

LQR 제어 기법을 적용한 수면 근처에서의 수중운동체 심도 제어

김동진^{†*}, 이기표*, 최진우*, 이성균*

서울대학교 조선해양공학과*

Depth Control of a Submerged Body
Near the Free Surface by LQR Control Method

Dong-Jin Kim^{†*}, Key-Pyo Rhee*, Jin-Woo Choi* and Sung-Kyun Lee*

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University*

Abstract

The submerged body near the free surface is disturbed by the 1st and 2nd order wave forces, which results in unstable movements when no control is applied. In this paper, the vertical motions of the submerged body are analyzed, and the time-variant nonlinear system for the vertical motions of the submerged body is transformed to the time-invariant linear system in state space. Next, depth controller of the submerged body is designed by using LQR control, one of the modern optimal control technique. Numerical simulation shows that effective depth controls can be achieved by LQR control.

※Keywords: Submerged body(수중운동체), Vertical motion(연직면 운동), 1st and 2nd order Wave forces and moments(1,2차 파 강제력 및 파 강제 모멘트), Free surface effects(자유표면 효과), LQR control(LQR 제어)

1. 서론

수중운동체가 수면 근처에서 운항할 경우 파도에 의한 외력을 받게 되는데, 파 강제력을 파 진폭에 비례하는 1차항 힘과 2차항 힘인 시간 평균 표류력으로 나타내었다. 이 중에서 2차항 힘과 모멘트는 운동체를 수면으로 끌어올리는 역할을 한

다. 따라서 수중운동체가 잠망경 심도로 운항할 때 원하는 심도를 유지 및 제어하기 위해서는 이러한 2차항 힘과 모멘트를 고려하여 선수와 선미의 수평타를 적절히 제어할 필요가 있다.

수면 근처에서 파 강제력 및 파 강제 모멘트를 고려하여 수중운동체의 심도를 제어하는 연구는 이전부터 진행되어 왔다. Richards and Stoten(1982)은 수중운동체의 형상을 고려한 파강제력 및 파 강제 모멘트 수학 모형을 정립하였다. Dumlü and İstefanopulos(1995)는 수중운동체 심

접수일: 2009년 3월 24일, 승인일: 2009년 7월 20일

† 교신저자: kdj8277@snu.ac.kr, 010-3994-4007

도의 최적 제어를 수행하였고, Hao et al.(2004)는 퍼지 이론을 적용하여 잠수체의 심도 제어를 설계하였다. Yoon and Trung(2008)은 규칙파 중에서 2차 파 강제력을 실험으로 측정하였으며, Rhee(2007)와 Choi et al.(2008)은 3차원 패널 방법을 이용하여 불규칙 파 중에서 새로운 파 강제력 및 파 강제 모멘트 수학 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 Rhee(2007), Choi et al.(2008)이 제안한 파 강제력 및 파 강제 모멘트 수학 모델을 이용하여 수면 근처에서 수중운동체의 운동 특성을 알아보고 PID 제어의 한계를 분석하였다. 그리고 수중운동체의 연직면 운동 방정식을 시불변 선형 시스템으로 수정한 후, 현대 제어 이론을 도입하여 다중 입출력 시스템 성격을 갖는 수중운동체 연직면 운동 시스템의 제어를 수행하였다.

2. 좌표계 및 운동방정식

2.1 좌표계

수중운동체의 연직면 운동을 기술하기 위해 Fig. 1과 같이 지구 고정 좌표계와 물체 고정 좌표계를 설정하였다. 지구 고정 좌표계는 연직 하방을 양의 Z축으로 하고, 운항 심도가 XY평면과 일치하도록 설정하였다. 물체 고정 좌표계는 원점이 운동체 형상 중심에 위치하며 원점의 길이 방향 좌표는 무게 중심의 길이 방향 좌표와 같다.

선수, 우현, 선저 방향을 각각 양의 x, y, z로 설정하였다. 운동체의 코닝 타워와 선미에 각각 수평타가 설치되어 있으며 이들의 각변위를 각각 δB 와 δS 로 표시한다.

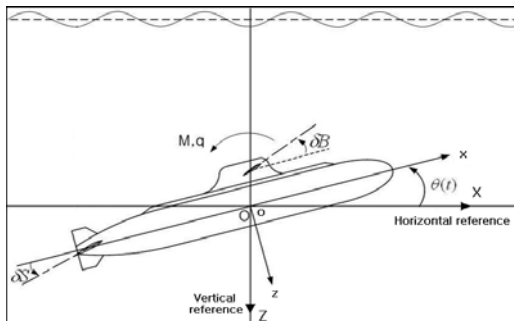


Fig. 1 Coordinate system

2.2 운동방정식

Choi et al.(2006)을 참고하면 수중운동체의 6자유도 운동 방정식 중 상하동요와 종동요 방정식을 기본으로 하고, 수평면 운동 관련항 및 비선형항을 제거한 후 무차원화 하면 식 (1), (2)와 같이 선형화된 연직면 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$(m - \frac{\rho}{2}L^3Z'_w)\dot{w} = \frac{\rho}{2}L^2Z'_w U w + \frac{\rho}{2}L^3Z'_q U q + m U q + \frac{\rho}{2}L^2Z'_0 U^2 + \frac{\rho}{2}L^2Z'_{\delta B} U^2 \delta B + \frac{\rho}{2}L^2Z'_{\delta S} U^2 \delta S + Z_{wave} \quad (1)$$

