

무인세일드론의 트윈커브세일 형상에 관한 연구

류인호* · 김부기** · 양창조***

* 목포해양대학교 기관시스템공학과 박사과정

** 목포해양대학교 해양메카트로닉스학부 부교수, *** 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수

A Study on the Shapes of Twin Curvy Sail for Unmanned Sail Drone

In-Ho Ryu* · Bu-Gi Kim** · Changjo Yang***

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

** Associate Professor, Division of Mechatronics Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

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

요 약 : 우리나라는 해상활동의 중요성이 크며, 산업화에 따른 이상기후 현상 등을 규명하기 위해 육상에 많은 자동기상 관측설비를 운영 중이지만 해상에서는 그 수가 매우 부족하다. 또한, 해양안전정보 구축 등을 위해 해양조사선을 운영 중이나 접근이 어려운 곳이 많고 높은 운영비용이 요구된다. 따라서 다양한 해양관측 등이 가능한 소형무인화선박의 개발이 필요하다. 한편 소형 무인화 선박에서 세일(Sail)은 항해 성능에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존 에어포일 형상보다 높은 공기역학적 성능을 갖는 것으로 알려진 트윈커브세일(Twin curvy sail)의 설계변수인 캠버(Camber)효과에 대해 검토하였다. 5 종류의 캠버에 대해 유동해석 결과, 캠버 크기가 9%일 때 가장 높은 양력계수를 나타내었다. 트윈커브세일의 경우 Port sail과 Starboard sail의 상호작용에 의해 받음각 23°에서 가장 높은 양력계수를 갖고, Port sail의 경우 받음각 20°에서 가장 높은 양력계수를 Starboard sail의 경우 받음각 15°에서 가장 낮은 양력계수를 나타내었다. 또한, 트윈커브세일은 모든 받음각에서 에어포일 형상인 NACA 0018보다 높은 양력계수를 나타내었다.

핵심용어 : 트윈커브세일, 캠버, 받음각, 양력계수, 항력계수, 세일드론

Abstract : In Korea, the importance of marine activities is great, and automatic weather observation facilities are operating on land to investigate abnormal weather phenomena caused by industrialization; however, the number of facilities at sea is insufficient. Marine survey ships are operated to establish marine safety information, but there are many places where marine survey ships are difficult to access and operating costs are high. Therefore, a small, unmanned vessel capable of marine surveys must be developed. The sail has a significant impact on the sailing performance, so much research has been conducted. In this study, the camber effect, which is a design variable of the twin curvy sail known to have higher aerodynamic performance than existing airfoil shapes, was investigated. Flow analysis results for five cases with different camber sizes show that the lift coefficient is highest when the camber size is 9%. Curvy twin sails had the highest lift coefficient at an angle of attack of 23° because of the interaction of the port and starboard sails. The port sail had the highest lift coefficient at an angle of attack of 20°, and the starboard sail had the lowest lift coefficient at an angle of attack of 15°. In addition, the curvy twin sail had a higher lift coefficient than NACA 0018 at all angles of attack.

Key Words : Twin curvy sail, Camber, Angle of attack, Lift coefficient, Drag coefficient, Sail drone

1. 서 론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 예전부터 해상 활동의 중요성이 매우 높게 여겨져 왔다. 또한, 산업화로부

터 시작된 화석에너지의 개발과 사용으로 인해 이상 기후 현상이 전 세계적으로 빈번하게 발생하고 있으며 기후 변화에 따른 원인을 규명하기 위한 노력이 진행 중이다. 이에 따라 우리나라에서도 육상에 많은 자동기상관측 설비를 설치하여 운용중이나 해상에서는 그 양이 절대적으로 부족한 실정이다. 해상에서의 관측 장비 구축은 많은 예산이 소요되

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

† Corresponding Author : cjyang@mmu.ac.kr, 061-240-7228

며, 운영에 어려움이 많다. 현재는 해상에 소수의 부이를 설치하여 운영하고 있지만, 긴급한 점검 또는 유지보수를 위한 선박의 필요성 및 운영비용 등의 문제점이 발생하고 있다(Nam, 2000).

