

## 한국 위성항법 강화를 위한 LEO PNT 적용 다중계층 항법 연구

원대희<sup>†</sup>, 이은성, 최철희

# Study on Multi-layer PNT through LEO PNT for Enhancing Korean Satellite Navigation

Daehee Won<sup>†</sup>, Eunsung Lee, Chulhee Choi

Satellite Navigation R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

### ABSTRACT

This study explores the applicability of Low Earth Orbit Positioning, Navigation, and Timing (LEO PNT) technology to enhance the performance of Korean satellite navigation systems. While LEO PNT technology is actively being developed worldwide, Korea has made significant advances in satellite navigation with the successful development and launch of the Korea Augmentation Satellite System (KASS) and the commencement of the Korean Positioning System (KPS) development. This paper proposes a configuration of a LEO PNT system to augment the performance of KASS and KPS, thereby improving the independence and accuracy of Korean satellite navigation systems. Utilizing simulation techniques, the study evaluates the performance of a PNT system using a small number of LEO satellites and analyzes the potential impacts and benefits of the LEO PNT on satellite navigation systems. It is anticipated that the results of this research can be used to suggest a direction for the development of Korean satellite navigation systems and will contribute to enhancing the international competitiveness of future satellite navigation technology.

**Keywords:** LEO, PNT, GNSS, multi-layer

**주요어:** 저궤도, 항법, 위성항법, 다중계층

## 1. 서론

Low Earth Orbit (LEO) 위성을 활용하여 Positioning, Navigation, and Timing (PNT) 정보를 제공하는 LEO PNT는 최근 몇 년간 급속한 발전을 이루었다. 기존 Medium Earth Orbit (MEO) 위성 기반의 Global Navigation Satellite System (GNSS) 신호가 도달하기 어려운 도심지, 극지방 등의 지역에서 서비스 제공 능력이 주목받고 있다. 특히 도심 지역에서 측위 정확도와 연속성을 향상시킬 수 있는 우수한 잠재력을 가지고 있다. LEO 위성의 높은 위성 고도각으로 인해, 건물이나 장애물에 의해 차단되는 GNSS 신호를 대체하거나 보완할 수 있다. 또한, LEO PNT는 기존 GNSS 신호 대비 높은 수신 강도로 재밍과 스푸핑에

대한 방어력을 강화할 수 있으며, 이는 국방 및 안보 분야에서도 중요한 의미를 가진다. 이러한 특징을 바탕으로 더욱 정확하고 안정적인 PNT 서비스 제공이 가능하며, 기존의 GNSS와 통합하여 정확도를 향상할 뿐만 아니라, 신호의 연속성과 가용성을 높이는 데 기여할 수 있다 (Ferre et al. 2022, Prol et al. 2022, Ries et al. 2023, Seok et al. 2023).

유럽의 경우 European Space Agency (ESA)는 GNSS를 보완하기 위해 LEO 위성군을 추가하는 다중계층 위성항법을 연구 및 개발 중이며, 5G/6G 통신과 연계하여 사물인터넷, 긴급서비스, 저지연 PNT 서비스 제공을 목표로 한다. 2025년 말 첫 LEO 항법 위성 발사를 목표로 유럽연합 내 14개 국가 50여개 업체가 개발에 참여하고 있다 (Menzione & Paonni 2023, Ries et al.

Received Nov 19, 2024 Revised Nov 26, 2024 Accepted Dec 02, 2024

<sup>†</sup>Corresponding Author E-mail: dhw@kari.re.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Table 1.** LEO-PNT system comparison (Eissfeller et al. 2024).

