

# AUV의 궤적제어에 관한 연구

유 휘 룡\* · 김 성 근\*\* · 김 상 봉\*\*\*  
(94년 7월 18일 접수)

## Study for Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicle

Hui-ryong Yoo\* · Seung-gun Kim\*\* · Sang-bong Kim\*\*\*

**Key Words** : AUV(Autonomous Underwater Vehicle), Servo Control System, Servo Compensator

### Abstract

This paper presents a design method of multivariable robust servo system for tracking control system for AUV(Autonomous Underwater Vehicle). In order to obtain the basic data for the design of the tracking control system, the control algorithm is evaluated in the view of computer simulation results. The tracking control is carried out for an AUV with 2 main thrusters, 2 side thrusters and 2 thrusters for the movement to up-down direction.

The results of computer simulation show that the proposed multivariable servo system design method is an efficient method for the control performance of tracking control system of AUV under severe underwater environment.

### 1. 서 론

AUV(Autonomous Underwater Vehicle)는 통상 무계류 무인잠수정으로 알려져 있으나, ROV(Remote Operating Vehicle)와 엄격히 구분하기 위해서는 UUV(Underwater Unmanned Untethered Vehicle)로 부르기도 한다. 환

편 AUV와 ROV를 통칭하여 UUV(Underwater Unmanned Vehicle, 약칭 UV : Unmanned Vehicle)라 하기도 한다.<sup>1)</sup> AUV에 관한 연구는 1970년대초 일본 기계 진흥협회의 250m급 OSR 시리즈의 실해역 실험을 시작으로 하여 1979년 프랑스 국립 해양 연구소(CNEXO)의 4000m급 EPAULARD등 30~6000m급 AUV에 관하여 각지에서 연구가 진행되고 있다.<sup>1,2)</sup> 특히 가까운

\* 부산수산대학교 대학원

\*\* 부산수산대학교 해양산업개발센터

\*\*\* 부산수산대학교 기계공학과

일본의 경우는 동경대학 생산기술 연구소를 중심으로 활발한 연구를 수행중에 있다. AUV에 대한 연구의 주류는 수 백미터의 거리를 이동하는 시스템에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며, 특히 성능면에서는 용도, 가동시간 및 심도의 향상에 중점을 두고 있다.<sup>1)</sup> 한편, 제어방법, 제어기술, 단일 칩 기술등의 향상에 따라 후발적인 연구를 수행함에도 불구하고 작업시간 및 명령의 추종성이 양호한 시스템의 개발이 가능할 것으로 생각된다.<sup>3~6)</sup>

본 연구에서는 주추진기 2대, Side 추진기 2대, 상하방향추진기 2대를 갖는 시스템을 고안하여 방향은 물론 Heave 방향이 제어 가능하도록 설계하였다. 이 시스템에 대한 운동방정식을 구하고 이에 대한 연속계 상태방정식을 구하였으며, 제어방법으로는 불규칙한 해상에 적합할 것으로 판단되는 서보계 설계법을 택하였다.<sup>5,6)</sup> 초기단계의 연구로서 시뮬레이션을 수행하기 위하여 연속계상태방정식에 대한 이산계 상태방정식을 구하고 서보 제어기 설계방법에 따라 서보 보상기 및 제어입력을 구하였다.

시뮬레이션 결과로부터 AUV시스템의 제어 가능성을 확인할 수 있었으며, 특히 외란에 대해 강한 설계법임을 알 수 있었다.

