

오차보정정보 적용에 의한 단일주파수 수신기의 측위정확도 향상

The Improvement of the Positioning Accuracy of a Single Frequency Receiver by Applying the Error Correction Information

최병규¹⁾ · 이상정²⁾ · 박종욱³⁾ · 조중현⁴⁾

Choi, Byung Kyu · Lee, Sang Jeong · Park, Jong Uk · Jo, Jung Hyun

Abstract

Providing a precise positioning information is the primary characteristics of GPS. The relative positioning technique which utilizes the common measurements between a GPS reference station and a user is generally used to do the generation of a precise positioning. But if user is far from a GPS reference site, the properties of medium penetrated by GPS signals will be different from each other, It is difficult to eliminate the error sources such as the ionosphere and the troposphere effectively by the double differencing method. In this study the additional error correction values with the ionosphere and the troposphere to the data processing have applied. As a result, the positioning accuracy of fourteen out of seventeen testing sites were improved by applying the error correction values. We also analysed the improved rate of the positioning accuracy by the baseline.

Keywords : GPS, Relative positioning, Error correction, Baseline

초 록

정밀한 위치정보의 제공은 GPS가 갖는 가장 큰 특징 중의 하나이다. 기준국과 사용자의 공통된 관측정보를 이용하는 상대측위방법이 일반적으로 정밀위치 정보 산출에 사용되고 있다. 그러나 기준국과 사용자의 기선거리가 멀어지면 GPS 신호가 통과하는 공간상의 매질특성이 서로 다르기 때문에 이중차분에 의해서도 전리층과 대류층 등의 오차요인은 완전히 제거가 되지 않는다. 본 연구는 이러한 특성을 고려하여 전리층과 대류층에 대한 오차보정정보를 추가적으로 생성하여 자료처리에 적용하였다. 그 결과 실험지역 17곳 중 14곳은 오차보정정보 적용이후에 위치정확도가 향상되었음을 알 수 있었다. 또한 기선거리에 따른 위치정확도 향상정도를 분석하였다.

핵심어 : GPS, 상대측위, 오차보정, 기선거리

1. 서 론

GPS가 기본적으로 제공하는 실시간 측위기술은 지리 정보시스템(GIS, Geographic Information System), 위치 기반서비스(LBS, Location Based Service) 그리고 지능형 교통시스템(ITS, Intelligent Transportation System) 등 다양한 응용분야에 핵심 기술로 활용되고 있다. 그러나

관련 서비스 산업의 발전에 비해 실시간 고정밀 측위정보 서비스는 국내에 잘 갖추어진 GPS 기준국망 인프라에도 불구하고 실현이 되고 있지 않다. 또한 GPS 방식의 단말기를 활용한 측위서비스는 일반사용자들에게 만족할 만한 수준의 정확도를 제공하지 못하고 있다.

일반적으로 지상기반(Ground based)으로 실시간 고정밀 측위서비스를 제공받기 위해서는 GPS 기준국과 측정

1) 정회원 · 한국천문연구원 위성항법기술그룹 선임기술원(E-mail:bkchoi@kasi.re.kr)
2) 연결저자 · 충남대학교 공과대학 전자공학과 교수(E-mail:eesjl@cnu.ac.kr)
3) 연결저자 · 한국천문연구원 위성항법기술그룹 책임연구원(E-mail:jupark@kasi.re.kr)
4) 한국천문연구원 위성항법기술그룹 선임연구원(E-mail:jhjo39@kasi.re.kr)

하고자 하는 지점이 약 20km 이내로 국한된다. 이것은 기준국과 사용자 측의 이중차분(Double Difference)에 의해 위성의 시계오차와 수신기의 시계오차를 제거하고, 마찬가지로 짧은 기선으로 인해 상층대기오차를 포함한 불확실한 오차정보가 대부분 제거되는 한계범위를 의미한다. 이중주파수 데이터(GPS L1/L2) 수신이 가능하고, 단 기선인 경우에는 대략적으로 10cm이내의 위치정확도를 산출할 수 있다. 그러나 장기선, 즉 기준국으로부터 100km 이상 벗어난 지역에서는 단기선에 비해 그 정확도가 현저히 떨어진다. 기선에 따른 위치정확도가 떨어지는 단점을 보완하기 위해 일본, 독일, 미국 등 선진국에서는 가상기준국(Virtual Reference Station)과 Network-based RTK(Real-Time Kinematic)와 같이 GPS 기준국망을 활용하여 추가적인 오차보정정보를 생성하여 제공하는 시스템을 독자적으로 개발하여 운영하고 있다(Vollath 등, 2000; Wanninger, 2002; Rizos, 2002).

