

풍동 실험시 요트 세일 공력에 미치는 차폐효과에 대한 수치해석

이평국*, 김형태†*, 유재훈**

충남대학교 선박해양공학과*
한국해양연구원 해양시스템안전연구소**

Numerical Analysis of Blockage Effects on Aerodynamic Forces for Yacht Sails in Wind Tunnel Experiment

Pyoung-Kuk Lee*, Hyoung-Tae Kim†* and Jae-Hoon Yoo**

Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chungnam National Univ.*
Korea Ocean Research & Development Institute**

Abstract

Due to the limitation of size of the test section, blockage effects could not be avoided in the model test of yacht sails for common wind tunnels. In this paper, a numerical analysis is performed to investigate the blockage effects on the lift and drag forces measured from wind tunnel experiments for a 30 feet sloop yacht sail. Complex airflows around the jib and main sails including three-dimensional flow separations are calculated for various close-hauled conditions. It is found that the blockage of a wind tunnel changes the flow separation and consequently the lift and drag forces of the sails, especially the main sail, reduce and increase, respectively, due to the blockage effects.

※Keywords: Sloop yacht(슬루프 요트), Jib sail(집세일), Main sail(메인세일), Lift force(양력), Drag force(항력), Blockage effect(차폐효과)

1. 서 론

세일링 요트(sailing yacht)는 바람을 이용하여 세일로부터 추진력을 얻으므로 세일에 작용하는 공력을 정확하게 추정하는 것이 매우 중요하다. 세일의 공력 특성을 추정하는 대표적인 방법으로

는 모형 세일에 대한 풍동 실험을 들 수 있는데, 세일 공력을 정확히 추정하기 위해서는 모형세일을 가능한 한 크게 만들어야 한다. 이 경우, 문제가 되는 것이 풍동 시험부의 크기 제약으로 인한 차폐효과(blockage effects)이다. 최근, 유재훈 등(2005a)은 마스트가 하나이고 세일이 앞, 뒤에 하나씩 장착된 슬루프(sloop) 요트 세일 주위의 유동에 대한 수치해석을 수행하고 계산된 공력특성을 풍동실험과 비교한 바 있다. 한편, 이 논문의

접수일: 2006년 1월 16일, 승인일: 2006년 6월 13일

† 교신저자: h-tkim@cnu.ac.kr, 042-821-6629

유동해석에는 풍동 차폐효과가 고려되지 않았기 때문에 계산 결과를 풍동실험 결과와 직접 비교하는 것이 타당한지에 대한 의문이 남아 있었다. 이 의문에 대한 해답을 얻기 위해, 본 연구에서는 풍동 시험부의 차폐효과를 고려해서 세일유동에 대한 수치해석을 수행하고, 계산된 공력을 풍동실험과 비교하였다. 한편, 슬루프 요트의 집세일(jib sail)과 메인세일(main sail)의 중첩(overlap)에 따른 세일의 양력 및 항력의 변화는 매우 작다는 것이 유재훈 등(2005a)에 의해 밝혀진 바 있다. 이에 본 연구에서는 세일의 간격(slit distance)에 따른 공력 변화에 대해 차폐효과가 미치는 영향을 조사하였다. 이를 통하여 일반적인 풍동에서 수행된 요트세일의 모형실험으로부터 실선 세일의 공력특성을 추정하기 위해서는 풍동의 차폐효과에 대한 수정이 필요하다는 것을 확인하였다.

2. 계산 조건

2.1 세일 형상의 정의

수치해석에 사용된 슬루프 요트세일의 기본제원 및 형상을 Table 1, 2 및 Fig. 1, 2에 도시하였다. 실제 세일은 빈 바람의 조건과 세일 튜닝에 따라 그 제원 및 형상이 변화하지만 본 연구에서는 각 세일의 제원과 형상의 변화가 없다고 가정하였다. 두 세일 간의 중첩이 20%인 경우에 대해 jib angle을 변화시켜 3개의 형상조건을 생성하였다. Jib angle은 집세일의 foot 각도(base line angle)를 의미한다. 세일 형상과 제원에 대한 보다 자세한 정보는 유재훈 등(2005b)을 참고하기 바란다.

