

# 다중 기준국 보정정보 모델링 방식에 따른 Compact Network RTK 사용자 성능 비교

## Performances Comparison of Compact Network RTK User Based on Modelling of Multiple Reference Station Corrections

송준솔\*, 박병운\*\*, 기창돈\*<sup>0</sup>

June-Sol Song\*, Byung-Woon Park\*\* and Chang-Don Kee\*<sup>0</sup>

### 요 약

본 논문에서는 Network RTK 보정정보를 사용자에 적용 시, 다중 기준국 보정정보 모델링 방식에 따른 사용자 성능 비교를 수행하였다. 기준국과 사용자 거리가 멀어질수록 사용자와 기준국의 GPS 오차요소 상관성이 감소하므로, 이와 같은 GPS 오차요소의 공간적 특성에 입각하여 다수의 네트워크 보정정보를 적절히 조합하여 사용자에 적용해주어야 한다. 기존에 기준국간 수평 거리 및 고도를 활용한 다양한 보정정보 모델링 방식을 활용하여, MAC 방식의 Compact Network RTK에 적용 가능한지 이론적으로 분석하였다. 한국 내 설치된 상시 기준국에서 습득한 실측 GPS 데이터를 활용하여, 서울대학교에서 제안한 Compact RTK와 기존의 Network RTK가 결합된 방식인 Compact Network RTK 사용자에 대해 각 모델링 방식 별 사용자 성능을 측정치 잔여오차 및 위치 정확도 예측치 관점에서 비교 및 분석을 수행하였다. 그 결과, 각 보정정보 모델링 방식에 대해 사용자 수평 위치 정확도 예측치의 경우 모두 2DRMS 5 cm 이내의 정확도를 보였고, 수직 위치 정확도 예측치의 경우 모두 95 % 신뢰도로 7 cm 이내의 정확도를 나타내었다. 또한, 기존 보정정보 모델 방식 중, 기준국간 고도 차이를 사용한 모델링 방법의 적용 가능 기준국 배치 조건에 대해 분석하였다.

### Abstract

In this paper, the performances of modeling methods for combining corrections from multiple reference stations for network user were compared and analyzed. The longer the distance between reference station and user is, the more the GPS errors are decorrelated. Based on this point, multiple corrections from reference stations which is constituting a network should be combined properly to be applied for user observation to eliminate GPS errors. There are many widely used conventional modeling methods and they are applied for Compact Network RTK users and user position accuracy is predicted by using residual errors in observation of user. Compact Network RTK is a technique of generating corrections which was developed by Seoul National University. As a result, the horizontal and vertical accuracies were within about 5 cm and 7 cm respectively with 95 % probability for all conventional modeling methods. In addition, we analyzed condition for reference station constellation for modeling method using height information.

Key words : Compact RTK, Network RTK, Correction Modeling Method, Correction Interpolation

### I. 서 론

Network RTK (Real Time Kinematics)는 여러 기준

\* 서울대학교 기계항공공학부(Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University), 항공우주신기술연구소(the Institute of Advanced Aerospace Technology)

\*\* 세종대학교 기계항공우주공학부(Mechanical and Aerospace Engineering, Sejong University)

· 제1저자 (First Author) : 송준솔(June-Sol Song)

0 교신저자 (Corresponding Author) : 기창돈(Chang-Don Kee, tel : +82-10-2201-9508, email : kee@snu.ac.kr)

· 접수일자 : 2013년 8월 20일 · 심사(수정)일자 : 2013년 8월 21일 (수정일자 : 2013년 10월 23일) · 게재일자 : 2013년 10월 30일

<http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.5.475>

국을 하나의 네트워크로 구성하고 반송파 위상을 활용하여 기존 RTK를 사용한 경우와 동일한 정확도의 위치 계산을 가능하게 하는 동시에, RTK 대비 동일 기준국 수로 더 넓은 영역에 대해 고 정확도 항법을 가능하게 하는 방식이다. 전 국토와 같은 광역에 대한 항법 인프라 구축은 기준국 설치 비용으로 인해 의사거리 측정치 기반 방식으로 제한되었으나, Network RTK의 개발로 반송파 측정치 기반 광역 보정 항법을 가능하게 하였다. Network RTK는 보정정보 생성 방식에 따라 크게 VRS (Virtual Reference Station), FKP (Flächenkorrekturparameter), MAC (Master-Auxiliary Concept) 방식으로 구분된다[1].

