

## 30ft급 요트 선체 주위의 점성유동 해석

지혜련\*, 김우전†\*, 박종환\*

목포대학교 기계·선박해양공학부 선박해양시스템전공\*

Viscous Flow Calculation around a 30 FT-class Sailing Yacht Hull

Hye-Ryoun Chi\*, Wu-Joan Kim†\* and Jong-Hwan Park\*

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

### Abstract

Turbulent flows around a sailing yacht hull were calculated using CFD technique. Grid system was generated by using Gridgen package and Fluent package was used to calculate flows around a 30ft-class yacht hull designed by MOERI. The drafts at starboard and port sides of a yacht, when the hull was heeled, were determined by adjusting the same displacement in the generated grid system. Pressure distribution on the sailing yacht hull was obtained and the changes of drag and side force by heel and leeway variation were shown. The flow calculations have been carried out both with and without free surface, and keel and rudder were included for both cases. It was found that the calculated results with free surface gives better agreement with experiments than those without free surface, although there are still a room for the improvement in correct prediction of forces.

※ Keywords: Sailing yacht(세일링 요트), CFD(계산유체역학), Grid generation(격자계 생성), Resistance(저항), Side force(횡력), Leeway(사향각), Heel(횡경사)

### 1. 서언

해양레저의 꽃이라고 할 수 있는 세일링 요트에 대한 유체동력학적인 해석은 대형 화물선에 비해 복잡하다. 우선 요트의 선체가 날개 형상인 킬을 가지고 있으며, 정상적인 운항에도 사향각(leeway angle)을 가지고 있어 유동장이 비대칭적이다.

또한 세일이 바람을 받게 되면 횡경사(heel)가 발생하는데, 부력에 의한 복원 모멘트와 세일과 킬에 의한 횡경사 모멘트가 밸런스를 이루는 각도까지 횡경사가 일어나게 된다(정종석 2003, Norman and Maynard 2001, Steve and Doug 1998). 이러한 사향각과 횡경사는 일반 화물선의 저항문제 해결을 위한 유동장 해석 기법과는 달리 선체, 킬, 타 등을 포함한 복잡한 형태에서 발생하는 비대칭적인 유동장을 동시에 해석해야 하는 어려움을 수반하게 한다. 그리고 자유수면을 고려하게 된다면

일반 조파문제와는 달리 선체를 따라 수면의 상승과 하강이 심하게 나타나는 등, 통상의 CFD 기법의 적용과는 차원이 다른 복잡한 과정을 통하여야 한다.

본 연구에서는 2005년 MOERI(전 KRISO)에서 개발한 30 ft급의 슬루프형 요트(유재훈과 안해성 2005a)를 그 대상으로 하였으며, 선체와 타 그리고 킬을 포함한 요트 주위의 점성유동을 해석하는 과정을 수행하였다. 모형시험 상황의 동일 배수량 조건을 만족시키기 위해 각 조건에 따른 좌·우현 흘수길이의 변화도 함께 결정하였다. 요트의 특성상 횡경사와 사향각이 동시에 존재하게 되므로 이에 따른 선체와 타 그리고 킬을 포함한 선체 표면에서의 압력 분포를 계산하였다. 자유수면을 고려한 경우와 대칭면으로 가정한 경우의 유체력이 달라지므로 각각 힘의 차이와 원인에 대해 알아보았다. 이를 통하여 세일링 요트의 세일 및 선체 주위의 유동을 동시에 계산하여 밸런스를 추정할 수 있는 기초로 삼고자 하였다.

2. 계산 조건

2.1 선체 형상 정의

MOERI(전 KRISO)에서 개발한 요트의 선형은 Table 1과 Fig. 1 에 보인 바와 같으며, 모형시험을 위해 MOERI에서 사용한 조건은 Table 2에 정리하였다. 모형시험 시 배수량을 일정하게 한 횡경사 조건을 사용하였으므로 선체표면 격자계를 바탕으로 격자계로 이루어진 선체의 배수량이 모

형시험 조건과 동일한 배수량을 가지도록 각 횡경사 조건에 따른 좌·우현의 새로운 흘수를 결정하였다. 그로 인해 계산 되어지는 침수표면적을 Table 3에 정리 하였다. 그리고 수치해석을 위한 좌표계로 Fig. 2에 보인 바와 같이 선미를 향하는 유동 방향을 x축, 우현 방향을 y축, 그리고 수직 상방향을 z축으로 선정하였다.