본 연구에서는 일반 GPS사용자들을 위해 단일주파수의 코드(Code)와 반송파위상(Carrier Phase)만을 이용하였고, 한국천문연구원에서 개발한 상대측위 알고리즘에 추가적으로 개발한 전리층 관측모델에서 산출된 오차보정정보와 대류층 관측정보를 적용하여 기선에 따른 위치정확도 향상 정도를 분석하였다.

2. GPS 관측 방정식

GPS의 정밀측위에 직접적으로 영향을 주는 요인으로는 대표적으로 전리층 지연오차, 대류층 지연오차 그리고 위성의 궤도오차 등이 있으며, 그 외에 위성시계, 다중경로, 지구조석, 수신기 시계 및 바이어스 성분, 위상말림(Phase wind-up) 등 다양한 오차요인이 있다. GPS 신호가 통과하는 공간상의 서로 다른 매질특성과 지형적인 형상은 GPS 위치정확도와 깊은 관련이 있으며, 특히 기준국과 사용자와의 두지점간 기선거리가 멀어질 경우, 위치오차에 대한 불확실성은 커지게 된다.

GPS 수신기에는 L1과 L2 두 주파수를 모두 수신할 수 있는 이중 주파수용 수신기와 L1 주파수만 수신하는 단일 주파수용 수신기가 있다. 이중 주파수용 수신기는 고가인 반면에 두 개의 주파수 차이를 이용하여 전리층에 의한 신호 지연 오차를 보정하거나 대부분 제거 할 수 있다. 한편, 단일 주파수용 수신기는 저가이지만 전리층에 의한 신호 지연 오차를 완전히 제거 할 수 없는 단점을 가지고 있다.

그러므로 단일 주파수용 수신기는 이중 주파수 수신기로 이루어진 지상의 GPS 상시관측소 데이터를 이용하여 추정된 전리층 모델을 사용함으로써 그 오차를 상당 부분 보정할 수 있다(Komjathy 등, 1997).

GPS 위성에서 송신되는 신호들 중에서 반송파 위상 데이터는 잡음이 작은 반면, 신호 끊김(Cycle Slip) 현상을 고려해야 하고 모호정수(Integer Ambiguity)를 반드시 결정해야만 한다(Erickson, 1992; Fotopoulos 등, 2001). 또한 정확한 모호 정수를 결정하기 위해선 정확한 측정값을 필요로 한다. 반면에, 의사거리 데이터는 신호 끊김 현상이 적고 모호정수를 결정할 필요가 없지만, 다중경로 오차(Multipath Error)와 시스템의 잡음이 많이 내재 되어있다. 따라서 본 연구에서는 의사거리와 반송파 위상 데이터를 동시에 활용하여 관측시간별로 데이터를 처리하였다. GPS의 L1 주파수의 경우 의사거리 데이터의 관측 값(P1)은 수식적으로 다음과 같다(Klobuchar, 1987).

$$P1(k) = \rho + c(\delta t^s - \delta t_r) + \epsilon_{iono} + \epsilon_{trop} + \epsilon_m + \epsilon_{L1} \quad (1)$$

여기에서,

ρ	GPS 위성과 수신기 사이의 거리
c	빛의 속도
δt^s	GPS 위성의 시계 오차
δt_r	수신기 시계 오차
ϵ_{iono}	전리층에 의한 오차
ϵ_{trop}	대류층에 의한 오차
ϵ_m	다중경로 오차
$\epsilon_{L_i}(i=1)$	L1 상의 수신기 잡음
k	관측시간 지수

GPS 기준국과 사용자의 공통된 L1 관측정보를 활용하여 이중차분(Double Difference)을 하면 위성시계와 수신기 시계오차는 완전제거가 되는 반면에 그림 1처럼 기선거리가 멀어지면 전리층과 대류층에 의한 오차는 이중차분에 의해서도 제거가 되지 않는다. 따라서 기선거리에 따라 오차요인을 고려하면 정밀한 위치정보를 산출할 수 있다.

