

차량항법용 네트워크 RTK 기반 연구

Preliminary Analysis of Network-RTK for Navigation

김민호¹⁾ · 배태석²⁾
Kim, Min-Ho · Bae, Tae-Suk

Abstract

It is well-known that even the DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System) technique in navigation for ground vehicles can only provide several meters of accuracy, such that it is suitable for simple guidance. On the other hand, centimeter to millimeter level accuracy can be obtained by using carrier phase observables in the field of precision geodesy/surveying. In this study, a preliminary study was conducted to apply NRTK (Network-RTK) by NGII (National Geographic Information Institute) to ground vehicle navigation. Onboard GNSS receivers were used for NRTK throughout the country, and the applicability of NRTK on navigation was analyzed based on NRTK surveying results. The analysis shows that the overall ambiguity fixing rate of NRTK is high and is therefore possible to apply it for navigation. In urban areas, however, the fixing rate decreases sharply, therefore, it needs to employ a method to minimize the effect of the float solutions, which can reach up to 10 meters. It is still feasible to obtain a centimeter level of accuracy in some area using NRTK under certain conditions. But, the ambiguity fixing rate of FKP falls down to 55% for high speed vehicles, and so the surveying accuracy should be determined by considering various factors of surveying environments. In addition, it is difficult to fix ambiguities using single-frequency GPS receivers. Finally, several suspicious NRTK(FKP) connection problems occurred during atmospheric disturbances (phase two or up), which should be investigated further in upcoming research.

Keywords : Network-RTK, Navigation, VRS, FKP

초 록

차량 항법장치에서 활용하고 있는 GNSS는 차분기법을 이용하더라도 수 미터 수준의 측위 정밀도를 확보할 수 있으므로, 길안내 수준의 위치기반서비스만 가능하다. 반면 정밀 측지/측량분야에서는 민간용 코드 대신 반송파 위상정보를 이용하여 센티미터에서 밀리미터까지의 위치 정확도를 확보할 수 있다. 본 연구에서는 국토교통부 국토 지리정보원의 NRTK(Network-RTK) 서비스를 차량항법에 적용하기 위한 기반연구를 수행하였다. 이를 위해, 차량에 GNSS 장비를 탑재하고 전국범위에서 NRTK를 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 NRTK의 차량항법 적용가능 여부를 판단하고자 하였다. 본 연구의 분석결과, NRTK는 대체적으로 높은 모호정수 결정율을 보이며, 지상 차량항법에 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 도심지에서는 모호정수 결정율이 급격히 낮아지며, 실수해 일 경우에는 측위 오차가 10m 이상의 수준에 달할 정도로 불안정할 수 있다. 따라서 안정적인 위치정확도를 확보하기 위해서는 실수해의 오차영향을 최소화할 수 있는 방안 등이 모색되어야 할 것으로 사료된다. 그러나 수신환경이 양호한 일부 도심지에서는 NRTK를 활용하여 센티미터 수준의 측위 정확도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. FKP는 고속 주행 시 모호정수 결정율이 약 55%까지 낮아지는 경우가 발생하였으므로 여러 수신환경을 고려하여 측위 정확도를 결정하여야 한다. 마지막으로 대기교란(2단계 이상)에 의해 NRTK(FKP) 접속오류로 의심되는 사례가 발생하였으며, 이에 대한 정확한 원인규명이 필요하다.

핵심어 : 네트워크 RTK, 차량항법, VRS, FKP

Received 2015. 09. 09, Revised 2015. 09. 30, Accepted 2015. 10. 26

1) Member, Dept. Geoinformation Engineering, Sejong University (E-mail: rlaalsgh9717@naver.com)

2) Corresponding Author, Member, Dept. Geoinformation Engineering, Sejong University (E-mail: baezae@sejong.ac.kr)

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.

1. 서론

차량 항법장치는 일반적으로 GNSS 신호 중 C/A 코드를 이용한 단독측위방식을 사용하고 있으며, 수십 미터의 측위 정확도를 가지고 있다. 그러나 차량 항법장치를 사용하는 일반인들에게 위치오차는 약 5 미터 정도로 인식되는데, 이는 차량의 위치를 가장 가까운 도로상의 위치로 표시하는 맵 매칭(map matching)기술을 통해 예측 불가능한 다양한 위치 오차를 줄여 운전자가 혼동하지 않도록 방지하기 때문이다(Kong, 2014). 또한 기존의 C/A 코드 기반 단독측위의 정확도를 향상시키기 위해 GNSS 기준국에서 추정된 대기 지연 오차정보를 이용한 DGNSS 방법이 활용되고 있다. 이를 통해 수 미터 수준의 측위 정밀도를 확보할 수 있으나, 여전히 길안내 수준의 위치기반서비스(Location Based Service, LBS)만이 가능하다.

반면, 정밀 측지/측량분야에서는 C/A 코드 대신에 반송파 위상 기반의 측위 방식을 이용하고 있으며, 대표적으로 NRTK(Network-RTK)를 활용하여 단초 이내에 수 센티미터 수준의 측위 정밀도를 확보할 수 있다. 따라서 준실시간으로 정확한 위치 정보를 확보할 수 있지만, 정밀 측지/측량 분야에서만 제한적으로 활용하고 있다. 따라서 이를 활용하여 차량항법에 적용함으로써 다양한 LBS가 가능할 것으로 기대된다. 그러나 반송파 위상데이터를 지원하는 GNSS 수신기는 C/A 코드 지원 장비에 비해 고가이며, 이중 주파수 지원여부에 따라 가격차가 크다. 따라서 GNSS 장비의 성능에 따라 NRTK 측위의 정확도 및 안정성에 차이가 있으며, 도로 주변 환경 및 주행 속도 등에 따라서도 큰 차이가 나타날 수 있다.

