

# Performance Estimation of KPST to GPS Time Offset for GNSS Interoperability to Increase Navigational Performance

Young Kyu Lee<sup>†</sup>, Sung-hoon Yang, Ho Seong Lee, Jong Koo Lee, Sang-wook Hwang, Joon Hyo Rhee, Ju Hyun Lee

Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science, 267 Gajeong-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34113, Korea

## ABSTRACT

In order to increase the practical use and navigational application performance of the Korean Positioning System (KPS), it is required to provide interoperability with other Global Navigation Satellite System (GNSS). This kind of interoperability can be obtained by broadcasting the time offset between KPS and GNSS using a KPS navigation message. With the assumption that KPS Time (KPST) will be generated by the similar method and equipment of UTC(KRIS), the overall behavior of KPST will be close to that of UTC(KRIS). Therefore, the time offset between KPST and GPS Time (GPST) is estimated by using UTC(KRIS) instead of KPST because KPST can not available at the present time. In this paper, we describe the estimation results of the KPS to GPS Time Offset (KGTO) obtained by using a GNSS time transfer receiver which reference inputs are fed from UTC(KRIS). The estimated KGTO performance is compared to the time offset between UTC(KRIS) and UTC(USNO) which is used to generate GPST and considered as the real GPST. The time offset between UTC(KRIS) and UTC(USNO) is obtained by using the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) Circular T report. From the results, it is observed that KGTO can be estimated under 10 ns with the assumption that KPST will be generated by a similar method of UTC(KRIS) generation.

**Keywords:** KPS, GNSS, KPST, KGTO, interoperability, system time

## 1. INTRODUCTION

한국형 위성항법시스템 (Korean Positioning System: KPS)은 2035년 구축을 목표로 현재 개발 중인 시스템으로 한반도 사용자를 위한 지역 위성항법시스템이다. KPS 위성 신호뿐만 아니라 기존의 GNSS 시스템을 활용하여 고품질의 향상된 위성 항법 관련 Positioning, Navigation and Timing (PNT) 서비스를 제공하기 위해서는 GPS와 같은 타 Global Navigation Satellite System

(GNSS) 위성항법시스템과의 상호운용성(interoperability)을 제공해야 한다 (Sesia et al. 2021). 이러한 상호운용성을 제공하기 위해서는 KPS 시스템 시각과 타 GNSS 시스템 시각과의 오프셋 값을 항법 메시지를 통해 사용자에게 방송해야 한다. 예를 들면, 이를 위해 전역 위성항법시스템인 유럽의 Galileo에서는 Galileo to GPS Time Offset (GGTO)를 방송하고 (EU ICD 2021, EU SDD 2021), 지역 위성항법시스템인 인도의 Navigation with Indian Constellation (NavIC)은 GPS, Galileo 등에 대한 오프셋 값을 제공한다 (Varma et al. 2015). 만일 이러한 오프셋 값을 사용자에게 전송해 주지 않는다면 KPS 위성 신호를 타 GNSS 위성 신호와 함께 사용하기 위해서는 수신기에서 추가적인 미지 변수로 항법해를 구해야만 하는 부담을 주게 된다. 이는 특히 가시성이 좋지 않은 도심 지역에서는 더 많은 관측치 및 처리 시간을 요구하게 되며, 측정치가 정확하지 않을 경우에는 항법해의 성능을 저하시키는 요인이 될 수 있다 (Vanschoenbeek et al. 2007).

위성항법시스템 사이의 오프셋을 구하는 방법은 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다 (Hahn & Powers 2005, Piriz et al. 2007). 첫 번째 방법은, 위성 이용 양방향 시각비교 (Two-Way Satellite

Received Aug 04, 2022 Revised Aug 24, 2022 Accepted Aug 30, 2022

<sup>†</sup>Corresponding Author

E-mail: ykleeks@kriss.re.kr

Tel: +82-42-868-5569 Fax: +82-42-868-5569

Young Kyu Lee <https://orcid.org/0000-0003-2753-5227>

Sung-hoon Yang <https://orcid.org/0000-0002-0207-0470>

Ho Seong Lee <https://orcid.org/0000-0001-6416-2162>

Jong Koo Lee <https://orcid.org/0000-0001-6880-9189>

Sang-wook Hwang <https://orcid.org/0000-0002-7409-2409>

Joon Hyo Rhee <https://orcid.org/0000-0001-7304-3624>

Ju Hyun Lee <https://orcid.org/0000-0001-9921-6300>

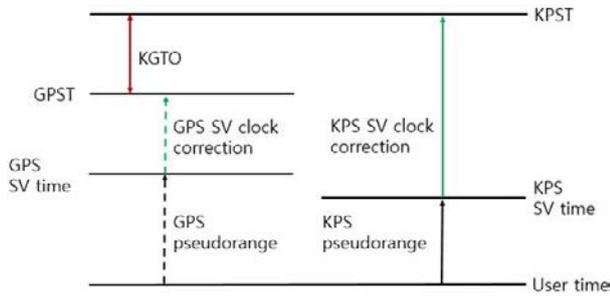


Fig. 1. Conceptual diagram of KGTO.