3. 오차보정정보 생성

3.1 전리층 오차 보정정보

일반적으로 전리층의 오차를 보완하기 위해 실시간으

로 가장 널리 사용하고 있는 모델은 전지구적 모델인 Klobuchar 모델이다. 이 모델은 단일 주파수 수신자를 위해 제안된 전리층 보정 모델이며, 중위도 지역에서 전리층 오차를 평균 약 50%까지 보정할 수 있다. 태양 플레어 폭발이나 강력한 지자기 변화에 의한 고층대기의 변화, 즉 우주환경변화로 인해 지구의 상층대기가 직접적으로 영향을 받아 전리층의 교란이 심해지면 Klobuchar 모델의 전리층 오차보정 정확도는 40% 이내로 감소하게 되어 GPS를 활용한 고정밀 위치정보 산출에 영향을 많이 준다.

기존에 실시간으로 단일주파수 사용자들을 위해 이용되고 있는 Klobuchar 모델의 정확도가 떨어지는 단점을 보완하기 위해 한국천문연구원은 GPS 기준국망을 활용한 독자적인 전리층 총전자수(TEC, Total Electron Contents) 감시 시스템을 개발하였다.(최병규 등, 2005)

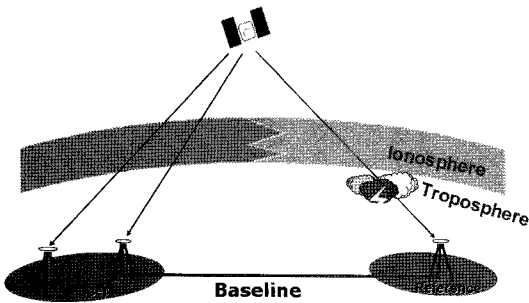


그림 1. 기선에 따라 다른 매질을 통과하는 GPS 신호

한국천문연구원의 대전(DAEJ) 국제 기준점(IGS, International GNSS Service)을 포함하여 전국에 고르게 분포하고 있는 9개의 GPS 기준국으로부터 실시간으로 원시 관측 정보를 전송받아 저장·가공하고 전리층 TEC값을 격자기반으로 생성한다.

그림 2와 3은 위도·경도에 대한 공간해상도를 각각 $1^\circ \times 1^\circ$ 와 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 의 격자로 나누어 산출한 전리층 TEC값을 나타낸다. 그림 3처럼 격자를 보다 세분화한 것은 사용자들에게 좀더 정밀한 정보를 제공하기 위한 것이고, 단점은 격자간격이 세밀하기 때문에 그에 해당하는 오차 정보 양이 많아진다는 것이다. 사용자가 현재 위치하고 있는 지역과 GPS 위성의 고도각(Elevation angle)에 따라 전리층 오차보정값이 서로 다르게 적용된다. 그리고 전리층 오차에 의한 신호 지연 거리는 전리층 내의 총 전자수에 의해 다음 식 2와 같이 바뀌어 사용된다.

$$1TECU \cong 0.162m \quad (2)$$

전리층에 의한 오차는 기준국과 사용자의 기선거리가 증가함에 따라 반드시 고려해야만 하는 요소이다.

3.2 대류층 오차 보정정보

GPS는 전파신호의 특성상 대류층을 통과할 때 신호지연이 발생한다. 전리층에 의한 오차보다는 상대적으로 오차가 작지만, 기상변화에 따라 그 값이 연속적으로 변화

