

요트 Keel의 유무에 따른 유체력 변화 연구

최기철 · 현범수

한국해양대학교 해양시스템공학부

Study on the Effect of Keel on Hydrodynamic Forces Acting on yacht

Ki-Chul Choi and Beom-Soo Hyun

Div. of Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea.

Abstract

Sailing yacht is not always operated in upright condition like general vessel, but is maneuvered with certain heeling and leeway angles. And the keel attached on the bottom of hull part prevents yacht from flowing sideway by sailing posture. In this study a 1-m model of cruiser-class sailing yacht was employed to investigate the effect of keel on yacht performance. Three different tests were performed: Resistance test at upright condition, Keel test to measure the normal force acting on keel and force measuring test at various combinations of heeling and leeway angles. All the tests were made with and without keel. Effects of keel were studied by comparing the results with and without keel under the hull. And When sailing yacht is upright condition, measuring difference of side force when keel attached and wasn't attached on the bottom of hull part and comparing keel's side force measured by rudder test. From this result searching correlation between hull and Keel. And case that leeway angle is 10° and heeling angle 20°, measuring flow of wake by PIV(particle Image Velocimetry) method when keel attached on the bottom of hull part and keel is alone in order to verify whether ignore of correlation between hull and keel is possible.

*Keywords : Sailing yacht(요트), Keel(용골), Leeway(β , 사항각), Heeling(ϕ , 횡경사각), Appendage (부기물)

1. 서론

연구 배경 및 개요

† 주저자, E-mail: baha78@hanmail.net
Tel : 051-410-4950

세일링 요트(sailing yacht)는 추진기를 이용
하여 추력을 발생시키는 일반 선박과 달리 세일
에 작용하는 풍력을 동력으로 추력을 발생시키
므로 이에 반하는 반작용으로 선체가 횡경사
(Heeling)와 사항(Leeway) 상태에서 운항되게

된다. 따라서 세일링 요트의 선형시험은 직립직진 상태에서 실시하는 일반선박과 다른 기법이 정립되어야한다. 특히 요트의 추진시 세일에 의해서 추력이 발생하기도 하지만 횡방향의 힘(Side Force)에 의한 횡류가 발생되기 때문에 이를 방지하기 위하여 선체하부에 Keel을 부착하게 된다. Keel은 세일에 작용하는 횡방향의 힘과 반대방향으로 횡방향의 힘을 작용하게 하여 횡류를 방지할 뿐 아니라, Keel 자체가 Ballast가 되어 안정성과 복원성능을 증가시키기도 한다. 이와 같이 Keel은 안정성 뿐 만 아니라, 추력에도 상당한 영향을 미치기 때문에 적절한 Keel의 선택은 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 심 (2005)이 사용했던 모형을 대상으로 하여 Keel이 부착된 경우와 부착되지 않은 경우에 직립 직진 상태의 저항시험과 횡경사-사항시험을 실시하여 두 경우를 비교하여 Keel의 영향을 살펴보았다. 또한 Keel 단독실험을 수행하여 Keel이 항주상태에 따라 Hull에 얼마나 영향을 미치는지를 조사하였고, 직립 상태에서의 횡경사-사항시험과 Keel 단독실험의 횡방향의 힘을 비교하여 Keel과 Hull간의 상관관계를 알아보고, PIV 실험을 통해 횡경사가 10°이고 Leeway가 20°에서의 유동을 비교하여 Keel과 Hull간의 상관관계를 확인해보았다.

연구사례

최근 국민소득의 증가와 레저보트의 저변확대로 요트에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나 이에 관한 연구는 선진 외국에서는 활발한 반면 국내 연구는 아직 부진한 상태이다. 먼저 국내의 경우 유 등(2004)이 보급을 목적으로 30

피트급 요트의 개발을 위하여 선형설계에서부터 각종 부가물의 설계 및 기본적인 성능추정을 실시하였다. 그후 유 등(2005)은 두 세일 간의 간섭효과를 중첩의 영향과 두 세일 간의 간격에 대한 영향으로 나누어서 살펴보았으며, 메인 세일과 집세일이 서로 간섭이 없는 독립적인 상태를 기준으로 어떠한 간섭 현상이 발생하는지와 양향력의 변화를 조사하였다. 심 (2005)은 본 연구에서 사용한 모형선을 이용하여 항주자세를 고려한 선형시험기법을 체계적으로 연구하였다.

