

이중주파수 가진이 후향계단 유동에 미치는 영향

진승완* · 김성욱* · 최해천** · 유정열† · 김사량***

(2001년 4월 26일 접수, 2002년 1월 4일 심사완료)

Effect of Two-Frequency Forcing on Flow Behind a Backward-Facing Step

Songwan Jin, Sungwook Kim, Haecheon Choi, Jung Yul Yoo and Sa-ryang Kim

Key Words : Two-Frequency Forcing(이중주파수 가진), Backward-Facing Step(후향계단), Separation Control(박리제어), Reattachment Length(재부착길이)

Abstract

An experimental study is conducted to investigate the effect of two-frequency forcing on turbulent flow behind a backward-facing step at the Reynolds number of 27000 based on the step height. The forcing is provided from a thin slit located at the edge of the backward-facing step to increase mixing behind the backward-facing step and consequently to reduce the reattachment length. With single frequency forcing, the minimum reattachment length is obtained at the non-dimensional forcing frequency (F) of $St_h = 0.29$. With two-frequency forcing, a subharmonic frequency ($F/2$) or biharmonic frequency ($2F$) is combined with the fundamental frequency (F), i.e. ($F, F/2$) or ($F, 2F$) forcing is applied. In the case of ($F, F/2$) forcing, the reattachment length is not much sensitive to the phase difference between F and $F/2$. However, the reattachment length significantly depends on the phase difference between F and $2F$ in the case of ($F, 2F$) forcing. At a certain range of the phase difference, the reattachment length becomes smaller than that of the single frequency forcing.

기호설명	
$E(u)$: 에너지 스펙트럼 밀도 함수
F	: 기본가진 주파수
f_1, f_2	: 가진 주파수 (식 (2))
H	: 형상계수
h	: 후향계단의 높이
q_1	: 단일주파수 가진
q_2	: 이중주파수 가진
Re_h	: 계단높이 기준 레이놀즈수 ($U_\infty h/\nu$)
St_h	: 계단높이 기준 가진 스트로울수 ($f_1 h/U_\infty$)
St_θ	: 박리점 운동량두께 기준 가진 스트로울

U	: 유동방향 평균속도
U_∞	: 자유흐름속도
u_{rms}	: 유동방향 섭동속도의 rms 값
V	: 수직방향 평균속도
v_{rms}	: 수직방향 섭동속도의 rms 값
X_r	: 재부착길이
X_{r0}	: 제어하지 않았을 경우 재부착길이
x	: 유동방향 좌표
y	: 수직방향 좌표

그리스문자

α, β_1, β_2	: 가진 진폭
δ	: 경계층두께
ϕ	: 위상차
ν	: 동점성계수
θ	: 운동량두께

* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

*** 회원, 강릉대학교 정밀기계공학과

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : jyyoo@plaza.snu.ac.kr

TEL : (02)880-7112 FAX : (02)883-0179

1. 서론

박리가 일어나는 난류 유동은 항공기의 날개, 터보기계 내의 블레이드, 자동차의 후류 유동 등 다양한 공학 분야에서 관찰되는 유동으로 그 성능에 중대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 특히 각종 차량, 철도 및 항공기의 항력에 큰 영향을 미치며 교량 및 고층 건물과 같은 구조물의 설계과정에서도 중요한 고려사항이 된다.

그중 박리-재부착을 수반하는 유동장은 박리 이전의 경계층 유동, 박리 이후의 전단 유동, 재순환 유동, 재부착 영역의 유동 및 재발달 경계층 유동 등 여러 형태의 유동들을 복합적으로 포함하고 있다.

후향계단 유동은 이러한 박리-재부착 유동 중에서 가장 간단한 형태의 유동으로 박리점이 계단의 모서리에 고정되어 있어, 박리선의 시간의 경과에 따른 변화를 고려할 필요가 없으므로 많은 학자들의 연구 대상이 되어 왔다. 최근에는 여러 학자들에 의해 후향계단 유동의 후류에서 혼합을 증대시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 외부로부터의 주기적인 가진을 이용한 제어방법이 많이 사용되고 있다.

Bhattacharjee 등⁽¹⁾은 후향계단 모서리 위의 풍동 시험부에 스피커를 설치하여 주기적인 가진을 가하였을 때 후향계단 유동의 변화를 관찰하였으며, 계단의 높이 h 로 무차원화한 가진 주파수 St_h 가 0.2 에서 0.4 사이일 때 박리 전단층의 확산비가 가장 효과적으로 증가하고 이 결과는 계단 높이를 기준으로 하는 레이놀즈수 Re_h 의 변화에 영향을 받지 않는다고 하였다. Roos와 Kegelmann⁽²⁾은 후향계단의 모서리에 얇은 진동판을 부착한 후 유동에 주기적인 가진을 가한 결과, 난류박리인 경우 보텍스 구조의 형성이 증대되고 재부착길이가 감소한다고 하였다. Hasan⁽³⁾은 스피커에서 파생되는 속도를 이용하여 후향계단의 모서리에서 분사/흡입하는 방법으로 불안정성 및 큰 에디의 구조에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 층류박리인 이 연구에서 Hasan은 후향계단 유동의 불안정성에는 두가지 모드가 있다고 하였는데, 하나는 운동량 두께 θ 를 무차원 변수로 사용한 주파수 St_θ 가 약 0.012 일 때 가장 효과적인 '전단층 모드'이고 다른 하나는 St_h 가 0.185 일 때 나타나는 '계단 모드'라고 하였다. 전경빈과 성형진⁽⁴⁾ 역시 후향계단의 모서리에서 스피커를 이용한 주기적인 국소가진을 가한 결과, 가진이 박리 전단층 내부에서 형성되는 보텍스들의 운동을 촉진시켜 재부착길이가 감

