

## 수중운동체의 구동장치부 제어특성에 관한 연구

이정규\* 백운보\* 김중완\*\* 이만형\*\*\*

부산대학교 대학원\*

동아대학교 공과대학 기계공학과\*\*

부산대학교 공과대학 정밀기계공학과\*\*\*

## A Study of the Actuator Control Characteristics of Underwater Vehicle

Jeong Kyu Lee\* Woon Bo Baek\* Joong Wan Kim\*\* Man Hyung Lee\*\*\*

Graduate School Pusan National Univ.\*

Dept. of Mech. Eng. Dong-A Univ.\*\*

Dept. of Mech. & Prec. Eng. Pusan National University\*\*\*

### ABSTRACT

The purpose of this paper is the design of a controller of electric actuator for high speed underwater vehicle which is robust against hydro load torque.

For this purpose, we design the controller of PD & VSC control schemes.

Under proper assumption of the hydro load torque, the tracking performances of these schemes are analyzed through the computer simulation, and the results are presented.

시스템 파라미터 변동 및 모델링 오차 등의 불확실성 때문에 강인한 제어기 설계는 어려운 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 이와같은 상황에서 요구성능을 만족할 수 있는 강인한 제어기 설계를 위한 연구의 일환으로 다음의 제어기를 구성하였다.

먼저 구조가 간단하고 구현이 용이하여 현장에서 널리 사용되고 있는 비례-적분-미분 제어기를 구성하였으며, 다음에 파라미터 변동과 외란에 대해 강인한 것으로 알려져 있는 가변구조 제어기를 설계하여 시뮬레이션을 통해 구동장치부 제어특성을 비교 분석하였다.

### 1. 서 론

수중운동체의 성능을 향상시키기 위해서는 음향 탐지부, 유도제어부 및 구동장치부 등의 내부오차 특성과 시스템 외부환경으로 인한 교란오차 영향을 분석하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

특히 구동장치부는 수중운동체가 수중에서 고속으로 기동함에 따라 타에 미치는 비정상 유동특성으로 인하여 큰 비중의 외란오차 문제점을 내포하고 있다. 본 연구에서는 PWM 증폭기, 영구자석 직류모터, 감속기구 및 타로 구성된 구동장치부의 모델링 및 내부/외부 교란 특성등을 분석하고, 이러한 외란 토오르크에 대해서 강인한 제어기를 구성하는데 목적이 있다.

그러나 실제 시스템 상황에서 본 연구의 대상 플랜트인 구동장치부는 외란변화가 비교적 심하고 또한

### 2. 모델링

#### 2.1 시스템 모델링

수중운동체 구동장치부는 PWM증폭기, 영구자석 직류모터, 감속기구 및 타로 이루어져 있으며 그 구성도는 그림 2.1 과 같다.

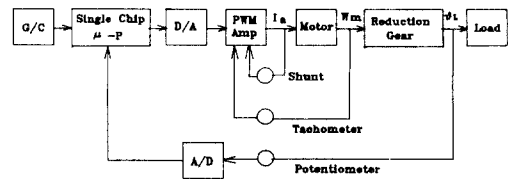


그림 2.1 피제어 시스템의 구성도.

이 시스템의 전달함수 구성도는 그림 2.2 와 같으며

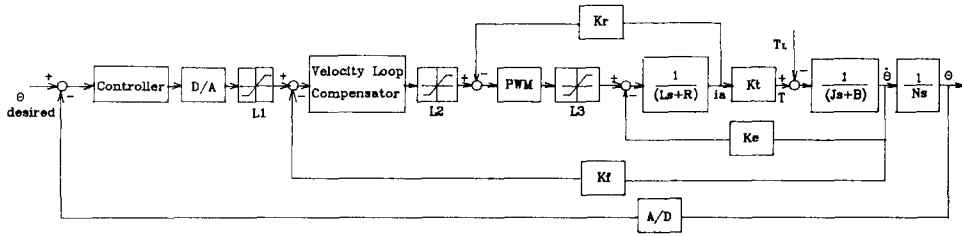


그림 2.2 시스템의 전달함수 구성도.

