

## 수면 근처에서 운동하는 잠수체의 수직면 운동 모델링 및 심도 제어

최주혁<sup>†</sup>\*, 여동진<sup>\*\*</sup>, 이기표<sup>\*\*\*</sup>, 박정용<sup>\*\*\*</sup>

현대중공업 선박해양연구소\*  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소\*\*  
서울대학교 조선해양공학과\*\*\*

### On the Vertical Plane Dynamics Modeling and Depth Control of a Submerged Body Moving beneath Free Surface

Ju Hyuck Choi<sup>†</sup>\*, Dong Jin Yeo<sup>\*\*</sup>, Key Pyo Rhee<sup>\*\*\*</sup> and Jeong Yong Park<sup>\*\*\*</sup>

Hyundai Maritime Research Institute/Hyundai Heavy Industries co., LTD.\*  
Maritime and Ocean Engineering Research Institute/KORDI\*\*  
Dept. of naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University\*\*\*

#### Abstract

In this paper, submerged body dynamics model in vertical plane which can include the effect of free surface and wave is suggested to simulate the motions of submerged body moving beneath free surface precisely. A controller is designed, which can maintain a constant depth below the mean sea level and minimize the pitch angle. Numerical simulations show that the designed controller is effective on depth keeping and minimizing pitch angle in regular waves and irregular waves.

※Keywords: Submerged body(잠수체), Free surface effect(자유표면효과), Periscope depth(잠망경심도), Wave force and moment(파랑제력과 강제모멘트), Controller(제어기)

#### 1. 서론

잠망경 심도(periscope depth)에서 운항하는 잠수함이나 AUV, 그리고 수상선을 타깃으로 하는 어뢰의 경우에는 수면 근처에서 운용되므로 자유

수면의 영향을 크게 받게 되며, 특히 파에 의해 수면으로 끌어 올리는 힘이 작용하여 운항 심도를 유지하지 못하고 수면 밖으로 노출 되는 경우가 발생할 수 있다.

Richards and Stoten(1982)은 파에 의해 발생하는 힘과 모멘트에 대한 수학 모형을 정립하였다. 또한 수면 근처에서 저속으로 운행하는 잠수체의 심도 제어에 대한 기본 이론을 정립하였다. Dumlü

and Istefanopulos(1995)은 잠수항의 보조탱크를 고려한 운동방정식을 정립하였으며, 컨트롤러 설계에 있어 확률론적인 이론을 도입하였다.

Mandzuka(1998)는 수심의 영향을 고려하기 위하여 심도에 따른 파스펙트럼을 적용한 파강제력의 수학적 모델을 제시하였다. 또한, 수면 근처를 항행하는 수중운동체에 대하여 설동명과 이기표(2005)는 수평면 평면운동장치 시험을 통해 조종 성능 변화를 파악하기 위한 연구를 수행한 바 있다.

본 논문에서는 위의 선행 연구들을 참고하여 잠수체의 수직면 운동에 대한 깊은 수심에서의 운동방정식에 수심의 영향 및 파도의 영향을 포함시켜 수중운동체의 수면 근처 수직면 운동방정식을 도출하였다. 선체에 작용하는 힘에 대한 수심의 영향은 조종성미계수의 변화로 포함시켰으며, 자유수면 근처에서 불규칙적으로 변화하는 제어력을 표현하기 위하여, 심도에 따른 양력 변화 및 파입자의 궤도 운동에 따른 영향을 고려하였다.

이렇게 도출된 운동방정식에 대하여 수치모사를 실시하여 기존의 연구에서 고려되지 않았던 심도에 따른 조종성미계수 변화 및 제어력의 심도에 의한 영향을 확인하였다. 또한, 도출된 운동방정식을 바탕으로 수면 근처에서의 심도 유지를 위한 제어기를 설계하여 그 성능을 확인하였다.

## 2. 운동방정식의 구성

### 2.1. 좌표계

잠수체의 수직면 운동을 기술하기 위해 Fig. 1 과 같이 지구고정좌표계(관성좌표계)와 물체고정좌표계를 설정하였다. 지구고정좌표계  $O-XYZ$  는 연직 하방을 양의  $Z$  축으로 하고, 운항 심도가  $XY$  평면과 일치하도록 설정하였으며, 물체고정좌표계  $o-xyz$  는 원점이 잠수체 무게중심의 연직선과 압력 선체의 상하 대칭 평면과의 교점에 놓여 있으며, 선수, 우현, 선저 방향을 각각 양의  $x, y, z$  로 설정하였다. 잠수체의 코닝 타워와 선미에 각각 제어판(Elevator)이 설치되어있으며 이들 제어판의 각변위를 각각  $\delta B$  와  $\delta S$  로 표시한다.

