



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



**저작자표시.** 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



**비영리.** 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



**변경금지.** 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

평판형 전개판의 3차원 운동 모델링



2007년 2월

부경대학교 대학원

수산물리학과

최 무 열

이학석사 학위논문

평판형 전개판의 3차원 운동 모델링

지도교수 이 춘 우

이 논문을 석사학위논문으로 제출함.

2007년 2월

부경대학교 대학원

수산물리학과

최 무 열

최무열의 이학석사 학위논문을 인준함.

2006년 12월 19일



주 심 수 산 학 박사 이 주 희



위 원 공 학 박사 강 일 권



위 원 수 산 학 박사 이 춘 우



# 목 차

Abstract .....	1
서 론 .....	3
재료 및 방법 .....	5
1. 전개판의 운동 모델링 .....	5
1.1 좌표계 .....	6
1.2 6자유도 운동방정식 .....	9
1.3 외력과 모멘트 .....	14
1.3.1 예인력과 그물의 저항 .....	17
1.3.2 침강력 .....	19
1.3.3 항력과 양력 .....	19
2. 전개판 운동 시뮬레이션 .....	23
2.1 수치해석 .....	23
2.2 시뮬레이션 조건 .....	25
2.2.1 전개판 모델 .....	25
2.3 트롤시스템에 적용한 전개판 시뮬레이션 .....	28
결과 및 고찰 .....	30
1. 종횡비가 서로 다른 전개판의 시뮬레이션 .....	30
요 약 .....	43
감사의 글 .....	45
참고문헌 .....	46

# Modeling of flat otter boards motion in three dimensional space

Moo-Youl, CHOE

*Department of Fisheries Physics, Graduate school  
Pukyong National University*

## Abstract

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 described below;

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.

# 서론

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

전개판의 성능에 대한 최근 연구로서는 전개판 주위의 유체 흐름에 대한 가시화 실험과 형상별 성능에 관한 연구가 있었고(高 등, 1990, 1991; 權, 1993), 유동장의 수치 시뮬레이션 분석을 통한 전개판의 유체역학적 성능계산에 관한 연구(高 등, 1992; 權, 1993)가 있었다. 박 등(2001, 2002)은 PIV(Particle Imaging Velocimetry)기법을 이용하여 유동장의 가시화를 통한 전개판의 유체역학적인 특성해석 및 성능향상에 관한 연구를 하였으며, 박(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, 만곡형 전개판의 성능에 관해 연구하였다. 하지만 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 전개

판이 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 예망력에 의한 힘과 전개판 자체의 항력, 양력 및 수중무게, 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

## 1. 전개판의 운동 모델링

전개판은 대부분 철 구조물로 제작되므로 조업 중에 외력이 작용해도 그 형상이 변하지 않는 물체이다. 그러나 엄밀히는 전개판도 힘이 가해지면 변형을 하게 되나, 변형의 정도가 무시할 수 있을 정도로 적으므로 강체(rigid body)로 간주하여 운동을 기술하기로 한다. 이러한 강체의 운동은 3차원 공간상에서 병진운동(translational motion)과 동시에 회전운동(rotational motion)으로 표현되며, 뉴턴의 제2법칙으로부터 그 기본 운동방정식을 유도할 수 있고, 오일러각(Euler angles)을 사용하여 물체의 자세를 표현하게 된다.

예인중의 전개판에는 끌줄과 꼬릿줄 및 후릿줄을 통해 어선의 예인력과 그물의 저항이 작용하고, 여기에 전개판의 자체 무게 및 유체력이 작용한다. 이러한 힘의 영향을 받는 전개판은 3차원 공간에서 3개의 병진운동(surge, sway, heave)과 3개의 회전운동(roll, pitch, yaw)을 가지는 6자유도의 운동을 하게 된다.

## 1.1 좌표계

전개판의 운동방정식은 뉴턴의 제2법칙으로부터 기술되며, 이때 운동은 관성좌표계(Inertia coordinate system)에서 성립을 하게 된다. 즉, 전개판의 운동은 이 관성좌표계를 기준으로 기술되고, 또 하나의 전개판 무게중심에 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.

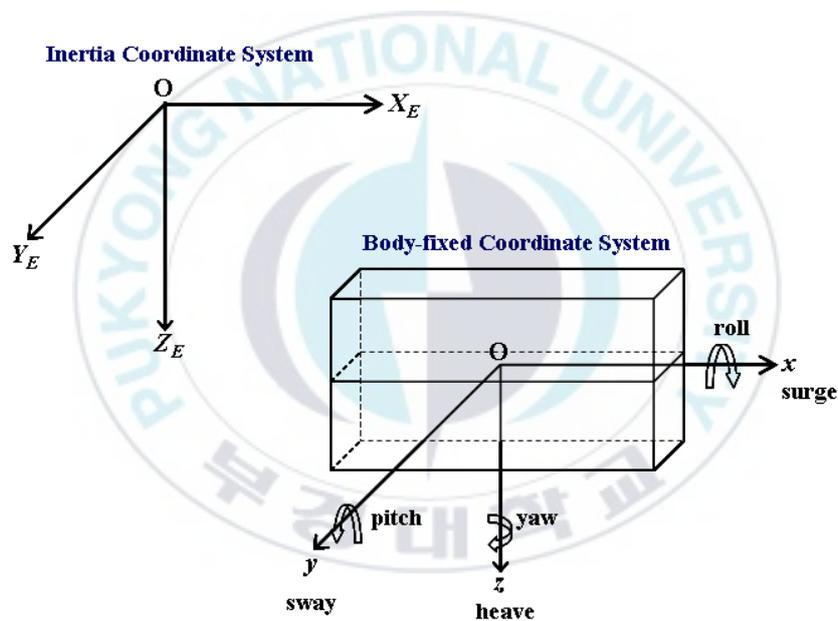


Fig. 1. Body-fixed and the inertia coordinate systems.

그리고 물체고정좌표계에서 기술된 전개판의 자세변화를 관성좌표계에 변환하여 나타내기 위해서 오일러 각( $\phi, \theta, \psi$ )을 사용하였다. 식(1)은 물체 고정좌표계와 관성좌표계간의 좌표변환행렬을 나타내며 두 좌표계간의 회전관계를 Fig. 2에 나타내었다.

우선 관성좌표계의  $Z_E$ 축을 기준으로  $\psi$ 만큼의 회전을 한 좌표계의 각 축을  $(x_1, y_1, z_1)$ 이라고 두고, 여기서  $y_1$ 축을 중심으로  $\theta$ 각도 만큼 회전을 한 좌표계의 각 축을 다시  $(x_2, y_2, z_2)$ 라고 둔다. 마지막으로  $x_2$ 축을 기준으로  $\phi$ 만큼 회전하게 되면 오일러 각을 이용해 변환된 물체에 대한 좌표계  $(x, y, z)$ 가 된다(김 등, 2004).

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

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

한편, 물체고정좌표계에서 얻어진 전개판의 각속도는 관성좌표계에서의 전개판의 자세를 표현해 주기 위해 사용되며, 전개판 각속도를 오일러각의 시간변화율로 변환시켜주기 위해 Fig. 2의 두 좌표계의 변환관계를 이용해 다음의 변환행렬을 정리할 수 있다(김 등, 2004).

$$E_2 = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\Phi}_E \\ \dot{\Theta}_E \\ \dot{\Psi}_E \end{pmatrix} = E_2^{-1} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}$$

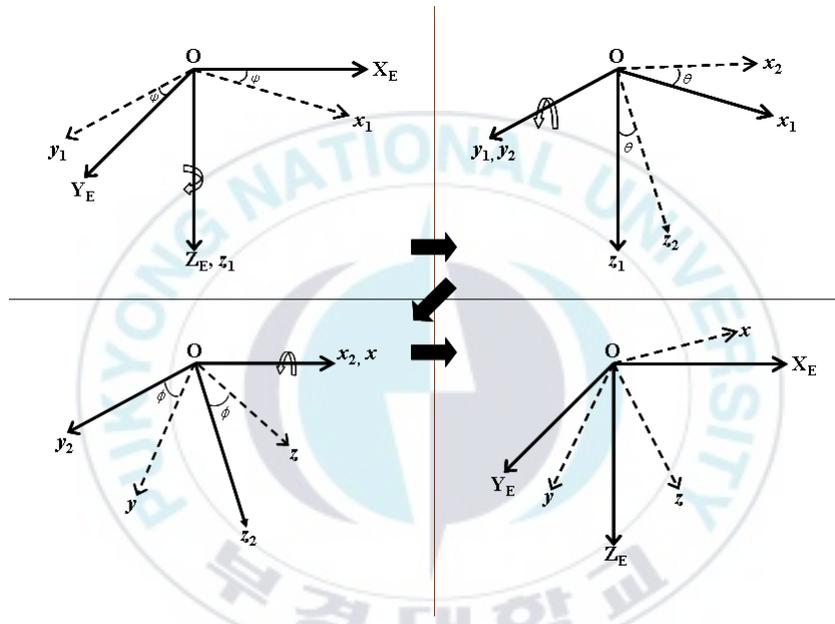


Fig. 2. The relation between Euler angles and coordinate systems.

