

요트 킬의 형상에 따른 유체력 및 유동특성 연구

최기철*, 현범수†*

한국해양대학교 해양시스템공학부*

Hydrodynamic Forces and Flow Characteristics for Three-Different Types of Yacht Keel

Ki-Chul Choi* and Beom-Soo Hyun †*

Division of Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University *

Abstract

Yacht is operated by wind-driven thrust on the sail, but also experiencing the side force. Thus the keel attached on the bottom of main hull prevents it from flowing sideway. Since the keel affects the stability and thrust of yacht, its selection is one of the most important factor in design. In the present paper the correlation between yacht hull and keel was investigated, through comparison of forces measured at various combinations of heeling and leeway angles with and without keel. Keel-only test was also performed to find out the drag and lift characteristics of keel itself. Finally three different types of keel, i.e. fin keel, bulb keel and winglet keel were tested to compare their advantages and drawbacks.

※ Keywords: Sailing yacht(요트), Keel(용골), Leeway(β , 사향각), Heel angle(ϕ , 횡경사각), Experiment(실험), Appendage(부가물), Hydrodynamic forces(유체력)

1. 서론

세일링 요트(sailing yacht)는 세일(Sail)에 작용하는 풍력을 동력으로 추력을 발생시키므로 이에 반하는 반작용으로 선체가 횡경사(Heeling)와 사향(Leeway) 상태에서 운항되게 된다. 따라서 세일링 요트의 선형시험은 직립직진 상태에서 실시하는 일반선박과 다른 기법이 적용되어야 한다. 특히 세

일에 가해지는 횡방향의 힘(Side force)에 기인한 횡류를 방지하기 위하여 선체하부에 킬(Keel)이 부착되는데, 이는 횡류를 방지할 뿐 아니라, 킬 자체가 밸러스트가 되어 안정성과 복원성을 증가시키는 역할을 하는 주요 부가물이다. 이와 같이 킬은 안정성 뿐 만 아니라, 추력에도 상당한 영향을 미치기 때문에 적절한 킬의 선택은 매우 중요한 설계변수라 할 수 있다.

과거의 연구를 살펴보면, Greeley and Cross-Whiter(1989)는 킬의 유체역학적인 거동에 영향을 주는 물리적인 변수를 고려하여 다양한 킬의

접수일: 2006년 1월 5일, 승인일: 2006년 5월 12일

† 교신저자: bshyun@mail.hhu.ac.kr, 051-410-4308

형상에 대해 킬의 성능을 수치해석과 실험을 통해 비교하였다. Flay and McMillan(1993)은 풍동과 예인수조에서의 실험을 통해 다양한 킬의 종횡비와 횡경사각에 따른 양력과 항력을 계측하고, 이를 기존의 이론식들과 비교하여 분석한 바 있다. 국내 연구는 극히 최근에야 몇몇 기본적인 연구결과가 발표되는 등 선진 외국에 비해 매우 부족한 실정이다. 그중 유재훈 등(2004)은 국내 보급용 30피트급 요트의 개발을 위하여 선형설계에서부터 각종 부가물의 설계 및 기본적인 성능추정까지를 종합적으로 실시하였으며, 유재훈 등(2005)은 두 세일 간의 간섭효과를 중첩의 영향과 두 세일 간의 간격에 대한 영향으로 나누어서 살펴보았다. 심상목(2005)은 길이 1m인 요트 모형을 이용하여 항주자세를 고려한 요트의 선형시험기법을 체계적으로 연구하였다.

본 연구에서는 심상목 (2005)이 사용했던 요트 모형을 대상으로 하여 킬이 부착된 경우와 부착되지 않은 경우의 횡경사 사항시험을 실시하여 킬의 영향을 살펴보았다. 또한 킬 단독실험을 수행하여 킬이 항주상태에 따라 선체에 얼마나 영향을 미치는지를 조사하였고, 직립상태에서의 횡경사-사항 시험과 킬 단독 실험의 횡방향의 힘을 비교하여 킬과 선체간의 상관관계를 알아보았다. 이를 통해 선체와 킬 간의 상호작용이 그리 크지 않음을 알 수 있었기 때문에, 이후로는 킬 만을 단독으로 형상을 변화시키면서 유체력 및 유동장을 비교하여 요트 킬의 유체공학적 특성을 조사 분석하였다.

