

## 수중운동체의 표적추적성능 해석과 제어기 설계

윤 강 섭 부산대학교 대학원 정밀기계공학과  
 이 만 형 부산대학교 제어기계공학과  
 부산대학교 기계기술연구소 및 NSDM-ERC 연구원

### Abstract

The actuator's response delay, disturbance and measurement noise can often cause a significant error in the target tracking of an underwater vehicle. The first purpose of this paper is error analysis about motion of an underwater vehicle when the closed loop system has actuator and disturbance and noise. The underwater vehicle is simulated for cases of various disturbances. The second purpose is robust controller design for the underwater vehicle with parameter uncertainty. So, two robust control methods are applied for the underwater vehicle. One is standard  $H_\infty$  control, and the other is time-varying sliding mode control with modified saturation function. Suboptimal design parameters for  $H_\infty$  control, and design parameters for time-varying switching surfaces are provided. Simulations for the two controllers are carried out and their performances are analyzed.

### 1. 서 론

수중운동체는 수중함정에서 발사되어 표적을 명중하는 것을 목적으로 하며, 18세기 중엽에 개발되기 시작하여, 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 수중운동체는 음향탐지부에서 수집된 표적의 정보와 자신의 정보로부터 자동조종장치에서 표적을 추적할 수 있는 타각명령을 출력하게 되고, 이 타각명령이 구동장치부에 인가되어 타각을 변화시켜 수중운동체의 운동방향을 변화시킴으로써 표적을 추적하게 된다.

그러나, 구동장치부의 시간지연으로 인하여, 수중운동체의 운동방정식에 인가되는 타각은 자동조종장치의 타각명령과는 오차를 가지게 되어 표적을 추적하는데 심각한 영향을 미칠 수도 있다. 그리고 항해중에는 여러가지 유체역학적인 요소들이 외란으로 작용하고, 또한 측정잡음이 발생되므로 이러한 요소들이 표적추적 성능에 미치는 영향을 분석하는 것은 필수적이다. 그래서, 본 연구에서는 수중운동체의 구동장치부 응답지연과 외란, 측정잡음이 표적추적에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였다.

한편, 수중운동체는 항해중에 유체의 영향에 의해 운동방정식의 파라미터들이 변동하여 표적추적에 영향을 미칠 수 있으므로, 모델 불확실성을 가진 시스템에 적용할 수 있는 강인한 제어기로서  $H_\infty$  제어기와 시변슬라이딩모드 제어기를 설계하였다. 그리고, 설계된 두 제어기에 대해서 명령추종성능과 파라미터 변동에 대한 강인성을 비교 분석하였다.

### 2. 시스템 모델링

수중운동체의 형상과 각 좌표축의 정의는 Fig. 1과 같다. 동체좌표계는 수중운동체의 진행방향을 X축으로, 수심방향을 Z축

으로, 그리고 Y축은 오른손 법칙에 의해서 설정한다.

일반적으로 수중운동체는 6자유도 비선형 운동방정식으로 나타나며, 롤, 피치, 요운동이 서로 연성되어 나타난다<sup>(1,2)</sup>. 비선형 운동방정식으로 모델링된 수중운동체의 타각입력은 횡방향 운동에 대한 수평타(rudder)각과 종방향 운동에 대한 승강타(elevator)각이 서로 독립적으로 작용하므로, 6자유도 운동방정식을 각각의 방향에서 원점에 대해 선형화할 수 있다.<sup>(3)</sup>

수중운동체의 횡방향 선형 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_H x + B_H \delta_r \\ y &= C_H x \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $x$ 는 상태변수,  $\delta_r$ 은 횡방향 제어입력인 수평타각이다.

$$x = \begin{bmatrix} v \\ \phi \\ \dot{\phi} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y\text{방향 속도} \\ \text{롤각} \\ \text{롤변화율} \\ \text{요오각} \\ \text{요오 변화율} \end{bmatrix}$$

$$A_H = \begin{bmatrix} -0.66 & 0.05 & 0 & 0 & -0.27 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.43 & -15.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -2.19 & -0.02 & 0 & 0 & -1.62 \end{bmatrix}, B_H = \begin{bmatrix} 0.047 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.271 \end{bmatrix}$$

$$C_H = [ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 ]$$

수중운동체의 종방향 선형 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_V x + B_V \delta_e \\ y &= C_V x \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $x$ 는 상태변수,  $\delta_e$ 는 종방향 제어입력인 승강타각이다.

$$x = \begin{bmatrix} u \\ w \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x\text{방향 속도} \\ z\text{방향 속도} \\ \text{피치각} \\ \text{피치변화율} \end{bmatrix}$$

$$A_V = \begin{bmatrix} -0.11 & 0 & 0.096 & 0 \\ 0 & -0.68 & -0.002 & 0.26 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2.08 & -0.008 & -1.68 \end{bmatrix}, B_V = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.076 \\ 0 \\ -0.434 \end{bmatrix}$$

$$C_V = [ 0 \ 0 \ 1 \ 0 ]$$

### 3. 수중운동체의 표적 추적 성능 해석

모델링한 수중운동체에 대하여 구동장치부의 응답지연과 외란, 측정잡음이 수중운동체의 표적 추적 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