Compact RTK는 2002년 서울대학교에서 개발된 반송파 기반 보정정보 생성 방식으로, 사용자를 대상으로 전송하는 보정정보 메시지 크기 및 스케줄링을 통해 최소 500 bps의 저속 통신으로 RTK가 가능한 방식이다[2]. 2008년 Compact RTK와 앞서 소개한 모든 방식의 Network RTK 간 호환성이 검증되었으며, 두 방식의 통합 방식인 MAC 기반 Compact Network RTK가 다수의 사용자가 넓은 영역에 대해 이동하는 육상교통 환경 사용자의 인프라로서 적합하다는 활용 가능성에 대한 연구가 수행된 바 있다[10].

한편, Network RTK는 기존의 RTK와 달리, 하나의 네트워크를 구성하는 다수의 기준국에서 생성된 보정정보를 적절히 모델링하여 사용자 위치에 알맞은 정보로 조합하여 적용해주어야 한다. 즉, 기준국과 사용자 거리가 멀어질수록 사용자와 기준국의 GPS 오차요소 상관성이 감소하므로, 이와 같은 GPS 오차요소의 공간적 특성에 입각하여 다수의 네트워크 보정정보를 적절히 조합해주어야 한다. 다중 기준국 보정정보 모델링 방식은 1990년대 중반부터 2000년대 초반까지 활발히 연구되어, 널리 사용되고 있다. 이와 같은 기존의 여러 기준국 보정정보 모델링 방식은 네트워크를 구성하는 여러 기준국 중 기준 기준국을 선정하고 기준 기준국과 나머지 기준국의 수평 거리, 높이 차이 등 기준국 배치에 대한 정보를 활용하여 네트워크 내 지역에 대한 보정정보 모델링을 수행하였다. Gao는 기준 기준국과 나머지 기준국간 수평 거리에 반비례하는 가중치를 설정하는 보정정보 조합 방식을 제안하였으며[3], Han과 Rizos [4], Wanninger

[5], Wübbena [6], Schaer [7], Vollath [7] 등은 기준 기준국과 나머지 기준국간 동서방향 및 남북방향 거리를 활용하여 보정정보 조합 방식을 이용하였다. Varner [8]는 동서 및 남북 방향 거리 외에 기준국간 높이 차이를 활용하여 평면함수로 보정정보 모델링하는 방식을 제안하였다.

Compact Network RTK의 보정정보 조합 적용 가능성에 대한 수식적 분석이 기존에 수행되었으며, 미국 내 상시 기준국 측정치를 활용하여 수평거리에 대해 반비례하여 가중치를 계산하는 보정정보 조합 방식에 대해 사용자 성능이 검증된 바 있다[1].

본 논문에서는 기존의 다중 보정정보 모델링 방식의 MAC 기반 Compact Network RTK에 적용 가능 여부 및 분산성 (dispersive) 및 비 분산성 (nondispersive) 항 각각에 대한 적용 가능 여부에 대해 수식적으로 소개하고, 한국 내 구축된 상시 기준국 GPS 실측 데이터를 습득하여 각 보정정보 방식 별 MAC 기반 Compact Network RTK 사용자 성능 비교 및 분석을 수행하였다. 또한, 고도 차이를 고려한 보정정보 조합 방식 활용을 위한 기준국 배치 고려사항에 대해 분석하였다.

## II. 보정정보 모델링 방식의 MAC기반 Compact Network RTK 적용 가능성 확인

### 2-1 L1, L2 주파수 보정정보

보정정보 모델링 방식의 MAC 기반 Compact Network RTK 적용 가능성 확인을 위해 반송파 위상 측정치를 다음 식과 같이 정의한다.

$$\phi_r^i = d_r^i + B_r - b^i + \delta\phi_r^i + N_r^i \lambda \quad (1)$$

식 (1)에서,  $d$ 는 위성-수신기간 거리,  $B$ 는 수신기 시계 오차,  $b$ 는 위성 시계 오차,  $\delta\phi$ 는 전리층과 대류층 오차, 위성 관련 오차, 수신기 잡음이 포함된 GPS 오차이다.  $N$ 은 미지정수를,  $\lambda$ 는 파장을 나타낸다. 앞으로 표현되는 모든 식의 위 첨자는 위성 인덱스, 아래첨자는 기준국 인덱스를 의미한다.

MAC 기반 Compact Network RTK에서는 네트워크를 구성하는 보정정보를 하나의 주 기준국과 나머지 부 기준국으로 구분한다. 주 기준국에서는 Compact RTK 방식으로 생성된 반송파 보정정보(Carrier Phase Correction, CPC)를 생성하고, 나머지 주 기준국에서는 주-부 기준국간 차분된 보정정보(Master-Auxiliary Correction, MAC)를 생성하여 사용자에게 전송한다.