국외의 경우 Greeley & Cross-Whiter(1989)이 수치해석과 실험결과를 비교하여 Keel의 유체역학적인 거동에 영향을 주는 물리적인 변수를 고려하여 요트 Keel의 성능을 다양한 Keel의 형상에 따라 비교 연구하였다. Flay & McMillan(1993)은 풍동과 예인수조에서의 실험을 통해 다양한 Keel의 Aspect ratios와 Heeling 각에 따른 양력과 항력을 계측하고, 이를 Nomoto(1978), Gerritsma (1981) 등이 제안한 이론식들과 비교하여 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험대상 모형선

본 연구에 사용한 모형선은 31피트급 크루저 세일링 요트의 모형으로써 선형은 박 등 (2004)이 우리나라 전통 돛배의 선형을 기초로 개발한 선형을 대상으로 하였다. Table 1은 모형선의 제원이고, Fig. 1은 대상 모형선의 사진이다.

Table 1. Principal particulars model ship

구분	Model ship	
LBP	1m	
Breadth	0.428m	
Depth(Max)	0.172m	
Draft	from B.L	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 Base Line	0.062m

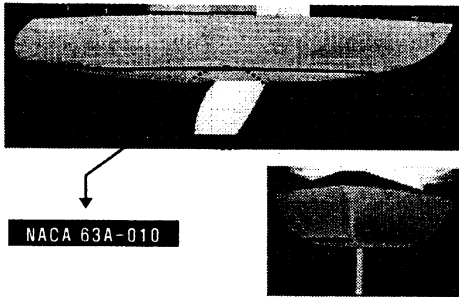


Fig.1 Model ship

2.2. 실험장치 및 측정 장치

2.2.1. 회류수조

실험은 한국해양대학교 회류수조(Circulating Water Channel)에서 수행하였다. 회류수조 하부에 AC 22KW 모터로 구동되는 2개의 임펠러(OV2-60B)로 0.1~2.0m/sec 사이의 계측부 유속을 생성한다. 수조전체 크기는 길이 12.5m, 폭 2.2m, 높이 5.2m이며 관측부의 크기는 길이 5m, 폭 1.8m, 높이 1.2m이다. 수조 가동시 물의 용량은 약 60t이다.

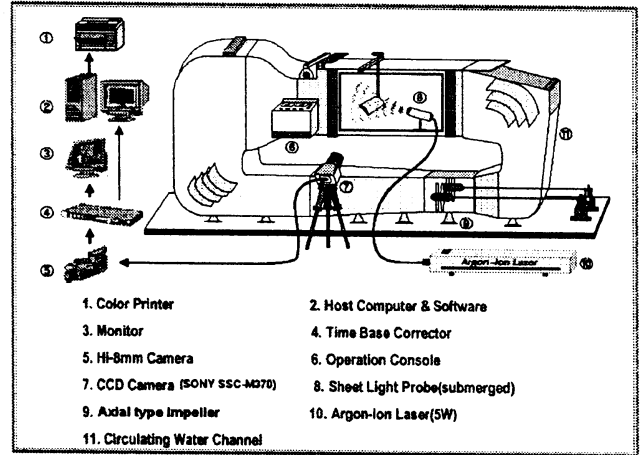


Fig. 2 CWC & PIV system

2.2.2. PIV System

Fig.2는 PIV실험의 개념도이다. 본 연구에서의 유동가시화 장치는 6W Ar-Ion Laser, Fiber Optic Cable 및 원추형 렌즈가 부착된 Probe를 사용하였다. 두께 5mm 정도로 생성된 Laser Sheet는 수중의 후방의 50cm×50cm 정도를 조사하도록 조절하였다. 그리고 입자는 비중이 1.1인 50마이크론 Vinyl Chloride Polymer를 사용하였다.

