

비정상 후류가 난류박리기포의 응집구조에 미치는 영향

전 세 종* · 성 형 진†

(2001년 11월 7일 접수, 2002년 7월 2일 심사완료)

Large-Scale Vortical Structure of Turbulent Separation Bubble Affected by Unsteady Wake

Sejong Chun and Hyung Jin Sung

Key Words : Wake Generator (후류 발생기), Separation Bubble (박리 기포), Large-Scale Vortical Structure (대형 와구조), Spatial Box Filtering (공간 필터링 기법)

Abstract

Large-scale vortical structure of a turbulent separation bubble affected by unsteady wake is essential to understand flow mechanisms in various fluid devices. A spoked-wheel type of wake generator provides unsteady wake, which modifies the turbulent separation bubble significantly by changing rotation directions and passing frequencies. A detailed mechanism of vortex shedding from the separation bubble with unsteady wake is analyzed by taking a conditional average with spatial box filtering, which spatially integrates measured signals at pre-determined wavelength. A convecting nature of the large-scale vortical structure is analyzed carefully. Spatial evolution of the large-scale vortical structure with frequency variance is also exemplified.

기호설명

CW : 시계방향 회전
 CCW : 반시계방향 회전
 H : 뭉툭한 물체의 절반두께, mm
 k : 난류 운동에너지, m^2/s^2
 Re_d : 원봉 레이놀즈 수, $U_\infty d/\nu$
 Re_H : 뭉툭한 물체 레이놀즈 수, $U_\infty H/\nu$
 St_H : 후류통과 스트로홀 수, $f_p H/U_\infty$
 U_G : 후류 유동속도, m/s
 U_x : 자유흐름 유속, m/s
 x_R : 재부착 길이, mm
 x : 유동 흐름방향 좌표, mm
 y : 벽면 수직방향 좌표, mm
 Φ : 교차 스펙트럼 (cross spectrum)

Γ : 응집도 (coherence)
 ρ : 교차 상관계수 (cross correlation)
 ξ : 유동 흐름방향 거리 간격, mm
 ζ : 벽면 수직방향 거리 간격, mm
 ϕ : 위상각
 τ : 시간 차이, s
 ω : 와도(vorticity), m^2/s

1. 서론

난류박리기포는 대부분의 유동에서 발생하며 운송체에서 발생하는 항력과 유동 소음의 주된 원인이다. 난류박리기포는 유동 재순환 영역과, 재부착 영역, 재발달 영역의 세 부분으로 크게 나뉘며, 유동 박리영역에서부터 발생하는 전단면을 따라 와구조들이 생성, 병합, 발달한다. 와구조들은 박리기포 내에서 대형와구조로 성장하며, 대형와구조가 재부착된 이후 난류박리기포로부터 외출된다. 난류박리기포에서 발생하는 항력과 소음은 대형와구조의 거동과 밀접한 관련이 있으며, 대형와구조를 이해하고 제어하기 위한 많은 방법들이 제

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

TEL : (042) 869-3027

FAX : (042) 869-5027

안되어 왔다.

문헌연구에 의하면, 뭉툭한 물체(blunt body) 주위에 형성되는 난류박리유동으로부터 응집구조를 추출하기 위해 많은 연구들이 수행되어 왔다. Kiya와 Sasaki⁽¹⁾는 뭉툭한 물체 주위 난류박리유동을 열선 풍속계를 이용하여 자세히 측정하였고, 시간 통계량 및 교차 상관관계수, 주파수를 해석하였다. Cherry 등⁽²⁾은 뭉툭한 물체의 여러 파라미터를 변화시켜가며 압력, 유속 측정 및 유동가시화를 전개하였으며, 압력-속도 동시측정에 의한 교차 상관관계수로부터 유동구조를 해석하였다. Kiya와 Sasaki⁽³⁾는 본격적으로 압력과 속도를 동시 측정하여 난류박리유동으로부터 응집구조를 추출하였으며, 대형와구조가 머리핀 와동(hairpin vortex)으로 대표되는 3차원 구조임을 밝혔다. 이들 연구들은 Taylor의 frozen field hypothesis를 이용하여 측정된 압력과 속도에 관한 시계열 신호를 공간적인 분포로 변환함으로써 응집구조를 해석하였다. Lee와 Sung⁽⁴⁾은 마이크로폰 배열과 열선 풍속계를 이용하여 후향계단 주위 난류박리유동을 보다 조직적으로 측정하였고, 박리초기영역에서 재부착 영역에 걸쳐 응집구조를 추출하였다.

응집구조를 추출하기 위해서는 우선 기준 신호가 마련되어야 하고, 기준 신호와 유동장을 동시에 측정한 후, 기준 신호를 이용하여 조건부 평균을 구하여야 한다. Lee와 Sung⁽⁴⁾은 기준 신호로 유동 벽면에 부착된 마이크로폰 배열을 이용하였고, 공간 필터링 기법(spatial box filtering)을 도입하여 난류박리유동을 대표하는 벽면 압력 신호를 만들었다. Lee와 Sung⁽⁴⁾이 마이크로폰 배열 신호를 기준 신호로 선정한 것은 Lee와 Sung⁽⁵⁾의 기존 연구에서 벽면 압력분포가 난류박리유동의 응집구조를 잘 나타냄을 밝혔기 때문이다.