주 기준국에서 생성되는 CPC 보정정보는 식 (2)와 같이, 반송파 위상 측정치에서 시간에 따라 변화가 큰 항인, 거리, 수신기 시계오차와 미지정수를 제거하여 생성할 수 있다.

$$\delta\phi_r^i = \phi_r^i - (d_r^i + \hat{B}_r - \hat{b}^i - \hat{N}_r^i \lambda) \approx l_r^i + \delta B_r - \delta b^i + \lambda N_r^i \quad (2)$$

MAC 보정정보는 다음 식 (3)과 같이 기준국간 차분된 GPS 오차요소, 수신기 시계오차 및 미지정수 추정 오차로 구성된다.

$${}_{AUX} \Delta_{MAS} \delta\phi_r^i = \phi_r^i - (d_r^i + \hat{B}_r - \hat{b}^i - \hat{N}_r^i \lambda) \approx l_r^i + \delta B_r - \delta b^i + \lambda N_r^i \quad (3)$$

단,  ${}_k \Delta_l(\cdot) = (\cdot)_k - (\cdot)_l$

최종적으로 사용자에게 적용되는 보정정보는 주 기준국과 부 기준국의 CPC와 MAC에 적절한 가중치 ( $\omega$ )를 적용하여 다음과 같이 조합되어 생성된다.

$$\delta\hat{\phi}_r^i = \phi_{MAS}^i + \sum_{k=1}^m w_{kAUX(k)} \Delta_{MAS} \delta\phi \approx \hat{l}_r^i + \lambda \delta N_{MAS}^i + \Theta \quad (4)$$

단,  $AUX = \{AUX1, \dots, AUXm\}$

$$\Theta = \delta B + \sum_{k=1}^m w_{kAUX(k)} \Delta_{MAS} (\delta B + \lambda \delta N^{ref})$$

식 (4)의  $\hat{l}_r^i$ 은 사용자 위치의 GPS 오차요소 추정치로, 사용자 측정치에 적용되어 GPS 오차요소를 보상하는 역할을 수행하게 된다.

한편, 사용자는 식 (4) 적용 후, 미지정수 해결을

위해 다시 한 번 위성 차분을 수행하게 된다. 네트워크 보정정보가 최종적으로 사용자 측정치에 적용되는 형태는 다음 식 (5)와 같다.

$${}^i \nabla^j \delta \hat{\phi}_{user} = {}^i \nabla^j \delta \phi_{MAS}^i + \sum_{k=1}^m w_{kAUX(k)} \Delta_{MAS}^i \nabla^j \delta \phi \quad (5) \\ = {}^i \nabla^j \hat{l}_r^i + \lambda^i \nabla^j \delta N_{MAS}$$

식 (5)와 같이 가중치와 관련된 항은 사용자 위치의 추정된 GPS 오차요소 이외에 위성 차분에 의해 완전히 사라진 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 보정정보 모델링 과정에서 계산한 가중치는 사용자 위치의 GPS 오차요소 추정에만 관여하는 것을 확인할 수 있다.

### 2-2 분산성(dispersive) 및 비 분산성 (nondispersive) 보정정보

기존의 MAC 방식 Network RTK 보정정보는 전리층 지연만을 포함하고 있는 분산성(dispersive) 항, 그리고 대류층 지연과 위성 궤도오차를 포함하고 있는 비분산성(nondispersive) 항으로 나뉘어져 방송된다 [11]. MAC 기반 Compact Network RTK에 대해서도 기존의 보정정보 모델링 방식을 적용 가능한지 확인하기 위해 간략한 이론적 수식 전개를 수행하였다.

분산성 및 비 분산성 MAC 보정정보는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta \delta \phi_{r,disp}^i = \Delta T_r^i + \left( \Theta_v - \delta B - \sum_{k=1}^m v_k \Delta \delta B \right) \\ = \Delta T_r^i + bias_{r,disp}^i \quad (6) \\ \Delta \delta \phi_{r,ndisp}^i = \Delta T_r^i + \Delta \delta R_r^i + \Delta \delta B_r + \Theta_u \\ = \Delta T_r^i + \Delta \delta R_r^i + \Delta \delta B_r + bias_{r,ndisp}^i$$

식 (6)에서 I, T,  $\delta R$ 은 각각 전리층, 대류층 및 위성 궤도오차를 나타낸다.  $\gamma$ 는 L2, L1 주파수 비율의 제곱이다. 그리고  $\Theta_v$ 는 식 (4)에서 정의된  $\Theta$ 를 분산성 항에 대한 가중치인  $v$ 를 이용하여 계산된 값이고,  $\Theta_u$ 는 비 분산성 항에 대한 값이다. 식 (4)와 같이 사용자 위치의 분산성 및 비 분산성 보정정보 계산식을 나타내면 다음과 같다.

