



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

AUV의 경유점 추적을 위한 제어기 설계



2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

정 보 통 신 공 학 과

권 순 태

공 학 석 사 학 위 논 문

AUV의 경유점 추적을 위한 제어기 설계

지도교수 주 문 갑

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

정 보 통 신 공 학 과

권 순 태

권순태의 공학석사 학위논문을 인준함.

2012년 2월 25일



주 심 공학박사 김 성 운 (인)

위 원 공학박사 이 원 창 (인)

위 원 공학박사 주 문 갑 (인)

목 차

I. 서론	1
II. AUV의 구성	3
1. 선체 제원	3
2. 전장 시스템	5
3. 전력 시스템	14
4. 누수 감지 시스템	21
5. 부분 동작 시험을 위한 프로그램	22
III. AUV의 운동 방정식	23
1. 좌표계 설정	23
2. 동역학 모델	24
IV. AUV의 제어기 설계 및 시뮬레이션	28
1. PD 제어기	28
2. 상태 궤환 제어기	30
3. 시뮬레이션	32
V. AUV의 제어기 성능 실험	41
1. 경유점 추적 실험	41
2. 깊이 제어 실험	43
VI. 결론	44
VII. 참고문헌	45
부록 1. 시뮬레이션에 사용된 상수	48

그림 목차

그림 1. AUV의 외형 및 치수	3
그림 2. AUV의 내부 및 배치	4
그림 3. 전장 시스템 배치도	5
그림 4. 실제 보드 배치	5
그림 5. 전장 시스템 구성도	7
그림 6. Probee ZS10	8
그림 7. 주제어부와 인터페이스 보드	9
그림 8. 센서 처리부	10
그림 9. 모터 제어부	11
그림 10. Tecnadyne model 300	12
그림 11. 추진용 모터 제어 신호 생성회로	12
그림 12. Back EMF를 제거하기 위한 capacitor bank	13
그림 13. Ground loop를 제거하기 위한 isolation circuit	13
그림 14. HDS 2288 coreless 서보모터	13
그림 15. 전원 시스템 구성	15
그림 16. 전장부 전원 회로	17
그림 17. 모터부 전원 회로	17
그림 18. 구성된 전력 관리 보드	18
그림 19. 배터리 잔량 체크 회로	19
그림 20. 누수 감지 센서 회로	21
그림 21. 부분 동작 시험을 위한 프로그램	22
그림 22. 좌표계	23
그림 23. MATLAB/Simulink를 사용한 simulator	33
그림 24. AUV의 내부 블럭도	33
그림 25. PD 제어기를 사용한 경우 AUV의 이동 경로	34
그림 26. 슬라이딩 모드 제어기를 사용한 경우 AUV의 이동 경로	34
그림 27. PD 제어기를 사용한 경우 수직면 제어 결과	35
그림 28. 상태 궤환 제어기를 사용한 경우 수직면 제어 결과	36
그림 29. PD 제어기를 사용한 경우 수평면 제어 결과	37
그림 30. 상태 궤환 제어기를 사용한 경우 수평면 제어 결과	37

그림 31. PD 제어기를 사용한 경우 방향별 속도	38
그림 32. 상태 궤환 제어기를 사용한 경우 방향별 속도	38
그림 33. PD 제어기를 사용한 경우 방향타 제어 입력	39
그림 34. 상태 궤환 제어기를 사용한 경우 방향타 제어 입력	40
그림 35. 경유점 추적 실험 결과와 시뮬레이션 결과 (1)	42
그림 36. 경유점 추적 실험 결과와 시뮬레이션 결과 (2)	42
그림 37. 깊이 제어 실험 결과	43

표 목차

표 1. Probee ZS10 사양	8
표 2. 주제어부 사양	9
표 3. Tecnadyne model 300 사양	12
표 4. HDS 2288 coreless 서보모터의 사양	13
표 5. VHB50W-Q24-S5 사양	15
표 6. UHE-12/2500-Q12-C 사양	16
표 7. VFK400W-Q24-S24 사양	16
표 8. VHB50W-Q24-S24 사양	16
표 9. Battery pack 1 사양	19
표 10. Battery pack 2 사양	20
표 11. Battery 잔량 체크 레벨	20

Controller design for the AUV's way-point tracking

Soon T. Kwon

Department of Information and Communications Engineering
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

Recently, The necessity of AUV (autonomous underwater vehicle) exploitation is ever increasing as the exploration of marine resources and underwater military applications are more activated. Therefore, in order to control AUV's correct location and posture in the sea water, the implementation of the AUV is a crucial key point for such applications.

In this dissertation, we propose a small size AUV consisting of GPS (global positioning system) interfacing equipment and various sensors such as IMU (inertial measurement unit), DVL (doppler velocity logger), and depth sensors. Actually the designed AUV is activated by thruster and four rudders. And then we developed a state feedback controller based on the pole placement method for tracking of the AUV's way-points. The proposed controller was simulated by MATLAB/Simulink using 6 degree-of-freedom nonlinear model. According to the simulation results, we experienced that the performance of the tracking ability of our suggested controller is superior to the case of the conventional PD controller and its performance of way point tracking is shown to be fulfilled within 1 m.

I. 서론

최근 로봇 기술의 발달로 무기 체계 또한 무인화 추세로 발전하고 있다. 무인 운동체에 관한 기술은 1960년대 초부터 시작되었으나, 최근 무인 운동체의 개발에 필요한 고속 프로세서, 센서, 항법 장비, 구동기 등의 기술이 상당히 발전함으로써 인명 피해를 줄이고, 인간이 직접 투입될 수 없는 환경에서의 운용을 목적으로 활발한 연구 개발이 수행되고 있다[1].

국방 분야에서 무인 체계는 인명 피해를 최소화하면서 은밀하고 정확하게 임무를 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 자율 무인 잠수정은 인간의 한계를 뛰어넘은 극한 환경에서 적 잠수함 탐색, 추적 등 대잠전, 기뢰를 탐색하고 식별하여 제거하는 기뢰전, 적 해역 깊숙이 침투하여 각종 정보를 획득하는 정보전, 그리고 각 해역에서 해전에 필요한 해양의 물리적 정보를 수집하는 해양 자료 수집의 역할을 담당하고 있다 [2][3],

무인 운동체 중 무인 잠수정의 경우 ROV (Remotely Operated Vehicle)과 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)로 구분할 수 있으며, ROV는 사람이 직접 조작하며 현재 잠수정의 상태나 잠수정에 부착된 카메라 등의 정보를 실시간으로 얻을 수 있으므로 바다 속 상황에 따른 제어가 가능하지만 잠수정과 모선이 케이블로 연결되어 있기 때문에 잠수 깊이 및 행동 반경에 대한 제한성을 가진다. 이러한 제한성의 이유 때문에 케이블의 길이에 대한 제한이 없는 AUV에 대한 필요성이 증대되고 있다.

대표적인 AUV로는 미국의 REMUS[4] 시리즈, 인도의 MAYA[5], 싱가포르

포르의 STARFISH[6] 등이 있고, 우리나라에서도 1993년의 CROV300을 시작으로 하여 1996년의 OKPO[7]를 거쳐, 최근 한국해양연구원에서 ISiMI[8][9][10]를 개발하였다.

AUV는 해저 상황이 변화하거나 고려되지 않은 미지 변수의 영향이 크게 작용하는 해저 상황에서, 자체 내장된 동력을 이용하여 자율적으로 기동해 임무를 수행하고 모함으로 복귀하는 것을 말한다. 이에 따라 잠수함의 임무 수행 및 안전 운항 영역 측면에서 우수한 제어 성능을 갖는 제어기 설계가 요구된다.

이에, GPS (Global positioning system), IMU (Inertial measurement unit), DVL (Doppler velocity logger) 및 깊이 센서를 이용하여 수중로봇의 위치 및 자세를 측정하고, 하나의 추진기 (thruster)와 4개의 방향키 (rudder)를 사용하는 소형 AUV를 개발하였다.

본 논문에서는 개발중인 AUV가 임의로 주어지는 경유점을 추종하기 위한 PD 제어기와 상태 궤환 제어기를 설계하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

II. AUV의 구성

1. 선체 제원

가. AUV의 외형 치수와 중량

AUV의 선체는 선수부 중앙부 선미부의 3부분으로 나눌 수 있다.



그림 1. AUV의 외형 및 치수

AUV의 외형은 그림 1과 같다. 선수부의 길이는 205 mm, 중앙부의 길이는 1003 mm, 선미부의 길이는 531 mm이며, 총길이는 1739 mm이다. 선수부는 비어있으며, 상하로 구멍이 있어 운용시 내부에 물이 채워지게 된다. AUV의 총 중량은 물 무게를 포함할 경우 약 37 kgf이며, 컴퓨터를 이용하여 계산된 부력은 약 43 kgf이다. 따라서 약 6 kgf의 양성 부력을 가지고 있다. 선체를 구성하고 있는 재료는 Al6061이며, 선수부는 engineering plastic 중에서 PC (poly carbonate)를 선택하여 제작하였다.

나. AUV의 내부 형상 및 배치

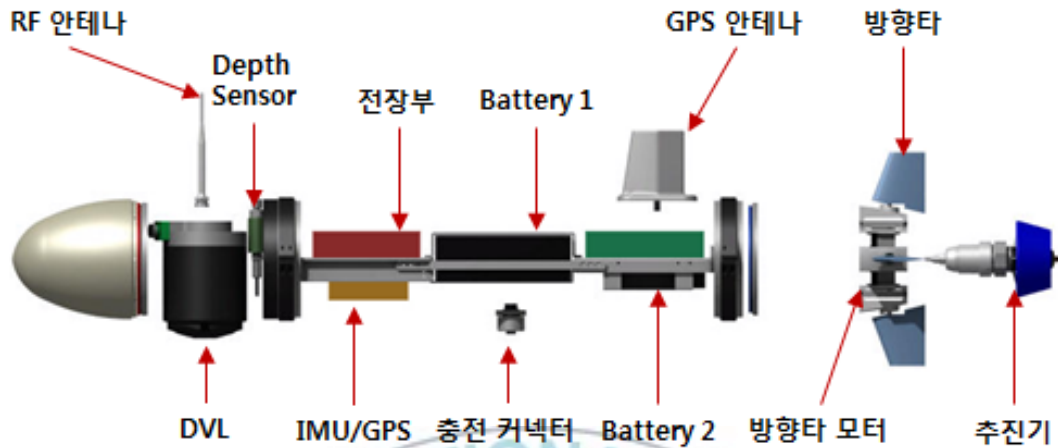


그림 2. AUV의 내부 및 배치

AUV의 내부와 탑재 장비의 배치는 그림 2와 같다. 탑재 장비의 배치는 전장부의 배선과 센서 장비가 노이즈에 노출되는 정도를 고려하여 구동기는 선미부 쪽으로 배치하고, 센서부와 전장부는 선수부 쪽으로 배치하도록 결정하였으며, 무게 중심이 선체의 중앙에 올 수 있도록 좌우 대칭을 고려하여 배치하였다. 현재 무게 중심 위치와 부력 중심의 위치를 맞추기 위해 납을 추가하였지만, AUV의 기능적 측면과 관련된 사항이 아니므로 탑재 장비 파트에서는 무게 중심 위치 조절에 사용된 납의 내부 배치에 대한 사항은 생략하였다.

2. 전장 시스템

AUV 전장의 배치는 그림 3과 같은 형태로 배치되며 실제 배치된 그림은 그림 4와 같다. AUV 전장에는 실제 동작에 관련된 시스템을 이루는 제어 시스템으로 주제어부, 모터 제어부, 센서 처리부 그리고 외부 사용자의 인터페이스가 되는 외부 사용자 컴퓨터가 있고, 그밖에 IMU, GPS, DVL 등의 센서들을 포함하고 있다. 그리고 외부 사용자와 AUV 간의 통신부로 RF 모뎀이 탑재된다. 이 모든 요소들이 구동할 수 있게 하는 전력 시스템으로 배터리와 전장부 각각의 동작 전원 레벨을 맞추기 위해 DC/DC 컨버터를 통하여 전압 변환을 한다.

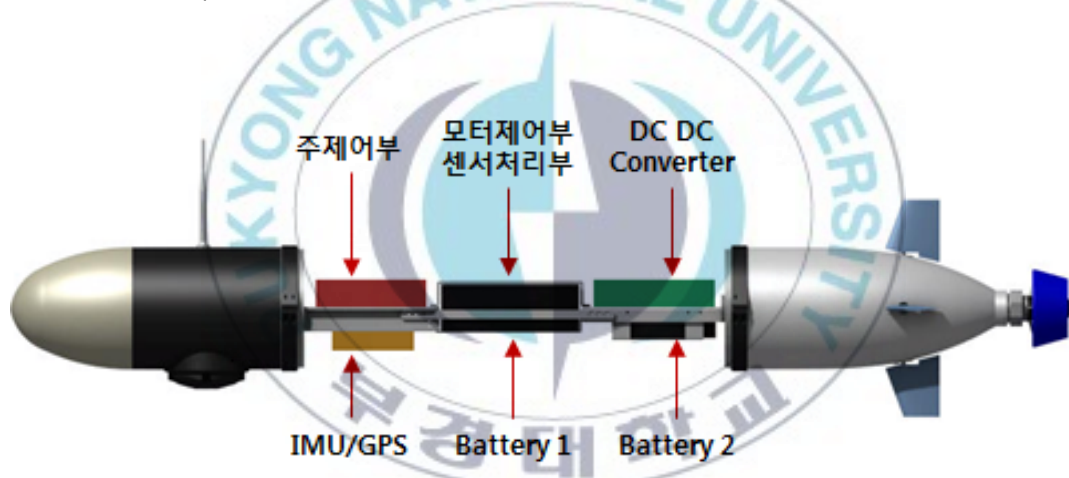


그림 3. 전장 시스템 배치도



그림 4. 실제 보드 배치

가. 전장 시스템 구성

AUV의 주된 동작을 제어하는 전장 시스템은 크게 외부 사용자 컴퓨터와, AUV 내부의 주제어부, 센서 처리부, 모터 제어부로 구성된다. 외부 사용자 컴퓨터와 AUV간의 정보 전달은 RF 통신 모뎀을 통하여 이루어지며, 각각 구성부의 연결은 그림 5와 같다[11].