2. 모형선, 킬 및 실험장치

본 연구에 사용한 모형선은 31피트급 크루저 세일링 요트의 모형으로써 박종현 등(2004)이 우리나라 전통 돛배의 선형을 기초로 개발한 선형이다. Table 1은 모형선의 주요제원이며, Fig. 1은 대상 모형선의 사진이다.

한편 Fig. 2은 이번 실험에서 사용된 3가지의 킬의 형상이다. Fig.1의 기존 모형선에 부착된 (a) 핀 킬(Fin Keel)을 기본형으로 하고, (b) 벌브 킬(Bulb Keel)은 1988년 아메리카스 컵에 출전한 '뉴질랜드'에 부착된 킬 형상을 참고하여 핀 킬 기

Table 1 Principal particulars of model ship

구분	Model ship	
L.W.L.	1m	
Breadth	0.428m	
Depth (Max)	0.172m	
Draft	from Baseline	0.054m
	from Keel Bottom	0.213m
Disp. (Δ)	without Appendage	0.008075m ³
	with Appendage	0.00848m ³
wetted surface	without Appendage	0.2684m ²
	with Appendage	0.33135m ²
KG	from Baseline	0.062m

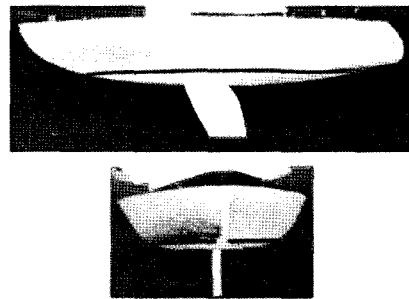
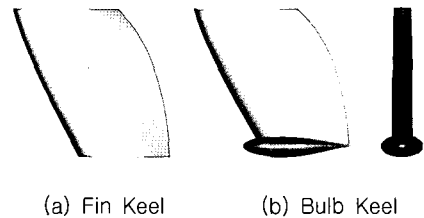


Fig. 1 Model ship (박종현 2005)



(a) Fin Keel (b) Bulb Keel



(c) Winglet Keel

Fig. 2 Three different keel types

본형에 부착한 경우이며, (c) 윙렛 킬(Winglet Keel)은 1983년 아메리카스 컵에 출전한 Australia II를 참고하여 부착한 것이다. 윙렛과 벌브는 모두 목재로 제작하였으며, 자세한 사양은 한국해양대

학교 해양시스템공학부 선박유체역학연구실 홈페이지(ocean-dos.hhu.ac.kr/laboratory/06-1.html)에 수록하였다.

실험은 한국해양대학교 회류수조에서 수행하였다. 회류수조 관측부의 크기는 길이 5m, 폭 1.8m, 높이 1.2m이며, 발생유속의 범위는 0.1~2.0m/sec이다. 횡경사 및 사향 중의 요트에 작용하는 유체력은 자체 보유한 사향시험기를 이용하였으며, 킬 단독시험 역시 보유중인 타단독시험기를 이용하였다. 끝으로 사향 중 킬 주위의 유동장을 해석하기 위하여 6W Ar-Ion 레이저, Fiber Optic Cable 및 원통형 렌즈가 부착된 Probe로 구성된 PIV 장치를 사용하여 킬의 후류 단면에서의 유동구조를 가시화하였다. PIV 해석용 입자는 50µm Vinyl Chloride Polymer를 사용하였다.

3. 선체와 킬의 상관관계 실험

3.1 실험조건

횡경사-사향시험

본 시험은 선체에 미치는 유체력을 측정하기 위하여 선체를 횡경사와 사향시키면서 횡방향의 힘과 요 (Yaw) 모멘트를 구하는 시험으로서, 사향시험기의 선수, 선미에서 계측되는 동유체력 Y_F , Y_A 로부터 식(1)과 같이 횡방향 힘과 모멘트를 구하게 된다.

$$\begin{aligned} Y &= Y_F + Y_A \\ M &= \ell \times (Y_F - Y_A) \end{aligned} \quad (1)$$

