

# Measurement Level Experimental Test Result of GNSS/IMU Sensors in Commercial Smartphones

Subin Lee, Gun-Hoon Ji, Jong-Hoon Won<sup>†</sup>

Autonomous Navigation Lab. Department of Electrical Engineering and Computer, Inha University, Incheon 22212, Korea

## ABSTRACT

The performance of Global Navigation Satellite System (GNSS) chipset and Inertial Measurement Unit (IMU) sensors embedded in smartphones for location-based services (LBS) is limited due to the economic reasons for their mass production. Therefore, it is necessary to efficiently process the output data of the smartphone's embedded sensors in order to derive the optimum navigation values and, as a previous step, output performance of smartphone embedded sensors needs to be verified. This paper analyzes the navigation performance of such devices by processing the raw measurements data output from smartphones. For this, up-to-dated versions of smartphones provided by Samsung (Galaxy s10e) and Xiaomi (Mi 8) are used in the test experiment to compare their performances and characteristics. The GNSS and IMU data are extracted and saved by using an open market application software (Geo++ RINEX Logger & Mobile MATLAB), and then analyzed in post-processing manner. For GNSS chipset, data is extracted from static environments and verified the position, Carrier-to-Noise ( $C/N_0$ ), Radio Frequency Interference (RFI) performance. For IMU sensor, the validity of navigation and various location-based-services is predicted by extracting, storing and analyzing data in static and dynamic environments.

**Keywords:** smartphone, global navigation satellite system, inertial measurement unit, navigation

## 1. INTRODUCTION

최근 위치정보의 수요가 증가하면서 다양한 방법으로 위치 기반서비스(LBS: Location-Based Service)를 제공받을 수 있다 (Jung et al. 2011). 특히 스마트폰 이용의 대중화에 따라 스마트폰 내장 센서들을 이용하여 다양한 위치기반서비스 제공이 가능 해졌다. 위치기반서비스의 핵심적인 목표는 시간, 날씨, 장소에 구애받지 않고 정확한 위치정보를 사용자에게 제공하는 것이다. 이를 위한 대표적인 기술로는 미국 Global Positioning System (GPS)를 필두로 하는 Global Navigation Satellite System (GNSS) 수신기를 활용하는 것이다. 하지만 스마트폰에 장착된 GNSS 칩셋(chipset)과 Inertial Measurement Unit (IMU) 센서는 저가 대량 방식으로 생산된 센서로써 위치정보의 핵심적인 목표를 추구

하는 데 있어 성능에 제약이 따른다. 그럼에도 불구하고 스마트폰의 편리한 휴대성으로 인하여 스마트폰에서 제공받는 위치기반서비스에 대한 의존도 및 활용 범위가 증가하고 있다. 이에 따라 스마트폰을 활용한 정확도 높은 항법해 도출이 관심 받고 있으며 관련된 연구들이 수행되어지고 있다.

2018년 이중주파수(dual frequency)와 반송파 위상(carrier phase)을 제공해주는 Broadcom BCM47755칩이 부착된 스마트폰 출시와 동시에 항법해 및 측정치 제공 기능을 갖춘 공개 응용 프로그램(APP)이 안드로이드 환경에서 제공됨에 따라 다양한 환경과 조건 하에서 스마트폰의 항법 성능을 검증하는 사례들이 발표되었다 (Lu et al. 2018). 이러한 연구에서는 기존에 제공되던 L1 대역만을 사용하여 도출한 측위값의 정확도와 L1 대역과 L5 대역을 동시에 사용하여 도출한 측위값의 정확도를 비교하여 그 결과를 제시하거나, 측지 수신기와 성능을 비교하여 결과를 제시하였다.

Robustelli et al. (2019)는 스마트폰의 다중경로 성능을 평가하기 위해 다중경로 오차가 낮을 것으로 예상되는 open sky 환경과 수신기가 건물로 둘러싸여 강력한 다중경로 오차가 예상되는 환경에서 스마트폰과 측지용 수신기의 반송파 위상 원시 데이터를 동시에 수집하여 다중경로 측위 성능을 비교하였다. 연구 결

Received Feb 27, 2020 Revised Aug 17, 2020 Accepted Aug 29, 2020

<sup>†</sup>Corresponding Author

E-mail: jh.won@inha.ac.kr

Tel: +82-32-860-7406 Fax: +82-32-863-5822

Subin Lee <https://orcid.org/0000-0001-8807-4327>

Gun-Hoon Ji <https://orcid.org/0000-0003-4132-4813>

Jong-Hoon Won <https://orcid.org/0000-0001-5258-574X>

과 스마트폰에 부착된 안테나는 측지 수신기에 비해 안테나의 성능이 제한됐기 때문에 두 환경에서 모두 신호 대 잡음비(C/N<sub>0</sub>: Carrier-to-Noise Ratio) 성능이 좋지 않지만 이중주파수를 이용한 신호 대 잡음비 성능은 단일주파수를 이용한 신호 대 잡음비 성능보다 좋다고 보고하였다.

스마트폰에서 도출한 항법해의 정확도 검증에 위한 또 다른 연구로는 스마트폰 내장 GNSS 칩셋과 IMU 센서를 중저가 수신기 및 IMU 센서와 비교하는 연구가 있다 (Martí et al. 2014, Warnant et al. 2018). 연구 결과 중저가 GNSS 수신기의 오류는 스마트폰의 GNSS 칩셋의 오류보다 상대적으로 낮고, 중저가 IMU 센서에서 계산된 표준 편차 또한 스마트폰 IMU 센서보다 4 배 낮다고 보고되었다. 단 스마트폰의 경우 GNSS와 IMU 센서 등 다양한 센서의 데이터를 결합하여 항법해를 도출할 경우 성능의 이점을 가질 수 있다.

GPS와 IMU 데이터를 결합하여 항법해를 도출하는 GPS/INS Integration 기법의 경우 GNSS 수신기의 특성상 신호 차단 또는 전파 간섭으로 인한 항법해 도출 한계점을 보완하기 위해 IMU 데이터를 결합하여 항법해를 도출하는 기법이다. IMU 센서의 경우 가속도와 각속도의 적분의 원리로 항법해를 도출하기 때문에 시간이 지남에 따라 오차가 누적되어 장시간 단독으로 사용할 수 없지만, 외부의 다른 정보 없이 센서 데이터를 획득할 수 있어 신호가 차단되거나 간섭이 있는 특정환경에서 GNSS 칩셋과 상호 보완적으로 사용할 수 있기 때문이다 (Kaplan & Hegarty 2005).

이상과 같은 연구는 주로 스마트폰의 측위 정확도 측정 또는 고정밀 항법해를 도출하기 위한 방법론적인 연구이다. 방법론적인 연구를 하는데 있어서 스마트폰에 내장된 센서 자체의 성능 평가는 유용하게 쓰일 수 있다. 칩셋 제조사가 출시하는 칩셋을 일방 구매하여 GNSS/IMU 통합 수신기와 같은 항법시스템을 구성하는 일반적인 방식과는 다르게, 민수 대량생산 방식 스마트폰 내장 항법시스템은 스마트폰 제조사가 칩셋 제조사로부터 GNSS/IMU 칩셋 (또는 IP) 및 해당 스마트폰에 최적화된 구동프로그램(baseband software)을 대량 구매하여 양사와 긴밀한 협력 속에 항법시스템을 구성한다. 가령 GNSS 칩셋 제조사는 해당 스마트폰 플랫폼 요구사항에 충족하도록 최적화된 구동프로그램을 칩셋과 함께 제공한다. 즉, 스마트폰 내장 GNSS의 성능을 좌우하는 안테나 및 RF부는 Combo 형태로서 스마트폰에 내장된 여타 통신시스템들과 공용으로 사용되므로, 칩셋 자체의 성능과 함께 해당 스마트폰 플랫폼에 탑재 후 성능도 중요하다. 따라서 본 논문에서는 스마트폰 제조사 본인이 아닌 제3자의 입장에서 다양한 실험을 통한 성능분석을 수행한다. 이러한 성능분석은 탑재된 GNSS 칩셋 및 내부 알고리즘에 대한 자세한 개발 상세 정보가 사내 기밀로 취급되어 외부에 부재한 상황에서 일반 연구자들에게 성능분석 결과를 제공할 수 있다.

한편, 미국의 Newark 공항에서 개인 휴대 장치(PPD: Personal Privacy Device)로 공항내의 지상 기반 보강 시스템(GBAS: Ground Based Augmentation System)장비가 순차적으로 마비된 사례가 보고되었다. 미연방항공국의 조사 결과에 따르면 트럭운전자들의 프라이버시를 이유로 자신의 현재 위치를 운송업체 관제 시스템으로부터 숨기기 위하여 개인 휴대 장치로 자발적 재밍 신호를 방출한 것이 원인 것으로 규명되었다 (Grabowski 2012).

이러한 개인 휴대용 재머는 누구나 쉽게 구매가능하고 저가로 공급되며 다양한 신호 대역의 재머 타입이 존재한다. GNSS에 대한 재밍 신호는 위치정보의 수요가 증가함에 따라 위치 정보가 중요해지는 현재, 큰 문제로 이어 질 수 있다. 이러한 동향에 따라 Miralles et al. (2018)에서는 스마트폰 내장 GNSS 칩셋과 IMU 센서의 원시 데이터를 이용한 재밍 탐지 및 솔루션을 제안하고, 스마트폰 응용 프로그램 GNSS Alarm의 개발을 통해 스푸핑과 재밍 공격을 감지할 수 있는 최초의 APP을 제공할 것이라 말하였다.