모형선을 이용한 MOERI(전 KRISO)의 수조시험(안해성과 유재훈 2005b)에서는 횡경사가 없는 조건에서 배수량을 일치 시킨 후 횡경사를 강제할

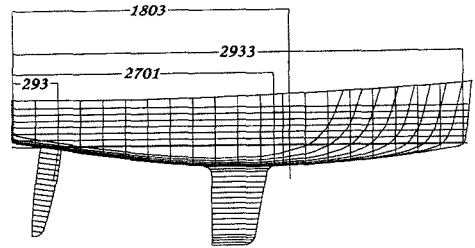


Fig. 1 Geometry of model yacht

Table 2 Conditions of model yacht

	Value	Definition
Model Scale	3.0	Ls/Lm
Model Length	3.047m	(Loa)m
Heel Variation	with keel & rudder	Vs = 6.5 kts Leeway = 3.0 deg.
Leeway Variation	with keel & rudder	Vs = 6.5 kts Heel = 20 deg.

Table 1 Principal particulars of the test yacht

	Unit	Definition	Value
Loa	m	Length Overall	9.142
Lwl	m	Waterline Length	8.245
B	m	Beam(Max)	3.024
Tc	m	Draft w/o Keel	0.400
T	m	Draft with Keel	1.900
▽	m <sup>3</sup>	Displacement	3.298
Wetted Surface Area	m <sup>2</sup>	Hull	15.60
	m <sup>2</sup>	Keel	2.84
	m <sup>2</sup>	Rudder	1.18

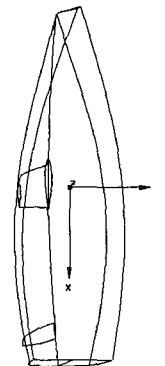


Fig. 2 Coordinates of model yacht

**Table 3** Wetted surface & Ts, Tp at various heel angles of model yacht

Heel	Wetted Surface [m <sup>2</sup> ]	Ts [cm]	Tp [cm]
0 deg.	2.1501	13	13
10 deg.	2.0911	19.706	6.148
20 deg.	2.0669	26.577	2.094
30 deg.	1.9637	29.126	0.03

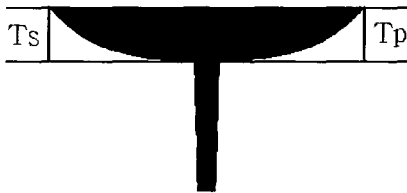


Fig. 3 Hull shape and draft with heel 0 deg.

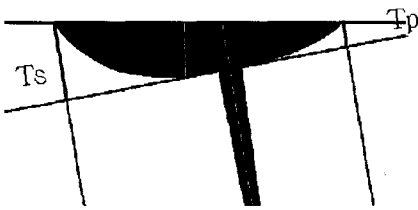


Fig. 4 Hull shape and draft with heel 10 deg.

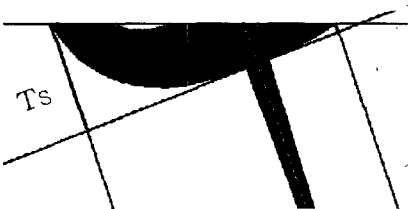


Fig. 5 Hull shape and draft with heel 20 deg.

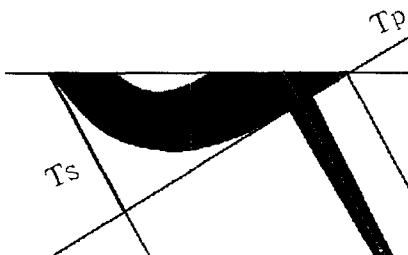


Fig. 6 Hull shape and draft with heel 30 deg.

수 있는 기구를 사용하여 동일 배수량 기준으로 시험을 수행하였다. 하지만 수치계산에서는 출수를 기준으로 초기 수면을 결정하여야 하기 때문에 따로 작업을 수행해야 한다. 본 연구에서 사용한 방법은 선체 표면에 격자계를 생성하여 초기 횡경사가 없는 경우의 배수량을 기준으로 삼아 격자계를 회전시켜 횡경사를 주고 그 상태에서 출수를 잘라가며 초기 상태와 같은 배수량을 가지는 횡경사가 있는 경우의 출수를 결정하였다. 이러한 과정을 통하여 실제 횡경사가 있는 경우의 출수 및 침수표면적 등을 산정하여 수치 계산에 활용할 수 있었다. Table 3에서 우현과 좌현에서의 출수를 선체 중심선 방향을 따라 선체 바닥면에서의 높이로 정의하였으며, 각각 Ts, Tp로 표시하였다. Fig. 3~6은 각각 횡경사 0, 10, 20, 30도에 대하여 얻어진 정수 상태의 선체 모양을 도시하고 있다. 이러한 방법은 실제 요트 설계에서도 횡경사가 있는 경우의 선체 조건을 평가해 볼 수 있는 방법으로 제안 될 수 있겠다.

