

## 층류박리 후향계단 유동의 이중주파수 가진

김성욱\* · 최해천\*\* · 유정열 †  
 (2002년 7월 23일 접수, 2003년 5월 26일 심사완료)

### Double Frequency Forcing of the Laminar Separated Flow over a Backward-Facing Step

Sungwook Kim, Haechon Choi and Jung Yul Yoo

**Key Words :** Local Forcing(국소가진), Vortex Pairing(보텍스 병합), Fundamental(기본주파수 성분), Subharmonic(분수조화 주파수 성분), Phase Difference.(위상차)

#### Abstract

The effect of local forcing on the separated flow over a backward-facing step is investigated through hot-wire measurements and flow visualization with multi-smoke wires. The boundary layer upstream of the separation point is laminar and the Reynolds number based on the free stream velocity and the step height is 13800. The local forcing is given from a slit located at the step edge and the forcing signal is always defined when the wind tunnel is in operation. In case of single frequency forcing, the streamwise velocity and the reattachment length are measured under forcing with various forcing frequencies. For the range of  $0.010 < St_\theta < 0.013$ , the forcing frequency component of the streamwise velocity fluctuation grows exponentially and is saturated at  $x/h = 0.75$ , while its subharmonic component grows following the fundamental and is saturated at  $x/h = 2.0$ . However, the saturated value of the subharmonic is much lower than that of the fundamental. It is observed that the vortex formation is inhibited by the forcing at  $St_\theta = 0.019$ . For double frequency forcing, natural instability frequency is adopted as a fundamental frequency and its subharmonic is superposed on it. The fundamental frequency component of the streamwise velocity grows exponentially and is saturated at  $0.5 < x/h < 0.75$ , while its subharmonic component grows following the fundamental and is saturated at  $x/h = 1.5$ . Furthermore, the saturated value of the subharmonic component is much higher than that for the single frequency forcing and is nearly the same or higher than that of the fundamental. It is observed that the subharmonic component does not grow for the narrow range of the initial phase difference. This means that there is a range of the initial phase difference where the vortex pairing cannot be enhanced or amplified by double frequency forcing. In addition, this effect of the initial phase difference on the development of the shear layer and the distribution of the reattachment length shows a similar trend. From these observations, it can be inferred that the development of the shear layer and the reattachment length are closely related to the vortex pairing.

————— 기호설명 —————			
$H$	: 형상계수	$h$	: 계단높이
		$f$	: 주파수
		$St_h$	: 계단높이 기준 스트라울수
		$St_\theta$	: 박리점 운동량두께 기준 스트라울수
		$Re_h$	: 계단높이 기준 레이놀즈수
		$U_\infty$	: 자유유동속도
		$x$	: 주유동방향
		$y$	: 수직방향

---

\* 회원, 서울대학교 마이크로열시스템 연구센터  
 \*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 †  
 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부  
 E-mail : jyoo@plaza.snu.ac.kr  
 TEL : (02)880-7112, FAX : (02)883-0179

$q$  : 가진량  
 $a$  : 가진진폭

#### 그리스문자

$\theta$  : 운동량두께  
 $\delta$  : 경계층두께  
 $\phi$  : 위상차

#### 하첨자

$f$  : 기본 주파수  
 $s$  : 분수조화 주파수

## 1. 서론

박리-재부착(separation-reattachment) 난류 유동장에 대한 연구는 공학적 응용에 매우 중요한 비중을 차지한다. 후향계단을 지나는 박리-재부착 유동은 단순한 기하학적 형상을 포함하면서도 박리 이전의 경계층 유동, 박리 이후의 전단유동 및 재순환 유동, 재부착 이후의 재발달 경계층 유동 등 여러가지 다양한 유동 형태를 함께 포함하고 있기 때문에, 아직도 명확하게 규명되지 않은 박리-재부착 유동현상의 물리적 원리 및 유동에 영향을 미치는 인자들에 관한 연구의 대상이 되고 있다. 최근에는 후향계단 유동의 박리 전단층에서 나타나는 보텍스(vortex)의 구조와 병합과정에 대한 연구가 보고되고 있다. 특히 후향계단 유동에 제어된 교란을 가하여 재부착길이를 감소시키고 혼합을 증가시키는 등 유동장의 제어가 시도되고 있다.

Bhattacharjee 등<sup>(1)</sup>은 풍동 천장에 설치된 스피커로 자유유동에 가진함으로써 가진이 후향계단 유동에 미치는 영향을 고찰하였으며, '최대효과 주파수'(most effective frequency)는 계단높이,  $h$  로 무차원화한 스트라울수,  $St_h (= fh/U_0)$  가 0.2 에서 0.4 사이라고 하였다. Roos & Kegelmann<sup>(2)</sup>은 계단 모서리에 진동하는 보조깃(flap)을 설치하여 유동을 제어하고자 하였으며, 레이놀즈수,  $Re_h (= U_0 h/\nu)$  를 변화시키면서 재부착길이를 측정된 결과 난류영역에서 더 큰 효과가 나타남을 관찰하였고, 유동 가시화를 통하여 보조깃의 진동이 보텍스의 형성을 촉진시킨다는 것을 관찰하였다. Hasan<sup>(3)</sup>은 스피커를 사용하여 계단 모서리에서 유동을 분사, 흡입하는 방식으로 가진하였으며, 가진이 불안정 파동(instability wave) 및 큰 에디 구조에 미치는 영향을 연구하였다. 그는 후향계단 유동의 불안정성 모드를 두 가지로 구분하였는데, 하나는 운동량두께,

$\theta$  를 무차원 변수로 사용한 주파수,  $St_\theta (= f\theta/U_0)$  가 약 0.012 일 때, 나타나는 '전단층 모드'(shear layer mode)이고, 다른 하나는 계단높이  $h$  를 기준으로 한 주파수,  $St_h$  가 0.185 일 때 나타나는 '스텝 모드'(step mode)라 하였다. Chun & Sung<sup>(4)</sup>은 입구유동이 난류인 경우의 세가지 레이놀즈수에서 계단 모서리에 설치한 스피커를 사용하여 국소적으로 가진함으로써 유동을 제어하였다. 가진으로 인하여 전단층의 성장률이 증가하고 박리점에서 큰 보텍스가 형성되어 엔트레인먼트가 증가하면서 재부착길이가 감소한다고 설명하였으며,  $St_\theta \approx 0.01$  일 때 재부착길이가 최소가 된다고 하였다. Kiya 등<sup>(5)</sup>은 전향 실린더의 선단 모서리에 스피커를 사용하여 가진함으로써 실린더 주위의 유동을 제어하였다. 단일주파수의 경우와 더불어 이중주파수의 경우의 가진도 하였으며, 이중주파수 가진의 경우 가진진폭이 커지면 재부착길이는 두 주파수 간의 위상차에 무관해지며 단일주파수 가진의 경우와 유사하다고 주장하였다. 진송완 등<sup>(6)</sup>은 난류박리가 일어나는 후향계단 유동에 이중주파수 가진을 부가하여 가진이 유동에 미치는 영향을 관찰하였다. 그들의 경우, 기본주파수는 재부착길이가 최소가 되는 주파수로 하였으며 기본주파수와 배수조화 주파수를 합성하여 가진하였을 때, 재부착길이가 위상차에 영향을 받음을 확인하였다. 또한 계단 하류의 속도 스펙트럼으로부터 기본주파수와 배수조화주파수를 합성하여 가진하였을 때, 두 가진주파수 중 한 주파수 성분이 감소된다는 것을 관찰하였다. 이 결과들로부터 후향계단 유동장에 특정 주파수의 가진을 부가하면 재부착길이가 감소하고 혼합이 증가한다는 것이 밝혀졌으며, 이는 후향계단의 박리점 이후 전단층에서 발생하는 보텍스의 형성, 병합과 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