자동조종장치는 음향탐지부에서 수집되는 표적의 위치, 속도 정보와 수중운동체 자신의 위치, 속도정보로부터 표적을 추적할 수 있는 오일러 각을 계산하고 이를 타각으로 변환하여 명령타각을 구동장치부에 인가한다. 구동장치부는 자동조종장치로부터의 타각명령에 대해서 타를 구동하게 되고, 타각은 수중운동체

의 운동방정식의 입력으로 작용하게 된다. 그러나 구동장치부를 거친 타각은 자동조종장치에서 계산된 타각명령을 그대로 추종하지 못하고 시간지연 및 오차를 가진 상태로 수중운동체의 운동방정식에 입력으로 작용하게 된다. 그래서, 이러한 구동장치부의 시간지연이 표적 추적 성능에 미치는 영향을 분석해 보고자 한다. 또한, 외란 및 측정잡음이 수중운동체의 표적추적 성능에 미치는 영향도 분석하고자 한다.

### 3.1 자동조종장치의 타각명령에 대한 구동장치부의 추종성능

자동조종장치의 타각명령에 대한 구동장치부의 추종성능을 알아보기 위해서, 타각명령이 계단입력(+14 deg)을 인가한 경우에 대해서, 지연이 없는 이상적인 타각응답과 응답지연이 있는 실제 타각응답을 Fig. 2에 나타내었다. 14 deg의 타각명령에 대한 타각응답은 약 0.3초의 응답지연이 있음을 알 수 있다.

### 3.2 수중운동체의 표적 추적성능

구동장치부의 응답지연, 외란 및 측정잡음이 수중운동체의 표적 추적 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서, 표적의 운동을 원운동과 사형운동으로 가정하였다. 동적외란은 2%, 5%의 외란이 인가되는 경우를, 측정잡음은 평균이 0, 분산이 0.33, 0.66인 잡음을 인가되는 경우에 대하여 운동특성을 해석하였다.

원운동에 대한 응답을 Fig. 3에, 사형운동에 대한 응답을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서는 응답지연이 없는 이상적인 경우, 응답지연과 동적외란 및 측정잡음을 가진 경우, 그리고 측정잡음이 있는 경우에 칼만필터를 사용하여 추정된 표적경로를 각각 나타내었다. Table 1에 각 경우에 대한 평균오차를 나타내었다.

Table 1. Average errors for real response (unit : m)

동적 외란	2%		5%		2%		5%	
	N(0.0.33)		N(0.0.33)		N(0.0.66)		N(0.0.66)	
측정 잡음	x	y	x	y	x	y	x	y
원 운동	0.24	0.31	0.53	0.74	0.28	0.38	0.59	0.79
사형 운동	0.17	0.46	0.28	0.56	0.28	0.66	0.44	1.30

여기서, 동적외란과 측정잡음이 커질수록 이상적인 응답에 대한 실제 응답의 오차는 증가하지만, 그 양이 표적명령에 심각한 영향을 미칠 정도는 아님을 알 수 있다.

그러므로 구동장치부의 응답지연, 동적외란 및 측정잡음으로 인한 제적오차는 미소한 것으로 나타났다.

### 4. $H_\infty$ 및 시변슬라이딩모드 제어기 설계

수중운동체는 항해중에 유체의 영향에 의해 운동방정식의 파라미터들이 변동할 수 있고, 모델링되지 못한 요소들이 운동에 영향을 미칠 수 있다. 그래서, 외란 및 측정잡음에 둔감하고 파라미터 변동에도 강한 성능을 가지는 제어기가 요구된다.

우선, 모델 불확실성을 가진 시스템에 대하여 안정도-강인성을 보장하는 페루프 루프형성기법인  $H_\infty$  제어를 설계하고, 또한 제어대상 시스템의 파라미터 변동 및 외란에 대하여 정확한 정보를 알 수 없더라도 강한 제어를 보장하는 것으로 알려진 슬라이딩모드 제어기의 문제점(과도한 제어입력, 채터링, 상태벡터의 과도한 오버슈트)을 해결할 수 있는 시변슬라이딩모드 제어를 설계하고, 설계된 두 제어기의 명령추종성능과 파라미터 변동에 대한 강인성을 비교 분석하였다.

#### 4.1 $H_\infty$ 제어

최적제어 이론에서 주로 사용되는 성능지수는  $H_2$ 와  $H_\infty$ 노름이다.  $H_2$ 노름은 외부신호가 고정된 신호이거나 고정된 파워스펙트럼을 가질때 해석하는 기법이며,  $H_\infty$  노름은 외란을 포함하는 외부입력 신호가 인가될 때, 혹은 모델의 불확실성이나 오차에 대한 보상을 하고자 할 때 주로 사용된다.<sup>(4)</sup> 여기서는 주파

수역에서 강인제어성능을 가지는  $H_\infty$ 제어기를 상태공간 설계기법으로 설계하고자 한다.

