요트세일의 풍동시험을 위한 공력 계측시스템 구축과 모형세일의 공력 계측

김철희¹·최정규²·김형태^{2,†}
한국해양연구원 대덕분원¹
충남대학교 선박해양공학과²

A Construction of Aerodynamic Force Measurement System for Wind Tunnel Test of Yacht Sail and Aerodynamic Forces Measurement of Model Sail

Choul-Hee Kim¹·Jung-Kyu Choi²·Hyoung-Tae Kim^{2,†}
Korea Ocean Research & Development Institute¹
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University²

Abstract

In order to estimate a yacht sail performance, measuring system of aerodynamic forces acting on the yacht sail is constructed and experiments of flexible model sail are carried out at the medium-size subsonic wind tunnel of Chungnam National University. Experimental results for a flexible sail are compared with experimental and numerical results of fixed shape sail. In case of a fixed shape sail, lift and drag coefficients are rarely changed at all velocity conditions. However, those of the flexible sail are decreased as the incoming velocity is increased. These are understandably resulted from shape variations due to the flexible material. Therefore aero-elastic similarity should be more carefully considered in the model test rather than other similarities.

Keywords : Yacht sail(요트세일), Wind tunnel(풍동), Aerodynamic forces measuring system(공력계측시스템), Flexible sail(유연세일), Aero-elastic similarity(공유탄성 상사)

1. 서 언

세일링 요트의 개발에 있어서 가장 중요한 요소 중 하나는 추진력을 발생시키는 세일의 형상과 크기를 결정하는 것이며, 이를 위해 설계단계에서 세일에 대한 공력학적 특성을 정확히 추정하여 반영하는 것이 무엇보다도 중요하다.

세일의 유체공력학적 특성을 추정하기 위한 가장 대표적인 방법으로는 모형세일에 대한 풍동시험이 있다. 모형세일의 풍동시험을 위해서는 실선세일을 정확히 모사하는 것이 중요한데 세일의 기하학적 상사와 뒀바람(apparent wind)의 재현이 필수적이다. 특히 세일의 재질 및 직조방법과 마스트(mast), 붐(boom) 등으로 이루어진 스탠딩 리그(standing rig)의 변형에 따라 세일 형상이 변화하기 때문에 세일의 기하학적 상사를 만족시키기 위해서는 모형세일 제작에 대한 적절한 재료의 선택과 리그의 구현이 필요하다. 또한, Lee, et al.(2006)에 따르면 폐회로식 풍동의 경우에는 차폐효과(blockage effect)의 영향을 무시할 수 없기 때문에 개방형 풍동에서의 시험 방법에 대한 고안도 필요하다. Fossati, et al.(2006)이 모형세일의 풍동시험을 위한 기하학적 상사 및 뒀바람 재현에 관한 연구를 수행한 바와 같이 해외에서는 모형세일에 대한 풍동시험이

활발하게 이루어져 시험에 대한 노하우가 축적되어 있으나, 국내에서는 최근 Lee, et al.(2006)의 풍동시험과 Yoo, et al.(2005)과 Chi, et al.(2007)의 수치해석적 연구가 이루어진 바 있으나 세일과 리그의 형상이 변형하지 않는 강체로 간주하는 등 제한적인 연구에 그친 실정이다. 본 연구에서는 세일의 풍동시험을 위하여 하나의 마스트에 메인세일(main sail)과 집세일(jib sail)이 각각 앞, 뒤에 부착된 슬루프(sloop)형 요트세일을 대상으로 개방형 시험부를 갖는 충남대학교 중형 아음속 풍동에서 모형 세일 시험에 필요한 리그 시스템을 고안하고, 힘 계측장비를 구성하여 모형세일의 풍력계측 시스템을 구축하였다. 구축된 시스템을 사용하여 유연 모형 세일에 대한 공력계측을 수행하고 계측결과로부터 형상 고정세일의 시험결과 및 수치해석 결과와 비교분석 하였다.

