

GPS 관측성분(Observable)에 따른
응용 및 오차분석

삼성데이터시스템
박사 송 인 성

GPS 관측성분(Observable)에 따른 응용 및 오차분석

송 인성
삼성데이타시스템

개요

GPS(Global Positioning System)에 의한 위치 결정은 Algorithm 이나 관측 성분(Observable)의 선택에 따라 다양한 방법으로 이루어져 있다. GPS의 응용 분야에서 요구되는 오차의 정도에 따라 적절한 관측 성분과 Algorithm 이 선택되어질 때 보다 효과적인 GPS 이용 방법이 개발 되어질 수 있다. 현재 여러 응용 분야에서 이용되고 있는 GPS Algorithm 이 서술 되었으며, 각 관측 성분의 특징과 정도는 관측 방정식과 함께 조사 되었다.

1. GPS Signal 의 구조

모든 GPS 위성으로부터 전송 되어지는 Signal 은 L-band Signal 로 기본 주파수 10.23 MHz 로 부터 변조 된다. L1, L2 carrier 는 기본 주파수에 154, 120 배수로 각각 1575.42 MHz, 1227.60 MHz 이다. P-code 의 Chipping Rate 는 기본 주파수와 같은 10.23 MHz 이며, C/A-code 의 Chipping Rate 는 P-code 의 1/10 인 1.023 MHz 이다. 위성 Ephemeris, GPS time 등의 정보가 포함되어 있는 Navigation Message 는 L1, L2 carrier 에서 50 bps 의 Chipping Rate 로 변조 되어진다.

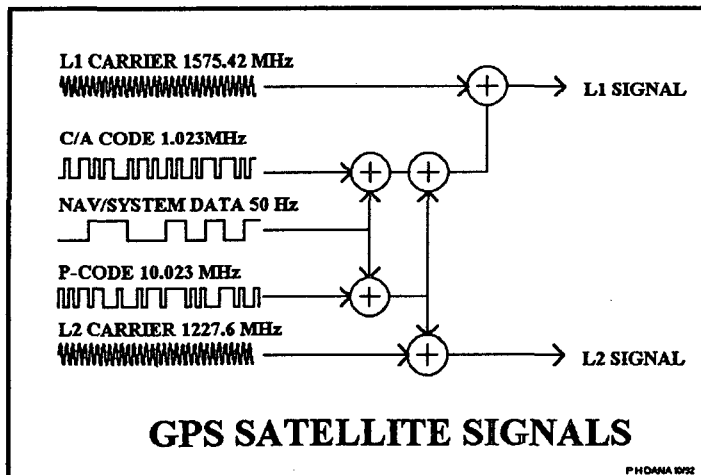


그림 1: GPS Signals

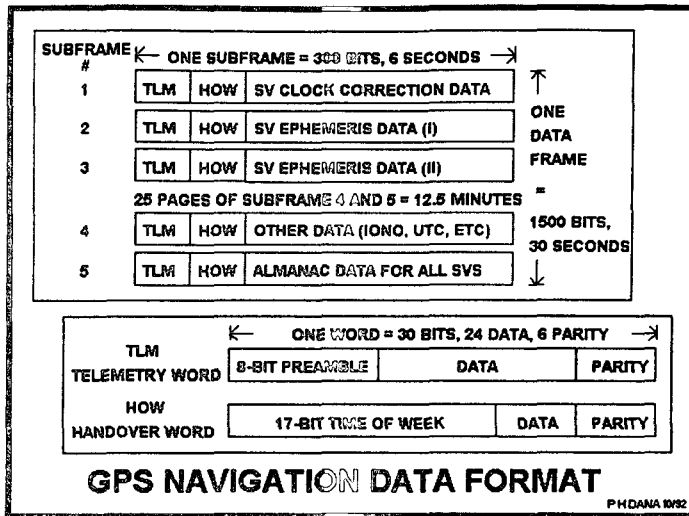


그림 2: GPS Navigation Message Format

L1 Carrier Phase: C/A-code, P(Y)-code 로 부터 변조

L2 Carrier Phase: P(Y)-code 로 부터 변조

L3 Combination : 이온층에 의한 지연을 제거하기 위한 L1, L2 의 조합 (Ionosphere-free combination)