Time and Frequency Transfer; TWSTFT)와 같은 통신 위성을 사용하여 KPS Time (KPST)와 GNSS 시스템 시각과의 직접적인 비교를 수행하는 것이다. 하지만 이러한 방법은 타 위성항법 시스템 시각을 생성하는 국외 사이트에 TWSTFT 안테나와 모뎀을 설치하고 장비들을 운용해야 하기 때문에 독립적인 생성이 가능하지 않다는 단점이 있다. 두 번째 방법은 GNSS 시각비교 수신기를 설치해서 위성 신호를 수신하여 두 위성 신호 사이의 시각차 데이터를 활용하는 것이다. 이러한 방법의 장점은 KPST가 생성되는 장소에 GNSS 수신기를 설치하기 때문에 독립적인 생성 및 운용이 가능하고, KPS 위성 신호를 사용하는 사용자와 유사한 환경에서 KGTO를 추정할 수 있다는 것이다.

본 논문에서는 상용의 GNSS 시각비교 수신기에 의해 측정된 데이터를 사용하여 추정한 GPS에 대한 시스템 시각 오프셋인 KPS to GPS Time Offset (KGTO) 성능 예측에 대하여 나타내었다. 이를 위하여 한국표준과학연구원에 설치된 GNSS 수신기의 데이터를 사용하여 구한 UTC(KRIS)와 GPS에 대한 시각차 데이터를 사용하였다. 이는 KPST가 UTC(KRIS)와 비슷한 방식으로 생성되고 GPS 위성 시계와 GPS Time (GPST)와의 오프셋을 알고 있다고 가정하면 KPST에 대한 GPST의 시각 오프셋인 KGTO를 구하는 것과 유사한 성능을 보일 것이라는 데에 기인한 것이다.

본 논문의 제 2장에서는 KGTO를 구하는 기본적인 방식에 대해서 기술한다. 제 3장에서는 실험실에서 운영 중인 GNSS 시각비교 수신기를 사용하여 구한 KGTO에 대한 성능 예측 결과에 대해서 나타내고, 마지막으로 제 4장에서 결론을 맺는다.

## 2. DESCRIPTION OF KGTO ESTIMATION METHOD

### 2.1 KGTO Measurement Methods

KPS 시스템 시각 KPST와 GPS 시스템 시각 GPST와의 오프셋인 KGTO에 대한 개념적인 개요도를 Fig. 1에 나타내었고, KGTO에 대한 수식적인 표현은 식 (1)과 같다.

$$KGTO=KPST-GPST \quad (1)$$

Fig. 1에서와 같이 KPS와 GPS 위성을 혼합하여 사용할 때 각

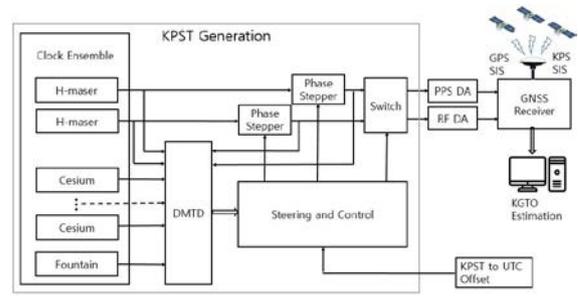


Fig. 2. Conceptual diagram of KGTO estimation using KPST by a GNSS time transfer receiver.

각의 위성 신호를 사용하여 의사거리 및 위성 클락에 대해 보상해 준 이후에도 두 시스템의 시각차에 의해 KGTO가 발생하게 된다. 만일 이러한 오프셋을 보상해 주지 않게 되면 하나의 위성 시스템만을 사용했을 때보다 오히려 항법 관련 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서, 이러한 두 시스템의 시각 오차를 보상해 주어야만 향상된 성능을 얻을 수 있게 된다.

GNSS 시각비교 수신기를 사용하여 KGTO를 구하는 방법은 GNSS 수신기를 KPST가 생성되는 운영센터 (Operation Center; OC)에 설치하고 KPST의 기준 신호를 GNSS 수신기에 입력하여 KGTO를 구하기 때문에 독립적인 운용이 가능하다. KPST를 생성하고 이를 사용하여 KGTO를 생성하는 방법에 대한 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 이는 Galileo 시스템과 유사한 형태인 주 (main) 시스템과 백업 시스템으로 구성하고 (Stehlin et al. 2006, Zanello et al. 2007), 여기에 시각 생성의 안정도를 향상 시키기 위해 KPS에서 구축 예정인 분수 시계가 추가되었다는 가정하에 대한 구성도이다. 실제적으로 KPST 생성 시스템을 구성하는 데에 사용되는 원자 시계의 종류 및 개수에는 요구되어지는 시각 및 주파수 안정도 성능에 따라 차이가 있을 수 있다. 하지만, Galileo의 Precise Time Facility (PTF)에서 구성한 것과 같이 최소 두 대의 수소메이저를 사용하여 주 및 백업으로 운영하는 것이 안정적인 시스템 시각을 생성하는 데에 있어서 요구된다.

먼저 KPST를 생성하고 이를 사용하여 KGTO를 추정하기 위한 각각의 장비에 대한 역할을 살펴보면 다음과 같다.