단, Y : 전체 횡방향의 힘, M : 요 모멘트
 ℓ : 선수(선미)의 동유체력 측정위치와 센터라인의 중심과의 거리

상기 Y , M 을 식(2)와 같이 무차원하여 횡방향 힘 계수 C_S 와 요 모멘트 계수 C_M 을 얻는다.

$$C_S = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho L d V^2}$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho L^2 d V^2} \quad (2)$$

단, L = 수선장, d = 흘수, V = 유속

사향각 β 는 직립($\phi=0^\circ$)일 경우는 좌우현으로 $0^\circ \sim 20^\circ$ 까지 5° 간격으로 실험을 수행하였다. 그리고 횡경사각 ϕ 이 10° 와 20° 일 때는 좌우현 대칭을 가정하여 좌현만을 횡경사 시켰고, 이 경우에는 우현으로만 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 로 사향시켜서 실험을 수행하였다. 본 실험에서의 좌표계는 Fig. 3과 같이 중심이 선체의 중심선에 존재하며, 선수방향으로 양의 x축을, 우현을 양의 y축으로 하는 오른손 선체고정좌표계를 사용하였다.

킬 단독시험

본 실험은 킬만을 따로 떼어내어 받음각 범위 $\beta = 0 \sim 35^\circ$ 에서 실험한 것으로서 킬의 사향과 실험조건은 Table 2와 같다.

여기서 Table 1에서 부가물이 있을 때와 없을 때의 침수표면적의 차이와 표 2의 킬의 침수표면적이 약 $0.019m^2$ 정도 차이가 있는데, 이는 Table1의 부가물에는 타의 침수표면적이 포함되어 있기 때문이다.

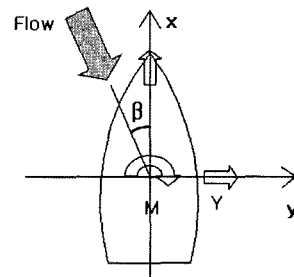


Fig. 3 Coordinate system

Table 2 Keel particulars and test conditions

Type of keel	Mean Chord	Span	Area	Re	Velocity
NACA 63A-010	0.141m	0.1623m	0.0229m ²	1.104×10^5	0.719m/s

그리고 킨의 받음각과 요트의 사항을 같은 기호로 표시한 것은 횡경사각이 없을 경우 이 둘은 물리적으로 같기 때문이었다. 이 실험에서 계측된 힘은 식 (3)의 Whicker-Fehlner의 이론식과 비교하기 위해 양력으로 환산하여 킨의 코드길이를 대표 길이로 무차원하였으며, 그중 0~20°까지의 결과를 서로 비교하였다. 이때 레이놀즈수는 1.104×10^5 인데, 레이놀즈수가 1×10^5 이상일 경우 척도효과가 무시할 만하다고 알려져 있다 (Okada 1958). 본 실험과 비교하기 위한 Whicker-Fehlner식은 반복 실험을 통해 얻어진 이론식(Lewis 1989)이다.

$$\left(\frac{\partial C_L}{\partial \beta}\right)_f = \frac{0.9 \times 2\pi \times a}{\cos \theta \sqrt{\frac{a^2}{\cos^4 \theta} + 4 + 1.8}} \quad (3)$$

여기서 a = 유효종횡비, θ = 후퇴각, β = 받음각

3.2 실험결과

횡경사-사항시험 결과

먼저 Fig. 4는 무차원 횡방향 힘 C_s 을 나타낸다. 킨이 선체에 부착된 경우와 부착되지 않은 경우 모두 횡경사각이 커질 때 횡방향의 힘이 다소 줄어드는 것을 알 수 있는데, 킨이 부착된 경우와 없는 경우를 비교할 때 횡경사각 별로 20% 정도까지 차이가 발생하였다. 반면 Fig. 5는 무차원 요모멘트 C_M 를 나타낸 것이다. 요모멘트는 횡경사각이 커질수록 더 커짐을 알 수 있고, 킨이 선체에 부착된 경우와 부착되지 않은 경우를 비교할 때 킨이 요모멘트에 미치는 영향은 지대한 것을 알 수 있다.