NRTK는 정밀 측지/측량 분야에 특화된 시스템으로서 국외의 경우 차량항법에 적용한 연구 사례는 드물다. 이는 주로 NRTK 서비스를 이용하기 위해서는 일정 시간에 따른 요금 부과되는데, 일례로 독일 SAPOS 서비스의 경우 1분 단위로 0.1€가 발생한다(NGII, 2013). 다시 말해서, 정밀한 측위 정확도를 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 항법의 특성상 지속적으로 NRTK 서비스를 이용해야 하고, 그에 따라서 NRTK 이용 시 많은 비용이 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 항법에서는 NRTK 서비스보다는 다양한 센서를 통합하여 위치정확도를 향상시킬 수 있는 통합항법에 관한 연구들이 진행되고 있다(Gao *et al.*, 2006; Li, 2009; Georgy *et al.*, 2011; Groves, 2013).

국내의 경우, 국토교통부 국토지리정보원에서는 전국의 GNSS 상시관측소를 이용하여 NRTK(VRS/FKP) 서비스를 무료로 지원하고 있으며, 평균적으로 수십 킬로미터 이내의

기선으로 이루어진 망을 구성하고 있으므로 양질의 NRTK 서비스가 가능하다. 따라서 국외와는 달리, 다양한 분야에서 활용이 가능하기 때문에 공공측량이나 인공구조물의 모니터링 등에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다(Kim and Bae, 2013). 또한 No *et al.*(2012)은 MMS(Mobile Mapping System) 차량을 이용하여 SRTK(Single-based RTK)와 NRTK(VRS)를 비교분석하고 이를 바탕으로 실시간 이동 측위 적용가능성을 제시하였다. 그러나 한정된 장소(주차장)에서 약 25분 동안 주행한 성과를 바탕으로 분석을 진행하였으므로 일시적이고 제한적인 비교분석에 국한되어 있다. 따라서 장기간에 걸쳐 다양한 외부 수신환경에서 NRTK를 수행할 필요가 있으며, 따라서 본 연구는 차량항법에 NRTK를 적용하기 위한 기반연구로서 차량항법에서 NRTK의 적용가능성을 분석하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 NRTK

NRTK 방식은 크게 MAC(Master-Auxiliary Concept), VRS(Virtual Reference Station), PRS(Pseudo-Reference Stations), FKP(Flächen Korrektur Parameter), i-MAX(individualized Master-Auxiliary corrections) 등이 있다(Takac and Zelzer, 2008). 우리나라에서는 국토지리정보원이 전국 범위에서 VRS와 FKP 서비스를 지원하고 있는데, 두 서비스는 다중 기준국을 이용하여 망 내부의 임의의 점과 기준국의 거리에 따라 변화하는 오차를 추정하여 보정하는 개념에서는 동일하지만, 보정 방법에서 약간의 차이가 있다.

VRS는 이동점의 근사적 위치에 가상의 반송파 위상 관측 데이터를 생성하는데, 관측정보에는 오차보정 정보를 포함하고 있으므로 기존의 RTK 모듈만을 이용하더라도 NRTK 측위가 가능하다. 반면, FKP 방식에서는 FKP로 정의되는 파라미터를 이용하여 이동점에서의 거리에 의존하는 오차(distance-dependent error)를 추정하여 이중차분 시 기준국의 반송파 위상정보를 보정하게 된다(Kim and Bae, 2013). 따라서, RTK 모듈 이외 FKP 파라미터를 처리할 수 있는 모듈이 추가적으로 필요하지만 서버의 부담을 줄여 동시 접속자 수의 제한이 없는 장점이 있다.

NRTK 통신규약은 RTCM SC-104에서 규정한 국제표준 프로토콜과 Trimble®의 CMR 프로토콜 등이 있으며, RTCM은 버전 2.1에서부터 3.x까지, CMR은 CMR/CMR+, CMRx를 지원하고 있다(Kim and Bae, 2013). 또한 NRTK 보정방법의 차이는 NRTK 시스템을 지원하는 벤더의 판매정책에도 영향

을 준다. VRS의 경우, 기준국의 증설보다는 동시 접속라이센스에 따라 구축비용을 달리하고 있으며, FKP는 무제한 접속이 가능하므로 기준국의 증설에 많은 비용이 든다. 실제로 우리나라의 경우, 국토지리정보원 VRS 시스템은 모든 GNSS 상시관측소를 이용하여 전국망을 구성하고 있지만, FKP 시스템은 30개의 GNSS 상시관측소를 이용하여 전국범위에서 서비스하고 있다(2015년 8월 현재). 따라서 이는 VRS와 FKP간의 측위성과에 차이점이 발생할 수 있음을 시사한다.

