한국측지학회지, 제 16 권, 제 1 호, pp.85~94(1998년 6월 30일)

3차원 기선벡터망 조정기법에 의한 국가기본점의 성과산정(KTRF94)

Adjustment Computation of the National Fundamental Stations Using 3-D Baseline Vectors(KTRF94)

李 榮 鎭*
Lee, Young-Jin

要 旨

국립지리원에서는 정밀측지망측량 사업의 일환으로 국가기본망의 구축을 위한 사업에 착수하였으며, 1996년도에는 전국 31점 규모의 GPS망을 관측한바 있다. 이 망은 변장 40 km-120 km(평균 67.4 km) 인 220개의 기선으로서 구성되었다. 본 연구에서는 3차원 기선벡터로 조합된 3차원망을 최소제곱법에 의해 조정하고 산정된 한국측지기준좌표계94(KTRF94) 성과를 제시하였다. VLBI관측점과의 편심관측에 의해 결정된 경위도원점의 ITRF94 좌표를 고정점으로 사용하였으며 조정정확도는 수평위치 1 cm, 높이 3 cm 인 것으로 분석되었다. 아울러 WGS84좌표와 KGS95좌표와의 차이에 대해서도 분석되었다.

ABSTRACT

In year 1996, the National Geography Institute(NGI) carried out a National Fundamental Network survey. A total of 220 baselines between 31 stations were occupied that the baseline length is 40 km-120 km(mean 67.4 km). A minimally constrained network adjustment with three dimensional baseline vectors, was carried out holding geocentric ITRF94 coordinates of the station SUWON which are determined by eccentric observations from the VLBI station. This paper shows KTRF94 coordinates of fundamental stations which accuracies are estimated 1 cm in horizontal and 3 cm in vertical. Also, the coordinates are compared to WGS84 and/or KGS95.

1. 서 론

측지분야의 학문, 기술 및 장비의 발전과 개발에 따라 위성측위시스템의 보급과 LIS/GIS기술의 활용은 정보통신망의 정비에 따라 일반사용자들이 언제, 어디서나, 필요한 정확도로서 위치정보를 파악할 수 있는 시대에 진입하고 있다.

측지계산의 기준이 되는 기준면에는 지오이드면과 기준타원체면이 있다. 일반적인 방위각측정, 수평각측정, 고도각측정, 수준차측정 등의 모든 지상관측은 지오이드를 기준으로 하고 있는 반면에 GPS측정은 지구중심좌표계를 기준으로 하고 있기 때문에 기준타원체면을 기준으로 하고 있다.[13,14]

기준타원체면을 기준으로 하여 데이터를 처리할때 모든 지상측정량은 기준타원체면상의 값으로 보정(reduction) 또는 변환되어야 하며 이 측정량은 GPS측정량과 통합하여 처리할 수가 있다. 이와 같이 모든 측정량을 기준타원체로 변환하여 측지계산을 실시하는 방법을 투영법(projection method)이라고 한다. 그러나 이 투영법에 있어서도 변환과정에서 측점의 표고와 지오이드고 또는 연직선편차를 알아야 한다는 전제조건을 필요로 하고 있다.

현대측지학에서는 EDM거리, 각도 등의 지상측정량과 중력측정량 등을 모두 통합하여 처리하고 위치(좌표) 뿐만 아니라 포텐셜까지도 미지량으로 하여 추정하는 통합측지학(integrated geodesy)으로 발전되고 있다. 통합측지학에서 말하는 엄밀투영법을 적용하기에는 현실적으로 많은 어려움을 내포하고 있기 때문에 현실적으로는 GPS수준측량 등에 의해 지역지오이드(근사 지오이드)를 수정하는 방법이 중간단계의 방법으로 이용되고 있다.

*慶一大學校 工大 測地工學科 助教授

한편, 우리나라와 같은 기존의 측지망에서는 천문중력법에 의한 지오이드와 삼각점에서의 연직선편차가 결정되지 않은 상태로 활용되고 있기 때문에 측정량이 타원체면이 아닌 지오이드면(근사적으로 평균해면)에 투영되어 있다. 따라서 지표면상의 측정량을 지오이드면에 보정하고 지오이드면상의 값을 그대로 기준타원체면에 전개하여 측지계산을 실시하는 전개법(development method)을 사용하고 있다.[4,6,7,10]

전개법에서 최적타원체의 결정 등의 방법에 의하여 큰 오차를 최소화할 수 있으나 여기에는 수 많은 시일과 노력이 필요하다. 우리나라의 경우에는 현재까지 동경원점계를 토대로 하는 전개법이 적용되고 있는데 최근에서야 Bessel지오이드와 연직선편차의 경향이 파악되고 있는 실정이다.[5]

외국의 경우에 미국의 NAD83이나 유럽의 EUREF가 지구중심좌표계의 대표적인 예이며 투영법이 도입되어 있다. 또한 호주와 일본의 경우에는 수년내로 기존의 체계를 지구중심계로 변경할 계획으로 있다.[12,14,18,19]

국내에서도 최근 이에 대한 집중적인 연구가 수행된 바 있으며 앞으로 지구중심계의 설정이 이루어지기 위해서는 GPS와 VLBI에 기초한 투영법에 의한 측지계산이 추구되어야 할 것이다. 위성측위시스템을 적극 활용할 수 있고 사용자에 대한 서비스 향상 및 다양한 위치정보의 요구에 부응할 수 있도록 하기 위하여 지심 3차원 성과의 구축을 필요로 하고 있다.[8,9]

이러한 배경에 따라 본 연구에서는 1996년도에 국립지리원에서 정밀측지망측량의 일환으로 GPS측량된 데이터로부터 3차원 기선벡터망의 조정기법을 이용하여 지구중심계인 국가기본망의 성과를 산정하여 제시하는데 목적이 있다.