AUV의 동작 모드에는 Manual (Joystick) mode와 Autonomous (경유점) mode가 있다. Manual mode에서는 RF 통신이 가능한 상황에서 외부 사용자 컴퓨터에 의해 RF 통신으로 전송된 명령을 주제어부가 수신 받아 모터 제어부와 센서 처리부로 전달하여 사용자 조작에 의해 AUV를 운용할 수 있다. Autonomous mode에서는 AUV의 주제어부에 탑재된 운용 알고리즘에 의해 자율 운행한다. 모터 제어부에서는 주제어부의 명령에 의해 각각의 요소들에 공급되는 전원을 관리하고, 자가진단 기능을 추가하여 누수 감지가 발생하거나 배터리 용량 체크 후 잔량이 부족할 경우 모든 전원을 차단하고 수면으로 부상할 수 있도록 한다. 센서 처리부에서는 GPS, IMU, DVL, depth sensor로부터 출력되는 데이터를 수집하고, 고속 연산을 통하여 수중 복합 항법 시스템을 사용할 수 있도록 구성하였다.

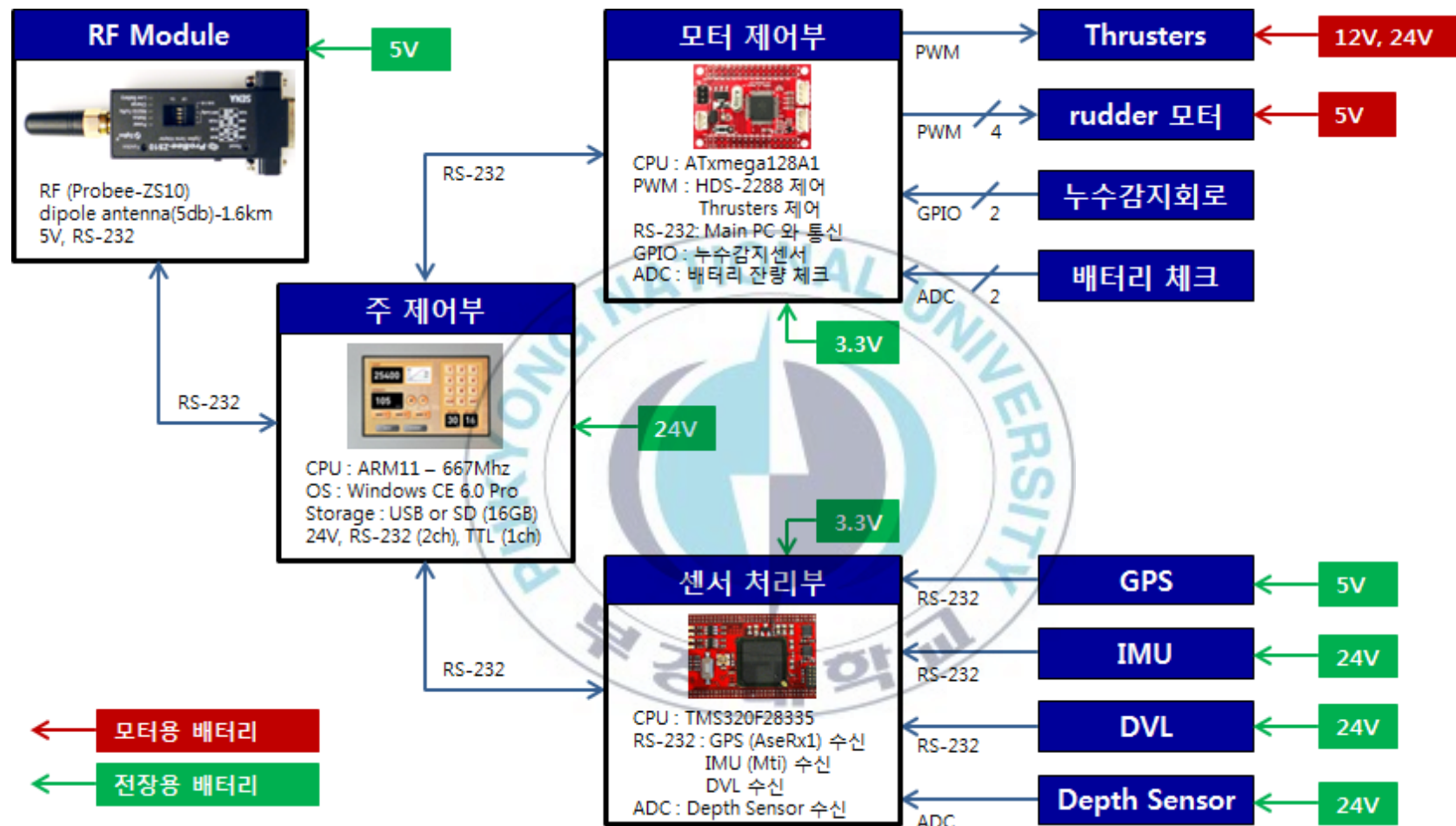


그림 5. 전장 시스템 구성도

나. RF 통신 시스템 구성

AUV가 RF 통신이 가능한 수상 환경에서 운용될 때, AUV는 RF 모뎀을 통하여 외부 사용자 컴퓨터와 통신이 가능하다. RF 모뎀은 AUV의 다양한 센서의 출력을 전송받고, AUV를 제어하기 위한 무선 통신 장치이다. 외부 사용자는 통신이 가능한 환경에서 AUV로부터 센서 데이터와 AUV의 상태 정보를 획득하거나 사용자의 제어 명령을 AUV로 전송할 수 있다. 수중에서의 데이터를 수집할 경우, 해수면으로 부상한 뒤에 RF 모뎀을 통하여 외부 사용자 컴퓨터로 수집한 정보를 전송할 수 있다. RF 통신 모뎀으로는 IEEE 802.12.4에 준하는 2.4GHz의 Zigbee module을 사용하였다. 사용된 RF module은 그림 6과 같으며, 사양은 표 1과 같다.



그림 6. Probee ZS10

표 1. Probee ZS10 사양

Frequency band	2.4 GHz
Transmit power	+ 20dBm E. I. R. P (max.)
Receiver sensitivity	-102dBm @1% BER
RF data rate	250 kbps
Working distance	Up to 1.6km using 5 dBi dipole antenna
Stack profile	Zigbee 2007 / Zigbee Pro

다. 주제어부

주제어부는 RF 통신을 통하여 전송되는 사용자 명령을 수신 및 실행하고 센서 처리부로부터 항법 관련 센서 데이터를 수신하며, 모터 제어부로 제어 명령을 송신한다. 또한 수중 카메라 데이터를 저장할 수 있도록 카메라 I/F를 구성 하였으며, 모터 제어부, 센서 처리부, 전방 소나 및 측방소나를 위한 I/F를 구성하였다. 주제어부의 OS인 Windows CE 6.0은 hard RTOS 커널을 지원하므로 사용자가 효율적으로 시스템의 성능을 설정할 수 있고, 상황에 따라 쉽게 운용 알고리즘을 교체할 수 있다. 주제어부는 그림 7과 같으며 사양은 표 2와 같다.

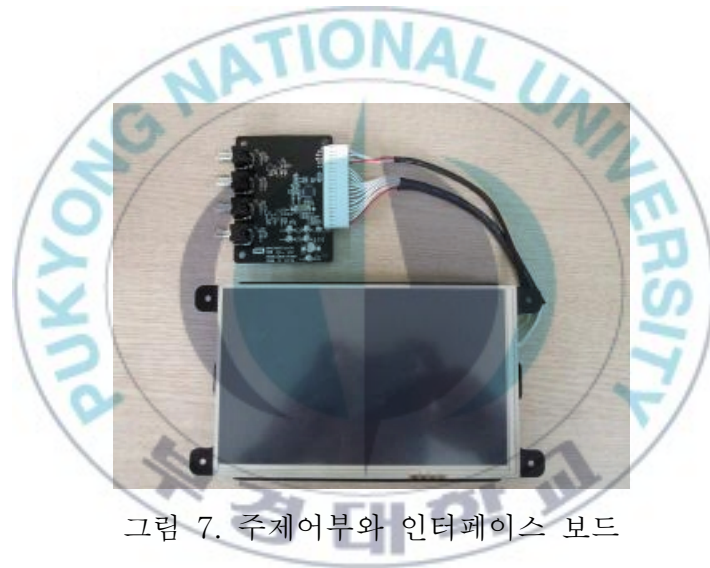


그림 7. 주제어부와 인터페이스 보드

표 2. 주제어부 사양

CPU	32Bit RISC ARM1179JZF - 667Hz
RAM / Flash	128MB / NAND Flash : 128MB
RS232	4CH
12C	1CH
SPI	1CH
Ethernet	10 Mbps
OS	Windows CE 6.0 Pro

라. 센서 처리부

센서에서 수신되는 데이터를 고속으로 연산하기 위하여 Texas Instrument 사의 TMS320F28335가 사용된다. 센서 처리부는 GPS, DVL, IMU, depth sensor에서 수신되는 정보를 수집 및 필터링하여 주제어부로 송신하여 수중 복합 항법 시스템이 이루어질 수 있도록 한다. 센서 처리부 보드의 모습은 그림 8과 같다.



그림 8. 센서 처리부

마. 모터 제어부

모터 제어부는 주제어부로부터 모터제어 명령을 수신 받아 4개의 서보모터 (HDS-2288)를 사용하여 방향타를 제어하고, 추진용 모터 (Tecnadyne model 300)를 제어한다. 그리고 모터 제어부에서는 각각의 DC/DC 컨버터를 제어 관리 하며 2개의 배터리 잔량을 체크하고, 누수 감지 센서를 구성하여 누수 여부를 체크하여 주제어부로 전송을 한다. 모터 제어부는 Atmel사의 ATxmega series를 사용하여 설계되었다. ATxmega series는 A/D, D/A 컨버터가 기본적으로 내장되어있고 다수

통신 포트를 가지고 있다. 따라서 다른 모듈과의 연계가 효율적이며 부가회로가 적어 소형화가 가능한 장점을 가지고 있다. 모터 제어부 보드는 그림 9와 같다.

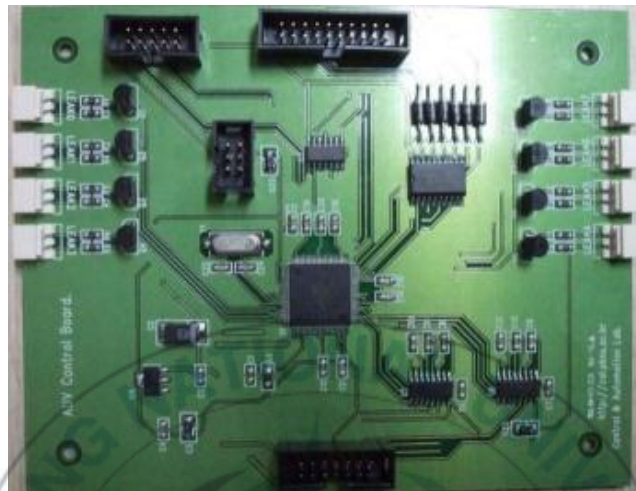


그림 9. 모터 제어부

본 AUV에 사용된 추진용 모터는 그림 10의 Tecnadyne사 model 300을 사용하였으며, 사양은 표 3과 같다. 추진용 모터의 동력을 위한 전원으로 24V가 인가되고, 제어를 위해 12V의 전원과 $\pm 5V$ 컨트롤 신호가 입력이 된다. ATxmega series에 내장된 D/A 컨버터를 이용하여 0V ~ 3V의 analog 신호를 생성하고, 그림 11의 회로와 같이 OP-amp를 사용하여 반전과 증폭을 통하여 $\pm 5V$ 제어 신호를 생성한다. 모터에서 발생하는 back EMF를 제거하기 위하여 그림 12의 회로와 같은 capacitor bank를 설계하였으며, 그림 13의 회로와 같이 모터쪽 전원과 제어부의 전원을 분리 (isolation)시켜 ground loop를 제거한다.

방향타를 제어하기 위한 모터로는 그림 14의 HDS 2288 coreless 서보모터를 사용하였고 사양은 표 4와 같다. 서보모터는 PWM 신호를 사

용하여 제어하며, 신호의 duty ratio를 사용하여 각도를 제어할 수 있다. 모터의 동력을 위한 전원으로 5V의 전원이 인가되고, ATxmega series에 내장된 PWM 기능을 사용하여 제어 신호를 생성하여 제어한다.



그림 10. Tecnam model 300

표 3. Tecnam model 300 사양

Tecnam model - 300	
Trust	8.2kg Forward 3.6kg Reverse
Input power	450-500 Watts 24-330vdc
Weight	1.0kg in air 0.7kg in water
Size	~11.1cm nozzle 22.6cm length

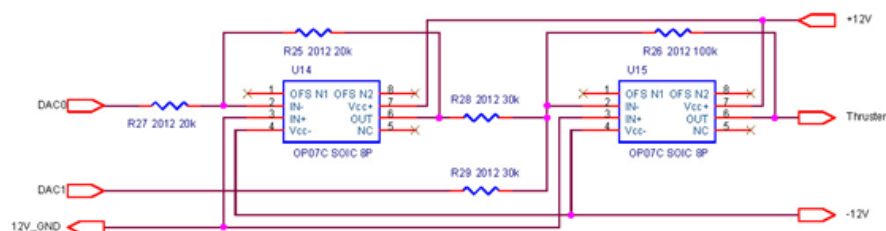


그림 11. 추진용 모터 제어 신호 생성회로

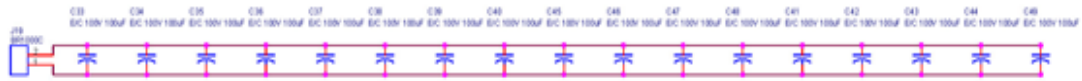


그림 12. Back EMF를 제거하기 위한 capacitor bank

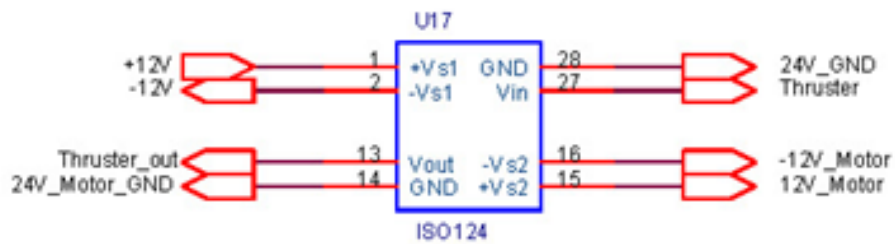


그림 13. Ground loop를 제거하기 위한 isolation circuit



그림 14. HDS 2288 coreless 서보모터

표 4. HDS 2288 coreless 서보모터의 사양

Type	Metalgear coreless motor
Operating voltage	4.8 V ~ 7.4 V
Neutral pulse	1.5 ms(Adjustable)
Travel angle	40~45° at $\pm 400\mu s$ (Adjustable)
Dead band	1 ~ 2 μs (Adjustable)
Torque(kg/cm) / Weight(g)	16.00 / 50
Dimensions (mm)	40x20x34

3. 전력 시스템

가. 전력 시스템의 구성

본 논문에서 사용한 AUV의 전원은 모터용 배터리로 29.4V-17A, 전장용 배터리로 29.4V-7.5A의 리튬 폴리머 배터리 (lithium polymer batteries)로 구성된다. 모터부와 전장부는 각각 5V, 12V, 24V의 전원을 요구하며, 6개의 DC/DC 컨버터를 통해 요구되는 전압 레벨로 변환하여 입력된다. 전장부와 모터부의 5V DC/DC 컨버터는 VHB50W-Q24-S5 모델을 사용하였고, 12V DC/DC 컨버터로 UHE-12/2500-Q12-C를 사용하였다. 24V 전원의 경우 모터부는 추진용 모터를 가동하기 위하여 입출력 용량이 큰 VFK400W-Q24-S25 모델을 사용하였고, 전장부는 VHB50W-Q24-S24 모델을 사용하였다. 각각의 DC/DC 컨버터는 개별 ON/OFF 제어가 가능하며, 비상 (emergency) 상황이 발생하면 각 부품의 보호를 위해 배터리와 부품을 분리해주는 역할을 하고, 최종적으로 모터 제어부를 통하여 AUV 전체의 전원을 차단시킬 수도 있다. DC/DC 컨버터 각각의 사양은 표 5, 표 6, 표 7, 표 8과 같고 각각의 컨버터는 전압 출력 단에서 발생할 수 있는 노이즈의 영향을 줄이기 위하여 접지 분리 기능을 지원하는 모델을 사용하였다. 전체 구성은 그림 15와 같으며, 전장부 전원 회로는 그림 16, 모터부 전원 회로는 그림 17과 같다. 구성된 전력 관리 보드의 모습은 그림 18과 같다.

