

# 변형을 고려한 요트 세일의 2차원 단면 해석

이희범<sup>1</sup>·이신형<sup>2,†</sup>·유재훈<sup>3</sup>  
서울대학교 대학원 산업조선공학부<sup>1</sup>  
서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소<sup>2</sup>  
목포대학교 해양시스템공학과<sup>3</sup>

## Analysis of a Two-Dimensional Section of Deforming Yacht Sails

Hee-bum Lee<sup>1</sup>·Shin-Hyung Rhee<sup>2,†</sup>·Jae-hoon Yoo<sup>3</sup>  
Department of Industrial Engineering and Naval Architecture, Seoul National University, Seoul, Korea<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea<sup>2</sup>  
Department of Ocean Engineering, Mokpo National University<sup>3</sup>

### Abstract

Although a yacht sails operate with large displacement due to very thin thickness, many studies for flow around yacht sails have not considered the sail deformation. The sail deformation not only caused a change in the center of effect(CE) on the sail but also a change in the thrust of the sail. The change of the CE and thrust affects the center of lateral resistance(CLR) and side forces of the hull, and the balance of the yacht. These changes affect the motion of the yacht which changes the velocity of the yacht. Thus, when analyzing the flow around yacht sails, the sail deformation should be considered. In the present study, fluid-structure-interaction(FSI) analysis of a two dimensional section of yacht sails was performed to consider the effects of sail deformation on the lift and drag performance. FSI and moving mesh methods were studied. Computational methods were verified using benchmark test cases such as the flow around horizontal and vertical cantilever beams. Shape deformation, pressure distribution, lift forces and separation flow were compared for both rigid and deformable sail.

**Keywords** : Fluid-structure interaction(FSI, 유체-구조 연성), Yacht sail(요트 세일), Moving mesh techniques(격자 변형 기법)

## 1. 서론

세일링 요트는 일반 상선과는 달리 세일을 이용하여 추진력을 얻는다. 요트는 세일의 성능이 좋을수록 보다 빠른 속도를 낼 뿐 아니라 세일에 의해 발생하는 힘은 선체 자세를 바꾸어 저항을 포함한 항해 성능에 큰 영향을 미치게 되므로 세일 성능을 해석하는 것은 매우 중요하며 이러한 세일의 성능 해석은 그 동안 실험적, 수치적 기법에 의하여 수행되어 왔다. Wilkinson (1984)은 풍동 실험을 통하여 메인(main) 세일 주위의 유동 특성을 관찰하여 세일의 변형과 압력의 상관관계를 9가지 영역으로 구분하였으며 Hobbs (2000)와 Coiro, et al. (2002)은 포텐셜 유동을 사용하여 Wilkinson (1984)의 실험결과와 비교하였다. Yoo, et al. (2005), Chi, et al. (2007)과 Paton, et al. (2008)은 난류의 영향을 고려하기 위하여 상용 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 코드를 사용하여 세일 주위의 유동을 계산하였으며, Yoo and Kim (2006)은 실험과 계산 모두를 병행하였다. Kim, et al. (2010)은 세일과 요트 선체를 모두 고려하여 실험 및 계산을

수행한 바 있으나 이러한 많은 연구들은 세일을 변형되지 않는 강체로 보았다. 그러나 대부분의 세일은 두께가 얇은 직물을 주재로 만들기 때문에 풍압에 의하여 늘어나거나 캠버(camber) 분포가 바뀌는 등의 변형이 발생하며 이 변형은 다시 세일 주위의 유동을 바꾸게 된다. 이 현상은 세일의 압력중심을 바꾸게 되고 나아가 요트의 거동 자세를 바꾸게 되므로 세일의 변형을 고려하는 것은 매우 중요한 문제라고 할 수 있다. 이러한 세일의 특성을 고려하여 계산하는 것은 유체-구조 연성 기법을 통해 이루어 질 수 있는데, Trimarchi, et al. (2009)은 세일의 변형을 위하여 유한요소법(FEM)을 도입하였고 세일 주위의 유동 해석을 위하여 경계요소법(BEM)을 사용하여 난류 유동을 제외한 유체-구조 연성 해석을 수행한 바 있다. Rensch, et al. (2008)은 세일의 변형을 위하여 유한요소법을 사용하고 세일 주위의 유동 해석은 난류의 영향을 고려하여 상용 CFD 코드를 사용하여 계산한 바 있으며 이러한 연구들은 메인 세일이나 집(jib) 세일에 비해 천 조직이 얇아 변형이 비교적 큰 풍하용 세일(Spinnaker)에 적용되었다. 본 연구에서는 풍하용 세일보다 변형이 작은 집 세일과 메인 세일 주위의 유동 변화를 수치적으로

해석하기 위하여 유체-구조 연성 기법을 적용하였다. 세일의 변형을 고려하기 위하여 격자 변형 기법을 사용하였으며 몇 가지 표준시험을 수행하여 그 타당성을 입증 하였다. 이를 토대로 30피트 급 요트 세일의 2차원 단면을 선정하여 세일의 변형과 그 주위 유동 변화에 대한 유체-구조 연성 해석을 수행하였으며, 해석 결과 세일의 변형에 의한 주위 유동 특성이 많이 달라진다는 것을 확인하였고, 요트 세일 해석 시 유체-구조 연성 해석이 반드시 필요하다는 결론을 도출하였다.

## 2. 수치 해석 기법

### 2.1 유체-구조 연성 기법

본 연구에서 사용한 유체-구조 연성 기법은 유동장과 세일의 변형을 각각 따로 풀어내는 분할기법을 사용 하였다. 분할기법은 유동장과 구조물 사이의 정보를 전달하는 과정에 따라 강한 연성 기법(strongly coupled)과 약한 연성 기법(loosely coupled)이 있다. 약한 연성 기법은 한 시간단계 동안 유체에서 구조로, 혹은 구조에서 유체로 정보를 단방향으로 전달하기 때문에 정확하지 못하며 복잡한 유체-구조 연성 문제에서는 적용할 수 없다. 반면 강한 연성 기법은 한 시간단계 동안 유체와 구조에 대한 정보를 양방향으로 전달하기 때문에 정확한 해를 구할 수 있으며 복잡한 유체-구조 연성 문제에도 적용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강한 연성 기법을 사용 하였다.

