

단기선 측지 성능 향상을 위한 GPS-RTK 알고리즘 개발

Development of GPS-RTK Algorithm for Improving Geodetic Performance in Short Baseline

최병규¹⁾ · 이상정²⁾ · 박종욱³⁾ · 백정호⁴⁾

Choi, Byung Kyu · Lee, Sang Jeong · Park, Jong Uk · Baek, Jeong Ho

Abstract

Relative positioning technique by GPS that can obtain the high positioning accuracy has been used for generation of high precision positioning with elimination or the reduction of the common errors. This paper gives some algorithms for RTK and considers the filter to estimate the positioning information and integer ambiguities at each epoch in the whole algorithms. The extended kalman filter has been employed to estimate the state parameters and the modified LAMBDA to resolve the integer ambiguities. The data processing was performed by GPS single frequency and dual frequency in short baseline. The verification procedure of these positioning compared with results from Bernese 5.0 software. We presented some statistic values on positioning errors and the rates of integer ambiguity resolution.

Keywords : GPS, Relative Positioning, Extended kalman filter, Integer ambiguity

초 록

상대측위 기법은 공통오차를 제거 또는 감소하여 상대적으로 높은 위치정확도를 얻을 수 있기 때문에 주로 고정밀 GPS 위치정보 생성에 사용된다. 본 연구에서는 높은 위치정밀도를 산출할 수 있는 RTK 알고리즘을 개발하였고, 또한 매 관측시간별로 위치정보와 모호정수를 추정할 수 있도록 필터를 구성하였다. 상태변수 추정을 위해 확장칼만필터를 사용하였고, 모호정수 결정을 위해 Modified LAMBDA 방법이 고려되었다. 자료처리는 단기선에서 GPS 단일주파수와 이중주파수를 이용하여 다양한 측위를 수행하였다. 측위결과에 대한 검증절차는 Bernese 5.0 소프트웨어의 결과와 비교하였고, 각 위치오차에 대한 통계값과 모호정수 결정율을 제시하였다.

핵심어 : GPS, 상대측위, 확장칼만필터, 모호정수

1. 서 론

일반적으로 고정밀 측지/측량에 있어서 가장 널리 사용하는 방법은 차분을 이용한 상대측위(Relative Positioning) 기법이다. 상대측위 방식은 위치를 정확하게 알고 있는 기준점과 높은 정확도의 위치정보를 얻고자 하는 사용자의 데이터를 각각 위성과 수신기에 대해 차분을 함으로써 가장 큰 오차요인으로 작용하는 하드웨어

오차, 즉 위성과 수신기의 시계오차를 동시에 제거하는 것을 의미한다. 상대측위 기법 중에서 실시간 이동측위 기법인 RTK(Real Time Kinematic)는 GPS(Global Positioning System) 기준국과 사용자 데이터를 이용하여 빠른 속도로 높은 정밀도의 위치정보를 산출해내는 기법이다.

RTK의 기본개념은 오차보정을 위해 전송하는데이터가 의사거리 보정값이 아닌 기준국과 사용자의 원시데

1) 교신저자 · 정회원 · 한국천문연구원 우주측지연구그룹 선임기술원(E-mail:bkchoi@kasi.re.kr)
2) 충남대학교 공과대학 전자공학과 교수(E-mail:eesil@cnu.ac.kr)
3) 한국천문연구원 우주과학연구부 책임연구원(E-mail:jupark@kasi.re.kr)
4) 정회원 · 과학기술연합대학원대학교 천문우주과학전공 박사과정(E-mail:llamb@kasi.re.kr)

이터라는 것을 제외하고는 DGPS의 개념과 거의 유사하다. 다만, RTK는 기준점에서 수신한 반송파 위상(Carrier Phase) 데이터를 지속적으로 제공하여야 하고, 정보의 전송장애로 인해 발생할 수 있는 오차의 한계가 DGPS (Differential GPS)보다 상대적으로 크기 때문에 무엇보다 안정적이고 신속한 통신매체가 필요하다. 또한 사용자의 수신기는 RTK 자료처리 기능을 가진 고가의 장비라는 점이 DGPS와 다르다.