2.2 모호정수 결정

NRTK 방식은 이중차분을 기반으로 위치를 결정하는데, 이때 모호정수 결정이 필요하다. Eq. (1)은 기준국과 이동점간의 반송파 위상 이중차분 방정식을 나타낸 것으로 위성 및 수신기의 시간편의량을 포함한 공통오차를 소거함으로써 정확한 위치결정이 가능하다(Wübbena *et al.*, 2001; Kim and Bae, 2013).

$$\Phi_{ij, L1/L2}^{kl} = \rho_{ij}^{kl} - \frac{I_{ij}^{kl}}{f_{L1/L2}^2} + T_{ij}^{kl} + \lambda_{L1/L2} N_{ij, L1/L2}^{kl} + m_{ij, L1/L2}^{kl} + \epsilon_{ij, L1/L2}^{kl} \quad (1)$$

where:

i, j : receivers;

k, l : GNSS satellites;

$f_{L1/L2}$: frequency of GNSS signal, L1 or L2;

$\lambda_{L1/L2}$: wavelength of GNSS signal;

$\Phi_{ij}^{kl} := \Phi_i^k - \Phi_j^k - \Phi_i^l + \Phi_j^l$: DD (Double-Differenced) carrier phase observation;

ρ_{ij}^{kl} : DD geometric distance;

I_{ij}^{kl} : DD ionospheric delay;

T_{ij}^{kl} : DD tropospheric delay;

$N_{ij, L1/L2}^{kl}$: DD ambiguity, L1 or L2;

$m_{ij, L1/L2}^{kl}$: DD multipath, L1 or L2;

$\epsilon_{ij, L1/L2}^{kl}$: DD observation error, L1 or L2.

또한 단일차분으로 인해 모호정수의 실수화가 이루어진 것을 다시 차분함으로써 모호정수가 정수라고 가정할 수 있다. 이 때, 모호정수 결정방법은 일반적으로 실수영역에서 모호정수를 추정하는 방법과 적절한 모호정수 후보로 구성된 검색 공간을 설정하여 통계적 검증으로 모호정수를 결정하는 방법으로 구별되며, 효율적인 검색을 위해 LSAST(Least Square Ambiguity Search Technique), ARCE(Ambiguity Resolution with Constraint Equation), LAMBDA(Least-square AMBiguity Determination Adjustment), wide-lane 등

의 방법이 제안되어 사용되고 있다(Park, 2008).

일반적으로 정확한 모호정수 결정이 이루어지면 높은 측위 정밀도를 확보할 수 있지만, 모호정수가 유실될 경우에는 측위 결과의 신뢰성이 낮아지게 된다. 따라서 모호정수 결정여부에 따라 측위 안정성을 평가할 수 있으며, 모호정수가 처음 결정되기까지 걸리는 시간(Time To First Ambiguity Fixing, TTFA)도 주요한 지표가 될 수 있다. 특히, 차량항법의 경우에는 도로수신환경에 따라 자주 모호정수가 유실됨으로 빠른 모호정수 결정을 요구한다. 따라서 TTFA가 빠를수록 많은 epoch에서 모호정수 결정이 가능하고, 그에 따라 측위 안정성이 높아지게 된다. 일반적으로 이중 주파수 지원 수신기를 사용할 경우, 단초 이내에서 초기 모호정수 결정이 이루어지는 것으로 알려져 있다.

3. 연구 방법

3.1 VRS/FKP 비교분석

본 연구를 위해 2013년 7월 26일부터 2013년 8월 5일까지 총 11일간에 걸쳐 차량을 이용하여 VRS와 FKP 방식의 NRTK를 동시에 수행하였다. 이를 위해 차량용 마운트장비를 별도로 제작하였으며, 두 장비는 초단기선(21.6cm)을 이루도록 설계하였다. GNSS 장비는 Trimble®의 R6 모델을 사용하였고, 고속도로와 국도, 산간도로 등 다양한 도로환경에서 관측을 수행하였다(Table 1). 또한 충분한 가시위성 수를 확보하기 위해 GLONASS를 추가하였으며, NRTK 방법 이외에 동일한 수신환경을 위해 프로토콜, GNSS 장비모델, 무선통신환경(3G)이 같은 조건에서 측위를 수행하였다.

각각의 GNSS 장비는 1Hz 간격으로 NRTK(VRS/FKP)를 수행하고, 1Hz 마다 측위결과로 형성되는 기선거리는 설계한 기선거리와 차분하여 평면성분 측위오차를 분석하였다. 또한 직전 epoch에서 형성된 기선방향을 참이라고 가정하고 해당 epoch에서의 평면성분별 측위오차를 분석하였으므로, 회전

Table 1. Specification of surveying (VRS vs. FKP)

Components	VRS	FKP
GNSS model	Trimble R6	
Date	2013.07.26 – 2013.08.05 (11 days)	
Protocol	RTCM 3.1	
GNSS	GPS+GLONASS	
Address & port	vrs3.ngii.go.kr:2101	fkp.ngii.go.kr:2201

주행 시에는 성분별 측위오차가 다소 커질 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 1). 비교 지표는 주행 환경(속도, 주행시간대, 위성 가시 수)에 따른 모호정수 결정율과 고정해의 평면성분별 측위오차로 설정하였다.

