

후향계단 난류 박리재부착 유동에서의 대형와의 구조

안승광* · 이인원** · 성형진†

(2002년 2월 26일 접수, 2002년 10월 30일 심사완료)

Large-Scale Vortical Structure in Separated and Reattaching Turbulent flow over a Backward Facing Step

Seung Kwang Ahn, Inwon Lee and Hyung Jin Sung

Key Words : Large Scale Vortex (거대와류), Coherent Structure (응집구조), Backward Facing Step (후향계단), Spatial Box Filtering (공간박스필터)

Abstract

An experimental study was made of a large-scale vortical structure over a backward-facing step. The Reynolds number based on the step height was $Re_H = 33,000$. To recognize the large-scale vortex, three components of velocity were measured. The measurements were performed in the recirculation zone ($x/H=4.0$) and the reattachment zone ($x/H=7.5$). To measure the wall pressure fluctuations in a turbulent flow over a backward-facing step, a 32-channel microphone array was installed beneath the wall in the streamwise and spanwise directions. From the measured pressure field, the size of large-scale vortex was obtained. As a detailed study, a conditionally-averaging technique was employed to characterize the coherent structure of the large-scale vortex. To see the relationship between the flow field and the relevant spatial mode of the pressure field, the spatial box filtering (SBF) was examined. A cross-correlation between velocity and pressure fluctuations was performed to identify the structure and the length scale of the large-scale vortex.

기호설명

- H : 후향계단의 높이, mm
- k : 난류 운동에너지, m^2/s^2
- q : 자유흐름의 동압, $\frac{1}{2}\rho U_0^2$
- Re_H : 후향계단 레이놀즈 수, $U_\infty H / \nu$
- U_C : 대류 속도, m/s
- U_0 : 자유흐름 유속, m/s
- x_R : 재부착 길이, mm
- x : 유동 흐름방향 좌표, mm
- y : 벽면 수직방향 좌표, mm
- z : 횡방향 좌표, mm

- τ : 시간 차이, s
- ω : 와도(vorticity), m^2/s
- ρ : 상호 상관계수 (cross correlation)

1. 서론

박리재부착 과정을 거치는 유동의 비정상 응집 구조는 과거 오랜 동안 실험 및 수치해석 연구의 현안과제가 되어 왔다. 많은 연구결과 박리재부착 유동은 근본적으로 비정상 특성을 보유하고 있음이 알려져 있다.⁽¹⁻³⁾ 박리재부착 유동의 응집구조를 이해하기 위해서는 벽면 변동압력이 높은 영역 위에 형성되는 대형와구조에 관한 연구가 이루어져야 한다. Kiya and Sasaki^(1,2) 나 Cherry et al.⁽³⁾은 난류박리기포의 재부착점에 형성되는 대형와구조의 유동특성에 주목하였으며, 압력-속도 동시측정에 의한 조건부 평균방법을 도입하여 난류박리에 의한 응집구조를 해석하고자 하였다. 이들 연구들은 재부착점(x_R)의 변동압력과 속도장과의 상호관계

* 한국과학기술원 기계공학과
 ** LG 전자 디지털어플라이언스 연구소, 정희원
 † 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : hjsung@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3027 FAX : (042)869-5027

를 고찰하였고, 재부착점 주위에 형성되는 높은 벽면압력 변동레벨(p'_{rms})이 유동소음의 주된 원인임을 보고하였다. 그러나 기존의 연구방법 들은 주로 재부착점의 변동압력으로부터 조건부 신호를 구하였을 뿐, 난류박리유동의 공간 발달적인 특징을 고려하여 조건부 신호를 구하는 방법을 채택하지 않았다. Lee and Sung⁽⁴⁾의 연구는 난류박리유동의 공간 발달적인 특징을 고려하여 조건부 신호를 구하는 방법을 채택하여 공간박스필터 기법(Spatial Box Filtering)을 제시하였다. 이 방법은 다채널 마이크로폰 배열 측정에 의한 벽면 변동압력장으로부터 공간발달 압력장을 대표하는 압력신호를 추출하는 방법이다. 재부착점의 변동압력만을 조건부 신호로 하여 응집구조를 고찰하는 기존의 방법은 국부적인 소규모 와동에 의하여 영향받을 수 있는 소지가 있는데 반하여 공간필터링 기법은 벽면 압력장의 파수성분별 필터링을 통하여 난류박리유동을 대표하는 거대구조 성분만을 추출하기 때문에 거대와구조의 관찰에 있어서 유리하다.

