Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography
Vol. 36, No. 6, 457-467, 2018
https://doi.org/10.7848/ksgpc.2018.36.6.457

ISSN 1598-4850(Print)
ISSN 2288-260X(Online)
Original article

GNSS관측 공공측량 정확도 분석 및 업무프로세스 제안

Accuracy Analysis of GNSS-based Public Surveying and Proposal for Work Processes

배태석[1)]
Bae, Tae-Suk

Abstract

Currently, the regulation and rules for public surveying and the UCPs (Unified Control Points) adapts those of the triangulated traverse surveying. In addition, such regulations do not take account of the unique characteristics of GNSS (Global Navigation Satellite System) surveying, thus there are difficulties in field work and data processing afterwards. A detailed procesure of GNSS processing has not yet been described either, and the verification of accuracy does not follow the generic standards. In order to propose an appropriate procedure for field surveys, we processed a short session (30 minutes) based on the scenarios similar to actual situations. The reference network in Seoul was used to process the same data span for 3 days. The temporal variation during the day was evaluated as well. We analyzed the accuracy of the estimated coordinates depending on the parameterization of tropospheric delay, which was compared with the 24-hr static processing results. Estimating the tropospheric delay is advantageous for the accuracy and stability of the coordinates, resulting in about 5 mm and 10 mm of RMSE (Root Mean Squared Error) for horizontal and vertical components, respectively. Based on the test results, we propose a procedure to estimate the daily solution and then combine them to estimate the final solution by applying the minimum constraints (no-net-translation condition). It is necessary to develop a web-based processing system using a high-end softwares. Additionally, it is also required to standardize the ID of the public control points and the UCPs for the automatic GNSS processing.

Keywords : Global Navigation Satellite System, Public Surveying, Tropospheric Delay, Minimum Constraints

초 록

공공측량/통합기준점측량 작업규정은 기존 트래버스 측량 작업규정을 준용하고 있으며, GNSS관측 특성을 정확하게 반영하지 않아서 현장 작업과 자료처리에 어려움이 있다. 또한, GNSS관측 자료처리 절차에 대한 규정이 명확하지 않고, 정확도 검증방법 역시 일반적인 기준과 차이가 있다. 본 연구에서는 현재 규정을 분석하고 적절한 업무프로세스를 제안하기 위해 공공기준점 측량과 유사한 시나리오를 바탕으로 짧은 세션(30분) 데이터를 처리했다. 서울특별시 네트워크 RTK (Real Time Kinematic) 기준점에 대해서 3일간 동일한 시간대 결과를 비교했으며, 하루 중 시간에 따른 결과를 비교해서 전반적인 자료처리 정확도를 평가했다. 대류권 지연오차 추정여부에 따른 정확도 차이를 동시에 분석했으며, 추정결과는 24시간 정지측량 결과와 비교했다. 대류층 지연오차를 추정하는 것이 정확도와 좌표안정성 향상에 유리하며, 평균제곱근오차는 대략 평면 5mm, 수직 1cm 수준으로 추정되었다. 본 연구결과를 바탕으로 통합기준점을 포함한 동시관측 일간해를 추정하고, 이를 통합하여 최소제약조건을 통해 최종해를 결정하는 업무프로세스를 제안한다. 이를 위해서는 학술용 자료처리시스템을 이용한 자료처리자동화시스템이 구축되어야하며, GNSS자료처리를 위해 통합기준점과 공공기준점 코드를 표준화해야 한다.

핵심어 : GNSS, 공공측량, 대류층 지연오차, 최소제약조건

Received 2018. 09. 19, Revised 2018. 10. 08, Accepted 2018. 10. 11
1) 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. 서 론

1990년대 중반 도입된 GPS (Global Positioning System)는 지구기준계를 결정하는 측지학적 문제와 더불어 지각변동 같은 다양한 과학분야에서도 활용되었다. 또한, 트래버스 형태의 전통적인 측량업무에서도 GNSS (Global Navigation Satellite System)가 큰 역할을 차지하고 있다. 우리나라는 2002년에 처음으로 "공공측량의 작업규정 세부기준"에서 처음으로 GPS 수신기에 대한 규정이 포함되었고(MCT, 2002, 2004), 지속적인 업데이트를 통해 최근에는 "공공측량 작업규정"과 "통합기준점측량 작업규정"을 적용하고 있다.

그러나 우리나라 공공측량/통합기준점측량 작업규정은 GNSS관측 특성보다는 기존 삼각측량 또는 삼변측량에 기반한 트래버스 측량 작업규정을 준용하고 있다. 모든 공공측량은 수신기 두 대를 이용한 상대측위를 채택하고 있으나, 공통의 위성을 동시에 관측하는 장점을 적절히 반영하지 못하고 있다. 따라서 가능한 많은 대상점을 동시에 관측하여 기선해석을 수행하기보다는, 단일기선 자료처리를 수행하여 두 점 사이의 기선벡터(또는 트래버스 측량의 측선)를 결정한다. 따라서, 모든 기준점으로부터 동일한 환경에서 동시관측함으로써 공통 오차를 제거하는 위성관측의 장점을 활용하지 못하고, 한 방향으로 기선을 연결하면서 오차가 누적되는 트래버스 측량으로 기능을 제한할 우려가 있다.

우리나라는 고정밀 지오이드 구축과 지속적인 정확도 향상이 이루어지고 있으므로(Lee and Kwon, 2015), 공공삼각점의 평면좌표와 높이 정보를 동시에 추정하여 활용하는 것이 바람직하다. 공간정보산업협회에서 진행하는 성과심사 업무흐름을 살펴보면, 측량 수행업체에서 GNSS관측 자료를 공통 교환포맷(RINEX: Receiver INdependent EXchange)으로 제출하고, 필요한 경우 자료처리를 수행한 상용소프트웨어 프로젝트 파일을 함께 제출한다. "공공측량 성과심사 규정"에서 명시한 세부항목 및 판정기준에 따라 성과점검이 이루어지지만, 대부분 일반적인 사항만 검사항목으로 규정되어 있다. 심사방법 역시 RINEX 데이터를 텍스트 편집기로 열어서 확인하도록 되어 있는데, 이 방법으로는 GNSS관측이 적절하게 수행되었는지 확인하기 어렵다. 자료처리 정확도 측면에서 보면, 공간정보산업협회 담당자가 자체적으로 수행한 자료처리 결과를 기준값으로하여 허용범위를 만족하면 검수작업이 완료된다. 그러나 이러한 업무 흐름은 담당자에 의존할 가능성이 있고, 자료처리와 성과점검 또한 GNSS관측보다는 트래버스 측량에 가깝다. 또한, 학술용 소프트웨어를 명시적으로 배제하지는 않으나, 상용소프트웨어를 전제로한 작업규정과 심사업무 절차로 인해 실제적으로 활용하기 어렵다. 상용소프트웨어는 자료처리 정확도가 학술용 소프트웨어에 비해 낮을 뿐 아니라, 각 단계별로 사용자 입력이 필요하므로 전체 자료처리 프로세스를 자동화하기 어렵다.

