

GPS 위성의 방송력과 정밀력을 이용한 장기선측정 정밀도 분석

The Precision Analysis of Long Baseline Measurement by using
Broadcast Ephemeris and Precise Ephemeris of GPS Satellites

유 환 희*
Yoo Hwan Hee

표 명 영**
Pior Myoung Young

藤井陽一郎***
Yoichiro Fujii

要 旨

GPS의 장거리 기선 측정정밀도를 분석하기 위해 한국에 2지점과 일본에 9지점을 선정하고 GPS 관측을 방송력과 정밀력을 이용하여 동시에 실시하여 정밀도를 비교·분석하였다. 그 결과 기선장이 100km이하인 경우 방송력과 정밀력의 정밀도는 0.1ppm보다 작게 나타났다. 그러나 100km 이상의 경우에는 정밀력의 정밀도가 방송력보다 우수하게 나타났으며, VLBI점과 비교해 볼 때 방송력을 이용할 경우 0.13ppm, 정밀력을 이용할 경우 0.04ppm으로 분석되었다.

본 연구의 결과는 앞으로 장거리 기선측정을 위한 GPS측량에 있어서 방송력과 정밀력의 이용에 대한 기본자료로 이용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

The purpose of this study is to estimate the precision of GPS survey for the long baseline measurement.

For this, we performed the simultaneous GPS observations at two points in Korea and nine points in Japan, and analyzed the precision of GPS survey by using broadcast ephemeris and precise ephemeris. As the results, in using precise ephemeris and broadcast ephemeris for the baseline less than 100km, each precisions are less than 0.1ppm. But the precision of precise ephemeris is more improved than that of broadcast ephemeris in the case of the baseline longer than 100km. That is, in comparing the results of VLBI and GPS survey, the precision is 0.13ppm for broadcast ephemeris and 0.04ppm for precise ephemeris.

We expect that in the future this study will be used as the basic data for using broadcast ephemeris and precise ephemeris in GPS survey for the long baseline measurement.

* 경상대학교 도시공학과 부교수

** 일본운수정책연구소 연구원

*** 茨城대학 지리부 교수

1. 서 론

인공위성을 이용한 지구상의 측지학적 3차원 위치 결정을 위해 GPS는 다방면에 이용되어 오고 있으며, VLBI와 SLR도 위성측지방법으로 사용되고 있다. 이러한 위성측지방법을 이용한 지구상의 3차원 위치결정은 적용범위도 매우 넓게 적용될 수 있어서 대륙간 또는 국가간의 상호위치결정을 가능하게 하였으며 지진조사 및 지각변동 등과 같은 범지구적인 측지조사에 활용될 수 있는 기법으로 평가받고 있다. GPS를 이용한 위치결정시 발생될 수 있는 오차요인은 GPS 위성궤도오차, 위성의 시계오차, 대류층 및 이온층의 오차등과 같은 다양한 오차요소가 포함될 수 있다.¹⁾ GPS의 위치결정원리를 분석해 볼 때 GPS 위성과 지상수신기간의 거리측정 정확도와 GPS위성의 궤도정보를 나타내는 궤도력(Ephemeris)의 정확도는 위치결정의 정확도에 커다란 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

위성궤도에 대한 정보는 방송력(Broadcast Ephemeris)과 정밀력(Precise Ephemeris)에 의해 얻어지며 이에 따른 오차발생특성은 GPS를 이용한 위치결정에 있어서 반드시 파악되어야 하나 국내의 GPS 결정에 있어서

관측성과가 비교적 좁은 지역에서 이루어진 관계로 장거리 관측에 따른 특성분석은 불가능한 실정이었다.

따라서 본 연구에서는 한국과 일본을 연결하는 장거리 기선을 설정하고 11개 GPS점을 설치하여 GPS 관측을 실시하고 이 관측값을 분석함으로써 장기선 측정에 있어서 방송력과 정밀력의 오차특성을 파악하여 범지구적인 측지학적 위치정보획득의 정밀도를 분석하는데 본 연구의 목적을 두고 있다.

2. GPS 위성의 방송력과 정밀력

GPS 위성의 궤도력에 대한 정보중 방송력은 GPS 수신기를 사용하는 이용자에게 신속하게 정보를 제공해 주는 장점이 있으나 방송력의 정확도는 낮아서 약 20~50m로 평가되고 있으며 최근에는 약 3m에 이르는 것으로 보고되고 있다.²⁾

GPS 위성의 궤도정보를 1시간마다 갱신하여 GPS 이용자에게 제공해 주고 있으며, 이러한 궤도력을 방송력이라 정의하고 있다. 방송력은 후처리된 궤도자료의 외삽(Extrapolation)의 결과이기 때문에 궤도자료들은 기준 epoch으로부터 1시간 30분 동안의 위성궤도를 표시할 뿐이다.^{3,4)} 따라서 정밀 위치결정을 위해서

표1.1 IGS 자료분석센터

Centre	Description
code	Centre for Orbit Determination in Europe(CODE)
emr	Natural Resources Canada(NRCan) (Formerly Energy, Mines and Resources-EMR) Ottawa, Canada
esa	European Space Agency(ESA) European Space Operations Center(ESOC) Darmstsd, Germany
gfz	GeoForschungsZentrum(GFZ) Potsdam, Germany
jpl	Jet Propulsion Laboratory Pasadena, USA
ngs	National Oceanic and atmospheric Administration(NOAA) National Geodetic Silver Springs, USA
sio	Scripps Institution of Oceanography La Jolla, USA

는 보다 확실한 궤도력이 필요한 것이다. 국제 GPS 관측망(IGS)에서는 정밀력을 계산하기 위해 전세계 약 110여개의 관측소를 이뤄진 GPS 관측망을 구성하여 각각의 관측소에서 얻어진 관측자료와 7개의 관측 자료분석센터로 모아 처리하고 있다.⁵⁾ 각각의 자료분석센터는 정밀력 산출을 위해 서로 다른 데이터와 기법을 적용하여 산출하게 되며 이때 산출결과는 관측소의 개수와 분포에 따라 그 결과가 다르기 때문에 IGS는 각 분석센터의 결과를 종합하여 최종적인 정밀력을 산출한다.⁶⁾⁷⁾ IGS 정밀력은 각 관측소에서 자료가 수집되고 난 후 약 11일 후에 INTERNET을 통해 이용자에게 공급되고 있다. 그러나 IGS의 정밀력의 신속한 공급을 위해 최근에는 관측 1일후에 약 10cm의 정밀도를 공급하고 있다

3. GPS 관측

관측점 분포는 한국의 성동과 대구에 한점씩 설치하고 일본에 9점을 설치하여 관측을 수행하였으며, 1995년 6월 15일 9:00시부터 6월 16일 8시 59분까지는 615A 세션(Session)과 6월 16일 10:00시부터 6월 17일 9시 59분까지는 616A 세션에서 관측을 수행하였다. 한국의 GPS 측정점인 대구 451점은 4등 삼각점이고 성동 311점은 3등 삼각점이다.