Table 1 Geometric parameters of main sail

Location	Foot	25%	50%	75%	Top
Height (mm)	0	3000	6000	9000	11900
Chord Length (mm)	4000	3000	2000	1000	10
Baseline Angle (deg)	0	5	10	15	20
Camber Ratio(%)	8	10	12	14	16
$P=11.9m, E=4.0m,$ Area of Main Sail $A_w=24.0 m^2$					

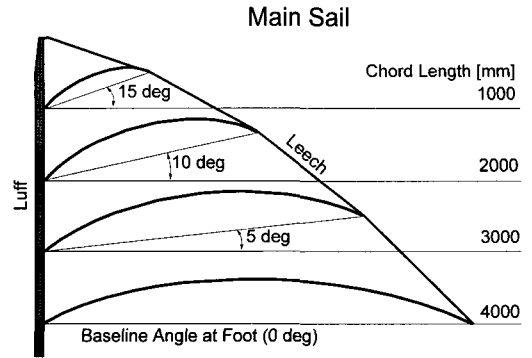


Fig. 1 Geometry of main sail

Table 2 Geometric parameters of jib sail

Location	Foot	25%	50%	75%	Top
Height (mm)	0	2750	5500	8250	11000
Chord Length(mm)	$C1$	75% of $C1$	50% of $C1$	25% of $C1$	10
Baseline Angle (deg)	$\beta1$	$1.25\beta1$	$1.5\beta1$	$1.75\beta1$	$2.0\beta1$
Camber Ratio(%)	8	10	12	14	16
<ul style="list-style-type: none"> • $C1=J \times (1+Overlap Ratio\%/100)$, means overlapped chord length at foot (mm) • J=non-overlapped chord length at foot • $\beta1$: Baseline Angle of Jib Sail Foot 					

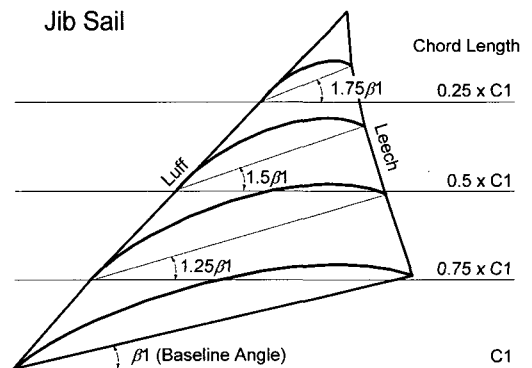


Fig. 2 Geometry of jib sail

2.2 풍동

충남대학교 중형아음속 폐회로식(closed-circuit type) 풍동은 두개의 시험부를 교체하여 실험할 수 있다. 제1시험부의 크기는 1.25×1.25×4m이고 최대풍속은 70m/s, 제2시험부는 1.8×1.8×5.2m, 최대풍속은 40m/s이다. 모형세일에 작용하는 공력 계측을 위한 실험은 척도효과(scale effect), 차폐효과를 고려하여 상대적으로 단면적이 큰 제2 시험부에서 수행하였다. Fig. 3은 충남대학교 풍동의 개략도를 보여주고 있다.

모형세일은 NC가공된 목재 모형에 FRP를 적층하여 제작하였고, 목재 합판을 요트갑판 모양으로

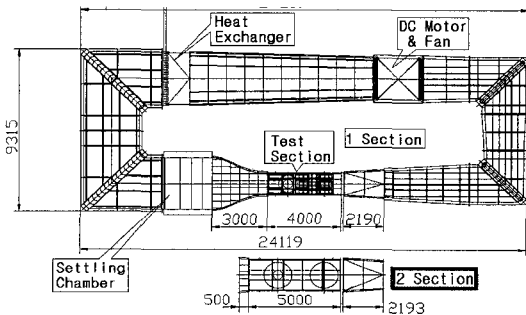


Fig. 3 Schematics of CNU wind tunnel

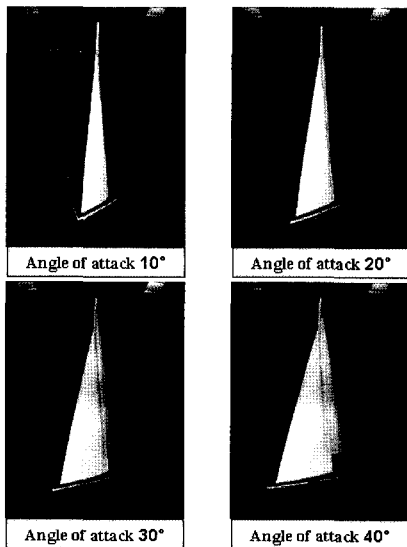


Fig. 4 Yacht sail in the wind tunnel

절단한 다음, 그 위에 FRP를 적층시켜 모형세일 고정판을 제작하였다. 풍동 시험부 바닥의 회전판 하부에 설치한 6분력계를 사용하여 모형세일에 작용하는 공력을 계측하였으며, Fig. 4에 풍동에 설치된 모형세일을 보이고 있다. 본 논문은 모형세일의 공력 계측에 영향을 미치는 풍동의 차폐효과에 대한 수치해석 연구가 목적이므로 모형실험에 대한 자세한 내용은 생략하기로 한다.

