

기준국 수에 따른 다중 위성항법 광역보정시스템의 전리층 지연 추정 성능 분석

Performance Analysis of Ionospheric Delay Estimation for Multi-Constellation WA-DGNSS According to the Number of Reference Stations

김 동 욱¹ · 한 덕 화¹ · 윤 호¹ · 기 창 돈^{1*} · 서 승 우² · 박 흥 원²

¹서울대학교 기계항공공학부

²국방과학연구소

Dong-uk Kim¹ · Deok-hwa Han¹ · Ho Yun¹ · Chang-don Kee^{1*} · Seung-woo Seo² · Heung-won Park²

¹Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

²Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Korea

[요 약]

광역보정시스템(WA-DGNSS; wide area differential GNSS)의 정확성을 향상시키기 위해서는 GPS 오차 요인 중 가장 큰 영향을 미치는 전리층 지연 오차에 대한 추정 성능이 향상되어야 한다. 본 논문에서는 전리층 지연 추정 성능 향상을 위해 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS, 유럽의 Galileo와 같은 각국의 다양한 위성항법시스템을 통합하여 광역보정시스템 알고리즘에 적용해보았다. 그리고 기준국 수를 증가시키면서 한반도 지역의 전리층 지연 추정 성능을 시뮬레이션을 통해 분석해보았다. 그 결과 추정에 사용한 측정치의 수가 비슷함에도 불구하고 기준국 수를 증가시키기보다는 다중 위성항법을 사용하는 것이 전리층 지연 추정 성능 향상에 더 효과적임을 확인하였다. 본 논문의 결과는 단일 주파수 SBAS (satellite based augmentation system) 사용자의 전리층 지연 추정 성능을 향상시키기 위한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

[Abstract]

For the purpose of improving the accuracy of Wide Area Differential GNSS (WA-DGNSS), estimation performance of ionospheric delay error which has a great impact on GPS error sources should be enhanced. This paper applied multi-constellation GNSS which represents GPS in USA, GLONASS in Russia, and Galileo in Europe to WA-DGNSS algorithm in order to improve performance of ionospheric delay estimation. Furthermore, we conducted simulation to analyze ionospheric delay estimation performance in Korean region by increasing the number of reference stations. Consequently, using multi-constellation GNSS to improve performance of ionospheric delay estimation is more effective than increasing the number of reference stations in spite of similar number of measurements which are in use for estimation. We expect this result can contribute to improvement for ionospheric delay estimation performance of single-frequency SBAS (Satellite Based Augmentation System) user.

Key word : Wide area differential GNSS, Multi-constellation GNSS, Ionospheric delay, GLONASS, Galileo.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2014.18.4.260>



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 31 July 2014; Revised 25 August 2014

Accepted (Publication) 20 August 2014(30 August 2014)

*Corresponding Author; Chang-don Kee

Tel: +82-2-880-1912

E-mail: kee@snu.ac.kr

I. 서론

광역보정시스템(WA-DGNSS; wide area differential GNSS)은 GPS 단독측위 시 발생하는 오차요인들을 보정정보로 제공함으로써 사용자가 더 높은 수준의 정확도와 신뢰도를 가지는 위치를 계산할 수 있도록 도와주는 현존 최고 성능의 전파항법시스템이다. 현재 미국의 WAAS (wide area augmentation system), 유럽의 EGNOS (European geostationary navigation overlay system), 일본의MSAS (MTSAT satellite based augmentation system)는 운용 중이고 우리나라도 한국형 SBAS (satellite based augmentation system) 개발을 위해 해양수산부 연구개발과제로 ‘광역보정시스템(WA-DGNSS) 구축기술개발’ 과제를 2010년부터 진행 중이다[1],[2].

광역보정시스템의 정확성 성능을 개선하기 위한 연구는 국내외에서 활발히 진행 중이다. 그 중에서도 미국의 GPS 뿐만 아니라 러시아의 GLONASS, 유럽의 Galileo, 중국의 BeiDou 및 일본의 QZSS와 같은 각 국가의 독자적인 위성항법 시스템을 통합하여 측위 성능 및 신뢰성을 향상시키는 다중 위성항법(multi-constellation)을 광역보정시스템과 접목시키려는 연구가 있다. Yun(2013)은 이중주파수 및 다중 위성항법을 사용한 광역보정시스템의 한반도 지역 성능을 예측하였고, 새로운 항법 위성이 추가됨으로써 사용자가 사용 가능한 측정치의 개수 향상으로 전체적인 시스템의 신뢰도가 향상되었다고 결론을 내렸다[3].