기존의 연구를 면밀히 조사해 본 결과 대형와의 구조는 본질적으로 3 차원성을 지니는 것으로 보고되었다. 그러나, 많은 연구들이 유동흐름방향의 공간 발달적 구조에 대해 수행되었으며, 횡방향의 공간 발달적 구조에 대해서는 거의 보고되지 않았다. 따라서 본질적인 대형와의 구조를 온전히 파악하기 위해서는 유동흐름방향의 구조해석뿐만 아니라 횡방향의 구조해석 역시 수행되어야 한다.

본 연구에서는 후향계단 난류 박리재부착 유동에서의 대형와의 구조를 고찰하기 위해 상기된 실험 방법을 도입하고 재순환영역($x/H=4.0$)과 재부착영역($x/H=7.5$) 주위에 대하여 이 영역에서 형성되는 대형와의 구조를 해석해보고자 한다. 이를 위해 기존 문헌의 연구결과를 바탕으로 하였으며, Lee and Sung⁽⁴⁾에서 제시된 방법을 참고하여 벽면 변동압력과 속도를 동시 측정하였다.

본 연구에서는 공간필터링 기법과 조건부 평균방법을 도입하였고, 조건부 평균된 유동장, 와도, 난류 강도 등을 해석하였다. 또한, 벽압력 섭동량과 속도 섭동량의 상관관계를 조사하여 유동장에 존재하는 응집구조를 파악하였다.

2. 실험장치와 실험방법

2.1 풍동 및 실험장치

본 연구에 사용된 풍동 및 측정장치 들은 Lee

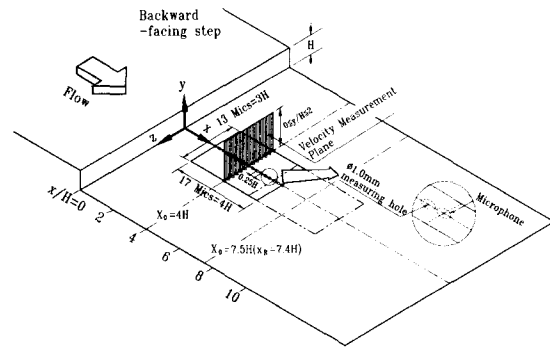


Fig. 1 Experimental setup of backward-facing step

and Sung⁽⁵⁾의 연구에 사용된 장치와 동일하다. 압력-속도의 동시측정을 위해, 본 연구에서는 Lee and Sung⁽⁵⁾에 제시된 방법을 사용하였다. 벽면압력장을 측정할 때는 마이크로폰 배열(TMS160A, (주) 소리텔)과 차동증폭기(PCB 514A)를 이용하였다.

전술한 바와 같이, 흐름 방향 및 횡방향 압력장의 동시 계측을 위하여 Fig. 1에 나타난 것과 같은 2 차원 십자형 배열을 후향계단의 시험부에 설치하였다. 마이크로폰 사이의 간격은 $0.25H$ 이며 흐름방향으로 17 개의 위치, 횡방향으로 13 개 배치되어 있으므로 이 십자형 배열은 흐름방향 및 횡방향으로 각기 $4H$ 및 $3H$ 의 공간을 차지한다. 이때 십자형 배열의 중심점이 배열의 기준점이라 할 수 있는데 이 기준점을 재부착영역($x/H=4.0$)과 재순환영역($x/H=7.5$)의 두 가지로 변화시켜 각 영역에서의 압력장을 측정하였다.

압력장 측정과 동시에 (x-y) 평면 및 (x-z) 평면에서의 3 차원 속도성분을 측정하였는데 스플릿 필름(TSI1288)과 X 형 열선(TSI1240, 1243), 그리고 열선 풍속계(IFA300)를 사용하였다.

동시에 측정된 압력장과 속도의 다채널 데이터를 저장하기 위하여 A/D 변환기(DT2839)를 이용하여 모두 31 채널의 신호들을 488Hz 의 추출주파수로 측정하였다. 대형와의 구조를 체계적으로 관찰하기 위하여 Kiya and Sasaki,⁽²⁾ Lee and Sung⁽⁴⁾이 제안한 조건부평균방법을 사용하였다.

2.2 실험조건

본 연구에서 사용된 대표길이 H 는 후향계단의 계단높이이고, U_∞ 는 자유흐름 유속이다. 레이놀즈수에 대하여 본 실험에서는 후향계단 높이에 의거한 레이놀즈 수로 정의하였다. 자유흐름유속은 $U_\infty=10.0m/s$ 이었고, $Re_H=33,000$ 이 되도록 정하였다.

