단순형태 세일의 변형에 대한 유체-구조 연성 해석

박세라¹ · 유재훈^{1,†} · 송창용¹
목포대학교 해양시스템공학과¹

Fluid-Structure Interaction Analysis on the Deformation of Simplified Yacht Sails

Sera Bak¹ · Jaehoon Yoo^{1,†} · Chang Yong Song¹
Dept. of Ocean Engineering, Mokpo National University¹

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Since most of yacht sails are made of thin fabric, they form cambered sail shape that can efficiently generate lift power by aerodynamic interaction and by external force delivered from supporting structures such as mast and boom. When the incident flow and external force alter in terms of volume or condition, the shape of sail also change. This deformation in shape has impact on the peripheral flow and aerodynamic interaction of the sail, and thus it is related to the deformation of the sail in shape again. Therefore, the precise optimization of aerodynamic performance of sail requires fluid-structure interaction (FSI) analysis. In this study, the simplified sail without camber was under experiment for one-way FSI that uses the result of flow analysis to the structural analysis as load condition in an attempt to fluid-structure interaction phenomenon. To confirm the validity of the analytical methods and the reliability of numerical computation, the difference in deformation by the number of finite element was compared. This study reproduced the boundary conditions that sail could have by rigs such as mast and boom and looked into the deformation of sail. Sail has non-linear deformation such as wrinkles because it is made of a thin fabric material. Thus non-linear structural analysis was conducted and the results were compared with those of analysis on elastic material.

Keywords : Fluid-structure interaction(유체-구조 연성), Yacht sail(요트 세일), Nonlinear structural analysis(비선형 구조해석)

1. 서 론

세일링 요트는 세일에 작용하는 바람의 힘으로 항주하기 때문에 세일을 최적의 추진 성능을 갖도록 만드는 것이 필요하다. 추진 성능 즉, 양력과 같은 유체역학적 성능 관점에서의 세일에 대한 최적화는 양항비와 유효 받음각을 향상시키기 위한 세일의 기본 제원과 구성 그리고 캠버와 같은 세일 단면형상에 대한 연구가 대부분이었다(Yoo, et al., 2005). 이러한 세일 성능에 대한 해석은 축소 모형에 대한 풍동 실험이나 전산유체역학(CFD)을 이용한 수치계산에 의해 수행되어져 왔다(Yoo & Kim, 2006). 세일의 형상은 두께가 얇은 직물 소재의 세일이 마스트(mast)와 붐(boom)등의 리그(rig)에 의해 지지되어 있기 때문에 풍압에 의해 늘어나는 등의 변형뿐만 아니라, 지지하는 리그에 의해 전달되는 외력과 리그 자체의 변형, 특히 휘어짐(bending)에 의해 영향을 받게 된다. 또한 풍압에 의한 세일 형상의 변형은 세일 주위 유동과 유체력을 바꾸게 되고, 유체력의 변화는 세일과 리그의 변형에 영향을 미치는 상호 연동적인 관계가 존재하게 된다. 이와 같이 유체력 관점에서의 세일 형상의 최적화를 위해서는 유체

-구조 연성해석을 해야 하나 이제까지의 대부분의 수치 계산들은 세일을 변형되지 않은 강체로 간주하는 경우가 많았다.

최근 들어 Trimarch, et al. (2009) 등이 세일의 변형을 유한요소법(FEM)으로 계산하고 주의 유동을 경계요소법(BEM)으로 계산하여 유체-구조 연성을 수행한 바 있으며, Lee, et al. (2011)은 30피트급 요트세일의 2차원 단면의 변형과 유동해석을 격자 변형기법으로 유체-구조 연성 해석을 수행하여 세일의 변형에 의한 주위 유동 특성이 달라지는 것을 연구한 바 있다. 일반적인 세일은 두께가 매우 얇고 유연한 직물 구조로서 원래 상태로 되돌아가려는 탄성 변형과 형상에 비해 변형도가 큰 대변형 거동이 동시에 일어나는 비선형적 거동이 나타나므로 변형 거동을 살펴 보기 위해서는 비선형적 해석이 요구된다.