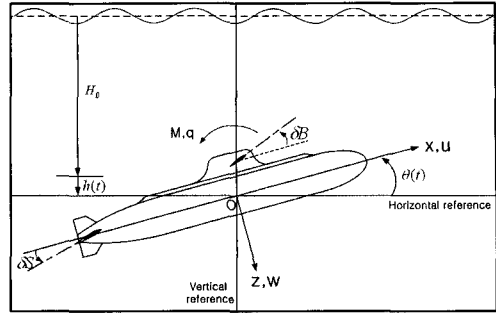


Fig. 1 Coordinates system

연직 방향의 운동만 고려하기 위하여 좌·우 양측에 있는 제어판은 함께 움직인다고 가정하였다.  $H_0$  는 목표한 운항 심도를 나타내며  $h(t)$  는 수심 변화를 나타낸다.  $\theta(t)$  는 종동요각이며,  $w$  는 상하동요 속도,  $q$  는 종동요 각속도를 의미한다.

### 2.2. 조종 운동방정식

강주년(2001)은 수중운동체에 대한 6 자유도 운동방정식을 기술하였다. 이를 참고하여, 수직 면에 대한 운동방정식을 유도하였다. 잠수체의 질량 분포가  $xz$  평면에 대해 대칭이라고 가정하면, 무게중심의  $y$  방향 성분과 질량관성모멘트의 교차항  $I_{xy}$  와  $I_{yz}$  는 모두 0 이 된다. 본 논문에서는 잠수체가 중성 부력을 가지는 것으로 가정하였으며, 프로펠러에 의한 외력 성분은 고려하지 않았다.

전진속도가 일정하고 상하동요, 종동요의 변화가 비교적 작다고 가정하면 깊은 심도에서 잠수체의 수직면 운동에 대한 선형 운동방정식은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\begin{aligned} (m - \frac{\rho}{2} I^3 Z_w') \dot{w} &= \frac{\rho}{2} I^2 Z_w'' U w + \frac{\rho}{2} I^3 Z_q' U q + m U q \\ &+ \frac{\rho}{2} I^2 Z_0'' U^2 + \frac{\rho}{2} I^2 Z_{\delta B}'' U^2 \delta B + \frac{\rho}{2} I^2 Z_{\delta S}'' U^2 \delta S \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} (I_{yy} - \frac{\rho}{2} I^3 M_q') \dot{q} &= \frac{\rho}{2} I^4 M_q'' U q + \frac{\rho}{2} I^3 M_w'' U w \\ &+ \frac{\rho}{2} I^3 M_0'' U^2 + \frac{\rho}{2} I^3 M_{\delta B}'' U^2 \delta B + \frac{\rho}{2} I^3 M_{\delta S}'' U^2 \delta S \\ &+ mg(z_G - z_B) \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

다음으로, 위와 같은 깊은 심도에서의 수직면 운동방정식에 파와 자유수면과 영향을 더해주면 자유수면 근처에서 운항하는 잠수체에 대한 수직면 조종 운동방정식을 얻을 수 있다.

### 3. 외력 모델링

#### 3.1. 파도에 의한 외력

규칙파 중에서 잠수체에 작용하는 외력은 파진폭에 비례하는 성분과 파진폭의 제곱에 비례하는 성분으로 구성하였다. 파진폭의 제곱에 비례하는 성분은 중성 부력 상태의 잠수체를 자유수면을 향해 지속적으로 끌어올리는 현상을 발생시킨다.

파의 영향을 고려하는 방법은 여러 가지가 있다. 본 논문에서는 Richard and Stoten(1982)이 제안한 경험식을 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 Z_{wave}(t) &= Z_1(t) + Z_2(t) \\
 Z_1(t) &= \sum_{i=1}^N C_{Z1} \nabla \rho (1.5 \sin^2 \mu + 1) (1 - 0.02U \cos \mu) F_{1i} \sin \omega_{ei} t \\
 Z_2(t) &= - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (F_{1i} \sin \omega_{ei} t) (F_{1j} \sin \omega_{ej} t) \frac{\nabla \rho (3 + \sin^2 \mu)}{g \cdot 10^{|\sin \mu|}} \\
 &\quad \times C_{Z2} (1 - 0.04U \cos \mu)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

이 때,  $Z_1(t)$  은 파진폭에 비례하며,  $Z_2(t)$  는 파진폭의 제곱에 비례하는 항이다.

