

〈論 文〉

원주의 근접후류에 대한 자유흐름 난류강도의 영향

김경천* · 정양범**

(1991년 4월 8일 접수)

The Effect of Free Stream Turbulence on the Near Wake Behind a Circular Cylinder

K.C. Kim and Y.B. Jung

Key Words : Near Wake(근접후류), Free-Stream Turbulence(자유흐름 난류 강도), Split-Film Sensor, Turbulence Structure(난류구조), Diffusion Velocity(확산 속도)

Abstract

The effect of free stream turbulence on the flow characteristics behind a circular cylinder is investigated in the present experimental study. The various free stream turbulent intensities are generated by different combinations of cylinder locations and grid shapes. Split film sensor with constant temperature anemometer is used to measure the local instantaneous velocity components. Experimental results demonstrate that the large scale coherent structures are rapidly distorted and the Strouhal number is decreased with increasing free stream turbulent intensity.

기호설명

A, B, C	: 교정상수	U_0	: 자유흐름 평균속도 (reference velocity)
$b_{1/2}$: 후류반폭치	$\bar{U}\bar{V}$: X, Y 방향 평균 속도 (m/sec)
d	: 실린더 모델 직경 (mm)	u, v	: X, Y 방향 순간속도 (m/sec)
$E1, E2$: Sensor 1, 2의 bridge output (Volt)	u', v'	: X, Y 방향의 난류 순간속도 성분 ($u - \bar{u}, v - \bar{v}$) (m/sec)
Eu, Ev	: 에너지 스펙트럼 밀도함수 (energy spectral density function)	\bar{u}^2, \bar{v}^2	: X, Y 방향의 평균 난류 운동 에너지
L	: 적분 길이 척도 (integral length scale)	$-\bar{u}'\bar{v}'$: Reynolds 전단 응력
P	: 확률 밀도 함수 (probability density function)	ΔU	: 평균 속도 결손
R_f	: 역류율 (reversal frequency : time of -u/ total sampling time)	ΔU_m	: 후류 중심선상의 평균 속도 결손
$R(\tau)$: 자기 상관 계수 (autocorrelation coefficient)	V	: 속도 vector
S	: 비대칭도 (skewness)	V_0	: 확산 속도 ($(\bar{u}^2\bar{v}' + \bar{v}^2\bar{u}') / (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$)
St	: Strouhal Number	X, Y, Z	: 직교좌표계
		Z	: 무차원변수
		θ	: 피치각
		τ	: 지연 시간
		—	: 시간평균

*정회원, 부산대학교 생산기계공학과, 부산대 기계기술연구소 연구원

**정회원, 부산대학교 대학원 생산기계공학과

1. 서 론

실제적인 공학문제에서의 외부 및 내부 난류 유동은 상당히 광범위한 난류 강도와 난류길이 척도를 동반하고 있으며, 난류 전단류의 상류측 유동 특성의 변화는 하류측 유동 특성에 많은 영향을 주게 된다. 나아가 자유흐름 난류(*free stream turbulence*)가 있을 경우, 자유흐름 난류의 특성이 후류의 박리 전단층의 증가율, 난류 에너지, Strouhal 수, *entrainment* 현상 등의 변화에 미치는 영향은 실험결과의 해석상 매우 중요하며⁽¹⁾, 공학적 장치 등 실용적인 면에서도 중요하다.

한 예로 다단 익형 문제를 다룰 때 코어(*core*) 흐름의 난류 강도와 전열 익형의 후류는 후열 익형의 성능에 크게 영향을 주게 되며⁽²⁾, 따라서 자유흐름 난류의 영향에 대한 난류 후류의 정확한 유동 시뮬레이션(*simulation*)을 위해서는 자유흐름 난류 특성의 영향에 대한 체계적인 고찰이 필요하게 된다.

이와 같은 연구의 필요성에 따라 자유흐름 난류의 발생장치 및 자유흐름 난류 특성치 자체의 변화를 주기위한 연구⁽³⁾들과 각종 난류 전단류에서의 자유흐름 난류 특성이 난류 후류에 미치는 영향에 대한 연구^(4~7)들이 진행되어 왔다.

본 연구에서 다루려고 하는 원형 실린더 후류에 대한 자유흐름 난류의 영향도 비교적 많이 연구되어 왔으나^(8,9) 주로 항력계수 및 압력의 변화 등 공기역학적 연구나 평균 유동장의 난류 특성 변화에 대한 연구가 대부분이며, 특히 역류가 존재하거나 순간 유입각이 매우 큰 원주의 근접 후류 난류 구조에 대한 연구 결과는 빈약한 실정이다.

본 연구에서는 역류의 측정과 원주의 근접 후류의 난류 구조에 미치는 자유흐름 난류의 영향을 정성적 및 정량적으로 조사하기 위하여, 역류가 존재할 경우나 순간 유입각이 매우 큰 경우에도 난류의 측정이 가능한 *split film probe*(이하 SFP로 줄여 표기함)를 사용하여 평균 유동장과 난류의 2차 및 3차 모멘트의 변화, 속도 변동 상관의 변화 및 대규모 와류의 유출 주파수 특성 등을 측정 분석하여, 격자에 의해 형성된 서로 다른 자유흐름 난류 특성에 따른 실험 결과들을 비교 검토해보고자 한다.

2. 실험장치 및 측정 방법

2.1 풍동 및 실험조건

실험에 사용된 풍동은 개회로 노즐형 흡입식 아음속 풍동으로 전체 길이는 4,950mm이고 노즐형의 입구 단면적은 533×533mm²이다. 공기는 3.7Kw 3상 유도 전동기로 구동되는 축류 송풍기에 의해 노즐형의 축소부를 거쳐 흡입되고 시험 구간과 확대부를 지나 송풍기를 통해 밖으로 흘러 나간다. 풍동 입구에는 *honeycomb*를 장착하고 시험구간 입구에는 250mesh의 가는 철망을 설치하여 시험구간에서의 난류강도가 1% 미만의 균일 유동이 되도록 하였으며, 시험구간의 재질은 투명한 아크릴로 길이는 2,430mm, 단면적은 305×305mm². 노즐면적축소비는 약 3이다. 실험에 사용된 원주는 직경이 10mm인 매끈한 스테인리스 원봉이며 Z방향에 평행하도록 시험구간 중심에 장착 시켰다. (Fig. 1) 이때 종횡비(*aspect ratio*)는 30.5이고 폐쇄비(*blockage ratio*)는 3%이므로 후류에 대한 풍동의 벽면 효과는 무시할 수 있다. 자유흐름 난류의 변화는 아래와 같이 격자의 설치와 원주의 장착 위치를 바꾸어 주어 4가지 경우의 실험 조건을 형성 시켰다.