$$(I_{yy} - \frac{\rho}{2}L^5M'_q)\dot{q} = \frac{\rho}{2}L^4M'_q U q + \frac{\rho}{2}L^3M'_w U w + \frac{\rho}{2}L^3M'_0 U^2 + \frac{\rho}{2}L^3M'_{\delta B} U^2 \delta B + \frac{\rho}{2}L^3M'_{\delta S} U^2 \delta S + m g (z_G - z_B)\theta + M_{wave} \quad (2)$$

2.3 파 강제력 및 파 강제 모멘트 모델링

Rhee(2007), Choi et al.(2008)이 제안한 파 강제력 및 파 강제 모멘트 수학 모델은 식 (3), (4)와 같다. a_i , ω_i , k_i 는 i번째 규칙파의 파고, 주파수 및 파수이며, l , b , d 는 각각 수중운동체의 길이, 폭, 높이의 1/2이다. u 와 μ 는 전진 속도 및 파 입사각이며 H 는 운항 심도이다. C_{Z1} , C_{Z2} , C_{M1} 은 운동체의 형상에 관련된 계수이다.

$$Z_{wave} = Z_1(t) + Z_2(t)$$

$$Z_1(t) = \sum_{i=1}^N C_{Z1} \delta \rho g a_i \frac{\sin(k_i l \cos \mu) \sin(k_i b \sin \mu) \sinh(k_i d)}{(1 - \omega_i u / g \cdot \cos \mu) k_i^2 \cos \mu \sin \mu} \times e^{-k_i H} \sin(\omega_i t)$$

$$Z_2(t) = - \sum_{i=1}^N C_{Z2} \frac{\rho g^2 a_i^2 k_i^2}{2(\omega_i - k_i u \cos \mu)^2} \sinh(2k_i d) b l e^{-2k_i H} \quad (3)$$

$$M_{wave} = M_1(t) + M_2(t)$$

$$M_1(t) = \sum_{i=1}^N C_{M1} \delta \rho g a_i \frac{[k_i l \cos \mu \cos(k_i l \cos \mu) - \sin(k_i l \cos \mu)]}{(1 - \omega_i u / g \cdot \cos \mu) k_i^3 \sin \mu \cos^2 \mu} \times \sin(k_i b \sin \mu) \sinh(k_i d) e^{-k_i H} \cos(\omega_i t)$$

$$M_2(t) \approx 0 \quad (4)$$

식 (4)에서처럼 $M_2(t)$ 는 $M_1(t)$ 에 비해 매우

작은 값이므로 무시할 수 있다.

$Z_1(t)$ 와 $M_1(t)$ 는 파고에 비례하고 심도에 대한 지수 함수이며 주기성을 갖는 반면에, $Z_2(t)$ 는 파고의 제곱에 비례하고 연직상방으로 일정하게 작용한다.

3. 불규칙 파 및 외력 생성

3.1 불규칙 파 생성

제 15차 ITTC에서 추천한 ISSC 파 스펙트럼 식을 이용하여 불규칙 파가 있는 해상 상태를 구현하였다. 식 (5)의 ISSC 스펙트럼 식을 그래프로 그리면 Fig. 2와 같다.

$$S(\omega) = \frac{0.11}{2\pi} H_{1/3}^2 T_1 \left(\frac{\omega T_1}{2\pi}\right)^{-5} \exp\left[-0.44\left(\frac{\omega T_1}{2\pi}\right)^{-4}\right] \quad (5)$$

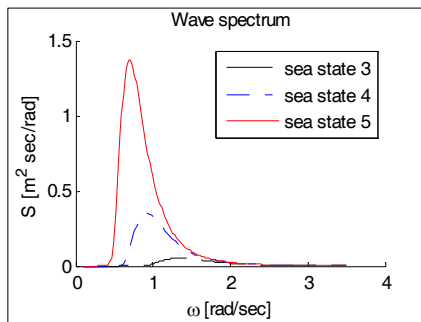


Fig. 2 Wave spectrum

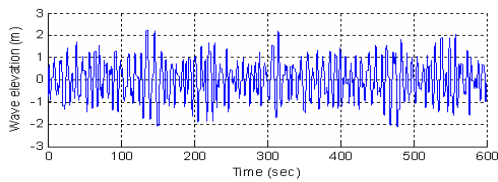


Fig. 3 Irregular wave elevation(sea state 5)