본 연구에서는 현업에서 수행하는 업무 프로세스를 점검하고, 학술용 소프트웨어를 이용한 자료처리와 정확도 분석, 이를 통해 현장업무와 자료처리 프로세스를 제안한다. 다만, 본 연구는 공공측량 작업규정 중 GNSS관측 관련 내용에 한정한다.

2. GNSS관측 작업 규정

우리나라에서는 "공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률"에 의거하여 "공공측량 작업규정"(NGII, 2015a)과 "통합기준점측량 작업규정"(NGII, 2015b)에서 GNSS관측과 자료처리에 관련된 내용을 기술한다. 공공삼각점측량은 1-4급 공공삼각점을 대상으로 이루어지며, 원칙적으로 결합트래버스 측량을 실시하도록 되어 있다(제17조). 그러나, 이는 기존의 삼각측량 또는 삼변측량을 위한 규정으로 보는 것이 타당하며, 명시적인 표현은 없으나 GNSS 측량에서는 적용하지 않는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

공공측량 작업규정 중 GNSS관측은 공공기준점측량(공공삼각점측량, RTK-GNSS 공공삼각점측량), 지형측량(RTK-GNSS 세부측량), 네트워크RTK측량으로 구분할 수 있으며, 본 연구는 정지측위법 또는 신속정지측위법에 의한 공공삼각점측량을 대상으로 한다. 공공측량성과는 국토지리정보원에서 위탁한 공간정보산업협회에서 검수하고 있다("공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률" 제 105조). 검수방법은 동일한 데이터에 대해서 담당자가 자료처리를 수행한 후, 평면 좌표 일치여부를 비교한다. 기선거리 10km 이하에서 평면좌표 각 성분이 10cm 이내로 일치하는 경우 정확도 기준을 만족하는 것으로 판단한다(KASM, 2018).

GNSS관측 규정은 크게 관측, 계산, 점검계산, 조정계산의 네 부분으로 구성되어 있으며, 2.1절에서 2.4절은 "공공측량 작업규정"에 대한 내용이며, 2.5절에서는 "통합기준점 작업규정"에 대한 내용을 검토하였다.

2.1 관측

GNSS관측은 크게 정지측위법, 신속정지측위법, 그리고 이동측위법의 세 가지로 규정되어 있으며(Table 1), 기지점과 미지점을 결합하는 트래버스 노선이 폐합된 다각형을 구성하도록 규정되어 있다(제21조). 그러나, 이는 위성을 동시

관측하는 GNSS 특성을 고려하지 않은 것으로서 기존의 TS(토탈스테이션, 트랜싯, 광파거리측량기 등) 관측을 전제로 한 규정이라고 할 수 있다. 부가적으로 동일한 기선의 반복성을 점검하기 위해 별도 세션으로 중복관측하도록 규정하고 있다.

3-4급 공공삼각점측량의 경우, 일부 현업에서는 통합기준점만으로 이루어진 GNSS관측을 우선적으로 실시하고, 이후 통합기준점과 공공삼각점을 포함한 신속정지측위를 실시하고 있다. 그러나, 이는 작업규정에 명시된 사항이 아니며, 공간정보산업협회 성과심사에서도 추가로 요구하지 않는다(KASM, 2018). 이는 GNSS관측 현장 프로세스가 정립되지 않은 채, "공공측량 작업규정"과 별개로 기존 경험에 의존하고 있음을 보여준다. 최종적인 공공삼각점 좌표는 통합기준점 좌표에 의해 상대적으로 결정되므로, 통합기준점만으로 구성된 네트워크를 관측할 필요없이, 통합기준점과 공공삼각점을 동시에 관측하는 것으로 충분하다.

이외에도 위성 수신 고도각과 위성 개수 등에 대한 규정이 있으나, 이는 GNSS 자료처리를 위한 최소한의 규정이며 실제적인 의미는 없다. 또한 공공삼각점측량을 위한 수신간격과 관측시간을 규정하고 있으나(Table 1), 기준에 대한 출처 또는 명확한 근거는 확인하기 어렵다.

Table 1. GNSS-based public surveying of triangulation control points (NGII, 2015a)

Methods	Observation	Data interval	Notes
Static	> 60 min	< 30 sec	Order 1 (< 10 km) Order 2-4
Rapid static	> 20 min	< 15 sec	Order 3-4
Kinematic	> 1 min	< 5 sec	Order 3-4

2.2 계산

GNSS관측은 기본적으로 위성의 위치(궤도)를 기지점으로하여 지상 또는 이동체에 탑재된 수신기의 좌표를 추정하는 방식이다. 그러나 공공측량 작업규정은 "GNSS 위성궤도는 방송력으로 한다"(23조)라고 규정하고 있는데, 더 정확한 정밀궤도 사용여부에 대한 모호한 표현을 수정할 필요가 있다.

공공측량 작업규정은 1) 단일기선을 전제로 기선해석을 규정하고 있으며, 2) 기지점 성과를 고정하여 관측점에 대한 좌표를 계산한 후, 계산된 관측점 좌표를 이용하여 다른 관측점을 계산하는 기선해석을 수행한다. 그러나, 이러한 프로세스는 첫 기지점 오차가 모든 관측점에 영향을 미치거나, 계속적으로 오차가 누적되는 결과를 초래한다. 이는 기존 트래버스 방식의 삼각측량 또는 삼변측량을 준용하여 GNSS관측 규정을 만들었기 때문으로 판단된다. 따라서, 현장에서는 수신기 개수가 부족하여 모든 관측점을 동시에 측정하지는 못하더라도, 개별 기선해석에 의한 정규방정식을 결합함으로써 모든 기선을 동시 조정하고 최종 결과를 추정하는 것이 바람직하다.

또한, "기상요소의 보정은 기선해석 소프트웨어에서 채용하고 있는 표준대기에 의한다"(23조)는 규정은 기선이 짧고, 기지점 좌표가 정확한 경우에는 적용할 수 있다. 그러나, 우리나라 산악지역처럼 고저차가 큰 경우에는 적용하기 어려우며, 하루 중 관측시간에 따른 변동성을 고려하면 모델값을 그대로 사용하기보다는 대류층 지연오차를 추정하는 것이 바람직하다.

결과적으로 GNSS관측과 자료처리 방법을 공공측량 기준점 등급에 따른 구분에서 목표정확도를 달성하기위한 규정으로 변경할 필요가 있다. 따라서, 학술용 소프트웨어를 이용한 표준화된 프로세스를 설계함으로써 위성기준점, 통합기준점, 공공삼각점에 동일하게 적용할 수 있다.