2.2.3. Keel 단독 시험

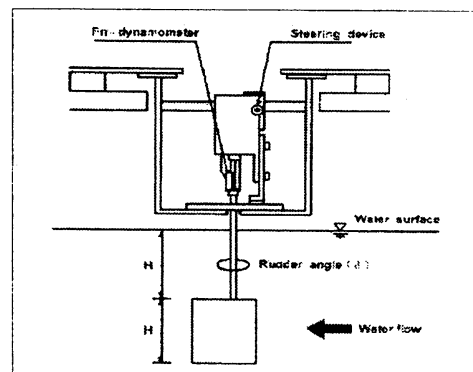


Fig.3 Keel Test Apparatus

Fig.3은 Keel 단독 시험기로서 유체의 흐름에 대하여 Keel 면에 수직한 방향으로의 힘을 측정하는 장비이다.

2.3. 실험조건

2.3.1. 저항시험 조건

직립직진시의 저항시험은 선체만 있을 때와 Keel을 부착했을 경우 2가지에 대하여 수행하였고, 횡경사나 사향이 없는 상태에서 Table 2와 같은 5가지의 선속에서 실시하였다.

Table 2. Resistance Test Condition

V_m	0.115	0.172	0.230	0.287	0.345
V_A	0.360	0.539	0.719	0.899	1.079

2.3.2. 횡경사-사향시험 조건

본 시험은 선체에 미치는 유체력을 측정하기 위하여 선체를 횡경사와 사향시켜가면서 Y (전체 횡방향의 힘)와 N (회두 모멘트)을 구하는 시험으로서 계측 속도는 0.719m/s이다. 선수, 선미에서 계측되는 동유체력 Y_F, Y_A 로부터 식 (1)과 같이 Y와 N을 구하고

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

단, Y : 전체 횡방향의 힘(sway force)

N : 회두모멘트(yaw moment)

l : Y_F, Y_A 측정위 사이의 거리

상기 Y, N을 식(2)와 같이 무차원하여 C_s 와 C_N 을 구한다.

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

$$C_N = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho L^2 d V^2}$$

(2)

(L: 수선장, ρ : 물의 밀도, d: 흘수, V: 유속)

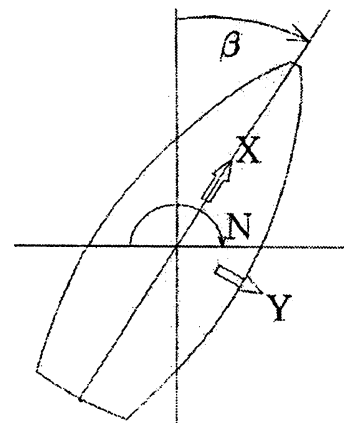


Fig.4 Coordinate system

사향각은 직립($\phi=0^\circ$)일 경우는 좌우현으로 $0^\circ \sim 20^\circ$ 까지 5° 간격으로 실험을 수행하였다. 그리고 횡경사각이 10° 와 20° 일 때는 좌우현 대칭을 가정하여 좌현만을 횡경사 시켰고, 이 경우는 우현으로만 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 와 같이 사향시켜서 실험을 수행하였다. 본 실험에서 좌표계는 Fig. 4와 같이 선수부를 양의 x축, 우현을 양의 y축으로 하는 직각 우수 좌표계인 선체 고정 좌표계를 사용하였다.

2.3.3. Keel 단독시험 조건

본 시험은 원래 유체의 흐름에 대한 타의 수

직한 방향의 힘을 측정하는 장비인데, 이번 실험에서는 Keel도 같은 날개 형상이므로 이 장비를 사용하여 힘을 계측하였다. Table 3은 이번 실험의 실험 조건을 나타낸 표이다.

