

풍상 범주 중인 세일링 요트의 자세를 고려한 속도 추정 방법

박미연,¹ 이희범,² 박선호,^{*3} 이신형⁴

¹대우조선해양 선박해양연구팀

²서울대학교 조선해양공학과

³한국해양대학교 해양공학과

⁴서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소

NUMERICAL METHOD FOR VELOCITY PREDICTION CONSIDERING MOTION OF A YACHT

M.Y. Park,¹ H. Lee,² S. Park^{*3} and S.H. Rhee⁴

¹Hydrodynamics R&D group, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.

²Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

³Dept. of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University

⁴Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University

One of the most important factors in sailing yacht design is an accurate velocity prediction. Velocity prediction programs (VPPs) are widely used to predict velocity of sailing yachts. VPPs, which are primarily based on experimental data and experience of long years, suffer limitations applied in realistic conditions. Thus, in the present study, a high fidelity velocity prediction method using the 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.

Key Words : 세일링 요트(Sailing yacht), 전산 유체 역학(Computational fluid dynamics, CFD), 속도 추정 프로그램(Velocity prediction program, VPP)

1. 서 론

일반 상선이 프로펠러로부터 추진력을 얻는 것에 비해, 세일링 요트는 세일에 작용하는 바람에 의해 추진력을 얻으므로 바람을 추진력으로 전환하는 세일의 유체역학적 성능을 최적화하는 것은 매우 중요하다.

세일에 작용하는 유체력, 즉, 항력이나 양력으로 인해 선체는 횡경사(heel)하며 동시에 일정한 각도(leeway)의 사향이 유발된다. 따라서 세일링 요트의 경우, 사향과 경사 상태에서의 저항을 고려해야 한다. 추진력, 선체의 자세, 저항과의 관계는 서로 밀접하게 연관되어 있으므로 이러한 모든 외력과 선체 반력 사이에 균형이 되는 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 균형 상태를 찾아내고 그 속도를 추정하는 프로그램이 Velocity Prediction Program (VPP) 이다. VPP는 입력된 풍속과 풍향에 대한 요트의 자세와 속도를 계산해내는 프로그램으로써 시간적인 면에서 효율적이라는 장점이 있으나, 경험식을 사용했기 때문에 새로운 선형이나 극한 해상상태에 대한 고려가 어렵다.

이와 같은 한계를 극복하기 위하여 많은 연구들이 수행되어 왔으며 Jones and Korpus[1]는 CFD를 이용하여 세일에 작용하는 공기역학적 힘(aerodynamic force)과 킬에 작용하는 수력학적 힘(hydrodynamic force)을 계산하였고 이를 설계에 적용하여 최적의 세일과 킬의 설계가 가능함을 보였다. Levadou et al.[2]은 수면 위 선체형상, 트림, 침수까지 고려해 선체 주

Received: April 24, 2014, Revised: July 28, 2014,

Accepted: July 28, 2014.

* Corresponding author, E-mail: spark@kmou.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.3.001

