

# 요트세일의 형상계측 기법 연구

김철희<sup>1</sup>·최정규<sup>2</sup>·김형태<sup>2,†</sup>  
한국해양연구원 대덕분원<sup>1</sup>  
충남대학교 선박해양공학과<sup>2</sup>

## A Study on Shape Measuring Technique of a Yacht Sail

Choul-Hee Kim<sup>1</sup>·Jung-Kyu Choi<sup>2</sup>·Hyoung-Tae Kim<sup>2,†</sup>  
Korea Ocean Research & Development Institute<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University<sup>2</sup>

### Abstract

In this study, we introduced image processing technic to measure shape variations of general bodies and applied it to the flexible yacht sail. Shape measurements of simple bodies sails were carried out and results showed that technic can be a reliable method to measure shape variations of the flexible yacht sail. The sail shape variation of 30ft sloop type yacht sail is measured on different sailing conditions. As velocity and direction of wind are increased, trailing edges in the upper part of the sail become more open than the lower part of the sail which are not changed. So it is confirmed that the shape measurement of a sail shape depending on a sailing condition is possible to use image processing scheme.

**Keywords :** Yacht sail(요트세일), Shape measurement(형상계측), Image processing(화상처리), Flexible sail(유연세일)

## 1. 서론

요트세일의 풍동실험을 위해서는 가장 먼저 실제 세일과의 기하학적 상사가 이루어져야 하는데, 모형세일을 실선에서와 같이 형상 변화가 가능한 천(cloth)으로 할 경우, 모형시험 상사를 위해서 많은 어려움이 존재한다. 일반적으로 세일은 천으로 제작되기 때문에 입사하는 바람의 세기 및 방향 그리고 마스트와 붐을 비롯한 리깅 상태에 따라 세일 형상이 변화하게 되므로 실선과 모형선의 사이의 축척비 뿐 아니라 풍향, 풍속 등 운항상태에 따른 유체 동역학적 특성과 재료의 탄성특성을 고려한 유탄성 상사가 이루어져야만 모형시험을 위한 상사가 가능하게 된다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서 일반적으로 세일에 사용하는 천이 아닌 복합소재를 사용하여 모형세일을 설계형상에 맞춰 제작 및 실험을 수행한 바가 있으며(Lee, et al., 2006), 최근에는 세일의 탄성변형을 고려한 유체-구조 연성에 대한 연구가 미국, 유럽 등의 선진국을 중심으로 이루어지고 있다. 주로 실선에서의 세일 형상계측이 이루어지고 있으며, 계측된 형상은 실선 세일 주위의 유동특성과 유체력에 대한 수치해석적 연구(Clauss & Heisen, 2005)와 풍동시험을 위한 모형 세일 상사에 대한 검토에 활용되고 있다(Fossati, et al., 2006). 특히 세계적으로 고성능요트 개발을 위해 유체-구조연성 연구가 활발히 진행 중에 있고, 이러한 연구에 있어서 세일의 형상계측은 매우 중요한 요소 중 하나로 관련 연구도 점점 활발해 지고 있는 추세이나 아직까지 국내에서는 실선 세일의 형상 및 성능 변화에 관한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 세일의 형상계측 방법에 대해 조사하였고, 2장 혹은 그 이상의 사진으로부터 비교적 쉽고 정확하게 3차원 형상을 도출할 수 있는 이미지 센싱 기법(image processing scheme)을 이용한 형상계측 방법의 신뢰성을 검토하였다. 또한 30ft급 세일링 요트를 대상으로 실제 해상상태에 따른 세일 형상을 계측하고 이로부터 계측방법의 타당성과 활용성을 검토하였다.

## 2. 형상계측기법

### 2.1 3차원 형상 계측방법의 종류

대상물의 3차원 좌표를 얻기 위해서는 크게 접촉식 방법과 비접촉식 방법으로 분류되며, Fig. 1에 나타내었다.