따라서 본 논문에서는 추정에 사용 가능한 측정치의 개수 향상이 광역보정시스템의 정확도를 향상시킬 것으로 기대하고 GPS 오차 요인 중 가장 큰 부분을 차지하는 전리층 지연 오차에 대한 추정 성능을 분석해 보았다. 특히 측정치의 개수와 추정 성능 사이의 상관관계를 확인하기 위하여 다중 위성항법시스템을 광역보정시스템에 적용해 보았고, 현재 운영되고 있는 위성항법중앙사무소(NDGPS)의 해양 기준국 수를 증가시키면서 추정 성능을 비교해 보았다.

Yun(2013)은 다중 위성항법의 위성궤도를 Almanac 정보를 바탕으로 가상으로 설계한 반면 본 논문에서는 실측데이터에 근거한 다중 위성항법의 위성궤도를 생성하고 이를 광역보정시스템 알고리즘에 적용해보았다는 점에서 알고리즘의 차이가 있다[3]. Han(2013)은 5개의 NDGPS 기준국 배치에 따른 광역보정시스템의 성능 분석을 통해 기준국 구축 시 최대한 넓은 지역에 많이 분포해야 최상의 성능을 낼 수 있다고 하였다[2]. 하지만 배치에 따른 성능 분석에 초점을 두었고 기준국 수에 따른 성능 비교를 직접적으로 수행하지는 않았다. 또한 앞선 연구들 모두 광역보정시스템의 오차 요인별 성능 분석보다는 전체 시스템의 위치 정확성과 가용성 분석에 초점을 맞췄다는 점에서 본 논문과 차이가 존재한다.

II. 다중 위성항법 광역보정시스템 알고리즘

2-1 다중 위성항법시스템의 시각 및 좌표계 동기화

GPS, GLONASS, Galileo 각각의 위성항법시스템은 독립적인 기준 시각 및 좌표계를 사용한다. 따라서 각 시스템을 모두 사용한 다중 위성항법 광역보정시스템 알고리즘 구현을 위해서는 각 시스템의 기준 시각과 좌표계의 동기화가 필요하다.

1) GPS/GLONASS 통합 항법시스템의 동기화

GLONASS Time은 러시아 모스크바의 UTC(UTC +03:00 hours)를 기준으로 표시되며 GPS Time과 윤초(leap second) 만큼의 차이가 존재하는 불연속적인 시간 축이다. GLONASS Time과 GPS time 사이의 오프셋은 항법메시지를 통해 제공하며 그 관계식은 식(1)과 같다. 이 때 τ_c 는 항법메시지에 포함된 GLONASS Time과 UTC+03:00 hours 와의 시간 오프셋이고, ΔT_{LS} 는 GPS Time과 UTC 사이의 윤초이다[4].

$$T_{GPS} - T_{GLONASS} = \tau_c + \Delta T_{LS} - 3\text{hours} \quad (1)$$

GLONASS에서 사용하는 좌표계는 PZ-90.02로 지구의 질량중심을 원점으로 한다. Z축은 IERS (international earth rotation service)에 의해 정의된 CTP (conventional terrestrial pole)이고, X축은 지구적도면과 그리니치 자오선의 교점 방향, Y축은 오른손 법칙에 의해 정의된다. 식(2)는 GLONASS 좌표계를 GPS 좌표계인 WGS-84로 변환하는 식이다[4].

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{WGS-84} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{PZ-90.02} + \begin{bmatrix} -0.36m \\ 0.08m \\ 0.18m \end{bmatrix} \quad (2)$$

2) GPS/Galileo 통합 항법시스템의 동기화

Galileo의 기준 시각인 GST (Galileo system time)는 1999년 8월 22일 UTC 00:00:00에 시작된 연속적인 시간 축이다. GST 와 GPS Time 사이의 오프셋은 항법메시지의 GGTO (GPS and Galileo time offset)으로 제공되며 그 관계식은 식(3)과 같다.

$$T_{Galileo} - T_{GPS} = A_{0G} + A_{1G} [TOW - t_{0G} + 604800((WN - WN_{0G}) \bmod 64)] \quad (3)$$

식(3)에서 A_{0G} , A_{1G} , t_{0G} , WN_{0G} 는 GGTO 파라미터로 항법 메시지에서 제공한다. TOW와 WN은 각각 GST의 time of week와 week number를 의미한다[5].