| System                 | Constellation (SVs/planes) | Orbits (altitude/inclination) | Frequency band                                | Funding concept          |
|------------------------|----------------------------|-------------------------------|---|--------------------------|
| IRIDIUM Next (USA)     | 66 / 6                     | 780 km / 86.4                 | L (1621-1626 MHz)                             | Private                  |
| APS-Globalstar (USA)   | 32 / 8                     | 1410 km / 52.0                | S (2483-2500 MHz)                             | Government               |
| OneWeb (UK, EU)        | 648 / 18                   | 1200 km / 86.4                | Ku (10.7-18.1 GHz, TBC)                       | Private & Government     |
| PULSAR (USA)           | 260 / 6 (TBC)              | 1000 km / 52.5                | L (1260 MHz), C (5020 MHz, TBC)               | Private & Research funds |
| TrustPoint (USA)       | ~300 / TBD                 | 500-800 km (TBD)              | C (~5000 MHz)                                 | Private (TBC)            |
| Synchrotube (France)   | TBD                        | TBD                           | L (TBD) to S (TBD)                            | Government               |
| Black-Jack (USA)       | 4 (20)                     | 550 km / 97.6                 | L, C & higher<br>optical: visible to IR (TBC) | Government               |
| Centispace (China)     | 1) 120 / 12                | 1) 975 km / 55.0              | CL1 (1569-1581 MHz)                           | Government               |
|                        | 2) 30 / 3                  | 2) 1100 km / 87.4             | CL5 (1170-1182 MHz)                           |                          |
|                        | 3) 40 / 4                  | 3) 1100 km / 30.0             |   |                          |
| GeeSpace/Geely (China) | 240 / TBD                  | 620 km / TBD                  | L-Band (TBC)                                  | Private                  |

2023, ESA 2024). 미국 XONA Space Systems의 PULSAR는 민간 주도 상업용 위성항법 시스템으로 2022년 첫 검증 위성을 발사하였고, 2025년 추가 발사 예정에 있다 (XONA 2024). 이외에도 Blackjack (Forbes 2024), Iridium (Kbidy et al. 2018, Iridium 2024), TrustPoint (Shannon 2022, TrustPoint 2024) 등의 LEO PNT 시스템이 있으며, 미국 정부와 민간 기업 주도로 개발되고 있다. 중국은 GNSS 보강 목적으로 CentiSpace (Xu et al. 2024, UNOOSA 2024) 개발 중이며, 2018-2022년에 총 6기의 위성을 발사하여 궤도 검증을 완료하였다. 2023년까지 100-110기 위성을 발사하여 최종 시험 및 완성을 목표로 한다. 이외에도 중국은 Geespace, SatNet 등의 LEO PNT를 개발하고 있다 (Seok et al. 2023, Eissfeller et al. 2024, Geely 2024). 2024년 6월에 개최된 UN International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG) 연례회의에서 다수 국가가 LEO PNT 연구 및 개발 동향을 발표하였다 (UNOOSA 2024). 주목할 만한 점은 중국, 일본을 비롯한 주변국에서 LEO PNT 연구를 활발히 수행한다는 것이다. 이에 대해 지속적으로 관찰하고 주의 깊게 살펴보면 국내 위성항법 연구 전략 수립 필요하다. Table 1은 LEO PNT의 대표적인 개발 사례를 보여준다.

전세계적인 LEO PNT 연구 및 개발의 진전에도 불구하고 국내는 아직 초기 연구 단계에 머물러 있다. 주로 보강항법 및 독자 위성항법 개발에 집중하고 있다. 현재 국내에서 집중적으로 진행되는 위성항법 시스템의 현황에 대해서 살펴보자. 우리나라는 Korea Augmentation Satellite System (KASS)를 성공적으로 완료하고, 2023년 말부터 Satellite Based Augmentation System (SBAS)의 Safety of Life (SoL) 서비스를 제공하기 시작했다. 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)의 기준을 충족하는 SBAS 서비스를 제공한다는 점에서 중요한 성과이다 (MOLIT 2024). KASS는 Global Positioning System (GPS)의 L1 신호를 보강하여 Approach Procedure with Vertical guidance-I (APV-I) 접근 서비스를 제공한다. 현재 서비스는 GPS L1 신호에만 국한되어 있어 다중 위성항법을 대상으로 서비스를 제공하지 못하는 한계가 있다. SBAS 선진국에서 추진 중인 Dual-Frequency Multi-Constellation (DFMC)로 시스템을 개량하여 서비스 대상 위성항법 신호의 확대와 성능 향상이 필요하다. 이와 더불어, 최근 한국형 위성항법시스템(Korean Positioning System, KPS) 개발에 착수하였으며 2035년 완성을 목표로 한다. 일반 서비스, 미터급 서비스, 센티미터급 서비스 등

