

碩士學位論文

소형 무인 해양탐사선 개발 및 항법에 관한 연구

濟州大學校 大學院



金 尙 徹

2003年 6月

소형 무인 해양탐사선 개발 및 항법에 관한 연구

指導教授 林 鍾 桓

金 尙 徹

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金尙徹의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2003年 6月

**A Study on the Development of an Unmanned Marine
Probing Ship and Navigation System**

Sang-Cheol Kim

(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of



Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

June 2003

목 차

| | |
|-----------------------------|----|
| SUMMARY | i |
| I. 서 론 | 1 |
| II. 시스템 구성 | 4 |
| 2.1 선체부 | 5 |
| 2.2 시스템 제어부 | 8 |
| 2.3 구동부 | 14 |
| 2.4 원격제어 및 모니터링부 | 16 |
| III. 탐사선의 위치평가 | 20 |
| 3.1 추측항법 | 20 |
| 3.2 위성항법 | 21 |
| 3.3 확장 칼만필터를 이용한 위치평가 | 26 |
| IV. 결과 및 고찰 | 31 |
| 4.1 예비실험 | 31 |
| 4.2 무인탐사선의 운항 실험결과 | 33 |
| 4.3 위치평가 실험결과 | 35 |
| VII. 결 론 | 41 |
| VIII. 참고문헌 | 42 |

SUMMARY

This thesis presents a small unmanned probing ship that can be used for acquiring information on marine and coastal environments. The control system is composed of three microprocessors; one is for overall mission control, another for control of propulsion motors, and the other for sensor operation. For The communication system, we adopt direct and indirect methods based on the wireless modem of a commercial cellular telephone. The former is direct communication between the modems of the ship and the server, and the latter is indirect communication via internet between the ship and the server.

The system is equipped with a digital compass module(DCM) and a GPS system for autonomous navigation. For position estimation, we used extended Kalman filter algorithm in order to associate the GPS and DCM information with Dead-Reckoning system that is usually corrupted to various sources of noise.

The designed vehicle and developed position estimation system have been integrated into a marine probing ship, and the performance of this ship has been tested in the sea. We find that the ship is very reliable against the waves and the wind in the surface of the sea. The dual communication system is suitable for communicating the command and data even when one of the communication methods does not work. In addition, navigation experiments on the sea show the proposed position estimation system is efficient and reliable for estimating the trajectory of the probing ship, so that it can be applied to practical probing mission.

I. 서론

해양은 지구 전면적의 약 72%를 점유하고 있고, 생물자원을 비롯한 광물 자원의 보고이며, 조력과 풍력 등 막대한 에너지를 내재하고 있어 개발 가능성이 무한한 존재로 주목되고 있다. 이에 따라 해양 선진국은 육상의 부족자원 고갈에 따라 21세기는 해저 및 해양자원 개발시대가 도래할 것을 예상하고 여기에 집중투자를 하고 있다. 특히 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있어서 생활전반에 걸쳐 해양과 밀접한 관계를 갖고 있으며 최근 수년간에 걸쳐 대규모 양식 산업과 생활하수로 인해 연근해의 환경오염이 심각하게 진행되고 있다. 이에 따라 조석간만, 계절 등에 따른 연안 환경을 실시간으로 관측, 자료화하며 연근해 해안에서 해양오염 실태를 조사, 감시하기 위한 무인 해양탐사선 개발의 필요성이 크게 대두되고 있다.

현재 해양탐사는 광범위한 해양을 폭넓고 정밀하게 탐사할 수 있는 대형 해양조사선, 해저 개발을 위한 자료 관측용 해중 유·무인 잠수정[1,2], 세계의 기상 변동에 영향을 미치는 해양 기상정보를 수집하기 위한 계류식 buoy[3] 등이 이용되고 있다. 이와 같이 선진 해양국가에서는 오래 전부터 해양 탐사 시스템 개발에 많은 투자를 하고 있다. 국내에서도 해양수산개발원을 중심으로 하여 해양환경관측을 위한 수질관측용 buoy 시스템을 개발하였으며[4,5], 대형 해양 탐사선을 보유하는 등 꾸준히 해양 환경탐사를 위한 연구개발이 이루어지고 있다.

최근 날로 심각해져 가는 연근해의 해양오염을 감시 관찰하기 위해서는 실시간으로 연근해의 해양환경을 관측할 필요가 있으나, 대형 해양탐사선의 경우는 항해가 가능한 해역에서만 탐사가 가능하고 부대 경비가 과다한 문제가 있다. 또한 계류식 buoy에 의한 관측은 이동이 불가능하므로 다양한 해역의 실시간 관측이 어렵다는 단점이 있다.

수입되는 무인 해양탐사선의 경우 최저 수 억원 이상 호가되고 있으며[6], 사후 서비스 등의 문제로 인하여 국내에서 이용이 저조한 형편이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 탐사방법에 비하여 효율적으로 연안의 상태를 조사할 수 있는 소형 무인 해양탐사선을 개발하고자 한다.

무인 해양탐사선의 자율운항을 위해서는 시스템에 알맞은 항법(Navigation)이 필요하다. 항법에 주로 사용되는 방법으로 Piloting, 추측항법(Dead Reckoning), 천체항법(Celestial Navigation), 관성항법(Inertial Navigation), 전자 혹은 전파항법 등이 있다. Piloting은 과거부터 널리 쓰였던 방법으로 익숙한 지형지물에 의존하여 목적지로 여행하는 방법이다. 추측항법은 현재 위치로부터의 이동속도와 방향을 계산하여 다음 위치를 추정(혹은 외삽)하는 방법이며, 천체항법은 천체를 정밀 측정하여 위치를 판별하는 방법이다. 관성항법은 자이로스코프를 이용하여 속도와 이동방향을 측정하는 방법이며, 전자 혹은 전파항법은 전파의 전달 시간을 측정하여 위치를 결정하는 방법이다. 가장 진보된 형태의 전파항법은 GPS(Global Positioning System)를 이용한 항법으로써 인공 위성을 이용하는 측위 시스템이다[7].

최근에는 전문 항법시스템을 둘 이상 결합한 형태의 항법 시스템들이 개발되어지고 있으며, 그 예로 관성항법과 GPS를 결합한 형태의 항법 등이 있다[8-10]. 본 연구에서는 탐사선의 무인항법을 위해 DGPS와 디지털 컴퍼스를 장착하여 DGPS 항법과 디지털 컴퍼스 및 탐사선의 속도에 의한 추측항법을 동시에 이용하는 방법[11]을 채택하였다.

무인 해양탐사선과 지상서버와의 통신은 무선 인터넷망을 통하여 지상의 서버와 데이터 송수신을 하는 간접통신방식과 무선 통신망을 이용하여 무인 해양탐사선과 지상서버의 1:1 통신 즉, 직접 통신 방식 등 두 가지 통신방식이 모두 가능하도록 설계하였다. 간접 통신은 주로 무인 해양탐사선에서 수집된 각종정보의 전송용으로 이용되며,

직접통신은 탐사 위치 등의 명령하달이나 비상시 또는 필요시 원격제어용으로 이용된다. 본 연구에서는 이와 같은 무인 해양탐사선을 설계제작하고 실 해역 실험으로 성능 및 시스템의 신뢰성을 검증하였다.



II. 시스템 구성

본 연구에서 제작한 무인 해양탐사선은 크게 선체부, 시스템 제어부, 구동부, 그리고 원격제어 및 모니터링부 등으로 구성되어 있다. Fig. 2-1은 시스템 전체의 구성을 나타낸다. 선체부는 파도 등 열악한 환경에서도 전복되지 않도록 하중분포를 조절할 수 있으며 수밀이 용이하고 유체저항이 작게 설계되었다. 제어부는 센서, 통신, 스크류 구동 등을 제어하며 향후 다양한 기능 추가에 대비하여 각 모듈별로 따로 프로세서를 채택하고 주 프로세서가 전체를 총괄하는 분산형으로 설계되었다.

통신부는 기존 무선 통신망을 이용하며 무인 해양탐사선과 지상서버간의 직접통신뿐만 아니라 기존 통신망에서 제공하는 인터넷망을 통해 지상서버와 무인 해양탐사선 간의 통신이 수행될 수 있도록 구성되어 있다. 또한 무인 해양탐사선의 위치정보를 얻기 위해 DGPS(Differential GPS)신호와 디지털 컴퍼스(Digital Compass Module : DCM)를 이용하였고, 무인 해양탐사선의 위치 데이터를 실시간으로 관측할 수 있도록 모니터링부를 설계하였다.

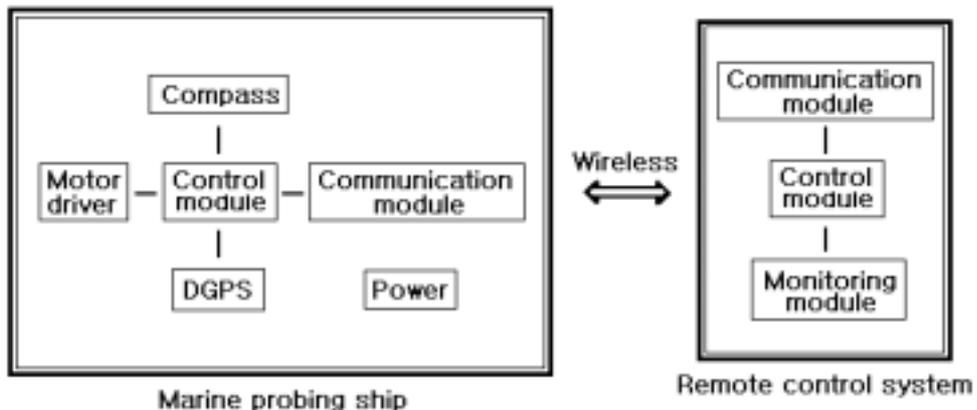


Fig. 2-1 System configuration

2.1 선체부

선체부는 Fig. 2-2와 같이 쌍동선 형태로 설계하였다. 그림에서 본체에는 제어, 통신, 계측 등을 위한 각종 회로 및 전원공급을 위한 배터리 등이 내장되어 있으며 이들이 부력 조절 역할도 동시에 수행한다. 본체 좌우에는 일정한 각도를 갖고 부력체 역할을 하는 부력체가 좌우 대칭으로 연결되어 있는데 각각의 부력체는 내부가 길이 방향으로 세 부분(앞, 중간, 뒤)으로 나뉘어져 있으며 각 부분에는 물을 주입하거나 배출할 수 있도록 하였다. 이렇게 설계한 이유는 세 부분의 물 양을 조절함으로써 부력중심을 용이하게 조절할 뿐만 아니라 파도나 바람의 세기에 따라 잠수정도를 조절함으로써 안전성을 주기 위함이다.

또한 구동부는 본체와 완전 분리형으로서 지상이동 및 보관시는 Fig. 2-2와 같이 구동부 전체를 접어 올린 상태로 하여 스크류의 파손 방지 및 이송의 편리함을 도모하고 수중 운항시는 구동부를 아래 방향으로 접어내려 물 속에 잠기게 설계하였다. 아울러 구동부는 선수와 선미 방향으로 이동이 가능하여 선체의 부력중심을 맞추는데 용이하게 되어있다. 본체, 부력체 그리고 구동부의 재질은 강도와 무게, 가공의 용이성, 방식성 등을 고려하여 PVC로 하였다, 특히 본체는 무선통신에 있어서의 외란을 줄이기 위해 가급적 철제의 사용을 지양하였다. 본체 및 부력체, 구동부의 연결은 스테인레스 레버를 사용하였다. 탐사선의 재원은 Table 1과 같으며, Fig. 2-3 은 무인 해양탐사선의 개략도면을 나타낸다.