© KSCFE 2014

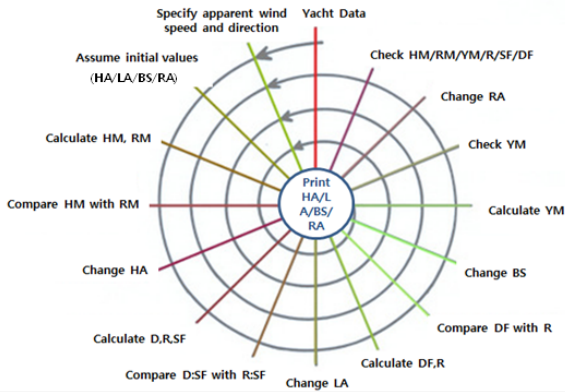


Fig. 1 Velocity prediction algorithm for CFD

위 유동을 CFD를 이용하여 해석하였으며 Parolini and Quarteroni[3]는 세일에 작용하는 공기압과 킬에 작용하는 수압 및 주변의 유동장을 CFD를 이용하여 해석하였다. 이러한 해석의 결과를 실험결과와 비교했을 때 저항이 훨씬 더 타당한 결과를 얻었다. 이상의 선행 연구들은 선속이 일정하다는 가정하에서 수행되었다. 세일링 요트의 자세 및 속도 추정까지 확장한 연구는 거의 없기 때문에 이러한 연구가 필요하다고 판단된다. 그래서 본 연구에서는 유체역학적인 접근이 가능한 CFD를 이용해 물리적으로 타당한, 좀 더 정확한 자세 및 속도를 도출하고자 한다.

2. 계산 방법

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

2.1 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 기존의 VPP 알고리즘을 참고로 CFD를 이용한 속도 성능 추정 해석에 적용하기 위해 속도 성능 추정 알고리즘을 Fig. 1과 같이 수정하였다. 그림에서 LA는 leeway angle, HA는 heel angle, BS는 boat speed, RA는 rudder angle, D는 driving force, R은 resistance, SF는 side force, HM은 heeling moment, RM은 righting moment, YM은 yaw moment의

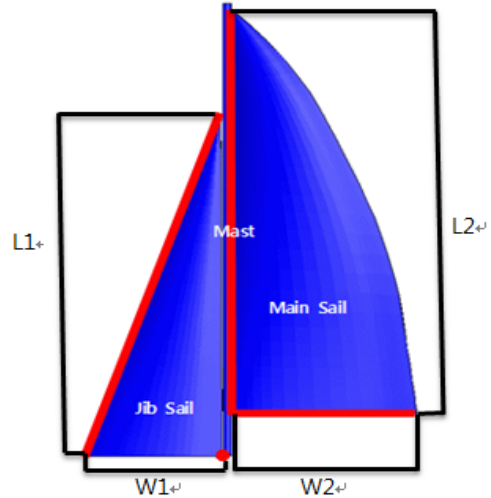


Fig. 2 Sail of KORDY30

약어이다. 우선, 빈 바람(apparent wind)과 각도를 결정하고, 선속과 횡경사각(heel angle), 사향각(leeway angle), 타각(rudder angle)을 가정한다. 두 번째 단계는 세일에 의한 공기역학적 힘과 모멘트를 계산한다. 세 번째 단계는 수면 아래에 존재하게 되는 모든 형상물에 대해서 수력학적인 힘과 모멘트를 계산한다. 네 번째 단계는 횡경사 모멘트와 횡복원 모멘트를 비교하여 횡경사각을 변경한다. 다섯 번째 단계는 ‘추력과 세일 횡력의 비’와 ‘저항과 선체 횡력의 비’를 계산, 비교하여 사향각을 변경한다. 여섯 번째 단계는 추력과 저항의 비교를 통해 선속을 도출한다. 일곱 번째 단계는 요잉 모멘트를 비교해보고 요잉 모멘트가 일치하지 않으면 타각을 조정한다. 마지막으로 모든 외력과 선체 반력의 평형을 계계산한 후, 일치하지 않으면 도출된 결과를 초기 값으로 하여 처음부터 다시 계산하는 작업을 반복한다.

2.2 수치 모델링

질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식, 볼륨비 이송 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 PISO 알고리즘을 선택하였다. 대류항은 2차 정확도의 상류 차분 도식으로 차분하였고, 확산항은 2차 중심차분을 사용하였다. 볼륨비는 고차의 이산화 방법[4]을 사용하여 계산하였다. 혼합류에 대해서는 상태방정식으로부터 밀도와 점성의 변화를 계산하였다. 계산의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid(AMG) 방법을 사용하였고, Gauss-Seidel 반복 계산법을 이용하였다. 계산은 상용 CFD 소프트웨어인 ANSYS CFX를 이용하여 진행되었다.