#### ① Clock Ensemble

- 수소메이저 (H-maser), 세슘 (Cesium) 및 분수 (Fountain) 원자시계들로 구성되며, 온도 및 습도가 제어되는 실험실에 설치하고, 앙상블 클락 (clock)을 생성하는 데에 사용
- 이중화의 경우에 있어서는 두 대의 수소메이저 중 하나가 KPST를 생성하는 주 시계의 역할을 하고 나머지는 백업 시계로 활용
- 분수 시계는 앙상블 클락을 생성하기 전에 두 수소메이저의 오프셋을 조정하여 KPST를 Coordinated Universal Time (UTC)에 동기 시키는 역할을 수행

#### ② Dual Mixer Time Difference (DMTD)

- 수소메이저, 세슘 및 분수 시계들과 위상조절기 (Phase Stepper) 출력을 입력으로 받아 이들 간의 위상차 값을 'Steering and Control' 모듈에 전송

#### ③ Phase Stepper

- 수소메이저의 출력을 입력으로 받아 ‘Steering and Control’에 의해 구해진 주파수 오프셋 값을 사용하여 조정된 주파수를 출력

#### ④ Switch

- ‘Steering and Control’의 제어 신호에 의해 두 개의 위상 조절기 출력 중에서 하나를 선택하여 출력, 일반적으로 ‘Switch’의 출력을 KPST로 정의

#### ⑤ Steering and Control

- 입력으로 들어오는 원자시계들 사이의 위상차를 계산하여 저장하고, 위상조절기 출력 (KPST)과 UTC와의 시각차를 계산하여 위상조절기 출력을 UTC에 동기되도록 조정
- 두 위상조절기 출력 및 정상동작 여부를 체크하고, 메인으로 사용하고 있는 위상조절기 출력이 허용 범위를 넘어서면 백업 위상조절기로 대체하기 위한 제어 신호를 ‘Switch’에 전송
- KPST 생성시스템에서는 “시각 제어 시스템” 등에서 역할 수행 예상

#### ⑥ GNSS Receiver

- KPST의 기준 신호를 입력으로 받아 GPST와의 시각차 데이터 생성

#### ⑦ KGTO Estimation

- GNSS 수신기에서 제공하는 KPST와 GPST와의 시각차 데이터를 이용하여 KGTO 추정
- 국제도량형국 (Bureau International des Poids et Mesures; BIPM)의 Circular T에서 제공하는 UTC와 UTC(KRIS) 및 UTC(USNO)에 대한 데이터 이용 KGTO 추정치에 대한 성능 분석
- BIPM의 각국의 표준시인 UTC(k) (여기에서 k는 국가별 기호이며 일반적으로 4개의 글자를 사용하고 한국의 경우에는 KRIS, 즉 UTC(KRIS)는 한국표준시를 의미함)와 세계협정시인 UTC와의 시각차를 Circular T를 통해 매달 제공
- UTC(USNO)는 GPST를 생성하는 기준 시스템 시각이고 이와 UTC와의 시각차 데이터도 BIPM Circular T에서 제공
- KPST가 UTC(KRIS)와 유사한 방법으로 생성된다고 가정하면, BIPM Circular T에서 제공하는 UTC와 UTC(KRIS) 및 UTC(USNO)와의 시각차 데이터를 사용하면 UTC(KRIS)와 UTC(USNO)와의 시각차를 구할 수 있고, 이는 KGTO에 대한 유효한 기준 값이 될 수 있음

다음으로 GNSS 시각비교 수신기를 이용하여 KGTO를 추정하는 방법들에 대해서 살펴 보면 다음과 같다. 첫 번째 방법은 OC에 GPS 수신기를 설치하여 수신된 GPS 신호를 활용하여 KGTO를 구하는 것이다. 이 방법에서는 OC의 KPST 생성 시스템에서 생성하는 KPST의 시각 및 주파수 기준 신호를 GPS 시각비교 수신기에 입력으로 제공해 GPS Signal-In-Space (SIS)를 수신하고 KGTO를 결정한다. 이 방법에 있어서는 KGTO를 구하기 위해 KPS SIS의 측정치를 사용하지 않기 때문에 이에 대해 독립적으로 결정되고, 이러한 방법의 주요 이점은 KGTO 결정이 전적으로

OC의 제어 하에 있으며, GPST가 사용자에게 가용한 것과 같은 방식으로 접근이 가능하다는 것이다. 하지만 이러한 방법의 주요 단점은 KGTO 생성을 위한 추가적인 GPS 시각비교 수신기의 유지 및 운영이 필요하다는 것이다.