해양환경, 지형 및 생태의 조사는 해양안전정보 구축을 위해 매우 중요하며 이를 위해 현재 수산과학원, 한국해양과학기술원, 한국해양조사원에서 총 20척 이상의 공공해양조사선이 투입되어 운영되고 있으며 이곳에 소요되는 운용비용은 연간 350억 정도이다. 반면에, 연근해 천수역의 해양조사의 경우 대형 해양조사선의 접근이 어려운 곳이 많고, NLL 부근 해역의 해양조사 역시 안전 문제로 조사가 쉽지 않아 대책마련이 필요하다. 따라서 이러한 해양관측, 조사 등이 가능한 세일드론과 같은 소형무인선박의 개발이 요구되며 이에 따른 연구가 진행되고 있다(Kim et al., 2014).

세일드론에서 세일(Sail)은 항해 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 기존 세일의 경우 두께가 얇은 직물 소재로 풍압에 의해 늘어지는 등의 변형에 의해 세일 주위의 유동을 변화시켜 추력을 발생시키지만 반드시 사람이 상주하여 세일을 조정해야 하므로 장기간 관측, 조사에 어려움이 많다(Park et al., 2013). 따라서 최근에는 무인세일드론의 항해 성능을 향상시키기 위해 에어포일형의 Wing sail(Mark, 2006)이 사용되고 있으며, Furukawa et al.(2015)은 Main sail(NACA 0025)에 보조플랩(Flap)을 장착하여 무인세일드론의 유효성을 시험하였다. 또한 Lee et al.(2006)과 Li et al.(2015)은 보조 또는 변형 플랩을 적용하여 다양한 공력 해석을 시도하였다. 하지만 에어포일형 세일의 경우 공기역학적인 특성을 향상시키기 위해 후행 플랩을 적용하거나 변형 플랩을 이용하기 때문에 무인세일드론의 세일을 설계하는데 어려움이 있다. 또한 장기간 무인항해를 하기 위한 세일드론의 세일은 공기 역학적 성능뿐 아니라 효율적인 디자인이 요구된다.

최근 Pham et al.(2020)은 에어포일형 세일보다 공기역학적 성능이 우수하고, 플랩 등과 같은 별도의 보조 장치가 필요 없는 트윈커브세일(Twin curvy sail)을 제안하고, 전산유동해석을 통해 두 세일의 형상 및 간격에 따른 공기역학적인 성능을 비교하였다.

그러므로 본 연구에서는 그 후속연구로 수치해석을 통해 에어포일형 세일과 트윈커브세일의 성능 비교하여 그 유효성을 검토하고, 성능에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 캠버 효과에 따른 최적의 트윈커브세일을 제시하고자 한다.

2. 세일 형상 및 해석 모델

2.1 지배방정식

유동해석을 위한 연속 방정식은 식(1)과 Reynolds averaged

Navier-Stokes 방정식 (2)을 사용하였다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

여기서, μ 는 유체의 점성계수이며 P 는 평균압력 U_i 는 평균속도의 유속을 $\overline{u_i u_j}$ 는 무차원화된 Reynolds 응력을 나타낸다. 세일드론(Sail drone)의 기본적인 형상은 Fig. 1과 같고, 세일을 유체해석과 연계하여 구하기 위한 변수를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서, θ 는 추력과 세일이 이루는 각, α 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 양력과 항력을 식(3)으로 나타낼 수 있다.



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

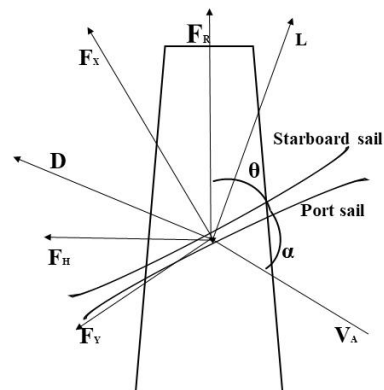


Fig. 2. Relations direction of yacht and the force by the wind.

$$\begin{Bmatrix} L \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_X \\ F_Y \end{Bmatrix} \quad (3)$$

2.2 수치해석

Fig. 3에서 보는 바와 같이 NACA 0018시위선(Chord Line)을 기준으로 반원의 15L에 위치하며 계산조건은 Table 1에 나타냈다. 수치해석을 위한 상용코드는 2차원 계산에 주로 사용되는 ANSYS-CFX를 사용했다.