소하게 된다고 하였다. 특히 가진에 의한 유동 변화는 $0.2 < St_h < 0.3$ 에서 매우 강하게 일어나며, 이를 운동량두께로 무차원화 하면 자유흐름의 평균 속도나 가진의 크기에 무관하게 0.01 과 0.02 부근에 가장 효과적인 주파수가 존재한다고 하였다. Chun과 Sung⁽⁵⁾은 수동에서 유동가시화를 통해 후향계단 유동에서 주기적인 분사/흡입으로 재부착 길이가 줄어드는 원인을 밝혀내고자 하였으며, 그 이유는 가진으로 인해 보텍스의 병합이 촉진되고 그 결과 혼합이 증대되기 때문이라고 하였다.

한편, 몇가지 주파수를 조합한 가진이 유동장에 미치는 영향에 대한 연구도 진행되고 있다. Inoue⁽⁶⁾는 혼합층에서 수치 실험을 통하여 이중주파수 가진이 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 그 결과 가진 주파수와 위상차를 이용하여 혼합층의 성장률을 조절할 수 있다고 하였다. Kiya 등⁽⁷⁾은 스피커를 이용하여 전향 실린더 주위의 유동을 제어하고자 하였다. 이들은 단일주파수 및 이중주파수 가진을 이용하여 실험하였고 이중주파수 가진시 두 주파수 사이의 위상차가 재부착길이에 큰 영향을 미치지만 가진의 진폭이 커지면 재부착길이는 위상차에 관계없이 일정하다고 하였다. 조성권 등⁽⁸⁾은 원형 제트에서 기본가진 및 분수조화 가진이 보텍스 병합에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며 제트의 직경 D 로 무차원화한 가진 주파수에 따라 차이는 있지만 초기 위상차에 따라 보텍스 병합 정도가 민감하게 변화하는 영역이 존재한다고 하였다.

본 연구에서는 이중주파수 음향 가진이 후향계단 유동에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 특히 기본가진 주파수와 분수조화가진 주파수 또는 배수조화가진 주파수를 합성하여 이중주파수 가진을 형성하고, 두 주파수의 위상차에 따른 후향계단 하류의 재부착길이의 변화에 대하여 관찰한다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 풍동은 폐순환식 피딩겐형 철제 풍동(KANOMAX Inc.)으로 실험부의 크기는 폭이 900 mm, 높이가 900 mm 이고 길이는 3600 mm이며, 수축부의 수축비는 64 : 9 이다. 속도는 0 m/s 에서 60 m/s 까지 연속적으로 조절이 가능하며, 풍속 10 m/s 인 경우 난류 강도는 0.3% 이내이다. 실험에 사용된 계단은 두랄루민과 베이클라이트 판으로 제작하였으며 하류측 계단 바닥이 풍동 바닥으로부터 약 390 mm 떨어진 곳에 위치하도록 설치되

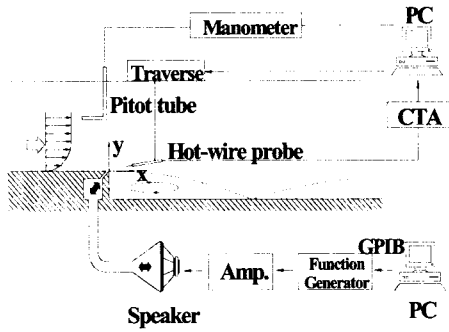


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

었다. 본 실험에서 사용된 계단의 높이(h)는 40 mm로 계단의 폭을 계단 높이로 나눈 종횡비 (aspect ratio)는 22가 된다. de Brederode와 Bradshaw⁽⁹⁾는 모형의 종횡비가 10보다 크면 모형 중심에서의 유동은 2차원성을 유지한다고 하였다. 또한 상류측 풍동 천장에서 계단 바닥까지의 거리로 하류측 풍동 천장에서 계단 바닥까지의 거리를 나눈 팽창비(expansion ratio, ER)는 1.08이다. 후향 계단의 상류평판의 길이는 $15.5h$ 이며 선단 부분은 4:1 타원형으로 만들어졌다. 난류경계층의 성장을 위하여 평판 선단에서 $3h$ 위치에 1 mm 지름의 철사를 설치하였다. 계단의 하류쪽으로는 $37h$ 길이의 평판을 두었다.

본 실험에서 가진은 계단 모서리 부분 바로 지점에 위치한 폭 약 1.4 mm ($0.035h$), 길이 400 mm ($10h$)의 슬릿을 통하여 유동장에 제공된다. 이 슬릿은 $24 \times 30 \times 460$ mm³의 챔버와 연결되어 있으며 이 챔버는 지름 19 mm의 플라스틱 튜브로 스피커와 연결되어 있다. 스피커와 챔버를 연결하는 플라스틱 튜브는 모두 네 개로 그 길이를 같게 하여 튜브 끝 가진 신호의 위상을 동일하게 유지할 수 있도록 하였다. 스피커는 12" sub-woofer를 사용하였으며 컴퓨터에서 원하는 가진 신호를 만들고 이 신호가 임의함수발생기(AFG320, Tektronix)에서 발생된다. 발생된 신호는 오디오 앰프(Inkel AD972)에서 증폭되고 스피커에서 음파로 변환되어 튜브를 통하여 계단 밑의 챔버로 전해진다.

