

초신속궤도력을 이용한 신속한 고정밀 GPS 데이터 처리 Rapid and Accurate GPS Data Processing with Ultra-rapid Orbits

박관동¹⁾ · 조정호²⁾ · 하지현³⁾ · 임형철⁴⁾

Park, Kwan Dong · Joh, Jeong Ho · Ha, Ji Hyun · Lim, Hyung Chul

Abstract

Rapid and accurate data processing is required in many GPS(Global Positioning System) applications including surveying. While one can use four different kinds of GPS satellite orbits, we evaluated the accuracy and precision of each kind of orbits to find the best candidate for rapid and accurate data processing. The four different kinds of orbits are: broadcast orbits from GPS satellites; and ultra-rapid orbits, rapid orbits, and precise orbits provided by international GPS data analysis centers such as IGS. With GIPSY and ultra-rapid orbits, we could get the positioning accuracy of 1.5cm from seven days of GPS data. From this study, we conclude that rapid and accurate data processing is achieved with GIPSY and ultra-rapid orbits.

Keywords : GPS, Ultra-rapid orbits, GIPSY, GPSurvey

요 지

측량을 비롯한 여러 GPS 응용분야에서 GPS 수신기에서 수집한 데이터를 빠른 시간 내에 처리하여 정밀 좌표를 산출할 필요성이 발생한다. GPS 데이터 처리에는 현재 네 종류의 GPS 위성궤도력을 이용할 수 있는데, 본 연구에서는 신속한 고정밀 데이터 처리에 가장 적합한 궤도력을 찾기 위해, 각 궤도력을 이용할 경우 성취할 수 있는 좌표성과의 정확성과 정밀도를 비교하였다. GPS 위성에서 제공되는 방송궤도력(broadcast orbits)과 IGS 등의 국제기관에서 제공하는 초신속궤도력(ultra-rapid orbits), 신속궤도력(rapid orbits), 그리고 정밀궤도력(precise orbits)을 이용하였다. 초신속궤도력을 이용하여 GIPSY로 데이터 처리를 하였을 때 일주일 평균 좌표 성과의 정확성이 1.5cm 이내였다. 본 연구를 통하여 GIPSY와 초신속궤도력을 이용하면, 신속한 데이터 처리가 가능한 동시에 고정밀 좌표성과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : GPS, 초신속궤도력, GIPSY, GPSurvey

1. 서 론

GPS(Global Positioning System) 수신기 하드웨어와 데이터 처리 알고리즘의 발전에 의해, GPS를 이용한 좌표결정의 정밀도가 점점 향상되고 있다. 현재 좌표결정 정밀도는 수 mm, 관측소 속도는 약 1mm/year의 수준에 달하고 있다. 그러므로 몇 년 전에는 생각하지 못했던 다양한 분야의 연구에 GPS가 응용되고 있다. 해수하중에 의한 수직 지각변위 검출(Vey 등, 2002)이나 빙하후 대륙상승 현상(post-glacial rebound)과 해수면 높이 변화 관측(Park 등,

2002)과 같은 최고 정밀도를 요구하는 응용분야와 더불어 실시간 응용분야, 예를 들어 실시간 가강수량(Precipitable Water Vapor) 결정(Ge 등, 2000 ; Jarlemark 등, 2002)과 화산활동 예측(Larson 등, 2001), 구조물 변위 모니터링(Kijewski-Corea 등, 2003)등에도 GPS가 다양하게 이용된다.

특히 실시간 GPS 응용분야에는 IGS(International GPS Service)가 제공하는 초신속궤도력이 이용되고 있다. 이 궤도력은 IGS가 전 세계 8곳의 IGS 데이터 분석센터(AC, Analysis Center)에서 계산한 궤도력을 빠른 시간에 취합하여 생성되며, 하루에 두 번 제공된다. 초신속궤도력에는

1) 연결저자 · 정희원 · 한국천문연구원 GPS연구그룹 선임연구원(E-mail:kdpark@kao.re.kr)

2) 한국천문연구원 GPS연구그룹 선임연구원(E-mail:jhjo@kao.re.kr)

3) 정희원 · 충북대학교 천문우주학과, 한국천문연구원 GPS연구그룹 학연과정(E-mail:hajh@kao.re.kr)

4) 한국천문연구원 GPS연구그룹 선임연구원(E-mail:hclim@kao.re.kr)

24시간 후까지 예측한 궤도력이 포함되어 있기 때문에 실시간 응용이 가능하다. 이를 이용한 연구는 전세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 특히 초신속궤도력의 정확성을 향상시키려는 연구에는 각 IGS 데이터 분석센터에서 경쟁적인 노력을 기울이고 있는 실정이다(Ge 등, 2000).

초신력궤도력과 GIPSY(아래 참고) 소프트웨어를 이용하면, 앞서 언급한 응용분야 외에도 측량과정에서 수집한 GPS 데이터를 신속하게 처리하여 고정밀 좌표성고를 얻을 수 있다. 그 정밀도는 기존의 상용 소프트웨어가 이중차분(double difference)을 이용하여 달성할 수 있는 정밀도보다 뛰어나며, 데이터 처리 속도도 아주 빠르다. 본 연구에서는 먼저 GPS 데이터 처리에 이용될 수 있는 각종 궤도력을 비교하고, 초신속궤도력을 이용한 데이터 처리방법과 국내 GPS 상시관측소 데이터를 준실시간으로 처리한 결과를 소개한다.