Wilson et al.(1974)에 의하면 불규칙 파를 시뮬레이션 상에서 구현할 경우 주어진 해상 상태를 충분히 표현하기 위해 주파수 분해능은 0.003Hz, 시간 간격은 0.075초 이하, 전체 계측 시간은 600초 이상으로 하는 것이 바람직하다. 이러한 기준을 따라 WMO sea state code에서 sea state 5

에 대한 불규칙 파를 600초간 시뮬레이션 하면 Fig. 3과 같다. 이하 본 논문에서의 시뮬레이션은 sea state 5를 기준으로 삼아 수행하기로 한다.

3.2 파에 의한 외력

2.2절의 수학 모델을 이용하여 수중운동체의 심도 15m, 전진속도 2m/s, 파 입사각 180°를 유지하는 시뮬레이션을 수행할 경우 불규칙 파에 대한 파 강제력 Z_1 , Z_2 및 파 강제 모멘트 M_1 을 그 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다. 힘은 $0.5\rho L^2 U^2$ 로, 모멘트는 $0.5\rho L^3 U^2$ 로 무차원화 하였다.

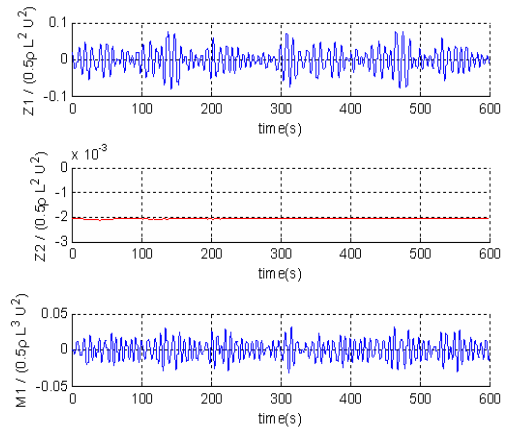


Fig. 4 Wave exciting forces Z_1, Z_2 , and wave exciting moments M_1

3.3 자유표면에 의한 외력

파가 없는 경우에도 수중운동체가 자유표면 근처로 접근하면 상하 유동 특성이 다르기 때문에 이로 인한 연직 방향 힘이 발생한다. Seol et al.(2005)은 실린더 형상의 물체를 여러 가지 심도에서 예인 실험하고 심도에 따른 연직 방향의 힘을 무차원화 하였다. 또한 코닝 타워의 유무가 연직 방향 힘에 거의 영향을 주지 않는다는 사실을 실험으로 검증하였다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 5와 같은 Seol et al.(2005)의 무차원화 결과를 대상 운동체의 제원으로 차원화하여 Z_p 를 추정하고 시뮬레이션에 이를 추가하였다. 단, Seol et al.(2005)의 결과는 실린더 형상, 즉 코닝 타워를 뺀 동체의 폭과 높이가 거의 같은 경우에 한정되므로

수중운동체의 폭과 높이가 다를 경우 Z_P 를 얻기 위한 추가적인 실험이 필요하다.

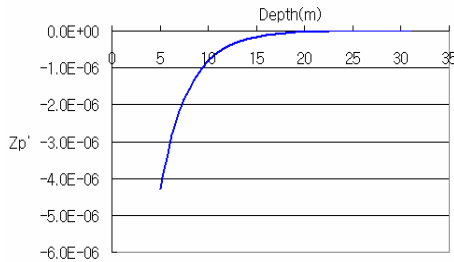


Fig. 5 The vertical forces due to free surface effects

4. 고전 제어를 적용한 시뮬레이션

4.1 PID 제어 원리 및 이득 결정

PID제어는 목표 값과 현재 값의 오차를 구한 뒤, 이 오차에 비례하도록, 오차의 미분, 적분 값에 비례하도록 각각 적절한 이득을 설정하여 입력 값으로 사용하는 제어 기법이다. 입력 u 를 수식으로 표현하면 식 (6)과 같다. 식에서 e 는 목표 값과 현재 값의 오차이다.

$$u = K_P e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (6)$$

PID 제어는 단순하고 직관적이어서 사용이 편리하나 단일 입출력 시스템에서만 사용할 수 있는 한계가 있다. 수중운동체의 연직면 운동처럼 입력 δB , δS 와 출력 z , θ 가 연성되어 있는 다중 입출력 시스템에서는 사용이 불가능하다. 하지만 대상 운동체의 경우 선수 수평타는 무게 중심과 가깝기 때문에 주로 심도 제어에 이용되며, 심도 제어시 종동요 모멘트가 매우 작게 발생한다. 한편 선미 수평타는 무게 중심과 멀리 떨어져 있어서 주로 종동요를 제어하는 모멘트를 발생시킨다. 따라서 우선 PID 제어를 사용하여 수중운동체의 운동을 제어하고 그 특성을 분석하기로 한다.

