

IOD 변화 시점에서 다항식 모델을 사용한 IGS RTS 보정정보 예측

Prediction of the IGS RTS Correction using Polynomial Model at IOD Changes

김민규 · 김진호 · 김정래*

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

Mingyu Kim · Jinho Kim · Jeongrae Kim*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

[요 약]

IGS에서 제공하는 RTS (real-time service) 정보는 인터넷으로 GNSS 궤도 및 시계에 대한 실시간 보정값을 제공하므로 실시간 정밀 위치추정에 많이 사용된다. 하지만 인터넷 환경이 불안정한 경우 RTS 신호가 단절될 수 있는데, 주로 다항식을 이용하여 손실된 신호예측을 수행한다. GNSS 항법메시지 IOD (issue of data)가 변화하는 구간에서는 RTS 보정정보도 급격히 변화하여 불연속성이 증가하고, 신호단절이 발생할 경우 예측이 어려운 문제가 발생한다. 본 연구에서는 IOD 변화에 의한 항법메시지 궤도 차이를 적용하여 연속적인 RTS 보정정보를 생성하는 방법을 제안하였다. 이를 이용하면 RTS 신호손실이 IOD 변화 직후 발생할 경우 예측 성능을 높일 수 있다. RTS 예측성능을 높이기 위한 최적화 연구를 수행한 뒤, 예측된 RTS 궤도정보를 정밀위치결정(PPP; precise point positioning)에 적용하였다. 기존 방법에 비해 위치오차가 상당히 감소하였으며, 신호손실 구간이 길어질수록 위치오차가 급증하는 경향도 감소하였다.

[Abstract]

Real-time service (RTS) provided by IGS provides correction for GNSS orbit and clock via internet, so it is widely used in fields that require real-time precise positioning. However, the RTS signal may be lost due to an unstable Internet environment. When signal disconnection occurs, signal prediction can be performed using polynomial models. However, the RTS changes rapidly after the GNSS navigation message issue of data (IOD) changes, so it is difficult to predict when signal loss occurs at that point. In this study, we proposed an algorithm to generate continuous RTS correction information by applying the difference in navigation trajectory according to IOD change. The use of this algorithm can improve the accuracy of RTS prediction at IOD changes. After performing optimization studies to improve RTS prediction performance, the predicted RTS trajectory information was applied to precision positioning (PPP). Compared to the conventional method, the position error is significantly reduced, and the error increase along with the signal loss interval increase is reduced.

Key word : GNSS, GPS, RTS corrections, RTS prediction, Precise positioning.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.6.533>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 2 December 2020; Revised 3 December 2020

Accepted (Publication) 22 December 2020 (30 December 2020)

*Corresponding Author; Jeongrae Kim

Tel: +82-2-300-0110

E-mail: jrkim@kau.ac.kr

I. 서론

GNSS (global navigation satellite system)을 사용한 정밀 위치 추정 시 신호에 포함된 오차를 제거해야 한다. 그 중에서 위성 궤도 및 시계에 의한 오차를 보정하기 위해서 IGS (international GNSS service)에서 제공하는 정밀궤도력 또는 RTS (real-time service)가 일반적으로 사용된다. 다만, 정밀궤도력은 데이터 생성에 걸리는 시간으로 인해 실시간 사용이 불가능하며, 실시간 사용 용도로 제공되는 초신속궤도력 (ultra-rapid orbit)은 시간이 지날수록 시계정보의 오차가 증가하는 단점이 있다[1].

IGS RTS 보정정보는 GNSS 궤도와 시계 보정정보를 포함하므로 이를 활용해 실시간 정밀 측위를 수행할 수 있다. RTS 보정정보는 인터넷을 통해 보정정보를 수신할 수 있으므로 인터넷 환경이 제공되는 모든 지역에서 활용이 가능하다. 사용자는 수신된 궤도 및 시계 보정정보를 항법메시지로 계산한 위성 궤도와 시계에 적용하여 쉽게 정밀 궤도/시계를 획득할 수 있다. 다만 RTS 생성 기관 또는 인터넷 환경의 문제, 그리고 수신하고 있는 하드웨어의 문제 등으로 단기간 신호 단절이 발생할 수 있다. 정밀 측위 중에 신호 단절이 발생하는 경우 측위오차가 급증하므로 신호단절에 대한 대비책이 필요하다.

신호 단절 상황에서 RTS 정보를 예측하여 사용하는 방법이 주로 연구되었다. 먼저 다항식 모델을 사용하여 단기간 보정정보를 예측하는 방법이 제안되었다[2]. RTS 신호와 초신속 궤도력 데이터를 조화함수로 모델링하여 RTS 시계를 예측한 연구 [3]-[5] 및 Fourier 급수를 적용하여 예측한 연구[6]도 있었다. 머신러닝 기법을 사용하여 예측을 시험한 사례도 있었는데, ARMA (auto-regressive moving average) 모델에 NN (neural network) 또는 GA (genetic algorithm)를 결합한 방법으로 RTS 정보를 예측한 사례 [7, 8] 및 LSTM (long-short term memory) 네트워크를 사용하여 RTS 시계를 예측한 사례가 있었다[9].