두 번째 방법은 별도의 KPS와 GPS 시각비교 수신기를 사용하는 것이다. 이 방법은 두 수신기가 OC에 같이 위치하고 GPST의 시각 및 주파수를 기준 신호로 사용하여 동작하는 별도의 KPS와 GPS 시각비교 수신기를 활용하여 KPS SIS와 GPS SIS의 수신으로부터 KGTO를 결정하는 것이다. OC에서의 GPS SIS의 수신으로부터 KGTO를 결정하는 첫 번째 방법과의 주요 차이점은, 이 경우에 있어서는 KPST에 대한 추정치가 KPST 생성시스템으로부터 구해지지 않고 KPS SIS로부터 구해진다는 것이다. 즉, KPS와 GPS 측정치가 모두 KGTO를 추정하기 위해 사용된다는 것이다. 이 방법은 KPST와 GPST가 모두 사용자에게 가용한 방법과 동일하다는 것과 단지 OC에서뿐만 아니라 동일한 시각 및 주파수 기준 신호를 사용하여 동작하는 KPS와 GPS 수신기들을 갖춘 모든 감시국에서도 구현될 수 있다는 장점이 있다. 반면에 KPS 위성 구축 초기 단계에 있어서는 가용한 KPS 위성 수가 적기 때문에 KPS SIS 사용으로 인해 KGTO 추정 성능이 저하될 수 있다는 단점이 있다.

세 번째 방법은 하나의 통합 KPS/GPS 수신기를 사용하는 것이다. 이 방법은 KPS와 GPS 위성 신호를 동시에 수신할 수 있는 하나의 수신기를 OC에서 설치하고 운영하는 것이다. 이 방법의 주요 이점으로는 KPST와 GPST가 모두 사용자에게 가용한 것과 동일한 방법으로 접근 가능하고, 하나의 수신기에서의 KPS와 GPS 신호의 신호 전파 시간 사이의 차이만이 고려됨으로써 잠재적으로 상당한 정확도의 개선을 가져올 수 있으며, KGTO가 하나의 센서를 사용하여 결정되는 것 등이 있다. 하지만 통합 KPS/GPS 수신기가 개발되기까지는 많은 시간이 필요하기 때문에 이와 같은 수신기가 프로젝트 기간 내에 가용할지에 대해 명확하지 않다는 단점이 있다.

위에서 살펴본 내용을 토대로 KPS 구축 단계에 따른 KGTO를 생성하기 위한 방법에 대해서 살펴 보면 다음과 같다.

- 첫 번째 단계: KPS 위성 신호를 수신 가능한 수신기가 개발되지 않은 시스템 구축 초기에는 상용의 GNSS 수신기를 사용하여 KGTO를 추정하고, KGTO 예측 알고리즘 개발 및 성능 시험 수행
- 두 번째 단계: KPS 위성 신호의 수신 가능한 수신기 및 GPS 수신기를 사용하여 위성 SIS를 사용하였을 때의 KGTO 성능 시험 수행
- 세 번째 단계: 통합 KPS/GPS 수신기를 사용하여 항법 메시지에서 방송할 KGTO 예측 값 산출 및 성능 시험 수행

## 2.2 KGTO Estimation Method

본 논문에서는 KPST와 GPST 사이의 시스템 시각 오프셋인 KGTO를 구하기 위한 방법으로 하나의 GPS 시각비교 수신기에 KPST를 기준신호로 제공하였을 때의 KGTO를 추정하기 위한 실험을 수행하였다. 현재에는 KPST가 생성되지 않기 때문에 KPST와 유사한 방법으로 생성되어지는 UTC(KRIS)를 활용하여 실험

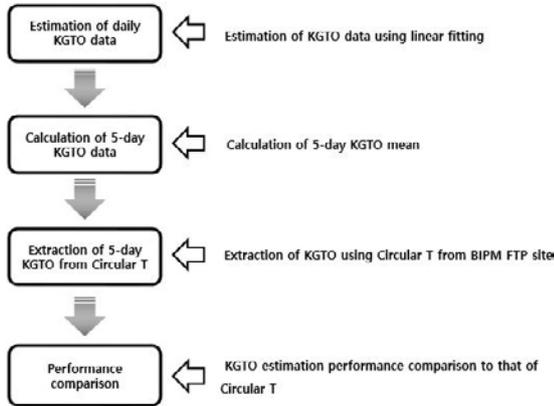


Fig. 3. Process of KGTO estimation using a GNSS time transfer receiver and Circular T data.

을 수행하였다. KGTO 추정 실험을 수행하는 절차에 대해 Fig. 3에 나타내었고, 이에 대한 설명은 다음과 같다.

- ① 일별 KGTO 데이터 추정
  - GPS 수신기에서 제공하는 일별 Common GNSS Generic Time Transfer Standard (CGGTTS) 데이터의 16분 간격의 UTC(KRIS) - GPST에 대한 선형 피팅 데이터의 중앙값 (median)으로 KGTO 추정
- ② 5일 간격의 KGTO 값 산출
  - 일별 KGTO 값들에 대해 5일 평균을 취하여 5일 간격의 KGTO 값 산출
- ③ Circular T로부터 5일 간격의 KGTO 추출
  - BIPM에서 제공하는 Circular T에 나와 있는 5일 간격의 UTC에 대한 UTC(KRIS)와 UTC(USNO) 차이 값을 이용하여 기준 KGTO(UTC(KRIS) - UTC(USNO)) 추출
- ④ KGTO 추정 성능 비교
  - GPS 위성 신호를 이용하여 추정된 5일 간격의 KGTO 값과 Circular T를 이용하여 산출한 KGTO 값과의 차이 값 비교