#### 4.1.1 $H_\infty$ 제어이론

먼저,  $H_\infty$  제어기 설계문제는 Fig. 5과 같이 표준보상기블록선도로 표현할 수 있다. 여기서,  $P$ 는  $[w \ u]^T$ 에서  $[z \ y]^T$ 로의 전달함수행렬(TFM)이고,  $K$ 는 제어기의 TFM이다. 또한,  $w$ 는 외부입력,  $u$ 는 제어입력,  $z$ 는 제어된 출력,  $y$ 는 측정된 출력을 나타낸다.

$w$ 에서  $z$ 까지의 페루프전달함수는 다음과 같이 나타난다.

$$T_{zw}(P,K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (3)$$

최적  $H_\infty$ 제어 문제는 페루프전달함수의 무한노름을 최소화하는 안정한 제어기  $K_{opt}$ 를 찾는 문제로서,  $K_{opt}$ 는 다음을 만족한다.

$$\inf \| T_{zw}(P,K) \|_\infty : K \text{ stabilizes } P := \gamma_{opt} = \| T_{zw}(P,K_{opt}) \|_\infty \quad (4)$$

식(4)를 만족시키는 최적  $H_\infty$ 제어문제가 항상 적절한 것은 아니므로 무한노름이 다음의 경계를 가지는 준최적문제를 얻는다.

$$\| T_{zw}(P,K) \|_\infty \leq \gamma \quad (5)$$

여기서,  $\gamma > \gamma_{opt}$ 이고, 이 경계를 만족시키는 제어기집합이 있다.<sup>(5)</sup>

일반적으로  $H_\infty$  제어기는 다음과 같은 설계사양을 요구한다.

$$\bar{\sigma}(S(j\omega)) \leq |W_1^{-1}(j\omega)| \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}(T(j\omega)) \leq |W_3^{-1}(j\omega)| \quad (7)$$

여기서,  $S$ 는 감도행렬,  $|W_1^{-1}(j\omega)|$ 은 요구하는 외란 제거를 위한 가중행렬,  $T$ 는 여감도행렬,  $|W_3^{-1}(j\omega)|$ 은 모델링오차 및 센서잡음에 대한 강인성을 위한 가중행렬이다. 식 (6),(7)은 각각 외란이 예너지를 가지는 저주파와 고주파에서의 강인 제어 성능을 만족시키는 식이다.

#### 4.1.2 $H_\infty$ 제어기 설계

Fig. 6은 (6),(7)식으로 나타난 가중함수행렬들의 특이값선도이며, 횡방향 및 종방향에 같이 적용된다. 사용된 가중함수행렬  $(\gamma W_1)^{-1}(s)$ ,  $W_3^{-1}(s)$ 는 다음과 같다.

$$(\gamma W_1)^{-1}(s) = \gamma^{-1} \frac{0.01*(100s+1)}{0.01s+1} I_{(1 \times 1)} \quad (8)$$

$$W_3^{-1}(s) = \frac{1000}{s^2} I_{(1 \times 1)} \quad (9)$$

여기서,  $\gamma$ 는  $H_\infty$  제어문제의 준최적 설계파라미터로서, 최종적으로 결정된 준최적 값( $\gamma_{subopt}$ )은 횡방향 제어시 18.5, 종방향 제어시 18.8로 선정하였다.

$\gamma$ 가 1부터 증가함에 따라 감도 및 여감도함수는 Fig. 7처럼 한계치인  $(\gamma W_1)^{-1}(s)$ 과  $W_3^{-1}(s)$ 을 따라 움직임을 알 수 있다. 그리고 이것은 설계사양인 식(6),(7)을 만족하고 안정도-강인성을 만족하는 바람직한 루프형상을 나타낸다. Fig. 9는 횡방향의 페루프 전달함수  $T_{zw}(P,K)$ 의 특이값선도를 나타내었고, 이는 식 (5)를 만족하는 준최적 문제의 해이다.

#### 4.2 시변슬라이딩모드 제어

슬라이딩모드 제어는 파라미터 변동이나 외란에 대한 정확한 정보가 없더라도 그 경계치만 안다면 강한 제어를 실현할 수 있을 뿐 아니라, 미지의 파라미터를 추정할 필요가 없으므로, 제어기 설계 알고리즘이 간단하다는 이점이 있다. 또한 상태공간에서 표시점이 미리 정의된 스위칭 평면에 도달하여 슬라이딩모드 운동을 하는 동안 제어대상 시스템은 변수변화 및 외란에 대하여 매우 둔감함을 나타낸다.

그러나, 슬라이딩모드 제어기(고정된 스위칭 평면을 갖는 슬라이딩모드 제어기)는 표시점이 슬라이딩 운동을 시작하기 전에는 시스템의 불확실성에 매우 민감하며 또한 명령 추적 시간도 길어진다 단점이 있다. 그래서 슬라이딩모드 제어기에서 스위칭 평면을 시간에 따라 변화시켜 도달시간을 줄여줄 수 있는 시변 슬라이딩모드 제어기를 설계하고자 한다.

