

## CFD를 이용한 범포 주위의 유동장 특성

배봉성\* · 배재현<sup>1</sup> · 안희춘<sup>1</sup> · 박성욱<sup>1</sup> · 박창두<sup>2</sup> · 정의철

국립수산과학원 동해수산연구소 자원관리조성팀

<sup>1</sup>국립수산과학원 수산공학팀 · <sup>2</sup>국립수산과학원 서해수산연구소 자원관리조성팀

## The characteristics of the flow field around canvas kite using the CFD

**Bong-Seong BAE\***, **Jae-Hyun BAE<sup>1</sup>**, **Heui-Chun AN<sup>1</sup>**, **Seong-Wook PARK<sup>1</sup>**,

**Chang-Doo PARK<sup>2</sup>** and **Eui-Cheol JEONG**

*Fisheries Resources Management and Enhancement Team, East Sea Fisheries Research Institute,  
NFRDI, Gangneung 210 – 861, Korea*

*<sup>1</sup>Fisheries Engineering Team, National Fisheries Research & Development Institute,  
Busan 619 – 902, Korea*

*<sup>2</sup>Fisheries Resources Management and Enhancement Team, West Sea Fisheries Research Institute,  
NFRDI, Incheon 400 – 420, Korea*

This research aims at establishing the fundamental characteristics of the kite through the analysis of the flow field around various types of kites. The approach of this study were adopted for the analysis; visualization by CFD(computational fluid dynamics). Also, the lift/drag and PIV(particle image velocimetry) tests of kites had been performed in our previous finding. For this situation, models of canvas kite were designed by solidworks(design program) for the CFD test using the same conditions as in the lift/drag tests. And we utilized FloWorks as a CFD analysis program. The results obtained from the above approach are summarized as follows: According to comparison of the measured and analyzed results from mechanical tests, PIV and CFD test, the results of all test were similar. The numerical results of lift – coefficient and drag – coefficient were 5 – 20% less than those of the tests when attack angle is 10°, 20° and 30°. In particular, it showed the 20% discrepancy at 40°. The numerical results of the ratio of drag and lift were 8 – 13% less than those of the tests at 10° and 10% less than those of the tests at 20°, 30° and 40°. Pressure distribution gradually became stable at 10°. In particular, the rectangular and triangular types had the centre of the high pressure field towards the leading edge and the inverted triangular type had it towards the trailing edge. The increase of the attack angle resulted in the eddy in order of the rectangular, triangular and inverted triangular type. The magnitude of the eddy followed the same order. The effect of edge – eddy was biggest in the triangular type followed by the rectangular and then the inverted triangular type. The action point of dynamic pressure as a function of the attack angle

\*Corresponding author: asako@nfrdi.re.kr Tel: 82-33-660-8523 Fax: 82-33-661-8513

was close to the rear area of the model with the small attack angle, and with large attack angle, the action point was close to the front part of the model.

Key words : Canvas kite, CFD system, Visualization, FloWorks

## 서 론

캔버스 카이트(이하 ‘범포’라 한다)를 어구에 부착하여 사용하는 경우는 주로 범포에 생기는 유체력을 이용하여 어구를 전개시키고자 할 때이다. 즉, 안강망에서는 그물 입구의 좌우에 달아 전개장치로, 트롤에서는 그물 입구의 위쪽 또는 날개그물 앞쪽에 부착하여 전개장치로 사용된다. 그러므로 향상된 성능의 어구를 개발하기 위해서는 범포 자체에 대한 유체역학적 특성에 대한 연구도 필요할 것이다.

따라서 前記 논문(Bae et al., 2004a; Bae et al., 2004b; Bae et al., 2006)(이하 ‘前記 논문’이라 한다)에서는 여러 가지 범포의 유체역학적 특성을 구명하고자 직사각형, 사다리꼴, 삼각형으로 평판과 범포 모형을 제작하여 역학적 실험을 실시하고 양력계수, 항력계수 및 양항비를 계산하여 각 모형별 특성을 알아보았으며 그중 일부 모형 주위의 유체흐름을 PIV를 이용하여 가시화해보았다.

한편, 본 실험에서 사용한 가시화 방법인 CFD는 유체의 흐름을 직접 측정하는 것이 아니고 컴퓨터를 이용하여 수치해석적으로 계산하는 것이다. 이러한 해석방법은 유한 비압축성 영역에서부터 극초음속 영역 전반에 걸쳐 난류유동 및 비정상상태 해석, 열전달 해석 등을 시행할 수 있다. 또 이전의 양·항력 실험, PIV 실험에서 사용한 모형을 전산유체를 이용하여 다시 해석해 봄으로써 이전 실험의 결과와 비교해 볼 수 있으며, 모형실험이 불가능한 영역도 해석해 볼 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 범포 모형 주위의 다양한 유체흐름을 컴퓨터 계산에 의한 방법으로 가시화함

으로써 범포와 같은 물체에 대해 유체가 어떻게 운동하는지를 알아보고 前記 논문의 실험 결과와 비교해 유체 흐름의 크기, 방향과 범포 모형에 작용하는 힘과의 상관관계를 알아보았다.

