

Network RTK 품질 분석 방법론별 성능 지표와 사용자 항법 정확도의 상관성

Correlation between the Position Accuracy of the Network RTK Rover and Quality Indicator of Various Performance Analysis Method

임철순¹ · 박병운^{1*} · 허문범²

¹세종대학교 항공우주공학과

²한국항공우주연구원 항법기술연구실

Cheol-soon Lim¹ · Byung-woon Park^{1*} · Moon-beom Heo²

¹Aerospace Engineering, Sejong University, Seoul, 05006, Korea

²Navigation R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, 34133, Korea

[요 약]

정지한 객체의 측위에 사용되던 Network RTK (real time kinematics) 기술을 이동형 항체의 항법에 적용하기 위해서는 보정정보와 함께 사용자의 성능을 대표할 수 있는 지표가 함께 제공되어야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 I95 (ionospheric index 95) / G95 (geodetic index 95), SBI (semivariance based index), RIU (residual interpolation uncertainty) 등의 지표 도출 알고리즘을 분석하고 이를 국토지리정보원의 기준국 원시 데이터와 VRS (virtual reference station) 사용자에게 적용함으로써 정밀 항법 성능 지표로의 활용 가능성을 타진하였다. 24시간 데이터를 처리한 결과 보정정보의 비선형성을 나타낼 수 있는 RIU 지표와 Network RTK 사용자의 위치 정확도와의 상관성이 0.52로 타 지표에 비해 훨씬 높은 것으로 나타났으므로 향후 이동 항체의 항법 성능 지표로 사용이 가능할 것으로 예상된다.

[Abstract]

In order to apply the Network RTK (real time kinematics) technology, which has been used for positioning of stationary points, to the navigation of vehicles, its infrastructure should provide correction data with a quality indicator that can show the expected accuracy in real time. In this paper, we analyzed various indicator generation algorithms such as I95 (ionospheric index 95) / G95 (geodetic index 95), SBI (semivariance based index) and RIU (residual interpolation uncertainty). We also applied them to the raw observables from the reference stations of National Geographic Information Institute and VRS (virtual reference station) users, and then examined its feasibility to be used as a real-time performance index of the Network RTK rover. 24 hour data analysis shows that the RIU index, which can represent the non-linearity of the correction, has the strongest correlation with the Network RTK rover accuracy. Therefore, RIU index is expected to be used as a real-time performance index of the Network RTK rover.

Key word : Network RTK, Position accuracy, Quality indicator, Spatial decorrelation, Residual analysis.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.5.375>



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 23 August 2018; Revised 1 October 2018

Accepted (Publication) 29 October 2018 (30 October 2018)

*Corresponding Author ; Byung-woon Park

Tel: +82-2-3408-4385

E-mail: byungwoon@sejong.ac.kr

I. 서론

Network RTK (real time kinematics)는 다수의 기준국을 네트워크로 연결하여 기준국의 측정치를 조합하거나 모델링함으로써 반송파 위상을 활용하여 정밀한 위치를 산출하는 RTK의 가용 범위를 기존 10 km 수준에서 반경 70~100 km 정도로 넓히고, 그 성능도 단일 기준국 RTK 수준의 수~10 cm 수준을 유지하는 매우 효율적인 시스템이다[1]. 과거에는 전 국토와 같이 광역에 대한 항법 인프라 구축은 기준국 설치 비용 등으로 인해 NDGPS (national differential global positioning system), WADGPS (wide-area DGPS) 등의 의사거리 측정치 기반 방식으로 제한되어 왔으나, 최근 측지, 측량 등에서 주로 사용되던 Network RTK의 보급으로 반송파 측정치 기반의 광역 항법에 대한 가능성이 점차 높아지고 있다[2].

현재 Network RTK가 적용되는 분야는 데이터가 수집되는 동안 정적인 상태가 유지되는 지적, 측지, 측량 등이 일반적이다. 정지 측량의 경우 보정정보 생성을 위한 기준국과 사용자간 기하학적 배치의 변화가 적고 그 수가 제한적이어서 서버의 부담이 적으므로, VRS (virtual reference station)와 같이 양방향 통신에 근거한 Network RTK 방식이 사용되고 있는데, 사용자 측 위 성능에 대한 지표는 위치 측정 후 계산된 잔차의 합에 의하여 도출된다.

최근 자율주행, 드론 등의 분야에서 이동형 항체의 요구 정확도가 점차 높아짐에 따라 항법 분야에 Network RTK를 적용하려는 시도가 다각도로 이루어지고 있다. 항체의 이동성, 다수성을 고려할 때 단방향 통신에 입각한 MAC (master-auxiliary concept), FKP (flächen korrektur parameter) 기법 등이 항법용 Network RTK의 주요 후보군으로 제시됨[3]에 따라, 기존 정적 측위에 주로 사용되던 성능 지표 산출과는 차별화된 새로운 접근 방법이 필요하다. 특히 Network RTK 인프라가 임의의 지점에 위치하는 사용자에게 보정정보와 함께 각 정보의 성능을 대표하는 지표를 함께 제공하여야만 사용자가 위성의 선별, 측위 weighting 등에 활용할 수 있으므로, 광역 항법에 적합한 보정정보의 성능 지표 도출을 모색하여야 한다.

일반적으로 epoch 수, 주파수, 측정치 잡음수준, 전리층/대류층 모델, 기저선 거리 등 다양한 인자가 Network RTK 보정정보와 사용자의 성능에 복합적인 영향을 끼친다. 그러나 이러한 인자들은 복합적으로 RTK 성능에 영향을 끼치므로, 각 인자와 성능 간의 일대일 대응 관계를 찾는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러므로 성능과 인자간의 대응 관계를 찾는 대신, 모든 Network RTK와 사용자 Process에 공통적인 이중차분 측정치 결과에 반영된 영향과 성능, 특히 가용성(availability)과 그 정확성(accuracy)등 대표적인 핵심 지표 간의 관계를 분석하는 것이 현실적이다. 본 논문에서는 측정치간 이중차분에 근거하여 사용자의 측위 성능을 예측할 수 있는 지표 산출 알고리즘을 조사하고 이를 국내 인프라에 적용함으로써 항법용 Network RTK 성능지표에 적합한 알고리즘을 제시하는 것을 그 목표로

한다.

