

# 발사체 시나리오에서 PLL 루프필터의 대역폭에 따른 GPS 수신기의 성능 분석

문지현\*, 권병문\*\*, 신용설\*\*\*, 최형돈\*\*\*\*

## Performance Analysis of the GPS Receiver according to the Bandwidths of a PLL Loop Filter in a Launch Vehicle Simulation

Ji-Hyeon Moon\*, Bung-Moon Kwon\*\*, Yong-Sul Shin\*\*\*, Hyung-Don Choi\*\*\*\*

### Abstract

This paper describes the analysis of the tracking and navigation performance of a GPS receiver in a launch vehicle simulation when the carrier tracking loop is designed as a 3rd order phase-locked loop with variable bandwidths. There are differences of tracking and navigation performance according to the variable bandwidths under the dynamics condition. When the bandwidth is set to narrow, the GPS receiver could not track the satellite signals so that the navigation information could not be calculated.

### 초 록

본 논문에서는 GPS 수신기의 반송파 추적루프를 3차 PLL로 구성하고 대역폭을 변화시켰을 때 발사체 시나리오를 이용한 시뮬레이션에서 GPS 수신기의 추적 및 항법성능을 분석한다. 시험에 사용된 GPS 수신기는 발사체가 가지는 동특성으로 인해 3차 PLL로 구성된 추적루프의 대역폭에 따라 추적 및 항법성능에 차이가 나타났으며, 특히 대역폭이 좁게 설정된 경우에는 신호추적을 놓쳐 항법 계산을 하지 못하는 경우도 발생하였다.

키워드 : 위성항법시스템(global navigation satellite system), 지피에스 수신기(GPS receiver), 반송파 추적루프(carrier tracking loop), 위상고정루프(phase-locked loop), 발사체(launch vehicle)

### 1. 서 론

위성발사체에 탑재되는 모든 전자장비들은 극한 발사 환경 및 비행 동특성 환경에서 안정적으로 동작하도록 하드웨어 및 소프트웨어가 적절하

게 설계되고 제작되어야 한다. 특히 엔진 연소 시작 및 종료 단계에서 발생하는 물리적인 진동 및 충격 뿐 아니라 초고속, 고가속, 고저크와 같은 비행 동특성 환경은 GPS 수신기의 신호 추적 성능과 직결되는 조건이므로 GPS 수신기의 신호

접수일(2013년 5월 3일), 수정일(1차 : 2013년 6월 13일, 게재 확정일 : 2013년 7월 1일)

\* 발사체제어팀/mjhdust@kari.re.kr

\*\*\* 발사체제어팀/bmkwon@kari.re.kr

\*\*\* 발사체제어팀/newys99@kari.re.kr

\*\*\*\* 발사체제어팀/hdchoi@kari.re.kr

추적루프는 발사 운용 및 비행 구간에서 GPS 수신기가 안정적으로 동작할 수 있도록 강건하게 설계되어야 한다.

GPS 수신기의 신호추적루프는 위성신호의 반송파를 추적하기 위한 반송파 추적루프와 코드를 추적하기 위한 코드 추적루프로 나뉘며, 위치 계산을 위한 Pseudorange와 속도 계산을 위한 Delta-Pseudorange가 각각의 추적루프를 통해 생성된다[1]. 코드 추적루프는 반송파 추적루프보다 낮은 주파수의 신호를 다루므로 외란이 발생하여도 덜 민감하게 동작한다. 따라서 반송파 추적루프를 적절하게 설계하여 반송파 추적성능을 확보하면 코드 추적루프는 반송파 Aiding을 통해 루프필터의 차수나 대역폭을 줄이고 추적 문턱값을 높여 측정치 잡음을 줄일 수 있다[1]. 반송파 추적루프는 PLL(Phase-Locked Loop), FLL(Frequency-Locked Loop), FLL-assisted-PLL 등의 종류에 따라 동적성능 및 항법성능이 달라지고, 루프필터의 차수에 따라 속도, 가속도, 저크에 대한 민감성이 달라지므로 사용자의 요구조건에 맞는 추적루프의 적절한 설계가 필요하다. GPS 수신기를 발사체용으로 사용하는 경우에는 연소 시작 및 종료 시점에 가속도의 증가 및 감소를 위한 상당한 수준의 저크가 발생하므로 최소한 3차 PLL, 2차 FLL 등으로 구성되거나 새로운 추적루프의 설계가 이루어져야 정해진 규격의 항법성능을 만족할 수 있다. 이에 따라 GPS 수신기의 반송파 추적루프를 2차 FLL, 3차 PLL 및 2차 FLL-assisted-3차 PLL 등으로 구성하고 대역폭을 변화시키면서 다양한 성능 분석을 수행하고 있다. 참고문헌 [2] ~ [4]에서는 진동 환경에서 2차 FLL, 3차 PLL, 2차 FLL-assisted-3차 PLL 루프필터의 대역폭에 따른 GPS 수신기의 성능 비교가 수행되었으며, 참고문헌 [5]에서는 발사체 시나리오에서 2차 FLL 루프필터의 대역폭에 따른 성능 분석을 수행하였다.

