

30피트급 요트의 유체력에 대한 실험적 연구

유재훈^{†*}, 안해성^{*}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*}

Experimental Study on the Hydrodynamic Forces of 30 Feet Sailing Yacht

Jaehoon Yoo^{†*} and Haeseong Ahn^{*}

Korea Ocean Research & Development Institute^{*}

Abstract

A model test was carried out, in order to verify the hydrodynamic performances of public 30 feet class sailing yacht. In the initial design stage, the performances and the running attitude of sail yacht including the hull form and sail plan, appendages were estimated by VPP, from which made the representative test conditions. A new experiment system such as captive model device was composed because the running attitude could be changed by wind conditions. The test results show that the minimum resistance is generated in the heeling 20 degree, which was expected in the initial design stage. It is thought to be the useful informations that the keel has an effects on hydrodynamic forces and resistance differences between the upwind and the downwind condition.

※Keywords: Sailing Yacht(요트), Resistance(저항), Towing Test(예인시험), VPP(Velocity Prediction Program), Upwind(풍상향), Downwind(풍하향), Leeway(사향)

1. 서론

국내 보급을 목적으로 30피트급 세일링 요트가 개발되어진 바 있으며(유재훈 등 2005), 본 연구에서는 설계되어진 선형의 유체역학적인 특성을

예인수조 모형시험을 통하여 확인하고자 하였다. 또한 실선 상태에서의 저항을 추정하는 방법에 대해 제안하였다. 부착되어진 부가물로서 Keel에 대한 특성을 함께 다루었으며, 세일링 요트의 항주 자세를 모형 시험에 재현하기 위하여 횡경사와 사향 상태에서의 예인 시험이 가능한 구속식 예인 장치를 개발하였다.

일련의 모형시험을 통하여 선형 설계에 반영되었던 기준 항주자세에서 최소의 저항을 가지는 것

접수일: 2005년 1월 20일, 승인일: 2005년 3월 3일

†주저자, E-mail: jhyoo@kriso.re.kr

Tel: 042-868-7242

을 확인하였으며, 사항 상태에서 Keel의 유체역학적인 역할을 파악하였다. 모형시험 조건은 VPP(Velocity Prediction Program)의 계산 결과 중에서 VMG가 각각 최대, 최소가 되는 풍상향의 항주 최적조건들과 풍하향의 항주 최적조건들을 기준으로 도출하였다. 또한 예인시험을 통하여 얻어진 모형선의 저항값을 요트의 유효 마력으로 환산하는 실선 확장 방법에 대해서도 제안하였다.

2. 모형 시험 조건

세일링 요트의 항주 자세는 일반 상선과는 달리 불어오는 바람에 대해 어떤 각도로 진행하고 있는가에 따라 비교적 큰 횡경사와 사항(Leeway)이 발생하게 된다. 따라서 요트에 대한 예인 시험을 위해서는 우선 시험하고자 하는 요트의 속도가 어떤 바람 상태에서 만들어진 것인지를 정의하여야 하며 이에 따라 각 속도 조건에서의 항주 자세를 미리 추정하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 자료를 얻기 위하여 VPP(Velocity Prediction Program)의 계산 결과를 사용하였으며, 요트가 항해 중에 경험하게 되는 광범위한 풍향과 풍속을 대표할 수 있는 조건으로서 VMG(Velocity Made Good)값이 최대가 되는 풍상향 최적점(Upwind Optimum) 상태와 VMG가 최소가 되는 풍하향(Downwind) 상태를 기준으로 예인 시험 조건을 도출하였다. VPP 계산 방법에 대한 자세한 내용은 Oossanen(1993)에서 살펴볼 수 있다.

예인 시험 대상은 보급형으로 개발된 30피트급 세일링 요트로서 개략적인 선체의 형상은 Fig. 1 과 같으며, 정수 중 횡경사가 없는 직립 상태에서의 제원을 Table 1에 정리하였다. Fig. 2에는 본 요트에 대해 계산된 VPP의 대표적인 결과로서 풍향, 풍속에 대한 선속을 표시한 Velocity Polar Diagram을 보였으며, 풍상향 항주 상태와 풍하향 항주 상태에서의 최적 조건들을 함께 표시하였다. 이러한 각각의 최적 항주 조건들은 Table 2에 풍하향 항주에 대한 결과를, Table 3에는 풍상향의 것을 정리하였으며, 이로부터 예인 시험 조건을 도출하였다.

