

중·장기선 GPS L1 상대측위에서 격자형 지역 전리층 모델 적용에 따른 측위 정확도 영향 평가

Assessment of Positioning Accuracy based on Medium- and Long-range GPS L1 Relative Positioning using Regional Ionospheric Grid Model

손은성¹⁾ · 원지혜²⁾ · 박관동³⁾

Son, Eun-Seong · Won, Jihye · Park, Kwan-Dong

Abstract

The ionospheric delay is the largest error source in GPS positioning after the SA effect has been turned off. The ionospheric error can be easily removed by using ionospheric-free combinations but it is only restricted for dual-frequency receivers. Therefore, in this study, the regional ionospheric grid model was developed for single-frequency receivers. The developed model was compared with GIM to validate its accuracy. As a result, it yielded RMSE of 3.8 TECU for 10 days. And L1 medium- and long-range relative positioning was performed to evaluate positioning accuracy improvements. The positioning accuracy was improved by 46.7% compared with that without any correction of ionosphere and troposphere and was improved by 14.5% compared with that only tropospheric correction.

Keywords : Regional Ionospheric Grid Model, Single-frequency Relative Positioning

초 록

전리층에 의한 신호지연은 SA 해제이후 GPS 측위에 가장 큰 오차 요인이다. 전리층 오차는 이중주파수 수신기를 이용할 경우 무전리층 조합으로 쉽게 제거할 수 있지만 단일주파수 수신기는 무전리층 조합을 수행할 수 없기 때문에 전리층 오차를 쉽게 제거할 수 없다는 단점이 존재한다. 따라서 이 연구에서는 단일주파수 사용자를 위한 격자형 지역 전리층 모델을 개발하였다. 개발된 지역 전리층 모델을 평가하기 위해 IGS의 전지구 모델과 비교하였으며 그 결과 열흘 평균 3.8 TECU의 RMSE를 나타내었다. 그리고 측위 정확도에 미치는 영향을 평가하기 위해 생성된 지역 전리층 모델을 적용하여 L1 관측치만을 이용한 중·장기선 상대측위를 수행하였다. 전리층과 대류권 오차를 보정한 결과 두 오차를 보정하기 전의 측위 결과와 비교하여 평균 46.7%의 측위 정확도가 향상되었으며 대류권 오차만 보정한 측위 결과와 비교하여 전리층 오차 보정 후에는 평균 14.5%의 측위 정확도가 향상되었다.

핵심어 : 격자형 지역 전리층 모델, L1 상대측위

1. 서 론

전리층은 SA(Selective Availability) 해제 이후 GPS(Global Positioning System) 측위에서 가장 큰 오차 요인으로 알려져 있다. 전리층 오차는 이중주파수 수신기에 기록된 관

측치를 이용하여 무전리층 조합(Ionospheric-free combination)을 수행하게 되면 99%까지 제거할 수 있다(Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Xu, 2007). 그러나 이중주파수 수신기는 가격이 매우 고가이므로 범용적 사용이 어려우며, 이에 반해 단일주파수 수신기는 이중주파수 수신기보다 절

1) 교신저자 · 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 석사과정(E-mail:h79s86@gmail.com)

2) 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 박사과정(E-mail:jhwon1021@inha.edu)

3) 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 부교수(E-mail:kdpark@inha.ac.kr)

반 또는 그 이상 저렴하므로 일반 사용자가 사용하기에 적합하다. 그러나 단일주파수 수신기는 무전리층 조합을 사용할 수 없기 때문에 단일주파수 사용자를 위한 전리층 모델에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 오늘날 개발된 전리층 모델은 사용자에게 전리층 총 전자수(TEC, Total Electron Contents) 값을 제공해준다.

단일주파수 사용자를 위한 지역 전리층 모델(RIM, Regional Ionosphere Model) 생성과 관련된 국내 선행연구로 황유라 등(2003)과 김경희 등(2009)은 DCB(Difference Code Bias)를 고려하지 않은 지역 모델을 개발하였으며, 최병규(2009)와 이창문 등(2011)은 DCB를 고려한 지역 모델을 개발하였으나 이들은 반송파 위상과 의사거리 관측치를 조합하여 지역 전리층 모델을 생성하였다. 의사거리 관측치는 반송파 위상 관측치보다 큰 잡음을 포함하고 있기 때문에 이들의 조합을 이용하여 전리층 모델을 생성할 경우 비교적 낮은 정확도의 전리층 총 전자수가 추정된다(이창문, 2011; Liao, 2000). 이에 따라 이창문(2011)은 상대 측위 기반으로 반송파 위상만을 이용하여 전리층 총 전자수를 추정하였으나 모호정수 결정과 사이클슬립 검출 및 보정 등 매우 복잡한 계산 과정이 내재되어있다. 또한, 추정된 TEC는 전지구 전리층 모델(GIM, Global Ionosphere Model)과 비교하여 RMSE(Root Mean Square Error) 차이만을 나타내었으며 측위에 직접 적용하지 않았다. 따라서 개발된 지역 전리층 모델이 측위 정확도에 미치는 영향을 알 수 없다.

