

工學碩士 學位論文

반송파 위상을 이용한 고정도 위치측정  
GPS에 관한 연구

A Study on the High-accuracy Position measurement GPS  
Using Carrier phase

指導教授 黃 勝 郁

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

制御計測工學科

金 正 權

# 목 차

Abstract .....	iii
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 GPS 개요 .....	3
2.1 GPS 구성 .....	3
2.2 GPS 위성신호 .....	4
2.3 GPS의 의사거리 측정방법 .....	7
2.3.1 코드를 이용한 의사거리의 측정 .....	7
2.3.2 반송파 위상을 이용한 의사거리의 측정 .....	8
2.4 GPS 관련오차 .....	14
제 3 장 GPS를 이용한 위치결정 방법 .....	16
3.1 코드신호를 이용한 절대위치 측정 .....	16
3.2 반송파 위상을 이용한 상대위치 결정 방법 .....	18
3.2.1 단일차분(Single Difference) .....	19
3.2.2 이중차분(Double Difference) .....	20
3.2.3 이중차분을 이용한 상대위치 결정 방법 .....	21
3.3 GDOP(Geomatic Dilution of Precision) .....	23
제 4 장 측정시스템의 구현 및 실험 .....	25
4.1 고정도 위치측정 시스템의 구성 .....	25
4.2 측정시스템을 이용한 실험 .....	30
4.2.1 Base와 Rover의 상대거리가 5[m]인 경우의 실험 .....	31
4.2.2 Base와 Rover의 상대거리가 10[m]인 경우의 실험 .....	32
4.2.3 Base와 Rover의 상대거리가 15[m]인 경우의 실험 .....	34
4.2.4 Rover의 위치표시 .....	36

제 5 장 결론 .....	38
부록 .....	39
참고문헌 .....	40

# A Study on the High-accuracy Position measurement GPS Using Carrier phase

By

Jung Keun Kim

Department of Control and Instrumentation Engineering.  
A Master's Thesis in Engineering, Korea Maritime University

## ABSTRACT

These days, As a variety of transportation media, the importance of navigation data is getting bigger and bigger. This navigation installation is the most necessary part for security and operation of the transportation media on a right way. There are many studies of investigation and develop to obtain.

Laboratory experiments utilize a dual configuration of MPC860 DGPS Adaptor Board. Outdoor testing was realized by RT · Star on a vehicle, along with a RT-Star base station located on a surveyed rooftop control point. Communication between both was performed with a modem transmitting the messages encoded in the RTCM-104 format at 9600 bauds. The vehicle followed a route with a surveyed geodetic marker situated along it. Stop-and-go operations were performed at the marker.

This paper will describe the test scenarios, the setup of the test platforms and the results obtained for the series of experiments. It will show a 10-centimeter level accuracy can be obtained in real-time under many kinematic scenarios with a Carrier phase GPS Receiver.

## 제 1 장 서론

Global Positioning System(GPS)은 인공위성을 이용한 전지구적인 위치 측정 시스템이다. GPS는 위성신호를 수신할 수 있는 모든 곳에서 간단한 수신기만으로 기후조건에 관계없이 다른 측정기구보다 정확하게 현재의 위치를 결정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 24시간 어느곳에서도 관측이 가능하다는 점, 고속운동체의 위치 및 속도측정이 용이하다는 점, 실시간으로 관측이 가능하다는 점 등으로 인해 정확한 위치를 필요로 하는 각 분야에 활발한 활용이 기대된다. GPS는 이론적으로는 [mm]단위의 상호위치 결정이 가능하고 또한 상호간의 시간기준이 없이도 수십 km간을 단시간에 계측이 가능하므로 기존의 기준점이 미비하거나 일반적인 측량이 곤란한 지역 등에서 손쉽고 빠르게 위치를 측정할 수 있다.

그러나 하나의 수신기만을 이용하는 단독 GPS(Stand-Alone GPS)의 경우에는 위성궤도 및 다중경로 오차, 전리층 및 대류권 지연 등의 영향으로 70[m]정도의 측위오차를 가지게 된다. 이러한 측위오차를 보정하기 위한 방법으로 DGPS(Differential GPS)의 방법을 사용한다. DGPS는 자신의 위치를 알고있는 기준국에서 단독 GPS 사용자의 의사거리(Pseudorange) 측정오차를 추정하여 통신시스템을 이용하여, 이를 적절한 방법으로 인근의 사용자에게 전달하여 사용자가 자신의 위치를 보다 정확하게 계산하여 측위오차를 보정하는 방법으로서, 고가의 DGPS 전용 수신기와 기준국의 설비가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 MPC860 보드를 이용하여 GPS 신호처리 장치를 설계 및 구현하였으며, Carrier phase GPS수신기, GPS Adaptor, Frequency Hopping 방식의 RF Modem을 이용하여 실제 시스템을 구현하여 10[cm] 이내의 오차범위를 갖는 고정도의 위치측정 GPS를 구현하고, 구현된 시스템을 가지고 Base와

Rover Station간의 상대거리를 구하는 실험을 통하여 [cm]레벨의 위치결정의 가능성을 검증하여, 구현된 시스템이 정밀 계측 시스템으로 적용가능함을 입증한다.

## 제 2 장 GPS 개요

### 2.1 GPS 구성

GPS는 미국 국방성에서 운영하는 항법시스템으로, 28개의 위성(Satellite)에서 발사되는 전파정보를 지구상의 어디에서나 무제한의 사용자가 시각과 기상에 관계없이 이를 수신하여 자신의 3차원 위치와 시간 및 속도를 확인할 수 있는 위성전파 항법시스템이다.

GPS는 현재 28개(25+3개의 예비위성)의 위성군(Satellite constellation)으로 구성되어 있다. 각각의 위성은 지구의 적도면과 55도의 궤도 경사각(Inclination)을 갖는 6개의 궤도면에 4~5개씩 배치되어 고도 20,183~20,187[km]에서 11시간 58분의 주기로 돌고 있다. 이와 같은 위성의 위치 배열은 지구상의 어느 위치에서도 4개 이상의 위성을 관측할 수 있도록 설계되었다. 또한 모든 위성은 Cesium 원자시계 2개와 Rubidium 원자시계 2개를 갖추고 있는데, 이들 시계는 하루에  $10^{-13} \sim 10^{-14}$  만큼의 오차를 갖고 있다. 그림 2.1은 GPS 위성군을 나타낸 것이다<sup>[1]</sup>.

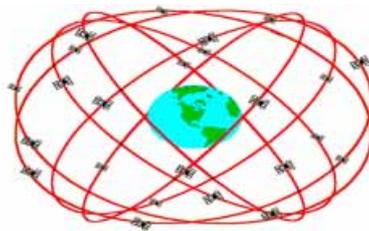


그림 2.1 GPS 위성군

Figure 2.1 GPS Satellite Constellation

## 2.2 GPS 위성신호

모든 GPS 위성에서 발사되는 신호는 PRN(Pseudo-Random Number)코드, 항법 메시지(Navigation Message), 반송파(Carrier) 등의 세가지 신호로 구성되어 있다. 표 2.1은 GPS 위성의 신호성분을 나타낸 것이다<sup>[2]</sup>.

Components		Frequency (MHz)	
Fundamental frequency		$f_o$	10.23
Carrier	L1	$154 f_o$	1575.42 ( $\approx 19.0\text{cm}$ )
	L2	$120 f_o$	1227.60 ( $\approx 24.4\text{cm}$ )
PRN-code	P-code	$f_o$	10.23
	C/A-code	$f_o/10$	1.023
Navigation message		$f_o/204,600$	$50 \cdot 10^{-6}$

표 2.1 GPS 위성의 신호성분

Table 2.1 Signal components of GPS Satellite

GPS 위성에 실린 발진자는 하루에  $10^{-13}$ 정도의 오차를 가지고 기본주파수  $f_0$ 를 발생한다. L-band 반송파 신호 L1과 L2는  $f_0$ 에 정수를 곱해서 만들어진다. 이러한 반송파는 코드들에 의해 변조되어 수신기에 위성시계와 궤도정보들을 전달하는데, 반송파를 변조시키는 코드들은 0과 1의 2진 코드로 구성되고 0과 1의 상태가 변할 때마다 반송파의 위상을  $180^\circ$  Shift시킴으로써 변조가 이루어진다.

GPS 위성은  $L_i(t) = a_i \cos(f_i t)$ 의 변조되지 않은 반송파에 항법메세지, C/A-code, P-code를 실어서 변조한 다음 신호를 발사한다. 변조된 반송파 L1과 L2는 식 (2.1)과 같다<sup>[2]</sup>.

$$L1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos(f_1 t) + a_1 C/A(t) D(t) \sin(f_1 t) \quad (2.1)$$

$$L2(t) = a_2 P(t) D(t) \cos(f_2 t)$$

$P(t)$  : P-code,  $C/A(t)$  : C/A-code,  $D(t)$  : Navigation message

반송파는 L1이 1.57542[GHz]이고 L2는 1.2276[GHz]가 사용된다.  
그림 2.2는 반송파의 위상변조 방식을 나타낸 것이다<sup>[2]</sup>.

