

난류박리기포에 대한 비정상 후류의 영향

전 세 종* · 성 형 진†

(2001년 9월 5일 접수, 2001년 11월 19일 심사완료)

Influence of Unsteady Wake on a Turbulent Separation Bubble

Sejong Chun and Hyung Jin Sung

Key Words : Wake Generator(후류가진기), Unsteady Wake(비정상후류), Separation Bubble(박리기포)

Abstract

An experimental study was made of turbulent separated and reattaching flow over a blunt body, where unsteady wake was generated by a spoke wheel-type wake generator with cylindrical rods. The influence of unsteady wake was scrutinized by altering the rotating direction (CW and CCW) and the normalized passing frequency ($0 \leq St_H \leq 0.20$). The Reynolds number based on the cylindrical rod was $Re_d=375$. A phase-averaging technique was employed to characterize the unsteady wake. The effect of different rotating directions was examined in detail, which gave a significant reduction of x_R . The wall pressure fluctuations on the blunt body were analyzed in terms of the spectrum and the coherence.

ϕ : 위상각

기호설명

CW	: 시계방향 회전
CCW	: 반시계방향 회전
C_p	: 벽압력계수, $(P - P_\infty) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$
C_p'	: 벽압력변동계수, $p' / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$
H	: 둔각물체의 절반두께, mm
Re_d	: 원봉 레이놀즈 수, $U_\infty d / \nu$
Re_H	: 둔각물체 레이놀즈 수, $U_\infty H / \nu$
St	: 스트로할 수, fH / U_∞
St_H	: 후류통과 스트로할 수, $f_p H / U_\infty$
U_G	: 원봉후류 속도, m/s
U_∞	: 자유흐름 속도, m/s
x_R	: 재부착 길이, mm
$\Gamma(\xi, \omega; x_0)$: x_0 를 기준한 압력 응집도
γ_p	: 흐름방향 유동 시간분율
ξ	: 흐름방향 거리 간격, mm
$\Phi_{pp}(\xi, \omega; x_0)$: 압력 교차 스펙트럼, $N^2/s/m^4$

1. 서론

터보기계에서 정지익렬과 회전익렬은 서로 번갈아가면서 규칙적으로 배열되어 있기 때문에, 터빈 블레이드 위에 형성되는 난류박리기포는 상류에 위치한 블레이드의 후류에 의해 주기적으로 영향받는다. 블레이드 후류는 평균속도의 감소와 높은 난류강도를 일으킨다. 이러한 비정상(unsteady) 유동조건들은 난류 박리기포에 상당히 영향을 끼친다. 이러한 조건들을 또한 유동과 공력체 간의 주기적 상호작용에 의해 발생하는 많은 소음 문제와 관련된다.

문헌조사에 의하면, 상류 익렬이 지나가면서 발생하는 비정상 후류의 효과에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 대다수의 연구들은 후류유동이 블레이드 표면의 천이현상이나 열전달과 어떤 상호작용을 일으키는지에 관해 관심을 기울여 왔다.⁽¹⁻⁷⁾ Han et al.⁽¹⁾은 풍동실험으로부터 비정상 후류 통과는 보다 넓은 영역에서 일찍 경계층 천이가 일어나도록 증진시키는 것을 보여주었다. 또한, 그들은 블레이드의 압력면보다 흡입면에서 열전달 계수가 보다 효과적으로 증가함도 보여주었다.⁽¹⁾ 그들은 실험에 사용한 원봉의 속도, 원

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

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

Table 1 Unsteady wake characteristics at $Re_d=375$ and reattachment lengths at $Re_H=560$ for $St_H=0, 0.02$ and 0.20

St_H	U_R	U_o	U_M	U_D	U_G	θ	x_R/H
0	0	6.0	0	0	0	90.0°	7.0
0.02	0.64	6.03	5.43	5.40	0.60	83.9°	4.5(CW), 3.7(CCW)
0.20	6.38	8.76	7.89	5.44	0.87	43.2	4.0(CW), 2.4(CCW)

봉 수 또는 원봉 지름을 증가시켜 '후류 스트로할 수'를 증가시키면, 블레이드의 열전달 계수가 이에 비례해 향상됨을 발견하였다. Funazaki^(2,3)는 주기적인 후류가 평판경계층 위의 열전달이나 천이에 미치는 영향을 실험하였다. 그는 실험결과와 비교하기 위해 후류 유도 천이 모형을 제안하였다. 한편, Minniti III and Mueller⁽⁴⁾는 무향풍동에서 주기적인 후류가 얇은 익형에 미치는 소음효과를 측정하였다. 그들은 실험결과로부터 주기적인 후류가 익형에 대해 강한 소음원으로서 작용한다고 보고하였다.

그밖의 많은 문헌들을 살펴보면, 주기적인 후류가 난류 박리기포에 미치는 영향에 관한 연구는 극히 드물다는 것을 알게 된다. 본 연구에서는, 주기적인 후류가 난류 박리 기포에 미치는 영향을 실험적으로 연구한다. 연구 목적을 위해, 둔각물체를 이용한 난류 박리 기포의 시험부를 제작하였고, 시험부를 후류 발생기의 뒤에 설치하였다(Fig. 1). 주기적인 후류를 발생시키기 위해, 원봉을 이용한 스포크 휠 형 후류 가진기를 채용하였다. 스포크 휠 형 후류 가진기를 채용한 이유는 풍동 내에 설치된 시험부의 크기를 제한하지 않기 때문이다. 후류 가진기에 관해서는 크게 두 가지 방식이 있다. 그 중 하나는 스포크 휠 형 후류가진기이고, 다른 하나는 다람쥐 쳃바퀴 형 후류가진기이다. 다람쥐 쳃바퀴 형 후류가진기는 Priddy and Bayley⁽⁵⁾과 Liu and Rodi^(6,7)에 의해 사용되었다. 한편, 스포크 휠 형 후류가진기는 Han et al.,⁽¹⁾ Funazaki^(2,3) 그리고, Minniti III and Mueller⁽⁴⁾ 등에 의해 사용되었다. 주기적인 후류를 특징짓기 위해 후류 스트로할 수(St_H)와 레이놀즈 수(Re_d)가 정의된다. St_H 와 Re_d 의 작동 범위는 $Re_d=375$ 에 대해 $0 \leq St_H \leq 0.20$ 이다. 위상평균기법이 주기적인 후류에 의한 위상 차이를 반영하기 위해 도입되었다.