선수 및 선미 수평타의 입력 δB , δS 는 각각 식 (7), (8)과 같이 결정된다. e_z 와 e_θ 는 각각 심도 및 피치각의 오차이다.

$$\delta B = -(K_{PB} \times e_z + K_{IB} \times \int e_z dt + K_{DB} \times \dot{e}_z) \quad (7)$$

$$\delta S = -(K_{PS} \times e_\theta + K_{IS} \times \int e_\theta dt + K_{DS} \times \dot{e}_\theta) \quad (8)$$

식 (7), (8)에서 각 이득은 Ziegler-Nichols tuning method를 이용하여 구하였으며, 결정된 이득은 Table 1과 같다.

Table 1 PID gains for bow and stern elevators

K_{PB}	0.4	K_{PS}	0.4
K_{IB}	0.002	K_{IS}	0.002
K_{DB}	2	K_{DS}	2

4.2 Open-loop 시스템 시뮬레이션

4.2.1 모든 차수의 파 강제력과 자유표면에 의한 외력을 고려할 경우

파 강제력 Z_1 , Z_2 와 파 강제 모멘트 M_1 , 그리고 자유표면에 의한 외력 Z_P 를 모두 고려한 상태에서 선수 및 선미 수평 타의 제어 입력을 0으로 두고 시간에 대한 수중운동체의 운동을 시뮬레이션하면 Fig. 6과 같다. 무차원화 방법은 3.2절과 같다. 심도가 꾸준히 상승하여 약 330초가 지나면 운동체가 수면 위로 떠오르는 것을 알 수 있다.

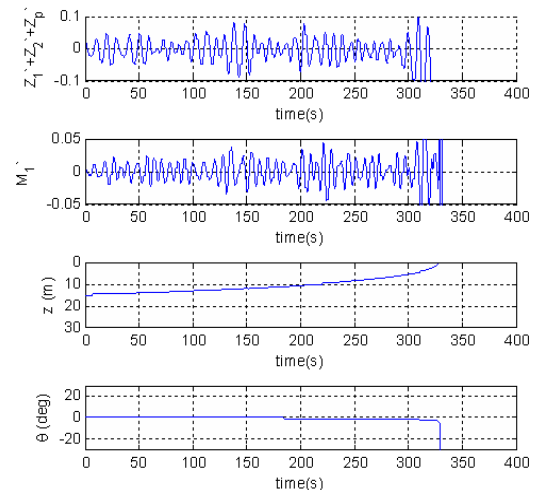


Fig. 6 Open-loop system simulation considered Z_1 , Z_2 , M_1 , and Z_P

4.2.2 1차 파 강제력만 고려할 경우

파 강제력 Z_1 과 파 강제 모멘트 M_1 만 고려한 상태에서 선수 및 선미 수평 타의 제어 입력을 0으로 두고 시간에 대한 수중운동체의 운동을 시뮬레이션하면 Fig. 7과 같다. 무차원화 방법은 3.2절과 같다.

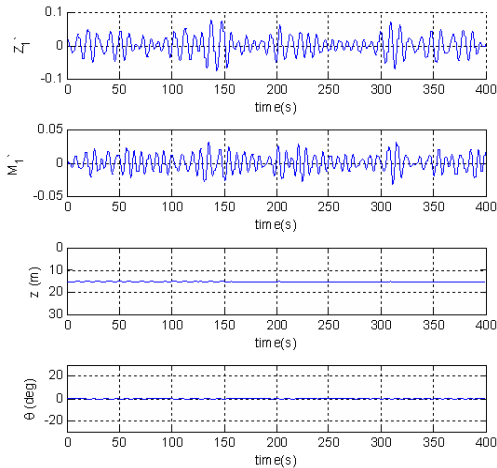


Fig. 7 Open-loop system simulation considered Z_1, M_1

Fig. 7에 의하면 수중운동체 자체가 저주파수 통과 필터 역할을 해서 1차 파 강제력 및 파 강제 모멘트는 심도에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있으며 2차 파 강제력과 자유표면에 의한 연직 방향 힘이 심도를 상승시키는 주된 요인이라고 분석할 수 있다.

4.3 Closed-loop 시스템 시뮬레이션

4.3.1 모든 차수의 파 강제력과 자유표면에 의한 외력을 고려할 경우

Table 1에서 구한 PID 제어 이득을 사용하여 1, 2차 파 강제력 및 파 강제 모멘트, 그리고 자유표면에 의한 외력을 모두 고려한 상태에서 600초 간 제어를 수행하면 Fig. 8과 같다. 초기 심도는 20m, 목표 심도는 15m이며 초기 및 목표 피치각은 각각 0° 이다. 초기에 심도 변경을 위한 선수 수평타의 제어 과정에서 saturation이 발생하지만 약 100초 이후에는 심도 및 자세 제어가 무리 없이 이루어짐을 확인할 수 있다.