## 1.2 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.

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

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

여기서  $\mathbf{V}_g$ 는 전개판의 무게중심의 속도이고,  $\mathbf{H}_g$ 는 회전운동량,  $\omega$ 는 물체 고정좌표계의 회전을 나타내는 각속도이다. 각각을 좌표계의 성분별로 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	$x$	$u$	$\phi$	$p$
Y	$y$	$v$	$\theta$	$q$
Z	$z$	$w$	$\psi$	$r$

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

- 가정 1. 전개판의 무게중심(center of gravity)은 전개판의 정 가운데로 물체고정좌표계의 원점과 일치한다.
- 가정 2. 전개판에 작용하는 저항의 발생위치인 압력중심은 영각에 따라 다르나, 본 논문에서는 알려져 있는 압력중심을 고정값으로 사용하였다.
- 가정 3.  $y$ 축을 중심으로 회전하는 피치각(pitch angle)이  $90^\circ$ 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 따라 달라지며 이는 실험을 통해 회전모멘트와 함께 구해야 하는 실험값으로, 본 논문에서는 평판형 전개판에 대해 알려져 있는 값을 사용하였다(Crewe, 1964; 이, 1989). 평판형 전개판의 경우 압력중심은 대체로 전연쪽에서 중심으로 약 40%의 지점에서 발생한다.

[가정 3]에서는 피치각이  $90^\circ$ 가 될 경우 회전변환행렬의  $\sec\theta$ 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 정리하면 다음과 같은 기본 6자유도 운동방정식을 얻을 수 있다(Morton G., Grant R. Hagen, 1967; 김 등, 2004).

$$\begin{aligned}
\Sigma F_X &= m[\dot{u} + qw - rv - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] \\
\Sigma F_Y &= m[\dot{v} + ru - pw + x_g(qp + \dot{r}) - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p})] \\
\Sigma F_Z &= m[\dot{w} + pv - qu + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p}) - z_g(p^2 + q^2)] \\
\Sigma M_X &= I_x \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - I_{xy}(\dot{q} - rp) + I_{yz}(r^2 - q^2) - I_{zx}(\dot{r} + pq) \\
&\quad + m[y_g(\dot{w} + pv - qu) - z_g(\dot{v} + ru - pw)] \\
\Sigma M_Y &= I_y \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - I_{xy}(\dot{p} + qr) - I_{yz}(\dot{r} - pq) + I_{zx}(p^2 - r^2) \\
&\quad + m[z_g(\dot{u} + qw - rv) - x_g(\dot{w} + pv - qu)] \\
\Sigma M_Z &= I_z \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + I_{xy}(q^2 - p^2) - I_{yz}(\dot{q} + rp) - I_{zx}(\dot{p} - qr) \\
&\quad + m[x_g(\dot{v} + ru - pw) - y_g(\dot{u} + qw - rv)]
\end{aligned} \tag{8}$$

여기서 운동방정식 좌변의  $\Sigma F_X, \Sigma F_Y, \Sigma F_Z, \Sigma M_X, \Sigma M_Y, \Sigma M_Z$ 는 전개판에 작용하는 외력과 모멘트의 합을, 우변의 식들은 관성력과 관성모멘트를 나타내며,  $(x_g, y_g, z_g)$ 는 물체의 무게중심의 위치이다.

[가정 1]에 의해 위의 식 (8)에서 관성승적항( $I_{xy}=I_{yx}, I_{xz}=I_{zx}, I_{yz}=I_{zy}$ )을 소거하여 정리하면 아래의 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
\Sigma F_X &= m[\dot{u} + qw - rv - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] \\
\Sigma F_Y &= m[\dot{v} + ru - pw + x_g(qp + \dot{r}) - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p})] \\
\Sigma F_Z &= m[\dot{w} + pv - qu + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p}) - z_g(p^2 + q^2)] \\
\Sigma M_X &= I_x \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m[y_g(\dot{w} + pv - qu) - z_g(\dot{v} + ru - pw)] \\
\Sigma M_Y &= I_y \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + m[z_g(\dot{u} + qw - rv) - x_g(\dot{w} + pv - qu)] \\
\Sigma M_Z &= I_z \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_g(\dot{v} + ru - pw) - y_g(\dot{u} + qw - rv)]
\end{aligned} \tag{9}$$

또한 물체의 무게중심과 물체고정좌표계의 원점이 일치하므로  $x_g, y_g, z_g$  성분도 모두 0이 된다. 따라서 0이 되는 성분을 고려하면 평판형 전개판의 기본 6자유도 운동방정식을 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Sigma F_x &= m(\dot{u} + qw - rv) \\
 \Sigma F_y &= m(\dot{v} + ru - pw) \\
 \Sigma F_z &= m(\dot{w} + pv - qu) \\
 \Sigma M_x &= I_x \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr \\
 \Sigma M_y &= I_y \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp \\
 \Sigma M_z &= I_z \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq
 \end{aligned} \tag{10}$$



### 1.3 외력과 모멘트

예망상태에서 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 힘과 그물과 연결되는 꼬릿줄(otter pendants) 및 후릿줄(hand rope)에 의한 힘을 받으며, 유체력(hydrodynamic forces)의 영향도 받게 된다. 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 작용한다. 이러한 외력들은 그 발생 위치에 따라 전개판의 운동에 모멘트를 만들어 회전운동을 일으키게 된다. 전개판에 작용하는 외력과 그때의 위치벡터를 Fig. 3에 나타내었다.

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

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

여기서,  $\mathbf{F}_{Tw}$ 는 끌줄(warp)의 장력,  $\mathbf{F}_{Th1}$ 은 위 꼬릿줄(otter pendant)에 작용하는 장력,  $\mathbf{F}_{Th2}$ 는 아래 꼬릿줄에 작용하는 장력,  $\mathbf{F}_{HS}$ 는 유체정역학적인 힘으로 전개판의 침강력(sinking force),  $\mathbf{F}_D$ 는 유체력 중 항력(drag force),

그리고  $\mathbf{F}_L$ 은 양력(lift force)을 나타낸다.  $\mathbf{r}_{T_0}$ 는 물체고정좌표계의 원점에서 끝줄의 부착지점까지의 위치벡터,  $\mathbf{r}_{T_1}$ 은 위 꼬릿줄의 위치벡터,  $\mathbf{r}_{T_2}$ 는 아래 꼬릿줄의 위치벡터,  $\mathbf{r}_g$ 는 전개판 무게중심의 위치벡터,  $\mathbf{r}_{cp}$ 는 압력중심의 위치벡터이다.