RTK는 측위 알고리즘 구성, 모호정수 추정 및 결정, 그리고 빠른 자료처리 등 많은 부분을 동시에 고려해야 하는 어려움이 있다. 또한 RTK의 위치정확도는 기선거리에 의해 좌우된다. 기준국과 사용자와의 두지점간 기선거리가 멀어질 경우, 위치오차에 대한 불확실성은 커지게 된다. 이는 GPS 신호가 통과하는 공간상의 매질 특성이 서로 다르기 때문에 나타나는 현상이다. 일반적으로 기선거리 10km 이내에서 이동하는 물체는 약 1m 내외, 정지측량의 경우에는 수 센티미터(cm) 이내의 위치결정이 가능하다(Mendes, 1999; Farwell et al., 1999). 또한 박운용(2003) 등은 일반측량에서 RTK 방법을 실시하여 6cm 이하의 위치오차가 발생한다는 분석결과를 발표하였다. RTK의 사용은 고정밀 위치정보를 요구하는 일반측량, 고정밀 항법 등 다양한 분야에서 사용이 증가하는 추세에 있다(이석배 등, 2007).

본 연구에서는 단기선에서의 GPS 단일주파수 데이터와 이중주파수 데이터 선형조합에 의한 위치정확도를 분석하고 모호정수 결정율을 각 자료처리 유형에 따라 제시한다.

2. 상대측위 방법 및 방정식

2.1 상대측위 방법

1장에서 설명하였듯이 고정밀 측위에 있어서 가장 널리 사용하는 방법 중의 하나가 상대측위이며, 이 기법은 '차분(Difference)'에 기반을 두고 자료처리를 수행한다. 특히, 위치결정에 큰 오차요인으로 작용하는 위성과 수신기 시계오차를 차분을 이용하여 동시 제거함으로써 위치정확도를 향상시키는 방법이다. 또한 상층대기에 의한 영향, 즉 전리층이나 대류층에 의한 지연량을 차분을 통해 줄일 수 있다.

그러나, 상대측위 기법은 동시에 관측된 서로 다른 관측데이터를 필요로 한다. 정확한 위치를 알고 있는 기준점 데이터와 측정하고자 하는 지점의 관측데이터가 필

요하다.

GPS 위성은 서로 다른 L밴드 주파수인 L1 (1575.42MHz) 과 L2(1227.60MHz) 주파수를 송신한다. 각각의 주파수는 의사거리에 해당하는 코드값과 반송파 위상을 포함하고 있다.

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.

지상에서 측지용으로 사용할 수 있는 수신기는 크게 두가지 타입으로 나눌 수 있는데, 하나는 GPS L1 주파수만을 수신하는 단일주파수용 수신기이고, 나머지는 L1과 L2 두 주파수를 동시 수신할 수 있는 이중 주파수용 수신기이다. 이중 주파수용 수신기는 고가인 반면에 두 개의 주파수 차이를 이용하여 전리층에 의한 신호 지연 오차를 보정하거나 대부분 제거 할 수 있고, 선형조합을 통해 다양한 측위결과를 산출할 수 있다. 한편, 단일 주파수용 수신기는 저가이지만 전리층에 의한 신호 지연 오차를 완전히 제거 할 수 없는 단점을 가지고 있다.

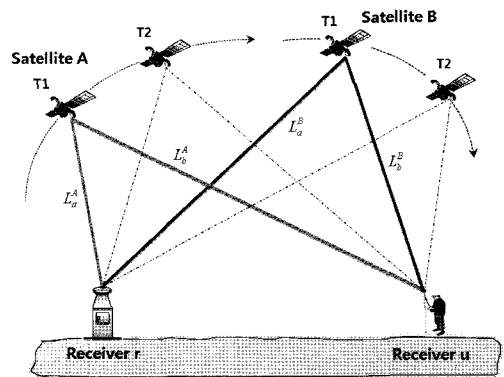


그림 1. 위성과 수신기간 차분을 포함하는 이중차분 개념도

2.2 상대측위 방정식

그림 1은 위성과 수신기간 차분을 함께 결합한 이중차분을 나타내고 있다. GPS 위성을 각각 A, B 그리고 기준국 수신기를, 사용자 수신기를 라 놓으면 이중차분된 반송파 위상은 식 1과 2처럼 나타낼 수 있다(Hofmann-

Wellenhof et al., 1997).

$$L_{rs}^{AB} \equiv (L_r^A - L_s^B) - (L_u^A - L_u^B) \quad (1)$$

$$L_{rs}^{AB} = \rho_{rs}^{AB} - I_{rs}^{AB} + T_{rs}^{AB} + \lambda N_{rs}^{AB} + \varepsilon_{rs}^{AB} \quad (2)$$

여기에서, ρ_{rs}^{AB} 는 이중차분된 의사거리 관측값
 I_{rs}^{AB} 는 이중차분된 전리층 지연값
 T_{rs}^{AB} 는 이중차분된 대류층 지연값
 N_{rs}^{AB} 은 이중차분된 모호정수값
 ε_{rs}^{AB} 는 이중차분된 잡음
 λ 는 파장이다.