Table 3. Keel & Test Condition

Mean Chord	Span	Area	Re	Velocity
0.141m	0.1623m	0.0229m ²	1.104×10 ⁵	0.719m/s

2.3.4. PIV 실험조건

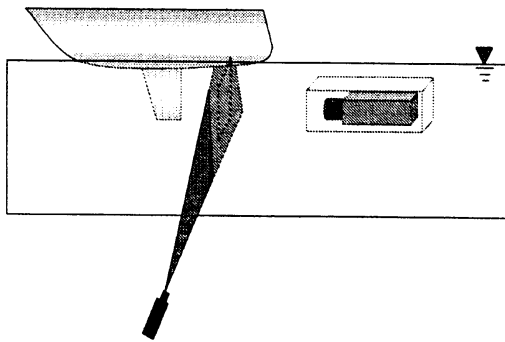


Fig.5 Schematic of PIV Experiment

본 실험은 횡경사가 10°이고 사향각이 20°인 경우의 후류를 관측하기 위한 개념도로써 선체에 Keel이 부착되어 있을 때와 Keel만 있을 때를 비교하여 보았다. 실험 유속은 0.2m/s였고, Re수는 28000이었다. Fig.5와 같이 Keel Tip의 trailing edge에서 Tip의 chord 길이만큼 후방(x/c=1)의 위치에 레이저를 조사하였고, CCD 카메라를 아크릴 수밀통에 넣어서 수중에서 Laser 단면과 평행하게 하여 촬영을 하였다. 본 실험시의 Re는 층류에 속하지만 수조내의 흐름자체에 난류성분이 포함되어 있고, 또한 모형의 거칠기의 영향 등으로 실제 모형 주위의 흐름은 난

류 유동으로 볼 수 있다.

3. 결과 및 논의

3.1. 저항시험 결과

Fig.5(a)는 Keel을 부착하였을 때와 부착하지 않았을 때 본 연구에서 수행한 저항시험 결과를 보여주고 있다. KMU라는 것은 본 실험결과를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 직립상태에서의 Keel의 영향을 보여주는데 높은 Froude수에서 거의 차이가 없는 반면 낮은 Froude수에서는 약 10%의 차이를 보이고 있다. 이는 고속에서 Keel로 인한 마찰저항이 상대적으로 작아지는 것에 기인한다고 생각할 수 있겠다. 한편 Fig. 5(b)와 (c)는 본 실험을 심 (2005)과 비교한 그래프로서 부가물을 부착했을 때와 부착하지 않았을 때 각 유속에서 2~10%정도의 차이를 보였다. 이는 본 실험이 심 (2005)과 달리 부가물 중 Rudder를 부착하지 않고 수행하였기 때문에 생기는 오차와 계측부의 유속분포 차이가 영향을 주었으리라 여겨지지만 정성적으로는 비슷한 경향을 보여 주었다.

3.2. 횡경사-사향시험 결과

본 시험은 선체에 미치는 유체력을 측정하기 위한 시험으로서 횡방향의 힘과 회두 모멘트를 알아보았다. 먼저 Fig. 6(a)는 심 (2005)과 비교한 결과이다. 저항시험과 마찬가지로 정량적으로는 다소 차이를 보였으나 정성적으로는 경향이 비슷한 것을 알 수 있으며, 횡경사각이 커질 때 횡방향의 힘은 적어진다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 6(b)에서 보듯이 Keel이 있는 경우와 없는 경우 횡방향의 힘이 횡경사각 별로 20%

정도까지 차이가 발생하였다. Fig. 6(c)는 횡경사각이 10°이고 사향각이 10°일 때 유속을 변화시키며 Keel의 영향을 비교한 것이다. 여기서 보듯이 요트의 횡방향의 힘은 유속에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며, 이때에도 Keel의 영향은 20%정도로 나타났다. 다만 고속(1.079m/s)에서 Keel의 영향이 상대적으로 적어졌는데 이것이 Keel의 영향에 의한 것인지에 대하여는 추가적인 조사가 필요하겠다. Fig. 7은 Keel이 부착되어 있는 상태에서 여러 횡경사각에 대하여 사향각의 변화에 따른 회두 모멘트를 측정된 결과이다. 회두 모멘트 또한 정성적으로는 비슷한 경향을 보였다. 그리고 Keel이 회두 모멘트에 미치는 영향은 지대한 것으로 나타났다.

그중 0°~20°까지를 이론식과 비교하여 나타내었다. 이때 레이놀즈수는 1.104×10^5 인데, 이는 $Rn=1 \times 10^5$ 이상일 경우 Rn 차이에 의한 척도효과가 무시할 만하다고 알려져 있기 때문이다.(Okada, 1958) 식(3)은 이번 실험과 비교하기 위한 이론식으로서 Whicker-Fehlner (Lewis, 1989)의 식이다.