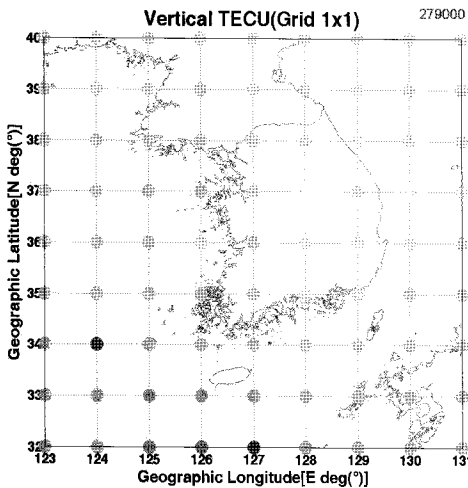


그림 2. 격자 $1^\circ \times 1^\circ$ 에 해당하는 한반도 상공의 전리층 TEC 값 산출

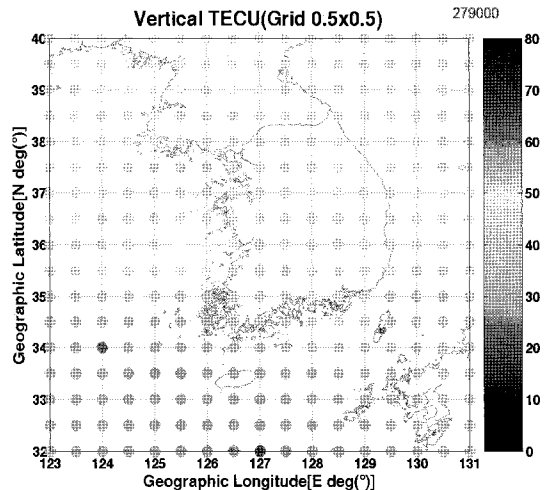


그림 3. 격자 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 에 해당하는 한반도 상공의 전리층 TEC값 산출

기 때문에 오차를 정밀하게 추정하는 것이 쉽지 않다.

일반적으로 대류층 지연은 건조지연(Hydrostatic delay)과 습윤지연(Wet delay)라는 두개의 부분으로 나뉘어 진다. 습윤지연이 대기중의 수증기 변화에 기인하는 반면, 건조지연은 수증기 이외의 대기 구성요소에 의한 것이다. 건조지연은 전체 대기 지연량의 90%이상을 차지하며, 대류권에서 발견되는 대기의 기상특징에 좌우된다. 따라서 이러한 오차는 단순히 지표면의 온도와 압력 그리고 습도를 측정함으로써 보다 정확한 측위 결과 산출을 위해 계산되고 수정되어 진다. 반면에 습윤지연은 지표면의 대기 특성과 완전히 독립적이다. 전체 지연량을 계산하고 건조지연량을 계산하면, 나머지가 습윤지연량이 되는 것이다. 대류층 지연오차는 다음 식 3처럼 나타낼 수 있다.

$$d_{trop} = d_d + d_w \quad (3)$$

여기에서 d_d 는 건조지연 오차, d_w 는 습윤지연 오차를 의미한다.

대류층 지연 오차는 계절별, 관측 지점의 위도 및 기후 특성과 밀접한 연관이 있다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 모델로는 Modified Hopfield 모델과 Saastamoinen 모델 등이며, 다양한 사상함수(Mapping Function)를 적용하여 대류층 지연오차를 계산한다. 그러나 위의 모델에서 주로 사용되는 주요변수들은 모두 지역의 기후에 기반한 평균값을 사용한다. 즉 평균온도, 평균압력 그리고 평균 상대습도 등을 사용하는 것이 일반적이다.

한국천문연구원에서는 대류층 오차의 정밀도를 높이기 위해 9개의 GPS 기준국에 디지털 기상장비(MET3A)를 모두 설치하여 실질적인 기상정보를 획득하고 있다. 그림 4는 여수(YOSU) GPS 기준국에 설치된 기상장비(MET3A)

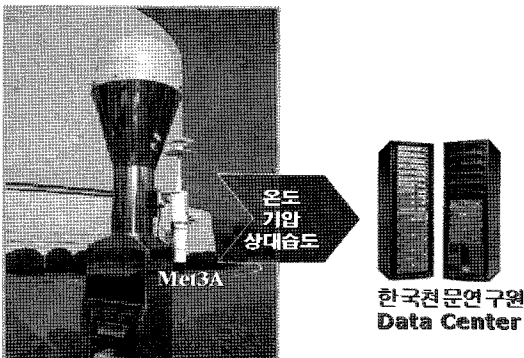


그림 4. 한국천문연구원 여수 GPS 기준국에 설치된 기상장비

를 나타내고 있다.

