

후향계단 주위의 난류 박리재부착유동에서의 벽압력변동의 통계적 특징

이 인 원 * · 성 형 진 *

(1999년 8월 4일 접수)

Cross-Spectral Characteristics of Wall Pressure Fluctuations in Flows over a Backward-Facing Step

Inwon Lee and Hyung Jin Sung

Key Words : Pressure Fluctuations(압력변동), Backward-Facing Step(후향계단), Separated and Reattaching Flow(박리재부착 유동), Cross Spectrum(교차 스펙트럼), Wavenumber Spectrum(파수 스펙트럼)

Abstract

Laboratory measurements were made of wall pressure fluctuations in a separated and reattaching flow over a backward-facing step. An array of 32 microphones along the streamwise direction was utilized. Various statistical properties of pressure fluctuations were scrutinized. The main emphasis was placed on the flow inhomogeneity along the streamwise direction. One point statistics such as the streamwise distribution of rms pressure and autospectra were shown to be generally consistent with other studies. The coherences and wavenumber spectra in the streamwise directions were indicative of the presence of dual modes in pressure; one is the large-scale vortical structure in low frequency and the other is the boundary-layer-like decaying mode in high frequency.

기호설명

- H : 후향계단의 높이
- k_l : 흐름방향 파수
- $R_{pp}(\xi, \tau; X_0)$: 기준점 X_0 에서의 압력상관함수
- Re_H : 계단높이와 자유흐름속도에 의한 레이놀즈수
- U_0 : 자유흐름속도
- x_R : 시간평균 재부착길이
- X_0 : 압력센서열의 기준점 위치
- 그리스문자
- γ_p : 정방향 흐름분율
- $\Gamma(\xi, \omega; X_0)$: 기준점 X_0 의 흐름방향 코히어런스
- ξ : 흐름방향 센서간 거리
- τ : 시간차
- $\Phi_p(\omega; x)$: 흐름방향 좌표 x 에서 측정된 압력의 스펙트럼

- $\Phi_{pp}(\xi, \omega; X_0)$: 기준점 X_0 의 흐름방향 교차스펙트럼
- $\Phi_{pp}(k_l, \omega; X_0)$: 기준점 X_0 의 흐름방향 파수스펙트럼

1. 서론

난류압력변동은 급격하게 변화하는 난류의 와 구조와 유동장에 접하는 고체표면과의 상호작용으로부터 생성되는 유동현상으로 난류유동에 의하여 유기되는 소음 혹은 진동의 주요한 원인으로 작용한다. 구조물의 주위를 흐르는 난류유동은 압력변동의 형태로 구조물에 분산하중을 가하고, 이것이 구조물의 고유한 모드와 연계되어 진동 및 소음을 일으킨다. 일반적으로 난류유동은 넓은 대역의 주 파수 및 파수 특성으로 대별되는 만큼, 난류압력변동의 특성을 파악하기 위해서는 높은 공간분해능을 갖는 어레이 센서를 이용하여 시공간적인 분포를 측정해야 한다. 이를 위하여 지금까지 많은 실험적 혹은 수치해석적인 연구가 수행되었는데, 비교적 단순한 난류경계층 유동장을 대상으로 하고 있다.⁽¹⁻³⁾ 난류경계층의 경우, 유동장의 실험적

* 한국과학기술원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hisung@cais.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3027 FAX : (042)869-5027

인 데이터베이스가 비교적 잘 구비되어 있고, 이를 근거로 한 압력장의 모형이 다수 제시되어 오고 있는 실정이다.^(4,5)

그러나 물체 형상의 급격한 변화와 같은 실질적인 이유로 인하여 경계층의 박리 후 재부착이 일어나는 유동장은 실제 공학적 문제와 관련하여 매우 중요함에도 불구하고 압력변동의 특성이 구체적으로 연구된 사례가 매우 드물다. 관련된 기존 연구는 기초적인 시간평균 통계량의 나열에 머물고 있는데, 여러 가지 박리재부착 유동에서의 압력변동의 근평균제곱(root-mean-square)과 스펙트럼의 분포를 비교, 정리하여 재부착길이 등의 특성길이에 의한 실험결과의 무차원화를 주장한 Mabey⁽⁶⁾의 연구결과가 대표적인 경우이다. 최근에는 Govinda Ram 과 Arakeri⁽⁷⁾에 의하여 벽면만이 아닌, 유동장 내의 압력변동을 측정 한 연구도 보고된 바 있다. 이러한 연구들은 기본적으로 단일한 센서를 이용한 것으로 산술적인 통계량의 나열에 그치고 있을 뿐, 압력장의 공간적 구조를 파악할 수 있는 상관함수 등은 제시하고 있지 않다.

박리재부착 유동은 경계층 유동과는 재부착점을 전후하여 유동장의 성격이 공간적으로 판이하게 변화하는 특성을 나타낸다. 가장 기본적인 박리재부착 유동 중의 하나인 후향계단 주위의 유동의 전반적 특징은 Eaton 과 Johnston⁽⁸⁾에 의하여 정리된 바 있다. 후향계단과 매우 유사한 둔각물체(blunt body) 주위 유동의 경우, Kiya 와 Sasaki^(9,10) 및 Cherry 등⁽¹¹⁾에 의한 실험적 연구의 결과 물체 두께의 수배에 달하는 크기에 상당하는 조직적 와 구조(coherent vortical structure)가 발견된 바 있다. 따라서, 후향계단 주위 유동장의 압력분포에서도 역시 와구조와 직접적으로 연계된 대규모구조(large-scale structure)가 존재할 것으로 예상되기 때문에 다수의 센서를 동원한 넓은 영역에서의 동시 측정이 요망된다. 또한 유동 방향에 걸쳐서 나타나는 유동의 불균일성(inhomogeneity)도 고려되어야 한다.