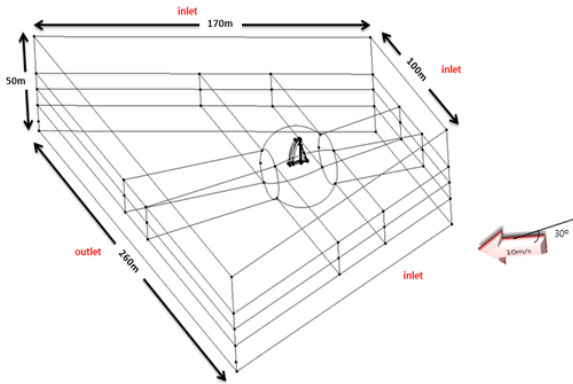


Fig. 3 Domain extent and boundary condition

3. 문제 정의

세일은 30 ft(=9.144 m) 급 요트인 KORDY 30의 세일로서 집세일(jib sail), 메인세일(main sail), 마스트(mast)로 이루어진 슬루프형 요트이다(Fig. 2). 요트 선체의 전장은 9.142 m이다. 메인세일의 총 길이 L2는 11.41 m이고 총 폭 W2는 4.41 m이며, 두께는 5×10^{-4} m이다. 집세일의 총 길이 L1은 9.68 m이고 총 폭은 3.294 m이며, 두께는 5×10^{-4} m이다. 세일의 재질은 DuPont의 “kevlar 29” 섬유로서 밀도는 $1.44 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 이고 포와송 비는 0.36, kevlar 섬유의 영률은 83 GPa의 값을 사용하였다. KORDY30의 주요제원은 Table 1과 같다.

세일 주위 유동을 위한 계산영역은 Fig. 3에서와 같고 길이는 가로 170 m, 세로 100 m, 260 m, 높이 50 m로서 사다리꼴 형태를 하고 있다. Fig. 4와 같이 세일을 둘러싸는 서브도메인의 비정렬 격자수는 130만개이며, 그 이외의 정렬 격자 계로 구성된 서브 도메인의 정렬 격자 수는 약 64만개로 전체 해석 도메인에 약 195만개의 격자가 사용되었다. 유입경계면은 앞, 왼쪽, 오른쪽, 위 면으로 속도가 일정한 Dirichlet type의 경계 조건을 사용하였고 유출경계면은 뒷면으로 Neumann type의 경계 조건을 사용하였다. 바닥면에는 slip 조건을 사용하였다.

Table 1 Principal particulars of KORDY30

	Unit	Definition	Value
LOA	m	Length Overall	9.142
LWL	m	Waterline Length	8.245
B	m	Beam	3.024
Tc	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

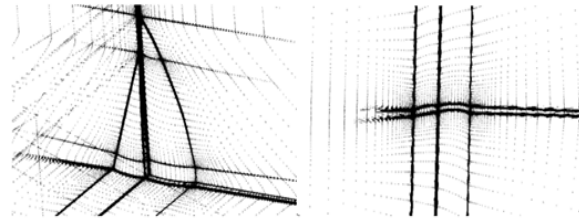


Fig. 4 Mesh around sail

세일에 입사되는 유동은 30도에서 90도 사이의 7가지 각도로 들어오는 공기이며 빈 바람의 속도는 20 knot(=10.28 m/s)를 사용하였다. 세일에 작용하는 공기역학적 힘과 요트에 작용하는 수력학적 힘은 각각의 계산영역을 만들어서 따로 계산하였다. 풍향이 90도 보다 클 때, 세일링 요트는 주로 스피네커(spinnaker)를 장착한 후 풍하로 범주한다. 앞에서 풍상 범주로 한정을 했기 때문에 풍상 범주의 범위인 풍향 90도까지 계산을 수행하였다. Table 2는 계산에 사용된 빈 바람의 크기 및 방향을 나타낸다.