2.3 지배 방정식 및 이산화

수치계산을 위한 기본 좌표계는 Fig. 5에 도시한 바와 같이 마스트와 풍동 바닥의 회전판이 만나는 지점을 원점으로 하여 요트의 길이 방향을 x축, 폭 방향을 y축, 연직 상방을 z축으로 하는 직교좌표계이며 이에 대한 유동의 지배 방정식인 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) \tag{2}$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i})] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j})$$

여기서, $U_i = (U, V, W)$ 는 각 좌표축 $x_i = (x, y, z)$ 방향의 평균속도 성분, μ 는 점성계수, p 는 정압을 나타내며, 레이놀즈 응력인 $-\rho \overline{u_i u_j}$ 는 Boussinesq의 isotropic eddy viscosity model을 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t [\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}] - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{3}$$

여기에서 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 이고, k 는 난류운동 에너지이다. 본 계산에는 Realizable $k-\epsilon$ 난류모형을 벽함수와 함께 사용하였다. 지배 방정식의 대류항과 확산항은 QUICK법으로 이산화하였고, 속도-압력 연성에는 SIMPLEC 방법을 사용하였다. 난류모형 및 이산화 관련 수식 모델은 FLUENT 6.1 user's guide(2003)의 내용을 토대로 하였다.

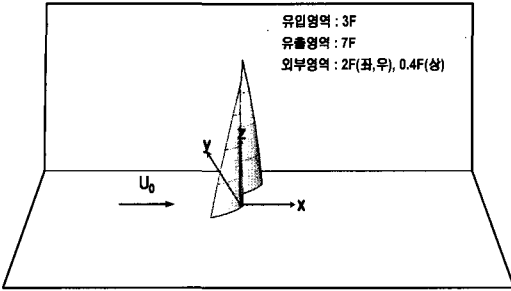


Fig. 5 Physical domain & coordinate system

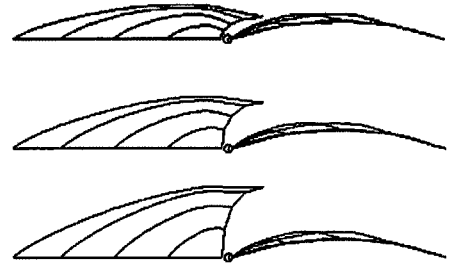


Fig. 7 Geometry of sail sets(Top view)

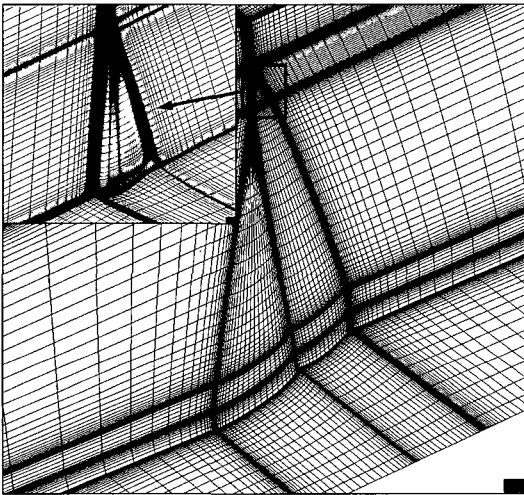


Fig. 6 Multi-block structured grid system

Table 3 Condition of calculation

Case	Overlap	Jib angle
1	20	5
2	20	10
3	20	15

양력과 항력은 $\rho V^2 S/2$ 로 무차원화 하였으며, 이 때 ρ 는 공기의 밀도, V 는 평균 유속이고 S 는 세일의 표면적이다.

2.4 수치격자 및 경계조건

유동 수치해석을 위한 계산 영역은 충남대학교 풍동 제2시험부를 동일한 축척비로 축소하여 정하

였고, 유입경계는 메인세일의 foot(F) 길이로 무차원화 하여 집세일로부터 3F, 유출경계는 메인세일로부터 7F, 외부 경계는 마스트로부터 연직상방으로 0.4F, 현측으로 2F 떨어진 곳에 위치한다. 수치계산을 위한 좌표계 및 계산영역을 Fig. 5에 개략적으로 도시하였다.