파강제모멘트에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 M_{wave}(t) &= M_1(t) + M_2(t) \\
 M_1(t) &= - \sum_{i=1}^N C_{M1} L \nabla \rho (1 - 0.02U \cos \mu) \text{Sgn}(\cos \mu) F_{1i} \cos \omega_{ei} t \\
 M_2(t) &= - C_{M2} L \theta(t) Z_2(t)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

파강제력과 마찬가지로,  $M_1(t)$  은 파진폭에 비례하며,  $M_2(t)$  는 파진폭의 제곱에 비례하는 종동요 파강제모멘트이다.

$F_{1i}$  는 wave 에 의한 힘이 깊이에 따라 달라지는 영향을 고려하기 위한 계수로서 다음과 같이 기술

된다.

$$\begin{aligned}
 F_{1i} &= a_i \omega_i^2 e^{-\frac{\omega_i^2 H}{g}} \\
 a_i &= \sqrt{2S(\omega_i) \delta \omega}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

이 때,  $a_i$  는  $i$  번째 파 성분의 진폭이며,  $\omega_i$  는  $i$  번째 파의 원진동수이고,  $\nabla$  는 잠수체의 배수용적이며,  $C_{Z1}$ ,  $C_{Z2}$ ,  $C_{M1}$ ,  $C_{M2}$  는 동유체력 계수로서, 잠수체의 형상 등에 의해 변하게 되며 일반적으로 실험을 통해 얻어진다. 잠수체의 형상이 유사하다고 가정하여, Richard and Stoten(1982)의 계수를 그대로 이용하였다. 그러나 구체적인 선형이 주어지는 경우 보다 정확한 계산이 요구된다.  $\rho$  는 물의 밀도이며,  $\mu$  는 파입사각을 의미한다.  $U$  는 잠수체의 전진방향속도이며,  $g$  는 중력가속도이다.  $S(\omega_i)$  는 파스펙트럼이다.

입사파의 만남주파수는 다음과 같이 정의 된다.

$$\omega_{ei} = \omega_i - \frac{\omega_i^2 U}{g} \cos(\mu) \tag{3.4}$$

#### 3.2. 선체에 작용하는 자유표면의 영향

파가 없는 잔잔한 해상 상태라고 할지라도, 자유표면으로 인하여 잠수체의 거동에 변화가 생긴다. 이러한 영향은 선체에 작용하는 유체력 항들에 심도 변화에 따른 계수를 곱해주는 방법으로 표현하였다.

설동명 과 이기표(2005)에 의하면 자유표면의 효과는 depth Froude number 를 사용하여 다음과 같이 표시된다.

$$E_f = e^{-\frac{2}{(F_D)^2}} \tag{3.5}$$

이 때,

$$\begin{aligned}
 F_D &= \frac{U}{\sqrt{gh}} \text{ (Depth Froude number)} \\
 h &= \text{Submerged depth}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

이다.

이를 이용하여 계수를 만들어, 조종성미계수  $z'_w, z'_w, z'_q, z'_0, M'_q, M'_q, M'_w, M'_0$ 에 곱하여 자유표면의 영향을 고려하였다. 일반적으로 연직면의 조종성미계수가 자유표면 근처에서 깊이에 따라 성분별로 어떻게 변화하는지에 대한 연구는 많지 않으며, 이를 밝히는 것은 이론적으로나 실험적으로 매우 어려운 일이다. 이러한 이유로 본 논문에서는 조종성미계수의 성분별 변화를 고려하지는 못하였다. Kim(2005)은 자유표면을 운동하는 수중익날개의 운동방정식을 정립함에 있어, 날개의 양력계수에 수면에서의 깊이 따라 변화하는 계수를 곱하여 자유표면의 영향을 고려하였다. 본 논문에서는 이를 참고하여 잠수체를 하나의 거대한 양력체로 가정하여 수면에서의 깊이에 따라 변화하는 계수를 조종성미계수에 일괄적으로 곱하여 선체에 작용하는 자유표면의 영향을 고려하였다.

3.3. 제어력

제어력은 선체에 작용하는 유체력과 마찬가지로 심도와 파도의 영향을 받게 된다.