II. Network RTK 사용자 알고리즘

위성항법 (GNSS, global navigation satellite system)의 반송파 측정치를 사용하여 정밀한 위치를 산출하는 RTK는 일반적으로 그림 1과 같이 과정을 거쳐 정밀한 위치를 산출한다. 반송파 측정치를 이중차분 (double difference) 후, 이중 차분된 측정치 (y)에 대하여 최소 자승법(least square estimation)을 적용하여 실수 영역에서 미지정수(a)를 결정한 float solution(\hat{b})을 산출한다. float solution을 중심으로 미지 정수의 후보군을 생성한 이후, threshold test, ratio test 등의 과정을 거쳐 적절한 미지정수를 검색하고 최종 결정하여 fixed solution(\check{b})을 산출한다[4].

Network RTK 데이터 처리는 크게 세 가지 단계로 구분되는데, 기준국의 미지정수 결정, 공간이격 보정정보 생성, 최적의 보정치 조합 설정의 순이다. 각 기준국의 측정치는 미지 정수가 정수 영역에서 정확하게 결정된 이후에만 오차의 보정치 생성 또는 모델링이 가능하므로 기준국의 미지정수 결정 과정이 가장 우선적으로 해결되어야 한다[5]. 기준국에서 수행하는 미지정수의 결정을 위해서는 정밀 위성 궤도 정보, 네트워크를 이용한 전리층-대류층 오차 추정, 다중 경로 오차 제거, 안테나 페이즈 센터 보정 및 캘리브레이션 등의 과정이 우선적으로 수행되어야 한다. 두 번째 단계인 공간 이격 보정정보 생성 및 가중치 설정을 위하여, 전리층이 주된 요인인 전리층 관련(dispersive) 오차와 나머지 성분들의 합인 비전리층(non-dispersive) 성분으로 주요 오차 성분을 분리하여 추정하는 방식을 주로 사용한다 [6]. 이상의 방식으로 추정된 보정정보 혹은 모델이 사용자에게 전달된 후 적용되기 위해서는 마지막 단계인 최적의 보정치의 조합 및 산출 단계가 필요하다. 일반적으로 사용자와 가장 가까이에 있는 주기기준국에서 최적의 부기준국 측정치나 보정치들을 선별하여 각 오차 성분들이 추정되며, 주기기준국으로부터의 수평 거리와 대략의 사용자 위치 등을 기반으로 최종 보정치 혹은 추정치가 보간되어 결정된다.

이상과 같이 사용자와 기준국 네트워크 프로세스 모두 공통적으로 측정치를 이중 차분하고, 이중 차분된 반송파 측정치의 미지정수를 결정하는 과정이 포함되어 있으며, 미지정수 결정의 적합성 여부가 RTK 성능에 결정적인 영향을 끼치므로, 이중차분 프로세스를 고려한 성능 인자의 도출이 필요하다.

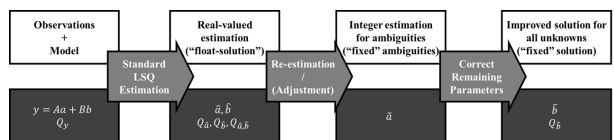


그림 1. RTK 사용자 프로세스 흐름도
Fig. 1. Flow chart of RTK rover process.

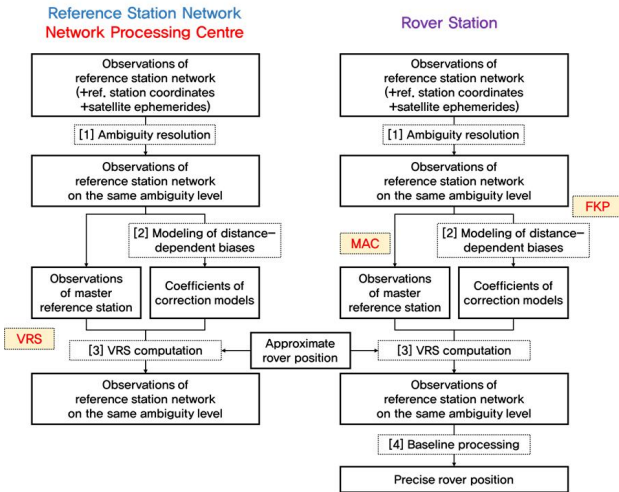


그림 2. Network RTK별 인프라 및 사용자 프로세스 흐름도
 Fig. 2. Flow chart of infrastructure and rover process for each network RTK system.

그림2는 대표적인 Network RTK 기법들인 VRS와 MAC, FKP 기법들의 프로세스 흐름도로, Network RTK의 기준국과 사용자가 어떠한 기능을 수행하고 있는지를 도시한 그림이다. 상기 그림에서 확인할 수 있듯이, 모든 Network RTK 기법이 (1) Observation collection, (2) Ambiguity resolution, (3) Fit model parameters, (4) Derive corrections for rover's position, (5) Calculate rover's position의 순으로 진행되고, 이중 VRS는 (3)의 단계, MAC과 FKP는 (2)의 단계까지를 기준국에서 처리한 후, 생성된 보정정보를 사용자에게 전송하고 있다. VRS, MAC, FKP의 공통 단계인 (1), (2)의 과정에는 이중 차분된 미지정수 결정 단계가 필수적이고, 따라서 이중 차분을 통한 공통오차 제거 성능이 미지정수 결정 성능에 큰 영향을 끼친다.