따라서 본 논문에서는 이러한 이슈를 확장시켜 스마트폰 내장 GNSS에 대한 측위 성능뿐 아니라 수신된 신호 품질을 분석하기 위한 신호 대 잡음비 성능과 신호간섭에 어느정도 강인한지 판단하기 위한 전파교란(RFI: Radio Frequency Interference) 성능을 모든 위성항법시스템에 대하여 분석하였다.

성능 실험에 사용할 스마트폰은 삼성 Galaxy s10e와 샤오미 Mi 8이며 각각 다른 모델의 GNSS 칩셋과 IMU sensor 및 내장 알고리즘을 탑재하고 있다. 삼성 Galaxy s10e는 Broadcom BCM4775x 시리즈 변형인 BCM47752가 내장되어 있고 (De 2019), 가속도(STM-15932), 각속도(STM-1) 등의 관성센서가 부착되어 있다 (DeviceSpecifications 2019). 단, 삼성 Galaxy s10e에 부착된 GNSS 칩셋은 이중주파수 모델이지만 현재까지 극히 일부지역에서 출시되는 제품들에서만 이중주파수를 제공하며 미국, 한국 등에 출시되는 일반 버전의 경우 이중주파수가 지원되지 않는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 한국 버전의 Galaxy s10e를 사용하여 실험을 수행하였기 때문에 단일 주파수만을 고려한다. 샤오미 Mi 8은 이중주파수를 제공하는 GNSS 칩셋인 Broadcom BCM 47755가 내장되어 있으며 (BROADCOM 2020), 관성센서(Qualcomm 257)가 부착되어 있다 (DeviceSpecifications 2018). 본 논문에서는 대표적인 안드로이드 계열 스마트폰의 공개 응용프로그램을 이용하여 출력한 GNSS 및 IMU 측정치를 각 스마트폰 내장 센서 모델에 따라 성능을 비교한다. 이와 관련하여 진행된 초기 연구 (Lee et al. 2019)에서는 단일주파수를 제공하는 스마트폰과 이중주파수를 제공하는 스마트폰을 단순 비교하여 스마트폰의 GNSS 칩셋의 측위 성능 및 IMU 센서의 데이터분석을 수행하고 간단한 항법성능을 시험하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장과 3장에서는 각각 GNSS 칩셋 출력 데이터와 IMU 센서의 출력 데이터 성능을 분석하고 4장에서 결론을 맺는다.

## 2. GNSS 칩셋 성능 실험

GNSS 칩셋이 내장된 스마트폰 또한 일종의 GNSS 수신기로서 스마트폰용으로 개발된 다양한 응용프로그램을 통하여 GNSS 데이터를 외부 인터페이스를 통하여 수집 및 저장할 수 있고 (Zhang et al. 2018), 획득한 데이터를 처리하여 위치해를 사용자에게 제공할 수 있다 (White Paper 2018). 스마트폰용 응용프로그램으로 획득한 GNSS 데이터는 수신기 종류와 무관하게 교환할 수 있는 포맷인 Receiver Independent Exchange Format

(RINEX) 형태의 파일로 저장되며, 이를 후처리 후 분석을 수행하였다. 본 논문에서는 위치해 및 신호강도 정보를 이용하여 측위, 신호 대 잡음비, 전파교란 성능을 비교 분석한다.

먼저 두 스마트폰의 측위 성능을 분석하기 위해 획득한 항법/관측 RINEX 파일을 오픈 소스 코드 형태로 제공되는 RTK LIB v.2.4.2에 적용하여 위치해를 구한다. 이를 위치가 알려진 기준점(참값)의 수평/수직 위치와 차분함으로써 각 스마트폰의 측위 정확도 성능을 비교한다. 이때 획득한 관측 RINEX 파일은 신호가 수신되는 시간동안 관측되는 위성에 대해 신호 대 잡음비를 dB 단위로 정보를 제공한다. 이를 통해 두 스마트폰에서 동일 시간에 수신된 동일한 GNSS 신호의 품질을 평가할 수 있다. 또한, 신호를 수신하는 중간에 의도적으로 간섭을 인가한 후 각 스마트폰에서 수신된 신호 대 잡음비의 감쇄 정도를 비교하여 두 스마트폰의 전파 교란 성능을 판단할 수 있다.

GNSS 칩셋을 이용한 다양한 성능 실험 환경은 Table 1, Fig. 1과 같다. Open sky 환경에 설치 되어있는 기준점용 고이득 안테나를 기준으로 하여 실험을 진행하였으며 안테나 신호를 다시 송신해주는 re-radiator를 이용하여 실내에서 전자파 차폐상

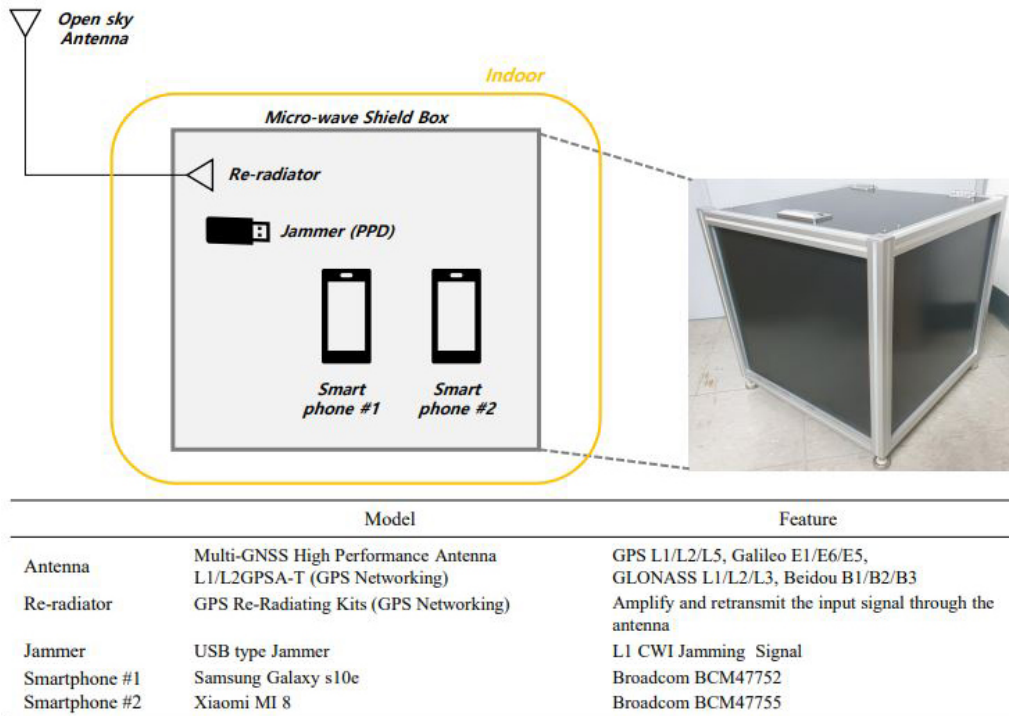
자 내에서 실험하였다. GNSS 데이터는 스마트폰용 응용프로그램인 Geo++ RINEX Logger App을 이용하여 획득하였다. 1 Hz의 데이터 전송 속도로 로깅했으며 정적상황에서 진행하였다. 측위 및 신호 대 잡음비 성능은 신호 간섭이 없는 환경에서 실험하였으며, RFI 성능 실험의 경우 L1 Continuous Wave Inteference (CWI) 재밍 신호를 방사하는 USB-타입 초소형 개인 휴대 장치를 이용하여 실험하였다. 한편, 실험은 모든 성능 실험에 대해 10분동안 진행됐는데, 이는 Anghileri et al. (2008)에서 언급하듯 수신기 상태가 캐시 데이터가 없는 cold start라고 가정하였을 때도 Time to first fix가 일반적으로 30초에서 1분 30초라는 것과 open sky 환경에서 실험을 진행하였다는 점을 감안하여 정하였다. 같은 이유로 RFI 성능 실험의 경우 2분 후부터 재밍을 방사하여 실험을 수행하였다.

## 2.1 측위 성능

본 논문에서는 삼성과 샤오미 스마트폰의 GNSS 측위 성능을 비교하기 위해 Geo++ RIENX Logger APP을 이용하여 관측 RINEX 파일을 획득한 후, Takasu (2013)가 설명한 매뉴얼을 바탕으로 RTK LIB v.2.4.2를 사용하여 위치해를 도출하였다. RTK LIB는 다양한 실험 환경에 따라 Positioning, Frequency, Satellite 등 여러 가지 option을 선택하여 항법해를 도출할 수 있다. 본 실험에서는 실험에 사용한 삼성 스마트폰 모델이 이중주파수를 제공하지 않기 때문에 공통의 신호대역을 이용하였을 때의 측위 성능을 분석하기 위해 L1대역을 이용한 Single Mode option을 선택하여 항법해를 도출하였다. 즉, 의사거리(Pseudorange)만을 이용한

**Table 1.** GNSS chipset experimental test environment.

| Parameters   | GNSS chipset test                                                          |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------|
| GNSS chipset | Broadcom BCM47752 (Samsung Galaxy s10e)<br>Broadcom BCM47755 (Xiaomi Mi 8) |
| Platform     | Samsung (Galaxy s10e) & Xiaomi (Mi 8)<br>Geo ++ RINEX Logger APP           |
| State        | Static                                                                     |
| Data rate    | 1 Hz                                                                       |
| Time         | 10 minutes                                                                 |



**Fig. 1.** GNSS experiment test set up.



항법해를 출력하여 분석에 사용하였다 (Takasu & Yasuda 2009). 항법해 도출을 위해 사용된 위성은 삼성과 샤오미 모두 Multi-GNSS 서비스를 제공하기 때문에 GPS, Galileo, GLONASS, QZSS, BeiDou를 모두 이용하였다.