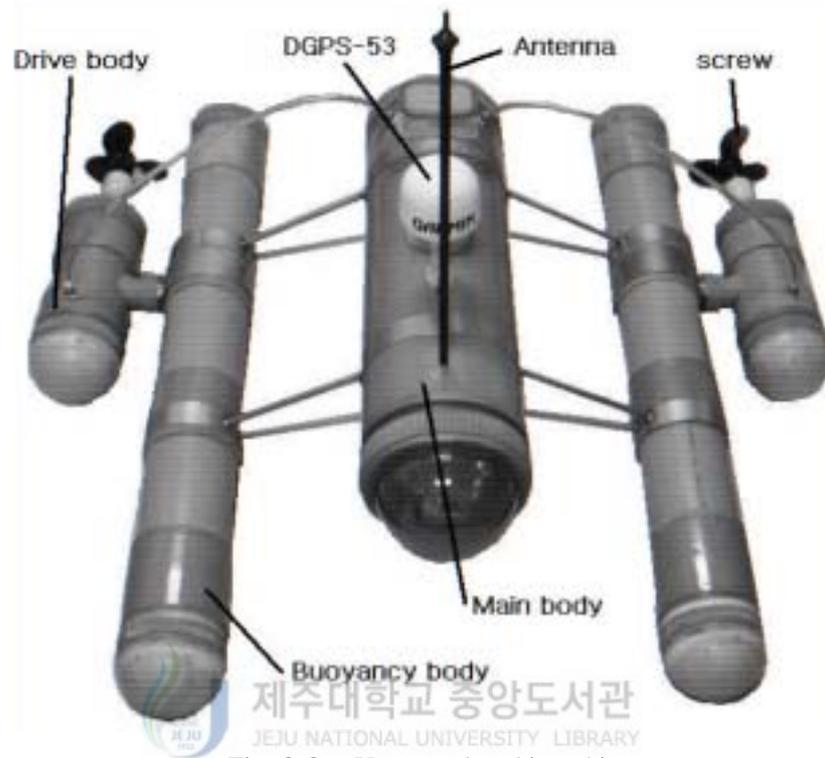
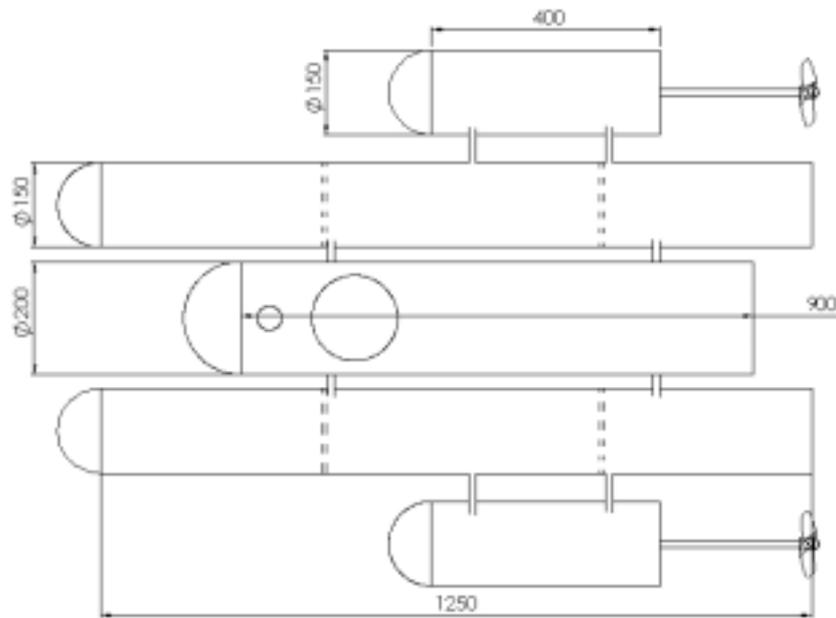


Fig. 2-2 Unmanned probing ship

Table 1 Volume and weight of the unmanned probing ship

| | Main body | Buoyancy body | Drive body | Total |
|---------------------------|-----------|---------------|--------------|---------|
| Volume (cm ³) | 42,524 | 22,089×2(set) | 7,952×2(set) | 102,606 |
| Weight (kg) | 30 | 11×29(set) | 8×2(set) | 68 |



(a) Top view



(b) Front view

Fig. 2-3 Dimension of the probing ship

2.2 시스템 제어부

제어부의 역할은 통신부로부터 명령을 수신하여 구동부를 적절하게 제어하거나, 수신되는 DGPS신호 및 디지털 컴퍼스 데이터를 획득하며 추후 이를 이용 자율항해가 가능하도록 하며, 얻어진 데이터를 송신부로 송신하는 역할을 한다. Fig. 2-4는 제어부의 구성도를 나타내며 주 제어기 하부에 모터 드라이버, 디지털 컴퍼스, DGPS 수신기 그리고 무선 통신모듈이 연결되어 있다. 주 제어기는 각종 명령처리 및 연산속도가 빠르고 신뢰성이 있는 80C196KC 마이크로 프로세서를 채택하였으며, Table 2에 그 사양을 나타내었다.

통신부는 무선 모뎀으로 구성되어 있으며 무인 해양탐사선 제어기와 지상 또는 모선의 서버와의 통신을 담당한다. 무인 해양탐사선의 동작을 지상서버에서 제어할 때 인터넷 망을 통한 경우 속도지연 문제가 발생하여 제어가 순조롭지 못할 경우를 대비하여 지상서버에 부착된 모뎀과 무인 해양탐사선 모뎀간의 직접통신을 통하여 수행하도록 설계하였다. 또한, 무선 모뎀에서 송신된 데이터는 기존 통신망의 중계기와 인터넷망을 통하여 지상의 서버에 전달될 수 있으며, 원격 제어시는 지상 서버로부터 반대 경로로 무인 해양탐사선에 명령을 전달할 수 있다.

Table 3은 기존 무선 통신망용 모뎀의 사양을 나타내며, 항해 중인 탐사선의 실시간 방향정보를 얻기 위한 디지털 컴퍼스의 사양을 Table 4에 나타내었다. Table 5는 Garmin 사의 DGPS-53 수신기에 대한 사양이다. DGPS-53의 위치정확도는 Table 6과 같다. Fig. 2-5와 Fig. 2-6은 각각 위치데이터 획득 흐름도와 모터 제어 흐름도이며, Fig. 2-7은 제작된 제어 시스템 사진이다.

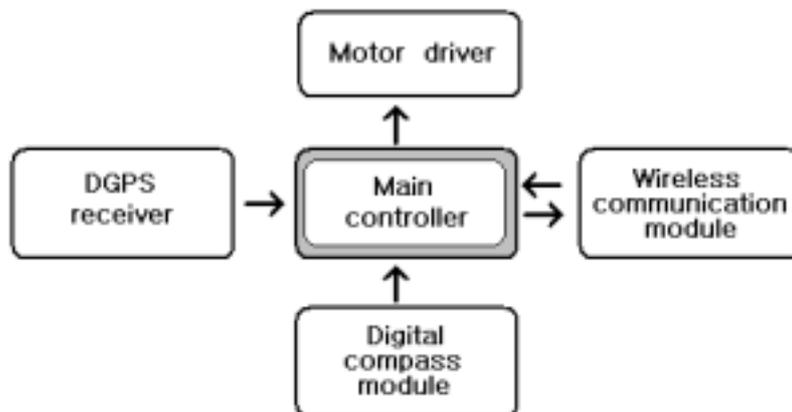


Fig. 2-4 Structure of the control system

Table 2 Specifications of the microprocessors

| | |
|----------------------------|-------------|
| ITEMS | 80C196KC |
| Frequency | Max. 20 Mhz |
| Flash Program Memory | None |
| ROM | 16 KB |
| Register RAM | 488 Byte |
| Adress size | 64 KB |
| I/O pin | 48 pin |
| Timer | 2 set |
| Capture/Compare/PWM Module | 3 |
| Serial Communication | MSSP, USART |
| 10 Bit A/D Module | 8 Channels |

Table 3 Specifications of the wireless modem

| Detail | Wireless modem |
|--------------------------|--|
| Producer | Anydata co. |
| Model | DTS-1800 |
| Frequency | 1800 MHz (PCS in Korea) |
| Communication velocity | High data rate up to 64 Kbps |
| Data interface connector | RS-232 |
| Support | TCP/IP, LCD, keyboard and audio interfaces |

Table 4 Specifications of digital compass module

| Detail | Digital Compass Module |
|------------------|--|
| Heading accuracy | $\pm 3^\circ$ |
| Resolution | 1 $^\circ$ (Repeatability: $\pm 1^\circ$) |
| Interface | RS-232C Interface (9600bps) |
| Response speed | 4Hz (Response time) |
| Input power | 7 ~ 12VDC, 55mA |
| Temperature | -20 $^\circ$ C ~ 70 $^\circ$ C |

Table 5 Specifications of DGPS-53

| | |
|------------------|---|
| Power | 8-35 VDC using supplied power/data cable. surge and revers polarity protected for up to 80VDC. current drain-95mA@12VDC |
| Frequency Range | 283.5 - 325.0 kHz @0.5kHz |
| Data Rates | 200/100/50/25 bps |
| Input | RS-232 or NMEA0183, 4800 baud |
| Input sentences | Binary(Magnavox), \$PSLIB(Starlink) |
| Output | RS-232 4800 baud |
| Output Sentences | RTCM SC-104(6 of 8bit format) NMEA0183 version2.0 |
| Pulse Per Second | One-Pulse-Per-Second accuracy ; ± 1 microsecond at rising edge of PPS pulse |

Table 6 Precision of DGPS-53

| | | | |
|-----------------|-----|----|----|
| Error range (m) | 0.5 | 3 | 5 |
| Precision (%) | 5 | 50 | 95 |