가진 신호는 다음과 같이 표시된다.

$$q_1 / U_\infty = \sqrt{2} \alpha \sin(2\pi f_1 t) \quad (1)$$

$$q_2 / U_\infty = \sqrt{2} (\beta_1 \sin(2\pi f_1 t) + \beta_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi)) \quad (2)$$

본 실험에서 U_∞ 는 10.3 m/s로 고정되었다. 식 (1), (2)의 α, β_1, β_2 및 ϕ 는 가진을 했을 때 계단 모서

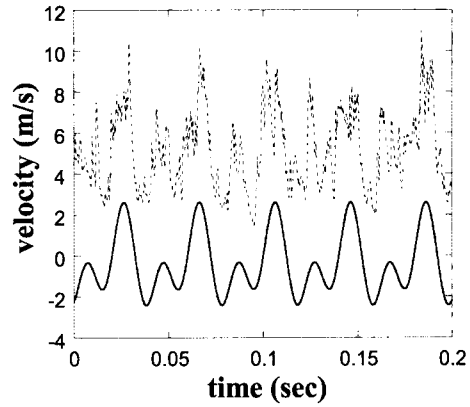


Fig. 2 Velocity signals at $x/h = 0.025$ and $y/h = 0.013$: -----, hot-wire signal; —, q_2 from the hot-wire signal ($f_1 = 22.5$ Hz and $f_2 = 50$ Hz)

리 부분에서의 속도 신호를 열선으로 측정하여 FFT를 통하여 얻었다. 측정위치의 y 좌표는 가진을 하지 않았을 때의 속도가 약 4.5 m/s가 되는 지점이며 x 좌표는 약 -1 mm이다. Fig. 2에 이 위치에서 측정한 속도 신호와 이 신호를 FFT한 후 f_1, f_2 주파수 성분만을 역푸리에변환하여 구한 가진 신호를 같이 나타내었다. 참고로 가진으로 인하여 주어진 위치에서의 평균속도가 약간 증가(약 5 m/s) 되었음을 볼 수 있다. 이는 스피커에서 흡입이 될 때에는 경계층유동의 넓은 영역에서 슬릿쪽으로 유동이 유입되므로 상대적으로 운동량이 작고 분사될 때에는 마치 평면제트와 같이 분사되므로 운동량이 흡입될 때보다는 크기 때문이다. 그림에서 난류로 인한 속도섭동을 제외하면 FFT를 통하여 얻은 가진 신호가 열선으로 얻은 신호를 잘 표현해주고 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 가진 신호의 진폭 및 위상차는 신호를 발생하는 부분, 즉 컴퓨터나 임의함수발생기에서 발생한 신호와 관계없이 후향계단 끝에서 측정된 신호로 정의할 수 있었다.

유동측정을 위한 열선유속계로는 Dantec의 Streamline(90C10)을 사용하였다. I-형 열선프로브(Dantec, 55P15)는 후향계단 상류의 경계층 속도와 모서리 슬릿에서 나오는 가진의 크기 측정 및 계단 후류 속도 및 속도섭동량을 측정하는데 사용하였다. 열선의 출력은 A/D 변환기(DT2838)를 거쳐 PC에 저장되며 유동방향과 수직방향의 프로브 이동은 컴퓨터로 제어하였다.

한편, 제어로 인한 후향계단 하류에서의 혼합량의 변화는 계단 하류 유동의 rms 값의 변화를 관찰하거나 재부착길이의 변화를 관찰하면 알 수 있

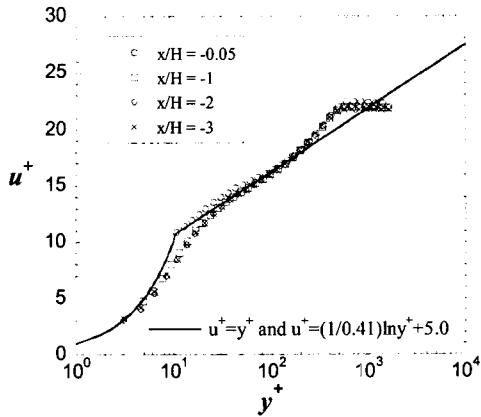


Fig. 3 Velocity profile of incoming boundary layer

Table 1 Experimental conditions of incoming boundary layer

U_∞	10.3 m/s
Re_h	27000
Re_θ	1100
δ/h	0.31
H	1.3

다. 그 중 재부착길이는 측정하기가 비교적 쉽고 제어의 효과를 1개의 숫자로 나타내므로 유동 제어 실험에 많이 사용되고 있다. 즉, 재부착길이의 감소는 혼합의 증대로 표현될 수 있다. 일반적으로 재부착길이를 측정하는 방법은 여러가지가 있으나, 본 실험에서는 후향계단 하류 바닥면 근처에서 총 측정시간 중에서 역흐름을 제외한 정흐름이 차지하는 시간비율이 0.5인 지점을 재부착지점으로 정의하였다. 이를 위하여 Dantec 55R57 스피릿필름프로브를 사용하였으며, 측정위치는 벽으로부터 약간 떨어진 $y/h = -0.93$ 인 지점이다.

