

## 미약신호 수신 알고리즘을 활용한 정지궤도위성 탑재용 소프트웨어 GPS 수신기 개발

# Development of Software GPS Receiver for GEO Satellites Using Weak Signal Receiver Algorithm

김종원 · 김강호 · 기창돈\*

서울대학교 기계항공공학부 및 항공우주신기술연구소

Chong-won Kim · Ghang-ho Kim · Chang-don Kee\*

School of Mechanical and Aerospace Engineering and the Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

### [요 약]

본 연구의 대상인 정지궤도위성은 GPS 위성 궤도보다 높은 고도에 위치하기 때문에 지상 사용자에게 비하여 GPS 신호의 가시성과 신호 세기 면에서 큰 차이가 있다. 본 연구에서는 이러한 정지궤도위성환경에 탑재되는 GPS 수신기에서의 GPS 위성 신호 가시성을 분석하고, 미약신호 획득 및 추적 알고리즘인 CCMDB 알고리즘을 적용하여 정지궤도위성 탑재 GPS 수신기에서 활용 가능한 소프트웨어 GPS 수신기를 개발하였다. 개발된 소프트웨어 GPS 수신기의 검증용 위하여 상용 하드웨어 시뮬레이터로 정지궤도위성 탑재 GPS 수신기에서 수신되는 GPS 신호를 생성하였고 이를 처리하여 성능을 분석하였다. 항법해 계산 결과 평균 3축 위치 및 속도 오차는 각각 165.636 m와 0.5081 m/s로 계산되었다.

### [Abstract]

The altitudes of GEO satellites are higher than those of GPS satellites. Therefore the visibility and the received power of GPS signals are totally different from those of the users near the Earth's surface. In this study, we analyzed the visibility of GPS signals received on GEO satellites. And we also developed a software GPS receiver that works on GEO satellites using CCMDB algorithm which is a weak signal receiver algorithm. GPS signals received on a GEO satellite are generated by a commercial hardware GPS simulator and used for the verification of the developed software GPS receiver. The mean 3D position and velocity error are calculated as 165.636 m and 0.5081 m/s.

**Key word :** GPS, GEO satellite, Software GPS receiver, Weak signal acquisition, Weak signal tracking.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2014.18.4.312>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 16 June 2014; Revised 26 August 2014  
Accepted (Publication) 21 August 2014(30 August 2014)

\*Corresponding Author; Chang-don Kee

Tel: +82-2-880-1912

E-mail: kee@snu.ac.kr

## 1. 서론

GPS를 비롯한 위성 항법 시스템 (GNSS; global navigation satellite system)은 오늘날 지상, 해양, 항공 사용자뿐만 아니라 우주 환경에서도 중요한 항법 도구 중의 하나로 활용되고 있다. 우주 환경에서 수신되는 항법 신호는 지상에서 수신되는 항법 신호와는 다른 특징을 갖으며, 특히 지구 정지 궤도 (GEO; geostationary earth orbit) 위성의 경우 고도가 약 35,800 km에 달하여, 고도 약 20,200 km에서 지구를 향해 방송되는 GPS 신호를 수신하기 어렵다. 따라서 GEO 위성에 탑재되는 GPS 수신기는 지구 반대편에서 방송되는 GPS 위성 신호를 수신해야 하는 상황이 된다. 그림 1에 GEO 위성 탑재 GPS 수신기의 GPS 신호 수신 상황을 도시하였다. 그림 1의 Main lobe와 Side lobe는 GPS 위성의 송신 안테나 패턴에 따라 생기는 것으로, Side lobe에서도 Main lobe보다 수신 세기가 약하지만 동일한 GPS 신호의 수신이 가능하다.