L4 Signal : 현재 계획 중인 상업용 Signal (NRC committee 제안)

SA (Selective Availability): SA 는 고의적으로 GPS Signal 의 정확도를 조작하기 위한 것으로 Ephemeris Data (SA-epsilon) 와 Satellite Clock Data (SA-dither) 의 조작을 통해 이루어진다. SA 는 1990 년 3 월 25 일 부터 모든 Block II 위성에 적용 되었다. SA 에 의한 정확도의 감소는 상대 측위(Relative Positioning) 혹은 DGPS 기법에 의해 효과적으로 제거된다.

AS (Anti-Spoofing): 군사목적의 P-code 를 적의 교란으로 부터 방지하기 위하여 암호화 시키는 기법을 말한다.

2. GPS 관측방정식

2.1 Pseudorange

GPS 위성에서 생성되어 전송된 PRN (Pseudo Random Noise) code 를 수신기에서 동일한 PRN code 를 재생하면 위성으로 부터 수신기 (안테나) 까지 Signal 의 전송시간을 구할 수 있다. Pseudorange 는 이 전송시간으로 부터 구하여진 거리를 말하며, 위성 p 와 수신기 k 간의 관측방정식은 식(1) 과 같다. C/A-code 와 P-code Pseudorange 의 관측정도는 대략 Chip Length 의 1/100 로 각각 3 M, 30 CM 이다.

$$P_k^p(t) = \rho_k^p(t) - c(dt_k - dt^p) + I_{k,p}^p(t_k) + T_k^p(t_k) + d_{k,p}^p(t_k) + d_{k,p}^p(t_k) + d_p^p(t_k) + \varepsilon_p \quad (1)$$

$$\rho_k^p(t) = \sqrt{(u^p - u_k)^2 + (v^p - v_k)^2 + (w^p - w_k)^2} \quad (2)$$

- $P_k^p(t)$: 관측시간 t 의 Pseudorange 관측값
 $\rho_k^p(t)$: 위성 p 와 수신기 k 간의 기하학적 거리
 $(u^p, v^p, w^p), (u_k, v_k, w_k)$: 위성 p 와 수신기 k 의 3 차원 좌표
 c : 빛의 속도
 dt^p : 위성 시계 오차
 dt_k : 수신기 시계 오차
 $I_{k,p}^p$: 이온층에 의한 지연 (Ionospheric Delay)
 T_k^p : 전리층에 의한 지연 (Tropospheric Delay)
 $d_{k,p}^p$: 수신기 Hardware Code Delay
 d_p^p : 위성 Hardware Code Delay
 $d_{k,p}^p$: Multipath
 ε_p : Pseudorange 관측 Noise

2.2 Carrier Phase

Carrier Phase 는 수신된 위성의 Carrier Signal 의 위상(Phase)과 수신기에 내장 되어 있는 Oscillator Signal 의 위상의 차이를 분석함으로써 관측된다. Carrier Phase 의 관측 정도는 대략 L1, L2 파장(19 CM, 23 CM)의 1/100 로 Pseudorange 의 관측 정도와 큰 차이를 보이고 있다. 그러나, 위성과 수신기 간의 기하학적 거리를 의미하는 Carrier Phase 관측 방정식을 구성하기 위해서는 식(3)과 같이 미지 정수배의 Carrier 파장 (Integer Ambiguity, N_k^p)을 포함 하여야 한다. 즉, Carrier Phase 관측을 이용하여 위치를 결정하기 위해서는 각 관측방정식에 포함된 Integer Ambiguity 를 구하여야 한다.

$$\varphi_k^p(t) = \frac{f}{c}\rho_k^p(t) - f(dt_k - dt^p) + N_k^p(1) + I_{k,\varphi}^p(t_k) + \frac{f}{c}T_k^p(t_k) + d_{k,\varphi}^p(t_k) + d_{k,\varphi}^p(t_k) + d_\varphi^p(t_k) + \varepsilon_\varphi \quad (3)$$