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

a : 유효종횡비 θ : 후퇴각 β : 양각

3.3. Keel 단독시험 결과

Fig. 8에는 Keel만을 별도로 Keel 단독시험기에 부착하여 각도범위 0°~35°에서 실험하였으며

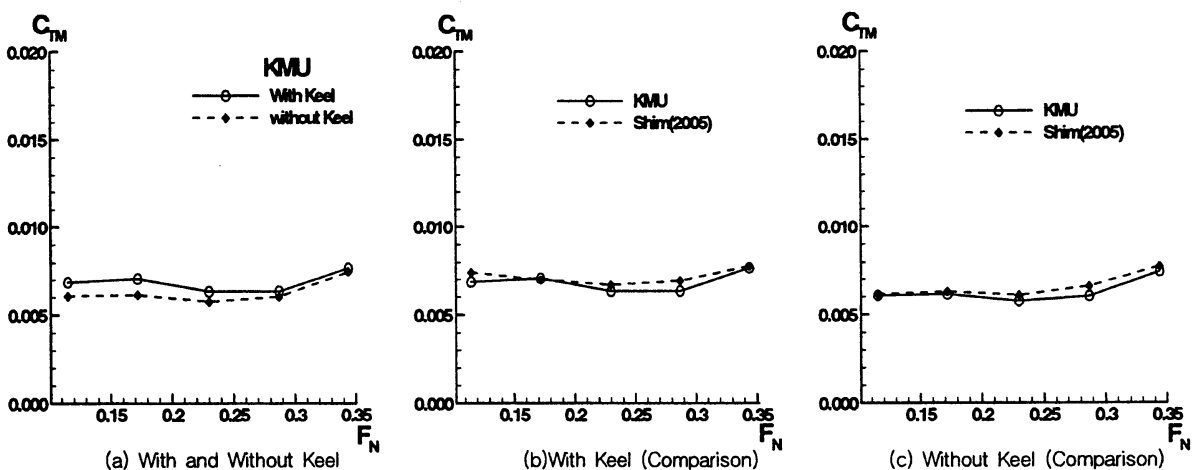
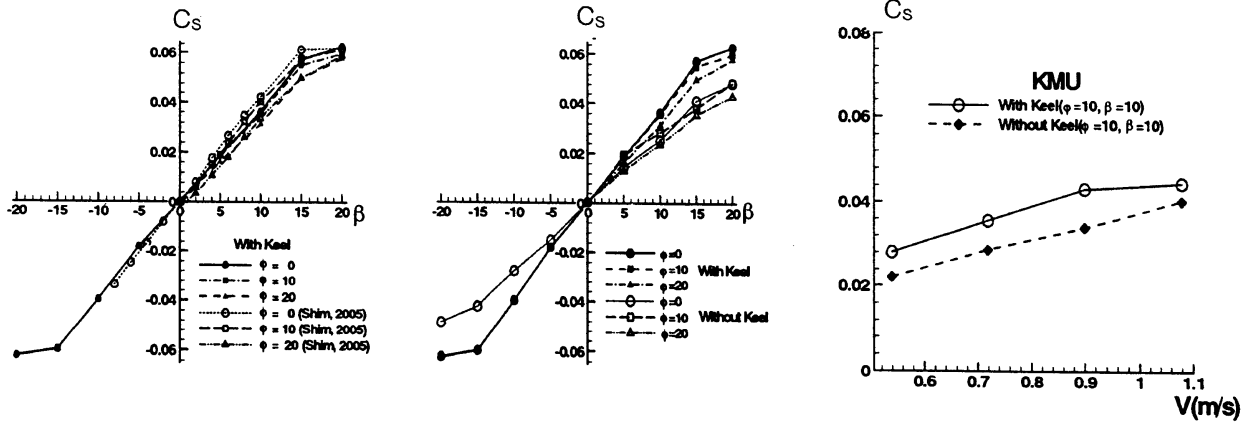
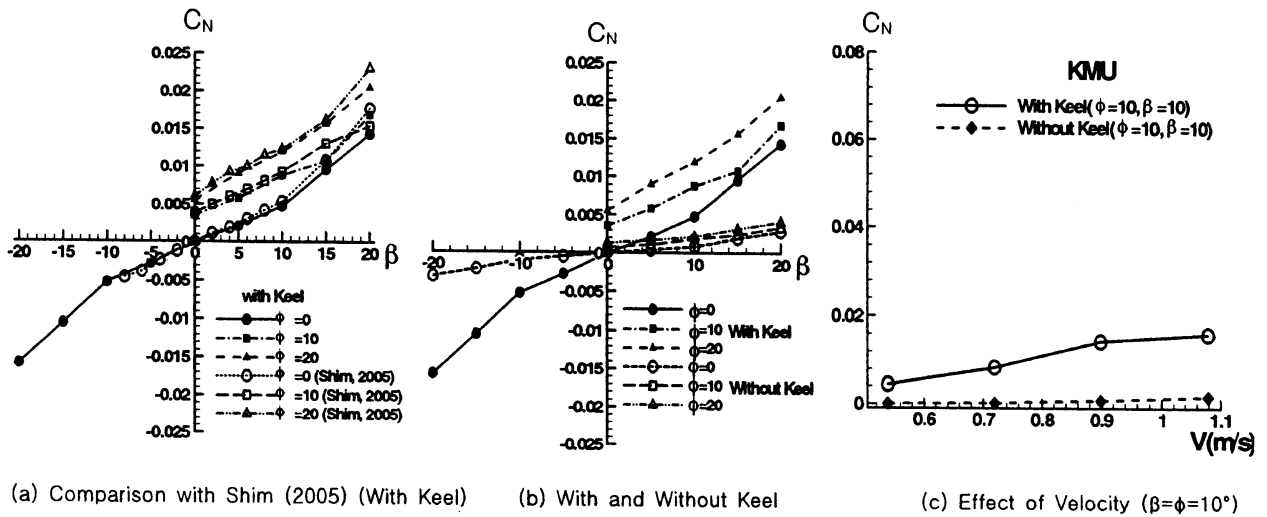


