



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](#)

工學碩士 學位論文

무선인터넷 기반의  
무인선박 제어에 관한 연구

A Study on Control of an Unmanned Surface Vehicle  
based on the Wireless Internet



2011年 2月

韓國海洋大學校 大學院

運航시스템工學科 金 曉 一

工學碩士 學位論文

무선인터넷 기반의  
무인선박 제어에 관한 연구

A Study on Control of an Unmanned Surface Vehicle  
based on the Wireless Internet



指導教授 田 承 桓

2011年 2月

韓國海洋大學校 大學院

運航시스템工學科 金 曉 一

本 論 文 을 金 曉 一 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 陳 康 奎 印

委 員 文 聲 培 印

委 員 田 承 桓 印



2010年 12月 21日

韓國海洋大學校 大學院

# 목 차

<b>Abstract</b> .....	X
<b>제1장 서론</b> .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구 목표 및 내용 .....	3
<b>제2장 통신시스템</b> .....	5
2.1 HSDPA 무선인터넷 .....	5
2.1.1 HSDPA 프로토콜의 특징 .....	7
2.1.2 HSDPA 무선인터넷 품질 측정 테스트 .....	8
2.2 2.4GHz RF Backup 통신시스템 .....	14
<b>제3장 무인선박 선체 제작</b> .....	17
3.1 선형 및 제원 .....	17
3.2 추진시스템(Propulsion System) .....	23
3.2.1 BLDC 모터 .....	24
3.2.2 전자변속기(Electric Speed Controller, ESC) .....	26
3.2.3 프로펠러(Propeller) .....	29
3.3 조타시스템(Steering System) .....	30
3.3.1 서보모터(Servo Motor) .....	31
3.3.2 서보제어기(Servo Controller) .....	34

3.4 냉각시스템(Cooling System) .....	35
<b>제4장 무인선박 제어시스템</b> .....	<b>39</b>
4.1 센서시스템(Sensor System) .....	41
4.1.1 카메라를 이용한 전방 감시 .....	41
4.1.2 GPS 및 Heading Sensor .....	44
4.1.3 온도센서 .....	47
4.2 원격제어 모드(Remote Control Mode) .....	50
4.2.1 원격제어 모드 설계 .....	50
4.2.2 해상 실험 및 결과 .....	55
4.3 자율운항 모드(Autonomous Navigation Mode) .....	60
4.3.1 선박 조종운동 모델 .....	61
4.3.2 Nomoto 응답 모델 .....	64
4.3.3 무인선박 모델의 파라미터 추정 .....	65
4.3.4 디지털 PID 제어기 설계 .....	71
4.3.5 해상 실험 및 결과 .....	77
<b>제5장 결론</b> .....	<b>79</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>82</b>

# 표 목차

Table 2.1 The Features of Different Mobile Communications .....	5
Table 2.2 The Performance Comparison between WCDMA and HSDPA ...	7
Table 2.3 Specification of Mobile Router .....	11
Table 2.4 Results of the Internet Quality Tests .....	13
Table 3.1 List of Equipments Installed on the USV .....	18
Table 3.2 $\Delta d$ according to $C_b$ .....	21
Table 3.3 Specification of the BLDC Motor .....	25
Table 3.4 Specification of the Electric Speed Controller .....	27
Table 3.5 Specification of the Propeller .....	30
Table 3.6 Specification of the Servo Motor .....	33
Table 3.7 Specification of the PMP-400 Pump .....	38
Table 4.1 Data Sizes according to the Image Pixels .....	42
Table 4.2 Specification of GH2183 .....	45
Table 4.3 Specification of USB-6210 .....	49
Table 4.4 RPM and Average Speed according to the Pulse Width .....	51
Table 4.5 Rudder Angle according to the Pulse Width .....	51
Table 4.6 The Calculation of $K$ , $T_I$ , $T_D$ .....	76
Table 4.7 Waypoints .....	77

# 그림 목차

Fig. 1.1 Unmanned Vehicle of Google .....	2
Fig. 1.2 Application of USV .....	4
Fig. 1.3 Configuration of USV System based on the Wireless Internet .....	4
Fig. 2.1 The Advancement of Mobile Communication .....	8
Fig. 2.2 The Internet Quality Test Sites .....	9
Fig. 2.3 Configuration for the Internet Quality Test .....	10
Fig. 2.4 The Result of Test_1 .....	12
Fig. 2.5 Block Diagram of a Backup Communication System .....	14
Fig. 2.6 Flow Chart for Changing Control Modes .....	15
Fig. 2.7 2.4GHz Transmitter & Receiver Set .....	16
Fig. 2.8 Range of 2.4GHz RF Communication System .....	16
Fig. 3.1 A Model Ship .....	19
Fig. 3.2 Self-made USV .....	22
Fig. 3.3 Block Diagram of the Propulsion System .....	23
Fig. 3.4 BLDC Motor with Water Cooling Jacket .....	25
Fig. 3.5 Electric Speed Controller with Water Cooling Heat-sink .....	26
Fig. 3.6 Configuration for Measuring the Propulsion System .....	28
Fig. 3.7 RPM of BLDC Motor according to the PWM .....	28
Fig. 3.8 Propeller .....	29
Fig. 3.9 Block Diagram of the Steering System .....	30
Fig. 3.10 The Principle of Servo Motor .....	32




Fig. 3.11 Servo Motor for the Steering System .....	33
Fig. 3.12 Servo Controller .....	34
Fig. 3.13 Temperature Measurement of the BLDC Motor .....	36
Fig. 3.14 Block Diagram of Cooling System .....	37
Fig. 3.15 Motor Pump for Cooling System .....	37
Fig. 4.1 Block Diagram of the USV System .....	40
Fig. 4.2 Image Grabbing Program using LabVIEW 8.6 .....	43
Fig. 4.3 Principle of Heading Sensor .....	44
Fig. 4.4 GPS & Heading Sensor(GH2183) .....	44
Fig. 4.5 GH2183 Data Acquisition Program using LabVIEW 8.6 .....	46
Fig. 4.6 LM35DH .....	47
Fig. 4.7 LM358 .....	47
Fig. 4.8 Non-inverting Amplifier Circuit using LM35DH and LM358 .....	47
Fig. 4.9 Non-inverting OP Amp .....	48
Fig. 4.10 DAQ Board(NI USB-6210) .....	49
Fig. 4.11 Remote Control Program using LabVIEW(Front Panel) .....	52
Fig. 4.12 Remote Control Program using LabVIEW(Block Diagram) .....	53
Fig. 4.13 Remote Control Program using LabVIEW(VI Hierarchy) .....	54
Fig. 4.14 USV Remote Control Test Site .....	55
Fig. 4.15 The Internet Quality Test of Control Station PC .....	56
Fig. 4.16 The Internet Quality Test of USV PC .....	56
Fig. 4.17 Trajectory of Remote Control USV .....	57
Fig. 4.18 Data Log File .....	57
Fig. 4.19 History of Rudder Angle during Remote Control .....	58
Fig. 4.20 History of Pulse Width during Remote Control .....	58
Fig. 4.21 History of Temperatures of BLDC Motor & Sea Water .....	59

Fig. 4.22 Continuous Still Images .....	59
Fig. 4.23 Harbour Patrol using an USV at Port Kiel, German .....	60
Fig. 4.24 6DOF Movement of Ship .....	61
Fig. 4.25 Ship's Coordination .....	62
Fig. 4.26 ARX Model .....	66
Fig. 4.27 Trajectory of USV during Turning Circle Test .....	66
Fig. 4.28 Turning Rate( $r_s$ ) according to Rudder Angle( $\delta$ ) .....	67
Fig. 4.29 FFT Analysis of Turning Rate( $r_s$ ) .....	67
Fig. 4.30 Turning Rates( $r_s, r_f$ ) before and after Filtering .....	68
Fig. 4.31 Model Adjustment Technique .....	69
Fig. 4.32 Comparison between $r_f$ and $r$ for Verification of Discrete Model .....	70
Fig. 4.33 PID Controller for Autonomous Navigation of USV .....	71
Fig. 4.34 Ziegler-Nichols Closed Loop Tuning Method using Relay Feedback .....	74
Fig. 4.35 Ultimate Oscillation of Relay Feedback System .....	75
Fig. 4.36 Digital PID Controller .....	76
Fig. 4.37 Trajectory during Autonomous Navigation of USV .....	78
Fig. 4.35 History of Rudder Angle during Autonomous Navigation .....	78

# A Study on Control of an Unmanned Surface Vehicle based on the Wireless Internet

Hyo-I1, Kim

Department of Navigation System Engineering  
*Graduate School of  
Korea Maritime University*



Abstract

Unmanned system has been introduced to many fields. In the beginning, the majority of the system consisted of simple and repetitive automation technology that can perform tasks that are difficult or dangerous for human. Recently, however, other systems such as unmanned car, aircraft, submarine, ship have been researched and developed thanks to the advancement of technology. Google, the world's largest Internet searching company, has developed unmanned car and succeeded in test running. As can be seen here, unmanned system technology is ubiquitous in our reality.

So far, researches on unmanned system have been mostly performed at national level for military purposes or by some universities due to high development cost. However, the fact that such researches have been

performed by commercial enterprises such as Google implies that the unmanned system technology will be commercialized before long.

Meanwhile, researches on USV are behind those on other unmanned systems, and Korea is no exception. However, surveys on market forecasts of USV indicate that such researches are urgent. First, American market forecast agency, Visiongain, estimated in 2008 that the market size of USV in 2009 will amount \$160 million. Secondly, Moire Inc. estimated in 2003 that the market size in 2011 will be about 300 ships and \$1.8 billion. Finally, the most recent survey performed by Research And Markets in 2010 estimated that the market size for the next decade (2010–2019) will range from 1,144 ships (\$2.3 billion) to 1,870 ships (\$3.8 billion). Altogether, this has been the background for our research on USV.

When USV carries out its mission at sea, every action including status check is taken by radio communication. Thus, selecting an appropriate means of radio communication is a crucial step. So far, VHF and/or UHF communication modem have been used for controlling USV, which need a separate operation console. Also, their communication range is greatly affected by antenna height, which decreases the mobility of control station and increases the development cost.

Thus, in this study, I would like to develop 'wireless Internet-based USV' that can communicate without such operation console and used for surveillance of major shore facilities and observation of marine environment. Control station will move the USV connected via wireless Internet to desired position. At the same time, the ship will transmit the data gathered by equipped camera and sensors to the station to enable real-time monitoring.

In order to develop such wireless Internet-based USV, we have applied

wireless Internet service that has a globally established standard for communication and commercially available. Wireless Internet services that are currently available in Korea are WLAN with IEEE 802.11 b, g, n standards, WiBro (Mobile WiMax) with IEEE 802.16e standard and HSDPA that uses 3.5-th generation mobile radio communication network. WLAN is theoretically very fast (54Mbps) but has a very small coverage of 100m, and the lack of hand-over feature is its major weakness. WiBro has hand-over feature and can be used while moving, but its theoretical coverage is still limited to 1km. On the other hand, HSDPA has rather slow (theoretical) download speed of 14.4Mbps but a wide coverage as it uses mobile radio communication network.

Meanwhile, in order to apply HSPDA wireless to USV, it is necessary to figure out its actual Internet speed and service coverage at sea. For this, I have performed quality test of HSDPA wireless Internet during anchoring and navigation. As a result, the average download speed and average upload speed were 4.87KB/sec and 6.05KB/sec, respectively. Also, ping test result showed that both download and upload were free of data delay or loss, indicating that the data transmission was slow but very stable. Another interesting fact was that, although I had expected before test that Internet speed would depend on distance, the actual speed of HSDPA did not differ very much depending on distance.

It is important to note that upload speed is more important than download speed in operating USV. The data sent from control station to USV are text data that do not exceed 1KB, so the average download speed of 4.87KB is more than enough. However, data from various sensors such as GPS and camera image should be transmitted from the ship to the station, and the camera image data far exceed the average upload speed of 6.05KB. Thus,

when designing communication program for USV, image size and transmission interval of image data should be considered. In this study, I have set the image size to be 105 x 75 pixels and the interval to be 3 sec. to resolve this problem.

Although I could verify the potential of HSDPA wireless Internet in controlling USV, it is thought to be more or less slow to be commercialized. However, once the 4th-generation mobile communication, LTE (Long Term Evolution) is commercialized, theoretical speed of HSDPA will increase by about 12 times. Moreover, the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs as well as 3 major telecom companies have been installing 45 mobile communication repeaters in coastal areas, islands and lighthouses since 2008, and have made an agreement that they will further install repeaters in 49 lighthouses until 2013 so that mobile phones can be used within distance of 30~50km. This will, in turn, increase the coverage of HSDPA. Thus, control of USV by HSDPA is thought to be practical in Korea's territorial waters.

Another feature of this study, along with the use of wireless Internet, is autonomous navigation. The goal of USV is not only to protect people from marine danger but also to save cost. Thus, USV without autonomous navigation feature does not have much economic profit compared to manned ship, as it should be monitored and controlled by someone at the control station. In this study, autonomous navigation is that the control station sets the waypoints of the ship through Internet, compares the ship position gathered by GPS and true course obtained from waypoint to heading gathered by heading sensor and enter it to controller, which will then autonomously adjust the rudder angle and navigate toward the waypoint.

In this study, in order to implement autonomous navigation, I have assumed the unmanned ship as discrete system and used ARX model (Autoregressive model with eXternal input) as linear I/O model of the discrete system. For estimating parameters of ARX model, I have used rudder angle ( $\delta$ ) and turning circle angular speed ( $r$ ) data that were gathered from the ship's turning circle test. Also, digital PID controller was applied to discrete system for autonomous navigation of the ship. Designing a digital PID controller requires  $K$  (Proportional Gain),  $T_I$ (Integral Time) and  $T_D$ (Derivative Time), which were determined by Z-N tuning method. The wireless Internet-based USV was then successfully verified by actual tests at sea.



## Abbreviations

<b>ASCII</b>	American Standard Code for Information Interchange
<b>ARX</b>	AutoRegresive model with eXternal input
<b>BLDC</b>	Brushless Direct Current
<b>CMOS</b>	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
<b>COLREG</b>	Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea
<b>DAQ</b>	Data AcQuisition
<b>DOF</b>	Degree of Freedom
<b>ESC</b>	Electric Speed Controller
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HSDPA</b>	High-Speed Downlink Packet Access
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>MEMS</b>	MicroElectroMechanical Systems
<b>OP Amp</b>	Operational Amplifier
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>RADAR</b>	Radio Detecting and Ranging
<b>RPM</b>	Revolution Per Minute
<b>SOG</b>	Speed Over Ground
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency



<b>USV</b>	Unmanned Surface Vehicle
<b>VHF</b>	Very High Frequency
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>WiBro</b>	Wireless Broadband
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

최근 많은 분야에 무인시스템이 도입되고 있다. 초기에는 산업분야에서 인간이 하기 힘들거나 위험한 작업을 대신하는 단순 반복적인 자동화기술이 대부분이었으나, 최근에는 전자, 통신 등의 기술발전에 힘입어 무인자동차, 무인항공기, 무인잠수정, 무인선박 등이 연구 개발되고 있다. 대표적인 무인선박 연구개발 사례를 살펴보면 다음과 같다.

James Colito는 그의 석사학위 논문에서 COLREGs에 따른 무인선박의 충돌회피 방법에 관하여 연구하였다[James Colito, 2007]. Michael Benjamin 등도 역시 COLREGs에 따른 충돌회피 기법을 연구하였으며, 그들이 직접 제작한 카약 타입의 무인선박을 이용하여 Head-on, Crossing Situation에 대한 실험을 수행한바 있다[Michael Benjamin et al, 2007]. 또한, Jacoby Larson 등은 그들이 개발한 SSC San Diego USV를 이용하여 자율항법 및 장애물 회피를 위한 기법을 연구하였다[Jacoby Larson et al, 2006]. Eric T. Steimle 등은 해양환경 모니터 및 평가수단으로써 활용하기 위한 무인선박을 개발하였다[Eric T. Steimle et al, 2006]. Jens Veers 등은 다목적 무인선박 개발을 위하여 전 세계적으로 연구개발되고 있는 무인선박의 사례와 주요 특징을 정리하였다[Jens Veers, 2006].

한편, 세계최대 인터넷 검색기업인 Google에서도 무인자동차를 개발하여 최근 도로 시험주행에 성공하였을 만큼 무인시스템 기술은 이제 미래가 아닌 우리의 현실 속에 있는 기술이 되었다.



Fig. 1.1 Unmanned Vehicle of Google

그 동안 무인시스템에 관한 연구는 많은 개발비용이 들어가는 만큼 군사 목적으로 국가적 차원에서 이루어지거나 일부 대학들의 연구차원에서 이루어졌다. 그런데 Google과 같은 상업기업에서 그러한 연구를 수행했다는 것은 무인시스템 기술이 멀지 않아 상용화될 것이라는 것을 암시한다.

한편, 무인선박 분야는 다른 무인시스템 분야보다 연구개발 수준이 뒤쳐져 있으며, 그러한 현상은 우리나라도 마찬가지이다. 그러나 무인선박과 관련한 시장전망 조사결과를 살펴보면, 무인선박 연구개발을 서둘러야 함을 알 수 있다.

먼저, 미국의 시장전망 조사기관인 Visiongain이 2008년에 예측한 2009년 미국의 무인선박 시장 규모는 1억 6천만 달러였다[Visiongain, 2008]. 다음으로 Moire Inc.가 2003년에 예측한 2011년 미국의 무인선박 시장 규모는 약 300척, 18억 달러였다[Moire Inc. 2003]. 마지막으로 가장 최근의 시장 전망조사인 Research And Markets이 2010년 초에 예측한 2010년부터 2019년까지 10년간 세계 무인선박 시장규모는 적게는 1,144척 23억 달

러에서 많게는 1,870척 38억 달러였다[Research And Markets, 2010].

이러한 무인선박 개발의 필요성에 따라, 기초연구로서 자율운항을 위한 알고리즘 개발[김과 전, 2009]과 WiFi 무선랜을 이용한 원격조종 및 자율운항이 가능한 듀얼모드 무인선박 개발[김과 전, 2010]을 발표한 바 있다. 그러나 이 때 제작한 무인선박들은 1미터 미만의 초소형으로 무인선박 개발을 위한 기반연구의 성격이 강하였다.

본 논문은 전체 5장으로 구성되어있고, 2장 이하의 논문구성은 다음과 같다.

제 2장에서는 무인선박에 적용된 HSDPA 무선인터넷에 대하여 기술하며, 제 3장에서는 상선이나 레저용 보트와는 확연히 다른 추진시스템과 조타시스템으로 구성된 무인선박의 제작과정을 기술한다. 제 4장에서는 제 2장, 3장을 통해서 제작한 무선인터넷 기반의 무인선박을 제어하기 위한 제어시스템 및 센서시스템 설계에 관하여 기술하며, 해상 실험을 통해서 유효성을 검증한다. 마지막으로 제 5장에서는 실험을 통해서 드러난 문제점을 토대로 추후 연구 과제를 도출하고 결론을 맺는다.

## 1.2 연구 목표 및 내용

기존에 연구 개발된 무인선박들의 대부분은 무인선박의 통제를 위해서 VHF 또는 UHF 통신모뎀을 이용한 전용의 운용 콘솔이 필요하였다. 그러나 본 연구에서는 그러한 전용 콘솔 없이도 인터넷이 되는 언제 어디서나 항만 등 주요 해안 시설물의 감시와 해양환경 관측에 활용할 수 있는 ‘무선인터넷 기반의 무인선박’을 개발하고자 한다. 즉, Fig. 1.2와 같이 육상제어국(Control Station)은 무선인터넷으로 연결된 무인선박을 제어하여 원하는 위치로 이동시키며, 동시에 무인선박은 탑재된 카메라와 각

중 센서로부터 획득한 데이터를 육상제어국에 전송하여 실시간 모니터링 하는 것이다. Fig. 1.3은 무선인터넷 기반의 무인선박 시스템을 개략적으로 나타낸 것이다.

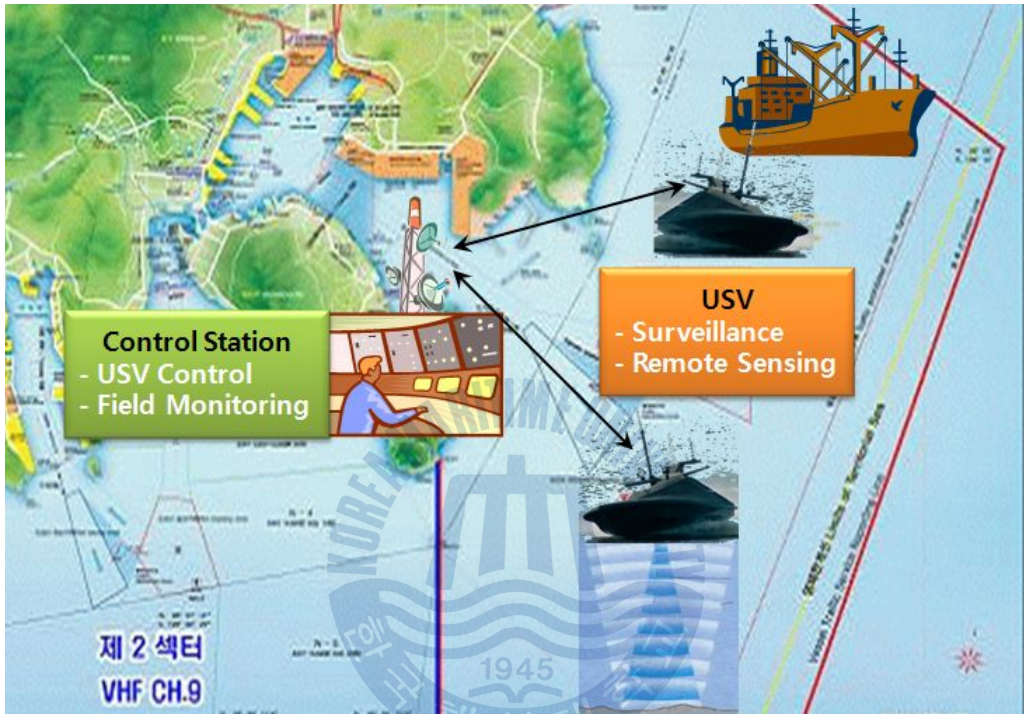


Fig. 1.2 Application of USV

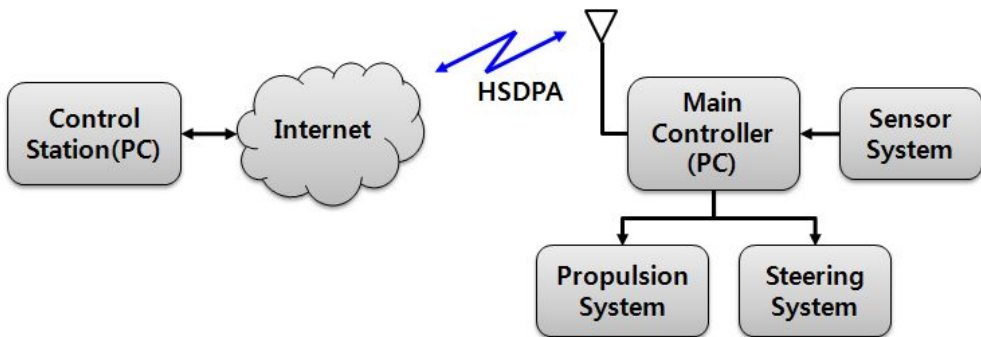


Fig. 1.3 Configuration of USV System based on the Wireless Internet

## 제 2 장 통신시스템

‘무선인터넷 기반의 무인선박’을 개발하기 위해서 고려해야 할 가장 중요한 요소는 무선인터넷의 이용범위와 속도이다. 따라서 2.1절에서는 몇몇 무선인터넷 규격에 대한 비교와 함께 연구목표에 가장 부합하는 ‘HSDPA 무선인터넷’에 대하여 기술하며, 2.2절에서는 무선인터넷 연결이 끊어지거나 프로그램에 오류가 발생할 경우 무인선박의 회수를 위한 Backup 통신시스템에 대하여 기술한다.

### 2.1 HSDPA 무선인터넷

통신기술의 발달에 힘입어 세계적으로 다양한 표준의 무선인터넷 기술이 있다. 현재 우리나라에서 이용 가능한 무선인터넷은 HSDPA, WiBro, WLAN이 있으며[이영우, 2006], 이들 특징을 Table 2.1에 나타낸다.