이와 같이 측정치 이중 차분은 Network RTK의 기준국과 사용자 측면에서 보정정보의 생성과 측위 과정 수행에서 중요한 시작점이므로 최종 측위 성능에 매우 중요한 단계일 뿐 아니라, Network RTK 기법의 종류와 무관하게 모두 포함되어 있는 단계이므로 알고리즘의 범용성 차원에서도 그 활용 가치가 높다. 따라서 본 논문에서는 다양한 RTK 성능 지표 알고리즘 중 이중차분에 기반한 다양한 품질 분석 알고리즘을 조사하고 이를 국내 시스템에 적용하여 그 적절성을 분석하도록 한다.

III. 이중차분 기반 Network RTK 항법해 품질 분석 알고리즘

3-1 Network RTK 항법해의 오차 상관 관계

이중차분 기반의 Network RTK 항법해 품질 분석은 크게 오차의 공간 비상관성 (spatial decorrelation) 관련 지표와 Network RTK 보정정보를 적용한 이후의 residual 관련 지표의 두 가지

방법론에 근거하여 접근할 수 있다.

공간 비상관 오차 지표에 대해서 살펴보면, 사용자가 기준국으로부터 멀리 떨어지거나, 전리층과 대류층 섭동이 큰 경우 반송파에 포함된 오차의 공간 비상관성이 커져 RTK 사용자의 성능이 저하되는 것은 자명하다. 따라서 오차의 공간 비상관성과 관련된 지표를 적용하면 사용자의 측위 성능을 평가할 수 있는데, 특히 Single reference station RTK에서는 비상관 오차로 인한 성능 저하가 뚜렷하게 나타나므로, 오차의 공간 비상관성 지표가 효과적으로 적용될 수 있다. 오차의 공간 비상관성이 높은 경우 저장각 위성, 전리층 폭풍 등과 같이 선형성, 예측성도 저하되므로 Network RTK 성능도 저하되는 것이 일반적이다.

그러나 Network RTK는 기준국간 오차의 모델링을 통하여 비상관 오차를 보상하기 위하여 제시된 개념이므로, 두 지점간의 비상관 오차가 크더라도 언제나 모델링 성능이 저하되는 것은 아니다.

임의의 위치($\vec{p} = (x, y, h)$)에서 전리층과 대류층, 위성 관련 오차 등을 포함하는 i 번째 위성의 위성항법 오차($g^i(\vec{p})$)를 특정 기준 위치($\vec{p}_0 = (x_0, y_0, h_0)$)를 기준으로 수평 방향(x, y)과 수직 방향(h) 변위에 대하여 테일러시리즈 전개를 하면 식 (1)과 같다[7].

$$g^i(\vec{p}) = g^i(\vec{p}_0) + \frac{\partial g^i}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial g^i}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial g^i}{\partial h}(h - h_0) \quad (1)$$

이를 3차원 각 방향별 변위($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)에 대하여 공간 상 평면 방정식으로 선형화한 방정식은 식(2)와 같다.

$$g^i(\vec{p}) = a^i + b^i \Delta x + c^i \Delta y + d^i \Delta z \quad (2)$$

대표적인 선형화 방법으로는 LCM (linear combination model), DIM(distance-based linear interpolation model), LIM (linear interpolation method), LSM (low-order surface model), LSC (least square collocation) 등이 있는데, 식 (2)의 계수를 결정하는 방법에 따라 차이가 있을 뿐 기본적으로는 각 기준국 별 오차 성분값의 차이가 평면이라는 가정이 전제된다. 따라서 아무리 비상관 오차가 크더라도 선형성이 보장되는 경우 그림3의 (좌)와 같이 적절한 모델링을 통해 측위해의 성능 저하는 크지 않을 수 있다.

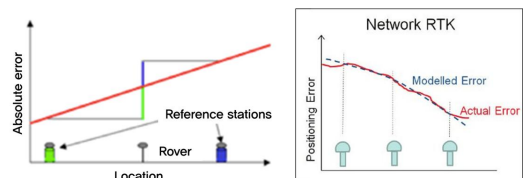


그림 3. Network RTK의 오차 모델링(좌)과 잔차(우)
 Fig. 3. Error modeling and residual error of network RTK.

즉, 그림3 (좌)와 같이 오차 선형화를 통해 Network RTK를 위한 GNSS 오차 모델링이 이루어지고, 이러한 오차를 사용자가 선형화를 통해 보정한 이후에는 그림3 (우)와 같이 비선형 오차로 인한 잔차가 남으며, 이 값이 결국 사용자 측위 오차에 영향을 끼친다.

따라서 본 논문에서는 공간 비상관성 관련 지표 외에도, Network RTK 보정 정보의 선형화 모델링 후에도 남는 비선형 오차 관련 지표를 도출함으로써 실제 Network RTK 사용자의 최종 위치에 남는 오차 성분에 대한 분석을 수행하도록 한다.

3-2 공간 비상관 오차의 선형 품질 분석 알고리즘

항법해의 품질 분석을 위하여 사용될 수 있는 오차의 공간 비상관성 지표는 I95(ionospheric index 95), G95(geodetic index 95), SBI(semivariance based index) 등이 대표적이다.

I95는 Wanninger에 의해 제안된 방식으로, 모든 위성 조합에 대하여 그림 4와 같이 전리층 오차의 이중차분 값을 선형화하고, 매 epoch, 모든 쌍의 위성에 대하여 독립적으로 계산하여 생성한 평면의 gradient를 1시간 단위로 산출한 후, 95% 통계값을 ppm (parts-per-million) 단위로 표현한 값이다. 중위도 지역에서는 일반적으로 TEC (total electron content)의 값이 4-5 ppm을 넘지 않는 것이 일반적이다. G95는 I95와 유사한 방식을 대류층과 위성 궤도 및 시계 오차 향으로 구성된 비발산 (non-dispersive) 항에 적용한 지표이다[8].