표 1. 위성항법시스템의 기준 시각 및 좌표계
Table. 1. Time frame and coordinate of GNSS.

System	Satellites Configuration	Time Frame	Coordinate
GPS	MEO* 32	GPS Time (Started on UTC 1980-01-06, 00:00:00)	WGS-84
GLONASS	MEO 24	GLONASS Time (UTC of Moscow)	PZ-90.02
Galileo	MEO 30	Galileo System Time (Started on UTC 1999-08-22, 00:00:00)	GTRF

*MEO: Medium Earth Orbit

Galileo 시스템의 좌표계는 GTRF (Galileo terrestrial reference frame)이다. Galileo에서 요구하는 좌표계는 가장 최근의 ITRF (international terrestrial reference frame)과 비교하였을 때, 3축의 차이가 3cm를 초과하지 않아야 하므로 WGS-84와의 차이는 무시할 수 있는 수준이다[5].

표 1에는 각 위성항법시스템의 기준 시각 및 좌표계를 정리하였다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 해당 시스템의 위성 궤도를 GPS의 시각과 좌표계를 기준으로 구현하였다.

2-2 광역보정시스템의 격자 전리층 지연 추정 알고리즘

1) 격자 전리층 지연 추정 알고리즘

광역보정시스템의 중앙처리국에서는 여러 개의 기준국으로부터 받은 각 전리층 통과점의 수직 전리층 지연 측정치를 가지고, 가중치 보간법을 사용하여 미리 정의된 격자점의 수직 전리층 지연을 추정한다. 그림 1은 전리층 격자점과 통과점을 개념적으로 나타낸 것이다. 이 때 중심에 있는 격자점을 추정하기 위해서 제한된 반경 이내에 있는 측정치만을 사용하게 된다. 반경을 크게 하면 많은 측정치를 사용할 수 있으므로 전체 격자점 분포가 완만해지지만, 너무 멀리 있는 측정치까지 추정에 사용되어 왜곡된 분포가 나타날 수 있다. 반경을 작게 하면 가까운 측정치 사용으로 실제 측정치에 보다 가까운 값이 반영되지만, 측정치 부족으로 인해 추정 불가 격자점이 늘어나게 된다. 본 논문에서는 전리층의 공간적 변화에 대한 특성을 고려하여 반경을 1,000 km로 설정하였다[6].

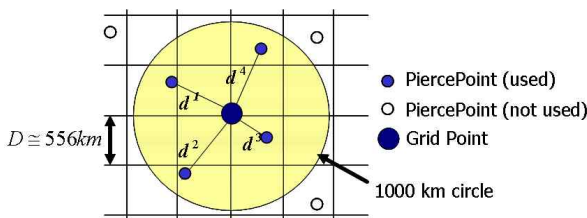


그림 1. 전리층 격자점과 전리층 통과점의 개념도
Fig. 1. Conceptual figure of grid point and pierce point.

제한 반경 이내 전리층 측정치를 가지고 격자점의 수직 전리층 지연을 추정하는 식은 아래와 같다.

$$\hat{I}_{Grid,V} = I_{Klob,V}^{Grid} \frac{\sum_{k=1}^M \left[\left(\frac{I_{Meas,V}^k}{I_{Klob,V}^k} \right) w_k \right]}{\sum_{k=1}^M w_k} \tag{4}$$

- $\hat{I}_{Grid,V}$: 해당 격자점에서 추정된 수직 전리층 지연
- $I_{Klob,V}^{Grid}$: 해당 격자점에서 Klobuchar model을 이용하여 추정된 수직 전리층 지연
- $I_{Klob,V}^k$: 측정치의 k번째 전리층 통과점에서 Klobuchar model을 이용하여 추정된 수직 전리층 지연
- $I_{Meas,V}^k$: 측정치의 k번째 전리층 통과점에서 측정된 수직 전리층 지연
- w_k : k번째 측정치에 대한 전리층 격자점 중심의 상대적인 가중치
- M : 제한 반경 이내 포함된 전리층 측정치 개수

이 때, 가중치 w_k 는 Chao(1997)가 제안한 거리와 측정치 분산에 반비례하는 값으로 정한다. d_k 는 격자점에서 통과점까지의 거리이고, D 는 5° 간격 격자점 기준 거리로 약 556 km 이다[6],[7].

$$w_k = \left(\frac{\Delta_k}{\sigma_k} \right)^2 \quad \text{where } \Delta_k = \exp[-(d_k/2D)^2] \tag{5}$$

