

# Test Results of Dual-Use Wide-Area Differential GPS System for Extending the Operational Coverage

Kap Jin Kim<sup>1,2†</sup>, Jae Min Ahn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

<sup>2</sup>Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

## ABSTRACT

Wide-Area Differential Global Positioning System (WADGPS) is a system that operates a number of reference stations to provide correction information to improve the accuracy of GPS users, and it is available to service users within the area where the wide-area reference stations are installed. Recently, as positioning information has been used in various applications, the need for WADGPS for precise navigation in long-distance spaced areas where the wide-area reference stations cannot be installed has been raised. This paper tested the user navigation performance outside the wide-area reference stations of the WADGPS system, which serves both GPS Precise Positioning Service (PPS) and Standard Positioning Service (SPS) users. Static and dynamic tests were conducted using vehicles, and as a result, position accuracy improvement through WADGPS was confirmed even at points hundreds of kilometers outside the network area of the wide-area reference stations. Through this, the performance of the PPS/SPS correction system and the possibility of expanding the service area were confirmed.

**Keywords:** WADGPS, PPS, SPS, GPS

## 1. INTRODUCTION

Global Positioning System (GPS) 광역보정시스템 (Wide-Area Differential GPS, WADGPS)은 다수의 지상 GPS 기준국을 이용하여 서비스 영역 내의 사용자에게 정확도 향상을 위한 보정 정보를 제공한다 (Kee 1994). WADGPS 기술을 기반으로 다양한 형태의 보정/보강시스템을 구축할 수 있다. 일례로 GPS의 Wide-Area GPS Enhancement (WAGE)는 Precise Positioning Service (PPS) 사용자 전용의 WADGPS 서비스이다. 또 다른 사례로 국제 민간항공기구 (International Civil Aviation Organization, ICAO)의 표준에 따라 구현되는 위성기반보강시스템 (Satellite-Based Augmentation System, SBAS)은 Standard Positioning Service (SPS) 사용자를 대상으로 구현되는 WADGPS 기술 기반의 시스템이다. 이중 SBAS는 가장 활발히 구축되고 활용되는 WADGPS

시스템이라고 할 수 있다 (Yun et al. 2011). SBAS는 항공운항을 위한 표준화 시스템으로 국가 단위에서 개발되고 운용된다. SBAS의 보정 정보는 정지궤도 위성을 이용하여 모든 국가 또는 대륙 영역에서 보정정보가 방송되므로 항공운항 뿐만 아니라 보정정보를 수신하는 모든 위성항법 사용자가 활용할 수 있다.

위성항법은 민군 모든 영역에서 활용도가 높아지고 있으며, 고정확도 Positioning, Navigation and Timing (PNT) 정보의 필요성도 계속 높아지고 있다. 고정확도 PNT 정보를 획득하기 위해서는 사용자가 운용되는 지역 근거리에서 보정시스템을 구성하는 기준국이 구축되는 것이 필수적이다. 하지만 다양한 응용 분야에서는 기준국을 설치할 수 없는 장거리 이격지역에서의 고정확도 PNT 정보를 요구한다. 이러한 필요에 따라 WADGPS의 서비스 영역을 기준국 외부로 확장하기 위한 연구들이 시도되고 있다 (Kim & Kim 2016). WADGPS의 보정 영역 확장을 위해서는 기준국 외부 영역에서의 보정 성능을 분석하고 거리 이격에 따른 성능 열화 원인을 추정한다. 이로부터 기준국 내부 영역에서 관측된 측정치를 이용하여 보정정보의 성능이 외곽 지역에서 보장될 수 있도록 새로운 전리층 모델을 구성하거나 적절한 외삽 기법을 선정할 수 있다 (So et al. 2016b). 기존의 연구에서는 이러한 기법들을 개발하고 그 결과를 시뮬레이션 또는 기 설치된 GPS 기준국을 이용하여 간접적인 검증을 수행하였다. 또한 검증 대상

Received Aug 10, 2023 Revised Aug 22, 2023 Accepted Sep 04, 2023

†Corresponding Author

E-mail: kjkim@add.re.kr

Tel: +82-42-821-3504 Fax: +82-42-823-3400

Kap Jin Kim <https://orcid.org/0000-0001-7078-2376>

Jae Min Ahn <https://orcid.org/0000-0002-6261-0010>



Fig. 1. Conceptual view of WADGPS testbed (So et al. 2016a).

도 사용자의 최종 항법 정확도가 아닌 개별 오차 요소를 분석하고 이로부터 사용자 항법 정확도를 추정하는 방식의 연구가 일반적이었다. 본 논문은 차량에 탑재한 사용자 수신기를 이용하여 WADGPS를 구성하는 기준국 외부로 이동하면서 실제 사용자 수신 환경에서의 WADGPS 성능을 확인하였다.