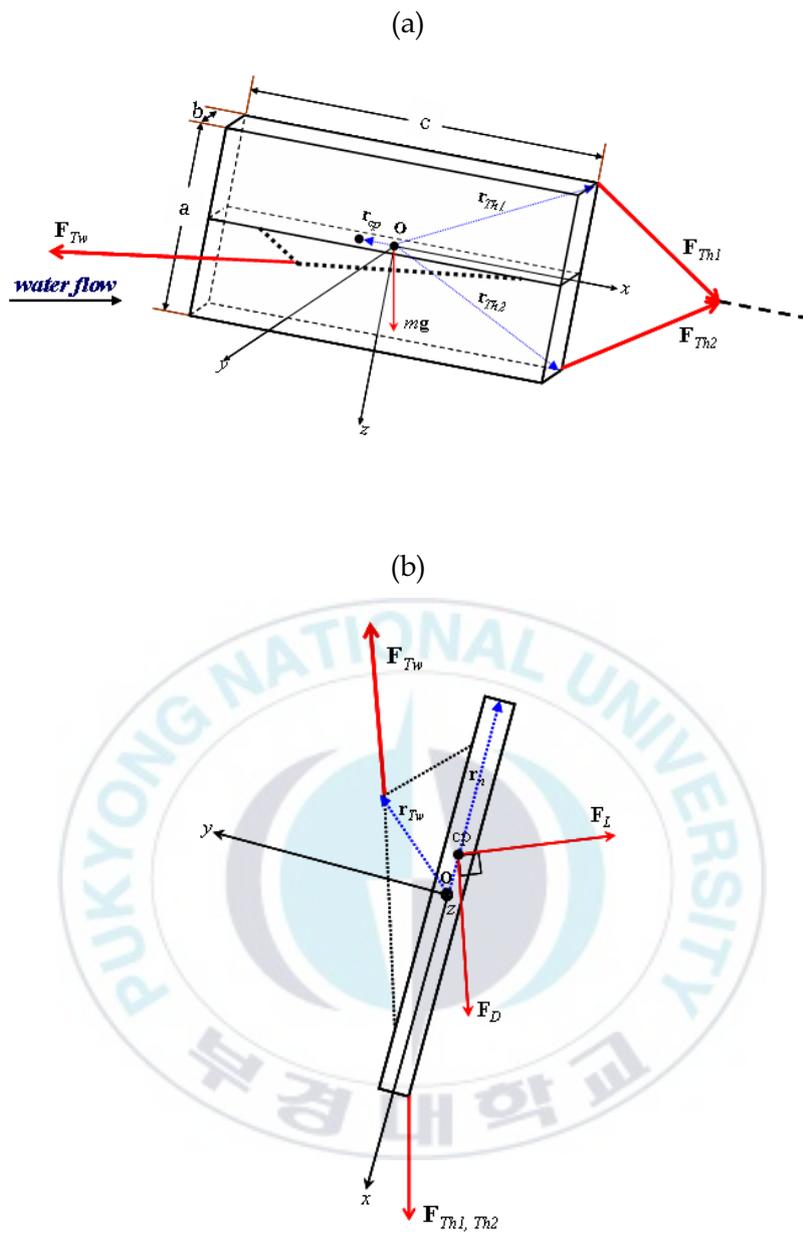


Fig. 3. External forces and position vectors on the otter board.  
 (a) side view (b) top view

### 1.3.1 예인력과 그물의 저항

전개판에 작용하는 예인력인 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. 4에는 모델을 적용한 끌줄과 꼬릿줄을 나타내고 있다.

배로부터 전달되는 힘인 끌줄의 장력은 다음과 같이 표현된다.

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

이때  $k_{Tw}$ 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.

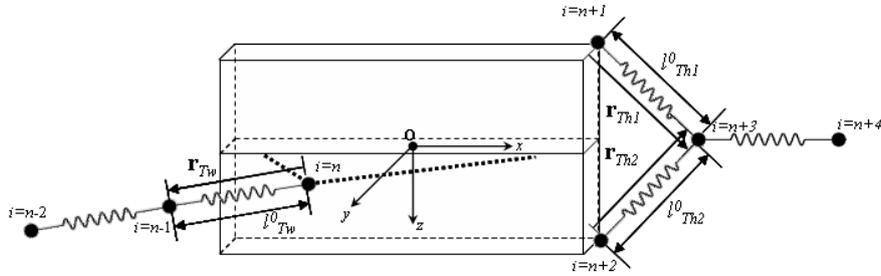


Fig. 4. Mass-spring model of the warp, other pendants and the hand rope.



### 1.3.2 침강력

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

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

여기서,  $E$ 는 관성좌표계를 물체고정좌표계에 대해 나타내기 위한 변환행렬 (식(1)),  $\mathbf{r}_g$ 는 전개판 무게중심의 위치벡터이다.

### 1.3.3 항력과 양력

수중에서 운동하는 전개판에 작용하는 유체역학적 힘은 잘 알려져 있듯이 비선형적이고 복잡하다. 수중 물체에 작용하는 유체력은 항력과 이에 따른 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.

$$F_D = -\frac{1}{2}C_D\rho SV^2\mathbf{n}_V$$

$$F_L = \frac{1}{2}C_L\rho SV^2\mathbf{n}_L$$
(15)

여기서  $C_D$ 와  $C_L$ 은 각각 항력과 양력의 계수값이고,  $\rho$ 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.

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

$$\mathbf{n}_L = \frac{\mathbf{V} \times (\mathbf{r}_n \times \mathbf{V})}{|\mathbf{V} \times (\mathbf{r}_n \times \mathbf{V})|}$$
(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 영각(Attack angle)에 따라 값이 달라지며, 이는 실험을 통해 얻을 수 있다. 본 연구에서는 평판형 전개판의 영각에 따른 계수값을 차(1994)이 전개판의 안정성 해석을 위해 실험을 통해 구한 중횡비가 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 중심계수 값을 사용하였다. 즉, 전개판의 현장

(chord)에 대해 전연(leading edge)에서부터 중심으로 40%되는 지점에 작용하는 것으로 간주하였다.(Crewe, 1964; 이, 1989).

예인중인 전개판은 영각(Attack angle)의 변화에 따라 유체력의 계수값이 차이를 보이게 되므로 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 진행방향의 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.

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

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

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

## 2. 전개판 운동 시뮬레이션

### 2.1 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.

비선형 운동방정식을 수치적분 하는데 있어 가장 보편적으로 사용되는 방법으로 양해법(Explicit method) 중 룬게-쿠타(Runge-Kutta)법이 있으며, 음해법(Implicit method) 중에는 뉴마크-베타(Newmark- $\beta$ )법과 후향 오일러법(Backward Euler method) 등이 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.

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

식(20)은 후향 오일러법을 이용한 해의 계산방정식으로  $\mathbf{q}(t)$ 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.

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

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.

## 2.2 시뮬레이션 조건

본 연구에서는 6자유도 운동방정식을 기본으로 전개관에 작용하는 다양한 외력과 내력을 기술하여 비선형의 2계 미분방정식을 얻었다. 이를 수치적분법을 통해 전개관의 위치와 속도를 구하고 다시 컴퓨터 그래픽을 통해 표현하게 되면 전개관의 운동을 가시적으로 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 다양한 특성들을 파악할 수 있다. 시뮬레이션 계산에 사용된 언어로는 문법이 비교적 간결하고 효율성이 좋으며 속도가 빠른 Visual Studio C++ 6.0을 사용하였고, 그래픽 표현을 위해 Open GL을 사용하였다.

### 2.2.1 전개관 모델

전개관 운동을 시뮬레이션하기 위해 중횡비가 서로 다른 3종류의 평판형 전개관을 사용하였고, 그에 따른 결과의 차이를 비교·분석하였다. 사용된 전개관의 중횡비 및 치수는 Table. 2에 나타내었고, 수중무게는 약 1톤이었다.

Table. 3에서는 평판형 전개관의 중횡비별 최대양력계수와 그때의 영각을 나타내고 있다(朴, 1994).

끝줄의 부착점은 전개판 전연의 수직축 1/2지점에서  $x$ 축을 따라 중심 방향으로 현장의 40%, 또 그 지점에서 위 방향으로 높이의 5%, 그리고 명에(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 3배이다. 끝줄과 꼬릿줄의 재질은 와이어(wire)이고, 일정한 크기의 경도(stiffness)를 가지는 탄성운동을 하게 된다. 끝줄과 꼬릿줄 및 후릿줄이 연결된 기본 전개판의 모습을 Fig. 5에 나타내었다.