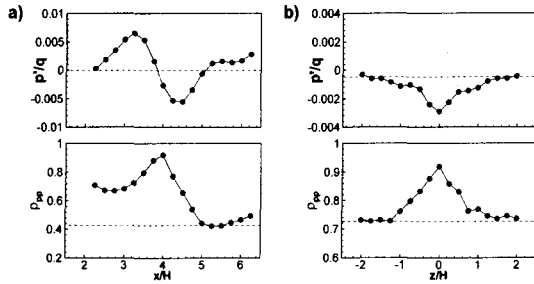


Fig. 2 Wall pressure fluctuations and correlations at $x/H=4.0$ a) streamwise direction b) spanwise direction

3. 실험 결과 및 토의

3.1 SBF (Spatial Box Filtering)

SBF 방법은 기초적인 이론에 관해 Blake⁽⁶⁾ 등이 소개하였으며, 난류 박리 유동장에 대해서는 Lee and Sung⁽⁴⁾이 마이크로폰 배열을 이용한 압력장 측정에 응용한 바 있다. 이 방법은 마이크로폰 배열을 이용하여 측정된 유동 벽면 압력장에 대해 특정 파수(wave number) 성분을 추출하기 위해 공간적으로 필터링하는 기법이다. Lee and Sung⁽⁴⁾의 방법은 벽면 압력장 내에 측정된 다수의 압력 신호들에 대해 +1 또는 -1의 필터링 함수(kernel)를 규칙적으로 곱하여 벽면 압력장에서 특정 파수(wave number)의 압력장을 추출하는 방법이다

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

여기서, N 은 마이크로폰 배열의 센서 개수, p_k 는 일련의 마이크로폰에서 측정된 압력 신호, λ_i 는 필터링 함수의 i 번째 모드에 해당하는 파장 길이, H 는 λ_i 를 무차원화하기 위한 특성길이이다. λ_i 는 센서 개수 N 과 센서 간격 Δx 에 대한 함수이고, $\lambda_i = \frac{N}{2i-1} \Delta x$ 이다. λ_i 를 정의하기 위해서 Fig. 2 와 Fig. 3 에서는 재순환, 재부착 영역부근의 p'/q 를 도시하였다. 또한 흐름방향 및 횡방향 압력상호상관계수를 각각 $\rho_{pp}(\xi) = \overline{p'(x, z, t)p'(x + \xi, z, t)} / (p_{rms}^2)$ 과 $\rho_{pp}(\zeta) = \overline{p'(x, z, t)p'(x, z + \zeta, t)} / (p_{rms}^2)$ 으로 정의하였다. 여기서, p'/q 는 재부착점에서 벽면 수직속도 성분 v 가 $-2.5v_{rms}$ 보다 더 낮은 값을 가질 경우에 대해 조건부 평균한 무차원화된 근제곱평균(rms)이다. 각각의 결과에서 봉우리(peak) 및 계곡(valley) 사이의 거리를 구할 수 있는데, 각 결과에서 해당되는 거리의 두 배를 해당 파장길이로 정의하였다. 그 결과 해당 파장길이는 유동흐름방향으로 $3H$, 횡방향으로 $2H$ 로 정하였으며, 재부착영역($x/H=7.5$)에서는 각각 $4H, 2.5H$ 로 나타났다.

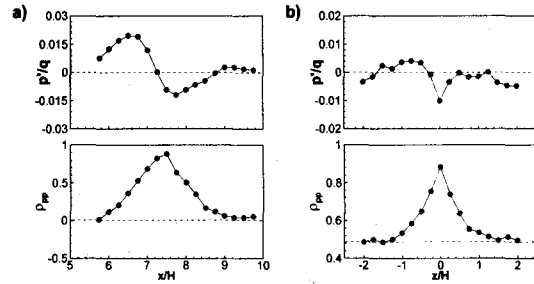


Fig. 3 Wall pressure fluctuations and correlations at $x/H=7.5$ (a) streamwise direction (b) spanwise direction

3.2 조건부 평균된 유동장

Kiya and Sasaki⁽²⁾는 재부착점 근방 한 점에서의 압력변동의 시계열의 조건부 평균을 얻었는데, 양의 압력 변동치는 대체로 높은 동압을 지닌 외부의 비회전성 유동이 와구조에 의하여 말려 들어와 벽면으로 돌입하는 현상과 일치하는 것으로 보고되었다. Lee and Sung⁽⁴⁾에서도 일치하는 결과가 보고되었다. 이를 토대로 압력변동 $\tilde{p}^{(1)}$ 이 $-2.5 p_{rms}$ 보다 작은 극소치에 달할 때에 대하여 속도장의 분포를 평균하여 조건부 평균된 속도장을 얻었다.