표 1. 기준국간 동서 및 남북 방향 거리 활용 방식 요약

Table 1. Correction Modeling Method using eastward and northward distances between reference stations

조합 방법	알고리즘 요약
Linear Combination Model (LCM)	$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ $\sum_{i=1}^n \alpha_i (X_u - X_i) = 0$ $\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \text{ minimized}$ $\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \Delta X_{1n} & \Delta X_{2n} & \dots & \Delta X_{n-1n} & 0 \\ \Delta Y_{1n} & \Delta Y_{2n} & \dots & \Delta Y_{n-1n} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta X_{un} \\ \Delta Y_{un} \end{bmatrix}$ <p style="text-align: center;">B <span style="margin-left: 100px;">α</span> <span style="margin-left: 100px;">W</span></p>
Linear Interpolation Model (LIM)	$V_m = \alpha \cdot \Delta X_m + b \cdot \Delta Y_m$ $V = \begin{bmatrix} V_{1,M} \\ V_{2,M} \\ \vdots \\ V_{n-1,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{1,M} & \Delta Y_{1,M} \\ \Delta X_{2,M} & \Delta Y_{2,M} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta X_{n-1,M} & \Delta Y_{n-1,M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T V \therefore \hat{V}_{est} = [\Delta X_{est} \quad \Delta Y_{est}] \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix}$
Low-order Surface Model (LSM)	$V = a \cdot \Delta X + b \cdot \Delta Y + c$ $V = a \cdot \Delta X + b \cdot \Delta Y + c \cdot \Delta H + d$

$$\hat{\delta\phi}_{user,disp}^i = \delta\phi_{MAS,disp}^i + \sum_{k=1}^m v_{k,UX(k)} \Delta_{MAS} \delta\phi_{disp}^i \quad (7)$$

$$\hat{\delta\phi}_{user,ndisp}^i = \delta\phi_{MAS,ndisp}^i + \sum_{k=1}^m u_{k,UX(k)} \Delta_{MAS} \delta\phi_{ndisp}^i$$

식 (7)을 활용하여 사용자 위치의 L1, L2 보정정보를 재조합하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\delta\phi}_{user,L1}^i &= \hat{\delta\phi}_{user,disp}^i - \hat{\delta\phi}_{user,ndisp}^i \\ &= \hat{l}_{user,L1} + \lambda_1 \delta N_{MAS,L1}^i \\ &\quad + bias_{r,disp}^i - bias_{r,ndisp}^i \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \hat{\delta\phi}_{user,L2}^i &= \gamma \hat{\delta\phi}_{user,disp}^i - \hat{\delta\phi}_{user,ndisp}^i \\ &= \hat{l}_{user,L2} + \lambda_2 \delta N_{MAS,L2}^i \\ &\quad + \gamma bias_{r,disp}^i - bias_{r,ndisp}^i \end{aligned}$$

식 (8)에서 bias 관련 항은 위성 차분 시 제거되므로, 분산성 및 비 분산성 항으로 재 조합하여 보정정보 모델링을 수행해도 문제가 없음을 확인할 수 있다.

### III. 기존 보정정보 조합 방식

#### 3-1 기준국간 수평 거리 활용 방식

사용자 위치의 보정정보 추정을 위한 가중치 계산 과정에서 기준국간 수평 거리를 활용하는 방식 (Distance-Based Interpolation Method, DIM)은 다음 식과 같이 기준국간 거리에 반비례하도록 가중치를 계산한다[9].

$$w_k = \frac{1}{d_k} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^m \frac{1}{d_i}$$

식 (9)에서  $d_i$  는 기준 기준국과 기준국 i간 수평 거리를 나타낸다.

#### 3-2 기준국간 동서 및 남북 방향 거리 활용 방식

기준국간 동서 및 남북 방향 거리를 활용하는 방식은 LCM (Linear Combination Method), LIM (Linear Interpolation Method), 그리고 LSM (Low-order Surface Method) 등이 있다[9]. 각 방식의 간략한 설명은 표 1과 같다.

표에서 V는 MAC 보정정보를 나타내고, ΔX, ΔY는 각각 동서방향, 남북방향 기준국간 거리이다.

### 3-3 기준국간 동서, 남북 방향 거리 및 고도 차이 활용 방식

앞서 소개된 LSM 방식에 고도항을 추가하여 기준국간 고도 차이를 고려해줄 수 있다. 다음과 같이 고도를 추가한 모델이 제안되었다[9].

$$V = a \cdot \Delta X + b \cdot \Delta Y + c \cdot \Delta H + d \quad (10)$$

본 논문에서는 식 (6)을 LSM h방식으로 명명하여 구분한다. 또한, 분산성 항은 LSM 방식으로, 비 분산성 항은 식 (6)으로 모델링한 경우는 LSM separate (sp)라고 명명한다.