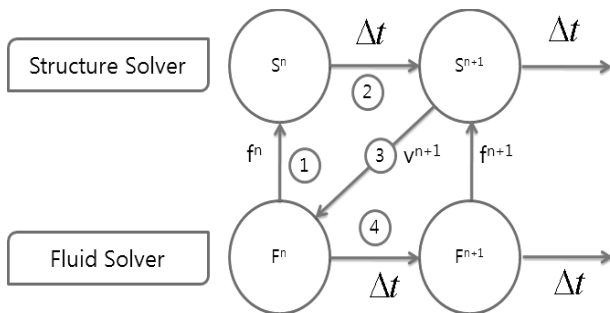


Fig. 1 Strongly coupled algorithm

강한 연성 기법은 Fig. 1과 같은 순서로 진행된다. 우선, 유동 계산영역(fluid solver)에서는 유동장을 계산하여 구조물에 힘과 속도 등의 정보를 넘겨준다. 구조계산영역(structure solver)에서는 유동장에서 계산된 힘과 속도 등을 바탕으로 구조물의 변형 및 변위를 계산한다. 여기서 계산된 구조물의 변형 및 변위는 유동장에서의 경계면 변화를 가져오게 되며 이를 반영하여 다시 유동장을 계산한다. 이 반복되는 과정이 어느 정도 수렴해 나가게 되면 다음 시간단계로 넘어간다. 본 기법은 유동장과 구조물의 변형을 하나의 계로 간주하여 계산하는 집적(monolithic) 기법과 비교하면 그 엄밀함(robustness)에는 미치지 못하지만 계산 결과의 정확도는 거의 비슷하고 계산 시간은 오히려 짧다는 장점을 가지고 있다고 알려져 있다(Heil, et al., 2008).

### 2.2 격자 변형 기법

격자 변형 기법은 구조물의 변형 및 변위가 생길 때 유동장의 경계면에 반영하기 위하여 필요한 기법이다. 구조물의 변형이나 변위가 매우 크다면 격자를 재생성하거나 중첩격자계(overset grid)를 사용하는 것이 일반적이지만 변형이나 변위가 작은 경우에는 격자의 연결성(connectivity)을 유지하는 격자 변형 기법을 사용하는 것이 효율적이다. 격자 변형 기법은 크게 스프링 기법과 라플라스(Laplace) 기법이 주로 사용되며 기타 탄성변형 기법 및 바이하모닉(bi-harmonic) 기법도 있다. 본 연구에서는 이 중 라플라스 기법을 사용하였다. 라플라스 기법은 그 지배방정식으로 라플라스 방정식을 사용하며 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla u) = 0 \tag{1}$$

여기서  $\gamma$ 는 확산계수로 작용하며 상수 혹은 변수로 표현할 수 있다. 이 확산계수는 그 크기에 따라 계산영역 전체 격자의 변형 속도  $u$ 를 조절하는 역할을 한다. 다음 시간단계에서의 격자의 위치 벡터는 다음과 같이 재구성 된다.

$$r^{n+1} = r^n + u \Delta t \tag{2}$$

여기서  $r^{n+1}$ 와  $r^n$ 는 시간단계  $\Delta t$ 에 따른 격자점의 위치를 뜻한다.

### 2.3 지배 방정식 및 이산화 방법

구조체의 변형과 유동장의 해석을 위하여 상용 프로그램인 ANSYS와 CFX v12.1 을 사용하였다. 구조체 변형의 경우 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[M]\ddot{q} + [C]\dot{q} + [K]q = F \tag{3}$$

여기서 [M]은 질량 행렬, [C]는 감쇠 행렬 그리고 [K]는 강성 행렬을 의미하고 F는 외력을 의미한다.

비압축성 유동장의 경우 그 지배 방정식은 연속방정식과 운동량방정식이며 제어체적의 변형을 고려하면 다음과 같다.

$$\oint_S n \cdot u dS = 0 \tag{4}$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int_V \rho u dV + \oint_S n \cdot \rho (u - u_s) u dS \\ & = \oint_S n \cdot (\mu \nabla u) dS - \int_V \nabla p dV \end{aligned} \tag{5}$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $n$ 은 경계면  $S$ 에서 바깥으로 향하는 방향의 법선벡터,  $u$ 는 유체의 속도,  $u_s$ 는 경계면  $S$ 에서의 속도를

의미한다.  $\mu$ 는 유체의 점성계수이며  $p$ 는 절대압력에서 정수압을 뺀 동압을 의미한다.  $g$ 는 중력가속도이고  $r$ 은 위치벡터를 나타낸다. 제어체적의 변화율과 제어체적면의 속도와의 관계는 다음과 같은 공간 보존 법칙을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \partial V - \oint_S n \cdot u_s \partial S = 0 \quad (6)$$

난류 효과를 모델링하기 위하여 식 (5)에 대하여 레이놀즈평균(Reynolds average)을 취하면 점성계수와 압력항이 다음과 같이 수정된다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \nabla \cdot u \quad (8)$$

여기서  $\mu_t$ 는 k- $\omega$  식 (9)와 같은 관계를 가진다.

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (9)$$

이 때, 식 (9)의 난류운동에너지 k와 난류 운동 에너지 당 소산율  $\omega$  은 식 (10)과 (11)을 풀어서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) \\ &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + P_{kb} - \beta' \rho k \omega \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) \\ &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k + P_{\omega b} - \beta \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $\beta'$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\rho k$ ,  $\rho \omega$  등은 상수 계수이며  $P_k$ 는 난류 생성율을 의미한다.

지배방정식의 대류항은 2차 정도를 가지는 상류 차분 도식을 사용하여 이산화 하였으며 확산항 역시 2차 정도를 가지는 중앙차분법을 사용하였다. 시간항은 1차 정도를 가지는 내재적 오일러 방법을 사용하였으며 난류 모델로는 k- $\omega$  모델을 사용하였다.

### 3. 유체-구조 연성 기법의 검증

선택된 유체-구조 연성 기법을 요트 세일에 적용시키기에 앞서 두 가지 수치계산 시험을 다음과 같이 수행하였다.

#### 3.1 유동장에 수평한 보의 거동

먼저 유연한 얇은 보의 한쪽 끝이 사각형 형상의 상자에 수평하게 붙어 있으며 유동은 얇은 보에 수평하게 지나가는 2차원 문제를 다루어 보았다. 이러한 유동장에서는 사각형 형상의 상자에 의하여 와류가 번갈아서 생겨나게 되며 이 때 보의 위와 아래의 압력차가 생기는 현상이 나타나게 된다. 보 주위의 주기적인 압력 변화는 보에 주기적으로 외력을 주게 되고 보가 이 외력에 의하여 변형을 일으키게 된다. 보가 변형을 일으키면 주위의 유동장을 다시금 교란시키는 문제로 Wood, et al. (2008), Wall and Ramm (1998), Matthies and Steindorf (2003) 그리고 Dettmer and Peric (2006)이 계산한 대표적인 유체-구조 연성 사례이다.

