

# 가중변수법에 의한 국가좌표계 변환요소의 산정 National Datum Transformation Parameters of South Korea Using Weighted Parameter Constraints

李 榮 鎮\*

Lee, Young-Jin

## 要 旨

최근 LIS/GIS측량과 지적조사 등의 분야에서는 위성측위시스템(GPS)의 활용이 보편화됨에 따라 지역측지계에서 지구중심좌표계로 변환하기 위한 국가변환요소를 필요로 하고 있다. 이 논문에서는 벡셀타원체 기준의 한국측지좌표와 WGS84 좌표간의 변환요소를 가중변수에 의한 최소제곱해법에 따라 결정하였다. 국가기준점망의 31개 측점에 대한 GPS관측으로부터 결정된 지심3차원좌표의 GPS성과와 실용성과 또는 정밀1차성좌표간의 기준계 변환요소는 표준편차 1미터 이내이며 벡셀지오이드고를 고려할 때 GPS기선해석을 위한 초기좌표결정과 중측척지도의 변환과 LIS/GIS 데이터베이스의 수정에 이용할 수 있는 것으로 분석되었다.

## ABSTRACT

The need of transformation parameters from local geodetic datums to a geocentric coordinate system is becoming more common, with the increasing application of satellite positioning techniques to LIS/GIS survey with cadastral management. In this paper, the national transformation parameters between the Korean geodetic coordinates which is based on the Bessel 1841 ellipsoid and the WGS84 ellipsoid are determined by the least square methods with weighted parameter constraints. Three-dimensional geocentric coordinates are based on GPS observation at 31 stations in the geodetic network, the datum parameters are computed within a standard deviation of less than 1 meter. In South Korea, the national transformation parameters with Bessel geoid-heights are useful for GPS baseline processing and for middle-scale map/database transformation.

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

기준좌표계(reference coordinate system)에서 3차원 좌표계의 변환이 필요한 경우로는 다음 세 가지를 들 수 있다.

- ① 3차원 망조정 성과를 실용성과로 변환할 경우
- ② GPS 기선해석에서 초기좌표를 결정할 경우
- ③ 중 소측척 지도를 새로운 기준계로 변환할 경우
- ④ LIS/GIS 데이터베이스의 위치정보를 새로운 기준계로 변환할 경우

여기서 ①의 경우에는 낮은 등급의 측량에서 활용될 수 있으며 측량작업이 실시된 국부지역에 대하여 두 기준계의 공통점으로부터 변환요소를 결정한 다음에 다른 점들을 변환해 내는 방법이다.

그러나 ②, ③, ④의 경우에는 국가변환요소를 사용하여 변환하는 것이 효과적이므로 적절한 정확도를 유지할 수 있는 변환요소가 결정되어야 하며, 특히 종합적인 LIS/GIS의 데이터베이스 구축을 위한 자료획득을 위해 그 필요성이 인정되고 있다.

LIS/GIS측량분야에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 변환방법은 등각변환(similarity transformation)이며, 이 방법은 망의 형상이 유지되지만 기선의 길이와 측점의 위치가 축척비율에 따라 변화하는 특징을 갖고 있다.

\* 正會員, 慶一大學校 工科大學 測地工學科 助教授

국내에서도 이 방법에 의한 변환요소를 결정하려는 연구가 수행된 바 있으며<sup>1,3)</sup>, 벡셀지오이드를 반영하는데 어려움이 있었고 아울러 삼각점에 대한 전국규모의 정확도를 추정하는 어려움 때문에 중량을 반영하지 못하였다. 반면에 지구중심계의 중력지오이드에 대한 연구는 많은 진전을 이루어 EGM96을 활용하기에 이르렀다.<sup>4,10)</sup>

그러나, 측지계간의 변환모델을 결정하는 데에는 기설측지망의 정오차의 모델링과 정확도의 평가가 어렵고 변환모델에서 변환요소간에 서로 높은 상관관계를 갖는 등의 어려움을 안고 있다.

이 논문에서는 지구중심좌표계와 현행 측지계간의 변환모델을 결정하기 위하여 가중변수(weighted parameter constraints)에 의한 최소제곱법을 사용하여 Bursa-Wolf모델과 Molodensky-Badekas모델에 의한 변환요소를 산정하고 LIS/GIS 등의 분야에 대한 활용성을 분석하는데 연구의 목적이 있다.

## 1.2 변환모델

그림 1에서 x, y, z축에 대하여 각각  $\omega$ ,  $\theta$ ,  $\kappa$ 만큼씩 순서대로 시계방향으로 회전시킨다면 기준계 A와 기준계 B간의 좌표계변환은 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>4,15,18-21)</sup>

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B = R_x R_y R_z \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_A = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_A \quad (1)$$

여기서 R의 요소는 여러 문헌에 제시되어 있다. 기준계 A와 기준계 B간의 원점이동( $x_0, y_0, z_0$ )이 있고 축척 변화( $1+\lambda$ )가 있다고 한다면 변환된 좌표는 식 (1)로부터 다음과 같이 된다. 즉,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + (1+\lambda)R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_A \quad (2)$$

기준계 A가 위성좌표계라고 할때 기준계 B는 지역좌표계가 되며 그 반대의 경우에는 회전행렬 R이 직교행렬이므로  $R^{-1}=R^T$ 로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_A = (1+\lambda)^{-1} R^T \left( \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

