

# 반자율 무인잠수정의 제어기 설계 및 시뮬레이션

전봉환\* · 이판목\* · 홍석원\*  
\*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

## Controller Design and Simulation of a Semi-Autonomous Underwater Vehicle

BONG-HWAN JEON\*, PAN-MOOK LEE\* AND SEOK-WON HONG\*  
\*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Semi-Autonomous Underwater Vehicle 반자율 무인잠수정, Motion Control 운동제어, Simulation 시뮬레이션, LQ(Linear Quadratic) 제어, Nonlinear dynamic model 비선형 운동 모델

**ABSTRACT:** This paper describes the design and simulation of a multivariable optimal control system for the combined speed, heading and depth control of a Semi-Autonomous Underwater Vehicle (SAUV) developed in Korea Ocean Research and Development Institute (KRODI). The SAUV is a test-bed for the evaluation of the navigation and manipulator technologies developed for a mine disposal vehicle (MDV) in military use and for a light working underwater vehicle in scientific use. The vehicle was designed to control its cruising speed, heading and depth with 4 horizontal thrusters installed at the rear of the hull. Therefore, the decoupled control methods are limited to apply to the SAUV because the thrust forces are highly coupled with the surging, yawing, and pitching motion of the vehicle. The multivariable Linear Quadratic (LQ) control method is chosen to control steering and diving in variable speed motion automatically. A series of simulation is carried out with fully nonlinear six degree of freedom dynamic model to validate the controller.

### 1. 서 론

한국해양연구원에서 민군겸용기술개발사업의 일환으로 개발 중인 DUSAUV(Dual Use Semi-Autonomous Underwater Vehicle)는 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)와 ROV(Remotely Operated Vehicle)의 중간적인 형태의 잠수정으로 AUV와 같이 자체 전원을 내장하면서 ROV와 같이 케이블로 지원 모선과 통신할 수 있는 시스템이다 (Hong, S.W. 2002). 따라서 전원을 케이블로 전송하는 ROV에 비해 훨씬 가느다란 통신용 케이블만을 사용함으로써 케이블에 의한 유체 저항의 영향을 줄일 수 있고 모선과의 통신에 제약을 받는 AUV에 비해 통신에 대한 제약이 적은 장점이 있다. 반면 전원사용에 제약이 있고 케이블 항력으로부터 완전히 자유로울 수 없는 단점을 가진다. DUSAUV는 MDV(Mine Disposal Vehicle)와 같이 군사목적과 민수목적으로 수중에서의 경작업을 수행하기 위한 기술 개발을 목적으로 설계되었다.

반자율 무인잠수정 DUSAUV는 4개의 종추진 모터를 이용하여 항주시 속도, 방위각 및 심도를 제어하도록 설계되었고, 선수부에 위치한 2개의 수직 추진기와 선미측 하단에 위치한 1개의 횡추진 모터를 이용하여 정지시나 저속시 자세를 제어하도록 하였다. DUSAUV는 항주시 자세제어를 위한 제어판이 없으므로 4개의 추진기의 조합으로 속도, 방위각 및 심도를 동시에 제어

하여야 하지만, 4개의 추진기가 속도, 선수동요(yaw) 및 종동요(pitch)에 동시에 연동되므로 연직면과 수평면으로 나누어 각각의 제어기를 설계하더라도 이들을 합성하여 추진기의 추력을 효율적으로 분배하기란 쉽지 않다.

따라서, 본 논문에서는 반자율 무인잠수정의 효율적인 운동제어기를 설계하고, 6자유도 비선형 모델을 이용하여 시뮬레이션 함으로써 그 타당성을 검증한다. 제어기는 광통신을 이용하는 반자율 무인잠수정의 장점을 최대한 이용하기 위해, 수동모드, 반자동모드, 자동모드로 나누어 설계하였다. 반자동 모드는 각각의 운동 모드를 분리하여 PID 제어기를 이용하여 설계하였고, 이를 조작자의 수동 명령과 합성하도록 하였다. 자동모드는 다변수 제어기로 LQ 제어기를 이용하여 설계하였다. 잠수정의 모델은 한국해양연구원의 장수조에서 수행한 수조시험을 통해 얻은 유체동역학 계수를 이용하여 구축한 비선형 모델을 선형화하여 사용하였다. 설계된 LQ 제어기의 성능을 검증하기 위하여 비선형 운동 방정식을 이용하여 Simulink로 구현된 통합시뮬레이션 환경에서 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 제시하였다.