난류박리유동을 효과적으로 제어하기 위해서는 박리점 주위에 섭동을 가하여 박리 전단층에서부터 생성되는 대형와구조의 성장과 합병을 촉진하여야 한다. Chun과 Sung⁽⁶⁾은 후향계단 주위 유동에 국소 음향가진을 가하는 실험을 수행하여 난류박리기포의 크기를 30% 이상 감소시켰다. 국소가진에 의해 박리 초기 영역에서 난류강도가 증가하였고, 와구조의 생성과 성장, 병합이 촉진되었다.⁽⁶⁾ 난류박리기포의 상류에 주기적으로 비정상 후류를 유입하면, 국소 음향가진과 마찬가지로 대형와구조의 생성과 성장이 촉진된다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 뭉툭한 물체 주위에 형성되는 난류박리유동에 주기적으로 비정상 후류를 유입하고, 비정상 후류가 난류박리유동의 응집구조에 대해 미치는 제어효과를 실험적으로 고찰하고자 한다. 난류박리유동에서 응집구조를 추출하기 위해

Lee와 Sung⁽⁴⁾이 제안한 압력-속도 동시 측정방법을 채택하고, 공간 필터링 기법을 이용한 조건부 평균 기법을 적용하여 유동구조를 해석하였다. 비정상 후류를 주기적으로 생성하기 위해 후류 발생기를 시험체의 상류에 설치하였다. 후류 발생기의 회전 방향에 따른 효과를 고찰하기 위해 회전 방향을 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)으로 나누고 각각의 경우에 대해 실험하였다. 압력-속도 동시 측정 결과를 가지고 유동장을 재구성하였으며, 비정상 후류를 생성하기 위한 후류 발생기의 회전 방향이 난류박리기포에 미치는 영향을 자세히 관찰하였다. 압력-속도의 교차 상관관계수로부터 응집도를 정의하였으며, 비정상 후류에 의해 대형와구조에 포함된 주파수 성분이 유동방향을 따라 어떻게 변화하는지 살펴보았다.

2. 실험장치와 실험방법

2.1 풍동 및 실험장치

주기적으로 생성되는 후류 유동이 난류박리기포에 미치는 영향을 실험하기 위하여, Fig. 1에 제시된 대로 후류 발생기(wake generator)와 뭉툭한 물체(blunt body)를 설치하였다.⁽⁷⁾ 상류에서 U_∞ 의 속도로 유동이 유입되면, 후류 발생기에 의해 입구 유동이 주기적으로 교란된다. 이 때, 원봉 주위로부터 후류 유동이 발생하며, 뭉툭한 물체 주위 난류박리기포에 주기적으로 영향을 미친다. 후류 발생기에는 모두 24개의 원봉이 설치되었고, 시계방향과 반시계 방향으로 회전하면서 후류 유동이 난류박리기포에 미치는 영향을 관찰하였다.⁽⁷⁾ 특히 뭉툭한 물체 벽면에 마이크로폰 배열을 설치하여 벽면 압력분포를 측정하였다.

2.2 실험방법

속도 측정으로부터 난류박리기포의 대형와구조를 추출하기 위하여, 벽면 압력분포와 유속을 동시에 측정하였다. 이 방법은 Lee와 Sung⁽⁴⁾이 제시한 방법으로, 열선풍속계를 이용하여 측정된 유동장을 동기시키기 위해 벽면 압력분포를 연관짓는 방법이다. 난류박리기포로부터 생성되는 대형와구조에 의해 발생하는 압력분포를 계속하고, 대형와구조가 측정 센서 위를 지나가는 순간을 조건적으로 평균하면, 열선풍속계로 측정된 유동장을 동기시키게 된다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 벽면 압력분포 측정을 위해 마이크로폰 배열(TMS160A, (주)소리텔)과 차동증폭기(PCB 514A, Piezotronics, Inc.)를 이용하였다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 뭉툭한 물체 내부에 마이크로폰을 설치하였고, 박리점에서부터 0.8H 간격으로

로 11 개 위치에서 압력분포를 측정하였다. 단, H 는 뭉툭한 물체의 절반 두께로 15mm 이다. 유속 측정을 위해 스플릿 필름(TSI1288, TSI)과 열선광속계(IFA300, TSI)를 사용하였다. 수직방향 속도성분을 측정하기 위하여 앵글 어댑터(TSI1157, TSI)를 부착하였고, 흐름방향 속도성분 측정처럼 역흐름을 정확하게 측정하고자 하였다. 압력분포와 유속을 동시 측정하기 위해 A/D 보드(DT2839, Data Translations, Inc.)를 이용하였고, 모두 14 채널의 신호들을 5kHz 의 추출주파수로 측정하였다.

비정상 후류의 위상차에 따른 영향을 관찰하기 위해 위상 평균 기법과 조건부 평균 기법을 모두 사용하였다.^(4,7) 위상 평균을 위해 광학 타코 미터(HT5200, Ono Sokki, Inc.)를 이용하였고 후류 발생기의 매 1 회전마다 펄스를 발생시켜 측정 신호의 위상을 동기시켰다. 조건부 평균을 취하기 위해 측정 신호들을 후처리(post-processing) 하였고 응용 소프트웨어(LabVIEW)를 이용하였다.