III장에서 소개된 각 방식을 활용하여 식 (6)과 같은 가중치를 계산하는 방식은 기존 연구에서 소개된 바 있다[9].

## IV. 실험 결과

### 4-1 실측 데이터 획득 네트워크 선정

앞서 소개된 각 보정정보 방식 별 Compact Network RTK 사용자 성능을 비교 및 검증하기 위해 그림 1과 같이 두 네트워크를 선정하였다. 네트워크 1은 파주를 주 기준국으로 하고 나머지 인천, 수원, 동두천을 부 기준국으로 구성되어 있으며, 네트워크 2는 동두천 대신 송파를 부 기준국으로 구성하였다. 사용자는 두 네트워크 모두 금천 기준국으로 동일하게 설정하였다.

네트워크 2는 주 기준국과 모든 기준국의 고도 차이가 15 m 이내이며, 네트워크 1은 주 기준국과 동두천과의 고도 차이가 67 m이고, 나머지 상황은 네트워크 2와 동일하다. 즉, 네트워크 2는 주-부 기준국간 고도 차이가 비슷한 수준을 유지하고 있으나, 네트워크 1은 동두천 기준국에 의해 그렇지 않은 경우이다. 다음은 각 기준국의 고도를 막대그래프로 표현한 것이다.

실측 데이터 습득은 2013년 6월 6일 오후 1시부터 오후 7시까지, 1초 간격의 총 6시간 데이터를 저장하였다. 파주, 인천, 수원, 동두천의 경우 국토지리정보원, 그리고 송파, 금천 기준국은 서울시 운영 기준국이다.

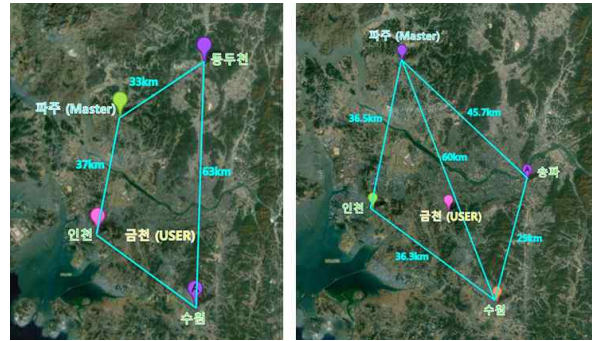


그림 1. 보정정보 모델링 방식 별 사용자 성능 비교를 위한 실측 데이터 습득 네트워크 선정 (좌: 네트워크1, 우: 네트워크2)

Fig. 1. Network selection for verifying user performance using all correction modeling methods (Left: Network1, Right: Network2)



그림 2. 기준국별 고도 비교

Fig. 2. Geodetic heights of all reference stations

### 4-2 보정정보 모델링 방식 별 사용자 성능 비교

사용자인 금천 기준국의 경우 정밀하게 측량된 고시 좌표를 알고 있으므로, CPC 생성이 가능하다. 따라서 사용자 검증을 위해 사용자 CPC에서 네트워크 주 기준국 CPC와 부 기준국 MAC가 각 보정정보 모델 방식에 의해 조합된 결과를 차분하고, 최종적으로 위성 차분한 값을 이용하였다. 이를 식 (4)를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$${}^i \nabla^j (\delta \hat{\phi}_{user} - \delta \hat{\phi}_{user}) \quad (11)$$

식 (7)에 포함된 미지정수 항을 제거 후 남은 값이 사용자 측정치 잔여오차가 되며, 사용자 위치 계산 시 오차로 작용하는 값이다.

네트워크 1에 대해 선별된 위성에 대해 보정정보

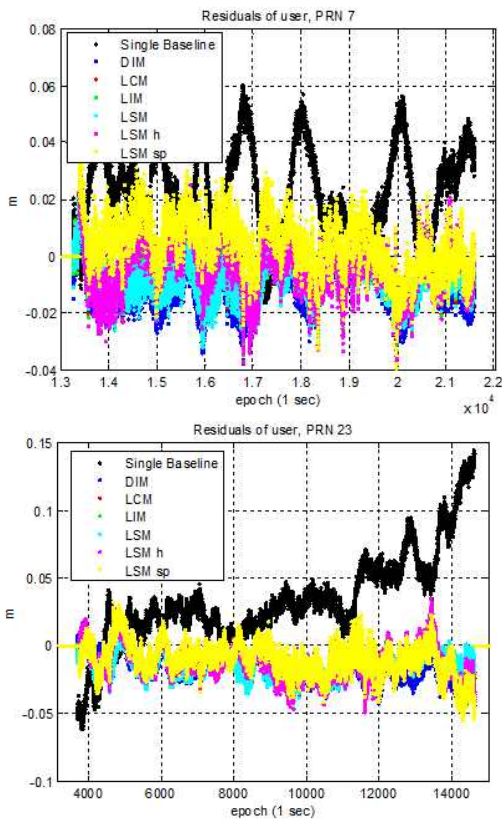


그림 3. Single baseline 및 각 보정정보 조합 방식 별 사용자 잔여오차(상: PRN7-PRN19, 하: PRN23-PRN31)

