

# 트윈 세일 드론의 성능추정에 관한 연구

류인호\* · 양창조\*\* · 한원희\*\*\*

\* 목포해양대학교 기관시스템공학과 박사과정, \*\* 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수

## A Study on the Performance Predictions of Twin Sail Drone

In-Ho Ryu\* · Changjo Yang\*\* · Won-heui Han\*\*\*

\* Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\* Professor, Division of Marine Engineering System, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

**요약** : 최근 무인선을 활용한 해양 조사가 주목을 받고 있으며, 특히 세일을 이용한 소형 무인 드론에 대한 연구가 고조되고 있다. 세일 드론의 용도는 해양 조사, 감시 및 오염방제 등을 들 수 있다. 따라서 본 연구에서는 트윈 세일을 채용한 드론에 대해 선속을 추정하는 방식을 이용하여 항추최적조건을 확인하고 세일드론의 운동성능 및 저항 등 초기설계단계에서 검토해야 할 성능에 대해서 고찰하고자 하였다. 그 결과, 트윈 세일 드론은 항해속도를 2.0 m/s 이하로 유지하는 편이 유리하며 복원성 또한 DNV에서 규정하는 조건을 충족시켰다. 또한, TWA 100°일 때 받음각 20°에서 최고속력은 1.69 m/s, TWA 100°일 때 받음각 25°에서 최고속력은 1.74 m/s를 보였다.

**핵심용어** : 참바람, 겉보기바람, 복원성, 받음각, 속도성능 추정, 트윈세일드론

**Abstract** : Recently, marine surveys using unmanned ships are attracting attention, and research on small unmanned ships using sails is on the rise. Sail drones can be used for marine surveys, monitoring, and pollution management. Therefore, in this study, using the method of estimating the ship speed for twin sail drones, the optimal conditions for sailing are checked, and the performance to be considered in the initial design stage, such as the motion performance and resistance of the sail drone. Consequently, the twin sail drone had a speed lower than 2.0 m/s, and the stability satisfied the rule by DNV. In addition, the maximum speed at an angle of attack of 20° at TWA 100° was 1.69 m/s and that at an angle of attack of 25° at TWA 100° was 1.74 m/s.

**Key Words** : True wind, Apparent wind, Stability, Angle of attack, Velocity prediction, Twin sail drone

### 1. 서론

삼면의 바다인 우리나라는 일본과의 독도영유권 문제, 서해 NLL상 해상충돌 및 어선 불법 어로행위 등으로 인해 해양영토관리 및 감시 업무가 매우 중요하다. 하지만 연근해역 조사는 해양조사선의 접근이 어려운 곳이 많고 NLL 부근역시 안전상의 문제로 조사가 어려워 효과적인 접근방법이 요구된다(Kim et al., 2014).

일반적인 해양조사는 유인선을 활용하거나 등부표 혹은 해양구조물을 이용하여 제한적으로 정점관측이 수행된다. 국내 부이를 포함한 연안 해양 관측시스템은 대부분 물리·기상 요소를 중심으로 운영되고 있으며, 용존 산소, 엽록소

등 생물화학적 요소에 관한 모니터링은 극히 제한적이다. 무인선을 활용한 해양 조사시스템은 기존의 높은 인건비 및 제한된 해양관측 효율에 비해서 효율적이며 저비용의 무인관측을 가능하게 할 수 있으나 현재 무인선의 광역해역을 대상으로 관측하는 시스템은 개발이 매우 미미한 실정이다(Kim et al., 2012).

한편 국외에서 무인선이 임무에 활용된 것은 매우 오래전이다. 미 해군은 세계 2차 대전 직후 위험한 임무를 수행하는데 사용했으며 이미 70년 전부터 무인선의 필요성이 제기되었고 업무에 활용되었다. 무인선의 용도로는 해양 조사, 감시, 수색, 구조 및 해양오염방제 지원 등을 들 수 있다. 최근에 수상드론에 대한 관심이 높아져 해양수산부, 미래과학기술부 등에서 주관하는 정부과제로 세일드론(Sail drone) 등에 대한 기술 개발이 활발히 진행되고 있다(Kim, 2014).

한편 세일드론에서 세일(Sail)은 항해 성능에 큰 영향을 미

\* First Author : imiim@mmu.ac.kr, 061-240-7431

† Corresponding Author : winhan@mmu.ac.kr, 061-240-7224

치게 되며 Mark(2006)은 에어포일 형의 Wing sail에 대해 연구하였고 Elkaim(2008)은 자동으로 회전하는 Wing sail을 이용한 세일드론에 대해 연구하였으며 Meining et al.(2015)은 해빙이 지표 냉각에 미치는 영향을 조사하기 위해 세일드론을 이용하여 각종 온도를 계측하였다. Furukawa et al.(2015)은 보조플랩(Flap)을 장착하여 세일의 성능에 대해 연구하였고, Lee et al.(2006)과 Li et al.(2015)은 보조 또는 변형 플랩을 적용하여 공력 해석을 시도하였다.