표 1. 세션계획과 관측시간

세션	세션명	관측일	관측시간(GPS시)	측점의 구성	추가측점
1	817A	96.8.17	01:00~09:00 (8^{hr})	SUWON, AS26	VLBI
	818A	96.8.18	01:00~09:00 (8^{hr})	TJ27, KH21, PC25	
2	820A	96.8.20	01:00~09:00 (8^{hr})	SUWON, OM25	VLBI
	821A	96.8.21	01:00~09:00 (8^{hr})	CG25, NY21, PC25	YI21
3	824A	96.8.24	01:00~09:00 (8^{hr})	SH21, KN26	SH01(BM)
	825A	96.8.25	00:00~09:00 (9^{hr})	CG25, NY21, SC21	
4	828A	96.8.28	00:00~09:00 (9^{hr})	YG23, SH21	YG01(BM)
	829A	96.8.29	00:00~09:00 (9^{hr})	CG25,OM25, UC22	
5	912A	96.9.12	01:00~10:00 (9^{hr})	SJ23, OM25	SJ01(BM)
	912B	96.9.13(12)	10:00~19:00 (9^{hr})	WG21, US25, YG23	
6	916A	96.9.16	03:00~12:00 (9^{hr})	PG24, PK22	YC01(BM)
	916B	96.9.17(16)	12:00~22:00 (10^{hr})	YD23, YC21, MS21	
7	918A	96.9.18	03:00~12:00 (9^{hr})	HC25, MS21	HC01(BM)
	918B	96.9.19(18)	12:00~22:00 (10^{hr})	YC21, WG21, US25	
8	921A	96.9.21	03:00~12:00 (9^{hr})	MS21, HC25	HC01(BM)
	921B	96.9.22(21)	12:00~21:00 (9^{hr})	NH24, UB12, KF21	
9	923A	96.9.23	03:00~12:00 (9^{hr})	KG21, HN23	KG01(BM)
	923B	96.9.24(23)	12:00~22:00 (10^{hr})	NB12, KF21, PA11	
10	013A	96.10.12	03:00~12:00 (9^{hr})	HS11, IW24	HS01(BM)
	013B	96.10.13(12)	12:00~22:00 (10^{hr})	UB12, HC25, PA11	
11	015A	96.10.15	03:00~12:00 (9^{hr})	HS11, TJ27	HS02(BM)
	015B	96.10.16(15)	12:00~22:00 (10^{hr})	AS26, CJ11, PA11	
12	017A	96.10.17	03:00~12:00 (9^{hr})	SUWON,AS26,	SUWON01
	017B	96.10.18(17)	12:00~22:00 (10^{hr})	OM25, CJ11, SJ23,TJ25	(BM)
13	019A	96.10.19	03:00~12:00 (9^{hr})	HS11, IW24	HS02
	019B	96.10.20(19)	12:00~22:00 (10^{hr})	WG21, CJ11, SJ23	
14	022A	96.10.22	03:00~12:00 (9^{hr})	YG23, YC21	
	022B	96.10.23(22)	12:00~22:00 (10^{hr})	UC22, YD23, US25	

2. 관측데이터

2.1 관측 및 기선해석

본 연구에서 사용한 GPS관측 데이터는 1996년도에 국립지리원에서 용역사업으로 수행된 것이며 전국망 44점(삼각점 31점, 수준점 10점, 기타 3점)의 규모이다. 이와 관련된 데이터는 모두 국립지리원으로 부터 제공받았다.

GPS측량 사업은 "GPS에 의한 정밀기준점측량 작업규정"에 따라 실시된 것으로서 과업의 중요성 때문에 가능한 한 세션간의 측선을 모두 중복되도록 하여 최소 2점 이상이 중첩되도록 관측한 것이다. 또한 선점에서 편심관측이 발생되지 않도록 망을 구성한 것도 특징중의 하나이다.

그림 1은 세션계획도를 보여주고 있으며 표 1에서는 세션계획의 세부내용을 나타내고 있다. 본 연구에서 사용한 전국망에 대한 GPS관측망은 변장 40 km~120 km로서 평균 67.4 km이다.