Fig. 2는 계산영역의 형상과 격자계를 나타낸 것으로 계산영역의 크기는 길이 19.5m 높이 12.0m의 크기를 가지며 계산영역 내의 사각형 상자는 길이와 높이가 각각 1.0m의 크기를 가진다. 유연한 보는 길이 4.0m이고 두께는 0.06m의 크기를 가진다. 유동장은 초기시간 0.0m/s에서 1초가 되었을 때 51.3m/s가 되도록 선형적으로 증가시켜 안정화하였으며, 이 때 보의 변형을 고려하지 않았다. 레이놀즈수는 333에 해당한다. 계산영역 왼쪽의 유입경계조건으로는 속도와 압력이 일정한 조건(Dirichlet type condition)을 사용하였으며, 오른쪽의 유출경계조건으로는 속도와 압력이 부드럽게 변하는 조건(Neumann type condition)을 사용하였고, 계산영역의 위와 아래쪽의 경계 조건은 대칭조건을 사용하였다.

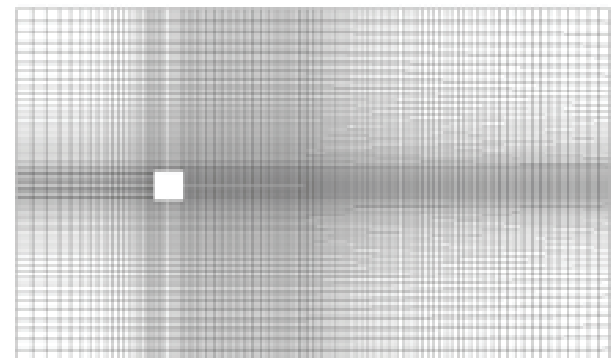
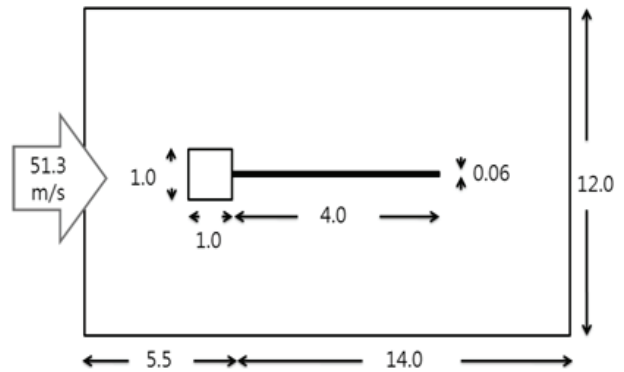


Fig. 2 Domain(top) and grid(bottom) for FSI verification

유동장 해석을 위한 격자는 구조격자를 사용하였으며 격자 테스트를 위하여 그 개수는 5,698개, 11,740개 및 23,172개를 사용하였다. 구조물 근방 격자의 최소 크기는 얇은 보두께의 절반 크기를 사용하였다. 보의 해석을 위한 격자는 60개의 셀을 사용하였으며 시간간격은 0.005초를 사용하였다. 유체의 밀도와 점성계수는 각각  $1.18 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  과  $1.82 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 의 값을 사용하였으며 보의 밀도와 영률은 각각  $0.1 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  과 2.5 MPa의 값을 사용하였다. 보의 포와송(Poisson) 비는 0.3을 사용하였다.

와류진동(vortex shedding) 현상은 Fig. 3에서와 같이 보 주위의 압력 변화를 가져오게 되고 보의 주기적인 변화를 가져오게 된다. 우선 보가 아래로 처지는 경우 보의 왼쪽 상단에서 강한 음의 압력이 발생하게 되고 이는 보를 위쪽으로 끄는 힘으로 작용한다. 이러한 힘으로 인하여 보는 위로 변형을 일으키게 되고, 위로 변형을 일으킨 보는 왼쪽 하단에서 강한 음의 압력이 발생하여 보를 아래로 잡아당기는 힘으로 작용하여 결국 이러한 변형 과정이 반복적으로 나타나게 된다.

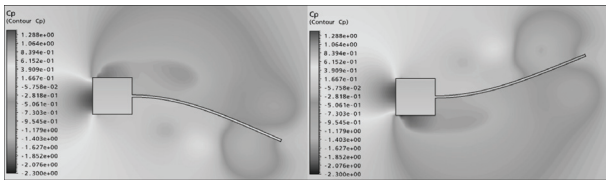


Fig. 3 Pressure coefficient contours at  $t=4.6\text{s}$ (left) and  $t=4.7\text{s}$ (right)

시간에 따른 보 끝의 수직방향 변위를 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있는데 보의 진동 주기는 약 0.30~0.32초이고 진폭은 약 1.22~1.23m임을 확인할 수 있다.

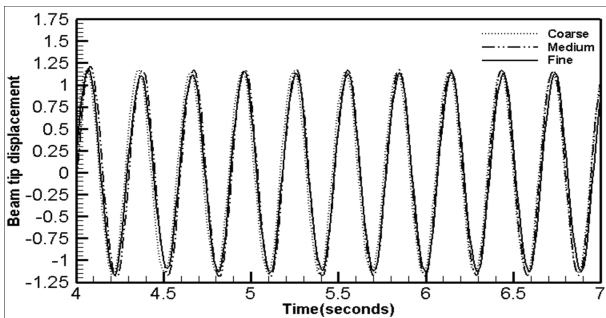


Fig. 4 Vertical tip displacement of the cantilever beam

일반적으로 사각형 상자 뒤에서 발생하는 와류진동의 스트루הל(Strouhal) 수는 약 0.12이며 이를 주기로 환산했을 때 0.16초가 된다. 이는 보의 진동 주기인 0.30 ~ 0.32초와는 큰 차이가 있다. 본 연구에서 사용한 보의 고유 진동주기가 0.33초임을 고려하면 보의 진동은 와류 진동주기보다는 보의 고유 진동주기에 보다 깊은 연관이 있음을 알 수 있다.

Table 1은 본 연구 결과를 Wall and Ramm (1998) 등의 다른 연구 결과들과 비교한 것으로 유사한 결과를 보여주고 있음을 확인할 수 있다.

