

후방 박리기포 감소를 위한 맥동제트의 최적화 연구

최영호* · 강인수* · 김형범†

Optimization Study of Pulsating Jet to Reduce the Separation Bubble behind the Fence

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

Abstract. We carried out the experiments which controled the periodic jet in front of the fence to alter the fence wake. The experiments were performed in circulating water channel and the vertical fence was submerged in the boundary layer. The frequency, jet nozzle distance and speed of jet passing the slit were investigated. Each case divided into 20 phases and phase-averaged results were compared with uncontrolled fence flow. From the results, we found the specific frequency and nozzle distance which were good for reducing the reattachment length. In this case, the reattachment length was decreased 35% compared with the uncontrolled fence flow.

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

1. 서 론

표면부착물 주위를 흐르는 유동은 실질적인 중요성에 의해 많은 연구가 진행되고 있다. 기존의 연구로부터 부착물 주위의 박리 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).

이러한 유동의 대표적인 경우인 수직벽(vertical fence) 유동은 전후로 각각 다른 특성을 가지는 두 가지 박리 유동이 존재한다. 수직벽 전방에서 부압구배(adverse pressure gradient)에 기인해 나타나는 박리현상과 수직벽 끝단에서의 기하학적인 형상에 의해 나타나는 박리 현상이 그것이다. 수직벽의 첨단부(tip)에서 발생하는 후방 박리유동(separation bubble)은 앞에서 언급된 다양한 변수들에 의해서 그 길이가 약 9H에서 14H까지 다양한 범위로 존재한다. 이러한 수직벽 주위의 유동은 항력의 감소나 혼합(mixing) 등에 영향을 주고 이를 제어하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 그리고

최근에는 전단박리유동에서 Aero-optics 문제를 해결하기 위해서도 후방박리유동 제어가 연구되고 있다.

유동제어를 위한 방법으로 외부 에너지의 공급 없이 표면부착물의 기하학적 형상의 변화나 유동조건을 변화시키는 수동 제어(passive control)방법과 외부에서 에너지를 공급하여 유동구조를 바꾸는 능동 제어(active control)방법으로 크게 구분된다^(3,4). 본 연구에서는 맥동제트를 이용한 능동 제어로 수직벽 후류에서 생기는 박리기포(separation bubble)의 감소연구를 수행하였다.

능동 제어기법을 이용한 수직벽 후류제어 연구로 Siller와 Fernholz⁽⁵⁾는 회전 스포일러와 스피커를 이용하여 후류제어 연구를 수행하여 $Str_H=0.05$ 일 때 재부착지점의 길이가 가장 짧아지고 그 전후로 재부착지점이 다시 길어진다고 보고하였다. 그리고 Orellano와 Wengle⁽⁶⁾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 주파수로 흡입과 토출을 반복했을 때 가장 큰 재부착지점 길이 감소가 나타났다.

†경상대학교 기계항공공학부 항공기부품기술연구소
E-mail : kimhb@gnu.ac.kr

*경상대학교 기계항공공학부 대학원

본 연구에서는 기존연구^(5,6)를 바탕으로 수직벽 전방에서의 맥동제트의 최적화 연구를 수행하였다. 맥동제트의 주파수, 수직방향 속도 그리고 수직벽과의 거리 변화에 따른 박리기포의 최대감소 조건을 찾았다. 기존의 실험 연구들은 열선유속계, LDV, PWA와 같은 점 측정 방식을 사용하여 제한된 정보만을 제공하였다. 본 연구에서는 위상평균 DPIV(phase-averaged digital partical image velocimetry)기법을 이용하여 관심영역 내의 2차원 순간 속도장을 각 위상마다 획득하였고 그로 인해 전방에서 맥동제트의 위상에 따른 수직벽 주위의 유동변화를 확인하고, 제어하지 않은 수직벽유동과의 비교를 통해서 재부착지점 길이 감소를 일으키는 요인을 찾았다.

2. 실험장치 및 방법

실험은 회류수조 내에서 수행되었고 시험부의 크기는 300W×300H×1000L(mm)이다. 평판에 설치되어진 수직벽은 실험영역의 입구로부터 500 mm 하류에 설치하였다. 실험에 사용한 수직벽의 높이(H)는 15 mm이고 폭은 20H, 두께는 0.1H이다. 수직벽에 의한 막힘비(blockage ratio)는 5%로 막힘비에 의한 가속효과와는 본 연구에서는 무시할 수 있었다. 종횡비(aspect ratio)는 20으로 수직벽 중앙에서의 2차원 유동조건을 만들었다. 난류 경계층을 만들기 위해 평판의 입구에 천이장치(tripping wire)를 설치하였고 만들어진 경계층의 두께는 4H이고, 배제두께(displacement thickness)는 0.7H이다. 자유흐름속도와 수직벽 높이를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_H)는 3000이다.