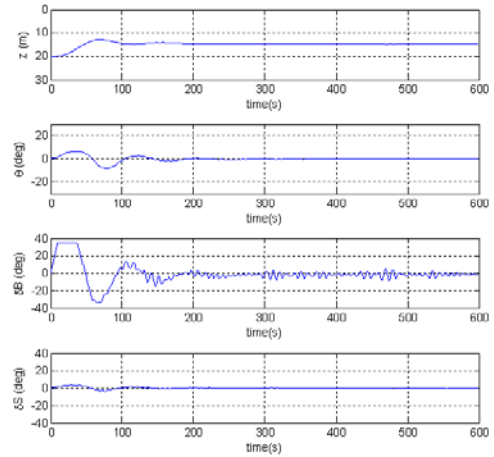


Fig. 8 Closed-loop system simulation considered $Z_1, Z_2, M_1,$ and Z_P

4.3.2 2차 파 강제력과 자유표면에 의한 외력만 고려할 경우

2차 파 강제력 Z_2 와 자유표면에 의한 외력 Z_P 만 고려한 상태에서 동일한 제어 이득으로 PID 제어를 수행하면 Fig. 9와 같다. 이 때의 선수 및 선미 수평타의 제어 입력을 $\delta B_0, \delta S_0$ 라고 한다.

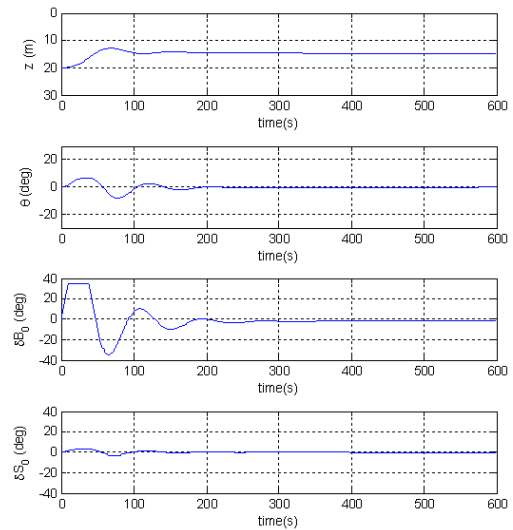


Fig. 9 Closed-loop system simulation considered $Z_2,$ and Z_P (control input = $\delta B_0, \delta S_0$)

4.3.3 제어 입력 $\delta B_0, \delta S_0$ 으로 모든 차수의 파 강제력과 자유 표면에 의한 외력을 고려한 상태에서 제어할 경우

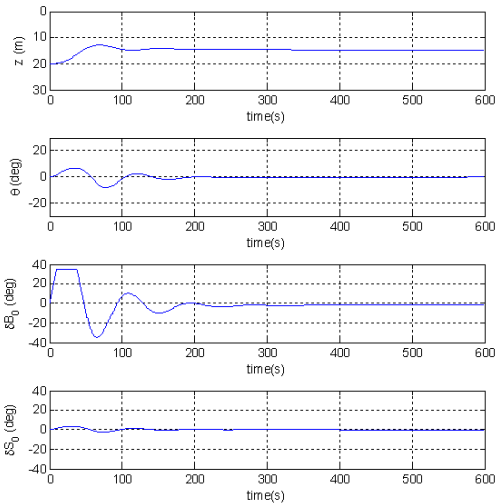


Fig. 10 Closed-loop system simulation considered $Z_1, Z_2, M_1,$ and Z_P (control input = $\delta B_0, \delta S_0$ / rising depth)

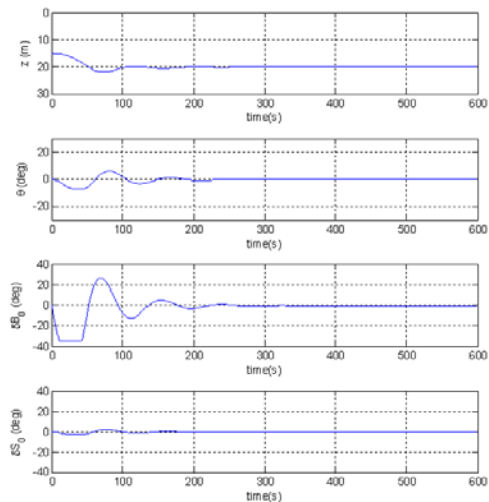


Fig. 11 Closed-loop system simulation considered $Z_1, Z_2, M_1,$ and Z_P (control input = $\delta B_0, \delta S_0$ / descending depth)

4.3.2에서 얻은 제어 입력 $\delta B_0, \delta S_0$ 을 사용하여 모든 파 강제력 및 자유 표면에 의한 외력을 고려한 상황에서 시뮬레이션을 수행하면 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 볼 때 심도 및 자세 제어가 잘 이루어지고 있다.