난류모델로는 역 압력구배에 의한 와류의 크기 및 박리점을 잘 예측한다고 평가받고 에어포일의 해석에 적합한 SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ 모델을 선택하였으며(Kim et al.,

Table 1. Computational model setup

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

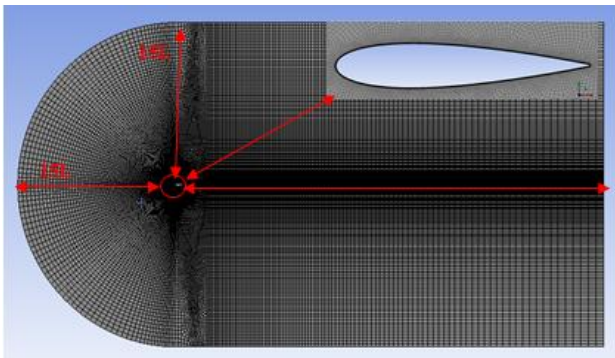


Fig. 3. The computational domain of airfoil.

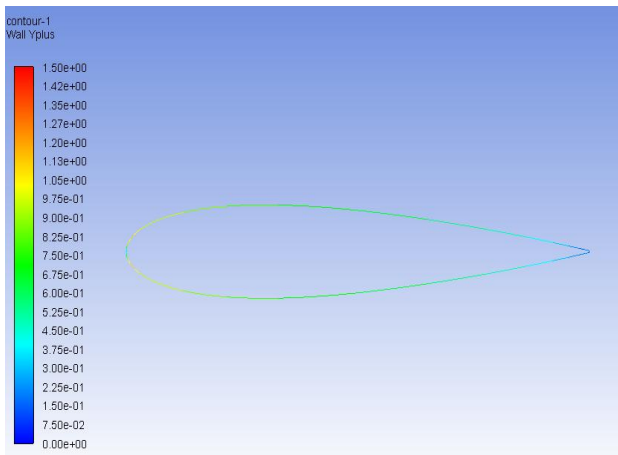


Fig. 4. The Y+ value of airfoil.

2006) 벽면에서는 유체의 유동의 속도와 벽면의 이동 속도와 같은 No Slip 조건을 부여하였고 벽함수에서 저 레이놀드 수 인접벽 모델로 자동인접벽면처리 모델을 사용하였고 대칭 (Symmetry) 경계조건을 부여하여 유동흐름이 통과하지 못하게 설정하였다. 유한체적법을 바탕으로 운동량방정식과 속도 압력 보정식을 연립하여 사용하였으며, 공간차분은 2차 풍상차분법을 사용하였다. 또한, 트윈커브세일 주변의 유동 해석을 위한 레이놀즈수는 6×10^5 이며 이때 트윈커브세일을 지나는 유동의 속도는 약 8m/s이다.

모델링의 수렴성 여부는 y^+ 에 의한 격자 밀집도에 의해 판단했다. 날개에서 천이, 박리가 발생 하는 곳은 날개의 상-하면이기 때문에 이곳에서의 y^+ 의 값은 중요하다(Lee et al., 2015). 또한, y^+ 는 경계층 주변에서 난류모델의 정확성에 직접적인 영향을 미치며 저 레이놀드 모델의 적용시 해석을 위한 y^+ 의 평균값은 약 1 정도로 구성되어야 신뢰성 있는 해석 결과의 확보가 가능하기 때문에(Kim et al., 2008) 세일의 단면 평균 y^+ 는 약 1 정도로 구성하였고 Fig. 4에 나타냈다.

한편, 격자의 의존성 확인을 위하여 받음각 $25^\circ \sim 45^\circ$ 에서의 양력계수를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6은 NACA 0018모델에 대한 실험 결과에 난류 모델의 시뮬레이션 값을 비교한 결과를 나타내었으며 최대 오차는 약 10%이며 평균 오차는 약 6%로 전체적으로 shedahl and Klimas(1981) 및 Timmer(2008)의 실험 결과와 유사하게 실속(Stall)현상이 발생 후 양력이 회복하는 모습을 보여주고 양력계수가 변화하는 추이를 유사하게 예측하였으며 이를 통해 계산결과가 신뢰성을 가짐을 알 수 있었다.