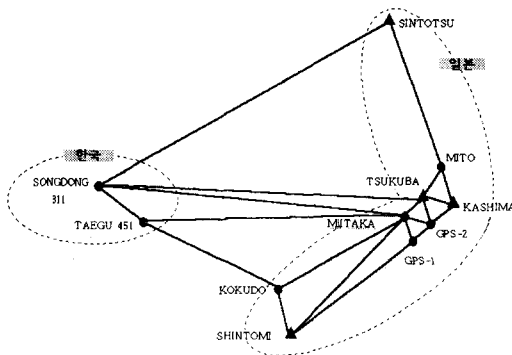
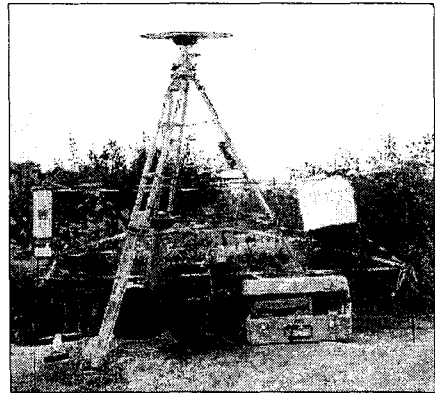


그림3.1 GPS 관측점의 분포도

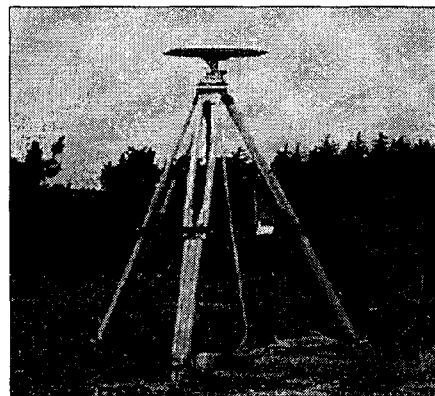
들은 그림1에서 ▲로 표현된 KASHIMA(鹿島), SUKUBA(筑波), SINTOTSU(新1律川), SHINTOME(新富)이다. 그리고 ●로서 표현된 나머지 7개의 점들은 GPS관측점 들이다.

GPS관측에서 TSUKUBA, SINTOTSU, SHINTOME I 측정점과 GPS-1측점에서는 3시간마다 기상요소(기온, 습도, 기압)를 관측하였다.

GPS 관측에서 사용된 GPS수신기는 Trimble 4000 SSE를 사용했으며 안테나의 종류는 compact L₁/L₂ w G/P를 사용하였다.

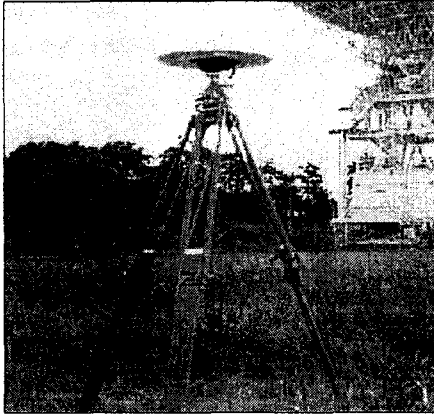


TAEGU 451측점

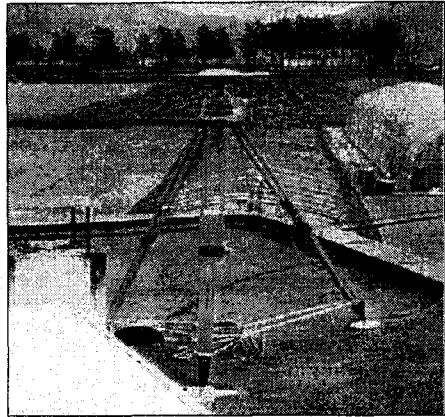


SONGDONG 311측점

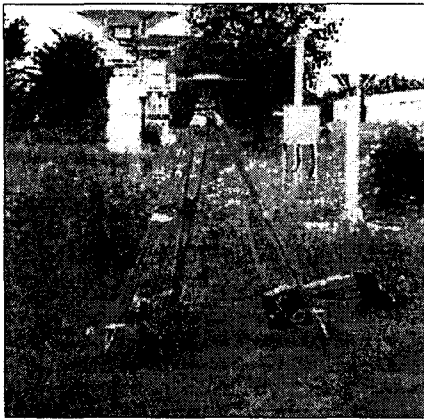
관측점중에는 VLBI점이 4점 포함되어 있으며 이 점



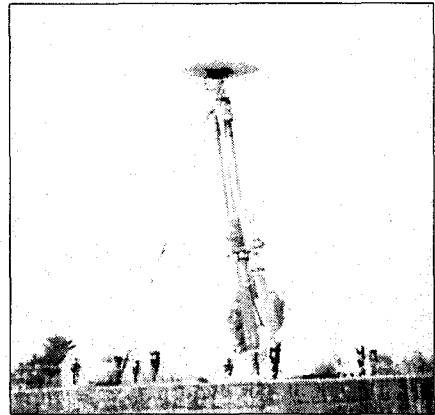
KASHIMA측점



SINTOTSU측점



TSUKUBA측점



SHINTOMI측점

그림3.2 GPS 관측지점의 관측현황

GPS 관측에서 사용된 GPS수신기는 Trimble 4000 SSE를 사용했으며 안테나의 종류는 compact L₁/L₂ w G/P를 사용하였다. 한 세션의 관측시간은 23시간 59분이었고 데이터 취득시간은 30초, GPS위성의 고도각은 15° 이상이었으며 GPS위성의 수는 동시에 4개 이상을 사용하였다. 모든 관측지점에서 수행된 관측은 순조롭게 이루어져 모든 데이터가 분석에 이용되었으나, 외부로부터의 인공전파인 대출력 레이더(기상용

또는 군사용)나 항공관제무선장치가 GPS수신기에 혼신방해의 영향을 미쳤다.

GPS수신기와 외부 전파원으로부터의 거리가 가까우면 상당한 관측오차를 유발시킬 수 있다. SHINTOMI VLBI점과 일본의 항공자위대 新田原 기지까지의 거리는 약 2.2km로써 GPS 위성위상의 궤적이 615A 세션이었다. 따라서 이 지역에서는 관측중에 대단히 많은 사이클슬립이 발생한 것을 알 수 있

으며, GPS 관측자료는 레이더와 항공관제무선장치등에 의한 전파방해를 받고 있음을 알 수 있었다. 또한 방송력(Broadcast Ephemeris)과 정밀력(Precise Ephemeris)에서 해석한 기선장의 정밀도는 양쪽 모두 0.1ppm보다 크게 나타났다. SHINTOMI와 다른 환경인 SINTOTSU측점은 외부전파방해를 전혀 받지 않았다. 표2는 한국과 일본의 11개 관측점에 대한 GPS 결합관측의 현황을 나타내고 있다.

개의 기선을 재계산하였다.

GSI(Geographical Survey Institute)력은 SP3(Standard Product 3)형식의 정밀력이지만 GPSurvey(Ver 2.0)에서는 EF18 format의 정밀력 밖에 사용할 수 없기 때문에 Dos에서 SP3 format의 정밀력을 EF18 format으로 변환하였다.