본 연구에서는 가정되어진 단순한 형태의 세일과 입사류 조건에 대해서 세일의 유동 해석을 통해 계산된 세일의 유체력을 One-way FSI(Fluid-Structure Interaction) 기법으로 천(fabric)소재의 세일에 대한 유한요소해석에 적용시킴으로써 세일이 풍압을 받았을 때의 세일천의 변형에 대한 유체-구조 연성 해석을 수행하였다. 세일은 마스트와 붐, 리그에 의해 지지 되어 있으므로 이

러한 지지 형태를 세일 변형의 경계 조건으로 사용하였으며 수치 계산의 첫 단계로서 경계 조건에 따른 세일 변형들을 해석하는 과정을 통해 수행되어진 해석 기법의 타당성을 검토하였다. 아울러 유한요소 수에 따른 계산의 수렴성을 확인하였으며, 세일을 탄성소재로 간주하고 해석한 후 그 결과를 천 조직에 대한 비선형 해석 결과와 비교하여 보았다.

2. 수치해석 기법

2.1 유체-구조 연성 기법

유체-구조 연성해석은 크게 Direct-coupled FSI, One-way FSI, Two-way FSI 기법으로 분류할 수 있다. Direct coupled FSI는 유동 및 구조해석을 한 번에 연성하여 계산하는 기법이며, One-way FSI는 유동해석 결과를 구조해석의 하중조건으로 적용하는 기법으로서, 경계면에서의 전달은 한번만 이루어지며 하중에 대한 반복 계산을 하지 않는 기법이다. Two-way FSI는 지속적인 반복계산이 필요한 기법으로 변위가 유동의 영향을 많이 받고 유동 또한 형상에 따라 그 양상이 많이 달라지는 경우에 사용되는 기법이다. 본 논문은 세일의 유체-구조 연성에 대한 연구의 초기 단계로서 비교적 계산 수행이 용이한 One-way 기법을 사용하여 해석하여 보았다. 유동 계산에 사용하기 위한 격자계 생성은 상용프로그램인 ICEM-CFD 프로그램을 사용하였으며, CFX 프로그램으로 유체력을 계산하였다. CFX의 경우 계산된 유체력이 격자 절점(node)에 대해 표현되는데 구조해석에 사용한 유한해석 코드인 LS-DYNA는 요소(element)에 대한 하중이 요구되어지기 때문에 적절한 방법으로 이를 해결해 주어야 한다. 절점에 표현되어 있는 유체력을 요소에 대한 유체력으로 계산하기 위한 방법으로 적분법이 있으나 요소의 수가 많을 경우 한계가 있어,

서 계산된 유체력을 정적 구조해석 코드에 분포 하중으로 적용시켜 유체력에 의한 구조 변형을 해석 한다. 정적 구조해석 코드에서는 유한요소의 모델링과 구조해석을 동시에 가능하며, 유한요소의 요소에 CFX에서 계산된 절점에 대한 압력을 정적 구조해석 코드에서 분포하중으로 계산하여 적용시킨다. 하지만 멤브레인(membrane)구조물 등의 소변형의 선형해석이 가능하고 천 소재의 두께가 얇은 대변형 구조물의 비선형해석은 적용되지 않는다. 본 연구는 Workbench에서 모델링한 유한요소 격자정보와 계산하여 적용된 요소에 대한 압력을 가져와 천 소재의 해석이 가능한 LS-DYNA 유한해석 코드에 적용시켜 풍압에 의해 변형된 유체-구조 연성 해석을 수행하였다.