## 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 모의실험의 조건은 前記 논문에서 사용한 조건과 동일하다. 그러나 취부장치와 모형의 미세한 굴곡 등 일부 영향이 미미할 것으로 추측되는 요소는 무시하였다.

## 모형 및 해석조건

CFD 실험에 사용한 모형은 역학적 실험 결과, 사각형, 삼각형 및 역삼각형 범포 모형 중 영각에 따른 양력의 변화와 양항비를 고려할 때 영각의 변화에 따른 양력의 변화가 적고 작은 영각에서 큰 양력을 갖는 종횡비 2:1인 것을 사용하였다(Fig. 1). 이것은 前記 논문의 PIV에 의한 가시화 실험에 사용한 범포 모형과 동일한 것이다. 또, 이 세 가지 모형이 영각 20°를 기준으로 할 때 양

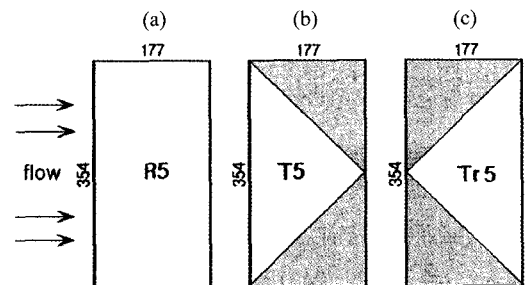


Fig. 1. The design drawing of canvas kite models (unit:mm).

- (a) rectangular type
- (b) triangular type
- (c) inverted triangular type

**Table 1. Processing condition of CFD**

Item	Specification
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Medium	Water(fluid)
Equations	Flow/Turbulence
Cell number	300,000 - 420,000
Fluid number1	60,000 - 270,000
Solid number	10,000 - 40,000
Particle number	100,000 - 160,000
Flow speed	0.6m/s
Material	Standard solid

호한 양력과 양항비를 가지므로 본 실험에서도 실험 영각을 10°, 20°, 30°, 40°로 결정하였다.

해석 프로그램은 코스모스사의 FloWorks 2003을 사용하였으며, 분석할 때 사용한 해석 조건은 Table 1과 같다. 범포 모형의 디자인은 회류 수조에 설치된 모형을 CCD 카메라로 촬영한 영상을 solidworks 2001+를 이용하여 입체적으로 렌더링(rendering)하였다. 수조를 이용한 모형 실험에서는 현장(弦長) 방향뿐만 아니라 익장(翼長) 방향으로도 미세한 만곡이 발생하지만, 이는 무시하였다. 또한, 수조 모형 실험에서 모형의 지지대로 사용한 직경 4mm 스테인리스 봉도 없는 것으로 간주하였다. 유속은 수조 실험과 마찬가지로 0.6m/s로 설정하였다.

해석 영역의 경계처리는 모형의 크기에 의한 흐름의 변동이 없는 육면체 영역을 해석 영역으로 설정한 표준 경계 모드를 사용하였고, 경계조건은 물체표면에서는 점착조건과 표면 압력구배가 0인 조건을 사용하였으며, 방정식은 유동과 난류에 관한 식만 사용하였다. 정렬 격자의 Cell 수, Fluid 수, Solid 수, Particle 수 등은 모형마다 달라지는데, 각각 약 300,000 - 420,000, 160,000 - 270,000, 10,000 - 40,000, 100,000 - 160,000 정도이다. 결과는 해석 데이터를 이용하여 벡터, 압력, 흐름, 난류에 대하여 도식화하였다.

**수치해석 방정식**

본 연구에 사용한 수치해석법은 유한체적법

(FVM)으로서 수치해석의 기본 방정식은 속도와 압력을 시간평균값과 변동성분으로 분해한 레이놀즈 방정식을 Navier - Stokes 방정식에 대입한 다음과 같은 유체의 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 사용한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_{II} \tag{3}$$

여기서,  $t$ 는 시간,  $u$ 는 유속,  $\rho$ 는 유체밀도,  $S_i$ 는 단위질량당 외체적력,  $E$ 는 단위질량에 작용하는 총 에너지,  $P$ 는 총 압력,  $Q_{II}$ 는 단위체적당 열생성항(source term),  $\tau_{ik}$ 는 전단응력,  $q_i$ 는 확산에 의한  $x_i$  방향의 열유속이다.