킨 단독시험 결과

Fig. 6은 킨 단독시험을 통하여 얻은 킨의 양력과 Whicker-Fehlner의 이론식을 비교한 것이다. 둘 사이에 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나 사항각이 커지면서 본 실험치가 다소 작아지

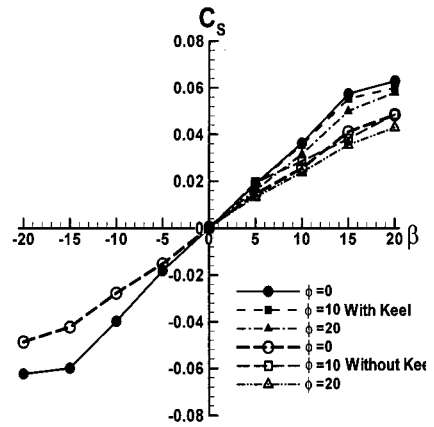


Fig. 4 Side forces with and without keel

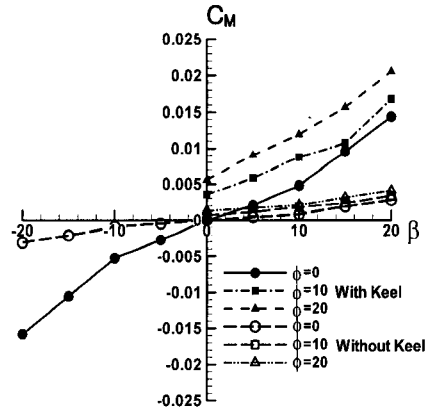


Fig. 5 Yaw moment with and without keel

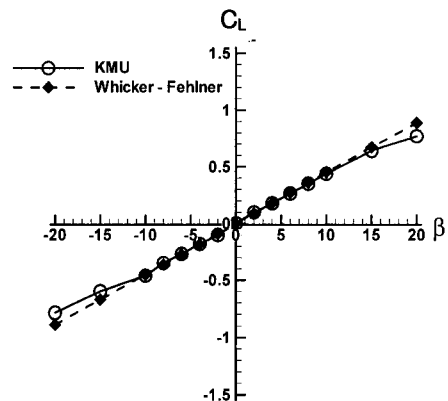


Fig. 6 Results of keel-only test

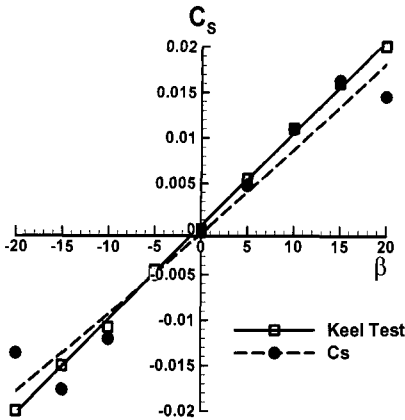


Fig. 7 Comparison of results between leeway test and keel-only test

는 경향을 보이는데, 이는 받음각 20도에서 이미 실속현상(Stall)의 발생이 시작하기 때문으로 여겨진다.

다음으로 Fig. 7은 요트의 횡경사-사향시험 결과와 킬 단독시험 결과를 비교한 그림이다. 즉, 요트가 직립상태일 때 킬이 선체에 부착되었을 경우의 C_s 에서 킬이 선체에 부착되지 않은 경우의 C_s 를 빼준다면 순수하게 킬 만에 의한 C_s 값이 얻어진다고 볼 수 있기 때문에 이 값을 킬 단독시험으로 구한 C_s 와 비교하여 보았다. 여기서 킬 단독시험에 의한 C_s 는 Fig. 6과 달리 양력이 아닌 킬의 직압력으로서 횡경사-사향시험에서의 C_s 와 힘의 작용 방향이 같다고 볼 수 있으며, 횡경사-사향시험과 비교하기 위해 모형선의 수선의 길이로 무차원화였다. 그림에서 보듯이 서로 잘 일치함을 알 수 있었고, 이에 따라 킬의 유체력 계측과 유동특성의 파악을 위해서는 선체 없이 킬만을 단독으로 조사하는 것도 무방하다 하겠다. 또한 이 실험을 통하여 사향시험과 킬 단독시험의 신뢰성도 간접적으로 검증할 수 있었다. 그러나 20°이상의 사향각에서는 차이가 있음을 볼 수 있는데, 이는 선체의 실속현상에 의한 복합적인 영향으로 여겨진다.