Table 1 Comparison of present results with the literatures

Author	Period of oscillation T(s)	Tip deflection (m)
Wall and Ramm (1998)	0,31 ~ 0,36	1,12 ~ 1,32
Matthis and Steindorf (2003)	0,32	1,0 ~ 1,35
Dettmer and Peric (2006)	0,32 ~ 0,34	1,1 ~ 1,4
Wood, et al. (2008)	0,32 ~ 0,36	1,10 ~ 1,20
Present work	0,30 ~ 0,32	1,22 ~ 1,23

### 3.2 유동장에 수직한 보의 거동

두 번째 수치시험의 경우, 유연한 얇은 보가 수직으로 세워져 있으며 한쪽 끝은 바닥에 고정되어 있는 2차원 유동을 살펴보았다. 유동은 보와 수직으로 흘러 지나가게 되며 유동장의 힘으로 인하여 보가 휘어지게 된다. 보가 휘어지면 보의 복원력으로 인하여 원위치로 돌아오려는 거동을 보이나 계속되는 유체력으로 인하여 다시 보가 휘게 되는데 이 과정이 반복되다가 일정한 변형을 유지하게 되는 문제로 Shin, et al. (2007)이 계산한 바 있다. Fig. 5는 계산영역의 형상과 격자를 나타낸 것으로 계산영역의 크기는 길이 30m 높이 10m의 크기를 가지며 유연한 보는 길이 1.0m 두께 0.01m의 크기를 가진다. 유동장은 초기시간 0.0m/s에서 시간이 2초가 되었을 때 1.0m/s가 되도록 선형적으로 증가시켜 유동을 안정화했으며 이 때 보의 변형은 고려하지 않았다. 이 때의 레이놀즈수는 500에 해당한다. 계산영역 왼쪽의 유입경계조건으로는 Dirichlet type 조건을 사용하였으며, 오른쪽의 유출경계조건으로는 Neumann type 조건을 사용하였고, 계산영역의 위와 아래쪽의 경계 조건은 대칭조건을 사용하였다.

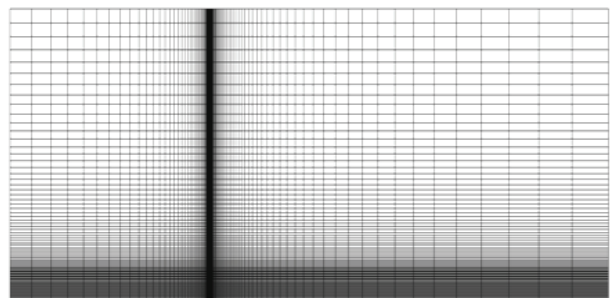
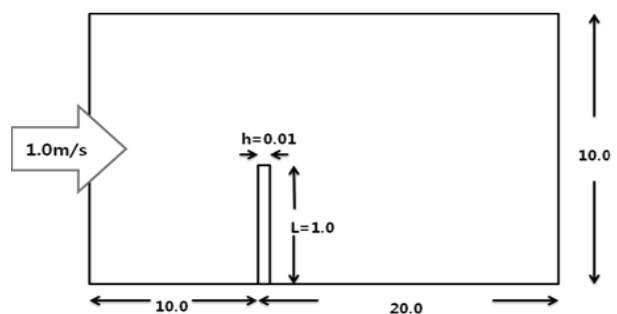


Fig. 5 Domain(top) and grid(bottom) for FSI verification

유동장 해석을 위한 격자는 구조격자를 사용하였으며 격자 테스트를 위하여 셀의 개수는 8,974개, 18,280개, 35,784개를 사용하였다. 보 주위 격자의 최소 크기는 보두께의 절반 크기를 사용 하였다. 보의 해석을 위한 격자는 50개의 셀을 사용하였으며 시간간격은 0.005초를 사용하였다. 유체의 밀도와 점성계수는 각각  $1.0 \text{ kg/m}^3$  과  $2.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 의 값을 사용하였으며 보의 밀도와 영률은 각각  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  과  $10.92 \text{ MPa}$ 의 값을 사용하였다. 보의 포와송 비는 0.3을 사용하였다.

시간에 따른 보 끝단의 수평방향 변위는 Fig. 6과 같다. 보가 처음에는 강한 유체력에 의하여 큰 변형을 일으키지만 복원력으로 인하여 다시 원상태로 돌아오는 모습을 확인할 수 있다. 그러나 유체력이 계속 작용하기 때문에 보가 완전히 원위치로는 돌아오지 않게 되고 다시 유체력에 의하여 변형을 일으킨다. 이 때는 보에 복원력이 남아있기 때문에 처음 변형이 일어날 때 보다는 덜 휘게 되며 시간이 지날수록 저주파수의 매우 작은 진동이 남게 된다.

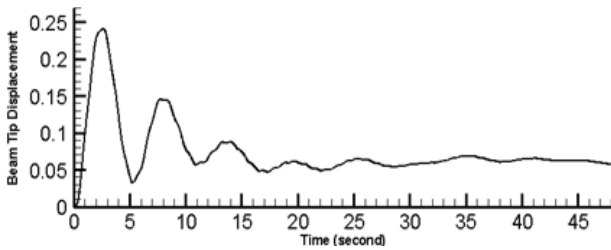


Fig. 6 Horizontal tip displacement of the cantilever beam

Fig. 7은 시간에 따라 보 주위의 와도 분포를 나타낸 것으로 보 뒤로 강한 음의 압력이 생기게 되어 보가 힘을 받게 되어 보에 변형을 일으키고 있다. 보가 거의 최대치로 변형을 하게 되면 복원력으로 인하여 보가 원위치로 가려하는데 이 때 보 뒤쪽으로 압력이 크게 떨어지게 되며 2차 와류가 발생하게 된다.

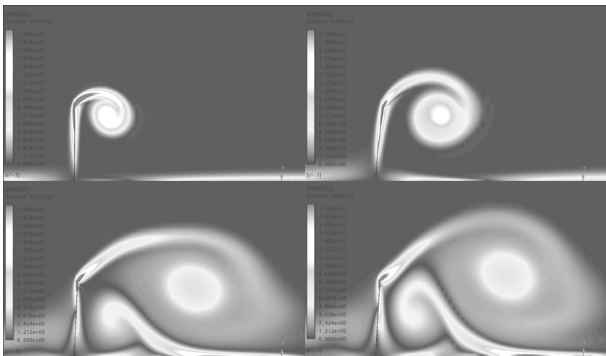


Fig. 7 Vorticity contours of the cantilever beam

진동 주기가 확실히 나타나는 20초 정도까지는 주기가 약 5.5 초 정도를 보이고 있으며 최대 변위는 약 0.24m 인 것을 확인할 수 있다. 20초 이후부터는 변위가 약 0.07m 정도인 것을 보이고 있으며 이는 Fig. 8에서 보이는 Shin, et al. (2007)의 결과와도 매우 잘 일치 하는 것을 알 수 있다.

