

도플러 측정치를 이용한 육상교통 환경에 적합한 정밀 측위 기법 연구

A Study on Precise Positioning with Doppler Measurements for Ground Transportation System

이병현*, 지규인*

Byung-Hyun Lee*, Gyu-In Jee*

요 약

사용자들이 위치 정보를 가장 많이 요구하는 분야가 바로 육상교통 분야이다. 특히 보다 정확한 위치 정보를 제공함으로써 지능형 도로 교통 관리가 가능하고, 일반 사용자에게도 편리를 가져다준다. 무선 통신망의 발달로 언제 어디서나 주변 기준국의 GPS 정보를 수신할 수 있기 때문에 차량에서도 정밀 측위가 가능하다. 일반적으로 정밀 측위를 위해서는 코드, 반송파 측정치를 사용한다. 하지만 수신기에서는 코드, 반송파 측정치 뿐 아니라 도플러 측정치도 제공하고 있고 도플러 측정치는 속도에 대한 측정치이다. 속도는 육상교통 환경에서 요구되는 중요한 정보이기 때문에 본 논문에서는 도플러 측정치까지 추가하여 육상교통 환경에 적합한 정밀 측위 기법을 연구하였다. 정밀 측위 기법으로는 RTK(Real-Time Kinematic) 기법을 사용하였고, 여기에 측정치로 이중 차분된 도플러 측정치를 추가하였다. 그 결과 도심지역에서 발생하는 다중 경로 또는 반송파의 사이클 슬립(Cycle Slip)에 의한 위치 오차가 완화되었다. 하지만 여전히 발생하는 위치 오차를 완화시키기 위해서 도플러 측정치를 이용한 위치 영역에서의 스무딩 기법을 적용하였다.

Abstract

Ground Transportation is one of the most required field that users need positioning information. Especially, more precise position can make smart traffic management possible and bring convenience to users. By advanced wireless network, cars can receive the GPS information of reference station in any time and any where. Thus land vehicles are possible to process precise positioning. In general, for precise positioning, code and phase measurements are used. But receivers provide not only code and phase measurements but also doppler measurements and Doppler is direct measurement of velocity. In this paper, because velocity is very important information required in Ground Transportation, precise positioning for Ground Transportation is studied. For precise positioning, RTK(Real-Time Kinematic) was used and double differenced doppler measurements were added. As a result, positioning error by multipath and cycle slip was soften. However there still remained positioning error. Thus smoothing technique using doppler measurement in position domain is used for softening positioning error.

Key words : Precise Positioning , Ground Transportation, RTK, Doppler Measurements

I. 서 론

유비쿼터스 시대를 맞이하여 위치 정보에 대한 중

요성이 재인식 되고 있다. 특히 이미 구축되어 있는 인프라인 위성항법 시스템을 이용하여 보다 정확한 위치 정보를 얻고자 하는 연구가 많이 진행되었다.

* 건국대학교 전자공학과(Electronics Engineering, Konkuk University)

· 제1저자 (First Author) : 이병현

· 투고일자 : 2010년 10월 5일

· 심사(수정)일자 : 2010년 10월 6일 (수정일자 : 2010년 10월 26일)

· 게재일자 : 2010년 10월 30일

특히 무선 통신망이 발달하여 차량에서도 기준국 데이터를 수신할 수 있고, 차량에서 위치 정보를 가장 많이 요구하기 때문에 위치 서비스를 제공하는 사업자들의 관심이 증가하고 있다. 게다가 차량의 위치 정확도를 차선 구분이 가능한 정도로 제공할 수 있다면 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 u-City 또는 u-Transportation과 같은 지능형 도로 교통 정책이 가능해 진다.

위성항법 기반의 정밀 측위를 위해서는 반송파 측정치를 사용해야 한다. 일반적으로 반송파 측정치의 해상도는 약 0.1mm 이다[1]. 하지만 이를 사용하기 위해서는 반송파의 미지정수 문제를 해결해야 한다. 하지만 차량이 고속으로 주행하는 환경에서는 미지정수가 거의 해결되지 않는다.