3. 실험결과

3.1 시험부의 입구 조건

후향계단 상류는 Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 완전 발달된 난류 경계층 유동이며, 경계층 두께를 비롯한 몇 가지 변수들을 Table 1에 제시하였다. 제어를 하지 않았을 때 재부착길이(X_r)는 $5.6h$ 이다.

3.2 단일주파수 가진

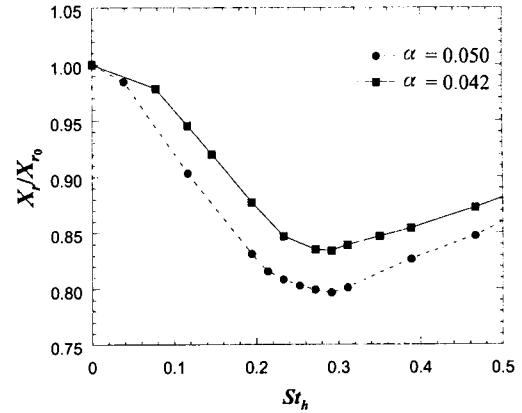


Fig. 4 Variation of reattachment length X_r/X_{r_0} with forcing frequency St_h

본 실험의 조건에서 재부착길이가 가장 많이 감소하게 되는 기본주파수를 알기 위해 단일주파수 가진이 후향계단 유동에 미치는 영향을 알아보았다. 가진 주파수(f_1)를 변화시켜가며 진폭 $\alpha = 0.042$ 와 0.050 일 때의 재부착길이(X_r)를 각각 측정 한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 여기에서 볼 수 있듯이, 단일주파수 가진의 경우 진폭에 관계없이 $St_h = 0.29$ 부근에서 재부착길이가 최소가 되는 것을 관찰할 수가 있으며 진폭이 커질수록 재부착길이도 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 이 주파수를 운동량두께로 무차원화하면 $St_{h_0} = 0.012$ 이고 이러한 결과 역시 앞선 연구자들^(1,3,10)의 결과와 유사하다고 할 수 있다.

3.3 이중주파수 가진

이중주파수 가진의 경우, 기본가진 주파수는 단일주파수 가진 실험시 재부착길이가 가장 많이 줄어든 $St_h = 0.29$ 로 하였다. 이때의 f_1 을 F 로 표시하자. 본 연구에서는 이중주파수로서 기본주파수와 분수조화주파수, 즉 $(f_1, f_2) = (F, F/2)$, 그리고 기본주파수와 배수조화주파수, 즉 $(F, 2F)$ 을 합성한 두 가지 형태의 가진을 선택하였다. 식 (1)과 (2)에서 주어지는 가진 q_1, q_2 의 rms 값을 동일하게 하기 위해 가진 진폭을 $\beta_1 = \beta_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}\alpha = 0.030$ ($\alpha = 0.042$)으로 고정하였다.

Fig. 5는 이중주파수 가진의 적용시 주파수 간의 위상차[Eq.(2)]에 따른 재부착길이의 변화를 보여주고 있다. 또한, 이중주파수 가진의 rms 값과 동일한 단일주파수 가진($\alpha = 0.042$) 적용시와, 이중주파수 중 각각의 주파수 성분의 rms 값과 동일한

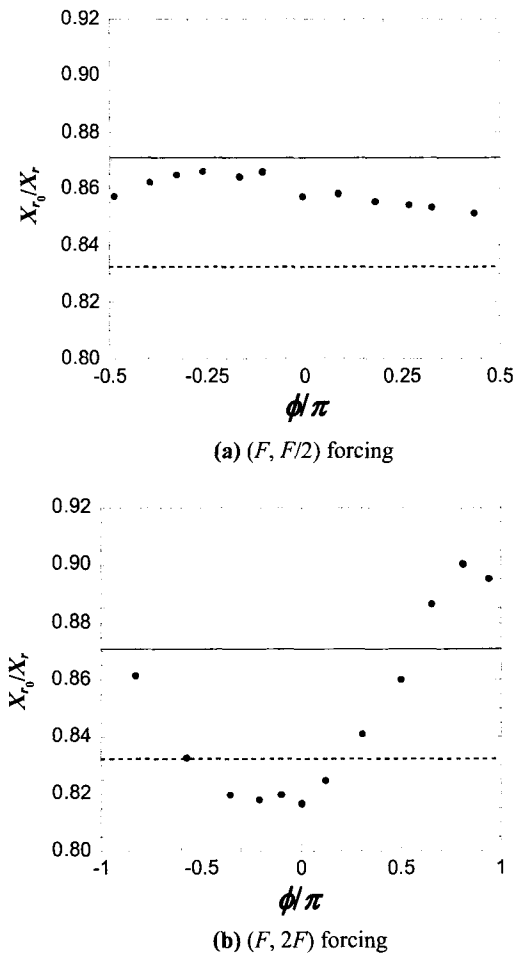


Fig. 5 Variation of reattachment length (●) with phase difference for two-frequency forcing ($\beta_1 = \beta_2 = 0.030$): ----, single frequency (F) forcing ($\alpha = 0.042$); —, single frequency (F) forcing ($\alpha = 0.030$)