본 논문의 또다른 특징은 PPS와 SPS 사용자 모두에 대한 WADGPS의 서비스 영역 확장 성능을 확인했다는 점이다. SBAS를 비롯한 대다수 상용 WADGPS 보정정보는 SPS 사용자를 대상으로 생성되어 PPS 수신기를 이용하는 사용자의 활용이 제한된다. 이에 따라 PPS/SPS 사용자 모두를 서비스할 수 있는 광역보강시스템이 연구되고 있다 (Kim & Ahn 2021). PPS/SPS 사용자를 서비스하기 위한 시스템 차원에서의 차이는 PPS 신호와 SPS 신호 간의 시간 지연을 보상하는 것이다. GPS CIP1 바이어스로 알려진 보상값을 직접 추정하고, 이를 포함하는 보정정보를 전송하면 PPS/SPS 사용자 모두를 서비스할 수 있다 (Kim et al. 2019). 시스템 자체적으로 이러한 서비스를 제공하기 위해서는 PPS 수신기를 이용한 기준국을 운영하고 이를 기반으로 CIP1 바이어스를 추정하기 위한 별도의 기능을 구현해야 한다 (Bu et al. 2018). 본 논문에서 수행한 실험 결과는 이와 같이 PPS/SPS를 서비스하도록 개발된 WADGPS 시스템을 이용하였다. 본 결과를 통해 PPS 사용자의 WADGPS 효용성과 활용 가능성을 확인할 수 있을 것이다.

위와 같은 PPS/SPS WADGPS 시스템의 장거리 이격지역에서의 성능을 확인하기 위하여 PPS 수신기를 적용한 WADGPS 기준국과 사용자 수신기를 운용하였다. PPS/SPS WADGPS 시스템은 기 개발된 연구 결과를 활용하였으며, 장거리 이격지역에서의 사용자 수신기 운용을 위하여 미국의 한반도와 유사한 위도를 갖는 지역에서 실험이 수행되었다. 실험은 사용자 수신기 1기, PPS 기준국 1기를 직접 운용하고, 그 외 기준국은 상용 기준국 데이터를 활용하였으며, 보정항법 성능은 후처리로 진행하였으나 보정정보의 적용은 일정 스케줄을 갖고 운용되는 메시지 전달 환경을

모사하였으므로 실제와 유사한 보정 메시지 수신 지연 및 업데이트 주기가 반영되었다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 보정정보를 생성하는 PPS/SPS 통합 WADGPS 시스템에 대해 간략히 소개한다. 3장에서는 실험 구성 및 실험 환경을 설명하고, 4장에서 실험 결과를 제시한다.

## 2. REVIEW OF THE DUAL-USE WADGPS SYSTEM

보정정보를 생성하기 위해 운용한 WADGPS 시스템은 다수의 관측기준국 (wide-area reference station)과 기준국 수신 데이터를 종합하여 보정정보를 생성하는 중앙처리국 (wide-area master station)으로 구성된다 (So et al. 2016a). Fig. 1은 WADGPS 테스트베드를 한반도에 구현했을 때를 가정한 개념도로써 관측 기준국과 중앙처리국의 연동 관계를 보여준다. 본 실험은 후처리로 진행되었으므로 보정 메시지를 사용자에게 실시간으로 전달하지 않고, 생성된 메시지를 시간에 맞추어 사용자에게 적용하는 방식으로 메시지 전달 지연 및 보정 정보 업데이트 환경을 반영하였다. 메시지 전달 및 업데이트는 SBAS에서 적용되는 방법을 적용하였다. 우선, WADGPS 보정정보는 SBAS의 메시지 타입과 동일하게 정의하고 추가적으로 CIP1 바이어스를 전달하기 위한 메시지 타입을 신규로 식별하였다. 메시지의 업데이트 주기는 RTCA MOPS DO-229D 문서의 Table A-25에 정의된 메시지 타입별 최대 업데이트 주기에 따라 생성되도록 하였고, 사용자에게 전달되는 전송 속도 또한 250 bps로 가정하여 업데이트 환경이 구성되었다 (RTCA 2006). 이 때, 신규 식별된 CIP1 바이어스 정보의 메시지는 SBAS 메시지 타입에서 정의하는 가장 긴 최대 업데이트 주기 값인 300초로 설정하였다.

관측기준국은 GPS 측정치를 획득하여 중앙처리국으로 전달

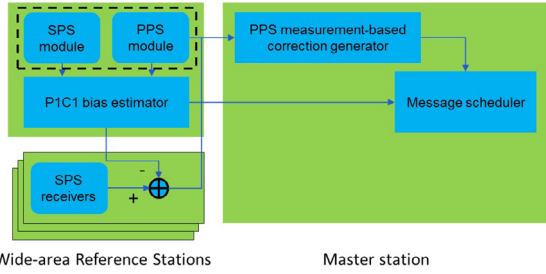


Fig. 2. PPS/SPS C1P1 bias estimation (Kim & Ahn 2021).

하고, 중앙처리국은 위성궤도/시각 보정정보와 전리층 보정정보를 생성한다 (Kee 2014). Fig. 1의 좌측 상단은 실제 운용되는 시스템 화면이며 시뮬레이션 및 실시간 데이터 운용 등을 통해 구현된 시스템의 성능을 확인한 바 있다 (So et al. 2016a).