## 2. 모델 AUV의 운동방정식 및 상태 방정식

### 2. 1 운동방정식

Fig. 1에 보인 좌표계에 기초한 운동방정식은 다음과 같다.

$$(M+m_x)\ddot{x} + D_x\dot{x} + R_x x = F_x + (1-t_T)(T_1+T_2) \quad (2-1)$$

$$(M+m_y)\ddot{y} + D_y\dot{y} + R_y y = F_y + (1-t_T)(P_1-P_2) \quad (2-2)$$

$$(M+m_z)\ddot{z} + D_z\dot{z} + R_z z = F_z + (1-t_T)(P_3-P_4) \quad (2-3)$$

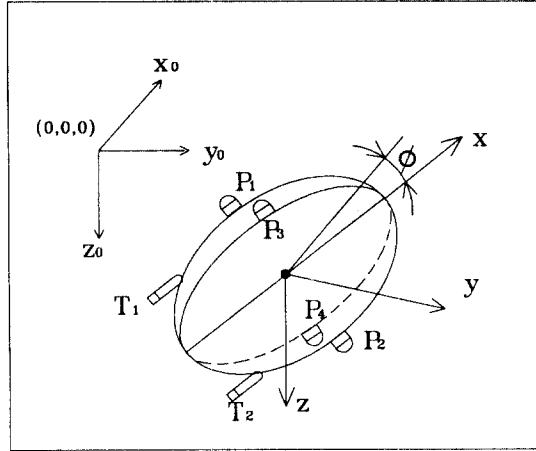


Fig. 1 Coordinate axes of AUV motion

$$(I_{zz}+J_{zz})\ddot{\phi} + D_{Iz}\dot{\phi} = F_{Iz} + \frac{\sqrt{2}}{2} a(T_1-T_2) \quad (2-4)$$

$$u_a = \frac{dx_0}{dt} = u \cos \phi - v \sin \phi \quad (2-5)$$

$$v_a = \frac{dy_0}{dt} = u \sin \phi + v \cos \phi \quad (2-6)$$

$$w_a = \frac{dz_0}{dt} = \frac{dz}{dt} = w \quad (2-7)$$

$$r_a = \frac{d\phi_0}{dt} = \frac{d\phi}{dt} = a \quad (2-8)$$

여기서,

$O(x_0, y_0, z_0)$  : 공간고정 좌표계

$G(x, y, z)$  : AUV의 고정 좌표계

$M$  : AUV의 질량

$m_x, m_y, m_z$  : AUV의  $x, y, z$  축 방향 부가질량

$D_x, D_y, D_z$  : AUV의  $x, y, z$  방향 감쇠계수

$D_{Iz}$  : AUV의 Yaw 방향 감쇠 모멘트 계수

$R_x, R_y, R_z$  : AUV의  $x, y, z$  방향 복원력 계수

$F_x, F_y, F_z$  : AUV의 외력

$F_{Iz}$  : AUV의 외부 모멘트

$t_T$  : 추진력의 보정계수

$P_i (i=1,2,3,4)$  : 부추진기의 좌우 상하 위치의 추력크기

$T_i (i = 1, 2)$  : 주 추진기의 좌우 추력크기

$I_{ZZ}$  : Z축방향의 모멘트

$J_{ZZ}$  : Z축방향의 부가 모멘트

## 2. 2 상태 방정식

$t=t_0$  에서의 상태를 평형상태라고 가정했을 경우, 각 파라메타들은 다음과 같은 값들을 갖는다고 가정할 수 있다.

$$\varphi(t_0) = \varphi_0 \cong 0, u(t_0) = u_0$$

$$v(t_0) = v_0, w(t_0) = w_0, r(t_0) = r_0$$

식(2-5), (2-6)로부터  $u$ 와  $v$ 를  $u_a, v_a, \varphi$ 로 나타낼 수 있으며, 평형점 근방에서 선형근사화하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dx_0}{dt} = u \varphi_0 v - (u_0 \varphi_0 + v_0) \varphi \quad (2-9)$$

$$\frac{dy_0}{dt} = \varphi_0 u + v + (u_0 - v_0 \varphi_0) \varphi \quad (2-10)$$

$$u = u_a + \varphi_0 v_a + (-u_{a0} \varphi_0 + v_{a0}) \varphi \quad (2-11)$$

$$v = -\varphi_0 u_a + v_a - (u_{a0} + v_{a0} \varphi_0) \varphi \quad (2-12)$$

식(2-9), (2-10)의 양변을  $t$ 로 미분하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\frac{du_a}{dt} = \frac{du}{dt} - \varphi_0 \frac{dv}{dt} - (u_0 \varphi_0 + v_0) \frac{d\varphi}{dt} \quad (2-13)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = \varphi_0 \frac{du}{dt} + \frac{dv}{dt} + (u_0 - v_0 \varphi_0) \frac{d\varphi}{dt} \quad (2-14)$$