2.3 점검계산

공공측량 작접규정 점검계산은 중복기선벡터 교차와 환폐합차의 두 부분으로 구성되어 있다. 그러나 기선해석 소프트웨어 자료처리방법에 대한 규정이 명확하지 않아 자료처리 품질을 보증할 수 없다.

GNSS관측 점검계산은 다른 세션과의 조합에 의해 최소변수 다각형으로 구성된 점검노선을 선정하고, 기선벡터 요소의 환폐합차와 중복기선을 비교, 점검하도록 규정하고 있다(제24조). 점검계산 허용범위는 Table 2와 같으며, 여기서 N은 다각형 변 수를 나타낸다. 앞절에서 설명한 바와 같이, 동일 세션이 아니더라도 단일기선 결과를 동시 조정계산하는 것이 바람직하므로, 기존 TS관측처럼 환폐합차를 점검계산 기준으로 설정하는 것은 바람직하지 않다. 또한 기선벡터 반복성은 관측 환경에 따라 달라질 수 있으므로, 전체적인 조정계산 후 오차요소를 점검하는 방향으로 규정을 개정할 필요가 있다. 공공삼각점측량 점검계산은 "관측종료" 후 실시하고, 허용범위를 초과하는 경우에는 재측량하도록 규정하고 있다. 그러나, GNSS 자료처리를 위해서는 위성 궤도와 시계오차 등 외부 정보가 필요하지만 GNSS관측 시점에는 획득할 수 없다. 결과적으로, 자료처리 이후에 점검계산이 가능하며, 만일 정확도 규정을 만족하지 못하면 당연히 재측량해야하므로 사실상 의미없는 규정이다.

Table 2. Tolerance of field check

	Criteria
Misclosure	$25mm\sqrt{N}$ where N=# of sides
Repetition	$25mm$

2.4 조정계산

공공삼각점측량은 GNSS관측 후 수평위치와 표고를 3차원 망 조정계산을 실시하도록 규정하고 있다(제25조). 그러나, 수평망 삼각측량 또는 삼변측량과 달리, GNSS관측은 3차원 위치결정이며, 기준면 타원체는 지오이드와 물리적으로 평행하지 않다. 따라서, GNSS관측 3차원망 조정계산을 수평성분과 표고를 조합하여 수행하는 것은 이론적으로나 실제적으로 적절하지 않다. 또한, 기지점 1점을 고정하는 3차원망 조정계산에서는 개별 기선해석에서 구한 분산-공분산 행렬의 상관성(비대각 요소)을 모두 무시하고, 대각 요소를 $(7mm)^2$로 설정한 후 조정계산을 수행하도록 규정하고 있다. 그러나, 합리적인 근거는 제시되어 있지 않으며, 이는 개별 기선 조정계산 결과와 무관한 값이므로 결과에 대한 정합성을 기대할 수 없다.

Table 3에서 보는 것처럼, 하나의 기지점을 고정한 3차원망 조정계산에서 수평위치 폐합차에 대한 허용범위 또한 적절한 근거를 확인하기 어렵고, GNSS관측 특성과 부합하지 않는다. 기준점을 두 점 이상 고정하는 경우에도 동일한 방식을 적용하지만, GNSS관측 자료처리에서는 기준점 자체 오차가 다른 관측점에 전파될 위험성과, 두 점 이상을 고정하는 경우 네트워크를 왜곡할 가능성이 있으므로 기준점을 직접 고정하지 않는다. 대신, 여러 기준점에 대해서 최소제약조건을 적용하는 것이 보편적이며, 지역좌표계의 경우 제약하는 기준점 무게중심이 변하지 않는다는 조건(no-net-translation)을 많이 적용한다(Dach *et al*., 2015). 미지점에 대한 표고는 타원체고 기준 3차원 망조정을 수행한 후 지역지오이드 모델(예를 들어, KNGeoid14)을 이용하여 계산한다.

Table 3. Criteria for network adjustment with one known point

	Criteria	Notes
Slant distance error	$20mm+4ppm \cdot D$	D: measured distance [km]
Ellipsoidal height error	$30mm+4ppm \cdot D$	D: measured distance [km]
Horizontal misclosure	$\Delta S=10cm+4cm\sqrt{N}$	ΔS: sum of baseline lengths N: Minimum number of sides to the known points

2.5 통합기준점측량 작업규정

통합기준점측량을 위해서는 작업지역 내 3점 이상의 기지점(위성기준점 및 통합기준점)을 사용하고, 가장 가까운 위치에 있는 위성기준점 및 통합기준점과 결합하도록 되어 있다(제8조). 그러나, 이 조항 역시 GNSS관측의 기본 원리와 관련없는 내용이며, 공공삼각점측량과 마찬가지로 기지점을 최소제약조건으로하는 조정계산을 적용해야 한다.

통합기준점 GNSS관측은 30초 간격으로 8시간 이상 수신하도록 되어 있으며, UTC (Corrdinated Universal Time) 기준으로 연속된 날짜에 걸쳐서 측량하지 않도록 규정하고 있다. 통합기준점 관측 후 현장에서 즉시 점검계산을 실시하고 필요한 경우 재관측하도록 되어 있다(제20조). 그러나, 수준측량 등 폐합점검이 가능한 측량과 달리, 위성궤도를 포함한 다양한 외부정보를 필요로하는 GNSS 자료처리에서는 현실적이지 않은 규정이다. 초신속궤도 등을 이용하더라도 학술용 소프트웨어를 이용한 자료처리자동화시스템 구축이 필요하다.

현재 규정은 두 점을 이용한 단일기선 데이터를 절반(각 4시간)으로 나눠서 각각 처리해서 반복성을 점검하는데, 수평위치는 각 성분별 2cm, 높이방향은 5cm를 초과하면 다시 관측해야 한다.

통합기준점측량 작업규정의 GNSS 기선해석은 내용상 단일기선을 전제로하고 있으며, 고정점 선정과 기선해석 순서를 임의로 하도록 규정하고 있다. 그러나, 이는 GNSS 자료처리와 무관한 규정이며, 재관측 규정(제21조)도 큰 의미를 부여할 수 없다. GNSS관측 성과계산(제22조)은 단일기선 해석 후 망평균계산을 하도록 규정하고 있으며, 학술용 정밀해석 프로그램을 사용하도록 되어 있다. 결과적으로 기지점을 "고정"하는 규정은 고정점 정확도에 전적으로 의존함으로써 전체적인 네트워크 안정성을 저하시킨다. 따라서, 기지점을 대상으로 한 Helmert 변환을 통해 이상점을 제거한 후, 최소제약조건(no-net-translation)으로 최종해를 결정하는 것이 바람직하다. 통합기준점 기선해석 결과에 대한 망평균에서도 추정된 기지점 좌표의 불확실성을 고려하지 않는 기준점 고정은 피해야 할 방법이다. 최소제약조건에 대한 이론적 내용은 4.1절에 설명되어 있다.