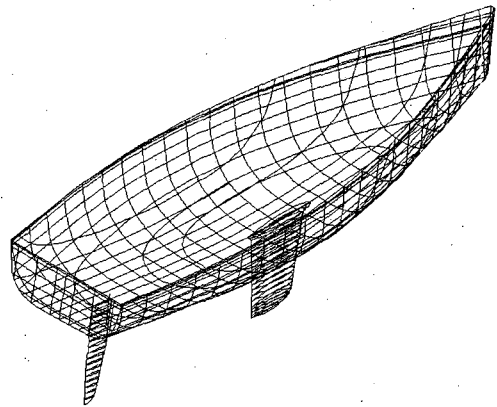


Fig. 1 Schematic view of test yacht

Table 1 Hydrostatics of test yacht (Full scale)

	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
▽	m3	Displacement	3.298
Wetted Surface Area	m2	Hull	15.60
	m2	Keel	2.84
	m2	Rudder	1.18

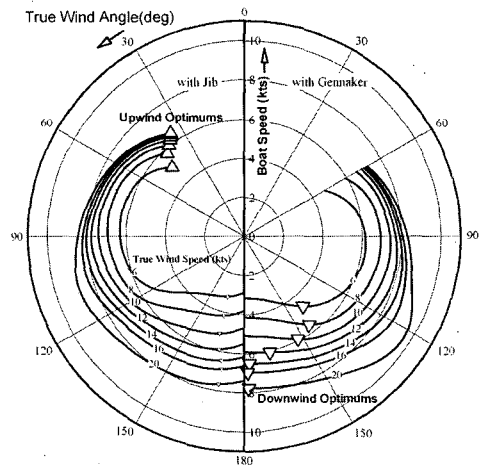


Fig. 2 VPP results-velocity polar diagram

Table 2 VPP Results (Downwind optimum)

True Wind		Apparent Wind		Boat		
Speed (kts)	Angle (deg)	Speed (kts)	Angle (deg)	Speed (kts)	Heel (deg)	Leeway (deg)
6.0	140.2	3.7	86.7	4.65	1.1	0.5
8.0	143.9	4.58	97.9	5.59	1.2	0.3
10.0	152.4	5.17	120.3	5.92	1.1	0.2
12.0	167.5	5.79	154.4	6.06	0.6	0.1
14.0	177.6	6.99	175.4	6.50	0.4	0.1
16.0	178.5	8.45	177.3	6.95	0.4	0.0
20.0	178.3	11.5	177.2	7.76	0.7	0.1

Table 3 VPP Results (Upwind optimum)

True Wind		Apparent Wind		Boat		
Speed (kts)	Angle (deg)	Speed (kts)	Angle (deg)	Speed (kts)	Heel (deg)	Leeway (deg)
6.0	46	9.89	24.2	5.08	5.7	1.8
8.0	42.5	12.38	23.9	5.76	11.1	2.4
10.0	39.4	14.52	23.5	6.04	14.2	2.7
12.0	37.5	16.53	23.5	6.21	16.2	2.8
14.0	36.3	18.47	23.7	6.32	17.6	2.9
16.0	35.7	20.35	24.1	6.40	18.7	3.0
20.0	35.4	24.01	25.1	6.47	20.4	3.1

Table 4 Model tests conditions (Upwind)

Vs (kts)	Heel (deg)	Leeway (deg)	Fn	Vm (m/s)
4.0	2.5	1.5	0.23	1.188
5.0	5.5	2.0	0.29	1.485
6.0	13.5	2.5	0.34	1.782
6.5	20.0	3.0	0.37	1.931
7.0	30.0	3.5	0.40	2.079

일반적인 예인 시험과 같이 선속 별로 시험을 수행하기 위하여 이러한 최적 항주 조건들의 결과를 삼간하여 최종적으로 Table 4와 같은 풍상항 항주에 대한 시험 조건을 도출하였으며, 풍하항에 대한 결과는 항주 조건에 따른 횡경사와 사항의 정도가 작다고 평가하여 예인 시험에는 직립, 직진 상태에서만 수행하도록 하였다.