#### 4.2.1 시변슬라이딩모드 제어기론

스위칭평면 근방에서 연속적으로 변화하는 스위칭논리를 발생시키기 위하여 수정된 포화함수(MOD) 스위칭논리를 사용한다.

$$MOD(z) = \begin{cases} sgn(z) & |z| \geq 1 \\ z & |z| < 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$z = \sigma(x,t) / (p \cdot N(x))$$

여기서,  $p$ 는 양의 정수( $p=1$ 을 사용)이며,  $N(x)$ 는 다음과 같다.

$$N(x) = \sum_{i=1}^n |x_i| \quad (11)$$

그리고,  $x$ 는 상태변수,  $\sigma(x,t)$ 는 시변 스위칭평면 함수이다.

$$\sigma(x,t) = \sum_{i=1}^n (c_i(t) x_i) + c_n x_n \quad (12)$$

$$c_i(t) = c_{i\min} + (c_{i\max} - c_{i\min}) \cdot H_i(t), \quad c_n = 1$$

여기서,  $H_i(t)$ 는 0에서 1로 변화하는 단조증가연속함수이다.

시변슬라이딩모드 제어는 스위칭 평면계수를  $c_{i\min}$ 에서  $c_{i\max}$ 로 증가시킴으로써 도달시간을 단축시킬수 있는 반면, 초기에는  $c_{i\min}$ 을 사용함으로써 과도한 입력 및 채터링을 예방할 수 있는 장점이 있다. 슬라이딩 운동이 발생할 필요충분조건은<sup>[6-7]</sup>

$$\sigma(x,t) \cdot \dot{\sigma}(x,t) < 0 \quad (13)$$

이므로, 이 조건에서 스위칭 평면계수를 찾는다. 이때 제어법칙은 다음과 같다.

$$u(x,t) = (-\sum_{i=1}^n \psi_i(t) |x_i|) \cdot MOD(z) \quad (14)$$

여기서,  $\psi_i(t) = \psi_{i\min} + (\psi_{i\max} - \psi_{i\min}) \cdot G_i(t)$  이고,  $G_i(t)$ 는 0에서 1로 단조증가하는 연속함수이다. 따라서  $\psi_i(t)$ 를 찾을 수 있으면 제어대상 시스템은 슬라이딩모드를 유지한다.

#### 4.2.2 시변슬라이딩모드 제어기 설계

고정된 스위칭평면을 가지는 슬라이딩모드 제어기와 시변슬라이딩모드 제어기의 성능 비교를 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션을 위한 파라미터는 각 방향에 대하여 식(13)을 만족하도록 적절한 값을 선정하였다.<sup>[7]</sup> 여기서 스위칭 평면함수와 제어법칙을 선정하는데 필요한 가중치 함수는 다음과 같다.

$$H_i(t) = \begin{cases} \sin(h_i \cdot t) & h_i \cdot t < \pi/2 \\ 1 & h_i \cdot t \geq \pi/2 \end{cases} \quad (15)$$

$$G_i(t) = \begin{cases} \sin(g_i \cdot t) & g_i \cdot t < \pi/2 \\ 1 & g_i \cdot t \geq \pi/2 \end{cases} \quad (16)$$

여기서,  $h_i$  및  $g_i$ 는 양의 정수들이며,  $h_i = g_i = 1 (i=1, \dots, n-1)$ 을 사용하였다. 그리고, 선정된 파라미터는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Parameter for SMC design.

시변슬라이딩모드 제어	고정형 슬라이딩모드 제어		시변슬라이딩모드 제어	고정형 슬라이딩모드 제어	
	횡방향	종방향		횡방향	종방향
$C_{1\min} - C_{1\max}$	10-36.5	10-140	$c_1$	36.5	140
$C_{2\min} - C_{2\max}$	15-387.6	25-60	$c_2$	387.6	60
$C_{3\min} - C_{3\max}$	12-595.2	15-35	$c_3$	595.2	35
$C_{4\min} - C_{4\max}$	13-739.5		$c_4$	739.5	
$\Psi_{1\min} - \Psi_{1\max}$	3.5-37	5.5-24	$\psi_1$	37	24
$\Psi_{2\min} - \Psi_{2\max}$	3.5-24	5.5-10	$\psi_2$	24	10
$\Psi_{3\min} - \Psi_{3\max}$	3.5-27	5.5-27	$\psi_3$	27	27
$\Psi_{4\min} - \Psi_{4\max}$	3.5-35	5.5-12	$\psi_4$	35	12
$\Psi_{5\min} - \Psi_{5\max}$	3.5-21		$\psi_5$	21	

또한 시뮬레이션을 위한 초기치는 횡방향의 경우  $[2 \ 3 \ 1 \ 2 \ 3]^T$ , 종방향은  $[4 \ 2 \ -3 \ -5]^T$ 로 두었다.

