

## 論文

## 기압 고도계를 이용한 DGPS 고도측정 향상

유 호\*, 천세범\*, 권철범\*, 이영재\*, 지규인\*, 전향식\*\*, 주정민\*\*

Altitude Estimation Improvement in DGPS using  
Barometric Altitude SensorsHo You\*, Sebum Chun\*, Chulbum Kwon\*, Young Jea Lee\*, Gyu-In Jee\*,  
Hyang-Sig Jun\*\* and Jung-Min Joo\*\*

## ABSTRACT

DGPS provides less altitude accuracy than horizontal accuracy according to geometric characteristics of GPS satellite arrangement. To assist DGPS altitude measurements, two barometric altitude sensors were used and set up at the mobile and the reference station respectively to get the differential altitude. This differential altitude is coupled with the DGPS altitude measurement by a Kalman filter so that the improved altitude is estimated. The differential altitude is based on the relative altitude measurement but results in providing the absolute altitude. The precision of this differential altitude is verified by experiments in accordance with a baseline length.

## 초 록

DGPS는 GPS위성배열의 기하학적인 특성에 따라 수평면 정확도에 비해 고도 정확도가 좋지 않다. DGPS고도를 보정하기위해 두 개의 기압고도계를 사용하였고 각각 이동국과 기준국에 설치하여 차분된 고도를 얻어냈다. 이 차분된 고도는 DGPS 고도측정치와 칼만필터로 결합하여 향상된 고도를 추정한다. 이와 같은 차분된 고도는 기존의 상대고도에 기반을 두고 있지만 압력 고도가 아닌 절대고도를 주는 것에 차이가 있다. 또한 기저선의 변화에 따라 차분된 고도가 얼마나 정확성을 갖고 있는지 실제 실험을 통해 확인한다.

**Key Words** : DGPS, Differential Altitude (차분 고도), Kalman Filter (칼만 필터)

## 1. 서 론

GPS는 세계 어디서나 시간에 관계없이 사용이 가능한 이상적인 항법시스템으로 처음에는 군용으로 개발되었으나 현재에는 민간부분에서 더 많이 사용되고 있다. GPS는 민간이 수신할 수 있는 C/A코드를 이용하는 SPS (Standard Positioning Service)와

군용신호인 P코드를 이용하는 PPS (Precise Positioning Service)의 두가지 서비스를 제공한다. 그러나 SPS를 이용한 단일 GPS 시스템의 위치는 10~15m의 오차범위를 갖기 때문에 보다 정밀 측정을 위해서 DGPS (Differential GPS)나 반송파 위상 (Carrier Phase)을 이용해야 한다. 반송파 위상을 이용하면 수 cm내의 정확도를 갖고 있지만 미지정수 결정 문제로 실시간 구현에는 많은 어려움이 따른다. 본 논문에서는 기준국의 도움을 얻어 사용자의 위치를 정확히 측정할 수 있는 DGPS시스템을 사용한다. 일반적으로 GPS는 수평면 오차보다 고도 오차가 좋지 않다. 이 점에서 DGPS도 예외일 수 없다. 본 논문의 초점은 부가적인 고도 정보를 이용해서 DGPS의 고