2. 시험장치 구성 및 시험방법

2.1 풍동

모형세일의 풍동시험은 충남대학교 중형 아음속 폐회로식(medium-size subsonic closed-circuit type)풍동에서 이루어

졌으며, 차폐효과를 없애기 위해 시험부를 제거한 개방형(open jet type)으로 사용하였으며, 이때 시험 가능 영역은 단면으로 1.6m×1.6m이고, 최대 속도는 45m/s 이다. 기본 제원을 Table 1, Fig. 1에 풍동의 개략도를 나타내었다.

Table 1 Specification of wind tunnel

	Size	Max Speed
Test section 1	1.25m×1.25m×4m	70m/s
Test section 2	1.8m×1.8m×5.2m	45m/s
Open Type	1.6m×1.6m×4m	45m/s
Fan Speed	1180rpm	
Fan Power	260Kw

Fig. 1 Schematic design of the wind tunnel(unit : mm)

2.2 계측장비

풍동에서 모형세일에 대한 유체력 계측을 위해 충남대학교에서 보유하고 있는 큐리오텍사의 6분력계를 사용하였고, 측정용량은 힘이 50kgf이며, 모멘트가 5kgf·m이다(Fig. 2). 6분력계는 x, y, z의 세 방향 힘(force)과 세 방향 모멘트(moment)를 동시에 계측 가능하며, 이에 따라 추력, 횡력, 높이 방향 풍압중심, 가로방향 풍압 중심 등 세일의 설계에 필요한 데이터를 한 번에 얻을 수 있다. 또한 세일과 세일 리그를 위한 프레임에 하나의 커넥터에 설치하여 6분력계에 연결하기 때문에 모형세일의 설치가 쉽고 리그가 간편하다. 분력계로부터 나오는 전압신호는 DAS(Data Acquisition System)에 의해 증폭되고, 디지털신호로 변환되어 PC로 전송되며, DAS는 HBM사의 MGCPlus를 사용하였다. 샘플링 데이터는 50Hz이며, 10초 동안의 데이터를 시간평균하여 결과를 도출하였다.

6분력계의 출력특성을 확인하고 각 방향 힘 및 모멘트의 상호간섭을 제거해 주기 위해 교정(calibration)을 실시하였다. 분력계의 용량이 비교적 크기 때문에 세일의 풍력계측에 필요한 용량(힘 : 10kgf, 모멘트 : 2kgf·m)까지만 교정을 수행하였으며, 분력계의 출력특성을 Fig. 3에 나타내었다. 교정데이터로부터 힘과 모멘트에 대한 전압 기울기가 선형적이며, 비선형성(non-linearity)이 $\pm 0.5\%$ 이내, 이력성(hysteresis)이 $\pm 0.5\%$ 이내에 있으므로 세일의 힘 및 모멘트 계측에 적합함을 확인하였다.

Fig. 2 Six component load cell

Fig. 3 Force and moment gradient for voltage

2.3 대상 실선세일 및 모형세일

본 연구의 대상세일은 하나의 마스트에 집세일과 메인세일이 있는 슬루프(sloop)형 세일요트이며, Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4 Sail system of a sloop

대상세일에 대한 모형세일은 1/9 축소모형이며, 그 기하학적 특성과 제작된 모형세일을 Fig. 5에 나타내었다. 모형 세일의 재질은 실선 세일에 사용되는 케블라(kevlar)이고, 풍속과 풍향, 리그 슈라우드(shroud)와 스테이(stay)로 사용된 와이어의 장력에 따라 세일 형상이 변화하는 유연세일(flexible sail)이다.

Fig. 5 Flexible model sail(unit : mm)

Fig. 6에 모형세일의 리그를 위한 하부 프레임에 나타내었다. 모형세일을 리그(rig)에 설치하기 위해서는 하부 프레임에 세일, 마스트(mast), 붐(boom)을 와이어에 연결하고 와이어 장력을 조절한다. 프레임 및 마스트는 세일 형상을 유지하기 위한 와이어 장력으로 인하여 위로 휘어버리는 매우 큰 외력이 발생하기 때문에 종방향 강도를 충분히 가진 알루미늄 프로파일을 이용하여 제작하였고, 와이어의 장력은 턴버클을 사용하여 조절하였다. 또한 손쉽게 장력조절이 가능하고, 부가적인 장치들의 간섭을 피하기 위해 프레임 하부에 턴버클을 배치하였으며, 이에 따라 와이어의 방향전환이 필요하므로 프레임 등 다른 부분에서 와이어에 의한 손상이 없도록 도드레를 사용하였다.

