

후향 계단 주위 난류 박리 유동에 대한 비정상 후류의 영향

전 세 종* · 성 형 진†

(2003년 4월 22일 접수, 2003년 10월 8일 심사완료)

Influence of Unsteady Wake on Turbulent Separated Flows over a Backward-Facing Step

Sejong Chun and Hyung Jin Sung

Key Words: Backward-Facing Step(후향계단), Unsteady Wake(비정상 후류), Spatial Box Filtering (SBF, 공간 박스 필터링)

Abstract

An experimental study was made of turbulent separated and reattaching flow over a backward-facing step, where unsteady wake was generated by a spoked-wheel type wake generator with cylindrical rods in front of the separated flow. The influence of unsteady wake was scrutinized in terms of the rotating speed of the wake generator ($0 \leq St_H \leq 0.4$). A conditional averaging technique in corporation with SBF was employed to elucidate the influence of the unsteady wake on the large-scale vortical structures of the separated flow. Special attention was made during two-dimensional measurements of wall-pressure with or without unsteady wake. The wall-pressure fluctuations were used to predict dipole sound source by Curle's integral formula. It was found that the reduction of the dipole sound source was due to the reduction of turbulent kinetic energy by unsteady wake in the recirculation region.

기호설명

C_p : 벽면 압력 변동 계수 ($p_w/0.5\rho U_\infty^2$)
 H : 후향 계단 높이 [m]
 L_x : 흐름방향 측정 범위 [m]
 L_z : 횡방향 측정 범위 [m]
 M : 흐름방향으로 이산화된 벽압력 요소의 개수
 N : 횡방향으로 이산화된 벽압력 요소의 개수
 R_s : 표면 음원에서 관찰점까지 거리 [m]

Re_H : 레이놀즈 수
 S : 표면적 [m^2]
 St : 무차원화된 주파수 ($St=fH/U_\infty$)
 St_H : 무차원화된 가진 주파수 ($St_H=fH/U_\infty$)
 T : 위상 주기 [sec]
 U : 흐름방향 유속 [m/s]
 U_∞ : 자유흐름 유속 [m/s]
 V : 벽면 수직방향 유속 [m/s]
 a : 음속 [m/s]
 d : 측정 평면상의 원점에서 관찰점까지의 거리 [m]
 f : 주파수 [Hz]
 dS : 미분 표면적 [m^2]
 l_j : 방향 코사인
 k : 난류 에너지 [m^2/s^2]
 p' : 변동 압력 [Pa]

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

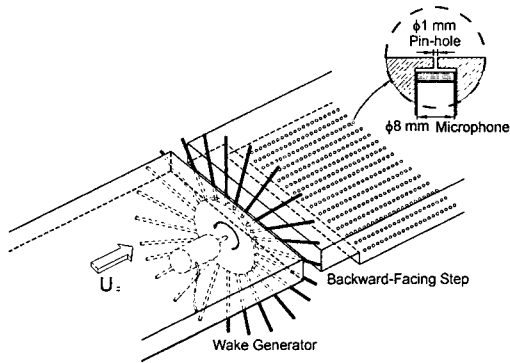


Fig. 1 Backward-facing step with wake generator

- p_a : 이극자 유동 소음 [Pa]
- p_w : 벽면 변동 압력 [Pa]
- r : 원점에서 관찰점까지 거리 [m]
- t : 시간 [sec]
- u' : 흐름방향 난류 강도 [m/s]
- u'_{max} : 최대 평균 유속의 제곱근 [m/s]
- v' : 벽면 수직방향 난류 강도 [m/s]
- x : 흐름방향 좌표 [m]
- x_i : 흐름방향 센서의 i번째 위치 [m]
- x_R : 재부착 길이 [m]
- y : 벽면 수직방향 좌표 [m]
- z : 횡방향 좌표 [m]
- z_j : 횡방향 센서의 j번째 위치 [m]
- δ : 경계층 두께 [m]
- δ^* : 변위 두께 [m]
- δ_{ij} : Kronecker 델타
- θ : 모멘텀 두께 [m]
- λ : 파장 길이 [m]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- τ : 시간차 [sec]
- ϕ : 수직좌표와 관찰점이 이루는 각도 [$^\circ$]
- ψ : 가로좌표와 관찰점이 이루는 각도 [$^\circ$]

