



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

AUV 심도 제어를 위한  
RCGA 기반 PD 제어

Depth Control of an AUV  
Using PD Controller Based on a RCGA



2016 년 2 월

한국해양대학교 대학원

메카트로닉스공학과 강선이

본 논문을 강선이의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 오 세 준 (인)

위 원 유 희 한 (인)

위 원 소 명 옥 (인)

2015년 12월 23일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vi
<b>제 1 장 서 론</b>	
1.1 연구 배경 및 동향 .....	1
1.2 연구 내용 및 구성 .....	4
<b>제 2 장 AUV의 설계사항 및 운동방정식</b>	
2.1 AUV의 설계 개요 .....	7
2.2 REMUS의 심도제어를 위한 선형모델 .....	12
<b>제 3 장 유전알고리즘</b>	
3.1 실수코딩유전알고리즘 .....	19
3.2 제약조건의 취급 .....	27
<b>제 4 장 RCGA 기반 심도 제어기 설계</b>	
4.1 PID 제어기의 동작 특성 .....	30
4.2 제어기의 파라미터 동조 .....	37
4.3 성능지수를 고려한 심도 제어기의 최적동조 .....	39
4.4. 심도 제어용 제어기 설계 .....	40
4.5 REMUS 심도 제어를 위한 제어기의 파라미터 추정 .....	42
<b>제 5 장 설정치 추종 성능 검토</b>	
5.1 제약조건이 없는 경우 .....	49
5.2 제약조건이 있는 경우 .....	55

제 6 장 결 론 ..... 59

참고문헌 ..... 61



## List of Tables

Table 2.1 The notation of SNAME(1950) for AUV .....	14
Table 2.2 Linearized coefficients .....	18
Table 4.1 Parameters of controller excluding constraints .....	44
Table 4.2 Parameters of controller including constraints .....	46
Table 5.1 Performance of depth control system excluding constraints .....	50
Table 5.2 Performance of depth control system including constraints .....	56



## List of Figures

Figure 1.1 Various AUV made in Korea .....	1
Figure 1.2 Various AUV made in other countries .....	3
Figure 1.3 Overview of this thesis .....	6
Figure 2.1 Hull forms of AUV .....	10
Figure 2.2 Appearance of REMUS .....	13
Figure 2.3 STD REMUS profile (XZ-plane) .....	13
Figure 2.4 Body-fixed and inertial coordinate systems of AUV ...	14
Figure 3.1 Modified simple crossover .....	23
Figure 3.2 Dynamic mutation .....	24
Figure 3.3 Operation of a RCGA .....	29
Figure 4.1 The proportional band .....	31
Figure 4.2 Integral control action .....	32
Figure 4.3 Derivative control action .....	33
Figure 4.4 Proportional-Integral control action .....	34
Figure 4.5 Proportional-Derivative control action .....	35
Figure 4.6 Proportional-Integral-Derivative control action .....	36
Figure 4.7 Block diagram of PID control system .....	37
Figure 4.8 Optimal tuning of PID controller using a RCGA .....	38
Figure 4.9 Depth control system for REMUS .....	40
Figure 4.10 Optimal tuning of the depth controller using a RCGA .....	43
Figure 4.11 Tuning process for $K_{p1}$ , $K_{p2}$ , $T_d$ using ISE(AE), excluding constraints .....	45
Figure 4.12 Tuning process for $K_{p1}$ , $K_{p2}$ , $T_d$ using ITAE, excluding constraints .....	45
Figure 4.13 Tuning process for $K_{p1}$ , $K_{p2}$ , $T_d$ using ISE(AE), including	

constraints .....	47
Figure 4.14 Tuning process for $K_{p1}$ , $K_{p2}$ , $T_d$ using ITAE, including constraints .....	47
Figure 5.1 Depth tracking response using ISE(IAE) and ITAE, excluding constraints .....	50
Figure 5.2 Depth tracking response using ISE(IAE), without saturator .....	51
Figure 5.3 Depth tracking response using ITAE, without saturator .....	52
Figure 5.4 Depth tracking response using ISE(IAE), with saturator .....	53
Figure 5.5 Depth tracking response using ITAE, with saturator .....	54
Figure 5.6 Depth tracking response using ISE(IAE) and ITAE, including constraints .....	66
Figure 5.7 Depth tracking response using ISE(IAE), with saturator .....	57
Figure 5.8 Depth tracking response using ITAE, with saturator .....	58



# Depth Control of an AUV Using PD Controller Based on a RCGA

Sun-Yi Kang

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

## Abstract

In industrial processes and many other control problems, even now more than 95% of the controllers are of the PID controller type. The PID controller has several important functions. It has ability to get rid of steady-state error through integral action and anticipate the future through derivative action. There are many different methods for tuning the PID controller.

In this thesis, P controller for pitch controller of outer loop control system and PD controller for fin controller of inner loop control system are proposed incorporating with real-coded genetic algorithms(RCGAs) for depth control of REMUS AUV. The optimal parameters sets of the depth controller are obtained based on a RCGA and a linearized depth plan model of REMUS. As for assessing the performance of the control system based on real-coded genetic algorithms, three performance criteria (ISE, IAE and ITAE) are

adopted. And designing the controller involves a constrained optimization problem. Therefore, a real-coded genetic algorithms incorporating the penalty strategy is used.

A set of simulation works are carried out on depth control system of REMUS AUV to be satisfied the set-point tracking performance within controller design criteria.

**KEY WORDS:** AUV; REMUS; PID control; depth control; RCGA; performance criteria(ISE, IAE, ITAE)



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 동향

해양탐사용 무인잠수정인 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)는 해양 자원 개발과 군사, 과학조사 분야 등에 대한 관심 고조와 더불어 현재까지도 선진 각국에서 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 AUV는 기계, 전기, 전자, 컴퓨터, 통신 등 다양한 분야의 기술을 바탕으로 구조 해석, 신호처리, 원격제어, 수중복합항법, 수중도킹 및 제어 등에 대한 연구가 진행되고 있다. 그림 1.1은 국내에서 개발된 다양한 형태의 AUV를 나타낸 것이다.



Figure 1.1 Various AUV made in Korea

우리나라는 다른 선진 해양국에 비하여 매우 늦게 AUV 개발을 시작하였으나, 기존의 선박 건조 기술을 바탕으로 AUV의 기초 기술을 신속하게 발전시킬 수 있었다. 1987년 KRISO에서는 수심 250[m]급 탐사용 유인잠수정인 ‘해양250’를 개발하여 해양개발을 위한 기반기술을 확보하였고, 1989년부터 3년간 국책연구사업인 ‘해양작업시스템 개발’ 과제를 수행하여 AUV의 기초기술을 수립하였다. 또한, 1992년에는 4자유도 운동제어가 가능한 수심 300[m]급 AUV인 CROV300을 국내에서 최초로 개발하기도 하였다. 대우중공업은 1993년에 러시아의 IMTP로부터 6,000[m]급 AUV 기술을 도입하면서 핵심 요소 기술을 확보하여 OKPO-6000 AUV를 개발하였다. 1999년부터 과학기술부 민군과제의 일환으로 해군사관학교, KAIST, 서울대학교, 한국해양연구원이 공동으로 연구하여 초음파·관성항법에 관한 기술을 접목한 반자율 AUV(SAUV : Semi-Autonomous Underwater Vehicle)도 개발하였다. 국방 분야 중 특히 해군에서는 UUV(Unmanned Underwater Vehicle) 6기, USV(Unmanned Surface Vessel) 3기, UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 1기를 개발 중에 있으며 정찰 및 감시, 대잠전, 기뢰전 및 특수전 등의 용도로 활용될 예정이다. 해양연구원이 2001년부터 2007년까지 해양수산부의 지원을 받아 독자 개발한 해미래(HEMIRE)는 해저 6,000[m]까지 잠수할 수 있는 무인 심해잠수정으로 지질, 생태계 및 극지연구와 심해 광물자원 탐사 등이 가능한 장비이다. 해미래 개발로 한국은 미국·프랑스·일본에 이어 세계 네 번째로 6,000[m]급 심해잠수정 보유국이 되었다. 해미래는 길이 3.3[m], 폭 1.8[m], 높이 2.2[m]이며 무게는 3.2[t]에 달하고, 시속 1~1.5[knot]의 속도로 운항할 수 있다. 특히, 로봇 팔과 각종 계측장비, 수중 카메라 등과 같은 최첨단 IT장비와 전동 추진기를 장착하여 시야를 확보한 상태에서 모든 방향으로 움직일 수 있으며 5[m] 오차범위에서 목표물을 자유롭게 탐지·추적할 수 있는 위치 추적 장치도 장착하였다[1].

해외의 경우, 해저자원개발, 수산업, 항만감시체계 및 군사목적을 위해

1960년대부터 미국의 잠수함 구조용 AUV 개발을 시작으로 하여 현재 선진국을 중심으로 기초연구와 응용연구가 완성단계에 접어들었다. 산업용 AUV는 사용 분야에 따라 그림 1.2와 같이 ROV(Remotely Operated Vehicle), SAUV, 그리고 AUV 등의 여러 가지 형태로 상용화되어 운용되고 있다.

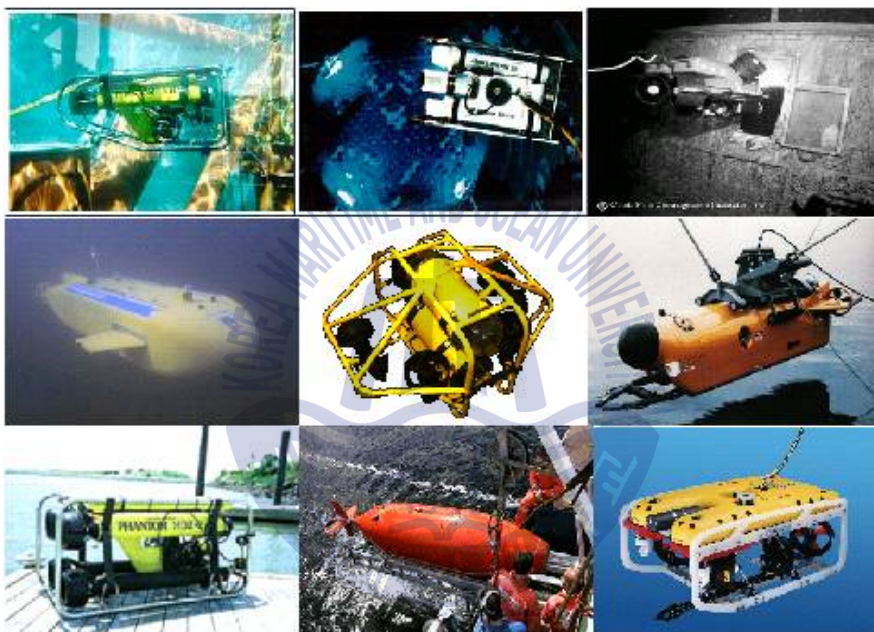


Figure 1.2 Various AUV made in other countries

우리나라를 포함해 각 국가별로 다양하게 개발된 AUV는 유인잠수정에 비해 개발과 유지보수 및 운용측면에서는 유리하다. 그러나 해중에서 운동 및 위치 제어성능을 보장할 수 있는 안정된 성능의 제어가 쉽지 않아 이를 개선하고 보완하는 많은 연구들이 수행되어 왔다.[2-15]

김 등[2, 3]은 Manta 형식의 UUV에 대해 슬라이딩 모드 제어기 설계

기법을, 이 등[4]과 Fauske 등[6]은 칼만필터를 이용하여 센서의 신호를 추정하는 기법을 제안하였다. 서 등[7]은 AUV의 제어모드를 자동과 반자동모드로 구분하고, 각각의 모드에 따라 LQ(Linear Quadratic) 제어기, PID 제어기, 슬라이딩모드 제어기를 설계하였으며, 이 등[8]은 AUV에 장착된 수중 카메라의 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식을 혼합하여 가격함수를 최소화하는 방법으로 비주얼 서보제어기를 구현하였다. 최근에는 최적화 알고리즘과 퍼지기법 및 신경회로망 등을 이용하여 제어기를 설계하는 연구도 진행되고 있다. 대표적인 연구로 Chen 등[9]은 AUV의 운동제어를 위해 유전알고리즘을 기반으로 하는 PID 제어기를 제안하였고, Pakhare 등[10]은 AUV의 조타제어를 위해 유전알고리즘으로 동조한 PD 및 PID 제어기를 사용하는 문제를 다루었다. Chang 등[11]은 수평평면에서 고려한 AUV에 대해 모델기반의 퍼지모델링과 퍼지제어기법을, Dong 등[12]은 Mamdani 퍼지추론을 이용하여 AUV의 회두각 제어기법을, Shin 등[13]은 퍼지 상태피드백 제어기를 이용한 AUV의 경로제어 기법을 제안하였다. 또한, Eski와 Yildirim[14] 그리고 Forouzantabar 등[15]은 신경회로망을 이용한 제어기 설계 기법을 제안하였다.

그러나 이와 같이 많은 연구들이 나름대로 만족할만한 성과를 제시하고 있지만 대부분은 설계사양과 작동기의 물리적 한계인 포화(saturation)를 고려하고 있지 않아 이를 만족시키면서 안정된 제어성능을 보이도록 하는 성능개선의 여지가 남아있다.

## 1.2 연구 내용 및 구성

본 논문에서는 AUV 핵심 기술개발에 필요한 운동제어 중 심도제어를 위한 PD 제어기 설계기법을 다룬다. 제어기 설계 시, 요구되는 제어시스템의 설계사양을 고려하며, AUV의 피치(pitch) 제어기로는 P 제어기를, 핀(fin) 제어기로는 PD 제어기를 적용한다. 각 제어기의 파라미터는 설계

사양과 작동기의 한계인 포화로 표현되는 일종의 제약조건을 만족하면서 제어시스템의 3가지 목적함수(ISE, IAE, ITAE)를 최소화하는 관점에서 실수코딩유전알고리즘(RCGAs : Real Coded Genetic Algorithms)으로 최적동조된다.

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

제2장에서는 AUV 설계 시 고려되는 사항에 대해서 간략하게 살펴보고, 심도제어를 위한 선형 운동방정식에 대해서 설명한다. 제3장은 심도제어기 설계 시 수반되는 파라미터들의 최적화 문제를 해결하기 위해 본 논문에서 사용하는 RCGA에 대하여 간단히 살펴본다. 제4장에서는 PID제어 동작의 일반적인 특성과 ISE, IAE, ITAE 성능지수에 대해서 알아보고, AUV의 심도제어를 위한 RCGA 기반의 PD 제어기를 설계한다. 이 때, 설계사양을 제약조건으로 갖는 경우에 대해 별점전략을 결합한 RCGA로 PD 제어기의 파라미터를 최적으로 동조하는 방법을 다룬다. 제5장에서는 제4장에서 설계된 제어시스템의 유효성을 검토하기 위해 0[m]에서 수심 10[m]로 단위 계단 형태의 심도 명령을 주었을 때, 이에 대한 추종성을 살펴본다. 또한, 설계사양으로 주어진 제약조건이 고려된 경우에도 제안한 방법이 설계사양을 만족하면서 안정적인 제어성능을 보이는지도 확인한다. 마지막으로 제6장에서는 본 연구에서 최종적으로 얻어진 결론을 요약하고 정리한다.

지금까지 설명한 본 논문의 내용과 구성을 도식적으로 나타내면 그림 1.3과 같다.