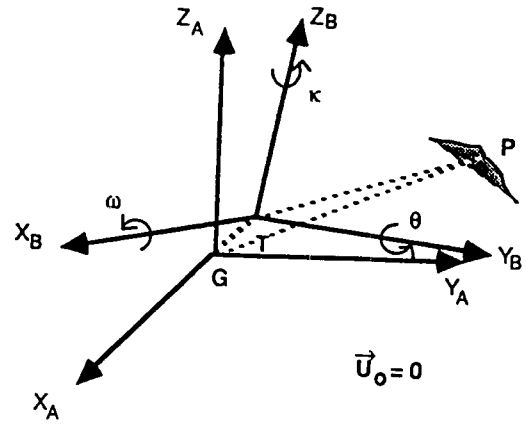


그림 1. Bursa-Wolf모델

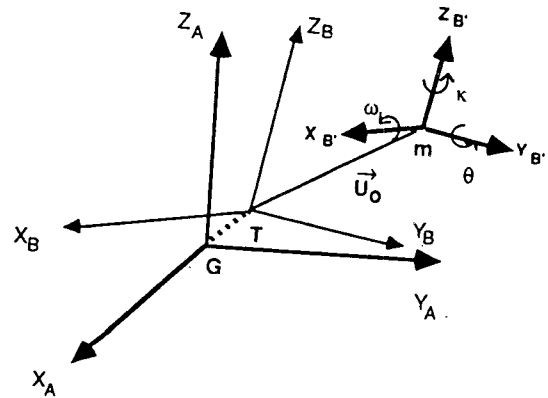


그림 2. Molodensky-Badekas모델

식 (3)에 의한 변환을 Bursa-Wolf모델이라고 하며, 지구전체로 볼때 극히 부분적인 지역에만 국한되므로 변환요소간의 상관계수가 커지게 된다.<sup>23)</sup> 예를 들면 z축에 대한 회전은 x축과 y축의 이동을 유발하게 되는 특징이 있는데 이는 회전중심(지구의 중심)이 멀기 때문이다(그림 1).

Bursa 모델을 개선하여 측점들의 무게중심 또는 측지원점에서 회전을 하는 방법이 Molodensky-Badekas 모델이며, 이 모델은 회전과 이동사이의 상관계수가 크게 감소하게 된다(그림 2).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0' \\ y_0' \\ z_0' \end{bmatrix} + (1+\lambda)R \begin{bmatrix} x-x_M \\ y-y_M \\ z-z_M \end{bmatrix}_A \quad (4)$$

여기서, 망의 무게중심 또는 측지원점의 좌표가 ( $x_M,$



$$= \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (16)$$

(3m × 1)

측정량인 좌표에 대응되는 공분산행렬은 (6m × 6m)의 크기로서  $Q_i = Q_u + Q_w$ 이며, 변환요소의 공분산행렬은 (7 × 7)의 크기로서  $Q_w$ 이다.

## 2.2 가중변수에 의한 최소제곱해

Lagranger 상관계수  $k$ 를 이용하여 최소제곱법의 원리를 적용하면<sup>21,27,28)</sup>,

$$\Phi(V, X, k) = V^T P V + X^T P_x X - 2k^T (AX + BV - b) = \min \quad (17)$$

따라서 편미분하여 0으로 두면 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial V} \right)^T = PV - B^T k = 0 \quad (18a)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial k} \right)^T = AX + BV - b = 0 \quad (18b)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial X} \right)^T = P_x V - A^T k = 0 \quad (18c)$$

식 (18a)로 부터  $V = P^{-1} B^T k$ 이므로 이 식을 식 (18b)에 대입하여 정리하면

$$\begin{bmatrix} -P_x & A^T \\ A & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서,

$$M = B P^{-1} B^T \quad (20)$$

식 (20)의 해는 분해행렬을 이용하여 다음과 같이 된다.

$$X = (P_x + A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} b \quad (21)$$

$$k = M^{-1} (AX - b) \quad (22)$$

또한, 식 (18a)와 식 (22)로 부터,

$$V = -P^{-1} B^T M^{-1} (AX - b) \quad (23)$$

식 (21)과 식 (23)의 결과는  $P_x = 0$ 일때 일반적인 최소

제곱해와 같게 됨을 알 수 있다. 또한 단위중량에 대한 사후분산값을 다음과 같이 된다.

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{6m - u + u_x} \quad (24)$$

여기서,  $m$ 은 공통점의 수,  $u$ 는 변환요소의 수(7),  $u_x$ 는 가중변환요소(weighted parameter)의 수이다.

공분산행렬의 경우에 식 (21)에 대응되는 값은 다음과 같이 유도된다. 즉,

$$Q_b = B P^{-1} B^T + A P_x^{-1} A^T = M + M_x$$

이므로

$$\begin{aligned} Q_x &= (P_x + A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} (M + M_x) \\ &= \{ (P_x + A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} \}^T \\ \therefore Q_x &= P_x^{-1} - (P_x + A^T M^{-1} A)^{-1} \end{aligned} \quad (25)$$

실제의 변환요소 계산에서는 사전에 계산된 초기값을 사용하므로

$$\begin{aligned} Q_x' &= \sigma_0^2 (Q_{xl} - Q_x) \\ &= \sigma_0^2 \{ P_x^{-1} - (P_x + A^T M^{-1} A)^{-1} \} \\ Q_x' &= (P_x + A^T M^{-1} A)^{-1} \end{aligned} \quad (26)$$

한편 측정량인 좌표에 대한 공분산의 전파는 앞서의 방법과 같은 과정에 따라 유도하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Q_i' &= \sigma_0^2 \{ P^{-1} + P^{-1} B^T M^{-1} A \left( \frac{Q_x'}{\sigma_0^2} \right) A^T M^{-1} P^{-1} \\ &\quad - P^{-1} B^T M^{-1} B P^{-1} \} \end{aligned} \quad (27)$$

앞에서 설명된 변환요소의 해법은 3차원좌표계로 처리되고 있으므로 경위도좌표계로 입력되거나 출력되어야 하는 경우에는 좌표전환을 필요로 하며 이에 대응되는 공분산행렬로 유도되어야 한다.