단일주파수 가진($\alpha = 0.030$) 적용시의 재부착길 이들도 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 $(F, F/2)$ 합성가진으로 인한 재부착길이의 변화를 보여준다. $(F, F/2)$ 합성가진의 경우 재부착길이는 $\alpha = 0.042$ 인 단일주파수 가진의 결과보다 모든 위상차에서 더 길며 $\alpha = 0.030$ 인 단일주파수 가진보다는 짧다. 그러나 위상차에 따른 재부착길이의 변화는 크지 않았다. 반면 $(F, 2F)$ 합성가진의 경우 $(F, F/2)$ 합성가진의 결과와 크게 달랐다[Fig. 5(b)]. $(F, 2F)$ 합성가진으로 인한 재부착길이는 가진의 위상차가 $\phi/\pi = -0.4 \sim 0$ 일때 최소값 $X_r/X_0 = 0.82$ 를 가지며 $\phi/\pi = 0.83$ 일때 최대값 $X_r/X_0 = 0.90$ 을 가진다. 그리고 $-0.5 < \phi/\pi < 0.2$ 에서 $(F, 2F)$ 가진의 재부

착길이가 진폭이 $\alpha = 0.042$ 인 단일주파수 가진의 재부착길이보다 더 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 전향실린더 주위 유동에 이중주파수 가진을 가한 Kiya 등⁽⁷⁾의 결과와 유사하다.

후향계단 하류 유동의 평균속도와 rms 속도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 이때의 속도는 X-형 프로브(Dantec, 55P61)를 사용하여 측정하였으며, i) 가진을 가하지 않았을 때, ii) 단일주파수(F) 가진을 가했을 때, iii) 재부착길이가 가장 많이 감소한 경우인 $\phi/\pi = -0.11$ 인 $(F, 2F)$ 가진을 가했을 때, iv) $(F, 2F)$ 가진 중 재부착길이가 가장 긴 경우인 $\phi/\pi = 0.83$ 인 $(F, 2F)$ 가진을 가했을 때, $x/h = 1$ 에서 $x/h = 6$ 까지 $1h$ 간격으로 각각 측정하였다. 유동방향의 평균속도 U [Fig. 6(a)]는 제어로 인하여 $y/h < 0$ 지역에서 평균속도의 값이 커짐을 볼 수 있으나, 재순환 영역을 측정할 수 없어서 가진을 가했을 때와 가진을 가하지 않았을 때의 두드러진 차이를 확인할 수 없다. 반면 수직방향 평균속도 V [Fig. 6(b)]는 대부분의 측정 영역에서 음수로 측정되었는데 가진 방법에 따라 크게 변화하였다. 재부착길이가 가장 많이 감소한 경우인 $\phi/\pi = -0.11$ 인 $(F, 2F)$ 가진을 가했을 때, V 의 절대값은 $x/h = 2 \sim 4$ 에서 가장 크고 $x/h = 4$ 이후에 점점 감소하여 $x/h = 6$ 이후에는 가장 작아진다. $\phi/\pi = 0.83$ 인 $(F, 2F)$ 가진 역시 비슷한 경향을 보이지만 절대값은 $\phi/\pi = -0.11$ 인 $(F, 2F)$ 가진의 경우보다 작다. 단일주파수 가진의 경우 V 의 절대값은 $\phi/\pi = -0.11$ 인 $(F, 2F)$ 가진의 경우보다 약간 작다. 그러나 가진을 가하지 않은 경우 V 의 절대값은 $x/h < 5$ 에서 가진을 가한 경우보다 작다가 $x/h = 5$ 에서 비슷한 값을 갖고 이 이후에는 가진을 가한 경우의 값보다 크게 된다. 후향계단 근방에서 수직방향 속도는 하류의 재순환 영역으로 인하여 대부분 음의 값을 가지게 되는데, 이 부근의 수직방향 속도가 음의 큰 값을 가진다는 것은 재순환 영역이 줄어들고 재부착길이가 감소하는 현상과 밀접한 관계가 있다. u_{rms} 와 v_{rms} 값은 재부착길이가 많이 감소한 $\phi/\pi = -0.11$ 인 $(F, 2F)$ 가진과 단일주파수 가진의 경우가 전반적으로 나머지 두 경우보다 크다. 이러한 rms 값의 변화는 가진으로 인하여 전단층 영역에서 보텍스의 강도가 강화되어 전단층이 빨리 성장하기 때문에 나타나는 결과라 할 수 있다. 이러한 경향은 전경빈과 성형진⁽⁴⁾의 결과와 유사하다.

Fig. 7에 $U = 0.95U_x$ 가 되는 위치에서 측정된 속도섭동의 스펙트럼을 가진이 없는 경우와 함께 나타내었다. (a)는 단일주파수 가진을 가한 경우,