2.3 실험조건

본 연구에서는 다음과 같은 실험조건을 주었다.

$$Re_H = \frac{U_\infty H}{\nu} = 560 \quad (1)$$

$$Re_d = \frac{U_\infty d}{\nu} = 375 \quad (2)$$

$$St_H = \frac{f_p H}{U_\infty} = 0.2 \quad (3)$$

Re_H 는 뭉툭한 물체에 대한 Reynolds 수이다. H 는 뭉툭한 물체의 절반 두께를 나타내고, 자유흐름유속은 $U_\infty = 6.0\text{m/s}$ 이다. Re_d 는 후류 유동에 대한 레이놀즈 수로서, d 는 10mm 의 원봉 지름을 나타낸다. St_H 는 Strouhal 수이며 무차원화된 주파수를 정의한다. St_H 는 H 를 기준하였는데, 이는 난류박리기포의 주파수 특성에 대한 기존 연구들과 일관성을 보이기 위함이다.⁽⁶⁻⁸⁾ St_H 에서 $f_p (= \omega / 2\pi)$ 는 후류 통과 주파수이다. 원봉의 회전속도(ω)는 타코미터의 회전속도에 의해 결정되고, 원봉의 수(n)는 24 개이다. 본 연구와 동일한 유동 조건에 대해 Chun 과 Sung⁽⁷⁾이 연구한 바 있다. 그들에 의하면, 난류박리기포의 재부착 길이(x_R)는 후류 발생기를 설치하지 않을 때($St_H = 0$) $x_R/H = 7$, 후류 발생기를 시계방향으로 회전할 때(CW) $x_R/H = 4$, 반시계 방향으로 회전할 때(CCW) $x_R/H = 2.4$ 이다.

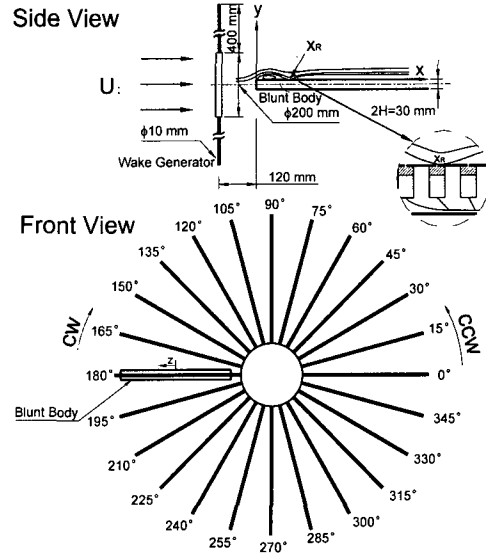


Fig. 1 Experimental setup

3. 실험 결과 및 토의

3.1 위상 평균 유동장

비정상 후류가 난류박리기포의 유동구조에 미치는 영향을 고찰하기 위해 먼저 위상 평균을 이용하였다. 후류 발생기에 부착된 원봉 한 개가 난류박리기포를 지나가는 순간을 0° 부터 12.5° 까지 2.5° 간격으로 위상 평균하였으며, Fig. 2 에 나타내었다. 후류 발생기가 시계방향(CW)으로 회전할 때 0° 에서 후류 유동은 크게 두 구조로 나뉜다. 이는 후류와 난류박리기포의 상호작용에 의한 것으로 난류박리기포 내에 강한 와구조가 형성된다. 0° 에서 관찰되는 후류 구조는 7.5° 일 때 재부착점($x_R/H = 4$)을 지나면서 하나의 구조로 합쳐진다. 후류 발생기가 반시계방향(CCW)으로 회전하면, 0° 의 박리 초기 영역에서 거대한 비정상 후류 구조가 나타난다. 이 구조는 5° 일 때 재부착점($x_R/H = 2.4$)을 지나가면서 점차로 쇠퇴한다. CW 와 비교하면 CCW 일 때 비정상 후류와 난류박리유동의 혼합이 더 잘 일어나며, 뭉툭한 물체 주위 박리점에서 난류강도가 증가하는 원인이다.⁽⁷⁾ CW 와 CCW 의 차이는 Chun 과 Sung⁽⁷⁾이 제시한 난류 강도 분포와 응집도(coherence)의 결과와 일관된 경향을 보인다.

