creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

풍상 범주 중인 세일링 요트의 세일 변형 해석 및 자세를 고려한 속도 추정 방법 개발

2014년 2월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

박 미 연

풍상 범주 중인 세일링 요트의 세일 변형 해석 및 자세를 고려한 속도 추정 방법 개발

지도교수 이 신 형

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014년 2월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

박 미 연

박미연의 석사 학위논문을 인준함

2014년 2월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위　　원 _____ (인)

Abstract

풍상 범주 중인 세일링 요트의 세일 변형 해석 및 자세를 고려한 속도 추정 방법 개발

Mi Yeon Park
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Yacht sails, which are made out of thin fiber, are deformed by wind pressure. This deformation change fluid force (side force, driving force) on the sails and the attitude of the yacht. Therefore, it is important to reflect the variations of the sail shape when performance analysis on yacht sails is studied. In the present study, fluid-structure interaction(FSI) analysis is used to consider sail's deformation and fluid force on the mutation. Using the method, the change of sail shape, pressure distribution, separation, vortex, Lift and Drag on the sails are calculated.

One of the most important factors in sailing yacht design is accurate velocity prediction. Velocity prediction programs (VPP's) are widely used to predict velocity of sailing yachts. VPP's, which are primarily based on experimental data and experience of long years, suffer limitations when applied in realistic conditions. Thus, in the present study, a high fidelity velocity prediction method using Computational Fluid Dynamics (CFD) is proposed. Using the developed method, velocity and motion of a 30 feet sloop yacht, which was developed by Korea Research Institute of Ship and Ocean (KRISO) and termed KORDY30, were predicted in upwind sailing condition.

Keywords : Sailing yacht (세일링 요트), Computational fluid dynamics (전산 유체 역학), Fluid-structure interaction analysis (유체-구조 연성 해석), Sail deformation (세일 변형), Velocity prediction program(VPP)

Student Number : 2011-23459

목차

1. 서론 1
1.1. 배경 1
1.2. 세일링 요트 3
1.3. 문헌 조사 6
1.4. 연구 목표 9
2. 수치 해석 방법 10
2.1. 지배방정식 10
2.1.1. 유체 영역 10
2.1.2. 구조영역 11
2.2. 수치 모델 13
2.2.1. 난류 모델 13
2.2.2. 자유 수면 모델 14
2.2.3. 솔리드 모델 16
2.3. 유체-구조 연성 기법 17
2.4. 자세 및 속도 추정 알고리즘 20
3. 요트 세일 변형 해석 22
3.1. 문제 및 형상 정의 22
3.2. 계산 영역 및 경계 조건 24
3.3. 결과 28

4. 요트의 자세 및 속도 추정 4 4
4.1. 문제 및 형상 정의 4 4
4.2. 계산 영역 및 경계 조건 4 6
4.3. 결과 5 3
4. 결론 8 0
5. 참고 문헌 8 2

List of Figures

그림 1 Sloop yacht system 4

그림 2 Flow chart of strong coupling method for solving FSI problem .. 1 8

그림 3 Velocity prediction algorithm for CFD 2 1

그림 4 Sail system of KORDY 30 ..... 2 2

그림 5 Generated grid system 2 5

그림 6 Domain and grid of the yacht sail system 2 5

그림 7 Grid of the Yacht sail for the structural analysis 2 6

그림 8 Camber line of the undeformed and deformed jib sail 2 9

그림 9 Cp contour and limiting streamlines on the undeformed and the deformed jib sail (windward side) 3 0

그림 10 Cp contour and limiting streamlines on the undeformed and the deformed jib sail (leeward side) 3 0

그림 11 Separation and vortex on 50% mast height of the undeformed (top) and deformed (bottom) jib sail 3 1

그림 12 Pressure distribution region on 50% mast height of the jib..... 3 2

그림 13 Camber line of the undeformed and deformed main sail 3 3

그림 14 Cp contour and limiting streamlines on the undeformed and the deformed main sail (windward side) 3 5

그림 15 Cp contour and limiting streamlines on the undeformed and the deformed main sail (leeward side) 3 5

그림 16 Separation and vortex on 50% mast height of the undeformed (top) and deformed (bottom) jib and main sail..... 3 6

그림 17 Pressure distribution region on 50% mast height of the main sail 3 7

그림 18 Separation and vortex on the foot of the undeformed (left) and deformed (right) main sail 3 8

그림 19 Separation and vortex on the top of the undeformed (left) and deformed (right) main sail 3 9

그림 20 Separation and vortex on 90% mast height of the undeformed (top) and deformed (bottom) main sail..... 4 0

그림 21 Pressure distribution region on 10% mast height of the main sail 4 1

그림 22 Pressure distribution region on 90% mast height of the main sail 4 1

그림 23 Lift coefficient of the main sail and jib sail 4 2

그림 24 Drag coefficient of the main sail and jib sail 4 3

그림 25 Lift-to-Drag ratio of the main sail and jib saill 4 3

그림 26 Sailling yacht geometry 4 5

그림 27 Domain and grid of yacht sail system..... 4 7

그림 28 Domain and grid of yacht hull system 4 9

그림 29 Side force change on hull by leeway angle (Vm=1.93m/s, heel: 20 deg.) 5 1

그림 30 Sail trim and yacht performance for apparent wind angle 30 ° 5 5

그림 31 Sail trim and yacht performance for apparent wind angle 60 ° 5 6

그림 32 Sail trim and yacht performance for apparent wind angle 90° 57

그림 33 Force and moment balance error for apparent wind angle 58-61

그림 34 CP contours on sails for apparent wind angle 30° (leeward and windward side) 63

그림 35 CP contours on sails for apparent wind angle 60° (leeward and windward side) 63

그림 36 CP contours on sails for apparent wind angle 90° (leeward and windward side) 64

그림 37 Comparison of CL and CD for the sail 64

그림 38 Thrust coefficient for apparent wind angle 65

그림 39 Side force coefficient for apparent wind angle 65

그림 40 Heel angle for apparent wind angle 67

그림 41 Heeling moment coefficient for apparent wind angle 68

그림 42 Boat speed for apparent wind angle 69

그림 43 Leeway angle for apparent wind angle 70

그림 44 Yaw moment coefficient for apparent wind angle 70

그림 45 Waterline shape for apparent wind angle 30° 71

그림 46 Waterline shape for apparent wind angle 40° 72

그림 47 Waterline shape for apparent wind angle 50° 72

그림 48 Waterline shape for apparent wind angle 60° 72

그림 49 Waterline shape for apparent wind angle 70° 73

그림 50 Waterline shape for apparent wind angle 80° 73

그림 51 Waterline shape for apparent wind angle 90° 7 3

그림 52 Wetted surface area for apparent wind angle 7 4

그림 53 CPress contours on port and starboard side for apparent wind angle 30° 7 5

그림 54 CPress contours on port and starboard side for apparent wind angle 40° 7 6

그림 55 CPress contours on port and starboard side for apparent wind angle 50° 7 6

그림 56 CPress contours on port and starboard side for apparent wind angle 60° 7 7

그림 57 CPress contours on port and starboard side for apparent wind angle 70° 7 7

그림 58 CPress contours on port and starboard side for apparent wind angle 80° 7 8

그림 59 CPress contours on port and starboard side for apparent wind angle 90° 7 8

List of Tables

표 1 Verification test for the sail deformation problem 27

표 2 Hydrostatics of Test Yacht (Full Scale) 45

표 3 Inlet boundary conditions..... 47

표 4 Verification test for the yacht velocity prediction problem..... 50

표 5 Heel angle, speed, leeway angle, rudder angle for apparent wind. 67

1. 서론

1.1. 연구 배경

일반 상선이 프로펠러로부터 추진력을 얻는 것에 비해, 세일링 요트는 세일에 작용하는 바람에 의해 추진력을 얻는다. 바람을 추진력으로 전환하는 세일의 유체역학적 성능을 최적화하는 것은 매우 중요하다. 요트 세일은 대부분 얇은 직물 소재로 만들어지기 때문에 조그만 힘에도 그 형상이 쉽게 변하는 특성을 지닌다. 풍압으로 인한 세일 형상의 변형은 세일 주위 유동과 유체력을 다시 바꾸게 된다.

세일에 작용하는 유체력, 즉, 항력이나 양력으로 인해 선체가 횡경사를 갖게 되며, 동시에 일정한 각도의 사항이 유발된다. 따라서 세일링 요트의 경우, 사항과 경사상태에서의 저항을 고려해야 한다. 추진력, 선체의 자세, 저항과의 관계는 서로 밀접하게 연관되어 있으므로 이러한 모든 외력과 선체 반력 사이에 균형이 이루어지는 상태를 찾아내고, 이 상태에 대한 선속을 추정해야 한다. 세일링 요트의 설계와 개발에서 가장 중요한 부분의 하나는 요트를 원하는 방향과 속도로 전진시키는데 필요한 추진력을 발생시키고 다양한 운항조건에서 수면 아래위 선체 부위에 각각 작용하는 수력과 풍력의 합력과 균형을 이루면서 안정된 자세로 운항할 수 있도록 하는 것이다. 이러한 외력과 선체 반력 사이의 균형을 이루는 상태를 찾아내고 그 속도를 추정하는 프로그램이

VPP(Velocity Prediction Program)이다. VPP는 입력된 풍속과 풍향에 대한 요트의 자세와 속도를 계산해내는 프로그램으로 시간적인 면에서 효율적이라는 장점이 있으나, 경험식을 사용하기 때문에 새로운 선형이나 극한 해상상태에 대한 고려가 어렵다. 그래서 본 연구에서는 유체역학적인 접근이 가능한 CFD를 이용해 물리적으로 타당한, 좀 더 정확한 값을 도출하고자 한다.

1.2. 세일링 요트

요트는 놀이나 스포츠에 이용되는 오락용 배로서 바람의 힘을 이용하여 달리는 세일링 요트와 기계의 힘으로 달리는 모터 요트의 두 종류가 있다. 본 연구의 연구 대상으로 선정한 세일링 요트는 돛대와 돛대수에 의해 분류하기도 하는데, 한 장의 세일이 있는 켓 보트, 집세일, 마스트, 메인세일이 있는 슬루프, 슬루프에 집세일이 하나 추가된 카터, 두 개 이상의 마스트를 가진 스쿠너 등이 있다. 가장 일반적인 형태이면서 속도가 빠르고 선회성이 좋은 슬루프형 요트를 연구 대상으로 선정하였다.

슬루프형 요트는 두 개의 세일과 선체, 킬, 러더로 이루어져 있기 때문에 구조가 복잡하다. 슬루프형 요트의 구조는 그림 1과 같다. 세일의 오른쪽 변을 리치(Leech)라고 하고, 세일의 왼쪽 변을 러프(Luff)라고 하며, 세일의 아래쪽 변을 풋(Foot)이라 한다. 포스테이(Forestay)는 돛대에서 뱃머리로 뻗은 버팀줄을 말하며, 집세일의 러프가 포스테이에 고정되어 있다. 붐(Boom)은 메인세일의 아랫부분을 지지하는 활대로, 메인세일을 조정하는 로프가 고정되어 있다. 메인세일의 러프는 마스트와 거의 맞닿아 있는데 마스트란 메인세일을 수직으로 올리기 위한 돛대이다. 선체부분을 살펴보면, 선체 외에도 킬과 러더가 있는데 킬은 횡력을 감소시키기 위해 밑에 걸어 놓은 플레이트를 말하고, 러더는 배의 방향을 조정하기 위한 것을 말한다. [1]

그림 1 Sloop yacht system

세일에 바람을 받아 요트가 항주 하는 것을 범주라고 하는데, 풍하 범주와 풍상범주로 나뉜다. 풍하 범주는 요트가 바람을 뒤쪽에서 받아 범주하는 경우이고, 풍상범주는 요트가 바람을 앞쪽에서 받아 범주하는 경우이다. 세일링 요트는 aerodynamic force와 hydrodynamic force의 평형을 만족하면서 범

주하는데 추진력과 저항이 같아야하고, 세일에 작용하는 횡력과 선체에 작용하는 횡력이 같아야 한다. 요트의 중력은 부력과 평형을 이루어야 한다. 횡경사 모멘트와 복원모멘트가 같아야 하며, 요트의 횡력으로 인한 요 모멘트와 요트의 추진력으로 인한 요모멘트가 평형을 이루어야 한다. [1,2]

1.3. 문헌 조사

요트 세일의 변형 효과를 고려한 수치 해석 기법으로는 '유한체적법-MITC 셀 요소법', '와류격자법-CST 박막요소법', '경계요소법-유한요소법', '유한체적법-유한요소법' 등이 연구되어 왔다.

Trimarchi 등은 유동영역은 유한 체적법으로, 구조영역은 MITC 셀 요소법으로 계산을 수행하여 풍하범주 중인 요트 세일의 변형을 해석하였다. 구조영역 해석 시 셀 요소법을 사용함으로써 풍하 범주에서 특히 중요하게 여겨지는 주름과 같은 좌굴을 잡아낼 수 있는 가능성을 보였다. [3]

Augier 등은 풍상범주 중인 요트 세일에 대하여 유동영역은 와류격자법으로, 구조영역은 CST 박막요소법으로 계산을 수행하였다. 본 해석 결과와 실험 결과와의 비교를 통해 비점성 가정 하에 개략적인 결과로 요트 세일의 설계 과정에 활용할 수 있음을 보였다. [4]

LeMaitre 등은 경계요소법과 유한요소법을 이용하여 풍상범주 중인 2차원 트 세일의 성능을 해석하였다. 세일과 비정상 유동간의 연성이 가능한 방법을 개발하였다. 이를 통해, 큰 변형을 수반하는 세일의 성능 변화를 계측하였다. [5]

Park 등은 캠버가 없는 단순한 형태의 세일의 변형을 고려하기 위해 CFD를 이용하였다. 세일의 경계조건을 달리하여 경계조건에 따른 세일의 변형을 살펴 보았으며, 이를 메인세일에 적용하여 계산을 수행하였다. [6]

Lee 등은 30ft 급 요트 세일의 2차원 단면의 변형을 고려하기 위해 CFD를 이용하여 유체-구조 연성 해석을 수행한 바 있다. 집세일, 메인세일, 마스트가 모두 있는 슬루프형 요트 세일에 대하여 연구를 수행하였으며, 상호 영향에 관해 분석한 바 있다. [7]

이상과 같이, 다양한 수치해석 기법으로 세일 변형을 해석하였으나, 선행된 연구들은 풍하 범주 중인 요트의 세일을 연구 대상으로 선정하였거나 비점성 가정 하에서 연구가 진행되었다. 게다가 풍상 범주 중인 요트 세일에 관하여서는 2차원 세일 단면 혹은 단순한 형태의 세일을 연구 대상으로 선정하였기 때문에 3차원 슬루프형 요트 세일에 관한 변형 해석은 거의 수행되지 않았다.

본 연구에서 다루고 있는 세일링 요트의 자세 및 속도 추정은 바람에 의해 세일에 작용하는 힘에 대한 요트의 자세와 속도를 도출하는 것이기 때문에 요트의 자세를 계속 바꿔주어야 하고 그에 따라 선체부분에 들어오는 물의 속도와 각도를 계속 바꿔주며 수렴하는 값을 찾아내야 한다. 세일링 요트 설계 시 정확한 자세와 속도를 추정하는 것은 필요하지만 앞에서 언급한 어려움 때문에 선행된 연구에서는 중점적으로 다루어지지 않았다.

Jones 등은 CFD를 이용하여 세일에 작용하는 aerodynamic force와 킬에 작용하는 hydrodynamic force를 계산하였으며, 이를 설계에 적용하여 최적의 세일과 킬의 설계 가능함을 보였다. [8]

Levadou 등은 수면 위 선체형상, 트림, 침수까지 고려해 선체 주위 유동을 CFD를 이용하여 해석하였다. 이러한 해석의 결과로 실험결과와 비교했을 때 저항이 훨씬 더 타당한 결과를 얻었다. [9]

Detorni 등은 정수 중과 파랑 중 요트의 선체가 범주할 때 선체 주위 유동을 자유수면까지 포함하여 해석하였다. 설계 시 이를 적용함으로써 세일링 요트 설계 시 CFD 이용의 중요성을 강조하였다. [10]

이상의 선행 연구들로 미루어보아, 아직까지는 선속이 일정하다는 가정 하에서 연구가 수행되었음을 알 수 있다. 따라서, 세일링 요트의 자세 및 속도 추정까지 확장한 연구는 거의 없기 때문에 이러한 연구가 필요하다고 판단된다.

풍압으로 인해 세일에 작용하는 유체력이 변하기 때문에 강한 연성 기법 기반의 유체-구조 연성 해석 기법을 이용한 세일 변형 효과를 검토할 수 있는 연구가 필요하며, CFD 기법을 이용하여 좀 더 정밀한 세일링 요트의 자세와 속도를 추정할 수 있는 연구 또한 요구되기 때문에, 본 연구를 수행하게 되었다.

1.4. 연구 목표

본 연구의 목적은 세일링 요트 범주 시 변화되는 요소들을 고려하여 성능을 추정할 수 있는 수치 해석 기법을 정립하는 것이다. 세일 변형 효과 및 선체 자세 변화를 고려하여 요트의 성능을 예측할 수 있는 수치 해석 기법을 정립하고, 결과의 검증, 비교 및 논의를 통해 변화 요소들을 고려한 성능 해석 기법의 필요성 및 방법을 제안한다. 연구 목적을 달성하기 위해 수행된 연구 절차는 다음과 같다.

전산유체역학(Computation Fluid Dynamics; CFD)을 이용하여 세일 변형을 고려한 세일 성능을 예측할 수 있는 해석 기법을 정립한다. CFD 해석 기법과 유한요소법을 결합하여 세일 변형을 시뮬레이션 할 수 있는 강한 연성 기반의 유체-구조 연성 해석 기법을 이용하여 세일 변형 효과를 고려한 세일 성능 해석을 수행하고, 세일 변형 효과를 고려하지 않은 해석 결과와의 비교를 통해 세일 변형이 세일 성능에 미치는 영향을 검토한다.

두 번째로, 전산유체역학(Computation Fluid Dynamics; CFD)을 이용하여 요트 자세를 고려한 요트 성능을 예측할 수 있는 해석 알고리즘을 개발한다. 개발된 해석 알고리즘을 통해 풍상 범주 시 세일링 요트의 속도와 자세를 추정한다.

2. 수치 해석 방법

2.1. 지배 방정식

세일 변형 효과를 고려한 수치 해석을 수행하기 위해 상용 CFD 및 FEM 해석 프로그램을 사용하였다. CFD 해석을 위해 ANSYS CFX 13.0을 사용하였고, FEM 해석을 위해 ANSYS Transient Structural을 채택하였다. 세일링 요트의 자세 및 속도 추정을 수행하기 위해 상용코드인 ANSYS CFX 13.0을 사용하였다.

2.1.1. 유체 영역

유동에 관한 지배방정식은 연속방정식 (1)과 시간 평균된 Navier-Stokes 방정식(2)를 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i^{'}u_j^{'}}) \tag{2}$$

여기서, δ_{ij}는 Kronecker delta 이며, $-\rho\overline{u_i^{'}u_j^{'}}$는 레이놀즈 응력이다. 레이놀즈 응

력은 Boussinesq 가정에 의해서 평균 속도 구배와 연관이 있다. [11]

$$Here,\ -\rho\overline{u_i^{'}u_j^{'}} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(\rho k+\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \tag{3}$$

2.1.2. 구조 영역

구조 영역 계산을 위해서 응력-변형 법칙에 기초한 지배방정식 (4)을 사용하였다. 구조물은 탄력성과 압축성이 있다고 가정한다.

$$\int_{\Omega}\delta\varepsilon^T\sigma d\Omega-\int_{\Omega}\delta u^T b d\Omega-\int_{\Gamma}\delta u^T t d\Gamma=0 \tag{4}$$

여기서, 변형은 변형-변위 관계(strain-displacement relationship)를 만족해야 한다. 실제 변위는 주어진 경계조건을 만족해야 하고 가상의 변위는 규정된 실제 변화된 위치에서 0의 값을 가져야 한다. Ω은 고려한 강체의 부피를 의미하며, Γ는 traction-loaded surface를 의미한다.

