

요트 세일의 성능에 관한 수치해석 및 실험

유재훈† · 안해성*

(원고접수일 : 2005년 8월 18일, 심사완료일 : 2005년 10월 14일)

Evaluation of Yacht Sails Performance by CFD and Experiments

Jae-Hoon Yoo† · Hae-Seong Ahn*

Abstract : It is important to understand flow characteristics and performances of sails for both sailors and designers who want to have efficient thrust of yacht. In this paper the viscous flows around sail-like rigid wings, which are similar to main and jib sails of a 30 feet sloop, are calculated using a CFD tool. Lift, drag and thrust forces are estimated for various conditions of gap distance between the two sails and the center of effort of the sail system is obtained. Wind tunnel experiments are also carried out to measure aerodynamic forces acting on the sail system and to validate the computation. It is found that the combination of two sails produces the lift force larger than the sum of that produced separately by each sail and the gap distance between the two sails is an important factor to determine total lift and thrust.

Key words : Sailing yacht(요트), VPP (Velocity Prediction Program), CFD, RANS, Wind Tunnel(풍동)

기호설명

I	: height of the upper end of the forestay above the sheer,	C	: chord length
J	: horizontal distance from the forestay at the sheer to the forward side of mast,	ϕ	: mast angle (angle between vessel centerline and sail chord line)
P	: mainsail hoist	ϕ_0	: mast angle at sail foot
E	: after side of mast to mainsail clew limit band	f	: camber of sail section
H	: height of sail from sail foot	A	: projected area of sail
		S	: surface area of sail (reference area for non-dimensionalization)
		C_L	: lift coefficient (= Lift / $\frac{1}{2}SU^2$).
		C_D	: drag coefficient (= Drag / $\frac{1}{2}SU^2$)
		C_P	: pressure coefficient (= P / $\frac{1}{2}U^2$)

† 책임저자(한국해양연구원 해양시스템안전연구소), E-mail : jhyoo@moeri.re.kr, Tel : 042)868-7249

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

U : inflow velocity, herein the apparent wind speed

subscript F : jib sail, M : main sail

1. 서 론

세일링 요트(Sailing Yacht)에 있어서 주 추진원은 바람이다. 바람이 약한 상황이나 위급 상황 등이 아닌 일반적인 항해 중에는 바람의 힘으로만 항주하게 되며, 특히 요트 경주와 같이 속도 성능을 위주로 항해하는 경우에는 바람을 추진력으로 전환하게 되는 장치인 세일의 기능과 효율을 최적의 상태로 만드는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 마스트가 하나이고 세일이 앞, 뒤에 각각 하나씩 장치되어 있는 슬루프(Sloop)형 요트의 세일 시스템에 대해 수치 계산을 수행하였으며, 앞, 뒤 세일 사이에 이루어지는 간섭 효과를 위주로 연구를 수행하였다. 계산에 사용되어진 세일 시스템은 30피트급 요트용으로 설계되어진 것으로서 집세일(Jib Sail)과 메인세일(Main Sail)로 구성되어 있다. 본 연구에서는 두 세일 간의 간섭 효과를 중첩간격에 대한 영향으로 살펴보았으며, 메인세일과 집세일이 서로 간의 간섭이 없는 독립적인 상태를 기준으로 어떠한 간섭 현상이 발생하게 되는지, 양력과 항력의 양은 어떻게 변화하게 되는지를 조사하였다. 또한 계산되어진 결과로부터 세일 면 위의 풍력 중심, 즉 CE(Center of Effort)의 위치를 찾아내었으며, 요트를 추진시키게 되는 추진력 성분을 도출하여 보았다. 아울러 풍동을 이용한 모형시험을 수행하였으며 계산되어진 결과와 비교하였다.

2. 계산 및 시험 조건

2.1. 세일 형상의 정의

30피트급 요트의 세일 시스템은 Fig.1과 같이 전형적인 슬루프형의 형태로서 마스트 하나에 전방에는 집세일(Jib Sail)이 후방에는 메인세일(Main Sail)이 부착되어진다. 또한 메인세일과 집세일은 서로 일정 부분 겹쳐있게 되므로, 메인세

일의 마스트 연결 부분과 집세일의 폭 방향 거리를 두 세일 간의 간격으로 보고 집세일의 Foot각도(ϕ_0 , mast angle)로 그 값을 정의하였다. 결국 이 값의 변화에 따라서 두 세일 간의 간섭 현상이 달라진다. 세일 형상에 대한 정의는 다음의 세 가지의 형태로 그 형상이 변화하게 되므로 이를 각각 아래와 같은 형상 변수로 정의하였다.