만약, 관측지점들의 상대기선이 단기선이라 가정하면, 다음 식 3과 4처럼 이중차분에 의해 전리층과 대류층 지연오차가 매우 작기 때문에 고려를 하지 않고 자료처리를 수행한다.

$$I_{rs}^{AB} = (I_r^A - I_s^B) - (I_u^A - I_u^B) \approx 0 \quad (3)$$

$$T_{rs}^{AB} = (T_r^A - T_s^B) - (T_u^A - T_u^B) \approx 0 \quad (4)$$

최종적으로는 다음 식 5를 얻을 수 있고, 이중차분된 의사거리와 모호정수, 그리고 관측 잡음만이 고려된다.

$$L_{rs}^{AB} = \rho_{rs}^{AB} + \lambda N_{rs}^{AB} + \varepsilon_{rs}^{AB} \quad (5)$$

본 연구에서는 의사거리와 반송파 위상 데이터를 동시에 활용하여 각 자료처리 유형별로 위치정확도를 관측시간별로 산출하였다.

3. 확장칼만필터 적용

측정지점의 위치정보와 모호정수의 상태변수를 추정하기 위해 확장칼만필터(EKF, Extended Kalman Filter)를 사용하였다. 확장칼만필터는 선형적인 모델뿐만 아니라 비선형적인 모델에도 적용이 가능하여 다양한 분야에 사용된다. 확장칼만필터는 초기값을 이용하여 선형화된 모델에서 다음의 상태변수를 추정하고, 새로운 상태변수를 다시 선형화된 모델에 적용하여 상태변수를 추정하는 방법이다. 이것은 칼만필터가 선형화 모델을 잘못 설계하였을 경우의 문제점을 해결하기 위한 방안이 된다. 그러

나 관측 및 상태방정식이 비선형 함수의 형태이면 최적의 필터를 구성하기 어렵다.

확장칼만필터는 비선형시스템을 테일러 전개식을 이용하여 선형시스템으로 근사하여 칼만필터를 적용하는 방식이다.

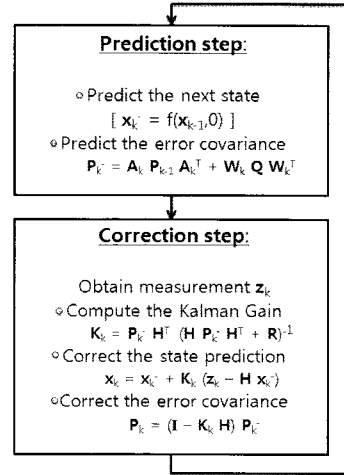


그림 2. 확장칼만필터의 상태변수 추정과정

그림 2는 확장칼만필터를 이용한 상태변수 추정과정을 나타내고 있다. 확장칼만필터는 예측과 업데이트(수정) 단계로 나누어지고, 상태변수(x_k)와 오차에 대한 분산-공분산 행렬(P_k)은 다시 초기값으로 반복적으로 사용되어 상태변수를 추정한다.

4. 자료처리 과정

그림 3은 본 연구에서 제시한 고정밀 위치정보 산출을 위한 자료처리 흐름이다. 원시 이진형태(Binary)로 수신되는 GPS 데이터는 공통규격인 RINEX (Receiver INdependent EXchange Format) 형태로 변환이 되며, RINEX 파일은 수신기 및 안테나 정보를 포함하고 있는 관측데이터(Observation)와 전리층 변수와 시각정보를 포함하고 있는 항법데이터(Navigation)로 구분이 된다. 기준국과 측정지점의 상대 위치결정을 위해서는 두 지점의 GPS 관측정보를 동시에 필요로 한다. 또한 고정밀 자료처리에서는 일반적으로 측정지점의 초기위치 정보가 필요하다. 이 정보는 다음의 방법에 의해 얻을 수 있다. 첫 번째는 RINEX 관측데이터의 헤더부분에서 근사위치를 얻는 방법이 있고, 두 번째는 관측데이터의 L1 C/A 코드