정밀력 format의 변환에 있어서 GSI8054, SP3은 SP3 format의 GSI 정밀력이고 COD 08054, E18은

표3.1. 한국과 일본의 GPS 결합관측 현황

	STATION	RECEIVER NUMBER	ANTENA HEIGHT(m)	SESSION 615A JUNE. 1995	SESSION 616A JUNE. 1995
1	TAEGU451	4294	1.678	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
2	SONGDONG311	4293	1.546	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
3	KOKUDO	8532	1.434	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
4	SHINTOMI	8045	1.683	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
5	MITAKA	6137	0.203	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
6	TSUKUBA	6136	1.754	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
7	KASHIMA	4298	1.745	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
8	SINTOTSU	4296	1.506	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
9	GPS-2	10073	1.674	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
10	GPS-1	10018	1.649	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59
11	MITO	4297	0.063	15,9:00-16,8:59	16,10:00-17,9:59

4. GPS 기선해석

GPS 기선해석은 미국의 Trimble에서 지원하는 GPS Survey(Version 2.00)소프트웨어를 사용하였다. GPS Survey에는 대류권보정의 모델이 4종류가 있으며, 표준은 Hopfield 모델이다. 그러나 기선해석의 경우 GPS 관측점 부근에서 측정된 기상 데이터, 즉 기온과 기압등을 이용하지 않았기 때문에 모델에서 대류권보정을 실행하였다. 기선해석의 경우 먼저 방송력에서 각각의 세션마다에 11개의 관측소간의 기선의 자동처리를 수행하여 MITO(水戸), MITAKA(三鷹)을 제외하고 다른 측정에서는 안테나 높이를 보정하였다.

기선관측에 있어서 기선 하나에 약 1시간의 처리시간이 소요되었으며, 장기선(100km이상)과 초정밀측량인 경우는 방송력보다 정밀력으로 해석하는 것이 바람직하다고 판단되어 세션마다 정밀력(GSI력)에서 55

EF18 format의 정밀력이다. 실제로 기선을 해석하는 경우 정밀력 파일(*.E18)을 GPSurvey(Ver 2.0)의 precise라는 Sub directory에 복사하고 메인메뉴 process의 Setup의 Advanced Controls에서 정밀력을 선택하였다. 방송력은 궤도상의 위치로 하여 10m 전후의 정확도를 갖는다. 정밀력과 방송력의 GPS기선해석 정밀도를 분석하였다.

55개의 기선중에 500km 이하의 기선이 19개, 500~1,000km의 기선이 23개, 1,000km이상이 13개이었다. 표3은 방송력에서 계산된 두 세션의 기선의 경사거리를 나타내고 있으며 기선장의 정확도가 몇 가지 특징을 보이고 있다. 첫째, 장기선의 상대정밀도는 단기선보다 좋아지고 있다. 이 표에서 최단기선의 거리가 6.4km(GPS-2~MITAKA)인데 정밀도가 0.78ppm인데 비해 1,000km의 기선인 TAEGU 451~MITO의 정밀도는 0.1ppm보다 작게 나타났다. 둘째, 기선장의

표4.1. 방송력 해석에 의한 기선장 정밀도

From Station	To Station	Slop Distance		Difference between 615A and 616A (m)	PPM
		615A (m)	616A (m)		
TAEGU 451	SONGDONG311	232236.394	232336.412	-0.018	0.08
TAEGU 451	MITAKA	986905.370	986905.151	0.219	0.22
TAEGU 451	MITO	1062535.959	1062536.023	-0.064	0.06
SONGDONG311	MITAKA	1131005.890	1131005.885	0.005	0.00
SONGDONG311	MITO	1191147.849	119147.817	0.023	0.03
KASHIMA	SHINTOMI	948328.199	948323.046	0.053	0.16
KASHIMA	TSUKUBA	54151.191	54151.186	0.005	0.09
KASHIMA	TAEGU 451	1083563.051	1083563.050	0.001	0.00
KASHIMA	KOKUDO	970253.051	970253.643	0.012	0.00
KASHIMA	GPS-1	106157.168	106157.158	0.010	0.09
KASHIMA	GPS-2	109140.117	109140.118	-0.001	0.01
KASHIMA	sintotsu	846338.512	846338.527	-0.015	0.02
KASHIMA	SONGDONG311	1220022.508	1220022.563	-0.055	0.05
KASHIMA	MITAKA	103818.231	1038180.243	-0.012	0.12
KASHIMA	MITO	53332.372	53332.370	0.002	0.04
TSUKUBA	SHINTOMI	909097.907	909097.636	0.271	0.30
TSUKUBA	TAEGU 451	1031508.178	1031058.207	-0.029	0.03
TSUKUBA	KOKUDO	924420.107	924420.189	-0.082	0.09
TSUKUBA	GPS-1	74167.776	74167.775	0.001	0.01
TSUKUBA	GPS-2	73289.516	73289.514	0.002	0.03
TSUKUBA	SINTOTSU	837170.734	837170.692	0.042	0.05
TSUKUBA	SONGDONG311	1166368.720	1166368.769	-0.049	0.04
TSUKUBA	MITAKA	66941.944	66941.946	-0.002	0.03
TSUKUBA	MITO	45846.821	45846.821	0.000	0.00
GPS-2	SHINTOMI	840033.424	840033.376	0.048	0.06
GPS-2	TAEGU 451	983404.717	983404.779	-0.062	0.06
GPS-2	KOKUDO	861993.156	861993.127	0.029	0.03
GPS-2	GPS-1	8226.388	8226.390	-0.002	0.24
GPS-2	SINTOTSU	898046.010	898045.987	0.023	0.03
GPS-2	SONGDONG311	1128474.981	1128474.942	0.039	0.03
GPS-2	MITAKA	6392.369	6392.364	0.005	0.78
GPS-2	MITO	119132.093	119132.087	0.006	0.05
GPS-1	SHINTOMI	842475.043	842474.864	0.179	0.21
GPS-1	TAEGU 451	989465.308	989465.246	0.062	0.06
GPS-1	KOKUDO	866086.038	866085.991	0.047	0.05
GPS-1	SINTOTSU	902811.245	902811.203	0.042	0.05
GPS-1	SONGDONG311	1135385.108	1135385.131	-0.023	0.02
GPS-1	MITAKA	11212.281	11212.277	0.004	0.36
GPS-1	MITO	119883.503	119883.499	0.010	0.22
SINTOTSU	SHINTOMI	1556798.406	1556798.255	0.151	0.10
SINTOTSU	TAEGU 451	1409394.628	1409394.6701	-0.042	0.30
SINTOTSU	KOKUDO	1481557.314	1481557.342	-0.018	0.01
SINTOTSU	SONGDONG311	1405509.809	1405509.901	-0.092	0.07
SINTOTSU	MITAKA	892314.463	892314.417	0.046	0.05
SINTOTSU	MITO	799710.434	799710.388	0.046	0.01
SHINTOMI	TAEGU 451	497102.126	497102.077	0.049	0.10
SHINTOMI	KOKUDO	188171.287	188171.277	0.010	0.05
SHINTOMI	SONGDONG311	728937.292	728937.296	-0.004	0.01
SHINTOMI	MITAKA	845751.579	845751.634	-0.005	0.07
SHINTOMI	MITO	952383.491	952383.355	0.136	0.14
KOCUDO	TAEGU 451	309042.383	309042.457	-0.074	0.24
KOCUDO	SONGDONG311	541078.214	541078.206	0.008	0.01
KOCUDO	MITAKA	866956.118	866957.022	0.096	0.11
KOCUDO	MITO	963884.864	963884.984	-0.120	0.12
MITAKA	MITO	112778.865	112778.862	0.003	0.03