최근 Pham et al.(2020)과 Ryu et al.(2021)은 에어포일형 세일보다 공기역학적 성능이 우수하고, 성능향상을 위한 후형 및 변형 플랩 등 추가 장치가 필요 없는 트윈 커브 세일(Twin curvy sail)을 제안하고, 전산유동해석을 통해 두 세일의 형상, 간격 및 캠버 효과에 따른 공기역학적인 성능을 비교하였다. 세일드론의 성능을 파악하기 위해서 각 항주 자세를 추정하여 어떤 상태에서 항해하는지를 파악해야 한다. 따라서 본 연구에서는 속도추정방법을 통해 항주조건들을 확인하고 세일드론의 운동 및 저항 등 초기설계단계에서 검토해야할 성능에 대해 확인해 보고자 한다.

## 2. 세일 형상 및 연구 방법

### 2.1 세일 형상

세일드론 및 트윈커브세일의 기본적인 형상은 Fig. 1과 2와 같고 설계 조건은 Table 1에 나타내었다. 또한, 세일드론과 바람에 의해 작용하는 힘과의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.



Fig. 1. 3D Design model of sail drone.

여기서,  $\theta$ 는 추력과 세일이 이루는 각,  $\alpha$ 는 받음각(Angle of attack),  $L$ 은 양력(Lift),  $D$ 는 항력(Drag),  $F_R$ 은 추력(Driving force),  $F_H$ 는 횡력(Heeling force),  $V_A$ 는 풍향(Apparent wind)을 나타내며 추력과 횡력을 식(1)으로 나타내었다. 계산 조건은 Table 2에 나타냈고 수치해석을 위해 ANSYS - CFX 18.1을 사용하였다. 유한체적법을 바탕으로 운동량방정식과 속도압력 보정식을 사용하였으며, 공간차분은 2차 풍상차분

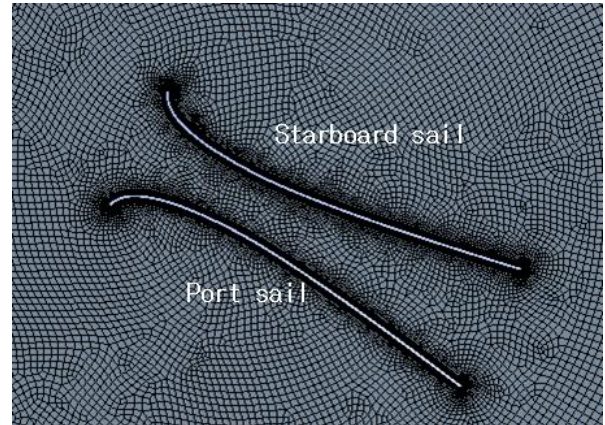


Fig. 2. Section of twin curvy sail.

Table 1. General specifications of sailing drone

Length overall (m)	4.2	Span (m)	3.5
Width (m)	1.2	Area (m <sup>2</sup> )	3.0
Depth (m)	1.0	Displacement (kg)	280
Height above waterline (m)	4.0		

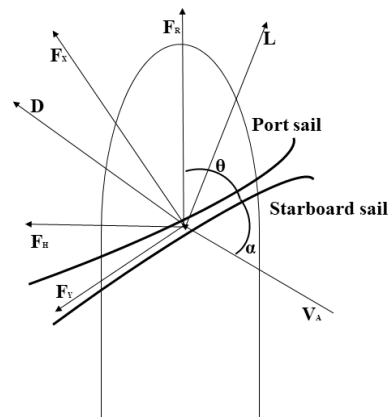


Fig. 3. Relations of yacht direction and the force by the wind.

$$\begin{Bmatrix} F_R \\ F_H \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\alpha + \theta) & -\cos(\alpha + \theta) \\ \cos(\alpha + \theta) & \sin(\alpha + \theta) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} L \\ D \end{Bmatrix} \quad (1)$$

법을 이용하였고 트윈커브세일 주변의 유동해석을 위한 레이놀즈수는  $6 \times 10^5$ 이다. Fig. 4는 NACA 0018모델에 대한 실험 결과와 시뮬레이션 값을 비교한 결과를 나타낸다. 수치해석결과, 양력계수가 변화하는 추이를 실험결과와 유사하게 예측하였다.