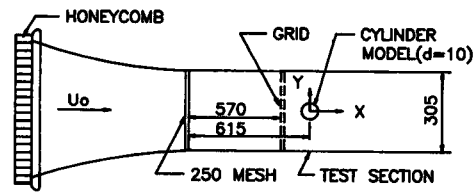


Fig. 1 Definition sketch and flow configuration

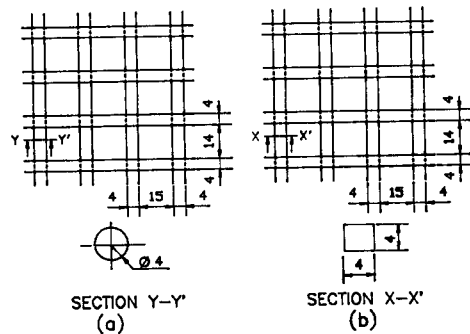


Fig. 2 Detail view of grid shapes

Table 1 Properties of grid generated free stream turbulence

Grid	u'/U_o	Lx/d	Ly/d
Case 1	0.008	—	—
Case 2	0.073	0.73	0.235
Case 3	0.098	0.78	0.318
Case 4	0.145	0.59	0.243

- Case 1 : 시험구간 입구에 250mesh의 가는 철망을 설치하고 mesh로부터 615mm 떨어진 위치에 원봉 설치.
- Case 2 : mesh로부터 570mm 위치에 Fig. 2(a)와 같은 격자를 설치 하고 격자로부터 90 mm 떨어진 위치에 원봉 설치.
- Case 3 : Case 2와 같은 조건에서 Fig. 2(b)의 격자를 설치.
- Case 4 : Case 3과 같은 조건에서 격자로부터 45 mm 떨어진 위치에 원봉 설치.

위의 각 경우에 대해 원주의 위치에서 구한 자유 흐름의 난류 특성은 Table 1에 요약되어 있다. 이때 자유흐름의 평균 유속은 7.5m/sec로 고정하였으므로 원주 직경을 기준으로 한 Reynolds 수는 약 4,970으로 아임계영역(subcritical region)이며, L_y 가 L_x 의 약 0.4배 이상이므로 자유흐름 난류는 균일난류(homogeneous turbulence)라 볼 수 있다.

2.2 Split Film Probe의 교정

SFP의 구성은 한개의 실린드형 수정섬유(quartz fiber)에 입혀진 전기적으로 독립인 두개의 백금막(platinum film)으로 이루어져 있으며 이 두개의 반원막은 금도금판으로 지지대에 연결되어 있다. film의 두께는 약 1,000 Angstroms 정도이며 SFP의 지름은 0.15mm 정도로 I-wire(0.0038mm), Hot film(0.051mm)과 비교하면 큰편이지만 이보다 큰 X-wire보다는 공간 해상도가 좋으며 높은 난류강도에서도 비교적 정확한 측정을 할 수 있으며, 역류 측정도 가능하다^(10,11).

SFP의 동작은 가열된 sensor 주위의 불균일한 열전달 분포에 근거를 두고 있으며 SFP의 두 출력의 합의 효과는 열선 프로브 하나의 출력과 유사하다고 볼 수 있으며, 따라서 속도의 크기는 SFP의 두 출력의 산술평균과 관련지어 아래식으로 표현된

다.

$$\left[\frac{E1+E2}{2} \right]^2 = A+B\sqrt{V}+CV \tag{1}$$

$E1, E2$: sensor 1, 2의 출력

V : 속도 크기

A, B, C : 교정 상수

식 (1)의 타당성은 SFP의 두 출력의 평균값은 단지 속도만의 함수라고 가정할 때 성립하며, 이의 타당성을 확인하기 위해 속도를 고정하고 피치각을 변화시키면서 두 출력의 평균값을 구했으며, 거의 일정한 값을 나타내고 있다(Fig. 3).

피치각에 대한 응답은 속도를 고정한 상태에서 프로브축을 회전하면서 측정하며, 본 연구에서는 피치각의 응답에 대한 속도의 의존도를 없애기 위하여 무차원 변수 Z 를 아래와 같이 도입했다.

$$Z = \frac{E1\theta - E1_0^\circ}{E1_{60^\circ} - E1_0^\circ} + \frac{E2_0^\circ - E2\theta}{E2_0^\circ - E2_{60^\circ}} \tag{2}$$

$E1, E2$: sensor 1, 2의 출력

θ : 피치각

식 (2)의 아래 첨자는 피치각을 나타낸다.

식 (2)에서 $E1_0^\circ, E2_0^\circ$ 는 피치각 영도에서 각 sensor의 출력과 속도와의 관계에 의해 아래 식으로 교정한다.

$$E1_0^\circ = E01 = A01 V + B01\sqrt{V} + C01 \tag{3}$$

$$E2_0^\circ = E02 = A02 V + B02\sqrt{V} + C02 \tag{4}$$

식 (2)의 분모항은 아래 식에 의해 교정 한다.