3. 공공측량 GNSS 자료처리

본 연구는 GNSS관측에 의한 공공측량 또는 통합기준점 측량자료를 처리하여 결과를 분석하고, 최적화된 현업 업무절차를 제안한다. 이를 위해, 10km 내외 기선형성이 가능한 기준점을 선정하였으며, 대류층 지연오차 추정과 좌표계 구현을 위해

Table 4. Summary of test cases used in this study (Year 2018) where YONS is used for the estimation. No tropospheric delay was estimated for SUWN due to the correlation between stations. All times are given in GPST

Cases	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Date	DOY 179-181 (June 28-30) 19:00-21:00	DOY 179 (June 29) **00:00-24:00**	DOY 179 (June 29) **00:00-24:00**	DOY 179-181 (June 28-30) 19:00-21:00
Time span	30 min Total 12 solutions	30 min Total 48 solutions	30 min Total 48 solutions	30 min Total 12 solutions
Interval	15 sec	15 sec	15 sec	15 sec
Ref. stations	DBON, GANS, GUMC, SONP, SUWN	DBON, GANS, GUMC, SONP, SUWN	DBON, GANS, GUMC, SONP, SUWN	DBON, GANS, GUMC, SONP, SUWN
Est. station	YONS	YONS	YONS	YONS
Tropo. estimation	DBON, GANS, GUMC, SONP	DBON, GANS, GUMC, SONP	DBON, GANS, GUMC, SONP, **YONS**	DBON, GANS, GUMC, SONP, **YONS**
Constraints	SUWN	SUWN	SUWN	-
Min. constraints	-	-	-	DBON, GANS, GUMC, SONP

위성기준점을 추가하였다. 현업에서 사용하는 GNSS 수신기는 대부분 이중주파수와 GPS+GLONASS를 지원하므로, 상시관측소에서 운영하는 수신기와 성능면에서 큰 차이가 없다. 따라서 본 연구에서는 다양한 정확도 분석을 위해 서울시에서 운영하는 "서울특별시 네트워크 RTK 시스템" 기준국 5점을 선정하였고, 중앙에 위치한 용산(YONS) 관측소를 임의로 공공측량 대상점으로 간주하였다. 우리나라 기준계 원점 역할을 수행하는 수원(SUWN) 관측소를 포함하여 단기선과 중기선이 포함된 네트워크를 구성하였고, 필요한 경우 수원 관측소 좌표 제약으로 우리나라 기준좌표계에 연결할 수 있다. 선정한 관측소 중 서울시 5개 관측소의 배치 현황은 Fig. 1과 같다.

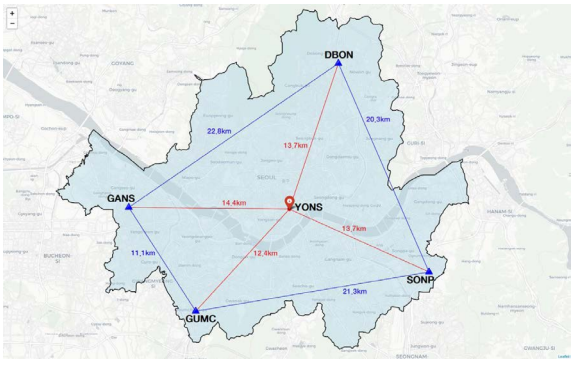

Fig. 1. Configuration of GNSS stations used in the study

공공측량 GNSS관측 중 신속정지측위법은 20분 이상 관측하도록 규정되어 있으나, 현업에서는 안전율을 고려하여 대략 30분 정도 측량한다. 본 연구에서는 기준점을 포함한 모든 관측소에 대해서 30분 단위 세션을 구성하였으며, 네 가지 시나리오는 Table 4에 정리하였다.

Case 1은 3일간 동일 시간대(19:00-21:00 GPST, 2시간)에 이루어진 GNSS관측 데이터를 이용하여 용산(YONS) 관측점에 대한 30분 단위 좌표값을 추정한 것이며, 위에서 설명한 것처럼 IGS14 좌표계 수원(SUWN)에 제약하였다. Case 2와 3은 시간에 따른 좌표 추정값 차이를 확인하기 위해 하루 24시간을 30분 단위로 나누어 총 48개 좌표추정값 반복재현성을 분석하였으며, YONS의 대류권 지연오차 추정 여부에 따라 구분하였다.

대류권 지연오차는 지역적인 상관성이 높아서 기선거리가 짧은 경우 정규방정식 안정성이 저하되는 경향이 있다. 따라서, 공공측량 등 단기선으로 이루어진 GNSS관측에서는 중장기선 기준점을 추가하거나, 하나의 기준점 대류권 지연오차는 모델값을 적용하여 파라미터에서 제외함으로써 시스템 안정성을 높이는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 SUWN 관측소 대류권 지연오차를 제외하였으며, 시나리오 별로 YONS 관측점의 대류권 오차를 추정하지 않거나(Cases 1&2) 또는 추정하였다(Cases 3&4).

3.1 정지측량

본 연구에서는 자료처리 정확도를 비교하기 위해 DOY (Day of Year) 178(2018-06-27) 정지측량 자료를 기선처리하여 좌표를 추정하였고, 이를 실험 결과 기준좌표로 사용하였다. 모든 관측점은 이중주파수 GPS+GLONASS 데이터를 저장하였으며, 30초 간격 24시간 데이터를 사용하였다. IGS (International

GNSS Service) 기준점 SUWN을 포함한 모든 측점 데이터를 동시에 처리하였으며, 속도벡터를 고려하여 관측시점 SUWN 좌표에 제약함으로써 IGS14 기준계 좌표값을 추정하였다 (Table 5).

Table 5. Reference coordinates of the stations for comparison. All coordinates are referenced to the IGS14 reference frame (Reference epoch: 2018-06-27 12:00:00) by constraining to the coordinates of IGS station SUWN

Stations	X [m]	Y [m]	Z [m]
DBON	-3046229.67940	4034987.82683	3875522.95779
GANS	-3035913.64740	4052534.14936	3865341.74233
GUMC	-3044105.63893	4053467.66351	3857987.11021
SONP	-3059553.60406	4039144.47391	3860771.93244
SUWN*	-3062023.25875	4055447.83615	3841818.13897
YONS	**-3047506.46376**	**4043979.39048**	**3865241.95229**

GNSS 자료처리를 위한 위성궤도와 시계오차는 CODE (Center for Orbit Determination in Europe) 최종해를 사용하였고, 좌표값 추정 정확도와 관련있는 대류층 지연오차 매핑함수와 추정 모델은 각각 GMF (Global Mapping Function)와 GPT (Global Pressure and Temperature)를 적용하였다. 대류층 지연오차 추정을 위해서 GMF/GPT 또는 VMF1/ECMWF 모델을 주로 사용하는데, 수평성분 차이는 1mm 이하이며, 높이는 대략 1mm 내외로서 실질적인 차이는 없다(Steigenberger *et al.*, 2009). GMF/GPT 모델은 외부 입력 데이터가 필요없으므로 많이 사용되고 있다. 그 외, GNSS 자료처리 방법과 모델은 Table 6에 요약되어 있으며, 기선해석은 학술용 소프트웨어인 Bernese GNSS V5.2를 사용하였다.

