

수직벽 후방박리영역 감소를 위한 맥동제트의 최적화 연구

최영호*, 강인수**, 김형범***

Optimization study of pulsating jet for reducing the separation bubble behind the vertical fence

Young-Ho Choi*, In-Su Kang** and Hyoung-Bum Kim***

Key Words : Vertical Fence wake(수직벽 후류), Pulsating Jet(맥동 제트), Separation bubble(박리기포)

Abstract

In this study, we experimentally investigated that the optimization of pulsating jet to reduce the separated flow region behind the vertical fence. The vertical fence was submerged in the turbulent boundary layer in the circulating water channel and we applied phase averaged PIV method to measure the instantaneous velocity fields around the fence. One cycle of pulsating jet is divided into 20 phases and grabbed total 200 instantaneous velocity fields at each phase. The experiments were performed by varying the frequency, maximum jet velocity and the shape of pulsating jet wave. Pulsating jet was precisely made by piston-type pump controlled by the computer. The obtained results were compared with normal fence flow. From this study, we found there is the specific frequency which is effective in reducing the reattachment region.

기호설명

ν	: 작동유체의 동점도 계수
f	: 맥동제트의 주파수
H	: 수직벽의 높이
X_v	: 수직벽과 노즐과의 거리
X_r	: 재부착지점의 길이
X_{r0}	: 제어하지 않은 수직벽 유동의 재부착지점 길이
U_0	: 수직벽이 없을 때의 자유흐름 속도
V_{jet}	: 맥동제트의 속도
Re_H	: 자유흐름속도와 수직벽 높이로부터 계산된 Reynolds 수 $(= H \times U_0 / \nu)$
Str_H	: 수직벽 높이와 맥동 주파수로부터 계산된 Strouhal 수 $(= H \times f / U_0)$

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. 수직벽 전방에서 부압구배(adverse pressure gradient)에 기인해 나타나는 박리현상과 수직벽 끝단에서의 기하학적인 형상에 의해 나타나는 박리현상이 그것이다. 수직벽의 첨단부(tip)에서 발생하는 후방 박리유동(separation bubble)은 앞에서 언급된 다양한 변수들에 의해서 그 길이가 약 9에서 14H까지 다양한 범위로 존재한다. 이러한 수직벽 주위의 유동은 항력의 감소나 혼합(mixing)등에 영향을 주고 이를 제어하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 유동제어 방법은 외부 에너지의 공급 없이 표면부착물의 기하학적 형상의 변화나 유동조건의 변화를 이용한 수동 제어(passive control)와 외부에서 에너지를 공급하여 유동구조를 바꾸는 능동 제어(active control)방법으로 크게 구분된다.[3]

본 연구에서는 능동 제어를 이용해 수직벽 후류에서 생기는 박리전단유동의 제어를 수행하였다. 능동 제어기법을 이용한 수직벽 후류제어 연구로 Siller와 Fernholz[4]는 회전 스포일러와

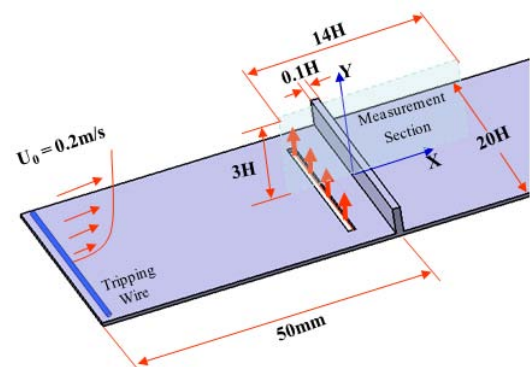


fig. 1 Schematic diagram of experimental model and its coordinate system

* 경상대학교 기계항공공학부 대학원, choi@gnu.ac.kr

** 경상대학교 기계항공공학부 대학원, kangis@gnu.ac.kr

*** 경상대학교 항공기부품기술 연구소, kimhb@gnu.ac.kr

스피커를 이용하여 후류제어 연구를 수행하여 $Str_H=0.05$ 일 때 재부착지점의 길이가 가장 짧아지고 그 전후로 재부착지점이 다시 길어진다고 보고하였다. 그리고 Orellano와 Wengle[5]은 수직벽 전방에서의 슬릿을 통한 특정 주기의 흡입과 토출에 따라 후류 유동의 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 토출시 가장 많은 재부착지점 길이 감소가 나타났다.