Boussinesq의 가정에 의하면, Reynolds의 응력은  $\tau_{ij}^r = -\rho u_i u_j$ 로 식 (4)와 같이 정의되며, 뉴턴유체에서는 전단응력은 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\tau_{ij}^r = \mu_r \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{4}$$

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{5}$$

여기서,  $\mu = \mu_l + \mu_r$ ,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta function ( $1(i=j)$ ,  $0(i \neq j)$ ),  $\mu_l$ 는 동점성계수,  $\mu_r$ 는 난류와 (turbulent eddy)점성계수,  $k$ 는 난류운동(turbulent kinetic)에너지이다.  $k - \epsilon$ 모델 구조에서는  $\mu_r$ 는 난류운동에너지( $k$ )와 그 소산율( $\epsilon$ )로 정의된다.

$$\mu_r = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \tag{6}$$

여기서,  $f_\mu$ 는 난류점성 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.025R_y)]^2 \left( 1 + \frac{20.5}{R_T} \right) \tag{7}$$

여기서,  $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_i \epsilon}$ ,  $R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu_i}$ , 이고  $y$ 는 외벽으로부터의 거리이다.

한편, 난류운동에너지와 그 소산율을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right) + S_\epsilon \quad (9)$$

여기서 사용된 생성항(source term)  $S_k$ 와  $S_\epsilon$ 는 다음과 같다.

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \mu_l P_B \quad (10)$$

$$S_\epsilon = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left( f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_l C_{B P_B} \right) - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (11)$$

또,  $P_B$ 는 부력 때문에 생기는 난류이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (12)$$

여기서,  $g_i$ 는 중력가속도의  $x_i$ 방향의 성분이고, 상수  $\sigma_B = 0.9$ , 상수  $C_B$ 는  $P_B > 0$  일 때는 1, 그 외에는 0인데 본 해석에서  $P_B$ 는 고려하지 않았다.

$$f_1 = 1 + \left( \frac{0.05}{f_\mu} \right)^3, f_2 = 1 - \exp(-R^2) \text{이며, } C_\mu, C_{\epsilon 1},$$

$C_{\epsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 은 모두 경험상수(Launder et al., 1974)로서  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ 을 사용하였다.

양력과 항력은 각 구간별 압력분포를 양력 및 항력 방향의 성분을 적분하여 구하는 방법으로 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_p = - \sum_{n=1}^n (p - p_{ref}) A \hat{n} = - \sum_{n=1}^n p A \hat{n} + p_{ref} \sum_{n=1}^n A \hat{n} \quad (13)$$

여기서,  $\vec{F}_p$ 는 양력 또는 항력,  $p$ 는 압력,  $n$ 은 구간

수,  $A$ 는 표면적,  $\hat{n}$ 은 구간의 단위면적이다.

## 결 과

범포 주위의 유동장을 해석하기 위하여 종횡비가 2:1인 사각형, 삼각형, 역삼각형 범포 모형을 영각 10°, 20°, 30°, 40°에서 CFD 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 2 및 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4와 같다.

Table 2는 수치해석으로 도출된 양력계수  $C_L$  및 항력계수  $C_D$ 와 前記 논문의 수조실험에서 측정한 값을 비교한 것이다.

사각형 범포는 영각 10°에서  $C_L$ 은 0.76,  $C_D$ 는 0.13으로 실험값보다  $C_L$ 은 약 16% 작게,  $C_D$ 는 7% 작게 나타났다. 영각 20°에서는  $C_L$ 은 1.07,  $C_D$ 는 0.38로  $C_L$ 은 4%,  $C_D$ 는 3% 정도 작게 나타나 거의 유사한 결과를 보여주었다. 영각 30°에서는  $C_L$ 은 0.95,  $C_D$ 는 0.50으로  $C_L$ 은 5%,  $C_D$ 는 7% 작게 나타났다. 영각 40°에서는 40%가 넘는 차이가 나타나 정량적인 값을 비교할 수 없었다. 이러한 현상은 삼각형과 역삼각형 모델에서도 유사하게 나타났으며, 수치해석에 의한 해석값이 실험값에 비하여 영각 10°, 20°, 30°에서는 5-20% 정도 작게 나타났으며, 영각 40°에서는 20% 이상의 차를 보였다. 그러나, 양항비 변화의 양상은 영각 10°에서는 8-13% 정도 작게 나