1. 서론

후향 계단 유동은 난류 박리 및 재부착으로 이루어진 복잡한 유동으로서 그동안 많은 풍동 실험과 수치 해석이 병행되었다.⁽¹⁾ 후향 계단 유동은 계단 모서리로부터 생성되는 와구조(rolled-up vortex)가 공간적으로 발달하면서 유동 벽면과

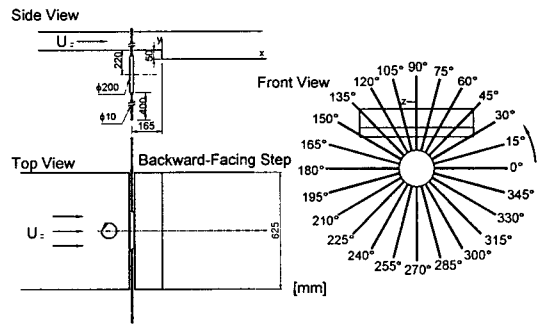


Fig. 2 Experimental setup of backward-facing step

일으키는 상호작용으로 특징지어진다. 박리된 유동이 유동 벽면에 재부착하면, 비정상성(unsteadiness), 벽면 압력 변동, 구조 진동이 발생하는데, 이는 압력 손실, 소음 등의 문제를 일으킨다. 후향 계단 유동에 비정상 후류가 주기적으로 유입되면, 유동 구조는 조직화되므로 비정상성, 압력 변동, 구조 진동이 감소한다.^(2,3)

비정상 후류에 의해 유동 구조가 조직화되는 대표적인 예는 터보 기계 내의 터빈 블레이드 캐스케이드 유동이다. 회전자와 고정자로 구성된 터빈 블레이드 캐스케이드에서 회전자가 회전하여 비정상 후류를 생성하면, 고정자는 유동 박리를 주기적으로 일으키고, 항력 및 소음을 발생하여 터보 기계의 성능을 저하시킨다. 이 문제는 유동-공력체 상호작용의 범주에 속하며, Han 등,⁽⁴⁾ Funazaki,⁽⁵⁾ Minniti III 과 Mueller,⁽⁶⁾ Jeon 등⁽⁷⁾ 많은 연구자들이 비정상 후류에 의한 경계층 또는 익형 주위 유동의 열전달 향상, 천이 지연 효과 및 유동 소음 저감에 대해 실험하였다.

Chun 등^(2,3)은 비정상 후류의 주기적인 생성이 둔각 물체 주위 박리 유동에 미치는 영향을 관찰하였다. Chun 등^(2,3)의 연구에서는 후류 발생기의 회전 방향이 둔각물체의 압력면과 흡입면을 구분하였는데, 둔각 물체의 압력면에서 항력과 유동 소음의 저감 효과가 잘 나타났다. Lee 등⁽⁸⁾과 Ahn 등⁽⁹⁾은 마이크로폰의 1차원 배열과 SBF 기법을 응용하여 박리 유동의 대형 와구조를 관찰하였다. 그러나, 정확한 박리 유동 구조의 이해를 위해서는 2차원 마이크로폰 배열을 응용한 측정 기법을 도입하여야 한다.

본 연구는 비정상 후류가 후향 계단 주위 유동의 항력 및 소음 감소에 미치는 영향을 고찰하였

다. 본 연구에서는 유동 구조를 측정하기 위해 조건부 평균과 SBF 기법을 도입하였고, 유동 소음원을 예측하기 위해 Curle의 적분식(Curle's integral formula)을 도입하였다. 또한, 본 연구에서는 후향 계단 바닥면에 배열 마이크로폰을 설치하여 벽면 압력 변동 계수와 압력 스펙트럼을 측정하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 풍동

본 연구에서는 개방 송출형 풍동을 사용하였다.^(9,10) 풍동 입구부에는 허니콤과 스크린, 6:1의 수축부를 설치하여 층류 유동을 얻었다. 풍동 출구부에는 높이 100 mm, 길이 1000 mm, 폭 630 mm인 채널을 설치하였다. 채널 입구에는 거칠기(roughness) 요소를 설치하였으며, 층류에서 난류로의 천이가 잘 일어나도록 하였다. 풍동 시험부에는 높이 100 mm, 길이 4000 mm, 폭 630 mm, 확장비 1.5인 확장관을 설치하였다. 시험부 입구에서 120 mm 떨어진 지점에 설치된 후향 계단의 높이는 50 mm이었다. 후향 계단의 중형 비는 12.5, 확장비는 1.5로서 이차원 유동 가정이 잘 성립하였다.⁽¹⁰⁾