**Table 2.1 The Features of Different Mobile Communications**

	HSDPA	WiBro		WLAN
		Mobile WiMAX	Fixed WiMAX	
Max. Speed	14.4Mbps	~50Mbps	~70Mbps	11~54Mbps
Ave. Speed	500Kbps	1Mbps	7Mbps	1Mbps
Mobility	High	Medium	Slow	Indoor
Hand Over	Possible	Possible	Uncertain	Impossible
Cell Coverage	3 ~ 4km	1km	~ 50km	50 ~ 100m

WLAN은 초고속 인터넷은 가능하지만, 통신범위가 100m 내외로 좁고 정지상태에서만 이용 가능하므로 무인선박에 적용이 불가능하다. WiBro는 WLAN 보다는 느리지만 충분히 빠른 인터넷 속도와 고속이동 중에도 이용이 가능하며, 기지국간 핸드오버가 가능한 장점이 있다. 하지만 커버리지가 1km내외로 좁으며 현재 서울 등 주요도시에서만 서비스되고 있다. 반면에 HSDPA는 인터넷 속도는 느리지만, 커버리지가 넓으며 전국 어디서나 이용이 가능하다.

또한 국토해양부와 이동통신 3사는 '08년부터 전국 연안 및 도서, 유·무인 등대에 45기의 이동통신 중계기를 설치하여 왔으며, 2013년까지 전국 연안의 도서를 중심으로 49개 유·무인 등대에 중계기를 추가 설치하여 전국 연안으로부터 30~50km 거리에서도 휴대전화 사용이 가능하도록 협약을 체결하였다. 결국 HSDPA의 사용범위도 그 만큼 늘어날 것이다 [국토해양부, 2010]. 이러한 이유로 본 연구에서는 무인선박의 제어를 위해 HSDPA 무선인터넷을 채택하였다.

HSDPA가 이동통신망을 이용하므로, HSDPA의 커버리지는 우리나라 이동통신망의 커버리지와 동일하다. 따라서 본 연구를 통해서 제작한 무인선박의 통신 가능 범위도 이론상으로는 우리나라 이동통신망의 커버리지와 동일하다. 국내 이동통신사중 한 곳인 K사는 이동통신망의 커버리지를 공식적으로는 셀 반경 3~4km로 발표하고 있다. 그러나 해상에서 휴대전화 사용자의 경험에 의하면 육지에서 10~20km 까지도 휴대전화 사용이 가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 무인선박에 HSDPA 무선인터넷을 적용하기 위해서는 HSDPA의 특징을 파악하는 것과 더불어 실제 해상에서 무선인터넷의 품질을 측정할 필요가 있다.

### 2.1.1 HSDPA 프로토콜의 특징

본 연구에서 무인선박 제어를 위한 통신수단은 국내 이동통신회사에서 상용 서비스하고 있는 고속 무선데이터 패킷통신 규격의 하나인 'HSDPA(High-Speed Downlink Packet Access, 하향고속화패킷접속)' 방식의 무선인터넷이다. HSDPA는 3세대 서비스인 WCDMA(Wideband Code Division Multiple Access)보다 한 단계 더 발전한 비동기식의 3.5세대 이동통신 서비스이다.

이것은 이동통신을 이용한 인터넷 접속이 증가함에 따라 정보의 흐름이 하향에 집중되는 현상을 보이는데, 이를 해결하기 위해 하향의 전송 규격을 보완한 것으로 적응형 변조 및 부호화(Adaptive Modulation and Coding) 방식, H-ARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) 기술 등을 채용하고 있다[R. Love et al, 2004]. HSDPA는 '하향고속화패킷접속'이라는 명칭에서 알 수 있듯이 다운로드 속도가 WCDMA에 비해서 최대 7배나 빠르며, 그 외에도 몇 가지 기술적으로 진보된 특징을 갖고 있다.

Table 2.2 The Performance Comparison between WCDMA and HSDPA

	WCDMA	HSDPA
Channel	Dedicated Channel	Shared Channel
Modulation	QPSK	Adaptive Modulation and Coding (QPSK or 16QAM)
Max Speed	2Mbps	14.4Mbps
Frame Size	10ms	2ms



Table 2.2는 HSDPA와 WCDMA 프로토콜의 특징을 비교한 것이다[여운영, 2007]. 또한 Fig. 2.1은 앞서 언급한 WCDMA, HSDPA의 이해를 돕기 위해 이동통신 기술의 발전과정을 요약한 것이다.

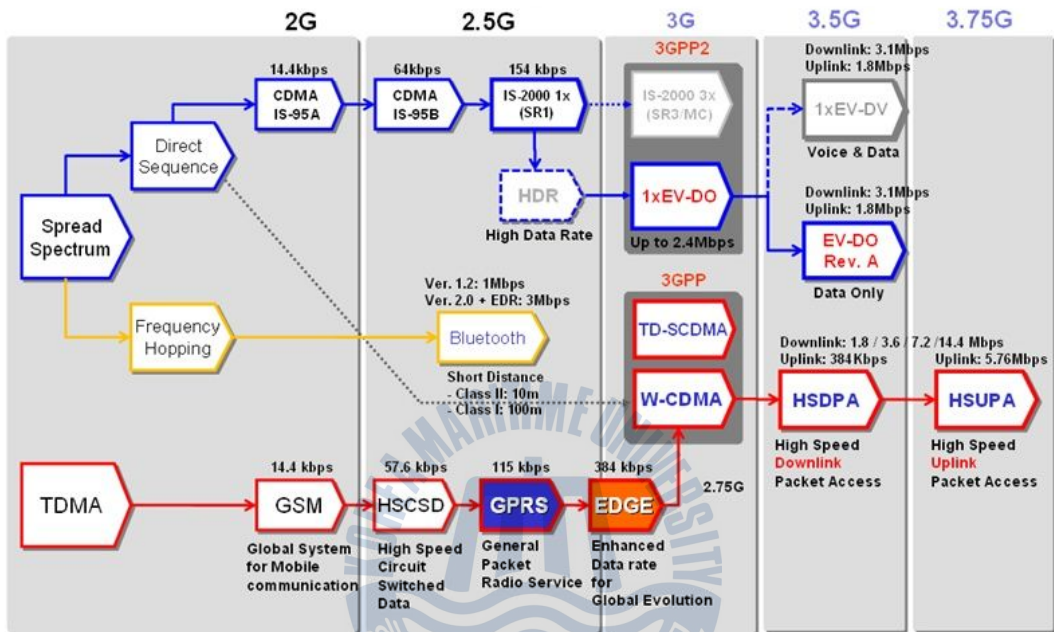


Fig. 2.1 The Advancement of Mobile Communication

### 2.1.2 HSDPA 무선인터넷 품질 측정 테스트

Table 2.1에서 볼 수 있듯이 K사가 발표한 HSDPA의 이론상 평균 속도는 500Kbps이다. 한편, 무인선박은 해상에서 사용되는 만큼 육상과는 환경이 다를 수밖에 없다. 실제로 육상에서는 이동통신망 기지국(Base Station) 외에도 음영지역을 해소하기 위한 간이중계기(Repeater)가 곳곳에 설치된다. 따라서 HSDPA를 이용한 무선인터넷의 실제 속도를 파악하고 해상에서 얼마나 멀리까지 무선인터넷을 사용할 수 있는지 알아보기 위해서 무선인터넷 품질 측정 테스트가 필수적이다.

인터넷 품질 테스트는 대조군으로 사용하기 위한 실험을 비롯하여, 무선선박의 운항조건을 고려하여 해상에서 정박 중일 때 1곳, 실제로 항해 중일 때 2곳 등 총 4곳에서 진행하였다.

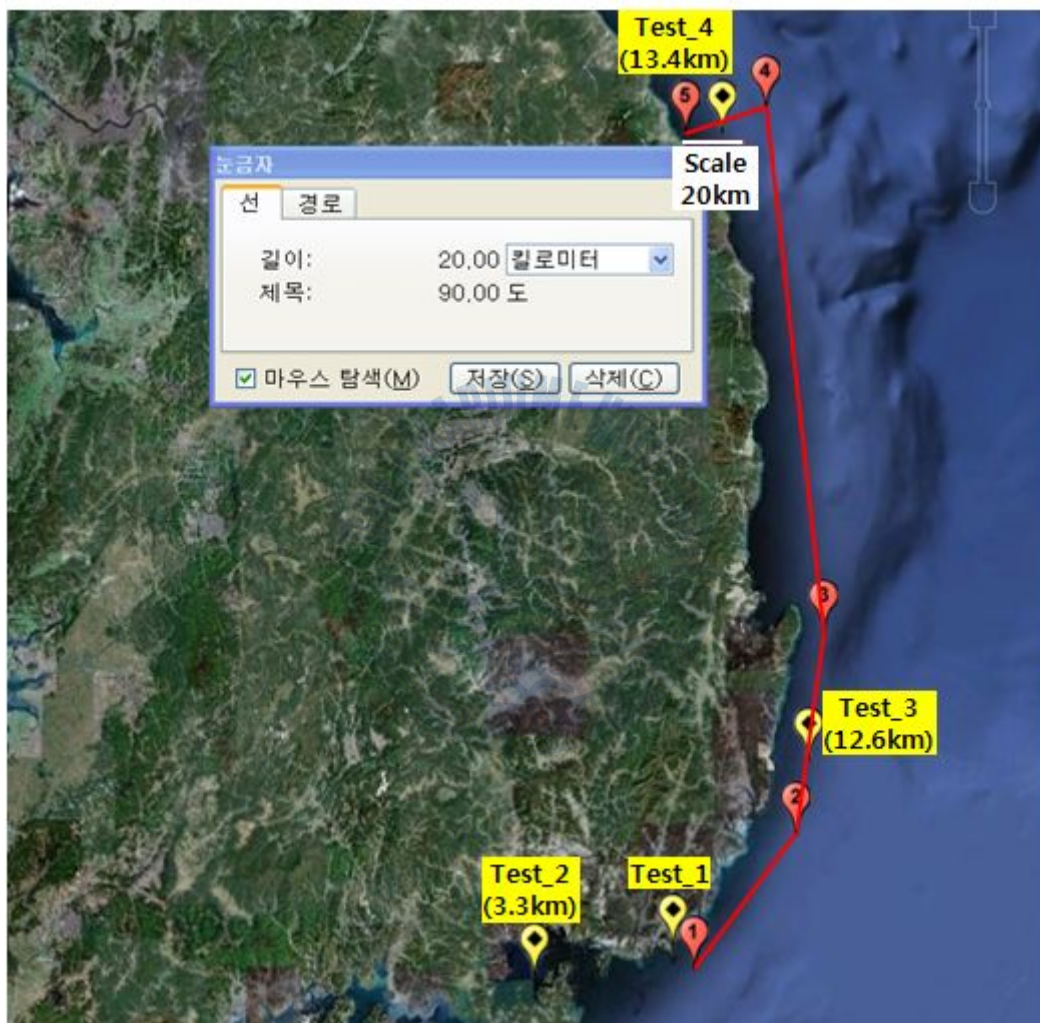


Fig. 2.2 The Internet Quality Test Sites

Fig. 2.2는 HSDPA를 이용한 무선 인터넷 품질 측정을 실시한 실제 장소를 나타낸 것으로, 노란색으로 표시된 것이 실제 인터넷 품질 테스트

가 실시된 곳을 의미한다. 노란색 지점의 괄호 안 숫자는 테스트 지점과 가장 가까운 육지까지의 거리를 의미한다. 또한, 빨강색 지점 및 실선은 2010년 9월 13일부터 9월 16일까지 한국해양대학교 실습선 한바다호의 부산-동해 연안항해의 주요 변침점과 코스라인을 나타낸다.

HSDPA 무선인터넷은 국내 이동통신사중 가장 많은 가입자와 기지국을 보유하고 있는 S사의 무선인터넷 서비스를 이용하였고, 무선인터넷 품질 측정을 위한 시스템을 Fig. 2.3과 같이 구성하였다. 그림에서 GPS는 실험 장소 및 정확한 시각을 측정하기 위한 것이며, Mobile Router는 기지국과 휴대폰 사이에 연결된 HSDPA 인터넷 신호를 WiFi 신호로 변환하여 노트북, PDA 등에 사용할 수 있게 해주는 장비로서 주요 사양은 Table 2.3과 같다. 인터넷 품질 측정은 (주)벤치비(www.benchbee.co.kr)에서 실시하였다.

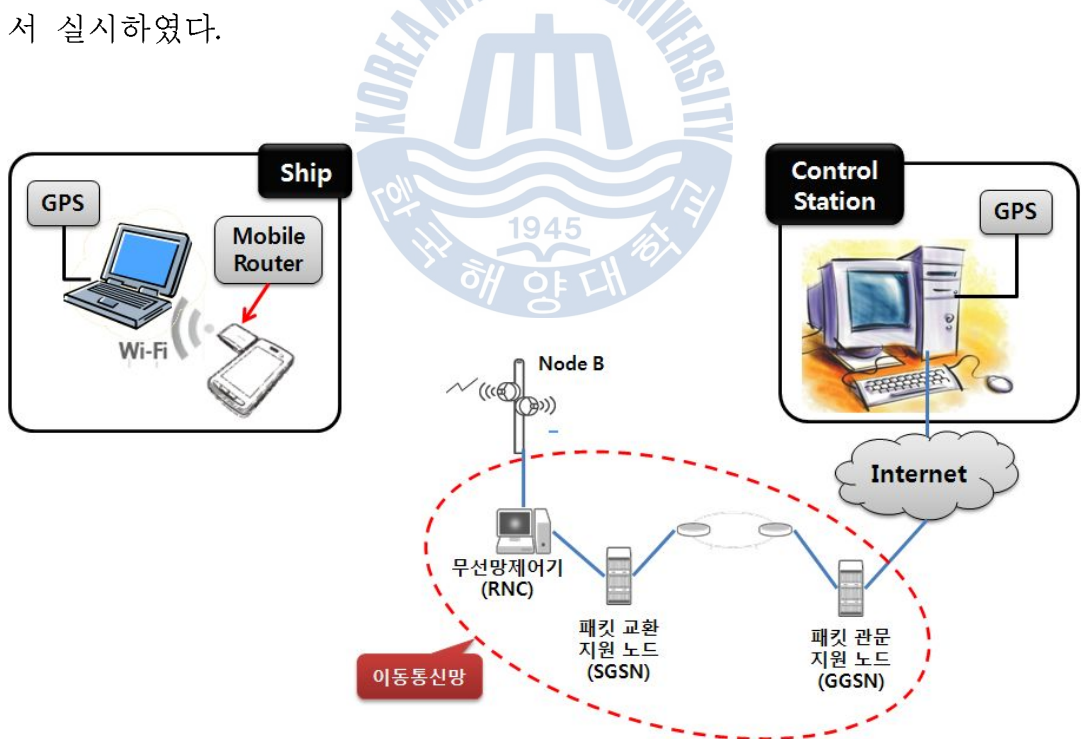


Fig. 2.3 Configuration for the Internet Quality Test

**Table 2.3 Specification of Mobile Router**

Item	Feature
Wireless Standard	IEEE 802.11 b/g
Size	29 × 56 × 8.8mm
Frequency	2.4GHz
Rx Sensibility	-78dBm in 54Mbps, -93dBm in 6Mbps
Tx Power	15dBm ± 2dB
Modulation	OFDM, CCK, BPSK, QPSK
Security	64/128bit WEP, WPA-PSK, WPA2PSK
802.11g Speed	54, 48, 36, 24, 18, 9, 6 Mbps
Antenna	Chip Type Helical Antenna

또한, 실질적인 무인선박의 원격제어 가능성 여부를 파악하기 위해서 육상제어국의 타각제어 명령시각과 무인선박의 프로그램의 동작시각의 시간차를 알아보는 실험도 병행하였다.

### (1) 무선인터넷 품질 테스트\_1

첫 번째 테스트는 해상에서의 인터넷 품질 테스트와 비교하기 위한 대조군으로 활용하기 위해서 육상에서 실험하였다. 테스트는 2010년 9월 9일 14시 50분경 하였으며, 장소는 Fig. 2.2에서 Test\_1로 표시된 곳으로 한국해양대학교 해사대학관 옥상이다. 테스트 결과 다운로드 속도는 43.63kbps(5.45KB/s), 업로드 속도는 59.75kbps(7.47KB/s) 이었으며, Ping 테스트 결과 데이터 지연이나 손실이 없는 것으로 나타났다. Fig. 2.4는 (주)벤치비(www.benchbee.co.kr)에서 실시한 Test\_1의 인터넷 품질 테스트 결과이다.

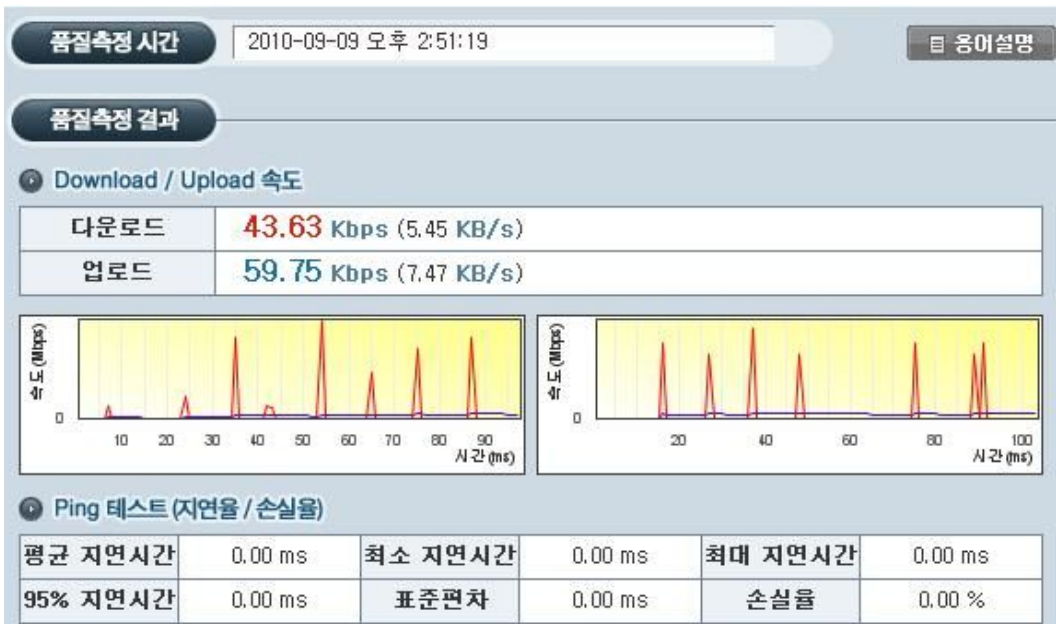


Fig. 2.4 The Result of Test\_1

## (2) 무선인터넷 품질 테스트\_2

두 번째 테스트는 한국해양대학교 실습선 “한나라호”가 진해만에 정박 중일 때인 2010년 9월 6일 19시경 진행되었다. 실험 위치는 Fig. 2.2에서 Test\_2로 표시된 곳으로 선박에서 가장 가까운 해안까지의 거리는 약 3.3km이었다. 테스트는 총 3차례 실시하였으며, 평균 다운로드 속도는 38.25kbps(4.78KB/s), 업로드 속도는 41.67kbps(5.21KB/s)이었으며, Ping 테스트 결과 데이터 지연이나 손실이 없는 것으로 나타났다.

## (3) 무선인터넷 품질 테스트\_3, 4

세 번째와 네 번째 테스트는 한국해양대학교 실습선 “한바다호”가 2010년 9월 13일부터 9월 16일까지 부산-동해-부산 연안 실습 항해중 진행되었다. 실험 위치는 Fig. 2.2에서 Test\_3과 Test\_4로 표시된 곳으로

Test\_3은 9월 13일 부산을 출항하여 동해로 향해하던 중이며 Test\_3 지점에서 가장 가까운 해안까지의 거리는 약 12.6km이었다. Test\_4는 9월 15일 동해를 출항하여 부산으로 향해하던 중이며 두 차례 실험하였다. Test\_4 지점에서 가장 가까운 해안까지의 거리는 각각 12.0km와 13.4km이었다. Test\_3 지점에서 실험결과 다운로드 속도는 39.35kbps(4.92KB/s), 업로드 속도는 62.42kbps(7.80KB/s)이었고, Test\_4 지점에서 실험결과 평균 다운로드 속도는 37.46kbps(4.68KB/s), 업로드 속도는 45.95kbps(5.74KB/s) 이었다. 두 지점 모두 Ping 테스트 결과 데이터 지연이나 손실이 없는 것으로 나타났다.

**Table 2.4 Results of the Internet Quality Tests**

No	Test Sites	Date /Time	Distance from shore (km)	Speed(KB/s)		Ping Test	
				Download	Upload	Time Delay	Data Loss
1	Test_1	2010-09-09 14:51:19	0	5.45	7.47	0ms	0.0%
2	Test_2	2010-09-06 19:04:23	3.3	5.45	5.37		
3		2010-09-06 19:17:25		4.64	4.67		
4		2010-09-06 19:20:07		4.25	5.59		
5	Test_3	2010-09-13 16:25:02	12.6	4.92	7.80		
6	Test_4	2010-09-15 17:13:33	12.0	5.33	7.37		
7		2010-09-15 19:05:21	13.4	4.04	4.11		
<b>Average</b>				<b>4.87</b>	<b>6.05</b>	<b>0ms</b>	<b>0.0%</b>

Table 2.4는 HSDPA 인터넷 품질 테스트 결과를 정리한 것이다. 테스트 결과 기지국으로부터의 거리에 상관없이 HSDPA의 이론상 속도인 500kbps의 약 7.8% 수준으로 나타났으며, 해안으로부터 약 10km까지는 데이터 지연이나 손실 없이 최소한 30kbps의 속도로 인터넷을 이용할 수 있는 것으로 파악되었다.

## 2.2 2.4GHz RF Backup 통신시스템

무선인터넷을 이용하여 무인선박을 제어하는 도중에 인터넷 접속이 끊어지거나 프로그램에 오류가 발생할 경우 무인선박의 제어가 불가능해진다. 그러한 상황에서 무인선박을 안전하게 회수하기 위해서 Fig. 2.5와 같이 2.4GHz RF 송수신기를 이용하여 Backup 통신시스템을 구현하였다.

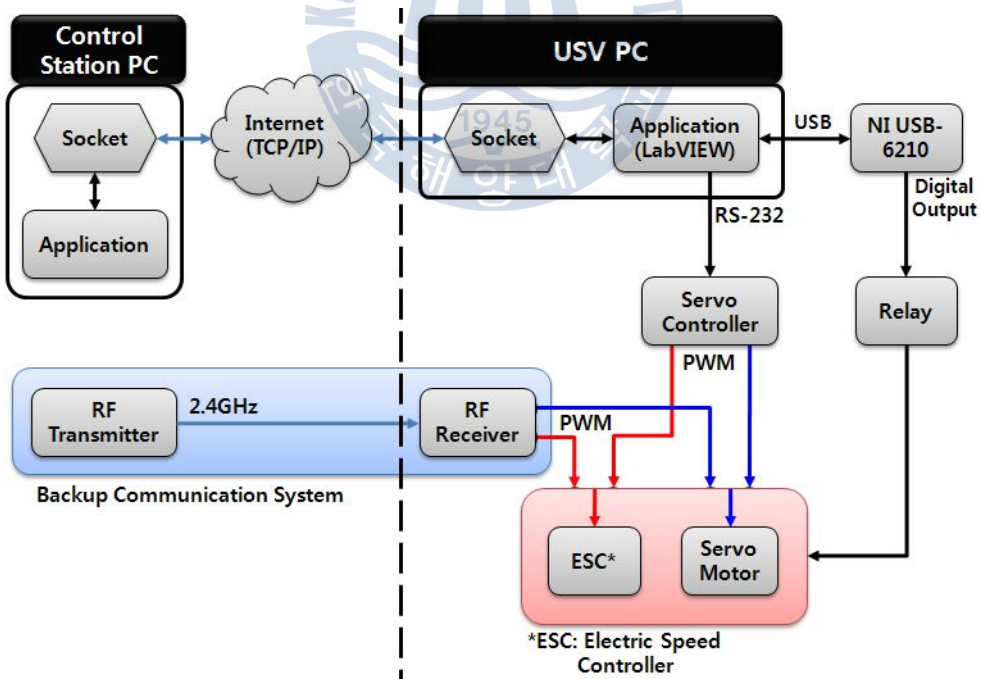


Fig. 2.5 Block Diagram of a Backup Communication System

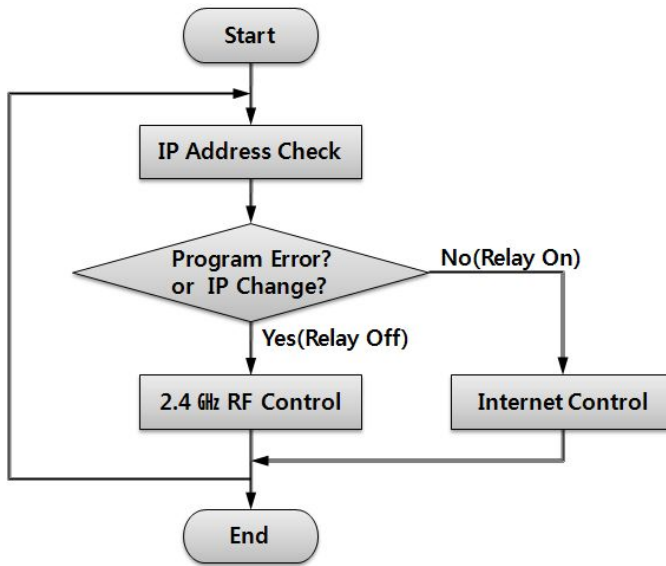


Fig. 2.6 Flow Chart for Changing Control Modes

Fig. 2.6은 이러한 제어모드 전환 알고리즘을 나타낸 것으로, 무선인터넷 연결이 끊어졌는지 여부는 매초마다 IP 주소를 점검하여 IP 주소가 변경되었는지 파악하는 것이다.