$$E1_{60^\circ} - E1_0^\circ = EA = AA V^2 + BA V + CA \tag{5}$$

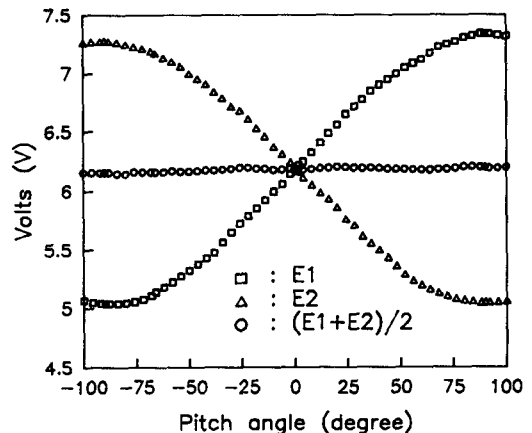


Fig. 3 Voltage response of the SFP with pitch angle

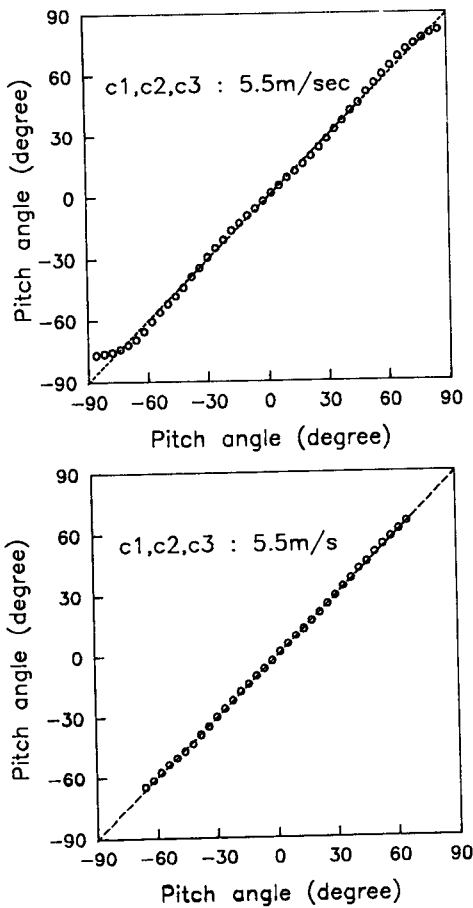


Fig. 4 (a) Calibrated curve of the pitch angle($\pm 8^\circ$)
(b) Calibrated curve of the pitch angle($\pm 6^\circ$)

$$E2_{\circ} - E2_{\circ} = EB = AB V^2 + BB V + CB \quad (6)$$

피치각 θ 에 대한 교정은 무차원 변수 Z 와 관련하여 다음 식으로 구한다.

$$\theta = C1 Z + C2 Z^2 + C3 Z^3 \quad (7)$$

Fig. 4는 위의 관계식에 의해 교정된 결과를 나타내며 $\pm 70^\circ$ 범위에서는 측정값과 교정값이 거의 일치함을 보여주고 있다.

SFP로 측정된 데이터를 처리하기 위하여는 먼저 위의 교정식 (1)~(7)에 관련된 18개의 상수를 구하여야 하며, 본 연구에서는 최소자승법(least square curve fit method)에 의해 이들 상수를 구하였다.

2.3 측정 및 데이터 처리

측정 장치로는 정온도형 열선 풍속계(C.T.A.,

TSI Model 1054 A)와 범용 파형 분석기(D-6000 model 611, Data Precision inc.)를 사용했으며, 측정에 사용한 SFP는 TSI Model 1288로서, 정온도형 열선풍속계의 square wave 테스트 결과 SFP의 동적 응답 주파수는 30~35KHz 정도였다. SFP의 교정에는 직경 4mm 길이 350mm의 피토판과 디지털 마이크로 마노메타(model Fc 012)를 사용하여 했으며, 난류 신호의 측정은 IBM-PC/AT에 의해 온라인으로 수행되었다⁽¹²⁾. 이때 C.T.A. 브릿지에서 나오는 두 출력은 5KHz Low-Pass Filter를 거쳐 Aliasing을 방지하고, 범용 파형 분석기에 장착된 14-bit A/D Converter와 Sample & Holder에 의해 동시에 디지털 값으로 표본되며 디지털 데이터는 block floating point 방식으로, 범용 파형 분석기에 연결된 데이터 레코더(Model 681)를 통해 디스크에 기록하였다. 이때 표본률은 Nyquist 표본 주기에 해당하는 초당 10,000개로 하였으며, 일회 표본수는 4,096개로 최대 적분시간 척도의 약 20배가 넘지만 측정 오차를 줄이기 위해 한 측정점당 열번을 표본하여 ensemble 평균을 취했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 역류 및 속도장에 대한 자유흐름 난류의 영향

원주의 근접후류의 유동 특성에 있어서 가장 특징적인 것은 바로 원주 뒤에 형성되는 역류 구역일 것이다. 즉 원주 후면에 형성된 흡입 압력과 강한 속도 구배로 vortex shedding이 이루어지는 동안 주기적인 역류가 발생하게 된다. 이와 같은 유동장에서는 종래에 주로 사용되어 왔던 X-형 열선 프로브로는 역류와 큰 폭의 순간 유동 유입각 때문에 난류값의 측정이 곤란하다. 본 실험에 사용한 SFP의 경우 두 sensor가 분리면에 대해 대칭으로 되어 있기 때문에 분리면을 자유흐름 방향으로 하여서는 역류 측정이 곤란하며, 따라서 역류를 측정하기 위하여 분리면을 자유흐름에 수직으로 위치시키면 전방 및 후방 센서의 출력 크기에 따라 유동의 방향과 크기를 알 수 있게 된다. Fig. 5는 Case 1의 경우 $x/d=1$ 의 위치에서 위의 두가지 방법에 의해 측정된 결과를 나타내고 있으며, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8은 Case 1의 경우 원주 바로 후방에서의 여러 위치에 대한 속도 분포, 역류율 및 역류율이 50%인 지점을 보여주고 있다. 여기서 역류율이란

주어진 시간에서 역류가 감지된 시간의 백분율이며, 역류율이 50%되는 곳이 평균 속도가 0인 지점으로 볼 수 있다. Fig 6~8로 부터 후류 중심선에

서 x/d 가 약 1.7 정도까지 영 속도 지점이 형성되며, $x/d=2.5$ 에서도 순간적인 역류가 감지되고 있음을 알 수 있다.