예인 시험을 위한 모형선은 사용할 3분력계

(3-component load cell)의 용량과 예인 속도를 고려하여 축적비 3으로 하여 목재로 제작되었으며, 부가물로서 Keel과 Rudder를 부착하였다. Keel은 Keel 자체의 유체역학적인 특성 조사가 가능하도록 탈, 부착이 가능하도록 구성하였다.

선체에 걸리는 유체력을 측정하기 위하여 3분력계를 선체의 마스트 위치에 부착하고 구속 상태로 예인하여 배의 길이 방향으로의 힘(Fx)과 횡방향으로의 힘(Fy), 그리고 높이방향 축에 대한 모멘트(Mz)를 계측하였다. Table 4를 보면 각각의 선속에 대한 횡경사 각도와 사항각이 다르므로 Fig. 3에 나타난 바와 같이 모형선 자체가 3분력계와 더불어 횡경사 및 사항 상태로 조절될 수 있는 예인 장치를 구성하였다. 구속 예인 장치를 이용해 모형선에 횡경사를 주게 되면 횡경사 각도에 따라 배수량이 변하게 된다. 따라서, 직립 상태의 배수량이 일정하게 유지될 수 있는 좌, 우측의 흘수를 미리 계산해 놓은 뒤, 모형선 조건에 따라 예인 대차의 높낮이를 조절하여 횡경사각에 따른 흘수를 맞추도록 하였다.

Table 5 Conditions of model tests

	Values	Remarks
Model Scale	3.0	Ls/Lm
Model Length	3.047m	Loa
Towing Speed	1.188m/s	Min (Vs=4kts)
	2.379m/s	Max (Vs=8kts)
Towing System	Captive	
Measurement	Fx, Fy, Mz	Body Fixed Coordinates
Load Cell	Fx: 100 kgf Fy: 100 kgf Mz: 10 kgf-m	3-Compo
Towing Conditions (all tests with Rudder)		
Downwind	with Keel	4~8 kts
Upwind	with Keel	5~7 kts
	w/o Keel	
Heel Variation	with Keel	Vs=6.5kts Leeway=3.0deg
Leeway Variation	with Keel	Vs=6.5kts Heel=20deg
	w/o Keel	

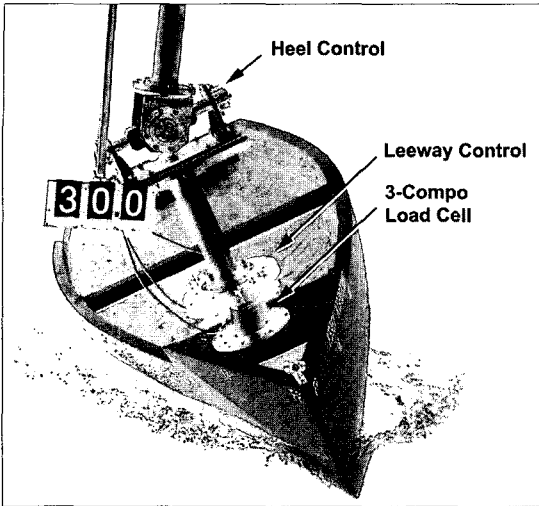


Fig. 3 Towing system

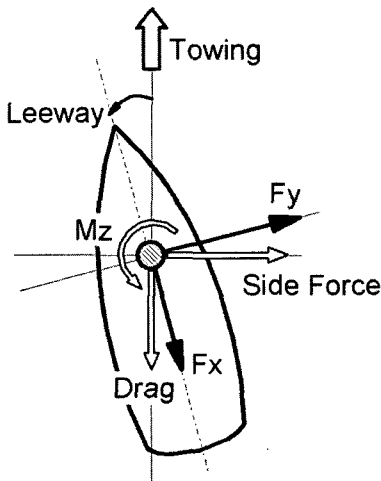


Fig. 4 Directions of forces

3. 시험결과

3.1. 횡경사(Heel)에 의한 저항 변화

먼저 세일링 요트의 횡경사(Heel)가 저항 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하기 위하여 설계 속도에 해당하는 선속 6.5노트에서 사향각(Leeway Angle)을 3.0도로 고정시킨 후 횡경사 각도만을 0도에서 30도까지 변화시키면서 모형선을 예인하였다. 배에 걸리는 길이방향 힘(F_x), 횡