비정상 후류에 의한 둔각물체의 압력면과 흡입면 사이의 차이를 그려내기 위해, 비정상 후류의 방향은 각각 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)으로 회전되었다. 서로 다른 회전방향의 영향을 이해하기 위해 속도삼각형을 가지고 해석하였다. x_R , 시간평균 유동장, 위상평균 유동장 등을 포함한

유동 특성들은 후류 조건을 변화시킴으로써 측정되었다. 난류박리기포 내 유동구조에 미치는 비정상 후류의 영향을 이해하려는 한 방면으로서, 벽압력변동량이 마이크로폰 배열을 사용하여 측정되었다.^(8,9) 벽압력변동량의 통계적 특성들이 벽압력변동계수, 압력 스펙트럼과 응집도를 측정함으로써 자세히 측정되었다.

2. 실험장치와 실험방법

2.1 풍동

Hwang et al.⁽¹⁰⁾의 선행 연구에 사용되었던 개방 송출형 풍동이 본 실험에 맞게 고쳐졌다. 세틀링 챔버, 허니콤, 스크린 등이 차례로 풍동 입구부에 설치되었다. 4:1의 압축비를 가진 수축부와 세틀링 챔버 내의 유동조절요소들은 시험부에 유동이 일정하게 유입되도록 하였다. 스포크 휠 형 후류가진기가 수축부와 시험부 사이에 설치되었다. 시험부와 스포크 휠 형 후류가진기의 설치사항은 Fig. 1에 도시되어 있다. Fig. 1에 보이는 바와 같이, 24개의 원봉이 스포크 휠 형 후류가진기에 부착되어 있다. 각 원봉의 단위는 길이 400mm, 지름 10mm이다. 이미 언급하였듯이, 두 회전 방향(CW와 CCW)이 압력면과 흡입면을 구별하기 위해 선택되었다. 후류가진기 뒤에 사각 덕트가 시험부로 설치되었다. 사각덕트의 단면은 폭 400mm, 높이 400mm, 길이 800mm이다. 시험부 내부에 둔각물체가 후류가진기로부터 120mm 떨어진 위치에 놓여졌다. 둔각물체는 폭 350mm, 두께 30mm, 길이 550mm이었다. 둔각물체의 특성길이는 둔각물체의 절반두께로 정의되었다($H=15mm$). 둔각물체의 종횡비는 H 단위로 26.7이었고, 폐쇄비는 7.5%이었다. 둔각물체의 중심선을 따라 이차원 유동 가정인 Brederode and Bradshaw⁽¹¹⁾의 결과를 참고하여 이루어졌다.⁽¹¹⁾

비정상 후류를 특징짓기 위하여, 후류 스트로할 수가 정의되었다.

$$St_H = \frac{f_p H}{U_\infty}$$

단, $f_p (= \omega n / 2\pi)$ 는 원봉의 회전속도(ω)와 원봉의

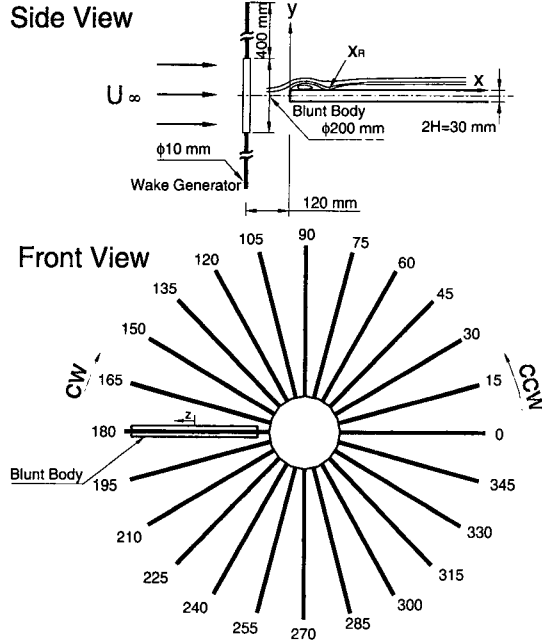


Fig. 1 Experimental setup of unsteady wake

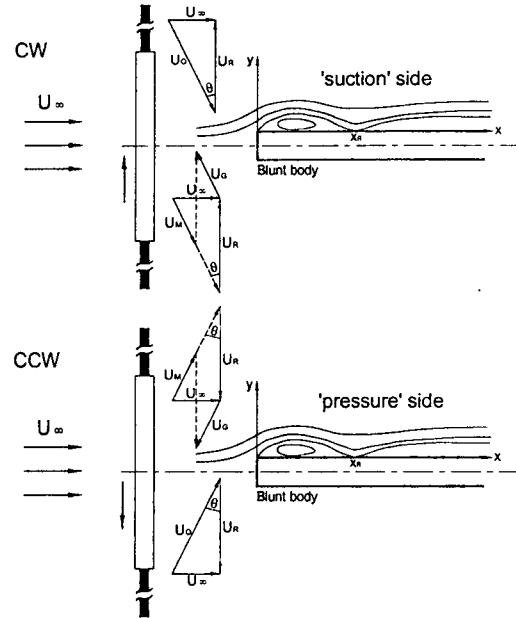


Fig. 3 Velocity triangles by unsteady wake

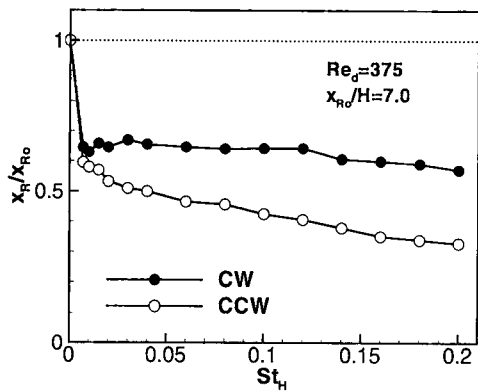


Fig. 2 Normalized reattachment x_R/x_{R0} against St_H

수(n)에 의해 조절되는 후류 통과 주파수이다. 두 가지 레이놀즈 수가 다음과 같이 정의되었다.

$$Re_H = \frac{U_\infty H}{\nu} \text{ 와 } Re_d = \frac{U_\infty d}{\nu}$$

단, H 는 둔각물체의 특성길이이고, d 는 원봉지름이다. 본 실험에서, 자유흐름유속은 $U_\infty=6.0\text{m/s}$ 이었고, $Re_H=560$ 이었다.⁽¹⁰⁾ 원봉에 대한 레이놀즈 수는 $Re_d=375$ 이었다.