GPS관측망도를 기초로 하여 세션계획이 수립되었으며 세션계획도가 작성되었다. 세션계획에서는 기본적으로 5대(특별한 경우 6대)의 수신기를 사용하는 방식에

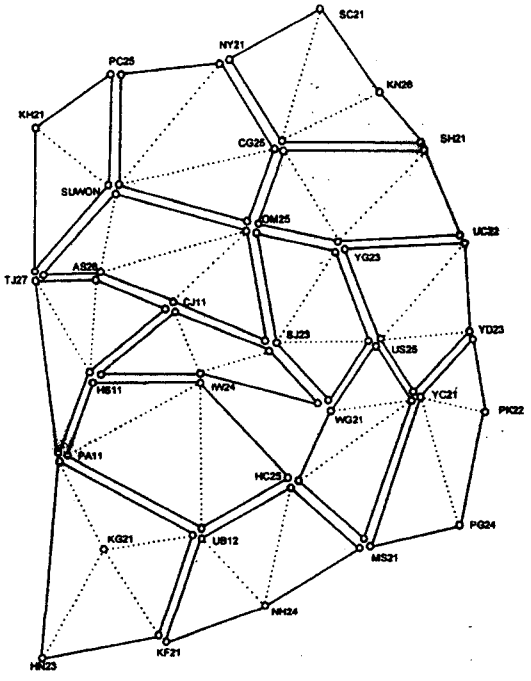

그림 1. 세션계획도(전국망)

의하고 수준점의 경우에만 1대의 수신기를 추가하는 방식으로 이루어졌으므로 총 6대의 수신기를 활용토록 계획하였다. 또한 이 과업의 중요성 때문에 세션과 세션을 접합되도록 하는 정밀한 관측계획이 수립되었다.

관측은 정밀1차기준점측량에 적합한 2주파수 수신기로서 정지측위 방식에 의한 상대정확도가 ±(5 mm+1 ppm×D)인 Topcon사의 Turbo-SII형 수신기 6대가 사용되었다. 이 수신기는 Ashtec사의 2주파수신기 모델과 동일한 것으로 알려지고 있다.

현지의 관측작업에서는 정밀1차기준점측량에 준하여 데이터 취득간격 30초, 1세션의 연속관측시간이 6시간 이상으로서 2세션(2회 관측)의 관측계획이 수립되었다. 원래 국내의 작업규정에는 1세션당 4시간 이상으로서 3세션(총 12시간 이상)을 관측하게 되어 있으나, 실제의 관측에서는 2세션으로서 총 16시간 이상을 관측하였다.

일본의 작업규정에는 1세션당 3시간 이상으로서 2세션(총 6시간 이상)을 관측토록 규정하고 있다. 따라서 총 수신시간면에서 볼때 국내 규정이 과도한 규정이라고 볼 수 있으나 전국망의 변장이 장거리이므로 국내규정을 적용토록 계획하였다. 이들 규정은 모두 30 km이상인 기선에도 적용할 수 있도록 하고 있는 규정이다.

관측중에는 제반 상황과 안테나의 측정이 실시되어 "GPS관측 기록부"에 기록되었다. 표 1에는 세션계획과 관측시간을 보여주고 있다.

GPS관측데이터는 모두 RINEX포멧으로 변환하고 TRIMVEC소프트웨어에 의해 기선해석을 실시하였다. 기선해석은 작업규정에 따라 실시하였으며 해석은 SUWON 경위도원점을 기준으로 하여 순차적으로 단일기선해석법(single baseline solution)에 따라 순차적으로 이루어졌다.

SUWON원점의 초기좌표로는 한일공동관측에 의한 1991년도의 GPS기선측량의 성과를 부여하였으며 GPS위성의 궤도정보는 방송력을 사용하여 기선해석이 실시된 것이다.

기선해석의 결과는 분산비(variance ratio)와 기준분산값(reference variance)에 의한 ratio test를 통과하였으며 모두 장거리이므로 Iono free fixed double difference(이중차에 의한 L_1+L_2 조합의 고정해)의 해가 구해졌다. 여기서는 수신시간이 충분하기 때문에 모두 고정해가 구해질 수 있었다.

2.2 점검계산

GPS측량에서 기선해석의 결과를 평가하는 방법으로는 기선해석의 단계에서 ratio test등의 방법에 의해 내부적으로 정확도를 평가할 수 있으나 이는 해석조건에 따라 달라지기 때문에 별도의 독립적인 평가법을 사용해야 한다. 다시 말해서 독립적으로 기하조건이 만족되

표 2a. 다른 세션망에 의한 폐합차(망 12-10-13)

세션망	기선	세션	dx	dy	dz	거리(km)	비고
13	IW24→WG21	1	-60208.592	-36483.175	-11060.561	71.263	
		2	.600	.167	.553		
12	WG21→HC25	1	-3509.880	29342.006	-35368.998	46.089	
		2	.903	2.028	.977		Δ/S=
10	HC25→IW24	1	63718.462	7141.193	46429.579	79.162	0.014 ppm
		2	.457	.182	.566		
	Σ	1	-0.010	0.024	0.020	196.514	
		2	-0.046	0.043	0.036		

