

해양 정밀측위 활용을 위한 GPS 정밀위성궤도 보간 연구

조득재† · 박상현*

†,*한국해양연구원 해양시스템안전연구소

A Study of GPS Precise Ephemeris Interpolation for Maritime Precise Positioning Applications

Deuk Jae Cho† · Sang Hyun Park*

†,*Korea Ocean Research & Development Institute, Daejeon 305-343, Korea

요 약 : 현재 선박들은 교량 및 시설물 통과시 선박의 흘수에 토대를 둔 대략적인 예측치로 안전통항 높이를 결정하고 있으나 표준선박을 제외한 바지선 등이 항해시 바다의 조석간만에 따라 안전통항 높이 예측치가 부정확할 때가 종종 있다. 또한 지구 온난화 및 국지적 해면 상승으로 인한 해양재난으로 인명피해와 재산피해가 점차 급증하고 있으며, 지진이 아닌 유사 재난해파에 대해서는 경고할 수 없는 문제가 상존하고 있다. 본 논문에서는 선박 등이 안전통항을 가능하게 하고, 쓰나미와 같은 재난해파로부터 피해를 절감시키기 위해 필요한 위성항법 기반의 정밀수직측위 기술들 중 해양 정밀측위 활용을 위한 GPS 정밀위성궤도의 보간에 관한 연구를 수행하였다. 본 논문에서 사용하는 GPS 정밀위성궤도는 국제 GNSS 서비스 기구인 IGS로부터 제공받을 수 있지만 데이터 간격이 15분으로 실시간 정밀측위시 최대 15분의 위성궤도 지연으로 오차가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 실시간 정밀측위 오차를 줄이기 위해 보간시 발생하는 발진현상을 효과적으로 제거하는 방법을 제안하였으며, 마지막으로 보간된 GPS 위성궤도의 정확도를 분석하였다.

핵심용어 : 정밀측위, 국제 GNSS 서비스 기구, 정밀위성궤도, 보간

Abstract : Currently many vessels determine an overhead obstruction by a rule of thumb based on their draft for maritime navigation. Therefore they doesn't have a good overhead obstruction clearance because vertical position of vessels varies on time by tidal. As a result, it is occurred maritime accidents that the mainmast of vessels is bumped against overhead facilities. And disaster by global warming and rising sea levels have increased casualties. So we feel keenly the necessity of warning system for not an earthquake but disaster wave such a tsunami. This paper analyzes a precise GPS ephemeris for maritime precise positioning to solve these problems. The precise GPS ephemeris provided by International GNSS service gives a difficulty to real-time application because of its sample interval. This paper proposes an effective interpolation method for real-time application, and it analyzes an accuracy of precise GPS ephemeris through an interpolation method.

Key words : Precise positioning, International GNSS service, Precise ephemeris, Interpolation

1. 서 론

현재 전 세계는 경제 및 산업 성장에 따라 육상, 해상 교통량이 증가하는 추세이다. 특히, 리아스식 해안의 특성을 가진 우리나라에서는 원활한 교통 흐름을 위하여 연륙교, 연도교, 대교 등 80여개소의 해상 교량을 건설했거나 건설 중에 있다(국토해양부, 2008). 이처럼 해상 교량 증가에 따라 해상 교량을 통과하는 선박의 수가 증가하고, 이로 인해 선박과 교량 간의 충돌 위험이 점차 증가하고 있는 추세이다. 예를 들면, 표준선박을 제외한 일부 크레인 부선이 붐(boom)을 충분히 낮추는 것을 소홀히 하고 운항하다 교량 상판과 충돌하는 등 Fig. 1과 같이 교량의 수면상 높이(형하고) 또는 본선의 높이에 대한 정확한 정보 없이 운항하면서 발생하는 사고 및 안개 등 시계 확보가 불가

능한 경우에 빈번한 충돌 사고가 발생하고 있다. 또한 Fig. 2와 같이 너울성 파도, 쓰나미 등의 재난해파로 인하여 빈번한 인명 피해 및 재산피해가 점차 급증하고 있다.