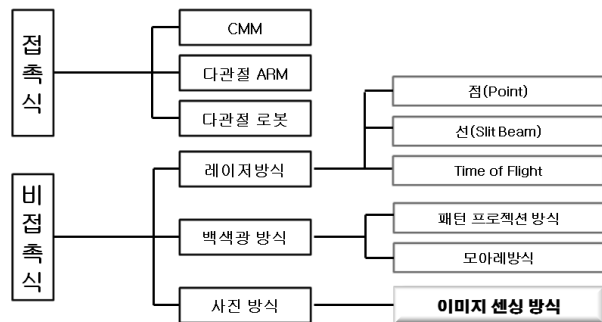


Fig. 1 Shape measurement schemes

접촉식은 사물의 표면과 직접 접촉하여 센서의 상대이동 값을 이용하는 방식이고, 비접촉식은 광학적 원리와 이미지 프로세싱 등을 이용하여 사물과 접촉 하지 않고 사물의 형상 정보를 획득하는 방식이다. 접촉식 방식의 장점으로는 정확도가 높은 장점이 있으나 시간이 오래 걸리고 강성 재질에 한에서만 가능하기 때문에 유연세일의 형상을 계측하는데 사용하기는 어렵다.

비접촉식 방식으로는 레이저를 이용하여 좌표에 대한 정보를 획득하거나, 레이저가 사물에 반사하여 돌아오는 시간으로 거리를 환산하는 방식, 백색광을 사물에 투영하여 카메라를 이용한 좌표 계산방식, 사진을 이용하여 2차원 이미지를 3차원으로 자료화 하는 이미지 프로세싱 방식 등이 있는데, 레이저 계측의 경우 정밀도가 우수하나 상당한 소요비용과 많은 장비들을 활용해야 하므로 비교적 작은 물체의 형상계측에 활용되고 있다.

반면 촬영된 2~3장의 사진으로부터 이미지 처리에 의해 형상을 계측하는 이미지 프로세싱 기법은 최근 이미지처리 기법향상으로 인해 상당한 정확도를 가지고 있고, 활용범위가 넓다. 또한 카메라를 제외한 여타의 추가 장비가 없어서 경제적이며, 대형 물체부터 소형까지 사용범위가 넓고, 접근하기 어려운 대상에 대해서도 계측 가능한 장점들을 가지고 있다. 따라서 요트세일의 형상계측은 사진으로부터 이미지처리를 통해 데이터를 얻을 수 있는 이미지 프로세싱 기법이 가장 적합한 것으로 판단하였으며, 이 기법을 활용하여 형상을 계측하는 방법에 대해 조사하였다.

### 2.2 이미지 프로세싱 기법의 원리

이미지 프로세싱의 기본적인 원리는 삼각측량 원리를 이용한 것이다. 사진 촬영 각도를 달리한 2장 이상의 사진을 이용하여 물체상의 특정 점들의 위치를 사진에서 추출하고, 각 사진에서 대응하는 상대좌표를 일치시키기 위해 삼각측량 기법을 거쳐 점들의 위치정보를 파악해 3차원 형상을 도출해 낼 수 있다.

삼각측량 기법을 활용하여 서로 다른 각도에서 촬영한 사진 2장으로 형상을 도출할 수 있는 사진계측 방법을 간단하게 Fig 2에 나타내었다. 대상의 한 점인 A의 공간좌표( $X_A, Y_A, Z_A$ )를 도출하기 위한 방정식은 닦은꼴 삼각형에 의해 전개된다. 닦은꼴의  $\Delta L_1 m o$ 와  $\Delta L_1 M O$ 로부터 다음 식 (1)을 유도한다.

$$\frac{X_A}{Y_A} = \frac{x_a}{f_1}, \quad \therefore X_A = \frac{x_a}{f_1} Y_A \tag{1}$$

또한 닦은꼴 삼각형  $\Delta L_2 o' m'$ 과  $\Delta L_2 O' M$ 으로부터,

$$\frac{B - X_A}{Y_A} = \frac{-x'_a}{f_2}, \quad \therefore X_A = B + \frac{x'_a}{f_2} Y_A \tag{2}$$

같은 카메라를 사용한다고 가정했을 때, 초점 거리  $f_1$ 과  $f_2$ 는 같으므로 식 (1)과 식 (2)를 등치하면 식 (3)과 같으며, 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 식 (4)를 얻는다.

