

난류박리기포에 대한 비정상 후류의 영향

전세종* · 성형진**

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.

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	스트로홀 수, fH / U_∞
St_H	후류통과 스트로홀 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, $N^2/s/m^4$
ϕ	위상각

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 난류박리기포에 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 (1,2,3,4,12). Han et al. (1993)은 풍동실험으로부터 비정상 후류 통과는 보다 넓은 영역에서 일찍 경계층 천이가 일어나도록 증진시키는 것을 보여주었다. 또한, 그들은 블레이드의 압력면보다 흡입면에서 열전달계수가 보다 효과적으로 증가함도 보여주었다⁽¹⁾. 그들은 실험에 사용한 원봉의 속도, 원

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과, 정회원

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)

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

봉 수 또는 원봉 지름을 증가시켜 ‘후류 스트로홀 수’를 증가시키면, 블레이드의 열전달 계수가 이에 비례해 향상됨을 발견하였다. Funazaki (1996)는 주기적인 후류가 평판경계층 위의 열전달이나 천이에 미치는 영향을 실험하였다⁽²⁾. 그는 실험결과와 비교하기 위해 후류 유도 천이 모형을 제안하였다. 한편, Minniti III 과 Mueller (1998)는 무향풍동에서 주기적인 후류가 얇은 익형에 미치는 소음효과를 측정하였다⁽³⁾. 그들은 실험결과로부터 주기적인 후류가 익형에 대해 강한 소음원으로서 작용한다고 보고하였다.

그밖의 많은 문헌들을 살펴보면, 주기적인 후류가 난류 박리 기포에 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(그림 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 후류 가진기이고, 다른 하나는 다람쥐 쳃바퀴 형 후류 가진기이다. 다람쥐 쳃바퀴 형 후류 가진기는 Priddy and Bayley (1988)과 Liu and Rodi (1994)에 의해 사용되었다^(4,12). 한편, 스포크 휠 형 후류 가진기는 Han et al. (1993), Funazaki (1996) 그리고, Minniti III and Mueller (1998) 등에 의해 사용되었다^(1,2,3). 주기적인 후류를 특징짓기 위해 후류 스트로홀 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 고려내기 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 방안으로서, 벽압력변동량이 마이크론 배열을 사용하여 측정되었다⁽⁶⁾. 벽압력변동량의 통계적 특성들이 벽압력변동계수, 압력 스펙트럼과 응집도를 측정함으로써 자세히 측정되었다.

2. 실험장치와 실험방법

2.1 풍동

Hwang et al.(2000)의 선행 연구에 사용되었던 개방형 풍동이 본 실험에 맞게 고쳐졌다⁽¹¹⁾. 세틀링 챔버, 허니콤, 스크린 등이 차례로 풍동 입구부에 설치되었다. 4:1 의 압축비를 가진 수축부와 세틀링 챔버 내의 유동조절요소들은 시험부에 유동이 일정하게 유입되도록 했다. 스포크 휠 형 후류 가진기가 수축부와 시험부 사이에 설치되었다. 시험부와 스포크 휠 형 후류 가진기의 설치사항은 그림 1 에 도시되어 있다. 그림 1 에 보이는 바와