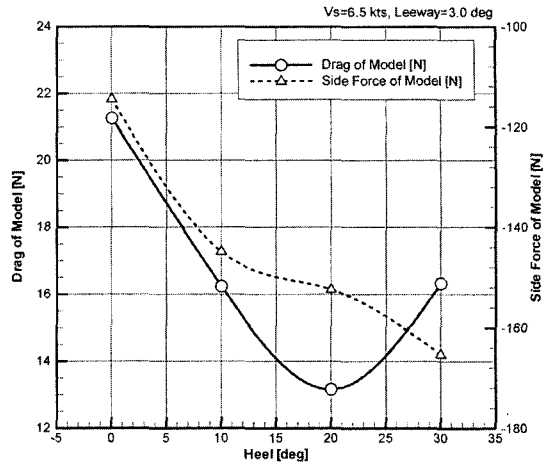


Fig.5 Forces change by heel angle (Model Scale, $V_s=6.5$ kts, Leeway=3.0deg)

방향 힘(F_y), Yawing Moment(M_z)를 계측한 후 사향각을 고려하여 저항으로 간주할 수 있는 전진 방향으로의 힘(Drag)과 횡 방향 힘(Side Force)을 산정하였다. 선체를 포함한 예인 방향과 각 계측력의 방향, 그리고 저항과 Side Force의 정의는 Fig. 4에 표시하였다.

시험 결과는 Fig. 5와 같으며, 횡경사 각도가 커질수록 저항이 줄어들다가 20도 횡경사에서 최소 값을 가진 후 다시 증가하는 형태를 보였다. 이를 통하여 선형 설계 시에 20도 횡경사를 설계 조건으로 설정하고 이에 대해 수선면 및 프레임 라인을 설계한 것이 유효했다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Side Force의 경우, 횡경사 되어진 모형선에서 계측되어진 Side Force는 주로 Keel에 의한 양력이라고 볼 수 있으며, 이러한 Keel의 양력이 횡경사에 의해 점차 줄어들게 됨을 살펴볼 수 있다.

3.2. 사향(Leeway)에 따른 유체력의 변화

다음으로는 선체의 사향이 미치는 영향을 조사하였다. 마찬가지로 선속 6.5노트를 기준으로 횡경사를 20도로 고정시킨 후 사향각을 0도에서 3도까지 변화시키며 선체에 걸리는 힘을 계측하였다. 본 시험에서는 사향 조건에서 Keel이 가지는

유체역학적 특성을 함께 조사하기 위해서 Keel이 부착되어진 상태와 제거된 상태에서 각각 예인 시험을 수행하였다. Fig. 6에는 사향각 변화에 따른 저항과 Side Force를 보이고 있는데, 사향각이 증가하면 전체적인 경향으로 저항은 줄어들며, Keel이 없는 경우에는 비교적 급격하게 감소하는 경향을 보이는 반면, Keel이 있는 경우에는 어느 정도 이상의 사향, 즉 2도 이상에서는 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면, Side Force는 사향각의 증가에 따라 지속적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. Keel의 존재에 따라 저항의 변화 추이가 다르다는 것은 Keel 자체가 가지는 형상 저항과 함께 어느 정도 이상으로 사향각이 커지게 되면 Keel에서 발생되어지는 형상 저항의 증가로 인해 이러한 경향이 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 Keel의 유체력을 세밀히 살필 수 있도록 Fig. 7과 같이 두 조건의 선체에 걸리는 힘의 차이를 Keel에 의한 힘으로 간주하여 표시하여 보았다. 사향각이 증가함에 따라 Keel의 저항은 1도 부근에서 최소 값을 가진 후 증가하는 경향으로, Side Force는 선형적으로 감소하는 모습을 보이고 있다. 이렇게 작은 사향각에서 비교적 작은 저항을 가지는 경향은 애초 Keel의 설계에 있어서 작은 받음각에서 비교적 작은 항력을 가지도록 선택되

어진 NACA63-009의 항력 특성과 유사한 결과를 가지고 있다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8에는 사향각 변화에 따른 Yawing Moment의 변화를 나타내었다. Keel의 유무에 따라 도출되어진 Keel에 의한 Yawing Moment를 살펴보면, 사향각의 증가에 따라 선체가 가지는 Leeway 방향으로의 모멘트가 Keel에 의해 어느 정도 줄어드는 효과가 나타나는 것을 볼 수 있다.