$$Y_A = B f / (x_a - x'_a) \tag{3}$$

$$X_A = B x_a / (x_a - x'_a) \tag{4}$$

닦은꼴 삼각형  $\Delta L_1 o n$ 과  $\Delta L_1 O N$ 으로부터,

$$Z_A / Y_A = y_a / f \tag{5}$$

식 (3)을 식 (5)에 대입하면,

$$Z_A = B y_a / (x_a - x'_a) \tag{6}$$

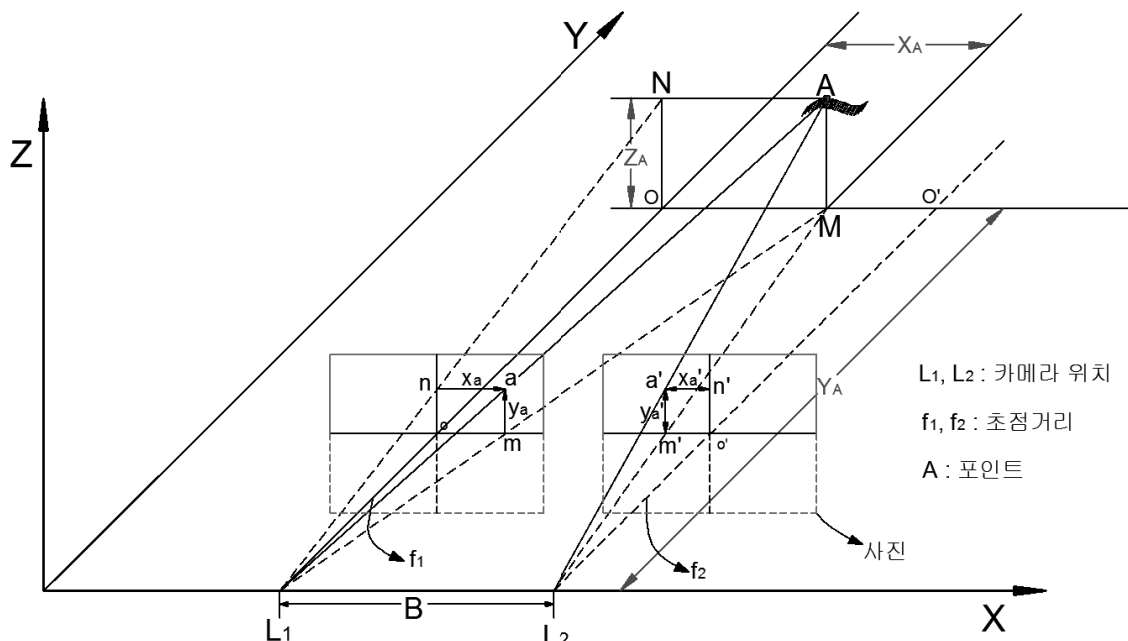


Fig. 2 Sketch of image processing method

따라서 임의의 거리만큼 떨어진 위치에서 촬영된 두 장의 사진을 가지고 식 (3), (4), (6)을 이용한 이미지 처리의해 임의의 점들에 대한 공간좌표 X, Y, Z를 산출할 수 있다.

이와 같은 원리를 이용한 이미지 프로세싱 기법을 통한 형상계측 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 형상계측을 실시할 대상에 대한 2장 이상의 사진을 서로 다른 위치에서 촬영하고, 이미지 프로세싱을 이용하여 각각의 사진에서 나타나는 실제의 동일한 부분을 마킹(marking)하고 같은 위치라고 지정하면 앞에서 설명한 삼각계측의 원리로 공간상의 좌표값을 추출할 수 있다. 좌표값의 정보를 가지고 CAD 프로그램을 이용하여 3차원 모델링이 가능하다. 여기서 이미지 프로세싱을 위한 프로그램은 상용코드인 포토 모델러 스캐너 (Photo Modeler Scanner Ver. 6.0, 이하 PMS)를 사용하였다.

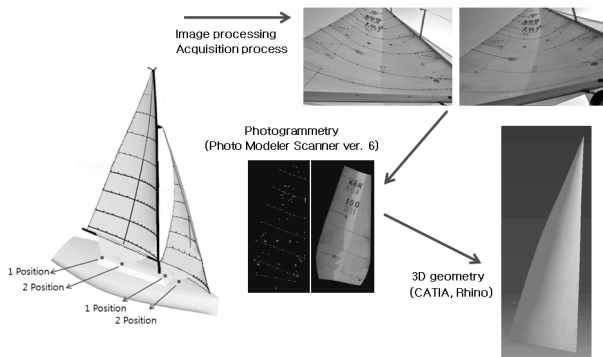


Fig. 3 Shape measurement process

### 2.3 계측 신뢰도 점검

이미지 프로세싱 기법을 이용한 형상계측 방법의 타당성을 검토하기 위해 간단한 도형들을 대상으로 PMS를 이용한 좌표정보를 추출하고 모델링을 한 후, 모델링으로부터 얻은 계측치수와 실제치수를 비교하여 오차를 확인하였다.

