

평판형 전개판의 3차원 운동 모델링

최무열* · 이춘우¹ · 이건호

부경대학교 수산물리학과, ¹부경대학교 해양생산시스템관리학부

Modeling of flat otter boards motion in three dimensional space

Moo-Youl CHOE*, Chun-Woo LEE¹ and Gun-Ho LEE

Department of Fisheries Physics, Graduate school, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

*¹Division of Marine Production System Management, Pukyong National University,
Busan, 608-737, Korea*

Otter boards in the trawl are the one of essential equipments for the net mouth to be spread to the horizontal direction. Its performance should be considered in the light of the spreading force to the drag and the stability of towing in the water. Up to the present, studies of the otter boards have focused mainly on the drag and lift force, but not on the stability of otter boards movement in 3 dimensional space. In this study, the otter board is regarded as a rigid body, which has six degrees of freedom motion in three dimensional coordinate system. The forces acting on the otter boards are the underwater weight, the resistance of drag and spread forces and the tension on the warps and otter pendants. The equations of forces were derived and substituted into the governing equations of 6 degrees of freedom motion, then the second order of differential equations to the otter boards were established. For the stable numerical integration of this system, Backward Euler one of implicit methods was used. From the results of the numerical calculation, graphic simulation was carried out. The simulations were conducted for 3 types of otter boards having same area with different aspect ratio($\lambda=0.5, 1.0, 1.5$). The tested gear was mid-water trawl and the towing speed was 4k' t. The length of warp was 350m and all conditions were same to each otter board. The results of this study are like this; First, the otter boards of $\lambda=1.0$ showed the longest spread distance, and the $\lambda=0.5$ showed the shorted spread distance. Second, the otter boards of $\lambda=1.0$ and 1.5 showed the upright at the towing speed of 4k' t, but the one of $\lambda=0.5$ heeled outside. Third, the yawing angles of three otter boards were similar after 100 seconds with the small oscillation. Fourth, it was revealed that the net height and width are affected by the characteristics of otter boards such as the lift coefficient.

Key words : Otter boards, 6DOF, Rigid body motion, Numerical simulation

*Corresponding author: s23good@pknu.ac.kr Tel: 82-51-620-6123 Fax: 82-51-622-3306

서 론

예망어구로 대표되는 트롤어구는 망구의 형상이 어획성능을 결정하는 중요 요인이다. 트롤어구의 망구형상은 망고와 망폭으로 결정되며, 망고는 주로 부력과 침강력으로 결정되고, 망폭은 예망속도와 전개판의 성능에 따라 결정된다. 전개판의 성능에 영향을 주는 인자로는 형상, 중량비 그리고 영각 등을 들 수 있다.

전개판의 성능에 대한 최근 연구로서는 전개판 주위의 유체 흐름에 대한 가시화 실험과 형상별 성능에 관한 연구가 있었고(Ko et al., 1990, 1991; Kwon, 1993), 유동장의 수치 시뮬레이션 분석을 통한 전개판의 유체역학적 성능계산에 관한 연구(Ko et al., 1992; Kwon, 1993)가 있었다. Park et al.(2001, 2002)은 PIV(Particle Imaging Velocimetry)기법을 이용하여 유동장의 가시화를 통한 전개판의 유체역학적인 특성해석 및 성능향상에 관한 연구를 하였으며, Park(1994)은 전개판의 정적, 동적 안정성에 대한 유체 특성을 연구하였다. 외국의 경우 Crewe(1964)가 평판형 전개판에 작용하는 힘과 모멘트 그리고 안정성에 관한 실험을 실시하였고, 반곡형 전개판의 성능에 관해 연구하였다. 그러나 이러한 모형실험을 통한 해석은 그 유체역학적 특성을 가시적으로 확인할 수 있고 정량적인 수치 결과를 얻을 수는 있지만, 실제 예망상태에서의 조건과는 다른 제한된 상황의 데이터만 제공하는 경우가 대부분이다. 즉, 실제의 전개판은 3차원 공간에서 운동하는데 반해 모형실험에서는 전개판을 고정시켜 놓고 실험을 하게 되므로, 일정한 영각에서 양항비 등을 구할 수는 있어도 전개판이 동적으로 운동하는 상태에서 성능을 분석하기는 어렵다.

그러나 컴퓨터 계산을 통한 시뮬레이션에서는 실제 조업조건 하에서의 실물 전개판의 거동과 성능 및 운동특성을 3차원적으로 파악할 수 있다. 시뮬레이션을 위해서는 전개판의 운동을 지배하는 운동방정식을 세우고 어선의 예망력

에 의한 힘과 전개판 자체의 항력, 양력 및 수중 무게, 그물의 저항 등 외력을 고려한 모델링을 하여야 한다. 여기서 기술된 운동모델을 해석하면 관성좌표계(inertia coordinate system)내에서의 전개판의 위치 및 자세변화를 관찰할 수 있고, 어구의 종류와 크기 그리고 어선의 예망력이나 진행방향 변화 등에 따른 다양한 조건에서의 성능 분석이 이루어질 수 있다.

본 연구에서는 트롤어업의 중요한 속구중의 하나인 전개판에 대하여, 수중에서의 3차원 운동에 대한 운동방정식을 도출하였다. 기본적인 평판형의 전개판에 대해 예인 중 작용하는 외력의 방정식을 기술하고 병진 및 회전운동을 모델링 하였다. 초기값을 설정하고 수치적분방법을 통해 운동을 시뮬레이션 하였는데, 트롤 어구의 시뮬레이션에 대한 상용소프트웨어에 적용하여 어선과 그물이 결합된 상태에서 전개판의 거동 및 자세변화를 관찰하였고 유용성에 대해 검토하였다.

재료 및 방법

전개판의 운동 모델링

좌표계

강체로 간주되는 전개판의 운동방정식은 뉴턴의 제2법칙으로부터 기술되며, 이때 운동은 관성좌표계(Inertia coordinate system)에서 성립을 하게 된다. 즉, 전개판의 운동은 이 관성좌표

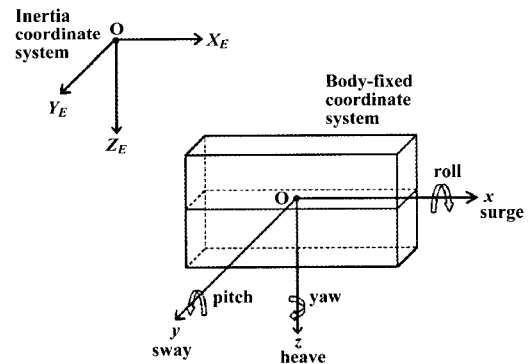


Fig. 1. Body-fixed and the inertia coordinate systems.

계를 기준으로 기술되고, 또 하나의 전개판 무게 중심에 원점을 둔 물체고정좌표계(Body-fixed coordinate system)를 사용하였다. Fig. 1은 관성좌표계(X_E, Y_E, Z_E)와 평판형 전개판에 고정된 물체고정좌표계(x, y, z)를 나타내고 있다.