Fig. 11은 같은 방법으로 심도를 15m에서 20m로 하강시킨 시뮬레이션 결과이며 역시 심도 및 자세 제어가 잘 이루어지고 있다. 앞의 결과들에 의하면 자유표면 근처에서 수중운동체의 심도 제어를 위해 2차 파 강제력과 자유표면에 의한 외력만을 고려하여 제어를 설계하는 것이 가능하다.

5. 현대 제어를 적용한 시뮬레이션

5.1 상태 방정식 구성

4.3절의 결과에 의해 1차 파 강제력과 파 강제 모멘트는 제외하고, 2차 파 강제력 Z_2 와 자유표면에 의한 외력 Z_P 를 포함하여 상태 방정식을 구성하기로 한다.

Z_2 와 Z_P 는 잠수함의 운항 상황 및 해상 상태가 정해졌을 때 그 크기가 일정하게 결정되며 시간에 대해서도 불변이고, 오직 심도가 알아질수록 지수 함수 형태로 증가한다. Fig. 12에서 심도 5~30m 구간에 대해 두 무차원화 힘 Z_2' 와 Z_P' 의 그래프를 작성하였다. 크기가 음이라는 것은 수면 쪽으로 끌어올리는 힘을 의미한다.

선형 시스템을 구성하기 위해 심도 구간을 1m

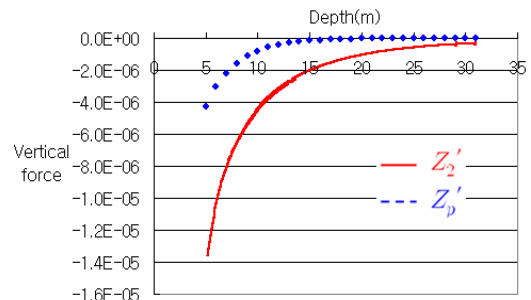


Fig. 12 The second order wave exciting forces and the vertical forces due to free surface effects

씩 나누고 위의 두 힘을 심도 z 에 대한 일차 함수로 구간별 선형화 한다. 식으로 표현하면 (9), (10)과 같다. i 는 심도 구간을 나타낸다.

$$Z_2 = \alpha_i z + \beta_i \tag{9}$$

$$Z_P = \gamma_i z + \delta_i \tag{10}$$

Z_2 와 Z_P 를 운동 방정식에 포함하여 상하동요 및 종동요 방정식을 행렬 방정식 형태로 재구성하면 식 (11)과 같다. 식 (11)에서 상태 변수 벡터 X 는 상하동요 변위, 종동요 변위각, 상하동요 속도, 종동요 각속도를 원소로 갖는다. 또한 입력 변수 벡터 U 는 선수 및 선미 수평타 변위를 원소로 갖는다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU + W \\ \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ (\alpha_i + \gamma_i) & 0 & \frac{B}{A} & \frac{(C+D)}{A} \\ 0 & \frac{J}{G} & \frac{I}{G} & \frac{H}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \theta \\ w \\ q \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{E}{A} & \frac{F}{A} \\ \frac{K}{G} & \frac{M}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta B \\ \delta S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{N}{A} + \frac{(\beta_i + \delta_i)}{A} \\ \frac{O}{G} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= (m - \frac{\rho}{2} L^3 Z_w'), \quad B = \frac{\rho}{2} L^2 Z_w' U, \quad C = \frac{\rho}{2} L^3 Z_q' U, \\ D &= mU, \quad E = \frac{\rho}{2} L^2 Z_{\delta B}' U^2, \quad F = \frac{\rho}{2} L^2 Z_{\delta S}' U^2, \\ G &= (I_{yy} - \frac{\rho}{2} L^5 M_q'), \quad H = \frac{\rho}{2} L^4 M_q' U, \quad I = \frac{\rho}{2} L^3 M_w' U, \\ J &= mg(z_G - z_B), \quad K = \frac{\rho}{2} L^3 M_{\delta B}' U^2, \quad M = \frac{\rho}{2} L^3 M_{\delta S}' U^2, \\ N &= \frac{\rho}{2} L^2 Z_0' U^2, \quad O = \frac{\rho}{2} L^3 M_0' U^2 \end{aligned} \tag{11}$$

제어 입력은 식 (12)와 같으며 적절한 제어 이득 K 행렬을 결정하여 입력 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + B(U + B^{-1}W) = AX + B(-KX) \\ U &= -KX - B^{-1}W \end{aligned} \tag{12}$$