그러나 앞에서 언급한 바와 마찬가지로, 박리재부착 유동장에서 압력변동의 시공간적인 특징을 조사한 사례는 매우 드물다. Farabee 와 Casarella⁽¹²⁾에 의한 연구가 거의 유일한 사례이지만, 여기에서는 불과 2개의 마이크로폰만이 좁은 간격으로 배치되었기 때문에 적절한 공간적인 거동을 밝혀내지 못했다. 비록 유동장의 비균일성을 고려한 실험이 수행되었으나, 작은 척도에만 측정이 집중되었기 때문에 훨씬 큰 구조를 조사하지 못하였다. 또한 근본적으로 Corcos 모형⁽⁴⁾과 같은 경계층 감쇠모형의 연장선상에서 측정결과를 정리하고 해석

하는 데에 그치고 있다.

본 연구는 주파수 및 파수 영역에서의 Fourier 변환을 통하여 평균적인 의미에서의 압력장의 포괄적인 시공간적인 구조를 조사하는 연구로서 현재까지 수행된 연구를 크게 보완하고, 알려진 유동현상과 실제 측정결과 사이의 괴리를 줄이기 위하여 다채널 마이크로폰 어레이를 이용하여 후향계단 주위 유동에서의 벽면압력변동을 세밀하게 측정하였다. 유동 방향으로 배열된 32채널 마이크로폰 열을 이용하여 전체 박리재부착 구역에서 동시에 압력변동을 측정하였다. 유동장의 불균일성을 감안하여 유동장을 몇 개의 구역으로 분할하여 공간 분해능을 향상시켰다. 이 데이터를 바탕으로 얻어진 교차 스펙트럼, 파수 스펙트럼과 같은 일련의 "주파수 통계량" (spectral statistics)에 중점을 두어 압력장 해석이 이루어졌다. 본 연구에서 제시되는 연구결과는 박리재부착 유동에서 이전에 볼 수 없었던 광범위한 파수 영역에서 측정된 새로운 포괄적인 표면압력장의 특성들을 보여주고 있으며, 기존에 알려진 대규모 와구조와 일맥상통하는 시공간적인 특징을 보여주고 있다.

2. 연구방법

2.1 풍동 및 유속측정

본 실험을 위하여 Chun 과 Sung⁽¹³⁾에서 사용된 개방송출형 풍동의 시험부를 약간 개조하여 사용하였다. 이 풍동은 벌집틀(honeycomb)과 3장의 철망(screen) 등이 설치된 정류실(settling chamber) 및 그에 연결된 면적비가 6:1인 수축부(contraction)를 구비하여 양질의 시험부 입구유동을 얻을 수 있다. 그 결과 자유 흐름 난류강도를 0.6% 이하로 유지할 수 있었다. 시험부 입구는 폭 630mm, 높이 100mm의 채널로서 입구에 trip wire를 설치하여 이로부터 1m 후류의 박리점에서는 유동이 완전 난류 상태에 이르게 하였다. 또한 자유 흐름의 속도변동의 스펙트럼에서는 어떠한 피크도 발견되지 않았다. 박리점 후류의 시험부는 폭 630mm, 높이 150mm, 길이 2500mm의 직사각형 덕트로서, 후향계단의 계단높이 H는 50mm, 형상비(aspect ratio, AR)는 12.5이다. Brederode 와 Bradshaw⁽¹⁴⁾가 지적한 것처럼, 형상비가 10 이상이므로 시험부 중심부에서는 충분한 이차원성을 유지하고 있다고 판단된다.

평균유속과 변동치의 통계량, 그리고 재부착길이를 추정하기 위한 정방향 흐름 분율 γ_p (forward flow fraction)을 측정하기 위하여 split film probe(TSI

model 1288)와 열선풍속계(TSI IFA-300)를 사용하였다. 각 위치에서 204800 개의 속도 신호를 4 채널 A/D converter(UEI WIN-30DS)를 이용하여 추출한 후 이를 Pentium PC 에 저장한다. 이들 계측기는 전용 LabVIEW S/W 를 통하여 원격 조종된다. 신호 추출에 있어 주파수 앨리어징(aliasing) 을 피하기 위한 저역통과 절단주파수(lowpass cutoff frequency)는 유속측정에서는 5kHz, 정방향 흐름 분을 측정에서는 100 Hz 로 고정하였다. 따라서 신호 추출주파수는 각각 10kHz, 200Hz 가 된다. 전기적인 구형파(square wave) 신호를 이용하여 열선의 주파수 특성을 검사할 수 있는데, 20~30 kHz 까지 평탄한 응답특성을 확인할 수 있었다.