Fig. 4에는 직육면체 모형과 모델링 결과를 나타내었다. 직육면체의 형상을 계측하기 위해 Fig. 5와같이 3곳의 위치에서 직육면체의 모든 면이 보이도록 촬영을 하고 PMS를 이용하여 직육면체의 꼭지점과 모서리 좌표정보를 추출하여 모델링하였다. 직육면체의 모든 모서리에 대해 실제치수와 계측치수를 Table 1에 정리하였다. 12개의 모서리 길이를 비교한 결과 평균 0.15%수준의 차이를 보였으며, 작게는 0%, 크게는 0.56%차이를 보이고 있다.

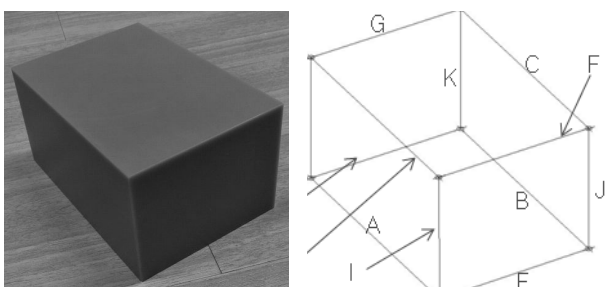


Fig. 4 Cube model and edge component of that

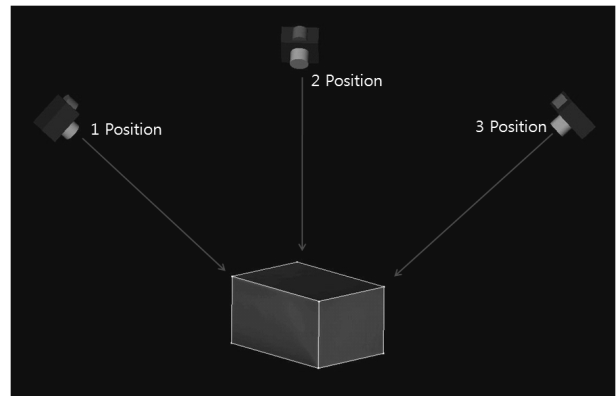


Fig. 5 Camera position to take photograph of cube

Table 1 Check the measurement error for cube

Element	Design(mm)	Measured(mm)	Error(%)
A	130	130	0
B	130	130.24	0.18
C	130	130.04	0.03
D	130	130.46	0.35
E	90	89.99	0.01
F	90	89.97	0.03
G	90	89.96	0.04
H	90	90.03	0.03
I	70	69.8	0.29
J	70	70.39	0.56
K	70	69.96	0.06
L	70	70.13	0.19

Fig. 6에는 원기둥 모형과 모델링 결과를 나타내었다. 직육면체와 같은 방법으로 형상계측을 실시하고 형상정보로부터 얻은 치수를 Table 2에 정리하여 비교하였으며, 원기둥의 지름오차는 0.95%이고 높이의 오차는 1.16%이다.

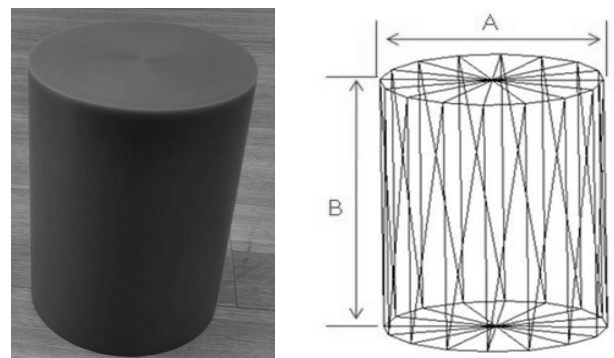


Fig. 6 Cylinder model and form component of that

Table 2 Check the measurement error for cylinder

Element	Design(mm)	Measured(mm)	Error(%)
A	100	99.05	0.95
B	140	138.38	1.16

Fig. 7에는 곡률이 포함된 모형과 모델링 결과를 나타내었다. 이도 마찬가지로 방법으로 형상계측을 실시하고, 설계치수와 계측치수를 Table 3에 정리하여 비교한 결과 평균 0.46%의 차이를 보였으며, 작게는 0%, 크게는 1.15%의 차이로 나타났다.

