

GNSS 망조정에 종속기선이 미치는 영향

윤성현¹, 이흥규^{2*}, 박종경³

¹창원대학교 대학원 친환경해양플랜트 FEED 공학, ²창원대학교 토목환경화공융합공학부,
³창원대학교 산업대학원 토목공학과

Impact of Trivial Baseline into GNSS Network Adjustment

Seong-Hyeon Yun¹, Hungkyu Lee^{2*}, Jong-Kyung Park³

¹Department of Eco-Friendly Offshore Plant FEED Engineering, Changwon National University

²School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University

³Department of Civil Engineering, Changwon National University

요약 본 논문에서는 GNSS 단일기선해석과 망조정을 통한 측량기준점 성과 산정에서 종속기선 포함여부가 미치는 영향을 분석하기 위해 망조정 이론을 바탕으로 실험적인 연구를 수행하였다. 이를 위해 국토지리정보원 운영 위성기준점 50 개소의 관측데이터를 이용하여 종속기선 포함여부에 따라 3가지 형태의 기준점 측량망 구성 및 조정실험을 수행하고, 그 결과를 정확도 표현과 산정성과의 차이 측면에서 분석 하였다. GNSS 망조정에 종속기선을 포함하는 경우 조정성과 차이는 밀리미터 수준으로 매우 제한적이었으나, 망의 자유도와 기하강도 왜곡으로 그 정확도가 과대평가되는 결과를 얻었다. 3가지 경우에 대한 조정성과를 국토지리정보원 고시좌표와 비교했으며, 그 결과 독립기선으로만 이루어진 망의 성과가 가장 높은 일치성을 보였다. 그러나 종속기선을 포함한 조정결과는 상대적으로 큰 차이를 나타내어 성과의 정확도 표현에 왜곡이 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 분석결과에 따라 GNSS 단일기선해석으로 얻어진 기선벡터의 망조정에서는 기존 성과와의 일치성, 현실적인 정확도 표현 그리고 과대한 데이터 처리에 따른 시간 및 비용 부담을 고려할 때 종속기선을 제외하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

Abstract This study examined the impact of trivial baselines obtained from GNSS single-baseline processing into a network adjustment in terms of accuracy and estimated coordinates sets. To this end, depending on the inclusion of the dependent baselines, three different types of experimental GNSS networks were composed and adjusted. The results showed that the networks including the trivial baselines are generally overestimated, but differences in the derived coordinates are limited at the millimeter level. A comparison of the adjusted coordinates with those published by the national geodetic agency showed that results of the network consisting of only the independent baselines are more constant than those of the networks with trivial baselines. Finally, a trivial baseline should be excluded from the GNSS network adjustment with a consideration of the realistic accuracy presentation and data processing burden.

Keywords : Accuracy, Baseline Processing, GNSS, Network Adjustment, Trivial Baselines

1. 서론

인공위성의 전자파 신호를 이용해 지상의 3차원 위치를 결정하는 GNSS(Global Navigation Satellite Systems)는

각과 거리관측에 기반하는 재래식 측량과 달리 측점 사이 시통(line of sight)을 요구하지 않을 뿐만 아니라 정확도와 생산성이 높은 측량이 가능하다. 이에 따라 현재 기본측량, 공공측량 그리고 일반측량의 기준점측량을 대

본 논문은 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2014R1A1A2056133)의 지원으로 연구되었음.

*Corresponding Author : Hung-Kyu Lee(Chanwon National Univ.)

Tel: +82-55-213-3777 email: hkyulee@changwon.ac.kr

Received March 2, 2018

Revised April 2, 2018

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

부분 대체하고 있으며, 산정성과의 정확도와 신뢰도 제고의 관점에서 GNSS 정지측량 방식을 사용하는 것이 일반적이다.

GNSS 정지측량 방식에 의한 기준점 성과 산정에서 위성의 원시 관측데이터를 처리하여 미지점의 좌표를 추정하는 절차를 “기선해석(baseline analysis or processing)”이라 한다. 이 절차는 관측데이터에 대한 수학적 모형화 방식에 따라 “다중기선(multi-baselines)”과 “단일기선(single-baseline)” 해석으로 구분할 수 있다. 전자는 동일 세션(session) 관측데이터를 단일 수학적모형으로 구성하는 반면, 후자는 3대 이상 수신기를 사용하여 동시 관측하는 경우 개별 기선을 독립적으로 모형화하여 처리한다. GNSS 관측망을 하나의 세션으로 구성할 때 이론적으로 다중기선해석은 원시 관측데이터 처리만을 통해 성과 산정이 가능하나, 독립기선해석을 수행하는 경우 별도의 망조정(network adjustment) 절차를 필요로 한다[1].

GNSS 관측망에 대한 단일기선해석에 의해 미지점 3차원 좌표를 추정할 경우 동일한 데이터의 중복처리를 통해 미지점의 좌표가 재추정되는 기선이 존재하게 되며 이를 종속기선(dependent or trivial baseline)이라 한다. 만약 N 개 GNSS 수신기를 이용하여 동시 관측하는 경우 형성 가능한 기선의 수는 $N(N-1)/2$ 개이며, 이들 중 $(N-1)$ 개는 독립기선(independent baselines) 그리고 나머지는 종속기선(dependent or trivial baseline)이 된다[2]. 이론적으로 종속기선을 원시 관측데이터의 처리와 망조정에 포함하더라도 산정성과에 미치는 영향은 매우 제한적이나, 망조정에서 자유도의 증가를 야기하여 결과의 통계적 특징과 표현되는 정확도를 왜곡할 우려가 있다[3].

