



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

비선형 PD 제어를 이용한  
자율 무인 잠수정의 심도 제어

Depth Control of an AUV  
Using Nonlinear PD Controller



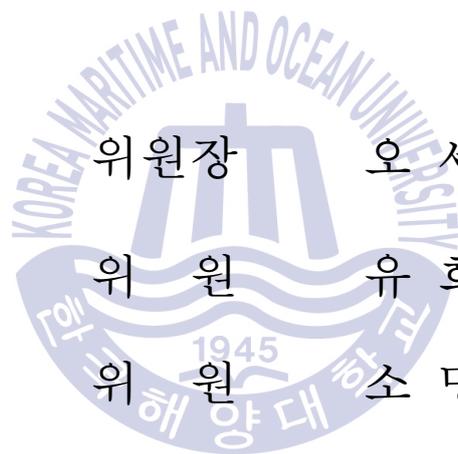
2019 년 02 월

한국해양대학교 대학원

기관공학과

고 건

본 논문을 고건의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 오 세 준 (인)  
위원 유 희 한 (인)  
위원 소 명 옥 (인)

2018년 12월 24일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vi
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 및 동향 .....	1
1.2 연구 내용 및 구성 .....	3
제 2 장 AUV 운동 방정식 및 모델링 .....	4
2.1 AUV의 비선형 모델링 .....	4
2.2 AUV의 선형 모델링 .....	11
제 3 장 비선형 PID 제어기와 유전 알고리즘 .....	18
3.1 선형 PID 제어기 .....	18
3.2 비선형 PID 제어기 .....	21
3.3 최적화 도구로서 유전 알고리즘 .....	24
제 4 장 RCGA 기반 심도 제어기 설계 .....	32
4.1 심도 제어 시스템 설계 .....	32
4.2 성능 지수를 이용한 AUV 심도 제어기의 파라미터 추정 .....	33
제 5 장 모의실험 및 결과 검토 .....	38
5.1 비선형 PD 제어기를 이용한 AUV 선형 모델의 심도 제어 .....	38
5.2 비선형 PD 제어기를 이용한 AUV 비선형 모델의 심도 제어 .....	41
제 6 장 결론 .....	50

참고문헌 ..... 51

감사의 글 ..... 54



## List of Tables

Table 2.1 The notation for AUV .....	5
Table 2.2 Non-Linear coefficients : Forces .....	15
Table 2.3 Non-Linear coefficients : Moments .....	16
Table 2.4 Linear coefficients .....	17
Table 4.1 Parameters of Non-Linear PD controller .....	35
Table 5.1 Performance of Non-Linear depth control system for Linear AUV Model(0[m] → 1[m]) .....	39
Table 5.2 Performance of Non-Linear depth control system for Linear AUV Model(0[m] → 10[m]) .....	40
Table 5.3 Performance of Depth control system for Non-Linear AUV Model .....	42
Table 5.4 Performance of Depth control system for Non-Linear AUV Model(Disturbance at 30[s]) .....	44
Table 5.5 Performance of Depth control system for Non-Linear AUV Model(Disturbance at 60[s]) .....	46
Table 5.6 Performance of Non-Linear depth control system for Non-Linear AUV Model(Noise) .....	48
Table 5.7 Performance of T. Prestero Linear depth control system for Non-Linear AUV Model(Noise) .....	49

## List of Figures

Fig. 1.1 Various AUV in Korea .....	1
Fig. 2.1 Body-fixed and Inertial coordinate system of AUV .....	5
Fig. 3.1 Used NPID control system .....	22
Fig. 3.2 Operation of a Genetic Algorithm .....	25
Fig. 3.3 Modified simple crossover .....	28
Fig. 3.4 Dynamic mutation .....	28
Fig. 4.1 Depth Control system of AUV using Non-Linear controller .....	32
Fig. 4.2 Optimal tuning of the Non-Linear depth controller using a RCGA .....	35
Fig. 4.3 Tuning process for controller parameter using ITAE .....	36
Fig. 4.4 Tuning process for controller parameter using ITAE( $K_p, T_d, \gamma, a_p, c_p, a_d, c_d, a_\gamma, c_\gamma$ ) .....	37
Fig. 5.1 Depth tracking response of Linear AUV Model using Non-Linear Controller(0[m] $\rightarrow$ 1[m]) .....	39
Fig. 5.2 Depth tracking response of Linear AUV Model using Non-Linear Controller(0[m] $\rightarrow$ 10[m]) .....	40
Fig. 5.3 Depth tracking response of Non-Linear AUV Model .....	42
Fig. 5.4 Depth tracking response of Non-Linear AUV Model (Disturbance at 30[s]) .....	44
Fig. 5.5 Depth tracking response of Non-Linear AUV Model (Disturbance at 60[s]) .....	46

Fig. 5.6 Depth tracking response of Non-Linear AUV Model  
using Non-Linear Controller(Noise) ..... 48

Fig. 5.7 Depth tracking response of Non-Linear AUV Model  
using T. Presterio Linear Controller(Noise) ..... 49



# 비선형 PD 제어기를 이용한 자율 무인 잠수정의 심도 제어

고 건

한국해양대학교  
기관공학과

## 초 록

AUV(Autonomous Underwater Vehicle)가 안정된 심도 제어 성능을 보이기 위해서는 제어 대상에 대한 주위환경의 영향을 고려해야 한다. 그러므로 기존의 선형 제어기보다 적응성과 강인성이 뛰어난 비선형 제어기를 사용한 AUV 심도 제어에 관한 연구를 시행해 볼 필요가 있다.

본 논문에서는 AUV의 심도 제어를 위해 피치 제어기로는 비선형 P 제어기를 설계하고, 핀 제어기로는 비선형 PD 제어기를 설계한다. 각 제어기의 파라미터 값은 최적화 기법의 하나인 RCGA를 통하여 동조되며, 이 때 평가 함수로는 ITAE를 사용한다. 최적 동조된 비선형 제어기를 사용하여 AUV 선형 모델과 비선형 모델의 심도 제어를 시뮬레이션을 통하여 수행한다. 시뮬레이션 결과 제안한 제어기는 설정 심도 추종, 지속적인 외란의 영향, 측정 잡음에 대해 만족할 만한 성능을 얻을 수 있었다.

**키워드** : AUV; 비선형 PD 제어기; AUV 심도 제어; RCGA; ITAE;

# Depth Control of an AUV using Nonlinear PD controller

Geon Koh

Department of Mechatronics Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The environmental impact on the control model should be considered to demonstrate performance of AUV(Autonomous Underwater Vehicle) depth control. Therefore, it is necessary to conduct a study on AUV depth control using nonlinear controllers with greater adaptability and robust than linear controllers.

In this thesis, Nonlinear P controller is designed for pitch and nonlinear PD controller is designed for fin to conduct the depth control of AUV. The Parameter values for controllers are optimized through the RCGA and ITAE performance criteria is adopted. Simulation of AUV linear model and the nonlinear model using a optimized controller is carried out. The simulation results suggest that the proposed controller demonstrates satisfactory performance for the effects of target depth values, continuous disturbance, and noise.

**KEY WORDS** : AUV; Nonlinear PD controller; AUV Depth control; RCGA; ITAE;

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 동향

AUV(Autonomous Underwater Vehicle)는 무인 잠수정으로서 수중에서의 정찰 및 감시를 수행하는 역할을 한다. 군사학 분야에서는 기뢰 탐색 및 제거 등의 연구를 시행하고 해양 산업 측면에서는 해양 정보를 관측, 분석해 수산 자원을 관리하는 분야의 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 최근에는 방사능 측정과 에너지 탐사 분야에서도 이를 활용하기 위한 연구가 이루어지고 있는 추세이다. 그림 1.1은 우리나라에서 개발된 다양한 형태의 AUV이다[1].

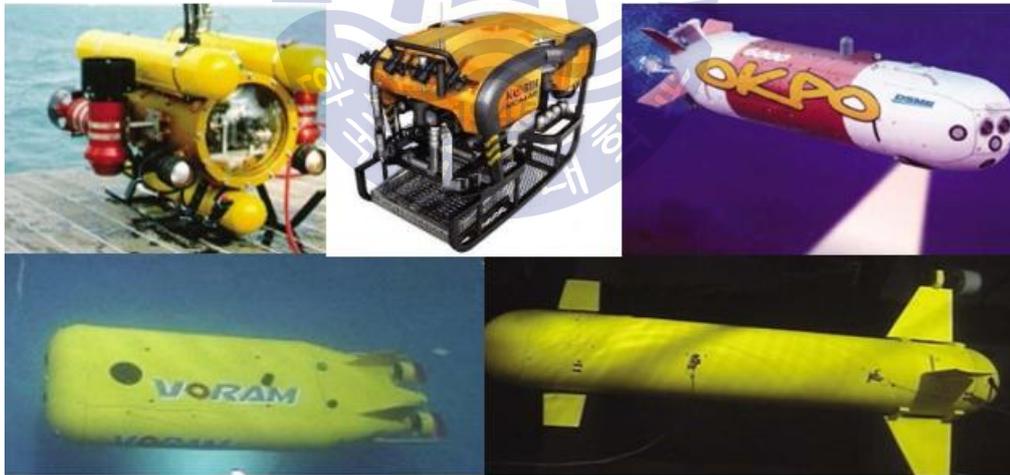


Fig. 1.1 Various AUV in Korea

초기에는 전원과 제어명령을 유선으로 전달하는 유삭식 무인 잠수정(ROV : Remotely Operated Vehicle)의 개발에 중점을 두었으나 로봇 공학과 자동 제어 기술이 발전함에 따라 자율 항해와 작업 능력을 갖는 무삭식 자율 무인 잠수정(AUV : Autonomous Underwater Vehicle)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 1980년대 후반기부터 해양 시스템 안전 연구소를 중심으

로 무인 잠수정 연구 개발이 시작되어 SAUV, 보람 AUV, 크로브 300(CROV 300)을 개발하였고, 1993년 대우조선해양이 러시아의 IMTP와 기술제휴를 통하여 6,000m급의 자율 무인잠수정인 옥포-6000을 개발하였다. 2006년에는 해양시스템안전연구소에서 ROV와 자율 무인잠수정을 포함하는 6,000m급의 과학탐사용인 심해 무인잠수정 해미래, 해누리를 개발하였다[1].

AUV는 우리나라를 비롯해 각 국가별로 다양하게 개발되고 있다. 그러나 심해 중에서의 운동 및 위치 제어성능을 보장할 수 있는 안정된 성능의 제어가 어렵다. 그래서 현재도 이를 개선하고 보완하는 연구들이 활발하게 수행되고 있는 추세이다.

김 등[2, 3]은 Manta 형식의 UUV에 대해 슬라이딩 모드 제어기 설계 기법을 연구하였고, 이 등[4]은 AUV에 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식을 혼합하여 관련된 가격함수를 최소화하는 방법으로 Visual 서보제어기를 개발하였다. Chen 등[5]은 AUV의 운동제어를 위해서 유전알고리즘을 최적화도구로 사용하는 PID 제어기를 제안하였고, Pakhare 등[6]은 AUV의 조타제어를 위해 유전알고리즘으로 제어기의 파라미터들을 최적 동조한 PD 및 PID 제어기를 사용하는 연구를 수행하였다. Dong 등[7]은 Mamdani 퍼지추론을 통하여 AUV의 회두각 제어기법을 연구하였고, Shin 등[8]은 퍼지 상태피드백 제어기를 이용한 AUV의 경로제어 기법을 제안하였다. 또한, Eski와 Yildirim[9] 그리고 Forouzantabar 등[10]은 신경회로망을 이용한 제어기 설계 기법을 제안하였다. 박 등[11]은 PD제어 기법을 적용하여 어뢰형 무인잠수정의 순사각 및 심도 제어기 설계와 실험 성능을 검증하였으며, 손 [12]은 MOOS-IvP를 적용한 무인잠수정의 심도 제어 시스템을 구현하였다. 또한 김 등[13]은 대형급 무인잠수정의 심도 및 속도 제어를 연구하였다.

그러나 위와 같은 많은 연구들이 나름대로 만족할만한 성과를 보여주고 있지만 AUV 심도 제어 시스템을 설계하기 위해서는 운전에 따른 제어 대상의 파라미터 크기가 변하는 것뿐만 아니라 운용되는 주위 환경의 변화에 따른 외란의 영향도 고려해야 한다. 이를 위해 제어기 파라미터 값의 크기를 조절할 수 있도록 적응성과 강인성이 뛰어난 비선형 제어기를 AUV 심도 제어에 적용시켜 기존의 선형 제어기와 그 결과를 검토할 필요가 있다.

## 1.2 연구 내용 및 구성

본 논문에서는 AUV의 심도 제어를 위한 비선형 제어기의 설계기법을 다루고, AUV의 선형 모델과 비선형모델의 심도 제어를 하게 된다. 제어기 설계 시, AUV의 피치(pitch) 제어기로는 비선형 P제어기를 사용하며 핀(fin) 제어기로는 비선형 PD 제어기를 사용한다. 각 제어기의 파라미터들은 제어시스템의 시간 곱 절대 오차 적분 함수(ITAE)를 최소화하는 관점에서 실수 코딩 유전 알고리즘(RCGAs : Real Coded Genetic Algorithms)을 통해 최적 동조된다.

본 논문은 위와 같은 내용으로 총 6장으로 구성되어 있으며, 각 장에서 다루고 있는 내용은 다음과 같다.

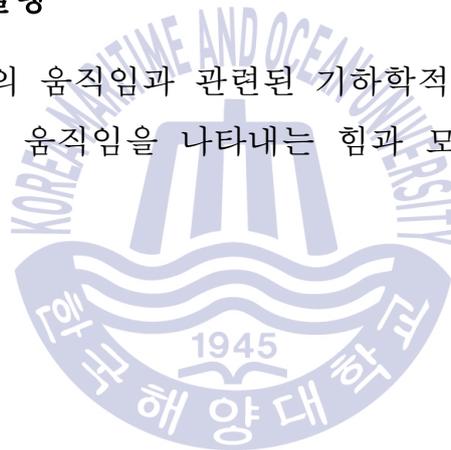
제2장에서는 AUV의 심도 제어를 위한 AUV의 비선형 모델 운동방정식과 선형 모델 운동방정식에 대해서 설명한다. 제3장은 일반적으로 사용되는 선형 PID 제어기에 대하여 알아보고, AUV 심도 제어기 설계 시 사용되는 비선형 PID 제어기에 대해 살펴본다. 또한 본 논문에서 제어 파라미터의 최적화에 사용되는 RCGA에 대하여 살펴본다. 제4장에서는 AUV 심도 제어를 위한 RCGA 기반의 비선형 PD 제어 시스템을 설계하고, ITAE 성능 지수를 최소화 시키도록 제어기 파라미터들을 RCGA를 이용해 최적으로 동조하는 방법을 다룬다. 제5장에서는 설계한 비선형 제어기를 이용하여 제2장의 AUV의 선형 모델에 대해 비선형 제어기의 설정치 추종, 지속적인 외란의 영향, 측정 잡음에 대한 성능을 기존의 선형 제어기의 성능과 비교 검토한다. 마지막으로 제6장에서는 본 연구에서 최종적으로 얻어지는 결론을 정리한다.

## 제 2 장 AUV 운동 방정식 및 모델링

본 장에서는 다른 AUV 비해 개발 비용이 적게 소모되는 REMUS(Remote Environmental Monitoring UnitS)[14]의 운동방정식에 대해서 살펴본다.

### 2.1 AUV의 비선형 모델링

AUV에 대해서는 동체의 움직임과 관련된 기하학적 요소인 운동학, 관성행렬로 나타내는 강체동역학, 움직임을 나타내는 힘과 모멘트인 기계학으로 3가지 요소가 있다.