Fig. 6 Rig system for model

2.4 시스템 구성

Fig. 7에 모형세일을 고정시킬 테이블을 나타내었다. 네 개의 다리로 고정된 테이블의 중간층에 LM 가이드를 따라 상하운동이 가능한 알루미늄 받침을 설치하여 그 위로 분력계를 고정하기 위한 척과 척의 각도를 조절하는 회전판, 회전판을 제어하는 서보모터로 구성되어 있다. 테이블에 장착된 서보모터는 0.6kgf·m의

토크를 가진 저속교류모터로서 디지털제어방식을 통해 회전각도와 회전속도를 제어할 수 있으며, 이를 통해 모형세일의 받음각 조절이 가능하다.

Fig. 7 Experimental device to set model

Fig. 8은 모형세일을 회전시키기 위한 회전판(turntable)으로 서보모터에 의해 360도 회전할 수 있도록 제작하였다. 이러한 회전판은 사각 관으로 구성된 프레임 위에 장착되어 무게가 상당하므로 분력계와 간섭이 일어나면 계측신호에 영향을 줄 수 있기 때문에 분력계에 영향을 주지 않고 회전시키기 위해서 서보모터와 분력계 사이에 원형 판을 설치하고 그 위에 회전판을 고정함으로써 분력계에 회전판의 하중이 작용하는 것을 방지하였다.

전체적으로 모형세일, 하부 프레임, 분력계, 회전 테이블, 상하이동 테이블을 하나의 구조물이 되도록 고안하였으며, Fig. 9에 계측시스템의 전체 구성과 도면을 나타내었다.

Fig. 8 Turntable

Fig. 9 Experimental device configuration

3. 시험결과 및 해석

3.1 시험조건

본 연구에서 우수 직교좌표계를 사용하였으며, 마스트 중심을 원점으로 후류 방향을 양의 x, 우현 방향을 양의 y, 연직 상방을 양의 z 방향을 하였다. 본 계측시스템의 특성상 분력계와 모형세일의 입사각이 같이 변화하므로 양항력 성분 도출을 위해서는 좌표변환이 필요하며, 이에 대한 좌표계를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10 Coordinates of a sail yacht

받음각은 본 바람(apparent wind)의 각도이고, 메인세일과 집세일 사이각은 집세일 각도(jib angle)로 표기하였다. 양력계수(lift coefficient, C_L)와 항력계수(drag coefficient, C_D)는 다음 식 (1)과 같이 정의되며, 여기서 사용된 공기의 밀도와 면적은 각각 $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$, $S(\text{wetted surface})=1.2703\text{m}^2$ 이다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 S}, C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (1)$$

시험부 속도(U)는 7m/s, 10m/s, 12m/s에 대해 시험을 수행하였고, 이에 대응되는 모형세일의 레이놀즈수는 각각 $Re=2.1\times 10^5$, 3.0×10^5 , 3.6×10^5 이며, Table 2에 나타내었다. 여기서 동점성계수는 $\nu=1.45\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$, 특성길이 $l=0.44\text{m}$ 로 메인세일의 풋(foot) 길이를 사용하였고, 샘플링 데이터는 고정 시험과 동일하게 50Hz로 10초 동안의 데이터를 평균한 값이다.

Table 2 Experimental conditions

속도(m/s)	7, 10, 12
레이놀즈수	2.1×10^5 , 3.0×10^5 , 3.6×10^5
받음각(deg.)	0, 10, 20, 30, 40
집세일각(deg.)	5, 10, 15

3.2 세일의 공력 특성

시험은 7, 10, 12m/s인 세 가지 풍속과 5, 10, 15도의 세 가지 집세일 각도에 대하여 세일의 받음각을 0도~40도까지 10도씩 변화시켜가면서 수행되었다. 세일만의 유체력 계측을 위하여 세일이 설치되지 않은 상태에서 프레임에 작용하는 풍력을 따로 계측하여 보정하였다.

