

## 기선 거리에 따른 VRS와 FKP 방식의 Network RTK 사용자 성능 비교

# Performance Comparison of VRS and FKP Network RTK User According to Baseline Length

임철순·박병운\*

세종대학교 항공우주공학과

Cheolsoo Lim · Byungwoon Park\*

Department of Aerospace Engineering, Sejong University, Seoul, 05006, Korea

### [요 약]

본 논문에서는 기선 거리에 따른 VRS (virtual reference station)와 FKP (flächen korrektur parameter) 방식의 Network RTK (real time kinematics) 사용자 성능을 비교 분석하였다. 이를 위해 현재 국토지리정보원에서 운영 중인 VRS 및 FKP 서비스를 통해 기선 거리 별 보정정보를 취득하여 상용 수신기에 적용한 후, RTK 수행 결과를 측정치 영역과 위치 영역에서 각각 분석하였다. VRS의 경우, 사용자가 기선 거리가 증가함에 따라 발생하는 공간이격 오차를 보상하지 못하므로 전반적인 RTK 성능이 저하되는 것을 확인하였다. 반면, FKP는 VRS와 달리 전리층 및 비전리층 오차의 구배를 이용하여 사용자와 기준국 간 측정치의 공간이격 오차를 보상하므로 기선 거리 약 130 km 수준까지는 기선 거리 증가하더라도 VRS에 비해 안정적인 RTK 성능을 보여주었지만, 150 km 이상의 장기기선 경우에는 FKP 보정정보의 성능 감소로 인해 미지정수 오결정 등의 문제가 발생하였다.

### [Abstract]

In this paper, the performances of virtual reference station (VRS) and flächen korrektur parameter (FKP) based Network real time kinematics (RTK) according to baseline length were compared and analyzed. We applied the VRS and FKP corrections for each baseline length obtained from National Geographic Information Institute Network RTK services to an FKP-supported commercial receiver and analyzed the RTK results in the range and position domains. In the case of VRS, RTK performance was degraded due to the spatial error, which increase in proportion of the baseline length. On the other hand, FKP compensates for spatial errors by using the gradients of dispersive and non-dispersive errors, so it showed stable RTK performance compared to VRS even if the baseline length increases up to 130 km. However, in the case of long baseline of 150 km or more, integer ambiguities were incorrectly fixed due to the decrease in the performance of the FKP corrections.

**Key word** : Network RTK, VRS, FKP, Baseline length, Position accuracy.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.6.540>



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 4 December 2020; Revised 7 December 2020

Accepted (Publication) 24 December 2020 (30 December 2020)

\*Corresponding Author; Byungwoon Park

Tel: +82-2-3408-4385

E-mail: byungwoon@sejong.ac.kr

## I. 서 론

Network RTK (real time kinematics)는 다수의 기준국을 하나의 네트워크로 연결하고, 각 기준국에서 실제 수집된 GNSS (global navigation satellite system) 반송파 측정치를 활용하여 새로운 측정치를 모델링함으로써 단일 기준국 RTK와 동일한 수준의 cm 급 정확도를 유지하면서, 서비스 반경을 10 km 수준에서 약 100 km 수준까지 확장할 수 있는 시스템이다 [1]. 전국토에 대하여 균질한 성능은 갖는 RTK 서비스를 제공하기 위해서는 약 10 km마다 최소 1개의 기준국이 구축되어야 하므로 전국토를 커버하기 위해서 많은 수의 기준국 설치가 필요한데, Network RTK의 보급으로 지상 인프라 구축 비용이 대폭 감소하여 반송파 기반의 광역 보강방법을 가능하게 하였다 [2]. 일반적으로 Network RTK는 보정정보 생성 기법에 따라 VRS (virtual reference station), FKP (flächen korrektur parameter), MAC (master-auxiliary concept)으로 구분된다 [3].

Network RTK는 과거 측지, 측량 등 사용자가 정적인 상태를 유지하는 분야에 주로 사용되어 왔지만, 최근 무인비행체, 자율주행 등 이동체의 항법 요구 정확도가 높아짐에 따라 Network RTK 활용에 대한 시도 및 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만, 기본적으로 RTK에서는 사용자의 이동성을 고려하지 않기 때문에 동적 사용자가 초기 보정정보 수신 위치에서 멀어지는 경우에 대한 고려가 필요하였다. 이 경우, 기선 거리가 길어질수록 기준국과 사용자 간 측정치 GNSS 오차의 시공간 상관성이 감소하므로 Network RTK 사용자의 측위 성능이 감소한다. 즉, 이동 중인 사용자는 서버에 업로드 한 초기 위치를 기반으로 하여 생성된 보정정보를 계속하여 적용하므로 Network RTK의 장점을 활용할 수 없다. 또한, 초기 위치가 아닌 다른 위치를 업로드 하여 해당 위치 기반의 보정정보를 수신하기 위해 인위적으로 서버와의 연결을 초기화하는 경우, 반송파 측정치의 미지정수 재결정 등 사용자 수신기의 RTK 프로세스가 초기화된다는 단점이 있다 [3].

Network RTK 시스템 운용 관점에서 볼 때, 점차 늘어나는 동적 사용자에게 대한 안정적인 측위 서비스 제공을 위해서는 Network RTK 보정정보의 원거리 이동 등 다양한 측위 환경에서의 성능을 파악하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 기선 거리에 따른 Network RTK 성능을 분석함으로써 원거리 이동체에 대한 고정밀 측위 사용자 성능을 예측하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 현재 국토지리정보원에서 운영 중인 VRS 및 FKP 서비스를 통해 Network RTK 사용자로부터의 기선 거리별(약 40~350 km) Network RTK 보정정보를 취득하고, 이를 GNSS 상용 수신기에 적용함으로써 기선 거리에 따른 VRS와 FKP 방식의 Network RTK 사용자 성능을 비교 분석하였다.

