

<학술논문>

수직벽 전방에서의 흡입/토출을 이용한 후류제어 연구

최영호* · 김형범†

(2007년 8월 31일 접수, 2007년 10월 16일 심사완료)

Study of Wake Control by Blowing and Suction in Front of the Vertical Fence

Young-Ho Choi and Hyoung-Bum Kim

Key Words: Fence Flow(수직벽 유동), Suction/Blowing(흡입/토출), DPIV(디지털입자화상속도계), Reattachment Length(재부착지점 길이)

Abstract

The effect of periodic blowing and suction of upstream flow on the separated shear flow behind the vertical fence was experimentally investigated. The fence was submerged in the turbulent shear flow and DPIV method was used to measure the instantaneous velocity fields around the fence. Periodic blowing and suction flow was precisely generated by the syringe pump. Spanwise nozzle made 2D planar periodic jet flow in front of the fence and the effect of frequency and maximum jet velocity was studied. From the results, the reattachment length can be reduced by 60% of uncontrolled fence case under the control.

기호설명

- ν : 작동유체의 동점도 계수
- f : 맥동제트의 주파수
- H : 수직벽의 높이
- X_r : 재부착지점의 길이
- U_0 : 수직벽이 없을 때의 자유흐름 속도
- V_{jet} : 맥동제트의 속도
- Re_H : 자유흐름속도 및 수직벽 높이로부터 계산된 Reynolds number ($= H \times U_0 / \nu$)
- Str_H : 수직벽 높이와 맥동 주파수로부터 계산된 Strouhal number ($= H \times f / U_0$)

1. 서론

평판 위의 장애물을 지나는 유동연구는 실질적인 중요성으로 지속적으로 연구되고 있다.

기존의 연구로부터 표면에 부착된 물체 주위의 유동은 부착물체의 기하학적 형상(높이(H), 길이(L), 두께(W)), 자유흐름속도(U_0), 경계층 두께(δ), 난류강도 등과 같은 여러 가지 변수에 의해 결정된다고 알려졌다.^(1,2)

표면 부착물 주위유동 중의 대표적인 예인 수직벽(vertical fence) 유동에서는 수직벽을 전후로 각각 다른 특성을 가지는 두 가지 박리유동이 존재한다. 벽 전방에서 일어나는 박리유동은 부압구배(adverse pressure gradient)에 기인한 박리현상으로 수직벽의 끝단에서 발생하는 기하학적 형상에 의한 박리현상과는 다른 특성을 갖는다.⁽³⁾ 기하학적 형상에 의한 후방 박리유동의 경우, 박리기포(separation bubble)의 선단부(leading edge)가 벽의 첨단부(tip)에 고정되어 있다. 반면에 부압력

* 책임저자, 회원 경상대학교 항공기부품연구소

E-mail : kimhb@gsnu.ac.kr

TEL : (055)751-6076 FAX : (055)762-0227

* 경상대학교 기계항공공학부 원

구배에 의한 박리의 경우, 박리기포의 선단 및 후단부는 고정되지 않고 움직일 수 있다.

이러한 특징을 가지는 수직벽 주위의 유동은 항력의 감소나 혼합(mixing)등에 영향을 주고 이를 제어하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 유동제어 방법은 외부 에너지의 공급없이 표면부착물의 기하학적 형상의 변화나 유동조건의 변화를 이용한 수동 제어(passive control)와 외부에서 에너지를 공급하여 유동구조를 바꾸는 능동 제어(active control)방법으로 크게 구분된다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 능동 제어를 이용해 수직벽 후류에서 생기는 박리전단유동의 제어를 수행하였다. 능동 제어기법을 이용한 수직벽 후류제어 연구로 Miao와 Chen⁽⁵⁾은 수직으로 진동하는 작은 벽을 수직벽 앞에 설치하여 후류 변화를 관찰하였고, Siller와 Fernholz⁽⁶⁾는 회전 스포일러와 스피커를 이용하여 후류제어 연구를 수행하여 $Str_H=0.05$ 일 때 재부착지점의 길이가 가장 작아지고 그 전후로 재부착지점이 다시 길어진다고 보고하였다. 그리고 Orellano와 Wengle⁽⁷⁾은 수직벽 전방에서의 슬릿을 통한 특정 주기의 흡입과 토출에 따라 후류유동의 변화를 수치해석기법을 이용해 연구하였다. 그들은 수직벽 유동에서 발생하는 두 가지 불안정성의 종류에 따라 두 가지 주파수($Str_H=0.6$ (shear layer type), $Str_H=0.08$ (shedding type))를 정하고 후류유동의 변화를 조사하였다. 그 결과, shedding type의 주파수의 흡입과 토출을 이용하여 재부착지점 길이를 약 36% 감소시켰다.