따라서 경위도좌표에 대응되는 공분산행렬  $Q_{\phi, \lambda, h}$ 는 3차원좌표에 대응되는 공분산행렬  $Q_{x, y, z}$ 로 전파시킬 수 있으며 그 역의 관계도 구할 수 있다. 즉, Jacobian 행렬  $C$ 를 사용하여

$$Q_{x, y, z} = C Q_{\phi, \lambda, h} C^T \quad (28)$$

$$Q_{\phi, \lambda, h} = C' Q_{x, y, z} C'^T \quad (29)$$

이 밖에도 한번 결정된 변환요소를 이용하여 다른 임

의의 점을 변환시킬 때에는 식 (2) 또는 식 (3)을 적용하게 되는데 식 (5)의 관계로부터 임의점 j에 대응되는 공분산의 전파는 다음과 같다.

$$w_j = a + (1 + \lambda) R u_j \quad (30)$$

$$Q_{w_j} = A_j Q_x A_j^T + (1 + \lambda_0) \bar{R} Q_{w_j} \bar{R}^T \quad (31)$$

(3×3) (3×7) (7×7) (7×3)                      (3×3) (3×3) (3×3)

실제의 문제에 있어서는 식 (17)에서의 좌표에 대한 사전분산값이 평가되어 있어야만 하는데 지역좌표계에 따른 기준점의 공분산행렬과 위성좌표계의 공분산행렬을 필요로 한다. 특히 기준점의 실용성과에 대한 평가는 상대오차의 개념이 아니라 측지원점에 대응되는 절대오차의 개념으로 국가기준점망의 평가를 전제로

하고 있음에 주의할 필요가 있다.

### 3. 국가변환요소의 산정

#### 3.1 데이터

본 연구에서 우리나라 국가변환요소를 산정하기 위하여 사용한 데이터는 1996년도에 국립지리원에서 정밀1차기준점측량 용역사업으로 시행된 전국망 31점에 의한 것이며(그림 3 참조), 이와 관련되는 데이터의 종류는 다음과 같다.

- ① GPS측량 3차원성과(WGS84)
- ② 정밀1차기준점망 조정성과(Bessel)
- ③ 현재 고시된 실용성과(Bessel)

표 1. 삼각점의 실용성과와 지오이드고

삼각점 번호	실 용 성 과			벡셀지오 이드고
	위 도	경 도	표 고	
AS 26	36 46 40.253	126 55 42.947	184.27	- 63.28
CJ 11	36 34 47.300	127 25 17.193	291.30	- 59.16
HC 25	35 35 01.674	128 09 41.235	244.25	- 50.10
HN 23	34 38 41.557	126 31 59.516	47.74	- 53.48
HS 11	36 11 31.594	126 53 01.291	214.97	- 59.94
KF 21	34 41 04.399	127 15 15.355	157.03	- 50.20
KG 21	35 14 44.146	126 52 28.539	60.93	- 55.12
KN 26	37 45 55.755	128 51 02.596	148.78	- 61.26
MS 21	35 13 14.016	128 36 48.103	297.78	- 46.92
NH 34	34 54 32.814	127 54 18.788	481.52	- 48.25
NY 21	37 58 54.538	127 47 46.152	784.65	- 66.39
OM 25	37 02 54.406	127 54 13.405	105.51	- 59.21
PA 11	35 43 51.476	126 38 27.327	287.96	- 58.87
PG 24	35 16 46.977	129 15 09.326	100.31	- 45.12
PK 22	35 55 50.909	129 26 12.793	291.33	- 47.69
SC 21	38 10 39.369	128 30 39.017	526.41	- 67.43
SH 21	37 26 41.880	129 11 04.359	137.54	- 58.14
SJ 23	36 21 08.441	128 06 45.611	92.65	- 54.18
SUWO	37 16 23.153	127 03 22.429	67.50	- 64.82
TJ 27	36 45 15.500	126 29 59.575	109.05	- 65.45
UB 12	35 17 26.211	127 32 03.228	1502.13	- 51.61
UC 22	36 57 01.158	129 25 06.095	57.07	- 54.27
US 25	36 18 57.136	128 36 24.321	291.90	- 52.02
WG 21	35 58 31.138	128 19 54.737	468.33	- 51.27
YC 21	35 58 39.844	128 55 57.592	155.10	- 49.30
YD 23	36 22 08.046	129 23 38.239	150.16	- 50.28
YG 23	36 52 58.429	128 32 52.303	376.72	- 55.48

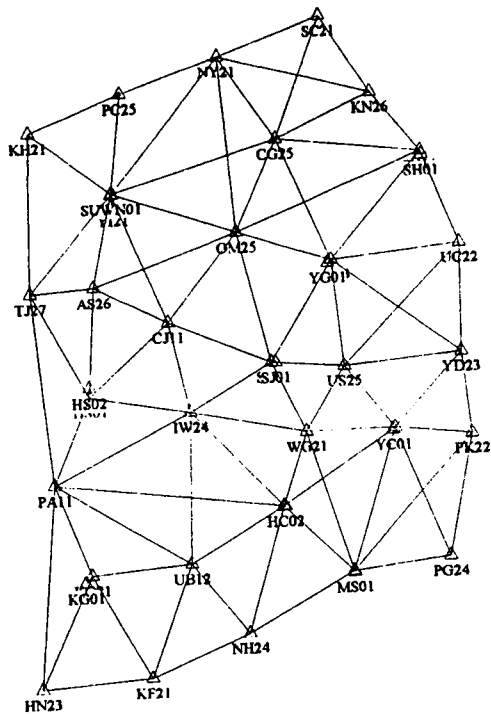


그림 3. GPS관측망도(전국망)

④ 벡셀 지오이드고

GPS측량은 “GPS에 의한 정밀기준점측량 작업규정”에 따라 실시된 것으로서 전국망을 2세션(반복)으로 관측하여 조정하였는데 본 연구에서는 변환요소의 결정을 목적으로 하였기 때문에 2세션중에서 1세션의 결과만을 활용하였다.

GPS수신데이터는 모두 RINEX포맷으로 변환하여 TRIMVEC 소프트웨어로 기선해석을 실시하고 소정의 점계산을 실시하였으며 수원원점 1점을 고정하여 3차원망조정을 실시하여 WGS84계에 의한 3차원좌표를 산출하였다. 고정점인 수원원점은 1992년도 한일 협력사업에 따라 수원-동경간의 상대측위에 의해 결정된 수치를 사용하였으며 이를 초기좌표로 하여 전국망의 기선해석이 실시되었다.