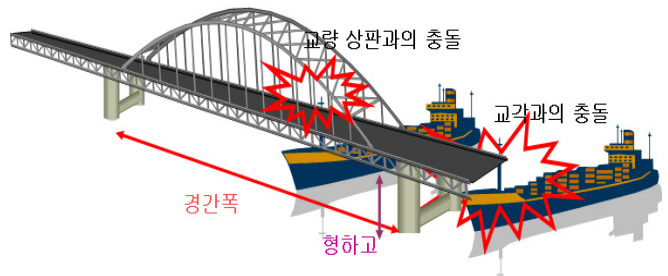


Fig. 1 Type of accidents between bridge and vessel

† 교신저자 : 조득재(정회원), djcho@moeri.re.kr 042)866-3683
* 정회원, shpark@moeri.re.kr 042)866-3681

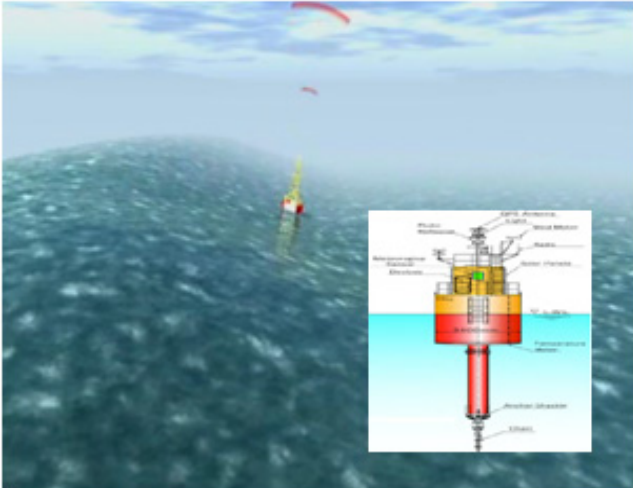


Fig. 2 Occurrence of freak wave

현재 국토해양부에서는 선박의 교량통항시 이러한 사고를 줄이기 위한 광파표지, 전파표지 등의 항로표지를 교량에 설치하여 운영 중에 있으나, 여전히 시계확보가 불가능한 경우나 항해사에 의존하는 경우에는 항상 사고의 위험이 존재한다. 특히, 조석간만의 차가 심한 우리나라에서는 시간에 따라 해수면의 높이가 달라지므로 사고 위험은 여전히 크다.

또한 지진발생 후 지진해일이 발생할 것인가에 대한 확실한 증거를 찾는 데에 상당한 시간이 소요되므로 만일의 사태에 대비하여 해상에서 일정한 규모 이상의 얇은 지진이 발생하는 경우에도 “주의보” 또는 “경보”를 발표하는 것이 국제적인 관례이다. 그러나 이들 발표가 지진해일 발생으로 이어지는 확률이 낮고, 지진이 아닌 유사 재난해파에 대해선 경고할 수 없는 문제가 상존한다. 이런 이유로 장주기 특성을 갖는 쓰나미와 같은 지진해파 또는 유사 재난해파의 발생을 조기에 검출하여 해양 재해로부터 피해 절감과 선박의 안전 피항을 효과적으로 유도할 필요가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 선박의 통항 높이 및 부이의 해수면 높이를 실시간으로 결정하기 위한 수직축 정밀 측위 기술이 필요하다. 선박이나 부이에서 사용할 수 있는 정밀 측위 기술로는 GPS 반송파 위상 측정치를 사용하는 HADGPS (High Accuracy Differential GPS), RTK (Real Time Kinematic) 등이 있다. 이들은 고정밀의 측위 정보를 제공하지만 사용하려는 모든 지역에 기준국을 세워야 하며, VHF 등과 같은 별도의 통신 채널을 구성하여야 하며, 기준국의 허용범위를 벗어나면 측위 오차가 증가하여 사용 지역에 한계를 갖는다. 따라서 본 논문에서는 기준국을 따로 설치할 필요 없이 선박이나 부이에 탑재된 항법 수신기와 인터넷 기반의 정밀측위에 대해서 기술한다. 특히 정밀측위 기술을 구성하고 있는 요소 중 GPS 정밀위성궤도를 해석하고 이를 실시간으로 활용하기 위해 보간시 발생하는 발진현상을 효과적으로 제거하는 방법을 제안한다. 마지막으로 보간된 GPS 위성궤도의 정확도를 분석한다.

