

## 요트 세일 주위의 난류유동 계산

지혜련\*, 김우전<sup>†\*</sup>, 박종환\*

목포대학교 기계·선박해양공학부 선박해양시스템전공\*

Turbulent Flow Calculation around Yacht Sails

Hye-Ryoun Chi\*, Wu-Joan Kim<sup>†\*</sup> and Jong-Hwan Park\*

Department of Naval Architecture & Marine Eng., Mokpo National University\*

### Abstract

Turbulent flows around yacht sails were calculated to access the applicability of CFD for yacht design. Multi-block grid system was generated by using Gridgen package and Fluent was used to calculate flows around two sail system. A 30ft class sailing yacht designed and tested by KRISO was chosen. The interference effect between main and jib sails was analyzed. Pressure distribution on the sails was obtained and the center of effort was estimated. It was found that the jib angle affects the flow phenomena around a main sail due to the change of inflow angle. The location of center of effort is much different from the empirical formula based on a simple geometrical consideration. The calculated results are compared with the previous numerical and experimental results. Both CFD results are similar, but there are some discrepancies with experimental data. However, it is certain that CFD can be a very useful tool for yacht design.

※Keywords: Sailing yacht(세일링 요트), CFD(계산유체역학), Grid generation(격자계 생성), Center of effort(풍압중심), Main sail(메인 세일), Jib sail(집 세일)

### 1. 서론

우리나라의 경제적 수준이 높아지면서 주 5일 근무제의 도입과 함께 주말 여가시간을 레저 스포츠와 함께하는 사람들이 많아지고 있다. 그 중에서 미국, 유럽, 대양주 등 선진국에서 이미 대중화

되어있는 레저선박 분야에 대한 관심이 국내에서도 차츰 높아지고 있다. 특히 레저선박의 꽃이라고 할 수 있는 세일링 요트에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있으며, KRISO(현재는 KORDI/MOERI로 명칭 변경됨)에서는 이미 보급형 세일링 요트를 개발하여 발표한 바 있다(유재훈 등 2005, 유재훈과 안해성 2005).

태동기에 있는 국내의 요트 설계 기술의 진보를 위해서는 체계적인 유체성능 해석을 통한 선체 및

접수일: 2006년 10월 27일, 승인일: 2007년 1월 30일

† 교신저자: kimwujoan@mokpo.ac.kr, 061-450-2766

킬과 세일 등의 밸런스, 항력 및 추력의 예측 등을 통한 선형설계 기술의 개발이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 CFD 기술을 활용하여 세일링 요트의 세일주위 유체 유동을 해석하는 연구를 수행하였다. 수치계산의 대상으로는 이미 KRISO에서 개발 한 바 있는 슬루프형 세일을 장착한 30피트급 요트를 선정하였다. 이 요트의 경우 이미 세일에 대하여서 수치계산과 모형시험이 수행된 바 있으며(유재훈 등 2005, 이평국 등 2006), 실제로 요트를 건조하여 실험역 시험을 수행하였기 때문에 수치계산 결과의 검증이 용이할 뿐 아니라, 국내의 표준형 요트로 생각될 수 있기 때문이다.

요트 세일주위의 유동 계산을 위해 30피트급 요트용으로 설계되어진 것으로 유재훈 등(2005)이 발표하였던 세일 시스템을 기본으로 수치 계산을 수행하였고, 세일의 상대적인 위치와 각도에 따른 유동 및 양력의 변화를 알아보기 전에 하나의 대표적인 경우를 선택하여 격자계의 분포나 난류 모형의 선택에 나타날 수 있는 수치계산 상의 차이를 먼저 알아보았다. 이중 공학적인 적용도가 가장 높은 난류 모형을 적용하여 메인 세일과 집 세일의 간격 및 각도에 따른 영향과 양력 및 항력의 변화를 조사하여 그 결과를 비교하였다. 유동현상을 난류로 생각하여 수치계산을 수행한 경우에 대해서는 난류 모형에 따른 변화는 그다지 크지 않았으며, KRISO의 수치계산 결과(유재훈 등 2005)와는 대동소이한 결과를 보였으나, 실험값과는 약간의 차이를 보였다. 마지막으로 수치계산 결과 얻어진 압력을 바탕으로 세일 면 위의 풍압중심의 위치를 찾아내어 흔히 설계 초기단계에서 면적 중심(Larsson and Elliason 2000)으로부터 얻어지는 풍압중심과 비교하였다.

## 2. 형상의 정의 및 계산 조건

### 2.1 세일 형상의 정의

KRISO에서 개발한 요트의 세일 시스템은 Fig. 1과 같이 전형적인 슬루프형 세일 형태이며, 그에 대한 기본적인 제원은 유재훈 등(2005)에서 사용한 바와 같이 정의하였다.