본 논문에서는 Orellano와 Wengle⁽⁷⁾의 연구를 바탕으로 수직벽 전방에서 주기적인 흡입과 토출에 따른 후방 박리유동의 변화를 실험적으로 연구하였다.

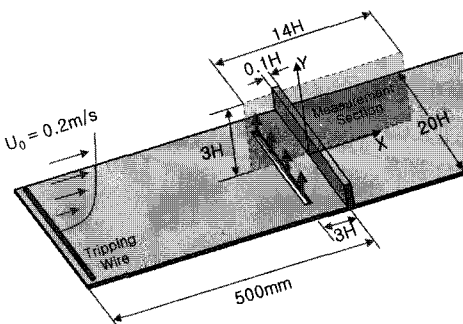


Fig. 1 Schematic diagram of experimental model and its coordinate system

기존 실험 연구들은 열선유속계, LDV, PWA와 같은 점측정 방법을 사용해 측정구간에서의 각 위상에 따른 속도장의 변화를 얻을 수 없었다.

본 연구에서는 위상평균(phase average) DPIV (digital particle image velocimetry)기법을 이용하여 각 위상에서의 순간 속도장을 획득하여 한 행정에서의 주기적인 흡입과 토출에 따른 후류 유동장의 정량적 변화를 관찰하였다. 본 연구는 수직벽 후류 유동의 이해와 제어의 최적화, 그리고 수치해석연구의 검증에 도움을 줄 수 있다.

2. 실험장치 및 방법

실험은 회류수조 내에서 수행되었고 시험부의 크기는 $300_w \times 300_H \times 1000_L$ (mm)이다. 평판에 설치되어진 수직벽은 실험영역의 입구로부터 500mm 하류에 설치하였다. 실험에 사용한 수직벽의 높이(H)는 15mm이고 폭은 20H, 두께는 0.1H이다. 난류 경계층을 만들기 위해 평판의 입구에 천이 장치(tripping wire)를 설치하였다. 경계층의 두께는 6H이고 자유흐름속도와 수직벽 높이를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_H)는 3000이다. Fig. 1에 실험 모델과 사용된 좌표계를 표시하였다. 주기적인 흡입 및 토출 유동은 수직벽 전방으로부터 3H 떨어진 홈에서 시린지 펌프를 이용하여 생성시켰다. 홈의 크기는 $0.1H_w \times 13H_L$ 이다

Fig. 2에 DPIV 시스템을 포함한 전체적인 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 시린지 펌프, CCD 카메라와 펄스 레이저는 동기화 장치(delay generator)를 이용하여 연계되어 동작된다. 시린지 펌프의 피스톤이 특정 위치를 지나게 되면 위치

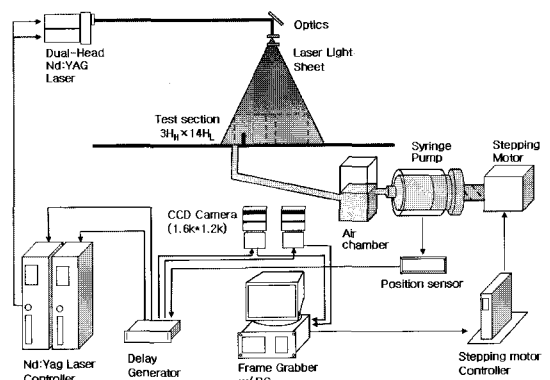


Fig. 2 Schematic diagrams of experimental setup

센서에 의해서 동기화 장치에 펄스 신호를 주고 동기화 장치는 CCD 카메라와 레이저를 동작시켜 한 주기상의 특정 위상에서 입자화상을 획득하게 된다.