그리고 물체고정좌표계에서 기술된 전개판의 자세변화를 관성좌표계에 변환하여 나타내기 위해서 오일러 각(ϕ, θ, ψ)을 사용하였다. 식(1)은 물체고정좌표계와 관성좌표계간의 좌표변환 행렬을 나타낸다.

우선 관성좌표계의 Z_E 축을 기준으로 ψ 만큼의 회전을 한 좌표계의 각 축을 (x_1, y_1, z_1)이라고 두고, 여기서 y_1 축을 중심으로 θ 각도 만큼 회전을 한 좌표계의 각 축을 다시 (x_2, y_2, z_2)라고 둔다. 마지막으로 x_2 축을 기준으로 ϕ 만큼 회전하게 되면 오일러 각을 이용해 변환된 물체에 대한 좌표계 (x, y, z)가 된다(Kim et al., 2004).

$$E = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & \sin\psi \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\psi \cos\phi + \cos\psi \sin\theta \sin\phi & \cos\psi \cos\phi + \sin\psi \sin\theta \sin\phi & \cos\theta \sin\phi \\ \sin\psi \sin\phi + \cos\psi \sin\theta \cos\phi & -\cos\psi \sin\phi + \sin\psi \sin\theta \cos\phi & \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{pmatrix} = E^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$

6자유도 운동방정식

수중에서 6자유도(six degrees of freedom) 운동을 하는 전개판의 각 축에 대한 속도와 각속도의 성분을 Table. 1에 나타내었다.

관성좌표계에 있어서 전개판의 운동방정식은 병진운동량과 회전운동량에 대한 보존법칙으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d}{dt} (m\mathbf{V}_g) = m(\dot{\mathbf{V}}_g + \omega\mathbf{V}_g) \quad (3)$$

$$\sum \mathbf{M} = \frac{d}{dt} (\mathbf{H}_g) = \dot{\mathbf{H}}_g + \omega\mathbf{H}_g \quad (4)$$

여기서 \mathbf{V}_g 는 전개판의 무게중심의 속도이고, \mathbf{H}_g 는 회전운동량, ω 는 물체고정좌표계의 회전을 나타내는 각속도이다. 각각을 좌표계의 성분별

로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{V}_g = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k} \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_g = H_x\mathbf{i} + H_y\mathbf{j} + H_z\mathbf{k} \quad (6)$$

여기서 ($\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$)는 물체고정좌표계의 단위벡터이고, (u, v, w)는 전개판의 방향별 속도, (H_x, H_y, H_z)는 방향별 회전운동량을 나타낸다. 회전운동량은 식(7)과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 I 는 물체의 관성모멘트(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})와 관성승적($I_{xy} = I_{yx}, I_{xz} = I_{zx}, I_{yz} = I_{zy}$)을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (7)$$

Table 1. Linear and angular velocity in the Body-fixed coordinate system

Axes	Position	Velocity	Euler angles	Angular velocity
X	x	u	ϕ	p
Y	y	v	θ	q
Z	z	w	ψ	r

평판형 전개판에 대한 운동방정식을 단순화시키기 위하여 다음의 3가지 가정을 두었다.

[가정 1] 전개판의 무게중심(center of gravity)은 전개판의 정 가운데로 물체고정좌표계의 점과 일치한다.

[가정 2] 전개판에 작용하는 저항의 발생위치인 압력중심은 영각에 따라 다르나, 본 논문에는 알려져 있는 압력중심을 고정값으로 사용하였다.

[가정 3] y 축을 중심으로 회전하는 피치각(pitch angle)이 90° 가 되는 경우는 없는 것으로 가정한다.

[가정 1]에 의해서 전개판은 $x-y, x-z, y-z$ 평면에 대하여 기하학적 대칭을 이루므로 전개판에 대한 관성승적(product of inertia)은 0이 된다.

[가정 2]에서 전개판의 압력중심은 영각에 따

라 달라지며 이는 실험을 통해 회전모멘트와 함께 구해야 하는 실험값으로, 본 논문에서는 평판형 전개판에 대해 알려져 있는 값을 사용하였다 (Crewe, 1964; Lee, 1989). 평판형 전개판의 경우 압력중심은 대체로 전연쪽에서 중심으로 약 40%의 지점에서 발생한다.

[가정 3]에서는 피치각이 90°가 될 경우 회전 변환행렬의 $\sec\theta$ 항이 무한대가 되어 특이점이 발생한다. 이 경우 쿼터니언(quaternion)으로 풀어야 하지만, 전개판의 경우 그러한 경우가 없어야 하므로 본 논문에서는 무시하였다.

앞서 기술된 뉴턴의 제2법칙을 이용하여 3차원 좌표계의 각 방향별로 전개판에 작용하는 힘과 모멘트를 정리하고, 물체고정좌표계를 무게중심의 원점에 오도록 잡아 가정 1에 의해서 관성승적항을 소거하면 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \sum F_X &= m(u + qw - rv) \\
 \sum F_Y &= m(v + ru - pw) \\
 \sum F_Z &= m(w + pv - qu) \\
 \sum M_X &= I_x \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr \\
 \sum M_Y &= I_y \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp \\
 \sum M_Z &= I_z \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq
 \end{aligned} \tag{10}$$

외력과 모멘트

예망상태의 전개판은 수중 유체속에 놓이게 되고 이때 전개판에는 외력과 모멘트가 발생하며, 이 힘들이 전개판의 자세를 결정하게 된다. 전개판에 작용하는 외력으로는 배와 연결된 끌줄(warp)에 의한 힘, 그물과 연결되는 꼬릿줄(otter pendants) 및 후릿줄(hand rope)에 의한 힘 그리고 유체력(hydrodynamic forces)이 있다. 이 유체력에는 항력(drag force)과 양력(lift force)이 있으며, 항력은 전개판 속도벡터의 반대방향으로 작용하고 양력은 이에 수직방향으로 작용한다. 또한 정역학적인 힘(hydrostatic forces)으로 전개판의 무게에 따른 침강력이 발생하며, 이 침강력은 관성좌표계에서 항상 수직 방향으로 작

용한다. 이러한 외력들은 그 발생 위치에 따라 전개판의 운동에 모멘트를 만들어 회전운동을 일으키게 된다. 전개판에 작용하는 외력과 그때의 위치벡터를 Fig. 2에 나타내었다.