2) 사용자 전리층 지연 보정치 적용 알고리즘

사용자는 중앙처리국에서 추정된 각 격자점의 수직 전리층 지연을 보정정보로 받아 자신의 전리층 지연 값을 계산한다. 사용자는 가시위성의 전리층 통과점을 포함한 주변 4개의 격자점을 찾는다. 그리고 그 격자점의 수직 전리층 지연 보정정보를 거리에 대해 보간하여 해당 가시위성의 수직 전리층 지연을 추정 한다. 경사 전리층 지연은 해당 가시위성의 양각을 이용하여 계산한다. 사용자 전리층 통과점의 수직 전리층 지연을 구하는 과정은 식(6)과 같으며, 그림 2는 사용자 보간 알고리즘 적용을 위한 4개의 격자점을 도시한 것이다[6],[8].

$$\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^4 W_i(x_{pp}, y_{pp}) \tau_{vi} \tag{6}$$

where

$$W_1 = x_{pp} y_{pp}$$

$$W_2 = (1 - x_{pp}) y_{pp}$$

$$W_3 = (1 - x_{pp})(1 - y_{pp})$$

$$W_4 = x_{pp}(1 - y_{pp})$$

$$x_{pp} = \frac{\lambda_{pp} - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, y_{pp} = \frac{\phi_{pp} - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1}$$

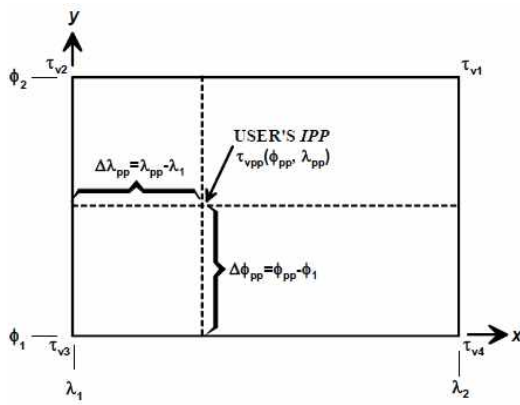


그림 2. 사용자 보간 알고리즘의 전리층 통과점
 Fig. 2. Definition of pierce point in user interpolation algorithm.

III. 다중 위성항법 광역보정시스템의 격자 전리층 지연 추정 성능 분석 시뮬레이션

3-1 시뮬레이션 설정

다중 위성항법 광역보정시스템의 전리층 지연 추정 성능을 확인하기 위해 한반도 주변 지역(위도: 25°~55°, 경도: 110°~145°, 간격: 2.5°)에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 다중 위성항법 적용의 이점을 확인하기 위하여 GPS만 사용한 경우와 GLONASS, Galileo를 각각 추가한 경우, GPS, GLONASS, Galileo를 모두 사용한 경우의 전리층 지연 추정 성능을 비교해 보았다. 또한 기준국 수에 따른 전리층 지연 추정 성능을 확인하기 위해 NDGPS의 해양 기준국 수를 증가시키면서 시뮬레이션 하였다. 그림 3은 사용된 해양 기준국의 위치를 나타낸 것이다.

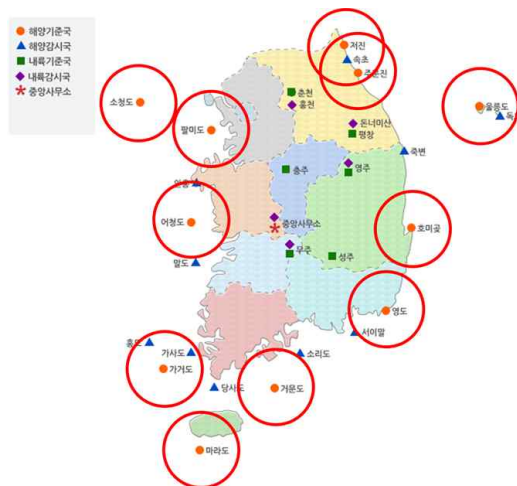


그림 3. NDGPS 해양 기준국의 위치
 Fig. 3. Position of NDGPS reference stations.

표 2. 기준국 배치 순서

Table. 2. Order of arrangement of reference station.

기준국 수	사용된 해양 기준국	기준국 수	사용된 해양 기준국
4	소청도, 마라도, 영도, 울릉도	8	+팔미도
5	+저진	9	+주문진
6	+가거도	10	+어청도
7	+거문도	11	+호미곶

표 3. 오차 요인 및 생성 방법

Table. 3. Error sources and generation method.