이와 같은 GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서는 GPS 가시 위성 수가 현저하게 적어지며 신호 수신 세기 또한 매우 약하다. 그림 2는 GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서 GPS 위성 신호의 가시성을 나타낸 것이다. 수신기의 최소 수신 세기는 약 25 dB-Hz로 하였으며, 이 때 대부분의 시간 동안 4기 이상의 가시위성을 확보하기 위해서는 Main lobe 신호와 Side lobe 신호를 모두 활용해야 함을 알 수 있다. 그림 3은 GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서 수신되는 GPS 신호의 도플러 편이량을 나타낸 것이다. 지상 신호가 약 5 kHz 이하의 도플러 편이량을 나타내는 데 비하여 GEO 환경에서는 약 15 kHz 이하의 도플러 편이가 일어남을 확인할 수 있으며 이러한 사항은 수신기의 신호 획득 및 추적

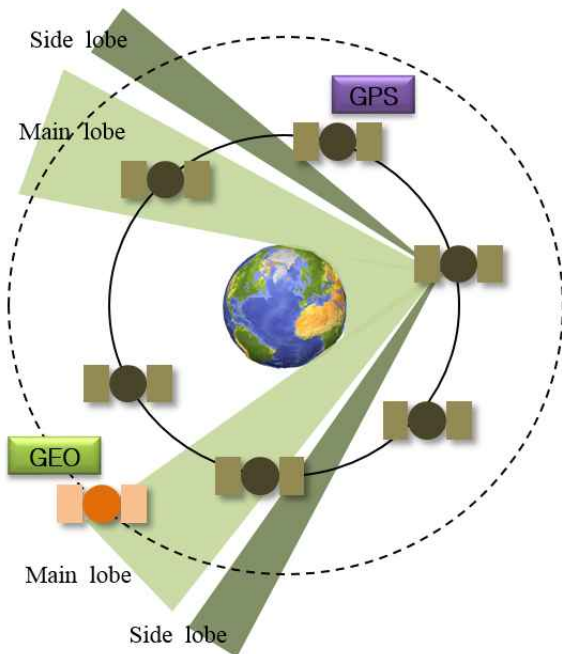


그림 1. GEO 위성에서 수신되는 GPS 신호  
Fig. 1. GPS signals received on GEO satellites.

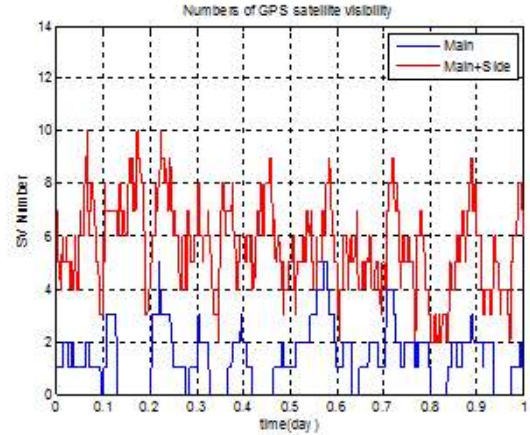


그림 2. GEO 위성 환경에서 GPS 위성 가시성 분석  
Fig. 2. Visibility of GPS signal on GEO satellite.

모듈의 설계에 반영되어야 한다.

미약신호의 획득 및 추적을 위하여 다양한 연구가 수행된 바 있다[1]-[6]. 대부분의 미약신호 처리 알고리즘은 수신기의 적분시간을 늘리는 방법을 사용하고 있다. 한 예로 Nesreen, I. Ziedan은 CCMDB (circular correlation with multiple data bits)와 MDBZP (modified double block zero padding) 알고리즘을 사용하여 신호 획득 및 추적을 수행하고 EKF (extended Kalman filter)를 이용하여 항법 비트의 추정과 항법해 계산을 수행하였다[1].

본 연구에서는 미약 신호 처리 알고리즘을 적용하여 GEO 위성 환경에서 GPS 신호 처리가 가능한 수신 소프트웨어를 개발하였다. 신호 획득과 추적을 위하여 CCMDB 알고리즘을 활용하였고 항법 비트 경계 추정은 후보군 검색을 통해 수행하였다. 또한 신호 추적 모듈에 가중적 단계를 추가함으로써 신호 획득 결과의 오차를 보상하였다.

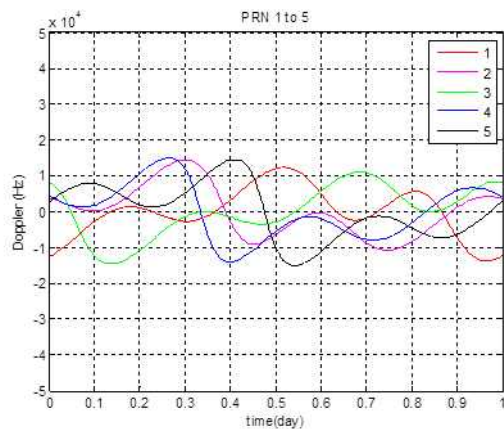


그림 3. GEO 위성 환경에서 GPS 신호의 도플러 편이 분석  
Fig. 3. Doppler shift of GPS signal on GEO satellite.