전개판에 작용하는 모든 외력과 모멘트를 정리하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \sum \mathbf{F} &= \mathbf{F}_{Tw} + \mathbf{F}_{Th1} + \mathbf{F}_{Th2} + \mathbf{F}_{HS} + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L \\
 \sum \mathbf{M} &= \mathbf{r}_{Tw} \times \mathbf{F}_{Tw} + \mathbf{r}_{Th1} \times \mathbf{F}_{Th1} + \mathbf{r}_{Th2} \times \mathbf{F}_{Th2} \\
 &\quad + \mathbf{r}_g \times \mathbf{F}_{HS} + \mathbf{r}_{cp} \times \mathbf{F}_D + \mathbf{r}_{cp} \times \mathbf{F}_L \tag{11}
 \end{aligned}$$

여기서, \mathbf{F}_{Tw} 는 끌줄(warp)의 장력, \mathbf{F}_{Th1} 은 위 꼬릿줄에 작용하는 장력, \mathbf{F}_{Th2} 는 아래 꼬릿줄에 작용하는 장력, \mathbf{F}_{HS} 는 유체정역학적인 힘으로 전개판의 침강력, \mathbf{F}_D 는 유체력 중 항력, 그리고 \mathbf{F}_L 은 양력을 나타낸다. \mathbf{r}_{Tw} 는 물체고정좌표계의 원점에서 끌줄의 부착지점까지의 위치벡터, \mathbf{r}_{Th1} 은 위 꼬릿줄의 위치벡터, \mathbf{r}_{Th2} 는 아래 꼬릿줄의 위치벡터, \mathbf{r}_g 는 전개판 무게중심의 위치벡터, \mathbf{r}_{cp} 는 압력중심의 위치벡터이다.

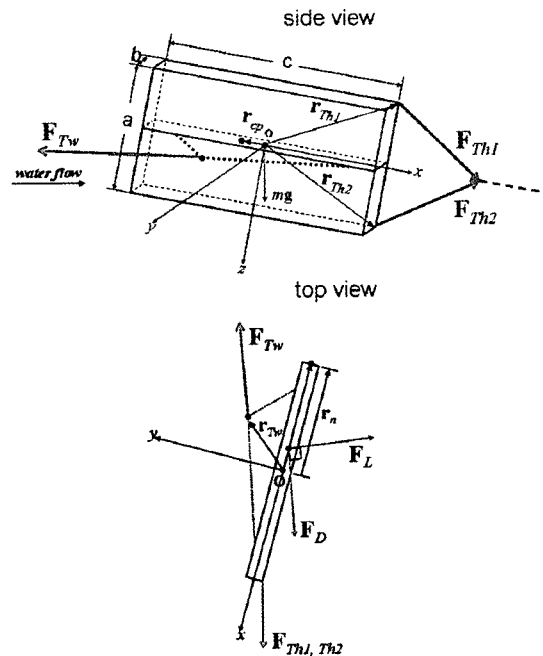


Fig. 2. External forces and position vectors on the otter board.

에인력과 그물의 저항

전개판에 작용하는 에인력인 끌줄의 장력과 그물의 저항에 의한 꼬릿줄에 작용하는 장력은 시간에 따라 방향과 크기가 변하게 되는데, 이 힘들을 표현하기 위해서 유연체 (flexible structures)의 운동해석에서 사용되는 질량-스프링 (mass-spring) 모델을 적용하였다(Lee, et al., 2005). Fig. 3은 모델을 적용한 끌줄과 꼬릿줄을 나타내고 있다.

배로부터 전달되는 힘인 끌줄의 장력은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{F}_{Tw} = -k_{Tw}\mathbf{n}_{Tw}(|\mathbf{r}_{Tw}| - l_{Tw}^0) \quad (12)$$

여기서 k_{Tw} 는 끌줄의 마지막 질점의 탄성계수를 나타내며, \mathbf{r}_{Tw} 는 마지막 질점의 위치벡터, $|\mathbf{r}_{Tw}|$ 는 위치벡터 크기, l_{Tw}^0 는 마지막 질점까지의 원래 길이, \mathbf{n}_{Tw} 는 위치벡터 \mathbf{r}_{Tw} 의 단위벡터로 $\mathbf{r}_{Tw}/|\mathbf{r}_{Tw}|$ 에 의해 계산할 수 있다.

꼬릿줄에 작용하는 장력은 유체 속 그물에 작용하는 저항에 의해 발생하는 힘으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{Th1} &= -k_{Th1}\mathbf{n}_{Th1}(|\mathbf{r}_{Th1}| - l_{Th1}^0) \\ \mathbf{F}_{Th2} &= -k_{Th2}\mathbf{n}_{Th2}(|\mathbf{r}_{Th2}| - l_{Th2}^0) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 k_{Th1} 과 k_{Th2} 는 각각 위 꼬릿줄과 아래 꼬릿줄의 첫 번째 질점의 탄성계수를 나타내며, \mathbf{r}_{Th1} 과 \mathbf{r}_{Th2} 는 두 꼬릿줄 첫 번째 질점의 위치벡터, $|\mathbf{r}_{Th1}|$ 과 $|\mathbf{r}_{Th2}|$ 는 두 꼬릿줄 위치벡터 크기, l_{Th1}^0 과 l_{Th2}^0 는 두 꼬릿줄 첫 번째 질점까지의 원래 길이, \mathbf{n}_{Th1} 과 \mathbf{n}_{Th2} 는 위치벡터 \mathbf{r}_{Th1} 과 \mathbf{r}_{Th2} 의 단위벡터로 각각 $\mathbf{r}_{Th1}/|\mathbf{r}_{Th1}|$ 과 $\mathbf{r}_{Th2}/|\mathbf{r}_{Th2}|$ 로 계산할 수 있다.

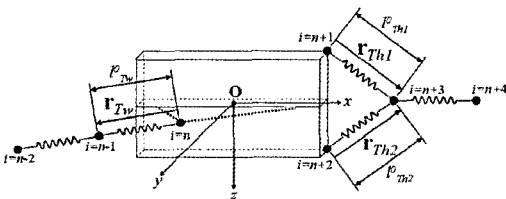


Fig. 3. Mass-spring model of the warp, otter pendants and the hand rope.

침강력

전개판에 작용하는 침강력은 정역학적인 힘으로 전개판 자체의 질량 m 에 중력가속도 \mathbf{g} 를 곱한 값이다. 이를 물체고정좌표계의 성분으로 변환하여 사용하기 위해 오일러각을 이용하고, 이때 중력은 관성좌표계상에서 항상 수직방향으로 지구중심을 향하므로 좌표계상에서는 Z_E 축 방향의 성분만 있게 된다. 따라서 오일러각을 이용해 물체고정좌표계상에 무게를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{HS} &= E \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix} \\ \mathbf{M}_{HS} &= \mathbf{r}_g \times \mathbf{F}_{HS} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, E 는 관성좌표계의 성분을 물체고정좌표계상에 나타내기 위한 변환행렬(식(1)), \mathbf{r}_g 는 전개판 무게중심의 위치벡터이다.