(1) Camber Line : NACA $a=0.8$ Mean Camber Line을 세일면의 기본 형상으로 가정하였다.

(2) Mast Angle : 세일은 Leading Edge에 해당하는 전방(Luff)이 마스트 또는 Fore Stay에 의해 고정되어 있는 반면, Trailing Edge에 해당하는 후단(Leech)은 고정되지 않는 특성을 가진다. 따라서 바람을 받으면 자연스럽게 세일 리치 부분이 열리는 현상이 발생하며, 이를 Camber mast의 각도가 변하는 것으로 표현하였다.

(3) Camber Ratio: 바람을 받으면 세일의 캠버가 깊어지게 되는데 이러한 형상 변화를 Foot 길이를 기준으로 한 코드 길이에 대한 캠버의 비율로 표현하였다. 이러한 세 가지 형상 변수를 높이 방향으로 5개의 단면(Foot, 25%, 50%, 75%, Top)에 대해 각각 정의한 후 전체적으로 순정하는 작업을 통해 3차원 세일 면을 정의하였다. (Wilkinson, 1989)

실제 세일면의 형상은 바람의 세기와 방향에 따라 변하게 되고, 세일을 조절하는 각종 리그(Rig)와 조절(Tuning) 장치로도 변할 뿐더러 높이 방향으로도 변하게 된다. 메인세일의 경우 마스트가 입사 부분을 고정하게 되며, 세일 밑변 즉 풋(Foot)은 붐(Boom)에 의해 고정되게 되므로, 나머지 한 변에 해당하는 Trailing Edge의 연결선, 즉 Sail Leech는 상부로 올라갈수록 열리게 되고, 세일면의 캠버는 깊어지는 현상이 나타나게 된다. 이러한 형상 변화, 즉, 세일의 비틀림(Sail Twist)을 세일의 형상을 정의하는 Camber Ratio와 각 높이 방향의 단면들의 Mast Angle의 변화로서 표현하였다. 메인세일의 형상은 Table 1 및 Fig.2와 같이 높이 방향별로 각각 다른 변수 값을 사용하여 정의하였다.

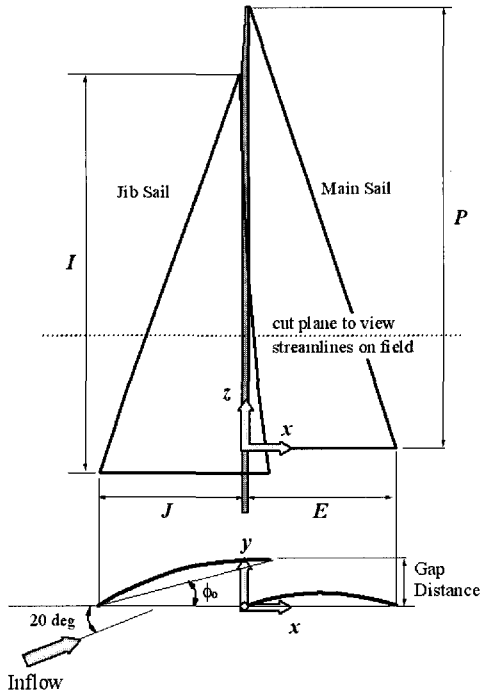


Fig. 1 Geometry of sail set

Table 1 Geometric parameters of main sail

	Foot	25%	50%	75%	Top
H(mm)	0	3000	6000	9000	11900
C(mm)	4000	3000	2000	1000	10
ϕ (deg)	0	5	10	15	20
f/C(%)	8	10	12	14	16

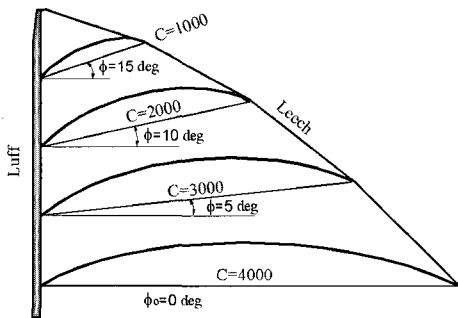


Fig. 2 Geometry of main sail

집세일의 경우에도 메인세일과 유사한 형태로 세일 형상이 변화하게 되며, 그 형상을 Table 2 및

Fig. 3 과 같이 정의하였다. 집세일의 경우는 높이 방향으로의 세일 비틀림의 형태를 Foot의 Mast각도(ϕ)를 기준으로 정의하였다. 이러한 정의는 메인세일은 선체 중앙에 놓여지는 볼에 의해 Foot의 각도와 캠버가 고정되는 반면, 집세일의 경우에는 Foot의 Trailing Edge에 달려있는 줄에 의해 메인세일과의 간격, 즉 Foot의 mast Angle이 조절되어지기 때문이다.