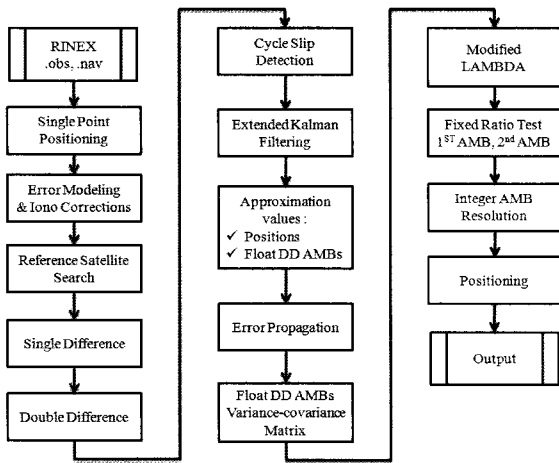


그림 3. GPS-RTK 자료처리 흐름도

와 항법데이터를 이용하여 초기 위치정보를 계산하는 방법이 있다. 전자는 정적측위에 국한되어 사용되는 반면, 후자는 정적측위와 동적측위에 동시 사용될 수 있다. 본 연구는 후자의 방법을 채택했다. 측정지점의 초기위치가 결정이 되면, 지역 진리층 모델에 의해 계산된 오차보정 정보를 관측정보에 적용한다. 다음으로 공통오차를 줄이거나 제거하기 위한 차분을 수행한다. 위성간 차분을 위해서는 기준위성을 결정해야하는데, 관측된 GPS 위성 중에서 고도각이 가장 큰 위성을 기준위성으로 선택한다. 기준위성이 결정되면, 이중차분을 통해 공통오차인 위성과 수신기의 시계오차를 제거한다. 다음으로 이중차분된 반송파 위상의 변화율을 검사하여 좋은 품질의 데이터만을 이용하는 '신호끊김 현상 감지(Cycle-Slip Detection)' 과정을 수행한다. 그리고 위치와 속도정보의 상태 및 이중차분된 실수모호수(Float Ambiguities)를 추정하기 위해 확장칼만필터를 적용한다. 확장칼만필터에 의해 분산-공분산 행렬이 갱신되면, 기준위성 및 위성조합의 변화를 검색하여 새로운 관측값을 형성하는 오차전파(error propagation)를 수행한다. 다음으로 모호정수 결정을 위해 MLAMBDA(Modified Least square AMBIGUITY Decorrelation Approach) 방법을 사용했다. MLAMBDA를 통해 잔차가 가장 작은 두 개의 모호정수 벡터가 생성되고, 다음 식 6과 같이 '비율 테스트(Ratio Test)'를 수행하여 모호정수 결정 여부를 판단하였다.

$$\frac{\|\hat{a} - \tilde{a}_2\|_{Q_{\hat{a}}}^2}{\|\hat{a} - \tilde{a}\|_{Q_{\hat{a}}}^2} > \beta \quad (6)$$

여기에서 \hat{a} 는 1차 모호정수 벡터, \tilde{a}_2 는 2차 모호정수 벡터, β 는 상수값(본 연구에서는 3으로 설정)이다. 마지막으로 모호정수가 결정되면, 최종해를 산출한다.

5. 자료처리 결과

자료처리는 다음과 표 1과 같이 다양한 관측정보 형태로 나누어 수행되었다.

표 1. 자료처리 유형 및 실험개요

유형	관측정보	수신기 및 안테나 타입
단일주파수	GPS L1	· 기준국
	GPS L2	- Trimble NetRS
이중주파수 (선형조합)	GPS L1/L2 Narrow-Lane	- TRM29659.00 DOME
	GPS L1/L2 Wide-Lane	· 측정지점
	GPS L1/L2 Geometry Free	- Trimble NetRS - TRM29659.00

자료처리 형태에 따른 위치정확도는 항법좌표계(ENU, East-North-Up)상으로 제시하였고, 위치오차에 대한 통계값도 함께 제시하였다.

측위실험은 GPS 기준국으로부터 약 4.78km 떨어진 지점에서 1일간 정지한 상태에서 수집한 데이터를 이용하여 자료처리를 수행했다. 기준국의 수신기는 Trimble사의 NetRS를 사용하였고, 안테나는 초크링(Choke-Ring)인 TRM29659.00 DOME 기종을 사용했다. 그리고 측정지점은 기준국과 동일한 수신기를 사용하였으며, 안테나는 TRM29659.00을 사용했다.