- $\varphi_k^p(t)$: 관측시간 t 의 Carrier Phase 관측값
 f : L1/L2 주파수
 N_k^p : Integer Ambiguity
 $I_{k,\varphi}^p$: 이온층에 의한 단축(Ionospheric Advance)
 $d_{k,\varphi}^p$: 수신기 Hardware Carrier Delay

- d_{ϕ}^p : 위성 Hardware Carrier Delay
- $d_{k,\phi}^p$: Multipath
- ε_{ϕ} : Pseudorange 관측 Noise

2.3 이중 주파수 선형 조합 및 Pseudorange Smoothing

이온층 효과(Ionospheric Effect)는 주파수 종속변수(frequency-dependent)이므로, 이중 주파수 P-code Pseudorange 및 Carrier Phase 관측의 선형 조합에 의해 식(4), (5)와 같이 제거 되어질 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{k,IF}^p(t) &\equiv \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} p_{k,1}^p(t) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} p_{k,2}^p(t) \\
 &\equiv \frac{1}{(1 - f_1^2/f_2^2)} \left\{ p_{k,2}^p(t) - \frac{f_1^2}{f_2^2} p_{k,1}^p(t) \right\} \\
 &= p_k^p(t) - cdt_k + cdt^p + T_k^p(t)
 \end{aligned} \tag{4}$$

$P_{k,IF}^p$: Ionosphere-free Pseudorange combination

$$\begin{aligned}
 \Phi_{k,IF}^p(t) &\equiv \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_{k,1}^p(t) - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_{k,2}^p(t) \\
 &= \frac{f_1}{c} \rho_k^p(t) - f_1 dt_k + f_1 dt^p + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_{k,1}^p(t) - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{k,2}^p(t) + T_k^p(t)
 \end{aligned} \tag{5}$$

$\Phi_{k,IF}^p$: Ionosphere-free carrier phase combination

또한, 이중 주파수 P-code 관측으로 부터 식(6)과 같은 형태의 선형 조합에 의해 P-code Pseudorange 의 Multipath 와 Noise 를 약 30%정도 감소 시킬 수 있다. 식(6) 과 같은 형태로 재 조합된 관측성분 $P_{k,W}^p(t)$ 을 Frequency-Weighted Pseudorange 라 한다.

$$\begin{aligned}
 P_{k,W}^p(t) &= \frac{f_1}{f_1 + f_2} P_{k,1}^p(t) + \frac{f_2}{f_1 + f_2} P_{k,2}^p(t) \\
 &= \rho_k^p(t) + \dot{\rho}_k^p(t) dt_k + cdt_k - cdt^p + T_k^p(t) + \frac{f_1}{f_2} I_{k,P1}^p(t) \\
 &\quad + \frac{f_1}{f_1 + f_2} (d_{k,P1}^p + \varepsilon_{P1}) + \frac{f_2}{f_1 + f_2} (d_{k,P2}^p + \varepsilon_{P2})
 \end{aligned} \tag{6}$$

Pseudorange 의 Noise 와 Multipath 를 효과적으로 감소 시키기 위한 또다른 방법은 관측된 Carrier Range 를 이용하여 역시 관측된 Pseudorange 를 Smoothing 하는 기법

이다. 이 경우 Carrier Range 를 이용하더라도 Integer Ambiguity 를 구하기 위한 초기화 과정이 필요 없다.

$$\tilde{P}_k^p(t_i) = wP_k^p(t_i) + (1-w)[\tilde{P}_k^p(t_{i-1}) + \Phi_k^p(t_i) - \Phi_k^p(t_{i-1})] \quad (7)$$

- $\tilde{P}_k^p(t_i)$: Epoch t_i 의 Smoothed Pseudorange
- $\tilde{P}_k^p(t_{i-1})$: Epoch t_{i-1} 의 Smoothed Pseudorange
- w : Smoothing Weight
- $\Phi_k^p(t_i)$: Epoch t_i 의 Carrier Range
- $\Phi_k^p(t_{i-1})$: Epoch t_{i-1} 의 Carrier Range

식(7)에 의한 Pseudorange Smoothing 기법은 이중 주파수는 물론 단일 주파수 관측에도 적용될 수 있기 때문에 광역 DGPS [WADGPS(Wide Area Differential GPS)] 등에 널리 이용되고 있다.