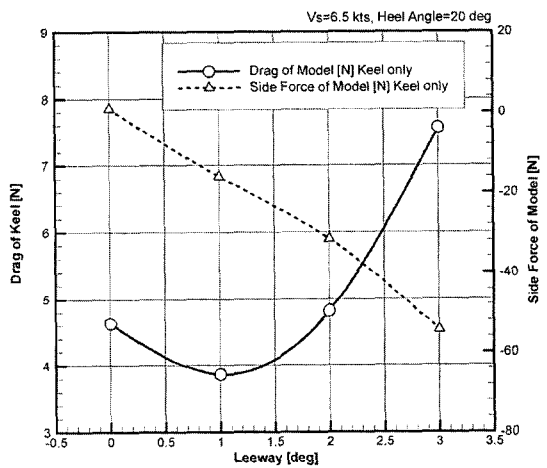


Fig. 7 Forces of keel change by leeway angle (Model scale, Vs=6.5kts, Heel=20deg)

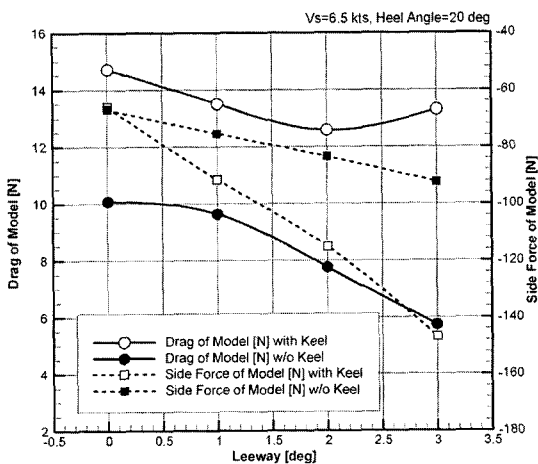


Fig. 6 Forces change by leeway angle (Model scale, Vs=6.5kts, Heel=20deg)

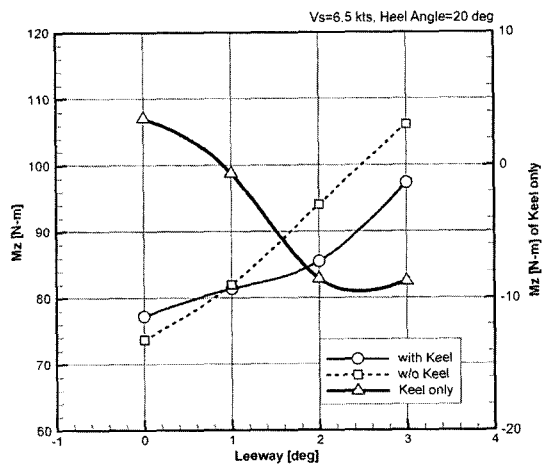


Fig. 8 Yawing moment change by leeway angle (Model scale, Vs=6.5kts, Heel=20deg)

이러한 효과는 Keel의 존재가 선체 자체의 사항 Moment를 줄여 줄 수 있고, 실제 항주 중인 요트에 사항이 발생하게 되는 경우 Keel의 배치에 의해 발생되어진 사항의 각도를 줄여주는 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.3. 실선 유효 마력의 추정

수행되어진 일련의 예인 시험 결과를 바탕으로 실선의 유효마력을 추정하여 보았다. 계측되어진 선체 길이 방향으로의 힘(Fx)을 전진 방향의 힘으로 환산한 후, 이를 저항으로 간주하고 이를 실선의 유효마력으로 확장하였다. 사용되어진 방법은 ITTC '78에 근거한 형상계수를 사용하는 3차원 확장법이며, 저항 성분의 분리 및 실선 확장은 식(1)과 식(2)와 같다. (Harvald, 1983)

$$C_{TS} = (1 + k)C_{FS} + C_W + \Delta C_F + C_A + C_{AA} + C_{AS} \quad (1)$$

$$C_W = C_{TM} - (1 + k)C_{FM} \quad (2)$$

where,

- C_T : Total Resistance Coefficient
- k : Form Factor
- C_F : Frictional Resistance Coeff.
- C_W : Wave Resistance Coefficient
- ΔC_F : Roughness Allowances
- C_A : Model - Ship Correlation
- C_{AA} : Air Resistance Coefficient
- C_{AS} : Steering Resistance Coeff.
- subscript M: value of Model
- subscript S: value of Full Scale Ship

