

GPS를 이용한 서울-제천 지역의 대류층 천정 지연 평가

권영철¹ · 한옥¹ · 박필호²

¹군사과학대학원 지구공학과, 139-799 서울특별시 노원구 공릉동 사서함 77호

²한국천문연구원 GPS 연구그룹, 305-348 대전광역시 유성구 화암동 61-1

Estimation of Tropospheric Zenith Delay over the Seoul-Jecheon area using GPS

Young-Cheol Kwon¹ · Uk Han¹ · Pil-Ho Park²

¹Department of Earth Sciences and Engineering, Advanced Institute of Military Science and Technology, Seoul 139-799, Korea

²GPS Group, Korea Astronomy Observatory, Taejeon 305-348, Korea

Abstract: The estimation of tropospheric zenith delay over the Seoul-Jecheon area using GPS is presented. Over the past ten years, the world-wide industrial nations have been intensively concerned over increasing GPS surveyings in the various fields of earth science. To preserve precise positioning under various weather conditions, relationships between tropospheric zenith delay and GPS accuracy are analyzed. GPS accuracies are compared with tropospheric zenith delay produced by Bernese 4.0 software. Errors of tropospheric delay are 20cm in mean and reduced up to 5cm when tropospheric correction models are used. Correlation between error of GPS and tropospheric zenith delay plays a positive role to monitor the migration of weather front in the established Korean GPS network.

Key words: GPS, tropospheric zenith delay, Bernese, correction models

요약: 이 연구는 GPS를 이용한 서울-제천지역에 대한 대류층 천정 지연 분석에 관한 것이다. 다양한 기상조건하에서 정확도를 보장하는 GPS 측위를 위하여 대류층 천정 지연과 GPS 정밀도와의 연관성을 분석하였다. Bernese 4.0 소프트웨어로 산출한 대류층 천정 지연값의 증가시 GPS 측위 오차도 증가하였다. 대류층에 의한 오차는 평균 20 cm 였으며, 보정 모델 사용시 모두 5cm 범위내로 줄일 수 있었으며, 보정 모델 간에는 차이가 거의 없었다. GPS 측위오차와 대류층 천정 지연의 상관관계를 밝힘으로써 전선의 이동상황을 모니터링할 수 있으며 이는 GPS 기준망의 확장으로 가능할 것이다.

주요어: 지구측위체계, 대류층 천정 지연, Bernese, 보정 모델

서론

GPS의 특징은 전천후 측량 및 항법 시스템으로 알려져 있지만 이는 모든 기상 조건을 일반화시켰을 경우에만 해당된다. 그러므로 여러 기상조건 및 대기의 조건에 따른 GPS의 정밀도 변화를 관찰하는 것은 의미 있는 일이다.

본 연구는 각기 상이한 기상 조건에서 GPS를 관측후 후처리과정에서 적용할 수 있는 각종 조건에 따른 해석상의 정밀도 변화에 대한 연구와 아울러 대류층에 의한 천정 지연값을 계산하여 기상 변화와의 관계성을 분석하였다. 전선의 이동에 따른 GPS 정밀도의 변화관계를

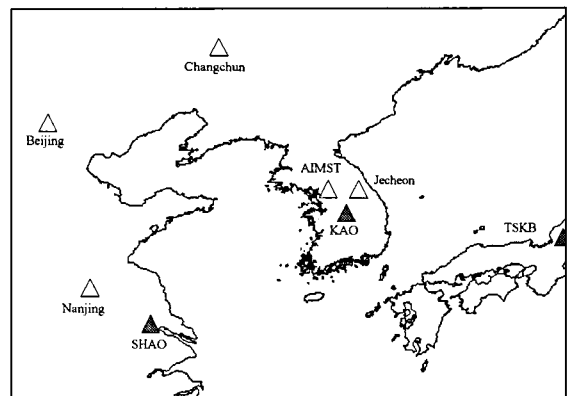


Fig. 1. GPS stations in the study area. SHAO, Shanghai, China; KAO, Taejeon, Korea; TSKB, Tsukuba, Japan.

분석하기 위해서는 Fig. 1과 같이 Shanghai(SHAO), Nanjing, Beijing, Changchun 등의 기준국과 한국천문연구원(KAO) 같은 편서풍대의 영향을 받는 기준국을 선정하여 동일 시간대의 자료분석을 하여야 한다.

그러나 본 연구에서는 대상 범위를 축소하여 비교적 동일한 위도상이고, 경도상으로 110km 이격된 서울과 제천의 GPS 관측소 자료를 이용하였다. 우리나라에 발생하는 전선은 편서풍의 영향으로 서울에서 제천방향으로 이동하며, 전선의 이동 속도는 약 30~40km/hr 이다. 그러므로 서울에 영향을 미친 전선은 약 2~3시간 후에 제천에 영향을 미치는 것으로 가정하였다.

GPS에 의한 수직정밀도와 대기 수분 요소의 결정은 대류층 지연 때문에 발생하는 오차에 의해 제한을 받게 된다. 이러한 것의 주요 원인은 대류층을 통과하면서 발생하는 굴절성의 공간 및 시간적 변이성 때문이다. 추측된 대류층 지연의 시간적 특성은 전선 변수의 방정식과 같은 단순 경로 지연 모델 측면에서 설명할 수 있다. 이러한 결과는 GPS가 기하학 및 전선 지역의 통과 시간을 추측하는데 사용될 수 있다는 것을 나타낸다. 일반적으로 GPS 측정이 천정방향이 아니기 때문에 정확한 총 천정 지연(zenith total delay)을 측정하기 위해

지도 기능들의 활용이 필요하다(Ruffini et al., 1999).