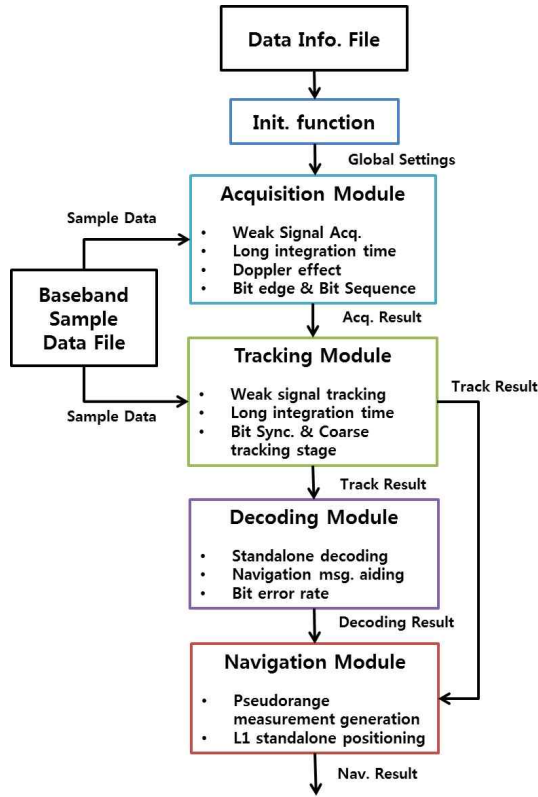


그림 4. 개발된 소프트웨어 GPS 수신기 구조  
 Fig. 4. Structure of developed software GPS receiver.

## II. GEO 위성용 소프트웨어 GPS 수신기 개발

### 2-1 수신기 구성

본 소프트웨어 GPS 수신기는 MATLAB을 이용하여 후처리 구조로 개발되었다. 그림 4는 본 연구로 개발된 소프트웨어 GPS 수신기의 구조를 나타낸 것이다. 입력 데이터로는 기저대역 샘플 데이터 파일 (baseband sample data file)이 사용된다. 해당 파일은 GPS 신호 수신 안테나 혹은 GPS 시뮬레이터 신호 등을 RF 신호 수집 장비 등을 이용하여 수집함으로써 얻을 수 있다. 수집된 데이터 파일의 특성은 수집 장비의 세팅에 따라 달라질 수 있으므로 데이터 정보 파일 (data information file)을 통하여 필요한 정보를 소프트웨어 수신기에 제공한다. 데이터 정보 파일은 데이터 수집 시에 사용된 샘플링 주파수 등 데이터 파일의 처리에 필수적인 정보들을 포함한다.

소프트웨어 GPS 수신기가 구동되면 우선 초기화 함수 (initialization function)가 실행되어 데이터 정보 파일을 읽어 들이고 신호 처리에 필요한 각종 상수 값을 변수에 저장하여 각각의 신호처리 모듈에 제공한다. 초기화 함수 다음으로는 신호 획득 모듈, 신호 추적 모듈, 항법데이터 디코딩 모듈, 항법해 모듈이 차례로 구동되며 최종적으로 항법해 계산 결과를 출력한다.

### 2-2 신호 획득 모듈[1]

신호 획득은 GPS 수신기에서 본격적인 신호처리에 앞서 어떤 위성 신호가 수신되는지, 해당 위성 신호의 코드 위상 지연과 도플러 편이는 어느 정도인지 대략적인 위성 정보를 획득하는 단계이다. 이러한 신호 획득은 GPS C/A 코드의 상관 특성을 이용하여 이루어진다. GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서는 수신되는 GPS 신호의 세기가 약하기 때문에 미약 신호 획득을 위하여 CCMDB 알고리즘을 활용하였다. CCMDB 알고리즘에서는 20 ms의 배수 만큼의 적분 시간을 사용하게 되는데, 본 연구에서는 20 ms의 coherent 적분 시간과 400 ms의 noncoherent 적분 시간을 사용하였다. 이와 같이 긴 적분시간을 사용할 경우 코드의 도플러 편이량에 대한 고려가 필요하다. 도플러 편이량을 보상하기 위하여 코드 복제 신호는 다음과 같이 사용하였다.