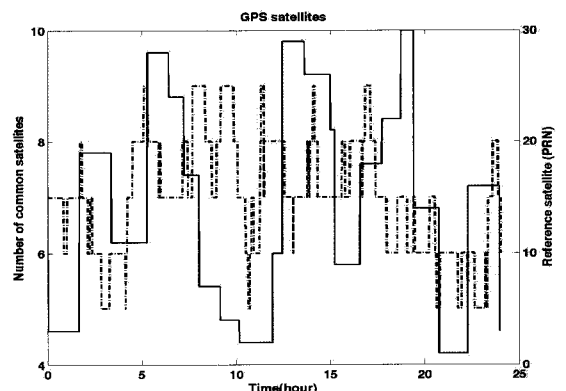


그림 4. 관측시간에 따른 공통위성 개수와 기준위성의 변화

TRM29659.00 DOME 기종을 사용했다. 그리고 측정지점은 기준국과 동일한 수신기를 사용하였으며, 안테나는 TRM29659.00을 사용했다.

그림 4는 시간변화에 따른 GPS 위성의 고도각이 가장 높은 위성 기준국과 사용자간의 공통위성 개수의 변화를 함께 나타낸 것이다. 하루동안 기준위성과 공통위성 개수가 빈번히 변화되는 것을 알 수 있고, 위성의 고도각 제한을 15도 이상으로 설정했을 때 공통위성 개수는 최소 5에서 최대 9까지 변화했다.

그림 5와 6은 각각 GPS L1과 L2 단일주파수 측위 오차를 나타내고 있고, 그림 7부터 그림 9까지는 이중주파수 선형조합에 의한 측위오차를 나타낸다.

측위결과는 스위스 베른 천문연구소에서 개발한

Bernese 5.0에 의한 결과와 비교한 것이다.

그림 5는 GPS L1 단일주파수만을 이용한 측위결과이다. 이미지 상에서 하나의 점으로 표시된 것은 추정된 모호정수가 비율 테스트를 통과해 정상적으로 결정된 것을 의미하며, 별모양으로 표시된 것은 그렇지 않은 것이다. 측위오차에 대한 RMS(Root Mean Square) 값은 각각 동쪽방향(E)으로 1.85cm, 북쪽방향(N)으로 0.62cm, 높이(U)는 2.41cm로 산출되었다. 그림 6은 GPS L2 단일주파수를 이용한 측위오차이다. 각 성분별 RMS 값은 1.45cm(E), 0.68cm(N), 1.68cm(U)로 산출되었다.

그림 7은 GPS L1과 L2 이중주파수를 협대역 관측값(NL, Narrow-Lane)으로 선형조합하여 산출된 결과이다. 각 성분별 RMS 값은 1.40cm(E), 0.91cm(N), 1.64cm(U)로