2. GPS 위성 궤도력의 종류

초신속궤도력을 이용한 좌표성고의 정확성(accuracy)과 정밀도(precision)를 비교하기 위하여, 네 종류의 GPS 위성궤도력을 이용하여 정밀좌표를 결정하였다. 각 궤도력은 생성과정이나 정밀도의 차이가 있으므로, 이 장에서 네 종류의 궤도력의 특징을 소개하고 비교하였다.

2.1 정밀궤도력(precise orbits)

국제GPS기구(IGS, International GPS Service)는 1994년 공식적으로 그 활동을 시작한 이래, 다양한 GPS 활용 및 연구 분야에서 국제적으로 가장 권위 있는 조직으로 자리를 잡았다. 현재 IGS는 전 세계 약 70여 국가에서 400개에 달하는 IGS 상시관측소를 운영하고 있다(국내에서는 한국천문연구원인 1995년 DAEJ를, 국토지리정보원이 1998년 SUWN을 설치하여 현재 두 곳의 IGS 관측소가 있다). IGS

는 GPS 관련 국제 공동연구의 모체 역할을 하면서 정밀궤도력을 생성하고 있다. IGS 산하의 8개 데이터 분석센터는 매일 전세계적으로 고루 분포되어 있는 IGS 국제관측소(Global Station)의 데이터를 수집하여 GPS 궤도력, 지구 자전축 움직임 등 관련 요소들을 모두 추정한다. 이 과정에서 생성된 궤도력들이 한 곳에서 취합되어 최적 조합된 정밀궤도력이 만들어진다. 이를 IGS 정밀궤도력이라 하며, 흔히 sp3 포맷(format)으로 보급된다(NOAA/NGS, 2003).

각 IGS 분석센터에서 계산한 값들이 조합되고 최적의 값을 추출하기까지는 약 2주가 소요되며, 대개 약 20일 이후에 최종 IGS 정밀궤도력이 만들어지고 IGS 국제데이터센터(Global Data Center)를 통해 전세계에 보급된다. 본 연구에서는 GPSurvey 소프트웨어를 이용한 데이터 처리에는 IGS 정밀궤도력을, GIPSY를 이용한 데이터 처리에는 JPL(Jet Propulsion Laboratory) 정밀궤도력을 사용하였다. JPL의 정밀궤도력을 이용한 이유는 JPL의 궤도력이 IGS 정밀궤도력 산출에 가장 크게 기여하며, 본 연구에서 사용되는 GIPSY에 최적화 되어 있기 때문이다. JPL에서 제공하는 정밀궤도력을 포함하여 데이터 처리에 사용되는 파일 목록을 표 1에 열거하였다. 표 1의 궤도력과 함께 제공되지 않은 파일들(표에서 ×로 표시됨)은 데이터 처리 과정에서 추정하거나 다른 파일로부터 도출해야한다.

2.2 신속궤도력(rapid orbits)

앞서 언급한 바와 같이, 정밀궤도력이 생성되기까지는 최소 2주 이상의 시간이 소요되기 때문에 신속한 데이터 처리에 이용될 수 없다. 그러나 신속한 데이터 처리가 필요한 여러 응용분야를 위해 몇몇 IGS 분석센터에서 신속궤도력을 제공한다. 신속궤도력은 전세계 GPS 데이터를 처리하여 생성되며, UTC 기준으로 약 20시간 이후에 제공된다(예를 들어 2003년 4월 10일의 신속궤도력은 다음날인 4월 11일 오후 8시경에 완성된다). 최근에 신속궤도력의 정밀도는 정

표 1. GIPSY를 이용한 데이터 처리에 이용된 네 가지 궤도력 및 함께 제공되는 파일들의 확장자 이름

	정밀궤도력 (Precise)	신속궤도력 (Rapid)	초신속궤도력 (Ultra-Rapid)	방송궤도력 (Broadcast)
GPS 위성궤도력	_nf.eci	.eci	_00.sp3 _12.sp3	brdcedd0.yyn
GPS 위성시계 오차	_nf.tdpc	.gps_clocks	×	×
국운동	tpeo_nf.nml	.TPNML	×	×
GPS 위성 그림자 정보	.shad	.shadow_events	×	×
GPS 위성 Yaw Rates	_nf.tdpc	.yaw_rates	×	×

밀궤도력에 손색이 없을 만큼 급격히 향상되고 있다.

신속궤도력은 해당 날짜의 전날 21시부터 다음날 03시 까지 총 30시간의 궤도력과 GPS 위성 시계 오차 추정치를 포함하고 있다. 예를 들어 2003년 4월 10일에 해당하는 신속궤도력에는 2003년 4월 9일 21시부터 4월 11일 03시 까지의 GPS 위성 궤도력이 포함된다. 본 연구에서는 JPL 에서 제공하는 신속궤도력을 이용하였다(표 1 참고). 표 1 에서 보는 바와 같이, 신속궤도력은 정밀궤도력에서 제공하는 정보가 모두 포함되어 있기 때문에, 데이터 처리 과정에서 별도로 위성 시계 오차를 추정할 필요가 없다.