이 때, WADGPS 시스템이 PPS/SPS 사용자 모두를 서비스하기 위해 기준국 중 최소 1기의 기준국 수신기는 PPS 수신기를 탑재하여 PPS/SPS 측정치간의 지연량을 측정하고 이로부터 가시위성에 대한 CIP1 바이어스를 추정해야 한다. GPS 위성이 PPS 신호인 10.23 MHz의 P(Y)코드와 SPS 신호인 1.023 MHz의 C/A코드 신호를 생성하고 송출하는 과정에서 필터나 케이블과 같은 RF 소자에서 발생하는 지연이 주파수에 따라 다르기 때문에 안테나 출력 시점에서 P(Y)코드와 C/A코드의 시간 지연이 발생한다. 이렇게 각 위성별로 발생하는 P(Y)코드와 C/A코드 간의 지연을 CIP1 바이어스로 정의한다. WADGPS는 SPS 또는 PPS 기준국 수신기를 기준으로 보정정보를 생성하므로, 생성된 보정정보를 SPS 사용자와 PPS 사용자 모두가 활용하기 위해서는 CIP1 바이어스 정보를 적용하여 지연값을 보상에 주어야 한다. Fig. 2는 개략적인 CIP1 바이어스 추정 과정을 도시한 그림이다 (Kim & Ahn 2021).

위성 CIP1 바이어스에 대한 추정을 위해서 식 (1), (2)와 같이 L1 C/A 코드 측정값  $C1$  과 L1 P(Y)의 측정값  $P1$ 에 대해 모델링하였다 (Bu et al. 2018).

$$C1_i = R_i + I_{L1,i} + Trop_i + B_{sat,i} + B_{rcv,i} + C1Bias_{sat,i} + C1Bias_{rcv,i} + MP_{C1,i} + N_{C1,i} \quad (1)$$

$$P1_i = R_i + I_{L1,i} + Trop_i + B_{sat,i} + B_{rcv,i} + P1Bias_{sat,i} + P1Bias_{rcv,i} + MP_{P1,i} + N_{P1,i} \quad (2)$$

여기서  $i$ 는 위성의 PRN번호,  $R$ 은 위성과 수신기 간의 Geometric Range,  $I_{L1}$ 은 L1 주파수에 대한 이온층 지연값,  $Trop$ 는 대류층 지연값,  $B_{sat}$ 는 위성 클럭 Bias,  $B_{rcv}$ 는 수신기 클럭 Bias를 의미한다.  $C1Bias_{sat}$ 는 위성에서의 L1 C/A 신호 생성 지연,  $P1Bias_{sat}$ 는 위성에서의 L1 P(Y) 신호 생성 지연,  $C1Bias_{rcv}$ 는 수신기에서의 L1 C/A 신호 지연,  $P1Bias_{rcv}$ 는 수신기에서의 L1 P(Y) 신호 지연을 의미한다. 그리고  $MP_{C1}$ ,  $MP_{P1}$ 과  $N_{C1}$ ,  $N_{P1}$ 는 각각 L1 C/A와 L1 P(Y) 측정값의 다중경로와 측정값 노이즈를 의미한다.

$$C1P1Bias_{sat,i} = C1Bias_{sat,i} - P1Bias_{sat,i} \quad (3)$$

$$C1P1Bias_{sat,i} = (C1_i - P1_i) - (C1Bias_{rcv,i} - P1Bias_{rcv,i}) - (MP_{C1,i} + N_{C1,i} - MP_{P1,i} - N_{P1,i}) \quad (4)$$

$$MP_{C1,i} = MP_{C1,i} + N_{C1,i} = C1_i - L1_i + \frac{2}{\alpha-1}(L2_i - L1_i) - mean(MP_{C1,i}) \quad (5)$$

$$MP_{P1,i} = MP_{P1,i} + N_{P1,i} = P1_i - L1_i + \frac{2}{\alpha-1}(L2_i - L1_i) - mean(MP_{P1,i}) \quad (6)$$

$$C1P1Bias_{sat,i} = (C1_i - P1_i) - (C1Bias_{rcv,i} - P1Bias_{rcv,i}) - (MP_{C1,i} - MP_{P1,i}) \quad (7)$$

$$Final\ C1P1\ DCB_{sat,i} = C1P1Bias_{sat,i} - mean(C1P1Bias_{sat,all}) \quad (8)$$

위성의 CIP1Bias는 식 (3)처럼 정의할 수 있다. CIP1Bias는 식 (1)에서 식 (2)를 차분하여 공통오차인  $R$ ,  $I_{L1}$ ,  $Trop$ ,  $B_{sat}$ ,  $B_{rcv}$ 는 제거함으로써 식 (4)와 같이 계산될 수 있다. C1 또는 P1의 측정값에 있는 다중경로와 측정값 노이즈 성분인  $MP_i$  값은 식 (5), (6)처럼 C1, P1 의사거리와 L1, L2 반송파 측정값으로 계산될 수 있다 (Vázquez et al. 2013). 최종 CIP1Bias 값은 C1 측정값과 P1 측정값의 차분과 수신기에서의 C1, P1 바이어스 차분 값과 측정값 C1, P1에 포함되어 있는  $MP_i$ 간의 차분으로 계산된다.