2.2 계산 조건 및 가정

킬과 타를 포함한 선체 주위의 유동장 해석을 위해 Gridgen을 사용하여 1,100,000개 정도의 격자를 생성하였다. 생성된 격자는 Fig. 7과 같다. 또한 수치 계산의 결과표시를 위한 유체력의 방향은 Fig. 8 에 나타내었다.

Froude의 대응법칙에 따른 모형선의 예인속도

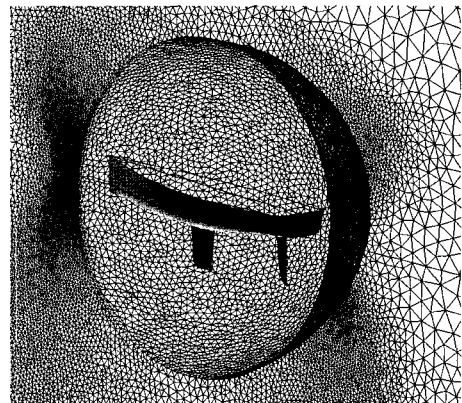


Fig. 7 Generated grids around a yacht hull

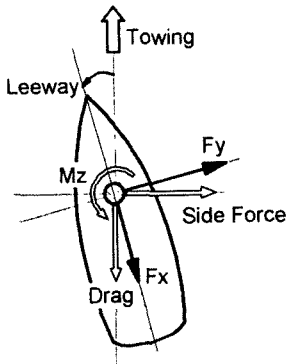


Fig. 8 Directions of forces

는 1.93m/s이였으며, 선체 전장을 기준으로 한 Reynolds 수는  $5.86 \times 10^6$  에 해당된다. 유동계산은 Fluent package를 사용하여 수행하였으며, 먼저 자유수면을 대칭면으로 간주한 경우에 대하여 횡경사와 사향각에 따른 선체 및 킬 등 부가물 표면에서의 압력을 추정하였다. 그리고 자유수면에서의 선체를 따라 발생하는 수면의 상승과 하강을 포함한 경우에 대하여 수치계산을 수행하여 그 결과를 같이 대칭면으로 간주한 경우와 함께 비교하였다. Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로 하여 난류모델로는 공학적으로 가장 널리 사용되고 있는 Standard k- $\epsilon$  난류 모형과 벽함수를 사용하였다. 수치계산 결과의 검증과 계산 결과의 확인을 위하여 MOERI에서 이미 발표한 바 있는 모형시험의 결과(유재훈과 안해성 2005b)와 비교하였다.

### 3. 수치계산 결과

#### 3.1 횡경사(Heel)와 사향각(Leeway)에 의한 선체 및 부가물의 압력 변화

세일링 요트는 세일에 작용하는 풍력이 추력뿐만 아니라 횡방향의 힘을 발생시키고, 이를 선체, 킬, 그리고 타에서 그에 상응하는 반대 방향의 횡력을 발생시켜 균형을 유지한다. 이를 위해 사향을 하게 되고, 세일과 수면 하의 선체, 킬, 그리고 타에 작용하는 횡방향의 힘들이 짝힘으로 작용하여 횡경사 모멘트로 작용한다. 이로 인해 발생하



Fig. 9 Lifting body of sailing yacht hull

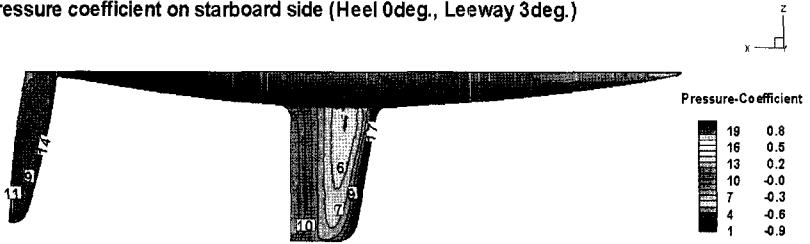
횡경사에 의한 선체의 복원 모멘트가 유체동력학적인 횡경사 모멘트와 균형을 이루는 각도까지 횡경사가 나타나게 된다. 선체의 형상이 대칭이라고 하더라도 횡경사가 발생하면 Fig. 9 에서 보듯 수면아래의 모양은 비대칭이 된다. 횡경사가 커질수록 그 비대칭성이 뚜렷해져 선체중심선 좌우의 유동현상이 서로 다르게 되고 선체는 수중에서 저항뿐만 아니라 양력을 받게 된다. 이는 선체에 작용하는 유체력이 횡경사가 없는 경우와는 달라지며, 특히 킬과 타에 입사되는 유동장을 변화시키는 역할을 하게 된다.