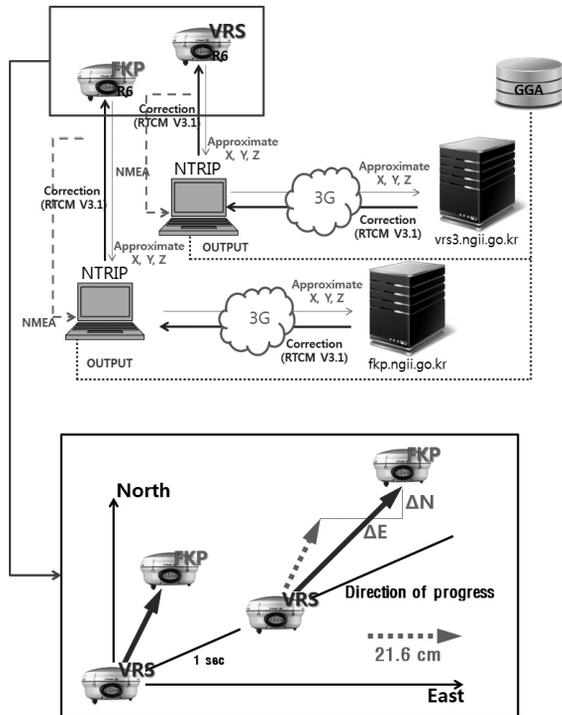


Fig. 1. Methodology of comparison between VRS and FKP

3.2 저사양 GNSS 장비를 이용한 NRTK

모호정수 결정을 위한 검색 기법을 활용할 때, GNSS 가시 위성 개수가 적거나 단일 주파수(L1)만을 이용하면 L1 방송파 위상 모호정수 후보가 너무 많아 계산속도가 느릴 뿐만 아니라, 메모리가 충분한 컴퓨터를 사용하지 않으면 실시간 모호정수 검색이 불가능하다. 또한 참 모호정수에 의한 잔차 제곱합이 거짓 모호정수에 의한 잔차 제곱합보다 충분히 작아 지는데 많은 시간이 소요되므로 모호정수 결정에 많은 시간이 소요된다(Park, 2008). 따라서 L2 주파수 지원여부에 따라 TTFA에 큰 차이를 보일 수 있으며, 그에 따라 NRTK의 측위 안정성에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이중 주파수를 지원하는 고사양의 GNSS 장비와 단일 주파수를 지원하는 저사양의 GPS 장비에 대하여 VRS 방식의 NRTK를 동일하게 적용한 측위 결과를 비교하여 단일 주파수만을 이용한 NRTK의 활용가능성을 평가하였다. 저사양

GPS 장비는 Ublox®의 EVK-6T 모델을 선정하였으며, 수신기에서 RTK를 지원하지 않기 때문에 관측데이터(raw data)를 오픈 소프트웨어인 RTKLIB을 이용하여 NRTK를 수행하였다(Fig. 2).

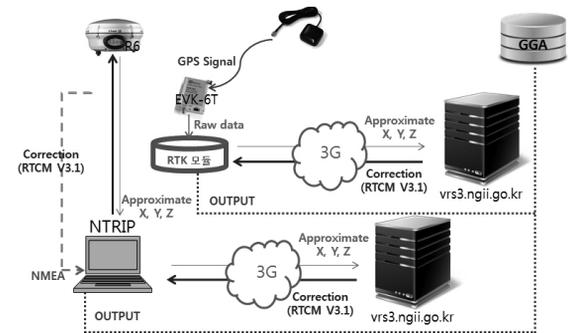


Fig. 2. Methodology of comparison between dual and single frequency receivers

저사양의 장비의 경우, 차량에 탈부착하는 저가형 GPS 안테나를 사용하여 차량 지붕의 임의 위치에 안테나를 부착시켰다(Fig. 3). 따라서 두 수신기간 평면기선거리를 추정하였으며, 그 결과(1.518m)를 참값으로 가정하고 3.1과 같은 방법으로 평면성분별 측위오차를 산출하였다. 이동 경로는 춘천에서 서울특별시 광진구까지이며, 서울춘천고속도로를 이용하였다(약 1시간 30분 소요).

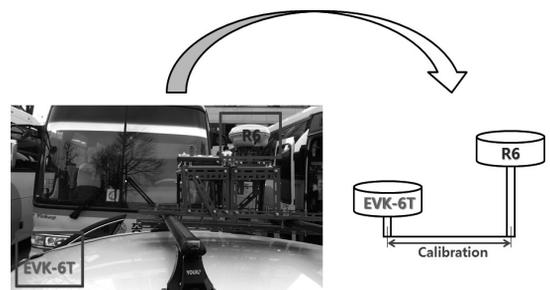


Fig. 3. Onboard GNSS receivers: dual and single frequency receivers

3.3 우주전파환경에 따른 NRTK 영향

Wübbena et al.(2001)은 태양폭풍으로 인한 NRTK 영향에 대하여 새로운 대처방안의 필요성을 제기하였는데, 이는 우주전파환경에 의한 교란 시 NRTK 시스템이 급변하는 대기환경을 적절하게 대처할 수 없기 때문이다. 따라서 국내외의 여러 기관에서는 우주 전파 교란 등급에 대한 예 경보서비스

를 제공하고 있으며(NGII, 2013), 사용자는 교란 여부에 따라 NRTK 사용여부를 판단하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 별도로 설치한 GNSS 상시관측소에서 장기간에 걸쳐 FKP 방식의 NRTK 측위를 수행하고, 우주전파환경에 따른 NRTK 영향을 분석하여 대기 교란 시 발생할 수 있는 NRTK 문제점을 파악하고자 하였다. 분석 기간은 2013년 09월 26일부터 10월 31일까지 총 36일간이며, 이 기간 중 국립전파연구원 산하 우주전파센터의 예·경보서비스 정보를 수집하여 FKP 측위 결과와 비교분석하였다.

4. 분석 결과

4.1 전국 분석

Fig. 4는 측위 당시에 NRTK 망 구성과 측위결과를 나타낸 그림으로서, 측정된 epoch 수는 165,719 개, 동시에 고정해를 산출한 경우는 116,023 개에 달했다. 또한 대부분은 망 내부에서 NRTK 측위를 수행하였지만, 해변도로 등에서는 외삽(extrapolation)을 이용한 NRTK를 수행하여야 한다. 따라서 이와 같은 경우에는 측위오차가 일반적인 망 내부에서의 NRTK 측위오차보다 커질 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 외삽 구간이 짧고 기준국과의 기선거리가 대부분은 수십 미터 이내이므로 거시적 분석에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