한편, GNSS에서 전송되는 항법메시지와 RTS 보정정보에는 IOD (issue of data) 정보가 있다. IOD는 전송된 메시지에 대한 발행 번호를 의미한다. IOD 정보는 궤도에 대한 IOD 값인 IODE (IOD ephemeris)와 시계에 대한 값인 IODC (IOD clock)이 있으며, 2시간마다 항법메시지가 갱신되면서 값이 변화한다. IOD가 변화하는 시점에서 항법메시지로 계산된 위성 궤도와 RTS 보정정보가 불연속적으로 변화한다. IOD가 변화하는 시점에서 RTS 신호 단절이 발생하는 경우 보정정보 예측이 매우 어렵기 때문에 기존 연구들은 IOD가 변화하지 않는 시점에서 예측을 시험하였다.

본 연구에서는 IOD가 변화한 직후에 신호 단절이 발생하였다고 가정 후 해당 시점에서 다항식 모델을 사용하여 예측을 시험하였다. IOD 변화 시 보정정보가 불연속적으로 변화하므로 이를 해결하기 위해 최근 및 과거 IOD 항법메시지의 궤도 차이를 RTS에 적용한 후에 이를 피팅 및 예측하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 사용하는 경우 다항식 차수와 피팅 기간에 따른 예측오차를 분석하여 최적 모델을 선정하였다. 최적 모

델을 사용하여 RTS 보정정보를 예측한 후 정확도 분석을 실시하고, PPP (precise point positioning)를 수행하여 제안한 방법의 위치추정 성능도 시험하였다.

II. RTS 보정정보

2-1 RTS 보정정보 개요

IGS RTS 보정정보는 RTCM SSR (state space representation) 형식으로 제공되는데, 사용자는 NTRIP (networked transport of RTCM via internet protocol) 방식으로 제공받을 수 있다 [10]-[12]. RTS 보정정보에는 GNSS 위성의 궤도와 시계 보정정보로 구성되어 있으며 사용자가 원하는 기관의 데이터 산출물을 선택할 수 있다. 여러 산출물 중 IGS03은 GLONASS 위성의 보정정보도 포함되어 있다. 궤도 및 시계 보정정보는 모두 m 단위로 제공되며, 궤도는 60초, 시계는 10초 간격으로 전송된다. 궤도 보정정보의 정확도는 약 0.05 m (RMS)이다 [13].

RTS 궤도 보정정보는 항법메시지에서 계산된 궤도의 좌표와는 달리 R (radial), A (along-track), 그리고 C (cross-track) 방향으로 제공된다. 따라서 항법메시지에 적용하기 위해서는 ECEF (earth-centered earth-fixed) 좌표계로 변환하여야 한다. 또한 보정정보가 적용되는 좌표계 원점은 각 데이터에 따라 2개의 종류가 있는데, APC (antenna phase center) 또는 위성 질량 중심 (CoM; center of mass)이 있다. IGS03 데이터의 보정정보 기준은 APC이다[12].

RTS 궤도 보정정보에는 IOD 정보도 포함되어 있다. 보정정보에 포함된 IOD 값은 보정정보가 적용되는 항법메시지를 지정하는데, 보정정보의 IOD가 항법메시지의 IODE와 일치할 때 보정정보를 적용하여야 한다[14]. 즉, 항법메시지의 IOD가 갱신되었지만 보정정보의 IODE는 갱신되지 않았다면, 보정정보는 과거의 항법메시지에 적용하여야 한다. 항법메시지 시

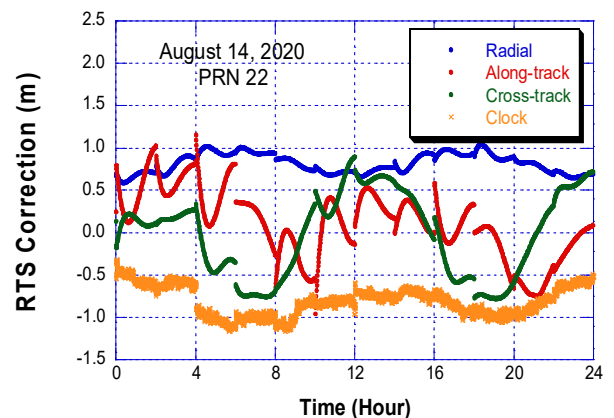


그림 1. 1일 RTS 보정정보 변화 (2020년 8월 14일, PRN 22)
 Fig. 1. The single-day variation of RTS corrections (August 14, 2020, PRN 22).