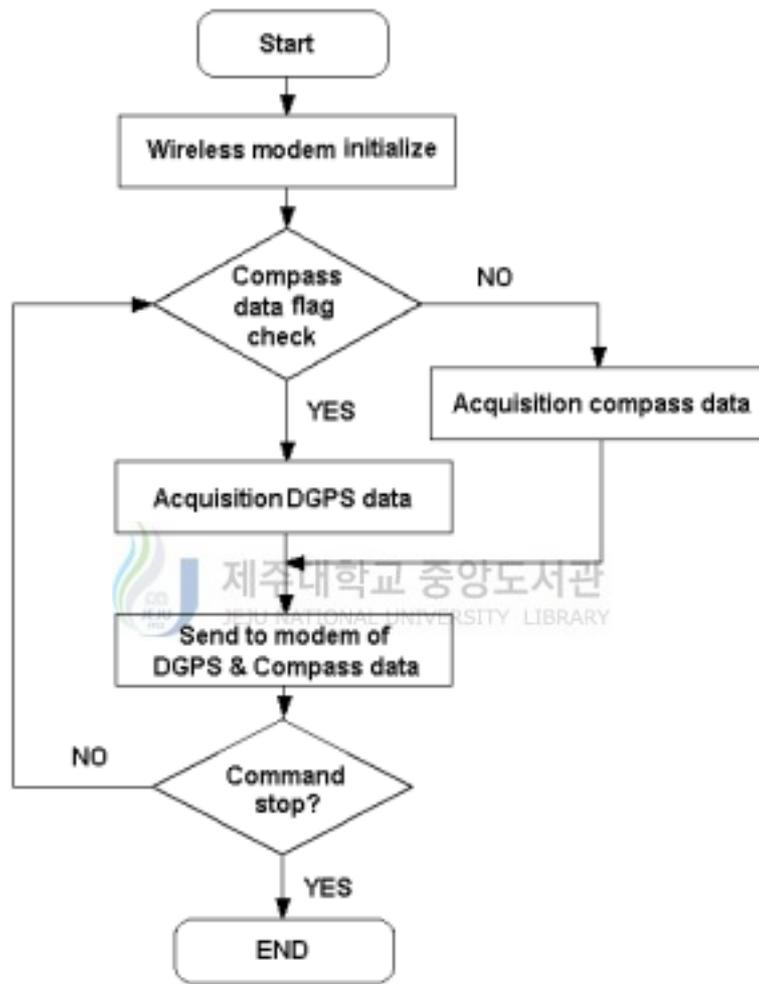


Fig. 2-5 Flowchart for acquisition of position data

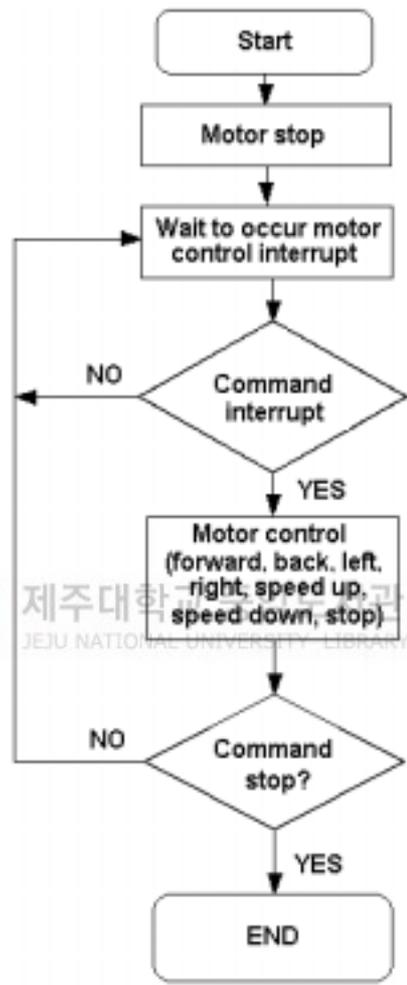


Fig. 2-6 Flowchart of the motor control

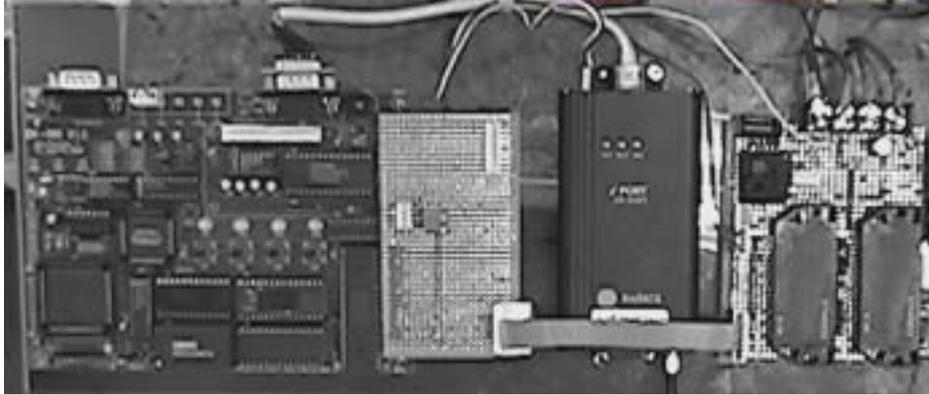


Fig. 2-7 Main controller

2.3 구동부

구동부는 무인 해양탐사선을 추진시키고 방향을 조절하는 역할을 담당하는데 양면의 부력체에 부착되어 있는 구동부 내부에 DC 모터가 장착되어 있고, 이 모터의 축이 외부로 돌출 되게 부착되어 있다. 무인 해양탐사선의 양측에서 두 개의 스크류가 동시에 작동하여 무인 해양탐사선을 추진시키며 양 스크류의 속도 차에 따라 방향을 전환하는 구조이다. 또한 내부 모터와 외부 스크류를 연결하는 축은 3중 방수패킹(Retainer)로 수밀 처리하였다.

Table 7은 DC 모터와 구동드라이버의 사양을 나타낸다. DC 모터의 용량은 40W이며 드라이버는 브레이크 기능과 PWM 제어기능이 있는 STK6855를 사용하였다. 콘트롤 유닛과 DGPS 수신기, 디지털 컴퍼스의 구동은 Table 8과 같은 사양의 배터리를 사용하였으며, 그 용량은 12V-7.0AH이다. 모터 구동용 배터리는 Table 9와 같은 사양의 배터리를 따로 사용하였는데, 이는 모터 구동시 발생하는 잡음에 의하여 제어 시스템이 영향을 받는 것을 최소화하기 위함이다.

Table 7 Specifications of motor and driver

| | Type | V | W/A | |
|--------|------------|--------|-----|-----------------------------|
| Motor | S9D40-24GH | 24V | 40W | Gear ratio:1:3 (S9KB3BH) |
| Driver | STK6855 | 16-42V | 5A | Break PWM control |

Table 8 Specifications of batteries for control unit

| TYPE | VOLTAGE | INITIAL CURRENT |
|-----------------|--------------|-----------------|
| STAND-BY USE | 13.5 ~ 13.8V | NO LIMIT |
| CYCLIC USE | 14.4 ~ 15.0V | 1.75A MAX |

Table 9 Specifications of batteries for motor

| TYPE | VOLTAGE | INITIAL CURRENT |
|-----------------|------------|-----------------|
| STAND-BY USE | 27 ~ 27.6V | NO LIMIT |
| CYCLIC USE | 28.8 ~ 30V | 4.0A MAX |

2.4 원격제어 및 모니터링부

지상 서버부는 무인 해양탐사선과의 통신을 위한 통신부 및 제어부 그리고 데이터 및 무인 해양탐사선의 위치 등을 감시하는 모니터링부로 구성되어있다. Fig. 2-8은 원격제어 및 모니터링 시스템의 개념도를 나타낸다. 탐사선으로부터의 위치 데이터나 방위각정보는 실시간으로 무선 통신망을 통해 Mobile to Mobile 방식으로 서버로 전송되어지며, 동시에 Fig. 2-9와 같이 인터넷망을 통한 서버로의 전달도 가능하다.

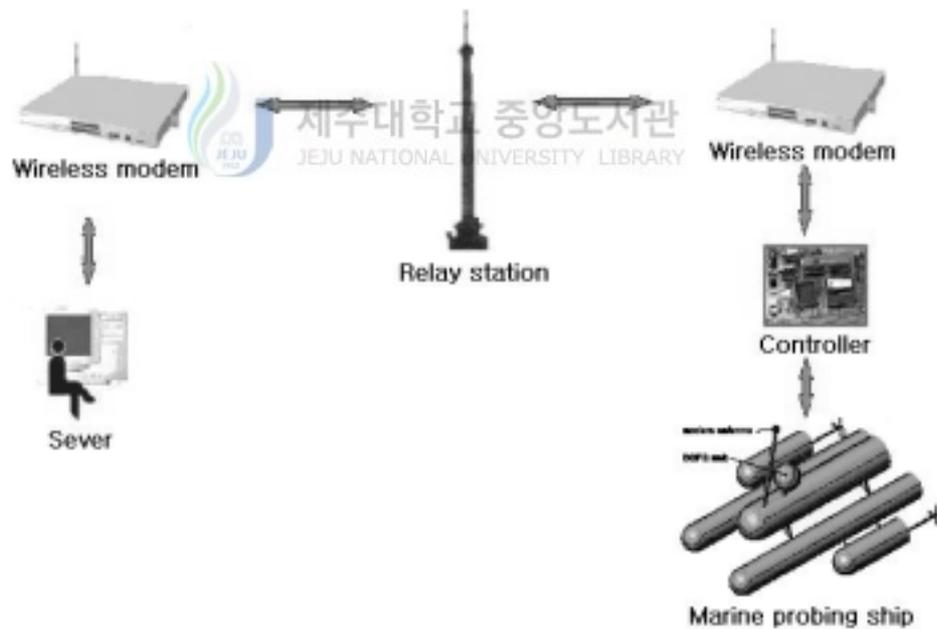


Fig. 2-8 Schematic diagram of the wireless control system (Mobile to Mobile)

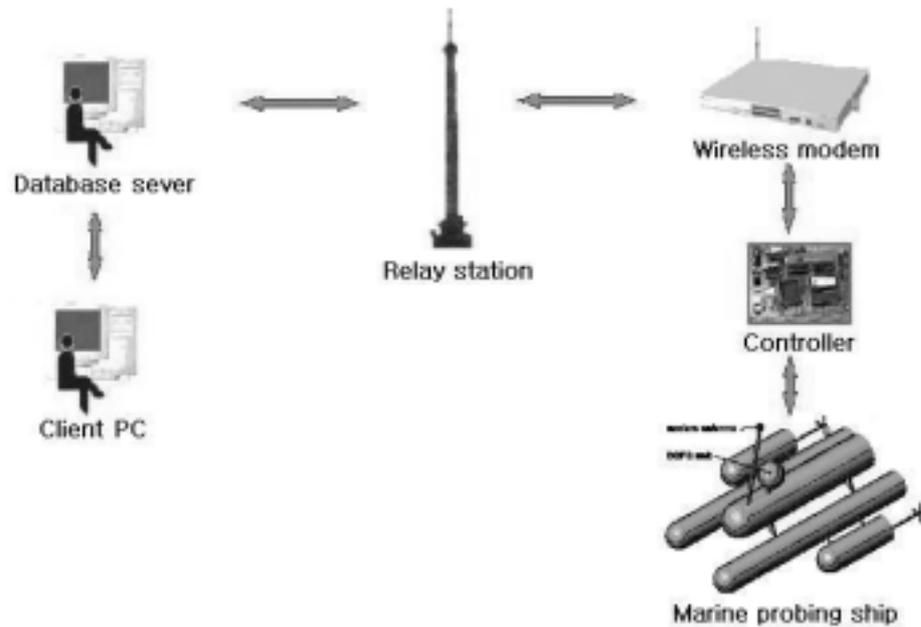


Fig. 2-9 Schematic diagram of the wireless control system (TCP/IP to Mobile)

본 연구에서 이용된 통신모듈은 우리나라에서 널리 이용되고 있는 019무선모뎀을 이용하였다. 따라서, 국내 통화권역 내에서는 거리와 시간의 영향을 받지 않고 무선 데이터 통신이 가능하며 서버측에서 무인 해양탐사선과 무선통신을 원할 때는 Mobile to Mobile 통신방식을 통하여 1:1 실시간 데이터 송수신이 가능하다. 만약 무인 해양탐사선의 개수가 다수일 때는 서버측에 동시에 데이터를 전송하기 위하여 TCP/IP 네트워크 망을 이용하게 되며 이를 통하여 송신되는 데이터들은 여럿이 공유할 수도 있다.