본 논문에서는 2차 FLL 루프필터와 유사하게 속도와 가속도에는 강인하나 저크에 민감한 추적 특성을 가지고 FLL보다 정확한 측정치를 생성하는 3차 PLL로 추적루프를 구성하였을 때 발사체가 가지는 동특성 조건에서 루프필터의 대역폭에

따른 GPS 수신기의 동작을 확인하기 위해 발사체 시나리오를 이용한 시뮬레이션을 수행하고, 대역폭에 따른 GPS 수신기의 추적 및 항법성능 비교를 수행한다. 참고문헌 [1]에 주어진 바와 같이 PLL 추적루프의 위상 오차를 발생시키는 주요인으로 동특성 조건과 열잡음을 들 수 있으며, 동특성에 의한 위상 오차는 루프필터의 대역폭이 좁을수록 열잡음에 의한 위상 오차는 대역폭이 클수록 커지는 특징을 가진다. 따라서 동적 요구 조건 및 항법성능 요구조건을 맞출 수 있는 적절한 수준의 대역폭의 선정이 필요하며 이를 위하여 다양한 대역폭에 따른 위상 오차 분석, 시험 및 검증이 수행되어야 한다. 본 논문에서는 루프필터의 대역폭에 따른 GPS 수신기의 최종 성능을 분석하여 동특성에 의해 발생한 위상 오차가 GPS 수신기의 추적 및 항법성능에 어떤 영향을 주는지 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 사용된 발사체 시나리오 및 시험 구성에 대하여 설명하고, 3장에서는 발사체 시나리오의 동특성 조건에서 PLL 루프필터의 각 대역폭에 따른 GPS 수신기의 성능 분석 결과를 기술한다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

## 2. 발사체 시나리오 및 시험 구성

본 논문에서 PLL 루프필터의 성능 분석에 사용된 발사체 시나리오는 나로호(KSLV-I)의 CDR (Critical Design Review) 단계에서 제시된 임무 궤적을 기반으로 작성되었다. GPS 수신기에 공급되는 항법 위성신호는 Spirent 사의 GPS 시뮬레이터를 이용하여 생성되었으며, 임무 궤적은 GPS 시뮬레이터의 입력 형식으로 변환되어 사용되었다[6]. 실제 발사 운용과 유사하게 GPS 수신기의 안정적인 초기 운용을 위하여 비행 시나리오가 시작되기 전 15분(900초)의 정적 구간을 설정하였다. 사용된 발사체 시나리오는 그림 1과 같이 1차 가속 구간과 2차 가속 구간으로 구분할 수 있다. 1차 가속 구간에서는 약 4.6km/sec의 속도가 발생하며, 가속도는 4g, 1단 엔진 종료 시

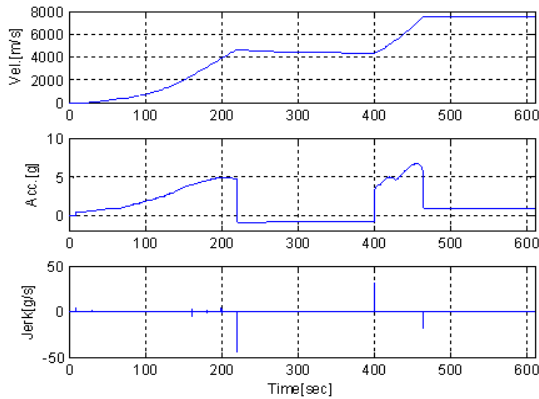


그림 1. 발사체 시나리오

표 1. PLL 루프필터에 적용된 대역폭

Marker	×	○	△	+	□	*
대역폭(Hz)	2	4	8	12	18	20

저크가  $-44\text{g}/\text{sec}$ 로 매우 크게 발생한다. 2차 가속 구간에서는 속도가 약  $7.5\text{km}/\text{sec}$  수준까지 증가하며 이 때 발생하는 가속도는  $6.75\text{g}$  수준이다. 2차 가속 구간의 시작 및 종료 시에는 각각  $31\text{g}/\text{sec}$ ,  $-18.5\text{g}/\text{sec}$ 의 수준으로 상당히 큰 저크가 발생한다. 이와 같은 발사체 시나리오에서 저크에 민감한 특성을 가지는 3차 PLL 루프필터의 대역폭에 따른 성능 분석을 위하여 1차 및 2차 가속 구간에서의 상세 분석이 수행된다.

3차 PLL 루프필터의 대역폭은  $2\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$ 의 범위 내에서 표 1과 같이 6가지 종류로 선정하였다. 시험에 사용된 GPS 수신기는 나로호의 비행 시험에 사용된 GPS 수신기와 하드웨어는 동일하고 반송파 추적루프를 구성하는 루프필터만 다르게 설계된 제품이다.