Fig. 10과 11은 사향각이 3도이며 횡경사가 각각 0도와 30도의 경우에 대하여 선체와 부가물에 작용하는 압력분포를 나타내었다. 횡경사가 발생한 경우 선체중 수면아래에 위치하는 부분이 달라질 뿐만 아니라 유동장에서도 변화가 생긴다. 킬에서의 압력 분포 또한 선체를 따라 흐르는 유동장의 변화로 인해 킬에 유입되는 유동의 각도에 미세한 변화를 야기 시킬 것으로 짐작된다.

그리고 수면아래에 잠기는 타의 부분이 횡경사로 인하여 줄어들게 되므로 사향각때문에 발생하는 타 전체의 유체력에도 변화가 발생한다.

앞에서 설명한 바와 같이 세일링 요트는 운항 중의 밸런스를 위해 사향각을 가지게 되는데, 이로 인해 선체는 물론, 킬과 타 표면의 좌우 압력이 달라져서 발생하는 양력이 횡방향의 균형을 위한 힘으로 작용한다(Larsson and Eliasson 2000). 본 연구에서 채택한 30 피트급 요트는 설계 횡경사 각도가 20도를 기준으로 하고 있기 때문에 횡경사를 20도로 고정 시킨 뒤 사향각만을 0, 1, 2, 3도로 변화시켜 생성되는 압력 분포를 Fig.12~15에 걸쳐 나타내었다. 압력 분포의 특성이 가장 많이 나타나 있는 킬의 경우를 살펴보았을 때 사향각에 따라 압력이 높은 부분과 낮은 부분의 영역

Pressure coefficient on starboard side (Heel 0deg., Leeway 3deg.)



Pressure coefficient on port side (Heel 0deg., Leeway 3deg.)

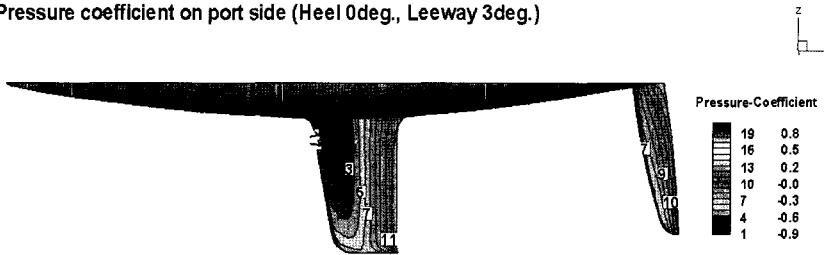
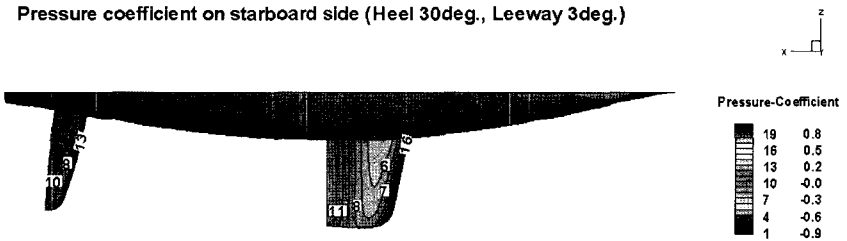


Fig. 10 Cp counters (Heel: 0 deg., Leeway: 3 deg.)

Pressure coefficient on starboard side (Heel 30deg., Leeway 3deg.)



Pressure coefficient on port side (Heel 30deg., Leeway 3deg.)