## II. Network RTK 기법

### 2-1 VRS

VRS [4]는 그림 1과 같이 사용자(user station)를 둘러싼 다수의 기준국(reference stations)의 측정치 또는 보정정보를 기반으로 사용자 근처에 가상의 기준국이 있다고 가정하고, 해당 기준국 위치를 기반으로 한 GNSS 측정치 또는 보정정보를 생성하여 사용자에게 제공하는 방식이다. 단일 기준국 RTK와 동일한 알고리즘을 활용하므로 사용자 수신기는 별도의 보정정보 수신 모듈이 불필요하다.

VRS 기반의 Network RTK 시스템 구축을 위해서는 정확한 위치를 알고 있는 최소 3개 이상의 지상 기준국, 보정정보를 생성하는 중앙 처리국, 사용자, 그리고 생성된 보정정보를 사용자에게 전송하기 위한 데이터 통신망으로 구성된다. 각 기준국에서는 GNSS 관측 데이터를 수집하고, 이를 네트워크로 연결된 중앙 처리국에 제공한다. 중앙 처리국은 모든 기준국의 측정치를 실시간으로 수신하면서 사용자의 요청에 대기하고, 인터넷을 통해 중앙 처리국 서버에 연결된 사용자는 자신의 위치를 NMEA (national marine electronics association) 포맷으로 전달한다. 사용자로부터 위치 정보를 수신한 중앙 처리국은 해당 위치를 기반으로 가상의 기준국을 설정하고, 가상 기준국에 대한 VRS 보정정보를 생성한 후, RTCM (radio technical commission for marine) [5] 메시지 형태로 사용자에게 제공한다. 사용자는 중앙 처리국 서버로부터 수신한 VRS 보정정보를 수신기에 적용함으로써 cm 수준의 고정밀 위치해를 산출할 수 있다.

VRS 방식의 Network RTK 시스템의 장점은 사용자가 자신의 위치와 거의 동일한 위치를 기반으로 생성된 가상 기준국 보정정보를 제공받는 방식이므로 사용자 측정치에 포함된 GNSS 오차를 효과적으로 제공할 수 있다는 점이다. 하지만, 앞서 언급하였듯이 가상 기준국 설정을 위해서는 사용자의 위치 정보가 제공되어야 하므로 사용자와 기준국 간의 양방향 통신이 지속적으로 유지되어야 하며, 이로 인해 VRS 서버로의 동시 접속자 수가 제한되는 단점이 있다. 또한, 가상 기준국의 좌표가 변경되면 기준국 네트워크의 미지정수가 재결정되어 사용자의 RTK 프로세스가 초기화되므로 이를 방지하기 위해 사용자는 초기에 업로드 한 VRS 위치를 기반으로 생성된 보정정보를 계속하여 적용하여야 한다. 따라서 사용자가 초기 위치에서 멀어질수록, 즉 기선거리가 길어질수록 단일 기준국 RTK와 동일하게 공간이격 오차가 발생하여 RTK 측위 성능이 저하될 수 있다.

### 2-2 FKP

FKP [8] 방식의 Network RTK 시스템은 GNSS 오차 성분을 전리층(dispersive) 항과 비 전리층(non-dispersive) 항으로 나누고, 위도와 경도에 대한 오차 평면의 구배(gradient)를 산출하여

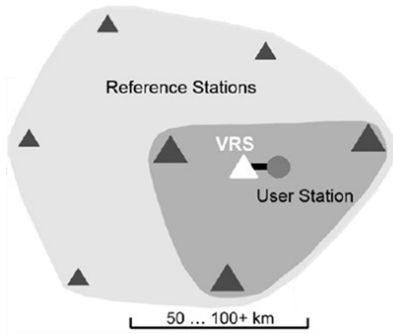


그림 1. VRS의 기본 개념 [6]  
 Fig. 1. The concept of VRS [6].

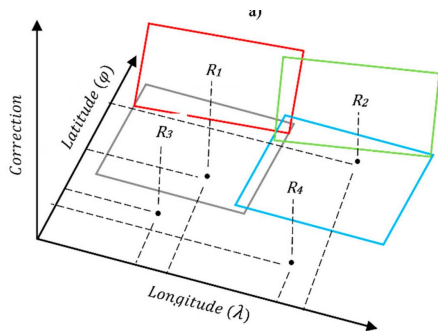


그림 2. FKP 보정정보 평면 [7]  
 Fig. 2. FKP correction plane [7].

각 오차 성분을 그림 2와 같이 평면 함수로 모델링하는 방식을 이용한다. 즉, 기준국 GNSS 측정치와 함께 오차 평면에 대한 모델링 파라미터를 제공하므로 사용자 수신기는 별도의 보정 정보 수신 및 재조합 모듈이 필요하다.

사용자는 오차 평면에 대한 구배, 기준국 네트워크의 주 기준국 위도와 경도 등을 제공받고, 이를 이용하여 사용자와 기준국 간 기선 거리에 따른 각 오차 성분의 변화량을 계산한 후, 기준국과 사용자 간 측정치의 공간이격 오차를 보상한다. 전리층 오차의 공간이격 보정정보( $\delta\rho_I$ )와 비전리층 오차의 공간이격 보정정보( $\delta\rho_0$ )는 오차 평면 구배, 기준국 위도( $\phi_R$ ) 및 경도( $\lambda_R$ ), 위성 양각( $E$ )의 함수로 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta\rho_0 = 6.37(N_0(\phi - \phi_R) + E_0(\lambda - \lambda_R)\cos(\phi_R)) \quad (1)$$

$$\delta\rho_I = 6.37H(N_I(\phi - \phi_R) + E_I(\lambda - \lambda_R)\cos(\phi_R))$$

$$H = 1 + 16(0.53 - E/\pi)^3$$

여기서  $\phi$ ,  $\lambda$ 는 각각 사용자의 위도와 경도,  $N_0$ ,  $E_0$ 는 각각 남북 및 동서 방향으로의 비 전리층 오차 평면 구배,  $N_I$ ,  $E_I$ 는 각각 남북 및 동서 방향으로의 전리층 오차 평면 구배를 의미한다.

