

스테레오 시간분해 입자영상유속계를 이용한 외부경계층 수직날 배열에 의한 마찰저항 저감 기구에 관한 실험적 조사

Experimental Investigation on the Drag Reduction Mechanism of Outer-layer Vertical Blades Array using Stereoscopic Time-Resolved PIV

이인원* · 박성현** · 전호환*** · 황아롬**** · 안남현*****†

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

(접수일 : 2013년 08월 28일, 수정일 : 2013년 09월 26일, 채택확정 : 2013년 09월 26일)

Abstract: A stereo PIV measurements in a circulating water channel has been performed to investigate the skin friction reduction mechanism of the outer-layer vertical blades first devised by Hutchins. In a recent PIV measurement study, considerable skin friction reduction was achieved as much as 2.73%~7.95% by outer-layer vertical blades array. In the present study, the influence of vertical blades array upon the characteristics of the turbulent coherent structures was analyzed by proper orthogonal decomposition method. It is observed that the vortical structures are cut and deformed by blades array and also the turbulent intensity and the Reynolds stress were weakened by the blades. These phenomena strongly associate the skin-friction drag reduction mechanism in the turbulent boundary layer flow.

Key Words : Drag reduction, Outer-layer vertical blades, POD analysis, Stereoscopic time-resolved PIV

1. 서 론

마찰항력을 줄이기 위한 노력은 많은 공학적 응용분야에서 꾸준히 추구하고 있는데, 특히 선박, 항공기 그리고 자동차와 같은 수송기계 분야에서 마찰항력을 줄이는 것은 경제적으로 많은 이점이 있다. 이런 이유로 마찰항력저감 기법과 관련한 연구들이 많이 진행되었다. 일반적으로 마찰항력

의 증·감 유무는 난류유동의 특성과 밀접한 관련이 있다. 난류유동에서 발생하는 여러 가지 이벤트 중 쓸림(sweep) 운동과 횡방향 모멘텀 교환은 마찰항력 유발 인자로 지목되고 있다. Schoppa등¹⁾은 난류 경계층에서 형성되는 와 구조의 적절한 제어가 표면마찰 항력 저감에 영향을 줄 수 있다고 한 바 있으며, Hutchins²⁾는 난류경계층 내에서 생성되는 응집구조(coherent structure)가 마찰항력

***** 안남현(교신저자) : 거제대학교 조선해양공학과
E-mail : namhyun@koje.ac.kr, Tel : (055)680-1604
*이인원 : 부산대학교 조선해양플랜트 글로벌핵심연구센터
**박성현 : 부산대학교 조선해양공학과 대학원
***전호환 : 부산대학교 조선해양플랜트 글로벌핵심연구센터
****황아롬 : 거제대학교 조선해양공학과

***† Nam-Hyun An (corresponding author) : Department of Shipbuilding and Marine Engineering, Koje College.
E-mail : namhyun@koje.ac.kr, Tel : (055)680-1604
*Inwon Lee : GCRC-SOP, Pusan National University
**Seong-Hyeon Park : Dept. of NAOE, Pusan National University
***Ho-Hwan Chun : GCRC-SOP, Pusan National University
****Arom Hwang : Dept. of Shipbuilding and Marine Eng., Koje College.

의 증·감에 영향을 줄 수 있다고 판단하였다. 이의 검증에 위하여 난류 경계층 근방에 흐름방향으로 수직하고 가지런한 얇은 수직 평판 배열(outer-layer vertical blades array)을 부과하는 방법으로 난류 응집구조가 변형되는 현상을 관찰하였다. 이때 수직날을 장착하지 않은 경우와 비교하여 수직날 하류방향에서 최대 30%의 국부마찰저감(local skin friction reduction) 효과를 확인하였다. 최근 외부경계층 수직날의 최적 높이 h 및 횡방향 간격 z 를 체계적으로 변화시키면서 평판의 전체저항을 계측한 예인수조 시험 결과³⁾에 따르면, 수직날로 인하여 평판의 전 마찰항력(global friction drag)이 최대 9.6% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 수직날을 이용한 회류 수조 시험 결과에 의하면, 수직날 평면(Z00)과 수직날 중간 평면(Z06)의 PIV 계측을 통하여 수직날 배열에 의한 국부 마찰저항 감소량을 제시하였는데, 수직날 평면(Z00)과 수직날 중간 평면(Z06)에서 약 2.7%와 7.9%의 국소 마찰저항 저감효과가 있는 것으로 각각 조사되었다⁴⁾(Fig. 1 참조). 이는 수직날 배열이 마찰저항 저감에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하고 있다.