Fig. 1에 실험 모델과 사용된 좌표계를 표시하였다. 주기적인 흡입 및 토출 유동은 수직벽 전방에 1 mm의 폭과 20H의 길이를 가지는 노즐에서 피스톤 펌프를 이용하여 생성시켰다. 제트 노즐의 폭은 기존 연구를 참고하여 결정하였다⁽⁵⁾. 노즐의 위치변화에 따른 효과 연구를 위해 노즐부는 수직벽과의 거리를 쉽게 변화시킬 수 있도록 탈부착식으로 제작하였다.

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

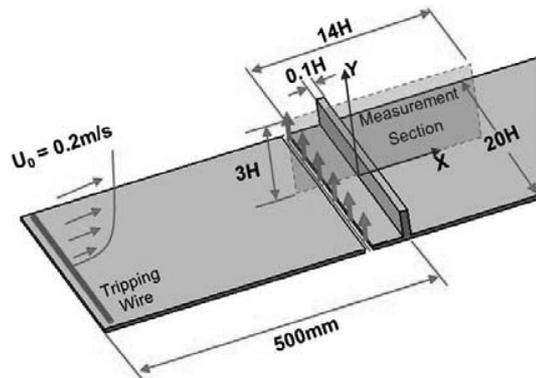


Fig. 1. Schematic diagram of experimental model and its coordinate system

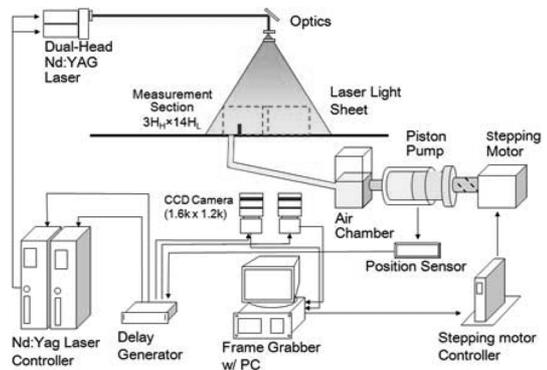


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup

동기화 장치는 CCD 카메라와 레이저를 동작시켜 한 주기상의 특정 위상에서 입자화상을 획득하게 된다.

속도측정은 수직벽의 전방 -3.5H부터 수직벽 후방 10.5H 길이에 3H의 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.

3. 실험결과

수직벽 후방에 존재하는 박리기포의 길이감소에 초점을 맞추고 최적화 연구를 수행하였다. Table 1에 실험 조건을 나타냈다. 주기적인 흡입과 토출의 맥동주파수와 노즐을 통과하는 제트의 최대 속도, 그리고 수

Table 1. Experimental conditions for pulse jet optimization

		Str_H	V_{jet}/U_0	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

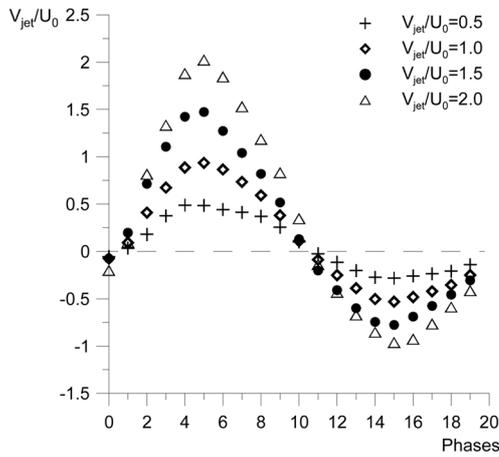


Fig. 3. Mean velocity of pulsating jet at $Str_H=0.05$

직벽과 노즐의 거리를 나타냈다. 위 조건들의 변화에 따라 맥동제트의 최적화 연구를 수행하였다. Fig. 3은 Strouhal 수 0.05에서 다양한 맥동제트의 수직방향 속도를 20개의 위상으로 표시하였다. 맥동제트의 수직방향 속도는 사인파(sine wave) 형태로 시간에 따라 변하고 다른 주파수에서도 각각의 속도에서 유사한 형태의 속도 프로파일을 가진다.

