

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(2), 97-108(2015)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.2.97>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

캠버가 있는 3차원 박판 강체 모형의 측풍 공기력에 대한 수치 연구

신종현*, 장세명**, 문병영***

Numerical Study on the Side-Wind Aerodynamic Forces of Chambered 3-D Thin-Plate Rigid-Body Model

Jong-Hyeon Shin*, Se-Myong Chang** and Byung-Young Moon***

Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kunsan National University*

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Kunsan National University**

Dept. of Naval Architecture, Kunsan National University***

ABSTRACT

In the design of sailing yachts, para-glider, or high-sky wind power, etc., the analysis of side-wind aerodynamic forces exerted on a cambered 3-D model is very important to predict the performance of various machinery systems. To understand the essential flow physics around the three-dimensional shape, simplified rigid-body models are proposed in this study. Four parameters such as free stream velocity, angle of attack, aspect ratio, and camber are considered as the independent variables. Lift and drag coefficients are computed with CFD technique using ANSYS-CFX, and the results with the visualization of post-processed flow fields are analyzed in the viewpoint of fluid dynamics.

초 록

돛 요트, 패러글라이더, 또는 고공 풍력 등의 설계에 있어, 3차원 모델에 가해지는 측풍 공기력을 해석하는 일은 다양한 기계의 성능을 예측하기 위해 매우 중요하다. 3차원 형상 주위의 본질적인 유동 물리를 이해하기 위하여, 본 연구에서는 간략화된 강체 모델들이 제안되었다. 자유류 속도, 받음각, 종횡비, 그리고 캠버가 독립변수로서 고려되었다. 양력과 항력 계수들은 ANSYS-CFX를 이용한 전산유체역학 해석을 통하여 계산되었고, 유동장의 후처리된 가시화 결과는 유체역학의 관점에서 해석되었다.

Key Words : Rigid-body Model(강체 모형), Aerodynamic Force(공기력), CFD(전산유체역학), 3-D Shape(3차원 형상)

1. 서 론

캠버가 있는 박판형상은 매우 단순한 형태지만, 이 형태를 조금 복잡하게 적용시켜 본다면

요트의 돛이나, 사다리 풍차(laddermill), 대형 선박에 사용하고 있는 추진형 연 등과 같은 풍력 기계(wind machine)가 될 수 있다. 이미 여러 개의 연을 직렬로 연결한 사다리 풍차는 신재생

† Received : August 18, 2014 Revised : December 28, 2014 Accepted : December 30, 2014

** Corresponding author, E-mail : smchang@kunsan.ac.kr



Fig. 1. The Skysails system with a parafoil (<http://www.skysails.info>)

에너지 분야에서 고공 풍력발전에 응용되고 있으며, Fig. 1과 같이 요트의 돛과 같은 원리로 추진력을 발생하여 대형 유조선 등에 응용되어 연료 소모를 줄일 수 있는 보조 기관으로 활용된다.

기존 연구를 살펴보면, 지금까지 추진 성능 즉 양력과 같은 유체역학적 성능 관점에서의 돛링 요트 돛에 대한 최적화는 양항비와 유효 받음각을 향상시키기 위한 돛의 기본 제원과 구성 그리고 캠버와 같은 돛 단면형상에 대한 연구가 대부분이었다[1]. 이러한 성능에 대한 해석은 축소 모형을 사용한 풍동 실험이나 전산유체역학(CFD)을 이용한 수치 계산에 의해 수행되어 왔다[2~4]. 최근에 들어와 돛의 변형에 대한 유체-구조 연성해석도 진행되고 있으며 유체력에 의해 변형되는 돛의 형상에 대한 연구도 진행되고 있다[5]. 또한, 국내에서 효율이 좋은 풍력터빈을 개발하려는 다양한 노력을 많이 하고 있다[6~8]. 그러나 상대적으로 새로운 분야인 사다리 풍차는 국외에서 일부 연구가 진행되고 있지만[9~11], 국내에서는 학술적으로 연구된바가 없고, 추진형 연의 경우 국내에서 Skysail 시스템의 활용에 대한 검토와 효용 분석이 전부였다[12].

기존의 연구는 특정한 형상에 대해서 좁은 대역(narrow band)의 공학적 인자 해석(parameter analysis)이었기 때문에, 과연 어떤 인자가 궁극적으로 돛의 공기력 분포에 결정적 영향을 미치는지에 대한 넓은 선택 범위에 대한 연구, 각 인자의 민감도(sensitivity)가 어떻게 작용하는지에 대한 원리적 고찰 등은 부족하였다. 본 연구에서는 캠버가 있는 박판형상에 작용하는 공기력을 박판의 형상, 바람의 각도와 속도 등 몇 가지 주

요 독립 파라미터로 정하고, 이들을 변경하여 공력 계수들을 추출 및 분석하였다.

II. 연구 방법

2.1 지배방정식과 난류 모델

본 연구에서의 지배방정식은 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로서, 유한 체적법에 근거한 수치 해석을 통해 정상 상태로 수립시켰다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

여기에서 ρ , \mathbf{V} , p , μ 는 각각 공기 밀도, 속도 벡터, 압력, 그리고 점성계수를 의미한다.

난류 모델은 $k-\omega$ SST(shear stress transport) 모델[13]을 쓰고, 수치 계산은 상용 코드인 ANSYS-CFX ver. 14.5를 사용한다.

2.2 모델의 정의

캠버가 있는 3차원 박판의 공력 특성에 대한 본질적인 유동 물리를 파악하기 위하여, 대상 형상을 대상으로 가장 단순한 모형의 모양을 Fig. 2와 같이 각각 삼각(triangle, Case T)과 사각(rectangle, Case R)으로 디자인하였다. 지지대(mast)는 지름 20 mm, 높이 4 m의 원기둥으로, 투영 높이(h)는 3.2 m로 고정한다. 일단 모델에 작용하는 유동력에 의하여 발생하는 불안정성(flow instability), 유체-구조 연성(fluid-structure interaction), 그리고 밧줄(ropes)과 같은 부속품의 영향을 무시하고 두께 2 mm의 강체 모델(rigid-body model)을 구성한다. 즉, 모델의 형