항력과 양력

수중에서 운동하는 전개판에 작용하는 유체역학적 힘은 비선형적이고 복잡하다. 수중 물체에 작용하는 유체력은 항력과 양력으로 이 힘들은 물체의 면적과 속도 등에 의해 결정되며, 이들의 계산은 물체의 거동을 정확하게 해석하기 위해 매우 중요한 요소이다. 항력과 양력은 유체역학 이론에서 다음 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_D &= -\frac{1}{2} C_D \rho S V^2 \mathbf{n}_v \\ F_L &= \frac{1}{2} C_L \rho S V^2 \mathbf{n}_l \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 C_D 와 C_L 는 각각 항력과 양력의 계수값이고, ρ 는 물의 밀도, S 는 전개판의 면적, V 는 전개판 무게중심 속도의 크기, \mathbf{n}_v 는 속도의 단위벡터, \mathbf{n}_l 은 양력이 작용하는 방향의 단위벡터이다. 두 단위벡터를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{n}_v = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \mathbf{i} + \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \mathbf{j} + \frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \mathbf{k}$$

$$\mathbf{n}_v = \frac{\mathbf{V} \times (\mathbf{r}_n \times \mathbf{V})}{|\mathbf{V} \times (\mathbf{r}_n \times \mathbf{V})|} \quad (16)$$

여기서 u, v, w 는 전개판의 x, y, z 방향별 선형속도, \mathbf{V} 는 전개판의 속도벡터, \mathbf{r}_n 은 물체고정좌표계의 원점에서 전연방향으로 향하는 위치벡터이다.

항력 및 양력계수는 전개판이 유체의 흐름과 이루는 영각에 따라 값이 달라지며, 이는 실험을 통해 얻을 수 있다. 본 연구에서는 평판형 전개판의 영각에 따른 계수값을 Park(1994)이 전개판의 안정성 해석을 위해 실험을 통해 구한 종횡비가 다른 평판형 전개판 모형의 영각에 따른 양·항력 계수값을 사용하였다.

유체력에 의한 전개판의 회전운동을 구하기 위해서는 전개판에 작용하는 압력중심을 구해야 한다. 본 연구에서는 직접적인 실험 이전에 평판형 전개판에 대해 알려져 있는 동압력 중심 계수 값을 사용하였다. 즉, 전개판의 현장(chord)에 대해 전연(leading edge)에서부터 중심으로 40%되는 지점에 작용하는 것으로 간주하였다.(Crewe, 1964; Lee, 1989).

예인중인 전개판은 영각의 변화에 따라 유체력의 계수값이 차이를 보이므로 이 영각을 구하기 위해 전개판의 속도벡터와 전개판에 고정된 임의의 위치벡터의 내적을 이용하였다. 본 연구에서는 계산의 단순화를 통해 기본적인 3차원 운동을 모델링을 하고자, z 축을 중심으로 한 영각만을 계산하였고, x 축 및 y 축을 중심으로 한 각각의 롤각(roll angle)과 피치각(pitch angle)은 고려하지 않았다. 물체고정좌표계의 원점에서부터 전연까지의 위치벡터 \mathbf{r}_n 과 전개판의 진행 방향의 속도벡터 \mathbf{V} 를 이용하면 임의의 시간 t 에서의 영각은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{r}_n}{|\mathbf{V}| |\mathbf{r}_n|} \right) \quad (17)$$

어선의 예망력에 따른 끌줄 및 꼬릿줄에 작용하는 장력과 전개판에 작용하는 유체력 및 침강력을 고려하여 외력 및 모멘트 식을 세우고 이를 식(10)의 6자유도 기본 운동방정식에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (m + m_{ax})(u + qw - rv) &= F_{Twx} + F_{Th1x} + F_{Th2x} + F_{Dx} + F_{Lx} + F_{HSx} \\ (m + m_{ay})(v + ru - pw) &= F_{Twy} + F_{Th1y} + F_{Th2y} + F_{Dy} + F_{Ly} + F_{HSy} \\ (m + m_{az})(w + pv - qu) &= F_{T wz} + F_{Th1z} + F_{Th2z} + F_{Dz} + F_{Lz} + F_{HSz} \\ I_x \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr &= M_{Twx} + M_{Th1x} + M_{Th2x} + M_{Dx} + M_{Lx} + M_{HSx} \\ &\quad - \frac{1}{2} C_{mx} \rho A p |p| \\ I_y \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp &= M_{Twy} + M_{Th1y} + M_{Th2y} + M_{Dy} + M_{Ly} + M_{HSy} \\ &\quad - \frac{1}{2} C_{my} \rho A q |q| \\ I_z \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq &= M_{T wz} + M_{Th1z} + M_{Th2z} + M_{Dz} + M_{Lz} + M_{HSz} \\ &\quad - \frac{1}{2} C_{mz} \rho A r |r| \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $m_{a(x, y, z)}$ 는 전개판의 가상질량, $C_{m(x, y, z)}$ 는 전개판의 좌표축별 모멘트계수이다.

이렇게 완성된 전개판 운동방정식의 수치해석을 통해 시간에 따른 위치와 속도 그리고 자세 등의 변화를 구하고, 이때 운동방정식은 비선형 상미분방정식으로서 초기치가 주어지면 해를 구할 수 있다.

전개판 운동 시뮬레이션

수치해석

앞에서 기술된 전개판의 운동방정식은 비선형의 형태를 가지고 있다. 이러한 비선형 운동방정식은 초기값(Initial value)이 주어지면 수치적분 방법을 통해 해를 찾아감으로써 운동을 해석할 수 있다.

본 연구의 모델인 평판형 전개판의 구조특성상 연결구조의 복잡성 정도가 낮고 계산되어야 할 질점의 수가 적으며, 또한 계산 시간간격이 짧지 않아도 관계없으므로, 긴 시간간격에서도 비교적 안정적으로 계산이 가능한 후향 오일러법을 사용하여 전개판의 운동을 해석하였다.

전개판의 완성된 6자유도 운동방정식인 식

(18)을 수치계산 하기위해 미분방정식의 형태로 변형하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{1}{(m+m_{ax})} [F_{Twx} + F_{Th1x} + F_{Th2x} + F_{Dx} + F_{Lx} + F_{HSx}] - qw + rv \\ \dot{v} &= \frac{1}{(m+m_{ay})} [F_{Twy} + F_{Th1y} + F_{Th2y} + F_{Dy} + F_{Ly} + F_{HSy}] - ru + pw \\ \dot{w} &= \frac{1}{(m+m_{az})} [F_{Twx} + F_{Th1z} + F_{Th2z} + F_{Dz} + F_{Lz} + F_{HSz}] - pv + qu \\ \dot{p} &= [M_{Twx} + M_{Th1x} + M_{Th2x} + M_{Dx} + M_{Lx} + M_{HSx} \\ &\quad - \frac{1}{2} C_{mx} \rho A p |p| - (I_{zz} - I_{yy}) q r] / I_{xx} \\ \dot{q} &= [M_{Twy} + M_{Th1y} + M_{Th2y} + M_{Dy} + M_{Ly} + M_{HSy} \\ &\quad - \frac{1}{2} C_{my} \rho A q |q| - (I_{xx} - I_{zz}) r p] / I_{yy} \\ \dot{r} &= [M_{Twx} + M_{Th1z} + M_{Th2z} + M_{Dz} + M_{Lz} + M_{HSz} \\ &\quad - \frac{1}{2} C_{mz} \rho A r |r| - (I_{yy} - I_{xx}) p q] / I_{zz} \end{aligned} \quad (19)$$

식(20)은 후향 오일러법을 이용한 해의 계산 방정식으로 $\mathbf{q}(t)$ 는 시간 t 에서의 물체의 속도 및 각속도, $\mathbf{S}(t)$ 는 시간 t 에서의 물체의 선형변위 및 각 변위를 나타내며, h 는 계산시간 간격(step size)을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(t) &= \mathbf{q}(t-1) + h \times \mathbf{q}(t) \\ \mathbf{S}(t) &= \mathbf{S}(t-1) + h \times \mathbf{S}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

그리고 두 식의 우변의 마지막 항은 구하고자 하는 계산시간에서의 값으로, 오일러법(Euler method) 계산을 통해 구한 예측자(Predictor) 값을 사용해 수정된(Corrector) 값으로 계산하게 된다. 실제계산에서 한번의 계산수행으로는 해가 얻어지지 않으며 수차례 반복계산을 하게 된다. 이때 마지막항의 예측자로서 앞에서 계산된 값을 대입해서 수행한다.