Kjorsvik에 의해서 제안된 SBI는 I95, G95와 유사하게 이중차분한 비상관 오차를 다루지만, gradient 값이 아닌 식(3)과 같은 선형 근사화의 semi-variance(γ)를 계산한다는 점에서 차이가 있다[9].

$$\gamma = a^2 + b^2 d^2 \tag{3}$$

여기서 a는 오차의 상수값, b는 거리(d)에 대한 계수를 의미한다.

상기의 계수들은 모든 epoch에 대하여 독립적으로 계산되는데, 최소자승법에 의해 산출되기 위하여 최소 3기 이상의 기준국에서 산출되어야 한다.

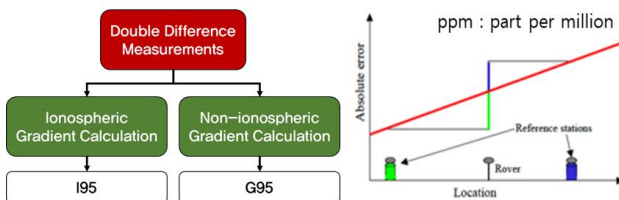


그림 4. 공간 비상관 오차 선형 부분 인자 계산 방법
Fig. 4. Linear part indicator of the spatial decorrelation error.

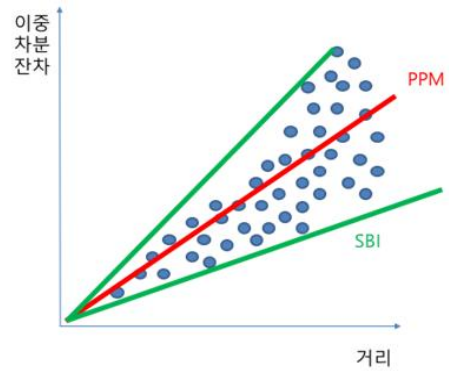


그림 5. I95/G95과 SBI 개념 비교
Fig. 5. Comparison of I95/G95 and SBI concept.

이와 같이 공간 비상관 오차를 나타내는 대표적인 지표인 I95/G95과 SBI의 개념을 간략화하면 그림 5와 같다. 두 방식 모두 모든 사용자에게 동일한 지표인 ppm과 γ 식의 계수를 산출한다는 점에서 항체용 정보로 활용이 가능하다. 다만, PPM은 거리에 따른 오차의 gradient를 표현하는 반면, SBI는 거리에 따른 분산값을 지표로 삼는다는 점이 차이점이다.

3-3 공간 비상관 오차의 선형화 잔차 분석 알고리즘

3-2에서 언급한 공간 비상관 오차는 Network RTK의 선형화 추정 과정을 통해 상당량을 상쇄시킬 수 있으므로, 실제 Network RTK 사용자의 측위 오차는 선형화를 통해 완벽히 제거되지 않는 비선형오차에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 이러한 비선형 오차의 지표로는 RIM (residual integrity monitor)과 RIU (residual interpolation uncertainty) 등이 대표적이다[10].

RIM은 사용자에 Network RTK 보정정보를 적용한 후에도 주기기준국 (master reference station)과 사용자 측정치 사이에 남아있는 잔차를 표현한 오차로, Network RTK로 생성된 보정정보와 감시국의 측정치간 이중차분을 통해 전리층과 비전리층 잔차를 계산하여 지표화한다. 그러나 이 방식은 네트워크 내부에 감시국을 설치하고 감시국에서 계산한 값을 네트워크의 대표 지표로 사용한다는 점에서 항체용 지표로 사용하기에는 한계가 있다. 반면 RIU는 그림 6과 같이 각 항체가 직접 지표를 산출하여 계산할 수 있으므로 단방향 Network RTK의 성능 지표로 사용이 적절하고, 이를 통해 사용자는 위성별 측정치의 weighting과 performance 향상에 사용할 수 있다.

RIU의 비선형 오차의 지표화를 위하여 본 논문에서는 사용자를 포함하는 최소 삼각망을 포함하여 인근의 삼각망으로 구성하여 j 부기준국 전리층($\Delta \nabla I_j$)과 비전리층 오차의 이중차분($\Delta \nabla G_j$)을 식 (4), (5)과 같이 평면화한다.

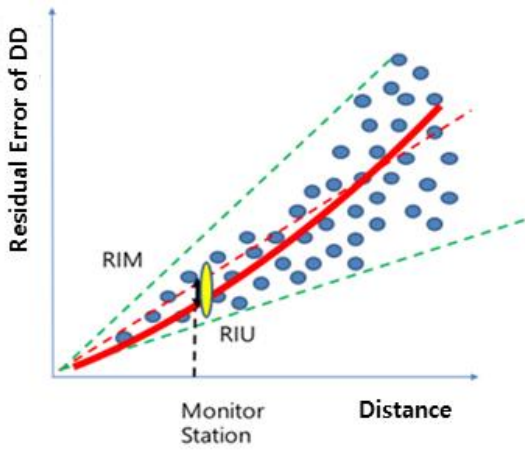


그림 6. RIM과 RIU 개념 비교
Fig. 6. Comparison of RIM and RIU concept.

$$\Delta \nabla I_j = a_{RIU, \Delta \nabla I_j} E_j + b_{RIU, \Delta \nabla I_j} N_j + c_{RIU, \Delta \nabla I_j} \quad (4)$$

$$\Delta \nabla G_j = a_{RIU, \Delta \nabla G_j} E_j + b_{RIU, \Delta \nabla G_j} N_j + c_{RIU, \Delta \nabla G_j} \quad (5)$$

총 m개의 기준국에 대하여 식(6)과 (7)와 같이 오차평면의 파라미터를 산출한다.

$$\begin{pmatrix} \Delta \nabla I_1 \\ \Delta \nabla I_2 \\ \vdots \\ \Delta \nabla I_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 & N_1 & 1 \\ E_2 & N_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_m & N_m & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{RIU, \Delta \nabla I} \\ b_{RIU, \Delta \nabla I} \\ c_{RIU, \Delta \nabla I} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \nabla G_1 \\ \Delta \nabla G_2 \\ \vdots \\ \Delta \nabla G_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 & N_1 & 1 \\ E_2 & N_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_m & N_m & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{RIU, \Delta \nabla G} \\ b_{RIU, \Delta \nabla G} \\ c_{RIU, \Delta \nabla G} \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서 E_j 와 N_j 는 주기기준국을 중심으로 j번째 부기준국의 동쪽(east)과 북쪽(north) 방향 이격 거리를 의미한다.