유동장 측정을 위해 정온형 열선 풍속계 (IFA100/300)를 사용하였다. 스플릿 필름 센서(TSI 1288)가 재부착길이(x_R)나 난류박리기포 내부 유동장을 측정하는데 사용되었다. 측정시, y 방향으로 20 개, x 방향으로 22 개의 측정점을 구성하였고, 각

측정점에서 204,800 개의 속도 데이터들을 얻었다. 유동 시험부에 대한 그림이 Fig. 1 에 도시되어 있다. 유속 신호를 얻기 위한 추출주파수는 5kHz 이었고, 2kHz 의 저역통과 필터를 같이 사용하였다. 마이크로폰 배열(TMS130A)이 둔각물체 위의 벽면 압력변동량을 측정하기 위해 사용되었다. 마이크로폰 배열이 둔각물체 내부에 설치되도록 지름 1mm 의 핀홀과 10.6mm 의 마이크로폰 설치홀이 동심원상으로 가공되었다. 16 채널 차동증폭기(PCB514A) 2 대가 벽면압력변동량을 공간적으로 동시측정하기 위해 사용되었다. 각 마이크로폰은 32 개의 측정위치에서 4960Hz 의 주파수로 204,800 개의 데이터를 얻었다. 위상평균기법을 적용하기 위해, 광학 타코미터(Onosokki HT-5200)가 스포크 휠 형 후류가진기 앞에 설치되었다. 후류가진기의 매 회전시 타코미터로부터 발생하는 트리거 신호는 동일한 위상의 유속신호를 평균하기 위해 사용되었다. 모두 135 개의 위상평균이 204,800 개의 유속 데이터로부터 평균되었다.

2.2 x_R 에 대한 효과

박리기포를 결정짓는 여러가지 측정량 중, 재부착길이는 시간평균된 의미에서 가장 대표적인 값으로서 사용된다. 재부착길이를 측정하기 위해, 벽면 근처($y/H=0.033$)에서 흐름방향유동 시간분율(γ_P)이 스플릿 필름(TSI 1288)을 사용하여 측정되었다. 시간평균된 재부착 위치는 흐름방향유동 시간분율이 $\gamma_P=0.5$ 인 지점으로서 정의된다. $Re_d=375$ 에서

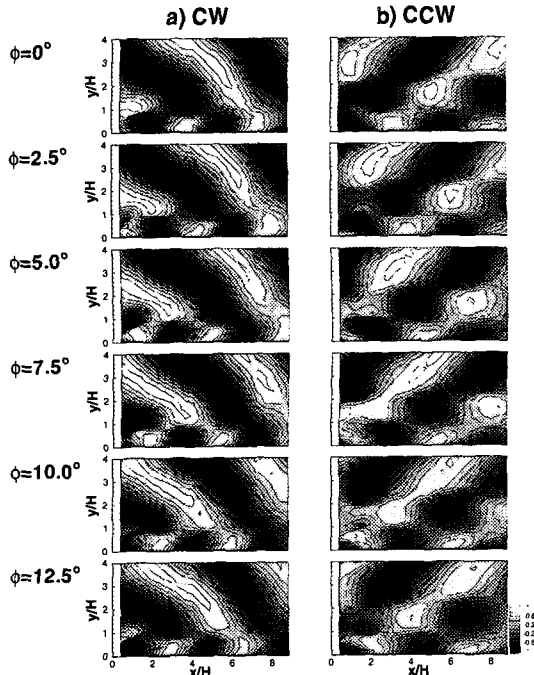


Fig. 4 Phase-averaged mean velocity correlation at $Re_d=375$ and $St_H=0.20$

두 가지 회전방향의 경우에 대해 무차원화된 재부착길이(x_R/x_{R0})를 가진주파수(St_H)의 함수로 나타내면 그림 2 와 같다. 여기에서, x_{R0} 는 $St_H=0$ 에서 재부착길이를 나타낸다. 보이는 것처럼, x_R 에 대한 St_H 의 영향은 그렇게 크지 않다. x_R 은 비정상 후류에 의해 작은 섭동이 가해질 때($St_H=0.01$), x_R 이 큰 폭으로 감소한다. 그러나, 회전방향의 효과가 더 지대하다. CCW 는 CW 보다 더 많이 재부착길이를 감소시킨다. CCW 의 재부착길이 감소율은 CW 의 경우보다 조금 더 높다. St_H 는 실험장치의 한계로 인해 $St_H \leq 0.20$ 으로 제한되었다. 유동 구조를 자세히 구별하기 위해, 본 실험에서는 이후부터 두 가지 특징적인 가진의 경우를 선정하였다 (두 가지 회전방향에 대해 $St_H=0.02$ 와 0.20). CCW 이고 $St_H=0.02$ 일 때 CW 이고 $St_H=0.20$ 일 때 보다 재부착길이 가 더 작다는 것에 주목하자.