Table 2. Computational model setup

Inlet Velocity	8.23 m/s
Inflation layer	30
Wall	No slip
Grid	90,345
Turbulence model	SST $k-\omega$

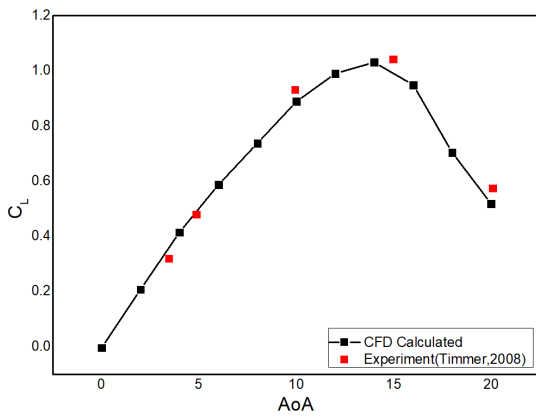


Fig. 4. Validation of lift coefficient.

## 2.2 속도추정 개요

일반 선박의 경우 기관에서 프로펠러로 전달되는 동력과 효율을 통해 전진력을 확인하고, 선박의 저항과 비교하여 선박의 직진속도를 추정한다. 반면에 세일드론은 풍력을 이용하여 동력을 얻으며, 세일을 통하여 전진력으로 전환하게 되며 항해시 선체에 횡경사(Heeling) 및 옆밀림(Leeway)이 생긴다(Chi et al., 2007). 또한, 바람의 방향과 세기에 따라 세일드론의 자세와 전진력이 변하게 되며 선속에 차이가 생긴다. 세일드론의 자세와 선체 저항과의 관계는 서로 밀접하게 연관되어있기 때문에 이 상태에 대한 선속을 추정하는 방식을 사용하게 된다(Yoo and Ahn, 2006). 본 연구에서는 국제외양경기회(ORC : Offshore Racing Congress)의 속도추정방법을 사용하였고 선형 설계 도구로는 DSYHS(Delft Systematic Yacht Hull Series)의 모델을 기반으로 이용하였다(Gerritsma et al., 1991).

속도추정방식에서 전진 방향을 따라 세일에 의한 추력과 선체 저항은 같고 세일에 의한 횡력은 수면 아래 선체에 의해 발생하는 횡력과 같다. 또한, 연직방향에서 부력은 배의 중력과 같고, 킬과 세일에 발생하는 수직방향 힘의 성분은 서로 상쇄된다. Fig. 5에 속도추정 계산방법에 대한 절차 흐름도를 표시하였다.

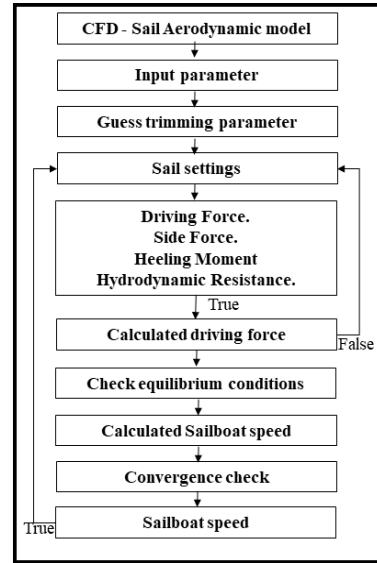


Fig. 5. Flow chart of velocity prediction.

## 2.3 세일드론의 선체유체력 계산방법

세일드론이 일정한 속력으로 항해 할 때 선체의 저항은 세일에서 발생하는 추진력과 균형을 이룬다. 또한, 선체의 좌우방향으로 발생하는 횡력은 세일에서 발생하는 횡력과 균형을 이뤄야 한다. 세일드론이 항해할 때 행기는 횡력과 사향이 발생하고 이때 세일드론의 속도성능에 큰 영향을 미치는 것은 세일드론의 선체 제원이다. Larsson and Eliasson (2000)은 점성저항(Viscous Resistance), 조파저항(Wavemaking resistance) 그리고 잉여저항(Residuary resistance)으로 접근하였으며, 선체 제원이 미치는 영향을 Keuning and Sonnenber (1998) 세일요트의 수조시험 등을 통해 연구했다. 점성저항은 일반적으로 마찰저항(Frictional resistance)을 의미하고 2차원 확장법을 이용하며 식(2)와 같이 계산된다. 이때  $V$ 는 세일드론의 전진속도,  $Sc$ 는 침수표면적(Wetted surface area),  $Cf$ 는 마찰계수이며 마찰계수는 식(3)과 같이 계산된다.

$$R_{fh} = \frac{1}{2} \rho V^2 S_c C_f \quad (2)$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\log(Rn) - 2)^2} \quad (3)$$

DSYHS에서 점성저항은 마찰저항과 점성압력저항(Viscous pressure resistance)등 기타 점성의 영향의 합이고 이때 나머지 저항을 잉여저항으로 간주하며 형상계수  $k$ (Form factor)를 이용해서 식(4)와 같이 계산되고 이때 잉여저항은 식(5)와 같이 계산되고 형상계수  $k$ 는 식(6)으로 계산된다.