전달함수의 구성도를 이용하여 피제어 시스템의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_p(s) = \frac{D}{As^3 + Bs^2 + Cs} \quad (1)$$

여기서

$$A = J \cdot L_a \cdot N$$

$$B = B \cdot L_a \cdot N + J \cdot N \cdot R + J \cdot N \cdot L_3 \cdot K_r \cdot PWM$$

$$C = B \cdot N \cdot R + B \cdot N \cdot L_3 \cdot K_r \cdot PWM + K_t \cdot K_e \cdot N$$

$$D = K_t \cdot L_3 \cdot PWM$$

식 (1)을 단순화시키면 즉,  $L_a$ 값 무시하면

$$G_p(s) = \frac{K}{s(s+a)} \quad (2)$$

여기서

$$a = \frac{B \cdot N \cdot R + B \cdot N \cdot K_r \cdot PWM + K_t \cdot K_e \cdot N}{J \cdot N \cdot R + J \cdot N \cdot K_r \cdot PWM} \quad (3)$$

$$K = \frac{K_t \cdot PWM}{J \cdot N \cdot R + J \cdot N \cdot K_r \cdot PWM} \quad (4)$$

## 2.2 모터선정

수중운동체 구동장치부 시스템의 부하특성을 보면 부하관성모멘트는 매우 적으나 상대적으로 부하토크 외란은 매우 크다. 따라서 적용될 모터는 경량에 비해 고출력이고 고정밀 특성이 요구된다. 본 시스템에서 선정된 모터는 영구자석 직류모터이며 모터 및 부하관련 데이터는 표 1 과 같다.

표 1. 모터 및 부하관련 데이터.

$K_r$ (Ohm)	0.001	Shunt Resistor
$K_t$ (Nm/Amp)	0.02154	Motor Torque const.
$K_f$ (V/rad/sec)	0.015	Tachometer
$K_e$ (V/rad/sec)	0.02154	Motor Emf Back
$L_a$ (H)		Motor Inductance
$R_a$ (Ohm)	1.8553	Motor Resistance
$J$ (Kg $m^2$ )	0.00002	Total Inertia
$B$ (N/rad/sec)	0.0001	Viscous Friction
$F$ (N)	0.01	Coulomb Friction
$N$	450.0	Gear Ratio
PWM	2.0	PWM Amplifier

## 2.3 표준외란 설정

외란은 복잡한 유동현상으로 인하여 이론적으로 해석이 어려우므로 모형에 의한 실험적 방법에 의하여 모델링을 하나 본 연구에서는 단순화하여 외란토크를 각위치에만 비례하여 발생한다고 가정했으며 설정된 모델은 그림 2.3 과 같다.

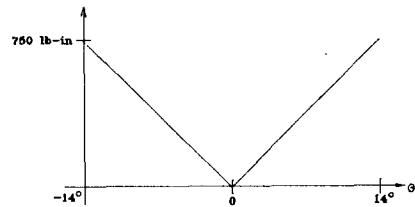


그림 2.3 타각에 따른 외란 토크 모델.

## 3. 제어기 구성

### 3.1 PID 제어

단순화된 플랜트 모델식은 다음과 같이 되며

$$G_p(s) = \frac{K}{s(s+a)} \quad (5)$$

원하는 출력  $y(t)$ 가 기준입력  $r(t)$ 를 추적하도록 할려면 식(5)로부터

$$\ddot{y}(t) = -a \dot{y}(t) + K u(t) \quad (6)$$

가 되고, 오차함수를  $e(t)$ 라 하고 상태변수들  $(x_1(t), x_2(t), x_3(t))^T = (e(t), \dot{e}(t), \ddot{e}(t))$ 로 정의하면 상태방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -K \end{bmatrix} V(t) \quad (7)$$

위식에서  $a \neq 0$ ,  $K \neq 0$  이고, 가제어행렬의 Rank가 3이므로 목적함수  $J$ 를 최소화하는 제어입력  $V(t)$ 가 존재한다.

$$J = \int_0^t (X^T Q X + V^T R V) dt \quad (8)$$

단,  $Q = \text{diag}(q_1 \ q_2 \ q_3) \geq 0$

$$R_1 = r_0 > 0$$

$$V(t) = -(K_1 \ K_2 \ K_3) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

모터 제어입력  $U(t)$ 는  $V(t)$ 의 적분이므로

$$\begin{aligned} U(t) &= \int_0^t V(t) dt \quad (10) \\ &= -K_1 \int_0^t e(t) dt - K_2 e(t) - K_3 \dot{e}(t) \\ &= K_I \int_0^t e(t) dt + K_P e(t) + K_D \dot{e}(t) \end{aligned}$$

와 같이 된다.

### 3.2 VSC 제어

가변구조 제어계(variable structure controller)는 매개변수 변환형의 피드백 제어계로 그 특징은 상태공간내에 설정된 슬라이딩 면의 양측에서 제어구조를 변환하는 것이다. 가변구조 제어계는 이 변환에 의해 슬라이딩 모드(sliding mode)를 발생시킨다.