최근에는 전선의 효과를 파악함으로써 통과하는 전선 때문에 발생하는 대류층 변화성과 날씨를 객관적으로 결정하는데 사용되는 측정치를 시험하고 개발하고 있으며, 전 세계적으로 분포되어 있는 관측소에서의 GPS 일일 자료들에 적용하여 대류층의 영향을 받은 자료를 제거함으로써 정밀도의 변화성을 줄이는 시도를 하고 있다. 이를 통하여 대류층에 의한 변화성의 원인에 대한 결론을 얻고, GPS 측량과 기상학과의 관련성을 알 수 있다. 또한 GPS 측위 정밀도와 기상조건과의 상관관계 분석이 가능하다.

천정 지연 모델

기상요소, 즉 기온, 습도 등이 어떤 경계면을 기준으로 급격히 변화하고 있을 때 이 불연속적인 면을 전선면(frontal surface)이라 하며, 이 전선면과 지표면이 만나는 선을 전선(weather front)이라고 한다. 전선은 통상 전선 지역으로 나타내며, 40~200km의 두께를 가진다. 위성사진에 의하면 전선은 길고 좁다란 구름의 밴드로 식별된다. 운동 방향에 따라 한랭전선과 온난전선

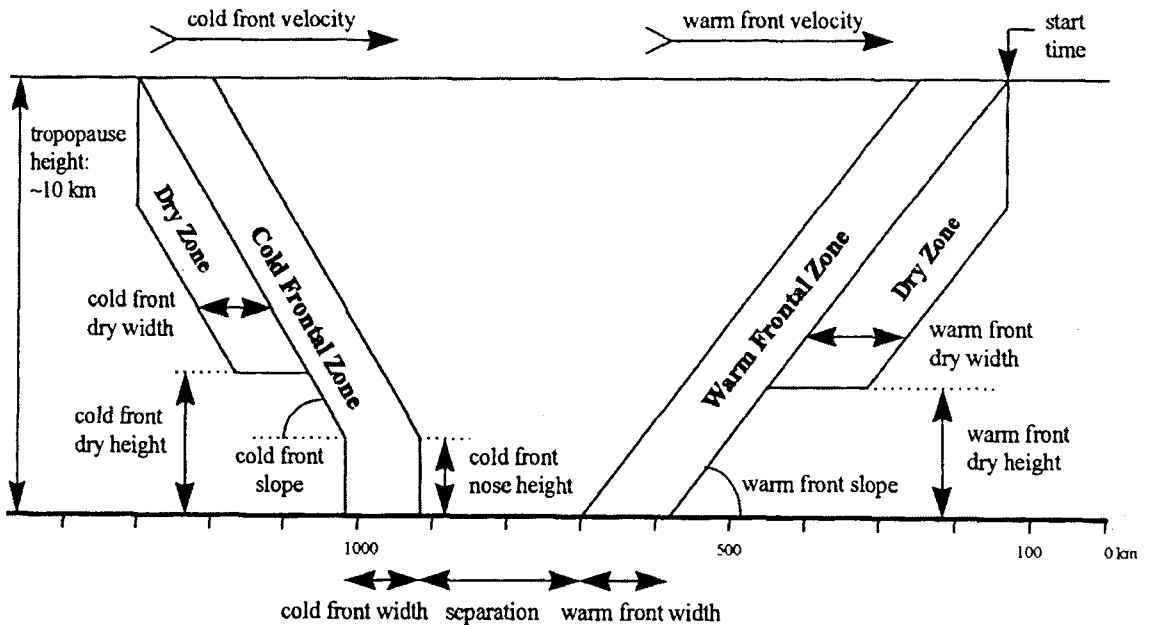


Fig. 2. Geometrical model parameters for cold and warm fronts, note that the model is largely idealized and that in this diagram the vertical scale is greatly exaggerated. A horizontal scale bar is shown to visualize the approximate dimensions of typical weather fronts (modified from Thierry et al., 1999).

으로 구분할 수 있으며, 전형적인 형태는 Fig. 2와 같다.

한랭전선은 전선의 진행 방향을 따라 찬공기 덩어리의 속도가 빨라서 더운 공기 덩어리 아래로 파고 들어갈 때 생기며, 반대로 온난전선은 온난한 공기 덩어리가 한랭한 공기 덩어리 위로 올라갈 때 생성된다. 한랭전선이 온난 전선을 추월함으로써 폐색전선이 생성되기도 한다.