### 3. 결과 분석

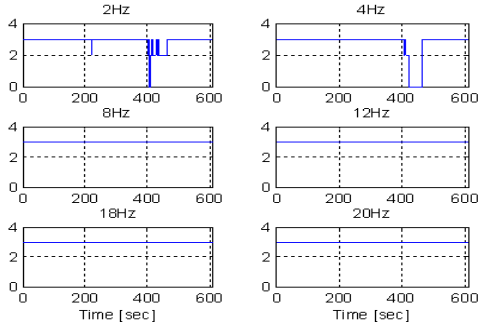
3차 PLL 루프필터의 대역폭에 따른 성능 비교는 그림 1에 제시된 발사체의 운용 구간에 대하여 1차 및 2차 가속 구간으로 구분하여 수행하였다. 가속 구간의 시작 및 종료 시점에서는 엔진 연소 시작 및 종료에 따른 가속도의 급상승 및

급강하가 발생하여 GPS 수신기의 성능에 큰 영향을 미치고 있으므로 가속 구간의 시작 및 종료 시점에 대한 상세한 분석도 기술된다. 표 2에 제시된 대역폭에 따른 GPS 수신기의 항법성능은 발사 10초 전부터 시나리오 종료 시까지 3D Fix로 출력된 항법정보에 대하여 계산되었다. 상세 분석에서 제시된 항법성능은 고도오차와 속도오차로 표시되어 기술되며, 결과 분석에서 항법오차 결과 그래프의 대역폭에 따른 구분은 표 1과 같이 서로 다른 마커로 표시하였다.

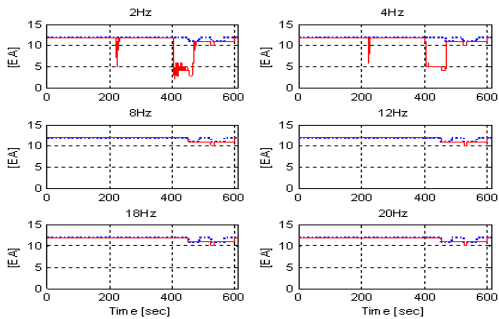
본 논문에서는 대역폭에 따른 루프필터의 위상 오차가 아닌 GPS 수신기의 최종적인 추적성능과 항법성능을 분석하였으므로 대역폭 증감에 따른 정량적인 위상 오차의 변화를 정확하게 확인할 수는 없다. 그러나 반송파 추적루프의 성능에 의해 크게 좌우되는 GPS 수신기의 추적성능은 설정된 대역폭에 따라 차이를 확인할 수 있으며, 반송파 루프필터의 결과로부터 생성되는 Delta-Pseudorange는 속도 계산에 직접 사용되므로 대역폭에 따른 속도오차의 영향을 확인할 수 있다. 한편 사용자의 위치는 코드 추적루프로부터 생성되는 Pseudorange를 이용해 계산하므로 GPS 수신기의 위치오차는 주로 코드 추적루프의 동작에 의해 좌우된다. 그러나 사용된 GPS 수신기의 코드 추적루프가 Carrier-aided 루프이므로 사용된 GPS 수신기에서 계산된 위치오차는 반송파 추적루프의 영향을 받게 되므로 분석 시 유의하여야 한다.

#### 3.1 전 구간 동작 결과

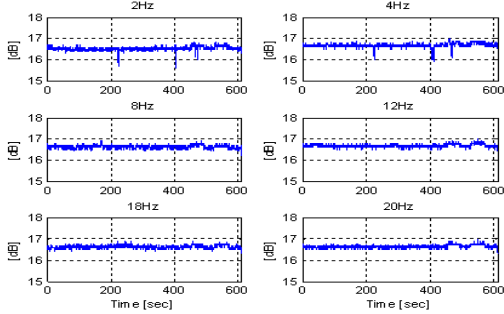
3차 PLL 루프필터의 대역폭에 따른 시험 전체 구간의 동작은 그림 2와 같다. 그림 2의 (a)와 같이 가속 구간의 영향으로 대역폭이  $2\text{Hz}$  및  $4\text{Hz}$ 로 설정되었을 때 3D Fix를 놓치는 구간이 발생하였으며, 해당 구간에서 항법정보 계산에 사용된 위성의 개수가 최소 2개 또는 4개까지 감소하였다. 그림 2의 (c)는 29번 위성에 대한 신호대잡음비를 나타내고 있으며 3D Fix를 놓치는 구간이 발생하였던  $2\text{Hz}$  및  $4\text{Hz}$  대역폭의 추적루프에서 신호대잡음비가  $1\text{dB}$  정도 강하하였다. 그림



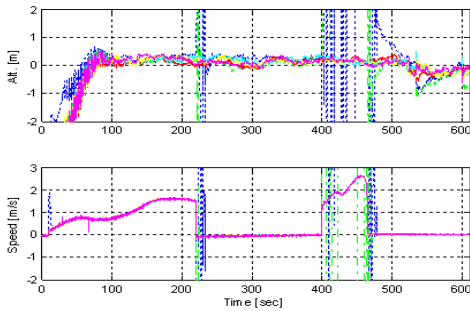
(a) Fix 모드



(b) 항법위성 개수(점선:가시위성, 실선:항법위성)

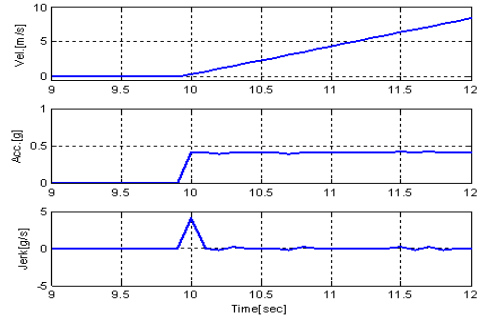


(c) 신호대잡음비(PRN 29)