5.2 LQR 제어 원리 및 가중치 행렬 결정

$$\dot{X} = AX + BV \tag{13}$$

식 (13)처럼 상태 공간에서 운동 방정식을 행렬 식으로 구성하고, 식 (14)와 같이 상태 변수와 입력 변수들의 이차식 형태로 성능 지수를 정한다.

$$J = \int_0^{t_f} (X^T Q X + V^T R V) dt \tag{14}$$

성능 지수가 최소가 되도록 하는 정상 상태의 제어 입력은 식 (15)의 대수 Riccati 방정식을 풀어서 행렬 P 를 계산하고, 이를 식 (16)에 대입하여 얻을 수 있다. 이를 Linear Quadratic Regulator(LQR) 제어라고 한다.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \tag{15}$$

$$V = -KX = -(R^{-1}B^T P)X \tag{16}$$

식 (14)에서 가중치 행렬 Q 와 R 는 일반적으로 대각 원소만을 0이 아닌 수로 가지며 각 원소의 분자는 1, 분모는 대응하는 변수의 최대값의 제곱으로 하면 자연스럽게 무차원화가 이루어져서 적절한 제어 이득을 얻을 수 있다. 식 (17), (18)은 가중치 행렬 Q 와 R 를 보여준다.

$$Q = \begin{bmatrix} (1/1)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (1/0.175)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$R = \begin{bmatrix} (1/0.6109)^2 & 0 \\ 0 & (1/0.6109)^2 \end{bmatrix} \tag{18}$$

5.3 LQR 제어를 적용한 시뮬레이션 결과

목표 심도와 현재 심도의 차이를 상태 변수 z 로 하고, 상하동요 속도 w 및 종동요 각변위 θ , 각속도 q 는 초기 값 0을 기준으로 변화된 양을 각각 상태 변수로 설정한다. 현재 심도에서 목표 심도까지 1m씩 상승 또는 하강하면서 각 구간마다 LQR 제어 기법을 사용하여 제어 이득 행렬 K

를 결정하고 시간에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 제어 이득 K 는 심도에 따라 변하게 되며 그 예로 식 (18), (19)은 심도가 각각 15m, 20m일 경우 행렬 K 이다.

$$K_{15} = \begin{bmatrix} -0.5040 & 2.5567 & -3.7801 & 7.6122 \\ -0.3509 & -0.7156 & -2.9546 & -6.5174 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$K_{20} = \begin{bmatrix} -0.4554 & 1.5722 & -4.3429 & 1.8223 \\ -0.1492 & -0.1622 & -1.5708 & -2.9430 \end{bmatrix} \quad (19)$$

시뮬레이션 시간은 총 600초이지만 목표 심도와 피치각에 도달한 이후에는 상태 변수와 입력 변수들이 항상 안정된 상태를 유지하기 때문에 시작부터 200초까지의 구간만을 그래프로 나타내었다. 실선이 LQR 제어 결과이며, 점선은 같은 경우의 PID 제어 결과이다.

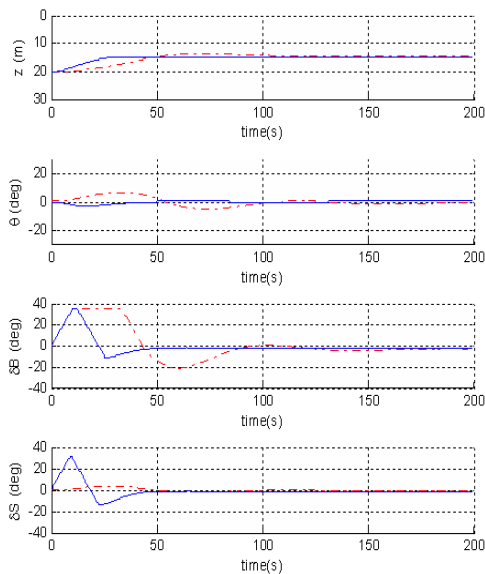


Fig. 13 LQR control simulation(rising depth)

먼저 심도를 20m에서 15m로 상승하였을 경우 PID와 LQR 제어를 수행한 결과는 Fig. 13과 같다. 두 번째로 심도를 15m에서 20m로 하강할 때 PID와 LQR 제어 결과는 Fig. 14와 같다.

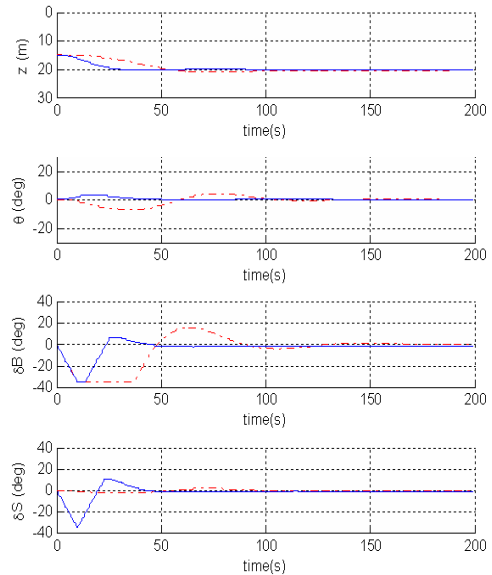


Fig. 14 LQR control simulation (descending depth)

Fig. 13-14에서 LQR제어는 PID 제어에 비해 상대적으로 선미 수평타 입력 값은 크지만, 목표 심도에 도달하는 시간이 짧아지고 심도의 오버슈트가 발생하지 않아서 심도 제어에 더 유리함을 확인할 수 있다.