**Table 2. The efficiency comparison between the CFD result and the experiment result**

model	angle	calculation			experiment		
		$C_L$	$C_D$	$C_L/C_D$	$C_L$	$C_D$	$C_L/C_D$
rectangle	10°	0.76	0.13	5.67	0.91	0.14	6.69
	20°	1.07	0.38	2.81	1.12	0.39	2.87
	30°	0.95	0.50	1.91	1.00	0.54	1.86
	40°	0.59	0.48	1.23	1.04	0.80	1.29
triangle	10°	0.57	0.21	2.67	0.61	0.21	2.99
	20°	0.84	0.37	2.26	0.86	0.35	2.48
	30°	0.85	0.50	1.71	0.98	0.55	1.78
	40°	0.76	0.64	1.19	1.07	0.81	1.31
inverted triangle	10°	0.79	0.32	2.47	0.94	0.34	2.80
	20°	1.09	0.58	1.86	1.02	0.50	2.03
	30°	0.87	0.62	1.41	0.97	0.67	1.44
	40°	0.81	0.74	1.10	0.98	0.93	1.06

타났으며, 영각 20°, 30°, 40°에서는 실험값과의 차이가 10% 이하로 모두 유사하게 나타났다.

Fig. 2는 영각 변화에 따른 사각형 범포 익장(翼長)의 중앙 횡단면 주변 유동을 수치해석에 의한 2차원적 압력장 및 속도장으로 나타낸 것이다. 영각 10°에서 속도장을 보면 PIV 실험 결과와 같이 범포의 후연에 속도성분의 감소가 약간 나타났으나 유동 박리와 같은 현상은 관찰되지 않았으며, 범포 모형의 면을 따라 거의 층류에 가까운 흐름임을 관찰할 수 있었다. 압력장을 보면 박리나 와동은 관찰되지 않았으며, 압력장의 분포도 점층적으로 나타나 안정된 모습이였다.

범포의 압력면 전연부에서 최대 압력 101,688Pa, 흡입면 전연부에서 최소 압력 100,942Pa로 계산되었다.

영각 20°에서도 PIV 실험 결과와 같이 전연부에서부터 현장(弦長)의 2/3 영역에서 경계층 박리에 의한 역압력구배와 와동이 상당히 발달된 형상을 보였으며, 압력장에서도 같은 영역에서 큰 와동과 저 압력 영역이 발생하고 있음을 알 수 있다. 최대 압력은 101,553Pa, 흡입면 전연부에서 최소 압력 100,706Pa이었다.

영각 30°와 40°에서 압력장을 보면 전연부에서부터 심한 와동과 고압력 영역과 저압력 영역

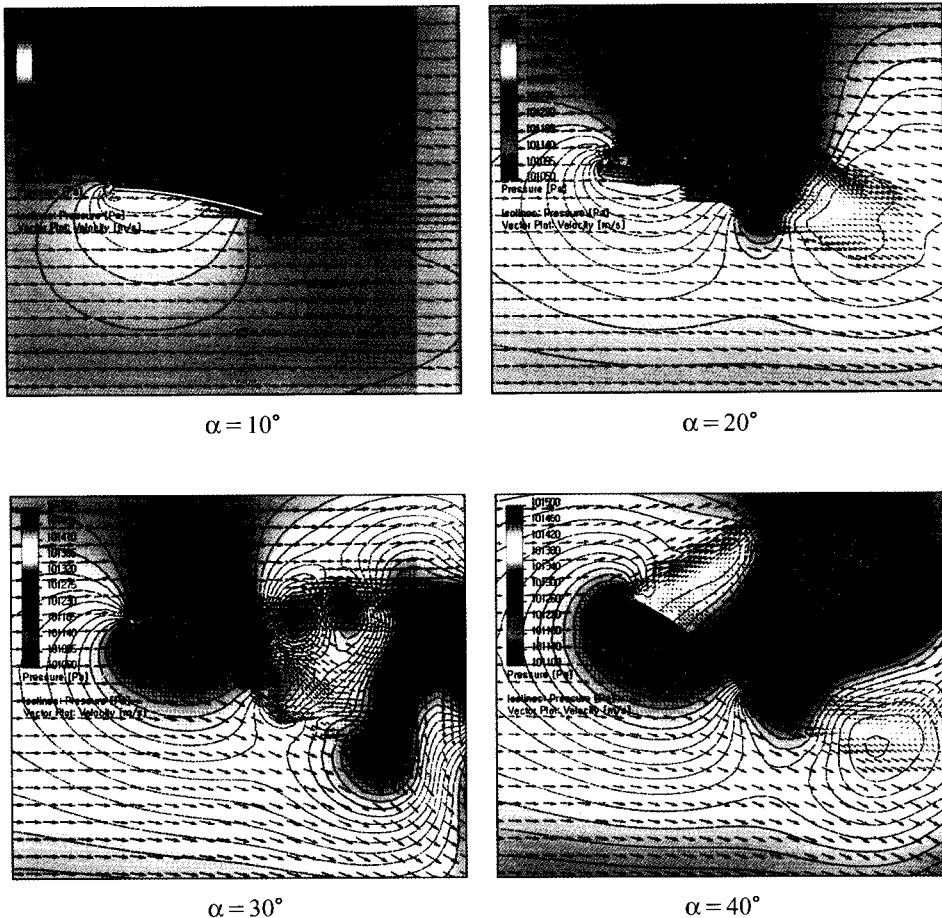


Fig. 2. The velocity vector's distribution and the pressure contour of the rectangular canvas as a function of the angle of attack( $\alpha$ ).