한편, 전단층에서 발생하는 보텍스의 구조 및 가진에 의한 보텍스 병합의 제어는 후향계단 유동뿐만 아니라, 원래는 자유전단 유동이나 혼합층 유동에 대해서 더 많은 연구들이 진행되어 왔다. Crow & Champagne<sup>(7)</sup>은 단일주파수로 제트에 교란을 가하였을 때, 제트 출구 직경을 기준으로 한 스트라울수,  $St_D$  가 0.3 인 경우에 가장 강력한 보텍스 구조를 얻을 수 있었고 이를 '선택적 모드'(preferred mode)라 하였으며 이것은 가진 초기의 기본주파수 성분이 최대로 증폭되는 주파수(most amplified frequency)로부터 구하였다. Zaman & Hussain<sup>(8)</sup>은 전단층 모드에서 초기의 층류 전단 유동이  $St_\theta = 0.012$  에서 가장 보텍스의 형성이 잘

이루어지며, 제트컬럼 모드에서는 초기의 전단 유동이 층류나 또는 난류나에 관계없이  $Sr_D = 0.85$ 에서 가장 안정된 보텍스 병합이 이루어짐을 보였다. 아울러 분수조화 주파수 성분의 성장이 보텍스 병합에 중요한 역할을 한다고 하였다. Ho & Huang<sup>(9)</sup>은 자유 전단유동에 넓은 주파수 범위의 초기 기본교란을 가함으로써 보텍스의 형성과 병합을 가시화를 통하여 관찰하였으며, 분수조화 성분은 보텍스 병합의 부산물이 아니라 보텍스 병합을 일으키는 중요한 촉매 역할을 한다고 하였다.

Arbey & Ffowcs Williams<sup>(10)</sup>은 이와 같은 분수조화 주파수 성분의 중요성에 착안하여 기본주파수 성분과 분수조화 주파수 성분을 함께 가함으로써 보텍스 병합을 제어할 수 있다는 것을 보였으며, Husain & Hussain<sup>(11)</sup>은 전단층 모드의 실험에서 초기의 기본주파수 성분과 분수조화 주파수 성분 및 이 두 주파수 사이의 초기위상차에 의해 보텍스 병합이 제어될 수 있음을 보였다. 조성권 등<sup>(12)</sup>은 원형 제트에서 기본교란 및 분수조화교란이 보텍스 병합에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 가진주파수의 초기위상차에 따른 보텍스 병합정도가 민감하게 변하는 영역이 존재한다고 하였다.

본 연구는 층류박리가 일어나는 후향계단 유동장에 국소 가진함으로써, 이로 인하여 발생하는 불안정 파동의 특성을 고찰하고 보텍스 구조의 형성과 병합을 제어하고자 하였다. 국소가진은 단일 주파수 가진 뿐만 아니라 이중주파수 가진도 수행하였다. 동일한 가진량으로 단일주파수 가진을 한 경우 유동장과 보텍스 병합에 대한 가진주파수의 영향을 고찰하였다. 또한 이중주파수 가진을 통하여 가진 주파수 및 각 가진주파수 간의 위상차가 보텍스의 형성, 성장과 병합에 미치는 영향을 속도의 스펙트럼 분석을 통하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 풍동은 폐순환식 피팅겐형 풍동으로 시험부의 크기는 폭이 0.9 m, 높이가 0.9 m 이고 길이는 3.6 m 이며, 수축부의 수축비는 64 : 9 이다. 유속이 40 m/s 일 때의 자유류 난류 강도는 0.2% 이내이며 균일도는 0.3% 이내이다.

실험에 사용된 계단의 높이는 40 mm, 폭은 880 mm 이며 계단의 폭을 계단 높이로 나눈 중횡비 (aspect ratio)는 22 이다. 계단의 선단부는 타원형이며 계단의 선단부로부터 계단의 모서리까지의 길이는 325 mm 이다. 계단의 선단부로부터 모서리까지의 표면은 매끄럽게 하여 박리 이전의 입구경계층이 층류경계층을 유지하도록 하였다.

가진을 위하여 계단 모서리 부분 박리 지점에 폭이 1.4 mm, 길이가 400 mm 인 슬릿을 설치하였다 이 슬릿은 24 × 30 × 460 mm<sup>3</sup> (H × W × D)의 챔버와 연결되어 있으며 이 챔버는 같은 길이의 지름 19 mm 의 플라스틱 튜브 네 개로 스피커와 연결되어 있다. 스피커는 12" 우퍼를 사용하였다.

유속의 측정을 위하여 I-형 열선 프로브(Dantec, 55P11)와 열선유속계(Dantec, Streamline)를 사용하였다. 재부착길이의 측정에는 Dantec 55R57 스플릿 필름 프로브(Split film probe)를 사용하였으며 주유동방향으로 0.2h 간격으로 측정하여 정방향 흐름 정도(forward flow factor)를 구하여 그 값이 0.5 가 되는 지점을 재부착길이로 정하였다. 열선의 출력은 DT2838 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장하였으며, 프로브의 이송도 함께 제어하였다.

한편 다중 스모크(smoke) 선을 이용하여 유동가시화를 수행하였다. 스모크선은 계단 모서리, 즉  $x/h = 0.0$  인 위치로부터  $x/h = 4.0$  까지 0.5h 간격으로 총 9 개를 설치하였다. 유동가시화에는 고해상도의 CCD 카메라(KODAK ES1.0)를 사용하였으며 노출시간은 0.5 ms 로 하였다. 조명으로는 할로젠 램프를 사용하였다. CCD 카메라와 스모크선을 가진신호와 동기시키기 위하여 555 타이머와 플립-플롭(flip-flop) 소자를 사용한 회로를 구성하였으며, 이를 통하여 동기와 가진신호와 스모크선, 카메라 셔터 사이의 시간지연 및 트리거를 실현하였다. 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다.