6. 결론

수중운동체는 일반적으로 선수와 선미 수평타 입력에 의해 상하동요와 종동요가 동시에 영향을 받으므로 다중 입출력 시스템의 특성을 갖는다. 본 연구의 대상 수중운동체는 선수 수평타가 코닝 타워 위치, 즉 무게 중심 근처에 있으므로 상하동요를 주로 제어하고, 선미 수평타는 종동요를 주로 제어하는 형태이다. 상하동요와 종동요의 입출력을 분리시켜 PID 제어 기법으로도 일단은 연직면 운동 제어가 가능하다. 그러나 PID 제어는 원칙적으로 단일 입출력 시스템을 대상으로 하기 때문에 다중 입출력 시스템인 수중운동체 연직면 상의 운동을 최적 제어하기에 충분치 않다. 따라서 본 연구에서는 상하동요와 종동요 운동을 상태 공간 방정식으로 옮기는 방법을 제안하였다. 수면

근처에서 수중운동체가 받는 파에 의한 외력 중 1차 파 강제력과 파 강제 모멘트를 시스템에서 제외하여 시변(Time variant) 시스템을 시불변(Time invariant) 시스템으로 변환 가능하다. 그리고 2차 파 강제력 및 자유표면 영향에 의한 외력은 심도에 대해 지수함수 형태이며 여러 개의 일정한 심도 구간으로 나누면 이 힘들을 심도에 대한 1차 함수로 각각 선형화 가능하다. 따라서 비선형(Nonlinear) 시스템을 선형(Linear) 시스템으로 변환 가능하다.

위의 과정을 통해 상태 공간에서의 시불변 선형 시스템을 완성한 후, 현대 제어 기법 중의 하나인 LQR 최적 제어를 적용하여 심도 제어를 수행하였을 때 PID 제어에 비해 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 현대 제어 기법은 LQR 이외에도 많은 방법이 개발되어 있으므로 본 연구에서 제안한 방법을 이용한다면 다양한 방법으로 심도 제어가 가능하리라 생각되며, 실제 수중운동체를 제어할 때는 실시간 파 예측 및 이에 대한 필터링 등의 과정이 추가로 필요할 것이다.

후 기

본 연구의 일부는 서울대학교 BK21 해양기술인력양성사업단과 서울대학교 해양시스템공학연구소(RIMSE)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Choi, J.H., Yeo, D.J., Rhee, K.P. and Park, J.Y., 2006, "On the Vertical Plane Dynamics Modeling and Depth Control of a Submerged Body Moving beneath Free Surface," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 6, pp. 647-655.
- Choi, J.W., Rhee, K.P., Ann, S.P. and Lee, S.K., 2008, "Mathematical Model of Wave Forces and Moments for the Depth Control of a Submerged Body," Proceedings of the Annual Spring Meeting of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 1228-1235.
- Dumlu, D. and Istefanopulos, Y., 1995, "Design of an Adaptive Controller for Submersibles Via Multimodel Gain Scheduling," Ocean Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 592-614.
- Hao, Y., Donghui S. and Zhilan, X., 2004, "Design of Submarine Near-surface Depth Controller," Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 4530-4533.
- Rhee, K.P., 2007, Development of the Periscope Depth Keeping System for a Submarine, Korea Navy Warfare Development Group Report.
- Richards, R.J. and Stoten, D.P., 1982, "Depth Control of a Submersible Vehicle," International Shipbuilding Progress, Vol. 28, pp. 30-39.
- Seol, D.M., Rhee, K.P. and Yeo, D.J., 2005, "An Experimental Study of the Submerged Depth Effect on the Manoeuvrability in a Horizontal Plane of an Underwater Vehicle," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 6, pp. 551-558.
- Wilson, B.W., Chakrabarti, S.K. and Snider, R.H., 1974, "Spectrum Analysis of Ocean Wave Records," Proceedings of the International Symposium on 'Ocean Wave Measurement and Analysis', Vol. 1, pp. 87-106.
- Yoon, B.S. and Trung, V.D., 2008, "Prediction of Free Surface Suction Force Acting on a Submerged Body," Proceedings of the Annual Autumn Meeting of the SNAK, pp. 205-208.



<김 동 진> <이 기 표> <최 진 우> <이 성 균>