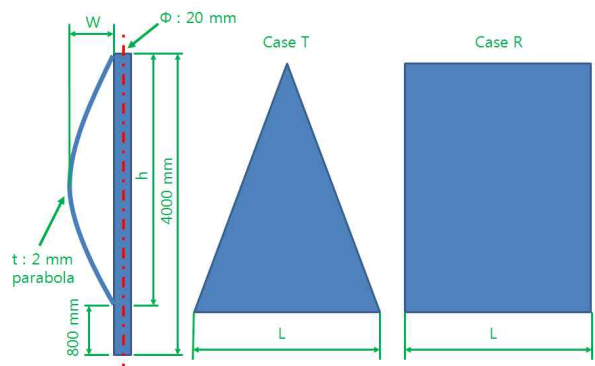


Fig. 2. Simplified models: T(triangle) and R(rectangle)

Table 1. Parameter set of each case

Case	Shape	V_{∞} (m/s)	θ (deg)	W (mm)	L (mm)
T-Base	T	5	30	800	3200
R-Base	R	5	30	800	3200
T/R-V.5	T/R	2.5	30	800	3200
T/R-V2	T/R	10	30	800	3200
T/R-th30	T/R	5	30	800	3200
T/R-th60	T/R	5	60	800	3200
T/R-th90	T/R	5	90	800	3200
T/R-L1.5	T/R	5	30	800	2400
T/R-L2	T/R	5	30	800	1600
T/R-W.5	T/R	5	30	400	3200
T/R-W.25	T/R	5	30	200	3200

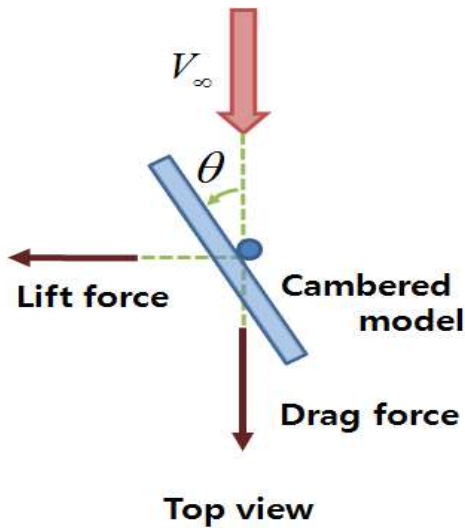


Fig. 3. Definition of aerodynamic forces and angle of attack

상은 Fig. 2의 측면도에서와 같이 그 투영 단면을 포물선(parabola)으로 주고, 그림에서 독립 인자 W 는 캠버 길이(camber length)로서 주요 파라미터로 변화를 준다.

Figure 3에 본 연구에서 사용하는 양력(lift force), 항력(drag force) 및 받음각(angle of attack, θ)의 정의를 개념도로 나타내었다. 양력과 항력의 기준은 입사하는 자유류 속도(free stream velocity, V_{∞}) 방향에 대해 각각 수직과 평행한 공기력을 나타낸다. 3차원 박판 모형은 항공기의 날개와 달리 자유류가 캠버의 횡단면으로 유입되고 실속(stall) 영역의 고 받음각에서도 작동하며, 모형에 작용하는 추진력에 양력 뿐 아니라 항력도 상당히 공헌하고 있다.

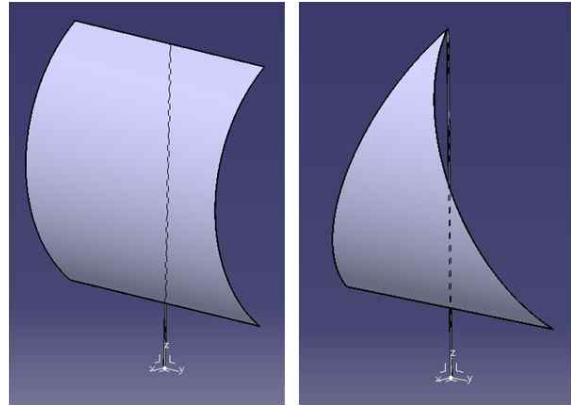


Fig. 4. 3D modeling

2.3 독립 파라미터

본 연구에서 사용한 주된 파라미터는 다음과 같다.

- V_{∞} ... 자유류 속도(free stream velocity)
- θ ... 측면 받음각(side angle of attack)
- L ... 돛의 최대 폭(max. width of sail)
- W ... 캠버 길이(camber length)

이 파라미터들로부터 무차원화된 인자들을 정리한다. h 는 투영된 돛의 높이를 말한다.

레이놀즈수(Reynolds number):

$$Re_L = \frac{\rho V_{\infty} L}{\mu} \tag{3}$$

종횡비(Aspect ratio):

$$AR = \frac{h}{L} \tag{4}$$

캠버율(Camber ratio):

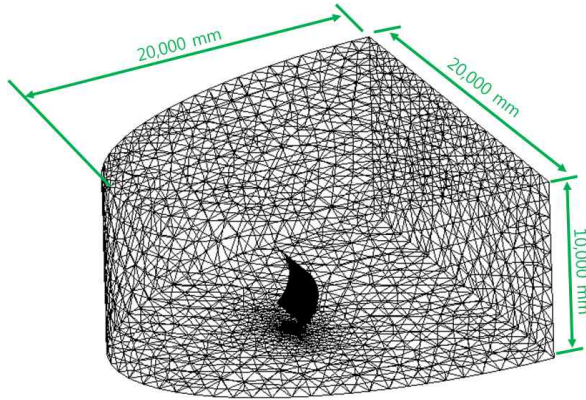
$$CR = \frac{W}{h} \tag{5}$$

Figure 2~3을 바탕으로 Table 1과 같은 파라미터 수준을 설정하였고, 3D CAD 프로그램인 CATIA V5를 이용하여 Fig. 4와 같이 돛 형상을 모델링 하였다. 위의 변수 중에서 자유류 속도를 제외하고는 기하학적 파라미터이기 때문에 각각의 Case에 따라 3-D 모델 데이터를 반복 형성하여야 한다.