먼저 직립상태로 사항각 없이 예인시켜 얻어진 풍항 상태에서의 모형선의 저항값을 사용하여 형상계수(k, Form Factor)를 도출하였다. 형상계수 도출에는 Prohaska's Method를 사용하였으며, C_T/C_F 값을 F_N^b/C_F 으로 회귀하였다. 이외에 실선 확장에 사용되어진 보정계수들의 값은 Table 6에 정리하였다.

Table 6 Parameters for extrapolation

	Condition	Values ($\times 1000$)	
		Downwind	Upwind
k	Form Factor	0.3811	0.3811
C_A	Model-Ship Correlation	0.37	0.37
C_{AS}	Steering Resistance	0.1	1.0
C_{AA}	Air Resistance	0.0	0.26
ΔC_F	Roughness Allowance	2.122	2.122

모형선 실선 상관 관계를 보정하기 위해 반영하는 C_A 는 예인 시험이 수행되어진 예인 수조에서 선체의 길이를 기준으로 산정하여 사용하는 회귀 식으로 부터 값을 결정하였다. 일반 상선과는 달리 항주 중에도 실 새 없이 러더(Rudder)를 사용하는 요트의 특성을 반영하기 위하여 C_{AS} 를 도입하였다. 일반 상선의 경우, 직진 성향이 좋지 않은 배에 대하여 0.04×10^{-3} 을 사용하는 경우가 있으나, 본 연구에서는 비교적 러더의 사용이 적은 풍항시에는 0.1×10^{-3} 을, 러더를 많이 사용하게 되는 풍상항시에는 1.0×10^{-3} 을 사용하였다. 이러한 구체적인 값은 그 근거가 필요하므로, 실선 시운전 등을 통한 본격적인 연구가 필요하다. 그러나 본 연구에서는 실선 확장에 이와 같은 Steering에 의한 저항 증가분을 고려한다는 면에서 잠정적인 값을 적용하였다.

수면상부의 선체에 의한 공기 저항을 반영하는 C_{AA} 값은 설계 요트의 수면 상부 선체의 횡단면적을 사용하여 얻어진 0.26×10^{-3} 를 풍상항시에만 적용하였다. 풍항항의 경우는 바람의 방향과 배의 전진 방향이 일치하여 선속에 의해 발생하는 공기 저항이 없다고 볼 수 있기 때문이다.

모형선-실선간의 선체 표면 거칠기에 대한 보정인 ΔC_F 의 값은 ITTC '78 방법에 의하여 결정하였다. 전체적으로 세일링 요트에 대한 실선 확장 방법은 사용되어지는 각종 보정 계수나 그 방법에 대한 경험이 부족하고, 실선에 대한 계측 자료가 취약한 상황으로서 이에 대한 많은 연구가

요구되어지는 상황이다. 본 연구에서는 우선적으로 사용할 수 있는 방법 중에 하나를 선택하여 고려해야 하는 모든 조건을 빠짐없이 적용한다는 개념에서 이와 같은 실선 확장법을 적용하였다.

실선 확장을 위해 계산되어진 조파저항(C_W) 성분의 선속에 따른 경향은 Fig. 9에 나타내었으며, 사용되어진 방법에 의한 실선의 저항값은 Fig. 10과 같다. 풍하향 항주보다는 풍상향 항주시의 조파 저항이 매우 크게 나타나고 있으며, 유효마력에서도 같은 경향을 보임을 알 수 있다. 이러한 경향은 직립되어진 항주 자세에 사향이 없는 상태인 풍하향 항주에 비해 풍상향 항주의 경우 선속에 따라 30도 까지의 횡경사를 가지고 있으며, 또한 사향 상태에서 항주하게 되므로, 이에 의한 저항이 부가되어진 것이 이유가 된다. 최종적으로 제안되어진 실선 확장법으로 추정되어진 실선의 저항값은 설계 속도 6.5노트에서 풍하향 항주 중에 약 830N, 풍상향시에 1406N가 얻어졌다.