위의 지배방정식 계산을 위해 정확한 이론해를 구하기 어려운 문제에 대한 수치적인 근사해법인 유한요소법을 사용한다. 유한요소법은 이론해를 직접 구

하기 어려운 복잡한 모델을 우리가 조작할 수 있는 유한개의 요소로 분할하고 개별 요소의 특성을 계산한 다음, 전체 요소의 특성을 모두 조합하여 전체 모델의 특성을 근사적으로 계산하는 방법이다. 세일은 얇은 두께와 탄성, 경계조건 때문에 외력에 의해 큰 변위가 나타나는 대변형 구조물이다. 대변형 거동을 포함하는 구조물은 비선형 유한 요소인 대변위 해석이 요구되어지며, 하중 단계에 따라 강성행렬을 변화시키면서 수렴값을 결정한다. [12]

2.2. 수치 모델

본 연구에서는 공통적으로 SST *k-ω* 모델을 사용하였다. 세일링 요트의 자세 및 속도 추정을 위한 연구에서 선체 주위 유동을 해석할 때는 자유수면까지 고려하여야 하며, 이를 위해 VOF 모델을 사용하였다. [13]

2.2.1. 난류 모델

본 연구에서는 Menter가 제안한 SST(Shear Stress Transport) *k-ω* 모델을 사용하였다. *k-ε* 모델은 경계층 내부에서 점성효과를 고려하기 위한 다양한 벽함수를 적용하여야 비교적 좋은 결과를 보이는 반면에 원방 경계에서는 유동에 거의 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. *k-ω* 모델은 벽함수를 사용하지 않고도 경계층 내부에서 좋은 결과들을 보여 주는 반면에 원방 경계에서는 유동에 아주 민감하다. 두 난류 모델이 갖는 장점만을 채택한 것이 Menter가 제안한 SST *k-ω* 모델이다. [14]

SST *k-ω* 모델의 이송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-Y_k+S_k \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega+S_\omega \tag{6}$$

여기서, G_k 는 평균 속도 구배로 인한 난류 운동 에너지의 생성을 나타내고, G_ω 는 ω의 생성을 나타낸다. Γ_k와 Γ_ω는 각각 k와ω의 유효 확산을 나타내고 Y_k와 Y_ω는 각각 난류에 대하여 k와 ω의 소멸을 나타낸다. D_ω는 교차 확산항을 나타낸다.

2.2.2. 자유 수면 모델

선체 주위 유동 해석을 위해서는 자유수면을 포착하는 것이 중요하다. 이를 위해 자유 수면 모델 중 하나인 VOF 모델이 사용되었다. VOF 모델에서는 유체체적비율을 의미하는 α_q을 활용한다. α_q는 임의의 어느 한 셀에 의해 구분된 검사체적내의 유체 1의 체적으로 정의된다. 셀 내부가 유체 1 에 의해 가득할 경우, α_q는 1로 정의되고, 셀이 유체 1이 아닌 유체 2로 가득할 경우 α_q는 0으로 정의된다. 그리고 셀 내부에 자유표면으로 정의되는 경계면이 존재하는 일반적인 경우를 모두 고려하면 α_q는 0과 1 사이의 값을 가진다. 초기조건으로는 일정한 값이 주어지지만 새로운 시간에서의 유체분포는 다음과 같은 수송방정식 (7)을 활용하여 정의한다. [14, 15]

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_q = 0 \tag{7}$$

두 상 사이의 경계면을 포함하고 있는 경우에는 다음과 같은 volume fraction 방정식 (8)을 만족 해야 한다.

$$\sum_{q=1}^{n} \alpha_q = 1 \tag{8}$$

VOF 모델과 함께 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위해 volume fraction을 고려한 물성치를 사용한다. 예를 들면 다음과 같다.

$$\rho = \sum_{q=1}^{n} \alpha_q q_q \tag{9}$$

2.2.3. 솔리드 모델

본 연구에서는 세일이 두께를 가지고 있기 때문에 솔리드 요소를 사용하였다. 솔리드 요소는 부피가 있는 구조물의 모델링에 주로 이용되며 솔리드 요소는 절점당 3개의 병진자유도만 갖고 회전 자유도는 없다. [12]

2.3. 유체-구조 연성 기법

세일 변형 효과를 고려하기 위해서는 유체영역과 구조영역이 결합되어야 한다. 유체영역과 구조영역을 결합하기 위한 기법에는 크게 집적 기법과 분할 기법이 있고 분할 기법은 또다시 약한 연성 기법과 강한 연성 기법으로 나뉜다.

집적기법은 하나의 해석자가 유체와 구조 영역으로부터 얻은 비선형 대수방정식의 완전한 시스템을 전체적으로 동시에 푸는 방법이다. 비선형 대수 방정식을 풀기 위해 계산이 여러 번 반복되기 때문에 안정성이 보장된다. 그렇기 때문에 강하게 연성된 문제뿐만 아니라 매우 약한 유체-구조연성에서도 강력한 기법이다. 하지만 3차원과 같은 문제의 경우에는 효율적인 전제조건들이 제공되어야 하는데다 메모리를 많이 사용하고 계산시간 또한 오래 걸린다는 단점이 있다. [16]

약한 연성 기법은 한 시간 단계에서 유동영역을 계산 하고 다음 시간 단계로 넘어가서 유동영역에서 구한 힘을 구조물에 반영하여 구조물의 변위를 구하기 때문에 유체와 구조의 결과 사이에는 항상 시간상 차이가 존재한다. 그렇기 때문에 약한 연성 기법은 계산시간은 짧다는 장점이 있지만 계산 결과의 정확성이 낮다. [16]

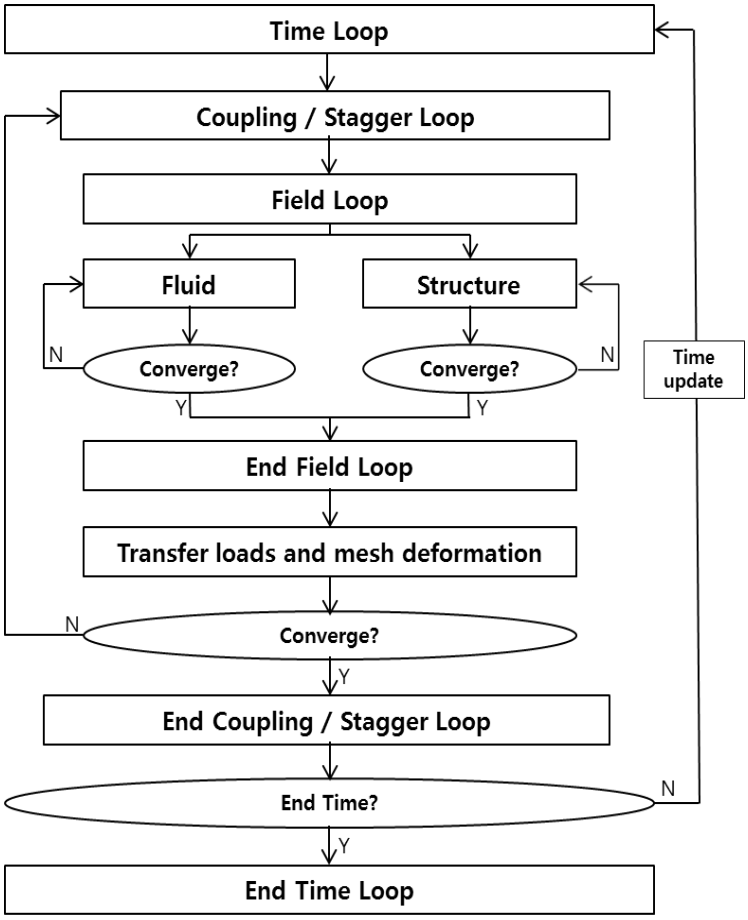


그림 2 Flow chart of strong coupling method for solving FSI problem

반면, 강한 연성 기법은 유체와 구조 영역에서 동시에 얻어지는 해가 있을 때까지 매 시간단위에 유체와 구조를 계산하는 것이다. 유동영역과 구조영역을 각각 계산하고 유동영역 계산결과 얻은 힘과 구조영역 계산 결과 얻은 변형을 서로 교환한 후, 이 모든 과정이 수렴하면 비로소 다음 시간 단계로 넘

어간다. 그렇기 때문에 약한 연성 기법과 비교했을 때, 시간이 많이 걸리긴 하지만, 비교적 정확한 해를 얻을 수 있다. [17]

세일링 요트는 바람이 주된 동력원으로서, 요트 세일 문제의 경우, 비선형 연성 문제이다. 게다가 세일은 굉장히 부드러운 구조물로 천으로 만들어진다. 그렇기 때문에 세일은 조그만 힘에도 큰 변형이 유발된다. 세일의 변형은 주위 유동의 변화를 유발하기 때문에 세일의 유체-구조 연성 문제는 비정상 문제라고 할 수 있다. 따라서, 세일의 유체-구조 연성 문제는 굉장히 복잡한 유체-구조 연성 문제로 분류되며, 이는 앞에서 언급했듯, 강한 연성 기법으로 해석이 가능하다. 물론, 집적기법을 사용하면 가장 정확한 해를 얻을 수 있겠지만, 계산 시간이 오래 걸리는데다가 메모리를 많이 사용한다는 단점을 생각하면 세일 변형을 해석 하는 데는 비효율적이라 할 수 있다. 또한, 복잡한 유체-구조 연성 문제인 세일 변형 해석에서 약한 연성 기법으로 타당한 결론을 얻기는 어렵기 때문에 이 또한 타당한 방법이라 여기기는 어렵다. 특히, 세일은 유체-구조 연성 문제에서 큰 변형이 일어나기 때문에 수치적 안정성을 확보하기 위해서 한 시간 단계 당 여러 번의 반복계산이 요구된다. 따라서 강한 연성 기법이 가장 적절한 방법이라 여겨지며 해석 수행에 있어 이 방법을 사용하였다.

2.4. 자세 및 속도 추정 알고리즘

일정한 풍속, 풍향에서 범주하는 세일링 요트의 자세 및 속도를 추정하기 위해서는 외력과 선체 반력 사이의 균형을 맞추어 가며 선체 자세와 속도를 하나씩 찾아가는 것이 필요하다. 본 연구에서는 CFD를 이용한 속도 성능 추정 알고리즘을 그림 3과 같이 수립하였다. 우선, 겉보기 풍속(apparent wind)과 각도를 결정하고, 선속과 횡경사각, 사항각, 러더각을 가정한다. 두 번째 단계는 세일에 의한 힘과 모멘트를 계산한다. 세 번째 단계는 수면 아래에 존재하게 되는 모든 형상물에 대해서 유체역학적인 힘과 모멘트를 계산한다. 네 번째 단계는 횡경사 모멘트와 횡복원 모멘트를 비교하여 횡경사각을 변경한다. 다섯 번째 단계는 ‘추력과 세일의 횡력의 비’와 ‘저항과 선체의 횡력의 비’를 계산, 비교하여 사항각을 변경한다. 여섯 번째 단계는 추력과 저항의 비교를 통해 선속을 도출한다. 일곱 번째 단계는 요잉 모멘트를 비교해보고 요잉 모멘트가 일치하지 않으면 러더각을 조정한다. 마지막으로 모든 외력과 선체 반력의 평형을 재계산한 후, 일치하지 않으면 도출된 결과를 초기값으로 하여 처음부터 다시 계산하는 작업을 반복한다.

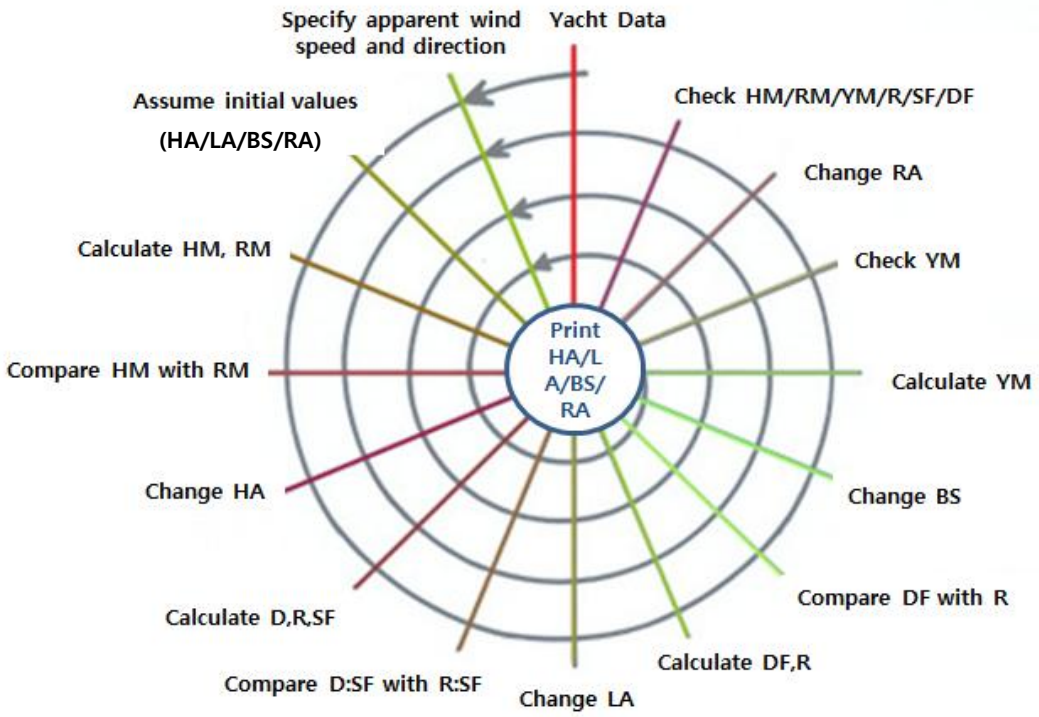


그림 1 Velocity prediction algorithm for CFD

3. 요트 세일 변형 해석

3.1. 문제 및 형상 정의

본 연구에서는 메인세일, 집세일, 마스트가 모두 있는 슬루프형 30피트급 요트 세일의 3차원 변형과 그 주위 유동 변화를 해석하였다. 메인세일과 집세일, 마스트간의 상호영향을 조사하였으며, 세일의 변형 결과, 양력과 항력의 변화도 살펴보았다.

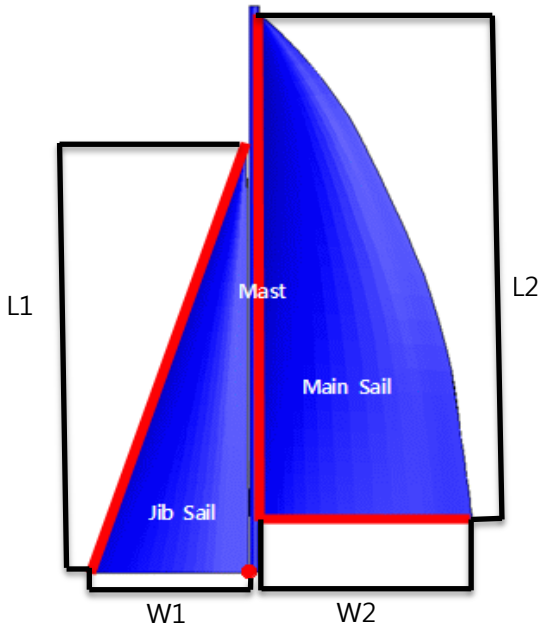


그림 4 Sail system of KORDY 30

본 연구에서 사용한 세일은 30ft 급 요트인 KORDY 30의 세일로서 집세일, 메인세일, 마스트로 이루어진 슬루프형 요트이다. 메인세일의 총 길이 L2는 11.41m이고 총 폭 W2는 4.41m 이며, 두께는 $5x10^{-4}$m 이다. 집세일의 총 길이 L1은 9.68m이고 총 폭은 3.294m 이며, 두께는 $5x10^{-4}$m 이다. 세일의 재질은 kevlar 섬유로서 밀도는 1.44 x 10^3 kg/m^3 이고 포와송 비는 0.36, kevlar 섬유의 영률은 83 MPa 의 값을 사용하였다.

3.2 계산 영역 및 경계 조건

해석 도메인에는 직교좌표계가 적용되었으며, 양의 X축 방향은 유체가 흐르는 방향, 양의 y축 방향은 선체에서 세일 쪽을 향하는 수직방향으로 산정되었다.

세일 주위 유동을 위한 계산영역은 그림 6에서와 같이 사다리꼴의 형상을 하고 있으며 가로 길이는 75m, 세로길이는 18m와 88m이며, 높이는 15.19m를 가지고 있다. 유동장 해석을 위한 유동계산 영역은 1,123,667개 셀의 구조격자로 이루어져 있으며, 유입경계면은 앞면, 왼쪽면, 오른쪽면으로 속도와 압력이 일정한 Dirichlet type의 경계 조건을 사용하였고 유출경계면은 뒷면으로 속도와 압력이 부드럽게 변하는 Neumann type의 경계 조건을 사용하였다. 세일에 입사되는 유동은 20도의 각도로 들어오는 공기이며 속도는 20knot를 사용하였다. 공기의 밀도와 점성계수는 각각 1.185kg/m^3 과 1.831 x 10^{-5} Pa·s 의 값을 사용하였다. 세일의 변형을 위한 구조격자는 메인세일에 12,728개, 집세일에 14,603개의 셀을 사용하였다. 유동해석에서 계산된 세일의 압력값을 하중 조건으로 적용하였으며, 지지조건으로는 병진 방향 자유도를 모두 구속하였다. 메인세일의 sail-mast 고정부 및 sail foot을 고정시키고, 집세일의 forestay와 leech-foot 연결부를 고정시켰다.

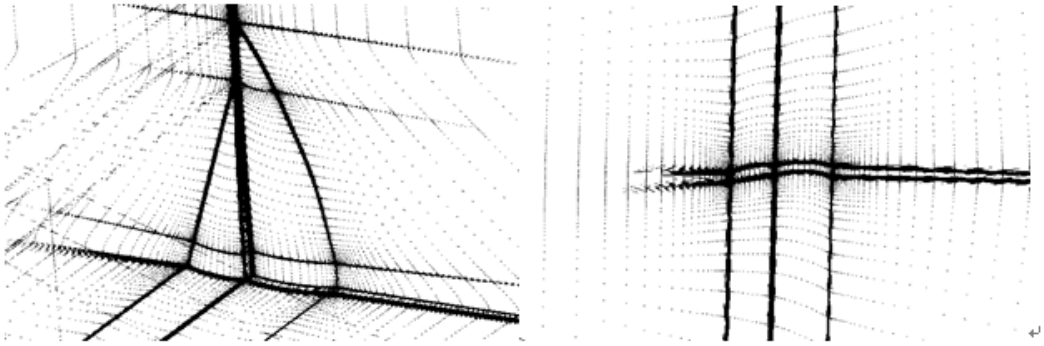


그림 5 Generated grid system

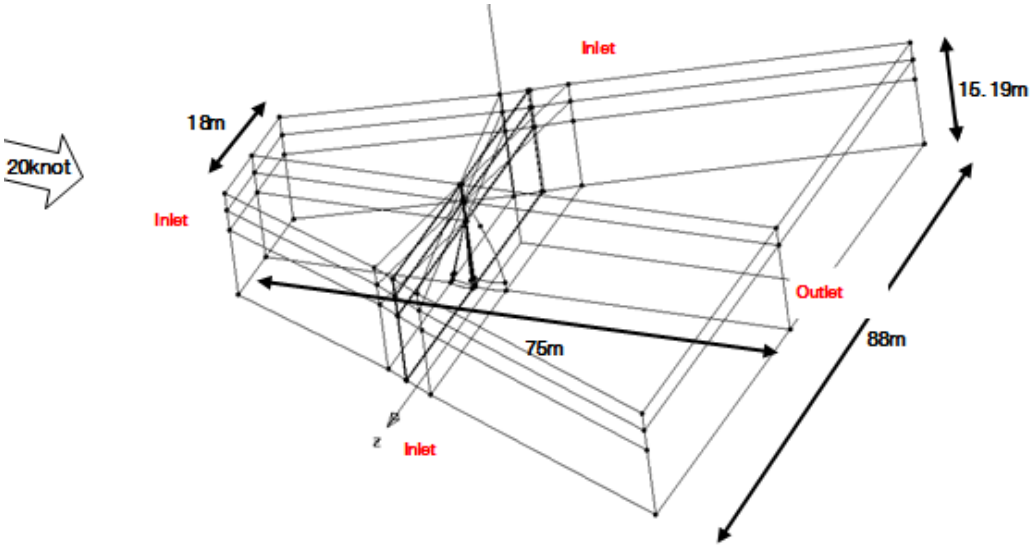


그림 6 Domain and grid of the yacht sail system

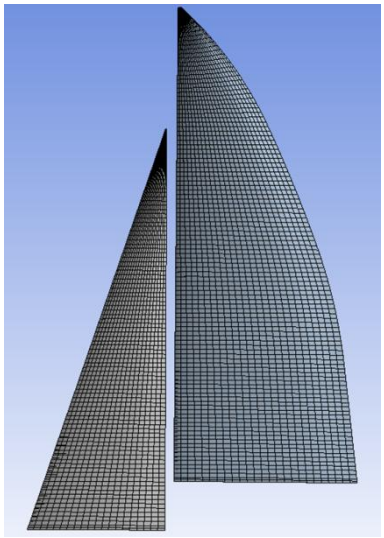


그림 7 Grid of the Yacht sail for the structural analysis

적절한 수준의 격자가 사용되었는지 검증하기 위하여, 격자 의존도 시험을 수행하였다. 격자 의존도 시험은 미국기계학회(American Society of Mechanical Engineers; ASME)에서 제안하는 절차에 따라 진행하였다. 표 1은 세일 변형 효과 시뮬레이션에 사용된 격자의 의존도 시험 결과를 요약하여 나타낸다. 격자 수 약 88만개, 195만개, 439만개 의 세가지 격자 케이스를 산정하였고, 각 격자 케이스 간의 셀 크기 대표 값(representative cell, *h*)비율이 약 1.3으로 유지되어, 공간 격자의 확장 비를 일정하게 유지하였다. 산정된 격자 케이스에 대해 세일 주위 유동 해석을 수행하여 결과를 도출하였다. [18]

세일에 작용한 항력은 각각 544N, 642N, 649N 으로 계산되었고 오차율은 각각 15.26%, 1.08%로 계산되어 적절한 수준의 격자수가 사용된 것으로 판단하였다.