각과 거리를 직접 관측하는 재래식 측량방식과 달리 GNSS 기선해석에서 얻어지는 기선벡터는 미지점 좌표 추정 후 좌표차를 계산하여 취득하는 것으로 관측데이터로 고려할 수 없어 다중기선해석에서는 독립기선에 대한 처리만을 원칙으로 하고 있다. 국토지리정보원의 관련 규정에서 기본측량에 해당하는 통합기준점측량의 기선해석은 과학기술용 GNSS 처리 소프트웨어를 사용하여 다중기선해석을 수행하도록 명시하고 있는 반면, 단일기선해석용 소프트웨어를 대부분 사용하는 공공 및 일반측량의 기준점 성과 산정에는 종속기선 포함여부에 대한 명확한 기준을 제공하고 있지 못하고 있는 실정이다.

GNSS 기선해석과 측량망 조정에 관련하여 국가기준

점 성과의 세계측지계 전환[4-5], 상용소프트웨어의 상시관측소 데이터 처리에 대한 적용성 검토[6], GPS 기반의 국가기준점 성과 산정 체계 구축방안[7], 수학적 모형이 기준점 정확도 표현에 미치는 영향분석[8] 등의 연구가 수행된 바 있다. 그러나 이들 연구의 대부분은 삼각형 형태의 관측망 형식으로 일부 종속기선을 포함하여 신뢰도 및 정확도 등의 분석에 대한 통계특성이 왜곡되어 있을 우려가 있다.

본 논문에서는 GNSS 기준점 측량 시 종속기선의 포함여부가 망조정 결과에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위해 국토지리정보원 상시관측소 50 개소 관측데이터를 취득하여 독립기선망, 일부 종속기선을 포함한 삼각형망, 가용한 모든 기선을 사용해 형성한 종속기선망으로 분류한 후 단일기선해석과 망조정을 수행하고 그 결과를 사후분산, 정확도 표현 그리고 조정좌표로 구분하여 분석하였다.

2. GNSS 기선해석 및 망조정

2.1. 기선해석

GNSS 정지측량 방식의 기준점 측량에서 기선해석은 인공위성의 전자파 신호로부터 취득한 반송파(carrier-phase)에 대한 차분(differencing)을 통해 기선장 종속오차를 보정하여 미지점의 3차원 좌표를 추정하는 수학적 절차이다. 이 절차는 GNSS 원시 관측데이터에 대한 수학적 모형화 방법에 따라 다중기선해석과 단일기선해석으로 구분할 수 있다[1, 9]. 전자의 경우는 지각변동 혹은 측지계 구현 및 유지관리 등에 주로 사용하는 과학기술용 소프트웨어가 채택하는 방식으로 단일 세션 관측망의 경우에는 망조정 절차 없이 기선해석만으로 성과 산정이 가능하다. 그러나 2개 이상 세션으로 이루어진 관측망에서는 다중기선해석을 수행하더라도 정규방정식을 의사관측데이터(pseudo observations)로 하는 망조정이 필요하다. 이에 반해 후자는 대부분의 상용소프트웨어가 구현하고 있는 방식으로 3대 이상의 수신기를 이용해 동시 관측을 수행한 경우 두 개의 관측점을 선택하여 기선을 생성한 후, 독립적으로 모형화하여 처리한다. 따라서 단일기선해석에 의한 GNSS 기준점 성과 산정을 위해서는 두 관측점의 ECEF(Earth-Centered-Earth-Fixed) 좌표계 상의 3차원 좌표 차이에 해당하는

기선벡터를 입력으로 하는 별도의 망조정이 필요하다.

2.2. 독립기선과 종속기선

GPS 기선해석을 통해 얻어지는 기선벡터는 앞서 언급한 바와 같이 직접 관측하는 것이 아니라 기지점과 기선해석을 통해 추정된 미지점의 3차원 좌표 차이가 계산된 결과이다. 이와 같은 이유로 N 개 수신기에 의한 동시 관측데이터의 단일기선해석을 통해 $N(N-1)/2$ 개의 기선벡터 형성이 가능하나, 이 망에서 독립기선의 수는 미지점의 수와 같이 $(N-1)$ 개이다. 따라서 나머지 $(N(N-3)/2 - 1)$ 개는 독립기선 관측데이터 처리에 사용한 동일한 인공위성의 원시 관측데이터를 재처리하여 미지점 좌표를 산정해 기선벡터를 계산한 것이기 때문에 종속기선이 된다. 이론적으로 종속기선을 망조정에 포함하는 것은 무의미하나, 각각 거리 관측을 통해 기준점망을 형성하는 것에 익숙한 측량기술자의 관점에서는 망의 기하강도와 신뢰성 측면에서 조정에 포함할 우려가 매우 높다.