### 2. DUSAUV의 비선형 모델

#### 2.1 SAUV의 비선형 운동방정식

잠수정의 6자유도 운동방정식은 모델링 방법에 따라 조금씩 차이가 있으나, 1967년 Gertler, Feldman 등(Gertler, M., and Hagen, G. R., 1967, Feldman J., 1979)에 의해 정리된 잠수함 시뮬레이션 운동방정식이 널리 사용된다. 이들 모델의 6자유도 운

제1저자 전봉환 연락처: 대전시 유성구 장동 171

042-868-7531 bhjeon@kriso.re.kr

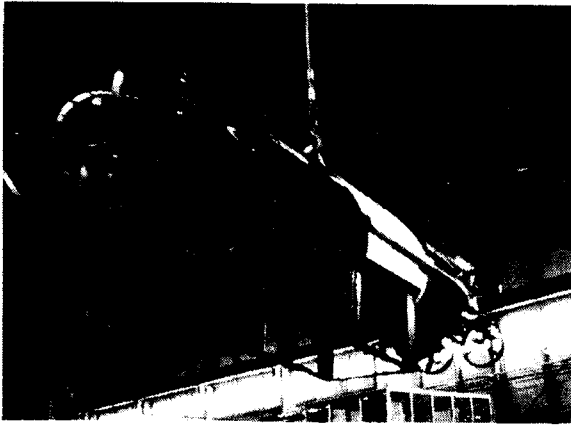


Fig. 1 Dual use semi-autonomous underwater vehicle

동방정식은 뉴턴의 제2법칙을 이용한 강체의 운동방정식에서 출발하여 얻어지고, 다음과 같은 기본 형태로 쓸 수 있다.

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{F}_{CC} + \mathbf{F}_{DL} + \mathbf{F}_{rest} + \mathbf{F}_{plan} + \mathbf{F}_{thrust} + \mathbf{F}_{ext} \quad (1)$$

여기서, 좌변 항의  $\mathbf{M}$ 은 부가질량을 포함한 질량행렬,  $\mathbf{v}$ 는 동체좌표계에서 본 잠수정의 속도이며, 우변항은 좌측부터 차례로, 전향력 및 원심력, 감쇠 및 양력, 복원력, 제어판의 영향력, 추진기에 의한 추력, 그리고 그 밖의 기타 외력을 나타낸다.

DUSAUV는 Fig. 1과 같은 형태의 외형을 가지며 운동제어를 위해 총 7개의 추진기를 가진다. 선수에 위치한 두 개의 수직추진기와 선미에 위치한 하나의 횡추진기는 DUSAUV가 정지 혹은 느린 속도로 운항할 경우에만 사용하며 본 연구에서 고려하는 자유항주 중에는 사용하지 않는 것으로 가정한다. 자유항주 시에는 4개의 선미 종추진기를 이용하여 전진속도, 선수동요 및 종동요를 제어한다. DUSAUV의 기본 사양은 Table 1과 같다.

$\mathbf{F}_{ext}$ 는 조류나 케이블에 의한 영향력을 무시하면 (1)식은 DUSAUV에 알맞은 식으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{F}_{CC} + \mathbf{F}_{DL} + \mathbf{F}_{rest} + \mathbf{F}_{thrust} \quad (2)$$

(2)식의 각 항을 이루는 식과 유체역학 계수들은 부록A와 B에 각각 나타내었으며, 그 계수들은 해양연구원의 장수조에서

Table 1 Principal specification of DUSAUV

Dimension		3.188(L)×0.745(W)×0.988(H)m
Weight in Air		about 668 Kg
Speed (Operating Time)		Max. 7 knots (0.5 hour) Cruising 3.5 knots (5 hours)
Operating Depth		400 m
Equipment	Thrusters	4 Horiz., 2 Vertical, 1 Lateral
	Navigation & Measurement	IMU, SSBL, Compass, DVL, Depth, Inclinator, Sonars (Scan, Identification & Altitude), CCD Camera & Lights
	Communication	Fiber Optic Communication

VPMM(Vertical Planar Motion Mechanism) 시험을 통하여 구

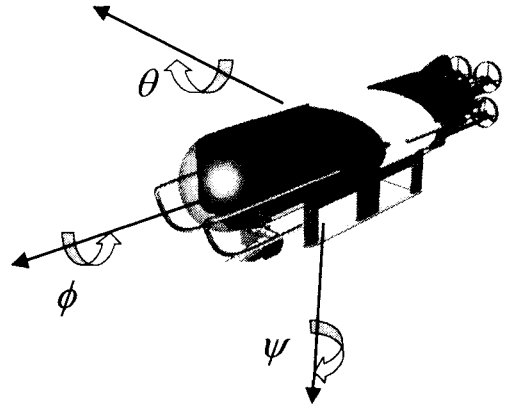


Fig. 2 Body coordinate system of DUSAUV

하여진 값들이다.