4. 킬의 형상에 따른 유동특성 비교

4.1 킬 단독시험을 통한 킬 형상별 비교

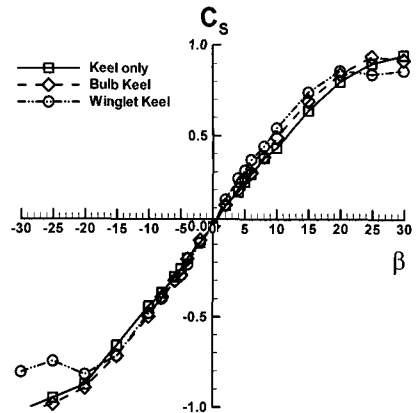
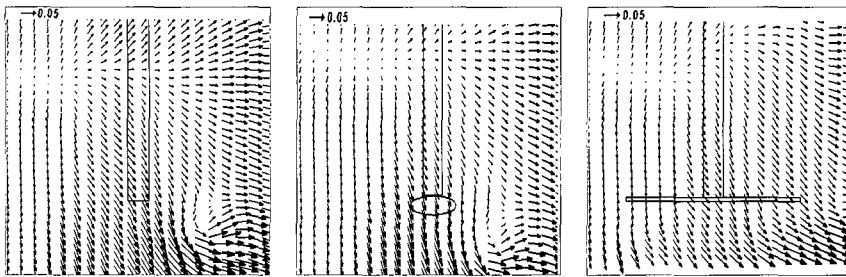


Fig. 8 Keel-only test results

여기서는 킬에 작용하는 C_s 를 계측하여 킬의 형상에 따른 유체력을 비교하였다. 실험은 Table 2의 실험조건과 동일하게 수행하였고, 킬의 형상은 Fig. 2와 같이 핀 킬, 핀 킬에 벌브가 부착되어진 벌브 킬, 그리고 윙렛을 부착한 윙렛 킬의 3종류였다. Fig. 8에서 보듯이 벌브 킬의 경우의 C_s 가 핀 킬에 비해 10%정도 증가하였고, 윙렛 킬은 10~15%정도 증가하였다. 또한 벌브 킬과 윙렛 킬을 비교할 때 사향각 20° 이하일 때는 윙렛 킬의 경우가 벌브 킬보다 C_s 가 다소 컸으나 20° 이상에서는 오히려 핀 킬보다 작게 계측되었다. 이는 윙렛 킬이 상대적으로 먼저 실속현상이 일어난 것이 아닌가 생각되나 이에 대한 자세한 조사가 이루어지지 못한 관계로 정확한 원인은 차후 과제로 미루고자 한다.

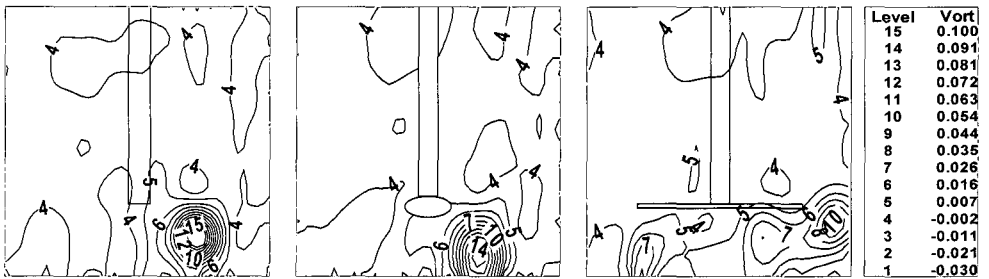
4.2. PIV 실험을 통한 Keel 형상별 비교

본 실험은 3가지 형상의 킬을 단독으로 실험하여 킬 후류에서의 유동장을 비교하였다. 실험은 보유하고 있는 PIV 장비의 한계로 인하여 설계속도가 아닌 $V=0.2\text{m/s}$ 에서 실험을 수행하였다. 킬의 평균 코드길이에 기초한 레이놀즈수는 28000이었다. 레이저 시트는 킬 끝 뒷날에서 킬 끝의 코드 길이만큼 후방 단면위치에 조사되었다. 이는 모형선에 킬이 부착되어 있다고 가정할 경우, 모형선의 10개 스테이션 중 킬 끝이 4번 스테이션에 위치하므로 레이저 시트의 단면은 3번 스테이션



