

한국형 광역보정위성항법 개발에 관한 연구

A Study on Developing Wide Area Differential GPS (WADGPS) in Korea

기창돈*, 신동호*

Chang Don Kee* and Dong Ho Shin*

요 약

최근 들어와 위성을 이용한 항법시스템인 GPS의 중요성이 점점 더 부각되고 있다. 미국을 위시로 유럽 등 각 대륙마다 자기들에 맞는 광역 보정위성항법 시스템을 구축하고 있다. 이에 우리나라도 우리나라에 맞는 광역보정위성항법을 구축해야 할 시점으로 보여지고 있는 시점이다. 기존의 보정위성항법이 반경 100km 정도를 포괄하여 넓은 영역에 서비스를 하기 위해서는 많은 수의 기지국이 필요한데 반해 광역보정위성항법은 적은 수의 기지국으로 넓은 영역을 포괄할 수 있는 장점을 지니고 있다. 이에 본 논문에서는 한국에 맞는 광역보정위성항법 구축을 위해서 모의 실험을 통해 한국을 포괄하는 광역보정위성 항법의 유효성을 검증하고 사용된 알고리즘에 대해 설명한다.

Abstract

The importance of GPS was greatly increased for aviation after the completion of the GPS satellite constellation in December of 1993. The Wide Area Augmentation System (WAAS) is being developed for operational use in the United States and also a similar system, European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), is also under development in Europe. There are needs to develop Wide Area Differential GPS (WADGPS) covering Korea to complete the GNSS mentioned above. The GNSS then allows international aviation users to fly world-wide with a single avionic system. In case of DGPS, it can cover within 100km and needs many stations for serving the widely-spreaded users. But WADGPS can cover wide area via fewer stations than DGPS. In this paper we propose an Korea version of WADGPS and discuss on algorithms and performances.

I. 서 론

최근 들어와 위성항법시스템(GPS)의 관심이 높아지고 있다. 더군다나, 1993년 12월에 지구상공에 위성항법 위성의 배치가 완료되어 비행항법에의 용

용을 위해 위성항법시스템의 중요성이 점점 더 증가하고 있는 실정이다. 위성항법 신호는 전세계 어디에서나 무료로 수신할 수 있기 때문에 글로벌 항법위성시스템(GNSS)을 만들어 국제 민간 항공기의 안전성을 증대할 수 있는 좋은 기회이다.

미국에서는 실제 운용할 수 있는 위성항법시스템

* 서울대학교 항공우주공학과 (Dept. of Aerospace Eng., Seoul National Univ.)

· 논문번호 : 97-1-1

· 접수일자 : 1997년 11월 6일

(WAAS)을 개발 중에 있고 유럽에서도 유사한 항법 시스템(EGNOS)을 개발 중에 있다. 이런 추세 속에서 우리나라에서도 보정위성항법 시스템(Wide Area Differential GPS: WADGPS)의 개발이 절실히 요구된다. 이 시스템이 완성됨으로써, 민간항공 사용자들은 단일의 항법장치로 우리나라 영역을 보다 정확하고 안전하게 운항할 수 있을 것이다. 따라서, 본 논문에서는 한국에 적합한 광역보정위성항법의 알고리즘과 성능에 대해 고찰하고자 한다. 그림 1은 한국형 보정위성항법의 개념도를 보여주고 있다.

보정위성항법(DGPS)은 기준국을 통해 기준국으로부터 떨어져 있는 사용자에게 정확한 자기위치를 찾을 수 있도록 보정치를 스칼라량으로 준다. 하지만 사용자와 기준국의 거리가 100 km 이내인 경우에는 비교적 정확한 위치를 사용자가 찾을 수 있지만 그 이상이 될 경우에는 오차가 점점 커지는 경향이 있다. 이에 반해 광역보정위성항법은 광역으로 분포되어 있는 기지국이 위성으로부터 여러 데이터를 받아 주 기지국으로 보내면 주 기지국에서는 데이터를 처리하여 위성궤도 오차, 위성시계 오차 그리고 수직 전리층 시간 지연값을 계산하여 사용자에게 보내면 사용자는 이를 이용하여 자기의 위치를 정확하게 구할 수 있게 된다. 본 논문은 전