각 GPS 기준국에 설치된 기상장비로부터 온도, 기압 그리고 상대습도와 같은 기상데이터를 얻을 수 있다.

그림 5는 그림 4에서 설명한 여수 GPS 기준국의 기상장비로부터 획득된 기상정보, 즉 온도, 기압 그리고 상대습도에 대한 일일(24시간) 변화량을 나타낸 것이다. 기압의 일일 변화량은 크지 않지만 상대적으로 온도와 상대습도는 큰 변화량을 갖고 있음을 알 수가 있다. 기상정보는 매 1분 간격으로 저장되며, 데이터 저장간격을 조절하는 것 또한 가능하다.

GPS 기준국에 설치된 디지털 기상장비는 실질적인 기상정보를 획득하여 대류층의 오차를 정밀하게 추정하는데 사용되며 점점 이용추세가 증가하는 편이다.

고정밀 측위서비스를 받는 사용자는 가장 가까운 기준국의 기상정보를 이용하여 측위 정확도를 향상시킬 수 있다.

4. 자료처리 결과

다양한 기선에서 측정된 GPS 관측정보에 추가적으로 오차보정정보를 적용하여 측위정확도에 어떠한 영향을 주는지에 대한 실험을 위해 표 1에 나타낸 것처럼 SKCH를 포함한 17곳을 선정하여 GPS 데이터를 확보하였다. 실험지역은 20km내외의 단기선부터 200km이상의 장기선까지 다양하게 분포하고 있으며, 기선에 따른 상층대기(전리층/대류층) 오차의 영향에 따른 분석과 이러한 오차

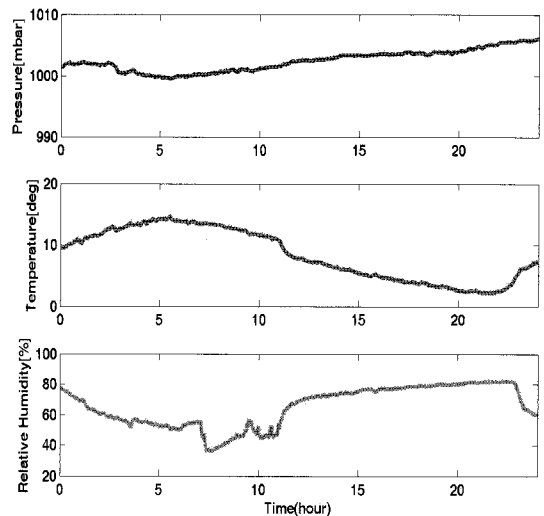


그림 5. 기상장비에 의해 획득된 데이터 일일 변화

표 1. 고정밀 위치정확도 결정에 사용된 실험지역의 좌표 및 기선

실험지역	ITRF 2000 좌표(m)			기선(km)
	X	Y	Z	
DAEJ	-3120041.850	4084614.929	3764026.954	기준국
SKCH	-3126510.829	3921458.268	3927386.216	230.972
BHAO	-3243254.159	4008470.851	3743543.849	146.283
SEOS	-3042060.369	4111978.757	3797578.729	89.194
CHAN	-3085225.229	4071232.758	3806614.288	56.612
GSAN	-3132489.196	4040304.017	3801190.161	59.156
NONS	-3108784.939	4110681.207	3744932.197	34.216
KIMC	-3185109.816	4055952.139	3740570.927	74.870
CNJU	-3117076.153	4067949.822	3784300.554	26.411
SNJU	-3175473.039	4043362.955	3762213.652	69.120
WULJ	-3238396.150	3940655.402	3816730.567	193.674
KANR	-3167833.726	3930397.144	3885411.916	201.994
NAMW	-3160209.648	4133954.288	3676319.392	108.353
SUWN	-3062023.544	4055449.045	3841819.210	101.333
CHYG	-3076700.296	4112486.570	3769348.679	51.804
MUJU	-3156360.116	4089577.280	3728622.179	50.962
HOMI	-3287392.348	3978484.189	3735219.207	200.249
JUNJ	-3124886.876	4126580.548	3714170.202	65.347

정보를 적용하기 전과 후의 결과를 서로 비교해 보았다. 기준국은 데이터의 품질과 안정적인 확보가 우선적으로 고려되어야하기 때문에 DAEJ 국제기준점으로 선정하였다.