$$Rva = Rfa(1 + k_a) \quad (4)$$

$$Rfa = \frac{1}{2} \rho V^2 Sa Cf \quad (5)$$

$$(1 + k_a) = \left(1 + 2 \frac{t_a}{c_a} + 60 \left(\frac{t_a}{c_a}\right)^4\right) \quad (6)$$

잉여저항은 식(7)으로 계산할 수 있다. 이때  $Rrh$ 는 세일드론의 잉여저항,  $\nabla c$ 는 형배수용적(Volume of displacement),  $\rho$ 는 중력가속도,  $g$ 는 밀도,  $Lwl$ 은 만재흘수선(Load waterline),  $Bwl$ 은 수선뱀(Beam of waterline),  $Cp$ 는 주형 비척계수(Prismatic coefficient),  $LCB$ 는 부심(Center of buoyancy),  $LCF$ 는 부면심(Center of flotation),  $Aw$ 는 수선면적(Waterplane area),  $fpp$ 는 수직선이다.

$$\begin{aligned} \frac{Rrh}{\nabla c \rho g} = & a_0 + \left(a_1 \frac{LCB_{fpp}}{Lwl} + a_2 Cp + a_3 \frac{\nabla c^{\frac{2}{3}}}{Aw} + a_4 \frac{Bwl}{Lwl}\right) \frac{\nabla c^{\frac{1}{3}}}{Lwl} \\ & + \left(a_5 \frac{\nabla c^{\frac{2}{3}}}{Sc} + a_6 \frac{LCB_{fpp}}{LCF_{fpp}} + a_7 \left(\frac{LCB_{fpp}}{Lwl}\right)^2 + a_8 Cp^2\right) \frac{\nabla c^{\frac{1}{3}}}{Lwl} \quad (7) \end{aligned}$$

## 2.4 세일드론의 복원성 계산방법

세일드론이 경사를 일으키면 부심은  $B$ 에서 풍하측  $B_1$ 로 이동하며, 내부 모멘트는 중량과 부력의 수평거리인  $GZ$ 에 의해 결정되고 이 거리를 복원정(Righting arm)이라하며 선체 경사가  $10^\circ$  이내 일 때 식(8)으로 계산할 수 있고 Fig. 6에 나타냈다. 이때  $M_R$ 은 복원모멘트,  $GM$ 은 메타센터 높이,  $\Delta$ 는 배수량을 나타낸다.

대경사 각도에서의 복원력은 직립 시 수선과 실제의 경사 수선이 선체 중심에서 교차하지 않고 횡 메타센터 역시 옮겨진다. 따라서 각도에 따른 메타센터 위치를 찾거나 부력 작용선의 연장선과 선체 중심선과의 교점인 겉보기 메타센터(False metacenter)인  $M_f$ 의 위치를 찾아 복원성을 계산해야 하며 식(9)에 의해 계산된다. 이때  $h_e$ 는 수면위로 노출된 부분의 체적중심에서 수선에 내려 만나는 점,  $h_i$ 는 수면아래 잠긴 부분의 체적중심에서 수선에 내려 만나는 점,  $V$ 는 선박의 배수용적이다. 즉, 복원모멘트는 형상복원력에서 중량복원력을 뺀 값이 된다.

$$M_R = \Delta GM \sin \phi \quad (8)$$

$$M_R = \Delta \left( \frac{v h_e h_i}{V} - B_0 G \sin \phi \right) \quad (9)$$

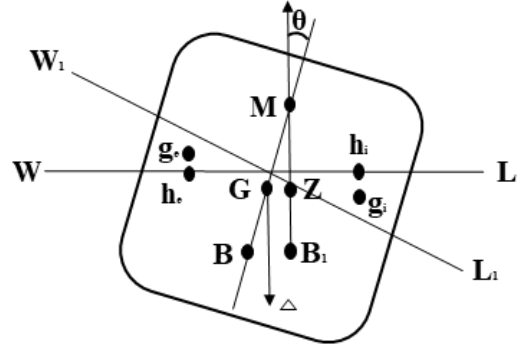


Fig. 6. Schematic view of sail drone.