풍동 시험부와 채널 사이에는 후류 발생기를 설치하였다. 후류 발생기에는 지름 10 mm, 길이 400 mm인 24개의 원봉들을 15°의 간격으로 설치하여, 난류 박리 유동을 주기적으로 교란하였다. 후류 발생기의 회전 속도는 0 ~ 3.33 rad/s으로, 무차원화된 가진 주파수(St_H)로 환산하면, $0 \leq St_H \leq 0.4$ 이었다. 풍동 시험부의 바닥면에는 25 mm의 간격으로 가로 17열, 세로 16열의 측정홀들을 가공하였다. 측정홀에는 배열 마이크로폰을 설치하여 벽면 변동 압력을 측정하였다.

2.2 측정 장치

본 연구에서는 열선 풍속계와 마이크로폰 배열을 이용하여 유속과 벽면 변동 압력을 동시에 측정하였다. 유속 측정에는 정온형 열선 풍속계(TSI IFA 300, TSI Inc.)와 스플릿 필름(Split film, TSI 1288)을 사용하였다. 본 연구에서는 풍동 시험부의 중심선을 따라 흐름방향(x)으로 28개,

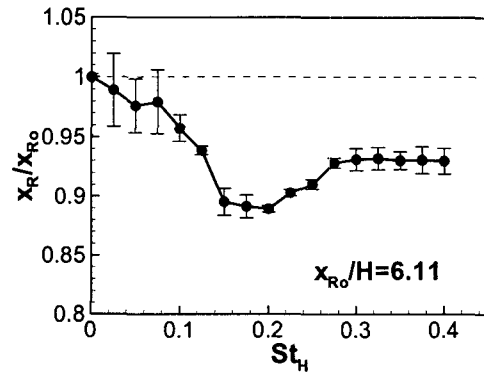


Fig. 3 Normalized reattachment x_R/x_{R0} against St_H at $Re_H = 33,000$

벽면 수직방향(y)으로 50개 위치에 측정 좌표를 정의하고, 유속을 측정하였다. 측정 원점은 확장관의 모서리로 정의하였고, 측정 범위는 x방향으로 $1 \leq x/H \leq 14.5$, y방향으로 $0 \leq y/H \leq 3$ 이었다. 측정 시에는 1.26 kHz의 샘플링 주파수로 45,600개의 데이터를 측정하였다. 신호 왜곡을 방지하기 위하여는 2 kHz의 저역 통과 필터를 사용하고 5 kHz의 주파수로 데이터를 측정 후, 다운 샘플링(downsampling)하여 데이터의 크기를 1/4로 줄였다.⁽⁹⁾

유동 소음원을 예측하기 위하여는 64채널의 다중 배열 마이크로폰(TMS060A, Soritel Inc.)을 벽면 변동 압력 측정에 이용하였다. 배열 마이크로폰은 지름 8 mm, 길이 12 mm, 감도 25 mV/Pa로서, 10 Hz ~ 10 kHz의 주파수 범위에서 크기 왜곡 ± 1 dB과 위상 오차 $\pm 3^\circ$ 이내의 특성을 보였다. 마이크로폰의 동적 특성 범위는 42 ~ 142 dB이었다. 다중 배열 마이크로폰을 설치하기 위하여는 풍동 시험부의 바닥면에 지름 1 mm의 핀홀과 지름 8.1 mm의 마이크로폰 설치홀을 동심원상으로 가공하였다. 벽면 변동 압력 측정 시에는 5 kHz의 샘플링 주파수로 409,600개의 데이터를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 스트로할 수와 재부착 길이

