

## IGS 산출물 생성을 위한 지상국 선정에 관한 연구

정성욱<sup>1†</sup>, 백정호<sup>1</sup>, 배태석<sup>2</sup>, 조중현<sup>1</sup>, 조성기<sup>1</sup>, 박종욱<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국천문연구원

<sup>2</sup>오하이오 주립대학교

### THE SELECTION OF GROUND STATIONS FOR IGS PRODUCTS

Sung-Wook Jung<sup>1†</sup>, Jeong-Ho Baek<sup>1</sup>, Tae-Suk Bae<sup>2</sup>, Jung Hyun Jo<sup>1</sup>,  
Sungki Cho<sup>1</sup>, and Jong-Uk Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

<sup>2</sup>Ohio State University, Columbus, Ohio 43210, U.S.A.

E-mail: astroyorong@kasi.re.kr

(Received October 12, 2007; Accepted November 27, 2007)

#### 요 약

IGS(International GNSS Service) 산출물 생성에 사용되는 지상국의 선정은 산출물 정밀도에 영향을 미칠 수 있는 중요한 과정이다. 지상국 선정에 있어서 지상국 자료의 품질이 좋지 않은 지상국들은 제외시켜야 하며, 전 지구적으로 고른 분포를 갖도록 선정해야 한다. 이 연구에서는 12개의 지상국 망을 이용하여 GPS 위성의 궤도력을 산출하고 지상국 선정이 GPS 위성의 궤도력 산출에 미치는 영향을 분석하였다. 지상국의 성능을 판단하기 위해 자료의 품질을 조사하였으며, 관측개수, 사이클 슬립 개수 및 L1, L2에 대한 의사거리의 다중경로 오차를 고려하였다. 고른 지역분포를 갖는 지상국 선정을 위해서 SOD(Second Order Design) 방법을 사용하여 Taylor-Karman 구조로부터 정의되는 기준 행렬과 여행렬(cofactor matrix)의 차이가 가장 작도록 지상국들을 선정하였다.

#### ABSTRACT

The selection of ground stations is one of the essential process of IGS (International GNSS Service) products. High quality GPS data should be collected from the globally distributed ground stations. In this study, we investigated an effect of ground station network selection on GPS satellite ephemeris. The GPS satellite ephemeris obtained from the twelve ground station networks were analyzed to investigate the effect of selection of ground stations. For data quality check, the observations, the number of cycle slips, and multipath of pseudoranges for L1 and L2 were considered. The ideal network defined by Taylor-Karman structure and SOD (Second Order Design) were used to obtain the optimal ground station network.

*Keywords:* orbit determination, ground station optimization, satellite navigation system, space geodesy

---

<sup>†</sup>corresponding author

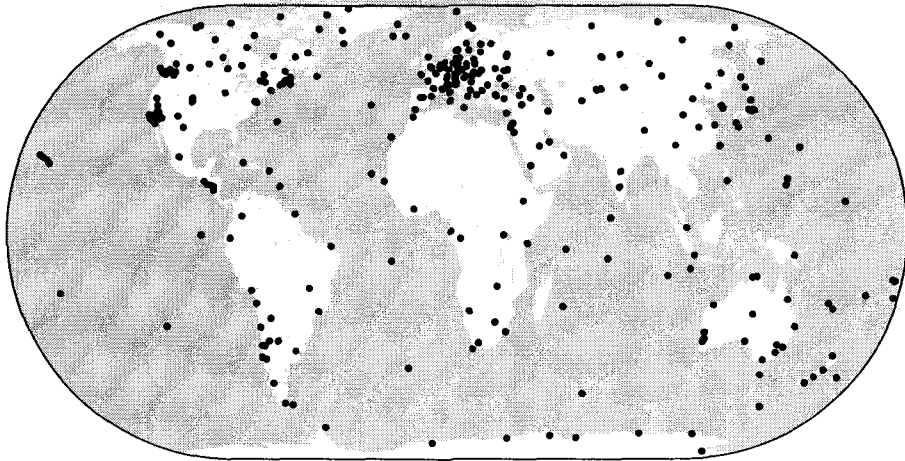


그림 1. 2007년 8월 26일 현재, IGS 지상국망의 분포도(<http://igsceb.jpl.nasa.gov>).

## 1. 서 론

IGS(International GNSS Service)는 전 세계 200여개 이상의 기관이 참여하는 국제기구로서, GPS(Global Positioning System)와 GLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)의 지상국 망을 구축하고, 이 지상국들의 관측 자료를 이용하여, GPS와 GLONASS의 정밀 산출물들을 생성 및 배포한다. IGS의 산출물에는 위성의 궤도력, 시계오차, 지구 자전 계수 및 극축 운동 등이 있으며, 이들은 IGS 분석 센터들에 의해 산출된다. IGS 분석 센터는 CODE(Center for Orbit Determination in Europe), GFZ(GeoForschungsZentrum) 및 JPL(Jet Propulsion Laboratory) 등 총 10곳이 있다. IGS의 자료와 산출물들은 IGS 자료 센터를 통해 사용자에게 전달되며, IGS 글로벌 자료 센터는 우리나라의 한국천문연구원을 포함하여 총 4곳이 있다. IGS 분석 센터는 지상국들의 자료를 이용한 GPS 위성의 궤도결정을 통한 파라미터 추정 방식으로 산출물들을 생성한다. 이 논문에서는 IGS 산출물 생성을 위한 기초 연구로서 IGS 산출물 생성을 위한 지상국 선정에 관하여 연구를 수행하였다.

2007년 8월 26일 현재, IGS는 총 386개의 지상국을 운영하고 있으며, 이들 중 346개가 정상운영 중이다. 이들의 지리적 분포는 그림 1에 나타나 있으며, 북미 지역과 유럽 지역에 밀집되어 있고, 해양 지역과 북아프리카 및 남미 일부 지역에는 지상국의 분포가 희박함을 확인할 수 있다. 우리나라의 지상국 중에는 한국천문연구원의 대전 관측소와 국토지리정보원의 수원 관측소가 IGS 지상국에 등록되어 있다. GPS 위성의 궤도결정을 위하여, 340여개의 모든 지상국 자료를 사용할 경우 많은 시간이 소모되며, 자료의 품질이 좋지 않은 지상국이 다수 포함되어 있기 때문에, 적절한 지상국을 선정하는 것이 중요한 과제이다. 각 분석 센터들이 산출물 생성을 위해 이용한 지상국 정보는 GPS 주(GPS week) 별로 sum 파일로 생성되며, 이 파일은 글로벌 자료 센터를 통해 제공되고 있다. 그러나 분석 센터별로 사용하는 지상국과 지상국의 개수는 모두 다르고, 지상국 선정 과정에 대한 내용은 공개되지 않는다. 따라서 IGS 산출물과 같은 고정밀 산출물을 생성하기 위해서는 산출물 생성을 위한 지상국 선정에 관한 연구가 선행되어야 한다.