세일 주위의 점성유동 계산을 위한 격자는 상용 코드인 Gridgen을 사용하여 Fig. 6과 같이 생성하였다. 생성된 수치 격자는 21개의 블록으로 구성하였고, 총 격자수는 약 1,500,000개 이다. 한편, 실선 세일의 레이놀즈 수는 2.8×10^6 인 반면, 풍동 실험에 사용된 모형 세일의 레이놀즈 수는 시험부의 크기와 풍속의 제약으로 인해 3×10^5 밖에 되지 못했으나, 풍동 실험에서 별도의 난류촉진 장치를 사용하지는 않았다. 본 수치계산에서는 풍동실험에서의 차폐효과를 조사하기 위하여 외부경계면 즉, 풍동시험부 벽에 대칭(symmetry)조건을 적용하였다.

3. 계산 결과

본 연구에서 유동계산을 수행한 집세일과 메인세일의 중첩 및 간격에 해당하는 jib angle에 대한 조건은 Table 3과 같으며 각 조건별 세일의 형상은 Fig. 7에 나타내었다.

메인세일 25% 높이의 단면에서 본 유동 흐름을 Fig. 8, 9에 도시하였다. 메인세일에 유입되는 유선을 면밀히 살펴보면, 풍동시험부 벽이 고려된

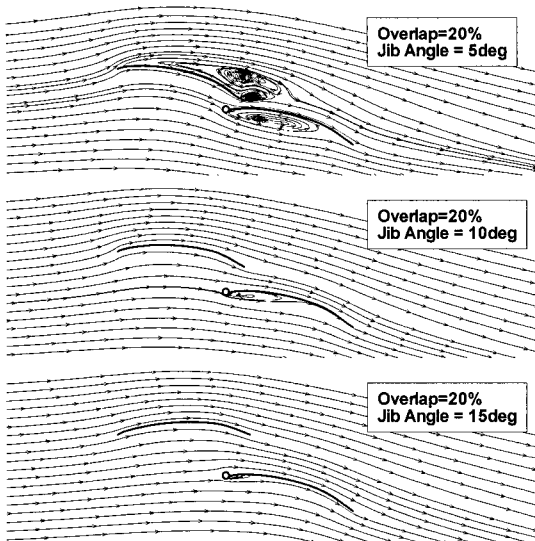


Fig. 8 Streamlines changed by jib angle (Overlap=20%, with blockage)

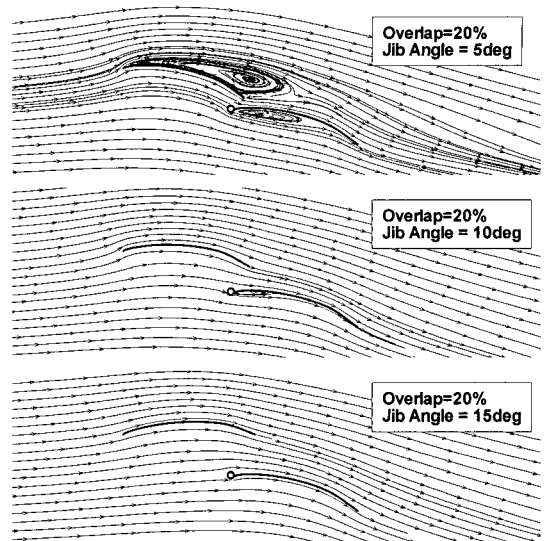


Fig. 9 Streamlines changed by jib angle (Overlap=20%, w/o blockage : Yoo et al.)

Fig. 8의 경우, 메인세일의 받음각이 조금 감소한 것을 알 수 있다. 이에 반해 벽이 고려되지 않은 Fig. 9에서는 보이지 않던 2차 박리가 생긴 것을 볼 수 있는데 이는 이미 초기에 실속 각도를 넘어선 상태에서 집세일이 메인세일의 받음각을 줄여 주었기 때문에 실속각으로 다시 되돌아 온 것으로 판단된다. 각 형상 조건(3가지 jib angle)에 대한 세일의 표면 압력을 벽이 있는 경우와 없는 경우를 비교하여 Fig. 10, 11에 도시하였다. 이로부터 벽이 있는 경우에는 벽이 없는 경우보다 세일 표면의 압력이 대체로 크게 나타난 것을 알 수 있다. 집세일에서는 jib angle과 상관없이 풍상측(windward side)과 풍하측(leeward side)에서 거의 같은 크기로 압력이 증가하였다. 메인세일에서는 풍상측에 비해 풍하측의 압력이 더 크게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 일반적으로 집세일로 인해 메인세일의 받음각이 작아지며 이러한 downwash 현상은 이미 오래전부터 잘 알려져 왔으나, 본 연구 결과로부터 벽이 있는 경우에는 downwash에 의한 메인세일 받음각의 감소가 더욱 심화되는 것으로 나타났으며, 이로부터 풍동시험부의 차폐효과로 인한 세일 주위의 유동 및 압력의 변화가 세일의 양력 및 항력 특성을 변화