3.3.1. 물수 심도에 따른 영향

첫 번째로 자유표면 근처에서 물수 심도의 변화에 의해 생기는 양력 변화를 고려해주었다. 잠수체가 진행함에 있어 수심이 얕을 때는 수면의 영향이 강하다가 점차 수심이 깊어짐에 따라서 영향이 약화되게 되는데 제어기로 인해 발생하는 양력 또한 수심의 영향을 받게 될 것이다.

Hydrofoil에서는 일반적으로 attenuate factor를 깊은 수심에서의 양력 계수에 곱해줌으로써 이를 고려해준다.

$$C_L = \alpha_{att} C_{L\infty} \tag{3.7}$$

이러한 attenuate factor에 대해서 다양한 방법이 제시되고 있다. 본 논문에서는, Grumman Aerospace Corporation (1978)에서 제시한 attenuate factor를 이용하였다.

$$\alpha_{att} = \frac{1}{1 + \frac{\Omega}{(4h/c)^2 + 1} + \frac{f(F_h)}{h/c}} \tag{3.8}$$

$$\Omega = 1 - 8f(F_h)E_1(2/F_h^2)$$

$$f(F_h) = \frac{e^{-2/F_h^2}}{2F_h^2}$$

이 때,  $E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt$  이다.

$$F_h = U/\sqrt{gh}$$

$c$ 는 양력면의 코드 길이이다.

운동방정식에서 제어기에 의한 외력항은 foil에 의한 양력의 일반적인 표현식과 비교해보면, 그 형태가 완전히 동일하다. 따라서 제어기의 조종 운동 계수인  $z'_{\delta\delta}$ 와  $z'_{\delta\delta}$ 를 양력 계수인  $c_L$ 로 볼 수 있으며, 깊은 수심에서의 상수 계수 값에 이 attenuate factor를 곱하는 방법을 이용하여 심도에 따른 제어력의 변화를 고려하였다.

3.3.2. 파입자의 케도운동의 영향

파 입자 운동은 날개에 입사하는 유체의 유입각을 변화시켜 양력의 크기를 교란시킴으로써 잠수체의 자세교란을 유발시킨다. 양력의 변화뿐 아니라 날개의 코드에 수직인 방향으로 발생한 가속운동은 관성력을 유발시키기도 한다. 이러한 파 교란을 표현하기 위해서는 파 입자의 운동을 모델링해야한다. 선형파 이론에 의하면 -x 방향으로 진행하는 정현파의 파고와 파도의 속도포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = -\frac{g}{\omega} \bar{\zeta} e^{k(z-\zeta)} \cos(kx + \omega t) \tag{3.9}$$

이 때,  $\zeta = \bar{\zeta} \sin(kx + \omega t)$ 이다.

(x, z) 위치에서 파 입자의 전후 방향과 상하 방향의 속도는 파도의 속도포텐셜을 각각 x 방향과 z 방향으로 미분함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u_w &= \frac{\partial \phi}{\partial x} = \omega \zeta \bar{e}^{k(z-\zeta)} \sin(kx + \omega t) \\
 w_w &= \frac{\partial \phi}{\partial z} = \omega \zeta \bar{e}^{k(z-\zeta)} \cos(kx + \omega t)
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

파입자 순환 속도는 양력면에 대한 입사각의 변화  $\alpha_w$  를 줌으로써 양력의 크기를 변화 시킨다

$$\alpha_w = \tan^{-1}\left(\frac{w_w}{U_0 - u_w}\right) \approx \frac{w_w}{U_0 - u_w}
 \tag{3.11}$$

파 입자 운동은 입사 속도에도 영향을 미치지만 그 효과는 상대적으로 작기 때문에 본 연구에서는 입사각의 변화만을 고려하기로 한다. 구해진 유체의 입사각을 제어각인  $\delta B, \delta S$  에 더해 줌으로써, 파입자의 궤도운동의 영향을 고려해 줄 수 있다.