Choi(2003)은 Jason-1 위성의 정밀궤도결정을 위한 지상국 선정에서, 지상국의 개수, 지상국의

성능 및 분포를 고려하였다. 지상국 개수에 따른 궤도 정밀도를 비교하여 최적의 지상국 개수를 얻었고, 지상국의 성능을 고려하기 위해 지상국 좌표의 정밀도, 자료의 품질 및 이중차분 관측개수를 사용하였다. 지상국 분포의 균일성을 측정하기 위해 지구를 구형이라 하고, 지표면에 있는 지상국들을 각 면이 삼각형으로 되어 있는 다면체의 꼭지점으로 간주하였다. 분포의 균일성 척도가 되는 파라미터는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$u \equiv 1 - \sqrt{N} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}}{4\pi R^2} = 1 - \frac{N}{4\pi R^2} \cdot \sigma \quad (1)$$

여기서,  $N$ 은 다면체의 삼각형의 수를,  $S_i$ 는 세 점으로 구성된  $i$ 번째 구면 삼각형의 면적을,  $\bar{S}$ 는 모든 구면 삼각형의 평균 면적을,  $\sigma$ 는 구면 삼각형의 면적의 표준편차를 나타낸다. 구면 삼각형의 면적은 Girard 공식에 의해 구할 수 있으며, 식 (2)와 같다(Girard 1629, Zwillinger 1995).

$$S = R^2 \cdot E = R^2 \cdot (A + B + C - \pi) \quad (2)$$

여기서  $E$ 는 구형 초과량(spherical excess)이라 불리며, 평면 삼각형의 경우 0인 값을 갖는다. 또한  $A, B$  및  $C$ 는 구면 삼각형의 세 내각이며, 이들의 합은 항상  $180^\circ$ 보다 크기 때문에 식 (2)의  $S$ 는 항상 양의 값을 갖는다. 이상적으로 균일한 분포를 갖는 지상국들의 경우 식 (1)에서  $u = 1$ 인 값을 갖는다.

저궤도 위성의 운동학적 정밀궤도결정(kinematic precise orbit determination)에서는 자료의 공백으로 정밀도가 낮아지는 단점이 있다. 이러한 단점은 의사위성(pseudolite)을 또 다른 저궤도 위성 과 지상국에 배열함으로써 극복될 수 있다(Grejner-Brzezinska, Hong, & Bae 2004). Bae(2005)는 의사위성의 최적 분포를 위하여 Taylor-Karman 구조(TK-구조)를 적용하고, TK-구조로부터 정의되는 기준행렬(criterion matrix)과 여행렬(cofactor matrix)의 차이를 가장 작은 값을 갖도록 하는 지상국을 선정하기 위해 SOD(Second Order Design)를 사용하여, 의사위성의 분포가 균일하도록 하였다. 이 과정은 2.3절에서 자세히 설명했다.

이 연구에서는 IGS 산출물 생성을 위한 기초 연구로서, 자료의 품질과 분포에 따라서 여러 지상국 망을 생성한 후, 각 지상국 조합에 대하여 GPS 위성의 궤도력을 산출 및 비교하였다.

## 2. 지상국 선정

이 연구를 수행한 기점은 임의로 선정된 2007년 45DOY(Day of Year)이며, 이 날 관측 자료가 존재하는 IGS 지상국의 개수는 324개이다. 지상국 선정을 위해서는 지상국의 개수, 지상국의 성능 및 분포를 고려해야 한다(Choi 2003). 2.1절에서는 최적의 지상국 개수를 선정하였으며, 2.2절에서는 지상국의 성능에 대하여, 2.3절에서는 균일한 지상국 분포에 대해서 언급하였다. 2.4절에서는 지상국 성능 중 자료의 품질과 분포에 따라 여러 지상국 조합을 생성하였다.

### 2.1 최적의 지상국 개수

지상국 개수는 정밀궤도결정 과정에서 관측개수에 영향을 미친다. 지상국 개수가 늘어감에 따라 관측개수 또한 늘어나고, 산출되는 궤도력의 정밀도에 영향을 미칠 수 있다. GPS 위성의 정밀궤도 결정에는 GIPSY-OASIS II(버전 4.03) 소프트웨어가 사용되었다. 아크 길이는 24시간이며, 사용된

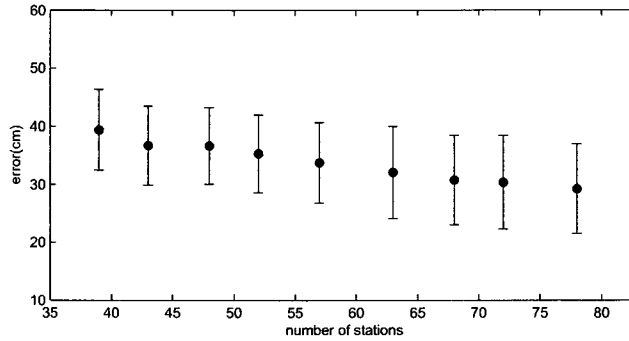


그림 2. 지상국 개수에 대한 GPS 위성의 궤도력 오차.

초기 궤도력은 방송 궤도력이다. 중력 모델은 JGM3  $12 \times 12$ 를 사용하였고, 3체 섭동으로써 JPL에서 제공하는 DE405를 사용하여, 태양, 달 및 행성들에 대한 섭동을 고려하였다. 또한, 태양 복사압에 의한 섭동을 고려하여 Y-바이어스를 추정하였다. 이 외에도 지구 극축 운동에 의한 섭동과 상대론적 섭동 등이 고려되었다. 추정된 파라미터로는 각 지상국들의 좌표와 GPS 위성의 시계오차, 지상국의 시계오차, 대류층 지연오차 및 지구자전계수(ERP) 등이 있다. 기준 좌표계로는 IGS05가 사용되었다.

그림 2는 지상국 개수에 따른 GPS 위성의 산출 궤도력 오차 변화를 나타낸 그림이다. 이 궤도력 오차는 IGS 최종 궤도력에 대한 PRN별 RMS 오차를 평균한 값이다. 지상국 개수는 4~6개 간격으로 39개부터 78개까지 분포한다. GIPSY-OASIS II가 수용할 수 있는 행렬의 크기의 제한으로 78개보다 많은 지상국 개수는 고려하지 않았다. 지상국 개수가 늘어감에 따라 산출된 GPS 위성의 궤도력 오차는 작아지므로, GPS 위성의 궤도력을 산출하기 위해 78개의 지상국을 사용하였다.

