

POD 기법을 이용한 경계층 외부 수직날의 마찰저항 저감 기구에 관한 관측

안남현* · 박성현** · 전호환** · 이인원***†

* 거제대학교 조선해양공학과, ** 부산대학교 조선해양공학과, ***부산대학교 조선해양플랜트 글로벌핵심연구센터

Investigation of Skin Friction Reduction Mechanism of Outer-Layer Vertical Blades Using POD Analysis

Nam Hyun An*, Seong Hyeon Park** and Ho Hwan Chun** and Inwon Lee***†

* Dept. of Shipbuilding and Marine Engineering, Kojje College,

** Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

*** Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan Nat'l Univ.

(Received November 16, 2012 ; Revised April 8, 2013 ; Accepted April 8, 2013)

Key Words: Drag Reduction(저항저감), Outer-Layer Vertical Blades(외부경계층 수직 날), Time-Resolved PIV(시간분해 입자영상유속계), POD Analysis(적합직교분해)

초록: 외부경계층 수직 날의 마찰저항 저감 기구를 규명하기 위하여 회류수조에서 시간분해 입자영상유속계로 측정된 비정상 유동장에 POD 분석을 실시하였다. 최근의 PIV 결과에서는 수직날 평면 및 수직날 사이 평면에서 각각 2.73%, 7.95%의 마찰저항 저감효과가 발견되었다. 본 연구에서는 수직날 배열이 난류조직구조에 미치는 영향을 POD 방법을 통하여 분석하였다. 난류유동의 조직적인 와구조가 수직날에 의하여 절단, 변형되고 비정상 거동이 난류경계층에서의 마찰저항 저감 기구와 밀접하게 관련된 것으로 관찰되었다.

Abstract: A POD analysis based on time-resolved PIV measurements in a circulating water channel has been conducted to identify the skin friction reduction mechanism of outer-layer vertical blades. A recent PIV measurement indicated 2.73% and 7.95% drag reduction in the blade plane and the blade-in-between plane, respectively. In the present study, the influence of vertical blades array upon the characteristics of the turbulent coherent structures was analyzed by the POD method. It is observed that the vortical structures are cut and deformed by the blades array and that their temporal evolution is strongly associated with the skin-friction drag reduction mechanism in the turbulent boundary layer flow.

- 기호설명 -

- a_i : i 번째 POD 모드 진폭
- h : 수직 날의 높이
- z : 수직 날 사이의 횡방향 간격
- U : 평균유속
- u' : 속도변동
- u_τ : 마찰속도
- λ_i : i 번째 POD 모드의 고유치

1. 서 론

마찰항력 저감은 운송수단 및 기계부품 등 다양

한 공학적 응용분야에 미칠 수 있는 잠재적 효과 때문에 오랫동안 많은 연구가 진행되어 왔다. 마찰저항은 난류유동과 밀접한 관련이 있기 때문에 난류 경계층 유동의 조직구조를 파괴 또는 억제하는 다양한 전략들이 제시되고 있다. Schoppa 와 Husain⁽¹⁾은 난류 경계층에서 형성되는 와 구조의 적절한 제어가 표면마찰 항력 저감에 영향을 줄 수 있다고 한 바 있으며, Hutchins⁽²⁾는 최근 일련의 얇은 수직 평판들을 난류 경계층에 배열함으로써 난류 경계층 내의 응집구조가 변형됨을 보인 바 있다. 그 결과 최대 30%의 국부 마찰 저감 효과를 확인하였다. 이를 외부경계층 수직날 배열(Outer-layer vertical blades array)라고 칭하는데, 최근 Park 등⁽³⁾의 예인수조 시험에 따르면 Fig. 1 과 같

† Corresponding Author, inwon@pusan.ac.kr

이 국소마찰저항 뿐만 아니라 마찰항력 또한 최대 9.6% 감소하며 수직 날의 최적 높이 및 횡방향 간격은 경계층 두께에 의한 외부 축척(outer scaling)을 따르는 것으로 조사되었다. 이는 내부 축척 (inner scaling)을 따르는 리블렛⁽⁴⁾ 보다 선박, 항공기와 같은 고 Reynolds 수 환경에서의 공학적 응용에 유리한 장점을 지닌다.

Park 등⁽⁵⁾은 회류 수조에서 PIV 계측을 통하여 수직 날 배열에 의한 국부 마찰저항 감소량을 제시하였는데, Fig. 2 와 같이 수직 날 평면 (z00) 에서는 평균 2.73%, 수직 날 중간 평면 (z06) 에서는 평균 7.95% 의 국소 마찰저항 저감효과가 조사되었다. 국소마찰저항 및 마찰항력 저감의 원인은 수직평판들에 의하여 내부 유동과 외부 유동의 연결이 방해되어 난류 파열의 강도와 횡수가 감소되는 현상으로 추정된다.

본 연구는 Park 등⁽⁵⁾에 의한 선행연구의 연장으

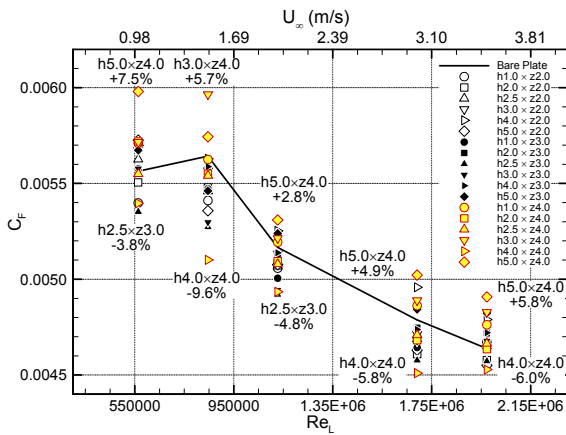


Fig. 1 Skin-frictional drag coefficient versus Re for flat plate with blades array (Park et al. ⁽³⁾)