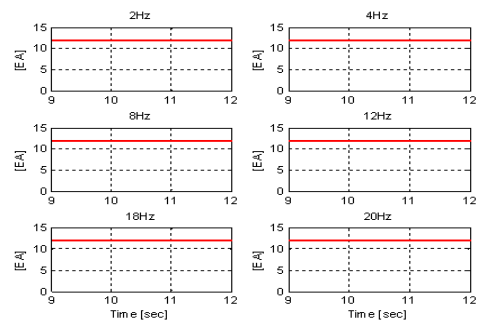


(d) 항법오차

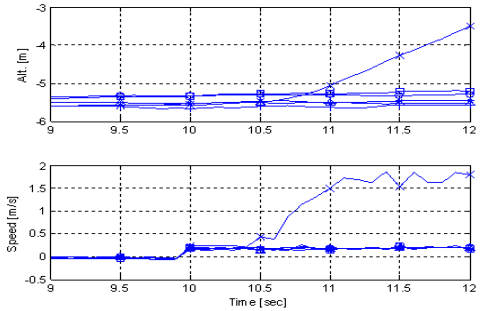
그림 2. 전 구간에서 GPS 수신기의 성능



(a) 동적 조건



(b) 항법위성 개수(점선:가시위성, 실선:항법위성)



(c) 항법오차

그림 3. 1차 가속 시작 시 GPS 수신기의 성능

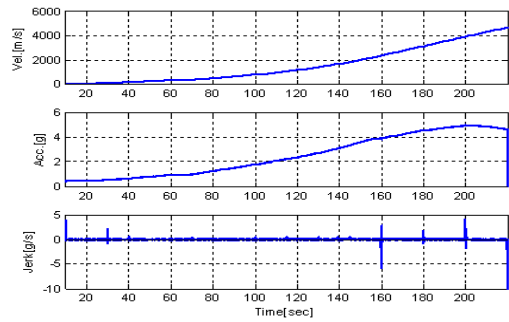
표 2. 대역폭에 따른 RMS 항법오차

대역폭(Hz)	2	4	8	12	18	20
Px[m]	5.95	4.65	0.35	0.33	0.32	0.35
Py[m]	5.54	2.55	1.12	1.21	1.09	1.12
Pz[m]	7.44	7.09	0.50	0.49	0.48	0.50
Speed[m/s]	8.2	6.74	0.94	0.94	0.94	0.94

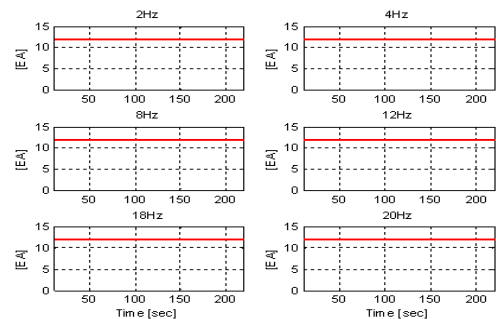
2의 (d)는 고도오차 및 속도오차를 나타내고 있다. 루프필터의 대역폭이 2Hz 및 4Hz인 경우 신호추적을 놓쳐 항법오차가 계산을 수행하지 못하는 구간이 발생하였고, 항법이 정상적으로 수행되는 구간에서도 8Hz 이상으로 설정된 루프필터보다 항법오차가 크을 알 수 있다. 전 구간에 대하여 3D Fix로 계산된 항법해의 RMS(Root Mean Square) 오차는 표 2와 같다. 대역폭이 2Hz 및 4Hz로 설정된 경우에 3D Fix를 놓친 구간은 계산에서 제외되었어도 대역폭이 8Hz 이상인 경우보다 현저하게 큰 항법오차를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 3차 PLL 반송과 추적루프의 대역폭이 작은 경우 사용된 발사체 시나리오의 동특성 조건에서 정상적으로 동작하지 않음을 확인할 수 있다. 대역폭에 따른 추적 및 항법성능의 상세 비교는 1차 및 2차 가속 구간으로 나누어 다음 절에서 기술한다.

### 3.2 1차 가속 구간

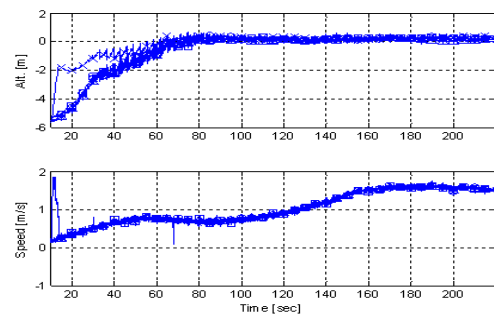
1차 가속 구간의 시작점은 1단 연소 시작 시점으로 발생한 가속도 및 저크는 그림 3의 (a)와 같이 각각 0.4g 및 4g/sec 수준이며, PLL 루프필터의 동작 결과는 그림 3과 같다. 그림 3의 (b)와 같이 전 대역폭에 대하여 항법위성의 개수는 변하지 않았으나 그림 3의 (c)에서와 같이 대역폭이 2Hz인 경우에는 다른 대역폭과 달리 저크의 영향으로 항법해가 다른 양상으로 변하고 있음을 확인할 수 있다. 4Hz 이상의 5개 대역폭에 대한 고도오차는 저크가 발생하여도 비슷한 수준을 유지하고 있으나 2Hz인 경우는 나머지 경우와 다르게 오차가 작아지는 방향으로 변하고 있다. -0.08m/sec ~ -0.03m/sec 수준을 유지하던 속도 오차는 저크 발생에 의하여 모든 대역폭에서 0.15m/sec ~ 0.2m/sec 수준으로 증가하였으며, 대역폭이 2Hz로 설정된 경우에는 속도오차가 최대 1.87m/sec까지 증가하였다. 1차 가속 구간이 시작되기 전 양각 0도 근처의 항법위성이 1개 추가되어 낮은 양각을 갖는 항법위성으로 인한 항법 오차가 발생하였으며, 1차 가속 시작점은 추가된 항법위성에 의해 증가한 항법오차가 수렴하