## 2.2 좌표의 설정 및 좌표변환

DUSAUV의 운동을 시뮬레이션하기 위하여 Fig 2와 같이 정의된 동체고정좌표계에서 표현된 (2)식의 운동방정식을 지구고정 좌표계로 좌표변환할 필요가 있다. 동체 고정좌표계에서의 병진운동 속도벡터  $\mathbf{v}_1$ 은 다음식에 의해 지구고정좌표계에서의 항진 경로로 표현된다(Fossen T. I., 1994).

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) \mathbf{v}_1 \Leftrightarrow \mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_1^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \quad (3)$$

여기서,  $\mathbf{v}_1 = [u, v, w]^T$ 는 동체좌표계에서의 병진운동속도벡터이고,  $\boldsymbol{\eta}_1 = [X, Y, Z]^T$ 와  $\boldsymbol{\eta}_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ 는 각각 지구고정좌표계에서의 위치 및 자세벡터이다.  $\dot{\boldsymbol{\eta}}_1$ 은 잠수정 위치의 시간 미분이고  $\mathbf{J}_1$ 은 속도 변환행렬이다. 각속도의 변환은 다음식으로 표현된다.

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_2 = \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \mathbf{v}_2 \Leftrightarrow \mathbf{v}_2 = \mathbf{J}_2^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \quad (4)$$

여기서,  $\mathbf{v}_2 = [p, q, r]^T$ 는 동체좌표계에서의 각속도벡터,  $\mathbf{J}_2$ 는 각속도 변환행렬이다.  $\mathbf{J}_1$ 과  $\mathbf{J}_2$ 는 부록A에 나타내었다.

## 3. 제어기설계

DUSAUV는 반자율형 무인잠수정으로 빠른 광통신 속도를 이용하여 조작자가 실시간으로 잠수정의 제어에 개입할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 이용하여 DUSAUV의 제어 모드를 자동모드와 반자동모드로 나누었으며, 각각의 모드에 따라 제어기가 설계되었다. 자동모드는 4개의 종추진기로 속도, 방위각 및 심도를 동시에 제어한다. 이때 각각의 추진기는 모두 속도, 선수동요 및 종동요 운동과 연동되므로 4 입력 3출력의 MIMO(Multi Input Multi Output) 시스템이 된다. 따라서, 잠수정의 운동을 연직면 운동과 수평면 운동으로 분리하여 각각에 대하여 제어기를 설계하여 단순하게 통합하는 방법으로는 제어

Table 2 Control mode of DUSAUV

제어모드	자동제어항목	수동제어항목	제어기
수동제어	-	속도, 방위각, 심도	-
속도자동	속도	방위각, 심도	PID
방위각자동	방위각제어	속도, 심도	PID
심도자동	심도	속도, 방위각	PID
속도방위각자동	속도, 방위각	심도	PID
방위각심도자동	방위각, 심도	속도	PID
속도심도자동	속도, 심도	방위각	PID
자동제어	속도, 방위각, 심도	-	PID
자동제어	속도, 방위각, 심도	-	LQ

기의 안정성을 확보하기가 어렵다. DUSAUV는 Table 1에 보인 것과 같이 다양한 계측장비로 모든 상태를 계측할 수 있으며, 실험에 의한 유체역학 계수들을 확보하고 있으므로 다변수제어 기로 LQ(Linear Quadratic)제어기 설계법을 이용하였다.

반자동 제어모드에서는 조작자가 조종기를 이용하여 추진기의 회전수 명령에 직접 개입하게 되고 필요에 따라 Table 2와 같이 여러 가지 조합의 제어방법이 이루어져야 하므로 PID 제어기를 이용하여 각각의 제어대상에 대하여 제어기를 설계하고 이들을 조작자의 수동제어 명령과 통합하여 제어입력을 연산하는 방법을 이용하였다.

### 3.1 모델의 선형화

DUSAUV의 제어기를 설계하기 위하여 2절의 6자유도 비선형운동 방정식을 선형 운동방정식으로 유도한다. 교차유동(cross flow)항을 무시하고, 추력 모델의 교차항을 무시하여 속도, 선속동요, 종동요에 관한 식을 정리하면,

$$(m - \frac{1}{2} \rho l^3 X'_{\dot{u}}) \dot{u} = a_x (u_{T1} + u_{T2} + u_{T3} + u_{T4}) \quad (5)$$

$$(I_y - \frac{1}{2} \rho l^3 M'_q) \dot{q} = \frac{1}{2} \rho l^4 u M_q q + a_M (u_{T1} + u_{T2} + u_{T3} + u_{T4}) \quad (6)$$