RTK LIB를 사용하여 도출한 2차원 측위 결과를 Fig. 2에 도시하였고, Table 2에 기준점(True Position)을 기준으로 수평오차의 평균, 표준편차, RMSE 값을 비교한 결과를 정리하였다. RMSE 결과 삼성의 경우 1.59 m이고 샤오미는 1.71 m로 삼성이 샤오미 보다 약 12 cm 더 좋은 정확도의 결과를 가졌다.

## 2.2 $C/N_0$ 성능

Table 3은 삼성과 샤오미에서 제공되는 신호대역을 정리한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 샤오미는 이중주파수 GNSS 칩셋인 Broadcom의 BCM47755를 탑재하였으므로 삼성과 다르게 GPS/Galileo/QZSS에 대해서 이중주파수를 제공한다.

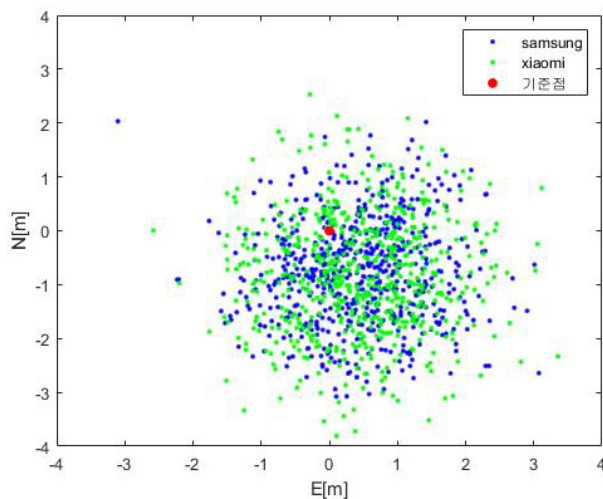
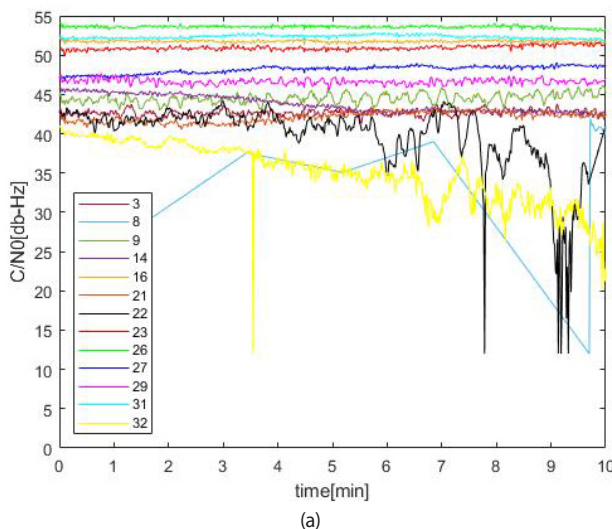


Fig. 2. 2D positioning result.



삼성과 샤오미 스마트폰에 탑재된 GNSS 칩셋의 신호대역을 확인한 후 같은 환경에서 각자 다른 스마트폰으로 수신된 신호의 품질을 비교하기 위해 공통 신호대역에 대하여 신호 대 잡음비 성능을 비교 분석 하였다. 이때 사용된 관측 RINEX 파일은 측위 성능을 파악하는데 있어 신호 대 잡음비와 위성의 가시성의 영향을 같이 분석하기 위해 측위 성능 실험에서 획득한 관측 RINEX 파일을 사용하였다. GPS/Galileo/GLONASS/QZSS/BDS 각각에 대하여 공통 신호대역인 L1/E1/G1/L1/B1의 신호 대 잡음비를 비교하여 Figs. 3~7에 도시하였다.

Fig. 3에서 GPS 경우 삼성과 샤오미의 위성의 가시성은 동일했다. 신호 대 잡음비의 변동성이 큰 것을 제외하고 동일한 PRN 번호의 위성에 대해서 신호 대 잡음비 평균을 구하여 신호 대 잡음비를 비교한 결과 삼성이 샤오미의 신호 대 잡음비보다 평균 5 dB 높은 것을 확인할 수 있었다. 한편, GPS의 경우 대부분의 신호가 안정적으로 들어오는 다른 항법시스템과 다르게 삼성과 샤오미 모두 3개의 위성 신호가 매우 불안정하게 들어오는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8의 sky plot에서 고도각을 확인해본 결과 신호가 불안정하게 들어오는 8, 22, 32번 위성은 모두  $10^\circ$ 가 넘지 않았고 고도각이 낮은 경우 다중경로로 인한 신호 세기 약화와 큰 측위 오차가 발생하는데 본 실험에서도 마찬가지로 신호가 불안정한 위성은 고도각이 낮음에 따른 다중경로로 인한 영향이라 예측된다.

Table 2. GNSS chipset 2D positioning results (horizontal error) (unit: m).

| Variable           | Samsung (Galaxy s10e) | Xiaomi (Mi 8) |
|--------------------|-----------------------|---------------|
| Mean               | 1.41                  | 1.52          |
| Standard deviation | 0.72                  | 0.77          |
| RMSE               | 1.59                  | 1.71          |

Table 3. Samsung/Xiaomi smartphones GNSS chipset performance.

|         | GPS |    | Galileo |    |     |     | GLONASS |    |    | QZSS |    |    |    | BeiDou |    |    |    |
|---------|-----|----|---------|----|-----|-----|---------|----|----|------|----|----|----|--------|----|----|----|
|         | L1  | L2 | L5      | E1 | E5a | E5b | E6      | G1 | G2 | G3   | L1 | L2 | L5 | L6     | B1 | B2 | B3 |
| Samsung | ●   |    |         | ●  |     |     |         | ●  |    |      | ●  |    |    |        | ●  |    |    |
| Xiaomi  | ●   |    | ●       | ●  | ●   |     |         | ●  |    |      | ●  |    | ●  |        | ●  |    |    |

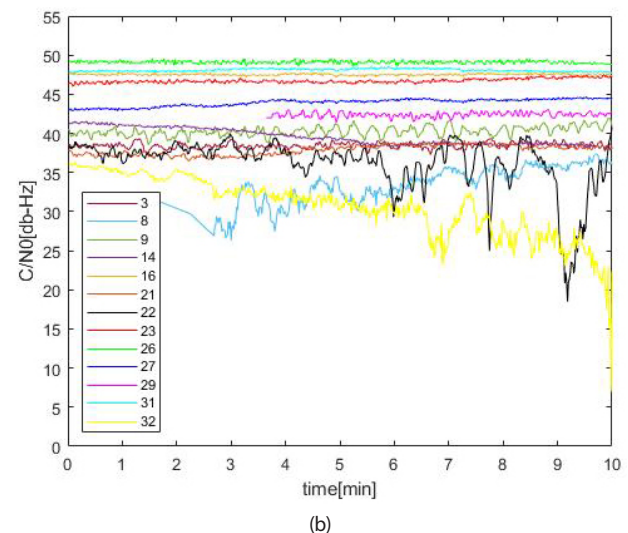
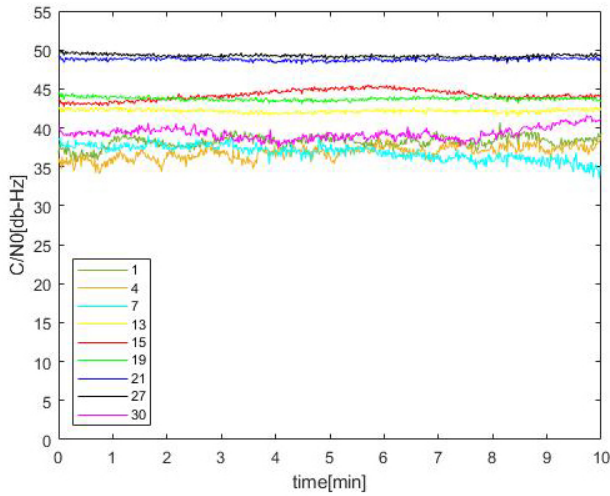
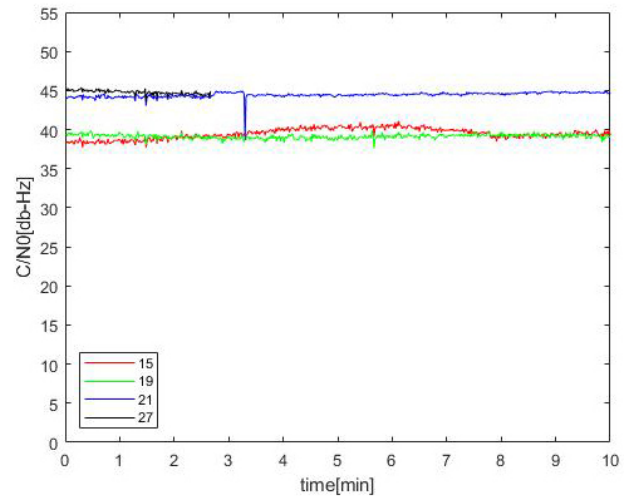