계의 IOD인 IODC는 IODE와 중복되므로, RTS 궤도 보정정보에만 IOD가 전송되며, RTS 궤도와 시계는 같은 IOD를 사용한다[14].

궤도 보정정보는 그림 1과 같이 연속적으로 변화하다가 매 2시간마다 IOD가 갱신되면서 보정값이 크게 변화한다. 즉, 2시간 주기로 불연속적인 변화가 발생한다. 이 때 보정값의 변화 크기는 일정하지 않고 IOD 변화 시점과 궤도 방향에 따라 변화량이 다르다. 시계 보정정보의 경우에는 IOD 변화 시점에서 변화가 발생할 수도 있지만, 변화가 없거나 변화량이 매우 작을 수도 있다[15]. 따라서 IOD가 변화하는 시점에서 궤도 및 시계 보정정보가 단절되었을 경우 보정정보를 예측하기가 어렵다.

2-2 IOD 변화 시점에서 RTS 보정정보 변화 분석

IOD가 변화하는 시점에서 RTS 궤도 보정정보는 불연속적인 형태로 나타나며, 시계 보정정보도 큰 폭으로 변화할 수 있다. 해당 시점에서 보정정보의 변화량을 통계적으로 분석하기 위해 2020년 8월 12일부터 16일까지 매 IOD 변화 시점에서 보정값 변화의 평균을 계산하여 변화 크기를 분석하였다. IGS03 데이터를 사용하였는데, 이는 다수의 AC에서 조합된 보정정보이며, 칼만 필터를 사용하여 추정되었기 때문에 보정정보 변화가 안정적이기 때문이다. PRN 14와 23 위성은 분석 시점에서 RTS 정보가 없으므로 통계 계산에서 제외하였다.

그림 2는 IOD 변화 시점에서 궤도 및 시계 보정정보 변화량의 평균을 계산한 결과이다. 방향에 따라 IOD 변화 시 편차값이 다른데, 궤도의 경우 A 방향의 보정값 변화가 평균 0.37 m으로 가장 컸으며, R 방향의 변화가 평균 0.07 m으로 가장 작았다. 위성 궤도 변화가 속도 방향에서 가장 크므로 A 방향 변화도 가장 큰 것으로 분석된다. 3D 궤도로 계산하는 경우 평균

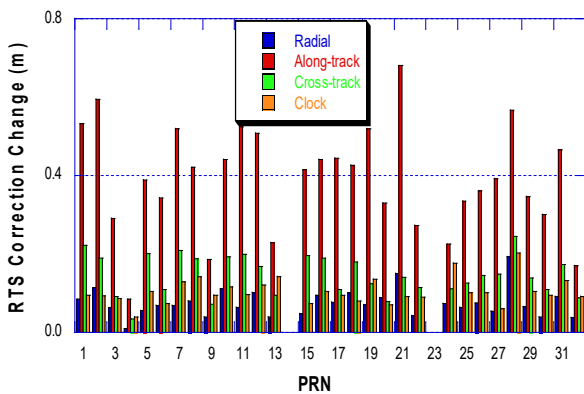


그림 2. IOD 변화 시점에서 PRN별 보정값 크기 변화의 평균 (2020년 8월 12-16일)

Fig. 2. The mean of the correction differences at IOD changes (August 12-16, 2020).

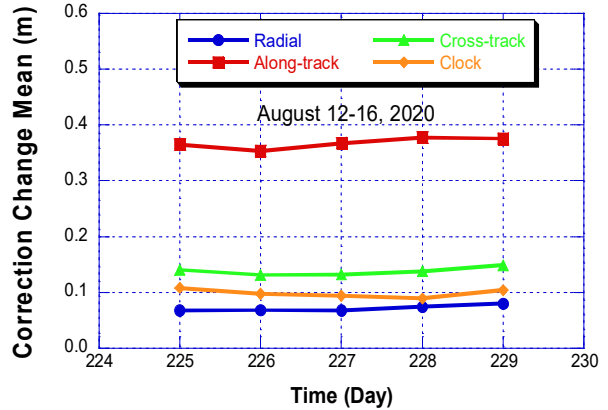


그림 3. 일일 IOD 변화 시점에서 보정값 변화의 평균 (2020년 8월 12-16일)

Fig. 3. The daily mean of the correction differences at IOD change (August 12-16, 2020).

변화량은 0.48 m이며 시계 보정값은 0.10 m으로 R 방향과 변화 크기가 유사하였다.

일일 RTS 보정정보 변화의 평균을 계산한 결과는 그림 3과 같다. 모든 위성에 대해 보정정보 변화값의 평균값을 일일 평균하여 나타내었다. IOD가 변화하는 시점에서 일평균 RTS 보정값의 변화는 0.03 m 이하로 거의 일정하다.

