이 0인 지점이 위치한다. 내벽면에 거칠기가 설치된 Case (b)와 Case (d)의 내벽 면 근처를 제외하고는 난류전단응력의 분포가 대체로 선형적으

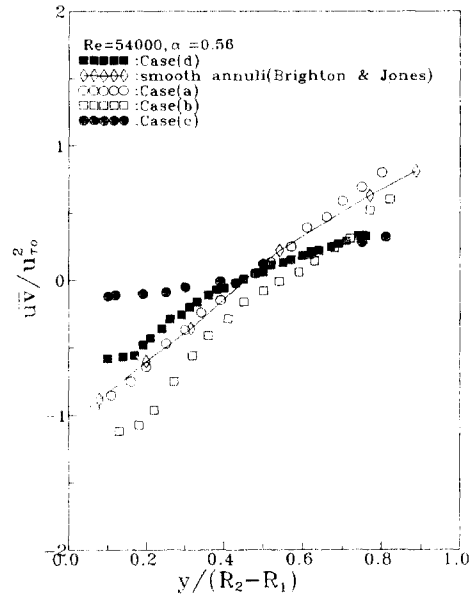


Fig. 5 Turbulent shear stresses

로 변하고 있다. 이는 난류전단응력은 속도 기울기 성분에 크게 좌우되며, 사각 돌출형 거칠기의 영향으로 내외관 거리의 20% 정도까지는 축방향 속도 기울기 성분의 증가율이 적기 때문이라 사료된다.  $Re=54000$ 과  $\alpha=0.56$ 에서 측정된 난류 3차상관관계(turbulent triple correlation)를 외관 내벽 마찰속도의 3제곱으로 무차원한 값들을 Figs. 6, 7 그리고 8에 나타내었다. Figs. 6, 7 그리고 8의 3가지

난류에너지 확산 성분들은 반경 방향의 무차원거리에 따라서 크게 변하고 있다. 이것은 동일하지 않는 v성분의 멱급수(power)를 포함하는 속도 상관관계의 특성 때문이라 판단되며 이것들은 동일 지점의  $\overline{uv}$ 값의 변화와 비교할 수 있다.

Case (c)와 비교할 수 있도록 사각 돌출형 거칠기(P/e=10)를 한 측면에만 설치한 평행 평판 채널<sup>(7)</sup>에서 레이놀즈수가 36500인 경우에 측정된 값을 포함하였다. 이때 거리는 Case (c)와 같이 매끈한 평면에서부터의 길이이다. Case (c)와 한 측면에만 사각 돌출형 거칠기가 있는 경우<sup>(7)</sup>를 보면  $\overline{u^2v}$ ,  $\overline{v^3}$ , 그리고  $\overline{uv^2}$ 의 상관관계들은 거친벽면 근처

에서 변화의 양상이 달라진다. 특히  $\overline{u^2v}$ 에서 뚜렷하였다. 이러한 현상은 거친 벽면 상에 설치된 돌출형 거칠기로부터 발생하는 큰와(large eddy)가 확산됨으로써 일어난다고 사료된다. Figs. 6, 7 그리고 8에서 Case (c)와 한 측면에서만 거칠기가 있는 경우<sup>(7)</sup>의 결과 값들의 절대치가 작은 것은 벽면마찰속도의 차이에 기인한다. 특히 한 측면에서만 거칠기가 있는 경우<sup>(7)</sup>의 결과 값들이 가장 작은 것은 이 경우는 거칠기 피치(P)/거칠기 높이(e)=10으로 설치하였으므로 벽면전단응력이 P/e=2일 때보다 훨씬 증가하기 때문이라 판단된다.

본 연구의 Case (c)와 Hanjalic & Launder<sup>(7)</sup>의

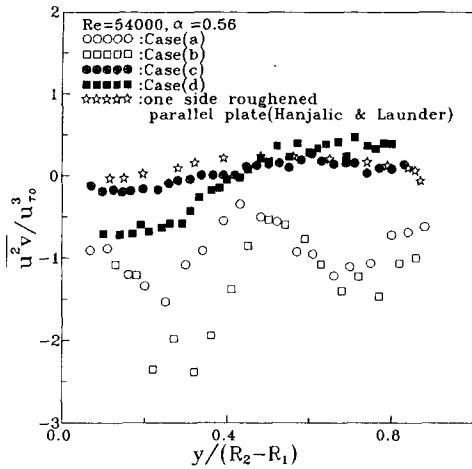


Fig. 6 Turbulent triple correlation ( $\overline{u^2v}$ )