2.3 속도 삼각형

Fig. 3 은 두가지 회전방향(CW 와 CCW)에 의해 발생하는 속도삼각형을 보여준다. 원봉에 의해 발생하는 비정상 후류는 후류 속도(U_M)를 가지고 하류로 대류된다. 반면, 원봉을 좌표원점으로 한 자유흐름속도(U_0)는 자유흐름속도(U_∞)와 원봉회전속도(U_R)로부터 얻어진다. θ 는 U_0 와 U_R 사이의 각도로 정의된다. 원봉후류속도(U_G)는 자유흐름속도(U_0)에서 후류속도(U_M)를 뺀 속도결손이다.

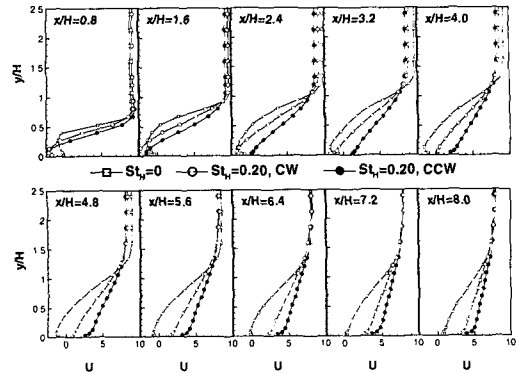


Fig. 5 Profiles of the time-averaged streamwise mean velocity at $Re_d=375$

($U_G=U_M-U_0$). $U_{G,x}=U_\infty-U_M \sin \theta$ 인 U_G 의 x 방향 성분은 위상평균기법에 의해 스플릿 필름(TSI1288)으로부터 실험적으로 결정된다. 원봉후류속도(U_G)는 다른 회전방향(CW 와 CCW)에 의해 나타나는 둔각물체의 흡입면과 압력면을 구분하는 데에 중요하다. 참고로, 측정된 모든 유속을 Table 1 에 나타내었다. $St_H=0$ 은 후류가진기를 설치하지 않은 경우를 가리킨다. 회전방향에 의해 다른 유동 패턴이 나타난다. 시계방향으로 회전시(CW), U_G 는 둔각물체로부터 벗어나는 방향으로, 둔각물체의 흡입면을 형성한다. 반면, 반시계방향으로 회전시(CCW), U_G 는 둔각물체를 향하는 방향으로, 압력면을 형성한다. 주기적인 후류에 의해 형성되는 원봉후류속도는 박리기포의 박리점에서 국소교란과 비슷한 효과를 보이고, 초기 박리전단층의 와형성 메커니즘을 변형시킨다.

3. 실험 결과 및 토의

이미 언급하였듯이 서로 다른 주기적인 후류에 의해 두 가지 유동 영역이 나타난다. 그 중 하나는 ‘말아올림’ 영역이고 다른 하나는 ‘절단’ 영역이다. 본 연구에서 ‘말아올림’ 영역은 둔각물체 위의 박리기포가 후류와 부딪치기 전 상향운동을 하고 뒤이어 비정상 후류가 박리기포를 감싸안은 특징을 갖는 영역이다. ‘절단’ 영역은 박리기포가 하향운동을 하면서 비정상 후류에 의해 영향을 받는 영역이다. 앞서 언급한 두 가지 영역을 살펴보기 위해, 위상평균한 평균속도 상관계수를 다음과 같이 정의하여 얻었다.

$$R_{uu}(x, y, \phi) = \langle U(x_0, y_0, \phi_0) U(x_0 + x, y_0 + y, \phi_0 + \phi) \rangle$$

단, 기준점은 $\phi_0=0$ 일 때, $(x_0/H, y_0/H)=(0.8, 0.033)$ 으

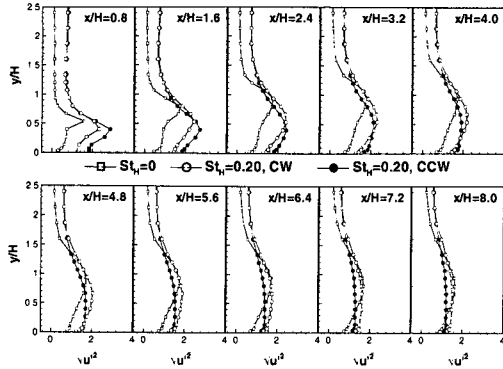


Fig. 6 Profiles of the time-averaged streamwise velocity fluctuations at $Re_d=375$

로 정의되었다. 상관계수 영역은 $0 \leq x/H \leq 8.8$ 과 $0 \leq y/H \leq 4.0$ 이었다. 후류가진기가 24 개의 원봉으로 구성되어 있으므로, 한 주기당 $360^\circ/24=15^\circ$ 이다. Fig. 4 에서 상관계수를 살펴보면 후류가 유동방향을 따라 하류로 움직이는 모습이 관찰된다. 시계 방향인 경우(CW), 원봉후류속도는 둔각물체로부터 벗어나는 방향이고, 따라서 ‘말아올림’ 영역이 흡입면에 형성된다. 반시계방향인 경우(CCW)에는 원봉후류속도는 둔각물체를 향하는 방향으로, ‘절단’ 영역이 압력면에 형성된다.

시간평균된 유동에 대한 비정상 후류의 영향을 자세히 기록하기 위해, $St_H=0.20$ 와 $Re_d=375$ 에서 두 가지 회전방향에 대해 실험을 수행하였다. $St_H=0$ 은 비정상 후류가 없는 경우를 의미한다. Fig. 5 에 보이듯이, 비정상 후류에 의해 상대적으로 큰 효과가 박리기포의 발달 과정상에 나타난다. 박리기포의 초기영역에서는($x/H=0.8$), 평균속도분포는 비정상 후류에 의해 조금밖에 영향받지 않는다. $x/H=0.8$ 이후의 위치에서 박리기포와 함께 평균속도레벨의 실질적인 변화가 관찰된다. 비정상 후류에 의해 영향받는 평균속도레벨은 비정상 후류가 없는 경우($St_H=0$)에 비해 증가한다. 이는 비정상 후류유동이 박리기포 내부로 모멘텀을 더 잘 전달함을 의미한다. 비정상 후류가 외병합을 촉진하기 때문에, 이러한 결과는 재부착길이(x_R)의 감소로 이어진다. CCW 일 때 x_R 의 감소는 CW 일 때보다 더 크다. CCW 일 때, 박리유동은 $x/H=2.4$ 에서 재부착한다. 반면, CW 일 때 $x/H=4.0$ 에서 재부착한다. 재부착 이후에 유동은 어느 경우든 서서히 재발달한다.⁽¹²⁾