† 2005년 3월 31일 접수 ~ 2005년 9월 21일 심사완료

\* 정희원, 건국대학교 차세대혁신기술연구원

\*\* 정희원, 한국항공우주연구원

연락처자, E-mail : yonglee@konkuk.ac.kr  
서울시 광진구 화양동 1번지

도측정을 향상시키는 데에 있다. 고도 정보를 제공하는 대표적인 보조센서로서 크게 두가지 형태의 고도계로 나뉘는데 하나는 압력구의 내부와 외부 기압의 차이를 이용하여 고도를 측정하는 기압계형 고도계이고, 다른 하나는 전파의 반사 시간을 이용한 레이더형 고도계이다. 기압계형 고도계는 날씨나 온도 등 다른 외적인 요인에 의해 고도정보가 매우 민감하게 반응하지만 외부 장애물에 의한 영향은 많이 받지 않는다. 레이더형 고도계는 매우 정확한 고도를 주지만 외부환경과 상대적인 고도 정보만을 얻을 수 있다는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 DGPS와 기압형 고도계를 결합해서 고도정보를 향상시킨다[1]. 그러나 고도계와 GPS를 결합하기 위해서는 고도계가 제공하는 압력고도와 GPS가 제공하는 절대고도가 다르기 때문에 이에 대한 고도 보상을 해야만 한다. 지금까지 연구된 기존의 고도 보상 방법은 고도계의 압력고도의 특성을 분석하고 오차를 모델링해서 필터를 통해 압력고도를 향상시켰다. 본 연구에서는 DGPS의 기준국에도 고도계를 써서 얻어진 차분고도와 DGPS측정치를 칼만필터로 결합해서 고도가 향상됨을 보인다. 본 논문의 2절은 DGPS의 개념과 고도오차 보정의 필요성을 설명하고 3절에서는 2개의 기압형 고도계를 이용한 차분고도를 알아본다. 4절은 DGPS 고도측정치와 차분고도를 가지고 칼만필터로 이용한 고도추정 결과이다. 5절은 결론으로 본 논문의 내용을 정리한다.

## II. DGPS

근접한 두 개의 GPS수신기가 같은 위성으로부터 신호를 받아 자신의 위치를 계산할 때 각 수신기들은 자신만의 고유오차와 더불어 공통적으로 갖는 오차가 있는데, 이 공통의 오차를 제거하여 보다 정밀하게 위치측정을 한다는 것이 DGPS의 기본 개념이다[2].

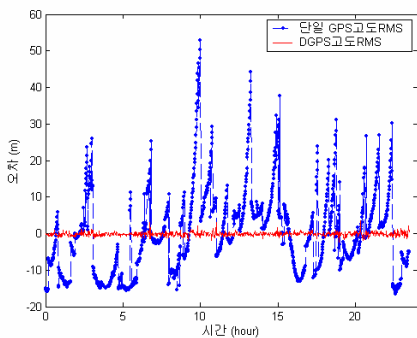


그림 1. 단일 GPS와 DGPS고도측정치 비교

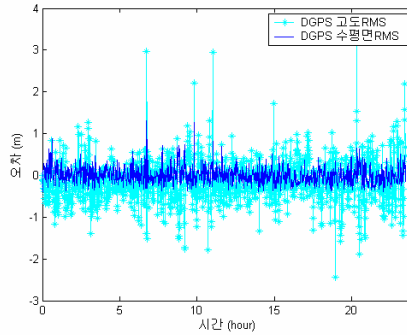


그림 2. DGPS 고도오차와 수평면위치오차 비교

그림 1은 단일 (Stand alone) GPS와 DGPS 고도 측정치 비교값이다. 실험은 건국대학교 공과대학 옥상에서 2004년 7월 30일 24시간 동안 정적인 위치에서 실시했다. 그림 1에서 단일 GPS고도의 표준편차는 11.5262m이고, DGPS의 고도 표준편차는 0.5069m이다. DGPS시스템은 위성 궤도 오차, 위성 시계 오차, 전리층 지연 오차, 대류권 지연 오차 등 공통오차가 소거함으로써 위와 같은 높은 정밀도를 나타낸다. 그러나 DGPS 시스템에도 불구하고 고도에서는 무시할 수 없는 오차를 가진다.

그림 2는 DGPS 고도오차와 수평면오차를 비교한 것이다. 수평면위치의 표준편차는 0.1949m, 고도 표준편차 0.5069m로 고도측의 오차가 수평면보다 상대적으로 2배이상 차이를 나타낸다. 따라서 DGPS를 이용한 3차원 정밀측위나 고도정보가 중요시되는 항공기 이착륙 등의 응용을 위해서는 고도 측위의 정확성을 높여야 한다.

