

소형 무인해양탐사선 및 항법 개발

임종환[#], 강철웅^{*}

Development of a Small Unmanned Marine Prober and Navigation

Jong Hwan Lim[#], Chul Ung Kang^{*}

ABSTRACT

The paper presents a small unmanned probing ship that can be used for acquiring information on marine and coastal environments. For communication system, we adopt direct and indirect methods based on the wireless modem of a commercial cellular telephone. The former is a direct communication between the modems of the ship and the server, and the latter is an indirect communication via internet between the ship and the server. The system is equipped with a digital compass and a GPS for position estimation, and extended Kalman filter is used for Navigation. The performance of the ship is demonstrated with the results produced by sets of experiments.

Key Words : Unmanned probing ship(무인탐사선), Wireless communication(무선통신), Internet(인터넷), Extended Kalman filter(확장칼만필터), Navigation(항법)

1. 서론

현재 해양탐사는 광범위한 해역을 폭 넓고 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 bouy³ 를 이용하고 있으며, 선진 해양국가에서는 오래 전부터 이와 같은 해양 탐사시스템 개발에 많은 투자를 하고 있다. 국내에서도 해양수산개발원을 중심으로 하여 해양환경관측을 위한 수질 관측용 bouy^{4,5} 시스템을 개발하였다.

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

2무인 해양탐사선의 자율운항을 위해선 적절한 항법이 필요하다. 항법에 주로 사용되는 방법으로는 추측항법(Dead Reckoning :DR), 천체항법, 관성항법, 전자 혹은 전파항법 등이 있다. 추측항법은 현재 위

✉ 2003년 6월 25일 접수; 게재승인일 : 2003년 11월 14일

교신저자, 제주대학교 생산공학과

Email jhlim@cheju.ac.kr Tel. (064)754-3712

* 제주대학교 생산공학과

치로부터의 이동속도와 방향을 계산하여 다음 위치를 추정하는 방법이며, 천체항법은 천체를 정밀 측정하여 위치를 판별하는 방법이다. 관성항법은 자이로스코프에 의존하여 속도와 이동방향을 측정하는 방법이며, 전자 혹은 전파항법은 전파의 전달 시간을 측정하여 위치를 결정하는 방법으로서 GPS는 가장 진보된 전파항법의 형태로서 인공위성을 이용하는 측위 시스템이다.⁷ 최근에는 전술한 항법 시스템을 둘 이상 결합한 형태의 항법 시스템들이 개발되어 지고 있으며, 그 예로 관성항법과 GPS를 결합한 형태의 항법 등이 있다⁸⁻¹⁰.

본 연구에서는 기존의 탐사방법보다 효율적으로 연안의 상태를 조사할 수 있는 소형 무인 탐사선을 개발하고자 한다. 탐사선과 지상서버와의 통신은 무선 인터넷을 통하여 데이터를 송수신 하는 간접통신방식과 무선 통신망을 이용하여 무인 해양 탐사선과 지상서버의 1:1 통신, 즉 직접 통신 방식 등 두 가지 통신방식이 모두 가능하도록 설계한다. 또한 지상 이동체의 무인 항법은 주로 GPS와 자이로 센서 및 가속도 센서가 주로 이용되나 본 연구에서는 GPS와 디지털 컴퍼스의 데이터만을 이용하여 GPS에 의한 항법과 디지털 컴퍼스에 의한 추측 항법을 확장칼만필터로 결합하는 방법을 채택한다. 이와 같이 설계된 탐사선 및 개발된 항법을 실험해역 실험으로 성능 및 신뢰성을 검증한다.