2-3 IOD 변화 시점에서 RTS 보정정보와 항법메시지 변화

IOD가 변화하는 시점에서 RTS 보정정보와 항법메시지 모두 불연속적으로 변화한다. 즉, RTS뿐만 아니라 항법메시지도 마찬가지로 궤도값이 불연속적으로 변화한다. 따라서 불연속적인 데이터로는 시계열예측이 불가능하므로 IOD 변화 직후에 수신된 짧은 기간의 데이터만으로 예측해야 하지만, 수신된 데이터의 수가 적으면 예측성능이 크게 떨어진다. 하지만 IOD 변화 시점에서 RTS 보정정보와 항법메시지를 결합하여 계산된 위성 궤도는 연속적으로 변화하는데, 이러한 특징을 사용하면 IOD 변화 시점에서도 연속된 신호를 획득할 수 있으며 신호예측이 가능하다.

IOD 변화 시점에서 RTS 보정정보와 항법메시지 궤도의 변화를 분석한 예를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 IOD가 변화하기 전 RTS 보정값을 RTS_{IOD1} 으로, IOD 변화 후 보정값을 RTS_{IOD2} 으로 나타내었는데, IOD 변화 직후 0.03 m의 변화가 발생하였으며 RTS 보정정보의 변화 경향성도 달라졌다. 최근 IOD와 과거 IOD 정보로 계산된 위성 궤도 차이값 벡터 \vec{dOrbit} 의 Along track 성분을 그림 상에 $dOrbit$ 으로 나타내었는데, 궤도차이 벡터는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\vec{dOrbit} = \vec{Orbit}_{IOD2} - \vec{Orbit}_{IOD1} \tag{1}$$

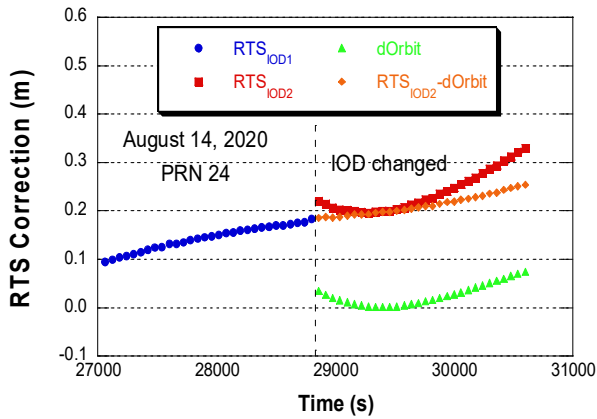


그림 4. IOD 변화 시점에서 RTS 보정정보 및 GPS 궤도 변화
 Fig. 4. The variation of the RTS correction and GPS orbit at the IOD change.

위 식에서 \vec{Orbit}_{IOD2} 는 최근 IOD 항법메시지로 계산된 위성 궤도이며, \vec{Orbit}_{IOD1} 은 이전 시점의 IOD 항법메시지로 계산된 위성 궤도이다. 두 궤도의 차이는 IOD 변화 직후부터 계산할 수 있다. 최근 수신된 RTS 보정값에 $d\vec{Orbit}$ 을 적용하면 IOD가 변화하더라도 이전 IOD 보정값과 연속적으로 변화하는 신호를 얻을 수 있다.

$$d\vec{RTS}_{IOD2-IOD1} = \vec{RTS}_{IOD2} - d\vec{Orbit} \quad (2)$$

위 식에서 \vec{RTS}_{IOD2} 는 IOD 변화 직후 수신된 RTS 보정값이며, $d\vec{RTS}_{IOD2-IOD1}$ 는 IOD 변화 전후의 궤도 차이가 보정된 RTS 신호이다. 따라서 IOD가 변화한 직후 신호단절이 발생하면, IOD 변화 전에 수신된 RTS 값과 IOD가 변화한 직후 수신된 RTS 값에 궤도 차이를 보정한 값으로 피팅이 가능하며, 궤도 차이가 보정된 RTS 값을 예측할 수 있다.