최종적인 제어력 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 F_{cont} &= \frac{\rho}{2} l^2 \alpha_{att} Z'_{\delta B} U^2 (\delta B + \alpha_w) \\
 &\quad + \frac{\rho}{2} l^2 \alpha_{att} Z'_{\delta S} U^2 (\delta S + \alpha_w) \\
 M_{cont} &= \frac{\rho}{2} l^3 \alpha_{att} M'_{\delta B} U^2 (\delta B + \alpha_w) \\
 &\quad + \frac{\rho}{2} l^3 \alpha_{att} M'_{\delta S} U^2 (\delta S + \alpha_w)
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

#### 4. 잠수체의 수면 근처 수직면 운동방정식

3 절에서 나타낸 영향들을 고려한 최종적인 조종 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 (m - \frac{\rho}{2} l^3 Z'_w C_h) \dot{w} &= \frac{\rho}{2} l^2 Z'_w U w C_h + \frac{\rho}{2} l^3 Z'_q U q C_h \\
 &\quad + \frac{\rho}{2} l^2 Z'_0 U^2 C_h + m U q + \frac{\rho}{2} l^2 Z'_{\delta B} (h) U^2 \delta B \\
 &\quad + \frac{\rho}{2} l^2 Z'_{\delta S} (h) U^2 \delta S + Z_{wave}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 (J_{yy} - \frac{\rho}{2} l^3 M'_q C_h) \dot{q} &= \frac{\rho}{2} l^4 M'_q U q C_h + \frac{\rho}{2} l^3 M'_w U w C_h \\
 &\quad + \frac{\rho}{2} l^3 M'_0 U^2 C_h + \frac{\rho}{2} l^3 M'_{\delta B} (h) U^2 \delta B \\
 &\quad + \frac{\rho}{2} l^3 M'_{\delta S} (h) U^2 \delta S + m g (z_G - z_B) \theta + M_{wave}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

이 때,  $C_h$  는 3.2 절에서 제시한 자유표면의 영향을 나타내는 계수이다.

### 5. 제어기 설계

#### 5.1. 상태방정식의 구성

자유수면 근처에서 잠수체가 심도를 유지하기 위해서는 운항 심도를 일정하게 유지하기 위한 제어와 과도한 중동요각의 변화를 막아 안정성을 확보하는 제어가 필요하다. 이러한 제어를 위하여 상태 방정식을 구성하고 제어기를 설계하였다.

상태 방정식의 상태변수와 제어 입력은 다음과 같이 설정하였다.

$$\mathbf{x} = [z \ \theta \ w \ q]^T, \mathbf{u} = [\delta B \ \delta S]^T
 \tag{5.1}$$

상태 방정식은 다음과 같이 구성하였다.

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{C}\mathbf{u} + \mathbf{D} + \mathbf{F}_{wave}
 \tag{5.2}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & B & C+D \\ 0 & J & I & H \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ E & F \\ K & M \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G \\ H \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{wave} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{wave} \\ M_{wave} \end{bmatrix}$$

#### 5.2. PID 제어기와 제어입력

PID(Proportional-Integrate-Derivative)제어기는 비례-적분-미분 제어기로서, 실제 산업현장에서 가장 많이 사용되는 제어기법이다.

본 논문에서는 코닝 타워와 선미부에 부착된 제어판에 대하여 제어 목적을 구분하여 제어기를 설계하였다.

코닝 타워에 위치한 제어기는 무게중심과의 거리가 짧기 때문에 중동요 제어에 필요한 모멘트를 만들어 내는데 불리하다. 따라서 코닝 타워의 제

여기는 심도 유지에 그 주된 목적이 있다고 할 수 있다. 선미부 제어기는 심도 유지에 이용될 수도 있으나, 모멘트 암인 무게중심과의 거리가 크기 때문에 커다란 모멘트를 발생시킬 수 있어 피치 제어에 유리하다. 따라서 코닝 타워의 제어기는 심도 유지를 위하여, 선미부 제어기는 중동요각 최소화를 위하여 사용된다고 가정하여 되먹임 제어를 설계하였다.

$$\begin{aligned} \delta_B &= -(K_p \times h(t)_z + K_i \times \int h(t)_z dt + K_D \times \dot{h}(t)_z) \\ \delta_S &= -(K_p \times h(t)_\theta + K_i \times \int h(t)_\theta dt + K_D \times \dot{h}(t)_\theta) \end{aligned} \quad (5.3)$$

이때, 하첨자 B 는 코닝 타워의 제어기를 의미하며, 아래 첨자 S 는 선미부 제어기를 의미한다.  $h(t)_z$  는 목표 심도와 현재 심도와의 차이를 나타내며  $h(t)_\theta$  는 목표 중동요각과 현재 중동요각의 차이를 나타낸다. 각각에 대하여 비례, 적분, 미분 제어를 설계하여 제어를 수행하였다.

## 6. 수치모사 결과

### 6.1 수치모사 조건

조종성미계수 및 잠수체의 제원은 D. Dumlu and Y. Istefanopulos(1995)의 것을 사용하였다. Table 1 은 수치모사에 사용된 잠수체의 제원을 나타낸다.