난류 박리 유동을 가장 잘 대표하는 물리량은 재부착 길이(x_R)이다. 재부착 길이를 측정하기 위

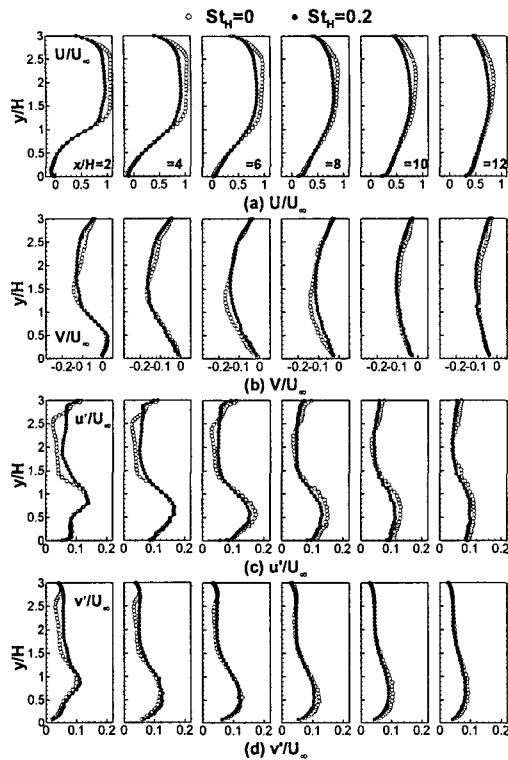


Fig. 4 Time-averaged velocity profiles at $Re_H = 33,000$

해서는 풍동 시험부의 바닥면 근처($y/H = 0.01$)에서 유동 정방향 흐름과 역방향 흐름이 확률적으로 동일한 위치를 찾아야 한다. 후류 발생기의 회전 속도를 증가시키면, x_R 이 감소한다. 무차원화된 재부착길이(x_R/x_{R0})는 무차원화된 가진 주파수(St_H)의 함수로서 나타낼 수 있으며, $St_H = 0.2$ 에서 x_R/x_{R0} 이 최소값을 나타낸다. 단, x_{R0} 는 $St_H = 0$ 의 재부착 길이로서, $x_{R0}/H = 6.11$ 이다. $St_H = 0.2$ 에서 x_R 이 최소가 되어, 박리 유동이 가장 효과적으로 제어된다. $St_H \geq 0.3$ 의 영역에서는 St_H 이 x_R 의 감소에 영향을 미치지 않는다. 이러한 결과들은 음향 국소 가진이 박리 유동에 미치는 영향에 관한 선행 연구 결과와 일치한다.⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 비정상 후류에 의한 유동 구조 및 유동 소음원의 변화를 고찰하기 위해, 두 가지 특징적인 St_H 의 경우를 $St_H = 0$ 과 $St_H = 0.2$ 로 선정하였다. $St_H = 0$ 은 후류 발생기를 설치하였지만, 회전하지 않은 경우이고, $St_H = 0.2$ 는 1.67 rad/s로 회전한 경우이다. $St_H = 0.2$ 는 최적의 가진 주파수로서, 와츨림 주파수($St = 0.067$)의

Table 1 Inlet boundary conditions

	δ (mm)	δ^* (mm)	θ (mm)	H
Past ⁽⁹⁾	21.69	3.01	2.18	1.38
Present	24.62	4.69	3.18	1.48

2~5배인 영역에 해당되어 기존 결과와 잘 일치한다.⁽¹¹⁾

3.2 입구 경계층 유동

후류 발생기를 설치하기 위해 채널과 풍동 시험부의 간격을 띄어 놓으면, 박리 이전의 유동이 천이 유동이 되어 벽 법칙이 잘 성립하지 않는다. 이 때, 풍동 시험부의 입구에 거칠기 요소를 부착하면, 박리 이전의 유동이 난류 유동이 되어 기존 결과와 잘 일치한다. 본 연구에서 측정된 입구 유동의 데이터를 Table 1에 나열하였다. 본 연구에서는 박리 이전의 유동이 형상계수가 1.48로서 난류 경계층임을 알 수 있다.

3.3 시간 평균 유동장

$St_H = 0.2$ 에서 재부착 길이가 줄어드는 이유를 고찰하기 위하여는 평균 유속과 난류 강도 등의 시간 평균 유동장을 측정하여야 한다. Fig. 4(a)에 도시된 흐름방향 유속(U/U_∞)을 살펴보면, 자유 흐름 영역($1 \leq y/H \leq 3$)에서는 비정상 후류에 의해 유속이 감소한다. 시험부 바닥면에 인접한 재부착 영역($4 \leq x/H \leq 8, 0 \leq y/H \leq 0.5$)에서는 비정상 후류에 의해 유속이 증가한다. Fig. 4(b)의 벽면 수직방향 유속(V/U_∞)은 자유 흐름 영역($1 \leq y/H \leq 3$)과 재부착 영역에서 비정상 후류에 의해 감소한다. Fig. 4(c)의 흐름방향 난류 강도(u'/U_∞)는 자유 흐름 영역($1 \leq y/H \leq 3$)에서는 증가하지만, 재순환 영역($0 \leq y/H \leq 1$)에서는 감소한다. Fig. 4(d)에 도시된 벽면 수직방향 난류 강도(v'/U_∞)도 자유 흐름 영역에서 증가하나 재순환 영역에서 감소한다. 이러한 결과들은 첫 번째, 후류 발생기의 회전에 의해 횡방향 유속 성분이 존재하게 되어 U, V가 감소하고, 두 번째, $St_H = 0.2$ 에서 비정상 후류가 유동장을 효과적으로 교란하고, 세 번째, 비정상 후류가 박리 유동과 상호작용하여 유동장을 조직화시키기 때문이다.^(2,3) 박리 유동을 효과적으로 교란하면, 자유 흐름 유동의 높은 모멘텀이 박리 유동으로 잘 전달되기 때문에 재부착 길이가 감소한다. 특기할 점은, 재