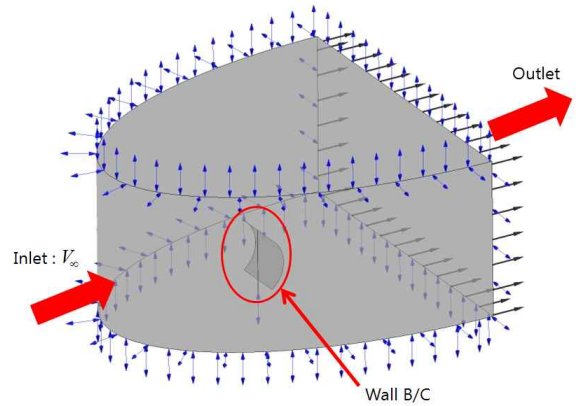
2.4 수치 해석

2.4.1 격자 생성

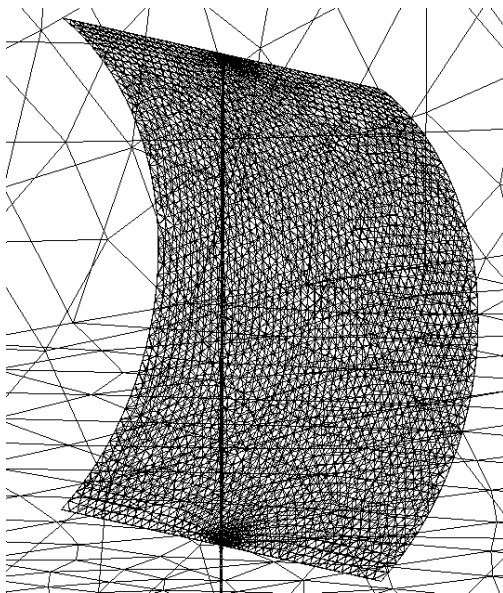
격자 품질을 향상시키기 위하여 벽 근처의 격자는 삼각기둥(prism) 형태로 설정 하였으며, 돛 표면의 격자 크기를 조절하여 모델 주위의 밀집



(a) Full view



(a) Schematic example



(b) Internal view

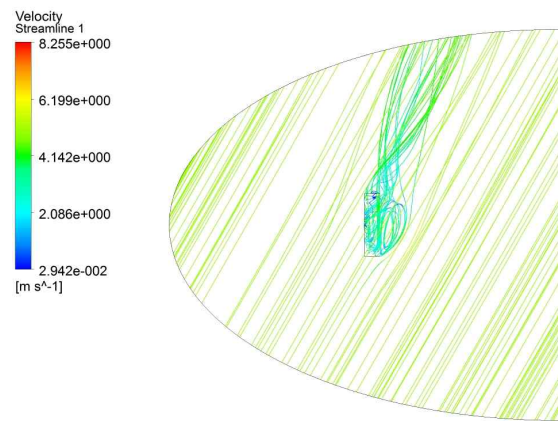
Fig. 5. Grid system

도를 향상시켰다. 격자는 ANSYS Workbench CFX-Mesh를 이용하여 생성하였으며, Fig. 5(a)의 경우 전체 격자점은 608,433개가 생성되었다. Fig. 5(b)에서 돛 위의 격자점은 비정렬(unstructured) 삼각형으로 18,249개를 생성하였다.

2.4.2 계산 영역 및 경계조건

후방으로는 유동이 일방적으로 나가기만 하기 때문에 출구 조건으로 평균 정압을 대기압과 같게 놓았다. 돛과 기둥 표면에는 점착 조건(no-slip condition)으로 처리하였다.

Figure 6(a)에서 계산 영역은 장축과 단축의 비가 2:1인 타원기둥을 단축 방향으로 반으로 잘라 적용하였다 (장축 길이 40 m; 모형 폭인 L 의 12.5 배에 해당). 돛 모형은 아래면 타원내부의 한 점에 기둥을 고정시켰으며, 출구까지의 거리



(b) Check for streamlines

Fig. 6. Computational domain and boundary condition

는 10 m이다. 타원기둥의 옆면은 원방 경계 조건으로서 평균 입사속도의 (x, y) 방향 유효 성분을 각각 주었다. 이곳에서의 풍속 조건은 풍향에 따라 돛 전방과 상하좌우 방향으로 유동의 출입이 자유로운 열린 경계조건(Open B/C)을 주었다. 한편 후방의 평면 위에서는 출구 조건으로 원방에서 대기 압력 조건을 주었다. 계산은 정상상태의 근사해로 수렴할 때까지 진행하였다. 비정상 유동 현상에 대한 내용은 2.4.4 절에서 논의한다.

Figure 6(b)는 이러한 경계 조건이 원방에서 잘 적용되고 있는지 확인하기 위하여 유선과 속도를 도시하였다($\theta = 30^\circ$). 확인 결과, 비대칭적인

Table 2. Validation of y^+

	# of grids			
	296,106	383,433	608,433	1,170,889
y^+	354.46	257.77	9.27	7.62

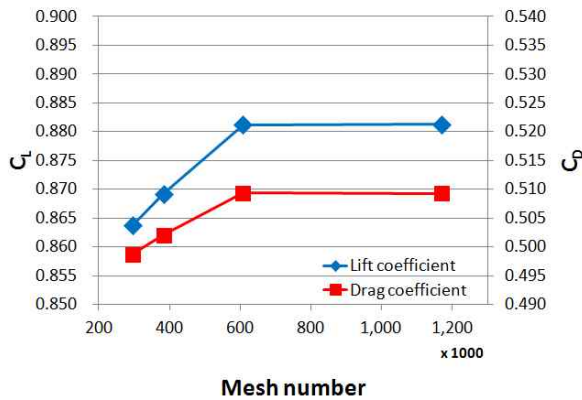


Fig. 7. Validation of computation

계산 영역에도 불구하고 유동 입사 각도가 후류에서 잘 유지되며, 평균 입사 속도 또한 5 m/s로 고정되고 있음을 알 수 있었다.

2.4.3 적절한 격자 수준 및 수렴 테스트

난류 유동장을 제대로 수치 모사하기 위해서는 벽면 경계에서 이웃한 첫 번째 격자의 적절한 무차원 길이 y^+ 를 확보해야 한다. 정확한 유동 전단응력을 구하기 위해서는 1보다 작은 값의 격자 수준을 사용해야 하지만, 인자 해석을 위한 계산의 하중을 줄이기 위하여 편의상 $y^+ \approx 10$ 인 격자계를 사용하였다.