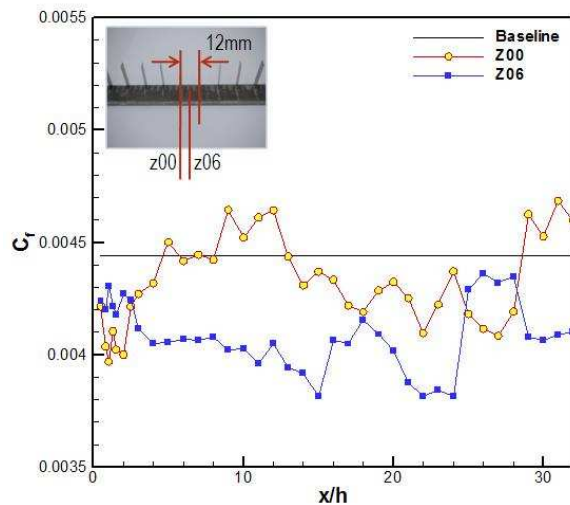


Fig. 2 Streamwise development of local skin friction coefficient (Park et al. ⁽⁵⁾)

로서, 시간분해 입자영상유속계(time-resolved PIV) 로 측정된 비정상 유동장에 적합적분해(POD: Proper Orthogonal Decomposition) 해석 기법을 적용하여 수직 날 배열이 비정상 난류 경계층 응집구조에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 실험방법

2.1 외부 경계층 수직 날과 시험부

수직 날 주위 난류 유동구조 관측을 위하여 Fig. 3 과 같이 2 차원 회류수조를 사용하였다. 본 회류 수조는 2 차원 채널유동을 발생하는 장치로서 제원은 길이 9m, 높이 1.5m, 폭 0.6m 이며 관측단면의 크기는 0.4m × 0.16m 이다. 채널 유동은 원심 펌프에 의하여 구동되며, 유속은 모터의 회전수를 인버터로써 조절한다. 회류수조에 장착된 수직 날은 두께 0.2mm 의 얇은 직사각형 스테인리스 스틸 판을 잘라 조립하였다. Fig. 4 에서는 수직 날의 형태와 회류수조에 장착된 외부 경계층 수직날의 모습을 나타내고 있다. 수직 날의 높이와 간격은 각각 $h/\delta = 0.312$ ($h^+ = 393$), $z/\delta = 0.187$ ($z^+ = 236$) 에 해당된다. 본 연구에서는 Dantec Dynamics 사의 시간분해 입자영상유속계(Time-Resolved PIV)를 사용하였는데, 입자를 조명하는 레이저는 Lee 사의 다이오드 펌프형 Nd:YAG 레이저(LDP-100MQG)로서 파장과 펄스당 에너지가 각각 532nm, 11mJ 이며 10~20kHz 의 주파수를 주사할 수 있다. 영상 획득에 사용된 고속 CMOS 카메라(NanoSense MK.III)는 10bit 해상도 및 1,280×1,024 픽셀 해상도를 가지며, 최대 초당 1,040 의 영상처리가 가능하다. 또한, 평균 직경이 10 μm인 중공 유리 입자(hollow glass particle)를 사용하였다.

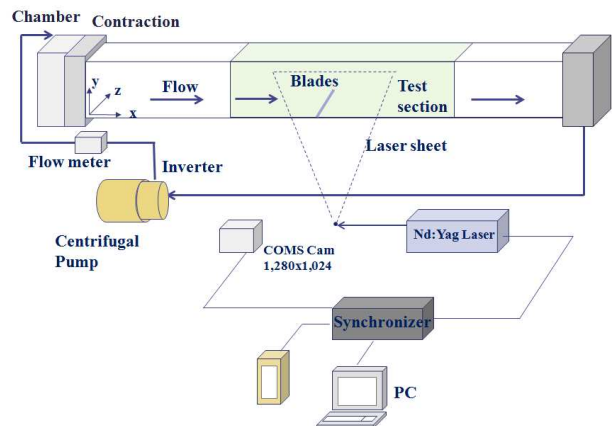
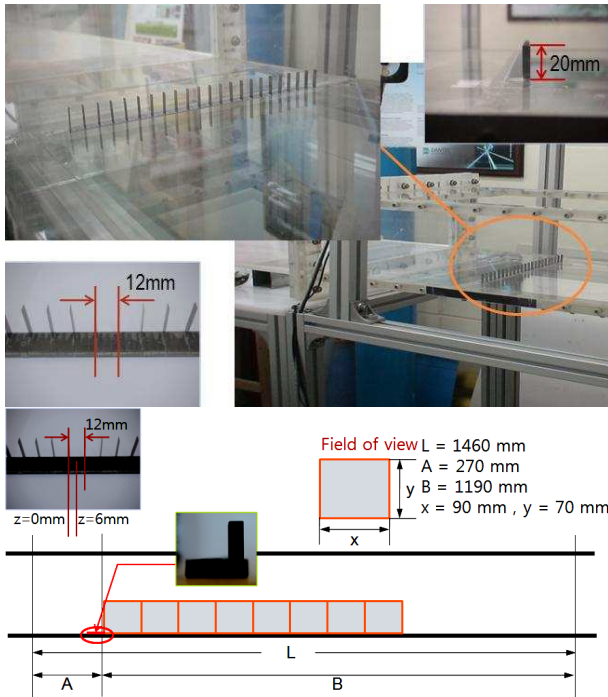


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Measurement conditions

	u_{avg} (m/s)
$h^+ = 393$	$u_{avg, xy}$
xy(BL)	0.445
xy-z00	0.435
xy-z06	0.482
$z^+ = 0$	$u_{avg, xz}$
xz(BL)	0.459
xz-y09	0.482

**Fig. 4** Vertical blades array installed in the test section

모든 PIV 측정에서는 400 쌍의 입자영상을 취득하였는데, 프레임율(frame rate)는 50Hz, 입자영상 쌍 사이의 시간간격(time separation)은 1,000 μ s 로 유지되었다. 탐색영역 크기는 32 \times 32 픽셀과 50% 중첩이 허용되었고, 입자 변위의 시계열은 상호상관(cross correlation) 알고리즘으로 계산되었다.

PIV 측정영역은 Fig. 4 에 도시된 것처럼 하류방향, 높이방향 그리고 폭방향을 각각 x , y , z 으로 한 좌표계를 중심으로 2 차원 xy 평면과 xz 평면으로 나누어 측정하였다. 수직날 배열의 폭 방향 간격은 12mm 를 이루고 있다. xy 평면은 두 가지 경우로 나누었는데, 수직날 사이의 중간 평면 ($z06$) 과 수직날 평면 ($z00$)을 각각 조사하였다. 하류 방향으로는 $0 \leq x/h \leq 32$ 까지의 범위를 8 개로 나누고 그 중에 첫번째 구간 즉, 수직날의 바로 뒤의 위치인 $0 \leq x/h \leq 4$ 구간에서의 유동의 양상과 거동을

점검하였다. 하나의 관측영역의 크기는 높이 $H = 70\text{mm}$ ($H^+ \approx 1370$), 길이 $L = 90\text{mm}$ ($L^+ \approx 1,760$)이며, 이는 하류방향으로 수직날 높이의 4h 범위를 탐색하기 위하여 설정되었다.