2.2 압력변동 측정

압력변동을 측정하기 위한 센서로서 Acoustical Array Microphone System (The Modal Shop Inc., Model TMS130A)을 사용하였다. 이 마이크로폰은 직경 10.54mm, 높이 25.4 mm 인 원통형의 32 개의 electret condenser microphone 과 연결 cable, 32 채널 차동증폭기(differential amplifier, Model 514A)로 구성되어 있다. 각 마이크로폰의 주파수 응답특성은 5Hz~10kHz 범위에서 크기 왜곡(magnitude distortion) ± 1 dB, 위상 오차(phase error) $\pm 3^\circ$ 로서 매우 우수하고, 42 ~ 142dB 에 이르는 동적영역(dynamic range)을 지니고 있다. 정리하면, 각 마이크로폰의 감도(sensitivity)만 알면 별도의 보정과정 없이 사용 가능하다. Array 마이크로폰의 제조자로부터 각 마이크로폰의 주파수 특성 및 감도의 데이터가 공급되었으나 본 연구에서는 Acoustic Array Calibrator Model 9080C 에서 기준 마이크로폰인 B&K 1/2" Condenser microphone, Type 4133 과 비교하여 감도를 직접 확인하였다. 그 결과 제조사가 공급한 데이터와 일치하는 특성을 확인할 수 있었는데, 마이크로폰의 대체적인 감도는 0.15V/Pa 이다.

위와 같은 배열형 마이크로폰을 Fig. 1 과 같은 방법으로 후향계단 시험부에 설치하였다. 시험부의 중심선상에 흐름방향의 마이크로폰 배열을 배치한다. 시험부에 일정한 폭의 홈을 가공하고 거기에 두께 5mm 인 알루미늄 판을 부착한다. 이 알루미늄 판의 윗면에는 직경 1mm 의 압력측정공, 밑면에 직경 10.6mm 의 마이크로폰 부착공을 가공하고 마이크로폰을 밑면으로부터 끼워 넣는다. 마이크로폰 사이의 간격은 12.5mm 이고, 전체 32 채널 어레이가 차지하는 길이는 7.75H 가 된다.

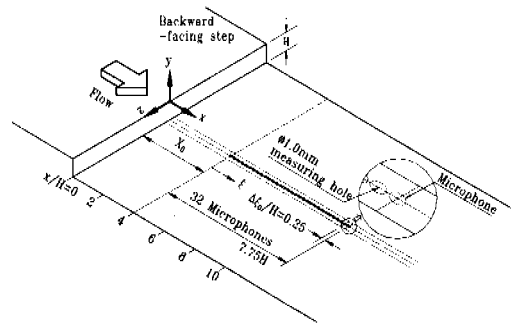


Fig. 1 Schematic diagram of backward-facing step

앞서 언급한 것처럼, 후향계단 유동장은 흐름방향으로 불균일하기 때문에 아래와 같은 압력상관 함수 $R_{pp}(\xi, \tau; X_0)$ 는 기준점 X_0 의 함수가 된다.

$$R_{pp}(\xi, \tau; X_0) = \overline{p(X_0, t)p(X_0 + \xi, t + \tau)}$$

즉, 뒤에서 논의될 교차 스펙트럼 등의 통계치들은 기준점에 따라 다른 거동을 보이기 때문에 이를 면밀히 조사하기 위하여 본 연구에서는 어레이의 기준점을 $X_0/H = 2.0, 4.0, 8.0$ 그리고 10.0 의 네 가지로 달리하여 측정을 수행하였다. 32 개의 압력 신호를 추출하는 A/D 변환기로서 DT2839(Data Translation Inc.)를 이용, 추출주파수 1953.125 Hz 로 각각 409600 개의 데이터를 PC 에 저장한다.

3. 연구결과

3.1 유동조건

본 실험에서 계단 높이(H) 기준 Reynolds 수 (Re_H)는 33,000, 경계층 운동량 두께 (θ) 기준 Reynolds 수(Re_θ)는 1,300 으로 Chun 과 Sung⁽¹³⁾의 실험과 동일한 조건이다. 본 실험에서 측정된 유동장 측정결과는 Chun 과 Sung⁽¹³⁾과 좋은 일치를 보이고 있다. 후향계단 주위 유동을 특징짓는 여러 데이터 중에서 유동장의 전반적인 평균적 상태를 나타내는 것으로 시간평균 재부착길이 x_R 가 있다. 재부착점을 찾기 위해 split film sensor 를 벽에 근접시켜 정방향 흐름 분을 측정한다. 시간평균 재부착점은 정방향 흐름 분을 y_p 가 0.5 인 지점으로 정의된다. 측정결과 $x_R=7.4H$ 를 얻었는데, 이는 Chun 과 Sung⁽¹³⁾에서의 결과 $x_R=7.8H$ 에 근접한 결과이다.