제어하지 않은 수직벽 유동과 맥동제트의 의해 제어되어진 수직벽 유동의 재부착지점 길이비교를 통해 각 경우의 제어효과를 측정하였다. 제어하지 않은 수직벽 유동은 1000장의 순간속도장을 이용하여 평균속도장을 계산하였다. 이때의 재부착지점 길이는 10H였다. Fig. 4는 맥동제트의 (a) Strouhal 수, (b) 제트와 노즐

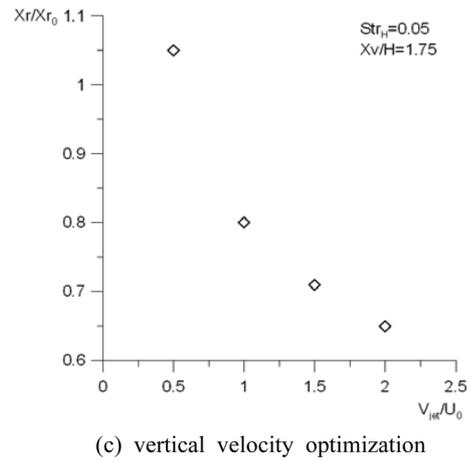
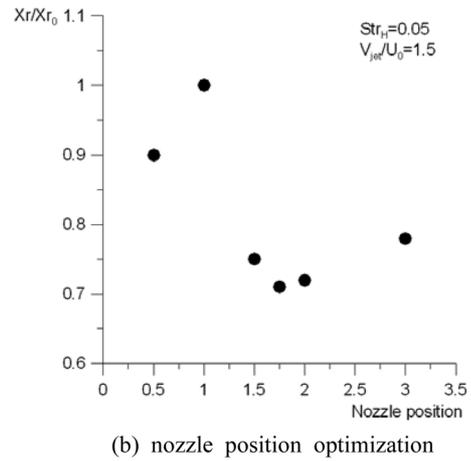
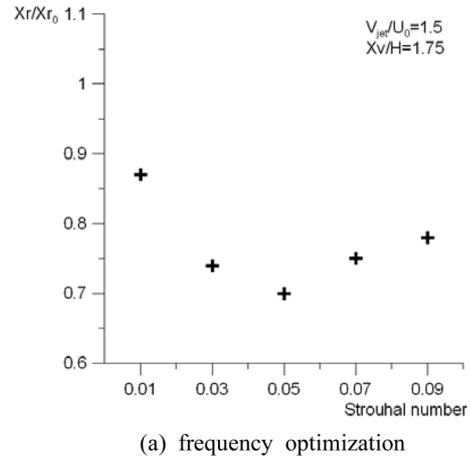


Fig. 4. Non-dimensionalized reattachment length comparison according to frequency, nozzle position and velocity

과의 거리, (c) 맥동제트의 최대속도에 따른 평균재부착지점 길이를 표시하였다.

그 결과, Strouhal 수 0.05에서 가장 좋은 제어효과가 나타났고, 이보다 크거나 작은 Strouhal값에서는 감소효과가 작게 나타났다. 이는 Siller와 Fermholz⁽⁵⁾의 연구와 같은 결과이다. 박리기포의 감소효과는 최적 Strouhal수를 기준으로 이보다 작은 값에서 더 빠르게 없어졌다.

Fig. 4(b)에 나타난 제트 노즐과 수직벽과의 거리 비교는 노즐이 수직벽으로부터 1.75H에서 가장 좋은 박리기포의 감소결과가 나타났고 이 값을 경계로, Strouhal수와 같이 수직벽과 더 가깝거나 더 멀어질수록 박리기포 크기의 감소효과는 작아졌다. 수직벽과의 거리가 1H에서는 맥동제트에 의한 박리기포 감소효과가 전혀 나타나지 않았다. 그러나, 1H보다 더 가깝게 위치했을 경우, 다시 박리기포의 감소효과가 나타났다.

Fig. 4(c)는 맥동제트의 수직방향 속도 크기에 따른 영향을 알아보았다. 그 결과, 본 연구 조건에서는 제트의 속도가 증가함에 따라 감소효과가 크게 나타났다. 여기서 특이한 점은 제트의 속도가 $0.5U_0$ 이하에서는 박리기포의 크기가 커지는 현상이 일어났다.

Choi와 Kim⁽⁷⁾의 선행 연구에서는 박리기포의 감소에는 수직벽 끝단에서의 수직방향 속도의 감소, 그리고 후방박리유동의 주기적 와류출에 의해 일어나는데, 가장 큰 영향을 주는 것은 와류출 현상임이 밝혀졌다.