선행연구^{2~4)}에서는 외부경계층 수직날이 국부 마찰저항을 줄이는 역할을 한다는 것을 확인하였고, 이러한 마찰저항의 감소효과가 공학적으로 유용한 평판의 전 저항 감소에 기여한다는 사실 또한 밝히고 있다. 본 연구에서는 3차원 스테레오 PIV 기법을 이용하여 수직날 설치 유·무에 따른

하류방향의 난류유동을 비교 관찰하였으며, 측정된 유동장의 고유모드를 적합적교분해 해석 기법을 이용하여 추출하였다.

2. 실험방법

2.1 수직날과 입자영상유속 실험 장치

Fig. 2에서는 난류 유동구조 관측을 위한 길이 9m, 높이 1.5m, 폭 0.6m 그리고 두께 15t의 아크릴로 구성된 2차원 채널발생장치를 나타내고 있다. 테스트 영역의 크기는 폭 0.4m, 높이 0.16m이며, 아크릴 수조 본체와 물의 굴절율에 따른 보정을 위하여 채널 좌우 방향에 2개의 아크릴 프리즘(굴절율 1.5, 각도 39.3°)을 제작하였다. 채널유동은 원심 펌프에 의하여 구동되며, 유속은 인버터로 조절된다. 변동유량은 0.7% 이하이며, 실험 전 과정에서 평균유속은 0.5m/s로 고정되었다.

회류수조에 장착된 수직날은 두께 0.2mm의 얇은 직사각형 스테인리스 스틸 판이며, 높이 h 와 간격 z 은 20mm와 12mm로서 수직날 높이와 간격은 경계층 두께 δ 와 벽면전단 응력 u_τ 를 이용하여 무차원하였다. 이때 수직날 높이는 $h/\delta=0.312$ ($H=373$)이다. PIV 측정에는 Dantec Dynamics사의 스테레오 시간분해 입자영상유속계를 사용하였는데, 입자를 조명하는 레이저는 Lee사의 다이오드 펌프형 Nd:YAG 레이저(LDP-100MQG)로서 파장과 펄스당 에너지가 각각 532nm, 11mJ이며 10~20kHz

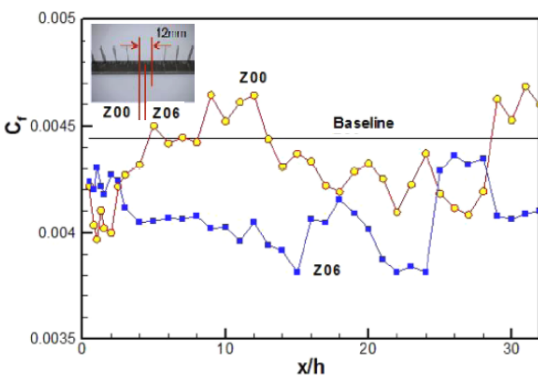


Fig. 1 Streamwise development of local skin friction coefficient (Park et al.³⁾)

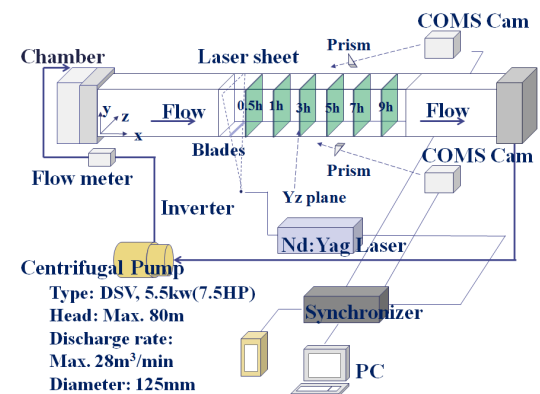


Fig. 2 Schematic diagram of Stereo-PIV setup

의 주파수를 주사할 수 있다. 영상 획득에 사용된 2대의 고속 CMOS 카메라는 Phantom (VRI-V210-86G-MAG-C)로서 최대 프레임율이 2,190Hz이고 1,280×800 픽셀 해상도를 가지며, 8G의 내부 메모리를 가진다.