일반적으로 많이 사용하는 정밀 측위 기법 중 하나가 바로 RTK(Real-Time Kinematic) 알고리즘이다. 이 알고리즘은 지속적으로 움직이는 수신기로부터 획득한 측정치를 이용하여 실시간으로(OTF, On The Fly) 정밀 측위를 수행한다. 앞서 연구된 바에 의하면 수신 환경이 양호한 지역에서 차량 주행 시 측위 정확도는 차선 구분이 가능하다[2].

하지만 육상교통 환경의 대부분이 도심지역과 같이 건물에 둘러싸여 있는 도로 위이다. 이로 인해 코드 측정치의 다중 경로 오차와 반송파 측정치의 사이클 슬립(Cycle Slip)이 위치오차를 발생시킨다. 이는 위치정보 서비스의 신뢰성에 위배되기 때문에 이러한 문제를 해결해야 한다.

본 논문에서는 위치 오차를 완화시키기 위해서 수신기에서 제공하는 또 하나의 측정치인 도플러 측정치를 이용하여 세 가지 구조를 제안하였다. 그리고 실제 차량 주행 실험을 통해 육상교통 환경에 적합한 정밀측위 알고리즘에 대해 성능을 분석하였다.

II. 도플러 측정치의 개요

도플러 측정치는 수신기에서 얻어지는 순간적인 위성과 수신기의 움직임에 의해 얻어진다. 일반적으로 도플러 측정치를 시간에 대해 적산하게 되면 반송파 측정치가 된다. 그렇기 때문에 반송파 측정치를

ADR(Accumulated Doppler Range) 라고 표현한다. 식 (1)은 도플러 측정치에 대한 수식이다[3].

$$\dot{\Phi}_u^s = \dot{r}_u^s + (\dot{B}_u - \dot{b}^s) + \dot{I}_u^s + \dot{T}_u^s + \delta \dot{V}^s + \xi \quad (1)$$

여기에서 \dot{r}_u^s 는 수신기 u와 위성 s 사이의 기하학적인 거리의 변화율을 의미하고, \dot{B}_u 는 수신기 시계 표류(Drift), \dot{b}^s 는 위성 시계 표류, \dot{I}_u^s 는 이온층 지연 변화율, \dot{T}_u^s 는 대류층 지연 변화율, $\delta \dot{V}^s$ 는 위성 속도 계산 시 발생하는 오차, 그리고 ξ 는 수신기 잡음을 의미한다.

식 (1)을 속도 성분으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\dot{\Phi}_u^s = \mathbf{h}_u^s \cdot (\mathbf{v}_u - \mathbf{V}^s) + \dot{B}_u + \epsilon_u^s \quad (2)$$

여기에서 \mathbf{h}_u^s 는 수신기와 위성 사이의 단위 벡터이고 \mathbf{v}_u 와 \mathbf{V}^s 는 수신기와 위성의 속도, 그리고 ϵ_u^s 는 이온층 지연 변화율, 대류층 지연 변화율, 위성 속도 계산 오차와 수신기 잡음을 의미한다.

수신기에서 측정되는 도플러 측정치의 단위는 Hertz이므로 속도 단위로 표현하기 위해 파장을 곱해 주어야 한다. 즉 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\Phi}_u^s = \lambda \hat{f}^i = \mathbf{h}_u^s \cdot (\mathbf{v}_u - \mathbf{V}^s) + \dot{B}_u + \epsilon_u^s \quad (3)$$

여기에서 \hat{f}^i 는 수신기에서 제공하는 도플러 측정치이다.

식 (2)와 (3)에서 알 수 있듯이, 위성의 속도 성분은 정확하게 위성 궤도 정보를 통해 추정이 가능할 때 사용자의 속도에 대한 직접적인 측정치가 된다.