$$I_L(t_k, \tau_k, f_d) = C_L \left( [t_k - \tau_k] \left[ 1 + \frac{f_{d_c}}{f_{L_1}} \right] \right) \cos(2\pi [f_{IF} - f_{d_c}] t_k) \quad (1)$$

$$Q_L(t_k, \tau_k, f_d) = C_L \left( [t_k - \tau_k] \left[ 1 + \frac{f_{d_c}}{f_{L_1}} \right] \right) \sin(2\pi [f_{IF} - f_{d_c}] t_k)$$

여기에서  $f_{d_c}$ 는 도플러 편이량 후보값,  $\tau_k$ 는 코드 지연 후보값이다.

이와 같이 긴 적분 시간을 사용하려면 항법 비트 시작점과 항법 비트 시퀀스에 대한 정보를 알아야 한다. 먼저 항법 비트 시작점은 1부터 20까지 연속된 코드 시작점을 20개의 후보로 하여 각각에 대하여 적분된 상관값을 비교하는 방식으로 수행하였다. 다음으로 항법 비트 시퀀스에 대한 추정에는 400 ms 데이터에 대하여 가능한 모든 항법 비트 시퀀스 조합에 대하여 역시 각각의 20 ms coherent 적분값을 곱하여 더함으로써 최종 400 ms 적분값을 구하고 이 값을 비교함으로써 결정하였다. 그림 5는 CCMDB 알고리즘의 구동 단계를 나타낸 것이다.

### 2-3 신호 추적 모듈

신호 추적 모듈은 신호 획득 모듈로부터 전달 받은 각 위성 신호에 대한 대략의 코드 지연값과 도플러 편이 값으로부터 정밀한 코드 지연 값과 도플러 지연 값을 연속적으로 추적해 나가는 기능을 수행한다.

GEO 위성 탑재 GPS 수신기와 같이 미약신호의 추적을 하는 경우 긴 적분시간을 사용하기 때문에 신호 획득 단계에서 남아 있는 도플러 편이량의 오차가 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 신호 추적 모듈의 초반에 신호 획득 오차를 제거하기 위한 전처리 구간이 구현되었다. 도플러 편이량의 신호 획득 오차는 신호 획득 모듈에서 사용한 도플러 검색 간격의 절반값 미만의 값을 갖는다. 본 연구에서 사용한 20 ms의 적분시간을 이용하는 경우 25 Hz의 신호 획득 간격이 사용되므로 최대 신호 획득 오차는 12.5 Hz가 된다. 신호 추적 모듈

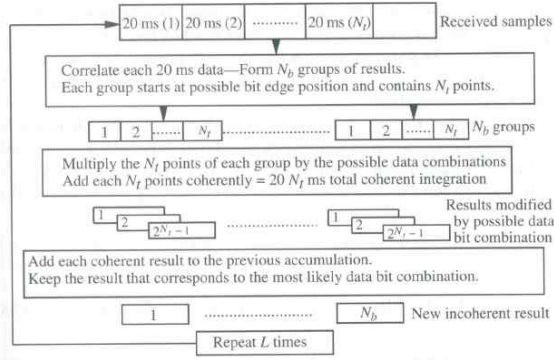


그림 5. CCMDB 알고리즘 구동 단계  
Fig. 5. Operation steps of CCMDB algorithm.

의 전처리 구간에서는 이러한 조건을 활용하여 신호 획득 모듈로부터 전달받은 도플러 편이값으로부터  $-12.5$  Hz부터  $+12.5$  Hz까지의 구간을 1 Hz 간격으로 나누어 각 신호를 총 26개 채널에 할당하여 신호 추적을 수행한다. 그러나 해당 후보들 중 일정 수준 이하로  $C/N_0$ 가 떨어지는 채널은 즉시 제거되며 가장 높은  $C/N_0$ 를 유지하는 하나의 채널을 선택하여 해당 위성 신호의 신호 추적을 지속하게 된다.