Table 2 Geometric parameters of jib sail

	Foot	25%	50%	75%	Top
H(mm)	0	2750	5500	8250	11000
C(mm)	4680	3450	2200	1050	10
ϕ (deg)	ϕ_0	$1.25\phi_0$	$1.5\phi_0$	$1.75\phi_0$	$2.0\phi_0$
f/C(%)	8	10	12	14	16

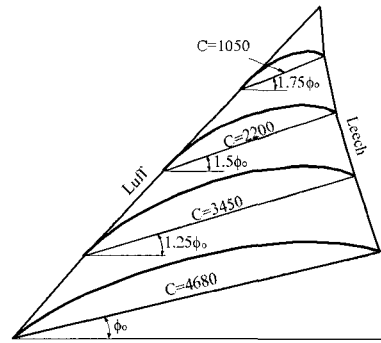


Fig. 3 Geometry of jib sail

수치 계산은 두 세일 간의 간격인 집세일 Foot의 Mast각도(ϕ_0)를 5도, 10도, 15도로 변화하면서 수행하였다. 모든 경우에 대해 메인세일에 대한 형상 변화는 없다는 가정 하에 계산을 수행하였다.

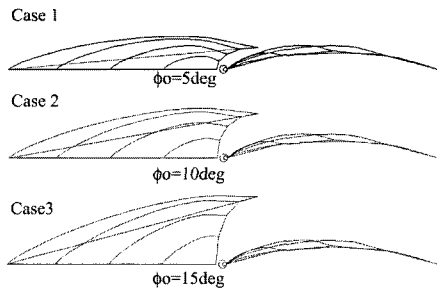


Fig. 4 Geometries of sail sets

2.2 모형시험

본 연구에 사용된 실험장치의 구성은 Fig. 5에 보인 것과 같다. 풍동 바닥의 회전판에 설치되어 있는 3분력계(Fig. 6)와 감판, 모형 세일을 설치하였다. 모형 세일에 작용하는 풍력을 계측하기 위하여 풍동 관측부 바닥의 회전판을 원하는 각도로 회전시키며 계측하였다. 사용되어진 풍동은 중형 아음속 폐회로식으로서 시험부의 크기는 $1.8 \times 1.8 \times 5.2\text{m}$, 최대 풍속은 45 m/s 이다. $1/9$ 로 축소되어진 모형 세일은 복합재료(FRP)를 사용하여 제작하였으며, 형상은 계산에 사용되어진 것과 동일하게 제작되었다. 모형시험은 시험 조건의 제한에 의하여 $Re=3 \times 10^5$ 에서 수행되어졌다.

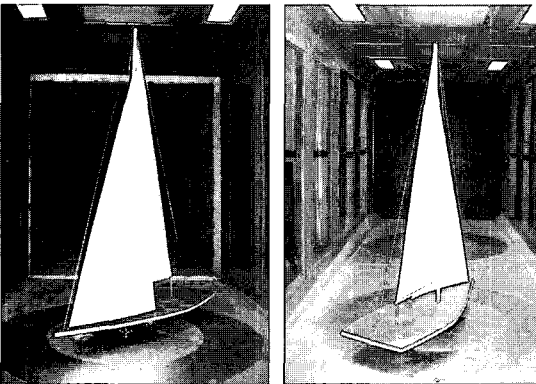


Fig. 5 Model arrangement in wind tunnel

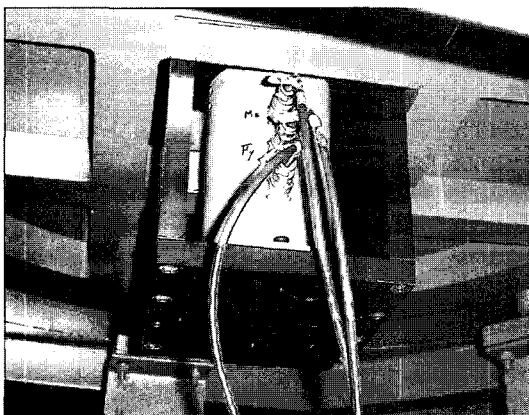


Fig. 6 3-components load cell to measure the sail forces

2.3 계산 조건 및 가정

수치 계산은 아래와 같은 가정 및 조건으로 수행되어졌다.