다음과 같은 상태방정식을 고려하면

$$\dot{X} = A X + B U \quad (11)$$

가변구조 제어계에서 스위칭 면과 제어칙은 다음식으로 정의된다.

$$\sigma(X) = \sum_{i=1}^n C_i X_i = C X = 0 \quad (12)$$

$$u = (-\sum_{i=1}^n \phi_i |X_i|) \text{sgn}(\sigma(X)) \quad (13)$$

여기서

$$\text{sgn}(\sigma(X)) = \begin{cases} +1 & \text{if } \sigma(X) > 0 \\ -1 & \text{if } \sigma(X) < 0 \end{cases} \quad (14)$$

만약 포화함수와 수정된 포화함수를 도입하면 다음과 같다.

$$\text{sat}(\sigma(X)) = \begin{cases} \text{sgn}(\sigma(X)) & \text{if } |\sigma(X)| > 1 \\ \sigma(X) & \text{if } |\sigma(X)| < 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{MOD}(z) = \begin{cases} \text{sgn}(z) & \text{if } |z| > 1 \\ z & \text{if } |z| < 1 \end{cases} \quad (16)$$

여기서

$$z = \sigma(X) / (p N(X)) \quad (17)$$

이때  $p$ 는 양의 가중치이고  $N(X)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$N(X) = \sum_{i=1}^n |X_i| \quad (18)$$

스위칭 면에서 슬라이딩운동이 일어날 필요충분조건은 다음과 같다.

$$\sigma(X) \dot{\sigma}(X) \leq 0 \quad (19)$$

식(19)으로부터 제어칙의 계수  $\psi_i$ 의 범위를 구하면 다음과 같다.

$$\psi_i \geq \max[a_i] / \min[b] \quad (20)$$

여기서

$$a_i = \sum_{j=1}^n C_j a_{ij}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad (21)$$

$$b = \sum_{j=1}^n C_j b_j > 0 \quad (22)$$

상태변수가 스위칭 면에서 이상적으로 슬라이딩운동을 한다면 다음 식이 성립한다.

$$\sigma(X) = 0 \quad (23)$$

$$\dot{\sigma}(X) = \frac{\partial \sigma}{\partial X} \dot{X} = C A X + C B u = 0 \quad (24)$$

식(24)에서 등가입력  $u_{eq}$ 는 다음과 같다.

$$u_{eq} = -(CB)^{-1} C A X, \quad \text{단 } |CB| \neq 0 \quad (25)$$

식(25)을 식(11)에 대입하면 다음과 같은 등가 상태방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{X} = (I - B(CB)^{-1} C) A X = A_{eq} X \quad (26)$$

위와같은 제어칙에 의해 제어되는 원래 시스템이 안정하기 위해서는 등가시스템행렬  $A_{eq}$ 는 고유치의 모든 실수부가 음의 값을 갖는 안정한 Hurwitz 행렬이 되어야 한다. 이 조건으로부터 벡터  $C$ 의 요소  $c_i$ 가 선택된다.

### 3.3 제어기 설계

그림 2.2에서 속도루프는 급속한 응답을 요구하는 특성을 가지며, 위치루프는 유도부로 부터의 신호가 디지털이므로 피드백 신호는 A/D 변환기를 통해 디지털로 바꾸어 유도 명령신호와 비교되고, 다시 D/A 변환기를 거쳐 아날로그 속도루프에 인가되도록 설계하였다.

1) 속도루프에는 PI 제어기를 설계하였으며 선정된

계인은 다음과 같다.

$$KP2 = 1800.2, \quad KI2 = 0.0086$$

2) 속도루프 제어기를 설계한 후 위치루프에 PD제어기와 VSC 제어기를 설계하였다.

① PD 제어기

선정된 계인은 다음과 같다.

$$KPI = 176, \quad KDI = 0.005$$

② VSC 제어기

스위칭 평면

$$\sigma(X) = C e + \dot{e} \\ = 65 (X_1 - \theta_1) + X_2/N$$

스위칭 논리

$$\text{SAT}(z) = \begin{cases} \text{sgn}(z) & \text{if } |z| > 1 \\ z & \text{if } |z| < 1 \end{cases}$$

여기서  $Z = \sigma(X) / (|X_1 - \theta_1| + |X_2/N|)$

제어입력

$$u = -[\psi_1 |X_1 - \theta_1| + \psi_2 |X_2/N|] \text{SAT}$$

여기서  $\psi_1 = 352.97, \quad \psi_2 = 0.63$

4. 시뮬레이션 및 고찰

이와같이 설계된 제어기의 성능분석을 위해 그림 2.2 와 같이 비선형 성분이 포함된 모델을 사용하여, 기준입력 추종 성능 및 외란제거 성능 등에 대한 시간역 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

① 기준입력 추종 성능

기준입력으로 계단입력 (14 deg)을 인가했을때 그림 1 에서와 같이 PD 제어기와 VSC 제어기는 거의 유사한 성능을 보여 주었으며, VSC제어기에서는 약간의 오버슈트를 가짐을 볼 수 있다.