Fig. 1은 4대의 수신기에 의한 동시 관측을 통해 형성한 독립기선과 종속기선의 예를 도시한 것으로 관측점 A를 기지점으로 고려한 것이다. 그림의 왼쪽 망은 AB, BC, CD 순서로 해석한 3개의 독립기선을 실선으로, 그리고 나머지 세 종속기선을 점선으로 나타낸 것이다. 이에 반해 그림의 오른쪽 망은 AB, AC, AD를 독립기선으로 우선 처리하여 나머지가 종속기선이 된 경우이다. 이들 이외에도 AD, BD, BC 등 다양하게 독립기선을 선택하여 처리할 수 있으나, 이론적으로 관측 조건이 동일한 경우 그 영향은 극히 제한적이다[3]. 실무적인 관점에서 독립기선의 선택은 기선의 길이 혹은 동시 관측 데이터 양에 따라 선택하는 것이 일반적이다.

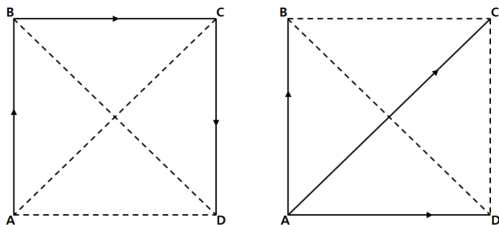


Fig. 1. Independent baseline(full line) and dependent baseline(dotted line).

단일 세션 관측에서 독립기선으로 망을 구성하는 경우 관측데이터와 미지수의 개수가 동일하여 자유도는 항

상 '0'이 된다. 이에 반해 Fig. 1의 경우, 종속기선을 모두 포함한다면 그 자유도는 최대 9가 되어 망조정에서 사후분산 계산에 직접적인 영향을 미쳐 조정결과와 통계 특성에 왜곡을 야기할 우려가 있기 때문에 조정을 위한 망의 구성에 신중을 기할 필요가 있다.

2.3 망조정

최소제곱법(least-squares)에 의한 GNSS 측량망 조정을 통해 성과를 산정하기 위해서는 함수모형(functional model)과 통계모형(stochastic model)으로 이루어진 수학적 모형이 정의되어야 한다[10]. 여기서 전자는 관측데이터와 추정값 사이의 함수적 관계, 후자는 관측데이터의 불확실성과 상관성을 나타낸다. 측량망 조정에서 이들 모형의 적합성은 최소제곱추정 결과로 얻는 사후분산(a posteriori variance)에 대한 통계검정을 실시하여 점검할 수 있다.

GNSS 기선벡터를 입력으로 하는 망조정에서 함수모형은 ECEF 좌표계에 대한 3차원 좌표성분 차이로 정의하며, 함수모형에 기지점 포함 여부에 따라 고정(fixed)과 가중제약(weighted constrained) 모형으로 구분한다. 전자는 기지점을 모형에서 제외하는 방식으로 조정 후 그 좌표는 불변하나, 후자는 기지점 좌표와 그 불확실성(분산)을 고려하여 포함하기 때문에 조정을 통해 기지점 좌표가 재추정 된다.

통계모형은 기선해석 결과로 얻어지는 분산-공분산 행렬을 사용할 수 있다. 그러나 기선해석 소프트웨어의 분산-공분산 행렬은 추정값의 정밀도를 극히 양호하게 반영하고 있기 때문에 망조정 성과의 정확도를 보다 현실적으로 표현하기 위해서는 기선벡터의 분산-공분산 행렬에 사후분산을 스케일링(scaling)하거나 경험적 통계모형화 기법(empirical stochastic modeling)을 적용하여 수정할 필요가 있다[1, 8].

GNSS 망조정에서 경험적 통계모형화 기법은 기선벡터를 수평과 수직성분으로 구분한 후 식(2-1)의 관계에 의해 각 벡터성분의 분산을 계산하고, 기선해석 결과의 상관성을 그대로 반영하여 분산-공분산 행렬을 재구성하는 방법이다[1]. 이 때 식(2-1)의 a 와 b 를 결정하기 위해 이들을 조절하며 사후분산에 대한 모형적합도 검사가 통과할 때까지 조정을 반복 수행할 필요가 있다.

$$\sigma_i^2 = (a + b \cdot L) \quad \text{식 (2-1)}$$

여기서, σ_i^2 은 기선벡터 성분의 분산, a 는 관측지점에 따른 절대오차, b 는 기선장에 영향 받는 상대오차 그리고 L 은 기선장이다.

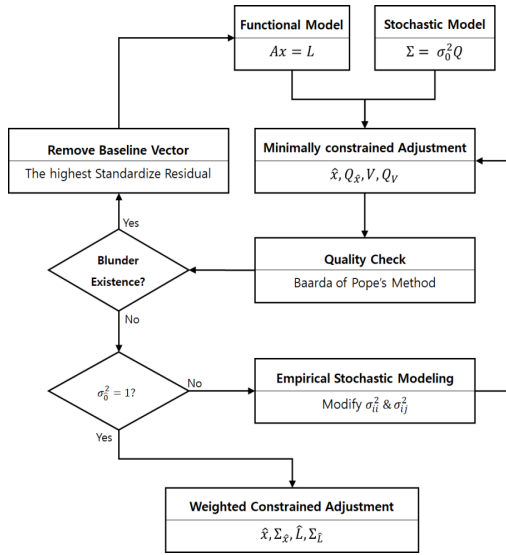


Fig. 2. Network adjustment procedure in this study.