## 2.2 지상국 성능

지상국의 성능을 가능하는 요소로는 지상국 좌표 오차, 자료의 품질 및 관측개수를 들 수 있다(Choi 2003). ITRF2000의 경우 BILI, CHWK, DRAG 및 IENG와 같은 지상국들은 10cm 이상의 오차를 나타낸다. 그러나 ITRF2005와 IGS05, 두 기준 좌표계에서는 모든 지상국의 위치 오차는 mm 수준으로, 안정된 오차를 나타낸다. 따라서 지상국의 성능은 관측 개수를 포함한 자료의 품질로 평가하였다.

자료 품질을 판단하기 위해 관측개수, 사이클 슬립 수 및 L1과 L2 반송파에 대한 의사거리의 다중경로오차 등 4개의 파라미터를 고려하였으며, 각 파라미터 값을 구하기 위해 TEQC 프로그램을 사용하였다. 지상국의 자료 품질 분석은 해당날짜(2005년 45DOY) 이전의 45일치 관측 자료에 대하여 수행되었으며, 각 파라미터의 평균값과 표준편차를 사용하였다.

그림 3은 지상국들의 관측 자료에 대한 정보를 나타내며, 가로축은 해당 파라미터의 값이 작은 순서를 나타낸다. 각 파라미터는 45일 동안의 자료 값을 평균한 것이며, 표준편차는 오차 막대로 나타내었다. 그림 3a는 IGS 지상국들의 관측개수를 나타낸 것이다. 화살표로 표시한 지상국은 관측개수의 평균값이 17.76으로 예비 지상국에서 제외되었다. 사이클 슬립 및 L1, L2 다중경로 오차의 경우,

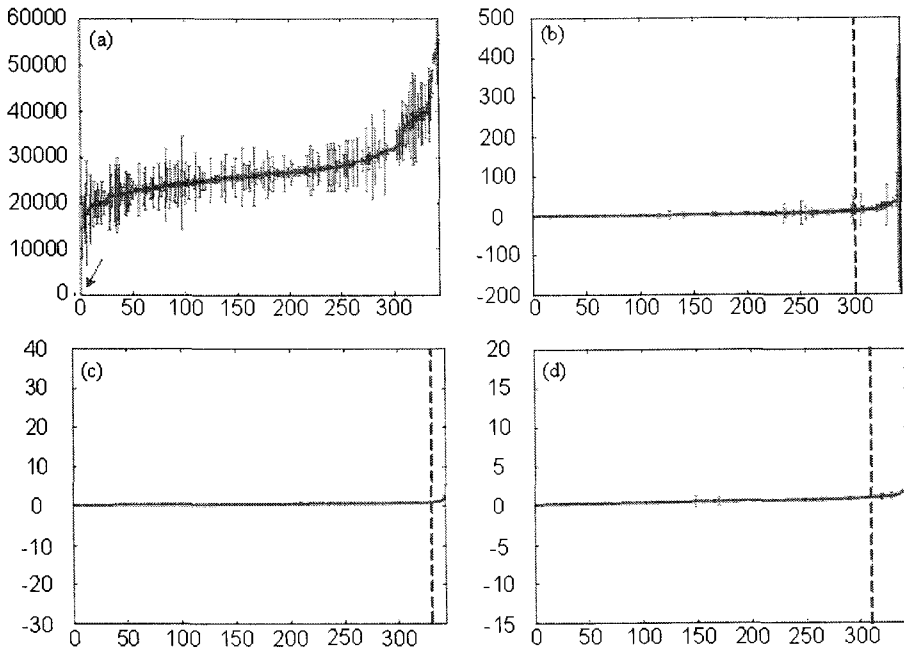


그림 3. 2007년 45 DOY의 IGS 지상국 관측 자료 정보. (a) 관측개수, (b) 사이클 슬립수, (c) L1 의사거리에 대한 다중경로 오차, (d) L2 의사거리에 대한 다중경로 오차.

그래프의 기울기의 변화가 급격히 변하는 지점을 자료 품질을 가늠하는 기준으로 하였다. 그림 3b는 사이클 슬립수를 나타낸 것으로서, 관측개수에 대한 사이클 슬립의 개수의 비에 1000을 곱한 수치를 나타낸다. 이 수치가 12 이상인 지상국들을 제외시켰으며, 제외된 지상국은 점선으로 표시된 지상국을 포함하여 우측에 분포한 지상국들이다. 또한, 이들 외에도 표준편차가 10 이상 되는 지상국들은 제외되었다. 그림 3c와 그림 3d는 각각 반송파 L1과 L2의 다중경로 오차를 나타낸다. 다중경로 오차가 1m가 넘는 지상국들이 제외 되었으며, 제외된 지상국들은 점선으로 표시된 지상국 우측에 분포한다. 특히, 그림 3d에서 표준편차가 0.45 이상인 지상국 두 곳은 제외되었다.

이와 같은 과정을 거쳐 선택된 예비 지상국들은 총 211개이며, 그 분포는 그림 4와 같다. 북미 지역과 유럽 지역에는 밀집된 분포를 보이며, 아프리카와 남미 지역 등에는 희박한 지상국 분포를 보인다. 이와 같은 분포는 그림 1과 같이 IGS 지상국들의 분포에 기인한다.

### 2.3 지상국 분포

고른 분포를 갖는 지상국을 선정하는 방법으로써, 첫 번째로 난수 생성기를 이용한 방법을 들 수 있다. 위도가 높아질수록 경도 간 간격은 좁아지게 되므로, 단순 난수 생성기를 사용한다면, 위도가 높아질수록 밀집된 분포를 얻게 된다. 그러나 Marsaglia(1972)와 같이 매개변수를 이용하면, 구 표면에 고른 분포를 갖는 점들의 집합을 얻을 수 있으며, 점의 개수를 증가시킬수록 그 분포가 더욱 고르게 된다. 두 번째로써 앞서 설명한 지상국을 하나의 꼭지점으로 하는 구면 삼각형의 면적을 이용한 방법(Choi 2003)을 들 수 있으며, 세 번째로는 TK-구조를 이용한 방법을 들 수 있다. 첫 번째 방법

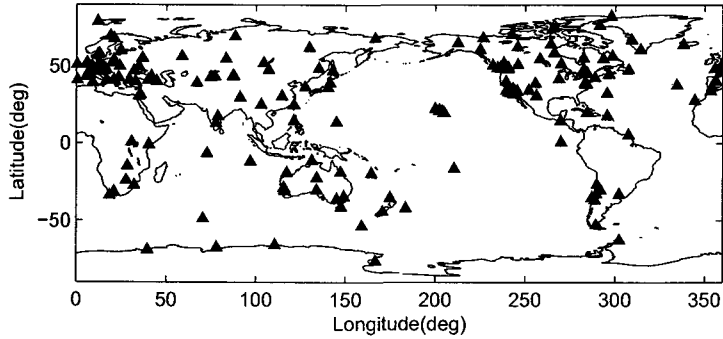


그림 4. 예비 지상국들의 분포.