III. 정밀 측위를 위한 측정치

위성항법 시스템에서 정밀 측위는 차분 항법을 기반으로 수행된다. 정밀 측위를 위한 항법 필터의 입

력은 이중 차분된 측정치를 사용한다. 코드와 반송파 측정치의 이중 차분을 통해서 제거되는 오차는 위성 시계 오차와 수신기 시계 오차가 완전히 제거된다. 그리고 기준국과 이동국 사이의 거리가 짧다면 이온층 오차와 대류층 오차는 완화된다.

본 논문에서 도플러 측정치를 이용하기 위해 도플러 측정치도 이중 차분된 값을 사용한다. 기준국 r은 정지 상태이기 때문에 속도가 0이고, 이 정보를 이용하여 기준국 r과 이동국 u, 위성 i와 j의 이중 차분 식은 다음과 같다.

$$\dot{\Phi}_{r,u}^{i,j} = h_{r,u}^i v^i - h_{r,u}^j v^j + h_u^{i,j} v_u + \xi \quad (4)$$

여기에서 v^i, v^j 는 위성 i, j의 속도, v_u 는 이동국의 속도를 의미한다.

도플러 측정치의 이중 차분을 통해서 수신기와 위성 시계의 표류와 위성 궤도에 의한 속도 오차가 제거되고, 대기권에 의한 지연 오차는 완화된다.

IV. 도플러 측정치를 이용한 위치 영역 스무딩 기법

보다 높은 정확도를 얻기 위해 연구되어 온 기법 중 하나가 바로 스무딩(Smoothing) 기법이다. 많이 알려진 기법으로는 반송파 측정치를 이용한 코드 스무딩 기법이 있는데 대표적으로 해치 필터(Hatch Filter)가 이에 해당한다. 이 기법은 코드 측정치에 존재하는 잡음 성분을 반송파 측정치로 완화 시키는 방법으로 거리 영역에서의 스무딩 기법이다. 이와 마찬가지로 거리 영역이 아닌 위치 영역에서의 스무딩 기법이 존재한다. 대표적인 방법으로는 PDP 필터[4]와 도플러 측정치를 이용한 위치 영역 스무딩 기법[5]이 존재한다. 본 논문에서는 도플러 측정치를 이용하여 위치의 변화량(Delta-Position)을 구하는 기법을 사용한다.

거리의 변화량과 위치의 변화량의 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{\rho}^j = \frac{d\rho^j}{dt} = h_j \cdot (v^j - v_u) \quad (5)$$

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} \dot{\rho}^j dt = \int_{t_{k-1}}^{t_k} h_j \cdot (v^j - v) dt \quad (6)$$

$$-\int_{t_{k-1}}^{t_k} \dot{\rho}^j dt + \int_{t_{k-1}}^{t_k} h_j \cdot v^j dt = \int_{t_{k-1}}^{t_k} h_j \cdot v dt \quad (7)$$

식 (7)의 좌변 첫 번째 항인 거리의 변화량(Delta-Range)는 도플러 측정값 \hat{f}^j 로부터 구할 수 있고, 좌변의 두 번째 항인 위성의 변화에 따른 성분은 위성 속도 v^j 와 방향 벡터 h_j 로부터 구할 수 있다. 그리고 위치의 변화량에 해당하는 우변은 다음과 같이 정리된다.

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} h_j \cdot v dt \approx h_j \cdot \int_{t_{k-1}}^{t_k} \dot{x} dt = h_j \delta x_k \quad (8)$$

따라서 정리하면 식 (9)와 같이 정리된다.

$$\tilde{g}^j \equiv \lambda \frac{\hat{f}^j(t_k) + \hat{f}^j(t_{k-1})}{2} [t_k - t_{k-1}] + h_j(t_k) \cdot \left(\frac{v^j(t_k) + v^j(t_{k-1})}{2} \right) \quad (9)$$

측정 오차를 고려하여 모든 가시 위성에 대해 정리하면 다음과 같은 선형식으로 표시된다.