본 연구에서 가진신호는 컴퓨터에서 HP-VEE 와 DT-2833(Data Translation) 보드를 사용하여 아날로그 전압신호로 변환하였다. 변환된 신호는 오디오 앰프를 거쳐 스피커로 공급된다.

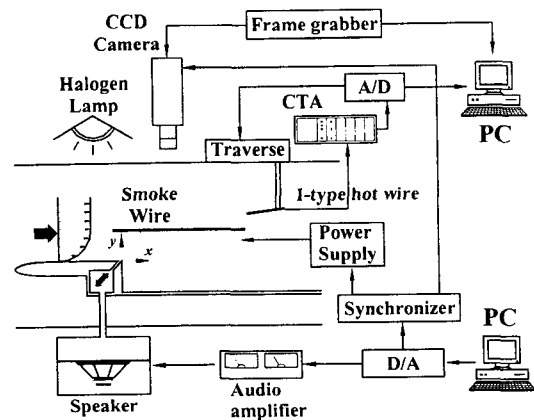


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

가진 신호는 다음과 같이 표시된다.

$$q/U_\infty = \sqrt{2}a \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$$q/U_\infty = \sqrt{2}(a_s \sin(2\pi f_s t) + a_f \sin(2\pi f_f t - \phi)) \quad (2)$$

여기서  $U_\infty$ 는 자유유동속도이며, 가진진폭을 속도 섭동량의 rms 값으로 정의하기 위하여  $\sqrt{2}$ 를 곱하였다. 식(1)은 단일주파수 가진의 경우이며 식(2)는 이중주파수 가진의 경우이다. 가진신호를 측정할 위치는 계단 모서리 부근으로, 주유동방향으로는  $x/h=0.0$  이고 수직방향으로는 가진하지 않았을 때 주유동방향 평균속도가  $1m/s$ 인 지점이다. 가진신호는 항상 풍동을 작동시키고 자유유동속도를 실험조건에 일치시킨 상태에서 측정하였으며 측정된 속도신호의 스펙트럼으로부터 각 가진주파수 성분을 구함으로써 가진진폭을 결정하였다. 본 연구에서 단일주파수 가진의 경우  $a=2.8\%$ 로 하였고, 이중주파수 가진의 경우에는  $a_s=a_f=2\%$ 로 하였다. 이는 단일주파수 가진의 경우와 이중주파수 가진의 경우 모두 유동장에 부가되는 가진에너지가 같게 하기 위함이다. Fig. 2(a)와 2(b)에 단일주파수 가진과 이중주파수 가진의 경우에 대하여 각각 측정된 가진신호의 대표적인 예를 제시

하였다. 측정 결과, 단일주파수 가진의 경우와 이중주파수 가진의 경우 모두, 식 (1)과 (2)에서 정의한 가진신호로 잘 표현된다는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 입구유동 및 가진하지 않은 경우

박리 이전의 입구 경계층을 측정하였다. 측정 위치는 횡방향으로는 계단의 중앙이며 주유동방향으로는 계단 모서리로부터 상류방향으로  $2\text{ mm}$  떨어진 곳이다. Fig. 3에 박리 이전의 입구 경계층에서 측정된 평균속도와 난류강도를 나타내었다. 평균속도는 층류 경계층의 엄밀해인 Blasius 속도분포와 잘 일치함을 알 수 있으며, 경계층 내부에서 보이는 난류강도의 최대값은 자유유동속도의  $0.9\%$  이내이다.

Table 1에 본 연구의 실험조건 및 입구 경계층의 변수들을 제시하였다. 이 표에 제시한 변수들을 Adams 등<sup>(13)</sup>이 박리 이전의 경계층두께 기준 레이놀즈수와 계단높이 기준 레이놀즈수, 그리고 경계층두께와 계단높이의 비와의 관계로써 박리와

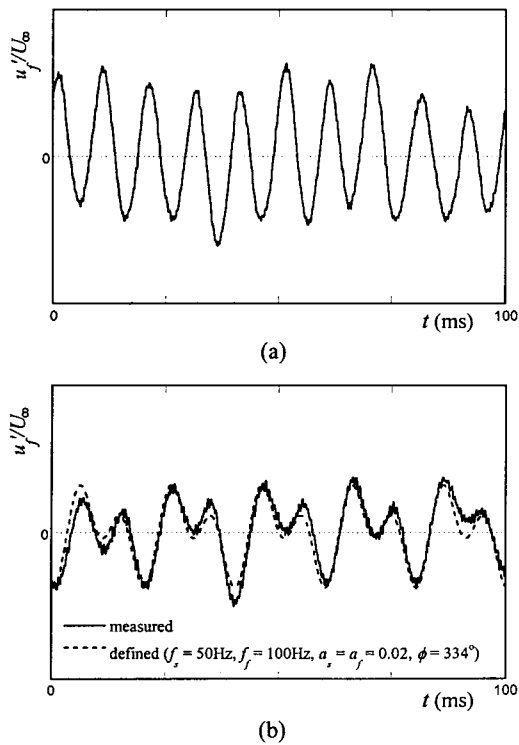


Fig. 2 Samples of the forcing signal: (a) single-frequency forcing, (b) double-frequency forcing

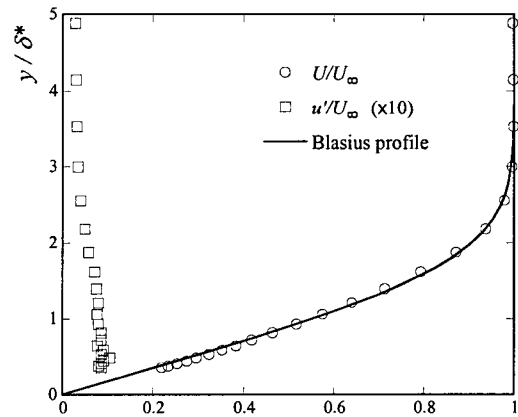


Fig. 3 Mean velocity and turbulence intensity profiles measured  $2\text{ mm}$  upstream of the step edge

Table 1 Boundary layer parameters

$U_0 = 5.2\text{ m/s}$
$\delta = 4.70\text{ mm}$
$\theta = 0.67\text{ mm}$
$H = 2.5$
$Re_\theta = 13800$
$Re_\delta = 230$

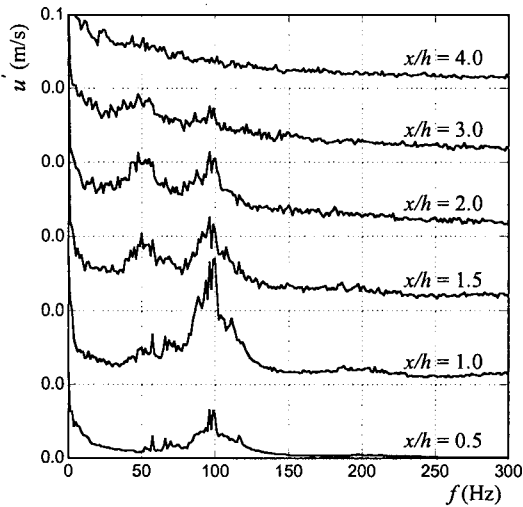


Fig. 4 Velocity spectra at  $y_{0.95}$  location for an unforced flow

재부착이 일어나는 지점의 유동상태를 구분한 것을 참고하면, 본 연구의 경우는 층류박리와 난류 재부착이 일어나는 유동임을 알 수 있다.