(a) 동적 조건



(b) 항법위성 개수(점선:가시위성, 실선:항법위성)



(c) 항법오차

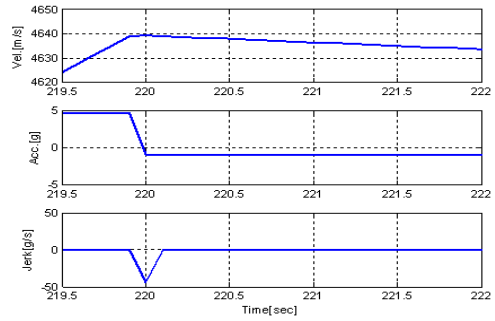
그림 4. 1차 가속 구간에서 GPS 수신기의 성능

는 도중의 시점으로 항법위성이 추가된 영향과 저크에 의한 영향이 동시에 나타나고 있다. 따라서 대역폭이 2Hz일 때 고도오차가 작아지는 현상은 대역폭이 작기 때문이라고 판단하기에는 어려움이 있다.

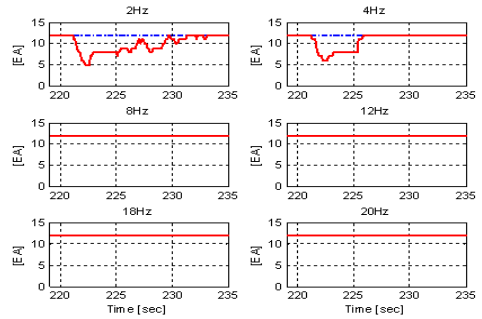
1차 가속 구간의 가속도는 그림 4의 (a)와 같이 0 → 5g로 증가하고 있으며, 저크는 해당 구간에서 0.2g/sec의 저크가 계속적으로 발생하는 가운데 -1g/sec, 2g/sec, 4g/sec, -6g/sec 등과 같

이 다소 큰 수준의 저크가 간헐적으로 발생한다. 그림 4의 (b)와 같이 1차 가속 유지 구간에서는 추적하던 위성을 모두 안정적으로 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. 가속 시작 전 항법위성이 추가된 영향으로 항법해의 수렴 구간이 그림 4의 (c)와 같이 80초 정도까지 지속되고 있으므로 반송파 추적루프의 대역폭에 의한 항법오차의 영향을 판단하기는 쉽지 않다. 수렴이 완료된 이후 구간에서는 루프필터의 대역폭에 따른 위치 및 속도 오차에 큰 차이가 없다.

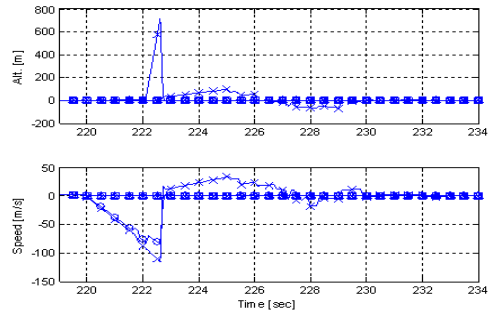
1차 가속 구간 종료 시는 1단 연소가 종료되어 그림 5의 (a)와 같이 증속이 감속으로 전환되는 시점으로  $-44g/sec$ 의 매우 큰 저크가 발생한다. 이 때 GPS 수신기의 추적성능은 그림 5의 (b)와 같다. 대역폭이 2Hz인 경우 저크 발생에 의해 항법해가 점차 증가하다가 기존에 추적하고 있던 위성의 추적을 최대 6개까지 놓치고 3D Fix가 2D Fix로 떨어지는 지점도 발생하였다. 고도오차는 2D Fix로 계산된 지점을 제외하고도 30m까지 증가하였으며 속도오차는  $-91.6m/sec$ 까지 증가하였다. 3D Fix 상태를 회복한 후에도 약 233초까지 추적이 불안정하여 항법위성이 정상적이지 않고 항법오차가 다소 크게 유지되고 있는 것을 볼 수 있다. 대역폭이 4Hz인 경우에는 기존 항법위성을 최대 5개까지 놓쳤으나 3D Fix 상태는 유지하였으며, 고도오차는 약 30m까지 증가하고 속도오차는  $-83.14m/sec$ 까지 증가하였다. 대역폭이 2Hz인 경우와 마찬가지로 저크가 사라진 이후에도 추적이 안정화될 때까지 항법오차가 크게 유지되고 있음을 볼 수 있다. 루프필터의 대역폭이 2Hz 및 4Hz로 설정된 경우에는 반송파 추적루프의 추적성능이 저하되어 항법위성을 순차적으로 놓치면서 위치오차 및 속도오차가 증가하고 있으며, 이는 반송파 추적루프에서 저크에 의해 발생한 위상 오차가 코드 추적루프에 영향을 주어 위치 오차가 증가한 경우이다. 반송파 추적루프의 추적성능이 안정적인 8Hz 이상의 대역폭에서는 고도오차가 그림 5의 (d)와 같이 모두  $\pm 0.5m$  이내로 유지되고 있다. 저크 발생 시 속도오차는 대역폭이 8Hz인 경우에 최대  $-0.223m/sec$  수준으로 발생하였고 8Hz 이상인