세일 면에는 no slip 경계 조건이 설정되었고, 세일을 둘러싸는 서브 도메인과 그 외부 도메인 사이에는 비정합 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.

4. 해석 결과 및 토의

Fig. 5는 빈 바람(apparent wind)이 30각도인 경우 세일 트림 및 선체 자세를 나타낸 그림이다. 세일 트림은 집세일의 포스테이(forestay)와 메인세일의 러프(luff) 부분을 고정시키고 빈 바람 각도에 따라 세일의 각도를 달리한다. 요트는 최종적으로 33도의 횡경사각을 가지고 3 m/s의 속력으로 좌현 쪽으로 범주하였다. 이 때, 사향각은 13도였으며, 타각은 우현 쪽으로 4도 틀어진 각도를 유지 하였다. 세일과 선체를 따로 계산을 수행했음에도 이러한 결과를 얻을 수 있었던 것은 요트

Table 2 Test conditions

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

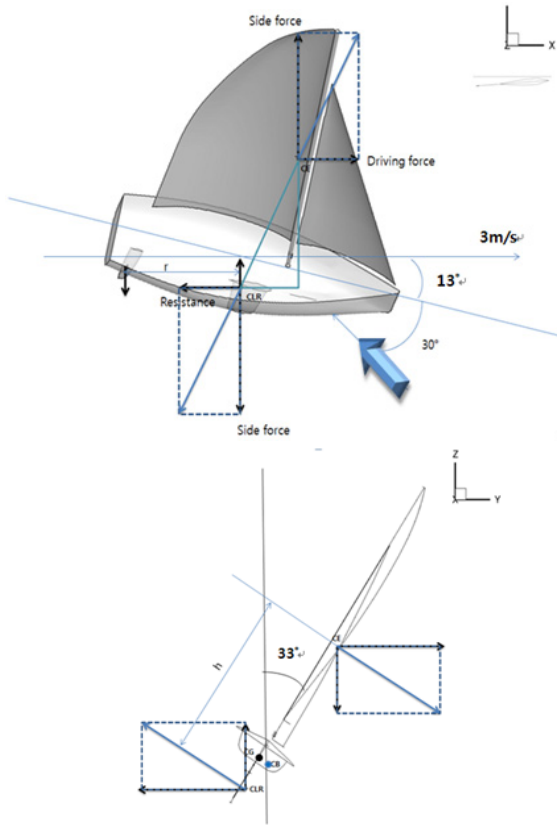


Fig. 5 Sail trim and yacht performance for apparent wind angle of 30°

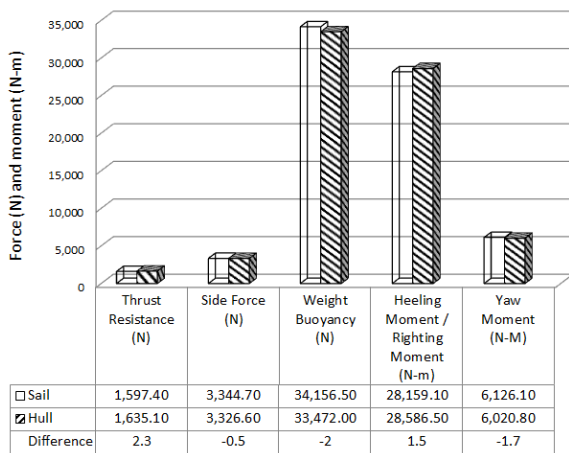


Fig. 6 Force and moment balance error for apparent wind angle of 30°

의 세일에 작용하는 공기역학적 힘(aerodynamic force)이 작용하는 풍압중심(Center of effect)과 선체 및 킬에 작용하는 수력학적 힘(hydrodynamic force)이 작용하는 횡저항 중심(Center