이 연구에서는 한반도 상공의 지역 전리층 모델을 개발하기 위해 17개 국내 상시관측소의 반송파 위상 관측치만을 사용하였으며, 기존 선행연구보다 단순한 알고리즘을 사용하여 TEC를 산출하였다. 개발된 지역 모델은 IGS(International GNSS Service)의 전지구 전리층 모델하여 결과를 분석하였다. 또한, L1 관측치 기반의 이용한 이중차분 상대측위 알고리즘을 구현하고 중·장기선에서 오차를 보정하지 않은 경우와 대류권 오차만 보정한 경우의 측위 결과를 비교하여 지역 전리층 모델 적용 전·후의 측위 정확도의 변화와 향상율을 분석하였다.

2. 격자형 지역 전리층 모델 개발

2.1 GPS 기반 TEC 격자지도 생성 알고리즘

GPS의 L1, L2 신호는 전리층을 통과하면서 서로 다른 크기의 굴절률을 나타내고, 이러한 성질을 이용하면 전리층 총 전자수를 관측할 수 있다. 일반적으로 GPS 위성과

수신기의 시선방향에서 관측한 전리층 총 전자수(STEC, Slant TEC)의 관측은 의사거리와 반송파 위상 기반의 기하형상 무시 선형 조합(Geometry-free combination)이 널리 사용되며(Blewitt, 1990), 수신기와 위성의 DCB, 그리고 다중경로 오차 등을 동시에 고려하면 이는 식 (1)과 식 (2)로 정의된다(최병규 등, 2009).

$$STEC_p = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (P_2 - P_1) + b_p^{r,s} + m_p + noise_p \quad (1)$$

$$STEC_\phi = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (N_1 \lambda_1 - N_2 \lambda_2) + b_\phi^{r,s} + m_\phi + noise_\phi \quad (2)$$

여기서 f_1, f_2 는 GPS L1, L2 신호의 주파수이며, k 는 전리층 굴절과 관련된 값으로 약 $80.62(m^2/s^2)$ 를 갖는다. P 는 의사거리 관측치, $b^{r,s}$ 는 수신기와 위성의 DCB, m 은 다중경로 오차, $noise$ 는 신호의 잡음, N 은 모호정수, λ 는 L1, L2 신호의 파장을 나타낸다.

두 식의 특징을 살펴보면, 의사거리 기반의 식 (1)은 TEC의 절대량 관측이 가능하나 신호의 잡음과 멀티패스의 영향을 많이 받아 정밀도가 낮은 단점이 있고, 반송파 위상 기반의 식 (2)는 신호의 잡음과 멀티패스의 영향을 적게 받는 반면 모호정수 결정을 위한 복잡한 자료처리 과정이 필요하다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Eucler & Goad(1991)과 Goad(1990)은 잡음과 멀티패스의 영향을 줄이기 위해 $STEC_p$ 에 칼만 필터를 적용하였으며, Mannucci 등(1993), Komjathy(1997), Skone(1998) 등의 선행 연구들은 $STEC_p$ 와 $STEC_\phi$ 을 동시에 사용하여 보다 정밀한 TEC 관측을 시도하였다. 그 중 Skone(1998)은 두 관측치의 오프셋을 가감해주는 반송파 위상 기반의 TEC 관측기법을 제안하였으며, 이 연구에서는 Skone(1998)이 제안한 식 (3)의 알고리즘을 기반으로 STEC을 관측하였다. 식 (3)의 $offset$ 은 식 (4)에 의해 산출된다.

$$STEC(t_j) = STEC_p(t_j) + offset(t_j) \quad (3)$$

$$offset(t_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^j (STEC_p(t_i) - STEC_\phi(t_i)) \quad (4)$$

$$= \frac{1}{N} [(N-1)offset(t_{j-1}) + (STEC_p(t_j) - STEC_\phi(t_j))]$$

식 (3)으로부터 계산된 STEC은 식 (4)의 $offset$ 계산 과정에서 다중경로 오차 및 신호의 잡음이 누적 평균됨으로써 그 크기가 감소되는 효과가 있다. 따라서 TEC 산출에

표 1. GPS VTEC과 구면조화 함수로 추정된 VTEC의 차이(단위: TECU)

차수	RMSE	차수	RMSE	차수	RMSE	차수	RMSE
1	6.27	4	3.99	7	10.97	10	5.23
2	3.48	5	1147.65	8	13500.51	11	21.5
3	29.17	6	478.44	9	66.95	12	342.87

직접적인 영향을 주는 DCB만을 고려하였으며, VTEC(Vertical TEC)과 STEC의 관계를 사상함수를 이용하여 최종적으로 정리하면 식 (5)와 같다.