표 2b. 다른 세션망에 의한 폐합차

세션망	기선	세션	dx	dy	dz	거리(km)	비고
1	TJ27→KH21	1	34460.904	-45470.920	75578.043	94.695	
		2	.911	.935	.034		
	KH21→PC25	1	-36454.341	-43582.037	16959.125	59.295	
		2	.304	.105	.080		
2	PC25→NY21	1	-39921.521	-45748.928	16137.030	62.825	
		2	.530	.918	.048		
3	NY21→SC21	1	-40904.443	-49433.699	16944.217	66.362	
		2	.416	.743	.178		
	SC21→KN26	1	-40713.854	3078.276	-36288.880	54.625	
		2	.856	.269	.884		
	KN26→SH21	1	-36559.216	-1693.397	-28182.344	46.191	
		2	.208	.416	.362		
4	SH21→UC22	1	-37041.754	12484.382	-43770.712	58.684	
		2	.757	.391	.725		
9	UC22→YD23	1	-22815.425	31208.297	-51695.933	64.552	
		2	.432	.286	.949		
6	YD23→PK22	1	-21262.735	19789.569	-39165.788	48.761	
		2	.765	.603	.787		
	PK22→PG24	1	-13652.638	42990.823	-58836.882	74.137	
		2	.670	.842	.879		
	PG24→MS21	1	42767.799	39624.378	-5246.073	58.539	
		2	.823	.357	.107		
8	MS21→NH24	1	38333.569	55698.018	-28175.213	73.250	
		2	.535	.037	.196		
	NH24→KF21	1	38701.313	47381.290	-20642.196	64.566	Δ/S=
		2	.291	.295	.191		1.8 ppm
9	KF21→HN23	1	51407.160	41598.281	-3676.728	66.231	
		2	.154	.233	.761		
	HN23→PA11	1	33388.091	-61440.505	98596.564	120.875	
		2	.093	.485	.595		
11	PA11→TJ27	1	50265.089	-46483.797	91465.824	114.251	
		2	.078	.783	.849		
	Σ	1	-2.029	0.031	0.054	1127.839	
		2	-2.058	-0.072	-0.057		

는지의 여부를 점검하고 관측값을 점검하는 것이 필요하다. 점검은 다음 방법에 의해 평가될 수 있다.

① 2세션의 관측에서는 세션간의 거리와 높이차의 교차를 비교하여 평가한다. 정밀1차기준점측량의 경우에는 거리에서 1 ppm, 높이차에서 2.5 ppm을 교차의 제한으로 하고 있다.

② 세션망(동시수신 관측망)에서는 삼각형폐합차와 외곽부의 다각형폐합차에 의해 평가한다. 2세션일 경우에는 폐합차의 평균을 고려하게 되며 정밀1차기준점측량의 경우에는 좌표차 벡터의 합에 의한 평균거리의 오차를 2.5 ppm내로 제한하고 있다.

③ 다른 세션망의 기선으로 구성되는 삼각형 또는 다각형의 폐합차는 관측데이터의 점검에 매우 유용하다. 정밀1차기준점측량의 경우에는 제한규정이 없으나 2.5 ppm의 제한을 적용할 수 있다.

④ 다른 세션으로 구성된 중복변의 경우에는 그 교차에 의해 점검할 수가 있다. 1, 2세션의 평균값 간의 교차를 평가하는데 정밀1차기준점측량의 경우에는 제한 규정이 없으나 2.5 ppm의 제한을 적용할 수가 있다.

본 연구에서 사용한 전국망 데이터는 9시간 수신의 2세션을 관측하였기 때문에 매우 양호한 상태에 있다. 세션내의 삼각형 폐합차는 제한보다 극히 양호한 결과가 나타났다.

1, 2세션 관측값의 교차는 최대교차가 거리에서 0.58 ppm, 높이차에서 2.38 ppm로서 모두 제한범위내에 들고 있음을 알수 있으며 오차의 평균은 거리 0.13 ppm, 높이차 0.63 ppm으로 나타났다. 또한 세션별 다각형 폐합차의 경우에는 최대 0.025 ppm으로서 모두 제한범위내에 들고 있다.

다른 세션망의 기선으로 조합된 다각망은 망12-10-13으로 구성된 삼각형과 전국망의 외곽부를 노선으로 하는 폐합다각망을 구성하여 폐합차를 구하였다. 이 결과는 표 2에 제시되고 있으며 내부삼각형의 경우 0.014 ppm, 외곽부 다각형인 경우1.8 ppm으로서 모두 거리 폐합차 제한규정내에 있음을 보여주고 있다.

전국다각형의 폐합차는 전국망의 GPS관측성과가 거리에서 약 0.45 ppm내에 들고 있음을 간접적으로 파악할 수 있다. 한편 다른 세션으로 구성된 중복변의 경우에는 최대 0.61 ppm 평균 0.1 ppm으로서 모두 제한규정내에 들고 있으며 표 3에 그 결과를 나타냈다.

점검계산에서는 허용범위보다 극히 양호함을 보여주고 있는데 40 km~120 km변장을 갖는 전국망의 경우에도 불구하고 매우 양호한 결과임을 알수 있다.

3. 3차원 망조정

3.1 데이터화일의 편성

망조정에 사용된 관측된 데이터는 소정의 절차에 따라 관측되고 기선해석한 기선벡터를 교차, 폐합차 점검계산을 통해 기선해석 등에 대한 이상유무를 검토한 것이다.

망조정에 사용되기 위하여 편성한 데이터 화일은 다음의 내용을 포함하고 있다.