규칙파에 대한 수치모사는 주파수 0.8 인 경우에 파진폭 1m, 2m, 3m 에 대하여 각각 수행하였으며, 불규칙파의 경우 Pierson-Moscowitz spectrum 으로 모델링 하였다. 해상 상태는 유의 파고 2m(sea state 4), 3m(sea state 5)인 경우에 대하여 계산하였다. 또한 head sea 에서의 상황으로 가정하였으며, 잠망경 심도에서의 일반적인 진

Table 1 Principal particulars

전진속도	$U = 2. m / s$
잠수체의 길이	$L = 87.17 m$
잠수체의 높이	$D = 12 m$
잠수체의 질량	$M = 2218 ton$
운항수심	$H_0 = 15 m$

행 속도인 2m/s 로 일정하게 전진한다고 가정하였다. 운항 심도는 일반적인 잠망경 심도인 15m 로 설정 하였다. 제어를 수행하였을 경우 타각의 최대 변위를 35° 로 정하였다.

### 6.2 제어를 하지 않았을 경우의 수치모사 결과

규칙파중에서 파진폭 1m, 2m, 3m 에 대해서 각각 계산한 결과, 파진폭이 커질수록 wave 에 의한 힘과 모멘트가 커지며, 이로 인해 더 빨리 수면으로 다가가는 결과를 얻었다. Fig. 2 에는 파고 3m 의 wave 에 대하여 깊은 수심에서 정의된 외력 모델과 새롭게 제시한 외력 모델을 적용하였을 때의 운항 심도 변화를 나타내었다. Fig. 3 에는 파진폭에 따른 잠수체의 심도 변화를 비교하였다. 심도 파진폭이 1m 인 경우 파도에 의한 suction force 의 영향이 미미했으나 파진폭 2m 부터는 그 영향이 두드러짐을 알 수 있다.

Fig. 4 에는 초기 운항 수심인 15m 에서 10m 수심에 도달하기까지의 시간을 각각의 파진폭에 따라 나타내었다. 파진폭이 커질수록 suction force 의 영향이 커져, 빠른 시간에 10m 심도에 도달하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 5 는 유의파고 3 미터(해상상태 5)인 불규칙 파중에서의 심도변화를, 기존의 외력 모델과 새롭게 제시한 외력 모델을 사용하였을 경우에 대하여 나타내었다. 두 결과의 차이가 크지는 않으며, 파강제력의 크기가 매우 커서 약 30 초 이내에 잠수체가 수면에 이르러 노출되는 결과를 얻었다.

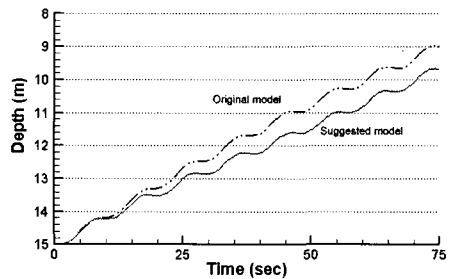


Fig. 2 Depth variations of conventional model and new model, in regular wave, amp = 3m

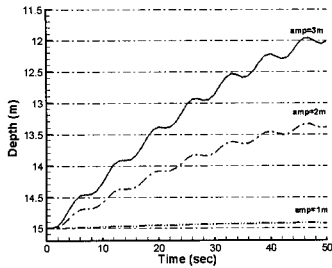


Fig. 3 depth variations in regular waves, amp=1m, 2m, 3m

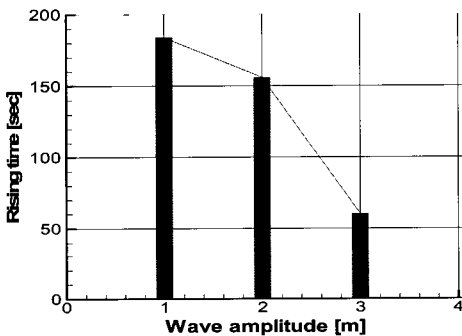


Fig. 4 Rising times for each amplitude

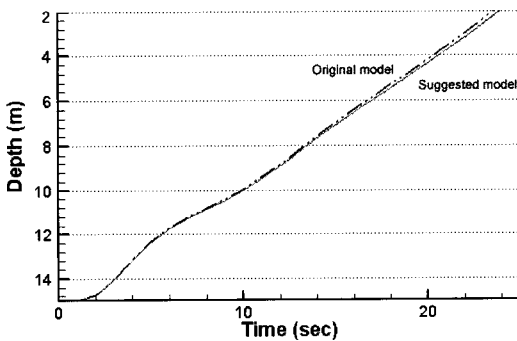


Fig. 5 Depth variations of original model and new model, in irregular waves, significant wave height = 3m