2. 무인 탐사선 설계

2.1 선체부

선체부는 파도와 바람에 대한 안전성을 고려하여 Fig. 1과 같이 쌍동선 형태로 설계하였다. 본체에는 제어, 통신, 탐사 등을 위한 각종 회로 및 전원공급을 위한 배터리 등이 내장되어 있다. 본체 좌우에는 일정한 각도를 갖고 부력을 조절하기 위한 부력체가 좌우 대칭으로 연결되어 있으며 각 부력체는 길이 방향으로 세 부분(앞, 중앙, 뒤)의 방으로 나뉘어져 있다. 각 방에는 물을 주입하거나 배출할 수 있도록 설계되어 있는데, 각 방의 물의 양에 따라 부력중심을 조절할 뿐만 아니라 파도나 바

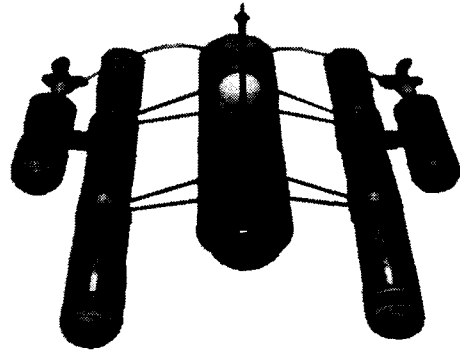


Fig. 1 Unmanned marine prober

람의 세기에 따라 잠수 정도를 조절함으로써 안전성을 주기 위함이다.

구동부는 부력체에 연결되어 있는데, 상하로 자유로이 위치가 조절되며 선수와 선미 방향으로 이동이 가능토록 하여 지상이동이나 보관 시 편리하고 선체의 부력중심을 맞추는데 용이하게 설계되어 있다. 구동부 내부에 DC 모터가 장착되어 있고 이 모터 축이 외부로 돌출되어 스크루가 연결되어 있다. 따라서 양측 두 개의 스크루가 동시에 작동하여 탐사선을 추진시키거나 방향을 전환하는 구조이다. Table 1은 설계된 탐사선의 제원을 나타낸다.

Table 1 Specifications of the prober(unit : mm)

Spec.	Main Body	Buoyance Body	Total system
Materials	PVC	PVC	PVC, Stainless Steel
Dimension (L × W × H)	900x200x200	1250x150x150	1250x950x315

2.2 제어 및 통신부

제어부는 Fig. 2와 같이 주 제어기 하부에 모터 드라이버, 항법용 센서, 그리고 무선 통신모듈이 연결되어 있으며, 모터 구동, 지상 서버와의 통신, GPS 및 디지털 컴퍼스로부터의 위치 데이터 획득, 그리고 각종 해양 정보를 수집하는 센서 등을 총괄하여 제어한다. 주 제어기는 각종 명령처리 및 항법을 위해서 연산속도가 빠르고 신뢰성이 있는

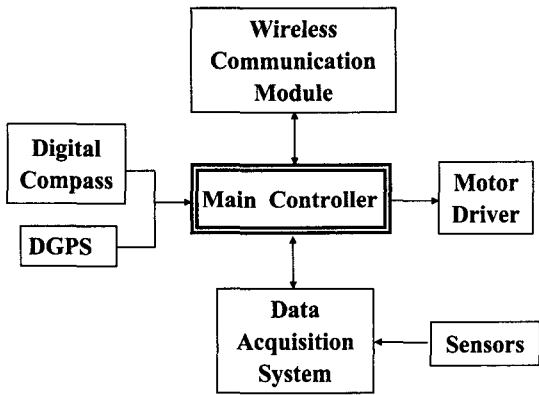


Fig. 2 The control system of the probe

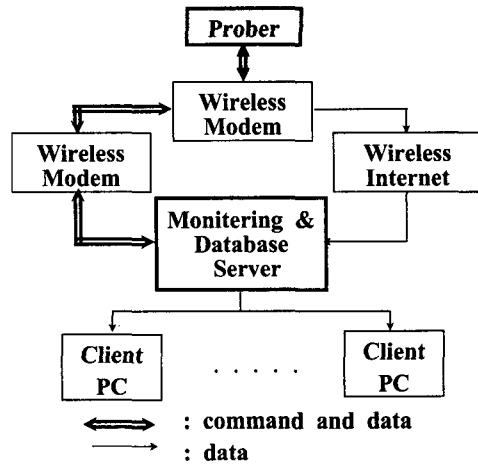


Fig. 3 The communication system

80C196 마이크로프로세서를 채택하였다.