2.2 유동해석을 위한 지배방정식

유동에 관한 지배방정식은 연속방정식 (1)과 Navier-Stoke's 방정식 (2)를 사용하였다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + U_j \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_j} \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, μ 는 유체의 점성계수이며, P 는 정압력이다. 난류의 시간적으로 변동하는 속도 U_i 를 시간평균속도 $\overline{U_i}$ 와 변동성분속도 u_i 의 합으로 나타내면 식(3)과 같다.

$$U_i = \overline{U_i} + u_i \quad (3)$$

복잡한 식을 간단하게 하기 위해서 Navier-Stoke's 방정식을 시간에 대해 적분하면 시간 평균된 방정식을 얻을 수 있는데 식 (4)와 (5)와 같이 시간 평균된 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stoke's) 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho \overline{U_i})}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \overline{U_i})}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial(\rho \overline{U_i})}{\partial x_j} \\ = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

수치 기법으로는 운동량 방정식의 이산화를 위해 대류항은 2

Fig. 1 Used procedure of one-way FSI analysis

본 연구에서는 유체-구조 연동 해석이 가능하도록 하는 ANSYS의 Workbench를 사용하였다. Workbench는 유체-구조 연성의 경우 CFX와 정적구조(static structure)시스템을 연계하여 CFX에

차 상류차분법, 확산항은 2차 중심차분법을 채택하였으며, 속도-압력 연성을 위해 SIMPLE 방법을 사용하였다. 난류 유동해석을 위해 realizable k- ϵ 난류모형, 벽함수(wall function) 기법을 사용하였다 (Kim, et al., 2000).

2.3 세일 비선형 구조해석 이론

2.3.1 세일 재료의 특성

세일은 캠버(camber)를 형성함으로써 양력이 효율적으로 발생하여 오프가 추진할 수 있는 힘을 얻게 된다. 일반적으로 세일은 복합 섬유로서 필름(film)이나 스크림(scrim) 혹은 테피터(taffeta) 등의 한 가지 이상의 재료를 여러 겹으로 고온 접착하는 방법으로 적층되어 만들어 진다. 필름은 등방성 플라스틱의 압출 성형된 얇은 판으로 듀폰사(Dupont)의 MYLAR 폴리에스테르 필름이 이에 속하며 모든 방향에 대해서 신장이 작고 원소결합이 우수하여 공극율(porosity) 거의 없는 특징이 있으나 잘 찢어지고 구겨지는 단점이 있다. 스크림은 신장이 거의 없고 복합섬유로서 다른 스크림과 여러 겹을 겹쳐 만들어지며, 테피터는 얇게 적층되어 있는 직조천으로 보통 폴리에스테르로 구성되어있다. 세일천은 다크론(Daron), 폴리에스테르(Polyester), 나일론(Nylon), 케블라(Kevlar), 스펙트라(Spectra) 등 수많은 재료들이 사용되어 인장에 관한 세일천의 물성치는 균일하지 못하기 때문에 소재의 특징을 고려하여 세일오프의 성능을 향상시킬 수 있는 최적의 소재를 적용해야 한다 (Spalatel-Lazar, et al., 2008).

2.3.2 천 복합재료의 구조해석

세일은 구조적으로 shell과 복합적층(laminated composite) 구조물로서 각 단층(lamina)의 방향성과 이방성(anisotropic)의 적층 구조물이며, 세일에 작은 두께와 탄성, 경계조건 때문에 외력에 의해 큰 변위가 나타나는 대변형 구조물이다. 이방성 shell이나 멤브레인을 포함하는 구조물은 비선형 유한요소소의 접근이 요구되어 지는데 세일천의 구조적 거동은 주름(wrinkling)에 지배적이며, 이러한 형상은 특히 두께가 얇은 downwind 세일에 많은 영향을 미치게 되고 세일 내 인장 분포에도 영향을 미치게 되어 최종적으로는 세일의 모양을 바꾼다. (Heppel, 2002) 세일의 거동을 실제와 유사하게 모사하기 위해서 유한변형(finite strain)과 두께가 얇아지는 감속 현상(thinning behavior)이 적용된 Hughes-Liu 이론을 적용하였으며 degenerate shell 요소를 공식화(formulation) 하면 다음과 같다.