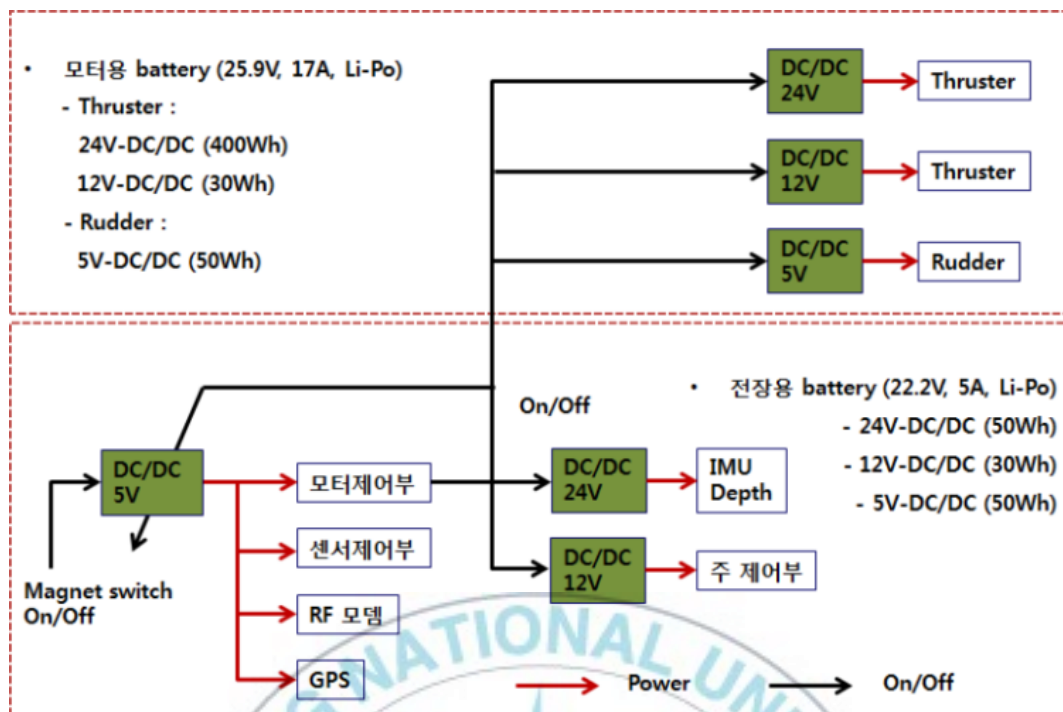


그림 15. 전원 시스템 구성

표 5. VHB50W-Q24-S5 사양

Input voltage	nominal	24 V
	range	9.0~36.0 V
Output voltage	voltage	5 V
	courent	10 A
Efficiency		81 %
Isolation specifications	input/output	1500 V
	input/case	1500 V
	output/case	1500 V
	resistance	100 MΩ

표 6. UHE-12/2500-Q12-C 사양

Input voltage	nominal	24 V
	range	9.0~36.0 V
Output voltage	voltage	24 V
	courant	2.5 A
Efficiency		87.5 %
Isolation specifications	input/output	1500 V
	input/case	1500 V
	resistance	100 MΩ

표 7. VFK400W-Q24-S24 사양

Input voltage	nominal	24 V
	range	10.0~36.0 V
Output voltage	voltage	24 V
	courant	16.7 A
Efficiency		86 %
Isolation specifications	input/output	1500 V
	input/case	1500 V
	output/case	1500 V

표 8. VHB50W-Q24-S24 사양

Input voltage	nominal	24 V
	range	9.0~36.0 V
Output voltage	voltage	24 V
	courant	2.08 A
Efficiency		83 %
Isolation specifications	input/output	1500 V
	input/case	1500 V
	output/case	1500 V
	resistance	100 MΩ

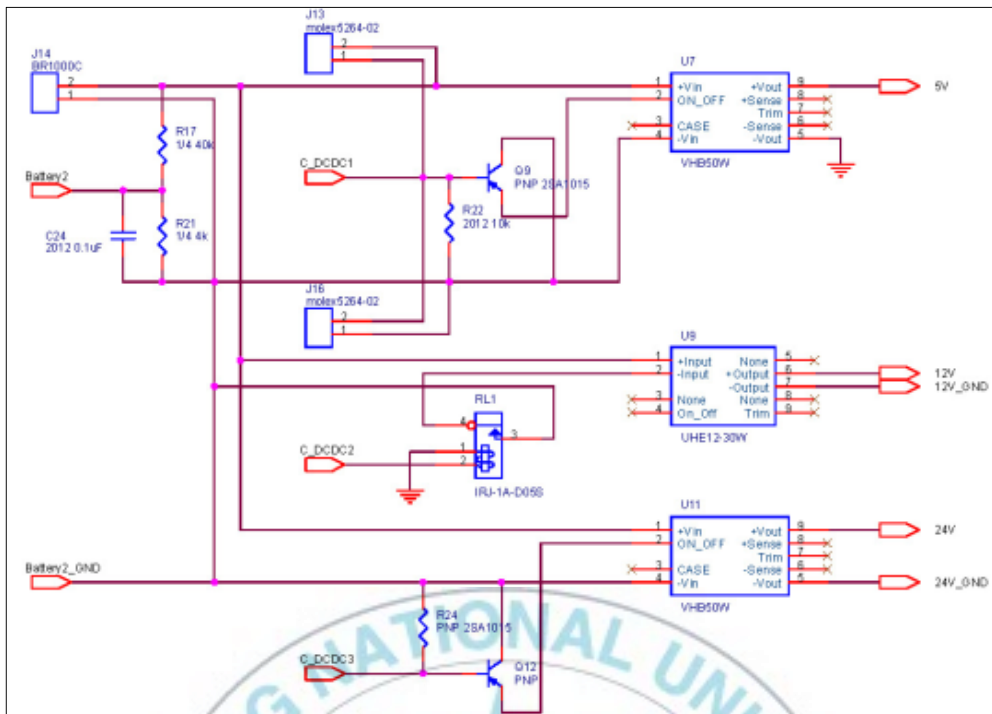


그림 16. 전장부 전원 회로

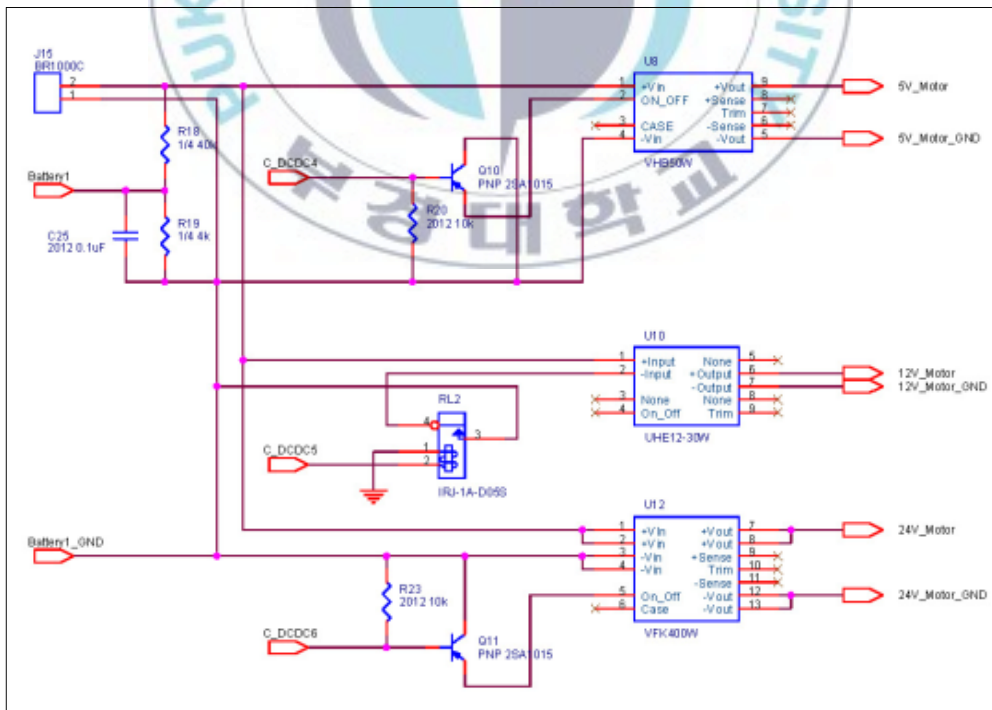


그림 17. 모터부 전원 회로



그림 18. 구성된 전력 관리 보드

나. 배터리부 및 배터리 잔량 체크

앞서 서술한 바와 같이 AUV의 전원은 전력 소모가 많은 모터용 배터리로 29.4V-17A, 전장용 배터리로 29.4V-7.5A의 lithium polymer batteries로 구성된다. 모터용 배터리는 battery pack1, 전장용 배터리는 battery pack 2로 명한다. 본 논문에서 사용한 AUV의 battery pack 1의 사양은 표 9와 같으며, battery pack 2의 사양은 표 10과 같다. 배터리의 잔량 체크는 모터 제어부의 ATxmega series에 내장된 A/D 컨버터 기능을 사용하여 체크하며, ATxmega가 0V~ 3.3V까지의 범위를 감지할 수 있으므로, 그림 19의 회로와 같이 정밀 저항을 사용해 전압 분배를 하여 ATxmega가 감지할 수 있는 범위로 변환한 후 잔량을 체크한다. 배터리의 잔량은 표 11과 같이 5 부분으로 기준을 나누어 잔량을 나타낸다.

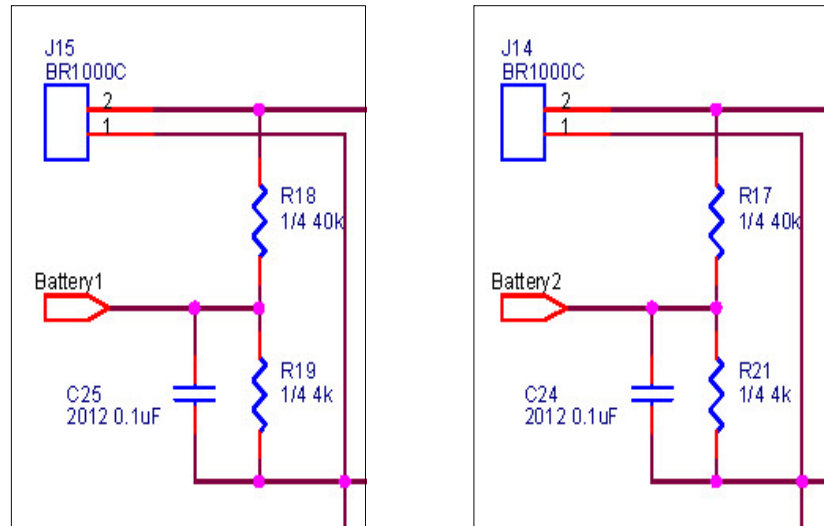


그림 19. 배터리 잔량 체크 회로

표 9. Battery pack 1 사양

Typical capacity		16.0 Ah
Nominal voltage		3.7 V
Charge condition	Max. current	16.0 A
	Voltage	4.2V±0.03V
Discharge condition	Continuous current	16.0 A
	Peak current	80.0 A
	Cut-off voltage	2.7 V
Cycle life		> 800 Cycles
Operating temp.	Charge	0 ~ 40 °C
	Discharge	-20 ~ 60 °C
Dimension	Thickness (mm)	7.5 ± 0.3
	Width (mm)	106.0 ± 2.0
	Length (mm)	205.0 ± 2.0
Weight(g)		330.0 ± 10.0

표 10. Battery pack 2 사양

Typical capacity		7.5 Ah
Nominal voltage		3.7 V
Charge condition	Max. current	7.5 A
	Voltage	4.2V±0.03V
Discharge condition	Continuous current	15.0 A
	Peak current	37.5 A
	Cut-off voltage	2.7 V
Cycle life		> 800 Cycles
Operating temp.	Charge	0 ~ 40 ℃
	Discharge	-20 ~ 60 ℃
Dimension	Thickness (mm)	7.5 ± 0.3
	Width (mm)	106.0 ± 2.0
	Length (mm)	100.0 ± 2.0
Weight(g)		155.0 ± 5.0

표 11. Battery 잔량 체크 레벨

0%	< 23.1V
20%	21.0V ~ 23.1V
40%	23.1V ~ 24.5V
60%	24.5V ~ 26.6V
80%	26.6V ~ 28.0V
100%	28.0V ~ 29.4V

4. 누수 감지 시스템

AUV는 수중에서 운동하므로 누수에 대한 대비책이 필요하다. 누수가 발생할 경우 내부에 설치된 전자 장비에 심각한 영향을 끼치게 되고, 최악의 경우 AUV를 회수하지 못하는 상황이 발생할 수도 있다. 본 논문에서 사용한 AUV에는 총 8개의 누수 감지 센서를 구성하였다. 구성된 누수 감지 센서는 AUV의 마디별 접합부 또는 안테나, 방향타의 샤프트와 같은 홀이 있는 부분에 설치되어 누수가 발생할 경우 모든 전원을 차단할 수 있도록 감시하는 역할을 한다. 누수 감지 센서는 TR로 간단히 구성이 가능하다. NPN TR의 콜렉터에 입력 전압을 넣고, 콜렉터와 베이스를 각각 전극으로 사용하면 누수가 발생할 경우 두 전극이 쇼트상태가 되어 콜렉터에 흐르는 전압이 베이스에도 걸려 TR이 ON 상태가 되고, 콜렉터에 흐르는 전류는 이미터를 통해 빠져나간다. 이러한 변화를 ATxmega에 내장된 A/D 컨버터 기능을 사용하여 감지하여 누수 여부를 확인할 수 있다. 누수 감지 센서의 회로는 그림 20의 회로와 같다.