시간평균된 x 방향 유속변동량에 대한 비정상 후류의 영향이 Fig. 6 에 나타나 있다. 변동유속레벨의 크기는 와구조가 형성되기 시작하는 박리점

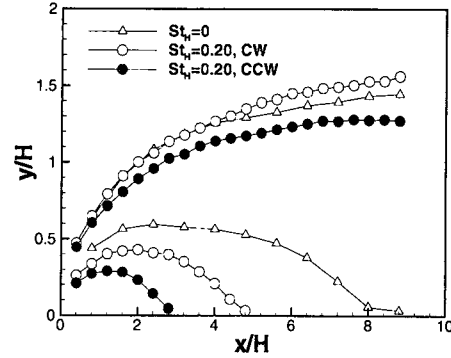


Fig. 7 Location of 10% and 90% local maximum velocity

근처($x/H=0.8$)에서 비정상 후류에 의해 상당히 영향을 받는다. 박리기포 내부 유동장을 더욱 자세히 조사하면, 비정상 후류가 있는 경우가 그렇지 않은 경우보다 더 높은 변동유속 레벨을 보임을 알 수 있다. 이것은 비정상 후류에 의한 원봉후류 속도로부터 유도되는 와구조의 병합이 난류 변동레벨을 증가시키기 때문이다.⁽¹²⁾ CW 와 CCW 사이의 유속변동레벨을 비교하면, CCW 의 유속변동이 CW 의 경우보다 유동 박리 초기에서($x/H=0.8$) 더 큰 변동레벨을 갖고 있음을 알 수 있다. $x/H \leq 2.4$ 인 영역에서 CCW 의 최대 난류강도는 CW 의 최대 난류강도보다 훨씬 더 크다. 그러나, 재부착 이후($x_R/H=2.4$), 변동레벨은 서서히 감소한다. 이러한 경향은 재부착 원거리 후류에서 난류에너지 레벨에 대한 영향이 줄어들 때까지 계속된다.

자유흐름유속의 10%와 90%인 유속의 위치가 Fig. 7 에 후류 위치의 함수로서 나타나 있다. $x/H=0.8$ 에서 자유흐름유속의 10%와 90%인 위치는 거의 같다. 그렇지만, 유동이 후류로 갈수록 전단층의 성장률은 급격하게 바뀐다. 벽면을 향한 곡률은 외부유체 유입률(entrainment)의 증가에 의해 재부착길이가 감소하는 것과 밀접하게 연관되어 있다. $St_H=0.20$ 과 CCW 의 경우는 다른 경우들 ($St_H=0$ 또는 $St_H=0.20$ 과 CW)에 비해 성장률이 훨씬 높다. 자유흐름유속의 10%인 위치를 있는 곡선을 점근적으로 연결하면, 박리유동의 재부착 위치를 구할 수 있다. 예상했던대로, $St_H=0.20$ 과 CCW 의 경우가 재부착길이를 매우 감소시킨다.

벽면압력계수(C_p)의 공간적 분포가 Fig. 8 에 도시되어 있다. 이미 언급한 것처럼, 비정상 후류의 효과는 작은 스트로할 수($St_H=0.02$)에서조차 지배적이다. Fig. 8 (a)는 $St_H=0.02$ 에서 C_p 의 최소값이 $St_H=0$ 인 경우보다 더 작으며, 벽압력회복점 또한

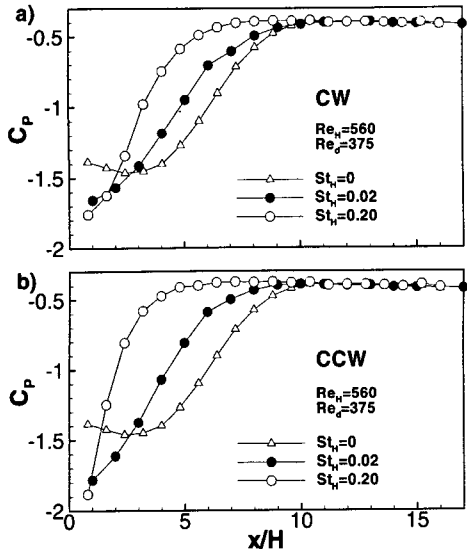


Fig. 8 Wall static pressure coefficient at $Re_a=375$

상류로 이동해 있음을 알 수 있다. 비정상 후류에 의해 벽압력 회복점이 이동하는 것은 박리기포의 초기단계에서 난류강도가 증가하였기 때문이다. 이는 박리점에서 국소교란을 가한 Chun and Sung⁽¹²⁾의 결과와 일치한다. St_H 가 더 증가하면 ($St_H=0.20$), 벽압력 회복점은 상류로 이동한다. St_H 를 증가하면, x_R 이 더욱 감소한다. Fig. 8(b)에서 CCW의 경우, 비정상 후류에 의한 벽압력 회복은 CW보다 효과적이다. 더 나아가 St_H 가 $St_H=0.02$ 에서 $St_H=0.20$ 으로 증가하면서 벽압력 회복점의 상류 이동이 뚜렷하다. 이는 비정상 후류에 대해 최적의 주파수가 존재함을 가리킨다. 박리점에서 외부유체 유입율은 후류통과 주파수를 증가시키면 어느정도 향상된다.⁽¹¹⁻¹³⁾