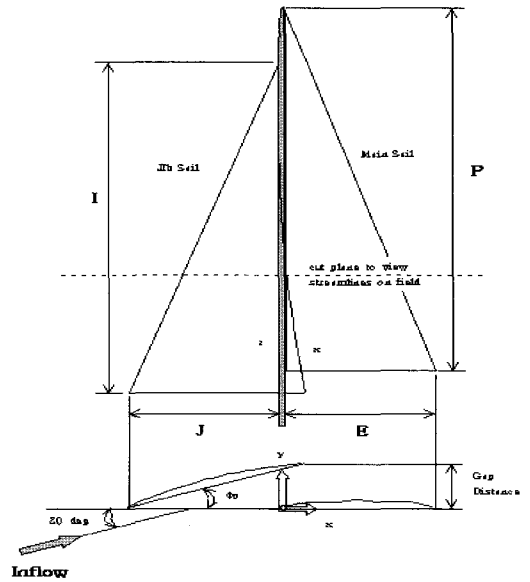


Fig. 1 Geometry of sail set

- I: 집세일의 높이
- J: 집세일의 기준 폭
- P: 메인세일의 높이
- E: 메인세일의 Foot의 길이

집세일과 메인세일의 형상은 크게 다음 세 가지의 형태로 변화하게 되므로 이를 각각 아래와 같은 형상 변수로 정의 하였다.

- (1) Camber Line : NACA  $a=0.8$  Mean Camber Line을 세일면의 기본 형상으로 가정하였다.
- (2) Baseline Angle : 세일은 부가물에 의해 Leading Edge가 고정되어 있는 반면 Trailing Edge 부분은 그렇지 않기 때문에 바람을 받으면 세일의 리치부분이 자연스럽게 열리므로 이러한 효과를 나타낸다.
- (3) Camber Ratio : 바람을 받으면 세일의 캠버가 깊어지게 되는데, 이러한 형상 변화를 Baseline을 기준으로 한 코드 길이에 대한 캠버의 비율로 표현하였다.

이러한 세 가지 형상 변수를 높이 방향으로 5개의 단면에 대해 메인세일(Table 1 및 Fig. 2)과 집세일(Table 2 및 Fig. 3)을 각각 정의하였다.

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
Angle (deg.)	0	5	10	15	20
Camber Ratio	8	10	12	14	16
P=11.9 m , E=4.0 m, Area of Main Sail $A_M=24.0 \text{ m}^2$					

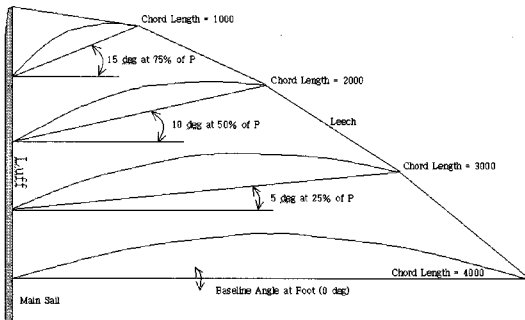


Fig. 2 Geometry of main sail

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%C1	50%C1	25%C1	10
Angle (deg.)	B1	1.25B1	1.5B1	1.75B1	2.0B1
Camber Ratio	8	10	12	14	16
C1=C0*(1+Overlapped Length), unit: mm C0: Length of Jib Sail Foot = 3900 mm B1: Baseline Angle of Jib Sail Foot (Jib Angle)					

2.2 메인세일과 집세일의 간섭 조건

수치 계산은 두 세일간의 간격인 집세일 Foot의 베이스라인 각도를 5도, 10도, 15도로 변화하면서 수행하였고, 두 세일간의 중첩은 집세일

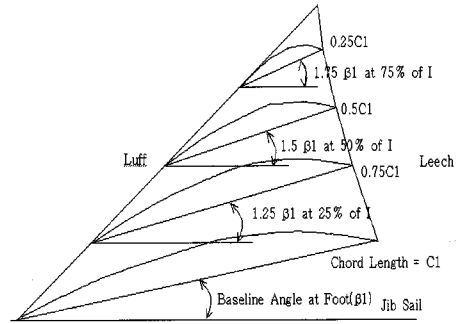


Fig. 3 Geometry of jib sail

Table 3 Conditions of calculation

Case	Overlap % of E	Jib Angle B1, deg	LP m	A <sub>F</sub> m <sup>2</sup>
1	20	5	4.45	25.7
2		10		
3		15		
C1=C0*(1+Overlap), C0=3900mm LP: Length of Fore Sail perpendicular A <sub>F</sub> : Area of Fore(jib) Sail, J=3.9 m, I=11.0m				

Case 1



Case 2



Case 3

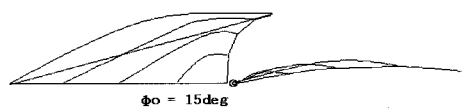


Fig. 4 Geometry of sail sets

Foot의 코드 길이를 메인세일 Foot의 코드길이의 20%로 확장시켰으며, 이는 각각 Table 3 과 Fig. 4로 나타내었다.

2.3 계산 조건 및 가정

수치 계산을 수행함에 있어서 실제 세일의 형상

변형과 선체나 수면과의 간섭 등 여러 가지 주위 환경으로부터의 영향이 발생할 것으로 예상 되는데, 이를 모두 수치계산에 반영하기에는 무리가 있으며, 실제 세일만의 유동해석을 통해서도 충분한 설계정보를 얻을 수 있기 때문에 본 연구에서는 다음과 같은 가정 하에서 수치계산을 수행하였다. 세일 주위의 유동해석을 위해서 다음과 같은 가정 및 조건으로 수치계산이 수행되었다.