한편 Bessel성과인 실용성과는 기존에 고시되어 있는 실용성과와 1994년도의 측지연구에서 산정된 정밀 1차망 성과를 사용하였는데 GPS성과와 함께 모두 국립지리원으로부터 제공받았다. 총 31점의 성과중에서 측지부대에서 재설한 KH21, PC25 삼각점, 그리고 정밀 1차성과가 산정되어 있지 않은 CG25, IW24 삼각점을 제외하였으며, 표 1은 그림 3에 대응되는 실용성과

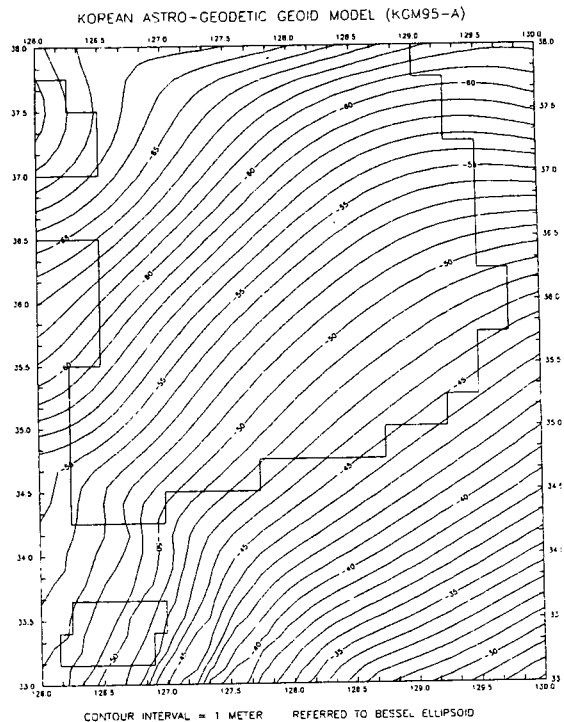


그림 4. 남한지역 천문지오이드 지도(KGM95-A)<sup>7)</sup>

와 벡셀지오이드고를 보여주고 있다.

또한 정밀 1차성과는 EDM방식에 의한 정밀 1차기준점망에 대하여 변동점을 제외한 완전점중에서 적합되는 안정점을 고정점으로 하는 전국규모의 동시조정된 성과이다. 벡셀지오이드고는 이영진(1995)의 연구<sup>7)</sup>에서 산정된 수치를 사용하였으며 이는 1947년부터 1979년까지 관측된 일본 국토지리원의 354점과 1973년부터 현재까지 국립지리원에서 관측된 40점을 혼합하여 결정한 천문측지 지오이드고이다. 그림 4에 남한지역의 천문지오이드 지도(KGM95-A)를 나타냈다.

3.2 전산처리 및 결과

국가변환요소의 결정을 위한 전산처리는 가중변수에 의한 최소제곱해법을 사용하였으며 가중변수를 적절히 선택하여 다음의 여러 경우별로 해를 구하였다.

- ① 7-변수 (측척, 3회전, 3이동)
- ② 6-변수 (3회전, 3이동)
- ③ 4-변수 (측척, 3이동)
- ④ 3-변수 (3이동)

가중변수에 의한 해법은 변수의 초기값을 부여하고 공분산행렬의 구성에서 표준오차의 크기를 작게 부여

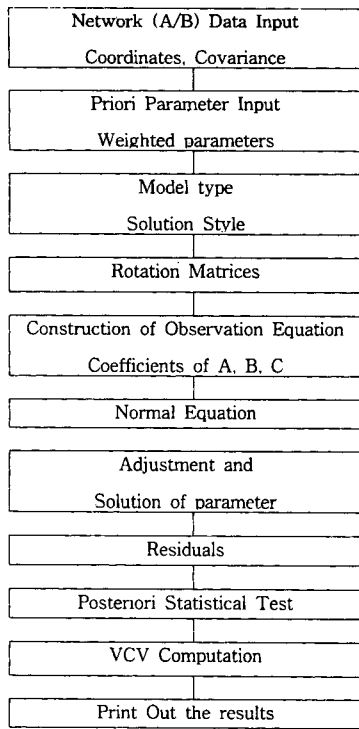


그림 5. 전산처리의 흐름도

하여 결과에 영향이 없도록 하였다. 또한 변환은 GPS 성과와 실용성과 또는 1차성과간의 두 가지 경우에 대하여 해를 구하였으며 실용성과와 1차성과에서는 모두 +10.405" 및 벡셀지오이드고를 고려하였다.

변환모델은 Bursa-Wolf모델(이하 B-W모델이라 함.)과 Molodensky-Badekas모델(이하 M-B모델이라 함.)의 두 가지 경우에 대하여 해를 구하고 이를 검토코자 하였으므로 총 16가지의 경우가 되었다. 그림 5는 본 연구에서 데이터 처리의 흐름도를 보여주고 있다.

GPS에 의한 WGS84성과와 실용성과의 중량은 오차를 추정하여 이를 반영하였다. 먼저 GPS성과에 대한 표준오차는 좌표의 조정오차를 A라고 할때 일본 동경과 국립지리원 수원원점과의 상대측위에 의한 오차가 있기 때문에 이를 포함하도록 하였다.

Lichten(1990)식은 케도해석(정밀력)에 의한 GPS상대측위의 오차를 추정하고 있으며 다음과 같다.<sup>24)</sup>

$$\sigma = (A_m^2 + 10^{-8} \cdot L_m)^{1/2}$$

여기서  $A_m$ 은 5 mm,  $L_m$ 은 m단위의 거리이므로 1000 km기선에 대하여 그 크기는  $\pm 0.011$  m이다. 따라서

표 2. 변환요소의 산정(WGS와 1차성과)