다시 실제 이중 차분치와 주 기준국으로부터 동쪽으로 E, 북쪽으로 N 떨어진 사용자의 위치에서의 평면 추정치 잔차를 계산하고 그 RMS (root mean square) 값을 산출함으로써 식 (8)과 (9)의 사용자 이중차분 추정치의 비선형 잔차를 지표화하였다. RIU는 이러한 잔차를 표준편차화하여 제공하는 값으로 이를 통해 사용자는 각 추정치의 weighting과 performance 향상에 사용할 수 있다.

$$RIU_{\Delta \nabla I} = RMS \left((E \ N \ 1) \begin{pmatrix} a_{RIU, \Delta \nabla I} \\ b_{RIU, \Delta \nabla I} \\ c_{RIU, \Delta \nabla I} \end{pmatrix} - \Delta \nabla I \right) \quad (8)$$

$$RIU_{\Delta \nabla G} = RMS \left((E \ N \ 1) \begin{pmatrix} a_{RIU, \Delta \nabla G} \\ b_{RIU, \Delta \nabla G} \\ c_{RIU, \Delta \nabla G} \end{pmatrix} - \Delta \nabla G \right) \quad (9)$$

본 논문에서는 공간 비상관 오차의 비선형 오차를 감지할 수 있는 RIU를 계산할 수 있는 알고리즘을 기준국 네트워크와 사용자에 적용함으로써 사용자 성능을 대표할 수 있는 값으로의 활용 가능성을 검토하였다.

IV. 국내 Network RTK 시스템 성능 분석을 통한 품질분석 알고리즘과 사용자 성능 상관성 분석

4-1 성능 비교용 실험 구성

본 논문에서는 III 장에서 검토한 Network RTK 사용자의 다양한 성능 분석 방법들 중 인프라에서 사용자에게 단방향으로 제공하기에 적합한 방식인 I95/G95, SBI, RIU 방법을 국내 운영 중인 Network RTK 시스템에 적용하고, 이를 사용자 측위 정확도와 비교함으로써 항체에 적용 가능한 Network RTK 성능 지표를 제시하고자 한다.

현재 국내에서는 국토지리정보원과 서울시에서 공식적으로 Network RTK 서비스를 제공하고 있는데, 두 방식 모두 지적, 측지, 측량 등의 분야를 주 대상으로 하고 있으며, VRS 방식의 보정정보를 전송한다. 최근 국토지리정보원에서는 항법에 적용 가능한 단방향 시스템인 FKP 기법을 도입하기도 하였는데, 기준국 수가 부족하여 VRS에 비하여 성능이 다소 떨어지고 시스템이 아직 안정화되지 않았으며, 모델링된 평면 계수만을 제공하므로 성능 분석에 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 사용자로 설정한 세종대를 포함하는 국토지리정보원 VRS 네트워크의 기준국 원시데이터를 활용하여 MAC 보정정보를 생성하고, 이를 바탕으로 각 성능 지표를 산출한 이후, 사용자 측위 정확도와 상관관계를 도출하였다. 사용자는 세종대학교 충무관 옥상에 설치된 Trimble NetR9 수신기로 설정하였고, 국토지리정보원의 VRS 서비스를 해당 수신기에 적용하여 획득한 RTK 측위 결과를 분석에 활용하였다.



그림 7. Network RTK 기준국과 사용자의 기하학적 배치
Fig. 7. Geometry of network RTK reference and rover stations.

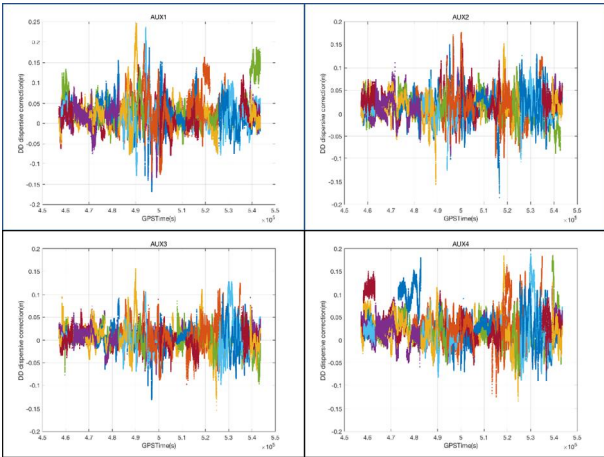


그림 8. 주-부기준국 간 전리층 이중차분 측정치 시계열 분포
 Fig. 8. Time history of double-difference dispersive measurement between master and auxiliary station.

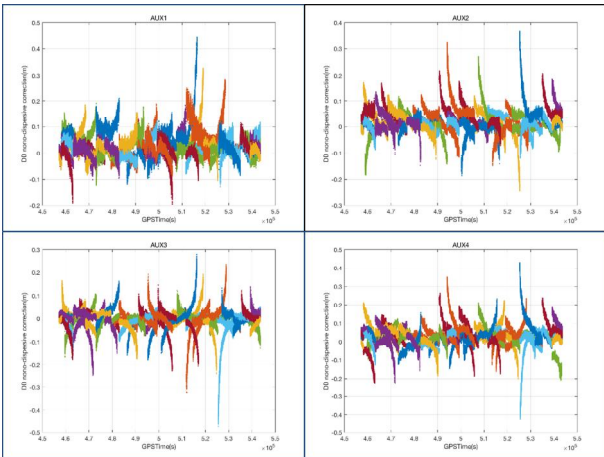


그림 9. 주-부기준국 간 비전리층 이중차분 측정치 시계열 분포
 Fig. 9. Time history of double-difference non-dispersive measurement between master and auxiliary station.