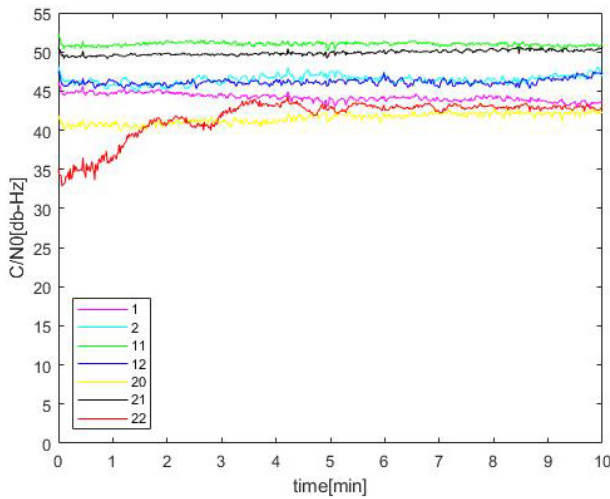
Fig. 3. GPS L1  $C/N_0$ . (a) Samsung, (b) Xiaomi



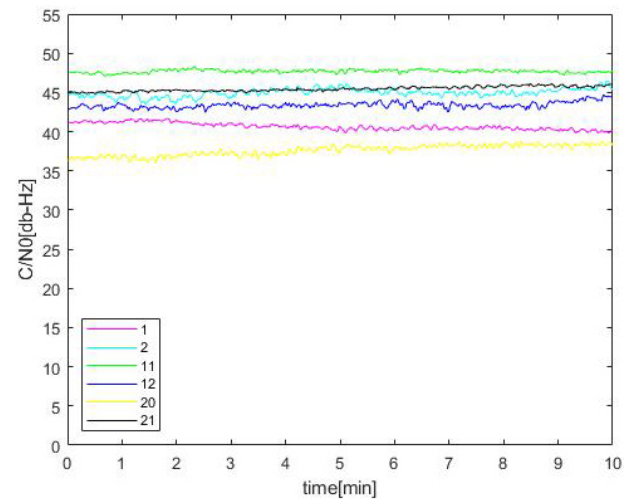
(a)



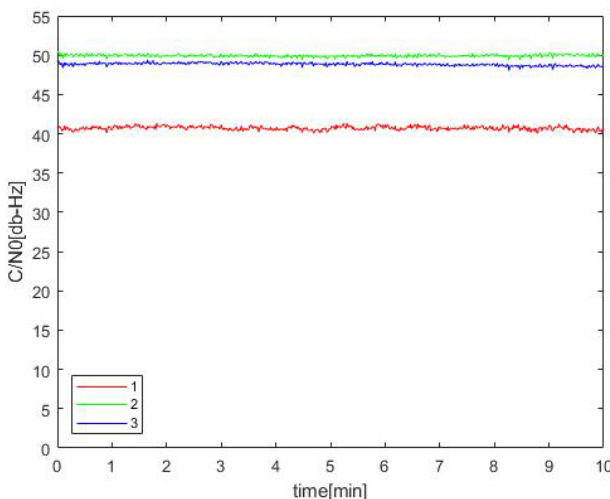
(b)

Fig. 4. Galileo E1  $C/N_0$ . (a) Samsung, (b) Xiaomi


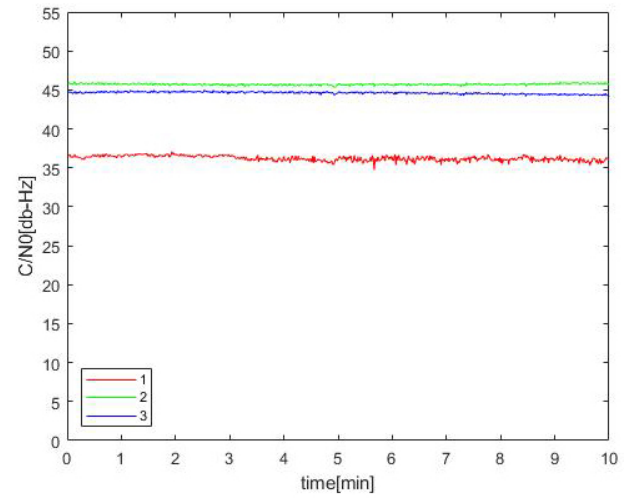
(a)



(b)

Fig. 5. GLONASS G1  $C/N_0$ . (a) Samsung, (b) Xiaomi


(a)



(b)

Fig. 6. QZSS L1  $C/N_0$ . (a) Samsung, (b) Xiaomi

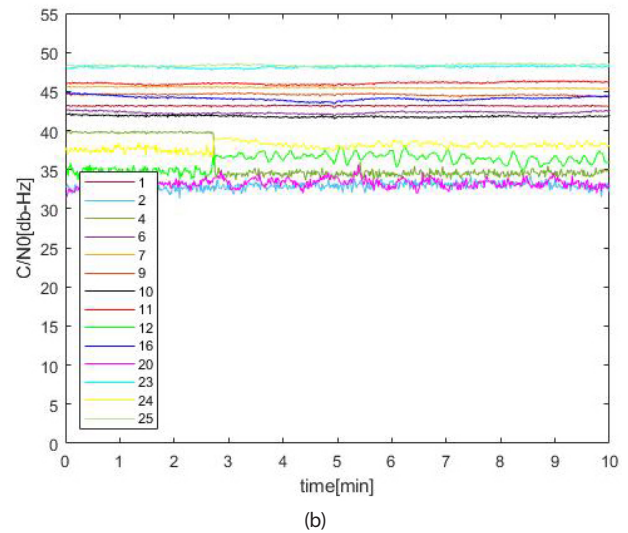
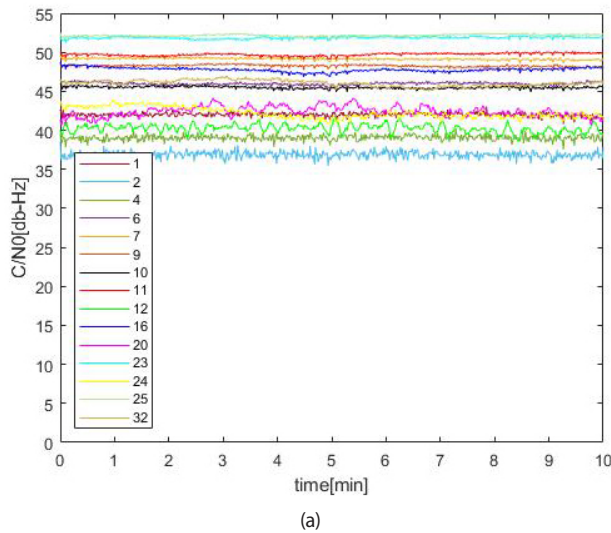
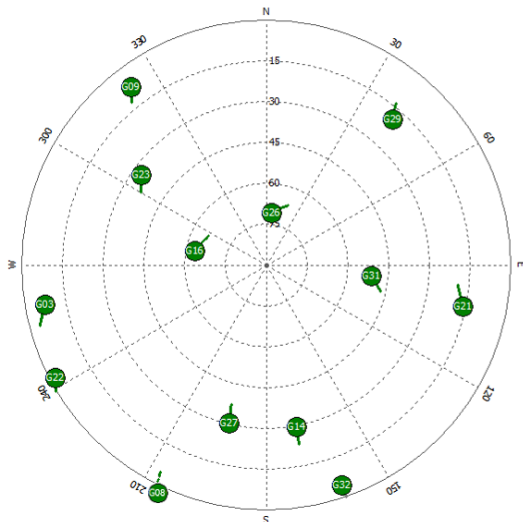
Fig. 7. BDS B1  $C/N_0$ . (a) Samsung, (b) Xiaomi

Fig. 8. Sky plot of GPS satellites during the data collection.

Fig. 4에서 Galileo 경우 삼성이 샤오미 보다 위성의 가시성과 신호의 안정성이 좋은 것을 확인할 수 있고 신호 대 잡음비 평균은 GPS와 마찬가지로 삼성이 샤오미 보다 약 3 dB 높은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에서 GLONASS 경우 위성의 가시성은 삼성과 샤오미의 결과가 비슷하나 삼성이 한 개의 위성 신호를 추가적으로 수신하는 것을 알 수 있다. 하지만 추가의 위성에 대한 신호 대 잡음비는 초기에 안정적이지 않다. 신호 대 잡음비 평균은 삼성이 샤오미 보다 약 3 dB 높은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서 QZSS 경우 위성의 가시성은 삼성과 샤오미의 결과가 같았다. 반복실험을 수행하여 대부분 PRN 1~3의 3개의 위성이 잡히는 것을 확인할 수 있었다. 신호 대 잡음비 평균의 경우 삼성이 샤오미 보다 약 4 dB 높았고, 삼성과 샤오미 모두 실험 시간 동안 같은 경향으로 신호가 안정적으로 들어오는 것을 확인할 수 있다.

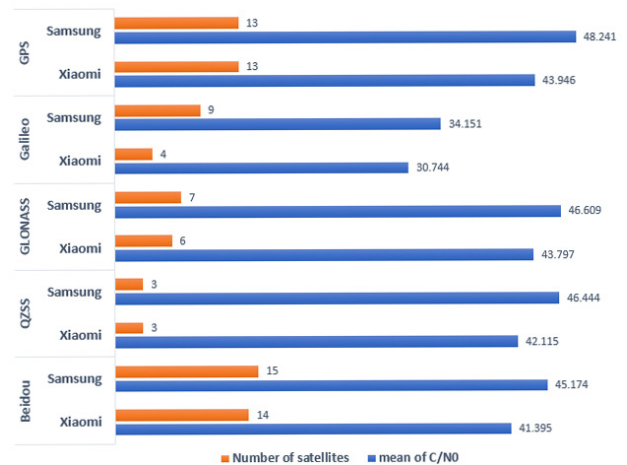
Fig. 9. GNSS chipset  $C/N_0$  and visibility results.