$$VTEC = (STEC - b_s - b_r) \cos \chi \quad (5)$$

여기서 b_s 와 b_r 은 각각 위성과 수신기의 DCB를 나타내며, $\cos \chi$ 는 GPS 수신기가 관측한 STEC을 IPP(Ionosphere Pierce Point) 지점에서의 VTEC으로 변경해주기 위한 사상함수를 나타낸다(Mannucci et al., 1993). 일반적으로 태양 활동이 활발하지 않은 낮 시간 동안 전자밀도 분포는 450km 높이에 밀집되어 있는 것으로 알려져 있으므로(Mannucci et al. 1998), 이 논문에서는 단일 레이어 높이를 450km로 적용하였으며, IPP의 위치를 산출하는 식은 지면 상 참고문헌으로 대체하였다(Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Ma & Maruyama(2003)에 따르면 식 (5)에서 VTEC과 DCB를 분리하기 위해 한 시간 동안 동일한 격자 범위 안에서 VTEC은 같은 값을 가지며, DCB는 하루 동안 변하지 않는 것으로 가정한다. 그러나 이 경우 VTEC과 DCB를 동시에 추정하게 됨으로써 자료처리 과정에서 정확도가 낮아지게 되므로 이 연구에서는 한 시간 간격으로 추정된 수신기 DCB의 일 평균값과 IGS에서 제공하는 위성 DCB 값을 식 (5)에 재적용하여 DCB가 제거된 VTEC을 최종 산출하였다. 이 연구에서 위성 DCB를 추정하지 않은 이유는 한반도 내 GPS 상시관측소만을 이용할 경우 GPS 위성이 24시간 연속적으로 관측되지 않음으로써 산출되는 위성 DCB의 정확도가 낮아지기 때문이다(최병규 등, 2009). 마지막으로 최종 산출된 IPP 위치에서의 VTEC은 2차원 격자형 전리층 모델로 구현하기 위해 구면조화 함수를 이용하였으며, 구면조화함수를 이용한 TEC 모델은 식 (6)과 같다(Schaer, 1999).

$$VTEC(\phi, \lambda) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \phi) (\tilde{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \tilde{S}_{nm} \sin(m\lambda)) \quad (6)$$

여기에서 ϕ 는 IPP의 지자기위도, λ 는 태양 지자기 좌표계에서 IPP의 경도를 지방시(local time)로 변환한 값이며, n_{max} 는 구면조화함수의 최대 degree, \tilde{P}_{nm} 은 nominal associated Legendre function, \tilde{C}_{nm} 과 \tilde{S}_{nm} 은 VTEC으로부터 추정해야 하는 구면조화함수의 계수를 나타낸다. 구면조화 함수의 차수를 결정하기 위해 1~12차까지 차수를 대입하여 각각의 구면조화 함수의 계수를 추정할 다음 산출된 결과물이 입력으로 사용된 VTEC 값과 가장 작은 편차를 보이는 차수를 최종 선택하였다. 표 1은 1~12차까지 차수를 대입하고 추정된 VTEC을 입력으로 사용된 GPS VTEC과 비교한 것이다. 표 1에 따르면 대입된 차수에 따라 추정된 VTEC의 정확도가 다르고 일부 차수는 발산하는 경향을 나타내었다. 이 연구에서는 가장 높은 정확도를 보인 2차 구면조화 함수를 격자모델 산출에 적용하였다.

이 연구에서는 한반도 상공의 지역 전리층 모델을 생성하기 위해 국토지리정보원의 17개 GPS 상시관측소를 이용하였으며 위경도를 각각 1° 간격으로 구성한 위도 18.5~49.5°N, 경도 104.5~149.5°E 범위의 한 시간 간격 VTEC 모델을 생성하였다. 연구에 사용된 GPS 상시관측소의 위

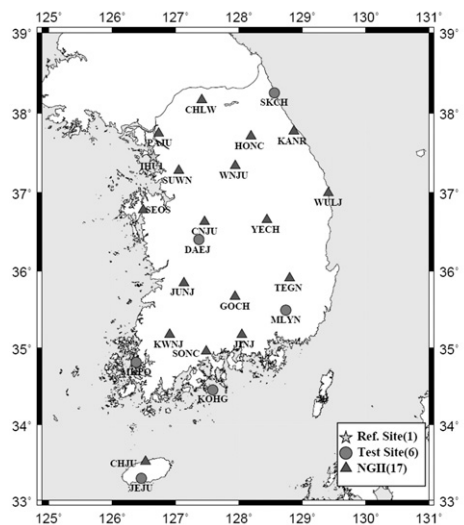


그림 1. 분석대상 GPS 상시관측소 위치

치는 그림 1과 같으며 그림 1에서 삼각형(△)은 전리층 모델 생성에 사용한 관측소이고, 원(○)은 측위 정확도 분석에 사용한 관측소이다. 측위 정확도 검증에 사용된 GPS 상시관측소의 위치좌표는 표 2와 같으며 2011년 7월 1일(DOY 182)에 관측된 GPS 자료를 사용하였다.