Fig. 4 는 (x, y) 평면에서의 조건부 평균된 속도장을 도시하고 있다. Lee and Sung⁽⁴⁾에서 제시된 대류속도(convection velocity) $U_c=0.6U_0$ 을 기준으로 하여 시계열의 정보를 공간적으로 확장할 수 있는 테일러의 가설을 사용하였다. 무차원화된 시계열의 정보 $-\tau U_c/H$ 는 공간적으로 x/H 와 동일한 길이가 된다. Fig. 4(a)는 재순환영역($x/H=4.0$)을 중심으로, Fig. 4(b)는 재부착영역($x/H=7.5$)를 중심으로 한 결과이다. 이 평면의 횡방향 위치는 시험부의 중심이다($z/H=0$). 재순환영역에서는 와구조의 생성이 공간적 발달에 따라 지속되는 결과를, 재부착영역의 결과에서는 난류박리기포로부터 방출된 와의 모습이 확인된다. 이 구조의 중심은 $(x, y)=(7.95H, 0.93H)$ 에 형성된다. Fig. 4 의 결과는 Lee and Sung⁽⁴⁾에 도시된 결과와는 달리 재순환구역 및 재부착구역의 구분이 불명확하다. 이는 속도장의 측정이 (y, z) 평면에서 이루어져 흐름방향의 정보는 테일러의 가설에 의하여 시간적인 정보로부터 유추되었기 때문으로 판단된다. 즉, 유동장의 비균질성(inhomogeneity)에 기인한 것이다. (x, y) 평면에서 관찰된 응집구조는 Lee and Sung⁽⁴⁾에 상세히 서술되어 있기 때문에, 그 후속편인 본 연구에서는 (y, z) 평면상 3 차원 유동구조의 고찰에 중점을 두기 위하여 상기와 같은 실험방법을 사용하였다.

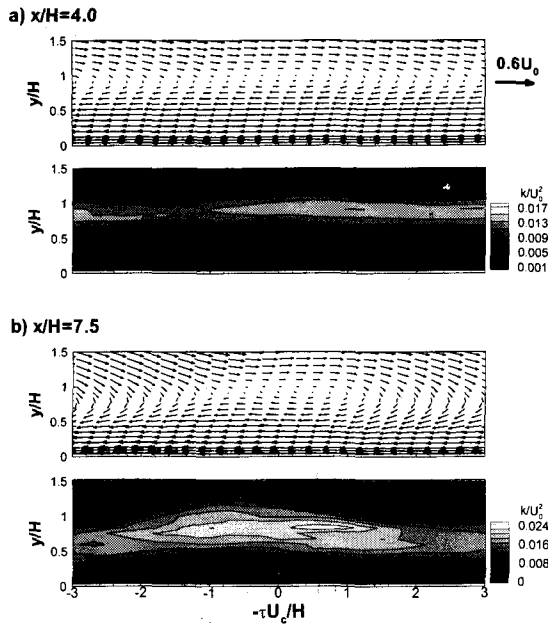


Fig. 4 Conditionally-averaged vector field (u,v) and turbulent intensity plot. a) $x/H=4.0$ b) $x/H=7.5$ (at $z/H=0$)

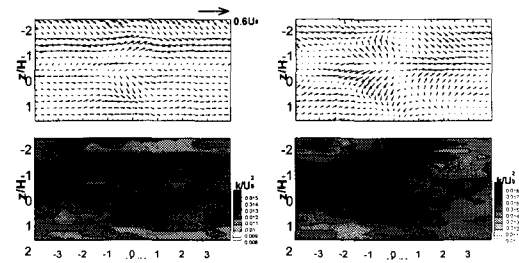


Fig. 5 Conditionally-averaged vector field (u,w) and turbulent intensity plot. (at $y/H=0.92$)

Fig. 5 는 (x,z) 평면 에서의 조건부 평균유동장 이다. Fig. 5(a)는 재순환영역($x/H=4.0$)에서, Fig. 5(b)는 재부착영역($x/H=7.5$)를 중심으로 한 결과이다. 이 평면의 벽면수직방향 위치는 유동장의 변화가 가장 활발한 $y/H=0.92$ 인 지점이다. 재순환영역의 결과에서보다 재부착영역에서 회전하는 구조가 명확히 관찰된다. 이 회전구조가 존재하는 위치는 재순환영역에서 $(x,z)=(4.6H,1.0H)$, $(3.3H,-0.9H)$ 부근이며 재부착점에서는 $(x,z)=(7.4H,-1.2H)$, $(7.4H,1.0H)$ 부근이다. 횡방향의 간격은 각각 $1.9H$, $2.2H$ 로서 앞서 Figs. 2,3 에서 제시하였던 횡방향의 공간적 길이척도와 유사하다. 이 구조가 존재하는 위치에서는 역시 높은 수준의 난류 강도가 존재한다.