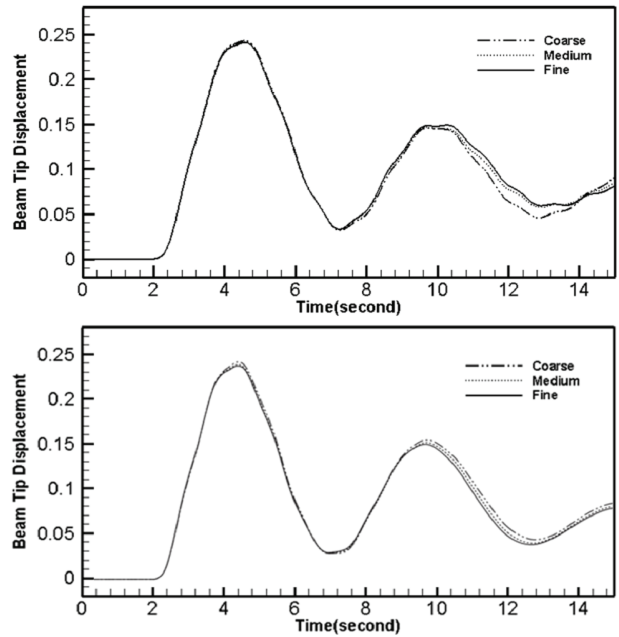


Fig. 8 Horizontal tip displacement of present(top) and Shin, et al. (2007)(bottom)

## 4. 요트 세일 주위의 유동 해석

### 4.1 요트 세일의 정의 및 계산 조건

본 연구에서는 30ft 급 요트인 KORDY30의 세일을 기준 세일 형상으로 선정하였다. KORDY30은 하나의 마스트(mast)에 집 세일과 메인 세일을 장착한 슬루프(sloop)형 요트이며, 수치계산에 사용되어진 세일의 단면은 NACA a=0.8 캠버선(camber line)의 형상을 기초로 하고 있다.

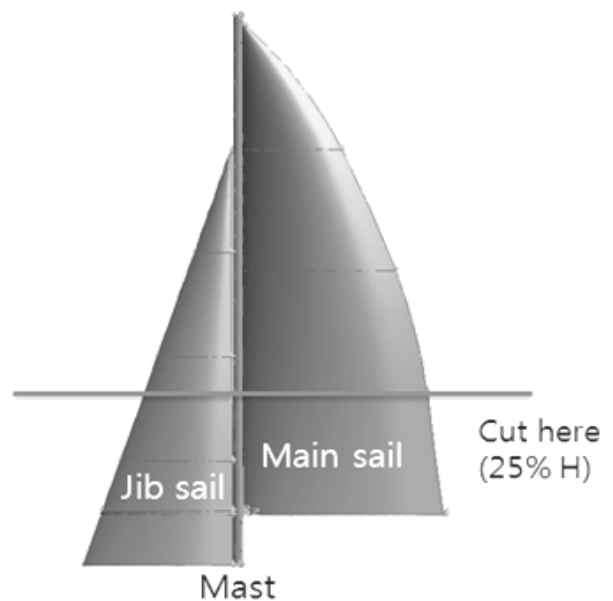


Fig. 9 Sail system of KORDY30

요트 세일의 2차원 단면은 Fig. 9에서와 같이 세일 높이의 25% 지점을 선택하였는데 세일의 위쪽과 아래쪽은 3차원 유동 현상이 활발히 일어나기 때문이다. 집 세일과 메인 세일의 2차원 단면은 각각 2.9475m와 4.4875m의 코드(chord) 길이를 가지고 있으며 메인 세일은 10도의 입사각을 가지고 있으며 집 세일은 메인세일과 11도의 각도를 가지고 있다.

계산영역의 크기는 Fig. 10에서와 같이 사다리꼴의 형상을 하고 있으며 50m의 길이와 20m, 30m의 높이를 가지고 있다. 세일의 두께는 0.32mm를 사용하였으며 유동장 해석을 위하여 33,780개의 셀로 이루어진 구조 격자를 사용하였다. 세일 근처에서의 y+ 값은 1 이하가 되도록 하였다. 세일의 변형을 위하여 집 세일과 메인 세일에 각각 50개와 80개의 셀로 이루어진 구조 격자를 사용하였다. 계산영역 왼쪽면, 위쪽면 그리고 아래쪽면의 유입경계조건은 속도와 압력이 일정한 Dirichlet type의 경계 조건을 사용하였고 계산영역 오른쪽 면의 유출경계조건은 속도와 압력이 부드럽게 변하는 Neumann type의 경계 조건을 사용하였다.

요트 세일을 2차원 단면으로 해석할 경우 세일의 양 끝단 경계 조건은 2차원 평면에서 벗어난 인장 (tension) 조건을 사용하여야 한다. 이 경우 세일의 양 끝단은 고정되어 있지 않을 뿐 아니라 자유롭게 움직일 수 있기 때문에 2차원 해석이 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 세일의 양 끝을 고정시키고 자유회전이 가능하도록 경계 조건을 사용하였다.

유체는 공기를 사용하였으며 유속은 20knots를 사용하였다. 공기의 밀도와 점성계수는 각각  $1,284 \text{ kg/m}^3$ 과  $1,8618 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 의 값을 사용하였다. 세일의 재질은 kevlar섬유로서 밀도와 영률은 각각  $1,44 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 와 83MPa이고, 포와송 비는 0.36의 값을 사용하였다.

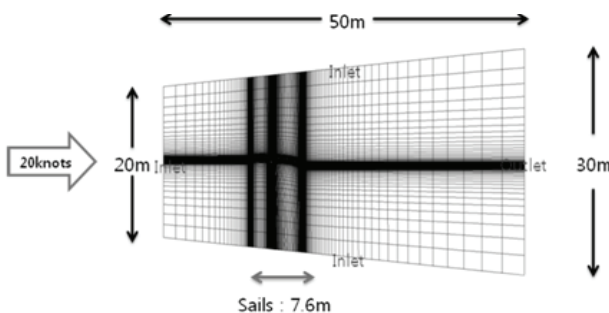


Fig. 10 Domain and grid of the yacht sail system

본 연구에서는 크게 두 가지 관점에서 요트 세일의 변형을 고찰하였는데 하나는 집과 메인 세일 모두 있을 경우와, 다른 하나는 메인 세일만 있을 경우이다.

#### 4.2 집과 메인 세일이 있을 경우

집과 메인 세일이 모두 있을 경우 메인 세일의 변형은 Fig. 11에서 보이는 것과 같으며 그 방향은 크게 세일의 앞쪽부터 아래-위-아래-위의 방향을 하고 있다.

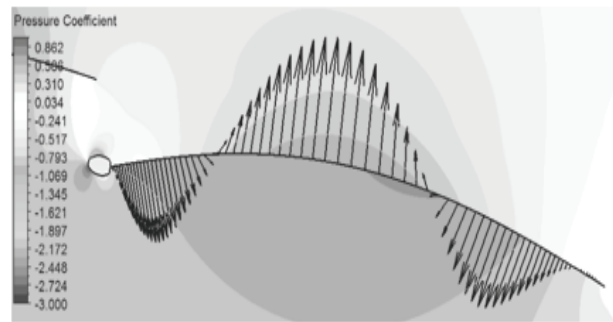


Fig. 11 Deformation of main sail

세일의 형상 변화와 세일 주위 압력과의 관계를 Fig. 12에 나타내었다. 이 때, 세일의 변형이 없는 위치와 세일 흡입면의 압력 변동이 없는 위치가 거의 일치함을 알 수 있으며 이를 기준으로 Fig. 12에서 보는 바와 같이 크게 네 영역으로 나누어 분석하였다.