Fig. 7에서 BDS 경우 위성의 가시성은 삼성과 샤오미의 결과가 비슷하다. 수신하는 위성의 수를 보았을 때 다른 위성에 비해 가장 많은 위성의 신호가 잡히는 것을 확인할 수 있다. 이는 다른 GNSS에 비하여 더 많은 궤도 및 위성으로 이루어지는 BDS 특성 및 최근 중국의 공격적인 연구개발 진행으로 실제 신호를 방송하는 위성의 수가 많아졌음을 의미한다. 신호 대 잡음비의 경우 삼성이 샤오미 보다 높은 것을 확인할 수 있고, 신호가 좀더 안정적으로 들어오는 것을 확인할 수 있다.

이상을 종합하면 모든 GNSS 위성에 대하여 삼성이 샤오미에 비해 가시위성수 및 신호 대 잡음비 결과가 약간 우수함을 확인할 수 있다. 특히 신호 대 잡음비의 경우 삼성이 샤오미에 비하여 3 ~ 5 dB 정도 우수함을 확인할 수 있다. 종합적으로 비교한 가시 위성수와 신호 대 잡음비 평균은 Fig. 9에 도시하였다.

## 2.3 RFI 성능

GNSS 칩셋을 이용하여 항법해를 도출할 경우 지상과 먼 거리



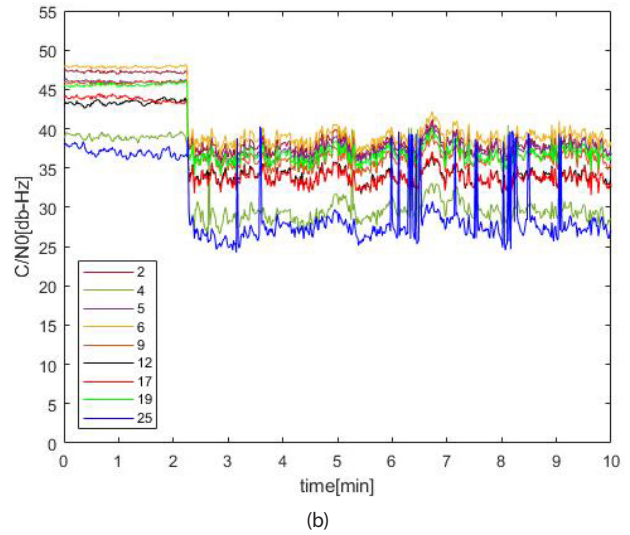
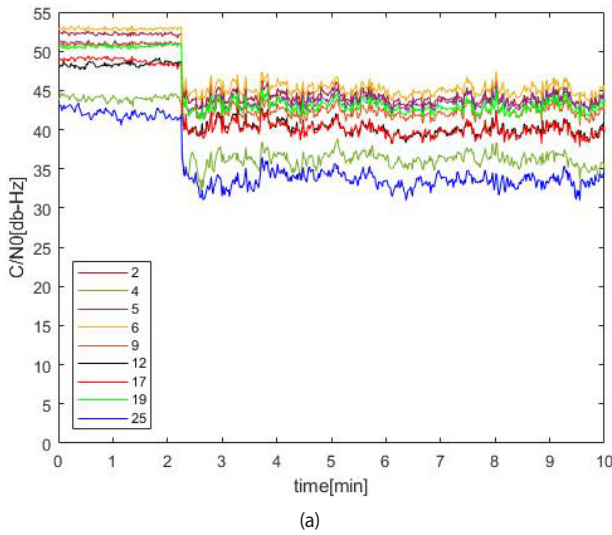


Fig. 10. GPS RFI results. (a) Samsung, (b) Xiaomi

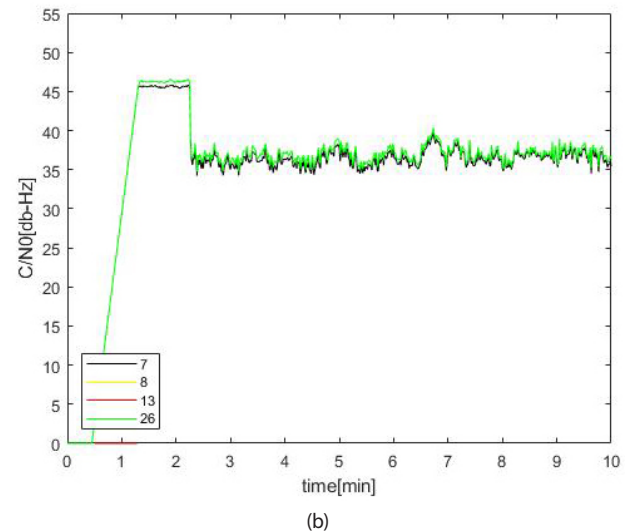
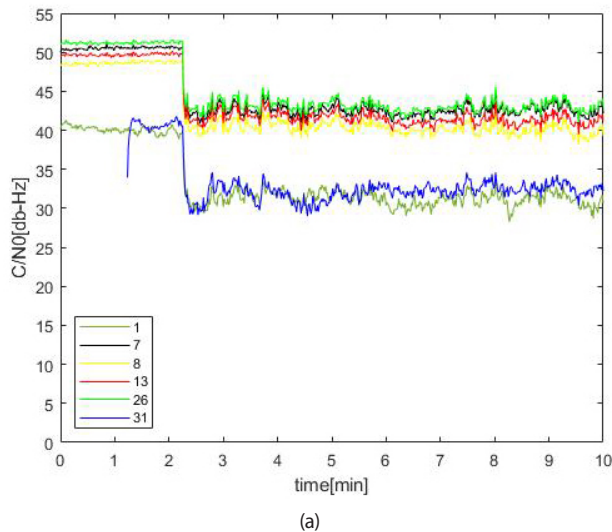


Fig. 11. Galileo RFI results. (a) Samsung, (b) Xiaomi

에 있는 위성으로부터 신호를 받기 때문에 지상의 수신기에 도달하는 위성 신호는 상대적으로 미약하다. 따라서 시스템적으로 GNSS는 전파 간섭이 있을 경우 매우 취약해지고 위성 신호를 수신하고 추적하는 것이 매우 어렵거나 불가능 해진다. 또한 민간 국내외 학계에서 다양한 전파교란 사례들이 보고되고 있으며, 특히 국외는 개인휴대용 재밍 장치를 장착한 트럭으로 인한 국가핵심시설이 마비되는 상황이 발생했었다. 이러한 전파교란 요소들은 앞으로 꾸준히 증가할 것으로 전망된다. 따라서 전파 간섭이 있을 경우 삼성과 샤오미 스마트폰의 신호 대 잡음비가 어떠한 양상으로 변화 되는지 확인하기 위해 RFI 성능 실험을 진행하였다.

Jammer을 외부에서 실험하는 것은, 주변의 GNSS 이용자에게 피해를 줄 수 있기 때문에 법령상 제약한다. 따라서, 측위 실험에서 기존 안테나로 사용했던 open sky 환경에 설치된 안테나 신호를 전파 차폐 상자 내에서 다시 송신해주는 re-radiator를 이용

하였다. 실험은 10분 동안 진행되었으며, 실험 시작 후 약 2분부터 신호간섭을 인가하여 실험을 수행하였다. 신호간섭을 인가하기 위하여 개인휴대형 USB 타입 초소형 개인 휴대 장치를 이용하여 가까운 거리에서 L1 CWI 재밍 신호를 방사하였다. 실험에서 사용한 초소형 USB 타입 PPD는 전원이 인가되면 약 30 m 반경의 GNSS L1 대역 신호에 대한 강력한 재밍 신호를 발생하는 장치이다. 따라서 Fig. 1의 실험환경에서 알 수 있듯 두개의 스마트폰과 재머와의 거리 차이가 존재하지만 이는 cm 수준의 차이로 재머가 두 스마트폰에 동일한 영향을 미친다 가정할 수 있다. 또한, 재밍 신호의 세기를 조절하는 기능이 없는 이유로 도명체를 이용하여 PPD 장치를 감싸는 형태로 적절히 재밍 신호의 세기를 전파차단 박스내에서 조절해 가며 실험을 수행하였고 RFI 재밍의 외부 방사를 최대한 억제하였다. 이에 따른 결과는 Figs. 10 ~ 14과 같다.