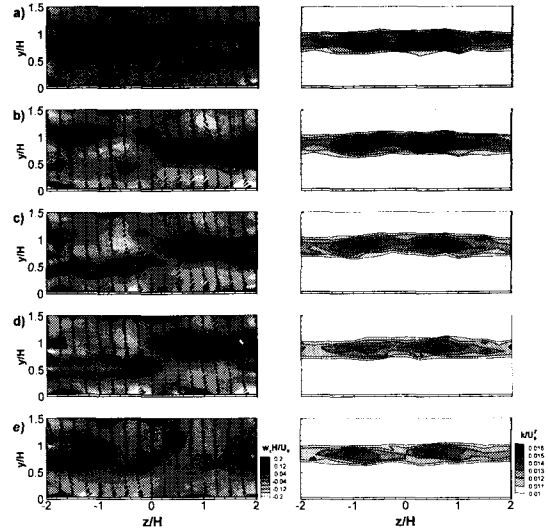


Fig. 6 Conditionally-averaged vector field (v,w) and turbulent intensity plot at $x/H=4.0$ a) $\tau=-T/4$ b) $\tau=-T/8$ c) $\tau=0$ d) $\tau=T/8$ e) $\tau=T/4$

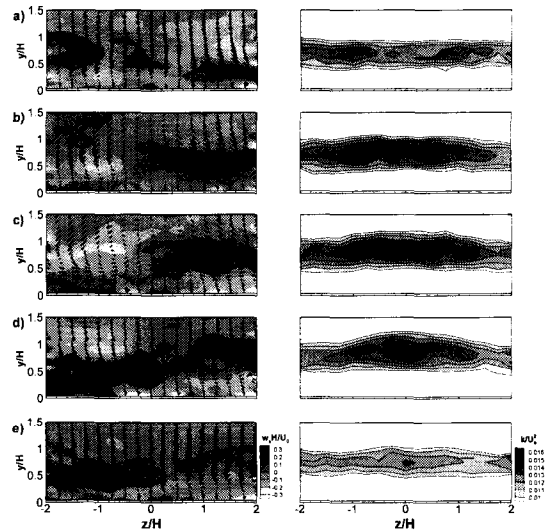


Fig. 7 Conditionally-averaged vector field (v,w) and turbulent intensity plot at $x/H=7.5$ a) $\tau=-T/4$ b) $\tau=-T/8$ c) $\tau=0$ d) $\tau=T/8$ e) $\tau=T/4$

Fig. 6 과 Fig. 7 은 벽면수직방향과 횡방향으로 이루어지는 평면 (y,z) 에서의 조건부 평균유동장의 정보이다. 여기에서 난류강도는 $k=0.5(v^2+w^2)$ 을 이동 평균하여 계산하였다. 유동 흐름방향의 강한 난류강도를 제외함으로써 (y,z) 평면과 직접적인 관련이 있는 위치를 파악하기 위함이다. T 는 와홀림주기로서 압력스펙트럼으로부터 얻어진 결과는 $TU_0/H=15.4$ 이다. Fig. 6,7 모두에서 와홀림이 일어나는 순간인 c)의 시점, 즉 $\tau=0$ 에서 횡방향으로 두개의 와구조가 존재한다. 이 쌍을 이루는 두

개의 와구조는 서로 반대방향으로 회전하는 것으로 나타났으며, 와구조의 중심은 재순환영역의 경우 $(y,z)=(0.94H,-0.63H)$, $(0.82H, 0.87H)$ 이고, 재부착 영역의 경우 $(y,z)=(0.80H,-1.02H)$, $(0.73H, 1.01H)$ 이다. 횡방향 크기는 각각 $1.5H$, $2.03H$ 로서 Fig. 5의 결과로부터 얻을 수 있는 횡방향 공간적 길이척도와 유사함을 확인 할 수 있다. 이것은 결국 (x,z) 평면에 존재하는 구조와 (y,z) 평면에 존재하는 구조가 서로 독립적인 구조가 아닌, 서로 영향을 미치는 하나의 구조라는 것을 의미한다.

3.3 압력-속도 상호상관관계

지금까지 언급된 결과들을 기초로 하여, 이 절에서는 압력변동과 전체 유동장과의 상호 상관관계를 조사한다. 압력과 속도장사이의 상호상관계수는 $\rho_{pu}(y,z,\tau) = p'(t)u'(y,z,t+\tau)/(p_{rms}u_{rms})$ 과 같이 정의된다. 정의에 따라, 시차 τ 가 양일 경우는 속도장이 압력신호보다 시간적으로 늦는 것을 의미한다. 마찬가지로 방식으로 $\rho_{pv}(y,z,\tau)$, $\rho_{pw}(y,z,\tau)$ 역시 구할 수 있다. 속도 섭동량의 절대치가 큰 경우는 의심할 여지 없이 대형와구조가 와출됨 되는 순간이다. 또한 압력섭동량이 극소치를 이룰 때는 대형와구조가 와출됨되는 순간으로서 속도 섭동량의 절대치가 큰 경우와 일치하는 순간이다. 따라서, 상관치가 극대, 극소인 구조는 대형와구조임을 의미한다.