은 실제 지상국이 임의로 분포하는 것이 아니라 지표면에 고정되어 있기 때문에 적절치 못하다. 구면 삼각형을 이용한 두 번째 방법은 결과적으로 비교적 고른 분포를 갖는 지상국 분포를 갖게 되지만, 200 ~ 300여개에 달하는 지상국들의 모든 조합에 대하여 분포 파라미터  $u$ 를 구해야 하므로, 많은 시간이 소요된다. 또한 지구를 구로 가정한 방법이기 때문에 지구가 타원체임을 고려한다면, 적도 지방의 구면 삼각형들의 면적은 극지방의 구면 삼각형에 비해 상대적으로 더 큰 값을 갖게 되어 결과에 다소 오차를 초래할 수 있다. 이에 비해 세 번째 방법은 실제 공간 좌표를 사용하고, 상대적으로 적은 시간이 소요된다.

Grafarend(1972)는 이상적인 지상국망의 조건으로 지상국의 위치 오차의 균질성과 등방성을 제시하였다. 따라서 이상적으로 균질하고 등방한 지상국망은 같은 크기의 원형 오차 타원을 만들게 되며, 공분산 행렬이 TK-구조를 갖는다. TK-구조를 갖는 망에서 점  $P_i$ 와 점  $P_j$ 의 여행렬의 기준 행렬은 식 (3)과 같다.

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \Sigma_m(s) & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_m(s) & 0 \\ 0 & 0 & \Sigma_m(s) \end{bmatrix} + [\Sigma_l(s) - \Sigma_m(s)] \cdot \frac{1}{s^2} [(r_i - r_j)(r_i - r_j)^T] \quad (3)$$

여기서  $r_i$ 와  $r_j$ 는 각각  $P_i$ 와  $P_j$ 의 위치벡터를 나타내며,  $s$ 는 두 점 사이의 거리,  $C_{ij}$ 는 두 점  $P_i$ 와  $P_j$ 의 이상적인 여행렬을 나타내며,  $\Sigma_l(s)$ 와  $\Sigma_m(s)$ 는 경도 공분산 함수 및 교차 공분산 함수를 각각 나타낸다. 또한 자기회기 과정의 상관함수는 식 (4)와 같다(Schaffrin 1985).

$$\Sigma(s) = \frac{1}{2}[\Sigma_m(s) + \Sigma_l(s)] = \sigma^2 \cdot \left(\frac{s}{d}\right) \cdot K_1\left(\frac{s}{d}\right) \quad (4)$$

여기서  $K_1$ 은 1차 제 2종 변형 베셀함수(modified Bessel function of the second kind and first order)이며,  $d$ 는 망의 특성 거리(characteristic distance)이다. 경도 공분산(longitudinal-covariance) 함수와 교차 공분산(cross-covariance) 함수는 식 (5)와 같다.

$$\begin{cases} \Sigma_l(s) = \frac{d}{ds} \Sigma_m(s) \\ \Sigma_m(s) = \frac{2}{s^2} \int_0^s x \Sigma(x) dx \end{cases} \quad (5)$$

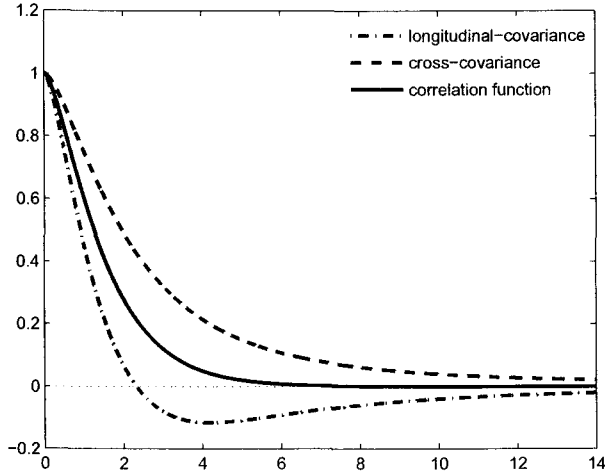


그림 5. 공분산 함수들의 그림.

Grafarend & Schaffrin(1979)은 1차 2-D Markov 과정을 가정하여, 식 (5)의 해석적인 해를 구하였으며, 식 (6), (7)과 같다.

$$\Sigma_l(s) = \sigma^2 \left( -\frac{4d^2}{s^2} + 2K_0 \frac{s}{d} + 4\frac{d}{s} K_1 \frac{s}{d} + 2\frac{s}{d} K_1 \frac{s}{d} \right) \quad (6)$$

$$\Sigma_m(s) = \sigma^2 \left( \frac{4d^2}{s^2} - 2K_0 \frac{s}{d} - 4\frac{d}{s} K_1 \frac{s}{d} \right) \quad (7)$$

여기서  $K_0$ 는 0차 제 2종 변형 베셀 함수(the modified Bessel function of the second kind and zero order)이다. 그림 5는 경도 공분산, 교차 공분산 및 상관 함수를 나타낸 그림이다. 세 함수 모두 대체로 두 점 사이의 거리가 멀어짐에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.  $s/d$ 의 값이 1보다 작으면, 식 (3), (6), (7)에서  $\frac{1}{\sigma^2} C_{ij}$ 이 단위 행렬에 가깝게 변하고,  $s/d$ 값이 10에 가까워져 감에 따라, 두 점  $P_i, P_j$ 가 비상관 관계(decorrelated)에 가깝게 된다. 따라서 특성 거리  $d$ 는 망의 최소 기선보다 짧아야 하며(Schmitt 1980), 망의 최대 기선은  $10d$ 보다 길어야 한다(Wimmer 1982).

최적의 망 구축 과정은 여행렬을 처리하는 방법에 따라, ZOD(Zero Order Design), FOD(First Order Design), SOD(Second Order Design) 및 TOD(Third Order Design) 등 네 가지로 분류된다. ZOD는 데이터(datum)을 변화시키며, 준 기준 행렬과 여행렬이 가장 근사한 값을 갖도록 하는 설계 방법을 말하며, FOD는 선형화된 도메인에서 설계 행렬(design matrix)을 이용하는 방법이다. SOD는 측정값의 가중치를 결정하는 과정이며, TOD는 SOD와 유사하지만, 준 여행렬을 기준 행렬에 근사시키고자 추가적인 측정값들의 가중치가 사용된다는 점에서 다르다(Bae 2005).