Fig. 4 에 가진하지 않은 경우에 대하여 후향계단 박리점 이후 발생하는 전단층에서 측정된 속도의 스펙트럼을 나타내었다. 여기서 수직방향 측정 위치,  $y_{0.95}$  는 주유동방향의 평균속도가 자유유동 속도의 95%가 되는 지점이다. 박리 직후 100 Hz 의 피크가 나타나며  $x/h=1.0$  에서 최대가 되고, 이후 감소하여  $x/h=4.0$  에서 소멸하는 것을 볼 수 있다. 이 100 Hz 를 스트라울수로 환산하면 각각  $St_h=0.77$ ,  $St_\theta=0.013$  이다. 또한  $x/h=1.5$  부터 50 Hz 의 피크가 성장하다가 하류에서 소멸하는 것을 볼 수 있다. Hasan<sup>(3)</sup>의 실험결과에는 가진하지 않은 경우  $St_\theta=0.012$  에서 피크가 나타나고 있으며 이를  $St_h$  로 환산하면 0.55 이다. Roos & Kegelmann<sup>(2)</sup>은  $St_h=0.4$  에서 피크가 나타남을 관찰하였다. 한편 본 연구에서 다양한 자유유동속도에서 측정된 운동량두께로 무차원화한 고유 불안정 주파수는 0.011 ~ 0.013 으로, Zaman & Hussain<sup>(8)</sup>과 Husain & Hussain<sup>(14)</sup>이 제트유동에서 측정된 고유 불안정 주파수,  $St_\theta=0.012$  과도 잘 일치한다.

3.2 단일주파수 가진

후향계단 유동장에 다양한 주파수의 가진을 부가하여 보텍스의 형성과 병합과정에 가진주파수가 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 5 에 다양한 단일 주파수로 가진한 상태에서  $x/h=2.0$  과  $y_{0.95}$  에서 측정된 주유동방향의 순간속도를 제시하였다. 이

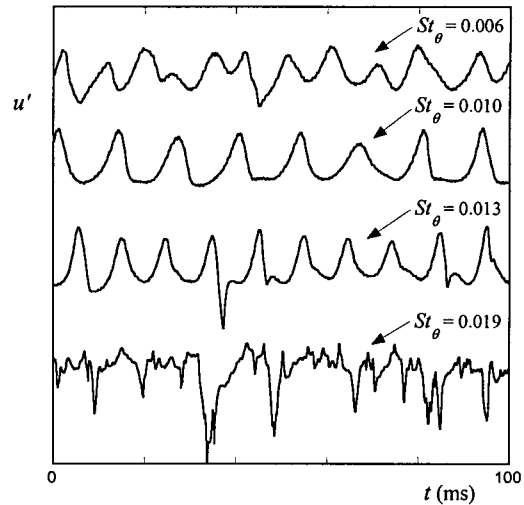


Fig. 5 Instantaneous velocity at  $x/h=2.0$  and  $y_{0.95}$  location for single-frequency forcing.

지점은 전단층과 자유류의 경계지점으로 보텍스가 지나가면서 나타나는 주기적인 신호를 잘 볼 수 있는 곳이다.  $St_\theta=0.010$  과  $St_\theta=0.013$  으로 가진하였을 때, 순간속도는 가진주파수를 잘 따르고 있으며  $St_\theta=0.006$  으로 가진한 경우에는 가진주파수와 함께 그것의 배수조화 주파수가 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러나  $St_\theta=0.019$  로 가진한 경우에는 주기적인 양상이 보이지 않으며 상당한 난류성분이 관찰되는데, 이로부터 보텍스의 형성이 잘 되지 않는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 6(a)와 6(b)에  $St_\theta=0.013$  과  $St_\theta=0.019$  로 가진한 경우, 주유동방향 속도섭동의 기본주파수와 분수조화 주파수 성분의 분포를 제시하였다.

Fig. 6(a)에서  $St_\theta=0.013$  로 가진한 경우를 살펴보면, 박리 직후 기본주파수 성분이 급격하게 증가하기 시작하여 초기에는 수직방향으로 하나의 피크를 갖는 분포를 보이다가 하류로 진행하면서 서서히 전단층 윗부분에서 기본주파수 성분의 크기가 증가하여 두개의 피크를 갖는 분포를 보인다. 그러나  $St_\theta=0.019$  로 가진한 경우에는 기본주파수 성분이 박리점 부근에서 큰 값을 가지나 하류로 진행하면서 성장하지 못하고 바로 소멸한다. 박리점 부근인  $x/h=0.05$  에서 기본주파수 성분의 최대값은  $St_\theta=0.013$  으로 가진한 경우의 최대값보다 크고 물론 초기 가진량보다도 더 큰 값이다. 이로부터  $St_\theta=0.019$  로 가진한 경우에는 기본주파수 성분의 성장률이 다른 주파수로 가진한 경우보다 현저히 크다는 것을 알 수 있다. 한편  $St_\theta=0.019$

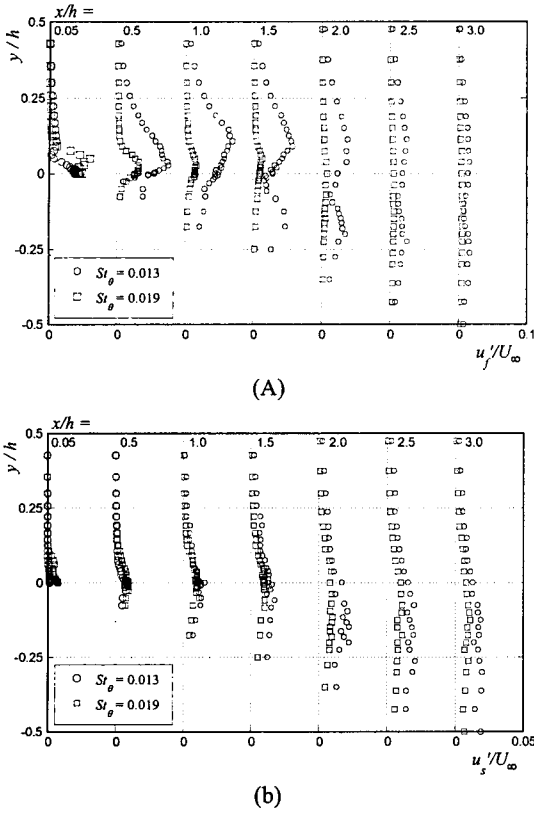


Fig. 6 Distributions of (a) fundamental and (b) subharmonic components for single-frequency forcing

로 가진한 경우에 최대값이 나타나는 단면상의 위치는 난류강도가 최대가 되는 위치이다.