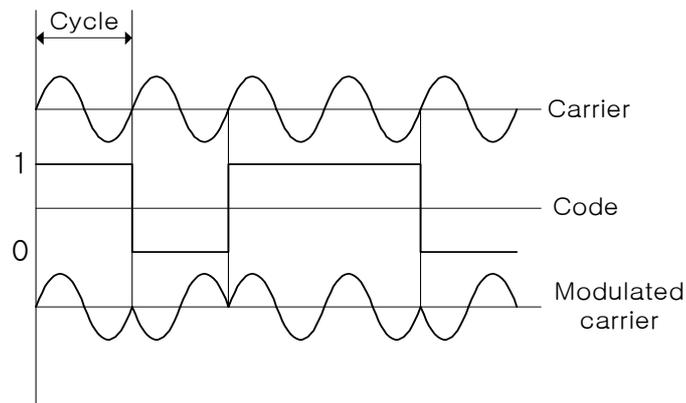


그림 2.2 반송파의 위상변조

Figure 2.2 Phase modulation of carrier wave

PRN 코드는 2진화된 코드로 위성마다 고유코드가 있어서, 수신기는 이 코드로 각각의 위성을 구별하게 된다 (CDMA, Code-Division Multiple Access).

PRN 코드에는 C/A(Coarse/Acquisition)코드와 P(Precision)코드의 2종류가 있는데, 식 (2.1)에서와 같이 C/A코드는 L1 반송파에만 실리고 P코드는 L1과 L2 모두에 실려 전송된다. 민간사용자는 C/A코드를 이용하는 표준측위서비스(SPS, Standard Positioning Service)만 이용이 가능한데, 이 코드는 1023비트로 구성되

어 있으며 1[msec]마다 반복된다. P코드를 이용하는 정밀측위서비스(PPS, Precise Positioning Service)는 군사용이나 허가된 사용자만이 이용이 가능하다. P코드는 GPS week로 1주마다 반복된다. GPS week는 1980년 1월 6일 이후 경과한 주일수로, 매주 토요일과 일요일 사이의 자정을 기준으로 증가하게 된다.

항법메세지는 50bps(bit per second)의 속도로 전송되는데, 한 프레임(Frame)의 길이가 1500비트이므로 한 프레임의 정보를 수신하는데는 30초가 소요된다. 완전한 항법메세지는 25개의 프레임으로 구성되어 있으며, 각각의 프레임은 길이가 300비트인 5개의 부프레임(Subframe)으로 나누어져 있고, 각각의 부프레임은 다시 길이가 30비트인 10개의 워드(Word)로 구성되어 있다. 따라서 부프레임 한 개를 전달하는데는 6초가 소요된다. 그리고 항법메세지를 완전히 전달하는데는 12분 30초가 소요된다. 그림 2.3은 항법메세지의 기본포맷을 나타낸 것이다.

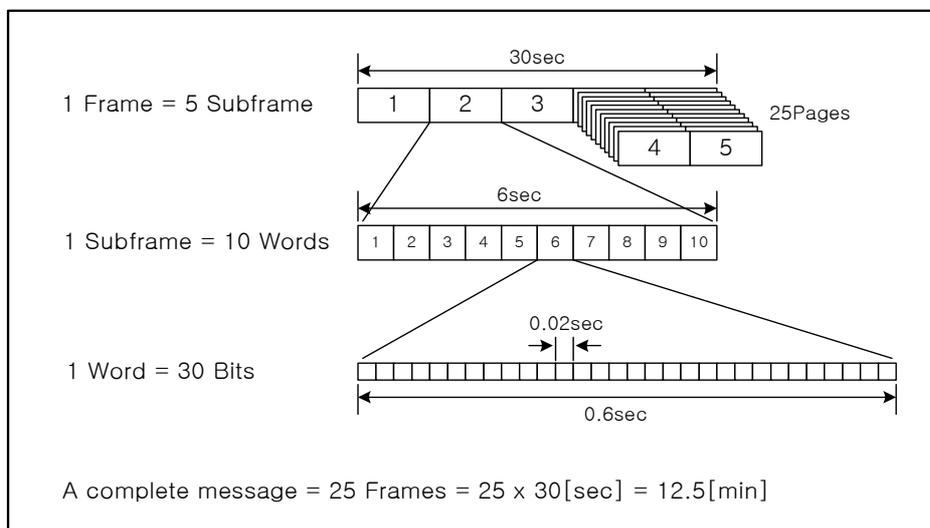


그림 2.3 항법메세지의 기본포맷

Figure 2.3 Basic format of Navigation message

## 2.3 GPS의 의사거리 측정방법

### 2.3.1 코드를 이용한 의사거리의 측정

그림 2.4는 코드신호를 이용하여 의사거리를 측정하는 과정을 나타내었다. 수신기가 측정한 신호의 전파(propagation) 시간은  $d\tau$ 가 되며 식 (2.2)와 같이 나타낸다.

$$d\tau = d\tau_{True} + dt - dT \quad (2.2)$$

- 단,  $d\tau$  : 수신기가 측정한 신호의 전파시간  
 $d\tau_{True}$  : 실제 신호의 전파시간  
 $dt$  : GPS 기준시간에 대한 위성시계 오차  
 $dT$  : GPS 기준시간에 대한 수신기 시계 오차

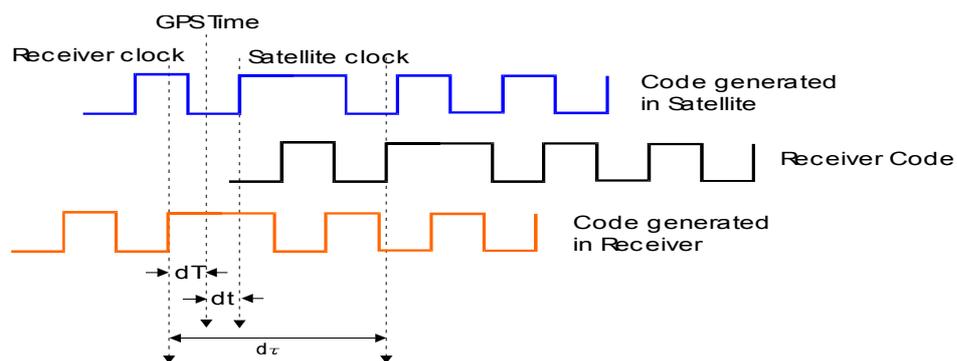


그림 2.4 코드신호를 이용한 의사거리 측정원리

Figure 2.4 Principle of Pseudorange measurement using Code signal

식 (2.2)에서  $d\tau$ 는 상관기(correlator)를 이용하여 구해지며, 이 값에 광속을 곱하면 의사거리가 된다. 위성은 약 20,200Km 고도에 위치하며 거리로 환산된 C/A 코드의 전체길이는 약 300Km에 해당한다. 수신기의 대략적인 초기위치를 알면 위성과 수신기 사이에 몇 개의 C/A 코드가 존재하는지를 알 수 있다.

GPS에서 측정되는 의사거리는 위성과 수신기간의 실제거리에 잡음이 추가된 측정치이며 오차성분을 포함하는 의사거리  $P$ 는 다음의 식 (2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \rho + \delta_{eph} + d_{ion} + d_{trop} + C(dt - dT) + M + v \quad (2.3)$$

- 단,  $\rho$  : 위성과 수신기간 실제거리
- $dt - dT$  : 위성과 수신기 시계 오차의 차
- $\delta_{eph}$  : 위성궤도 오차
- $d_{ion}$  : 이온층 지연에 의한 오차
- $d_{trop}$  : 대류권 지연에 의한 오차
- $M$  : 다중경로에 의한 오차
- $v$  : 수신기 측정잡음

### 2.3.2 반송파 위상을 이용한 의사거리의 측정

그림 2.5에 반송파 위상을 이용하여 의사거리를 측정하는 과정을 나타내었다. 반송파 비트신호(carrier beat phase)는 위성으로부터 수신한 신호와 수신기 내

부에서 생성한 신호의 차이이며, 이때 반송파 위상은 이 비트신호의 위상을 이용하여 측정한다. 위성과 수신기의 시계가 정확하게 동기되어 있다고 가정하면 위성  $i$ 에서 시간  $t_s$ 에서 만들어져 수신기 A에서 수신된 신호와 수신기 내부에서  $t_o$  시간에 만들어진 신호로부터 반송파 비트신호는 식 (2.4)와 같이 나타난다.

$$\phi(t_o) = \phi^i(t_s) - \phi_A(t_o) \quad (2.4)$$

단,  $\phi(t_o)$  : 반송파 비트신호

$\phi^i(t_s)$  : 위성에서 발생한 반송파

$\phi_A(t_o)$  : 수신기에서 생성한 반송파

짧은 시간 동안은 수신기 시계(oscillator)가 충분히 안정하다고 볼 수 있으므로 주파수  $f$ 에 대해 식 (2.5)가 성립한다.

$$\phi(t + \delta t) = \phi^i(t_s) - \phi_A(t_o) \quad (2.5)$$

여기에  $t + \delta t = t_o - t_s$  를 대입하면 식 (2.6)을 얻을 수 있다.