FKP 방식은 VRS와 달리 양방향 통신이 아닌 단방향 통신의 형태로 보정정보 전송이 가능하므로 이론적으로 무제한 사용자에 대하여 서비스 제공이 가능하다. 또한, 사용자가 자신의 위치 정보를 반영하여 공간이격 오차를 보상할 수 있으므로 기준국 네트워크 내에서 고속으로 이동하는 사용자가 초기 위치에서 멀어지더라도 cm 수준의 정확도 확보가 가능하다. 다만, FKP 보정정보는 서비스 제공자에 의해 가공된 값이므로 사용자의 성능이 서비스 제공자에 의해 결정된다는 단점이 있다. 또한, FKP는 RTCM version 3.2에 표준으로 채택되었음에도 불구하고, NovAtel 등 일부 고가의 상용 수신기에서만 FKP 보정정보를 적용한 RTK 측위가 가능하며, u-blox, SwiftNav 등 저가형 수신기에서는 FKP 보정정보 메시지를 지원하지 않는다.

### III. 기선 거리에 따른 국토지리정보원 VRS 및 FKP 서비스 성능 비교 분석

#### 3-1 기선 거리에 따른 기준국 및 사용자 선정

본 논문에서는 기선 거리에 따른 국토지리정보원 VRS 및 FKP 서비스의 성능을 비교 분석하기 위해 사용자는 세종대학교 총무관에 설치된 NovAtel FlexPak6 (FKP 지원) 수신기로 설정하였고, 국토지리정보원 상시관측소 중에서 사용자와의 기선 거리를 고려하여 강화(GANH), 양평(YANP), 원주(WNJU), 영월(YOWL), 울진(WULJ), 칠원(CHLW), 괴산(GSAN), 군산(KUSN), 영광(YONK), 진도(JIND), 총 10개소의 기준국을 선정하였다. 선정된 기준국과 사용자 간 기하학적 배치는 그림 3과 같으며, 표 1은 기준국 좌표와 기선 거리를 정리한 것이다.

표 1. 기준국 별 좌표 및 기선 거리

Table 1. Geodetic coordinates and baseline length for reference stations.

CORS ID	Latitude [°]	Longitude [°]	Height [m]	Baseline length [km]
GANH	37.7194	12.3902	43.5010	63.1
YANP	37.4542	127.5056	71.5452	39.7
WNJU	37.3372	127.9471	180.2060	80.9
YOWL	37.1825	128.4618	253.5853	129.6
WULJ	36.9920	129.4130	80.7407	216.6
CHLW	38.1645	127.4152	308.7779	74.3
GSAN	36.8162	127.7868	183.1706	103.4
KUSN	36.0055	126.7616	49.0819	173.9
YONK	35.2786	126.5165	100.0015	257.2
JIND	34.4720	126.3237	503.4156	348.4

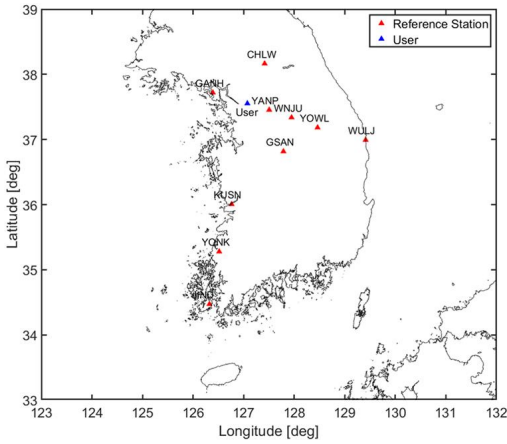


그림 3. 기준국과 사용자 간 기하학적 배치  
Fig. 3. Geometry between reference stations and user.

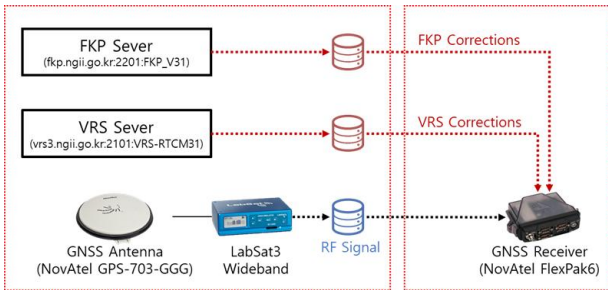


그림 4. 정적 실험 구성 [9]  
Fig. 4. Static test configurations [9].

### 3-2 성능 비교 분석을 위한 데이터 취득

이중의 GNSS 보정정보에 대한 공정한 성능 비교를 위해서는 동일한 신호 환경(동일한 수신기 및 시간) 하에서 실험을 수행하는 것 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 그림 4와 같이 사용자 관측 데이터와 기선 거리별 Network RTK 보정정보를 저장하기 위한 실험(실험 1)과 저장된 관측 데이터 및 Network RTK 보정정보를 GNSS 수신기에 재방사하는 실험(실험 2), 총 2단계로 구성된 실험 환경을 구축하였다. 먼저, 실험 1에서는 GNSS RF (radio frequency) 신호 저장 및 재생이 가능한 LabSat 3 Wideband [10] 장비를 이용하여 사용자 관측 데이터를 저장한다. 이와 동시에 표 1의 기준국 좌표를 국토지리정보원 VRS 및 FKP NTRIP (networked transport for RTCM via internet protocol) [11] 서버에 업로드 한 후, 각 기준국 좌표를 기반으로 생성된 RTCM 포맷의 Network RTK 보정정보를 저장한다. 그 다음, 실험 2에서는 실험 1을 통해 LabSat 3 Wideband에 저장된 RF 신호와 Network RTK 보정정보를 GNSS 수신기에 입력하여 RTK 측위를 수행한다.