Fig. 6(b)의 분수조화 주파수 성분의 분포를 살펴보면,  $St_\theta = 0.013$  으로 가진한 경우가  $St_\theta = 0.019$  로 가진한 경우보다  $x/h = 1.5$  의 하류에서 다소 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있으나, 두가지 가진주파수 모두 분수조화 주파수 성분의 성장은 기본주파수 성분의 성장에 비해 더딤을 알 수 있다.

Fig. 7(a)와 7(b)에서  $St_\theta = 0.013$  과  $St_\theta = 0.019$  로 가진한 경우 주유동방향 속도의 기본주파수와 분수조화 주파수 성분의 하류로의 발달과정을 살펴 보았다. 수직방향의 위치는 평균속도가 자유유동 속도의 75%가 되는 지점이다. 여기서 점선들은 가진하지 않은 경우 주유동방향 속도섭동의 기본 주파수 성분과 그것의 분수조화 주파수 성분을 나타낸 것이다. 우선, 가진하지 않은 경우를 보면 기본 주파수 성분이 박리 후 급격히 성장하여  $x/h = 0.75$  인 위치에서 먼저 최대값을 갖고, 이후 감소하기 시작한다. 한편 분수조화 주파수 성분은

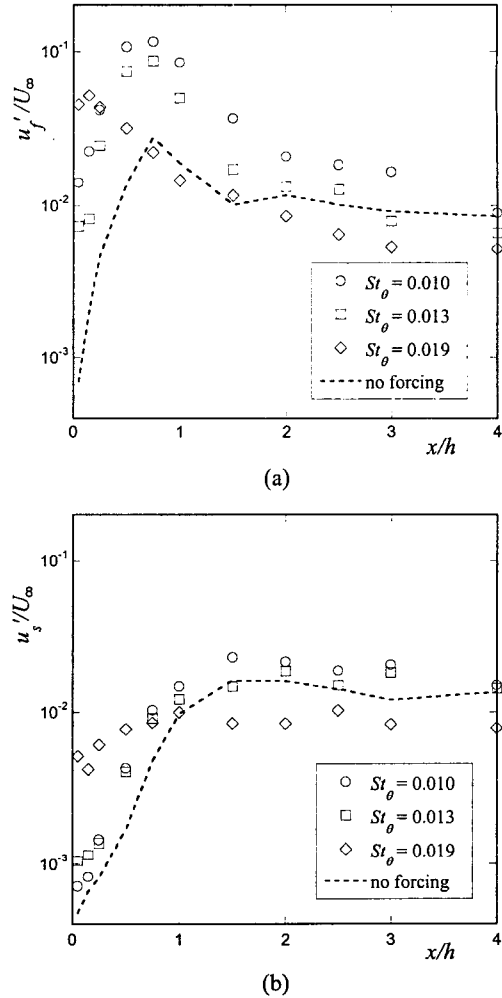


Fig. 7 Downstream evolutions of (a) fundamental and (b) subharmonic components along  $y_{0.75}$  location for single-frequency forcing

박리 직후 기본주파수 성분보다 낮은 값으로부터 성장하기 시작하는데,  $x/h = 1.3$  부근에서 기본주파수 성분보다 더 큰 값을 갖기 시작하여  $x/h = 1.5$  인 위치에서 최대값을 갖는다.  $St_\theta = 0.013$  으로 가진한 경우에는  $x/h = 1.5$  를 지난 위치에서 분수조화 주파수 성분이 기본주파수 성분보다 더 커지며 분수조화 주파수 성분은  $x/h = 2.0$  에서 최대에 도달한다. 그러나 증폭된 분수조화 주파수 성분은 자유유동속도의 1% 정도의 크기로 비록 초기의 매우 미약한 값보다 상당히 성장하였다고 볼 수 있지만 강한 보텍스 병합이 일어났다고 판단하기엔 여전히 미약하다. 한편  $St_\theta = 0.019$  로 가진한 경우에는 기본주파수 성분

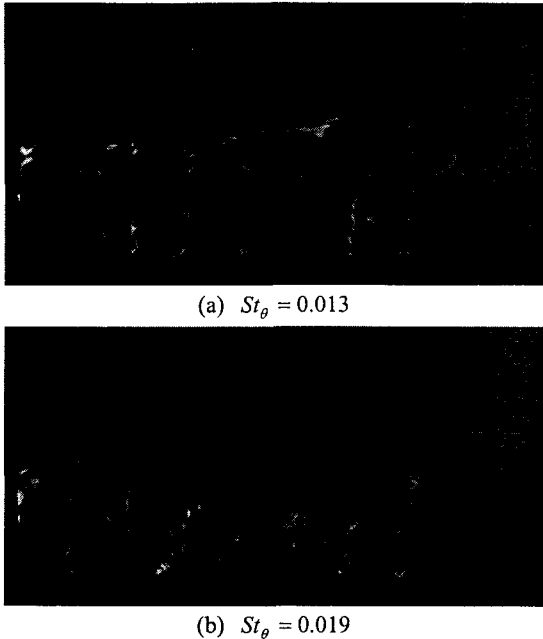


Fig. 8 Instantaneous flow visualizations using multi-smoke wires for single-frequency forcing: (a)  $St_\theta = 0.013$ , (b)  $St_\theta = 0.019$

과 분수조화 주파수 성분의 크기가 박리점 직후에서 이미 다른 경우보다 더 큰 값을 나타내고 있다. 기본주파수 성분은  $x/h=0.15$  위치에서 포화된 것으로 보이는데 그 값은 자유유동 속도의 약 6% 정도로  $St_\theta = 0.013$  으로 가진한 경우와 같이 자유유동속도의 약 10%까지는 미치지 못한다. Husain & Hussain<sup>(11)</sup>은 기존의 연구결과들로부터 교란의 증폭율이 가장 큰 주파수(maximum amplification rate frequency)는  $St_\theta \approx 0.017$  이고, 최대 증폭 주파수 또는 포화된 크기가 최대가 되는 주파수와 다르다고 하였다. 이것은 증폭율이 최대가 되는 주파수에서는 낮은 크기로 포화가 이루어지기 때문에 보텍스 병합이 억제되고 난류성분이 억제되기 때문이라 하였다.<sup>(15)</sup> 이러한 경향은 Hasan<sup>(3)</sup>의 결과에서도 찾아볼 수 있다.