시뮬레이션 조건

전개판 모델

전개판 운동을 시뮬레이션하기 위해 종횡비가 서로 다른 3종류의 평판형 전개판을 사용하였고, 그에 따른 결과의 차이를 비교·분석하였다. 사용된 전개판의 종횡비 및 치수는 Table. 2

Table 2. Specification of the flat otter boards for the simulation

No.	Aspect ratio	Length (mm)	Height (mm)	Thickness (mm)	Area (m ²)
1	0.5	3,536	1,768	200	6.25
2	1.0	2,500	2,500	200	6.25
3	1.5	2,042	3,063	200	6.25

Table 3. Maximum lift coefficients of the flat otter board according to the angle of attack and aspect ratio

No.	Aspect ratio	Attack angle at CLmax	Maximum coefficient of lift (C _{Lmax})
1	0.5	40°	1.24
2	1.0	25°	0.99
3	1.5	20°	0.84

에 나타내었고, 수중무게는 약 1톤이었다.

Table. 3에서는 평판형 전개판의 종횡비별 최대양력계수와 그때의 영각을 나타내고 있다 (Park, 1994).

끌줄의 부착점은 전개판 전연의 수직축 1/2지점에서 x축을 따라 중심방향으로 현장의 40%, 또 그 지점에서 위 방향으로 높이의 5%, 그리고 멩에(bracket)의 효과를 고려하기 위해 전개판 안쪽 방향으로 평판 두께의 300%되는 지점이다. 꼬릿줄은 전개판의 바깥쪽 면 후연의 상하에서 시작하여 두 줄을 하나의 후릿줄에 연결하였으며, 위 꼬릿줄과 아래 꼬릿줄의 길이는 각각 전개판 높이의 2.9배와 3배였다. 끌줄과 꼬릿줄의 재질은 와이어(wire)이고, 일정한 크기의 경도(stiffness)를 가지는 탄성운동을 하게 된다.

전개판의 운동방정식은 초기값문제(Initial value problem)로 보고 해를 구할 수 있으며 초기값으로 다음과 같은 위치와 속도 및 자세결정에 관한 변수를 가지게 된다.

$$\text{Initial Values} = \{x_0, y_0, z_0, \phi_0, \theta_0, \psi_0, u_0, v_0, w_0, p_0, q_0, r_0\}$$

트롤시스템에 적용한 전개판 시뮬레이션

트롤어구에서 사용되는 전개판은 2개의 대형인 평판이 그물의 앞쪽 좌우에서 예인되면서 그물의 입구를 전개시켜주는데, 기하학적으로는

대칭의 구조를 가지지만 그물의 좌우 대칭성, 수중 조류의 영향 등으로 두 전개판의 성능은 차이를 보인다.

트롤시스템에서의 전개판 운동을 확인하기 위해서 그물과 결합하여 선박이 예인하는 상태를 만들었다. 평판형 전개판의 경우 주로 저층트롤에서 사용되나 본 연구에서는 전개판의 기본적인 운동을 우선적으로 구현하기 위하여 해저 마찰력이나 해저와의 충돌 등의 변수가 없는 중층트롤시스템을 구성하였다.

중층트롤어구를 설계하기 위해 상용 소프트

웨어인 트롤 어구 설계 및 시뮬레이션 소프트웨어(SimuTrawl)를 사용하였고, 설계프로그램을 이용하여 4매식의 전장이 약 158m인 그물을 설계하였다. 이때 끌줄 및 후릿줄의 길이는 각각 350m, 40m이었다. Fig. 4는 설계프로그램을 사용하여 설계된 시뮬레이션용 중층트롤어구의 설계도를 나타내고, Fig. 5에서는 전체 트롤시스템의 모습을 보여주고 있다. 시뮬레이션상의 전개판과 그물의 초기위치는 예망 목표수심으로 설정하였으며, 투망과정에 대한 시뮬레이션은 생략하였다.

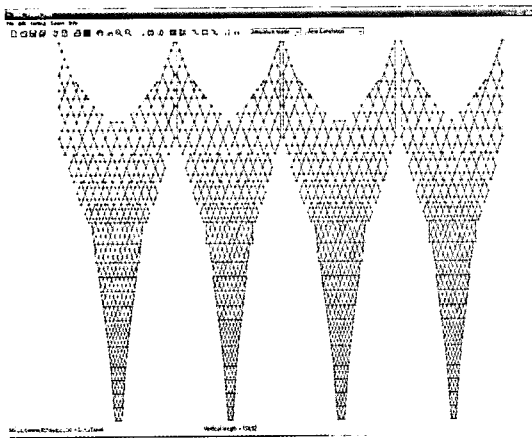


Fig. 4. The designed mid-water trawl net for the simulation.

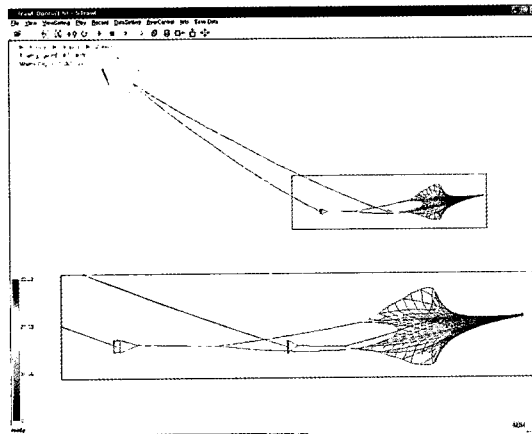


Fig. 5. The whole view of the trawl system - a ship, otter boards and a trawl net.