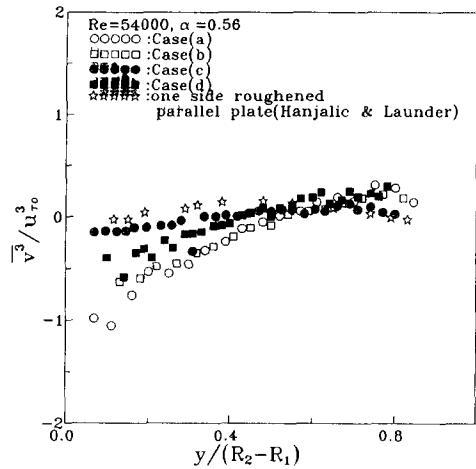


Fig. 8 Turbulent triple correlation ( $\overline{v^3}$ )

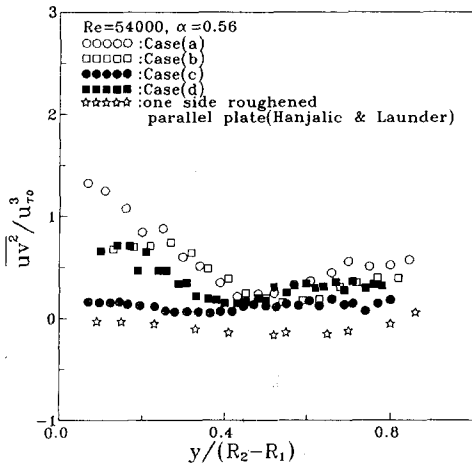


Fig. 7 Turbulent triple correlation ( $\overline{uv^2}$ )

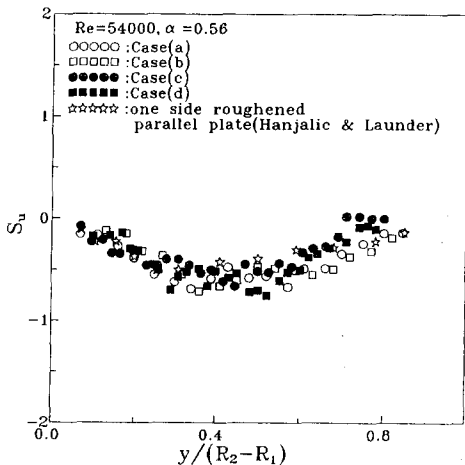


Fig. 9 Skewness factor in axial direction

$\overline{u^2v}$ ,  $\overline{uv^2}$  그리고  $\overline{v^3}$ 의 상관관계들을 비교해보면 Case (c)의 경우에서 절대치 값들이 가장 클 때 Hanjalic & Launder의 경우는 거의 최소가 되었다. 이는 평행평판과 이중동심관 형상의 차이에 기인되었다고 사료된다.

축방향과 반경 방향의 비대칭도(skewness)를 Figs. 9과 10에 나타내었다. 비대칭도(skewness),  $S_u$ 와  $S_v$ 는 각각  $\frac{\overline{u^3}}{\overline{u}^3}$ 와  $\frac{\overline{v^3}}{\overline{v}^3}$ 으로 정의 된다. 비교를 위하여 Figs. 6~8과 마찬가지로 한측벽면에서만 거칠기가 설치된 평행 평판에서  $Re=36500$ 인 경우의 측정값들<sup>(13)</sup>을 포함하였다. 한 측면에서만 사각 돌출형 거칠기가 있는 경우에는  $S_u$ 는  $S_v$ 에 비해 전체적으로 반대의 양상을 보이지만 본 연구의 모든 경우, 즉 Case (a), Case (b), Case (c), 그리고 Case (d)의  $S_v$ 는 전단응력이 0인 지점을 중심으로 값들의 부호(+, -)가 바뀌어  $S_u$ 의 변화와 전혀 다르게 변화함을 알 수 있다. 이는 평행평판 내에서 한 측면에만 거칠기( $P/e=10$ )를 설치한 것이 본 연구의 Case (c)의 거칠기 요소( $P/e=2$ )인 경우보다 강한 비대칭적 난류구조의 와(eddy)를 채널 내에 형성하여 전단응력이 0인 지점의 위치가 훨씬 매끈한 벽면 근처로 이동하기 때문이라 판단된다. 양벽면 모두 매끈한 대칭적 구조인 평행 평판에 관한 Comte-Bellot<sup>(14)</sup>의 연구에 의하면  $S_u$ 는 대칭인 중심선에서 최대가 되고  $S_v$ 는 전단응력이 0인 지점인 대칭인 중심선에서 0이 되었지만 비대칭적 난류특성이 큰 본 연구의 Case (c)와 Hanjalic & Launder<sup>(7)</sup>의 경우에는  $S_u$ 의 절대치 최