Fig. 8(a)와 8(b)에 단일주파수 가진 하에서 다중스모크선을 이용한 유동가시화 결과를 제시하였다. 이 그림에서 유동은 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르며 첫번째 스모크선이 있는 위치가  $x/h=0.0$  인 위치이다. Fig. 8(a)의  $St_\theta = 0.013$  으로 가진한 경우에는 가진에 의해 보텍스가 형성되는 것을 볼 수 있으나 Fig. 8(b)의  $St_\theta = 0.019$  로 가진한 경우에는 가진에 의한 보텍스 또는 조직적인 구조를 볼 수 없다. 이러한 가시화 결과는 앞서 제시한 속도의 스펙트

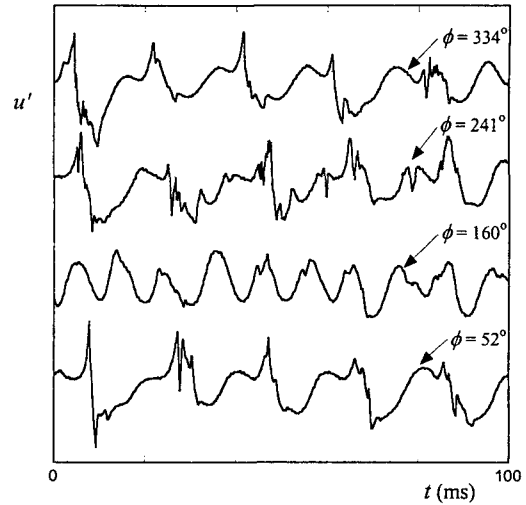


Fig. 9 Instantaneous velocity at  $x/h=1.5$  and  $y_{0.95}$  location for double-frequency forcing

럼 분석 결과들로부터  $St_\theta = 0.019$  에서의 가진이 보텍스의 형성을 방해한다는 것을 다시 한번 확인시켜주고 있다.

### 3.3 이중주파수 가진

본 연구에서 이중주파수 가진은 고유 불안정 주파수(natural instability frequency)인  $St_\theta = 0.013$  를 기본주파수로 하고 그것의 분수조화 주파수를 중첩하여 가진하였다.

Fig. 9 에 여러 초기위상차에 대하여  $x/h=1.5$  와  $y=y_{0.95}$  에서 측정된 주유동방향의 순간속도를 제시하였다. 초기위상차가  $160^\circ$  인 경우를 제외하고는 모두 기본주파수와 분수조화 주파수 성분을 함께 볼 수 있으나, 초기위상차가  $160^\circ$  인 경우에는 분수조화 주파수 성분은 잘 나타나지 않는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10(a)와 10(b)에는 이중주파수 가진의 경우 두 개의 초기위상차에 대하여 주유동방향 속도섭동의 기본주파수와 분수조화 주파수 성분의 분포를 제시하였다. Fig. 10(a)의 기본주파수 성분의 분포는  $x/h=1.5$  인 위치와 그 하류에서 두 개의 피크를 갖는 것을 보이며, 대체로  $St_\theta = 0.013$  의 단일주파수로 가진한 경우와 유사하다. 그러나 Fig. 10(b)의 분수조화 주파수 성분은 단일주파수 가진의 경우와 달리 그 크기가 기본주파수 성분의 크기에 상응하는 정도로 증가하였으며,  $x/h=1.5$  이후에는 기본주파수 성분보다 더 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이것으로 이중주파수 가진의 경우 안정적인 보텍스 병합이 일어나는 것으로 판단할

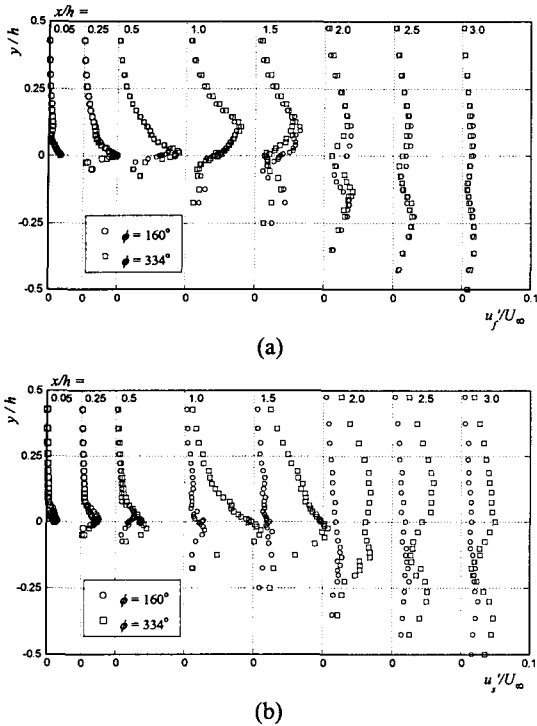


Fig. 10 Distributions of (a) fundamental and (b) subharmonic components for double-frequency forcing

수 있으며,  $x/h=3.0$  이후의 하류에서도 상당한 크기를 갖는다. 그러나 이 그림에서 초기위상차가  $160^\circ$ 인 경우의 분수조화 주파수 성분의 분포는  $334^\circ$ 의 초기위상차를 갖는 경우보다 크기가 작고, Fig. 6(b)에 제시한 기본주파수만의 단일주파수 가진과 유사한 분포를 갖는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11(a)와 11(b)에서 이중주파수 가진의 경우, 주유동방향 속도의 기본주파수와 분수조화 주파수 성분의 하류로의 발달과정을 살펴보았다. 수직방향의 위치는 평균속도가 자유유동속도의 75%가 되는 지점이다. 단일주파수 가진과의 비교를 위하여 기본주파수만의 단일주파수 가진의 경우를 함께 나타내었다. Fig. 11(a)로부터 기본주파수 성분은 초기위상차에 관계없이 거의 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있으며, 기본주파수만의 단일주파수로 가진한 결과와도 같은 경향을 볼 수 있다. 기본주파수 성분의 분포를 Fig. 11(b)의 분수조화 주파수 성분과 비교하면  $x/h=0.5\sim 0.75$ 에서 최대값을 갖고 상대적으로 급격한 소멸을 보이며 최대값은 자유유동속도의 거의 10%에 달하는 값이다. 분수조화 주파수 성분은 초기에 완만한 상승을 시작하여  $x/h=1.5$  부근에서 최대값을 갖는다. 최대