본 연구에서 감소효과가 나오지 않은 노즐위치가 1H이고 제트속도가 $0.5U_0$ 인 경우에는 후방박리유동의 와류출 현상이 발생하지 않았다. 와류출 현상대신 발달한 와동에 의한 유체의 혼입으로 재순환영역의 길이가 연속적으로 변화하는 결과가 나타났다.

맥동제트의 주파수, 노즐과 수직벽과의 거리, 제트의 수직방향 속도를 이용한 최적화 연구결과, 수직벽과 1.75H 떨어진 전방에 설치된 노즐에서 Strouhal 수 0.05로 흡입과 토출을 반복하는 맥동제트를 작동했을 때 가장 좋은 제어효과가 나타났다. 그리고 맥동제트의 최대속도가 $1.0U_0$ 이상에서 박리기포의 감소효과가 나타났다. 이 같은 실험조건에서 제트속도가 $2.0U_0$ 에서 평균재부착지점 길이가 6.5H로 나타났고, 제어하지 않은 수직벽 유동과 비교했을 때 35%의 감소가 나타났다.

Strouhal수의 경우에 본 연구과 기존의 연구가 일치하는 결과를 보여주었으나, 제트 속도의 결과는 기존

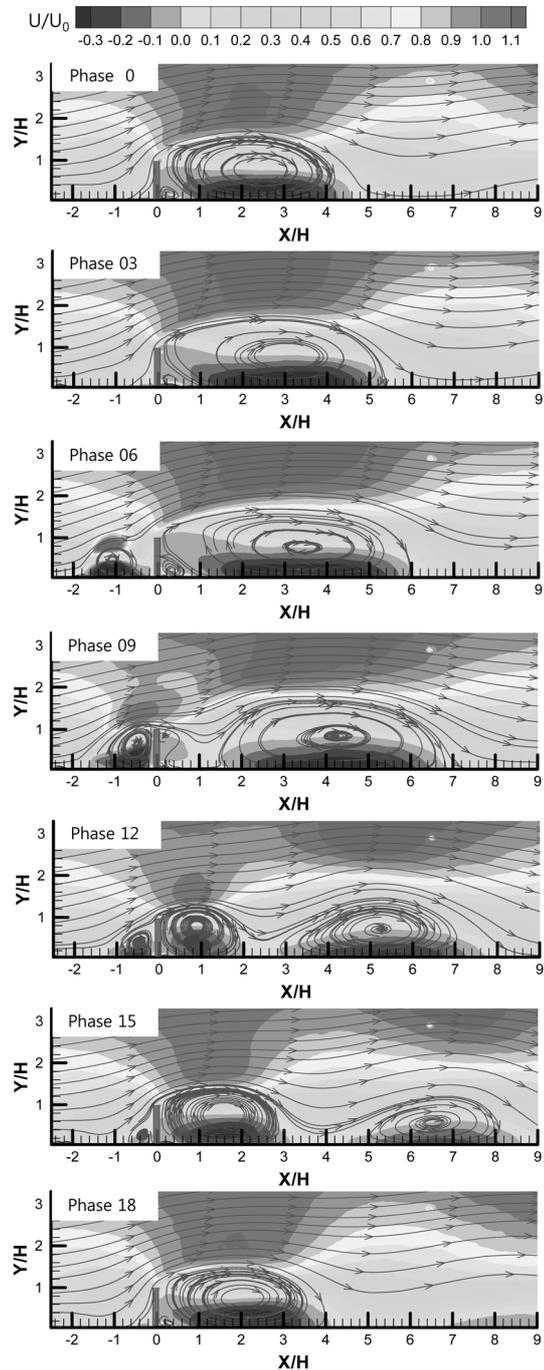


Fig. 5. Phase averaged streamwise velocity contour and streamline at $Str_H=0.05$, $V_{jet}=2.0U_0$