시킬 것을 예측할 수 있다. Fig. 12, 13에는 세일 표면의 한계 유선을 풍동시험부 벽이 있는 경우와 없는 경우를 비교하여 도시하였다. Jib angle이 5도일 때는 유선부착선(line of attachment), 안장점(saddle point), 나선점(spiral point) 등의 위치가 시험부 벽이 없는 경우와 유사한 것을 알 수 있다. 집세일 꼭지점 뒤쪽의 메인세일 표면에서 이상절점(improper node) 같은 것도 벽이 없는 경우와 매우 유사한 분포를 보이고 있으나, 메인세일의 박리 영역이 벽이 없는 경우보다 더 큰 것을 알 수 있다. Jib angle이 10도일 때는 5도일 때와 다르게 시험부 벽이 있는 경우와 없는 경우 모두 나선점은 나타나지 않고 있으나 이상절점 같은 점이 모두 보이고 유선부착선등이 두 경우 모두 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 집세일의 유선은 거의 동일하나 메인세일의 유선부착선의 위치는 차이를 보이고, 이를 통해 박리 영역이 jib angle 5도일 때와 마찬가지로 시험부 벽이 있는 경우에 더 커짐을 확인할 수 있다. Jib angle이 15도인 경우도 집세일의 유선은 거의 동일하나, 메인세일의 박리 영역에서 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

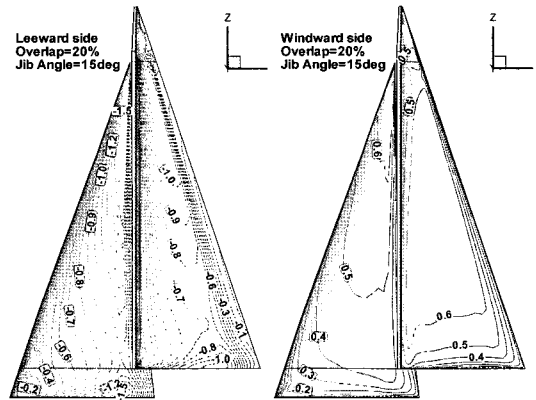
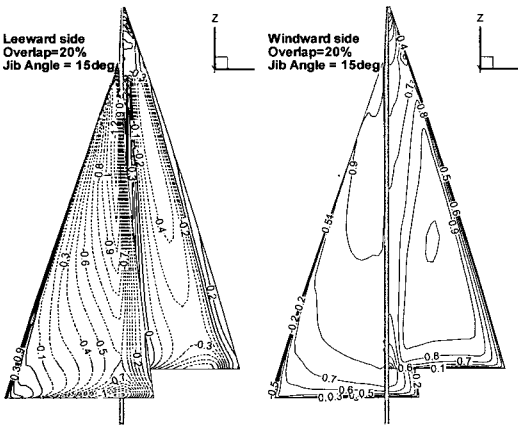
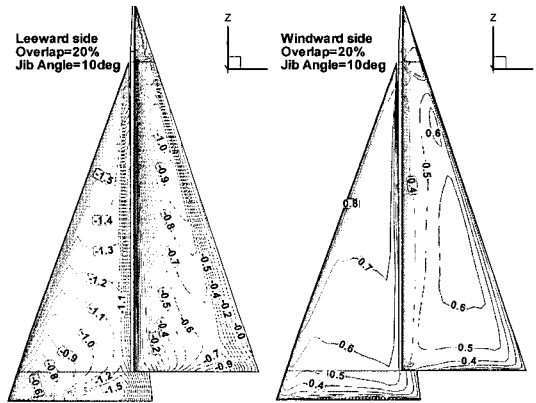
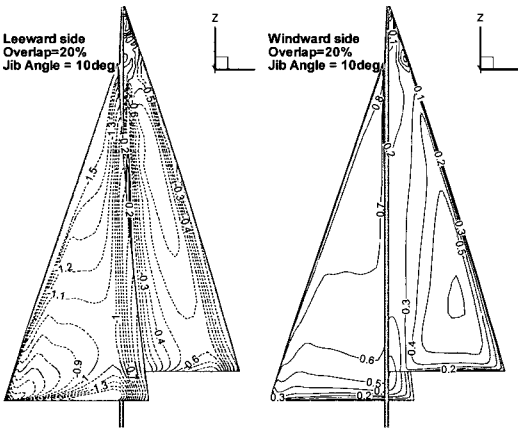
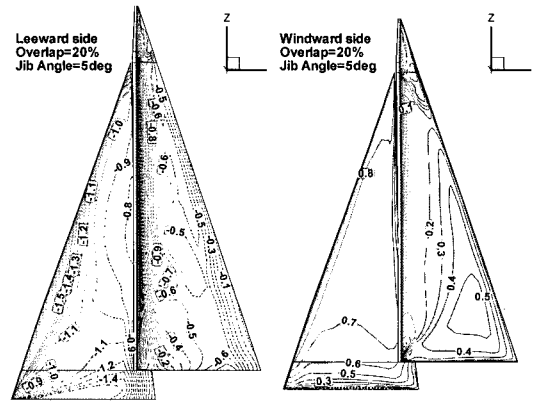
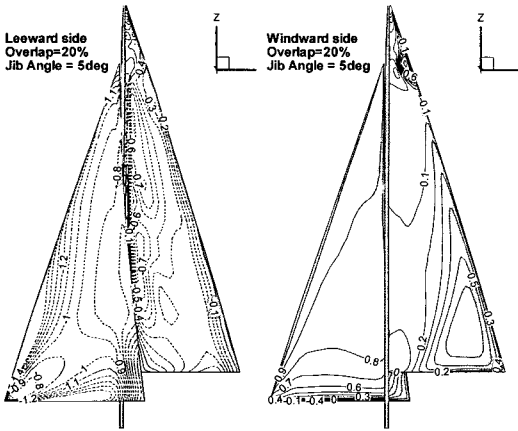