GPS위성의 방송력과 정밀력을 이용한 장기선 측정 정밀도 분석

표4.2. 정밀력 해석에 의한 기선장의 정밀도

From Station	To Station	Slop Distance		Difference between 615A and 616A (m)	PPM
		615A (m)	616A (m)		
TAEGU 451	SONGDONG311	232236.363	232236.371	0.008	0.03
TAEGU 451	MITAKA	986905.411	986905.428	-0.017	0.02
TAEGU 451	MITO	1062535.984	1062536.078	-0.094	0.09
SONGDONG311	MITAKA	1131005.909	1131005.950	-0.041	0.04
SONGDONG311	MITO	1191147.713	1191147.766	-0.053	0.04
KASHIMA	SHINTOMI	948328.003	948328.164	-0.061	0.17
KASHIMA	TSUKUBA	541510186	54151.182	0.004	0.07
KASHIMA	TAEGU 451	1083563.175	1083563.175	0.000	0.00
KASHIMA	KOKUDO	970253.745	970253.640	0.105	0.11
KASHIMA	GPS-1	106157.160	106157.155	0.005	0.09
KASHIMA	GPS-2	109140.114	109140.116	-0.002	0.02
KASHIMA	sintotsu	846338.471	846338.458	0.013	0.02
KASHIMA	SONGDONG311	1220022.518	1220022.528	-0.010	0.01
KASHIMA	MITAKA	103818.262	103818.241	0.021	0.20
KASHIMA	MITO	5332.367	5332.364	0.003	0.06
TSUKUBA	SHINTOMI	909097.742	909097.797	-0.055	0.06
TSUKUBA	TAEGU 451	1031508.147	1031508.238	-0.091	0.09
TSUKUBA	KOKUDO	924420.176	924420.180	-0.004	0.04
TSUKUBA	GPS-1	74167.774	74167.774	0.000	0.00
TSUKUBA	GPS-2	73289.515	73289.513	0.002	0.03
TSUKUBA	SINTOTSU	837170.637	837170.629	0.008	0.01
TSUKUBA	SONGDONG311	1166368.738	1166368.741	-0.003	0.00
TSUKUBA	MITAKA	66941.942	66941.945	-0.003	0.04
TSUKUBA	MITO	45846.821	45846.820	0.001	0.02
GPS-2	SHINTOMI	840033.327	840033.292	0.035	0.04
GPS-2	TAEGU 451	983404.765	983404.722	0.043	0.04
GPS-2	KOKUDO	861993.242	861993.193	0.049	0.06
GPS-2	GPS-1	8226.387	8226.389	-0.002	0.24
GPS-2	SINTOTSU	898045.918	898045.925	-0.007	0.01
GPS-2	SONGDONG311	1128474.930	1128474.959	-0.029	0.03
GPS-2	MITAKA	6392.369	6392.364	0.005	0.78
GPS-2	MITO	119132.083	119132.081	0.002	0.02
GPS-1	SHINTOMI	842474.894	842474.934	-0.040	0.05
GPS-1	TAEGU 451	989465.341	989465.251	0.090	0.09
GPS-1	KOKUDO	866086.062	866086.061	0.001	0.00
GPS-1	SINTOTSU	902811.162	902811.154	0.008	0.01
GPS-1	SONGDONG311	1135385.088	1135385.152	-0.064	0.06
GPS-1	MITAKA	11212.280	11212.277	0.003	0.26
GPS-1	MITO	119883.493	119883.491	0.002	0.02
SINTOTSU	SHINTOMI	1556798.274	1556798.224	0.050	0.03
SINTOTSU	TAEGU 451	1409394.657	1409394.561	0.096	0.07
SINTOTSU	KOKUDO	1481557.183	1481557.232	-0.049	0.03
SINTOTSU	SONGDONG311	1405509.848	1405509.866	-0.018	0.01
SINTOTSU	MITAKA	892314.355	892314.358	0.003	0.00
SINTOTSU	MITO	799710.338	799710.327	0.011	0.00
SHINTOMI	TAEGU 451	497102.098	497102.069	0.029	0.06
SHINTOMI	KOKUDO	188171.274	188171.261	0.013	0.07
SHINTOMI	SONGDONG311	728937.242	728937.309	-0.051	0.07
SHINTOMI	MITAKA	845751.542	845751.561	-0.020	0.02
SHINTOMI	MITO	952383.370	952383.349	0.021	0.02
KOCUDO	TAEGU 451	309042.384	309042.410	-0.026	0.08
KOCUDO	SONGDONG311	541078.207	541078.184	0.023	0.04
KOCUDO	MITAKA	866956.057	866956.063	0.006	0.01
KOCUDO	MITO	963885.010	963884.970	0.040	0.04
MITAKA	MITO	112778.859	112778.857	0.002	0.02

정밀도는 0.1ppm보다 큰 기선수가 13개이고 계산된 기선장의 정밀도의 평균값은 0.09ppm이었다.

표4.2는 정밀력에서 계산된 두 세션의 기선의 경사 거리이고 표3.1과 같은 특징을 보여주고 있다. 정밀력에서 계산된 기선장의 정확도 평균은 0.06ppm이고 5개 기선의 정밀도는 0.1ppm보다 커지고 있다.

의 정밀도를 비교하였다. 이 표에서 방송력으로부터 얻어진 기선장의 정확도는 0.1ppm보다 큰 기선들이다. 표4.3을 보면 100km이하의 기선의 경우에 정밀력에서 얻어진 기선장의 정밀도는 방송력의 결과와 거의 같지만 100km이상의 기선의 경우에는 KASHIMA ~ SHINTOMI간의 기선을 제외하고 방송력보다 정밀력의 기선장의 정밀도가 더 좋다는 것을 알 수 있다.

표4.3. 방송력과 정밀력 해석에 의한 기선장 정밀도 비교

	FROM STATION→ TO STATION	DISTANCE km	DIFFERENCE OF TWO SESSIONS(BE)		DIFFERENCE OF TWO SESSIONS (PE)	
			(m)	PPM	(m)	PPM
1	GPS-2 ----> MITAKA	6.4	0.005	0.78	0.005	0.78
2	GPS-2 ----> GPS-1	8.2	-0.002	0.24	-0.002	0.24
3	GPS-1 ---->MITAKA	11.2	0.004	0.36	0.003	0.26
4	KASHIMA---->MITAKA	103.8	-0.012	0.12	0.021	0.20
5	GPS-1 ----> MITO	119.9	0.010	0.22	0.002	0.02
6	KOJUDO ----> TAEGU 451	309.0	-0.074	0.24	-0.026	0.08
7	GPS-1 ----> SHINTOMI	842.5	0.179	0.21	-0.040	0.05
8	KIKUDO ---->MITAKA	867.0	0.096	0.11	0.006	0.01
9	TSUKUBA ----> SHINTOMI	909.1	0.271	0.30	-0.055	0.06
10	KASHIMA ----> SHINTOMI	948.3	0.153	0.16	-0.161	0.17
11	SHINTOMI --->MITO	952.4	0.136	0.14	0.021	0.02
12	KOKUDO ---->MITO	963.9	-0.120	0.12	0.040	0.04
13	TAEGU 451 ---->MITAKA	986.9	0.219	0.22	-0.017	0.02