PIV 측정영역은 하류방향, 높이방향 그리고 폭 방향을 각각 x, y, z로 한 좌표계를 중심으로 하고 측정하는 yz 평면은, Fig. 2에 도시된 바와 같이 채널유동의 하류방향으로 6가지 구간을 나누어 유동의 양상과 거동을 점검하였다. 이는 수직날의 높이의 0.5, 1, 3, 5, 7, 9배에 해당한다. 즉, $0.5 \leq x/h \leq 9$ 이다. 관측영역의 높이와 길이는 각각 70mm, 90mm이다.

스테레오 PIV 조사에서는 100Hz의 프레임율로 1024쌍의 입자영상을 획득하였고, 이때 입자영상 간의 시간간격은 1,400 μ s로 유지되었다. 모든 PIV 해석에서의 탐색영역 크기는 32×32 픽셀이며, 75% 중첩이 허용되었다. 입자 변위의 시계열은 적응상관(adaptive correlation) 알고리즘으로 계산되었는데 Table 1에 yz평면에서의 x방향의 평균속도, u_{avg-yz} 와 획득된 이미지들의 지연시간, 프레임율을 요약하였다.

본 실험 전 과정에서 설정된 유량 평균유속 u_m 은 전체 실험과정에서 0.5m/s로 일정하게 유지되

었으며 동일한 유속에서 수직날을 장착하지 않은 기준유동(이하 BL)과 수직날을 장착한 유동(이하, yz-05h, yz-1h, yz-3h, yz-5h, yz-7h, yz-9h)으로 나누어 수행되었다.

2.2 적합직교 분해

적합직교분해(proper orthogonal decomposition, 이하 POD)는 고차의 공간함수 데이터 집단체에서 최적의 저차 직교기저를 추출하는 목적으로 도입이 되었으며⁵⁾ 현재 유동의 응집구조 관찰⁶⁾을 위한 기법으로 널리 사용되고 있다. 즉, 공간함수의 POD 분해를 통하여 난류 고유구조를 지배하는 최적의 기저함수를 얻을 수 있다. 유동장을 평균속도와 변동속도로 분해를 하면, 변동속도는 식(1)과 같이 n개의 기저함수로 투영이 가능하고, 오차

$$E = \left\| \left\| u(x,t) - \sum_{i=1}^n a_i(t)\varphi_i(x) \right\|^2 \right\| \text{가 최소가 된다.}$$

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

$$\int R(x,x^*)\varphi_i(x)dx = \lambda\varphi_i(x) \quad (2)$$

여기서, $R(x,x^*)$ 속도의 자기상관함수를 의미하며, 유동장의 POD 모드를 대변한다. 직교 기저함수 φ_i 는 식(2)의 적분 방정식을 계산함으로써 해결되는데, 적분방정식의 빠른 계산을 위하여 스냅샷(snapshot) 방법⁷⁾을 채택하였다. 이 방법은 유한한 M개의 앙상블을 스냅샷으로 하기 때문에 적분방정식의 직접적인 계산과정에서 소모되는 시간을 상당히 단축할 수 있다. 본 연구에 사용된 스냅샷은 1024장의 데이터 앙상블이다.

3. 실험결과

3.1 수직날 장착 전후의 채널 유동장

Fig. 3에서는 채널유동의 흐름방향에 따른 수직날 후류의 비정상 난류구조를 파악하기 위하여 수직날 높이의 0.5배 하류방향의 지점인 $x/h \sim 0.5$ 위치에서의 yz평면에 나타난 변동 속도장 벡터와 흐름방향의 변동속도의 등고선도를 나타내고 있으

Table 1 Measurement condition

yz plane	u_{avg-yz} (m/s)	Delay	Frame
		time(μ s)	rate(Hz)
Base line			
yz-0.5h	0.51	1,400	100
yz-1h	0.49	1,400	100
yz-3h	0.46	1,400	100
yz-5h	0.49	1,400	100
yz-7h	0.47	1,400	100
yz-9h	0.49	1,400	100
Blade			
yz-0.5h	0.47	1,400	100
yz-1h	0.46	1,400	100
yz-3h	0.47	1,400	100
yz-5h	0.48	1,400	100
yz-7h	0.45	1,400	100
yz-9h	0.47	1,400	100