한랭전선과 온난전선의 주요 차이점은 경향성이다. 한랭전선은 찬 공기 덩어리가 더운 공기 덩어리를 강제적인 운동으로 상승시키므로 전선면의 경사도는 온난전선보다 급하며, 평균적으로 볼 때 1/75 정도이다. 이러한 급경사를 이루는 이유는 마찰의 영향으로 지표면의 풍속이 느리고 전선은 지표면보다 대기 중에서 신속히 진행하기 때문이다. 지표면 근처에서의 한랭전선 지역은 표면 마찰 때문에 진행방향의 앞쪽으로 팽창되어 있다. 반면, 온난전선은 매우 완만한 경사를 이루는데, 통상 $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 를 넘지 않으며, 지표면 마찰의 영향으로 진행 방향으로 경사져 있으며, 전선 지역과 관련된 상부 공기 구름은 지표면상에서 전선의 도달을 12시간 또는 그보다 앞서 예고한다. 반면 일기도에서는 항상 지표면상의 전선을 표시하고 있는데, 이것은 상부 층에서 뒤에 온난전선 또는 한랭전선 지역이 있다는 것을 의미하는 것이다. 전선의 통과는 온도, 바람, 습도와 때로는 압력의 변화에 의해서 알 수 있다. 전선을 등압선으로 나타내 보면 수 백 km 이상의 폭을 가진 낮은 압력 이상 지역으로 인식할 수 있다. 그러나 전선을 단순히 압력분야의 이상에 의해 추정할 수만은 없다.

McIntosh and Thom(1969)는 보이지 않는 전선을 나타낼 수 있는 이상적인 전선 모델은 없다고 하였다. 그러나, 모델에서는 전형적인 특성을 가진 전선의 통과에 의해 기대되는 경로 지연량을 도출할 수 있는데 모델에 의해 예측된 지연값은 지표면상에서 기록된 기상 자료에 기초를 둔 것이다.

일반적으로 상부 공기에 대한 기상 자료가 없다는 것의 의미는 매우 낮은 수준의 시간적 및 공간적인 처리 결과만이 가능하다는 것이다. 이러한 모델에는 첫째, 기상청으로부터 얻을 수 있는 지표면에서의 온도, 상대 습도, 압력 둘째, 각 공기 덩어리의 온도 및 습도에 대한 대표적인 수직적 변화도 셋째, 전선의 시작시간 및 속도를 포함한 모델의 기하학적인 모형 등의 세 가지 기본 자료를 입력하여야 한다.

이러한 매개변수들은 GPS 지연 곡선에 가장 유사하도록 값들을 변화시켜주고, 최적의 해에 대한 연구는 Downhill Simplex method(Nelder and Mead, 1965)에 의해 수행할 수 있다. 체계적인 수행과 최소사승법과 같은 경험적인 방법의 에러 처리는 필수적인 것이다.

일반적인 전선형태를 가장 간단한 모델로 나타내고 최적의 매개변수를 선택하기 위하여 명백한 온난 및 한랭전선을 공기 덩어리와 분리하였고, 각 전선 아래에 건조 지역을 두었다. 온난 전선 지역의 전방 끝이 GPS 관측소 위를 지날 때 그 수직적인 아래를 온난 전선의 시작시간이라고 정의했다. 이 지점을 모델 구조의 시발점으로 삼았다. 서로 상이한 경향 때문에 한랭전선의 시작시간은 지표면의 관측소에서 표면 전선의 도착과 일치한다.

지연 모델은 식 (1)로 나타낼 수 있다(Thierry and Geoffrey, 1999).

$$N = K_1 \frac{P}{T} + [(K_2 - K_1)T + K_3] \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

N : 굴절률

T : 온도 (degrees Kelvin)

P : 총 압력(hPa)

e : 수증기 분압

K : 굴절률 상수

(K_1 : 77.61K hPa⁻¹,

K_2 : 72 K hPa⁻¹,

K_3 : $3.75 \times 10^5 \text{K}^2 \text{ hPa}^{-1}$)

여기에서 천정 경로 지연(zenith delay)은 공기층의 수직적인 두께($h_2 - h_1$)로 표현되며, 굴절률 상수(n)를 적용한 굴절률 방정식 식 (1)은 다음과 같다.

$$d_{zenith} = \int_{h_1}^{h_2} [n(h) - 1] dh = 10^{-6} \int_{h_1}^{h_2} N(h) dh \quad (2)$$

식 (2)와 같이 N 은 고도 방정식 h 로 통합되어 진다. 왜냐하면, 온도, 압력, 수증기 압력이 모두 지표면 위의 고도에 따라 변화하기 때문이다.

GPS 관측소 위의 수직적 요소에서 서로 다른 공기 덩어리가 각각 쌓인 곳에 대류권의 두께에 의해 발생하는 지연은 각 층의 깊이와 그것의 부분적인 지연을 합하는 식 (1)에 의해 얻게 된다. 또한 방정식의 첫 번째 및 두 번째의 요소가 통합됨에 따라 "dry"와 "wet"이 지연에 미치는 정도를 독립적으로 결정할 수 있다. 대

류권의 온도와 수증기의 농도는 연속적으로 감소하는 것으로 추정하였다. 지표면에서 야간에 발생할 수 있는 기온 역전현상과 다른 비선형적인 편차는 전체 지연에서 매우 작은 효과이므로 무시할 수 있다. 상부 공기의 기상학적 모델을 구현하는 데에는 다음 Table 1과 같은 지표면 자료의 수직적 변화도를 적용한다.

또한, 건조 구역은 수증기가 전혀 없는 것으로 모델링 되었다. 온난 및 한랭 공기의 경사도는 열대지방과 극지방마다 각각의 전형적인 해수면상의 상부공기 값에 기초를 두었고, 전선 지역은 한랭 및 온난 공기 덩어리 경사도의 평균값으로 모델링 하였으며, 고도에 따른 압력의 편차는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dh = -(RT/gP)dP \quad (3)$$

R : the universal gas constant
g : gravitational acceleration

상부 공기 자료를 모델화하는 절차는 다음과 같다.