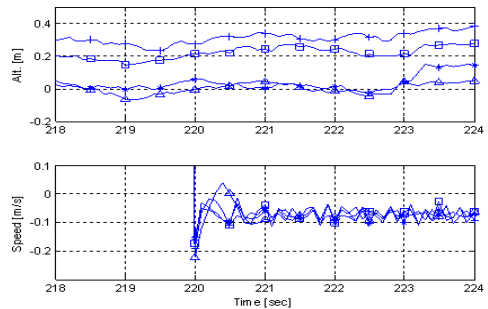
(a) 동적 조건



(b) 항법위성 개수(점선:가시위성, 실선:항법위성)

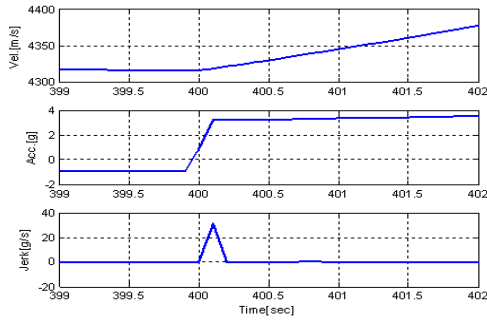


(c) 항법오차

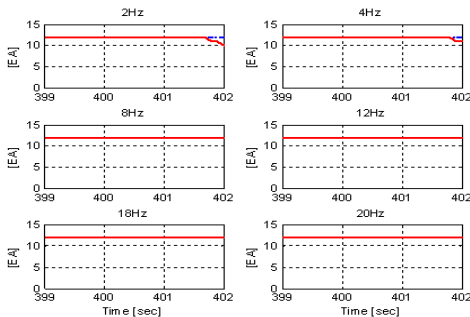


(d) 항법오차(확대)

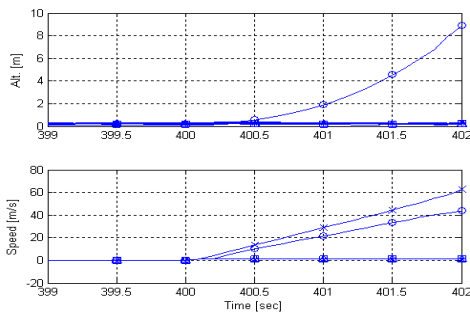
그림 5. 1차 가속 종료 시 GPS 수신기의 성능



(a) 동적 조건



(b) 항법위성 개수(점선:가시위성, 실선:항법위성)



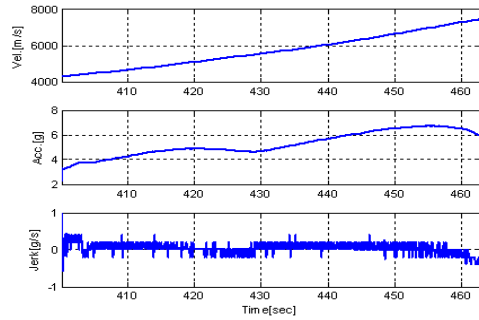
(c) 항법오차

그림 6. 2차 가속 시작 시 GPS 수신기의 성능

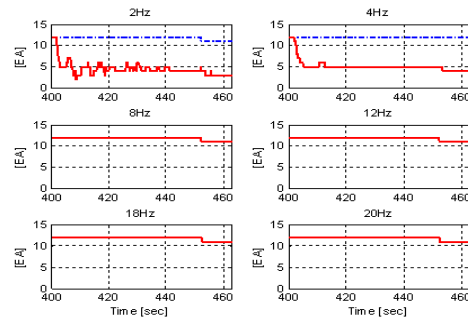
경우에는 대역폭이 클수록 속도오차의 변화폭이 작아졌다. 저크의 영향으로 증가한 속도오차가 바로 정상 상태로 수렴하였으며, 수렴된 이후에는 대역폭에 따른 속도오차의 차이가 크지 않다.