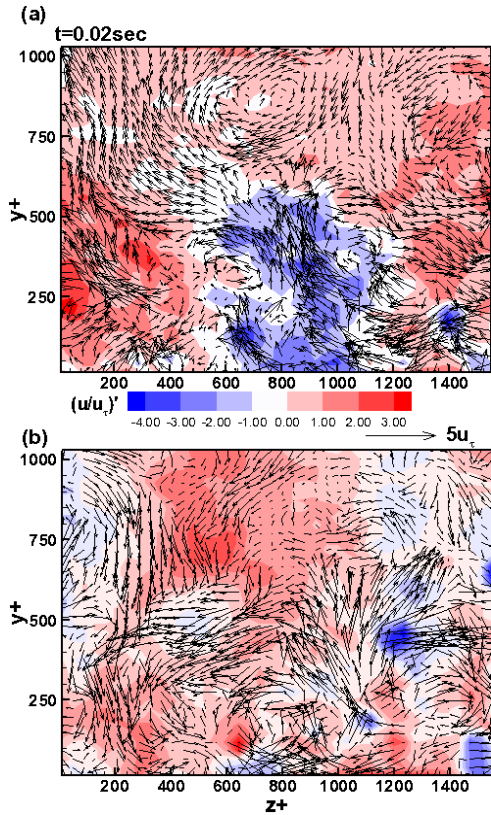


Fig. 3 Vector plot of fluctuating velocity and contour plot of streamwise velocity fluctuations; (a) $yz-0.5h$ (BL), (b) $yz-0.5h$ (Blade)

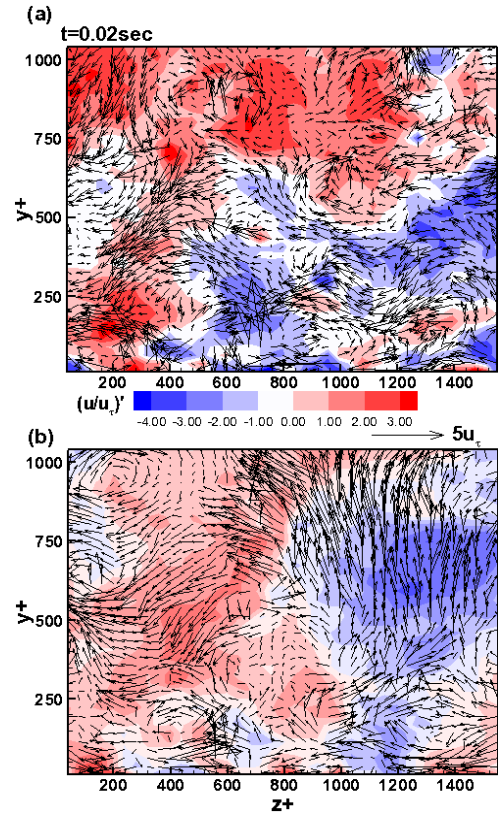


Fig. 4 Vector plot of fluctuating velocity and contour plot of streamwise velocity fluctuations; (a) $yz-9h$ (BL), (b) $yz-9h$ (Blade)

며, 수직날이 설치되지 않은 기준유동과(Fig. 3(a)) 수직날을 설치한 교란유동(Fig. 3(b))의 특성을 비교 도시하였다. 여기서, u_τ 는 벽면전단응력을 의미한다.

난류채널유동의 특징적인 분출(ejection), 쓸림(sweep), 전단층(shear layer) 등의 요소가 yz 평면에서의 와 구조에 잘 드러나 있다. Fig. 4는 하류방향으로 9h 만큼 떨어진 위치에서의 yz 평면의 모습을 볼 수 있다. 두 경우 모두에서 난류 구조의 본질적인 차이는 발견할 수 없으나 수직날로 인하여 난류 유동 구조가 바뀌는 모습은 확인할 수 있다.