$$H \cdot \delta x_k = \tilde{g}^j + \epsilon_g^j, \quad R_g = E(\epsilon_g \epsilon_g^T) \quad (10)$$

이를 가중 최소자승법(Weighted Least Square)을 이용하여 계산하면 다음과 같다.

$$\delta x_k = (H^T R_g^{-1} H)^{-1} H R_g^{-1} \tilde{g} \quad (11)$$

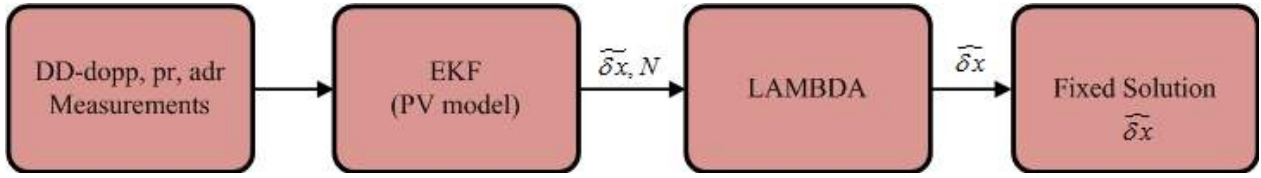


그림 1. 이중 차분된 도플러 측정치를 추가한 RTK 알고리즘 구조
 Fig. 1. Structure of double-differenced Doppler added RTK algorithm

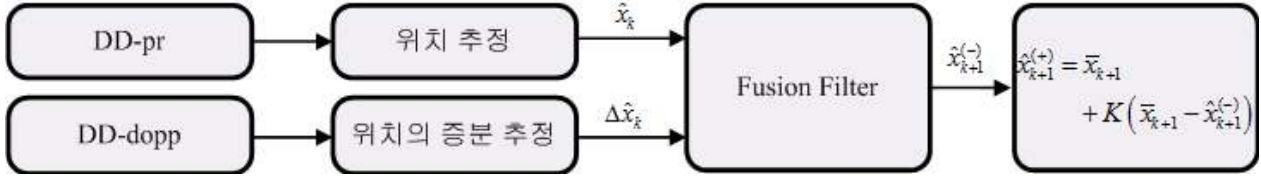


그림 2. 이중 차분된 코드 측정치와 도플러 측정치를 이용한 위치 영역 스무딩 기법을 적용한 구조
 Fig. 2. Structure of double-differenced Code for positioning and Doppler for smoothing in position domain

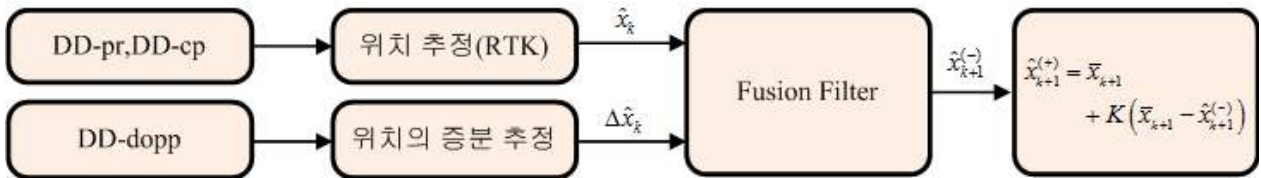


그림 3. 일반적인 RTK 알고리즘에 도플러 측정치를 이용한 위치 영역 스무딩 기법을 적용한 구조
 Fig. 3. Structure of smoothing in position domain on general RTK algorithm

식 (11)에서 계산한 위치의 변화량과 항법 필터에서 계산된 위치의 추정값의 융합을 통해서 위치 영역에서의 스무딩을 수행할 수 있다. 추정값의 융합은 칼만 필터를 통해서 수행한다. 필터의 수식은 다음과 같다.