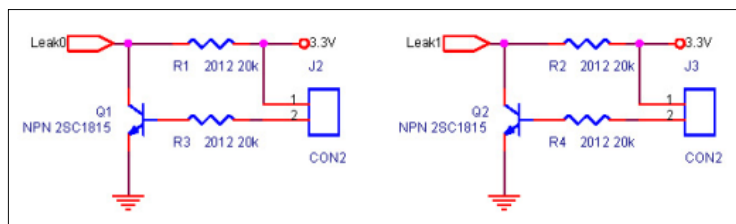


그림 20. 누수 감지 센서 회로

5. 부분 동작 시험을 위한 프로그램

본 AUV의 부분 동작 시험을 위한 프로그램으로 그림 21와 같은 프로그램을 제작하여 각각의 기능에 대한 테스트를 수행할 수 있도록 하였다. 프로그램의 기능으로 4개의 방향타 모터, 배터리 잔량, DC/DC 컨버터, 8개의 누수 센서, 추진기 동작에 대한 개별 테스트 기능을 할 수 있도록 제작하였다.

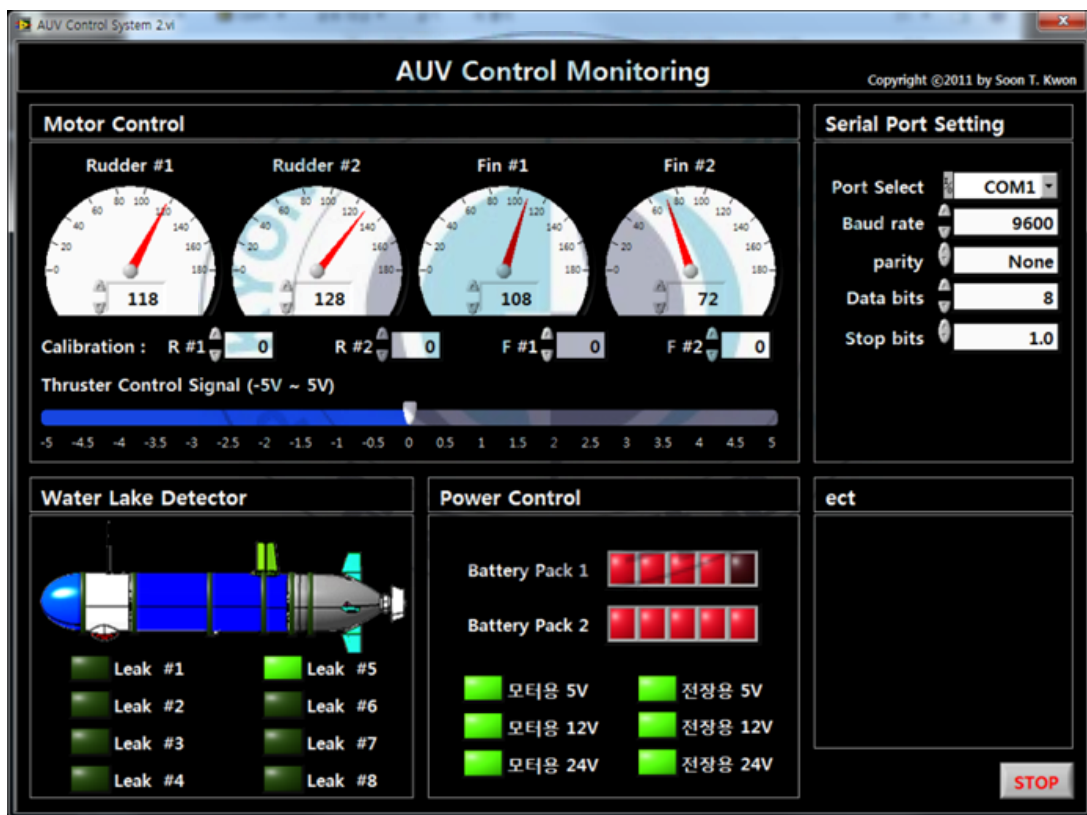
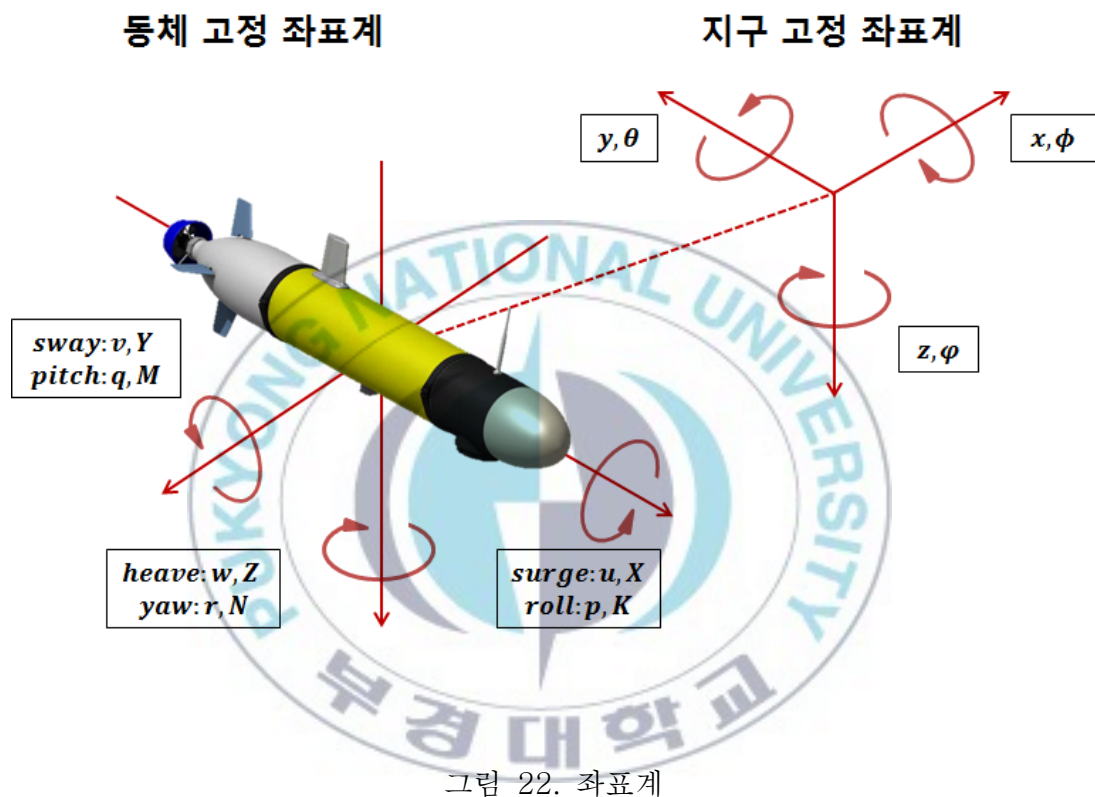


그림 21. 부분 동작 시험을 위한 프로그램

Ⅲ. AUV의 운동 방정식

1. 좌표계 설정



무인 잠수정의 위치, 속도 및 자세를 나타내기 위해서 그림 22와 같이 지구 고정 좌표계를 정의해야 하고, 또한 운동체에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하기 위해서는 동체 고정 좌표계를 설정해야한다. 지구 고정 좌표계는 무인 잠수정이 출발하는 지점에 대한 해수면 상의 한 점을 원점으로 하여 무인 잠수정이 출발하는 방향이 해수면에 투영된 방향을 x 축, 해수면에 수직인 아래축 방향을 z 축, 그리고 오른손 법칙에

따라 이미 구해진 두 축으로부터 결정되는 방향을 y 축으로 정한다. 동체 고정 좌표계는 수중 로봇의 부력 중심을 원점으로 하여 각 축 방향의 속도 (u, v, w) 및 각 축을 중심으로 한 회전 각속도 (p, q, r) 를 나타내고, 지구 고정 좌표계는 로봇의 위치 (x, y, z) 및 방향 (ϕ, θ, ψ) 을 나타낸다[4][12].

2. 동역학 모델

6자유도를 가진 AUV의 동역학 모델은 12개의 상태 변수를 사용한 비선형 미분 방정식으로 표시되는데, 그 중 동체 고정 좌표계와 관련된 u, v, w, p, q, r 는 다음의 식 (1)~(6)들과 같이 표현된다[4][13].

$$\begin{aligned} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} + mz_g\dot{q} - my_g\dot{r} &= X_{HS} + X_{u|u}|u|u| \\ &+ (X_{wq} - m)wq + (X_{qq} + mx_g)q^2 \\ &+ (X_{vr} + m)vr + (X_{rr} + mx_g)r^2 \\ &- my_gpq - mz_gpr + X_{prop} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - mz_g\dot{p} + (mx_g - Y_{\dot{r}})\dot{r} &= Y_{HS} \\ &+ Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + my_gp^2 \\ &+ (Y_{ur} - m)ur + (Y_{wp} + m)wp \\ &+ (Y_{pq} - mx_g)pq + Y_{uv}uv + my_gp^2 \\ &+ mz_gqr + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} + my_g\dot{p} - (mx_g - Z_{\dot{q}})\dot{q} &= Z_{HS} \\ &+ Z_{w|w}|w|w| + Z_{q|q}|q|q| \\ &+ (Z_{uq} + m)uq + (Z_{vp} - m)vp \\ &+ (Z_{rp} - mx_g)rp + Z_{uw}uw + mz_g(p^2 + q^2) \\ &- my_grq + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
& -mz_g \dot{v} + my_g \dot{w} + (I_{xx} - K_p) \dot{p} = K_{HS} \\
& + K_p |p| |p| - (I_{zz} - I_{yy}) qr \\
& + m(uq - vp) - mz_g (wp - ur) + K_{prop}
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
& mz_g \dot{u} - (mx_g + M_w) \dot{w} + (I_{yy} - M_q) \dot{q} = M_{HS} \\
& + M_w |w| |w| + M_q |q| |q| \\
& + (M_{uq} - mx_g) uq + (M_{vp} + mx_g) vp \\
& + [M_{rp} - (I_{xx} - I_{zz})] rp + mz_g (vr - wq) \\
& + M_{uw} uw + M_{uu\delta_s} u^2 \delta_s
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
& -my_g \dot{u} + (mx_g - N_v) \dot{v} + (I_{zz} - N_r) \dot{r} = N_{HS} \\
& + N_v |v| |v| + N_r |r| |r| \\
& + (N_{ur} - mx_g) ur + (N_{wp} + mx_g) wp \\
& + [N_{pq} - (I_{yy} - I_{xx})] pq - my_g (vr - wq) \\
& + N_{uv} uv + N_{uu\delta_r} u^2 \delta_r
\end{aligned} \tag{6}$$

AUV의 자세와 위치는 오일러 각을 이용하여 다음 식 (7)으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
\dot{\phi} &= p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\
\dot{\theta} &= q \cos \phi - r \sin \phi \\
\dot{\psi} &= (q \sin \phi + r \cos \phi) / \cos \theta \\
\dot{x} &= u \cos \psi \cos \theta + v (\cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi) \\
& + w (\cos \psi \sin \theta \sin \phi + \sin \psi \sin \phi) \\
\dot{y} &= u \sin \psi \cos \theta + v (\sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi) \\
& + w (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \\
\dot{z} &= -u \sin \theta + v \cos \theta \sin \phi + w \cos \theta \sin \phi
\end{aligned} \tag{7}$$

AUV의 동역학 모델은 외력, 유체 정역학적인 힘, 양력, 항력, added mass 등을 포함한다. 유체 저항 계수는 유사 모델의 시험치를 활용하거나, 회류 수조를 사용하여 실험치를 사용하였는데, 사용된 변수의 정의는 [2]에 의한다. 시뮬레이션에 사용된 상수값은 부록 1에 자세히 나타내었다.

제어 시스템의 설계와 성능 분석을 위해서는 복잡한 6자유도 비선형 방정식 대신에 간단화된 선형 운동 방정식이 필요하다. 6자유도 운동 방정식의 선형화 연구[14][15]는 이전에 많이 이루어 졌다. 수중 운동체의 6자유도 비선형 운동 방정식을 이용하여 적절한 가정을 설정함으로써 선형화된 운동 방정식을 유도할 수 있다.

- 전진 방향의 속도는 일정한 것으로 가정한다.
- 관성 상승 모멘트는 수중 운동체에 있어서 압력 선체와 내부 구조가 근사적으로 기하학적 대칭이기 때문에 무시할 수 있다고 가정한다.
- 무게를 포함하는 항들은 수중 운동체가 수중에서는 중성 부력 상태를 유지한다고 가정하여 버린다.
- 6자유도 운동은 수직면 운동과 수평면 운동으로 분리하고, 수직면과 수평면간의 연성은 없다고 가정한다.