RFI 실험 결과 신호 대 잡음비 성능 실험과 같은 결과로 삼성

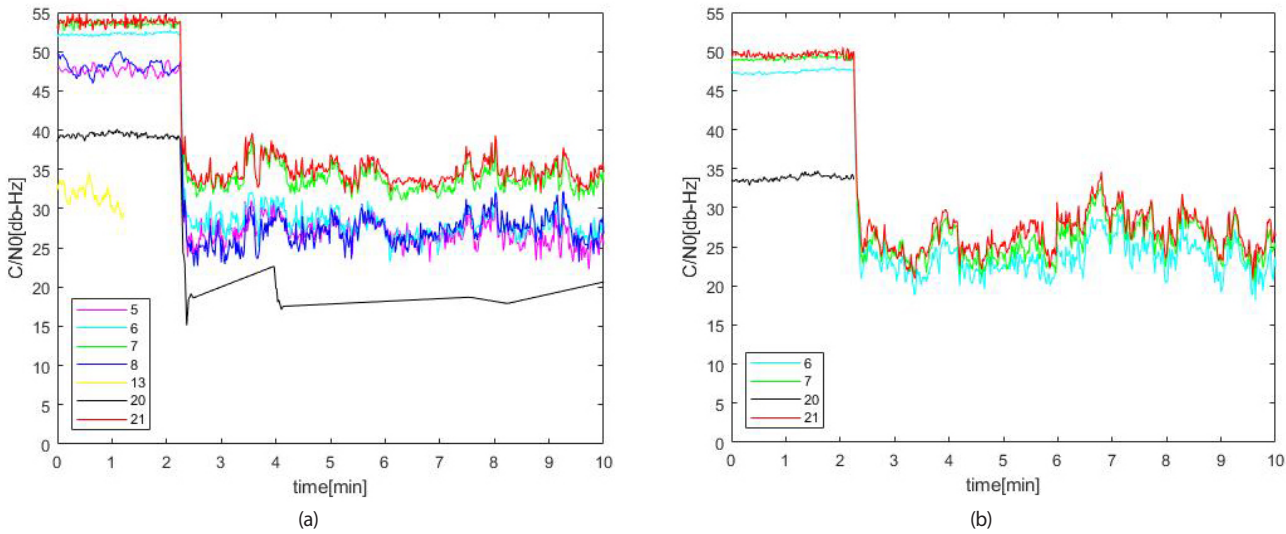


Fig. 12. GLONASS RFI results. (a) Samsung, (b) Xiaomi

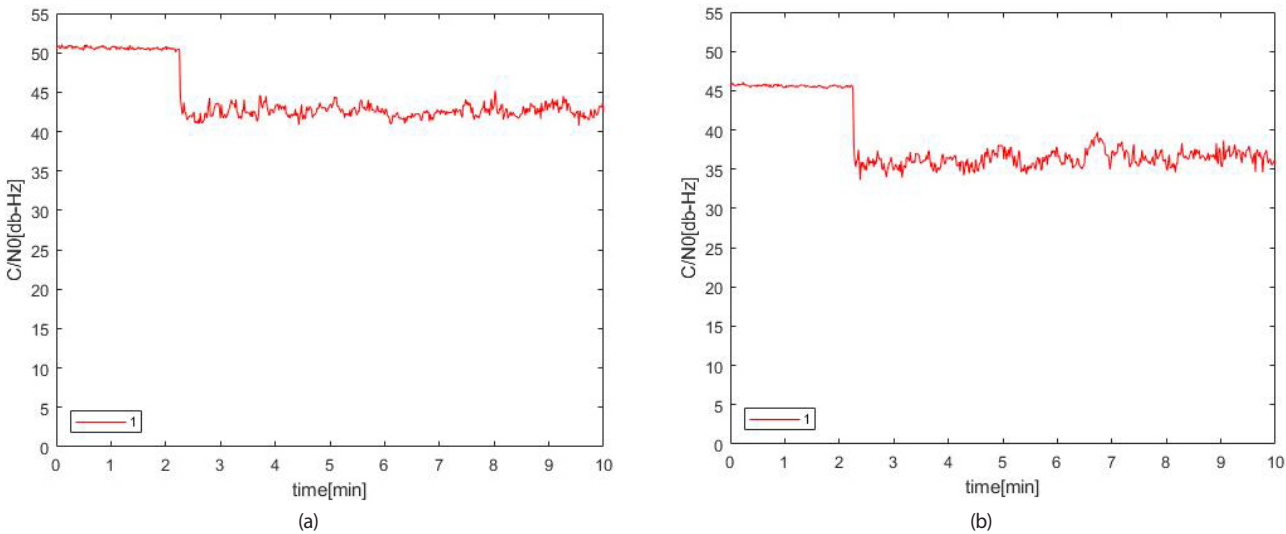


Fig. 13. QZSS RFI results. (a) Samsung, (b) Xiaomi

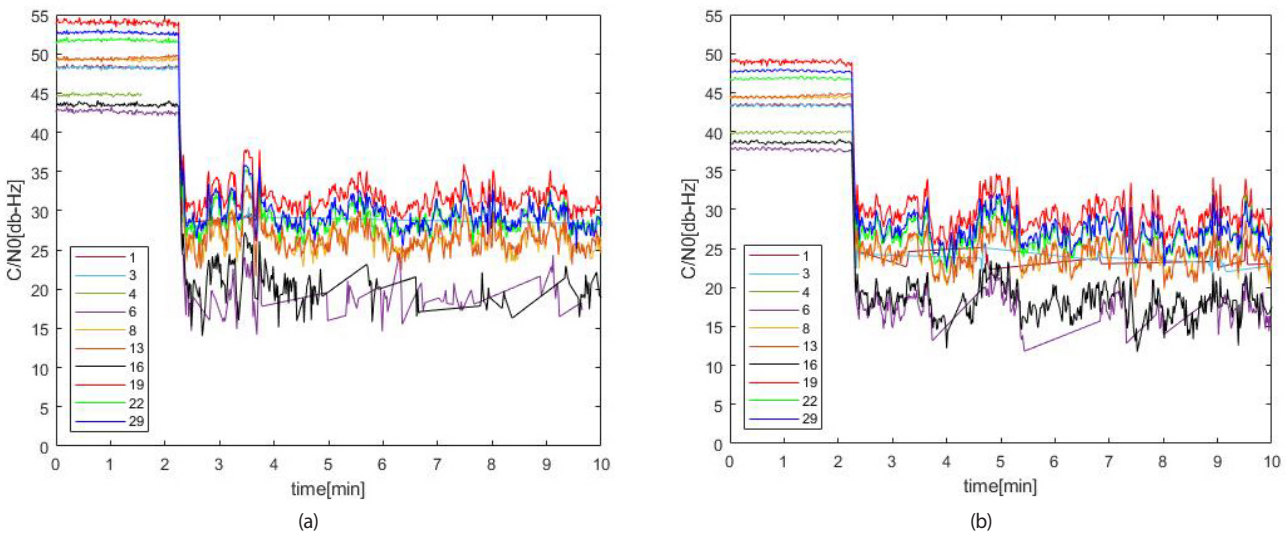


Fig. 14. BDS RFI results. (a) Samsung, (b) Xiaomi



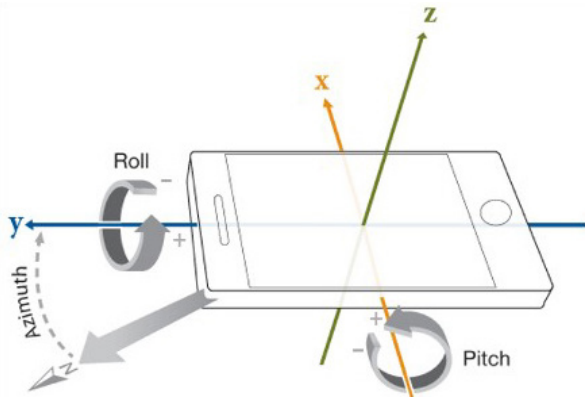


Fig. 15. x-y-z axis configuration of smartphone IMU.

이 샤오미에 비해 가시위성수 및 신호 대 잡음비 결과가 우수함을 확인할 수 있다. 실험 시작 약 2분 후 재밍이 인가 됐을 때는 삼성과 샤오미 모두 신호 감쇄가 있었다. GPS, Galileo, QZSS는 삼성과 샤오미 모두 10 dB 정도 신호 감쇄가 있었고, GLONASS와 BeiDou는 20 dB 이상의 큰 신호 감쇄가 있었다. 재밍을 인가했을 때 삼성과 샤오미 모두 비슷한 경향으로 신호 감쇄가 있었으며 감쇄 정도는 위성 항법 시스템에 따라 다소 차이가 있음을 확인할 수 있다.

### 3. IMU 센서 성능 실험

IMU 센서는 가속도계와 자이로스코프와 같은 관성센서의 측정값 출력과 이를 처리하여 항법해를 제공한다 (Qian et al. 2013). 제공된 가속도와 각속도는 적분을 통하여 항법정보로 변환된다. 하지만 위치를 구하는 과정에서 적분에 의해 오차가 지속적으로 누적되고 이는 측정 초기의 항법해에 대해서는 비교적 정확한 결과를 제공하지만 시간이 지날수록 오차가 누적됨으로써 정확도가 매우 감소되는 특성이 있다. 단, 주변환경의 영향을 많이 받지 않아 위성신호가 잠시 차단되는 경우 GNSS 칩셋의 한계점을 보완할 수 있다. 일반적으로 한계점을 보완하기 위해 칼만필터를 이용해 도출한 GPS/INS 통합 항법해를 사용하고 있는데 이때 IMU센서 자체의 성능 파악은 칼만필터를 구성하는데 있어 유용할 수 있다. 이러한 이유로 현재의 거의 대부분 스마트폰은 GNSS 칩셋과 초저가 MEMS IMU를 동시에 탑재하여 결합하는 방식을 채택하고 있다. 단, 스마트폰에 탑재되는 IMU는 항법에 사용할 수 있는 등급의 것이 아니며, 주로 스마트폰의 손 떨림 방지와 같은 기타기능을 지원하기 위함이다. 따라서 본 논문에서는 정적환경과 동적환경에서 획득한 IMU 데이터를 통해 두 스마트폰의 센서 자체 성능만을 파악하였다. 실험에 사용되는 삼성과 샤오미 스마트폰의 IMU 3축을 Fig. 15에 도시하였다.