전처리 과정을 마친 위성 신호 채널은 일반적인 루프 필터를 이용하여 신호 추적을 수행하게 된다. 그림 6은 신호 추적 모듈의 구조를 나타낸 것이다. 수신기 프로세서 (receiver processor)에는 DLL (delay locked loop), FLL (frequency locked loop), PLL (phase locked loop)이 구현되었다. DLL과 FLL은 2차 루프 필터가 사용되었고 PLL에는 3차 루프 필터가 사용되었다.

### 2-4 항법 데이터 디코딩 모듈

항법 데이터 디코딩 모듈은 GPS ICD (interface control document)를 참조하여 구현되었다. 그러나 GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서는 미약 신호의 처리를 수행하기 때문에 BER (bit error rate)이 일반적인 경우에 비하여 크게 증가한다. 따라서 위성 궤도 정보 등의 데이터는 별도의 데이터 링크를 통해 전송받을 수 있음을 가정하고, 의사거리 생성을 위하여 필요한 수신된 GPS 신호의 서브프레임 시작점은 서브프레임의 반복성을 이용하여 찾아내는 방법을 사용할 수 있다.

### 2-5 항법해 계산 모듈

항법해 계산 모듈은 신호 추적 결과를 이용하여 의사거리와 도플러 추정치를 생성하고 이를 이용하여 항법해를 추정한다. 본 연구에서는 순수한 신호 추적 성능 확인을 위하여 필터 등의 사용 없이 kinematic 항법해만을 출력하도록 하였다.

## III. 시뮬레이션 결과

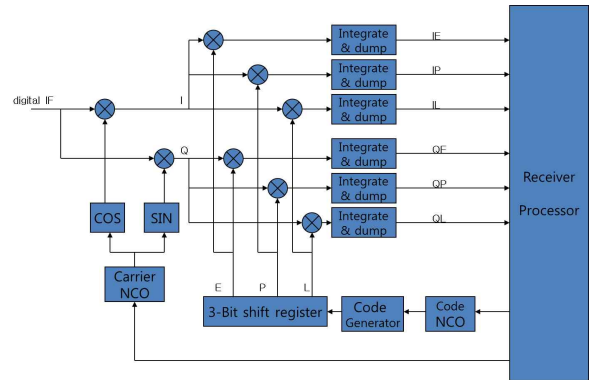


그림 6. 신호 추적 모듈 구조  
Fig. 6. Structure of signal tracking module.

### 3-1 시뮬레이션 세팅

개발된 GEO 위성용 소프트웨어 GPS 수신기를 검증하기 위하여 상용 하드웨어 GPS 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션 테스트를 수행하였다. 그림 7은 시뮬레이션 테스트를 위한 세팅을 나타낸 것이다. Spirent사의 GSS8000 GPS 시뮬레이터가 사용되었으며 NI사의 RF 데이터 수집 장비를 이용하여 기저대역 샘플 데이터 파일을 생성하였다. 생성된 파일은 개발된 소프트웨어 GPS 수신기로 처리하였다. 그림 8은 시뮬레이션 시나리오에서 GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서 수신된 GPS 위성 신호들의 skyplot을 나타낸 것이다. GEO 위성 탑재 GPS 수신기는 궤도 특성 상 지구 반대편에서 방송되는 GPS 신호를 수신 처리하기 때문에 일반적인 경우와 달리 지구 중심 방향을 천정으로 하여 skyplot이 그려졌다. 시뮬레이션 시나리오에서 GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서는 4개의 GPS 위성 신호가 수신되었으며 수신 신호 세기는 PRN 7, 11, 13, 31번에서 각각 24.0, 28.7, 24.6, 27.0 dB-Hz였다.

### 3-2 시뮬레이션 결과

시뮬레이터에서 출력된 4개의 GPS 위성신호에 대하여 신호

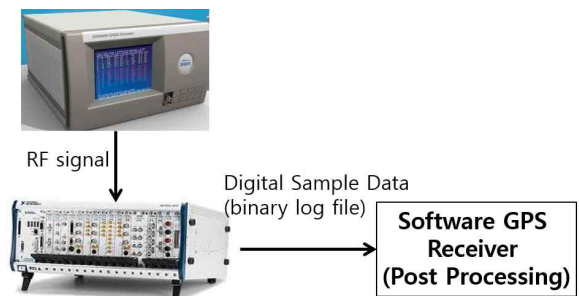


그림 7. 시뮬레이션 세팅  
Fig. 7. Simulation settings.