가. 수직면에서의 선형 운동 방정식

무인 잠수정의 수직면 운동에서의 상태 변수를 식 (8)과 같이 정의하고, $z_g \simeq 0$ 와 $u = U$ (정속)의 가정 하에, AUV의 수직면 운동은 아래와 같이 4개의 상태 변수를 가진 선형 시스템 식 (9)로 간략화 및 선형화된다[4,16].

$$X = [w, z, q, \theta]^T \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -(mx_g + Z_{\dot{q}}) & 0 & 0 \\ -(mx_g + M_{\dot{w}}) & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Z_w & mU + Z_q & 0 & 0 \\ M_w & -mx_g U + M_q & 0 & M_\theta \\ 1 & 0 & 0 & -U \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{\delta_s} \\ M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \end{aligned} \quad (9)$$

나. 수평면에서의 선형 운동 방정식

무인 잠수정의 수평면 운동에서의 상태 변수를 식 (10)와 같이 정의하고, $z_g \simeq 0$, $u = U$ (정속), $\phi \simeq 0$, $\theta \simeq 0$ 의 가정 하에, AUV의 수평면상의 운동은 대략적으로 아래와 같이 3개의 상태 변수를 가진 선형 시스템 식 (11)으로 간략화 및 선형화할 수 있다[16].

$$X = [v, r, \psi]^T \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_v & Y_r - mU & 0 \\ N_v & N_r & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{\delta_r} \\ N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (11)$$

IV. AUV의 제어기 설계 및 시뮬레이션

본 논문에서 사용한 AUV는 PD 제어기를 탑재하고 있으며, PD 제어기의 운동 성능과 비교하기 위해 상태 궤환 제어기를 추가로 설계하여 시뮬레이션을 통해 비교하였다.

1. PD 제어기

PD 제어기는 선형화 된 모델을 이용하여 설정값 부근에서 정밀성을 향상시키기 위한 많은 규칙 및 짧은 샘플링 주기가 필요하고, 계산된 제어값이 실제 구동기가 작용할 수 있는 값의 한계보다 커서 구동기의 포화가 발생하게 되는 경우 발생하는 적분기 와인드업 (Integrator wind-up)을 피할 수 있는 비교적 단순하면서도 이득값 변화에 따른 선체의 운동 변화 관찰이 쉬운 이유로 널리 사용되고 있다.

가. 수직면 제어기

수직면 운동을 제어하기 위하여 식 (12)와 같은 PD 제어기를 이용하여, 스티의 각도 δ_s 를 결정한다. δ_s 의 결정에는 목표 깊이값 z_d 와 목표 pitch각 θ_d 가 사용된다.

$$\begin{aligned}\delta_s &= K_{p_z} e_z + K_{d_z} \dot{e}_z + K_{p_\theta} e_\theta + K_{d_\theta} \dot{e}_\theta \\ e_z &= z_d - z \\ e_\theta &= \theta_d - \theta\end{aligned}\tag{12}$$

- z_d : 목표 깊이값

- K_{p_z} : 수직 운동 비례 게인
- K_{d_z} : 수직 운동 미분 게인
- θ_d : 목표 pitch각
- K_{p_θ} : pitch 제어 비례 게인
- K_{d_θ} : pitch 제어 미분 게인

실험적인 결과로 각각의 이득 값은 다음 식 (13)과 같이 설정하였다.

$$K_{p_z} = 3, K_{d_z} = 0.5, K_{p_\theta} = -7, K_{d_\theta} = 0 \quad (13)$$

나. 수평면 제어기

수평면 운동을 제어하기 위하여 식 (14)와 같은 PD 제어기를 이용하여, 리더의 각도 δ_r 를 결정한다. δ_r 의 결정에는 yaw 목표각 ψ_d 가 사용된다.

$$\begin{aligned} \delta_r &= K_{p_\psi} e_\psi + K_{d_\psi} \dot{e}_\psi \\ e_\psi &= \psi_d - \psi \end{aligned} \quad (14)$$

- ψ_d : 목표 yaw각
- K_{p_ψ} : yaw 제어 비례 게인
- K_{d_ψ} : yaw 제어 미분 게인

실험적인 결과로 각각의 이득 값은 다음 식 (15)와 같이 설정하였다.

$$K_{p_\psi} = -2, K_{d_\psi} = -0.5 \quad (15)$$

2. 상태 궤환 제어기

3차 또는 그 이상의 시스템에서 PD, PI, 1단 제어기로는 각 제어기에 두 개의 자유 파라미터만 있기 때문에 독립적으로 시스템의 모든 극들을 제어할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 극배치 (pole placement)법을 사용한 상태 궤환 제어기를 설계하고 PD 제어기의 결과와 비교하였다.

가. 수직면 제어기

식 (9)를 $x_e = [w \ q \ z_e \ \theta]^T$, $z_e = z - z_d$, $\dot{z}_d = 0$ 를 사용하여 변환하고, 프로토타입에 사용된 변수 및 상수들을 대입한 후, 0.1초의 샘플링 타임으로 ZOH를 이용한 이산 시스템을 식 (16)과 같이 얻었다. 여기서 $u = 1.2m/s$ 로 가정하였다. 여기에서 z_d 는 로봇의 목표 수심을 나타내며 $\dot{z}_d = 0$ 의 가정은 목표 수심을 계단 함수로 표시하면 만족된다.

$$\dot{x}_e(k+1) = Ax_e(k) + Bu(k)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.9198 & 0.0509 & 0 & -0.0002 \\ 0.3559 & 0.9157 & 0 & -0.0663 \\ 0.0950 & -0.0032 & 1 & -0.1198 \\ 0.0184 & 0.0956 & 0 & 0.9966 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -0.0172 \\ -0.1011 \\ -0.0006 \\ -0.0051 \end{bmatrix} \quad (16)$$

제안된 제어기는 $x_e \rightarrow 0$ 를 목표로 하는 상태 궤환 ($u(k) = -Kx_e(k)$) 제어기로서, 목표 수심에서 AUV의 선속도 및 각속도 변화가 없이 자세를 유지하는 것을 목표로 한다.

극배치 기법을 사용하여 상태 궤환 후 이산 시스템의 극이

$(0.9512, 0.9512, 0.8186 + j0.0164, 0.8186 - j0.0164)$ 에 위치하도록 하는 이득 값은 식 (17)과 같다.

$$K = [-3.4416 \quad -2.2215 \quad 0.4944 \quad -1.9826] \quad (17)$$

여기에서 이산 시스템의 극의 위치는 연속 시스템의 극 $(-0.5, -0.5, -2 + j0.2, -2 - j0.2)$ 에 해당한다. AUV가 깊이 제어시에 오버슈트 없이 최단 시간에 목표 깊이에 도달할 수 있도록 중근을 선택하고, 나머지 두 개의 근은 가능한 한 영향을 적게 줄 수 있도록 2배 이상 좌측에 위치하도록 선택하였다.

나. 수평면 제어기

식 (11)을 $x_e = [v \ r \ \psi_e]^T$, $\psi_e = \psi - \psi_d$, $\dot{\psi}_d = 0$ 를 사용하여 변환하고, 프로토타입에 사용된 변수 및 상수들을 대입한 후, 0.1초의 ZOH를 이용한 이산 시스템을 아래 식 (18) 과 같이 얻었다.

$$\dot{x}_e(k+1) = Ax_e(k) + Bu(k)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.9701 & -0.1191 & 0 \\ -0.3412 & 0.9651 & 0 \\ -0.0173 & 0.0979 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.0211 \\ -0.1033 \\ -0.0051 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기에서 $\psi_d = \text{atan2}(y_d - y, x_d - x)$ 는 로봇의 목표 방향을 나타내는데, 제어기는 로봇의 진행 방향이 목표 방향과 일치하도록 제어한다. 목표 위치와 로봇의 위치간 오차가 큰 초기에는 $\dot{\psi}_d \simeq 0$ 의 가정이 만족되며,

일단 로봇이 목표한 방향을 향한 이후에는 $\dot{\psi}_d \simeq 0$ 이 만족된다.

극배치 기법을 사용하여 상태 궤환 ($u(k) = -Kx_e(k)$) 후 시스템의 극이 $(0.6065, 0.9048 + j0.0090, 0.9048 - j0.0090)$ 에 위치하도록 하는 이득값은 식 (19)와 같고, 이 극들은 연속 시스템의 극 $(-5, -1 + j0.1, -1 - j0.1)$ 에 해당된다.

$$K = [3.2880 \quad -4.1813 \quad -3.4995] \quad (19)$$

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB/Simulink를 이용하여 수행되었다. 그림 23은 전체 시스템을 나타낸 것으로, AUV는 2장에서 소개된 12개의 상태 변수를 사용한 비선형 모델식과 ZOH를 사용하여 그림 24와 같이 표현된다.

제안된 제어기는 10 Hz로 동작하는 이산 제어 시스템으로서, 시뮬레이션을 위한 해석기로 ode45를 사용하였다. 두쌍의 방향키는 최고 속도 $60^\circ/s$ 의 속도로 $\pm 40^\circ$ 까지 동작하는 것으로 가정하였고, 추진기의 추력은 9.25 N, 추진기의 토크는 -0.543 Nm로 일정하게 유지된다고 가정하였다. 또한 AUV의 초기 속도는 0.514 m/s (1 knot), 초기 위치는 (0, 0, 0), 초기 방향은 (0, 0, 0)으로 설정하였다. AUV의 방향별 속도 및 각속도의 측정에는 각각 최대 $\pm 0.005 \text{ m/s}$, $\pm 15^\circ/s$ 의 랜덤노이즈를 포함하는 것으로 가정하였다.

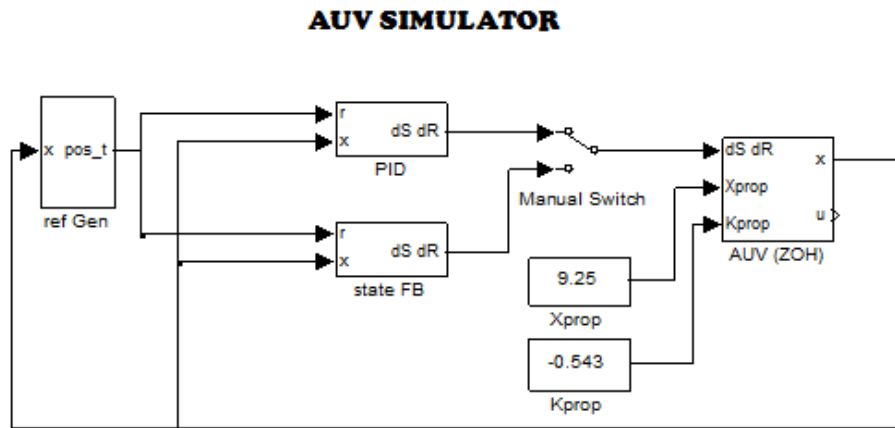


그림 23. MATLAB/Simulink를 사용한 simulator

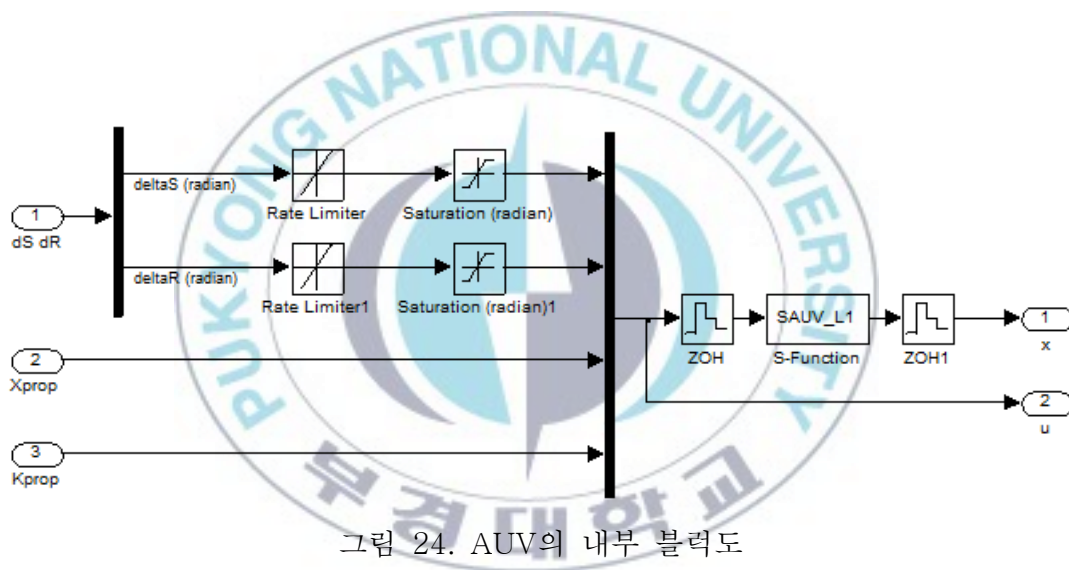


그림 24. AUV의 내부 블럭도

AUV가 경유점으로 이동하여 경유점과의 거리가 1m 이내가 되면 경유점의 목표 좌표를 바꾸는데, (0, 0, 0), (20, 0, 0), (40, 20, 5), (40, 40, 10), (20, 40, 5), (0, 0, 0)의 6점을 지정한 경우, AUV의 이동은 다음 그림 25, 그림 26과 같다. 그림의 실선은 AUV의 이동 경로를 나타내고 작은 원은 목표 좌표를 나타낸다.