Fig. 10,11은 각각 횡방향, 종방향에 대한 슬라이딩제어기와 시변 슬라이딩모드 제어기의 응답선도이다.

시뮬레이션 결과로부터, 수정된 포화함수 스위칭논리를 사용함으로써 채터링이 적은 제적을 발생시키고, 제어입력도 감소하였고, 오버슈트와 언더슈트의 크기가 감소하였음을 알 수 있다.

#### 4.3 설계된 두 제어기의 성능분석

설계된  $H_\infty$  및 시변슬라이딩모드제어기에 대해 명령추종성능, 파라미터변동에 대한 강인성, 표적추적성능 등을 분석을 하였다.

##### 4.3.1 명령추종성능 비교

명령추종성능을 분석하기 위해, 요오각과 피치각에 단위스텝 입력을 인가한 경우에 대해, 시간응답을 Fig. 12에 나타내었다. 이 그림에서  $H_\infty$  제어기는 시변슬라이딩모드 제어기보다 오버슈트 양이 적을 뿐 아니라 정착시간도 상당히 단축되므로, 스텝 입력에 대한 명령추종성능이 훨씬 양호함을 알 수 있다.

##### 4.3.2 파라미터 변동에 대한 강인성 비교

시스템 파라미터 변동에 대한 강인성을 비교하기 위해, 운동방정식에 나타난 여러 파라미터들 중 수중운동체의 운동에 큰 영향을 미치는 파라미터에 50%, 100%의 변동을 주었을때 요오각과 피치각에 대한 시간응답을 Fig. 13에 나타내었다. 그림을 보면  $H_\infty$ 제어기는 파라미터 변동에 대해 오버슈트의 크기나 정착 시간에 거의 영향이 없다. 그러나 시변슬라이딩모드 제어기는 파라미터 변동에 의해 오버슈트의 양이 비교적 크게 영향을 받고 있으나 명령추종성능은 양호하다. 이는 고차 시스템인 경우에는 시변슬라이딩모드 제어기를 설계하는데 필요한 준최적 파라미터를 설정하는 것이 쉽지 않음을 알 수 있다.

##### 4.3.3 표적추적성능 비교

설계된 제어기를 가진 수중운동체의 표적 추적성능을 알아 보기 위해서, 5%의 동적외란, 측정잡음은  $N(0,0.66)$ 을 인가하였다. 시뮬레이션 결과인 Fig. 14를 보면,  $H_\infty$ 제어기가 시변슬라이딩모드 제어기에 비해 표적추적성능이 약간 좋으나, 전체적으로 표적추적성능은 거의 동일하다고 볼 수 있다.

이상과 같이 설계된 제어기의 성능(명령추종, 파라미터 변동에 대한 강인성, 표적추적성능)을 분석해 본 결과, 명령추종성능과 파라미터 변동에 대해 강인성면에서  $H_\infty$ 제어기가 시변슬라이딩모드 제어기보다 양호한 성능을 가지고, 표적추적성능면에서는 두 제어기가 모두 양호함을 알 수 있었다.

#### 5. 결론

수중운동체의 자동조종장치의 타각명령에 대해 구동장치부의 응답지연과 랜덤량으로 모델링된 외란과 측정잡음이 수중운동체의 표적 추적 성능에 미치는 영향을 분석하였고, 파라미터 변동에 대해 강인한 제어성능을 가지는 제어기를 설계하고 설계된 제어기의 성능을 분석하였다.

먼저, 구동장치부의 응답지연과 외란 및 측정잡음이 수중운동체의 운동에 미치는 영향이 미소한 것으로 나타났다.

파라미터에 불확실성이 있는 수중운동체에 대한 강인한 제어기로  $H_\infty$  제어기를 설계하였다. 그리고, 기존의 슬라이딩모드 제어기의 문제점들을 보완한 시변슬라이딩모드 제어기를 설계하여, 기존의 슬라이딩모드 제어기보다 성능이 양호함을 보였다.

또한, 설계된 두 제어기의 명령추종성능, 파라미터 변동에 대한 강인성과 표적 추적 성능을 분석한 결과,  $H_\infty$ 제어기는 시변슬라이딩모드 제어기보다 명령추종성능, 파라미터 변동에 대해 강인성면에서 양호함을 알 수 있었고, 그리고 표적추적성능면에서는 두 제어기 모두 양호한 성능을 가짐을 알 수 있었다.

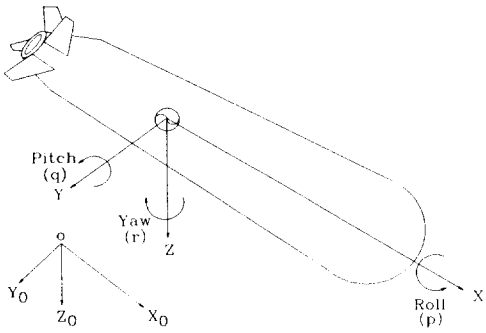


Fig. 1 The coordinate of underwater vehicle.