무선인터넷 제어모드와 Backup 통신 제어모드사이의 전환은 '무인선박 제어시스템' 프로그램에서 스위치를 이용하여 수동으로 전환할 수 있다. 프로그램을 실행하면 초기 설정은 Backup 통신모드이며, 이후 '제어모드' 스위치를 동작시키면 Relay에 의해서 무선인터넷 제어모드로 전환된다. 이후 무선인터넷 연결이 끊어지거나 에러 발생 시 자동적으로 Relay를 끊어서 초기 설정값인 Backup 통신모드로 전환된다.

Backup 통신시스템으로는 Fig. 2.7과 같이 Futaba사의 2.4GHz RF 송수신기(Transmitter: T8FG, Receiver: R6008HS)를 사용하였다. 송수신기의 통신 가능 범위를 파악하기 위해서 송수신 거리 측정실험을 하였다. 실험 결과 2.4GHz의 고주파수 특성상 직진성이 매우 강하여 송수신기 사이에



건물, 나무와 같은 장애물이 있을 경우 500m이내에서도 수신이 이루어지지 않았다. 반면에 Fig.2.8과 같이 전방 장애물이 없도록 고지대(고신대학교 도서관 앞, 고도 193m)에서 전파를 송신할 경우 2.5km 이상 떨어진 곳(해사대학관 옥상, 고도 25m)에서도 안정적인 수신이 이루어졌다.



Fig. 2.7 2.4GHz Transmitter & Receiver Set

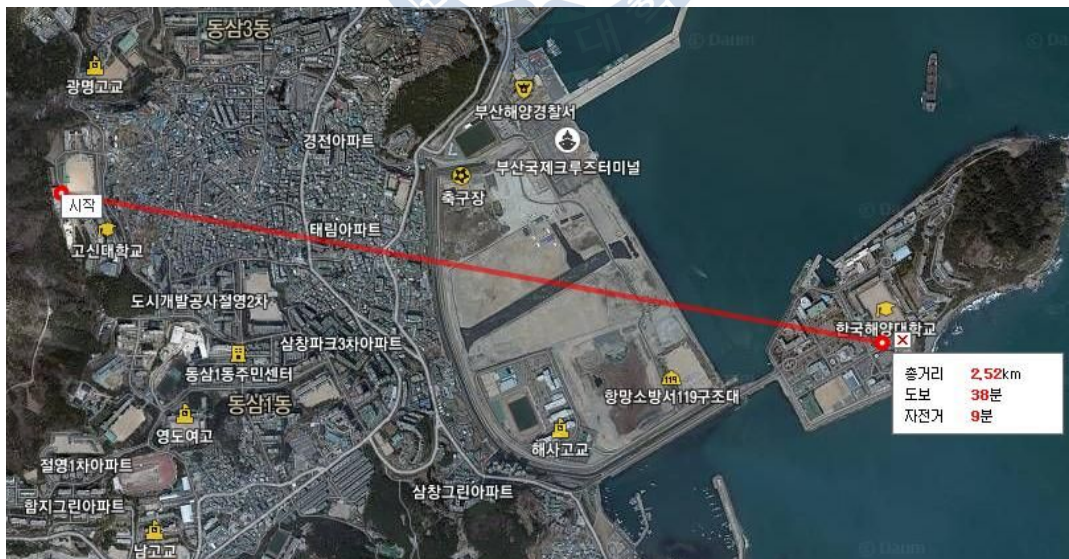


Fig. 2.8 Range of 2.4GHz RF Communication System(Image Source: Daum)

## 제 3 장 무인선박 선체 제작

본 연구에서 개발한 무인선박은 전장 1,325mm, 선폭 380mm, 중량 8.16kg의 소형 선박으로, 대형 상선이나 레저용 소형 보트의 시스템 구성 및 제작 방법과는 많은 차이가 있다. 따라서 이 장에서는 무선인터넷 기반의 소형 무인선박 개발을 위한 선박 제작과정을 기술한다.

### 3.1 선형 및 제원

본 연구는 무선인터넷 기반의 무인선박 제어에 관한 것으로, 상용화된 FRP 모형선박을 연구목적에 맞게 개조하여 소형 무인선박을 제작하였다. 일반적으로 모형선박은 실제 선박을 상사(Similitude)시킨 형태로 제작되므로, 선박의 복원성 및 조종운동성능이 어느 정도 확보되어 있다. 따라서 본 연구와 같이 선박의 응용 연구에 있어서 별도의 조선공학적인 고려 없이, 연구목표 달성에만 더욱 집중할 수 있는 장점이 있다.

모형선박을 선택함에 있어서 무엇보다 중요한 사항은 탑재 장비의 종류 및 중량을 파악하는 것이다. 왜냐하면, 탑재 장비에 의해서 선박 전체의 배수량(Displacement)이 증가하고 무게 중심의 위치가 변하게 되므로, 모형선박이 충분한 예비 부력을 갖고 있지 못할 경우 복원성 손실로 인한 전복 및 침몰의 우려가 있기 때문이다. Table 3.1은 제조회사에서 제공한 데이터시트를 참고해서 무인선박에 탑재될 주요 장비 및 부품의 중

류와 무게를 정리한 것이다. 장비 중에서 가장 많은 무게를 차지하는 것은 Laptop PC와 납축전지로 각각 1.3kg과 1.14kg을 차지한다. 가급적 선박의 무게 중심 변화를 막기 위해서 가솔린 엔진이 위치해 있던 선체 중앙부에 두 장비를 배치하였다.

**Table 3.1 List of Equipments Installed on the USV**

No.	Items	Weight × Unit	Usage
1	Gigabyte M912M(235×180×42mm)	1,300g × 1	Laptop PC
2	NI USB-6210	206g × 1	DAQ Board
3	Lead Accumulator(12V)	570g × 2	Cooling System
4	Cooling Pump(Including Hose & Coupling)	437g × 1	
5	Lithium Polymer Cell	180g × 2	Propulsion System
6	Brushless Motor	302g × 1	
7	Electric Speed Controller(ESC)	165g × 1	
8	RF Receiver	21g × 1	RF System
9	GPS(Including Cable)	64g × 1	Sensor System
10	Electric Circuit(Including Housing)	532g × 1	
11	Cellular Phone(SCH-W720)	106g × 1	HSDPA Internet
12	Mobile Router	25g × 1	
13	Unknown Weight	Max. 500g	
	<b>Total</b>	<b>5,158g</b>	

한편, 무인선박 제작 과정에서 애기치 못하게 추가될 부품 및 전선 등을 '불명중량(Unknown Weight)'으로 가정할 경우 탑재될 장비와 부품의 총 중량은 5.158kg이었다. 이러한 고려를 통해서 본 연구에서 채택한 모형 선박은 Fig. 3.1과 같이 WorldModels사에서 제작한 'Valkyrie'이다. 이 모형 선박은 총 중량 5.86kg, 전장 1,325mm, 선폭 360mm이며, V-shaped 선형의 FRP 선박으로 24cc 가솔린 엔진이 탑재되어 있다.



Fig. 3.1 A Model Ship

그러나 '3.2 추진시스템'에서 자세히 설명되지만 선박의 정밀한 속력제어를 위해서 가솔린 엔진시스템을 전기-모터 시스템으로 개조하였다. 따라서 Table 3.1과 같이 부가 탑재물의 총 예상 중량 5.158kg에서 가솔린 엔진시스템(엔진, Muffler, 클러치, 연료 탱크 등)의 중량 3.07kg을 뺀 약 2.1kg의 중량이 증가할 것으로 예상된다. 한편, 선박의 흘수가 1cm 증가하기 위한 중량을  $T_{cm}$  이라 하며, 다음과 같이 정의한다[김순갑, 2004].

$$\begin{aligned}
 T_{cm} &= L \times B \times \Delta d \times C_b \times \gamma \\
 &= 1.12m \times 0.36m \times 0.01m \times C_b \times 1025kg/m^3 \quad (3.1) \\
 &= 4.133 C_b \text{ kg}
 \end{aligned}$$

여기서,  $L$  은 전장으로 본 모형선박에서는 타를 제외한 FRP 선체만의 길이로 112cm,  $B$  는 선폭으로 36cm,  $\Delta d$  는 흘수변화량으로 1cm 이며,  $C_b$  는 방형비척계수,  $\gamma$  는 해수의 비중이며, 일반적으로 표준해수의 비중은 1.025t/m<sup>3</sup> 이다.

식 (3.1)로부터  $T_{cm}$  은  $C_b$  에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 따라서 탑재 장비로 인한 선박의 예상 무게 증가량( $\Delta W=2.1kg$ )에 대하여  $C_b$  에 따른 예상 흘수 증가량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\Delta W}{T_{cm}} = \frac{2.1[kg]}{4.133 C_b [kg/cm]} = \frac{0.508}{C_b} [cm] \quad (3.2)$$

식 (3.1), (3.2)에  $C_b$  대신 0.1 ~ 1.0의 값을 대입하여 정리하면 Table 3.2와 같다.  $C_b$ 를 0.3으로 가정하여도 흘수 증가량은 2cm 미만으로 모형선박을 개조한 무인선박의 예비부력이 충분한 것으로 계산되었다.

**Table 3.2**  $\Delta d$  according to  $C_b$

$C_b$	$T_{cm}$ (kg)	$\Delta d$ (cm)
0.1	0.413	5.08
0.2	0.827	2.54
0.3	1.240	1.69
0.4	1.653	1.27
0.5	2.067	1.02
0.6	2.480	0.85
0.7	2.893	0.73
0.8	3.306	0.64
0.9	3.720	0.56
1.0	4.133	0.51

Fig. 3.2는 모형선박을 개조하여 직접 제작한 무인선박의 정면과 후면 사진이다. 제작된 무인선박의 실제 총 무게는 8.16kg으로, 예상했던 수치보다 212g 더 많았다. 선폭은 무인선박의 상단 구조물에 의해서 20mm 증가한 380mm 이었다. 상단 구조물은 반투명 PVC 밀폐 용기로 탑재 장비를 해수의 침입으로부터 보호하기 위해 설치한 것이다.

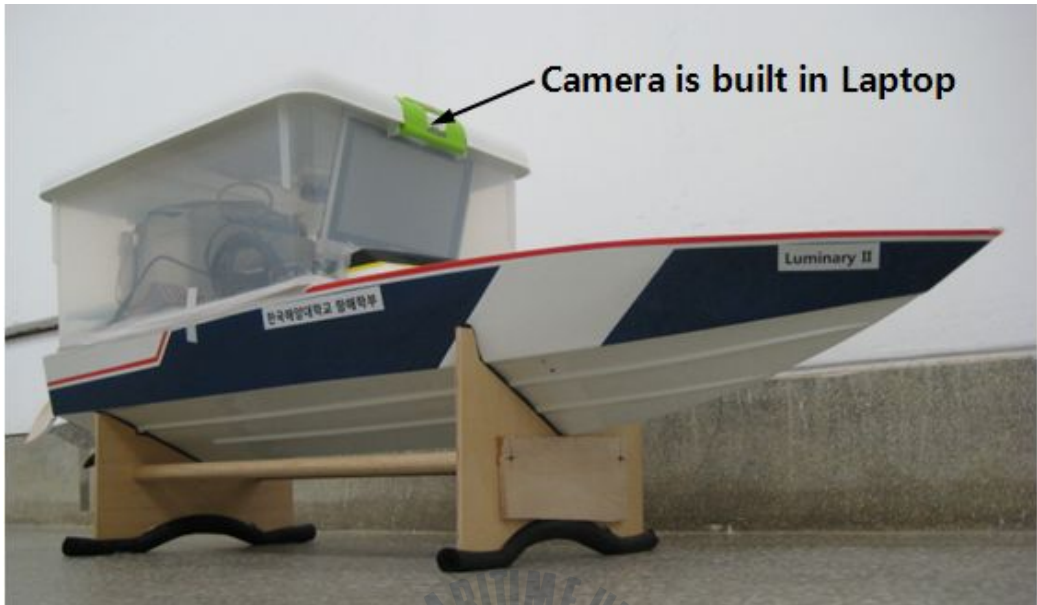


Fig. 3.2 Self-made USV

### 3.2 추진시스템(Propulsion System)

무인선박 제작을 위해 구입한 모형 선박의 추진시스템에는 24cc 가솔린 엔진이 탑재되어 있으며, throttle cable을 기계적으로 잡아당겨 엔진의 RPM을 제어하도록 되어 있다. 이러한 가솔린엔진은 고출력으로 선박의 고속 주항을 가능한 장점이 있지만, 소음 및 진동이 매우 심하며, 정밀한 속도제어가 어려운 단점이 있다.

특히, 무인선박에는 Laptop PC, DAQ Board, 센서 등 각종 전자 장비 및 부품이 탑재되므로 진동, 소음, 매연은 해당 장비에 물리적인 손상을 가할 수 있다. 또한, 무인선박의 목적상 고속 주항보다는 일정한 속력을 유지하는 정속성과 정밀한 RPM 제어가 보다 중요하다. 따라서 본 연구에서는 정밀한 속도제어를 위해서 모형 선박에 탑재된 가솔린엔진 대신 전기-모터를 이용한 추진시스템을 적용하였다.

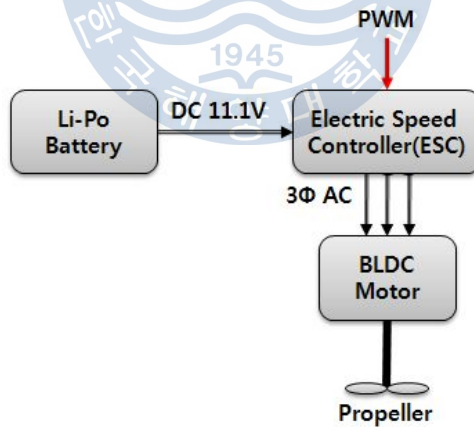


Fig. 3.3 Block Diagram of the Propulsion System

Fig. 3.3은 추진 시스템의 블록 다이어그램으로 ESC는 Li-Po 배터리로부터 공급받은 DC 전기를 3Φ AC 전기로 변환하여 BLDC 모터에 공급



한다. 이 때 ESC는 PWM 신호에 따라 AC 전압을 조절하여 BLDC 모터의 RPM을 제어하는 역할을 한다. 그리고 모터의 토크는 샤프트를 통해서 프로펠러에 전달되어 추진력으로 변환된다. 지금부터는 좀 더 세부적으로 BLDC 모터, ESC, 프로펠러에 대해서 차례로 설명한다.

### 3.2.1 BLDC 모터

본 연구를 통해서 개발하고자 하는 무인선박은 5kts(2.57m/s) 정속 주향을 목표로 하며, 최대 10kts(5.14m/s)까지 속력을 낼 수 있도록 설계하고자 한다. 한편, 모형선박에 탑재된 24cc 가솔린엔진의 최대출력은 1.2ps(895.2W)이며, 모형선박의 최대 주향 속력은 50km/h(13.89m/s)에 이른다. 따라서 최대 속력을 비교하였을 때 필요한 BLDC 모터의 출력은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{USV.Motor} &= \frac{V_{Max.Speed(USV)}}{V_{Max.Speed(Model Ship)}} \times P_{Model Ship.Engine} \\
 &= \frac{5.14m/s}{13.89m/s} \times 895.2 W = 331.3 W
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

그런데, 본 연구를 위해서 제작한 무인선박의 중량이 모형선박보다 약 2.2kg(37.5%) 크므로, BLDC 모터의 최대 출력은 456W 이상 되어야 한다. 또한, 추후 무인선박에 추가로 탑재될 장비들을 감안하여, 무인선박의 추진시스템으로 최대출력 560W의 BLDC 모터를 채택하였다. Fig. 3.4는 BLDC 모터의 실물 사진으로 수냉 자켓이 설치되어 있으며, Table 3.3은 BLDC 모터의 주요 특징을 정리한 것이다.

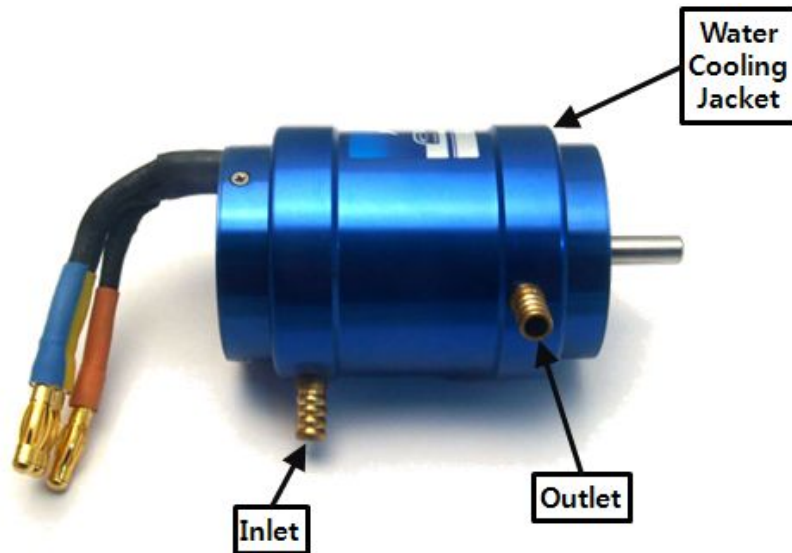


Fig. 3.4 BLDC Motor with Water Cooling Jacket

Table 3.3 Specification of the BLDC Motor

Items	Feature
Manufacturer	Hobbywing
Max. Power	560W
Max. Current	90A
RPM	3,060/V
Shaft Diameter	5mm
Weight	302g

선박의 속력을 좌우하는 BLDC 모터의 RPM은 모터에 공급되는 AC전압에 의해서 결정되는데, Table 3.3에서 보듯이 1[V]당 3,060RPM으로 모터에 공급하는 전압을 제어함으로써 모터의 RPM을 제어할 수 있다.

### 3.2.2 전자변속기(Electric Speed Controller, ESC)

전자변속기(ESC)는 11.1V Li-Po 배터리의 DC 전기를 3 $\phi$  AC 전기로 변환하여 BLDC 모터에 공급해주는 장치이다. 또한, 전자변속기에 입력되는 PWM 신호의 펄스폭에 따라 모터에 공급하는 전압을 조절하여 BLDC 모터의 RPM을 제어해주는 역할도 한다.

전자변속기의 선택 시 중요한 점은 BLDC 모터의 최대출력에 필요한 전류를 안정적으로 공급해줄 수 있는가이다. 본 연구에 사용된 BLDC 모터의 최대전류는 Table 3.3에서 보듯이 90A이지만, 추후 출력이 더 큰 BLDC 모터의 사용을 고려하여 최대 180A까지 전류를 공급할 수 있는 전자변속기를 사용하였다. Fig. 3.5는 전자변속기의 실물 사진이며, Table 3.4는 전자변속기의 주요 특징을 정리한 것이다.

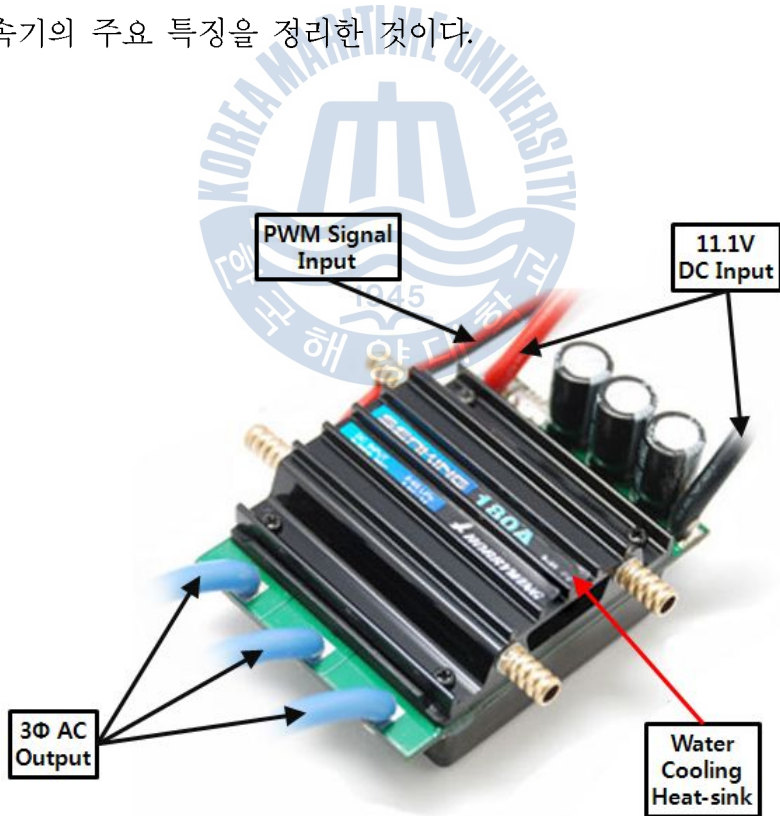


Fig. 3.5 Electric Speed Controller with Water Cooling Heat-sink

**Table 3.4 Specification of the Electric Speed Controller**

Items		Feature
Manufacturer		Hobbywing
Output	Continuous Current	180A
	Burst Current	360A
Input		6-18 cells NiMH/NiCd or 2-6 cells LiPo
Suitable Motor		Sensorless BLDC Motor
Protection		Low Voltage Cut-off Protection Over-heat Protection PWM Signal Loss Protection
Running Mode		Forward / Backward
External Diameter of the Water Cooling Pipe		5.0mm
Weight		165g

무인선박의 정밀한 속도제어를 위해서는 BLDC 모터의 RPM을 파악해야만 한다. 따라서 PWM 신호와 Motor의 RPM 관계를 파악하기 위한 실험을 Fig. 3.6과 같이 실험 장치를 구성하여 수행하였다. LabVIEW 프로그램에 의해서 펄스폭을 ASCII 코드 값으로 Servo Controller에 전달하면, Servo Controller는 해당 펄스폭을 발생시키는데, 이 때 오실로스코프를 이용하여 PWM의 펄스폭을 측정한다. 또한, PWM 신호를 받은 ESC는 DC 전기를 3 $\phi$  AC 전기로 변환하여 BLDC Motor에 공급하는데, 이 때 디지털 테스터기를 이용하여 AC 전기의 전압을 측정한다. 측정된 전압에 Table 3.3의 1V당 RPM 값을 곱하면 PWM 펄스폭에 따른 BLDC 모터의 RPM을 알 수 있다.