표 1 Verification test for the sail deformation problem

		coarse	medium	fine
Total # of cells		880,068	1,953,631	4,391,576
Representative cell, h		1.15	0.88	0.67
Ratio of h			1.30	1.31
Results	**Drag(N)**	544	642	649
	Difference rate		15.26%	1.08%

3.3 결과

세일 변형이 요트 성능에 미치는 영향을 검토하기 위해 우선, 10.288 m/s의 속도를 가지고 20도의 각도로 입사하는 바람을 설정하였다. 유체-구조 연성 기법을 통해 변형된 세일의 성능 해석을 수행하였고, 변형이 없는 상태에서의 세일 성능과의 비교를 통해 변형으로 인한 요트 세일의 성능 변화를 검토하였다. 먼저, 변형된 집세일의 형상을 변형이 없는 집세일의 형상과 비교하였다. 그림 8은 leech-foot 연결부 및 forestay에 대해서 고정시킨 집세일의 변형을 세일 높이에 따른 단면상의 캠버 형상으로 나타내었다. 전체적으로 집세일의 흡입면(leeward side) 과 압력면(windward side)의 압력 차이로 인해 집세일이 리치(leech) 부근에서 흡입면 쪽으로 후퇴하는 양상을 보였다. 집세일의 경우, 포스테이와 리치-풋 연결부를 고정시켰기 때문에 마스트 높이의 30%, 50% 지점인 세일 가운데 부근에서 큰 변형이 일어났다. 변형 전 일정한 캠버를 가진 세일이 변형되면서 캠버가 줄어들었다는 것을 확인할 수 있으며, 좀 더 부드러운 곡선을 이루는 방향으로 변형했다고 말할 수 있다.

변형 전, 후 세일 표면에 작용하는 압력 분포 및 유선의 변화를 살펴보았다. 그림 9를 보면 압력면의 경우 변형 후에 집세일의 포스테이 쪽으로 높은 압력이 더 치우쳤다는 것을 알 수 있다. 그림 10의 흡입면을 살펴보면, 변형 전 최저 압력 분포 영역이 더 넓다가 변형 후 최저 압력 분포 영역이 감소했음을

확인할 수 있었다. 이것은 집 세일의 형상변화로 캠버가 줄어들었고 이로 인해 평균 캠버 라인에 대한 유동의 입사각이 감소하였다. 이로 인해 그림 11에서 보듯, 변형 후 더 작은 와류가 발생하였기 때문이라 여겨진다.

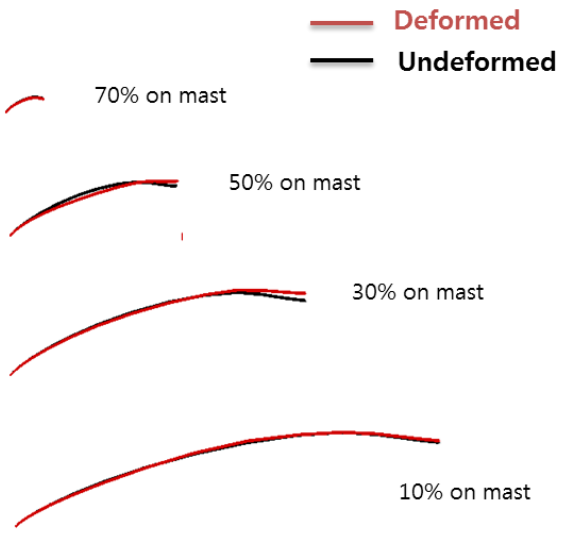


그림 8 Camber line of the undeformed and deformed jib sail

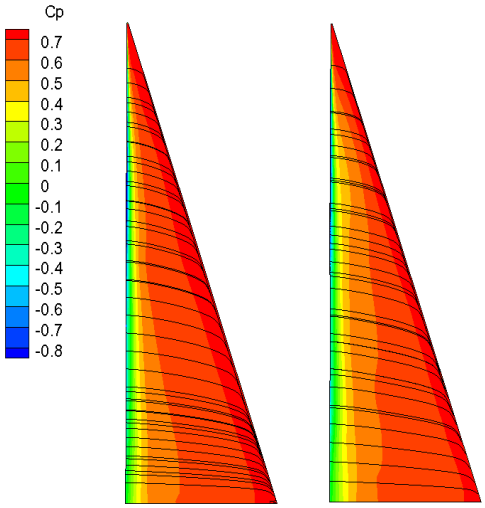


그림 9 Cp contour and limiting streamlines on the undeformed and the deformed jib sail (windward side)

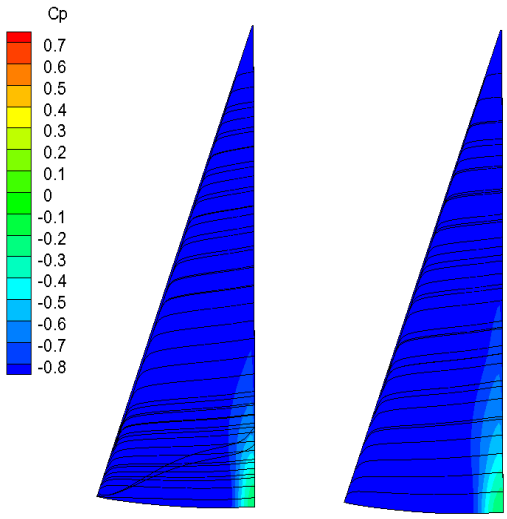


그림 10 Cp contour and limiting streamlines on the undeformed and the deformed jib sail (leeward side)

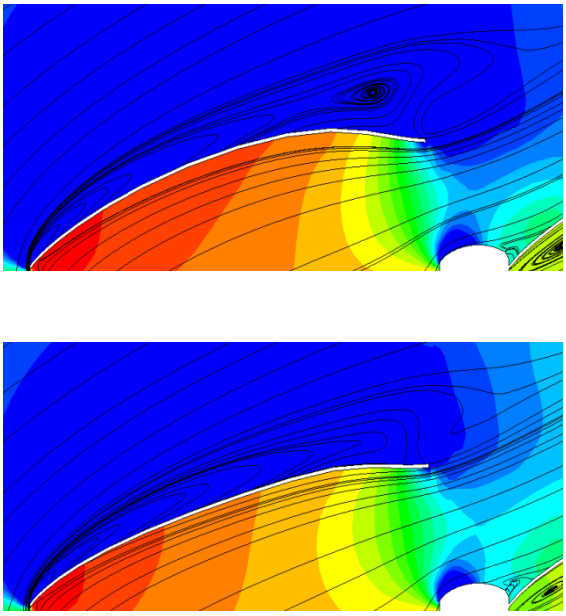


그림 11 Separation and vortex on 50% mast height of the undeformed (top) and deformed (bottom) jib sail

그림 12는 높이 50%지점에서의 집세일의 압력계수를 나타낸 것인데, 변형 후 전체적으로 양압과 음압의 차이가 감소했다는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 흡입면에서의 음압감소가 두드러지는데 세일이 부드러운 곡선 형상으로 변화했기 때문에 이 변형으로 인한 흡입면에서의 와류 크기의 감소가 그 원인이다.

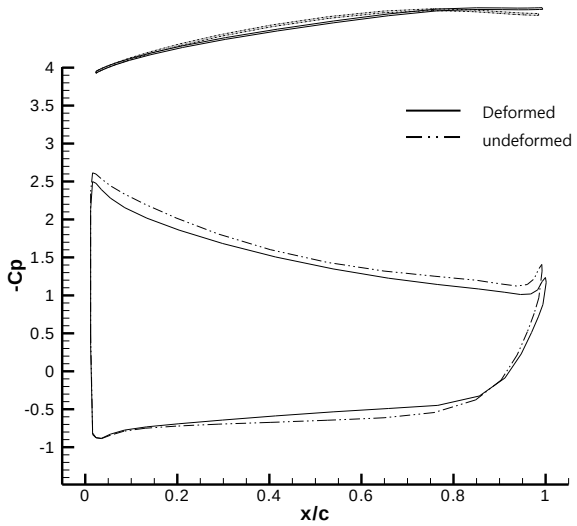


그림 12 Pressure distribution region on 50% mast height of the jib

변형된 메인세일의 형상을 변형이 없는 메인세일의 형상과 비교하였다. 그림 13은 sail-mast 고정부 및 sail foot에 대해서 고정시킨 메인 세일의 변형을 세일 높이에 따른 단면상의 캠버 형상으로 나타내었다. 전체적으로 메인세일의 흡입면과 압력면의 압력 차이로 인해 메인 세일이 리치 부근에서 흡입면쪽으로 후퇴하는 양상을 보였다. 메인 세일의 경우, 러프(luff)와 풋(foot)을 고정시켰기 때문에 마스트 높이의 50%, 70% 지점인 세일 가운데 부근에서 큰 변형이 일어났다. 세일은 압력면에서 흡입면 방향으로 힘을 받기 때문에 고정되지 않은 리치부분이 흡입면쪽으로 후퇴하였다는 것이 눈에 띄게 관찰되

었다. 변형 전 일정한 캠버를 가진 세일이 변형되면서 세일의 펴짐으로 인해 캠버가 줄어들었다는 것을 확인할 수 있으며, 즉, 좀 더 부드러운 곡선을 이루는 방향으로 변형했다고 말할 수 있다.

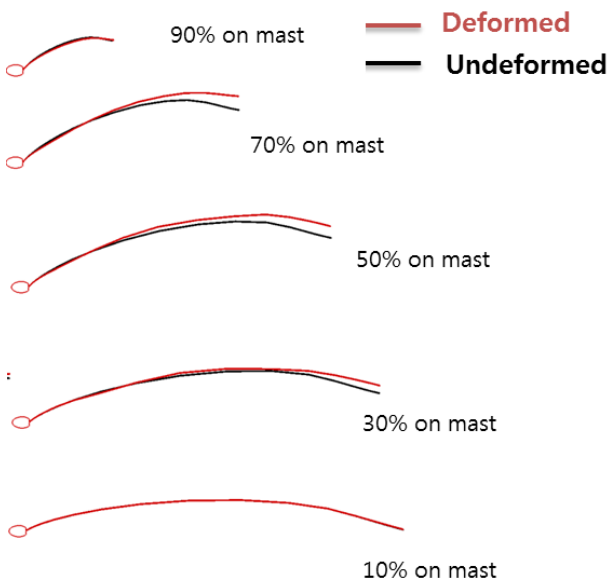


그림 13 Camber line of the undeformed and deformed main sail

변형 전, 후 세일 표면에 작용하는 압력 분포 및 유선의 변화를 살펴보았다. 그림 14를 보면 압력면의 경우 변형 전에는 전체적으로 높은 압력을 받다가

변형 후에는 세일 가운데 부분을 중심으로 어느 일정한 부분만 높은 압력을 받는 것을 볼 수 있다. 마스트와 맞닿아 있는 세일 러프(luff) 부분에서 유동박리로 인한 와류 현상이 발생하는데, 유체가 물체 주위를 따라가지 못하기 때문이다. 그림 16에서 알 수 있듯, 메인 세일 러프 부분을 변형전과 비교하면 변형후 더 적은 유동박리가 발생하며 와류영역이 더 작아진 것을 볼 수 있다. 이것은 메인 세일의 형상 변화로 인해 평균 캠버 라인에 대한 유동의 입사각이 줄어들었기 때문이다. 그림 15에서 흡입면의 50% 정도의 높이 지점을 보면, 최저압력이 마스트 부근쪽에 치우쳐 있다가 가운데로 이동한 것을 알 수 있다. 이것은 메인세일 앞에 존재하는 집세일의 형상 변형으로 인한 영향 때문이라 여겨진다. 앞에서 언급했듯, 집세일 리치 부근의 와류가 현저히 줄어들었기 때문에 그 주변 압력 강하는 변형 전과 비교했을 때, 그 정도가 덜하고, 그 영향으로 메인세일의 흡입면에서의 최저압력이 뒤로 밀리는 현상이 발생하였다.

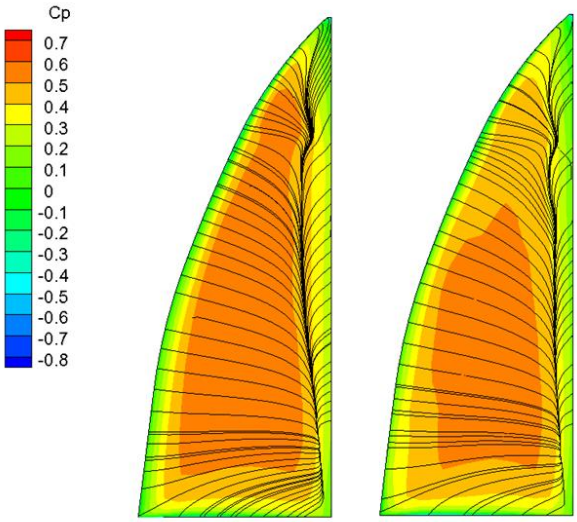


그림 14 Cp contour and limiting streamlines on the undeformed and the deformed main sail (windward side)

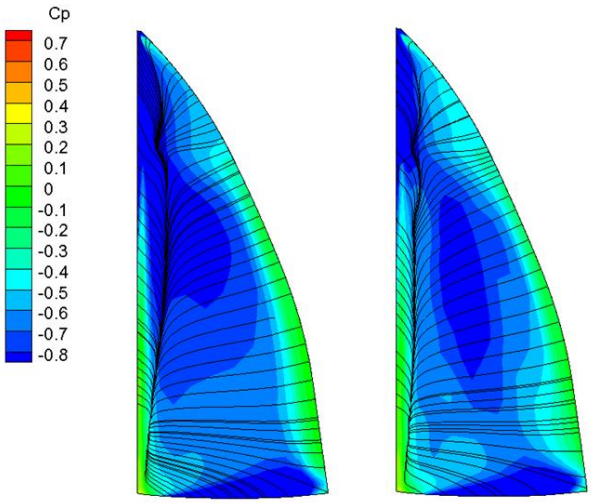


그림 15 Cp contour and limiting streamlines on the undeformed and the deformed main sail (leeward side)

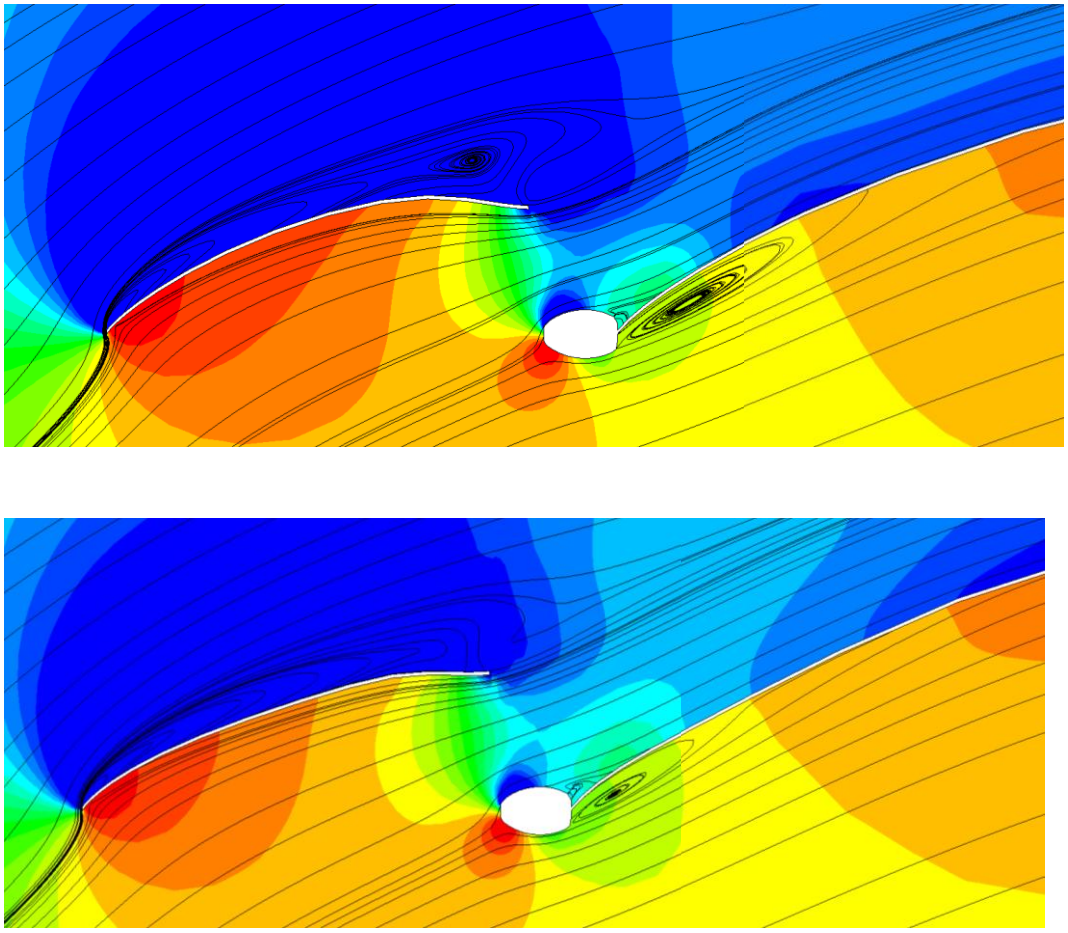


그림 16 Separation and vortex on 50% mast height of the undeformed (top) and deformed (bottom) jib and main sail

그림 17은 높이 50%지점에서의 메인세일의 압력계수를 나타낸 것인데, 마스트 근처에서 갑작스런 음압과 양압의 감소가 두드러진다. 집세일의 형상변화로 주위 유동이 바뀌고 메인 세일이 그 영향을 받기 때문에 마스트 근처에서 음압 감소가 나타나고 메인세일의 형상변화로 인한 와류의 감소로 마스트

근처에서 양압 감소가 두드러진다.