## 2.5 세일드론의 속도추정 계산방법

세일드론에서 느끼는 바람은 참바람(True wind)과 세일드론이 움직여서 생기는 바람이 합쳐진 것이다. 이 바람을 겉보기 바람(Apparent wind)라고 한다. 즉, 겉보기 바람이란 참바람과 세일드론의 속도에 의한 바람, 그리고 조류에 의한 바람을 합성한 것이고 이 바람이 세일드론의 동력원이며 Fig. 7에 나타냈다. 여기서,  $V_S$ 는 세일드론 속도(Sailing drone speed),  $V_T$ 는 참바람 속도(TWS : True wind speed),  $V_A$ 는 겉보기 바람 속도(AWS : Apparent wind speed),  $\beta$ 는 겉보기바람 각도(AWA: Apparent wind angle),  $\gamma$ 는 참바람 각도(TWA : True wing angle)를 나타내며 겉보기 바람의 속도와 각도는 De Rideer et al.(2004)이 제시한 식(10), (11)으로 계산할 수 있다.

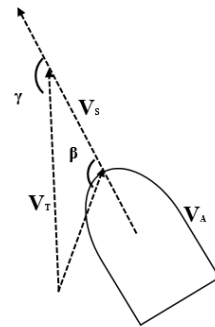


Fig. 7. Sailing triangle

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{V_T \sin \gamma}{V_S + V_T \cos \gamma} \right) \quad (10)$$

$$V_A = \sqrt{V_T^2 + V_S^2 + 2V_T V_S \cos\gamma} \quad (11)$$

Larsson and Eliasson(2000)에서 언급한 것처럼 세일드론의 경사(Heel)는 세일에서의 유효속도와 바람의 각도에 영향을 미치기 때문에 고려되어야 하고 식(12)~(15)로 계산되어진다. 여기서,  $V_1$ 는 운동방향에 따른 겉보기 바람속도,  $V_2$ 는 세일과 운동방향이 직각일때 겉보기 바람속도,  $V_{AWe}$ 는 유효 겉보기 바람속도,  $\beta_{AWe}$ 는 유효 겉보기 바람각도,  $\Phi$ 는 경사 각도이다.

$$V_1 = V_S + V_T \cos(\gamma) \quad (12)$$

$$V_2 \approx V_T \sin(\gamma) \cos(\Phi) \quad (13)$$

$$V_{AWe} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (14)$$

$$\beta_{AWe} = \arctan\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (15)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 선체유체력 변화

계산 결과의 유효성을 비교하기 위하여 여러 선체 실험 중 3개의 예인수조 실험 결과와 비교하였다. 모델링 한 DSYHS의 선체는 Fig. 8에 나타내었다.

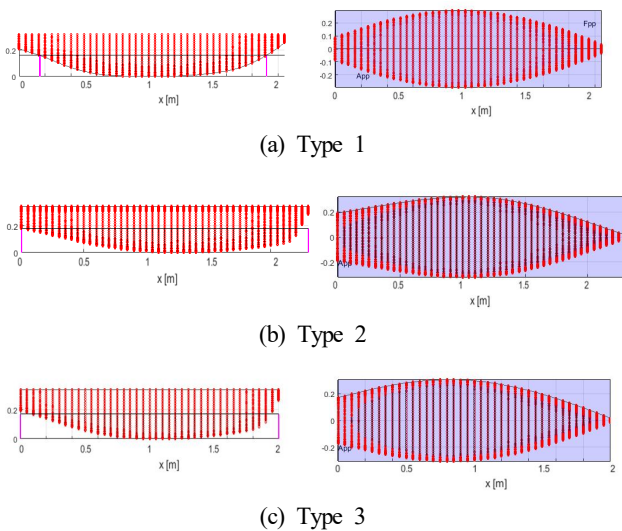


Fig. 8. Hull models.

Fig. 9에 계산 결과값을 나타내었다. Type 1의 경우 보트 속도가 1.5m/s 전까지는 조파저항이 완만하게 증가한 후 2.4 m/s에서 약 58 N의 선체저항력을 갖는다.