Table 6. GNSS processing models used in the study

Item	Models
GNSS orbit	CODE final
Solid Earth tides	Applied
Antenna phase center	Applied
Troposphere/mapping fn	GPT / GMF wet
GNSS observables	Double-difference phase
Constraints	Constrained to SUWN

3.2 Case 1(동일 시간대 관측 결과)

현장 측량작업은 작업일정과 작업자의 안전 등을 고려하여 낮시간에 주로 진행되며, 하루 중 비슷한 시간대에 이루어지는 경우가 많다. Case1은 3일간 동일한 시간대의 2시간 데이터이며, 각 세션을 30분 단위로 나누어 자료처리를 하였다. 따라서, 용산(YONS) 기준점에 대한 총 12개 좌표값을 추정했다. 수원(SUWN)은 대류층 지연오차를 추정하는 대신 모델값을 적용하고, 나머지 기준점에 대해서는 지연량을 추정하였다(YONS 제외). Fig. 2에서 확인할 수 있는 것처럼 수평성분 오차는 최대 8mm 이내이며, 각 추정값별 차이는 최대 6mm 수준이다.

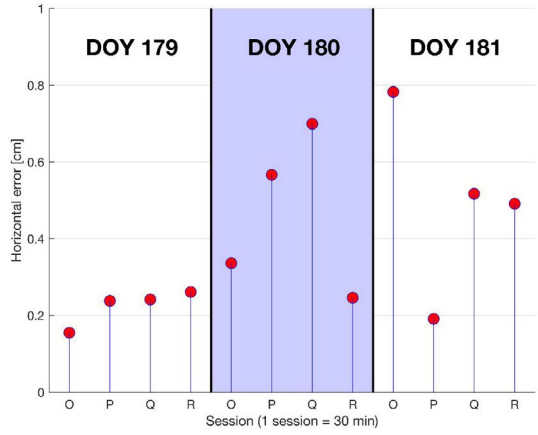

Fig. 2. Horizontal error of each session (Case 1) where each symbol represents one session (30 minutes). The tropospheric delay parameters were not estimated in Case 1. The time span of each solution is defined as follows: Session O (19:00-19:30), P (19:30-20:00), Q (20:00-20:30), R (20:30-21:00) of each day

3.3 Cases 2&3(대류층 지연오차 추정 여부)

Figs. 3&4는 DOY 179(2018. 6. 28) 24시간 관측 데이터를 이용하여 세션별(30분 관측값)로 추정한 결과(각각 48개 추정값)를 나타낸다. Fig. 3은 대류층 지연오차를 추정하지 않은 결과이며, Fig. 4는 대류층 지연오차를 포함하여 추정한 좌표값의 수평성분 오차를 나타낸다. Fig. 3에서 보는 것처럼 전체 48개 추정좌표값은 크게 세 부분으로 구분할 수 있다. 초반 8시간 동안은 좌표값이 대체로 선형적으로 변하며, 이후 8시간 동안은 상당히 안정적인 상태, 마지막 8시간 동안은 완만한 변화양상을 보여주고 있다. 반면, 대류층 지연오차를 추정한 Fig. 4에서는 수평오차가 24시간 동안 전반적으로 큰 변화를 보이지 않고 있다. 따라서, 세션이 짧은 경우에도 대류층 지연오차를 추정하는 것이 좌표값 안정성에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 모든 GNSS관측 자료처리에 적용하는 것이 바람직하

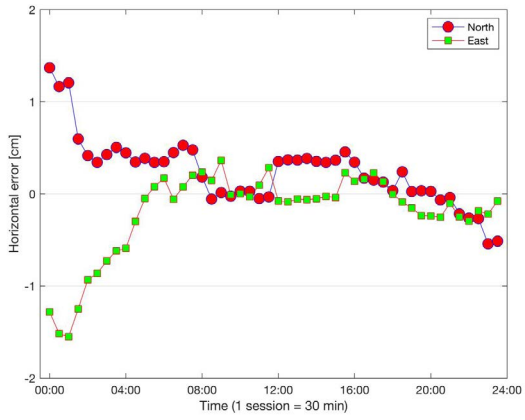

Fig. 3. Horizontal error of YONS without estimation of tropospheric delay (Case 2) on 2018-06-28 (DOY 179). Each symbol represents one session (30 minutes)

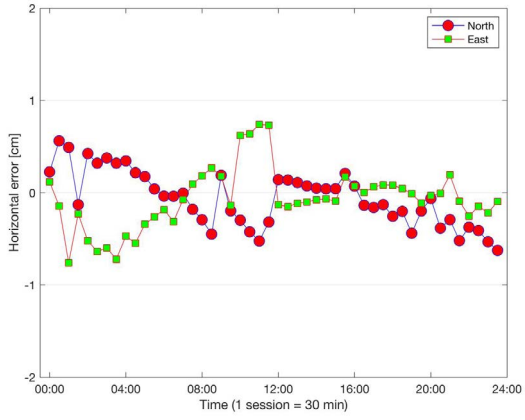

Fig. 4. Horizontal error of YONS with estimation of tropospheric delay (Case 3) on 2018-06-28 (DOY 179). Each symbol represents one session (30 minutes)

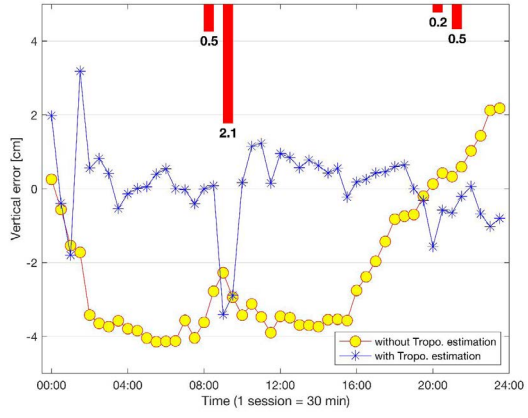

Fig. 5. Vertical error estimated with (Case 3) and without (Case 2) tropospheric delay. The 1-hr interval rainfall was plotted as a bar with numbers in unit of centimeter

다고 판단된다.