결과 및 고찰

종횡비가 서로 다른 전개판의 시뮬레이션

면적이 비슷하고 종횡비가 서로 다른 3종류 ($\lambda=0.5, 1.0, 1.5$)의 평판형 전개판을 트롤그물과 연결하였고, 다음과 같은 조건에서 예망 시뮬레이션을 실시하였다. 예망수심은 100m, 예망속도는 4k't로 3종류의 전개판에 모두 동일한 조건과 동일한 그물을 사용하였다. 계산 시간 간격은

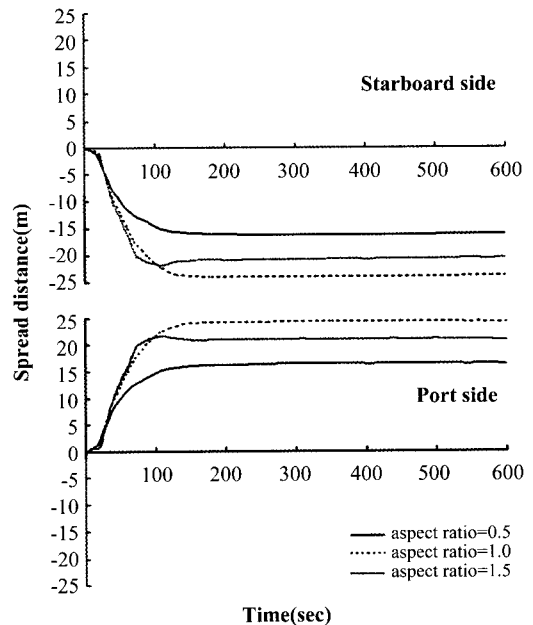


Fig. 6. The spread distance of 3 types of otter boards with different aspect ratio.

0.002초였으며, 10초 간격으로 10분간의 시뮬레이션 데이터를 수집하여, 각 전개판의 전개거리 및 각 변위에 대한 결과를 나타내었다.

Fig. 6은 종횡비별 전개판 각각의 좌우측 전개거리를 나타내고 있다. 좌표계 상에서 우측(starboard side) 전개판은 (-) 변위를, 좌측(port side) 전개판은 (+) 변위를 나타낸다.

예망초기에는 시간에 따른 전개거리가 종횡비가 큰 순서로 크게 나오지만, 예망시간이 100초가 넘어 전개거리가 안정화 되면서 종횡비가 1.0인 전개판의 전개거리가 가장 크고 다음으로 1.5, 0.5의 순서였다. Park(1994)의 연구에 의하면 실험을 통한 평판형 전개판의 양력계수의 크기는 영각이 20° 정도까지는 1.5 > 1.0 > 0.5의 종횡비 순으로 증가하였지만, 영각이 더 커지면서 종횡비가 1.0인 전개판의 양력계수가 가장 커지고 영각이 약 30° - 40°를 넘어가면서 양력계수의 크기는 0.5 > 1.0 > 1.5의 종횡비 순서를 보였다. 전개판의 전개거리에 가장 큰 영향을 미치는 양력의 크기는 전개판의 면적, 속도, 양력계수 등

에 영향을 받는다. 3종류 전개판의 경우 동일한 예망속도와 어구를 사용하고 비슷한 면적을 가지고 있으므로, 전개거리는 영각에 따른 양력계수의 크기와 상관이 있고, 선행연구의 실험결과를 잘 따른다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 전개판의 회전운동 중 좌표계상의 x축을 중심으로 한 rolling 운동으로, 정면에서 봤을 때 전개판의 내외 경사를 나타내며 일반적으로 부르는 heel 각도에 해당된다. 우측(starboard side) 전개판의 경우 (+) 각 변위를 보이면서 내방경사를 이루었고, (-) 각 변위를 보이면서 외방경사를 이루었다. 좌측(port side) 전개판의 경우는 정반대가 되었다. 종횡비가 1.0과 1.5인 전개판의 경사 각도는 예망초기 심한 외방경사를 이루다 안정화되면서 직립상태를 이루고 약 200초 이후부터 내방경사를 이루었다. 하지만 종횡비가 0.5인 전개판은 다른 두 전개판과 비슷한 경향은 보였지만, 내방경사는 없는 것을 알 수 있었다.

일반적으로 전개판을 직립상태로 만들고 수중에서 안정되도록 하기 위해 전개판 하부에 무게를 더 줌으로써 무게중심이 아래에 위치하도록 하지만, 본 연구에서는 무게중심이 전개판의 정 중앙에 있고 예망시작단계에서 그물이 벌어지면서 약간 짧은 위 꼬릿줄에 의하여 외방경사를 이루었다. 그리고 시간이 지나 그물의 입구가 어느 정도 전개되면 위 꼬릿줄의 장력방향이 전개판의 안쪽으로 이동하고 이에 따라 전개판은 내방경사를 이루게 된다. 그러나 종횡비가 0.5인 전개판의 경우는 높이가 현장에 비하여 짧고, 상하 꼬릿줄의 길이 차이가 다른 두 전개판에 비해 거의 나지 않기 때문에 내방경사가 없는 것으로 분석된다.

Fig. 8은 전개판의 회전운동 중 좌표계상의 y축을 중심으로 한 pitching 운동으로, 측면에서 봤을 때 전개판 전후 경사를 나타내며 일반적으로 부르는 tilt 각도에 해당된다. 우측(starboard side) 전개판의 경우 예망초기에는 (+) 각 변위를 보이면서 전연이 아래로 기울어진 상태가 되었

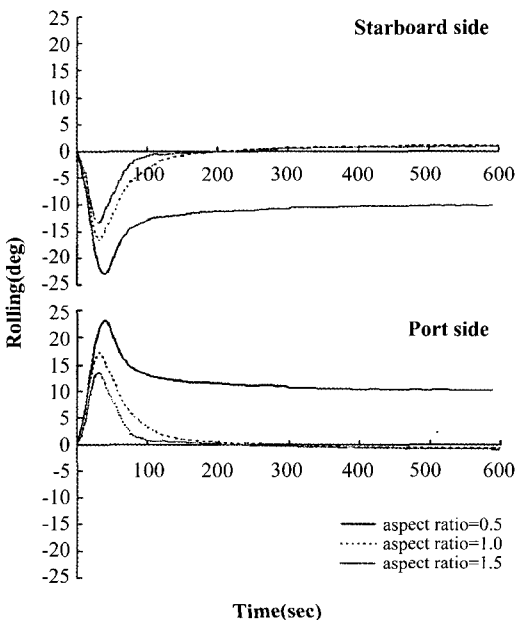


Fig. 7. The angular displacement(rolling) of 3 types of otter boards with different aspect ratio.

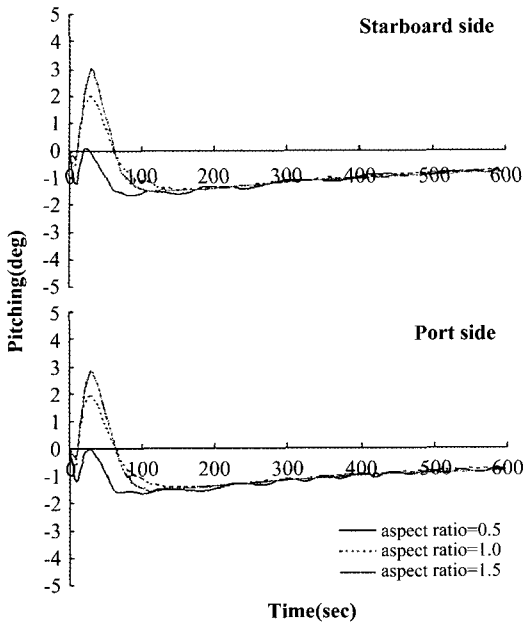


Fig. 8. The angular displacement(pitching) of 3 types of otter boards with different aspect ratio.