이 순차적으로 나타나는 칼만 볼텍스의 모습이 관찰되었다. 이미 최대전개력이 나타나는 영각보다 큰 영각이므로 양향력 값의 심한 진동과 압력변화가 관찰되었으며 경계층 박리와 재순환에 의하여 크거나 작은 와동이 생성과 소멸을 반복함에 따라 영역별 압력 변화가 수렴과정 중 반복적으로 나타나 정량적인 수치해석 값은 신뢰하기 힘들었다.

Fig. 3은 영각 변화에 따른 삼각형 범포 익장(翼長)의 중앙 횡단면 주변 유동을 수치해석에 의한 2차원적 압력장 및 속도장으로 나타낸 것이다. 영각  $10^\circ$  에서 속도장을 보면, 범포 모형의

면을 따라 흐르는 흐름이 거의 층류에 가까운 상태를 알 수 있었다. 압력장 또한, 박리나 와동은 관찰되지 않았으며, 압력장의 분포도 점층적으로 나타나 안정된 모습이였다. 다만, 압력면의 고압력 영역 중심이 전연 쪽으로 치우친 경향이 나타났으며, 압력면 후연쪽에서도 약한 고압력 영역이 나타났다. 최대 압력은 101,495Pa, 최소 압력은 101,090Pa로 계산되었다.

영각  $20^\circ$ 에서는 PIV 실험 결과와 같이 전연부에서부터 현장의 3/4 영역에서 경계층 박리에 의한 와동이 나타나면서 후연으로 갈수록 난류가 심하게 나타났다. 압력장에서도 같은 영역에서

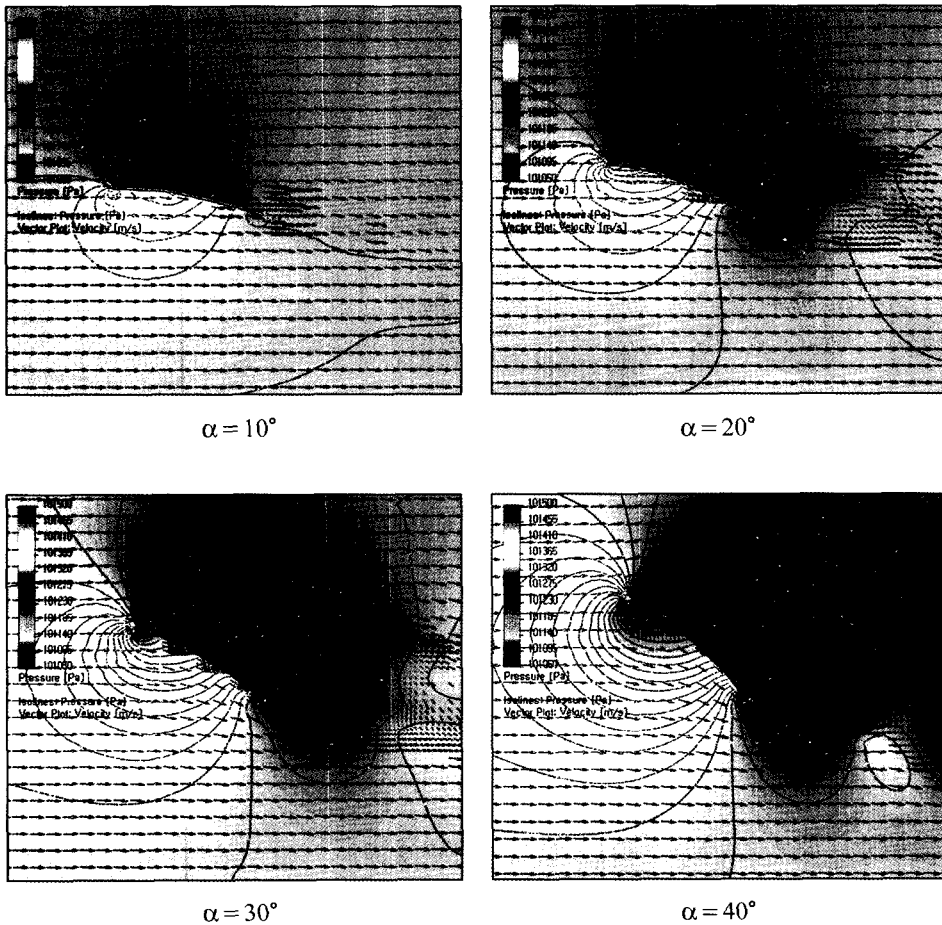


Fig. 3. The velocity vector's distribution and the pressure contour of the triangular canvas as a function of the angle of attack( $\alpha$ ).