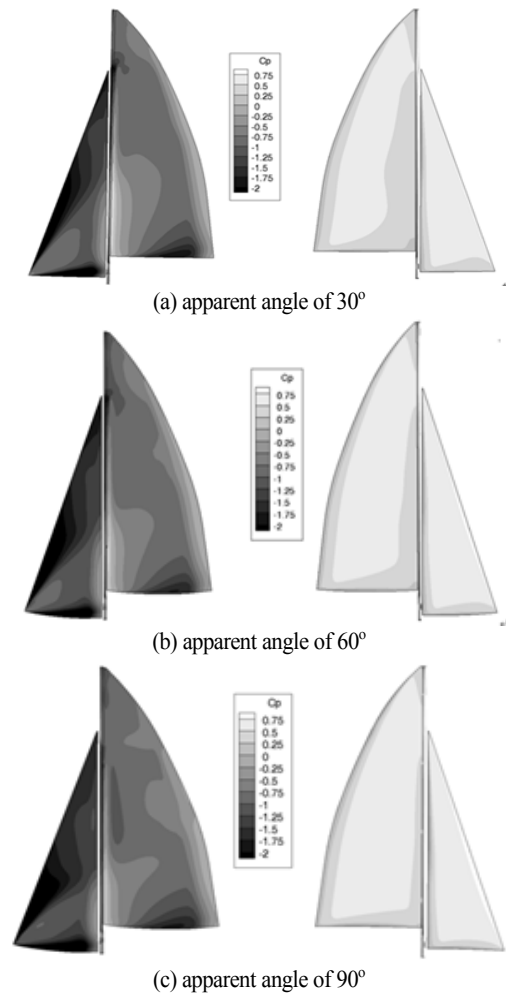


Fig. 7 Pressure coefficient contours (left: suction side, right: pressure side)

of lateral resistance)을 각각 계산하여 모멘트를 구하기 때문이다. 또한, 뒀 바람 각도 60도에 대해 요트는 27도의 횡경사각과 2.5도의 사향각을 가지고 4.45 m/s의 속력으로 좌현 쪽으로 범주하였다. 이 때, 타각은 좌현 쪽으로 1.8도 틀어진 각도를 유지하였다. 뒀 바람 각도 90도에 대해서는 12도의 횡경사각과 0.4도의 사향각, 5.03 m/s의 속력을 가진 채 좌현 쪽으로 범주하는 경우였다. 이 때, 타각은 0.88도였다.

뒀 바람 30도에서 90도까지의 모든 계산은 공기역학적 힘과 수력학적 힘이 평형을 이룰 때까지 계산이 수행되었으며, 두 영역에서 구해진 힘의 차를 이용해 오차를 구하였다. Fig. 6는 뒀 바람 30도에서의 결과를 나타낸다.

세일링 요트가 범주하는 자세는 외력에 의해 결정되기 때문에 세일이 받는 힘에 대해 분석하였다. Fig. 7은 뒀 바람 30

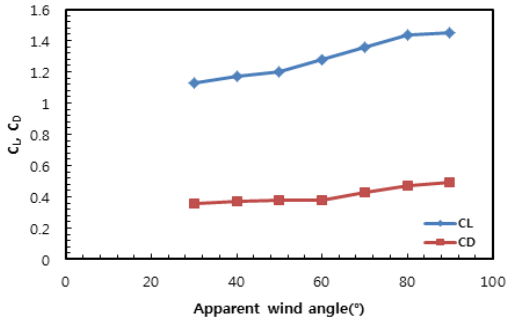


Fig. 8 Drag (C_D) and lift (C_L) force coefficients for various apparent wind angles