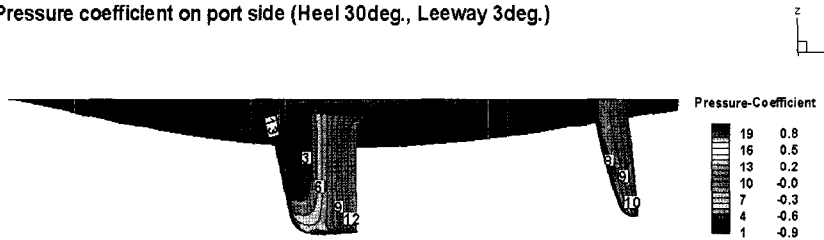


Fig. 11 Cp counters(Heel: 30 deg., Leeway: 3 deg.)

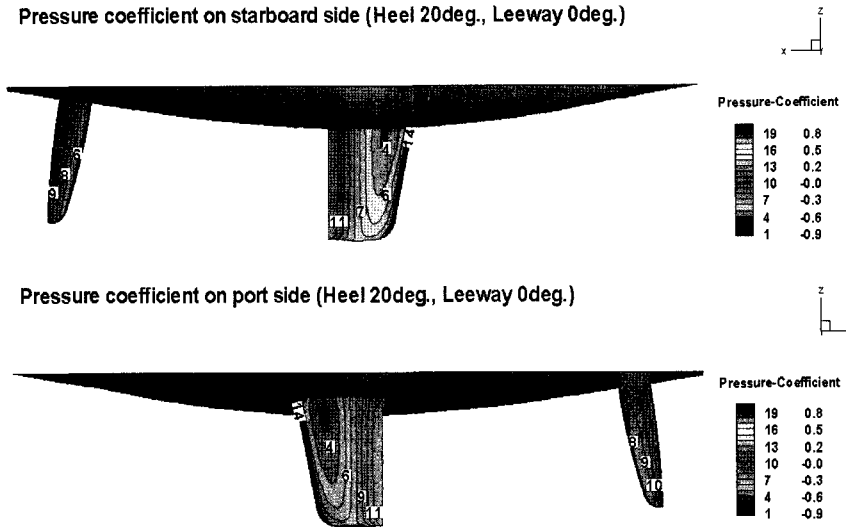


Fig. 12 Cp counters(Heel: 20 deg., Leeway: 0 deg.)

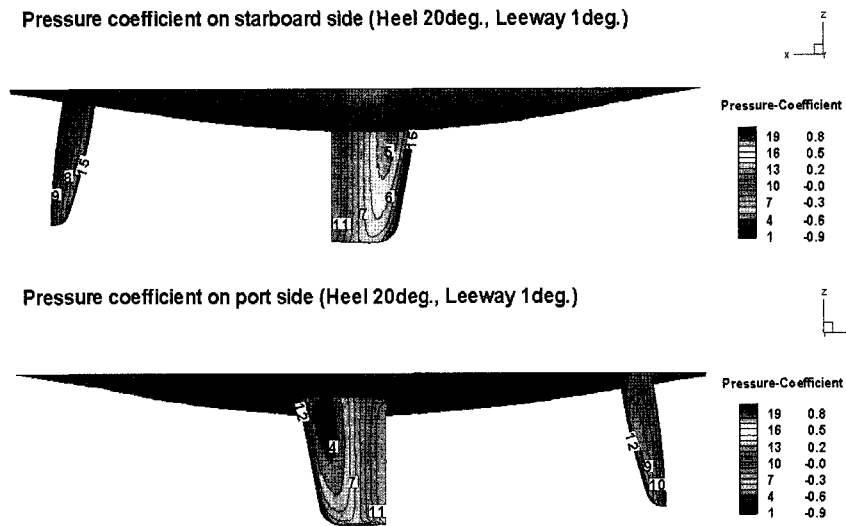


Fig. 13 Cp counters(Heel: 20 deg., Leeway: 1 deg.)