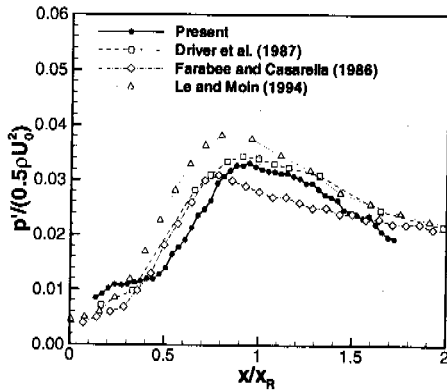


Fig. 2 Streamwise distribution of rms pressure

3.2 압력변동의 1 점 통계량

Fig. 2 는 압력변동의 근평균제곱(root-mean-square)을 접근유동의 동압($1/2\rho U_0^2$)으로 무차원화한 값의 흐름방향 분포를 보이고 있다. 비교를 위해 후향계단 유동의 실험 및 수치해석 결과^(12,15,16)를 함께 도시하였다. 상이한 조건들을 감안하기 위하여 Mabey⁽⁶⁾가 제안한 바와 같이 흐름방향 좌표를 재부착 길이로 무차원화한다. 각 결과들 사이에 전반적으로 유사한 분포를 보이고 있으며 특히 재부착점 약간 전방에서 압력변동이 최대가 되는데, 이는 후향계단 뿐 아니라 둔각물체와 같은 여타의 박리재부착 유동에서도 널리 알려진 현상이다.^(6,9,11) 또한, 압력변동의 근평균제곱치는 $x/x_r=0.5$ 이후부터 증가하는데 Chun 과 Sung⁽¹³⁾의 Fig. 8 을 보면 이 지역에서 평균압력계수 역시 증가한다. 즉, 압력변동의 근평균제곱의 증가와 평균압력의 회복이 밀접한 관계가 있음을 알 수 있는데 이는 Govinda Ram 과 Arakeri⁽⁷⁾가 지적한 사실과 부합된다. Devenport 와 Sutton⁽¹⁷⁾은 박리재부착 유동의 벽 부근에서 대규모적도의 속도변동의 존재를 규명했는데, 이것은 박리전단층(separated shear layer)으로부터 가해지는 압력구배변동(pressure gradient fluctuation)에 의하여 지배된다. 따라서 재부착구역 내의 압력변동 역시 전단층의 압력구배변동, 즉 비정상성(unsteadiness)과 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있다. 재부착점 이후에서 압력변동의 에너지는 서서히 감소하는데, 이는 압력변동을 발생시키는 자유전단층이 더 이상 기능하지 않기 때문이다. 더욱이 Farabee 와 Casarella⁽¹²⁾가 지적한 것처럼, 근평균제곱의 완만한 감소는 재부착 이후에도 상당한 거리에 걸쳐 대규모 와구조가 존속함을 나타내고 있다.

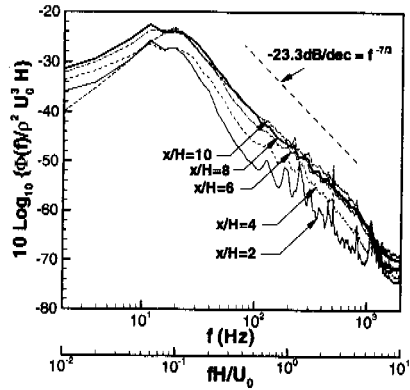


Fig. 3 Pressure spectra at various locations

Fig. 3 에는 흐름방향의 여러 지점에서 측정된 압력변동의 스펙트럼이 도시되어 있다. $x/H=2$ 에서는 다른 지점과 비교해 볼 때, 매우 낮은 주파수 ($fH/U_0 \sim 0.015$)를 제외하고는 전반적으로 스펙트럼의 크기가 작다. 이 주파수를 재부착길이를 사용하여 계산하면, $fx_r/U_0 \sim 0.11$ 로서 이는 잘 알려진 flapping 주파수가 된다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ Cherry 등⁽¹¹⁾도 역시 박리점에 근접한 지역에서 낮은 주파수 성분이 상대적으로 큰 현상을 보고하고 있다. 모든 지점을 통하여 압력변동의 스펙트럼은 $fH/U_0 \sim 0.068$ 에서 최대가 된다. 이 주파수는 Eaton⁽¹⁸⁾에서 보고된, 속도변동의 스펙트럼이 최대가 되는 주파수 $fH/U_0 \sim 0.066$ 과 거의 일치한다(Figs. 3-36, 3-40 참조). 이를 재부착길이를 환산하면 $fx_r/U_0 \sim 0.50$ 로 Mabey⁽⁶⁾가 언급한 주파수 범위에 속하며, 대규모 와구조의 주파수 $fx_r/U_0 \sim 0.60$ 에 근접한다.⁽¹⁵⁾

x/H 가 증가하면서, 고주파수 영역이 증대되면서, 스펙트럼의 기울기는 대체로 -7/3 계급 정도가 된다. George 등⁽¹⁹⁾은 평균전단응력이 일정한 자유전단류에서의 압력에 대한 Poisson 방정식을 Fourier 변환을 수행함으로써 난류압력변동에 대한 주파수 모형을 제시한 바 있다. 두 가지의 주요한 압력변동의 생성항 중에서, 고주파수 영역에서는 주로 난류-난류 상호작용 항에 의하여 -7/3 계급의 주파수 기울기가 만들어짐을 보이고 있다. Fig. 3 에 제시된 동일한 기울기로부터, 재순환구역 후반부($4.0 \leq x/H \leq 8.0$)에서의 압력변동은 대체로 박리전단층에 의한 것임을 추론할 수 있다. 재부착점 이후에는 스펙트럼의 형상이 거의 바뀌지 않는데, 이는 앞서 언급한 경계층 유동으로의 느린 회귀현상과 관련된 것으로 보인다. 여기에서 압력변동의 시공간적 발달 특성은 경계층 보다는 자유전단층과 보다 유사함을 예측할 수 있다.