연구와 차이를 보여준다. Orellano와 Wengle의 경우, 제트속도가 $0.5U_0$ 에서 박리기포의 큰 감소결과가 나

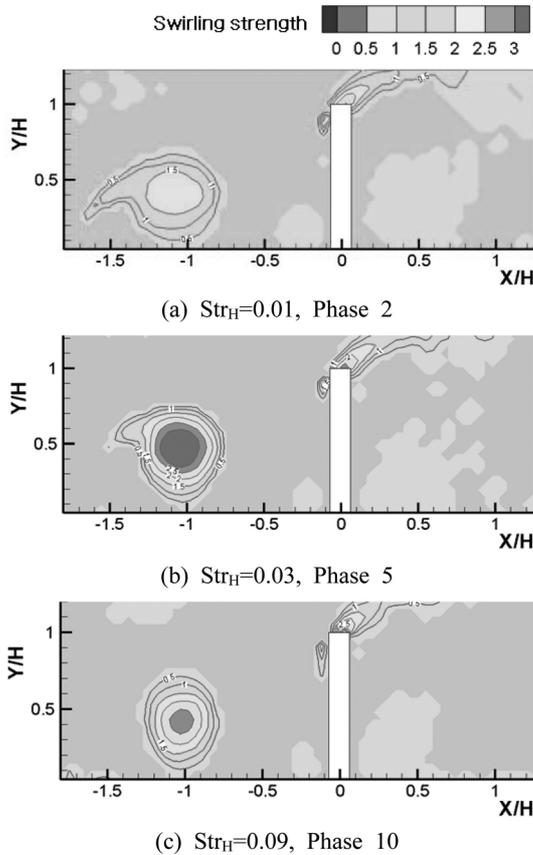


Fig. 5. Swirling strength in front of the fence

왔다. 이 차이는 수직벽이 놓인 유동조건에 의해 생 각되고 이에 대한 후속연구가 진행 중이다. 기존의 연구들은 경계층의 높이가 수직벽보다 작았고, 수직벽 끝단에서의 속도가 본 연구에서보다 모두 컸다.

Fig. 5은 수직벽 전방 $1.75H$ 의 위치에서 각각 다른 주파수로 토출된 제트가 수직벽 전방의 동일한 위치 ($1H$)를 지날 때 swirling strength와 와도 결과이다. Swirling strength는 와동을 찾기 위한 유동특성의 하나로, 단순한 와도보다 전단유동에서의 와동을 찾는 데 유효한 특성값이다⁽⁸⁾. 결과로부터, Strouhal 수가 가장 작은 0.01에서는 맥동제트와 주유동에 의해 생성 발달 되는 와동이 $1H$ 위치에 왔을 때, 아직까지 토출되는 제트에 의해 와동이 계속 생성 발달됨을 알 수 있다. 이는 Strouhal 수가 증가함에 따라 점차적으로 감소하여 Strouhal 수 0.09에서는 원형의 와동을 확인할 수 있었다. 이 비교를 통해 가장 감소효과가 크게 나타난

Strouhal 수 0.05에서 와동의 swirling strength가 가장 큰 값을 가졌다.

4. 결 론

본 연구에서는 수직벽 후류에서 발생하는 박리기포의 크기 감소를 위한 맥동제트의 최적화 연구를 수행 하였다. 결과로부터 찾아진 맥동제트의 Strouhal 수와 수직벽과 노즐의 거리의 최적값을 중심으로 그 값의 차이가 클수록 후방박리유동의 감소효과는 낮게 나타났다. 제트의 세기에 대해서는 그 값이 클수록 효과가 크게 나타나는데 본 연구에서는 기존의 연구보다 큰 값에서 박리기포크기 감소효과가 나타났고 이는 추후 지속적인 연구가 필요한 부분이다.

후방박리기포의 크기감소는 와유출 현상에 의해 크게 나타나는데 이는 전방에 강한 와동이 발달 될수록 크게 나타나고, 박리기포 제어효과가 없거나 역효과가 나타나는 조건에서는 이러한 와유출 현상이 나타나지 않았다.

기호설명

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

후 기

본 연구는 2005년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2005-005-J09901)과 과기부(과학재단)에서 지원한 시스템바이오디나믹스연구센터의 연구지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다. 최영호, 강인수는 2단계 BK21사업 첨단기계항공고급인력

양성사업단의 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) Gad-el-Hak, M., 2006, Flow Control : Passive, Active, and Reactive Flow Management, Cambridge, New York.
- 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, pp.417-426.
- 5) Siller, H. A. and Fernholz, H. H., 2007, "Manipulation of the reverse-flow region downstream of a fence by spanwise vortices," E.J.M. B/Fluid, Vol.26, pp. 236-257
- 6) Orellano, A. and Wengle, H., 2001, "POD Analysis of Coherent Structures in Forced Turbulent Flow over a Fence," J. Turbulence, Vol.2 008.
- 7) Choi, Y. H. and Kim, H. B., 2008, "Study of Wake Control by Blowing and Suction in Front of the Vertical Fence," KSME., Vol.32, pp. 47-53.
- 8) Adrian, R. J., Christensen, K. T. and Liu, Z. C., 2000, "Analysis and Interpretation of Instantaneous Turbulent Velocity Fields," Exp. in Fluids, Vol.29, pp.275-290.