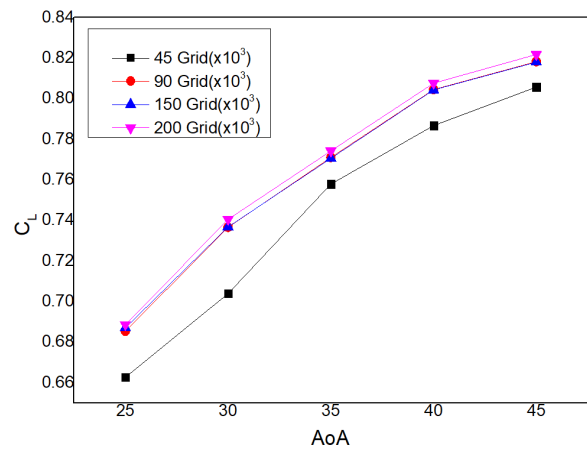


Fig. 5. Grid dependency.

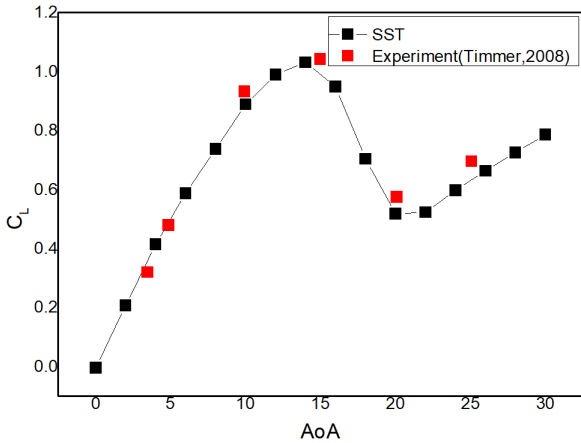


Fig. 6. Validation of lift coefficient.

2.3 트윈커브세일 형상

Pham et al.(2020)은 트윈커브세일의 형상 및 사이 간격에 따른 수치해석을 진행하였고 사이 간격이 0.28C일 때 가장 효율이 좋음을 확인했다. 일반적인 세일의 경우 캠버의 크기는 약 7~12%, 높이는 러프로부터 약 30%의 위치가 좋다고 알려져 있으며 캠버의 크기가 작고, 최대 캠버는 러프로부터 약 30%의 위치가 최적으로 알려져 있다(Jeong, 2003).

트윈커브세일의 설계 및 형상은 Fig. 7과 Table 2와 같으며 Port sail 과 Starboard sail로 구성된다. Fig. 8에서와 같이 Chord length는 1125 mm, 각 세일 간 간격은 0.28C, 드래프트(Draft)는 30%로 설계되었으며 각 Case 마다 캠버 값을 변화시켰고 드래프트 및 캠버는 식(4), (5)에 나타내었다.

$$Draft = X_d/c \tag{4}$$

$$Camber = Y_{max}/c \tag{5}$$

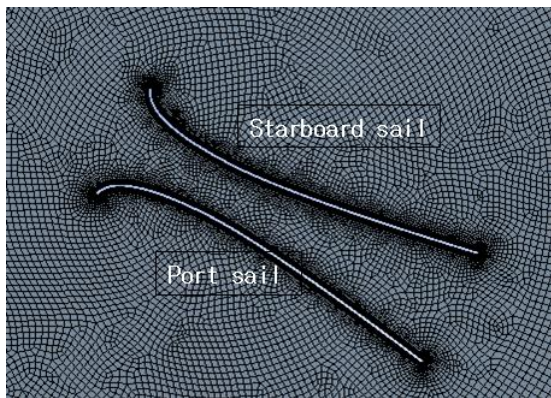


Fig. 7. Twin curvy sail.

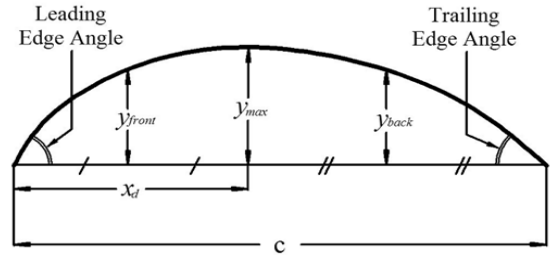


Fig. 8. Twin curvy sail section with defining geometry.