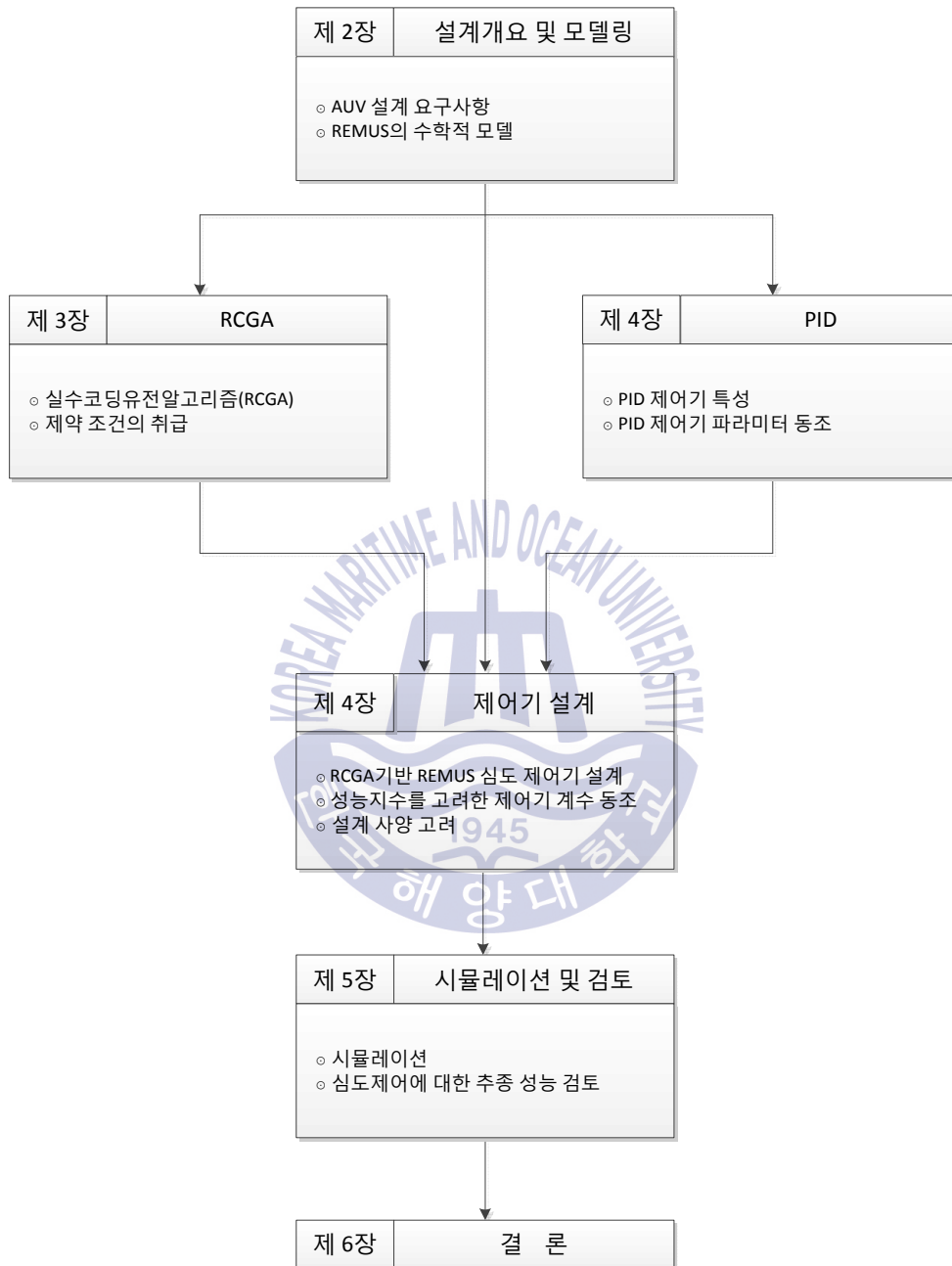


Figure 1.3 Overview of this thesis



## 제 2 장 AUV의 설계사항 및 운동방정식

해양탐사작업에 사용되는 AUV는 유삭식(tethered)과 무삭식(untethered)으로 구분할 수 있다. 유삭식은 수상모선으로부터 케이블을 통하여 전력 및 제어신호를 공급받고, 수집된 각종 측정자료를 수상모선으로 전송하는 형식으로 많은 전력이 소비되는 해양작업을 수행할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 작업수심이 깊고, 조류가 심한 지역에서는 케이블에 작용하는 항력 때문에 수중작업이 매우 어려운 단점을 갖고 있다. 무삭식은 축전지에 의한 자체 동력원을 가지며 무선통신을 이용하여 수상모선과 정보를 주고받는 형식이다. 따라서 해양탐사를 목적으로 하는 경우에는 무삭식이 넓은 탐사영역, 수중에서의 자유로운 운동, 모선이 필요하지 않은 장점 때문에 폭넓게 운용되고 있다.

본 장에서는 무삭식 AUV 설계를 위해 고려되는 사항들과 AUV의 한 종류로 운반이 용이하고, 개발비용이 적게 드는 것을 목적으로 개발된 REMUS(Remote Environmental Monitoring UnitS)의 수학적 운동방정식에 대해서 살펴본다.

### 2.1 AUV의 설계 개요

AUV를 설계하기 위해서는 일반적으로 임무 및 요구사항, 본체 및 부가적인 부분의 개략적인 설계, 구조설계, 추진시스템, 중량 및 부력균형, 진수 및 회수 등이 고려된다. 이들은 결국 수중운동체의 형상 및 크기와 밀접한 관련이 있으므로 여러 가지 형상의 수중운동체들에 대하여 시뮬

레이션을 하는 것이 설계의 첫 단계이자 가장 중심이 된다.

AUV의 상승과 침강에 영향을 주는 중량과 부력은 탑재된 에너지 저장 요건, 내압용기에 저장되는 각종 시스템에 의하여 지배되는 항목이므로 중량과 부력의 균형은 설계가 진행 될수록 점차적으로 더 민감하게 다루어진다. 상세 설계단계에서는 매우 엄격한 중량 및 부력조종이 요구되며 설계단계에 따라서 정밀도를 더해가게 된다[5].

### 2.1.1 AUV의 임무설정 및 설계요구사항

AUV의 임무는 일반적으로 넓은 해역을 신속하게 항행하면서 해저에 매설된 케이블의 탐사, 수중 인공물의 탐사, 해중환경자료의 획득 등의 임무를 수행하는 것이다.

설계요구사항으로는 항속거리, 수심, 운항속도, 탑재된 에너지 저장량, 구조, 중량 및 부력 등이 포함되며 모두는 상호 종속적인 관계이다. 예를 들어, 수심이 깊어지면 장비적재용 내압용기와 선체구조가 무거워져 탑재에너지의 양이 추가로 더 요구되게 된다. 저장에너지는 저항과 관련되어 순항속도 및 항속거리에 영향을 준다. 통상 저속일수록 적은 에너지가 사용되므로 에너지 면에서 유리할 것 같지만, 저속에 따른 임무수행시간이 추가되어 추진 목적 외에 소모되는 에너지가 증가된다. 따라서 임무에 따른 AUV 설계 작업은 최적화 과정이 필요하다.

### 2.1.2 AUV의 외부형상

AUV의 외부형상은 임무에 따라서 크게 좌우된다. 일반적으로 장기간 항행용 AUV는 심도 및 방위각 제어를 용이하게 할 목적으로 미사일 형상으로 제작한다. 이에 반하여 해면에서 해저, 해저에서 해면으로의 글라이딩 기능과 해저고도 유지기능이 중요한 AUV는 비행기 날개 형상의

동체 후부에 추진기, 승강타 및 안정핀을 취부하는 형태를 갖는다. 심해 작업용의 경우에는 상승과 하강 속도를 향상시키기 위하여 선형으로 설계되기도 한다.

AUV는 가급적 높은 에너지 효율을 갖도록 적은 저항과 높은 추진효율을 가져야 하며 추진 효율면에서 추진기의 위치는 선체 중심선상 선미부가 바람직하다. 또한, 우수한 직진성을 위해 큰 장폭비를 갖는 선체형상이 요구된다. 그러나 장폭비가 큰 선체형상은 조사해역 끝에서 회전이나 위험물로부터의 회피 성능이 좋지 않으므로 AUV의 임무에 따라 낮은 장폭비를 갖는 선체형상으로 설계하기도 한다.

그림 2.1은 수중운동체의 여러 가지 형상을 보여주고 있으며, 주어진 임무수행에 최적의 선형의 선택은 항해기거나 조사장비의 탑재에 따른 공간 확보 문제, 유체나 기계적인 진동문제, 각 부의 배치에 따른 기술적인 난이도, 잠수기의 조종이나 운동의 용이성 등을 고려하여 결정한다.

### 2.1.3 AUV의 저항 및 추진

유체동력학적인 측면에서 AUV 설계의 가장 큰 목표는 최소저항성이므로 설계 시 가장 중요하게 고려해야 할 사항이다.

#### (1) 최소저항선체

NACA(National Advisory Committee for Aeronautics) 시리즈의 비행기 날개 단면 형상과 같이 축대칭 선체는 선체 표면의 넓은 부분에 층류가 유지되도록 하여 최소저항이 가능하다. 층류는 일반적으로 수중운동체에 점성경계층을 형성시켜 주므로 난류보다 저항면에서 우수한 특징을 보인다.

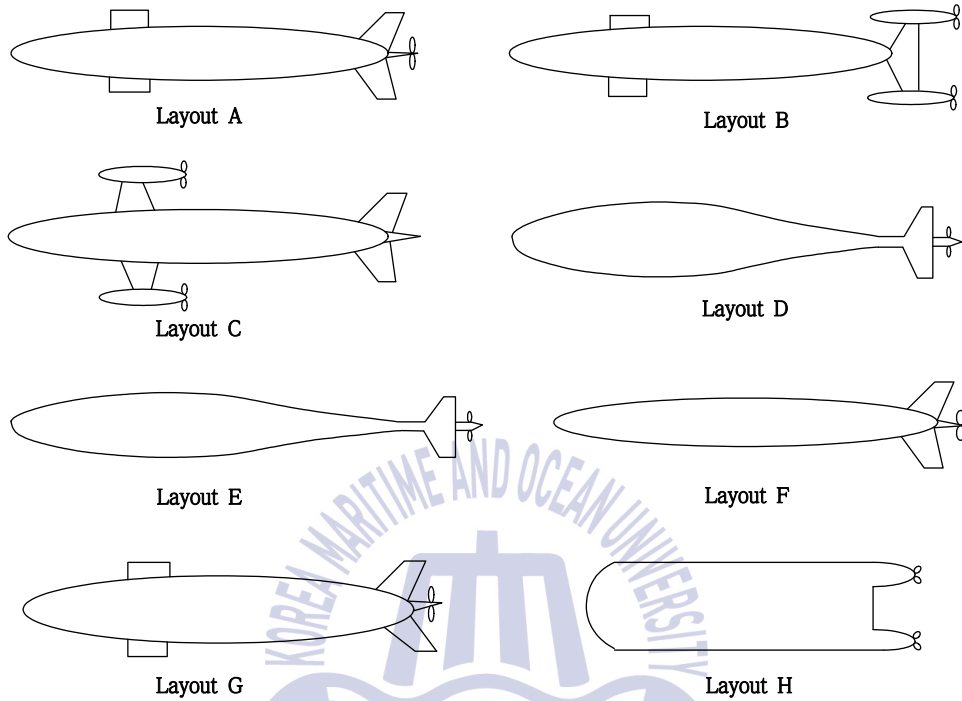


Figure 2.1 Hull forms of AUV

## (2) 에너지원

AUV가 장시간 항행하기 위해서는 고밀도이면서 저렴한 에너지원이 필요하다. 에너지원의 선택기준은 단위중량당 에너지밀도, 단위체적당 에너지, 제조가격, 유지비용, 신뢰성, 관리의 편의성 등이다. 또한, 에너지원은 AUV에 탑재되는 장비의 공간과 중량 면에서 대부분을 차지하므로 임무의 성격과 비용도 고려해야 한다. 일반적인 에너지원으로 축전지, 연료전지, 폐쇄회로 내연기관[16] 등을 사용할 수 있다. 일반적인 축전지는 에너지 밀도가 충분하지 못해 중량 부력에서 손실을 감수해야 한다. 연료전지는 장기간으로는 좋은 시스템이나, 단기적인 면에서 개발의 한

계점을 가지고 있다. 최근 고에너지 밀도의 첨단 축전지가 개발되었으나, 고온을 유지해야 하는 단점이 있다. 폐쇄회로 내연기관은 중량 부력 면에서 매우 유용하지만 음향진동문제, 잠수정 설계, 보수유지 등에서 문제가 있다.

### (3) 추진기

모터를 작동시키는 장치로는 유압, 전기, 열기관 등이 있으나 유압장치와 열기관은 용적, 중량, 저효율, 진동과 소음 등의 문제점으로 고려대상에서 제외하고 있다. 전기추진방식은 무공해이며, 기계 및 음향진동특성이 비교적 낮으므로 가장 바람직한 방법이다. 특히, 전동모터는 매우 작게 제작이 가능하고, 추진기와 근접하게 설치할 수 있어서 소음원을 음향장비로부터 멀리 떨어진 뒤쪽에 위치시킬 수 있다.

#### 2.1.4 조종 및 항행

##### (1) 수중운동체의 주요치수

수중운동체의 주요치수를 선정할 때는 조종 및 안정성에 주안점을 두어야 한다. 수중운동체의 선회성과 항로유지성은 본체의 길이와 직경 비에 의하여 결정된다. 예를 들어, 길이가 짧고 직경이 커서 뚱뚱한 형태의 본체는 회전은 용이하지만 침로보침성이 나쁘며, 길고 가는 형태의 본체는 침로보침성이 좋으나 회전이 용이하지 않게 된다.

주요치수는 우선적으로 최소저항에 초점을 맞추고, 침로 보침성 및 장애물 회피를 위한 선회성을 포함한 조종성능 등을 동시에 고려하여야 한다. 장애물을 인식하고 적절하게 회피하기 위해서는 인식하는 순간에 수중운동체와 장애물간의 상대거리에 따라서 감속, 회피각도 및 심지어는 정지 및 재진하는데 소요되는 시간과 에너지 손실을 감수해야 한다

[17, 18]. 따라서 길고 가느다란 직진안정성 선체가 일반적으로 요구되지  
만 만일 장애물을 인식하지 못하거나 너무 늦게 판단하게 되어 재판단하  
거나, 정지 또는 급회전이 요구되는 경우에는 짧고 뚱뚱한 선체가 요구  
된다.

## (2) 조종장치

수중운동체의 조종은 양력 조절장치, 주추진기, 중량 부력효과, 기타  
보조 장치 및 추진기에 의해 수행된다.

일반적으로 주추진기는 자체의 저항모멘트에 의하여 직진 안정성을 증  
가시키는 역할을 하며 2축 추진기는 더 큰 효과가 있다. 조종판(fin)의 작  
동을 위한 장치는 액추에이터만 필요하며 직진 운동의 조종 및 에너지 요  
구 면에서 보면 매우 유리하다. 그러나 조종판은 수중운동체가 유체에 대  
하여 상대운동을 하고 있을 때에만 효과가 있다.

수중운동체는 중량과 부력의 균형에 의하여 부침하며, 전자가 크면 침  
하하고, 후자가 크면 부상한다. 중량과 부력의 중심위치가 변할 수 있으  
면 피치와 수직 운동조종이 가능하다.

## 2.2 REMUS의 심도제어를 위한 선형모델

REMUS는 휴대용으로 운반이 용이하고, 저비용을 목적으로 하여  
WHOI OSL(Woods Hole Oceanographic Institutes Oceanographic System  
Laboratory)에서 개발한 AUV의 한 종류를 의미한다[19-21]. 그림 2.2는  
REMUS 특정모델의 외부 모습을 나타낸 것이고, 그림 2.3은 Myring[22]  
의 선체 프로파일 방정식을 이용하여 그림으로 나타낸 선체모양이다.



Figure 2.2 Appearance of REMUS

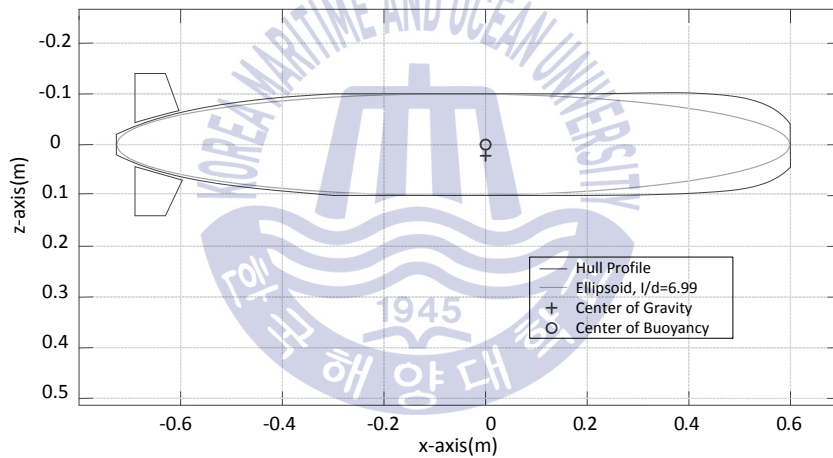


Figure 2.3 STD REMUS profile (XZ-plane)

REMUS는 가장 큰 특징 중의 하나인 자율도킹(autonomous docking) 방식을 이용하여 해양조사 및 천수구역의 광물자원 탐사 임무를 누적시간으로 1,000시간 이상 수행한 기록을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 AUV 중에서 이와 같은 장점과 경험을 소유한 REMUS를 제어대상으로 고려하여 다루기로 한다.