2.3 초신속궤도력(ultra-rapid orbits)

신속궤도력의 정밀도가 정밀궤도력 수준에 달하고, 빠른 시간 내에 제공되는 장점으로 많은 GPS 정밀 응용분야에 이용되고 있지만, 실시간이나 준실시간 응용에 이용될 수는 없다. 그 이유는 측량 등을 통해 수집된 데이터를 신속 궤도력을 이용하여 처리하기 위해서는, 최소 20시간을 기다려야하기 때문이다. 또한, 신속궤도력을 가지고 보간법을 사용하여 예측궤도력을 만든다면, 그 정밀도가 현저히 저하된다. 이러한 이유로 GPS의 준실시간 혹은 실시간 응용분야를 위해 IGS에서 초신속궤도력을 제공한다. 초신속 궤도력이라 명명된 이유는 이 궤도력은 JPL이나 CODE (Center for Orbit Determination of Europe)같은 대표적인 IGS 분석센터에서 매시간 새로이 수집된 전세계 GPS 데이터를 신속하게 고정밀 데이터 처리 하여 하루에 두 번씩 제공되기 때문이다. 초신속궤도력은 해당날짜와 생성 시간에서 24시간 후까지 추정된 궤도력을 포함하고 있어 예측궤도력이라고 명명되기도 한다.

표 1에서 나타난 파일 확장자에서 보는 것처럼 초신속궤도력은 UTC 기준으로 00시와 12시에 만들어진다. 예를 들어 2003년 4월 10일에 생성되는 초신속궤도력은 두 개이며, 당일에 해당하는 GPS Week Number(1213)와 GPS Weekday Number(4)가 붙어 igu12134_00.sp3와 igu12134_12.sp3가 생성된다. 여기서 _00의 경우는 당일 00시까지 수집된 데이터를 기반으로 생성된 궤도력이며, _12의 경우는 당일 12시까지의 데이터를 이용하여 만들어진 것이다. igu12134_00.sp3에는 2003년 4월 9일 00시부터 4월 10일 24시까지 2일 동안의 정보가, igu12134_12.sp3에는 2003년 4월 9일 12시부터 4월 11일 12시까지 2일 동안의 정보가 수록되는 것이다. 그러므로, 앞서 언급한바와 같이 신속 궤도력이 30시간의 궤도력을 포함한 반면, 초신속궤도력은 48시간의 궤도력을 포함한다. 한편, IGS의 정밀궤도력

처럼, 초신속궤도력도 sp3 형태로 제공되므로 15분 간격으로 각 위성의 궤도력이 제공된다.

2.4 방송궤도력(broadcast ephemerides)

방송궤도력은 GPS 위성으로부터 수신되는 궤도력으로 GPS 신호에 포함되어 전달된다. GPS 수신기에 기록된 데이터에서 변환되는 이 궤도력은 흔히 항법메시지(navigation message)라고도 불린다. 방송궤도력은 모든 GPS 수신기에서 생성되지만, 본 연구에서는 특정 관측소의 방송궤도력이 아니라, 가장 대표적인 방송궤도력이며 IGS에서 제공하는 brdcddd0.yyn을 사용하였다(2003년 4월 10일의 brdc 방송궤도력은 brdc1000.03n이라 명명된다).

방송궤도력은 부관제국(Monitor Station)에서 관측한 위성 추적 데이터를 기반으로 주관제국(Master Control Station)에서 계산되며, 매 8시간마다 GPS 위성으로 전달된다. 방송 궤도력의 정밀도는 현재 약 3m 정도로 매우 낮은 편이다. 방송궤도력은 각 GPS 위성에 대해 매 2시간마다, ECEF (Earth-Centered and Earth-Fixed, 지심지구고정) 직각좌표 계상의 위성의 위치를 나타낸다. 그러므로 GPS 데이터 수신시간이 방송궤도력상의 관측시간과 일치하지 않을 때는 대부분 내삽(interpolation)을 통해 해당 시간의 위성궤도를 결정하므로, 내삽에 의한 오차가 부가적으로 포함된다.

3. GPS 데이터 처리

네 가지 다른 종류의 GPS 위성궤도력을 이용한 신속한 좌표결정의 정확성을 비교하기 위하여 2003년 4월 10일부터 16일까지 일주일동안 수집된 한국천문연구원 상시관측소 9곳의 데이터를 처리하였다. 표 2는 각 관측소의 위치와 1999년 3월부터 2002년 11월까지의 데이터를 GIPSY와 정밀궤도력으로 처리한 결과로 산출된 좌표성과를 보여준다(본 연구에 이용된 일주일의 중간 날짜인 2003년 4월 13일의 좌표). 표 2의 ITRF2000 좌표는 안테나 기준점(ARP)의 좌표임을 밝혀둔다(아래참고). 각 관측소는 Trimble 4000SSi 수신기와 Trimble choke ring 안테나(모델번호: 29659.00)를 구비하고 있으며, 모든 수신기는 30초 간격으로 관측치를 저장한다.