또한 높이 방향으로는 동일한 관측영역에서 벽면으로부터 높이 방향으로 $y = 9\text{mm}$ 떨어진 지점의 xz 평면을 측정하여, 채널 유동의 폭방향(spanwise) 양상을 파악하였다. 이 경우 무차원 높이 $y^+ \approx 220$ 에 해당되며 이 높이는 완충층과 중첩층 사이가 된다.

본 실험에서 설정된 유량 평균유속 u_m 은 전체 실험과정에서 0.5m/s 로 일정하게 유지되었고, 동일한 유속에서 수직날을 장착하지 않은 기준유동(BL)과 수직날을 장착한 유동($z00$, $z06$, $y09$)으로 나누어 수행되었다. 본 연구에서는 xy 평면상 수직날의 높이에서의 평균 속도 $u|_{y^+=393} = u_{avg, xy}$ 와 xz 평면으로 채널유동의 폭방향 중간지점에서의 평균 속도 $u|_{z^+=0} = u_{avg, xz}$ 를 특성속도로 하고 관측영역 길이 $L_{field} = 90\text{mm}$ 를 특성길이라고 정의하였다. Table 1 에 각 실험조건에 대응되는 지점의 평균속도를 요약하였다.

2.2 적합직교분해 (POD)

적합직교분해 기법은 실험이나 시뮬레이션 등에서 얻은 고차의 공간함수의 데이터 앙상블에서 최적의 저차 직교기저를 추출하는 방법으로 Karhunen⁽⁶⁾에 의하여 소개되었다. 이후 Berkooz 등⁽⁷⁾은 유동장의 응집구조를 표현하는데 이 분석 기법을 사용하였고, 현재 유동의 응집구조 파악을 위한 기법으로 광범위하게 사용되고 있다. 이 기저 함수는 지배적인 구조를 대표하는 공간 함수의 POD 분해를 통하여 얻을 수 있다. 공간 속도장은 다음과 같이 평균속도와 변동속도(fluctuation part)로 분해를 할 때, 변동속도는 n 개의 기저함수로 투영이 가능하다.

$$u(x, t) = U(x) + u'(x, t), \quad u'(x, t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \phi_i(x) \quad (1)$$

이때 직교 기저함수 $\phi_i(x)$ 는 다음의 적분방정식의 계산을 통하여 얻어진다.

$$\int R(x, x^*) \phi_i(x^*) dx^* = \lambda_i \phi_i(x) \quad (2)$$

여기서, $R(x, x^*)$ 는 속도의 자기상관함수를 의미하며, 본 연구에서는 적분커널의 계산을 위하여 Sirovich⁽⁸⁾에 의해 제안된 스냅샷(snapshot) 방법을 채택하였다. 이 경우 기저함수는 아래와 같이 나타낼 수 있으며, 유동장의 POD 모드를 대변한다.

$$\varphi_i = \frac{1}{M\lambda_i} \sum_{m=1}^M a_m^{[i]} (u^m - u_0) \quad (3)$$

이산화 시간 영역에서 M 개의 스냅샷을 이용하는 스냅샷 방법은 위 적분방정식의 직접적인 계산과정에서 필요한 시간을 크게 단축할 수 있다.

3. 실험결과

3.1 전체 유동특성

이 절에서 나타난 유동장은 흐름방향에 평행인 xy 평면과 수직인 xz 평면에서 측정되었으며, 각각의 평면에서 외부경계층 수직날을 장착하지 않은 흐름과 수직날을 장착한 흐름을 나타내고 있다. 전반적으로 2 차원 채널유동의 특성을 잘 반영하고 있다. 시간변화에 따른 변동속도의 관찰을 하면 기준유동과 z06 유동의 경우, 수직날에 의한 후류가 발견되지 않으나 z00 유동의 경우에는 수직날의 높이에 해당하는 $y^+ \approx 390$ (20mm)에서 후류가

관찰된다. Fig. 5(a)는 수직 날을 장착하지 않은 기준유동에서의 순간 유동장 $(u/u_\tau, v/u_\tau)$ 의 벡터도 및 흐름방향 속도의 변동성분 u'/u_τ 의 등고선도를 나타내고 있으며, (b)에서는 주유동과 함께 하류로 대류되는 난류구조를 파악하기 위하여 변동속도 성분 $(u'/u_\tau, v'/u_\tau)$ 의 벡터도를 도시하였다.

기준 유동의 레이놀즈 수는 $Re_\theta \approx 300$ 이며, 변동속도 벡터 그림을 통하여 분출(ejection)/쓸림(sweep), 전단층과 같은 채널유동의 조직구조⁽⁹⁾를 확연하게 확인할 수 있다. 수직 날을 장착한 xy 평면(z00) 의 결과 역시 Fig. 6에 도시 하였다. 이 경우도 마찬가지로 난류 유동장의 특성을 잘 나타내 주고 있는데, 수직 날의 존재로 인하여 기준유동에 대비하여 수직 날의 후류로 인한 유동의 흐름 패턴이 바뀌는 현상은 볼 수 있으나, 여전히 난류구조의 특징적인 모습을 볼 수 있으므로 조직 구조의 큰 변화는 관찰할 수 없다.