체적 알고리즘보다는 주 기지국에서 각각의 보정치가 어떻게 계산되어지는지에 대해 중점적으로 설명한다. 다음 부분의 첫번째 절에서는 3차원 위성궤도 오차, 시계오차 추정에 관한 알고리즘에 대해 설명하고 두 번째 절에서는 수직전리층 시간지연 추정 알고리즘, 세 번째 절에서는 사용자의 전리층 지연값을 구하기 위한 보정방법에 대해 설명한다. 나머지 부분에서는 한국에 적용한 모사 결과를 보여 주고 토의한다.

II. 광역보정위성항법 알고리즘

2-1 3차원 위성궤도오차와 위성시계오차 추정

위성으로부터 위성의 위치를 계산할 수 있는 항법메세지를 보내주는 데 고의적 잡음과 지상 제어부의 능력의 한계로 오차가 생길 수 밖에 없다. 또한 위성의 시계오차 역시 주요한 오차 원인인 고의적 잡음으로 인해 오차가 생긴다. 이러한 오차값을 추정함으로써 정확한 사용자의 위치를 찾을 수 있도록 보정치를 주 기지국에서 계산하여 사용자에게 제공해 준다. 사용자가 4개 이상의 위성으로부터의 거리값을 사용하여 자기의 위치와 시계오차를 계산할 수 있는 위성항법의 기본적인 원리[1][2]를 역으로 이용한다. 즉 같은 위성을 볼 수 있는 위치정보를 정확하게 알고 있는 4개 이상의 기지국이 있다면 역으로 위성의 위치와 위성의 시계오차, 기지국들의 시계오차값을 추정할 수 있다. 수식적으로 전개하면 다음과 같다.

대기권 오차(이온층, 대류층)와 다경로 오차(multipath errors)에 관해 올바르게 조정된 후 i -번째 기지국과 j -번째 위성과의 측정된 의사거리(pseudorange)는 다음과 같이 모델링된다.

$$\begin{aligned} \rho_{ij} &= D_{ij} \cdot e_{ij} - b_j + B_i + n_{ij} \\ &= [(R_j + \delta R_j) - S_i] \cdot e_{ij} - b_j + B_i + n_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

ρ_{ij} : i -번째 기준국과 j -번째 위성 사이의 측정 의사거리

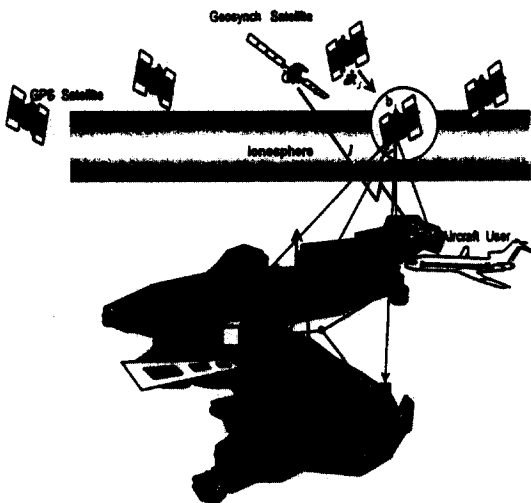


그림 1. 한국형 광역보정위성항법 개념도
Fig. 1. Overview of WADGPS in Korea.