$$N(\xi, \eta, \zeta) = N_a(\xi, \eta, \zeta)x_a \quad (6)$$

$$N_a(\xi, \eta, \zeta) = \frac{(1 + \xi_a \xi)(1 + \eta_a \eta)(1 + \zeta_a \zeta)}{8} \quad (7)$$

$$x(\xi, \eta, \zeta) = \bar{x}(\xi, \eta) + X(\xi, \eta, \zeta) \quad (8)$$

Shell의 형상은 위에 식에 의해 정의되며, x 는 요소의 임의의 점, (ξ, η, ζ) 은 parametric 좌표, x_a 는 global nodal 좌표, N_a 는 절점 a의 요소 형상 함수, X 는 위치 벡터, $\bar{x}$ 는 reference 표면에 있는 임의의 점이다. Hughes-Liu shell 요소는 기존의 8-절점의 육면체 요소의 변형에 기초를 둔 것으로 solid 요소의 결정은 이 bi-unit cube의 iso-parametric mapping을 기반으로 한 shell 이론이다. Reference 표면과 fiber벡터의 보간은 shell 요소의 변위보간과 iso-parametric 표현을 위해 사용된다. Fiber의 변위는 reference 표면의 변위와 fiber 방향에 대한 회전으로 분리되고 다음 식들로 표현된다.

$$u(\xi, \eta, \zeta) = \bar{u}(\xi, \eta) + U(\xi, \eta, \zeta) \quad (9)$$

$$\bar{u}(\xi, \eta) = N_a(\xi, \eta)\bar{u}_a \quad (10)$$

$$U(\xi, \eta, \zeta) = N_a(\xi, \eta)U_a(\zeta) \quad (11)$$

$$U_a(\zeta) = z_a(\zeta)\hat{U}_a \quad (12)$$

u 는 generic point의 변위, $\bar{u}$ 는 reference 표면에 있는 점의 변위, U 는 fiber 변위 또는 회전이다. Fiber coordinate system은 4개 절점의 shell 요소에 적용되며, $\bar{u}$ 는 병진운동(translational motion)방정식과 회전운동(rotational motion)방정식의 양으로써 shell의 운동을 알기 위해서는 nodal 회전과 fiber 변위 U 사이에 관계가 정의되어야 한다. 각 절점에서 대변형으로 인한 회전량 증가를 적절하게 계산할 수 있는 기준 좌표로 이용하기 위하여 국부 직교좌표계를 적용하였다.

3. 세일 유동해석

3.1 계산조건 및 가정

유동에 대한 계산은 다음의 가정과 조건으로 수행되어졌다.

- (1) 계산에 사용되어진 세일 형상은 변형되지 않은 상태에서는 가로, 세로 각각 1m인 사각형과 삼각형의 평면인 단순 형태이다.
- (2) 입사 유동의 속도는 5노트이며, 최대 입사각(angle of attack)에 해당하는 90도 유동에 대해서 계산을 수행하였다.
- (3) 유체는 공기이며 밀도 1.185kg/m³, 점성계수 1.831×10⁻⁵ Pas의 값을 사용하였다.

- (4) 사각형 세일의 경우 정규(structured) 격자를 사용하였으며, 세일 표면의 격자수는 Table 1에 정리한 바와 같이 각각 10×10, 30×30, 50×50, 80×80, 100×100의 5가지 경우에 대해 계산하였다.
- (5) 삼각형 세일의 경우 비정규(unstructured) 격자를 사용하였으며, 격자수에 따라 coarse, medium, fine의 세 가지로 분류하여 계산하였으며, Table 1과 같다.

유동장과 세일에 대해 생성한 격자의 모습은 Fig.2 와 Fig. 3에서 살펴볼 수 있다.

Table 1 Computational conditions

	Coarse (No. of grids)		Medium (No. of grids)		Fine (No. of grids)
Square sail	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
	10×10 (100)	30×30 (900)	50×50 (2,500)	80×80 (6,400)	100×100 (10,000)
Triangle sail	Case6		Case7		Case8
	336		3,014		6,489

Fig. 2 Flow field grid system for flow analysis

Fig. 3 Sail surface grid system for flow analysis

3.2 격자수 검토 및 수치계산 결과

구조해석 시 유한 요소로 모델링을 하기 위해서 수치 계산에 사용되는 격자의 수가 많을수록 실제와 유사한 거동이 나타나는 것으로 알려져 있으며, CFD를 이용한 유동해석 또한 격자수가 충분하여야 정량적으로도 신뢰성 있는 결과를 주는 것으로 알려져 있으므로, 먼저 유동 해석에 대해서 격자수에 따른 해의 수렴성을 검토하여 보았다.