Fig. 2는 본 연구의 실험에 사용한 GNSS 망조정 절차를 도시한 것으로 기지점 1점을 고정하는 최소제약조정(minimally constrained adjustment)과 9점에 대한 가중제약조정을 통해 최종 성과를 산정하는 절차로 이루어져 있다. 최소제약조정은 기선해석 소프트웨어가 산출한

분산-공분산 행렬을 이용하여 과대오차를 점검하는 절차와 식(2-1)에 의해 경험적 통계모형을 결정하는 반복 조정 단계로 구성되어 있으며, 결과를 통해 측량망의 상대정확도를 평가할 수 있다. 가중제약조정에서는 최종 성과 산정을 위해 가용한 모든 기지점의 3차원 좌표와 이들 분산을 적용하여 미지점들의 3차원 성과와 절대정확도를 계산한다.

3. 망조정실험 및 결과

3.1 GNSS 데이터

GNSS 측량망 조정에 종속기선이 미치는 영향을 고찰하기 위해 국토지리정보원 상시관측소 중 도서지역에 위치한 것을 제외한 총 50개의 관측소를 이용하여 실험망을 구성하였다. 1일 관측세션은 중복점 포함 약 20점으로 하여 2017년 1월 1일 ~ 4일 관측자료를 취득하였고 LGO (Leica Geomatics Officer) 버전 8.4에 의해 Fig. 3과 같이 3가지 경우로 구분하여 기선해석을 수행하였다. 그림에서 CASE 1은 형성 가능한 모든 기선을 포함하는 경우이며, CASE 2는 종속기선들 중 일부를 포함하여 삼각형 형태로 망을 구성한 것, 그리고 CASE 3은 각 세션에 대해서 독립기선만을 처리한 결과이다.

기선해석 후 동일 소프트웨어에 의해 기지점 SUWN을 고정하는 최소제약조정을 반복 수행하고 표준화잔차에 대한 통계검정을 통해 총 6개 기선을 과대오차로 판

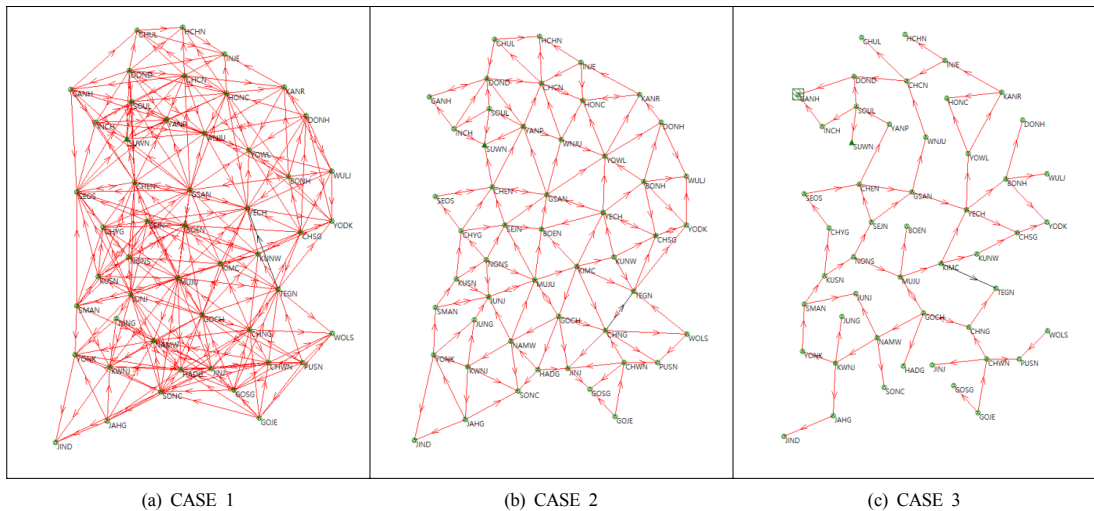


Fig. 3. Networks of GNSS baseline vectors for the adjustment tests.

정하여 망에서 제외하였다. 이 절차를 통해 최종적으로 GNSS 망조정 실험에 사용할 CASE 1 ~ 3을 각각 313, 131, 63개의 기선으로 구성하였다. 따라서 이후 망조정 단계에서는 기선벡터에 대한 별도의 과대오차 규명절차를 수행하지 않았다.

3.2 GNSS 관측 망조정

본 연구의 GNSS 망조정 실험은 GeolabPX5 버전 5.6.1로 수행하였다. 해당 소프트웨어는 재래식 관측데이터 및 GNSS의 기선벡터를 이용한 관측망 조정에 폭넓게 사용되고 있으며 최적화 알고리즘을 통해 연산 시간을 단축할 수 있어 대규모 망조정에 적합하여 선정하였다[4,11].

LGO 해석 기선벡터를 Leica ASCII 형식으로 출력한 후 별도의 Matlab 스크립트를 이용하여 GeolabPX5의 입력파일 형식으로 일괄 변환하였다. SUWN을 고정한 최소제약조정, 그리고 2003년 세계측지계 구현에 사용한 내륙의 13개 위성기준점 중 관측소 이동과 안테나 교체가 없고 비교적 안정점으로 알려진 9점을 가중제약하는 조정을 수행하여 그 결과를 분석하였다.