모 델	Bursa-Wolf 모델	Molodensky-Badekas 모델
7-변수	$\lambda = -5.93 \pm 0.33$ ppm	$-5.92 \pm 0.33$ ppm
	$\omega = +2.03 \pm 0.44''$	$+2.03 \pm 0.44''$
	$\theta = -0.72 \pm 0.51''$	$-0.72 \pm 0.51''$
	$\kappa = -2.70 \pm 0.55''$	$-2.70 \pm 0.55''$
	$X_0 = +165.32 \pm 18.96$ m	$+143.71 \pm 0.26$ m
	$Y_0 = -475.77 \pm 13.65$ m	$-502.71 \pm 0.34$ m
6-변수	$\lambda = 0$	0
	$\omega = +2.02 \pm 1.03''$	$+2.02 \pm 1.03''$
	$\theta = -0.70 \pm 1.18''$	$-0.70 \pm 1.18''$
	$\kappa = -2.80 \pm 1.27''$	$-2.80 \pm 1.27''$
	$x_0 = +185.96 \pm 43.66$ m	$+144.00 \pm 0.60$ m
	$y_0 = -497.70 \pm 31.36$ m	$-501.59 \pm 0.78$ m
4-변수	$\lambda = -6.55 \pm 1.77$ ppm	$-6.55 \pm 1.77$ ppm
	$\omega = \theta = \kappa = 0$	0
	$x_0 = +123.27 \pm 5.55$ m	$+143.31 \pm 0.77$ m
	$y_0 = -477.76 \pm 7.10$ m	$-504.30 \pm 0.97$ m
	$z_0 = -662.04 \pm 6.59$ m	$-687.19 \pm 0.96$ m
	3-변수	$\lambda = 0$
$\omega = \theta = \kappa = 0$		0
$x_0 = +143.65 \pm 0.83$ m		$+143.65 \pm 0.82$ m
$y_0 = -503.82 \pm 1.04$ m		$-503.82 \pm 1.03$ m
$z_0 = -686.24 \pm 1.00$ m		$-687.42 \pm 0.32$ m

GPS망의 경우에는 일본원점의 측위오차와 국내와의 연결오차를 고려하여 다음과 같이 GPS성과의 오차를 중량에 반영하였다.

$$\sigma_{WGS} = 2 \text{ cm} + \sigma_A$$

우리나라 삼각점의 실용성과에 대한 정확도의 평가에 한계가 있으므로<sup>6,11)</sup> 다른 나라에서 알려지고 있는 식을 참고로<sup>16,22,25)</sup> 일본의 경우를 고려하면 1000 km거리에서 약 2 m이므로 경위도좌표에서는  $\sigma_{\phi, \lambda} = 2 \text{ m} / \sqrt{2} = \pm 1.5 \text{ m}$ 값을 고려하였다.

또한 벡셀지오이드고를 고려한 높이의 경우에는 오차의 주원인이 지오이드에 있으며 그 정확도가 약  $\pm 3$  m인 것으로 보고되어 있다.<sup>7)</sup> 그러나 천문측량의 정확도를 너무 낮게 취급하였고 최근 일본의 삼각망과 VLBI와의 비교결과를 볼 때<sup>12)</sup> 동경원점의 원방위각과 VLBI가 0.2" 차이로서 추정오차인  $\pm 0.46''$ 의 1/2이하이므로 벡셀

표 3. 변환요소의 산정(WGS와 실용성과)

모 델	Bursa-Wolf 모델	Molodensky-Badekas 모델
7-변수	$\lambda = -3.67 \pm 1.80$ ppm	$-3.67 \pm 1.80$ ppm
	$\omega = +2.68 \pm 0.45''$	$+2.68 \pm 0.45''$
	$\theta = -1.59 \pm 0.53''$	$-1.59 \pm 0.53''$
	$\kappa = -3.14 \pm 0.56''$	$-3.14 \pm 0.56''$
	$X_0 = +165.41 \pm 18.62$ m	$+144.59 \pm 0.38$ m
	$Y_0 = -489.73 \pm 14.63$ m	$-501.35 \pm 0.42$ m
	$Z_0 = -644.61 \pm 14.30$ m	$-687.71 \pm 0.45$ m
6-변수	$\lambda = 0$	0
	$\omega = +2.69 \pm 0.46''$	$+2.69 \pm 0.46''$
	$\theta = -1.61 \pm 0.54''$	$-1.61 \pm 0.54''$
	$\kappa = -3.15 \pm 0.57''$	$-3.15 \pm 0.57''$
	$x_0 = +177.05 \pm 18.09$ m	$+144.98 \pm 0.35$ m
	$y_0 = -504.60 \pm 12.94$ m	$-501.31 \pm 0.43$ m
	$z_0 = -658.40 \pm 12.85$ m	$-687.42 \pm 0.44$ m
4-변수	$\lambda = -4.52 \pm 2.98$ ppm	$-4.52 \pm 2.98$ ppm
	$\omega = \theta = \kappa = 0$	0
	$x_0 = +129.95 \pm 9.46$ m	$+143.80 \pm 0.51$ m
	$y_0 = -485.72 \pm 12.10$ m	$-504.05 \pm 0.45$ m
	$z_0 = -669.69 \pm 11.24$ m	$-687.06 \pm 0.60$ m
3-변수	$\lambda = 0$	0
	$\omega = \theta = \kappa = 0$	0
	$x_0 = +144.27 \pm 00.41$ m	$+144.27 \pm 0.41$ m
	$y_0 = -504.03 \pm 1.45$ m	$-504.03 \pm 0.45$ m
	$z_0 = -686.69 \pm 0.56$ m	$-686.69 \pm 0.56$ m

지오이드고의 오차를 1.5 m로 고려할 수 있다.

정밀1차망의 경우에는 위성측량에 의한 중량을 부여한 후 조정을 통하여 정확도를 반복적으로 추정하였으며 그 결과는 다음과 같다. 단, 높이의 경우에는 실용표고를 사용하였으므로 실용성과의 경우와 동일하였다.

$$\sigma_{\psi, \lambda} = \pm 0.25 \text{ m}, \quad \sigma_h = \pm 1.5 \text{ m}$$

표 2는 WGS성과와 정밀1차성과의 변환요소를 경우별로 산정한 결과를 보여주고 있으며, 표 3은 WGS성과와 실용성과간의 변환요소를 같은 경우별로 산정한 결과를 보여주고 있다. 또한, 표 4는 1차성과와 실용성과 사용시 변환정확도를 분석한 것으로서 변환요소의 산정에서 나타나는 잔차를 검토한 것이다.