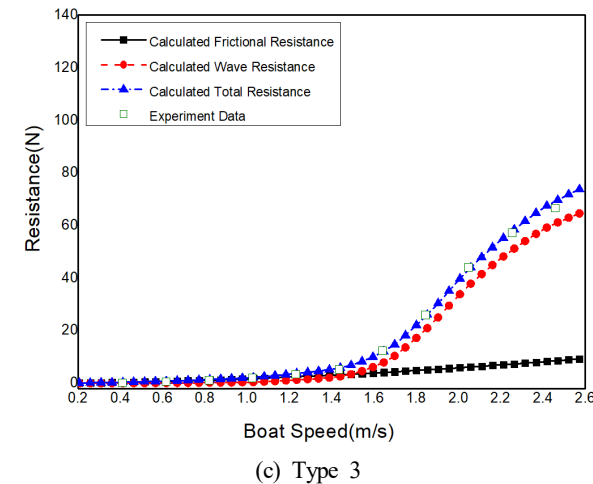
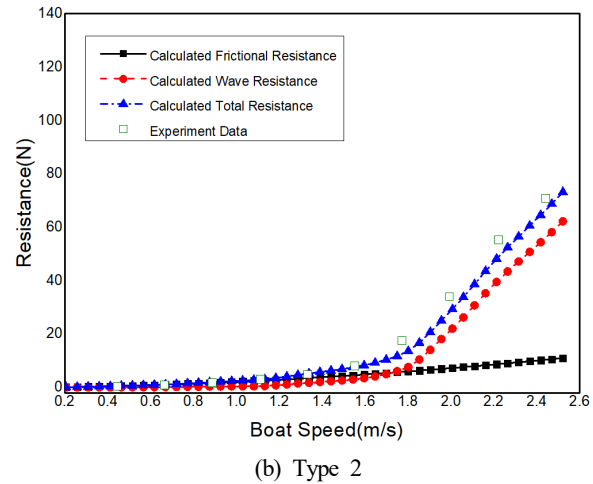
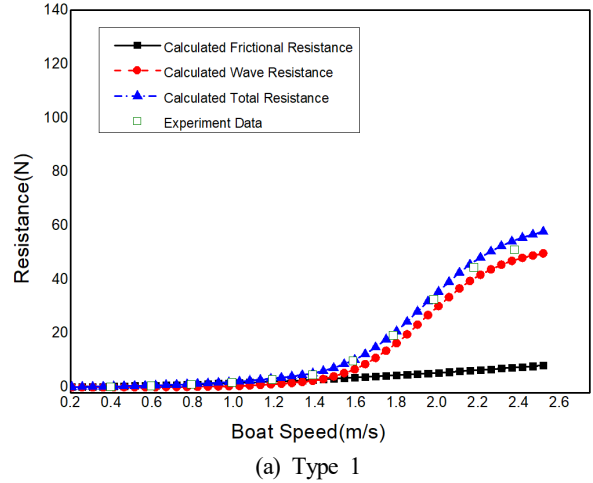
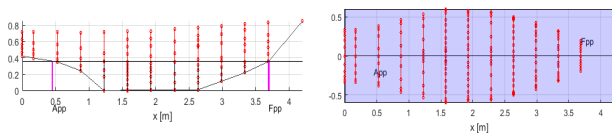


Fig. 9. Variation of resistances acting on hulls.

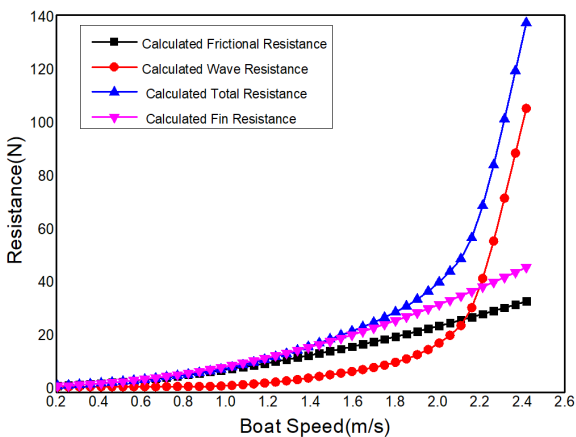
Type 2는 보트 속도가 1.5 m/s까지 조파저항의 증가가 비교적 완만하며 2.4 m/s에서 약 77N의 선체 저항력을 갖고 Type 1에 비해 조파저항의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

Type 3의 경우 보트 속도가 1.6 m/s 이상이 되면서 조파저항이 증가하여 선체 저항력이 커지며 2.4 m/s에서 약 73 N의 선체 저항력을 갖는다. 모델링 계산결과와 회유수조 실험결과와의 차이는 Type 1의 경우 약 6%, Type 2의 경우는 선체 저항력이 갑자기 증가하는 1.8 m/s에서 약 16%의 차이를 보이지만 선체 저항력 증가하는 추이를 유사하게 나타내며 그 이후 범위를 줄여 2.4 m/s에서는 약 3%의 차이를 보인다. Type 3의 경우는 약 3% 차이 값을 갖는다. 모델링 결과 값이 예인수조 실험결과 값과 유사하게 예측하였으며 이를 통해 계산결과가 신뢰성을 가짐을 알 수 있다. 세일드론 선체는 Dragon 2.4mR을 사용했으며 이 선체는 지금까지 1000척 이상이 건조되었고 유지 보수 및 내구성 검증된 장점이 있다.

Fig. 10의 (a)는 세일드론의 선형 모델링이며 (b)는 선체 유체력 계산결과이다. 세일드론은 속도가 빨라지면서 조파저항 및 마찰저항이 증가하며 조파저항은 속도가 2.0 m/s를 넘어서면서 저항이 급격히 증가한다. 그에 따라 세일드론의 항주 속도는 최대 2.2 m/s 이하로 유지하는 것이 효과적인 것을 알 수 있다.