시간 업데이트:

$$\hat{x}^-(t_k) = \hat{x}(t_{k-1}) + \delta x_k \quad (12)$$

$$P^-(t_k) = P(t_{k-1}) + Q(t_{k-1}) \quad (13)$$

측정치 업데이트

$$K(t_k) = P^-(t_k) [P^-(t_k) + R(t_k)]^{-1} \quad (14)$$

$$\hat{x}(t_k) = \hat{x}^-(t_k) + K(t_k) (\hat{x}_{EKF}(t_k) - \hat{x}^-(t_k)) \quad (15)$$

여기에서 δx_k 는 식 (11)을 통해 계산한 위치의 변

화량이고 \hat{x}_{EKF} 는 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter)를 사용한 항법 필터를 통해 추정된 위치를 의미한다.

V. 도플러 측정치를 이용한 정밀 측위 알고리즘의 구조

육상교통 환경에서 위치정보를 가장 많이 요구하는 분야가 차량이다. 차량은 동적 특성을 가지고 있기 때문에 사용자는 차량의 위치 정보 뿐 아니라 속도에 대한 정보도 요구한다. 따라서 칼만 필터를 사용하여 항법 필터를 구성할 때 추정해야 할 상태 변수는 이중 차분된 측정치를 사용하기 때문에 수신기 시계 오차를 제외한 위치와 속도의 6개의 상태를 추정해야 한다. 이는 일반적인 RTK 알고리즘을 적용할 때 신뢰할 수 있는 위치와 속도 정보를 추정하기 위해서 최소한 7개 이상의 위성 신호(1개의 기준위성 + 6개의 위성)를 수신해야 함을 의미한다. 하지만 육상 교통 환경에서는 다수의 건물에 의해 위성신호가 차

단되는 구간이 존재하여 충분한 위성신호를 수신할 수 없는 구간이 상당수 존재한다. 하지만 도플러 측정치를 이용하여 속도 정보에 대한 측정치로 추가하게 되면 일반적인 RTK 알고리즘과 마찬가지로 4개의 위성 신호(1개의 기준 위성 + 3개의 위성)를 수신하면 위치와 속도가 추정이 가능하다.

본 논문에서는 이러한 도플러 측정치를 이용하여 위치와 속도를 추정할 수 있는 3가지 구조를 연구했다.

첫 번째는 일반적인 RTK 알고리즘에 이중 차분된 도플러 측정치를 추가하는 구조이다. 그 구조는 그림 1과 같다.

두 번째는 도심 지역에서 반송파 측정치의 안정적인 사용이 어렵기 때문에 반송파 측정치를 제거하고 이중 차분된 코드 측정치를 이용하여 위치를 추정하고, 이중 차분된 도플러 측정치를 이용하여 위치 영역 스무딩 기법을 사용하는 방법이다(그림 2).

마지막으로 일반적인 RTK 알고리즘을 적용, 위치를 추정한 후 이중 차분된 도플러 측정치를 이용하여 위치 영역 스무딩 기법을 적용한 구조이다(그림 3).

VI. 실험 결과

위에서 제안한 세 가지 구조를 적용하여 실제 차량 주행 실험을 통해서 그 성능을 분석하였다. 이 실험은 이동 실험이기 때문에 정확한 실제 위치를 알 수 없다. 따라서 정량적인 성능 분석이 불가능 하여 주행 궤적에 대한 분석으로 그 성능을 분석했다.

- 기준국 : 한국 항공대학교
- 실험 장소 : 일산 백석역 부근
- 기준국과의 거리 : 약 8 km
- 수신 모듈 : Novatel Propak V-3(기준국), Novatel OEMV1-G(이동국)

그림 5의 위 그림에서 좌측 상단이 백석역 사거리 부근으로 주변 환경은 그림 5의 아래와 같이 높은 건물에 의해 가시성이 매우 나쁘다(그림 4).

이 구간에서 일반적인 RTK 알고리즘을 적용했을

때 결과는 그림 6과 같이 나타난다.