표4.4. 방송력에서 해석된 폐합차

	TRIANGULATION	Total slope distance(m)	Dx(m)	Dy(m)	Dz(m)
1	SINTOMI-KASHIMA-MITO-SHINTOTSU	1699381.285	-0.0146	-0.0255	-0.0083
2	sintotsu-MITO-TSUKUBA-SINTOTSU	1682727.943	0.1088	-0.0034	-0.0041
3	MITO-KASHIMA-MITAKA-SINTOTSU	269929.475	0.0004	-0.0090	-0.0008
4	KASHIMA-GPS-1-MITAKA-KASHIMA	221187.678	0.0023	0.0002	-0.0013
5	GPS-1-GPS-2-MITAKA-GPS-1	25831.030	-0.0044	0.0016	0.0013
6	TSUKUBA-KOKUDO-TAEGU451-TSUKUBA	2264970.853	0.0640	-0.0121	-0.0332
7	TSUKUBA-TAEGU451-SUNG DONG311-TSUKUBA	2430113.340	0.0286	0.1298	0.0787
8	TSUKUBA-SONG DONG311-MITO-TSUKUBA	2403363.358	-0.0360	-0.0705	-0.0099
9	MITO-SONG DONG311-SINTOTSU-MITO	3396368.014	0.0381	0.1995	0.0861
10	GPS-2-SHINTOMI-TSUKUBA-GPS-2	1822420.576	0.1302	0.2166	0.0031
11	MITAKA-GPS-2-TSUKUBA-MITAKA	146623.826	-0.0100	0.0107	0.0161
12	MITO-TSUKUBA-MITAKA-MITO	225567.629	0.0045	-0.0096	-0.0050
13	GPS-2-GPS-1-SHINTOMI-GPS-2	1690734.854	0.0566	-0.0255	-0.0504
14	TSUKUBA-SHINTOMI-KOKUDO-TSUKUBA	2021689.113	-0.0985	-0.1064	0.0222
15	SINTOTSU-TSUKUBA-KOKUDO-SINTOTSU	3243148.238	-0.1594	0.0898	0.0644
16	SINTOTSU-SHINTOMI-KOKUDO-SINTOTSU	32265527.007	0.1244	0.0511	-0.0252
17	SINTOTSU-KOKUDO-TAEGU451-SINTOTSU	3199994.398	0.2425	0.0538	-0.090
18	SINTOTSU-TAEGU451-SONG DONG311-SINTOTSU	3047140.849	-0.0971	0.1065	0.0704

표4.3에서 방송력과 정밀력에 의하여 얻어진 기선장 표4.1과 표4.2를 정리하면 기선장의 정확도는 0.1ppm

보다 좋다고 할 수 있다. 100km이상의 장기선 경우에는 기선해석을 하는 경우 정밀력을 사용하는 것이 필요함을 알 수 있었다.

기선해석의 결과를 확인하기 위해 방송력에서 계산된 두 세션의 3차원 기선벡터를 이용하여 폐합차(closure)를 계산하였다. 기선들의 폐합차는 직접적인 측량 정밀도의 평가가 되지는 않지만 기선해석의 결과를 확인하기 위해서 수행하였다. 표6에 18개 삼각형의 폐합차가 포함되어 있다.

표4.4에서 나타난 바와 같이 dx가 가장 큰 것은 24.3cm(17번 삼각점: 길이가 3200km), dy가 가장 큰 것은 21.6cm(10번 삼각형: 길이가 1822km), 모든 삼각형의 dz가 10cm 보다 작게 나타났다. 기선장이 1,000km 이하의 삼각형의 기선벡터의 3개의 성분의 폐합은 거의 1cm보다 작게 나타났으며, 장기선의 GPS 측지망의 경우에 방송력에 의한 기선해석의 결과도 좋은 결과를 얻었다.

5. VLBI와 GPS측량결과 비교에 따른 정확도 평가

기선장의 정밀도는 GPS 자체에 의한 내부적인 정밀도이고 객관적인 GPS 정확도를 알기 위해서는 다른 측량기법과의 비교가 필요하다. 본 연구에서 GPS 측량 관측점중에는 네 개의 VLBI점이 포함되어 있으며, 이들 측정의 정밀좌표는 기지값이기 때문에 이 점들의 3차원좌표를 이용하여 측정간의 경사거리를 계

산할 수 있다. VLBI와 GPS에 의한 경사거리를 비교하면 엄밀한 GPS의 정확도평가가 가능하게 된다.

그러나, VLBI관측점의 좌표값은 전세계적 측지계인 ITRF89(IERS Terrestrial Reference Frame, 1989)로 표시되어 있다. ITRF89 좌표계와 WGS-84 좌표계는 원점이 모두 지구중심인좌표계로서 정의되어 있지만 새로운 관측값의 채용에서 다소의 차이가 있다. GPS의 결과와 비교하기 위해서는 ITRF89 좌표계로 표시되어 있는 VLBI점의 좌표를 WGS-84 좌표계로 변환하여야 한다. 이러한 변환은 다음의 방법으로 수행하였다.

측지계의 변환은 타원체변환식을 이용하여 수행할 수 있다. 임의점의 직교좌표가 측지계 1에서는 (X1,Y1,Z1)이고 측지계 2에서는 (X2,Y2,Z2)일 경우 변환식은 다음과 같다.⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1 + \delta S) \begin{bmatrix} 1 & \delta\omega & -\delta\phi \\ -\delta\omega & 1 & \delta\varepsilon \\ \delta\phi & -\delta\varepsilon & 1 \end{bmatrix} Z_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

여기서, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$: 평행이동량

$\delta\varepsilon, \delta\phi, \delta\omega$: 회전각(radian)

δS : 축척계수(scale factor)

식(5.1)을 이용하여 VLBI점들에 대한 좌표변환매개변수를 계산하였는데 ITRF89에서 ITRF90으로의 변환매개변수는 표7과 같이 결정되었다.

먼저 ITRF89의 좌표값을 역변환식을 이용하여 ITRF89에서 ITRF90으로 변환하고, 다음으로 ITRF90

표5.1. ITRF89에서 ITRF90으로의 변환매개변수

	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$	δS	$\delta\varepsilon(^{\circ})$	$\delta\phi(^{\circ})$	$\delta\omega(^{\circ})$
매개변수값	0.005	0.024	0.038	0.003×10^{-6}	0.000	0.000	0.000

표5.2. ITRF90에서 WGS-84로의 변환매개변수

	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$	δS	$\delta\varepsilon(^{\circ})$	$\delta\phi(^{\circ})$	$\delta\omega(^{\circ})$
매개변수값	0.060	-0.517	-0.223	-0.011×10^{-6}	0.0183	0.0003	0.0070

에서 WGS-84로 변환하였다.

ITRF90에서 WGS-84로의 변환매개변수는 표8과 같다.

이상의 변환과정을 통해 VLBI점의 좌표를 WGS-84 좌표로 변환한 결과는 표9와 같다.