벽압력 변동계수(C_p)의 공간분포가 Fig. 9에 나타나 있다. $St_H=0$ 에 대해 C_p 는 $0 \leq x/H \leq 5$ 의 범위에서 유동방향으로 증가하고, $x/H \geq 12$ 의 범위에서 서서히 감소한다. $x/H=6$ 과 10 사이에는 평탄한 곡선을 보인다. 재부착길이($x_{R0}/H=7.0$)를 고려하면, 압력변동의 최대 에너지는 재부착 지점의 상류에서 일어난다.^(8,9) Lee and Sung^(8,9)에서 언급된 것처럼 $St_H=0$ 의 경우 $x/H=6$ 은 C_p 가 증가하기 시작하는 지점이면서 동시에 C_p 가 최대값을 갖는 지점이다. 비정상 후류가 주어지면, 박리기포 내의 C_p 분포가 크게 변화한다.⁽⁸⁾ $St_H=0.02$ 일 때, 지배적인 피크가 나타나고 상류로 이동한다. 이러한 양상은 Minniti III and Mueller⁽⁴⁾의 결과와 일치한다. Fig. 9(a)를 자세히 관찰하면, $St_H=0.20$ 에서 C_p 의

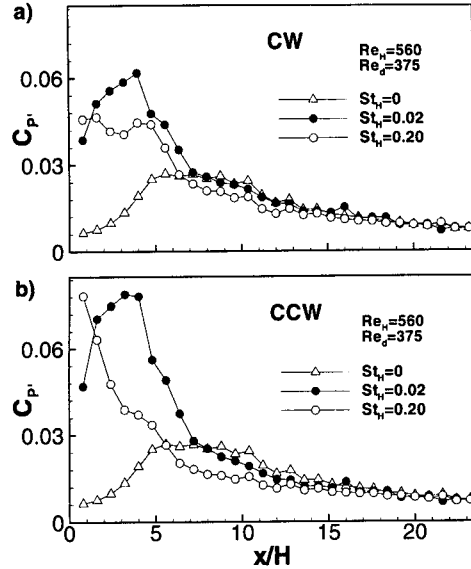


Fig. 9 Wall pressure fluctuation coefficient at $Re_a=375$

최대값의 크기는 $St_H=0.02$ 의 최대값의 크기보다 더 작다. 잘 조직화된 와구조가 일반적으로 대형 와-벽면 상호작용을 향상시켜 유속변동량을 감소시킨다는 사실에 주목하자.^(10,15,16)

St_H 의 효과를 검증하기 위해, 여러 위치에서 $St_H=0.2$ 인 경우의 압력스펙트럼을 측정하여 그림 10에 나타내었다. $St_H=0$ 일 경우의 압력스펙트럼도 측정하여 비교하였다. St 는 무차원화된 주파수 ($St=fU_\infty/H$)이다. $St_H=0$ 일 때, 에너지 레벨은 박리기포 근처($x/H \leq 3.2$)에서 상대적으로 낮다. $St_H=0$ 일 때 넓은 주파수 피크가 $St=0.02$ 를 중심으로 하여 관찰된다. x_R 과 U_{max} 를 가지고 무차원화시키면, $f_{xR}/U_{max} \approx 0.11$ 이다.⁽¹⁷⁾ 이 주파수는 플랩핑 주파수와 일치한다.^(8,17) 유동이 진행할수록 ($x/H \geq 5.6$) 압력스펙트럼은 $St \approx 0.09$ 에서 최대값에 도달한다. x_R 과 U_{max} 를 가지고 무차원화시키면, $f_{xR}/U_{max} \approx 0.47$ 이다.^(8,18)

$St_H=0.20$ 일 때, 비정상 후류에 의한 통과 주파수는 $St=0.20$ 에서 분명히 관찰되고 유동장 전체에 걸쳐 나타난다. $0.8 \leq x/H \leq 3.2$ 에서 비정상 후류에 의해 전반적인 에너지 레벨이 상승한다. CCW의 경우, 넓은 피크가 $St \approx 0.25$ 근처에 나타난다. 이는 앞서 언급한대로 비정상 후류에 의해 생성되는 박리점에서의 교란 때문이다. 박리점에서의 교란은 외부유체 유입률을 크게 증가시킨다. Sigurdson⁽¹³⁾은 난류박리기포의 와홀림 주파수가 가진 주파수와 밀접하게 연관되어 있으며, 가장 효과적인 재

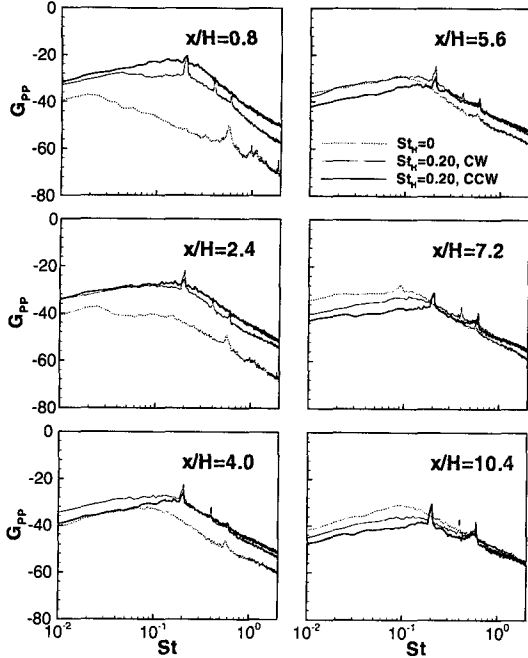


Fig. 10 Pressure spectrum at $Re_d=375$

부착 길이의 감소는 와홀림 주파수의 2 배~5 배의 주파수에서 일어난다고 하였다.⁽¹³⁾ 가진주파수 $St_H=0.20$ 은 효과적인 주파수 범위 내에 있다. 유동이 후류로 진행되면서 피크 값은 점점 감소한다. 재부착 이후에 에너지 레벨은 CW 와 CCW 의 경우 모두 감소하고, 유속변동량의 결과와 일치한다. $x/H=8.0$ 에서 난류에너지 레벨은 $St_H=0$ 의 레벨보다 더 낮다.