Fig. 2-10은 원격 제어 및 모니터링부의 흐름도를 나타내며, Fig. 2-11은 서버부의 제어 및 모니터링 화면이다. Fig. 2-11에서 데이터 형식을 보면 Fig. 2-12와 같은데, a는 UTC, b는 위도, c는 경도, d는 방위각을 나타낸다.

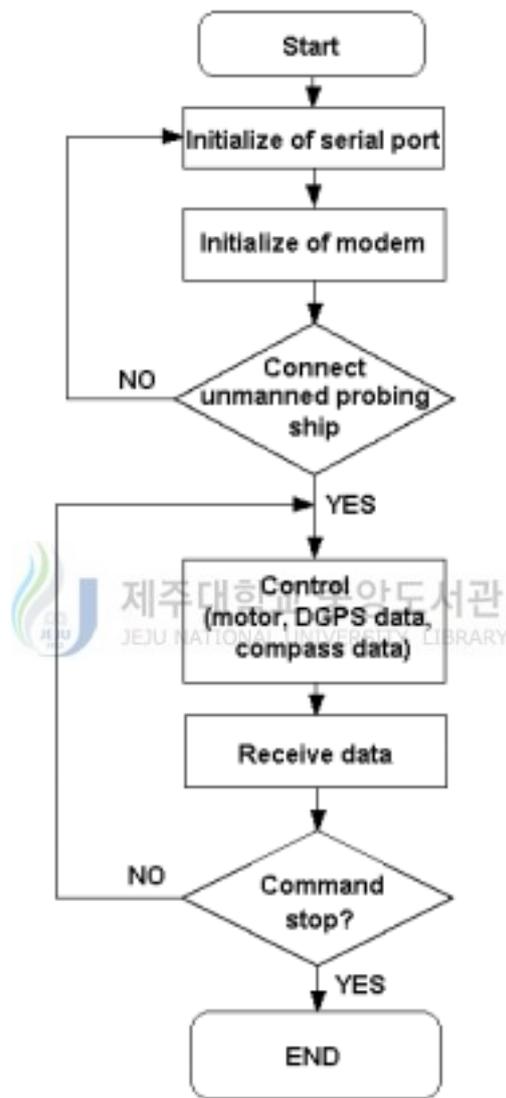


Fig. 2-10 Flowchart for remote control and monitoring

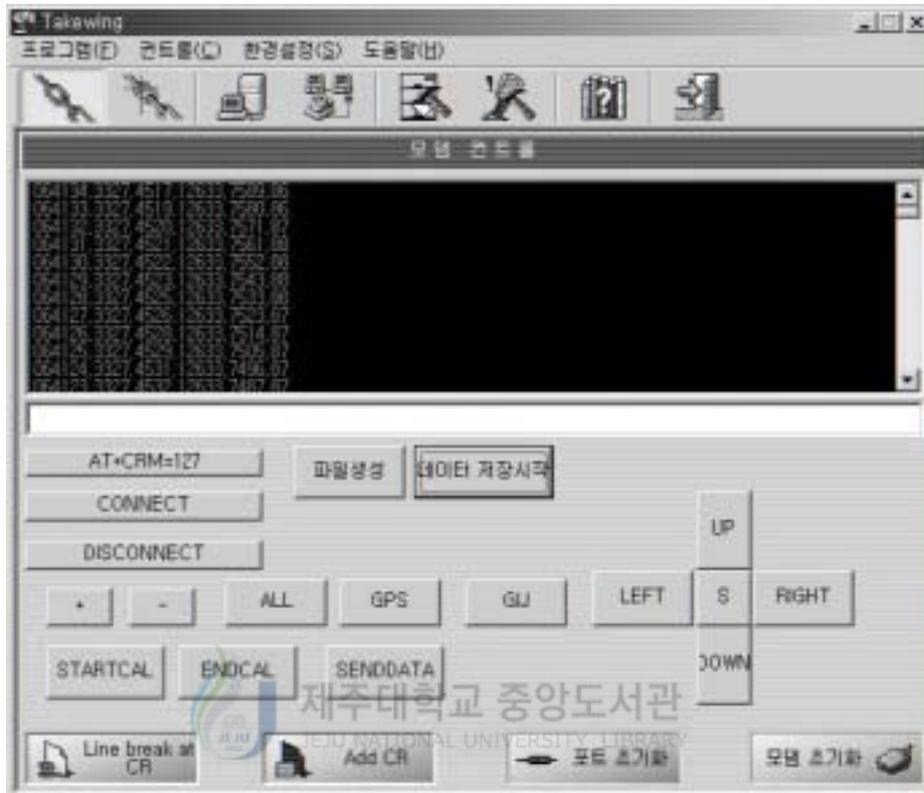


Fig. 2-11 Monitoring dialogue box

064118.3327.4540.12633.7449.87
a b c d

064119,3327.4539,12633.7460,87

064120,3327.4537,12633.7469,87

Fig. 2-12 Monitoring data format

Ⅲ. 탐사선의 위치평가

위치 정보를 제공해주는 위치 추적 기술은 크게 나누어, 외부의 도움을 받지 않고 선박 내에 장착된 센서만을 사용하여 자신의 위치를 알아내는 추측항법과 인공 위성의 신호를 이용한 위성항법이 있다. 추측항법은 누적오차가 연속적으로 발생하므로 장기간 위치 정보 제공에는 적합하지 않지만 짧은 시간 동안에는 비교적 정밀한 정보를 제공한다[12]. GPS의 위치 정확도는 일반적으로 대략 수십 미터 정도의 오차를 포함하고 있는 것으로 알려져 있다[13].

3.1 추측항법



추측 항법의 원리는 무인 해양탐사선의 초기 위치를 설정한 후 장착된 센서만으로 무인 해양탐사선의 이동 거리와 방향을 검출하여 주행 궤적을 계산하고 현재 위치를 추정하는 방법이다. 추측 항법은 외부의 지원 시설이 필요하지 않을 뿐 아니라 탐사선의 위치를 연속적으로 검출할 수 있다[12]. 이 항법은 이미 알고있는 위치에서 진행방향 속도 및 자세각 정보로부터 새로운 탐사선의 위치를 계산하는 항법 시스템으로서

최환[14]에서의 위치를 알고있는 경우에 시간 $t+\Delta t$ 에서의 위치는 다음과 같이 표현

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda} &= \frac{V \sin \theta}{(R_e + h) \cos \phi} \\
\dot{\phi} &= \frac{V \cos \theta}{R_e + h} \\
\lambda(t + \Delta t) &= \lambda(t) + \dot{\lambda} \Delta t \\
\phi(t + \Delta t) &= \phi(t) + \dot{\phi} \Delta t
\end{aligned}
\tag{3-1}$$

여기서,

λ : 경도, ϕ : 위도, h : 고도

V : 시간 t 에서의 속도의 평균속도

R_e : 지구반경

식(3-1)에서 V 는 속도 명령 값이며 θ 는 디지털 컴퍼스의 출력 값을 의미한다. 이와 같이 추측항법은 계산 주기 탐사선의 진행 궤적을 직선으로 간주하여 위치 변화를 계산하고 그 이전 값에 누적시켜 새로운 위치를 평가하는 것으로서 시간이 경과함에 따라 위치오차가 연속적으로 누적되는 단점이 있다.

3.2 위성 항법

가. GPS 항법

GPS 항법은 인공 위성에서 발사하는 전파를 수신하여 측위 정보를 얻는 것으로, 처

음에는 군사목적으로 사용되어 왔으나, 1983년 민간부분으로 확대되어 현재 여러 분야에서 활용되고 있으며, 지구상 어디에서나 24시간 이용할 수 있는 것은 물론, 기상조건·외부의 간섭 및 방해에 강하고 전 세계적으로 공통 좌표계(WGS-84 : World Geodetic System)를 사용한다. GPS(Global Positioning System)는 우주부분(Space Segment), 제어부분 및 이용자 부분으로 나누어져 있다. 우주부분은 6개의 궤도면에 각각 4개의 위성이 할당되어 있고 이중 3개는 예비 위성이다. 위성의 지상고도는 약 20,183km이고 공전주기는 약 12시간, 궤도 경사각은 55° , 같은 궤도면의 위성간 각거리는 120° 로 구성된 궤도를 돌기 때문에 지구상의 어느 장소에서도 지평선 5° 이상에서는 최소 4개의 위성을 24시간 내내 볼 수 있게 된다.

제어 부분은 위성을 추적하여 각 위성의 궤도를 결정하고 정밀시간을 유지하여 이들 정보를 위성에 송신하며 작동상태를 수신하는 역할을 한다. GPS 위성에는 원자 시계가 장착되어 있어 정밀 시간을 유지하고 있으며 위성마다 PRN(Pseudo Random Noise) 코드라는 고유코드를 발생하여 상호 구분이 된다. 이용자 부분은 GPS 수신기, 안테나, 자료처리용 소프트웨어로 이루어지며 위성에서 보낸 전파를 수신하여 수신점의 좌표를 측정하게 된다[15].

GPS 위성으로부터 전송된 전파의 속도는 빛의 속도와 같기 때문에 위성과 GPS 수신기간의 거리는 전파가 발사되어 수신기에 도달할 때까지의 시간을 알면 구할 수 있

이용한 거리 측정 방법을 수식으로 표현하면 다음 식과 같다[16].

다. c 는 빛의 속도이고, Δt 가 도달 시간의 관측 값, E 가 시계 오차이고, GPS 항법을

$$\sqrt{(X-X_i)^2+(Y-Y_i)^2+(Z-Z_i)^2} = (\Delta t - E)c \quad (i=1,2,3,4) \quad (3-2)$$

여기서 X, Y, Z 는 GPS 수신기의 위치, X_i, Y_i, Z_i 는 i 번째 위성의 위치이다. 이 식은 빛의 속도를 1로 하도록 단위계를 설정하고 있는데, 이 식을 Navigation equation이라고 한다. 식(3-2)를 보면 시계오차 E 가 포함되어 있는데, 이는 GPS 위성에는 매우 정밀한 원자 시계가 내장되어 있는 반면 사용자측 수신기에는 정밀도가 떨어지는 시계가 내장되어 있기 때문에 시계오차 E 를 포함한다. 결국 미지수가 4개이므로 최소한 4개 이상의 GPS 위성 신호를 얻어야만 보다 정밀한 측위가 이루어진다. Fig. 3-1은 GPS 위성항법 시스템의 개념도이다[17].