속도측정은 수직벽의 전방 $-3.5H$ 부터 수직벽 후방 $10.5H$ 길이에 $3H$ 의 높이를 갖는 구간에서 두 대의 CCD카메라를 사용하여 이루어졌다.

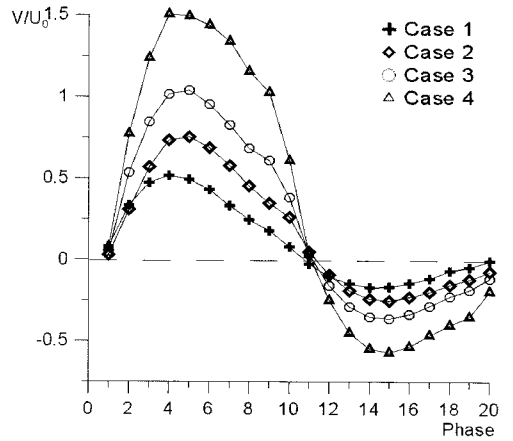
주기적인 흡입과 토출에 따른 후류유동의 변화를 관찰하기 위해 흡입과 토출의 한 행정(cycle)을 20개의 위상(phase)으로 나누고 각각의 위상에서 200장의 순간 속도장을 획득하였다.

Table 1에 실험 조건을 나타냈다. 흡입과 토출의 맥동주파수와 흡을 통과하는 제트의 최대 속도, 그리고 단위 행정당 유량을 나타냈다. 맥동주파수를 기준으로 Strouhal 수는 0.03에서 0.09로 기존의 연구에서 제어효과가 좋게 나타난 0.05와 0.08을 포함하여 연구를 수행하였다. Strouhal 수가 0.09에서는 시린지 펌프의 한계로 최대 V_{jet}/U_0 는 0.75로 제한되었다. 주파수 및 최대 속도와 더불어 단위 행정당 유량에 따른 영향도 비교하기 위해서 Case 1과 Case 6, Case 2와 Case 7, Case 5와 Case 9의 유량을 유사하게 맞추고 연구를 수행하였다.

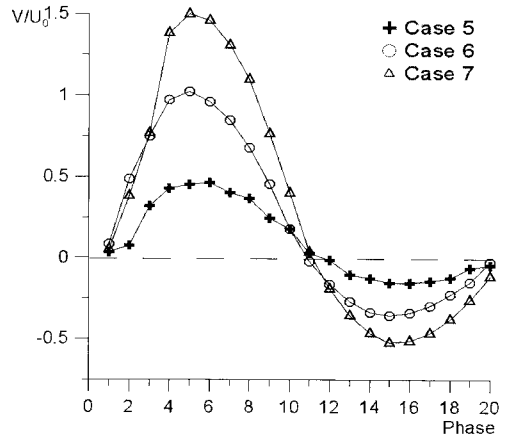
Fig. 3은 각각의 실험조건에서의 수직벽 전방의 흡을 통과하는 맥동 제트의 속도를 위상에 따라 표시하였다. 토출시의 최대속도가 흡입시보다 큰 이유는 토출시의 제트반폭(jet half width)이 흡입시보다 작기 때문이다.

Table 1 Experimental condition of frequency and maximum jet velocity

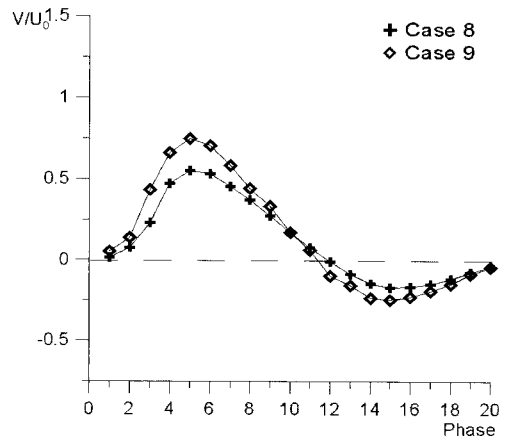
	f(Hz)	Str _H	V _{jet} /U ₀	Q(ml/stroke)
Case 1	0.4	0.03	0.50	23.6
Case 2	0.4	0.03	0.75	35.3
Case 3	0.4	0.03	1.00	52.0
Case 4	0.4	0.03	1.50	79.9
Case 5	0.8	0.06	0.45	11.1
Case 6	0.8	0.06	1.00	24.1
Case 7	0.8	0.06	1.50	34.2
Case 8	1.2	0.09	0.55	8.0
Case 9	1.2	0.09	0.75	10.7