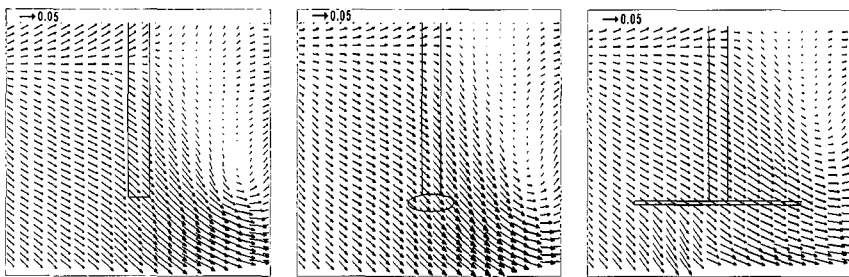
(a) Fin keel (b) Bulb keel (c) Winglet keel

Fig. 9 Velocity vectors ($\beta=10^\circ$)



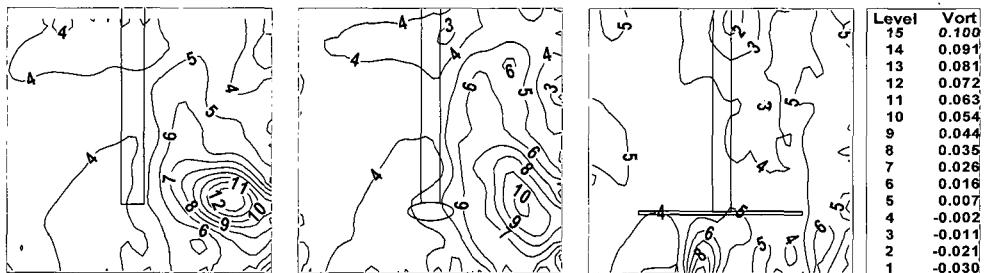
(a) Fin keel (b) Bulb keel (c) Winglet keel

Fig. 10 Vorticity distribution ($\beta=10^\circ$)



(a) Fin keel (b) Bulb keel (c) Winglet keel

Fig. 11 Velocity vectors ($\beta=20^\circ$)



(a) Fin keel (b) Bulb keel (c) Winglet keel

Fig. 12 Vorticity distribution ($\beta=20^\circ$)

에 조사되는 것으로 볼 수 있다. CCD 카메라는 아크릴 수밀통에 넣어 수중에서 레이저 조사단면을 직접 촬영을 하였다. 이 때 사용한 카메라 해상도는 640×480 pixels이고, $20 \times 15 \text{cm}^2$ 크기의 측정단면에서 유동장을 측정하였다. 그리고 킬의 상부면이 수면에서 30cm 떨어지도록 설치하여 실험하였으며, 킬 단독상태에서는 횡경사에 의한 유동의 변화가 없기 때문에 10° 와 20° 의 사향각 만을 고려하여 유동장을 측정하였다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 사향각이 10° 일 때 3가지 형상의 킬 후류에서의 횡단면 속도벡터와 와도분포이고, Fig. 11 과 Fig. 12 는 사향각이 20° 일 때 횡단면 속도벡터와 와도분포를 비교한 그림이다. 사향각 10° 와 20° 에서의 와도를 살펴보면 핀 킬과 벌브 킬은 큰 차이가 없지만, 이를 윈렛 킬과 비교해 보면 와도에서 큰 차이가 있음을 볼 수 있다. 이는 핀 킬과 벌브 킬은 킬 끝에서 Roll-up현상이 일어나는데 반하여 윈렛 킬은 이러한 현상이 억제되고 있다. 즉 윈렛 킬의 경우, 킬 단독시험 결과 사향각 20° 까지 횡방향 힘이 가장 크게 측정되고 있는 것이 이러한 Roll-up현상의 효과적인 조절에 기인하는 것으로 판단할 수 있을 것이다. 또한 벌브 킬의 효율을 높이기 위하여 킬 끝의 두께 방향으로 좀 더 크게 설계한다면 보다 큰 횡방향의 힘을 얻을 수 있으리라 여겨진다. 그러나 증가하는 면적만큼 항력이 증가할 것이므로 벌브의 크기나 형상 등에 의한 비교 연구를 통해 신중한 검토를 해야 할 필요가 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 킬의 형상에 따른 유체력과 유동특성을 연구하기 위하여 선체에 킬이 부착되어 있는 경우와 선체만 있는 경우의 횡경사-사향시험을 통해 얻어진 횡방향 힘의 차이와 킬 단독 시험을 통한 킬 만의 횡방향의 힘을 비교하였고, 그 결과 요트 선체와 킬의 상호작용은 무시할 만 한 것으로 파악되었다. 따라서 킬 만을 따로 분리하여 핀 킬과 벌브 킬, 윈렛 킬의 3가지 형상을 채택하여 모형시험을 실시하였다. 그 결과 사향각이 20° 이하일 경우는 횡방향의 힘의 경우 윈렛 킬이 핀 킬에 비