Table 2는 격자수에 따른 유체력의 변화로서 각 절점에 걸리는 압력을 평균한 값으로서, 수치계산 결과의 수렴성과 계산에

적절한 격자수가 어느 정도 인지를 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 유동 계산에는 약 3,000개 정도의 격자수를 사용하였다. 계산으로 얻어진 동적 압력값의 분포를 살펴보면 Fig. 4에 보이는 것과 같이 세일에 중앙 부위에 가장 큰 압력이 분포하는 일반적인 경향이 나타남을 확인하였으며, 계산된 압력값은 세일 변형을 일으키게 되는 유체력으로서 구조해석에 하중조건으로 적용되게 된다.

Table 2 Change in aerodynamic interaction by grid size

Case	No. of grids	Fluid Force on nodes (averaged value of nodes, unit: N)
Square sail	Case1	100
	Case2	900
	Case3	2,500
	Case4	6,400
	Case5	10,000
Triangle sail	Case6	336
	Case7	3,014
	Case8	6,489

Fig. 4 Distribution of dynamic pressure on sail surface

4. 세일 구조해석

4.1 계산조건 및 가정

세일에 대한 구조 해석은 아래와 같은 가정 및 조건으로 수행되어졌다.

- (1) 세일천은 Kevlar®29(DuPont, USA)를 사용하였으며 물성은 Table 3에 정리하였다.
- (2) 유동해석에서 얻어진 동압력값을 하중으로 적용하였다.
- (3) 경계조건으로는 병진방향 자유도를 구속하였으며, 마스트나 붐에 고정된 상태에서의 변형 거동을 살펴보았다.
- (4) 세일 자체의 무게에 의한 변형은 없다고 가정하였다.

Table 3 Property of Kevlar[®]29 fabric

Density	1439.4 kg/ m ³
Young's modulus	83 GPa
Poisson ratio	0.36
Thickness	0.33 mm

4.2 수치 계산 결과

4.2.1 유한요소 크기에 따른 세일의 변형

세일은 천 소재로 만들어져 바람의 세기가 커지게 되면 풍압에 의해 늘어나게 되어 캠버(camber)의 형상이 변하게 될 뿐 아니라

Fig. 5 Deformation behaviors by the number of finite element of a square sail ((a),(b),(c) are the initial geometries, (d),(e),(f) are the deformed shapes)

Fig. 6 Deformation behaviors by the number of finite element of a triangular sail ((a),(b),(c) are the initial geometries, (d),(e),(f) are the deformed shapes)

주름(wrinkling)이 발생한다. 먼저 사각형과 삼각형의 세일의 유한 요소 크기에 따라 coarse, medium, fine 세 가지로 분류하여 모델링하고 한쪽 변만 고정되어진 경계 조건에 대해 계산하여 격자 수에 따른 해의 수렴성과 변형거동의 차이를 검토하였다. Fig. 5 와 Fig. 6으로 표현된 바와 같이 계산 결과를 살펴보면 유한 요소의 크기가 작을수록 풍압을 받은 세일에 주름이 잘 나타나는 것을 볼 수 있다.

4.2.2 지지 종류에 따른 세일 변형

세일은 세일의 형상 변화에 따라 세일을 고정하고 있는 리그 및 마스트에 하중이 가해져 변형하게 되고 또 세일은 마스트의 휨(bending)에 의해 세일의 캠버 형상이 변하게 되어 세일은 지지하는 구조물에 의해서 세일의 형상이 변한다. 실제 세일은 마스트에 의해 단순 고정되고, 리그에 의한 인장력을 받지만 본 연구는 경계조건으로 세일의 변을 단순 고정하여 각 변에 따라 고정해보고 유동해석으로부터 압력이 가해졌을 때 시간에 따라 변하는 세일의 변형을 살펴보았다.