GPS 데이터 처리에는 GIPSY-OASIS(GIPSY-OASIS는 GPS Inferred Positioning System - Orbit Analysis and Simulation Software의 약어이며, 이하 GIPSY라고 호칭함)와 GPSurvey를 사용하였다. GPSurvey는 Trimble사에서 공급하는 상용 소프트웨어이며, 본 연구에는 버전 2.3을

표 2. 데이터 처리에 이용된 한국천문연구원의 9개 상시관측소의 위치와 ITRF2000 좌표성과(2003년 4월 13일 기준)

관측소	위치	지리좌표		ITRF2000 좌표(meters)		
		위도 (북위)	경도 (동경)	X	Y	Z
BHAO	보현산천문대 (경북 영천시)	36.1637	128.9763	-3243254.251	4008470.825	3743543.823
DAEJ	한국천문연구원 (대전광역시)	36.3994	127.3744	-3120041.942	4084614.903	3764026.926
JEJU	탐라대학교 (서귀포시)	33.2883	126.4621	-3171944.202	4292560.166	3480970.979
MKPO	목포기상대 (전남 목포시)	34.8168	126.3814	-3109396.161	4220348.724	3621241.275
MLYN	밀양기상대 (경남 밀양)	35.4913	128.7439	-3253750.433	4054963.271	3682413.358
SBAO	소백산천문대 (충북 단양군)	36.9342	128.4569	-3175229.601	3997975.780	3812384.442
SKCH	속초기상대 (강원도 속초시)	38.2509	128.5647	-3126510.917	3921458.238	3927386.183
SKMA	서울기상청 (서울특별시)	37.4935	126.9179	-3043536.549	4050959.035	3861031.760
YOSU	여수MBC방송국 (전남 여수)	34.7572	127.7062	-3208481.151	4150350.015	3615841.050

사용하였다. GPSurvey를 이용하여 데이터 처리를 할 때 IGS의 정밀궤도력과 방송궤도력 두 가지를 이용하였다.

GIPSY는 JPL에서 개발된 고정밀 GPS 데이터 처리 프로그램이며, 그 대표적인 특징은 이중차분을 이용하지 않는다는 것이다(Webb 등, 1993). 이중차분을 이용할 경우에는 위성 궤도 GPS 관측소 시계 오차가 서로 상쇄되는 장점이 있지만, GIPSY는 이중차분을 사용하지 않으면서 데이터 처리과정에서 위성 시계와 관측소 시계 오차를 추정하거나, 타 기관이 제공하는 위성 시계 오차 해(solution)를 사용한다.

GIPSY로 데이터를 처리할 때 가장 뛰어난 장점은 정밀 단독측위(precise point positioning) 기법을 이용할 수 있다는 것이다. 정밀단독측위는 국제 GPS 데이터 분석센터에서 제공하는 GPS 위성궤도력과 위성 시계 오차 해를 사용하여, 위치를 알고자 하는 관측소의 데이터만을 이용하여 처리하는 기법이다(Zumberge 등, 1997). 정밀단독측위를 할 경우에는 기준국(reference station)의 관측 데이터가 필요하지 않다. 이중차분 없이 데이터 처리가 가능하고 관측소간의 기선을 고려할 필요가 없으므로, 데이터 처리 속도가 빨라진다. 다시 말해, 이중차분을 이용하는 기존 처리방식은 관측소 수가 많아지면 데이터 처리에 소요되는 컴퓨터시간(CPU time)이 기하급수적으로 증가하는 반면, 정밀

단독측위의 경우에는 컴퓨터시간이 관측소 수에 비례하여 선형적으로 증가한다. Trimble 4000SSi 수신기로 30초 간격으로 하루동안 수집한 GPS 데이터를 정밀단독측위 방법으로 고정밀 데이터 처리할 경우 소요되는 시간은 약 1분으로 매우 신속하다. 그 정밀도 또한 궤도력을 동시에 추정하면서 데이터 처리할 경우 성취할 수 있는 정밀도 수준에 달한다(Zumberge 등, 1997).

정밀궤도력과 신속궤도력을 이용하여 데이터를 처리할 때는 궤도력과 함께 위성 시계 오차 해가 같이 제공되므로, 관측소의 시계 오차만을 추정하면 된다. 이런 경우 기준 시계는 모든 GPS 위성 시계가 된다. 하지만, 초신속궤도력과 방송궤도력을 이용할 때는 같이 제공되는 위성 시계 오차 해의 정밀도가 현저히 낮으므로, 관측소들 중 가장 안정된 관측소의 시계를 그 기준으로 선택하고, 나머지 관측소 시계와 위성 시계 오차 해를 추정해야 한다. 이 때는 일반적으로 Cesium이나 H-maser와 같은 외부기준시계(external reference clock)가 연결되어 있는 관측소를 이용한다. 한국천문연구원 GPS 상시관측소 중에 외부기준시계가 연결되어 있는 관측소는 DAEJ이므로(Cesium이 연결됨), 본 연구에서는 DAEJ의 외부기준시계를 기준으로 나머지 관측소 시계 오차 해를 추정하였다. 기준 시계를 제공하는

관측소의 좌표는 추정하지 않기 때문에 DAEJ의 좌표 값은 추정하지 않았다. 이 경우는 엄밀한 의미의 정밀단독측위가 아니다.