① 기본데이터
- 데이터 설명문
- 측점수
- 고정점수
- 관측의 수(측선수×3)

② 측점데이터
- 측점번호와 명칭
- 고정점, 공통점(좌표계 변환용) 구분
- X, Y, Z 좌표

③ 관측데이터
- 관측데이터 번호
- 기선해석의 시종점(AT, TO)
- 측정량벡터(TO-AT)
- 공분산행렬(3×3행렬)

데이터 화일에는 삼각점 30점, 경위도원점 1점, 수준점 11점의 총 42점으로 구성되어 있으며 총 220개 측선으로서 660개의 측정량을 포함하고 있다. 입력화일에 저장된 데이터는 입력실수 등을 검출하는 등의 면밀한 검토작업이 수반되었으며 조정계산의 실시과정에서 과대오차 검출기법을 통해 반복적으로 데이터 확인이 이루어졌다.

3.2 GPS관측방정식과 해

GPS망에서 기선벡터 구성된 하나의 기선에 대하여 좌표차 Δx, Δy, Δz와 측점의 좌표 x, y, z간의 관계식은 측점 i와 측점 j간의 기선벡터에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.[14,19,21].

$$x_j - x_i = \Delta x_{ij} + v_{xij}$$

$$y_j - y_i = \Delta y_{ij} + v_{yij} \qquad (1)$$

$$z_j - z_i = \Delta z_{ij} + v_{zij}$$

행렬로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{ij} + \begin{bmatrix} Vx \\ Vy \\ Vz \end{bmatrix}_{ij} \quad (2)$$

또한, 대응되는 측정량인 기선벡터에 대한 공분산행렬은 다음과 같다.

$$\sum_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{\Delta x} & \sigma_{\Delta x \Delta y} & \sigma_{\Delta x \Delta z} \\ & \sigma^2_{\Delta y} & \sigma_{\Delta y \Delta z} \\ & & \sigma^2_{\Delta z} \end{bmatrix}_{ij} \quad (3)$$

식 (2)의 관측방정식은 선형이므로 반복계산이 필요치 않다. 반면에 3차원 좌표로 나타낼때의 계산에서는 유리하지만 지상측정량과 혼합할 경우에는 적합하지 않은 단점이 있다. 식 (2)를 행렬로 간편하게 표기한다면,

$$[-I_3 \quad I_3] \begin{bmatrix} X_i \\ X_j \end{bmatrix} = \Delta X_{ij} + V_{ij} \quad (4)$$

여기서,

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}$$

만일 GPS망이 A, B, C, D의 4측점으로 4각망의 형태로서 6개 기선벡터망인 경우에는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -I_3 & I_3 & 0 & 0 \\ 0 & -I_3 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & -I_3 & I_3 \\ I_3 & 0 & 0 & -I_3 \\ -I_3 & 0 & I_3 & 0 \\ 0 & -I_3 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \\ X_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta X_{BC} \\ \Delta X_{CD} \\ \Delta X_{DA} \\ \Delta X_{AC} \\ \Delta X_{BD} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CD} \\ V_{DA} \\ V_{AC} \\ V_{BD} \end{bmatrix} \quad (5)$$

GPS기선벡터에 대한 모든 관측방정식은 결과적으로 다음과 같이 나타낼 수 있으므로 해법은 일반적인 경우와 같다.

$$A\Delta = L + V \quad (6)$$

공분산행렬로 부터 정규방정식과 해는,

$$(A^T W A)\Delta = A^T W L \quad (7)$$

$$\Delta = (A^T W A)^{-1} A^T W L \quad (8)$$

또한 오차분석을 위한 사후분산값과 조정좌표의 공분산행렬은 다음과 같다.

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T W V}{r} \quad (9)$$

$$\sum_{\bar{x}} = \hat{\sigma}_0^2 Q \quad (10)$$

$$\sum_{\bar{L}} = \hat{\sigma}_0^2 A Q A^T = \hat{\sigma}_0 Q_L \quad (11)$$

$$\sum_v = \hat{\sigma}(W^{-1} - AQA^T) = \hat{\sigma}_0^2 Q_v \quad (12)$$

이 식들을 사용하여 χ^2 검정과 함께 과대오차의 검출 등의 오차분석이 실시될 수 있다. 3차원망조정의 경우에는 조정좌표의 오차가 오차타원체의 형태로 나타나게 되며 중량의 경우에도 (3×3)행렬의 역행렬을 사용해야 한다. 또한 지심 3차원좌표 x, y, z에 대응되는 모든 값은 φ, λ,, h 또는 u, v, w에 대응되는 값으로 변환하는 등의 비교평가에 적합한 변환이 필요하다.

3.3 망조정과 중량

3차원망조정은 2단계로 실시되는 것이 일반적이다. 1단계 예비조정으로서는 1점고정에 의한 조정 또는 자유망 조정에 의해 망을 평가하고 과대오차 검출 등의 오차분석을 실시하는 것이다. 2단계 본조정으로서는 기지점을 모두 고정하여 조정하고 실용성과 또는 3차원 성과를 산정하는 것으로서 변동량 벡터분석을 포함한다.

본 연구에서 실시한 3차원 망조정은 전국망으로서 기지점이 VLBI에 의한 경위도원점의 ITRF94좌표 1점이므로 1단계의 과정만을 수행하였다. 또한 ITRF94성과에 근거한 KTRF94(Korean Terrestrial Reference Frame) 성과와 WGS84의 결과가 산정되었다.