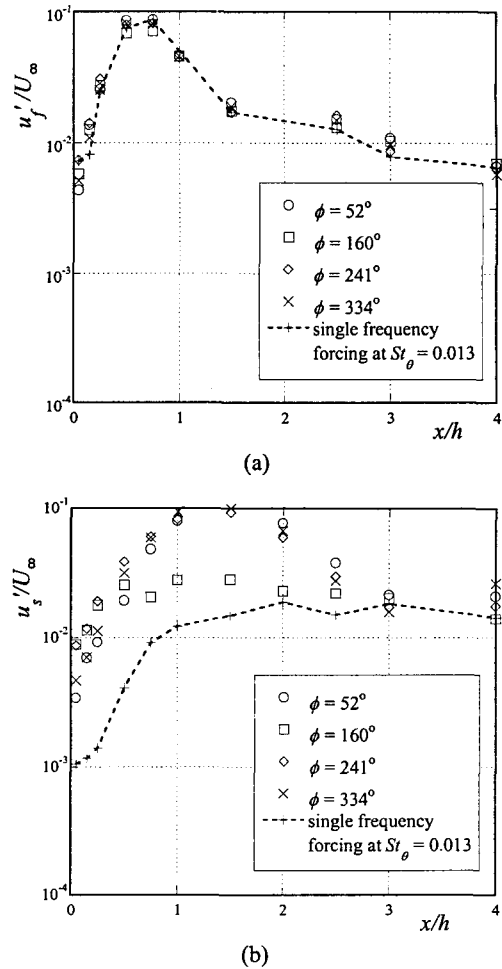
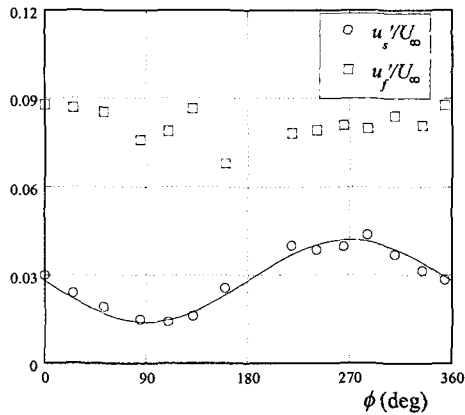


Fig. 11 Downstream evolutions of (a) fundamental and (b) subharmonic components along  $y_{0.75}$  location for double-frequency forcing

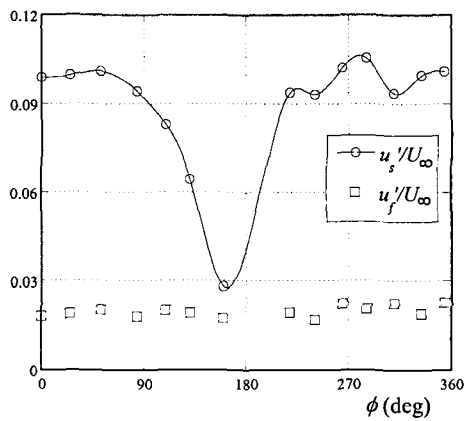
값의 크기는 기본주파수 성분의 최대값과 유사하며 오히려 약간 더 큰 값을 갖기도 한다. 한편 초기위상차가  $160^\circ$ 인 경우의 분수조화 주파수 성분은 바로 직후에는 다른 초기위상차와 같은 성장을 보이지만  $x/h=0.5$  부터는 성장을 멈추고 그 최대값의 크기도 다른 초기위상차의 경우에 비하여 미약하다. 자유 전단유동의 이중주파수 가진의 경우에도 기본주파수와 분수조화 주파수의 가진량이 거의 동일한 상태에서 특정한 초기위상차에서만 보텍스의 병합이 지연되거나 미약한 경우를 볼 수 있으며 ‘전단층 모드’에서 실험한 Husain & Hussain<sup>(11)</sup>의 연구나 ‘제트 컬럼 모드’에서 실험한 조성권 등<sup>(12)</sup>의 연구에서 그 예를 찾을 수 있다.

$x/h=0.5$ 와  $x/h=1.5$ 의 두 위치에서 기본주파수 성분과 분수조화 주파수 성분의 초기위상차에 의





(a)



(b)

Fig. 12 Variations of the fundamental and subharmonic components with the initial phase difference for double-frequency forcing: (a)  $x/h = 0.5$ , (b)  $x/h = 1.5$

한 영향을 각각 Fig. 12(a)와 12(b)에 나타내었다.  $x/h = 0.5$ 는 Fig. 11(a)로부터 기본주파수 성분이 최대값에 도달하는 위치이며,  $x/h = 1.5$ 는 분수조화 주파수 성분이 최대값을 갖는 위치이다. Fig. 12(a)에서 최대값에 도달한 기본주파수 성분은 초기위상차에 따라 크기가 거의 일정하다. 분수조화 주파수 성분은 초기위상차에 따라 그 정도가 매우 미약하나 사인함수의 형태를 갖는데, Fig. 12(b)의 분수조화 주파수 성분이 최대가 되는 위치에 도달하면 이전 그림에서도 설명한 것과 같이  $160^\circ$ 와 그 부근의 좁은 초기위상차 범위에서 분수조화 주파수 성분이 매우 작게 되고 그 이외의 초기위상차에서는 위상차에 따라 별다른 경향을 보이지 않는 형태의 분포(cusp-like shape)를 보인다. 이것은 이중주파수 가진에 의하여 보텍스의 병합을 촉진

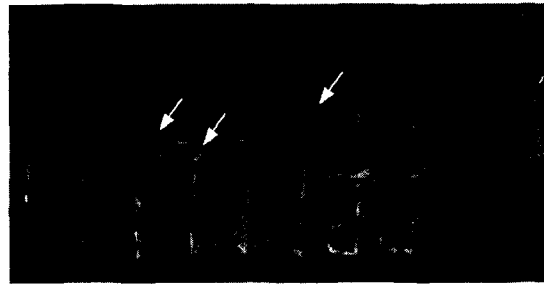


Fig. 13 Instantaneous flow visualization using multi-smoke wires for double-frequency forcing at  $\phi = 334^\circ$

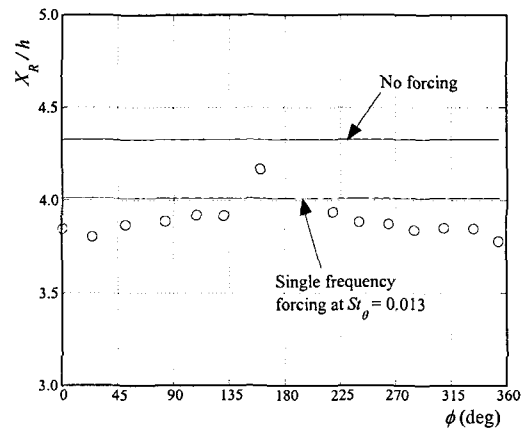


Fig. 14 Effect of double-frequency forcing on the reattachment length

시키고 강화시킬 수 있으나 모든 초기위상차에 대하여 항상 같은 결과를 나타내지는 않는다는 것을 의미한다.