Fig. 8 은 ρ_{pu} 를 시차에 따라 나타낸 것이다. $x/H=4.0$ 과 $x/H=7.5$ 의 결과에서 동일하게 c) 인 순간, 즉 $\tau=0$ 인 순간 응집된 구조가 나타난다. $x/H=7.5$ 에서의 구조는 $x/H=4.0$ 의 구조에 비해 상관도가 더 큰 구조를 나타낸다. 시차 τ 인 지점에서 상관치가 극대인 부분은 조건부 평균을 이용한 속도장에서 파악되는 와구조의 위치와 유사함을 확인 할 수 있다. 또한 횡방향으로 존재하는 응집구조의 횡방향 크기는 $x/H=4.0$ 에서 $2H$, $x/H=7.5$ 에서 $2.4H$ 정도임을 파악할 수 있다. 이는 벽압력 신호의 상호상관계수, 벽면 변동압력 레벨로부터 추정된 대형와구조의 횡방향 크기인 $2H$, $2.5H$ 와 거의 일치한다.

Fig. 9 의 ρ_{pv} 을 살펴보면 강한 음의 구조가 $\tau=0$ 근처에서 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 압력섭동량이 음의 극소치일 때 조건부 평균된 v 의 속도장에서 강한 양의 섭동량이 존재하여 이 두 물리량의 곱은 강한 음의 값을 갖게 되는데 이 결과와 부합됨을 알 수 있다. 시차가 증가하면서 반대 부호를 갖는 강한 구조가 존재한다. 난류강도의 분포와 비교해 볼 때 이 구조는 응집구조가 아닌, 대형와구조의 방출로 인한 외부 유체 유입에 기인한 구조와 관련이 있음을 시사한다.

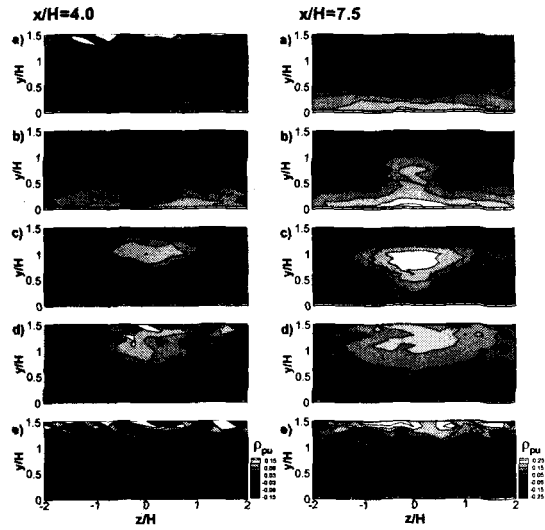


Fig. 8 Pressure-velocity correlation (ρ_{pu}) a) $\tau=-T/4$ b) $\tau=-T/8$ c) $\tau=0$ d) $\tau=T/8$ e) $\tau=T/4$

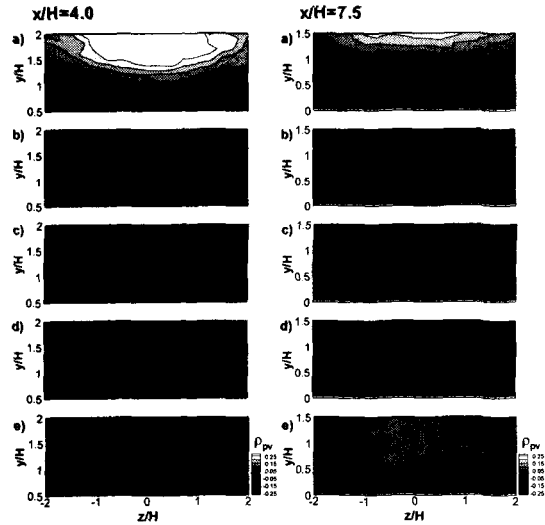


Fig. 9 Pressure-velocity correlation (ρ_{pv}) a) $\tau=-T/4$ b) $\tau=-T/8$ c) $\tau=0$ d) $\tau=T/8$ e) $\tau=T/4$