수신기에서의 Bias 차분인  $C1Bias_{rcv} - P1Bias_{rcv}$  값은 모든 위성 수신 안테나부터 신호 처리 단까지 같은 RF 소자, 필터, 케이블을 거쳐 수신되기 때문에 모든 위성에 대해 같은 값을 가진다. 따라서 바이어스를 제거하지 않아도 위치해에 영향을 주지 않는다. 또한 CIP1 바이어스 계산 시 최종 평균값을 0으로 만드는 과정을 거쳐 각 위성간의 상대적인 값을 계산하기 때문에 CIP1 바이어스 값에도 영향을 주지 않는다. 반면 L1 C/A 와 L2 P(Y)의 상관기 종류 및 코드 추적 루프의 대역폭의 차이로 인해 수신기 다중경로와 노이즈 성분이 위성마다 의사거리에 미치는 영향이 다르게 된다. 따라서  $MP_{C1}$ 과  $MP_{P1}$ 을 추정 후 해당 C1, P1 측정값에서 다중경로와 수신기 노이즈 성분을 제거하였다. 각 위성에 대하여 식 (7)을 이용해 전체 CIP1Bias를 계산하고, 최종적으로 전체 위성에 대하여 Bias의 평균을 0으로 조정하여 식 (8)과 같이 각 위성 간 상대적인 값인 CIP1 바이어스를 계산하였다.

이와 같은 추정 과정을 볼 때, 기준국에서 다양하게 발생하는 다중경로 수신환경과 그것이 C/A코드와 P(Y)코드에 미치는 영향의 차이가 CIP1 바이어스 추정 결과에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 개발된 시스템에서 직접 추정된 결과와 CIP1 바이어스를 추정하는 타 기관의 값을 정성적으로 비교하는 방식으로 추정된 CIP1 바이어스의 신뢰성을 간접적으로 확인하였다. 보다 직접적인 방법으로는 다중경로를 포함하는 측정치의 신뢰성을 분석하여 추정과정 자체의 신뢰수준을 확인하는 방법이 있을 수 있으며, 이에 대해서는 CIP1 바이어스 추정 신뢰도 보장에 관한 향후 연구과제로 진행이 필요할 것으로 판단된다.

### 3. TEST SET-UP

실험을 위한 구성은 WADGPS 시스템을 구성하는 기준국의 배치, 기준국 구성, 사용자 수신기 구성, 실험 환경으로 구분할 수 있다.

첫째로 WADGPS 모의 시스템을 구축하기 위하여 관측기준국

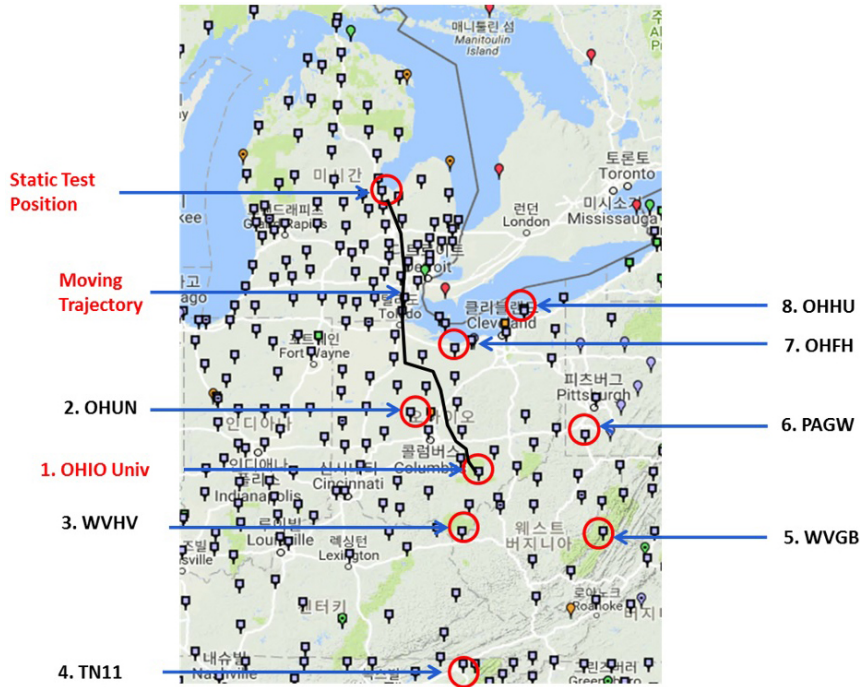


Fig. 3. WADGPS reference stations in Ohio, United States.



Fig. 4. Reference station set-up at Ohio University.

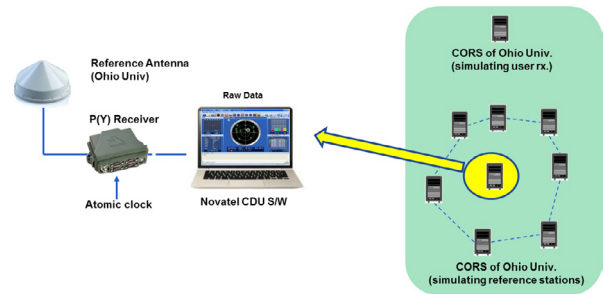


Fig. 5. Reference station overview.