#### 2.1.1 동체의 운동학

일반적으로 AUV의 6자유도 운동은 식 (2.1)로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \eta_1 &= [x \ y \ z]^T; & \eta_2 &= [\phi \ \theta \ \psi]^T; \\ v_1 &= [u \ v \ w]^T; & v_2 &= [p \ q \ r]^T; \\ \tau_1 &= [X \ Y \ Z]^T; & \tau_2 &= [K \ M \ N]^T; \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서  $\eta_i$ 는 관성 또는 지구고정좌표계를 기준으로 AUV의 위치와 방향을 나타낸다.  $v_i$ 는 물체고정좌표계 기준으로 AUV가 나아가는 변위와 회전 속도를 나타내고,  $\tau_i$ 는 물체고정좌표계 기준으로 AUV에 작용하는 총 힘과 운동 모멘트로 나타낸다. 그림 2.1과 표 2.1은 위 식에 기초하여 조합한 것으로 SNAME 형식의

물체고정좌표계에 따라 표현할 수 있다[14].

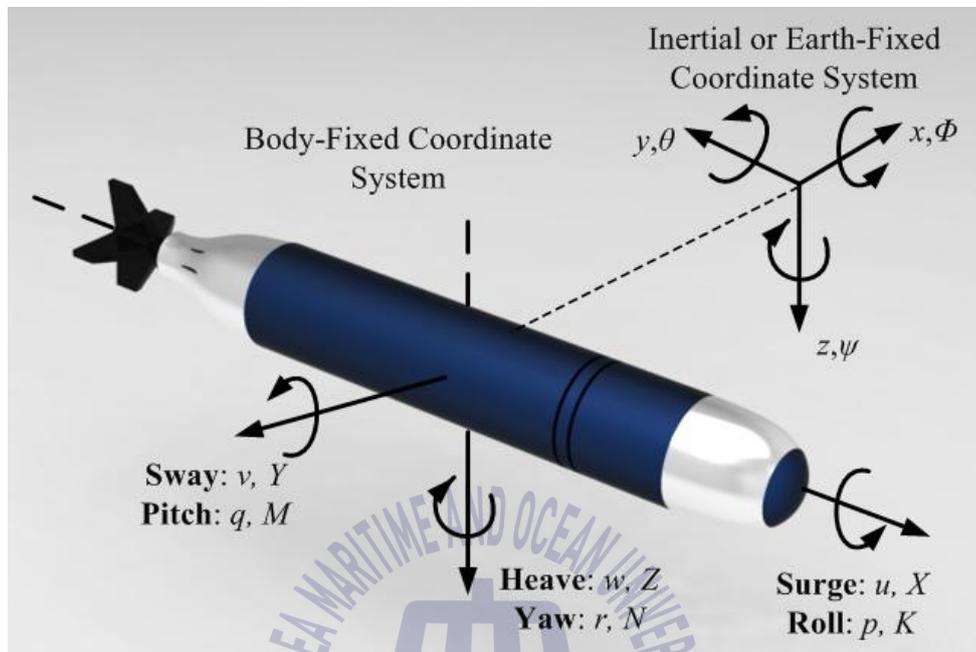


Fig. 2.1 Body-fixed and inertial coordinate systems of AUV

Table 2.1 The notation for AUV

DOF	Motion and rotation	Forces & moments	Linear & angular velocities	Positions & angles
1	Motions in x-direction (Surge)	$X$	$u$	$x$
2	Motions in y-direction (Sway)	$Y$	$v$	$y$
3	Motions in z-direction (Heave)	$Z$	$w$	$z$
4	Rotation about x-axis (Roll)	$K$	$p$	$\phi$
5	Rotation about y-axis (Pitch)	$M$	$q$	$\theta$
6	Rotation about z-axis (Yaw)	$N$	$r$	$\psi$

식 (2.2)는 물체고정좌표계와 지구고정좌표계의 병진속도에 관한 것이고,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_1) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

식 (2.3)은 물체고정좌표계와 지구고정좌표계의 회전속도에 관한 것이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\eta_2) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$J_1(\eta_1)$ 과  $J_2(\eta_2)$ 는 식 (2.4) 및 식 (2.5)와 같이 나타낸다.

$$J_1(\eta_1) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\sin\theta\cos\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

### 2.1.2 동체의 동역학

동체 고정 좌표계의 중심이 부력의 중심에 위치하게 된다면, 식 (2.6)과 같이 동체 고정 좌표계로 정의되는 6자유도 운동방정식으로 표현된다.

식 (2.6)에서  $m$ 은 동체의 질량이고, 첫 번째부터 세 번째 식은 병진 운동의 방정식이고 네 번째부터 여섯 번째의 식은 회전 운동을 나타낸다.  $I_{xy}$ 는  $xy$ 축에

대한 관성 모멘트,  $I_{xz}$ 는  $xz$ 축에 대한 관성 모멘트,  $I_{yz}$ 는  $yz$ 축에 대한 관성 모멘트이다.  $I_{xx}$ 는  $x$ 축에 대한 관성 모멘트,  $I_{yy}$ 는  $y$ 축에 대한 관성 모멘트,  $I_{zz}$ 는  $z$ 축에 대한 관성 모멘트이다.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u}-vr+wq-x_g(q^2+r^2)+y_g(pq-\dot{r})+z_g(pr+\dot{q})] &= \Sigma X_{ext} \\
 m[\dot{v}-wp+ur-y_g(r^2+p^2)+z_g(qr-\dot{p})+x_g(qp+\dot{r})] &= \Sigma Y_{ext} \\
 m[\dot{w}-uq+vp-z_g(p^2+q^2)+x_g(rp-\dot{q})+y_g(rq+\dot{p})] &= \Sigma Z_{ext} \\
 I_{xx}\dot{p}+(I_{zz}-I_{yy})qr-(\dot{r}+pq)I_{xz}+(r^2-q^2)I_{yz}+(pr-\dot{q})I_{xy} \\
 +m[y_g(\dot{w}-uq+vp)-z_g(\dot{v}-wp+ur)] &= \Sigma K_{ext} \\
 I_{yy}\dot{q}+(I_{xx}-I_{zz})rp-(\dot{p}+qr)I_{xy}+(p^2-r^2)I_{xz}+(qp-\dot{r})I_{uz} \\
 +m[z_g(\dot{u}-vr+wq)-x_g(\dot{w}-uq+vp)] &= \Sigma M_{ext} \\
 I_{zz}\dot{r}+(I_{yy}-I_{xx})pq-(\dot{q}+rp)I_{yz}+(q^2-p^2)I_{xy}+(rq-\dot{p})I_{xz} \\
 +m[x_g(\dot{v}-wp+ur)-y_g(\dot{u}-vr+wq)] &= \Sigma N_{ext}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

여기서  $I_{xy}$ ,  $I_{xz}$ ,  $I_{yz}$ 가  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$ ,  $I_{zz}$ 에 비해 매우 작고,  $y_g$ 값을 매우 작다고 가정을 하게 되면 식 (2.7)과 같이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u}-vr+wq-x_g(q^2+r^2)+z_g(pr+\dot{q})] &= \Sigma X_{ext} \\
 m[\dot{v}-wp+ur+z_g(qr-\dot{p})+x_g(qp+\dot{r})] &= \Sigma Y_{ext} \\
 m[\dot{w}-uq+vp-z_g(p^2+q^2)+x_g(rp-\dot{q})] &= \Sigma Z_{ext} \\
 I_{xx}\dot{p}+(I_{zz}-I_{yy})qr+m[-z_g(\dot{v}-wp+ur)] &= \Sigma K_{ext} \\
 I_{yy}\dot{q}+(I_{xx}-I_{zz})rp+m[z_g(\dot{u}-vr+wq)-x_g(\dot{w}-uq+vp)] &= \Sigma M_{ext} \\
 I_{zz}\dot{r}+(I_{yy}-I_{xx})pq+m[x_g(\dot{v}-wp+ur)] &= \Sigma N_{ext}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

식 (2.7)에서 등호 기준 왼쪽 식은 6자유도 운동에 대한 뉴턴의 법칙과 오일러 법칙에 연관이 있고 오른쪽 식은 각 방향에 대하여 작용하는 힘과 모멘트에 연관이 있는 식이다.

### 2.1.3 동체의 기체학

동체 운동 방정식에서 외부의 힘과 모멘트는 동체의 계수에 따라 표현될 수 있다. 이러한 계수들은 이론적인 방정식과 실험적으로 도출된 공식들의 조합에 의해 결정된다. 식 (2.8)은 하나의 예를 나타내고 있다.

$$\Sigma F_{ext} = F_{hydrostatic} + F_{lift} + F_{drag} + \dots + F_{control} \quad (2.8)$$

$\Sigma F_{ext}$ 은 Hydrostatic, Hydrodynamic Forces(Lift and Drag), Added masses, Thrust Force, Control Force 등과 관련이 있는 힘과 모멘트의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 구성요소들은 동체의 기하학적 형태 및 동작 조건에 따라 값이 변할 수 있다. 이러한 구성 요소들에 대한 설명은 본 논문의 연구 범위를 벗어나기 때문에 생략하고 참고 문헌 [14]을 인용한다.

Hydrostatics, Hydrodynamic damping, Added Mass, Body Lift and Moment, Fin Lift and Moment, Propeller Thrust and Torque와 관련된 각 식들을 더하면 동체의 힘과 모멘트에 대한 식 (2.9)가 도출된다.

$$\begin{aligned}
\Sigma X_{ext} &= X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr \\
&\quad + X_{prop} \\
\Sigma Y_{ext} &= Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} \\
&\quad + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r \\
\Sigma Z_{ext} &= Z_{HS} + Z_{w|w}|w|w| + Z_{q|q}|q|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} \\
&\quad + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s
\end{aligned} \tag{2.9}$$

$$\Sigma K_{ext} = K_{HS} + K_{p|p}|p|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop}$$

$$\begin{aligned}
\Sigma M_{ext} &= M_{HS} + M_{w|w}|w|w| + M_{q|q}|q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} \\
&\quad + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Sigma N_{ext} &= N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} \\
&\quad + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r
\end{aligned}$$

$X_{HS}$ ,  $Y_{HS}$ ,  $Z_{HS}$ 는 동체의 Hydrostatic Force이고  $K_{HS}$ ,  $M_{HS}$ ,  $N_{HS}$ 는 동체의 Hydrostatic Moments이다. 나머지 각 계수의 정의는 표 2.2와 표 2.3에 명시하였다.

#### 2.1.4 비선형 운동 방정식의 결합

뉴턴의 운동법칙과 오일러 법칙에 연관이 있는 강체동역학 식 (2.7)과 동체의 힘과 모멘트로 이루어진 동체의 기계학적 식 (2.9)을 이용하여 식 (2.10)인 AUV의 6자유도 비선형 운동 방정식을 구할 수 있다[14].

$$\begin{aligned}
& (m - X_u) \dot{u} + mz_g \dot{q} - my_g \dot{r} \\
& = X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + (X_{wq} - m)wq + (X_{qq} + mx_g)q^2 + (X_{vr} + m)vr \\
& \quad + (X_{rr} + mx_g)r^2 - my_gpq - mz_gpr + X_{prop} \\
& (m - Y_v) \dot{v} - mz_g \dot{p} + (mx_g - Y_r) \dot{r} \\
& = Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + my_g r^2 \\
& \quad + (Y_{ur} - m)vr + (Y_{wp} + m)wp + (Y_{pq} - mx_g)pq \\
& \quad + Y_{uv}uv + my_g p^2 + mz_g qr + Y_{uu\delta_r} u^2 \delta_r \\
& (m - Z_w) \dot{w} + my_g \dot{p} - (mx_g + Z_q) \dot{q} \\
& = Z_{HS} + Z_{w|w}|w|w| + Z_{q|q}|q|q| + (Z_{uq} + m)uq + (Z_{vp} - m)vp \\
& \quad + (Z_{rp} - mx_g)rp + Z_{uw}uw + mz_g(p^2 + q^2) - my_g rq + Z_{uu\delta_s} u^2 \delta_s \\
& \hspace{20em} (2.10) \\
& - mz_g \dot{v} + my_g \dot{w} + (I_{xx} - K_p) \dot{p} \\
& = K_{HS} + K_{p|p}|p|p| - (I_{zz} - I_{yy})qr + m(uq - vp) - mz_g(wp - ur) \\
& \quad + K_{prop} \\
& mz_g \dot{u} - (mx_g + M_w) \dot{w} + (I_{yy} - M_q) \dot{q} \\
& = M_{HS} + M_{w|w}|w|w| + M_{q|q}|q|q| + (M_{uq} - mx_g)uq + (M_{vp} + mx_g)vp \\
& \quad + [M_{rp} - (I_{xx} - I_{zz})]rp + mz_g(vr - wq) + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s} u^2 \delta_s \\
& - my_g \dot{u} + (mx_g - N_v) \dot{v} + (I_{zz} - N_r) \dot{r} \\
& = N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + (N_{ur} - mx_g)ur + (N_{wp} + mx_g)wp \\
& \quad + [N_{pq} - (I_{yy} - I_{xx})]pq - my_g(vr - wq) + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r} u^2 \delta_r
\end{aligned}$$

식 (2.10)을  $\dot{u}$ ,  $\dot{v}$ ,  $\dot{w}$ ,  $\dot{p}$ ,  $\dot{q}$ ,  $\dot{r}$ 에 관한 행렬식으로 표현하게 되면 식 (2.11)과 식 (2.12)로 나타낼 수 있다. 본 논문에서 설계된 제어기의 성능 평가를 위해 식 (2.12)를 AUV의 비선형 모델로 사용하였고, 각 파라미터 값은 힘에 관련된 파라미터 표 2.2와 모멘트에 관련된 파라미터 표 2.3에 명시하였다[14].

$$\begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m - Y_v & 0 & -mz_g & 0 & mx_g - Y_r \\ 0 & 0 & m - Z_w & my_g & -mx_g - Z_q & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_{xx} - K_p & 0 & 0 \\ mz_g & 0 & -mx_g - M_w & 0 & I_{yy} - M_q & 0 \\ -my_g & mx_g - N_v & 0 & 0 & 0 & I_{zz} - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma X \\ \Sigma Y \\ \Sigma Z \\ \Sigma K \\ \Sigma M \\ \Sigma N \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m - Y_v & 0 & -mz_g & 0 & mx_g - Y_r \\ 0 & 0 & m - Z_w & my_g & -mx_g - Z_q & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_{xx} - K_p & 0 & 0 \\ mz_g & 0 & -mx_g - M_w & 0 & I_{yy} - M_q & 0 \\ -my_g & mx_g - N_v & 0 & 0 & 0 & I_{zz} - N_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Sigma X \\ \Sigma Y \\ \Sigma Z \\ \Sigma K \\ \Sigma M \\ \Sigma N \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

## 2.2 AUV의 선형 모델링

AUV 선형모델은 식 (2.10)의 비선형 운동방정식으로부터 다음의 절차를 통해 유도할 수 있다. 심도 제어에 영향을 미치는 요인들만 고려하기 위해서  $u$ (surge velocity),  $w$ (heave velocity),  $q$ (pitch rate),  $\theta$ (pitch angle)를 제외한 나머지 상태  $v$ (sway velocity),  $p$ (roll rate),  $r$ (yaw rate),  $\phi$ (roll angle),  $\psi$ (yaw angle)는 0으로 가정한다[14, 19].