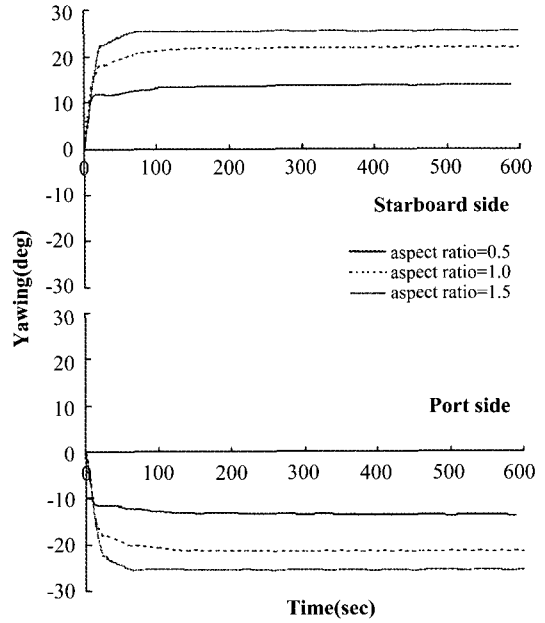


Fig. 9. The angular displacement(yawing) of 3 types of otter boards with different aspect ratio.

Table 4. The measured value of otter boards and net between different aspect ratio when the towing time is 600sec

Items		Aspect ratio			
		0.5	1.0	1.5	
Doors distance(m)		33	48	41	
Rotating angle(°)*	rolling	- 10	1	0.9	
	pitching	- 0.8	- 0.7	- 0.8	
	yawing	14	22	26	
Vertical position(m)	starboard	76	74	75	
	port	76	74	75	
Tension on warps(kgf)	starboard	8,148	8,561	8,486	
	port	8,214	8,616	8,584	
Tension on otter pendants (kgf)	starboard	upper	4,323	4,738	4,825
		lower	3,504	3,250	3,079
	port	upper	4,368	4,773	4,888
		lower	3,553	3,276	3,120
Net height(m)		25	23	24	
Net width(m)		15	20	18	

※ Rotating angle presents the value of the otter boards in starboard side.

고, 약 70초 이후부터 (-) 각 변위를 보이면서 위로 기울어진 상태가 되었다. 좌측(port side) 전개판의 경우도 동일하였다.

예망초기 아래로 기울어졌던 전개판은 끌줄의 장력에 의해 위로 들리게 되고 시간이 지나면

서 약간의 진동과 함께 점점 평형상태를 찾아가는 것을 알 수 있었다. 끌줄과 후릿줄 모두 경도가 큰 와이어 재질이지만 탄성운동을 하게 되고 이의 영향으로 전개판의 pitching 운동에 진동을 발생시키는 요인이 된다.

Fig. 9는 전개판의 회전운동 중 좌표계상의 z 축을 중심으로 한 yawing 운동으로, 윗면에서 봤을 때 전개판 좌우회전을 나타내며 일반적으로 전개판의 영역에 해당된다. 우측(starboard side) 전개판의 경우는 (+) 각 변위를 보이면서 전연이 우측으로 돌아간 상태로, 좌측(port side) 전개판의 경우는 (-) 각 변위를 보이면서 전연이 좌측으로 돌아간 상태가 되었다. 종횡비별 회전각도는 $\lambda=0.5$ 일 때 최대 14° , $\lambda=1.0$ 일 때 최대 22° , $\lambda=1.5$ 일 때 최대 26° 를 나타내었다.

세 종류의 전개판 모두 빠르게 안정화 되었고, 종횡비가 클수록 회전각도의 크기도 컸다.

시뮬레이션 시간이 600초 일 때의 세 종류의 전개판에 대한 전개판 사이의 거리, 축별 회전각 변위, 전개판의 수직위치, 끌줄 및 꼬릿줄에 작용하는 장력의 크기, 트롤어구 망고 및 망폭의 크기 등을 Table. 4에 나타내었다.

전개판 사이의 거리는 종횡비가 1.0일 때 48m로 가장 크게 나타났으며, 세 종류의 전개판의 수직위치는 거의 비슷하였다. 끌줄에 작용하는 장력의 크기는 좌우측 모두 비슷하였고, 우측(starboard) 전개판에 대해 종횡비가 0.5, 1.0, 1.5일 때 각각 8,148kgf, 8,561kgf, 8,486kgf 이었다. 이때 각 우측 전개판의 위 꼬릿줄에 작용하는 장력의 크기는 4,323kgf, 4,738kgf, 4,825kgf 이었다.

트롤 망고는 종횡비가 0.5, 1.0, 1.5일 때 각각 25m, 23m, 24m로 나타났으며, 망폭은 각각 15m, 20m, 18m의 크기를 보여주었다. 앞의 각 전개판에 대한 전개거리 결과에서와 같이 전개거리가 가장 큰 종횡비 1.0일 때의 망폭이 가장 크고 망고가 작았다.

Fig. 10은 예망 중 전개판의 운동 시뮬레이션 결과를 종횡비별로 구분하여 그래픽으로 나타낸 것으로서, 전면에서 본 모습이다. 수치적인 결과에서와 같이 종횡비가 1.0인 전개판의 전개거리가 가장 크게 나타났고, 3차원적으로 표현한 그래픽을 통해 다양한 각도에서 결과를 확인할 수 있었다.

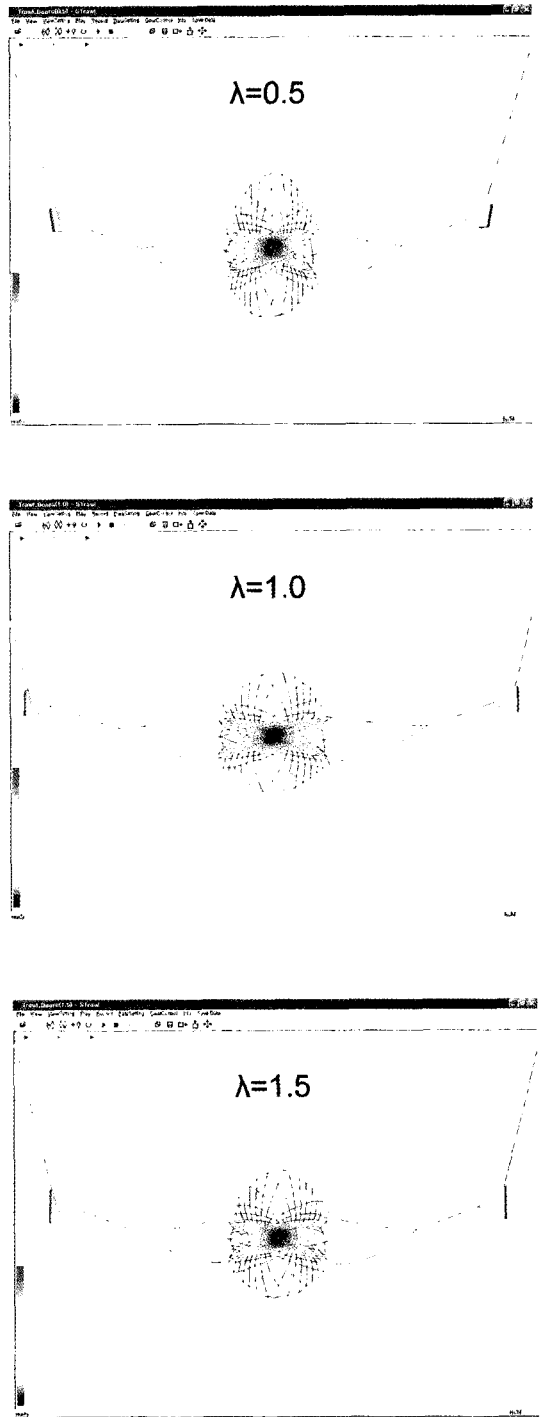


Fig. 10. The front view of spread otter boards and trawl net.