Fig. 5는 수직날 설치 여부에 따른 하류 방향 위치를 기준으로 한 흐름방향의 난류 강도, $\sqrt{u'^2}/u_m$ 를 나타내고 있는데, 이때의 높이는 수직날의 설치

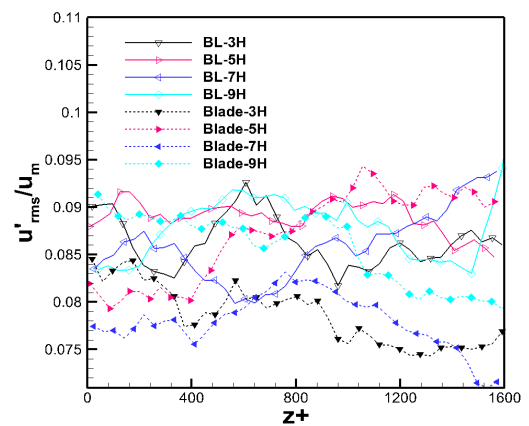


Fig. 5 Turbulence intensity($\sqrt{u'^2}/u_m$) profiles in yz plane

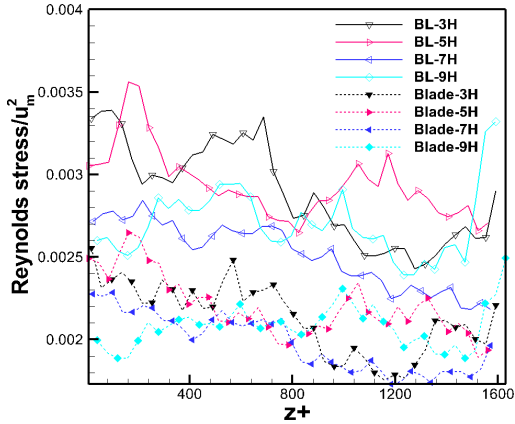


Fig. 6 Reynolds stress ($-\overline{w'v'}/u_m^2$) profiles in yz plane

높이에 해당한다. 전체적으로 수직날이 설치된 경우, 3h 이후에서는 기준유동에 비하여 난류강도가 약해지는 것을 볼 수 있다. 한편, 동일 위치에서 yz평면의 레이놀즈 응력, $-\overline{w'v'}/u_m^2$ 을 나타낸 그림에서도 수직날 장착 유동의 경우, 기준유동에 비하여 크기가 작음을 알 수 있다. 하류방향으로의 난류강도와 레이놀즈 응력의 감소는 난류 구조의 약화를 의미한다.

3.2 POD 해석 결과

유동을 구성하는 지배적인 난류구조는 POD 해석에서 고유값(eigenvalue)을 통하여 알 수 있는데, 이 고유값은 해당모드에서의 상대에너지를 의미한다. Fig. 7은 yz 평면에서 기준유동과 수직날 유동의 하류방향에 따른 POD 모드별 에너지 분포를 나타내고 있다. Fig. 7(a)은 수직날을 장착하지 않은 기준 유동의 결과이고, Fig. 7(b)은 수직날 유동의 결과이다. 두 경우 모두 저차모드 이후에 에너지가 급격히 떨어지는 모습을 볼 수 있고, 고차모드로 갈수록 에너지가 완만히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 유동장을 구성하고 있는 지배적인 모드는 저차모드이고, 이 저차모드의 합을 통하여 유동장을 재구성 할 수 있다는 의미이다. 기준유동(Fig. 7(a), Table 2)에서 하류방향으로 0.5h 위치에서의 1, 2차 모드의 에너지 점유율은 각각

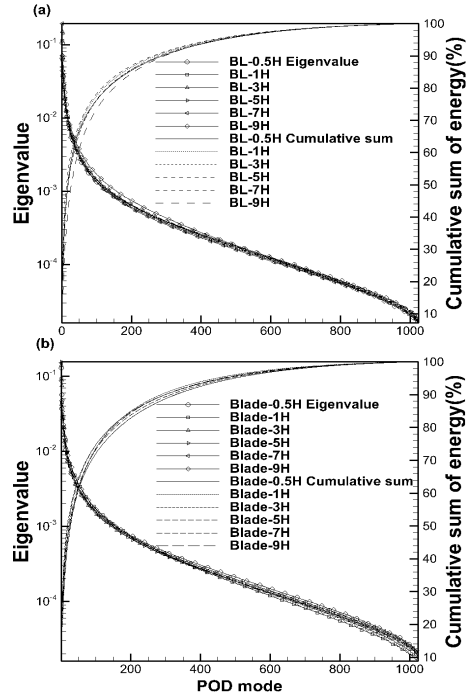


Fig. 7 Eigenvalue versus POD mode; (a) Base line cases, (b) Blade cases

Table 2 Cumulative sum of Energy (%)

yz-BL Mode	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th
yz-0.5h	10.5	17.0	22.4	26.1	29.5	32.5
yz-1h	11.3	17.5	22.7	26.5	29.9	32.8
yz-3h	14.9	22.1	26.1	29.5	32.7	35.2
yz-5h	13.9	20.4	24.8	28.1	31.5	34.3
yz-7h	19.3	24.3	28.5	32.0	35.3	38.2
yz-9h	7.1	11.5	15.4	18.8	21.7	24.4