표 2. 정확도 검증에 사용된 GPS 상시 관측소 위치

관측소	위도 [N]	경도 [E]	고도 [m]	기선 [km]
IHU1	37°27'02.0"	126°39'19.7"	61.0	-
DAEJ	36°23'57.9"	127°22'28.1"	116.8	133.1
SKCH	38°15'03.5"	128°33'53.1"	46.1	190.1
MLYN	35°29'28.9"	128°44'38.3"	43.6	286.8
MKPO	34°49'00.7"	126°22'53.1"	65.4	293.3
KOHG	34°27'13.6"	127°31'09.1"	40.5	341.5
JEJU	33°17'18.0"	126°27'43.8"	431.2	462.0

2.2 TEC 산출 결과 분석

이 연구에서 개발된 지역 전리층 모델은 IGS에서 제공하는 전지구 전리층 모델을 기반으로 TEC 산출 결과를 분석하였다. IGS는 4개 기관으로부터 생성된 TEC 모델을 가중평균법을 사용하여 최종 결합하고 이를 final 버전의 전리층 모델로 제공한다. IGS final 버전의 전리층 모델은 위도 2.5°, 경도 5.0° 마다 2시간 간격의 VTEC을 제공한다(IGS 홈페이지).

개발된 RIM 모델은 GIM 모델과 비교하기 위해 위도 5°, 경도 10° 마다 총 30개의 격자점을 선정하였으며 2011년 6월 26일부터 7월 5일(DOY 177~186)까지 총 열흘 동안의 TEC 차이를 비교하였다. TEC 비교를 위해 분석 대상으로 선정된 각 격자지점에 대하여 공간차원에서는 Junkins 등(1973)이 제안한 보간법을 시간차원에서는 스플라인 보간법을 적용하였으며 30초 간격으로 하루 동안 2,880개의 TEC를 산출하였다. 선정된 30개 지점의 RIM과 GIM의 열흘 평균 RMSE는 표 3에 나타내었으며 RIM 모델은 GIM 모델을 기준으로 전체 평균 3.8 TECU의 RMSE를 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 개발된 모델은 위도 35°N에서 GIM 모델과 가장 잘 일치하고, 저위도일수록 그리고 한반도에서 멀어질수록 RMSE 수치는 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 모델 개발에 사용된 VTEC이 한반도와 그 주변에 분포하기 때문에 격자지도의 가장자리에서는 관측데이터의 부재로 구면조화 함수의 계수 추정 정확도가 낮아진 것으로 판단된다. 그림 2는

측위 정확도 분석에 사용된 2011년 7월 1일(DOY 182)의 위도 35°N, 경도 115°E 지점의 TEC 시계열을 나타낸 것으로 분석 당일 한반도 상공의 TEC는 최대 40 TECU까지 상승하는 것을 보여준다.

표 3. GIM기준 RIM의 열흘 평균 RMSE(단위: TECU)

위도(°N) \ 경도(°E)	105	115	125	135	145
	45	4.8	4.7	4.5	4.5
40	3.2	3.1	3.1	3.2	3.4
35	3.1	2.8	2.8	3.0	3.2
30	3.8	3.2	3.0	3.1	3.2
25	5.1	4.2	3.5	3.2	3.2
20	6.0	5.2	4.4	4.2	4.3

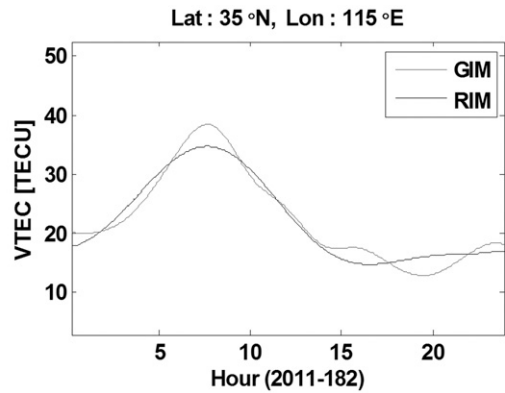


그림 2. 한반도 상공에서의 TEC 변화

3. 격자형 지역 전리층 모델을 이용한 상대측위

3.1 L1 상대측위 알고리즘 구현 및 검증

이 연구에서는 개발된 전리층 모델 적용에 따른 측위 정확도 변화를 분석하기 위해 L1 반송파 위상 관측치를 이용한 이중차분 상대측위 알고리즘을 구현하였다. 이중차분 상대측위는 수신기 시계오차와 위성 시계오차를 제거할 수 있는 장점이 있으며 PPP(Precise Point Positioning)에서 고려해야할 phase wind up, site displacements 등의 오차 요인은 미세하게 작용하여 무시할 수 있다(Kouba, 2009).