이 연구에서 최적의 지상국 선정을 위해 SOD가 사용되었다. SOD는 지상국들의 정보를 가지고 얻은 여행렬  $Q_\xi$ 와 이상적 망이 갖는 기준 행렬  $C$  사이의 차이를 가중치를 변화시킴으로써 최소가 되도록 하는 과정이다.

$$\|Q_\xi - C\| = \min. \quad (8)$$

여기서  $\xi$ 는 추정되는 점의 좌표를 의미한다. Gauss-Markov 모델에서 비상관 관측을 가정하면,  $y =$

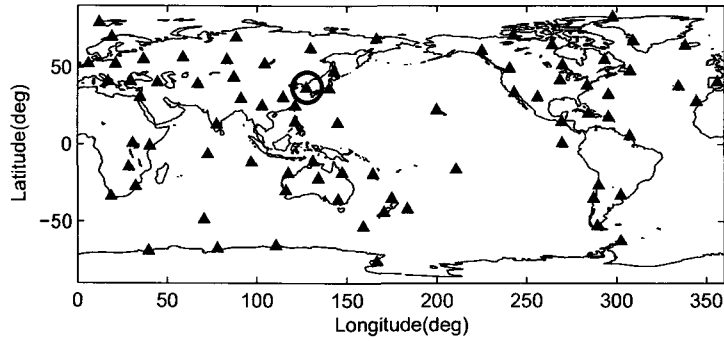


그림 6. DAEJ을 첫 번째 지상국으로 선택한 80개의 최적의 망.

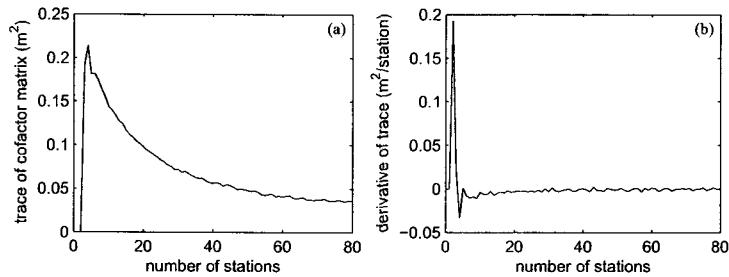


그림 7. (a) 여행렬의 대각합을 0이 아닌 고유값의 개수에 대하여 평균한 값. (b) 지상국 개수에 대한 (a)의 도함수값.

$A\xi + e, e \sim (0, \sigma_0^2 P^{-1})$ 와 같으며, 식 (8)은 식 (9)와 같이 변환 된다.

$$(ACA^T * ACA^T)\hat{p} = \text{vecdiag}(ACA^T) \tag{9}$$

여기서  $\hat{p}$ 는 가중치 벡터를 의미하며, \*는 Hadamard 곱을 나타낸다. 기선의 길이가 긴 지상국들 사이의 가중치는 기선의 길이가 짧은 지상국들보다 가중치가 작다. 따라서 최적의 분포를 갖는 지상국 선정을 위해서는, 가중치 벡터의 표준편차가 가장 작은 지상국을 선정해야 한다(Bae 2005).

그림 4의 예비 지상국들로부터 DAEJ(위도 36.4°, 경도 127.4°)을 첫 번째 지상국으로 선정하여 얻는 80개의 지상국 망이 그림 6에 나타나 있다. 사용된 기준 좌표계는 ITRF2005이다. 그림 4와 같이 아프리카 및 남미 지역과 해양 지역에는 지상국의 공백이 크며, 다른 지역에서는 고른 분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 지상국 선정 과정에서 가중치 벡터 원소들의 표준편차가 가장 작은 지상국을 선정하기 때문에, 지상국들이 균일하게 분포하는 특성을 갖게 된다. 이 논문에서 지상국 망을 선정하는 과정에 사용되는 측정값은 오직 지상국 간의 거리이기 때문에, 인접한 지상국들이 선정되어 국지적으로 밀집된 분포를 보일 수 있다. 그러나 북미 지역과 유럽 지역과 같이 밀집된 지상국들의 경우, 앞서 언급한 바와 같이 특성 거리의 범위를 정함으로써, 선택된 지상국과 근거리에 있는 지상국이 선정되는 것을 방지하였다. 또한 지구가 구형임을 감안할 때, 이상적인 지상국 분포의 경우, 그림 6과 같은 평면 그림에서 적도 지방 및 저위도 지방에 많은 지상국들이 분포해야 한다. 그러



표 1. 오차 타원들에 대한 통계.

	$a/b$	이심률
평균	1.15	0.26
표준편차	0.47	0.28
최대값	5.01	0.98
최소값	1.00	0.00

나 그림 1의 IGS 지상국의 분포와 그림 4의 예비 지상국의 분포에서, 적도 지방의 IGS 지상국 개수가 적기 때문에 위와 같은 결과를 얻게 된다.

그림 7a,b는 최적성을 가늠하는 그림이다. 여행렬의 대각합(trace)으로부터 최적성을 판단할 수 있다(Bae 2005). 그림 7a는 여행렬의 대각합을 0이 아닌 고유값(eigenvalue)의 개수로 나눈 값을 나타낸다. 지상국의 개수가 3부터 개수가 늘어남에 따라 값이 감소하는 경향을 보인다. 그림 7b는 여행렬의 평균된 대각합의 지상국 개수에 대한 도함수로 나타낸 것이다. 지상국 개수가 54개 이상일 때, 도함수값은 평균  $10^{-4} m^2/station$ 의 값을 갖게 되며, 최적성의 정도가 거의 증가하지 않는다.

표 1은 국지 좌표계에서의 오차 타원에 대한 통계를 나타낸다. 여기서 오차란 선택한 지상국들과 TK-구조를 이루는 점들의 차이를 나타내는 파라미터로서, 오차 타원으로부터 오차의 균질성과 등방성을 확인할 수 있다. 오차 타원을 얻기 위해서는 지구중심 좌표계로 이루어진 여행렬을 다음과 같이 국지 좌표계로 변환해야 한다(Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Collins 2003).

$$\begin{pmatrix} Q_{\xi} \end{pmatrix}_{neu} = R \begin{pmatrix} Q_{\xi} \end{pmatrix}_{xyz} R^T \quad (10)$$

여기서  $R$ 은 지구중심 좌표계를 국지 좌표계로 바꾸어주는 변환 행렬이며,  $(Q_{\xi})_{xyz}$ 는 지구중심 좌표계에서의 여행렬을,  $(Q_{\xi})_{neu}$ 는 국지 좌표계에서의 여행렬을 나타낸다. 표 1에서  $a$ 는 오차 타원의 장 반경을,  $b$ 는 단반경을 나타내며,  $a/b$ 는 두 반지름 사이의 비를 나타낸다.  $a/b$ 의 값과 이심률이 최대값 일 때의 경우를 제외하면, 오차 타원의 두 반지름의 비는 대부분 1에 가까운 값을 갖게 되어 1.15인 평균값을 갖는다. 이는 대부분의 오차 타원이 원에 가까운 모습을 하고 있음을 알려주며, 오차의 균질성과 등방성을 나타낸다.