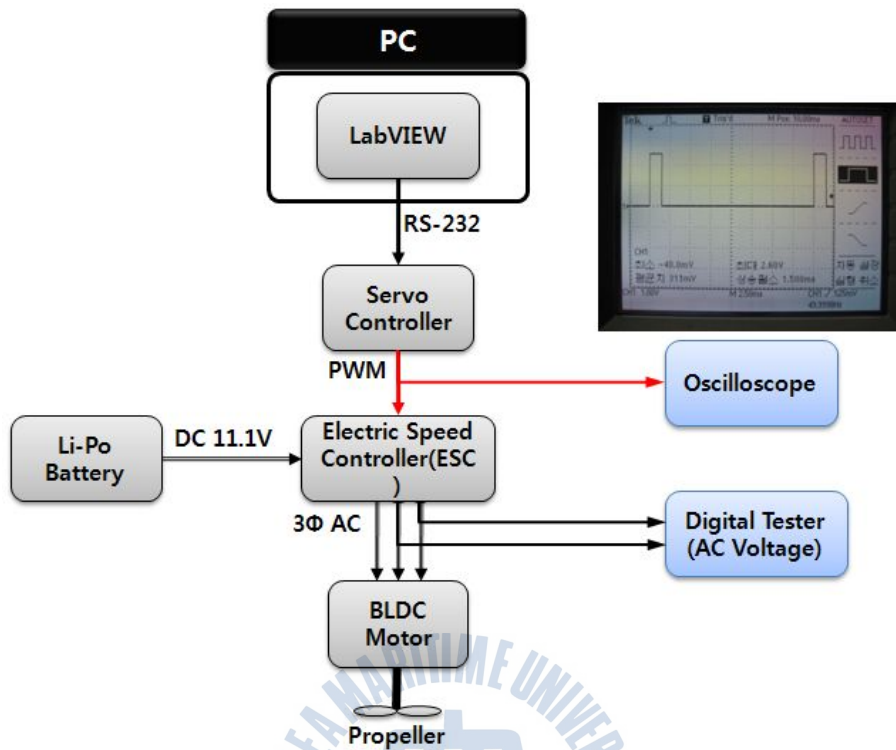


Fig. 3.6 Configuration for Measuring the Propulsion System

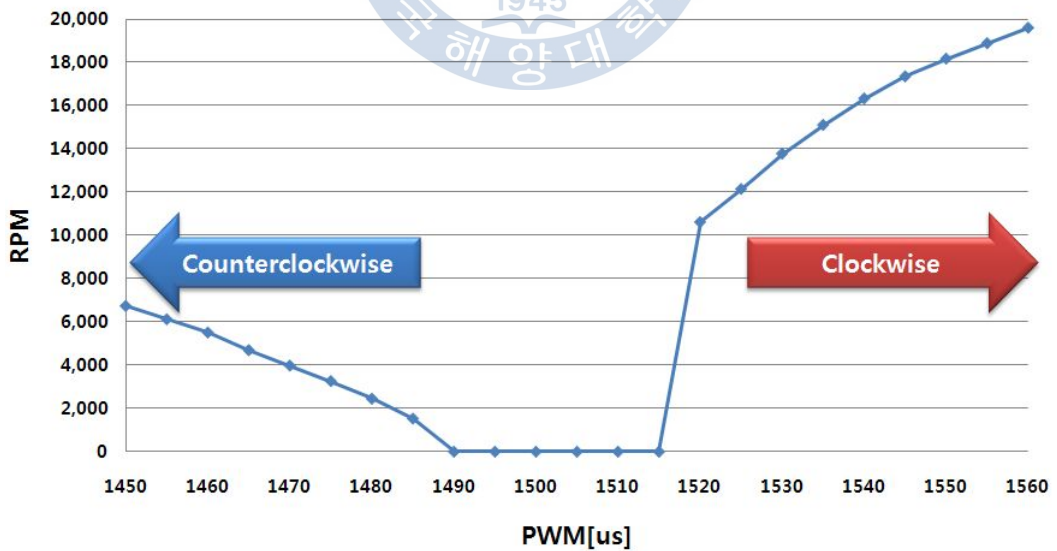


Fig. 3.7 RPM of BLDC Motor according to the PWM

본 연구에 사용된 전자변속기는 펄스주기가 50Hz(20ms)인 PWM 신호를 인식하도록 설계되어 있으며, 펄스폭이 1.5ms일 때를 중립으로 하여 펄스폭이 1.5ms보다 커지면 Motor를 우회전 시키며, 1.5ms보다 작아지면 좌회전 시킨다. 실험은 PWM의 펄스폭을 5 $\mu$ s(0.005ms)씩 증가시키면서, 총 3회 반복 실시하여 평균값을 구하였으며, Fig. 3.7은 실험 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 우회전의 경우 1.52ms 이상부터, 좌회전의 경우 1.485ms이하부터 모터가 동작되었고, 그 중간 영역에서는 모터가 정지상태를 유지하였다. 그래프를 보면 모터 구동 영역에서는 PWM 펄스폭에 따른 RPM이 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 또한, 좌회전의 경우 펄스폭에 대한 RPM의 변화량이 우회전보다 약 3분의 1정도 작게 설계되어 있는 것을 알 수 있다.

### 3.2.3 프로펠러(Propeller)

전기모터가 전기에너지를 회전력(Torque)으로 변환시키는 장치라면 프로펠러는 회전력을 추진력으로 변환시켜주는 장치이다. 프로펠러 선정시 주의할 점은 직경이 작은 프로펠러는 물에 의한 부하가 작아 고속회전이 가능하지만 추진력이 나쁘게 되고, 직경이 큰 프로펠러는 추진력은 커지지만 부하가 크게 걸려 전자변속기에 과전류를 유발시키고, 그로 인해 BLDC 모터로 전기공급을 차단시켜 모터가 정지되는 일이 발생한다는 것이다. 본 연구에서는 Fig. 3.8과 같이 직경 50mm의 2엽 프로펠러를 이용하였다. Table 3.5는 프로펠러의 주요 특징을 정리한 것이다.



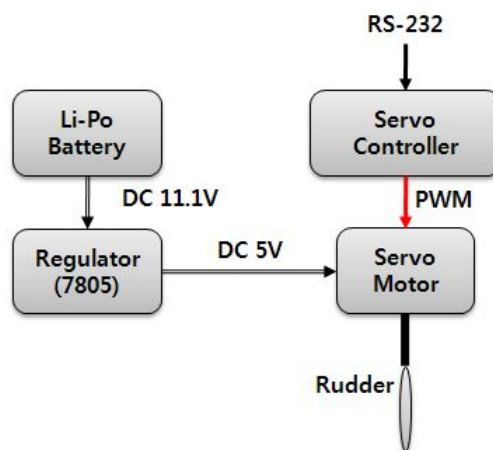
Fig. 3.8 Propeller

**Table 3.5 Specification of the Propeller**

Items	Feature
Manufacturer	Octura(USA)
Name	X450
Diameter	50.0mm
Pitch	70.0mm
Shaft Size(Inner Diameter)	4.76mm
Material	Beryllium Copper

### 3.3 조타시스템(Steering System)

본 연구를 위해서 제작한 무인선박의 방향제어는 오로지 선미에 장치된 타에 의해서 이루어진다. 따라서 타를 제어하기 위한 조타시스템은 추진시스템 못지않게 무인선박의 제어를 위해서 중요하다.



**Fig. 3.9 Block Diagram of the Steering System**

Fig. 3.9는 조타시스템의 블록 다이어그램으로 타의 직접적인 제어는 서보모터를 통해서 이루어진다. 서보모터는 레귤레이터에 의해서 변환된 DC 5V 전압으로 동작되며 서보제어기로부터 입력받은 PWM 신호에 의해서 회전각도가 제어된다. 최종적으로 서보모터의 회전은 커넥팅 로드 (Connecting Rod)를 통해서 타로 전달된다. 지금부터는 좀 더 세부적으로 서보모터 및 서보제어기에 대해서 설명한다.

### 3.3.1 서보모터(Servo Motor)

서보모터는 일반적인 모터와는 달리 서보모터에 입력되는 PWM의 펄스폭의 크기로 정, 역, 정지의 동작을 하여 위치(각도)를 제어하는 특수한 모터이다. 즉, 직류모터의 회전축에 감속기어를 연결하고, 여러 번 감속된 기어의 마지막 회전축을 외부로 인출한다. 인출된 마지막 회전축의 내부에 가변저항을 연결하여 이 회전축이 움직인 각도에 비례하여 움직이는 가변저항의 저항값을 내장된 피드백 제어회로에 되먹여 펄스폭에 비례하는 각도를 출력한다.

서보모터는 위치제어를 위한 피드백 시스템이 모터 내부에 구성되어 있어 외부에서 별도의 처리가 필요 없으며, 작고 가벼우면서도 커다란 감속비로 상당히 큰 토크를 낼 수 있어 최근에는 로봇의 관절이나 조향장치 등 많은 곳에 사용되고 있다.

서보모터에 인가되는 PWM의 주기는 50Hz(20ms)이며, 펄스폭이 1.5ms일 때 90도(중립), 0.7ms이하이면 0도(좌측으로 90도), 2.3ms이상에서 180도(우측으로 90도)를 지시한다. Fig. 3.10의 (a)는 펄스폭이 1.2ms일 때 좌측으로 30°, (b)는 1.5ms일 때 중립, (c)는 1.65ms일 때 우측으로 15° 회전한 상태를 나타낸다.



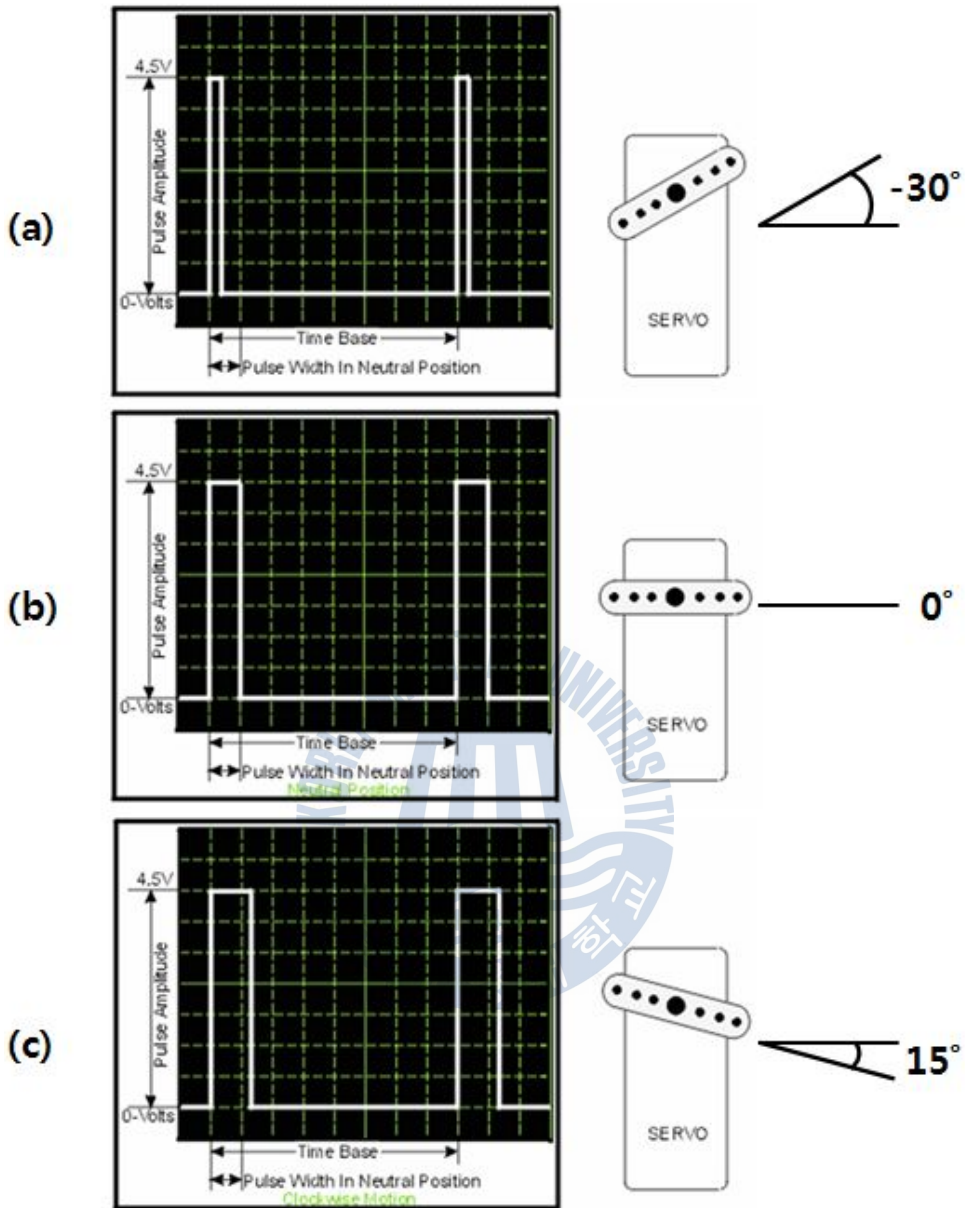


Fig. 3.10 The Principle of Servo Motor

무인선박의 조타시스템을 구성하기 위해서 가장 중요한 서보모터의 성능 요소는 토크이다. 본 연구를 통해서 제작한 무인선박은 오로지 타 (Rudder)를 통해서 방향을 제어하는데, 타가 외부 힘에 의해서 목표로

하는 타각을 생성하지 못하면 선박의 방향제어가 불가능하기 때문이다.

Fig. 3.11은 본 무인선박의 조타시스템을 구성하기 위해서 채택한 서보모터이다. 이 서보모터는 약 5V 전압 인가시 7.8kg · cm의 강력한 토크를 발생시키며, 60° 각도를 0.24초 만에 생성할 정도로 빠른 응답속도를 가지고 있다. Table 3.6은 서보모터의 주요 특징을 정리한 것이다.



Fig. 3.11 Servo Motor for the Steering System

Table 3.6 Specification of the Servo Motor

Items		Feature
Manufacturer		RoboBlock
Name		RBD-707MG
Output Torque	at 4.8V	7.8 kg · cm
	at 7.4V	9.8 kg · cm
Operating Speed	at 4.8V	0.24sec/60°
	at 7.4V	0.18sec/60°
Weight		60g

### 3.3.2 서보제어기(Servo Controller)

서보제어기는 원하는 PWM 신호를 발생시켜주는 장치로 무인선박의 제어를 위해 중요한 장치이다. LabVIEW 프로그램의 시리얼 통신을 이용하여 원하는 크기의 펄스폭을 ASCII 코드로 전송하면 서보제어기가 그에 해당하는 펄스를 만들어서 서보모터로 전달한다. Fig. 3.12는 조타 시스템을 위해서 사용한 서보제어기(NT-SERVO-16CH)로서 동시에 최대 16개의 PWM 신호를 생성시킬 수 있다.

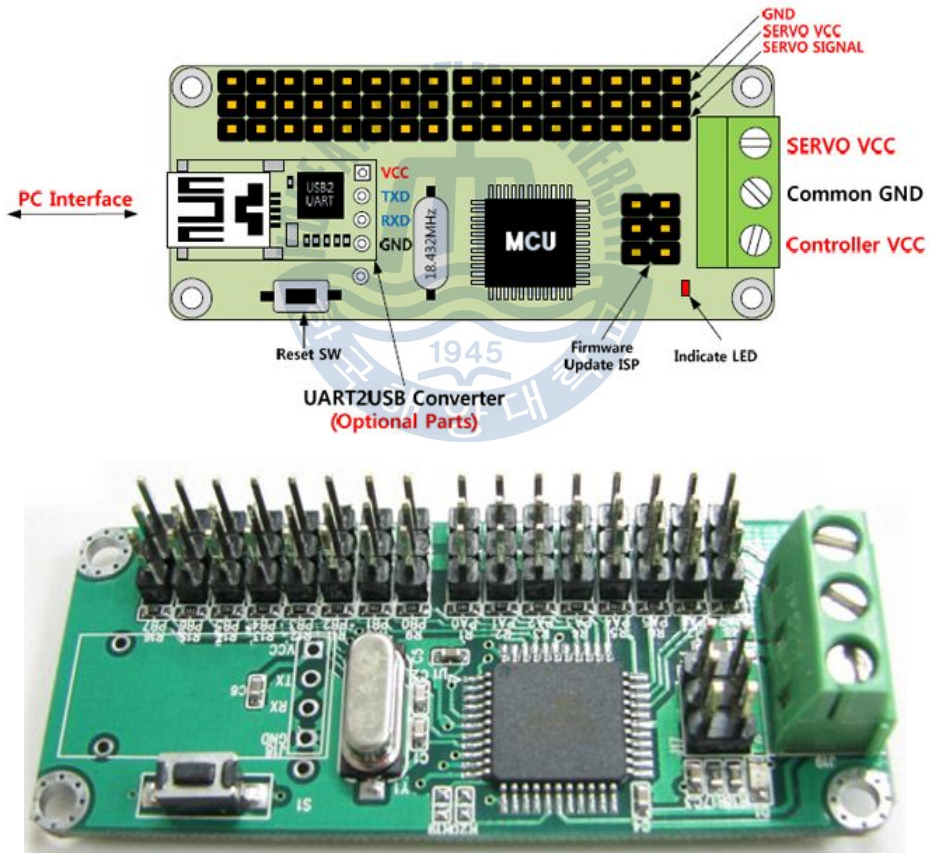


Fig. 3.12 Servo Controller

### 3.4 냉각시스템(Cooling System)

모터의 효율은 모터의 종류에 따라 다소 차이가 있으나 일반적으로 70~90% 사이로 알려져 있다[권대복 외, 2008]. 따라서 모터에 공급되는 전기에너지의 약 20%는 소모되어 없어지며, 그 중 대부분은 열에너지로써 모터를 과열시키는 원인이 된다. 이러한 모터의 과열을 방지하기 위해서 연구에 사용된 BLDC 모터에는 수냉 자켓(Jacket)이 설치되어 있다.

식 (3.3)을 이용하여 5kts의 정속 주항을 목표로 계산한 무인선박의 출력은 456W이었다. 따라서 456W의 20%인 약 90W는 열에너지로 소모된다. 90W가 어느 정도의 발열량인지 가늠하기 위해서 단위 환산을 하면 다음 식과 같다.

$$1[W] = \frac{1[J]}{1[sec]} \quad \text{단, } 1[J] \approx 0.238[cal] \quad (3.4)$$

여기서 1cal는 물 1g의 온도를 1°C만큼 증가시킬 수 있는 열량의 단위이다. 따라서, 90W는 1초 동안 90joule의 일을 할 수 있는 에너지이며, 칼로리로 환산하면 1초 동안 약 21.4cal의 열량이 발생하는 것이다.

그러나 이러한 수치는 BLDC 모터의 최대 출력시 발생하는 열량이므로, 일반적인 출력시 BLDC 모터에서 발생하는 열량을 알아보기 위한 실험을 하였다. BLDC 모터의 자켓에 물 100g을 채우고 펌프를 동작시키지 않은 상태에서 1,530 $\mu$ s의 펄스를 가하여 BLDC 모터를 동작시켰다. 그 결과 Fig. 3.13과 같이 약 6분만에 BLDC 모터의 표면 온도가 16°C 가량 상승하였다.

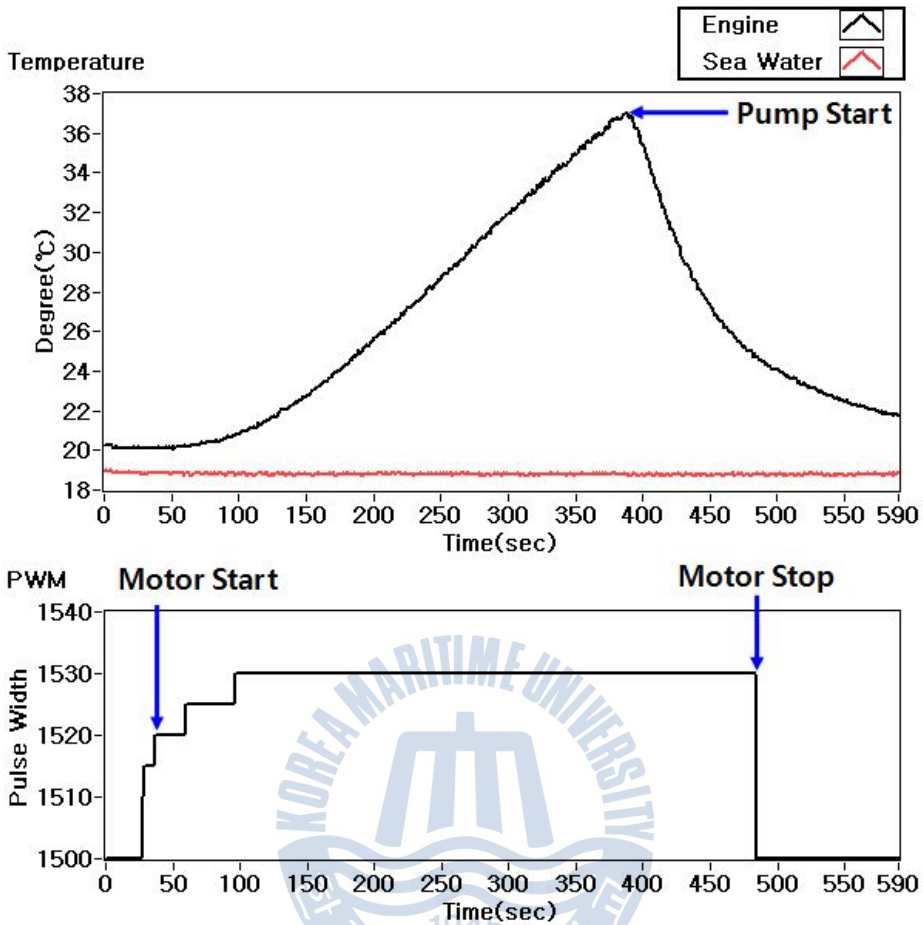


Fig. 3.13 Temperature Measurement of the BLDC Motor

물 100g이 16°C 상승하였으므로, 6분 동안 1,600cal의 열량이 발생되었고, 1초로 환산하면 약 4.44cal의 열량이 BLDC 모터에서 발생하였다. 이러한 수치는 BLDC 모터가 최대출력시 1초 동안 발생하는 열량 21.4cal의 약 21% 수준이다. 이와 같이 모터의 발열량을 이론적 계산 및 실제 실험을 통해서 추진시스템의 냉각이 반드시 필요함을 알 수 있었다. 이에 따라 Fig. 3.14와 같이 냉각시스템을 구성하였고, 펌프의 호스 내경(10mm)과 전자변속기와 BLDC 모터의 호스 내경(5mm)이 달라서 커플러(Coupler)를 이용하였다.

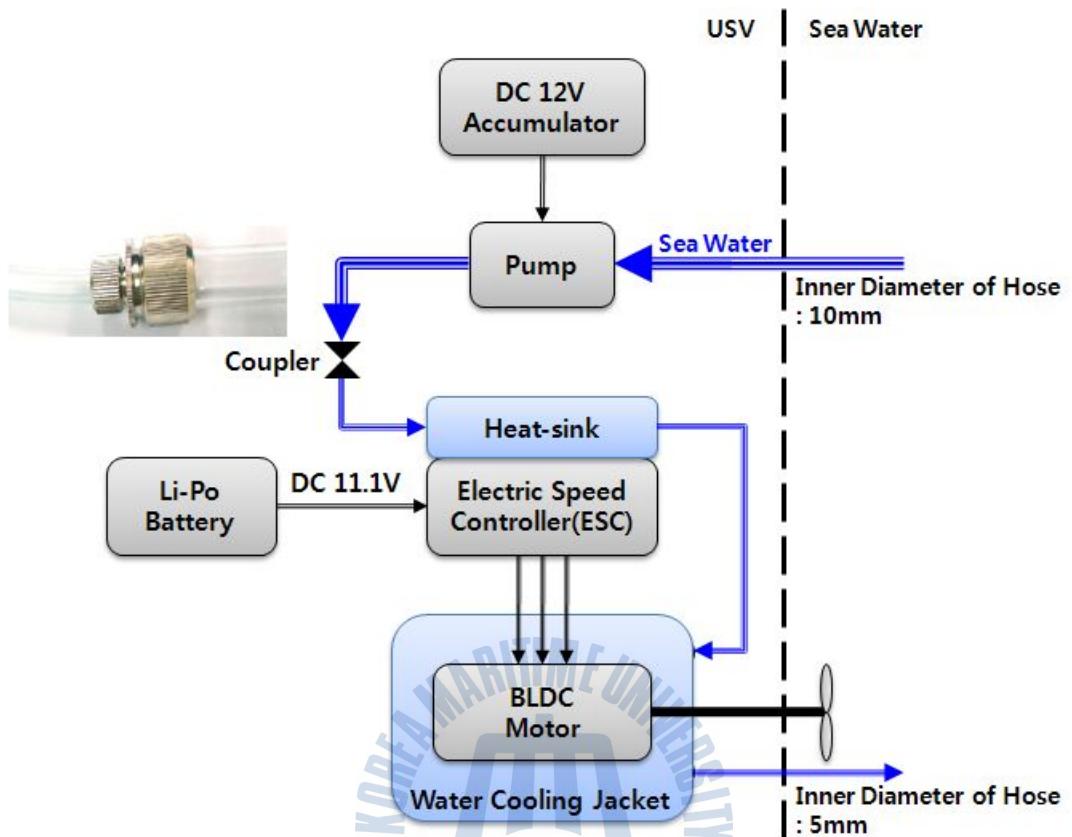


Fig. 3.14 Block Diagram of Cooling System

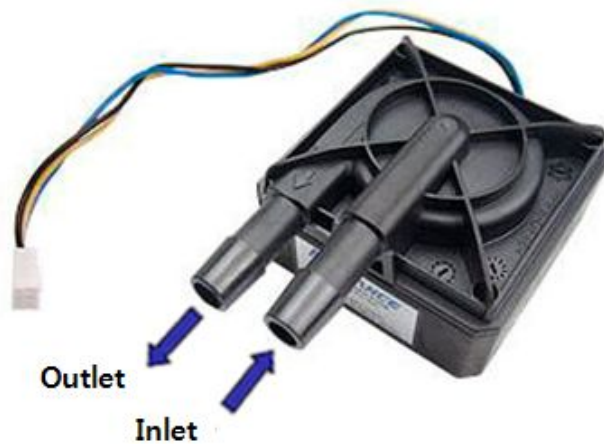


Fig. 3.15 Motor Pump for Cooling System

Fig. 3.15는 냉각시스템에 사용된 펌프이며, Table 3.7은 펌프의 주요 사항을 정리한 것이다.