- (1) 실제로는 항주 중에 세일의 형상을 리그 및 마스트의 변형을 통해 조정하게 되지만, 본 연구에서는 마스트와 붐 등의 리그에 대한 변형은 없다고 가정하였다.
- (2) 항주 중에 횡경사가 발생하여 세일에 입사되는 바람의 방향과 크기가 달라지지만, 본 계산에서는 직립 상태를 기준으로 선체가 없는 경우로 가정하고 마스트의 밀면 위치를 대칭면으로 가정하고 계산하였다.
- (3) 바람의 방향과 크기는 계산의 분량을 고려하여 20노트의 바람이 20도의 각도로 세일에 입사되는 것으로 하였다.

#### 2.4 격자계 생성 및 수치계산 방법

세일 주위의 유동계산을 위해서 갑판을 대칭면으로 생각하였으며, 선체나 자유수면의 파계 등은 고려하지 않고, 마스트와 집 세일, 그리고 메인 세일 주위에 Gridgen(Pointwise Inc. 1997)을 사용하여 1,500,000개 정도의 격자수를 가지는 다중블록 격자계를 생성하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 생성된 격자계의 일부를 보이고 있다.

입사 풍속을 20노트로 가정하면, 메인세일의 Foot의 길이를 기준으로 한 Reynolds 수는  $2.84 \times 10^6$ 에 해당된다. 계산되어진 양력과 항력 등 유체력은 각각  $0.5\rho S V^2$ 로 무차원화 하였으며, 이 때, S는 두 세일의 한쪽 면에 대한 표면적이다.

유동계산은 Fluent package(Fluent Inc. 2001)를 사용하였으며, 운동량 이송방정식의 대류항과 확산항은 QUICK법과 중앙 차분법을 각각 사용하였고, 속도-압력 연성은 SIMPLE 법을 사용하였다. 난류유동 해석을 위해 우선 Standard k- $\epsilon$  난류모형과 벽함수 기법을 사용하여 세일면으로부터

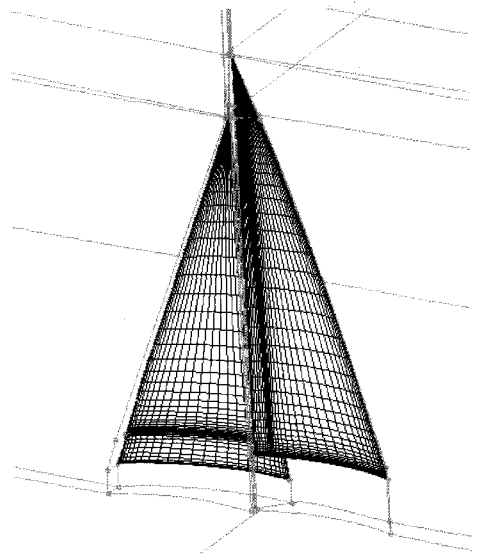


Fig. 5 Generated grid system on sail system

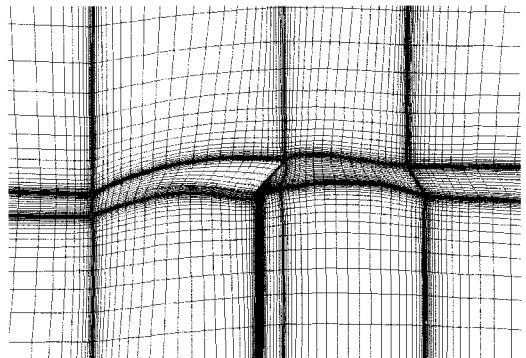


Fig. 6 Grids around two sails

첫 번째 격자계의 위치에 따른 변화를 검토하였으며, 비정상 유동과 층류를 포함한 다양한 난류 모형에 대한 수치시험을 수행하였다. 그리고 두 세일간의 간격을 변화시키면서 수치계산을 수행하여 이미 발표된 바 있는 수치계산 및 실험 결과(유재훈 등 2005)와 비교하였다.