식(2-11), (2-12)를 식(2-1), (2-2), (2-3), (2-4)에 대해 평행점 근방에서 정리한 결과에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{du}{dt} = \frac{1}{M+m_x} \{ -D_x u_a - D_x \varphi_0 v_a - D_x (-u_{a0} \varphi_0 + v_{a0}) \varphi$$

$$+ (1 - t_T)(T_1 + T_2) \} \quad (2-15)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{1}{M+m_y} \{ + D_y \varphi_0 u_a - D_y v_a + D_y (u_{a0} + v_{a0} \varphi_0) \varphi + (1 - t_T)(T_1 + T_2) \} \quad (2-16)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{dw}{dt} = \frac{1}{M+m_z} \{ -D_z w + (1 - t_r)(P_3 - P_4) \} \quad (2-17)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{dr}{dt} = \frac{1}{I_{ZZ} + J_{ZZ}} \{ -D_{Iz} a + \frac{\sqrt{2}}{2}(T_1 - T_2) \} \quad (2-18)$$

식 (2-15), (2-16)을 식 (2-13), (2-14)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{du_a}{dt} = & \varphi \left\{ \frac{-D_x(-u_{a0} \varphi_0 + v_{a0})}{M+m_x} + \frac{D_y \varphi_0 (u_{a0} + v_{a0} \varphi_0)}{M+m_y} \right\} \\ & + u_a \left( -\frac{D_x}{M+m_x} - \frac{D_y \varphi_0^2}{M+m_y} \right) \\ & + v_a \left( -\frac{D_x \varphi_0}{M+m_x} + \frac{D_y \varphi_0}{M+m_y} \right) \\ & + \frac{d\varphi}{dt} \left( \frac{-u_0 \varphi_0}{M+m_x} - \frac{v_0}{M+m_y} \right) \\ & + T_1 \left( \frac{1 - t_T}{M+m_x} \right) \\ & + T_2 \left( \frac{1 - t_T}{M+m_x} \right) \\ & + P_1 \left\{ \frac{-\varphi_0 (1 - t_r)}{M+m_y} \right\} \\ & + P_2 \left\{ \frac{\varphi_0 (1 - t_r)}{M+m_y} \right\} \end{aligned} \quad (2-19)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = \varphi \{ -D_x \varphi_0 (-u_{a0} \varphi_0 + v_{a0})$$

$$\begin{aligned}
 &+D_y(u_{a0} + v_{a0} \varphi_0) + u_a(-D_x \varphi_0 + D_y \varphi_0) \\
 &+v_a(-D_x \varphi_0^2 - D_y) + \frac{d\varphi}{dt}(u_0 - v_0 \varphi_0) \\
 &+T_1\{\varphi_0(1-t_T)\} + T_2\{\varphi_0(1-t_T)\} \\
 &+P_1(1-t_T) + P_2(-1+t_T) \quad (2-20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dw_a}{dt} = w_a \left( -\frac{D_z}{M+m_z} \right) \\
 +P_3(1-t_T) + P_4(-1+t_T) \quad (2-21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dr}{dt} = r \left( \frac{-D_{Iz}}{I_{zz} + J_{zz}} \right) + T_1 \left( \frac{v_2}{2} a \frac{1}{I_{zz} + J_{zz}} \right) \\
 + T_2 \left( \frac{-v_2}{2} a \frac{1}{I_{zz} + J_{zz}} \right) \quad (2-22)
 \end{aligned}$$