**Table 3.7 Specification of the PMP-400 Pump**

Items	Feature
Manufacturer	Coolance
Name	PMP-400
Maximum Flow Rate	7.6 ℓ /min
Maximum Head Pressure	6.1 m
Maximum System Pressure	1.5 kgf/cm <sup>2</sup> (22 psi)
Motor	Brushless DC, electrically commutated, spherical motor
Power Consumption	18 W
Voltage Range	8 ~ 13.2 VDC
Startup Voltage	9 ~ 13.2 VDC
Hose Connection	Hose of 10mm Inner diameter

## 제 4 장 무인선박 제어시스템

올바른 무인선박 제어시스템을 설계하기 위해서는 무인선박의 운영 환경 및 특성을 정확히 파악해야만 한다. 왜냐하면 상선을 비롯한 대형 선박의 경우 일정한 선속으로 미리 계획된 항로를 따라 항해하는 반면에 모터보트와 같은 소형 선박들은 계획된 항로 없이 그때그때 자신의 위치를 확인하면서 수시로 선속과 방향을 변화시키며 항해하기 때문이다.

또한 대형 선박에는 선수 방위를 알려주는 자이로컴퍼스와 마그네틱 컴퍼스, 선속을 알려주는 Doppler Log, 장애물 탐지를 위한 RADAR 등 위치제어를 위한 다양한 고가의 장비들이 탑재된다. 하지만 무인선박은 소형이라는 본래 특성상 탑재할 수 있는 센서에 한계가 있고, 그 정밀도 또한 상선의 그것과는 차이가 있다.

마지막으로 무인선박은 육상제어국의 끊임없는 모니터링과 명령을 통해서 제어되므로, HSDPA 무선인터넷 품질 테스트 결과는 무인선박의 제어 시 반드시 고려해야 할 요소이다. 따라서 이러한 무인선박의 특성을 감안하여 무인선박 제어시스템 설계에 반영해야 한다.

무인선박의 제어를 위해서는 각종 센서를 통해서 획득한 정보가 필수적이다. 따라서 4.1절에서는 무인선박에 적용된 주요 센서에 대하여 기술하며, 4.2절과 4.3절에서는 각각 무인선박의 '원격제어 모드'와 '자율운항 모드'의 설계 및 제작에 대하여 기술한다. Fig. 4.1은 앞서 2장, 3장에서 살펴본 각각의 하위 시스템들을 종합한 무인선박의 제어를 위한 전체 무인선박 시스템의 구성을 나타낸다.



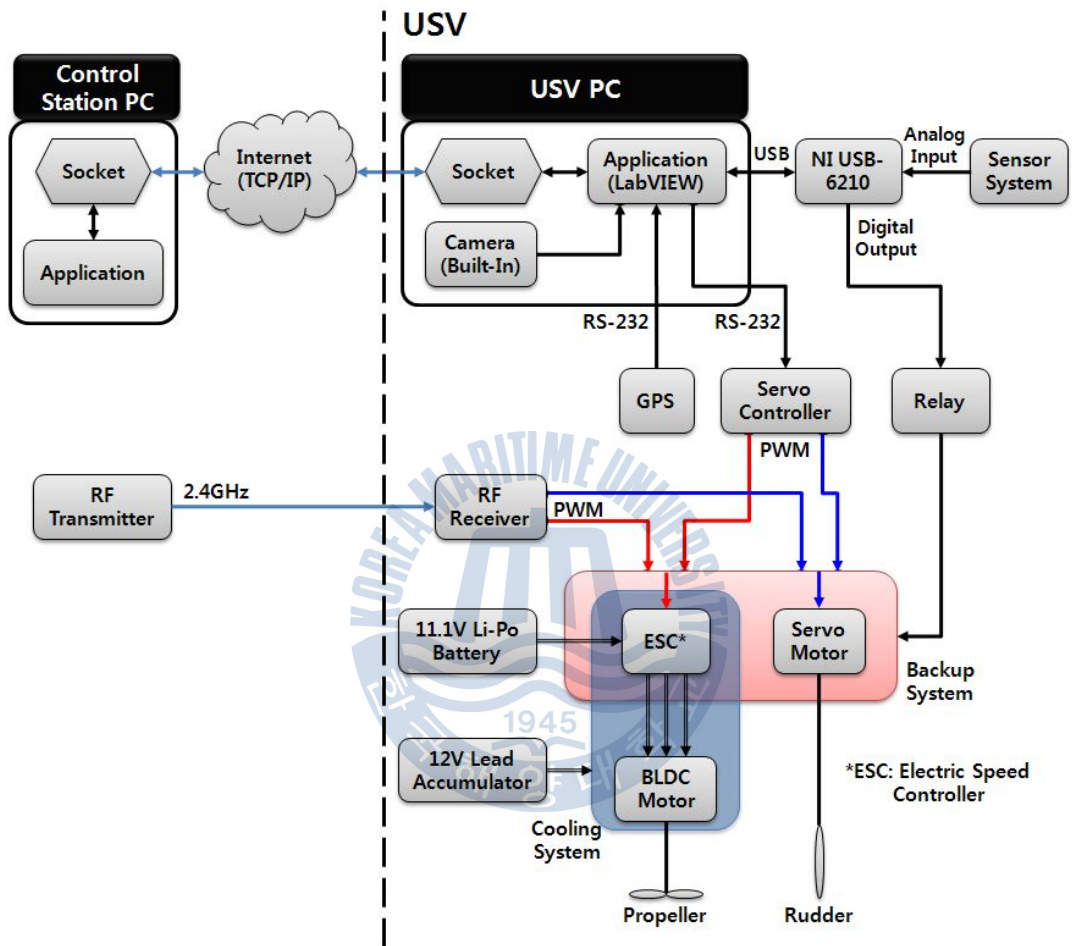


Fig. 4.1 Block Diagram of the USV System

## 4.1 센서시스템(Sensor System)

무인선박은 사람 없이 무선통신을 이용하여 원격지에서 선박을 제어하므로, 무인선박 내·외부에서 발생하는 다양한 상황을 원격지에서 파악할 수 있어야 하며, 상황에 따른 적절한 조치를 취할 수 있어야 한다. 무인선박의 센서시스템은 크게 무인선박의 상태를 파악하기 위한 센서시스템과 무인선박의 외부 환경을 파악하기 위한 센서시스템으로 구분할 수 있다.

먼저, 무인선박의 상태를 파악하기 위해서 선박의 선수방향(Heading), 선회각속도(ROT, Rate Of Turn), 롤링, 피칭 등 선체운동 상태를 알려주는 Heading Sensor와 엔진의 과열 여부를 파악하기 위한 온도센서를 이용하였다.

다음으로 무인선박의 외부 환경을 파악하기 위한 것으로 전방 상태를 파악하기 위한 카메라와 선박의 위치를 파악하기 위한 GPS를 이용하였다. 또한, 센서시스템을 구성함에 있어서 고려해야 할 가장 중요한 요소는 앞서 2장에서 살펴본 무선인터넷의 속도이다. 왜냐하면, 다양한 센서들이 획득한 데이터를 실시간으로 육상제어국으로 전송해야 하는데, 무선인터넷의 속도가 데이터 전송에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다.

### 4.1.1 카메라를 이용한 전방 감시


본 연구에 사용된 카메라는 기가바이트사의 Laptop PC인 M912M에 내장된 CMOS방식의 webcam으로 최대 화소는 1.3M pixels이다. 카메라를 이용한 전방 감시는 무인선박의 원격제어를 위해서 가장 중요한 정보이나, 다른 센서들과 달리 데이터 용량이 큰 단점이 있다.

인터넷 품질 측정 테스트를 통해 파악한 HSDPA 무선인터넷의 평균

속도는 다운로드가 4.87KB/sec, 업로드가 6.05KB/sec이었다. 따라서, HSDPA 무선인터넷을 이용하여 Table 4.1과 같이 100×75 pixels로 데이터를 전송하기 위해서는 2.0초의 시간이 필요하다. 그러나 영상 데이터 이외에 텍스트 데이터와 HSDPA 무선인터넷의 데이터 업로드 속도의 변동성을 고려하여 영상획득 및 전송간격을 3초로 하였다.

Table 4.1의 사진은 해상실험 동안 촬영한 영상을 캡처한 것이며 100×75 pixels의 영상으로도 전방 장애물 유무의 판단이 가능함을 알 수 있다. 그리고, Fig. 4.2는 카메라를 이용한 전방 감시시스템을 LabVIEW 8.6을 이용하여 구현한 프로그램이다.

**Table 4.1 Data Sizes according to the Image Pixels**

Compression Format	jpeg		
Pixel	160 × 120	120 × 90	100 × 75
Real Image			
Data Size	23.6KB	15.5KB	12.1KB
Upload Time	≥ 3.90sec	≥ 2.56sec	≥ 2.0sec



#### 4.1.2 GPS 및 Heading Sensor

GPS는 위치정보를 경위도 좌표로 표시해주는 센서로서 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 또한, Heading Sensor는 Fig.4.3과 같이 MEMS(MicroElectroMechanical Systems) 기술을 이용한 디지털 나침반으로 무인선박이 정해진 항로를 따라 운항하도록 제어하기 위해서 반드시 필요하다.



Fig. 4.3 Principle of Heading Sensor



Fig. 4.4 GPS & Heading Sensor(GH2183)

Fig. 4.4는 본 연구에서 사용한 GPS 및 Heading Sensor이며, Table 4.2는 GH2183의 주요 사양을 정리한 것이다.

**Table 4.2 Specification of GH2183**

Items		Specification	
Manufacturer		Airmar	
Name		GH2183	
GPS Satellite Tracked		12 channels	
Position Accuracy		3m with WAAS	
TTF(To First Fix)		Cold Start	35sec, average
		Warm Start	34sec, average
		Hot Start	1.0sec, average
Accuracy	Heading	Static Compass	1° RMS
		Dynamic Compass	2° RMS
	Pitch and Roll	Static Compass	< 1°
		Dynamic Compass	< 3°
Display Resolution	Heading	0.1°	
	Pitch and Roll	0.1°	
Pitch and Roll Range		±50°	
Data Output Protocol		NMEA 0183 / 2000	
Communication		RS-485	

Fig. 4.5는 GPS 및 Heading Sensor의 데이터 수집을 위해서 RS-485 시리얼 통신 프로그램을 LabVIEW로 구현한 것이다. RS-485 시리얼 통신을 위해서 Baud rate를 4800bps, 데이터 비트는 8비트, 패리티는 '없음', 정지 비트는 '1.0', 흐름 제어는 '없음'으로 설정하였다.

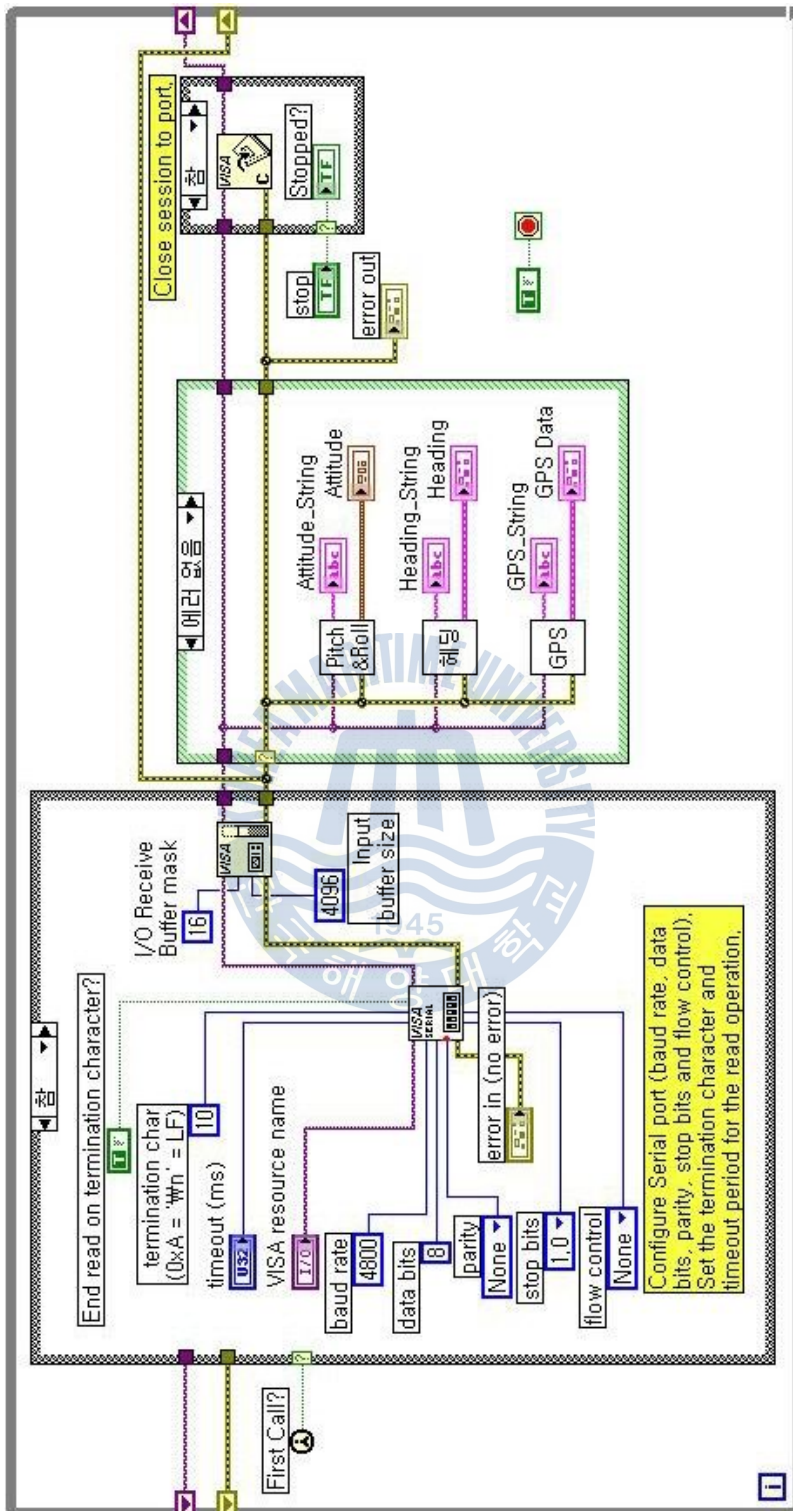


Fig. 4.5 GH2183 Data Acquisition Program using LabVIEW 8.6





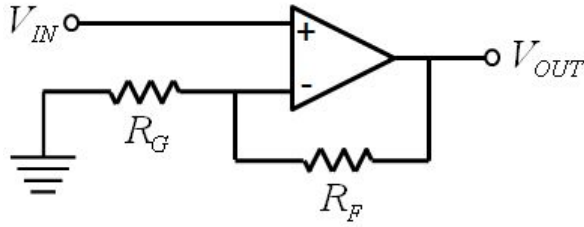


Fig. 4.9 Non-inverting OP Amp

한편, Fig. 4.9와 같이 OP Amp를 이용한 비반전 증폭회로의 증폭률은 다음 식과 같다.

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_G + R_F}{R_G} = 1 + \frac{R_F}{R_G} \quad (4.1)$$

따라서, Fig. 4.8 회로에서 R42, R43 저항 값을 적절히 조절하면 원하는 증폭률을 만들 수 있다. 본 연구의 AD 변환을 위한 DAQ Board의 아날로그 입력범위가  $\pm 10V$ 이므로, 증폭률을 10배로 하였고, 이를 위해서 R42는  $10k\Omega$ , R43은  $90k\Omega$ 으로 하였다. 10배 증폭된 아날로그 출력을 USB-6210 DAQ Board로 입력받아 LabVIEW 프로그램에서 다시 10배 증폭하면 최종 온도가 산출된다.

본 연구에 사용된 온도 센서는 센서 값을 아날로그 형태의 DC 전압으로 출력한다. 따라서 아날로그 데이터를 AD 변환하기 위한 DAQ Board(Data Acquisition Board)가 필요하다. 본 연구에서는 LabVIEW로 프로그램이 가능한 NI사의 'USB-6210'을 사용하였다. Fig. 4.10과 Table 4.3은 각각 USB-6210의 실물사진과 주요 사양을 정리한 것이다.



Fig. 4.10 DAQ Board(NI USB-6210)

Table 4.3 Specification of USB-6210

Items	Feature
Analog Inputs	8 differential or 16 single ended
ADC Resolution	16 bits
Max Sampling Rate	250 kS/s
Timing Resolution	50 ns
Analog Input Range	$\pm 10V$
Digital I/O	4 DI / 4 DO
Interface	USB

## 4.2 원격 제어모드(Remote Control Mode)

### 4.2.1 원격제어 모드 설계

본 연구에서 무인선박의 '원격 제어모드'는 육상제어국에서 인터넷을 이용하여 무인선박의 GPS가 획득한 위치 정보와 카메라로 획득한 영상 정보를 통해서 전방 장애물을 파악하면서 무인선박의 속력과 방향을 제어하는 것을 의미한다. 무인선박의 원격제어는 누구나 쉽게 제어할 수 있도록 컴퓨터 키보드의 방향키(상하좌우)와 마우스만으로 동작되도록 구현하였다. 즉, 최초 무인선박 원격 제어시스템의 초기 설정과 동작 실행은 마우스를 이용하여 선택하도록 하며, 실질적인 무인선박의 속도와 방향 제어는 키보드의 방향키만으로 조종 가능하다.

앞서 '3.2 추진시스템'에서 파악한 바와 같이 BLDC 모터의 RPM은 PWM의 펄스폭에 의해서 좌우된다. 본 연구에서는 상하(↑, ↓) 방향키를 누를 때마다 펄스폭의 크기를  $5\mu\text{s}$ 씩 증감시켰으며, 무인선박의 주향 속도를 5kts로 목표하였기 때문에 펄스폭의 최소값과 최대값은 각각  $1,500\mu\text{s}$ 와  $1,560\mu\text{s}$ 로 제한하였다. Table 4.4는 펄스폭에 따른 모터의 RPM과 무인선박의 평균속력을 정리한 것이다.

무인선박의 속력 측정은 펄스폭을 일정하게 하여 왕복으로 약 200m의 거리를 운항시키고 1초 간격으로 저장된 GPS 로그파일의 SOG(Speed Over Ground) 값을 평균한 것이다. 실험 결과 펄스폭을  $1,560\mu\text{s}$ 로 하였을 때 본 연구에서 목표로 하였던 무인선박의 속력인 5kts( $2.57\text{m/s}$ )에 근접하였다.

**Table 4.4 RPM and Average Speed according to the Pulse Width**

Pulse Width[ $\mu$ s]	Average Speed(m/s)
1500 ~ 1515	0
1520	1.39
1525	1.60
1530	1.81
1535	1.97
1540	2.15
1545	2.27
1550	2.38
1555	2.48
1560	2.56

**Table 4.5 Rudder Angle according to the Pulse Width**

Pulse Width[ $\mu$ s]	Rudder Angle(°)	Pulse Width[ $\mu$ s]	Rudder Angle(°)
		1500	0
1150	Port 35	1550	Stbd 5
1200	Port 30	1600	Stbd 10
1250	Port 25	1650	Stbd 15
1300	Port 20	1700	Stbd 20
1350	Port 15	1750	Stbd 25
1400	Port 10	1800	Stbd 30
1450	Port 5	1850	Stbd 35

또한, 앞서 '3.3 조타시스템'에서 파악한 바와 같이 서보모터 역시 PWM의 펄스폭에 의해서 좌우된다. 본 연구에서는 좌우(←, →) 방향키를 누를 때마다 펄스폭의 크기를  $50\mu\text{s}$ 씩 증감하도록 하여 스텝 조타를 하도록 하였다.  $50\mu\text{s}$ 의 변화량은 실제 타각으로  $5^\circ$ 의 변화량에 해당하며, 펄스폭의 최소값과 최대값은 각각  $1,150\mu\text{s}$ 와  $1,850\mu\text{s}$ 로 제한하였고, 실제 타각으로 좌현  $35^\circ$ 와 우현  $35^\circ$ 에 해당한다. Table 4.5는 펄스폭에 따른 실제 타각을 정리한 것이다.

지금까지 살펴본 통신, 추진, 조타, 센서, 원격제어 등의 하위 시스템을 통합하여 무인선박의 원격 제어시스템을 완성하였다. Fig. 4.11과 Fig. 4.12는 무인선박 제어시스템을 LabVIEW로 구현한 Front Panel과 블록다이어그램이다. 또한, Fig. 4.18은 각 하위 시스템과 Main 프로그램과의 종속관계를 계층적으로 보여주는 VI Hierarchy이다.



Fig. 4.11 Remote Control Program using LabVIEW(Front Panel)



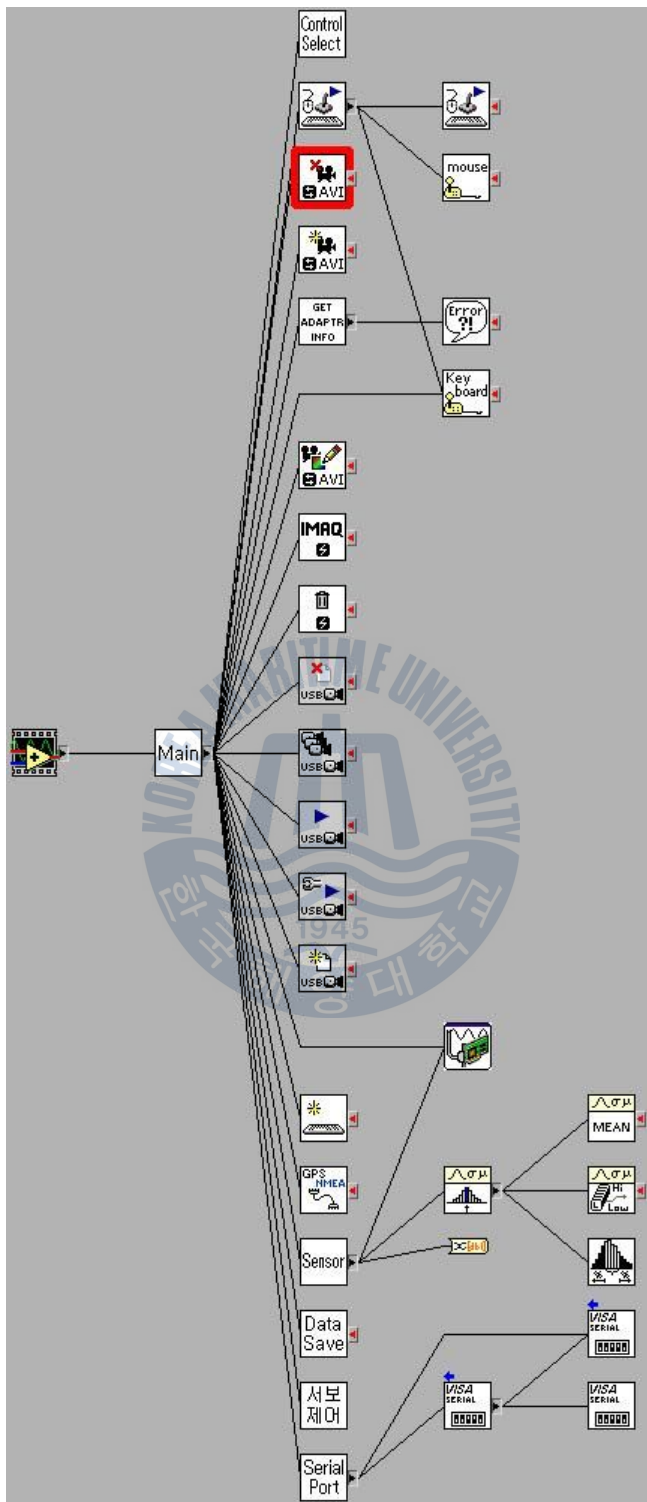


Fig. 4.13 Remote Control Program using LabVIEW(VI Hierarchy)

## 4.2.2 해상 실험 및 결과

무인선박의 원격 제어시스템 검증을 위하여 해상 실험을 수행하였다. 실험은 2010년 10월 22일(금) 오전에 실시하였으며, 실험장소는 Fig. 4.14와 같이 육상제어국 PC가 인터넷에 연결될 수 있고, 해상실험장소와 가까운 곳에서 실시하였다.