Fig. 3. Residuals of user for single baseline and all correction modeling methods

조합 방식 별 사용자 측정치 잔여오차를 도시한 결과는 다음과 같다. 비교를 위해 파주 기준국-사용자 간 single baseline RTK 보정정보를 사용한 경우에 대해서도 같이 도시하였다. 이 경우 baseline 길이는 약 35 km이다.

사용자 잔여오차 도시 결과, single baseline RTK 사용자의 경우 그 잔여오차가 일정 수준을 유지하지 않고 반 파장 이상 증가하는 것을 확인할 수 있다.

표 2. Single baseline 및 보정정보 모델 방식별 사용자 잔여오차 RMS 오차

Table 2. RMS errors of residuals of user for single baseline and all correction modeling methods

	Single	DIM	LCM	LIM	LSM	LSM h	LSM sp
RMS error (m) 네트워크1		0.0189	0.0190	0.0200	0.0181	0.0232	0.0239
	0.0398						
네트워크2		0.0177	0.0177	0.0181	0.0196	0.0930	0.107

그림 3에서 PRN23-31조합의 경우, PRN 23 양각이 감소할수록 단일 기준국 CPC 보정정보의 사용자 GPS 오차요소 제거 성능이 저하되는 것을 확인할 수

표 3. 보정정보 모델 방식별 각 주-부 기준국 보정정보에 대한 가중치

Table 3. Weighting factors of MAC's for all correction modeling methods

가중치		DIM	LCM	LIM	LSM	LSM h
인천-파주	네트워크1	0.360	0.291	0.197	0.406	-0.033
	네트워크2	0.301	0.287	0.247	0.523	-1.825
수원-파주	네트워크1	0.296	0.451	0.496	0.395	0.607
	네트워크2	0.247	0.289	0.343	-0.024	3.091
동두천-파주	네트워크1	0.140	0.126	0.066	0.199	-0.081
송파-파주	네트워크2	0.282	0.225	0.178	0.501	-2.237

있다. 반면, 보정정보 모델을 통해 다중 기준국 기반 보정정보를 활용한 경우에는 사용자 잔여오차가 5 cm 이내를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 보정정보 모델 방식별로는 사용자 잔여오차 크기가 거의 비슷한 것을 볼 수 있다.

표 3은 네트워크 1과 2에 대해 보정정보 조합 방식 별 사용자 잔여오차 RMS 오차를 정리한 것이다.

네트워크 1의 경우 모든 보정정보 모델 방식에 대해, 네트워크 2의 경우는 고도를 고려하는 방식인 LSM h, LSM sp 방식을 제외하고 다중 기준국 기반 보정정보를 활용한 방식이 single baseline 방식에 비해 약 2배 정도 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, 고도를 고려하는 방식을 제외하고는 네트워크 2에서 생성된 다중 기준국 보정정보 성능이 네트워크 1에서 생성된 것보다 약 6 % 좋은 것을 볼 수 있다. 이는, 동두천에 비해 사용자에게 가까운 송파 기준국을 활용하여 네트워크 2를 구성하였기 때문으로 판단된다.

한편, 네트워크 2에서 고도를 고려하는 방식의 사



표 4. 기준국 배치 행렬 조건 값

Table 4. Condition number of reference station constellation matrix

		LSM h
기준국 배치행렬 조건 값	네트워크 1	1642.222
	네트워크 2	47783.788

용자 잔여오차의 RMS 오차가 최대 9 cm까지 증가하여 single baseline 사용자보다 성능이 저하되는 결과가 나타났다. 이를 확인하기 위해 각 보정정보 모델링 방식으로 계산한 부 기준국에 대한 가중치 값은 표 3과 같다. LSM sp 방식의 dispersive, nondispersive 항에 대한 가중치는 각각 LSM h 가중치와 동일하다.