이상의 식들을 정리하면 다음과 같은 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{z}_0 \\ \dot{\varphi}_0 \\ \dot{u}_a \\ \dot{v}_a \\ \dot{w}_a \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & a_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{26} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{37} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{48} \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 & a_{58} \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & a_{66} & 0 & a_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{77} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varphi \\ u_a \\ v_a \\ w_a \\ r \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & 0 & 0 \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{75} & b_{76} \\ b_{81} & b_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (2-23)
 \end{aligned}$$

### 3. 서보 제어계의 설계

본 절에서는 AUV 궤적 제어 시스템에 적용 가능하도록 Parabolle 형태의 목표치에 추종하고 내부 안정한, 다변수 디지털 서보계의 구성방법을 보이도록 한다.<sup>5-7)</sup>

연속계의 상태방정식 (2-23)에 대하여 샘플링

시간 T로 이산화한 후, 외란  $\delta(k)$ 를 가했을 경우 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) + \delta(k) \\
 \cdot (x \in R^8, u \in R^7) \quad (3-1a)
 \end{aligned}$$

그리고 출력 방정식을 다음과 같다고 한다.

$$y(k) = Cx(k) \quad (y(k) \in R^4) \quad (3-1b)$$

외란  $\delta(k)$ 와 목표치  $y_{sr}(k)$ 는 다음과 같은 차분방정식의 성질을 가지는 Parabolle 형태로 생각한다.

$$\begin{aligned}
 P_d(q^{-1})(k) = (1-3q^{-1} \\
 + 3q^{-2} - q^{-3})(k) = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_r(q^{-1})y_{sr}(K) = (1-3q^{-1} + 3q^{-2} - q^{-3}) y_{sr}(K) \\
 \quad (3-3)
 \end{aligned}$$

여기서,  $q^{-1}$ 는  $q^{-1} \delta(k) = \delta(k-1)$ 를 의미하는 Shift Operator이다.

출력과 목표치에 대해 다음과 같은 오차방정식을 정의한다.

$$e_s(k) = y(k) - y_{sr}(k) \quad (3-4)$$

$$\begin{aligned}
 y(k) &= [ \bar{y}_x(k) \quad \bar{y}_y(k) \quad \bar{y}_z(k) \quad \bar{y}_\theta(k) ]^T \\
 y_{sr}(k) &= [ \bar{y}_{xr}(k) \quad \bar{y}_{yr}(k) \quad \bar{y}_{zr}(k) \quad \bar{y}_{\theta r}(k) ]^T \\
 \bar{y}_x(k) &= [ y_x(k-2) \quad y_x(k-1) \quad y_x(k) ]^T \\
 \bar{y}_y(k) &= [ y_y(k-2) \quad y_y(k-1) \quad y_y(k) ]^T \\
 \bar{y}_z(k) &= [ y_z(k-2) \quad y_z(k-1) \quad y_z(k) ]^T \\
 \bar{y}_\theta(k) &= [ y_\theta(k-2) \quad y_\theta(k-1) \quad y_\theta(k) ]^T \quad (3-5)
 \end{aligned}$$

오차함수식(3-4)가  $k \rightarrow \infty$ 일 때 0으로 되는 문제를 생각하고 목표치와 외란의 최소공배다

항식  $P^*(q^{-1}) = \ell, c, m(p_d(q-1), p, (q-1))$ 을 이용하여 오차상태방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$z_s(k+1) = N_e z_s(k) + M_e P^*(q^{-1}) \cdot x(k+1) \quad (3-6)$$

단,  $N_e = \text{diag} \{ N, N, N \}$

$$M_e = [ M_x, M_y, M_z, M_\theta ]^T$$

여기서,

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -3 & 3 \end{bmatrix}$$

$$M_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_\theta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