3.3 압력변동의 흐름방향 공간적 특성

압력변동의 흐름방향 공간적 특성을 나타내는 물리량으로 다음과 같이 정의되는 흐름방향 교차 스펙트럼(cross spectrum)이 있다.

$$\Phi_{pp}(\xi, \omega; X_0) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{pp}(\xi, \tau; X_0) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

여기에서 $R_{pp}(\xi, \tau; X_0)$ 는 위에서 정의된 흐름방향 교차 상관함수(cross correlation)이다. ξ 는 흐름방향 어레이에서의 센서 사이의 간격, τ 는 시간차이다. 유동장은 흐름방향으로 불균일하기 때문에 위의 교차 상관함수 및 교차 스펙트럼은 기준점 X_0 에 따라 달라진다. 위의 교차 스펙트럼은 복소수로서, 각 위치 사이의 상관관계의 절대량을 조사하기 위해서 다음과 같은 코히어런스(coherence)를 정의한다.

$$\Gamma(\xi, \omega; X_0) = \frac{\Phi_{pp}(\xi, \omega; X_0)}{[\Phi_p(\omega; X_0)\Phi_p(\omega; X_0 + \xi)]^{1/2}}$$

$X_0/H=2.0$ 및 $X_0/H=8.0$ 인 경우에 계산된 코히어런스의 2차원 플롯을 Fig. 4에 나타내었다. 각각의 경우에서 코히어런스가 특정한 주파수 및 길이척도에서 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 주파수-길이척도로 정의되는 이차원 공간에서 코히어런스가 높은 값을 갖는 지역을 백색의 직선으로 연결하였다. 주파수 축에서 살펴볼 때, $X_0/H=2.0$ 에서는 비교적 높은 주파수 대역($fH/U_0 \leq 0.3$)까지 coherence peak/valley가 여러 개 주기적으로 발견되는 반면, $X_0/H=8.0$ 에서는 그러한 영역이 $fH/U_0 \leq 0.15$ 정도로 축소되어 있다. 또한 공간적으로도 peak들이 $X_0/H=2.0$ 에서는 $X_0/H=8.0$ 보다 조밀하게 분포되어 있다.

압력변동의 교차상관함수와 교차스펙트럼은 기준점과 그 후류의 어떤 지점 사이에서 수행되는 통계적인 과정이다. 즉, 앞서 스펙트럼에서 나타난 것과 같은 각 지점에서 광대역의 난류특성 중에서 평균을 통하여 기준점에 존재하는 특정한 주파수 혹은 크기 모드를 가려내는 과정으로 이해될 수 있다. 이러한 관점에서, 위의 결과는 $X_0/H=8.0$ 에서는 $X_0/H=2.0$ 과 비교하여 주파수는 작아지고 크기는 증대되는 현상을 뒷받침하고 있다. 압력변동은 박리전단층의 거동과 밀접한 관련이 있으므로 이는 바로 박리점으로부터 성장하는 전단층의 거대와가 융합과정을 통하여 크기가 증대되면서 주파수는 낮아지는 과정에 의한 것으로 설명될 수 있다.

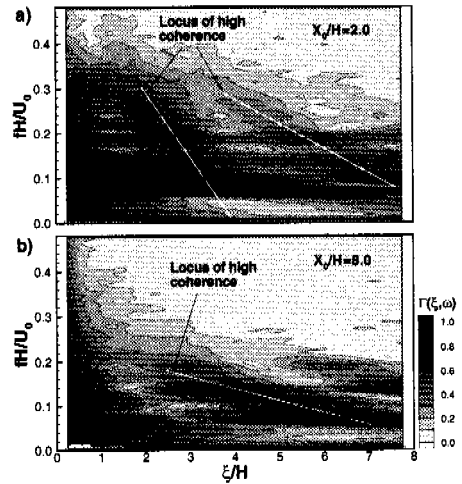


Fig. 4 Contour plot of coherence

이상과 같은 코히어런스의 분포를 포괄적으로 조사한 예는 발견되고 있지 않다. Farabee와 Casarella⁽¹²⁾의 연구에서는 센서 간격을 비교적 작은 경우에 한정하여 측정한 바 있다. 그들의 Fig. 8을 보면 재부착 구역 내부 ($X/H=2, 4, 6$)에서 측정된 코히어런스가 특정주파수($\omega\xi/U_0 \sim 3$)에서 최대가 됨을 관찰할 수 있다. 그러나 그들은 본 연구에서와 같이 특정한 주파수 혹은 크기 모드의 존재 가능성에 주목하지 않고 단지 경계층 유동과 비교하여 코히어런스의 감소율이 큰 사실로부터 재부착 구역 내의 유동이 경계층보다 덜 조직화되어 있다는 결론을 도출하고 있다. 이는 그들이 대규모 척도를 검출하기 어려운 실험장치를 사용했고, 보다 근본적으로는 Corcos 모형⁽⁴⁾으로 대변되는 경계층 감쇠모형에 의거하여 해석을 시도했기 때문이다. 그러나, 본 연구결과로부터, 압력장은 일정한 감쇠 패턴이 아닌 특정한 모드에 에너지가 집중되어 있음을 알 수 있다.

코히어런스가 주파수-길이 척도의 2차원 공간 상에서의 전반적인 거동을 길이척도에 대한 거동으로 나누어 고찰한 결과가 Fig. 5 및 Fig. 6에 도시되어 있다. 여기에서는 코히어런스가 Corcos 모형과 같은 단일한 상사변수(similarity variable)로 표현될 수 있는가를 조사하였다. Corcos 모형⁽⁴⁾에서는 코히어런스를 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\Gamma(\xi, \omega; X_0) = \exp(-\alpha_1 |\omega\xi/U_0|)$$

여기에서 α_1 은 흐름방향의 감쇠상수(decay constant)로서 경험적으로 정의되는 상수이다.