## 2.4 지상국 선정

GPS 위성의 궤도력을 산출 및 비교하기 위하여, 78개의 지상국으로 구성된 12개의 지상국 망을 사용하였으며, 그 분포는 그림 8과 같다. 그림 8a~l에 해당하는 지상국 망을 각각 CASE 1 ~ 12로 명명하자. 또한 2.2절의 과정을 알고리즘 1이라하고 2.3절의 과정을 알고리즘 2라 하자. CASE 1에서 CASE 7까지는 두 알고리즘이 적용되지 않은 경우이다. 이 중 CASE 1은 북미 지역과 유럽 지역의 지상국 망으로 구성된 것이며, CASE 2는 아시아 지역과 북미 지역의 지상국 망으로 구성된 것이다. CASE 6과 CASE 7은 JPL에서 사용한 지상국 망이며, 이들을 기본으로 유럽과 북미 지역 등의 지상국들을 수정하여 CASE 3, CASE 4, CASE 5을 얻었다. CASE 8에서 CASE 11은 알고리즘 1과 알고리즘 2를 적용하여 얻은 지상국 망으로, 각각 유럽의 ONSA, 북미 지역의 ALBH, 남반구의 HOB2를 첫 번째 지상국으로 선정하여 얻은 망이다. CASE 12는 지상국의 성능 분석 과정인 알고리즘 1은 적용되지 않았으며, 분포만을 고려한 알고리즘 2만 적용되었다. 12개 지상국 망에 대한 정보와 분포는 각각 표 2와 그림 8에 나타나 있다.

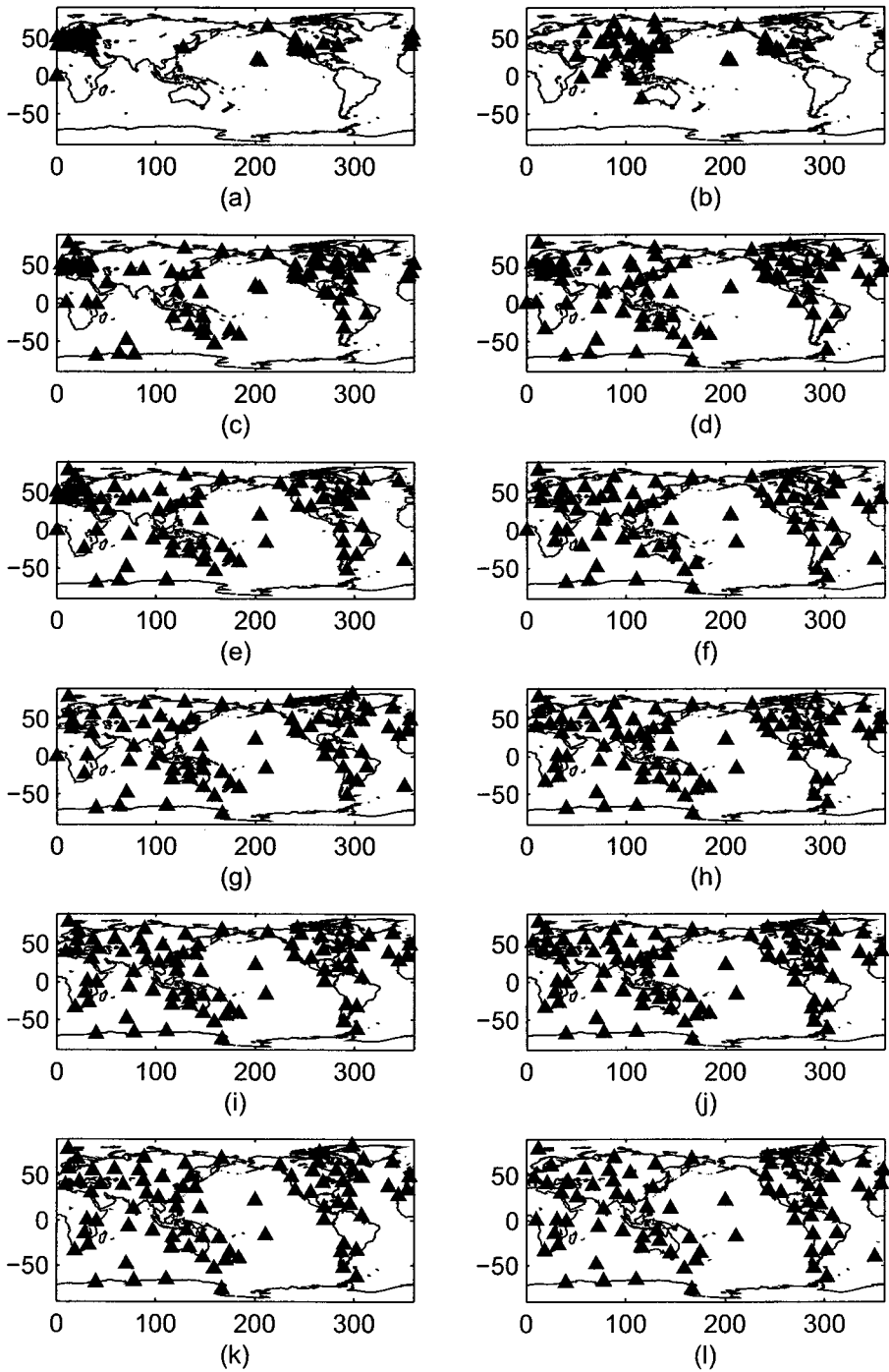


그림 8. GPS 위성의 궤도력 생성 및 비교를 위한 지상국 망의 분포. 각 그림의 가로축은 경도( $^{\circ}$ )를, 세로축은 위도( $^{\circ}$ )를 의미한다. 그림에서 (a)~(l)를 각각 CASE 1 ~ 12라 명명한다.

표 2. GPS 위성의 궤도력 생성과 비교를 위한 12개의 지상국 망의 정보. 비교란의 영문은 알고리즘 2를 적용하였을 때, 첫 번째로 선정된 지상국이며, 괄호 안의 숫자는 적용된 알고리즘이다.