수중운동체로 분류되는 AUV의 운동방정식(equations of motion)은 일반적으로 동체의 움직임에 대한 기하학적 요소인 운동학(kinematics), 동체의 관성행렬로 나타내는 강체동역학(rigid-body dynamics), 동체의 움직임을 만들어 내는 힘과 모멘트인 기계학(mechanics)으로 구성된다[23].

REMUS의 6자유도 비선형 운동방정식[24]은 운동학, 강체동역학 및 기계학에 기초한 방정식들을 조합하여 그림 2.4, 표 2.1과 같은 SNAME 형식의 물체고정좌표계에 따라 표현할 수 있다.

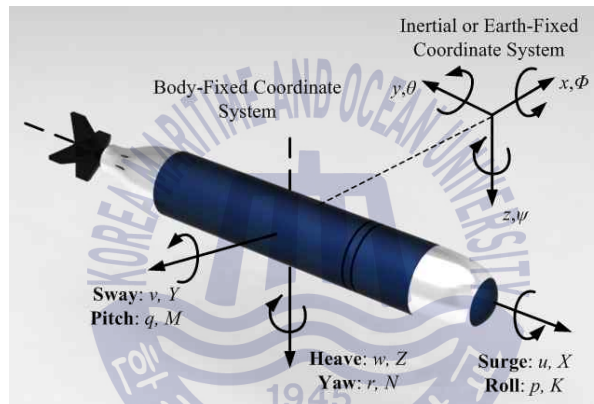


Figure 2.4 Body-fixed and inertial coordinate systems of AUV

Table 2.1 The notation of SNAME(1950) for AUV

Motion and rotation	Forces & moments	Linear & angular velocities	Positions & angles
motions in x-direction (surge)	X	u	x
motions in y-direction (sway)	Y	v	y
motions in z-direction (heave)	Z	w	z
rotation about x-axis (roll)	K	p	$\phi$
rotation about y-axis (pitch)	M	q	$\theta$
rotation about z-axis (yaw)	N	r	$\psi$



심도 제어기를 설계하기 위해 필요한 선형모델은 크게 보면 비선형 운동방정식으로부터 다음의 두 가지 절차를 통해 유도하는 것이 가능하다. 첫째, 선체운동에 영향을 미치는 인자들의 적절한 가정을 이용하여 선형화하고, 둘째, 심도제어에 영향을 미치는 선체운동만을 분리(decoupled)한다[23, 24].

REMUS의 깊이 방향 동작에 대해서만 고려된 선형 운동방정식[24]은 식 (2.1)이고 관련된 각 계수들의 값은 표 2.2와 같다. REMUS가 정상상태에서 1.54m/s의 일정한 속도  $U$ 로 이동하고 있다면, 동체 운동은 작은 움직임으로만 구성되고, 히브(heave)와 피치(pitch)는 거의 움직임이 없으므로 각각의 속도가 0라고 가정한다. 이와 같이 속도에 대해 선형화를 하게 되면 식 (2.2)로 간단히 표현된다.

$$\begin{aligned}
 (m - X_{\dot{u}})\dot{u} + mz_g\dot{q} - X_u u - X_q q - X_\theta \theta &= 0 \\
 (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} - (mx_g + Z_{\dot{q}})\dot{q} - Z_w w - (mU + Z_q)q &= Z_{\delta_s} \delta_s \\
 mz_g\dot{u} - (mx_g + M_{\dot{w}})\dot{w} + (I_{yy} - M_{\dot{q}})\dot{q} - M_w w + (mx_g U - M_q)q - M_\theta \theta &= M_{\delta_s} \delta_s
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

$$\dot{z} = w - U\theta \tag{2.2}$$

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

만약 식 (2.1)에서 무게중심  $z_g$ 가 다른 조건들에 비해 매우 작다고 가정하면, 써지(surge)로부터 히브와 피치를 식 (2.3)과 같이 분리시킬 수 있다.

$$(m - Z_{\dot{w}})\dot{w} - (mx_g + Z_{\dot{q}})\dot{q} - Z_w w - (mU + Z_q)q = Z_{\delta_s} \delta_s \quad (2.3)$$

$$-(mx_g + M_{\dot{w}})\dot{w} + (I_{yy} - M_{\dot{q}})\dot{q} - M_w w + (mx_g U - M_q)q - M_\theta \theta = M_{\delta_s} \delta_s$$

식 (2.2)와 식 (2.3)을 결합하여 상태방정식 형태로 나타내면 식 (2.4)와 같다.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{C}_d \mathbf{x} = \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -(mx_g + Z_{\dot{q}}) & 0 & 0 \\ -(mx_g + M_{\dot{w}}) & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} Z_w & \mu + Z_q & 0 & 0 \\ M_w & -mx_g u + M_q & 0 & M_\theta \\ 1 & 0 & 0 & -U \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

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

여기서,  $\mathbf{x}$ 는  $[w \ q \ z \ \theta]^T$ 인 상태벡터로  $w$ 는  $z$ 방향 속도,  $q$ 는  $y$ 축 피치각속도,  $z$ 는  $z$ 방향 위치,  $\theta$ 는  $y$ 축 피치각도를 의미한다.  $\mathbf{u}$ 는 입력벡터로서  $[\delta_s]^T$ 이다.

식 (2.4)는 일반적인 상태방정식 표현인 식 (2.5)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_d, \quad \mathbf{B} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}$$

한편, 히브 속도가 다른 조건들에 비해 매우 작다고 가정하면, 운동방정식은 식 (2.6)과 같이 더 간단하게 표현 가능하다.

$$\begin{bmatrix} I_{yy} - M_q & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M_q & 0 & -M_\theta \\ 0 & 0 & U \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s] \quad (2.6)$$

식 (2.6)을 일반적인 상태방정식 표현인 식 (2.5) 형태로 표현하면 식 (2.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2.7)$$

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

Table 2.2 Linearized coefficients

parameter	value	units	description
$m$	+3.05e+001	kg	vehicle mass(weight/gravity)
$x_g$	+0.00e+000	m	center of gravity
$z_g$	+1.96e-002	m	center of gravity
$I_{yy}$	+3.45e+000	kg · m <sup>2</sup>	moment of inertia about y-axis
$X_{\dot{u}}$	-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
$Z_{\dot{w}}$	-3.55e+001	kg	added mass
$Z_{\dot{q}}$	-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
$M_{\dot{w}}$	-1.03e+000	kg · m	added mass
$M_{\dot{q}}$	-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 유전알고리즘

본 장에서는 제어기의 파라미터를 최적으로 동조하기 위해 사용되는 실수코딩유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithms : RCGAs)[25]에 대해서 살펴보고, 선택된 유전자의 우열을 평가하기 위한 성능지수를 알아본다.

### 3.1 실수코딩 유전알고리즘

유전알고리즘은 자연환경에서 발견되는 자연선택과 같은 유전 메커니즘을 컴퓨터 알고리즘으로 모방한 최적화 기법이다[26-32]. 이는 1975년 Holland 교수[26]에 의해 처음으로 개발 되었고, Goldberg[27]에 의해 비약적인 발전을 이루었다. 유전알고리즘은 주어진 해 공간에서 최적의 값을 결정하기 위해 ‘적자생존’의 개념을 이용한다. 이를 위해 임의적으로 설정된 집단 혹은 세대는 상속되고, 서로간의 유전정보를 교환한다. 따라서 인위적인 진화를 일으킬 집단(해 집단)이 필요하고, 이 집단 안에서 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 자연 진화기구를 모방한 유전 연산자가 작동하게 된다.

이처럼 자연환경을 모사한 유전알고리즘은 연속성, 미분가능성, 다봉성과 같은 다양한 형태의 탐색공간으로부터 자유롭고, 목적함수 외의 탐색공간에 대한 사전지식을 요구하지 않으며, 매우 크고 복잡한 공간일지라도 전역해 쪽으로 수렴시키는 것이 가능하다. 또한 기존의 탐색 기법[27, 30, 34, 35]이 갖는 ‘결정적’이라는 특징보다 ‘확률적’이라는 특성을

가지며, 보다 더 강인한 탐색이 가능한 장점 때문에 함수의 최적화[35, 36], 신경회로망의 학습[37-39], 동적시스템의 파라미터 추정 및 제어 [40-44], 신호처리[45, 46], 스케줄링 문제의 최적화[47, 48] 등의 많은 분야에서 성공적으로 응용되고 있다.

### 3.1.1 실수코딩

유전알고리즘은 해결하고자 하는 문제의 해를 직접 다루는 것이 아니라 이를 염색체 혹은 자연 파라미터의 형태로 변형하여 사용한다. 일반적으로 이진코딩(binary coding), 그레이코딩(gray coding), 실수코딩(real coding) 등의 여러 가지 코딩 방법이 사용되고 있으나 전통적으로 염색체를 표현하는데 사용되어 온 방법은 이진코딩이다. 그러나 탐색공간이 크고, 제약조건이 존재하여 고정밀도의 해가 필요한 경우에는 염색체의 길이를 크게 설정해야 하는 단점이 있다. 이는 연산 부담으로 나타나며 경우에 따라서는 탐색을 불가능하게 한다. 따라서 본 논문에서는 이진코딩 유전알고리즘의 이러한 단점을 극복하고 제약조건이 있는 경우에도 적절하게 응용이 가능한 RCGA를 사용한다.

RCGA는 염색체를 실수로 표시하기 때문에 염색체의 실수 유전자가 문제의 해 벡터와 일대일로 대응된다. 따라서 실수코딩 염색체는 다음과 같이 표시된다.

#### 정의 3.1 (실수코딩 염색체)

실수코딩 염색체는 실수 값의 열로 표현된다.

$$S=(s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_i \ \cdots \ s_n) \quad (3.1)$$

여기서  $s_i \in \mathbb{R}$ 는  $i$ 번째 유전자(요소),  $n$ 은 벡터의 차원이다.

실수코딩을 채용함으로써 염색체의 길이는 벡터의 차원  $n$ 과 일치하게 되고, 문제공간에서 가까운 두 점은 표현공간에서도 서로 가깝게 되는 특징을 갖는다.

### 3.1.2 초기 집단의 생성

RCGA는 염색체로 이루어진 집단 안에서 모의진화를 수행하고, 세대를 거치면서 좋은 유전자를 보유하게 된다. 이 집단은 세대에서 식 (3.2)와 같고,  $N$ 으로 나타나는 집단크기는 세대가 변하더라도 항상 일정한 크기를 갖는 것으로 가정한다.

#### 정의 3.2 (집단)

$k$ 세대의 집단  $P(k)$ 는 염색체로 특정되는  $N$ 개의 개체들로 이루어진 집합으로 정의된다.

$$P(k) = \{s_1(k), s_2(k) \cdots s_i(k) \cdots s_N(k)\} \quad (3.2)$$

특히 초기 집단  $P(0)$ 는 무작위로 생성되거나 경험을 기반으로 생성될 수 있다. 전자는 난수발생기를 통하여 발생된 실수로 초기집단을 구성하고, 후자는 다른 간단한 탐색 알고리즘으로 해를 포함하는 근사적인 정의영역을 얻고, 그 안에서 균등확률로 점들을 선택해서 초기화시킨다. 본 논문에서는 무작위법으로 초기집단을 초기화한다. 따라서 염색체 요소들은 난수발생기를 통하여 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 실수값으로 설정된다.

### 3.1.3 유전 연산자

집단 내에서 모의진화를 일으키기 위해서는 자연의 진화원리를 알고리즘으로 흉내 내어야 하며, 이를 위해 대부분의 유전알고리즘에서 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전 연산자를 사용한다.

#### (1) 재생산

재생산(reproduction)은 자연의 적자생존 또는 자연도태를 모방하는 메커니즘으로 각 개체의 적합도를 기반으로 집단 내의 개체들을 선택하고, 새로운 집단을 형성하는 과정이다. 이를 통해 집단 내의 약한 개체들은 도태되고, 강한 개체가 선택되어 세대교체가 진행될수록 좋은 유전자를 가진 집단이 되게 한다.

재생산 연산자는 룰렛휠선택 재생산, 토너먼트선택 재생산, 순위에 기초한 선택 재생산[49-51], 구배와 유사한 재생산 등이 있다. 본 논문에서는 Pham과 Jin[52]이 제안한 구배와 유사한 재생산을 사용한다.

#### (2) 교배

교배(crossover)는 자연계 생물의 성적결합을 모방하는 것으로 이를 통해 부모 세대의 유전인자가 서로 교환된다. 교배 연산자는 플랫 교배[53], 단순 교배[54], 산술적 교배[55] 등이 있으며, 본 논문에서는 수정단순 교배[30]를 사용한다. 수정단순 교배는 선택된 교배점 이후의 유전자를 서로 교환하여 자손을 형성하는 단순 교배와 교배점의 유전자를 식(3.3)과 같이 일차 결합하여 자손을 생성하는 산술적 교배를 결합한 형태이다.



$$\begin{aligned}\tilde{x}_j^u &= \lambda x_j^v + (1-\lambda)\bar{x}_j^u \\ \tilde{x}_j^v &= \lambda x_j^u + (1-\lambda)\bar{x}_j^v \quad (1 \leq j \leq n)\end{aligned}\tag{3.3}$$

여기서  $\bar{x}_j^u$ 와  $\bar{x}_j^v$ 는 집단에서 선택된 부모 염색체의 유전자이고,  $\tilde{x}_j^u$ 와  $\tilde{x}_j^v$ 는 자손 염색체의 유전자이다.  $\lambda$ 는 곱인수(multiplier)로써 고정되거나 각 유전자 마다 독립적으로 결정될 수 있는 0과 1사이의 난수이다.

그림 3.1은 이 연산자의 연산 결과를 보여준다.

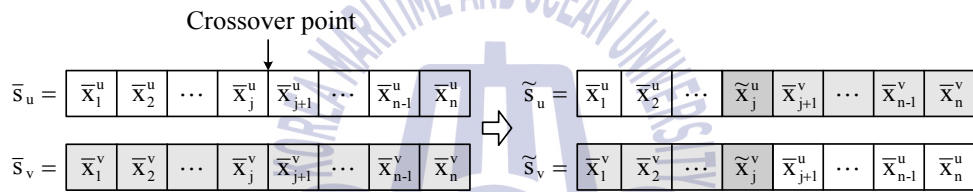


Figure 3.1 Modified simple crossover

### (3) 돌연변이

모의진화가 진행되는 동안 재생산과 교배를 통해 집단은 더욱 해에 근접한 염색체로 되고, 이는 염색체들이 서로 닮아가게 되는 요인이 된다. 그러나 이러한 현상이 진화 초기에 발생하면 유전자의 다양성 결핍으로 인해 지역해나 사점에 빠지게 될 수 있다. 돌연변이(mutation)는 이를 벗어나기 위한 전략으로 균등 돌연변이, 경계 돌연변이, 동적 돌연변이 등이 있으며, 본 논문에서는 동적 돌연변이를 사용한다[55]. 이 돌연변이 연산자는 세대 초기에 전 탐색공간을 균등한 확률로 탐색하다가 세대수가 증가하면서 탐색영역을 좁혀 지역적으로 탐색하기 때문에 돌연변이

확률을 다른 돌연변이 연산자보다 크게 선정하는 것이 가능하다. 그림 3.2와 같이 j번째 유전자에서 돌연변이가 일어나면  $x_j$ 는 식 (3.4)로부터 결정된다.

$$\tilde{s} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 & \cdots & \tilde{x}_j & \tilde{x}_{j+1} & \cdots & \tilde{x}_{n-1} & \tilde{x}_n \end{bmatrix} \Rightarrow s = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_j & x_{j+1} & \cdots & x_{n-1} & x_n \end{bmatrix}$$

Figure 3.2 Dynamic mutation

$$x_j = \begin{cases} \tilde{x}_j + \Delta(k, \tilde{x}_j^{(U)} - \tilde{x}_j), & \text{if } \tau = 0 \\ \tilde{x}_j - \Delta(k, \tilde{x}_j - \tilde{x}_j^{(L)}), & \text{if } \tau = 1 \end{cases} \quad (3.4)$$

여기서  $\tilde{x}_j$ 는 교배 연산을 거친 염색체 내에서 돌연변이 확률에 의해 선택된 j번째 유전자이다.  $\tilde{x}_j^{(L)}$ ,  $\tilde{x}_j^{(U)}$ 는 각각 j 번째 유전자의 하한값과 상한값이고,  $\tau$ 는 0 또는 1을 취하는 난수이다. 이때  $\Delta(k,y)$ 는 식 (3.5)의 함수가 사용된다.

$$\Delta(k,y) = y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{k}{T}\right)^b \quad (3.5)$$

여기서  $r$ 은 0과 1사이의 실수 난수이고,  $T$ 는 유전알고리즘의 최대 세대수이며,  $b$ 는 불균형 정도를 나타내는 매개변수로서 사용자에게 의해 결정된다.