(a) Hull model



(b) Total resistance

Fig. 10. Sail drone model.

### 3.2 복원성 변화

복원성은 선박의 중요 설계요소이며 선박의 항해 안정성을 위하여 많은 나라에서 일정 규모 이상의 선박에 대하여 기준을 정해 규정하고 있지만 24 m 미만의 선박에 대해서는 여객선, 13인 이상의 낚시 어선 및 카페리 선을 제외한 선박에 기준은 설정되어 있지 않다(Kwon and Lee, 2007).

이를 위해 본 연구에서는 DNV(2015)에서 규정하는 소형선 복원성 기준에 적합한지 검토하기 위해 세일드론의 복원 모멘트를 계산하였고 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

DNV에서 요구하는 값은 10°에 복원정 높이는 0.05 m를 초과하여야 하며 이때 세일드론은 5°에서 0.07 m, 11°에서 0.15 m로 그 기준을 충족함을 확인했고 최소한 10°를 넘어서 최대 복원정 값을 갖아야 하는데 세일드론은 그 값을 충분히 충족했다. 또한, 30° 이상의 각도에서 최소한 복원정은 0.2 m를 충족해야하며 이때 세일드론은 14°에서 0.2 m를 충족하며 30°에서 약 0.38 m의 값을 나타내었다.

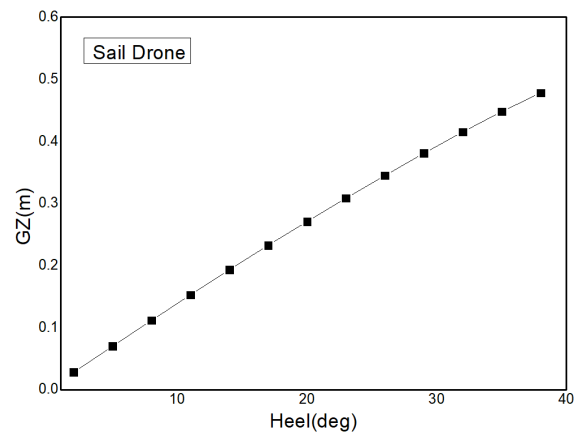


Fig. 11. GZ of sail drone

### 3.3 속도추정 계산결과

받음각 10°~25°, TWS 5 m/s에 대한 속도추정 계산결과를 Fig. 12에 나타내었다. 받음각 10°, 15°, 20°에서 범주 불능 범위는 약 TWA 0°~30° 정도이며 받음각 25°의 범주 불능 범위는 TWA 0°~35°까지이다. 받음각 10°는 TWA 90°에서 최고 항주 속도 1.59 m/s(3.0 knot)를 내며 받음각 15°는 TWA 95°에서 1.64 m/s(3.1 knot), 받음각 20°는 TWA 100°에서 1.69 m/s(3.2 knot), 받음각 25°는 TWA 100°에서 1.74 m/s(3.3 knot)를 낸다.

TWA 30°일 때 받음각 10° 및 15°에서 세일드론의 속도는 약 0.87 m/s(1.6 knot)이고 받음각 20°에서는 0.6 m/s(1.1 knot)이며, TWA 35°일 때 받음각 25°에서는 0.72 m/s(1.3 knot)이다.

세일드론의 최고 항주속도는 받음각 25°이지만 범주 불능 범위가 다른 받음각에 비해 크다는 단점이 있다. TWA



45°까지는 받음각 10° 및 15°를 유지하는 것이 유리하며 그 이후 TWA 90°까지 받음각 20°를 유지하는 것이 좋은 성능을 낼 수 있고 그 이후로는 받음각 25°를 유지하는 것이 가장 빠른 속도를 낼 수 있음을 알 수 있다.

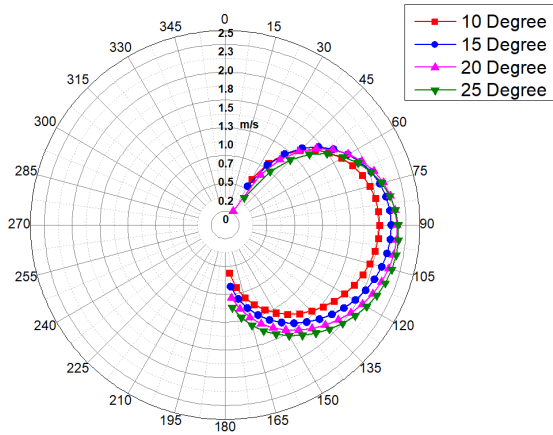


Fig. 12. Polar velocity diagram of sail drone according to different angle of attack.

#### 4. 결론

본 연구에서는 세일드론의 성능을 파악하기 위하여 세일드론의 설계를 통한 선체저항, 선박의 항해 안정성을 위한 복원성 및 받음각에 따른 성능 비교를 통해 최적의 항주조건을 확인하였다.