## III. 차분 고도(Differential Altitude)

본 논문에서는 기압형 고도계를 보조센서로 사용하여 DGPS의 고도측위의 정확성과 안정성을 높인다. 기압형 고도계의 고도는 압력고도 (Pressure Altitude)로 GPS에서 주는 절대고도 (Absolute Altitude)와는 많은 차이가 있다. 고도에는 절대, 기하학적, 지구 포텐셜, 온도, 압력, 밀도 고도 등이 있는데 기압형 고도계의 압력고도는 지오이드상에서 수직고도로서 지하 매질의 밀도에 따라 지역마다 다르게 나온다. 반면 GPS의 절대고도는 지구가 완벽한 타원체라는 가정아래 중심에서부터의 고도이다.

### 3.1 기압형 고도계

기압형 고도계는 고도에 따라 대기의 온도와 압력이 변화하는 성질을 이용하여 고도를 계산하는 장비

로서, 대기의 온도와 압력을 측정하는 센서와 이를 이용하여 고도를 계산하는 대기자료 컴퓨터로 구성되어 있다. 일반적으로 대기자료컴퓨터에 저장된 대기자료는 표준대기에 대한 자료로서 실제 대기와는 차이를 가지고 있으며 이것은 상당한 크기의 고도오차를 유발한다. 또한 초기에 정확한 값으로 대기자료를 입력하였다 하더라도 사용자의 위치가 변화함에 따라 주변의 대기도 변화하게 되므로 역시 고도오차를 유발한다. 그러므로 우수한 항법시스템을 구성하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 고도오차의 성질을 규명하고, 실시간으로 오차를 추정하여 보상하는 알고리즘이 요구된다[3].

$$\Delta H \cong \frac{\Delta T}{T} H_p + \frac{RT_0}{g} \left( \frac{\Delta P}{P_0} \right) \quad (1)$$

다음 식(1)과 같이 대기변화에 따른 압력 고도의 오차는 주로 스케일팩터 오차와 바이어스 오차로 표시할 수 있고, 온도의 변화는 스케일팩터 오차로서 표현되며 기압의 변화는 바이어스 오차로 표현됨을 알 수 있다.  $H_p$ 는 압력고도,  $H_0, T_0, P_0$ 는 측정 시작지점에서의 고도, 온도, 압력이고  $R$ 는 기체상수이며,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다. 저고도에서는 바이어스 오차가 주 오차 요인이지만, 고도가 상승할수록 스케일팩터 오차가 전체 오차의 대부분을 차지하게 된다. 표준대기에서의 대류권 안에서 압력고도는 식(2)으로 표현된다[4].

$$H_p = 44,332 \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{0.19026} \right] (m) \quad (2)$$

실제의 대기가 표준대기의 가정과 일치한다면 압력고도는 해면상에서 기하학적고도를 나타낸다[5]. 다음 그림 3은 정적인 위치에서 기압형 고도계로 압력고도를 측정된 데이터다. 실험은 2004년 8월 20일 건국대학교 공과대학 옥상에서 24시간동안 실시했다.