### 3.1.4 적합도 평가

자연계에서 한 생물의 생존 능력은 그 환경에 대한 적합도를 반영하게 되는 것과 마찬가지로 유전알고리즘은 최적해로의 수렴 정도를 개체의 적합도 평가(fitness evaluation)로 반영시킨다. 재생산, 교배, 돌연변이 연산을 통해 새로운 집단이 형성될 때마다 개체의 적합도는 목적함수에 의해 평가되고 적합도의 크기에 따라 다음 세대에서 선택되어 재생산되는 비율이 결정되게 된다. 이 과정에서 적합도가 큰 개체가 더 많은 보상을 받을 수 있도록 배려하기 위해서 적합도 함수는 최대화 문제 형태로 표현되어야 하고, 음의 값을 갖지 않아야 한다. 따라서 최대화 혹은 최소화 문제로 기술되는 목적함수로부터 적절한 적합도 함수는 식 (3.6)과 같은 사상(mapping)을 통해 얻을 수 있다.

$$\text{최대화 문제 : } f(\mathbf{s}(k)) = F(\mathbf{x}(k)) - \gamma \quad (3.6a)$$

$$\text{최소화 문제 : } f(\mathbf{s}(k)) = -F(\mathbf{x}(k)) - \gamma \quad (3.6b)$$

여기서  $f(\mathbf{s}(k))$ 는 적합도 함수,  $F(\mathbf{x}(k))$ 는 목적함수,  $k$ 는 세대,  $\gamma$ 는 항상  $f(\mathbf{s}) \geq 0$ 을 보장하는 상수로써 유전알고리즘의 성능에 직접적인 영향을 주므로 적절한 선정이 필요하다.

일반적으로 탐색 공간 내에서 목적함수의 최소치를 아는 것이 쉽지 않기 때문에  $\gamma$ 는 경험적으로 아주 작은 값으로 선정된다. 그러나  $\gamma$ 를 초기에 잘 선정해도 진화 도중에 값이 고정되면 선택압(selection pressure)이 떨어지는 문제가 발생한다. 이것이 적합도 함수의 스케일링(scaling)이 필요한 이유이다.

### 3.1.5 적합도의 스케일링

유전알고리즘이 특히 작은 집단을 취급할 때 개체집단의 적합도 평가는 그 성능에 크게 영향을 미친다. 만약 초기 세대의 집단에 초우량 개체가 출현하게 되면 재생산 연산자는 이 개체를 여러 번 복제하게 되고, 그 결과 이들이 집단을 지배하게 되어 지역 최적점으로 급히 수렴하게 된다. 이와 반대로 후기 세대에는 집단이 강해지고 개체들이 한 점 주위로 군집되어 좋은 개체와 더 나은 개체를 구별하는 것이 쉽지 않게 된다. 그러므로 초기에는 유전자의 다양성을 충분히 유지할 수 있도록 개체간의 상대적인 적합도의 영향을 줄여주고, 후기에는 그 영향을 커지게 해서 선택압을 일정하게 유지시켜 줄 필요가 있다.

이 같은 역할을 하기 위해 스케일링을 통한 정규화 방법과 스케일링 윈도우 기법을 통한 정규화 방법이 사용될 수 있다. 전자의 방법으로는 선형 스케일링, 시그마 절단, 로그 스케일링 등이 있다. 후자의 방법은 과거 집단의 개수인 스케일링 윈도우  $W_s$ 를 사용하여 선택압을 유지하는 것으로써  $\gamma$ 값을 과거의 다수 집단에서 발견되는 목적함수 값으로 계속 변경해 주는 방법이다. Grefenstette[55]는  $W_s$ 의 크기에 따라 세 가지 스케일링 모드를 제안했는데 광범위한 시뮬레이션 결과  $W_s$ 가 1인 경우에 효과적이라는 결과를 발표하였다. 따라서 본 논문에서도  $W_s$ 를 1로 선택한 스케일링 윈도우 기법을 사용한다.

### 3.1.6 엘리트 전략

엘리트 전략(elitist strategy)은 한 세대의 최적 개체의 소멸을 방지하는 전략으로, 이전 세대의 최적 개체를 저장하고 있다가 일련의 모의진화를 수행한 후 최적 개체가 소멸된 것이 확인 되면 현 세대의 가장 약한 개체 또는 임의로 선택된 개체를 저장된 최적 개체와 교환함으로써 집단

내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 전달되는 것을 보장한다. 이 방법은 일반적으로 유전알고리즘의 성능을 개선하는 것으로 알려져 있다[35].

### 3.1.7 종료 조건

유전알고리즘이 확률적인 탐색법이라는 사실을 생각할 때, 어느 시점이 전역해에 도달한 것인지 알기가 쉽지 않다. 그러나 구체적인 적용에 있어서는 유전알고리즘을 정해진 세대까지 모의진화 시키는 방법을 사용한다. 만약 최종 세대까지 진화한 염색체가 만족할 만한 해에 근접하지 못하면, 최종 세대수를 증가시켜 다시 모의진화를 진행시킨다. 또 다른 방법으로 목적함수 값의 허용치를 정하고, 세대에 관계없이 목적함수가 허용치 안에 들어오면 모의진화를 종료시키는 방법도 있다. 본 논문에서는 전자의 종료 조건을 사용한다.

## 3.2 제약조건의 취급

복잡한 최적화 문제에 유전알고리즘을 적용할 때 고려되어야 할 사항 중 하나는 제약조건을 어떻게 다룰 것인가 하는 것이다. 왜냐하면 주어진 문제에는 제약조건이 수반될 수 있고 또한 유전 연산자들이 염색체를 다루면서 부적합한 해를 생산할 수 있기 때문이다. 제약조건을 다루는 방법에는 크게 거부전략, 복구전략, 유전 연산자와의 보완 전략, 벌점전략이 있다. 여기서는 본 연구에서 사용할 벌점전략 중 고정 벌점전략에 대해서 간단히 살펴보도록 한다.

흔히 제약조건을 가지는 최적화 문제들의 해공간은 적합한 영역과 부적합한 영역으로 구성되기 때문에 만약 알고리즘이 부적합한 영역을 탐색하게 될 때 벌점을 부과하고 이 벌점을 평가함수 계산에 반영하면 제약조건이 따르는 최적화 문제를 제약조건이 없는 문제로 변환할 수 있

다. 대부분의 경우 시스템은 다음과 같이 몇 가지 고려되어야 할 제약조건을 가진다.

- ① 계단함수 입력에서 정의되는 최대오버슈트( $M_p$ )
- ② 지연시간( $t_d$ )
- ③ 상승시간( $t_r$ )
- ④ 정정시간( $t_s$ )
- ⑤ 제한된 입력( $u$ ) 등

이외에도 시스템 설계 시 요구되는 사항들을 추가하여 고려되어야 할 요소를 선정할 수가 있다.

이러한 제약조건을 고려함으로써 REMUS의 심도제어를 위한 제어기 설계 문제는 복잡한 제약성 최적화 문제로 귀착되는데 그 해를 구하기 위해 유전알고리즘을 이용한다. 유전알고리즘이 제어기의 파라미터를 찾는 과정에서 집단 내의 잠정적인 해들이 제약조건을 위반(부적합한 영역을 탐색)할 때를 처리하기 위해 별점전략을 채용하고, 그 위반 정도에 따라 별점을 추가하도록 별점함수  $P(\psi)$ 를 식 (3.7)과 같이 정의하였다.

$$F(\psi) = J(\psi) + P(\psi) \quad (3.7)$$

$$\text{단, } P(\psi) = \begin{cases} 0 & , \psi \text{가 적합한 해일 경우} \\ \sum_{j=1}^J w_j g_j^2 & , \psi \text{가 부적합한 해일 경우} \end{cases}$$

여기서  $w_j$ 는 각 제약조건에 대응되는 별점상수로써 설계자에 의해 적절하게 선정되는 변수이며  $J(\psi)$ 는  $\psi$ 에 종속되는 목적함수 값이다. 이렇게 함으로써 제약성 최적화 문제는 시스템의 방정식을 만족하면서  $F(\psi)$ 를 최소로 하는 비제약성 최적화 문제로 변환된다.

그림 3.3은 지금까지 설명한 RCGA의 진화 과정을 보이고 있다.

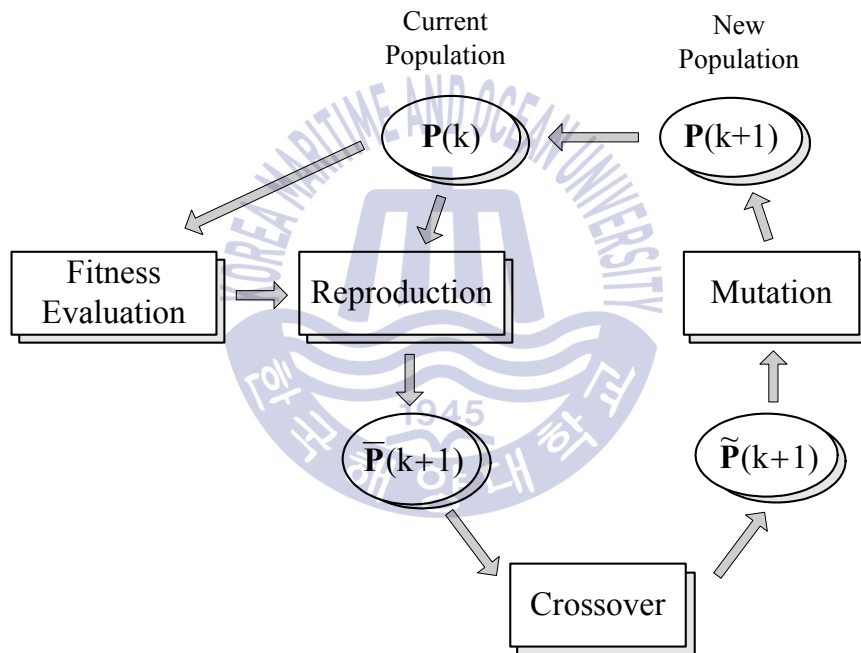


Figure 3.3 Operation of a RCGA

## 제 4 장 RCGA 기반 심도 제어기 설계

이 장에서는 제어기의 구조가 간단하여 적용이 쉽고, 제어 성능이 우수하며 제어이득 조정이 비교적 쉬워 산업현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 PID 제어기에 대해서 살펴보고, 제3장에서 다룬 RCGA를 이용하여 제어기 설계사양이 고려된 REMUS의 심도 제어기를 설계하는 것에 대해서 알아본다.

### 4.1 PID 제어기의 동작 특성

#### 4.1.1 비례 동작

비례 동작(P : Proportional)은 식 (4.1)과 같이 목표값과 현재 출력과의 오차에 적절한 비례이득  $K_p$ 를 곱하여 제어기 출력을 만들어낸다.  $u_0$ 는 초기상태의 제어입력을 나타낸 것이다.

$$u_p = K_p e + u_0, \quad PB = \frac{100}{K_p} \quad (4.1)$$

그림 4.1과 같이 제어기 출력의 전체범위와 그에 해당하는 오차의 크기와 비를 비례대(Proportional Band : PB)라고 하며 PB의 크기에 따라 제어기의 민감도가 결정된다. 즉 비례대는 100[%]의 출력 변화를 만들어



내는 데에 필요한 입력신호의 변화를 [%]로 나타내는 값이다.

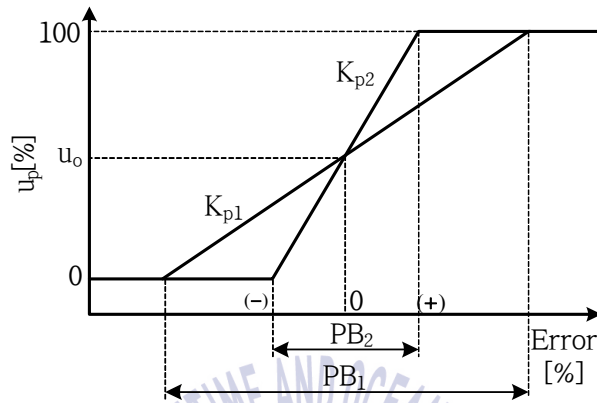


Figure 4.1 The proportional band

비례 제어 동작은 0형 시스템에서 오프셋(off-set)이라 하는 영구적인 잔류 오차가 정상상태에서 발생한다. 오프셋은 비례이득  $K_p$ 를 크게, 즉 PB를 작게 하여 오차에 민감한 제어기로 설계하면 작아지지만, 시스템 파라미터의 변화나 데드밴드의 존재 등으로 인해 완전한 0으로 만들기는 비례동작만으로는 불가능하며 대부분의 경우 적분동작이 함께 사용된다.

#### 4.1.2 적분 동작

앞에서 설명한 것처럼 비례 제어기는 0형 시스템에서 오프셋을 발생시킨다. 이를 제거하기 위한 방법으로 식 (4.2)와 같이 오차를 적분하여 적절한 이득을 곱한 제어기 출력을 선정함으로써 충분한 시간이 경과한 후에는 목표값에 대한 출력의 오차를 0으로 만들 수 있다.

$$u_i = K_i \int_0^t e \, dt + u_o \quad (4.2)$$

오차에 대한 적분(I : Integral) 제어기의 동작은 그림 4.2에서 나타내고 있다.

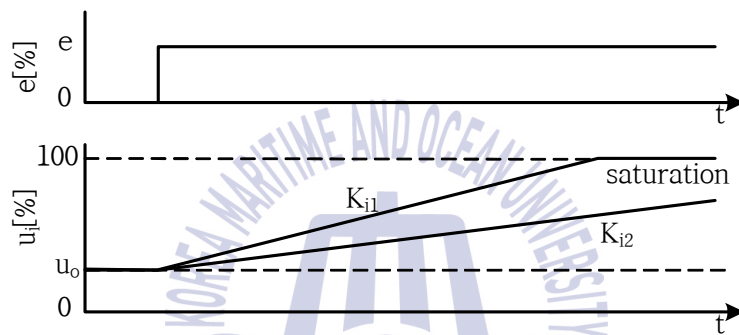


Figure 4.2 Integral control action

제어기 출력은 오차의 적분값과 이득  $K_i$ 의 크기에 따라 변화한다. 오차의 합이 0이면 적분 제어기는 그 당시의 출력상태로 고정되며, 오차가 0이 아니면 출력은 1[%]의 오차에 대하여  $K_i$ [%/sec]의 비율로 출력이 증가 또는 감소한다. 적분 제어기는 시스템의 파라미터가 변화하는 시스템에서도 정상상태 오차를 없앨 수 있으나 제어동작의 특성상 오버슈트를 크게 하고 출력이 정상상태로 수렴하기 전까지 진동을 유발시키는 단점이 있다.

### 4.1.3 미분 동작

미분(D : Derivative) 제어 동작은 오차의 미분 즉, 현재의 오차의 변화율에 대해 반응한다. 식 (4.3)과 같이 표현되는 미분 제어기의 출력은 오차가 일정할 때 0이 되므로 단독으로는 사용될 수 없고 비례 제어기나 적분 제어기와 함께 사용되어야 한다.

$$u_d = K_d \frac{de}{dt} \quad (4.3)$$

미분 제어기는 그림 4.3과 같이 오차의 변화율에 따라 제어기의 출력이 급격히 변화할 수 있기 때문에 동적 응답특성이 빠른 시스템에서는 주의 깊게 사용해야 한다. 그리고 잡음이 입력에 포함되어 있으면 미분 동작은 보통 이 잡음을 크게 증폭하므로 잡음 차단에 특별한 주의를 하여야 한다.