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	3536	1768	200	6.25
2	1.0	2500	2500	200	6.25
3	1.5	2042	3063	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 $C_{Lmax}$	Maximum coefficient of lift ( $C_{Lmax}$ )
1	0.5	40°	1.24
2	1.0	25°	0.99
3	1.5	20°	0.84

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

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

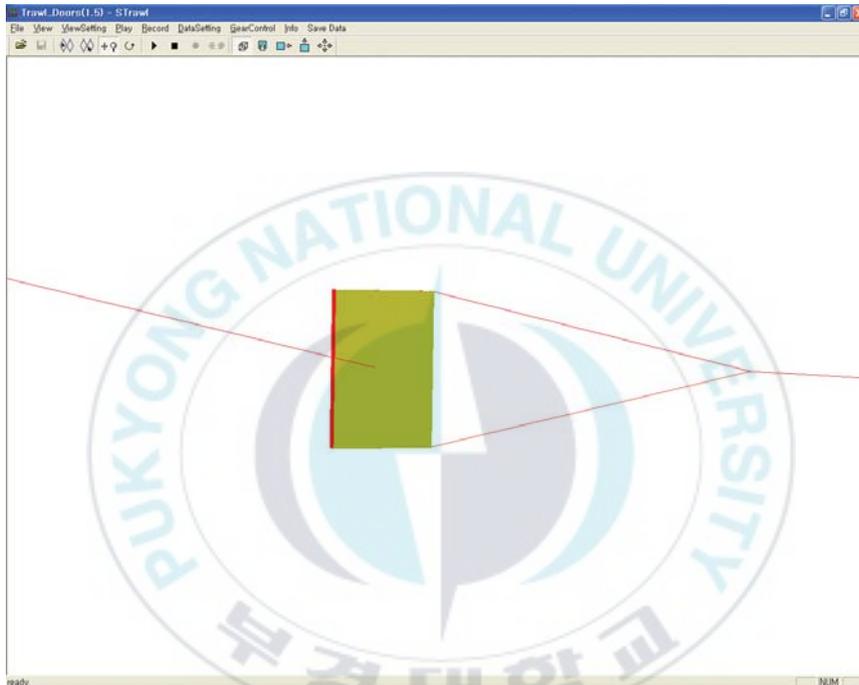


Fig. 5. The model otter board with a warp, otter pendants and a hand rope(Aspect ratio=1.5).

### 2.3 트롤시스템에 적용한 전개판 시물레이션

트롤어구에서 사용되는 전개판은 2개의 대칭인 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 소프트웨어인 트롤 어구 설계 및 시물레이션 소프트웨어(SimuTrawl)를 사용하였고, 설계프로그램을 이용하여 4매식의 전장이 약 158m인 그물을 설계하였다. 이때 끌줄 및 후릿줄의 길이는 각각 350m, 40m이었다. Fig. 6은 설계프로그램을 사용하여 설계된 시물레이션용 중층트롤어구의 설계도를 나타내고, Fig. 7에서는 전체 트롤시스템의 모습을 보여주고 있다. 시물레이션상의 전개판과 그물의 초기위치의 예망 목표수심으로 설정하였으며, 투망과정에 대한 시물레이션은 생략한다.

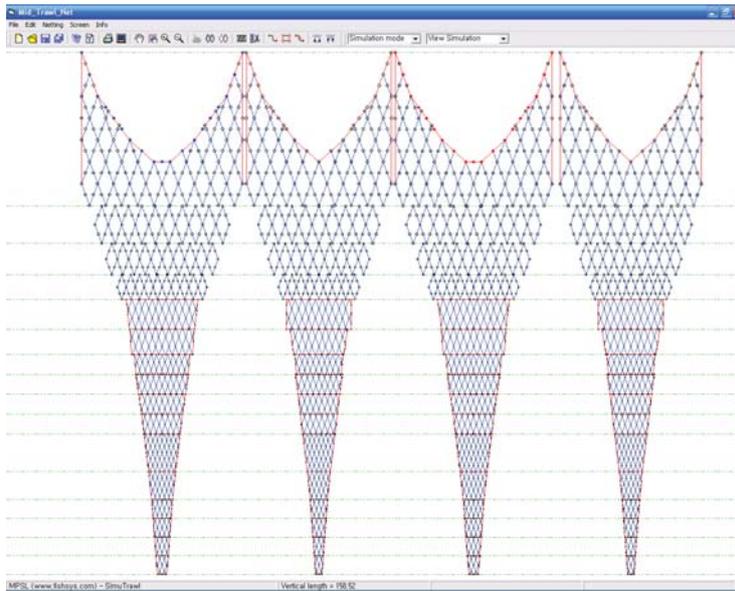


Fig. 6. The designed mid-water trawl net for the simulation.

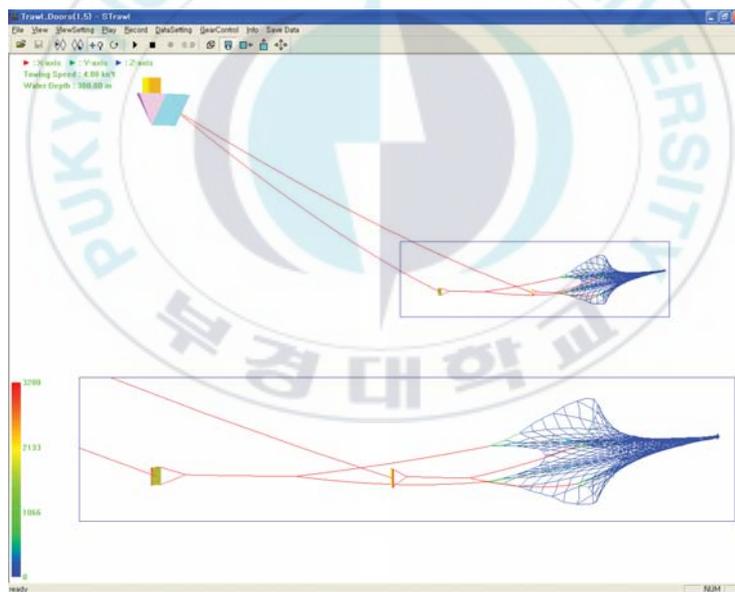
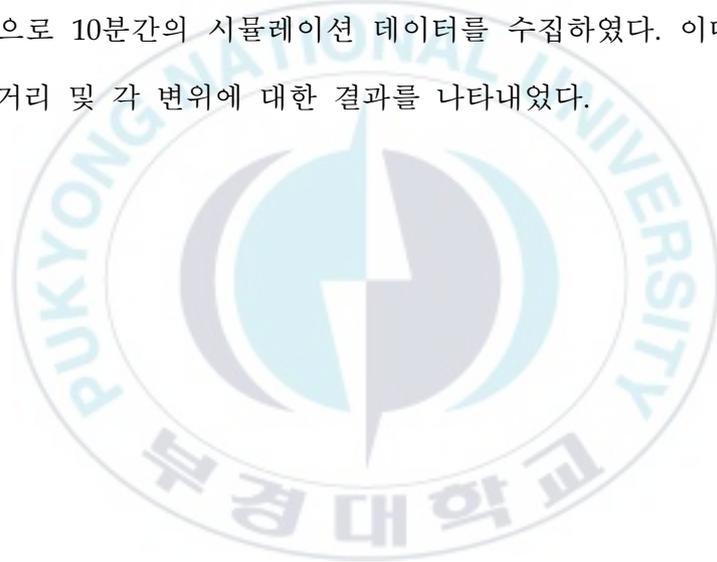


Fig. 7. The whole view of the trawl system - a ship, otter boards and a trawl net.

# 결과 및 고찰

## 1. 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  $4k't$ 로 3종류의 전개판에 모두 동일한 조건과 동일한 그물을 사용하였다. 계산 시간 간격은  $0.002$ 초였으며,  $10$ 초 간격으로  $10$ 분간의 시뮬레이션 데이터를 수집하였다. 이때의 각 전개판의 전개거리 및 각 변위에 대한 결과를 나타내었다.