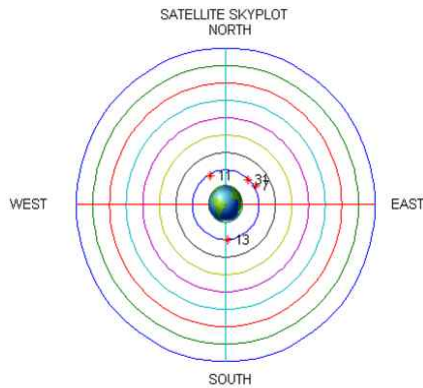


그림 8. 시뮬레이션된 GEO 시나리오에서의 skyplot  
 Fig. 8. Skyplot of simulated GEO scenario.

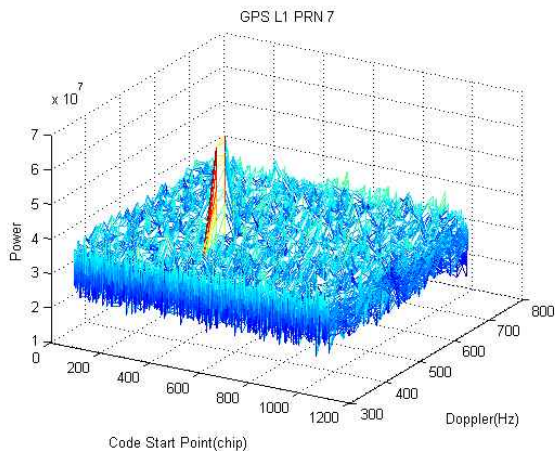


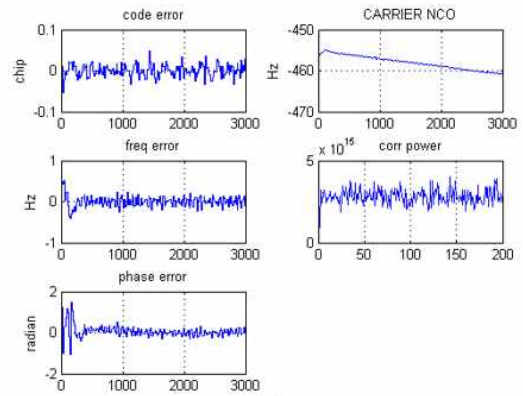
그림 9. GEO 위성 환경에서 GPS 신호 획득 결과  
 Fig. 9. Acquisition results of GPS signal on GEO.

획득이 성공적으로 이루어졌다. 그 중 가장 수신 신호 세기가 약한 PRN 7번 위성 신호에 대한 신호획득 결과를 그림 9에 나타내었다. GEO 환경의 약한 수신 신호 세기에서도 성공적으로 신호 획득이 수행되었음을 확인하였다.

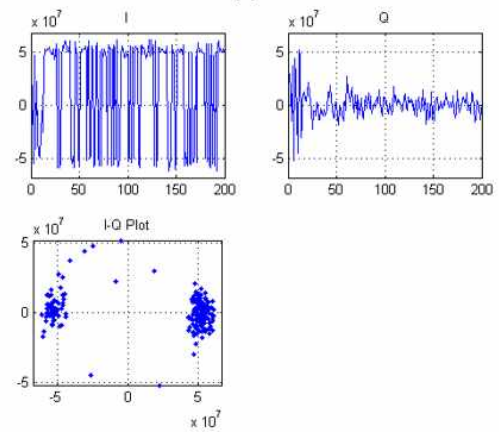
다음으로 신호 획득을 통해 얻은 4개의 GPS 위성신호에 대하여 각각 신호 추적이 이루어졌다. 그림 10은 PRN 7번 위성 신호의 신호추적 결과를 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 코드지연 오차, 주파수 오차, 반송파 위상 오차가 0 근처에서 제어되고 상관 파워( $I^2+Q^2$ )가 유지되고 있는 모습을 나타낸 것이며, 그림 10(b)는 inphase와 quadrature phase 측정치를 각각 나타내고 또한 I/Q plot에서 나타낸 것이다. GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서 수신되는 미약한 GPS 신호에 대해서 신호추적이 정상적으로 이루어짐을 확인할 수 있다.