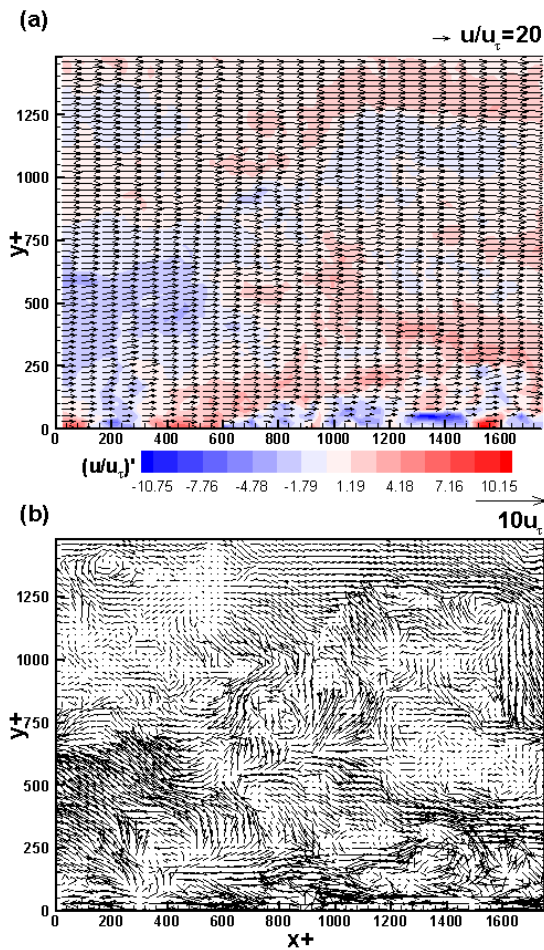


Fig. 5 Flow field of baseline case in xy(BL) plane; (a) vector plot of instantaneous velocity and contour plot of streamwise velocity fluctuations, (b) vector plot of fluctuating velocity

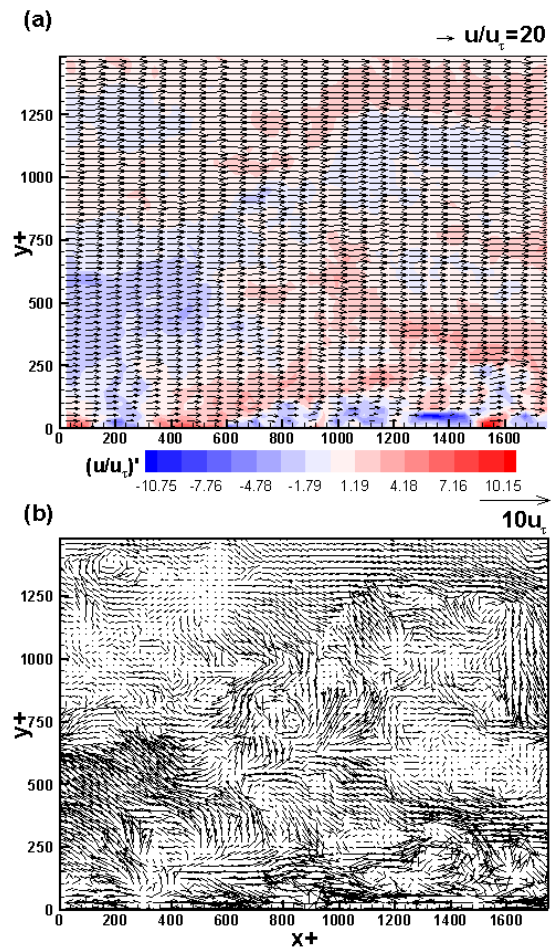


Fig. 6 Flow field of blade case in xy-z00 plane; (a) vector plot of instantaneous velocity and contour plot of streamwise velocity fluctuations, (b) vector plot of fluctuating velocity

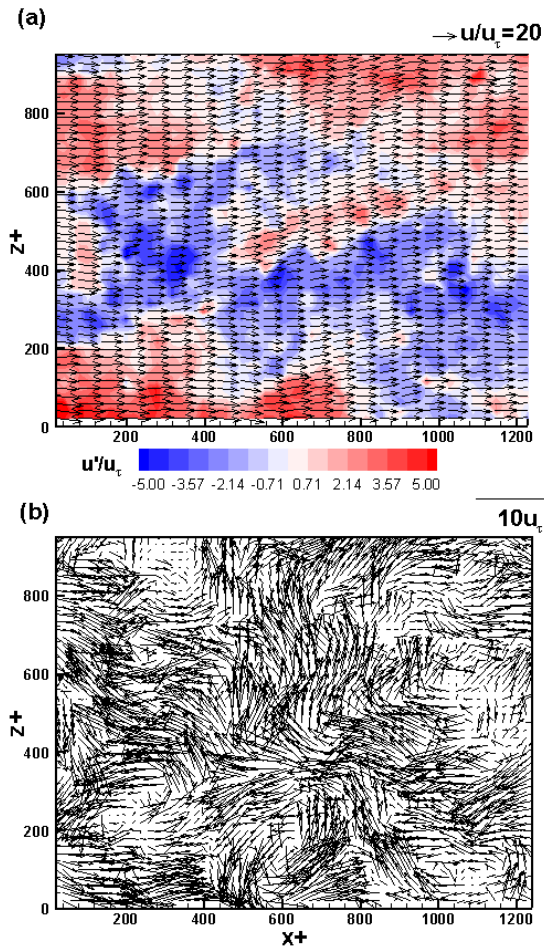


Fig. 7 Flow field of baseline case in xz (BL) plane; (a) vector plot of instantaneous velocity and contour plot of streamwise velocity fluctuations, (b) vector plot of fluctuating velocity

Fig. 7에서는 수직 날이 장착되지 않은 기준유동의 흐름방향과 폭방향의 유동장을 위에서 아래 방향으로 관찰한 xz 평면상의 공간유동을 표현하고 있다. 순간속도장, 변동속도 벡터 그리고 변동속도의 등고선도를 각각 나타내고 있다. Fig. 8은 수직날이 설치된 경우 바닥면으로부터 $y^+ \approx 220$ (9mm) 떨어진 지점 xz 평면상의 유동장을 표시하고 있다.