대 값이 전단응력이 0인 지점보다 오른쪽에,  $S_v$ 는 전단응력이 0인 지점보다 왼쪽에서 0이 되었다. 이러한 모순된 현상은 비대칭적 난류구조를 가진 와(eddy)에 의한  $S_u$ 와  $S_v$ 의 상호관계 때문이라 사료된다.

Figs. 11과 12는 축방향과 반경 방향 성분의 편평도(flatness)를 나타낸다.  $F_u$ 와  $F_v$ 는 각각  $\frac{\overline{u^4}}{\overline{u}^4}$ 와  $\frac{\overline{v^4}}{\overline{v}^4}$ 로 정의 된다.  $S_u$ 와  $S_v$ 에비해서  $F_u$ 와  $F_v$ 는 매우 유사한 분포를 나타낸다. 비대칭성 난류특성이 비교적 적은 Case (a), Case (b) 그리고 Case (d)는

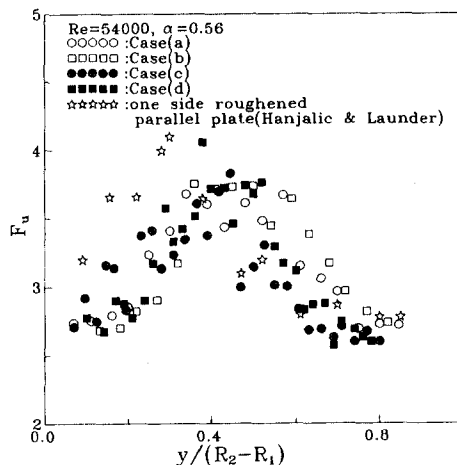


Fig. 11 Flatness factor in axial direction

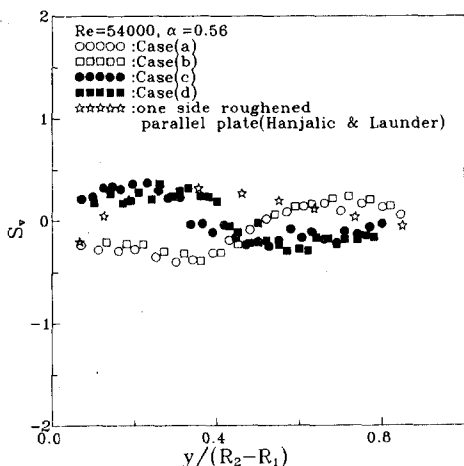


Fig. 10 Skewness factor in radial direction

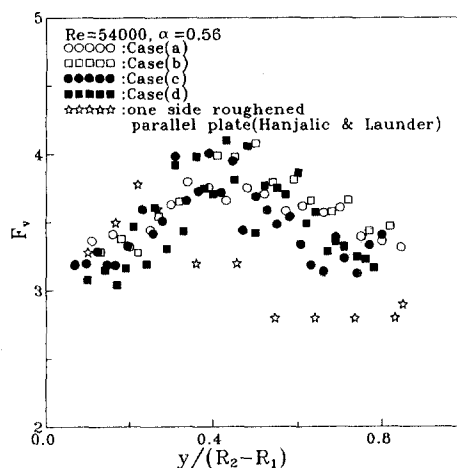


Fig. 12 Flatness factor in radial direction

대체로 가우스 분포(Gaussian distribution) 형태의 특성을 보인다. 이러한 현상은 양측 모두 매끈한 평판채널에 관한 Comte-Bellot의 연구<sup>(14)</sup>와 매끈한 원형 파이프의 Lawn의 결과<sup>(15)</sup>와 유사하였다.