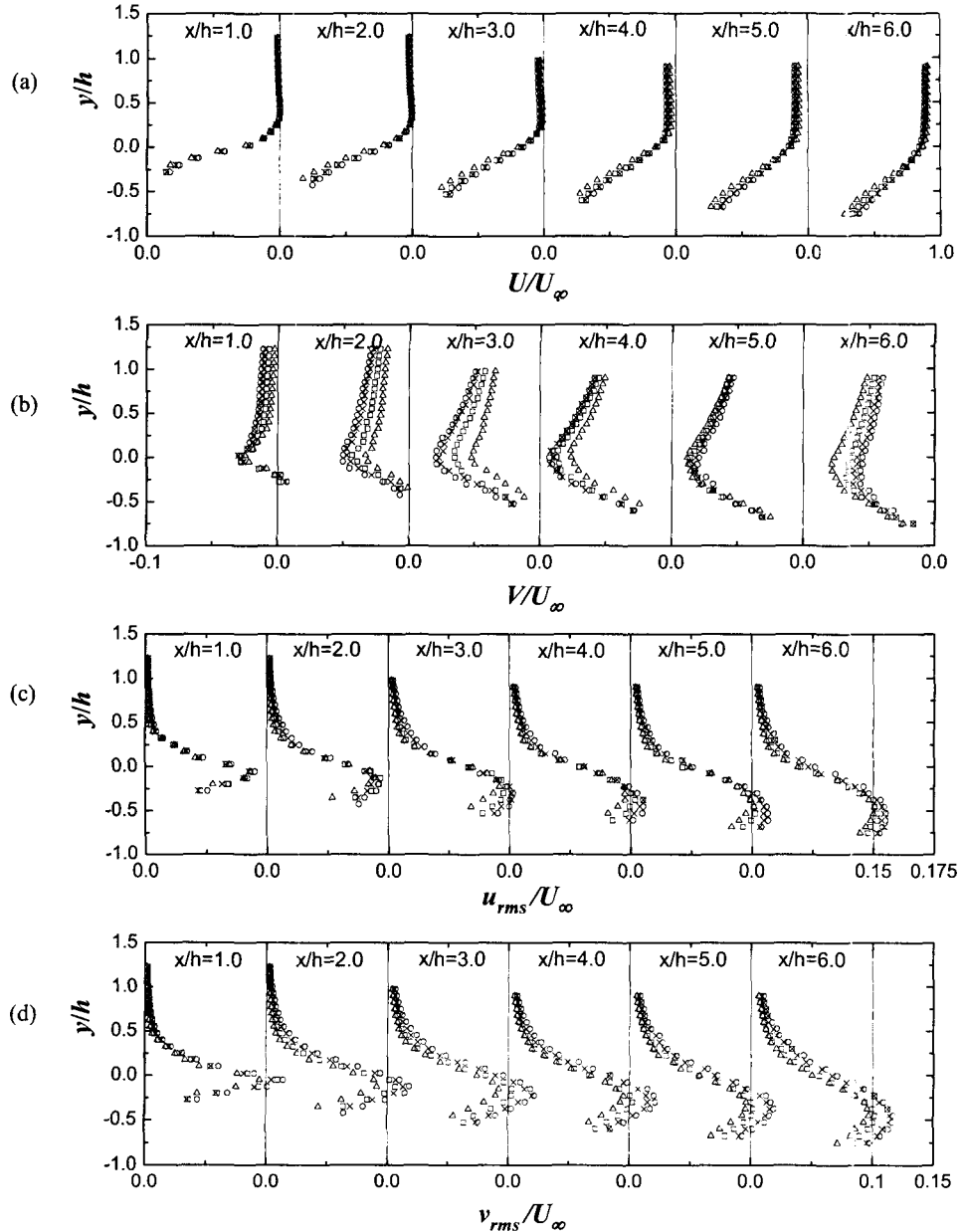


Fig. 6 Variation of mean and rms velocities with distance for different forcing cases: (a) U/U_∞ ; (b) V/U_∞ ; (c) u_{rms}/U_∞ ; (d) v_{rms}/U_∞ . \triangle , no forcing; \times , single frequency (F) forcing ($\alpha = 0.042$); \circ , ($F, 2F$) forcing at $\phi/\pi = -0.11$; \square , ($F, 2F$) forcing at $\phi/\pi = 0.83$

(b)는 ($F, 2F$) 가진 중에서 재부착길이가 가장 짧아 감소한 경우 ($\phi/\pi = -0.11$), (c)는 ($F, 2F$) 가진 중에서 재부착길이가 가장 긴 경우 ($\phi/\pi = 0.83$)이다.

$x/h = 1$ 에서는 가진을 가한 세 가지 경우 모두 기본주파수 및 배수조화주파수 성분의 에너지가

가진이 없는 경우에 비해 크게 증가하였다. 하지만 증가되는 양은 각각의 경우 약간씩 차이가 있는데, 특히 세 가지 가진 중 재부착길이가 가장 긴 $\phi/\pi = 0.83$ 인 ($F, 2F$) 가진의 경우[Fig. 7(c)]에는 배수조화주파수 성분의 에너지가 기본주파수 성분의 에너지보다 더 크고, 나머지 두 경우[Fig. 7(a)와