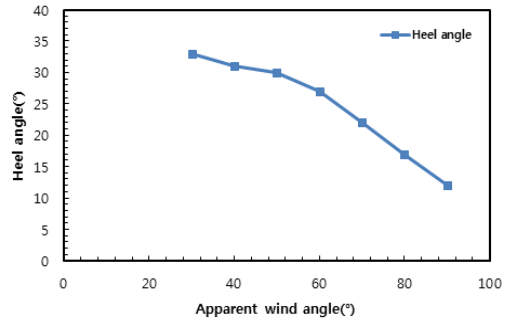


Fig. 10 Heel angle for apparent wind angle

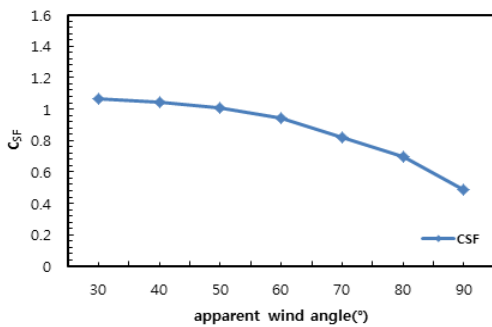


Fig. 9 Side force coefficient (C_{SF}) for various apparent wind angles

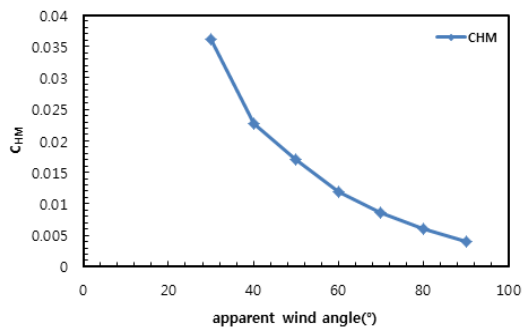


Fig. 11 Heeling moment coefficient (C_{HM}) for apparent wind angle

도에 대한 세일의 압력 계수분포를 나타낸 그림이다. 최저 압력은 흡입 면에서 집세일의 포스테이와 풋(foot), 메인세일의 풋에서 발생한 반면, 최고 압력은 압력 면에서 발생하였다. 세일의 압력 면과 흡입 면 사이의 압력 차이가 양력을 발생시키므로 압력 계수 분포를 볼 때, 뒀 바람 각도가 증가할수록 더 큰 양력을 발생시킨다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 뒀 바람 각도에 따른 세일의 양력과 항력 계수를 나타낸 그림이다. 뒀 바람 각도가 증가할수록 양력뿐 아니라 항력도 증가한다는 것을 알 수 있다. 양력과 항력의 증가는 총합력의 증가를 의미한다. Fig. 9을 보면 세일에 작용하는 총

합력이 증가한 데 반해, 세일에 작용하는 횡력은 감소했다. 뒀 바람에 의한 세일의 총합력은 추력과 횡력의 합으로 고려할 수 있고, 횡력이 감소했다는 말은 추력이 증가했다는 것을 의미한다. 따라서, 뒀 바람 각도가 증가할수록 세일의 추력은 증가하고 횡력은 감소한다고 말 할 수 있다.

Table 3는 계산 결과 얻어진 뒀 바람에 따른 횡경사각, 선속, 사항각, 타각을 나타낸 표이다. 뒀 바람 각도가 클수록 요트 범주 시의 횡경사각은 작아지는데, 이것은 세일에 작용하는 힘에서 그 원인을 찾을 수 있다. 뒀 바람 각도가 클수록 세일이 받는 횡력은 작아지고 추력은 커지기 때문에 횡경사각의 차이 때문에 횡력과 추력에서 차이가 나기도 하지만 풍향과 그에 따른 세일 트림으로 인해 세일에 작용하는 힘이 달라진다고도 할 수 있다. 뒀 바람 각도가 증가함에 따라 세일에 작용하는 횡력이 작아지기 때문에 힘의 평형에 의해 선체에 작용하는 횡력도 작아야 한다. 세일에 작용하는 횡력은 횡경사 모멘트와 크게 연관되어 있기 때문에 횡력의 감소는 횡경사 모멘트의 감소를 의미한다. 이는 복원 모멘트가 작아야 된다는 것을 의미하고, Fig. 10과 fig. 11에서 보듯이, 횡경사 모멘트가 작아지기 때문에 작은 복원 모멘트를 갖기 위해서 횡경사각 또한 작게 된다.