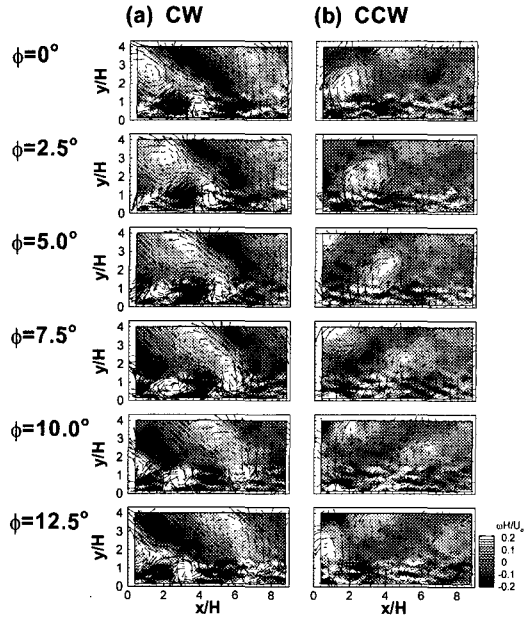


Fig. 2 Phase-averaged velocity field at $Re_d=375$ and $St_H=0.20$

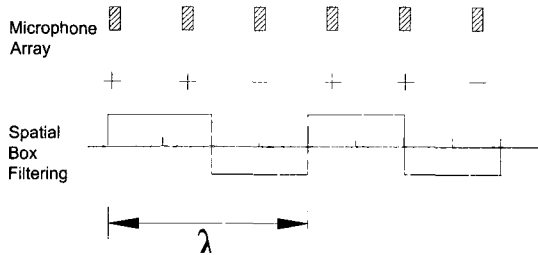


Fig. 3 Spatial box filtering

3.2 조건부 평균

3.2.1 공간 필터링 기법

공간 필터링 기법(spatial box filtering, SBF)은 벽면 압력분포에 가장 지배적인 파수(wavenumber) 성분을 추출하기 위해 공간적으로 필터링하는 기법이다.⁽⁴⁾ 공간 필터링 기법은 기초적인 이론에 관해 Blake⁽⁹⁾가 소개한 바 있으며, Lee 와 Sung⁽⁴⁾이 난류박리유동에서 마이크로폰 배열을 이용하여 벽면 압력분포 측정에 적용한 바 있다.

공간 필터링 기법은 측정된 압력분포에, 파장 길이가 압력분포의 특성길이와 같고 크기가 1 인 필터링 함수를 적분하여 구한다.⁽⁴⁾

$$\tilde{p} = \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^{[kH/\lambda]} p_k \quad (4)$$

단, N 은 마이크로폰 배열의 센서 개수, p_k 는 k 번째 마이크로폰에서 측정된 압력 신호, λ 는 압력 분포에 지배적인 파장 길이이고, H 는 λ 를 무차원

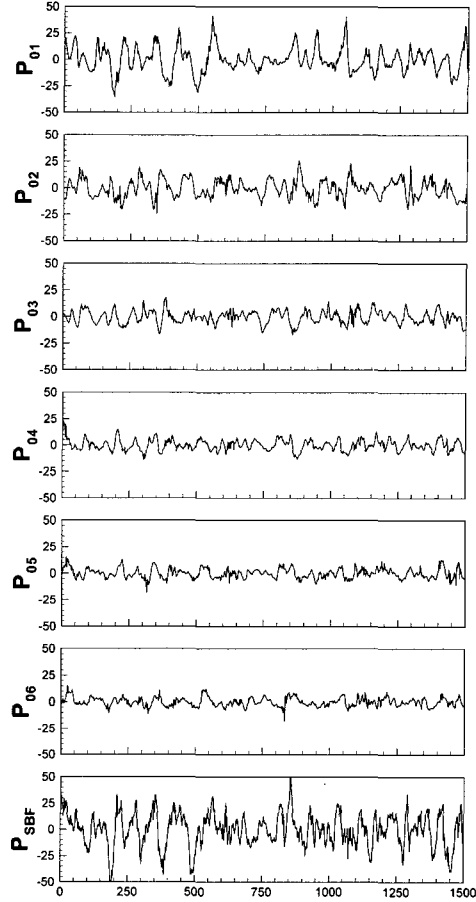


Fig. 4 Examples of pressure signals and P_{SBF}

화하기 위한 파라미터이다.⁽⁴⁾ λ 는 센서 개수 N 과 센서 간격 Δx 에 대한 함수로 $\lambda = \frac{N}{2} \Delta x$ 이다. 본 연구에서 $N=10$ ($St=0$, CW) 또는 $N=6$ (CCW)으로 정의하였고, Δx 는 $0.8H$, λ 는 $4H$ ($St=0$, CW) 또는 $2.4H$ (CCW)이다.

공간 필터링 기법의 적용 예를 보이기 위해 $N=6$ 일 때 측정된 벽면 압력분포와 공간 적분한 압력 신호(P_{SBF})를 Fig. 4 에 나타내었다. $P_1 \sim P_6$ 은 박리점에서부터 $0.8H$ 간격으로 측정된 압력 신호이다. P_1 은 $x/H=0.8$ 에서 측정된 압력 신호로서 다른 위치보다 압력변동레벨이 높다. 높은 압력변동레벨은 측정 위치에서 큰 와도를 갖는 대형와구조가 지나가는 것을 의미한다. P_1 에서 P_6 으로 갈수록 압력변동레벨이 낮아지는데, 이는 대형와구조가 흐름방향으로 공간 발달하면서 와구조의 크기가 증가하는 반면 와도는 작아지기 때문이다. P_{SBF} 는 $P_1 \sim P_6$ 의 압력분포를 공간 필터링한 것으로, P_{SBF} 의 압력변동레벨은 대형와구조가 재부착점(x_R)을 지나가는 순간을 의미한다. P_1 과 P_{SBF} 를 비교하

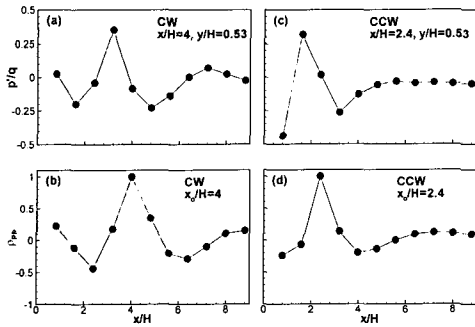


Fig. 5 Streamwise scale of pressure fluctuations. (CW) (a) p'/q (b) ρ_{pp} (CCW) (c) p'/q (d) ρ_{pp}

면, P_{SBF} 가 더 크고, 더 규칙적인 압력변동을 보여 준다. P_{SBF} 에 나타나는 압력변동의 주기는 대형와구조의 와홀림 주기와 일치하는데, 이는 압력구조에 지배적인 파장길이 λ 를 가지고 필터링함으로써 압력변동의 주기성이 증폭되었기 때문이다.