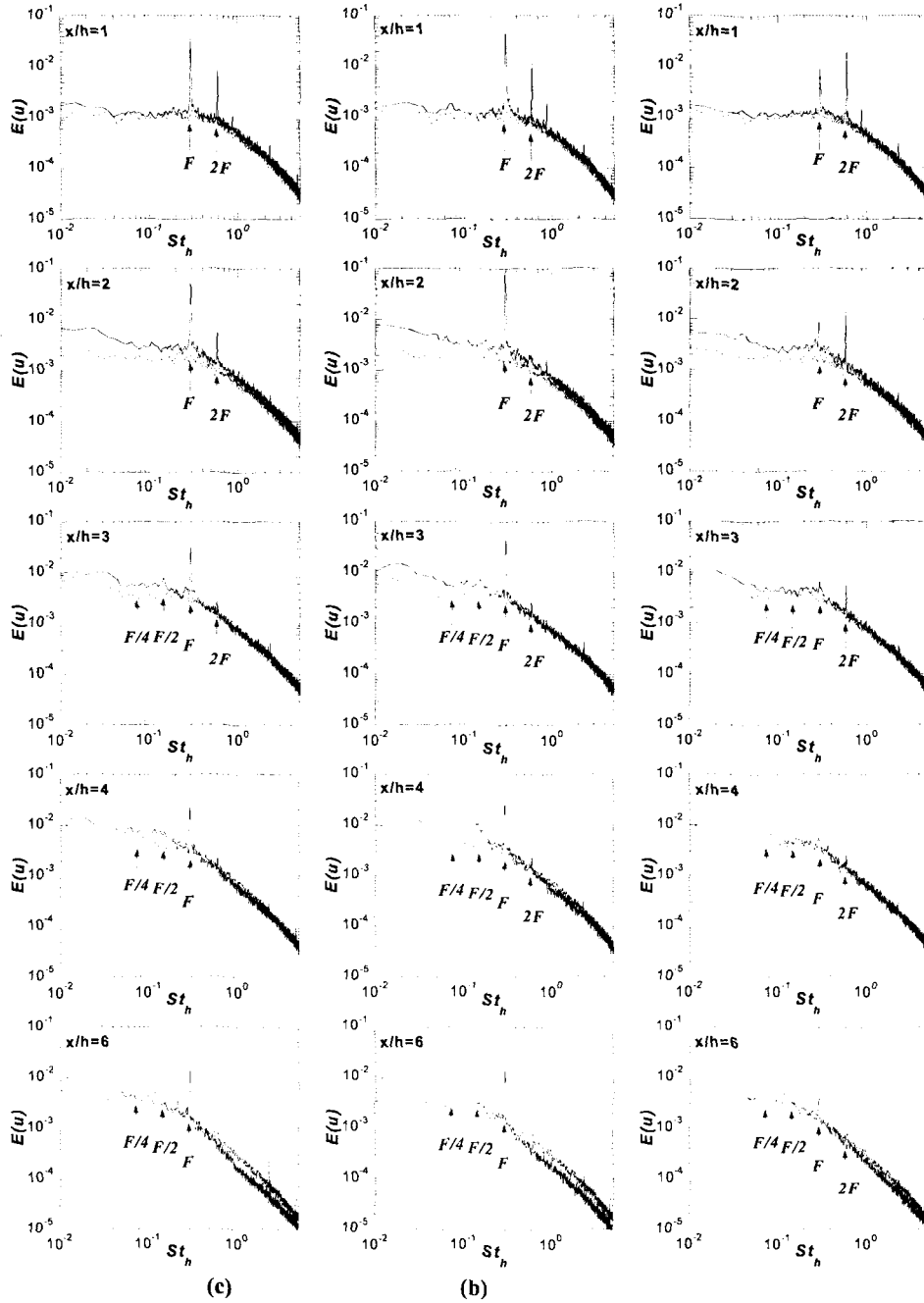


Fig. 7 Energy spectra at five different streamwise locations (y locations are selected to be positions where $U = 0.95U_\infty$): (a) single frequency (F) forcing ($\alpha = 0.042$); (b) ($F, 2F$) forcing at $\phi/\pi \approx -0.11$; (c) ($F, 2F$) forcing at $\phi/\pi \approx 0.83$. —, forcing; ----, no forcing

(b)에는 기본주파수 성분의 에너지가 더 컸다. $x/h=2$ 에서는 가진을 가한 경우 기본주파수 성분의 에너지는 여전히 가진이 없는 경우보다 컸으며 또한 저주파영역의 에너지도 전체적으로 증가하였다. 하지만 배수조화주파수 성분의 에너지에는 각

각의 가진마다 차이가 있다. 재부착길이가 가장 짧은 $\phi/\pi = -0.11$ 인 ($F, 2F$) 가진의 경우[Fig. 7(b)] 배수조화주파수 성분의 에너지 피크가 거의 사라졌음을 볼 수 있다. 하지만 $\phi/\pi = 0.83$ 인 ($F, 2F$) 가진의 경우[Fig. 7(c)]에는 배수조화주파수 성분의

에너지가 여전히 기본주파수 성분의 에너지보다 크다. 단일주파수 가진의 경우[Fig. 7(a)]에도 배수조화주파수 성분이 $x/h = 1$ 에서 보다는 많이 줄었지만 다른 주파수들의 에너지에 비해 큰 것을 관찰할 수 있다. 기본주파수 성분만을 가할 때 배수조화주파수 성분이 생기는 이유는 유동의 비선형 상호작용 때문이라고 할 수 있다[Fig. 7(a)]. Fig. 7(b)에서 배수조화주파수 성분을 강제적으로 가했음에도 불구하고, 이 성분이 Fig. 7(a)의 비선형 상호작용에 의해 생기는 배수조화주파수 성분보다 더 작아진 것은 매우 이채로운 현상이다. 이는 이중주파수 가진으로 가진의 에너지를 하나의 주파수로 집중할 수 있도록 조절할 수 있는 가능성을 보여준다고 할 수 있다. $x/h = 3$ 에서 단일주파수 가진과 $\phi/\pi = -0.11$ 인 ($F, 2F$) 가진의 경우[Fig. 7(a)와 (b)], 배수조화주파수 성분의 에너지 피크는 거의 없는 반면, 분수조화주파수 성분의 에너지가 가진을 가하지 않은 경우에 비해 증가된 것을 관찰할 수 있다. 이러한 분수조화주파수 성분의 에너지 증가는 가진에 의해서 보텍스들의 병합이 촉진되는 것을 뒷받침하는 결과라 할 수 있다. 그러나 $\phi/\pi = 0.83$ 인 ($F, 2F$) 가진의 경우[Fig. 7(c)], 배수조화주파수 성분의 에너지가 가진이 없는 경우에 비해 여전히 증가되어 있고 기본주파수 성분은 가진이 없는 경우보다 약간 증가되어 있기는 하지만 그 양은 배수조화주파수 성분보다 작았다. 그리고 Fig. 7(a)와 (b)의 두 가진방법에서 나타나는 분수조화주파수 성분의 증가는 관찰할 수 없었다. $x/h = 4$ 에서는 $\phi/\pi = -0.11$ 인 ($F, 2F$) 가진을 가했을 때 분수조화주파수 성분이 $x/h = 3$ 에서 보다는 더 증가하였다. $x/h = 6$ 에서는 모든 가진의 경우 가진을 하지 않았을 때 보다 에너지가 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 제어를 하지 않았을 경우 보텍스 병합이 일어나는 위치가, 제어를 가했을 경우 보텍스 병합이 일어나는 위치보다 더 하류이기 때문으로 설명할 수 있다.⁽¹⁰⁾