Table 3 Heel angle, boat speed, leeway angle, rudder angle for apparent wind

Apparent wind angle(°)	Heel angle(°)	Boat 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

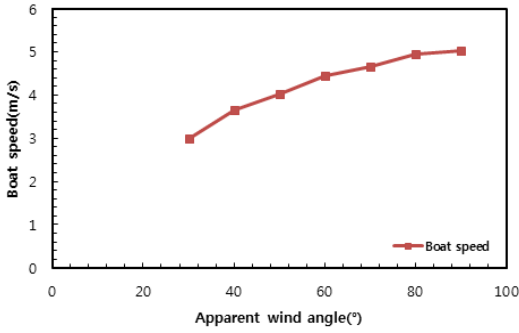


Fig. 12 Boat speed for apparent wind angle

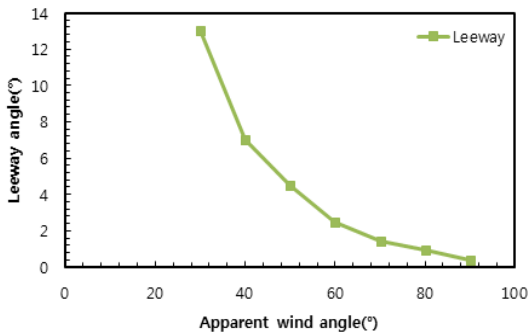


Fig. 13 Leeway angle for apparent wind angle

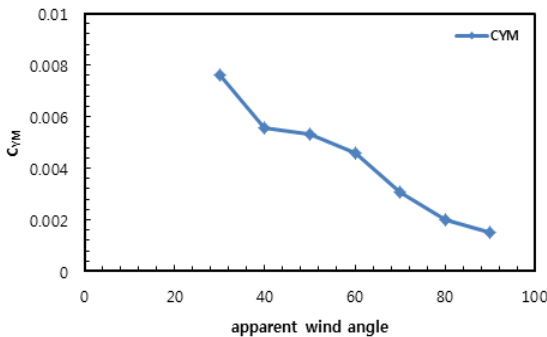


Fig. 14 Yaw moment coefficient (C_{YM}) for apparent wind angle

Fig. 12와 Fig. 13은 뱃 바람에 대한 선속과 사향각을 나타낸 그래프이다. 뱃 바람의 각도가 증가함에 따라 선속은 증가하며, 사향각은 감소한다는 것을 알 수 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이, 뱃 바람 각도가 증가할수록 세일에 작용하는 추력은 증가하고 횡력은 감소한다. 요트는 추력에 상응하는 선체의 저항을 가져야 하기 때문에 선속이 커지게 된다. 선속의 증가는 수면 하 부분의 횡력의 증가를 유도하는데 세일의 횡력은 감소하는 양상을 보이므로 수면 하 부분의 횡력의 증가

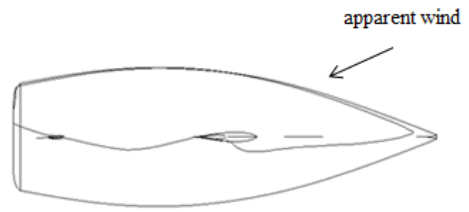


Fig. 15 Waterline shape for apparent wind angle 30°

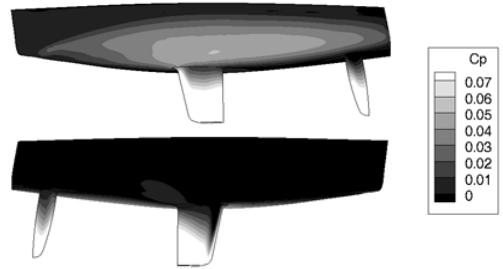


Fig. 16 Pressure coefficient contours on port (top) and starboard (bottom) side for apparent wind angle of 30°

를 상쇄시키기 위해 사향각의 감소가 요구된다. 뱃 바람 각도에 따른 선체의 횡경사각의 감소, 사향각의 감소는 Fig. 14과 같이 선체의 요 모멘트 감소와 연관이 있고 범주를 위한 요 모멘트의 평형을 위해 타각을 조정하게 된다.