6.3 제어를 하였을 경우의 수치모사 결과

먼저, 기존에 사용되던 운동방정식의 외력 및 제어력 모델을 바탕으로 제어를 설계하였다. 그리고, 이렇게 설계된 제어기의 이득값을 기존

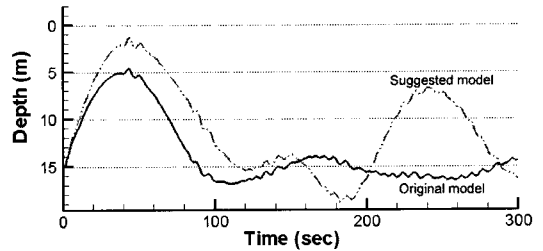


Fig. 6 Comparison of control performance with control gains designed with conventional model, in irregular waves, significant wave height = 3m

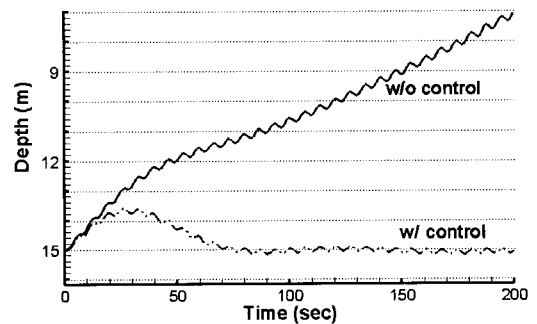


Fig. 7 Depth variation w/ and w/o control, in regular wave, amp. = 3m

의 운동 모델에 적용하여 제어를 실시한 결과와 본 논문에서 제시된 외력 및 제어력 모델에 그대로 적용하여 제어를 실시한 경우를 비교하였다. Fig. 6 은 그 결과를 보여주는 그림이다. 그림에서 나타난 것과 같이 외력 및 제어력 모델이 변화한 경우 제어기가 정상적으로 동작하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 외력 및 제어력에 대한 부정확한 모델을 바탕으로 제어기를 설계할 경우 원하는 제어를 수행하지 못할 가능성이 있다는 것을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 새롭게 제시된 모델에 따라 제어기를 새롭게 설계하여 제어를 실시하였다. 설계된 제어기의 성능을 살펴보면 다음과 같다.

규칙파중에서는, 계산한 모든 파고에 대하여 작은 타각으로도 빠른 시간에 운항 심도를 유지할

수 있었다. Fig. 7 은 파고 3 미터인 규칙파중에서 제어를 하지 않았을 경우와, 제어를 하였을 경우에 대한 심도 변화를 나타낸다.

불규칙파 중에서는 유의파고 3m 에 대한 계산을 수행하였다. 파도에 의한 힘과 모멘트가 상당히 큰 편이므로, 두 경우 모두 수면으로 끌려 올라가는 폭이 상당히 크게 나타났다. 그러나 시간이 지남에 따라 제어력이 파도에 의한 힘과 모멘트를 극복함으로써 결과적으로 목표 심도를 유지하고 중동요각을 최소화하는 효과적인 제어가 이루어졌다. 유의파고 3m 인 경우, 시간에 따른 파강제력 및 심도와 중동요각, 그리고 제어 입력에 대한 그래프를 Fig. 8 ~ Fig. 10 에 나타내었다. 유의파고 3m 이상의 경우에, 파강제력을 극복하기 위하여 코닝 타워의 제어판이 최대 타각 상태로 수심 초간 유지되는 현상이 나타났다.