AUV의 깊이 방향 동작에 대해서만 고려된 운동방정식은 식 (2.13)이고 관련된 각각의 파라미터 값은 표 2.4와 같다. 이 때 AUV가 정상상태에서 일정한 속도  $U$ , 1.54[m/s](약 3[knots])로 이동하고 있다. 이 때 동체 운동이 작은 움직임으로만 구성되고 히브(heave)와 피치(pitch)는 거의 움직임이 없기 때문에 각각의 속도가 0라고 가정 할 수 있다. 그리고 속도에 대해서 선형화를 하게 되면 식 (2.14)와 같이 간단히 표현된다.

$$\begin{aligned}
(m - X_u) \dot{u} + mz_g \dot{q} - X_u u - X_q q - X_\theta \theta &= 0 \\
(m - Z_w) \dot{w} - (mx_g + Z_q) \dot{q} - Z_w w - (mU + Z_q) q &= Z_{\delta_s} \delta_s \\
mz_g \dot{u} - (mx_g + M_w) \dot{w} + (I_{yy} - M_q) \dot{q} - M_w w + (mx_g U - M_q) q - M_\theta \theta &= M_{\delta_s} \delta_s
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

$$\dot{z} = w - U\theta \tag{2.14}$$

$$\dot{\theta} = q$$

만약 식 (2.13)에서 무게중심  $z_g$ 가 다른 조건들에 비교하여 매우 작다고 가정하게 된다면, 식 (2.15)과 같이 Surge를 Heave와 Pitch로부터 분리시킬 수 있다.

$$\begin{aligned}
(m - Z_w) \dot{w} - (mx_g + Z_q) \dot{q} - Z_w w - (mU + Z_q) q &= Z_{\delta_s} \delta_s \\
- (mx_g + M_w) \dot{w} + (I_{yy} - M_q) \dot{q} - M_w w + (mx_g U - M_q) q - M_\theta \theta &= M_{\delta_s} \delta_s
\end{aligned}
\tag{2.15}$$

식 (2.14)와 식 (2.15)를 상태방정식으로 나타내면 식 (2.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\dot{x} - C_d x = D i \quad (2.16)$$

$$M = \begin{bmatrix} m - Z\dot{w} & -(mx_g + Z_q) & 0 & 0 \\ -(mx_g + M_w) & I_{yy} - M_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_d = \begin{bmatrix} z_w & mu + Z_q & 0 & 0 \\ M_w & -mx_g u + M_q & 0 & M_\theta \\ 1 & 0 & 0 & -U \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} Z_{\delta_s} \\ M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



여기서,  $x$ 는  $[w \ q \ z \ \theta]^T$ 인 상태벡터이고,  $w$ 는  $z$ 방향 속도를 나타내고,  $q$ 는  $y$ 축 피치각속도를 의미하며,  $z$ 는  $z$ 방향 위치를 나타내고,  $\theta$ 는  $y$ 축 피치각도를 의미한다.  $i$ 는 입력벡터로  $[\delta_s]^T$ 이다.  $\delta_s$ 는 핀 제어기 출력값으로 핀의 입력각도이다.

식 (2.16)를 일반적인 상태방정식 표현인 식 (2.17)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.17)$$

$$A = M^{-1}C_d, \quad B = M^{-1}D$$

한편, 히브 속도가 다른 조건들과 비교하여 매우 작다고 가정하면, 운동방정식은 식 (2.18)과 같이 간단하게 표현이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} I_{yy} - M_q & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M_q & 0 & -M_\theta \\ 0 & 0 & U \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s] \quad (2.18)$$

식 (2.18)을 일반적인 상태방정식으로 표현하게 되면 식 (2.19)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2.19)의 파라미터 값은 표 2.4에 명시하였다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{M_q}{I_{yy} - M_q} & 0 & \frac{M_\theta}{I_{yy} - M_q} \\ 0 & 0 & -U \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s]$$

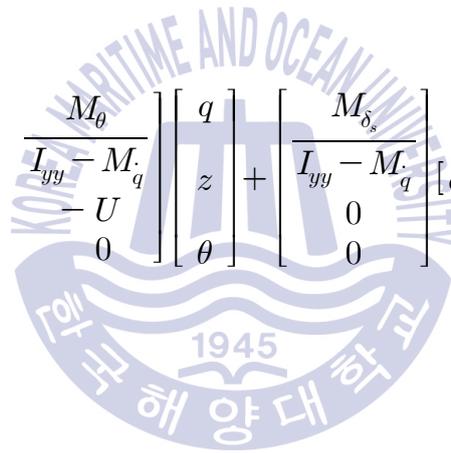


Table 2.2 Non-Linear coefficients : Forces

parameter	value	units	description
$X_{u u }$	-1.62e+000	kg/m	Cross-Flow Drag
$X_{\dot{u}}$	-9.30e-001	kg	Added Mass
$X_{uq}$	-3.55e+001	kg/rad	Added Mass Cross-Term
$X_{qq}$	-1.93e+000	kg · m/rad	Added Mass Cross-Term
$X_{vr}$	+3.55e+001	kg/rad	Added Mass Cross-Term
$X_{rr}$	-1.93e+000	kg · m/rad	Added Mass Cross-Term
$X_{prop}$	+3.86e+000	N	Propeller Thrust
$Y_{v v }$	-1.31e+002	kg/m	Cross-Flow Drag
$Y_{r r }$	+6.32e-001	kg · m/rad <sup>2</sup>	Cross-Flow Drag
$Y_{uv}$	-2.86e+001	kg/m	Body Lift Force and Fin Lift
$Y_{\dot{v}}$	-3.55e+001	kg	Added Mass
$Y_{\dot{r}}$	+1.93e+000	kg · m/rad	Added Mass
$Y_{ur}$	+5.22e+000	kg/rad	Added Mass Cross-Term and Fin Lift
$Y_{wp}$	+3.55e+001	kg/rad	Added Mass Cross-term
$Y_{pq}$	+1.93e+000	kg · m/rad	Added Mass Cross-term
$Y_{uu\delta_r}$	+9.64e+000	kg/(m · rad)	Fin Lift Force
$Z_{u w }$	-1.31e+002	kg/m	Cross-Flow Drag
$Z_{q q }$	-6.32e-001	kg · m/rad <sup>2</sup>	Cross-Flow Drag
$Z_{uw}$	-2.86e+001	kg/m	Body Lift Force and Fin Lift
$Z_{\dot{w}}$	-3.55e+001	kg	Added Mass
$Z_{\dot{q}}$	-1.93e+000	kg · m/rad	Added Mass
$Z_{uq}$	-5.22e+000	kg/rad	Added Mass Cross-Term and Fin Lift
$Z_{vp}$	-3.55e+001	kg/rad	Added Mass Cross-Term
$Z_{rp}$	+1.93e+000	kg/rad	Added Mass Cross-Term
$Z_{uu\delta_s}$	-9.64e+000	kg/(m · rad)	Fin Lift Force

Table 2.3 Non-Linear Coefficients : Moments

parameter	value	units	description
$K_{p p }$	-1.30e-003	kg · m <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup>	Rolling Resistance
$\dot{K}_p$	-1.41e-002	kg · m <sup>2</sup> /rad	Added Mass
$K_{prop}$	-5.43e-001	N · m	Propeller Torque
$M_{u w }$	+3.18e+000	kg	Cross-Flow Drag
$M_{q q }$	-9.40e+000	kg · m <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup>	Cross-Flow Drag
$M_{uw}$	+2.40e+001	kg	Body and Fin Lift and Munk Moment
$\dot{M}_w$	-1.93e+000	kg · m	Added Mass
$\dot{M}_q$	-4.88e+000	kg · m <sup>2</sup> /rad	Added Mass
$M_{uq}$	-2.00e+000	kg · m/rad	Added Mass Cross Term and Fin Lift
$M_{vp}$	-1.93e+000	kg · m/rad	Added Mass Cross Term
$M_{rp}$	+4.86e+000	kg · m <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup>	Added Mass Cross Term
$M_{uu\delta_s}$	-6.15e+000	kg/rad	Fin Lift Moment
$N_{v v }$	-3.18e+000	kg	Cross-Flow Drag
$N_{r r }$	-9.40e+000	kg · m <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup>	Cross-Flow Drag
$N_{uv}$	-2.40e+001	kg	Body and Fin Lift and Munk Moment
$\dot{N}_v$	+1.93e+000	kg · m	Added Mass
$\dot{N}_r$	-4.88e+000	kg · m <sup>2</sup> /rad	Added Mass
$N_{ur}$	-2.00e+000	kg · m/rad	Added Mass Cross Term and Fin Lift
$N_{wp}$	-1.93e+000	kg · m/rad	Added Mass Cross Term
$N_{pq}$	-4.86e+000	kg · m <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup>	Added Mass Cross Term
$N_{uu\delta_r}$	-6.15e+000	kg/rad	Fin Lift Moment

Table 2.4 Linear coefficients

parameter	value	units	description
$m$	+3.05e+001	kg	Vehicle Mass(weight/gravity)
$x_g$	+0.00e+000	m	Center of Gravity
$I_{yy}$	+3.45e+000	kg · m <sup>2</sup>	Moment of Inertia about y-axis
$X_u$	-9.30e-001	kg	Added Mass
$X_u$	-1.35e+001	kg/s	Axial Drag
$X_q$	-5.78e-001	kg · m/s	Added Mass Cross Term
$X_\theta$	+8.90e+000	kg · m/s <sup>2</sup>	Hydrostatic
$Z_w$	-3.55e+001	kg	Added Mass
$Z_q$	-1.93e+000	kg · m	Added Mass
$Z_w$	-6.66e+001	kg/s	Combined Term
$Z_q$	-9.67e+000	kg · m/s	Combined Term
$Z_{\delta_s}$	-5.06e+001	kg · m/s <sup>2</sup>	Fin Lift
$M_w$	-1.03e+000	kg · m	Added Mass
$M_q$	-4.88e+000	kg · m <sup>2</sup>	Added Mass
$M_\theta$	-5.77e+000	kg · m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Hydrostatic
$M_w$	+3.07e+001	kg · m/s	Combined Term
$M_q$	-6.87e+000	kg · m <sup>2</sup> /s	Combined Term
$M_{\delta_s}$	-3.46e+001	kg · m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Fin Lift

## 제 3 장 비선형 PID 제어기와 유전 알고리즘

본 장에서는 산업 현장에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 제어기로 구조가 간단하고 제어기 게인 조정이 쉬운 선형 PID(Linear PID : LPID) 제어기와 AUV 심도 제어를 위해 적응성과 강인성을 향상시킨 비선형 PID(Nonlinear PID : NPID) 제어기에 대해 알아본다. 그리고 제어기 파라미터의 동조를 위해 최적화 도구의 한 종류인 유전알고리즘에 대해 살펴보고자 한다.

### 3.1 선형 PID 제어기

#### 3.1.1 비례 제어기

비례 동작(P : Proportional)만을 갖는 제어기로 목표값과 현재 출력의 오차에 비례 게인을 곱하여 출력한다. 식 (3.1)은 비례 제어기의 식이다.

$$u_p(t) = K_p e(t) + u_o, \quad PB = \frac{100}{K_p} \quad (3.1)$$

위 식에서  $K_p$ 는 비례 게인,  $e(t)$ 는 출력과 목표값 사이의 오차,  $u_o$ 는 초기상태의 입력값을 나타낸다.  $PB$ (Proportional Band)는 제어기 출력 전체범위와 그 값에 해당하는 오차 크기와의 비를 나타내며  $PB$ 의 크기에 따라서 제어기의 민감도가 결정된다. 비례 게인  $K_p$ 가 클수록 응답속도가 빠르게 되지만 너무 작게 되면 정상상태 편차(off-set)가 발생한다.

### 3.1.2 비례적분 제어기

적분(I : Integral) 제어기는 오차의 면적을 적분하는 제어기이다. 시간이 지날수록 오차의 면적이 점점 커지게 되어 제어기의 출력은 증가하게 된다. 일반적으로 적분 제어기는 단독으로 사용하지 않고 정상상태 오차를 줄이기 위해 비례 제어기와 결합하여 사용한다. 식 (3.2)는 비례 적분(PI : Proportional Integral) 제어기이다.

$$u_{pi}(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt] \quad (3.2)$$

$T_i$ 는 적분 시간(reset time)이다. 적분시간이 짧을수록 목표치에 도달하는 시간이 줄어들게 되지만, 적분시간이 너무 짧으면 끊임없이 진동하는 현상이 발생할 수 있으므로 진동 현상이 발생하지 않게 적절하게 조정하는 것이 좋다.

### 3.1.3 비례미분 제어기

미분(D : Derivative) 제어기는 오차의 변화율을 증폭시킨다. 미분 제어는 비례 제어 혹은 적분 제어가 과도하게 작용하였을 때 감쇠시키는 역할, 즉 과도 응답특성을 개선시킨다. 식 (3.3)은 비례미분(PD : Proportional Derivative)를 나타낸다.

$$u_{pd}(t) = K_p [e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (3.3)$$

여기서  $T_d$ 는 미분시간을 나타낸다. 미분 동작이 들어있는 시스템의 입력에 잡음이 포함되어 있으면 미분 동작은 잡음을 크게 증폭하므로 잡음에 유의해야 한다.

### 3.1.4 비례적분미분 제어기

비례, 적분, 미분 동작이 전부 결합된 PID(Proportional Integral Derivative) 제어기는 적분 제어를 통하여 정상상태편차를 제거하여 정상상태 특성을 개선할 수 있고, 미분 제어를 통하여 빠른 응답을 얻을 수가 있다. 식 (3.4)는 기본적인 PID 제어기를 나타낸다.

$$u_{pid}(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.4)$$

전달함수로 표현하면 식 (3.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.5)$$

위 식에서  $K_p$ 는 비례 게인,  $T_i$ 는 적분시간,  $T_d$ 는 미분시간이며 식(3.6)과 같이 각각의 게인만으로 표현할 수 있다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.6)$$

$K_i$ 는 적분 게인으로  $\frac{K_p}{T_i}$ 이고,  $K_d$ 는 미분 게인으로  $K_p T_d$ 이다.

## 3.2 비선형 PID 제어기

### 3.2.1 비선형 PID 제어기

기존의 선형 PID 제어기의 단점은 제어기 파라미터를 정확하게 동조하였어도 운전 조건의 변화 등으로 인하여 제어대상이 변하게 되면 재동조해야 하는 점이다. 그렇기 때문에 기존의 선형 PID 제어기는 기능적 한계를 갖게 된다. 이러한 문제점을 개선시키기 위해 적응성과 강인성을 향상시키는 방법 중 비선형 PID 제어기가 효과적인 방법으로 선택되고 있다. 식(3.7)은 비선형 PID 제어기의 일반적인 표현을 나타내고 있다.

$$u(t) = K_p(e(t))e(t) + K_i(e(t)) \int e(t)dt + K_d(e(t)) \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

$K_p(e(t))$ 는 비례 게인,  $K_i(e(t))$ 는 적분 게인,  $K_d(e(t))$ 는 미분 게인이며 시변 게인(Time-varying gains)이다. 각각의 시변 게인은 오차  $e(t)$ 의 함수로 특정 지워진다.  $e(t)$ 를  $e$ 로 표기하고 식 (3.7)를 주파수 영역으로 표현하면 아래 식 (3.8)과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(e) + \frac{K_i(e)}{s} + K_d(e)s \quad (3.8)$$

### 3.2.2 AUV 심도 제어에 사용되는 비선형 PID 제어기

본 논문에서 사용되는 비선형 PID 제어기[20]는 식 (3.9)와 같이 표현되고 블록선도로 표시하면 그림 3.1과 같다.

$$C(s) = K_p(e) + \frac{K_i(e)}{s} + K_d(e, \dot{e})s \quad (3.9)$$

$K_p(e)$ ,  $K_i(e)$ ,  $K_d(e, \dot{e})$ 는 오차  $e$ 와 오차 변화율  $\dot{e}$ 에 대한 비선형 함수로써 시변 계인이다.