GPS 신호가 안테나에서 수신되는 위치는 안테나의 기하학적인 중심과 차이가 있다. 이 차이를 위상중심변화(phase center variations)이라 하는데, 그 변화량은 위성신호의 수신방향(GPS 위성의 방위각과 고도각)에 따라 변화하며 고정밀 측지용 GPS 안테나의 경우에도 심한 경우 2cm 가량의 차이가 발생한다(Schupler 등, 1994). 그러므로 위성 수신방향에 따른 위상중심변화량은 정밀 데이터처리에서는 반드시 고려해줘야 한다. 이를 고려하지 않을 경우 특정 안테나의 경우 10cm 정도의 수직방향 좌표 값의 차이가 난다(Park, 2000). 그러나 본 연구에서는 이를 고려하지 않았다. 그 이유는 비교대상이 된 GPSurvey는 위상중심변화량을 고려하지 않기 때문이다. 본 연구에서는 단지 평균적인 위상중심차이만 고려하였다. 따라서 본 연구에서 보여주는 좌표성과는 모두 안테나 기준점(ARP, Antenna Reference Point)의 좌표임을 밝혀둔다.

4. 결과 및 토론

GIPSY와 GPSurvey를 이용하여 앞서 언급한 일주일간의 데이터를 처리하고, 매일 추정된 좌표성과의 평균값을 비교에 이용하였다. 데이터 처리의 좌표성과는 ECEF 좌표계인 ITRF2000의 XYZ값으로 산출되며, 이를 해당 관측소의 위도와 경도를 이용하여, NEV 좌표계로 변환하였다(NEV는 local north, east, and vertical 좌표계를 나타내며, 본 논문에서는 남-북, 동-서, 그리고 수직으로 지칭한다). 표 3에서 GIPSY의 결과는 세 가지 다른 종류의 GPS 위성 궤도력을 사용하여 데이터 처리한 좌표성과의 정밀궤도력을 이용하여 산출된 좌표성과의 비교한 것이다. GPSurvey의 결과는 DAEJ의 좌표를 표 2의 DAEJ 좌표에 고정시키

고, 나머지 8개 관측소의 좌표성결과를 정밀궤도력과 방송궤도력을 이용하여 산출한 결과를 표 2의 좌표성결과와 비교한 것이다. 좌표성결과와 비교는 NEV 좌표계의 각 방향으로 비교한 결과이며 단위는 모두 cm를 사용하였다.

표 3은 각 궤도력의 정확성과 정밀도를 비교하기 위하여 좌표성결과와 제공평균(RMS, root-mean-square) 오차와 표준편차(standard deviation)를 보여준다. RMS 오차란 기준이 되는 좌표성결과와 해당 궤도를 이용한 좌표성결과와의 제공평균을 의미한다. 만일 좌표성결과 차이를 일주일 동안 단순 평균할 경우 양수와 음수 좌표성결과 차이 값이 서로 상쇄되는 것을 방지하기 위하여 RMS 오차를 계산한 것이다. 그리고 평균 좌표성결과에 대한 표준편차를 계산함으로써 좌표성결과와 정밀도를 동시에 평가하였다. 비교의 기준이 되는 좌표성결과는 본 연구에 사용된 일주일간의 데이터를 정밀궤도력을 이용하여 산출된 좌표성결과이다. 다시 말해, 정밀궤도력으로 산출된 좌표 평균값을 실제 좌표 값이라 가정하고, 세 가지 다른 궤도력으로 산출된 좌표 값과의 차이를 비교한 것이다. 참고로, 정밀궤도력을 이용하여 GIPSY로 정밀단독측위 기법으로 고정밀 데이터 처리를 할 경우 NEV 좌표계에서, 수평방향으로 대략 2-4mm, 수직방향으로 6-9mm 정도의 절대 좌표 정밀도를 보인다(Park, 2000).

표 3을 살펴보면, GIPSY를 이용한 데이터 처리결과, 방송궤도력을 이용한 경우를 제외하고는 좌표성결과가 1.5cm 이내로 정확하게 산출되었음을 알 수 있다. 신속궤도력의 경우 각 방향으로 모두 1cm 이내의 정확성을 보이고, 3차원 오차는 1.1cm로 매우 정확함을 알 수 있다. 초신속궤도력 또한 거의 신속궤도력의 정밀도에 근접하는 정확한 결과를 보였으며, 특히 남-북 방향 오차는 0.1cm이다. 신속궤도력과 초신속궤도력의 경우 모두, 표준편차는 각 방향으로 1cm 이하로 본 연구의 좌표성결과와 정밀도가 매우 높았다.

방송궤도력을 이용한 경우의 3차원 RMS 오차는 남-북

표 3. GIPSY와 GPSurvey를 이용한 각 궤도력의 좌표성결과 비교 (단위 : cm)

NEW	궤도력	RMS 오차(cm)				표준편차(cm)		
		남-북	동-서	수직	3차원	남-북	동-서	수직
GIPSY	신속	0.6	0.7	0.5	1.1	0.4	0.9	0.8
	초신속	0.1	1.3	0.8	1.5	0.2	0.6	0.6
	방송	373.7	529.2	2487.4	2570.4	9.8	24.4	40.1
GPSurvey	정밀	3.3	1.5	1.2	3.8	0.4	1.3	0.9
	방송	3.4	1.9	1.5	4.2	0.6	1.7	0.8