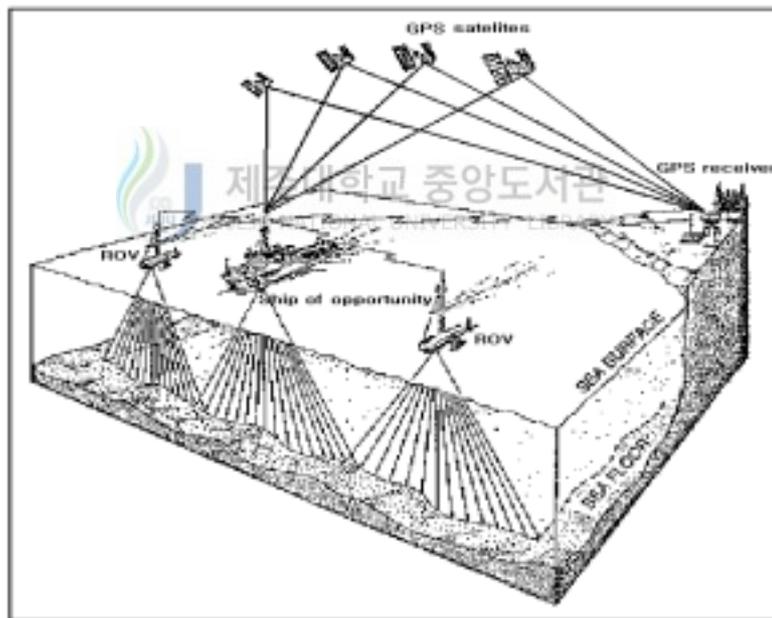


Fig. 3-1 Operation of GPS navigation system

나. DGPS(Differential GPS)

DGPS는 이미 위치를 알고 있는 기준점에 기준국용 GPS수신기를 설치하여 정밀하

계 측정된 자신의 위치값과 GPS위성 신호를 받아 수신기로 계산된 위치를 비교하여 오차를 계산함으로써 GPS보다 위치정밀도가 높다. 우리나라 DGPS는 1개소 통제국의 대전 중앙사무소와, 11개소의 기준국(Reference Station) 및 8개소의 감시국(Integrity monitor)로 구성되어 운영되고 있다. 중앙사무소는 기준국과 감시국의 DGPS 운영상태를 PSDN망을 이용하여 실시간 원격 감시 및 제어함과 동시에 측위 정보에 대한 감시, 위성상태 Integrity 감시, 기준국 및 감시국 측위오차 분석을 통한 GPS가용 상태 확인과 함께 측위 보정데이터(Post Processing Data : PPS), RINEX(Receiver Independent Exchange data), SSF(Standard Storage Format)등의 정보를 웹(<http://www.ndgps.go.kr>)으로 24시간 무료제공을 하고 있다. 기준국은 정확한 기준점에 GPS안테나를 설치하여 각각의 GPS위성 신호를 수신하여 측정된 거리(의사거리)와 이미 알고 있는 거리를 비교 후 위성 오차값을 보정하여 RTCM SC-104(Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee 104)의 포맷형식에 따라 중파(283.5-325KHz)을 이용하여 이용자에게 실시간으로 방송하고 있다. 감시국은 기준국으로 부터 약 100NM(180Km)떨어진 지점에 GPS안테나를 이용 위성오차 보정신호가 한계치를 벗어날 경우와 위성신호 이상시 경보메시지를 중앙사무소에 전달로 위성상태 및 측위 정보 정확성 파악과 측위 기준점으로 활용하고 있다(해양수산부 위성항법중앙사무소)[18, 19]. Fig. 3-2는 현재 우리나라에 설치된 기준국 및 감시국을 나타낸다.

3.3 확장 칼만필터를 이용한 위치평가

가. 시스템 모델 및 측정 모델

무인탐사선의 위치에 관련된 정보는 탐사선의 속도와 DGPS의 위치정보, 그리고 디지털 컴퍼스로부터 출력되는 탐사선의 자세각이다. 3.1절에 언급한 바와 같이 탐사선 속도 V 와 디지털 컴퍼스의 자세각만으로 위치를 평가할 경우 오차가 계속해서 누적되어 시간에 따라 점점 위치 오차가 커진다. 또한 3.2절에 서술한 DGPS만을 이용할 경우에는 시간에 따라 오차가 누적되지는 않지만 최대 5m이상의 오차가 발생할 수 있다. 그 결과 전체 이동 경로중 국부적으로 일부분의 위치는 추측방법이 오히려 효과적일 수 있으며, 장시간 이동에 대한 위치는 DGPS에 의한 방법이 더 낫다. 따라서 두 방법의 장점만을 취하여 적절히 결합함으로써 최적의 방법을 수행할 수 있다.

두 가지 이상의 정보를 적절히 결합하여 최적의 값을 평가하는 방법은 칼만 필터가 가장 효율적이다. 확장 칼만 필터는 잡음이 포함된 다수의 측정값으로부터 오차가 최소화되는 최적 측정값을 평가하는 알고리즘으로서 다음과 같이 모델링 된다.

3.1절과 같이 $\lambda(k)$ 는 경도, $\phi(k)$ 는 위도, 그리고 $\theta(k)$ 는 탐사선의 자세각으로 정의하면, 탐사선의 위치는 $x(k)=[\lambda(k), \phi(k), \theta(k)]^T$ 로 표현된다. 먼저 시스템 모델을 구성하면 다음과 같다.

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) + v(k), \quad v(k) \sim N(0, Q(k)) \quad (3-3)$$

여기서, $f(x(k), u(k))$ 는 상태전이 함수이며, $u(k)$ 는 제어입력, $v(k)$ 는 평균이 0이고 공분산이 $Q(k)$ 인 가우시안 잡음이다. 식(3-1)을 이용하여, 이산시간 $f(x(k), u(k))$ 를 구

하면 다음과 같다.

$$f(x(k), u(k)) = \begin{pmatrix} \lambda(k) + \frac{d(k)\sin\theta(k)}{R\cos\phi(k)} \\ \phi(k) + \frac{d(k)\cos\theta(k)}{R} \\ \theta(k) + \Delta\theta(k) \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

다양한 센서(θ)를 사용하여 $w(k)$ 의 노이즈를 가정하였다. GPS와 DCM의 위치를 비교하여 얻은 확장 평면을 측정하는 모델은 다음과 같다.

$$Z(k) = h(x(k)) + w(k), \quad w(k) \sim N(0, R(k)) \quad (3-5)$$

여기서 $w(k)$ 는 평균이 0이고 공분산이 $R(k)$ 인 가우시안 잡음이며, GPS는 정확한 위치에 단지 잡음만 개입된 것으로 가정하여 $h(x(k))$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$h(x(k)) = \begin{pmatrix} \lambda(k)_{GPS} \\ \phi(k)_{GPS} \\ \theta(k)_{DCM} \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

이와 같이 정의된 시스템 모델과 측정모델을 확장 칼만 필터 알고리즘에 적용하여 탐사선의 위치를 평가한다[20].

나. 위치평가

먼저 시스템 모델과 제어 입력 $u(k)$ 로부터 시간 $k+1$ 에서의 탐사선 위치를 다음과 같이 예측한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1|k) &= f(\hat{x}(k|k), u(k)) \\ &= \begin{pmatrix} \lambda(k|k) + \frac{d(k)\sin\theta(k)}{R\cos\phi(k)} \\ \varphi(k|k) + \frac{d(k)\cos\theta(k)}{R} \\ \theta(k|k) + \Delta\theta(k) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3-7)$$

이 예측에 수반되는 공분산 행렬 $P(k+1|k)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{P}(k+1|k) = \nabla f \cdot P(k|k) \cdot \nabla f^T + Q(k) \quad (3-8)$$

구해진다.

여기서, ∇f 는 상태 천이함수 $f(\hat{x}(k|k), u(k))$ 의 자코비안으로서 아래 식과 같이

$$\nabla f = \begin{bmatrix} 1 + \frac{d(k)\sin\theta(k)\sin\phi(k)}{\cos^2\phi(k)} & 0 & \frac{d\cos\theta(k)}{R\cos\phi(k)} \\ 0 & 1 & -\frac{d(k)\sin\theta(k)}{R} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

다음으로는 측정모델로부터 측정된 값과 예측 값의 차로 구성되는 innovation 행렬

$\nu(k)$ 를 구성한다. 즉,

$$\begin{aligned} \nu(k+1) &= Z(k+1) - \hat{Z}(k+1) \\ &= \begin{pmatrix} \lambda(k+1)_{GPS} - \hat{\lambda}(k+1|k) \\ \phi(k+1)_{GPS} - \hat{\phi}(k+1|k) \\ \theta(k+1)_{DCM} - \hat{\theta}(k+1|k) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3-10)$$

여기서, $\hat{Z}(k+1)$ 은 추측항법으로 예측된 위치로서,

$$\hat{Z}(k+1) = h\hat{x}(k+1|k) = \begin{bmatrix} \hat{\lambda}(k+1|k) \\ \hat{\phi}(k+1|k) \\ \hat{\theta}(k+1|k) \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

로 표현된다.



식(3-10)에 수반되는 공분산 행렬 $S(k+1)$ 은 다음과 같이 정의된다[21].

$$\begin{aligned} S(k+1) &\equiv E[\nu(k+1) \cdot \nu^T(k+1)] \\ &= \nabla h \cdot P(k+1|k) \cdot \nabla h^T + R(k+1) \end{aligned} \quad (3-12)$$

식(3-12)에서 ∇h 는 식(3-11)로 정의된 $h(\hat{x}(k+1|k))$ 의 자코비안으로서,

$$\nabla h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

로 표현된다.

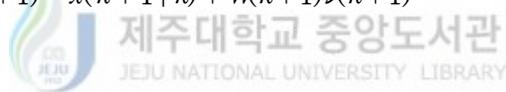
위치평가의 마지막 단계는 $\hat{x}(k+1|k)$ 로 부터 $\hat{x}(k+1|k+1)$ 즉, 시간 $k+1$ 에서의 최적의 위치를 평가하고 거기에 수반된 공분산 행렬 $P(k+1|k+1)$ 을 갱신하는 것이다. 먼저 잘 알려진 칼만 게인 $W(k+1)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$W(k+1) = P(k+1|k) \cdot \nabla h^T \cdot S^{-1}(k+1) \quad (3-14)$$

이 게인의 의미는 추측항법으로 예상된 위치에 대해 센서로 측정된 위치를 얼마만큼 비중을 두어 수정하느냐 하는 정도를 나타낸다.

칼만 게인을 이용하여 예상된 위치를 다음과 같이 보정한다.

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + W(k+1)\nu(k+1) \quad (3-15)$$



마지막으로 이 평가에 수반된 공분산 행렬은 다음과 같이 갱신된다.

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - W(k+1)S(k+1)W^T(k+1) \quad (3-16)$$

이와 같은 방법으로 각 샘플링 타임마다 위치보정 및 공분산 행렬을 추정함으로써 최적의 위치 평가를 수행한다.

IV. 결과 및 고찰

4.1 예비실험

본 연구에서 무인항법시스템에 이용된 DGPS-53수신기의 정확도를 평가하기 위하여 기초 실험을 시행하였다. Fig. 4-1은 DGPS-53 수신기의 출력 데이터 형식을 나타내며, a는 UTC 시간, b는 북위값, c는 동경값, d는 기준국 ID를 나타낸다. Fig. 4-2는 2002년 11월 1일 07시24분 58초부터 07시 43분 13초까지 18분 15초간 제주기상청 DGPS기준점(건교부 측량점)에서 DGPS-53수신기를 통해 수신된 WGS경위도 데이터이다. 가로축은 경도를 세로축은 위도를 나타내며, 절대값은 DGPS 기준점에 대한 건설교통부의 측량 값이다. 가로 한 칸의 단위는 2.5809m이며, 세로 한 칸의 단위는 3.0810m이다. 위치데이터의 획득시 DGPS-53의 출력 데이터를 \$GPGGA로 설정하였기 때문에 그 형식이 ddmm.mm(도분)형태였다. Fig. 4-2와 Table 10에서는 건설교통부 측량점과 비교하기 위하여 도분초(dms)형태로 변환하여 비교하였다.