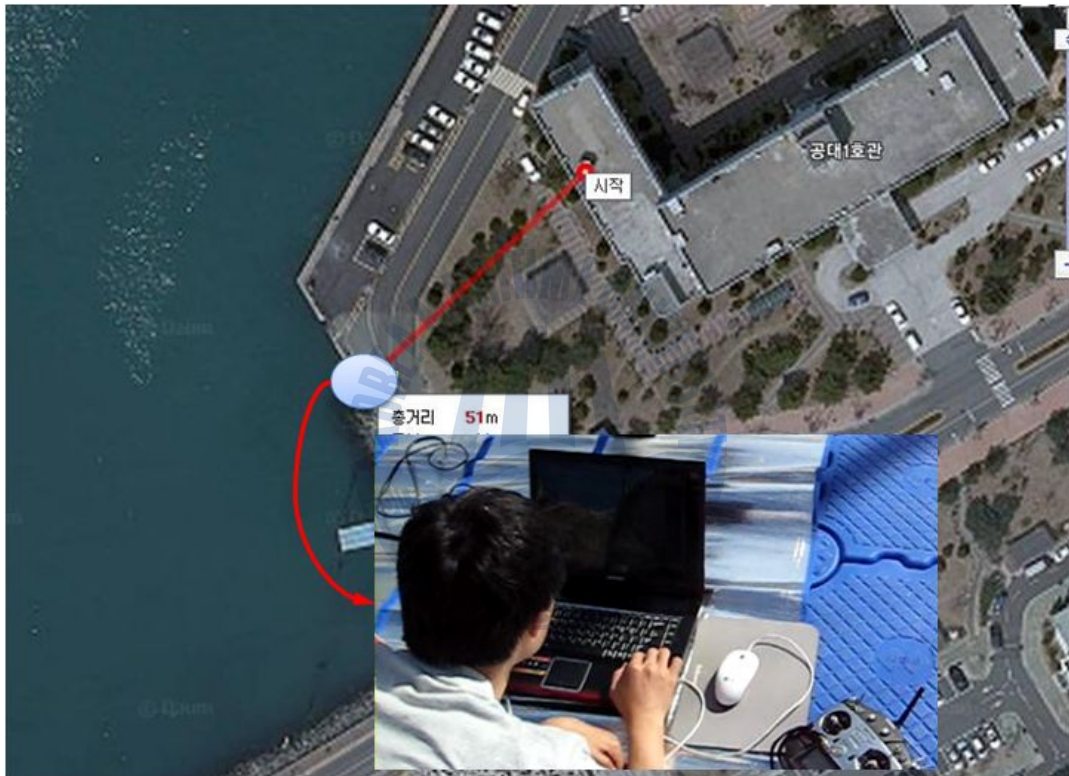


Fig. 4.14 USV Remote Control Test Site

실험에 앞서 육상제어국 PC와 무인선박 PC의 인터넷 품질 테스트를 실시하였다. 육상제어국 PC는 공과대학의 WiFi 무선인터넷을 이용하였고, 인터넷 품질 테스트 결과 Fig. 4.15와 같이 다운로드 2.50Mbps, 업로드 1.36Mbps로 초고속 인터넷 연결이 가능하였다. 무인선박 PC는



HSDPA 무선인터넷에 연결하였으며, 인터넷 품질 테스트 결과 Fig. 4.15 와 같이 다운로드 56.03Kbps, 업로드 41.06Kbps로 '2.1.3 HSDPA 무선인터넷 품질 측정 테스트' 결과와 큰 차이가 없었다.

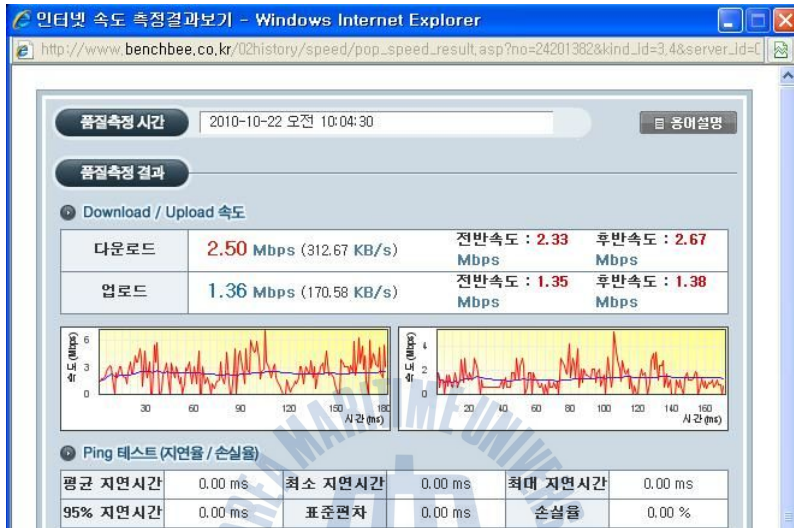


Fig. 4.15 The Internet Quality Test of Control Station PC

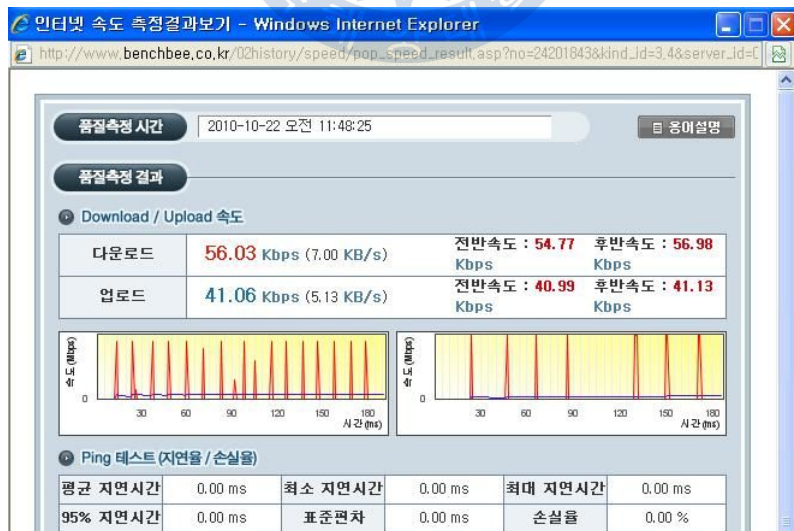


Fig. 4.16 The Internet Quality Test of USV PC

Fig. 4.17은 무인선박이 원격 제어모드로 주향한 GPS 위치를 플로팅한 이미지와 Google Earth 지도를 중첩한 것이다. Fig. 4.18은 실험 동안 무인선박의 중요 정보를 하드디스크에 저장한 데이터 로그 파일이다.

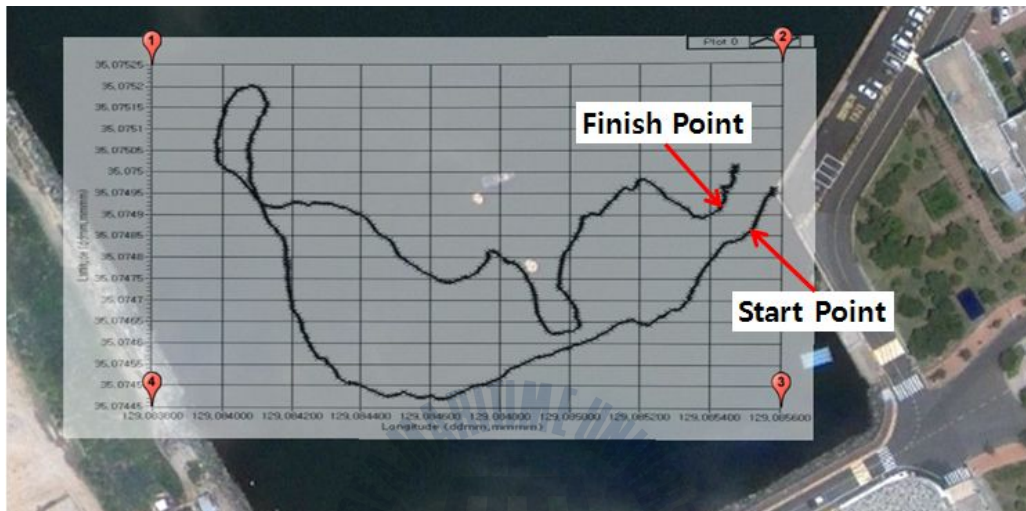


Fig. 4.17 Trajectory of Remote Control USV

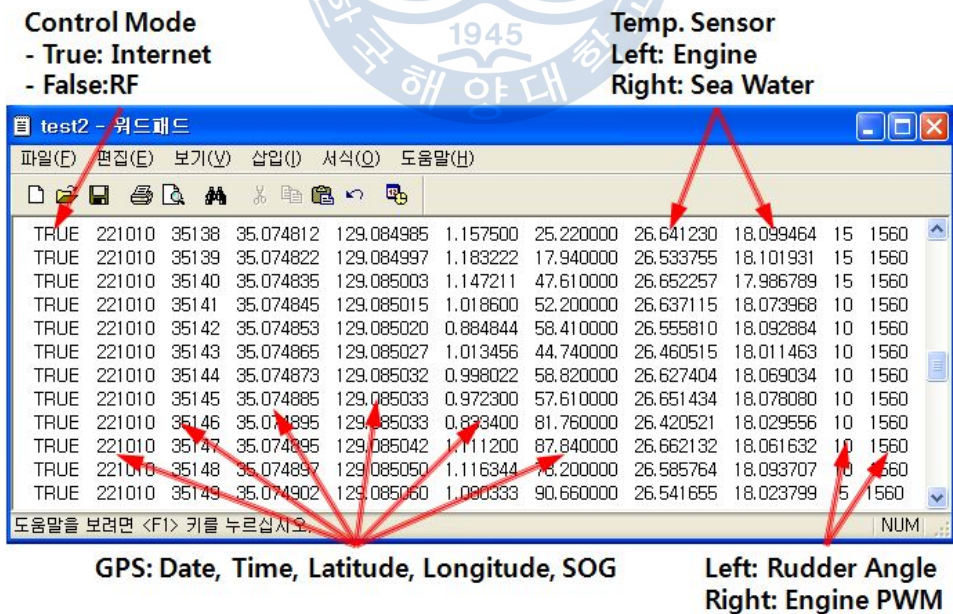


Fig. 4.18 Data Log File

실험 시간은 약 400초 동안 이루어졌으며, Fig. 4.17에서 볼 수 있듯이 무인선박을 원격 제어하여 출발지점으로 돌아오게 하였으나 3초 간격의 영상 이미지만으로 무인선박을 완벽하게 제어하기는 쉽지 않았다. Fig. 4.19는 무인선박의 원격제어를 위해 명령한 타각 그래프이며, Fig. 4.20은 무인선박의 속력을 제어하기 위해서 명령한 PWM 펄스폭 그래프이다.

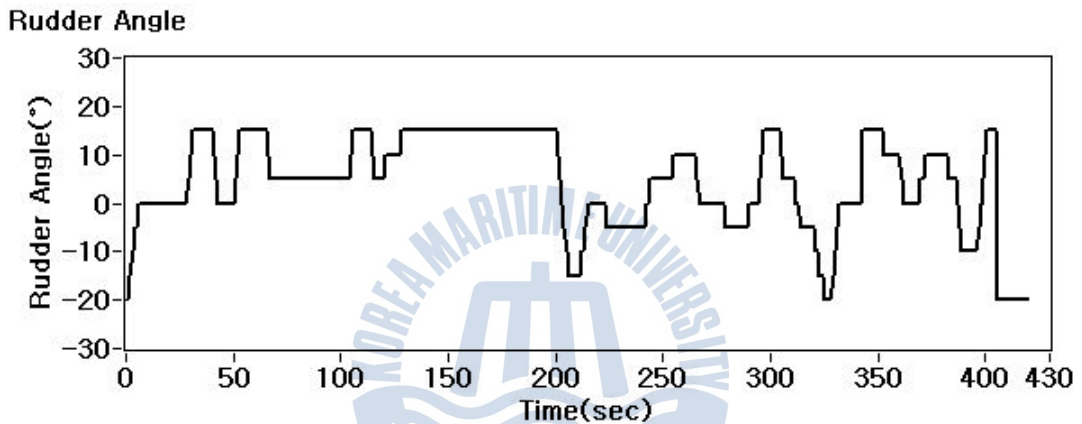


Fig. 4.19 History of Rudder Angle during Remote Control

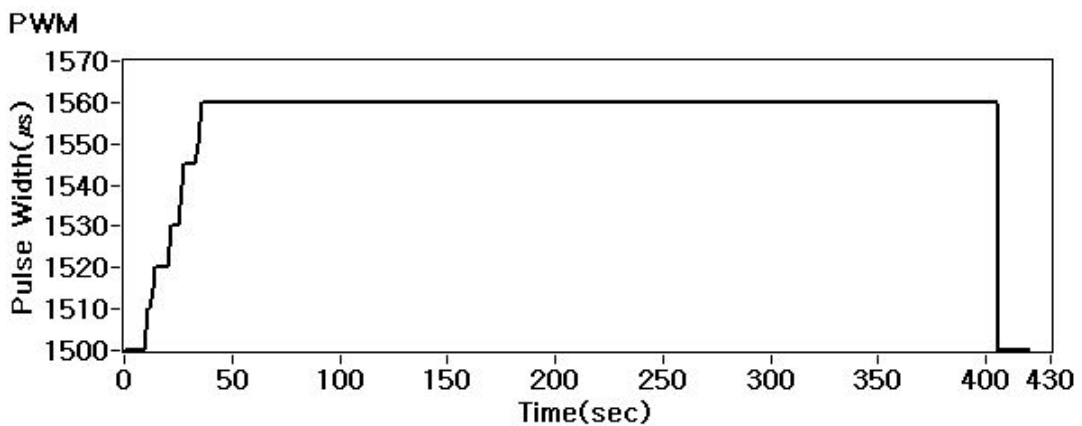


Fig. 4.20 History of Pulse Width during Remote Control

Fig. 4.21은 실험중 온도센서를 이용하여 측정한 BLDC 모터와 해수 온도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4.22는 무인선박의 카메라가 3초 간격으로 촬영한 영상의 일부를 시간 순서대로 나열한 것이다.

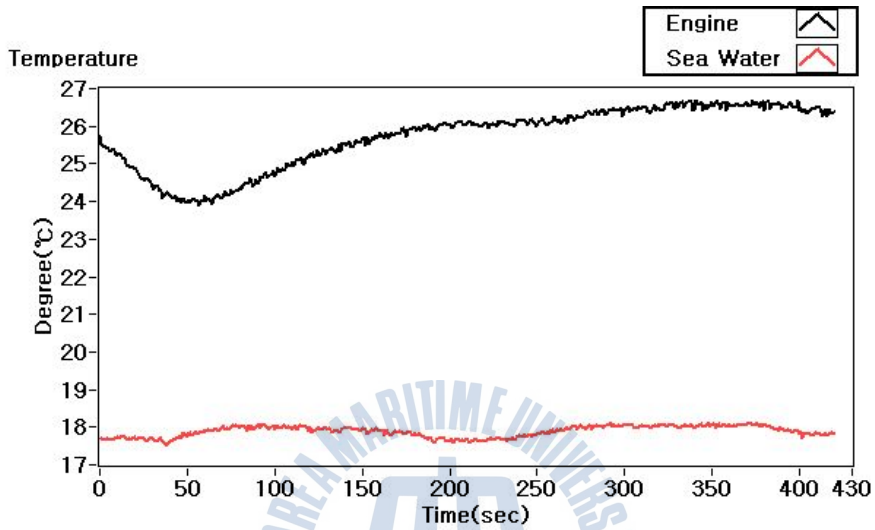


Fig. 4.21 History of Temperatures of BLDC Motor & Sea Water

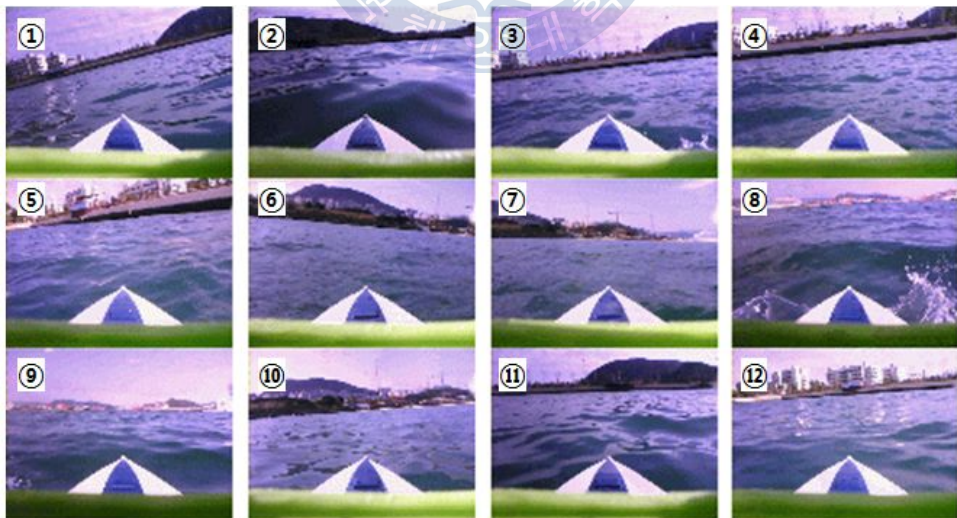


Fig. 4.22 Continuous Still Images

### 4.3 자율운항 모드(Autonomous Navigation Mode)

Fig. 4.23은 독일에서 개발하고 있는 항만감시 목적의 무인선박 운용도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 무인선박은 자율운항에 의해서 변침점을 스스로 찾아 다니면서 정보를 수집하여 육상제어국으로 전송하도록 하고 있다. 본 연구에서도 이러한 무인선박의 자율운항 기능을 구현하고자 하였다. 무인선박의 '자율운항 모드'는 육상제어국에서 인터넷을 이용하여 무인선박의 변침점을 설정하면, GPS를 통해서 획득한 본선의 위치에서 변침점까지의 진침로를 Heading 센서에서 획득한 선수방위와 비교하여 제어기에 입력하고, 제어기는 선박의 방향을 제어하기 위한 타각을 스스로 명령하여 설정한 변침점을 찾아가도록 구현된다. 지금부터는 무인선박의 자율운항 모드를 구현하기 위한 과정을 설명한다.



Fig. 4.23 Harbour Patrol using an USV at Port Kiel, German

### 4.3.1 선박 조종운동 모델

선박은 일종의 부유체로서 Fig. 4.24와 같이  $x, y, z$ 축 방향의 운동인 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 상하동요(heave)와  $x, y, z$ 축 주위의 회전운동인 횡동요(roll), 종동요(pitch), 선수동요(yaw)의 6자유도 운동을 한다. 만약, 선체에 작용하는 힘( $\vec{F}$ )과 모멘트( $\vec{M}$ )를  $x, y, z$ 축 성분으로 표시하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}\vec{F} &= \vec{i}X + \vec{j}Y + \vec{k}Z \\ \vec{M} &= \vec{i}K + \vec{j}M + \vec{k}N\end{aligned}\tag{4.2}$$

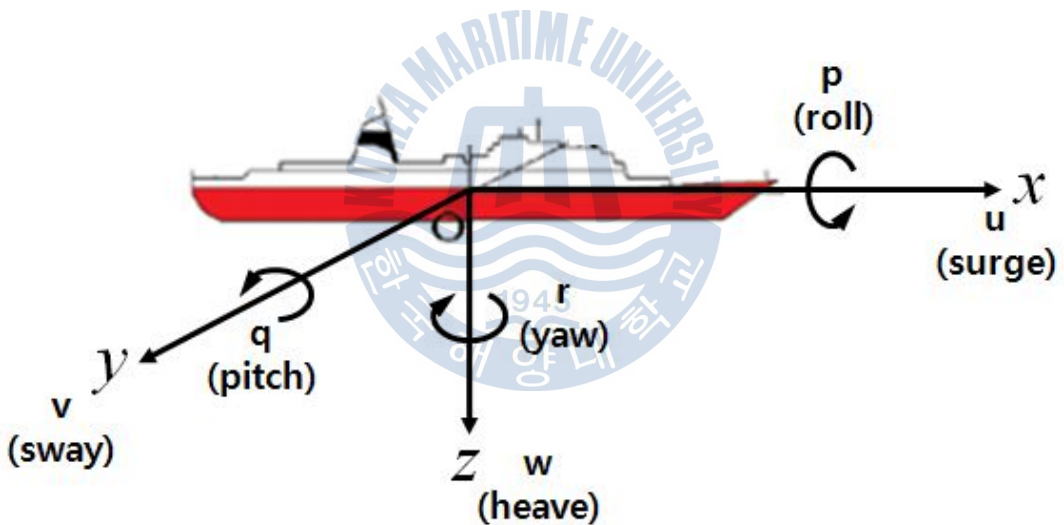


Fig. 4.24 6DOF Movement of Ship

한편, 선박을 강체(rigid-body)로 가정하여 선박의 6자유도 운동을 표현하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\
I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\
I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
\end{aligned} \tag{4.3}$$

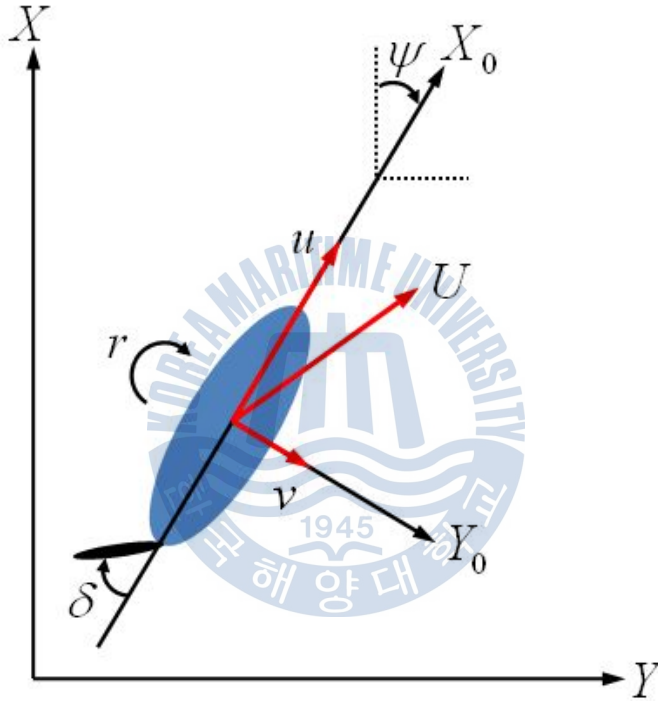


Fig. 4.25 Ship's Coordination

그러나 선박의 운동을 식 (4.3)과 같이 6자유도 운동으로 해석하려고 하면 많은 어려움이 있다. 따라서 몇 가지 가정을 통해서 식을 간략화 한다. 즉, 좌표계의 원점이 선박의 중심선에 있고, 선박의 무게 분포가 균등하며, Fig. 4.25와 같이 선박이 2차원 평면상에서 운동을 한다고 가정하면,  $y_G = 0$ ,  $I_{xy} = I_{yz} = 0$ 이 된다. 또한 heave, roll, pitch와 관련된 운

동을 무시할 수 있어  $w=p=q=\dot{w}=\dot{p}=\dot{q}=0$ 이 된다. 따라서 선박의 운동은 surge-sway-yaw의 3자유도 운동이 되며, 다음과 같이 간략화 된다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u}-vr-x_G r^2) &= X \\ m(\dot{v}+ur+x_G \dot{r}) &= Y \\ I_z \dot{r}+mx_G(\dot{v}+ur) &= N \end{aligned} \quad (4.4)$$

한편, sway 속도( $v$ ), yaw rate( $r$ ), 타각( $\delta$ )이 작고 선박의 평균 전진속력( $u_0$ )이 일정하다고 가정하면 surge 운동을 sway, yaw 운동으로부터 분리할 수 있으며, 이 때 선박의 조종운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m(\dot{v}+u_0 r+x_G \dot{r}) &= Y \\ I_z \dot{r}+mx_G(\dot{v}+u_0 r) &= N \end{aligned} \quad (4.5)$$

Davidson과 Schiff가 제안한 것처럼 식 (4.5)의 좌변항인  $Y, N$ 의 운동에 관여하고 있는 변수를  $\dot{v}, \dot{r}, v, r, \delta$ 라 가정하고, 이들 변수로 Taylor 전개(1차)항만으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y &= Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_\delta \delta \\ N &= N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r + N_\delta \delta \end{aligned} \quad (4.6)$$

여기서 우변의 1, 2번째 항은 관성항, 3, 4번째 항은 감쇠항, 5번째 항은 타력항이다. 식 (4.6)를 식 (4.5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.



$$M\dot{\nu} + N(u_0)\nu = b\delta \quad (4.7)$$

$$\text{단, } \nu = [v, r]^T, \quad M = \begin{bmatrix} m - Y_v & mx_G - Y_r \\ mx_G - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix}$$

$$N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix}$$

식 (4.7)은 sway, yaw의 복합운동을 나타내는 선형 조종운동방정식이 라고 한다[Davidson, K.S.M. and Schiff, L.I., 1964].