III. RTS 다항식 모델 최적화

IOD 변화 시점에서 RTS 보정정보를 예측하기 위해 다항식 모델을 사용하였다. 다항식 모델은 시간을 입력으로 하여 궤도 및 시계 보정정보의 값을 추정할 때 사용할 수 있는데, 다항식의 차수 및 피팅 기간에 대한 최적화가 필요하다. RTS 궤도 보정정보를 다항식으로 모델링하는 경우 주로 1~3차를 사용하며, 시계 보정정보는 0 또는 1차를 사용한다[2]. 시계 보정정보는 시간이 지남에 따라 누적되는 확률적 변화가 포함되어 있으며, 일부 백색 잡음 특성도 가지고 있으므로 예측 시 주로 다항식보다는 최근값을 사용한다 (0차 다항식)[2]. 다만 연구[2]에서는 모델의 피팅 과정에서 피팅할 데이터의 길이를 최적화하지 않아서 각 차수별 피팅 결과와 예측 결과의 차이가 컸다. 따라

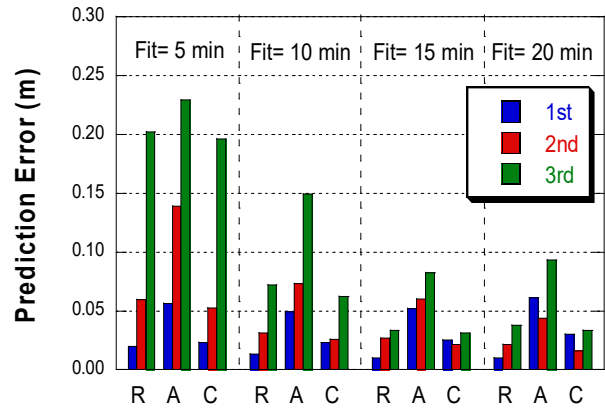


그림 5. 피팅 길이 및 다항식 차수별 RTS 궤도 보정정보 예측 오차의 절대 평균값
 Fig. 5. The absolute mean of the RTS orbit prediction errors for each fitting range and polynomial order.

서 다항식 차수뿐만 아니라 각 차수별로 피팅할 데이터의 길이 또한 최적화가 필요하다.

다항식 모델 최적화에 사용된 데이터 기간은 2020년 8월 12일부터 16일까지이다. 먼저 최적 피팅기간을 결정하기 위해 피팅 기간은 최대 20분, 간격은 5분으로 설정하였다. 신호 손실은 IOD 변화 직후 3분 뒤에 발생하였다고 가정하였으며, 신호 손실이 발생한 직후부터 예측을 실시하였다. IOD는 하루에 12번 변화하는데, 모든 IOD 변화 시점에서 피팅 및 예측을 수행하였다. 예측 기간은 15분으로 설정하였는데, 궤도와 시계정보의 수신 간격은 각각 60초, 10초이므로 궤도 데이터는 15개, 시계는 90개가 예측된다.

그림 5는 피팅 길이 및 다항식 차수에 따른 궤도 보정정보의 예측오차 평균값을 나타낸 것이다. 먼저 1차의 경우 R 방향은 피팅 길이가 길수록 예측오차가 감소한 반면, A 방향은 피팅 길이가 10분을 초과할 때 예측오차가 오히려 증가하였다. 2차의 경우는 피팅 길이가 20분일 때 3차는 15분일 때 예측오차가 가장 낮았다. 모든 차수를 고려하였을 때 최적 피팅 길이는 15분이며, 해당 피팅 길이에서 1차 다항식 모델이 오차가 가장 작았다. 최적 변수에 대해 1차 다항식 모델의 예측오차는 R 방향 궤도가 0.010 m, A 방향은 0.052 m, C 방향은 0.026 m이다. 시계 보정정보의 경우 최근값을 사용할 때 예측오차는 0.033 m으로 나타났다.

IV. 예측된 RTS를 사용한 PPP 성능 분석

1차 다항식 모델로 예측된 RTS 보정정보를 GNSS 항법메시지에 적용한 후 gLAB (GNSS-lab tool)을 사용하여 PPP를 수행하였다. gLAB은 UPC (universitat politecnica de Catalunya)의 gAGE (group of astronomy and geomatics)에서 개발되었으며, GNSS 궤도정확도 분석 및 위치추정 용도로 많이 사용되는 상

용 프로그램이다. 전리층 오차를 제거하기 위해 이중주파수를 사용하였으며, 반송파 관측값의 가중치는 코드의 100배로 설정하였다. 관측데이터는 미국 콜로라도주에 있는 NIST (national institute of standards and technology) 관측소의 데이터를 사용하였다. NIST 관측소에서는 NovAtel OEM4-G2 수신기를 사용하고 있으며, 관측데이터는 30초 간격으로 제공된다.

예측값의 PPP 성능 분석을 위해 같은 기간에 수신된 RTS 원 신호의 PPP 성능과 비교하였다. 표 1은 총 3개 추정 방법에서 사용된 다항식 모델 변수이며, 그림 6은 각 추정 방법에 따른 피팅 및 예측 구간을 나타낸 것이다. 먼저 Case 1은 앞서 기술된 최적 1차 다항식 모델이며 Case 2는 2차 다항식 모델인데, 피팅 길이를 1차와 동일한 15분으로 설정하였다. Case 1과 2는 최근 IOD와 이전 IOD 데이터를 모두 사용하였으며, 식 (2)의 궤도 차이가 보정된 RTS를 예측한 후 궤도 차이 dOrbit을 더하여 RTS 신호를 획득하였다. Case 3은 IOD가 변화한 직후 수신된 RTS 데이터만 사용하여 1차 다항식 모델로 예측한다. 신호 손실이 IOD가 변화한 시점에서 3분 이후에 발생하였으므로 Case 3의 입력 피팅데이터 길이는 총 3분이다.