의 배치에 관해 설명한다. 본 실험을 위해 총 8기의 관측기준국을 이용하였으며, 관측기준국의 배치가 한반도의 환경과 유사한 위치가 되도록 하였다. 이를 위해 미국 내 GPS 원시데이터를 제공하는 상시 운용 위성항법 기준국 7기와 본 실험을 위해 직접 구축한 PPS 수신기 운용 기준국 1기를 활용하였다. 실험이 수행된 지역은 미국 Ohio 주의 Athens에 위치한 Ohio University를 기준으로 하였고, 해당 장소에서 PPS 수신기가 적용된 기준국을 운용하였다. 그 외 7기 기준국은 미국 해양대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)과 미국 교통부가 운용하는 Ohio 주 지역의 상시 기준국을 활용하였다. 7기의 사이트 약어는 OHUN, WVHV, TN11, WVGB, PAGW, OHFH, OHHU이고, Fig. 3에 관측기준국의 배치를 도시하였다.

둘째로, PPS 기준국은 Ohio University의 건물 내에서 Novatel 사의 FlexPak-S 수신기를 적용하였다. FlexPak-S 수신기는 PPS와 SPS 측정치를 동시에 제공하여 중앙처리국 S/W에서 CIPI 바이어스를 추정할 수 있다. Fig. 4는 기준국 운용을 위해 FlexPak-S

수신기, 원자시계, 비교 검증용 수신기 등으로 구성된 테스트 박스이다. Fig. 5는 최종적으로 구성되는 관측기준국 개념도로서, Ohio University를 중앙처리국 및 PPS 수신기 적용 기준국으로 운용하고 주변 7기의 SPS 상용 상시 기준국 데이터를 활용하였다.

셋째로, 사용자 수신기는 Novatel 사의 FlexPak-S를 사용하였고, Novatel OEM7 수신기를 같이 장착하여 정적 및 동적 실험에서의 정밀 기준위치 획득에 활용하였다. Fig. 6은 수신기가 장착된 수신기 박스이고, Fig. 7과 같이 노트북을 이용하여 차량 내에서 사용자 수신기의 수신 상태 모니터링과 데이터 저장 등의 운용 제어를 수행하였다. Fig. 8은 실험에 사용된 차량이고, 차량 상단에 설치된 안테나를 확인할 수 있다.

마지막으로 실험을 수행한 경로를 Fig. 9에 도시하였다. 출발 지점은 Fig. 9 하단의 Ohio 주 Athens의 Ohio University이고, 북쪽으로 약 364마일을 6시간가량 이동하여 Michigan 주의 Bay City 지역까지 동적 테스트를 위한 측정치를 획득하고, Bay City에서 4시간가량의 정적 실험을 수행하였다.



Fig. 6. User equipment with PPS and SPS GPS receivers.

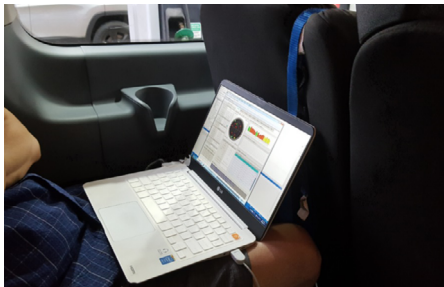


Fig. 7. Operation of control and display software for user receiver.



Fig. 8. Test van and GPS antenna attached on the roof.

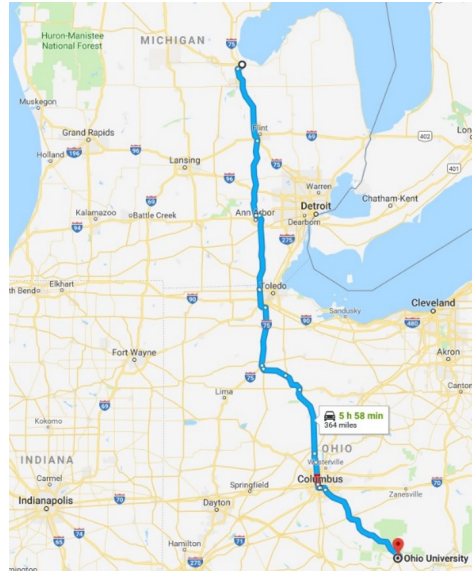


Fig. 9. Trajectory of the user.

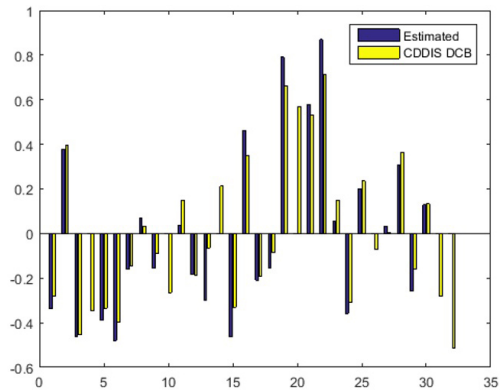


Fig. 10. CIP1 bias estimation results with CDDIS DCB.

#### 4. TEST RESULTS

실험 결과는 PPS 수신기를 이용하여 추정된 CIP1 바이어스 결과와 PPS, SPS 수신기에 대한 정적, 동적 결과로 구분하였다. 실험은 2018년 7월 31일부터 8월 1일까지 진행되었다.