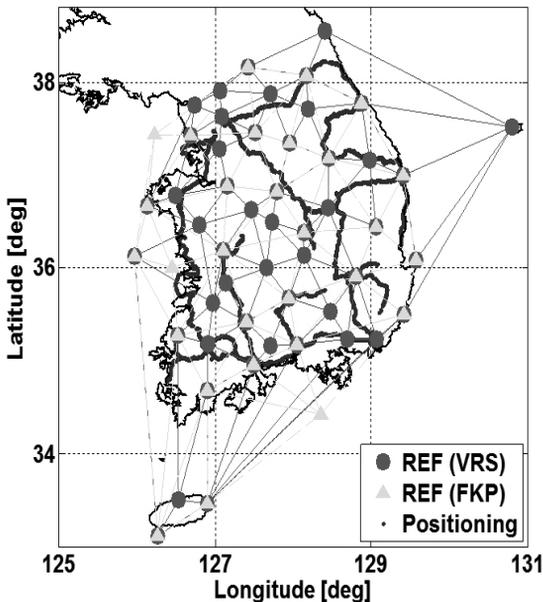


Fig. 4. Result of NRTK using vehicle

전체적으로 VRS는 약 78%, FKP는 약 68%의 모호정수 결정률을 보였으며, VRS와 FKP간 다소 차이가 있음을 확인할 수 있다. 또한 두 NRTK 결과가 동시에 고정해를 가질 경우에는 평균적으로 RMSE가 0.07m 이므로, 모호정수가 고정되는 경우 수 센티미터의 정확도를 확보할 수 있을 것이라 판단된다. 그러나 실수해인 경우에는 10m 수준의 편차를 가지므로 측위 신뢰성이 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 두 측위성과에 포함된 측위오차를 감안하였을 때, NRTK는 실수해의 경우 수 미터 수준의 측위오차가 발생한 것으로 생각된다(Table 2).

Table 2. Accuracy of NRTK

Ambiguity fixing rate [%]	78.42 (VRS)	
	68.29 (FKP)	
Horizontal error [m]		
Fixed epochs (Both)	Mean	0.03
	RMSE	0.07
Float epochs (Both)	Mean	2.90
	RMSE	10.36

과대오차 비율은 Fig. 5와 같이, 세 가지 경우의 수로 나누어 오차를 산출하였으며, 각각의 경우에 따라 과대오차의 범위를 다르게 하였다.

먼저, VRS와 FKP의 모호정수가 모두 결정된 경우, $Error \leq Outlier1$ 에 포함된 epoch 비율은 약 92.96%, $Outlier1 < Error \leq Outlier2$ 는 약 7.00%, $Error > Outlier2$ 는 약 0.03%으로 나타났다. 다음으로 VRS와 FKP의 모호정수가 모두 실수해인 경우에는 위와 같은 순서대로 약 75.54%, 21.60%, 2.85%으로 나타났으며, 마지막으로 VRS와 FKP 중 하나만 모호정수가 결정된 경우에는 약 95.17%, 4.53%, 0.30%으로 나타났다. 따라서 이를 종합하여 분석하면 NRTK가 안정적으로 모호정수를 결정할 수 있는 환경에서는 과대오차의 영향이 거의 없고 수 센티미터의 정밀도를 확보할 수 있을 것으로 판단되지만, 모호정수 결정이 어려운 지역(도심지 등)에서는 과대오차의 영향이 다소 나타나고 서브미터에서 수십 미터까지 측위안정성이 불안정할 수 있다. 그러나 약 97.14% 정도가 10 미터 안에 포함되므로 수십 미터의 과대오차가 나타나는 경우도 종종 발생할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 일반적인 수신환경에서 실수해를 산출한 경우에는 서브미터 수준의 측위 정밀도를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

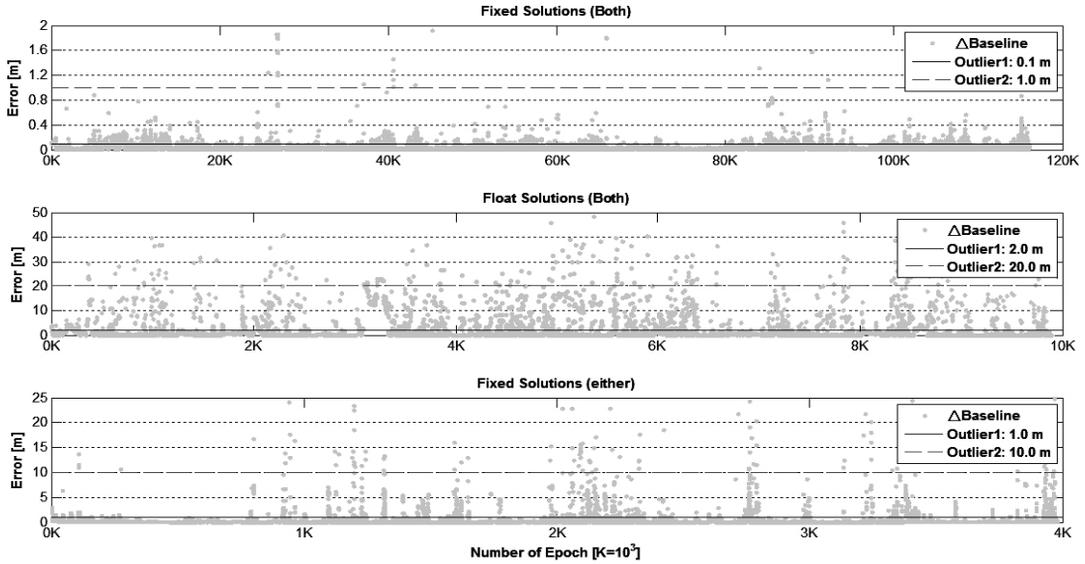


Fig. 5. Error of NRTK and ranges of outlier

4.1.1 주행 속도

항법에 NRTK를 적용가능한지의 여부를 판단하기 위해서는 이동체의 속도에 따른 NRTK 측위 안정성 분석이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 차량의 주행 속도에 따른 NRTK 측위 안정성을 분석하였으며, 이를 위해 VRS 측위결과를 이용하여 각 epoch에서의 주행속도를 계산하고 그 결과를 기준으로 10km/h 간격으로 구분하여 해당 epoch의 측위 안정성을 분석하였다. 또한 140km/h 이상의 값은 과대오차의 영향이라 판단하고 분석에서 제외하였다. 분석결과, 고속으로 주행할 경우에는 중저속으로 주행할 때보다 측위 안정성이 낮아지는 것으로 나타났다(Fig. 6). 특히, FKP의 경우 모호정수