각 실험지역의 정밀좌표는 ITRF(International Terrestrial Reference Frame) 2000이고, 고정밀 자료처리 프로그램인 Bernese 5.0에 의해 결정된 값이다.

자료처리에는 상대측위(Relative Positioning)기법이 적용되었고, 오차보정정보를 적용하기 전과 후의 결과를 각각 3차원 RMS(Root Mean Square) 값으로 비교를 하였다. 이에 대한 자료처리 결과는 표 2에 기술하였고 그 중에서 3곳(CNJU, CHAN, SKCH)의 실험지역에 대한 관측시간별 자료처리 결과는 각각 그림 6과 7 그리고 그림 8과 같다. 이처럼 임시로 3곳을 선정한 이유는 CNJU는 30km 이내의 단기선이고, CHAN은 기선거리가 약 56km의 중기선이며, 마지막으로 SKCH는 기선거리가 200km 이상인 장기선이기 때문이다.

그림 6은 단기선인 CNJU에 대해 자료 처리한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실선으로 표시된 것은 오차보정 정보가 적용되지 않았을 때의 결과이며, 점선으로 표시된 것은 상층대기(전리층/대류층) 오차보정정보가 자료처리에 적용된 결과이다.

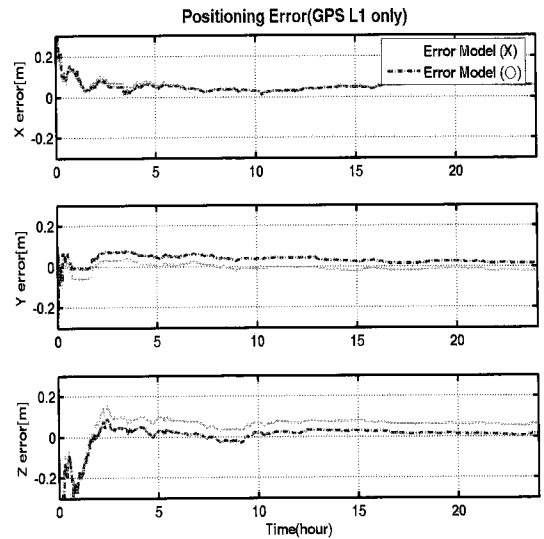


그림 6. CNJU의 자료처리 결과

오차보정정보가 적용되지 않았을 때는 정밀좌표와 비교했을 때 3차원 RMS로 약 6.63cm 오차가 발생했으며, 적용 이후에는 3차원 RMS로 약 5.58cm 오차가 발생했다. 따라서 오차보정정보 적용 이후에 사용자의 위치정보가 보다 정확하게 산출되었음을 알 수가 있었다.

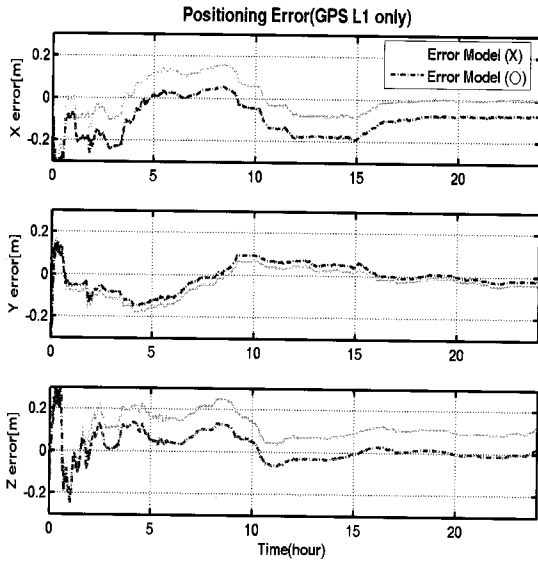


그림 7. CHAN의 자료처리 결과

그림 7은 중기선인 CHAN에 대해 자료처리한 결과를 비교한 것이다. 오차보정정보가 적용되지 않았을 때는 정밀좌표와 비교하여 3차원 RMS로 약 10.44cm 오차가 발생했으며, 적용 이후에는 약 9.35 cm 오차가 발생했다. 즉 오차보정정보 적용이후에 위치정확도가 약 10.4% 향상되었다.