(1) 실제 세일의 형상에 대한 조절은 리그의 변형을 통해 이루어지게 되지만, 본 연구에서는 마스트와 붐 등 리그에 대한 변형은 없다고 가정하였다.

(2) 항주 중에 횡경사가 발생하지만, 본 계산에서는 직립 상태를 기준으로 선체가 없이 마스트의 밑면 위치에 Mirror Body를 두고 계산하였다.

(3) VPP계산을 통해 최적 풍상 항주 상태를 얻어내었으며, 이를 계산 조건으로 사용하였다. 즉, 계산에 사용되어진 조건은 20노트의 빈바람(Apparent Wind)이 20도의 각도로 세일에 입사되는 것으로 하였다.

(4) 점성유동 계산을 위한 지배방정식은 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stoke's) 방정식이며, 유한 체적법을 이용하여 그 해를 구하였다. 난류 유동 해석을 위해 realizable $k-\epsilon$ 난류모형 (Shih et al. 1995)과 벽함수 (wall function) 기법을 사용하였다. 시간항에 대한 시간적분법은 2차 정도의 Euler implicit법을 사용하였으며, 운동량 이송 방정식의 대류항과 확산항은 3차 정도 (3rd order)의 QUICK법과 중앙차분법을 이용하여 각각 이산화하였다. 속도-압력의 연성을 위해서 SIMPLEC방법을 사용하였으며, 이산화된 선형연립방정식의 해는 SIP(Strongly Implicit Procedure)기법을 사용하여 구하였다. 보다 상세한 수치해석 설명은 김우전 등(2000), Kim et. al.(2002), Ferziger/Peric (1996)의 문헌에서 찾을 수 있다.

(5) 계산에 사용되어진 격자는 다중 블록 구조로서 각 경우 13개씩의 블록으로 구성하였으며, 총 격자수는 1,796,770개로 생성되어졌다. (Fig. 7) 각 경우에 대한 계산은 약 16시간 (Pentium IV 2.8 GHz 사용)이 소요되었으며, 메인세일의 Foot의 길이를 기준으로, 입사 풍속

이 20노트에 해당하는 $Re=2.84 \times 10^6$ 에 대하여 수행되어졌다.

리 현상이 보이지는 않으며 전반적으로 원활한 유동을 가지고 있음을 알 수 있다.

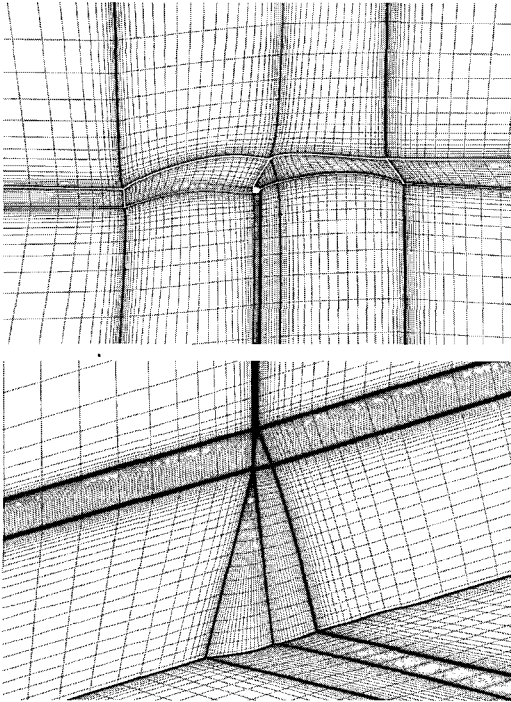


Fig. 7 Grid system

3. 수치 계산 결과

3.1. 각각의 세일에 대한 계산 결과

먼저 각각의 세일이 독립적으로 놓여 있는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 세일에 입사되는 바람의 방향과 조건은 결합된 후와 동일하게 적용하였다. 수치계산 결과로서 세일면의 표면유동은 메인세일에 대해 한계유선과 등압곡선을 Fig. 8에 표시하였으며, Fig. 9에는 Case 2에 해당하는 집세일에 대한 계산 결과를 나타내었다. 또한 세일 주위 유동장의 공기 흐름을 조사하기 위하여 Fig. 10과 같이 세일 시스템 전체 높이의 25%에 해당하는 높이의 단면에서의 유동장 유선을 살펴보았다. Fig. 10, Fig. 11의 각 세일 주위의 유동을 살펴보면, 눈에 띄는 박