위성 s 로부터 수신기 r 에 수신된 L1 반송파 위상의 관측치는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_1 \phi_{r,1}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - \delta I_{r,1}^s + \delta T_r^s + \lambda_1 N_{r,1}^s + \epsilon_{r,1}^s \quad (7)$$

여기서, $\phi_{r,1}^s$ 은 사이클 단위의 L1 관측치, ρ_r^s 는 수신기와 위성사이의 기하학적 거리, c 는 빛의 속도, dt_r 은 수신기 시계오차, dt^s 은 위성시계오차, $\delta I_{r,1}^s$ 은 L1 관측치의 전리층 오차, δT_r^s 은 대류권 오차, 그리고 $\epsilon_{r,1}^s$ 은 랜덤오차이다. 식 (7)에 표기된 오차들 이외에 궤도 오차, 위성과 수신기 안테나의 위상중심변화 등이 있으나 이 연구에서는 고려하지 않았다. 식 (7)을 이용하여 위성간, 수신기간 차분을 수행하면 식 (8)과 같이 이중차분 수식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_{ij,1}^{kl} &= \Phi_{ij,1}^k - \Phi_{ij,1}^l = \Phi_{i,1}^k - \Phi_{j,1}^k - [\Phi_{i,1}^l - \Phi_{j,1}^l] \\ &= \rho_{ij}^{kl} - \delta I_{ij,1}^{kl} + \delta T_{ij}^{kl} + \lambda_1 N_{ij,1}^{kl} + \epsilon_{ij,1}^{kl} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 k 는 기준위성으로 한 개의 관측시각에 기준 위성을 제외한 n 개의 위성 ($l_1 \dots l_n$)이 수신기 시야에 관측되었다고 가정했을 때, k 위성은 고정되어 나머지 n 개의 위성과 차분된다. 따라서 l 은 기준위성을 제외한 나머지 위성이고 i 는 기준국, j 는 이동국 수신기이다.

식 (8)에 따르면 반송파 위상 기반의 상대측위 알고리즘은 정확한 모호정수 결정을 위해 이중차분된 전리층 오차와 대류권 오차를 보정해야한다. 전리층 오차와 대류권 오차 보정에 앞서 반송파 위상을 이용한 측위에서 반드시 고려해야할 요소는 모호정수 결정과 사이클슬립 검출이다. 모호정수는 위성에서 송출되는 첫 번째 신호가 수신기에 도달할 때 알 수 없는 위상의 값을 말하며 사이클슬립이 발생하지 않을 경우 그 값이 변하지 않는 특징을 가지고 있다. 모호정수는 실수형과 정수형으로 구분할 수 있으며, 정수형 모호정수로 결정하는 것은 정밀하고 정확한 측위를 위한 과정이다(Hofmann-Wellenhof et al., 2008). 이 연구에서는 모호정수 결정을 위해 모호정수 산출에 효과적인 방법으로 알려진 LAMBDA(Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment) 알고리즘을 적용하였다(Hofmann -Wellenhof et al., 2008; Teunissen, 1993; 최병규, 2009).

또한 사이클슬립은 GPS 위성 신호가 수신되는 과정에 서 신호가 단절되어 갑작스럽게 접목하는 현상으로서(그림

3) 정확한 모호정수 결정을 위해 반드시 검출 또는 보정해야한다. 이 연구에서는 사이클슬립 검출을 위해 반송파 위상과 의사거리 차분을 이용하였으며 식 (9)에 나타내었다. 이를 시간에 대해 차분해 주면 사이클슬립이 발생하지 않았을 경우 전리층 지연량의 변화량만 남게 되는데 짧은 시간에 전리층 지연량의 변화는 크지 않으므로 이를 감지함으로써 사이클슬립을 검출할 수 있다(Hofmann-Wellenhof et al., 2008). 이렇게 검출된 사이클슬립 발생 위성은 측위 과정에서 제외하였다.

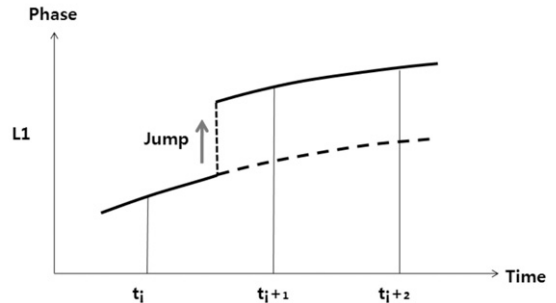


그림 3. 사이클슬립이 발생한 경우(Hofmann-Wellenhof et al., 2008)

$$R_{r,1}^s = -2\delta I_{r,1}^s + \lambda_1 N_{r,1}^s \quad (9)$$

이 연구에서는 측위 알고리즘 구현을 위해 방송궤도력을 이용하여 위성의 위치를 산출하였으며 위성고도각은 10° 로 설정하였다. 그리고 상대측위를 수행하기 위한 기준국의 참값과 측위 정확도 분석에 쓰일 좌표는 고정밀 GNSS(Global Navigation Satellite System) 자료처리 소프트웨어인 GIPSY-OASIS(GNSS-Inferred Positioning SYstem and Orbit Analysis Simulation Software) 5.0으로 처리한 결과를 사용하였다. GPS 자료처리 과정에서는 측위 좌표 결과와 RIM, 그리고 GIM의 좌표계를 모두 IGS08로 통일하였다.