벽면 압력구조의 파장길이 λ 는 압력분포에 대한 교차 상관계수나 조건부 평균된 압력변동량을 측정하여 구할 수 있다.⁽⁴⁾ 교차 상관계수는 재부착점을 중심으로 흐름방향을 따라 다음과 같이 구한다.

$$\rho_{pp}(x,0,\tau) = \langle p(x_R,0,0)p(x_R+x,0,\tau) \rangle / p_{rms}^2 \quad (5)$$

단, τ 는 시간차이로서 계산 편의를 위해 $\tau=0$ 으로 놓았다. CW와 CCW의 두 가지 경우에 대해 교차 상관계수를 구한 결과를 Fig. 5의 (b)와 (d)에 나타내었다. p'/q 는 조건부 평균된 압력변동량으로 대형와구조가 벽면에 부딪치는 순간의 압력변동량이다.

$$p'(x)/q = \frac{\langle p'(x) \rangle}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \Big|_{v'=-2.5v'_{rms}} \quad (6)$$

식 (6)에서 $v'=-2.5v'_{rms}$ 라는 조건은 대형와구조가 벽면에 부딪치는 순간을 구체화하기 위한 조건이다. v' 의 측정 위치는 $(x/H, y/H)=(x_R/H, 0.53)$ 이다. Fig. 5에 도시한 ρ_{pp} 의 분포와 p'/q 의 분포는 서로 비슷한 경향을 보여주고 있으며, CW일 때 $\lambda=4H$, CCW일 때 $\lambda=2.4H$ 이다.

3.2.2 유동장 재구성

조건부 평균과 공간 필터링 기법을 활용하여 유동장을 재구성하면 대형와구조가 난류박리기포로부터 와홀림되는 구조를 관찰할 수 있다. Fig. 6은 후류 발생기를 설치하지 않을 때($St=0$), 와홀림 크기 T 에 대해 $1/4$ 주기씩 나누어 조건부 평균된 유동장과 와도, 난류에너지 분포를 보여준다. 와홀림 주기는 Chun과 Sung⁽⁷⁾이 밝힌 $St=0.09$ 에

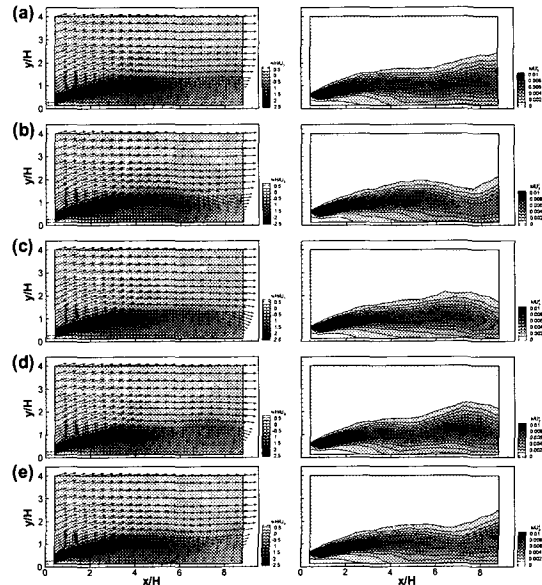


Fig. 6 Conditionally-averaged vector, vorticity and turbulent intensity at $St=0$. (a) $\tau=-T/2$ (b) $\tau=-T/4$ (c) $\tau=0$ (d) $\tau=T/4$ and (e) $\tau=T/2$

해당하는 값으로, $TU_\infty/H=11.11$ 로 정의하였다.⁽⁷⁾ 유동장을 재구성할 때, 속도 측정의 매 순간마다 $0 \leq x/H \leq 8.8$ 의 벽면 압력분포로부터 P_{SBF} 를 얻고, 대형와구조가 재부착점을 지나가는 조건을 정의하여 조건적으로 유동장을 평균하였다.

$$|P_{SBF}| \geq 1.8(P_{SBF})_{rms} \quad (7)$$

재구성된 유동장의 유동구조를 살펴보면, 시간 흐름에 따라 대형와구조가 난류박리기포로부터 와홀림되는 과정을 관찰할 수 있다. 대형와구조의 거동은 Fig. 6의 왼편에 제시된 와도와 오른편에 제시된 난류 에너지가 대류되는 모습으로 알 수 있다. 와홀림의 매순간마다 최대 와도의 위치와 최대 난류 에너지의 위치가 서로 일치하며, 이로부터 대형와구조는 난류박리기포에 축적된 난류 에너지를 상당량 가지고 대류하는 것을 알 수 있다.