WGS-84 좌표계로 표현되어 있는 VLBI점의 좌표를 이용하여 각 점간의 경사거리를 계산하였으며, 따라서 이들의 거리와 GPS에서 얻어진 거리와의 비교가 가능해졌다. 본 연구의 GPS측량은 두 개의 세션이 있고 각각의 방송력과 정밀력에서 기선해석이 이루어졌기 때문에, 표5.4, 표5.5와 같이 세션별 GPS기선장과

표5.3. WGS-84 좌표계로 변환된 VLBI점의 좌표

	VLBI STATION	WGS-84 COORDINATE					
		DEG.MIN.SEC			X,Y,Z		
1	KASHIMA	LAT.	35	57	19.9331	X(m)	-3997609.1286
		LONG.	140	39	33.3273	Y(m)	3276754.9532
		HEIGHT. (m)			60.2931	Z(m)	3724234.6229
2	TSUKUBA		36	06	20.4046		-3957202.8269
			140	05	15.2745		3310193.3457
					64.6443		3737709.0638
3	SHINTOMI		32	05	43.7738		-3582765.3938
			131	28	58.0609		4052030.8034
					102.6739		3369018.5264
4	SINTOTSU		43	31	43.7738		-3642114.6287
			141	50	41.0072		2861484.5079
					116.8660		4370364.8224

표5.4. VLBI와 GPS 615A기선장의 비교

	FROM STATION → TO STATION	VLBI DISTANCE(m)	GPS DIFFERENCE BROADCAST EPH. (615A) (m)	GPS-VLBI	
				(m)	PPM
1	(KASHIMA ---> TSUKUBA)	(54151.232)	(54151.191)	(-0.041)	(0.76)
2	KASHIMA ---> SHINTOMI	948328.234	948328.199	-0.035	0.04
3	KASHIMA ---> SINTOTSU	846338.460	846338.512	0.052	0.06
4	TSUKUBA --->SHINTOMI	909097.857	909097.907	0.050	0.05
5	TSUKUBA ---> SINTOTSU	837170.591	837170.737	0.146	0.17
6	SHINTOMI ---> SINTOTSU	1556798.249	1556798.406	0.157	0.10
MEAN					(0.20) 0.08

	FROM STATION → TO STATION	VLBI DISTANCE(m)	GPS DIFFERENCE PRECISE EPH. (615A)(m)	GPS-VLBI	
				(m)	PPM
1	(KASHIMA ---> TSUKUBA)	(54151.232)	(54151.186)	(-0.046)	(0.85)
2	KASHIMA ---> SHINTOMI	948328.234	948328.003	-0.231	0.24
3	KASHIMA ---> SINTOTSU	846338.460	846338.471	0.011	0.01
4	TSUKUBA --->SHINTOMI	909097.857	909097.742	-0.115	0.13
5	TSUKUBA ---> SINTOTSU	837170.591	837170.637	0.046	0.05
6	SHINTOMI ---> SINTOTSU	1556798.249	1556798.274	0.025	0.02
MEAN					(0.22) 0.09

GPS위성의 방송력과 정밀력을 이용한 장기선 측정 정밀도 분석

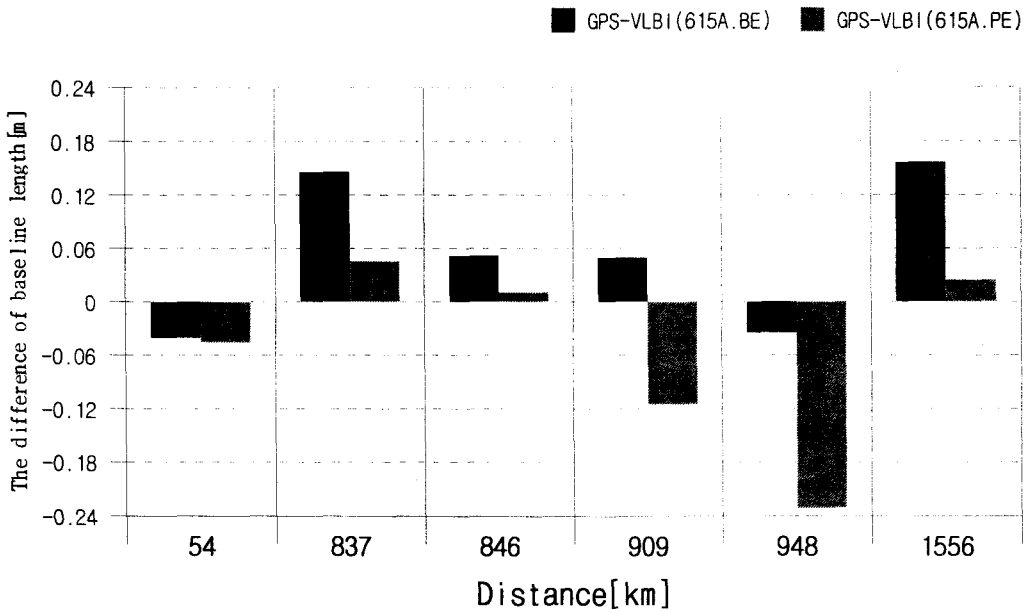


그림5.1. 방송력과 정밀력 해석에 의한 GPS경사거리와 VLBI점간 경사거리와의 비교(615A)

표5.5. VLBI와 GPS 616A 기선장의 비교

	FROM STATION → TO STATION	VLBI DISTANCE(m)	GPS DIFFERENCE BROADCAST EPH. (616A)(m)	GPS-VLBI	
				(m)	PPM
1	(KASHIMA ---> TSUKUBA)	(54151.232)	(54151.186)	(-0.046)	(0.85)
2	KASHIMA ---> SHINTOMI	948328.234	948328.046	-0.188	0.20
3	KASHIMA ---> SINTOTSU	846338.460	846338.527	0.067	0.08
4	TSUKUBA --->SHINTOMI	909097.857	909097.636	-0.221	0.24
5	TSUKUBA ---> SINTOTSU	837170.591	837170.692	0.101	0.12
6	SHINTOMI ---> SINTOTSU	1556798.249	1556798.255	0.006	0.00
MEAN					(0.25) 0.13

	FROM STATION → TO STATION	VLBI DISTANCE(m)	GPS DIFFERENCE PRECISE EPH. (616A)(m)	GPS-VLBI	
				(m)	PPM
1	(KASHIMA ---> TSUKUBA)	(54151.232)	(54151.182)	(-0.050)	(0.92)
2	KASHIMA ---> SHINTOMI	948328.234	948328.164	-0.070	0.07
3	KASHIMA ---> SINTOTSU	846338.460	846338.458	-0.002	0.00
4	TSUKUBA --->SHINTOMI	909097.857	909097.797	-0.060	0.07
5	TSUKUBA ---> SINTOTSU	837170.591	837170.629	0.038	0.05
6	SHINTOMI ---> SINTOTSU	1556798.249	1556798.224	-0.025	0.02
MEAN					(0.19) 0.04

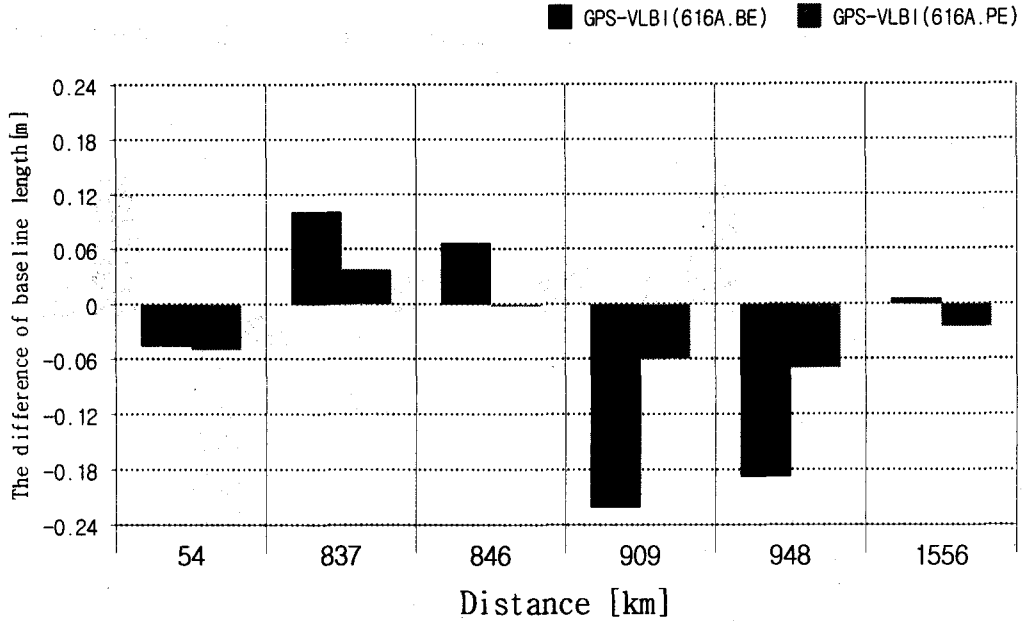


그림5.2. 방송력과 정밀력 해석에 의한 GPS경사거리와 VLBI점간 경사거리와의 비교(616A)