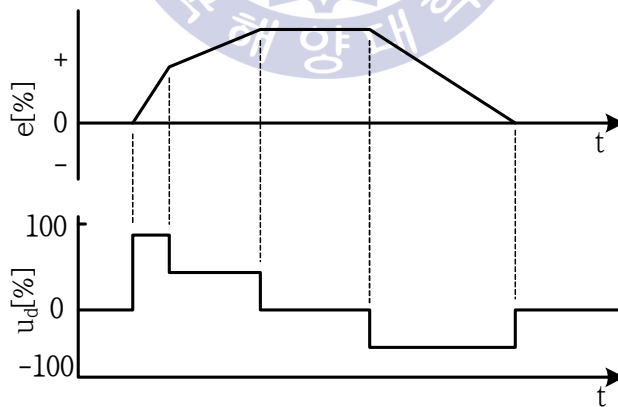


Figure 4.3 Derivative control action

#### 4.1.4 PI 제어

비례 동작과 적분 동작을 혼합한 형태인 PI 제어(Proportional-Integral control)는 파라미터가 변화하는 시스템에서도 정상상태 오차를 없앨 수 있으며 제어기의 출력은 식 (4.4)와 같다.

$$u_{pi} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + u_0 \quad (4.4)$$

그림 4.4는 오차에 대한 PI 제어기의 출력을 나타내고 있는데, 오차가 0이면 제어기 출력은 현 시점까지의 적분제어 동작의 향으로 고정되고, 오차가 0이 아니면 비례항은 오차를 수정하고, 적분항은 오차의 누적값을 수정하게 된다. 그러나 제어동작의 특성상 오버슈트를 크게 하고 출력이 정상상태로 수렴하기 전까지 진동을 유발시키는 단점이 있다.

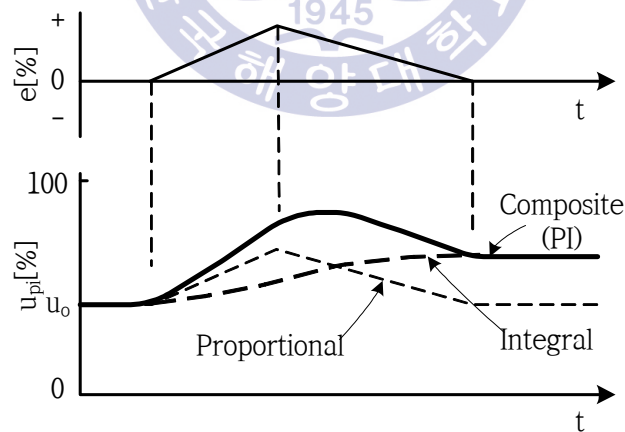


Figure 4.4 Proportional-Integral control action

#### 4.1.5 PD 제어

식 (4.5)와 같은 출력을 갖는 PD 제어(Proportional-Derivative control)는 비례 제어 동작에서 발생하는 오프셋을 제거하지 못하지만, 오차의 변화에 의해 신속하게 반응하므로 오프셋이 허용범위 내에서 발생하는 시스템의 제어에 효과적으로 사용될 수 있다.

$$u_{pd} = K_p e + K_d \frac{de}{dt} + u_o \quad (4.5)$$

그림 4.5는 오차의 변화와 오프셋을 갖는 시스템의 PD 제어기 응답을 나타내고 있으며 오차의 변화율, 즉 기울기에 따라 제어기의 출력이 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다.

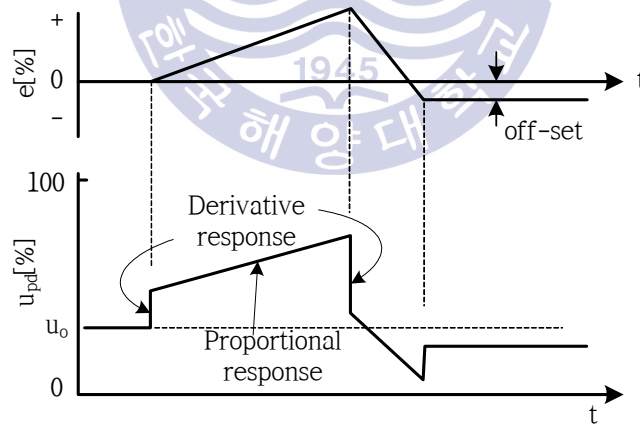


Figure 4.5 Proportional-Derivative control action

#### 4.1.6 PID 제어

식 (4.6)은 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어기의 출력을 나타낸 것으로,  $e$ 는 목표값과 출력값의 오차이고,  $K_p$ 는 비례이득,  $K_i$ 는 적분이득,  $K_d$ 는 미분이득이다. 즉, 현재의 오차에 비례이득  $K_p$ 를 곱하고, 누적된 오차에 적분이득  $K_i$ 를 곱하며, 오차의 변화율에 미분이득  $K_d$ 를 곱하여 이들 값을 초기상태의 제어입력  $u_0$ 와 합한다. PID 제어기는 비례, 적분, 미분 동작이 혼합된 형태로서 비례 제어 동작에서 발생하는 오프셋을 효과적으로 없애면서 빠른 응답을 얻을 수 있으므로 대부분의 제어 문제에 성공적으로 적용될 수 있다.

$$u_{pid} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} + u_0 \quad (4.6)$$

그림 4.6에서는 세 가지 동작이 결합된 제어기의 오차에 대한 제어기 출력을 나타내고 있다.

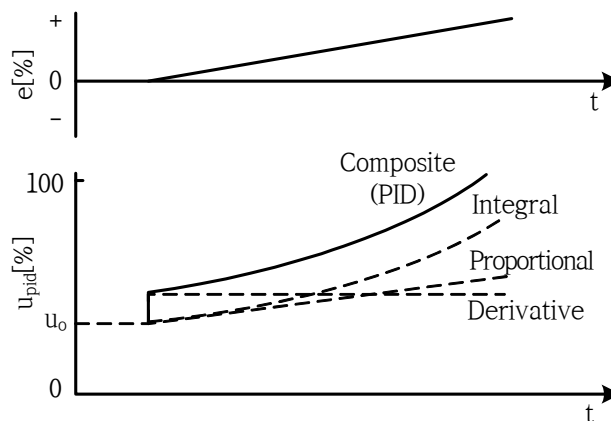


Figure 4.6 Proportional-Integral-Derivative control action

## 4.2 제어기의 파라미터 동조

P 제어기는 가장 간단한 제어기로써 적절히 동조되었을 때 근본적으로 안정하며 동조하기는 쉬우나 제어 대상이 0형인 시스템에 대해서는 정상 상태에서 오프셋이 발생한다. PI 제어기는 P 제어기에서 발생된 오프셋을 제거할 수 있으며 적분 동작 하나를 사용할 때보다 더 좋은 동적응답을 얻을 수 있다. PD 제어기는 P 제어기 단독으로 사용하는 것 보다 오프셋이 감소되며 응답지연을 감소시켜 더 빠른 응답을 얻을 수 있다. D 제어기를 도입함으로써 비레이득을 더 증가할 수 있다. PID 제어기는 가장 복잡하고 고가이기는 하나 빠른 응답을 얻을 수 있고 오프셋이 없으며 적절히 동조되면 가장 좋은 제어기가 된다. 이러한 이유로 PID 제어기는 산업현장에서 가장 많이 사용되는 제어기이며 제어대상에 따라 제어기의 파라미터를 어떻게 선정하느냐에 따라 제어기의 성능이 결정된다. 일반적으로 현장에서 파라미터 조정은 제어대상의 특성과 작업자의 경험에 의해 시행착오의 결과로 결정된다. 이를 위해서는 PID 제어기의 파라미터 조정에 따른 시스템 응답특성을 잘 알고 있어야 제어기의 적절한 동조가 가능하다.

제어시스템은 그림 4.7과 같이 제어기와 제어대상을 포함하는 폐루프 블록선도로 나타낼 수 있다.

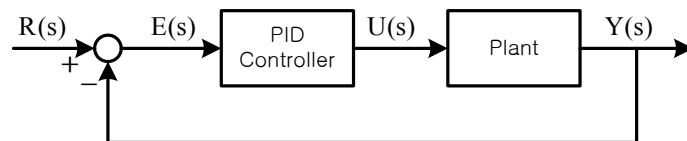


Figure 4.7 Block diagram of PID control system

제어시스템의 성능을 보장하기 위해서는 제어기의 파라미터를 적절히 조정하여야 한다. 제어기의 파라미터를 자동적으로 조정하는 것을 자동 동조라고 하며, 산업계에서 많이 필요로 하고 있다. 대표적인 동조 방법으로는 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols) 동조법, 계전기(relay) 동조법 등이 있으며, 이 방법들은 제어대상의 모델을 사용하지 않고 간단한 동조과정을 거쳐 이득을 결정한다. 제어대상의 모델이 주어질 경우에 제어기의 이득은 주파수영역 설계법, 근궤적법, 과도응답법, 극배치법 등을 사용하여 반복과정을 통해 설계할 수 있다.

본 논문에서는 그림 4.8과 같이 RCGA를 이용하여 PID 제어기의 파라미터들을 최적 동조하고자 한다.

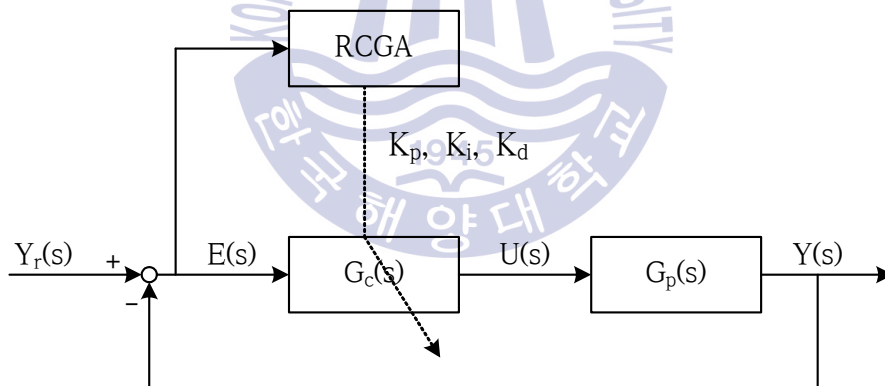


Figure 4.8 Optimal tuning of PID controller using a RCGA



### 4.3 성능지수를 고려한 심도 제어기의 최적동조

심도 제어기의 파라미터를 탐색하기 위해 사용되는 RCGA는 집단이 진화해 가는 동안 개체간의 우열을 평가하기 위하여 적합도를 필요로 하게 되는데 적합도는 성능지수(목적함수)로부터 계산된다. 그리고 이때 제약조건으로 고려되는 설계사양으로는 ① REMUS의 심도 명령시 오버슈트를 최소화하고, ② 최단시간 내에 목표 심도에 도달하여야 하며, ③ 정상편차가 없어야 한다. 또한, 탐색된 파라미터에 의한 제어시스템의 성능이 좋고 나쁨을 정량적으로 평가할 수 있는 성능지수로는 식 (4.7)의 제곱오차적분(ISE : Integral of the Square Error), 식 (4.8)의 절대오차적분(IAE : Integral of the Absolute Error), 식(4.9)의 시간곱 절대오차 적분(ITAE : Integral of the Time-weighted Absolute Error) 등을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 세 가지 성능지수를 모두 고려하였다.

$$ISE : J_{ISE} = \int_0^{t_f} (e_z^2(t) + e_\theta^2(t)) dt \quad (4.7)$$

$$IAE : J_{IAE} = \int_0^{t_f} (|e_z(t)| + |e_\theta(t)|) dt \quad (4.8)$$

$$ITAE : J_{ITAE} = \int_0^{t_f} t (|e_z(t)| + |e_\theta(t)|) dt \quad (4.9)$$

여기서 시간  $t_f$ 는 이 이후의 오차가 무시되어도 좋을 정도로 충분히 큰 값이다.

일반적으로 ISE는 해석이 용이하여 최적제어기 설계 등에 자주 이용되거나 오차가 클 때는 큰 벌점을, 작을 때는 작은 벌점을 주는 결과를 초래해 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하다. 한편 IAE는 오차의 절대크

기를 취함으로써 양이나 음의 오차에 균등한 벌점을 부여하는 효과를 주므로 ISE보다 나은 감도를 나타낸다. ITAE는 장시간의 과도현상에 대해 벌점을 주는 매우 유용한 기준으로 IAE나 ISE보다 훨씬 더 변별력이 있으며, 이 적분의 최소값은 시스템의 파라미터들이 변하는 경우에 훨씬 더 잘 정의될 수 있다[56].

#### 4.4 심도 제어용 제어기 설계

REMUS의 심도 제어기를 그림 4.9와 같이 내부(inner loop) 제어시스템인 핀 제어기로는 PD 제어기를 사용하고, 외부(outer loop) 제어시스템인 피치 제어기로는 P 제어기를 사용하여 REMUS의 전체적인 심도 제어를 하고자 한다. 이는 다중루프(multi loop)를 적용하는 캐스케이드 제어(cascade control) 기법으로 두 개의 제어기가 직렬로 연결되는 형태이다. 이는 제어기가 하나인 단일 루프(single loop) 제어보다 응답속도나 제어 특성이 전체적으로 개선되는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 REMUA의 심도제어에 캐스케이드 제어시스템을 적용하기로 한다.

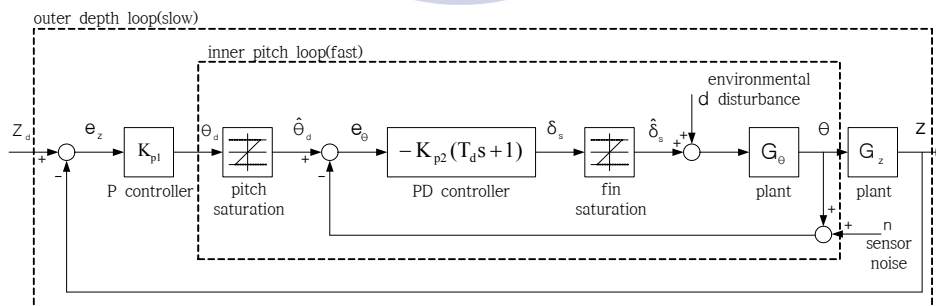


Figure 4.9 Depth control system for REMUS

핀 제어기로 사용되는 PD 제어기의 전달함수는 식 (4.10)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\delta_s(s)}{e_\theta(s)} = -K_{p2}(T_d s + 1) \quad (4.10)$$

여기서,  $\delta_s$ 는 PD 제어기의 출력으로써 핀의 입력 각도이다.  $e_\theta$ 는 작동기의 포화를 고려한 핀의 목표각  $\hat{\theta}_d$ 와 현재 핀 각  $\theta$ 에 대한 오차이다.  $K_{p2}$ 는 핀 제어기용 비례제어 이득이고  $T_d$ 는 미분시간이다.

이때 핀 제어기에 음의 부호를 붙여주는 이유는 선체의 피치각과 선미의 핀 각 간에 기호 규칙의 차이가 있기 때문이다. 예를 들어, 양의 방향으로 핀 각(positive stern plane angle)이 움직이면, 핀에 의한 유체의 압력변화로 선체의 후미는 y축에 대하여 음의 방향(negative pitch rate)으로 힘을 받아 움직이게 된다. 결과적으로 선체의 선수는 무게중심을 중심으로 양의 방향으로 모멘트를 생성시키게 된다.

피치 제어기로 사용되는 P 제어기는 식 (4.11)과 같은 전달함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\theta_d(s)}{e_z(s)} = K_{p1} \quad (4.11)$$

여기서,  $e_z$ 는 심도오차  $Z_d - Z$ 이고  $K_{p1}$ 은 피치 제어기용 비례제어 이득이다.