후류 유동이 주기적으로 난류박리유동에 유입되면 유동구조가 변화하는데, 조건부 평균과 공간 필터링 기법을 이용하여 유동장을 재구성하면 변화된 유동 구조를 시각적으로 관찰할 수 있다. Fig. 7은 CW일 때 후류 유동에 의해 유동장이 변화된 모습을 보여준다. 후류 발생기를 이용하여 난류박리유동을 가진다면 후류 통과 주파수(St_H)가 지배적인 주파수 성분이 되므로, 와홀림 주기가 아닌 후류 통과 주기를 T 로 정의하였다. $St=0$ 과

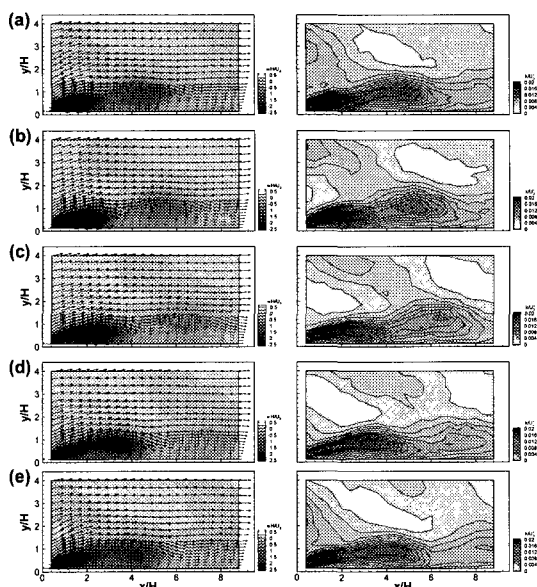


Fig. 7 Conditionally-averaged vector, vorticity and turbulent intensity for CW. (a) $\tau=-T/2$ (b) $\tau=-T/4$ (c) $\tau=0$ (d) $\tau=T/4$ and (e) $\tau=T/2$

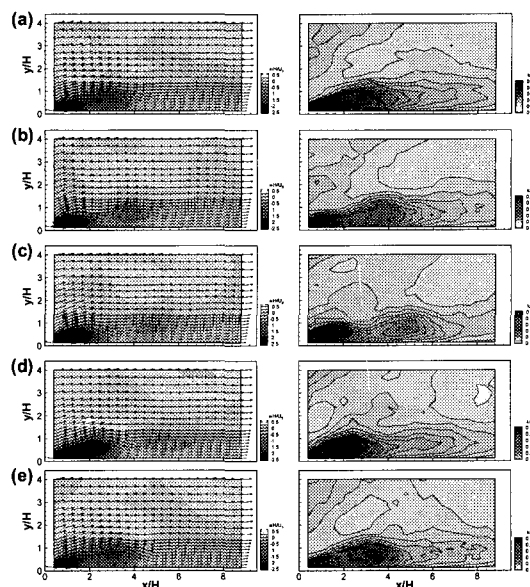


Fig. 8 Conditionally-averaged vector, vorticity and turbulent intensity for CCW. (a) $\tau=-T/2$ (b) $\tau=-T/4$ (c) $\tau=0$ (d) $\tau=T/4$ and (e) $\tau=T/2$

비교하면 대형와구조는 더욱 뚜렷해지고, 난류박리기포의 크기는 줄어든다. 비정상 후류의 주기적 가진에 의해 줄어든 난류박리기포는 항력의 감소를 의미한다. 그러나, 유동장에 지배적인 파장 길이를 측정하면, ρ_{pp} 와 p'/q 로부터, CW와 $St=0$ 모두 $4H$ 로 동일하였다. 이는 CW가 후류의 주기적 유입에 의해 난류박리기포의 크기를 변화시키지만, 서로 이웃한 대형와구조의 거리까지 변화시키지는 않음을 의미한다.

CCW일 때, 비정상 후류는 대형 와구조를 효과적으로 제어할 뿐만 아니라, 서로 이웃한 대형와구조의 거리도 단축한다. CCW의 영향을 재구성한 유동장이 그림 8에 도시되어 있다. Fig. 7의 CW와 비교하면, 유동 구조가 동일하면서도 전체적인 크기는 줄어든 모습을 보인다. 난류박리기포를 대표하는 시간평균된 재부착길이(x_R)를 비교하면, CW일 때 $x_R=4H$ 에서 CCW일 때 $x_R=2.4H$ 로 40% 감소하였다. 난류 에너지 k'/U_∞^2 를 관찰하여도 인접한 대형와구조의 간격이 CW보다 줄어든 것을 알 수 있다. 대형와구조의 간격은 Fig. 5에 나타난 ρ_{pp} 와 p'/q 를 의미하고, CW일 때 $\rho_{pp}=4H$ 에서 CCW일 때 $\rho_{pp}=2.4H$ 로 40% 줄어들었다. 그러므로, 주기적으로 비정상 후류가 유입되면 대형와구조의 간격이 난류박리기포의 크기와 유사하며, CCW가 난류박리유동구조를 효과적으로 변화시킨 것을 알 수 있다.