Table 3 Cumulative sum of Energy (%)

yz-Blade Mode	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th
yz-0.5h	9.3	13.7	17.4	20.4	23.0	25.3
yz-1h	12.8	18.6	22.3	25.1	27.7	30.0
yz-3h	14.0	21.4	25.3	28.7	31.5	34.3
yz-5h	15.6	20.5	24.1	27.6	30.5	33.2
yz-7h	15.3	19.4	22.8	25.9	28.6	31.0
yz-9h	8.8	13.5	17.5	21.1	24.0	26.4

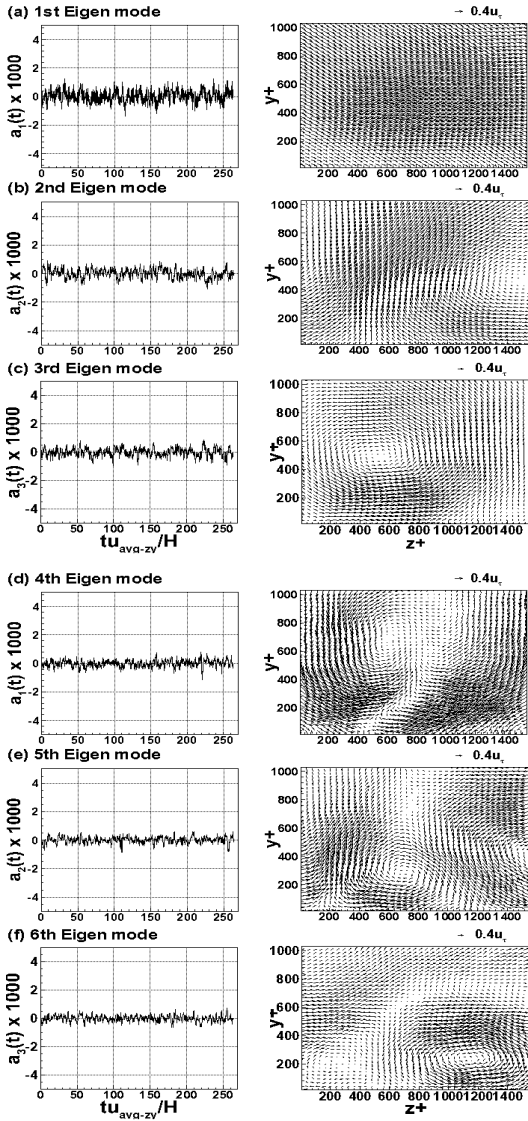


Fig. 8 POD coefficient and POD mode vector of BL-0.5H; (a) 1st mode, (b) 2nd mode, (c) 3rd mode, (d) 4th mode, (e) 5th mode, (f) 6th mode

10.5%, 6.5%(누적 17.0%)이고, 전체 1024차 모드를 기준으로 1~18차 모드까지의 누적에너지는 전체 에너지의 50.9%를 차지한다. 같은 방식으로, 수직날 유동(Fig. 7(b), Table 3)에서는 1,2차 모드의 에너지 점유율이 각각 9.3%, 4.8%(누적 13.7%)로서 기준유동보다 저차모드의 집중도가 떨어진다.