2. GPS 정밀위성궤도의 해석

IGS (International GNSS Service)는 광범위한 GNSS 응용 분야 및 실험 등의 목적을 만족시키기 위해 높은 정확도를 갖는 GNSS 측정 데이터를 수집, 저장 및 배포를 수행하는 국제 기구로서 Table 1과 같이 GPS 위성궤도 및 위성시계 오차를 SP3 형식의 파일로 제공한다(IGS).

Table 1 IGS product table

GPS Satellite Ephemerides/ Satellite & Station Clocks		Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Broadcast	Orbits	~ 100 cm	real time	--	daily
	Sat. clocks	~ 5 ns RMS ~ 2.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (predicted half)	Orbits	~ 5 cm	real time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~ 3 ns RMS ~ 1.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	Orbits	~ 3 cm	3 - 9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~ 150 ps RMS ~ 50 ps SDev			
Rapid	Orbits	~ 2.5 cm	17 - 41 hours	at 17 UTC daily	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~ 75 ps RMS ~ 25 ps SDev			5 min
Final	Orbits	~ 2.5 cm	12 - 18 days	every Thursday	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~ 75 ps RMS ~ 20 ps SDev			Sat.: 30 sec Stn.: 5 min

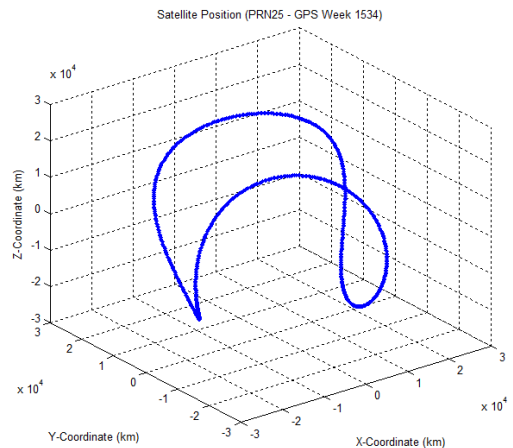


Fig. 3 IGS GPS ephemeris for 1 week

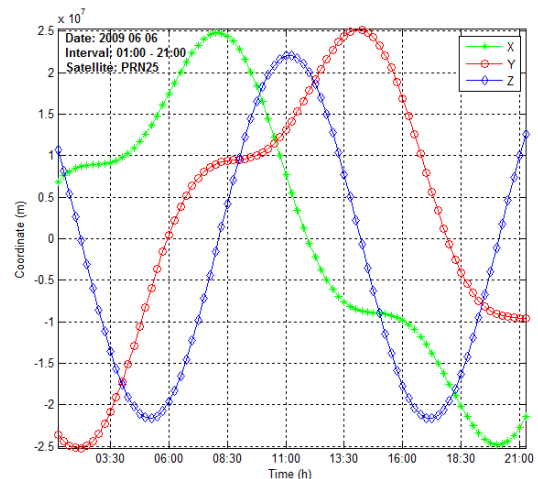


Fig. 4 IGS GPS ephemeris for 20 hours

본 논문에서는 실시간 활용을 고려해 Ultra-Rapid 데이터를 사용하기로 한다. 이 데이터는 현재를 기준으로 이전 하루치의 계산된(observed half) 위성궤도와 이후 하루치의 예측된(predicted half) 위성궤도를 포함하고 있다. 따라서 예측된 위성궤도를 이용할 경우, 실시간 활용이 가능해진다.