D_{ij} : i -번째 기준국과 j -번째 위성 사이의 거리
벡터

e_{ij} : i -번째 기준국과 j -번째 위성 사이의 거리
단위벡터

R_j : 위성신호로부터 계산된 j -번째 위성위치

δR_{ij} : j -번째 위성의 궤도 오차벡터

S_i : 알려진 i -번째 기준국 위치

b_j : j -번째 위성의 시계오차

B_i : i -번째 기준국의 시계오차

n_{ij} : 전리층과 대류층의 모델링 오차를 포함한
측정잡음

(i -번째 열)

$$I_i = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad i=1, \dots, n-1$$

$$I_n = 0, \quad (i=n) \quad (m \times (n-1))$$

$$D = [D_1^T \ D_2^T \ \cdots \ D_n^T]^T$$

$$D_i = [\rho_{i1} \ \rho_{i2} \ \cdots \ \rho_{im}]^T$$

$$P = [P_1^T \ P_2^T \ \cdots \ P_n^T]^T$$

$$P_i = [(R_1 - S_i)^T \ (R_2 - S_i)^T \ \cdots \ (R_m - S_i)^T]^T$$

모든 기준국($i=1,2 \dots, n$)과 GPS위성($j=1,2, \dots, m$)에 대해 다음과 같이 x 를 정의하자.

$$x = [\delta R^T \ b^T \ B^T]^T \quad (2)$$

$$\delta R = [\delta R_1^T \ \delta R_2^T \ \cdots \ \delta R_m^T]^T$$

$$\text{여기서 } b = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_m]^T$$

$$B = [B_1 \ B_2 \ \cdots \ B_{n-1}]^T$$

모든 기준국과 위성에 대한 모든 측정식인 식 (1)을 이용하면 다음과 같은 행렬식을 얻는다.

$$H = \begin{bmatrix} E_1 & -I & I_1 \\ E_2 & -I & I_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_n & -I & I_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} E_1 & -I & I_1 \\ E_2 & -I & I_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_n & -I & I_n \end{bmatrix} x = D - \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_n \end{bmatrix} P \quad (3)$$

$$z = D - \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_n \end{bmatrix} P \quad (5)$$

여기서

$$E_i = \begin{bmatrix} e_{i1}^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{i2}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{in}^T \end{bmatrix} \quad (m \times 3m)$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (m \times m)$$

위 식에서 I_n 은 영행렬로 두었다. 왜냐하면 모든 시계오차는 상대적이므로 n -번째 기준국을 기준으로 삼았기 때문이다. 시스템 행렬을 H , 측정행렬 z 를 다음과 같이 정의하자.

위의 정의를 사용하여 식 (1)을 다시 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z = Hx \quad (6)$$

i -번째 기준국이 j -번째 위성을 볼 수 없는 경우에는 z 와 H 의 해당되는 행벡터는 없애고 행렬식을 구성하여 위성과 기준국의 시계오차, 그리고 위성의 궤도오차(ephemeris errors)를 계산한다.

2-2 주 기지국의 수직전리층 시간지연 추정

GPS위성으로부터 나오는 신호는 이온층을 통과 하면서 전리층에 분포되어 있는 이온들의 영향으로 지연효과가 일어나는데 위성항법에 있어서 주요한 오차원인으로 알려져 있다.

전리층 시간지연은 지역시(local time), 자기위도(magnetic latitude), 흑점주기 등의 영향을 받는다. 그리고 하루 중 오후 2시경에 최고치를 이룬다. 전리층 시간지연은 Klobuchar 모델로 알려져 있는 간단한 해석해를 이용한다. 단일 주파수를 이용하는 사용자가 전리층 시간지연을 보정할 수 있도록 GPS위성에서 Klobuchar 모델의 8개의 파라미터를 보내준다. 광역보정위성항법에서는 광역으로 분포하고 있는 기지국이 볼 수 있는 모든 위성과의 시선벡터와 평균높이 350 km에 분포되어 있는 가상의 전리층구와 만나는 전리층 통과점(pierce point)에서의 모든 수직전리층 지연데이터를 주 기지국에서 이용하여 상공 350 km에 가상의 격자점에서 수직전리층 지연값을 추정한다. 수직전리층 추정 알고리즘은 일종의 가중 보간방법인 다음의 격자 알고리즘을 사용한다[3].

$$\hat{I}_{Grid, \nu} = I_{Klob, \nu}^{Grid} \sum_{k=1}^K \left[\left(\frac{I_{Klob, \nu}^{meas, k}}{I_{Klob, \nu}^{k}} \right) \cdot \omega^k \right] / \sum_{n=1}^K \omega^n \quad (7)$$