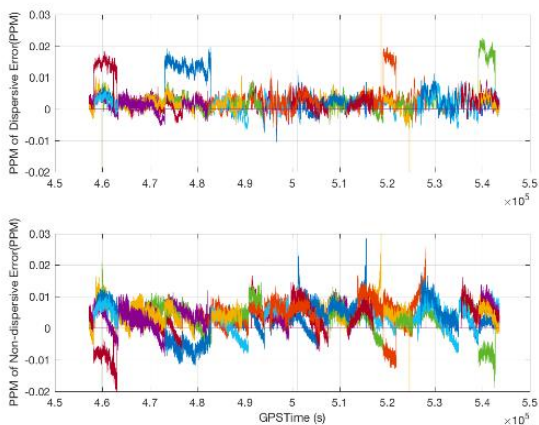


그림 10. 오차 성분별 공간 비상관 오차 PPM (위:전리층, 아래:비전리층)
 Fig. 10. Time history of Spatial Decorrelation Error PPM (Upper : Dispersive, Bottom : Non-dispersive).

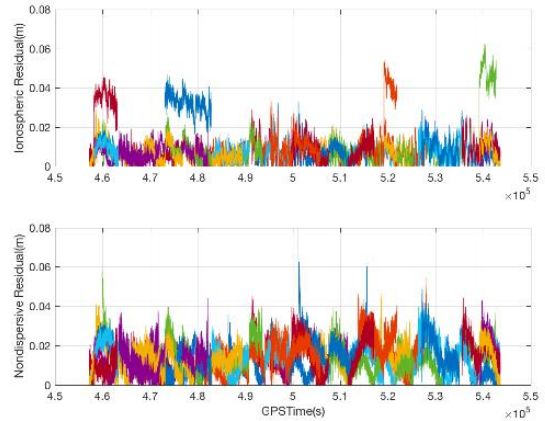


그림 11. 오차 성분별 RIU 시계열 분포 (위:전리층, 아래:비전리층)
 Fig. 11. Time history of RIU for error modeling (upper : dispersive, bottom : non-dispersive).

실험일시는 2017년 11월 17일 00:00-23:59이었고, MAC 보정정보 생성을 위한 주기준국은 SOUL, 부기준국은 INCH (AUX1), YANP(AUX2), SUWN(AUX3), YOIN(AUX4)을 선정하였다. 기준국 Network와 사용자의 기하학적 배치는 그림 7과 같다. 또한 상기와 같은 기준국에서 계산한 주기준국-부기준국 간 전리층, 비전리층 항의 이중차분 잔차의 결과는 그림 8, 9와 같다.

4-2 Network RTK 품질 분석 알고리즘별 성능 지표 생성

1) Network RTK 선형 품질 분석 지표 산출

4-1절에서 산출한 주-부기준국 간의 전리층/비전리층 오차의 이중차분 측정치를 이용하여 성분별 PPM 값을 산출하였다. PPM 값 산출을 위하여 matlab의 polyfit 명령을 사용하였으며 위성별 PPM의 시계열 경향성은 그림 10과 같다.

이와 같이 산출한 PPM에 거리를 대입하여 공간이격 오차를 생성하고, 이를 다시 주-부 기준국 간 이중 차분 측정치와의 차이를 계산한 후, matlab을 이용하여 식(3)의 함수에 근사화함으로써 SBI의 계수를 산출하였다.

2) Network RTK 비선형 품질 분석 지표 산출

4-2-1과 동일한 방식으로 전리층/비전리층 MAC 보정정보를 식 (6),(7)에 따라 평면화한 후, 각 기준국에서의 오차 성분별 모델링 잔차를 식(8),(9)을 이용하여 산출하였다. 그림 11은 각 위성별로 4개의 부기준국에서 계산한 잔차의 RMS 값을 RIU로 사용하여 시계열로 도시한 그림이다.

4-3 Network RTK 품질 지표와 사용자 정확도 상관성 분석

4-2에서 산출한 PPM, SBI, RIU와 측위 오차간 상관성 분석을 위하여 세종대학교 측무관에 설치된 Trimble NetR9 수신기의 VRS 측위 결과를 분석하였다. 반송파 측정치 측위에서는 결

정된 미지 정수가 유효하다고 판단될 때 고정해(fixed solution)라 하고 일반적으로 사용자의 위치해가 정확하다고 인정할 수 있다. 미지 정수가 정수 영역이 아닌 실수 영역에서 추정된 위치해, 즉 유동해(float solution)는 부정확한 것으로 인지되며, batch로 해석할 때의 결과와 달리 epoch-by-epoch에서의 실수해는 결국 코드 측정치를 이용하여 계산한 측위 수준과 동일하다. [11] 이와 같이 반송파 측정치 미지정수의 정수성을 보장하지 않는 float solution은 정밀 측위 및 항법 분야에서 불확실한 해로 간주되므로, 정확성(accuracy)과 가용성(availability) 등 RTK 위치해의 성능 인자는 미지정수가 정확히 결정된 이후의 항법해인 고정해에 한하여만 평가한다. 또한 측위에 사용한 위성 조합에 따라 그 성능이 달라질 수 있으므로, 사용자 측위의 위성 조합과 인프라에서 생성한 보정정보의 위성 조합이 유사한 경우에 한하여 측위와 성능 지표간 상관성을 도출하였다. 그림 12(위)는 24시간 측위 시험에서 고정해의 3차원 오차를 나타내고, 그림 12(아래)는 해당 시간 동안 성능 예측 index가 확보된 위성수와 사용자의 위치를 결정하는데 사용한 위성수의 차이를 나타낸다. 삼각망으로 VRS 보정정보를 생성하므로 사용자 측위를 위해서는 주기준국과 2개의 부기준국만으로 VRS 보정정보 확보가 가능하나, 성능 index를 위해서는 부기준국 3개 이상이 필요하므로 이와 같은 위성수의 차이가 불가피하게 발생한다. 이로 인한 영향을 최소화하기 위하여 상관계수 산출을 위해서는 위성 수의 차이가 1개 이하인 지점, 즉 GPS Time 462180~471679, 495813~497774, 509005~511602, 539224~ 542753 지점에 대한 분석을 수행하였다.