### 3. 수치계산 결과

#### 3.1 첫 번째 격자계 위치에 따른 변화

우선 Standard k- $\epsilon$  난류모형과 벽함수를 사용하여 첫 번째 격자계의 위치에 따른 유동해석 결

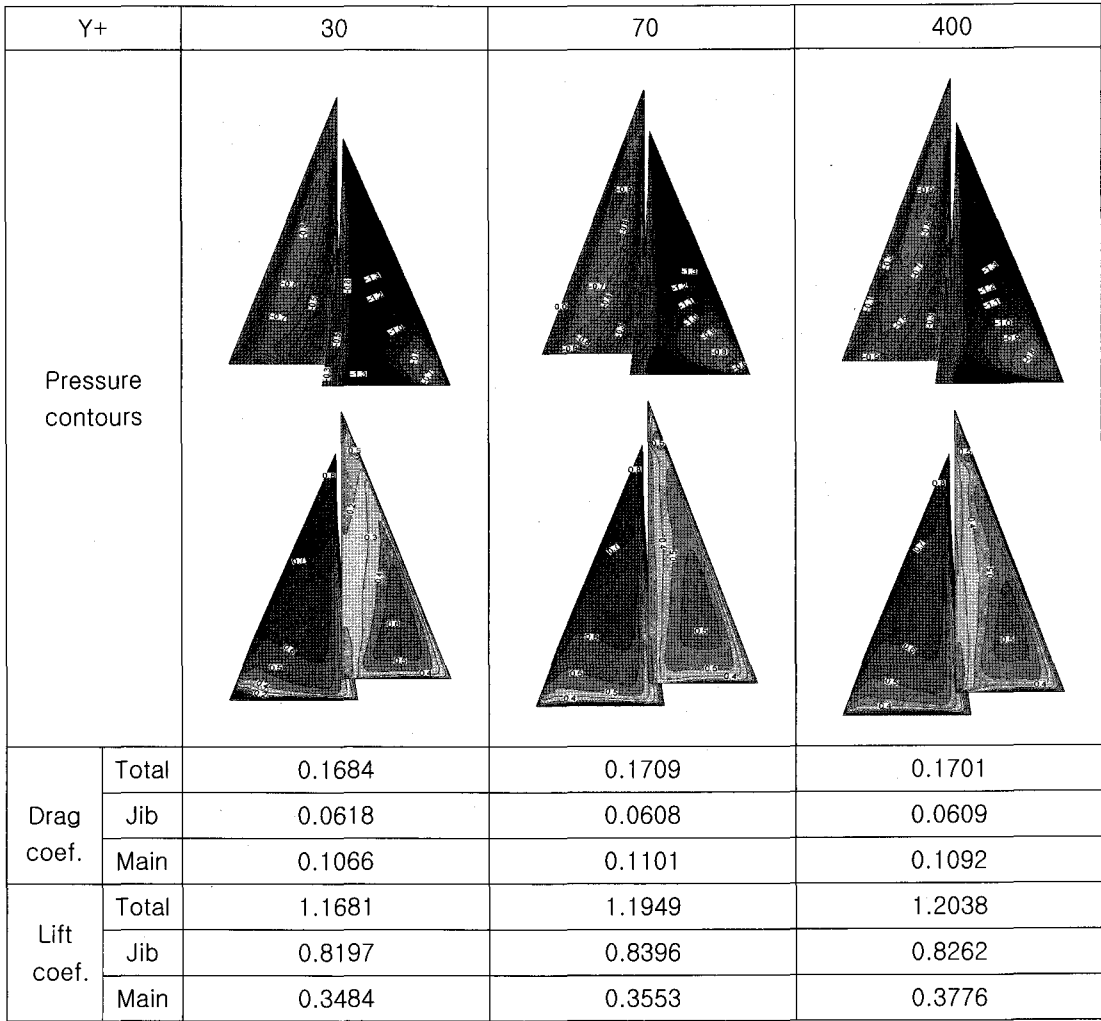


Fig. 7 Results with first grid interval changes

과를 비교하였다. 통상 벽함수를 사용할 때, 첫 번째 격자계의 위치는 충분히 난류가 형성되어 벽함수의 적용이 안정적인 위치를 선택하는 것이 보통인데, 그 위치에 따라 계산 결과에 차이를 보일 수 있다. 본 연구에서는 첫 번째 격자계의 Y+값이 30, 70, 400의 세 가지 경우에 대하여 값을 비교하였다.

첫 번째 격자계의 위치가 지나치게 가까운 경우에는 압력 분포와 적분된 양력 및 항력의 값이 약간 차이를 보이고 있으나, 어느 정도 떨어진 경우

에서는 상당히 멀리 둔 경우와 비교하여서 그 값의 차이가 크지 않을 뿐만 아니라, 압력 분포의 변화도 거의 비슷하게 나타나고 있다. 다음의 수치계산에 대하여서는 통상 Fluent의 벽함수 사용에서 권장하고 있는 두 번째 그림에서 보이고 있는 격자 분포를 바탕으로 수치계산을 수행하여 그 결과를 도시하였다.

### 3.2 난류 모형의 영향

수치 계산을 수행할 때 사용하는 수치계산의 기

법이나 격자계의 구성 등도 중요하지만, 유동에 따라서는 난류 모형(Wilcox 1993)의 선택이 결과에 큰 영향을 미치는 경우가 많다. 본 연구에서는 비록 세일이 큰 박리 등을 동반하지는 않지만, 집세일의 후류에 메인세일이 위치하여 경우에 따라서는 약한 박리를 동반한 유동장이 발생하기 때문에 난류 모형의 영향을 미리 알아보기 위해 하나의 경우에 대하여 여러 가지 난류 모형을 적용하여 그 차이를 알아보았다. Table 4에 수치 계산을 수행한 각각의 난류 모형에 대해 나타내었다. 여기서 첫 번째의 model 1은 비점성 유동장 해석으로 간주할 수 있으며, 두 번째의 model 2는 층류로 가정하고 해석한 결과를 나타낸다. 그리고 model 3~8은 각각 Fluent package에서 제공하는 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식의 해를 위해 선택한 난류 모형들이다.