오차 요인	오차 생성 방법
위성 궤도 및 시계 오차	정밀궤도력(SP3), 방송궤도력(BRDC)
전리층 지연 오차	IONEX
대류층 지연 오차	Black Model
수신기 잡음 및 다중경로오차	Function of Elevation Angle
수신기 시계 오차	2 nd Order Markov Process

해양 기준국은 총 11개가 존재하며 Han(2013)의 연구 결과에 따라 한반도 전역의 최대한 넓게 분포된 소청도, 마라도, 영도, 울릉도 4개의 기준국을 기본으로 선정하였다. 이후 기준국을 한 개 씩 추가하면서 성능을 비교하였다. 추가된 기준국의 배치 순서는 표 2에 정리하였다.

표 3에는 의사거리 측정치를 생성하기 위한 각각의 오차 요인 생성 방법을 나타내었다. GPS와 GLONASS의 위성 궤도 및 시계 오차의 경우 IGS (international GNSS service)에서 제공한 실측데이터인 정밀궤도력(SP3)과 방송궤도력(BRDC)을 사용하였으며, Galileo의 경우 아직 실측데이터 제공이 서비스되고 있지 않은 관계로 GSC (European GNSS service centre)에서 제공한 Almanac 데이터를 활용하여 가상의 궤도 및 시계 오차를 정규분포로 생성하였다. 전리층 지연의 참값은 IGS에서 제공한 실측데이터인 IONEX (IONosphere EXchange format)로 생성하였고, 격자 전리층 지연 추정 알고리즘과 사용자 보정치 적용 알고리즘으로 추정된 전리층 지연과의 차이를 전리층 지연 추정 오차로 하여 추정 오차의 RMS (root mean square)를 확인하였다.

전리층 지연 추정 효과를 보다 잘 확인하기 위해 태양 흑점 폭발로 전리층이 극대기를 유지하던 2013년 10월 30일 24시간 동안의 실측데이터를 활용하였다. 시뮬레이션 간격은 300초이며, 기준국과 사용자의 mask angle은 10°이다.

3-2 시뮬레이션 결과

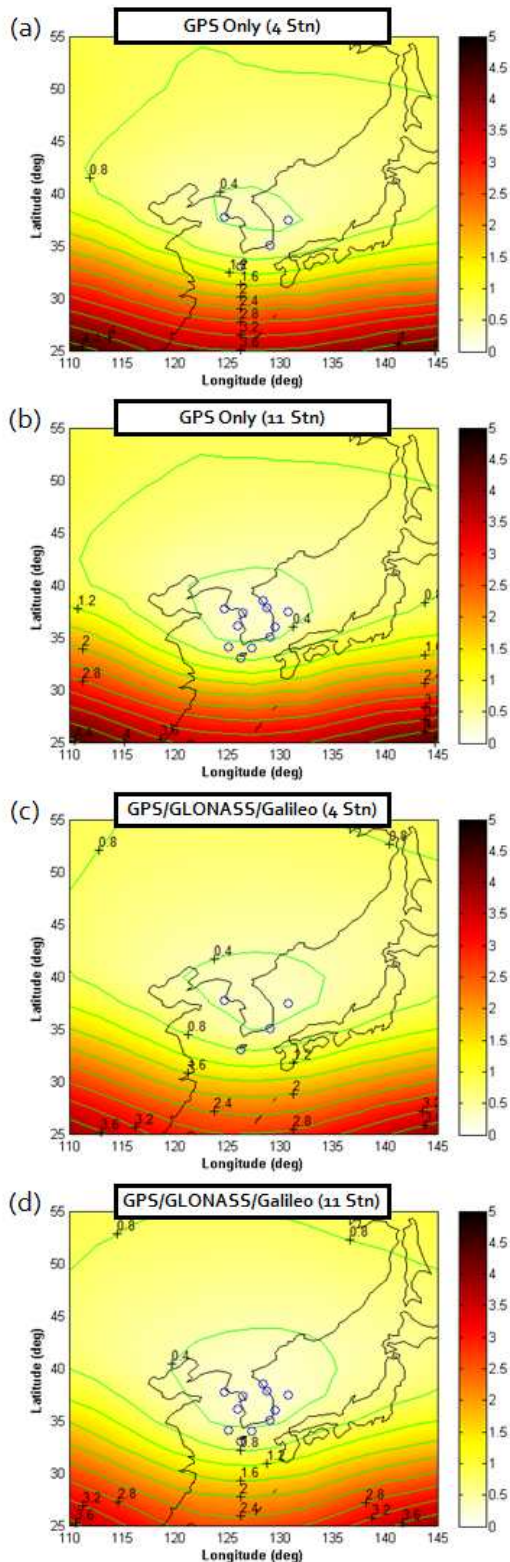


그림 4. 전리층 지연 추정 오차의 RMS
Fig. 4. RMS residual error of ionospheric delay.