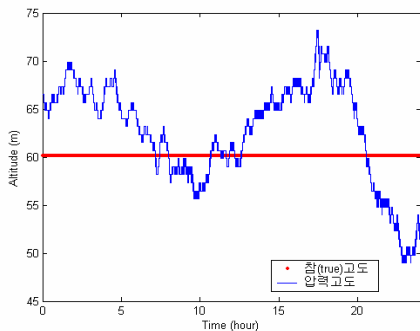


그림 3. 기압형 고도계를 이용한 압력고도측정

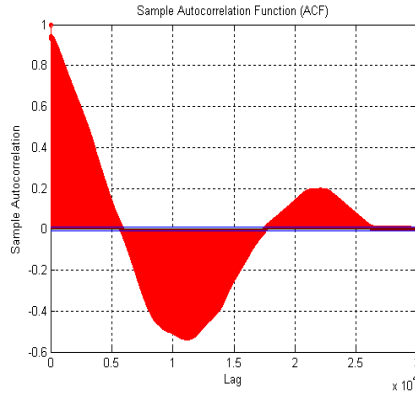


그림 4. 압력고도의 자기상관계수

$$\psi_{XX}(\tau) = \frac{\sigma^2}{\cos\eta} e^{-\xi\omega_n|\tau|} \cos(\sqrt{1-\xi}\omega_n|\tau| - \eta) \quad (3)$$

참고도 (True Altitude)는 60.1m 이지만 압력고도는 상당한 바이어스와 함께 제 2차 마코프프로세스 형태로 측정됨을 알 수 있다. 그림 4는 이러한 압력고도의 자기 상관계수를 나타낸 것이다. 식(3)은 제 2차 마코프 프로세스의 자기상관계수를 나타낸 식이다. 여기서  $\omega_n$ 은 0.00028라디안/초,  $\eta$ 는 0.1,  $\xi$ 는 0.2이다. 이와 같이 기압형 고도계의 압력고도는 주위 대기압에 의하여 위치가 좌우되는 것을 알 수 있다.

### 3.2차분고도 측정절차

정적인 위치에서 초기고도보정을 해주어도 시간에 따라 평균해수면 기압이 일정하지 않기 때문에 마코프프로세스 형태의 오차로 진행된다. 이러한 오차는 다른 지역에서 시각동기가 된 같은 기압형 고도계로 측정하면 공통오차로 제거될 수 있다. 등기압선은 반경거리에 따라 변화하므로 근거리에서 상대고도측정은 가능하다. 차분고도(Differential Altitude)은 이러한 상대고도를 기반해 두고있다.

그림 5와 같이 기준국에 기압 고도센서와 GPS수신기를 설치하여 무선통신으로 다음 절차로 진행된다.

- ① 기준국과 이동국에서 각기 압력측정
- ② 측정된 압력으로부터 각기 압력고도 산출
- ③ 기준국에서 알고있는 절대고도와 압력고도와 차를 계산, 이동국으로 전송
- ④ 기준국에서 받은 차이값으로 이동국 압력고도 보정