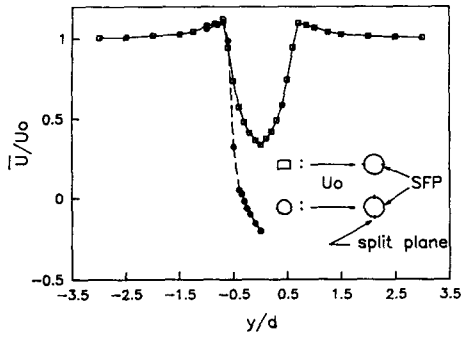


Fig. 5 Compare of the velocity distribution at $x/d=1$ with sensor location (case 1)

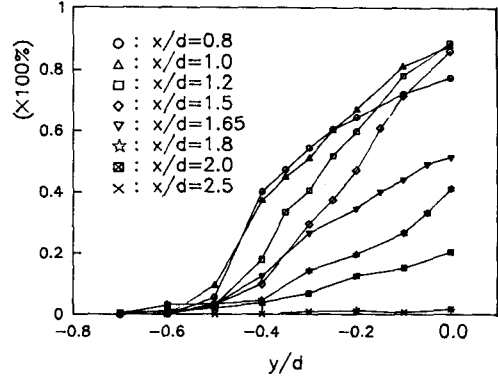


Fig. 7 Variation of flow reversal frequency (case 1)

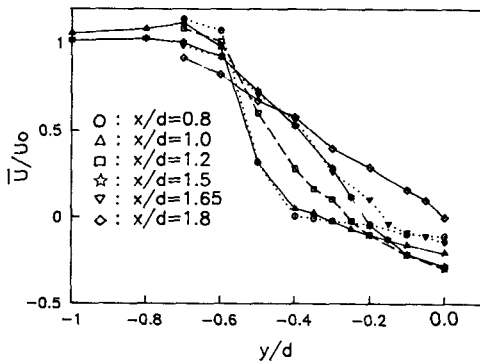


Fig. 6 Variation of the velocity distribution (case 1)

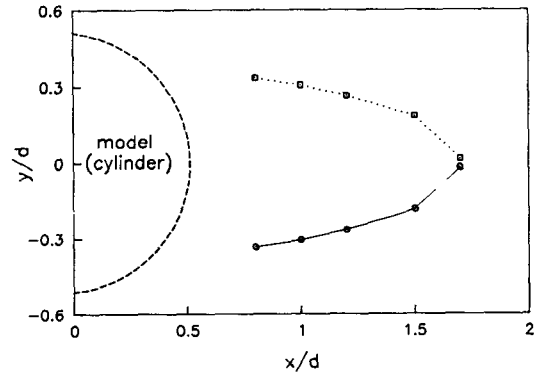


Fig. 8 Flow reversal frequency of 50% curves (case 1)

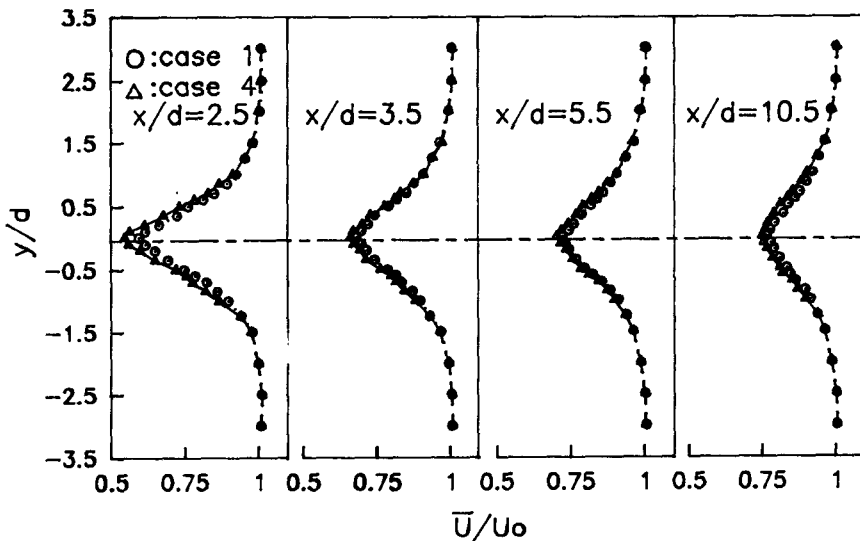


Fig. 9 Compare of velocity distribution along the x direction

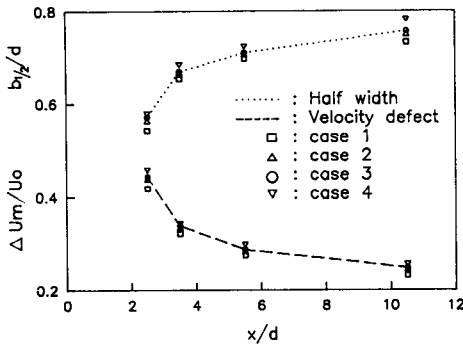


Fig. 10 Variation of half width and maximum velocity defect

Fig. 9, Fig. 10은 시간 평균 속도 분포 및 후류 반폭, 최대 속도 결손 분포를 보여주고 있다. x/d 가 증가 할수록 후류 반폭치는 증가하고 속도 결손이 감소하는 것은 기존 실험결과와 동일하며, 자유흐름 난류 강도가 클수록 같은 위치에서 속도 결손 및 후류 반폭이 증가하고 있다. 이는 자유흐름 난류 강도의 증가로 인해 원주 후류의 확산속도가 감소하며, 따라서 entrainment 현상이 줄어들기 때문이라고 생각할 수 있다.

Fig. 11은 후류 중심선에서 $x/d=2.5$ 인 곳에서 SFP에 의해 얻어진 속도 벡터의 순간 유입각의 변화를 보여주며, Case 1의 경우 평균 ± 50 도, Case 4 즉 자유흐름 난류 강도가 큰 경우 평균 ± 45 도 정도 이나, 후자의 경우 분산이 더욱 심한 것을 알 수 있다. 이는 자유흐름이 매끈한 경우 대규모의 코히어런트 와가 주기적으로 잘 형성되는 반면 자유흐름이 거친 경우에는 대규모 와의 규모가 고르지 않을 뿐 아니라 흐름방향에 대한 수직방향 난류 속도 성분의 상관관계가 감소하여 vorticity도 빨리 손실되고 있음을 보여주고 있으며, 이에대한 관계는 확산속도, 상관관계, 스펙트럼분석 등에서 자세히 다루어질 것이다.