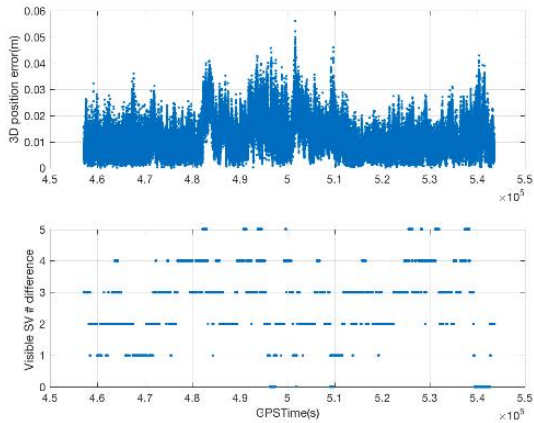


그림 12. 3차원 위치 오차(위)와 인프라-사용자간 위성수 차이(아래)
 Fig. 12. Time history of 3D rover position error(upper) and visible satellite number difference between infrastructure and the rover(bottom).

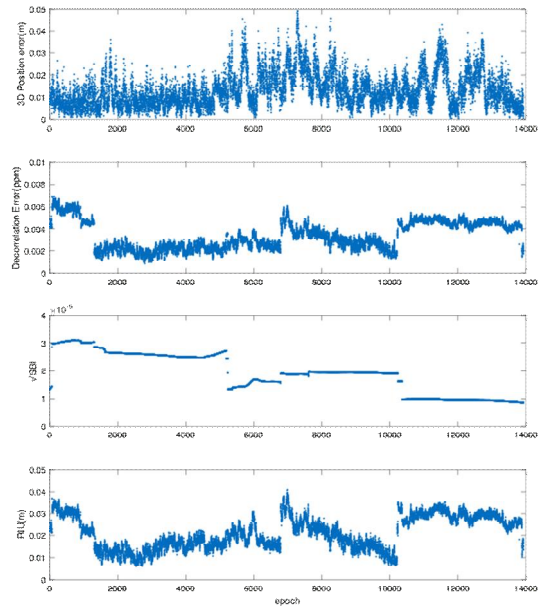


그림 13. 3차원 위치 오차와 PPM, SBI, RIU 시경향
 Fig. 13. Time history of 3D rover position error, PPM, SBI, RIU.

해당 시간동안 사용자의 위치에 적합하게 PPM, SBI, RIU 지표를 산출하였고, 그 결과는 그림 13과 같다. SBI는 측위 결과와의 뚜렷한 상관성을 찾을 수 없으나 PPM과 RIU의 경우 특히 2,000~10,000 epoch에서 측위 결과와의 유사성이 관찰되었다. 각 지표와의 상관계수를 산출한 결과는 표1과 같다. 표1의 결과에서도 확인할 수 있듯이 SBI는 측위 결과와의 상관계수가 음수로 상관성을 찾기 어렵고, PPM과 RIU는 0.25, 0.27 수준으로 SBI에 비하여 높은 상관성이 있음을 수치적으로 확인할 수 있다.

그림 13에서 육안으로 확인되는 경향성 결과에 비하여 표1의 수치 상관성이 작은 값을 갖는 이유가 측위 결과와 index의 random noise 성분의 영향일 것으로 예상되므로, 300 epoch의 평활화 과정을 측위 결과와 index에 적용하여 상관계수를 재산출하였다. 표2의 결과와 같이 SBI는 측위 결과와 무관하였으나, PPM과 RIU는 0.5 수준으로 그 상관성이 높아져서 측위 지표로의 활용 가능성이 확인되었다. 특히 RIU의 경우 그 알고리즘이 Network RTK 보정정보의 모델링 잔차가 측위에 끼치는 영향을 나타내므로 그림 14와 같이 측위 결과와도 직접적으로 매칭된다. 따라서 index의 생성 알고리즘의 측면에서도 Network RTK의 성능 인자로 활용하는 것이 유용할 것으로 판단된다.

표 1. 성능 지표별 측위결과와의 상관 계수

Table 1. Correlation coefficient with position accuracy for each performance index.

Performance index	PPM	SBI	RIU
Correlation coefficient	0.25	-0.25	0.27

표 2. 300 epoch 평활화된 성능 지표별 측위결과와의 상관 계수

Table 2. Correlation coefficient with position accuracy for each performance index after 300 epoch smoothing.

Performance index	PPM	SBI	RIU
Correlation coefficient	0.47	-0.35	0.53

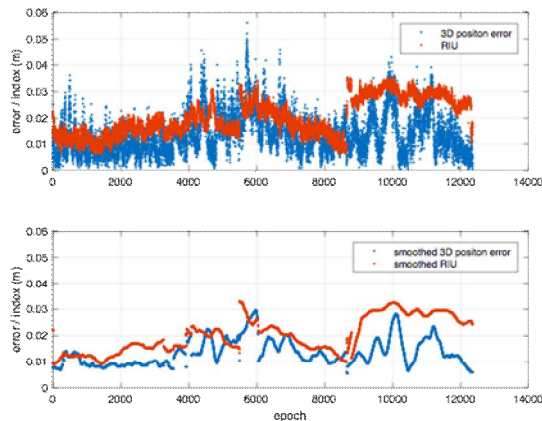


그림 14. 3차원 위치 오차와 RIU의 시경향 (위: 원결과, 아래:평활화 결과)

Fig. 14. Time history of 3D rover position error and RIU (upper: without smoothing, bottom: with smoothing).