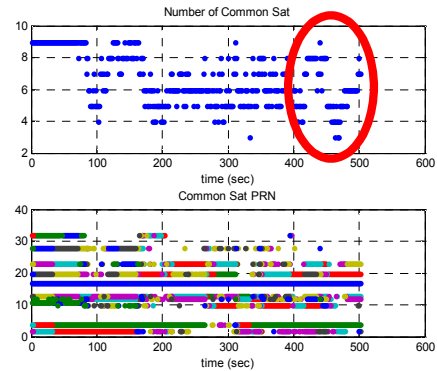


그림 4. 실험 지역의 가시 위성(상)과 기준국과의 공통 위성(하)

Fig. 4. Visible satellites(top) and common satellites(bottom) of test site



그림 5. 실험 장소(일산 백석역)

Fig. 5. Test site(ilsan baeksuck station)

그림 6과 같이 차량의 움직임과 맞지 않는 순간적인 큰 위치 오차가 나타난다. 그리고 미지정수 추정은 거의 되지 않는 것을 볼 수 있다.

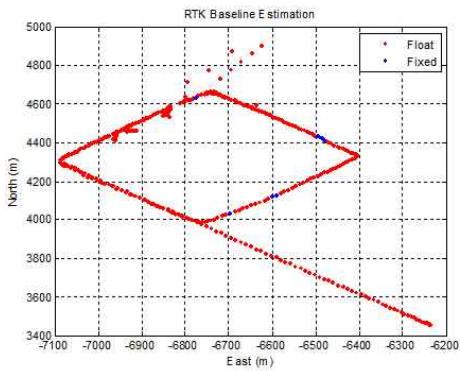


그림 6. 일반적인 RTK 알고리즘 결과(위치)
Fig. 6. Result of general RTK(position)

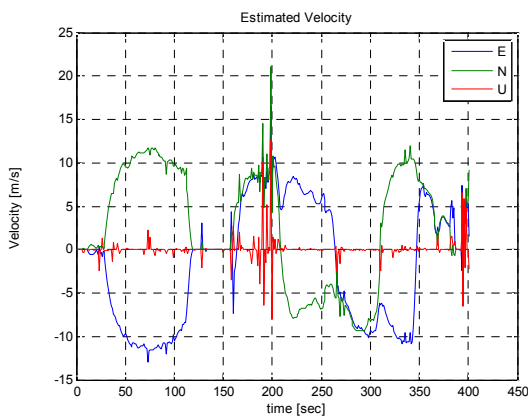


그림 7. 일반적인 RTK 알고리즘 결과(속도)
Fig. 7. Result of general RTK(velocity)

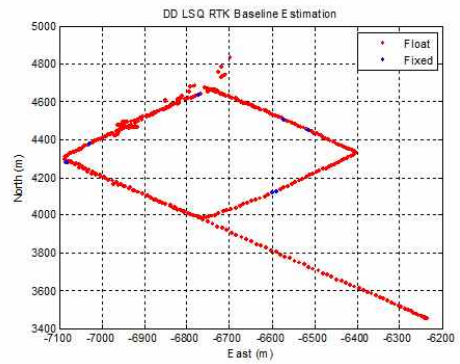


그림 8. 이중 차분된 도플러 측정치를 추가한 RTK 알고리즘(위치)
Fig. 8. Double-differenced Doppler added RTK(position)

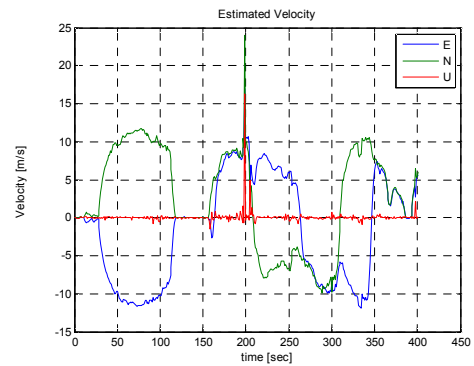


그림 9. 이중 차분된 도플러 측정치를 추가한 RTK 알고리즘(속도)
Fig. 9. Double-differenced Doppler added RTK(velocity)