통신부는 Fig. 3과 같이 탐사선과 지상 서버 간에 무선 인터넷 망을 통하여 탐사선에서 수집된 탐사 위치 등의 각종 정보를 지상 서버로 전송하며, 탐사선을 원격으로 제어할 경우에는 지상 서버로부터 반대 경로로 탐사선에 명령을 전달할 수 있게 설계되어있다. 명령하달이나 비상시 또는 필요시 지상서버에서 원격제어 할 때 인터넷 망을 통한 경우 속도지연 문제가 발생하여 제어가 순조롭지 못할 경우를 대비하여 지상서버에 부착된 모뎀과 탐사선 모뎀간의 직접통신도 가능하게 설계되어있다.

항법을 위한 위치측정 센서는 DGPS와 디지털 컴퍼스를 이용하고 있으며, Table 2는 그 사양을 나타낸다. DGPS 모듈은 자동 기준국 선정 기능을 가지며 최대 오차 5m, 오차의 표준편차가 경도 2.48 m, 위도 1.23 m의 특성을 가지고 있다. 또한 지상 서버부는 탐사선의 원격 제어를 위한 제어부, 데이터 및 명령 하달을 위한 통신부, 그리고 데이터 및 탐사선의 위치 등을 감시하는 모니터링부로 구성되어 있다. Fig. 4는 지상 서버의 모니터링 화면을 나타낸다.

Table 2 Specifications of the digital compass and DGPS.

Digital Compass		DGPS-53	
Heading Accuracy	$\pm 3^\circ$	Frequency Range	283.5 - 325.0 kHz @0.5 kHz
Resolution	1°	Data Rates	200/100/50/25 bps
Response Speed	4 Hz	Input/Output	RS-232, 4800 baud rate
Standard Deviation	$\pm 7^\circ$ (on the sea)	Standard Deviation	2.48 m (Longitude) 1.23 m (Latitude)
		Accuracy	1 ~ 5 m

3. 탐사선의 항법

3.1 시스템 및 측정 모델

일반적으로 지상 이동체의 항법에는 GPS와 자이로센서 및 가속도 센서가 주로 이용된다. 해양탐

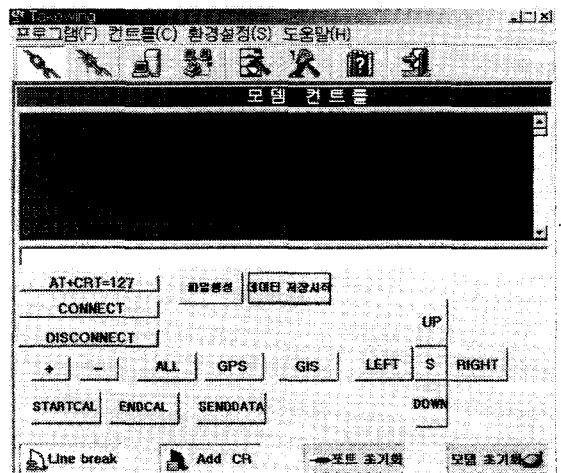


Fig. 4 Monitoring dialog box

사선의 경우는 파도 등으로 환경이 열악하며 위치 정밀도가 덜 요구되므로 DGPS 및 방향각 센서와 확장 칼만필터를 이용한 항법을 개발하고자 한다.