이산화된 상태방정식 (3-1)에 최소공배다항식  $P^*(q^{-1})$ 을 작용시킨 식과 오차상태방정식 (3-6)으로부터 다음과 같은 확대계가 구성될 수 있다.

$$x_e(k+1) = \Phi_e x_e(k) + \Gamma_e v(k) \quad (3-7)$$

단,  $x_e(k) = \begin{bmatrix} P^*(q^{-1})x(k) \\ z(k) \end{bmatrix}$ ,

$$v(k) = P^*(q^{-1})u(k)$$

$$\Phi_e = \begin{bmatrix} \varphi & 0 \\ M_e & N_e \end{bmatrix} \quad \Gamma_e = \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix}$$

최소공배다항식이 작용되어진 상태방정식에 서

보보상기 변수  $\xi(k) = P^*(q^{-1})^{-1} z_s(k)$ 를 적용하면 다음과 같은 서보보상기를 얻을 수 있다.

$$\xi(k+1) = N_e \xi(k) + I e(k) \quad (3-8)$$

단,

$$e(k) = \begin{bmatrix} y_{rx}(k) - y_x(k) \\ y_{ry}(k) - y_y(k) \\ y_{rz}(k) - y_z(k) \\ y_{r\theta}(k) - y_\theta(k) \end{bmatrix}$$

$$I = \text{diag} \{ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \}$$

이때, 제어입력은 다음과 같이 주어진다.

$$u(k) = F [ x^T \xi^T ]^T = [ F_1 F_2 ] [ x^T, \xi^T ]^T \quad (3.9)$$

이상의 서보계 설계법에 의해 구성된 페루프계를 블록 선도로 표시하면 Fig.2와 같다.

### 4. 수치 시뮬레이션

#### 4.1 모델의 특성

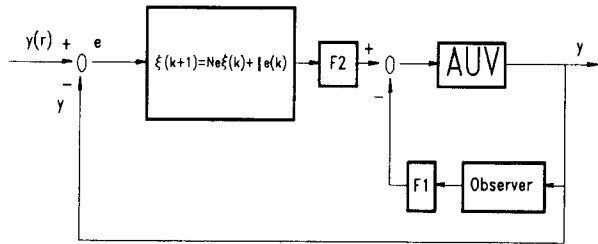


Fig.2 Block diagram of servo control system

수치 시뮬레이션에 적용한 모델의 그 주요 치수는 Table 1에, 평행점 근방의 값 및 허용량은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Specification of AUV model

Symbol	Description	Values
M	Mass of AUV	10 Kg
m <sub>x</sub>	Added mass of x-axis direction	5 Kg
m <sub>y</sub>	Added mass of y-axis direction	5 Kg
I <sub>zz</sub>	Inertia moment around z-axis direction of AUV	5 Kg-m
J <sub>zz</sub>	Added inertia moment around z-axis direction of AUV	2.5 Kg-m
D <sub>x</sub> , D <sub>y</sub> , D <sub>z</sub>	Damping coefficient of x,y and z-axis direction	2.5 Kg-m
D <sub>lz</sub>	Damping moment coefficient of x-axis direction	1.25 Kg-m <sup>2</sup> s
a	Radius of AUV	0.25 m
tr	Correction coefficient of trust power	0.1

Table 2 Values of equilibrium point

Symbol	Values
u <sub>0</sub> , u <sub>a0</sub>	0.1 m/sec
v <sub>0</sub> , v <sub>a0</sub>	0.1 m/sec
φ <sub>0</sub>	0.01 radian
r <sub>0</sub>	0.01 rad/sec

연속계 상태방정식의 A,B행렬은 Table 2와 Table 3의 평형점 근방조건과 수치모델의 사양을 식(2-30)에 대입함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0e+00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0e+00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0e+00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0e+00 \\ 0 & 0 & 0 & -1.6e-02 & -1.6e-01 & 0 & 0 & 1.0e-01 \\ 0 & 0 & 0 & 1.6e-02 & -1.6e-01 & 0 & 9.9e-02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.6e-01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.4e-01 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6.000e-02 & 6.000e-02 & -6.000e-04 & 6.000e-04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6.000e-04 & 6.000e-04 & 6.000e-02 & -6.000e-02 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6.000e-02 & -6.000e-02 & 0 & 0 \\ 2.357e-02 & -2.357e-02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

샘플링 시간 0.01sec로 이산화 하면 이산화된 상태 방정식의 φ와 Γ는 다음과 같다.