기준국 고도계와 이동국 고도계는 각각 GPS 수신기와 시각동기 되어있어야지만 RF모뎀에 의한 시간지

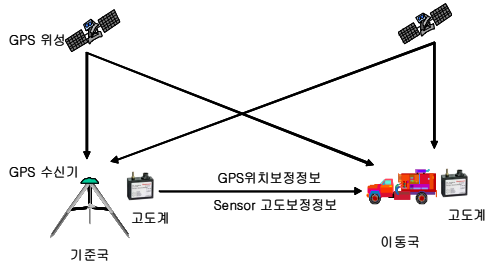


그림 5. 차분고도 측정절차 과정

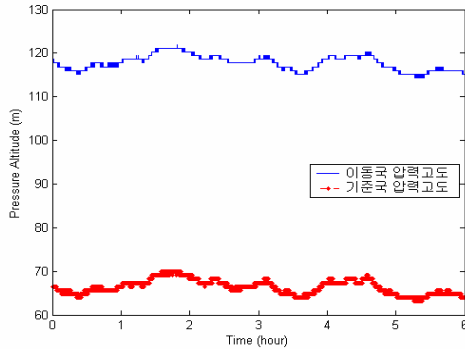


그림 6. 이동국과 기준국에서의 압력고도

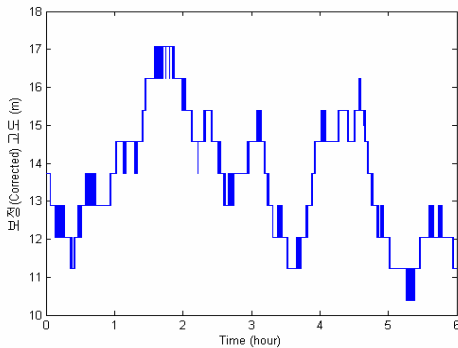


그림 7. 기준국에서의 보정된 고도

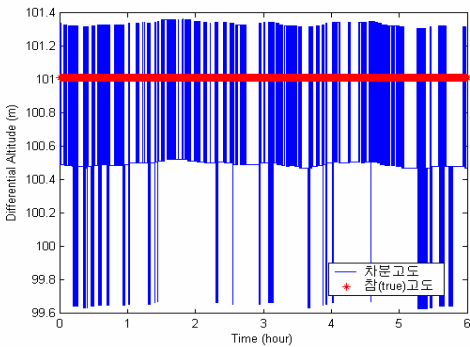


그림 8. 이동국에서의 업데이트된 차분고도

연오차를 막을 수 있다. 이러한 방식으로 이동국에서는 압력고도가 아닌 절대고도를 얻을 수가 있다.

실험은 2004년 8월 20일 오전 1시부터 7시까지 건국대학교 내 327m 떨어진 두 지점에서 각각 압력고도를 측정하였다. 두 지점의 고도 차이는 약 50m 정도이고 낮은 곳의 절대고도는 이미 알고 있으므로 기준국으로 지정하고 다른 높은 곳은 이동국으로 한다.

그림 6은 식 (2)으로 계산된 이동국과 기준국의 압력고도이다. 기준국에서는 미리 알고 있는 절대고도와 압력고도와의 차이를 산출해서 이동국에 전송하는데 이 보정된 고도정보는 그림 7과 같다. 그림 8은 이동국에서 보정된 고도정보를 받아 업데이트된 절대고도로 실제고도 101m 와 0.3m 정도 바이어스가 있지만 마코프 프로세스 형태의 오차 흐름은 제거되었다. 여전히 바이어스가 존재하는 이유는 크게 두 지점간에 기압차에 의한 오차, 지오이드면의 높이차, 환산계수오차 등으로 고려할 수 있다.

### 3.3 거리에 따른 차분고도 성능 분석

차분고도는 기압에 바탕을 둔 절대고도이므로 등기압선의 직각인 방향으로 멀리 갈수록 성능이 반비례할 것이다. 본 질에서는 얼마나 거리가 멀어질수록 차분고도가 효과적인지 실험한 결과이다. 기준국에서 정확하게 등기압선의 직각인 방향으로 움직이면서 측정하기란 현실적으로 어렵기 때문에 되도록 직선방향의 도로에서 차량 실험하였다. 5km마다 20분정도 정차하여 기압형 고도계로 압력을 측정하였다. 참 (True)고도는 반송파 수준의 정밀도가 있는 GPS RTG (Real Time GIPSY)의 고도정보를 사용하였다[6].

그림 9를 그림 10, 11과 비교해보면 기저선이 길어질수록 조금씩 참 (True)고도와 차분고도 사이에 차이가 생기는 것을 볼 수 있다. 그림 12는 5km씩