첫째로, 본 실험 기간 동안 Ohio University에 설치된 PPS 기준국을 이용하여 추정된 CIP1 바이어스 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 추정 방법은 기존 논문에서 사용한 기법을 적용하였다 (Kim & Ahn 2021). Fig. 10의 보라색 그래프는 직접 추정된 결과이고 노란색은 미국 NOAA에서 운용하는 Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) 데이터베이스에서 제공되는 Differential Code Bias (DCB) 결과값으로써 CIP1 바이어스를 의미한다. 그림에서 보이는 바와 같이 모든 가시 위성에 대해서 유사한 결과를 보이고 있으며, 기존 연구에서 확인된 바와 같이 CIP1 바이어스 추정 결과는 기준국을 제공하는 시스템 간에도 차이가 있으며, Fig. 10의 차이는 일반적으로 알려진 차이와 유사한 수준임을 확인하였다 (Kim et al. 2019). 이로부터 FlexPak-S 수신

기를 이용한 CIP1 바이어스 추정값의 유효성을 확인할 수 있다.

둘째로, Michigan 주 Bay City 지역에서 수행된 정적 실험 결과를 보인다. Bay City의 정적 실험 장소는 WADGPS 중심 지역인 Ohio University와는 직선 거리로 500 km가량 이격되었으며, 8기의 기준국 중 가장 외곽에 위치하여 Bay City와 가장 근접한 7번 OHFH 기준국과의 직선 거리는 270 km로써, 사용자는 WADGPS 기준국 네트워크 외부에 위치한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 11은 측위 결과를 도시한 것으로 상단은 수평 위치해의 누적 그래프이고, 중간 및 가장 아래의 그래프는 시간에 따른 오차를 도시한 것이다. 보정정보를 적용하지 않은 경우의 수평정확도는 0.68 m (CEP)이고 수직 정확도는 2.77 m (PE)이고, 보정정보를 적용한 경우는 수평정확도 0.20 m (CEP), 수직정확도 0.84 m (PE)로써 보정정보 적용 시 정적으로 1m 이내의 측위 성능을 확인할 수 있었다. PPS 수신기의 성능 또한 SPS 수신기와 유사한 수준으로 확인되었으며, PPS 수신기의 단독 항법 대비 PPS 보정항법 적용 시의 수평 수직 개선 비율은 약 71%, 70% 수준으로 확인되었다.

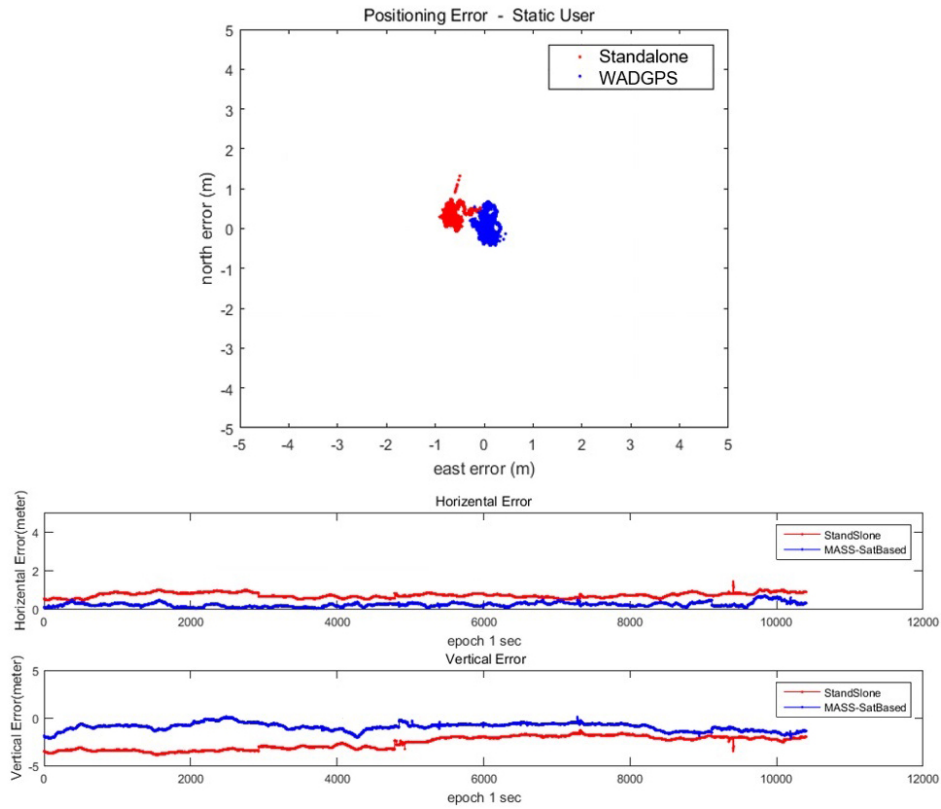


Fig.11. Static positioning results for SPS receiver.