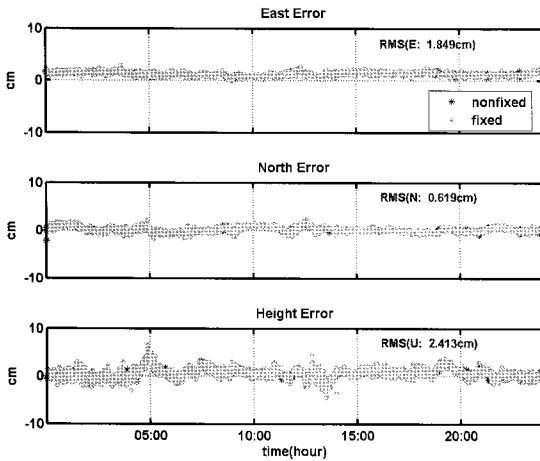


그림 5. GPS L1 측위오차

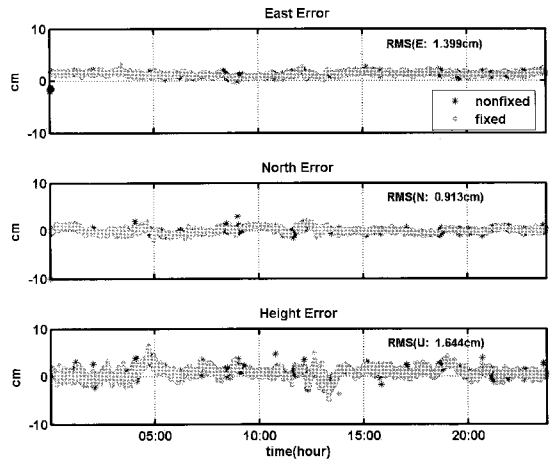


그림 7. GPS NL 측위오차

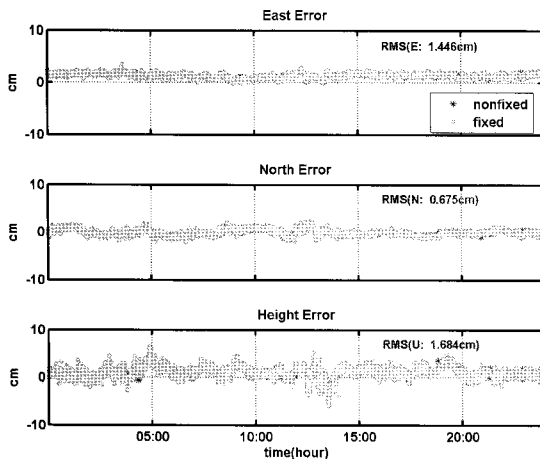


그림 6. GPS L2 측위오차

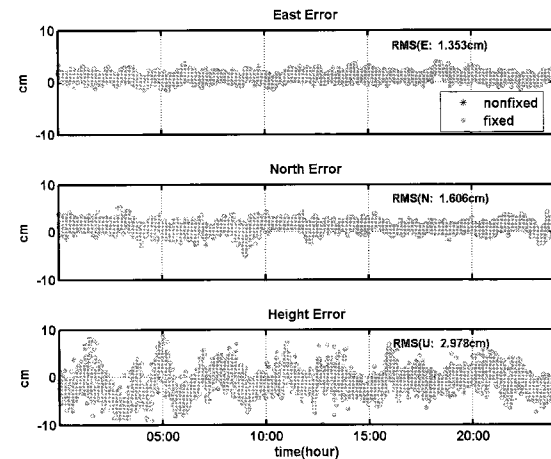


그림 8. GPS WL 측위오차

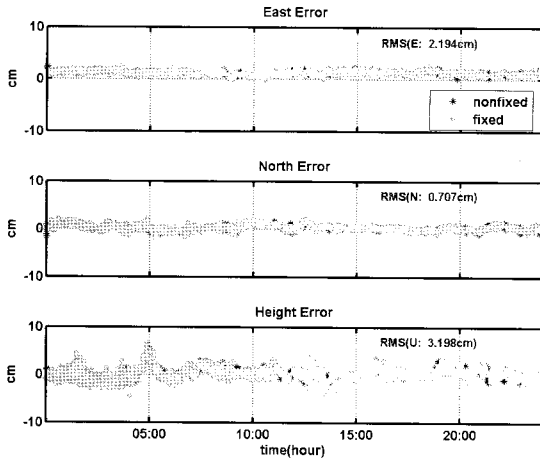


그림 9. GPS GF 측위오차

나타났다. 그림 8은 광대역 관측값(WL, Wide-Lane)으로 선형조합하여 산출된 결과이다. 각 성분별 RMS 값은 1.35cm(E), 1.61cm(N), 2.98cm(U)로 산출되었다.

마지막으로 그림 9는 기하형상 무시 관측값(GF, Geometry-Free)으로 선형조합하여 산출된 결과이다. 이 조합은 대류층 지연에 대한 오차를 무시할 수 있기 때문에 정밀한 전리층 지연오차를 추정할 수가 있다. 자료처리 결과 각 성분별 RMS 값은 각각 2.19cm(E), 0.71cm(N), 3.20cm(U)로 나타났다.

위의 자료처리에 대한 보다 자세한 통계적인 값은 표 2에 자세히 기술하였다. 통계값은 일일동안의 평균값, 표준편차 그리고 제곱-평균 제곱값 순으로 나타났다.