Fig. 12는 같은 위치 ($x/d=3.5, y/d=0.0$)에서 SFP와 x-형 열선 프로브의 경우를 비교한 것이며, 유입각의 변화가 SFP의 경우 ± 40 도 부근에서 요동 하지만 열선 프로브의 경우 ± 30 도 부근에서 거의 균일한 상태를 보여준다. 이는 실제 유입각이 ± 30 도 이상의 큰 폭으로 변하고 있지만 열선 프로브의 경우 ± 30 도 이상의 유입각은 측정이 곤란함을 보여주며, 따라서 역류가 존재하는 부분은 물론 유입각의 변화가 큰 유동장에서의 열선 프로브에

의한 난류 신호의 측정시 신뢰도가 매우 낮다고 볼 수 있다.

3.2 난류의 2차 및 3차 모멘트에 대한 자유 흐름 난류의 영향

Fig. 13은 case 1, case 2 및 case 4의 경우 $x/d=2.5, 5.5, 10.5$ 위치에서 시간평균에 의한 난류변동의 u 성분과 v 성분에 대한 난류 운동에너지 분포를 비교한 것이다. 자유흐름 난류 강도가 클 경우 동일 위치에서 최대 난류 에너지의 값이 줄어드나, 흐름 방향(u) 난류 에너지는 후류의 중심선에서 자유흐름 난류의 영향을 받고 있음을 나타낸다. 흐름에 직각 방향(v 성분)의 난류 에너지는 자유흐름의 난류 에너지가 클 때 피크치가 현저히 줄고 있으며 또한 난류 에너지의 후류 폭방향 확산도 별로 눈에 띄지 않는다. 이와 같은 결과는 원주의 근접후류가 실제로는 상당히 뚜렷한 주기성이 있는데에도 위상 평균을 하지 않고 바로 시간 평균을 했으므로, v 성분 난류 에너지에는 특히 코히어런트와 운동에 의한 기여도가 지배적으로 포함되어 있다고 볼 수 있으며, 따라서 자유흐름의 난류 강도가 증가하면 코히어런트 와의 구조를 와해시키면서 폭방향의 요동 운동의 강도도 약화시키기 때문이라고 짐작할 수 있다.

Fig. 14는 시간평균에 의한 속도 변동 상관을 나타내며, 이것은 Reynolds 전단응력에 대응된다. $\bar{u}'v'$ 의 값은 $y>0$ 에서 부, $y<0$ 정이되고 후류 중심에서 영이 된다. 이 경향은 와류 방향이 후류 중심을 기준으로 서로 반대가 되기 때문이다.

난류 운동 에너지와 난류 전단 응력의 전달은 평균 유동장의 대류와 확산에 기인한다. 물리적 관점에서 볼 때 난류 확산은 entrainment에 밀접히 연관되어 있다. 평균 유선에 평행한 방향으로의 확산은 그동안 얇은 전단층 가정에서는 무시되어 왔다. 난류 운동 에너지 전달 방정식에서 확산은 압력 요동에 의한 항과 난류 3차 모멘트의 항으로 대별된다. 이중 후자의 기여도를 살펴보기 위해 난류 3차 모멘트 \bar{u}'^2v' \bar{v}'^3 측정치를 Fig. 15에 비교 하였으며, Fig. 16에는 Case 1, 2, 4에대한 확산 속도(diffusion velocity)를 비교 하였다. Fig. 15, Fig. 16에서 알 수 있는 바와 같이 자유흐름의 난류 강도가 증가함에 따라 3차 모멘트들의 최대값이 작아짐을 볼 수 있으며, 확산 속도도 작아짐을 볼 수 있다. 그 이유는 대규모 와의 운동이 자유흐름 난

류 강도의 증가로 인해 와해 되어짐으로 기인되었다고 볼 수 있다. 결국 자유흐름의 난류 강도가 증가 할수록 국소 평형에 빨리 도달 되리라는 짐작을 가능케 한다.

3.3 자기상관계수 및 Strouhal 수에 대한 자유흐름 난류 강도의 영향

Fig. 17은 case 1, case 2, case 4의 경우 $x/d=5.5$ 에서 y 방향에 대한 u 및 v 변동 성분의 자기상

관계수 $R(r)$ 의 분포도를 나타내고 있다. Fig. 17에서 알 수 있는 바와 같이 후류 중심에서는 자유흐름 난류와 관계없이 v 변동 성분은 강한 주기성을 나타내며, $y/d=1.0$ 의 위치에서도 뚜렷한 주기성이 존재한다. 그러나 $y/d=2.0$ 의 위치에서는 자유흐름 난류가 없을경우 강한 주기성을 나타내지만 자유흐름 난류의 증가와 함에 따라 주기성이 일그러지며, Case 4의 경우 상관관계가 거의 없게 되어 이는 자유흐름 난류의 영향은 강하게 받고 있음