Fig. 8(b)에 도시된 순간속도벡터 성분의 등고선도를 통하여 기준유동과 수직 날 변형유동 모두에서 흐름방향으로 띠무늬 구조(streak structure)를 확인할 수 있다. Fig. 7과 같이 띠무늬 구조가 전 영역에 걸쳐서 넓게 분포되어 있는 기준유동과는 달리, Fig. 8의 수직 날 $y09$ 평면의 경우, 변동속도 성분의 세기와 간격이 하류 방향으로 갈수록 약해지고 있으며, z 방향 속도 성분이 수직 날 유동에서는 잘 보이지 않고, 길게 늘어진 모습으로 나타나고 있다. 이는 외부경계층 수직 날의 존재로

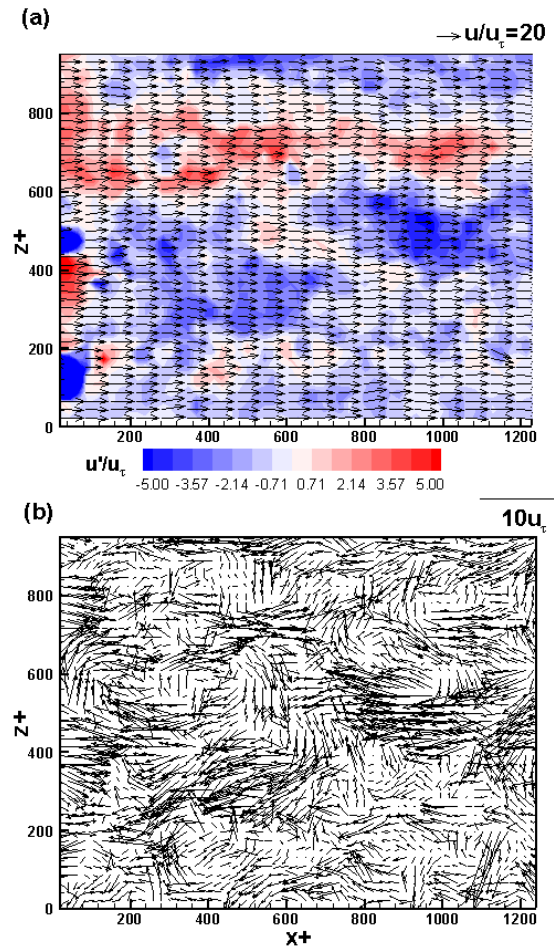


Fig. 8 Flow field of blade case in xz - $y09$ plane; (a) vector plot of instantaneous velocity and contour plot of streamwise velocity fluctuations, (b) vector plot of fluctuating velocity

인하여 난류 조직구조가 변형이 되고 구조의 성장이 억제되어 횡방향의 모멘텀 교환에 방해가 되기 때문이다.

보다 자세한 관찰을 위하여 다음절에서 기술한 바와 같이, 흐름방향 공간함수에서 순간속도장을 제거한 변동속도 성분을 스냅샷으로 하는 공간 유동장에 대하여 POD 해석을 수행하였다. 이를 통하여 각 고유모드에서 나타나는 지배적인 난류구조를 추출하였다

3.2 POD 해석결과

POD 해석에서 고유값(eigenvalue)은 각각의 고유모드 (eigenmode)에서의 에너지 점유율을 대변한다. Fig. 9(a)에서 xy 평면에서 기준유동과 xy - $z00$, xy - $z06$ 평면의 고유값과 고유모드별 누적 상대 에너지 분포를 비교 도시하고 있다.

Fig. 9(a)의 기준 유동은 1, 2 차 모드의 에너지

점유율이 각각 15.8%, 7.6%로 나타났으며, 전체 400 차 모드를 기준으로 1~9 차 모드까지의 누적 에너지는 전체의 43.7%를 차지하고, 9 차모드 이후 1% 이내로 완만히 감소하고 있다. 이는 xy-z00 평면의 경우에는 1, 2 차모드의 에너지 점유율이 각각 10.4%, 8.2%, 그리고 1~9 차 모드까지의 누적 에너지는 39.5% 를 차지하여 기준 유동에 비하여 저차 모드의 에너지 점유율이 낮아지고 있다. 반면, z06 평면의 경우는 다소 다른 양상을 보이고 있다. 1 차모드의 에너지는 27.0%로 xy-z00 평면보다 2 배 이상 높고, 9 차모드까지의 누적합도 53.6%에 달해 기준유동 및 xy-z00 에 비하여 10% 이상 높은 값을 보이고 있다. 이는 z00 평면에서는 유동이 수직날 바로 뒤에 놓여서 대형와구조의 성장이 억제되는 데 반하여, z06 에서는 난류 조직구조가 기준유동보다 더 발달함을 의미한다. 이 같은 현상은 이후 Figs. 10-12 의 모드별 POD 계수 및 와 구조에서도 구분할 수 있다.

Fig. 2 의 선행연구 결과에서 보는 바와 같이, 하류방향의 전체영역에서는 xy-z06 평면에서 측정된 표면마찰항력 저감 효과가 5% 정도 우위를 보이고 있으나 수직날 직후의 영역 $0 \leq x/h \leq 4$ 에서는 xy-z00 평면의 경우가 1.7% 높은 국소마찰저항 저감효과를 보이고 있다. 본 실험에서 조사된 영역이 $0 \leq x/h \leq 4$ 임을 감안 할 때 1 차 모드의 에너지 값의 차이는 이러한 현상을 반영한다고 할 수 있다. 한편, Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 xz 평면의 경우는 기준유동에서 1, 2 차 모드의 에너지 점유율이 10.6%, 6.8%로 그리고 xz-y09 평면에서 11.4%, 6.6%로 비슷한 분포를 보이고 있다. 그러나 Fig 9 (b)에 도시된 모드별 누적 에너지 합은 xz-y09 평면의 유동이 기준유동보다 대략 5%가량 낮다. 앞서 언급한 xy 평면 상의 유동관측 결과는 수직 날과의 상대적인 횡방향 위치에 따라서 저차 POD 모드로 대변되는 조직구조의 발달양상이 다르게 나타났으나, xz 평면상에서 볼 때에는 수직날에 의하여 조직구조의 발달이 전반적으로 저해됨을 알 수 있다.