$$(I_z - \frac{1}{2} \rho l^3 N'_r) \dot{r} = \frac{1}{2} \rho l^4 u N_r r + a_N (u_{T1} + u_{T2} + u_{T3} + u_{T4}) \quad (7)$$

$$Z = -u \sin \theta \quad (8)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (9)$$

$$\dot{\phi} = r \quad (10)$$

여기서,  $u$ 는 전진속도이며,  $u_{Ti}$ 는 제어입력으로 4개의 종추진기의 추력을 나타내고, 잠수정의 설계속도와 이때의 프로펠러 회전수를 각각  $u_0$ 와  $n_0$ 라 하면, 프로펠러 회전수와는 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$u_{Ti} = \frac{u_0 n_i}{n_0 u} - 1, \quad n_i = \frac{n_0}{u_0} u (u_{Ti} + 1) \quad (11)$$

$x = [u \ q \ r \ Z \ \theta \ \phi]^T$ 로 하여 (5)~(10)식을 행렬로 정리하면,

$$M \dot{x} = A_1 x + B_1 u \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A x + B u \\ y &= C x \end{aligned} \quad (13)$$

$$A = M^{-1} A_1, \quad B = M^{-1} B_1, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} m - \frac{1}{2} \rho l^3 X'_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_y - \frac{1}{2} \rho l^3 M'_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_z - \frac{1}{2} \rho l^3 N'_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \rho l^4 u M_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \rho l^4 u N_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -u \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} a_x & a_x & a_x & a_x \\ a_M & a_M & a_M & a_M \\ a_N & a_N & a_N & a_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_{T1} \\ u_{T2} \\ u_{T3} \\ u_{T4} \end{bmatrix}$$

### 3.2 자동제어기 설계

LQ 설계법을 이용하여 DUSAUV의 자동제어기를 설계하기 위해 출력에러와 제어입력으로 다음과 같은 평가함수를 고려한다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T (\tilde{y}^T Q \tilde{y} + u^T R u) dt = \frac{1}{2} \int_0^T (\tilde{x}^T \tilde{Q} \tilde{x} + u^T R u) dt \quad (14)$$

여기서,  $\tilde{y} = y - y_d = C(x - x_d) = C\tilde{x}$ ,  $\tilde{Q} = C^T Q C$ 이고,  $Q$ 와  $\tilde{Q}$ 는 준정정(semi-positive definite)행렬이고,  $R$ 은 정정(positive definite)행렬이다. 그러면 (14)를 최소화하는 제어입력  $u$ 는 다음식으로 얻을 수 있다.

$$u = G_1 x + G_2 y_d \quad (15)$$

$$G_1 = -R^{-1} B^T P \quad (16)$$

$$G_2 = -R^{-1} B^T (A + B G_1)^{-T} C^T Q \quad (17)$$

여기서,  $P$ 는 다음의 리카티 방정식을 만족하는 해이다.

$$PA + A^T P - P B R^{-1} B^T P + \tilde{Q} = 0 \quad (18)$$

### 3.3 반자동 제어기 설계

반자동 제어기는 자동제어기에 조작자의 수동명령이 개입되는 모드로 각각의 제어대상에 대한 자동제어기가 설계되어야 하며 조작자의 수동명령과 합쳐져서 추진기 제어입력이 계산된다. 반자동 제어모드에서 속도, 방위각 및 심도 제어를 위하여 각각에 대하여 (19), (20), (21)식과 같은 PID 제어기를 설계하였다(진봉환 외, 2000).

$$n_i^s = K_p^s e_s(t) + K_i^s \int e_s(t) dt + K_d^s \frac{d}{dt} e_s(t) \quad (19)$$

여기서,  $e_s$ 는 속도에러,  $n_i^s$ 는 속도제어기의 출력,  $i=1, 2, 3, 4$

$$n_i^\psi = K_\beta^\psi e_\psi(t) + K_\alpha^\psi r(t), \quad i=1, 3, \quad (20)$$

$$n_i^\psi = -n_i^\psi, \quad i=2, 4$$

여기서,  $e_\psi$ 는 방위각 에러,  $n_i^\psi$ 는 방위각 제어기의 출력

$$n_i^d = K_\beta^d (Z(t) - Z_{com}) + K_\alpha^d \theta(t) + K_\alpha^d q(t), \quad i=3, 4 \quad (21)$$

$$n_i^\psi = -n_i^\psi, \quad i=1, 2$$

여기서,  $n_i^\psi$ 는 방위각 제어기의 출력이다.