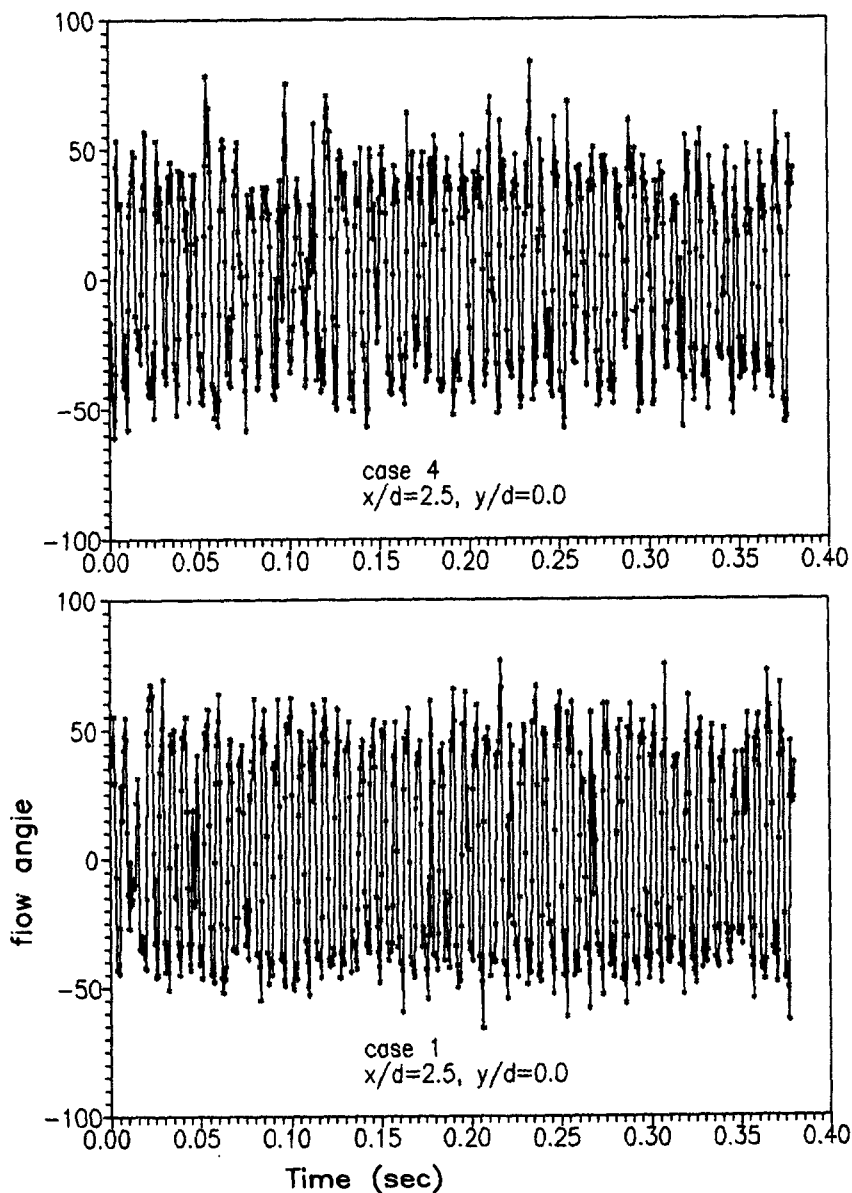


Fig. 11 Compare of instantaneous flow angle variation with SFP

을 뜻한다. 즉 자유흐름 난류강도가 증가함에 따라 대규모 조직적인 와가 빨리 와해되어 entrainment 현상이 줄어들고 따라서 상관관계가 약해진다고 볼 수 있다.

Fig. 18은 energy spectrum 대 strouhal number 를 나타내고 있다. 자유흐름 난류 강도에 따른 규칙적인 와의 유출 주파수 변화는 Fig. 18에서 보는 바와 같이 자유흐름 난류 강도가 증가 할수록

strouhal 수가 작아짐을 알 수 있다. 동일한 Reynolds 수에서 자유흐름 난류 강도가 각각 0.8, 7.3, 14.5% 일때 strouhal 수는 각각 0.202, 0.179, 0.174 였다. 이와 같이 자유흐름 난류 강도가 증가 할수록 조직적인 와의 유출 주기가 늦어져 strouhal 수가 작아지는 원인은 자유흐름 난류 강도의 증가로인해 원주 표면에서의 박리가 지연되는 것과, 후류의 확산속도가 약해지면서(Fig. 16) 유

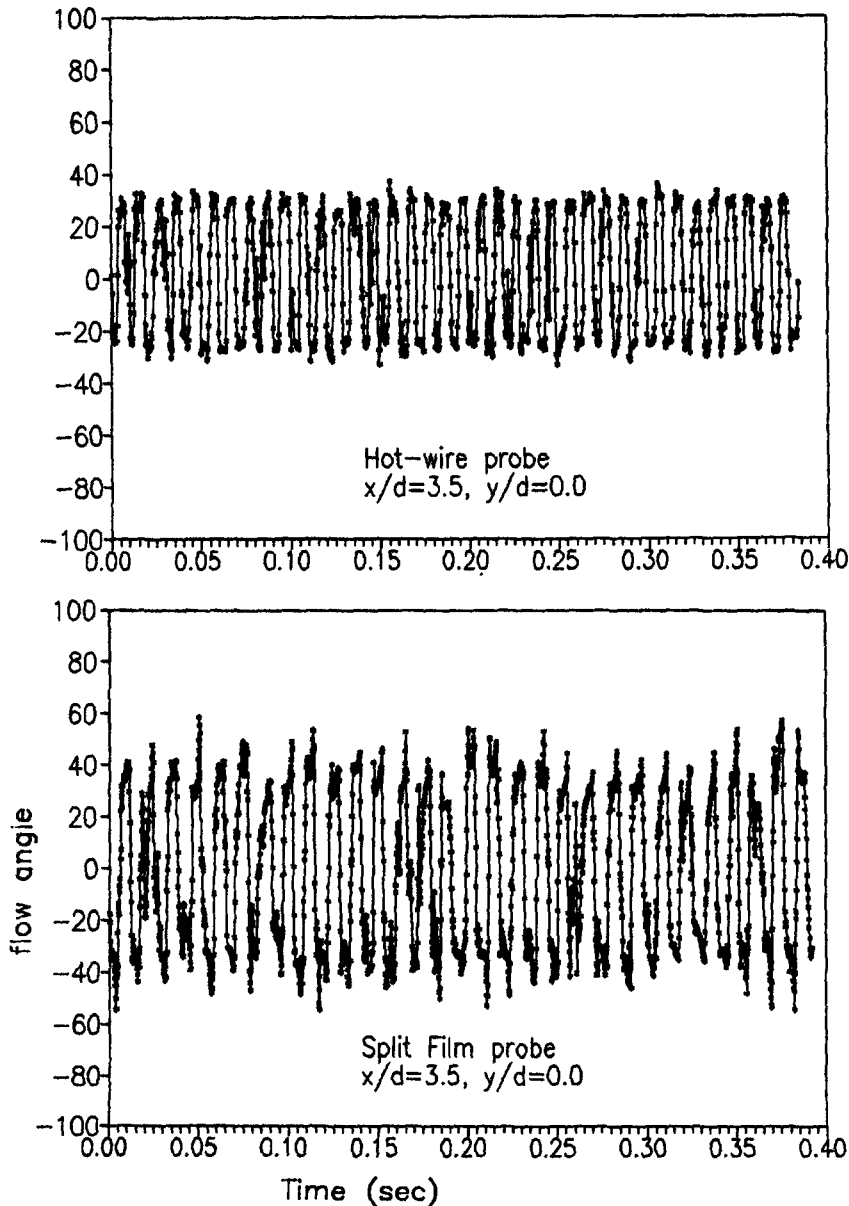


Fig. 12 Compare of instantaneous flow angle variation with SFP and Hot-wire probe