Fig. 10~12 에서는 xy 평면에서 유동별로 1~9 차 모드까지 고유모드별 POD 계수와 POD 속도 벡터를 도시하였고 Fig. 13 에서는 xz 평면의 POD 유동장을 수직방향 와도와 함께 비교 도시하였다. 앞서 기술한 바와 같이 기준유동 (Fig. 10)과 xy-z06 유동 (Fig. 12)의 경우, POD 모드가 전체적으로 유사하며, 특히 4 차모드 이하에서 매우 유사한 구조를 보인다. 반면 xy-z00 유동 (Fig. 11)의 경우에서

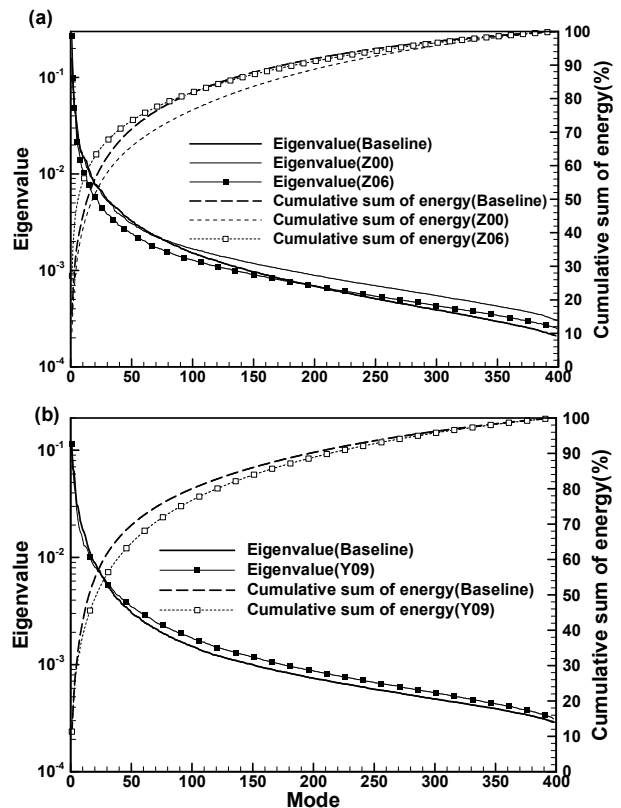


Fig. 9 Eigenvalue versus eigenmode; (a) xy plane, (b) xz plane

는 3~6 차 모드가 기준유동과 상이한 공간적 특성을 나타내고 있다.

Fig. 14 에서는 모드별 POD 계수를 통하여 지배적인 저차모드에서의 무차원 주파수를 도시하였다. 무차원 주파수는 $fZ/u_{avg,xy}$ 로 정의하였다. 모드가 증가할수록 기준유동과 xy-z00 유동의 패턴은 비슷한 반면, xy-z06 의 경우는 다소 차이를 보인다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 xy-z00 유동에서의 와 변형이 적음을 암시한다. 에너지가 가장 큰 1 차모드에서는 기준유동, xy-z00 및 xy-z06 유동에서 각각 0.12, 0.20 그리고 0.05 으로 나타났다. 3 차모드를 제외하고 xy-z00 의 주파수와 xy-z06 의 주파수가 현저한 차이를 보이고 있다.

이와 같이, POD 모드의 관찰을 통하여 수직날에 의하여 난류 조직구조가 변형되어 마찰저항 생성 기구에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 외부 경계층 수직 날에 의한 항력저감 성능 및 마찰저항 저감 기구에 대한 실험적 평가를 수행하였다. 회류수조에서 PIV 계측을 통하

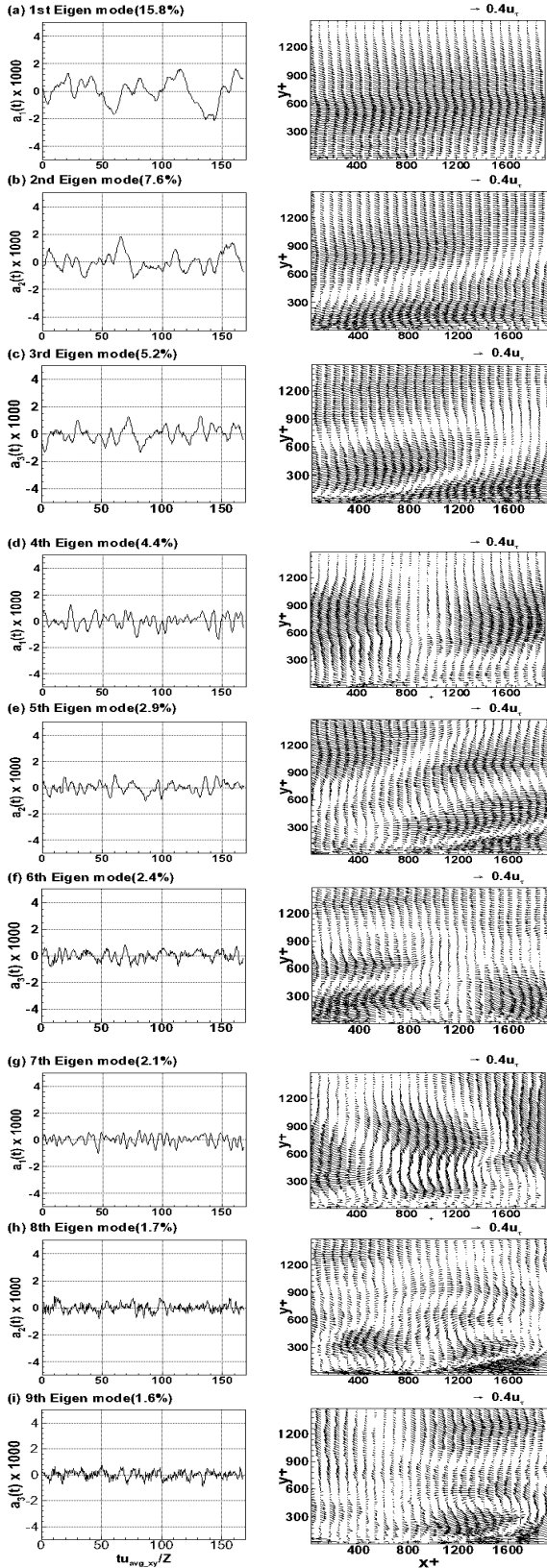


Fig. 10 POD coefficient and POD mode vector of baseline case in $xy(BL)$ plane; (a) 1st mode, (b) 2nd mode, (c) 3rd mode, (d) 4th mode, (e) 5th mode, (f) 6th mode, (g) 7th mode, (h) 8th mode, (i) 9th mode