망조정에 사용된 전산프로그램은 3차원좌표를 미지수로 하는 관측방정식을 사용하여 편성하였으며 외국의 관측데이터와 망조정의 결과를 토대로 조정결과의 타당성을 점검하였다. 그림 2는 연구에 사용된 3차원망

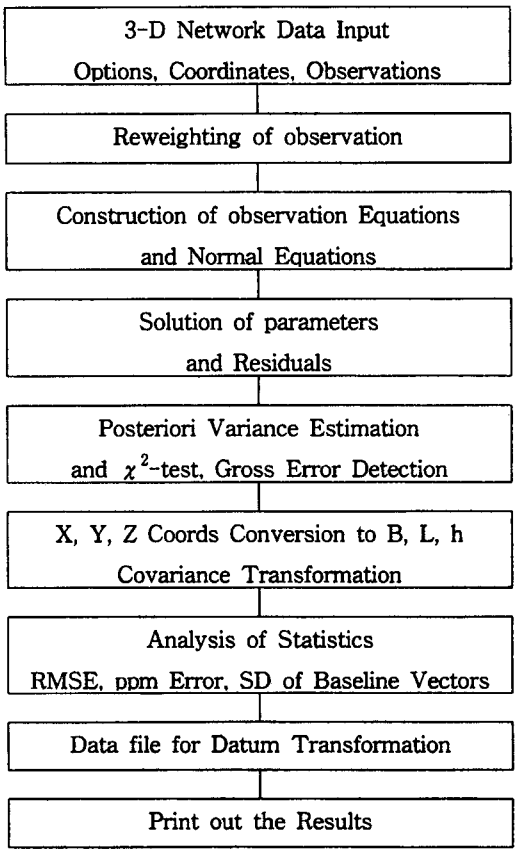

그림 2. 3차원 망조정 흐름도

조정 프로그램 ADJ3D의 흐름도를 보여주고 있다.

망조정의 실시단계에서는 사전분산값을 가정하고서 반복적으로 처리하면서 과대오차의 검출과정이 이루어졌으며 기선벡터의 중량은 다음 식에 따랐다.[16,19,21]

$$\sigma'_{xi} = \{\sigma_{xi}^2 + (b \cdot D_f)\}^{1/2} \quad (13)$$

여기서,

σ_{xi} = 기선벡터의 표준오차

σ'_{xi} = 기선해석의 결과인 표준오차

b = 거리비례오차 (ppm 보정량)

D = 기선벡터

i = X, Y, Z

이 식 (13)은 전국망의 측선길이가 최소 45 km~최대 120 km이며 평균변장 67.4 km로서 모두 30 km를 초과하고 있기 때문에 ppm오차를 반영한 것이다. 기선해석에 의한 공분산행렬을 중량에 직접 반영할 수 없는 이유로서는 다음과 같은 GPS측량의 특성 때문이다.

① 기선해석의 결과인 분산은 표본분산이며 실제보다 과소하므로 본조정계산에 사용되기 곤란하다.

② 기선해석에 사용되는 소프트웨어마다 처리방법이 다른 관계로 서로 다른 공분산행렬이 나타난다.

③ 기선해석의 결과인 분산은 관측조건에 따라 크게 다르기 때문에 분산값이 큰 측정량에 오차배분이 집중될 수 있다.

④ 국가의 측량체계에서는 동일한 방식의 오차처리가 필요하다.

전산처리과정에서 reweighting기법에 의해 ppm보정량 b을 추정한 결과 0.3 ppm(거리로 고려하면 0.5 ppm)으로 나타났다. 조정결과인 출력화일의 내용은 다음과 같다.

① 조정좌표
- 3차원좌표와 표준오차
- 경위도좌표와 표준오차

② 통계분석
- χ^2검정량
- 과대오차 검출

③ 기선의 조정벡터
- 조정벡터와 표준오차, 상관행렬
- 조정거리와 ppm오차
- 잔차와 표준오차

4. 성과 및 결과분석

4.1 KTRF94성과

조정된 KTRF94성과는 표 3에 보여주고 있으며 이 결과는 VLBI관측에 의해 산정된 수원 경위도원점 표석중심의 ITRF94좌표를 고정점으로 하는 성과이며 경위도 좌표는 GRS80타원체를 기준으로 하여 전환한 것이다.[2,9,11]

엄밀하게 본다면 ITRF는 지구의 질량중심을 원점으로 하는 3차원 좌표와 이동속도벡터에 의해 나타나지만 실용적으로 활용하기 위해서는 기준타원체로서 GRS 80을 기준으로 할 수 있다.

또한 WGS84성과도 역시 VLBI관측에 의해 산정된 수원 경위도원점 표석중심의 WGS84좌표를 고정점으로 하여 산정하였으며 경위도좌표는 WGS84타원체를 기준으로 하였다.