출되는 와의 entrainment가 줄어들고 전단층의 roll-up 현상을 억제하여 와의 성장 속도가 늦어져 와의 유출이 지연된다고 판단된다.

4. 결론

2차원 원주의 근접 후류에 미치는 자유흐름 난류

강도의 영향과 역류가 존재하는 부분에 대해 SFP에 의한 실험적 연구로 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 지금까지 난류의 실험에 주로 사용 되어온 X-형 열선 프로브로는 불가능했던 역류의 측정과 순간 유입각이 매우 크게 존재하고 있는 근접 후류 영역에서 SPF를 사용 함으로서 난류 측정을 비교

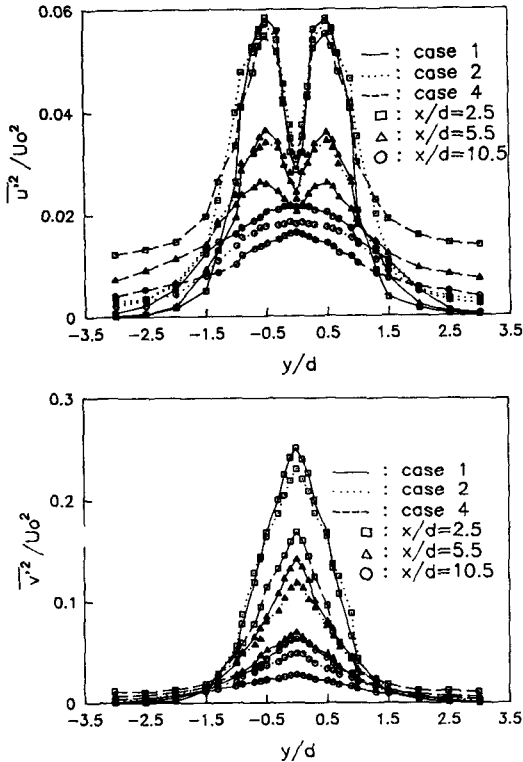


Fig. 13 (a) Distribution of the turbulent kinetic energy (u-fluctuation)
(b) Distribution of the turbulent kinetic energy (v-fluctuation)

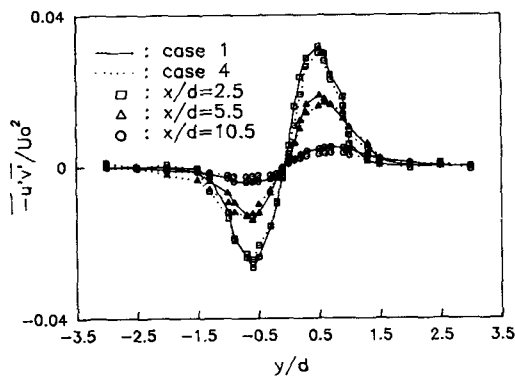


Fig. 14 Distribution of the turbulent shear stress

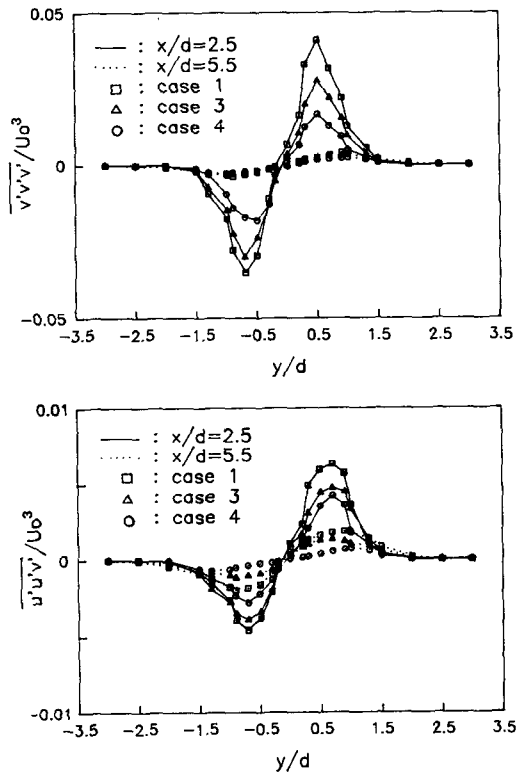


Fig. 15 (a) Distribution of the third order moments
(b) Distribution of the third order moments