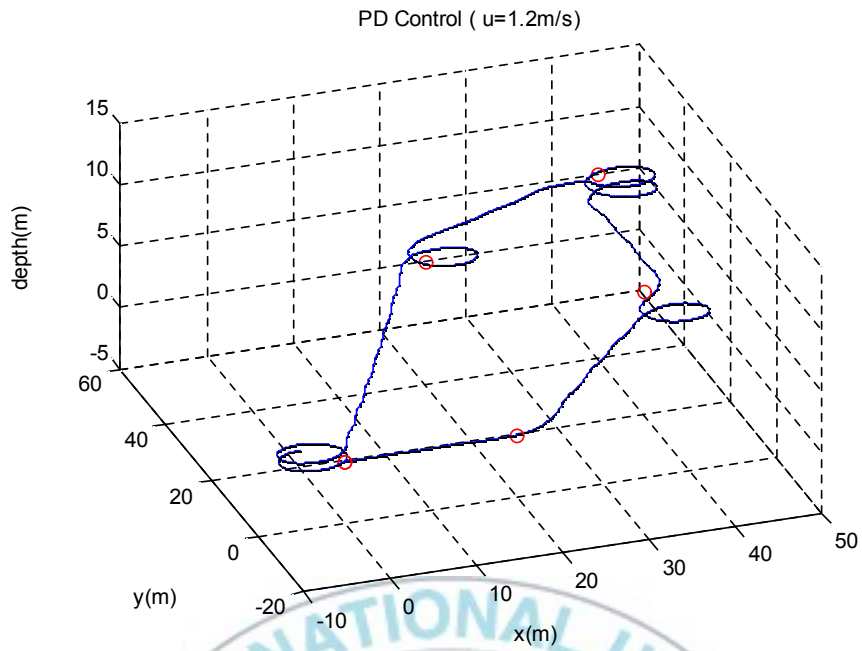


그림 25. PD 제어기를 사용한 경우 AUV의 이동 경로

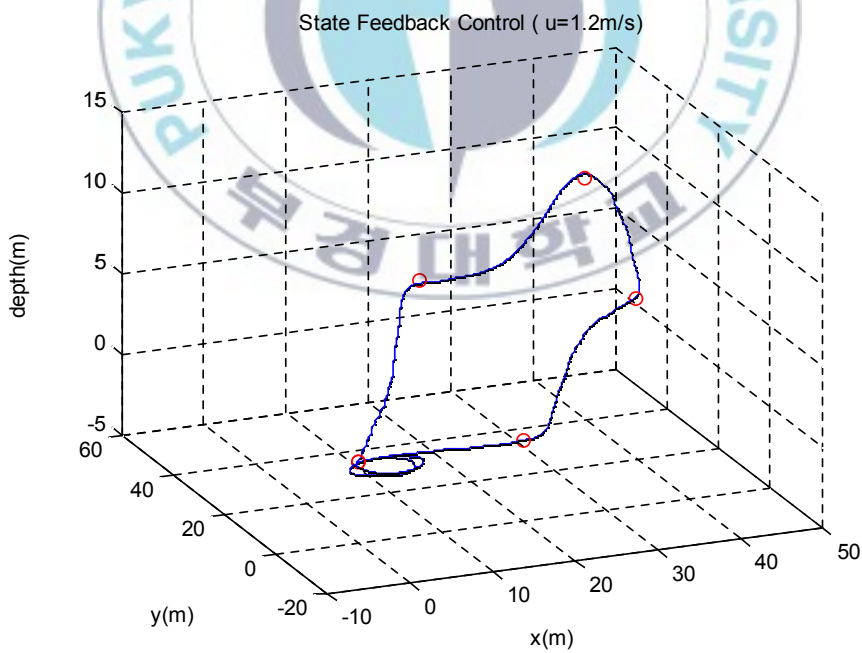


그림 26. 슬라이딩 모드 제어기를 사용한 경우 AUV의 이동 경로

AUV가 목표 좌표를 모두 거쳐 제자리로 돌아왔음을 알 수 있고, 더 이상의 목표 좌표 변화가 없기 때문에 AUV는 계속하여 최종 좌표인 (0, 0, 0)에 접근하였음을 볼 수 있다. 그러나 상태 궤환 제어기를 사용한 경우 한번에 모든 경유점을 추적 하였지만, PD 제어기를 사용한 경우 한번에 추적하지 못하고 맴돌았음을 확인 할 수 있었다.

다음 그림 27, 그림 28은 AUV의 수직면 방향의 깊이 제어 결과를 나타낸다. 두 제어기 모두 목표 지점의 수직축 좌표 순서대로 (0, 0, 5, 10, 5, 0)를 추종하였음을 확인할 수 있다. 그러나 PD 제어기를 사용한 경우 경유점을 추적하는데 약 220 sec가 걸린 반면, 상태 궤환 제어기를 사용한 경우가 경유점을 추적하는데 약 80 sec가 걸렸음을 확인할 수 있다. 상태 궤환 제어기를 사용한 경우, 약 140 sec 가량 더 빠르게 추적하였다.

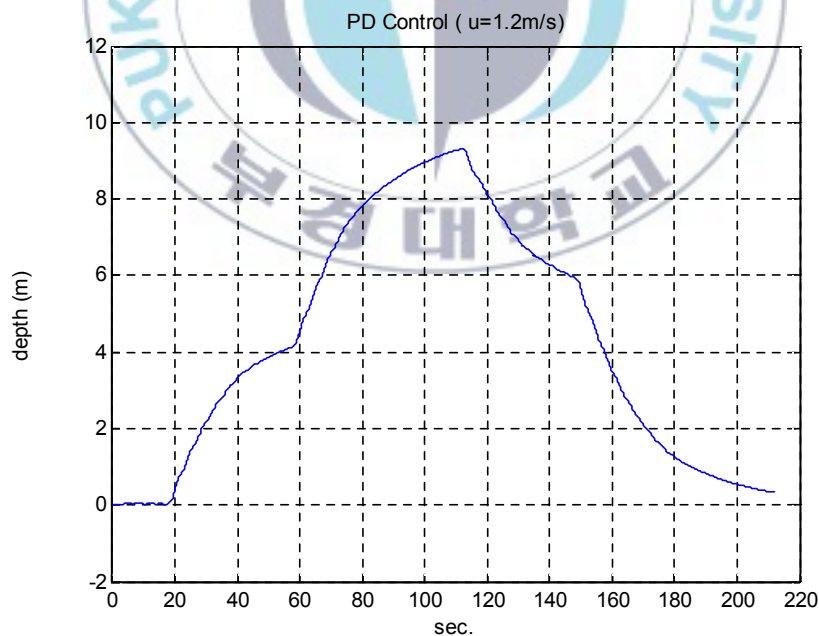


그림 27. PD 제어기를 사용한 경우 수직면 제어 결과

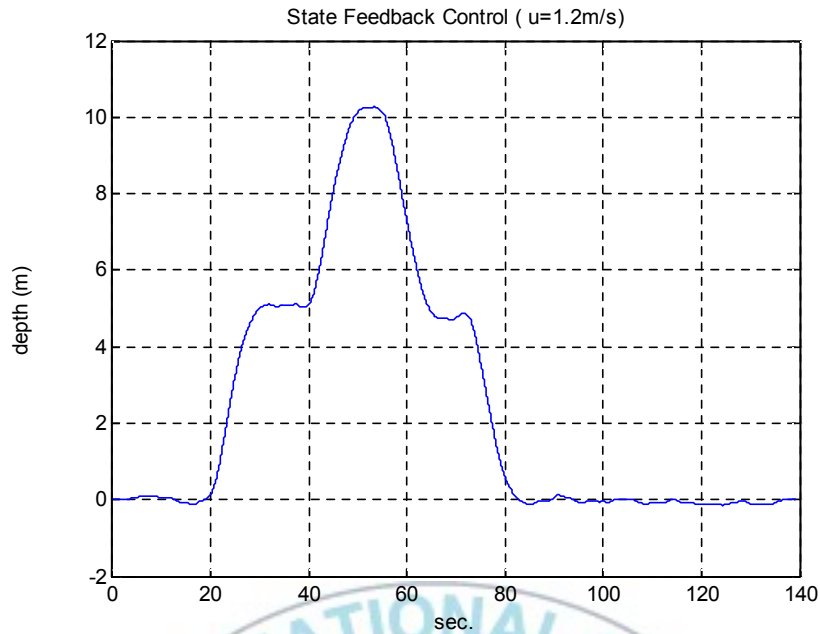


그림 28. 상태 궤환 제어기를 사용한 경우 수직면 제어 결과

그림 29, 그림 30은 AUV의 수평면에서의 제어 결과를 나타낸다. 목표 지점의 xy 축 좌표 순서대로 (0, 0), (20, 0), (40, 20), (40, 40), (20, 40), (0, 0)의 좌표를 잘 추종하였음을 알 수 있다. 그러나 PD 제어기를 사용한 경우 5개의 경유점 중 3개의 경유점에서 한번에 추적하지 못하고 맴돌았음을 확인할 수 있다.

AUV의 방향별 속도는 다음 그림 31, 그림 32와 같고, 전진 속도 (surge speed) u 는 약 1.2 m/s로, 제어기의 설계시에 가정했던 값이다. 본 논문에서는 AUV의 전진 속도 제어를 하지 않고, 프로펠러 추력 및 토크를 일정한 값으로 제어한다고 가정했기 때문에 AUV의 회전 및 잠수에 따라 두 제어기 모두 전진 속도에 변화가 생김을 알 수 있다.

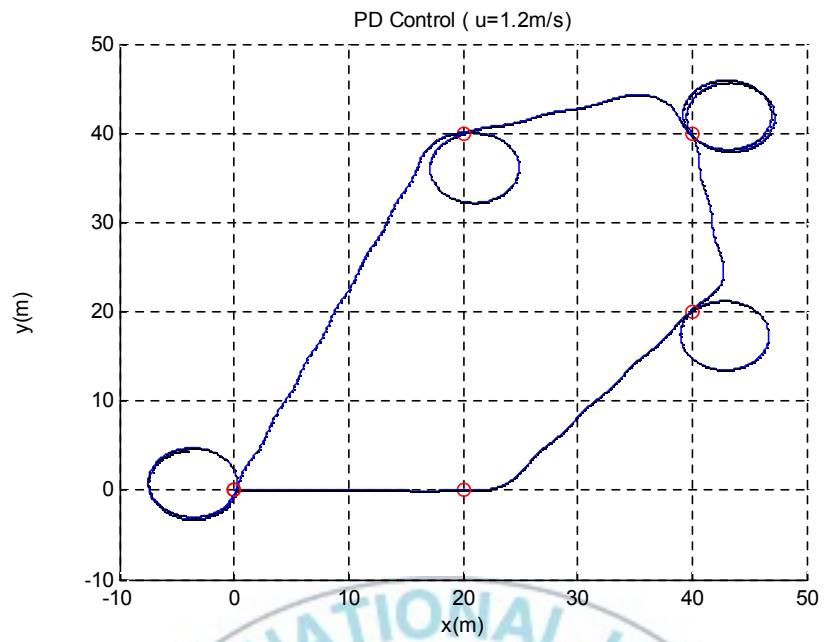


그림 29. PD 제어기를 사용한 경우 수평면 제어 결과

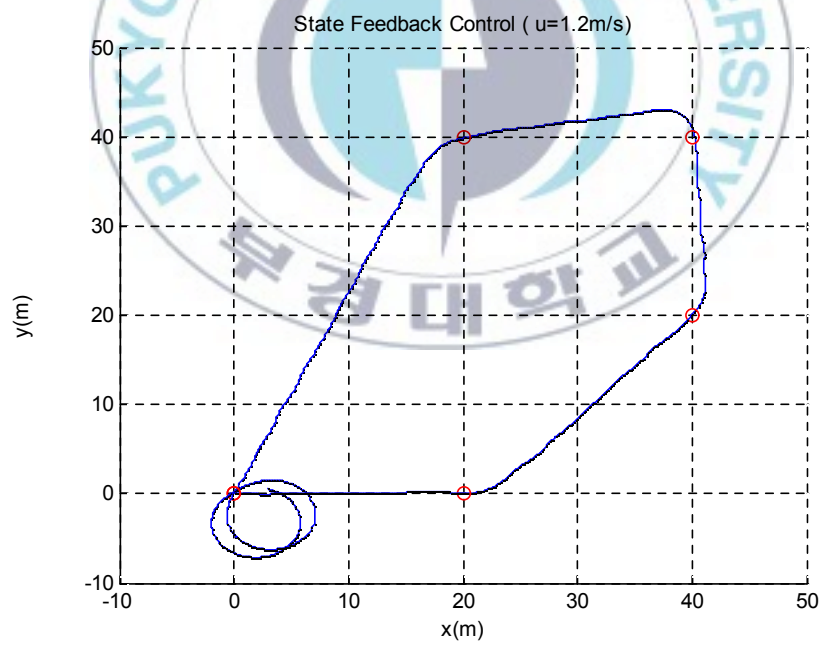


그림 30. 상태 궤환 제어기를 사용한 경우 수평면 제어 결과

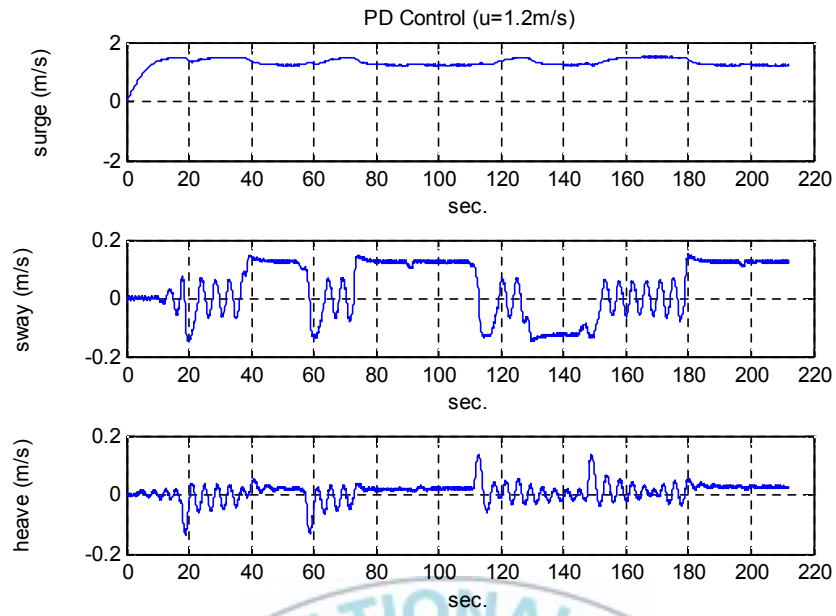


그림 31. PD 제어기를 사용한 경우 방향별 속도

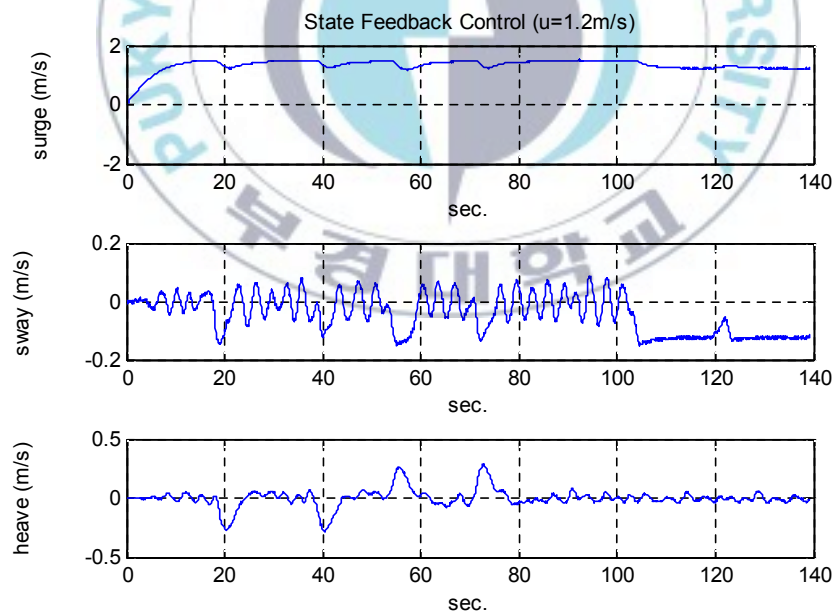


그림 32. 상태 궤환 제어기를 사용한 경우 방향별 속도

AUV의 전진 속도는 추진기의 프로펠러 회전수를 변화시켜 일정하게 유지할 수 있으나, 배터리의 허용 전류량을 고려할 때, AUV의 전진 속도가 아닌 프로펠러 회전수를 일정하게 제어하는 것이 유리하다고 판단되었다. 이것은 제어기 설계시의 가정인 일정한 전진 속도라는 가정을 정확하게는 만족하지 못하는 결과를 가져오지만, AUV의 경유점 추적과 같은 문제에서는 AUV와 경유점과의 거리 오차가 허용되기 때문에 문제를 야기하지 않는다.