$$\phi_A(t_o) = \phi^i(t_s) + f(t_o - t_s) \quad (2.6)$$

$$\phi_A(t_o) = \phi^i(t_s) - \phi_A(t_o) = -f(t_o - t_s) \quad (2.7)$$

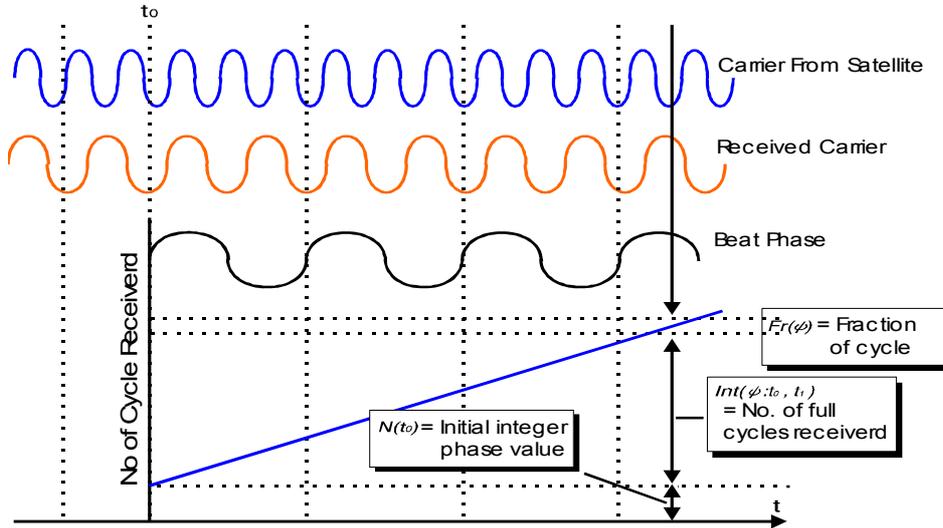


그림 2.5 반송파 위상의 측정원리

Figure 2.5 Principle of Carrier phase measurement

그러나, 실제 수신기에서는 수신기와 위성의 시계가 정확하게 동기가 일치하지 않으므로 수신기가 측정한 반송파 위상  $\phi_{Total}$ 은 파장의 정수배에 해당하는 오차가 포함된 식 (2.8)로 표현된다.

$$\phi_{Total} = -f(t_o - t_s) - N(t_o) \quad (2.8)$$

식 (2.8)에서  $N$ 은 미지정수(integer ambiguity)라고 부르며 한 개의 측정치에 대하여 한 개의 미지정수가 존재한다.

그림 2.5에서 보는 바와 같이 어떤 시각  $t_1$ 에서 전체 위상은  $\phi_{Total}(t_1)$

$$\begin{aligned}\phi_{Total}(t_1) &= \int_{t_o}^{t_1} f_D(t) dt + \phi_{Total}(t_o) \\ &= Fr(\phi) + Int(\phi; t_o, t_1) - N(t_o)\end{aligned}\quad (2.9)$$

여기서 ,  $Int(\phi; t_o, t_1)$  는 수신기가 위성신호를 처음 수신한 이후 반송파 추적 루프(carrier tracking loop)의 전압 제어 발진기(VCO ; Voltage Controlled Oscillator)로부터 측정되는 위상의 변동을 계속 적분하다가 한 파장을 넘으면 카운터를 하나씩 증가시켜 얻은 값이다.

신호의 전파시간과 오차요인에 의해 식 (2.10)이 성립한다.

$$t_o - t_s = (dt - dT) + \frac{\rho - d_{ion} + d_{trop} + \delta_{eph} + M + w}{C} \quad (2.10)$$

어떤 시간 t에서 측정되는 반송파 위상  $\phi_{Total}(t)$ 은

$$\begin{aligned}\phi_{Total}(t) &= -f \cdot (dt - dT) - \frac{f}{C} \rho \\ &\quad - \frac{f}{C} (-d_{ion} + d_{trop} + \delta_{eph} + M + w) - N(t)\end{aligned}\quad (2.11)$$

$$\begin{aligned}\Phi(t) \equiv -\lambda \phi_{Total}(t) &= \rho - C(dt - dT) + \\ &\quad + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \delta_{eph} + M + w\end{aligned}\quad (2.12)$$

식 (2.12)는 거리의 단위를 갖고 위성과 수신기 사이의 거리를 나타낸다.

그러나, 수신기에서 측정한 반송파 위상에는 미지정수가 포함되어 있으므로 반송파 위상측정으로 부터 위치를 구하기 위해서는 미지정수를 먼저 구해야 한

다. 반송파 위상측정시 미지정수가 포함되어 있음에도 불구하고 이를 이용하는 이유는 다중경로에 의한 오차와 수신기 측정잡음이 식 (2.3)의 코드를 이용한 의사거리 측정치에 비해 월등히 작기 때문이다.

최근의 연구에 의하면 식 (2.3)과 식 (2.12)의 의사거리 측정식에서 전리층 지연, 대류권 지연오차 및 다중경로 오차는 1차 Gauss-Markov 프로세스로, 수신기 측정잡음은 백색 가우시안(white gaussian) 잡음으로 모델링 할 수 있다. Gauss-Markov 프로세스는 식 (2.13)으로 표현되는 분산  $\sigma^2$  과 시정수  $1/\beta$  인 지수함수적인 자기상관을 갖는다<sup>[4]</sup>.

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\beta \tau} \quad (2.13)$$

또한 식 (2.14)로 Gauss-Markov 프로세스를 나타낼 수 있다.

$$x_{k+1} = e^{-\beta \Delta T} x_k + w_k \quad (2.14)$$

여기서,  $w_k$  : 백색 가우시안 잡음

$\Delta T$  : 샘플링 주기

표 2.2에 의사거리 측정치에 포함되는 오차성분을 Gauss-Markov 프로세스로 모델링한 경우의 표준편차  $\sigma$  와 시정수  $\beta$  의 값들을 나타내었다. 여기서 전리층 지연과 대류권 지연은 모델에 의해 보상된 후의 값들을 나타낸다. 표 2.3은 수신기 측정잡음의 일반적인 표준편차를 나타내었다.

오차요인		
위성 궤도	표준편차( )	생성시간(sec)
전리층 지연	5.0 m	1800 sec
대류권 지연	2.0 m	3600 sec
다중경로(C/A 표준 상관기)	5.0 m	600 sec
다중경로(C/A 협상관기)	0.25 m	600 sec
다중경로(P)	1.0 m	600 sec
다중경로(L1 반송파)	0.048 m	600 sec

표 2.2 GPS 오차모델의 Gauss-Markov 프로세스 상수

Table 2.2 Gauss-Markov process constants of GPS error model

오차요인	
C/A 코드, 표준 상관기	표준편차( )
C/A 코드, 협상관기	0.1 m
P 코드	0.3 m
L1 반송파	0.0019 m

표 2.3 GPS 수신기의 측정잡음

Table 2.3 Measurement noise of GPS receiver

## 2.4 GPS 관련오차

GPS 신호는 그림 2.6과 같이 여러 가지의 오차요인을 포함하고 있다. 위성에 의한 오차에는 위성궤도 오차, 위성시계 오차가 있으며 수신기에 의한 오차에는 수신기 내부의 시계오차, 다중경로(Multi-path) 오차가 있고, 전달 매체에 의한 오차는 전리층 지연과 대류권 지연 등이 있다.

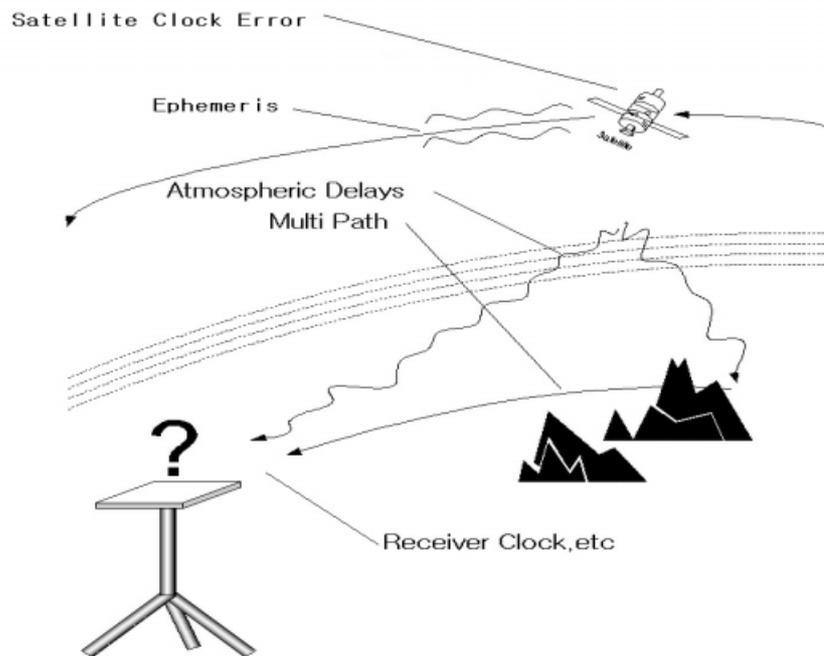


그림 2.6 측위오차 성분

Figure 2.6 Error source of measurement

표 2.4는 SA(Selective Availability)가 없을 때 GPS를 이용한 위치 및 시각 측정시 영향을 주는 오차성분을 나타낸 것이다. 고정도 측위를 위해서는 이러한 오차에 대한 효과적인 대처방안이 필요하다.