실험결과 DGPS-53의 데이터는 최대 5m정도의 오차를 나타내며 표준편차는 경도가 2.418m 위도가 1.236m이었다. 또한 바다표면에서 디지털 컴퍼스의 특성을 실험한 결과 파도에 의한 각도 표준편차가 약 10°정도로 나타났다.

```

$GPGGA,072458,3330.8361,N,12631.7882,E,2,07,1,3,31,7,M,19.5,M,0.0724+4C
                a         b         c         d
$GPGGA,072459,3330.8361,N,12631.7882,E,2,07,1,3,31,8,M,19.5,M,0.0724+42
$GPGGA,072500,3330.8360,N,12631.7882,E,2,07,1,3,32,0,M,19.5,M,0.0724+45

```

Fig. 4-1 DGPS-53 data format

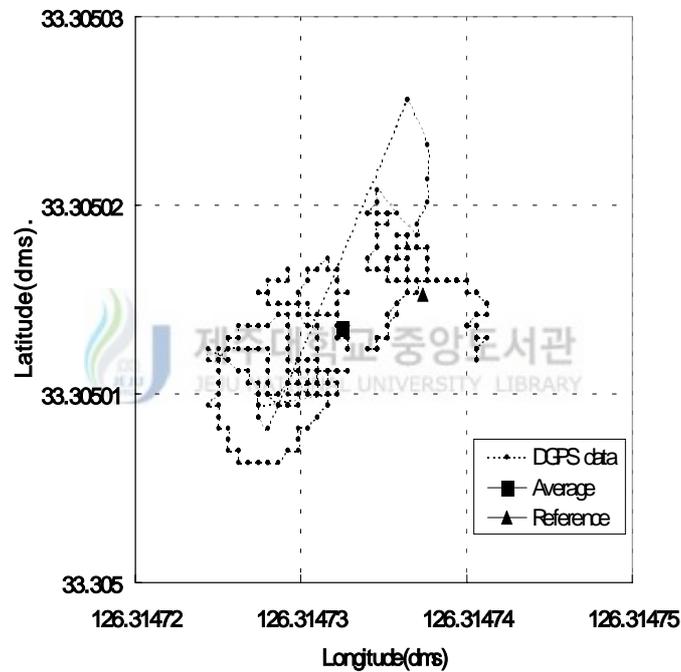


Fig. 4-2 Characteristics of the DGPS-53 position data

Table 10 Stochastic parameter of the DGPS-53 (unit : dms)

| | Average | Reference | Standard deviation |
|-----------|-------------|-------------|--------------------|
| Longitude | 126.3147325 | 126.3147373 | 9.36588E-06 |
| Latitude | 33.30501348 | 33.30501526 | 4.01217E-06 |

4.2 무인탐사선 운항 실험결과

제작된 탐사선의 안정성 및 운항특성을 시험하기 위해 실 해역 실험을 다양한 날씨 조건에 대해 수행하였다. Fig. 4-3은 탐사선의 실제 운항 실험사진을 나타낸다. 탐사선의 좌우의 무게 중심은 본체를 중심으로 좌우 대칭 되게 설계되어 있어 좌우 수평은 별 문제가 없는 것으로 나타났으며, 선수와 선미의 전후 중심은 본체와 부력체 및 구동부의 상호 위치를 조절함으로써 쉽게 수평이 되게 조절할 수 있었다.

전술한 바와 같이 탐사선의 부력조절을 위해 양 측면에 부착된 부력체를 각각 3개의 방으로 나누고 각 방에 물을 주입하여 상하 좌우 무게 중심 및 잠수정도(부력조절)를 조절할 수 있게 되어있다. 실제 탐사선은 부력조절을 하지 않을 경우 본체의 2/3정도만이 수면위로 노출되기 때문에 바람에 의한 불안정성 문제는 거의 없는 것으로 나타났다. 다만 바람에 의한 떠밀림 및 운항저항이 발생할 수 있는데 이것은 부력을 조절하여 잠수율을 높임으로써 그 영향을 훨씬 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

파고가 1m 이하로 높지 않은 경우에는 잠수율을 최대한 낮춤으로써 유체저항이 줄어들기 때문에 탐사선이 최대속도로 운항할 수 있었으며, 파고가 높은 경우는 반대로 잠수율을 높임으로써 안정성을 확보할 수 있었다. 탐사선의 최대잠수율은 거의 100%에 달하며 실제 탐사선의 작업은 태풍이나 과량주의보 등의 극한 상황이 아닌 정상 날씨에 수행될 것이므로 설계된 탐사선의 안정성은 충분한 것으로 사료된다. 탐사선의 최대속력은 1.5m/s로 측정되었으며, 쌍동선 형태로 인해 나타나는 좌우 스크루의 속도차는 직선운항실험을 반복적으로 시행하여 Offset값을 조절하여 맞추었다.

실험기간동안 모니터링부와 탐사선간의 통신두절이 1회 실험당 1~2번 정도 발생하였는데, 이는 통신회선상의 문제점과 특정지역에서의 송수신 불가로 인한 것이라 사료된다. 이 문제는 통신 두절시 자동 재접속 할 수 있도록 프로그램하여 해결하였다. 또한 인터넷 통신에 의한 데이터 수신은 회선 과부하(트래픽)가 걸릴 때마다 조금씩 지연

되는 경향을 보였으나 실시간 데이터 확보에는 큰 문제가 되지 않을 정도였다.

모터 구동용 배터리의 용량은 최대전력 구동시 이론적으로 5시간 연속구동이 가능하나, 배터리 성능의 70%정도를 감안하여 3시간 연속 실험을 하였다. 이때 탐사선 제어 시스템에 사용된 전력의 소모량을 Table 11에 나타내었다. 본 연구에서는 탐사선의 연속 운항 실험을 3시간으로 제한하였으나, 필요시에는 용량의 변화를 통하여 충분히 그 운항시간을 축소 혹은 확대가 가능하리라 사료된다.



Fig. 4-3 View of the experimental navigation

Table 11 Consumption of electric power

| | Current(mA) | Voltage(VDC) |
|------------------------|-------------|--------------|
| DGPS-53 | 95 | 12 |
| Digital compass module | 55 | 12 |
| Main controller | 300 | 5 |
| Wireless modem | 300 | 12 |

4.3 위치평가 실험결과

먼저 단거리 이동시의 추측항법, 확장 칼만필터를 이용한 항법, 그리고 DGPS만 이용한 항법의 성능을 비교 분석하는 실험을 수행하였다. 실험방법은 길이가 30m인 직선 경로를 설정하고 이 경로를 한번 주행하는 형태와 한 변이 10m인 정사각형 경로를 설정하고 이 경로를 1회 주행하는 방법으로 같은 실험을 반복 실시하였다. Fig. 4-4와 4-5는 30m 직선 실험, Fig. 4-6과 4-7은 한 변이 10m인 정사각형 실험에서의 추측항법에 의한 결과이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 30m 직선 주행결과 위치오차가 시간에 따라 크게 발생할 뿐만 아니라 발산되는 경향임을 알 수 있다.

Fig. 4-5와 Fig. 4-7은 각각 DGPS와 칼만필터를 이용한 위치평가의 결과로서 DGPS에 의한 결과는 30m 직선 실험시 연속적으로 위치오차가 늘어나는 것을 알 수 있으며, 10m 정사각형 실험의 경우 주행한 경로의 정사각형 형태를 이루지 못하고 전체적으로 찌그러져 나타나는 경향을 보였다. 이것은 DGPS자체의 최대오차가 5m 정도(시간에 따라 연속적으로 변화)이므로 단거리 주행에 대해서는 당연한 결과라 할 수 있다.

그러나 확장 칼만 필터를 이용한 결과는 비록 오차가 있긴 하지만 각각의 경로에 대해서 상당히 근접한 형태를 나타냄을 알 수 있다. 직선 실험의 경우 실제의 경로에 대한 DGPS의 최대오차는 2.8m, 확장칼만필터 방법의 최대오차는 1.15m였으며, 정사각형실험의 경우는 DGPS의 최대오차 1.74m, 확장칼만필터의 최대오차는 0.77m이었다. 따라서 DGPS만을 이용할 경우 5m 이내의 위치 정확도를 유지할 수 있지만 국부적인 장애물 회피 등 위치 정확도가 더욱 요구되는 경우에는 확장칼만필터 방법이 필수적이라 사료된다.

Fig. 4-8과 4-9는 실제 바다에서 탐사선의 항해 실험을 한 결과이다. 실험은 4곳의 위치(그림에서 사각점)를 미리 설정한 다음 탐사선을 설정된 위치를 차례대로 통과시키는 방법으로 수행하였으며 총 이동거리는 1,050m정도이다. Fig. 4-8은 추측항법만으로 운항한 결과로서 가로 한 눈금은 37.18m, 세로 한 눈금은 44.37m 정도이다. 그림에서 알 수 있듯이 비슷한 경로를 3회 항해했음에도 불구하고 오차가 크게 발생하였음을 알 수 있다. 이것은 일정한 속도 명령에도 불구하고 파도 등에 의해 속도에 오차가 많이 개입되며 또한 디지털 컴퍼스의 자세각에도 오차가 많이 발생하기 때문이다.