VLBI의 변의 길이를 비교하여 보았다.

표5.4과 표5.5는 각각의 세션 615A, 616A의 GPS 기선장과 VLBI를 비교한 것이다. KASHIMA~TSUKUBA의 기선은 54.2km로서 가장 짧다. 다른 5개의 기선장은 800km이상이고, SINTOTSU~SHINTOM의 기선은 1556.8km로서 GPS 관측망중에서 가장 긴 기선이다. 표5.4, 표5.5에서 VLBI와 GPS에 의한 기선장 차의 상대정도의 평균값중에서 ()내의 값은 6개 기선의 평균값으로서 KASHIMA~TSUKUBA의 기선을 포함한 것이고, 그 아래 표시된 값은 5개 기선의 평균값으로서 KASHIMA~TSUKUBA의 기선을 포함하지 않은 것이다. KASHIMA~TSUKUBA의 기선을 제외하고 장기선(800km이상)의 경우에는 VLBI와 정밀력에서 계산된 GPS 기선장의 차는 평균적으로 0.1ppm보다 작은 것을 알 수 있다. 표11에서 보는 바와 같이 VLBI와 방송력으로 계산된 GPS 기선장의 차는 0.6~22.1cm, 0.13ppm, VLBI와 정밀력에서 계산된 GPS 기선장의 차는 0.2~7.0cm, 0.04ppm이다. VLBI의 경사거리를 표준으로 하면 정밀력에서 해석된 기선장이 방

송력보다 우수한 것으로 평가되었다.

6. GPS관측망의 3차원망 조정결과 분석

WGS-84좌표계로 표시되어 있는 VLBI점의 좌표는 기지값이기 때문에 이들의 점을 고정점으로 하여 기지의 좌표를 입력하고 다른 새로운 점들에 대해 좌표와 정확도를 계산하였다.

정밀력에서 얻어진 기선장의 결과가 방송력의 결과보다 정도가 좋기 때문에 정밀력에서 해석된 기선벡터를 이용하여 망조정계산을 수행하였다. 관동지방에 관측점이 6개소 있고, 기선장이 짧고, 가장 긴 변이 112.2km이다. 북해도, 구주와 한국의 관측점의 기선장은 수백 km~1

500km이다. 단기선과 장기선을 함께 망조정의 계산을 하는 경우, 관측값의 경중율을 주는 방법에 문제가 있기 때문에 표5.6, 표5.7과 같이 짧은 거리의 망과

GPS위성의 방송력과 정밀력을 이용한 장기선 측정 정밀도 분석

표5.6. 615A세션의 정밀력에 의한 3차원망 조정값

	STATION	SESSION 615A ADJUSTMENT COORDINATE			S.D. (m)			
		DEG.	MIN.	SEC.		(m)		
1	KASHIMA	LAT.	35	57	19.9331	X	-39627609.129	FIXED
		LONG.	140	39	33.3273	Y	3276754.953	FIXED
		HEIGHT (M)			60.2931	Z	3724234.623	FIXED
2	MITO		36	24	09.9307		-3962593.038	FIXED
			140	26	31.5080		3273242.394	FIXED
					89.3716		3764308.020	FIXED
3	TAEGU 451		35	53	35.1112		-3229561.823	0.0650
			128	37	52.6808		4041072.518	0.0578
					94.7244		3718643.410	0.2140
4	SONGDONG 311		37	35	30.3043		-3053360.464	0.0676
			127	06	44.0837		4035473.250	0.0610
					304.2041		3869823.638	0.2515
5	KOKUDO		33	32	55.8494		-3452615.095	0.0498
			130	27	17.8583		4048933.525	0.0428
					61.9464		3504885.086	0.1356
6	SHINTOMI		32	05	26.8081		-3582765.398	FIXED
			131	28	58.0609		4052030.803	FIXED
					102.6739		3369018.526	FIXED
7	MITAKA		35	40	51.2585		-3947674.568	0.0149
			139	33	39.7409		3364365.834	0.0131
					109.9584		3699554.354	0.0400
8	TSUKUBA		36	06	20.4046		-3957202.827	FIXED
			140	05	15.2745		3310193.346	FIXED
					64.6443		3737709.064	FIXED
9	SINTOTSU		43	31	43.7738		-3642144.629	FIXED
			141	50	41.0072		2861484.508	FIXED
					116.8660		4370364.822	FIXED
10	GPS-2		35	38	07.8235		-3947340.251	0.0163
			139	31	03.2783		3369253.297	0.0143
					86.3596		3695447.851	0.0437
11	GPS-1		35	34	51.3260		-3953654.916	0.0143
			139	34	44.4767		3367321.008	0.0129
					117.5511		3690542.266	0.0406

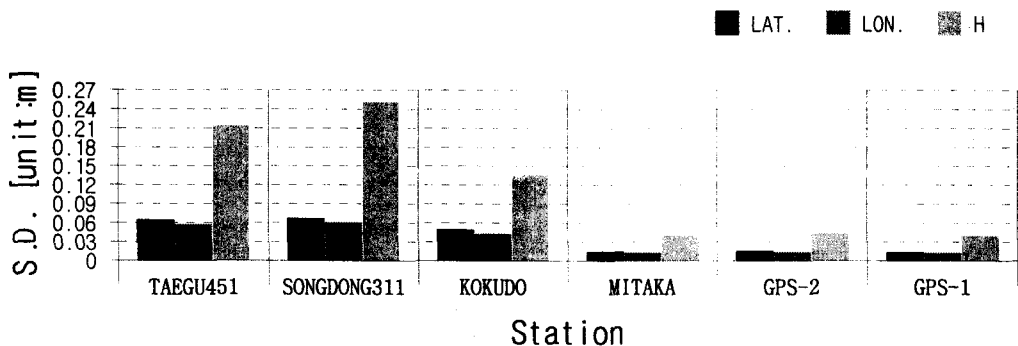


그림5.3 3차원망 조정에 의한 관측점의 표준오차(615A세션)