#### 4.3.2 Nomoto 응답 모델

Nomoto는 Davidson과 Schiff가 제안한 조종운동방정식에서 sway 속도( $v$ )를 제거하여 타각( $\delta$ )에 따른 선회각속도( $r$ )로 표현되는 새로운 모델을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{K(1 + T_3 s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$$

$$\text{단, } T_1 T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)}$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)} \quad (4.8)$$

$$K = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)}$$

$$KT_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)}$$

여기서  $m_{ij}$ ,  $n_{ij}$ ,  $b_i$ 는 식 (4.7)에서 정의된 행렬  $M$ ,  $N$ ,  $b$ 의 원소를 의미한다. 만약,  $T = T_1 + T_2 - T_3$ 으로 놓으면 다음과 같이 1계 미분방정식 형태의 Nomoto 1차 모델로 근사화할 수 있으며, 이를  $KT$  모델이라고도 한다[T. I. Fossen, 1994].

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{1 + Ts} \quad (4.9)$$

이러한 Nomoto 모델의 장점은 선박의 운동을 유체력의 관점이 아닌 입력( $\delta$ )에 대한 응답( $r$ )의 형태로 표현되므로, 선박의 조종운동 특성을 쉽게 파악할 수 있다는 것이다.

### 4.3.3 무인선박 모델의 파라미터 추정

본 연구에서 제작한 무인선박은 근본적으로 연속시스템이지만 제어극과는 일정한 시간간격, 즉 1초 샘플링 주기( $T_0$ )로 제어지령과 센서 값을 주고받기 때문에 이산시간시스템으로 간주할 수 있다. 따라서 식 (4.9)의 연속시간 모델을 이산화하여 ARX(AutoRegressive model with eXternal input) 모델로 표현하면 식 (4.11)과 같으며, Fig. 4.26은 ARX 모델을 도식적으로 표현한 것이다[Velasco F. J. et al, 2007].

$$A(z^{-1})r(k) = B(z^{-1})\delta(k) + e(k) \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} \\ B(z^{-1}) &= b_1 + b_2z^{-1} \end{aligned}$$

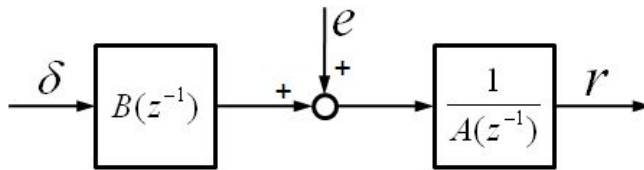


Fig. 4.26 ARX Model

한편, 제어대상인 무인선박의 ARX 모델의 파라미터  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ 를 추정하기 위해서는 타각( $\delta$ ) 및 선회각속도( $r$ )에 관한 데이터를 수집해야 한다. 이를 위해 타각  $30^\circ$  및 타각  $20^\circ$ 에 대해서 Fig. 4.27과 같이 선회시험을 수행하면서 데이터를 수집하였다.

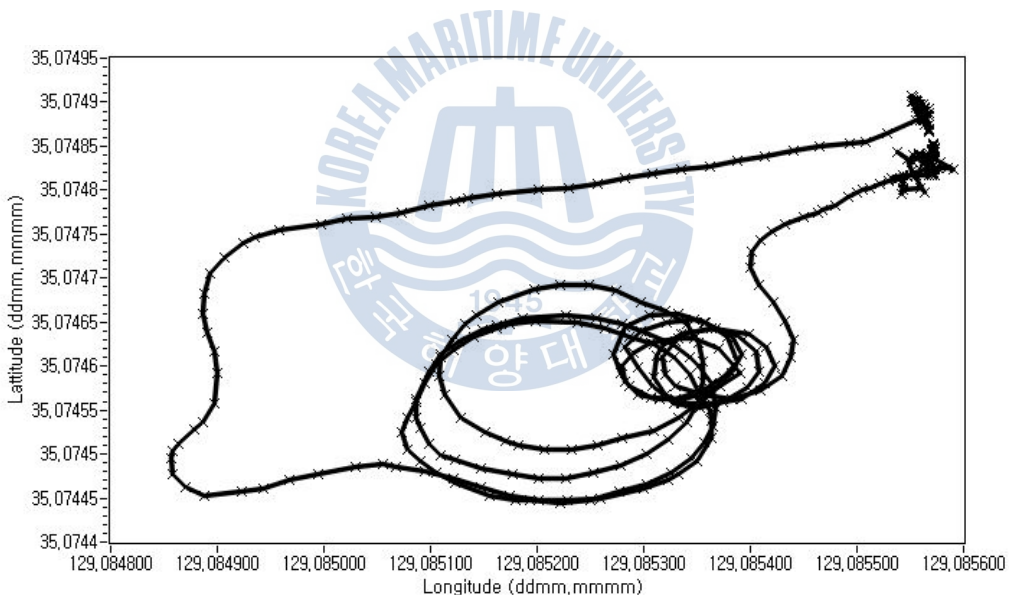


Fig. 4.27 Trajectory of USV during Turning Circle Test

Fig. 4.28은 선회시험동안 타각( $\delta$ ) 및 GH2183 Heading 센서가 측정한 선회각속도( $r_s$ )를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 바람, 파도 등의 외란으로 선회각속도에 잡음이 많이 섞여있는 것을 알 수 있다. 이러한 잡음

을 파악하기 위해서 수집된 데이터를 FFT 분석하였다. FFT 분석 시 해닝 윈도우를 사용하였으며, Fig. 4.29는 그 결과를 나타낸 것이다.

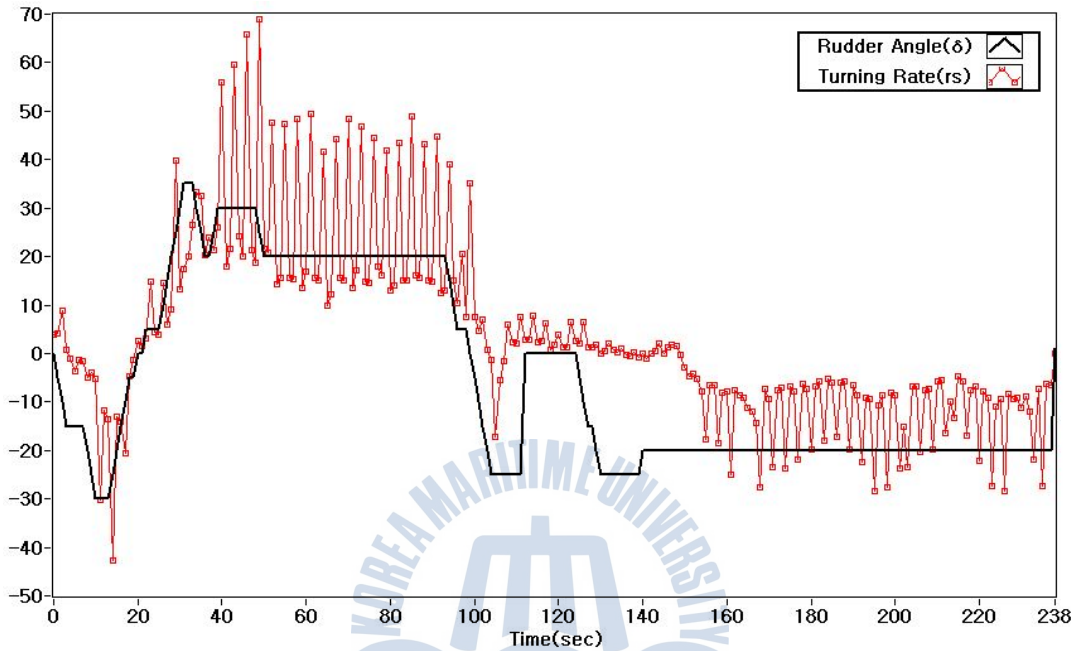


Fig. 4.28 Turning Rate( $r_s$ ) according to Rudder Angle( $\delta$ )

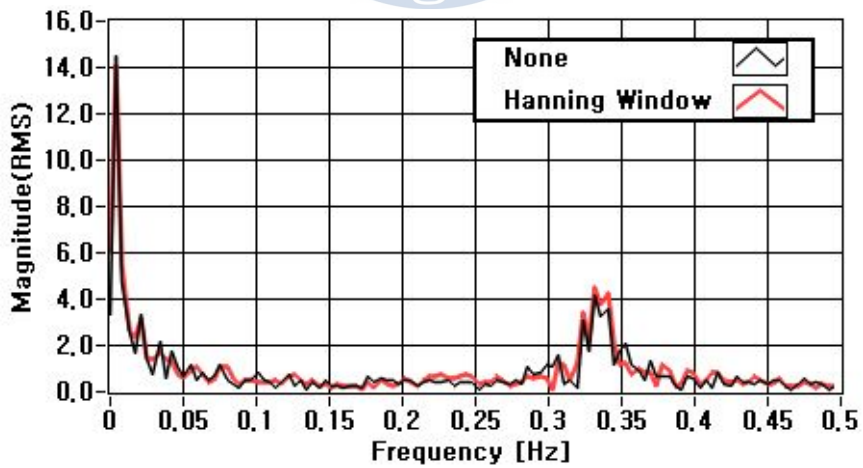


Fig. 4.29 FFT Analysis of Turning Rate( $r_s$ )

그래프로부터 차단주파수(cut-off frequency)를 0.25Hz로 결정하였으며, MATLAB의 BUTTER 명령어를 이용하여 다음과 같이 Butterworth 3차 필터를 설계하였다.

$$\begin{aligned}
 H(z^{-1}) &= \frac{r_f(z^{-1})}{r_s(z^{-1})} \\
 &= \frac{0.1667 + 0.5000z^{-1} + 0.5000z^{-2} + 0.1667z^{-3}}{1 + 0.3333z^{-2}}
 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Fig. 4.30은 필터전(-x-)과 필터후(-●-)의 선회각속도를 나타낸 것으로 잡음이 많이 제거된 것을 알 수 있다.

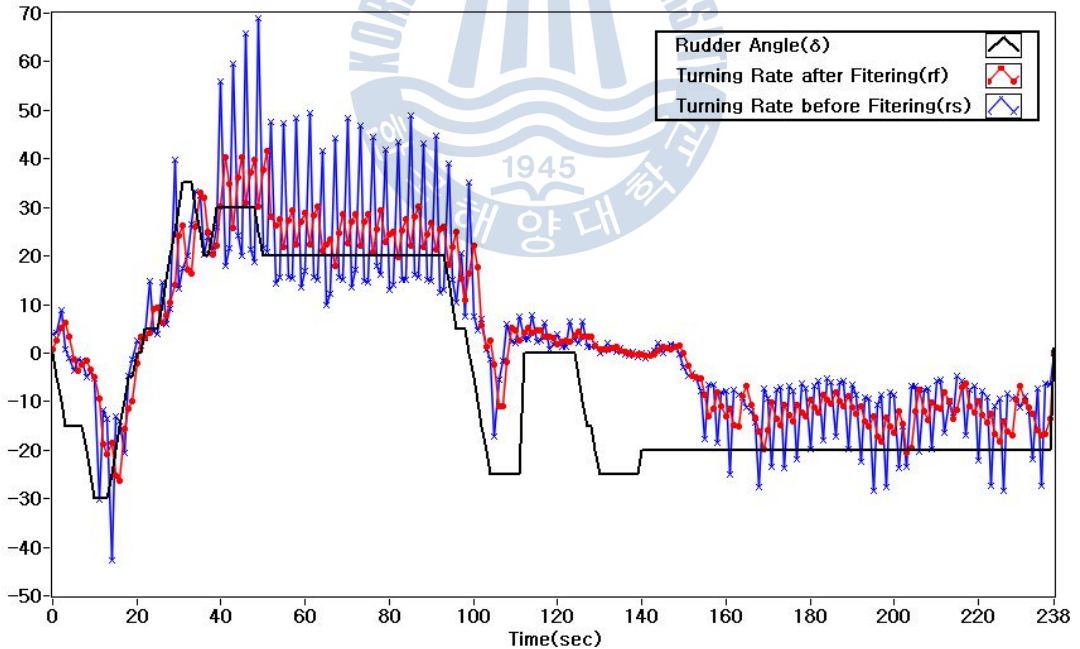


Fig. 4.30 Turning Rates( $r_s, r_f$ ) before and after Filtering

그리고, 프로그래밍을 위해서 식 (4.12)을 시간영역의 차분방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{r_f(z^{-1})}{r_s(z^{-1})} = \frac{0.1667 + 0.500z^{-1} + 0.500z^{-2} + 0.1667z^{-3}}{1 + 0.3333z^{-2}} \quad (4.13)$$

$$r_f(k) = -r_f(k-2) + 0.1667r_s(k) + 0.500r_s(k-1) + 0.500r_s(k-2) + 0.1667r_s(k-3)$$

데이터( $\delta$ ,  $r_f$ )가 수집되면 Fig. 4.31과 같이 적응자를 이용하여  $r_f$ 와  $r$ 의 오차제곱의 합이 최소가 되도록 ARX 모델의 파라미터를 구할 수 있는데, 이때 적응자로 최소자승법을 사용하였다. 본 연구에서는 MATLAB의 식별(System Identification) 툴박스를 이용하였고, 이로부터 구한 이산 시스템의 파라미터는 다음과 같다.

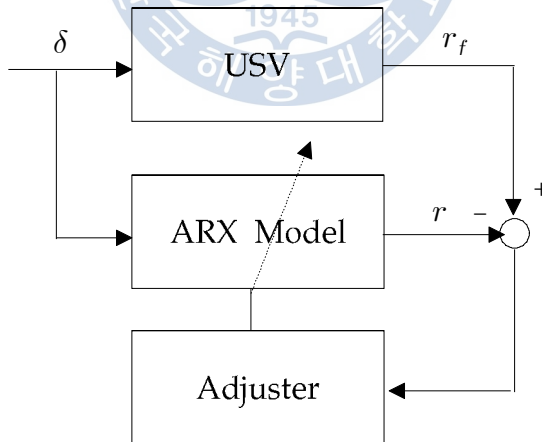


Fig. 4.31 Model Adjustment Technique

$$A(z^{-1})r(k) = B(z^{-1})\delta(k) + e(k) \quad (4.14)$$

$$\text{단, } A(z^{-1}) = 1.0132 - 0.6151z^{-1}$$

$$B(z^{-1}) = 0.0881 + 0.0914z^{-1}$$

그리고, 식 (4.14)를 시간영역의 차분방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$r(k) = \frac{1}{1.0132} (0.6151r(k-1) + 0.0881\delta(k) + 0.0914\delta(k-1) + e(k)) \quad (4.15)$$

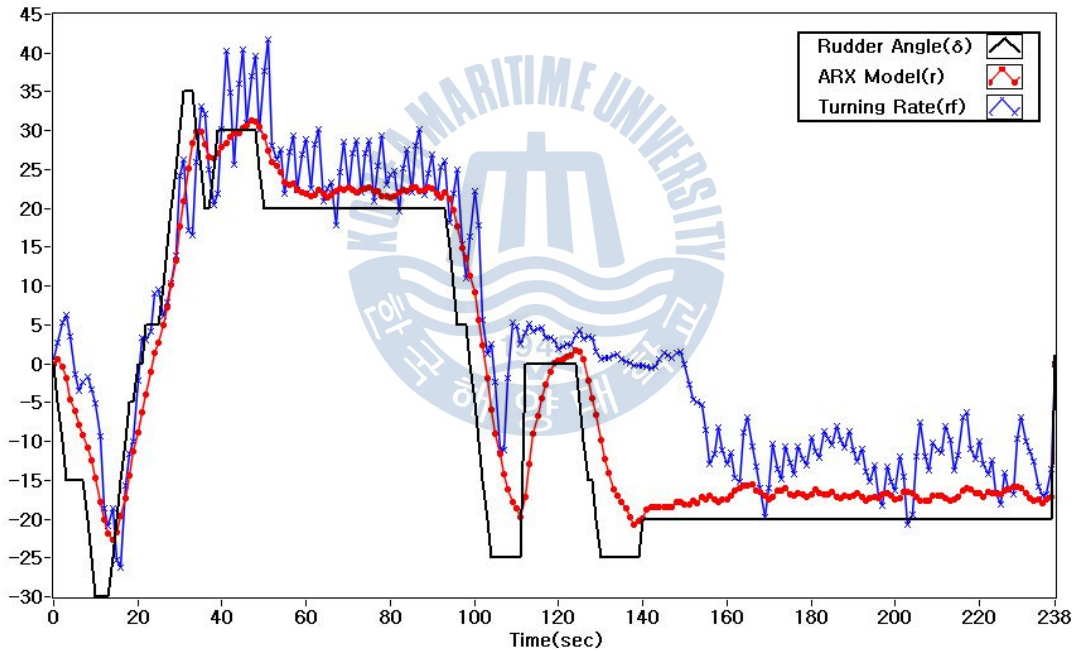


Fig. 4.32 Comparison between  $r_f$  and  $r$  for Verification of Discrete Model

이렇게 구한 무인선박의 이산시스템 모델이 올바른지 검증이 필요하다. 이를 위해서 식 (4.15)에 2010년 11월 6일 선회시험의 타각( $\delta$ ) 데이터와 평균이 0이고 표준편차가 1인 외란( $e(k)$ )을 입력하여 이산시간 모델의 선회

각속도( $r$ )을 구하였다. 이렇게 구한 선회각속도( $r$ )를 Fig. 4.32와 같이 선회 시험 시 측정된 선회각속도( $r_f$ ) 데이터와 함께 그래프로 나타내었다.

그림에서 검은색 실선은 선회시험 동안 명령한 타각( $\delta$ ) 데이터를 의미하며, 단위는  $[^\circ]$ 이다. 파랑색과 빨강색 그래프는 각각 선회각속도  $r_f$ ,  $r$ 을 의미하며, 단위는  $[^\circ/\text{sec}]$ 이다. 125~150초 구간에서 다소 차이가 있으나 비교적 ARX 모델과 실제 무인선박의 타각에 대한 선회각속도 응답이 근사함을 알 수 있다.

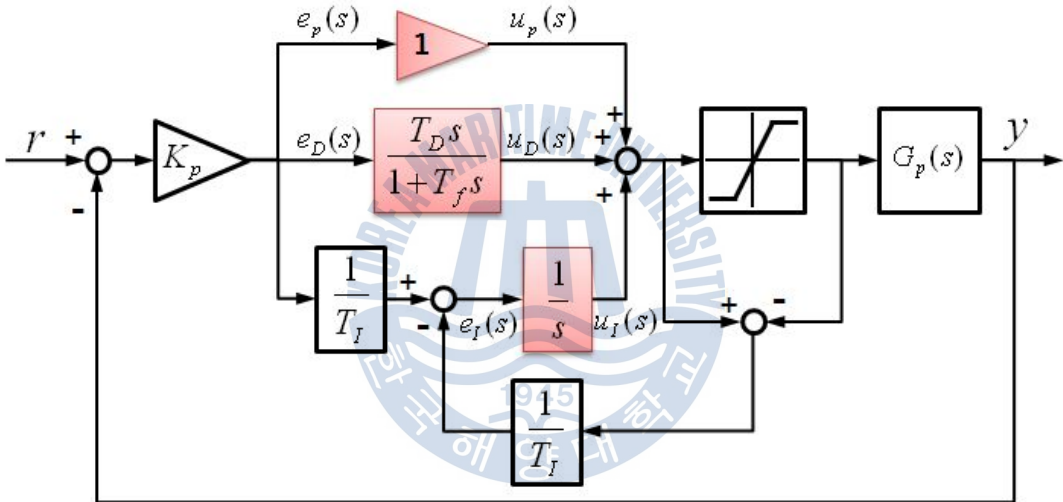


Fig. 4.33 PID Controller for Autonomous Navigation of USV

### 4.3.4 디지털 PID 제어기 설계

앞에서 우리는 제어대상의 이산시간 모델을 얻었으므로 이를 바탕으로 무인 선박의 자율운항에 필요한 제어기를 설계하고 적용해야 한다. 이를 위해서 Fig. 4.33과 같은 디지털 PID제어기를 설계하였다. 이상적인 미분동작은 측정신호에 고주파 잡음이 섞이게 되면 이 신호가 함께 미분되면서 출력이 매우 커지는 미분폭주(Derivative Kick) 현상이 발생하므로 이러한 현상을 막기 위



해서 식 (4.16)과 같이 1차 저역필터를 적용한 수정식을 사용하였다.

$$G_D(s) = \frac{T_D s}{1 + T_f s} \quad (4.16)$$

$$\text{단, } T_f = \frac{T_D}{N}$$

여기서  $K_p$ 는 비례계수(Proportional Gain),  $T_D$ 는 미분시간(Derivative Time)이며,  $N$ 은 필터의 대역폭을 조절하는 계수로서 일반적으로  $3 \leq N \leq 10$  범위의 값을 사용한다.  $N$ 이 작을수록 대역폭이 작아져서 고주파 성분을 차단하는 효과를 나타내며,  $N$ 이 아주 클 경우에는  $T_f \approx 0$ 이 되어 필터효과가 없어진다.

또한, 무인선박의 타각은  $\pm 35^\circ$ 로 제한되므로 포화기(Saturator)를 적용하였다. 그러나 포화기를 적용하면 적분기 와인드업(Windup) 현상이 발생한다. 이것은 제어기의 출력이 포화기의 한계를 벗어나는 동안 일정하게 되고 이로 인해 출력에는 변동이 일어나지 않지만 적분기에는 오차가 누적됨으로 인해서 정작 출력이 설정치에 가까워졌을 때 제어값이 작아져야 함에도 불구하고 계속 큰 값이 출력되어 Overshoot가 커지고 정정시간(Settling time)이 길어지게 되는 것을 말한다. 이러한 와인드업 현상을 방지하기 위해서 Anti-windup 기법을 적용하였다[Karl J. Astrom, 1995].