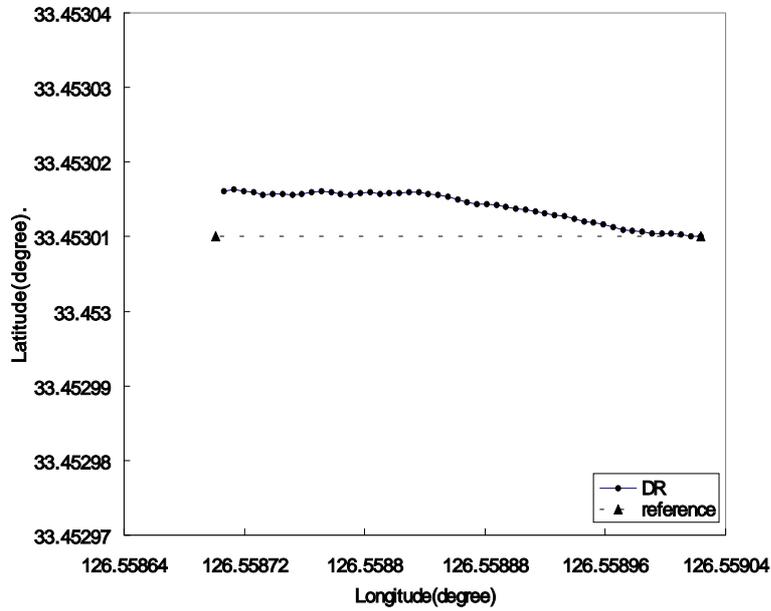


Fig. 4-4 Dead reckoning

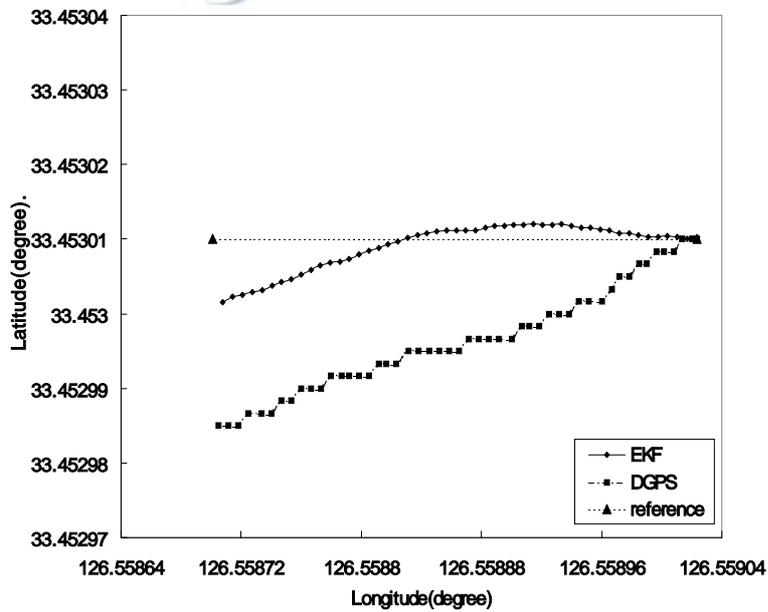


Fig. 4-5 Extended Kalman filter and DGPS

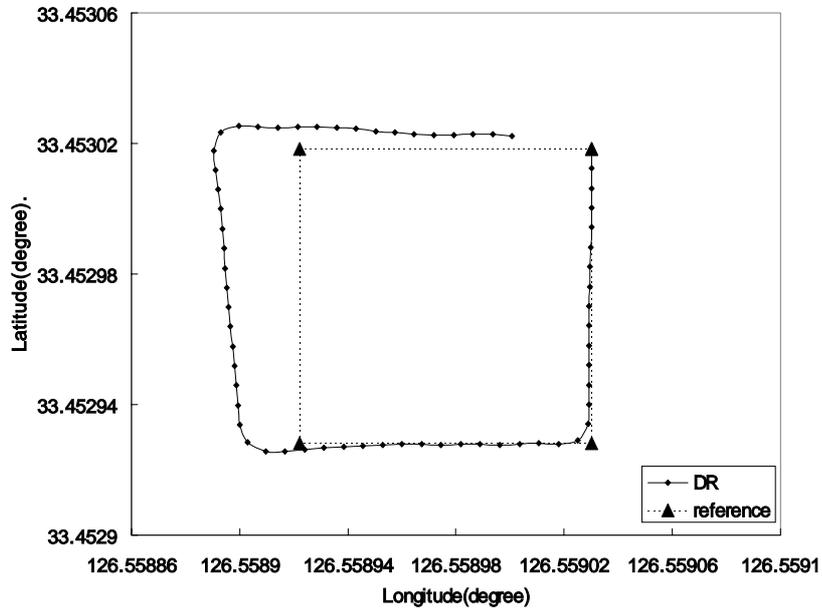


Fig. 4-6 Dead reckoning

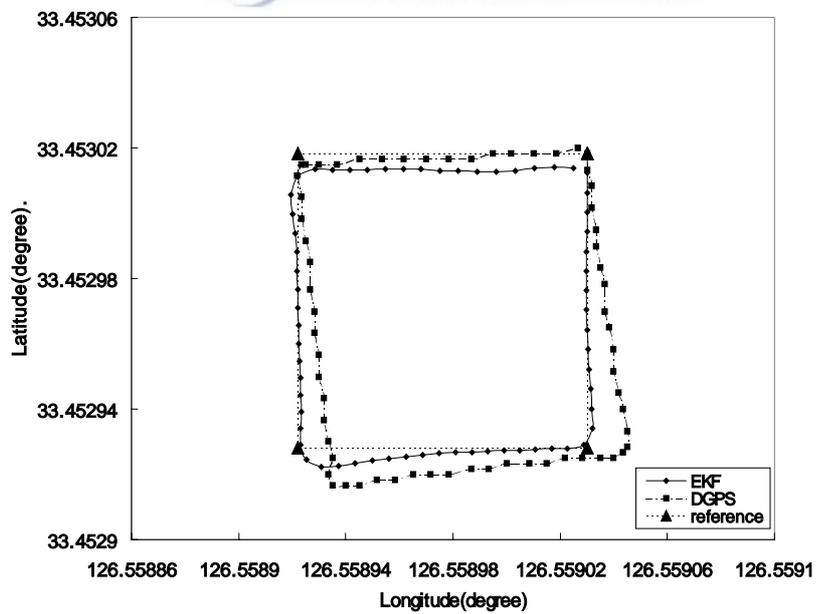


Fig. 4-7 Extended Kalman filter and DGPS

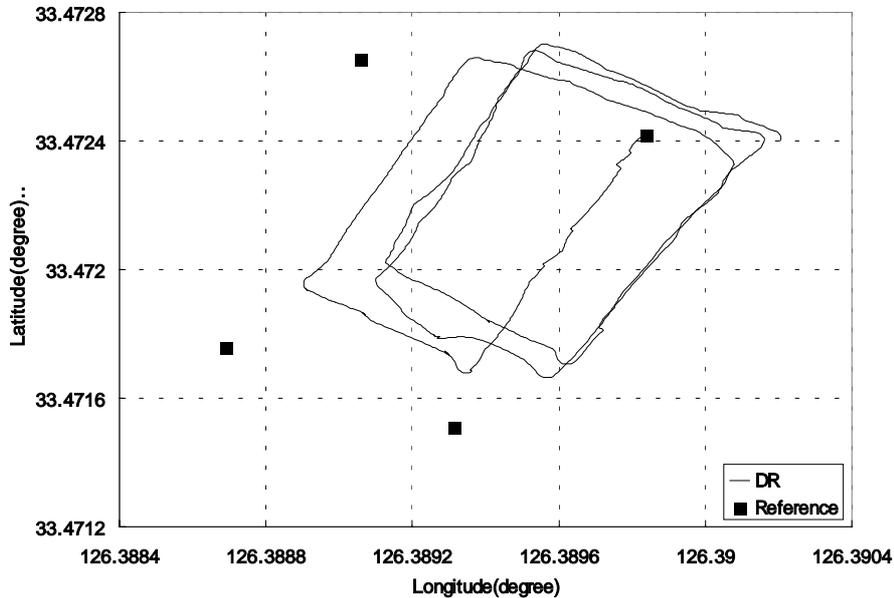


Fig. 4-8 Results of navigation using only dead reckoning



Fig. 4-9는 DGPS와 확장칼만필터를 각각 이용한 항법의 결과를 동시에 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 DGPS에 의한 결과이고 실선은 확장칼만필터에 의한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 긴 경로 항해에서는 DGPS나 확장칼만필터가 차이가 없는 것처럼 보이지만 국부적으로는 확장칼만필터에 의한 결과가 DGPS의 경우보다 완만한 경로를 나타내고 있다. 즉, 국부적으로는 DGPS는 5m 정도 무작위 오차가 발생하기 때문에 편차가 심하지만 확장칼만필터는 DGPS와 추측항법을 동시에 이용하기 때문에 경로가 완만하게 나타난다고 사료된다.

Fig 4-10은 각 위치에서의 DGPS와 확장칼만필터 위치평가의 편차를 나타낸다. 최대 편차는 3.4m였으며 편차의 경향은 원점을 중심으로 골고루 분포되어 있음을 알 수 있는데 이는 확장칼만필터 항법이 무편차 평가기구(unbiased estimator)라는 것과 설정된 시스템 모델과 측정모델의 타당성을 입증하는 것이다.

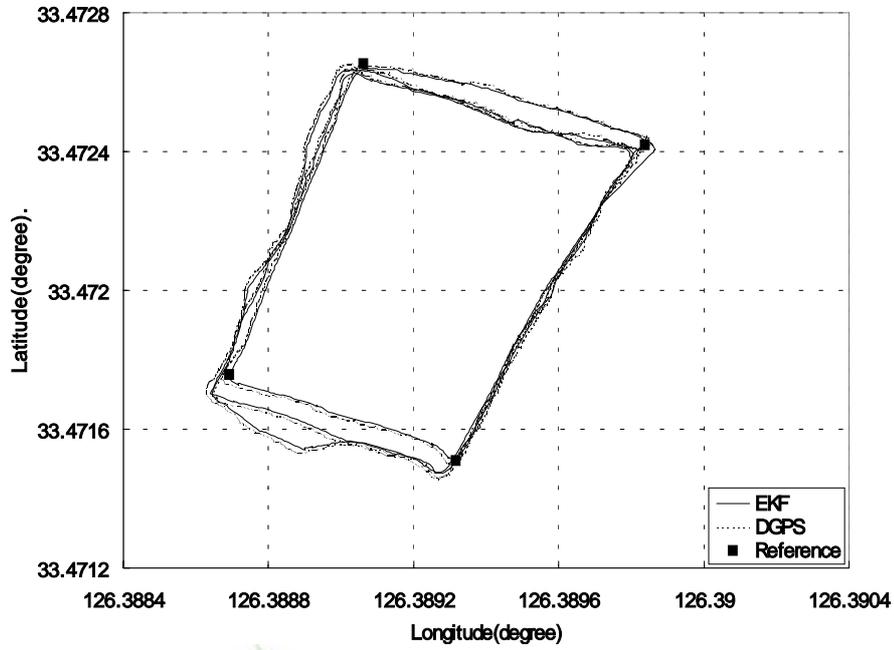


Fig. 4-9 Results of navigation using DGPS and EKF

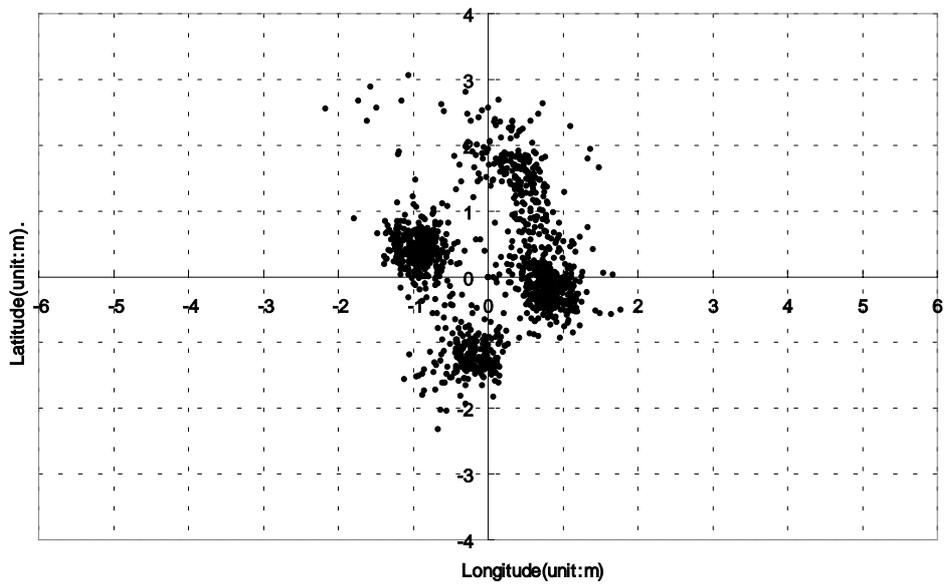


Fig. 4-10 Position deviations between DGPS and EKF

Fig. 4-11과 4-12는 위치평가에 수반된 오차 공분산을 나타낸다. 그림에서 보 여지듯이 경도, 위도 모두 발산하지 않고 있는데 이는 오차가 시간경과에 따라 무한히 커지지 않고 일정 값 범위 내로 수렴함을 의미한다.