그림 7과 8은 각각 8월 14일에 case별로 PPP를 수행하고 수평 및 수직 위치오차를 계산한 것이다. 예측은 14,580초부터 15,480초까지 총 15분간 진행되었으며, 수직오차는 오차의 크기를 비교하기 위해 절댓값을 취하여 나타내었다. 현재 IOD 정보만 사용한 Case 3의 경우 예측 길이가 길어질수록 위치오차가 급증하였다. 이는 IOD 변화 직후에 RTS 신호 손실이 발생하는 경우 수신된 RTS 신호만으로 예측할 시 일반적인 PPP 성능 이하를 보일 수 있음을 의미한다. 반면, Case 1의 경우는 수평 및 수직오차가 예측 구간이 길어지더라도 RTS 원 신호의 위치오차와 유사한 것을 볼 수 있다. 2차 다항식 모델을 사용한 Case 2의 경우는 Case 1과 3의 중간 정도의 성능을 보였다. RTS 예측오차가 필드 공분산 및 추정값에 영향을 주기 때문에 15,480초 이후 오차가 큰 경우 예측 구간을 벗어나더라도 RTS 원 신호와 PPP 성능이 동일하지 않으며, 추가 수렴 시간이 필요하였다.

5일간 PPP를 수행하고 날짜별 3D 위치추정 오차의 평균값을 계산한 결과는 그림 9와 같은데, 평균값은 예측 구간에 대해서만 계산하였다. 해당 날짜에서 Case별 RTS의 3D 궤도 예측오차는 각각 0.062 m, 0.075 m, 0.100 m으로 나타났다. 5일간 RTS 원 신호의 3D 위치오차 평균값은 0.085 m이며 Case 1은

표 1. 예측에 사용한 다항식 차수 및 IOD 적용 방법
Table 1. Polynomial orders and IOD types for prediction.

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3
IOD use	Recent + Past	Recent + Past	Recent
Fitting length	15 min	15 min	3 min
Polynomial order	1	2	1

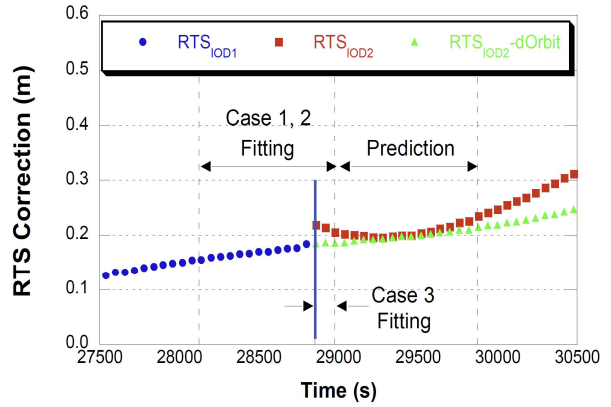


그림 6. 추정 방법에 따른 피팅 및 예측 예시
Fig. 6. The example of the fitting and prediction for different prediction methods.

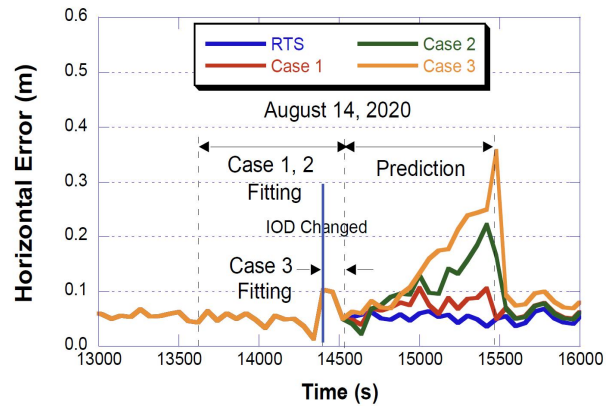


그림 7. 추정 방법에 따른 수평 위치오차 변화 (2020년 8월 14일)
Fig. 7. Time series of horizontal position error for different prediction methods (August 14, 2020).