표 3. KTRF94성과

STAT.	X	Y	Z
SUWON	-3062002.553	4055436.750	3841860.869
CG25	-3130641.98	3980754.30	3865449.63
CJ11	-3115984.73	4072692.93	3780498.63
HC25	-3208513.11	4083262.38	3691165.43
HN23	-3126770.56	4220785.92	3605857.68
HS11	-3092906.30	4122119.04	3745822.15
IW24	-3144794.62	4090403.54	3737594.98
KF21	-3178177.72	4179187.66	3609534.42
KG21	-3128966.73	4171557.81	3660480.96
KH21	-3008656.45	4067390.69	3871498.13
KN26	-3166650.57	3931704.23	3885249.57
MS21	-3255212.55	4076108.30	3658351.79
NH24	-3216879.02	4131806.36	3630176.60
NY21	-3085032.29	3978059.68	3904594.26
OM25	-3130917.59	4021616.03	3822018.17
PA11	-3093382.48	4159345.43	3704454.26
PC25	-3045110.77	4023808.61	3888457.23
PG24	-3297982.37	4036483.93	3663597.88
PK22	-3284329.72	3993493.09	3722434.75
SC21	-3125936.72	3928625.96	3921538.45
SH21	-3203209.78	3930010.83	3857067.21
SJ23	-3174046.96	4046487.72	3760085.11
AS26	-3072901.49	4088778.31	3798056.79
TJ27	-3043117.40	4112861.65	3795920.11
UB12	-3175740.53	4133908.54	3665391.87
UC22	-3240251.53	3942495.22	3813296.49
US25	-3210416.77	4020968.66	3756943.90
YG23	-3182946.78	3994977.36	3807505.98
WG21	-3205003.22	4053920.37	3726534.42
YC21	-3247076.74	4019772.70	3726569.11
YD23	-3263066.97	3973703.51	3761600.54

4.2 조정좌표의 분석

조정좌표의 정확도(표준오차)는 KTRF94와 WGS84에서 모두 동일하게 나타나고 있다. 이는 좌표에 대한 공분산행렬은 지구 중심좌표계의 경우에 지심이동량의 차이가 작기 때문에 서로 같은 것으로 취급될수 있음을 보여준다.

3차원 조정좌표에 대한 표준오차의 평균제곱근차는 X, Y, Z좌표에 대해 각각 ±0.010 m로 나타났다. 평균제곱근차는 다음 식에 의해 산정하였다.

$$\bar{\sigma}_i = \left(\frac{\sum \sigma_i^2}{n} \right)^{1/2} \qquad i = x, y, z$$

전국망의 3차원좌표의 상대정확도(수원 경위도원점 기준)는 좌표에서 ±1.0 cm로 고려할 수 있으며 위치오차로는 ±1.7 cm로 고려될 수 있다. 또한 경위도좌표의 개념으로 변환시켰을 때의 수치는 경위도인 수평좌표의 상대정확도가 각각 ±0.00014″이며 약 ±0.4 cm에 상당한다. 그러므로 경위도좌표는 ±0.4 cm, 높이는 ±1.0 cm의 정확도를 갖고 있는 것으로 나타났는데 수평위치에 비해 높이가 2.5배 낮은 정확도임을 알 수 있다.

표 4는 3차원좌표에 대한 정확도를 보여준다. 절대좌표(지구중심기준)에서 본다면 이들 망의 오차에 경위도원점의 VLBI관측성과의 오차를 조합시켜야할 것이다. VLBI성과가 X, Y, Z좌표에서 각각 2 cm정확도(경위

표 4. 3차원좌표의 정확도

(3차원)평균제곱근오차	(경위도)평균제곱근오차
$\overline{\sigma}_x = \pm 0.010$ m	$\overline{\sigma}_\varphi = \pm 0.00014''$ (± 0.0043 m)
$\overline{\sigma}_y = \pm 0.010$ m	$\overline{\sigma}_\lambda = \pm 0.00014''$ (± 0.0035 m)
$\overline{\sigma}_z = \pm 0.010$ m	$\overline{\sigma}_h = 0.010$ m

표 5. KTRF94, WGS84, KGS95의 비교

좌표차(평균)	(WGS84) - (KTRF94)	(WGS84)-(KGS95)
$\Delta\varphi$	$+0.016''$ (+0.49 m)	$-0.012''$ (-0.37 m)
$\Delta\lambda$	$+0.025''$ (+0.62 m)	$-0.010''$ (-0.25 m)
Δh	-0.55 m	+1.10 m

도좌표 1 cm, 높이좌표 3 cm)이므로 ITRF94성과의 절대정확도는 거의 동등한 수준에 있는 것으로 예상된다.

한편, KTRF94, WGS84간의 경위도좌표차를 비교한 결과 경위도와 높이에서 0.5~0.6 m의 차이를 보여주고 있으며 그 결과는 표 5에 제시하였다.

이 결과는 WGS84인 GPS좌표계가 지구의 질량중심으로 부터 약 1 m 편심되어 있음을 알 수 있다. 또한 높이는 지오이드고의 영향을 미치게 되므로 GRS80지오이드(예로서 EGM96)와 WGS84지오이드간에도 약 0.6 m차이가 발생됨을 알 수 있다.

또한 1995년도에 한 · 미 공동관측에 의한 군사좌표계의 성과로서 KGS95(Korean Geodetic System)가 결정된 바 있는데(국방부, 문서번호 : 합정지 33700-150), 이 결과와 본 연구에서 산정된 결과를 비교할 수 있다.[3)]

표 5에서 보여주고 있는 바와 같이 KGS95는 WGS 84로 부터 경위도에서 약 0.3 m, 높이에서 약 1.1 m의 차이가 발생되고 있다. 이는 국내의 1점의 GPS관측점을 고정점으로 하여 조정한 성과이기 때문이며 KGS 95좌표계가 WGS84좌표계에서 약 1 m정도 편심되고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 WGS84에 연동되어 결정한 KGS95성과가 WGS84의 오차범위내에서 있음을 보여준다. GRS80타원체와 WGS84타원체는 실용적인 면에서 거의 같은 것으로 취급할 수가 있으나 높이에서는 사용에 주의가 필요함을보여주고 있다.