첫 번째로 제안된 구조(그림 1)인 일반적인 RTK 알고리즘에 이중 차분된 도플러 측정치를 추가한 결과는 그림 8과 같이 나타난다. 그림 8의 상단을 보면 빨간색의 측위 오차가 위치 영역 스무딩을 통해서 완화된 것을 확인할 수 있다. 그리고 하단의 순간적인 코드의 다중 경로 오차에 의해 발생하는 위치 오차 역시 항법 필터에서 도플러 측정치에 의해 완화되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 역시 큰 오차가 발생하고 있다.

이중 차분된 도플러 측정치를 추가한 경우에도 여전히 측위 오차가 큰 점들이 존재한다. 하지만 그 정도가 그림 6과 비교했을 때 완화되었다. 도플러 측정치를 추가했을 때의 가장 큰 이득은 추정된 속도 정보이다. 그림 7과 9를 비교해 보았을 때 고도 방향의 속도가 거의 0에 가까운 값을 갖고, 추정된 속도의 잡음 특성도 더 좋다.

다음은 제안된 두 번째 구조(그림 2)의 결과이다 (그림 10).

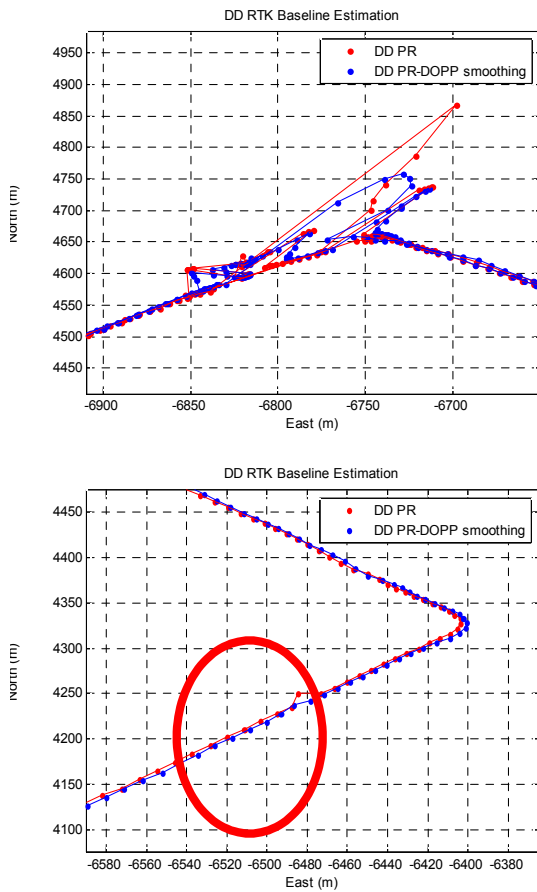


그림 10. 이중 차분된 코드 측정치 + 위치 영역 스무딩
 Fig. 10. Double-differenced Code + smoothing in position domain