본 연구에서는 기존연구[4,5]를 바탕으로 수직벽 전방에서의 맥동제트의 최적화 연구를 수행하였다. 맥동제트의 주파수, 수직방향 속도, 수직벽과의 거리 그리고 맥동제트의 profile 변화에 따른 후방재부착지점의 최대감소 조건을 찾았다. 기존의 실험 연구들은 열선유속계, LDV, PWA와 같은 점 측정 방식을 사용하여 제한된 정보만을 제공하였다. 본 연구에서는 위상평균(phase average) DPIV(digital partical image velocimetry)기법을 이용하여 관심영역 내의 2차원 순간 속도장을 각 위상마다 획득하였고 그로 인해 전방에서 맥동제트의 위상에 따른 수직벽 주위의 유동 변화를 확인 할 수 있었다. 제어하지 않은 수직벽유동과의 비교를 통해서 재부착지점 길이 감소를 일으키는 요인을 찾을 수 있었다.

2. 실험장치 및 방법

실험은 회류수조 내에서 수행되었고 시험부의 크기는 $300W \times 300H \times 1000L$ (mm) 이다. 평판에 설치되어진 수직벽은 실험 영역의 입구로부터 500mm 하류에 설치하였다. 실험에 사용한 수직벽의 높이(H)는 15mm이고 폭은 20H, 두께는 0.1H이다. 막힘비(blockage ratio)는 5%로 막힘비에 의한 가속효과를 줄였고 종횡비(aspect ratio) 역시 20으로 2차원 유동조건을 만들었다. 난류 경계층을 만들기 위해 평판의 입구에 천이장치(tripping wire)를 설치하였다. 만들어진 경계층의 두께는 4H이고 자유흐름속도와 수직벽 높이를 기준으로 한 레이놀즈수(ReH)는 3000이다.

Fig. 1에 실험 모델과 사용된 좌표계를 표시하였다. 주기적인 흡입 및 토출 유동은 수직벽 전방에 1mm의 크기 노즐에서 피스톤 펌프를 이용하여 생성시켰다.

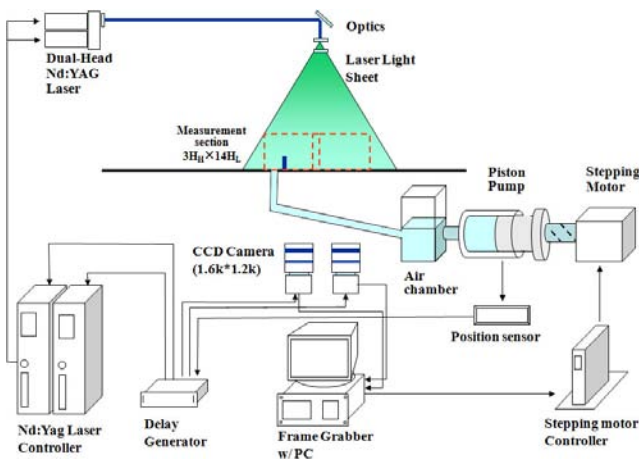


fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

Fig. 2에 DPIV 시스템을 포함한 전체적인 실험장치의 개략도를 나타내었다. 피스톤 펌프, CCD 카메라와 펄스 레이저는 동기화 장치(delay generator)를 이용하여 연계되어 동작된다. 피스톤 펌프의 피스톤이 특정 위치를 지나게 되면 위치센서에 의해서 동기화 장치에 펄스 신호를 주고 동기화 장치는 CCD 카메라와 레이저를 동작시켜 한 주기상의 특정 위상에서 입자화상을 획득하게 된다.

속도측정은 수직벽의 전방 -3.5H부터 수직벽 후방 10.5H 길이에 3.5H의 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.