Fig. 3은 IGS에서 제공하는 2009년 6월 첫째 주 7일 동안의 GPS 정밀위성궤도를 나타낸 그림이고, Fig. 4는 그 일부분인 2009년 6월 6일 오전 1시부터 오후 9시까지 20시간 동안의 GPS 정밀위성궤도력을 나타낸 그림이다. 그러나 이들 정밀위성궤도는 Table 1에 나타낸 바와 같이 데이터 간격이 15분이기 때문에 실시간 정밀측위시 최대 15분의 시간지연으로 인한 오차가 발생하게 된다. 따라서 GPS 수신 처리부에서는 보간 방법을 이용하여 15분 사이의 데이터를 추정해야 실시간 활용이 가능하다.

위성궤도의 보간을 위한 가장 정확한 방법은 태양의 복사압(radiation pressure)을 고려하는 중력장에서 위성 움직임의 미분방정식을 푸는 것이다. 이러한 방법은 주로 위성의 궤도 결정에 사용된다(Hugentobler, 2001). 그러나 IGS에서 제공하는 위성정밀궤도가 있다면 이러한 접근 방법은 불필요하게 복잡하다. 또한 간단한 다항식 보간법 또는 삼각(trigonometric) 보간법은 보간된 위성궤도의 정확도를 센티미터 이상으로 제공한다는 기존의 연구결과가 있다(Schenewerk, 2003).

본 논문에서는 기존 연구결과 중 다항식 보간법을 사용하였다. 다항식 보간법은 식 (1)과 같이 2차 이상의 다항식을 가진다. 일반적으로 $n+1$ 개의 데이터가 있는 경우에는 다항식의 차수는 n 차가 된다. 왜냐하면 이 $n+1$ 개의 데이터를 모두 통과해야 하는 곡선을 선택해야 하기 때문이다.

$$p(t) = a_1t^n + a_2t^{n-1} + \dots + a_nt + a_{n+1} \quad (1)$$

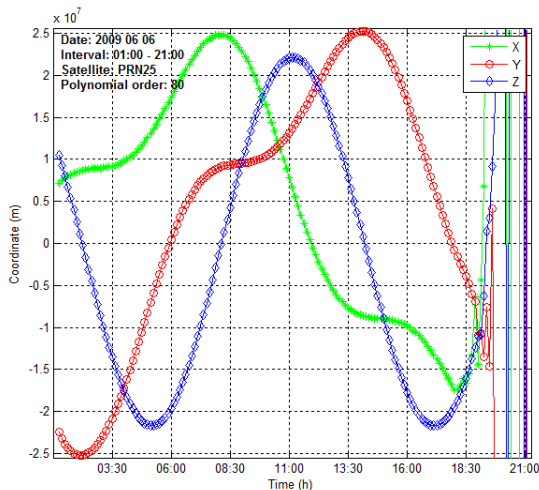


Fig. 5 Runge's phenomenon

여기에서 $p(t)$ 는 위성의 좌표 X, Y, Z를 나타내며, t 는 에폭(epoch)을 나타낸다.

다항식 보간법은 데이터가 많을수록 차수가 높아지므로 계산

의 복잡성이 커지며, Fig. 5와 같이 주어진 데이터 구간, 즉 적합구간 (fit interval)의 끝부분에서 발진이 일어나는 Runge 현상이 발생한다(Dahlquist and Bjorck, 1974). Fig. 5는 2009년 6월 6일 오전 1시부터 오후 9시까지 20시간 동안의 IGS 15분 샘플 간격, 즉 81개의 정밀위성궤도 샘플을 일반적인 80차 다항식 보간법을 이용하여 내삽한 결과이다.