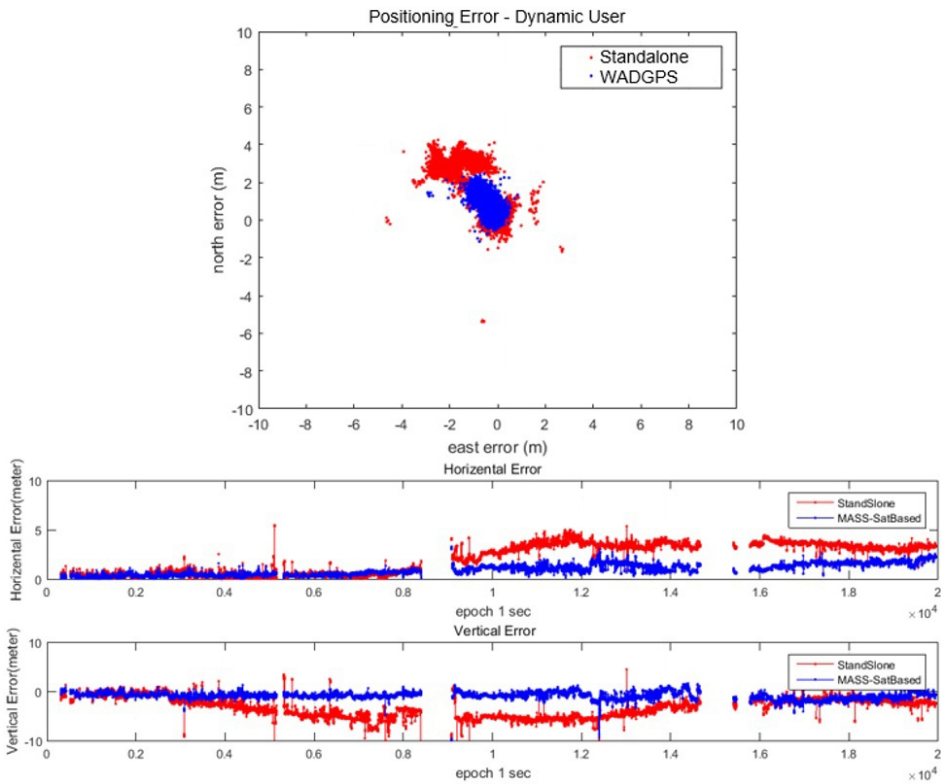


Fig.12. Dynamic positioning results for SPS receiver.

Table 1. Summary of the test results.

		Static Test (In Bay City)		Dynamic Test (Ohio → Bay City)	
		Horizontal (CEP)	Vertical (PE)	Horizontal (CEP)	Vertical (PE)
PPS	Standalone	OOO	OOO	OOO	OOO
	WADGPS	71% (w.r.t Standalone)	70% (w.r.t Standalone)	64% (w.r.t Standalone)	76% (w.r.t Standalone)
SPS	Standalone	0.68	2.77	2.78	3.32
	WADGPS	0.20 (71%)	0.84 (70%)	0.90 (68%)	0.92 (72%)

셋째로, Ohio University에서 출발하여 Bay City에 도착하기까지 6시간 동안의 차량 이동을 통해 수행된 동적 실험 결과를 보인다. 동적 실험 성능 확인을 위한 정밀 기준 위치는 차량에 사용자 수신기와 같이 탑재된 Novatel OEM7 수신기 측정치, 차량 이동 경로에 따라 위치한 NOAA 및 DOT 위성항법 상시 기준국 데이터, 상용 정밀측위 소프트웨어인 Waypoint를 이용하여 생성하였다. Fig. 12는 실험 결과를 요약한 그래프로서 상단의 그림은 차량이 이동하면서 측위한 결과를 누적하여 수평오차를 보인 것이며, 중간 및 하단 그래프는 시간에 따른 수평 및 수직 오차이다.

정성적인 측면에서는 중간 그래프의 수평오차 결과를 보면 시간이 증가하면서 파란색의 보정항법 오차가 서서히 증가하는 현상이 관찰되었다. 이것은 두가지 원인으로 파악할 수 있는데, 실험이 오전에 시작되어 시간이 지남에 따라 전리층이 활발해지는 시간대여서 단독항법해와 보정항법해 오차가 모두 증가하였다. 동시에 사용자 수신기가 WADGPS 기준국에서 멀어지면서 보정 성능이 서서히 열화되는 특성도 반영되었을 것으로 추정된다. 하단 그래프의 수직 오차 성능에서는 보정항법 성능이 전체 구간에 비교적 균등하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 실험 전체 구간에 대하여, 보정정보를 적용하지 않은 경우의 수평정확도는 2.78 m (CEP)이고 수직 정확도는 3.32 m (PE), 보정 정보를 적용한 경우는 수평정확도 0.90 m (CEP), 수직정확도 0.92 m (PE)로써 보정 정보 적용 시 차량이동 수준의 동적 환경에서도 1 m 이내의 측위 성능을 확인할 수 있었다. PPS 수신기의 성능 또한 SPS 수신기와 유사한 수준으로 확인되었으며, PPS 수신기의 단독 항법 대비 PPS 보정항법 적용 시의 수평 수직 개선 비율은 약 64%, 76% 수준으로 확인되었다.