1) 본 연구에서 세일드론의 속도가 2.0 m/s 이상에서는 저항이 증가하기 시작하므로 세일드론의 항주 속도는 그 이하로 유지해야 한다.

2) 세일드론의 복원모멘트를 계산하고 DNV(2015)의 기준을 검토한 결과, 그 값을 충족하였다.

3) 받음각 25°에서 TWA 100°일 때 세일드론은 1.74 m/s (3.3 knot)의 최고속도를 내며, 받음각 20°는 TWA 100°에서 1.69 m/s(3.2 knot), 받음각 10°~15°일 때 TWA 90°과 95°에서 각각 1.59 m/s(3.0 knot), 1.64 m/s(3.1 knot)를 보였다.

#### 사 사

이 논문은 2021년도 한국산업기술진흥협회(KOITA) 산학연 클러스터 지원사업의 재원으로 “한국해안에 적합한 Sail Drone 연구 개발”의 지원을 받아 수행된 연구임(KOITA-COLTER-2021-0059).

#### References

- [1] Chi, H. R., W. J. Kim, and J. H. Park(2007), Viscous Flow Calculation around a 30 FT-class Sailing Yacht Hull, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 248-257.
- [2] De Ridder, E. J., K. J. Vermeulen, and J. A. Keuning(2004), A mathematical model for the tacking maneuver of a sailing yachts, The International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction, pp. 1-34.
- [3] DNV(2015), Rules for High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft, Pt. 5, Ch. 7.
- [4] Elkaim, G. H.(2008), Autonomous Surface Vehicle Free-Rotating Wingsail Section Design and Configuration Analysis, Journal of Aircraft, Vol. 45, No. 6, pp. 1835-1852.
- [5] Furukawa, H., A. W. Blakeley, R. G. J. Flay, and P. J. Richards(2015), Performance of wing sail with multi element by two-dimensional wind tunnel investigations, The Journal of Fluid Science and Technology Vol. 10, No. 2, pp. 1-14
- [6] Gerritsma, J., J. A. Keuning, and R. Onnink(1991), CSYS the Delft Systematic Yacht Hull (Series II) Experiments.
- [7] Kim, S. Y., N. S. Sun, and S. H. Kim(2014), Development Localization of Multipurpose Intelligent Unmanned Ship, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 51, No. 2, pp. 9-12.
- [8] Kim, S. J., H. S. Kim, and M. J. Lee(2012), Development of Multipurpose Intelligent Unmanned Ship Marine Observation System, Journal of the Society of Marine Environment & Energy, pp. 504-503.
- [9] Kim, S. Y.(2014), Unmanned Ship Research Trend, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 51, No. 2, p. 2.
- [10] Keuning, J. A. and U. B. Sonnenberg(1998), Approximation of the Hydrodynamic Forces on a Sailing Yacht based on the ‘Delft Systematic Yacht Hull Series’. Proceedings of the 15th International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction.
- [11] Kwon, S. Y. and H. J. Lee(2007), A Study on the Stability Criteria of Small Vessels, The Journal of the Korean Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 285-295.
- [12] Li, Q., Y. Nihei, T. Nakashima, and Y. Ikeda(2015), A study on the performance of cascade hard sails and sail-equipped vessels, Ocean Engineering, pp. 23-31.
- [13] Larsson, L. and R. E. Eliasson(2000), Principles of Yacht Design. Second edition. A&C Black.

- [14] Mark, N.(2006), A hardware proof of concept of a sailing robot for ocean observation, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 462-469.
- [15] Meinig, C., N. Lawrence-Slavas, R. Jenkins, and H. M. Tabisola(2015), The Use of Sail-drones to Examine Spring Conditions in the Bering Sea, Vehicle Specification and Mission Performance. OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, Retrieved.
- [16] Pham, M. N., B. G. Kim and C. J. Yang(2020), Shape and Spacing Effect in Curvy Twin Sail for Autonomous Sailing Drone, The Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 26, No. 7, pp. 931-941.
- [17] Ryu, I. H., B. G. Kim and C. J. Yang(2021), A Study on the Shape of Twin Curvy Sail for Unmanned Sail Drone, The Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 27, No. 7, pp. 1059-1066.
- [18] Timmer, W. A.(2008), Two-dimensional low-Reynolds number wind tunnel results for airfoil NACA 0018, Wind Engineering, 32(6), pp. 525-537.
- [19] Yoo, J. H. and H. S. Ahn(2006), Performance Predictions for Sailing Yacht by Towing Tests and VPP Calculation, Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, 30(1), pp. 116-124.

---

Received : 2022. 06. 17.

Revised : 2022. 08. 12.

Accepted : 2022. 08. 29.