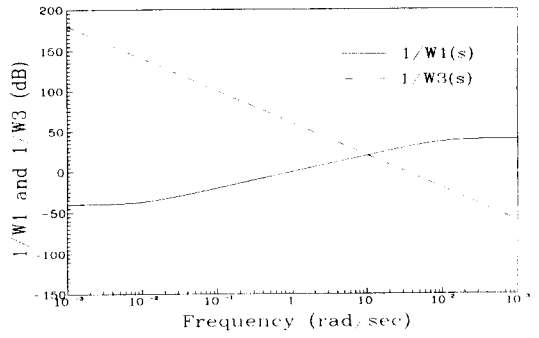


Fig. 6 Singular value of weighting function.

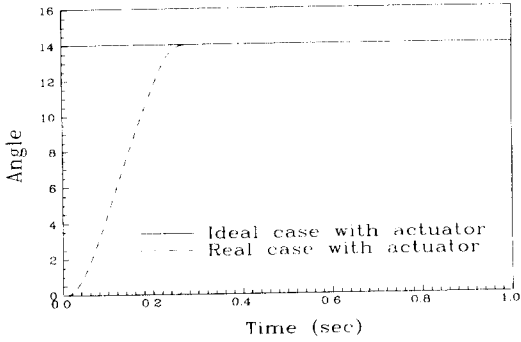


Fig. 2 Actuator tracking performance for constant input.

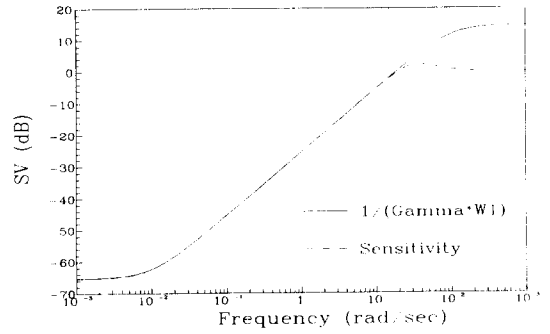


Fig. 7 Singular value of Sensitivity and  $(\gamma W_1)^{-1}(s)$

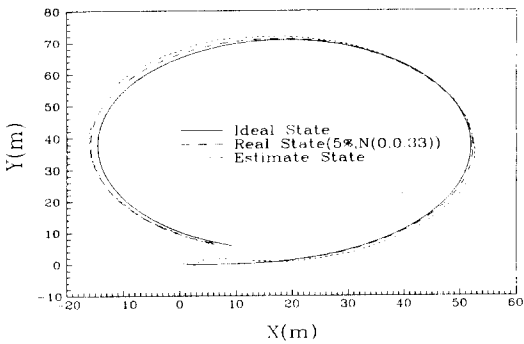


Fig. 3 Error of circle motion navigation. (5%,  $N(0,0.33)$ )

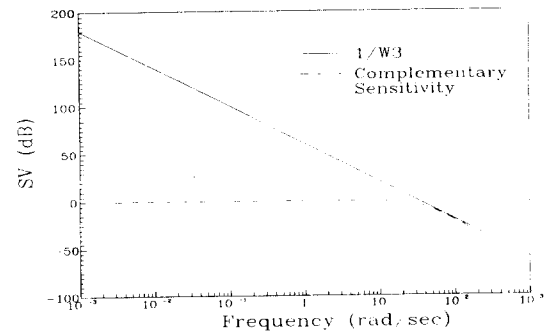


Fig.8 Singular value of Complementary sensitivity &  $W_3^{-1}(s)$

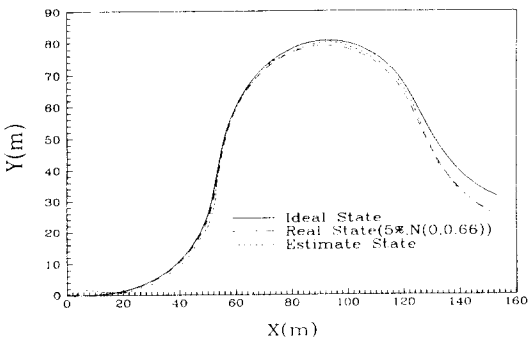


Fig. 4 Error of snake motion navigation. (5%,  $N(0,0.66)$ )