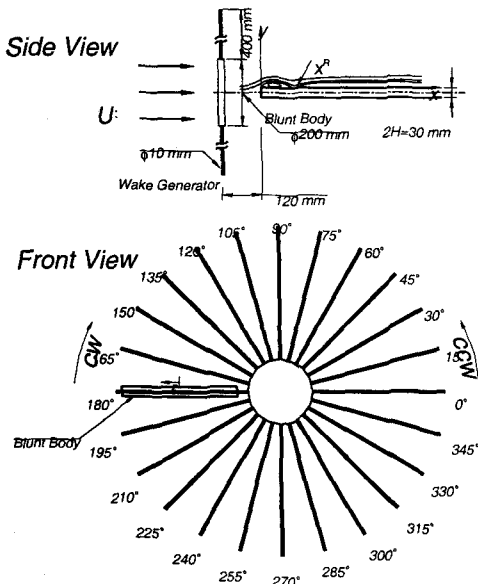


Fig. 1 Experimental setup of unsteady wake

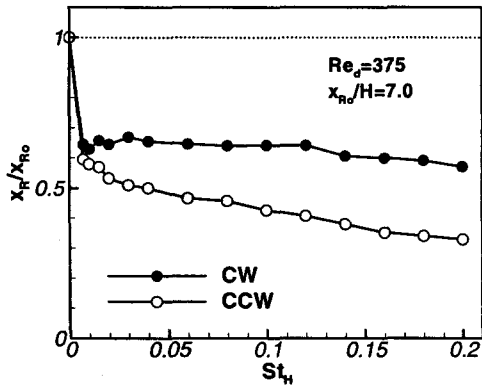


Fig. 2 Normalized reattachment x_R/x_{R0} against St_H

같이, 24 개의 원봉이 스포크 휠 형 후류가진기에 부착되어 있다. 각 원봉의 단위는 길이 400mm, 지름 10mm 이다. 이미 언급하였듯이, 두 회전 방향(CW 와 CCW)이 압력면과 흡입면을 구별하기 위해 선택되었다. 후류가진기 뒤에 사각 덕트가 시험부로 설치되었다. 사각덕트의 단면은 폭 400mm, 높이 400mm, 길이 800mm 이다. 시험부 내부에 둔각물체가 후류가진기로부터 120mm 떨어진 위치에 놓여졌다. 둔각물체는 폭 350mm, 두께 30mm, 길이 550mm 이었다. 둔각물체의 특성길이는 둔각물체의 절반두께로 정의되었다($H=15mm$). 둔각물체의 종횡비는 H 단위로 26.7 이었고, 폐쇄비는 7.5%이었다. 둔각물체의 중심선을 따라 이차원 유동 가정이 Brederode 와 Bradshaw(1972)의 결과를 참고하여 이루어졌다⁽⁶⁾.

비정상 후류를 특징짓기 위해, 후류 스트로홀수가 정의되었다.

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

단, $f_p (= \omega n / 2\pi)$ 는 원봉의 회전속도(ω)와 원봉의 수(n)에 의해 조절되는 후류 통과 주파수이다. 두가지 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 $U_\infty = 6.0m/s$ 이었고, $Re_H = 560$ 이었다⁽¹¹⁾. 원봉에 대한 레이놀즈 수는 $Re_d = 375$ 이었다.

2.2 x_R 에 대한 효과

박리기포를 결정짓는 여러가지 측정량 중, 재부착 길이는 시간평균된 의미에서 가장 대표적인 값으로서 사용된다. 재부착길이를 측정하기 위해, 벽면

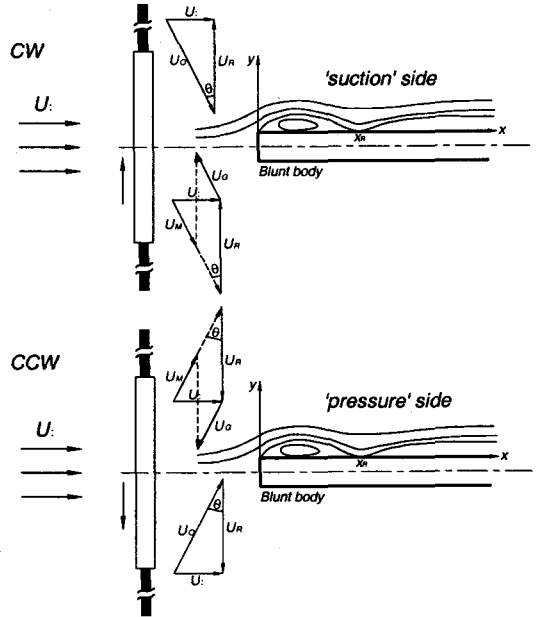


Fig. 3 Velocity triangles by unsteady wake

근처($y/H=0.033$)에서 흐름방향유동 시간분율(y_p)이 측정되었다. 시간평균된 재부착 위치는 흐름방향 유동 시간분율이 $y_p=0.5$ 인 지점으로서 정의된다. $Re_d=375$ 에서 두가지 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 ($St_H \approx 0.01$), x_R 이 큰 폭으로 감소한다. 그러나, 회전 방향의 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 두가지 특징적인 가인의 경우를 선정하였다(두가지 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 재부착길이가 더 작다는 것에 주목하자.