CASE	기선길이(km)		궤도력 오차(cm)	비 고
	평균	표준편차		
1	5124.1	3755.8	55.02	북미 지역 및 유럽 지역
2	6124.5	4002.3	63.01	아시아 및 북미 지역
3	7759.9	3373.3	38.64	-
4	7915.8	3167.4	28.13	-
5	8082.1	3204.2	25.54	-
6	8109.5	3081.1	30.63	-
7	8147.7	3080.7	26.33	-
8	8238.9	3123.5	29.59	ONSA(1+2)
9	8242.4	3123.1	30.81	ALBH(1+2)
10	8254.0	3120.4	28.41	DAEJ(1+2)
11	8258.0	3133.6	29.73	HOB2(1+2)
12	8356.4	3074.7	27.46	DAEJ(2)

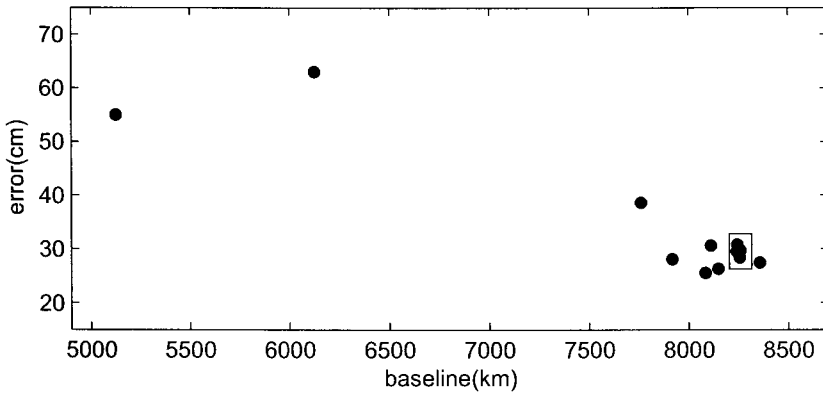


그림 9. 평균 기선과 궤도력 오차.

### 3. GPS 위성의 궤도력 산출

앞서 선정된 12개의 지상국 망을 이용하여, 해당 날짜(2007년 45DOY)에 대한 GPS 위성의 궤도력을 산출하였다. 궤도력 산출에 사용된 소프트웨어, 관측 모델 및 동역학 모델은 2.1절에서와 같다.

표 2는 12개 지상국 망에 대한 정보를 나타낸 것이고, 그림 9와 그림 10은 표 2에서 산출된 GPS 위성의 궤도력의 오차를 각각 지상국 망의 기선길이의 평균과 표준편차에 대하여 나타낸 그림이다. 궤도력의 오차는 IGS 최종 궤도력에 대하여 각 PRN별 RMS 오차를 평균한 값이다. 그림 9에서 평균 기선길이가 길수록 GPS 위성 궤도력 오차가 작아짐을 알 수 있으며, 평균 기선길이와 궤도력 오차의 상관계수는  $-0.91$ 로서, 높은 상관관계를 갖는다. 또한 그림 10에서 기선길이의 표준편차가 작을수록 궤도력 오차가 작아짐을 확인할 수 있으며, 상관계수는  $0.98$ 로서, 역시 높은 상관관계를 갖는다. 따라서 기선길이의 평균길이와 표준편차 모두 궤도력 오차와 높은 상관관계를 갖지만, 기선길이의 표준편차가 평균 기선길이보다 궤도력 오차와 더 밀접한 관계를 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 결국 그림 9와 그림 10으로부터 GPS 궤도력 산출을 위한 지상국 선정 과정에서 최적성이 고려되어

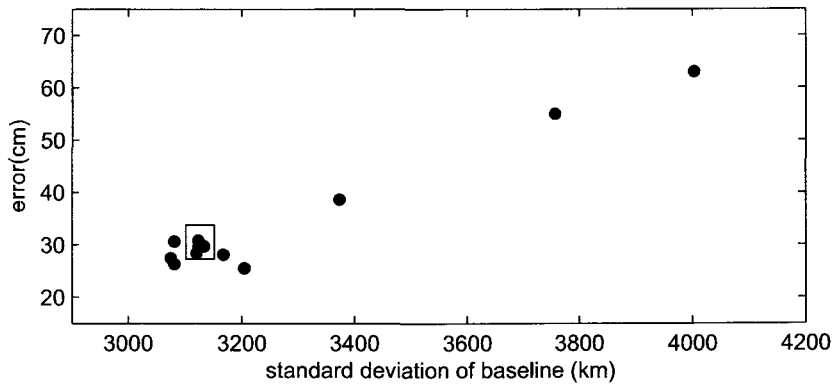


그림 10. 기선의 표준편차와 궤도력 오차.

야 한다. 또한 지상국 망의 개수를 늘려 평균 기선 및 표준편차와 궤도력 오차 사이에 특정 관계를 도출해낼 수 있으며, 원하는 궤도력 정밀도를 얻기 위한 지상국 망의 평균 기선길이나 표준편차의 범위를 구할 수 있다.

지상국의 분포가 고를수록 평균 기선길이는 길어지는 경향을 나타낸다. 기선길이의 표준편차는 지상국 망의 최대 기선길이가 짧을수록, 다시 말하면 국지적으로 한 곳에 밀집된 분포를 보일 경우 작아진다. 이와는 반대로 전 지구적으로 분포하지만 일부 밀집된 지상국들이 있을 경우는 커지게 되며, 이는 표 2와 그림 8a,b,c에서 확인할 수 있다.

그림 9와 그림 10에서 사각형 안에 표시된 점들은 알고리즘 1과 알고리즘 2를 적용 통하여 얻은 지상국 망들이다. 두 그림에서 이들보다 더 작은 궤도력 오차를 나타내는 지상국 망은 표 2로부터 CASE 4, CASE 5, CASE 7 및 CASE 12 등 총 4개임을 알 수 있다. 이러한 현상은 남대서양 지역과 아프리카 및 적도 근방의 남미 지역에 지상국을 포함하고 있기 때문이다. 이 지상국들은 알고리즘 1과정에서 제외된 지상국들로서 그림 4의 예비 지상국들에 포함되어 있지 않다. 따라서 이 지상국들은 지상국의 성능보다 지상국의 분포에 우선순위를 갖는 지상국들이다. CASE 10과 CASE 12는 모두 DAEJ를 첫 번째 지상국으로 선정하여 얻은 지상국 망으로서, 이 중 CASE 12는 알고리즘 1을 거치지 않은 지상국 망이며, 평균 기선길이나 기선길이의 표준편차로 볼 때, 가장 좋은 분포를 갖는 지상국 망이다. 궤도력의 오차는 CASE 12가 CASE 10보다 더 작게 나왔다. 이러한 사실들로 미루어 고정밀 산출물 생성을 위해서는 지상국의 성능 검증 단계인 알고리즘 1에 대한 보완이 필요하다.