조정좌표와 공분산행렬로 부터 구한 기선벡터의 조정벡터와 공분산행렬이 계산되었으며 조정벡터의 표준오차와 조정거리에 의해 ppm오차가 산출되었다. 측선의 수는 모두 108개이며 ppm오차의 평균은 0.056 ppm이었고 최대 0.1 ppm이었다.

5. 결 론

본 연구에서는 위성측위시스템을 적극 활용할 수 있고 사용자에 대한 서비스 향상 및 다양한 위치정보의 요구에 부응할 수 있도록 하기 위하여 새로운 한국측지좌표계의 재정립과 관련된 3차원좌표계의 국제지구기준좌표계에 근거한 우리나라의 3차원망 조정성과(KTRF 94)를 산정하였다. 결론을 요약하면 아래와 같다.

1. 3차원 기선벡터망(3-Dimensional Baseline Vector Net)의 조정기법을 연구하고, 변장 40 km~120 km 간격인 전국망 30점에 대하여 새로운 지구중심계의 KTRF 94 성과를 산정하였다(표 3).

2. KTRF94 성과는 수평좌표 1 cm, 높이위치 3 cm의 정확도를 갖는 것으로 분석되었다.

3. KTRF94계와 WGS84계 상호간에는 경위도와 높이에서 0.5~0.6 m의 차이가 있으며, KGS95는 WGS 84계와 1 m 오차범위내에 있음을 보여준다.

4. KTRF94 성과는 GPS기선해석, 성과산정 등의 기본측량 분야에서 우선적으로 활용되어야 할 것이며, 국가기준점측량에서는 새로운 체계의 KTRF94 성과와 기존체계의 Bessel 성과를 이중으로 산정하여 관리하는 것이 요망된다.

감사의 글

이 연구는 국립지리원의 1997년도 측지연구사업의 일환으로 한국측지학회에서 수행한 것으로서 관계자 여러분의 도움과 지원에 대하여 사의를 표합니다.

참고문헌

1. 국립지리원, "GPS방식에 의한 정밀기준점측량 작업규정", 1994.
2. 국립지리원, "한일GPS측량 · VLBI관측자료", 1992~1996.
3. 국방부, "KGS95 군사좌표계 성과", 합정지 33700-150 자료.
4. 백은기, 이영진, "가중측점망 조정법의 적용에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 11(4), 1991, 133-141.
5. 이영진, "벳셀타원체 기준의 남한지역 지오이드모델(KGM95)", 한국측지학회지, 13(2), 1995, 125-133.
6. 이영진, "GPS방식에 의한 정밀기준점측량의 실용화에 대한 연구", 대한토목학회 논문집, 13(5), 1993, 201-208.
7. 이영진, "희박행렬의 기법을 이용한 대규모 측지망의 조정", 대한토목학회 논문집, 11(4), 1991, pp. 143-150.

8. 이영진, 조규전, 김원익, "한국측지좌표계의 재정립에 대한 연구", 한국측지학회지, **14**(2), 1996, 141-150.
9. 이영진, "한국측지좌표계와 지구중심좌표계의 재정립에 관한 연구(I),(II)", 1996-7, 국립지리원.
10. 최재화, 이영진, 최윤수, "정밀삼각망의 성과산정 방안에 관한 연구", 1992, 국립지리원.
11. 國土地理院, "日韓GPS測量 · VLBI觀測資料", 1992~1996.
12. 國土地理院, "基準点座標 92", 1994, 國土地理院 技術資料
13. 大野重保, "測地學の方法", 東洋書店, 1987.
14. 中根勝見, "測量テ-タの 3次元處理", 東洋書店, 1994.
15. Bevin, A. J. and J. Hall, "The Review and Development of a Modern Geodetic Datum", proc. of FIG 1994 Congress, 1994, TS506.3, 81~85.
16. Eckels, R., "Surveying with GPS in Australia", UNSW report, UNISURV S-28, 1987.
17. Engberg L. E. and T. Lithen, "The Establishment of an Improved Reference Network in Greater Stockholm by Densification of the National Network with GPS-Technique", proc. of FIG 1994 Congress, TS506.2, 3~13.
18. Kinoyside, D. A., "The Geocentric Datum of Australia; transform or readjust?", proc. of FIG 1994 Congress, 1994, TS506.1, pp. 1~12.
19. Leick, A., "GPS Satellite Surveying (2nd ed.)", 1995, Wiley.
20. Mikhail, E. M., "Observations and Least Squares", IEP, 1976.
21. Wolf, P. and C. D. Ghilani, "Adjustment Computations : statistics and least squares in surveying and GIS", 1997, Wiley.
22. 이영진, "VLBI /GPS에 의한 한국원점의 국제지구기준좌표계 설정", 한국측지학회 학술발표회, 1998년 2월, 1~13.