항법 데이터 디코딩 결과에는 미약신호의 특성 상 비트 에러가 빈번히 나타나는 결과를 얻을 수 있었다. 디코딩 모듈 부분에서 설명했듯이 이 부분은 지상에서 데이터링크를 통해 위성 궤도 정보를 전달받을 수 있다고 가정하였다.

항법해 계산 모듈에서는 신호 추적 모듈에서 얻은 코드 시작



(a)



(b)

그림 10. GEO 위성 환경에서 GPS 신호 추적 결과  
 Fig. 10. Tracking results of GPS signal on GEO.

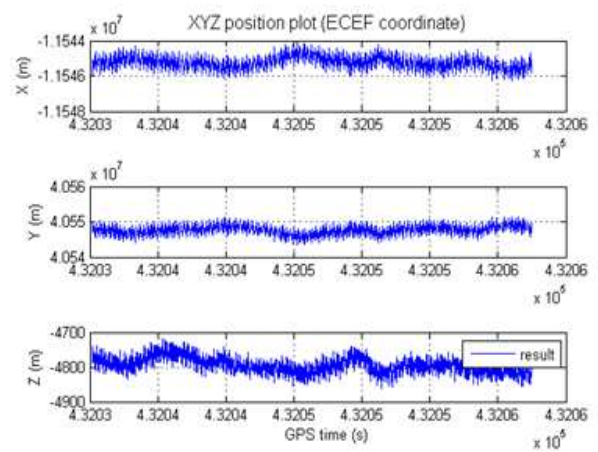


그림 11. GEO 위성 환경에서 위치 계산 결과  
 Fig. 11. Estimated positions of GPS receiver for GEO.

점 정보와 항법 데이터 디코딩 모듈에서 얻은 위성 궤도 정보를 바탕으로 의사거리 측정치와 도플러 측정치를 생성하고 이로부터 위치 및 속도를 계산하였다.

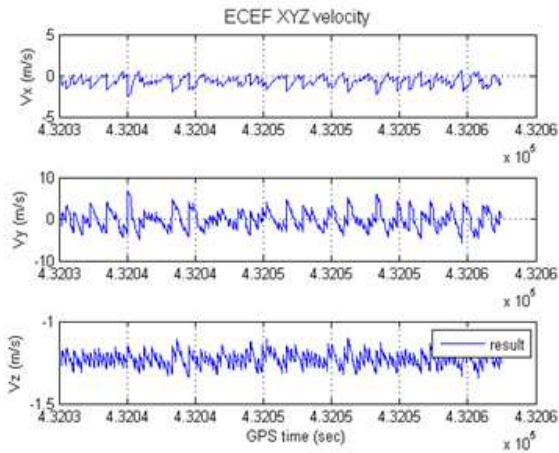


그림 12. GEO 위성 환경에서 속도 계산 결과  
 Fig. 12. Estimated velocities of GPS receiver for GEO.

표 1. GEO 위성 환경에서 항법해 계산 결과  
 Table. 1. Navigation results of GPS receiver for GEO.

위치단위: m, 속도단위: m/s	ECEF 위치 계산 결과			ECEF 속도 계산 결과		
	x	y	z	x	y	z
평균 오차	37.982	-161.204	-2.463	-0.099	0.498	0.019
표준편차	342.4	1290.0	19.2	0.568	2.149	0.040

그림 11와 12는 각각 ECEF (earth centered earth fixed) 좌표계에서 위치와 속도 계산 결과를 나타낸 것이다. 항법해 계산이 성공적으로 이루어짐을 알 수 있으며, 수신기의 신호 추적 모듈에서 적분시간을 길게 사용함에 따라 항법해에 필터링 효과가 나타나는 것 또한 확인할 수 있다. 위치 및 속도 계산 결과 수치를 표 1에 정리하였다. 계산된 수치를 살펴보면 평균 3축 위치 오차와 표준편차가 각각 165.636 m와 1334.8 m로 계산되었으며 평균 3축 속도 오차와 표준편차는 각각 0.5081 m/s와 2.2232 m/s로 계산되었다. 지상 사용자 기준으로 생각하면 매우 큰 위치 오차로 생각될 수 있으나, 이는 GEO 위성 탑재 GPS 수신기의 환경 특성 상 기하학적인 상태가 좋지 않아서 생기는 자연스러운 결과이다.