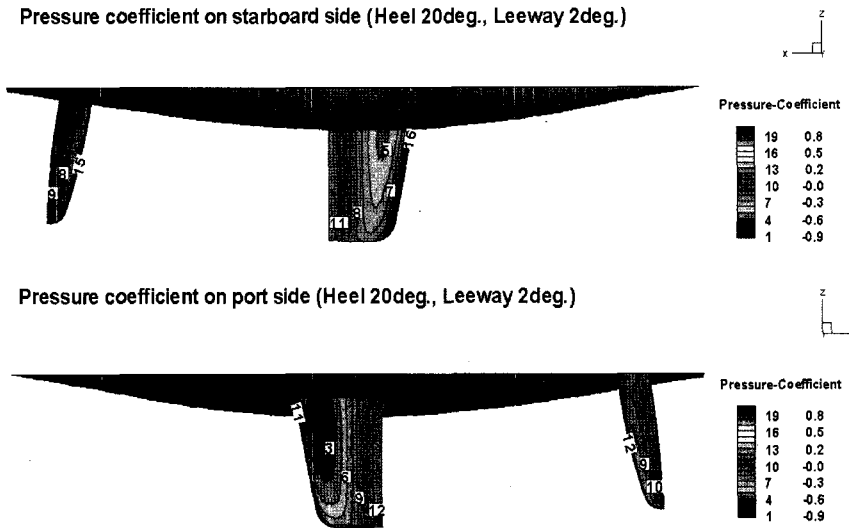


Fig. 14 Cp counters(Heel: 20 deg., Leeway: 2 deg.)

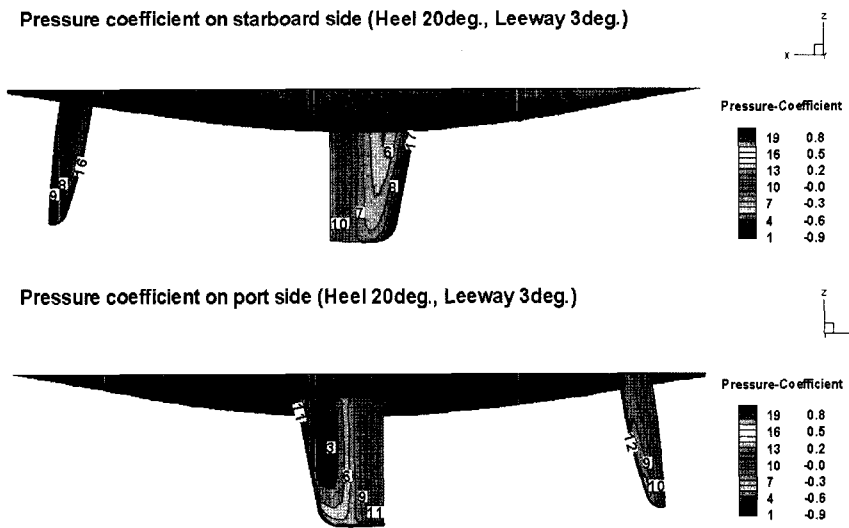


Fig. 15 Cp counters(Heel: 20 deg., Leeway: 3 deg.)

이 달라진다는 것을 알 수 있으며 이러한 압력의 차로 인해 사향각에 따른 유체력이 달라진다고 하겠다.

3.2 자유수면 효과를 포함한 유체력 변화

실제 세일링 요트의 유동해석을 위해서는 자유수면을 대칭면으로 생각하지 않고, 선체 표면에서 발생하는 수면 상승과 하강 등을 고려해야한다. 또한 모형시험 결과와의 직접 비교를 위해서도 자유수면에서 발생하는 파형 등에 대한 정확한 예측이 필요하다. 하지만 요트와 같이 선체, 킬, 그리고 타 등을 포함한 채, 자유수면에서 발생하는 정확한 파형을 예측 하는 일은 대단히 어려운 작업이다. 통상적으로 자유수면을 포함한 계산의 경우 수치계산 시간이 5배 이상 소요되며, 격자계 또한 정확한 파형의 예측을 위해서는 대단히 많이 필요하기 때문이다.

본 연구에서는 선체에서 발생하는 조파현상을 정확히 묘사하지는 못하였지만, 선체표면 근처에서의 수면의 상승 및 하강 등을 고려하여 유체력을 평가하기 위해 Fluent package에서 제공하는 VOF 방법을 사용하여 자유수면을 포함한 유동계산을 수행하였다. 비록 자유수면에서 발생한 파형은 격자계의 부족과 계산시간 등의 한계로 인해 예측이 어려웠지만, 난류 유동장 계산을 위해 선체와 부가물 주위에는 비교적 많은 격자가 분포되어 있기 때문에 선체 표면 근처에서의 자유수면의 상승과 하강 등에 대한 추정은 어느 정도 타당성이 있으리라 짐작된다.

Fig. 16~19는 본 연구에서 대상으로 선정한 30피트급 세일링 요트의 설계 사향각인 3도의 경우에 대하여 횡경사 각도가 0, 10, 20, 30도로 변하면서 발생하는 수면의 변화를 초기 정수 상태의 수면과 비교하였다. 횡경사가 없는 경우에는 선체 중앙에서는 수면이 약간 하강하며, 선미 쪽으로 수면의 상승이 뚜렷이 발생하는 것으로 추정된다. 횡경사가 있는 경우에는 수면과 선체가 만나는 각도가 좌현과 우현이 크게 달라지므로 그 차이가 두드러진다. 본 연구에서는 우현으로 횡경사가 생기는 경우를 묘사하였는데, 횡경사가 생기면서 횡경사의 반대쪽에 수면의 하강이 뚜렷이 나타

나고 있다. 이러한 수면의 상승과 하강은 작용하는 유체력에도 뚜렷한 차이를 보이고 있다.