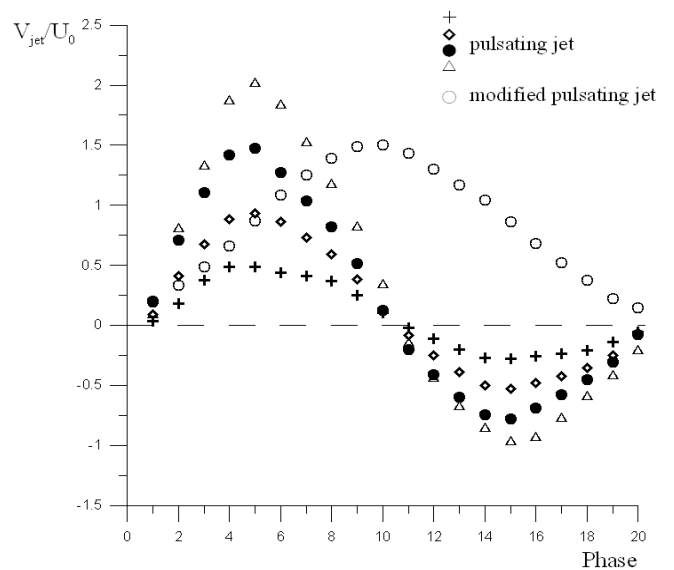


fig. 3 Mean velocity of jet at $Str_H=0.05$

Table 1 Experimental condition for optimization

		Str_H	V_{jet}/U_o	Xv/H
Frequency optimization	Case 1	0.01	1.5	1.75
	Case 2	0.03	1.5	1.75
	Case 3	0.05	1.5	1.75
	Case 4	0.07	1.5	1.75
	Case 5	0.09	1.5	1.75
position optimization	Case 6	0.05	1.5	0.5
	Case 7	0.05	1.5	1.0
	Case 8	0.05	1.5	1.5
	Case 9	0.05	1.5	2.0
	Case 10	0.05	1.5	3.0
Velocity optimization	Case 11	0.05	0.5	1.75
	Case 12	0.05	1.0	1.75
	Case 13	0.05	2.0	1.75

3. 결과 및 토의

3.1 맥동제트의 최적화 연구

수직벽 후방에 존재하는 박리기포의 길이감소에 초점을 두고 최적화 연구를 수행하였다. Table 1에 실험 조건을 나타냈다. 흡입과 토출의 맥동주파수와 노즐을 통과하는 제트의 최대 속도, 그리고 수직벽과 노즐의 거리를 나타냈다. 위 조건들의 변화에 따라 맥동제트의 최적화 연구를 수행하였다. Fig. 3은 동일한 주파수에서 각각의 속도가 다른 경우에서 맥동제트를 위상에 따라 표시하였다. 토출시의 최대속도가 흡입시보다 큰 이유는 토출시의 제트반폭(jet half width)이 흡입시보다 작기 때문이다.