표5.7. 616A세션의 정밀력에 의한 3차원망 조정값

	STATION	SESSION 616A ADJUSTMENT COORDINATE			S.D. (m)			
		DEG.	MIN.	SEC.		(m)		
1	KASHIMA	LAT.	35	57	19.9331	X	-39627609.129	FIXED
		LONG.	140	39	33.3273	Y	3276754.953	FIXED
		HEIGHT (M)			60.2931	Z	3724234.623	FIXED
2	MITO		36	24	09.9307		-3962593.038	FIXED
			140	26	31.5080		3273242.394	FIXED
					89.3716		3764308.020	FIXED
3	TAEGU 451		35	53	35.1116		-3229561.824	0.0618
			128	37	52.6799		4041072.552	0.0518
					94.7666		3718643.445	0.1808
4	SONGDONG 311		37	35	30.3042		-3053360.487	0.0697
			127	06	44.0829		4035473.313	0.0588
					304.2826		3869823.684	0.2218
5	KOKUDO		33	32	55.8498		-3452615.123	0.0312
			130	27	17.8586		4048933.544	0.0256
					61.9926		3504885.121	0.0791
6	SHINTOMI		32	05	26.8081		-3582765.398	FIXED
			131	28	58.0609		4052030.803	FIXED
					102.6739		3369018.526	FIXED
7	MITAKA		35	40	51.2585		-3947674.588	0.0156
			139	33	39.7410		3364365.848	0.0138
					109.9815		3699554.360	0.0440
8	TSUKUBA		36	06	20.4046		-3957202.827	FIXED
			140	05	15.2745		3310193.346	FIXED
					64.6443		3737709.064	FIXED
9	SINTOTSU		43	31	43.7738		-3642144.629	FIXED
			141	50	41.0072		2861484.508	FIXED
					116.8660		4370364.822	FIXED
10	GPS-2		35	38	07.8235		-3947340.271	0.0174
			139	31	03.2783		3369253.311	0.0153
					86.3868		3695447.864	0.0483
11	GPS-1		35	34	51.3258		-3953654.941	0.0145
			139	34	44.4769		3367321.023	0.0133
					117.5819		3690542.279	0.0439

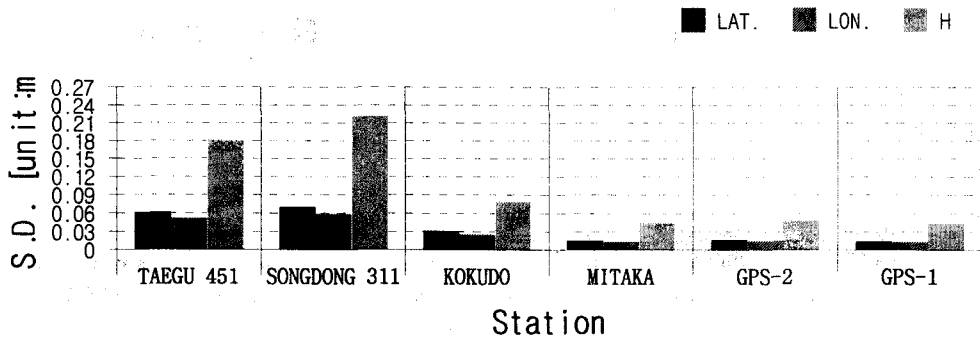


그림5.4. 3차원망 조정에 의한 관측점의 표준오차(616A세션)

긴 거리의 망 각각에 대해 망조정을 수행하였다.

짧은 거리의 망조정은 KASHIMA, TSUKUBA와 MITO(기지의 좌표값)를 기지점으로 하여 GPS-1, GPS-2와 MITAKA의 새로운 점의 평균좌표를 계산하였다.

장거리의 망조정은 TAEGU 451, SONDDONG 311, KOKUDO와 KASHIMA, TSUKUBA, SINTOTSU외에 SHINTOMI를 고정점으로 하여 계산하였다. 망조정 계산의 결과를 살펴보면, 단거리망의 새로운 점의 좌표에 대한 표준오차가 장거리의 망보다 짧고, σ_{LAT} , σ_{LON} 은 약 1cm, σ_{HT} 는 4cm정도지만, 장거리망은 σ_{LAT} , σ_{LON} 이 약 2~7cm, σ_{HT} 는 8~25cm정도로 나타났다.

7. 결론

본 연구에서는 1995년 6월 15일부터 17까지 한일양국에 11개의 GPS 관측소를 설치하고 관측된 GPS 관측자료들을 이용한 장거리 위치결정에 있어서 세션별로 방송력과 정밀력에 의한 위치결정 정확도를 기지점인 VLBI점과 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 방송력과 정밀력에서 해석된 기선장의 정밀도는 평균적으로 0.1ppm보다 작았으며, 기선장이 100Km이하인 경우에 방송력과 정밀력에서 얻어진 기선장의 정밀도는 거의 동일하였지만 수백 km이상의 경우에는 정밀력에서 획득된 기선장의 정밀도가 방송력에서 획득된 기선장보다 우수하다는 것을 알 수 있었다.

둘째, 세션 616A의 장기선의 경우에 VLBI와 방송력에서 계산된 GPS의 기선장의 차는 0.6~22.1cm, 평균값이 0.13ppm이지만 VLBI와 정밀력에서 계산된 GPS의 기선장의 차는 0.2~7.0cm, 평균값이 0.04ppm이었다. 따라서 정확도 측면에서 정밀력에 의한 장기선의 해석정도가 우수하였다.

셋째, VLBI점의 정밀좌표를 고정점으로 하고 GPS 관측점의 3차원망조정을 수행한 결과 단기선망에서의

점좌표의 표준오차중 σ_{LAT} , σ_{LON} 은 약 1cm, σ_{HT} 는 4cm정도지만, 장기선망에서의 점좌표 표준오차중 σ_{LAT} , σ_{LON} 가 약 2~7cm, σ_{HT} 는 8~25cm로 분석되어 수백 km로 구성된 단기선망이나 수천 km로 구성된 장기선망의 위치결정시 GPS의 정확도를 예측할 수 있는 기틀을 마련하였다.

참 고 문 헌

1. Tobita, M., "Precise Determination of the Geodetic Framework of Japan", Bull. Geogr. Surv. Inst., 40, pp. 7~36, 1994
2. Di Wells, "Guide to GPS Positioning", Canadian GPS Associates, 1997
3. R.B Langley, "The Orbits of GPS Satellites", GPS world, No.1, pp. 50~53, 1991.
4. M. Rothacher, "Orbits of Satellite System in Space Geodesy", Swiss Geodetic Commission, pp. 37~41, 1992
5. IUGG, "GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications", pp.14~23, 1996
6. IGS, "IGS 1995 Annual Report", 1996
7. 박필호, 박종욱, 조정호, "GPS 위성의 정밀 궤도력에 의한 기선결정의 정밀도 향상에 관한 연구", 한국측지학회지, 제14권, 제2호, pp.199~207, 1996
8. 藤井陽一郎, 宮下芳, 菊池隆?, 李建新, 小林敬辛, "國內 VLBI の 長距離 GPS 結合(1)", 日本 測地學會, 第84圈 講演會要行, 38, 1995
9. Kikuchi, T., Kobayashi, T., Miyashita, K., Fujii, Y., Asanuma, T., Isezaki, N., "Geodetic Connection of GPS Station to Kashima · VLBI Station in the Kanto District, Central Japan", "Proceeding of the Japanese Symposium on GPS, pp. 169~176, 1994
10. Abusali, P.A.M, Schutz, B.E., Tapley, B.D., Bevis, M., "Transformation between SLR/VLBI and WGS-84 reference frames", Bull.Geod., 69, pp. 61~72. 1995