네트워크 1과 2의 DIM, LCM, LIM, LSM 가중치는 서로 비슷한 수준으로 계산된 것을 확인할 수 있다. 그러나 고도가 고려된 방식인 LSM h의 경우에는 네트워크 2의 가중치가 네트워크 1의 값에 비해 상당히 큰 값으로 계산된 것을 볼 수 있다. 이는, 네트워크 2의 경우는 네트워크를 구성하는 모든 기준국의 고도가 모두 비슷한 수준인 반면, 네트워크 1의 경우 동두천 기준국이 다른 기준국에 비해 고도가 높아, 가중치 계산과정에서 기준국 배치에 대한 정보를 담고 있는 행렬의 조건을 좋게 하였기 때문으로 생각된다. 표 4는 두 네트워크에 대해 LSM h 방식의 기준국 배치 행렬의 조건 값(condition number)을 정리한 것이다.

기준국 배치 행렬 조건 값은 그 값이 클수록 해당 행렬이 singular에 가깝다는 것을 의미한다. LSM h 방식의 경우, 예상한 것과 같이 네트워크 2의 경우 네트워크 1에 비해 값이 30배 정도 큰 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 고도가 고려된 기법을 활용하기 위해서는 네트워크 구성 시, 고도 차이가 존재하는 기준국을 선정해야 한다는 것을 확인할 수 있다.

각 보정정보 조합 방식을 활용한 경우 사용자 위치 정확도를 예측해 보기 위해, 사용자 잔여오차에 시선벡터로 구성된 관측 행렬을 곱하여 측정치 영역의 잔여오차를 위치 영역으로 변환하였다. 네트워크 1에 대해 보정정보 조합 방식 별 사용자 수평 및 수직 오차 예측치는 그림 4와 같다. 다중 기준국 기반 보정정보 조합 방식의 성능 비교를 위해 single baseline RTK 사용자에게 대한 위치 정확도 예측치도 같이 도시하였다.

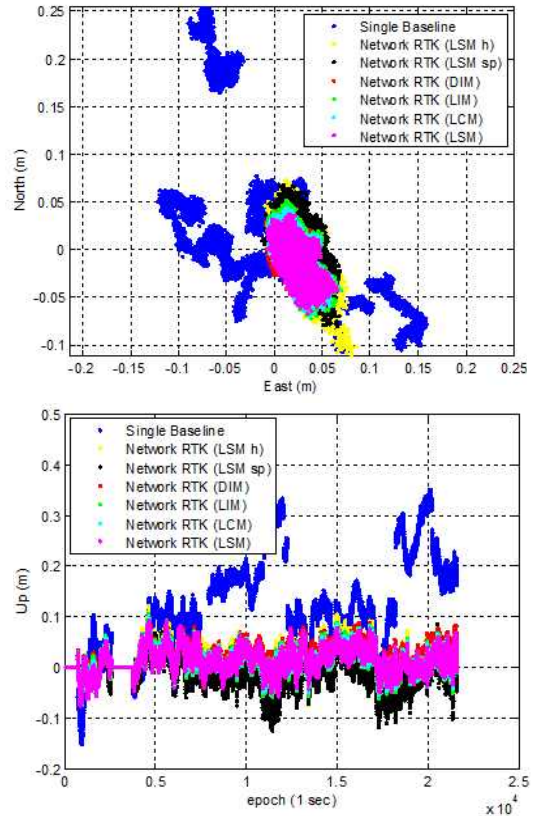


그림 4 Single baseline 및 각 보정정보 조합 방식 별 사용자 위치 정확도 예측치 (상: 수평오차, 하: 수직오차)

Fig. 4. Predictions of user position accuracy for single baseline and all correction modeling methods (Up: horizontal accuracy, Down: vertical accuracy)

표 5는 네트워크 1과 2에 대해 각 보정정보 모델링 방식 별 사용자의 수평 및 수직 위치 정확도를 정리한 것이다. 사용자 위치 정확도 예측 결과, 다중 기준국 기반 보정정보를 활용한 경우 single baseline 사용자와 달리, 사용자 위치 정확도가 어느 정도 제한되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 각 보정정보 모델링 방식에 대한 사용자 위치 정확도가 비슷한 수준을 보이나, 수평위치 정확도의 경우 네트워크 1은 DIM방식이, 네트워크 2는 LSM 방식이 가장 높은 정확도를 보이는 것을 알 수 있다. LSM h, LSM sp 방식은 LSM 방식에 비해 고도 정보를 더 활용함에도 불구하고 사용자 위치 정확도에는 향상이 없는 것을 확인할 수 있었다.