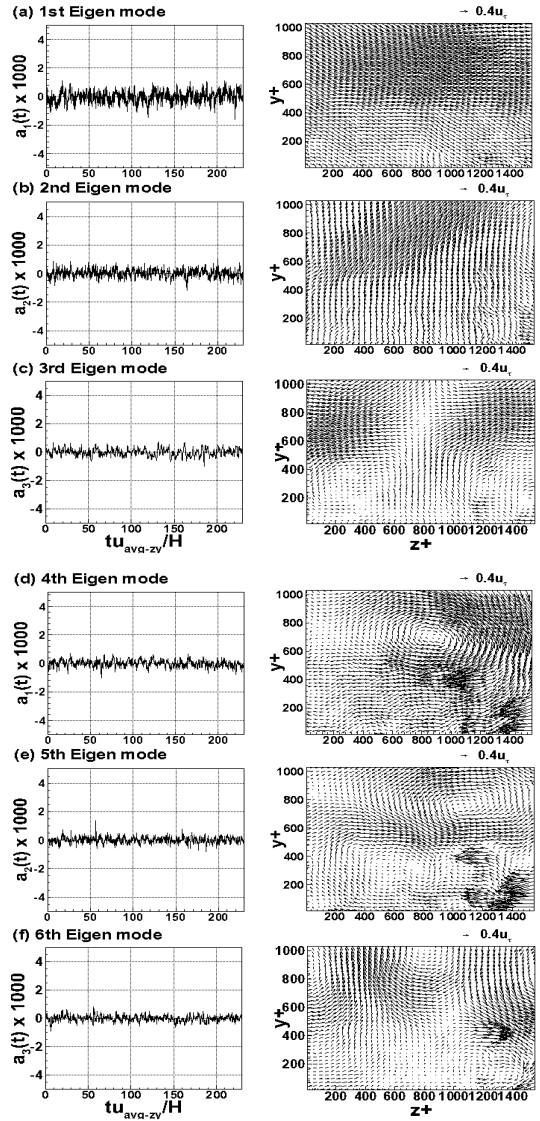


Fig. 9 POD coefficient and POD mode vector of Blade-0.5H; (a) 1st mode, (b) 2nd mode, (c) 3rd mode, (d) 4th mode, (e) 5th mode, (f) 6th mode

또한, 50%누적에너지를 나타내는 모드는 27차 모드까지 올라간다. 반면, 하류방향으로 9h 위치에서는 기준유동과 수직날 유동의 누적에너지 값이 비슷해진다. 한편, Fig. 8과 Fig. 9에서는 기준유동과 수직날 유동의 POD 분석을 통하여 추출된 전체 1024차 POD모드 중 에너지가 높은 순으로 1

차 모드에서 9차 모드까지의 무차원 POD 계수의 시계열과 POD 모드를 도시하였다. 이는 유동의 재구성에 필요한 지배적인 구조라 볼 수 있다. 수직날 유동에서는 기준유동에서 나타나는 와 구조의 변형을 쉽게 관찰할 수 있으며 1, 2차 모드의 경우는 비슷한 패턴을 보이나, 3차 모드 이후에는 서로 다른 모드를 보이고 있다.

4. 결 론

지배적인 POD 모드의 집중도는 기준유동에 비하여 수직날 유동이 낮음을 확인하였다. PIV 관찰을 통하여 하류 방향으로 수직날로 인한 난류구조의 변형 현상을 관찰하였는데, 기준유동에 비하여 수직날 유동에서 흐름방향의 난류강도가 약해지는 현상이 나타났다. 또한 yz 평면에서의 레이놀즈 응력도 감소하였는데, 이는 횡방향과 높이 방향의 모멘텀 교환이 억제됨을 의미하고 이로 인하여 마찰저항의 감소로 이어진다고 설명한 선행 연구 결과를 뒷받침한다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

References

1. W. Schoppa and F. Hussain, 1998, "Genesis of longitudinal vortices in near-wall turbulence", *Meccanica*, Vol. 33, pp. 489-501.
2. N. Hutchins, 2003, "An investigation of larger-scale coherent structures in fully developed turbulent boundary layers", Ph.D. Thesis, University of Nottingham.
3. H. Park et. al., 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. H. Park et. al., 2011, "PIV Investigations on the Skin Friction Reduction Mechanism of Outer-layer Vertical Blades," *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 9, pp. 20-28.
5. K. Karhunen, 1946, "Zur spectral theorie stochastischer prozesse", *Annales Academiae Scientiarum Fennicae Series A*, Vol. 1, p. 34.
6. G. Berkooz, P. Holmes and J. Lumley, 1993, "The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 25, pp. 539-575.
7. L. Sirovich, 1987, "Turbulence and the dynamics of coherent structures", *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 45, No. 3, pp. 561-590.