정적 데이터 취득 실험은 2020년 8월 17일 12시부터 13시까지 약 1시간동안 진행하였으며, 사용자 관측 데이터 취득 및

RTK 측위 수행을 위해 NovAtel FlexPak6 수신기와 NovAtel GPS-703-GGG 안테나를 사용하였다. 재방사 실험은 총 20회 수행하였으며, 실험 과정에서는 매 10분마다 RTK 프로세스가 초기화되도록 수신기에 reset 명령(hot start)을 입력하였다.

### 3-3 측정치 영역에서의 성능 비교 분석

위치 영역에서의 RTK 측위 결과 분석에 앞서, 사용자 반송파 측정치와 각 기준국 위치를 기반으로 생성된 반송파 측정치 간 이중 차분 잔차(double difference residuals)를 산출하고, 이를 바탕으로 VRS와 FKP 간 성능 비교 분석을 수행하였다.

이중 차분 잔차 산출 과정은 다음과 같다. 먼저, 사용자와 가상 기준국 반송파 측정치 간 단일 차분(single difference)을 통해 GNSS 공통 오차를 제거한 후, 이를 위성 간 단일 차분하여 수신기 시계 오차를 제거함으로써 식 (1)과 같이 반송파 이중 차분 측정치를 산출한다.

$$\Delta \nabla \phi_f - \Delta \nabla d = \Delta \nabla (T - I_f + \epsilon_{\phi_f}) + \lambda_f \Delta \nabla N_f \quad (2)$$

여기서  $\phi$ 는 반송파 측정치,  $d$ 는 위성-사용자 간 거리,  $T$ 는 대류층 지연 오차,  $I$ 는 전리층 지연 오차,  $\epsilon_{\phi}$ 는 반송파 측정치 잡음,  $N$ 은 미지정수(integer ambiguity),  $\lambda$ 는 반송파 파장의 길이, 아래 첨자  $f$ 는 위성 신호(e.g. L1),  $\Delta$ 와  $\nabla$ 는 각각 사용자-기준국 간 단일 차분, 위성 간 단일 차분을 의미한다.

반송파 측정치의 cycle slip이 발생하지 않는다고 가정한다면, 식 (1)의 미지정수 이중차분 항( $\lambda_f \Delta \nabla N_f$ )은 상수라 할 수 있다. 또한, 전리층 및 대류층 지연오차와 측정치 잡음의 이중 차분 항( $\Delta \nabla (T - I_f + \epsilon_{\phi_f})$ )은 비상관 오차 제거 시 Gaussian 분포로 가정할 수 있다. 따라서 식 (2)의 시간에 대한 평균값을 반올림(round)함으로써 식 (3)과 같이 후처리 미지정수를 추정할 수 있다.

$$\Delta \nabla \hat{N}_f = \text{round} \left( \frac{\Delta \nabla \phi_f - \Delta \nabla d}{\lambda} \right) \quad (3)$$

최종적으로 식 (3)을 이용하여 식 (1)의 이중차분 된 미지정수 항을 제거함으로써 식 (4)와 같이 반송파 측정치 이중 차분 잔차를 산출한다.

$$\Delta \nabla r_{\phi_f} = (\Delta \nabla \phi_f - \Delta \nabla d) - \lambda_f \Delta \nabla \hat{N}_f \quad (4)$$

기선 거리 별 반송파 측정치 이중 차분 잔차 산출 시, VRS의 경우에는 사용자와 기준국 간 고도 차이에 의한 대류층 오차 보상을 수행하였고, FKP의 경우에는 고도 차이에 의한 대류층 오차 보상 외에 FKP 시스템에서 제공하는 면보정 파라미터, 즉 동서 및 남북 방향의 오차 평면 구배 값을 이용하여 FKP 보정치를 계산하여 반송파 측정치 이중 차분 잔차를 보정하였다.

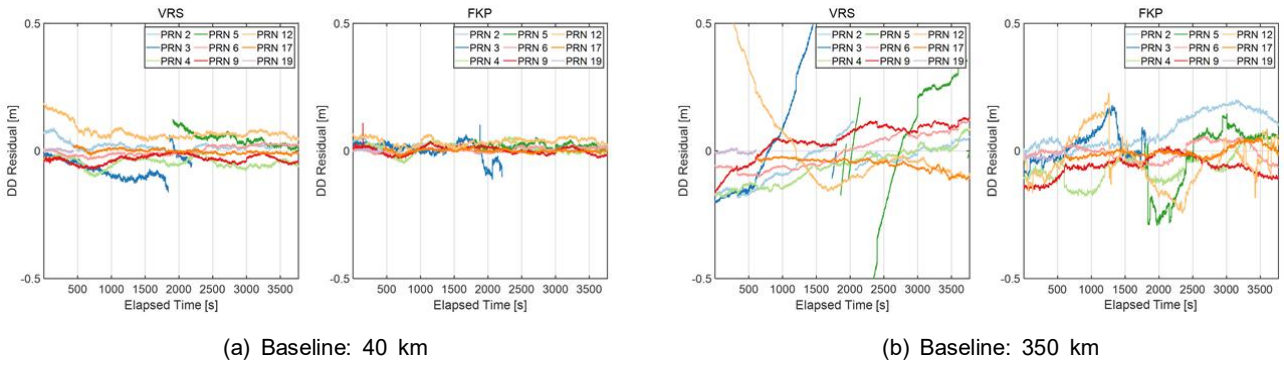


그림 5. 반송파 측정치 이중차분 잔차 시계열 (좌: 40 km, 우: 350 km)  
 Fig. 5. Time history of double difference phase residuals (left: 40 km, right: 350 km).