Fig. 13 에는 초기위상차가  $334^\circ$ 인 이중주파수 가진 하에서 가시화한 결과를 제시하였다. 그림으로부터  $x/h = 1.0 \sim 1.5$ 에서 두 개의 보텍스가 서로 접근하면서 병합되고 있는 것을 볼 수 있으며  $x/h = 2.5$ 인 위치에서는 병합된 큰 보텍스 구조를 볼 수 있다. 물론 이러한 병합된 보텍스 구조는 다른 위상차에서도 관찰되나, 초기위상차가  $160^\circ$ 인 경우에는 매우 간헐적으로 관찰되었다. 이중주파수 가진의 경우에 대하여 초기위상차에 의한 재부착길이의 영향을 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기위상차가  $160^\circ$ 인 경우를 제외하고는 모두 기본주파수만으로 가진한 경우의 재부착길이보다 감소하였다. 초기위상차가  $160^\circ$ 인 경우에 재부착길이가 가장 덜 감소하며 이때 보텍스 병합이 잘 이루어지지 않는다는 사실로부터, 보텍스 병합과 재부착길이는 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 초기위상차

가 전단층의 발달과 주유동방향 평균속도와 난류 강도 분포에도 영향을 주는 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구결과, 단일주파수 가진의 경우,  $0.010 < St_\theta < 0.013$  에서는 주유동방향 속도섭동의 가진주파수 성분이 우선적으로 성장하여 주유동방향의  $x/h = 0.75$  부근에서 포화되며 분수조화 주파수 성분은 가진주파수 성분의 성장에 뒤따라 성장하여  $x/h = 1.5 \sim 2.0$  부근에서 포화되는 것으로 나타났다. 그러나 포화된 분수조화 주파수 성분의 크기는 가진주파수 성분의 크기보다 상당히 미약하였다. 한편  $St_\theta = 0.019$  인 경우에는 오히려 가진이 보텍스의 형성과 전단층의 성장을 방해하는 것을 속도의 스펙트럼과 함께 유동 가시화를 통하여 명확하게 확인할 수 있었다.

이중주파수 가진의 경우, 주유동방향 속도섭동의 기본주파수 성분은 단일주파수 가진의 경우와 마찬가지로 우선적으로 성장하여 주유동방향의  $x/h = 0.5 \sim 0.75$  인 위치에서 포화되며, 분수조화 주파수 성분은 기본주파수 성분의 성장을 뒤따라 성장하여  $x/h = 1.5$  부근에서 포화되는 것으로 확인되었다. 또한 포화된 분수조화 주파수 성분의 크기는 기본주파수 성분의 크기와 같거나 더 큰 값까지 성장하였으며, 특정 초기위상차 범위에서는 분수조화 주파수 성분이 성장하지 못하는 것으로 나타났다(cusp-like shape). 이것은 이중주파수 가진에 의하여 보텍스의 병합을 촉진시키고 강화시킬 수 있으나 모든 초기위상차에 대하여 항상 같은 결과를 나타내지는 않는다는 것을 의미한다. 그리고 이러한 초기위상차의 영향은 전단층의 발달과 재부착 길이의 분포에서도 같이 나타났으며, 이것으로부터 전단층의 발달과 혼합 및 재부착길이는 보텍스의 병합과 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

#### 후 기

이 연구는 BK21 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Bhattacharjee, S., Scheelke, B. and Troutt, T. R., 1986, "Modification of Vortex Interactions in a Reattaching Separated Flow," *AIAA J.*, Vol. 24, 623~629.
- (2) Roos, F. W. and Kegelmann, J. T., 1986, "Control of Coherent Structures in Reattaching Laminar and Turbulent Shear Layers," *AIAA J.*, Vol. 24, 1956~1963.
- (3) Hasan, M. A. Z., 1992, "The Flow over a Backward-Facing Step Under Controlled Perturbation: Laminar Separation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 238, 73~96.
- (4) Chun, K. B. and Sung, H. J., 1996, "Control of Turbulent Separated Flow over a Backward-Facing Step by Local Forcing," *Exp. in Fluids*, Vol. 21, 417~426.
- (5) Kiya, M., Shimizu, M. and Mochizuki, O., 1997, "Sinusoidal Forcing of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.*, Vol. 342, 119~139.
- (6) Songwan Jin, Sungwook Kim, Haecheon Choi, Jung Yul Yoo and Sa-ryang Kim, 2002, "Effect of Two-Frequency Forcing on Flow Behind a Backward-Facing Step," *Trans. Of the KSME B*, Vol. 26, No. 3, 423~431.
- (7) Crow, S. C. and Champagne, F. H., 1971, "Orderly Structure in Jet Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, 547~591.
- (8) Zaman, K. B. M. Q. and Hussain, A. K. M. F., 1980, "Vortex Pairing in a Circular jet Under Controlled Excitation. Part 1. General Jet Response," *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, 449~491.
- (9) Ho, C. M. and Huang, L.-S., 1982, "Subharmonic and Vortex Merging in Mixing Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 119, 443~473.
- (10) Arbey, H. and Ffowcs Williams, J. E., 1984, "Active Cancellation of Pure Tones in an Excited Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 149, 445~454.
- (11) Husain, H. S. and Hussain, F., 1995, "Experiments on Subharmonic Resonance in a Shear Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 304, 343~372.
- (12) Sungkwon Cho, Jung Yul Yoo and Haecheon Choi, 1997, "Vortex Pairing in an Axisymmetric Jet Using Fundamental and Subharmonic Forcing," *Trans. Of the KSME B*, Vol. 21, No. 10, 1350~1362.
- (13) Adams, E. W., Johnston, J. P. and Eaton, J. K., 1984, "Experiments on the Structure of Turbulent Reattaching Flow," Rep. MD-43, Thermosciences Div., Mech. Engng. Dept., Stanford Univ.
- (14) Husain, M. A. Z. & Hussain, A. K. M. F., 1983, "Natural Instability of Free Shear Layers," *AIAA J.*, Vol. 21, 1512~1517.
- (15) Zaman, K. B. M. Q. and Hussain, A. K. M. F., 1981, "Turbulence Suppression in Free Shear Flows by Controlled Excitation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 103, 133~159.