여기서

$I_{Klob, \nu}^{Grid}$: 격자점에서의 전송된 Klobuchar 수직전리층 지연값

$I_{Klob, \nu}^k$: 전리층 통과점에서의 전송된 Klobuchar 수직 전리층 지연값

$I_{Klob, \nu}^{meas, k}$: 전리층 통과점에서의 측정된 수직 전리층 지연값

$\hat{I}_{Grid, \nu}$: 격자점에서의 추정된 수직전리층 지연값

ω^k : k-번째 전리층 통과점에 대한 가중치

본 논문에서는 가중치 ω 값으로 격자점에서부터

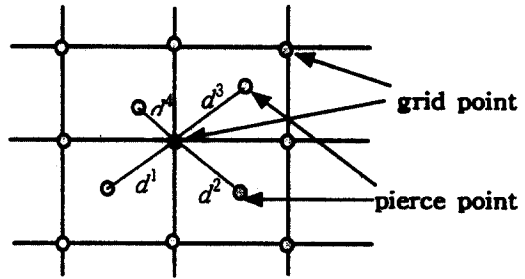


그림 2 격자점과 전리층 통과점

Fig. 2. Grid points and pierce points.

표 1. 정의된 전리층 격자점(경도 80°~170°)

Table 1. Predefined ionosphere grid location(Longitude 80°~170°).

Latitudes degrees	Latitude spacing degrees	Longitude spacing degrees	Number of grid points
N 90~N 75	15	-	1
N 75~N 55	10	10	18
N 10~N 55	5	5	110

전리층 통과점과의 거리의 역수로 주었다.

$$\omega^k = 1/d^k \quad (8)$$

그림 2에 격자점과 전리층 통과점이 나타나 있다.

그리고, 본 논문에서는 격자점을 표 1과 같이 구성한다.

2-3 사용자의 수직전리층 시간지연 추정

주 기지국에서 추정된 격자점에서의 수직전리층 지연값이 사용자에게 전송되면 사용자는 전송된 값을 이용하여 자기가 볼 수 있는 위성에 대한 전리층 통과점에서의 수직전리층 지연값을 구하고 그 알고리즘은 다음과 같다. 사용자의 전리층 통과점을 둘러싸고 있는 4개의 격자점에서의 수직전리층 지연값을 τ_w 라 하면, 사용자의 전리층 통과점에서의 수

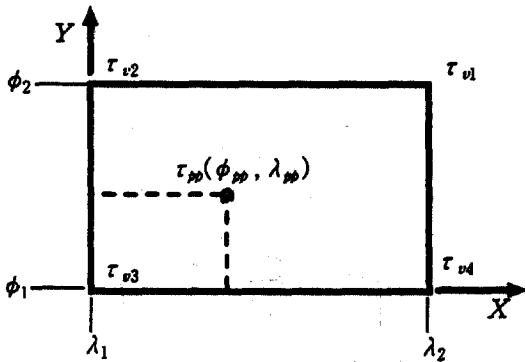


그림 3. 보간 알고리즘 기호 정의
Fig. 3. Interpolation algorithm definitions.

직전리층 지연값 τ_{vpp} 는 다음과 같이 구할 수 있다 [4]. 그림 3은 보간을 위해서 정의된 값들을 보여준다.

$$\tau_{vpp} = \sum_{i=0}^4 W_i(x_{pp}, y_{pp}) \tau_{vi} \quad (9)$$

여기서

$$W(x, y) = x^2y^2(9 - 6x - 6y + 4xy)$$

$$W_1(x, y) = W(x, y), W_2(x, y) = W(1-x, y)$$

$$W_3(x, y) = W(1-x, 1-y), W_4(x, y) = W(x, 1-y)$$

$$x_{pp} = \frac{\lambda_{pp} - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, y_{pp} = \frac{\phi_{pp} - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1}$$

$(\phi_{pp}, \lambda_{pp})$ 는 사용자 전리층 통과점의 위도와 경도이다.