수면을 대칭면으로 생각했을 때는 횡경사가 10도인 경우에 이미 타의 일부가 수면위로 노출되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 사향각으로 인해 발생하는 타의 횡력의 감소로 나타난다. 하지만 자유수면을 고려한 경우에는 횡경사 각도가 30도에 이른 경우에도 타가 수면 아래에 있으므로 사향각으로 인한 횡력을 충분히 발생시키고 있음을 알 수 있다. 이러한 자유수면에 의한 차이는 다음에 설명한 선체 및 부가물의 전체 유체력 변화 경향의 차이를 설명하는 단초가 된다고 하겠다. Fig. 20과 21에는 자유수면을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 수치계산으로 얻어진 저항(Drag)과 횡력(Side force)을 모형시험의 결과와 비교하였다.

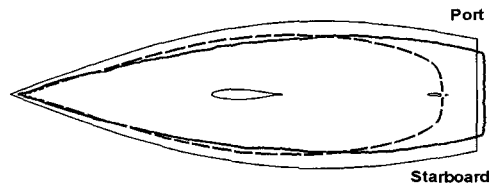


Fig. 16 Waterline shape(Heel: 0 deg., dashed: symmetry, solid: VOF)



Fig. 17 Waterline shape(Heel: 10 deg., dashed: symmetry, solid: VOF)

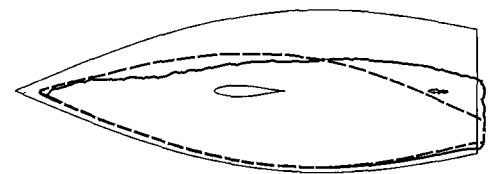


Fig. 18 Waterline shape(Heel: 20 deg., dashed: symmetry, solid: VOF)



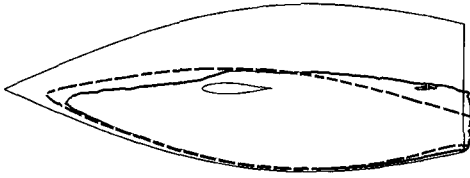


Fig. 19 Waterline shape(Heel: 30 deg., dashed: symmetry, solid: VOF)

먼저 Fig. 20에 보인 설계 사향각 3도에 대하여 횡경사 각도의 변화에 따른 결과를 살펴보면, 횡경사가 없는 경우에는 수치계산의 결과가 저항의 경우 모형시험의 값과 좋은 일치를 보임을 알 수 있다. 자유수면의 효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우가 거의 비슷한 값을 주고 있다. 횡경사가 있는 경우의 비교에서는 모형시험에서 횡경사 20도에서 가장 작은 저항 값을 보이고 있는데, 자유수면을 대칭면으로 계산 경우에는 오히려 저항이 크게 증가한 것으로 예측되었다. 하지만 자유수면을 고려하면 값은 비록 크게 예측 되었지만 저항 값의 변화 추이는 정확하게 추정하고 있는 것을 알 수 있다. 횡방향의 힘 역시 자유수면을 대칭면으로 계산한 경우에는 그 경향을 반대로 추정하고 있으나, 자유수면을 고려한 경우에는 그 경향을 잘 따라가고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 21에서 보이고 있는 설계 횡경사 각도 20도에 대한 사향각 변화에 따른 저항과 횡력의 결과에서도 자유수면을 고려한 경우가 대칭면으로 계산한 경우에 비하여 그 추정값의 경향이 훨씬 정확한 것을 알 수 있다. 하지만 자유수면을 고려한 경우에도 수치계산 결과가 실험값과 정량적인 차이를 보이고 있다.