난류 모형간의 비교를 위해서는 집세일 Foot의 코드 길이를 메인세일 Foot의 코드길이의 20%로 확정하였고, 집세일 Foot의 베이스라인 각도가 10도의 경우를 선택하여 수치계산을 수행하여 그 결과를 Fig. 8 ~ Fig. 15에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 비점성 유동해석의 결과와 층류 유동장 해석 결과는 다른 경우와 확연한 차이를 보이고 있으나, 난류 모형을 채택한 경우의 계산 결과는 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 이는 세일이 두께가 없고, 캠버만 있는 아주 간단한 유선형

Table 4 Definition of turbulence model

model	난류 모형
1	Inviscid model (Euler equation)
2	Laminar model (Navier-Stokes equation)
3	Spalart-Allmaras turbulence model
4	Standard $\kappa-\epsilon$ turbulence model
5	RNG $\kappa-\epsilon$ turbulence model
6	Realizable $\kappa-\epsilon$ turbulence model
7	Standard $\kappa-\omega$ turbulence model
8	SST $\kappa-\omega$ turbulence model

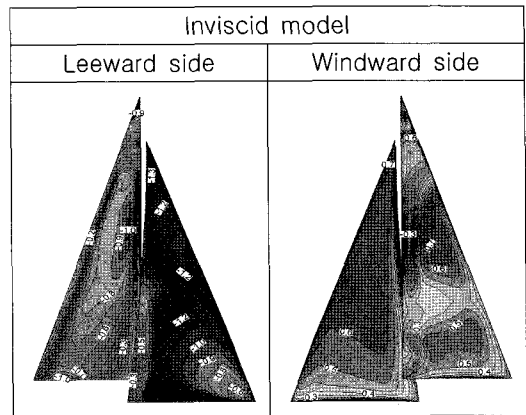


Fig. 8 Cp contours (model 1)

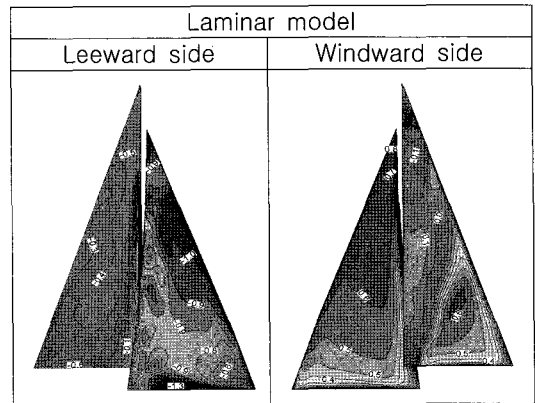


Fig. 9 Cp contours (model 2)

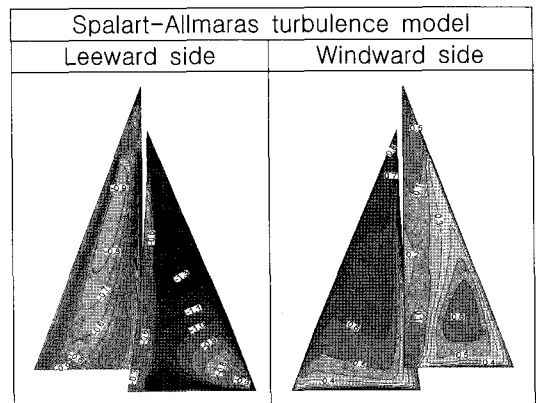


Fig. 10 Cp contours (model 3)

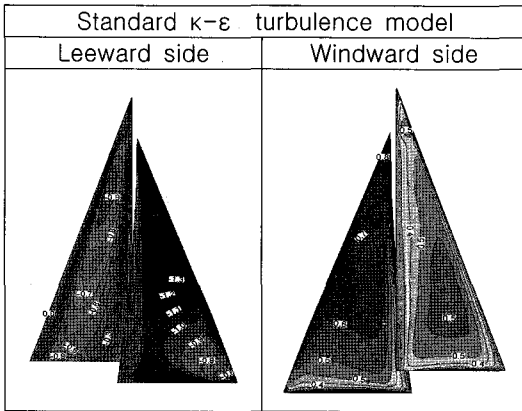


Fig. 11 Cp contours (model 4)

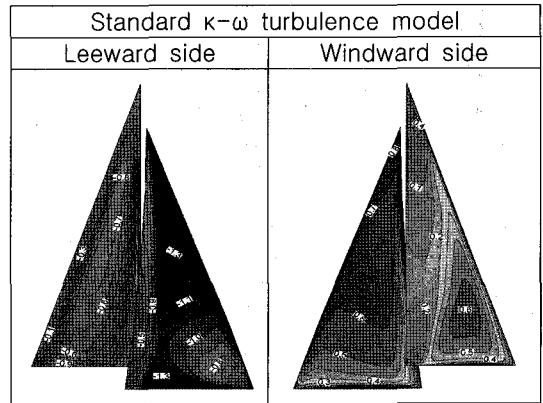


Fig. 14 Cp contours (model 7)

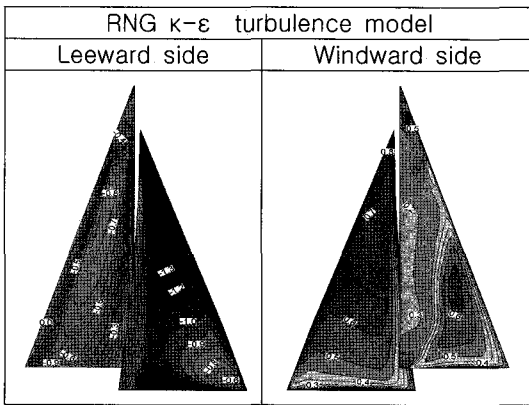


Fig. 12 Cp contours (model 5)