Table 1은 정적, 동적 실험 결과를 정리한 표이다. PPS 수신기의 성능은 SPS 사용자 수신기의 단독항법/보정항법 성능 차이와의 비교를 통해 간접적으로 확인할 수 있다. SPS 사용자 수신기는 단독/보정 항법 성능을 제시하였으며, 보정에 따른 성능 개선 비율도 같이 표기하였다. PPS 사용자 수신기에 대해서는 구체적인 수치를 제시하는 것이 제한되므로, 단독 항법 대비 향상된 정도를 비율로만 표기하였으며 그 결과가 SPS 수신기에서의 성능 향상 수준과 유사한 것을 확인하여 개발된 PPS/SPS WADGPS 시스템이 PPS와 SPS 사용자 모두에 대해 기준국 네트워크 외부에서 향상된 정확도 성능을 제공할 수 있음을 보였다.

## 5. CONCLUSIONS

본 논문에서는 PPS/SPS 사용자 모두를 서비스할 수 있도록 개발된 WADGPS 시스템을 이용하여 WADGPS 기준국 외부에서의 성능을 확인하기 위한 실험결과를 보였다. 기존의 연구 결과들

이 시뮬레이션 또는 상시운용되는 위성항법 기준국을 이용해서 WADGPS 기준국 외부의 성능을 간접적으로 확인했던 것 대비 본 논문은 실제 사용자 수신기를 운용하여 성능을 확인했다는 데 의미가 있다. 성능 실험에서는 PPS 수신기를 이용하여 CIP1 바이어스를 추정하고 이를 이용하여 PPS와 SPS 사용자 모두에게 제공 가능한 보정정보를 생성하였다. 이를 이용하여 정적, 동적 사용자 환경에서 PPS와 SPS 각각의 성능을 확인하였다. 실험 결과, 보정항법 적용 시 단독항법 대비 약 70%가량의 정확도 개선 효과가 있음을 확인하였다. 이러한 성능 향상은 보정항법을 이용하여 1 m급의 위치 정확도를 달성할 수 있는 수준임을 의미한다. 특히, 이러한 정확도가 WADGPS 내부뿐만 아니라 가장 외부에 위치한 기준국으로부터 약 270 km 떨어진 지점까지를 포함한 것이므로 기준국을 설치할 수 없는 지역에서의 WADGPS 활용 가능성을 보였다. 본 실험 결과를 통해 GPS 광역보정시스템 기술을 기존의 많은 민간 영역 외에도 PPS 수신기의 응용이나 장거리 이격지역에서 운용되는 사용자 수신기에 대해서도 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, K.Kim; simulation and test results analysis, K.Kim; writing and editing, K.Kim; review and supervision, J.Ahn.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- Bu, S., So, H., Kim, K., Lee, C., Kim, D., et al. 2018, Wide Area Augmentation System Estimating CIP1 DCB, JANT, 22, 400-408. <https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.5.400>
- Kee, C. 1994, Wide Area Differential GPS (WADGPS), Ph.D. Dissertation, Stanford University.
- Kee, C. 2014, Presentation Material, Lecture Notes distributed in SBAS System Design at Seoul National University, Korea on 3-5 March 2014.
- Kim, K. & Ahn, J. 2021, Test Results of Wide-Area Differential Global Positioning System with Combined Use of Precise

Positioning Service and Standard Positioning Service Receiver, JPNT, 10, 43-48. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.1.43>

- Kim, K., Ahn, J., Jang, J., & So, H. 2019, Differential Code Bias Estimation for Wide-Area DGPS, KIMST 2019 Conference, 2019 June 13, ICC, Jeju, pp.422-423.
- Kim, M. & Kim, J. 2016, Extending Ionospheric Correction Coverage Area by Using A Neural Network Method, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 17, 64-72. <https://doi.org/10.5139/IJASS.2016.17.1.64>
- So, H., Jang, J., Lee, K., Park, J., & Song, K. 2016a, Performance analysis of WADGPS system for improving positioning accuracy, JPNT, 5, 21-28. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2016.5.1.021>
- So, H., Jang, J., Lee, K., Song, K., & Park, J. 2016b, Test Results of WADGPS System using Satellite-based Ionospheric Delay Model for Improving Positioning Accuracy, JPNT, 5, 213-219. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2016.5.4.213>
- RTCA DO-229D, 2006, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment
- Vázquez, G. E., Bennett, R., & Spinler, J. 2013, Assessment of pseudorange multipath at continuous GPS stations in Mexico, Positioning, 4, 253-265. <https://doi.org/10.4236/pos.2013.43025>
- Yun, H., Kee, C., & Kim, D.-Y. 2011, Korean Wide Area Differential Global Positioning System Development Status and Preliminary Test Results, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 12, 274-282. <https://doi.org/10.5139/IJASS.2011.12.3.274>



**Kap Jin Kim** received B.S. and M.S. degree in control and instrumentation engineering at Hanyang University. He is a principal researcher of the Agency for Defense Development in Korea. His research interests are GNSS signal processing, anti-jamming/spoofing algorithm, and WADGPS technologies.



**Jae Min Ahn** received B.S. degree in electronic engineering at Seoul National University and M.S. and Ph.D. degree in electric and electronic engineering at Korean Advanced Institute of Science. He is a professor of Chungnam National University in Korea. His research interests are communication system design and signal processing.