세일링 요트는 횡경사한 상태로 범주하기 때문에 선체 주변에서 자유수면이 대칭적이지 않다. 그래서 자유수면의 상승과 하강을 고려해야 한다. Fig. 15은 뱃 바람 각도 30인 경우 수선면을 나타낸 것으로, 전반적으로 우현 쪽에서 수면 하강이 일어났으며, 좌현 쪽에서 수면 상승이 발생하였다. 이는 좌현 쪽으로 횡경사가 일어났기 때문이다. 뱃 바람 각도가 작을수록 우현 쪽의 수면 하강과, 좌현 쪽의 수면 상승이 더욱 뚜렷이 나타났다.

일정한 뱃 바람에서 세일링 요트가 힘의 평형을 이루며 범주할 때, 선체의 압력 분포를 Fig. 16에 나타내었다. 뱃 바람에 따라 요트의 범주 자세가 변화하기 때문에 선체에 작용하는 압력 분포가 달라진다. 세일링 요트는 운항 중의 밸런스를 위해 횡경사각 및 사향각을 가지게 되는데 이로 인해 선체는 물론, 킬과 타 표면의 좌우 압력이 달라져서 발생하는 양력이 횡방향의 균형을 위한 힘으로 작용한다. Fig. 16에서 선체, 킬, 타를 각각 살펴보았을 때, 모든 뱃 바람에서 우현보다 좌현에서 큰 압력이 분포하는 것을 확인하였다. 이것은 좌현 쪽으로 횡경사하기 때문이다. 뱃 바람 각도가 클수록 압력(특히, 킬의 압력)이 감소한다는 것을 알 수 있는데, 사향각의 감소로 수면 하부의 입사각이 줄어들기 때문이다.

5. 결 론

세일링 요트의 자세 및 속도를 추정할 수 있는 해석 기법을 정립하였다. 특히, 공기의 속도와 각도는 일정하지만 물의 속도와 각도는 힘의 평형을 만족할 때까지 계속 바뀌어야 하기 때문에 이를 위해 새로운 알고리즘을 정립하였다. 개발된 해석 알고리즘을 통해 풍상 범주 시 세일링 요트의 속도와 자세를 추정하였다.

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

본 연구에서는 새로 정립된 알고리즘을 통해 세일링 요트의 자세와 속도를 추정하였다. 요트 성능 해석을 위해 세일 변형 고려와 요트의 정확한 자세 및 속도 추정이 요구됨을 시사하였다.

후 기

이 논문은 한국해양대학교 산학협력 선도대학(LINC) 사업

단의 지원과 교육과학기술부의 “기초연구사업(2011-0020563)”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the KSCFE 2013 Autumn Annual meeting, Seoul National University of Science and Technology, October 31, 2013.

References

- [1] 2001, Jones, P. and Korpus, R., "America's Cup class yacht design using viscous flow CFD," *15th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis, USA.
- [2] 1998, Levadou, M.M.D., Prins, H.J. and Raven, H.C., "Application of advanced computational Fluid Dynamics in Yacht Design," *15th International Symposium on Yacht Design and Yacht Construction*, Amsterdam, Netherlands.
- [3] 2005, Parolini, N. and Quarteroni, A.I., "Mathematical models and numerical simulations for the America's Cup," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.194, pp.1001-1026.
- [4] 1996, Ubbink, O., "Numerical prediction of two fluid systems with sharp interface," *Ph.D Thesis*, Imperial College of Science, Technology and Medicine.