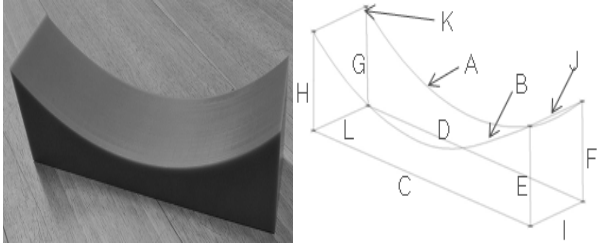


Fig. 7 Model including curvature and edge component of that

Table 3 Check the measurement error for curvature

Element	Design(mm)	Measured(mm)	Error(%)
A	219.8	218.84	0.44
B	219.8	217.71	0.95
C	200	199.05	0.47
D	200	200.43	0.22
E	60	60	0
F	60	59.64	0.6
G	60	60.02	0.03
H	60	59.31	1.15
I	50	49.87	0.26
J	50	49.9	0.2
K	50	49.85	0.3
L	50	50.46	0.92

설계 데이터(Yoo, et al., 2005)가 있고, CNC 가공한 세일 목형(Fig. 8)을 대상으로 PMS를 이용한 형상계측을 실시하고 형상계측으로부터 얻은 계측결과를 설계 형상과 비교하였다. 세일 목형의 설계 제원을 Table 4에 나타내었고, 계측된 값을 높이방향으로 5개의 위치에서 단면 형상에 대한 정보로 나타내었다.

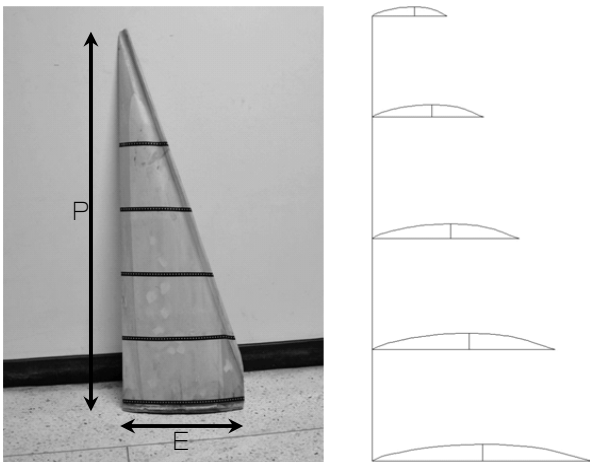


Fig. 8 Wooden mold of model sail

Table 4 The dimension of wooden mold of sail

Location(%)	Foot	16	33	51	66
Height(mm)	0	220	440	680	880
Chord length(mm)	440	367	295	223	150
Max. camber( $f/c$ )	8.0	9.4	10.4	11.7	12.7
Max. camber position(%)	51.4	52.6	52.9	53.4	54.7
P = 1320mm, E=440mm					

Table 5 The result of measurement for wooden mold of sail

Location(%)	Foot	16	33	51	66
Height(mm)	0	220	440	680	880
Chord length(mm)	440	367	295	223	150
Max. camber( $f/c$ )	8.2	9.7	10.4	11.9	12.8
Max. camber position(%)	50.5	51.8	51.9	52.0	54.0
P = 1320mm, E=440mm					

Table 5에 보인 바와 같이 코드길이의 경우에는 계측결과가 설계 형상과 정확하게 일치하고 있고, 최대캠버(maximum camber)의 경우 1.5%, 최대캠버위치(maximum camber position)의 경우 1.8%의 차이가 있음을 확인하였다.