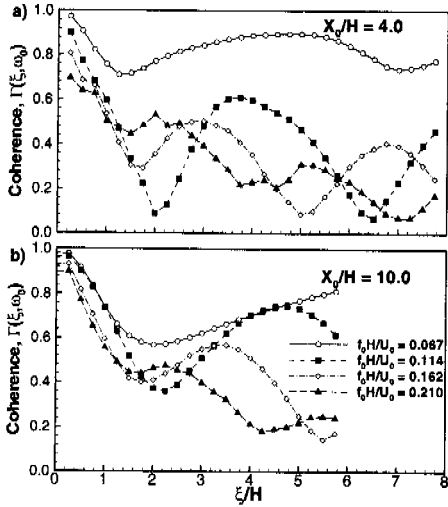


Fig. 5 Coherence as a function of ξ/H

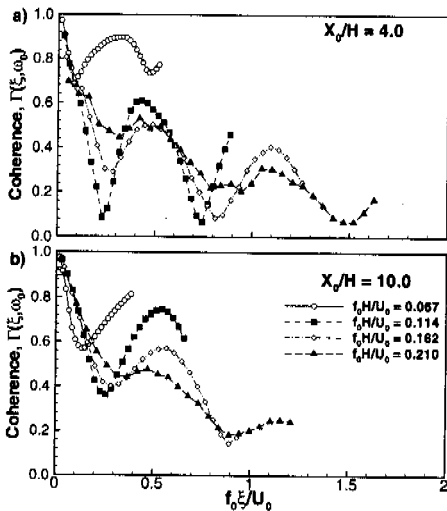


Fig. 6 Coherence as a function of $f_0\xi/U_0$

위에서도 언급한 바와 같이, 이것은 상사변수 $\omega\xi/U_c$ 에 의한 감쇠모형으로 볼 수 있다. Fig. 5 와 Fig. 6 은 같은 기준점에서 주파수를 고정하고 ($f=f_0$), 센서간격 ξ 를 변화시킬 때의 코히어런스를 보이고 있다. Fig. 5 에서는 통상적인 ξ/H 척도, Fig. 6 에서는 상사변수 식의 $f_0\xi/U_0$ 척도를 사용하였다. 저주파 대역, 특히 대규모 와구조의 주파수 성분은 여타의 주파수 성분보다는 훨씬 더 조직화되어 있다. Fig. 5 에서는 나머지 고주파 성분들의 최대치의 위치가 일치되지 않는 반면, Fig. 6 에서는 대체적인 일치를 보이고 있다. 물론 Fig. 6 과 같은 척도를 사용하여도 코히어런스가 지역최대가

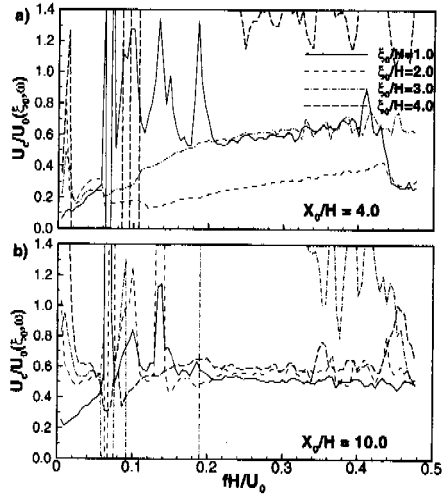


Fig. 7 Convection velocity as a function of fH/U_0

되는 지점은 $X_0/H=4.0$ 에서 $f_0\xi/U_0 \sim 0.45$, $X_0/H=10.0$ 에서 $f_0\xi/U_0 \sim 0.60$ 으로 변화하는 등, 기준점에 따라 다른 거동을 보이고 있다. 이상의 결과를 정리하면, 박리재부착 유동에서의 압력변동은 저주파 대역에서의 거대와구조에 의한 특정모드와 고주파대역에서의 감쇠모형으로 대별할 수 있다.

이상과 같은 코히어런스 이외에도 압력변동의 교차 스펙트럼의 위상 $\varphi(\xi, \omega, X_0)$ 으로부터 대류속도 $U_c(\xi, \omega, X_0)$ 를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$U_c(\xi, \omega, X_0) = -\omega\xi/\varphi(\xi, \omega, X_0)$$

이는 $\Phi_{pp}(\xi, \omega) = \Phi(\omega)\exp[-(\alpha_1 + j)|\omega\xi/U_c|]$ 으로 나타낼 수 있는 Corcos 모형에 따른 것이다. 즉, 교차 스펙트럼의 크기는 감쇠, 위상은 흐름방향으로의 대류를 표현한다. 대류속도를 정의함에 있어서 적절한 phase unwrapping 과정을 통하여 위상이 연속적으로 정의되도록 하였다.