오차요인	에러범위[m]	설명
위성궤도	20[m]	위성 궤도 예측의 부정확
전리층 지연	30[m]	L1과 L2 반송파를 동시 사용하면 제거 가능
대류권 지연	10[m]	기압·수증기 분포 등에 관계
다중경로	10[m]	수신기의 주변 환경
총오차	70[m]	C/A-code 사용자의 수평위치 오차

표 2.4 SA가 없을 때의 오차성분들

Figure 2.4 Error components without SA

## 제 3 장 GPS를 이용한 위치결정 방법

GPS를 이용하여 위치를 구하는 방법들은 코드신호를 사용하는가 또는 반송파 위상신호를 사용하는가에 따라 분류될 수 있다. 지구상에서 절대위치를 구하는 방법과 측량된 지점에 기준국을 설치하고 이 기준국과 상대적인 위치를 결정하는 방법이 있다. 상대적인 위치결정에서는 기준점에서의 측정치를 사용하여야 하므로 한 대의 수신기만으로는 위치를 구할 수가 없으며 또한 실시간으로 위치를 구하고자 하는 경우에는 기준점에서 측정된 데이터를 무선링크를 이용하여 전송하여야 한다.

### 3.1 코드신호를 이용한 절대위치 측정

코드신호를 이용한 절대위치 측정에서는 일반적으로 최소자승법을 이용한다. 의사거리 측정식은 사용자와 위성사이의 거리에 대해서 이 식을 선형화하여 반복적으로 최소자승법을 이용하여 해를 구한다.

항법 메시지를 이용하여 위성시계 오차, 전리층 및 대류권에서의 지연에 의한 오차를 보상하면 위성과 수신기 사이의 의사거리 측정치는 식 (3.1)과 같이 된다.

$$p_i = \rho + cdT + v_i \quad (3.1)$$

단,  $u = [x \ y \ z]^T$  : 수신기의 위치

$[X_i \ Y_i \ Z_i]^T$  : 위성  $i$ 의 위치

$$\rho_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} \quad : \text{위성과 수신기간}$$

실제거리

$p_i$  : 수신기에서 위성까지의 의사거리 측정치

$c$  : 광속

$v_i$  : 오차모델에 의해 제거되지 않는 모든 오차

$i = 1, 2, \dots, n$

선형화 기준점  $u_o = [x_o \ y_o \ z_o]^T$ 에서 식 (3.1)을 테일러 급수로 전개하면 식 (3.2)와 같다.

$$\rho_i = \rho_i \Big|_{u_o} + \frac{\partial \rho_i}{\partial u} \Big|_{u_o} \delta u + \frac{\partial^2 \rho_i}{\partial^2 u} \Big|_{u_o} \delta^2 u + \dots \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서 2차항 이상을 무시하고 선형화하면 다음의 식을 얻는다.

$$p_i = \rho_i \Big|_{u_o} + \frac{\partial \rho_i}{\partial u} \Big|_{u_o} \delta u + cdT + v_i \quad (3.3)$$

단, 
$$\delta p_i = \left[ \frac{\partial \rho_i}{\partial x} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial y} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial z} \right] \Big|_{u_o} \delta u + cdT + v_i$$

$$\delta p_i = p_i - \rho_o$$

$$\delta u = u - u_o$$

식 (3.3)을 식 (3.4)로 정의하면,  $h_i$ 는 식 (3.5)로 구해진다.

$$\delta p_i = [h_i \ 1] \begin{bmatrix} \delta u \\ cdT \end{bmatrix} + v_i \quad (3.4)$$

$$h_i = \left[ \frac{x-X_i}{\rho_i} \quad \frac{y-Y_i}{\rho_i} \quad \frac{z-Z_i}{\rho_i} \right] \Big|_{u_0} \quad (3.5)$$

따라서, n개의 위성을 이용하면 식 (3.6)의 선형화된 측정식을 얻는다.

$$\delta p = \begin{pmatrix} h_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ h_n & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \delta u \\ cdT \end{bmatrix} \equiv H \delta u + v \quad (3.6)$$

따라서, 위치와 수신기 시계오차는 식 (3.7)과 같이 구해진다.

$$\delta u \equiv H^T(H^T H)^{-1} \delta p \quad (3.7)$$

초기위치를 개략적으로 주고 식 (3.7)의 위치오차를 구한 후 다시 보정하고 보정치의 크기가 임계치 이내로 들어오면 최종 위치를 구한다.

### 3.2 반송파 위상을 이용한 상대위치 결정방법

상대위치 결정에서 두 수신기간에 공통으로 작용하는 오차를 제거하기 위해 차분기법을 이용한다. 차분은 위성간 차분, 수신기간 차분 및 시간간 차분으로 나누어지며, 이들을 조합하면 이중차분, 삼중차분이 된다. 코드를 이용한 의사거리 측정에 차분기법이 적용되지 않는 이유는 코드신호는 반송파 위상신호에 비해 차분에 의한 수신기 측정잡음이 증폭되기 때문이다.

### 3.2.1 단일차분(SD : Single Difference)

#### 3.2.1.1 수신기간 차분

그림 3.1은 두 수신기 A, B간의 단일차분의 개념을 보여준다. 즉, 두 수신기가 가까운 거리에서 위성  $j$ 로부터 측정된 반송파 위상은 위성궤도, 전리층 지연 및 대류권 지연오차의 효과가 거의 같다. 따라서, 두 수신기의 측정치에 대하여 차분을 취하면 공간적으로 공통인 오차를 모두 제거하여 식 (3.8)과 같은 차분된 반송파 위상을 얻을 수 있다.

$$\Phi_{AB}^j(t) \equiv \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \rho_{AB}^j(t) + cB_{AB}^j + \lambda N_{AB}^j + M + w_{AB}^j \quad (3.8)$$

단,  $\Phi_A^j$  : 수신기 A에서 위성  $j$ 로부터 측정된 반송파 위상

$\Phi_B^j$  : 수신기 B에서 위성  $j$ 로부터 측정된 반송파 위상

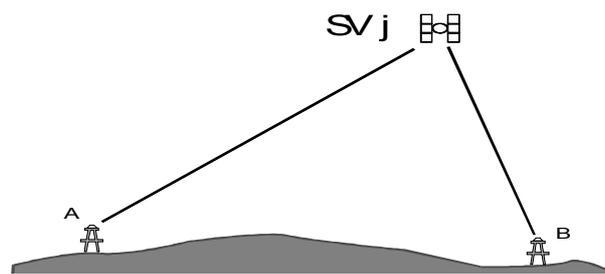


그림 3.1 단일차분 반송파 위상 측정

Figure 3.1 Single Difference Carrier phase measurement

### 3.2.1.2 위성간 차분

수신기 A에서 위성  $j$ 와  $k$ 로부터 얻은 측정치에 대하여 차분을 취하면 다음과 같은 위성간 차분된 측정식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\Phi_A^{jk}(t) &\equiv \Phi_A^k(t) - \Phi_A^j(t) \\ &= \rho_A^{jk}(t) + \lambda N_A^{jk} - \delta_{IA}^{jk} + \delta_{EA}^{jk} + M_A^{jk} + w_A^{jk}\end{aligned}\quad (3.9)$$

위성간 차분을 취하면 수신기 시계오차는 제거되지만 나머지 오차는 증폭되므로 일반적으로 위성간 차분만으로는 사용되지 않는다.

### 3.2.2 이중차분(DD : Double Difference)

그림 3.2와 같이 수신기 A와 B에서 위성  $j$ 와  $k$ 로부터의 측정치에 대해 수신기간 차분과 위성간 차분을 취하면 식 (3.10)과 같은 이중차분된 반송파 위상을 얻는다. 이중차분은 위성시계와 수신기 시계 오차를 모두 제거할 수 있어 상대위치측정에서는 대부분 이를 사용한다.

$$\begin{aligned}\Phi_{AB}^{jk}(t) &\equiv (\Phi_A^k(t) - \Phi_A^j(t)) - (\Phi_B^k(t) - \Phi_B^j(t)) \\ &= \rho_{AB}^{jk}(t) + \lambda N_{AB}^{jk} + M_A^{jk} + w_A^{jk}(t)\end{aligned}\quad (3.10)$$

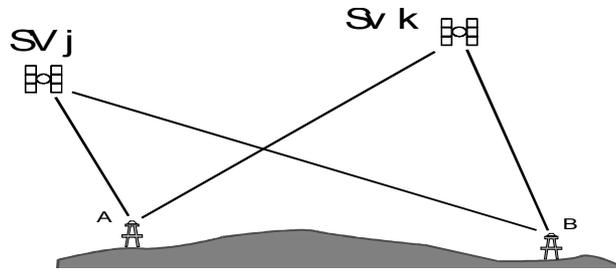


그림 3.2 이중차분 반송파 위상 측정

Figure 3.2 Double Difference Carrier phase measurement

### 3.2.3 이중차분을 이용한 상대위치 결정방법

이중차분된 반송파 위상을 선형화 기준점(nominal point)  $B_0$  에 대하여 선형화시키면 식 (3.11)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$l_{AB}^{jk}(t) = h_{AB_0}^{jk}(t) \delta x(t) + \lambda N_{AB}^{jk}(t) + w_{AB}^{jk}(t) \quad (3.11)$$

단,  $\delta x$  :  $B_0$  (선형화 기준점)과 실제위치의 차를 나타내는 위치오차 벡터

$h_{B_0}^j$  :  $B_0$  에서 위성  $j$  사이의 시선각 벡터

위 식은 3개의 위치와 1개의 미지정수로 구성된 4개의 미지수를 포함하고 있다. 만약 미지정수를 알고 있다면 이는 매우 작은 수신기 잡음만을 포함한 측정식이 되고 이를 이용하면 정확한 위치측정이 가능하다.