그리고 그림 (1-c)는 제어입력의 포화특성을 보여주며 그림 (1-d)는 모터에 인가되는 전류가 VSC 제어기에서 PD 제어기 보다 심하게 채터링(chattering)함을 보여 준다.

② 외란제거 성능

외란에 대한 영향을 알아보기 위하여 선정된 표준 외란을 인가했을때의 결과는 그림 2와 같다.

선정된 외란에 대해 PD 제어기와 VSC 제어기 모두 비교적 양호한 성능을 보여 주었으며 그림 (2-a)에서와 같이 타의 각위치 응답은 유사한 결과를 나타내었으나, 그림 (2-b)에서 타의 각

속도응답은 정상상태 도달직전에 VSC제어기에서 PD 제어기 보다 급격하게 감소하며 요동함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 수중운동체의 소형 고정밀 전기식 구동장치의 성능개선을 위해 PWM증폭기, 영구자석 직류 모터, 감속기구 및 타로 이루어져 있는 피제어 시스템에 대해 PD 및 VSC 제어기를 설계하였다.

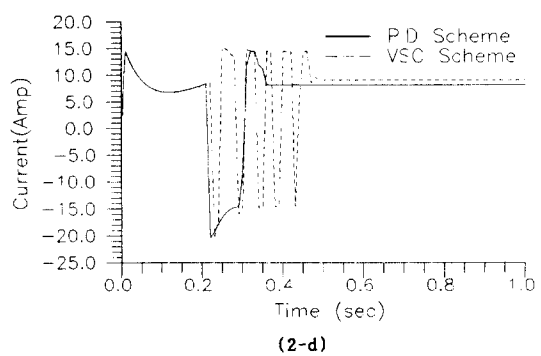
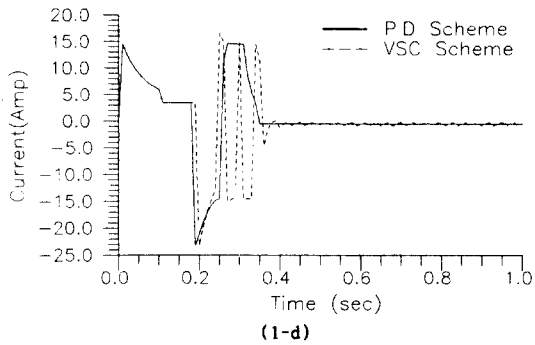
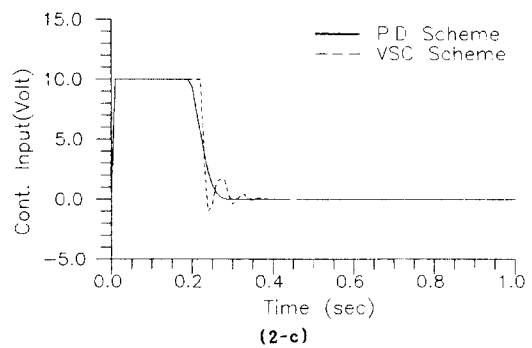
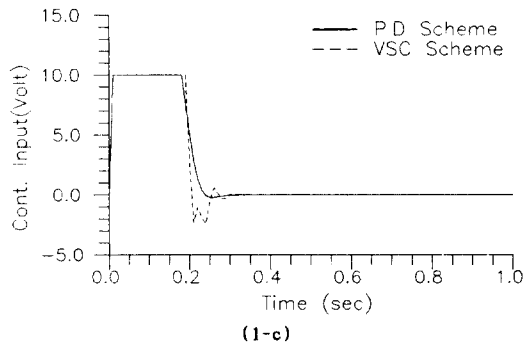
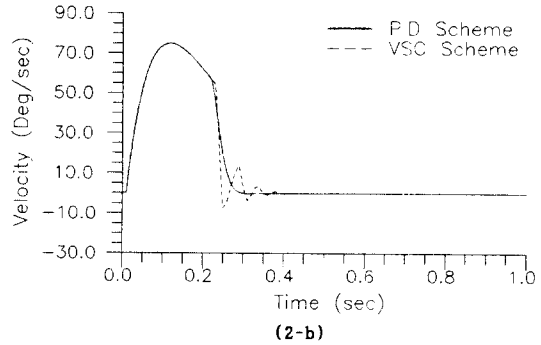
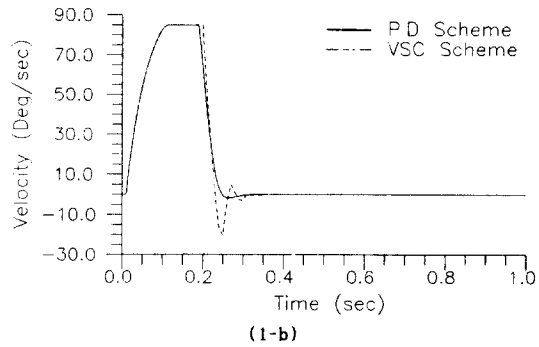
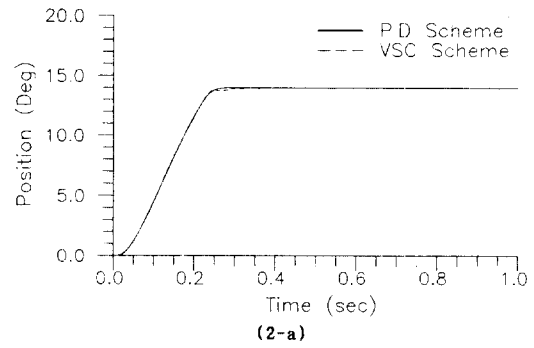
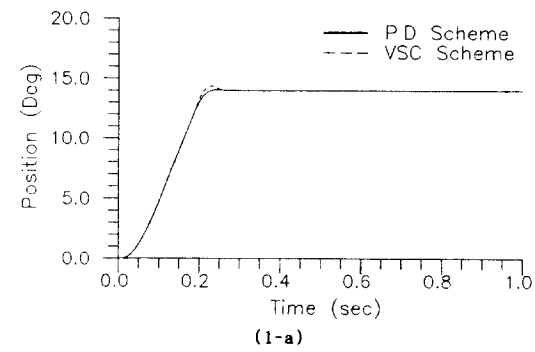
이들에 대한 추적능력과 외란변화에 대한 성능에 대해서 시뮬레이션을 통해 분석된 결과를 요약하면 다음과 같다.