#### 3.1 정적 성능 실험

IMU 측정 데이터를 획득하기 위한 실험 환경은 Table 4와 같다. 두 대의 스마트폰을 같은 환경에서 기울임이 없도록 수평으

Table 4. IMU sensor experimental test environment.

| Parameters       | Static test                                             | Dynamic test               |
|------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------|
| Accelerometer    | STM-15932 (Samsung Galaxy s10e)                         | Qualcomm 257 (Xiaomi Mi 8) |
| Gyroscope        | STM-1 (Samsung Galaxy s10e)                             | Qualcomm 257 (Xiaomi Mi 8) |
| Platform         | Samsung (Galaxy s10e) & Xiaomi (Mi 8) Mobile MATLAB APP |                            |
| Data rate        | 10 Hz                                                   |                            |
| Average velocity | -                                                       | 10 km/h                    |

로 설치한 후 움직임이 없는 상태로 1분 30초동안 측정치 데이터 로깅을 수행하였다. 로깅 된 데이터는 측정치 추출에 활용한 안드로이드 앱의 유닉스 시간(Unix time)으로 0.1초(10 Hz)마다 저장된다. 단, 정확하게 0.1초 마다 데이터가 로깅 되는 것이 아니기 때문에 정확한 시각동기를 위하여 보간을 통해 데이터를 후처리 하였다. 후처리 된 데이터는 정확히 0.1초 간격의 가속도와 각속도 출력을 가지며 이에 따른 정적 환경 실험 데이터는 Fig. 16과 같다. 가속도와 각속도 모두 정적 환경에서 실험하였지만 지속적으로 짧은 주기의 진동 또는 잡음 특성을 가지는 것을 알 수 있다. 가속도 z축의 경우 삼성의 결과가 실제 값에 가깝지만 샤오미 보다 잡음 오차가 심한 것을 볼 수 있고 전체적으로 모든 값에 대하여 삼성에 비해 샤오미의 잡음오차가 덜 포함된 것을 확인할 수 있다. 이는 두 스마트폰에 탑재된 센서 칩셋의 성능 차이 또는 샤오미의 경우 내부 저역 필터를 활용하여 측정치의 출력 값을 평활화 하는 것으로 판단된다. 삼성과 샤오미 모두 잡음오차는 바이어스 오차 특성을 보이며, 가속도의 x, y축의 경우 삼성은 0.05 m/s<sup>2</sup>, 샤오미는 0.1 m/s<sup>2</sup>로 샤오미가 좀 더 심한 바이어스 오차 특성을 보인다. 자이로의 경우도 유사한 경향을 보이며 이는 IMU 각속의 정렬 오차로 보인다. 위치정보를 도출할 때 효율적인 추정 및 제거 기법을 사용하지 않은 경우 지속적으로 큰 영향을 끼칠 것으로 예상되며, 이러한 센서 바이어스 오차는 항법 필터부에서 제거 가능하다.

#### 3.2 동적 성능 실험

IMU만으로 도출한 위치결과의 분석을 위하여 평균 10 km/h 속도로 임의의 궤적으로 이동해 가며 동적 실험을 수행하였다. 실험 환경은 Fig. 17와 같다. 차량의 위쪽에 두대의 스마트폰을 수평하게 설치한 후 Fig. 17b와 같이 임의의 궤적을 주행하며 실시하였다. 인하대학교 주차장에서 실험을 하였으며 가로 약 45 m, 세로 약 66 m의 직사각형 궤적을 그리며 실험하였다. 동적 실험에서의 3축 가속도 및 3축 자이로의 출력은 Fig. 18에 나타내었으며, 정적 환경의 데이터와 마찬가지로 후처리를 통해 시각동기를 수행하였다. 스마트폰에 탑재되는 초저가 IMU의 경우 GNSS와 통합 항법이 필수이며, 이 경우 GNSS 항법해의 성능에 좌우된다. 본 논문은 스마트폰에 탑재되는 IMU 자체의 성능분석에 관심을 가지므로 GNSS/IMU 통합 항법은 수행하지 않았다. IMU 단독 항법의 경우 단기간에 오차가 발산하므로 항법해로 사용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 IMU 측정치에 대한 분석만을 수행한다. 정적 환경에서와 마찬가지로 오차가 지속적으로 포함되어 있는 것을 확인할 수 있었고 샤오미가 삼성에 비해 값이 평활화 되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 전체적으로 샤오미가 삼성에 비해 센서의 반응속도가 느린 것을 확인할 수 있는데 이는 앞서 정

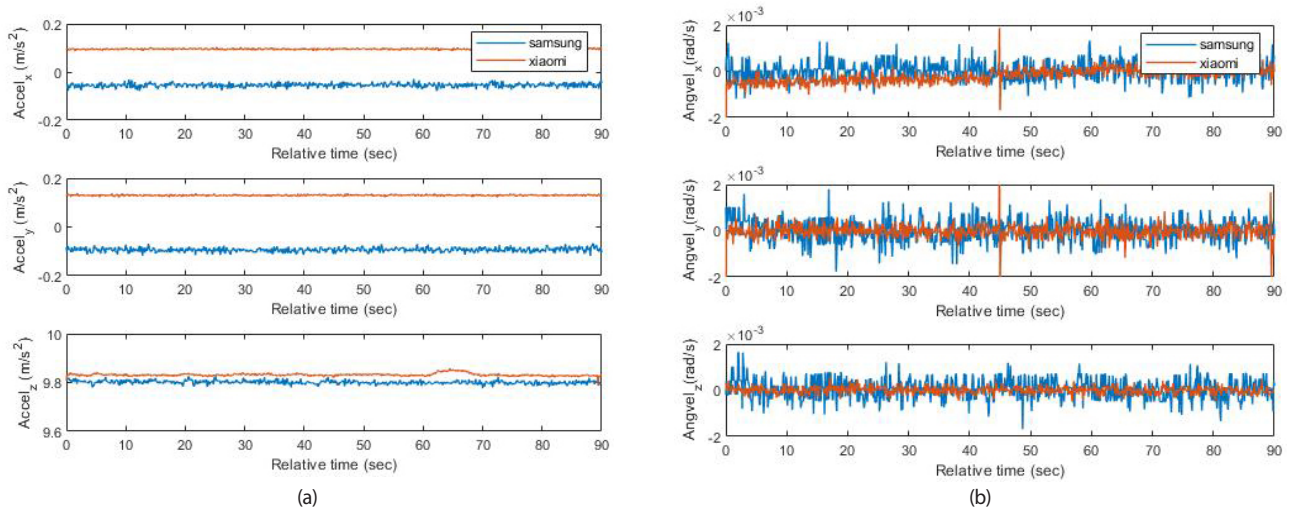


Fig. 16. Static test results: Samsung/Xiaomi IMU data. (a) Acceleration, (b) Angular velocity



Fig. 17. IMU dynamic test. (a) Experimental test set up, (b) Experimental driving path

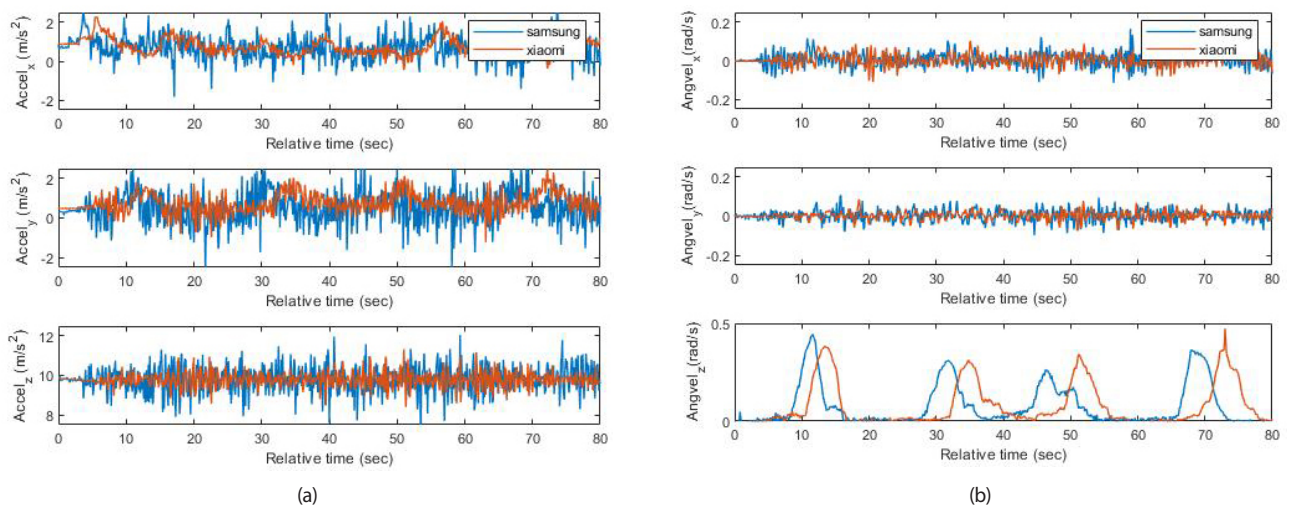


Fig. 18. Dynamic test results: Samsung/Xiaomi IMU data. (a) Acceleration, (b) Angular velocity



적환경의 결과에서도 예상했듯이 내부 저역 필터를 거쳐 출력되면서 값의 출력이 늦어지는 현상이거나 측정치 추출에 활용안 드로이드 앱의 시각동기부 오류 등의 사유로 짐작된다. 이는 각 속도의 z축에서 삼성과 샤오미의 반응 속도 차이를 보면 쉽게 알 수 있으며, 샤오미가 삼성보다 약 0.033초 늦음을 확인할 수 있다.