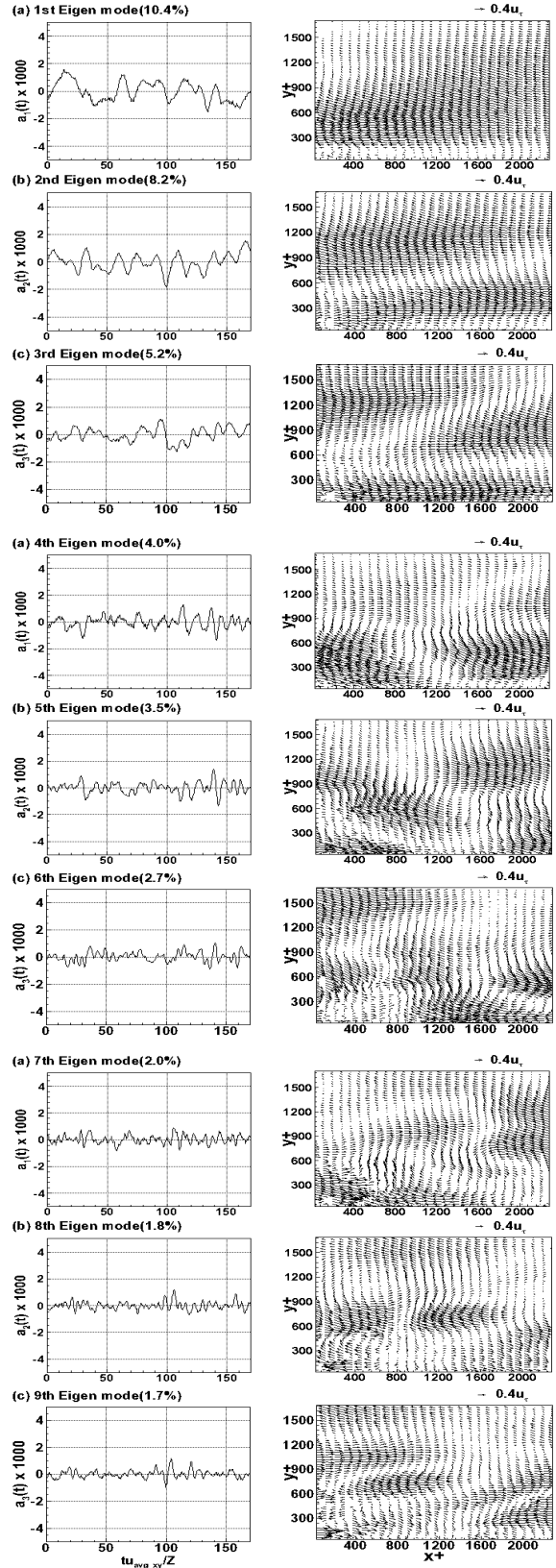


Fig. 11 POD coefficient and POD mode vector of blade case in $xy-z00$ plane; (a) 1st mode, (b) 2nd mode, (c) 3rd mode, (d) 4th mode, (e) 5th mode, (f) 6th mode, (g) 7th mode, (h) 8th mode, (i) 9th mode

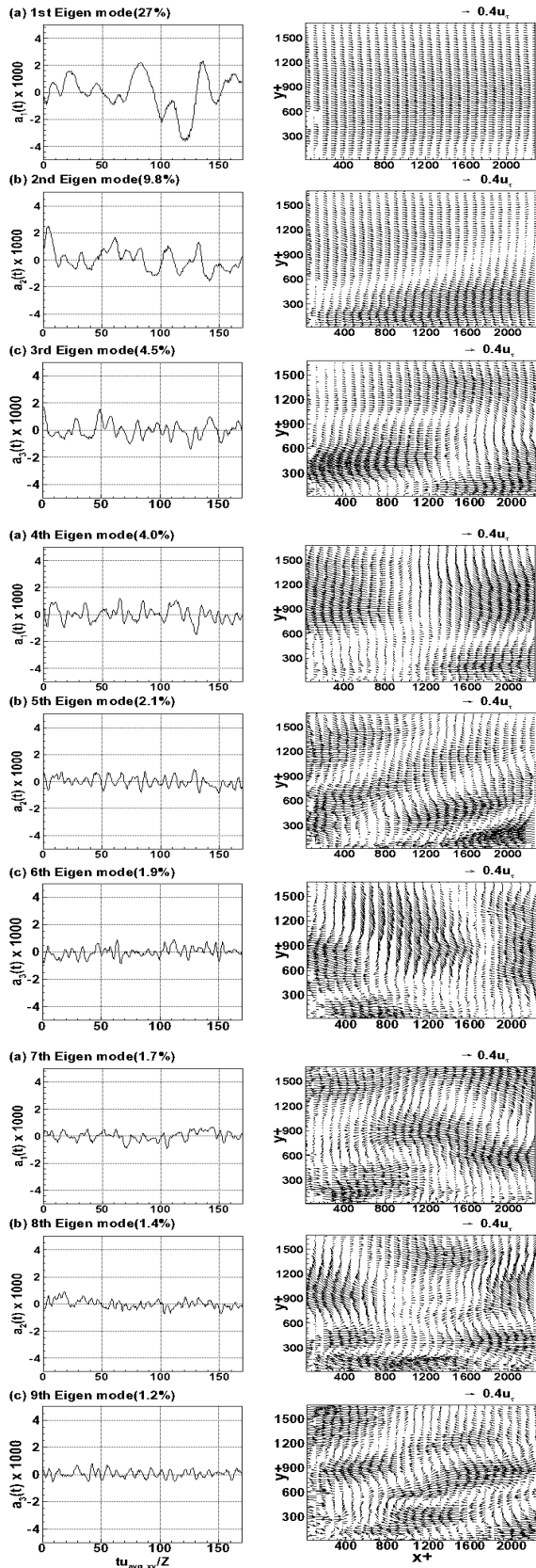


Fig. 12 POD coefficient and POD mode vector of blade case in xy-z06 plane; (a) 1st mode, (b) 2nd mode, (c) 3rd mode, (d) 4th mode, (e) 5th mode, (f) 6th mode, (g) 7th mode, (h) 8th mode, (i) 9th mode