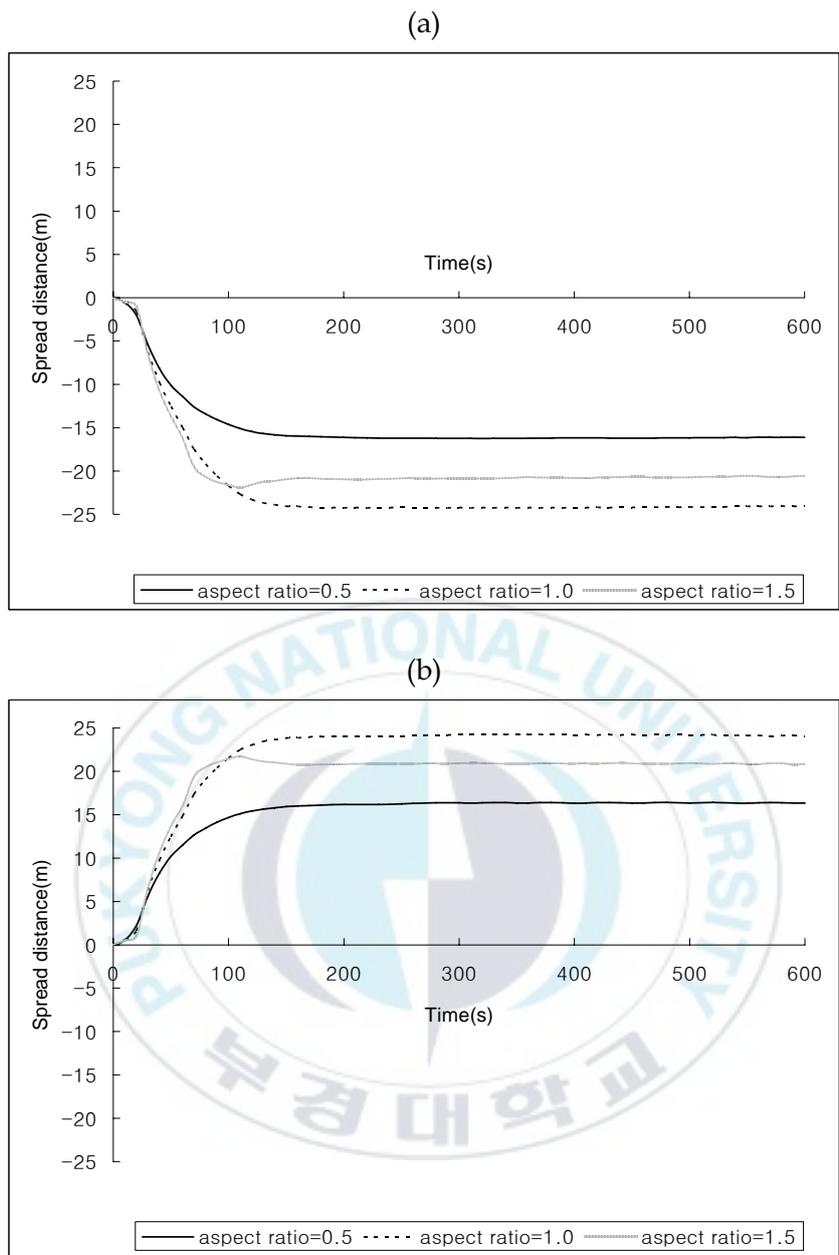


Fig. 8. The spread distance of 3 types of otter boards with different aspect ratio.  
 (a) starboard side (b) port side

Fig. 8은 종횡비별 전개판 각각의 좌우측 전개거리를 나타내고 있다. 좌표계 상에서 우측(starboard side) 전개판은 (-) 변위를, 좌측(port side) 전개판은 (+) 변위를 나타낸다.

예망초기에는 종횡비가 큰 순서로 시간에 따른 전개거리가 크게 나오지만, 예망시간이 100초가 넘어 전개거리가 안정화 되면서 종횡비가 1.0인 전개판의 전개거리가 가장 크고 다음으로 1.5, 0.5의 순서인 것을 알 수 있다. 차(1994)의 연구에 의하면 실험을 통한 평판형 전개판의 양력계수의 크기는 영각이 20°정도까지는  $1.5 > 1.0 > 0.5$ 의 종횡비 순으로 증가하지만 영각이 더 커지면서 종횡비가 1.0인 전개판의 양력계수가 가장 커지고 영각이 약 30°~40°를 넘어가면서 양력계수의 크기는  $0.5 > 1.0 > 1.5$ 의 종횡비 순서가 된다. 전개판의 전개거리에 가장 큰 영향을 미치는 양력의 크기는 전개판의 면적, 속도, 양력계수 등에 영향을 받는다. 세 전개판의 경우 동일한 예망속도와 어구를 사용하고 비슷한 면적을 가지고 있으므로, 전개거리는 영각에 따른 양력계수의 크기와 상관이 있고, 선행연구의 실험결과를 잘 따른다고 볼 수 있다.

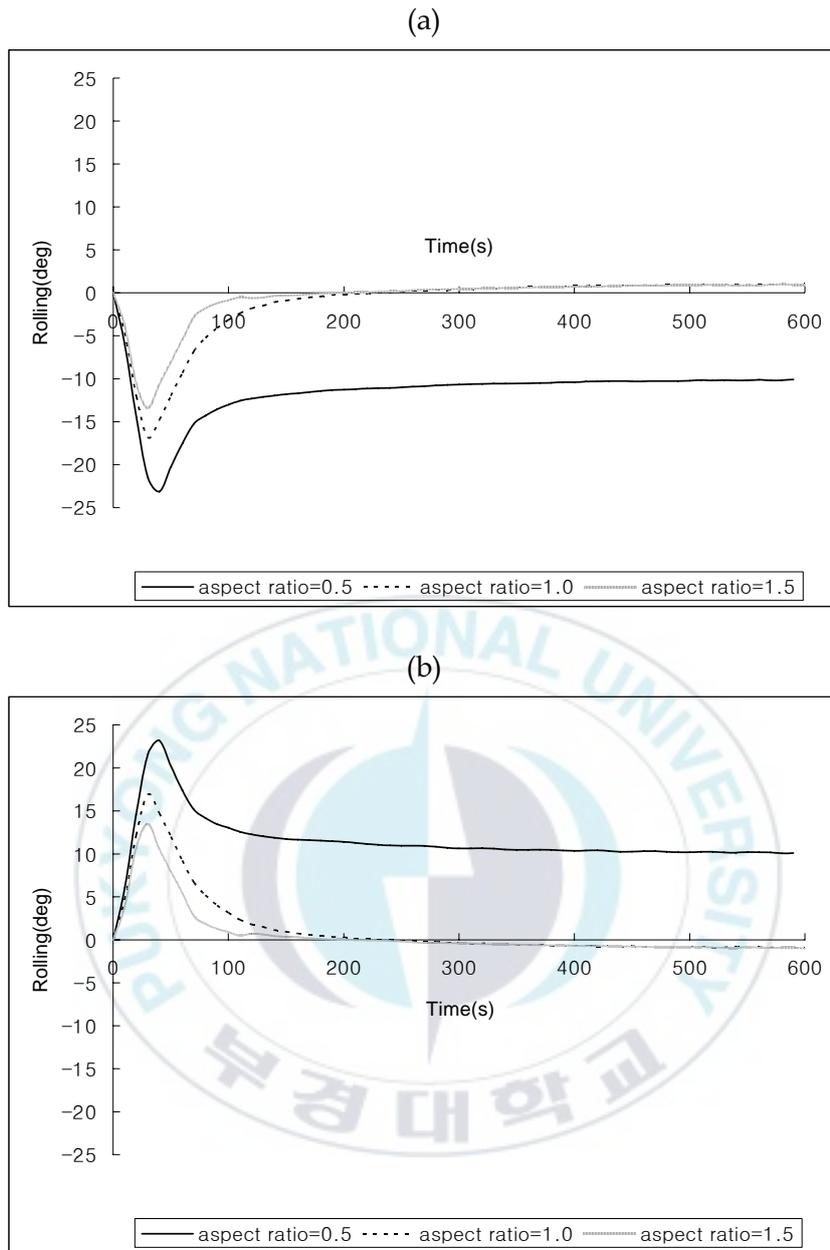


Fig. 9. The angular displacement(rolling) of 3 types of otter boards with different aspect ratio.  
 (a) starboard side (b) port side

Fig. 9는 전개판의 회전운동 중 좌표계상의  $x$ 축을 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 이루고, (-) 각 변위를 보이면서 외방경사를 이루게 된다. 좌측(port side) 전개판의 경우는 정반대가 된다. 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 보이지만, 내방경사는 없는 것을 알 수 있다.