위의 첫 번째 절차에서 일별 KGTO를 추정하기 위해 선형 피팅 데이터의 중앙값을 사용하는 것은 GPS 데이터를 처리하기 위해 사용되는 일반적인 방법을 채택한 것이다 (Weiss & Thomas 1994). KGTO를 구하기 위해 선형 피팅을 사용한 이유는 KPST와 GPST의 생성을 위해 사용되는 세슘이나 수소메이저와 같은 고성능의 원자시계의 거동이 주파수 오프셋(선형 피팅의 기울기에 해당)에 의한 영향을 가장 크게 받기 때문에 원자시계에 존재하는 다른 잡음들에 의한 영향은 무시할 수 있다는 가정에 근거한 것이다. 선형 피팅 방법으로는 선형최소제곱 (Linear Least Square; LLS)을 사용하였다. 관측된  $n$ 개의 데이터 쌍을  $(x_n, y_n)$ 라 하면 LLS 1차 선형 모델은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x \tag{2}$$

여기서  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 이고  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 이며,  $\alpha_0$ 는 선형 피팅의 절편이고  $\alpha_1$ 는 선형 피팅의 기울기이다.  $\alpha_0$ 와  $\alpha_1$ 에 대한 LS 추정은 추정된 값이 관측된 값에 대해 차분한 값의 제곱합이 최소화 되도록 하는 것이다. 이는 식 (3)과 같이 제공한 값의 나머지에 대

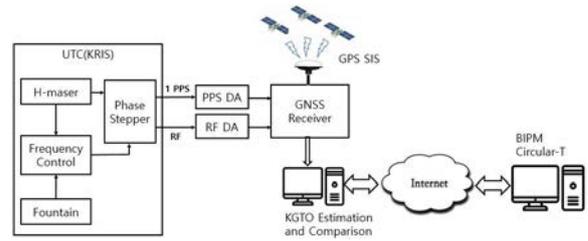


Fig. 4. Block diagram of KGTO estimation experiment using a GNSS time transfer receiver with UTC(KRIS) reference signals and Circular T data.

해 최소화할 수 있는  $\alpha_0$ 와  $\alpha_1$ 를 구하는 것이다.

$$S(\alpha_0, \alpha_1) = \sum_{i=1}^n (y - \alpha_0 + \alpha_1 x)^2 \tag{3}$$

식 (3)를 최소화하기 위한  $\alpha_0$ 와  $\alpha_1$ 의 값은 각각 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha_0} = 0, \frac{\partial S}{\partial \alpha_1} = 0 \tag{4}$$

식 (4)의 편미분을 수행하면, 절편 및 기울기에 대한 추정 값  $\hat{\alpha}_0$ 과  $\hat{\alpha}_1$ 을 식 (5)와 (6) 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n y_i = n\hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 \sum_{i=1}^n x_i \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = \hat{\alpha}_0 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\alpha}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 \tag{6}$$

식 (5)와 (6)를 연립하여 풀면  $\hat{\alpha}_0$ 과  $\hat{\alpha}_1$ 을 각각 식 (7)과 (8) 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\alpha}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \tag{7}$$

$$\hat{\alpha}_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \tag{8}$$

식 (7)과 (8)을 이용하여 선형 피팅 데이터를 구하고 이의 중앙값을 선택하여 KPST와 GPST와의 시각차를 추정하게 된다.

### 3. PERFORMANCE ESTIMATION OF KGTO

본 장에서는 상용의 GNSS 수신기에 UTC(KRIS)를 기준 신호로 입력하여 추정된 KGTO의 성능 분석에 대해서 기술한다. 이를 위해 먼저 측정 실험에 대해서 기술하고, 다음으로 추정된 KGTO와 Circular T를 통해 구해진 KGTO와의 시각차를 구하여 추정 성능을 분석한다.

#### 3.1 Measurement Set-up

KGTO 성능을 추정하기 위한 실험에 사용된 개념도는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에 나타낸 것과 같이 UTC(KRIS)는 수소메이저 시

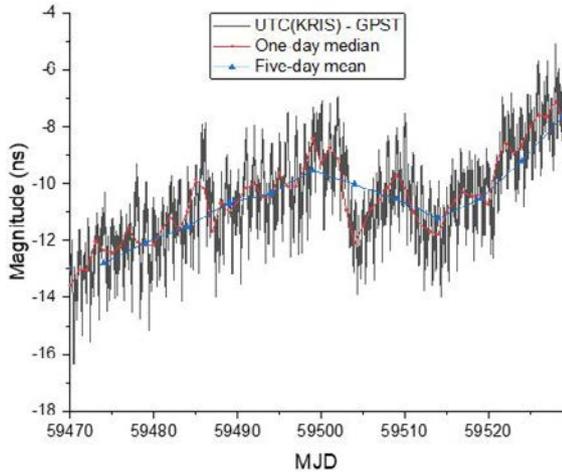


Fig. 5. Phase data of UTC(KRIS) – GPST, one-day median and five-day mean obtained from the GNSS receiver, respectively.