참고 문헌 [14]에서 규격화된 벽 함수(scaled wall function)를 사용하여 y^+ 를 표현하면

$$y^+ = \max\left(\frac{\rho}{\mu} \Delta y C_\mu^{1/4} \sqrt{k}, 11.06\right) \quad (6)$$

여기에서 Δy 는 격자의 실제 크기이고, C_μ 와 k 는 각각 난류 모델의 계수와 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy)를 의미한다. 식 (6)에서 $y^+ < 11.06$ 인 영역은 ANSYS-CFX 코드에서

Table 3. Aerodynamic forces of rectangular model

	Drag (N)	Lift (N)	C_D	C_L
R-Base	76.15	131.84	0.50	0.87
R-V.5	18.97	32.88	0.50	0.87
R-V2	306.38	531.25	0.50	0.88
R-th60	199.08	114.97	1.31	0.76
R-th90	235.64	0.00	1.55	0.00
R-L1.5	56.90	98.51	0.50	0.87
R-L2	39.83	68.82	0.53	0.91
R-W.5	80.17	139.02	0.53	0.92
R-W.25	82.25	142.57	0.54	0.94

Table 4. Aerodynamic forces of triangular model

	Drag (N)	Lift (N)	C_D	C_L
T-Base	39.14	67.23	0.52	0.89
T-V.5	9.78	16.77	0.52	0.88
T-V2	156.57	269.30	0.52	0.89
T-th60	83.26	48.07	1.10	0.63
T-th90	113.72	0.00	1.50	0.00
T-L1.5	29.48	50.77	0.39	0.67
T-L2	20.29	35.01	0.27	0.46
T-W.5	38.03	65.81	0.50	0.87
T-W.25	36.61	63.36	0.48	0.84

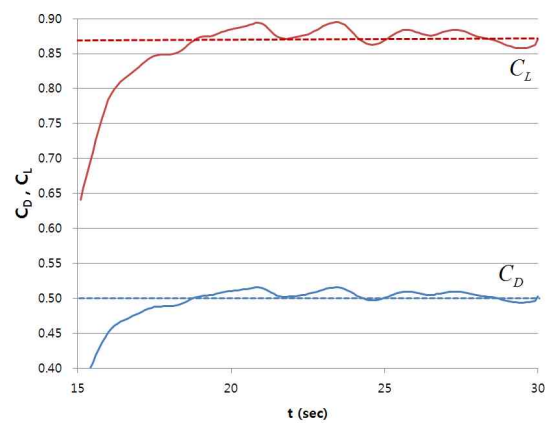


Fig. 8. Comparison of steady and unsteady computation: R-Base case

사용하는 근사 벽 함수에 의해 복원되므로, $y^+ \approx 10$ 이 경계적인 격자 규모임을 알 수 있다.

계산의 정확도를 확인하기 위하여 수렴 테스트(convergence test)를 실시하였다. 즉, 기저 설계안에 대해 현재의 격자 수준을 기준으로 하여 기저 설계 값 계산에 대해 각각 296,106개(49%), 383,433개(63%), 608,433개(100%), 1,171,889개(193%) 네 가지의 격자 수준에서 계산 결과를 비교하였다. 평균값을 비교하면 벽면 첫 번째 격자의 y^+ (최대값)는 격자 수준에 대해 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 100% 격자에서 $y^+ = 9.27$, 193% 격자에서는 $y^+ = 7.62$ 로 목표 값과 대체로 일치한다. Fig. 7에서는 공력 계수의 값의 수렴 테스트 결과가 제시되어 있다. 격자 수준 100% 이상에서 공력 계수의 결과 값이 거의 수렴한다는 사실을 관찰할 수 있다.

2.4.4 비정상 유동 현상에 대한 고찰

본 연구의 대상은 본질적으로 비정상 유동 현상으로서 정상해는 이를 시간 평균한 근사해로

볼 수 있다. Fig. 8에서는 별도로 수행한 R-Base 모델의 비정상 계산(실선)이 정상 해석에서의 평균 공력 계수 값(점선)을 적절하게 추적하고 있음 보여준다.

III. 결과 및 토의

식 (3)~(5)의 독립 파라미터로부터 각각 CFD 계산을 실시하여 돛 표면의 압력을 적분, 항력과 양력을 구한다. 이들은 각각 다음과 같은 무차원 파라미터인 항력 계수(C_D)와 양력 계수(C_L)로 표시할 수 있다.

항력계수와 양력 계수는 대표 면적을 사용하여 정의된다[15]. 여기에서 A_{ref} 는 사각형과 삼각형에 대해 각각 투영 면적인 hL 과 $hL/2$ (Fig. 2 참조)를 사용하였다.

$$C_L = \frac{Lift}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A_{ref}} \quad (7)$$

$$C_D = \frac{Drag}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A_{ref}} \quad (8)$$

3.1 레이놀즈수

Table 1에서 자유류 속도(V_∞)는 기저 값의 0.5~2배, 즉 2.5~10 m/s로 주었다. Re_L 의 범위는 5.42×10^5 에서 2.17×10^6 사이인데, 이 영역은 대체로 완전 난류(fully turbulent)로 천이하면서 유동 유사성(flow similarity)이 성립하는 것으로 보인다. Table 3~4 모두에서 C_D , C_L 값은 거의 일정하게 유지된다(Fig. 9 참조).

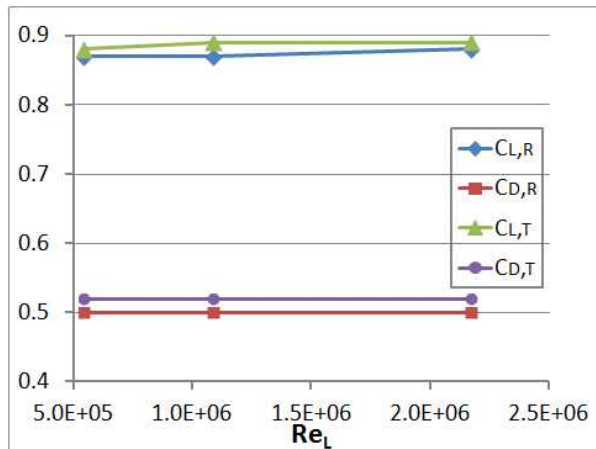


Fig. 9. Coefficients vs. Reynolds number

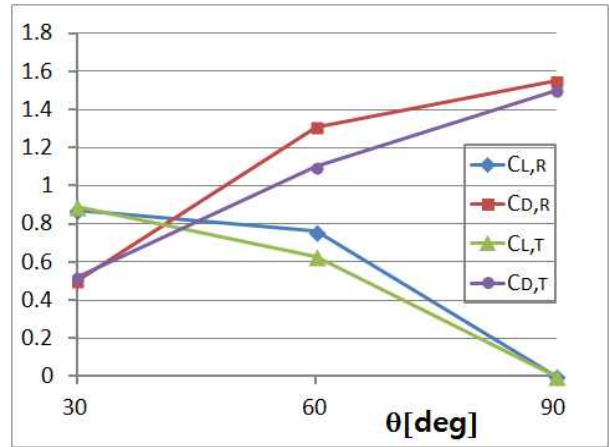


Fig. 10. Coefficients vs. angle of attack

사각형과 삼각형에서의 공력 계수 값을 비교하면, 양항비(C_L/C_D)가 각각 1.74 및 1.538로 사각형이 13% 더 높게 나왔다. 공기역학적 효율 관점에서 보면 사각형이 삼각형보다 성능이 우수하지만, 많은 상용 범선형 요트에서 삼각형 돛을 사용하는 이유는 구조 및 부력 안정성(stability)과 제어(control)의 용이성 때문으로 보인다.