방향으로 3.7m, 동-서 방향으로 5.3m이다. 그러므로 수평 방향 좌표성과의 정확성은 6.5m이다. 하지만, 수직방향으로는 24.9m의 오차를 보여, 방송궤도력의 3차원 RMS 오차 25.7m의 대부분이 수직방향 오차 때문임을 알 수 있다. 또한 표준편차도 수직방향으로 가장 높게 나타났지만, 그 수치는 40cm 정도이다. 한편, 수평방향으로는 표준편차가 훨씬 낮아서 25cm 이내이다. 방송궤도력을 이용한 좌표성과의 3차원 RMS 오차가 25.7m임을 고려하면, 방송궤도력에서 제공하는 GPS 위성의 궤도 정보자체에 큰 오차 또는 편향(bias)이 포함되었음을 간접적으로 알 수 있다. GIPSY와 방송궤도력을 이용한 경우 수평방향 좌표 오차가 6.5m, 수직방향 좌표 오차가 25.7m이므로, GIPSY를 이용한 신속한 고정밀 데이터 처리에 방송궤도력을 이용할 수 없다.

표 3에서 한가지 특이한 점은 초신속궤도력을 이용했을 때의 표준편차가 신속궤도력을 사용하였을 때보다 모든 좌표 성분 방향에서 낮다는 것이다. 초신속궤도력을 사용한 경우 RMS 오차가 신속궤도력의 경우보다 높은 수치를 보이므로, 두 궤도력을 비교하면 초신속궤도력의 정확성은 낮지만, 정밀도는 오히려 높은 것이다. 그 이유는 초신속궤도력의 경우에는 신속궤도력을 사용한 경우와는 달리 데이터 처리 과정에서 GPS 위성 시계 오차를 추정하므로 위성 시계의 오차가 다른 미지수들과 명확히 분리되지 않아 정확성이 낮은 것으로 판단된다.

방송궤도력을 이용할 경우 정밀도에 비해 정확성이 많이 떨어진 것에 대해 앞서 언급하였는데, 이러한 궤도력 고유의 오차는 초신속궤도력에도 일부 발견되었다. 그림 1은 BHАО(보현산천문대) 관측소의 데이터를 초신속궤도

력으로 7일간 처리한 결과 좌표 차이를 날짜별로 보여준다. 참고로, BHАО와 DAEJ간의 기선거리는 146.3km이다. 좌표 차이 0에 보여진 직선에 비교하여 볼 때, 남-북 방향 좌표의 평균 좌표 차이는 대략 0에 가깝다. 하지만, 수직방향은 7일 내내, 동-서 방향의 경우에는 둘째 날을 제외하고 6일간 모두 양수의 좌표 차이를 보인다. 이는 동-서 방향과 수직방향에 좌표 편향(bias)이 존재함을 의미한다. 그 이유는 데이터 처리과정에서 고정시킨 GPS 위성궤도력에 내재하는 오차 때문이다.

GPSurvey를 이용하여 데이터를 처리한 결과, 정밀궤도력과 방송궤도력을 이용한 차이가 거의 없었다. 두 경우 모두 3차원 오차가 4.2cm 이하이다. 예상대로 방송궤도력을 이용한 오차가 정밀궤도력을 이용한 오차보다 높지만, 그 차이는 무시할 만하다. 궤도력의 차이에 의한 좌표성과의 오차가 적은 것은 앞서 언급한 바와 같이, GPSurvey는 이중차분을 이용하기 때문에 위성궤도력에 내재된 오차가 차분과정에서 상쇄된 것으로 생각된다.

GPSurvey는 GIPSY와 달리 이중차분을 이용함으로써, 궤도력과 위성 시계 오차 등의 공통 오차요인을 제거할 수 있는 장점이 있지만, 단점은 기준국으로부터 멀어질수록 그 좌표성과 오차가 기선거리에 비례하여 증가한다는 것이다(박필호 등, 1996 ; 최윤수 등, 2003). 하지만, GIPSY로 정밀단독측위를 할 경우, 기선거리에 비례하여 증대하는 오차는 감소하거나 없어지게 된다. 이를 증명하기 위하여 그림 2에서처럼, DAEJ으로부터의 기선거리에 따른 3차원 RMS 오차를 비교하였다.

그림 2의 (a)는 GPSurvey와 IGS 정밀궤도력, (b)는 GIPSY와 초신속궤도력, 그리고 (c)는 GIPSY와 신속궤도력을 이용한 결과이다. 기선거리에 따른 RMS 오차의 상관관계를 비교하기 위하여 상관계수(correlation coefficient)를 계산하였다. 그 결과 (a)의 경우에는 상관계수가 0.97로 거의 1에 가까운 높은 상관계수를 보였다. (b)의 경우에는 상관관계가 다소 감소하여 0.58이었다. 엄밀한 정밀단독측위의 경우인 (c)는 상관계수가 -0.26으로 RMS 오차가 기선거리에 무관하였다. (b)에서 다소간의 상관관계가 존재하는 이유는 초신속궤도력을 사용하는 경우 DAEJ의 외부 기준시계를 이용하면서 DAEJ 좌표를 고정하였기 때문에 관측소간의 상관관계가 일부 반영되었기 때문이다. 하지만, 그 상관관계는 GPSurvey를 이용한 경우보다 훨씬 낮기 때문에 국내 GPS 관측 데이터를 GIPSY와 초신속궤도력으로 처리할 때, 기선거리에 따른 오차의 증대는 크게 염려할 필요가 없다고 할 수 있다.