표면 공기의 굴절률을 결정하기 위한 표면 기상 자료로는 온도, 압력, 수증기 밀도가 있다. 상대습도를 구하여 도표로 만들어진 포화 증기압력과 대기 온도의 값과 함께 압력과 온도를 이용하여, 수증기 밀도로 쉽게 바꿀 수 있다. 실제로 전선의 전이는 추정한 것보다 점진적으로 이루어진다. 온도와 습도의 명확한 경계는 모델화된 지연 시간대별로 계단 함수를 적용하게 된다. 또한 선형적인 습도의 수직분포 기율기에 따라 일정 고도(통상 4~5km, 표면습도에 따라서 상이함) 이후에는 습윤 증기를 0으로 모델화하였다.

지상에 설치된 습도 측정 장비만으로는 대류권 상부의 상태를 나타낼 수 없는데, 이는 천정 지연량을 정확히 결정하기 위한 이 모델 능력의 한계이다. 대류권 상

부의 공기 자료를 정확히 결정할 수는 없지만, 지상에서 관측한 결과치 이상의 다른 조건으로 나타낼 수는 없다. 실제로, 자료를 통한 모델 시험에서 표면의 습도와 천정 지연과의 높은 상관관계를 얻었다. 이 모델의 상부 공기 자료를 결정할 수 있는 방법이 없는 것에 대한 추가적인 보완될 사항은 모델화된 공기 덩어리의 물리적인 특성을 정확하게 나타낼 수 있는 기율기를 결정하는 것이다.

GPS 관측

전선에 의한 영향을 분석하기 위하여 서울 및 제천 GPS 기준국에서 1999년 5월 7일 00시부터 5월 26일 24시까지의 자료를 2시간 간격으로 연속적으로 관측하였다. 자료의 수신은 서울의 AIMST 군사기준점과 제천의 한국전력 기준점의 Trimble 4000SSI L1/L2 2주파수신기를 이용하였으며, 위성 고도각은 15°, 최소위성수는 4개, GPS 자료의 수신간격은 15초로 하였다. AIMST 군사기준점은 세계측지체계 (1984) 좌표에서 RMS 오차 6

Table 2. Weather conditions in the study area (1999. 5. 17 ~ 5. 26).

Area	Date	Rainfall (mm)	Humidity (%)	Clouds (%)	Sunshine duration (hr)	Remark
Seoul	5.17		51.0	45	9.8	/shower
	5.18	33.2	70.0	98	0.0	rain/fog
	5.19	1.7	79.0	98	0.0	sunny/fog
	5.20		66.0	21	9.9	sunny/fog
	5.21		55.0	04	11.4	partly cloudy
	5.22		59.0	30	10.1	rain/fog
	5.23	1.3	62.0	80	6.9	rain/fog
	5.24	23.9	87.0	84	0.0	shower
	5.25		77.0	53	5.7	rain/shower
	5.26	1.4	82.0	95	0.0	partly cloudy
	Jecheon	5.17		51.0	39	10.7
5.18		28.0	66.0	95	0.0	rain
5.19		6.0	76.0	98	0.0	sunny
5.20			57.0	21	12.4	sunny
5.21			58.0	00	12.7	sunny
5.22			57.0	10	10.8	rain
5.23		0.0	57.0	81	9.9	rain
5.24		21.0	76.0	99	0.0	mostly
5.25			70.0	73	2.6	cloudy
5.26		0.5	69.0	85	1.0	rain

Table 1. Vertical gradients to the surface data. The humidity mixing ratio is in grams of water vapor per kilogram of dry air (modified from Thierry et al., 1999).

	Temperature (K km ⁻¹)	Humidity mixing ratio (g kg ⁻¹ km ⁻¹)
Warm air	-5.1	-1.02
Cold air	-6.4	-0.95
Warm frontal zone	-2.9	-0.98
Cold frontal zone	-2.9	-0.98
Warm frontal dry zone	-6.4	0
Cold frontal dry zone	-6.4	0

cm의 정밀도의 GPS 기준점으로 설정되었다(박용준 · 한옥, 1998).

기상 자료는 기상청에서 제공하는 3시간 단위 습도 기록표와 2시간단위 강수 기록표를 이용하였으며, Table 2와 같다. 관측기간 동안의 지역별 습도와 강수량의 관계는 Fig. 3과 같다.

결과 및 자료 분석

제천의 한국전력 GPS 관측소를 기준으로 하여 서울의 AIMST 관측소의 자료를 GPSurvey 2.35와 천문연구원의 Bernese 4.0 소프트웨어를 이용하여 후처리하였다. 이를 방송 궤도력과 JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 제공하는 정밀 궤도력으로 후처리하여 적용되는 궤도력에 따른 정밀도의 변화를 비교하고, GPSurvey 2.35 소프트웨어의 Hopfield(default), Saastamoinen, Black model 등의 대류층 보정 모델별과 모델을 적용하지 않은 상태(none)로 각각 후처리하여 각 모델에 따른 정밀도의 비교를 통하여 가장 적합한 적용 모델을 선정하였다. 또한 서울지역에 대한 대류층에 의한 총 천정 지연값을 추정하여 기상 조건의 변화에 따른 총 천정 지연값의 변화를 관찰함으로 전선의 이동상황을 탐지하고, 이에 따른 정밀도의 변화를 비교하였다.