V. 결 론

Network RTK 기술은 짧게는 수 초~수 분, 심지어는 하루 이상 정지된 지점 또는 구조물의 측량에 주로 활용되어 왔으므로, 엄격하고 높은 수준의 실시간 신뢰성이 그 동안 요구되지는 않았다. 위성항법을 통해 산출한 측위 결과에 대한 검증과 신뢰성 확보를 위하여 이전에 측량한 DB (data base)와의 비교 또는 반복 측량을 통한 재현성 검증을 수행하여 왔다. 그러나 이와 같은 방식은 수많은 이동체가 임의의 지점에서 실시간으로 동시에 이동하는 항법 서비스에는 적용될 수 없는 방법이다. 특히 항체는 현재 위치에 대하여 실시간으로 성능 예측을 하지 않으면 치명적 사고를 유발할 수 있고 거시적 관점에서 시스템 운영이 불가능하므로 항체의 동특성에 적합한 실시간 성능 예측 지표가 필요하다.

본 논문에서는 I95/G95, SBI, RIU 등 Network RTK 성능 지

표의 산출 알고리즘을 분석하고, 세종대에 설치되어 있는 상용 수신기의 VRS 측위 결과와 국토지리정보원의 원시데이터로 생성한 MAC 보정정보를 이용하여 이러한 지표들의 사용자 측위 오차 간의 예측 가능성을 평가하였다. 초 단위 상관성의 경우 측위 오차와 각 성능 지표에 포함된 random 성분들의 영향이 커서 일관성 있고 깊은 상관관계의 도출이 어려웠으나, 약 300 epoch의 평활화 결과 PPM과 RIU와의 상관성이 높은 것으로 확인되었다. 이중 PPM의 경우 오차의 변동이 클 때 일반적으로 비선형적으로 변한다는 자연 현상에 기인한 상관성으로 보이므로, Network RTK의 핵심 알고리즘과 같은 맥락에서 산출이 가능한 RIU가 측위 성능 지표로의 활용 가능성이 가장 높다고 판단된다.

따라서 향후 Network RTK를 실시간 항체를 대상으로 서비스를 제공할 시, 사용자의 품질 예측에 RIU 지표를 사용하는 것이 가장 현실적이라고 예상된다. 사용자의 성능 예측 뿐 아니라, 인프라에서 생성한 Network RTK 보정정보의 성능을 실시간으로 감시할 수 있는 기술적 토대로도 활용될 수 있으므로, 향후 인프라의 품질 감시 및 사용자의 측위 성능 향상에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업 (18TLRP-C113269-03)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] U. Vollath, H. Landau, X. Chen, "Network RTK-concept and performance," in *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland: OR, pp. 24-27 Sept. 2002.
- [2] J. S. Song, B. W. Park and C. D. Kee, "Study on generating compact Network RTK corrections considering ambiguity level adjustment among reference station networks for constructing infrastructure of land vehicle," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 404-412, 2013
- [3] B. W. Park, "A study on reducing temporal and spatial decorrelation effect in GNSS augmentation system: consideration of the correction message standardization," Ph. D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, Feb. 2008.
- [4] P. Joosten and C. Tiberius, "LAMBDA: FAQs," *GPS Solutions*, Vol. 6, No. 1-2, pp. 109-114, 2002.
- [5] L. Dai, S. Han, J. Wang and C. Rizos. "Comparison of interpolation algorithms in network-based GPS techniques,"

- Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 50, Np. 4, pp. 277-293, 2004.
- [6] H. J. Euler, S. Seeger, O. Zelzer, F. Takac and B. E. Zebhauser, "Improvement of positioning performance using standardized Network RTK messages," in *Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego: CA, pp. 453-461, Jan. 2004.
- [7] C. Varner, "DGPS carrier phase networks and partial derivative algorithms", Ph.D. dissertation, University of Calgary, Calgary, Canada. 2002.
- [8] L. Wanninger, "The performance of virtual reference stations in active geodetic GPS-network under solar maximum conditions," in *Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 1999*, Nashville: TN, pp. 1419-1427, 1999.
- [9] N. S. Kjorsvik, "A semivariance-based index for spatially correlated errors in rapid differential GNSS applications," *GPS Solutions*, Vol. 8, No. 4, pp. 217-225, 2004
- [10] D. Prochniewicz, R. Szpunar, J. Walo, "A new study of describing the reliability of GNSS Network RTK positioning with the use of quality indicator," *Measurement Science and Technology*, Vol. 28, No. 10, pp. 1-14, 2016
- [11] D. H. Han, C. S. Park, D. H. Hwang, S. J. Lee, "Characteristics of the float solutions in epoch-by-epoch GNSS precise positioning", *Journal of Institute of Control, Robotics, and Systems*, Vol. 15, No. 12, pp. 1254-1257, 2009



임철순 (Cheol-Soon Lim)

2015년 2월 : 세종대학교 항공우주공학과 (공학사)
 2017년 2월 : 세종대학교 대학원 항공우주공학과 (공학석사)
 2017년 3월~현재 : 세종대학교 대학원 항공우주공학과 박사과정
 ※ 관심분야 : GNSS, SBAS, PPP



박병운 (Byung Woon Park)

2001년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학사)
 2003년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학석사)
 2008년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학박사)
 2012년 8월 : LX 국토정보공사 공간정보연구원 선임연구원/책임연구원
 2012년 9월 ~ 현재 : 세종대학교 항공우주공학과 조교수/부교수
 ※ 관심분야 : DGPS, WADGPS, RTK, Network RTK, GNSS



허문범(Moon Beom Heo)

1992년 2월 : 경희대학교 기계공학과 (공학사)
 1997년 2월 : Illinois Institute of Technology 항공기계공학과 (공학석사)
 2004년 2월 : Illinois Institute of Technology 항공기계공학과 (공학박사)
 2005년 3월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 위성항법팀 책임연구원
 ※ 관심분야 : GNSS, 위성항법, 항행시스템