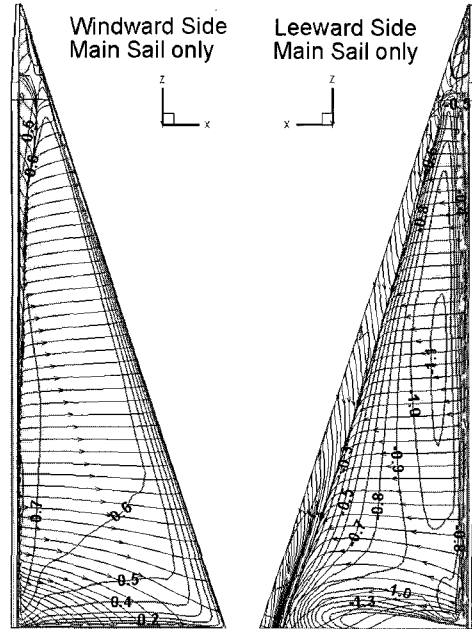


Fig. 8 Cp Contours and limiting streamlines on main sail only

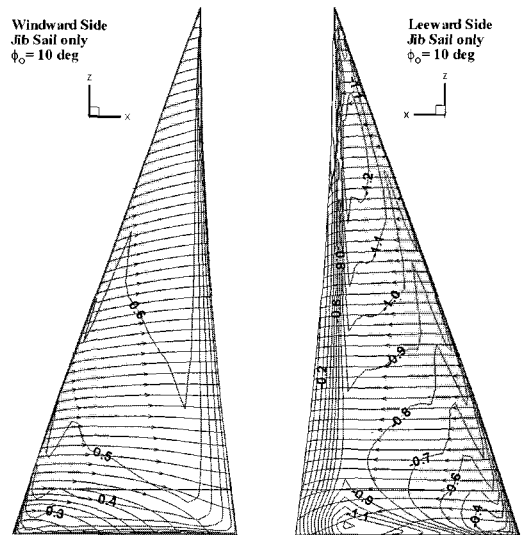


Fig. 9 Cp Contours and limiting streamlines on jib sail only

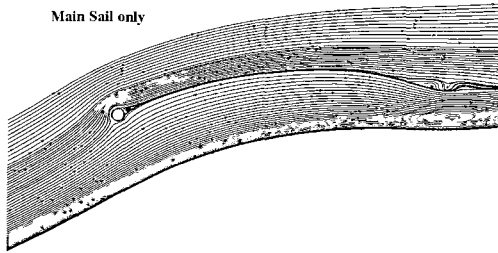


Fig. 10 Streamlines over main sail with no interactions (on the section of 25% height)

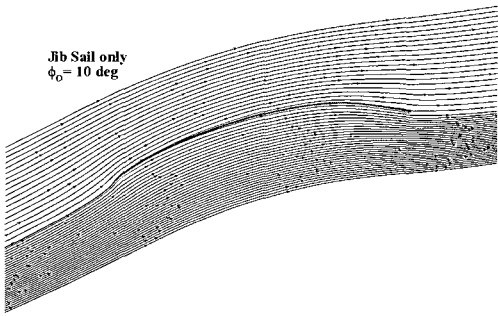


Fig. 11 Streamlines over jib sail with no interactions (on the section of 25% height)

3.2 두 세일 사이의 간격 변화에 따른 영향

두 세일이 조합되어진 상태로, 먼저 두 세일 간의 간격 변화에 따른 유동과 힘의 변화를 조사하였다. 계산 결과 중 20%의 중첩을 가진 세일 세트들의 간격을 변화시켜 유동의 변화를 살펴보면, Fig. 12에 나타난 바와 같이 세일 표면의 한계 유선과 표면 압력 분포에 비교적 큰 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 전체적인 유동 현상의 차이는 메인세일의 존재가 집세일에 입사되는 유동에 영향을 주게 되어 집세일의 받음각(Angle of Attack)을 키워주는 역할, 즉 Upwash 현상이 나타나고 이에 따른 유동의 변화임을 알 수 있다. 반대로 집세일의 존재는 메인세일의 받음각을 줄여주는 역할 즉, Downwash를 유발하고 있음을 살펴 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 작은 레이놀드수($Re=1 \times 10^5$)에서 수행한 Lee(1997)의 계산 결과에서도 잘 나타나고 있다. 이러한 받음각의 변화는 결국, 세일 간격이 작은 경우에 특히 집세일 Leeward Side에 유동 박리(Flow Separation) 현상을 유발하게

되고, 메인세일에는 마스트 근처에 받음각이 거꾸로 되어, Windward Side에 유동 박리와 정체 유동이 발생하는 것으로 보여 진다.