Fig. 7 은 위와 같이 정의된 대류속도를 보이고 있다. 저주파 대역에서는 대류속도가 비정상적으로 커지거나 작아지지만 고주파로 갈수록 $0.6U_0$ 에 근접함을 발견할 수 있다. 그리고, $X_0/H=4.0$ 에서는 $\xi_0/H=4.0$, $X_0/H=10.0$ 에서는 $\xi_0/H=3.0$ 에서 주파수에 관계없이 매우 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 거동은 측정상의 오차라기 보다는 Corcos 모형에 의하여 설명될 수 없는 대형와 거동에 의한 것으로 판단된다. Corcos 모형은 압력에 대한 Poisson 방정식을 주파수-파수 영역에서 Fourier 전개하여 나타난 것으로 이해할 수 있다. 즉, 일정한 주파수 및 파수를 갖는 압력을 발생하는 난류와동

(turbulent eddy)들의 선형함으로 유동장을 바라보는 것이다. 각각의 난류와동들이 고유한 정체성(identity)을 보존하면서 감쇠되는 과정을 기술하는 경험식이 바로 Corcos 모형인 것이다. 그런데, 박리전단층에서 일어나는 와용합과 같은 비선형과정에서는 와동의 주파수 및 위상이 갑자기 도약하기 때문에 선형적인 해석들은 무의미해진다. 실제로 대류속도를 Fig. 4와 같은 주파수-길이척도 공간에서 도시하면(여기에는 보이지 않았음), 특이점들은 Fig. 4에 도시된 high coherence locus와 거의 일치함을 보이고 있다. $X_0/H=4.0$ 에서 $\xi_0/H=2.0$ 일 때 예외적으로 낮은 대류속도가 예측되는 것은 특이점으로부터 정상적인 영역으로 천이되면서 나타나는 과도특성으로 이해할 수 있다. 또한, $X_0/H=10.0$ 으로 가면서 특이척도가 $\xi_0/H=3.0$ 으로 감소하는 것은 유동이 재부착되면서 박리전단층이 사라지고 벽으로부터 성장하는 경계층에 의하여 거대와의 크기가 감소함을 예시하고 있다. 일부 주파수 및 척도에서 특이점을 보이는 것을 제외하고 대류속도는 재순환구역($X_0/H=4.0$)과 재발달구역($X_0/H=10.0$)두에서 양의 값을 지닌다. 이는 Farabee와 Casarella⁽²⁾에서도 보고된 현상으로, 압력변동이 벽 근처의 재순환유동이 아닌 박리전단층에 의하여 생성됨을 증명한다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 교차 스펙트럼을 공간상에서 Fourier 변환하여 얻어지는 파수 스펙트럼 $\Phi_{pp}(\xi, \omega, X_0)$ 을 나타내고 있다. 경계층 유동의 경우 매우 선명한 대류능선(convective ridge)을 관찰할 수 있다(Panton과 Robert⁽²⁰⁾의 Fig. 7 참조). Figs. 8, 9에서도 능선을 발견할 수 있으며 함께 도시된 흑색 실선의 기울기로부터 $U/U_0 \sim 0.6$ 임을 알 수 있다. 또한 하류 지역으로 갈수록 능선에 포함되는 주파수 영역이 확대된다. $X_0/H=8.0$ (Fig. 9 (a))에 이르러 능선의 파수방향 폭이 가장 커지다가 $X_0/H=10.0$ (Fig. 9 (b))에서는 그 폭이 다시 좁아진다. 능선의 파수방향 폭은 대류현상과 연관된 와동의 길이척도의 범위를 나타내기 때문에 위와 같은 거동은 재부착점 근방에서 벽면과의 상호작용을 통하여 일시적으로 다양한 척도의 와동이 존재하다가 소멸되면서 규칙적인 구조만이 존속되는 과정을 보이고 있다. 각 경우에서, 일정한 주파수를 가리키면서 파수 스펙트럼의 극소최대점들을 지나가는 백색 점선을 도시하였다. 여기에서 $X_0/H=8.0$ 까지는 대형와구조의 주파수 $fH/U_0=0.067$ 에서 파수 스펙트럼이 최대치를 보이다가, $X_0/H=10.0$ 에서는 최대주파수가 $fH/U_0=0.095$ 로 증가한다. 이는 역시, 재부착 이후 와의 찢어짐으로 인한 길이척도 감소

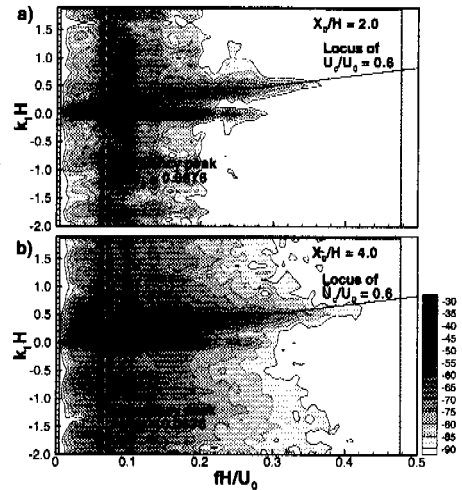


Fig. 8 Wavenumber spectra in recirculation region

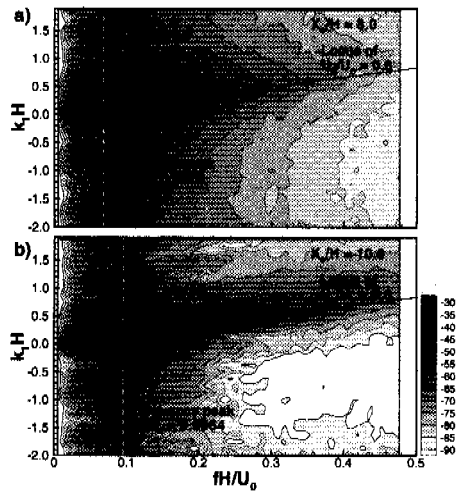


Fig. 9 Wavenumber spectra after reattachment

와 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서 계산된 파수 스펙트럼이 경계층에서의 결과와 다른 점은 재부착지역까지는 대류능선 이외에도 $k_1=0$ 축 주변의 정지모드가 존재한다는 것과 대형와구조 주파수에서는 에너지가 특정 파수 성분에 집중되지 않고 거의 모든 파수 영역에 분산되어 있다는 점을 들 수 있다.