3.2.1 최소제약조정

GNSS 기선해석을 통해 구성된 3가지 관측망에 대하여 SUWN을 고정한 최소제약조정을 수행하고 그 결과를 관측데이터와 미지변수의 수, 자유도 및 사후분산으로 구분하여 Table 1에 요약하였다. 모든 종속기선을 포함하는 CASE 1과 독립기선으로만 이루어진 CASE 3를 비교할 때 관측데이터 수는 약 5배 그리고 자유도는 약 19배 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 자유도는 사후분산 계산에서 분모에 해당하므로 이 값이 큰 CASE 1이 3에 비해 약 0.6배 낮은 값을 계산하여 조정결과의 정밀도가 높게 나타났다. 특히 주목할 것은 일부 종속기선을 포함한 삼각형망인 CASE 2의 사후분산으로 자유

도가 CASE 1에 비해 낮아 보다 큰 사후분산을 계산할 것으로 예상되나, 실제 결과는 보다 작은 값을 나타내었다. 이는 사후분산의 분자 계산에 사용하는 잔차벡터와 가중행렬의 영향으로, 특히 이들 중 기선해석 소프트웨어가 제공하는 기선벡터 분산-공분산 행렬의 비현실성 (non-realistic)에 기인한 것으로 판단되었다.

기선벡터에 대한 보다 현실적 통계모형화를 위해 2.3 절에서 언급한 경험적 기법을 적용하여 식(2-1)의 절대오차(a)와 상대오차(b)를 각각 0.2cm와 0.7cm로 결정한 후 벡터들 사이의 상관성을 유지하면서 새로운 분산-공분산 행렬을 생성하였다. 동일한 기선벡터들에 대해 경험적 방식으로 모형화한 분산-공분산 행렬을 적용하여 최소제약조정을 수행한 결과 CASE 1~3의 사후분산은 각각 0.323, 0.513, 1.034로 나타났다.

수정한 통계모형을 이용해 실시한 제조정에서 주목할 것은 CASE 2의 사후분산이 CASE1에 비해 커져 사후분산 값이 분모인 자유도에 종속하게 되었다는 것으로, 이는 조정에 사용한 분산-공분산 행렬이 통계적으로 보다 실제와 가까운 정밀도를 반영하고 있음을 의미한다. 따라서 이후에 이루어진 모든 망조정은 수정 통계모형을 적용하여 이루어졌다.

본 연구의 3가지 경우에 대해 사후분산을 수정한 후 최소제약조정을 실시하고 신뢰수준 95%의 상대오차 타원과 막대를 관측망도와 함께 Fig. 4에 도시하였다. 이와 함께 조정결과의 상대정확도 고찰을 위해 상대 오차타원 장축과 막대 크기 및 이들의 평균, 표준편차를 Fig. 5에 나타내었다. 이들 결과는 종속기선을 포함한 조정결과의 상대정확도가 그렇지 않은 경우에 비해 높게 평가된 것을 보여준다. 특히 CASE 1과 3을 비교할 때 그 정확도는 수평과 수직방향에서 평균적으로 약 1.8배 차이가 발생하였다. 이러한 결과는 자유도가 증가함에 따라 작은 값으로 계산된 사후분산의 영향과 종속기선의 포함이 망의 기하강도를 크게 증가시켰기 때문인 것으로 판단된다.

Table 1. Statistical summary of the minimally-constrained adjustment with the original variance-covariance matrices of observations

Network	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Number of observations	939	393	189
Number of unknown parameters	147	147	147
Degree of freedom	792	246	42
Posterior variance (σ_0^2)	29.780	27.549	48.578

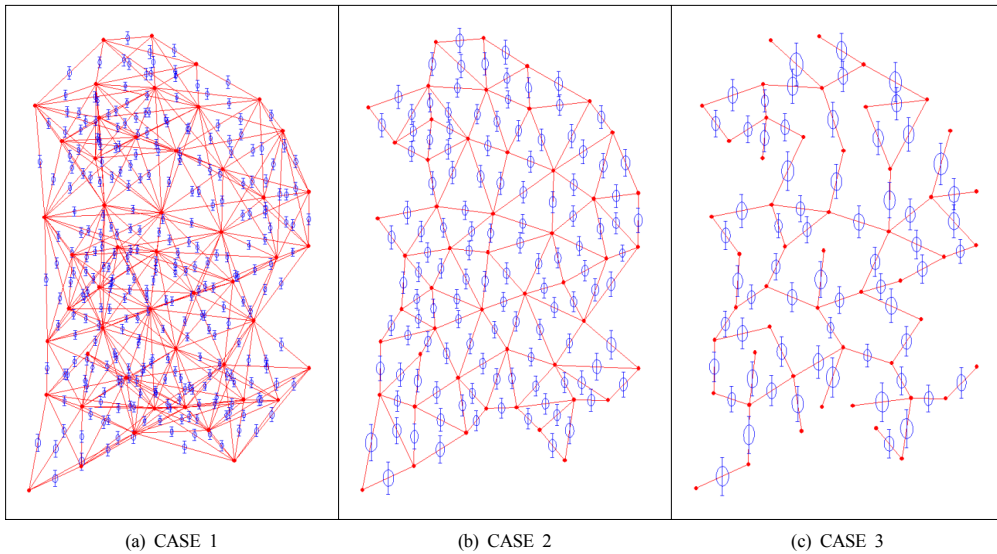


Fig. 4. Adjusted networks with error ellipsoids and bars with 95% confidence level.