그림 8은 장기선인 SKCH에 대해 자료 처리한 결과는 비교한 것이다. 마찬가지로 오차보정정보 적용 전에는 3차원 RMS로 약 30.15cm 오차가 발생했으며, 적용 이후에는 약 12.99 cm 오차가 발생했다. 즉 오차보정정보 적용 이후에 위치정확도가 약 56.9% 향상되었다.

그림 9는 16곳의 실험지역에 대해 기선거리를 각각 단기선, 중기선, 장기선으로 분류하여 자료처리한 결과이다. 기선별로 평균적인 위치오차는 모든기선에 대해 오차보정정보 적용 이후에 위치정확도 모두 향상되었음을 알 수 있다. 그리고 장기선의 처리결과는 단기선과 중기선에 비해 위치정확도 향상 비율이 상대적으로 크게 나타났다. 또한 표 2의 비교에서 볼 수 있듯이 오차보정정보 적용 이후에 14곳의 실험지역은 위치정확도가 향상된 반면, 3곳(NONS, CHYG, JUNJ)의 실험지역 위치정확도는 오차보정정보 적용 후에 약 0.6cm에서 2.8cm까지 오히려 좋지 않은 결과가 산출되었다. 3곳은 모두 기선거리가 30km 이상이고 100km이내의 중기선에 해당하는 지역으로써, 유사한 기선거리를 갖는 CHAN, GSAN, SNJU, MUJU와

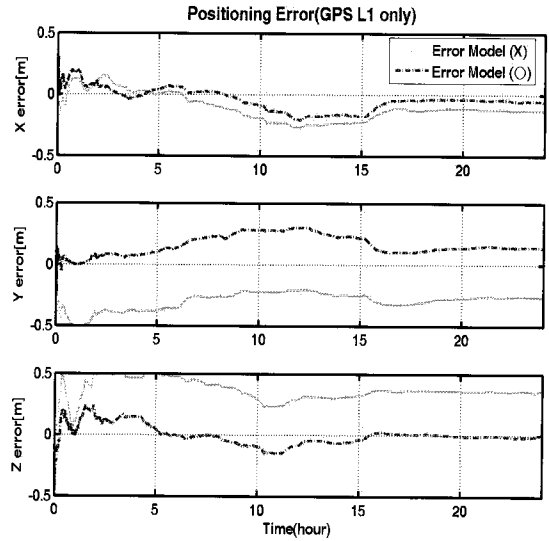


그림 8. SKCH의 자료처리 결과

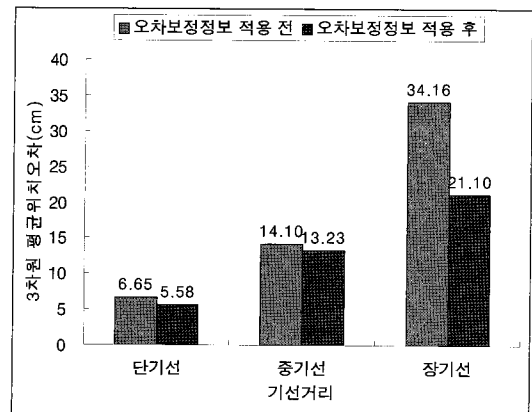


그림 9. 기선거리에 따른 오차보정정보 적용 전과 후의 결과 비교

비교할 만하다. 위의 4곳은 3차원 RMS로 위치정확도 평균적으로 약 2.24cm 향상된 반면 NONS, CHYG, JUNJ 3곳의 평균은 약 1.70cm 위치정확도 저하가 발생했다. 즉, 전반적으로 중기선에서는 작은 범위내에서 위치 정확도의 향상과 저하가 있었음을 알 수 있으며, 전리층과 대류층 등의 오차보정정보를 적용하는 가장 민감한 구간이라 할 수 있다. 단기선에서는 이러한 오차보정정보를 무시해도 위치정확도의 오차가 작아 큰 문제점이 될 수 없으며, 반대로 장기선 일 경우에는 GPS 신호가 통과하는 지점의 공간상의 매질특성이 많이 다를 수 있으므로(예를