Fig.5 Results of Resistance Test



(a) Comparison with Shim (2005) (With Keel) (b) With and Without Keel (c) Effect of Velocity ($\beta = \phi = 10^\circ$)

Fig.6 Results of Heeling and Leeway Test (Side Force C_s)



(a) Comparison with Shim (2005) (With Keel) (b) With and Without Keel (c) Effect of Velocity ($\beta = \phi = 10^\circ$)

Fig.7 Result of Heeling and Leeway Test (Yaw Moment C_N)

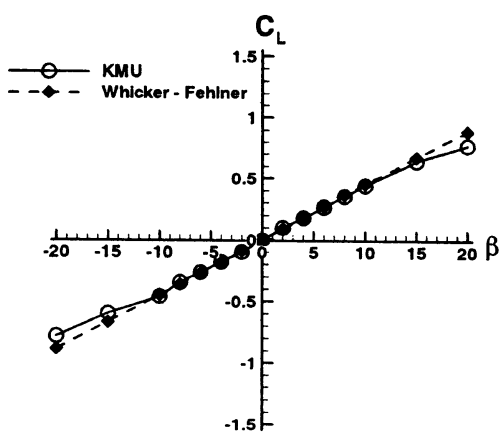


Fig. 8 Results of Keel Test

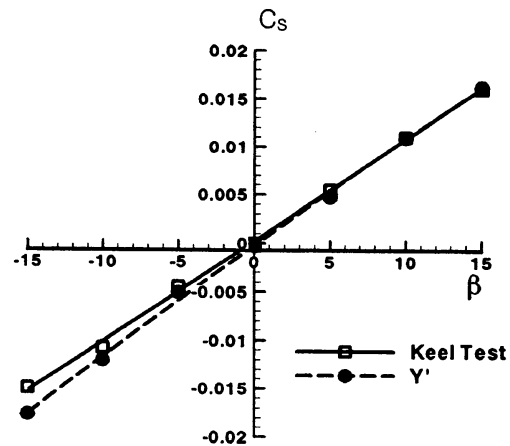
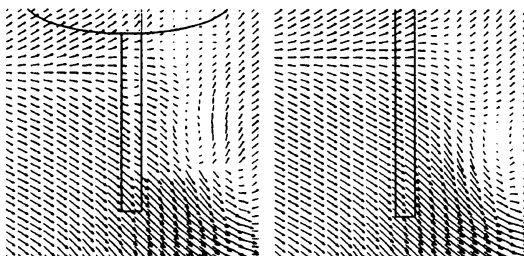