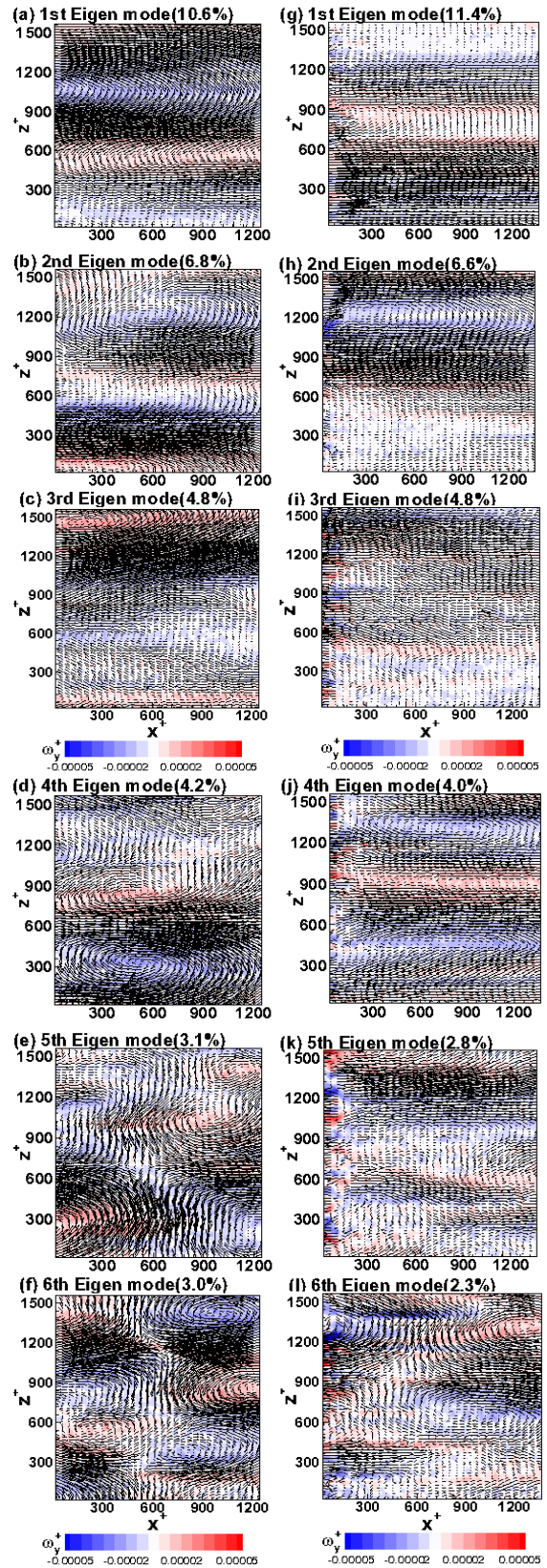


Fig. 13 Comparison of POD mode vectors and vorticity contours of baseline case in xz(BL) plane and blade case in xz-y09 plane; (a, g) 1st mode, (b, h) 2nd mode, (c, i) 3rd mode, (d, j) 4th mode, (e, k) 5th mode, (f, l) 6th mode

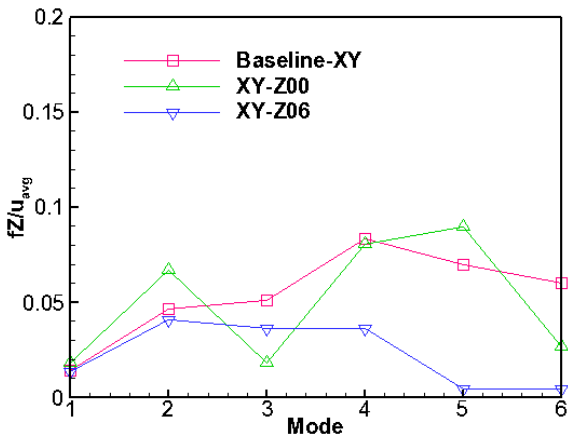


Fig. 14 Normalized frequency of POD coefficient versus eigenmode

여 수직 날에 의한 난류유동의 변화를 실시간으로 계측, 이를 바탕으로 적합직교분해(POD) 기법을 통하여 마찰저항저감 기구의 실험적 평가를 수행하였다. POD 해석 결과 전반적으로 수직 날이 설치될 경우 유동 저차 모드의 에너지 집중도가 저하되는 것으로 나타났다. 또한 수직 날 사이 공간에서 POD 모드와 POD 계수의 주파수가 기준 유동과 달라지는 경향을 확인하였다. 이로부터 수직 날 사이 영역에서는 난류 조직구조에 큰 변형이 생겨서 기준 유동과는 크게 다른 유동 패턴이 생겼음을 알 수 있다. 이러한 결과는 수직 날 배열에 의하여 난류 조직구조의 성장이 억제되어 횡방향의 모멘텀 교환에 방해가 되는 마찰저항 저감 기구를 뒷받침한다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Schoppa, W. and Hussain, F., 1998, "Genesis of Longitudinal Vortices in Near-Wall Turbulence," *Meccanica*, Vol. 33, pp.489~501.
- (2) Hutchins, N., 2003, "An Investigation of Larger-Scale Coherent Structures in Fully Developed Turbulent Boundary Layers," Ph.D. Thesis, University of Nottingham.
- (3) Park, H., An, N. H., Hutchins, N., Choi, K-S., Chun, H. H. and Lee, I., 2011, "Experimental Investigation on the Drag Reducing Efficiency of the Outer-Layer Vertical Blades," *Journal of Marine Science Technology*, Vol. 16, pp. 390~401.
- (4) Beckert, D. W. and Bartenwerfer, M., 1989, "The Viscous Flow on Surfaces with Longitudinal Ribs," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 206, pp.105~129.
- (5) Park, H., An, N. H., Park, S. H., Chun, H. H. and Lee, I., 2011, "PIV Investigation on the Skin Friction Reduction Mechanism of Outer-Layer Vertical Blades," *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 9, pp. 20~28.
- (6) Karhunen, K., 1946, "Zur Spectral Theorie Stochastischer Prozesse," *Annales Academiae Scientiarum Fennicae Series A*, Vol.1, p.34.
- (7) Berkooz, G., Holmes, P. and Lumley, J., 1993, "The Proper Orthogonal Decomposition in the Analysis of Turbulent Flows," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.25, pp.539~575.
- (8) Sirovich, L., 1987, "Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 45, No. 3, pp.561~590.
- (9) Adrian, R. J., Meinhart, C. D. and Tomkins, C. D., 2000, "Vortex Organization in the Turbulent Boundary Layer," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 422, pp.1~54.