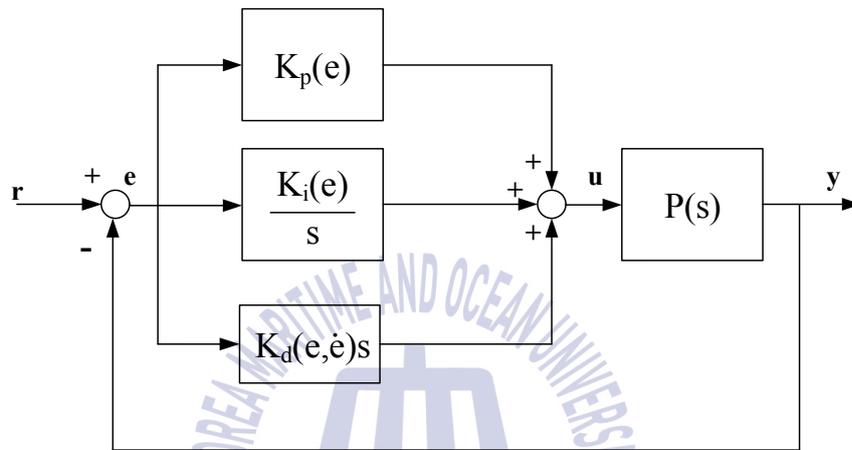


Fig. 3.1 Used NPID control system

(1) 비선형 비례 게인(Nonlinear Proportional gain)

비례 게인 크기는 오차  $e$ 에 따라서 적절히 조절될 수 있다.  $K_p(e)$ 는 식 (3.10)과 같이 오차  $e$ 에 따라 적절히 조절 될 수 있는 함수이다.

$$K_p(e) = K_p g_p(e) \quad (3.10a)$$

$$g_p(e) = 1 - \frac{1}{a_p + (c_p e)^6} \quad (3.10b)$$

$K_p$ 는 양의 상수,  $g_p(e)$ 는 두 매개변수  $a_p(\geq 1)$  와  $c_p(>0)$ 를 갖게 되는 비선형 함수이다. 식 (3.10)에서 오차  $e$ 가 무한대로 커지게 되면  $g_p(e)$ 는 상한값 1로 수렴하고, 반대로 오차  $e$ 가 0이면 하한값  $(1-1/a_p)$ 로 수렴한다. 하한값으로 수렴할 때의 크기는  $a_p$ 값에 따라 달라진다.

### (2) 비선형 적분 게인(Nonlinear Integral Gain)

$e$ 의 절대값이 클 때에는 적분 게인 값을 작게 하여 오버슈트 생성에 대비하고,  $e$ 의 절대값이 작을 때에는 적분 게인 값을 큰 값으로 하여 정상상태 오차를 줄일 수 있다. 이를 위해 식 (3.11)을 사용한다.

$$K_i(e) = K_i g_i(e) \tag{3.11a}$$

$$g_i(e) = \frac{1}{1+(c_i e)^6} \tag{3.11b}$$

여기서  $K_i$ 는 양의 게인,  $g_i(e)$ 는  $c_i(>0)$ 를 매개변수로 갖는 비선형 함수이다. 비선형 함수  $g_i(e)$ 는 0과 1 사이 값을 갖는다.

### (3) 비선형 미분 게인(Nonlinear Derivative Gain)

비선형 미분동작은 오차의 변화율과 미분 게인에 비례해서 커지고, 비례 동작과 적분 동작이 커지면 출력도 같이 커지게 될 것을 미리 예측하고 제동을 걸게 된다. 이를 위해서 식 (3.12)로 표현되는 시변 미분 게인을 사용한다.

$$K_d(e, \dot{e}) = K_d g_d(e, \dot{e}) \tag{3.12a}$$

$$g_d(e, \dot{e}) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{a_d + (c_d e)^6} & , \quad e\dot{e} > 0 \\ 1 - \frac{1}{a_d} & , \quad \textit{elsewhere} \end{cases} \quad (3.12b)$$

$K_d$ 는 양의 계인,  $g_d(e, \dot{e})$ 는 두 매개변수  $a_d(\geq 1)$ 와  $c_d(>0)$ 를 갖는 비선형 함수이다. 비선형 함수  $g_d(e, \dot{e})$  또한 0과 1 사이의 값을 갖는다.

### 3.3 최적화 도구로서 유전 알고리즘

유전알고리즘은 자연환경에서 발견되는 자연선택과 같은 진화 원리와 유전학을 알고리즘 형태로 모방한 최적화 탐색기법 중의 하나이다. 이 기법은 1975년 J. H. Holland 교수[21]에 의해 처음으로 개발된 것으로, Goldberg[22]에 의해 더욱 발전하게 된다. 유전알고리즘이란 주어진 해 공간에서 최적의 값을 선정하기 위해 적자생존의 개념을 이용한다. 초기 집단이 생성되고 염색체들의 열성과 우성이 적합도 항목에 의해 평가된다. 이 때 각 염색체는 복호화 되어 목적함수를 제공하고 그 결과로 적합도가 개선된다. 유전 연산자로 사용되는 재생산은 적합도 값에 의하여 더 적합한 개체를 선택하여 다음 세대의 집단을 생성하고, 교배는 개체들 사이의 정보교환이 가능하게 하며, 돌연변이는 유전자를 임의로 변경하여 집단에 새로운 변화를 도입한다. 한 세대 동안 유전 연산자를 통해 재생산, 교배, 돌연변이 과정을 거치면서 새롭게 생성된 집단은 다시 평가되고 앞서 수행한 연산과정은 최적의 해가 찾아질 때 까지 반복된다. 그림 3.6은 유전알고리즘의 대략적인 흐름을 나타낸 것이다[23].

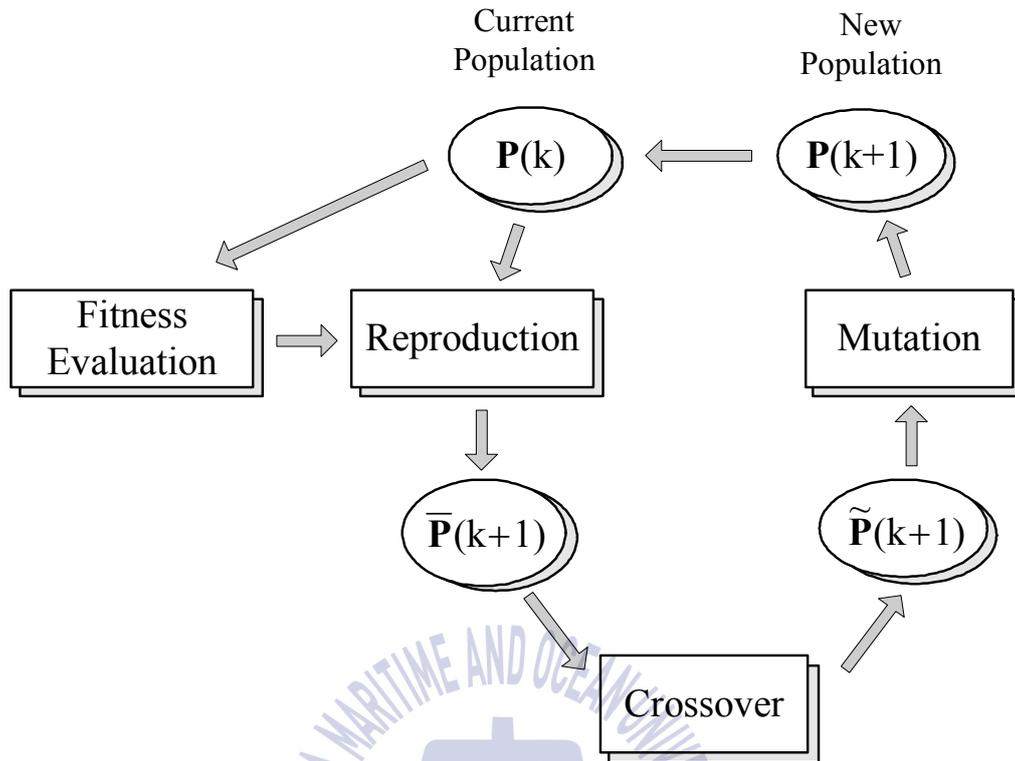


Fig. 3.2 Operation of a Genetic Algorithm

### 3.3.1 실수 코딩 유전 알고리즘

실수 코딩 유전 알고리즘은 해결하고자 하는 문제를 직접 다루는 것이 아니라 해를 염색체 혹은 자연 파라미터의 형태로 변형하여 사용한다. 유전 알고리즘은 이진코딩(binary coding)에 기초를 두고 있지만, 이진코딩을 사용할 경우 탐색공간이 크고, 제약조건이 존재하여 높은 정밀도의 해가 필요한 경우 염색체의 길이를 크게 설정해야 하는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 염색체를 실수로 표시함으로 정확히 문제의 변수와 일대일로 일치하게 되는 실수 유전자를 갖게 하는 실수코딩 유전 알고리즘(RCGA)[24]을 사용한다. 실수 유전자가 문제의 해 벡터와 일대일로 대응하게 된다. 따라서 실수코딩 염색체는 식 (3.13)과 같이 실수 값의 열로 표현된다.

$$s = (s_1 \ s_2 \ \dots \ s_i \ \dots \ s_n) \quad (3.13)$$

여기서  $s_i \in \mathbb{R}$ 는  $i$ 번째 유전자이고,  $n$ 은 벡터의 차원이다.

실수코딩을 사용하게 되면 염색체 길이는 벡터 차원  $n$ 과 일치하게 되고, 문제공간에서 가까운 두 점은 표현공간에서도 가깝게 되는 특징을 갖는다.

### 3.3.2 초기 집단의 생성

주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들이 유전 연산자를 통해 모의 진화를 수행하고 여러 세대를 거치면서 우성의 유전자만 보유하게 된다. 이 집단은 세대에서 식 (3.14)로 나타내어지고,  $N$ 으로 나타나는 집단크기는 세대가 변하게 되더라도 항상 일정한 크기를 갖게 된다고 가정한다.

$k$ 세대 집단  $P(k)$ 는 염색체로 특정 지워지는  $N$ 개의 개체들로 이루어진 집합으로 정의된다.

$$P(k) = \{s_1(k), s_2(k) \dots s_i(k) \dots s_N(k)\} \quad (3.14)$$

특히 초기 집단인  $P(0)$ 는 경험을 통해 생성되거나 무작위로 생성될 수 있다. 후자는 난수 발생기를 통하여 발생된 실수로 초기집단을 구성한다. 본 논문에서는 후자의 방법인 무작위로 초기집단을 생성한다. 염색체 요소들은 난수발생기를 사용하여 발생하는 정의영역  $x_j^L \leq x_{ij}(k) \leq x_j^U (1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n)$  내의 임의의 실수 값으로 설정된다.

### 3.3.3 유전 연산자

집단 내에 모의진화를 발생시키기 위해서 자연의 진화원리를 알고리즘으로 모방해야 하며, 이를 위해 대부분의 유전알고리즘에서는 기본연산자로 재생산, 돌연변이, 교배와 같은 유전 연산자를 사용한다.

## (1) 재생산

재생산(reproduction)은 자연의 적합한 생물이 더 높은 생존 기회를 갖는 적자 생존과 자연도태를 모방하는 메커니즘으로 각 개체의 적합도를 기반으로 하여 집단 내의 개체들을 선정하고, 새로운 집단을 만드는 과정이다. 이를 통해 집단 내 약한 개체들을 몰아내고, 강한 개체들이 선정되어 세대교체가 진행될수록 좋은 유전자를 가진 집단이 되게 한다.

본 논문에서는 Pham과 Jin[25]이 제안한 구배와 유사한 재생산을 사용한다.

## (2) 교배

교배(crossover)는 자연계 생물의 성적결합을 모방하는 것으로써 이를 통하여 부모 세대의 유전인자가 서로 교환된다. 교배 연산자로는 플랫폼 교배[26], 단순 교배[27], 산술적 교배[28] 등이 있으며, 본 논문에서 사용되는 수정단순 교배는 식 (3.15)과 같이 일차 결합하여 자손을 생성하는 산술적 교배와 선택된 교배점 이후의 유전자 끼리 서로 교환하여 자손을 형성하는 단순 교배를 결합한 형태이다.

$$\begin{aligned}\tilde{x}_j^u &= \lambda x_j^v + (1-\lambda)\bar{x}_j^u \\ \tilde{x}_j^v &= \lambda x_j^u + (1-\lambda)\bar{x}_j^v \quad (1 \leq j \leq n)\end{aligned}\tag{3.15}$$

여기서  $\bar{x}_j^u$ 와  $\bar{x}_j^v$ 는 집단에서 선택된 부모 염색체 유전자이며,  $\tilde{x}_j^u$ 와  $\tilde{x}_j^v$ 는 자손의 염색체 유전자이다.  $\lambda$ 는 곱인수(multiplier)로써 고정되거나 또는 각 유전자 마다 독립적으로 결정되어지는 0과 1사이의 난수이다.

그림 3.3은 이 연산자의 연산 결과를 보여준다.

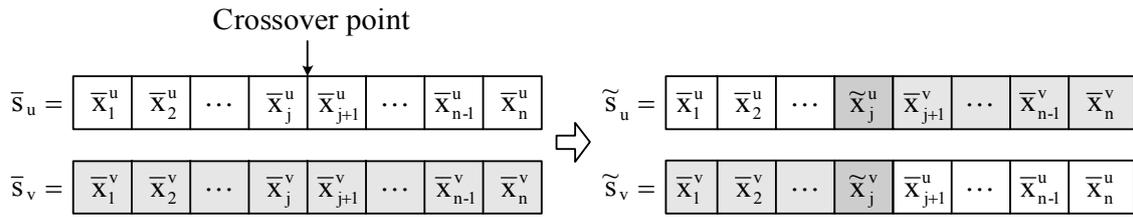


Fig. 3.3 Modified simple crossover

### (3) 돌연변이

모의진화가 진행되는 동안 교배와 재생산을 통해 우수한 집단만 남게 될 때 염색체들이 서로 닮아가게 되어 지역해나 사점에 빠지게 될 수 있다. 이러한 원하지 않는 해로부터 벗어나기 위한 메커니즘이 돌연변이이다. 돌연변이를 구현하는 방법으로 경계 돌연변이, 동적 돌연변이, 균등 돌연변이 등이 있으며, 본 논문에서는 동적 돌연변이를 사용하였다. 이 돌연변이 연산자는 세대 초기에는 모든 탐색공간을 균등한 확률로 탐색하게 된다. 세대수가 증가하게 되면 탐색영역을 좁혀서 지역적으로 탐색하기 때문에 돌연변이 확률을 다른 돌연변이 연산자보다 크게 설정할 수 있다. 그림 3.4와 같이  $j$ 번째 유전자에서 돌연변이가 일어나게 되면  $x_j$ 는 식 (3.16)로부터 결정된다.

$$\tilde{s} = [\tilde{x}_1 \mid \tilde{x}_2 \mid \dots \mid \tilde{x}_j \mid \tilde{x}_{j+1} \mid \dots \mid \tilde{x}_{n-1} \mid \tilde{x}_n] \Rightarrow s = [x_1 \mid x_2 \mid \dots \mid x_j \mid x_{j+1} \mid \dots \mid x_{n-1} \mid x_n]$$

Fig. 3.4 Dynamic mutation

$$x_j = \begin{cases} \tilde{x}_j + \Delta(k, \tilde{x}_j^{(U)} - \tilde{x}_j), & \text{if } \tau = 0 \\ \tilde{x}_j - \Delta(k, \tilde{x}_j - \tilde{x}_j^{(L)}), & \text{if } \tau = 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

여기서  $\tilde{x}_j$ 는 교배 연산 과정을 거치고 염색체 내에서 돌연변이 확률에 의해 선택된  $j$ 번째 유전자이다.  $\tilde{x}_j^{(L)}$ 는  $j$ 번째 유전자 하한값이고,  $\tilde{x}_j^{(U)}$ 는  $j$ 번째 유전자의 상한값이다.  $\tau$ 는 0 또는 1을 갖는 난수이다. 이때  $\Delta(k, y)$ 는 식 (3.17)의 함수가 사용된다.

$$\Delta(k, y) = y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{k}{T}\right)^b \quad (3.17)$$

여기서  $r$ 은 0 ~ 1 사이의 실수 난수이고,  $T$ 는 최대 세대수이며,  $b$ 는 불균형 정도를 표시하는 매개변수로써 사용자에게 의해 결정된다.

### 3.3.4 적합도 평가

자연계에서 생물의 생존 능력이 환경에 대한 적합도를 반영하게 되는 것과 동일하게 유전알고리즘은 최적해로 수렴 정도를 개체의 적합도를 평가하는 과정을 통해 반영된다. 새로운 집단이 생성될 때마다 개체 적합도는 목적함수에 의해 계산되고, 적합도의 평가는 새로운 집단이 형성 될 때 마다 계속 된다. 이 과정에서는 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받게 배려하기 위해 적합도 함수는 최대화 문제 형태로 나타내어야 하고, 음의 값을 갖지 않아야 한다. 따라서 적절한 적합도 함수는 식 (3.18)과 같이 사상(mapping)을 통해 얻을 수 있다.

$$\text{최대화 문제} : f(\mathbf{s}(\alpha)) = F(\mathbf{x}(\alpha)) - \beta \quad (3.18a)$$

$$\text{최소화 문제} : f(\mathbf{s}(\alpha)) = -F(\mathbf{x}(\alpha)) - \beta \quad (3.18b)$$

여기서  $f(\mathbf{s}(\alpha))$ 는 적합도 함수,  $F(\mathbf{x}(\alpha))$ 는 목적함수,  $k$ 는 세대,  $\beta$ 는 항상  $f(\mathbf{s}) \geq 0$ 을 보장하는 상수로 유전알고리즘의 성능에 직접적인 영향을 미치므로

적절한 선정이 필요하다.