4. 결론

(1) 횡경사 변화 시험을 통해 설계 항주 자세인 20도 횡경사에서 설계 선형이 최소의 저항을 가지고 있음을 알 수 있었으며, 이로부터 선형의 설계가 비교적 성공적으로 이루어졌음을 확인하였다.

(2) Keel의 설계에 있어서 작은 받음각(Angle of Attack)에서 비교적 작은 항력을 가지도록 선택되어진 NACA63-009의 항력 특성과 유사한 결과를 가지고 있음을 확인하였다.

(3) Keel의 존재는 작은 사향 각도에서 발생 할 수 있는 급격한 Yawing Moment의 양을 줄여주는 역할을 하고 있다.

(4) 풍하향에 비해서 횡경사와 사향 상태에서 항주하게 되는 풍상향 항주의 경우 설계 속도를 기준으로 약 70% 정도의 저항 증가가 있다.

(5) 실선 상태의 저항을 추정하기 위한 확장법을 제안하였으나, 정량적인 정확성을 가지기 위해서는 실선 시운전을 통한 경험 자료의 축적이 필요하다.

(6) 정량적으로 정확한 모형 시험을 위해서는

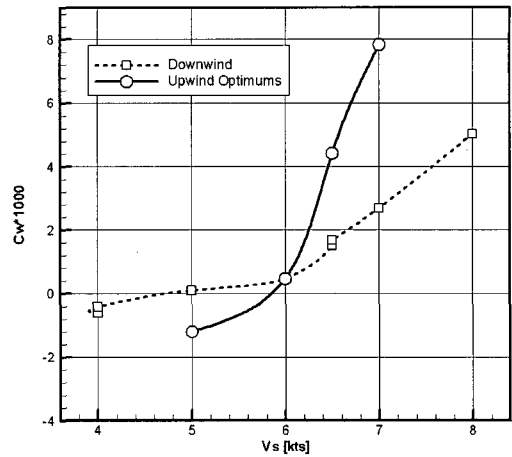


Fig. 9 Wave resistance (k=0.3811)

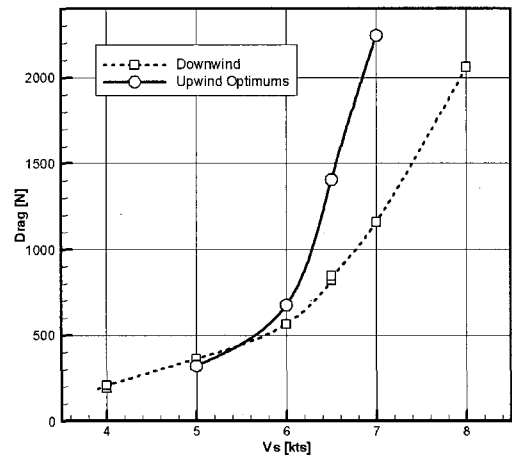


Fig. 10 Resistance of full scale yacht

본 연구에서 사용된 구속식 예인 장치가 아닌 동역학적 힘에 의한 자세 변화가 허용되는 자유식 예인 장치의 개발이 요구되어진다.

(7) 세일링 요트에 대한 정확한 선속 추정을 위한 모형 시험 및 실선 저항의 추정을 위해서는 파랑 중 부가 저항 성분에 대한 고찰이 필요하다.

후 기

본 연구는 해양수산부 개발 과제인 '보급형 해양 레저 선박 개발'의 일부로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 유재훈, 반석호, 안해성, 김진, 김상현, 2005, “30피트급 요트의 선형개발 및 성능추정,” 대한조선학회 논문집, 제42권 1호, pp34-42
- 유재훈, 박일룡, 김진, 안해성, 반석호, 이평국, 2005, “요트의 Main세일과 Jib세일 사이의 간섭 효과에 대한 수치해석,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 1호, pp. 24-33.
- Harvald, S.A., 1983, Resistance and Propulsion of Ships, A Wiley-Interscience Publication
- Peter van Oossanen, 1993, “Predicting the Speed of Sailing Yacht,” SNAME Trans., Vol. 101, pp. 337-397.



< 유 재 훈 >



< 안 해 성 >