압력변동량의 공간적 특성은 교차스펙트럼 ($\Phi_{PP}(\xi, \omega; \mathbf{x}_o)$)으로부터 얻어진다. 두 측정점 사이의 거리를 ξ 라 할 때,

$$\Phi_{PP}(\xi, \omega; \mathbf{x}_o) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{PP}(\xi, 0, \tau; \mathbf{x}_o) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

로 정의된다. 단, $R_{PP}(\xi, 0, \tau; \mathbf{x}_o)$ 는 벽면 압력변동량의 교차상관계수이다. 교차스펙트럼의 무차원화된 크기는 거리차(ξ)에 대한 압력장의 변화를 계량화하기 위해 나타내었다. 응집도($\Gamma(\xi, \omega; \mathbf{x}_o)$)라고 불리는 이 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma(\xi, \omega; \mathbf{x}_o) = \frac{|\Phi_{PP}(\xi, \omega; \mathbf{x}_o)|}{[\Phi_P(\omega; \mathbf{x}_o)\Phi_P(\omega; \mathbf{x}_o + \xi)]^{1/2}}$$

$St_H=0$ 일 때, $x_o/H=0.8$ 과 $x_o/H=7.2$ 에서 응집도를 구하여 Fig. 11(a)와 (b)에 나타내었다. 재부착길이는 $x_{R0}/H=7.0$ 이었다. Fig. 10 의 $x/H=0.8$ 에서 나타난 $St=0.02$ 의 피크가 Fig. 11(a)에서 잘 관찰된다. 이

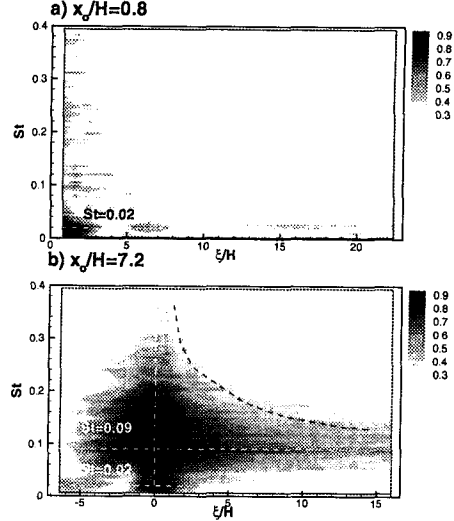


Fig. 11 Coherence ($St_H=0.20$, $x_o/H=0.8$ and 7.2)

로부터 플래핑의 범위가 $0 \leq \xi/H \leq 3.0$ 에 걸쳐있음 또한 관찰된다. 그렇지만, 기준점이 재부착점 근처이면($x_o/H=7.2$), 플래핑의 효과는 무시할 만하다. $St \leq 0.09$ 에서 와홀림 주파수가 더 지배적이다. ξ 가 증가할수록 응집도는 점차로 감소한다. Corcos 의 모델에 따르면, 응집도는 $\omega\xi/U_c$ 를 변수로 하여 지수적으로(exponentially) 감소한다.⁽⁸⁾

$$\Gamma(\xi, \omega) = \exp(-\alpha_1 |\omega\xi/U_c|)$$

단, α_1 은 실험적으로 결정된 감쇠상수이고, U_c 는 대류속도이다.⁽⁸⁾ ω 는 $\omega = 2\pi St U_o / H$ 로 표시된다. $\omega\xi/U_c$ 의 궤적은 ($\xi/H, St$) 평면상의 곡선으로 나타난다.

$St_H=0.20$ 에 대한 응집도가 Fig. 12 와 13 에 도시되어 있다. 시계 방향에 대해(CW), $x_o/H=0.8$ 를 기준한 응집도는 비정상 후류 주파수($St=0.20$)에서 지배적이다. 그렇지만, 반시계 방향에 대해(CCW) $x_o/H=0.8$ 을 기준한 응집도는 $St=0.20$ 에서 약간 감소되어 있다. 응집도가 지수적으로(exponentially) 감소되는 것으로 보인다. $\xi/H \geq 5$ 의 주기적 특성이 Fig. 12 와 13 에서 얻어졌다. $\xi/H \geq 5$ 의 주기적 특성은 $St_H=0.20$ 에서 $St_H\xi/H=1$ 을 가진 후류주파수의 공간 변형($\xi=f/U_o$)이다. 반시계 방향의 경우(CCW), 비정상 후류에 의해 생성되는 원봉후류속도는 둔각물체를 향하는 방향이다. 원봉후류속도는 비정상 후류가 박리기포와 상호작용을 일으키기 전에 박리점과 충돌하도록 유도한다. 비정상 후류의 충돌에 의해 응집도는 약화되고, 후류 내에 유지되던 에너지가 분산된다. 이러한 에너지 분산은 초기 난류강도레벨을 상승시킨다. 비정상 후류의 회

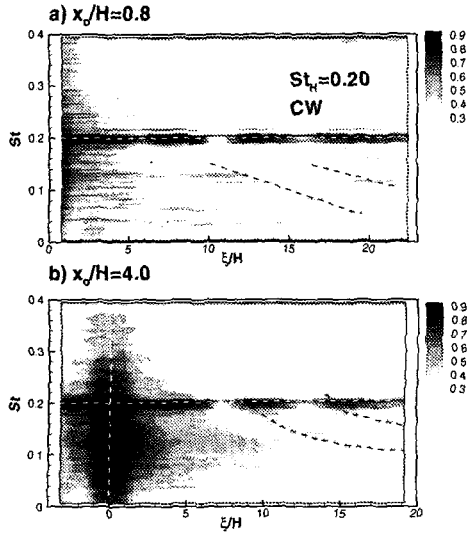


Fig. 12 Coherence ($St_H=0.20$, $x_o/H=0.8$ and 4.0 , CW)

전방향인 경우, 박리기포의 초기영역에서 주로 차이가 나타난다. 그렇지만, 회전방향 변경에 따른 차이는 Fig. 12(b)와 Fig. 13(b)에서 보이는 것처럼 재부착점에서는 잘 나타나지 않는다. 플랩핑 성분($St=0.02$)은 강한 비정상 후류에 의해 사라진다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