여기서 제어칙은 다음과 같은 2차 형식의 평가 함수를

$$\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -8.2e-079 & 9.9e-03 & 0 & 0 & -5.0e-06 \\ 0 & 1 & 0 & 8.3e-07 & 0 & 9.9e-03 & 0 & 4.9e-06 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 9.9e-03 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 9.9e-03 \\ 0 & 0 & 0 & -1.6e-04 & 9.9e-01 & 0 & 0 & -1.0e-03 \\ 0 & 0 & 0 & 1.6e-04 & 9.9e-01 & 0 & 0 & 9.8e-04 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9.9e-01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9.9e-01 \end{bmatrix}$$

최소로 하는 최적제어설계문제에 의해서 구해지 는 것으로 한다.

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} (x_e^T(k) Q x_e(k) + v^T(k) R v(k)) \quad (4-1)$$

$$v(k) = F X e(k) \quad (4-2)$$

$$F = \begin{bmatrix} 2.997937e-06 & 2.998730e-06 & -2.998333e-08 & 2.998333e-08 & 0 & 0 \\ 3.037192e-08 & 2.950475e-08 & 2.998333e-06 & -2.998333e-06 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.998334e-06 & -2.998334e-06 \\ 1.177191e-06 & -1.177191e-06 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5.998131e-04 & 5.998191e-04 & -5.995002e-06 & 5.995002e-06 & 0 & 0 \\ 6.115444e-06 & 5.978452e-06 & 5.995002e-04 & -5.995002e-04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.995002e-04 & -5.995002e-04 \\ 2.352076e-04 & -2.352076e-04 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

평가함수(4-1)의 하중행렬 Q와 R이

$$R = \text{diag} [ 1.0e-10, 1.0e-04, 1.0e+10, 1.0e-02, 1.0e-0 + 1.0e-0 ]$$

$$Q = \text{diag} [ 1.0e-10, 1.0e-04, 1.0e+10, 1.0e-02, 1.0e-0, 1.0e-10, 1.0e-04, 1.0e+10, 1.0e-02, 1.0e-0, 1.0e-10, 1.0e-04, 1.0e+10, 1.0e-02, 1.0e-0 ]$$

일 때, 제어칙의 F값은 다음과 같이 얻어진다.