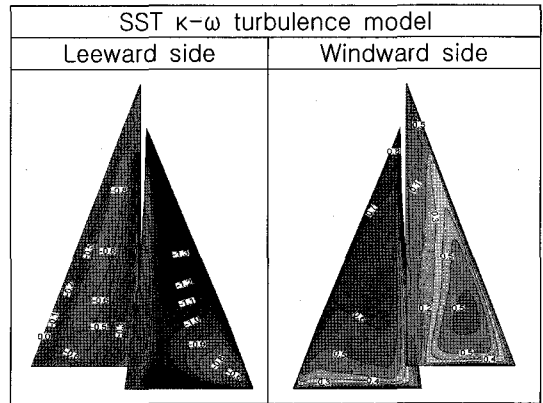


Fig. 15 Cp contours (model 8)

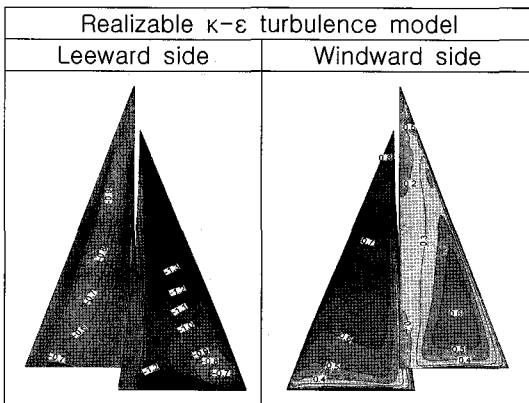


Fig. 13 Cp contours (model 6)

물체로 처리되었으며, 두 세일간의 간섭과 캠버를 제외하면 대체로 각도를 가지는 평판의 유동과 유사하기 때문으로 생각된다.

### 3.3 두 세일 사이의 간격 변화에 따른 영향

두 세일간의 간격 변화에 따른 유동과 힘의 변화를 확인하기 위해 Table 3에 나타난 바와 같이 Overlap 20%에 대하여 Jib angle 5, 10, 15도에 대하여 Standard  $\kappa$ - $\epsilon$  난류모형을 사용하여 수치 계산을 수행하였다. 각각의 case에 대한 세일의 앞면과 뒷면에서의 압력 분포와 한계 유선을 Fig. 16~21에 각각 도시하였다.

각각의 case마다 표면 압력의 분포와 유선의

**Table 5** Variation of drag coefficients with turbulence models

Model	Total	Jib Sail	Main Sail
Inviscid	0.1853	0.0747	0.1106
Laminar	0.1384	0.0636	0.0748
Spalart-Allmaras	0.1585	0.0599	0.0986
Standard $\kappa-\epsilon$	0.1709	0.0608	0.1101
RNG $\kappa-\epsilon$	0.162	0.0618	0.1002
Realizable $\kappa-\epsilon$	0.1612	0.0547	0.1065
Standard $\kappa-\omega$	0.1595	0.0600	0.0995
SST $\kappa-\omega$	0.1604	0.0598	0.1006

**Table 6** Variation of lift coefficients with turbulence models

Model	Total	Jib Sail	Main Sail
Inviscid	1.2153	0.8135	0.4018
Laminar	0.9267	0.6972	0.2295
Spalart-Allmaras	1.1419	0.8255	0.3164
Standard $\kappa-\epsilon$	1.1949	0.8396	0.3553
RNG $\kappa-\epsilon$	1.1316	0.8136	0.3180
Realizable $\kappa-\epsilon$	1.0101	0.6594	0.3507
Standard $\kappa-\omega$	1.1022	0.7933	0.3089
SST $\kappa-\omega$	1.1218	0.8009	0.3209

흐름의 차이가 크다는 걸 발견할 수 있는데, 이는 메인 세일이 존재가 집세일에 입사되는 유동에 영향을 주게 되어 집세일의 받음각(Angle of Attack)을 키워주는 역할을 하고 있음에 기인한다고 할 수 있다. 이는 메인세일과 집세일의 간격 선택이 중요하다는 것을 의미하며, 이러한 하나의 요소로 요트의 전체적인 속도 성능을 크게 좌우

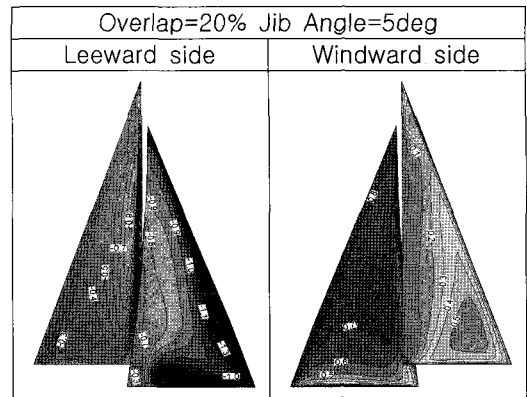


Fig. 16 Cp contours (Case 1)