궤도력 오차가 가장 작은 지상국 망은 CASE 5로 나타났다. 그림 8e에서 CASE 5는 유럽 지역에는 밀집된 분포를 보이며, 아프리카 지역에는 상대적으로 큰 지상국 공백을 갖고 있다. 그럼에도 불구하고 CASE 5가 가장 좋은 궤도력 오차를 나타낸 이유는 전체적으로 낮은 궤도력 정밀도를 갖기 때문이다. 표 2에서 궤도력 오차는 25cm 이상이며, 이는 IGS 최종 궤도력 정밀도가 5cm 이하임을 감안할 때, 낮은 정밀도이다. 이렇게 낮은 정밀도를 나타내는 이유는 추정 파라미터의 초기값(a priori) 때문이다. 추정 파라미터의 초기값에 따라서 결과가 전역 극소(global minimum)값을 나타내지 않고 국부 극소(local minimum)값을 나타낼 수 있으며, 이 때문에 25cm 이상의 높은 궤도력 오차를 나타내는 것이다. 따라서 5cm 이하의 높은 정밀도의 궤도력을 얻기 위해서는, 관측 모델과 동역학 모델

에 포함된, 추정 파라미터의 초기값의 변화에 따른 궤도력 오차의 변화 추이를 분석하고 모델의 미세조정이 필요하다.

#### 4. 결 론

IGS 산출물 생성을 효율적으로 하기 위해서는 최적의 지상국 조합을 선정해야 한다. 최적의 지상국을 얻기 위해서는 우선 최적의 지상국 개수를 선정해야 한다. 이후 각 지상국들의 성능을 검증한 후, 최종적으로 고른 분포를 갖도록 지상국을 선정해야 한다. 지상국 개수를 39개에서 4~6개 간격으로 78개까지 GPS 위성의 궤도결정을 수행한 결과 78개에서 가장 작은 궤도 오차를 나타내었다. 또한 IGS 지상국 성능을 가늠하기 위해 자료의 품질을 고려하였으며, 자료의 품질 조사에는 관측개수, 사이클 슬립 수 및 L1과 L2에 대한 의사거리 다중경로 오차 등 4개를 고려하였다. 또한 고른 분포를 갖는 지상국 조합을 얻기 위하여, TK-구조에 가깝도록 지상국을 선정하였다.

지상국 선정이 GPS 위성의 궤도력에 미치는 영향을 조사하기 위해 총 12개의 지상국 망을 선정하였으며, 이들에 대해 GPS 위성의 궤도력을 생성 및 비교하였다. 12개의 지상국에는 자료 품질 조사 과정을 거친 최적의 분포를 갖는 4개의 지상국 망과 분포만을 고려한 지상국 망 1개 및 국지적으로 분포하는 지상국 망 3개를 포함한다. GPS 위성의 궤도력 생성 결과, 궤도력의 오차는 지상국 망의 평균 기선길이가 길수록, 기선길이의 표준편차가 작을수록 궤도력 오차가 작아짐을 확인할 수 있었다. 또한 궤도력 오차와 기선길이의 평균값, 표준편차의 상관계수를 구한 결과 각각 -0.91과 0.98을 얻었다. 따라서 평균과 표준편차 모두 궤도력 오차와 높은 상관관계를 갖고 있으며, 기선길이의 표준편차는 평균값에 비해 더 밀접한 관계를 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

자료의 품질과 분포를 고려한 지상국 망보다 더 좋은 궤도력 오차를 갖는 지상국 망은 총 4개였으며, 이유는 자료 품질 조사에서 제외된 지상국들 중 상대적으로 지상국 분포가 적은 남대서양 지역과 아프리카 및 남미 지역의 지상국들이 포함되어 있었기 때문이다. 또한 가장 작은 궤도력 오차를 나타낸 지상국 망은 유럽 지역에 지상국이 밀집된 경향을 나타내었다. 이러한 지상국 망이 가장 좋은 궤도 정밀도를 나타낸 것은 전반적으로 궤도력 오차가 크다는 점에서 원인을 찾을 수 있다. 추정 파라미터의 초기값에 따라 최종 수렴값은 전역 극소가 아니라 국부 극소점에 달할 수 있으며, 이 때문에 정밀도가 떨어지게 된다.

일반적으로 IGS 지상국들은 여느 지상국들에 비해 양질의 자료를 제공한다고 알려져 있다. 이 때문에 자료 품질 조사 과정에서 많은 수의 지상국이 제외된다면, 지상국 망의 분포에 공백이 생기게 되어 오히려 궤도력의 정밀도를 떨어뜨리게 된다. 또한 추정 파라미터들의 초기값을 변화시키며 그 추이를 분석한다면 5cm 이하의 오차를 갖는 궤도력을 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 자료의 품질 및 지상국의 분포와 궤도력 오차와의 관계를 도출해낼 수 있다.

#### 참고문헌

- Bae, T.-S. 2005, in Proceedings of the 2005 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, p.515
- Choi, K.-R. 2003, PhD Thesis, University of Texas at Austin
- Girard, A. 1629, Invention Nouvelle En Algebra (Netherlands: Amsterdam)

- Grafarend, E. 1972, Genauigkeitsmae geodätischer Netze (München: Verlag der Bayer. Akad. d. Wiss.)
- Grafarend, E. & Schaffrin, B. 1979, Kriterion-Matrizen I - zweidimensionale homogene und isotrope geodätische Netze, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 104, 133
- Grejner-Brzezinska, D., Hong, C., & Bae, T. 2004, in *Proceedings of the ION National Technical Meeting*, p.652
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J. 2003, *GPS: Theory and Practice*, 5th edition (Wien: New York: Springer-Verlag), p.273
- Marsaglia, G. 1972, *Ann. Math. Stat.*, 43, 645
- Schaffrin, B. 1985, Network Design. In: Grafarend/Sansó, *Optimization and Design of Geodetic Networks* (Berlin: New York: Springer-Verlag), p.548
- Schmitt, G. 1980, Second Order Design of Free Distance Networks Considering Different Types of Criterion Matrices, *Bulletin Geodesique*, 54, 531
- Wimmer, H. 1982, Ein Beitrag zur Gewichtsoptimierung geodätischer Netze (München: the German Geodetic Commission), DGK C-269, 254
- Zwillinger, D. 1995, *CRC Standard Mathematical Tables and Formulae* (Boca Raton: CRC Press)