Fig. 10 C_p Contours changed by jib angle (Overlap=20%, with blockage)

Fig. 11 C_p Contours changed by jib angle (Overlap=20%, without blockage, Yoo et al.)

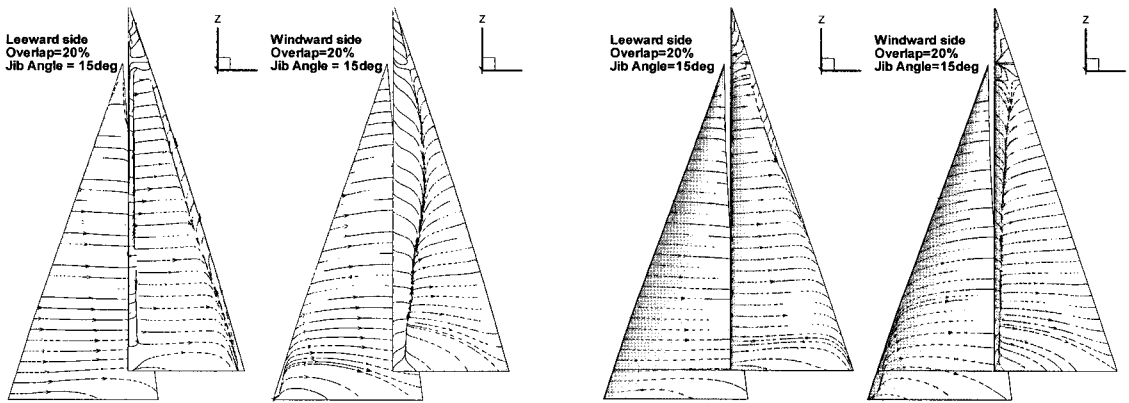
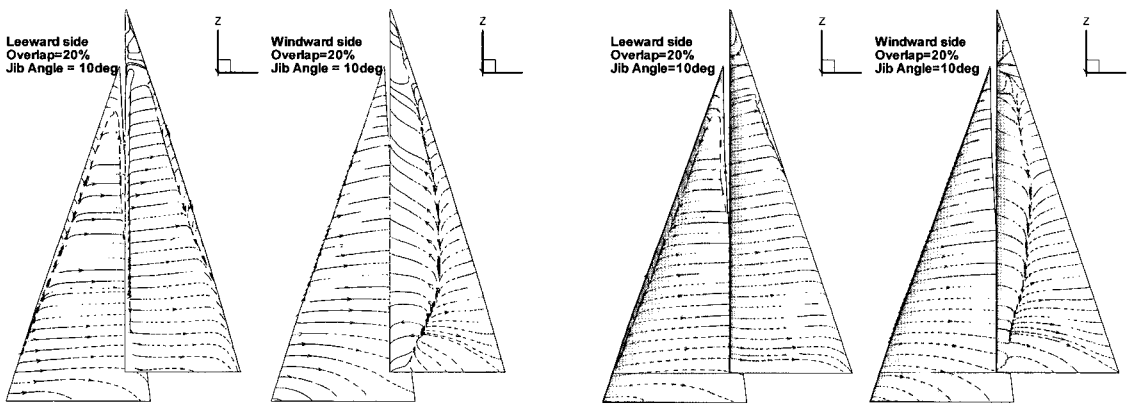
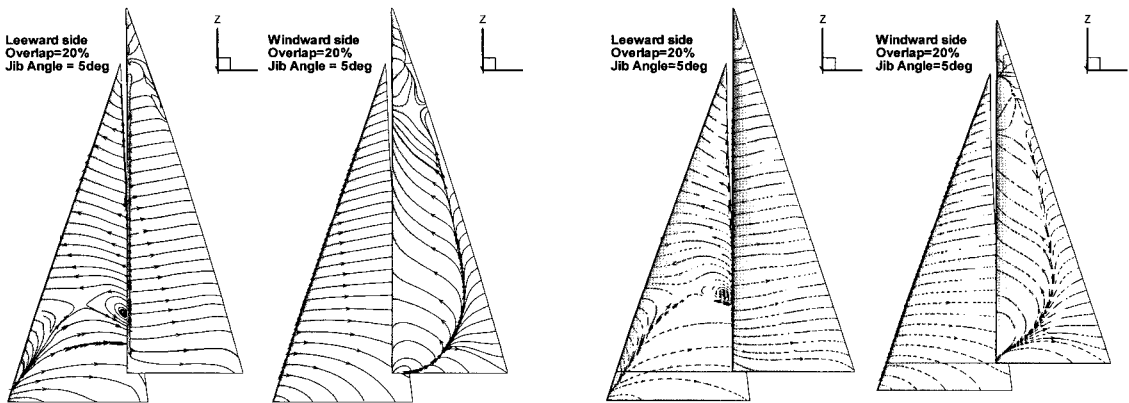