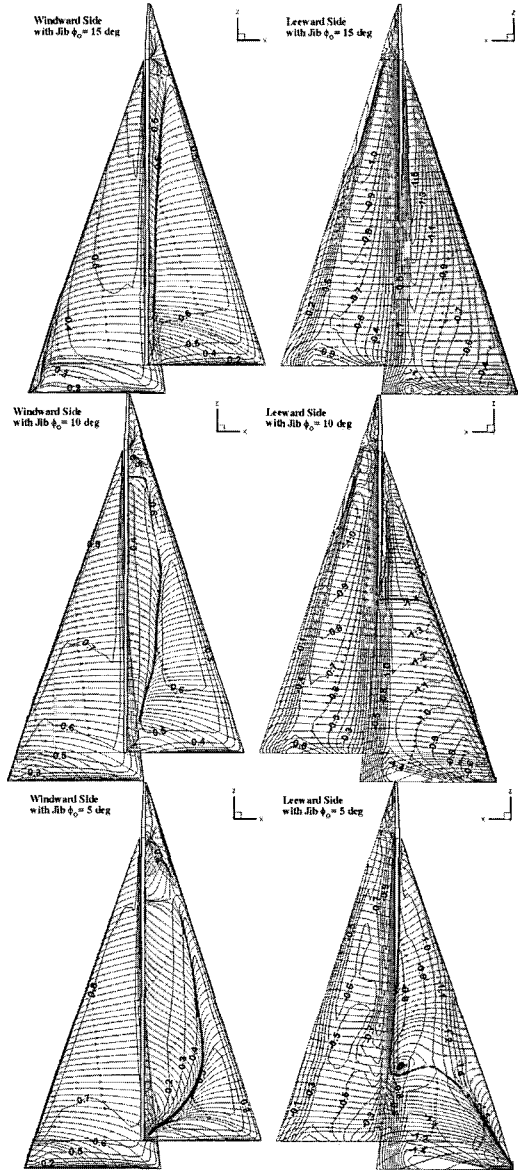


Fig. 12 Cp contours and limiting streamlines according to gap distance

이러한 세일 간격에 따른 유동의 변화는 메인세일 높이의 25%에 해당하는 단면에서의 유동을 보

이고 있는 Fig. 13에 두드러지게 나타난다. 이러한 현상은 독립적으로 존재하는 세일에서는 나타나지 않았던 현상으로서 세일 간의 간섭으로 인해 발생한 것이라고 볼 수 있다.

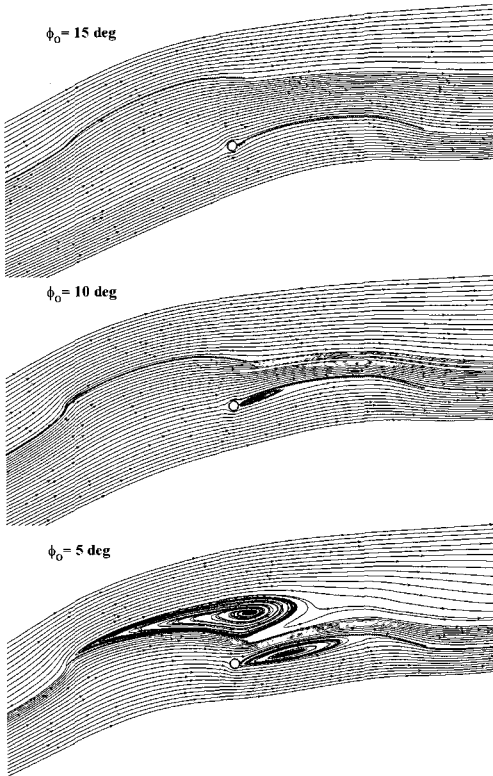


Fig. 13 Streamlines according to gap distance (on the section of 25% height)