큰 와동과 저 압력 영역이 발생하고 있음을 알 수 있다. 최대 압력은 101,510Pa, 압력면 전연부에서 최소 압력 101,020Pa이었다.

영각 30°와 40°에서는 사각형 범포에서와 같이 전연부에서부터 경계층 박리가 관찰되었고 와동과 복잡한 유동 현상이 나타났다.

삼각형 범포에서는 흐름 및 압력의 분포가 대체적으로 전연을 중심으로 나타났다. 이것은 전연쪽이 면적이 넓고 후연쪽이 좁기 때문에 흐름이 전연에서 후연으로 갈수록 익단와(tip vortex)에 의한 3차원 유동이 나타나 후연으로 갈수록 교란이 심하게 나타난 것으로 판단된다. 따라서

후연부에서 압력차가 유지되지 않으므로 인하여 최대 전개력 계수가 작게 나타난 반면, 와동의 발생과 소멸로 인한 진동은 감소되었고, 최대 전개력을 가질 때의 영각 이후에도 다른 모델에 비하여 상대적으로 안정된 모습을 보였다.

Fig. 4는 영각 변화에 따른 역삼각형 범포 익장(翼長)의 중앙 횡단면 주변 유동을 수치해석에 의한 2차원적 압력장 및 속도장으로 나타낸 것이다. 영각 10°에서 속도장을 보면 PIV 실험 결과와 같이 범포 모형의 면을 따라 흐르는 흐름이 원활하였으며, 전연에서 1/2을 지나면서 곡면의 변화가 커짐에 따라 아래쪽으로 향하는 속도성

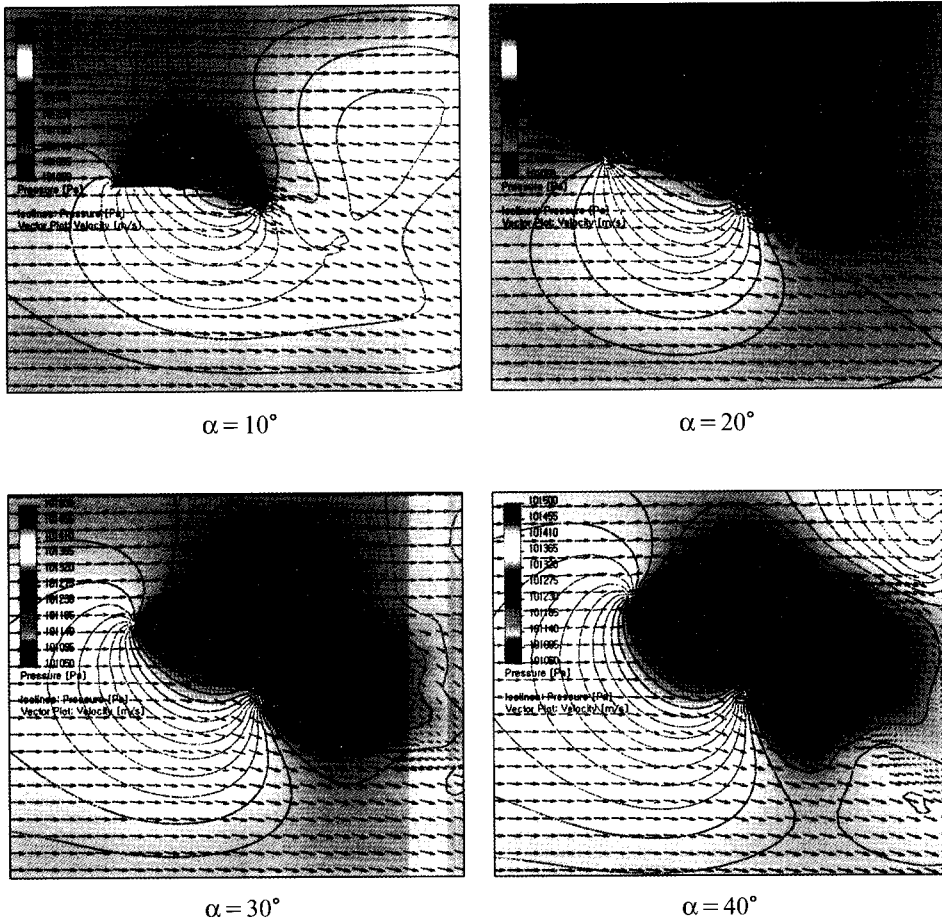


Fig. 4. The velocity vector's distribution and the pressure contour of the inverted triangular canvas as a function of the angle of attack( $\alpha$ ).