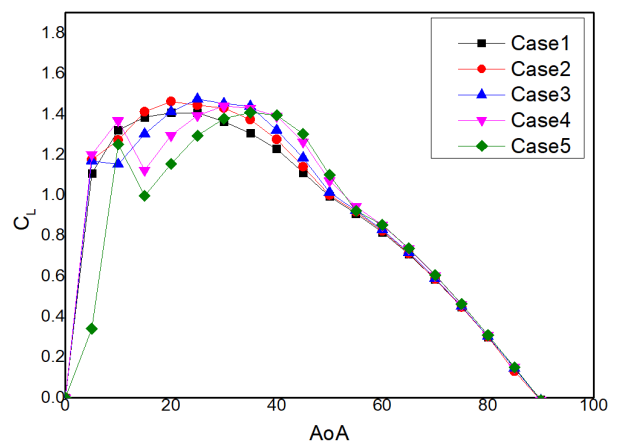
Table 2. Case study

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Chord	1125 mm				
Gap	0.28C				
Draft	30%				
Camber	5%	7%	9%	11%	12%

3. 결과 및 고찰

3.1 트윈커브세일 해석결과

트윈커브세일의 Port sail과 Starboard sail에 작용하는 양력과 항력 계수를 구하여, Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9 (a)와(b)는 각 Case 별 양력계수(C_L)와 항력계수(C_D)를 나타내고 Case 1과 Case 2는 받음각 20°에서 Case 3에서는 받음각 25°, Case 4는 받음각 30°, Case 5는 받음각 35°에서 가장 높은 양력계수를 나타내었다. 캠버의 크기가 9%인 Case 3이 모든 Case 중에서 가장 높은 양력계수를 갖고 캠버의 크기가 커짐에 따라 최대양력을 낼 수 있는 받음각 역시 증가함을 알 수 있다. 또한, 항력계수의 경우는 받음각이 커짐에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) Lift coefficient

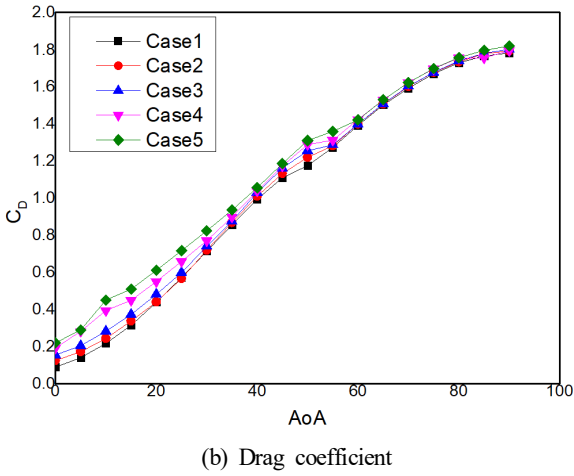


Fig. 9. Lift and drag coefficient with angle of attack.

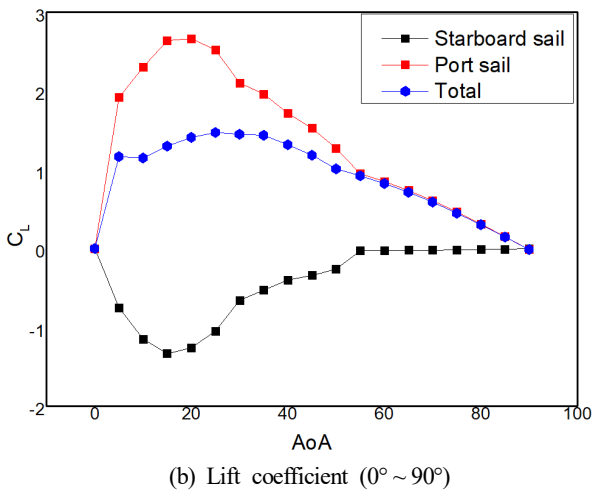
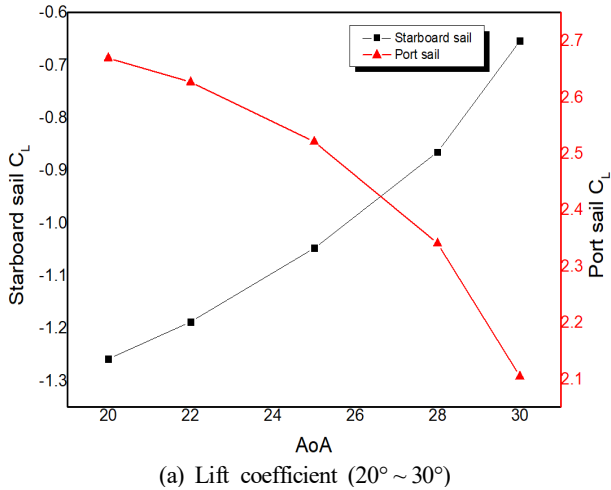


Fig. 10. Lift coefficient for port and starboard sail at Case 3.