기준입력에 대한 추종성과 외란제거 성능면에서 PD 제어기와 VSC 제어기는 유사한 성능을 보여 주었는데, 이것은 시스템 요소의 하드웨어적인 제약 및 제어기 포화특성등의 제한에 기인된 것으로 판단된다.

앞으로 보다 강인한 제어기 설계를 위해서는 외란에 대해 보다 정확한 모델링 및 실험장치를 통한 검증이 계속되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] D.R. Wilson, Modern Practice in Servo Design, Pergamon Press, 1970.
- [2] Electro-Craft Corporation, DC Motors Speed Controls Servo Systems, Pergamon Press, 1977.
- [3] K. T. Parker, B.A., M. Sc, "Design of Proportional-Integral-Derivative Controllers by the Use of Optimal Linear Regulator Theory," Proc. IEE, Vol.119, No.7, July 1972.
- [4] M. Atans, "On the PID Controllers Using Optimal Linear Regulator Theory," Automatica Vol.7, pp.643-647, 1971.
- [5] N.N. Bengiamin and B. Kauffmann, "Variable Structure Position Control," Control Syst. Mag., pp.3-8, Aug. 1984.
- [6] V. I. Utkin, Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems, Moscow, Soviet Union: MIR Publishers, 1978.
- [7] 김중완, 이만형, "가변구조제어계의 채터링 현상 제거를 위한 연속입력 제어법칙의 개선," 전기학회 논문지, 제38권, 제1호, pp.60-67, 1989.
- [8] 이동권, "슬라이딩 모드를 이용한 편로트 유압 실린더의 추종제어 특성 연구," 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 8, 1990.
- [9] Y. Ohshima, Servo Sensors-Elements and Applications, Intertec Communications Inc., 1988.



**Fig.1 System responses without disturbance**  
 (a) angular position, (b) angular velocity,  
 (c) input voltage, (d) armature current.

**Fig.2 System responses with disturbance**  
 (a) angular position, (b) angular velocity,  
 (c) input voltage, (d) armature current.