$m$ 개의 위성에 대하여  $m-1$ 개의 이중차분된 측정은 식 (3.12)로 쓸 수 있다.

$$l = H\delta x + \lambda N + w \quad (3.12)$$

여기에서

$$H = \left[ \left( \frac{x_o - x^k}{\rho_{ABo}^k} - \frac{x_o - x^k}{\rho_{ABo}^k} \right) \left( \frac{y_o - y^k}{\rho_{ABo}^k} - \frac{y_o - y^k}{\rho_{ABo}^k} \right) \left( \frac{z_o - z^k}{\rho_{ABo}^k} - \frac{z_o - z^k}{\rho_{ABo}^k} \right) \right]$$

$$\delta x = [ dx \ dy \ dz ]$$

위 식은  $3+(m-1)$ 개의 미지수를 포함하고 있으므로, 측정치보다 미지수가 많으므로 한 epoch의 측정치로 해를 구할 수 없다. 따라서, 여러 epoch의 측정치를 사용하면 해를 구할 수 있다. 정지한 경우는  $3+(m-1)$ 개, 이동하는 경우  $3n+(m-1)$ 개의 미지수를 포함하므로 정지한 경우는 식 (3.13), 이동하는 경우에는 식 (3.14)의 조건을 만족해야 해를 구할 수 있다.

$$(m - 1)n \geq 3 + m - 1 \quad (3.13)$$

$$(m - 1)n \geq 3n + m - 1 \quad (3.14)$$

반송파 위상을 이용하여 자세측정을 수행할 경우 식 (3.14)를 고려해야 하며 이를 만족하는  $m$ 과  $n$ 은 존재한다.

### 3.3 GDOP(Geometric Dilution of Precision)

GPS에서 위성의 상대운동으로 구해진 위치의 정확도는 시간과 장소에 따라 변한다. 가시위성의 geometry는 절대위치 결정, 이동중 측량에서 높은 정확도를 얻기 위한 중요한 요소이다.

코드신호를 이용하면 식 (3.7)로 해를 구할 수 있으며 추정된 해  $\delta u$ 의 공분산은 식 (3.15)로 나타난다.

$$cov(\delta u) = (A^T A)^{-1} A^T cov(\delta p) A (A^T A)^{-1} \quad (3.15)$$

추정된 위치오차는 의사거리 측정오차와 위성의 배치에 의한 영향을 받으며, 의사거리 측정오차는 수신기의 성능과 신호의 전파환경에 의한 영향을 받는다. 위 식에서 수신기의 각 채널이 독립이고 특성이 같다면  $\delta p$ 의 공분산 행렬  $cov(\delta p)$ 을 단위행렬로 둘 수 있으며, GDOP은 식 (3.16)으로 정의된다.

$$GDOP = \sqrt{tr(A^T A)^{-1}} \quad (3.16)$$

$$\text{단, } (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{tx}^2 & \sigma_{ty}^2 & \sigma_{tz}^2 & \sigma_{tt}^2 \end{bmatrix}$$

즉, GDOP은 의사거리 측정오차가 위치오차로 증폭되는 정도를 나타내며 사용자가 바라보는 위성의 기하학적인 배치에 의해 결정된다. DOP값이 작은 경우는

위성이 공간상에 넓게 분포되어 있고, DOP값이 큰 경우에는 위성이 한 곳에 몰려 있는 경우를 나타낸다. 식 (3.17)에서  $\sigma_{xx}^2$ ,  $\sigma_{yy}^2$ ,  $\sigma_{zz}^2$ ,  $\sigma_{tt}^2$ 는 각각 동서방향 오차, 남북방향 오차, 고도오차, 수신기 시계오차를 나타낸다. 또한 3차원 위치와 관련된 항은 PDOP, 2차원 평면위치는 HDOP, 고도는 VDOP, 수신기 시계오차는 TDOP로 정의한다.

$$\begin{aligned}
 GDOP &= \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + \sigma_{tt}^2} \\
 PDOP &= \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2} \\
 HDOP &= \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2} \\
 VDOP &= \sqrt{\sigma_{zz}^2} \\
 TDOP &= \sqrt{\sigma_{tt}^2}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

위치오차는 의사거리 측정오차에 GDOP이 곱해진 값이 되므로 GDOP의 최소값은 중요하다. GDOP의 이론적인 최소치는 식 (3.18)로 나타나며, 가시위성의 개수가 4개인 경우는  $\sqrt{2.5}$ 가 되며, 가시위성이 증가할수록 그 값이 감소함을 알 수 있다.

$$GDOP|_{\min} = \sqrt{\frac{10}{\text{No. of Satellites}}} \tag{3.18}$$

많은 위성을 사용할수록 DOP 값을 줄일 수 있으므로 최근의 수신기들은 여러 채널을 보유하여 보이는 모든 위성을 사용하여 해를 구하는 것이 일반적인 추세이다.

## 제 4 장 측정시스템의 구현 및 실험

### 4.1 고정도 위치측정 시스템의 구성

본 연구에서는 반송파 위상을 이용한 고정도 위치측정 GPS를 구현하기 위해 실제 시스템을 구성하였다. 그림 4.1은 전체 시스템의 구성도를 나타낸 것이다.

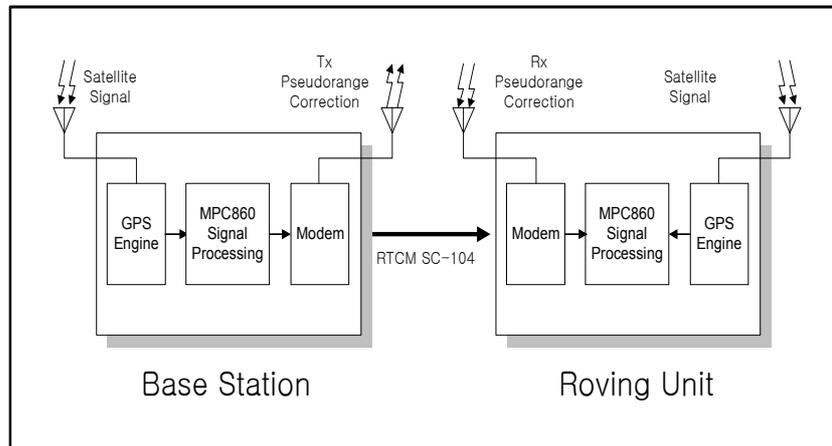


그림 4.1 고정도 위치측정 GPS의 구성도

Figure 4.1 Block diagram of High-accuracy Position measurement GPS

시스템의 구성에 사용된 두 대의 GPS 수신기는 Canadian Marconi사의 12채널 수신보드로서 코드값을 이용한 의사거리 뿐만 아니라 반송파 위상측정이 가능하도록 설계되었다. 이 GPS 수신기에서 출력되는 데이터는 TTL 레벨의 신호이므로 MPC860 보드를 이용하여 데이터를 수집하여 미지정수를 결정한 후 이 값을 이용하여 정확하게 구한 위치좌표를 지도상에 나타내었다. GPS 수신기와 MPC860 보드를 장착하기 위한 GPS Adaptor를 직접 설계하여 모뎀을 통하여

데이터를 송수신 하였다.

그림 4.2와 4.3은 각각 GPS 수신기와 MPC860 보드를 나타낸 것이고, 그림 4.4는 GPS Adaptor에 MPC860 보드와 GPS 수신기를 장착해 모델과 함께 실제로 구성한 Carrier phase 수신기 모듈을 나타낸 것이다. 그리고 그림 4.5는 정확하게 구한 좌표를 지도상에 나타내기 위한 프로그램을 나타낸 것이다.