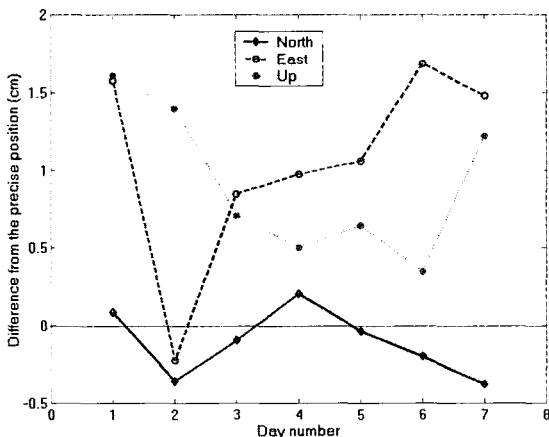


그림 1. BHАО의 일지별 NEV 좌표성과 차이 비교

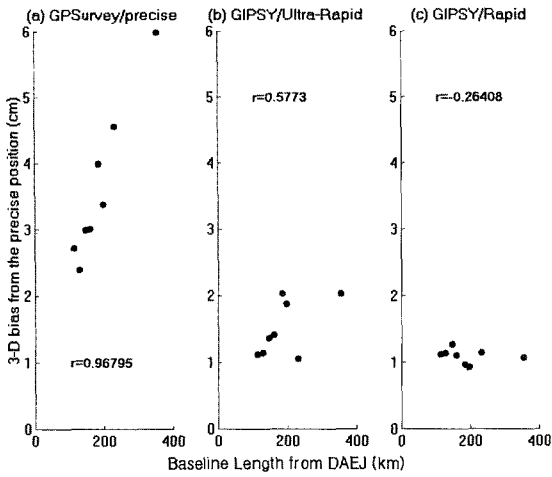


그림 2. DAEJ부터의 기선거리와 3차원 좌표성과 오차

GPS 상시관측소의 1일간의 관측 데이터를 처리할 때는 그림 1에서와 같이 최대 2cm 내외의 정확성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 데이터 수집시간이 24시간 미만일 때는 그 정확성이 감소될 수밖에 없을 것이다. 그래서, 본 연구에서는 관측시간이 2시간일 경우 GIPSY와 초고속계도력을 얻을 수 있는 좌표성과의 정확성을 비교해 보았다. 이를 위해 DAEJ로부터의 기선거리가 197.3km 인 MKPO의 2003년 4월 10일 데이터를 2시간 간격으로 처리하였다. 다시 말해 두 시간의 관측으로 얻을 수 있는 좌표성과의 정확성을 비교한 것이다. 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3은 2시간의 관측 데이터를 이용하여 산출한 좌표성과를 24시간 데이터를 정밀계도력으로 산출한

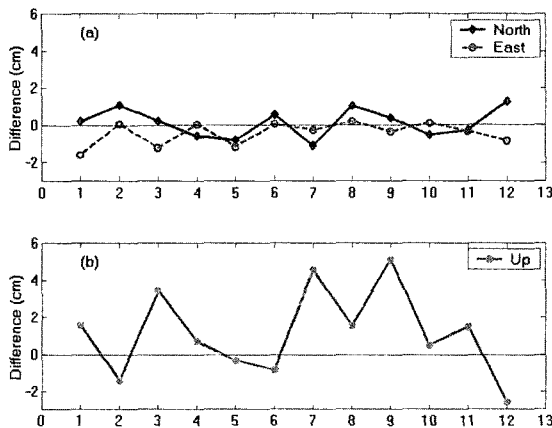


그림 3. GIPSY와 초고속계도력을 이용한 MKPO의 두 시간 관측 데이터의 NEV 좌표성과 차이 비교

값과 비교한 수치를 남-북, 동-서 그리고 수직방향으로 각각 비교한 것이다. 먼저 그림 3의 (a)에는 수평방향 좌표의 변화량을 나타내었는데, 모든 경우 $\pm 2\text{cm}$ 이내에서 일치함을 알 수 있다. (b)는 수직방향의 좌표는 차이를 나타내는데, 최대 5.1cm의 차이를 보인다. 따라서 관측시간이 짧아질수록, 수평방향의 좌표성과 오차는 크게 증가하지 않지만, 수직방향은 약 2-3배정도 증가함을 알 수 있었다. 그림 3에 나타난 12개 좌표성과의 RMS 오차는 남-북 방향으로 0.8cm, 동-서 방향으로 0.7cm, 그리고 수직방향으로 2.5cm로 매우 정확하였다.

신속한 데이터 처리에 또 하나 고려해야 할 점은 데이터 처리 속도이다. 앞서 언급한 여러 가지 준실시간 응용분야는 짧은 시간 내에 정밀한 좌표성과를 산출할 필요가 있다. GIPSY와 초고속계도력을 이용했을 경우, DAEJ와 나머지 8개 관측소에서 수집된 하루의 데이터를 처리하는데 약 7-8분이 소요되었다. 하지만, GPSurvey로 같은 데이터를 처리하는데는 약 50분 정도 걸렸다. 그러므로 데이터 처리 속도에 있어 GIPSY가 대략 6-7배 빠른 것이다. GIPSY는 Sun 워크스테이션(CPU: UltraSPARC II, 200MHz)에서, 그리고 GPSurvey는 PC(CPU: Pentium 4, 2.53GHz)에서 구동되었지만, CPU에 따른 차이보다는 이중차분 과정의 유무가 데이터 처리속도에 큰 영향을 미친 것으로 생각된다.