### 3.3 2차 가속 구간

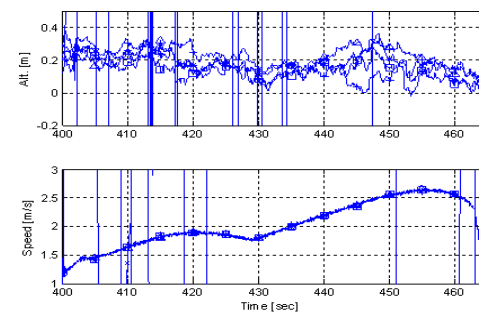
2단 연소 시작과 함께 시작되는 2차 가속 구간은 그림 6의 (a)와 같이 약 31g/sec의 수준의



(a) 동적 조건



(b) 항법위성 개수(점선:가시위성, 실선:항법위성)



(d) 항법오차

그림 7. 2차 가속 구간에서 GPS 수신기의 성능

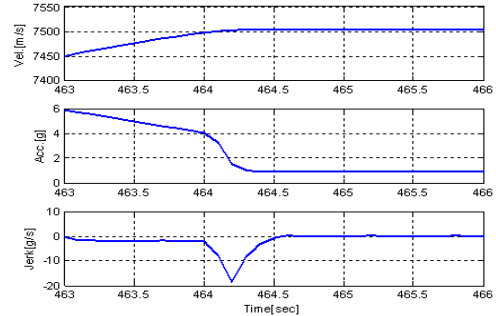
저크가 발생하여 가속도가 약 3.2g 정도 상승하였으며, 이후 유지 구간에서도 계속적으로 가속도가 상승하여 6.75g 수준까지 증가한다. 대역폭이 2Hz로 설정된 경우 반송파 추적루프가 저크 발생에 의한 가속도 변화를 정상적으로 추적하지 못함으로써 항법오차가 크게 증가하고 있는 것을 볼 수 있으며, 항법오차가 계속 증가하다가 402초가 되기 직전 항법위성의 개수가 떨어지기 시작하고 3D Fix 상태를 놓치게 된다. 대역폭이

4Hz인 경우도 2Hz인 경우보다 항법오차가 다소 작은 수준에서 오차가 증가하고 있으며, 이후 3D Fix 상태를 놓치게 된다. 대역폭이 8Hz 이상인 경우의 추적 상태는 매우 양호하며, 고도오차는 0.5m 이내로 안정적으로 계산되고 있는 것을 볼 수 있다. 가속 시작 시 발생한 저크에 의해 속도 오차가 증가하고 있으며, 대역폭이 8Hz일 때 속도오차는 약 1.34m/sec까지 증가하고 대역폭이 8Hz 이상인 경우에는 대역폭이 클수록 속도오차가 상대적으로 작게 발생하였다.

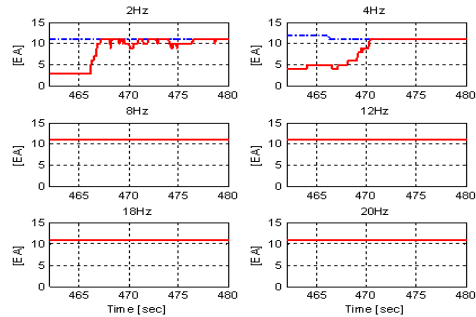
지속적인 저크가 발생하여 가속도가 점진적으로 증가하는 2차 가속 유지 구간에서 GPS 수신기의 동작은 그림 7과 같다. 대역폭이 2Hz 및 4Hz인 경우 2차 가속 시작 시점에서의 동특성 변화를 적절하게 추적하지 못한 상태에서 지속적으로 가속도가 변화하므로 신호추적이 안정적으로 수행되지 않는다. 이에 따라 위성신호 추적을 놓치기 시작하여 항법위성이 최소 2개 및 4개까지 감소하며 항법을 수행할 수 없는 구간이 발생하였고, 이러한 결과는 2차 가속구간이 종료될 때까지 지속되고 있다. 대역폭이 8Hz 이상인 경우에는 안정적으로 추적을 수행하고 있으며, 고도오차도  $\pm 0.5m$  이내의 성능을 나타내고 있다. 8Hz 이상의 대역폭에 대한 속도오차는 대역폭에 따른 큰 차이 없이 가속도의 변화 양상과 유사한 형태로 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이는 3차 PLL 추적루프가 저크 발생에 의한 가속도의 변화를 실시간으로 추적하지 못하여 가속도의 변화와 유사한 형태로 오차가 발생되기 때문이다.

2차 가속 종료 시점에서는 최대  $-18.5g/sec$ 의 저크가 발생하여  $6.75g$  수준까지 증가하였던 가속도가  $0.9g$  수준으로 감소한다. 대역폭이 2Hz 및 4Hz인 경우 2차 가속 시작 이후 구간에서 신호 추적이 정상적으로 수행되지 않았으나 2차 가속 종료 구간에서의 저크 발생 이후 약 24초 및 7초 동안 불안한 추적이 유지되다가 정상화됨을 볼 수 있다. 8Hz 이상으로 설정된 경우에 추적 성능은 매우 안정적으로 해당 가시위성을 모두 추적하고 있으며 고도오차는  $\pm 0.5m$  이내의 정상적인 성능을 나타내고 있다. 속도는 저크 발생 시 오차가 증가하며 대역폭이 넓을수록 오차의

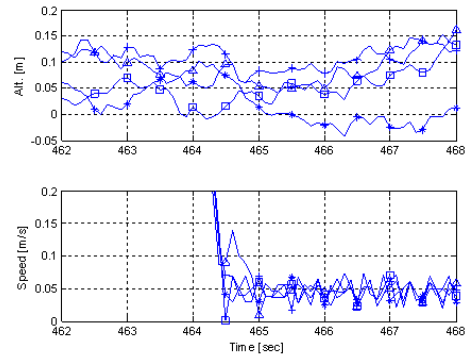
변화폭이 작은 것을 확인할 수 있다.