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 이룬다. 그리고 시간이 지나 그물의 입구가 어느 정도 벌어지면 위 꼬릿줄의 장력방향이 전개판의 안쪽으로 이동하고 이에 따라 전개판은 내방경사를 이루게 된다. 하지만 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.

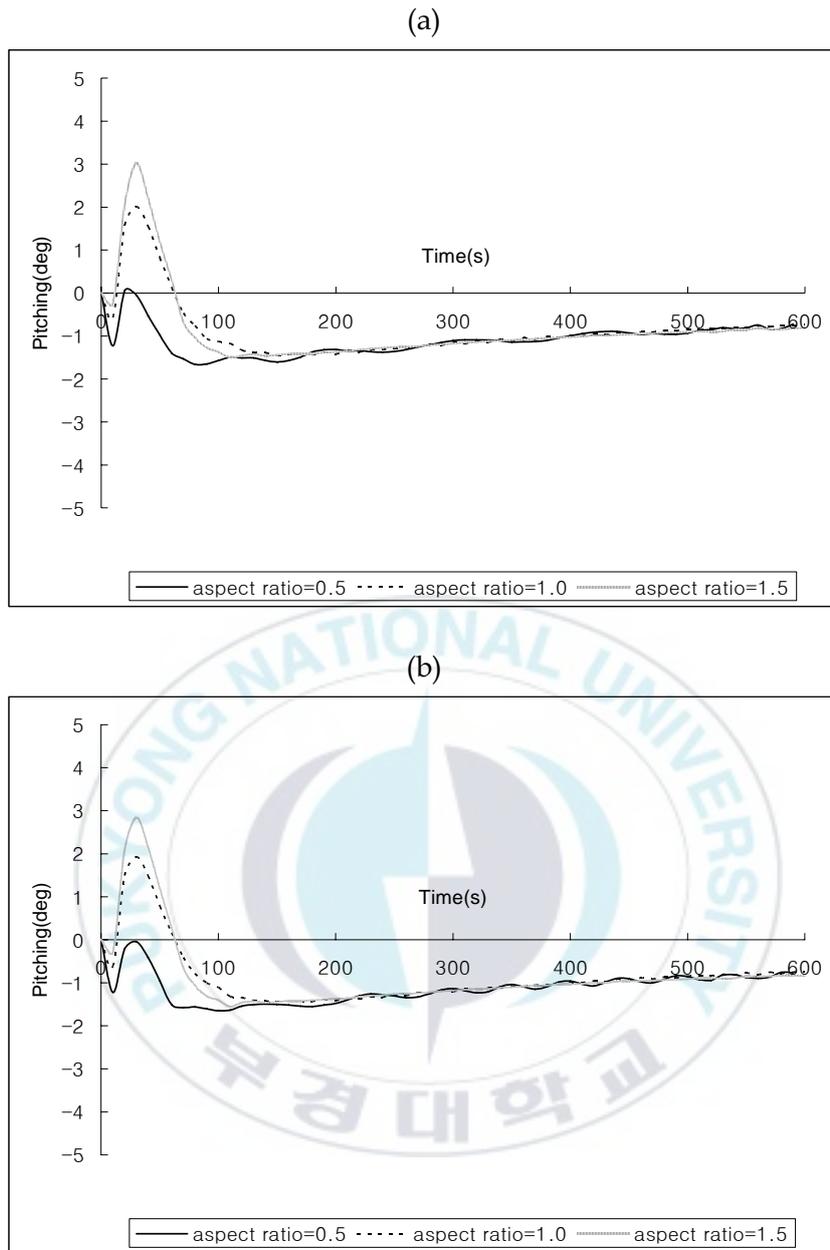


Fig. 10. The angular displacement(pitching) of 3 types of otter boards with different aspect ratio.  
 (a) starboard side (b) port side

Fig. 10은 전개판의 회전운동 중 좌표계상의  $y$ 축을 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 되고, 약 70초 이후부터 (-) 각 변위를 보이면서 위로 기울어진 상태가 된다. 좌측(port side) 전개판의 경우도 동일하다.

예망초기 아래로 기울어졌던 전개판은 끝줄의 장력에 의해 위로 들리게 되고 시간이 지나면서 약간의 진동과 함께 점점 평형상태를 찾아가는 것을 알 수 있다. 끝줄과 후릿줄 모두 경도가 큰 와이어 재질이지만 탄성운동을 하게 되고 이의 영향으로 전개판의 pitching 운동에 진동을 발생시키는 요인이 된다.

Fig. 11은 전개판의 회전운동 중 좌표계상의  $z$ 축을 중심으로 한 yawing 운동으로, 윗면에서 봤을 때 전개판 좌우회전을 나타내며 일반적으로 전개판의 영각에 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 된다. 종횡비별 회전각도는  $\lambda=0.5$ 일 때 최대  $14^\circ$ ,  $\lambda=1.0$ 일 때 최대  $22^\circ$ ,  $\lambda=1.5$ 일 때 최대  $26^\circ$ 를 나타내었다.

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

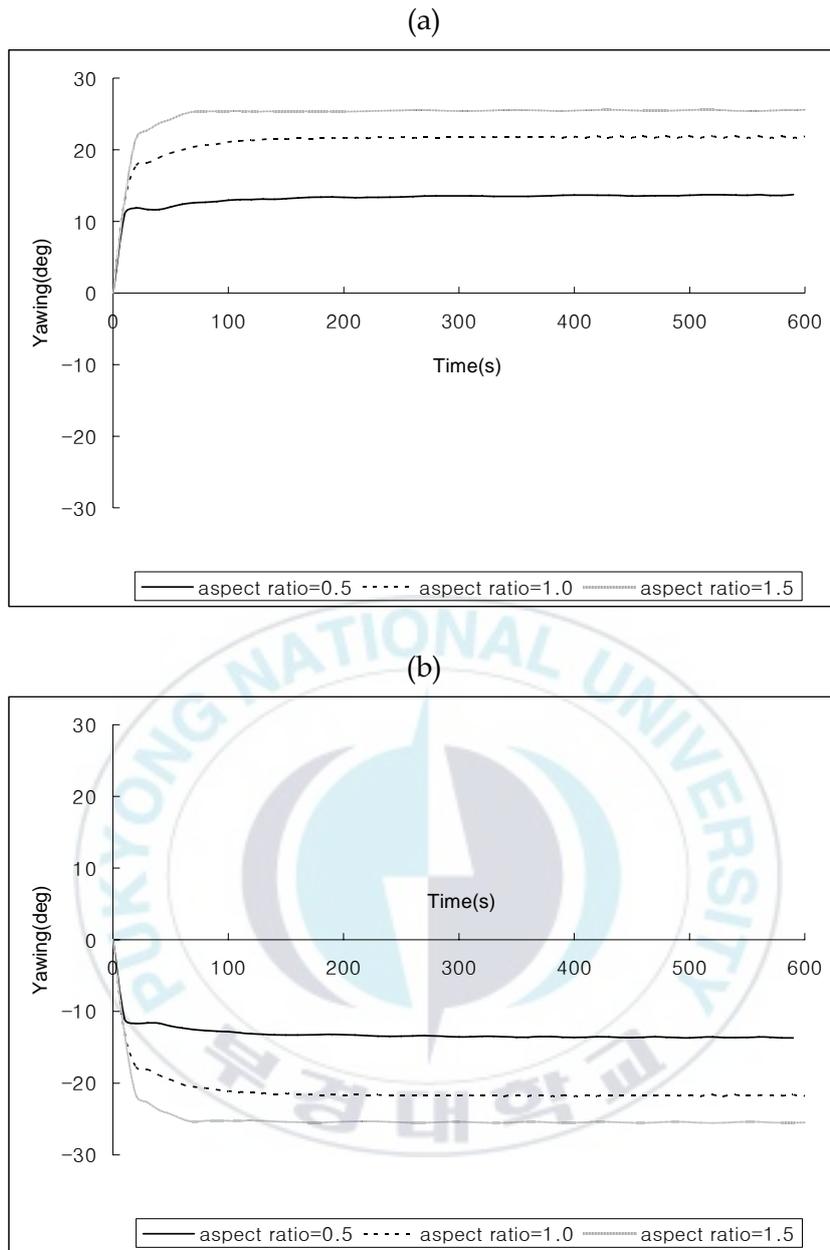


Fig. 11. The angular displacement(yawing) of 3 types of otter boards with different aspect ratio.  
 (a) starboard side (b) port side

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

전개판 사이의 거리는 중횡비가 1.0일 때 48m로 가장 크게 나타났으며, 세 종류의 전개판의 수직위치는 거의 비슷하였다. 끌줄에 작용하는 장력의 크기는 좌우측 모두 비슷하였고, 우측(starboard) 전개판에 대해 중횡비가 0.5, 1.0, 1.5일 때 각각 8148kgf, 8561kgf, 8486kgf 이었다. 이때 각 우측 전개판의 위 꼬릿줄에 작용하는 장력의 크기는 4323kgf, 4738kgf, 4825kgf 이었다.