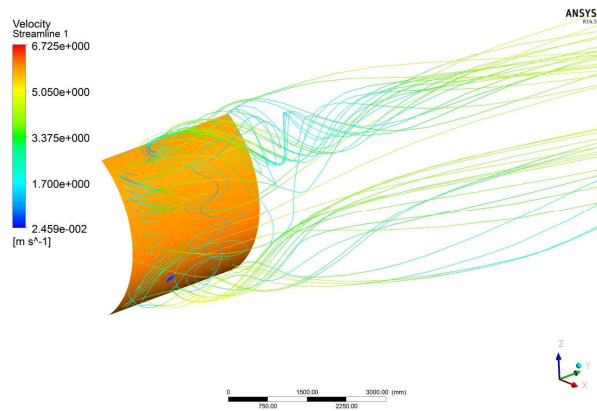
3.2 측면 받음각

Table 1에서 측면 받음각은 30~90도로 변동시키면서 공력 계수 값을 관찰하였다. Table 3~4에서 저 받음각인 30도를 제외하고 사각형의 공력 계수들이 삼각형보다 같은 받음각에서 다소 크게 나온다(Fig. 10참조). 받음각이 30도 이상으로 크기 때문에 실속 영역에서 받음각이 클수록 양력 계수는 감소한다. 특히 받음각 90도에서는 양력 계수가 거의 0이 된다. 공력 계수의 곡선은 캠버 때문에 대체로 위로 볼록한 형태를 보인다.

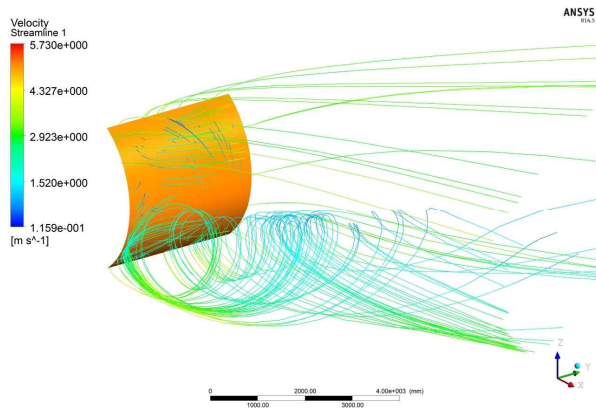
Figure 11~12에서 (a)와 (b)~(c)를 비교해 보면, 돛은 위아래가 좌우보다 긴, 훅쭉한 형태이기 때문에 깃 끝 와류(wing-tip vortex)가 세로로 배열된 형태를 보여준다. 물론 가로로 배열된 깃 끝 와류도 동시에 관찰되어서 전체적으로는 3차원적인 복잡한 와류 구조를 보여준다(Fig. 11(c) 참조). 각도가 커지면서 와류의 시작점은 앞전(leading edge)에 오는 것을 알 수 있다.

3.3 종횡비

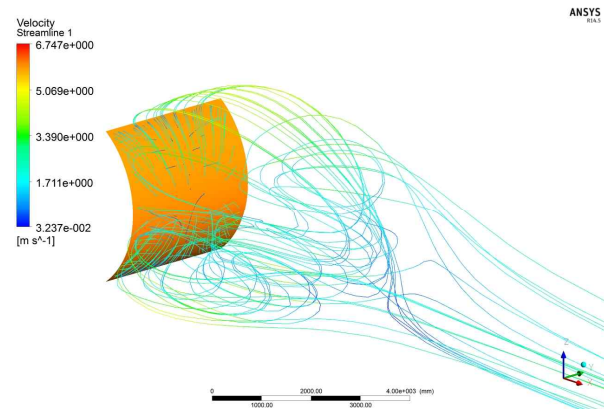
Table 1에서 폭은 기저 값의 1/2, 2/3, 1으로 비교되었고, L 값은 1.6~3.2 m, AR 로 1~2의 영역에 있다. 삼각형의 경우, 폭이 좁아질수록, 또는 AR 이 커질수록 공력 계수의 값은 거의 선형적으로 작아진다(Fig. 13 참조). 사각형의 경우 폭의 영향이 거의 없는 반면에, 삼각형은 폭의



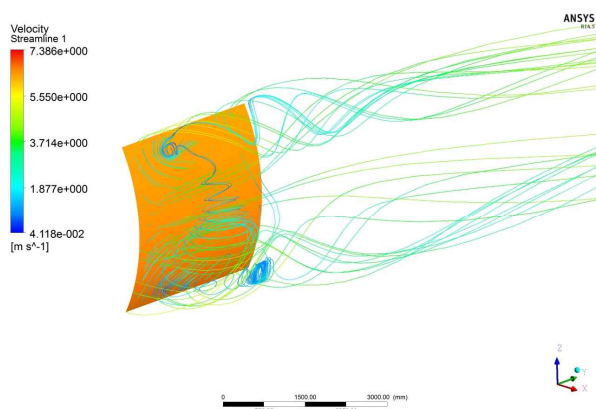
(a) R-Base($\theta = 30^\circ$, $CR = 0.25$)



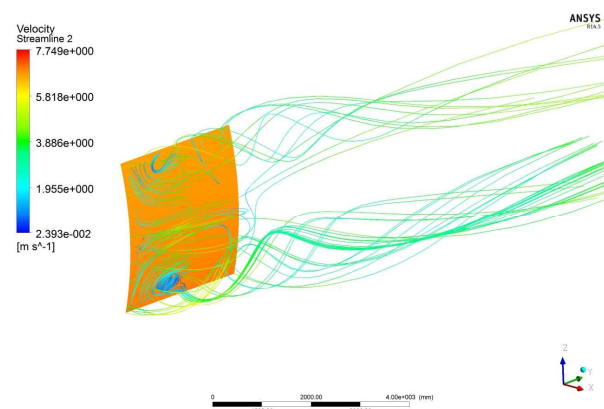
(b) R-th60($\theta = 60^\circ$, $CR = 0.25$)



(c) R-th90($\theta = 90^\circ$, $CR = 0.25$)