Fig. 10 은 ρ_{pw} 의 결과이다. 이는 벽압력 섭동량으로 횡방향의 압력신호를 사용하여 구한 것이다. 횡방향 속도섭동량의 변화는 유동흐름방향보다는 횡방향의 압력섭동량의 변화와 관련이 깊기 때문에 이 압력신호를 사용하여 구조를 파악하는 것이 더 합당하다. $z/H=1$ 에서는 음의 상관값을 갖는 구조, $z/H=-1$ 에서는 양의 상관값을 갖는 구조가 관찰된다. 이 구조 역시 Fig. 9 와 같은 맥락으로 볼 수 있다. 즉, 조건부평균된 횡방향 속도성분 (w) 의 분포와 ρ_{pw} 의 구조가 유사한 위치에 존재한다. 한편, ρ_{pv} 와는 다르게 바닥면 근처에 까지 구

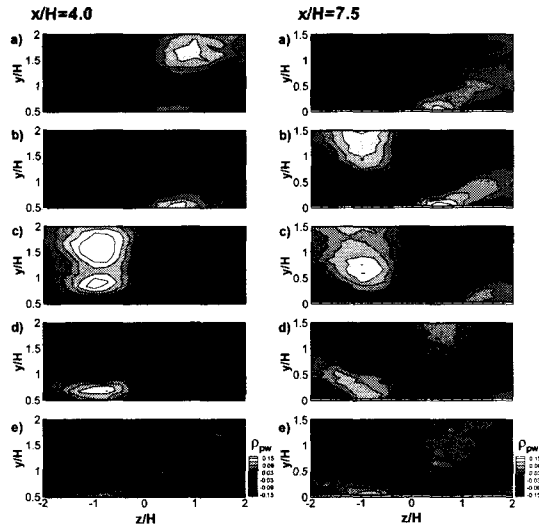


Fig. 10 Pressure-velocity correlation (ρ_{pw}) a) $\tau=-T/4$ b) $\tau=-T/8$ c) $\tau=0$ d) $\tau=T/8$ e) $\tau=T/4$

조가 형성되는 바 대형와구조의 꼬리부분을 이루는 주 요인은 횡방향 속도성분으로 사료된다. $x/H=4.0$ 과 $x/H=7.5$ 두 경우 동일하게 시차 $\tau=T/8, -T/8$ 에서 바닥면에 형성되는 응집구조의 부호는 정반대로 나타났으며, 재순환영역의 c)시점에서는 윗부분에 강한 구조가 포착되는 동시에 아래부분에 같은 부호를 갖는 구조가 존재한다.

Fig. 11 은 압력-속도 상호상관계수의 분포를 (x,y)평면상에 표현한 것이다. 이를 통해 유동흐름 방향의 구조를 파악할 수 있다. ρ_{pu} 의 $-U_c/H=0$ ($x/H=7.5$)인 부근에 존재하는 응집구조는 대형와구조의 머리부분, ρ_{pw} 에서 전체적으로 존재하는 횡방향의 쌍을 이루는 구조는 대형와의 꼬리부분으로 해석할 수 있다. 상관계수 0.25 전후의 극대영역이 (x,y)=(7.58H, 0.98H), (8.65H, 0H)에서 발견된다. 상기한 상관계수의 극대영역을 연결하는 직선은 -x 축에 대하여 45°의 각도를 지니고 있다. 이는 Kiya and Sasaki⁽²⁾에 의하여 보고된 둔각물체 주위 대형와구조의 중심면상의 타원형 와류유선구조의 장축이 이루는 각도와 일치한다. 또한 극대영역 (x,y) =(7.58H,0.98H)의 y 좌표는 $0.13x_R$ 에 해당하는데 이 역시 Kiya and Sasaki⁽²⁾ 의 $0.18x_R$ 과 유사함을 발견할 수 있다. 따라서 이 위치의 극대영역은 응집구조의 중심부로 간주 할 수 있다. ρ_{pw} 에서의 극대점 (x,y) =(7.95H,0.94H)와 바닥면을 연결하는 직선은 +x 축에 대하여 30°의 각도를 지니고 있다.

Fig. 12 및 Fig. 13 은 Figs. 8-10 을 통해 파악된 $x/H=7.5$ 근처의 응집구조의 등강도 평면이다.

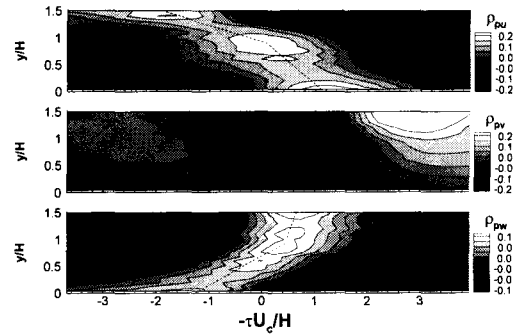


Fig. 11 Pressure-velocity correlation at $x/H=7.5$

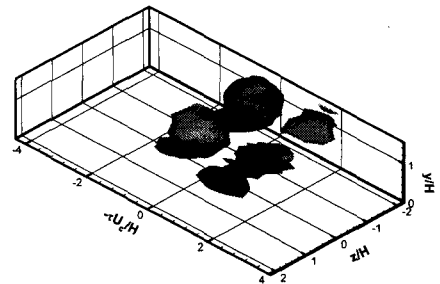


Fig. 12 Iso-surface of pressure-velocity correlation coefficient at $x/H=4.0$ (ρ_{pw})