대류층 지연오차는 대개 2시간 단위, 또는 경우에 따라 1시간 간격으로 미지수를 추정한다. 따라서, 공공측량 등 30분 단위 관측이 이루어지는 경우에는 대류층 지연오차를 추정하지 않는 경향이 있다. 공공측량에서는 수평성분에 대해서만 정확도를 판단하지만, 대류층 지연오차는 높이 정확도와 직접적인 연관이 있다. 따라서, 본 연구에서는 대류층 지연오차를 추정하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 높이 정확도를 추가적으로 분석하였다.

Fig. 5는 Cases 2&3의 높이 오차를 나타낸 것으로서, 대류권 지연오차를 추정하지 않는 경우 높이 성분에 바이어스가 명확히 나타나는 반면, 대류권 지연오차를 추정하는 경우에는 바이어스가 대부분 제거된 것을 확인할 수 있다. 특히, 16시(local time 01:00, June 30)부터 오차가 선형적으로 변하는 것은 온도와 관련된 대류권 지연오차 변화 특성을 나타내는 것으로 판단된다. Fig. 5 상단에는 1시간 간격으로 관측한 강수량(KMA, 2018)이 표시되어 있으며, 08시(local time 17:00)부터 강우가 시작되어 09시(local time 18:00)에 2.1cm의 강우가 발생했다. 대류층 지연오차를 추정한 Case 3 결과는 해당 세션에 3cm 이상의 오차가 발생한 것을 보여준다. 따라서, 대류권 지연오차를 추정하더라도 30분 간격의 짧은 세션에서는 대기환경에 따라 수 cm의 높이 오차가 발생할 수 있다.

Table 7은 Cases 2&3 결과에 대한 통계값을 요약한 것이다. 대류층 지연오차를 추정하지 않은 경우 높이 방향에서 바이어스가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 결과적으로 수평성분에도 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 타원체고 추정에서 대류권 오차 보정기법에 따른 정확도 영향에 대한 최근 연구는 Lee (2018)을 참고할 수 있다.

Table 7. Statistics of Cases 2 and 3

	Case 2 (without Tropo.)			Case 3 (with Tropo.)		
	N [cm]	E [cm]	U [cm]	N [cm]	E [cm]	U [cm]
Mean	0.24	-0.20	**-2.22**	-0.06	-0.07	**0.05**
Std.dev.	0.37	0.46	1.88	0.30	0.33	1.06
RMSE	0.44	0.50	2.91	0.31	0.34	1.06

4. 업무프로세스 제안

본 연구에서는 현장 측량계획과 데이터 품질검증, 그리고 자료처리 전략과 정확도 분석을 위한 전반적인 업무프로세스에

대해서 제안한다.

4.1 최소제약조건

기존 좌표계($\boldsymbol{X}$)와 새로 추정된 좌표값으로 결정되는 좌표계($\tilde{\boldsymbol{X}}$)가 주어졌을 때, 두 좌표계는 평행이동, 회전, 축척을 나타내는 7개의 매개변수로 변환할 수 있다(Jekeli, 2001; Dach *et al*., 2015).

$$\begin{bmatrix}\tilde{X}_i\\ \tilde{Y}_i\\ \tilde{Z}_i\end{bmatrix}=(1+\mu)\begin{bmatrix}1 & \gamma & -\beta\\ -\gamma & 1 & \alpha\\ \beta & -\alpha & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_i\\ Y_i\\ Z_i\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta X\\ \Delta Y\\ \Delta Z\end{bmatrix} \tag{1}$$

where $\boldsymbol{X}$ and $\tilde{\boldsymbol{X}}$ represent the a priori reference frame and the reference frame of the resulting coordinates, respectively, and the subscript i refers to the station defining the reference frame. $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ represent the translation between two reference frames, α, β, γ refer to the rotation angles about each axis, and finally μ is the scale factor.

일반적으로 두 측지좌표계의 회전각은 매우 작으므로, Eq. (1)은 다음과 같은 선형식으로 표현할 수 있다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\tilde{X}_i\\ \tilde{Y}_i\\ \tilde{Z}_i\end{bmatrix}}_{\tilde{\mathbf{X}}_i}=\underbrace{\begin{bmatrix}X_i\\ Y_i\\ Z_i\end{bmatrix}}_{\mathbf{X}_i}+\underbrace{\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & -Z_i & Y_i & X_i\\ 0 & 1 & 0 & Z_i & 0 & -X_i & Y_i\\ 0 & 0 & 1 & -Y_i & X_i & 0 & Z_i\end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_i}\underbrace{\begin{bmatrix}\Delta X\\ \Delta Y\\ \Delta Z\\ \alpha\\ \beta\\ \gamma\\ \mu\end{bmatrix}}_{\xi} \tag{2}$$

좌표계 결정에 관련된 모든 기준점을 Eq. (2)의 벡터로 표현하면, 최소제곱조정을 이용한 변환계수(ξ) 추정식은 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi=(B^TB)^{-1}B^T(\tilde{X}-X) \tag{3}$$

최소제약조건은 Eq. (3)의 7개 매개변수 중 일부에 제약조건을 부여함으로써 두 좌표계 사이의 관계를 설정한다. 예를 들어, 평행이동($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)을 0으로 설정하면(no-net-translation) 원점이동량이 0이 되므로, 결과적으로 두 좌표계 무게중심이 일치한다. 이를 통해, 일부 기준점 좌표값에 오차가 있더라도 기준계의 기하학적 왜곡을 방지하고 데이텀 품질의 급격한 저하를 방지한다. 전역좌표계에서 위성궤도와 지구자전 성분을 추정할 때는 좌표계 회전성분을 0으로 제약(no-net-rotation)할 필요가 있다. 축척성분에 대한 제약은 안테나 위상중심을 추정하는 특별한 경우에만 제약한다(Dach *et al*., 2015).

Eq. (4)는 평행이동 성분을 0으로 제약하는 (가상)관측식을 GNSS 기석해석 정규방정식에 포함한 (확장)정규방정식을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix}N\\ (B^TB)^{-1}B^T\end{bmatrix}(\tilde{X}-X)=\begin{bmatrix}c\\ 0_{3\times1}\end{bmatrix} \tag{4}$$

where $N(\tilde{X}-X)=c$ represents the normal equation based on the GNSS baseline processing to estimate the coordinates of the points.

4.2 GNSS관측 시나리오

공공기준점 또는 통합기준점측량 작업규정은 단일기선을 전제로 한다. 그러나 Case 4에서 설명한 것처럼, 실제 공공기준점 측량은 특정 지역에서 2-3일에 걸쳐서 작업이 이루어지고 있으며, 활용가능한 수신기의 대수에 따라 작업일정이 결정된다. 따라서, 일정 수 이상 통합기준점을 포함한 측량이 이루어지면, 실제 자료처리에서는 개별 일간해를 계산하고 정규방정식을 저장해야 한다. 이를 통해, 일간해 정규방정식을 결합하여 통합기준점에 대한 최소제약조건으로 최종해를 계산하면, 현재의 공공기준점측량 작업규정에서 요구하는 반복재현성 또는 기선벡터 교차를 만족하며, GNSS관측 자료처리 흐름과 부합한다.