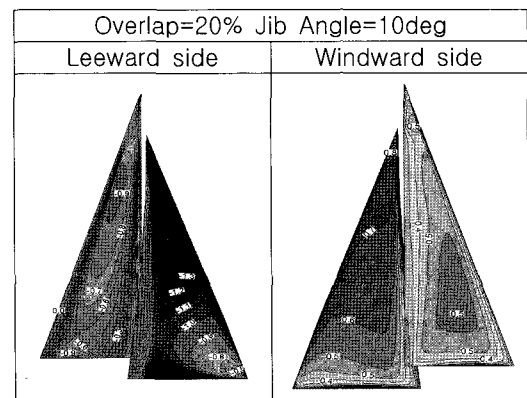


Fig. 17 Cp contours (Case 2)

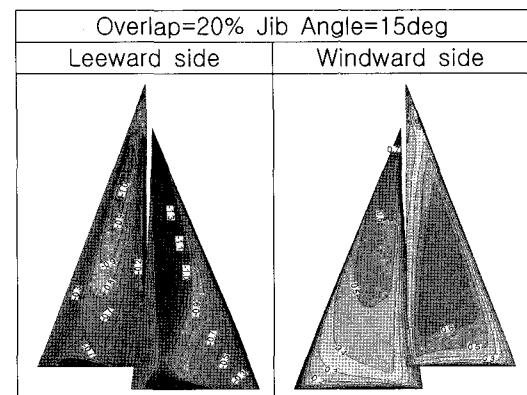


Fig. 18 Cp contours (Case 3)

할 수 있다는 것을 의미하기에 보다 많은 연구가 필요할 것이다. 이는 Fig. 22와 23에 도시한 양력



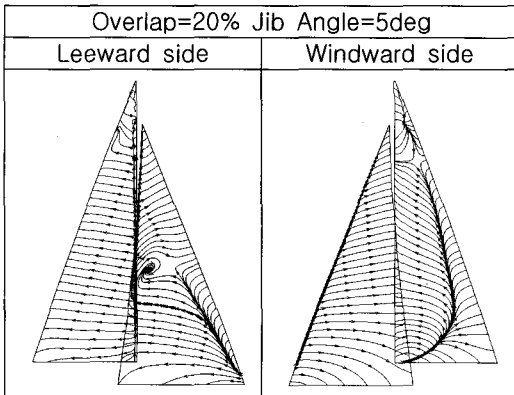


Fig. 19 Limiting streamlines (Case 1)

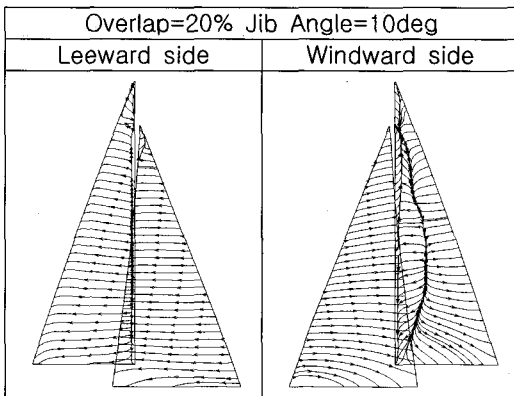


Fig. 20 Limiting streamlines (Case 2)

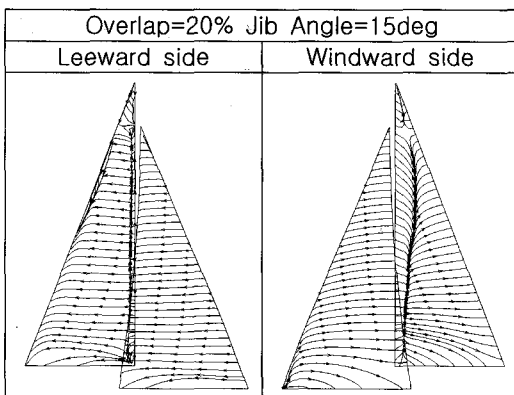


Fig. 21 Limiting streamlines (Case 3)

및 항력계수를 비교하여도 알 수 있는데, Jib angle에 따른 집세일의 뒤쪽 끝단과 메인세일의

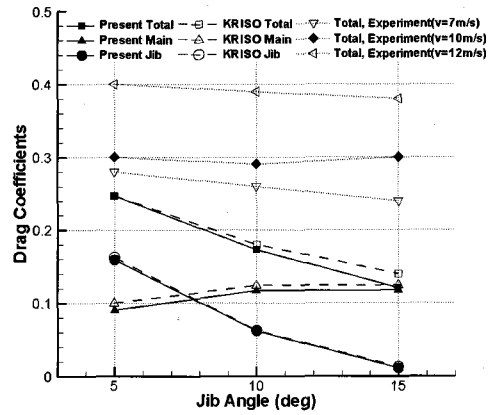


Fig. 22 Drag coefficients

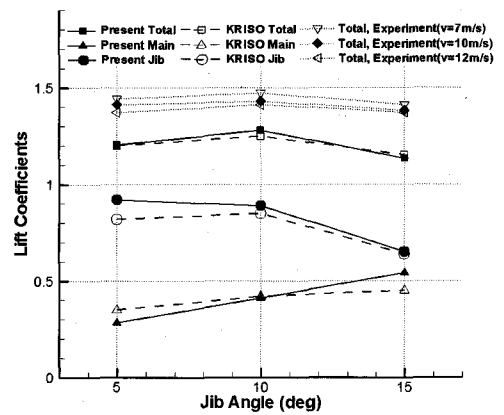


Fig. 23 Lift coefficients

간격에 따라 양력과 항력계수의 증감이 반대로 나타남을 확인 할 수 있다.