3. GPS 정밀위성궤도의 효율적인 보간 방법

본 논문에서는 보간시 발생하는 이러한 Runge 현상을 효과적으로 제거하는 방법을 제안하였다. 효과적인 GPS 정밀위성궤도의 보간을 위해 기존의 보간 방법들을 적용하여 Runge 현상을 완화시키는 것 대신, 유효구간 (validity interval)의 길이를 사용자가 조정하게 함으로써 적합구간에서 발생하는 Runge 현상의 영향을 무시하는 방법으로 그 문제를 해결하였다. 이때 유효구간은 Fig. 6에서처럼 항상 적합구간의 가운데에 오도록 설정한다. 결국, 현재를 기준으로 하루치의 예측된 15분 간격의 GPS 정밀위성궤도 SP3 파일에서 적합구간 및 유효구간의 길이를 설정하고, 설정된 적합구간 안에 있는 데이터 샘플들로부터 추정된 식 (1)의 다항식을 이용하여 설정된 유효구간에서의 에폭에 대해서만 보간된 위성궤도를 계산하도록 하는 것이다. Fig. 7은 본 논문에서 제안한 n 시간 동안 유효구간에서의 위성궤도 보간이 이루어지면 그 다음 n 시간의 유효구간에서 계속 보간이 이루어지는 구조를 나타내었다. 즉, 새롭게 업데이트 되는 SP3 파일을 얻는다면 연속적으로 모든 구간의 보간 결과를 얻을 수 있으며, 이때 n 시간의 유효구간에서 계산되는 보간 결과는 한꺼번에 계산되므로 실시간 활용에 문제가 없다.

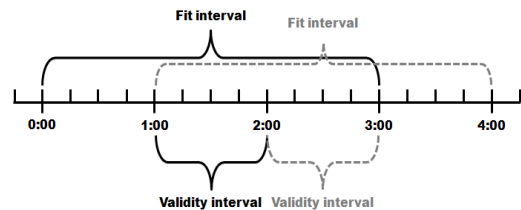


Fig. 6 Fit and validity interval

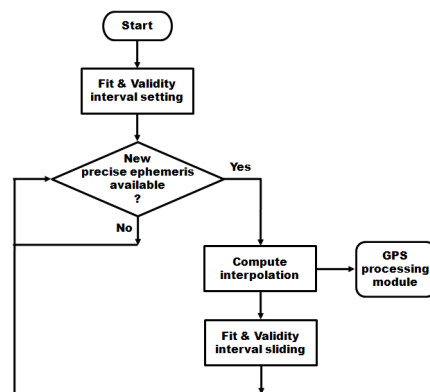


Fig. 7 Flow diagram of the orbit interpolation module for real-time applications

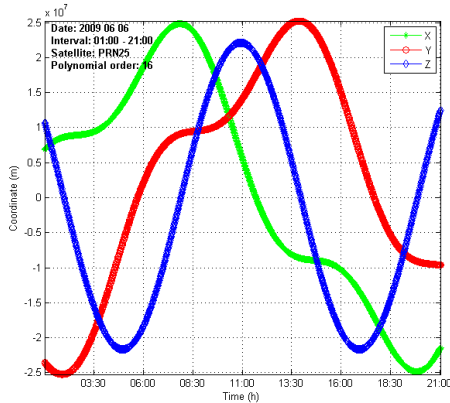


Fig. 8 Results of the orbit interpolation

위에서 제안한 방법을 이용하여 보간한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 2009년 6월 6일 오전 1시부터 오후 9시까지 20 시간 동안의 IGS 15분 샘플 간격, 즉 81개의 위성정밀궤도 샘플을 4시간의 적합구간, 2시간의 유효구간으로 나누어 설정한 후, 16차 다항식 보간법으로 10회의 슬라이딩 방식을 사용하여 1분 간격으로 내삽한 결과를 나타낸다. Fig. 5와 비교해보면, Runge 현상이 해결된 것을 알 수 있다.