$$F = [F1 F2]$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 1월 \sim 4월 \\ +8.964891e+04 & +6.440204e+02 & -1.593946e-07 & +4.738164e+03 \\ +1.967989e+03 & +1.962878e+01 & -4.314510e-09 & -5.069360e+03 \\ -2.181290e+02 & +1.663172e+04 & -3.453152e-09 & +3.982765e+01 \\ +2.181290e-15 & -1.663172e-13 & +3.453152e-26 & -3.982765e-16 \\ +1.603404e-15 & -7.521331e-18 & +3.920022e-04 & -4.118967e-15 \\ -1.603404e-07 & +7.521331e-10 & -3.920022e+04 & +4.118967e-07 \\ 5월 \sim 8월 \\ +1.351564e+03 & +1.581293e+01 & -1.340181e-09 & +3.198133e+02 \\ +1.737640e+02 & +1.735788e+00 & -4.147782e-11 & -4.423712e+02 \\ -7.985883e+00 & +6.966557e+02 & -4.152576e-11 & +2.565369e+00 \\ +7.985883e-17 & -6.966557e-15 & +4.152576e-28 & -2.565369e-17 \\ +1.109492e-16 & +4.406583e-19 & +1.023120e-05 & -2.824187e-16 \\ -1.109492e-08 & -4.406583e-11 & -1.023120e+03 & +2.824187e-08 \end{bmatrix}$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 1월 \sim 4월 \\ +2.563206e+04 & -5.632697e+04 & +3.124965e+04 & +1.187627e+02 \\ +1.286277e+02 & -2.625713e+02 & +1.340552e+02 & +1.280289e+00 \\ -3.189747e+01 & +6.692393e+01 & -3.519633e+01 & +2.153130e+03 \\ +3.189747e-16 & -6.692393e-16 & +3.519633e-16 & -2.153130e-14 \\ +1.120114e-16 & -2.284888e-16 & +1.163621e-16 & -1.585620e-18 \\ -1.120114e-08 & +2.284888e-08 & -1.163621e-08 & +1.585620e-10 \\ 5월 \sim 8월 \\ -2.524194e+02 & +1.347532e+02 & -5.752124e-08 & +1.287324e-07 \\ -2.613325e+00 & +1.334137e+00 & -1.474853e-09 & +3.33337e-09 \\ -4.487308e+03 & +2.342123e+03 & -9.748742e-10 & +2.123551e-09 \\ +4.487308e-14 & -2.342123e-14 & +9.748742e-27 & -2.123551e-26 \\ +2.528836e-18 & -1.116198e-18 & +7.650749e-05 & -1.629985e-04 \\ -2.528836e-10 & +1.116198e-10 & -7.650749e+03 & +1.629985e+04 \\ 9월 \sim 12월 \\ -7.309240e-08 & +9.960074e+02 & -2.194984e+03 & +1.222129e+03 \\ -1.880043e-09 & -3.334149e+02 & +6.807343e+02 & -3.476154e+03 \\ -1.162914e-09 & +6.236945e+00 & -1.304172e+01 & +6.829867e+00 \\ +1.162914e-26 & -6.236945e-17 & +1.304172e-16 & -6.829867e-17 \\ +8.718790e-05 & -2.906028e-16 & +5.936619e-16 & -3.035683e-16 \\ -8.718790e+03 & +2.906028e-08 & -5.936619e-08 & +3.035683e-08 \end{bmatrix}$$

4.2 시뮬레이션

Simulation condition 1.

잠수정이 그림과 같은 일정한 궤적을 추적하며 운행중에 있을 때 다음과 같은 외란이 순간적으로 0.2, 0.5, 0.7시간에 들어올 경우.

- x축 방향 : 잠수정을 30m이동시킬 수 있는 힘
- y축 방향 : 잠수정을 30m이동시킬 수 있는 힘
- z축 방향 : 잠수정을 30m이동시킬 수 있는 힘

simulation condition 2.

잠수정이 일정한 궤적을 추적하며 운행중에 있을 때 다음과 같은 외란이 0.2시간 ~ 0.4시간 사이에 불규칙하게 들어올 경우.

- x축 방향 : 잠수정을  $15 \times \text{random}(0.1)$ m이동시킬 수 있는 불규칙한 힘
- y축 방향 : 잠수정을  $15 \times \text{random}(0.1)$ m이동시킬 수 있는 불규칙한 힘
- z축 방향 : 잠수정을  $15 \times \text{random}(0.1)$ m이동시킬 수 있는 불규칙한 힘