2.3 속도 삼각형

그림 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 원봉회전 속도(U_R)로부터 얻어진다. θ 는 U_0 와 U_R 사이의 각

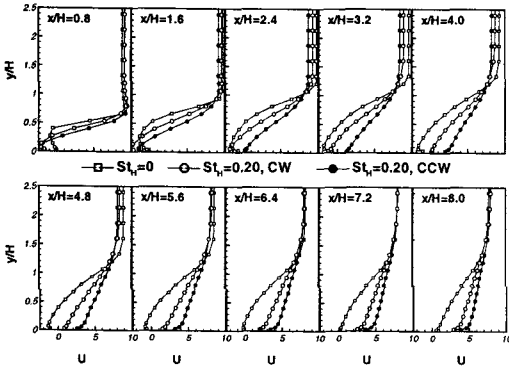


Fig. 4 Profiles of the time-averaged streamwise mean velocity at $Re_d=375$

도로 정의된다. 원봉후류속도(U_G)는 자유흐름속도(U_∞)에서 후류속도(U_M)를 뺀 속도결손이다($U_G=U_\infty-U_M$). $U_{G,x}=U_\infty-U_M\sin\theta$ 인 U_G 의 x 방향 성분은 위상평균기법에 의해 스플릿 필름(TSI1288)으로부터 실험적으로 결정된다. 원봉후류속도(U_G)는 다른 회전방향(CW와 CCW)에 의해 나타나는 둔각물체의 흡입면과 압력면을 구분하는 데에 중요하다. 참고로, 측정된 모든 유속을 표 1에 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 박리점의 박리점에서 국소교란과 비슷한 효과를 보이고, 초기 박리전단층의 와형성 메커니즘을 변형시킨다.

3. 실험 결과 및 토의

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. 그림 4에 보이듯이, 비정상 후류에 의해 상대적으로 큰 효과가 박리점의 발달 과정상에 나타난다. 박리점의 초기영역에서는($x/H=0.8$), 평균속도분포는 비정상 후류에 의해 조금밖에 영향받지 않는다. $x/H=0.8$ 이후의 위치에서 박리점과 함께 평균속도레벨의 실질적인 변화가 관찰된다. 비정상 후류에 의해 영향받는 평균속도레벨은 비정상 후류가 없는 경우($St_H=0$)에 비해 증가한다. 이는 비

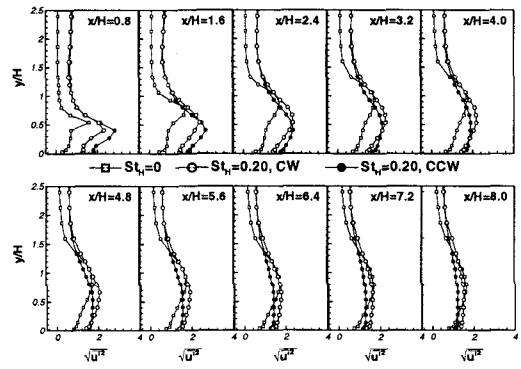


Fig. 5 Profiles of the time-averaged streamwise velocity fluctuations at $Re_d=375$

정상 후류유동이 박리점 내부로 모멘텀을 더 잘 전달함을 의미한다. 비정상 후류가 와병합을 촉진하기 때문에, 이러한 결과는 재부착길이(x_R)의 감소로 이어진다. CCW일 때 x_R 의 감소는 CW일 때보다 더 크다. CCW일 때, 박리유동은 $x/H=2.4$ 에서 재부착한다. 반면, CW일 때 $x/H=4.0$ 에서 재부착한다. 재부착 이후에 유동은 어느 경우든 서서히 재발달한다⁽⁷⁾.

시간평균된 x 방향 유속변동량에 대한 비정상 후류의 영향이 그림 5에 나타나 있다. 변동유속레벨의 크기는 와구조가 형성되기 시작하는 박리점 근처($x/H=0.8$)에서 비정상 후류에 의해 상당히 영향을 받는다. 박리점 내부 유동장을 더욱 자세히 조사하면, 비정상 후류가 있는 경우가 그렇지 않은 경우보다 더 높은 변동유속 레벨을 보임을 알 수 있다. 이것은 비정상후류에 의한 원봉후류속도로부터 유도되는 와구조의 병합이 난류 변동레벨을 증가시키기 때문이다⁽⁷⁾. CW와 CCW 사이의 유속변동레벨을 비교하면, CCW의 유속변동이 CW의 경우보다 유동 박리 초기에서($x/H=0.8$) 더 큰 변동레벨을 갖고 있음을 알 수 있다. $x/H \leq 2.4$ 인 영역에서 CCW의 최대 난류강도는 CW의 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.