Fig. 9에는 계측된 자료로부터 모델링한 형상과 설계 형상을 비교하여 나타내었다. 전체적으로 형상이 잘 일치하고 있으나 형상의 앞날(leading edge)과 뒷날(trailing edge)은 약간의 오차를 보이고 있는데, 이것은 PMS를 이용하여 좌표정보를 획득할 때 사진 상에서 피사체의 앞날과 뒷날 측 경계면에서의 낮은 해상도에 따른 것으로 볼 수 있다. 특히 목형세일의 경우 곡률반경의 중심방향인 압력면(pressure side)이 아닌 흡입면(suction side)을 촬영해야하기 때문에 더욱 해상도에 문제가 발생할 수 있는데, 실선 세일의 계측은 압력면에서 이루어지므로 경계면의 형상 정보를 충분히 도출할 수 있을 것으로 판단하였다.

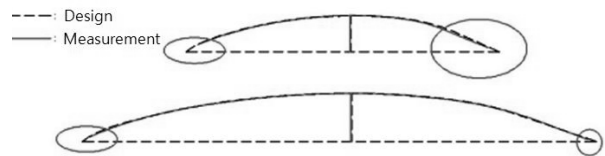


Fig. 9 Comparison of camber line of measurement and design

### 3. 실선 세일의 형상계측 및 결과

#### 3.1 실선 세일의 형상계측

실선 세일의 형상계측을 위한 대상 세일 요트는 한국해양연구원원에서 개발한 슬루프(sloop)형 세일 요트인 Kordy 30을 대상으로 하였으며, 실선 세일의 촬영 사진을 Fig. 10에 나타내었다. 세일의 형상은 해상상태에 따라 수시로 변화하고, 2장 이상의 사진이 필요하기 때문에 카메라 두 대를 동기화시켜 촬영할 수 있도록

록 시스템을 구성하였다. 이를 위해 유선 릴리즈를 두 카메라에 연결하고 릴리즈의 셔터 하나로 두 카메라가 동시에 구동되어 사진촬영이 가능하도록 카메라 장비를 구축하였다.

Table 6에는 촬영된 시점에서의 항해 상태를 나타내었으며, case1과 2는 속도 조건은 같고 받음각이 다른 경우이며 case3과 4는 받음각과 풍속이 모두 다른 경우로 case 4의 경우가 가장 풍속이 세고 case1의 경우가 풍속이 가장 작은 경우이다.

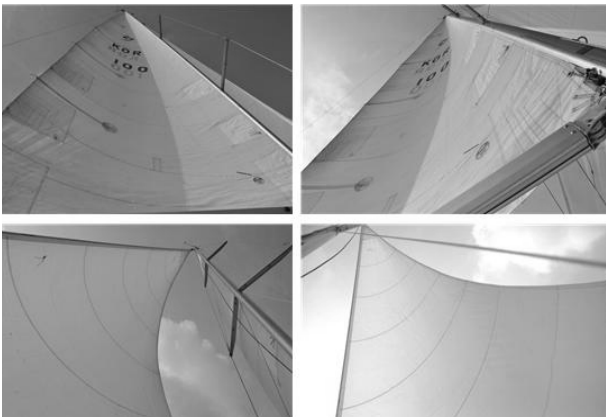


Fig. 10 Yacht sail measurement(up : main sail, down : jib sail)

Table 6 Sailing conditions about measurement

Case	1	2	3	4
Incident angle (deg.)	43	57	50	63
Incident speed(Knot)	2.7	2.7	7.3	11.3
Heel angle (deg.)	5.4	7.3	8.3	16.2
ship speed (knot)	2.2	2	5.6	9.6

### 3.2 계측결과

요트세일의 형상계측 결과를 세일의 높이방향으로 4개 단면에 대해 형상 변수인 코드길이, 최대캠버위치, 최대캠버, 기준선 각도를 도출하고 비교하였다.

높이방향의 72% 위치의 단면(Fig. 11, Table 7)을 살펴보면, case1에서 case4로 감에 따라 즉, 받음각과 풍속이 증가할수록 뒷날(trailing edge)이 바깥쪽으로 많이 열리는 경향을 확인할 수 있으며, 높이방향의 54%의 단면비교 결과(Fig. 12, Table 8)도 역시 비슷한 경향을 보이고 있다. 또한 풍속이 증가할수록 최대 캠버(maximum camber)가 줄어들고 베이스라인 각도(baseline angle)가 늘어난 경향을 확인할 수 있다.