#### 4. 분석 및 고찰

##### 4.1 변환요소의 분석

먼저 B-W모델과 M-B모델의 결과를 분석하기 위하여 1차성과를 사용한 경우를 검토해 보면(표 2), 7-변수와 4-변수의 경우에서 축척의 변환요소 값이 동일한 결과이며 7-변수와 6-변수의 경우에 있어서도 회전에 대한 변환요소 값이 동일함을 알 수 있다. 이는 실용성과를 사용한 결과(표 3)에서도 모두 같게 나타나고 있으므로 두 변환모델에서는 각각 축척과 회전인자의 값이

표 4. 변환정확도 분석

변 수	WGS84와 1차성과		WGS84와 실용성과		
	표준편차	최대편차	표준편차	최대편차	
7-변수	$\varphi$	$\pm 0.013'' (\pm 0.4 \text{ m})$	0.054'' (1.6 m)	$\pm 0.044'' (\pm 1.4 \text{ m})$	0.154'' (4.7 m)
	$\lambda$	$\pm 0.007'' (\pm 0.2 \text{ m})$	0.017'' (0.4 m)	$\pm 0.046'' (\pm 1.1 \text{ m})$	0.166'' (4.0 m)
	h	$\pm 1.2 \text{ m}$	2.7 m	$\pm 1.2 \text{ m}$	2.7 m
6-변수	$\varphi$	$\pm 0.026'' (\pm 0.8 \text{ m})$	0.061'' (1.9 m)	$\pm 0.045'' (\pm 1.4 \text{ m})$	0.130'' (4.0 m)
	$\lambda$	$\pm 0.021'' (\pm 0.5 \text{ m})$	0.045'' (1.1 m)	$\pm 0.049'' (\pm 1.2 \text{ m})$	0.179'' (4.4 m)
	h	$\pm 1.2 \text{ m}$	3.4 m	$\pm 1.2 \text{ m}$	2.8 m
4-변수	$\varphi$	$\pm 0.046'' (\pm 1.4 \text{ m})$	0.114'' (3.5 m)	$\pm 0.076'' (\pm 2.3 \text{ m})$	0.242'' (7.5 m)
	$\lambda$	$\pm 0.064'' (\pm 1.6 \text{ m})$	0.132'' (3.2 m)	$\pm 0.096'' (\pm 2.3 \text{ m})$	0.254'' (6.2 m)
	h	$\pm 1.4 \text{ m}$	2.3 m	$\pm 1.4 \text{ m}$	2.3 m
3-변수	$\varphi$	$\pm 0.047'' (\pm 1.4 \text{ m})$	0.123'' (3.8 m)	$\pm 0.074'' (\pm 2.3 \text{ m})$	0.214'' (6.6 m)
	$\lambda$	$\pm 0.071'' (\pm 1.7 \text{ m})$	0.143'' (3.5 m)	$\pm 0.101'' (\pm 2.5 \text{ m})$	0.262'' (6.4 m)
	h	$\pm 1.4 \text{ m}$	2.9 m	$\pm 1.4 \text{ m}$	2.3 m

※ B-W모델과 M-B모델 모두 크기가 분포가 동일함.



같이 나옴을 알 수 있다. 그러나 이동의 경우에는 7-변수, 6-변수, 4-변수 모두 서로 다른 결과를 보여주고 있으며 3-변수인 경우에는 거의 유사한 결과를 보여주고 있다.

결정된 변환요소의 추정정확도면에서 볼때(표 4), B-W모델의 경우보다 M-B모델이 훨씬 정밀한 결과를 보여주고 있는데 이는 B-W모델에서는 회전에 따른 이동이 발생되기 때문이며 본 연구에서는 M-B모델에서 수원원점의 3차원 근사좌표를 기준으로 하였기 때문에 망의 무게중심 또는 동경원점을 적용한 경우와 다른 결과일 것이다.

WGS성좌와 1차성좌 또는 실용성좌를 적용한 결과를 분석해 보면, 3변수의 경우를 제외한 7-변수, 6-변수, 4-변수의 경우에 있어 변환요소의 수치는 표준편차의 범위내에 있으므로 서로 동등한 것으로 파악되지만 표준편차의 크기는 1차성좌를 사용한 경우가 실용성좌를 사용한 경우보다 약 2배 양호함을 알 수 있다. 이는 1차망의 성과가 비교적 균질성을 확보하고 있고 전국적으로 조정된 것이므로<sup>5,8)</sup> 1910년대 이후 계속적으로 유지관리되어 오고 있는 실용성좌 보다는 양호할 것이기 때문에 예상될 수 있는 결과이다.

그러나 3-변수의 경우에는 실용성좌의 쪽이 표준편차가 더 양호한 것으로 나타났는데 이는 실용성좌를 사용한 경우와 1차성좌를 사용한 경우(표 4)에 대한 변환의 적합도에 대한 분석을 해보면 다른 형태가 되고 있음을 알 수 있다. 즉, 이 표에서 3-변수의 경우를 보면 1차성좌를 사용한 모델이 보다 양호함을 보여준다.

변환정확도의 적합성의 측면에서 볼때 표 2의 1차성좌를 사용할때의 결과에서 보면 7-변수의 경우가 가장 양호하며, 표준편차는 위도  $\pm 0.013''$ , 경도  $\pm 0.007''$ , 높이가  $\pm 1.2$  m이고 최대 편차는 위도  $0.054''$ , 경도  $0.017''$ , 높이가 2.7 m로서 최대편차가 표준편차의 4배 이내에 있음을 보여준다. 그러나 이 결과는 표 3의 실용성좌를 사용한 경우에서 높이는 동일하지만 위도와 경도는 2배 이상 낮은 정확도인 사실과 비교된다.

높이만을 고려한다면 측척을 고려하는 7-변수와 4-변수의 경우는 1차성좌와 실용성좌를 사용한 경우가 모두 같은 수치를 보여주고 있으며 이는 두 성과의 표고를 같은 수치를 적용한 결과이므로 타당성을 갖고 있는데 이는 표고(높이)성좌가 측척에 크게 영향 받는다는 사실을 알 수 있다.

변환정확도 분석의 결과에서는 7-변수의 경우가 가장 적합되고 있으며 3-변수와 4-변수는 거의 동등한 수준으로 보여진다. 이 결과는 표 4에서 변환요소의 표준편차의 크기가 B-W모델에서는 과대한 것이며 M-B모델은 과소한 것이다. 그러나 3-변수의 경우에 있어서는 변환요소의 표준편차가  $\pm 1.0$  m, 변환정확도  $\pm 1.5$  m로서 추정결과와 변환결과의 정확도가 유사함을 보여준다.