상대측위 알고리즘에서 지역 전리층 모델의 영향을 분석하기에 앞서 인하대학교 4호관 옥상에 설치된 IHU1과 IHU3 관측소를 이용하여 구현된 알고리즘의 정확도를 평

표 4. 초단기선에서의 알고리즘 구현 평가 결과

관측소	Float ambiguity(cm)		Integer ambiguity(cm)		Imp.(%)	
	RMSE	Std.	RMSE	Std.	RMSE	Std.
IHU3	2.21	0.72	2.15	0.40	2.71	42.86

가하였다. 이중차분 상대측위 알고리즘은 기준국과 이동국의 거리가 10km 이내일 경우 전리층 오차와 대류권 오차는 공통오차로 대부분 소거된다(이민석, 2006). 따라서 IHU1과 IHU3 관측소는 기선이 약 1m 이기 때문에 두 개의 관측소를 이용하여 상대측위를 수행하게 되면 정밀한 측위 결과를 얻을 수 있고 구현된 알고리즘의 정확도를 평가할 수 있다.

구현된 상대측위 알고리즘의 정확도 평가를 위해 최소자승법으로 추정된 실수형 모호정수와 LAMBDA 알고리즘으로 산출한 정수형 모호정수를 이용한 측위 결과를 비교하였다. 표 4에 상대측위 결과를 나타내었으며 두 가지 방법 모두 약 2cm 수준의 측위 정확도가 산출된 것을 확인할 수 있다. LAMBDA를 적용한 결과 최소자승법으로 추정된 실수형 모호정수보다 측위 정확도가 2.7%로 다소 미세하게 향상되었지만 정밀도의 경우 약 43%가 향상된 것을 확인할 수 있었으며 그림 4에서도 실수형 모호정수로 측위한 결과보다 LAMBDA를 적용한 측위 결과의 시계열이 더 나은 정밀도를 보이는 것을 확인할 수 있다.

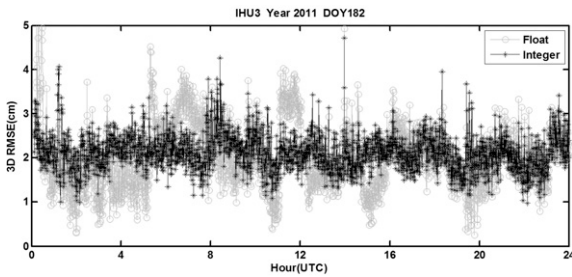


그림 4. 모호정수 결정에 따른 3차원 오차 시계열

3.2 지역 전리층 모델 적용에 따른 측위 정확도 분석

이중차분 상대측위에서 전리층과 대류권 오차를 공통 오차로 소거할 수 있는 기선은 약 10km 이내이므로 중·

장기선에서는 전리층과 대류권 오차를 기준국과 이동국에 개별적으로 모델링해서 보정해야한다. 따라서 이 연구에서 개발된 지역 전리층 모델이 측위 정확도에 미치는 영향만을 분석하기 위해서는 대류권 오차가 정확하게 보정되어야한다. 대류권 지연 오차는 GIPSY-OASIS 5.0으로 산출된 천정방향 총 지연량과 기상센서에 기록되어있는 상대습도, 기압, 온도를 이용하여 관측소 지점에서의 정밀한 천정방향 건조지연(ZHD, Zenith Hydrostatic Delay)과 천정방향 습윤지연(ZWD, Zenith Wet Delay)을 산출하였다(김두식, 2011). 산출된 ZHD와 ZWD는 Niell 사상함수를 이용하여 시선방향 건조지연과 시선방향 습윤지연으로 변환 후에 측위에 적용하였다. 그리고 격자형 지역 전리층 모델은 1° 간격의 격자점에만 VTEC 값이 있으므로 자료처리에 사용하려면 필요한 지점으로 내삽할 모델이 필요하다. 격자형 모델을 내삽할 때 사용한 방법은 Junkins 등(1973)이 제안한 모델을 사용하였으며 사상함수를 이용하여 STEC으로 변환 후 측위에 적용하였다.

앞서 계산된 보정정보를 측위 알고리즘에 적용한 결과는 표 5에 나타내었으며 자료처리시 기준국은 IHU1 관측소를 이용하였다. 모든 자료처리는 LAMBDA를 이용하여 모호정수를 산출하였으며 모호정수 산출 정확도를 높이기 위해 관측치들을 누적하여 산출하였다. 그리고 표 5에서 각각의 열은 오차를 보정하지 않은 경우, 대류권 오차만 보정한 경우, 그리고 전리층 오차와 대류권 오차를 모두 보정한 경우의 3차원 RMSE와 그 향상율을 나타낸다. 표 5를 보면 대류권 오차만 적용한 경우 평균 37.4%의 측위 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있으며 전리층과 대류권 오차를 모두 적용할 경우 평균 46.7%의 측위 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 대류권 오차만 적용한 측위 결과 대비 전리층과 대류권 오차 모두를 보정한 경우의 측위 정확도는 평균 14.5% 향상되는 것을

표 5. 오차 보정 전과 후의 상대측위 결과

관측소	Non	Trop		IonoTrop		
	3D RMSE (cm)	3D RMSE (cm)	Imp.(%)	3D RMSE (cm)	Non Imp.(%)	Trop Imp.(%)
DAEJ	73.8	39.5	46.5	38.8	47.4	1.8
SKCH	98.6	62.4	36.7	58.6	40.6	6.1
MLYN	113.7	72.6	36.1	55.4	51.3	23.7
MKPO	134.3	85.0	36.7	71.1	47.1	16.4
KOHG	139.1	88.2	36.6	69.7	49.9	21.0
JEJU	171.2	117.1	31.6	95.8	44.0	18.2

확인할 수 있다. 대류권과 전리층 오차를 모두 보정했을 경우 기선이 가장 짧은 대전 관측소에서 38.8cm, 기선이 가장 긴 제주 관측소에서 95.8cm 3차원 RMSE 측위 정확도를 나타내었다.