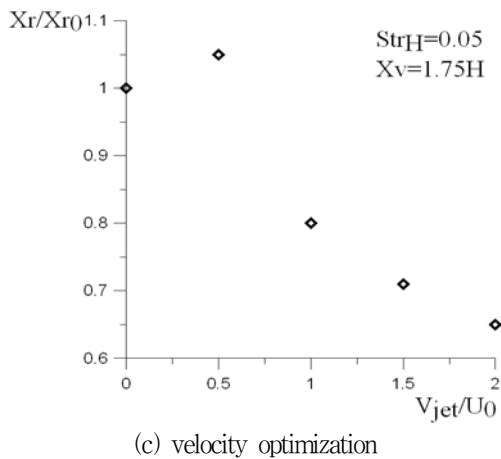
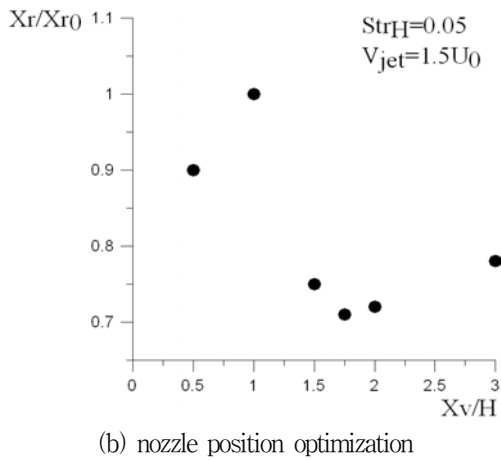
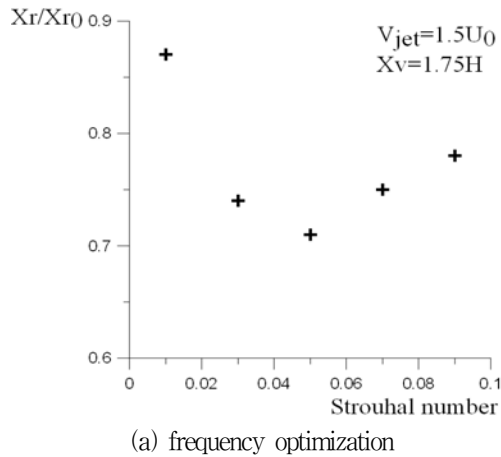


fig. 4 Non-dimensionalized reattachment length comparison according to frequency, nozzle position and velocity

제어하지 않은 수직벽 유동과 맥동제트의 의해 제어되어진 수직벽 유동의 재부착지점 길이를 비교하였다. 제어하지 않은 수직벽 유동은 1000장의 순간속도장을 이용하여 평균속도장을 계산하였다. 이 때의 재부착지점 길이는 $10H$ 이다. Fig. 4는 맥동제트의 (a) Strouhal 수, (b) 제트와 노즐과의 거리, (c) 맥동제트의 최대속도에 따른 평균재부착지점 길이를 표시하였다. 그 결과 수직벽과 $1.75H$ 떨어진 전방에 설치된 노즐에서 Strouhal 수 0.05로 흡입과 토출을 반복하는 맥동제트를 작동했을 때 가장 좋은 제어효과가 나타났다. 그리고 맥동제트의 최대속도가 클수록 제어효과가 크게 나타났다. 이 같은 실험조건에서 평균재부착지점 길이가 $6.5H$ 로 나타났고, 제어하지 않은 수직벽 유동과 비교했을 때 35%의 감소가 나타났다.

Fig. 5는 제어효과가 가장 좋은 실험조건에 대해서 주요 위상에 대해 순간속도장과 유선을 표시했다. 결과로써 노즐로 부터 토출된 제트에 의해 수직벽 전방에 와동이 생성되고 위상에 따라 발달된 와동은 수직벽 유동의 박리점인 수직벽 후방에서 박리기포에 유체를 유입시킨다. 그로 인해 특정 위상에서는 수직벽 후방의 박리기포 영역이 거의 사라지는 것을 볼 수 있다.