자료의 비교 및 분석은 세 가지로 구분하였는데, 첫째는 방송 궤도력과 정밀 궤도력을 이용하여 GPSurvey 2.35 S/W로 후처리하여 위도, 경도, 고도별 측위 결과를 도식하고, 이를 수평 및 수직요소의 오차로 환산하여 그 분포를 비교하였다. 또한 기상의 변화와의 관계성을 분석하였다. 둘째는 정밀 궤도력을 이용하여 GPSurvey 2.35 S/W의 Hopfield, Saastamoinen, Black model 등의 대류층 오차 보정 모델을 사용한 것과 모델을 사용하지 않은 non-mode 상태로 후처리하여 위도, 경도, 고도별 변화성을 비교하였으며, 대표적인 오차 보정 모델의 사용 여부에 따른 정밀도 변화를 수평, 수직 성분으로 구분하여 비교하였다. 셋째는 스위스 Bern 대학에서 개발한 GPS처리 소프트웨어인 Bernese 4.0을 이용하여 얻은 대류층 총 천정 지연값과 기상 조건과의 관계성을 비교하였으며, 적용하는 궤도력 및 보정 모델의 사용 여부에 따른 상관성을 분석하였다.

방송궤도력과 정밀궤도력의 비교 결과는 Fig. 4에 나

타내었다. Fig. 4에서와 같이 AIMST기준국의 자료를 일일 2시간 간격으로 후처리하여 동거차 성분의 오차량을 비교한 결과에서는 정밀 궤도력을 사용하였을 때가 방송 궤도력을 사용했을 때보다 정확도 0.012m, 표준편차 0.013m로 정확하게 나타났으나, 고도상에서는 거의 동일한 정밀도를 나타내었다.

또한, 측위 결과를 기준점으로부터의 위치오차로 환산하여 2σ 를 기준으로 각 측점의 분포를 분석한 결과,

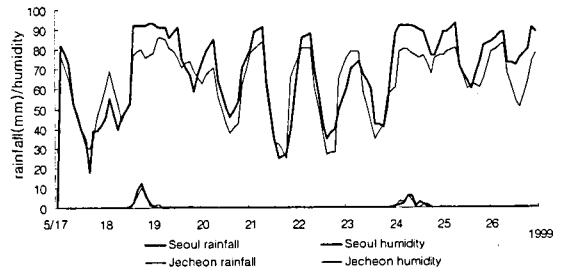
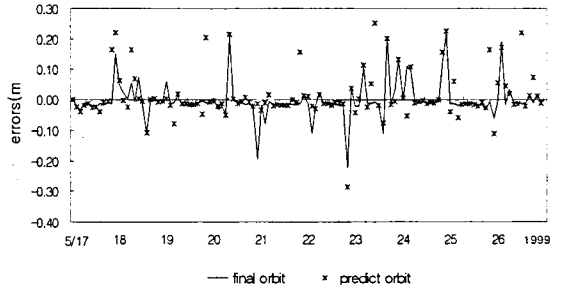
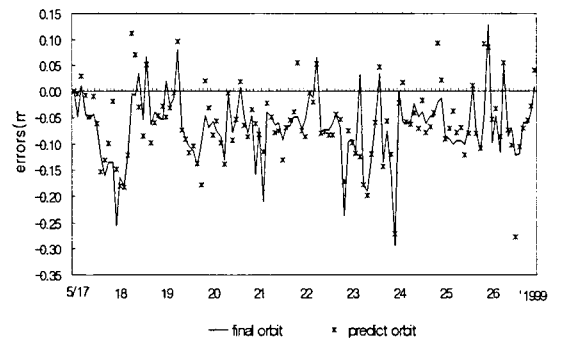


Fig. 3. Variations of humidity and rainfall in the study area.



(a)



(b)

Fig. 4. Comparison of errors by final orbit and predict orbit; (a) easting, (b) height.

수평요소에서는 정밀케도력의 경우 평균오차 0.041m, 2σ 0.108m로 95%가 0.142m 오차 범위안에 분포되었다. 정밀케도력을 사용했을 경우의 분포가 방송케도력을 사용했을 때보다 평균위치를 중심으로 밀집되게 분포되었다. 수직 요소에서는 정밀케도력과 방송케도력의 분포도의 차이는 나타나지 않았다.

후처리 정밀도는 $5\text{mm} \pm 1\text{ppm}$ 로 알려져 있다. 기선거리 111km에서 2시간 관측한 결과, 정밀 케도력을 사용하였을 때는 수평 0.37ppm, 수직 0.71ppm의 정밀도로 나타났으며, 방송 케도력을 사용하였을 때에도 수평 0.49ppm, 수직 0.71ppm의 정밀도를 보였다. 이것은 2시간씩 관측한 결과이므로 정밀 케도력과 차이가 나타나지 않은 것이다.