표 2. 오차보정정보 적용 전과 후의 위치오차 비교

실험지역	위치오차(3D RMS)		비교(m)
	오차보정정보 적용 전	오차보정정보 적용 후	
SKCH	0.3015	0.1299	-0.1716
BHAO	0.3378	0.2267	-0.1111
SEOS	0.2017	0.1759	-0.0259
CHAN	0.1044	0.0935	-0.0109
GSAN	0.1751	0.1297	-0.0454
NONS	0.1024	0.1305	+0.0284
KIMC	0.2576	0.1268	-0.1308
CNJU	0.0665	0.0558	-0.0107
SNJU	0.1230	0.0990	-0.0240
WULJ	0.3618	0.2541	-0.1077
KANR	0.2501	0.1989	-0.0512
NAMW	0.2614	0.2357	-0.0257
SUWN	0.2414	0.1431	-0.0983
CHYG	0.1223	0.1389	+0.0166
MUJU	0.1838	0.1742	-0.0096
HOMI	0.6376	0.2888	-0.3488
JUNJ	0.1150	0.1167	+0.0062

들면 기준국 주변은 비가 옴, 실험지역은 날씨가 좋음 등) 반드시 오차보정정보를 고려해야할 사항이다. 또한 실험지역의 주변 환경은 관측정보에 직접적으로 영향을 주기 때문에 중기선의 작은 위치정확도 변화에 충분히 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 중기선처럼 작은 오차에도 민감하게 반응하는 지역에서는 오차보정정보의 정밀도와 신뢰도가 위치정확도의 향상에 영향을 주는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 GPS L1 수신기 사용자들에게 높은 수준의 위치정확도와 정밀도를 제공하기 위한 목적으로 추가적으로 오차보정정보를 생성하여 다양한 기선에 대한 자료처리에 적용함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 전리층과 대류층에 대한 오차보정정보를 생성하여 자료처리에 적용한 결과 실험지역 중 14곳은 위치정확도가 향상되었고, 그 외 3곳은 위치정확도가 저하되었다.

2. 단기선, 중기선 등 기선거리에 따라 자료 처리된 결과를 제공하였으며, 기선거리가 커짐에 따라 GPS 신호가 통과하는 공간상의 매질특성이 서로 달라지기 때문에 오차보정정보를 적용하였을 때 상대적으로 단기선과 비교했을 때 위치정확도 향상비율이 커짐을 알 수가 있었다.

향후 전리층과 대류층에 대한 오차보정정보의 정밀도를 향상시키고, 다중경로오차와 같은 추가적인 오차정보를 생성하여 적용한다면 GPS L1 수신기 사용자들에게 고품질의 측위서비스를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 최병규, 박종욱, 정종균, 박필호 (2005), 지역적 GPS 관측망을 이용한 준실시간 전리층 모델링, 한국우주과학회지, 한국우주과학회, 제 22권, 제 3호, pp. 283-292.
- Erickson, C. (1992), *An Analysis of Ambiguity Resolution Techniques for Rapid Static GPS Surveys Using Single Frequency Data*, Proceedings of ION GPS-92, pp. 39-42.
- Fotopoulos, G. and Cannon, ME. (2001), *An Overview of Multi-Reference Station Methods for Cm-Level Positioning*, GPS Solutions, Vol. 4, No 3, pp. 1-10.
- Klobuchar J. (1987), *Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, AES, Vol. 23, No. 3, pp. 325-331.
- Komjathy A. (1997), *Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System*, Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report 188, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.
- Rizos, C. (2002), *Network RTK research and implementation : A geodetic perspective*, Journal of Global Positioning Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 144-150
- Vollath, U., Buecherl, A., Landau, H., Pagels, C. and Wagner, B. (2000), *Multi-Based RTK Positioning Using Virtual Reference Stations*, Proceedings of ION GPS 2000, pp. 123-131.
- Wanninger, L. (2002), *Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning*, ION GPS 2002, pp. 1400-1407.

(접수일 2007. 8. 6, 심사일 2007. 9. 3, 심사완료일 2007. 10. 9)