일본의 경우로서 Nishi(1979)의 결과와 비교해 볼때<sup>29)</sup> 3-변수의 경우에 유사한 결과가 제시되고 있으나 이동요소에서 3~5 m의 차이를 보여주고 있으며, 측척의 수치는 -4 ppm으로서 1차성좌를 사용한 본 연구의 결과(표 2)인 -6 ppm과 비교된다.

이 결과는 측척 등의 요소에서 본 연구의 결과와 유사하지만 이동량에서 큰 차이를 보여주고 있는데 이는 우리나라 남한지역이 동경원점계의 외곽에 위치하고 있고 평균해면이 다른 등의 원인이 내포된 것으로 사료된다.

#### 4.2 변환요소의 고찰

본 연구에서 산정된 변환요소는 GPS기선해석에서 초기좌표의 결정에 사용될 수 있으며 지형도 또는 지적도/임야도의 지도변환 또는 도로지도에 의한 차량항법 등에 활용될 수 있을 것이다. 어떤 용도에 활용될 수 있는지를 파악하기 위하여 먼저 GPS기선해석에서 필요로 하는 기지점(초기좌표)의 정확도를 분석할 필요가 있다.

Beutler등(1988)에서는 높이오차  $\Delta h$ 와 수평위치오차  $\Delta p$ 가 있을때 그 영향을 다음 식으로 제안하였다.<sup>13)</sup> 여기서 R은 지구반경이다.

$$\frac{\Delta L}{L} = 0.20 \frac{\Delta h}{R}, \quad \frac{\Delta L}{L} = \omega'' = 0.10 \frac{\Delta p}{R}$$

이 식에서  $\Delta h$ 에 65 m의 오차(이는 국내 최대의 벡셀 지오이드고에 상당)가 있다면 기선에 2 ppm의 오차가 유발됨을 알 수 있으며, 수평위치  $\Delta p$ 에 20 m의 오차가 있다면 0.3 ppm의 오차가 유발됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 정오차를 최소화하기 위해서는 GPS기선해석을 위한 기지점(고정점의 초기좌표)의 WGS84좌표를 가능한 정확히 구해야 한다. 만일 해석결과에서 목표정확도를 0.2 ppm까지 허용한다면 높이오차와 수평위치

오차 한계는 각각 6.4 m와 12.8 m이다.

본 연구에서 산정된 모델에서 최대좌표오차 9.1 m이 내에 있는 경우는 1차성과를 사용한 경우와 실용성과를 사용한 경우의 모든 경우가 해당된다. 또한 일반적으로 위치오차 10 m는 1 ppm의 정확도<sup>2)</sup>라고 말하는 것은 실용적으로 좌표오차로 고려할 수 있다.

따라서 지적측량/공공측량에서의 GPS측량을 위한 기선해석용 초기좌표의 결정을 위해서는 활용이 간편하고 사용성과나 사용모델에 대한 변환요소의 수치가 안정되고 있는 3-변수식을 사용하는 것이 합리적일 것이다. 이 경우에 있어서는 높이오차의 영향때문에 필히 벡셀지오이드(0.5 m 단위)를 반영하여야 하며, 그 수치는 1차성과와 실용성과의 값이 거의 동등하므로 1차성과로부터 추정된 결과를 기초로 하는 것이 타당하다.

국가기준점외의 다른 공공기준점이나 지적기준점에서 변환할 경우에는 정확도 예측이 곤란하므로 기선해석에서의 초기좌표는 항상 국가기준점에서 출발되어야 한다는 점에 유의할 필요가 있다.

국가기준점측량에서는 GPS기선해석의 정확도를 0.1 ppm까지 허용하고 있으므로 위의 분석결과에 따른다면 최대편차 5 m이내인 7-변수식을 적용할 수 있으나, 국가기준점측량에서 기선해석을 위한 초기좌표는 별도의 방법<sup>3)</sup>으로 결정된 3차원기준점의 성과인 WGS84 또는 ITRF좌표를 직접 연결하여 결정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

LIS/GIS 데이터베이스 또는 지도를 직접 변환하기 위해서는 도상 0.1 mm를 목표정확도로 할때 축척 1/2.5만 에서 2.5 m, 등고선간격 10 m의 1/4인 2.5 m의 위치정확도를 가져야 한다. 실용적으로 지도수정(데이터베이스 갱신) 등에 있어서 최대 2배까지 오차를 허용한다고 볼때 5 m가 한계이다. 따라서 축척 1/2.5만 지도를 변환하고자 할때 실용성과의 변환정확도가 5 m이내인 7-변수식을 적용할 필요가 있으며, B-W모델이 이동에 대한 표준오차가 회전인자 때문에 과대하게 나타나고 있으므로 M-B모델을 활용하는 것이 바람직할 것이다.

또한 축척 1/1만 이상의 대축척 지도 또는 전산화일에 있어서는 기선 국가기준점에 대한 지심 3차원성과를 별도의 방법(GPS측량 또는 재조정 등)에 의해 결정하고 나서 변환요소를 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

한편 본 연구에서 사용한 GPS의 결과인 WGS성과는 1992년도에 한일 측지협력사업으로 상대측위된 수원원점(SUWON)의 WGS84좌표를 고정점으로 전국망을 3차원망조정한 결과이다. 그러나 이후에도 1994년에 한일측지협력사업이 다시 실시되었고 1995년도에는 일본 스쿠바와 VLBI관측이 실시되어 그 성과가 잠정적으로 결정되어 있다. 92년 성과와 다른 두 성과 간에는 x에서 -2 m정도의 차이가 있으나 변환요소의 정확도와 변환정확도는 같을 것이므로 전체적으로 볼 때 허용범위내에 있다고 볼 수 있다. 만일 ITRF좌표계에 의한 3차원성과를 산정하여 변환요소를 결정한다면 보다 개선된 결과가 제시될 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

1. 측지계 변환모델은 가중변수에 의한 최소제곱법에 따라 Brusa-Wolf모델과 Molodensky-Badekas모델에 대한 7-변수, 6-변수, 4-변수, 3-변수의 각 경우별로 변환요소가 산정되었다.