본 연구에서는 앞 절에서 분석한 결과를 바탕으로 새로운 프로세스를 정의하기 위한 테스트를 진행했다. Case 1과 동일한 데이터로 3일간 일간해를 계산하고 정규방정식을 저장했다. 최종적으로 DBON, GANS, GUMC, SONP에 대한 최소제약조건을 부여한 후, YONS에 대한 최종해를 계산했다. 또한, 추정 좌표값의 바이어스와 일간변화를 보정하기 위해 SUWN을 제외한 모든 스테이션에 대한 대류층 지연오차를 추정하였다.

Case 4는 4대의 수신기를 이용하여 3일 동안 동일한 시간대에 측량을 수행했다고 가정한 경우이다. 상시관측소 SWUN은 현장측량 종료 후 국토지리정보원(NGII, 2018)에서 다운로드하거나, NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol) 방식으로 실시간으로 저장(GNSSDC, 2018)할 수 있다. 총 4대의 수신기 중 2대를 관측지역 내 통합기준점에 번갈아 설치하고, 나머지 2대는 공공삼각점에 설치한 경우를 가정했다. 만일 사용가능한 수신기가 4대 이상이면 공공삼각점을 추가적으로 동시 관측할 수 있다. 이는 가장 보편적인 작업 형

Table 8. Observation chart of Case 4. The time span of each solution is defined as follows: Session O (19:00-19:30), P (19:30-20:00), Q (20:00-20:30), R (20:30-21:00). YO[L/M/N][O/P/Q/R/] are actually the same station, that is, YONS, but treated as different stations for stability comparison of the solutions. The symbol ● represents that there is an observation at the specified session. SUWN was used as a reference station to be aligned to IGS14 reference frame and to reduce the correlation of the tropospheric parameters between stations

Session / Station	DOY 179				DOY 180				DOY 181			
	O	P	Q	R	O	P	Q	R	O	P	Q	R
DBON	●	●	●	●								
GANS	●	●	●	●	●	●	●	●				
GUMC					●	●	●	●	●	●	●	●
SONP									●	●	●	●
SUWN*	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
YOLO	●											
YOLP		●										
YOLQ			●									
YOLR				●								
YOMO					●							
YOMP						●						
YOMQ							●					
YOMR								●				
YONO									●			
YONP										●		
YONQ											●	
YONR												●

태이며 보유한 수신기를 최대한 활용할 수 있는 방식이다. 또한, 통합기준점에 수신기를 번갈아 설치하는 시나리오는 자료처리 결과의 반복재현성을 검토하기 위한 목적도 있다.

Table 8은 GNSS관측에 의한 공공측량 방법을 제안하기 위한 테스트 결과를 요약한 것이다. 2018년 6월 28-30일(DOY 179-181) 3일에 걸쳐서 매일 2시간 동안 네 개 세션을 설정하였다. YONS를 서로 다른 12개의 공공삼각점으로 간주하고 매 세션마다 결과를 추정하였다. 결과적으로, 매 세션마다 4개의 수신기가 사용되었으며, 기선처리와 망 조정을 동시에 수행하였다. 최종 결과는 기준점(DBON, GANS, GUMC, SONP)에 대해서 최소제약조건을 적용하여 추정하였고, 정지측량 결과와 비교하였다.

4.3 정확도 분석

Fig. 6은 Case 4의 YONS 기준점에 대한 30분 세션, 총 12개의 추정 좌표를 정지측량 결과와 비교한 수평성분 오차를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것처럼, 동일한 기준점에 대해 3일간 추정한 좌표값 오차가 대부분 0.4mm 내외로 반복되고 있으며, 최대 오차 또한 약 6mm에 수준하다. 또한, 앞에서 설명한 것처럼, 대류층 지연오차를 추정함으로써 날짜별, 또는 하루 중 변화는 나타나지 않고 있다.

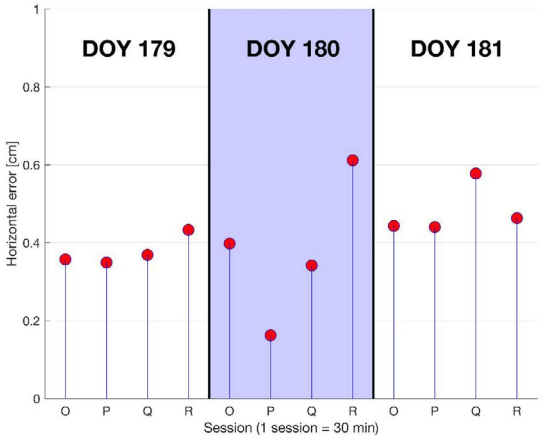

Fig. 6. Results of the suggested strategy for the public surveying (Case 4)

Table 9는 동일한 세션에 대해서 실행한 두 실험 결과에 대한 통계를 나타낸다. Case 1은 대류층 지연오차를 추정하지 않은 결과이며, 최종해는 SUWN을 기준으로 IGS14 기준계에 연결되어 있다. 반면, Case 4는 각 세션별 기선처리 결과에 대해 최종적으로 서울지역 기준점(통합기준점으로 가정)을 최소제약한 결과를 정지측량 결과와 비교한 것이다. 평균제곱근오차(RMSE: Root Mean Squared Error)는 수평 1mm 이내, 높이 2mm 이내의 차이를 보이지만, 절대값 기준 최대 오차를 Case 1 기준으로 나타내면 성분별로 최대 20% 이상 줄어들었음을 알 수 있다.

Table 9. Statistics of Cases 1 and 4

	Case 1 (without Tropo.)			Case 4 (with Tropo. & min. constraints)		
	N [cm]	E [cm]	U [cm]	N [cm]	E [cm]	U [cm]
Mean	0.21	-0.05	-0.15	-0.18	0.16	-0.45
Std.dev.	0.31	0.26	1.01	0.26	0.26	1.10
RMSE	0.37	0.26	1.03	0.32	0.30	1.19
Max(abs)	0.71 (100%)	0.55 (100%)	2.17 (100%)	0.56 (78.9%)	0.49 (88.7%)	1.71 (78.8%)

4.4 업무 프로세스 제안

Fig. 7은 본 연구결과를 바탕으로 GNSS관측에 의한 공공측량 또는 통합기준점 측량 자료처리 프로세스를 제안한 것이다. 공공측량과 통합기준점 측량은 작업규정에서 제시하는 관측시간 차이를 제외하면, 기본적으로 동일한 GNSS 자료처리 프로세스를 적용할 수 있다. 사용자는 현장에서 필요 절차에따라 자료를 취득하고, 라이넥스 포맷으로 변환하여 웹서버에 업로드한다. 서버에서는 데이터 품질 점검 후 필요한 자료처리를 수행하고, 결과를 사용자에게 이메일로 전송하면 모든 절차가 완료된다. 데이터 처리 서버는 동일 날짜를 기준으로 일간해를 생성하는데, 동일 세션은 물론 같은 날짜에 관측을 수행한 모든 수신기를 포함한다. 일간해 정규방정식은 다시 대류층 지연오차 파라미터를 소거함으로써 좌표값만으로 이루어진 (축소)정규방정식을 생성하고, 전체 프로젝트 정규방정식을 통합하여 최소제약조건을 통해 최종해를 생성한다.