(a) Str_H=0.03



(b) Str_H=0.06



(c) Str_H=0.09

Fig. 3 Mean velocity profiles at each phase

3. 결과 및 토의

3.1 평균 속도장 비교

제어하지 않은 수직벽 유동과 주기적인 흡입과 토출을 이용하여 제어된 수직벽 유동의 평균속도장을 비교하였다. 제어하지 않은 수직벽 유동에서는 400장의 순간속도장을 이용하여 평균속도장을 계산하였고, 제어된 경우에는 각각의 경우에 총 4000장의 순간속도장으로 평균속도장을 계산하였다. Fig. 4는 각각의 경우에서 재부착지점 길이를 비교한 결과이다. 제어하지 않은 수직벽 유동에서 재부착지점 길이는 약 9.4H였다. 이것은 일반적인 수직벽 유동의 재부착지점 길이보다 짧은 것으로 Dimaczek 등⁽⁶⁾의 연구에 의하면 본 연구에 사용한 실험장치에 의한 높은 막힘비(blockage ratio) 때문이다. 제어를 통한 재부착영역의 최대감소는 Case 4의 조건에서 나타났다. 이때의 재부착지점길이는 5.6H로 제어하지 않은 수직벽과 비교하여 40%의 재부착지점 길이의 감소가 나타났다.

Fig. 4의 결과로부터 평균 재부착길이의 감소는 흡입과 토출 주파수에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 맥동 주파수가 작을수록 감소효과가 크게 나타났다. 제트의 속도에 의한 영향은 제트 속도가 클수록 감소효과도 커짐을 알 수 있다. 주파수가 다르고 유량이 같을 경우의 비교에서는 유량에 의한 제어효과는 나타나지 않았다.

Fig. 5는 몇몇 경우(case 3, 7, 9)에서의 평균흐름방향 속도장 결과와 제어하지 않은 속도장 결과를 등고선 그래프로 나타낸 결과이다. 그래프