분이 강하게 나타났다. 압력장과 속도장에서 박리나 와동은 나타나지 않았으며 전체적으로 안정된 모습을 보여주었다. 다만, 후연쪽의 곡면 변화로 압력면의 고압력 영역의 중심이 후연으로 치우쳐 있으며, 최대 압력은 101,532Pa, 최소 압력은 100,899Pa로 큰 압력차를 보여주었다.

영각 20°에서는 범포의 전면에 고른 압력차를 보이며 이상적인 유선을 보여주었다. 압력 분포에서도 경계층 박리나 와동의 발생 없이 흡입면과 압력면의 압력차가 고르게 유지되어 안정된 모습을 보여주었다. 또한, 최대 압력은 102,677Pa, 압력면 전연부에서 최소 압력은 97,423Pa로 흡입면과 압력면의 압력차가 가장 큰 상태임을 알 수 있었다.

영각 30°와 40°에서는 PIV 실험 결과와 같이 전연에서부터 속도성분의 감소와 후연에서 와동이 나타나는 것이 관찰되었다. 그러나 후연쪽의 면적이 넓기 때문에 삼각형 범포에서와 같이 3차원 성분이 심하게 나타나지는 않았다.

영각이 증가됨에 따라 와(渦)의 발생 빈도는 PIV 실험 결과와 같이 사각형, 삼각형, 역삼각형 순으로 크게 나타났으며, 와의 크기도 이와 같은 순으로 나타났고 사각형에서는 영각 20° 정도의 작은 영역에서도 심하게 나타났다. 사각형 범포에서는 압력면에서 고압력 영역의 중심이 전연 쪽으로 나타났다. 압력차와 경계층 박리에 의한 재순환 영역에서 심한 와동이 영각 20° 정도의 작은 영역에서도 발생하여 영각이 증가될수록 심한 와동이 나타났다. 삼각형 범포에서 와동의 발생과 크기는 사각형 범포에 비하여 작았으나 흡입면의 고압력 영역 중심이 전연 쪽으로 상당히 치우쳐 있고, 후연으로 갈수록 익단와의 영향이 커지는 것으로 나타났다. 역삼각형의 경우 형상적 특성으로 작은 영각에서도 압력차를 잘 유지하고, 후연의 범포 곡면이 변화가 커 후류를 아래 방향으로 가속하여 상대적으로 영각 10°와 같은 작은 영각에서도 양호한 양력을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

익단와의 발생과 크기는 모형에 따라 유동에 확연한 차이를 보였다. 익단와의 영향이 가장 크게 나타나는 범포 모형은 삼각형 모형이 가장 크고 사각형, 역삼각형 순으로 작았다. 이러한 영향은 압력면의 고압력 영역 중심에도 변화를 주어 삼각형과 사각형 모형은 전연 쪽으로 치우쳐 있고 역삼각형은 후연 쪽으로 그 중심이 이동해 있었다. 범포를 중심으로 한 압력면과 흡입면의 고압력 영역 중심과 저압력 영역 중심의 변화는 범포에 작용하는 힘의 방향에 직접적으로 영향을 주게 되는 요인이 될 것으로 판단된다.

## 고 찰

본 논문에서 시행한 수치해석 결과, 시물레이션 실험값과 실측 실험값의 절대적인 정량적 비교는 경우에 따라 다소 무리가 될 수 있으나, 영각 변화에 따른 계수의 변화 양상과 영각 변화에 따른 유동장의 변화가 매우 유사하게 나타나 수치해석적 방법이 범포와 같은 유연체의 유체역학적 특성해석은 물론이고, 각종 모멘트를 계산하는 데에도 충분히 이용될 수 있을 것으로 생각되며, 극히 예민한 해석에도 그 활용이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 본 실험에서는 최대 양력이 나타나는 영각보다 영각이 클 경우, 실험값과의 차가 크게 나타났는데, 이러한 현상은 실험에 의한 계수값은 일정한 시간동안 측정된 평균 계수값인 반면, 수치해석에 의한 값은 반복된 수렴과정 중 하나에 해당되는 것으로 사실상의 순간 계수값을 의미하고 있다. 따라서 최대 양력 이후의 영각에서와 같이 칼만 불텍스와 유사한 형태의 주기적인 와동현상과 주변 압력장의 변화가 심하게 일어날 경우, 그 과정 중 하나의 순간 압력장의 분포를 가지고 해석을 해야 함으로 정량적인 비교에는 어려움이 있다. 그러므로 수치해석을 이용하여 범포와 같은 유연체의 유체역학적 특성 연구를 수행할 경우, 정량적인 특성값은 심한 와동 및 난류가 일어나기 전에 사용하는 것이 신뢰성이 있을 것으로 판단되며, 이러한



현상이 일어났다고 하더라도 수렴 중 반복해서 나타나는 유동현상을 PIV에 의한 속도장과 순차적으로 비교를 함으로써 정성적인 난류 유동장의 특성을 파악할 수 있으며, PIV에 의한 속도장을 통계적 기법을 이용해 평균난류강도를 구하고, 이 결과를 수치해석 결과와 비교함으로써 난류 유동 특성을 이해할 수 있을 것이다.