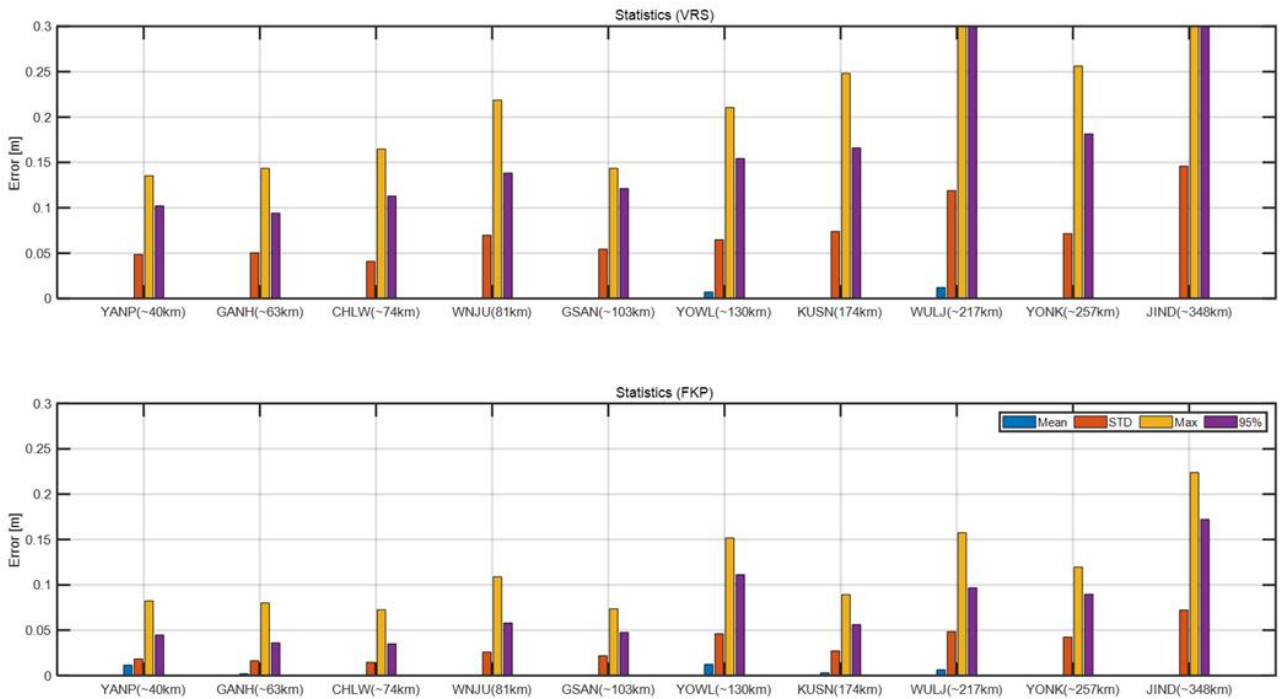


그림 6. 기선 거리에 따른 반송파 측정치 이중차분 잔차 통계치  
 Fig. 6. Statistics of double difference phase residuals according to baseline length.

위 식 (4)를 이용하여 기선 거리 40 km와 350 km 경우에 대한 반송파 측정치의 이중차분 잔차를 계산한 결과는 그림 5와 같다. 그림 6은 기선 거리에 따른 반송파 측정치 이중 차분 잔차의 통계치(mean, standard deviation, max, 95th percentile)를 bar chart 형태로 도시한 것이다. VRS의 경우, 시스템 특성 상, 단일 기준국 RTK와 마찬가지로 사용자와 가상 기준국 간 기선 거리에 비례하여 증가하는 공간이격 오차를 보상하지 못하므로 그림 6과 같이 반송파 측정치 잔차 값이 기선 거리에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면, FKP의 경우, VRS와 달리 면보정 파라미터를 이용하여 공간이격 오차를 보상하므로 기선 거리가 증가하더라도 반송파 측정치 이중 차분 잔차 값이 VRS

에 비해 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 또한, 기선 거리 약 100 km까지는 잔차의 95th percentile 값이 약 0.05 m 수준으로 유지되는 것으로 보아 FKP의 면보정 방식이 공간이격 오차에 완화에 효과적이지만, 기선 거리 100 km 이상인 경우에는 오차 보상 효과가 대폭 감소하는 것을 확인하였다.

그림 7은 위성 앙각 별 반송파 측정치 이중차분 잔차의 RMS 값을 산출하고, 그 값을 기선 거리에 따라 나타낸 것이다. 대류층 및 전리층 지연오차는 위성 앙각이 낮을수록 그 값이 커지는 것이 일반적이며, 기선 거리가 짧을수록 사용자와 기준국 간 측정치의 대기 오차의 시공간 상관성이 크므로 그림 7과 같이 단기저선의 경우, 저앙각 위성과 고앙각 위성의 이중차분 잔차의