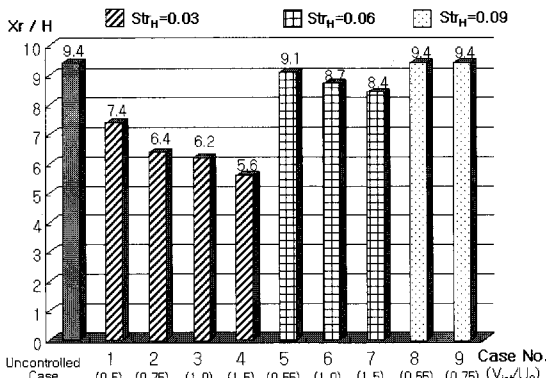


Fig. 4 Comparison of mean reattachment length

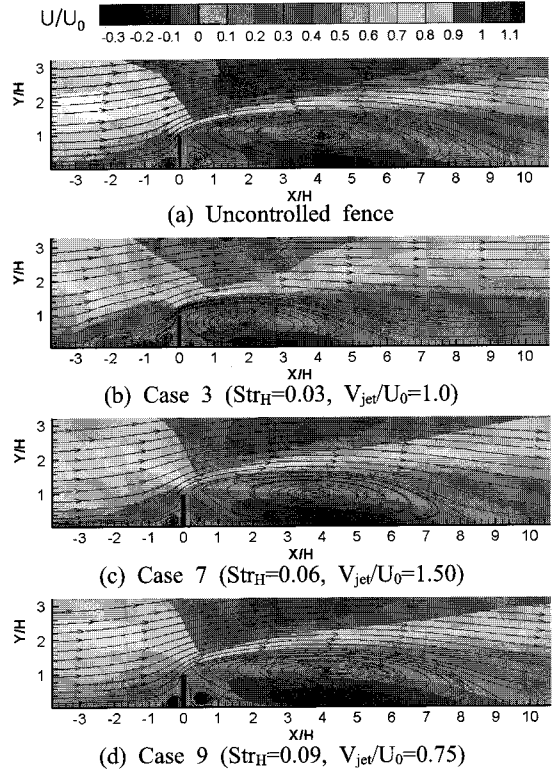


Fig. 5 Comparison of mean streamwise velocity contour and streamline

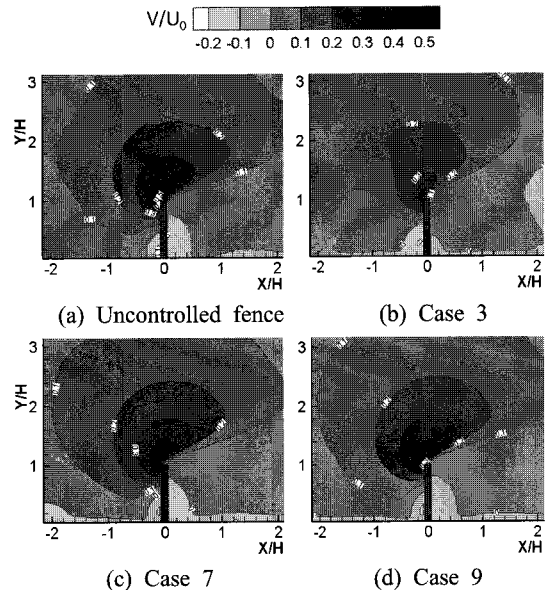
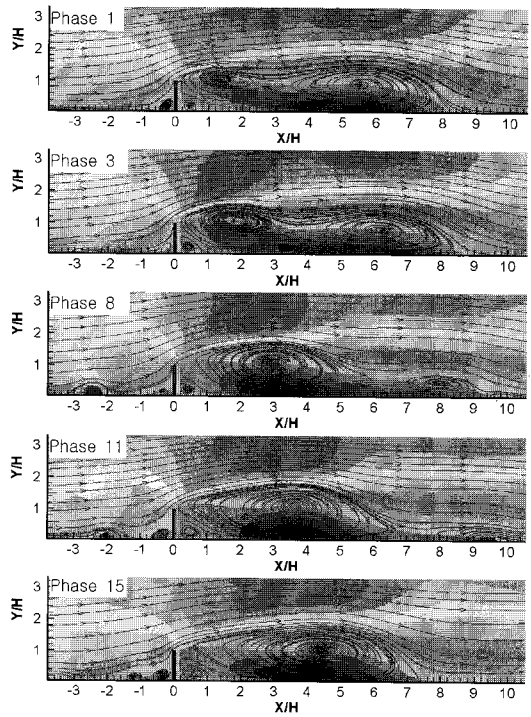


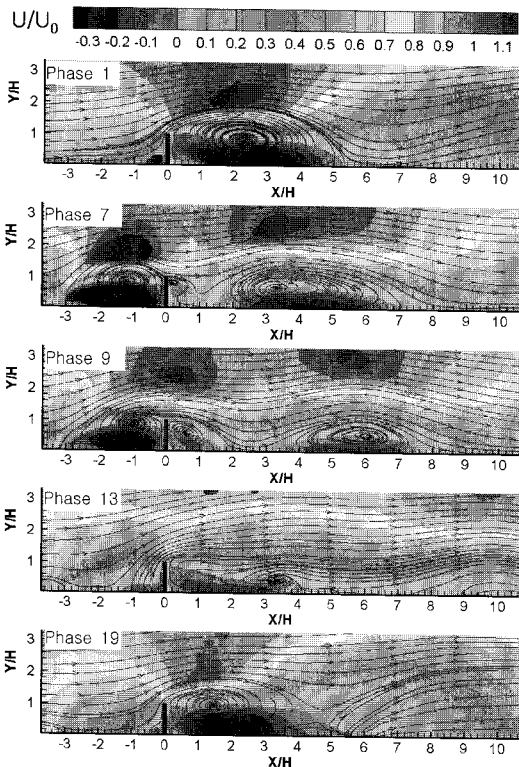
Fig. 6 Comparison of mean vertical velocity contour at the tip region of fence

로부터 수직벽 전방에 뚜렷한 와동을 볼 수 있는 case 3에서 가장 작은 후방 재순환 영역을 가짐을 알 수 있다. 제어효과가 없는 case 9의 경우에는 제어하지 않은 평균속도장 결과와 거의 동일한 형태를 갖는다. 그래프로부터 후류유동 제어 효과가 클수록 전방에서 맥동제트에 의한 와동의 발달이 뚜렷하게 나타나고 있다.