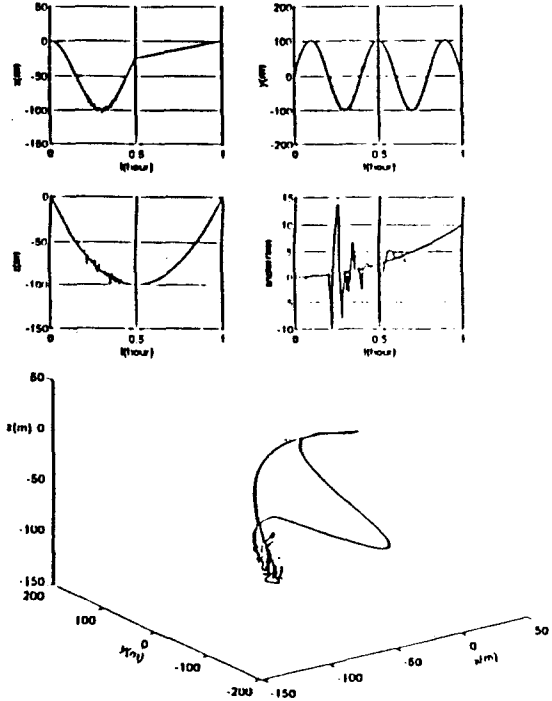


Fig. 4 Simulation results for condition 2

5. 결 론

AUV의 궤적제어를 위해, 비선형 동적모델을 평형점 근방에서 선형근사화한 후, 선형 제어이론인 다변수 디지털 서보계 설계법을 적용하여 궤적제어계를 구성하는 방법을 제안하였으며, 서보계 구성법이 불규칙한 자연환경에서 작업되어지는 AUV의 궤적제어 방법으로서 타당함을 수치 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

특히, 불규칙한 외란과 순간외력이 발생할 경우에도 수렴정도 및 수렴시간에 대하여 비교적 양호한 결과를 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

1. T. Ura, and S.Takagawa, " 海中 로봇 卜總覽 ", 成山堂書店, 1994,
2. 김상봉, 신민생, 하주식, " 수중작업로봇 ", 한국박용기관학회지 제 15권 제 1호 별책,

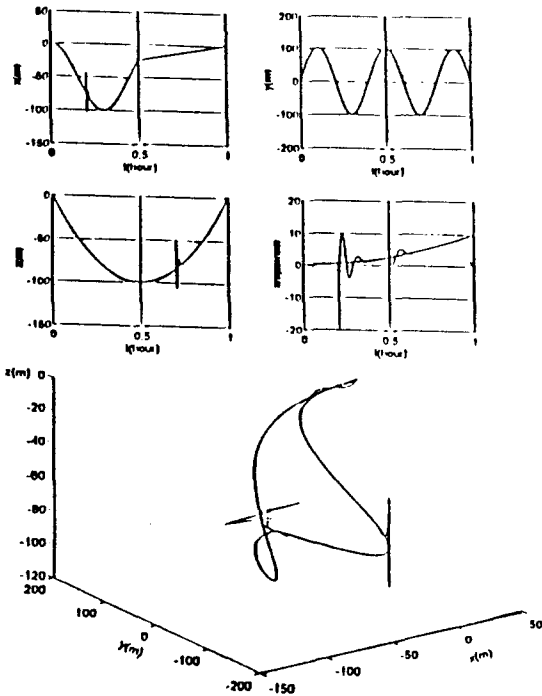


Fig. 3 Simulation results for condition 1

1992. 2
3. 赤坂則之, 岩崎 晃, 三和英一, “首振式スラストによる作業船のダイナミックポジショニング”, 三菱重工技報, VOL.18 NO.2, 1981.
  4. Naoki Kushida, Yukio Nishimura, Yoh Yonezawa, “A Design for Adaptive Time Optimal Autopilot and Its Sea Trial”, 計測自動制御學會論文集 Vol. 27, No. 4, 429-435, 1991.
  5. H.Y.Yoo, S.K.Kim and S.B.Kim, “An Experimental Study for Orbital of Pipelaying Platform”, ‘94 ISOPE’ Symposium, Osaka, 1994.
  6. S.K.Kim and S.B.Kim, “An Experimental Study Dynamic Positioning Control System for Floating Platform by Servo System Design Method,” 12th OES, Tokyo, 1994.
  7. 김상봉, 하주식공역, “메카니칼 시스템 제어”, 도서출판 한미, 1992.