#### 4. CONCLUSION

본 논문에서는 현재 시장에서 출시된 삼성(Galaxy s10e)과 샤오미(Mi 8) 스마트폰에 내장된 GNSS 칩셋과 IMU 센서를 이용하여 정적 및 동적 환경에서 출력치를 획득하고, 이를 후처리 하여 스마트폰 내장 센서 모델에 따른 성능을 비교하였다.

GNSS 칩셋 성능 실험은 측위, 신호 대 잡음비, RFI 성능에 대하여 수행하였다. 측위 성능의 경우 단일 주파수 대역만을 사용하여 항법해를 도출하였고, RMSE 결과 삼성의 경우 1.59 m, 샤오미는 1.71 m로 삼성이 샤오미 보다 12 cm 수준으로 더 좋은 정확도의 결과를 가졌다. 이는 신호 대 잡음비 성능에서 확인할 수 있듯 모든 위성항법시스템에 대하여 삼성이 샤오미의 신호 대 잡음비보다 약 3 ~ 5 dB 높았고, 가시 위성수가 같거나 많았던 것이 영향을 끼쳤다고 예상된다. 하지만 샤오미는 이중주파수 GNSS 칩셋인 Broadcom의 BCM47755를 탑재하였으므로 삼성과 다르게 GPS/Galileo/QZSS에 대해서 이중주파수를 제공한다. 따라서, 샤오미의 경우 이중 주파수를 이용하여 항법해를 도출할 경우 측위 오차를 감소시킬 수 있고 신호 대 잡음비 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 본 논문에서는 전파 간섭이 있을 경우 삼성과 샤오미 스마트폰의 신호 대 잡음비의 양상 변화를 확인하기 위해 RFI 성능 실험을 수행하였다. 실험 결과 삼성과 샤오미 모두 신호 간섭을 인가한 즉시 신호 대 잡음비가 감소하였고 스마트폰 모델에 따른 성능 차이는 크지 않았다. 단, 항법시스템에 따른 감소 정도가 다름을 확인하였는데 GPS, Galileo, QZSS는 약 10 dB의 신호 감쇄가 있었고 GLONASS와 BDS의 경우 약 20 dB의 큰 신호 감쇄를 가졌다.

IMU 센서 성능 실험은 정적환경과 동적환경에서 획득한 IMU 데이터를 통해 두 스마트폰의 센서 자체 성능만을 파악하였다. 실험 결과 삼성과 샤오미 모두 가속도 및 각속도의 데이터는 지속적으로 짧은 주기의 진동 또는 잡음특성을 가지는 것을 알 수 있고, 잡음오차는 바이어스 특성을 보였다. 전체적으로 삼성의 잡음오차가 크지만 샤오미가 좀 더 심한 바이어스 오차 특성을 보였다. 이때, 샤오미는 삼성에 비해 센서의 반응속도가 느린 것을 확인할 수 있는데 이는 두 스마트폰에 탑재된 센서 칩셋의 성능 차이 또는 내부 저역 필터를 거쳐 출력되면서 값의 출력이 늦어지는 것으로 짐작된다. 동적환경에서 획득한 각속도의 z축에서 삼성과 샤오미의 반응 속도 차이를 보면 쉽게 알 수 있으며, 샤오미가 삼성보다 약 0.033초 늦음을 확인할 수 있다.

#### ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 교육부가 한국연구재단을 통해 지원한 '이공학개인

기초연구지원사업'으로 지원을 받아 수행된 연구 결과임 [NRF-2017RID1A1B03031787].

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

S. Lee and J. -H. Won contributed to the design and implementation of the research, to the analysis of the results and to the writing of the manuscript. Conceptualization, S. Lee and J. -H. Won; methodology, S. Lee and J. -H. Won; software, S. Lee; validation, S. Lee and J. -H. Won; formal analysis, S. Lee; investigation, S. Lee; resources, S. Lee and J. -H. Won; data curation, S. Lee; writing—original draft preparation, S. Lee; writing—review and editing, S. Lee and J. -H. Won; visualization, S. Lee; supervision, J. -H. Won; project administration, J. -H. Won; funding acquisition, J. -H. Won.

#### CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

#### REFERENCES

- Anghileri, M., Paonni, M., Wallner, S., Avila-Rodriguez, J.-A., & Eissfeller, B. 2008, Estimating the time-to-first-fix for GNSS signals theory and simulation results, European Navigation conference (ENCNSS) Proceedings, Toulouse, France, pp.23-25.
- BROADCOM 2020, BCM47755 [Internet], cited 2020, available from: <https://www.broadcom.com/products/wireless/gnss-gps-socs/bcm47755>
- De, K. 2019, Samsung Galaxy S10 dual GPS support reportedly crippled in US models [Internet], cited 2020, available from: <https://piunikaweb.com/2019/04/05/samsung-galaxy-s10-dual-gps-support-reportedly-crippled-in-us-models/>
- DeviceSpecifications 2018, Xiaomi Mi 8 Review [Internet], cited 2018, available from: <https://www.devicespecifications.com/en/editor-review/4f1676/6>
- DeviceSpecifications 2019, Samsung Galaxy s10 Exynos Review [Internet], cited 2019, available from: <https://www.devicespecifications.com/en/editor-review/d1fc9b/6>
- Grabowski, J. C. 2012, Personal Privacy Jammmer: Locating Jersey PPDs Jamming GBAS Safty-of-Life Signlas [Internet], cited 2020, available from: <https://www.gpsworld.com/personal-privacy-jammers-12837/>
- Jung, G. M., Choi, W. S., Han, K. Y., Seo, D. G., & Yeo, J.



- Y. 2011, LSB paradigm Shift and Service Trends by smartphone, *Information & communications magazine*, 28(7), 59-68
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2005, *Understanding GPS Principles and Applications*, 2nd ed (Artech House, Inc.: Massachusetts).
- Lee, S. B., Ji, G.-H., & Won, J. H. 2019, Experimental Tests to Assess Navigation Performance of Low-Cost GNSS Chips and IMU Sensors Embedded on Smartphones, *Proceeding of ISGNSS2019*, Oct 29-Nov 1 2019, Jeju, Korea, pp.403-406.
- Lu, Y., Ji, S., Chen, W., & Wang, Z. 2018, Assessing the Performance of Raw Measurement from Different Types of Smartphones, In *Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)*, Sep 24-28 2018, Miami, Florida, pp.304-322. <https://doi.org/10.33012/2018.15881>
- Martí, E., García, J., & Molina, J. M. 2014, Navigation capabilities of mid-cost GNSS/INS vs. smartphone: Analysis and comparison in urban navigation scenarios, *17th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, 7-10 July 2014, Salamanca, Spain, pp.1-7.
- Miralles, D., Levigne, N., Akos, D. M. Blanch, J., & Lo, S. 2018, Android Raw GNSS Measurements as the New Anti-Spoofing and Anti-Jamming Solution, *Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)*, September 24-28, 2018, Miami, Florida, pp.334-344. <https://doi.org/10.33012/2018.15883>
- Qian, J., Ma, J., Ying, R., Liu, P., & Pei, L. 2013, An improved indoor localization method using smartphone inertial sensors, *Proceeding of Int. Conf. Indoor Positioning Indoor Navigat (IPIN)*, Oct. 28-31, 2013, pp.1-7. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2013.6817854>
- Robustelli, U., Baiocchi, V., & Pugliano, G. 2019, Assessment of dual frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android smartphone and Positioning Performance Analysis, *Electronics*, 8, 91. <https://doi.org/10.3390/electronics8010091>
- Takasu, T. 2013, RTKLIB: Documents [Internet], cited 2013, available from: [http://www.rtklib.com/rtklib\\_document.htm](http://www.rtklib.com/rtklib_document.htm)
- Takasu, T. & Yasuda, A. 2009, Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB, in *Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS, ICC Jeju*, Korea, November 4-6, 2009, pp.4-6
- Warnant, R., Van De Vyvere, L., & Warnant, Q. 2018, Positioning with Single and Dual Frequency Smartphones Running Android 7 or Later, *Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)*, Miami, Florida, September 26, 2018, pp.284-303. <https://doi.org/10.33012/2018.15880>
- White Paper 2018, Using GNSS Raw measurements on Android devices [Internet], cited 2018, available from: <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/available-now-white-paper-using-gnss-raw-measurements-android-devices>
- Zhang, X., Tao, X., Zhu, F., Shi, X., & Wang, F. 2018, Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach, *GPS Solutions*, 22, 70. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0736-8>



**Subin Lee** is a M.S. student in the Department of Electrical Engineering and Computer at Inha University, Korea. She received B.S. degree from Inha University in 2020. Her research interests are GNSS signal design, and navigation.



**Gun-Hoon Ji** is a M.S. student in the Department of Electrical Engineering and Computer at Inha University, Korea. He received B.S. degree from Inha University in 2019. His research interests include GNSS receiver signal processing, navigation, and SSV.



**Jong-Hoon Won** received the Ph.D. degree in the Department of Control Engineering from Ajou University, Korea, in 2005. After then, he had worked with the Institute of Space Application at University Federal Armed Forces (UFAF) Munich, Germany. He was nominated as Head of GNSS Laboratory in 2011 at the same institute, and involved in lectures on advanced receiver technology at Technical University of Munich (TUM) since 2009. He is currently an associate professor of the Department of Electrical Engineering at Inha University. His research interests include GNSS signal design, receiver, navigation, target tracking systems and self-driving cars.