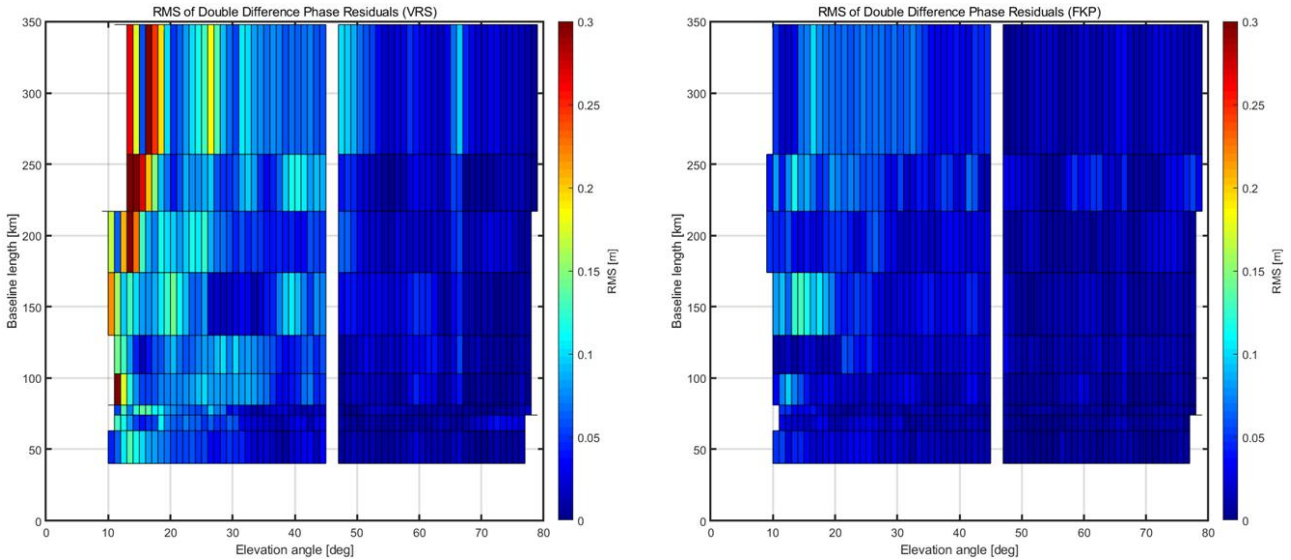


그림 7. 기선 거리에 따른 양각 별 이중차분 잔차 RMS (좌: VRS, 우: FKP)  
 Fig. 7. RMS of double difference phase residuals by elevation angle according to baseline length (left: VRS, right: FKP).

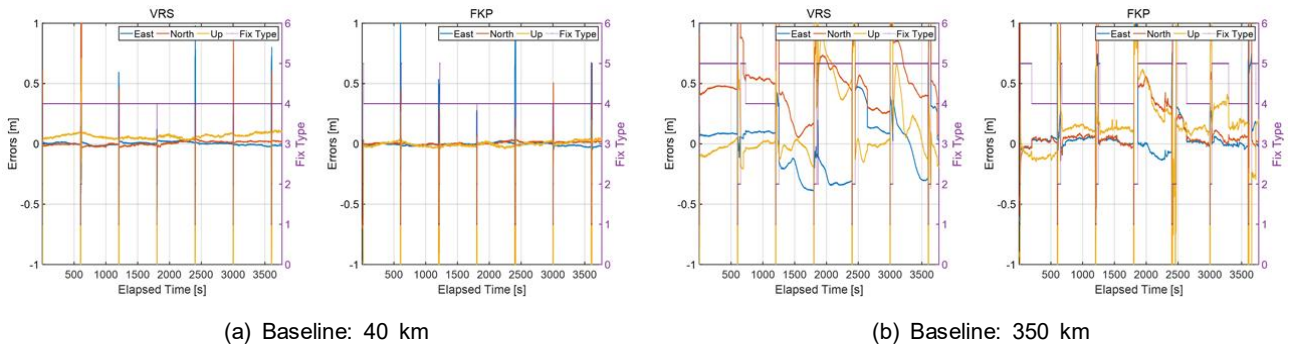


그림 8. RTK 측위 오차 시계열 (좌: 기선 거리 40 km, 우: 기선 거리 350 km)  
 Fig. 8. Time history of RTK positioning errors (left: baseline length - 40 km, right: baseline length - 350 km).

수준은 유사하다. 하지만, 기선 거리가 길어질수록 동일한 위성에 대한 측정치 대기 오차의 공간적 비상관성이 증가하므로 측정치 간 이중차분을 통해 제거되지 않는 공간적 오차가 발생하며, 그림 7의 VRS 결과에서 확인할 수 있듯이 그 영향은 고양각 위성보다 저양각 위성에서 더 두드러진다. 또한, VRS 결과를 보면, 고양각 위성의 경우, 기선 거리에 관계없이 이중차분 잔차가 거의 유사하게 나타나지만, 위성 양각이 낮아질수록 기선 거리에 비례하여 이중차분 잔차가 증가함을 확인할 수 있다. 반면, FKP의 경우, VRS와 달리 기준국 네트워크를 통해 추정된 오차 평면의 구배 정보를 이용하여 전리층 및 비전리층 오차에 대한 공간적 오차를 보상하므로 저양각 위성에 대하여 기선 거리가 증가하더라도 이중차분 잔차가 크게 증가하지 않음을 확인할 수 있다.

3-4 위치 영역에서의 성능 비교 분석

반송파 측정치 이중차분 잔차와 위치 영역에서의 측위 오차

의 상관관계는 수식적으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{\delta x} = (H^T H)^{-1} H^T \Delta \nabla r_{\phi_f} \tag{5}$$

여기서  $H$ 는 관측 행렬(observation matrix),  $\vec{\delta x}$ 는 이중차분 측정치의 투영 오차를 의미한다. 앞서 기술한 바와 같이 기선 거리가 길어질수록 사용자와 기준국 측정치에 포함된 대기오차의 시간적, 공간적 상관성이 감소하므로 이중차분 측정치의 잔차가 증가한다. 결국 식 (5)에 따르면 이중차분 잔차의 증가는 투영 오차의 증가로 연결되므로, 즉 기선 거리에 비례하여 위치 영역에서의 사용자 위치 오차가 증가할 것을 해석적으로 확인해볼 수 있다.