그림 5는 표 5의 결과를 바탕으로 좌측에는 기선거리에 따른 전리층 및 대류권 오차 보정 전·후의 측위 정확도를 나타내었으며 우측에는 오차 보정 후의 측위 정확도 향상율을 나타낸 것이다. 그림 5(좌)를 보면 오차를 보정하지 않은 경우와 대류권 오차만 보정했을 경우의 상대측위는 기선이 길어짐에 따라 오차가 증가하는 것으로 나타났다지만, 전리층과 대류권 오차를 모두 보정한 경우에는 속소 관측소보다 기선이 긴 밀양 관측소가 더 나은 측위 결과를 나타내었으며 또한 고흥 관측소도 목포 관측소보다 더 나은 측위 결과를 나타내었다. 이러한 측위 결과는 대류권의 경우 관측소 지점의 정밀한 대류권 오차 보정정보를 이용한 반면 전리층은 내삽과정을 거치므로 이에 따른 다소 낮은 정확도의 전리층 보정정보가 적용된 것으로 판단된다. 그러나 전리층과 대류권 보정정보 적용에 의해 기선이 멀어질수록 RMSE가 크게 줄어드는 것으로 확인되었으며 이들의 상대적인 크기의 향상율로 비교하면 그림 5(우)와 같이 관측소들은 서로 유사한 향상율을 갖는 것으로 나타났다.

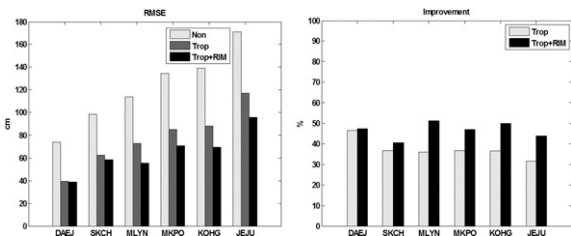


그림 5. 오차 보정 전과 후의 상대측위 정확도(좌)와 향상율(우)

그림 6은 상대측위 알고리즘에 실제로 적용한 이중차분된 시선방향 전리층 오차와 대류권 오차의 히스토그램을 나타낸 것이다. 그림 6을 보면 대전 관측소보다 제주관측소에서 이중차분된 지연량이 크게 나타난 것을 확인할 수 있고 이는 기선이 멀어짐에 따른 전리층 오차와 대류권 오차의 지역적인 차이를 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 이중차분된 지연량의 크기를 살펴보면 전리층 오차의 경우 대부분 0에 집중되어 분포한 반면, 대류권 오차는 전리층 오차 보다 이중차분된 값이 크게 나타났으며 전리층보다 측위 알고리즘 자료처리 과정에서 지역적인 차이를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

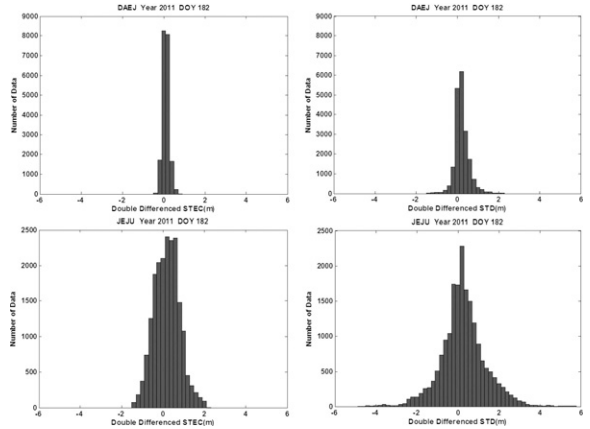


그림 6. 이중차분된 시선방향 전리층(좌) 및 대류권 오차(우)

4. 결론

이 연구에서는 반송파 위상 기반의 TEC 관측 알고리즘을 기반으로 단일주파수 사용자를 위한 격자형 지역 전리층 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 IGS 전지구 전리층 모델을 기준으로 TEC 산출 결과 분석을 수행하였으며, L1 반송파 위상을 이용한 이중차분 상대측위 알고리즘에 적용하여 중·장기선에서의 지역 전리층 모델 적용에 따른 측위 정확도의 영향을 분석하였다. 개발된 지역 전리층 모델은 측위 정확도 분석에 앞서, IGS 전지구 전리층 모델과 비교하였으며, 그 결과 열흘 평균 3.8 TECU의 RMSE를 나타내었다. 또한, 개발된 모델은 분석에 사용된 VTEC이 한반도와 그 주변에 분포함에 따라 한반도와 인근 상공에서 정확도가 가장 높고 격자지도의 가장자리에서 정확도가 다소 저하되었다.