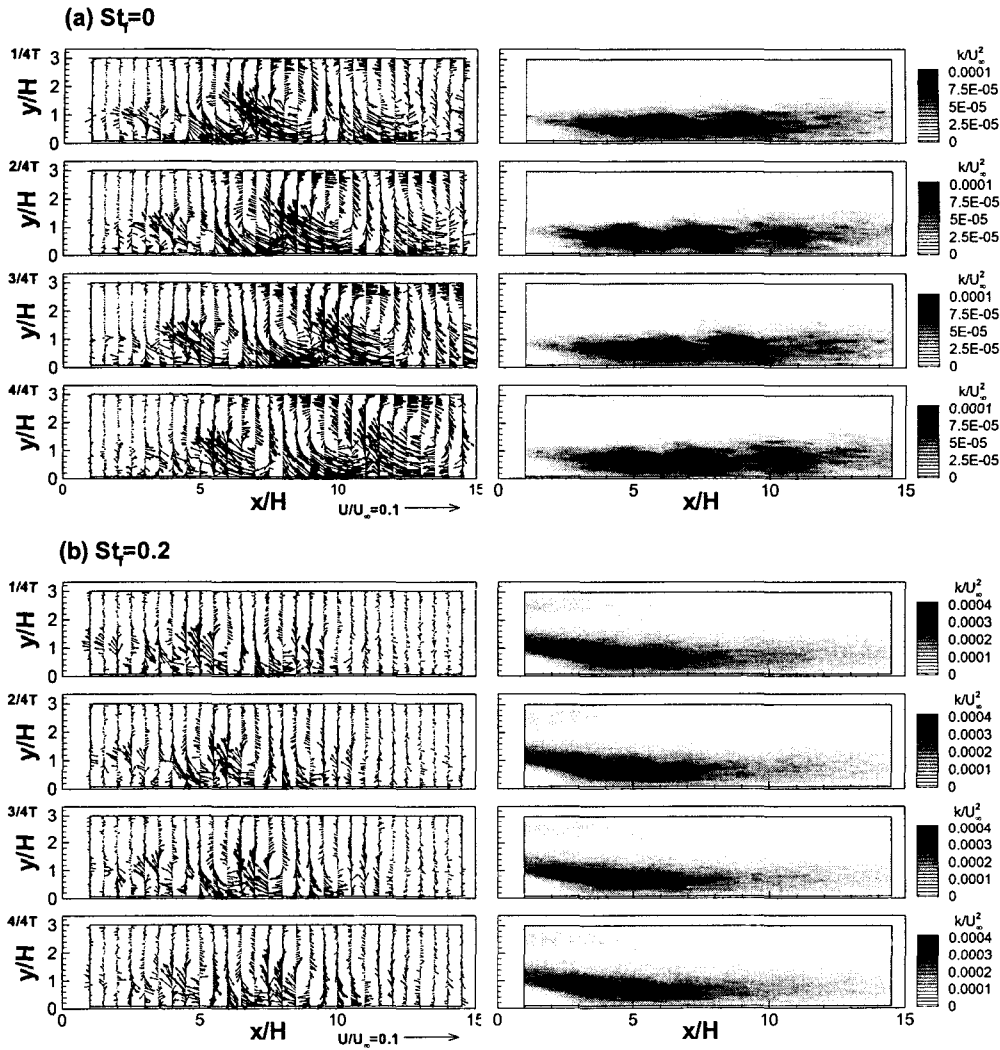


Fig. 5 Sequential plots of the conditionally averaged velocity field at $Re_H = 33,000$

순환 영역에서 난류 강도가 감소한다는 것이다. 비정상 후류에 의해 재순환 영역의 난류 강도가 감소하면, 이는 난류 혼합에 의한 유동 소음이 감소함을 의미한다.