높이방향 36% 위치의 단면(Fig. 13, Table 9)도 앞의 경우와 경향은 비슷하나 뒷날이 열린 정도가 작아진 것을 확인할 수 있으며, 높이방향 13%의 단면비교 결과(Fig.14, Table 10)에서는 뒷날의 열린 정도가 더 작아진 것을 볼 수 있는데, 이는 메인세일 밑에 붐과 리깅에 의해 구속되기 때문인 것으로 보인다. 결과적으로 세일의 상부에서 바람의 세기나 각도에 의해 뒷날이 많이 열리게 되며, 하부로 내려오면서 뒷날의 열린 정도가 줄어들고

있는 경향을 볼 수 있다. 이를 통해 풍속과 풍향에 대한 세일의 형상변화 도출이 가능함을 확인하였다.

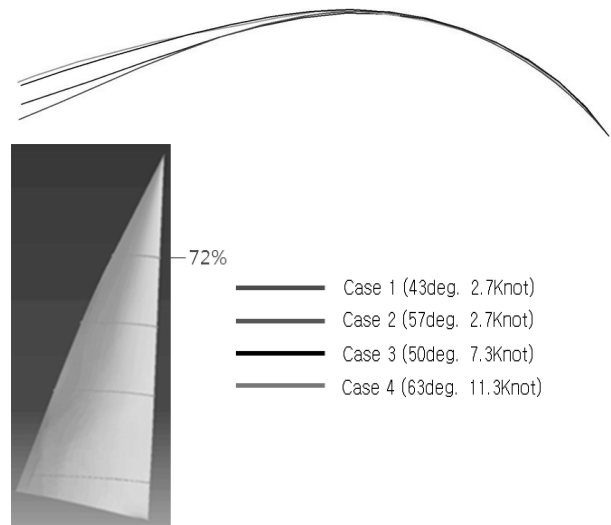


Fig. 11 Comparison of cross section at 72% of high

Table 7 Cross section informations at 72% of high

Case	1	2	3	4
Chord(mm)	1247	1243	1247	1220
Max. camber position(%)	42.23	39.02	38.84	39.31
Max. camber( $f/c$ )	19.40	18.19	17.28	16.41
Baseline angle(deg.)	2.062	3.838	6.117	7.582

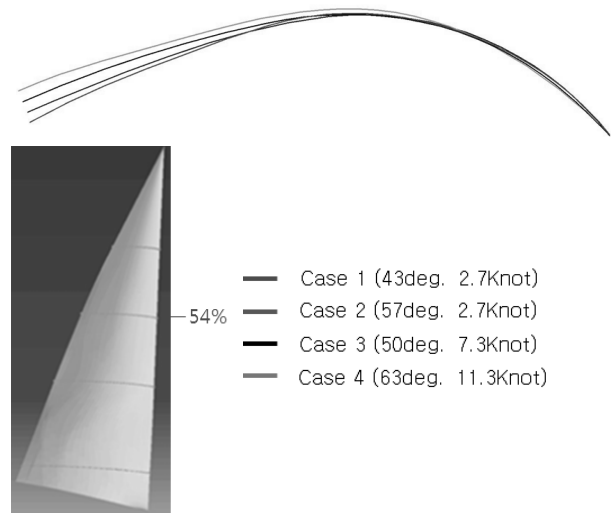


Fig. 12 Comparison of cross section at 54% of high

Table 8 Cross section informations at 54% of high

Case	1	2	3	4
Chord(mm)	2072	2081	2096	2117
Max. camber position(%)	42.39	41.75	42.83	40.52
Max. camber( $f/c$ )	19.61	18.68	17.72	17.68
Baseline angle(deg.)	1.718	3.099	4.508	5.952