이상과 같이 계산된 각 제어기의 출력은 Table 2의 반자동 제어 모드에 따라 조작자의 수동 지령과 더해져서 프로펠러 회전수 지령으로 계산된다. 예를 들어 방위각 심도 자동제어 모드일 경우, 조작자의 조작레버에 의한 속도 지령을  $(n_i^s)_{man}$ 이라 하면 프로펠러 회전수 지령은,

$$n_i = n_i^\psi + n_i^d + (n_i^s)_{man} \text{으로 된다.}$$

#### 4. 시뮬레이션

Fig. 3은 무인잠수정의 통합시뮬레이션 환경(전봉환 외, 1999, 2000)의 구성도를 나타낸다. 2절에서 얻어진 DUSAUV의 6자유도 비선형 모델을 Fig. 3 내의 잠수정 모델로 대체 함으로써 DUSAUV의 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 시뮬레이션 환경을 이용하여 3.2절에서 LQ 제어기로 설계된 다변수 제어시스템의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션환경은 Matlab Simulink로 구현되었고, Fig. 4에 구현된 모습을 나타내었다. 케이블과 조류에 의한 외력은 무시하였고, 추진기의 응답특성은 다음과 같은 1차 필터로 모델링하여 잠수정의 모델에 포함 시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{1}{T_T} (n_i^c - n_i) \quad (22)$$

여기서,  $n_i^c$ 는 프로펠러 회전명령값이며,  $T_T$ 은 프로펠러의 시정수이다. Fig. 5는 제어를 하지 않고 DUSAUV의 좌현 프로

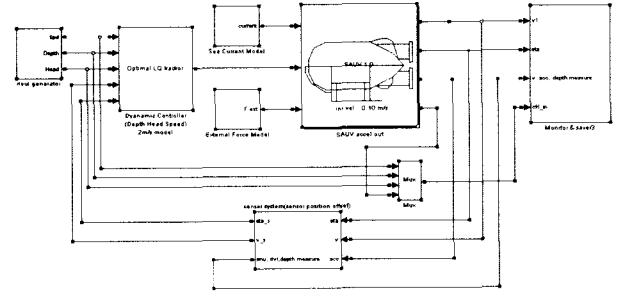
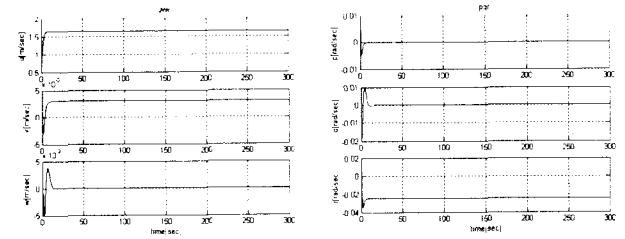


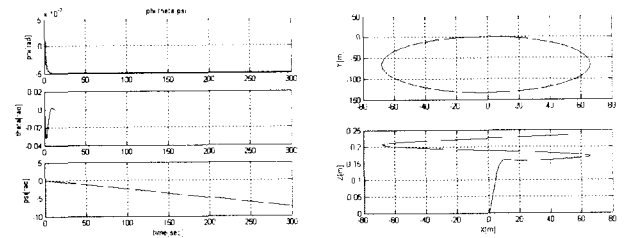
Fig. 4 Constructed simulation environment

펠러들의 rps를 0으로 우현 프로펠러들의 rps를 15로 하여, 초기 속도가 0.5 m/s인 DUSAUV의 응답특성을 시뮬레이션한 결과이다. 초기 가속시의 불안정한 상태에서 과도 상태가 발생하고 전진방향의 속도는 1.64 m/s에서 정상상태에 도달한다(Fig. 5 (a)). 회전 반경은 약 65m 정도이며, +Z 방향 즉, 수직 아래로 변위가 발생한다. 이는 음인  $Z_{uv}$ 와 양인  $M_{uv}$ 의 영향은 -Z 방향으로 힘을 발생시키지만,  $M_w$ 와  $M_{uw}$ 가 양이므로 -θ방향으로 중동요 모멘트가 발생하며 속도가 빠를수록 그 영향은 크고 전체적으로 +Z 방향으로 변위가 발생하는 것으로 생각된다. 제어기 없는 선회시험에서 보는 바와 같이 커플링 항에 의해 잠수정의 운동은 서로 연동됨을 알 수 있다.