그러므로, 장거리 기선에서 방송 케도력을 사용할 경우 긴 관측시간으로 정밀 케도력에 준하는 정밀도를 얻

을 수 있었다. 이러한 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

또한 관측시의 기상 조건에 따른 측위 결과는 Fig. 6과 같다. 매일 22시와 24시까지의 관측 결과에서는 평균 오차가 0.04m 인 것에 비해 4~5배 이상인 0.25m 정도의 오차가 규칙적으로 발생하였는데, 이는 위성의 케도 배열에 의한 오차로 추정할 수 있다. 기상조건과의 연관성을 찾기 위해 이러한 규칙적인 오차를 배제시키고 나면, 강수 전 및 습도 분포의 급격한 변화의 전후 시점에 불규칙적인 오차가 발생하였다.

둘째, 대류층 보정 모델별 비교 결과는 다음과 같다. 일반적으로 후처리 소프트웨어인 GPSurvey 2.35에서는 Hopfield 모델을 기본값으로 설정하여 사용하고 있는데, 각 대류층 보정 모델별 처리결과 특이한 차이없이 Fig. 7과 같이 각 모델간에 비슷한 결과를 나타내었다. 반면, 대류층 보정 모델을 사용하지 않았을 경우에는 수평 위치는 평균 0.21m, 수직 위치에서 0.29m의 오차가 발생하였다.

Fig. 8에서는 강수량 및 습도와 Hopfield 대류층 보정 모델을 이용한 수평 위치 오차와의 관계에 대하여 비교하였다. 측위의 결과 자료가 2시간 간격이며, 대류층 보

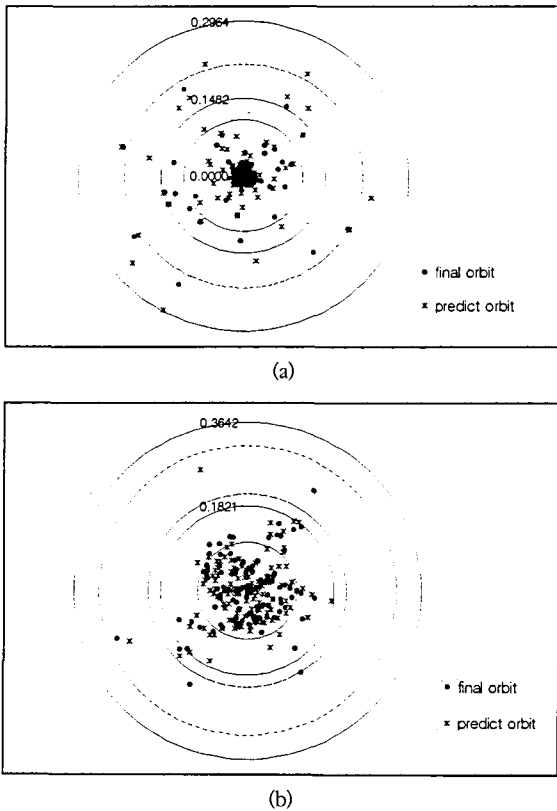


Fig. 5. Distribution of positioning errors by final orbit and predict orbit; (a) horizontal component: final orbit (mean: 0.041m, 2σ : 0.108m), predict orbit (mean: 0.054m, 2σ : 0.131m) (b) vertical component: final orbit (mean: 0.078m,

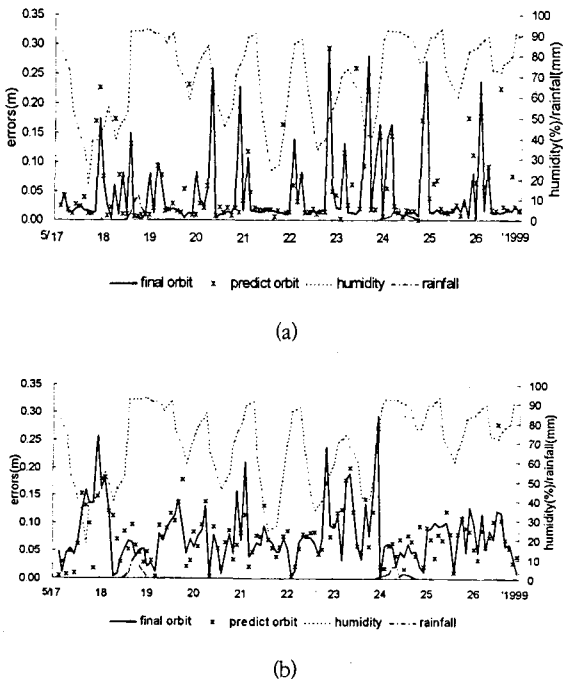
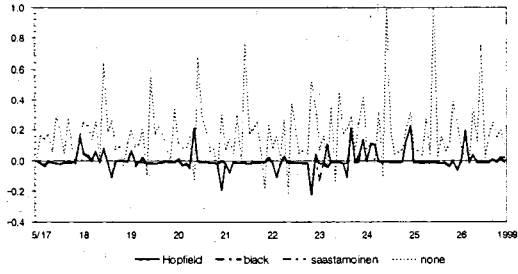
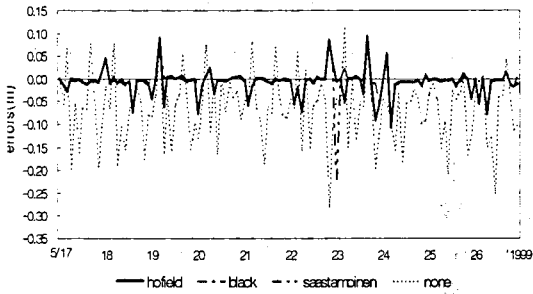


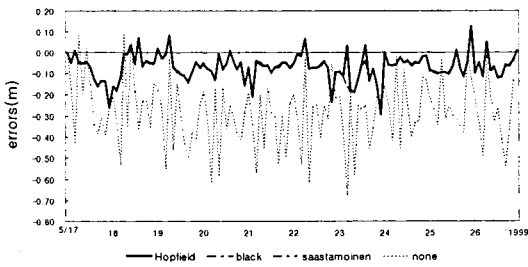
Fig. 6. Variations of accuracy by weather condition; (a) horizontal component (b) vertical component.