3.4 조건부 평균 유동장

비정상 후류가 재부착 길이를 감소시키는 원인을 고찰하기 위하여는 유동 구조를 측정하여야 한다. Fig. 5는 $St_H = 0$ 와 $St_H = 0.2$ 의 유동 구조를 조건부 평균과 SBF 기법에 의해 나타낸 것으로서 1/4 주기 단위로 나타내었다. 본 연구에서는 유동 구조의 특징을 이해하기 위하여 $St_H = 0$ 은

와홀립 주기($St = 0.067$)에 대해, $St_H = 0.2$ 는 후류 가진 주기($St = 0.2$)에 대해 각각 나타내었다. Fig. 5(a)는 와홀립 주기로 관찰하므로, Fig. 5(b)보다 유동 구조가 더 크고, 대형 와구조가 공간 발달하는 모습이 잘 나타난다. $St_H = 0$ 일 때, 재부착 이후로 대형 와구조의 크기는 풍동 시험부의 전 영역으로 확대된다. $St_H = 0.2$ 는 후류 가진 주기로 유동 구조를 관찰하므로, $St_H = 0$ 에 비해 유동 구조가 작다. 난류 에너지 분포는 $St_H = 0$ 와 달리 하나의 거대한 응집구조로서 나타나고, 유동 구조가 조직화되어 있다. 박리 전단층의 진행 방향 또한 $St_H = 0$ 보다 벽면을 향해 더 기울어져

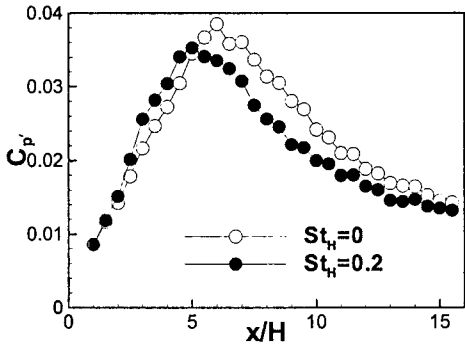


Fig. 6 Wall-pressure fluctuation coefficient at $Re_H = 33,000$

있다. 이로부터 비정상 후류가 박리 유동의 진행 방향에 영향을 주어 재부착 길이를 감소시키는 것을 알 수 있다.

3.6 시간 평균 벽면 압력장

Fig. 6은 풍동 시험부 바닥면의 중심선을 따라 측정된 벽면 압력 변동 계수 C_p 를 측정한 결과이다. $St_H = 0$ 일 때, C_p 은 $x/H = 6$ 에서 최대값을 갖는다. 본 연구에서는 후류 발생기를 풍동 시험부 상류에 설치하였기 때문에, C_p 의 최대값은 기존 연구 결과와 달리 정확히 재부착점보다 1H 상류에 위치하지는 않는다.⁽⁹⁾ $St_H = 0.2$ 일 때 C_p 의 최대값은 $x/H = 5$ 에 위치하는데, 재부착 길이가 $x_R/H = 5.44$ 이므로 C_p 의 최대값은 재부착점보다 0.4H 상류에 위치한다. 비정상 후류에 의해 $St_H = 0.2$ 에서 C_p 의 최대값이 약 8% 감소한다. 이는 재순환 영역에서 비정상 후류에 의해 난류 강도가 감소하는 현상과 일치한다. 이로부터, 비정상 후류가 벽면 변동 압력을 감소시켜 유동이 벽면에 부딪치므로 발생하는 유동 소음이 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 풍동 시험부 바닥면의 중심선을 따라 벽면 변동 압력의 주파수 스펙트럼을 측정한 결과이다. 유동 박리 직후($x/H = 1.25$)에는 와홀림 주파수가 $St = 0.067$ 에서 관찰된다. $St = 0.1$ 에서는 와홀림 주파수 이외의 성분이 관찰되는데 이는 후류 발생기를 설치함으로써 나타나는 주파수 성분이다. $St = 0.2$ 에서는 비정상 후류의 가진 주파수 성분이 나타난다. $St = 0.02$ 에서는 기존 문헌에