4.2.2.1 사각형 세일

(1) 한 변 고정

실제 세일의 경우 마스트에 의해서만 고정된 경우로서 세일이 한 변만 고정된 채 풍압을 받으면, Fig. 7의 계산 결과에서 살펴볼 수 있듯이, 변형 초기에는 먼저 세일의 중앙부가 부풀게 되며, 시간이 지남에 따라 세일이 압력에 저항하지 않고 유동 방향으로 점점 후퇴되면서 세일 끝단에는 주름이 만들어지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7 Deformation by one side of square sail fixed (unit: m)

(2) 두 변 고정

서로 만나는 두 변이 고정된 경우 지지되어 있는 변에서는 변형이 발생하지 않은 상태인데 반해 지지되지 않는 나머지 두 변에서는 세일이 풍압을 이기지 못하고 유동의 후류 방향으로 펼쳐지는 것을 볼 수 있었다. Fig. 8의 Time=0.15s의 상태를 보면 세일이 풍압을 이기기 위해 주름이 지고 최종적으로는 지지되지 못한 쪽의 세일이 반으로 접히는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8 Deformation by two sides of square sail fixed (unit: m)

(3) 세 변 고정

세일이 세변이 지지되어 있어 풍압을 받을 경우 지지 되어 세 변에서 인장력으로 버티고 지지되지 않는 변에서 세일이 펴려지고 주름지는 것을 확인하였다. 아래 Fig. 9의 변위 contour에서 보면 Time=0.15s 와 0.25s에서 세일의 가운데 부분에서 색깔이 다르게 보이는 것은 작은 변위이기 하지만 세일 천의 탄성 거동으로 인해 세일 면이 탄력적인 거동을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 Deformation by three sides of square sail fixed (unit: m)

Fig. 10 Deformation by all sides of square sail fixed (unit: m)

(4) 네 변 고정

세일의 모든 변에서 세일의 풍압을 모두 지지해야 하기 때문에 가운데에서 압력과 변위가 최대가 되고, 아래 Fig. 10을 봤을 때 변화가 없는 것처럼 보이지만 최대 0.13cm의 변위가 발생하였으며, 가운데 부분의 변위 크기가 시간에 따라 커졌다가 작아지는

경향을 보이는데 세 변 지지와 마찬가지로 세일천의 탄성에 의한 현상임을 볼 수 있다.

4.2.2.2 삼각형 세일

(1) 한 변 고정

실제 세일과 유사한 삼각형 세일의 한 변을 단순 지지하였을 때 경우, Fig. 11에 보이는 것과 같이 세일이 풍압을 받아 캠버가 형성되고 바람이 들어오는 입사각이 0도가 될 때까지 세일이 펼쳐지면서 돌아가는 것을 확인하였다.

(2) 두 변 고정

Fig. 12를 살펴보면, 두 변 지지 역시 사각형 세일과 마찬가지로 지지되지 않는 변에서 주름지는 것을 확인하였으며, 압력을 받았을 때 두 변에서 지지하면서 버티고 나머지 변에서는 펴려지는 것을 확인하였다.

Fig. 11 Deformation by one side of triangular sail fixed (unit: m)

Fig. 12 Deformation by two sides of triangular sail fixed (unit: m)

(3) 한 변과 꼭짓점 고정

실제 세일은 한 변은 마스트에 의해 고정되어 있고, 나머지 한 변의 끝은 오토의 outhaul과 같이 줄에 의해 인장으로 지지되어 있다. 이러한 고정 조건과 같이 세일의 한 변과 세일 clew에 해당

하는 꼭짓점 위치의 절점을 단순 고정한 경우 Fig. 13에 보이는 바와 같이 비선형적이지만 세일의 밑변에 일반적인 날개의 캠버와 유사한 형태의 변형이 생기는 것을 확인하였다.

Fig. 13 Deformation by three sides of triangular sail fixed (unit: m)

4.2.3 변형해석 방법에 따른 세일의 거동

본 연구에서는 2장에서 설명된 대변형 천재질에 대한 구조변형해석 이론이 적용된 방법과 표2의 Kevlar®29 fabric 물성치를 사용하여 세일의 변형을 검토하였다. 천재질에 대한 대변형 해석물성치는 일반적으로 방향 별 영률(Young's modulus) 계수와 포아송비(Poisson's ratio)를 적용하지만, 본 연구에서 고려한 바람의 입사각과 유동속도가 균일하기 때문에 천재질을 등방성으로 고려하였다. 대변형 이론의 결과는 동일 물성치에 대해서 미소 탄성 변형이론을 적용한 해석방법의 결과와 비교를 수행하였다.