Fig. 14에서는 간격 변화에 따른 양력의 변화를 볼 수 있으며, 증첩도가 다른 나머지 세일 세트에 대해서도 동일한 결과를 주고 있다. 간격에 따른 양력의 변화는, 간격이 좁아질수록 메인세일의 양력은 감소하고 짐세일의 양력은 중간의 간격에서 늘어나다가 다시 줄어드는, 메인세일과 짐세일에 상반되는 영향을 주고 있음을 알 수 있다. Fig. 15에서 볼 수 있듯이 항력에 있어서도 두 세일의 경향은 반대로 나타난다. 메인세일의 항력은 간격이 좁을수록 작아지는 반면, 짐세일의 항력은 늘어나고 있다. 따라서 세일 세트의 배치와 항해 중 세일을 조절함에 있어서 두 세일 간의 간격 조절이 전

체적인 속도 성능에 매우 중요한 요인이라는 것을 알 수 있다.

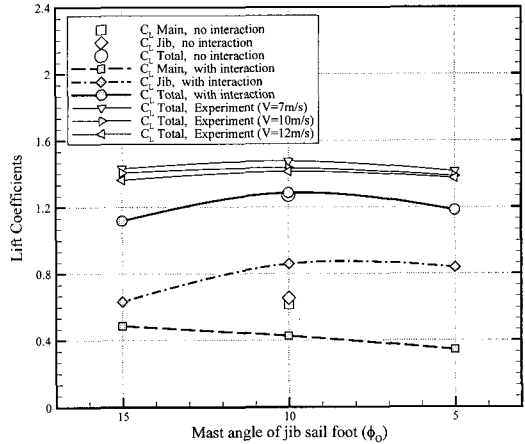


Fig. 14 Lift coefficients according to gap distance

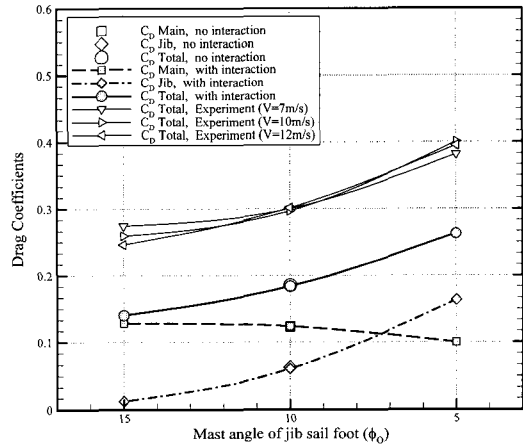


Fig. 15 Drag coefficients according to gap distance

3.4 추진 성분의 계산

짐세일과 메인세일의 독립적으로 존재하는 경우를 포함하여 조합되어진 9가지의 조건에 대해서 계산되어진 양력과 항력의 합력으로부터 배의 전진 방향 성분의 힘을 계산하여 Fig. 16에 나타내었다. 세일이 독립적으로 놓여진 상태에 비해서 짐세일과 메인세일이 조합되어진 조건에서 두 세일 간의 간격이 가장 좁은 경우를 제외하면 나머지 모든 조건에서 짐세일에 의한 추진력이 증가한 것을 볼 수

있다. 반면 조합되어진 후의 메인세일은 독립적인 상태보다 모든 조건에서 작은 값의 추진력을 가지고 있다. 계산 조건 중에서는 Jib Sail Angle이 10도인 상태에서의 추진력이 가장 큰 것으로 나타났다.