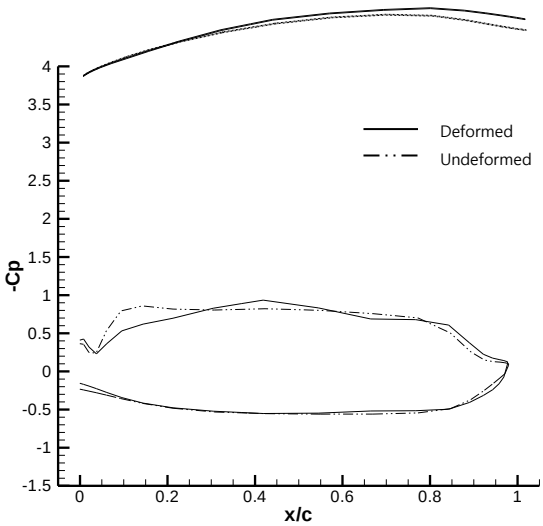


그림 17 Pressure distribution region on 50% mast height of the main sail

흡입면의 압력분포를 좀 더 면밀히 살펴보면, 풋부분과 메인세일의 꼭대기 부분에서도 최저압력이 나타난 것을 확인할 수 있다. 그림 18은 메인세일의 3차원 형상으로 인해 풋 부분에서 유동이 압력면에서 흡입면쪽으로 넘어가기 때문에 이 부분에서 와류가 형성됨을 알 수 있다. 변형 후보다 변형 전이 3차원효과로 인한 와류의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

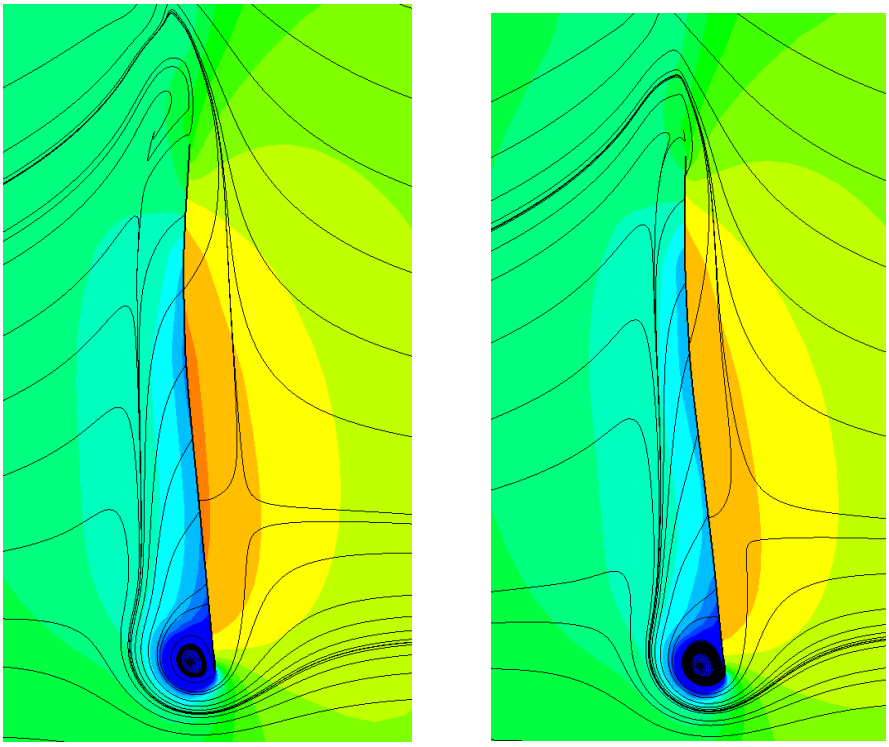


그림 18 Separation and vortex on the foot of the undeformed (left) and deformed (right) main sail

그림 19는 메인세일의 꼭대기 부분에서 3차원 형상으로 인해 와류가 형성됨을 나타내고 있다. 그림 20에서는 세일의 50%지점과 달리, 꼭대기 근처인 90%지점에서 3차원 효과로 인해 흡입면에서도 큰 와류가 형성된 것을 알 수 있다. 3차원 효과가 생기는 이유는 압력면의 압력이 주위 대기보다 높으므로 공기가 세일끝 부분을 향하여 바깥쪽으로 흐르는데 흡입면에서의 압력은 낮은 상태이기 때문에 공기흐름이 안쪽을 향한다. 이 결과로 세일 끝부분에서 공기

가 압력면에서 흡입면쪽으로 돌고 세일 끝 근처에서 집중된 와류가 뚜렷하게 형성되는 것이다. 그리고 와류 강도는 흡입면 전체를 따라 전반적으로 존재하며 변형 전의 메인세일에서 더 큰 와류 강도를 관찰 할 수 있다.

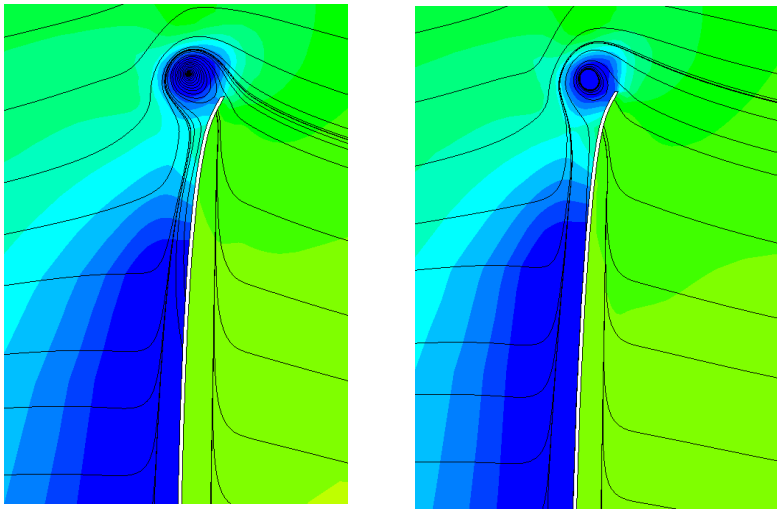


그림 19 Separation and vortex on the top of the undeformed (left) and deformed (right) main sail

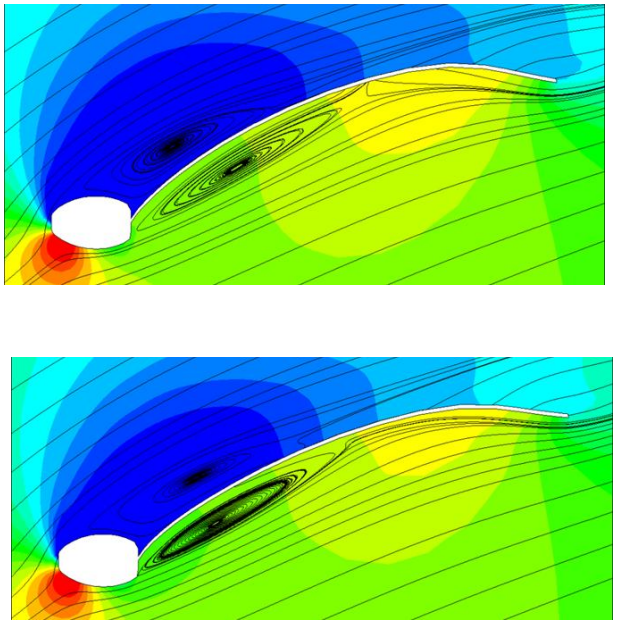


그림 20 Separation and vortex on 90% mast height of the undeformed (top) and deformed (bottom) main sail

그림 21은 높이 10% 지점에서의 메인세일의 압력계수를 나타낸 것이고 그림 22는 높이 90% 지점에서의 메인세일의 압력계수를 나타낸 것이다. 메인세일 변형으로 인한 와류의 감소로 음압이 감소했음을 확인하였다. 이것은 양압과 음압의 차이가 감소했다는 것을 의미하며 압력 차의 감소는 양력과 항력의 변화와 연관이 있다.

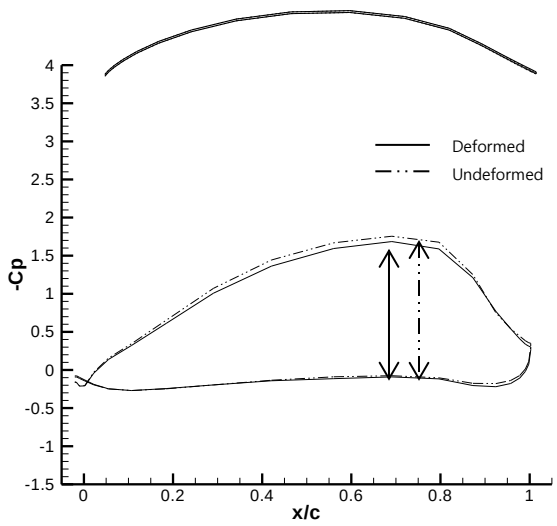


그림 21 Pressure distribution region on 10% mast height of the main sail

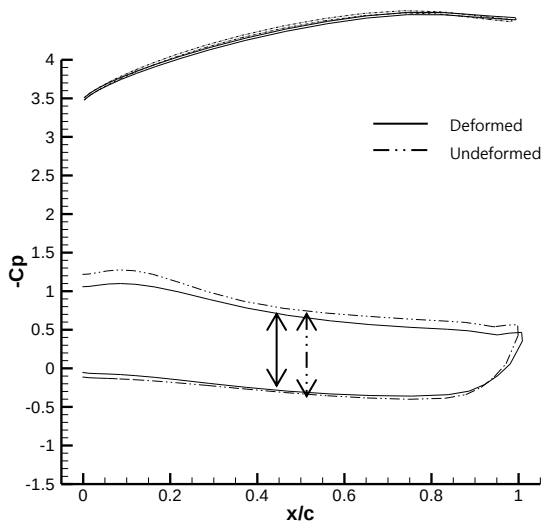
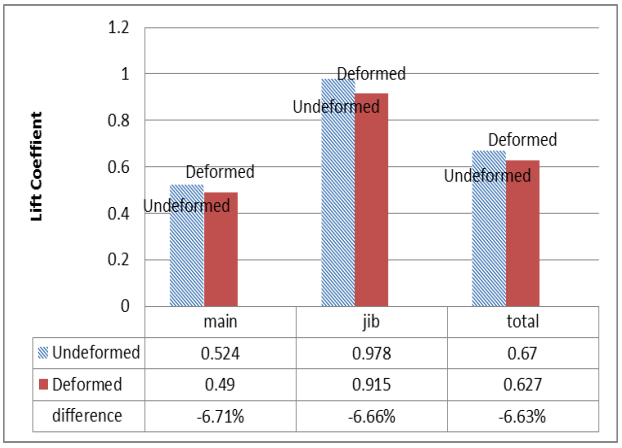


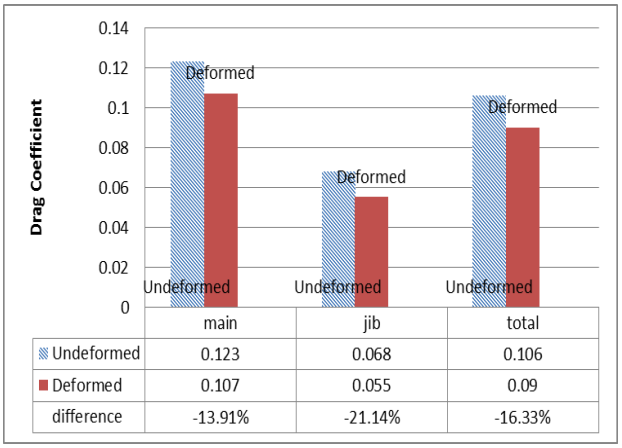
그림 22 Pressure distribution region on 90% mast height of the main sail

집세일과 메인세일의 변형으로 인한 와류 감소로 집세일과 메인세일의 양력과 항력은 감소하였고, 그 결과로 전체 세일 시스템의 양력과 항력도 감소하였다. 세일의 효율을 나타내는 양항비는 증가하는 양상을 보여 변형 후 세일의 효율이 증가했음을 알 수 있었다.



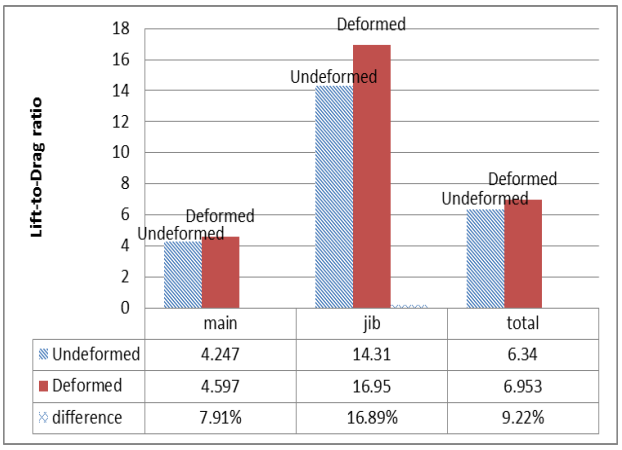
	main	jib	total
Undeformed	0.524	0.978	0.67
Deformed	0.49	0.915	0.627
difference	-6.71%	-6.66%	-6.63%

그림 23 Lift coefficient of the main sail and jib sail



	main	jib	total
Undeformed	0.123	0.068	0.106
Deformed	0.107	0.055	0.09
difference	-13.91%	-21.14%	-16.33%

그림 24 Drag coefficient of the main sail and jib sail



	main	jib	total
Undeformed	4.247	14.31	6.34
Deformed	4.597	16.95	6.953
difference	7.91%	16.89%	9.22%

그림 25 Lift-to-Drag ratio of the main sail and jib sail

4. 요트의 자세 및 속도 추정

4.1 문제 및 형상 정의

본 연구에서는 세일 변형을 무시하였다. 세일 변형으로 풍압중심이나 유체력이 변하기 때문에 세일 변형을 고려할 필요성이 있지만 본 연구는 CFD를 이용한 세일링 요트의 자세 및 속도 추정 연구의 초기 단계로서 세일 변형을 고려한 요트 자세 및 속도 추정은 추후 연구 과제로 남기기로 한다. 본 연구에서는 세일과 선체 부분을 분리 하여 계산하였다. 30ft급 요트인 KORDY 30을 해석 대상으로 선정하여 연구를 진행하였다. 집 세일, 메인 세일, 마스트 모두 있는 슬루프형 요트이며, 질량은 3.3톤이다. 그림 26과 표 2에 나와있듯이, 집 세일의 길이는 9.68m이며 메인 세일의 길이는 11.41m이다. 요트 선체의 전장은 9.142m이다.

표 2 Hydrostatics of Test Yacht (Full Scale)

	Unit	Definition	Value
L_{oa}	m	Length Overall	9.142
L_{wl}	m	Waterline Length	8.245
B	m	Beam	3.024
T_c	m	Draft w/o Keel	0.4
T	m	Draft with Keel	1.9
∇	m^3	Displacement	3.298
Wetted Surface Area	m^2	Hull	15.6
	m^2	Keel	2.84
	m^2	Rudder	1.18

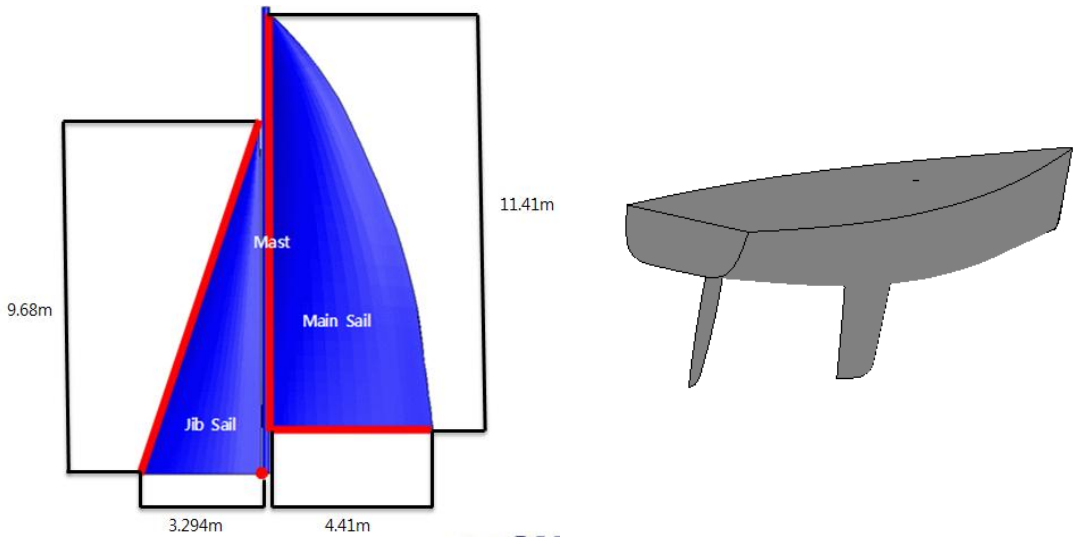


그림 26 Sailling yacht geometry

4.2 계산 영역 및 경계 조건

해석 도메인에는 직교좌표계가 적용되었으며, 양의 X축 방향은 세일링 요트가 향하는 방향, 양의 z축 방향은 선체에서 세일쪽을 향하는 수직방향으로 산정되었다. 좌표계의 원점은 세일링 요트의 무게중심에 위치하였으며, 따라서, 양의 x축은 횡경사 하는 세일링 요트의 회전 축이 된다.

세일 주위 유동을 위한 해석 도메인의 전체 길이는 가로 170m, 세로 100m, 260m, 높이 50m로써 사다리꼴 형태를 하고 있다. 세일을 둘러싸는 서브도메인의 비 정렬 격자 수는 130만개이며, 그 이외의 정렬 격자 계로 구성된 서브 도메인의 정렬 격자 수는 약 64만개로 전제 해석 도메인에 약 195만개의 격자가 사용되었다. 그림 27은 세일 주위 유동을 위한 해석 도메인으로 유입부는 압력과 속도가 일정한 Dirichlet 타입이고 유출부는 압력과 속도가 부드럽게 변하는 Neumann 타입이 적용되었다. 유입부에는 뵌바람 속도 10m/s를 가지고 뵌바람 각도 30도~90도 사이의 총 7가지 해석 케이스를 선정하였다. 세일링 요트의 경우, 바람이 정면 방향에서 불어오면 세일링이 불가능한데, 이를 범사구역이라 한다. 일반적으로 범사구역은 풍향이 30도 보다 작은 경우이므로 30도부터 계산을 수행 하였다. 풍향이 90도 보다 클 때, 세일링 요트는 주로 스피네커를 장착한 후 풍하로 범주한다. 앞에서 풍상범주로 한정을 했기 때문에 풍상범주의 범위인 풍향 90도까지 계산을 수행하였다.

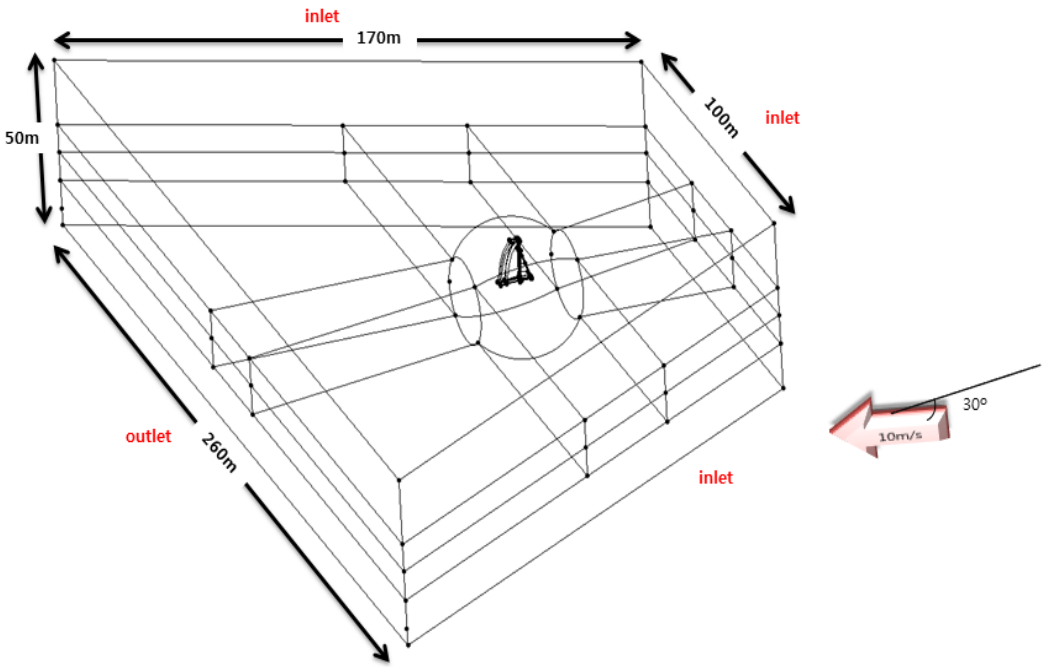


그림 27 Domain and grid of yacht sail system

표 3 Inlet boundary conditions

Apparent wind velocity	Apparent wind angle
10m/s	30˚
	40˚
	50˚
	60˚
	70˚
	80˚
	90˚

세일 면에는 no slip조건이 설정되었고, 세일을 둘러싸는 서브 도메인과 그 외부 도메인 사이에는 비 정합 경계면 조건이 적용되어 세일링 요트가 횡경사 함에도 내부 격자는 변형이 없도록 하였다. 서브 도메인과 외부 도메인 사이는 GGI(General Grid Interface) 보간 기법을 이용하여 계산을 수행하였다.