위의 알고리즘을 사용하여 사용자는 전리층 지연 효과로 나타나는 오차를 보정할 수 있게 된다.

그림 4는 지금까지의 알고리즘을 간단히 보여주고 있다.

III. 광역보정위성항법의 한국에의 적용

본 논문에서는 위에서 제시한 알고리즘을 이용하여 한국에 적용해 모사해 보았다. 한국의 범위는 북위 33°~43°, 동경 122°~132°로 두었고 사용자는

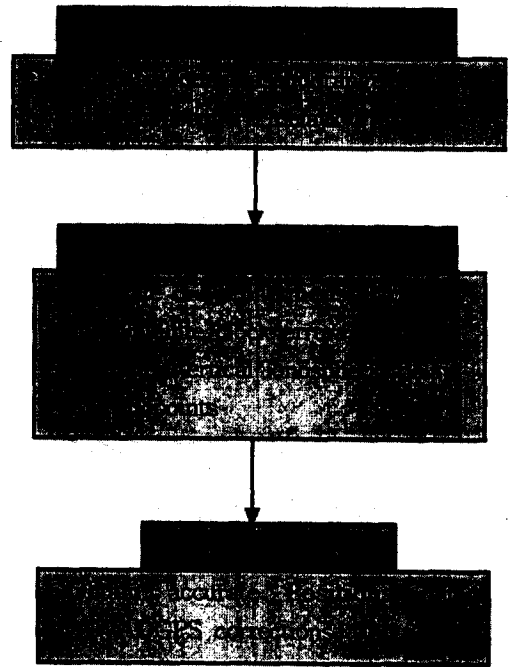


그림 4. WADGPS 블럭선도
Fig. 4. The block diagram of WADGPS.

위도, 경도 각각 1°간격으로 분포되어 있는 것으로 모사하였다. 기지국 5개를 공항이 있는 제주도, 영종도, 청주, 속초, 부산에 있는 것으로 가정하였다.

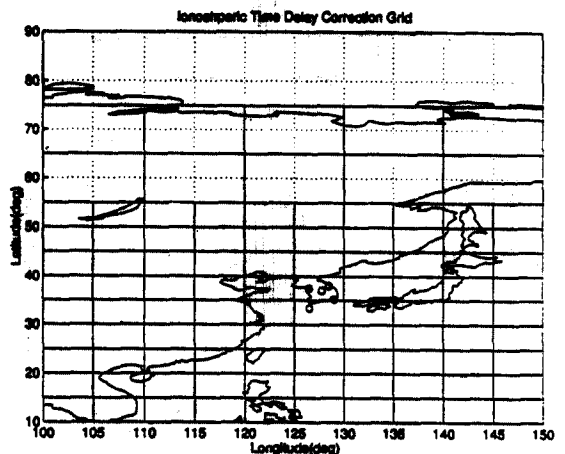


그림 5. 전리층 시간지연 격자점
Fig. 5. Ionospheric delay correction grid.

그리고, 주 기지국은 한국의 영종도로 두었다. 이하 나오는 그림들은 모사 결과들의 그림이다. 그림 5

에 기지국들의 위치와 전리층 시간 지연값을 계산하기 위한 격자점 분포그림이 나와 있다. 그림 6은

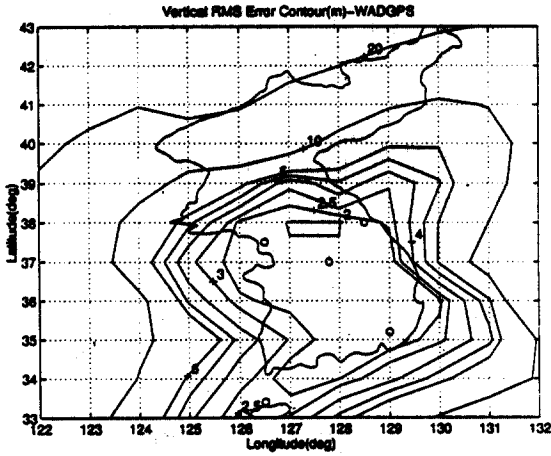


그림 6. 수직 위치 RMS 오차
Fig. 6. Vertical position RMS error.