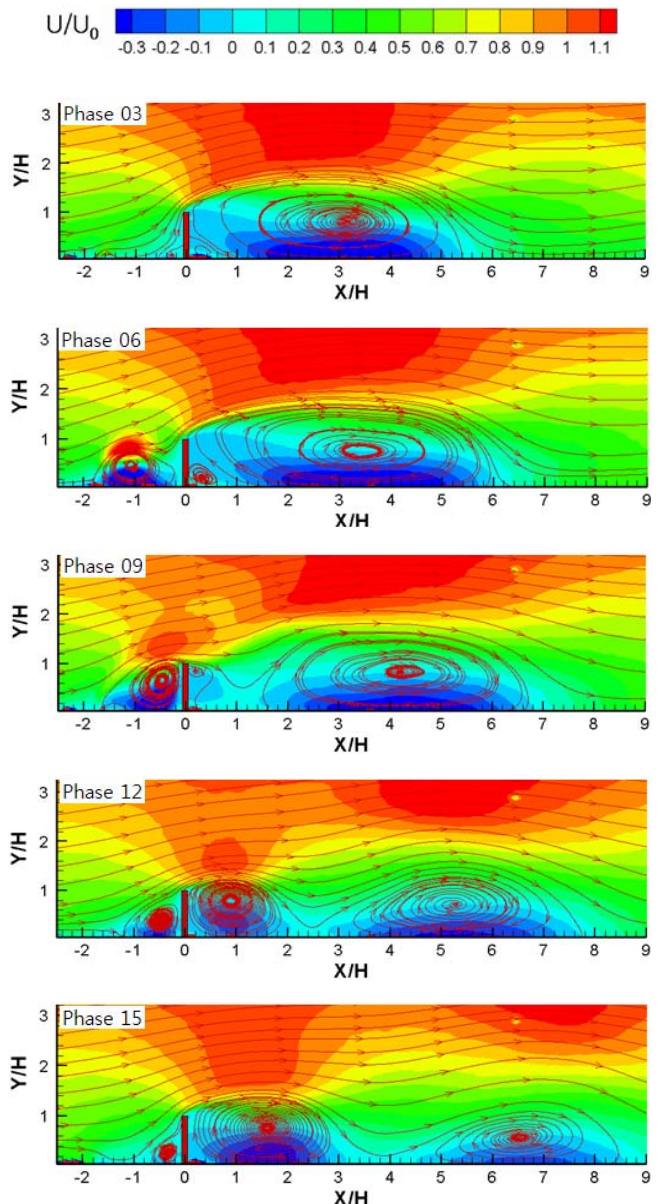


Fig. 5 Phase averaged streamwise velocity contour and streamline at $Str_H=0.05$, $V_{jet}=2.0U_0$

3.2 제트의 속도 변화에 따른 영향

앞에서 수직벽 후방의 박리기포의 크기 감소는 토출된 제트에 의한 와동의 발달로 재순환 유동의 박리도 이루어짐을 알 수 있었다. 이번 연구에서는 맥동제트의 profile을 바꾸어 흡입부분을 배제하고 연속된 토출에 따른 제트의 영향을 알아보았다. Fig. 3에 변경된 맥동제트에서는 흡입 위상 없이 주기적으로 토출만이 있다. 제트의 최대속도는 $1.5U_0$, 수직벽과 흡 사이의 거리는 $1.75H$ 로 고정하고, 제어효과가 좋게 나타난 세 가지의 Strouhal 수($Str_H=0.03, 0.05, 0.07$)에서 실험을 진행하였다.

Fig. 6은 변경된 맥동제트와 기존의 맥동제트에 의한 평균 재부착지점 길이를 비교한 그래프이다. 흡입과 토출이 반복되는 경우 Str_H 수 0.05에서 $7.1H$ 의 평균 재부착지점 길이를 가졌고 토출만을 한 경우 Str_H 수 0.05에서 $7.3H$ 의 평균 재부착지점 길이가 나타남에 따라 흡입과 토출을 반복한 경우가 더 좋은 제어효과를 보여주었다. 그 원인으로써 전방에서 생성되는 와동이 수직벽에 다가가며 발달되는 과정에서 찾을 수 있는데 흡입과 토출을 반복한 경우에서 와동의 발달이 더 강하게 나타났다. Fig. 7은 토출 제트와 흡입/토출 제트가 수직벽에 다가가기 직전 위상에서 swirling strength를 비교한 것이다. 흡입 위상이 있는 맥동제트가 토출만 있는 맥동제트에 비해 강한 회전유동이 나타나고 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 수직벽 후류에서 발생하는 박리기포의 크기 감소를 위해 최적화 연구를 수행하였다. 맥동제트의 Strouhal 수와 수직벽과 맥동제트의 거리, 제트의 세기에 대해서 각각 최적화 된 값을 찾았다. 그리고 재부착지점 길이를 줄이는 결정적인 요인은 수직벽 전방에서 발달된 강한 와동에 의한 수직벽 후방의 박리기포의 와유출 현상임을 알 수 있었다.

그리고 흡입과 토출의 맥동제트와 토출 맥동제트를 비교하였을 때 흡입과 토출 위상을 모두 가진 맥동제트가 더 뛰어난 제어효과가 있음을 확인 할 수 있었다.