선체 주위 유동을 위한 해석 도메인의 전체 길이는 세일 주위 유동을 위한 해석 도메인의 전체길이와 같으며, 선체 주위 유동을 위한 해석 도메인에 약 340만개의 격자가 사용되었다. 그림 28은 선체 주위 유동을 위한 해석 도메인으로, 도메인의 유입부는 압력과 속도가 일정한 Dirichlet 타입이고 유출부는 압력과 속도가 부드럽게 변하는 Neumann 타입이 적용되었다. 하지만 유입 유동의 속도와 각도를 나타내는 선속과 사항각이 본 연구에서 결과값으로 얻고자 하는 값이기 때문에 초기에 선속과 사항각을 가정하고 앞에서 언급한 속도 추정 알고리즘을 이용해 반복 계산을 통해 가정된 선속과 사항각을 계속 바꿔주면서 최종값을 찾게 된다. 선체, 킬, 러더 면에는 no slip조건이 설정되었고 선체에서는 자유수면을 고려해야 하기 때문에 자유수면 부근에 보다 더 조밀한 격자가 분포되었다. 정확한 성능 추정을 위해서는 자유수면을 정확하게 포착 해야 할 필요가 있기 때문이다.

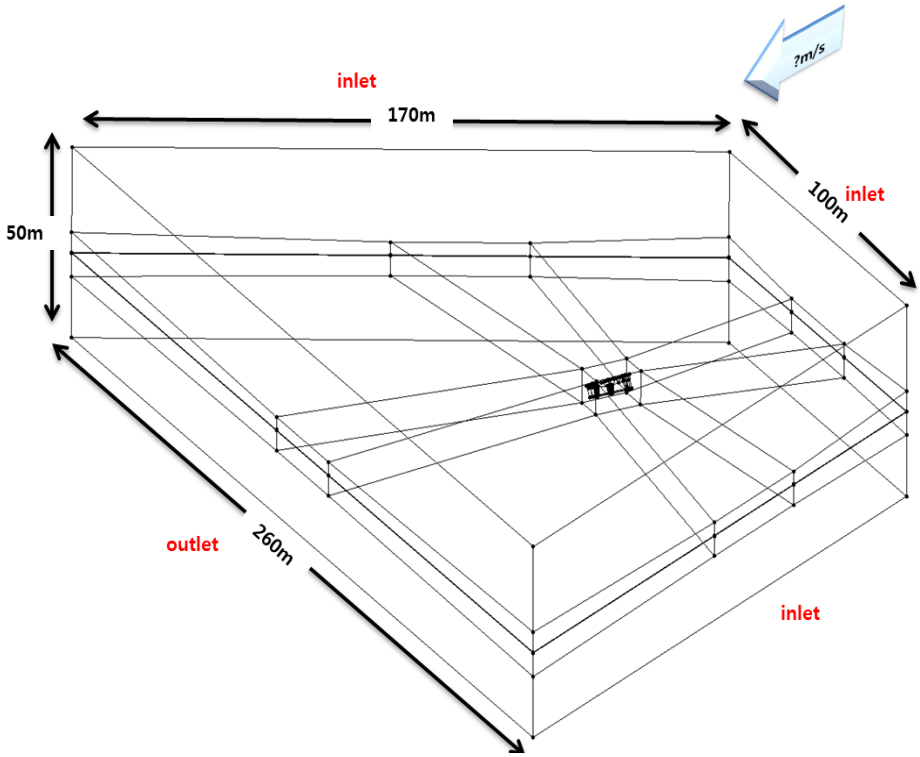


그림 28 Domain and grid of yacht hull system

요트의 자세 및 속도 추정에서도 적절한 수준의 격자가 사용되었는지 검증하기 위하여, 격자 의존도 시험을 수행하였다. 표 3은 속도 추정을 위해 선체에 사용된 격자의 의존도 시험 결과를 요약하여 나타낸다. 격자 수 약 148만개, 340만개, 766만개의 세가지 격자 케이스를 산정하였고, 각 격자 케이스 간의 셀 크기 대표 값(representative cell, *h*)비율이 약 1.3으로 유지되어, 공간 격자의 확장 비를 일정하게 유지하였다. 산정된 격자 케이스에 대해 선체 주위 유동 해석을 수행하여 결과를 도출하였다.

선체에 작용한 횡력은 각각 2625N, 3155N, 3200N 으로 계산되었고 오차율은 각각 16.79%, 1.39%로 계산되어 적절한 수준의 격자수가 사용된 것으로 판단하였다.

표 4 Verification test for the yacht velocity prediction problem

		coarse	medium	fine
# of cells on the hull		8,696	17,180	34,360
Total # of cells		1,487,234	3,403,655	7,659,605
Representative cell, h		0.97	0.73	0.56
Ratio of h			1.32	1.31
Results	**Side force(N)**	2625.8	3155.5	3200
	Difference rate		16.79%	1.39%

요트의 자세 및 속도 추정을 위해 정립된 해석 기법을 통한 세일링 요트 성능 추정의 정확성을 검증하기 위해, 선행된 연구에서 사용된 요트 선체에 대한 해석 결과를 실험 결과 및 CFD(Fluent) 해석 결과와 비교하였다. 지혜련 등은 본 연구에서 사용된 세일링 요트의 모형스케일을 상용코드인 Fluent를 이용하여 성능추정을 하였고 실험결과와 비교하였다. 선행연구에서는 선속 1.93m/s, 횡경사각 20도, 사항각 0도에서 3도까지일 때에 대하여 성능 추정을 하였다. 본 연구에서 사용된 해석 기법을 이용하여 요트 형상 및 스케일과 운용조건 모두 선행연구와 동일하게 설정하여 해석결과를 도출하였다. [19]

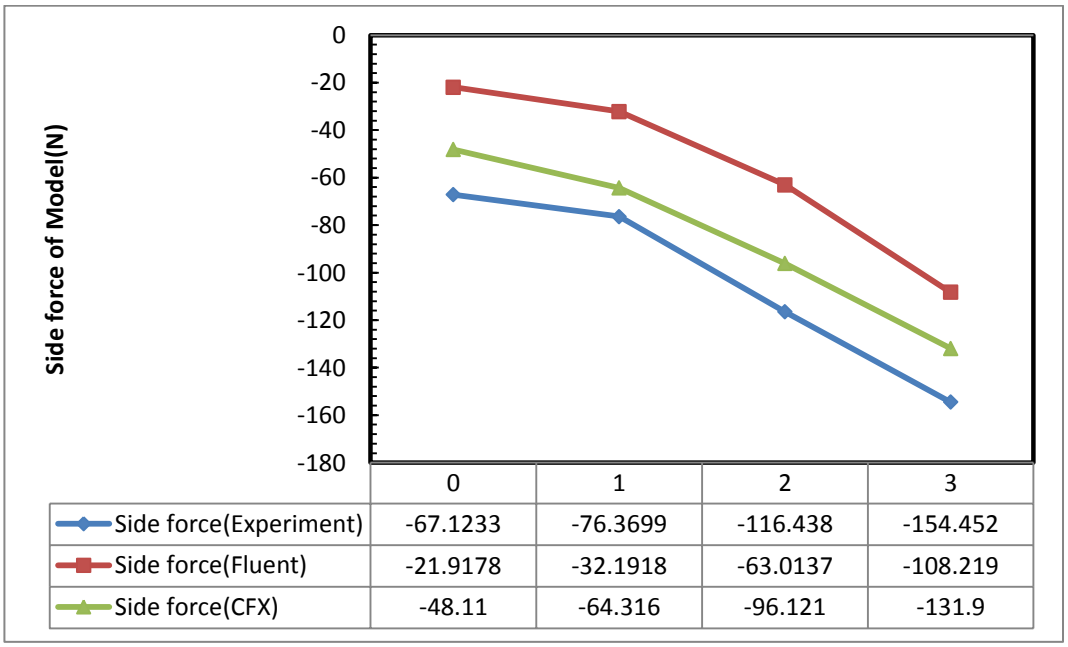


그림 29 Side force change on hull by leeway angle (Vm=1.93m/s, heel: 20 deg.)

그림 29는 사항각에 따른 횡력을 실험에서 계측된 값과 Fluent 해석을 통해 도출된 값, CFX13.0 해석을 통해 도출된 값을 비교하여 나타낸다. 본 연구의 CFD 해석 기법을 통해 추정된 결과 값이 실험결과 값과 Fluent 해석 결과 값의 사이에 위치하고, 경향이 유사하므로 본 해석 기법을 사용한 해석 결과를 신뢰할 만 하다고 판단하였다.

4.3 결과

풍상 범주 중인 세일링 요트의 속도를 추정하기 위해 총 7가지의 풍향을 선정하였다. 풍속은 10m/s로 일정하되 풍향은 30도에서 90도 까지 10도씩 변화를 주며 해석을 수행하였으며, 이때의 풍향은 뵌 바람 각도(apparent wind angle) 이다. 요트의 속도 추정 연구에서는 앞에서 언급한 속도 추정 알고리즘을 이용하여 일정한 풍속, 풍향에서 요트가 최종적으로 가지게 되는 자세를 예측하고 그 때 실제 범주하는 속도를 추정하였다. 그리고 그에 따른 세일과 선체가 받는 힘을 비교하여 우선, 뵌 바람 각도에 따라 요트가 범주할 때의 세일과 선체의 해석 결과를 살펴보고 그 영향을 검토하였다.

그림 30~32는 뵌 바람 각도에 따라 세일 트림 및 선체 자세를 나타낸 그림이다. 세일 트림은 집세일의 포스테이와 메인세일의 러프 부분을 고정시키고 뵌 바람 각도에 따라 세일의 각도를 달리한다. 그림 30은 뵌 바람 각도 30도에 대한 세일 트림 및 선체 자세를 나타낸 그림인데, 요트는 최종적으로 33도의 횡경사각을 가지고 3m/s의 속력인 채 좌현 쪽으로 범주하였다. 이 때, 사항각은 13도였으며, 타 각은 우현 쪽으로 4도 틀어진 각도를 유지 하였다. 세일과 선체 따로 계산을 수행했음에도 이러한 결과를 얻을 수 있었던 것은 요트는 aerodynamic force가 작용하는 풍압중심(Center of effect)과 hydrodynamic force가 작용하는 횡저항 중심(Center of lateral resistance)

이 각각 따로 존재하는데다 이 두 중심점의 거리를 이용하여 모멘트를 구하기 때문이다. 그림 31는 뷘 바람 각도 60도에 대한 세일 트림 및 선체 자세를 나타낸 그림이다. 세일링 요트는 27도의 횡경사각과 2.5도의 사항각을 가지고 4.45m/s의 속력으로 좌현쪽으로 범주하였다. 이 때, 타 각은 좌현쪽으로 1.8도 틀어진 각도를 유지하였다. 그림 32에는 뷘 바람 각도 90도에 대한 세일 트림 및 선체 자세를 나타내었다. 12도의 횡경사각과 0.4도의 사항각, 5.03m/s의 속력을 가진 채 좌현쪽으로 범주하는 경우였다. 이 때, 타 각은 0.88도 였다.