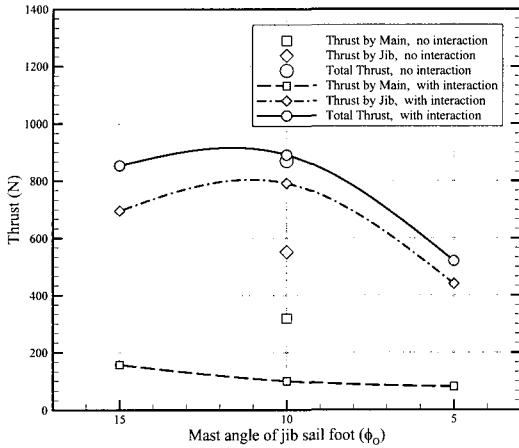


Fig. 16 Thrust according to gap distance

3.5 풍력 중심점(CE)의 계산

계산 조건 중에서 실제 요트에서의 세일 형상과 유사하다고 판단되는 Case 2에 대해서 풍력의 중심점, 즉 CE(Center of Effort)를 찾아내었다. CE의 위치는 세일 표면에 분포되어있는 각각의 Cell에 대해서 Windward Side의 압력과 Leeward Side의 압력의 차에 기준점과의 거리를 곱하여 적분하고, 이를 다시 압력의 적분 값으로 나누어 구할 수 있다. 계산되어진 CE의 위치는 초기 설계에 일반적으로 손쉽게 사용하는 경험에 의한 방법 (Larsson, 2000)과 비교하여 Table 4에 정리하였다. 경험식은 각 세일의 도심을 구한 뒤, 두 점 사이의 거리를 각 세일의 면적비로 구분하여 CE를 찾아내는 방법이다. 계산결과와 비교해보면, 경험식에 의한 CE가 아래쪽으로, 그리고 선미 쪽에 놓여져 있다. 이러한 차이는 경험식에 의한 방법에도 원인이 있겠지만, 계산에 사용되어진 세일 면의 형상이 실제와 차이가 있는 것에도 그 원인이 있을 수 있을 것이다.

Table 4 Calculated Location of CE (mm)

	Present	Empirical	Difference
Longitudinal	-341.6 mm	-130.9 mm	210.7 mm
Vertical	3592.9 mm	3312.7 mm	280.2 mm

CE locations are measured based on origin (tag of main sail).

4. 결 론

본 연구에서는 세일링 요트의 추진원으로 사용되는 세일에 대해서 실제적인 형상에 최대한 가깝게 형상화하여 이에 대한 유동과 힘에 대한 수치 계산을 수행하였다. 특히, 두 세일간의 간섭효과를 파악하기 위해 각각의 세일간의 거리에 대한 유동의 변화를 조사하였다. 두 세일 간의 간격은 매우 중요한 성능 요소로서, 간격의 조절로 인해 전체적인 양력과 항력의 차이가 크게 나타나고 있음을 확인하였다. 각각의 세일에 의한 양력이나 추진력보다 두 세일이 결합되어 있는 실제 요트의 세일 시스템이 좀 더 많은 양의 추진력을 발생시킬 수 있음을 확인하였으며, 이러한 결과는 짐세일에 의한 양력 증가가 주 원인임을 알 수 있었다.

전반적으로 모형시험 결과의 경향은 계산결과와 매우 유사한 경향을 가지고 있었으나, 정량적으로 계산에 의한 값보다는 크게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 결과는 모형 세일의 지지를 위한 부가적인 리그의 설치, 계산에 비해 상대적으로 작은 레이놀드수를 가지는 모형시험 조건, 풍동 시험부 내의 벽면 효과 등에 기인하는 것으로 판단된다. 일련의 세일에 대한 수치 계산을 통해서 최적의 설계 조건의 방향을 얻어낼 수 있었으며, 고효율의 세일 설계나 항해 중의 세일 조절 지침에 대한 중요한 자료로 사용할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

[1] 김우전, 김도현, 반석호, 2000, "유한체적법을 이용한 상선주위의 난류유동 계산에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 4호.

pp. 19-31.

[2] Ferziger, J.H. and Peric, M., 1996, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag, Berlin.

[3] Kim, W.J., Kim, D.H. and Van, S.H., 2002, "Computational study on turbulent flows around modern tanker hull forms," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 38, No. 4, pp. 377-406.

[4] Larsson, L. and Eliasson, R.E., 2000, Principles of Yacht Design, International Marine of McGraw-Hill.

[5] Lee, Y.W., Miyata, H., and Sato, T., 1997, "CFD Simulation of Two-Sail Interaction about a Sailing Yacht," J. SNAJ Japan, Vol. 181, pp. 25-34.

[6] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabir, A., and Zhu, J., 1995, "A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation," Computers and Fluids, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238.

[7] Wilkinson, S., 1989, "Static Pressure Distributions Over 2D Mast/Sail Geometries," Marine Technology, Vol. 26, No. 4, pp. 333-337.

[8] Yoo, J. et al, 2005. Calculations on the Interactions between Main and Jib Sails, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 1, pp 24-33.

[9] Yoo, J. et al, 2005. Development of 30 Feet Sailing Yacht and Performance Predictions, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 1, pp. 34-42.

저 자 소 개



유재훈 (유재훈)

1964년 3월생, 1996년 2월 서울대학교 조선해양공학과 박사, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양운송안전본부.

※ 관심분야 : 예인수조모형시험, 선박 설계 및 유동해석, 세일링요트 및 레저선박 설계



안해성 (안해성)

1969년 4월생, 2003년 2월 서울대학교 조선해양공학과 박사, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양운송안전본부.

※ 관심분야 : 예인수조모형시험, 선박 설계 및 유동해석, 레저선박 설계