표 5. 보정정보 모델 방식에 대한 사용자 위치 정확도 예측치

Table 5. Predicted position accuracy of user for all correction modeling methods

		DIM	LCM	LIM	LSM	LSM h	LSM sp
Horizontal Accuracy (2DRMS, m)	네트워크 1	0.0361	0.0438	0.0464	0.0411	0.0553	0.0483
	네트워크 2	0.0385	0.0404	0.0435	0.0291	-	-
Vertical Accuracy (95%, m)	네트워크 1	0.0483	0.0481	0.0594	0.0474	0.0526	0.0598
	네트워크 2	0.0457	0.0446	0.0439	0.0618	-	-

V. 결 론

본 논문에서는 반송파 위상을 활용한 다중 기준국 보정정보를 기존에 개발된 보정정보 모델 기법을 적용하여 각 방식 별로 사용자 성능을 비교분석하였다. 또한, 기준국간 고도 차이가 고려된 보정정보 모델 방식 활용 가능성 확인을 위해 기준국간 고도 차이가 있는 네트워크 1과 그렇지 않은 네트워크 2에 대해 결과를 비교하였다. 그 결과 다중 기준국 보정정보를 활용하는 사용자는 single baseline 사용자에 비해 성능이 약 2배 정도 향상되었으며, LSM h, LSM sp를 제외한 모든 보정정보 모델 방식에 대해 유사한 성능을 보였다. 고도를 활용하는 방식인 LSM h, LSM sp는 네트워크를 구성하는 기준국간 고도 차이가 비슷한 경우에는 기준국 배치 행렬의 조건을 저하시켜 사용이 부적합하였다. 구성 기준국간 고도 차이가 어느 정도 있는 경우에도 고도 정보를 사용하지 않는 보정정보 모델 방식에 비해 더 향상된 결과를 제공하지는 못하였다.

감사의 글

본 연구는 정밀기계공동연구소를 통해 계약된 국토해양부 위성항법기반 교통인프라 기술개발의 연구비지원(06교통핵심A03)에 의해 수행되었습니다.

본 연구에 사용된 GPS 데이터를 제공해주신 국토지리정보원과 서울시에 감사드립니다.

Reference

- [1] B. Park, "A study on reducing temporal and spatial decorrelation effect in GNSS augmentation system: Consideration of the correction message standardization," *phD Thesis, Seoul National University, Department of Mechanical and Aerospace*, Feb. 2008.
- [2] J. Song et al, "Development of Compact Network RTK for Land Vehicle Users and Performance Evaluation for Selected Networks in South Korea", *ENC 2012, Gdansk, Poland April*, 2012.
- [3] Y. Gao, et al, "Carrier phase based regional area differential GPS for decimeter-level positioning and navigation", *ION GPS 1997, Kansas City, Missouri*, pp.1305-1313, September, 1997.
- [4] S. Han and C. Rizos, "GPS network design and error mitigation for real-time continuous array monitoring systems", *ION GPS 1996, Kansas City, Missouri*, pp.1827-1836, September, 1996.
- [5] L. Wanninger, "Improved ambiguity resolution by regional differential modelling of the ionosphere", *ION ITM 1995, Palm Springs, California*, pp.55-62, September, 1995.
- [6] S. Schaer, et al, "The impact of the atmosphere and other systematic errors on permanent GPS networks", *IAG Symposium on Positioning, Birmingham, UK*, 1999.
- [7] U. Vollath, et al, "Multi-base RTK positioning using virtual reference stations", *ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah*, pp.121-131, September, 2000.
- [8] C. Vamer, "DGPS carrier phase networks and partial derivative algorithms", *Ph.D. Thesis, University of Calgary, Dept. of Geomatics Engineering*, Report No. 20129, Calgary, Canada.
- [9] L. Dai, et al, "Compason of Interpolation Algorithms in Network-based GPS Techniques", *Navigation*, vol.50, no.4, pp.277-293, Winter, 2004.
- [10] C. Kee, and J. Kim, "RTK-GPS correction generation technique for low-rate data-link", *Journal of Navigation*, vol. 57, no. 3, pp.465-477, Sept, 2004.
- [11] RTCM Standards 10403.1, Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service - Version 3, July, 2011.



송 준 솔 (June-Sol Song)



2008년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)  
2008년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 (박사과정)  
관심분야 : 위성항법, RTK, 측량

기 창 돈 (Chang-Don Kee)



1984년 2월 : 서울대학교 항공공학 (공학사)  
1986년 2월 : 서울대학교 항공공학 (공학석사)  
1994년 1월 : 미국 Stanford University 항공우주공학 (공학박사)  
1996년 9월~현재 : 서울대학교 기계

항공공학부 교수

관심분야 : 위성항법, WADGPS, RTK, 의사위성, 무인항공기, 수신기

박 병 운 (Byung-Woon Park)



2001년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)  
2003년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)  
2008년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)  
2008년 2월 ~ 2010년 5월 : 서울대학교

차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단BK21 연수연구원

2010년 5월~2012년 8월 : 대한지적공사 지적연구원 선임연구원, 책임연구원

2012년 8월~현재 : 세종대학교 기계항공우주공학부 조교수  
관심분야 : 위성항법, RTK, 측량

사진