$\lambda(k)$, $\phi(k)$, 그리고 $\theta(k)$ 를 각각 시간 k 에서 탐사선의 경도, 위도 및 자세각으로 정의하면, 탐사선의 위치는 $X(k) = [\lambda(k), \phi(k), \theta(k)]^T$ 로 표현된다. 먼저 시스템 모델은 다음으로 표현된다.

$$X(k+1) = F(X(k), u(k)) + v(k) \quad (1)$$

여기서, $F(X(k), u(k))$ 는 상태 천이함수이며, $u(k)$ 는 제어입력으로서 탐사선의 속력 $V(k)$ 와 자세각의 증분 $\Delta\theta(k)$ 로 구성되고, $v(k)$ 는 평균이 0이고 공분산이 $Q(k)$ 인 가우시안 잡음이다. 탐사선의 속도와 경.위도 변화관계는 다음과 같다.¹¹

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} &= \frac{V \sin \theta}{(R_e + h) \cos \phi} \\ \dot{\phi} &= \frac{V \cos \theta}{R_e + h} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \lambda(t + \Delta t) &= \lambda(t) + \dot{\lambda} \Delta t \\ \phi(t + \Delta t) &= \phi(t) + \dot{\phi} \Delta t \end{aligned}$$

여기서 V 는 탐사선의 속도, R_e 는 지구반경, h 는 고도로서 탐사선은 항상 바다 표면을 향해하므로 $h=0$ 으로 가정한다. 따라서 식(2)를 이용하여, 이산시간 $F(X(k), u(k))$ 를 구하면 다음과 같다.

$$F(X(k), u(k)) = \begin{bmatrix} \lambda(k) + \frac{d(k) \sin \theta(k)}{R_e \cos \phi(k)} \\ \phi(k) + \frac{d(k) \cos \theta(k)}{R_e} \\ \theta(k) + \Delta \theta(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$d(k)$ 는 시간 k 와 $k+1$ 사이의 이동거리로서 $V(k)\Delta t$ 이다. 측정모델은 측정값과 탐사선의 위치를 연관시키는 것으로서 아래와 같이 정의 한다.

$$Z(k) = H(X(k)) + w(k) \quad (4)$$

$w(k)$ 는 평균이 0, 공분산이 $R(k)$ 인 가우시안 잡음이다.

GPS 및 디지털 컴퍼스는 각각 고유한 측정 메커니즘을 갖고 있으며, 각 센서의 위치정보 발생과정은 탐사선의 위치를 제외한 다른 특별한 관계가 존재하지 않으므로 센서의 정보는 실제 위치정보에 단지 각 센서의 특성에 따른 무작위 오차만이 개입된다고 가정할 수 있다. 따라서 $H(X(k))$ 를 다음과 같이 정의 한다.

$$H(X(k)) = \begin{bmatrix} \lambda(k) \\ \phi(k) \\ \theta(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

이와 같이 정의된 플랜트 모델과 측정모델을 확장 칼만 필터 알고리즘에 적용하여 탐사선의 위치를 평가한다.¹²

3.2 위치평가

먼저 시스템 모델과 제어 입력 $u(k)$ 로부터 시간 $k+1$ 에서의 탐사선 위치 $\hat{X}(k+1|k)$ 를 다음과 같이 예측한다.

$$\hat{X}(k+1|k) = F(\hat{X}(k|k), u(k)) \quad (6)$$

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

$$P(k+1|k) = \nabla F \cdot P(k|k) \cdot \nabla F^T + Q(k) \quad (7)$$

∇F 는 상태천이함수의 자코비안으로서 다음과 같다.

$$\nabla F = \begin{bmatrix} 1 & \frac{d(k) \sin \theta(k) \sin \phi(k)}{R_e \cos^2 \phi(k)} & \frac{d(k) \cos \theta(k)}{R_e \cos \phi(k)} \\ 0 & 1 & -\frac{d(k) \sin \theta(k)}{R_e} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