둔각물체 주위 난류박리재부착 유동장에 대한 비정상 후류의 영향을 실험적으로 연구하였다. 원봉을 단 스포크 휠 형 후류가진기를 비정상 후류를 생성하기 위해 사용하였다. 후류 스트로할 수의 작동 범위는 $Re_d=375$ 에 대해 $0 \leq St_H \leq 0.20$ 이었다. 위상평균기법을 비정상 후류에 의한 위상차이를 구별하기 위하여 채택하였다. 시계방향인 경우(CW), 원봉후류속도는 둔각물체로부터 나가는 방향으로 둔각물체의 흡입면이 ‘말아올림’ 영역에 형성되었다. 반시계방향인 경우(CCW), 원봉후류속도는 둔각물체를 향하는 방향으로, 압력면이 ‘절단’ 영역에 형성되었다. 회전방향의 영향은 두드러졌다. 반면, St_H 의 영향은 상대적으로 약했다. 실험결과로부터 CCW가 CW보다 x_R 을 더 감소시키는 것을 발견하였다. 비정상 후류에 의한 유속변동은 박리전단층을 향상시키고, 와형성을 크게 일으켜 x_R 을 감소시켰다. CCW의 벽압력 회복은 CW의 경우보다 더 효율적이었다. 그렇지만, 벽압력 변동의 공간분포(C_p)는 $St_H=0.20$ 의 크기가 $St_H=0.02$ 의 크기보다 더 작은 것을 보여주었다.

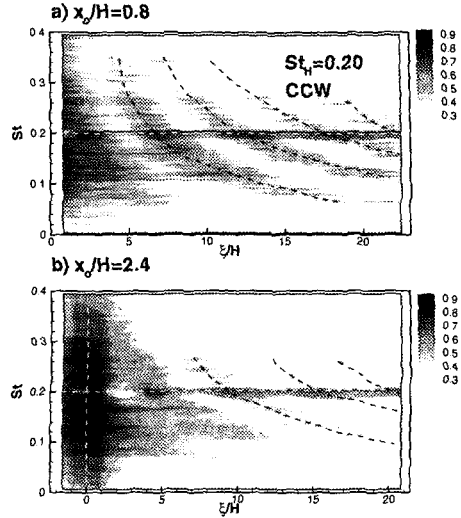


Fig. 13 Coherence ($St_H=0.20$, $x_o/H=0.8$ and 2.4 , CCW)

조직화된 와구조는 대형와구조-벽면 상호작용에 의한 유속변동레벨을 감소시켰다. 전체적인 에너지 레벨이 비정상 후류에 의해 증가되었으며, 이는 박리점 근처 외부유동 유입률이 증가하였기 때문이다. $St-\xi$ 다이어그램에서 플랩핑 주파수가 초기영역($x_o/H=0.8$)에서 지배적이었다. 그렇지만, 재부착 영역에서는 플랩핑 주파수의 효과가 무시할 만큼 작았으며, 와홀림 주파수의 영향이 지배적이었다. ξ 가 증가할수록, 응집도는 점차로 감소하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Han, J.C., Zhang, L. and Ou, S., 1993, "Influence of Unsteady Wake on Heat Transfer Coefficient from a Gas Turbine Blade," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 904-911.
- (2) Funazaki, K., 1996, "Unsteady Boundary Layers on a Flat Plate Disturbed by Periodic Wakes: Part I - Measurement of Wake-Affected Heat Transfer and Wake-Induced Transition Model," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 327-336.
- (3) Funazaki, K., 1996, "Unsteady Boundary Layers on a Flat Plate Disturbed by Periodic Wakes: Part II - Measurements of Unsteady Boundary Layers and

- Discussion," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 337~346.
- (4) Minniti III, R.J. and Mueller, T.J., 1998, "Experimental Investigation of Unsteady Aerodynamics and Aeroacoustics of a Thin Airfoil," *AIAA Journal*, Vol. 36, pp. 1149~1156.
- (5) Priddy, W.J. and Bayley, F.J., 1988, "Turbulence Measurements in Turbine Blade Passages and Implications for Heat Transfer," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 73~79.
- (6) Liu, X. and Rodi, W., 1992, "Measurements of Unsteady Flow and Heat Transfer in a Linear Turbine Cascade," ASME paper No. 92-GT-323.
- (7) Liu, X. and Rodi, W., 1994, "Surface Pressure and Heat Transfer Measurements in a Turbine Cascade with Unsteady Oncoming Wakes," *Experiments in Fluids*, Vol. 17, pp. 171~178.
- (8) Lee, I. and Sung, H.J., 2001, "Characteristics of Wall Pressure Fluctuations in Separated Flows over a Backward-Facing Step Part I: Time-Mean and Cross-Spectral Analyses," *Experiments in Fluids*, Vol. 30, pp. 262-272.
- (9) Lee, I. and Sung, H.J., 2001, "Characteristics of Wall Pressure Fluctuations in Separated Flows over a Backward-Facing Step Part II: Unsteady Wavelet Analysis," *Experiments in Fluids*, Vol. 30, pp. 273-282.
- (10) 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.
- (11) Brederode, V. and Bradshaw, P., 1978, "Influence of the Side Walls on the Turbulent Center-Plane Boundary-Layer in a Square Duct," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 100, pp. 91~96.
- (12) 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.
- (13) Sigurdson, L.W., 1995, "The Structure and Control of a Turbulent Reattaching Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 298, pp. 139~165.
- (14) Marshall, J.S. and Krishnamoorthy, S., 1997, "On the Instantaneous Cutting of a Columnar Vortex with Non-Zero Axial Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 351, pp. 41~74.
- (15) Bhattacharjee, S., Sheelke, B. and Troutt, T.R., 1986, "Modifications of Vortex Interactions in a Reattaching Separated Flow," *AIAA Journal*, Vol. 24, pp. 623~629.
- (16) Kiya, M. and Sasaki, K., 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 137, pp. 83~113.
- (17) Mabey, D.G., 1972, "Analysis and Correlation of Data on Pressure Fluctuations in Separated Flow," *Journal of Aircraft*, Vol. 9, pp. 642~645.
- (18) Eaton, J.K. and Johnston, J.P., 1981, "A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment," *AIAA Journal*, Vol. 19, pp. 1093~1100.