저항과 횡방향 힘을 정확하게 추정하기 위해서는 첫 번째로 킬과 타로 구성된 두 개의 양력면에 대한 수치계산의 정확도가 보장되어야 하는데, 격자계의 수와 분포가 부가물 표면의 급격한 압력변화를 모사하기에 불충분했던 것으로 사료된다. 두 번째로는 자유수면에서 발생하는 스프레이 등을 포함한 선체 주위의 수면변화 및 파계에 대한 정확한 재현이 필요한데 현재의 격자계의 수로는 이에 대한 정확도를 담보하기에는 무리가 있었던 것으로 판단된다. 자유수면에서 발생하는 파계를 추

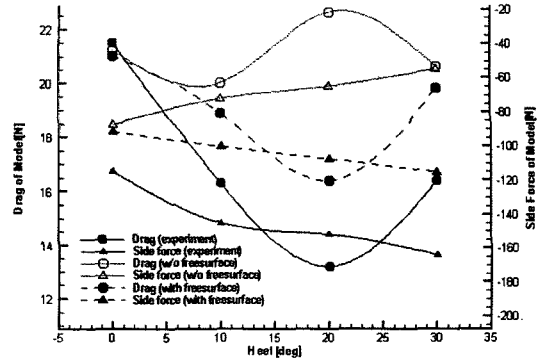


Fig. 20 Force change by Heel angle(Model scale,  $V_m=1.93\text{m/s}$ , Leeway: 3 deg.)

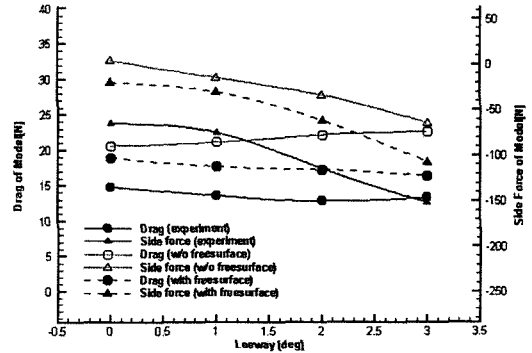


Fig. 21 Force change by Leeway angle (Model scale,  $V_m=1.93\text{m/s}$ , Heel: 20 deg.)

정하게 되면, 현재의 계산 결과보다 개선된 결과를 제공할 수 있으리라 생각되나, 선체와 부가물 주위의 점성 유동장 해석과 자유수면의 파계 추정을 동시에 하기 위해서는 보다 체계적인 대용량 수치계산 기반 구축이 선행되어야 한다고 판단된다.

#### 4. 결론

킬과 타를 포함한 요트 선체 주위의 유동해석을 수행하였다. 격자계의 생성과 난류 유동장 해석을 위하여 Gridgen과 Fluent package를 각각 사용하였다. 먼저 모형시험과 같은 조건을 만들기 위해 횡경사가 있는 경우에 동일 배수량을 가지도록 생

성된 격자계를 활용하여 좌우현의 흘수 길이를 결정하였다. 설계 사항각인 3도에 대하여 횡경사 각도를 바꾸어 가며 선체와 부가물 표면에서의 압력 분포를 비교하였다. 그리고 설계 횡경사 20도에 대하여 사항각의 변화에 따른 압력 분포를 살펴보았다. 자유수면의 효과를 고려한 수치계산을 수행하여 작용하는 유체력을 모형시험의 결과와 비교하였는데, 자유수면을 대칭면으로 생각한 수치계산 결과가 모형시험의 결과와 경향이 다른데 반해 자유수면을 고려한 경우에는 그 경향이 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다. 하지만 수치계산 결과를 설계에 직접 활용하기 위해서는 킬 및 타 등 부가물에서 발생하는 양력의 정확한 예측을 위한 충분한 격자의 분포가 선행되어야 하며, 자유수면 파계의 모사를 위한 대용량 수치계산 기반이 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 목포대학교 BK21사업과 학술진흥재단의 지원(R05-2004-000-11629-0)을 받았음을 밝힙니다. 그리고 선형과 모형시험 결과를 제공하여주시는 MOERI 유재훈 박사께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 유재훈, 안해성, 2005a, “30피트급 요트의 선형개발 및 성능추정,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 1호, pp. 34-42.
- 유재훈, 안해성, 2005b, “30피트급 요트의 유체력에 대한 실험적 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 3호, pp. 233-240.
- 정종석, 2003, 세일링 요트, 중앙서림
- Larsson, L. and Eliasson, R.E., 2000, Principles of Yacht Design, International Marine of McGraw\_Hill.
- Norman, S. and Maynard, B., 2001, Elements of Yacht Design, Sheridan House Inc.
- Steve K. and Doug, H., 1998, Yacht Design Explained, Norton & Co Inc.



< 지 혜 련 >



< 김 우 전 >



< 박 종 환 >