Fig.9 comparison of Leeway test & Keel test

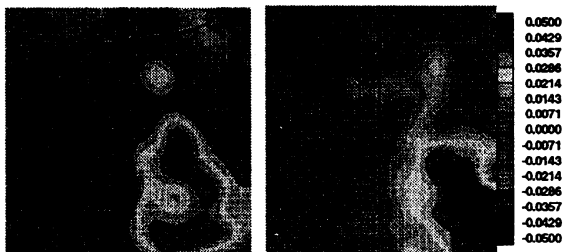
그림에서 보듯이 실험과 이론식이 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 각이 커지면서 본 실험치가 다소 작아지는 것은 실속현상 (Stall)이 발생하기 시작하기 때문이 아닌가 여겨진다. 그리고 횡경사-사향시험 중에 요트의 직립상태의 실험에서 Keel이 있을 경우에서의 C_s 에서 Keel이 없는 경우의 C_s 을 빼주어서 순수한 Keel만의 C_s 을 계산하여 Keel 단독 시험 결과와 비교하여 보았다. Fig.9에서 보듯이 상당히 잘 일치함을 알 수 있었고 이에 따라서 Keel의 성능 파악을 위해서 Keel 단독으로 성능을 연구하는 것도 무방하다 하겠다. 또한 이 실험으로부터 사향시험과 Keel 단독시험의 신뢰성 검증도 가능하였다.

3.4. PIV 실험 결과



(a) with Hull (b) without Hull

Fig.10 MV ($\phi=10, \beta=20$)



(a) with Hull (b) without Hull

Fig. 11 Vorticity ($\phi=10, \beta=20$)

Fig.10~11은 횡경사가 10°,사향 20°인 경우에서

실험한 결과로서 평균속도 백터와 와도를 비교해 본 결과이다. 이 그림에서 보듯이 요트 선체와 Keel의 상관관계가 크지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 실험은 요트의 항주상태에 따라 Keel이 선체에 미치는 영향을 알아보기 위한 목적으로 저항시험, 횡경사-사향시험, Keel 단독 시험을 수행하였다. 전반적으로 사향시와 횡경사시 Keel의 영향을 잘 알아볼 수 있었다. 횡경사-사향시험을 통해서 살펴본 결과 횡경사각이 커질수록 횡방향의 힘이 작아지는 것을 알 수 있었고, Keel의 성능 연구를 위해서 Keel을 단독으로 성능비교를 해도 무방할 것으로 생각된다. PIV 실험을 통해서 횡경사와 사향이 있을 때, Keel이 선체에 있을 경우와 Keel만 있을 경우의 유동장이 비슷한 것을 보아 Keel과 Hull간의 상관관계는 크지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 추후 Keel의 형태를 변화시킴으로 해서 Keel의 성능 연구를 계속할 계획이다.

참 고 문 헌

- 박종현, 박근용 외, 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, 김진 외, 2004, “요트의 전, 후 세일 사이의 간섭효과에 대한 수치 해석”, 대한조선학회추계학술대회논문집, pp. 181-189
- 유재훈, 반석호 외, 2004, “30피트급 요트의 선형개발 및 성능추정”, 대한조선학회 추계 학술대회논문집, pp. 172-180
- 유재훈, 박일룡 외, 2005, “요트의 Main세일 과 Jib세일 사이의 간섭효과에 대한 수치해석”, 대한조선학회논문집, 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
- Gerritsma, J., Onnink, R. and Versluis, A., 1981, “Geometry Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht Hull series”, Internal Shipbuilding Progress Vol. 28 no 328.
- 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
- Killing, S., 1998, *Yacht Design Explained*, W.W. Norton & company
- Larsson, L. and Eliasson, R.E., 2000, *principles of Yacht Design*, International Marine of McGraw-Hill
- Lewis, E.V., 1989, *Principles of Naval Architecture, Vol. III, 2nd Revision*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City.
- Nomoto, K and Tatano, H., 1978, “Hydrodynamic Analysis on sailing (1st Report)”, Journal of the Kansai Society of naval Architects, Japan, Vol. 170, pp.11-18
- 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
- Takada, N. and Miyata, H., 1998, “CFD Simulation of 3-dimensional motion of a vehicle with movable wings”, J. SNAJ Japan, Vol.184, pp. 37-45