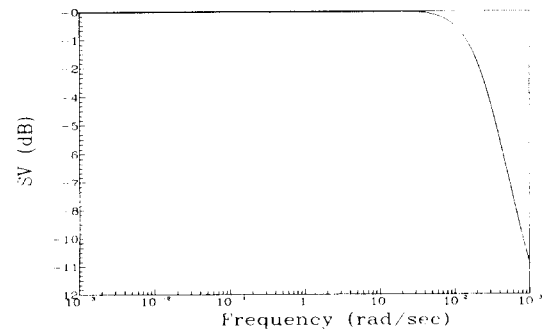
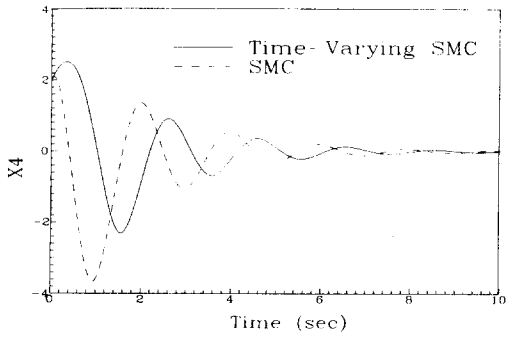
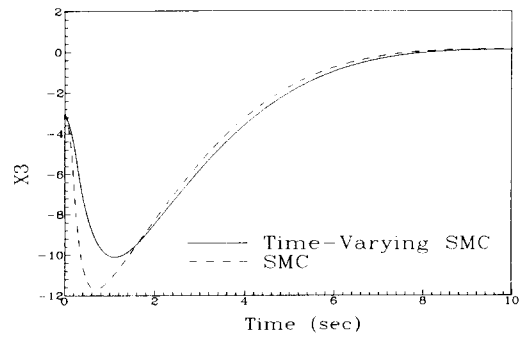


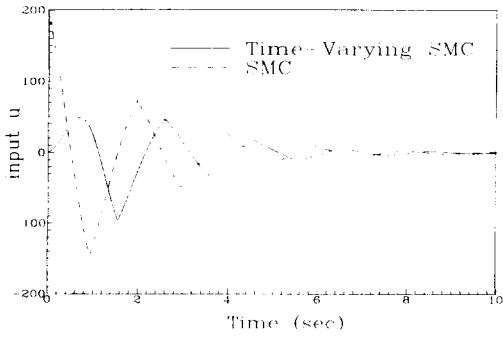
Fig. 9 Singular value of Closed loop TF  $T_m(P,K)$



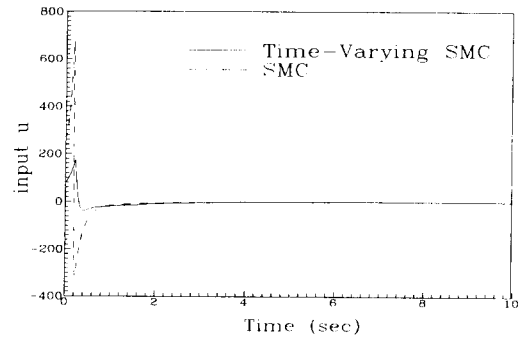
(a) Time response of yaw angle



(a) Yaw angle response



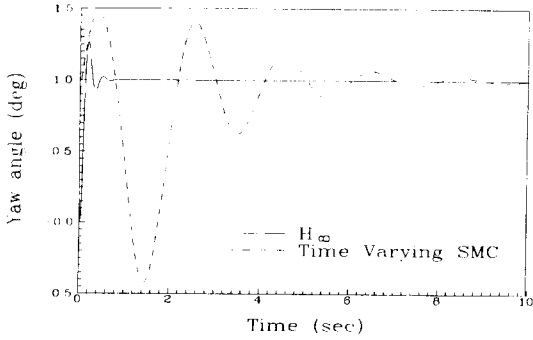
(b) Control input



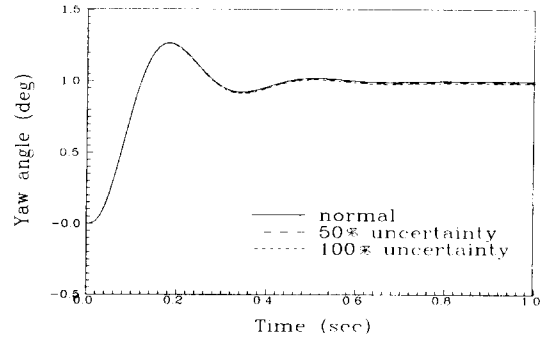
(b) Pitch angle response

Fig. 10 Sliding mode controller design of lateral motion.

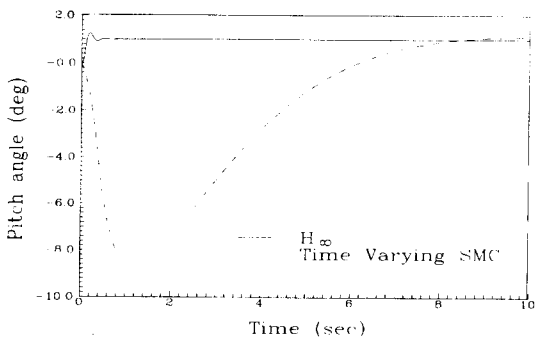
Fig. 12 Time response of system with designed controller.