벽압력 변동계수(C_p)의 공간분포가 그림 6에 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⁽⁵⁾. Lee and Sung(2000)에서 언급된 것처럼

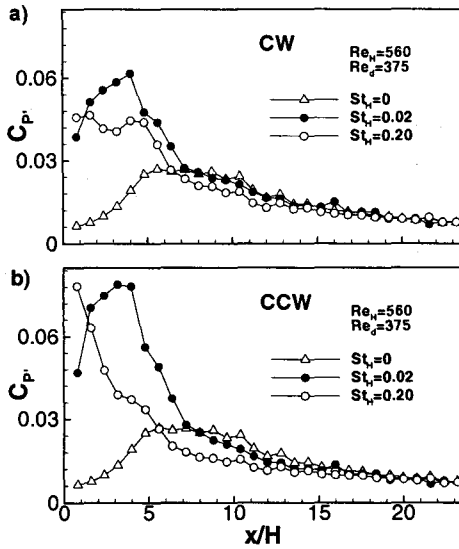


Fig. 6 Wall pressure fluctuation coefficient at $Re_d=375$

$St_H=0$ 의 경우 $x/H=6$ 은 C_p 가 증가하기 시작하는 지점이며 동시에 C_p 가 최대값을 갖는 지점이다. 비정상 후류가 주어지면, 박리기포 내의 C_p 분포가 크게 변화한다⁽⁵⁾. $St_H=0.02$ 일 때, 지배적인 피크가 나타나고 상류로 이동한다. 이러한 양상은 Minniti III and Mueller(1998)의 결과와 일치한다⁽³⁾. 그림 6 (a)를 자세히 관찰하면, $St_H=0.20$ 에서 C_p 의 최대값의 크기는 $St_H=0.02$ 의 최대값의 크기보다 더 작다. 잘 조직화된 와구조가 일반적으로 대형 와벽면 상호작용을 향상시켜 유속변동량을 감소시킨다는 사실에 주목하자^(9,11).

St_H 의 효과를 검증하기 위해, 여러 위치에서 $St_H=0.2$ 인 경우의 압력스펙트럼을 측정하여 그림 7 에 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, $fx_R/U_{max} \approx 0.11$ 이다⁽¹⁰⁾. 이 주파수는 플랩핑 주파수와 일치한다^(5,10). 유동이 진행할수록($x/H \geq 5.6$) 압력스펙트럼은 $St \approx 0.09$ 에서 최대값에 도달한다. x_R 과 U_{max} 를 가지고 무차원화시키면, $fx_R/U_{max} \approx 0.47$ 이다⁽⁵⁾. $St_H=0.20$ 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. CCW 의 경

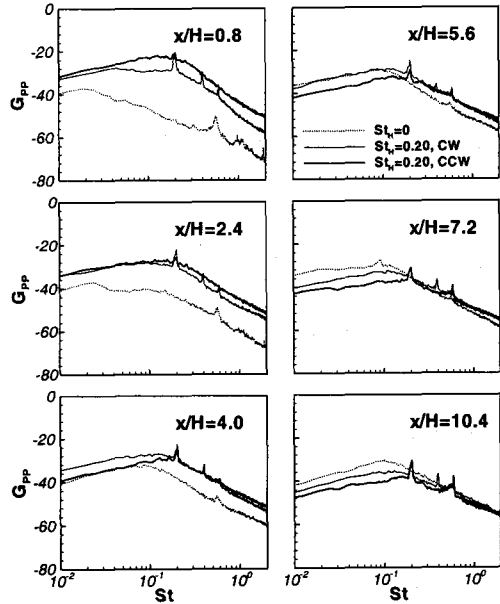


Fig. 7 Pressure spectrum at $Re_d=375$

우, 넓은 피크가 $St \approx 0.25$ 근처에 나타난다. 이는 앞서 언급한대로 비정상 후류에 의해 생성되는 박리점에서의 교란 때문이다. 박리점에서의 교란은 외부 유체 유입율을 크게 증가시킨다.