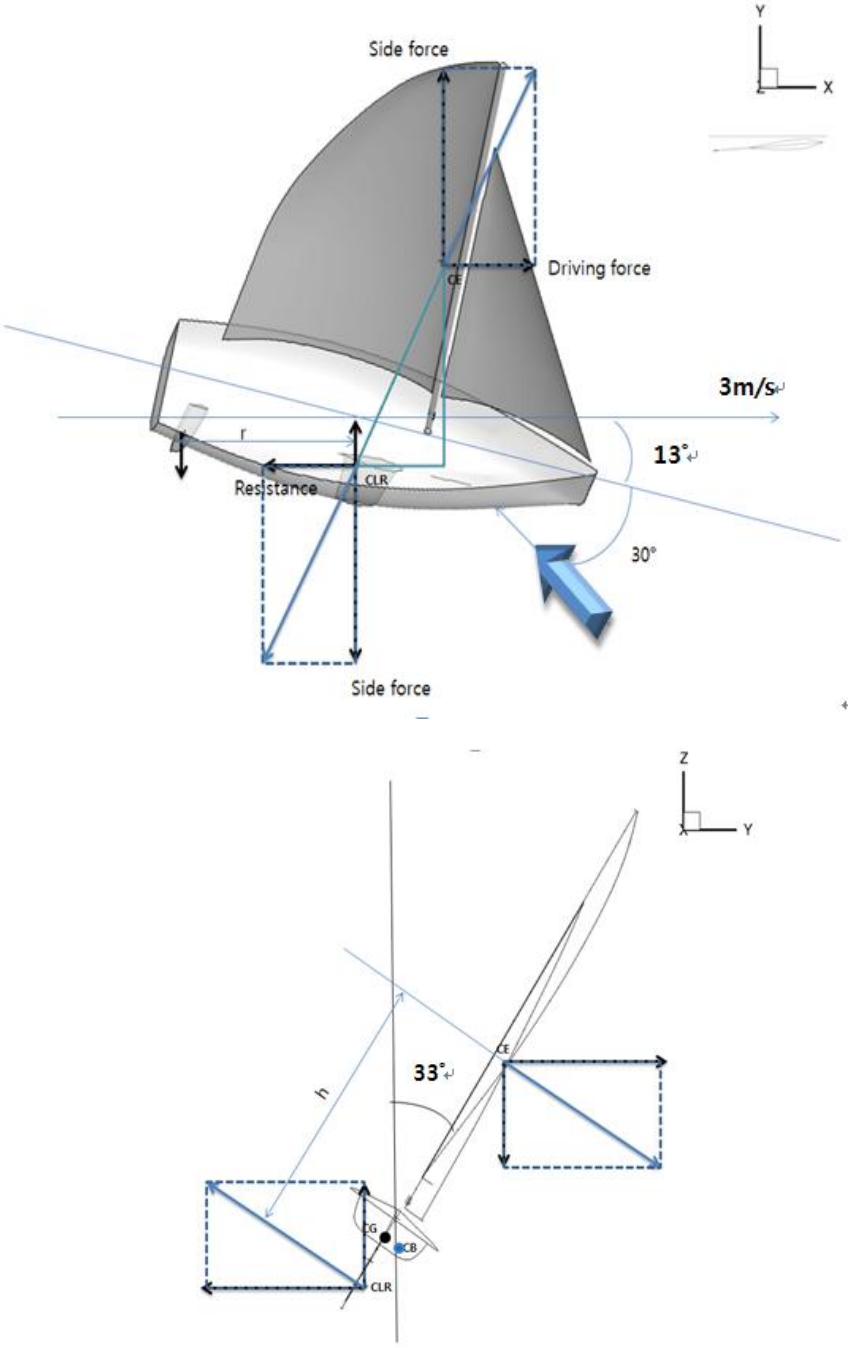


그림 30 Sail trim and yacht performance for apparent wind angle 30˚

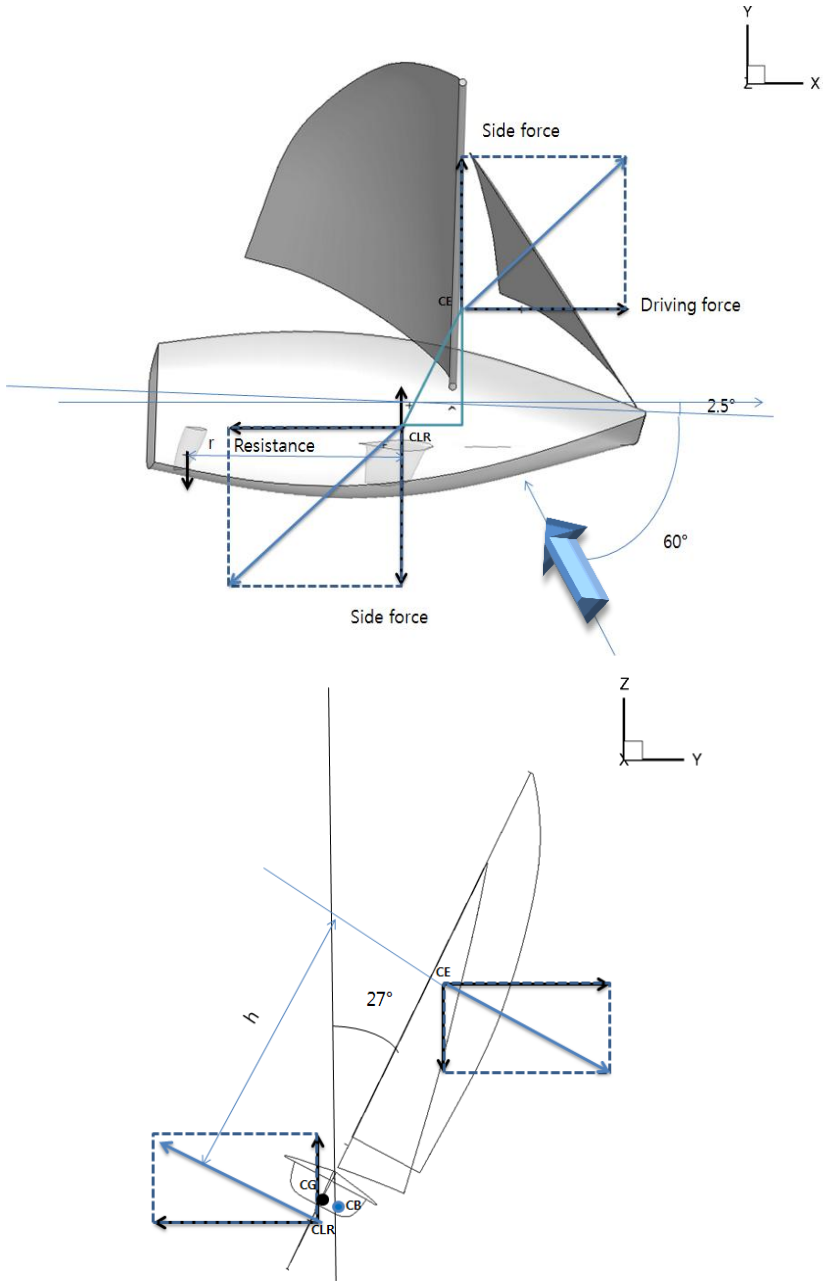


그림 31 Sail trim and yacht performance for apparent wind angle 60˚

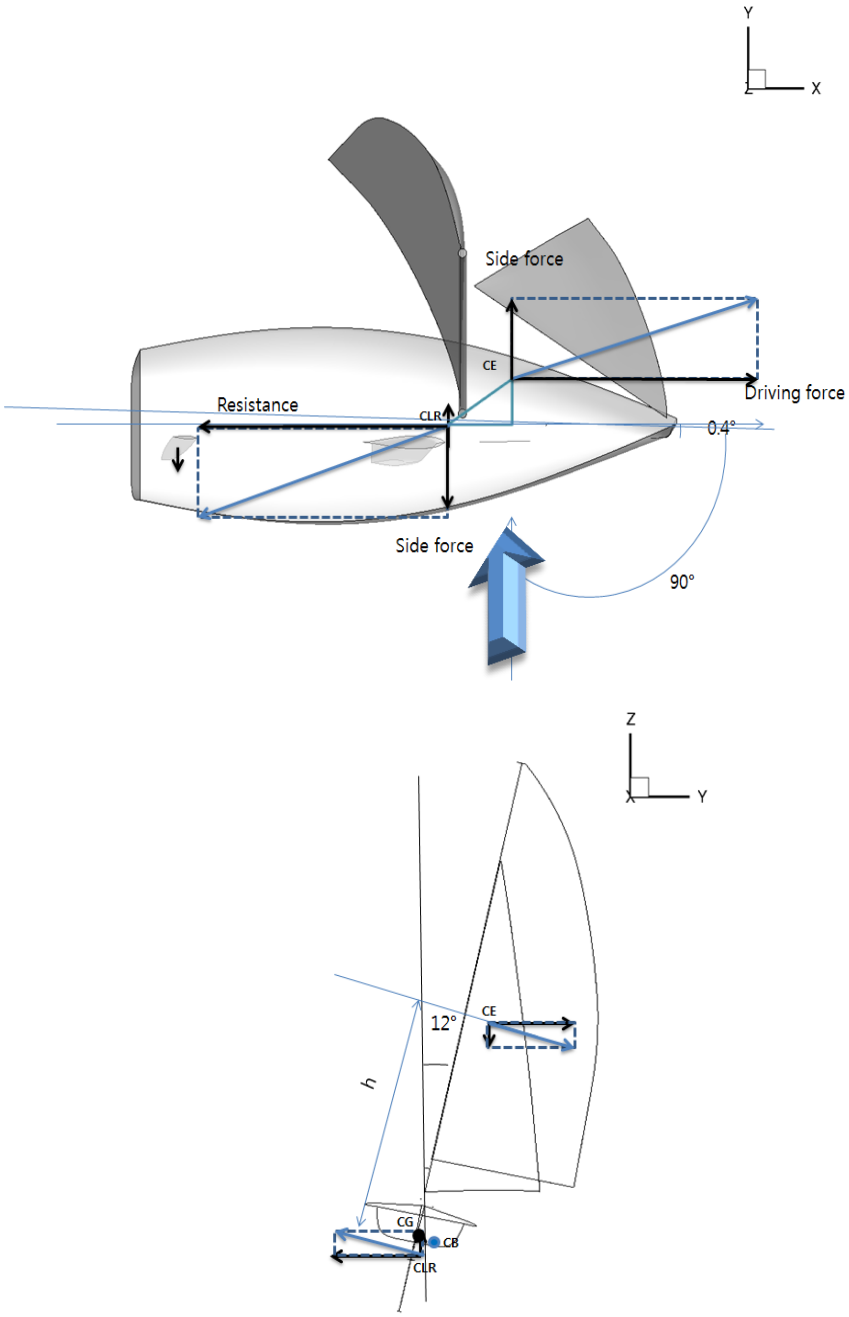
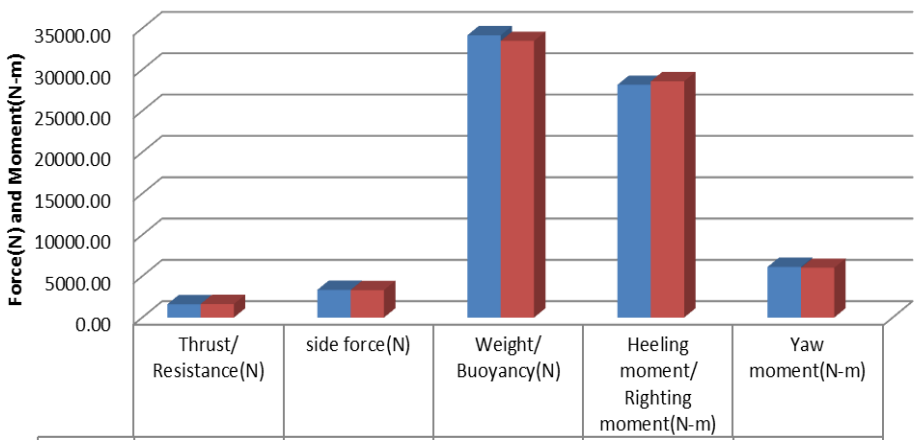
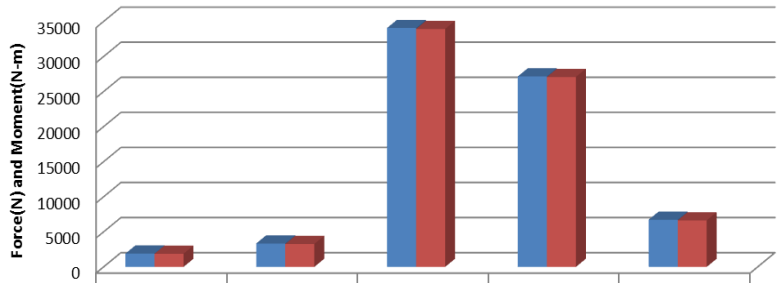


그림 32 Sail trim and yacht performance for apparent wind angle 90˚

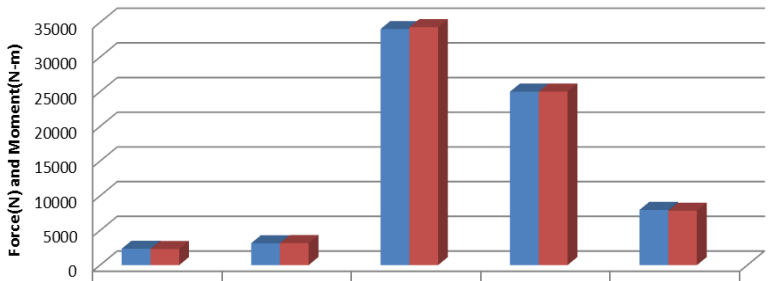
대표적으로 뵌 바람 30도, 60도, 90도 3가지 경우에 관하여 설명을 했지만, 실제로는 앞에서 언급했듯 30도에서 90도까지의 7가지 경우에 대하여 계산이 수행되었다. 뵌 바람 30도~90도까지의 모든 계산은 앞에서 설명한 aerodynamic force와 hydrodynamic force가 거의 일치할 때까지 계산이 수행되었으며, 두 영역에서 구해진 힘의 차를 이용해 오차를 구하였다. 그림 33에서 보는 것과 같이 모든 경우에서 모든 힘은 2.5%이내의 오차율을 가진다.



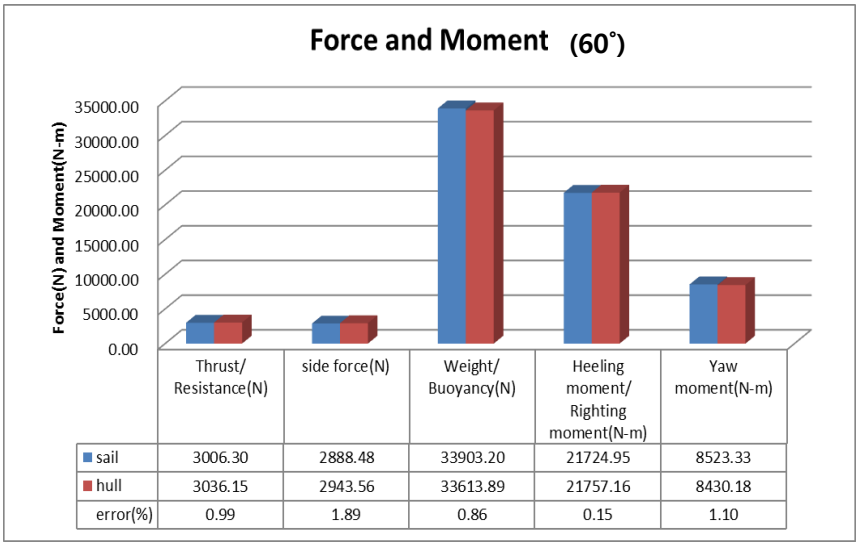
	Thrust/ Resistance(N)	side force(N)	Weight/ Buoyancy(N)	Heeling moment/ Righting moment(N-m)	Yaw moment(N-m)
sail	1597.37	3344.70	34156.50	28159.12	6126.08
hull	1635.13	3326.59	33471.96	28586.47	6020.76
error(%)	2.34	0.54	2.02	1.51	1.73



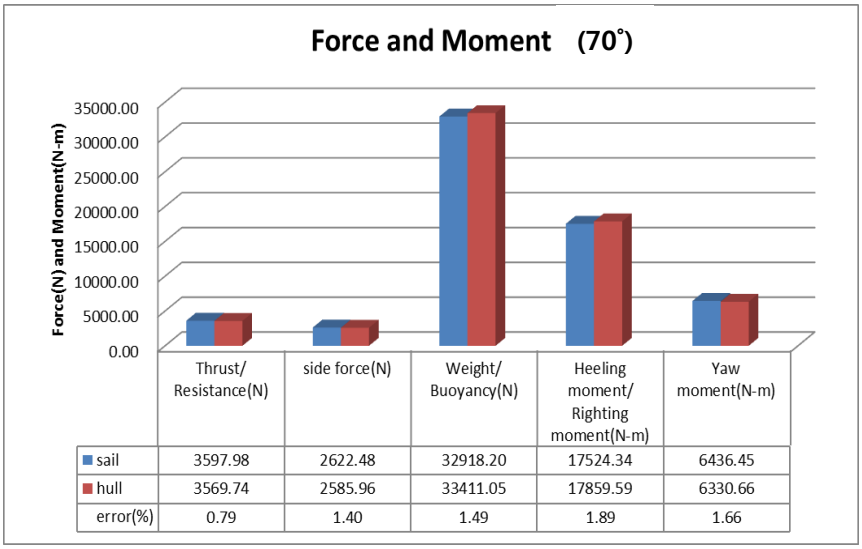
	Thrust/ Resistance(N)	side force(N)	Weight/ Buoyancy(N)	Heeling moment/ Righting moment(N-m)	Yaw moment(N-m)
sail	1897.609	3340.8	34062	27162.7	6715.3
hull	1868.04	3268.57	33931.45	27083.1	6640
error(%)	1.5704597	2.185684869	0.384007577	0.293478942	1.127642209



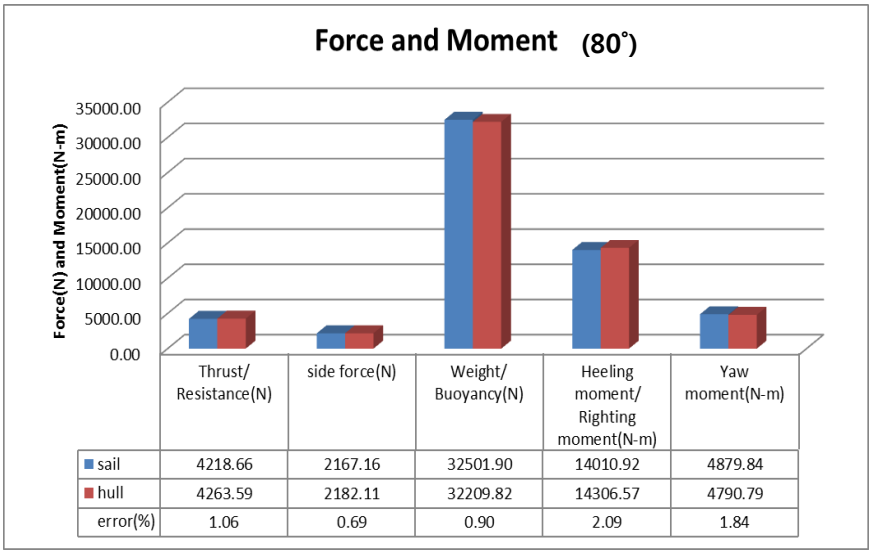
	Thrust/ Resistance(N)	side force(N)	Weight/ Buoyancy(N)	Heeling moment/ Righting moment(N-m)	Yaw moment(N-m)
sail	2363.788	3151.556	34033.9	25007.92	7956.61
hull	2304.84	3163.34	34290.58	25018.57	7839.48
error(%)	2.525281517	0.373212797	0.751355883	0.042577442	1.48302523



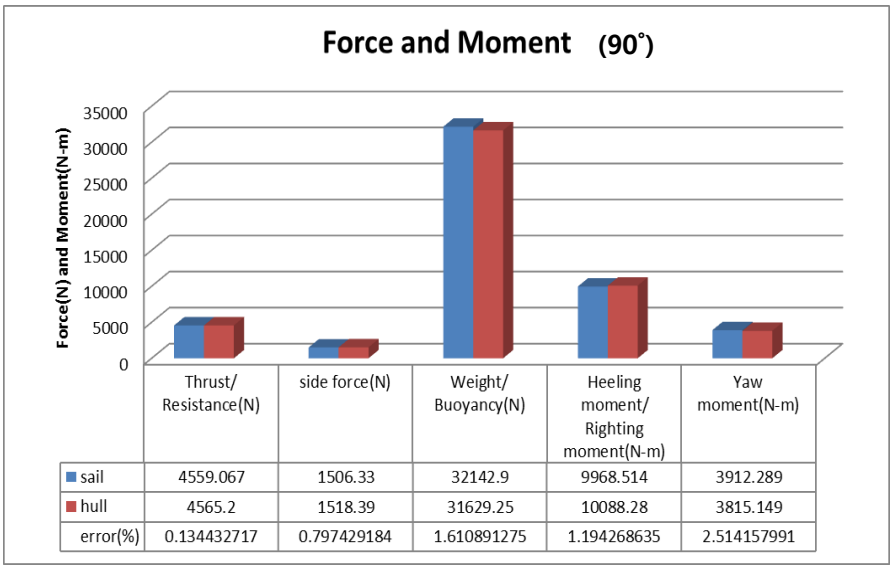
	Thrust/ Resistance(N)	side force(N)	Weight/ Buoyancy(N)	Heeling moment/ Righting moment(N-m)	Yaw moment(N-m)
sail	3006.30	2888.48	33903.20	21724.95	8523.33
hull	3036.15	2943.56	33613.89	21757.16	8430.18
error(%)	0.99	1.89	0.86	0.15	1.10



	Thrust/ Resistance(N)	side force(N)	Weight/ Buoyancy(N)	Heeling moment/ Righting moment(N-m)	Yaw moment(N-m)
sail	3597.98	2622.48	32918.20	17524.34	6436.45
hull	3569.74	2585.96	33411.05	17859.59	6330.66
error(%)	0.79	1.40	1.49	1.89	1.66



	Thrust/ Resistance(N)	side force(N)	Weight/ Buoyancy(N)	Heeling moment/ Righting moment(N-m)	Yaw moment(N-m)
sail	4218.66	2167.16	32501.90	14010.92	4879.84
hull	4263.59	2182.11	32209.82	14306.57	4790.79
error(%)	1.06	0.69	0.90	2.09	1.84



	Thrust/ Resistance(N)	side force(N)	Weight/ Buoyancy(N)	Heeling moment/ Righting moment(N-m)	Yaw moment(N-m)
sail	4559.067	1506.33	32142.9	9968.514	3912.289
hull	4565.2	1518.39	31629.25	10088.28	3815.149
error(%)	0.134432717	0.797429184	1.610891275	1.194268635	2.514157991

그림 33 Force and moment balance error for apparent wind angle

세일링 요트가 범주하는 자세를 분석하기에 앞서 세일이 받는 힘을 분석하는 것이 중요하다. 그림 34-36은 뵌 바람에 대한 세일의 압력분포를 나타낸 그림이다. 최저 압력은 흡입 면에서 집 세일의 포스테이(forestay)와 풋(foot), 메인 세일의 풋에서 발생한 반면, 최고 압력은 압력 면에서 발생하였다. 세일의 압력 면과 흡입 면 사이의 압력 차이가 양력을 발생시키므로 압력 계수 분포를 볼 때, 뵌 바람 각도가 증가할수록 더 큰 양력을 발생시킨다는 것을 알 수 있었다. 그림 37은 뵌 바람 각도에 따른 양력과 항력 계수를 나타낸 그림이다. 뵌 바람 각도가 증가할수록 양력뿐 아니라 항력도 증가한다는 것을 알 수 있다. 양력과 항력의 증가는 총합력의 증가를 의미한다. 그림 38와 39를 보면 총합력이 증가한 데 반해, 세일에 작용하는 횡력은 감소했는데 이는 추력이 횡력과 비교했을 때, 급격히 증가했다는 것을 말해준다. 따라서, 뵌 바람 각도가 증가할수록 세일의 추력은 증가하고 횡력은 감소한다고 말 할 수 있다.

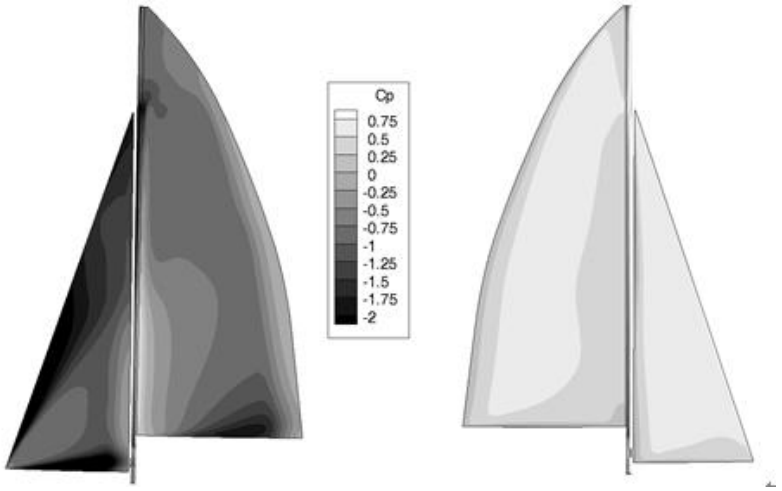


그림 34 C_P contours on sails for apparent wind angle 30° (leeward and windward side)

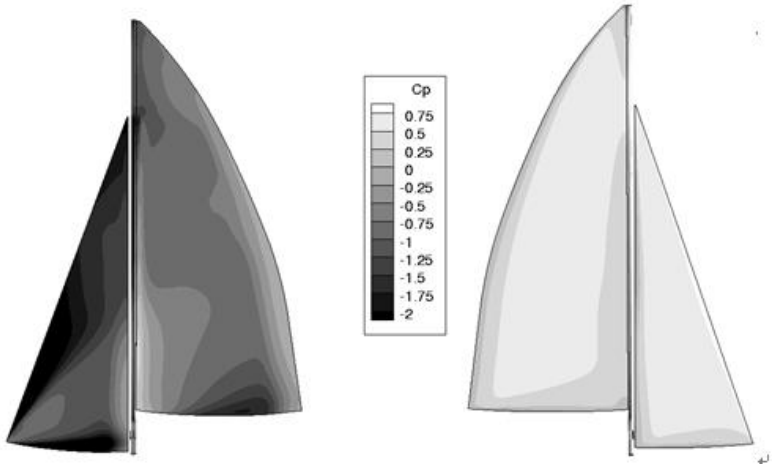


그림 35 C_P contours on sails for apparent wind angle 60° (leeward and windward side)

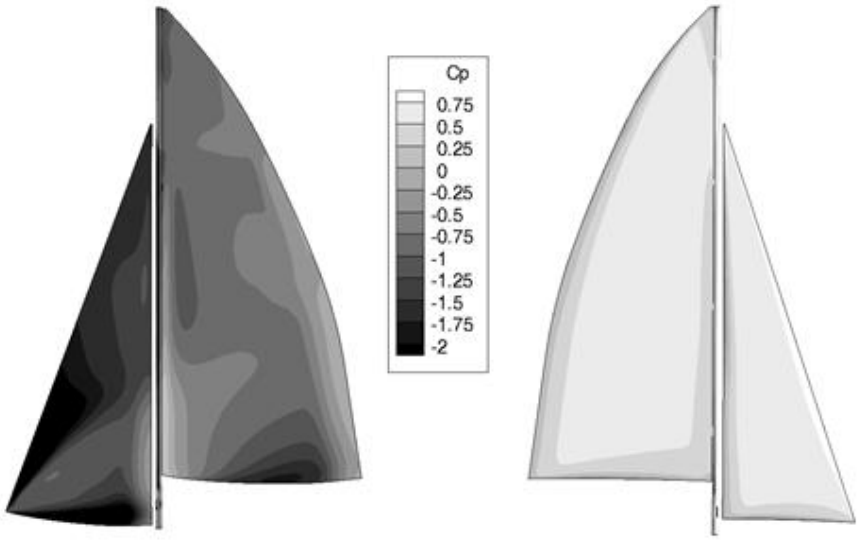


그림 36 C_P contours on sails for apparent wind angle 90° (leeward and windward side)