(a) speed

(b) angular rate



(c) attitude

(d) trajectory

Fig. 5 Turning simulation results

port thruster : 0 rps, stbd thruster : 15rps

Fig. 6은 3.2절에서 설계된 LQ 제어기를 이용하여 DUSAUV의 제어 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 초기속도는 0.1 m/s이며 속도 지령은 1.5m/s 심도지령은 5 m 그리고, 방위각 지령은

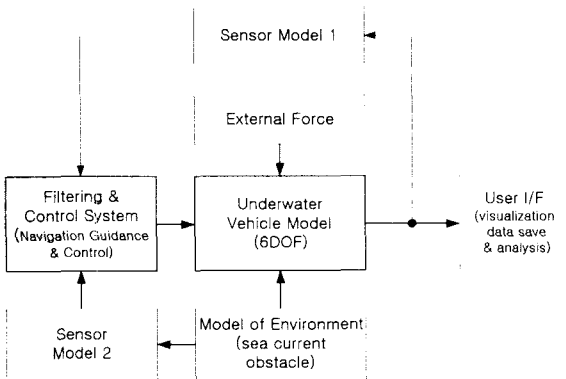


Fig. 3 통합시뮬레이션환경의 구조

90도씩 변화시켜 'ㄷ'자 형태의 궤적을 그리도록 하였다. 제어기에 사용된 하중행렬은 각각 다음과 같이 선정하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

1.5 m/s의 지령속도에 도달한 후 심도변경 및 방위각 변경시마다 속도추종 특성에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는 4개의 추진기가 모두 출력과 연동되기 때문인데, 지령 속도가 빠를수록 추진기 회전속도의 포화가 일어나기 쉬워 더 현저하게 나타난다. Fig. 6의 (e)는 추진기의 제어입력을 나타내는데, 제어 초기 속도 추종을 위해 4대의 추진기의 출력이 같이 증가하고, 30초 지점에서 심도변경 명령에 의해 상위 2개의 추진기는 +추력, 하위 2개의 추진기는 -추력을 내고 있다. 이후 방위각 변경지령에 따라 좌우 추진기가 반대 추력을 내지만 전진방향으로 추진기 포화가 먼저 일어남을 볼 수 있다. (d)의 출력 그림에서 전진 속도는 방위각을 90도씩 변경할 때마다 약 1m/s로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 (23)식에서 보는 바와 같이 방위각 제어 정밀도에 상대적으로 비중을 높였기 때문이다. 설계된 LQ 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 속도, 선수가 및 심도 제어는 서로 연동되어 영향을 받아 벗어나지만 지령치를 다시 추종하는 것을 확인할 수 있다.