결 론

평판형 전개판의 3차원 운동 모델링을 위하여, 강체의 3차원 운동 해석에 사용되는 6자유도 운동방정식을 기본으로 한 수중 전개판에 작용하는 외력방정식을 도출하였고, 수치계산을 통해 전개판의 3차원적인 운동을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용된 전개판은 종횡비가 서로 다른($\lambda=0.5, 1.0, 1.5$) 세 종류의 평판형 모델을 사용하였고, 사용된 트롤그물은 중형의 중층 트롤이었다. 세 전개판 모두 비슷한 면적을 가지고 동일한 그물과 동일한 예망상태에서 계산을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다. 계산수행이 안정된 이후 전개거리는 종횡비가 1.0인 전개판이 가장 컸으며, 다음으로 $1.5 > 0.5$ 의 순서였다. 이는 면적이 비슷하고 동일한 예망상태를 가지는 조건에서 전개판의 영각에 따른 양력계수의 차이 때문이다. 전개판의 회전운동에서 x 축을 중심으로 하는 rolling운동의 각 변위결과 1.0과 1.5의 종횡비를 가지는 전개판은 안정적인 계산상태에서 내방경사를 이루지만, 종횡비가 0.5인 모델은 일정한 외방경사를 이루었다. 세 전개판의 pitching 운동은 모두 비슷한 크기의 각도를 나타내었고, 일정한 진동상태를 보였다. 또한 yawing 운동에서는 종횡비의 크기에 비례한 각 변위를 나타내었다. 전개판의 형상변화에 따라 그물의 망고 및 망폭 크기에 차이가 발생함으로 전개판의 성능은 형상변화에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 시뮬레이션에 사용된 평판형 전개판의 경우 현재 저층트롤어구에 사용하는 것으로, 중층트롤에서는 평판형에 비해 양항비가 좋은 만곡형과 V형 등을 사용하고 있다. 또한 저층트롤에서 사용되는 전개판의 경우 해저와의 마찰력을 고려한 설계가 되어야한다. 모양과 특성이 다른 다양한 전개판 운동을 모델링하고 해석하기 위해서는 우선 전개판의 무게 중심을 고려해야 보다 안정된 자세를 가지는 운동을 해석할 수 있을 것이다. 또한 형태별 양항력 계수 및 압력중심의 변화를 반영하고, 해저

바닥과의 마찰이나 조류의 영향등과 같은 외적 환경요인과 예망중인 선박이 미치는 영향 등을 고려한다면 트롤시스템을 전체적으로 해석하는 것이 가능할 것이다.

본 연구에서는 6자유도의 운동을 고려한 평판형 전개판에 대한 기초적인 운동 모델링을 하기 위해 전개판의 모델과 여기에 작용하는 외력을 단순화 하였다. 따라서 배의 예망력, 그물의 저항, 예망 중 발생하는 유체력 등만 고려하였으며, 전개판과 그물의 연동계산을 통해 실제에 근접한 환경을 구현하였고, 안정적인 시뮬레이션의 수행을 확인할 수 있었다. 따라서 현용 전개판을 모델로 계산을 실행하고, 실제 데이터와의 비교를 통해 모델을 개선해 나간다면 전개판 성능해석을 위한 시뮬레이션 도구로서의 개발이 가능할 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R012006000110250) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Crewe, P.R., 1964. Some of the general engineering principles of trawl gear design. *Modern fishing gear of the world II*, Fishing New Ltd, pp. 165 – 180.
- Deng, Z., M.C. Richmond, C.S. Simmons and T.J. Carlson, 2004. Six – degree – of – freedom sensor fish design: governing equations and motion modeling. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, pp. 40.
- Jiaming, W. and Allen T.C., 2000. A hydrodynamic model of a two – part underwater towed system. *Ocean Engineering* 27, 455 – 472.
- Kim, B.S., Y.D. Kim, H.C. Bang, M.J. Tak and S.K. Hong, 2004. *Flight dynamics and control*. Kyugn – Moon press, Korea, pp. 319.
- Ko, K.S., B.G. Kwon and K.D. Ro, 1990. Computational fluid analysis for the otter boards – 1. Pattern of fluid flow besides otter board – . *Bull. Korean Fish.*

- Tech. Soc., 26(4), 333 – 340.
- Ko, K.S., B.G. Kwon and K.D. Ro, 1991. Computational fluid analysis for the otter boards – 2. Efficiency analysis for the otter boards of various types – . Bull. Korean Fish. Tech. Soc., 27(3), 163 – 169.
- Kwon, B.G. 1993. A study on the hydrodynamic characteristics of otter board. Ph.D. thesis, National Fisheries university of Pusan, Korea. pp. 105.
- Lee, B.G., 1989. Fishing methods of modern Trawl. TaeHwa Press, pp. 116 – 145.
- Lee, C.W., S. Igarashi, T. Mikami, and N. Yamashita, 1990. A mechanical analysis of hook separation. Nippon Suisan Gakkaishi, 56(11), 1797 – 1802.
- Lee, C.W., J.H. Lee, B.J. Cha, H.Y. Kim and J.H. Lee, 2005. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation. Ocean Engineering 32, 331 – 347.
- Morton, G., and G.R. Hagen, 1967. Standard equations of motion for submarine simulation. Technical report DTMB 2510, David Talyor Research Center, pp. 27.
- Park, C.D., 1994. A study on the fluid characteristics of otter boards. Ph.D. thesis, Graduate school of Tokyo university of marine science and technology, Japan. pp. 154.
- Park, K.H., J.H. Lee, B.S. Hyun and J.H. Bae, 2001. The study on the hydrodynamic characteristics of the single slot cambered otter board. Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 37(1), 1 – 8.
- Park, K.H., J.H. Lee, B.S. Hyun, Y.H. Ro and J.H. Bae, 2002. Study on the measurements of flow field around cambered otter board using particle image velocimetry. Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 38(1), 43 – 57.
- Timothy, P., 2001. Verification of a six – degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, pp. 128.

2007년 1월 3일 접수
2007년 2월 12일 수리