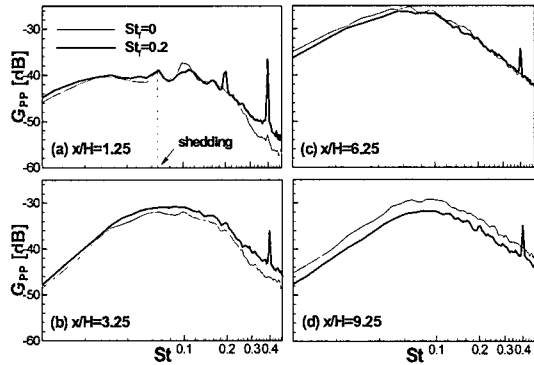


Fig. 7 Wall-pressure spectrum at $Re_H = 33,000$

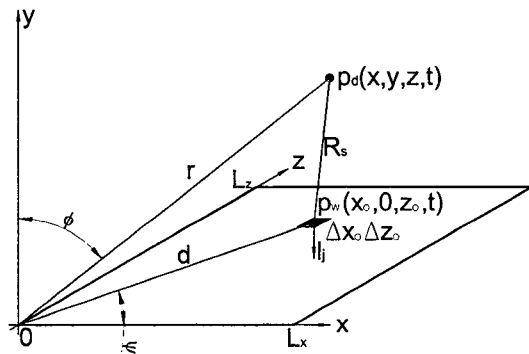


Fig. 8 Coordinate system for calculating the Curle's integral

보고된 플랩핑(flapping) 주파수 성분이 나타난다.^(1,8,11,12) 비정상 후류의 영향은 재부착 영역($x/H = 6.25$)을 기점으로 재순환 영역($x/H = 3.25$)에서 스펙트럼의 크기를 증가시키고, 재발달 영역($x/H = 9.25$)에서 스펙트럼의 크기를 감소시킨다.

3.6 이극자 유동 소음원

Fig. 8은 Curle의 적분식에 의한 이극자 유동 소음원을 계산하기 위한 좌표계이다. Curle의 적분식은 다음과 같이 주어진다.⁽¹³⁾

$$p_a(x, y, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x_i} \int \int_S l_j [\delta_{ij} p_w] \frac{dS}{R_s} \quad (1)$$

[]는 시간차(retarded time)를 나타내며, [] = $\tau = t - \frac{x}{a}$ 를 의미한다. 이를 다중배열 마이크로폰의 위치와 연관지어 이산화시키면,

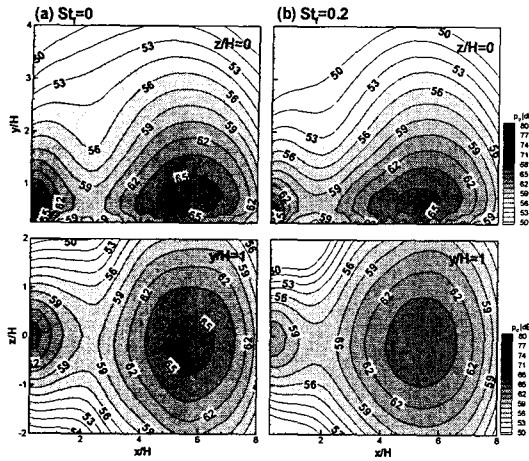


Fig. 9 Distribution of dipole sound source by conditional averaging

$$\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x_i} \int \int l_j [\delta_{ij} p_w] \frac{dS}{R_s} \approx \frac{\cos \phi}{4\pi} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [p_w(x_i, z_j, t)] \times \frac{r - \sqrt{x_i^2 + z_j^2} \sin \phi}{r^2 - 2\sqrt{x_i^2 + z_j^2} \sin \phi r + x_i^2 + z_j^2} \Delta x \Delta z \quad (2)$$

이다. 단, x_i, z_j 는 벽면 압력장의 i, j 번째 좌표, M, N 은 이산화된 벽압력 요소의 x, z 방향 개수이다. 유동 소음원을 계산할 때에는 압력장을 조건부 평균하여, 측정 시의 불필요한 잡음을 제거하고, 대형 와구조에 의한 변동 압력만을 샘플하였다.

Fig. 9에는 식 (2)로부터 계산한 유동 소음원의 분포를 나타내었다. $St_H = 0$ 일 때, 유동 소음원은 재부착 영역($4 \leq x/H \leq 8$)과 2차 유동 영역($0 \leq x/H \leq 2$)에 분포한다. 이 중, 재부착 영역의 유동 소음원이 지배적인 유동 소음원이다. 비정상 후류는 $St_H = 0.2$ 일 때, 재부착 영역과 2차 유동 영역의 유동 소음원의 크기를 모두 감소시킨다. 원거리장($x/H = 8, y/H = 4$)에서 소음 레벨은 비정상 후류에 의해 약 3 dB 감소한다.