5. 결 론

GPS 데이터를 준실시간으로 처리하기 위하여 네 가지 종류의 GPS 위성계도력을 비교하고, 그 중 준실시간 처리에 가장 적합하다고 생각되는 초고속계도력을 이용하여 그 정확성과 정밀도를 평가하였다. GIPSY와 초고속계도력을 이용하였을 때 좌표결정 정확성이 1.5cm 이내였고, 좌표성과의 표준편차도 3차원 각 방향으로 1cm 이내로 나타났다. GIPSY와 신속계도력을 이용한 경우는 3차원 RMS 오차가 1.1cm로 초고속계도력의 경우보다 정확하지만, 준실시간 데이터 처리에 신속계도력을 사용할 수 없다. 상용소프트웨어인 GPSurvey를 이용할 경우는 좌표성과의 정확성이 사용된 계도력에 무관하게 4cm 정도였으나, 기준국으로부터의 기선거리에 비례하여 오차가 증대됨을 보였다. 초고속계도력과 GIPSY를 이용하여 준실시간 데이터 처리를 할 때의 좌표성과의 정확성과 정밀도 모두 1.5cm 이하이며, 데이터 처리속도 또한 GPSurvey에 비하여 월등하게 빨랐다. 또한 2시간 간격으로 데이터 처리한 결과 수평방향으로는 2cm 이내, 그리고 수직방향으로는 최대 5.1cm의

정확성을 얻을 수 있었다. 이들 연구결과를 토대로, 측량을 비롯한 각종 응용분야에서 신속한 GPS 데이터 처리를 필요로 할 경우 GIPSY와 초신속궤도력을 이용하면 매우 높은 정확성과 정밀도의 좌표성과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 “원전부지 지진안정성 평가기반 기술개발” 과제(과제번호 M20313010001-03A0213-00410)의 지원으로 수행된 연구결과의 일부이며, 지원에 감사드립니다. 본 논문을 심사해주신 심사위원들의 지적과 제안에 감사드립니다.

참고문헌

박필호, 박종욱, 조정호 (1996), GPS 위성의 정밀궤도력에 의한 기선결정의 정밀도 향상에 관한 연구, 한국측지학회지, 제 14권, 제 2호, pp. 199-207.
 최윤수, 고준환, 이기도 (2003), GPS 장기선 해석에 관한 기초 연구, 한국측량학회지, 제 21권, 제 2호, pp. 123-129.
 Ge, M., Calais, E. and Haase, J. (2000), Reducing satellite orbit error effects in near real-time GPS zenith tropospheric delay estimation for meteorology, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 13, pp. 1915-1918.
 Jarlemark, P. O. J., Johansson, J. M., Stoew, B. and Elgered, G. (2002), Real time GPS data processing for regional atmospheric delay deviation, *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 16, doi:10.1029/2001GL014568.

Kijewski-Corea, T. and Kareem, A. (2003), Monitoring buildings: The height of precision, *GPS World*, Vol. 14, No. 9, pp. 20-34.
 Larson, K. M., Cervelli, P., Lisowski, M., Miklius, A., Segall, P. and Owen, S. (2001), Volcano monitoring using the Global Positioning System: Filtering strategies, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. B9, pp. 19453-19464.
 URL, NOAA/NGS (2003), SP3 Format, National Oceanic and Atmospheric Administration/National Geodetic Survey, Silver Spring, MD, USA., http://www.ngs.noaa.gov/GPS/SP3_format.html
 Park, K.-D. (2000), *Determination of glacial isostatic adjustment parameters based on precise point positioning using GPS*, Ph.D. Thesis, The University of Texas at Austin.
 Park, K.-D., Nerem, R. S., Davis, J. L., Schenewerk, M. S., Milne, G. A. and Mitrovica, J. X. (2002), Investigation of glacial isostatic adjustment in the northeast U.S. using GPS measurements, *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 11, doi: 10.1029/2001GL013782.
 Schupler, B. R., Allshouse, R. L. and Clark, T. A. (1994), Signal characteristics of GPS user antennas, *Navigation: Journal of The Institute of Navigation*, Vol. 41, No. 3, pp. 277-295.
 Vey, S., Calais, E., Llubes, M., Florsch, N., Woppelmann, G., Hinderer, J., Amalvict, M., Lalancette, M. F., Simon, B., Duquenne, F. and Haase, J. S. (2002), GPS measurements of ocean loading and its impact on zenith tropospheric delay estimates: a case study in Brittany, France, *Journal of Geodesy*, in press, Vol. 76, No. 8, pp. 419-427, doi:10.1007/s0019-002-0272-7.
 Webb, F. H. and Zumberge, J. F. (1993), *An introduction to the GIPSY/OASIS-II*, JPL Publ., D-11088, Pasadena, Calif.
 Zumberge, J. F., Hefflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. and Webb, F. H. (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B3, pp. 5005-5017.

(접수일 2003. 10. 10, 심사일 2003. 11. 11, 심사완료일 2003. 11. 30)