일반적으로 탐색 범위 내에서 목적함수의 최소값을 찾는 것이 어렵기 때문에  $\beta$ 는 경험적으로 아주 작은 값으로 선정된다. 그러나  $\beta$ 를 초기에 잘 선정하여도 진화 도중의 값이 고정되면 선택압(selection pressure)이 떨어지는 문제가 발생하게 된다. 이 문제를 방지하기 위해 적합도 함수의 스케일링(scaling)이 필요하다.

### 3.3.5 적합도의 스케일링

유전알고리즘에서 작은 집단을 취급할 때 개체집단의 적합도 평가는 유전알고리즘 성능에 크게 영향을 미친다. 만약 초기 세대의 집단에 초우량의 개체가 출현하게 된다면 재생산 연산자는 이 개체를 수차례 복제하게 되고, 그 결과 복제된 개체가 집단을 지배하게 되어서 지역 최적점으로 급히 수렴하게 된다. 이와 반대로 후기 세대에서는 집단이 강해지게 되고 개체들이 한 점 주위로 모이게 되어 좋은 개체, 더 좋은 개체를 구별하는 것이 쉽지 않다. 그렇기 때문에 초기에 유전자의 다양성을 충분히 유지할 수 있게 개체간의 상대적인 적합도 영향을 줄여주어야 하고, 후기에는 그 영향을 커지게 하여 선택압을 일정하게 유지시켜 줄 필요성이 있다.

이와 같은 역할을 하기 위해서 스케일링 윈도우 기법을 통한 정규화 방법과 스케일링을 통한 정규화 방법이 사용된다. 전자의 방법은 과거 집단 개수인 스케일링 윈도우  $W_s$ 를 사용하여서 선택압을 유지하는 것으로  $\beta$  값을 과거 다수 집단에서 발견 되는 목적함수 값으로써 지속적으로 변경해주는 방법이고, 후자의 방법으로는 선형 스케일링, 시그마 절단, 로그 스케일링 방법 등이 있다. 본 논문에서는  $W_s$ 를 1로 선정하여 스케일링 윈도우 기법을 사용한다.

### 3.3.6 엘리트 전략

엘리트 전략(elitist strategy)은 일정한 세대에서 최적 개체의 소멸을 방지하는 전략으로써, 이전 세대의 최적 개체를 저장하였다가 일련의 모의진화를 시행하여 최적 개체가 소멸된 것으로 확인이 되면 현 세대에서의 가장 약한 개체를 저장되었던 최적 개체로 교환함으로써 집단 내에서 가장 최적의 개체가 다음 세대로 전달되는 것을 보장한다. 이 방법은 유전알고리즘의 성능을 개선하는 것으로 알려져 있다[29].

### 3.3.7 종료 조건

확률적인 탐색법으로서 유전알고리즘은 어느 시점에 전역해 값에 도달하게 될 것인지 알기가 쉽지 않다. 그러나 구체적인 적용에 있어 유전알고리즘을 정해진 세대까지 모의진화 시키는 방법을 사용한다. 만약 최종 세대까지 진화한 염색체가 만족하게 될 만한 해에 근접하지 못하게 된다면, 최종 세대수를 증가시켜서 다시 모의진화를 진행시킨다. 본 논문에서는 이와 같은 방법의 종료 조건을 사용한다.

## 제 4장 RCGA 기반 심도 제어기 설계

### 4.1 심도 제어 시스템 설계

AUV의 심도 제어 시스템을 위해 비선형 제어기를 설계하였다. 그림 4.1의 비선형 제어기를 이용한 제어 시스템에서 내부 제어 시스템인 핀 제어기로는 식 (4.1)의 비선형 PD 제어기를 사용하였고, 외부 제어 시스템인 피치 제어기로는 식 (4.2)의 비선형 P 제어기를 사용하였다. 제어 시스템에서는 핀 제어기와 피치 제어기를 통하여 전체적인 AUV의 심도 제어를 하게 된다.

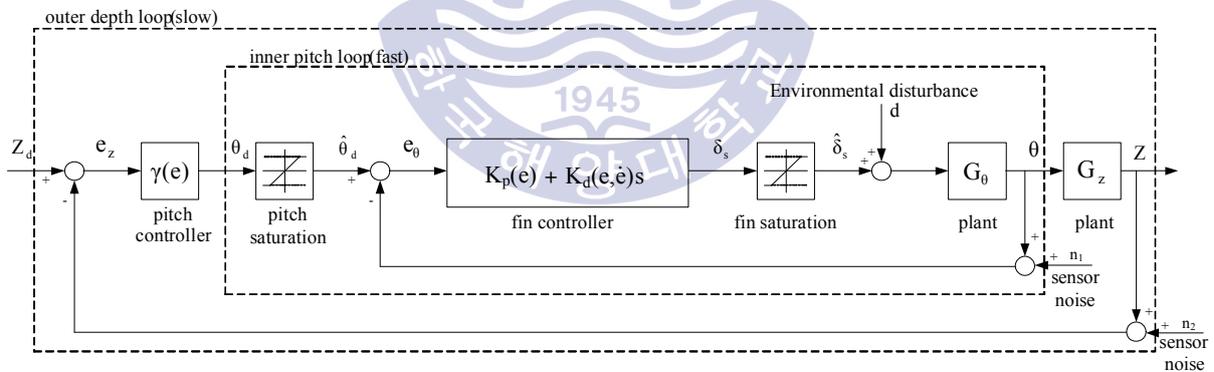


Fig. 4.1 Depth control system of AUV using Non-Linear controller

핀 제어기로 사용되는 비선형 PD 제어기는 식 (4.1)로 표현할 수 있다.

$$\frac{\delta_s(s)}{e_\theta(s)} = K_p \left( 1 - \frac{1}{a_p + (c_p e_\theta)^6} \right) + K_d g_d(e_\theta, \dot{e}_\theta) s \quad (4.1)$$

$$g_d(e_\theta, \dot{e}_\theta) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{a_d + (c_d e_\theta)^6}, & e_\theta \dot{e}_\theta > 0 \\ 1 - \frac{1}{a_d}, & \text{elsewhere} \end{cases}$$

여기서,  $\delta_s$ 는 PD 제어기의 출력으로써 핀의 입력 각도이고,  $e_\theta$ 는 핀의 목표각  $\theta_d$ 와 현재 핀 각  $\theta$ 의 오차 값이다.  $K_p$ 는 핀 제어기용 비례 제어 이득이고  $K_d$ 는 핀 제어기용 미분 계인이다.

피치 제어기로 사용되는 비선형 P 제어기는 식 (4.2)로 표현할 수 있다.

$$\frac{\theta_d(s)}{e_z(s)} = \gamma \left( 1 - \frac{1}{a_\gamma + (c_\gamma e_z)^6} \right) \quad (4.2)$$

여기서,  $e_z$ 는 심도오차  $Z_d - Z$ 이고,  $\theta_d$ 는 P 제어기의 출력으로 피치의 입력 각도이며,  $\gamma$ 는 피치 제어기용 비례 제어 이득이다.

제안하는 비선형 제어기와 비교되어지는 T. Prestero의 선형 제어기는 내부 제어 시스템인 핀 제어기로 선형 PD 제어기( $-K_p(\tau_d s + 1)$ )을 사용하였고, 외부 제어 시스템인 피치 제어기로 선형 P 제어기( $\gamma$ )를 사용하였다. 각 제어기의 이득 값은 극배치법을 사용하여 %Overshoot가 5[%], 정착시간이 0.75[s]에 만족하도록  $K_p$  값은 10.345,  $\tau_d$  값은 0.210,  $\gamma$  값은 -0.772로 선정하였다[14].

## 4.2 성능 지수를 이용한 AUV 심도 제어기의 파라미터 추정

AUV 심도 제어기의 파라미터를 탐색하기 위하여 사용되는 RCGA는 집단이 진화해 가는 동안 개체 간 우열을 평가하기 위하여 적합도를 필요로 한다. 이때 적합도는 목적 함수로부터 계산된다. 목적 함수로 사용되는 식 (4.3) ~ 식 (4.5)

의 성능 지수를 이용해 탐색된 제어기 파라미터를 적용해 제어시스템의 성능을 정량적으로 평가할 수 있다. 식 (4.3)은 제곱 오차 적분(ISE : Integral of the Square Error), 식 (4.4)는 절대 오차 적분(IAE : Integral of the Absolute Error), 식(4.5)은 시간 곱 절대 오차 적분(ITAE : Integral of the Time-weighted Absolute Error)을 나타낸다[30]. 본 논문에서는 RCGA를 사용하여 그림 4.2와 같이 AUV의 심도 제어를 위한 제어기의 파라미터를 ITAE(시간 곱 절대 오차 적분) 성능 지수를 목적 함수로 사용하여 탐색하였다.

$$ISE : J_{ISE} = \int_0^{t_f} \sqrt{(e_z^2(t) + e_\theta^2(t))} dt \quad (4.3)$$

$$IAE : J_{IAE} = \int_0^{t_f} (|e_z(t)| + |e_\theta(t)|) dt \quad (4.4)$$

$$ITAE : J_{ITAE} = \int_0^{t_f} t (|e_z(t)| + |e_\theta(t)|) dt \quad (4.5)$$

AUV 심도 제어를 위한 제어기의 파라미터 추정을 위해서 식 (2.19)의 AUV의 선형모델을 사용하였다. 모델의 파라미터는 표 2.4로 구할 수 있다.

이 때 사용된 RCGA의 제어 변수로 집단 크기는 30, 재생산 계수 1.8로 선정하고, 교배 확률은 0.95, 돌연변이 확률은 0.2로 선정하였다. 미지의 이득 행렬을 탐색하기 위한 탐색 구간의 선정은  $-80 < K_p < 80$ ,  $0.01 < T_d < 10$ ,  $-10 < \gamma < 10$ ,  $0.1 < a_p < 50$ ,  $0.1 < c_p < 50$ ,  $0.1 < a_d < 50$ ,  $0.1 < c_d < 50$ ,  $0.1 < a_\gamma < 50$ ,  $0.1 < c_\gamma < 50$  으로 설정하였다. 이 때 초기의 AUV는 수면 0[m]에서 일정 속도로 항로 유지(course keeping) 운항하고 있으며, 목표 심도를 수심 1[m]로 명령한다.  $q$ (pitch rate),  $z$ (heave position),  $\theta$ (pitch angle)의 초기값은 0으로 선정한다.

일반적으로 유전 알고리즘을 통해 얻게 되는 추정치의 정밀도는 초기 집단의 선택에 크게 좌우된다. 이를 배제하기 위하여 본 논문에서는 독립된 seed로 10

회의 시뮬레이션을 실시한 후 평균하여 최종적으로 표 4.1과 같이 제어기 파라미터를 선정한다. 표 4.1은 RCGA를 통해 탐색된 비선형 제어기의 파라미터들이다.

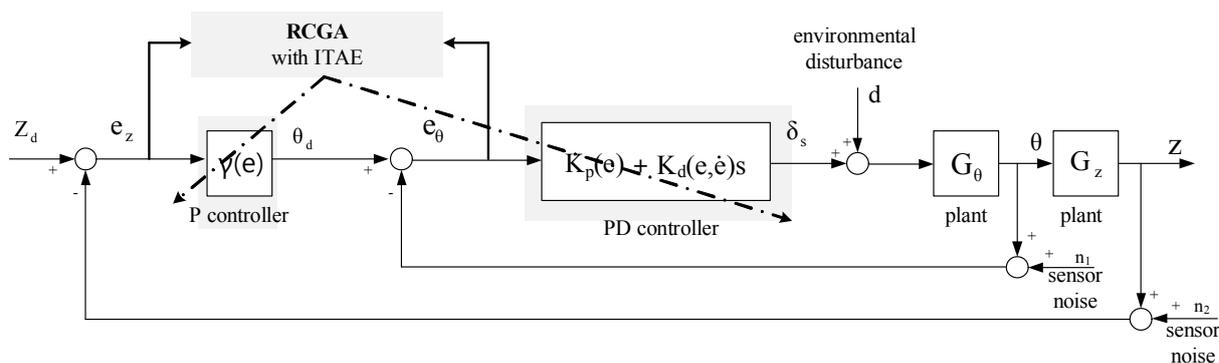


Fig. 4.2 Optimal tuning of the Non-Linear depth controller using a RCGA

Table 4.1 Parameters of Non-Linear PD controller

Parameters		
$K_p$	$T_d$	$\gamma$
-42.579	0.114	-1.085
$a_p$	$c_p$	$a_d$
24.34	48.282	13.152
$c_d$	$a_\gamma$	$c_\gamma$
36.296	33.257	33.382

그림 4.3은 RCGA가 목적함수인 ITAE 성능 지수를 최소화시키면서 파라미터들을 탐색하고 있는 과정의 일례를 나타낸 것이다. 40세대 전후로 최적 파라미터 값에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다.