그림 10은 각 자료처리 유형에 따라 결정된 모호정수의 비율테스트 결과이다. 즉, 자료처리 기간동안 비율테스트에 대한 확률을 나타낸다. 비율테스트를 통과한 경

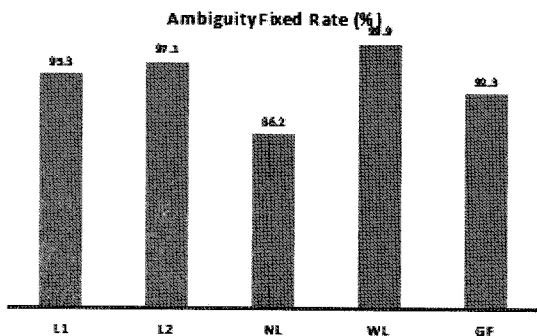


그림 10. 자료처리 유형에 따른 모호정수 결정율

표 2. 자료처리 유형에 따른 측위오차 비교

타입	통계	성분별 위치오차(단위: cm)		
		E	N	U
L1	mean	1.28	0.21	0.58
	std	1.32	0.58	2.34
	rms	1.85	0.62	2.41
	3D rms	1.87		
L2	mean	1.37	-0.03	1.09
	std	0.45	0.67	1.28
	rms	1.45	0.68	1.68
	3D rms	1.37		
NL	mean	1.33	0.07	0.78
	std	0.45	0.91	1.45
	rms	1.40	0.91	1.64
	3D rms	1.37		
WL	mean	1.07	1.08	-1.05
	std	0.83	1.19	2.79
	rms	1.35	1.61	2.98
	3D rms	2.17		
GF	mean	1.20	0.38	0.22
	std	1.84	0.60	3.19
	rms	2.19	0.71	3.20
	3D rms	2.39		

우에 한정해서 모호정수가 참값으로 결정되었다고 가정하였다. 참값의 모호정수가 결정된 경우에도, 비율테스트를 통과하지 못하는 경우가 발생하기 때문에 이러한 비율테스트를 통해 안정적인 측위결과를 산출해 낼 수 있다.

각각의 자료처리 유형별로 비율테스트를 통과한, 즉 모호정수 결정율은 각각 GPS L1이 95.4%, L2는 97.1%, NL은 86.2%, WL은 99.9%, 그리고 GF는 92.3%로 나타났다.

6. 결 론

본 연구는 단기선에서 측지·측량 등 높은 정확도의 위치정보를 요구하는 GPS 사용자들에게 유용한 정보 제

공 목적으로 수행되었다. GPS L1 단일주파수 및 이중주파수 선형조합에 의한 위치오차의 통계값과 모호정수 결정율을 산출하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 단기선에서 단일주파수 측위결과, 각 성분별 위치 오차에 대한 평균값과 RMS 값은 동쪽방향과 북쪽방향 성분이 각각 2cm 이내, 그리고 높이방향 성분은 최대 2.41cm로 매우 정밀하게 산출되었다.
2. 이중주파수 선형조합에 의한 결과는 위치오차에 대한 각 성분별 평균값이 모두 약 1.5cm 이내, 그리고 3차원 RMS 값은 약 2.5cm 이내에서 결정되는 것으로 나타났다.
3. 모호정수 결정율은 단일주파수가 95%이상의 확률을 보였고, 이중주파수의 협대역 파장은 86.2%, 그리고 파장이 가장 큰 광대역 파장은 99.9%의 확률이 산출되었다.

본 연구를 통해 산출된 결과는 향후 고품질의 GPS 측위서비스를 요구하는 다양한 분야에 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2009년도 교육과학기술부 기초기술연구회 의 협동연구사업비 지원에 의해 수행되었습니다. [과제명 : GPS 기반 집중호우·전파장애·지각변동 상시감시 기술 개발].

참고문헌

박운용, 홍순현, 차성렬, 김정동 (2003), RTK GPS를 이용한 거대구조물 변위분석, 03추계학술대회논문집, 한국측량학회, pp. 97-101.

이석배, 최보용 (2007), RTK GPS에 의한 하천현황측량, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 25권, 제 3호, pp. 267-275.

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.

Farwell, M., Caldwell, D. and Abousalem, M. (1999), *RTK-based vehicle tracking and unmanned operation for agriculture*, Proceedings of ION GPS-99, pp. 2047-2054.

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.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J. (1997), *Global Positioning System: theory and practice*, Springer-verlag, New York, fourth revised edition.

Mendes, V. (1999), *Modelling the neutral atmosphere propagation in radiometric space technique*, Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.

(접수일 2009. 7. 10, 심사일 2009. 8. 6, 심사완료일 2009. 8. 7)