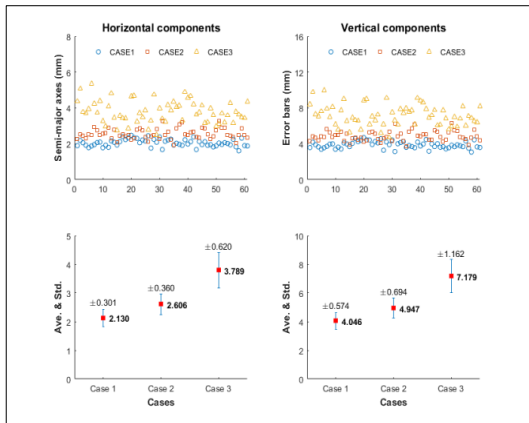


Fig. 5. Sizes of semi-major axis of the relative error ellipsoids and bars with 95% confidence level and their averages and standard deviations.

중속기선 포함여부에 따른 망의 기하강도를 고찰하기 위해 GNSS 위성배치가 측위정밀도에 미치는 영향을 나타내는 지표인 DOP(Dilution of Precision) 계산과 동일하게 관측데이터의 분산-공분산 행렬을 단위행렬로 수정하여 최소제약조정을 실시하였다. 이를 통해 얻은 추정기선벡터의 분산-공분산 행렬 대각선 요소의 제곱근에 대한 통계값을 Table 2에 요약하였다.

이들 결과는 예상한 바와 같이 중속기선의 포함이 조정망의 기하강도를 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 GNSS 망조정에서 중속기선의 포함은 자유도와 기하강도를 증가시켜 조정망의 상대정확도 표현에 왜곡을 유발하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Statistical summary of the network strengths

(unit: mm)

Network	Horizontal			Vertical		
	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Mean	0.75	1.19	2.33	0.77	1.22	2.39
Std.	0.10	0.13	0.24	0.10	0.13	0.24
Max	1.10	1.51	2.64	1.13	1.54	2.70
Min	0.53	0.94	1.68	0.55	0.97	1.71

Table 3. Summary of the weighted-constrained adjustments

Network	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Observations	966	420	216
Unknowns	150	150	150
Degree of Freedom	816	270	66
Posterior variance(σ_0^2)	0.376	0.589	1.136

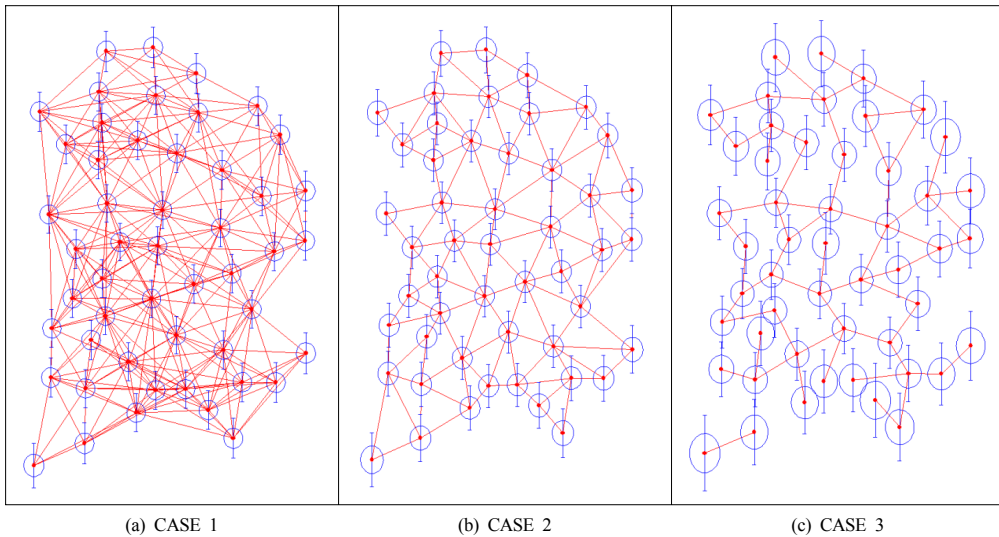


Fig. 6. Adjusted network with absolute error ellipsoids and bars with 95% confidence level.

3.2.2 가중제약조정 및 성과 산정

9개 위성기준점의 국토지리정보원 고시좌표에 대한 수평과 수직 정확도에 각각 $\pm 0.8\text{cm}$ 와 $\pm 1.5\text{cm}$ 를 가중 제약하는 망조정을 통해 41점의 성과를 산정했으며, 그 주요 결과를 Table 3에 요약하였다. 망조정에 제약점의 3차원 좌표 27개를 관측데이터로 추가하였으나, 조정을 통해 모든 관측점 좌표를 추정해야하기 때문에 미지수의 개수는 150개가 되었다. 이로 인해 자유도가 모든 경우에 대하여 최소제약조정의 그것보다 24 증가하였다.

Fig. 6은 가중제약조정 후 관측망도에 신뢰수준 95%에 대한 절대오차 타원과 막대를 표현한 것이며, Fig. 7에 오차타원 장축과 오차막대 크기를 나타내었다. 최소제약조정의 상대정확도와 유사하게 종속기선이 포함됨에 따라 산정성과의 절대정확도가 높게 평가되었으며, 이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 자유도와 망의 기하강도 증가에 기인한 것이다.