이를 통해, 현업에서는 측량작업에 집중할 수 있고, 자료처리는 표준화된 프로세스를 통해 일관된 품질의 결과물을 자동으로 생성하여 사용자에게 전달할 수 있다.

그러나, 본 연구에서 제안한 프로세스가 현업에 적용되기 위해서는 공공측량 또는 통합기준점측량 작업규정 개정이 우선적으로 이루어져야하며, 수반된 성과심사 규정 역시 GNSS측량 특성이 반영되도록 변경되어야 한다.

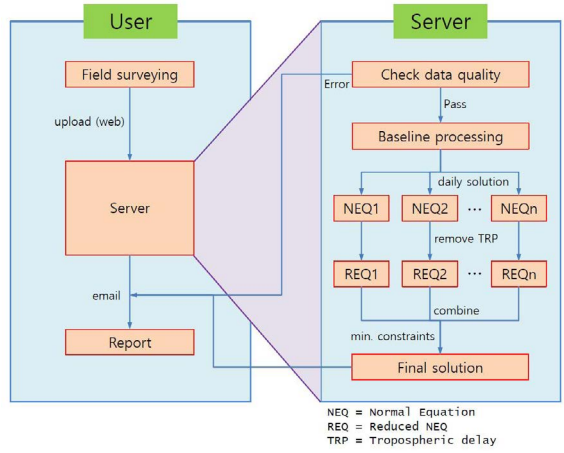

Fig. 7. Suggested strategy for public surveying based on GNSS observation

5. 결 론

본 연구는 GNSS관측 기반 공공측량 또는 통합기준점측량 작업규정과 업무 프로세스를 분석하고, 실제 데이터 처리결과를 통한 정확도 분석으로 표준화된 프로세스를 제안했다. 현재의 "공공측량 작업규정"과 "통합기준점측량 작업규정"은 GNSS관측 특성을 고려하지 않고 기존 트래버스 측량 규정을 준용함으로써 이론과 실제에서 차이가 발생한다. 본 연구에서는 실제 데이터를 이용한 표준화된 절차를 제안함으로써 일관된 품질의 결과물을 얻을 수 있음을 보였으며, 이는 통합기준점과 공공삼각점(1-4급) 정지측위법과 신속정지측위법에 동일하게 적용할 수 있다. 일반적인 공공측량에서는 본 연구에서 적용한 기선보다 훨씬 더 짧으므로 실제 공공측량에 적용하면 보다 향상된 위치정확도를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 최종해 추정을 위해 통합기준점을 최소제약하므로 통합기준점까지 거리에 특별한 제약을 부여할 필요는 없다고 판단된다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 제시한다.

1) 공공기준점 측량은 대략 30분 정도 수행하며, 이 경우에도 대류권 지연오차를 추정하는 것이 좌표값 반복재현성과 안정성에 유리하다.
2) 전체 프로젝트 기간 동안 통합기준점을 일부 포함하여 최대한 많은 공공기준점을 측량하고, 개별 일간해를 결합하

여 통합기준점과 위성기준점에 최소제약 조건을 부여하여 최종해를 구한다.

3) 현업에서는 정밀 학술용 소프트웨어 라이선스 문제 또는 전문지식 부족을 이유로 상업용 소프트웨어를 사용하며 개별 작업자의 경험에 의존한다. 그러나, 작업규정뿐만 아니라 일관성 있는 성과를 위해서는 시스템에 의한 자료처리가 이루어져야 한다.

본 연구에서 제시한 프로세스가 효과적으로 활용되기 위해서는 현장 취득 데이터를 자동으로 처리할 수 있는 시스템이 필요하며, 모든 데이터 흐름이 웹에서 이루어져야한다. 이를 위해서는, 국내 전문가들이 자동화된 자료처리시스템을 개발하여 현업을 지원할 필요가 있다. 이 외에도, GNSS관측 자료는 표준포맷(RINEX) 파일로 저장되는데, 각 기준점은 4자리의 고유한 아이디로 표시한다. 그러나 통합기준점 번호는 공통문자인 'U'를 포함하여 5자리이며, 특히 공공삼각점 번호는 GNSS관측에 그대로 사용하기에는 적절하지 않다. 따라서, 통합기준점과 공공삼각점 번호체계는 그대로 유지하더라도 GNSS관측을 위한 표준화된 코드(4자리)를 관리할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 <기상·지진See-At기술개발>(KMI2018-05710)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., and Fridez, P. (2015), *Bernese GNSS Software Version 5.2*, Vol. 1, Austronomical Institute, University of Bern.

GNSSDC (2018), GNSS data center, http://gnssdata.go.kr (last date accessed: 20 August 2018).

Jekeli, C. (2001), *Geometric Reference Systems in Geodesy*, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, Ohio State University.

KASM (2018), Korean Association of Spatial information, surveying & Mapping, Personal communication.

KMA (2018), Open portal for meteorological data, *Korea Meteorological Administration*, https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do (last date accessed: 10 September 2018).

Lee, H. (2018), Impact of tropospheric modeling schemes into accuracy of estimated ellipsoidal heights by GPS baseline processing: experimental analysis and results, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 4, pp. 245-254. (in Korean with English abstract)

Lee, J. and Kwon, J.H. (2015), Construction and precision verification of Korean national geoid model KNGeoid14, *Proceedings of the 2015 Spring Conference of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, The Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography, 23-24 April, Changwon, Korea, pp. 177-179.

MCT (2002), Regulations and rules in detail on public surveying, *Ministry of Construction and Transportation*, Notification No. 2002-177.

MCT (2004), Regulations and rules in detail on public surveying, *Ministry of Construction and Transportation*, Notification No. 2003-326.

NGII (2015a), Regulations and rules on public surveying, *National Geographic Information Institute*, Notification No. 2015-2538.

NGII (2015b), Regulations and rules on the surveying of unified control points, *National Geographic Information Institute*, Notification No. 2015-1842.

NGII (2018), Land information platform, *National Geographic Information Institute*, http://map.ngii.go.kr (last date accessed: 20 August 2018).

Steigenberger, P., Boehm, J., and Tesmer, V. (2009), Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and implications for atmospheric loading, *Journal of Geodesy*, Vol. 83, pp. 943–951.