표 4. 전리층 지연 추정 오차의 RMS 결과

Table 4. Results of RMS residual error of ionospheric delay.

기준국 수	GPS Only	+GLONASS	+Galileo	+GLONASS /Galileo
4	1.4030	1.2976	1.2533	1.1902
8	1.3427	1.2336	1.1902	1.1396
11	1.3459	1.2361	1.1870	1.1377
평균	1.3585	1.2523	1.2031	1.1500
개선율	-	7.82%	11.43%	15.35%

(단위: meter)

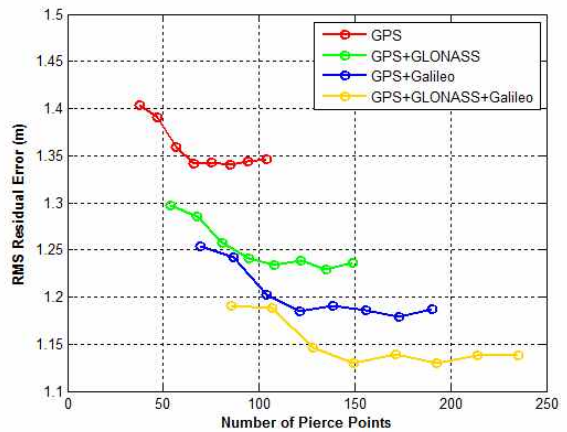


그림 5. 전리층 통과점 수에 따른 전리층 지연 추정 오차의 RMS
Fig. 5. RMS residual error of ionospheric delay according to the number of pierce points.

그림 4는 광역보정시스템 전리층 지연 추정 오차의 24시간 동안 평균 RMS 결과를 나타낸 것이다. 그 결과 기준국 네트워크 중심으로부터 멀어질수록 성능 저하가 발생하며, 특히 전리층 지연 오차가 큰 저위도 지역 성능 저하가 극심한 것을 볼 수 있다. 그림 4(a)는 기준국 4개일 때 GPS 단일 항법, 4(b)는 기준국 11개일 때 GPS 단일 항법, 4(c)는 기준국 4개일 때 GPS/GLONASS/Galileo 다중 항법, 그리고 4(d)는 기준국 11개일 때 GPS/GLONASS/Galileo 다중 항법을 적용한 시뮬레이션 결과이다. 예상대로 기준국 수가 많고 다중 위성항법을 사용한 경우 전리층 지연 추정 성능이 향상된 것을 볼 수 있다. 기준국 네트워크 내부의 오차 RMS가 0.4 이하인 영역이 넓어진 것이 확연히 드러나며, 성능 저하가 심했던 저위도 지역의 추정 성능도 약간 향상된 모습을 확인할 수 있다.

그림 5는 측정치 수에 따른 전리층 지연 추정 성능을 확인하기 위해 전리층 통과점 수에 따른 전리층 지연 추정 오차의 RMS를 도시한 것이다. GLONASS만 추가 한 경우, Galileo만 추가 한 경우, GLONASS/Galileo를 모두 추가 한 경우의 순서로 전리층 통과점 수가 증가한 것을 확인할 수 있다. 이에 따

라 전리층 지연 추정 오차의 RMS는 다중 위성항법을 적용하여 전리층 통과점 수가 증가할수록 큰 폭으로 감소하는 경향을 나타내었다. 반면 기준국을 추가한 경우에도 전리층 통과점의 수는 늘어났지만 추정 성능은 크게 향상 되지 않았다. 그리고 비슷한 전리층 통과점 수를 가짐에도 불구하고 다중 위성항법을 적용한 만큼 좋은 성능 개선은 나타나지 않았으며, 8개 이상의 기준국을 사용한 경우 추정 성능에 거의 영향을 미치지 않았다. 표 4는 전리층 지연 추정 결과를 정리한 것이다. 앞서 설명한 것과 마찬가지로 기준국의 수가 4개 일 때보다 8개인 경우 약간의 성능 향상이 있지만, 기준국의 수가 8개와 11개인 경우를 비교해 보았을 때는 큰 성능 개선이 나타나지 않았다. 반면 GPS/GLONASS/Galileo 다중 위성항법 적용시 GPS만 사용한 경우 대비 약 15%의 전리층 지연 추정 성능 개선을 확인할 수 있다. 즉, 기준국을 추가하는 것보다 다중 위성항법을 적용하는 것이 성능 개선에 더 효과적이라고 할 수 있다.