(a) 동적 조건



(b) 항법위성 개수(점선:가시위성, 실선:항법위성)



(d) 항법오차

그림 8. 2차 가속 종료 시 GPS 수신기의 성능

## 4. 결 론

본 논문에서는 GPS 수신기의 반송파 추적루프를 3차 PLL로 구성하고 대역폭을 변화시켰을 때 대역폭에 따른 GPS 수신기의 추적 및 항법성능



을 분석하였다.

발사체 시나리오에서 3차 PLL로 구성된 GPS 수신기의 추적성능은 설정된 루프필터 대역폭에 따라 큰 차이를 보였다. 대역폭이 2Hz 및 4Hz로 설정된 경우에는 가속 시작 및 종료 구간에서 발생하는 저크에 의해 추적이 불안해지는 현상이 발생하였으며, 저크의 크기가 클수록 그러한 현상이 심화되었다. 큰 저크가 발생한 후 지속적으로 가속도가 변화하는 구간에서는 다수개의 위성 신호 추적을 놓치고 회복되지 못하다가 가속도가 감소하는 구간에서의 저크 발생으로 가속도가 0에 가까운 값이 되었을 때 비로소 추적이 회복되었다. 한편 루프필터 대역폭이 8Hz 이상으로 설정된 경우에는 발사체 시나리오에서 위성 추적을 놓치는 현상은 발생하지 않았다.

GPS 수신기의 항법성능은 위치오차와 속도오차로 구분하여 설명할 수 있다. 속도해를 계산하는 Delta-Pseudorange는 반송파 추적루프로부터 직접 생성되므로 추적루프의 성능이 속도 오차에 직접적인 영향을 주게 된다. 대역폭이 작게 설정된 2Hz 및 4Hz의 경우 저크 발생 시 추적성능이 떨어지면서 항법성능도 감소함을 확인할 수 있다. 저크가 발생하면 점차 속도 오차가 증가하다가 위성신호의 추적을 놓치게 되며, 다수개의 위성신호 추적을 놓쳐 항법계산을 수행할 수 없는 구간도 발생하였다. 대역폭이 8Hz 이상으로 설정된 경우에 속도는 현저한 저크 발생 시 일시적으로 영향을 받아 오차가 증가하였으며, 대역폭이 클수록 속도오차의 증가폭이 작음을 확인하였다. 그러나 저크의 크기가 상대적으로 작은 경우에는 대역폭에 따른 오차의 차이가 크지 않았는데 이는 동특성이 작은 경우에는 동특성에 따른 속도오차에의 영향이 작아지는 반면 상대적으로 열잡음에 의한 영향이 커지기 때문으로 보인다. 한편 위치해를 계산하는 의사거리는 코드 추적루프로부터 생성되는 측정치로 위치오차는 코드 추적루프의 성능 변화에 크게 영향을 받는다. 그러나 사용된 GPS 수신기의 코드 추적루프는 Carrier-aided 루프이므로 위치오차가 반송파 추적루프의 성능에 의해 영향을 받게 된다. 분석 결과 반송파 추적이 정상적으로 수행되는 경우에

는 반송파 추적루프의 루프필터 대역폭에 따른 위치오차의 차이는 미미하였으나, 반송파 추적이 정상적이지 않고 위상 오차가 크게 증가하는 경우에는 코드 추적루프가 영향을 받아 위치오차도 함께 증가하는 현상이 나타남을 확인하였다.

결론적으로 GPS 수신기의 반송파 추적루프를 3차 PLL로 구성하였을 때 대역폭을 2Hz 및 4Hz로 설정한 경우에는 추적이 불안정하여 발사체용으로 적합하지 않았으며, 대역폭이 8Hz 이상인 경우에는 추적성능이 안정적이므로 발사체용으로 사용 가능한 것으로 확인되었다. 그러나 대역폭이 8Hz 이상으로 설계되어도 약 3m/sec 수준의 다소 큰 속도오차가 발생하므로 사용자의 항법 요구조건을 만족하는지 고려하여 결정해야 한다.

## 참 고 문 헌

1. Kaplan, E. D., editor, Understanding GPS: Principles and Applications, Chapter 5, Satellite Signal Acquisition, Tracking, Artech House Publishers, Boston, MA, 1996.
2. 권병문, 신용설, 문지현, 최형돈, "진동 환경에서 FLL 루프필터의 대역폭에 따른 GPS 수신기의 성능 비교," 2012 한국항공우주학회 춘계 학술발표회, 2012,04.
3. 권병문, 신용설, 문지현, 최형돈, "진동환경에서 PLL 루프필터의 대역폭에 따른 GPS 수신기의 성능 비교," 제18차 GNSS Workshop, 2011. 11.
4. 권병문, 신용설, 문지현, 최형돈, "진동환경에서 FLL-assisted-PLL 루프필터의 대역폭에 따른 GPS 수신기의 성능 비교," 한국위성항법시스템학회 정기학술대회, 2012.
5. 문지현, 권병문, 신용설, 최형돈, "발사체 시나리오에서 FLL 루프필터의 대역폭에 따른 GPS 수신기의 성능 분석," 제12회 우주발사체기술 심포지움, 2013.
6. J. "SimGEN(Including SimLOCATE) User Manual," DGP00686AAA, Spirent, 2003.