그리고 설계사양으로는 계단 입력인 심도 명령에 대한 REMUS의 과도 응답 특성에서 오버슈트( $M_p$ )는 없어야 하고, 상승시간( $t_r$ )은 2[sec] 안에 들어오도록 제약조건으로 고려하기로 한다. 식 (4.12)는 이들을 고려한

별점함수  $g_1(\psi)$ 를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} g_1(\psi) &= -M_p(\psi) \geq 0 \\ g_2(\psi) &= 2 - t_r(\psi) \geq 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

이렇게 선정된 별점함수는 위반 정도에 따라 별점을 추가하게 되고, 세 가지 성능지수에 별점함수가 추가된 새로운 평가함수는 식 (4.13)부터 식 (4.15)과 같이 정리된다.

$$F_{ISE}(\psi) = J_{ISE} + w_1 g_1^2 + w_2 g_2^2 \quad (4.13)$$

$$F_{IAE}(\psi) = J_{IAE} + w_1 g_1^2 + w_2 g_2^2 \quad (4.14)$$

$$F_{ITAE}(\psi) = J_{ITAE} + w_1 g_1^2 + w_2 g_2^2 \quad (4.15)$$

여기서 RCGA로 제어기의 파라미터들을 동조할 때,  $M_p$ 의 별점 상수  $w_1$ 은  $1 \times 10^{50}$ ,  $t_r$ 에 대한 별점상수  $w_2$ 는  $1 \times 10^{20}$ 로 선정하였다.

#### 4.5 REMUS 심도 제어를 위한 제어기의 파라미터 추정

본 논문의 제어대상인 REMUS의 심도 제어를 위해 사용된 선형모델은 식 (2.7)과 표 2.2를 참고하여 정리하면 식 (4.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -0.82 & 0.00 & -0.69 \\ 0.00 & 0.00 & -1.54 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} -4.16 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix} \delta_s \quad (4.16)$$

REMUS의 심도 제어를 위한 제어기의 파라미터는 별점함수가 추가된 RCGA를 이용하여 그림 4.10과 같이 세 개의 성능지수별로 탐색한다.

이때 사용된 RCGA의 제어변수로는 집단의 크기  $N$ 은 30, 재생산계수  $\eta$ 는 1.8, 교배확률  $P_c$ 는 0.95, 돌연변이 확률  $P_m$ 은 0.2가 사용되었고, 미지의 이득행렬을 탐색하기 위한 구간은  $-50 \leq K_{p1} \leq 50$ ,  $0 \leq K_{p2} \leq 50$ ,  $0 \leq T_d \leq 50$ 으로 한다.

이 때 초기의 동체는 수면 0[m]에서 운항하고 있으며, 목표 심도를 수심 10[m]로 명령한다. 심도 제어시스템에서 포화기로 작용하는 핀각의 작동과 피치각의 운전 가능 범위는 각각  $\pm 9[^\circ]$ 로 제한된다.

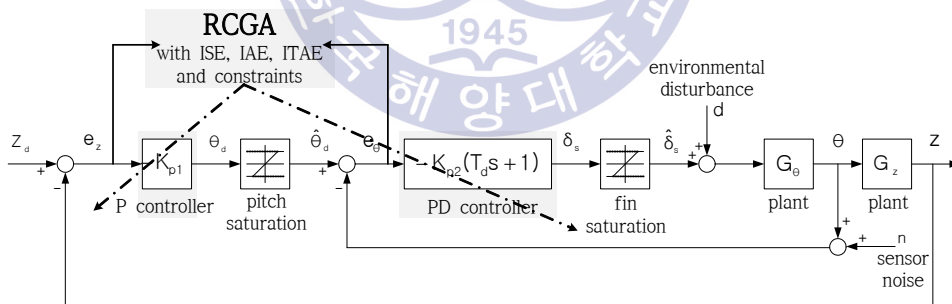


Figure 4.10 Optimal tuning of the depth controller using a RCGA

일반적으로 유전알고리즘을 통해 얻어지는 추정치의 정밀도는 초기집단의 선택에 크게 좌우된다. 이를 배제하기 위하여 본 논문에서는 독립

된 seed로 10회의 시뮬레이션을 실시하고 평균하여 최종적으로 제어기의 파라미터를 결정한다.

#### 4.5.1 제약조건이 없는 경우

표 4.1은 REMUS 심도 제어시스템에 편각의 작동과 피치각의 운전 가능 범위를 제한하지 않고, 제어기 설계사양도 고려하지 않은 경우에 RCGA를 통해 탐색된 제어기의 파라미터들이다. 그림 4.11과 그림 4.12는 RCGA가 제어기의 파라미터들을 탐색하고 있는 일례를 나타낸 것이며 모두 200세대 전후로 최적 파라미터에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다.

Table 4.1 Parameters of controller excluding constraints

objective function	$K_{p1}$	$T_d$	$K_{p2}$	value
ISE(AE)	-4.5433	1.2840	14.4999	2.9129
ITAE	-9.5664	0.4715	46.7712	0.1835

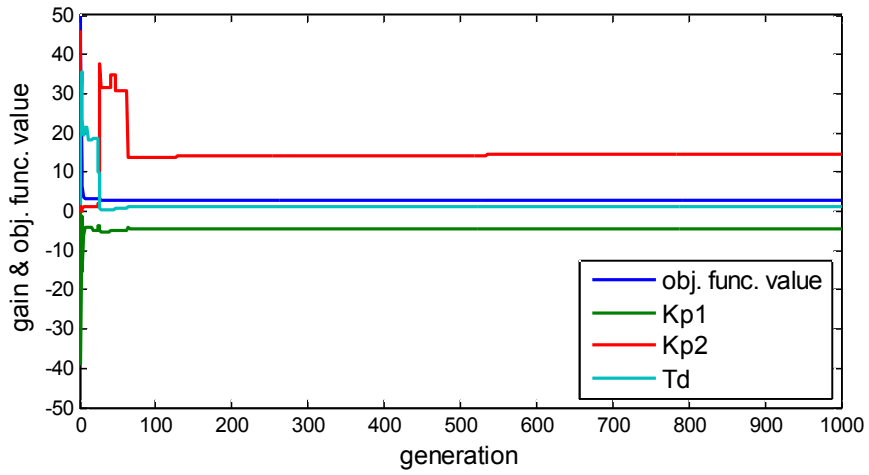


Figure 4.11 Tuning process for  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$ ,  $T_d$  using ISE(IAE), excluding constraints

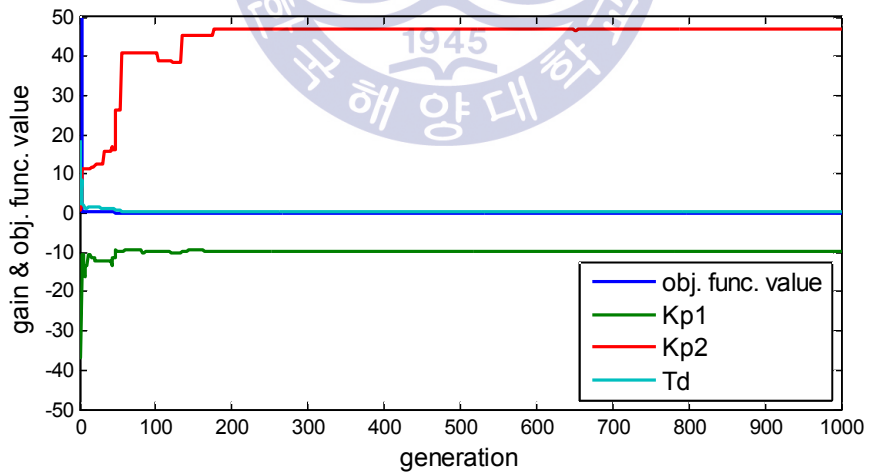


Figure 4.12 Tuning process for  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$ ,  $T_d$  using ITAE, excluding constraints

#### 4.5.2 제약조건이 있는 경우

표 4.2는 REMUS 심도 제어시스템에 편각의 작동과 피치각의 운전이  $\pm 9[^\circ]$ 의 한계 범위를 가지고 있으며 설계사양이 제약조건으로 고려된 경우에 RCGA를 이용해 탐색된 제어기의 파라미터들이다. 그림 4.13과 그림 4.14는 RCGA가 제어기의 파라미터를 탐색하고 있는 일례를 보여주며 모두 700세대 전후로 최적 파라미터에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다.

Table 4.2 Parameters of controller including constraints

objective function	$K_{p1}$	$T_d$	$K_{p2}$	value
ISE(AE)	-1.2189	0.3300	14.3811	15.5476
ITAE	-1.2817	0.3570	7.7620	8.1720



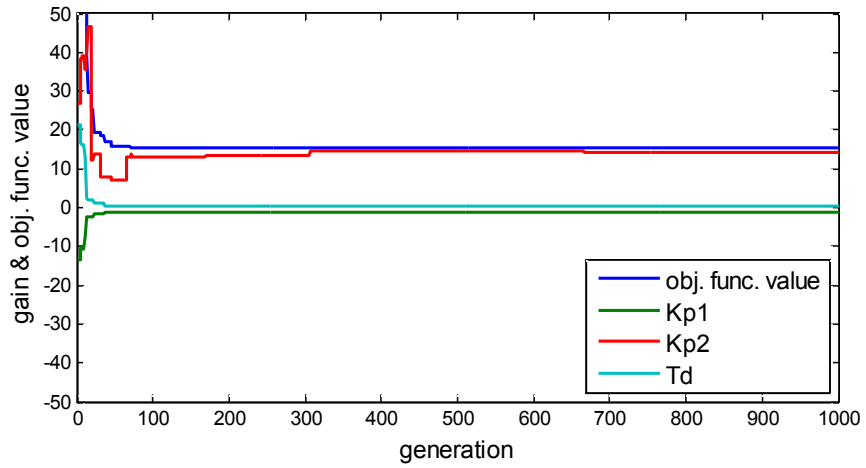


Figure 4.13 Tuning process for  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$ ,  $T_d$  using ISE(IAE), including constraints

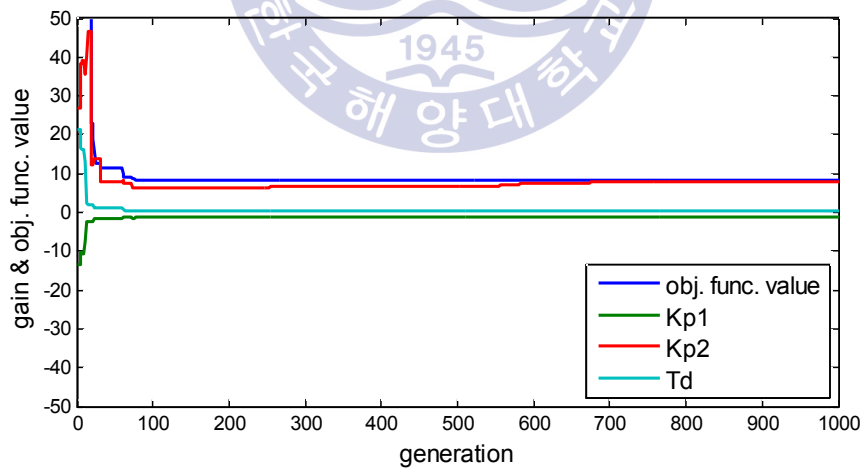


Figure 4.14 Tuning process for  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$ ,  $T_d$  using ITAE, including constraints

## 제 5 장 설정치 추종 성능 검토

본 장에서는 앞서 제안한 제어기 설계 방법의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 제어기의 동조는 초기의 REMUS가 수면에서 운항하고 있으며, 계단입력으로 목표 수심을 10[m]로 명령했을 때, 세가지 성능지수와 주어진 제어기 설계사양을 만족시키도록 RCGA에 의해 수행 되었다. 그리고 물리적인 포화기의 한계를 고려하지 못하고 제어기의 파라미터를 선정한 경우와 파라미터 동조시 포화기의 한계를 고려한 경우를 비교하기 위하여 본 논문에서는 다음과 같은 시뮬레이션을 진행하였다.

1) 핀각의 작동과 피치각의 운전 가능 범위가 제한되지 않고 제어기 설계사양이 고려되지 않은 경우에 RCGA로 탐색된 제어기 파라미터를 사용하여 포화기가 없는 시스템과 포화기가 설치된 시스템에 대하여 각각 시뮬레이션 하고 그 결과를 비교하였다.

2) 본 논문에서 제안하는 제어시스템 즉, 포화기와 제어기 설계사양이 고려된 경우에 RCGA로 탐색된 제어기 파라미터를 사용하여 제어대상이 주어진 설계사양을 만족시키는지 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

## 5.1 제약조건이 없는 경우

본 절에서는 핀의 작동과 피치 운동을 제한하는 포화기 및 제어기 설계사양이 제약조건으로 고려되지 않은 경우에 RCGA로 탐색된 제어기의 파라미터에 대하여 시뮬레이션 한 결과를 살펴본다.

그림 5.1은 시스템에 포화기가 없는 경우의 목표심도에 대한 응답을 비교한 것이다. 이때의 성능은 표 5.1과 같이 오버슈트와 정상상태 오차 없이 상당히 빠른 시간 안에 목표심도에 도달하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 5.2와 그림 5.3에서 볼 수 있듯이 각각의 응답에 대한 제어입력과 핀의 실제 작동상태를 살펴보면 현실적으로는 불가능한 작동범위를 보여주고 있다.

동일한 제어기의 파라미터들을 포화기가 설치된 시스템에 적용시켜보면, 제어입력과 핀의 실제 작동상태는 현실적으로 작동이 가능한 범위 내에서 작동하고 있으나 그림 5.4처럼 ISE(IAE)에 의해 동조된 제어기는 오버슈트와 함께 목표심도에 도달하는 시간이 길어졌고, ITAE를 이용하여 동조된 제어기는 그림 5.5처럼 핀의 작동 제한으로 목표심도에 추종하지 못하고 있다.

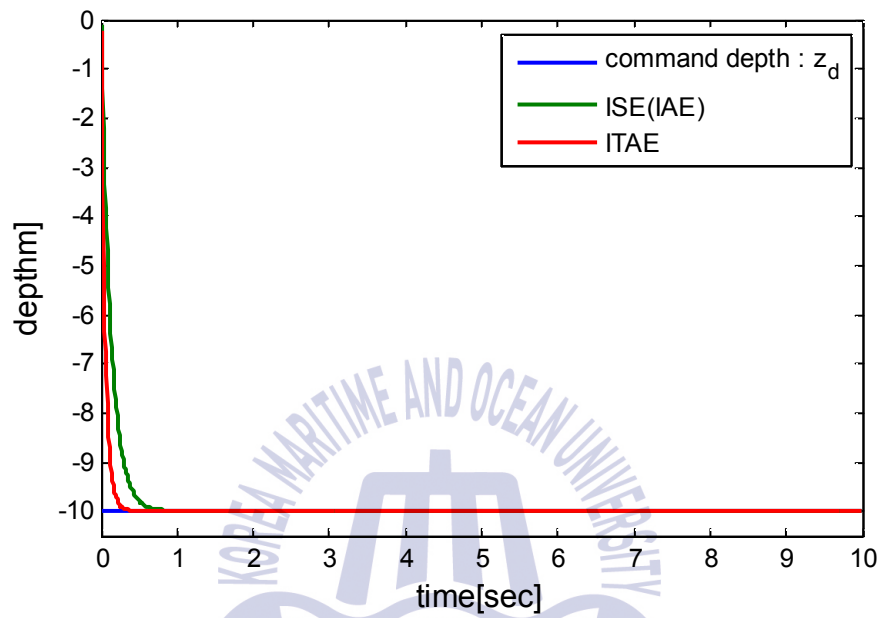


Figure 5.1 Depth tracking response using ISE(IAE) and ITAE, excluding constraints

Table 5.1 Performance of depth control system excluding constraints

objective function	value	$M_p$	$t_r$	$t_s$	$e_{ss}$
ISE(IAE)	2.9289	0.0000	0.2828	0.8750	0.0000
ITAE	0.1835	0.0000	0.1200	0.4150	0.0000