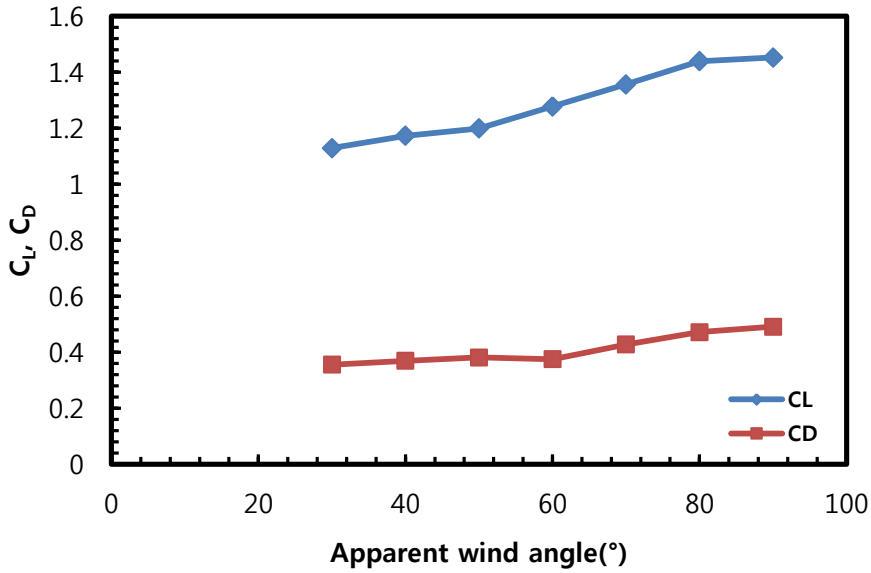


그림 37 Comparison of C_L and C_D for the sail

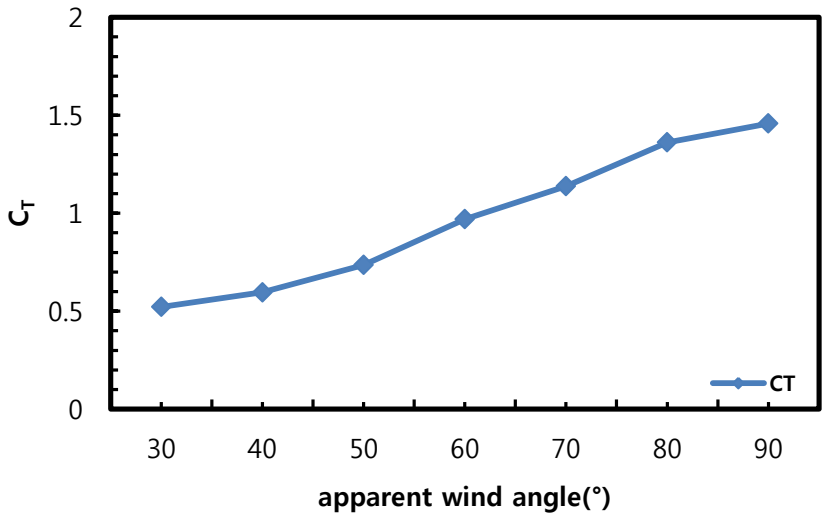


그림 38 Thrust coefficient for apparent wind angle

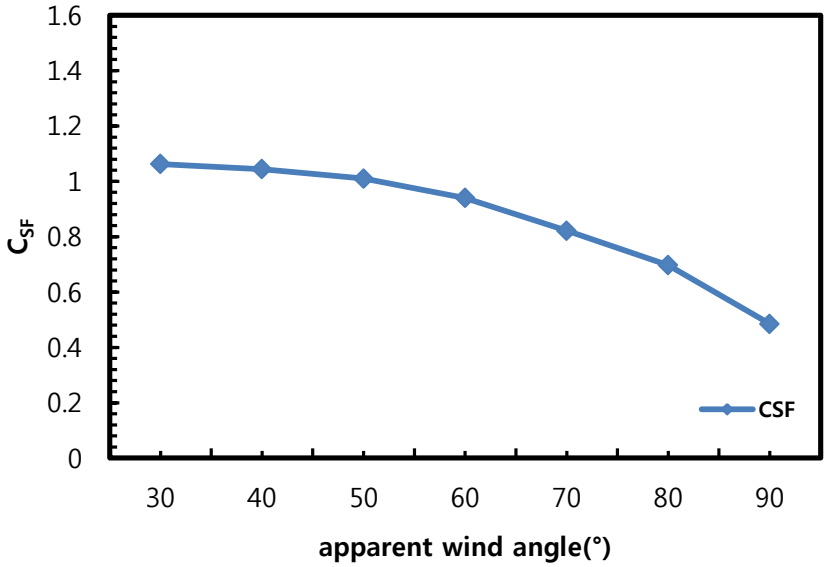


그림 39 Side force coefficient for apparent wind angle

표 5는 계산결과 얻어진 뵌 바람에 따른 횡 경사각, 선속, 사항각, 타 각을 나타낸 표이다. 그림 40은 뵌 바람 각도에 대한 횡 경사각의 변화를 나타낸 것이다. 뵌 바람 각도가 클수록 요트 범주 시의 횡 경사각은 작아지는데, 이것은 세일에 작용하는 힘에서 그 원인을 찾을 수 있다. 그림 38과 39를 보면, 뵌 바람 각도가 클수록 세일이 받는 횡력은 작아지고 추력은 커진다. 횡 경사각의 차이 때문에 횡력과 추력에서 차이가 나기도 하지만 풍향과 그에 따른 세일 트림으로 인해 세일에 작용하는 힘이 달라진다고도 할 수 있다. 뵌 바람 각도가 증가함에 따라 세일에 작용하는 횡력이 작아지기 때문에 힘의 평형에 의해 선체에 작용하는 횡력도 작아야 한다. 횡력은 횡 경사 모멘트와 크게 연관되어 있기 때문에 횡력의 감소는 횡 경사 모멘트의 감소를 의미한다. 이는 복원 모멘트가 작아야 된다는 것을 의미하고, 그림 40과 41에서 보듯이, 횡 경사 모멘트가 작아지기 때문에 작은 복원 모멘트를 갖기 위해서 횡 경사각 또한 작게 된다.

표 5 Heel angle, speed, leeway angle, rudder angle for apparent wind

apparent wind angle(°)	Heel angle(°)	Speed (m/s)	Leeway angle(°)	Rudder angle(°)
30	33	3	13	-4
40	31	3.65	7	-1.7
50	30	4.02	4.5	0
60	27	4.45	2.5	1.8
70	22	4.65	1.4	1.85
80	17	4.94	0.95	0.9
90	12	5.03	0.4	0.88

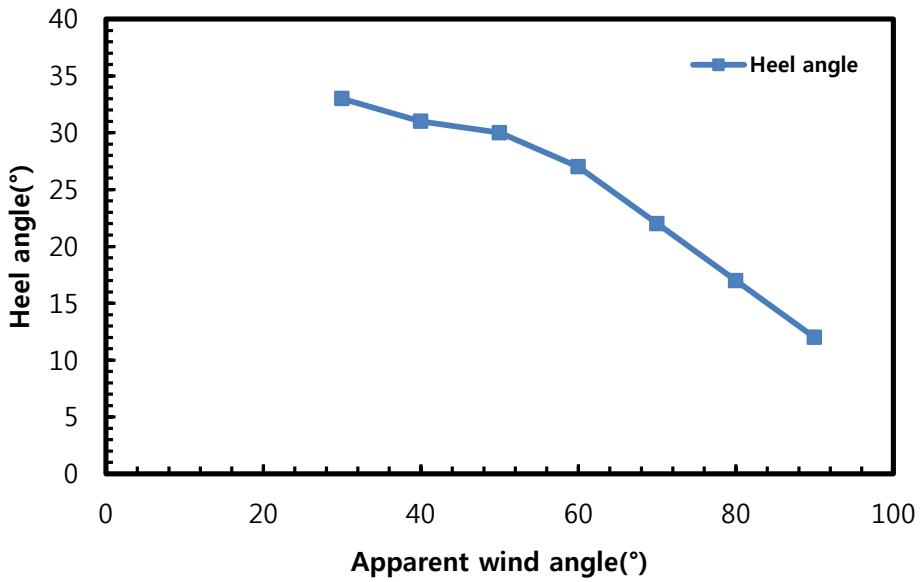


그림 40 Heel angle for apparent wind angle

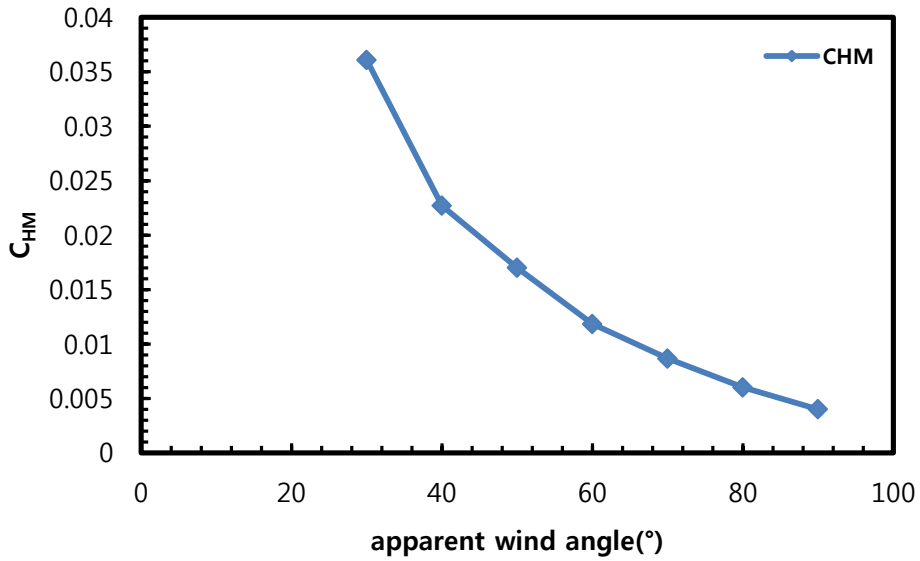


그림 41 Heeling moment coefficient for apparent wind angle

그림 42와 43은 뵌 바람에 대한 선속과 사항각을 나타낸 그래프이다. 뵌 바람의 각도가 증가함에 따라 선속은 증가하며, 사항각은 감소한다는 것을 알 수 있다. 앞에서 살펴 본 바와 같이, 뵌 바람 각도가 증가할수록 세일에 작용하는 추력은 증가하고 횡력은 감소한다. 그림 38에서 보듯, 뵌 바람 각도가 커질수록 세일의 추력이 굉장히 커진다. 요트는 추력에 상응하는 저항을 가져야 하기 때문에 선속이 커지게 된다. 선속의 증가는 수면 하 부분의 횡력의 증가를 유도하는데 세일의 횡력은 감소하는 양상을 보이므로 수면 하 부분의 횡력의 증가를 상쇄시키기 위해 사항각의 감소가 요구된다. 뵌 바람 각도에

따른 횡경사각의 감소, 사항각의 감소는 요 모멘트의 감소와 연관이 있고 범주를 위한 요 모멘트의 평형을 위해 타 각을 조절하게 된다.

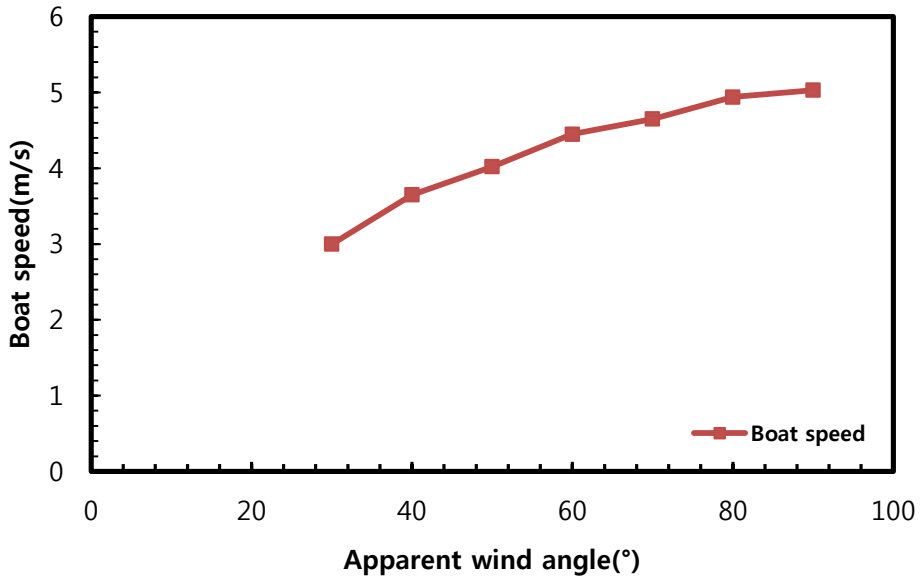


그림 42 Boat speed for apparent wind angle

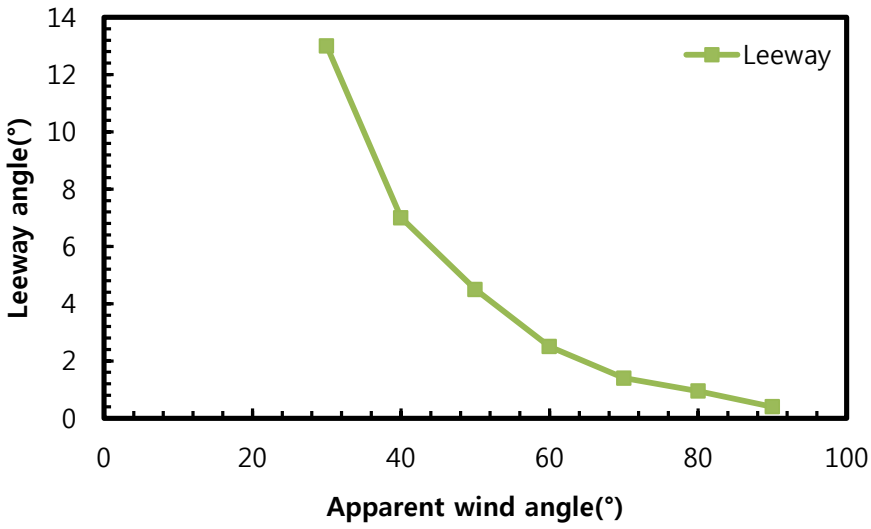


그림 43 Leeway angle for apparent wind angle

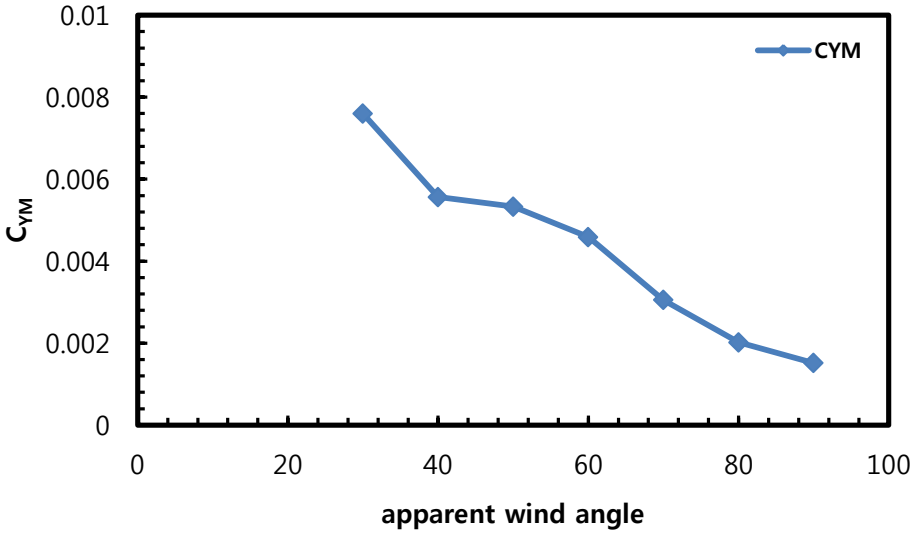


그림 44 Yaw moment coefficient for apparent wind angle

세일링 요트는 횡경사한 상태로 범주하기 때문에 선체 주변에서 자유수면이 대칭적이지 않다. 그래서 자유수면의 상승과 하강을 고려해야 한다. 그림 45~51는 각각의 뵌 바람 각도에 따른 수선면을 나타낸 것으로, 전반적으로 우현쪽에서 수면 하강이 일어났으며, 좌현쪽에서 수면 상승이 발생하였다. 이는 좌현쪽으로 횡경사가 일어났기 때문이다. 뵌 바람 각도가 작을수록 우현쪽의 수면하강이, 좌현쪽의 수면상승이 더욱 또렷이 나타났다.

그림 52는 뵌 바람 각도에 따른 침수표면적을 나타낸 그래프이다. 뵌 바람 각도가 클수록 침수표면적이 크게 계산되었다.

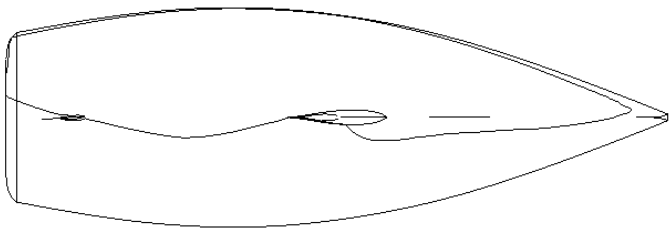


그림 45 Waterline shape for apparent wind angle 30°

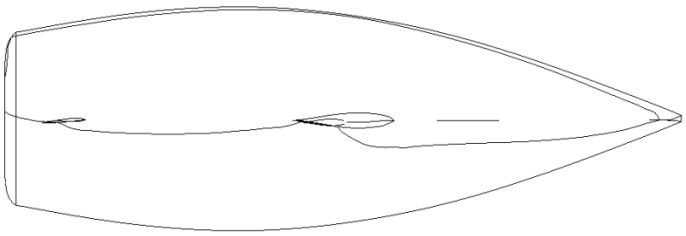


그림 46 Waterline shape for apparent wind angle 40°

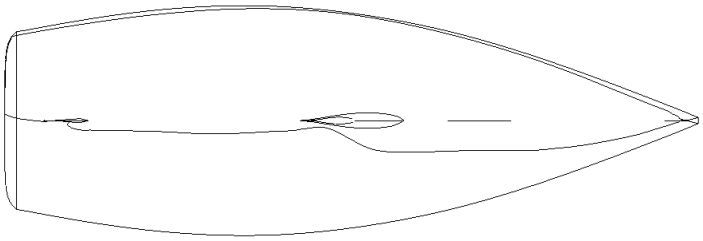


그림 47 Waterline shape for apparent wind angle 50°

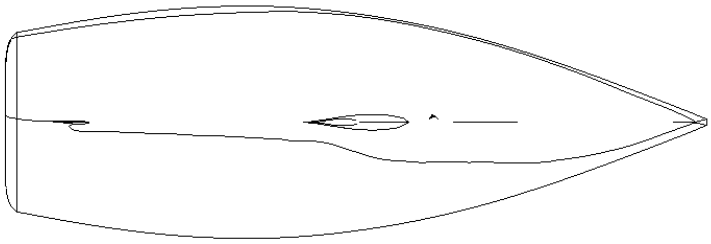


그림 48 Waterline shape for apparent wind angle 60°

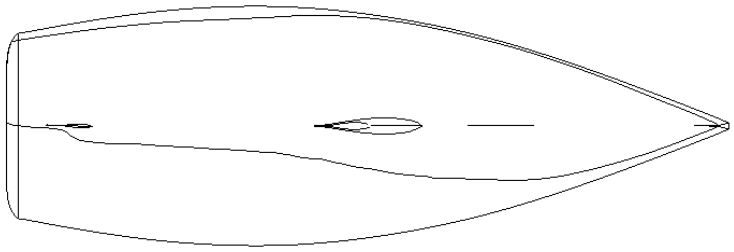


그림 3 Waterline shape for apparent wind angle 70°

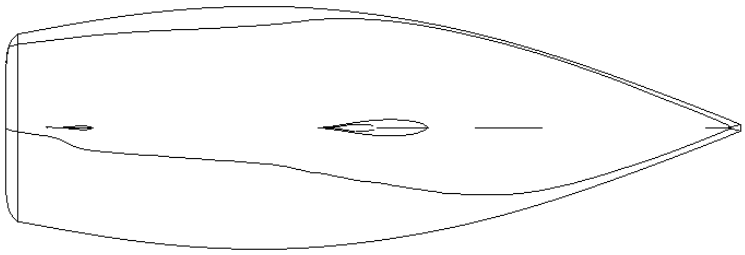


그림 50 Waterline shape for apparent wind angle 80°

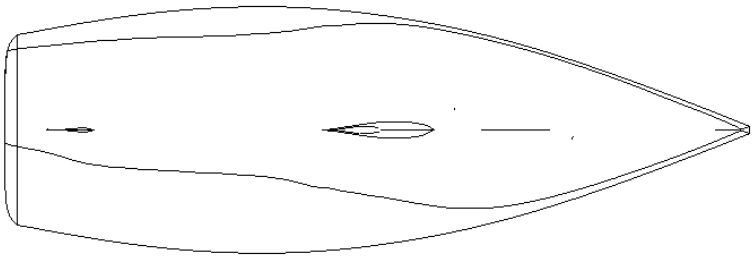


그림 51 Waterline shape for apparent wind angle 90°

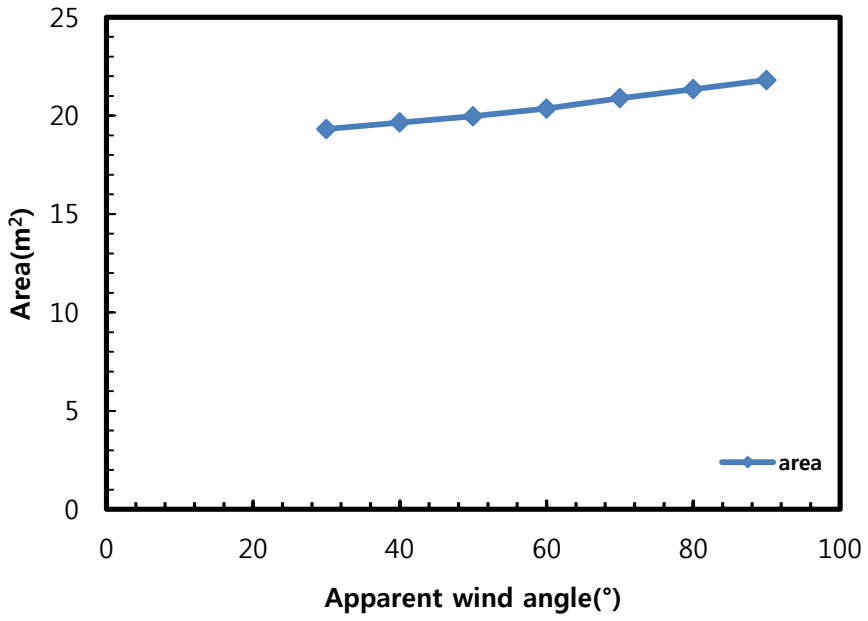


그림 52 Wetted surface area for apparent wind angle

일정한 뵌 바람에서 세일링 요트가 힘의 평형을 이루며 범주할 때, 선체의 압력분포를 그림 53-59에 나타내었다. 뵌 바람에 따라 요트의 범주 자세가 변화하기 때문에 선체에 작용하는 압력분포가 달라진다. 세일링 요트는 운항 중의 밸런스를 위해 횡경사각 및 사항각을 가지게 되는데 이로 인해 선체는 물론, 킬과 타 표면의 좌우 압력이 달라져서 발생하는 양력이 횡방향의 균형을 위한 힘으로 작용한다. 그림 53-59에서 선체, 킬, 타를 각각 살펴 보았을 때, 모든 뵌 바람에서 우현보다 좌현에서 큰 압력이 분포하는 것을 확인하였

는데 이것은 좌현쪽으로 횡경사하기 때문이다. 뵌 바람 각도가 클수록 압력(특히, 킬의 압력)이 감소한다는 것을 알 수 있는데, 사항각의 감소로 수면하 부분의 입사각이 줄어들기 때문이다.