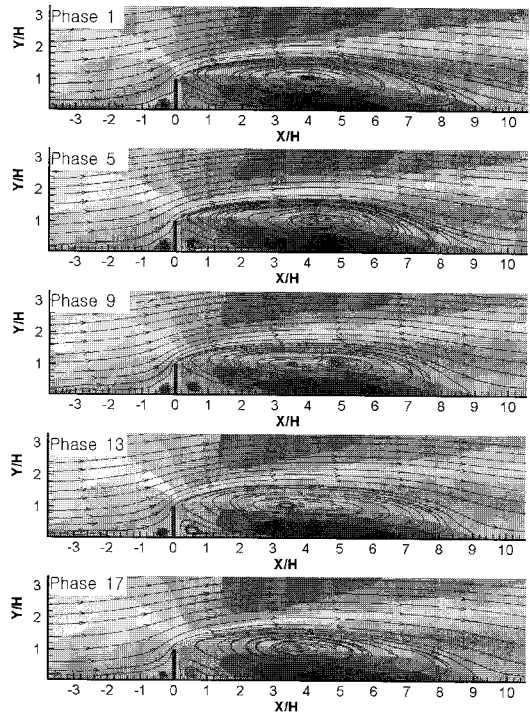
박리가 일어나는 수직벽 첨단부의 속도분포를 분석하기 위해 Fig. 6에 수직벽 주위의 수직방향 속도분포를 등고선으로 나타냈다. 이 결과로부터 제어효과가 클수록 박리가 일어나는 첨단부에서의 수직방향 속도가 감소하는 것을 보여준다. 수직벽 후방박리 유동과 후향계단유동(backward facing step flow)에서의 박리전단유동의 차이는 첨단부에서 박리되는 전단유동의 기울기로 수직벽의 경우 위로 향하는 형태를 갖고 이는 수직벽 후방 재순환영역의 길이가 후향계단의 그것보다 크게 되는 것의 한 가지 원인이다. Fig. 6에서의 결과는 제어효과가 클수록 첨단부에서 박리되는 유동의 기울기가 줄어들고 이는 재순환 영역의 최대높이가 감소함을 의미한다.



(b) Case 7 ($Str_H=0.06$, $V_{jet}=1.50$)



(a) Case 3 ($Str_H=0.03$, $V_{jet}=1.0$)



(c) Case 9 ($Str_H=0.09$, $V_{jet}=0.75$)

Fig. 7 Comparison of phase averaged streamwise velocity contour and streamline

3.2 위상 평균속도장 비교

Fig. 7은 몇 가지 경우(case 3, 7, 9)에서 한 행 정에서의 흡입과 토출에 따른 유동장의 흐름방향 속도성분의 변화를 위상에 따라 등고선 그래프로 보여준다. 제어 효과가 있는 경우와 없는 경우의 비교시, 가장 큰 특징은 후방 재순환영역에서의 와유출 (vortex shedding)의 유무이다. 제어효과가 크게 나타나는 낮은 주파수의 경우(case 3), 맥동 주파수와 일치하여 후방 재순환영역으로부터 와동이 유출되나 제어효과가 없는 경우(case 9)에는 와유출이 발생하지 않았다. 또한 전방에서 맥동 제트에 의해 생성발달하는 와동이 제어효과가 클수록 뚜렷하게 나타나고 있다.

Fig. 8은 주파수가 다른 3가지 경우에서 위상에 따른 재부착지점 길이 변화를 보여준다. 결과로부터 재순환영역의 길이변화는 Fig. 7에서 본 바와 같이 와유출에 의해 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 제어효과가 나타나지 않은 경우에는 위상에 따른 재순환영역의 길이 변화는 없었다. 제어효과가 작은 경우에는 와유출에 의한 재순환영역의 감소가 보이나 와동이 박리되기 전에는 제어되지 않은 경우보다 재순환영역의 길이가 더 커지는 현상을 보여준다.