저장된 GNSS RF 신호와 VRS, FKP 보정정보를 상용 수신기에 재방사하여 RTK 측위를 수행하고, 수신기에서 출력된 결과를 바탕으로 위치 영역에서의 기선 거리에 따른 Network RTK 사용자 성능 비교 분석을 수행하였다.

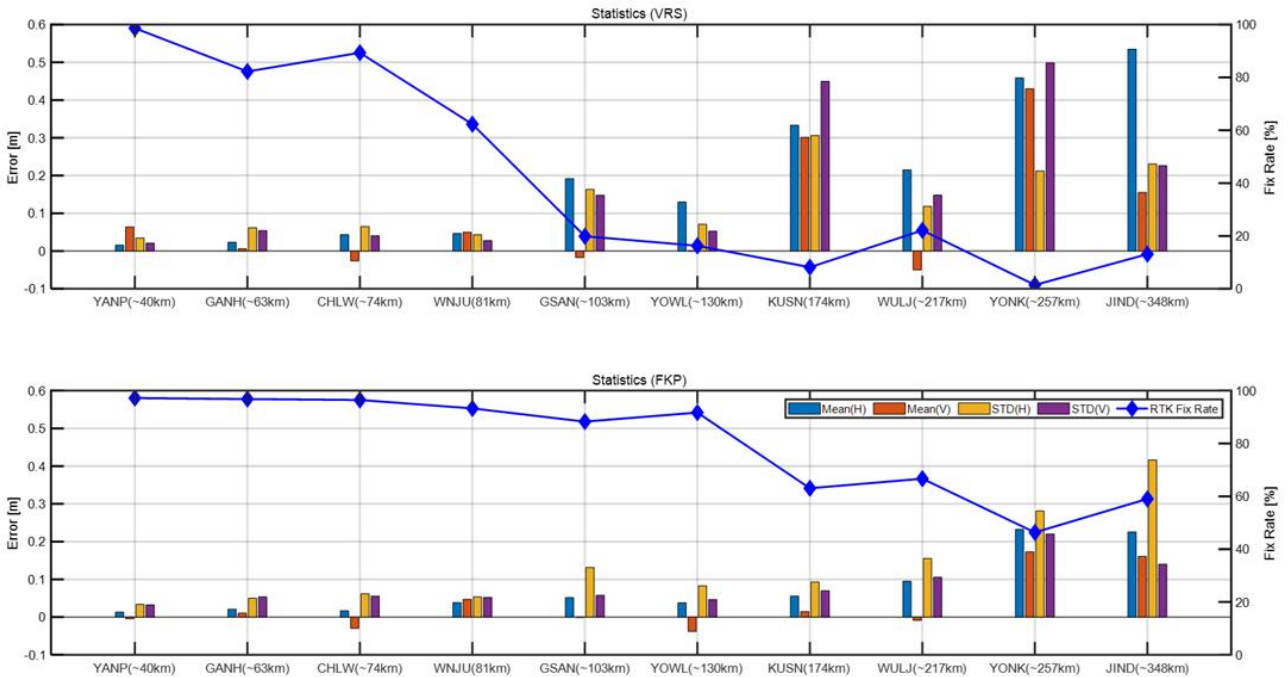


그림 9. 기선 거리에 따른 RTK 측위 오차 통계치  
 Fig. 9. Statistics of RTK positioning errors.

총 20회의 재방사 실험을 통해 취득한 RTK 측위 결과를 바탕으로 수평 및 수직 오차의 통계치(mean, standard deviation, max, 95th percentile) 및 미지정수 결정율(ambiguity fixed rate)을 산출하였다. 기선 거리 40km와 350km 경우에 대한 VRS 및 FKP 측위 오차의 시계열은 그림 8과 같다. 그림 9는 산출된 통계치 결과를 기선 거리에 따라 도시한 것이다. 기선 거리 80km 이내에서는 VRS와 FKP의 수평 및 수직 측위 오차의 평균이 약 0.1m 이하 수준으로 위치 정확도 측면에서 볼 때, 두 시스템은 비슷한 성능을 보여주고 있지만, 미지정수 결정율 측면에서는 큰 차이를 보이고 있다. 본 논문에서 정의한 미지정수 결정율은 실험 시간동안 수신기에서 출력된 해 중에서 미지정수가 정수 영역에서 결정된 해, 즉 고정해(fixed solution)의 비율을 의미하며, 일반적으로 고정해는 cm 수준의 정확도를 갖는다. 기선 거리 40km에서는 VRS와 FKP 모두 95% 이상의 높은 미지정수 결정율을 보여주고 있지만, VRS는 기선 거리가 증가함에 따라 미지정수 결정율이 감소하여 기선 거리 80km에서 미지정수 결정율이 약 60%로 기선거리 40km 대비 2/3 수준이었다. 반면, FKP는 기선 거리 80km에서 미지정수 결정율이 약 90%로 기선 거리가 증가하였음에도 불구하고, 미지정수 결정율의 감소 폭이 VRS에 비해 작은 것으로 나타났다. 기선 거리 80km의 결과를 보면, 평균 오차는 FKP가 VRS에 비해 다소 작았지만, 표준 편차는 FKP가 VRS에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는, 국토지리정보원 FKP 기준국 수가 VRS에 비해 적고, FKP 면보정 파라미터가 GNSS 오차를 평면으로 가정하여 모델링 된 것이므로 FKP 보정정보가 VRS 보정정보보다 잡음 수준이 높은 것이 주요 원인인 것으로 판단된다.