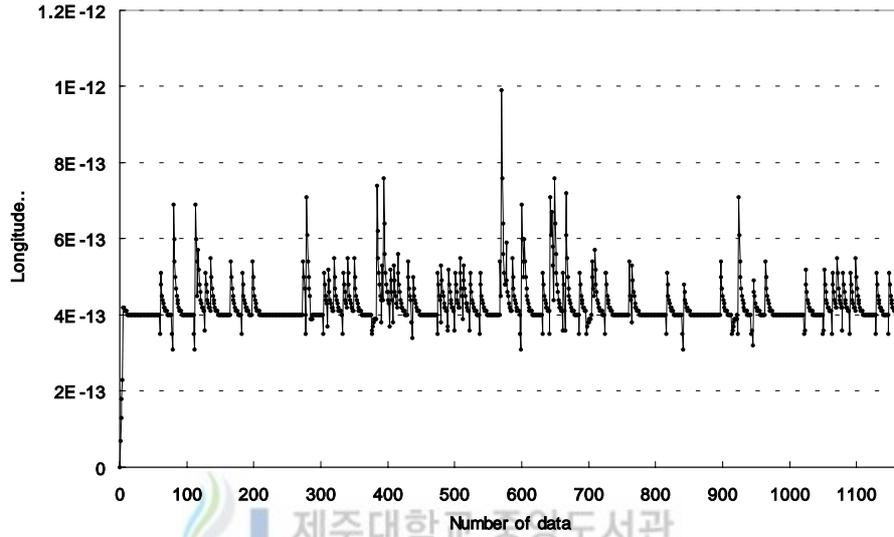


Fig. 4-11 Error covariance for longitude

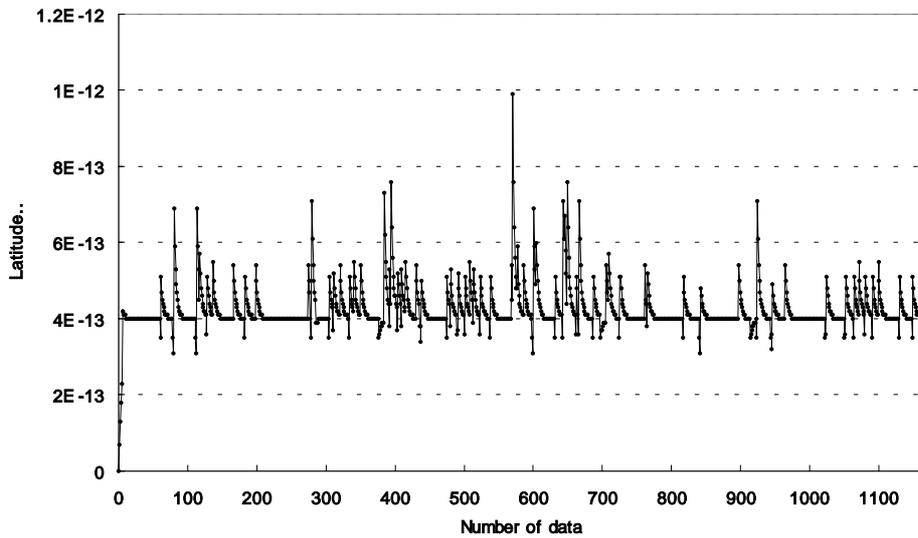


Fig. 4-12 Error covariance for latitude

VI. 결론

본 연구에서는 해양의 각종 물리, 화학적 정보를 측정할 수 있는 무인 원격제어형 해양 탐사선을 개발하였다. 수집된 각종정보는 무선통신 및 인터넷망을 통하여 실시간으로 지상에서 모니터링 가능하게 설계하였으며, 자율 항해를 위하여 확장 칼만 필터를 이용한 항법을 개발하였다.

설계된 탐사선 및 개발된 확장 칼만필터를 이용한 위치평가 방법을 실 해역 실험을 통하여 성능을 검증하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 쌍동선 형태로 설계된 탐사선은 항해실험결과 부력을 파고와 바람의 세기에 따라 조절하여 잠수율을 변화시킴으로써 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 무선통신망을 이용한 지상서버와의 직접 통신과 인터넷망을 통한 통신 등 2가지 통신 방법을 동시에 채택하여 데이터 수신은 인터넷 망으로, 비상시를 포함한 탐사선 제어는 무선통신망을 이용함으로써 효율적인 제어 및 모니터링이 가능함이 확인되었다.
3. 개발된 시스템은 수집된 정보를 실시간으로 인터넷망을 통하여 제공하므로 정보 이용의 효율 측면에서 기존방식보다 우수하다.
4. 탐사선의 위치를 평가하기 위해 확장 칼만필터 방법을 이용하였으며 실 해역 실험결과 일정 오차 범위 내로 위치를 평가할 수 있을 뿐만 아니라 DGPS만을 이용한 경우보다 위치 정확도를 높일 수 있음이 입증되었다.
5. 개발된 무인탐사선은 소형이고 자율항해가 가능하며, 지상에서 원격으로 제어할 수 있으므로 대형 탐사선이 접근하기 어려운 해역이나 위험한 지역의 탐사가 가능하고, 해양탐사에 필요한 부대 경비가 최소화 될 수 있어 실용성이 클 것으로 사료된다.

VII. 참고문헌

- [1] Tamaki, U., "Development of AUV 'PTEROA'," International J. of Advanced Robotics, MBARI, pp.195-200., 1990.
- [2] Yuh, J., " Design and Control of Autonomous Underwater Robots," International J. of Autonomous Robots, Vol. 8, No. 1, pp. 7-24, 2000.
- [3] Ishida, A., Kasino, Y., Mitsudera, H. and Kadokura, T., " Mean Structure and variability of the Equatorial Pacific Subspace Countercurrent in the JAMSTEC High-resolution OGCM," JAMSTECR, No.39, pp.117-137, 1999.
- [4] 안유환, "해양환경관측 및 개선을 위한 기반기술 연구," KORDI 2000 Annual Report, 2000.
- [5] 한국해양연구소, 광역 표층 해류관측을 위한 TG PS Buoy 시스템 운영지침서, 1995.
- [6] Marin Tech 사, 연안 관측모형선 카탈로그, 1998.
- [7] Tom Logsdon, Understanding the NAVSTAR - GPS, GIS, and IVHS, VNR Van Nostrand Reinhold, New York, 1995.
- [8] Cox, D. B. "Integration of GPS with Inertial Navigation Systems," Journal of the Institute of Navigation, vol. 1, pp. 144-153., 1978.
- [9] Upadhyay, T., "Autonomous GPS/INS navigation experiment for space transfer vehicle," IEEE Trans. of Aerospace & Electronic Systems, Vol. 29, No. 3, 1993.
- [10] Kao, W., "Integration of GPS and Dead Reckoning Navigation Systems," Proc. of VNIS, 1991.

- [11] 김진원, 지규인, 이장규, 이영재, "GPS와 Dead-Reckoning을 이용한 항법 시스템 설계," 제어·자동화·시스템 공학회지., Vol. 2, No. 3, pp188-193, 1996.
- [12] 박요섭, 다중 빔 음향 측심 자료 처리를 위한 해저면 맵핑 시스템, 인하대학교 자동화 공학과 석사 학위 논문, 1996.
- [13] 박대선, 실시간 OS 를 이용한 GPS/DR 결합 무인지상차량 항법시스템 개발, 건국대학교 전자·정보통신공학과 석사 학위 논문, 2001.
- [14] Siouris, G., Aerospace Avionics Systems, A Modern Synthesis, Academic Press Inc., San Diego, California, USA, 1993.
- [15] 한국해양연구소, DGPS운용을 위한 기반 구축, BSPE 98716-00-1158-2, 1998.
- [16] 유복모, 지리공간 정보론, 동명사, P.234, 1995
- [17] Derrick, R. Peyton., "Using GPS and ROVs to Map the Ocean," GPS World, PP.40-44, 1992.
- [18] 이영재, 지규인, 박찬식, 김일선, 이장규, 김춘식, "DGPS를 이용한 위치측정실험," 제2차 GPS Workshop, pp.273-280, 1995.
- [19] Roberts, G., Williams, A., David, L, J., Penning, D, P., Mark, S, R., "A Low-Power Postprocessed DGPS System for Logging the Locations of Sheep on Hill Pastures," Journal of the Institute of Navigation Vol.42, No.2 pp.327, 1995.
- [20] Lim, J, H., Kang, C, U., " Grid-based Localization of a Mobile Robot using Sonar Sensors," KSME Int. J., Vol. 6, No. 3, pp. 302-309, 2002.
- [21] Bar-shalom, Tracking and Data Association, Academic Press, 1988

감사의 글

논문의 마지막 페이지를 장식하는 감사의 글. 누군가 이런 말을 했던 기억이 납니다. 「논문의 내용을 작성하는 것보다 감사의 글을 쓰는 것이 더 힘들다」. 저에겐 그 말이 더욱 가슴에 와 닿습니다. 본 논문이 나오기까지 애써 주신 주위 여러분들의 고마움을 단 몇 자의 글로 표현한다는 것이 결코 쉽지만은 않은 듯 합니다.

우선 짧고도 긴 시간동안 변함 없는 가르침으로 이끌어 주시고 애정을 베풀어 주신 임종환 교수님께 다른 어떤 분보다도 먼저 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 지금 돌아보니 대학 4년과 대학원 석사과정 동안 수강했던 과목들과 교수님들의 얼굴의 주마등처럼 스쳐지나 갑니다. 흥미롭게 배웠던 내연기관의 권기린 교수님, 4학년 1년 동안 생활하면서 많은 가르침을 주셨던 재료역학의 김귀식 교수님, 카리스마를 물씬 풍기시는 유체역학의 허종철 교수님, 무서울 정도로 연구에 몰두하시는 모습이 보기 좋은 정역학의 조경호 교수님, 인생에 보탬이 될 많은 경험을 할 수 있도록 도와주신 열역학의 현명택 교수님, ‘서글서글한 웃음’이란 단어가 생각나게 하시는 기구학의 정동원 교수님, 지금은 외국에서 연구 중이신 최경현 교수님, 선배님이시자 교수님이신 강철웅 교수님, 그리고 박윤철 교수님, 김상재 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

기쁠 때 같이 웃고 힘들 때 독려해주던 승균이형, 성환이형, 실험장치 제작부터 연구까지 항상 함께 하면서 고생한 재철이형, 민호, 도성이, 창모, 희철이, 준철이, 실험실 막내 소영이, 직장생활에 여념이 없는 병수, 사업하라 공부하라 바쁘신 용철이형님, 경부형, 명범이형, 동원이형, 창수형, 석우, 승현이, 수환이, 그 외에도 도움을 주신 많은 분들께 고마움을 전하고 싶습니다.

논문심사에 애써주신 조경호 교수님과 강철웅 교수님께 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

짧지 않았던 대학원 석사과정 기간 많이 힘들고 즐거웠던 시간들... 이제 접어야 할 때가 온 것 같습니다. 끝으로 항상 용기를 주시는 아버지, 어머니, 사랑하는 가족들에게 이 논문을 바칩니다.

2003년 6월 여름을 맞이하며... 김 상 철