Fig. 11~13은 집세일각과 받음각 변화에 따른 양항력 특성을 속도에 따라 나타내었다. 그래프의 심볼은 좌측 아래부터 우측 상부까지 받음각 0, 10, 20, 30, 40도를 나타낸다. Lee, et al. (2006)의 형상 고정세일 시험결과와 Yoo, et al. (2005)의 수치 해석 결과를 함께 나타내었으며, 수치해석의 경우 유입속도 10.23m/s, 받음각 20도인 경우에 대한 결과이다.

Fig. 11~13에 나타난 바와 같이 유연세일과 형상 고정세일 공히 각각의 속도조건에서 받음각이 증가함에 따라 세일의 양력계수와 항력계수가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 집세일 각도가 증가함에 따라서 항력계수는 작은 차이를 보이고 있지만, 양력계수는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 유연세일의 경우 받음각이 30도 이상에서 항력계수는 증가하나 양력계수는 거의 일정해짐을 볼 수 있고, 반면에 형상 고정세일의 경우 받음각이 30도 이상에서 항력계수는 증가하나 양력계수는 작아지는 것을 볼 수 있다.

풍속이 변화하는 경우 형상 고정세일은 양력 및 항력계수의 변화가 거의 없는 것으로 나타나고 있는 반면에 유연세일의 경우 속도에 따른 양항력 계수 값의 차이가 큰 것으로 나타나고 있는데,

속도가 증가할수록 양력 및 항력계수의 값이 작아지는 경향을 보이고 있다. 또한 속도가 낮은 7m/s에서는 유연세일의 양력과 항력계수 값이 형상 고정세일보다 크지만 속도가 증가할수록 유연세일이 형상 고정세일보다 작아지는 경향을 보이고 있다. 또한 받음각이 0도일 때 형상 고정세일의 양력계수는 양의 값으로 나타나고 있지만 유연세일의 양력계수는 음의 값을 나타내고 있다. 이는 형상고정 세일은 풍속 및 받음각에 상관없이 동일한 형상을 유지하지만, 유연세일은 형상이 변화하기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 12에는 시험결과와 수치해석 결과를 동시에 나타내었다. 형상 고정세일의 경우 수치해석 결과보다 양력과 항력계수가 크게 나타난 것을 볼 수 있으나 유연세일의 경우에는 양력계수는 작으나 항력계수는 크게 나타나고 있다.

상기에서 살펴본 바와 같이 풍속, 집세일 각도, 받음각에 따라 유연세일의 양항력 특성이 크게 달라짐을 확인할 수 있었으며, 이는 유연세일 형상이 변화함에 따라 나타난 것으로 볼 수 있다.

Fig. 11 Lift and drag coefficient by jib angle($u=7\text{m/s}$)

Fig. 12 Lift and drag coefficient by jib angle($u=10\text{m/s}$)

Fig. 13 Lift and drag coefficient by jib angle($u=12\text{m/s}$)

세일의 받음각이 20도인 경우 집세일 각도가 5, 10, 15도로 변환에 따른 세일의 양항비 변화를 Fig. 14에 나타내었다.

모든 경우에 대해서 집세일 각도가 증가할수록 양항비는 증가하는 경향을 보이고 있으나, 집세일 각도 증가에 따른 양항비 증가 경향이 유연세일과 형상고정 세일 및 수치해석 결과에서 다른 경향을 보여주고 있는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 유연세일의 형상 변화에 기인한 것으로 보인다.

Fig. 14 Lift to drag ratio by jib angle

풍속 10m/s에서 세일의 추력계수를 Fig. 15에 형상고정 세일과 수치해석 결과와 함께 도시하였다.