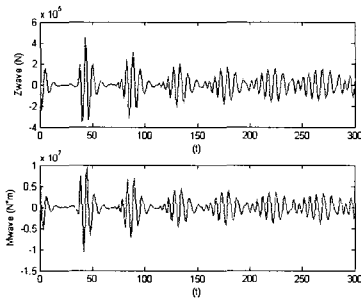


Fig. 8 Wave force and moment, irregular wave, significant wave height = 3m, w/ control

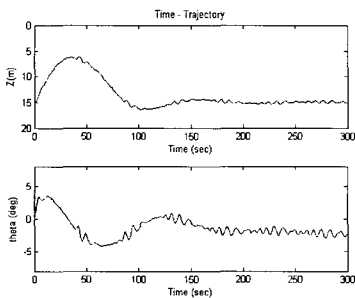


Fig. 9 Depth and pitch angle, irregular wave, significant wave height = 3m, w/ control

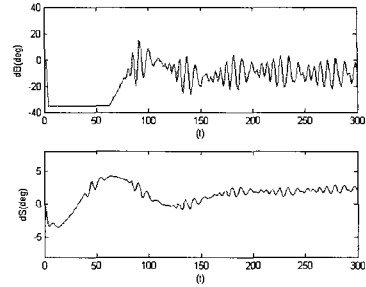


Fig. 10 Control inputs, irregular wave, significant wave height = 3m, w/ control

### 7. 결론

본 논문에서는 자유수면 근처에서 운항하는 잠수체에 대하여, 자유 수면과 파의 영향을 고려한 연직면 조종 운동방정식을 기술하였으며, 이를 바탕으로 일정한 목표 심도를 유지할 수 있는 제어기를 설계 하였다.

먼저, 파도의 직접적인 영향을 모델링 하기 위하여 파강제력 및 파강제모멘트를 계산할 수 있는 수학 모델을 적용하였으며, 다양한 시뮬레이션의 수행 및 결과 분석, 참고 문헌과의 결과 비교를 통해 이를 검증 하였다.

다음으로, 심도의 변화 및 파입자의 궤도운동의 영향에 따른 제어력의 변화를 고려하여 적용하였으며, 이를 통해 심도 유지 관점에서 중요한 의미를 지니는 제어력의 불규칙적인 변화를 모델링 하였다.

시뮬레이션 결과, 규칙파중에서는 파진폭이 2m 이상인 경우에 표류력이 잠수체의 거동에 영향을 미치기 발생하기 시작하였으며, 불규칙파중에서는 유의파고 3m 이상인 경우에는 35 초 이내에 잠수체가 수면에 도달하여 노출되었다.

둘째, 수면 근처에서의 불규칙적인 외력으로 인해 발생하는 잠수체의 심도 및 자세 변화를 제어할 수 있는 제어기를 설계 하였다. 기존의 외력 및 제어력 모델을 바탕으로 설계한 제어 입력으로는 새로운 외력 및 제어력 모델을 적용할 경우 심도 유지가 불가능 하였으며, 따라서, 새로운 외력



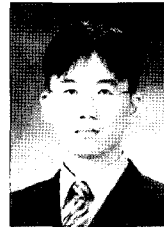
및 제어력 모델을 바탕으로 제어를 새로이 설계하여 적용하였다.

설계된 제어기는 규칙파중에서는 빠른 시간 내에 목표 심도를 되찾았으며, 종동요각 또한 안정적으로 유지되었다. 불규칙파중에서는 큰 값의 파강제력과 강제 모멘트로 인해, 초기에 큰 폭으로 수면으로 끌려 올라가는 경향이 나타났으나, 시간이 지남에 따라 제어력이 파도에 의한 힘과 모멘트를 극복함으로써 결과적으로 목표 심도를 유지하고 종동요각을 최소화하는 효과적인 제어가 이루어졌다.

참 고 문 헌

- 설동명, 이기표, 2005, “수중운동체의 잠수 심도에 따른 수평면내 조종성능 변화에 대한 실험적 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 6 호, pp. 571-558.
- Dumlu, D. and Istefanopulos, Y., 1995, “Design of an Adaptive Controller for Submersibles Via Multimodel Gain Scheduling,” Ocean Engng, Vol. 22, No. 6, pp. 592-614.
- Grumman Aerospace Corporation, 1978, Advanced Technology Lift and Propulsion System Preliminary Design Final Report December, NAVSEC Report, NO. 6114-043-79.

- Kim, S.H., 2005, “RAO Calculation of a Hydrofoil through Numerical Simulations,” International Conference on Fast Sea Transportation, St-Petersburg, Russia, Vol. 1.
- Mandzuka, S., 1998, “Mathematical Model of a Submarine Dynamics at the Periscope Depth,” Brodogradnja, 36.
- Richards, R.J. and Stoten, D.P., 1982, “Depth Control of a Submersible Vehicle,” International Shipbuilding Progress, 29.



< 최 주 혁 >



< 여 동 진 >



< 이 기 표 >



< 박 정 용 >