다음으로는 측정된 값과 예측 값의 차로 구성되는 innovation 행렬 $\nu(k+1)$ 을 구성한다. 즉,

$$\begin{aligned} \nu(k+1) &= [Z(k+1) - \hat{Z}(k+1)] \\ &= [Z(k+1) - H(\hat{X}(k+1|k))] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $Z(k+1)$ 은 센서의 측정값, $\hat{Z}(k+1)$ 은 식 (6)으로 예측된 위치이다. 식 (9)에 대한 공분산 행렬 $S(k+1)$ 은 다음과 같이 정의된다.¹³

$$S(k+1) = \nabla H \cdot P(k+1|k) \cdot \nabla H^T + R(k+1) \quad (10)$$

여기서 ∇H 는 식 (4)로 정의된 $H(X(k))$ 의 자코비안이다. 이 식들을 이용하여 칼만 게인 행렬 $W(k+1)$ 을 구하면 다음과 같다.

$$W(k+1) = P(k+1|k) \nabla H^T S^{-1}(k+1) \quad (11)$$

칼만게인을 이용하여 예측된 위치를 다음과 같이 보정한다.

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + W(k+1) \nu(k+1) \quad (12)$$

마지막으로 이 평가에 수반된 공분산 행렬은 아래와 같이 갱신된다.

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - W(k+1)S(k+1)W^T(k+1) \quad (13)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 탐사선 운항실험

설계된 탐사선의 안정성 및 운항특성을 알아보기 위해 실 해역 실험을 다양한 날씨 조건에 대해 수행하였다. Fig. 5는 탐사선의 실제 운항 실험사진을 나타낸다. 운항실험 결과 부력조절을 하지 않을 경우 탐사선 본체의 2/3정도만이 수면위로 노출되기 때문에 바람에 의한 불안정성 문제는 거의 없었다.

파고가 1m 이하로 높지 않은 경우에는 잠수율을 최대한 낮춰 유체저항을 줄임으로서 탐사선이 최대속도(1.5m/s)로 운항할 수 있었으며, 파고가 높은 경

우는 반대로 잠수율을 높임으로써 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 부력조절을 할 경우 탐사선의 최대 잠수율은 거의 100%에 달하며 실제 탐사선의 작업은 태풍이나 파랑주의보와 같은 극한 상황이 아닌 정상 날씨에 수행될 것이므로 설계된 탐사선의 안정성은 충분한 것으로 사료된다.

지상 서버와 탐사선간의 직접 통신은 통신장애 지역이 아니한 별 문제가 없었으며, 인터넷 통신에 의한 데이터 수신은 회선 과부하가 걸릴 때마다 조금씩 지연되는 경향을 보였으나 실시간 데이터 확보에는 큰 문제가 되지 않을 정도였다.

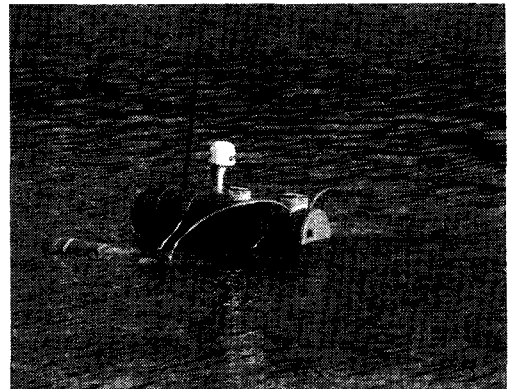


Fig. 5 View of the navigation experiment

4.2 위치평가 결과

먼저 단거리 이동시의 추측항법, 확장 칼만필터를 이용한 항법, 그리고 DGPS만 이용한 항법의 성능을 비교 분석하기 위해 한 변이 10m인 정사각형 경로를 설정하고 이 경로를 운항하는 실험을 실시하였다. Fig. 6은 추측항법만의 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 초기에는 큰 오차가 없으나 운항거리가 증가할수록 속도 및 방향오차가 누적되어 위치오차가 크게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 7은 DGPS와 칼만 필터를 각각 이용한 위치평가의 결과로서, DGPS에 의한 결과는 운항 경로가 정사각형 형태를 이루지 못하고 전체적으로 찌그러져 나타나는 경향을 보였다. 이것은 DGPS자체의 최대오차가 5m 정도(시간에 따라 연속적으로 변화)이므로 당연