또한, 항력계수의 경우는 받음각이 커짐에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 그 중 양력계수가 가장 높았던 Case 3에서 Port sail과 Starboard sail간의 상호작용을 확인하기 위해 각각 계산하여 그 값을 Fig. 10 (a)에 나타내었고 받음각 25°~30°사이에 Port sail의 양력계수가 떨어지고 음의 양력계수를 갖는 Starboard sail의 경우는 증가하여 트윈커브세일의 전체 양력계수는 상승한다. Fig. 10에서 (b)는 Case 3의 받음각 20°~30°에서 Port sail 과 Starboard sail의 양력계수를 각각 나타내었다. Port sail은 받음각 20°에서 가장 높은 양력계수를 갖고 그 후로 조금씩 줄어들다 25°에서 30°로 받음각이 커질 때 양력계수의 급격한 감소를 볼 수 있고 Starboard sail의 경우 받음각이 커짐에 따라 음의 양력계수가 점점 줄어들어 25°에서 30°로 받음각이 변할 때 양력계수가 급격히 증가함을 볼 수 있다.

받음각이 증가함에 따라 Port sail은 최대 양력계수 값을 갖은 후 감소하는 반면에 Starboard sail은 15°에서 음의 양력계수가 최대가 되고 그 후에 점차 그 값이 줄어 점점 좋아짐을 확인했다. 트윈커브세일의 Starboard sail과 Port sail의 상호작용을 통해 Case 3의 경우에서 받음각 23°에서 가장 높은 양력계수를 나타내었다.

Fig. 11에서 Starboard sail과 Port sail에서의 압력 차이를 보면 Port sail에서 세일의 아랫면과 윗면의 차압은 받음각 20°가 더 큼을 알 수 있다. 반면에, Starboard sail은 그 반대로 받음각 30°에서 차압이 더 큼을 확인할 수 있고 이 차압은 더

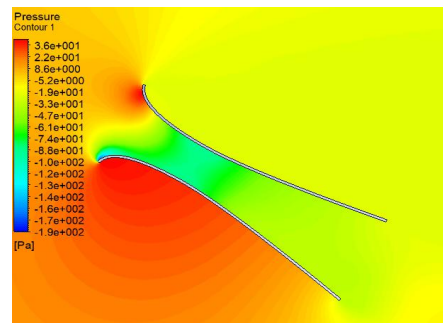
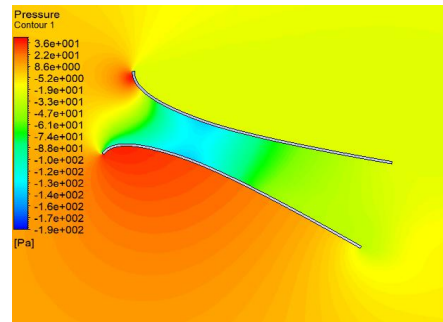


Fig. 11. Pressure contour distribution.

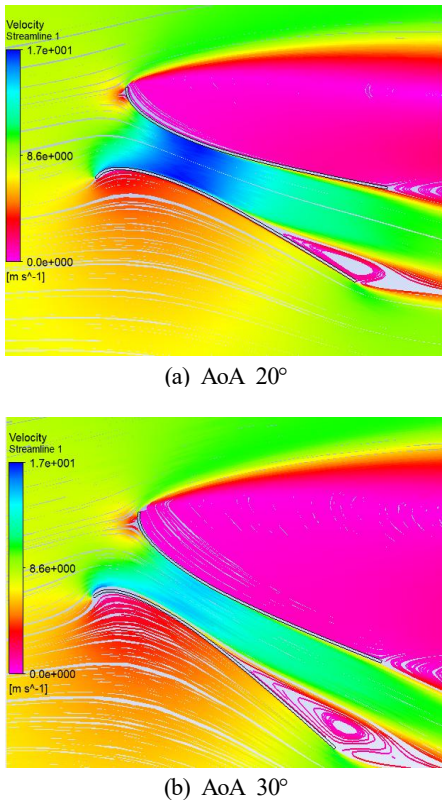


Fig. 12. Velocity streamline.

높은 양력을 생성한다.