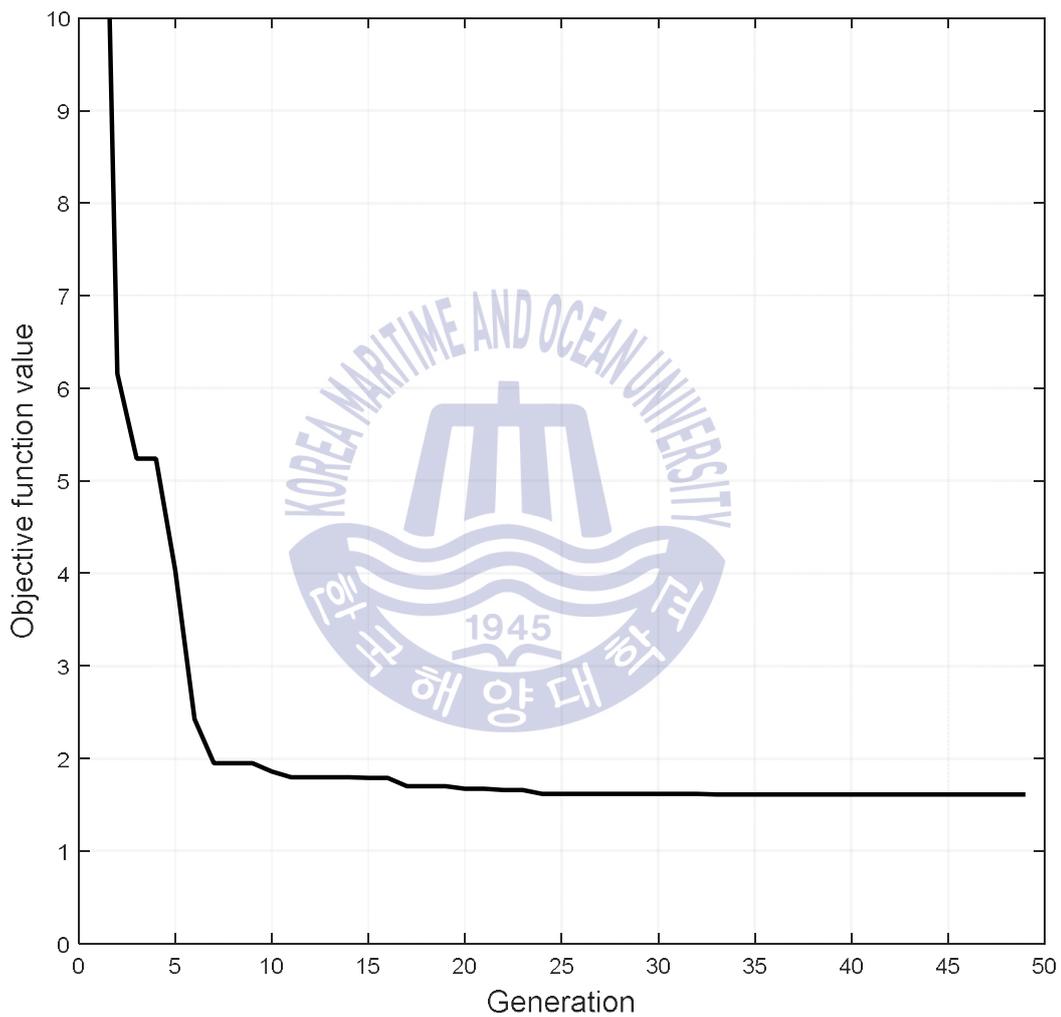


Fig. 4.3 Tuning process for controller parameter using ITAE

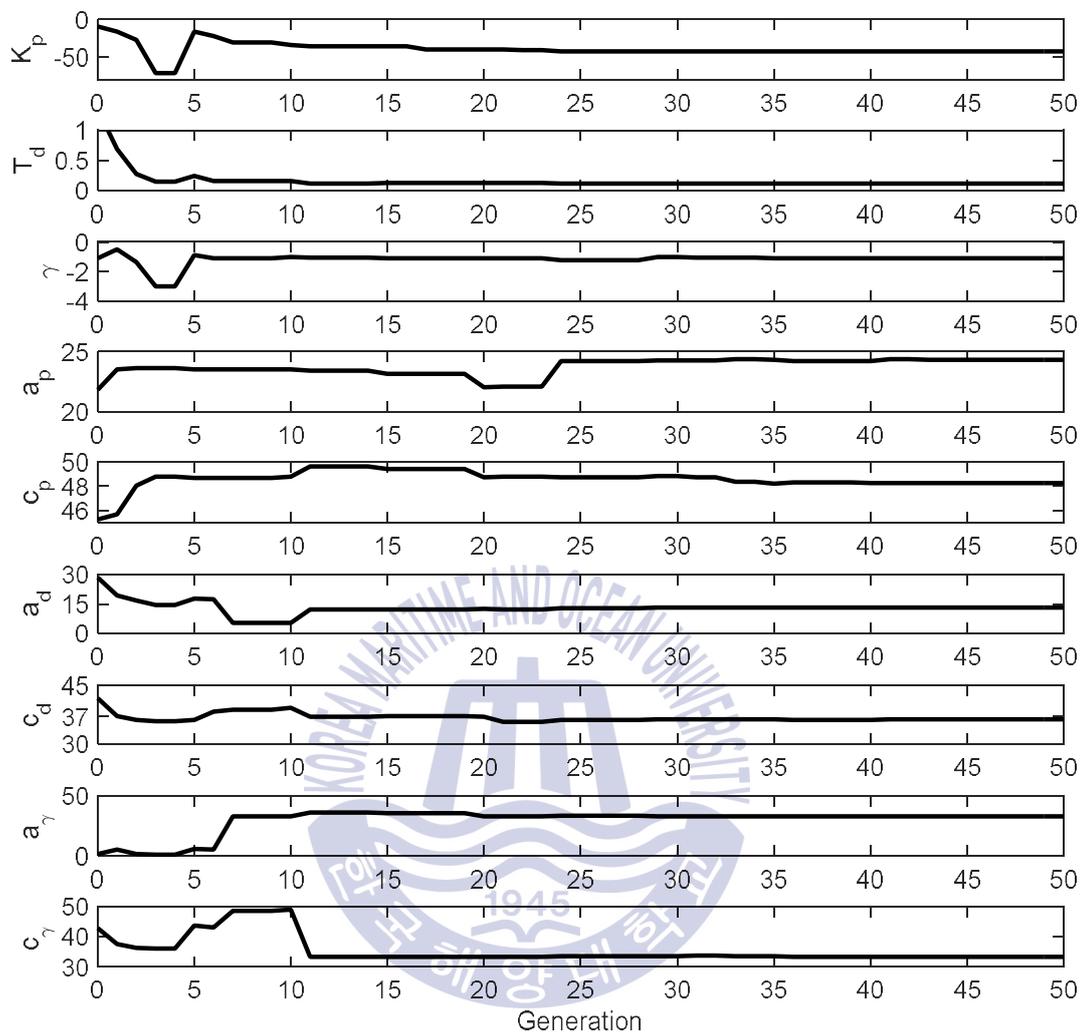


Fig. 4.4 Tuning process for controller parameter using ITAE

$$(K_p, T_d, \gamma, a_p, c_p, a_d, c_d, a_\gamma, c_\gamma)$$

## 제 5장 모의실험 및 결과 검토

제어기의 동조는 초기의 AUV가 수면에서 일정 속도로 운항하고 있으며, 수심을 1[m]로 명령하였을 때, ITAE 성능지수를 최소화 시키는 관점에서 RCGA에 의해 수행되었다.

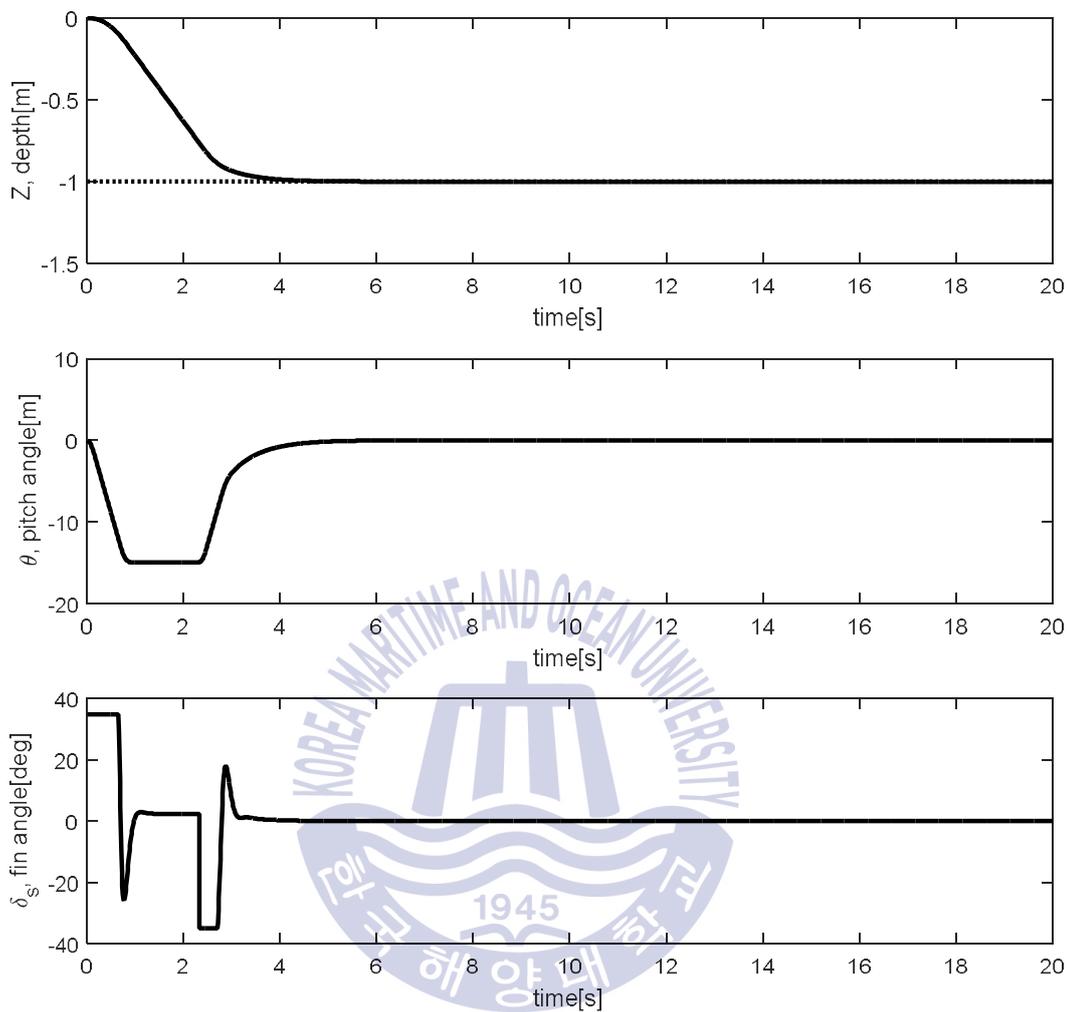
본 장에서는 RCGA를 통해 동조된 비선형 제어기를 이용해 AUV의 선형모델 및 비선형모델에 대해 심도 제어를 컴퓨터 시뮬레이션 한다. 또한 T. Prestero[14]가 제안한 선형 제어기(TP)와 본 논문의 비선형 제어기(NPD)를 AUV의 비선형모델에 적용하여 그 결과를 비교하여 본다.

정량적인 비교를 위해 특정 시간 동안의 오차 값(IAE : Integral Absolute Error), 목표 심도 값의 10[%]에서 90[%] 사이의 상승시간, 목표 심도값의  $\pm 2 \sim 2.5$ [%]에 도달하는 정착시간을 비교하였다.

### 5.1 비선형 PD 제어기를 이용한 AUV 선형 모델의 심도 제어

본 절에서는 제안한 비선형 제어기를 식 (2.19)의 AUV 선형모델에 적용하여 목표심도(0[m]  $\rightarrow$  1[m], 0[m]  $\rightarrow$  10[m])에 대하여 심도 제어를 시뮬레이션 한다. 핀 각의 작동 운동 범위는  $\pm 35^\circ$  ], 피치 각의 운전 가능 범위는 각각  $\pm 15^\circ$  ]로 제한하는 포화기가 설치되어 있다. AUV는 수면 0[m]에서 1.54[m/s](약 3[Knots]) 일정 속도로 운항하고 있으며,  $q$ (pitch rate),  $z$ (heave position),  $\theta$ (pitch angle)의 초기값은 0으로 선정한다.

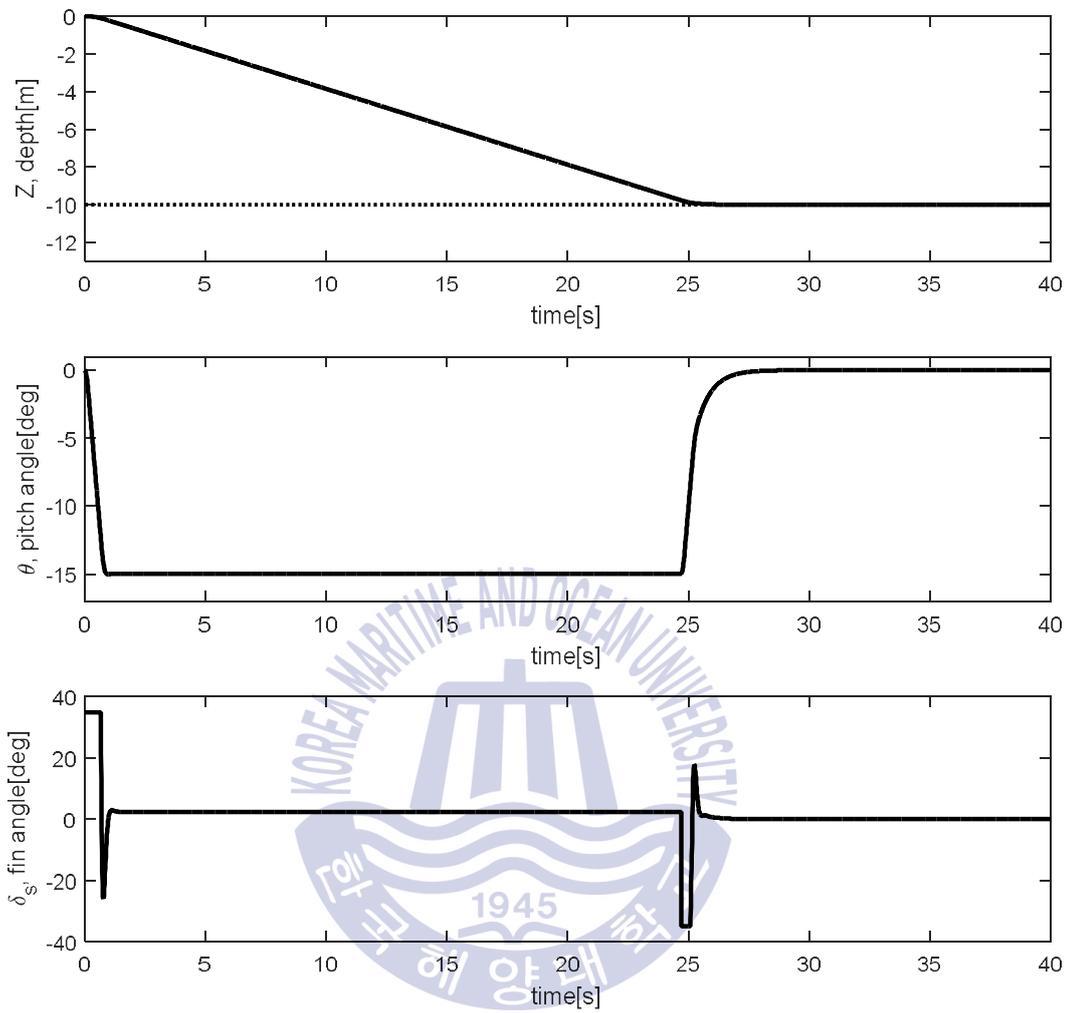
목표 심도 값 1[m] 일 때 그림 5.1과 목표 심도 값 10[m] 일 때 그림 5.2에서와 같이 오버슈트와 정상상태 오차 없이 목표 심도 값에 도달하는 것을 알 수 있다. 정량적인 값으로 표 5.1과 표 5.2에는 상승시간, 정착시간, IAE 값을 정리하였다.



**Fig. 5.1** Depth tracking response of Linear AUV Model using Non-Linear Controller (0[m] → 1[m])

**Table 5.1** Performance of Non-Linear depth control system for Linear AUV Model (0[m] → 1[m])

Controller	IAE	Rise Time	Settling Time
NPD	1.8675	2.0971	3.7497



**Fig. 5.2** Depth tracking response of Linear AUV Model using Non-Linear Controller (0[m]  $\rightarrow$  10[m])

**Table 5.2** Performance of Non-Linear depth control system for Linear AUV Model (0[m]  $\rightarrow$  10[m])

Controller	IAE	Rise Time	Settling Time
NPD	128.8982	19.8850	24.7966

## 5.2 비선형 PD 제어기를 이용한 AUV 비선형 모델의 심도 제어

본 절에서는 T. Prestero가 제안한 선형 제어기와 본 논문의 비선형 제어기를 AUV 비선형 모델에 적용하여 아래의 조건과 함께 그 결과를 비교하였다. 그리고 핀 각의 작동 범위 및 피치각의 작동 범위는 각각  $\pm 35[^\circ]$  및  $\pm 15[^\circ]$ 로 제한하는 포화기가 설치되어 있다.  $u$ (surge velocity)는  $1.54[m/s]$ (약  $3[Knots]$ ),  $\phi$ (roll angle)은  $-0.0873[rad]$ 이며,  $v$ (sway velocity),  $w$ (heave velocity),  $p$ (roll rate),  $q$ (pitch rate),  $r$ (yaw rate),  $\theta$ (pitch angle),  $\psi$ (yaw angle)의 초기값은 0으로 선정한다.

- 1) 설정치 추종에 대한 심도 제어
- 2) 과도상태에서 지속적인 바이어스 형태의 피치 각 외란 부가
- 3) 정상상태에서 지속적인 바이어스 형태의 피치 각 외란 부가
- 4) 측정용 센서에 잡음이 섞였을 경우

### 5.2.1 설정치 추종에 대한 심도 제어

제안한 비선형 PD 제어기의 추종성능을 알아보기 위해 목표 심도값을  $0[m]$ 에서  $10[m]$ 로 변경시켰다.