AUV에 인가되는 방향타의 제어각 (δ_s, δ_r)은 그림 33, 그림 34와 같다. 두 제어기의 결과 모두 주어진 $\pm 40^\circ$ 범위 내에서 방향타가 구동했음을 확인할 수 있다.

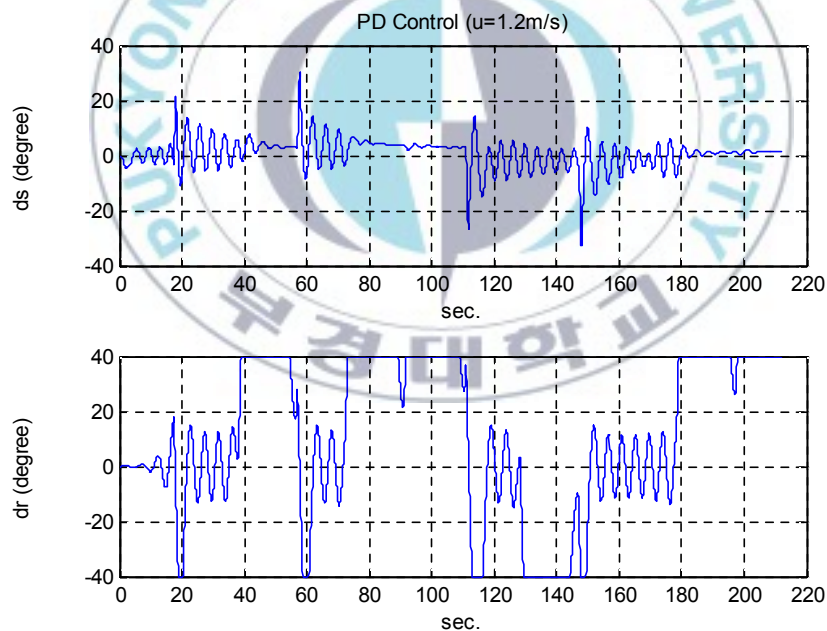


그림 33. PD 제어기를 사용한 경우 방향타 제어 입력

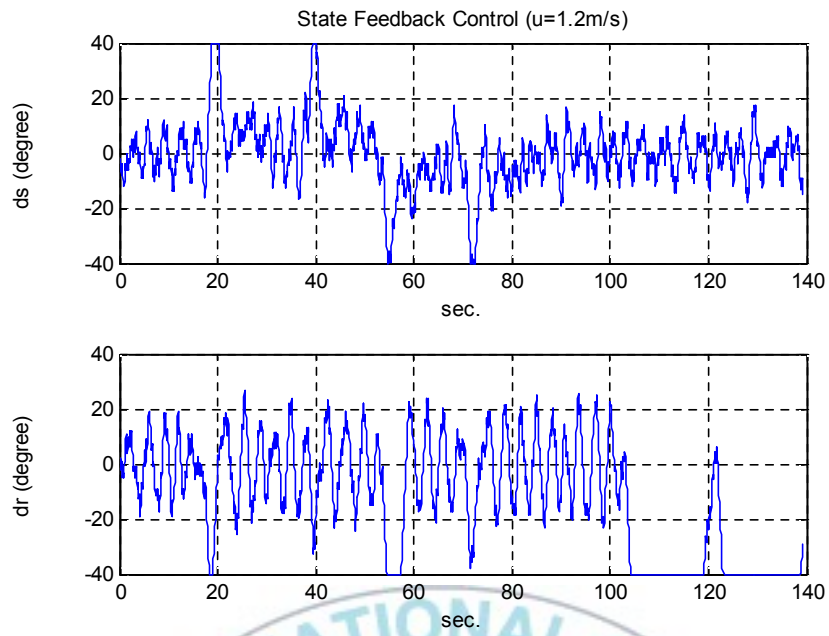


그림 34. 상태 궤환 제어기를 사용한 경우 방향타 제어 입력



V. AUV의 제어기 성능 실험

본 논문에서 사용한 AUV의 경우 PD 제어기를 탑재하고 있으며, 주어진 임무를 수행할 수 있는지의 검증을 위하여, 몇 가지 실험을 하였다. 실험을 통하여 실제 얻은 데이터와, 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 비교하며 설계된 AUV의 제어기의 성능을 분석 하였다.

1. 경유점 추적 실험

AUV의 경유점 추적 성능 실험을 위하여 두가지의 경로를 설정하여 실험을 하였다. 실험은 실 해역에서 이루어 졌다.

첫번째 실험은 다이아몬드 형태의 경로를 $(0, 0, 0)$, $(10, 30, 0)$, $(0, 40, 0)$, $(-10, 30, 0)$, $(0, 0, 0)$ 와 같이 설정하였다. 실험을 통해 그림 35와 같은 형태의 결과를 얻을 수 있었다. 그림에서 점선으로 표현된 것은 시뮬레이션 결과이며, 실선으로 표현된 것은 실험 결과이다. 경유점은 작은 점으로 표현되어 있다. 조류의 영향으로 이동 경로가 약간의 차이는 있지만, 실제 실험 데이터와 시뮬레이션 모두 경유점을 잘 추적하는 것을 확인할 수 있다.

두번째 실험은 lawn mower 타입의 이동 경로로 AUV가 정찰, 측정 등의 목적으로 이동할 때, 빈틈없는 감시를 위해 널리 사용되는 방법이다. 경로는 $(0, 0, 0)$, $(-75, 20, 0)$, $(-75, 55, 0)$, $(-55, 55, 0)$, $(-55, 20, 0)$, $(-35, 20, 0)$, $(-35, 55, 0)$, $(-15, 55, 0)$, $(-15, 20, 0)$, $(0, 0, 0)$ 와 같이 설정하였다. 실험을 통해 그림 36과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 회전하는 각이 크고 회전수가 많이 그림 35의 결과보다, 시뮬레이션결과와의 차이가 크지만 모든 경유점을 잘 추적하는 것을 확인할 수 있다.

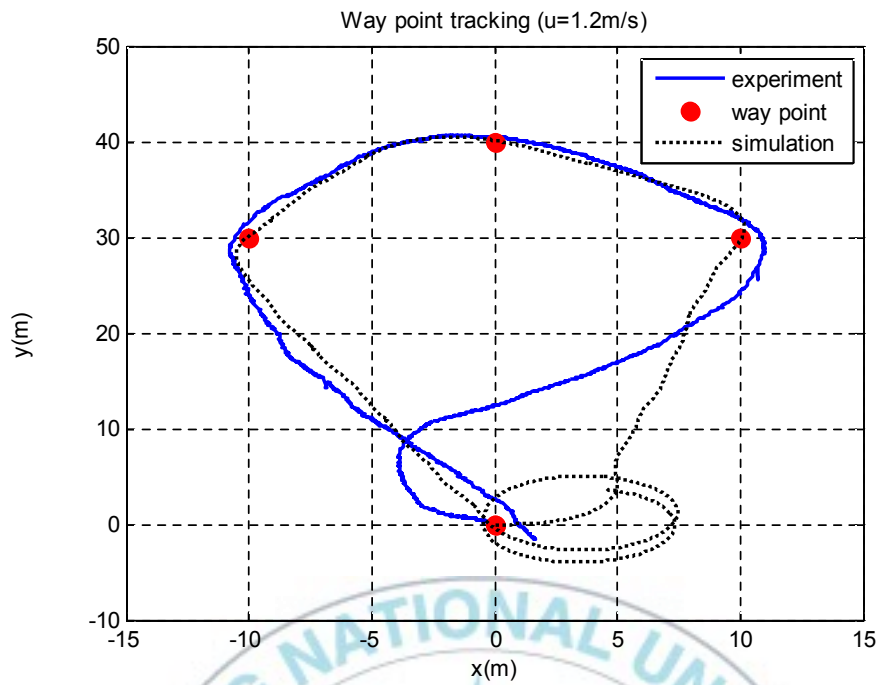


그림 35. 경유점 추적 실험 결과와 시뮬레이션 결과 (1)

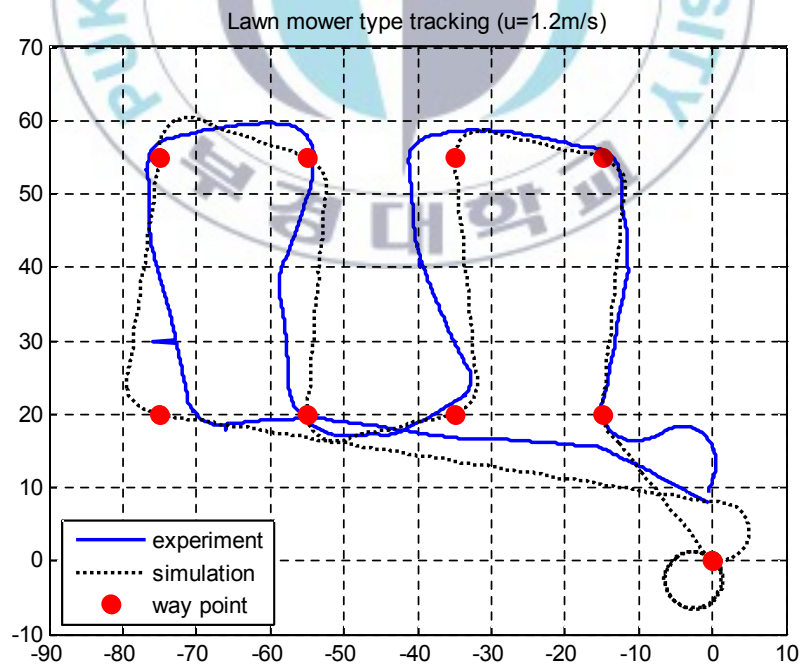


그림 36. 경유점 추적 실험 결과와 시뮬레이션 결과 (2)

2. 깊이 제어 실험

AUV의 수직면 운동 성능을 실험 하였다. 시험은 조류의 영향이 비교적 적은 실내 수조에서 진행되었다. AUV가 직선으로 이동할때 수심 1m 깊이로 잠수하고 수면으로 부상하여 계속 이동하도록 하고 실험을 진행하였다. 실험 결과 그림 37과 같은 결과를 얻었다. 그림에서 점선으로 표현된 것은 시뮬레이션 결과이며, 실선으로 표현된 것은 실험 결과이다. 실험 결과에서는 AUV가 약 0.5m 정도 잠수를 하고 부상하여 이동을 하였고, 시뮬레이션 결과에서는 약 0.7m 정도 잠수를 하고 부상하였다. 실험 결과 잠수를 시작하고 복귀하는 시간이 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 차이를 보인다. 이는 물의 밀도에 따른 부력의 영향에 따른 차이로 생각된다. 그러나 두 결과 모두 1m 오차 범위 내의 조건은 감안하였을 경우 운용 가능한 제어 성능을 가진다고 판단된다.

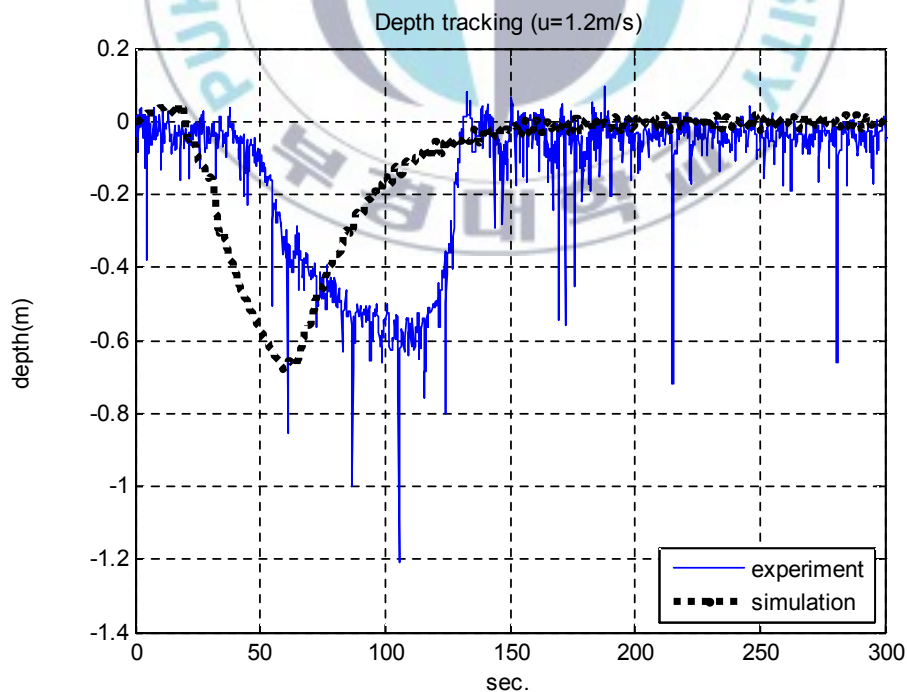


그림 37. 깊이 제어 실험 결과

VI. 결론

본 논문에서는 소형 AUV를 개발하고 AUV의 경유점 추적을 위한 자세 제어에 대한 연구를 진행하였다. AUV가 주어진 경유점을 모두 통과하도록 PD 제어기를 설계하였고, PD 제어기와의 성능 비교를 위하여 수직축 방향 제어에 4개의 상태 변수와 수평면 상의 제어에 3개의 상태 변수를 각각 사용하는 상태 궤환 제어기를 설계하고, MATLAB/Simulink를 사용하여 1m 오차 범위 내에서 주어진 여러 개의 목표 좌표를 추적에 대한 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

AUV에 탑재된 제어기는 PD 제어기로써 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 유사하게 운동하였음을 알 수 있다. 그러나, 4차, 3차 상태 변수를 가지는 AUV 시스템에서 PD, PI, 1단 제어기로는 독립적으로 시스템의 모든 극들을 제어할 수 없어 그 성능이 극 배치 기법을 사용한 상태 궤환 제어기를 사용한 경우보다 부족함을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. AUV는 방향타에 비하여 몸체가 크고, 느린 운항속도를 가지므로 제어력이 약하여 현재 사용하는 PD 제어기 보다 강인한 제어기가 필요할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 제어기의 설계를 간략하게 하기 위하여 AUV의 전진 속도가 일정하게 유지된다고 가정하였으나, 다양한 운용 속도 변화에 따른 제어 능력의 향상을 위하여 fuzzy 로직을 포함한 제어기, Sliding mode 제어기, adaptive fuzzy 제어기 등, 새로운 강인한 제어기의 설계가 필요할 것으로 판단되어 후속 연구를 진행 중이다.