트롤 망고는 중횡비가 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 중횡비 1.0일 때의 망폭이 가장 크고 망고가 작았다.

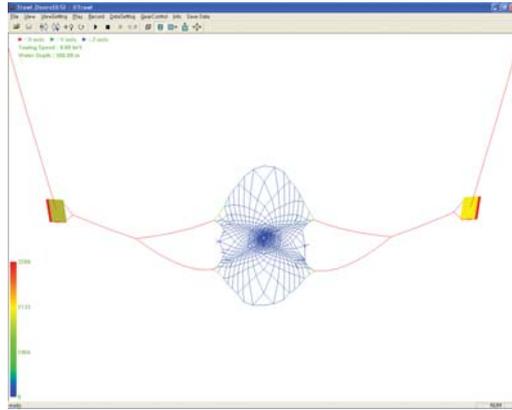
Fig. 12와 Fig. 13은 예망 중 전개판의 운동 시뮬레이션 결과를 중횡비별로 구분하여 그래픽으로 나타낸 것으로써, 각각 전면과 윗면에서 본 모습이다. 수치적인 결과에서와 같이 중횡비가 1.0인 전개판의 전개거리가 가장 크게 나타났고, 3차원적으로 표현한 그래픽을 통해 다양한 각도에서 결과를 확인할 수 있다.

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

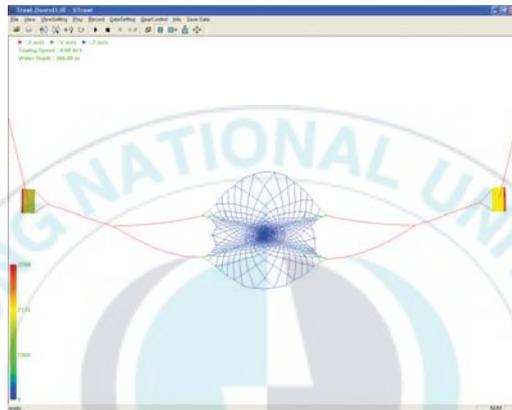
Items		Aspect ratio		
		0.5	1.0	1.5
Doors distance ( <i>m</i> )		33	48	41
Rotating angle (°)	rolling	-10	1	0.9
	pitching	-0.8	-0.7	-0.8
	yawing	14	22	26
Vertical position ( <i>m</i> )	starboard	76	74	75
	port	76	74	75
Tension on warps ( <i>kgf</i> )	starboard	8148	8561	8486
	port	8214	8616	8584
Tension on otter pendants ( <i>kgf</i> )	upper	4323	4738	4825
	starboard lower	3504	3250	3079
	upper	4368	4773	4888
	port lower	3553	3276	3120
Net height ( <i>m</i> )		25	23	24
Net width ( <i>m</i> )		15	20	18

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

(a)



(b)



(c)

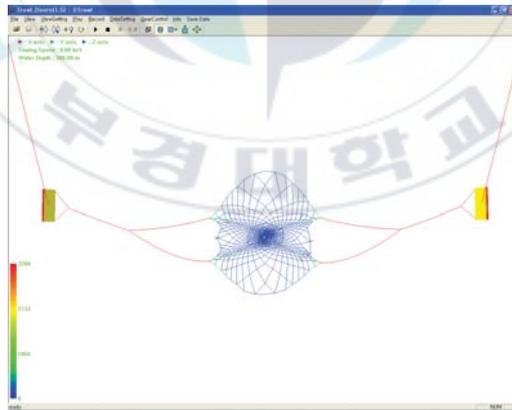
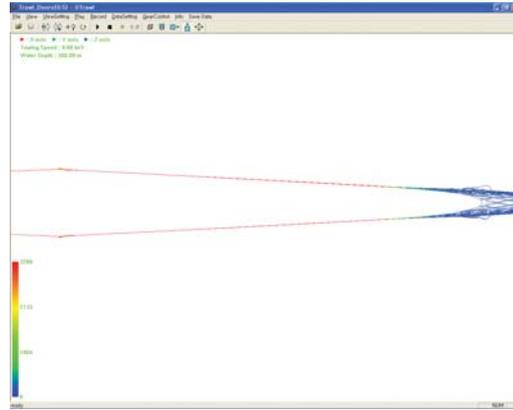
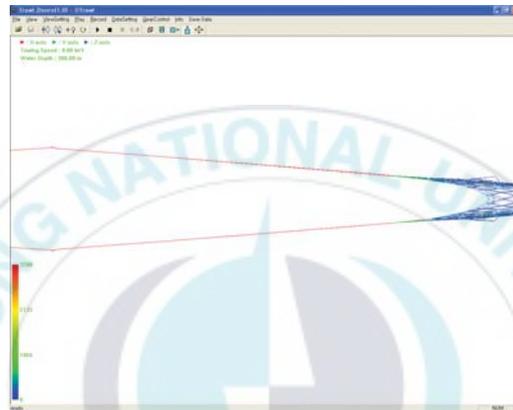


Fig. 12. The front view of spread otter boards and trawl net.  
(a)  $\lambda = 0.5$ , (b)  $\lambda = 1.0$ , (c)  $\lambda = 1.5$

(a)



(b)



(c)

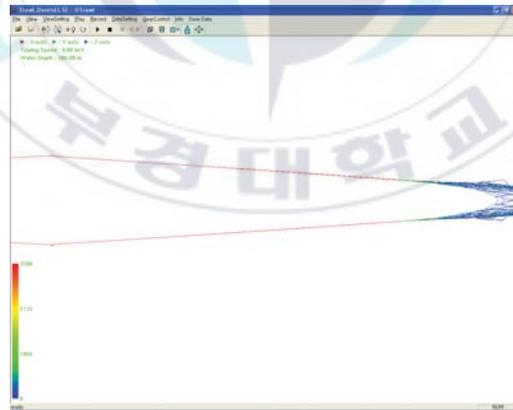


Fig. 13. The top view of spread otter boards and trawl net.  
(a)  $\lambda = 0.5$ , (b)  $\lambda = 1.0$ , (c)  $\lambda = 1.5$

시뮬레이션에 사용된 평판형 전개판의 경우 현재 저충트롤어구에 사용하는 것으로, 중충트롤에서는 평판형에 비해 양항비가 좋은 만곡형과 V형 등을 사용하고 있다. 또한 저충트롤에서 사용되는 전개판의 경우 해저와의 마찰력을 고려한 설계가 되어야한다.

모양과 특성이 다른 다양한 전개판 운동을 모델링하고 해석하기 위해서는 우선 전개판의 무게중심을 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 예상중인 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 단순화하였다. 따라서 배의 예망력, 그물의 저항, 예망 중 발생하는 유체력 등만 고려하였으나, 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.