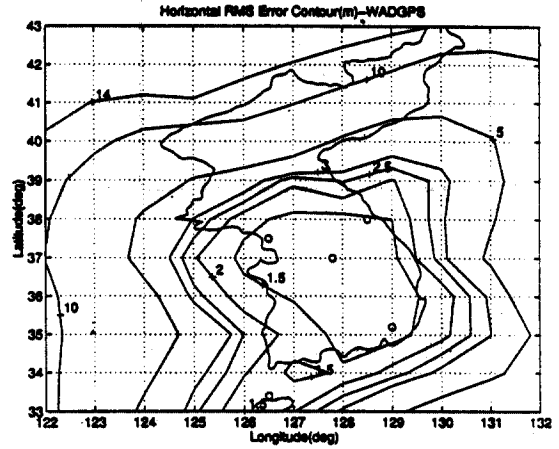


그림 7. 수평 위치 RMS 오차
Fig. 7. Horizontal position RMS error.

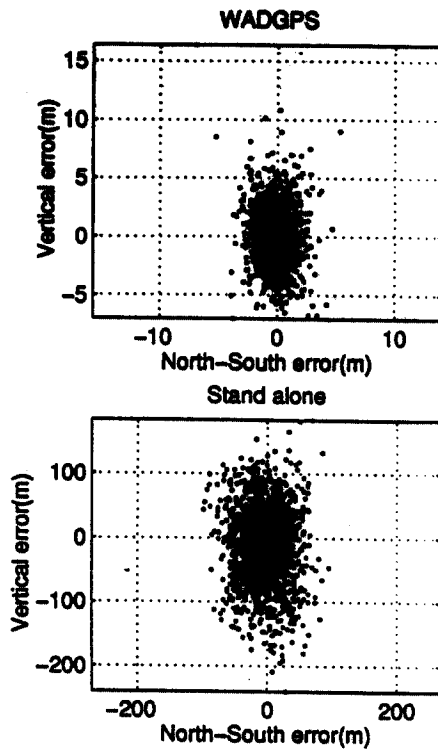
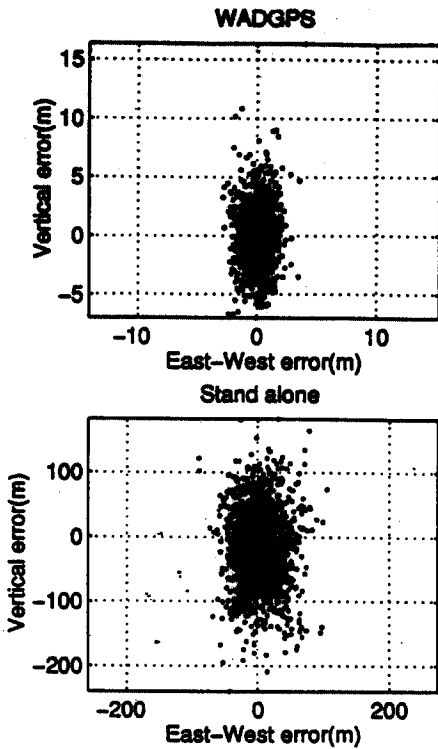


그림 8. 한 사용자의 위치 오차
Fig. 8. Positioning errors for one user(lat : 36 deg lon: 127 deg).

하기 위한 격자점 분포그림이 나와 있다. 그림 6은 수직위치오차의 RMS값에 대한 등고선의 모양을 보여준다. 기지국들을 동심원으로 하여 오차의 경향이 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 기지국의 분포상으로 볼 때 당연한 결과로 보여진다. 기지국을 싸고 있는 안쪽 영역에서는 보정치가 정확하게 추정되어 오차의 값이 작게 나타나지만 기지국을 싸고 있지 않는 영역에서는 점점 더 보정치의 추정값이 정확하지 않게 되어 오차값이 커짐을 알릴 수 있다. 그림 7은 수평위치 오차의 RMS값에 대한 등고선이다. 역시 수직위치오차 등고선과 비슷한 경향을 보여주고 있다. 수평오차값은 GPS의 특성대로 수직오차보다 낮게 나타났다.