정지모드의 존재는 박리기포가 전반적인 확대 및 축소의 과정을 겪는 flapping 현상에 의한 것임을 뒷받침하고 있다. Cherry 등⁽¹¹⁾은 유동가시화 결과로부터 대형와구조가 flapping의 특정한 단계마다 두드러지거나 혹은 감쇠됨을 보인 바 있다. 이와 같이, 파수 성분의 분산은 대형와구조가 공간적으로 흐트러져 있음을 나타내고 있는데 flapping

에 의한 무작위적 변조(random modulation)의 존재 가능성을 시사하고 있다.

4. 결론

다채널 마이크로폰 어레이를 이용하여 후향계단 주위의 난류 박리재부착 유동장에서의 압력변동의 시공간적인 특성을 조사하였다. 이미 잘 알려진 바와 같이, 본 연구에서도 압력변동의 에너지는 시간평균 재부착점의 약간 전방에서 최대가 된다. 각 위치에서 측정된 압력변동의 확률밀도함수는 Gaussian 확률과정과 매우 유사하다.

주파수-과수 영역의 각종 통계량에서 압력장은 저주파 대역에서는 대형외구조의 특징을 보이며, 고주파 대역에서는 경계층 감쇠 모형과 비슷한 거동을 보인다. 압력변동은 주로 박리전단층에 의한 거대외구조에 의하여 생성되며 이는 재순환 구역 내부에서 측정된 양의 대류속도에 의해서도 확인된다. 전반적으로 압력변동의 특성이 유동장의 조직구조에 의해 지배되므로 박리재부착 유동에서의 압력장의 거동에 대한 새로운 모형의 개발이 필요한 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, H. C. and Moin, P., 1990, "On the Space-Time Characteristics of Wall-Pressure Fluctuations," *Phys. Fluids A*, Vol. 2, pp. 1450~1460.
- (2) Farabee, T. and Casarella, M. J., 1991, "Spectral Features of wall Pressure Fluctuations beneath Turbulent Boundary Layers," *Phys. Fluids A*, Vol. 3, pp. 2410~2420.
- (3) Schewe, G., 1983, "On the Structure and Resolution of Wall-Pressure Fluctuations Associated with Turbulent Boundary-Layer Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 134, pp. 311~328.
- (4) Corcos, G. M., 1964, "The Structure of the Turbulent Pressure Field in Boundary-Layer Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 18, pp. 353~378.
- (5) Chase, D. M., 1987, "The Character of the Turbulent Wall Pressure Spectrum at Subconvective Wavenumbers and a Suggested Comprehensive Model," *J. Sound Vib.*, Vol. 112, pp. 125~147.

- (6) Mabey, D. G., 1972, "Analysis and Correlation of Data on Pressure Fluctuations in Separated Flow," *J. Aircraft*, Vol. 9, pp. 642~645.
- (7) Govinda Ram, H. S. and Arakeri, V. H., 1990, "Studies on Unsteady Pressure Fields in the Region of Separating and Reattaching Flows," *J. Fluids Eng.*, Vol. 112, pp. 402~408.
- (8) Eaton, J. K. and Johnston, J. P., 1981, "A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment," *AIAA J.*, Vol. 19, no.9, pp. 1093~1100.
- (9) Kiya, M. and Sasaki, K., 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.*, Vol. 137, pp. 83~113.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Farabee, T. M. and Casarella, M. J., 1986, "Measurements of Fluctuating Wall Pressure for Separated/Reattached Boundary Layer Flows," *J. Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, Vol. 108, pp. 301~307.
- (13) Chun, K. B. and Sung, H. J., 1996, "Control of Turbulent Separated Flow over a Backward-Facing Step," *Exp. Fluids*, Vol. 21, pp. 417~426.
- (14) Brederode, V. and Bradshaw, P., 1978, "Influence of the Side Walls on the Turbulent Center-Plane Boundary-Layer in a Aquareduct," *J. Fluid Eng.*, Vol. 100, pp. 91~96.
- (15) Driver, D. M., Seegmiller, H. L. and Marvin, J. G., 1987, "Time-Dependent Behavior of a Reattaching Shear Layer," *AIAA J.*, Vol. 25, no.7, pp. 914~919.
- (16) Le, H. and Moin, P., 1994, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over a Backward Facing step," *Dept. of Mech. Eng.*, Stanford Univ., Report No. TF-58.
- (17) Devenport, W. J. and Sutton, E. P., 1991, "Near-Wall Behavior of Separated and Reattaching Flows," *AIAA J.*, Vol. 29, no.1, pp. 25~31.
- (18) Eaton, J. K., 1980, "Turbulent Flow Reattachment: an Experimental Study of the Flow and Structure behind a Backward-Facing step," Doctoral Thesis, Dept. of Mech. Eng., Stanford Univ.
- (19) George, W. K., Beuther, P. D. and Arndt, R. G., 1984, "Pressure Spectra in Turbulent Free Shear Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 148, pp. 155~191.
- (20) Panton, R. L. and Robert, G., 1994, "The Wavenumber-Phase Velocity Representation for the Turbulent Wall-Pressure Spectrum," *J. Fluids Eng.*, Vol. 116, pp. 477~483.