재순환영역의 길이가 최소가 되는 위상은 맥동 제트가 최대 토출 후, 속도가 점차 감소할 때 나타난다.

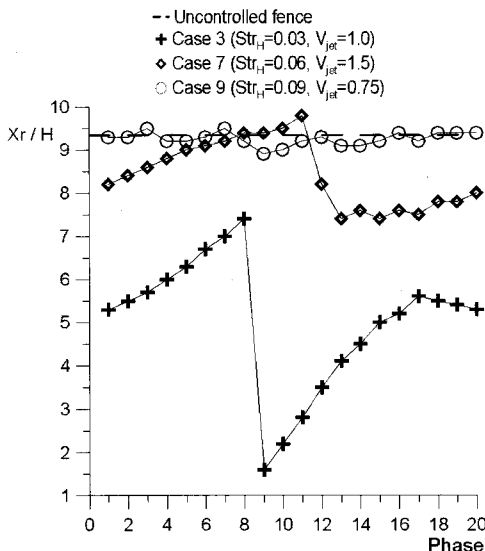


Fig. 8 Comparison of reattachment length along the different phase

4. 결론

본 논문에서는 수직벽 전방에서의 주기적인 흡입과 토출을 이용한 유동제어 연구를 수행하였다. 결과로부터 맥동 주파수가 낮을수록, 그리고 맥동제트의 속도가 클수록 제어 효과가 크게 나타났다. 수직벽 침단부에서의 수직방향 속도의 감소는 박리전단유동의 기울기를 줄여 재순환 영역의 길이감소에 영향을 준다. 재순환영역의 크기를 가장 작게 만드는 것은 재순환영역에서의 와유출 현상으로 와유출 현상의 유무로 제어효과가 지배적으로 결정된다. 재순환영역에서의 와유출은 전방에서 생성발달하는 와동에 큰 영향을 받는다.

후 기

본 연구는 2005년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2005-005-J09901)과 과기부(과학재단)에서 지원한 시스템바이오다이내믹스연구센터의 연구지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다. 최영호는 2단계 BK21사업 침단기계항공고급인력양성사업단의 장학금 지원을 받았습니다.

참고문헌

- (1) Good, M. C. and Joubert, P. N., 1968, "The Form Drag of Two-dimensional Bluff-plates Immersed in Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 31, pp. 547~582.
- (2) Castro, I. P. and Fackrell, J. E., 1978, "A Note on Two-dimensional Fence Flows, with Emphasis on Wall Constraints," *J. I. Aerodynamics*, Vol. 3, pp. 1~20.
- (3) Kim, H. B., Back, S. J., Lee, S. J., 1995, "Velocity Field Measurement of the 2-D Fence Wake Using 2-Frame PTV," *KSME*, Vol. 2, pp. 44~48.
- (4) Gad-el-Hak, M., 2000, *Flow Control : Passive, Active, and Reactive Flow Management*, Cambridge, New York.
- (5) Miao, J. J. and Chen, M. H., 1991, "Flow Structures Behind a Vertically Oscillating Fence Immersed in a Flat-plate Turbulent Boundary Layer," *Exps. Fluids*, Vol. 11, pp. 118~124.

- (6) Siller, H. A. and Fernholz, H. H., 1997, "Control of the Separated Flow Downstream of a Two-dimensional Fence by Low Frequency Forcing," *Appl. Sci. Res.*, Vol. 57, pp. 309~318.
- (7) Orellano, A. and Wengle, H., 2001, "POD Analysis of Coherent Structures in Forced Turbulent Flow Over a Fence," *J. Turbulence*, Vol. 2 008.
- (8) Dimaczek, G., Kessler, R., Martinuzzi, R. and Tropea, C., 1989, "The Flow Over Two-dimensional Surface-mounted Obstacles at High Reynolds Numbers," *7th Symposium on Turbulent Shear Flows*, pp. 10.1.1~10.1.6.