(a)



(b)

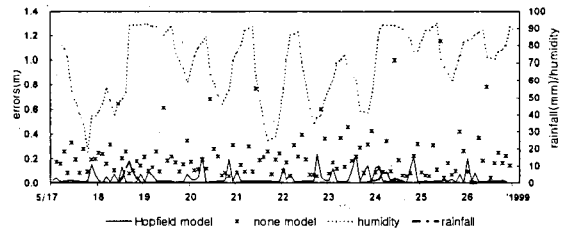


(c)

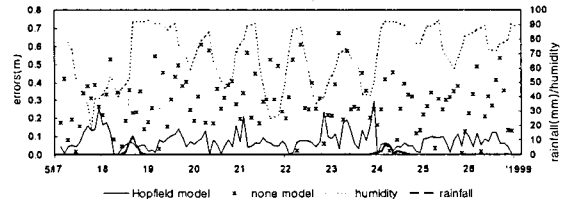
Fig. 7. Comparisons with tropospheric correction models; (a) easting, (b) northing, (c) height.

정값의 추정간격이 시간 단위로 설정된 이유로 상관관계를 정확하게 규명할 수는 없었으나, 강수 및 습도 등의 기상 조건 변화에 따라 GPS 정밀도의 변화가 있음을 알 수 있다.

셋째, 주어진 기상 조건하에서의 Bernese 4.0 소프트웨어를 이용한 대류층 천정 지연값의 추정 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 강수현상과 80% 이상의 습도가 유지되기 전 시점에서 대류층 천정 지연값의 변화는 발견할 수 있었으나, 최초로 예상했던 전선의 이동 상황을 발견할 수는 없었다. 이를 통하여 기준점인 제천과 관측지점인 서울이 습도 분포 및 강수량의 분포에서 알 수



(a)



(b)

Fig. 8. Comparison of tropospheric correction models by weather condition; (a) horizontal component: Hopfield model (mean: 0.041m, σ : 0.054m), none (mean: 0.217m, σ : 0.187m), (b) vertical component: Hopfield model (mean: 0.078m, σ : 0.052m), none (mean: 0.291m, σ : 0.144m).

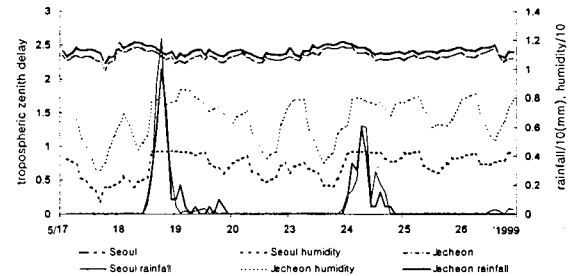


Fig. 9. Relationship between tropospheric zenith delay and weather condition.

있듯이 5월 18일과 24일의 강수현상은 전선의 영향을 받은 것이 아니었다는 것을 알 수 있었다. 또한 추정된 대류층 천정 지연값과 적용한 캐도력에 따라 수평 및 수직 분포의 관계를 비교한 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 천정 지연값이 증가하는 시점에서는 측위의 정밀도가 불안정하게 나타나고 있다. 수평 분포를 비교해 볼 때, 10:00~12:00 사이의 자료에서는 평균 오차의 4배인 0.2m 이상의 오차가 24시간을 주기로 반복적으로 발생하며, 22:00~24:00의 경우에서도 24시간의 주기로 0.1m 내외의 오차가 반복적으로 발생하였다. 즉, 오전

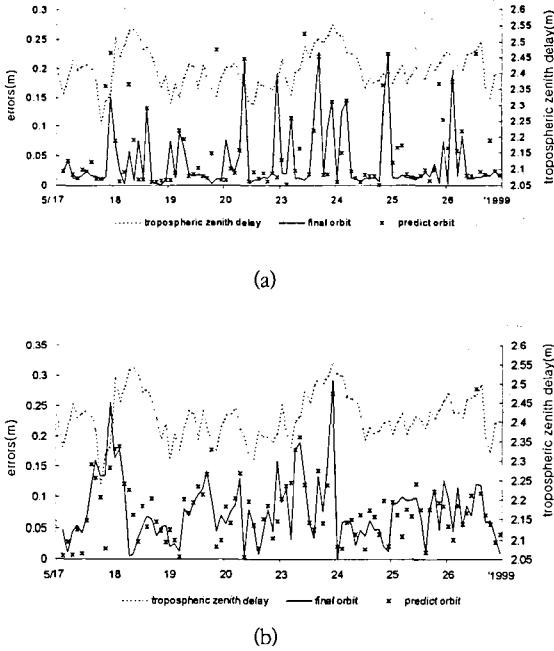


Fig. 10. Relationship between tropospheric zenith delay and positioning errors of orbits; (a) horizontal component (b) vertical component.