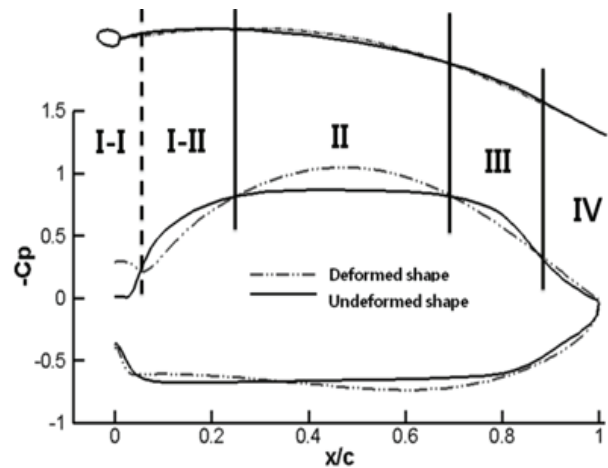


Fig. 12 Pressure distribution region on the main sail

영역 II와 IV는 음의 압력 계수가 커지고 있는데 이 때, 세일은 위로 변형되고 있음을 알 수 있다. 반면, 영역 III과 I-I는 음의 압력 계수가 작아지고 있으며 세일은 아래쪽으로 변형되고 있음을 알 수 있다. 그러나 세일의 압력면을 기준으로 살펴보면 세일의 형상 변화와 세일 주위 압력변화의 관계가 명확하게 나타나지는 않는다. 즉, 세일의 형상 변화는 세일 압력면 보다는 세일 흡입면 쪽에서의 압력과 밀접한 관계가 있다. 또한, 세일의 변형된 형상을 살펴보면 세일의 초기 형상보다 전체적으로 부드러운 곡선의 형태를 하고 있음을 알 수 있다.

영역 I-II은 음의 압력계수가 크에도 불구하고 세일이 아래쪽으로 변형되고 있음을 보이는데 이는 Fig. 13과 같이 마스트에 의한 영향으로 보인다. 세일이 변형되지 않았을 때는 세일의 압력면에서 보다 큰 유동 박리 현상이 발생한다. 그러나 세일이 변형되었을 때는 세일의 흡입면에서 보다 큰 유동 박리 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, I-II 영역에서는 세일이 아래쪽으로 변형이 되지만 유동 박리의 발생으로 인하여 그 주변의 압력이 크게 감소하기 때문에 음의 압력계수는 커지게 된다.

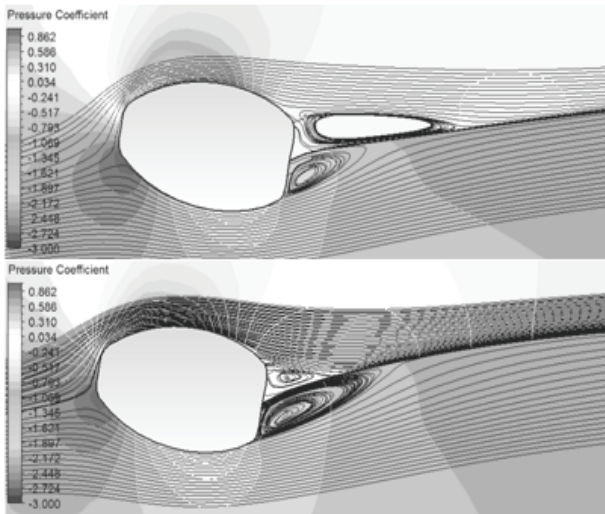


Fig. 13 Separation bubble and reattachment region on deformed main sail(top) and undeformed main sail(bottom)

집 세일의 변형은 Fig. 14에서 보이는 바와 같으며 메인 세일과 유사한 변형을 보이고 있다. 집 세일의 변형은 크게 아래-위-아래 방향을 보이고 있으며 변형된 집 세일의 형상은 변형되지 않았을 때 보다 전체적으로 부드러운 모양을 하고 있음을 알 수 있다.

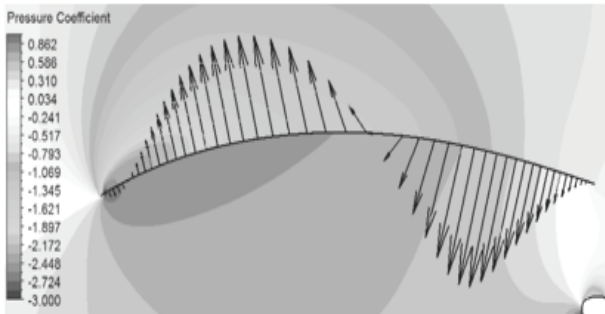


Fig. 14 Deformation of jib sail

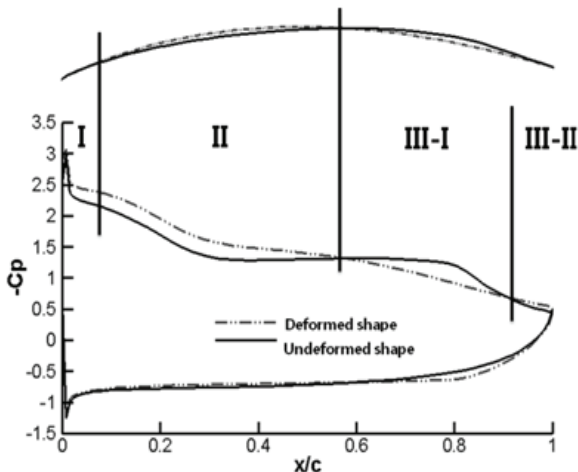


Fig. 15 Pressure distribution region on the jib sail

메인 세일과 같은 방법으로 집 세일 주위의 압력 계수와 세일의 변형을 Fig. 15와 같이 나타내었다. II 영역에서 음의 압력계수는 커지게 되며 세일은 위쪽으로 변형된다. III-I 영역에서는 음의 압력계수가 작아지며 세일은 아래쪽으로 변형됨을 알 수 있다. I 영역은 메인 세일의 I-I 영역과 마찬가지로 음의 압력계수가 큼에도 불구하고 세일은 아래쪽으로 변형 된다. 집 세일은 마스트가 없기 때문에 영역 I에서 Fig. 16과 같은 모습을 보인다.