이러한 이유를 전리층 통과점 배치 분포에서 찾을 수 있다. 그림 6은 전리층이 가장 활발한 UTC 기준 오후 2시의 전리층 통과점 분포를 도시한 것이다. 전리층 통과점의 배치가 균일하고 넓게 분포될수록 다양한 지역의 전리층 특성을 추정에 반영할 수 있기 때문에 전리층 지연 추정 성능이 향상된다. GPS만 사용한 경우인 그림 6(a), 6(b)와 GPS/GLONASS/Galileo 다중 위성항법을 적용한 그림 6(c), 6(d)를 비교해보면 전리층 통과점의 분포 면적이 다중 위성항법을 적용한 경우 더 넓어진 것을 확인할 수 있다. 반면 기준국 개수가 증가한 경우 전리층 통과점 배치 분포 면적은 크게 변하지 않았다. 즉, 사용 가능한 가시위성 수가 많고 기하학적 배치가 좋아지는 다중 위성항법을 광역보정시스템에 적용한 경우가 기준국을 추가하여 측정치 수를 증가시키는 것 보다 전리층 지연 오차 추정 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있으며, 결과적으로 사용자 항법해의 정확도 성능을 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 결론

본 논문에서는 기존 광역보정시스템 알고리즘에 실측데이터를 활용한 다중 위성항법을 적용하여 한반도 주변 지역의 전리층 지연 추정 성능을 기준국 수를 증가 시켜가며 확인하였다. 시뮬레이션 결과 다중 위성항법을 적용한 광역보정시스템의 전리층 지연 추정 성능이 향상된 반면, 기준국 수를 증가시킨 경우 큰 성능 향상이 나타나지 않았다. 또한 일정 개수 이상의 기준국을 사용한 경우 추정 성능에 이점을 보이지 않았다. 그 이유는 측정치의 수가 증가하는 것도 중요하지만 가시위성의 고른 배치로 다양한 전리층 특성의 측정치를 사용하는 것이 더 중요하기 때문이다. 우리나라 광역보정시스템의 서비스 영역은 비교적 좁기 때문에 기준국이 다른 나라