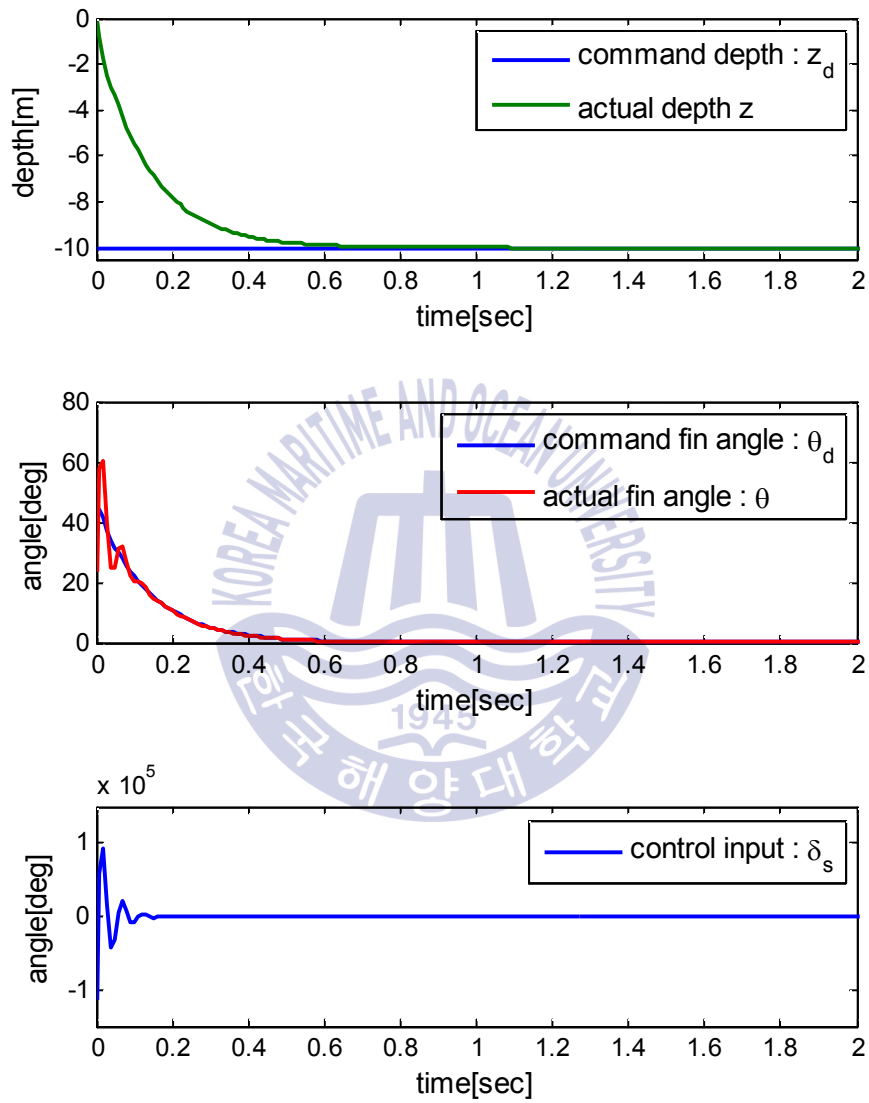


Figure 5.2 Depth tracking response using ISE(IAE), without saturator

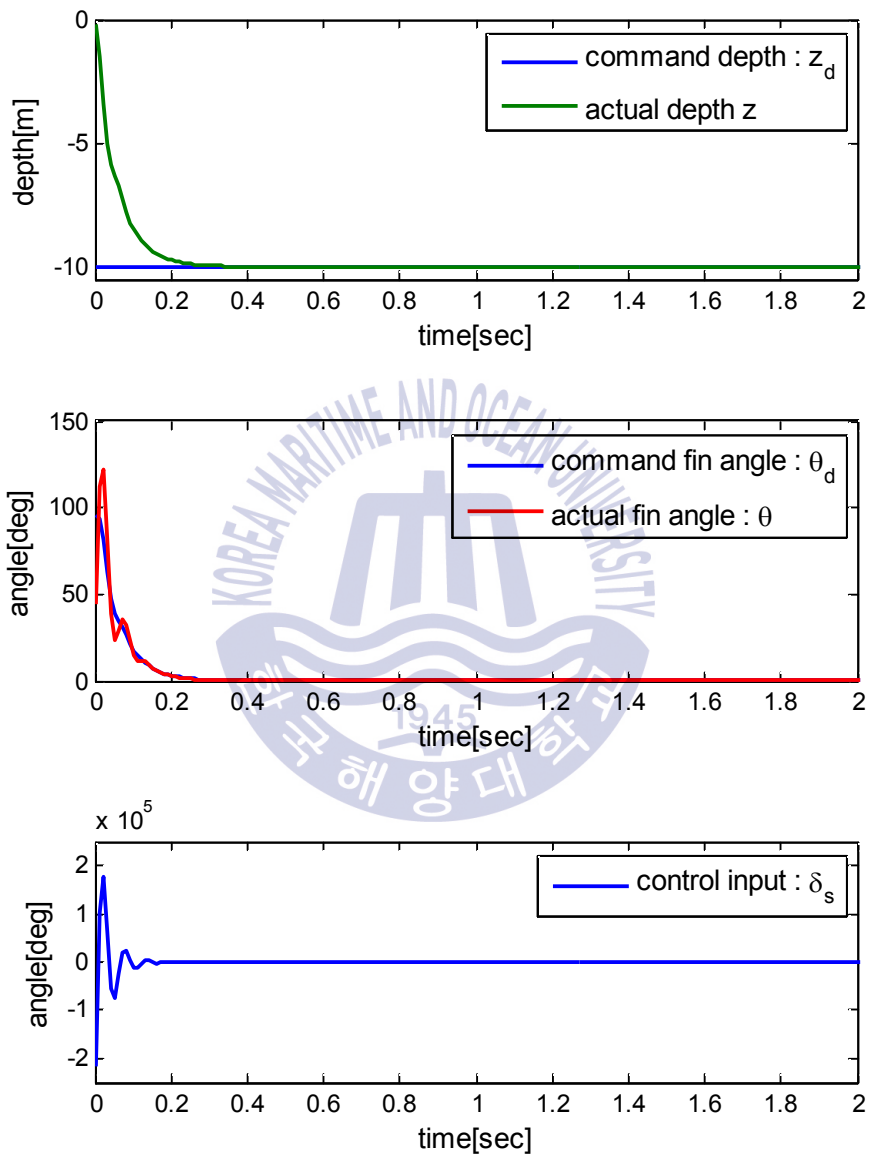


Figure 5.3 Depth tracking response using ITAE, without saturator

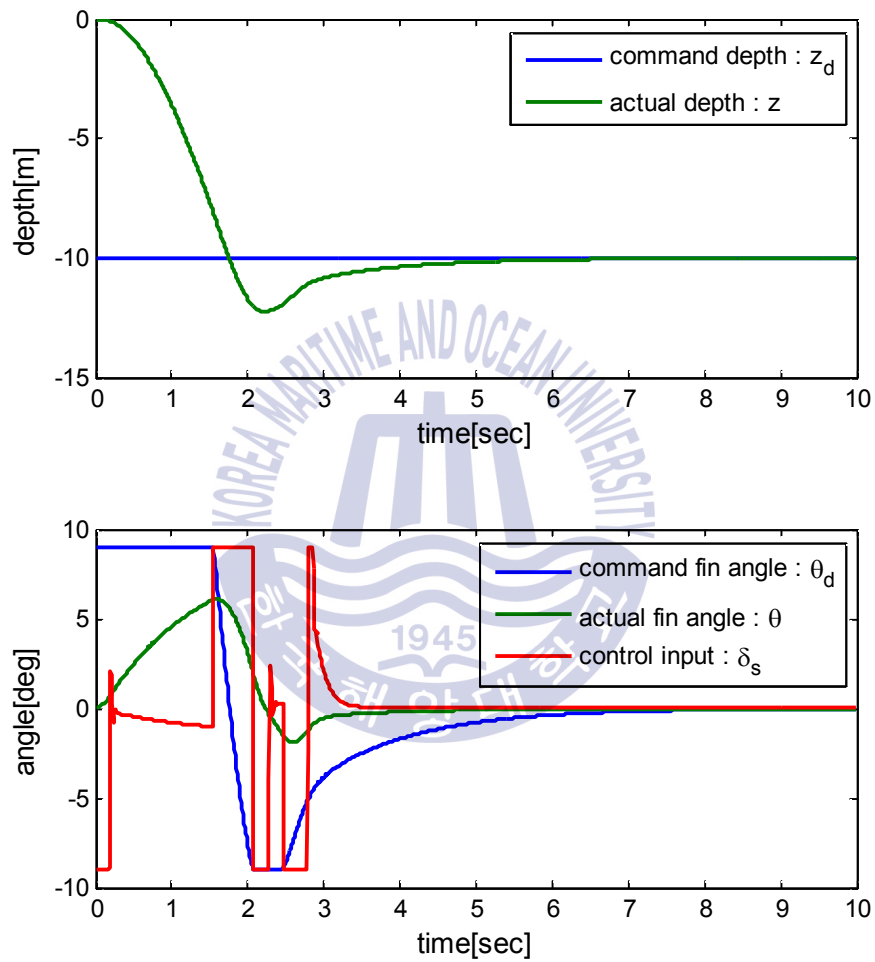


Figure 5.4 Depth tracking response using ISE(AE), with saturator

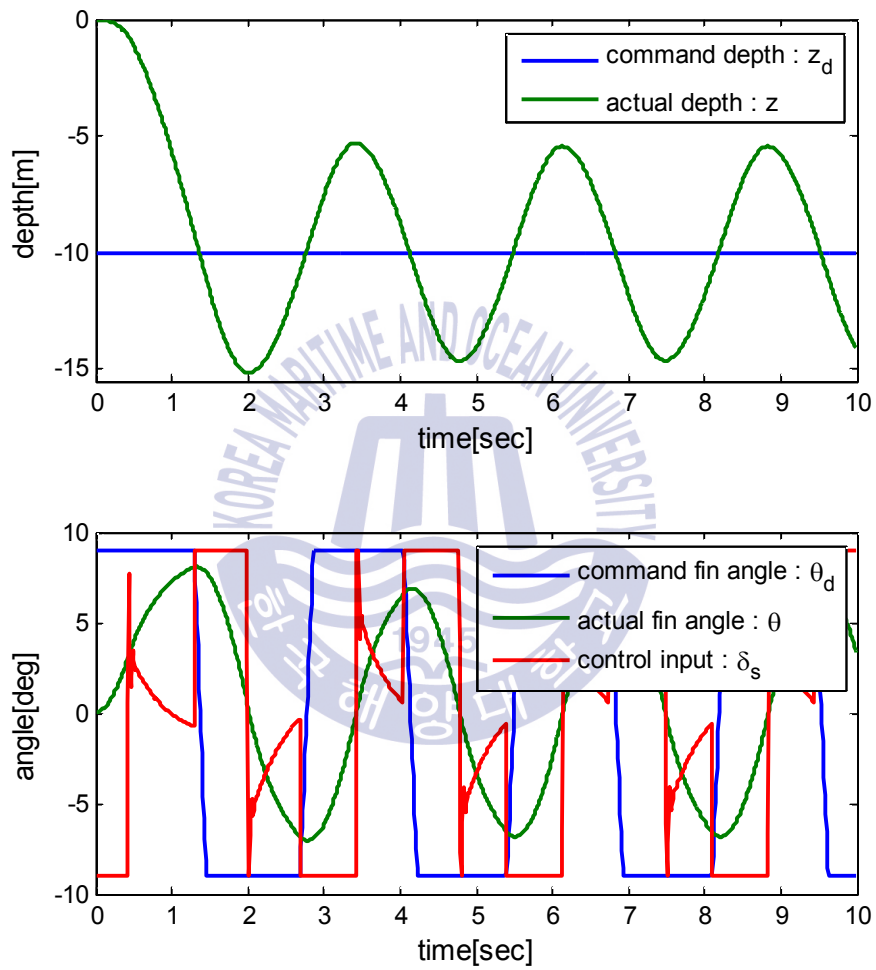


Figure 5.5 Depth tracking response using ITAE, with saturator

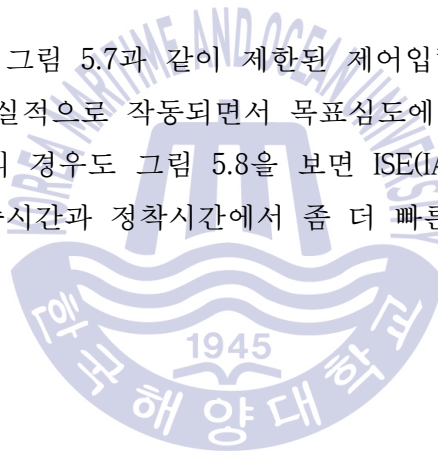


## 5.2 제약조건이 있는 경우

본 절에서는 핀의 작동과 피치 운동을 제한하는 포화기가 설치되고, 오버슈트와 상승시간이 제약조건으로 고려된 경우를 살펴본다.

그림 5.6은 세 가지 성능지수와 제어기 설계사양이 고려된 각각의 목적함수를 최소화 시키도록 RCGA로 탐색된 제어기를 사용하여 목표심도 ( $0[m] \rightarrow -10[m]$ )에 대한 응답을 비교한 것이다. 이 때 오버슈트, 상승시간, 정착시간은 표 5.2에 나타내었으며, 설계된 제어시스템은 설계사양으로 주어진 오버슈트와 상승시간의 제약조건을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

ISE(IAE)의 경우 그림 5.7과 같이 제한된 제어입력을 따라 핀도 제한된 범위 내에서 현실적으로 작동되면서 목표심도에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. ITAE의 경우도 그림 5.8을 보면 ISE(IAE)의 경우와 비슷한 결과를 보이거나 상승시간과 정착시간에서 좀 더 빠른 응답특성을 보여주고 있다.



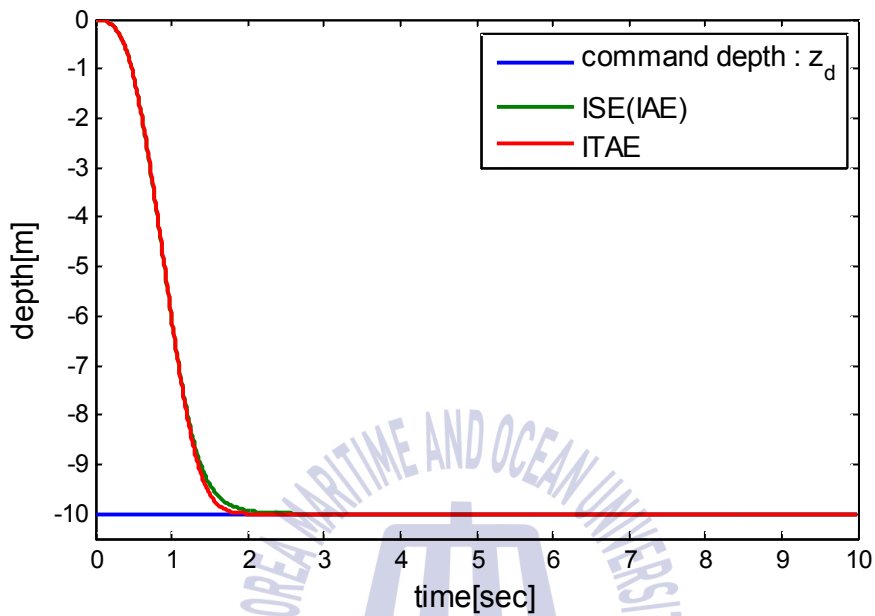


Figure 5.6 Depth tracking response using ISE(AE) and ITAE, including constraints

Table 5.2 Performance of depth control system including constraints

objective function	value	$M_p$	$t_r$	$t_s$	$e_{ss}$
ISE(AE)	15.5476	0.0000	0.9000	2.2950	0.0000
ITAE	8.1720	0.0000	0.8682	1.8750	0.0000