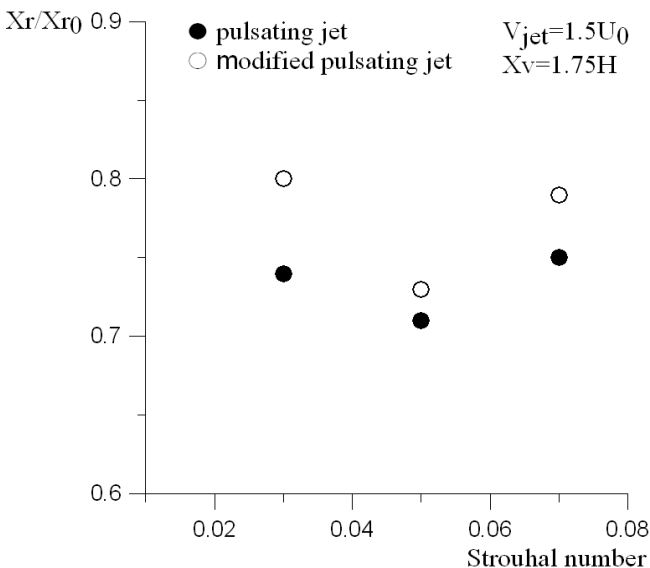


fig. 6 Comparison of mean reattachment length

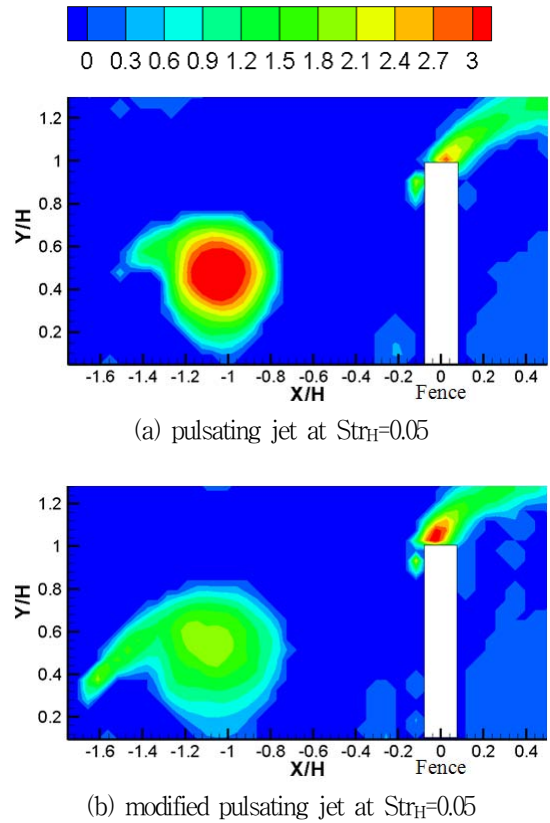


fig. 7 Comparison of Swirling strength

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 첨단기계항공고급인력양성사업단의 장학금 지원을 받았습니다.

참고문헌

- [1] Good, M. C. and Joubert, P. N., "The Form Drag of Two-dimensional Bluff-plates Immersed in Turbulent Boundary Layers," J. Fluid Mech., Vol. 31(1968), pp. 547~582.
- [2] astro, I. P. and Fackrell, J. E., "A Note on Two-dimensional Fence Flows, with Emphasis on Wall Constraints," J. I. Aerodynamics, Vol. 3(1978), pp. 1~20.
- [3] Gad-el-Hak, M., Flow Control : Passive, Active, and Reactive Flow Management, Cambridge, New York.(2006)
- [4] Siller, H. A. and Fernholz, H. H., "Manipulation of the reverse-flow region downstream of a fence by spanwise vortices", E. J. M. B/Fluid 26(2007), pp. 236~257
- [5] Orellano, A. and Wengle, H., "POD Analysis of Coherent Structures in Forced Turbulent Flow over a Fence", J. Turbulence, Vol. 2(2001) 008.