3.3 응집도

동일한 후류통과주파수(St_H)에서 CW와 CCW가 난류박리기포에 미치는 영향이 다른 이유를 고찰하기 위해 응집도를 구하여 유동흐름 방향에 따라 주파수 성분이 어떻게 변화하는지를 비교하였다. 응집도는 압력-속도 교차 상관계수를 푸리에 변환하여 구하였고, 유동흐름방향과 유동수직방향에 대해 Γ_{pu} 와 Γ_{pv} 를 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$\Gamma_{pu}(\xi, \zeta, \omega; x_o, y_o) = \frac{|\Phi_{pu}(\xi, \omega; x_o, y_o)|}{[\Phi_p(\omega; x_o, y_o)\Phi_u(\omega; x_o + \xi, y_o + \zeta)]^{1/2}} \quad (8)$$

$$\Gamma_{pv}(\xi, \zeta, \omega; x_o, y_o) = \frac{|\Phi_{pv}(\xi, \omega; x_o, y_o)|}{[\Phi_p(\omega; x_o, y_o)\Phi_v(\omega; x_o + \xi, y_o + \zeta)]^{1/2}} \quad (9)$$

단, $\Phi_{pu}(\xi, \zeta, \omega; x_o, y_o)$ 와 $\Phi_{pv}(\xi, \zeta, \omega; x_o, y_o)$ 는 압력-속도 교차 스펙트럼으로 정의된다.

$$\Phi_{pu}(\xi, \zeta, \omega; x_o, y_o) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{pu}(\xi, \zeta, \tau; x_o, y_o) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

$$\Phi_{pv}(\xi, \zeta, \omega; x_o, y_o) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{pv}(\xi, \zeta, \tau; x_o, y_o) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (11)$$

여기서, ξ 는 유동흐름방향 거리차, ζ 는 유동수직방향 거리차이고, τ 는 시간차이다.

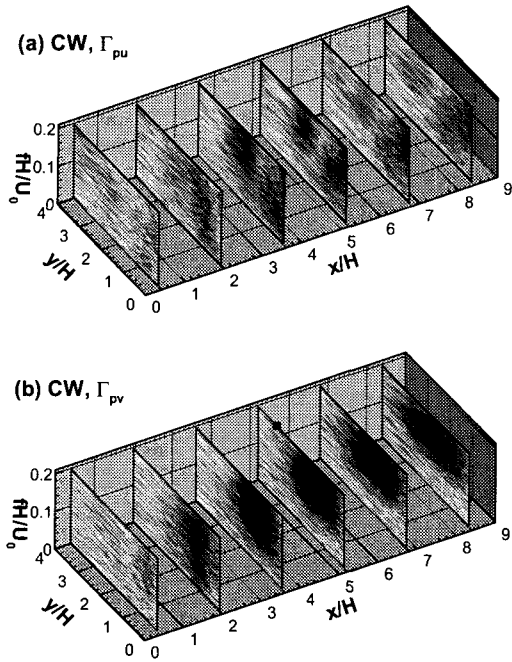


Fig. 9 Coherence for CW. (a) Γ_{pu} (b) Γ_{pv}

CW 와 CCW 에 대해 응집도를 공간적으로 나타내면, 유동흐름방향을 따라 대형와구조의 주파수 성분이 변하는 것을 관찰할 수 있다. CW 를 도시한 Fig. 9 의 (a)를 살펴보면, 모든 주파수에 걸쳐 높은 응집도를 가진 영역이 난류박리기포의 재순환 영역($x/H=2$)에 나타난다. 높은 응집영역은 재부착점(x_R)에서 두 영역으로 나뉘고, 이 중 $2 \leq y/H \leq 3$ 의 영역은 감소한다. $2 \leq y/H \leq 3$ 은 주기적으로 유입되는 후류 유동이 지배적인 구간이다. 반면, $0 \leq y/H \leq 2$ 은 난류박리기포로부터 생성되는 대형와구조가 존재하는 구간으로 유동 재부착 이후에도 응집영역이 뚜렷하다. Fig. 9 의 (b)에서 Γ_{pv} 를 관찰하면 유동 재순환 영역에서 응집영역은 모든 주파수 성분을 가지지만, 재부착점을 지나면서 응집영역은 벽면 수직방향으로 확산하고, 주파수 성분이 변화하여 $0.1 \leq fH/U_\infty \leq 0.2$ 의 범위만을 나타낸다. 이는 난류박리기포에 존재하던 여러 크기의 와구조들이 와흩어지면서 난류박리기포 외부의 비정상 후류에 흡수됨을 의미한다.

Fig. 10 의 (a)에서 Γ_{pu} 를 관찰하면, CCW 일 때 높은 응집영역은 유동 재순환 영역($x/H=2$)에서 서 부분으로 나뉜다. 세 영역의 응집구조 중 유동 재순환 영역에 속하는 구조는 $0 \leq y/H \leq 2$ 에 위치한 것으로 유동 재부착 이후에 감소된다. 오히려 $y/H \geq 3$