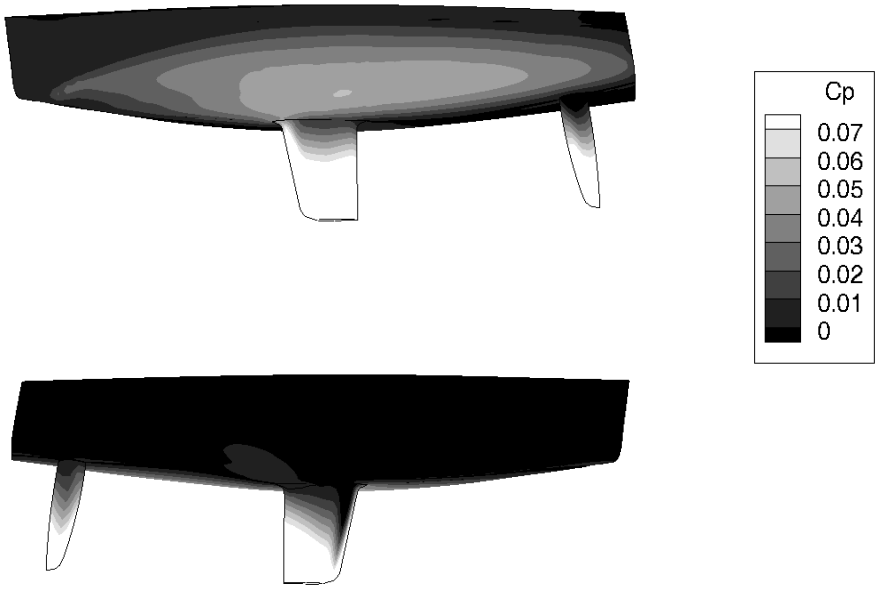


그림 53 C_{Press} contours on port and starboard side for apparent wind angle 30°

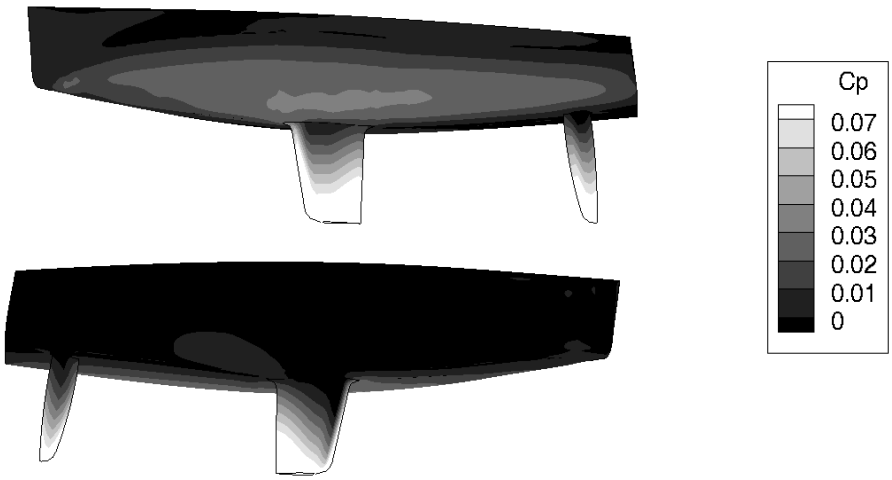


그림 54 C_{Press} contours on port and starboard side for apparent wind angle 40°

그림 55 C_{Press} contours on port and starboard side for apparent wind angle 50°

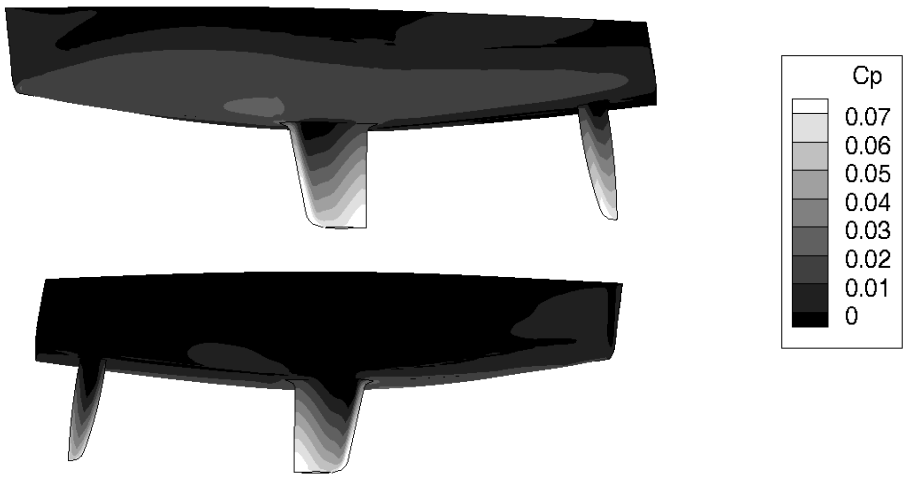


그림 56 C_{Press} contours on port and starboard side for apparent wind angle 60°

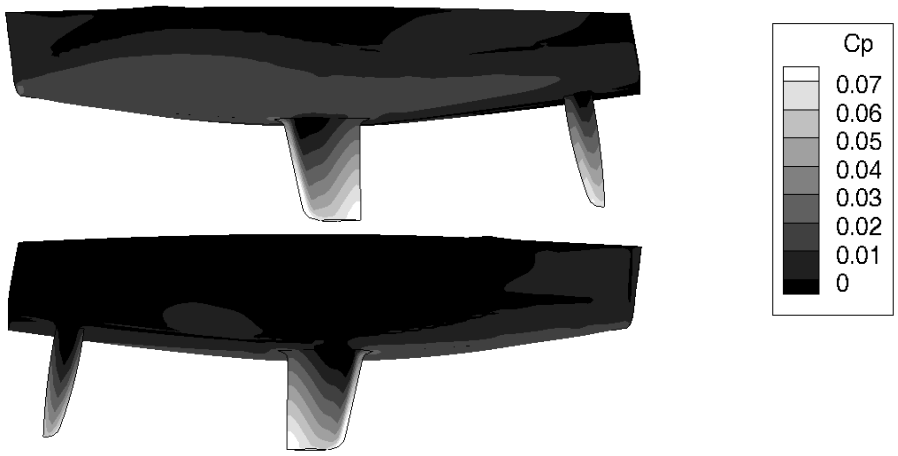


그림 57 C_{Press} contours on port and starboard side for apparent wind angle 70°

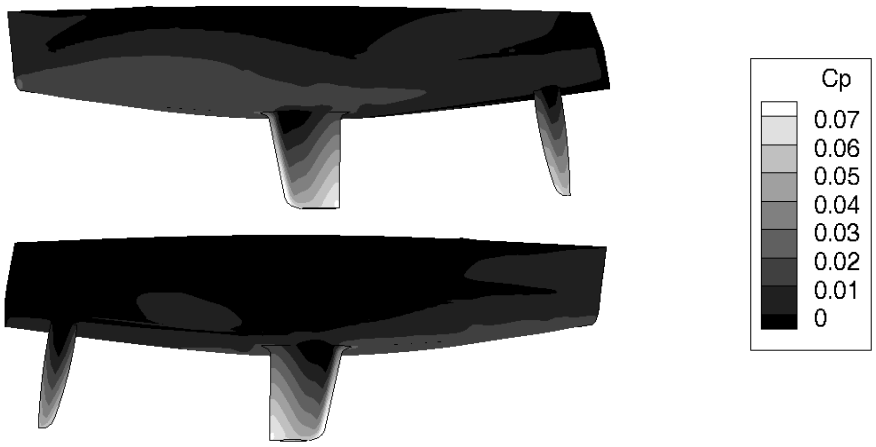


그림 58 C_{Press} contours on port and starboard side for apparent wind angle 80°

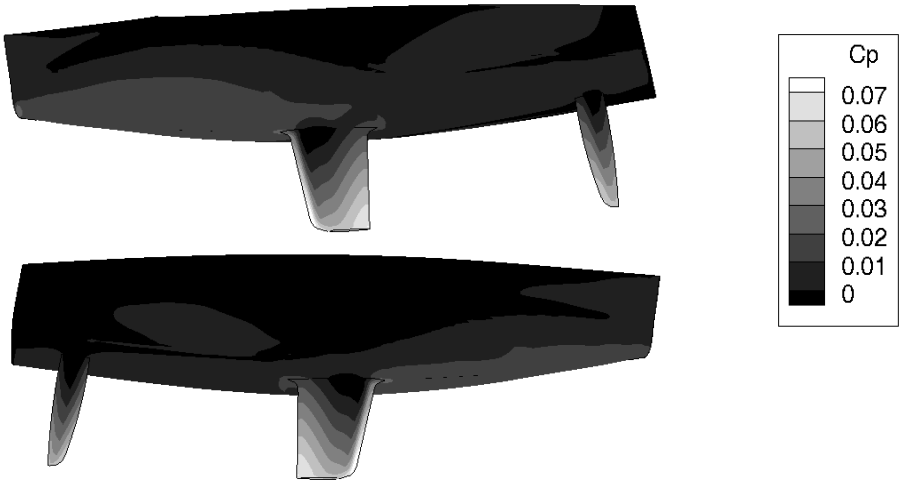


그림 59 C_{Press} contours on port and starboard side for apparent wind angle 90°

일정한 뵌 바람에서 요트의 자세 및 그에 따른 압력 분포는 요트의 성능과 밀접한 관계가 있다. 풍속 10m/s, 풍향 30도~ 90도일 때 세일링 요트의 자세에 따른 저항, 횡력, 횡 경사 모멘트, 요잉 모멘트를 계산해 보았다. 이러한 모든 외력과 선체 반력 사이의 균형이 이루어지는 자세를 결정하고 그로 인한 범주 속도를 추정하였다.

5. 결론

본 연구에서는 세일링 요트 범주 시 변화되는 요소들인 세일 변형 및 선체 자세 변화를 고려하여 요트의 성능을 예측할 수 있는 수치 해석 기법을 정립하였다.

상용 CFD 해석 툴인 ANSYS CFX 13.0 및 상용 구조 해석 툴인 ANSYS Transient Structural을 이용하여, 30피트급 세일링 요트의 세일 변형 효과를 고려할 수 있는 강한 연성 기법 기반의 유체-구조 연성 해석 기법을 정립하였다. 정립된 CFD 해석 기법은 격자 의존도 시험을 통해 신뢰도를 확인하였다.

ANSYS CFX 13.0을 이용하여, 세일링 요트의 자세 및 속도를 추정할 수 있는 해석 기법을 정립하였다. 특히, 공기유동의 속도와 각도는 일정하지만 물유동의 속도와 각도는 힘의 평형을 만족할 때까지 계속 바꿔줘야 하기 때문에 이를 위해 새로운 알고리즘을 정립하였다. 개발된 해석 알고리즘을 통해 풍상 범주 시 세일링 요트의 속도와 자세를 추정하였다. 정립된 해석 기법은 격자 의존도 시험을 통해 산정된 적정 수준의 격자 해상도가 적용되었고, 일정한 자세를 가진 요트의 성능계측 실험 및 Fluent 결과와 해석 결과를 비교하여 해석 기법의 정도를 검증하였다.

집세일, 마스트, 메인 세일이 있는 슬루프형 요트 세일에 대하여 유체-구조

연성 해석을 수행하였다. 유동에 의해 세일의 캠버가 감소하는 방향으로 변형되어, 좀 더 부드러운 곡선을 가지게 되었다. 변형으로 인한 와류 감소로 흡입면에서의 압력 강하가 발생하였으며, 세일의 양력은 6.63%, 항력은 16.33% 감소하는 양상을 보였으며, 양항비는 9.22% 증가하는 양상을 보였다. 세일의 양항력의 감소는 세일 평균 캠버라인에 대한 유동의 입사각의 감소로 인한 압력 분포 변화에 기인한 것으로 확인하였다. 특히, 흡입면의 와류 감소로 인한 음압 강하가 두드러져 양압과 음압의 차이가 크게 감소하는 경향이 있었다.

세일과 선체, 킬, 러더를 포함하는 30피트급 세일링 요트에 대해 풍상 범주 중일 때의 자세와 속도를 추정하는 해석을 수행하였다. 풍속 10m/s, 풍향 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°의 7가지 케이스에 대해 수행한 해석결과를 비교하였다. 뵌 바람 각도가 커질수록 세일의 추력은 증가하였으며, 횡력은 감소하였다. 이에 따라 세일링 요트의 횡경사각은 감소하는 양상을 보였으며, 선속은 증가하였고, 사항각은 감소하였다. 이러한 경향은 뵌 바람에 따라 추력, 횡력, 횡경사 모멘트, 요 모멘트 등이 다르기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구에서는 세일 변형이 세일 성능에 미치는 영향을 정략적이고 분석적으로 검토하였으며, 새로 정립된 알고리즘을 통해 세일링 요트의 자세와 속도를 추정하였다. 요트 성능 해석을 위해 세일 변형 고려와 요트의 정확한 자세 및 속도 추정이 요구됨을 시사하였다.

6. 참고문헌

[1] 미야타 히데아키, 2006, “요트의 과학”, *지성사*

[2] F.Fossati., 2010, “Aero-hydrodynamics and the performance of sailing yachts”, *International Marine Publishing*

[3] Trimarchi, D., Turnock, R., & Taunton D.J., 2010, “The Use Of Shell Elements To Capture Sail Wrinkles, And Their Influence On Aerodynamic Loads”, *Proc. 2nd. Intl. Conference on Innovations in High Performance Sailing Yachts*, Lorient

[4] Augier, B., Bot, P., Hauville, F., Durand, M., 2013, “Dynamic Behaviour of a Flexible Yacht Sail Plan”, *Ocean Engineering*, 66:32–43, 2013.

[5] LeMaitre, O., Huberson, S., and Souza De Cursi, E., 1999, “Unsteady Model of Sail and Flow Interaction”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 13, No. 1, pp. 37–59.

[6] Park. S.R., Yoo. J. and Song. C.Y., 2011, “Fluid-Structure Interaction Analysis of 30ft Yacht Sail deformation”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, pp.610-617

[7] Lee. H.B., Rhee. S.H., Yoo. J.H., 2011, “Analysis of a Two-Dimensional Section of Deforming Yacht Sails”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea* , Vol.48, No.4, pp.308-316

[8] P. Jones and R. Korpus, 2001, “*America’s Cup class yacht design using viscous flow CFD”*, *Proceedings of the 15th Chesapeake Sailing Yacht* Symposium (Annapolis,USA)

[9] M.M.D. Levadou, H.J. Prins, H.C. Raven, 1998, “Application of advanced computational Fluid Dynamics in Yacht Design”

[10] D. Detomi, N. Parolini, and A. Quarteroni., 2010, “Numerical models and simulations in sailing yacht design.”, In M. Peters, editor, *Computational Fluid Dynamics for Sport Simulation*, pages 131. Springer-Verlag

[11]H. K. Versteeg., 2007, “An Introduction to Computational Fluid Dynamics”, *Pearson College Div*

[12] “midas NFX를 활용한 실무 유한요소해석의 이해와 활용”, *마이다스 아이티*

[13] Menter, Florian R., 1994, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications.”, *AIAA journal* 32(8), pp.1598-1605.

[14] 김종은, 2006, “자유표면유동 해석을 위한 비정렬격자계에 적합한 경계면 포착법 연구.”, *한국전산유체공학회지* 11(4)pp.14-19.

[15] Rhee, Shin Hyung, et al., 2005, “Assessment of the volume of fluid method for free-surface wave flow.”, *Journal of marine science and technology* 10(4), pp.173-180.

[16] 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.

[17] Jean-Marc. V., Pascal. D.V., Charles, H., Benoit. L., 2006, “Strong Coupling Algorithm to Solve Fluid-Structure-Interaction Problems with a Staggered Approach”, *The ESA Flow-SCHyp reserch project*

[18] Celik, Ishmail B., Urmila Ghia, and Patrick J. Roache., 2008, “Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications.”, *Journal of fluids Engineering*, 130(7)

[19] 지혜련, 김우전, 박종환, 2007, "30ft 급 요트 선체 주위의 점성유동 해석." *대한조선학회논문집* 44(3) pp.248-257.

감사의 글

대학원에 입학하여 석사 학위를 수여 받기까지, 2년이라는 그리 길지 않은 시간이었지만 26년 살아오면서 학업과 생활 면에서 어느 때보다 많은 깨달음이 있었던 시간이었다고 자부합니다. 때로는 칭찬으로, 때로는 충고로 저를 지도해 주신 이신형 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 언제나 든든하게 연구실을 지켜 주신 설동명 학형, 연구실에 행복 바이러스를 퍼뜨려주셨던 한범우 학형, 여러 가지 조언으로 올바른 길을 알려주셨던 박선호 학형, 학문적으로나 생활 면에서 많은 도움을 주신 이희범 학형, 우리 연구실을 잘 이끌어 주셨던 서정화 학형, 귀찮은 질문에도 친절히 답변해 주셨던 박세완 학형에게 감사의 인사를 전합니다. 그리고 함께 공부하면서 의지가 되었던 김동환, 임태구, 박성택, 크리스에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 수조동을 항상 지켜주시고 생활하는데 있어 도움을 주신 유극상, 유옥선 선생님과 김창희에게도 감사 드립니다. 끝으로, 언제나 저를 믿어주시고 뒤에서 묵묵히 지켜봐 주신 부모님과 언니, 오빠에게 감사 드리며, 저를 지켜봐 주신 모든 분들께 이 논문을 바칩니다.