다음으로는 세일에 작용하는 표면 압력을 적분하여 얻어진 양력과 항력을 KRISO의 수치계산 및 실험 결과와 비교하였다. 본 논문에서 얻어진 Fluent를 사용하여 계산한 양력과 항력 값은 KRISO의 수치계산 결과(유재훈 등 2005)와는 거의 일치하고 있으나, 기존의 계산 결과와 마찬가지로 실험값(유재훈 등 2005)과는 차이를 보이고 있다. 이는 수치계산에서 사용된 가정이 실제로 수행된 풍동실험과는 차이가 있었던 것이 아닌가 생각된다.

**Table 7** Location of center of effort (CE)

CE위치	Present Calculation	KRISO Calculation	Empirical Formula
길이방향위치	-321.6	-341.6	-130.9
높이방향위치	3428.5	3592.9	3312.7
CE: Location based on Main Sail Tag Coordinates positive to stern, to top. (unit: mm)			

**3.4 풍력 중심점의 계산**

세일 주위의 유동계산 조건 중 실제 요트의 세일 형상과 가장 비슷한 case 2의 풍력 중심점 (Center of Effort CE)을 수치계산 결과로부터 추정하고, 유재훈 등(2005)의 결과와 비교하였다.

수치계산의 결과는 KRISO의 계산 결과와 마찬가지로 Larsson and Eliasson(2000)의 세일 도심과 면적비를 이용한 CE의 추정결과와는 차이를 보이고 있으며, 길이방향으로는 선수 쪽, 높이 방향으로는 좀 더 위 방향에 위치함을 알 수 있다. 이는 세일에 작용하는 압력이 일정하다는 가정에서, 추정된 결과와는 달리 세일면에서의 압력분포가 세일의 캠버와 집세일과 메인세일간의 간섭효과에 의해서 많이 달라지기 때문에 단순한 면적비를 이용한 CE의 추정은 실제와는 차이를 보일 수 있다는 사실을 보여주고 있는 것이다.

**4. 결론**

세일링 요트의 설계기술 개발에 CFD의 활용도를 확인하기 위해 두 개의 세일로 이루어진 30피트급 세일링 요트의 세일 주위 난류유동 해석을 수행하였다. 격자계의 생성과 유동해석을 위하여 Gridgen과 Fluent package를 각각 사용하였다.

먼저 격자계의 분포 및 난류 모형에 대한 영향을 알아보기 위해 세 가지의 격자 위치에 대한 수치계산 결과를 살펴보았으며, 비점성 및 층류 유동과 6개의 난류 모형을 적용한 결과를 비교하였다. 비점성과 층류 유동을 제외하면, 난류 모형을 도입한 계산 결과는 큰 차이를 보이지 않았다.

집세일의 각도 및 세일간의 간격에 따른 영향을 살펴보기 위해 세 가지의 Jib angle에 대하여 수치계산을 수행하였으며, 이를 기존의 수치계산 및

실험값과 비교하였다. Jib angle의 변화는 곧 집세일에 유동각의 변화를 가져오기 때문에 집세일 주위의 압력 분포가 달라짐은 물론, 메인 세일이 집세일의 후류에 위치하므로 메인 세일에 입사되는 유동각 또한 변화하여 메인 세일의 압력 분포도 많이 달라짐을 알 수 있었다. 본 계산 결과는 기존의 다른 계산과는 비슷한 값을 주고 있으나, 실험값과는 상당한 차이를 보이고 있었다. 또한 유동해석을 통하여 얻어진 압력 중심점을 면적 중심을 이용한 풍압중심 추정값과 비교하여 그 차이를 명시하였다.

**후 기**

본 연구는 목포대학교 BK21사업과 학술진흥재단의 지원(R05-2004-000-11629-0)을 받았음을 밝힙니다. 그리고 풍동시험 및 수치계산 결과를 제공하여주신 KRISO 유재훈 박사께 감사드립니다.

**참 고 문 헌**

- 유재훈, 박일룡, 김진, 안해성, 반석호, 이평국, 2005, “요트의 Main세일과 Jib세일 사이의 간섭 효과에 대한 수치해석,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 1호, pp. 34-42.
- 유재훈, 안해성, 2005, “30피트급 요트의 유체력에 대한 실험적 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 3호, pp. 233-240.
- 이평국, 김형태, 유재훈, 2006, “풍동 실험시 요트 세일 공력에 미치는 차폐효과에 대한 수치해석,” 대한조선학회 논문집, 제 43권, 제 4호, pp. 431-439.
- Fluent Inc., 2001, Fluent manual.
- Larsson, L. and Eliasson, R.E.2000, Principles of Yacht Design, International Marine of McGraw Hill.
- Pointwise Inc., 1997, Gridgen manual.
- Wilcox, D.C., 1993, Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries.



< 지 혜 련 > < 김 우 전 > < 박 종 환 >