Fig. 12 Limiting streamlines changed by jib angle(Overlap=20%, with blockage)

Fig. 13 Limiting streamlines changed by jib angle(Overlap=20%, without blockage)

시험부 벽이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 집세일과 메인세일의 양력과 항력을 Fig. 14, 15에 도시하였다. 이 때 jib angle은 메인세일을 기준으로 한 것이므로 jib angle이 커질수록 집세일의 유효 받음각은 작아진다고 할 수 있다. Jib angle 10도 일 때의 양력을 제외하면, 집세일의 양력 및 항력은 두 경우 모두 유사하다. 이는 차폐효과가 있음에도 불구하고 풍상측과 풍하측이 거의 동일한 압력차를 유지하기 때문으로 판단된다. 10도에서 양력이 차이를 보이는 이유는 분명치 않으나,

Fig. 10, 11에 보인 바와 같이 집세일의 풍상측 압력이 거의 동일한 차이를 보이는 것에 비해 풍하측에서는 시험부 벽이 있는 경우의 압력이 없는 경우보다 상대적으로 높게 계산되어졌기 때문이라고 판단된다. 한편, 메인세일의 양력은 차폐효과 때문에 거의 동일한 차이만큼 작게 계산되었고, 이런 경향은 항력의 경우에도 유사하다. 이는 양력은 물론 항력에 대해서도 압력 성분이 지배적인 상황에서, 시험부 벽이 있는 경우와 없는 경우의 압력차가 발생하기 때문이다.

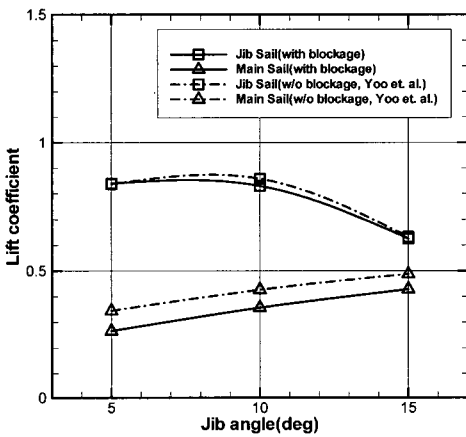


Fig. 14 Lift changed by jib angle

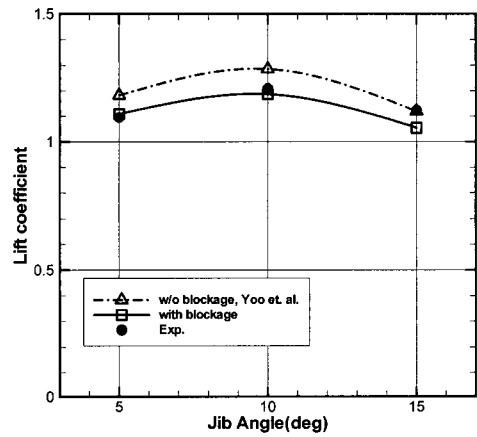


Fig. 16 Lift changed by jib angle(Total)