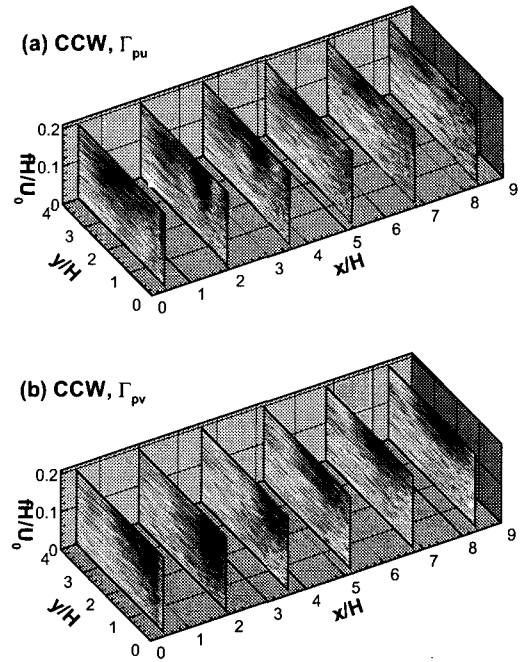


Fig. 10 Coherence for CCW. (a) Γ_{pu} (b) Γ_{pv}

인 후류유동 영역에서 관찰되는 응집영역이 더 뚜렷한데, 이러한 구조는 CW 에서 관찰된 것과 대조적이다. Fig. 10 의 (b)에 도시된 Γ_{pv} 를 관찰하면, 유동 흐름방향에 따라 Γ_{pv} 가 감소하는 것을 알 수 있다. CW 처럼 유동 재부착 이후 응집영역은 벽면 수직방향으로 확산하면서 제한적인 주파수 영역을 보인다.

4. 결론

주기적으로 유입되는 비정상 후류 유동이 뭉뚱한 물체 주위 난류박리기포에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 주기적 후류가 난류박리유동 구조에 미치는 영향을 실험하기 위해, 벽면 압력분포와 속도를 동시 측정하였으며, 조건부 평균 기법을 도입하여 유동장을 재구성하였다. 벽면 압력분포로부터 조건부 신호를 추출하기 위해 공간 필터링 기법을 이용하였고, 대형와구조가 재부착점을 통과하는 시점과 일치하는 조건부 신호를 추출하였다. 비정상 후류 유동이 난류박리기포에 미치는 영향을 자세히 조사하기 위해 후류 발생기의 회전방향을 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)의 두 가지 방향으로 나누었고, 후류 발생기를 설치하지 않은 경우($St=0$)와 비교하였다.

$St=0$ 일 때 재구성한 유동장은 동일한 실험조건에서 유동가시화 한 실험 결과들과 잘 일치하였고, 속도 분포와 난류 에너지 분포를 정량적으로 보여 주었다. CW 일 때, 주기적으로 유입되는 후류 유동에 의해 난류박리유동 구조가 변화하는 것을 시각적으로 확인할 수 있었다. CW 일 때 난류박리기포의 크기는 줄어들지만, ρ_{pp} 와 p'/q 로부터 대형와구조 간의 거리는 그대로 유지됨을 알 수 있었다. CCW 일 때는 CW 보다 난류박리기포가 40% 줄어든 것을 관찰하였고, 대형와구조 사이의 거리도 그에 비례하여 줄어들었다. 이로 미루어볼 때, 외부 가진이 없으면 난류박리기포에 대형와구조가 하나 이상 존재할 수 있는 공간이 생기지만, 외부 가진이 주어지면 난류박리기포의 크기와 대형와구조 사이의 거리가 동일해지므로, 난류박리기포에는 대형와구조가 하나 이상 존재할 수 없음을 알 수 있었다.

CW 와 CCW 의 차이를 보다 자세히 관찰하기 위하여 응집도를 측정하였고, 박리유동에서 대형와구조가 가지고 있는 주파수 성분을 공간적으로 나타내었다. CCW 는 난류박리기포와 후류 유동이 인접한 지역에 높은 응집영역을 나타내었고, CW 보다 복잡한 응집구조를 보여주었다. 이는 CCW 일 때 후류 유동과 난류박리기포 사이의 상호작용이 CW 보다 더 활발하기 때문인 것으로 사료된다. CW 와 CCW 에서는 공통적으로 유동 재부착 이후 대형와구조가 전 공간에 확산하면서 후류유동 주파수 성분을 갖는 주파수 변조 현상을 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업

에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kiya, M. and Sasaki, K., 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 137, pp. 83~113.
- (2) Cherry, N.J., Hillier, R. and Latour, M.E.M.P., 1984, "Unsteady Measurements in a Separated and Reattaching Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 144, pp.13~46.
- (3) Kiya, M. and Sasaki, K., 1985, "Structure of Large-Scale Vortices and Unsteady Reverse Flow in the Reattaching Zone of a Turbulent Separation Bubble," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 154, pp. 463~491.
- (4) Lee, I. and Sung, H.J., 2001, "Multipoint Measurement of Wall Pressure Fluctuations in a Separated and Reattaching Flow over a Backward-Facing Step," *Turbulence and Shear Flow Phenomena*, June 27~29, KTH, Stockholm, pp. 411~416.
- (5) Lee, I. and Sung, H.J., 2000, "Cross-Spectral Characteristics of Wall Pressure Fluctuations in Flows over a Backward-Facing Step," *Trans. of the KSME*, Series B, Vol. 24, pp. 280~287.
- (6) Chun, K.B. and Sung, H.J., 1996, "Control of Turbulent Separated Flow over a Backward-Facing Step by Local Forcing," *Experiments in Fluids*, Vol. 21, pp. 417~426.
- (7) Chun, S. and Sung, H.J., 2002, "Influence of Unsteady Wake on a Turbulent Separation Bubble," *Trans. of the KSME*, Series B, Vol. 26, pp. 353~361.
- (8) Hwang, K.S., Sung, H.J. and Hyun, J.M., 2001, "An Experimental Study of Large-Scale Vortices over a Blunt-Faced Flat Plate in Pulsating Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 30, pp. 202~213.
- (9) Blake, W.K., 1986, "Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration," Academic Press.