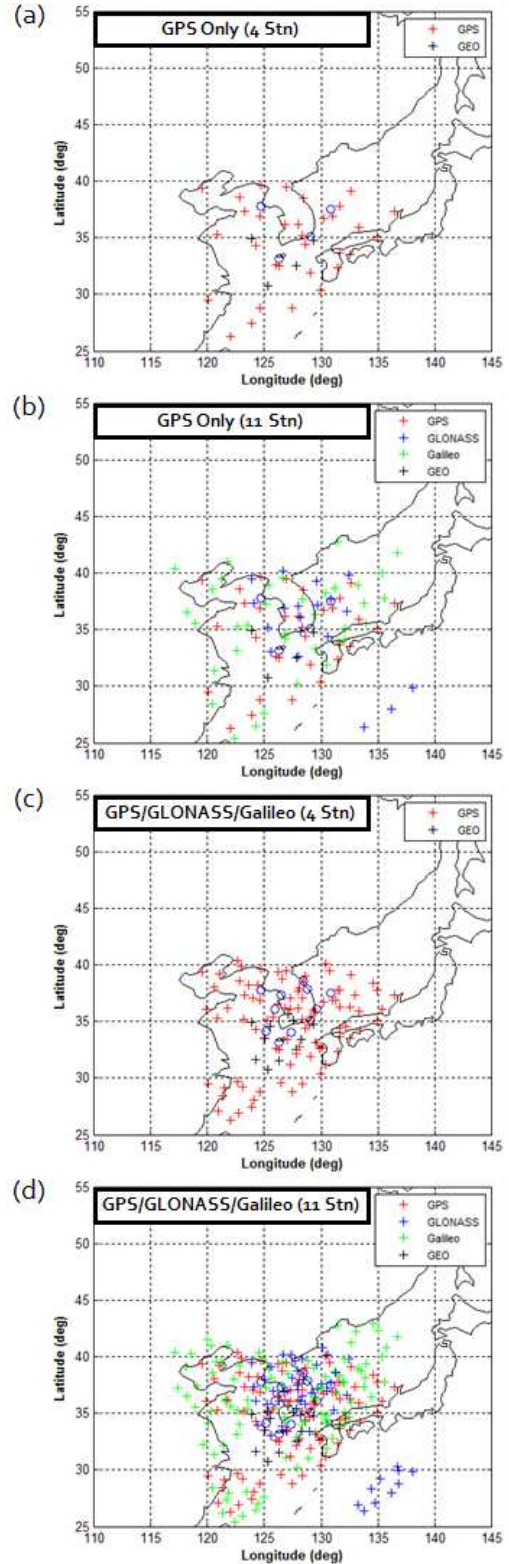


그림 6. 전리층 통과점 분포 (UTC 14:00)
Fig. 6. Distribution of pierce points (UTC 14:00).

보다 밀집하게 분포되어 있다. 따라서 다수의 기준국 추가는 성능에 큰 영향을 미치지 못하므로, 추후 한국형 광역보정시스템 구축 시 기준국 수의 증가 보다는 다중 위성항법을 활용하여 구축 하는 것이 더 효과적이라고 할 수 있다. 본 논문에서 수행된 다중 위성항법 광역보정시스템의 전리층 지연 추정 성능 분석을 통해 향후 네트워크 외곽 지역의 전리층 지연 추정 성능을 개선하기 위한 참고자료로서 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 단일 주파수 SBAS 사용자의 전리층 지연 추정 성능을 향상시키기 위한 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소를 통해 계약된 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방위성항법특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] C. S. Sin, J. H. Kim, and J. Y. Ahn, "Technical development trends of satellite based augmentation system," *Electronics and Telecommunications Trends*, Vol. 29, No. 3, pp. 74-85, Jun, 2014.

[2] D. H. Han, H. Yun, and C. D. Kee, "Performance analysis

of WA-DGNSS in Korea with the selection of reference stations," *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 37, No. 4, pp. 367-373, Aug, 2013.

[3] H. Yun, D. H. Han, and C. D. Kee, "Performance estimation of dual frequency and multi-constellation satellite based augmentation system for Korean region," *Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 17, No. 4, pp. 396-403, Aug, 2013.

[4] Russian Institute of Space Device Engineering, GLONASS interface control document, Moscow, Russia, Edition 5.1, 2008.

[5] European Space Agency, European GNSS(Galileo) open service, OS SIS ICD Issue 1.1, Sep, 2010.

[6] D. Y. Kim, A study on correction generation algorithms for wide area differential GNSS, Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 2007.

[7] Y. Chao, Real time implementation of the wide area augmentation system for the global positioning system with an emphasis on ionospheric modeling, Ph.D. dissertation, Stanford University, Stanford, CA, 1997.

[8] RTCA SC-159, Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment, RTCA Incorporation, Washington, DC, DO-229D, 2006.



김 동 옥 (Dong-Uk Kim)

2013년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2013년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 석박사통합과정
※ 관심분야 : 광역보정시스템, 다중 위성항법시스템



한 덕 화 (Deok-Hwa Han)

2011년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2011년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 석박사통합과정
※ 관심분야 : 광역보정시스템, 전리층 지연



윤 호 (Ho Yun)

2006년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2013년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
2013년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 선임연구원
※ 관심분야 : 광역보정시스템, 무결성 감시



기 창 돈 (Chang-Don Kee)

1984년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학사)
1986년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학석사)
1994년 1월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학과 (공학박사)
1996년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수
※ 관심분야 : 위성항법시스템, 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 초정밀위치결정시스템, 우주비행체 자세결정, 무인항공기 자동제어 시스템, 실내용 자동항법시스템, 항공교통관제시스템



서 승 우 (Seung-Woo Seo)

2008년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학과 (공학사)
2010년 2월 : 고려대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2010년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 3본부 4부 연구원
※ 관심분야 : 위성항법시스템, 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 의사위성항법시스템



박 흥 원 (Heung-Won Park)

1979년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
1988년 8월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학석사)
1995년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학박사)
1995년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 수석연구원
※ 관심분야 : 관성항법시스템, 위성항법시스템, 복합항법, 추정이론 및 분산형시스템