Fig. 12는 Case 3에서 받음각 20°와 30°에서의 세일 주변 유선의 분포를 나타낸다. 일반적으로 세일의 전체 면적에 공기가 원활히 흐르는 경우는 드물고, 부분적으로 박리 (Separation) 가 생긴다. (a)와 (b)역시 박리가 생김을 확인할 수 있다. Port sail의 경우 받음각이 커짐에 따라 세일 앞부분에서 가속된 흐름은 세일 주위의 유동이 불안정하게 되며 박리가 시작된다. (b)에서 박리점이 전방으로 밀려 박리하는 범위가 커짐을 확인할 수 있다. Port sail의 경우 박리 및 차압으로 인해 받음각 20°에서 30°보다 더 높은 양력계수를 갖고 Starboard sail의 경우 차압으로 인해 받음각 30°가 더 높은 양력이 발생된다.

3.2 NACA 0018과 Case3의 성능비교

Fig. 13에서 트윈커브세일에서 성능이 가장 우수했던 Case 3과 에어포일 형상인 NACA 0018의 양력계수를 비교했다. 모든 받음각에서 트윈커브세일의 양력계수가 높음을 알 수 있다. Fig. 14는 NACA 0018의 받음각 15°, 20°를 비교하였고 (b)에서 실속현상이 발생함을 볼 수 있다. 그로 인해 NACA 0018은 받음각 15°에서 최대양력계수를 갖고 그 이후 실속이 발생하여 양력계수가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 15는 받음각 15°에서의 NACA 0018과 트윈커브세일의 압력 분포를 나타낸다. 트윈커브세일의 아랫면과 윗면의 차압이 NACA 0018 세일보다 더 큼을 알 수 있고, 이 차압은 더 높은 양력을 생성한다. 또한, NACA 0018의 실속 받음각이 트윈커브세일 보다 작기 때문에 트윈커브세일이 에어포일 형상의 세일보다 우수한 성능을 보이는 것으로 사료된다.

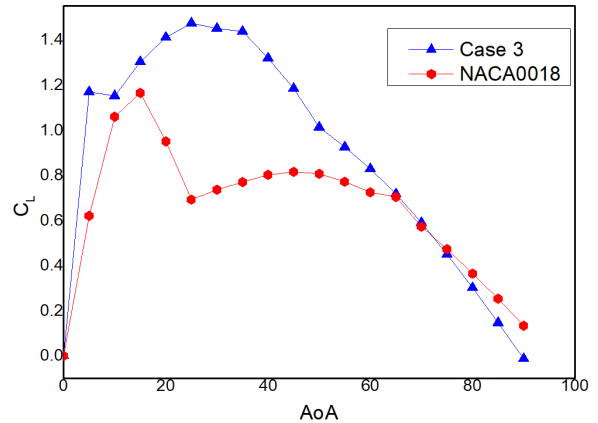


Fig. 13. Lift coefficient for case3 and NACA 0018.

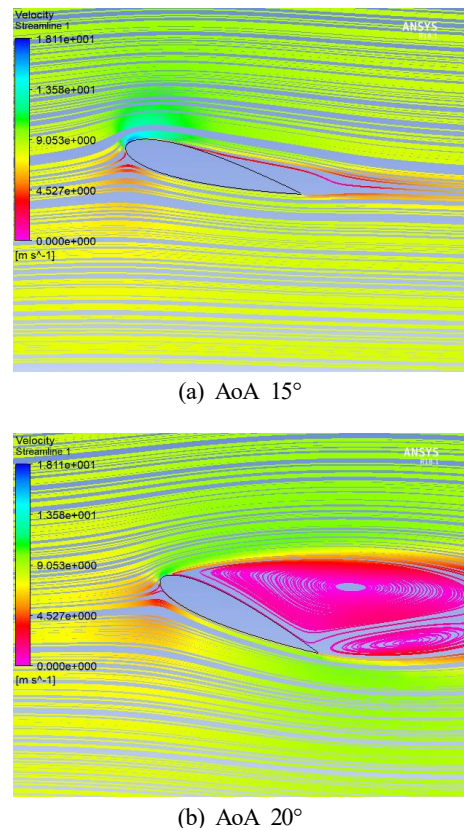


Fig. 14. Velocity streamline at NACA 0018.

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] 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.

[2] Jeong, J. S.(2003), Sailing Yacht, pp. 1-204.

[3] Kim, J. S., T. U. Lee, T. H. Kang, I. K. Kim, and Y. S. Kim(2006), A CFD Analysis on Axial Inlet Cyclone using Realizable $k-\epsilon$ Turbulence Model, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 1576-1581.