결정율이 약 55%까지 낮아지는 것으로 나타났지만, 속도 증가로 인한 FKP 실수해의 영향은 수 센티미터의 수준인 것으로 나타났다.

따라서 FKP를 차량항법에 적용할 경우에는 여러 수신환경을 고려하여 측위 정확도를 판단하여야 하며, VRS의 경우에는 주행속도에 따른 영향은 미미한 것으로 사료된다. 따라서 고속도로와 같이 100km/h 이상의 속도로 주행할 경우에는 FKP보다 VRS를 활용한 NRTK 측위성결과를 이용하는 것이 효과적일 것으로 생각된다.

4.1.2 주행 시간대

일반적으로 전리층 지연오차는 이중주파수 관측 방정식의 선형결합을 통해 제거하더라도 이차항에 의한 영향이 여전히 존재하며, 기선거리, 관측시간 등에 따라 그 영향이 불안정하게 나타날 수 있다(Kim and Bae, 2013). 또한 관측시간대에 따른 NRTK(VRS/FKP)의 측위 안정성 분석결과에 따르면 시간에 따라 FKP-GPS는 모호정수 결정율이 최대 20% 이상의 차이를 보일 수 있고, VRS-GPS는 상대적으로 안정적인 것으로 나타났다. 또한 FKP를 이용하여 고정해를 산출할 지라도 낮 시간대에 군집을 이루는 바이어스가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 주간에는 FKP의 안정성 및 정확도가 저하될 가능성이 있을 것으로 판단되며, 주간과 야간 주행으로 나누어 NRTK 측위 영향을 분석하였다. 주간 주행시간은 UTC 기준으로 00시부터 09시(한국지역시 09시부터 18

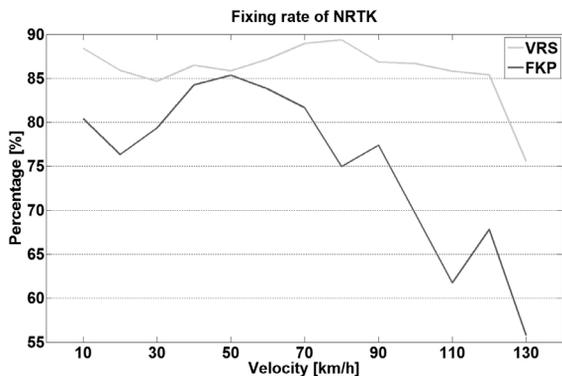


Fig. 6. Relationship between velocity and ambiguity fixing rate

Table 3. Relationship between timeslot and accuracy of NRTK

Measurement information		Daytime	Nighttime
Ambiguity fixing rate [%]	VRS	88.93	82.34
	FKP	77.53	75.07
Horizontal error [cm]			
North	Mean	0.08	0.69
	RMSE	5.17	4.23
East	Mean	0.31	-0.32
	RMSE	5.35	3.42

시)까지, 야간주행시간은 UTC 기준 09시부터 24시까지로 구분하였다.

GLONASS를 추가하는 경우에는 큰 차이는 없으나 오히려 낮 시간대의 모호정수 결정율이 더 높은 것을 알 수 있다. 그러나 고정해의 측위 정확도는 낮 시간대의 RMSE가 밤 시간대보다 크게 나타나지만 그 차이는 1-2 센티미터 수준이었다(Table 3). 따라서 GLONASS를 추가함으로써 FKP의 측위 안정성 및 정확도 향상에 상당 부분 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4.1.3 도로 환경

도심지와 같은 환경에서는 가시위성의 수가 적은 반면, 고속도로에서는 인공구조물 등이 거의 존재하지 않기 때문에 충분한 가시위성을 확보할 수 있다. 따라서 추적된 가시위성 개수가 5개 이하일 경우와 6개 이상일 경우로 나누어 NRTK

의 측위 영향을 분석하였다. 추적된 가시위성 개수는 VRS를 기준으로 도심지와 개활지로 각각 구분하여 분석을 진행하였으며, 전체적인 분석결과는 Table 4와 같다.