(1) 한 번 고정

탄성 소재의 세일과 천 조직 세일의 한 번 고정 시의 변형을 비교해 보면, Fig. 11에 나타난 천 조직 세일이 캠버가 만들어지면서 주름을 포함한 비선형적인 거동을 보이고 있는 것에 반해 탄성 세일은 Fig. 14와 같이 풍압에 따른 변형이 단순하게 이루어짐을 살펴볼 수 있다.

Fig. 14 Deformation of elastic and fabric sail by one side fixed (upper: elastic, lower: fabric, unit: m)

(2) 두 번 고정

Fig. 15의 계산 결과를 살펴보면, 두 번 고정 시 고정되지 않는 변에서 천의 경우 세일이 풍압을 이기지 못하고 주름지는데 반해 탄성 소재의 경우 변위가 부드럽게 일어나고 지지된 변에서의 변형 기울기가 비교적 작은 것을 볼 수 있다.

Fig. 15 Deformation of elastic and fabric sail by two sides fixed (upper: elastic, lower: fabric, unit: m)

(3) 한 번과 꼭짓점 고정

Fig. 16에 나타난 바와 같이 두 소재의 변형을 비교해 보면, 탄성 소재로 간주한 세일의 경우가 비교적 변형량이 작게 나타나고 천소재 세일과 다르게 주름이 발생하지 않으면서 압력에 의한 변형 형태가 일정한 것을 확인하였다.

Fig. 16 Deformation of elastic and fabric sail by three sides fixed (upper: elastic, lower: fabric, unit: m)

5. 결론

본 연구에서는 풍압에 의한 세일의 변형을 유체-구조 연성 해석을 통해 살펴보았다. 세일 천의 물성과 세일을 고정하는 경계 조건의 변화에 따라 변형 거동이 다르게 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 천 조직으로 간주하여 비선형 해석한 경우 주름 현상을 포함하여 형상 변화 자체가 탄성 소재로 해석한 경우와는 확연히 다를 수 있었다. 이는 요트 세일의 성능 해석에 있어서 세일의 유체-구조 연성적 변형을 고려하지 않고는 정성, 정량적

인 신뢰성을 높일 수 없다는 것뿐만 아니라 세일의 구조적 변형을 어떻게 간주하고 해석할 것인가도 매우 중요한 요소임을 의미한다. 다음 연구 단계로서 요트의 세일 형상에 대해 실제 입사각에 의한 FSI 해석을 수행 할 예정이다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0027357).

참 고 문 헌

- Heppel, P., 2002. Accuracy in sail simulation: Wrinkling and growing fast sails. *Proceeding of Hight Performance Yacht Design Conference*, Auckland, New Zealand, 4-6 December 2002.
- Kim, W. Kim, D. & Van, S., 2000. Development of Computational Methods for Viscous Flow around a Commercial Ship Using Finite-Volume Methods. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(4), pp.19-30.
- Lee, H. Shin. H. & Yoo, J., 2011. Analysis of Two-Dimensional Section of Deforming Yacht Sails. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(4), pp.308-316.

Spalatelu-Lazar, M. Lene, F. & Turbe, N., 2008. Modelling and Opimization of Sails. *Computers and Structures*, 86(2008), pp.1486-1493.

Trimarchi, D. Turnock, S. Chapelle, D. & Taunton, D., 2009. Fluid-Structure Interactions of anisotropic thin composite materials for application to sail aerodynamics of a yacht in waves. *12th Numerical Towing Tank Symposium*, Cortona, Italy, 4-6 October 2009.

Yoo, J. et al., 2005. Calculations of the Interactions between Main and Jib Sails. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(1), pp.1-10.

Yoo, J. & Kim, H.T., 2006. Computational and Experimental Study on Performance of Sails of a Yacht. *Ocean Engineering*, 33(10), pp.1322-1342.