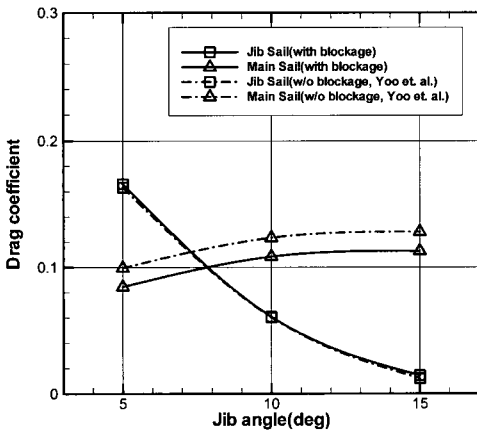


Fig. 15 Drag changed by jib angle

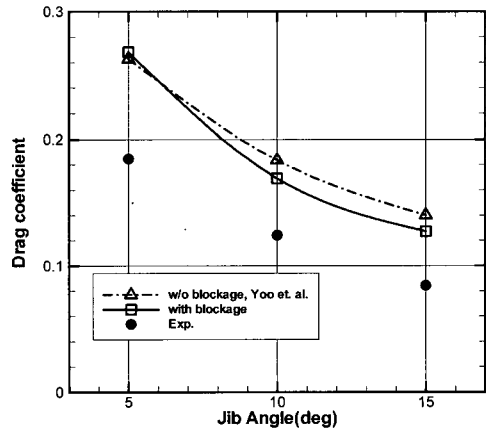


Fig. 17 Drag changed by jib angle(Total)

Fig. 16, 17에는 jib angle에 따른 세일의 양력 및 항력을 풍동실험 결과와 함께 도시하였다. 양력의 경우, 예상한 바와 같이 시험부 벽이 존재할 때가 없을 때에 비해 작은 것을 확인할 수 있다. 하지만 jib angle 15도에서는 벽이 없을 때와 오히려 일치하고 있는데, 이는 와이어로 고정시킨 모형세일, 특히 메인세일의 받음각이 증가하면서 세일의 비정상 유동이 심하게 발생한 것 때문이 아닌가 생각된다. 항력은 실험값이 수치해석에 비해 최대 30% 작게 예측되었는데, 현재 이러한 차이가 발생한 이유는 알 수 없으며, 향후 실험과 계산 모두에 대해 보다 면밀히 조사해 볼 필요가 있다. Jib angle 5도일 때, 시험부 벽이 없는 경우보다 조금 크게, jib angle 15도일 때는 작게 계산되어진 것을 볼 수 있다. 이 역시 Fig. 15에서 알 수 있듯이, jib angle 5도일 경우에는 집세일의 항력이 지배적이고, 10도일 때에는 메인세일의 항력이 지배적이기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 풍동 시험부 벽의 차폐효과가 요트 세일의 공력 특성에 미치는 영향을 수치해석을 통해 조사하였다. 충남대학교 중형 아음속 풍동에서 실험에 사용된 슬루프 요트 모형세일을 대상으로 3개의 세일 형상에 대해 유동계산을 수행하여 얻어진 계산결과를 벽이 없는 경우와 비교, 분석하였다. 풍동 시험부의 차폐효과 때문에 각 세일 주위의 유동과 표면 압력이 변화하고 이로 인해 양력과 항력이 감소하는 것과 이러한 차폐효과가 주로 메인세일의 양력과 항력의 감소에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 양력의 경우, 감소율이

거의 동일하고 그 크기는 최대 8%이며, 항력의 감소율은 최대 10%로 나타난 것을 볼 때, 모형세일에 대한 풍동실험으로부터 실선 세일의 공력특성을 정확히 추정하기 위해서는 풍동 시험부의 차폐효과를 고려하여 풍동실험 결과를 수정할 필요가 있음을 알 수 있다. 이러한 차폐효과 수정을 통해서 모형세일에 대한 체계적인 풍동실험의 결과를 실선세일의 설계를 위한 기초 자료로서 충분히 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구를 지원하여 주신 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(MOERI)의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 유재훈, 박일룡, 김진, 안해성, 반석호, 이평국, 2005a, “요트의 Main세일과 Jib 세일 사이의 간섭 효과에 대한 수치해석,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 1호, pp. 24-33.
- 유재훈, 반석호, 안해성, 김진, 김상현, 2005b, “30 피트급 요트의 선형개발 및 성능 추정,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 1호. pp. 34-42.
- FLUENT 6.1 user's guide.



< 이 평 국 > < 김 형 태 > < 유 재 훈 >