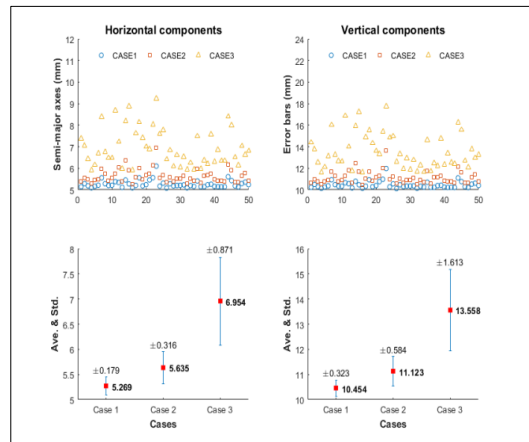


Fig. 7. Magnitudes of semi-major axis of the absolute accuracies with 95% confidence level and their averages and standard deviations.

Table 4. Statistics summary of differences of the adjusted coordinates among the cases (unit: mm)

Network	Case 1 & 3			Case 2 & 3		
	N-S	E-W	U-D	N-S	E-W	U-D
Mean	4.3	2.3	3.0	0.5	0.4	2.0
Std.	2.5	1.5	2.4	0.6	0.4	1.7
Max	9.3	6.3	9.3	4.1	2.2	8.1
Min	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

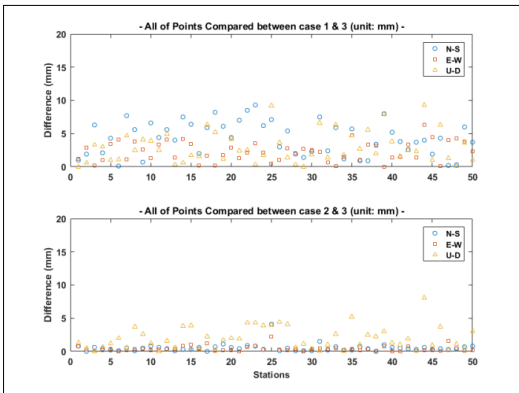


Fig. 8. Differences between adjusted and published coordinates.

중속기선의 포함이 조정성공에 미치는 영향을 살펴보기 위해 CASE 1과 3 그리고 2와 3의 조정좌표 차이를 계산하여 Fig. 8에 도시하였고 좌표 차이에 대한 통계값을 Table 4에 요약하였다. 이들 결과는 중속기선의 포함으로 독립기선망(CASE 3)에 비해 약 5배 혹은 2배 많은 관측데이터를 포함한 GNSS 망조정을 수행하는 경우라도 산정성과 차이는 평균적으로 수 밀리미터 수준이며, 가장 큰 경우라 할지라도 센티미터 수준 이내임을 보여준다. 이러한 결과를 통해 관측망에 중속기선을 포함한 경우, 그것이 GNSS 망조정 성과에 미치는 영향은 제한적인 것을 알 수 있다.

가중제약조정의 성과와 고시좌표의 일치성을 확인하기 위해 이들 차이를 계산하여 Fig. 9에 그리고 이에 대한 RMSE를 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 9에서 수직성분에 발생하는 수 센티미터 이상의 불일치는 상용기선해석 소프트웨어의 상대대류권지연 모형화 알고리즘의 한계에 따른 것으로 판단된다. 주목할 것은 Fig. 10의 RMSE로 독립기선망의 조정결과가 중속기선을 포함한 것에 비해 그 값이 작다는 사실이다. 이는 Fig. 7의 절대정확도

에 반하는 결과로 중속기선을 포함한 망조정 정확도가 그렇지 않은 경우에 비해 높게 표현되지만 고시좌표와의 일치성은 오히려 낮다는 것을 의미한다. 즉, 최대 5배 많은 기선벡터를 조정에 포함할지라도 산정성공에 미치는 영향은 밀리미터 수준으로 제한적인 반면 정확도 표현에 왜곡을 유발한다.

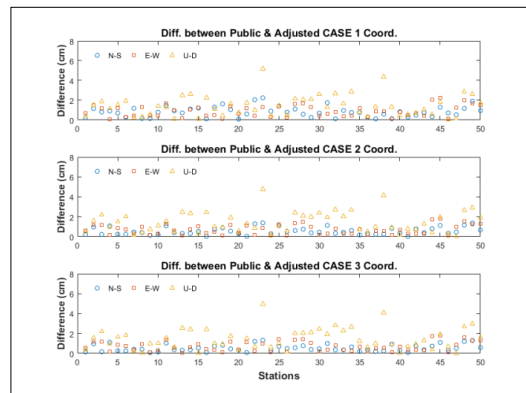


Fig. 9. Gap of coordinates each cases with public

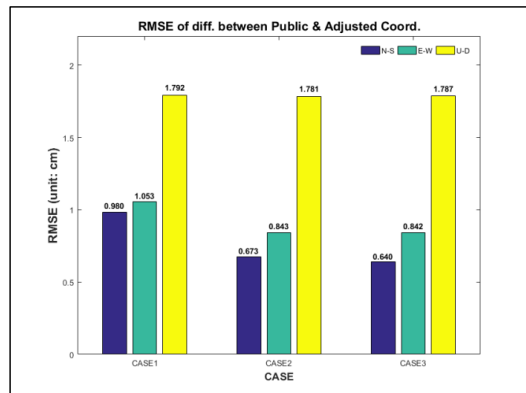


Fig. 10. RMSE about difference coordinates between public & adjustment

4. 결론

본 논문에서는 종속기선이 GNSS 망조정에 미치는 영향을 성과 산정과 정확도 표현의 측면에서 분석하였다. 이를 위해 국토지리정보원 위성기준점 관측데이터를 이용한 실험망을 종속기선 포함여부에 따라 3가지로 구분하였고 조정을 통해 분석한 결과를 다음과 같이 요약하였다.