도심지에서는 FKP가 VRS보다 모호정수 결정율이 약 22% 정도 높게 나타났지만 개활지에서는 VRS가 FKP보다 약 10.6% 높게 나타났다. 따라서 FKP가 VRS보다 도심지에서 다소의 강점을 보이나, 일반적인 수신환경에서는 VRS가 더 높은 안정성을 보였다. 또한 위성가시 수에 따라 실수해의 측위 정확도는 큰 차이를 보였으며, 도심지의 경우에는 수십 미터까지 측위 오차가 나타난 반면, 개활지의 경우에는 수십 미터 수준의 오차를 나타냈다. 따라서 도심지에서 NRTK만을 이용할 경우 항법시스템의 안정성을 보장할 수 없으며, 다중 센서를 통합한 통합항법 시스템이 필요할 것으로 사료된다. 특히, FKP는 도심지에서 약 38%의 비교적 높은 모호정수 결정율을 보였으며, 이를 활용한 통합항법 시스템은 도심지에서도 항법시스템의 안정성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

4.2 단일 주파수(L1)를 이용한 NRTK 활용평가

Table 5와 같이 저사양 GPS 장비를 이용한 NRTK는 약 8% 수준의 모호정수 결정율을 보였다. 따라서 차량항법에 적용하는 경우에는 모호정수 결정이 힘들 것으로 판단되며, 모호정수 결정율이 현저히 낮은 이유는 차량의 이동으로 위성수신 환경이 변화하고, 그에 따라 모호정수가 빈번히 유실되기 때문에 TTFA 능력의 한계로 인해 모호정수 결정이 어려운 것으로 판단된다. 또한 모호정수가 고정된 경우에도 지속시간이 수 초 이내로 매우 짧고, 산출된 해는 실수해와 비슷한 수준의 측위 정밀도를 가지는 것으로 나타났다(Table 5). 또한 평

Table 4. Relationship between the number of tracked satellites and accuracy of NRTK

Urban area				Open area					
Ambiguity fixing rate [%]	VRS		FKP		Ambiguity fixing rate [%]	VRS		FKP	
	15.90		37.99			87.89		77.26	
Horizontal error [cm]									
Fixed (Both)	North	Mean	RMSE	Fixed (Both)	North	Mean	RMSE		
		-1.13	8.56			0.24	4.94		
	East	Mean	RMSE		East	Mean	RMSE		
		-0.61	16.25			0.15	4.89		
Float (Both)	North	Mean	RMSE	Float (Both)	North	Mean	RMSE		
		0.28	13.44			0.006	3.13		
	East	Mean	RMSE		East	Mean	RMSE		
		2.37	26.46			0.18	3.46		

면오차 1.5m 이상을 과대오차라고 가정하였을 때, 고정해의 경우 약 1.1%, 실수해의 경우 약 2.5%로 측위 안정성에도 큰 차이를 보이지 않았으며, 과대오차의 수준은 수 미터 정도인 것으로 나타났다. 따라서 단일주파수 GPS 장비를 이용할 경우에는 NRTK 측위성과향상을 위해 안테나 개선, GPS이외 GLONASS, Galileo, Beidou 등 다양한 위성항법시스템을 활용하거나, 단일 센서만을 이용하기보다는 통합항법시스템을 적용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

Table 5. Accuracy of NRTK using single frequency

GNSS models	U-blox®, EVK-6T	Trimble®, R6
Ambiguity fixing rate [%]	8	94

References are R6 solutions

Horizontal error [m]	EVK-6T (Fixed)	North	Mean	-0.057	N/A
			RMSE	0.415	
		East	Mean	-0.065	
			RMSE	0.719	
	EVK-6T (Float)	North	Mean	-0.004	
			RMSE	0.378	
		East	Mean	-0.231	
			RMSE	0.446	

4.3 대기교란에 의한 FKP 시스템 오류

연구 기간 중 몇 차례 지자기 교란과 전파두절이 발생하였으며, 1 단계 등급의 교란의 경우에는 일반적인 환경과 비교해 보았을 때 특별히 측위 안정성에 문제를 보이진 않았지만, 2단계, 3단계의 교란이 일어났던 시기에는 FKP 시스템이 제대로 작동하지 않는 것으로 판단된다. 특히, 2013년 10월 25일에 발생한 두 번의 3단계 정보 기간에 FKP 시스템에 접속하지 못하였으며, 그 이후에도 교란의 시기와 맞물려 장기적으로 FKP 시스템에 접속하지 못한 기간이 발생하였다(Fig. 7). 따라서 교란 시기와 접속 오류시점간의 연관성을 분석한 결과, NRTK를 이용할 경우에는 우주전파환경에 따라 사용여부를 판단할 필요가 있는 것으로 생각된다. 따라서 사용이 불가한 경우에는 기존의 DGPS나 Standalone 측위방법을 사용해야 할 것으로 생각된다. 그러나 본 연구에서는 단기간(총 36일간)에 국한되어 대기교란에 의한 NRTK의 영향을 분석하였으므로 정확한 영향을 판단하기 위해서는 타 연구에 있었던 대기교란에 의한 NRTK 영향사례, 대기교란 시기와 NRTK 시

스템 측위성과의 영향 등에 대한 정량적 분석 등이 필요할 것으로 생각된다.