해 $10 \sim 15\%$ 증가하여 가장 우수하였으며, 벌브 킬의 경우 윈렛 킬과 전반적으로 비슷한 횡방향의 힘이 측정되었다. 그러나 벌브 킬은 킬 끝에서 핀 킬의 경우와 비슷하게 Roll-up 현상이 발생함을 PIV 실험으로 확인할 수 있었다. 벌브 킬에서 벌브의 역할이 자중에 의한 밸러스트 역할 뿐만 아니라, Roll-up 방지 역할도 함을 감안한다면 벌브 킬도 Roll-up현상을 억제할 수 있는 두께로 설계한다면 좀 더 효율적일 것으로 판단되었다. 그러나 이번 실험에서는 회류수조에서 나타나는 측벽효과나 수면경사 등에 대한 보정을 충분히 고려하지 않았고, 척도효과의 영향으로 인한 실선에서의 적용 또한 세밀한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다. 추후 사향시험의 측정정도 향상, 상대적으로 높은 유속에서 측정 가능한 PIV 시스템구축 등 실험 인프라가 개선된다면 보다 정확한 양항력 측정과 유동장 측정을 통한 레저보트 성능해석 및 설계연구가 가능해질 것으로 기대된다.

후 기

본 논문을 위해 요트 모형선의 도면을 비롯하여 많은 도움을 주신 부경대학교 김동준 교수님과 실험을 위해 요트 모형선과 비교자료를 제공하신 중소조선연구원의 심상목 박사님께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 박종현, 박근용, 김동준 2004, "세일링 요트 개발을 위한 20세기초 전통어선의 선형연구," 한국해양공학회지, 제 18권, 제 4호, pp. 71-76.
- 심상목, 2005, 항주자세를 고려한 세일링 요트의 선형시험 기법연구, 부경대학교 박사학위 논문, pp. 1-144.
- 유재훈, 반석호, 안해성, 김진, 김상현, 2004, "30 피트급 요트의 선형개발 및 성능추정," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 172-180.
- 유재훈, 박일룡, 김진, 안해성, 반석호, 이평국, 2005, "요트의 Main세일과 Jib세일 사이의 간섭효과에 대한 수치해석," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 1호, pp. 24-33.

- Flay, R.G.J. and McMillan, D.C., 1993, "A Wind Tunnel Investigation of Yacht Hydrodynamic Side Force and Drag," Journal of ship Research, Vol. 37, No. 4, pp. 331-341.
- Greeley, D.S. and Cross-Whiter, J.H., 1989, "Design and Hydrodynamic Performance of Sailboat Keels," Marine Technology, Vol. 26, No. 4, pp. 260-281.
- Lewis, E.V., 1989, Principles of Naval Architecture, Vol. III, 2nd Revision, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City.
- Okada, S., 1958, "On the Results of Open Test of Model Rudders(Hydrodynamical Research of Ship's Rudder - the Second Report)," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 103. pp. 91-98.



< 최 기 철 >



< 현 범 수 >