4. GPS 정밀위성궤도의 보간 정확도 분석

IGS에서 제공되는 정밀위성궤도는 15분 간격이므로 보간된 위성궤도 전체에 대해서 정확도를 분석하는 것이 불가능하다. 따라서 Fig. 9와 같이 15분 간격의 IGS 정밀위성궤도와 같은 에폭에서 보간된 위성궤도와와의 차분을 통해 제안한 방법을 활용한 보간 정확도를 분석하였다.

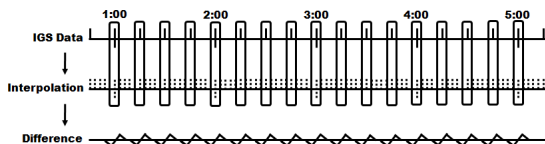


Fig. 9 Accuracy analysis of the orbit interpolation module

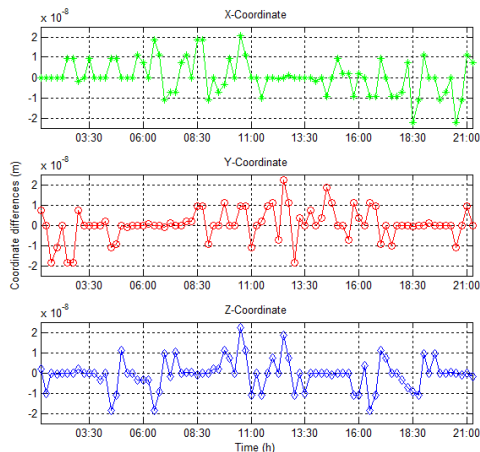


Fig. 10 Accuracy of the interpolated coordinate's difference

Fig. 10은 Fig. 9의 방법으로 15분 간격의 IGS 정밀위성궤도와 보간된 위성궤도 사이의 차분을 나타낸 그림이다. Fig. 10으로부터 X, Y, Z 좌표의 차분결과는 2.5×10^{-6} cm 이내의 정확도를 나타내며, 이는 IGS 정밀위성궤도와 거의 유사하게 보간 되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 정밀측위를 위한 필수 요소 기술인 정밀위성궤도의 해석과 보간시 발생하는 Runge 현상을 효과적으로 제거하는 방법을 제안하였다. 효과적인 GPS 정밀위성궤도의 보간을 위해 유효구간 (validity interval)의 길이를 사용자가 조정하게 함으로써 적합구간에서 발생하는 Runge 현상의 영향을 무시하는 방법으로 그 문제를 해결하였다. 다양한 적합구간 및 유효구간, 다항식 차수에 대해 시험한 결과 4시간의 적합구간, 2시간의 유효구간, 16차 다항식이 가장 높은 보간 정확도를 보였다.

최근 해양 분야에서의 정밀측위 요구사항이 증가하고 있으며, 특히 정밀수직측위 정보의 요구를 만족시키기 위한 연구가 필요한 시점이다. 본 연구 결과는 이러한 요구사항을 만족시킬 수 있을 것으로 판단하며, 고정밀 측위 정보를 요구하는 응용 분야에 적용할 수 있으리라 기대된다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원의 지원으로 수행된 “선박 안전통항 높이 결정을 위한 위성항법기반 수직측위기술 개발”과제 (PES129B) 및 “다중 기준국 기반 UDRE 추정기법 성능해석 연구”과제(PGS2160)의 연구결과 중 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- [1] 국토해양부 안전관리관실(2008), 해상교량 통항선박의 안전성 확보방안.
- [2] Dahlquist, G. and Bjorck, A. (1974), Numerical methods, Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs.
- [3] Hugentobler, U., Schaer, S., and Fridez.(2001), Documentation of the Bernese GPS Software, Version 4.2, University of Bern, Switzerland.
- [4] IGS(International GNSS Service), <http://www.igs.org>.
- [5] Schenewerk, M.(2003), A brief review of basic GPS orbit interpolation strategies, GPS Solutions 6(4), pp.265-267.

원고접수일 : 2009년 9월 18일
 심사완료일 : 2009년 12월 8일
 원고채택일 : 2009년 12월 8일