3. GPS 기법

3.1 Navigation Solution (Pseudorange Point Positioning)

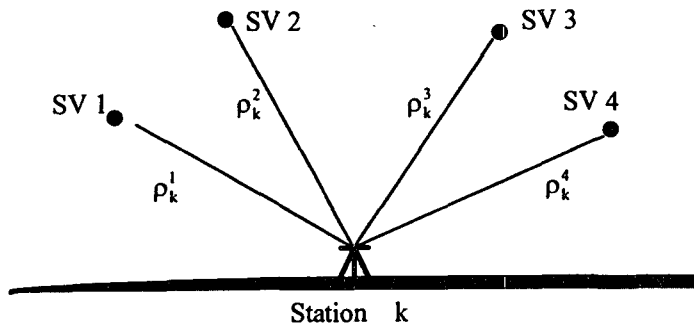


그림 1: GPS Navigation Solution (Point Positioning)

낮은 정도를 요구하는 GPS 응용에서는 Pseudorange 를 이용하여 간단하게 미지점의 위치를 구할 수 있다. Satellite Ephemeris 로 부터 위성의 3 차원 좌표가 주어질 때, Pseudorange 관측 방정식의 주요 미지변수는 위성 및 수신기의 시계오차, 미지점의 좌표, 이온층 및 전리층에 의한 오차 등 이다. 위성의 시계오차는 Navigation Message Subframe 1 에 포함 되어 있고, 이온층 및 전리층에 의한 오차는 수신기 시계오차에 비해 적은 양이므로 낮은 정도의 위치를 결정하기 위한 Solution 에서는 무시된다. 이 경우 4 개의 미지변수 (수신기 시계오차, 미지점의 3 차원 좌표)

만이 남게 되며, 이 4 개의 미지변수를 구하기 위하여 4 개의 위성으로 부터 Pseudorange 관측을 통해 식(8)-(11)의 연립 방정식이 구성된다. 식(8)-(11)을 이용하여 미지점의 독립위치를 결정하는 방법을 Navigation Solution 이라 한다.

$$P_k^1 = \sqrt{(u^1 - u_k)^2 + (v^1 - v_k)^2 + (w^1 - w_k)^2} + cdt_k \quad (8)$$

$$P_k^2 = \sqrt{(u^2 - u_k)^2 + (v^2 - v_k)^2 + (w^2 - w_k)^2} + cdt_k \quad (9)$$

$$P_k^3 = \sqrt{(u^3 - u_k)^2 + (v^3 - v_k)^2 + (w^3 - w_k)^2} + cdt_k \quad (10)$$

$$P_k^4 = \sqrt{(u^4 - u_k)^2 + (v^4 - v_k)^2 + (w^4 - w_k)^2} + cdt_k \quad (11)$$

Navigation Solution 및 여러 GPS 기법을 이용하여 위치결정을 할 때 위치 오차에 중요한 영향을 미치는 요소로 위성의 기하학적 배치를 들 수 있다. 즉, 어떤 특정 오차 인자가 위성의 기하학적 배치에 의해 증폭 되어질 수 있다. 이 위성의 기하학적 배치를 계수로 나타낸 것을 DOP (Dilution of Precision)라 하며, 위치요소에 따라 다음과 같이 분류된다.

- VDOP : Vertical Dilution of Precision
- HDOP : Horizontal Dilution of Precision
- PDOP : Position Dilution of Precision
- TDOP : Time Dilution of Precision
- GDOP : Geometric Dilution of Precision
- RDOP : Relative Dilution of Precision

또한, 이온층 오차와 SA 의 존재 여부에 따라 Navigation Solution 의 정확도에 많은 영향을 미치며, 그림 2 는 이 요소들의 영향에 따른 Navigation Solution 위치오차를 비교하고 있다.