#### 4. 결 론

사각형 표면돌출형 거칠기를 이중동심관 벽면에 설치한 4가지의 경우에 대한 유동의 난류구조를 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시간평균속도형상은 거칠기 위치에 따라 매우 비대칭적으로 변화하였다. 특히 거칠기가 외관에 설치된 Case (c)에서 비대칭정도가 가장 컸으며 이는 외관벽에 설치된 거칠기가 전체 유동장에 미치는 효과가 가장 큼을 보여준다.

(2) 반경방향의 난류강도 성분( $\bar{v}$ )은 축방향의 난류강도 성분( $\bar{u}$ )의 값들과 유사한 경향을 보이나 크기는 모두 작았으며, 최소 난류강도 지점으로부터 내측에서는 축과 반경방향 모두의 난류강도가 내관 외벽의 거칠기 영향을 강하게 받아서 외관 내벽에만 거칠기가 있는 경우보다 난류강도가 크게 나타났다.

(3) 전단응력이 0인 지점의 위치는 거칠기 위치에 따라서 강한 영향을 받으며 Case (c)가 가장 내측에, Case (b)가 가장 외측에 위치하였다.

(4) 3개의 에너지확산 성분( $\overline{u^2v}$ ,  $\overline{uv^2}$  그리고  $\overline{v^3}$ )은 본 연구의 Case (c)에서 최대일 때 한측에서만 거칠기가 있는 평행판 채널에서는 기하학적 형상의 차이로 거의 최소가 되었다.

(5) 비대칭적 난류특성이 큰 Case (c)에서는  $S_0$ 의 절대값은 양벽면에 가까울수록 최소가 되었고  $S_1$ 는 내외관거리의 약 40%정도에서 절대값이 최소가 되었다.

#### 후 기

이 연구는 1995년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 지방대 육성과제 학술연구조성비에 의하여 수행된 것으로 관계 여러분에게 고마움을 표한다.

#### 참고문헌

(1) Laufer, J., 1954, "The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow," NACA Rept.

1174.

(2) Clark, J. A., 1968, "A Study of Incompressible Turbulent Boundary Layers in Channel Flow," *J. of Basic Eng., Trans. ASME*, Vol. 90, pp. 445~468.

(3) Yang, G. and Ebadian, M. A., 1994, "Fluid Flow Behavior in the Curved Annular Sector Duct," *J. of Fluids Eng., Trans. of ASME*, Vol. 116, pp. 53~60.

(4) Youn, B., Yuen, C. and Mills, A. F., 1994, "Friction Factor for Flow in Rectangular Ducts with One Side Rib-Roughened," *J. of Fluids Eng., Trans. of ASME*, Vol. 116, pp. 489~493.

(5) Sparrow, E. M., Chen, T. S. and Johnsson, V. K., 1964, "Laminar Flow and Pressure Drop in Internally Finned Annular Ducts," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 7, pp. 583~585.

(6) Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., 1979, "Heat Transfer and Friction Factor in Tubes with Repeated-Rib Roughness," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 601~618.

(7) Hanjalic, K. and Launder, B. E., 1972, "Fully Developed Asymmetric Flow in a Plane Channel," *J. of Fluid Mech.*, pp. 301~335.

(8) 김내현, Webb, R. L., 1994, "삼차원 조도관의 열수력 성능에 대한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 403~406.

(9) 이규정, 문정은, 1995, "나선코일형 이중관식 열교환기의 유동 및 열전달 해석," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 402~407.

(10) Lawn, C. J. and Hamlin, M. J., 1969, "Velocity Measurements in Roughened Annuli," CEGB Rep. RD/B/N 1278.

(11) 김경천, 안수환, 이병규, 1994, "외벽에 거칠기가 있는 이중동심관 유동의 난류구조," 대한기계학회논문집, 제18권, 9호, pp. 2443~2453.

(12) Park, S. D., 1971, "Developing Turbulent Flow in Concentric Annuli: an Analytical and Experimental Study," Ph. D. Thesis, Mech. Eng., University of Ottawa.

(13) Schlichting, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, Inc., pp. 564~565.

(14) Comte-Bellot, G., 1965, "Écoulement Turbulent Entre Deux Parois-Parallèles," Publ.



Scientifiques et Techniques du Ministre de l'Air,  
No. 419.  
(15) Lawn, C. J., 1970, "Application of the Turbu-

lent Energy Equation to Fully Developed Flow in  
Simple Ducts," C. E. G. B. RD/B 1575.