그림 5.3은 제안한 비선형 PD 제어기와 T. Prestero 선형 PD 제어기를 AUV 비선형 모델에 대해 시뮬레이션한 것이다. 각각의 정량적인 값은 표 5.3에 정리하였다.

제안된 비선형 PD 제어기와 T. Prestero의 선형 PD 제어기는 거의 동일한 추종 성능을 보이고 있다. 두 제어기 모두 정상 상태 오차값  $0.04[m]$ , 최종 심도  $-9.96[m]$ 에 수렴하였다. 비선형 PD 제어기는 명령 초기 오차가 클 때는 오차를 작게 하기 위해 빠른 응답 성능을 보이고, 설정치에 도달하게 되면 오차가 작아지기 때문에 제어기 게인 값을 조절하여 설정치 부근에서 제어 대상의 급격한 움직임이 상대적으로 작았다.

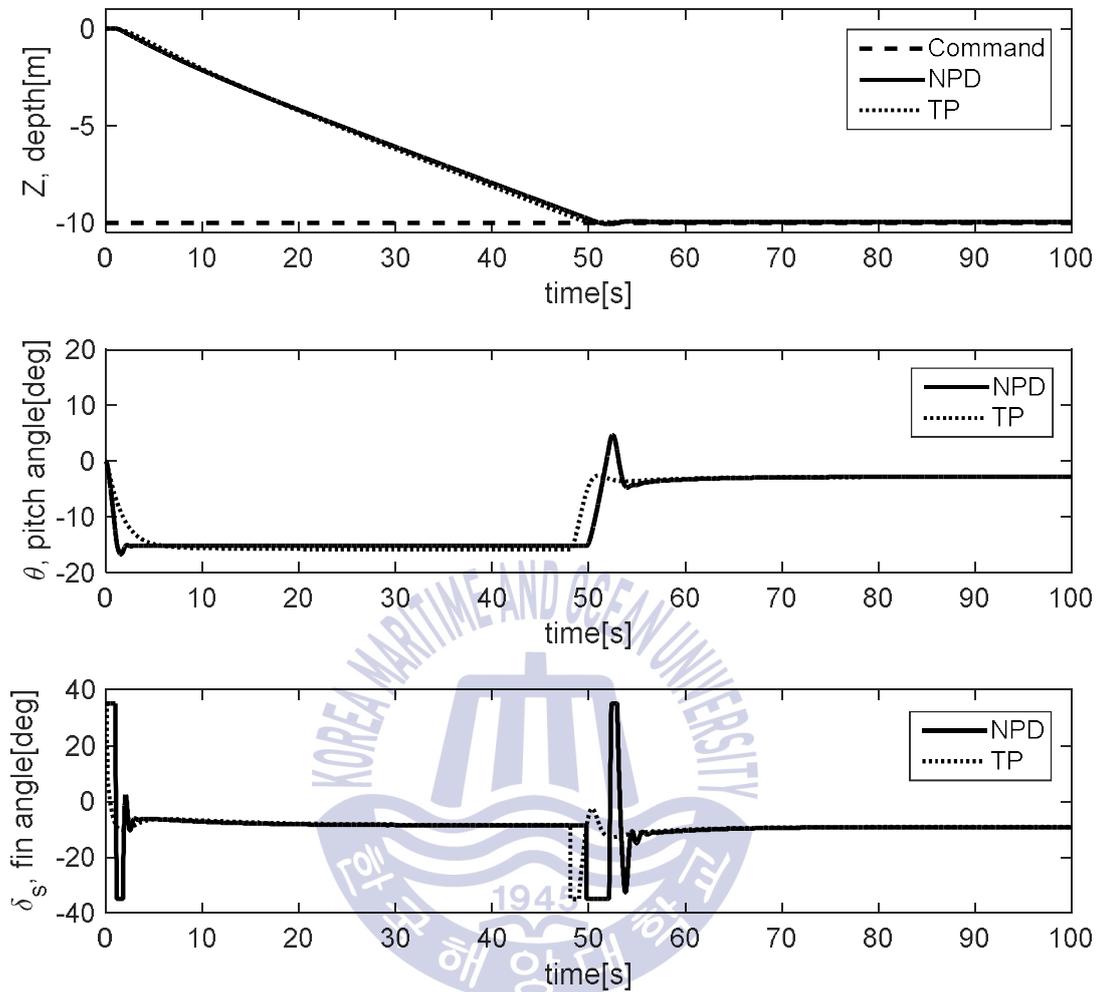


Fig. 5.3 Depth tracking response of Non-Linear AUV Model

Table 5.3 Performance of Depth control system for Non-Linear AUV Model

Controller	IAE	Rise Time	Settling Time
NPD	251.2808	40.5749	49.9845
T.P	249.2671	38.9268	48.8219

## 5.2.2 과도 상태에서 지속적인 바이어스 형태의 피치 각 외란 부가

AUV 비선형 모델에 대한 심도 제어 도중 과도상태인 30[s]부터 피치 각에  $+0.3[\text{rad}]$ 에 해당하는 외력이 지속적으로 작용한다고 가정하여 시뮬레이션을 하였다. 여기서 지속적인 바이어스 형태의 외란이란 AUV가 잠수하는 중에 수중에서 물방울과 같이 외부 환경 변화에 의해 피치각의 변화가 있는 경우이다.

그림 5.4는 각각의 제어기를 사용했을 때의 결과를 나타낸 것이다. 정량적인 값은 표 5.4에 정리하였다. 그림 5.4의 두 번째 그림은  $Z$ , depth[m]에 대하여 time축을 40[s] ~ 100[s] 범위로 확대 시킨 결과이다.

제안된 비선형 PD제어기를 사용한 경우 목표 심도값의 2.5[%] 이내인  $-10.23[\text{m}]$ 에 수렴하였지만, T. Prestero 선형 PD 제어기를 사용한 경우 목표 심도값에서 점차 벗어나는 것을 확인하였다.



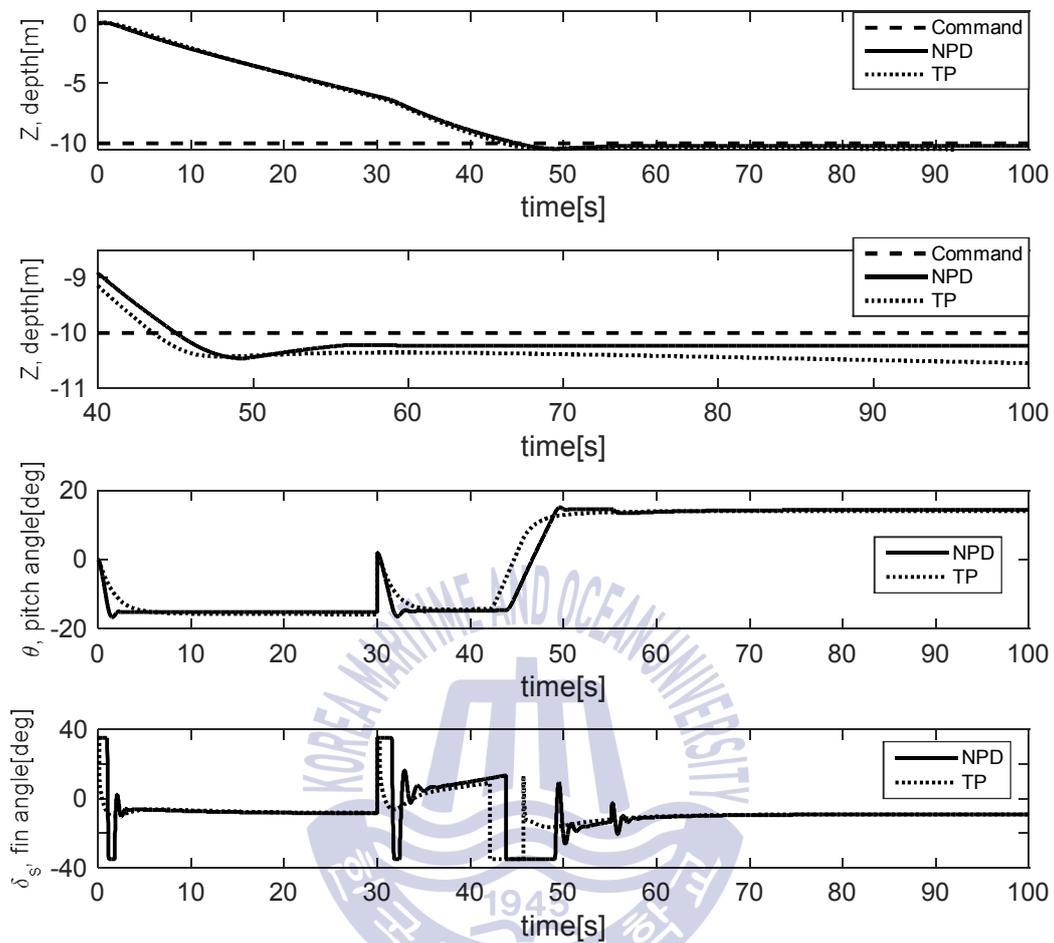


Fig. 5.4 Depth tracking response of Non-Linear AUV Model

(Disturbance at 30[s])

Table 5.4 Performance of Depth control system for Non-Linear AUV Model (Disturbance at 30[s])

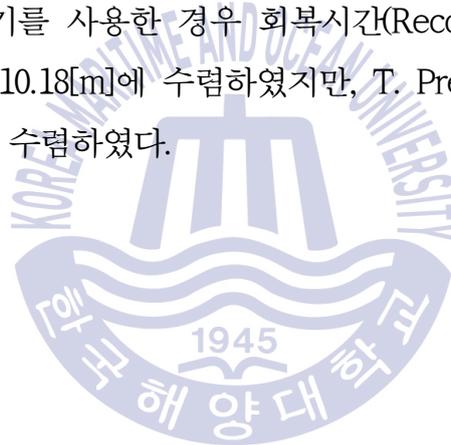
Controller	IAE	Rise Time	Settling Time
NPD	250.1248	35.2461	54.8618
T.P	258.5804	33.7353	NaN

### 5.2.3 정상 상태에서 지속적인 바이어스 형태의 피치 각 외란 부가

AUV 비선형 모델에 대한 심도 제어 도중 정상상태인 60[s]부터 피치 각에  $+0.25[\text{rad}]$ 에 해당하는 외력이 지속적으로 작용한다고 가정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 여기서 지속적인 바이어스 형태의 외란이란 AUV가 잠수하는 중에 수중에서 물방울과 같이 외부 환경 변화에 의해 피치각의 변화가 있는 경우이다.

그림 5.5는 각각의 제어기를 사용했을 때의 결과를 나타낸 것이다. 정량적인 값은 표 5.5에 정리하였다. 그림 5.5의 두 번째 그림은  $Z$ , depth[m]에 대하여 time축을 60[s] ~ 100[s] 범위로 확대 시킨 결과이다.

제안된 비선형 PD 제어기를 사용한 경우 회복시간(Recovery Time) 8.9061[s] 후 목표 심도값의 2[%] 이내인  $-10.18[\text{m}]$ 에 수렴하였지만, T. Prestero 선형 PD 제어기를 사용한 경우에는  $-10.28[\text{m}]$ 에 수렴하였다.



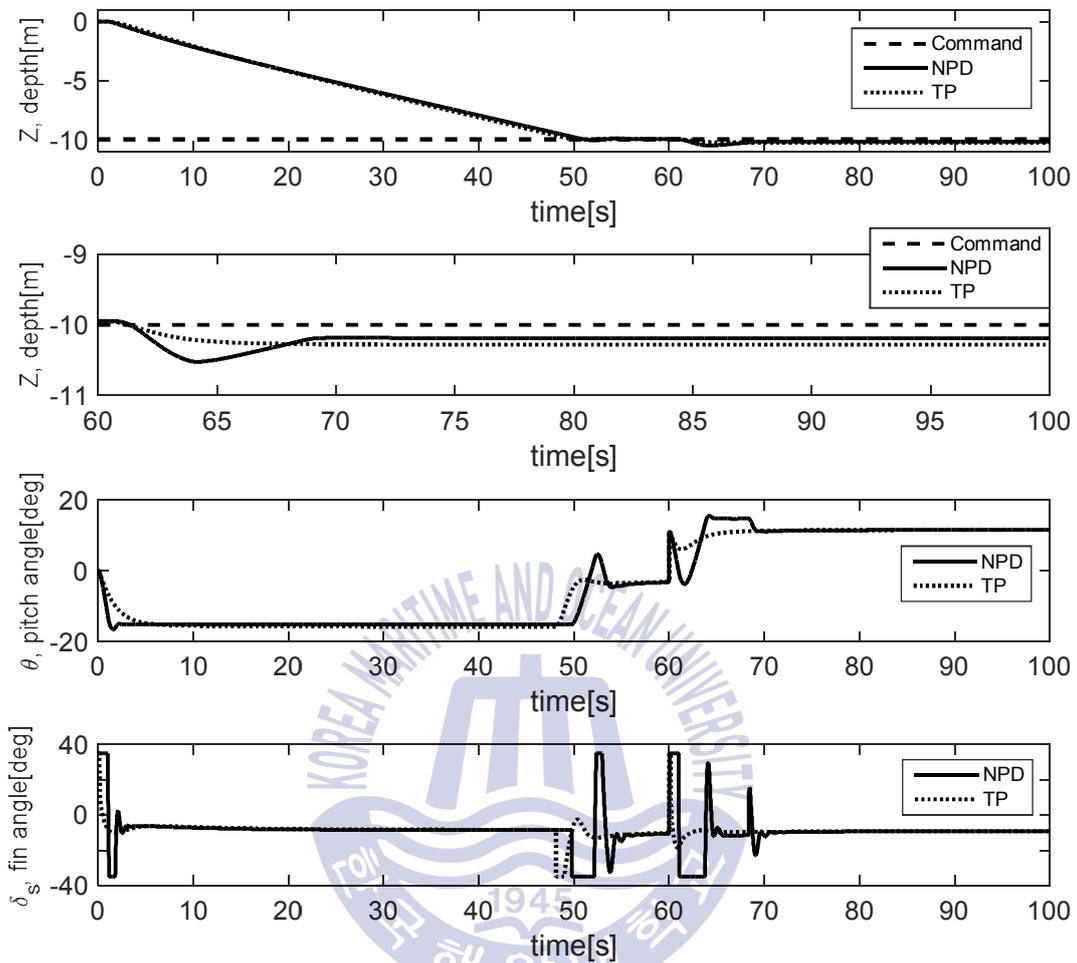


Fig. 5.5 Depth tracking response of Non-Linear AUV Model

(Disturbance at 60[s])

Table 5.5 Performance of Depth control system for Non-Linear AUV Model (Disturbance at 60[s])

Controller	IAE	Rise Time	Settling Time
NPD	258.6516	40.5749	68.9061
T.P	258.0457	38.9268	NaN