## 결 론

범포 주위의 형상별 유동 특성을 규명하고자 사각형, 삼각형, 역삼각형 모양의 범포에 대하여 CFD를 이용한 가시화 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 사각형 범포는 영각  $10^\circ$ 에서  $C_L$ 은 약 16% 작게,  $C_D$ 는 7% 작게 나타났다. 영각  $20^\circ$ 에서는 각각 4%, 3% 정도 작게 나타나 거의 유사한 결과를 보여주었다. 그러나 영각  $40^\circ$ 에서는 40%가 넘는 차이가 나타나 정량적인 값을 비교할 수 없었다. 이러한 현상은 삼각형과 역삼각형 모델에서도 유사하게 나타났다. 영각  $10^\circ$ 에서 흐름은 범포 모형의 면을 따라 거의 층류에 가까운 흐름임을 관찰할 수 있었다. 특히, 사각형과 삼각형은 압력면 영역의 중심이 전연 쪽으로 약간 치우치고 역삼각형은 면적이 넓은 후연으로 치우치는 것으로 나타났다. 영각  $20^\circ$ 에서 사각형과 삼각형 범포는 전연에서부터 경계층 박리에 의한 와동이 나타나면서 후연으로 갈수록 난류가 심하게 나타났다. 그러나 역삼각형 범포는 경계층 박리나 와동 없이 안정된 모습이 관찰되었다. 영각  $30^\circ$ 와  $40^\circ$ 에서도 사각형, 삼각형 범포는 전연부에서부터 경계층 박리가 관찰되어 와동과 복잡한 유동 현상이 관찰되었다. 영각의 증가에 따른 와(渦)의 발생 빈도는 사각형, 삼각형, 역삼각형 순으로 크게 나타났으며, 와의 크기도 이와 같은 순이었다. 익단와의 영향이 가장 크게 나타난 모형은 삼각형 범포가 가장 크고 다음으로 사각형, 역삼각형 순으로 작았다. 범포의 곡면 특성상 영각이 작을 경우는 양력의 작용영역이 모형의 뒤쪽에 가깝고, 클수

록 앞쪽에 가까우며 이 때 작용영역의 면적이 넓어야 큰 양력을 얻을 수 있다.

## 사 사

이 연구는 국립수산과학원(범포를 이용한 트롤어구 개발 연구, RP-2006-FE-004)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- An, H.C., 2000. Development and hydrodynamic characteristics of sea anchor for squid jigging vessel. Ph.D. thesis, Pukyong National university, Korea, 53 - 72.
- Bae, B.S., J.H. Bae, H.C. An, J.H. Lee and J.W. Shin, 2004a. The hydrodynamic characteristics of the canvas kite. 1. The characteristics of the rectangular, trapezoid canvas kite. Bull. Kor. Fish. Tech. Soc., 40(3), 196 - 205.
- Bae, B.S., J.H. Bae, H.C. An, J.H. Lee and J.W. Shin, 2004b. The hydrodynamic characteristics of the canvas kite. 2. The characteristics of the triangular canvas kite. Bull. Kor. Fish. Tech. Soc., 40(3), 206 - 213.
- Bae, B.S., H.C. An, J.H. Bae, C.D. Park and I.O. Kim, 2006. The characteristics of the flow field around canvas kite using the PIV. J. Kor. Fish. Tech. Soc., 42(2), 86 - 96.
- COSMOS, 2003. COSMOS FloWorks Fundamentals, Chapter 5, pp. 19.
- Hoerner, S.F., 1975. Fluid dynamic lift, Chapter 5, pp. 18.
- Kim, C.J., 1998. Computational fluid dynamics. Moonwoodang, 33 - 36, 127 - 132, 315 - 330.
- Lange, K., 1989. Design and operation of flexible sail kites. ICES council meeting collected papers, pp. 7.
- Lauder, B.E. and D.B. Spalding, 1974. The numerical computation of turbulent flows' computer methods in applied mechanics and engineering, 3, 269 - 289.
- Lee, S.K., 2002. Wing theory. Wooyong publication, 32 - 113.
- Park, K.H., 2003. A study on the hydrodynamic

characteristics of the two slot cambered otter board.  
Ph.D. thesis, Pukyong National university, Korea,  
73 – 86.

Sinhwa technique information, 2002. Solidworks 2001  
plus Training Manual, 1 – 351.

---

2006년 7월 11일 접수

2006년 8월 4일 수리