프로그램을 검증하기 위해 한 사용자에게 대한 24시간 모사를 수행하였다. 그림 8은 동경 127°, 북위 36°에 위치하고 있는 사용자의 24시간동안 위치오차를 보여주고 있다. 표 2을 살펴보면 보정을 하기 전보다 주 기지국에서 보내준 보정치를 사용한 경우에 월등히 오차값이 줄어듦을 확인할 수 있다.

표 2. 광역 위성항법 사용자의 위치 RMS 오차
Table 2. WADGPS user RMS positioning error.

Error Type	Vertical RMS Error(m)	Horizontal RMS Error(m)
Stand alone	62.41	41.16
WADGPS	2.32	1.45

IV. 결론 및 토의

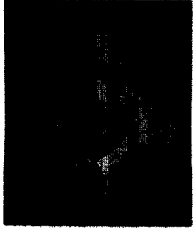
최근 들어와 각 대륙마다 자기 지역에 맞는 광역 보정 위성항법시스템을 개발하고 있다. 이에 본 논문에서는 광역보정항법 알고리즘을 이용하여 한국의 항법시스템을 개발하는데 필요한 기초작업으로 광역보정위성항법 시스템의 모사결과를 보여주었다. 5개의 기지국으로 북위 33°~43°, 동경 122°~132°내에 있는 사용자들이 비교적 정확하게 자기의 위치를 찾을 수 있음을 보여주었다. 한국에 기지국

이 위치함으로 한국 내에서는 수직위치오차의 RMS값이 3 m, 수평면상의 위치오차의 RMS값이 2.5 m내에 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] B. W. Parkinson, J. Jr. Spillker, P. Axelrad, (eds.), *The Global Positioning System: Theory and Applications*, vol. 1, AIAA, Washington, DC, 1996.
- [2] B. W. Parkinson, J. Jr. Spillker, P. Axelrad, (eds.), *The Global Positioning System: Theory and Applications*, vol. 2, AIAA, Washington, DC, 1996.
- [3] M. B. El-Arini, J. A. Klobuchar, and P. H. Doherty, "Evaluation of the GPS WASS Ionospheric Grid Algorithm During the Peak of the Current Solar Cycle," *Proceedings of the Institute of Navigation 1994 National Technical Meeting*, Inst. of Navigation, Alexandria, VA, 1994, pp. 961-968.
- [4] A. J. Van Dierendonck, and P. K. Enge, "The Wide-Area Augmentation System (WASS) Signal Specification," *Proceedings of the Institute of Navigation GPS-94*, Inst. of Navigation, Alexandria, VA, 1994, pp. 985-994.
- [5] C. Kee, T. Walter, Y-C. Chao, Y-J. Tsai, P. Enge, and B. W. Parkinson, "Comparison of Master Station and User Algorithms for Wide Area Augmentation System," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 20, No. 1, 1997, pp.170-176.

기창돈 (奇昌敦)



1984년 서울대학교 항공우주공학과
학사

1986년 서울대학교 항공우주공학과
석사

1993년 Stanford University 항공우
주공학과 박사

1993년~1996년 Stanford University, WADGPS Lab, Re-
search Associate

1994년~1995년 미연방항공국(FAA) GPS에 관한 기술고문

1996년 9월~현재 서울대학교 항공우주공학과 조교수

관심분야 : GPS를 이용한 항공기, 인공위성, 선박 그리고 자
동차에 대한 항법시스템 및 자세결정시스템 설계 및 개발

신동호 (申東皓)



1995년 서울대학교 항공우주공학
과 학사

1997년 서울대학교 항공우주공학
과 석사

1998년 3월~현재 서울대학교 항
공우주공학과 박사과정

관심분야 : GPS를 이용한 항공기, 인공위성, 선박 그리고
자동차에 대한 항법시스템 및 자세결정시스템 설계 및
개발