디지털 PID제어기를 얻기 위해서는 Fig. 4.33의 붉은색으로 표시된 연속 PID제어기를 Tustin법을 사용하여 근사화하면 된다[R. Isermann, 1981]. 먼저, 비례(P) 동작을 근사화하면,

$$G_P(z) = 1 \quad (4.17)$$

이 되고, 식 (4.17)을 시간영역의 차분방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$u_P(k) = e_P(k) \quad (4.18)$$

다음으로 적분(I)동작을 근사화하기 위해서 전달함수  $G_I(s) = 1/s$  에  $s = 2(z-1)/T_0(z+1)$  을 대입하면,

$$G_I(z) = \frac{1}{\frac{2}{T_0} \frac{z-1}{z+1}} = \frac{(T_0/2)(1+z^{-1})}{1-z^{-1}} \quad (4.19)$$

이 되고, 식 (4.19)를 시간영역의 차분방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$G_I(z) = \frac{u_I(z)}{e_I(z)} = \frac{(T_0/2)(1+z^{-1})}{1-z^{-1}} \quad (4.20)$$

$$u_I(k) = u_I(k-1) + (T_0/2)(e_I(k) + e_I(k-1))$$

마지막으로 식 (4.16)과 같이 1차 저역필터가 적용된 미분(D) 동작에  $s = 2(z-1)/T_0(z+1)$  을 대입하여 근사화하면,

$$G_D(z) = \frac{T_D \frac{2}{T_0} \frac{(z-1)}{(z+1)}}{1 + T_f \frac{2}{T_0} \frac{(z-1)}{(z+1)}} = \frac{2T_D(z-1)}{T_0(z+1) + 2T_f(z-1)} \quad (4.21)$$

$$= \frac{2T_D(z-1)}{(T_0 + 2T_f)z + (T_0 - 2T_f)}$$

이 되고, 식 (4.21)을 시간영역의 차분방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$G_D(z) = \frac{u_D(z)}{e_D(z)} = \frac{2T_D(1-z^{-1})}{(T_0+2T_f) + (T_0-2T_f)z^{-1}}$$

$$(T_0+2T_f)u_D(k) = (T_0-2T_f)u_D(k-1) + 2T_D(e_D(k) - e_D(k-1)) \quad (4.22)$$

$$u_D(k) = \frac{(T_0-2T_f)}{(T_0+2T_f)}u_D(k-1) + \frac{2T_D}{(T_0+2T_f)}(e_D(k) - e_D(k-1))$$

디지털 PID제어기 설계를 위한 마지막 단계는  $K_P$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  값을 적절히 동조 (tuning)해 식 (4.17), (4.19), (4.21)을 완성하는 것이다. 본 연구에서는 Ziegler-Nichols 폐회로 동조법을 이용하여 PID제어기의 파라미터를 결정하였다 [J.G. Ziegler and N.B. Nichols, 1942].

(1) Relay Feedback을 통한 시스템의 한계진동 발생

Ziegler-Nichols 폐회로 동조법을 이용하여 제어상수를 결정하기 위한 첫 번째 단계는 Fig. 4.34와 같이 제어대상 모델에 Relay 제어를 적용한 후 한계진동이 발생하도록 Relay 출력( $d$ )을 증가시키는 것이다.

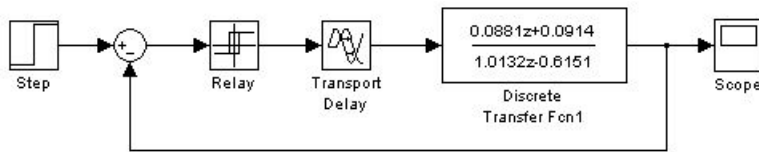


Fig. 4.34 Ziegler-Nichols Closed Loop Tuning Method using Relay Feedback

(2) 한계이득( $K_u$ ) 및 한계주기( $T_u$ ) 계산

제어상수 결정을 위한 두 번째 단계는 한계진동이 일어날 때의 한계주기(ultimate period,  $T_u$ )와 한계이득(ultimate gain,  $K_u$ )을 구하는 것이다. 한계주기( $T_u$ )는 한계진동 그래프를 분석하여 구하는데, Fig. 4.35는 Relay 제어기의 크기( $d$ )를 100으로 하였을 때 한계진동 그래프를 나타낸 것이다. 그래프로부터 구한 한계주기( $T_u$ )는 4초 이다. 다음으로, 한계이득( $K_u$ )은 Relay 출력( $d$ )과 한계진동의 진폭( $a$ )를 다음 식에 대입하여 구한다.

$$K_u = \frac{4d}{\pi a} = \frac{4 \times 100}{\pi \times 12.8} \approx 9.9472 \quad (4.23)$$

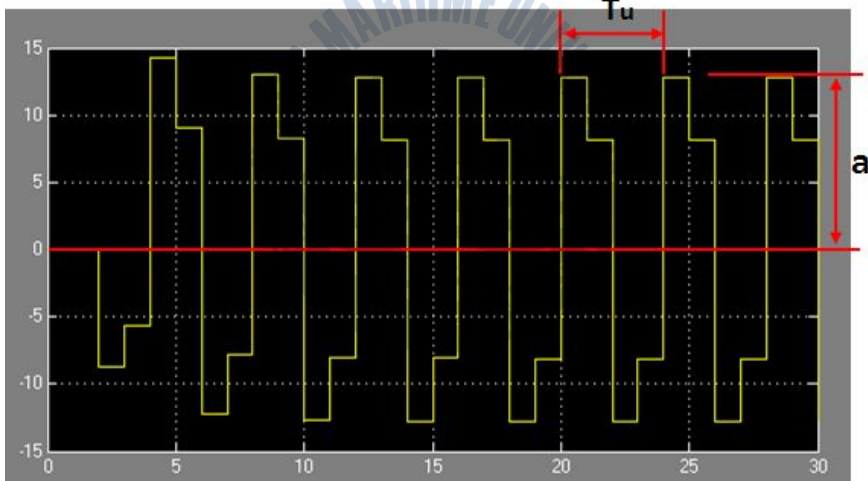


Fig. 4.35 Ultimate Oscillation of Relay Feedback System

(3) 제어상수( $K_P$ ,  $T_I$ ,  $T_D$ ) 결정

세 번째 단계는 한계주기( $T_u$ )와 한계이득( $K_u$ )을 Table 4.6에 대입하여 비례게인(Proportional gain,  $K_P$ ), 적분시간(Integral time,  $T_I$ ), 미분시간(Derivative time,  $T_D$ )을 구하는 것이다.

**Table 4.6 The Calculation of  $K_P$ ,  $T_I$ ,  $T_D$**

	$K_P$	$T_I$	$T_D$
PID	$\frac{1}{1.7}K_u = 5.851$	$\frac{1}{2}T_u = 2.000$	$\frac{1}{8}T_u = 0.500$

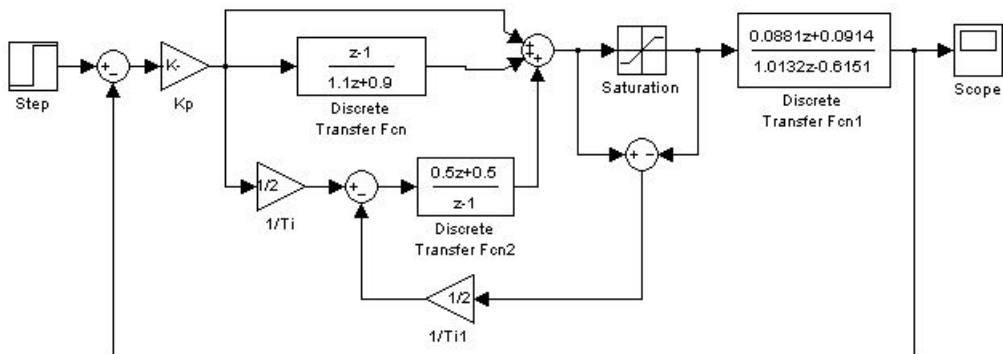
이렇게 구한 제어상수( $K_P$ ,  $T_I$ ,  $T_D$ )와  $T_0 = 1$ ,  $T_f = \frac{T_D}{N} = \frac{0.5}{10} = 0.05$ 를 식 (4.17), (4.19), (4.21) 대입하면,

$$G_P(z) = 1$$

$$G_I(z) = \frac{(T_0/2)(z+1)}{z-1} = \frac{(1/2)(z+1)}{z-1} = \frac{0.5z+0.5}{z-1} \quad (4.24)$$

$$G_D(z) = \frac{2T_D(z-1)}{(T_0+2T_f)z+(T_0-2T_f)} = \frac{z-1}{1.1z+0.9}$$

이 된다. 이것을 MATLAB의 Simulink를 이용하여 Fig. 4.36과 같이 구현하였다.



**Fig. 4.36 Digital PID Controller**

### 4.3.5 해상 실험 및 결과

앞에서 구한 디지털 PID 제어를 무인선박에 적용하여 해상실험을 하였다. 실험은 2010년 11월 14일(일) 오전에 원격 제어시스템 실험장소와 동일한 곳에서 실시하였다. 자율운항모드를 검증하기 위해서 한 변의 길이가 55m인 정사각형의 꼭지점에 해당하는 4개 지점을 변침점으로 설정하였으며, 각각의 변침점은 Table 4.7과 같다.

Table 4.7 Waypoints

	Latitude	Longitude	True Course
Waypoint_4(start)	35.074848°	129.085610°	230°
Waypoint_1	35.074528°	129.085147°	320°
Waypoint_2	35.074908°	129.084760°	050°
Waypoint_3	35.075226°	129.085225°	140°
Waypoint_4(finish)	35.074848°	129.085610°	

Fig. 4.37은 무인선박이 자율운항모드로 주향한 GPS 위치를 플로팅한 이미지와 Google Earth 지도를 중첩한 것이다. 그림에서 시작위치가 변침점\_4와 다른 것은 실제 실험 장소에 요트 계류를 위한 폰툰이 설치되어 있기 때문이다. 무인선박이 변침점에 도착하였는지 여부는 본선의 GPS 위치와 변침점의 거리를 계산하여 판단하였다. 즉, 두 지점사이의 거리가 10m 이하로 작아지면 다음 변침점으로 전환되도록 하였다. 이에 따라 변침점에 도달하기 전에 미리 변침하는 것을 그림에서 볼 수 있다. Fig. 4.38은 무인선박이 자율운항모드로 주향한 동안 타각명령 그래프로서 우회두를 위해서 주로 우현타를 사용한 것을 볼 수 있다.



Fig. 4.37 Trajectory during Autonomous Navigation of USV

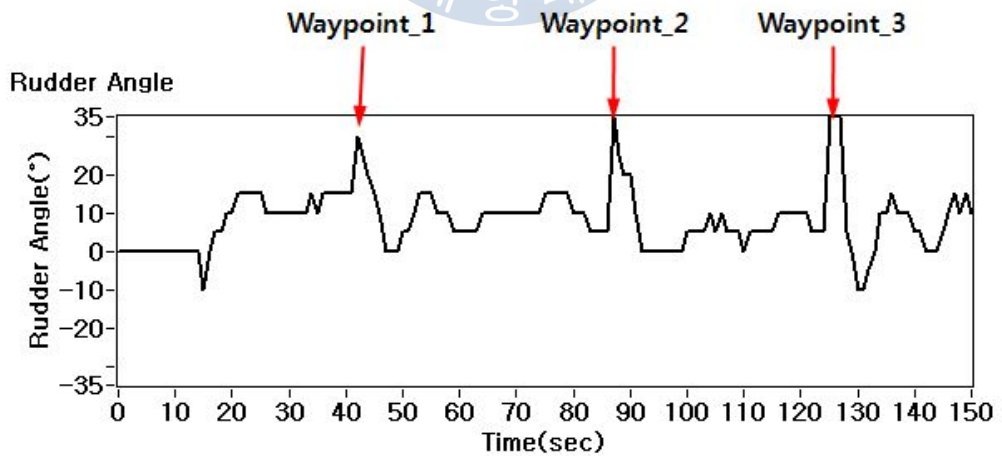


Fig. 4.38 History of Rudder Angle during Autonomous Navigation

## 제 5 장 결론

본 연구는 앞으로 다양한 분야에서 활용 가능성이 높아질 것으로 예상되는 무인선박에 관한 것으로 특히, 육상제어국과 무인선박간의 통신수단으로 무선인터넷을 이용하였다.

무인선박은 해상에서 임무 수행 시 무인선박의 상태 파악은 물론 모든 조치를 무선통신을 통해서 이루어진다. 따라서 무선통신 수단의 선택은 매우 중요한 요소이다. 그러나 기존 무인선박의 통신수단은 주로 VHF나 UHF같은 전용 통신모뎀을 이용하였는데, 이것은 무인선박 제어를 위해 별도의 운용콘솔을 필요로 하며, 안테나의 높이에 따라 통신거리에 큰 영향을 미친다. 따라서 육상제어국의 이동성이 떨어지고 무인선박의 개발 비용이 커지는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 전 세계적으로 통신 규격이 정해져 있으며, 상업적으로 서비스되고 있는 무선인터넷을 적용하였다. 현재 국내에서 이용 가능한 무선인터넷의 종류는 3가지가 있다. 그 중에서 이론상 인터넷 다운로드 속도가 14.4Mbps로 다소 느리지만 이동통신망을 이용하여 커버리지가 크며 기지국간 핸드오버(Hand-over) 및 이동중에도 사용이 가능한 HSDPA 무선인터넷을 무인선박 통제에 적용하였다.

한편 HSDPA를 무인선박에 적용하기 위해서는 실제 해상에서 HSDPA의 인터넷 속도 및 커버리지를 파악해야 한다. 이를 위해서 해상에서 표박중일 때와 항해중일 때 HSDPA 무선인터넷의 품질측정 실험을 하였



다. 실험결과 다운로드 속도는 초당 평균 4.87KB이었으며, 업로드 속도는 초당 평균 6.05KB이었다. 또한 Ping Test 결과 다운로드 및 업로드 모두 데이터 지연이나 손실이 없는 것으로 나타나 속도는 느리지만 매우 안정적인 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었다.

한편, 무인선박을 운용함에 있어서 중요한 것은 다운로드 속도보다는 업로드 속도이다. 왜냐하면 육상제어국에서 무인선박으로 전송하는 데이터는 텍스트 데이터로 1KB를 넘지 않으므로, 다운로드 평균속도인 초당 4.87KB로 충분하다. 그러나 무인선박은 GPS 등 각종 센서데이터와 카메라 영상데이터를 육상으로 전송해야 하는데 카메라의 영상데이터는 업로드 평균속도인 초당 6.05KB를 훨씬 초과한다. 따라서 무인선박의 통신프로그램 설계 시 영상데이터에 대한 이미지 크기 및 전송간격에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 영상의 크기를 가로, 세로 105×75 pixels, 압축포맷을 jpeg로 하여 영상데이터의 크기를 약 12KB로 줄였으며, 전송 시간 간격은 3초로 하였다.

본 연구를 통해서 HSDPA 무선인터넷을 이용한 무인선박 제어의 가능성을 확인하였지만 상용화 단계로 발전시키기에는 인터넷 속도 측면에서 다소 무리가 있는 것으로 판단되었다. 그러나 앞으로 4세대 이동통신인 LTE(Long Term Evolution)가 상용화 된다면 HSDPA의 이론상 속도가 지금보다 약 12배 이상 빨라져 무선인터넷을 이용한 무인선박의 제어가 충분히 가능할 것으로 판단된다.

무선인터넷 기반의 무인선박 개발과 더불어 본 연구의 또 다른 큰 특징은 자율운항이 가능하다는 것이다. 본 연구에서는 이러한 자율운항 기능을 구현하기 위해서 무인선박을 이산시간 시스템으로 가정하고, 선박의 선회시험을 통한 타각( $\delta$ ) 및 선회각속도( $r$ ) 데이터를 이용하여 파라미

터를 추정하였다. 추정된 이산시스템으로부터 디지털 PID 제어를 설계하였다.

무인선박의 자율운항을 위해서는 본선의 위치 정보를 알려 주는 GPS와 본선의 선수방향 정보를 알려 주는 Heading 센서가 반드시 필요하다. GPS가 획득한 본선의 위치와 변침점의 위치로부터 구면삼각형(대권계산)법을 이용하여 무인선박의 진침로(True Course)와 두 지점 사이의 거리를 구할 수 있다. 이렇게 구한 진침로와 Heading 센서의 선수방위의 차이를 디지털 PID 제어기에 입력하여 무인선박의 침로유지를 위한 타각 제어를 수행한다. 또한, 무인선박이 변침점에 도달하였는지 여부는 구면삼각형법으로 구한 두 지점 사이의 거리를 이용하여 판단한다. 본 연구에서는 변침점으로부터 반경 10m 이내에 들어왔는지 여부를 판단하여 자율운항 시험을 하였고, 파도, 바람 등 외력의 영향에도 불구하고 자율운항 기능을 성공적으로 구현하였다.

그러나 본 연구에서 구현한 무인선박의 자율운항은 변침점을 스스로 찾아가는 것으로, 전방 장애물을 스스로 감지하여 피항하는 기능은 없다. 이를 해결하기 위해서는 두 가지 방법이 있는데 첫 번째는 레이더를 이용하는 것이며, 두 번째는 카메라로 획득한 영상데이터를 신호처리하는 것이다. 앞으로 이에 대한 연구를 통해서 좀 더 완벽한 자율운항 기능을 구현해야 할 것이다.

## 후기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국장학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. S2-2009-000-00634-1).

## 참고문헌

- [1] James Colito(2007), "Autonomous Mission Planning and Execution for Unmanned Surface Vehicles in Compliance with the Marine Rules of the Road", MSc Thesis, University of Washington.
- [2] Michael Benjamin et al(2007), "Navigation of Unmanned Marine Vehicles in Accordance with the Rules of the Road", Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3581-3587.
- [3] Jacoby Larson, Michael Bruch, and John Ebken(2006), "Autonomous Navigation and Obstacle Avoidance for Unmanned Surface Vehicles", Proceedings of SPIE Unmanned Systems Technology VIII, April 2006.
- [4] Eric T. Steimle, Michael L. Hall(2006), "Unmanned Surface Vehicles as Environmental Monitoring and Assessment Tools", IEEE OCEANS 2006, pp.1-5.
- [5] Jens Veers and Volker Bertram(2006), "Development of the USV Multi-Mission Surface Vehicle III", Proceedings 5th International Conference on Computer Application.
- [6] Visiongain(2008), "The Emerging UMV and UGV Markets 2008~2018".
- [7] Moire Inc.(2003), "The Growing US Market for Unmanned Surface Vehicles(USVs)", pp.1-8.
- [8] Research And Markets(2010), "The Growing US Market for Unmanned Surface Vehicles(USVs)", pp.1-8.
- [9] 김호일, 전승환(2009), "GPS 기반의 초소형 무인선박을 위한 자율항법 알고리즘 개발", 한국항해항만학회지, 제33권 5호, pp.303-308.

- [10] H. I., Kim, S.H. Jun(2010), "Development of Dual Mode(Autonomous and Remote Control) Unmanned Surface Vehicle", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 34, No. 3, pp.376-382.
- [11] 이영우(2006), "WiBro Operation & Management", KT 네트워크 기술연구소.
- [12] 국토해양부(2010), "국토해양부 해양교통시설과 보도자료".
- [13] R. Love *et al*(2004), "Performance of 3GPP High Speed Downlink Packet Access(HSDPA)", Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall, IEEE 60th, pp.3359-3363.
- [14] 여운영(2007), "WCDMA/HSDPA 프로토콜 구조", SK텔레콤.
- [15] 김순갑(2004), "선박적화", 다솜출판사.
- [16] 권대복 외 3명(2008), "HEV 동력계 및 배터리계 냉각 시스템용 BLDC모터 개발", 한국자동차공학회 창립 30주년 기념 학술대회 논문집, pp.2071-2076.
- [17] Davidson, K.S.M and Schiff, L.I.(1964), "Turning and Course Keeping Qualities", Transactions of SNAME, Vol. 54.
- [18] Fossen, T. I.(1994), "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons Ltd.
- [19] Velasco F. J. et al(2007), "Manoeuvring Model Parametric Identification of an Autonomous in-scale Fast-ferry Model", IEEE OCEANS 2007.
- [20] Karl J. Astrom and Tore Hagglund(1995), "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning", 2nd ed. Research Triangle Park, NC.
- [21] R. Isermann(1981), "Digital Control System", Springer-Verlag, pp.74-76.
- [22] J.G. Ziegler, N.B. Nichols(1942), "Optimum Settings for Automatic Controllers", Transactions of ASME, Vol. 64, pp.759-768.

## 감사의 글

어느 덧 조도(朝島)에 첫 발을 디딘지 6년이 되었습니다. '2010년 대한민국 국비유학생'으로 선발되어 노르웨이 NTNU로 유학을 위해서 정든 섬을 떠날 생각을 하니 기쁜 마음보다는 진한 아쉬움이 더 남습니다. 하지만 회자정리(會者定離)가 거스를 수 없는 인생의 순리이듯 거자필반(去者必返)을 기약할 수 있기에 조도를 잠시 떠납니다. 섬을 떠나기에 앞서 6년간 많은 도움을 주신 분들과 본 석사학위 논문에 도움을 주신 분들께 이 자리를 빌려 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

가장 먼저 전승환 지도교수님께 존경과 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 제가 학문적으로 생각하고 계획하는 것들을 늘 지지해 주신 것은 물론이고, 그러한 일들을 수행할 때 필요한 것들(특히, 저의 짧은 소견으로 알지 못했던 장비, 부품, 소프트웨어 등)을 미리 예상하시고 준비해 주셨습니다. 교수님의 그러한 안목 덕분에 제가 하고자 하는 것들을 적시적소에서 부족함 없이 할 수 있었습니다. 또한, 단순히 대학원 지도교수를 떠나 제가 학부 1학년 때부터 지금 이 순간까지 6년간 저를 길러주신 아버지 같은 분입니다. 특히 무뚝뚝한 성격도 너그러이 이해해주시며, 지난 6년간 단 한 번도 화를 내시거나 큰소리치지 않았을 정도로 탈권위적인 소탈하신 교수님이었기에 더욱 존경을 표하고 싶습니다.

그리고 논문 심사위원장님이신 진강규 교수님께 감사의 말씀의 드리고 싶습니다. 진강규 교수님은 제가 학부 4학년 1학기 때 '제어시스템설계'라

는 과목을 처음 접한 이후 지금까지 ‘현대제어’, ‘선형시스템이론’, ‘수치해석특론’, ‘유전알고리즘’ 등 가장 많은 수업을 들었던 교수님입니다. 특히, 제가 부족한 분야인 제어와 관련해서 많은 영감을 주셨습니다. 그러나 무엇보다도 말로는 다 표현할 수 없는 교수님의 인품과 학문적 열정을 받고 싶습니다.

다음으로 문성배 교수님께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 저의 지도 교수가 아님에도 불구하고 지난 6년 동안 많은 조언과 배려로 저를 아끼고 사랑해 주셨습니다. 이번 석사학위 논문심사 과정에서도 논문의 구성은 물론이고 단어 하나하나까지 세심한 배려로 저의 논문이 좀 더 완성도 높은 결과물이 될 수 있도록 신경 써 주셨습니다.

이 외에도 제가 작은 결실을 맺는데 학문적으로 도움을 주신 많은 교수님들께 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 먼저, 본 논문의 선박조종운동과 관련하여 손경호 교수님의 ‘부유체안정론’, ‘선박해양제어시스템설계’ 과목이 많은 도움이 되었습니다. 또한 공길영 교수님의 ‘선체추진특론’, ‘항해안전평가론’ 수업도 많은 도움이 되었습니다.

그리고 무선인터넷 기반의 무인선박 제어에 필수적인 TCP/IP 통신프로그램 제작에는 임재홍 교수님의 ‘고급프로그래밍언어’, ‘컴퓨터네트워크특론’이 결정적인 역할을 하였습니다. 또한 HSDPA, WCDMA 등 통신과 관련한 전반적인 내용은 예병덕 교수님의 ‘통신시스템및통신망’ 수업이 큰 도움이 되었습니다.

또한, 선박의 침로 및 거리를 알기 위해서 반드시 필요한 항법계산은 송재욱 교수님의 ‘지문항해학’ 수업 때 배운 구면삼각형법을 이용하였습니다.

니다. 이 외에도 본 논문의 Butterworth 필터 설계 등 디지털신호처리와 관련하여 조석제 교수님의 ‘디지털신호처리’, ‘신호처리특강’이 큰 도움이 되었으며, 센서시스템 설계 및 제작과 관련해서는 예병덕 교수님의 ‘회로이론’, ‘전기전자기초’, 하윤수 교수님의 ‘Sequence 제어’, 윤영 교수님의 ‘회로망CAD설계’, 전태인 교수님의 ‘전기전자계측’이 많은 도움이 되었습니다.

그리고, ‘2010년 대한민국 국비유학생’ 선발시험과 관련하여 많은 정보와 조언을 아끼지 않으신 전승환, 정태권, 진강규, 공길영 교수님께 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 오늘의 제가 있도록 해주신 부모님께 감사의 말씀과 함께 이 작은 결실을 바칩니다.