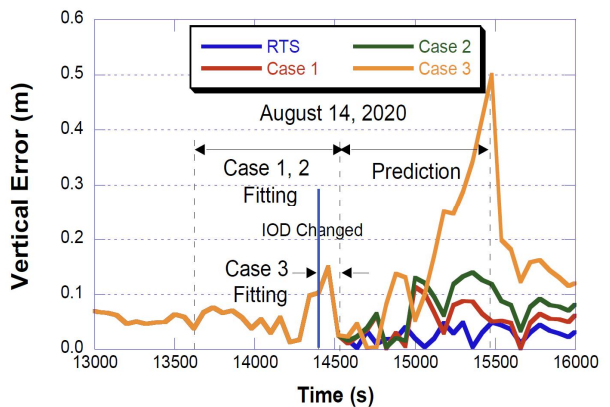


그림 8. 추정 방법에 따른 수직 위치오차 변화 (2020년 8월 14일)
Fig. 8. Time series of vertical position error for different prediction methods (August 14, 2020).

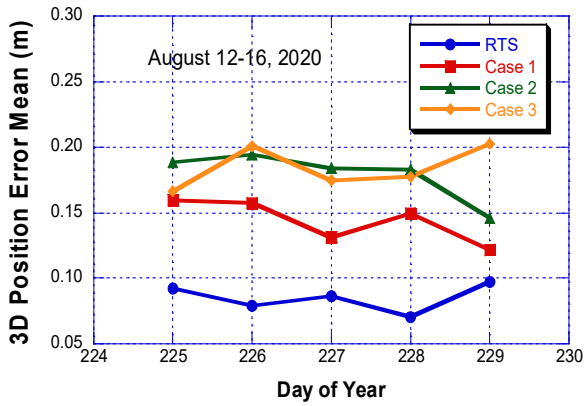


그림 9. 일일 3D 위치추정 오차 평균값 (2020년 8월 12-16일)
 Fig. 9. Daily mean of 3D position errors (August 12-16, 2020).

0.144 m으로 0.059 m 더 컸다. Case 2와 3는 평균 오차값이 최대 0.194 m, 0.203 m까지 증가하였다.

표 2는 7월 1-5일에 대해 수평과 수직 오차의 통계값을 계산한 결과이며, 표 3은 8월 12-16일에 대한 통계 계산 결과이다. 각 표도 마찬가지로 예측 구간에 대해서만 통계를 계산하였다. RTS 시계 보정정보는 공통적으로 최근값을 사용하였기 때문에 오차 통계는 Case별 궤도 예측오차와 함께 시계에 의한 오차도 포함되어 있다. Case 1-3은 8월에 위치오차가 더 큰데, 이는 PRN 4 위성의 보정정보 품질이 떨어져 예측값에 영향을

표 2. 수평 및 수직 위치오차 통계 (2020년 7월 1-5일, 단위: meters)

Table 2. Horizontal and vertical positioning error statistics (July 1-5, 2020, unit: meters).

	RTS	Case 1	Case 2	Case 3
H Mean	0.049	0.056	0.081	0.088
V Mean	0.068	0.084	0.117	0.106
H STD	0.026	0.030	0.056	0.067
V STD	0.065	0.076	0.106	0.102

표 3. 수평 및 수직 위치오차 통계 (2020년 8월 12-16일, 단위: meters)

Table 3. Horizontal and vertical positioning error statistics (August 12-16, 2020, unit: meters).

	RTS	Case 1	Case 2	Case 3
H Mean	0.051	0.086	0.102	0.110
V Mean	0.060	0.101	0.130	0.132
H STD	0.042	0.059	0.070	0.071
V STD	0.045	0.073	0.101	0.105

받은 것으로 분석된다. PRN 4 위성의 정보는 8월에 반복적으로 송신이 중단되었다. Case 1은 7월에 RTS의 오차 통계값과의 차이가 20% 이내로 나타났으며 8월에는 정확도가 감소하였지만 RTS와 Case 3의 중간 정도로 나타났다. 두 개 날짜 통계를 확인한 결과 이전 IOD 정보도 사용하는 Case 1은 현재 IOD 정보만 사용하는 Case 3에 비해 수평 평균값은 28.3%, 수직 평균값은 22.3% 더 작았으며, 편차는 각각 35.5%, 28.0% 더 작았다.

V. 결론

IGS RTS 보정정보는 IOD가 변화하는 시점에서 불연속적으로 변화한다. 따라서 해당 시점에서 신호 단절이 발생할 경우 다항식 모델이나 기존 시계열 추정 방법으로 예측하기 매우 어렵다. RTS 정보에 최근 IOD와 과거 IOD 항법메시지 궤도 차이를 적용하면 연속적인 신호를 획득할 수 있으므로 해당 정보를 다항식으로 모델링할 수 있다. 따라서 RTS 궤도신호에 항법메시지 궤도 차이를 적용한 값을 예측에 사용하는 방법을 제안하였다.