IV. 결론

본 연구에서는 GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서 수신되는 GPS 신호에 대하여 분석하고 이에 따라 GEO 위성 탑재 환경에서 사용 가능한 소프트웨어 GPS 수신기를 개발하였다. 미약한 GPS 신호를 수신 처리하기 위하여 CCMDB 알고리즘을 활용한 신호 획득 및 추적 모듈을 구현하였다. 개발된 소프트웨어를 이용하여 상용 시뮬레이터 신호를 처리한 결과 성공적으로 신호 획득 및 추적이 이루어지고 항법해 계산 결과를 확인할 수

있었다. 항법해 계산 결과 평균 3축 위치 오차와 표준편차가 각각 165.636 m와 1334.8 m로 계산되었으며 평균 3축 속도 오차와 표준편차는 각각 0.5081 m/s와 2.2232 m/s로 계산되었다.

본 연구는 미약신호 수신 처리 기법을 GEO 위성 탑재 GPS 수신기에서의 GPS 신호 처리에 적용하여 초기 결과를 확인한 것으로, 상용 시뮬레이터로 생성한 데이터를 처리한 결과 의사 거리 측정치 생성과 항법해 계산이 가능함을 확인하였다. 실제 GEO 탑재 항법 모듈에서는 GPS 수신기의 출력에만 의지하지 않고 궤도 모델을 적용한 필터를 사용하게 되며 GPS 수신기의 측정치나 항법 결과는 필터의 측정치로 활용되는 것이 바람직하다. 향후 GEO 위성에서 실제 탑재하여 활용할 수 있는 항법 모듈과 GPS 수신기를 개발하기 위해서는 본 연구 결과를 기반으로 추가적인 연구개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소를 통하여 계약된 해양수산부 소관 연구개발사업 "광역보정시스템(WA-DGNSS) 구축 기술개발"의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

This research was supported by a grant from "Development of Wide Area Differential GNSS" which is funded by Ministry of Maritime Affairs of Korean government, contracted through SNU-IAMD at Seoul National University.

참고문헌

- [1] N. I. Ziedan, *GNSS Receivers for Weak Signals*, Boston, MA: Artech House, 2006.
- [2] D. M. Lin, and J. B. Y. Tsui, "An efficient weak signal acquisition algorithm for a software GPS receiver," in *Proceeding of ION GPS*, Salt Lake City: UT, pp. 115-119, 2001.
- [3] D. M. Lin, and J. B. Y. Tsui, "A software GPS receiver for weak signals," in *Proceeding of IEEE MTT-S Digest*, Phoenix: AZ, pp. 2139-2142, 2001.
- [4] M. L. Psiaki, "Block Acquisition of weak GPS signals in a software receiver," in *Proceeding of ION GPS*, Salt Lake City: UT, pp. 2838-2850, 2001.
- [5] D. M. Akos, et al., "Low power global navigation satellite system (GNSS) signal detection and processing," in *Proceeding of ION GPS*, Salt Lake City: UT, pp. 784-791, 2000.
- [6] M. L. Psiaki and H. Jung, "Extended Kalman filter methods for tracking weak GPS signals," in *Proceeding of ION GPS*,

Portland: OR, pp. 2539-2553, 2002.



**김 종 원 (Chong-won Kim)**

2010년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)  
2010년 2월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 박사과정  
※ 관심분야 : GNSS 수신기, vector tracking, 실내 항법, 의사위성



**김 강 호 (Ghang-ho Kim)**

2006년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)  
2006년 8월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 박사과정  
※ 관심분야 : 궤도결정 알고리즘



**기 창 돈 (Chang-don Kee)**

1994년 1월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학 (공학박사)  
2006년 10월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수  
※ 관심분야 : 위성항법시스템(GPS), 실시간 보정위성항법시스템 (DGPS design, Implementation, Error analysis), 실시간 광역보정위성항법시스템 (WADGPS design), 센티미터급 실시간 초정밀위치결정시스템 (CDGPS), 항공기/우주비행체 자세결정 (Attitude determination using GPS), 무인항공기 자동제어 시스템, 항공기 자동착륙 유도제어시스템, 차량항법시스템 (Car Navigation System), 실내용 자동항법시스템(Indoor Navigation System), 위성체 위치결정시스템, 항공교통관제시스템 (Air traffic Management), Avionics