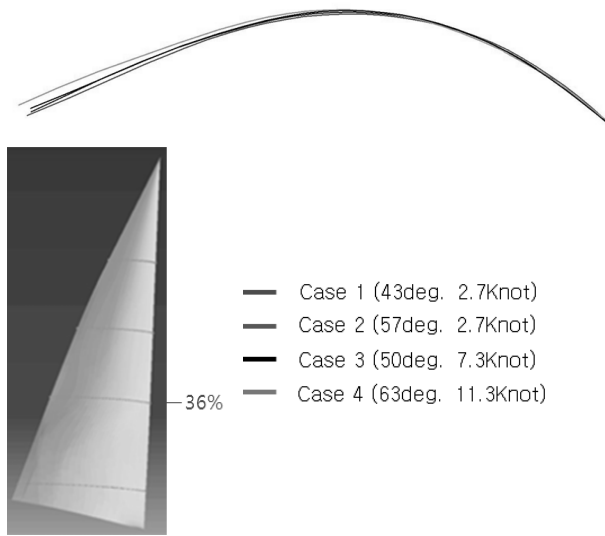


Fig. 13 Comparison of cross section at 36% of height

Table 9 Cross section informations at 36% of high

Case	1	2	3	4
Chord(mm)	2789	2772	2773	2831
Max. camber position(%)	45.31	44.45	42.53	44.42
Max. camber( $f/c$ )	17.25	17.59	17.50	16.91
Baseline angle(deg.)	0.927	1.781	2.539	3.195

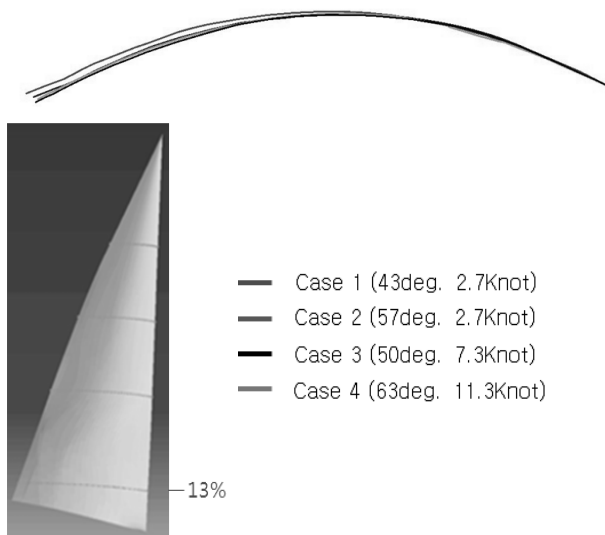


Fig. 14 Comparison of cross section at 13% of height

Table 10 Cross section informations at 13% of high

Case	1	2	3	4
Chord(mm)	3619	3573	3563	3668
Max. camber position(%)	49.70	49.66	48.21	48.60
Max. camber( $f/c$ )	12.24	12.06	12.61	12.85
Baseline angle(deg.)	0	0	0	0

## 4. 결론

본 연구에서는 요트세일의 형상계측을 위해 경제적이고, 사용이 용이하며, 정밀도가 우수한 이미지 프로세싱 기법을 도입하였다. 직육면체, 원기둥 등 간단한 형상 및 세일 목형에 대해 형상계측을 수행하여 형상계측이 가능함을 확인하였다. 이 기법을 이용하여 30ft급 국산 요트인 Kordy30을 대상으로 세일의 형상계측을 실시하였다. 계측결과 풍향, 풍속 증가에 따라 세일 상부에서 뒷날의 열리는 정도가 점점 커지며, 세일 하부에서는 봄의 영향으로 형상이 거의 변하지 않는 것으로 나타났다. 이를 통해 본 기법을 활용한 항해상태에 따른 세일의 형상변화 계측이 가능함을 확인하였다.

향후 본 연구 결과를 통해 요트 세일의 항해상태에 따른 더 많은 형상 변화 정보를 확보하여 고성능 세일 설계에 반영할 수 있는 정보를 제공할 것으로 기대된다.

## 후기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0027357).

## 참고 문헌

- Clauss, G. & Heisen, W., 2005. CFD Analysis On The Flying Shape of Modern Yacht Sails. *12th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean*.
- Fossati, F. Muggiasca, S. Viola, I.M. & Zasso, A., 2006. Wind Tunnel Techniques For Investigation And Optimization Of Sailing Yachts Aerodynamics. *2th High Performance Yacht Design Conference*, Auckland.
- Lee, P.K. Kim, H.T. & Yoo, J.H., 2006. Numerical Analysis of Blockage Effects on Aerodynamic Forces for Yacht Sails in Wind Tunnel Experiment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(4), pp.431-439.
- Yoo, J.H. et al., 2005. Calculations on the interactions between Main and Jib Sails. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(1), pp.24-33.