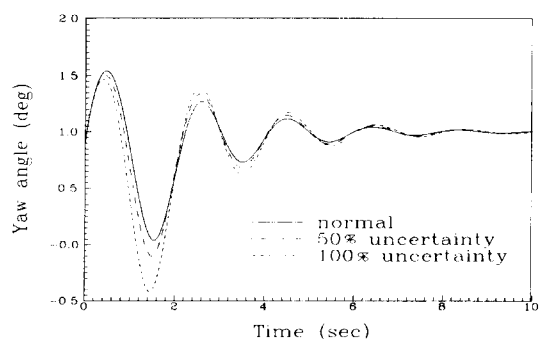
(a) Time response of pitch angle



(a) Yaw response of  $H_\infty$  controller

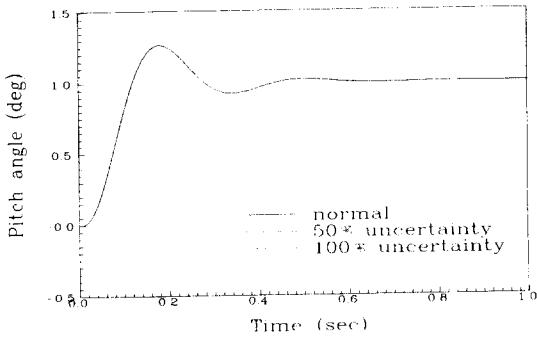


(b) control input

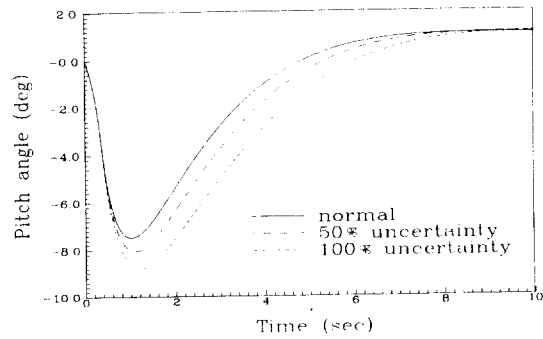


(b) Yaw response of time varying SMC controller

Fig. 11 Sliding mode controller design of vertical motion.

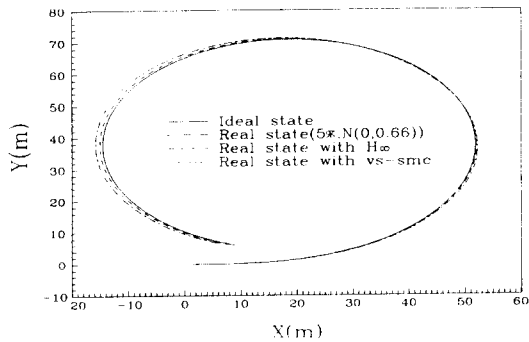


(c) Pitch response of  $H_\infty$  controller

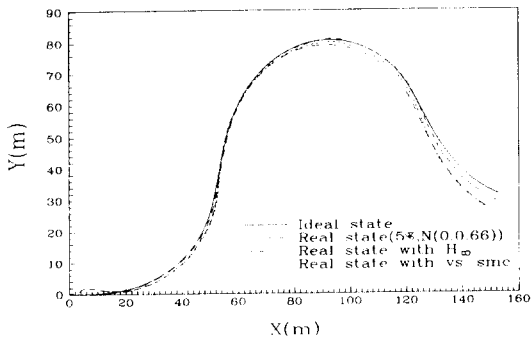


(d) Pitch response of time varying SMC controller

Fig. 13 Time response of system with parameter uncertainty.



(a) Circle motion



(b) snake motion

Fig. 14 Target tracking performance

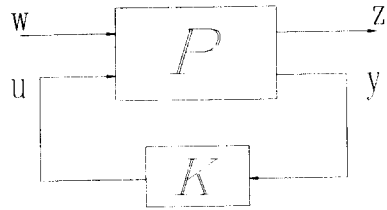


Fig. 5  $H_\infty$  standard compensator block diagram.

### 참고 문헌

- 1) 박철재, 이만형, "수중운동체의 오차해석," 대한기계학회 '92 춘계학술대회논문집(I), pp. 727~731, 1992.
- 2) 박철재, 이만형, "Error Analysis of Underwater Vehicle with Disturbance and Measurement noise," 대한기계학회 '93 춘계학술대회논문집(I), pp. 360~364, 1993.
- 3) Franklin, G. F., Powell, J. D. and Emami-Naeini, A., *Feedback Control of Dynamic Systems*, Addison-Wesley Publishing Com., pp. 523~546, 1991.
- 4) Doyle, J. C., Glover, K., Khargonekar, P. P. and Francis, B. A., "State Space Solutions to Standard  $H_2$  &  $H_\infty$  Control Problems," *IEEE*, Vol.AC-34, No.8, pp.831-847, 1989.
- 5) Li, X. P., Chang, B. C., Banda, S. S. and Yeh, H. H., "Robust Control Systems Design Using  $H_\infty$  Optimization Theory," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 15, No. 4, pp. 944~952, 1992.
- 6) Harashima, F., Hashimoto, H. and Maruyama, K., "Sliding Mode Control of Manipulator with Time-Varying Switching Surfaces," *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 335~342, 1986.
- 7) Young, K. D., "Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems," *IEEE*, Vol.SMC-8, No. 2, pp. 251~259, 1978.