2. 지적측량이나 공공측량에서 GPS를 활용할 때, 국가삼각점의 실용성과로부터 GPS기선해석에 필요한 초기좌표의 변환식은 벡셀지오이드를 고려한 3-변수식이 제시되었다. 변환요소의 정확도는 ±1 m수준이며 실용성과에 벡셀지오이드를 고려할때의 최대편차는 10 m이내로 추정되고 있다(아래첨자 B와 W는 각각 벡셀과 WGS를 의미함.).

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} +143.65 \text{ m} \\ -503.82 \text{ m} \\ -6686.24 \text{ m} \end{bmatrix}$$

3. 축척 1/5만과 축척 1/2.5만 지도와 데이터베이스의 변환식으로는 Molodensky -Badekas모델에 의한 7-변수식이 제시되었으며, 실용성과에 벡셀지오이드를 고려할 때의 최대편차는 7 m이내로 추정되고 있다.

4. 국가기준점측량에서는 국가기준점측량의 체계와 높은 정확도가 요구된다는 점을 고려할 때 VLBI점, 위성기준점, 3차원기준점과의 연결측량에 의해 초기좌표로 사용하는 것이 바람직하다.

5. 또한 축척 1/1만 이상의 대축척 지도 또는 데이터베이스에서는 소정의 정확도로서 기준점의 3차원좌표를 직접 측량하여 활용하거나 지역별 변환요소를 별도

로 결정하여 활용하는 방법이 필요하다.

6. 기준계 변환모델은 한국측지좌표계의 원점수치를 결정하고 국가기본망에 준하는 3차원 기선벡터의 동시망조정을 통한 성과를 활용함으로써 1~2 m정도 개선될 수 있으며, 지적도/현황도와 같은 대축척지도 또는 전산화일의 변환에 대한 연구가 계속되어야 한다

### 참고문헌

1. 강준목, 이영진 외, "지적재조사사업을 위한 GPS의 활용에 관한 기초연구," 지적기술연구소, 1996.
2. 강준목, 신봉호, 이용창, 윤철규, "매개변환요소에 따른 WGS84와 Bessel타원체간의 좌표변환해석," 대한토목학회 논문집, 14(5), 1994, pp. 1209~1217.
3. 권대원, 윤홍식, 최재화, "7-매개변수 좌표변환에 의한 우리나라 측지계와 WGS- 84의 좌표변환," 한국측지학회지, 13(2), 1995, pp. 117~124.
4. 이영진, "한국측지좌표계와 지구중심좌표계의 재정립에 관한 연구(I)," 국립지리원, 1996.
5. 이영진, 조규진, 김원익, "한국측지좌표계의 재정립에 대한 연구," 한국측지학회지, 14(2), 1996, pp. 141~150.
6. 백은기, 이영진, "가중측점망 조정법의 적용에 관한 연구," 대한토목학회 논문집, 11(4), 1991, pp. 133~141.
7. 이영진, "벡셀타원체 기준의 남한지역 지오이드모델 (KGM95)," 한국측지학회지, 13(2), 1995, pp. 125~133.
8. 이영진, "GPS방식에 의한 정밀기준점측량의 실용화에 대한 연구," 대한토목학회 논문집, 13(5), 1993, pp. 201~208.
9. 이영진, "GPS위성의 P코드/위상측정용 2주파수 수신기에 의한 정밀측위," 대한토목학회 논문집, 13(2), 1993, pp. 219~228.
10. 조규진, 이영진, 조봉환, "개선된 남한지역의 GRS80 중력지오이드모델 (KGM 93)," 한국측지학회지, 12(1), 1994, pp. 61~68.
11. 최재화, 이영진, 최윤수, "국가삼각점 성과의 갱신방안에 관한 연구," 한국측지학회지, 10(2), 1992, pp. 13~28.
12. 飛田幹男, "最近の測量にあって明らかになった 基準點成果の 特徴," 國土地理院 技術資料, A1-NO. 154, pp. 1~18.
13. 飛田幹男, "Local Transformation Parameters between Tokyo Datum and WGS84 System," 國土地理院 時報, 79, 1994, pp. 7~14.
14. 國土地理院, "GPSを用いる公共測量作業マニュアル(案)," 國土地理院 技術資料 A.1-No.159, 1993.
15. 中根勝見, "測量データの3次元處理," 東洋書店, 1994.
16. 日本測地學會, "測地學の概觀," 1974,
17. Abd-Elmotaal, H., "Comparison of Polynomial and Similarity Transformation Based Datum-shifts for Egypt," Bulletin Geodesique, 68, 1994, pp. 168~172.
18. Eckels, R., "Surveying with GPS in Australia," UNSW, UNISURV S-28, 1987.
19. Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins, "Global Positioning System; theory and practice(3rd ed.)," 1994, Springer-Verlag.
20. Leick, A., "GPS Satellite Surveying (2nd ed.)," 1995, Wiley.
21. Mikhail, E. M., "Observations and Least Squares," IEP, 1976.
22. Nishi, S., "Transformapion parameters between the Japanese Geodetic and the Average Terrestrial Coordinate System," J, of the Geodetic Society of Japan, 25(4), 1979, pp. 269~276.
23. Rens, J. and C. L. Merry, "Datum Transformation Prameters in South Africa," Survey Review, 30(236), 1990, pp. 281~293.
24. Seeber, G. "Satellite Geodesy," 1993, Walter de Gruyter.
25. Thomson, D. B., "Combination of Geodetic Networks," UNB Technical Report No.30, 1976.
26. Vanicek, P., "Report on Geocentric and Geodetic Datums," UNB Technical, Report No. 32, 1975.
27. Wolf, P. R. and C. D. Ghilani, "Adjustment Computations: statistics and least squares in surveying and GIS," Wiley, 1997.
28. Ezeigbo, C. U., "Definition of Nigerian Geodetic Datum from Recent Doppler Observations," Survey Review, 30(237), 1990, pp. 343~353.
29. Barnes, G., M. Eckl, and B. Chaplin, "A Medium Accuracy GPS Methodology for Cadastral Surveying and Mapping," Surveying and Land Information Systems, 56(1), pp. 3-12.