$St_H=0.20$ 에 대한 응집도가 그림 8 과 9 에 도시되어 있다. 시계 방향에 대해(CW), $x_0/H=0.8$ 를 기준 응집도는 비정상 후류 주파수($St=0.20$)에서 지배적이다. 그렇지만, 반시계 방향에 대해(CCW) $x_0/H=0.8$ 을 기준 응집도는 $St=0.20$ 에서 약간 감소되어 있다. $\xi/H \approx 5$ 의 주기적 특성이 그림 8 과 9 에서 얻어졌다. $\xi/H \approx 5$ 의 주기적 특성은 $St_H=0.20$ 에서 $St_H \xi/H=1$ 을 가진 후류주파수의 공간 변형 ($\xi=f/U_\infty$)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 회전방향이 다를 경우, 박리기포의 초기영역에서 주로 차이가 나타난다. 그렇지만, 회전방향 변경에 따른 차이는 그림 8 (b)와 그림 9 (b)에서 보이는 것처럼 재부착점에서는 잘 나타나지 않는다. 플랩핑 성분($St \approx 0.02$)은 강한 비정상 후류에 의해 사라진다는 점에 주목하자.

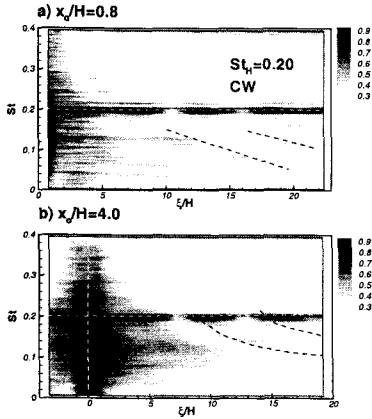


Fig. 8 Coherence ($St_H=0.20$, $x_j/H=0.8, 4.0$, CW)

4. 결론

단각물체 주위 난류박리계부착 유동장에 대한 비정상 후류의 영향이 실험적으로 연구되었다. 원봉을 단 스프로크 휠 형 후류가진기가 비정상 후류를 생성하기 위해 사용되었다. 후류 스트로홀 수의 작동 범위는 $Re_d=375$ 에 대해 $0 \leq St_H \leq 0.20$ 이었다. 위상평균기법이 비정상 후류에 의한 위상차이를 구별하기 위해 채택되었다. 실험결과로부터 CCW 가 CW 보다 x_R 을 더 감소시키는 것을 발견하였다. 비정상 후류에 의한 유속변동은 박리전단층을 향상시키고, 와형성을 크게 일으켜 x_R 을 감소시켰다. 벽압력 변동의 공간분포(C_p)는 $St_H=0.20$ 의 크기가 $St_H=0.02$ 의 크기보다 더 작은 것을 보여주었다. 이는 조직화된 와구조가 대형와구조-벽면 상호작용에 의한 유속변동레벨을 감소시키기 때문이다. 전체적인 에너지 레벨이 비정상 후류에 의해 증가되었으며, 박리점 근처 외부유동 유입률이 증가하였다. 응집도의 측정결과, κ_i 이 증가할수록, 응집도가 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, II"

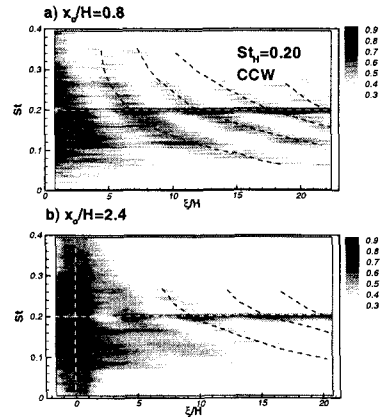


Fig. 9 Coherence ($St_H=0.20$, $x_j/H=0.8, 2.4$, CCW)

Journal of Turbomachinery, Vol. 118, pp. 327~346.

(3) 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.
 (4) 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.
 (5) Lee, I. and Sung, H.J., 2001, "Characteristics of Wall Pressure Fluctuations in Separated Flows over a Backward-Facing Step: Part I, II" *Experiments in Fluids*, Vol. 30, pp. 262~282.
 (6) 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.
 (7) 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.
 (8) Sigurdson, L.W., 1995, "The Structure and Control of a Turbulent Reattaching Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 298, pp. 139~165.
 (9) Kiyama, M. and Sasaki, K., 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 137, pp. 83~113.
 (10) Mabey, D.G., 1972, "Analysis and Correlation of Data on Pressure Fluctuations in Separated Flow," *Journal of Aircraft*, Vol. 9, pp. 642~645.
 (11) 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.
 (12) 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.