계와 분수 시계와의 주파수 오프셋을 구하고 이를 사용하여 수소메이저 시계의 출력을 위상조절기를 통해 조절해줌으로써 생성된다. KPST도 앙상블 클락을 구현하여 활용하기 전까지는 그림에 나타난 UTC(KRIS)를 생성하는 방법과 유사하게 수소메이저의 출력을 분수 시계를 사용하여 조절할 것으로 예상된다(앙상블 클락의 구현 이후에도 백업 또는 대체 방법으로 활용될 수 있다). Fig. 4에 나타난 GNSS 시각비교 수신기는 UTC(KRIS)의 초펄스 (Pulse Per Second; PPS) 및 10 MHz의 RF 기준 신호를 입력으로 받아 GPS 위성 신호와의 시각차 데이터를 생성한다. GNSS 수신기에서 생성된 시각차 데이터는 KGTO를 추정하는데 사용되고, 이는 BIPM에 전송되어 세계협정시 (Coordinated Universal Time; UTC)에 대한 UTC(KRIS)의 시각 오프셋을 구하는데 사용된다. 또한 BIPM의 Circular T에는 GPST를 생성하는데 사용되는 UTC(USNO)의 UTC에 대한 시각 오프셋 값이 제공되기 때문에 이를 이용하여 UTC(KRIS)와 GPST와의 실질적인 차이를 산출할 수 있다.

### 3.2 Measurement Results

KGTO 추정을 위해 60일 동안의 측정 데이터가 사용되었다. Fig. 5에 실험에 사용된 GNSS 시각비교 수신기에서 구한 UTC(KRIS)와 GPST에 대한 하루 동안의 위상 데이터와 이를 선형 피팅한 후의 1-day 중앙값 및 1-day 중앙값에 대한 5-day 평균값을 각각 나타내었다. Fig. 5에 나타난 5-day 평균값이 KGTO에 대한 추정값으로 사용되고, 이는 이전에 기술한 것과 같이 BIPM에서 UTC와 UTC(k)와의 시각차 데이터를 5일 간격으로 제공해 주기 때문이다.

Fig. 6에는 BIPM의 Circular T에서 제공해 주는 5일 간격의 UTC에 대한 UTC(KRIS)와 UTC(USNO)와의 시각차 데이터를 나타내었다. Fig. 6에 나타난 UTC와 UTC(KRIS)와의 시각차 데이터의 경향이 Fig. 5에 나타난 UTC(KRIS)와 GPST와의 시각차 데이터와의 경향과 반대인 것은 Fig. 5에서는 UTC(KRIS)를 기준신호로 설정했고 Fig. 5에서는 UTC를 기준신호로 설정했기 때문이

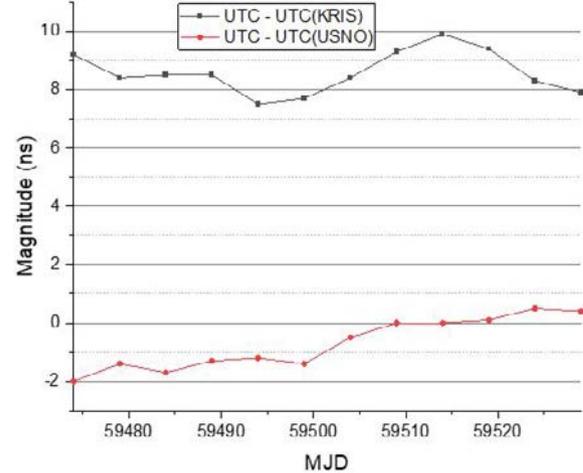


Fig. 6. Time offsets of UTC - UTC(KRIS) and UTC - UTC(USNO) obtained from Circular T.

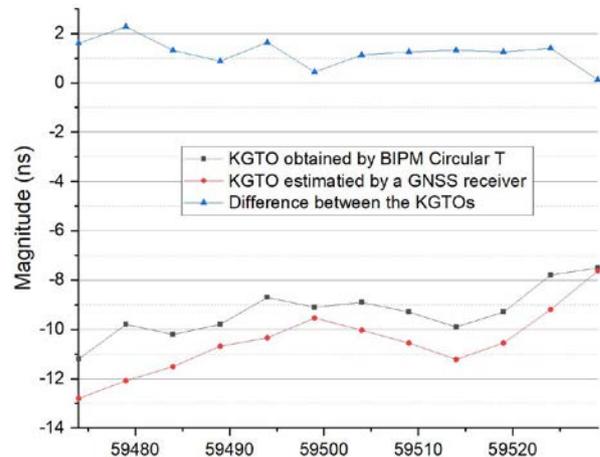


Fig. 7. KGTO values of the estimated and Circular T and their differences, respectively.

다. Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 60일 데이터에 대해 UTC(KRIS)의 경우에는 10 ns 이내에서 유지되고 있고 UTC(USNO)의 경우에는 2 ns 이내에서 유지되고 있음을 알 수 있으며, 이는 BIPM 권고에서 요구되어지는 100 ns (Bauch et al. 2012)보다 월등히 우수한 성능이다. UTC와의 동기화 성능은 시스템 시각 생성 시스템의 주파수 오프셋을 추정하는 데에 사용되어지는 원자시계의 개수가 많을수록 좋아지며, UTC(USNO)가 UTC(KRIS) 보다 UTC와의 동기 성능이 우수한 이유는 UTC(USNO) 생성 시스템에서 UTC(KRIS) 생성 시스템보다 월등하게 많은 원자시계를 사용하기 때문이다. 또한, 그림에서 볼 수 있는 것처럼 UTC에 동기시키기 위해서 단 시일에 위상 오프셋이 0이 되도록 급격하게 제어하지 않고, 위상 오프셋이 일정 범위 이내에 있으면 주파수 안정도의 변화를 최소화하는 방법으로 제어를 한다. 이는 위상 오프셋의 경우에는 항법메시지 등을 통해 사용자에게 제공함으로써 보상이 가능한 반면, 주파수 안정도가 낮으면 항법메시지를 통해 예측된 위성 시계의 거동에 대한 변동폭이 커지고 이로 인해 항법 성능의 저하를 가져올 수 있기 때문이다. 이는 UTC와의 시각

오프셋을 실제적으로는 수 ns 이내에서 유지할 수 있음에도 불구하고 Galileo 경우에 UTC 시각 전송 (time dissemination) 정확도를 30 ns 이내로 상당히 큰 값으로 설정하는 이유이기도 하다 (EU QPS 2018).

Fig. 7에는 수신한 GPS 위성 신호를 이용하여 추정된 KGTO와 BIPM Circular T로 구한 KGTO 및 둘 사이의 차이 값을 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있는 것과 같이 추정된 KGTO와 Circular T로 구한 KGTO와의 차이가 3 ns 이내에 있음을 관찰할 수 있다. 따라서, GPST가 UTC(USNO)와 GPS 위성 시계들의 양상블에 의해 산출되기 때문에 UTC(USNO)가 GPST에 대해 수 ns 정도의 오프셋이 존재함을 감안하더라도, GPS 위성 신호를 수신하여 10 ns 이내의 KGTO 추정이 가능함을 예상할 수 있다. 참고적으로 Galileo의 경우 항법메시지를 통해 제공하는 GGTO 전송 정확도를 20 ns 이내로 설정하고 있다 (EU ICD 2021).

## 4. CONCLUSIONS

KPS는 한반도에서의 PNT 서비스를 제공하기 위해 개발 중인 독자적인 지역항법시스템이다. KPS의 활용성을 높이고 PNT 성능을 향상시키기 위해서는 타 GNSS 위성과의 상호운용성을 제공해야 한다. 이러한 상호운용성을 제공하기 위해서는 KPS의 시스템 시각인 KPST와 타 위성항법시스템의 시스템 시각과의 오프셋 값을 항법메시지를 통해 사용자에게 전송하는 것이 필요하다. 타 위성항법시스템의 시스템 시각을 얻는 방법으로는 통신 위성을 이용한 TWSTFT 방법과 GNSS 수신기를 이용하여 항법위성 신호로부터 구하는 방법이 있을 수 있다. 이 중에서 TWSTFT 방법은 시스템 시각을 생성하는 외국 사이트에 장비를 설치하고 운용해야만 하기 때문에 독자적으로 링크를 구현할 수 없다. 따라서, 가장 현실적인 방법은 KPST 생성 사이트에 GNSS 수신기를 설치하고 이를 통해 타 항법시스템 시각을 추정하는 것이다. 본 논문에서는 KPST 사이트에 GPS 수신기를 설치하고 이를 통해 GPST를 추정하였을 때에 대한 KPST와 GPST의 시각 오프셋인 KGTO 추정 성능에 대해서 고찰하였다.

KGTO 추정을 위해 KPST가 수소메이저 시계를 분수 시계를 이용하여 주파수를 조정함으로써 생성된다는 가정하에, 이와 유사한 방법으로 생성되는 UTC(KRIS)의 데이터를 이용하여 KGTO 추정 성능을 고찰하였다. KGTO 추정 값은 실험실에 설치된 GNSS 수신기로부터 생성된 UTC(KRIS)와 GPS와의 시각차 데이터를 통해 구해졌고, 이의 성능을 검증하기 위한 KGTO 값은 BIPM Circular T에서 제공하는 UTC와 UTC(KRIS) 및 UTC(USNO)와의 시각차 데이터를 활용하였다. BIPM의 Circular T가 5일 간격의 데이터를 제공하기 때문에 GPS와 UTC(KRIS)에 대한 16분 간격의 하루 데이터를 선형 피팅하여 이의 중앙값을 사용하여 1-day KGTO 추정 값을 생성하고, 이의 5일 동안의 값에 대한 평균 값으로 5일 간격의 KGTO 추정 값을 산출하였다. 실험 결과 GPS 위성 신호를 이용하여 추정된 KGTO와 BIPM Circular T를 통해 산출한 KGTO의 차이 값이 3 ns 이내에 있음을 관찰하였다. 실제 KPST 사이트에 GPS 수신기를 설치하여 운용할 때에는 직접적으로 UTC와의 시각차를 구하지 않고 UTC(KRIS)를 통해

구하기 때문에 이의 링크에 따른 추가적인 에러 및 UTC(USNO)와 GPST 사이에 존재하는 수 ns 정도의 오프셋을 감안하더라도 KGTO를 10 ns 이내로 추정할 수 있을 것으로 예상된다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Division of Physical Metrology of KRISS (project code: KRISS-2022-GP2022-0001).