그림 4.2 GPS 수신기

Figure 4.2 GPS Engine



그림 4.3 MPC860 보드

Figure 4.3 MPC860 Board

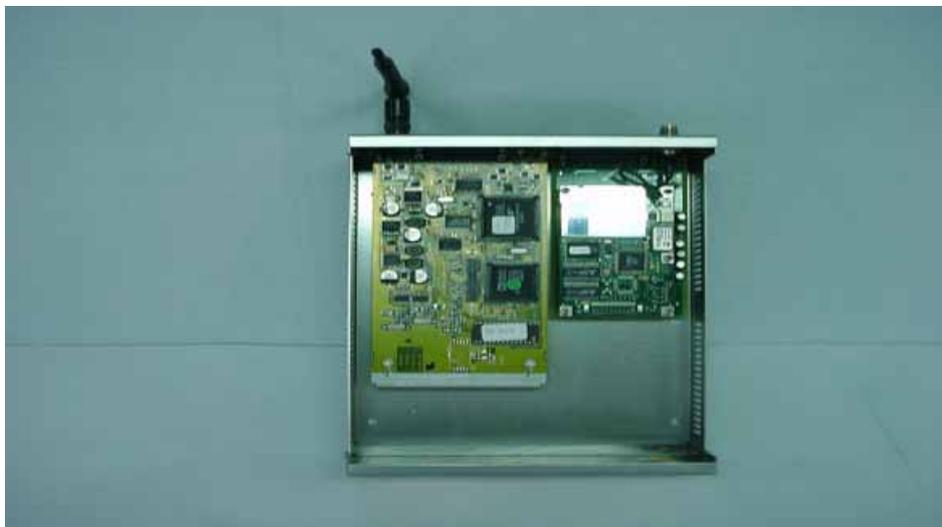


그림 4.4 Carrier phase 수신기 모듈

Figure 4.4 Carrier phase receiver module

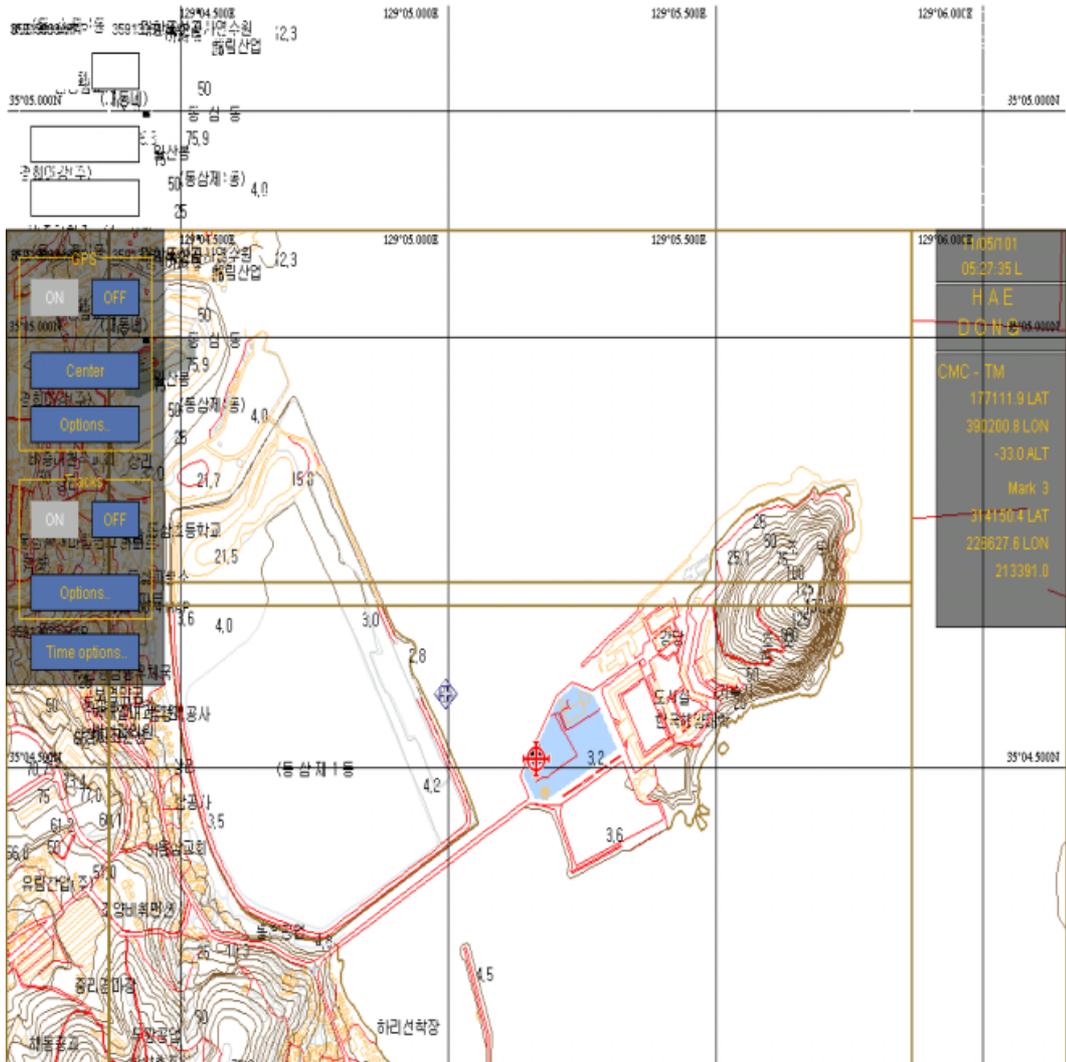


그림 4.5 좌표 출력 프로그램

Figure 4.5 Coordinate display program

그림 4.6은 Base station과 Rover의 상대거리를 구하기 위한 프로그램을 나타낸 것이다.

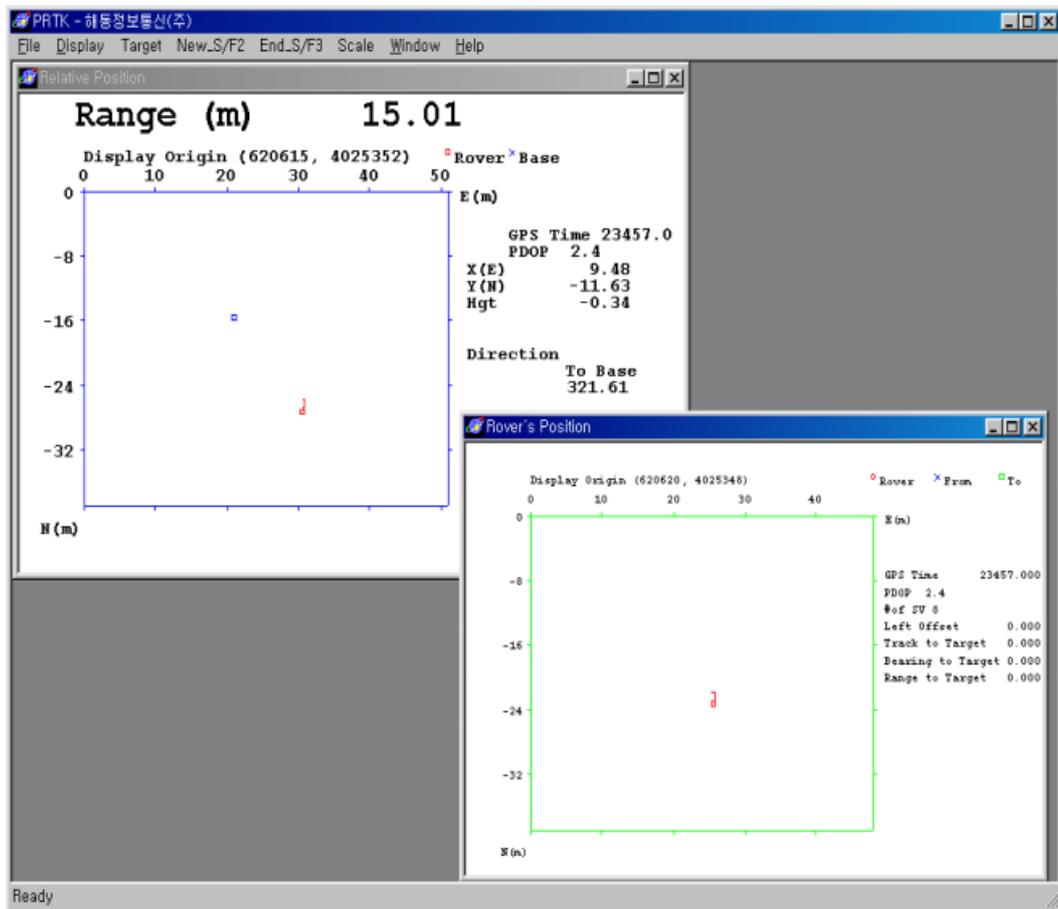


그림 4.6 상대거리 출력 프로그램

Figure 4.6 Relative range output program

## 4.2 측정시스템을 이용한 실험

실험은 그림 4.7과 같이 한국해양대학교 S관 건물 옥상에서 Base station과 Rover의 두 대의 안테나를 설치하여 Base station에서 Rover에 데이터를 송신하고 Rover에서는 수신된 데이터를 이용하여 정확한 위치좌표를 구하고 이것을 지도상에 나타내었다.

실험을 통해 두 대의 Carrier phase GPS 수신기만으로 [cm]레벨의 오차범위 내에서 정확한 위치를 구할 수 있음을 검증하였다.

정지한 상태에서 Base station과 Rover사이의 거리를 각각 5[m], 10[m], 15[m]로 하고 측정치를 1초 단위로 수집하여 각각의 경우에 PDOP값, 위성의 수, 상대거리를 각각 그림으로 나타내었다.