4. 결론

본 연구에서는 비정상 후류가 후향 계단 주위 난류 박리 유동에 미치는 영향을 실험적으로 연

구하였다. 본 연구에서는 후류 발생기를 풍동 시험부 상류에 설치하여 주기적으로 비정상 후류를 생성하였다. 본 연구에서는 무차원화된 가진 주파수(St_H)에 따른 재부착 길이의 감소 효과를 고찰하였다. 본 연구에서는 Curle의 적분식을 이용하여 유동 소음원을 예측하였고, 비정상 후류가 유동 소음을 저감하는 것을 확인하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 비정상 후류는 특정 주파수에서 난류 박리 유동의 재부착 길이를 효과적으로 감소시킨다. 최적의 가진 주파수는 $St_H = 0.2$ 로서, 기존 문헌 결과와 일치한다.
- (2) 비정상 후류는 $St_H = 0.2$ 일 때, 박리 전단층의 유동 진행 방향을 벽면으로 향하게 함으로써 재부착 길이를 감소시킨다.
- (3) 비정상 후류는 유동 재순환 영역에서 난류 강도를 감소시키고, 이는 난류 혼합에 의한 유동 소음을 감소시킨다. (사극자 소음원)
- (4) 비정상 후류는 최대 벽면 압력 변동 계수를 감소시키고, 이는 유동-벽면 상호작용에 의한 유동 소음을 감소시킨다. (이극자 소음원)
- (5) 본 연구에서는 Curle의 적분식을 적용하여, 이극자 유동 소음원을 예측하였고, 유동 소음원이 재부착 영역과 2차 유동 영역에 위치함을 발견하였다. Curle의 적분식을 이용하여 얻은 유동 소음원은 유동-벽면 상호작용에 의한 유동 소음과 일치하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Eaton, J. K. and Johnston, J. P., 1981, "A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment," *AIAA J.*, Vol. 19, pp. 1093~1100.
- (2) Chun, S. and Sung, H. J., 2002, "Influence of Unsteady Wake on a Turbulent Separation Bubble," *Exp. fluids*, Vol. 32, pp. 269~279.
- (3) Chun, S. and Sung, H. J., 2003, "Large-Scale Vortical Structure of Turbulent Separation Bubble

- Affected by Unsteady Wake," *Exp. fluids*, Vol. 34, pp. 572~584.
- (4) Han, J. C., Zhang, L. and Ou, S., 1993, "Influence of Unsteady Wake on Heat Transfer Coefficient from a Gas Turbine Blade," *J. Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 904~911.
- (5) Funazaki, K., 1996, "Unsteady Boundary Layers on a Flat Plate Disturbed by Periodic Wake" *J. Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 327~346.
- (6) Minniti III, R. J. and Mueller, T. J., 1998, "Experimental Investigation of Unsteady Aerodynamics and Aeroacoustics of a Thin Airfoil," *AIAA J.*, Vol. 36, pp. 1149~1156.
- (7) Jeon, W. P., Park, T. C. and Kang, S. H., 2001, "Effects of Wake-Passing Orientation and Frequency on Unsteady Boundary Layer Transition on an Airfoil," *The First Symposium on AFI-2001*.
- (8) Lee, I. and Sung, H. J., 2002, "Multiple-Arrayed Pressure Measurement for Investigation of the Unsteady Flow Structure of a Reattaching Shear Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 463, pp. 377~402.
- (9) Ahn, S. K., Lee, I. W. and Sung, H. J., 2002, "Large-Scale Vortical Structure in Separated and Reattaching Turbulent Flow over a Backward-Facing Step," *KSME J.*, Vol. 26, pp. 1674~1680.
- (10) Brederode, V. and Bradshaw, P., 1978, "Influence of the Side Walls on the Turbulent Center-Plane Boundary-Layer in a Square Duct," *J. Fluid Eng.*, Vol. 100, pp. 91~96.
- (11) Sigurdson, L. W., 1995, "The Structure and Control of a Turbulent Reattaching Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 298, pp. 139~165.
- (12) 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.
- (13) Smol'yakov, A. V., 1994, "The Influence of Viscous Stress Fluctuations in a Flow on Aerodynamical Noise," *Acoustica*, Vol. 80, pp. 541~546.