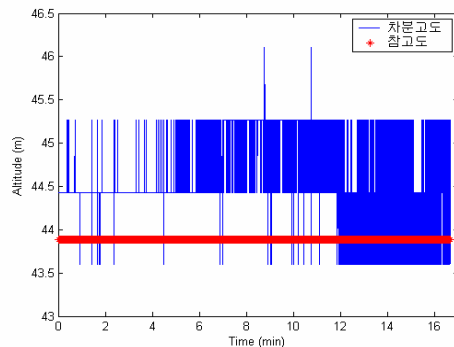


그림 9. 기저선 길이가 5km 지점에서 고도

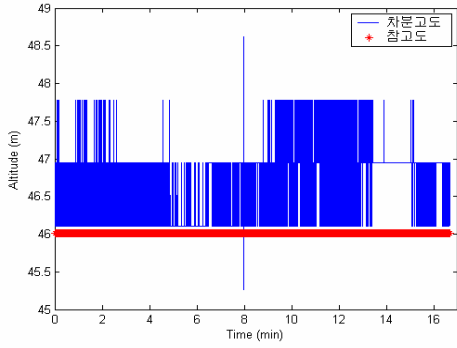


그림 10. 기저선 길이가 15km 지점에서 고도

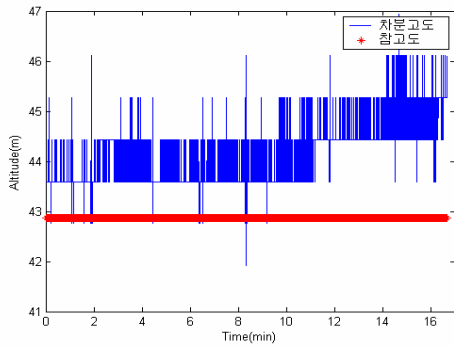


그림 11. 기저선 길이가 27km 지점에서 고도

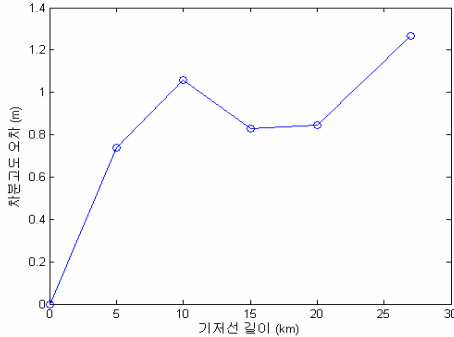


그림 12. 기저선 거리에 따른 차분고도 오차

기저선이 길어짐에 따라 표준편차가 커짐을 알 수 있다. 30km안에서는 1.5m 편차로 나타내므로, 저가용 센서만으로도 높은 고도정밀측위를 할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 칼만필터를 이용한 고도 추정

칼만필터는 상태변수의 최적 추정치를 구하는

알고리즘으로 구조가 선형적이고 실제 값의 평균치와 추정치의 평균치 사이에 바이어스가 없으며 추정된 상태변수의 오차분산을 최소화하는 특성을 가지면 정규 (Gaussian)분포를 갖는 백색잡음 (White noise)에 의하여 구동되는 선형 시스템 적용되는 경우 최적 필터임이 알려져 있다[7].

본 논문에서 제시한 차분고도와 DGPS의 측정치로 보다 정확한 고도추정을 위해 칼만필터를 이용한다.

$$Z_k = [H(+), H^{sf}(+)] \begin{bmatrix} X_{k+1} \\ X_{k+1}^{sf} \end{bmatrix} + v_{k+1} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} H \\ B \\ N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.005 & 0.1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.005 & 0.1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ B \\ N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} w_H \\ 0 \\ w_{4 \times 1}^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (4)는 측정식이고, 여기서 X는 고도를 나타내며  $X^{sf}$  는 고도계바이어스를 위한 shaping filter 상태변수를 나타낸다. 식 (5)의 시스템 모델에서 B는 차분고도와 DGPS고도와의 차이이며, N은 마코프 형태의 노이즈를 만들기 위한 B의 변화율, H는 DGPS의 고도를 나타낸다.  $v, w$  는 각각 측정식, 시스템 노이즈이다.