#### 5.2.4 측정용 센서에 잡음이 섞였을 경우

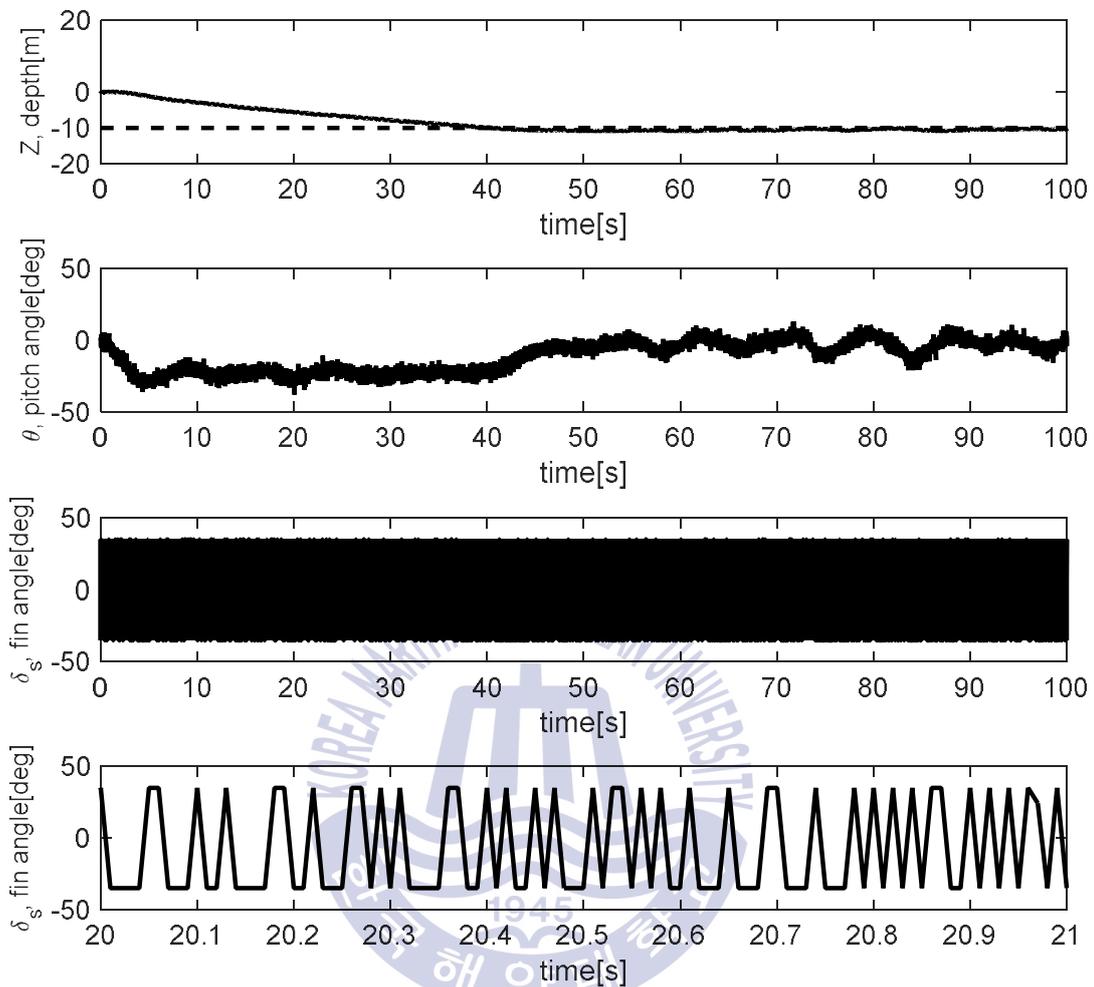
심도 제어 도중 심도 측정용 센서 및 피치 각 측정용 센서에 잡음이 섞였을 경우를 가정하여 시뮬레이션 한다. 심도측정용 센서 및 피치 각 측정용 센서의 잡음(noise)은 모두 평균이 0이고 분산이 0.05인 정규잡음이라고 가정하였다.

그림 5.6 및 그림 5.7은 각각 이러한 잡음이 있는 경우에 제안한 비선형 PD 제어기와 T. Presterio 선형 PD 제어기에 의한 응답을 나타낸 것이다.

표 5.6과 표 5.7은 각각의 정량적인 값을 정리하여 나타낸 것이다.

그림 5.6에서 비선형 PD 제어기는 미분필터가 없음에도 불구하고 충분히 추종성능을 보이고 있는 것을 나타내고 있다. 반면에 그림 5.7에서 T. Presterio 선형 PD 제어기는 잡음에 의해 목표 심도값에서 점차 벗어나는 것을 확인하였다. 즉, 비선형 PD 제어기만으로도 측정 잡음이 약간 섞이는 시스템에서 충분히 만족할 만한 제어성능을 얻을 수 있다.

그림 5.6과 그림 5.7의 네 번째 그림은  $\delta_s$ , fin angle[deg]에 대하여 time축을 20[s] ~ 21[s] 범위로 확대시킨 결과이다.



**Fig. 5.6** Depth tracking response of Non-Linear AUV Model using Non-Linear Controller (Noise)

**Table 5.6** Performance of Non-Linear depth control system for Non-Linear AUV Model (Noise)

Controller	IAE	Rise Time	Settling Time
NPD	251.5218	30.9467	99.9317

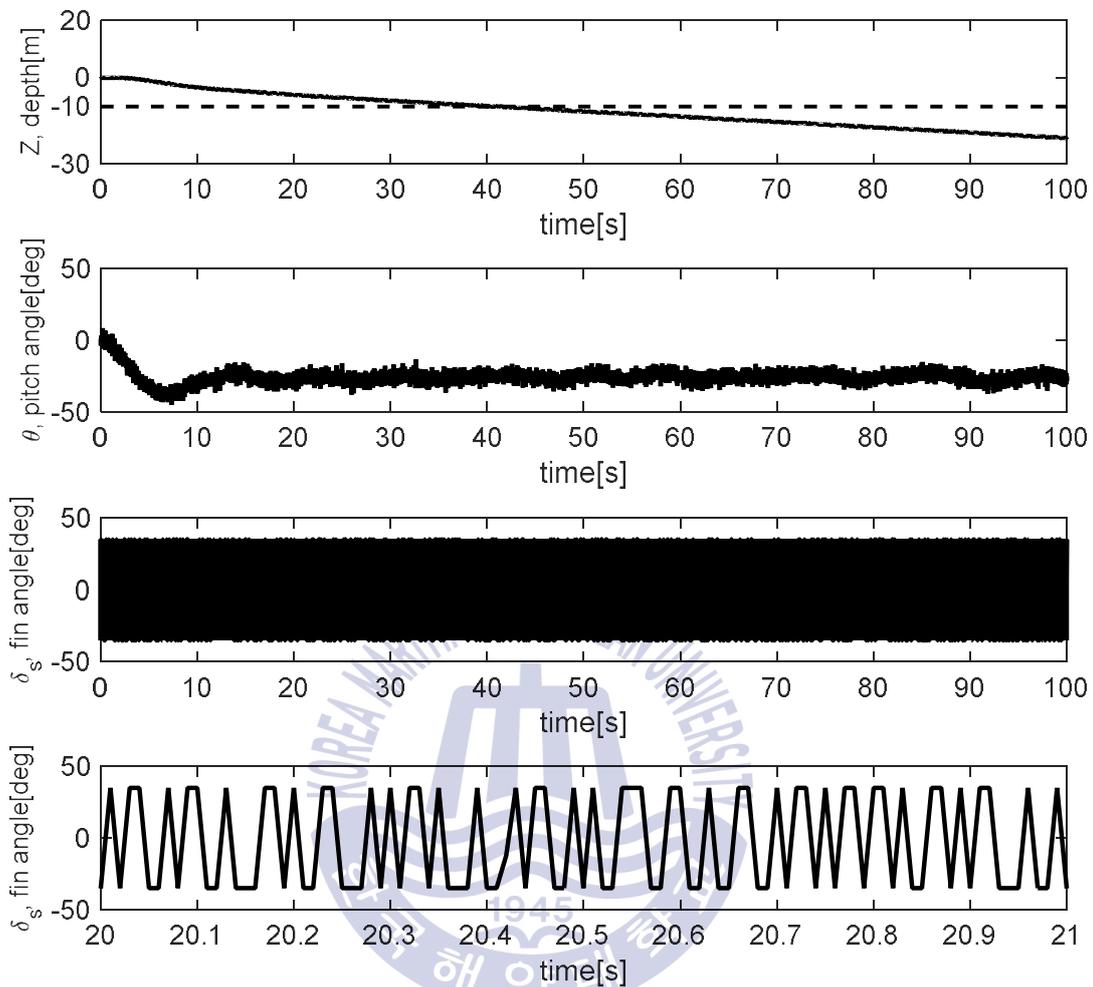


Fig. 5.7 Depth tracking response of Non-Linear AUV Model using

T. Prestero Linear Controller (Noise)

Table 5.7 Performance of T. Prestero Linear depth control system for Non-Linear AUV Model (Noise)

Controller	IAE	Rise Time	Settling Time
T.P	559.4115	30.5197	NaN

## 제 6장 결론

본 논문에서는 수중 운동체인 AUV의 심도 제어를 위한 비선형 제어기를 제안하였다. 핀의 각도를 제어하기 위한 비선형 PD 제어기는 내부 루프에 있고, 피치각을 제어하기 위한 비선형 P 제어기는 외부 루프에 있다. 이들 비선형 제어기의 파라미터들은 최적화 도구인 RCGA를 이용하여 동조하였으며 이때 평가함수로는 ITAE를 사용하였다.

제안한 비선형 제어기를 AUV의 선형 모델과 비선형 모델에 적용하여 심도 제어 시뮬레이션을 수행하였으며 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 제안한 비선형 제어기에 의한 응답은 정상상태 오차 없이 적정시간 이내에 목표 심도를 잘 추종하고 있음을 확인하였다.
- 2) 지속적인 바이어스 형태의 외란에서도 충분히 만족할 만한 제어 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.
- 3) 미분필터가 없어도 측정 잡음이 섞이는 시스템에서 충분히 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

이 후에는 더 다양하고 엄격한 제약조건이 고려된 제어기 설계에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 한국의 배, 2006. 무인잠수정, [Online] (2006.02.28.) Available at : <https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=2267757&cid=51087&categoryId=51087>
- [2] 김희수, 손경호, 이승진, 2011. “Manta type UUV의 슬라이딩 모드 제어기 설계에 관한 연구”, 한국항해항만학회, 2011년도 추계학술대회 논문집 pp. 3~4.
- [3] 김형동, 김준영, 김시홍, 이승진, 2011. “만타형 UUV의 제어기 설계에 관한 연구”, 한국항해항만학회지 제35권 제5호 pp. 359~363.
- [4] 이판목 외, 2003.05. 차세대 심해용 무인잠수정 개발(2).
- [5] Qiang Chen, Tao Chen, Yang Zhang, “Research of GA-based PID for AUV Motion Control”, Proceedings of the 2009 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation, August 9<sup>th</sup>-12<sup>th</sup>, Changchun, China.
- [6] Abhay A. Pakhare, Kunal N. Tiwari and Rajan H. Chile, 2013. “PID/PD tuning for Steering Control of Autonomous Underwater Vehicle : Genetic algorithm Approach”, National Conference on Instrumentation, Control and Signal Processing,
- [7] Z. Dong, L. Wan, T. Liu and J. Zhuang, 2015. “Heading Control of an AUV Based on Mamdani Fuzzy Inference”, International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics,
- [8] D. H. Shin, S.T. Kwon, S.H. Park, and M.G. Joo, 2013. “Fuzzy State Feedback Control for Way-Point Tracking of Autonomous Underwater Vehicle”, International Journal of Control and Automation, vol. 6, no. 1,

- [9] I. Eski, and S. Yildirim, 2014. “Design of Neural Network Control System for Controlling Trajectory of Autonomous Underwater Vehicles” , International Journal of Advanced Robotic Systems,
- [10] A. Forouzentabar, B. Gholami, M. Azadi, 2012. “Adaptive Neural Network Control of Autonomous Underwater Vehicles” , World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering vol. 6, no. 7,
- [11] 박성국, 이필엽, 박상웅, 권순태, 정훈상, 박민수, 2015.10. “PD제어 기법을 적용한 어뢰형 무인잠수정의 선수각 및 심도제어기 설계와 실험적 성능 검증” , 제어로봇시스템학회 논문지 제21권 제10호, PP 951~957
- [12] 손지현, 2016.08. “MOOS-Ivp를 적용한 무인잠수정의 심도제어 시스템 구현” , 경북대학교 대학원 공학석사 학위논문.
- [13] 김도완, 김문환, 박효규, 김태영, 2017.03. “대형급 무인잠수정의 심도 및 속도 제어” , 대한전기학회 전기학회논문지 제66권 제3호, PP 563~567
- [14] T. Prestero, 2001. “Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle” , Master thesis.
- [15] Robert D. Blevins, 1979. “Formulas for Natural Frequency and Mode Shape” , Kreiger Publishing, Florida, PP 27~29.
- [16] J. N. Newman, 1977. “Marine Hydrodynamics” , MIT Press, Massachusetts, PP 25~28.
- [17] Sighard F. Hoerner and Hery V. Borst, 1985. “Fluid Dynamic Lift” , Published by author, second edition, PP 30,31,98.
- [18] C. von Alt, B. Allen, T. Austin, and R. Stokey, 1994. “Remote environmental monitoring units” , In Proceedings MTS/IEEE Oceans Cambridge, MA, PP 12,36.
- [19] T. I. Fossen, 1994. “Guidance and Control of Ocean Vehicles” , John wiley & Sons, New York.

- [20] 소건백, 2014. “RCGA에 기초한 비선형 PID 제어기의 설계”, 한국해양대학교 대학원 공학석사 학위논문.
- [21] J. H. Holland, 1975. “Adaptation in natural and artificial systems”, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- [22] D. E Goldberg, 1989. “Genetic algorithms in search, Optimization and Machine Learning”, Addison-Wesley.
- [23] 이윤형, 소명옥, 정병건, 진강규, 진선호, 2005. “RCGA에 기초한 선박 가스터빈 엔진용 PID제어기의 동조”, 한국박용기관학회지, vol. 29, no. 1, pp. 116~123.
- [24] 진강규, 2002. 유전알고리즘과 그 응용, 교우사.
- [25] D. T. Pham and G. Jin, 1996. “A Hybrid Genetic Algorithm”, Proc. 3rd World Conf. on Expert Systems, Seoul, Korea, vol. 2, pp. 748~757.
- [26] N. J. Radcliffe, 1991. “Equivalence Class Analysis of Genetic Algorithms”, Complex Systems, vol. 5, no. 2, pp. 183~205.
- [27] A. Wright, 1991. Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization, Foundations of Genetic Algorithms 1, G. J. E. Rawlin(Ed.), Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA.
- [28] J. J. Grefenstette, 1986. “Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms”, IEEE Trans, Syst., Man, Cybern., vol 1. SMC-16, no. 1, pp. 122~128.
- [29] K. A. De Jong, 1975. “an Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptation Systems”, Ph.D. Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor.
- [30] 강선이, 2016. “AUV 심도 제어를 위한 RCGA 기반 PD 제어”, 한국해양대학교 대학원 공학석사 학위논문.

## 감사의 글

2년이라는 시간을 헛되이 보내지 않고 논문이라는 작은 성과를 만들었습니다. 이 논문을 완성하기 위해서 많은 도움을 주신 분들에게 이 글을 통해서 감사의 인사를 드립니다.

가장 먼저 저의 지도교수가 되어 주시고 아낌없는 가르침과 조언을 해주신 **소명옥 교수님**께 감사드립니다. 교수님의 가르침과 조언으로 논문을 완성할 수 있었습니다. 바쁘신 와중에도 논문 심사를 위해서 시간을 내주시고 따뜻한 충고와 격려를 아끼지 않으셨던 **오세준 교수님**, **유희한 교수님**께 감사드립니다. 그리고 학교에서 만날 때마다 격려를 해주신 **오진석 교수님**께 감사드립니다.

아무것도 모르는 부족한 저를 위해서 세미나를 해주시고 논문의 시작부터 끝까지 아낌없는 도움을 주신 **안중갑 박사님**께 정말 감사드립니다. 늦은 시간까지 귀찮게 헤드려서 정말 죄송스럽고 감사합니다. 자동제어 연구실 선배님인 해양수산연수원 **이윤형 교수님**, **류기탁 교수님**께 감사드립니다.

지금은 서로 다른 곳에서 일하고 있지만 같이 대학원에 입학한 동기 **강민** 사관부 동기이자 현재 학교 실습선에서 교관을 하고 있는 **이형탁**에게 감사드립니다. 그리고 대학원 선배이자 동기인 **김민욱**에게 감사드립니다.

항상 저를 위해서 걱정해주시고 격려해주시고 기도해주시는 고맙고 사랑하는 **부모님**께 감사드립니다. 타지에서 고생하지만 항상 응원해주는 **동생**에게도 고마움을 전합니다. 그리고 항상 저에게 힘이 되어주고 기쁨이 되어주는 사랑하는 여자친구 **강자현**에게도 감사드립니다.

언급되지 않는 다른 분들에게도 감사의 인사를 드리며 이 글을 마칩니다. 감사합니다.

한국해양대학교 기관공학과

고 건 올림