IOD 변화 시점에서 제안한 방법을 적용하여 연속된 RTS 궤도신호에 다항식 모델 기반 RTS 보정값 예측을 수행하였다. 시계정보는 다항식에 의한 예측 효과가 크지 않으므로, 제안한 방법 대신 최근 상수값을 사용하였다. 예측 및 신호 손실은 IOD 변화 시점에서 3분 후에 발생하였다고 가정하고, 예측은 15분간 진행하였다. 최적 다항식 모델을 결정하기 위해 다항식 차수 및 피팅 길이에 따른 예측오차를 분석하였다. 1~3차 다항식의 공통된 최적 피팅 길이는 15분이었으며, 이때 1차 다항식의 예측오차가 가장 작았다. 최적 모델로 예측된 RTS 궤도정보를 정밀위치결정(PPP)에 사용하였으며, 최근 IOD만 사용하여 예측한 RTS 정보의 위치결정결과와 비교하였다. 최적 모델로 예측한 RTS 정보(Case 1)가 기존 방법(Case 3)에 비해 수평 오차는 28.3%, 수직오차는 22.3% 감소하였다. 신호손실 구간이 길어질수록 예측 오차가 급증하는 경향도 크게 감소하였다.

Acknowledgments

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1F1A1062605).

References

[1] S. Bhattarai and M. Ziebart, "A performance analysis of the IGS predictions of the GPS satellite clocks," in *Proceeding of the IGS Workshop 2014: Celebrating 20 Years of Service*,

- California: CA, 2014.
- [2] T. Hadas and J. Bosy, "IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time," *GPS Solutions*, Vol. 19, No. 1, pp. 93-105, Jan. 2015.
- [3] Z. Nie, Y. Gao, Z. Wang, S. Ji, and H. Yang, "An approach to GPS clock prediction for real-time PPP during outages of RTS stream," *GPS Solutions*, Vol. 22, No. 1, Nov. 2017. (Online Publication)
- [4] A. El-Mowafy, M. Deo, and N. Kubo, "Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections," *GPS Solutions*, Vol. 21, No. 3, pp. 937-947, 2017
- [5] X. Cao, J. Li, S. Zhang, L. Pan, and K. Kuang, "Performance assessment of uncombined precise point positioning using Multi-GNSS real-time streams: Computational efficiency and RTS interruption", *Advances in Space Research*, Vol. 62, No. 11, pp. 3133-3147, 2018
- [6] Y. Lv, Z. Dai, Q. Zhao, S. Yang, J. Zhou, and J. Liu, "Improved Short-Term Clock Prediction Method for Real-Time Positioning", *Sensors*, Vol. 17, No. 6, p. 1308, 2017. (Online Publication)
- [7] M. G. Kim and J. R. Kim, "Predicting IGS RTS corrections using ARMA neural networks," *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2015, No. 851761, pp. 1-11, 2015.
- [8] M. G. Kim and J. R. Kim, "GA-ARMA model for predicting IGS RTS corrections," *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 2017, No. 6316590, pp. 1-7, 2017.
- [9] M. G. Kim and J. R. Kim, "A short-term prediction method of the IGS RTS clock correction by using LSTM network," *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, Vol. 8, No. 4, pp. 209-214, 2019.
- [10] RTCM, RTCM Standard 10403.1 differential GNSS services – version 3. RTCM Special Committee no. 104, Arlington, Virginia, USA.
- [11] M. Elsobeiey and S. Al-Harbi, "Performance of real-time precise point positioning using IGS real-time service," *GPS Solutions*, Vol. 20, No. 3, pp. 565-571, 2016.
- [12] International GNSS Service. Real-time Service Products [Internet]. Available: <http://www.igs.org/rts/products/>.
- [13] M. G. Kim, J. W. Myung, and J. R. Kim, "A performance analysis of the IGS real-time service," in *Proceedings of the 2016 Korean GNSS Society Conference*, Jeju: Korea, pp. 225-228, 2016.
- [14] RTCM SC-104 SSR Working Group and IGS Real-Time Working Group, IGS State Space Representation (SSR) Format Version 1.00, Oct. 2020.
- [15] M. G. Kim, J. H. Kim, and J. R. Kim, "An analysis of the IGS RTS correction changes after IOD changes," in *Proceedings of the Korean Navigation Institute Conference 2020*, Online, pp.47-48, 2020.



김민규 (Mingyu Kim)

2013년 2월 : 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)
 2013년 2월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원 석박사과정
 ※관심분야 : 위성항법, 위성궤도



김진호 (Jinho Kim)

2019년 2월 : 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)
 2019년 2월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원 석사과정
 ※관심분야 : 위성궤도, 위성항법



김정래 (Jeongrae Kim)

1991년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학사)
 1993년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학석사)
 2000년 : 미국 University of Texas at Austin (공학박사)
 2000년 ~ 2002년 : 미국 Center for Space Research 연구원
 2002년 ~ 2004년 : 한국항공우주연구원 선임연구원
 2004년 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수
 ※관심분야 : GNSS, 위성항법, 위성궤도