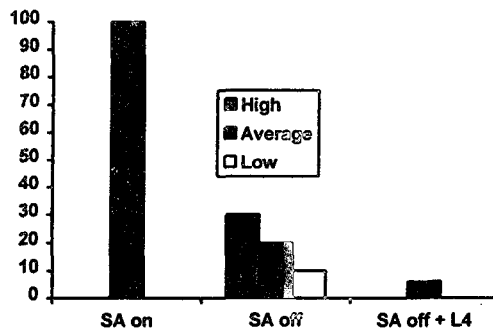


그림 2: SA 와 이온층의 영향에 따른 Navigation Solution 의 위치오차

3.2 Pseudorange (Code) Differential Positioning

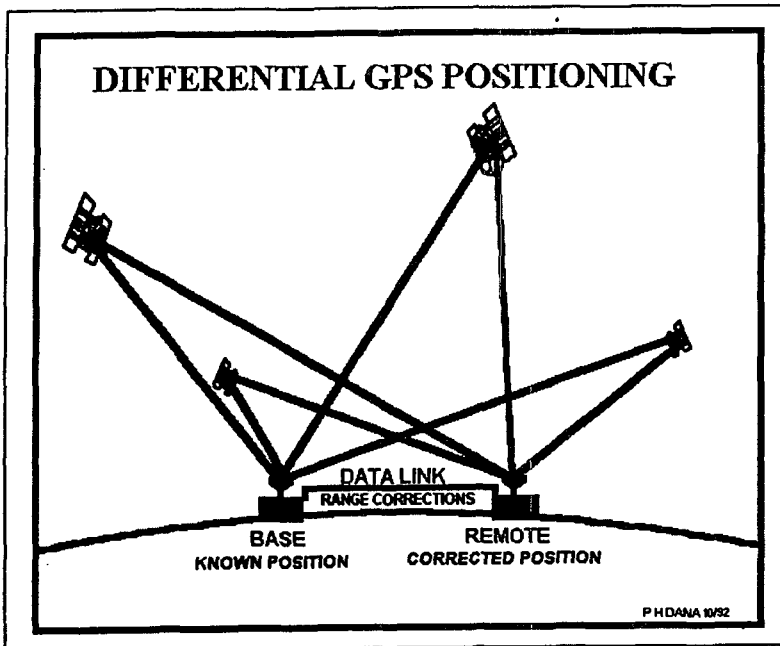


그림 3: GPS Pseudorange Differential Positioning

Real-Time 및 Post-Processing 을 이용한 위치 결정에서 Ephemeris, SA, 이온층, 전리층 등에 의한 오차 등을 효과 적으로 제거하기 위하여 Differential Positioning 기법이 이용되고 있다. 기지점과 미지점이 근거리(보통 100 KM 이내)에 있을 때, 동시에 Pseudorange 관측을 하면 두 점의 관측값에 각각 같은 양의 오차 요소들이 포함되어 진다. 이 들 두 점의 관측값의 조합에 의해 오차를 제거하는 기법을 Differential Positioning 이라 한다. 특히, Real-Time 에 이를 적용하기 위해서 Data Link 와 Data 의 표준 Format 을 필요로 한다. Pseudorange 를 이용한 Real-Time Differential Positioning 기법에서는 기지국에서 오차보정량(Differential Correction)을 계산하여 Data Link 를 통해 이동에 전송하는 기법을 이용하고 있다. 이러한 Differential 기법을 총칭하여 DGPS(Differential GPS)라 한다. 각각의 오차 성분이 표 1 에서 보여지는 바와 같이 누적 되었을 경우 Pseudorange 독립관측과 DGPS 에 의한 위치오차는 커다란 차이를 보이고 있다.

그러나, 기지점과 미지점이 원거리(100 KM 이상)에 있는 경우에는 Differential 기법에 의해 위성 Ephemeris, SA, 이온층 및 전리층 등에 의한 오차 성분을 효과적으로 제거할 수 없다. 그러므로, 원거리 Differential Positioning 에서는 전리층에 의한 관측오차는 수학적 Model 에 의해, 이온층의 관측오차는 이중 주파수 관측에 의해 각각 제거되어질 수 있다. 단일 주파수 관측일 경우 Navigation Message 로 전송되는 이온층에 의한 오차보정값을 이용할 수 있으며, 이 경우 이온층에 의한 오차를

약 50%정도 제거할 수 있다.