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology and software, Y.K. Lee; data acquisition, S.-h. Yang, H.S. Lee; measurement system, J.K. Lee, S.-w. Hwang, J.H. Rhee, J.H. Lee.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- Bauch, A., Weyers, S., Piester, D., Staliuniene, E., & Yang, W. 2012, Generation of UTC(PTB) as a fountain-clock based time scale, *Metrologia*, 49, 180-188. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/3/180>
- European Union 2021, European GNSS (Galileo) Open Service, Signal-In-Space Interface Control Document, Issue 2.0. [https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo\\_OS\\_SIS\\_ICD\\_v2.0.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf)
- European Union 2021, European GNSS (Galileo) Open Service, Service Definition Document, Issue 1.2. [https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD\\_v1.2.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.2.pdf)
- European Union 2018, European GNSS (Galileo) Initial Services, Quarterly Performance Report. [https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-IS-OS-Quarterly-Performance\\_Report-Q4-2018.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-IS-OS-Quarterly-Performance_Report-Q4-2018.pdf)
- Hahn, J. H. & Powers, E. D. 2005, Implementation of the GPS to Galileo time offset (GGTO), Joint IEEE International Frequency Symposium and Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, 29-31, Aug 2005, Vancouver, BC, Canada, pp.33-37. <https://doi.org/10.1109/FREQ.2005.1573899>
- Piriz, R., Cueto, M., Fernandez, V., Tavella, P., Sesia, I., et al. 2007, GPS/Galileo Interoperability: GGTO, Timing Biases, and Giove-A Experience, 38th Annual Precise

Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 7-9, Dec 2006, Reston, Virginia, USA, pp.49-67. <https://www.researchgate.net/publication/235034393>

Sesia, I., Signorile, G., Thai, T. T., Defraigne, P., & Tavella, P. 2021, GNSS-to-GNSS time offsets: study on the broadcast of a common reference time, *GPS Solutions*, 25, 61. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01082-y>

Stehlin, X., Wang, Q., Jeanneret, F., Rochat, P., & Detoma, E. 2006, Galileo System Time Physical Generation, 38th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 7-9, Dec 2006, Reston, Virginia, USA, pp.395-405. <https://www.researchgate.net/publication/259216248>

Vanschoenbeek, I., Bonhoure, B., Boschetti, M., & Legenne, J. 2007, GNSS Time Offset: Effects on GPS-Galileo Interoperability Performance, *InsideGNSS*, 60-70.

Varma, K., Rajarajan, D., Tirmal, N., Rathnakara, S. C. & Ganeshan, A. S. 2015, Modeling of IRINSS System Time-Offset with Respect to other GNSS, *Control Theory and Informatics*, 5, 10-17. <https://iiste.org/Journals/index.php/CTI/article/view/20060>

Weiss, M. A. & Thomas, C. 1994, Implementation of a Standard Format for GPS Common View Data, 26th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Reston, VA, 6-8 Dec 1994, pp.75-88. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA518492.pdf>

Zanello, R., Busso, A., & Detoma, E. 2007, Time Transfer with the Galileo Precise Timing Facility, 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 26-29, Nov 2007, Long Beach, CA., pp.439-448.



**Young Kyu Lee** received the Ph.D. degree in information and communications engineering from Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Korea, in 2002. In 2002, he joined the Time and Frequency group of the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Korea. He has been engaged in the research and development work field in precise time comparison via satellites and time distribution using ground-waves, since he participated in the satellite applications laboratory.



**Sung-hoon Yang** received the Ph.D. degree in electronic engineering from Chungnam National University, Daejeon, Korea, in 2012. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 1984. He has worked on the develop-

ment of a primary atomic clock and standard time keeping. His current activity is research on time transfer using satellites.



**Ho Seong Lee** received his Ph.D. degree in Physics from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 1986. He joined the Time & Frequency Group of the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) in 1986. He worked for the development of cesium atomic clocks for about 20 years. His current interest includes the generation of timescales for the Korea Standard Time and the Korean Positioning System Time.



**Jong Koo Lee** graduated from the Department of Statistics and Data Science at Cheongju University, in 1989. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 1990. His interesting fields are calibration of timing systems and statistical estimation.



**Sang-wook Hwang** received the Ph.D. degrees in Electronics Engineering from Chungnam National University, Daejeon, Korea, in 2019. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 2015. His current activity is research on time transfer using satellites.



**Joon Hyo Lee** received the B.S degree in electrical and electronic engineering and Ph.D. degree in integrated technology at Yonsei University, Incheon, South Korea in 2019. He is currently a researcher with the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, South Korea. He is now working at the Time and Frequency Group in KRISS, taking part in researches related to precise timing systems.



**Ju Hyun Lee** received the Ph.D. degree in Electronics Engineering at Chungnam National University, Daejeon, South Korea, in 2018. He was a senior research engineer of DSNVCOURS Co., Ltd., Daejeon, South Korea from 2017 to 2022. He is currently a researcher with the Korea Research Insti-

tute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, South Korea. He is now working at the Time and Frequency Group in KRISS.