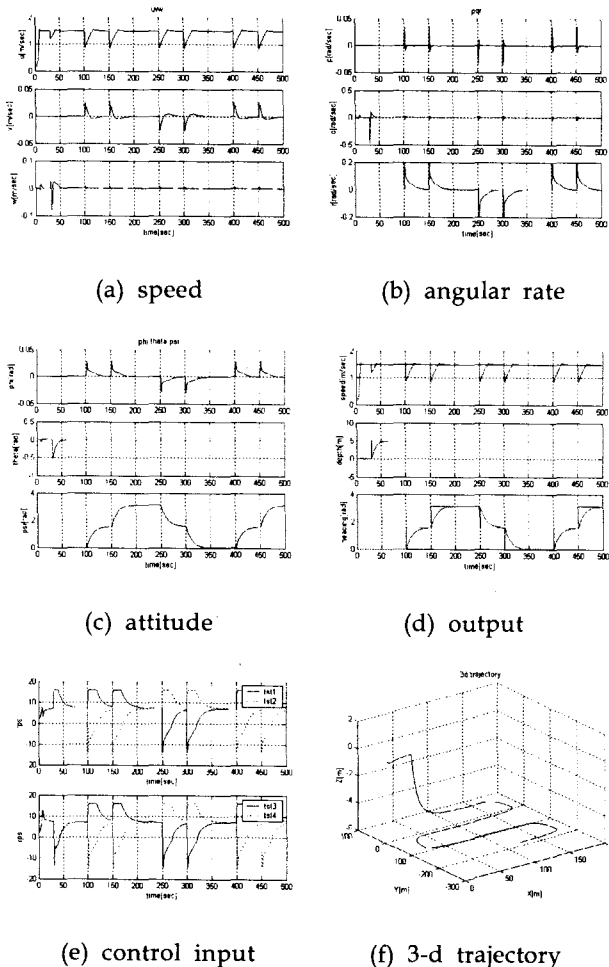


Fig. 6 LQ control simulation results

## 5. 결 론

반자율 무인잠수정은 광통신 케이블을 이용하여 빠른 데이터 통신이 가능한 장점을 이용하여 조작자가 실시간으로 제어가 가능하지만, 비선형성이 강한 특성 때문에 수동으로 제어하기란 쉽지 않다. 본 논문에서는 4개의 중추진기를 이용하여 속도, 방위각 및 심도를 제어하기 위한 반자율 무인잠수정의 제어기를 설계 제시하였다. 제어기는 수동, 반자동 및 자동제어 모드로 나누어지고, 반자동 모드에서는 속도, 방위각 및 심도제어 각각에 대해 제어기를 설계하고 조작자의 명령과 합성되도록 설계하였다. 자동 모드에서는 효율적인 추진력 분배를 위해 다변수 제어기로 LQ제어기 설계법을 이용하여 설계하였다. 제어모델은 수조시험을 통해 얻은 운동방정식을 선형화하여 사용하였다. 설계된 LQ 제어기의 성능을 확인하기 위하여 Simulink로 구현된 통합시뮬레이션 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 제어 없이 선회시험한 결과 Z방향으로 변위가 발생하던 DUSAUV가 안정적으로 제어되는 것을 확인하였으며 특히, 심도 및 방위각의 목표값 변경에 대하여 추종하면서, 속도목표 값을 동시에 추종함을 확인할 수 있었다. 본 연구는 향후 DUSAUV의 실험을 통하여 그 결과를 다시 한번 검증할 계획이다.

## 후 기

본 연구결과는 과기부의 민군겸용기술개발과제의 일환으로 수행된 "무인잠수정의 운항제어 및 매니퓰레이터 기술개발"과제 연구결과의 일부입니다.

## 참 고 문 헌

- 전봉환, 이판목, 이재동 (1999), "무인잠수정의 통합시뮬레이션 환경 구축을 위한 기초연구", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp125~130
- 전봉환, 이판목, 임용곤, 홍석원 (2000), "무인잠수정의 통합시뮬레이션 환경의 개발", 제3회 해상무기체계 세미나 논문집, pp81~87
- Anthony J. Healey (1993), David Lienard, "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles", IEEE J. of Oceanic Eng. Vol. 18, No.3
- Feldman J. (1979), "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion", DTNSRDC /SPD-0393-09
- Fossen T. I. (1994), "Underwater robotic vehicle dynamics", Workshop on Future Research Directions in Underwater Robotics, Hawaii
- Gertler, M., and Hagen, G. R. (1967), "Standard equations of motion for submarine simulations", "NSRDC Report No.

Hong S.W, et al. (2002), "Design and Implementation of a Dual Use Purpose Semi-Autonomous Underwater Vehicle", UDT2002, Korea

#### 부록A 운동방정식 및 좌표변환의 구성행렬

계수들은 모두 무차원화된 값들이며, 구하기 어려운 항들은 무시하였음

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{ii} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{ii} & 0 \\ 0 & 0 & m - Z_{ii} \\ 0 & -mz_G - K_v & my_G \\ mz_G & 0 & -mx_G - M_{ix} \\ -my_G & -mx_G - Y_r & 0 \\ 0 & mz_G & -my_G \\ -mz_G - Y_p & 0 & mx_G Y_r \\ my_G & -mx_G - Z_q & 0 \\ I_x - K_p & -I_{xy} & -I_{xz} + K_r \\ -I_{xy} & I_y - M_q & -I_{yz} \\ -I_{xz} - K_r & I_{yz} & I_z - N_r \end{bmatrix}$$

$$F_{CC} = [X_{CC} \ Y_{CC} \ Z_{CC} \ K_{CC} \ M_{CC} \ N_{CC}]^T$$

$$X_{CC} = mvr - mqw - my_G pq - mz_G pr + mx_G q^2 + mx_G r^2$$

$$Y_{CC} = -mur + mwp - mx_G qp - mz_G qr + my_G p^2 + my_G r^2$$

$$Z_{CC} = muq - mvp + mx_G rp - my_G rq + mz_G p^2 + mz_G q^2$$

$$K_{CC} = my_G uq + mz_G ur - my_G vp - mz_G wp - (I_z - I_y)qr + I_{xx} q^2 + K_a qr - I_{xx} r^2 + I_{xz} pq - I_{xy} pr$$

$$M_{CC} = mz_G vr + mx_G vp - mx_G uq - mz_G wq - (I_x - I_z)rp - I_{xz} p^2 - I_{yz} pq + I_{xy} qr + I_{xz} r^2$$

$$N_{CC} = -mx_G ur - my_G vr + my_G wq + mx_G wp + I_{xy} p^2 - I_{xy} q^2 + I_{yz} rp - I_{xz} rq - (I_y - I_x) pq$$