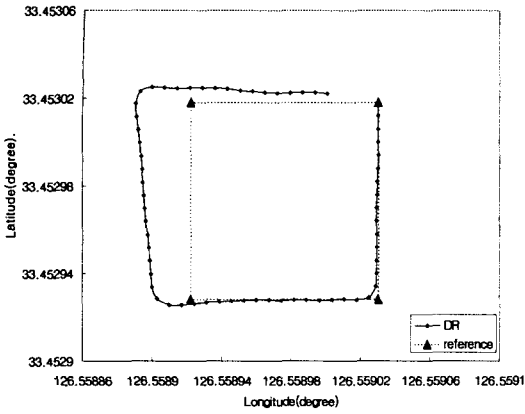


Fig. 6 Dead reckoning

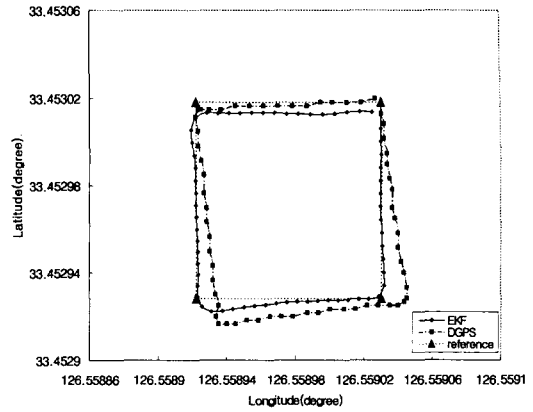


Fig. 7 Extended Kalman filter and DGPS

한 결과라 할 수 있다. 그러나 확장 칼만 필터를 이용한 결과는 비록 오차가 있긴 하지만 실제 경로에 대해서 상당히 근접한 형태를 나타냄을 알 수 있다. DGPS에 의한 결과의 최대오차는 1.74m, 확장칼만필터에 의한 결과의 최대오차는 0.77m이었다. 따라서 DGPS만을 이용할 경우 5m (사용된 DGPS의 최대 오차) 이내의 위치 정확도를 유지할 수 있지만 국부적인 장애물 회피 등 위치 정확도가 더 요구되는 경우에는 확장칼만 필터 방법이 더욱 효과적일 것으로 사료된다.

Fig. 8과 9는 실 해역에서 탐사선의 장거리 항해 실험을 한 결과이다. 실험은 그림에서 사각형 점으로 표시한 4곳의 위치를 미리 설정한 다음, 탐사선을 설정된 위치를 차례대로 통과시키는 방법으로 수행하였으며 총 이동거리는 1,050m 정도이다. 그림에서 가로 한 눈금은 37.18m, 세로 한 눈금은 44.37m 정도이다. Fig. 8은 추측항법만의 결과로서 위치오차가 거리의 증가에 따라 점차 발산하는 경향이 뚜렷하다.

Fig. 9에서 점선은 DGPS에 의한 결과이고 실선은 확장칼만필터에 의한 결과이다. 그림을 살펴보면 설정된 기준위치에 대해 평가된 위치의 오차가 크게 나타나고 있는 것으로 보인다. 이것은 실제 실험시에 탐사선의 경로제어나 위치제어가 실시되지 않았으며, 설정된 기준위치 4곳에 부표를 띄우고 조종자의 관측에 의해 지상에서 원격으로 탐사선이 설정된 위치부근을 지나가게 조작함으로써 탐사선의 실제 경로가 설정된 위치에 대해 어느 정도 오차가 있었기