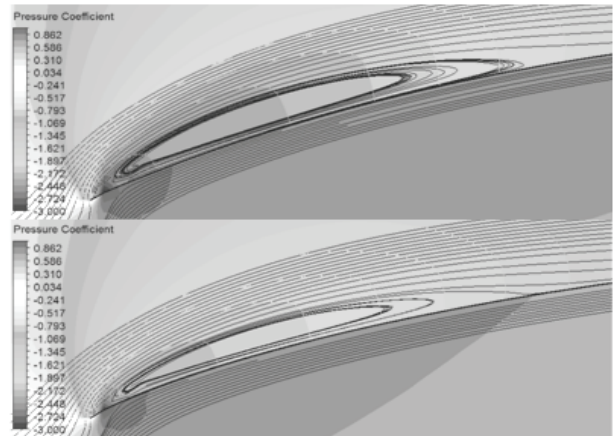


Fig. 16 Separation bubble and reattachment region on deformed jib sail(top) and undeformed jib sail(bottom)

집 세일은 마스트가 있는 메인 세일과는 달리 흡입면에서만 유동 박리가 발생함을 알 수 있다. 세일이 변형하게 되면 유동 박리가 변형되지 않았을 때 보다 커짐을 알 수 있고 음의 압력 계수 역시 커짐을 알 수 있다.

영역 III-II는 집 세일의 끝단으로, 음의 압력계수가 조금 커지지만 세일의 형상 변화가 거의 없음을 볼 수 있다. 즉, 세일이 경계면에 매우 가까이 위치하고 있기 때문에 흡입면에 작용하는 압력이 세일을 크게 변화시키지는 못하는 것으로 보인다.

집 세일과 메인 세일 주위의 유동은 변형을 고려하였을 경우 Fig. 17과 같이 세일에 걸리는 압력의 중심이 앞쪽으로 움직이고 있음을 알 수 있으며 세일의 양력 성능과도 연관되어져 있다.

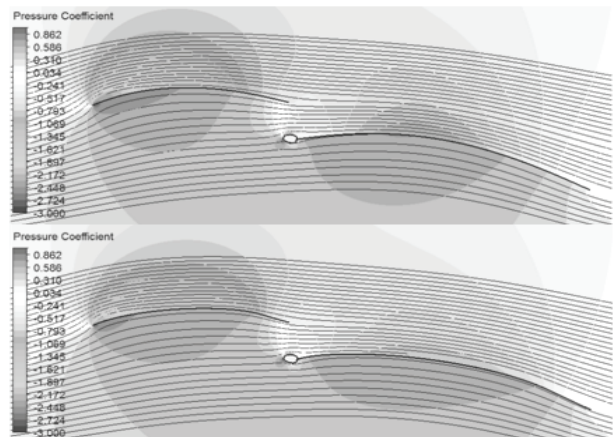


Fig. 17 Cp contours and streamline of deformed sails(top) and undeformed sails(bottom)

세일의 변형에 따른 양력 성능은 Fig. 18에서처럼 나타나는데 세일의 변형을 고려하였을 경우 메인 세일은 약 4.02%의 양력이 증가하였고 집 세일은 약 3.2%의 양력이 증가하여 전체 세일 시스템에서 발생하는 양력이 약 3.6% 증가함을 알 수 있다.

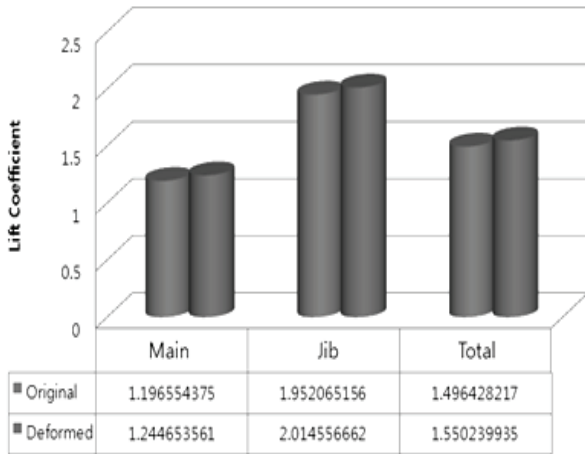


Fig. 18 Lift coefficient of the main sail and jib sail

### 4.3 메인 세일 단독의 경우

집 세일이 없는 경우 메인 세일의 변형은 Fig. 19와 같이 집 세일이 있는 경우와 크게 다를 수 있다. 집 세일이 없는 경우 흡입면의 압력 중심과 압력면의 압력 중심이 모두 앞쪽으로 이동하며 세일의 변형되는 모양도 달라진다. 세일의 형상 변화와 압력계수의 관계를 Fig. 20과 같이 나타내면, 집 세일이 없는 경우 메인 세일 주위의 압력 분포는 전체적으로 집 세일 주위의 압력 분포와 매우 유사하다. 영역 I의 경우 세일의 흡입면에서 유동 박리가 강하게 발생하며 이는 집 세일에서의 유동 박리와 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서 이 영역에서는 유동 박리로 인하여 압력이 급격히 감소하게 되고 음의 압력 계수의 값이 높아진다.

영역 II의 경우 음의 압력계수가 작아지고 세일은 아래쪽으로 변형되며 영역 III의 경우 음의 압력계수는 커지고 세일은 위쪽으로 변형된다. 영역의 크기와 위치를 보면, 영역 II의 크기는 감소하고 영역의 중심이 앞쪽으로 이동한 반면 영역 III의 크기는 증가하고 영역의 중심 역시 앞쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 영역의 중심이 앞쪽으로 이동한 것은 세일의 유효 압력 중심이 세일의 앞쪽으로 이동하였기 때문에 집 세일은 메인 세일에 걸리는 압력 중심점을 좀 더 앞쪽으로 이동시키는 역할을 하고 있다. 영역 IV는 음의 압력이 더욱 커지지만 세일의 변형에 큰 영향을 미치고 있지는 않음을 확인할 수 있다.

집 세일의 유무에 따른 메인 세일의 양력은 Fig. 21에서와 같이 나타나는데 집 세일이 있는 경우 메인 세일이 변형되면서 양력이 4.02% 증가하는데 비하여 집 세일이 없는 경우 메인 세일이 변형되면서 양력이 오히려 9.43% 감소함을 알 수 있다.