세일의 받음각이 20도인 경우, 형상 고정세일의 시험과 수치해석 결과는 집세일 각이 10도일 때 추력계수가 가장 크며, 집세일 각도 15도에서 감소하는 것으로 나타났으나 유연세일은 집세일 각이 10도에서 추력계수가 음의 값을 갖고 집세일 각이 15도가 되었을 때 추력이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 받음각 20도 이하에서 유연세일의 형상이 제대로 형성되지 않는 펄럭임 현상(shiver)이 나타나 세일의 양력이 충분히 발생되지 않기 때문인

것으로 보인다. 한편 유연세일의 받음각이 30도 이상에서는 집세일 각도가 증가함에 따라 추력계수도 증가하며, 형상고정 세일의 결과와 정성적으로 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 15 Thrust coefficient by jib angle

3.3 결과분석

유연세일에 대한 풍동시험을 수행하고, 형상 고정세일의 풍동 시험 및 수치해석 결과와의 비교를 통해 풍향, 풍속에 따른 유연 세일의 형상변화가 세일의 공력특성에 큰 영향을 주게 됨을 알 수 있었고, 모형 세일의 풍동시험을 위해서는 무엇보다도 세일의 유연성에 대한 상사를 만족시키는 것이 중요함을 확인하였다.

이러한 모형시험을 위한 세일 형상에 대한 상사는 축척비를 통한 기하학적 상사뿐 아니라 천(cloth)과 같은 탄성을 가지는 유연 재질을 고려한 유탄성 상사까지 고려해야한다. 기하학적상사는 축척비를 통해 쉽게 만족할 수 있으나 유탄성 상사를 만족하게 하기 위해서는 실선과 모형 세일에서 다음 식 (2), (3)의 계수를 동일한 값을 갖도록 해야 한다(Shin, et al., 2007).

$$C_f = \frac{\rho_f}{\rho_s} \frac{L}{t} \quad (2)$$

$$C_s = \frac{E}{\rho_s U^2} \frac{I}{tcL^2} \quad (3)$$

ρ_f : 유체 밀도, ρ_s : 물체 밀도, E : 물체 탄성계수, L : 물체 높이, t : 물체 두께, c : 물체 폭, I : 물체 단면계수

식 (2)는 물체와 유체의 밀도 등 물성치에 관계된 계수이고, 식 (3)은 강성과 관성력의 비로 나타난 계수이다. 식 (2)의 경우 쉽게 상사가 가능하나 식 (3)의 우변 분자에 포함된 관성모멘트 (I)의 경우 세일 형상에 종속되는 변수로 볼 수 있기 때문에 유탄성 상사를 위해서는 실선 세일 요트에서의 항해 상태에 따른 세일 형상 정보가 필수적으로 요구된다.

따라서 모형시험시 형상의 정확한 재현은 거의 불가능할 것으로 보이며, 현재 단계에서 무엇보다도 실선에서의 세일 형상의 변화에 대한 정보가 우선되어야함을 알 수 있다.

4. 결 론

요트세일의 성능추정을 위해 충남대학교 중형 아음속 풍동에서 6분력계를 이용한 세일의 유체력 계측 시스템을 구축하였고, 집(jib)세일과 메인(main)세일을 갖는 슬루프형 요트세일의 모형 유연세일을 대상으로 풍속과 집세일 각도, 받음각에 따라 세일에 작용하는 유체력을 계측하였다.

계측된 결과는 형상고정 세일 시험 및 수치해석 결과와 비교하였으며, 유연세일의 공력특성이 형상고정 세일과는 다르게 풍속, 집세일 각도 및 받음각에 따라 크게 변화함을 확인하였다. 이는 탄성을 가지는 유연한 재질의 세일이 풍속, 풍향에 따라 그 형상이 변화하고 있는 것으로 볼 수 있다.

이를 통해 요트세일의 성능 추정을 위해서는 기하학적 상사뿐만 아니라 유탄성 상사도 만족시켜야하며, 이를 위해서는 실선 세일의 항해상태에 따른 형상에 대한 정보가 필수적임을 알 수 있다. 따라서 모형시험시 형상의 정확한 재현은 상당히 어려운 것으로 판단되며, 현재 단계에서는 무엇보다도 실선 세일 형상의 변화에 대한 정보가 우선적으로 요구된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- Chi, H.R. Kim, W.J. & Park, J.H., 2007. Turbulent Flow Calculation around Yacht Sails. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), pp.64-73.
- 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.
- Shin, S.M. et al., 2007. Computational of flow over a flexible plate using the hybrid cartesian/immersed boundary method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 55(3), pp.263-282.
- 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.

김철희

최정규

김형태