[4] Kim, B. S., H. J. Eum, J. B. Won, and M. E. Kim(2008), Flow Simulation and Power Prediction of a HAWT Based upon a Change of Turbulence Models, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, No. 5, pp. 27-32.

[5] 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. 21, No. 2, pp. 9-12.

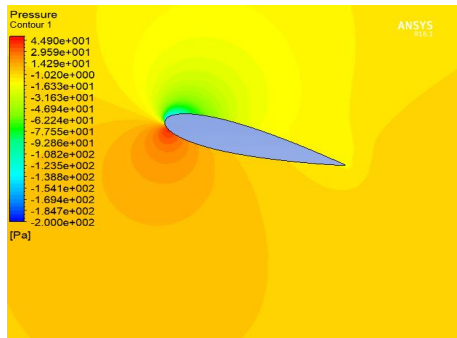
[6] Lee, H. J., Y. M. Jo, S. I. Choi, J. H. Kwan, and S. M. Ahn(2006), Aerodynamic Analysis and Design Optimization of Wing-sails, Journal of the Korean Society for Computational Fluids Engineering, pp. 350-363.

[7] Lee, K. S., Z. Huque, and S. E. Han(2015), A study on the y^+ Effect on Turbulence Model of Unstructured Grid for CFD Analysis of Wind Turbine, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, pp. 75-84.

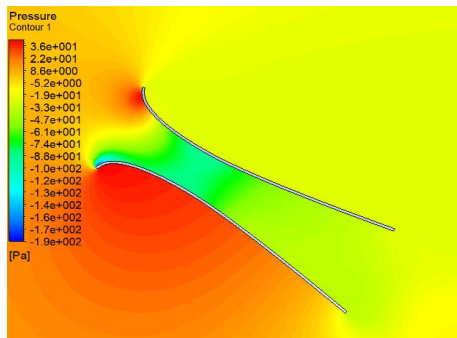
[8] Li, Q., Y. Nihei, T. Nakashima, and Y. Ikeda(2015), A study on the performance of cascade hard sails and sail-equipped vessels, Ocean Engineering, pp. 23-31.

[9] 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.

[10] Nam, J. C.(2000), Marine Survey Ship (No.2000) in Sailing, The Journal of Korean Meteorological Society, Vol. 10, No. 2, pp. 15-17.



(a) NACA 0018



(b) Case 3

Fig. 15. Pressure contour distribution at AoA 15°.

4. 결론

무인세일드론은 바람을 이용하여 항해하므로 세일의 최적화를 통해 큰 추진력을 갖도록 하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 기존에 사용했던 전통적인 직물소재나 에어포일 형상과 다른 트윈커브세일의 캠버 효과에 따른 성능 비교를 통해 최적의 세일 형상을 제시하였다.

1) 트윈커브세일은 에어포일 형상의 NACA 0018 보다 모든 받음각에서 높은 양력계수를 보였다.

2) 트윈커브세일의 캠버가 9% 인 받음각 23°에서 최대 양력계수 1.36을 나타내었다.

3) Case 3의 경우 Port sail은 받음각 20°에서 최대 양력계수를 갖고 Starboard sail의 경우 15°에서 최대 음의 양력계수를 나타내었다.

세일드론은 항해시 선체에 횡경사(Heeling) 및 옆밀림(Leeway)이 생기며 안정된 자세를 유지하는 것이 중요하다. 따라서 항후 추력(Driving force), 횡력(Heeling force)을 구하고 속도 예측프로그램(Velocity Prediction Program) 등을 통한 무인세일드론의 성능향상을 위한 추가적인 연구가 요구된다.

- [11] Park, S. R., J. H. Yoo, and C. Y. Song(2013), Fluid-Structure Interaction Analysis on the Deformation of Simplified Yacht Sails, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 50, No. 1, pp. 33-40.
- [12] 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.
- [13] Sheldahl, R. E. and P. C. Klimas(1981), Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines, Technical Report No. SAND80-2114, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- [14] Timmer, W. A.(2008), Two-dimensional low-Reynolds number wind tunnel results for airfoil NACA 0018, Wind Engineering, 32(6), pp. 525-537.

Received : 2021. 07. 30.

Revised : 2021. 09. 13. (1st)

: 2021. 11. 01. (2nd)

Accepted : 2021. 12. 28.