그림 13은 그림 8에서의 차분고도와 DGPS 측정치를 나타낸다. GPS는 1Hz, 기압형 고도계는 10Hz로 측정하였다. 차분고도가 GPS고도측정치보다 안정되지만 약간의 바이어스 성분이 있음을 알 수 있다. 그림 13의 결과에서 DGPS 고도의 표준 편차는 1.0260m, 차분고도의 표준편차는 0.3861m이다. 이것은 앞선 실험의 그림 2와 그림 3의 결과와 다소 차이를 보이고 있으나, 이것은 실험 시간과 실험 환

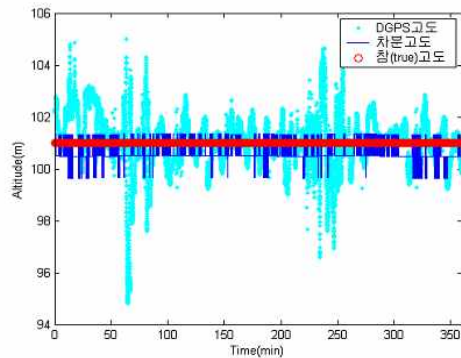


그림 13. 차분고도와 DGPS 고도 측정치

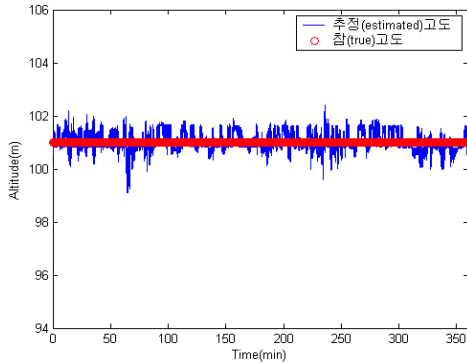


그림 14. 칼만필터링으로 고도추정

경을 달리하였으므로 나타나는 결과이다. 그림 14는 칼만필터로 인해 추정된 고도로, 고도표준편차가 0.3322m이다. DGPS의 고도표준편차에 비해 향상된 결과를 나타냈다.

## V. 결 론

기압형 고도계는 높은 주기의 고도정보를 주지만 큰 바이어스 오차를 포함하고 있다. 본 논문에서는 이러한 마코프프로세스 형태의 바이어스 오차를 제거하고 압력고도가 아닌 절대고도로 나타내는 차분고도 추정법을 제시하였다. 기준국에 GPS 수신기를 설치함으로써 DGPS 고도정보를 얻고 차분고도 측정치와 칼만필터링으로 향상된 고도를 추정할 수 있었다. 이러한 통합시스템으로 낮은 샘플링 주기를 갖는 DGPS의 고도의 정확성과 안정성을 높일 수 있었다. 30km안의 기저선에서는

1.5m 이내의 오차를 가짐으로 차분고도만으로도 정밀측위가 가능함을 보였다. 차분고도 또는 DGPS 측위치는 거리가 늘어남에 따라 정밀도가 떨어지지만 기준에 세워진 많은 GPS기준국을 고려하면 중장거리에도 이 시스템이 이용가능 할 것이다.

## 후 기

본 논문은 산업자원부 지원으로 수행하는 “항공 우주 기술 개발 사업”의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 1) 진용, 박찬국, “GPS 와 보조 고도정보를 이용한 항법 시스템의 성능 분석”, 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, 1999, pp. 343-346.
- 2) 오병주, “한국 지역에서 다중 기준국 DGPS를 이용한 위치 측정”, 석사학위논문, 1997년 2월.
- 3) 이주하, 유태익, “기압오차보정에 관한 연구”, 항공운항학회지, 제3권 제1호 1995. 12. pp. 145-159.
- 4) 박경하, “GPS 수직축 안정화를 위한 GPS와 고도계의 결합”, 석사학위논문, 2003년 2월.
- 5) 이봉준, 김학봉, 김문상, “항공역학”, 세화, 2002.
- 6) Ron Hatch, Tenny Sharpe "StarFire: A Global High Accuracy Differential GPS System" Paper 1.6 [www.navcomtech.com](http://www.navcomtech.com).
- 7) F.L.Lewis, Optimal Estimation with an Introduction to Stochastic Control Theory, Wiley&Sons, 1986.