표 1: GPS 오차 성분과 오차량

오차 성분	독립 관측 오차	DGPS 관측 오차 (100 KM 이내)
SV Clock	1 M	
SV Ephemeris	1 M	
SA	10 M	
전리층	1 M	
이온층	10 M	
Pseudorange Noise	1 M	1 M
Receiver Noise	1 M	1 M
Multipath	0.5 M	0.5 M
RMS Error	15 M	1.6 M
위치오차 (PDOP=4.0)	60 M	6 M

3.3 Carrier Differential Positioning

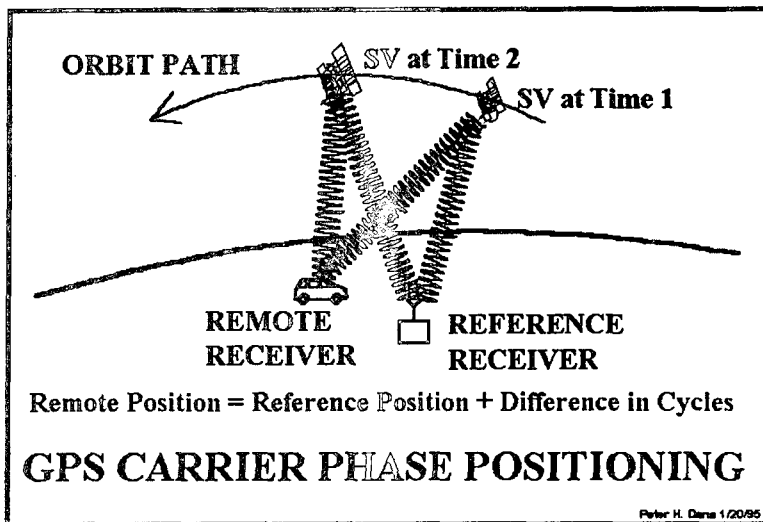


그림 4: GPS Carrier Differential Positioning

Carrier Phase 관측값은 그 정확도로 인하여 Static 및 Kinematic 응용에 널리 이용되고 있다. GPS 초창기 세대에는 정확한 Integer Ambiguity를 구해야 하는 번거로움 때문에 측량 등 Post-processing 응용에 주로 이용되었으나, 현재는 Ambiguity

Resolution 기법의 다양한 개발로 항법 등의 Real-Time 응용에도 널리 이용되고 있다. 정확도에 영향을 미치는 여러 오차 성분을 제거하기 위해 Differencing 관측 기법이 이용된다. 요구되는 정확도에 따라 Single, Double 및 Triple Difference 방식이 이용되며 이에 따른 오차 감소 효과는 표 2와 같다.

표 2: Differencing 에 따른 오차 제거 및 감소 효과

Differencing 관측 기법	오차 제거	오차 감소
Single Difference	위성 시계오차	이온층 및 전리층에 의한 오차
Double Difference	수신기 시계오차	위성 Ephemeris, SA 에 의한 오차
Triple Difference	위성 및 수신기 시계오차	(근거리 Baseline)

3.4 Ambiguity Resolution On-The-Fly (OTF)

Carrier Phase 를 Kinematic 측량에 이용하기 위한 과정 중에서 가장 중요한 과정으로는 정확한 Integer Ambiguity 를 먼저 구하는 것이다. Antenna Swap, Pseudo-Kinematic, Stop and Go Kinematic 등 과거의 방법들은 번거롭고 Real-Time 에 응용하기 까다로운 기법들이었다. 최근에는 보다 빠른 시간에 Integer Ambiguity 를 구하여 Carrier Phase 관측을 Post-Processing 과 Real-Time 에 보다 간편하게 이용할 수 있는 기법들이 개발 되었다. 이러한 기법을 총칭 하여 Ambiguity Resolution On-The-Fly (OTF)라 하며, 표 3 은 대표적인 Ambiguity Resolution 기법을 비교한 것이다.