지역 전리층 모델에 따른 측위 정확도의 영향을 분석하기 위해 L1 반송파 위상 기반 상대측위 알고리즘에 GIPSY-OASIS와 기상센서에서 산출한 ZHD와 ZWD 값을 적용하여 대류권 오차를 보정한 다음 지역 전리층 모델 적용에 따른 측위 정확도 변화를 분석하였다. 그 결과 전리층과 대류권 오차를 보정하지 않은 측위 결과 대비 대류권 오차만 보정했을 경우 3차원 측위 정확도는 평균 37.4% 향상되었으며, 전리층과 대류권 오차를 모두 보정했을 경우 평균 46.7%의 측위 정확도가 향상된 것을 확인할 수 있었다. 또한 자료처리 알고리즘에 적용된 전리층과 대류권 보정정보의 특징을 분석하기 위해 이중차분된 시선방향 전리층 및 대류권 오차를 히스토그램으로 살펴 보았으며, 그 결과 기선이 증가함에 따라 이중차분된 시

선방향 오차들의 크기도 같이 증가하였다. 또한 이중차분된 시선방향 전리층 오차는 대부분 0에 분포한 반면 대류권 지연오차는 보다 큰 값으로 측위 알고리즘에 적용되어 측위정확도 향상에 영향을 미친 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 위성항법기반 교통인프라 기술개발의 연구비지원(06교통핵심A03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김두식 (2011), AWS 기상자료 보간을 통한 GPS 가강수량 산출 및 정확도 검증, 석사학위논문, 인하대학교.

김경희, 박관동 (2009), 국토해양부 GPS 상시관측소를 활용한 한반도 전리층의 총전자수 추정, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제 17권, 제 1호, pp. 149-155.

이민석 (2006), 무선인터넷과 RF모형을 혼합한 RTK-GPS측량 정확도 개선, 박사학위논문, 인하대학교.

이창문, 김지혜, 박관동 (2011), Differential Code Bias를 고려한 한반도 전리층 총전자수 지도 생성, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 29권, 제 3호, pp. 293-301.

이창문 (2011), 반송파 위성 기반 전리층 총전자수 추정, 석사학위논문, 인하대학교.

최병규 (2009), 중거리 기선 측지 성능 개선을 위한 지역 전리층 모델 개발, 박사학위논문, 충남대학교.

최병규, 조성기, 이상정 (2009), 전리층 TEC를 이용한 GPS 수신기와의 위성의 DCB 추정, 한국우주과학회지, 한국우주과학회, 제 26권, 제 2호, pp. 221-228.

황유라, 박관동, 박필호, 임형철, 조정호 (2003), 지역적인 GPS 관측 데이터를 이용한 이온층 모델링 및 추정, 대한원격탐사학회지, 제 19권 제 4호, pp. 227-284.

Blewitt G. (1990), An automatic editing algorithm for GPS data, *Geophysical Research Letters*, Vol. 17, No. 3, pp. 199-202.

Eucler H. and Goad C. C. (1991), On optimal filtering of GPS dual-frequency observations without using orbit information, *Bulletin Geodesique*, Vol. 65, No. 2, pp. 130-143.

Goad C. C. (1990), Optimal filtering of pseudoranges and phases from single-frequency GPS receivers, *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 37, No. 4, Fall.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Wasle E. (2008), *GNSS: Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo & More*, Springer/WienNewYork.

IGS 홈페이지 : <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>

Junkins J. L., Miller G. W., and Jancaitis J. R. (1973), A weighting function approach to modelling of irregular surfaces, *Journal of Geophysical Research* Vol. 78, No. 11, pp. 1794-1803.

Komjathy A. (1997), *Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system*, Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

Kouba J. (2009), A guide to using International GNSS Service(IGS) products, *Natural Resources Canada*.

Liao X. (2000), *Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network*, UCGE Reports, Number 20143, The university of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

Ma G. and Maruyama T. (2003), Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan, *Annales Geophysicae*, Vol. 21, pp. 2083-2093.

Mannucci A. J., Wilson B. and Edwards C. (1993), A new method for monitoring the Earth's ionospheric total electron content using the GPS global network, *Proceedings of the ION GPS-93*, Salt Lake City, Utah, pp. 1323-1332.

Mannucci A. J., Wilson B. D., Yuan D. N., Ho C. H., Lindqwister U. J. and Runge T. F. (1998), A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements, *Radio Science*, Vol. 33, No. 3., pp. 565-582.

Schaer, S., (1999), *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*, Ph. D dissertation, Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland.

Skone S. (1998), *Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region*, Ph.D. dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

Teunissen P. (1993), The least squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation, *Journal of Geodesy*, Vol. 70, No. 1-2, pp. 65-82.

Xu G. (2007), *GPS: theory, algorithms and applications*, Springer.