기선 거리 100km 이상부터는 VRS의 미지정수 결정율이 20% 이하로 대폭 감소하였으며, 측위 오차 또한 기선 거리에 비례하여 증가하여 최대 약 0.5m 수준의 평균 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. FKP의 경우, 기선 거리 130km까지는 위치 정확도와 미지정수 결정율이 VRS에 비해 상대적으로 안정적으로 유지되지만, 기선 거리 170km 이상부터는 미지정수 결정율이 약 60% 수준으로 대폭 감소하였고, 오차의 평균은 최대 약 0.2m 수준으로 나타났다. 특히, 장기저선의 경우, FKP는 VRS에 비해 높은 수준의 미지정수 결정율을 보여주고 있음에도 불구하고, RTK 측위 오차의 평균이 수평 및 수직 방향으로 각각 약 0.2m, 0.17m 수준으로 RTK 위치해가 다소 편향된 것을 확인할 수 있다. 이는 FKP 면보정 파라미터로 생성한 전리층 및 비전리층 공간이격 오차 보정정보 적용 후에도 제거되지 않은 잔여 오차로 인해 미지정수가 오결정이 주된 원인인 것으로 예상된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 국토지리정보원의 VRS 및 FKP Network RTK 서비스를 이용하여 기선 거리에 따른 VRS와 FKP 방식의 Network RTK 사용자 성능을 비교 분석하였다. 그 결과, VRS는 기선 거리에 비례하여 측정치 이중차분 잔차가 증가하는 반면에 FKP는 면보정 파라미터를 이용한 공간이격 오차 보상을 통해 기선 거리가 증가하더라도 이중차분 잔차 값이 VRS에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 하지만, 기선 거리가 100km 이상

인 경우에는 FKP 면보정 방식에 의한 공간이격 오차 보상 효과가 급격하게 감소함을 확인하였다. 또한, 위성 양각 별 반송파 측정치 이중차분 잔차의 RMS 값을 산출하여 분석한 결과, 사용자와 기준국 측정치 간 GNSS 오차 성분의 시공간 상관성이 작은 장기저선의 경우, FKP 보정정보가 저양각 위성의 전리층 및 비전리층 오차에 대한 공간이격 오차를 효과적으로 보상을 확인하였다. 마지막으로 정적 실험을 통해 취득한 사용자 관측 데이터와 Network RTK 보정정보를 상용 수신기에 재방사하여 RTK 사용자 성능을 분석한 결과, 측위 정확도 측면에서는 기선 거리 약 80 km까지 VRS와 FKP가 비슷한 성능을 보여 주었지만, VRS의 미지정수 결정율은 기선 거리가 증가함에 따라 감소하여 기선 거리 100 km 이상부터는 20% 이하 수준의 미지정수 결정 성능을 나타내었다. 반면 FKP의 경우, 기선 거리 130 km까지는 VRS에 비해 상당히 안정적인 측위 정확도, 미지정수 결정 성능을 나타내었지만, 기선 거리 170 km부터는 측위 오차의 평균이 약 0.2 m, 미지정수 결정율은 60%로 대폭 감소함을 확인하였다.

## Acknowledgments

This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korean government(Motie : Ministry of Trade, Industry&Energy) (No. N0002431). This research was a part of the project titled 'Development of Ground-based Centimeter-level Maritime Precise PNT Technologies', funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea. This research was supported by Unmanned Vehicles Core Technology Research and Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) and Unmanned Vehicle Advanced Research Center(UVARC) funded by the Ministry of Science and ICT, the Republic of Korea(No. 2020M3C1C1A01086407).

## References

[1] C. Rizos and S. Han, "Reference station network based RTK systems-concepts and progress," *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, Vol. 8, No. 2, pp. 566-574, June, 2003.

[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, Aug. 2013.

- [3] B. 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, Feb. 2008.
- [4] G. R. Hu, H. S. Khoo, P. C. Goh and C. L. Law, "Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning," *Journal of Geodesy*, Vol. 77, No. 5-6, pp. 292-302, Aug. 2003.
- [5] RTCM Standards 10403.2, Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services - Version 3, Feb. 2013.
- [6] B. Eissfeller, D. Dotterbock, D. Junker and C. Stober, Online GNSS data processing - status and future developments [Internet]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/266874829\\_Online\\_GNSS\\_Data\\_Processing\\_-\\_Status\\_and\\_Future\\_Developments](https://www.researchgate.net/publication/266874829_Online_GNSS_Data_Processing_-_Status_and_Future_Developments).
- [7] Ö. Gökdaş and M. T. Özlüdemir (2020, July). A variance model in NRTK-based geodetic positioning as a function of baseline length. *Geosciences 2020* [Online]. 10(7), pp. 262-275. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3263/10/7/262>
- [8] G. Wubbena, A. Bagge, and M. Schmitz, "RTK networks based on Geo++® GNSMART - concepts, implementation, results," in *Proceeding of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001)*, Salt Lake City: UT, pp. 368-378. 2001.
- [9] C. S. Lim, H. J. Yoon, A. Cho, C. S. Yoo and B. W. Park (2019, Dec.). Dynamic performance evaluation of various GNSS receivers and positioning modes with only one flight test. *Electronics 2019* [Online]. 8(12), pp. 1518-1538. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/12/1518>
- [10] RACELOGIC, LabSat 3 Wideband [Internet]. Available: <https://www.labsat.co.uk/index.php/en/products/labsat-3-wideband>
- [11] GNSS Science Support Centre, Networked transport of RTCM via internet protocol (Ntrip) - Version 1.0 [Internet]. Available: <https://gssc.esa.int/wp-content/uploads/2018/07/NtripDocumentation.pdf>.





**임철순 (Cheolsoo Lim)**

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



**박병운 (Byungwoon 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