## 요 약

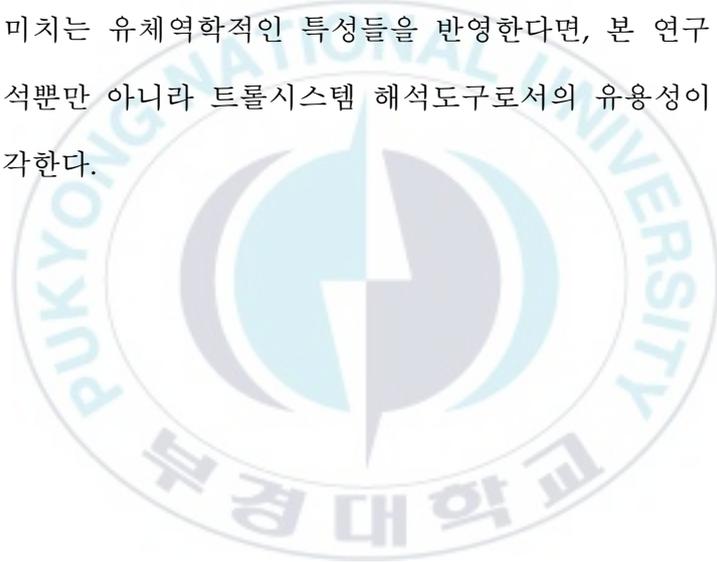
본 연구에서는 트롤어구의 전개성능을 좌우하는 전개판에 대한 운동을 모델링 하였다. 모델링에는 강체의 3차원운동 해석에 사용되는 6자유도 운동방정식을 기본으로 하여 수중 전개판에 작용하는 외력방정식을 도출하였고, 수치계산을 통해 전개판의 3차원적인 운동을 시뮬레이션 하였다.

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 수행하였다.

평판형 전개판의 3차원 운동 시뮬레이션의 결과는 다음과 같다.

1. 계산수행이 안정된 이후 전개거리는 종횡비가 1.0인 전개판이 가장 컸으며, 다음으로 1.5>0.5의 순서였다. 이는 면적이 비슷하고 동일한 예망상태를 가지는 조건에서 전개판의 영각에 따른 양력계수의 차이에 기인한 것이다.
2. 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.

3. 세 전개판의 pitching 운동은 모두 비슷한 크기의 각도를 나타내었고, 일정한 진동상태를 보였다. 또한 yawing 운동에서는 종횡비의 크기에 비례한 각 변위를 나타내었다.
4. 전개판의 형상변화에 따라 그물의 망고 및 망폭 크기에 차이가 발생함으로 전개판의 성능은 형상변화에 크게 영향을 받는 다는 것을 알 수 있었다.
5. 평판형 전개판에 대한 기초 운동 모델링을 통해 트롤어구와의 연동계산을 수행하였고 실제 전개판 운동에 근접한 환경을 구현하였다. 다양한 형태의 전개판에 미치는 유체역학적인 특성들을 반영한다면, 본 연구 결과는 전개판 성능해석뿐만 아니라 트롤시스템 해석도구로서의 유용성이 충분히 있을 것이라 생각한다.



## 감사의 글

공부를 시작하면서 이 한편의 논문을 완성하기까지 학문에 대한 동기부여와 바른 학업자세를 가르쳐 주시고 세심한 지도를 해주신 이춘우 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 여러 직책의 바쁜 업무 중에도 귀한 시간을 내주셔서 논문을 다듬어 주시고 격려해주신 이주희 교수님과 강일권 교수님께 감사드립니다. 그리고 수업과 세미나를 통해서 학문에 대한 자세를 가르쳐 주시고 의욕을 북돋워 주셨던 신형일 교수님과 이대재 교수님, 권병국 교수님, 홍철훈 교수님, 장창익 교수님, 신현옥 교수님, 김형석 교수님께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

지금의 연구실에 인연을 맺게 해주시고 항상 용기와 격려를 주시는 김인진 선배님, 차봉진 선배님, 바쁜 시간 쪼개 귀중한 자료 구해주신 김현영 선배님, 대학원생으로써 연구실 생활에 항상 힘이 되어주는 이명우 선배님, 현장의 지식과 경험으로 궁금증을 해결해준 백경공업의 원성재 실장님과 윤홍근 계장님, 제 능력에는 다소 힘든 주제를 가능케 해준 이건호 선배님, 친구같이 동생같이 격려해주는 이미경 후배님께 많이 감사하다고 말하고 싶습니다. 석사과정동안 많은 도움을 상부상조 했던 김부영, 김병수, 박희원, 이혜옥, 황보영과 수산물리학과 선배님들께 감사드립니다. 그리고 해명회 가족 여러분들께도 고마운 마음을 전합니다. 언제나 한결같고 할 수 있다고 말해주는 내 친구 동명이와 제호, 고맙다 친구야.

지금까지 공부할 수 있도록 지원해 주시고 격려해 주신 아버지, 어머니께 이 논문과 함께 머리 숙여 감사드립니다.

## 참고문헌

- Chang-Doo Park, Ko Matuda, Hu Fuxiang, and Sun-Man Chang(1993): The Effect of the Bottom on the Hydrodynamic Characteristics of the Flat Plates, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 59(1), 79-84.
- Chun-Woo Lee, Shuzo Igarashi, Takayoshi Mikami, and Nariharu Yamashita(1990): A Mechanical Analysis of Hook Separation, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 56(11), 1797-1802.
- Chun-Woo Lee, Ju-Hee Lee, Bong-Jin Cha, Hyun-Young Kim, Ji-Hoon Lee(2005): Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation, *Ocean Engineering*, 32, 331-347.
- Crewe, P. R.(1964): Some of the general engineering principles of trawl gear design, *Modern Fishing Gear of the World II*, Fishing News Ltd, 165-180.
- Jiaming Wu, Allen T. Chwang(2000): A hydrodynamic model of a two-part underwater towed system, *Ocean Engineering* 27(2000), 455-472.
- Keigo EBATA, Shigeru FUWA, Hideki SANO, Tomonori HIRAISHI, Katsutaro YAMAMOTO(2005): Dynamics and control of a depressor used in the trolling fishery, *Contributions on the Theory of Fishing Gears and Related Marine Systems*, Vol. 4, 279-285.

- Morton Gertler and Grant R. Hagen(1967): Standard equations of motion for submarine simulation, Technical report DTMB 2510, David Taylor Research Center.
- R. C. Hibbeler(1998): 공업역학-정역학, 피어슨 에듀케이션 코리아.
- Richard J. Schmidt, Arthur P. Boresi(2002): Engineering Mechanics Dynamics, 시그마프레스.
- Steven C. Chapra, Raymond P. Canale(2001): Numerical Methods for Engineers, Mc Graw Hill, 719-793.
- Thor I. Fossen(1994): Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons, New York.
- Timothy Prestero(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.
- Wallace Fowler, Anthony Bedford(2002): Engineering Mechanics Dynamics, 피어슨 에듀케이션 코리아.
- Z. Deng, M. C. Richmond, C. S. Simmons, T. J. Carlson(2004): Six-Degree-of-Freedom Sensor Fish Design: Governing Equations and Motion Modeling, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington.
- 朴倉斗(1994): 오탈터보드의 流體特性에 關する 研究, Doctor's thesis, 東京水産大學大學院, 水産學研究科, 129-145.

- 高冠瑞, 權炳國, 盧基德(1990): 展開板에 대한 數值解析 -1. 展開板 주위에서의 유체흐름의 패턴-, 韓國漁業技術學會誌, 26(4), 333-340.
- 高冠瑞, 權炳國, 盧基德(1991): 展開板에 대한 數值解析 -2. 展開板의 形狀別性能分析-, 韓國漁業技術學會誌, 27(3), 163-169.
- 權炳國(1993): 展開板의 流體力學的 特性에 관한 研究, 박사학위 논문, 부산수산대학교 대학원, 수산물리학과.
- 朴倉斗, 安熙璿(2002): 迎角의 변화에 대한 전개판의 靜的 安定性 研究, 韓國漁業技術學會誌, 38(3), 234-240.
- 김병수, 김유단, 방효중, 탁민제, 홍성경(2004): 비행동역학 및 제어, 경문사.
- 박경현, 이주희, 현범수, 배재현(2001): 단일 슬롯 만곡형전개판의 유체역학적 특성 연구, 韓國漁業技術學會誌, 37(1), 1-8.
- 박경현, 이주희, 현범수, 노영학, 배재현(2002): PIV를 이용한 만곡형 전개판의 유동장 계측에 관한 연구, 韓國漁業技術學會誌, 38(1), 43-57.
- 이병기(1989): 現代 트로울 漁法, 대화출판사, 116-145.
- 한국항공우주학회, 박춘배(2004): 비행동역학의 이해, 경문사.
- 천승현, 전호환, 하문근, M. Nakato(1999): 바람과 파랑충격을 고려한 소형경주정의 안정성해석, 大韓造船學會論文集, 第36卷 第1號.