표 3: Ambiguity Resolution 방법론

방법론	Ambiguity Function Method (AFM)	Fast Ambiguity Resolution Approach (FARA)	Least Squares Ambiguity Search Technique (LSAST)
Initial Solution	Pseudorange Solution	Carrier Float Solution	Pseudorange Solution
Search Domain	Test Points	Ambiguity Sets	Ambiguity Sets

4. GPS 표준 Data

DGPS 는 위성이나 Radio Beacon 등과 같은 다양한 Data link 를 이용하기 때문에 Data Message 의 표준화를 필요로 한다. 특히, Real-Time 응용에서 표준 Data Format 의 필요성 때문에 미국 RTCM-SC104 (Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104)는 Real-Time DGPS 에 이용되어질 수 있는 다양한 형태의 표준화된 Data Format 을 제정했다. 이와 비슷한 형태로 미국 RTCA (Radio Technical Commission) for Aviation)에서도 표준화 된 Data Format 을 제정하여 자동 항법, 항공기 이착륙 등의 이용 분야에 이용되고 있다. 또한 미국 NMEA (National Marine Electronics Association) 에서는 NMEA-0183 표준 Format 을 제정하여 타 기종 수신기 간의 Data 호환을 가능하게 하고 있다.

타 기종의 수신기로 부터 얻어진 GPS Data 를 Post-processing 에 이용하기 위해서 표준 Format 을 이용하고 있으며, 현재 이용되고 있는 표준 Format 은 RINEX (Receiver INdependent EXchange) format 으로 ASCII File 형태로 되어 있다. 응용 목적과 관측 성분에 따라 여러 형태(Type)로 분류되어 있다.

5. GPS 기준망 (Networks)

GPS 기준망은 현재 전세계적으로 설치, 운영되고 있는 약 400 개의 GPS 기준점을 포함하고 있으며, 약 1400 개의 GPS 기준점이 설치 및 운영 계획 중에 있다. GPS 기준망은 항법, 측지측량, GIS 등 여러 가지 목적으로 이용되고 있으며, 활용도는 급속히 확대될 전망이다.

표 4: 현재 운영 중이거나 계획 중인 GPS 기준점 수

기준망	현 기준점 수	계획적인 기준점 수
지역 기준망 (美國内)	70	360
국가 기준망 (美國内)	250	875
광역 기준망 (전세계)	75	125
소계	395	1360
총계		1755

6. GPS 관측성분과 위치오차

GPS 위치 결정에 있어서 관측성분의 선택은 효율적인 위치정보 획득을 위해 GPS 기법의 선택과 더불어 대단히 중요하다. 표 5 는 GPS 기법과 관측 성분 선택에 따

큰 위치오차를 보여 주고 있다.

표 5: GPS 기법 및 관측성분에 따른 위치오차

GPS 기법	위치오차	L1 C/A-code	L1 P-code	L1 Carrier	L2 P-code	L2 Y-code
SPS Navigation	100 M	X				
SPS Differential (> 30 KM)	10 M	X				
SPS Differential (<30 KM)	1 M	X				
PPS Navigation	10 M	X	X		X	
AS Navigation	10 M	X	X	X	X	X
L1 Carrier Phase Survey	0.1 M	X		X		
L1 L2 Carrier Phase Survey	0.01 M	X	X	X	X	

참고문헌

Leick, A. (1990). *GPS Satellite Surveying*. Wiley Interscience, 352 p.

Hofman-Wellenhof, B. et al. (1992). *Global Positioning System, Theory and Practice*. Springer-Verlag, 326 p.

Sandlin, A. et al. (1995). "Selective Availability: To Be or Not to Be?" *GPS World*, September, Vol. 6, No. 9, pp. 44-51.

Langley, R.B. (1995). "NMEA 0183: A GPS Receiver Interface Standard." *GPS World*, July, Vol. 6, No. 7, pp. 54-57.