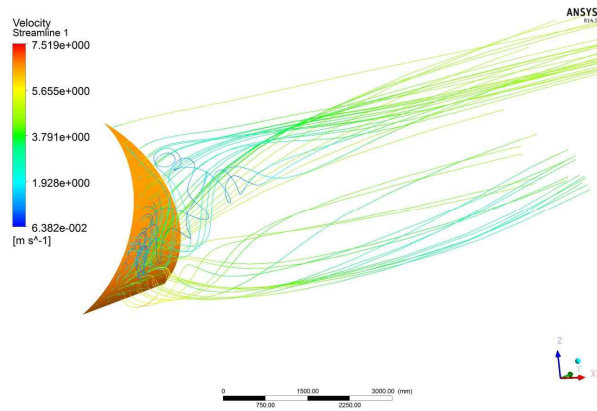


(d) R-W.5($\theta = 30^\circ$, $CR = 0.125$)

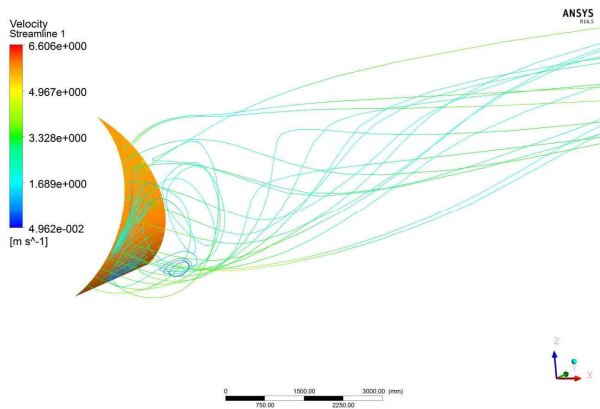


(e) R-W.25($\theta = 30^\circ$, $CR = 0.0625$)

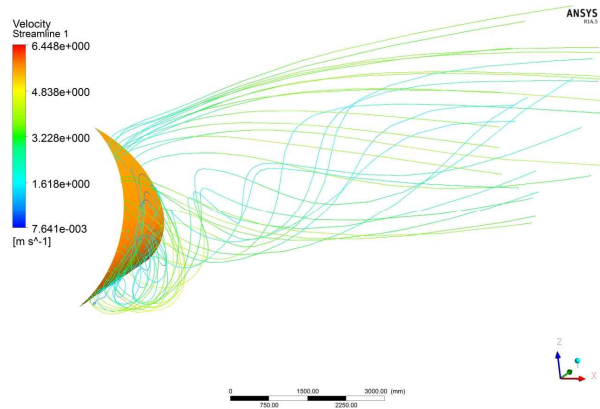
Fig. 11. Velocity field and streamline of rectangular model
 : $Re_L = 1.08 \times 10^6$, $AR = 1$



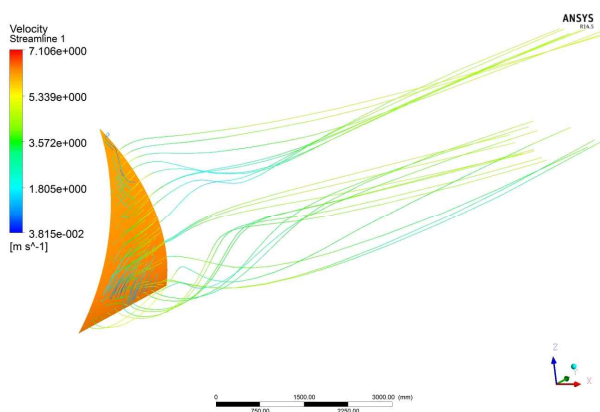
(a) T-Base($\theta = 30^\circ$, $CR = 0.25$)



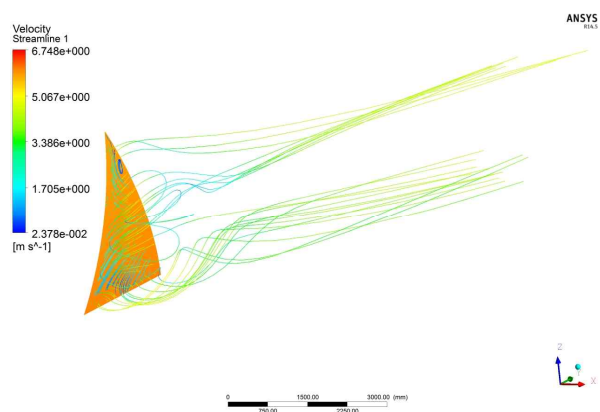
(b) T-th60($\theta = 60^\circ$, $CR = 0.25$)



(c) T-th90($\theta = 90^\circ$, $CR = 0.25$)



(d) T-W.5($\theta = 30^\circ$, $CR = 0.125$)



(e) T-W.25($\theta = 30^\circ$, $CR = 0.0625$)

Fig. 12. Velocity field and streamline of triangular model
 : $Re_L = 1.08 \times 10^6$, $AR = 1$

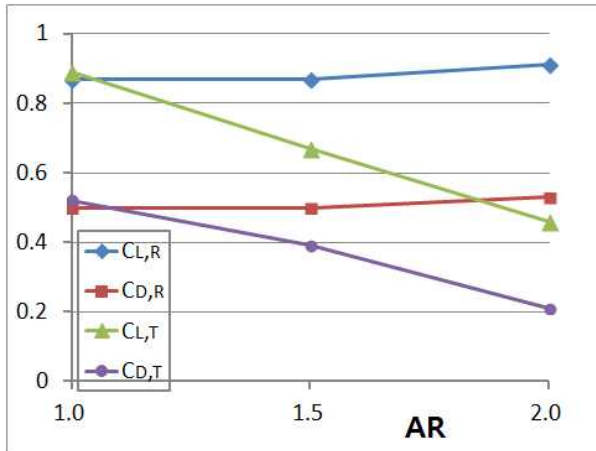


Fig. 13. Coefficients vs. aspect ratio

영향을 많이 받는 것으로 보인다. 그 이유는 기하학적으로 분석하면 분명해 보인다. 사각형의 경우 적어도 종단면 방향으로 같은 꼴이지만, 삼각형의 경우에는 꼭지각이 달라지기 때문에 기하학적 유사성이 전혀 성립하지 않는다. 따라서 삼각형에서는 유동장의 유사성도 깨지므로, 각각의 형상에 대해서 독립적으로 유동장과 공력 계수를 고려해야 한다.