첫째, GNSS 망조정에 종속기선을 포함하는 경우 자유도와 기하강도를 왜곡시키며, 종속기선의 수가 증가할수록 정확도는 높게 나타난다.

둘째, 독립기선망에 비해 약 2배 혹은 5배 많은 종속기선을 포함하는 GNSS 망을 구성하여 조정하는 경우라도 산정 성과에 미치는 영향은 밀리미터 수준으로 제한적이다.

셋째, 국토지리정보원 고시좌표와 비교해 RMSE를 계산한 결과 독립기선망 조정결과가 높은 일치성을 보였으며, 종속기선 수가 증가할수록 그 차이가 커졌다. 이러한 결과로부터 종속기선을 포함하여 상대적으로 높게 평가된 조정결과가 왜곡된 것임을 확인할 수 있었다. 따라서 GNSS 망조정에 의한 기준점 성과 산정에 종속기선을 가급적 제외하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

끝으로 각과 거리측량에 익숙한 측량기술자들은 기선 해석 망도에 나타난 종속기선을 독립관측 데이터로 오해할 우려가 있으며, 이들을 망조정에 포함하는 경우 본 연구에서 확인한 바와 같이 결과에 부정적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 무의미한 종속기선해석에 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 따라서 향후 상용소프트웨어를 이용한 기준점 측량 시 종속기선 처리와 망조정 방법을 명시하도록 GNSS 기준점 측량 관련 규정의 개정이 필요할 것이다.

References

- [1] C. Rizos, Principle and practice of GPS surveying, School of Surveying and Spatial Information Systems, 555pp. The University of New South Wales, Sydney, Australia, 1996.
- [2] E. Wei, K. Yang, X. Deng, Q. Zhang, On the method of selecting independent baselines for GPS control network, *Proceedings of International Conference on Electronics, Communication and Control (ICECC)*, Ningbo, China, pp.2162-2165, 9-11 September, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECC.2011.6066403>

- [3] R. C. Wilkie. Trivial baselines as redundant measurements, *Surveying and land Information Systems*, vol. 55, no. 2, pp.99-108, 1995.
- [4] Y. J. Lee, G. H. Jeong, H. K. Lee, G. O. Kwon, J. H. Song, J. R. Cho, G. B. Nam, S. H. Cha, The 3rd GPS Network Adjustment for Determining of KGD2002 Coordinate Sets, *Korean Journal of Geomatics*, vol. 25, no. 5, pp. 437-449, October, 2007.
- [5] Y. J. Lee, H. K. Lee, G. H. Jeong, J. H. Lee, GPS Network Adjustment for Determining KGD2002 Coordinates of the 2nd Order Geodetic Control Points, *Korean Journal of Geomatics*, vol. 25, no. 5, pp. 451-463, October, 2007.
- [6] J. W. Kim, J. H. Kwon, J. S. Lee, The Analysis of the GPS Data Processing of the NGII CORS by Bernese and TGO, *Korean Journal of Geomatics*, vol. 26, no. 6, pp. 549-559, December, 2008.
- [7] K. H. Jeong, H. K. Lee, A Study on Continuous Management Strategy Published Coordinates of National Geodetic Points using GPS Network Adjustment, *Korean Journal of Geomatics*, vol. 29, no. 4, pp. 367-380, August, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2011.29.4.367>
- [8] H. K. Lee, W. S. Seo, Impact of Mathematical Modeling Schemes into Accuracy Representation of GPS Control Surveying, *Korean Journal of Geomatics*, vol. 30, no. 5 pp. 445-568, October, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2012.30.5.445>
- [9] A. Leick, L. Repoport, D. Tatarnikov, GPS satellite surveying, 4th Edition, pp. 656, John Wiley & Sons, Inc., 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119018612>
- [10] R. W. Paul, D. G. Charles, Adjustment and computation: Spatial data analysis, 4th Edition, 611pp, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [11] Microsearch (2001), Microsearch Geolab 2001 field manual, Microsearch, Canada, 197pp.

윤 성 현(Seong-Hyeon Yung)

[정회원]



- 2017년 2월 : 창원대학교 토목공학과 (공학학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 친환경 해양플랜트 FEED 공학과 (석사과정)

<관심분야>

GNSS 측위/항법, 측지측량, 공간정보 수치모델링

이 흥 규(Hungkyu Lee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 동아대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 10월 : 호주 뉴사우스 웨일즈 대학교 측량정보공학과 (공학박사)
- 2004년 11월 ~ 2005년 2월 : 한국 전자통신연구원 선임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

GNSS 측위/항법, 측지측량, 공간정보 수치모델링

박 종 경(Jong-Kyung Park)

[정회원]



- 2001년 2월 : 동명정보대학교 유통경영학과 (공학학사)
- 2002년 7월 ~ 현재 : 한국국토정보공사
- 2016년 3월~ 현재 : 창원대학교 산업대학원 토목공학과 (석사과정)

<관심분야>

GNSS, 지적측량, 측지망 조정계산