이러한 실험 결과로부터 ($F, 2F$) 가진에서 두 주파수 사이의 위상차를 적절하게 조절하면 두 주파수 중 한 주파수 성분을 빠르게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 기본주파수 성분이 감소되는 경우[Fig. 7(c)], 후향계단 하류의 보텍스 성장을 더디게 하여 전단층을 느리게 성장시키게 된다. 반면 배수조화주파수 성분이 감소되는 경우[Fig. 7(b)], 상대적으로 기본주파수 성분의 에너지가 커지고 이로 인한 보텍스 강도가 커지며 순차적으로 보텍스 병합이 촉진되어 전단층의 성장을 야기시키게 된다. Fig. 7(b)의 결과는 적절한 위상차를 가지는 ($F, 2F$) 가진을 통해 배수조화주파수 성분의 에너지를

$x/h = 0$ 에서 공급하게 되면, 이 제어가 하류에서 배수조화주파수 성분의 에너지 성장을 오히려 막는다는 흥미로운 해석을 제공해 준다.

4. 결론

이중주파수 가진이 난류박리가 일어나는 후향계단 유동에 미치는 영향을 알아보기 위해 스피커를 이용하여 국소가진을 가하며 실험을 수행하였다. 기본주파수를 정하기 위한 단일주파수 가진 실험에서는 $St_0 = 0.012$ ($St_h = 0.29$) 부근에서 가진 진폭에 상관없이 재부착길이 l_c 가 최소가 된다. 이러한 결과는 이전 실험들의 결과와 잘 일치하며 이 주파수를 기본주파수(F)로 정하였다.

기본주파수와 배수조화주파수($2F$), 기본주파수와 분수조화주파수($F/2$)를 각각 합성하였을 경우, 전자의 경우 두 주파수 사이의 위상차에 따라 재부착길이 l_c 가 크게 변화하였으나, 후자의 경우 재부착길이 l_c 의 변화는 작았다. ($F, 2F$) 합성가진인 경우 일부 위상차 구간에서 단일주파수 가진을 가하였을 때의 재부착길이보다 더 많이 줄어들었다. 또한 후향계단하류에서 속도 스펙트럼을 구한 결과 ($F, 2F$) 합성가진인 경우 특정한 위상차에서 두 가진 주파수 성분 중 한 주파수 성분을 빠르게 감소시키는 것을 관찰할 수 있었으며 이러한 성질이 전단층에 영향을 미쳐 위상차에 따라 재부착길이 및 난류강도가 달라졌다.

후 기

본 연구는 BK21사업 서울대·한양대 기계분야 연구인력양성사업단의 연구비 지원과 과학기술부 창의적연구진흥사업의 지원으로 수행한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Bhattacharjee, S., Scheelke, B. and Troutt, T. R., 1986, "Modification of Vortex Interactions in a Reattaching Separated Flow," *AIAA J.*, Vol. 24, pp. 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, pp. 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, pp. 73~96.
- (4) 전경빈, 성형진, 1994, "국소교란에 의한 난류

- 재순환유동의 제어," 대한기계학회논문집(B), 제 18 권, 제 2 호, pp. 446~455.
- (5) Chun, K. B. and Sung, H. J., 1998, "Visualization of Locally-Forced Separated Flow over a Backward-Facing Step," *Exp. in Fluids*, Vol. 25, No. 2, pp. 133~142.
- (6) Inoue, O., 1992, "Double-Frequency Forcing on Spatially Growing Mixing Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 234, pp. 553~581.
- (7) Kiya, M., Shimizu, M. and Mochizuki, O., 1997, "Sinusoidal Forcing of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.*, Vol. 342, pp. 119~139.
- (8) 조성권, 유정열, 최해천, 1997, "기본교란 및 분수조화교란을 이용한 원형제트에서의 보텍스병합," 대한기계학회논문집(B), 제 21 권, 제 10 호, pp. 1350~1362.
- (9) De Brederode V. and Bradshaw, P., 1978, "Influence of the Side Walls on the Turbulent Center-Plane Boundary Layer in a Square Duct," *J. Fluids Eng.*, Vol. 100, pp. 91~96.
- (10) 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, pp. 417~426.