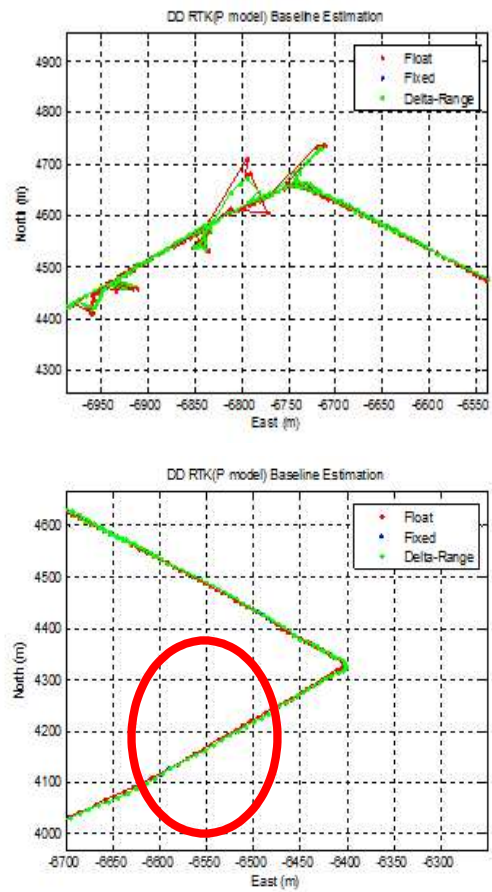


그림 11. 이중 차분된 도플러 측정치를 추가한 RTK 알고리즘 + 위치 영역 스무딩
 Fig. 11. Double-differenced Doppler added RTK + smoothing in position domain

마지막으로 제안된 세 번째 구조(그림 3)의 결과는 그림 11과 같다. 그림 11에서와 같이 항법 필터에서 반송파 측정치에 의해 코드 측정치에 존재하는 다중 경로 오차가 완화되어 그림 11과 같이 위치 오차가 완화 되거나(그림 11의 상단) 나타나지 않는다(그림 11의 하단).

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 육상교통에서 보다 신뢰도 있고 정확성 높은 측위 결과를 얻기 위한 연구의 일환으로 도플러 측정치를 이용하여 정밀 측위하는 기법에 대해 연구하였다. 그 첫 번째로 일반적인 RTK 알고리즘에 이중 차분된 도플러 측정치를 항법 필터에 추가하는 방식을 제안하였다. 그 결과 순간적으로 크게 발생하는 위치 오차가 완화되고, 또한 추정된 속도 정보가 차량의 주행 특성에 맞게 고도 방향 속도가 0에 가깝고 추정된 속도의 잡음 특성이 더 좋다는 장점을 보이고 있다. 하지만 이 경우에도 역시 커다란 위치 오차가 발생하였다. 이를 줄이기 위해 위치 영역에서의 스무딩을 수행하였다. 그 결과로 측위 궤적

이 보다 차량 주행의 궤적에 가까운 결과를 보였다. 그러나 아직까지 신호 수신 환경이 나쁜 도심 구간에서는 큰 위치 오차가 발생하고, 이는 정밀 측위라는 개념에 적합하지 않다. 따라서 향후 연구에서는 차량의 주행 궤적을 예측하고, 이를 통해서 항법 필터에서 추정된 위치를 검증하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 BK21과 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비지원(06 교통핵심 A03)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, Wasle, *GNSS - Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo & more*, Springer Wien NewYork, 2008

[2] u-TSN 차량시스템 통합항법 알고리즘 개발, u-Transportation 기반 기술 개발, *교통체계 효율화 사업 최종보고서*, 2010

[3] L.Serrano, D.Kim, R. B. Langley, "A Single GPS Receiver as a Real-Time, Accurate Velocity and Acceleration Sensor", *ION GNSS 17th ITM*, 21-24 Sept. 2004, Long Beach, CA

[4] Thomas J. Ford, Jason Hamilton, "A New Positioning Filter: Phase Smoothing in Position Domain", *Journal of The Institute of Navigation*, Vol. 50, No. 2, 2003

[5] Helena Leppakoski, Jari Syrjarinne, Jarmo Takala, "Complementary Kalman Filter for Smoothing GPS Position with GPS Velocity", *ION GPS/GNSS 2003*, Portland, OR

이 병 현 (李秉玆)



2007년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학사)
 2009년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재 : 건국대학교 전자공학과 박사과정
 관심분야 : GNSS 수신기 신호처리, 소프트웨어 GNSS 수신기, Anti-Jamming, GNSS RTK

지 규 인 (池圭仁)



1982년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학사)
 1984년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)
 1989 : Case Western Reserve Univ. System and Control Engineering (공학박사)
 1992년~현재 : 건국대학교 전자공학부 교수
 관심분야 : GPS/INS 결합항법, GPS 수신기 신호처리, 무선측위, 소프트웨어 GPS, Anti-Jamming