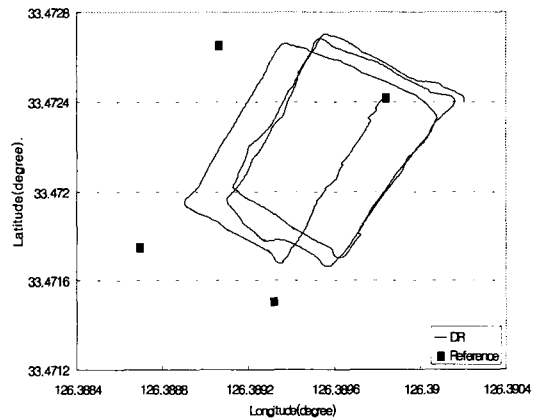


Fig. 8 Results of navigation (Dead Reckoning)

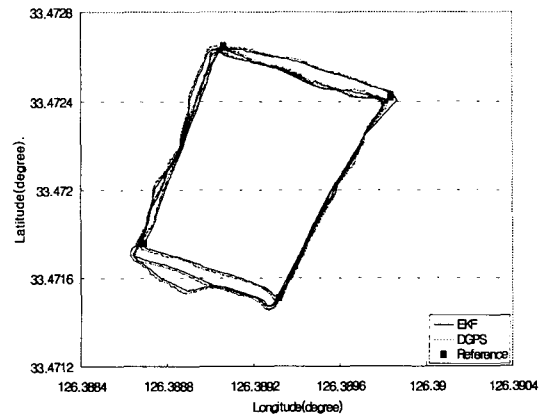


Fig. 9 Results of navigation (DGPS and EKF)

때문이다.

장거리 실 해역 운항 실험의 경우는 정확한 실제 경로를 측정하기 어렵기 때문에 각 방법의 정량적인 오차 분석을 할 수는 없지만 단거리 운항실험의 결과로 유추할 때 장거리 운항 시에도 확장 칼만 필터 방법이 더 효과적일 것으로 사료 된다

5. 결 론

본 연구에서는 해양의 각종정보를 측정할 수 있는 무인 해양 탐사선을 개발하였다. 수집된 각종정보는 무선통신 및 인터넷망을 통하여 실시간으로 지상에서 모니터링이 가능하게 설계하였으며, 확장 칼만 필터를 이용한 항법을 개발하였다. 설계된 탐사선 및 확장칼만필터를 이용한 항법을 실 해역 실험을 통하여 성능을 검증한 결과, 탐사선은 파고와 바람의 세기에 따라 잠수율을 변화시킴으로써 안정성을 확보할 수 있으며, 2중 통신시스템은 제어 및 모니터링에 효율적임이 확인되었다.

또한 확장칼만필터를 이용한 항법은 DGPS만을 이용한 경우보다 위치 정확도를 높일 수 있음이 입증되었다. 따라서 개발된 무인 탐사선은 대형 탐사선이 접근하기 어려운 해역이나 위험한 지역의 탐사가 가능하고, 해양탐사에 필요한 부대 경비가 최소화 될 수 있어 실용성이 클 것으로 사료된다.

향후 연구과제는 무인탐사선의 운항제어 및 장애물 회피 등의 기능을 추가함으로써 완전한 자율항해가 가능한 탐사선을 개발하는 것이다.

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2002-002-D00015)에 의하여 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

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 Counter current in the JAMSTECH," JAMSTECH, No.39, pp.117-137, 1999.
4. Ahn, Y., H., " Basic Technologies for Monitoring and Improvement of a Ocean Environment," KORDI 2000 Annual Report, 2000.
5. KORDI, Operation Manual of TGPS Buoy System, 1995.
6. Marin Tech Co., Catalog for Costal Observation Ship, 1998.
7. Logsdon, T., 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. Siouris, G., Aerospace Avionics Systems, A Modern Synthesis, Academic Press Inc., San Diego, California, USA, 1993.
12. 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.
13. Bar-shalom, Tracking and Data Association, Academic Press, 1988.