VII. 참고문헌

- [1] M. Brady, L. Gerhardt and H. Davison, "Arificial Intelligence and Robotics", Springer-Verlag, 1984.
- [2] F. Busby and J. R. Vadus, "Autonomous Underwater Vehicle R&D Trends", Sea Technology, pp. 66-73, May, 1990.
- [3] D. Bildberg, "Autonomous Underwater Vehicles: Current Activiess and Research Opportunities", Intelligent Autonomous System, pp. 51-64, 1989
- [4] T. Prestero, "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle", M. S. thesis, MIT/WHOI, 2001.
- [5] E. Desa, R. Madhan, P. Maurya, et al, "The small MAYA AUV: Initial field results", Underwater World Publications, pp. 1-9, 2007.
- [6] E. Y. Hong, H. G. Soon, and M. Chitre, "Depth control of an autonomous underwater vehicle, STARFISH," OCEANS 2010 IEEE-Sydney, pp. 1-6, May, 2010.
- [7] J. Woo and M. D. Ageev, "Development and preliminary sea trial of OKPO-6000 AUV," Proc. the 2nd Symposium Ocean Mining,

pp. 24-26, Nov. 1997.

- [8] J. Y. Park, B. H. Jun, P. M. Lee, and J. Oh, "Development of test-bed AUV 'ISiMI' and underwater experiments on free running and vision guided docking," Underwater vehicles, pp. 371-398, Dec, 2009.
- [9] B. H. Jun, J. Y. Park, F. Y. Lee, P. M. Lee, C.M. Lee, K. Kim, Y. K. Lim, and J. H. Oh, "Development of the AUV 'ISiMI' and a free running test in an ocean engineering basin," Ocean Engineering, vol. 36, no. 1, pp. 2-14, Jan, 2009.
- [10] J. H. Li, P. M. Lee, and B. H. Jun, "A Neural Network Adaptive Controller for Autonomous Diving Control of an Autonomous Underwater Vehicle," International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 2, no. 3, pp. 374-383, 2004
- [11] Soon T. Kwon, Woon Kyung Baek, and Moon G. Joo, "Implementation of AUV Test-Bed," ISCC 2011, June, Loutraki, Greece, 2011.
- [12] C. H. Hong, K. C. Choi, and B. S. Kim, "Autopilot Design of an Autonomous Underwater Vehicle Using Robust Control," Transaction on Control, Automation and Systems Engineering, vol. 4, no. 4, pp. 264-269, 2002.
- [13] T. I. Fossen, Guidance and control of ocean vehicle, Jone Wiley & Sons, New York, 1994.

- [14] E. Romero, "Mathematical Models and Computer Simulation for Equation of Motion of Surface Ship and Submarine," M.S Thesis, Naval Postgraduate School, 1972.
- [15] H. L. Drurey, "Automatic Control of Submarine Depth, Pitch and Trim," M.S. Thesis, Naval Postgraduate School, 1975.
- [16] K. M. Fauske, F. Gustafsson, and Ø. Hegrenæs, "Estimation of AUV dynamics for sensor fusion," Proc. of the 10th Conf. Information Fusion, pp. 1-6, July, 2007.



부록 1. 시뮬레이션에 사용된 상수

$m = +4.3E+01$	[kg]	%Mass of AUV
$\rho = +1.03E+03$	[kg/m ³]	%Seawater Density
$A_f = +4.14E-02$	[m ²]	%Hull Frontal Area
$A_p = +3.41E-01$	[m ²]	%Hull Projected Area(XZ-plane)
$S_w = +7.09E-01$	[m ²]	%Hull Wetted Surface Area
$\nabla = +3.15E-02$	[m ³]	%Estimated Hull Volume
$W = +4.3E+02$	[N]	%Measured Vehicle Weight
$B = +4.3E+02$	[N]	%Measured Vehicle Weight(horizontal)
$B_{est} = +3.17E+02$	[N]	%Estimated Hull Buoyancy
$x_{cb(est)} = +5.54E-03$	[m]	%Estimated Long. Center of Buoyancy
$C_d = +4.00E-01$	[n/a]	%Axial Drag Coeff.
$C_{dc} = +8.80E-01$	[n/a]	%Cylinder Cross Flow Drag Coeff.
$c_{y\delta\beta} = +1.20E+00$	[n/a]	%Hoerner Body Lift Coeff.
$x_{cb} = +0.00E+00$	[m]	%Center Buoyancy: X-dir
$y_{cb} = +0.00E+00$	[m]	%Center Buoyancy: Y-dir
$z_{cb} = +0.00E+00$	[m]	%Center Buoyancy: Z-dir
$x_{cg} = +0.00E+00$	[m]	%Center Gravity: X-dir
$y_{cg} = +0.00E+00$	[m]	%Center Gravity: Y-dir
$z_{cg} = +2.00E-02$	[m]	%Center Gravity: Z-dir
$I_{xx} = +1.77E-01$	[kg·m ²]	%Moment Inertia
$I_{yy} = +3.45E+00$	[kg·m ²]	%Moment Inertia
$I_{zz} = +3.45E+00$	[kg·m ²]	%Moment Inertia
$X_{uu} = -3.90E+00$	[kg/m]	%Cross Flow Drag
$X_u = -9.30E-01$	[kg]	%Added Mass
$X_{wq} = -3.55E+01$	[kg/rad]	%Added Mass Cross Term
$X_{qq} = -1.93E+00$	[kg·m/rad]	%Added Mass Cross Term
$X_{ur} = +3.55E+01$	[kg/rad]	%Added Mass Cross Term
$X_{rr} = -1.93E+00$	[kg·m/rad]	%Added Mass Cross Term
$X_{prop} = +9.25E+00$	[N]	%Propeller Thrust
$Y_{vv} = -1.31E+03$	[kg/m]	%Cross Flow Drag
$Y_{rr} = +6.32E-01$	[kg·m/rad ²]	%Cross Flow Drag
$Y_{uv} = -2.86E+01$	[kg/m]	%Body Lift Force and Fin Lift
$Y_v = -3.55E+01$	[kg]	%Added Mass
$Y_r = +1.93E+00$	[kg·m/rad]	%Added Mass

Y_{ur}	$= +5.22E+00$	$[kg/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term\ and\ Fin\ Lift$
Y_{φ}	$= +3.55E+01$	$[kg/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term$
Y_{pq}	$= +1.93E+00$	$[kg \cdot m/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term$
$Y_{uu\delta_r}$	$= +9.64E+00$	$[kg/(m \cdot rad)]$	$\%Fin\ Lift\ Force$
Z_{uw}	$= -1.31E+02$	$[kg/m]$	$\%Cross\ Flow\ Drag$
Z_{qq}	$= -6.32E-01$	$[kg \cdot m/rad^2]$	$\%Cross\ Flow\ Drag$
Z_{uw}	$= -2.86E+01$	$[kg/m]$	$\%Body\ Lift\ Force\ and\ Fin\ Lift$
Z_w	$= -3.55E+01$	$[kg]$	$\%Added\ Mass$
Z_q	$= -1.93E+00$	$[kg \cdot m/rad]$	$\%Added\ Mass$
Z_{uq}	$= -5.22E+00$	$[kg/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term\ and\ Fin\ Lift$
Z_{vp}	$= -3.55E+01$	$[kg/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term$
Z_{rp}	$= +1.93E+00$	$[kg/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term$
$Z_{uu\delta_s}$	$= -9.64E+00$	$[kg/(m \cdot rad)]$	$\%Fin\ Lift\ Force$
K_{pp}	$= -1.30E-01$	$[kg \cdot m^2/rad^2]$	$\%Rolling\ Resistance$
K_p	$= -7.04E-02$	$[kg \cdot m^2/rad]$	$\%Added\ Mass$
K_{prop}	$= -5.43E-01$	$[N \cdot m]$	$\%Propeller\ Torque$
M_{uw}	$= +3.18E+00$	$[kg]$	$\%Cross\ Flow\ Drag$
M_{qq}	$= -1.88E+02$	$[kg \cdot m^2/rad^2]$	$\%Cross\ Flow\ Drag$
M_{uw}	$= +2.40E+01$	$[kg]$	$\%Body\ and\ Fin\ Lift\ and\ Mnk\ Moment$
M_w	$= -1.93E+00$	$[kg \cdot m]$	$\%Added\ Mass$
M_q	$= -4.88E+00$	$[kg \cdot m^2/rad]$	$\%Added\ Mass$
M_{uq}	$= -2.00E+00$	$[kg \cdot m/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term\ and\ Fin\ Lift$
M_{vp}	$= -1.93E+00$	$[kg \cdot m/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term$
M_{rp}	$= +4.86E+00$	$[kg \cdot m^2/rad^2]$	$\%Added\ Mass$
$M_{uu\delta_s}$	$= -6.15E+00$	$[kg/rad]$	$\%Fin\ Lift\ Moment$
N_{vv}	$= -3.18E+00$	$[kg]$	$\%Cross\ Flow\ Drag$
N_{rr}	$= -9.40E+01$	$[kg \cdot m^2/rad^2]$	$\%Cross\ Flow\ Drag$
N_{uv}	$= -2.40E+01$	$[kg]$	$\%Body\ Fin\ Lift\ and\ Mnk\ Moment$
N_v	$= +1.93E+00$	$[kg \cdot m]$	$\%Added\ Mass$
N_r	$= -4.88E+00$	$[kg \cdot m^2/rad]$	$\%Added\ Mass$
N_{ur}	$= -2.00E+00$	$[kg \cdot m/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term\ and\ Fin\ Lift$
N_{φ}	$= -1.93E+00$	$[kg \cdot m/rad]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term$
N_{pq}	$= -4.86E+00$	$[kg \cdot m^2/rad^2]$	$\%Added\ Mass\ Cross\ Term$
$N_{uu\delta_r}$	$= -6.15E+00$	$[kg/rad]$	$\%Fin\ Lift\ Moment$

$$\begin{aligned}
M_{\theta} &= -5.77E+00 \quad [kg \cdot m^2/s^2] \%Hydrostatic \\
M_q &= -6.87E+00 \quad [kg \cdot m^2/s] \%combined \ Term \\
Z_w &= -6.66E+01 \quad [kg/s] \%combined \ Term \\
Z_q &= -9.67E+00 \quad [kg \cdot m/s] \%combined \ Term \\
M_w &= +3.07E+01 \quad [kg \cdot m/s] \%combined \ Term \\
Z_{\delta s} &= -5.06E+01 \quad [kg \cdot m^2/s^2] \%Fin \ Lift \\
M_{\delta s} &= -3.46E+01 \quad [kg \cdot m^2/s^2] \%Fin \ Lift \\
Y_{\delta r} &= -5.06E+01 \quad [kg \cdot m^2/s^2] \%Fin \ Lift
\end{aligned}$$



감사의 글

정든 학교를 떠나 새로운 시작을 하려합니다. 처음 입학할 때의 설렘과 두려움에서 새로운 시작에 대한 목표와 기대감을 갖기까지 저에게 힘을 주신 많은 분들께 이 글을 통해 감사의 마음을 전해드리고자 합니다.

먼저, 오늘의 영광이 있기까지 저에게 많은 관심을 기울여주시고 날카로운 비판과 애정 어린 조언을 아끼지 않으셨던 저의 지도교수님 주문갑 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 연구와 강의로 바쁘신 가운데에도 제 학위 논문 심사를 맡아주시고 많은 조언을 해주신 김성운 교수님, 이원창 교수님께 감사드립니다.

5년 넘게 보낸 Control&Automation 연구실에서 많은 추억을 남겼습니다. 연구실을 만들고 초석을 다져준 진수형, 태용형 그리고 형으로서 때로는 친구로서 저를 대해준 태진형, 함께 지내며 저를 믿고 따라준 후배 동협과 부연, 창무에게도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

지금은 다른 곳에서 열심히 활동하고 있는 준영형, 현종형, 기주형, 상혁형, 태형형, 부건형, 찬효형, 재연형, 함께 밤샘하며 많은 추억을 남겼던 영준형, 우근혁, 우진형, 영선이, 제가 힘들 때 옆에서 응원해준 친구 성하, 성원, 동완, 영환, 성욱, 수민, 영모, 식사동기로서 서로에게 힘이 되어준 재식형, 종욱형, 재영형, 상호형, 성준에게도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

마지막으로 언제나 제 모든 힘의 원천이며 살아가는 원동력인 사랑하는 아버지, 어머니 그리고 공부한다는 핑계로 가족에게 소홀했던 부족

한 오빠를 대신한 든든한 동생 미남이, 늘 함께 기뻐하고 슬퍼해준 여자 친구 보라에게도 감사의 말을 전합니다.

이외에 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나 많습니다. 그 분들의 이름을 하나하나 되새기지 못함을 죄송하게 생각합니다.

제가 하고자하는 일에 대한 가치를 찾을 수 있도록 많은 분들이 도와주시고, 응원해주셨기에 지금 이렇게 감사의 글을 작성할 수 있는 영광스러운 기회를 얻었습니다. 앞으로 어떠한 길이 제 앞에 나타나더라도 저에게 힘을 주는 분들을 떠올리며, 그 길을 헤쳐나갈 수 있는 자신이 있습니다. 어디에서는 가치 있는 역할을 할 수 있는 사람이 되겠습니다. “모두들 감사드립니다.”

한 걸음 한 걸음 그저 걸어가기만 하면서
목적지에 다다를 수 있다고 생각해서는 안된다.
한 걸음 한 걸음 그 자체에 가치가 있어야 한다.

큰 성과는 가치 있는 작은 일들이 모여서 이뤄지는 것이다.

- A.단테 -