3.4 캠버율

본 연구에서 가장 주목했던 부분이 바로 캠버 길이였다. Table 1에서 캠버 길이는 기저 값의 1/4, 1/2, 1과 같이 변화시켰으며, W 값의 범위는 200~800 mm, CR 로는 0.0625~0.25이다. 그런데 사각형과 삼각형의 계산 결과는 정 반대의 경향을 보인다(Fig. 14 참조). 사각형의 경우 캠버 길이가 커질수록 공력 계수는 작아지는 반면, 삼각형의 경우 반대 경향을 보인다. 즉 곡선의 기울기가 사각형에 대해서는 음의 값을 갖는 반

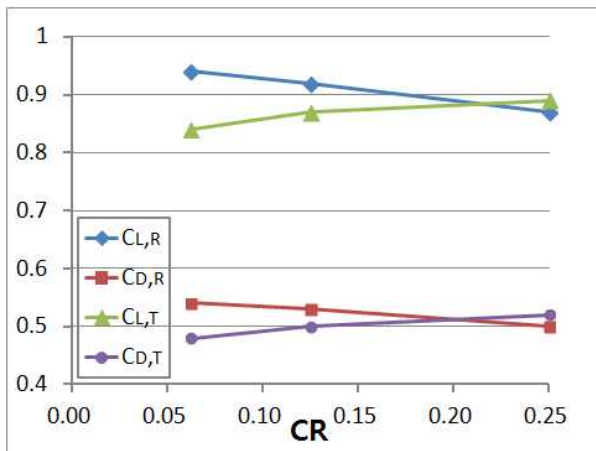


Fig. 14. Coefficients vs. camber ratio

면, 삼각형에 대해서는 양의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 사각형의 경우 민감도(sensitivity, 즉 그래프의 기울기)가 선형인 반면, 삼각형의 경우 다소 비선형적인 경향을 보인다.

Figure 11~12의 후류 유동장을 살펴보면, (d)~(e)에서 W 값이 작아질수록 표면에서의 와류가 더 분명하게 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 캠버율이 커지면 난류에 의해 유동장은 비대칭적 형태를 보인다.

Figure 15는 와도(vorticity, $\zeta = |\nabla \times \mathbf{V}|$)의 분포를 도시해 본 결과이다. 모형의 앞면(front side)에서는 캠버가 작을수록 지지대에 밀착되므로 기둥의 영향을 더 많이 받는다: 그림 (c)와 (g) 참조. 그러나 이러한 영향은 공력 계수의 주된 차이를 만든다고 볼 수 없다. 대신 모형의 뒷면(rear side)에서 표면의 와도 분포가 캠버가 커질수록 더 넓어져 보이고, 날개 끝단 와류(wing tip vortex) 강도가 다소 증가해 보인다: 그림 (b)와 (d) 참조. 반면에 삼각형의 경우 그림 (f)의 경우가 (h)에 비하여 현저하게 와도의 분포가 증가하였다.

측풍에 대해 물체의 앞전(leading edge)에서 발생하는 와동의 세기는 물체의 유동에 대한 저항의 척도로 이해할 수 있다. 이러한 와류는 끝단에 부착되어 후류로 뺏어 나간다. 사각형 모델에서는 끝단 와류의 강도가 증가하여 전반적으로 내리씻음(downwash)의 3차원 효과(3-D effect)에 의한 양력의 저하가 발생하는 반면, 삼각형 모델에서는 날개 앞전에 부착되는 와동선(vortex filament)으로 인한 삼각의 효과(delta wing effect)에 의해 다소간 양력의 이득이 발생하는 것으로 해석된다[15].

IV. 결 론

본 연구에서는 다양한 공학적 응용이 가능한 캠버가 있는 3차원 박판 강체 모형에 작용하는 측풍 공기력을 해석하기 위하여 단순화된 파라미터 연구를 제안하였다. 모형의 전산유체역학 해석을 통하여 4가지 독립 인자(레이놀즈수, 측면 받음각, 종횡비, 캠버율)에 대한 광범위 파라미터 연구를 실시하였다. 사각형과 삼각형 모델에 대한 양력계수와 항력계수가 분석되었으며, 각각의 인자에 대한 수치해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다:

- 1) 자유류 속도에 대해서 주어진 인자 범위의 레이놀즈수 영역 내에서 공력 계수의 변화는 거의 없다. 이는 끝이 무딘 물체(bluff

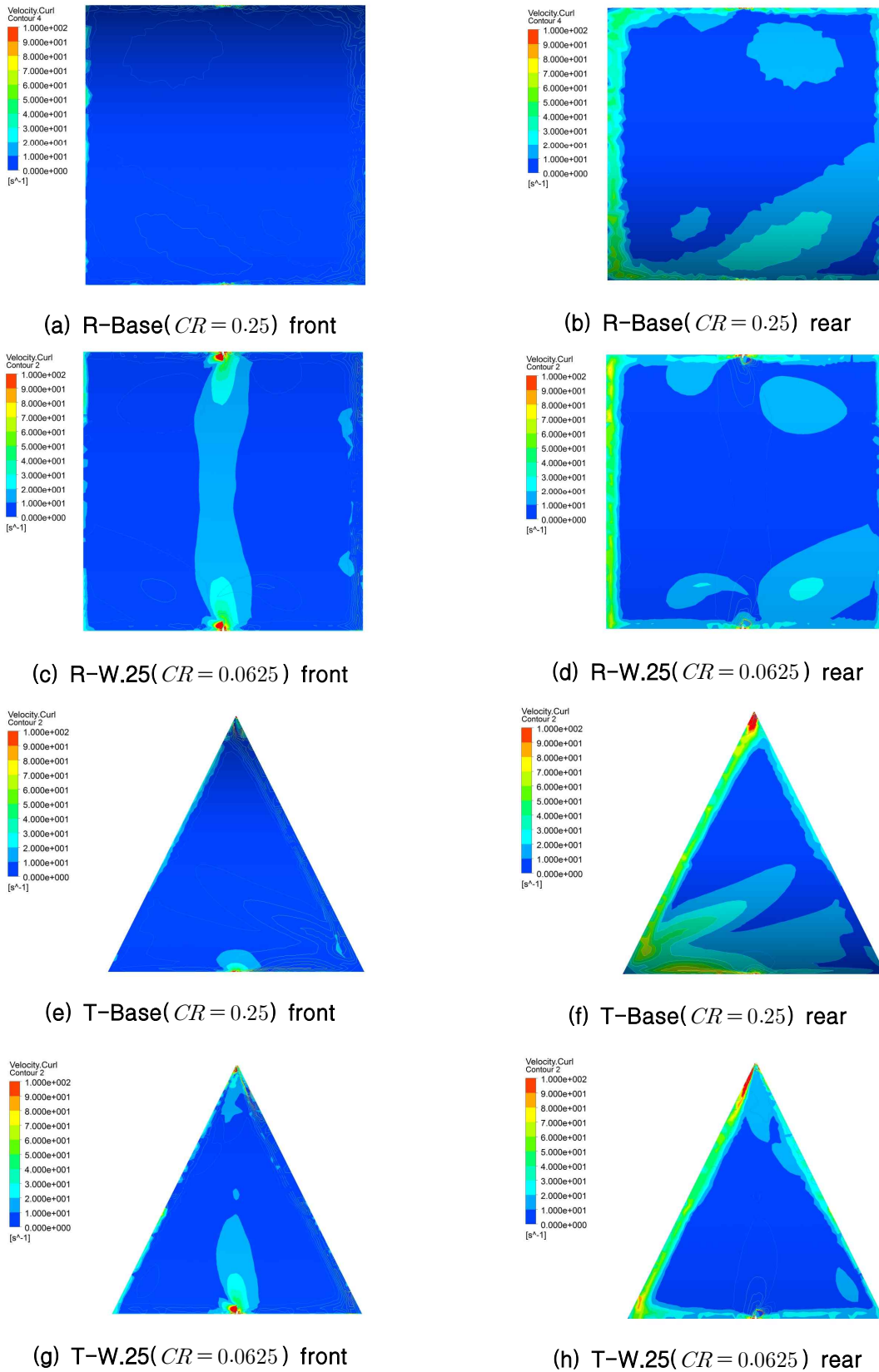


Fig. 15. Comparison of the vorticity, $|\nabla \times V|$
 : $Re_L = 1.08 \times 10^6$, $\theta = 30^\circ$, $AR = 1$

body)의 실속 특성으로 파악되며, 레이놀즈 수 변화는 작은 받음각 영역에서 비교하는 것이 바람직하다.

- 2) 실속 영역 내에 있기 때문에 측면 받음각이 커지면 양력은 감소하고 항력은 증가한다.
- 3) 사각형은 종횡비에 관계없이 공력 계수가 비슷하게 나오는 반면, 삼각형은 종횡비가 작아질수록, 즉 폭이 커질수록 공력 계수 값들은 커진다. 삼각형 모델은 종횡비가 바뀌면 기하학적으로 닮은꼴이 아니기 때문에 유동 상사성이 성립하지 않는다.
- 4) 사각형과 삼각형에 대해, 캠버 길이의 코드 길이에 대한 비율을 변화시켜가며 관찰한 결과, 공력 계수는 서로 정반대의 경향을 보인다. 사각형은 캠버와 공력 계수들이 역방향의 민감도를 보이는 반면, 삼각형은 순방향의 민감도를 보인다. 유동장 내 와도의 분석 결과, 돛 뒷면의 앞전에서 발생하는 점성 경계층 유동 박리에 의한 와류 강도 손실과 아직 완전히 규명되지 못한 복잡한 3차원 난류 유동장 내 와동 간섭에 의해 후류의 와도가 영향을 받는 것으로 밝혀졌다.

이러한 기초 파라미터 연구를 통하여 3차원 박판 강체 모델 주변에 나타나는 유동 물리 현상을 좀 더 깊이 이해하고 추후 범선형 요트, 패러글라이더, 고공형 풍력기관 등 다양한 공학 기계의 설계를 위한 주요 인자와 민감도를 기저 값으로 이용하고자 한다.

후 기

본 논문은 1)교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(Grant No. 2013H1B8A2023237)과 2)산업통상자원부에서 지원하는 KETEP 에너지인력양성사업(Grant No. 20124010203240)의 인건비 등 재정 지원을 받았습니다. 저자들은 이에 감사드립니다.

References

- 1) Yoo, J., " Two-Equation Eddy- Viscosity Turbulence Models for Engineering Application," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.42, No.1, 2005, pp.24-33.
- 2) Yoo, J., and Kim, H.T., " Computational and Experimental Study on Performance of

Sails of a Yacht," *Ocean Engineering*, Vol.33, No.10, 2006, pp.1322-1342.

- 3) Yoo, J., " Experimental Study on the Hydrodynamic Forces of 30 Feet Sailing Yacht," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.42, No.3, 2005, pp.233-240.
- 4) Lee, P.K., and Kim, H.K., " Numerical Analysis of Blockage Effects on Aerodynamic Forces for Yacht Sails in Wind Tunnel Experiment," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.43, No.4, 2006, pp.431-439.
- 5) Bak, S., "Fluid-Structure Interection Analysis on the Deformation of Simplified Yacht Sails." *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.50, No.1, 2013, pp.33-40.
- 6) Dong, K. M., and Jung, S. N., " Aerodynamic Performance Prediction of a Counter-rotating Wind Turbine System with Wake Effect," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.30, No. 7, 2002, pp. 20-28.
- 7) Gong, C. D., Lee, H. S., and Kim, I. K., " Aerodynamic and Structural Design of A High Efficiency Small Scale Composite Vertical Axis Wind Turbine Blade," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.39, No. 8, 2011, pp. 758-765.
- 8) Nam, Y. S., and La, Y. H., " Individual Pitch Control of NREL 5MW Wind Turbine in a Transition Region," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.41, No. 3, 2013, pp. 210-216.
- 9) Podgaets, A.R., and Ockels, W.J., " Three-dimensional Simulation of a Laddermill," *Power Congerence WindPowerAsia2006*, 2006, pp. 116-121
- 10) Lansdorp, B., " Design and Construction of a 4 KW Groundstation for the Laddermill," *Published at IASTED EuroPES 2007*, Palma de Mallorca, Spain, 2007.
- 11) Lansdorp, B., "Long-Term Landderrmill Modeling for Site Selection," *AIAA, Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit 2008*, 2008.
- 12) Park, W.S., and Park, J.H., " Examination and Utility Analysis about Skysails System Application in the Coastal Waters," *Journal of*

Navigation and Port Research, Vol.32, No.10, 2008, pp. 813~819.

13) Menter, F.R., " Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Application," *AIAA Journal*, Vol.32, No.8, 1994, pp.1598-1605.

14) ANSYS, Inc., ANSYS CFX-Solver Theory Guide R15.0, Canonaburg, United States, 2013, pp.121~125.

15) White, F.M., Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 2007, pp.510