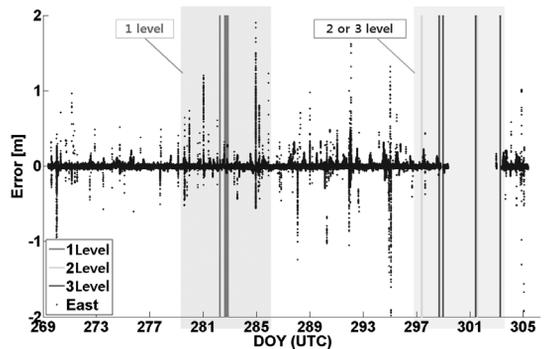


Fig. 7. Result of monitoring of FKP and warning time

5. 결론

본 연구는 정밀 측지/측량 분야에서 제한적으로 활용하고 있는 NRTK를 차량항법에 적용가능한지의 여부를 판단하기 위해, 차량을 이용하여 전국 범위에서 총 11일간 NRTK(VRS/ FKP) 측위를 수행하고 이를 바탕으로 NRTK 측위 안정성 및 정확도를 분석하였다. 또한 우주전파교란에 의한 NRTK 영향을 분석하기 위해, 총 36일간에 걸쳐 GNSS 상시관측소에서 1Hz 간격으로 FKP 측위를 수행하고, 이 기간 중 우주전파센터의 예-경보서비스 정보를 수집하여 NRTK 결과와 비교분석하였다. 본 연구에서는 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 차량을 이용하여 NRTK를 수행할 경우, 평균적으로 높은 모호정수 결정율을 보이며(VRS: 약 78%, FKP: 약 68%), 고정해를 산출한 경우에는 수 센티미터, 실수해의 경우에는 수 미터 수준의 측위 정확도를 확보할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 도심지(가시 위성개수가 5개 이하)에서는 모호정수 결정율이 급격히 낮아지며(VRS: 약 16%, FKP: 약 38%), 실수해일 경우에는 측위 오차가 10m 이상에 이를 정도로 불안정할 수 있다. 따라서 안정적인 위치정확도를 확보하기 위해서는 추측항법처럼 도심지의 영향이 없는 항법시스템을 통합하거나, Beidou 위성항법시스템을 추가적으로 활용하여 가시 위성 수를 높이는 방법 등의 해결방안이 필요할 것으로 판단된다. 또한 주행시간대에 따라 측위 정확도에 다소 차이를 보였으나 수 센티미터 수준으로 크지 않았다.

둘째, 주행속도가 증가함에 따라 FKP의 측위 안정성이 낮아지는 경향을 확인할 수 있었으나, 그에 따른 영향은 수 센티

미터 수준인 것으로 판단된다. 따라서 FKP를 차량항법에 적용할 경우, 여러 수신환경을 고려하여 측위 정확도를 판단하여야 할 것으로 생각된다. 그러나 도심지에서 비교적 높은 모호정수 결정율(약 38%)을 보였으며, 따라서 일부 지역에 대해서는 도심지에서도 NRTK를 활용하여 센티미터 수준의 측위 정확도를 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 NRTK를 활용한 통합항법시스템은 도심지에서도 항법시스템의 안정성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

셋째, 단일 주파수 지원 GPS 장비를 차량항법에 적용하는 경우에는 모호정수 결정이 어려울 것으로 판단되지만 개활지에서 서브미터의 측위 정확도를 보였다. 따라서 단일 주파수 지원 GPS 장비만을 이용한 NRTK는 도심지와 같은 수신환경을 고려하였을 때, 현 시점에서 차량항법에 적용하기에 무리가 있다. 그러나 안테나 개선, GPS이외의 GLONASS, Galileo, Beidou 등 다양한 위성항법시스템을 활용하거나 INS(Inertial Navigation System) 등을 결합한다면 측위 정확도와 안정성에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 생각한다.

마지막으로 대기교란(2단계 이상)에 의해 NRTK(FKP) 접속오류로 의심되는 사례가 발생하였으며, 분석을 통해 교란의 시기와 접속 오류시점이 상당히 유사한 것을 확인했다. 그러나 교란해제 이후에도 계속적으로 FKP 이용이 불가하였으며, 이에 대한 정확한 원인규명이 필요할 것으로 생각된다. 또한 차량항법의 무결성을 위해서는 우주전파 환경에 따른 사용여부 결정이 필요할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 단기간에 국한되어 대기교란에 의한 NRTK의 영향을 분석하였으므로, 동일한 시점 또는 유사한 상황에서의 NRTK 영향사례, 대기교란 시기와 NRTK 시스템 측위성과의 영향에 대한 정량적 분석 등의 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2012R1A1A2006940)

References

- Gao, J., Petovello, M.G., and Cannon, M.E. (2006), Development of precise GPS/INS/wheel speed sensor/yaw rate sensor integrated vehicular positioning system, *Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION NTM 2006)*, Vol. 2, pp. 780-792.
- Georgy, J., Karamat, T., Iqbal, U., and Noureldin, A. (2011), Enhanced MEMS-IMU/odometer/GPS integration using mixture particle filter, *GPS Solutions*, Vol. 15, No. 3, pp. 239-252.
- Groves, P.D. (2013), The PNT boom: future trends in integrated navigation, *Inside GNSS*, Vol. March/April 2013, pp. 44-49.
- Kong, S. (2014), R&D trends of navigation technology for vehicles, *OSIA Standards & Technology Review Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 16-22. (in Korean)
- Kim, M. and Bae, T. (2013), Stability assessment of FKP system by NGII using long-term analysis of NTRIP correction signal, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 4, pp. 321-329. (in Korean with English abstract)
- Li, T. (2009), *Use of Wheel Speed Sensors to Enhance a Reduced IMU Ultra-Tight GNSS Receiver*, Master's thesis, University of Calgary, Calgary, Canada, 169p.
- NGII (2013), *A Study for FKP-GPS Service*, No. 11-1613436-000016-01, National Geographic Information Institute, Suwon, p. 11.
- No, S., Han, J., and Kwon, J. (2012), Accuracy analysis of network-RTK(VRS) for real time kinematic positioning, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 30, No. 4, pp. 389-396. (in Korean with English abstract)
- Park, B. (2008), *A Study on Reducing Temporal and Spatial Decorrelation Effect in GNSS Augmentation System*, Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea. (in Korean with English abstract)
- Takac, F. and Zelzer, O. (2008), The relationship between network RTK solutions MAC, VRS™, PRS, FKP and i-MAX, *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, 16-19 September, Savannah, GA, pp. 348-355.
- Wübbena, G., Bagge, A., and Schmitz, M. (2001), Network-based techniques for RTK applications, *Proceedings of the Japan Institute of Navigation, GPS Symposium*, 14-16 November, Tokyo, Japan, pp. 53-65.