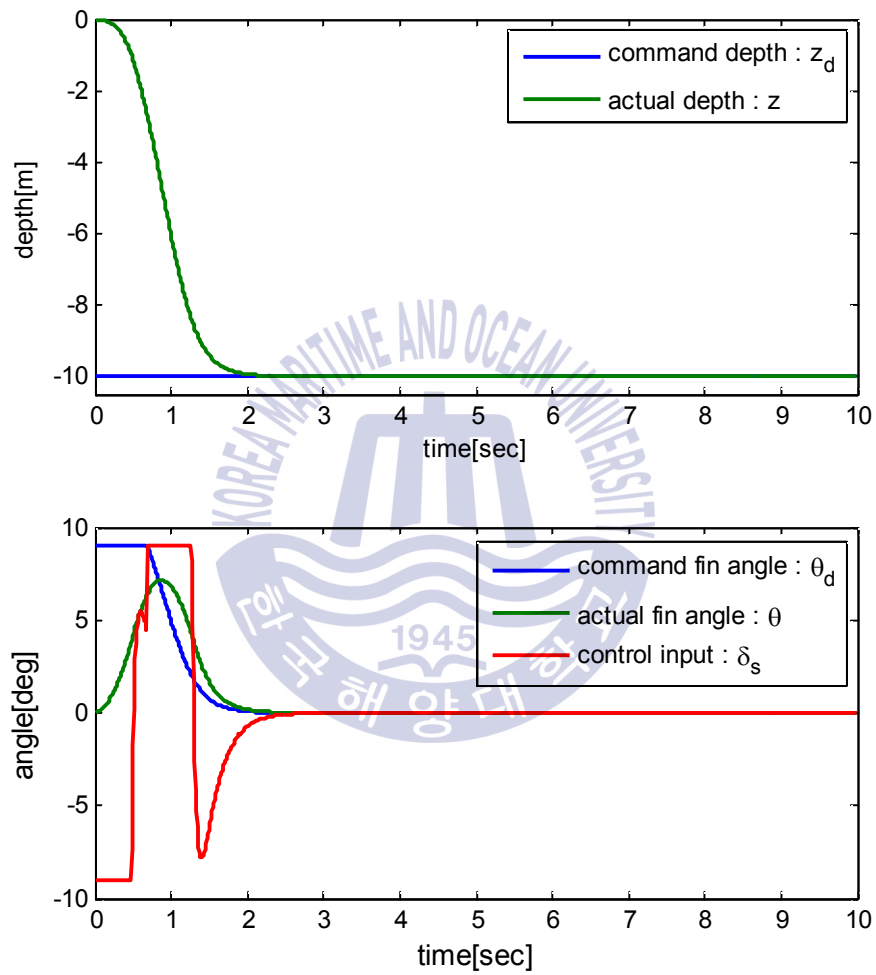


Figure 5.7 Depth tracking response using ISE(IAE), including saturator

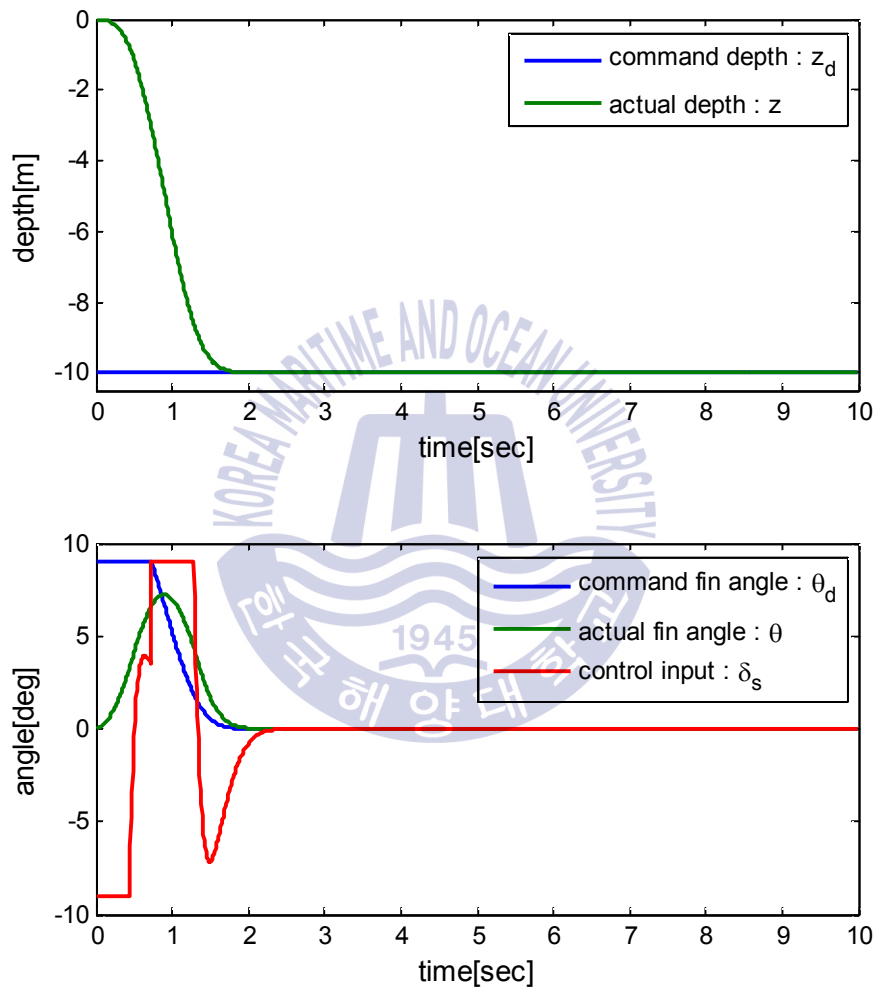


Figure 5.8 Depth tracking response using ITAE, with saturator

## 제 6 장 결 론

본 논문에서는 별점함수를 결합한 RCGA를 이용하여 PD 제어기를 설계하는 방법에 대하여 제안하였으며, 수중운동체인 REMUS의 심도 제어 시스템에 적용하였다. REMUS의 심도 제어를 위해 내부루프(inner loop) 제어를 담당하는 핀 제어기로 PD 제어기를 사용하고, 외부루프(outer loop)를 제어하는 피치 제어기로 P 제어기를 사용하는 캐스케이드 제어 시스템을 적용하였다.

이 때 REMUS의 핀과 피치 동작이 실현 가능한 작동 범위 내에서 운전될 수 있도록 기계적 한계를 고려한 포화기를 설치하였다. 또한, 제어 시스템의 설계사양으로 오버슈트가 없고, 설정된 상승시간 안에 정상상태 오차 없이 목표 심도에 도달할 수 있도록 RCGA를 이용하여 제어기의 파라미터를 동조하였다.

RCGA의 평가함수로는 ISE, IAE, ITAE 세 가지 성능지수를 사용하였으며, 제약조건으로 주어지는 설계사양을 고려하기 위해 새롭게 정의한 별점함수를 평가함수에 추가하는 기법을 적용하였다. RCGA는 이렇게 구성된 새로운 평가함수 값이 최소가 되는 관점에서 제어기의 파라미터를 탐색하였다. 이렇게 동조된 제어기의 파라미터들을 REMUS 심도 제어시스템에 적용하였으며, 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 포화기를 고려하여 제어시스템의 파라미터들을 동조한 결과 현실적으로 작동 가능한 범위 내에서 핀과 피치가 작동되는 것을 확인할 수 있었다.

2) 설계사양을 제약조건으로 고려한 새로운 평가함수를 사용하여 제어 시스템의 파라미터들을 동조한 결과 주어진 설계사양을 만족하면서 목표심도에 잘 추종하는 것을 확인할 수 있었다.

이상의 결과로 미루어 보아 본 논문에서 제안된 방법은 AUV의 심도 제어시스템에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

한편, 실제의 시스템에 직접 적용하기 위한 하드웨어 및 소프트웨어 개발에 대한 연구, 시스템의 외부적 작동환경에서 발생하는 외란들에 대한 검토, 시변시스템에 대한 지능제어 기법 적용에 대한 연구 등은 향후 추가적인 연구과제로 수행되어야 할 것으로 사료된다.



## 참 고 문 헌

- [1] 네이버 지식백과, 해미래(HEMIRE), 시사상식사전, 박문각.
- [2] 김희수, 손경호, 이승건, “Manta type UUV의 슬라이딩 모드 제어기 설계에 관한 연구”, 한국항해항만학회, 2011년도 추계학술대회 논문집 pp. 3~4, 2011.
- [3] 김형동, 김준영, 김시홍, 이승건, “만타형 UUV의 제어기 설계에 관한 연구”, 한국항해항만학회지 제35권 제5호 pp. 359~363, 2011.
- [4] 이호, 이승건, “갈만필터를 이용한 해양선박의 위치제어에 대한 연구”, 한국항해항만학회, 2012년도 추계학술대회 논문집 pp. 74~76, 2012.
- [5] 이종식 외, “200미터급 탐사용 AUV 개발”, 1차년도 연구보고서, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터, 과학기술처, May, 1995.
- [6] K. M. Fauske, F. Gustafsson, O. Hegrenæs, “Estimation of AUV dynamics for sensor fusion”, IEEE Information Fusion, 10<sup>th</sup> 2007 International Conference on 9<sup>th</sup>-12<sup>th</sup>, July, 2007.
- [7] 서승정 외, 무인잠수정의 운항제어 및 매니퓰레이터 기술개발(최종보고서), July, 2003.
- [8] 이판묵 외, 차세대 심해용 무인잠수정 개발(2), May, 2003.
- [9] 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.

- [10] Abhay A. Pakhare, Kunal N. Tiwari and Rajan H. Chile, “PID/PD tuning for Steering Control of Autonomous Underwater Vehicle : Genetic algorithm Approach” , National Conference on Instrumentation, Control and Signal Processing, 2013.
- [11] W. J. Chang, W. Chang, and H.H. Liu, “MODEL-BASED FUZZY MODELING AND CONTROL FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES IN THE HORIZONTAL PLANE” , Journal of Marine Science and Technology, vol. 11, no. 3, pp. 155-163, 2003.
- [12] Z. Dong, L. Wan, T. Liu and J. Zhuang, “Heading Control of an AUV Based on Mamdani Fuzzy Inference” , International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics, 2015.
- [13] D. H. Shin, S.T. Kwon, S.H. Park, and M.G. Joo, “Fuzzy State Feedback Control for Way-Point Tracking of Autonomous Underwater Vehicle” , International Journal of Control and Automation, vol. 6, no. 1, February, 2013.
- [14] I. Eski, and S. Yildirim, “Design of Neural Network Control System for Controlling Trajectory of Autonomous Underwater Vehicles” , International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014.
- [15] A. Forouzentabar, B. Gholami, M. Azadi, “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, 2012.
- [16] D. H. Lee, “Closed-Loop Combustion Control of Advanced Internal



Combustion Engines” , the degree of Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) in The University of Michigan, 2011.

- [17] 이승진, 권배준, “선박의 충돌회피를 위한 자동제어에 관한 기초적 연구” , 한국항해항만학회지 제26권 제1호 pp. 8~14, 2002.
- [18] J. H. Kim, S. K. Lee, S. E. Lee and C. H. Bae, “A Study of the Depth Control System and the Collision Avoidance System for the Manta-type UUV” , Journal of Navigation and Port Research, vol. 32, Issue 6, pp. 447-452, 2008.
- [19] M. Purcell, C. von Alt, B. Allen, T. Austin, N. Forrester, R. Goldsborough, and R. Stokey, “New capabilities of the REMUS autonomous underwater vehicle” , In Proceedings MTS/IEEE Oceans 2000, Providence, Rhode Island, September 2000.
- [20] C. von Alt, B. Allen, T. Austin, and R. Stokey, “Remote environmental monitoring units” , In Proceedings MTS/IEEE Oceans 1994, Cambridge, MA, 1994.
- [21] C. von Alt and J.F. Grassle, “LEO-15: An unmanned long term environmental observatory” , In Proceedings MTS/IEEE Oceans 1992, Newport, RI, 1992.
- [22] D. F. Myring, “A Theoretical Study of Body Drag in Subcritical Axisymmetric Flow” , Aeronautical quarterly, August, 1976.
- [23] T. I. Fossen, “Guidance and Control of Ocean Vehicles” , John wiley & Sons, New York, 1994.
- [24] T. Prestero, “Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle” , Master thesis, 2001.

- [25] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2002.
- [26] J. H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [27] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- [28] Whitley and Darrell, A Genetic Algorithm Tutorial, Statistics and Computing (4), pp. 65~85, 1994.
- [29] M. Gen and R. Cheng, Genetic Algorithms and Engineering Design, A Wiley- Interscience Publication, 1997.
- [30] J. Matyas, “Random Optimization”, Automation and Remote Control, vol.26, pp. 246~253, 1965.
- [31] G. Jin and S. Ju, “A Study on a Real-Coded Genetic Algorithm,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 6, no. 4, pp. 268~275, 2000.
- [32] M. Gen and R. Cheng, Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
- [33] J. L. Kuester and J. H. Mize, Optimization Techniques with Fortran, McGraw-Hill Book Co., N.Y., 1973.
- [34] G. V. Reklaitis, A. Ravindran and K. M. Ragsdell, Engineering Optimization: Methods and Applications, John Wiley and Sons, 1983.
- [35] K. A. De Jong, “an Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptation Systems”, Ph.D. Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, 1975.
- [36] J. D. Schaffer et al., “A Study of Control Parameters Affecting Online Performance of Genetic Algorithms for Function Optimization” ,

- Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications, pp. 51~60, 1989.
- [37] D. J. Montana and L. Davis, “Training Feedforward Neural Networks Using Genetic Algorithms”, Proc. 11<sup>th</sup> Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, pp. 762~767, 1989.
- [38] P. Arena, R. Caponette, L. Fortuna and M. G. Xibilia, “Genetic Algorithm to Select Optimal Neural Network Topology”, Proc. 35<sup>th</sup> Midwest Symposium on Circuit and Systems, Washington, 1992.
- [39] P. Arena, R. Caponette, L. Fortuna and M. G. Xibilia, “MLP Optimal Selection Via Genetic Algorithms”, Proc. Int. Conf. Neural Networks and Genetic Algorithms, 1993.
- [40] R. Das and D. E. Goldberg, “Discrete-time Parameter Estimation with Genetic Algorithms”, Proc. 19<sup>th</sup> Annual Pittsburgh Conf. on Modeling and Simulation, pp. 2391~2395, 1988.
- [41] 이현식, 진강규, “유전알고리즘을 이용한 연속시스템의 온라인 퍼 래미터 추정”, 제어·자동화·시스템공학 논문지, vol. 4, no. 1, pp. 76~81, 1998.
- [42] 이운형, 소명옥, 정병건, 진강규, 진선호, “RCGA에 기초한 선박 가 스텐 엔진용 PID제어기의 동조”, 한국박용기관학회지, vol. 29, no. 1, pp. 116~123, 2005.
- [43] 이운형, 소명옥, 황승욱, 안종갑, 김민정, 진강규, “시간지연을 갖는 적분시스템용 PID 제어기의 동조규칙”, 한국마린엔지니어링학회지, vol. 30, no.6, pp. 753~759, 2006.
- [44] 김민정, 이운형, 소명옥, 하운수, 황승욱, 진강규, “RCGA를 이용한 외란제거용 PID 제어기의 동조규칙”, 한국마린엔지니어링학회지, vol. 31, no. 4, pp. 448~454, 2007.

- [45] D. M. Etter, M. J. Hicks and K. H. Cho, "Recursive Adaptive Filter Design Using an Adaptive Genetic Algorithm", Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Paris, France, pp. 635~638, 1982.
- [46] D. J. Montana, "Automated Parameter Tuning for Interpretation of Synthetic Images", Handbook of Genetic Algorithms, VNR Computer Library, 1989.
- [47] D. Abramson and J. Abela, "A Parallel Genetic Algorithm for Solving the School Timetabling Problem", The 15<sup>th</sup> Australian Computer Science Conf., Hobart, 1992.
- [48] E. burke, D. Elliman and R. Weare, "A Genetic Algorithm Based University Timetabling System", Proc. 2<sup>nd</sup> East-West Int. Conf. on Computer Technologies in Education, pp. 35-40, 1994.
- [49] M. G. Bulmer, "The Mathematical Theory of Quantitative Genetics", Clarendon Press, 1980.
- [50] D. Whitley, "The Genetic Algorithm and Selection Pressure: Why Rank-based Allocation of Reproductive Trials in Best", Proc. 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications, pp. 116-121, 1989.
- [51] H. Schwefel, "Numerical Optimization of Computer Models", Wiley, 1981.
- [52] D. T. Pham and G. Jin, "A Hybrid Genetic Algorithm", Proc. 3rd World Conf. on Expert Systems, Seoul, Korea, vol. 2, pp. 748~757, 1996.
- [53] N. J. Radcliffe, "Equivalence Class Analysis of Genetic Algorithms", Complex Systems, vol. 5, no. 2, pp. 183~205, 1991.

- [54] A. Wright, Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization, Foundations of Genetic Algorithms 1, G. J. E. Rawlin(Ed.), Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA, 1991.
- [55] J. J. Grefenstette, “Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms” , IEEE Trans, Syst., Man, Cybern., vol 1. SMC-16, no. 1, pp. 122~128, 1986.
- [56] 김민정, “외란제거용 PID 제어기의 RCGA 기반 동조” , 한국해양대학교 대학원 석사학위논문, 한국해양대학교, 2007.