그림 4.7 실험환경

Figure 4.7 Test environment

4.2.1 Base와 Rover의 상대거리가 5[m]인 경우의 실험

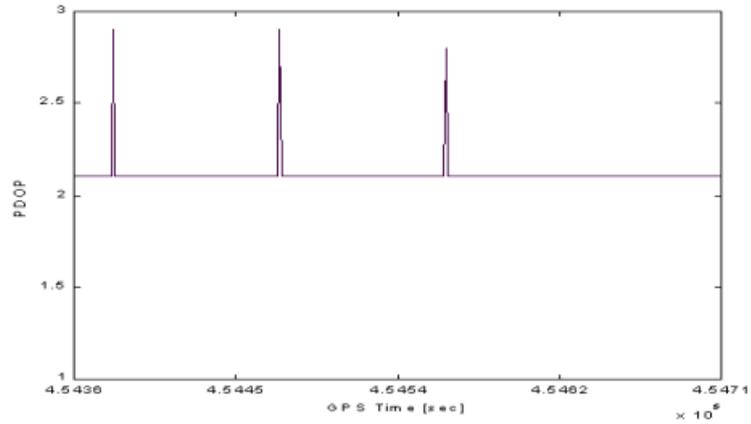


그림 4.8 PDOP의 값

Figure 4.8 Value of PDOP

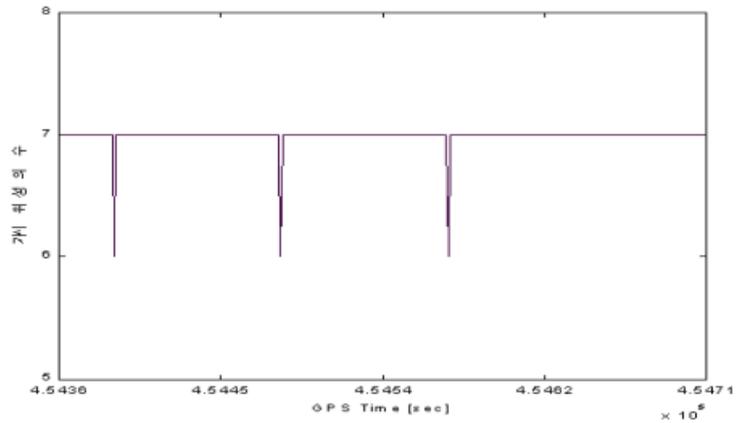


그림 4.9 위성의 수

Figure 4.9 Number of Satellite

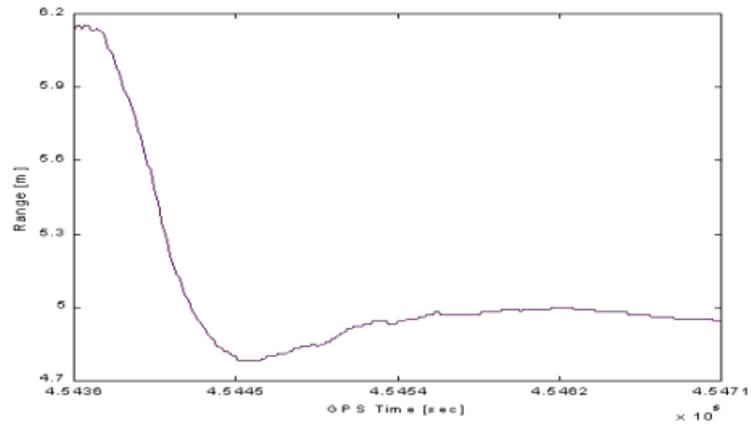


그림 4.10 상대거리

Figure 4.10 Relative range

#### 4.2.2 Base와 Rover의 상대거리가 10[m]인 경우의 실험

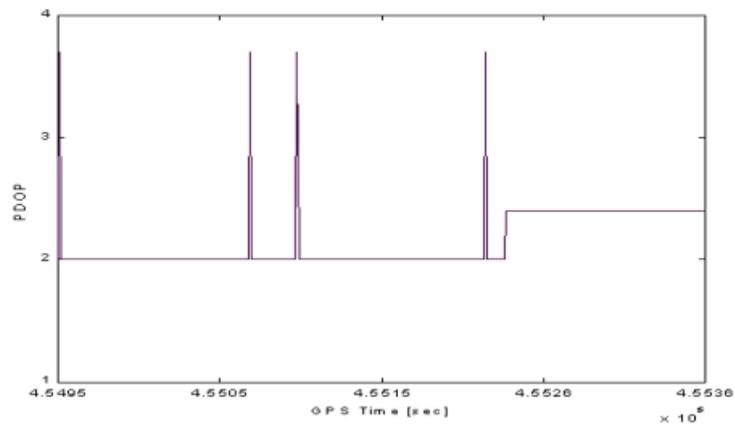


그림 4.11 PDOP의 값

Figure 4.11 Value of PDOP

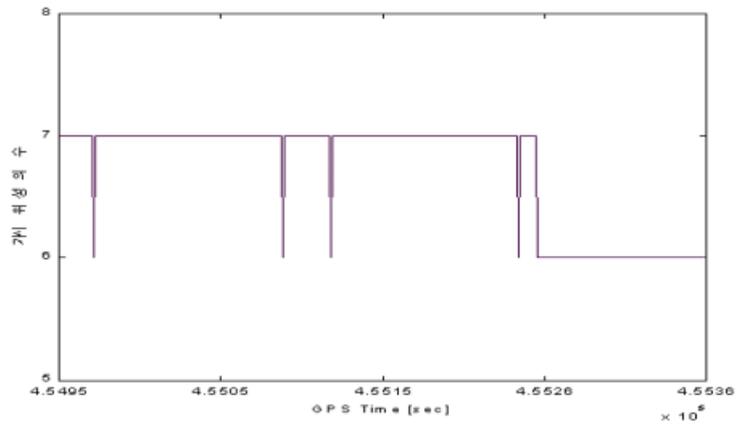


그림 4.12 위성의 수  
Figure 4.12 Number of Satellite

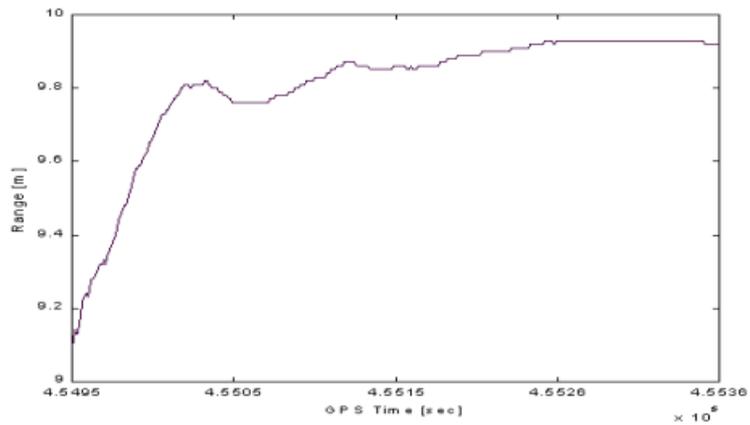


그림 4.13 상대거리  
Figure 4.13 Relative range

### 4.2.3 Base와 Rover의 상대거리가 15[m]인 경우의 실험

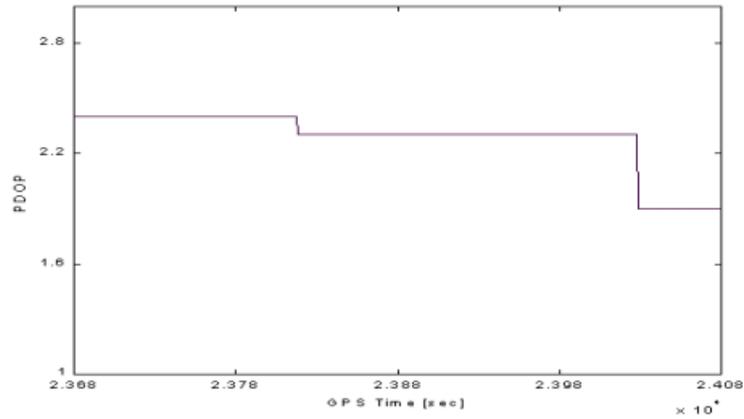


그림 4.14 PDOP의 값

Figure 4.14 Value of PDOP

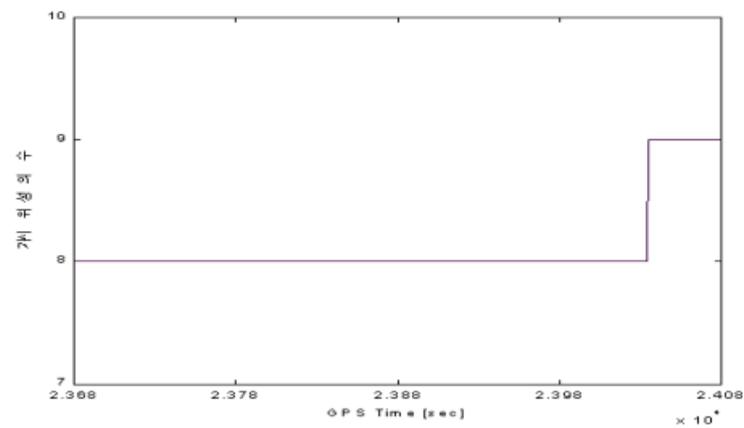


그림 4.15 위성의 수

Figure 4.15 Number of Satellite

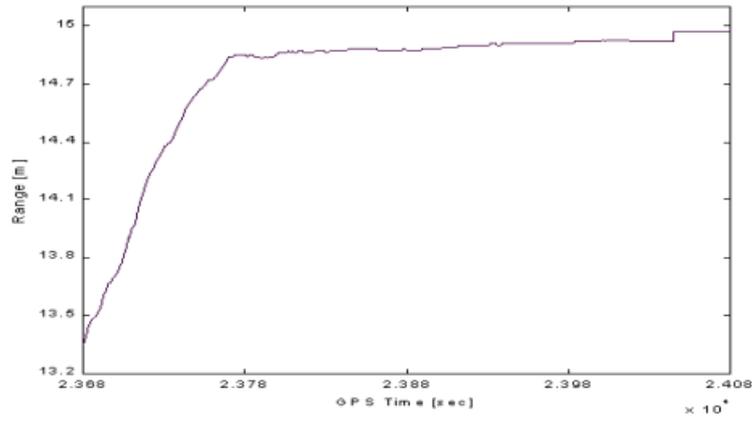


그림 4.16 상대거리

Figure 4.16 Relative range

#### 4.2.4 Rover의 위치 표시

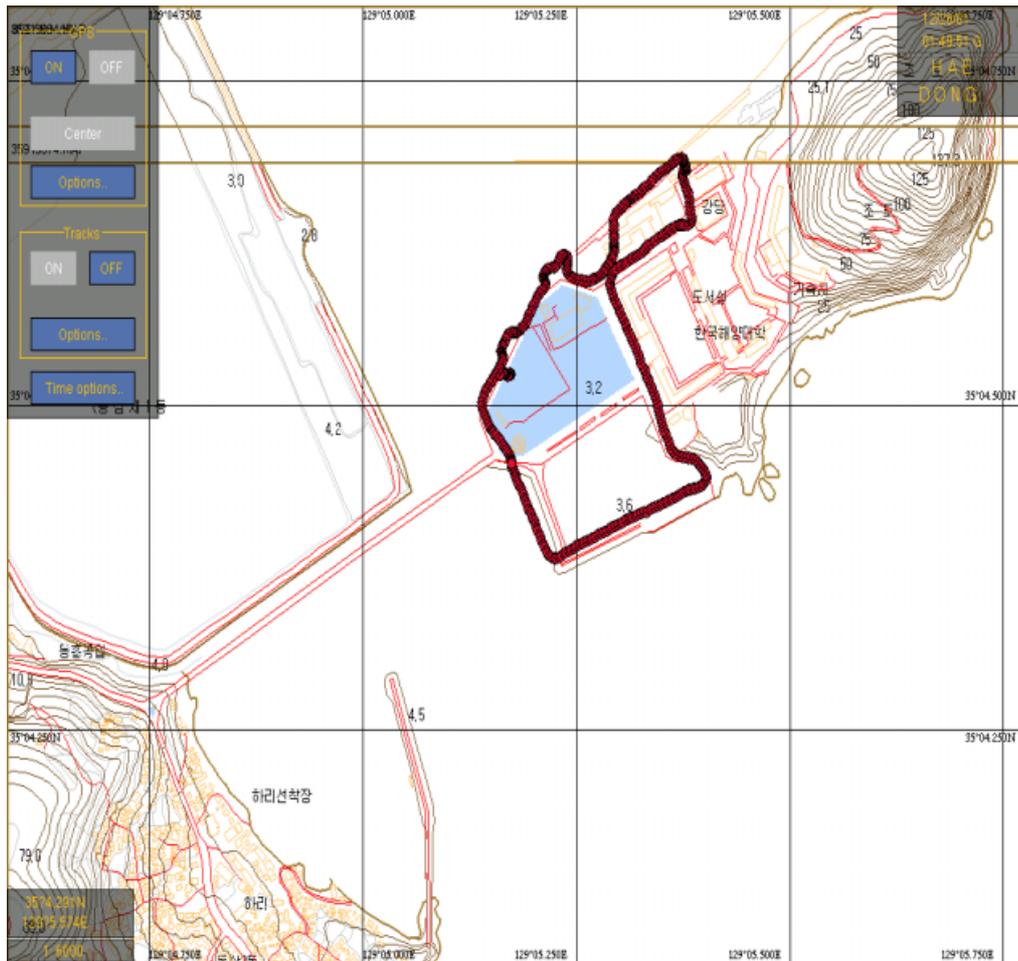


그림 4.17 지도상에 나타낸 좌표

Figure 4.17 Coordinate on the Map

그림 4.17은 Rover를 자동차에 탑재한 후 한국해양대학교를 주행하면서 구한 위치좌표를 지도상에 나타낸 것이다.

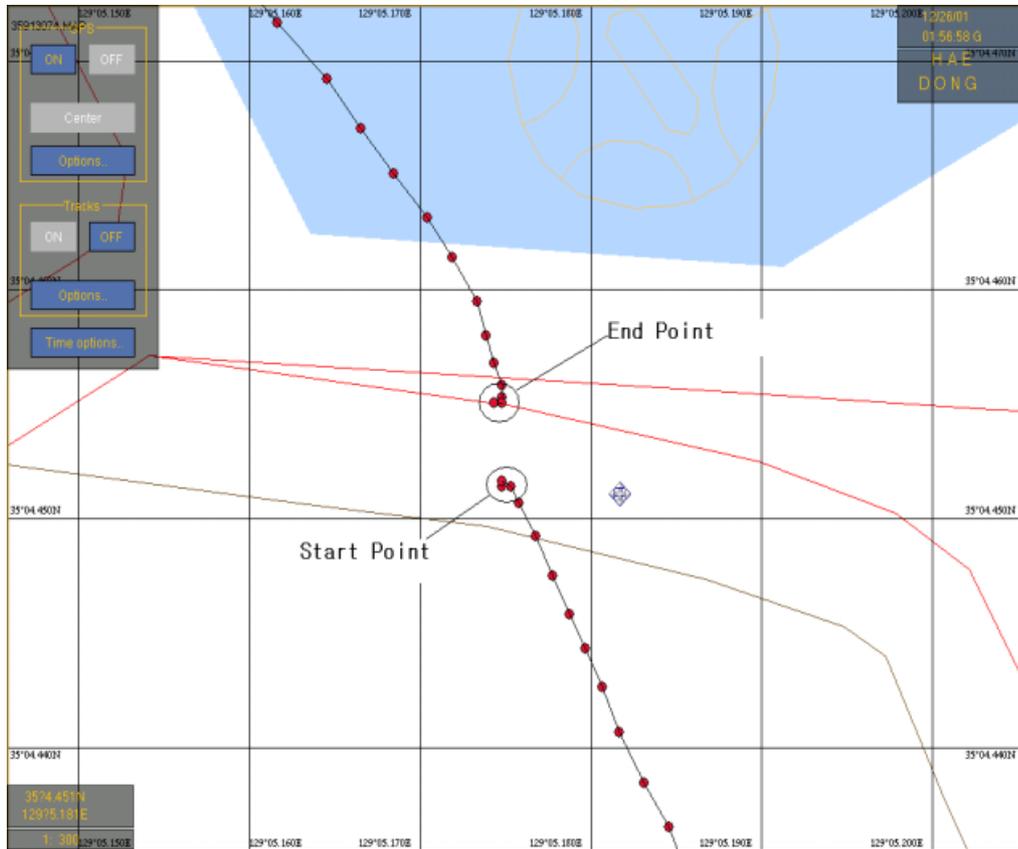


그림 4.18 주행의 시작점과 끝점

Figure 4.18 Start point and End point of Rover

그림 4.18은 그림 4.17에서 주행시의 출발점과 도착점을 확대한 것이다. 좌표는 동경이  $129^{\circ}05.170 \sim 129^{\circ}05.180$ 이고 북위  $35^{\circ}04.450 \sim 35^{\circ}04.460$  사이에 나타나 있다. 지도상에 나타난 좌표에서  $0.001[\text{sec}]$ 당 실제거리에서는 약  $1[\text{cm}]$ 의 오차를 가진다. 따라서 그림 4.18을 보면 동경과 북위의 좌표 모두  $0.01[\text{sec}]$  이내에서 움직임을 알 수 있다. 그러므로 Rover에서 계산된 위치좌표는  $10[\text{cm}]$ 이내의 오차범위를 가진다고 말할 수 있다.