$$F_{DL} = [X_{DL} \ Y_{DL} \ Z_{DL} \ K_{DL} \ M_{DL} \ N_{DL}]^T$$

$$X_{DL} = X_{vv} v^2 + X_{ww} w^2 + X_{qq} q^2 + X_{rr} r^2$$

$$Y_{DL} = Y_v v + Y_{v|v} |v| + Y_r r + Y_{r|r} |r|$$

$$Z_{DL} = Z_{vv} v^2 + Z_{q|q} |q| + Z_w w + Z_q q$$

$$K_{DL} = K_v v + K_r r + K_{r|r} |r|$$

$$M_{DL} = M_{vv} v^2 + M_w w + M_q q + M_{v|v} |v| + M_{q|q} |q|$$

$$N_{DL} = N_v v + N_{r|r} |r| + N_r r + N_{v|v} |v|$$

$$F_{rest} = \begin{bmatrix} -(W-B)s\theta \\ (W-B)c\theta s\phi \\ (W-B)c\theta c\phi \\ (y_G W - y_B B)c\theta c\phi - (z_G W - z_B B)c\theta s\phi \\ -(x_G W - x_B B)c\theta c\phi - (z_G W - z_B B)s\theta \\ (x_G W - x_B B)c\theta s\phi + (y_G W - y_B B)s\theta \end{bmatrix}$$

$$F_{thrust} = [X_{thrust} \ Y_{thrust} \ Z_{thrust} \ K_{thrust} \ M_{thrust} \ N_{thrust}]^T$$

$$X_{thrust} = X_{T1} + X_{T2} + X_{T3} + X_{T4}$$

$$Y_{thrust} = Z_{thrust} = K_{thrust} = 0$$

$$M_{thrust} = -M_{T1} - M_{T2} + M_{T3} + M_{T4}$$

$$N_{thrust} = N_{T1} - N_{T2} + N_{T3} - N_{T4}$$

$$X_{Ti} = a_X + b_X(\eta_i - 1) + c_X(\eta_i - 1)^2 + d_X(\eta_i - 1)^4 + e_X(\eta_i - 1)^4$$

$$M_{Ti} = a_M + b_M(\eta_i - 1) + c_M(\eta_i - 1)^2 + d_M(\eta_i - 1)^4 + e_M(\eta_i - 1)^4$$

$$N_{Ti} = a_N + b_N(\eta_i - 1) + c_N(\eta_i - 1)^2 + d_N(\eta_i - 1)^4 + e_N(\eta_i - 1)^4$$

여기서,  $i = 1, 2, 3, 4$ ,

$$\eta_i = \frac{n_i U_0}{n_0 U_0}, \quad n_0, U_0 \text{는 각각 프로펠러 설계 속도 및 전진속도}$$

#### 좌표변환행렬

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix}$$

s, c, t는 각각 sin, cos, tan

#### 부록B DUSAUV의 유체역학 계수

Table B-1 Maneuvering Coefficients of DUSAUV  
(Nondimensionalized with Lpp)

Coeff.	Coefficients about Center of Gravity	Coefficient	Coefficients about Center of Gravity
$m$	0.04835599	$Z_q$	-0.02568048
$I_y$	0.00296337	$Z_{\dot{q}\dot{q}}$	-0.072053-
$X_{uw}$	-0.00454427	$M_{\dot{u}}$	-0.00632000
$X_{qq}$	0.04466548	$M_{\dot{u}\dot{u}}$	0.00880454
$Z_{\dot{u}}$	-0.05582685	$M_q$	0.00346087
$Z_w$	-0.08999440	$M_{\dot{q}}$	-0.00308712
$Z_{\dot{u}\dot{u}}$	-0.08490253	$M_q$	-0.01597730
$Z_q$	-0.00477980	$M_{\dot{q}\dot{q}}$	-0.050803
$I_z$	0.00296337	$K_v$	-0.00328219
$X_{vv}$	-0.00285640	$K_r$	0.00037772
$X_{rr}$	0.04837608	$K_r$	0.00045582
$Y_v$	-0.05257961	$K_{r r}$	0.00234668
$Y_v$	-0.14264210	$M_{vv}$	0.01153473
$Y_{v v}$	0.03185948	$N_v$	0.00523318
$Y_r$	0.00750169	$N_v$	-0.01129999
$Y_r$	0.04083242	$N_{v v}$	0.06226890
$Y_{r r}$	0.035929	$N_r$	-0.00351482
$Z_{vv}$	-0.03450369	$N_r$	-0.02304781
$K_v$	0.00154146	$N_{r r}$	-0.034163

#### 추력계수

$$a_X = 0.1802, \quad b_X = 0.0012, \quad c_X = 0.0002405, \quad d_X = 0.000058$$

$$a_M = -0.00035, \quad b_M = -0.00027, \quad c_M = -0.000103, \quad d_M = 0.00041$$

$$a_N = 0.000236, \quad b_N = 0.000306, \quad c_N = 0.000084, \quad d_N = -0.000047$$