10:00를 기준으로 2시간 간격의 자료 처리 결과 12시간의 주기를 가진 이상적인 오차가 발생하고 있음을 발견하였다.

산출된 대류층 천정 지연값과 보정 모델에 따른 수평 및 수직 성분의 오차량과의 관계에 대하여 비교한 결과 대류층 총 천정 지연값이 2.4m를 기준으로 변화가 생기는 시점에서 위치 오차에 영향을 미친 것을 알 수 있었다. 대류층 총 천정 지연값이 급격히 증가하거나, 감소하는 시점에서 수평 및 수직 성분의 오차량의 변화가 나타났으며, 오히려 총 천정 지연값이 최대인 시점에서는 수평 및 수직 성분의 오차량은 발생하지 않았다.

본 연구의 GPS 자료 관측기간이 짧았기 때문에 이들의 관계를 규명할 수는 없었지만, 보다 장기간의 GPS 자료 관측과 분석을 통하여 관계를 규명할 수 있을 것이다. 반면 수평 및 수직 위치의 오차가 평균 오차보다 4~5 배 이상 벗어나는 시간대인 10:00~12:00, 22:00~24:00의 처리결과에는 기상조건뿐만 아니라 위성의 배열 및 기타 오차 요소의 영향이 있었다. 이들의 관계는 Fig. 11에 나타내었다.

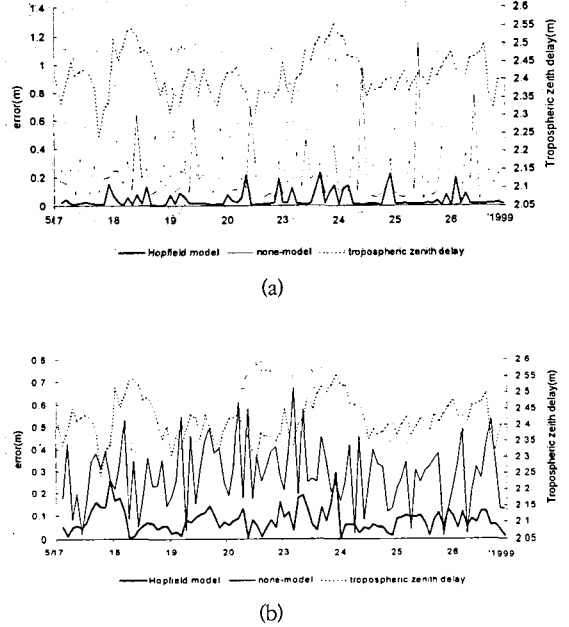


Fig. 11. Relationship between tropospheric zenith delay and positioning errors of correction models; (a) horizontal component (b) vertical component.

결론

대류층 천정 지연 추정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 111km의 기선거리에서 2시간씩 GPS 관측 자료를 final orbit와 predict orbit를 이용하여 후처리한 결과 수직 성분의 오차량 차이는 mm 이내로 차이가 없었다. 반면 수평위치에서는 1cm 이상의 차이가 나타났다. final orbit를 사용하여 후처리 한 결과 111km의 기선거리에 대하여 수평 평균오차는 4.1cm로 나타났다. 또한 관측 횟수의 95% 이상이 평균 오차로부터 2σ 범위내에 분포하였고, 나머지 5%의 경우 20cm 이상의 오차가 발생하였다. 22:00~24:00 사이의 GPS 측위 결과를 기준으로 12시간 주기로 평균 20cm의 오차가 발생하였다.

둘째, Hopfield, Saastamoinen, Black model 등의 대류층 보정 모델별 후처리 결과를 비교했을 때, Hopfield 모델을 사용한 것과 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나, 보정 모델을 적용하지 않았을 경우는 수평 요소 22cm, 수직요소 29cm의 오차가 발생하였다.

셋째, GPS 정밀도와 기상 및 대류층 천정 지연값의 관계는 기상 및 대류층 천정 지연값이 증가 또는 감소하는 시점에서 측위 정밀도의 변화가 나타났다.

따라서 지속적인 연구를 통하여 습도, 강수량 등의 기상조건 변화에 따른 GPS 정밀도가 변화하는 관계를 이용하여 보다 높은 정밀도의 GPS 측위 체계를 유지할 수 있으며 동시에 GPS를 이용한 일기예보가 가능하게 될 것이다.

참고문헌

박용준 · 한옥, 1998, 지구중력모델을 이용한 군사적 GPS 기

준점에 관한 연구, 한국군사과학기술학회 1997 추계학술대회논문집, 663~669.

McIntosh, K.H. and Thom, A.S., 1969, Essentials of meteorology, Wykeham, London.

Nelder, F.A. and Mead, R., 1965, A simple method for function minimization, Comput. F., 7, 308~313.

Ruffini, G., Kruse, L.P., Rius, A., B rki, B., Cucurull, L., and Flores, A., 1999, Estimation of tropospheric zenith delay and gradients over the Madrid area using GPS and WVR data. Geophysical Research Letters, 26 447~450.

Thierry, L.H, Gregorius and Geoffrey Blewitt, 1999, Modeling weather fronts to improve GPS heights. Journal of Geophysical Research, 104, 15, 261~15, 279.

2000년 3월 7일 원고 접수
2000년 8월 4일 원고 채택