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 두 대의 수신기만을 이용해 반송파 위상을 이용하여 10[cm]이내의 오차범위를 갖는 고정도의 위치측정 GPS를 제시하였다. 이를 위해 두 대의 Carrier phase GPS 수신기, MPC860 보드, 모뎀을 이용하여 실제 시스템을 설계 및 제작하였다.

구현된 시스템을 이용하여 실험한 결과 계산된 위치좌표가 10[cm] 이내의 오차범위를 가진다는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 10[cm] 이내의 오차범위를 갖는 시스템을 제안하였으나, 차후 보다 높은 고정도의 위치측정 방법에 대한 연구가 필요하며 나아가 GPS가 고정도의 센서로서 활용될 수 있도록 활발한 연구가 진행되어야 할 것이다.



## 참고문헌

- [1] Elliot D. Kaplan, "Understanding GPS Principles and Applications", Artech House, 1996
- [2] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, "Theory and Practice", Springer-Verlag Wien New York, 1994
- [3] Alfred Leick, "GPS Satellite Surveying", Wiley-Interscience, 1995
- [4] Gilbert Strang, Kai Borre, "Linear Algebra, Geodesy, and GPS", Wellesley Cambridge Press, 1997
- [5] Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, "Kalman filtering", Prentice Hall Information, 1993
- [6] Shaowei Han, "Carrier Phase-Based Long-Range GPS Kinematic Positioning", School of Geomatic Engineering, 1997
- [7] Canadian Marconi Company, "Allstar User's Manual", Canadian Marconi Company, 1998
- [8] Motorola INC, MPC860 User's manual, Motorola INC, 1998
- [9] Dingsheng Chen, "Development of a Fast Ambiguity Search Filter(FASF) Method for GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution", 1994
- [10] Erick Masella, Michel Gonthier and Michel Dumaine CMC Electronics, "Precise Kinematic Positioning Experiments with a Low-Cost RTK GPS Engine", IEEE PLANS'98 Conference Proceedings, 1998
- [11] 박찬식, 김인호, 최일홍, "GPS 반송파 측정치를 이용한 절대위치 결정기법", Proceeding of the 13<sup>th</sup> KACC, October 1998