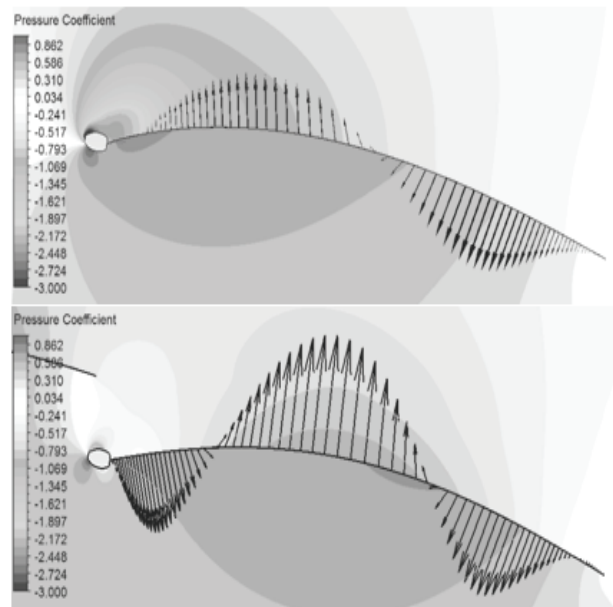


Fig. 19 Deformation of the main sails w/o jib sail(top) and w/ jib sail(bottom)

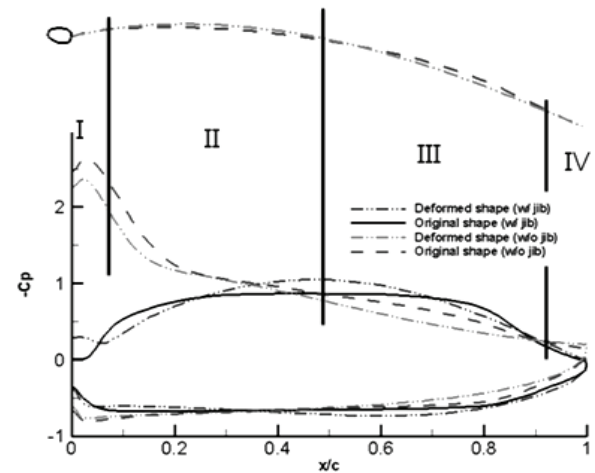


Fig. 20 Pressure distribution region on the main sail w/ and w/o jib sail

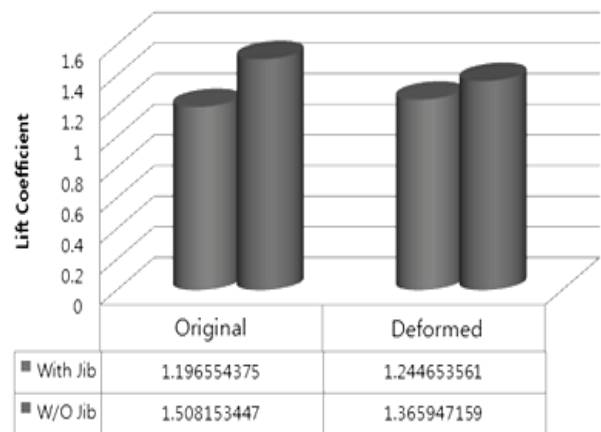


Fig. 21 Lift coefficient of the main sail w/ and w/o jib sail



## 5. 결론

본 연구에서는 집과 메인 세일 모두 있을 경우와, 메인 세일만 있을 경우에 때 때 주위 유동의 특성을 살펴보았다. 집 세일과 메인 세일이 모두 있는 경우 요트 세일의 변형을 고려하면 세일 전체의 양력이 약 3.6% 증가함을 보였다. 반면, 집 세일이 없는 경우 메인 세일의 변형을 고려하면 세일에 걸리는 양력이 약 9.43% 감소함을 보였다. 이는 세일의 변형을 고려함에 따라 요트 세일 성능 해석의 결과가 크게 차이 난다는 것을 의미하고 있다. 요트 세일의 양력 변화는 요트의 자세 변화와 밀접한 관련이 있으며 이는 요트의 추진 성능에도 영향을 주게 되기 때문에 요트 세일 해석을 수행할 경우 세일의 변형을 고려해야 할 것이다.

## 후 기

본 논문은 교육과학기술부 선도연구센터육성사업의 다중현상 CFD 연구센터(2009-0093129)와 교육과학기술부 지원 World Class University(R32-2008-000-10161-0), 연구재단 기초연구사업(2010-0028150) 및 목포대학교 2009학년도 교내연구비 지원으로 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

Chi, H.R. Kim, W.J. & Park, J.H., 2007. Turbulent flow calculation around yacht sails. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), pp.64-73.

Coiro, D. Nicolosi, F. Scherillo, F. & Maisto, U., 2002. Numerical and Experimental Aeroelastic Analysis of Sails. *High Performance Yacht Design Conference, Auckland, New Zealand*.

Dettmer, W. & Peric, D., 2006. A computational framework for fluid-structure interaction: finite element formulation and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, pp.5754-5779.

Heil, M. Hazel, A.L. & Boyle, J., 2008. Solvers for large-displacement fluid-structure interaction problems: segregated versus monolithic approaches. *Computational Mechanics*, 43, pp.91-101.

Hobbs, M., 2000. Aeroelastic Analysis of a Yacht Rig. *Ph.D. thesis, University of Southampton*.

Kim, W.J. et al., 2010. Hydro- and aerodynamic analysis for the design of a sailing yacht. *Journal of Marine Science Technology*, 15, pp.230-241.

Matthies, H.G. & Steindorf, J., 2003. Partitioned strong coupling algorithms for fluid-structure interaction. *Computers and Structures*, 81, pp.805-812.

Paton, J. Morvan, H.P. & Heppel, P., 2008. Fluid Structure Interaction of Yacht Sails. *International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts, Lorient, France*.

Renzsch, H. Muller, O. & Graf, K., 2008. A Fluid Structure Interaction Program for the Investigation of Spinnakers. *International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts, Lorient, France*.

Shin, S. et al., 2007. Computations of flow over a flexible plate using the hybrid Cartesian/immersed boundary method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 55, pp.263-282.

Trimarchi, D. Turnock, S. Chapelle, D. & Taunton, D., 2009. Fluid-structure interaction of an isotropic thin composite materials for application to sail aerodynamics of a yacht in waves. *12th Numerical Towing Tank Symposium, Cortona, Italy*.

Wall, W.A. & Ramm, E., 1998. Fluid-structure interaction based upon a stabilized(ALE) finite element method. *4th World Congress on Computational Mechanics - New Trends and Applications, S. Idelsohn, E. Onateand E. Dvorkin(eds) CIMNE, Barcelona, Spain*.

Wilkinson, S., 1984. Partially Separated flow around Masts and Sails: *Ph.D. thesis, University of Southampton*.

Wood, C. Gill, A.J. Hassan, O. & Bonet, J., 2008. A partitioned coupling approach for dynamics fluid-structure interaction with applications to biological membranes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 57, pp.555-581.

Yoo, J. et al., 2005. Calculations of the interactions between main and jib sails. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(1), pp.1-10.

Yoo, J. & Kim, H.T., 2006. Computational and experimental study on performance of sails of a yacht. *Ocean Engineering*, 33(10), pp.1322-1342.



이희범

이신형

유재훈