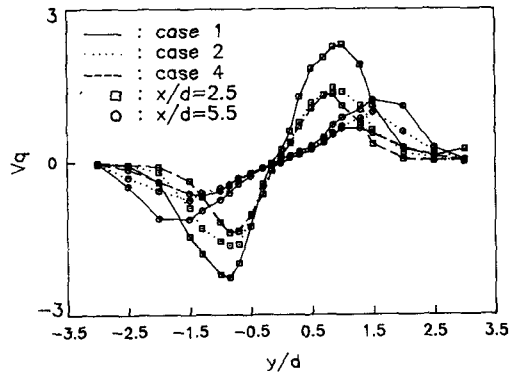


Fig. 16 Distribution of the diffusion velocity

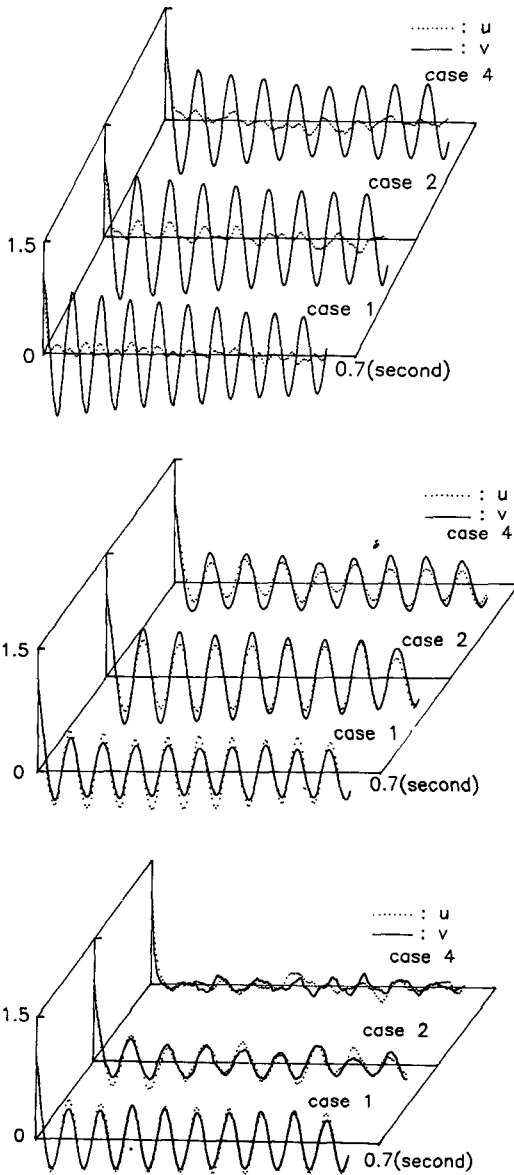


Fig. 17 (a) Compare of autocorrelation coefficient at $x/d=5.5, v/d=0.0$
 (b) Compare of autocorrelation coefficient at $x/d=5.5, y/d=1.0$
 (c) Compare of autocorrelation coefficient at $x/d=5.5, y/d=2.0$

적 정확하게 할 수 있었다.

(2) 자유흐름 난류 강도가 증가 할수록 같은 위치에서 속도 결손과 후류 반폭치가 증가하여, 평균 유동장의 폭이 넓어진다.

(3) 자유흐름 난류 강도가 증가 할수록 코히어런

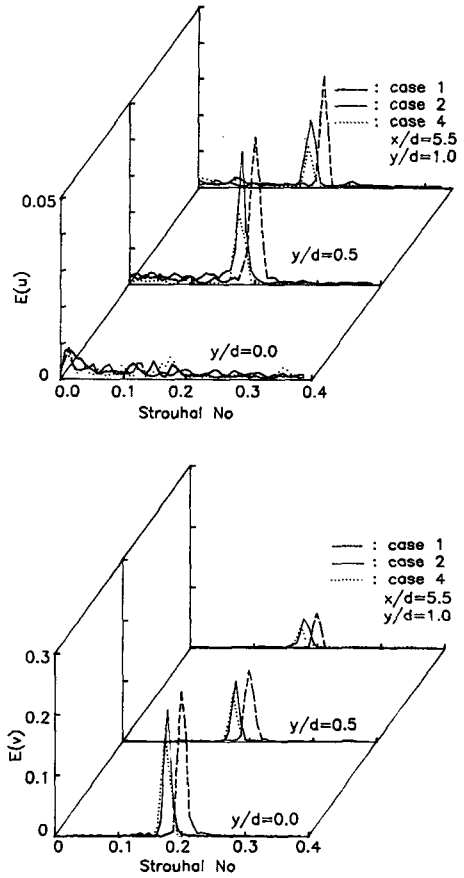


Fig. 18 (a) Compare of the energy spectrum vs. strouhal number
 (b) Compare of the energy spectrum vs. strouhal number

트와의 유출 주파수가 떨어짐과 동시에 조직적인 와가 빨리 와해되고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Bradshaw, P., 1978, "Turbulence : Topics in Applied Physics," Vol.12, pp.63~66.b
- (2) Dzung, L.S., 1970, "Flow Research in Blading," Elsevier Pub, Co. Amsterdam.
- (3) Tan-Atichat, J., Nagib H. M. and Loehrke, R. I., 1982 "Interaction of Free Stream Turbulence with Screens and Grids," J.Fluid Mech., Vol.114, pp.501~528.
- (4) Castro, I. P., 1984, "Effect of Free Stream Turbulence on Low Reynolds Number Boundary

- Layers", ASME J. Fluids Eng., Vol.109, pp.298~306.
- (5) Dziomba B., and Fiedler, H. E., 1985, "Effect of Initial Conditions on Two-Dimensional Free Shear Layers," J. Fluid Mech., Vol.152, pp.419~442.
- (6) Yasuhiro Suzuki and Masaru Kiya, 1985, "Effect of Free Stream Turbulence on Separated-Reattaching Flows for Different Angles of Separation," Bull. JSME, Vol.28, pp.1887~1892.
- (7) Yasuharu Nakamura and Yuji Ohya, 1984, "The Effect of Turbulence on the Mean Flow Past Two-Dimensional Rectangular Cylinders," J. Fluid Mech., Vol.149, pp.255~273.
- (8) Masaru Kiya, Yasuhiro Suzuki and Mikio Area, 1982, "A Contribution to The Free Stream Turbulence Effect on The Flow Past a Circular Cylinder," J. Fluid Mech., Vol.115, pp.151~164.
- (9) Surry, D., 1972, "Some Effect of Intense Turbulence on the Aerodynamics of a Circular Cylinder at a Subcritical Reynolds Number," J. Fluid Mech., Vol.52, pp.543~563.
- (10) Wells, M.R., 1978, "Application of Split Film Anemometry to Low Velocity, High Turbulence Intensity Flow."
- (11) Kyuro SASFKI, Masaru KIYA, "스프리트 필름 로-프による逆流領域の亂流測定", JSME., Vol.51, pp.1615~1618, (昭 60-5).
- (12) 김경천, 최경현, 이석희, "난류 유동의 측정 및 분석을 위한 마이크로 컴퓨터 온라인 시스템의 개발," 부산대 공대 연구보고 제37집(1989).