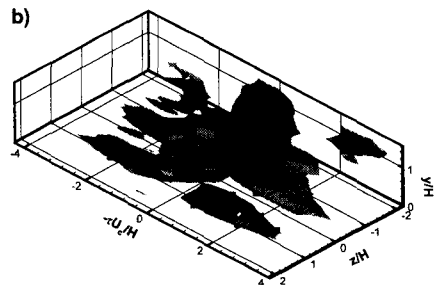
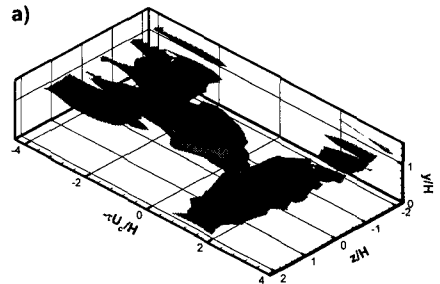


Fig. 13 Iso-surface of pressure-velocity correlation coefficient at $x/H=7.5$ a) ρ_{pu} b) ρ_{pw}

Fig. 12 는 재순환영역에서 발달되어지는 대형와구조의 꼬리부분을 형상화 한 것이며, Fig. 13 은 재부착영역에서 와홀림 되어지는 대형와구조의 머리부분과 꼬리부분을 형상화한 것이다. ρ_{pw} 만을 비

교 하였을 때 재순환영역에서 덜 발달된 꼬리부분이 재부착영역에서 완전히 바닥면부터 중심까지 발달되어 있는 것을 확인할 수 있다.

결론적으로 재부착지점에서 방출되어지는 대형 와의 구조는 Fig. 13 에서 표현한 머리부분과 꼬리부분이 합성된 구조이다.

4. 결 론

후향계단 난류 박리재부착 유동에서 주기적으로 와흡립되는 대형와구조가 실험적으로 연구되었다. 난류박리기포에서 대형와구조의 흡립이 일어나는 순간은 벽 압력 섭동량과 밀접한 관계가 있으므로 유동장 측정과 동시에 벽 압력 섭동량을 측정하여 응집구조의 해석을 위한 조건부 평균기법을 도입하였고 속도섭동량과 벽압력섭동량의 상호상관관계를 조사하였다. 이를 통해 3 개의 평면상에 존재하는 와구조를 검출하였는데, 횡방향 중심을 기준으로 (x,y) 평면에 반시계 방향으로 존재하는 와구조가 존재하고, 그 양쪽에 (y,z) 평면과 (x,z) 평면에 존재하는 와구조가 형성됨을 파악하였다. 각 2 차원평면에 나타난 개개의 와구조는 3 차원 머리핀 와구조의 꼬리부분임을 파악하였다. 또한 와구조가 형성될 때 그 주위에는 와구조의 방출로 인한 외부 유체의 유입으로 인하여 반대방향으로 회전하는 구조가 있음이 확인되었다. 재순환영역에서 나타나는 대형와의 크기는 유동흐름방향으로 3H, 횡방향으로 2H 정도로 파악되었으며, 재부착영역에서 방출되는 대형와의 크기는 유동흐름방향

으로 4H, 횡방향으로 2.5H 정도로 파악되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업에 의해 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Kiya, M. and Sasaki, K., 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.*, Vol. 137, pp. 83~113.
- (2) Kiya, M. and Sasaki, K., 1985, "Structure of Large-Scale Vortices and Unsteady Reverse Flow in the Reattaching Zone of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.*, Vol. 154, pp. 463~491.
- (3) Cherry, N.J., Hillier, R. and Latour, M.E.M.P., 1984, "Unsteady Measurements in a Separated and Reattaching Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 144, pp.13~46.
- (4) Lee, I. and Sung, H.J., 2002, "Multiple-Arrayed Pressure Measurement for Investigation of the Unsteady Flow Structure of a Reattaching Shear Layer," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.463, pp.377~402.
- (5) Lee, I. And Sung, H. J. 2001, "Characteristics of Wall Pressure Fluctuations in Separated Flows over a Backward-Facing Step Part. I Time-Mean Statistics and Cross-Spectral Analysis," *Exp. Fluids*, Vol.30, pp. 262~272
- (6) Blake, W.K., 1986, "Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration," Academic Press.