다양한 항법 서비스가 제공될 것으로 기대된다 (MOSICT 2024). 다만, 정지궤도(Geostationary Orbit, GEO)와 경사궤도(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) 위성을 사용하는 지역 위성항법 시스템(Regional Navigation Satellite System, RNSS)의 특성으로 인해, 가시 위성이 고르게 분포하지 못하여 PNT 성능이 다소 제한될 것으로 예측된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 기존 KASS 및 KPS를 LEO PNT로 통합하여 다중 계층 항법 시스템을 구축한다면, 국내 위성항법 시스템의 견고성을 높일 수 있다. 국내 위성항법 시스템의 독립성과 정확성을 향상시킬 수 있으며, 국제적인 PNT 체계와의 호환성을 강화하는 데도 중요한 역할을 할 것이다. 따라서 LEO PNT를 도입하여 KASS와 KPS의 성능을 보강하고 국내 위성항법 시스템의 독립성을 강화하기 위한 연구는 국가의 기술적 자립과 안보를 위해 매우 중요하다.

이에 본 연구는 KASS와 KPS의 성능을 보강하고, 국내 위성항법 시스템의 독립성과 정확성을 향상시키기 위해 LEO PNT가 결합된 다중계층 LEO PNT 구성을 제안한다. 세부적으로는 국내 위성항법 기술 현황을 분석하고, LEO PNT 도입의 이점에 대하여 살펴본다. 이후, 국내 환경에 부합하는 LEO PNT 궤도 요소를 설계한다. 소수의 LEO 위성으로 KPS와 KASS를 통합하는 다중계층 LEO PNT를 구성하고, 시뮬레이션을 통해 PNT 성능과 구성 가능성을 확인한다.

제안하는 다중계층 LEO PNT는 우리나라가 전 세계 위성항법 시스템의 발전에 기여하고, 국내 산업의 경쟁력을 강화하는 동시에, 국민의 삶의 질을 향상시키는 데 중요한 역할을 할 것이다. LEO PNT의 성공적인 도입과 구축은 한국을 위성항법 기술의 선두주자로 만들 수 있으며, 이는 국제적인 협력과 기술 교류의 새로운 기회를 열어줄 것이다.

## 2. 연구 배경

최근 KASS의 성공적인 개발과 서비스 개시는 국내 위성항법 시스템의 발전에 큰 이정표를 세웠으며, 후속으로 KPS 개발에 착수함으로써 독자적인 위성항법 능력을 갖추는 길로 나아가고 있다. 2장에서는 국내 위성항법 시스템의 현황과 현재 해외에서 연구/개발되고 있는 LEO PNT의 기술적 특징을 살펴본다.



Fig. 1. KASS system conceptual diagram (UNOOSA 2024).



Fig. 2. KPS system conceptual diagram (UNOOSA 2024).

**2.1 KASS 현황**

KASS는 위성기반 보강항법 시스템으로, GPS 신호의 정확도를 향상시키기 위해 개발되었다. 2014년 개발에 착수하였고, 2023년 말부터 SoL 서비스를 제공하기 시작했다. Fig. 1과 같이 국내에 분포한 지상 기준국에서 GPS 신호를 수신하고, 이를 기반으로 보정 정보를 생성하여 위성을 통해 전국에 방송한다. GPS 보정신호로 항공기의 정밀 접근이 가능하므로, KASS는 항공 안전과 효율성을 크게 향상시키는 중요한 기술이다 (MOLIT 2024). KASS는 국제민간항공기구의 최신 기준에 부합하도록 지속적으로 업데이트되어, 전 세계적인 항공 안전 표준을 선도하는 역할을 할 것으로 기대된다. 이와 같은 노력은 대한민국이 항공 분야에서 선진국 지위를 확고히 하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

현재 KASS는 다수의 위성항법 신호 중 GPS L1 신호만 서비스 대상으로 하고 있어, 다중 위성항법 시스템을 활용하지 못하는 한계가 있다. 다양한 위성 신호를 동시에 수신하여 항법 성능을 향상시킬 수 있는 DFMC로의 개선이 시급하다. 차세대 KASS에서는 이러한 기술적 한계를 극복하고, 다양한 위성 신호를 통합하여 더욱 정밀하고 안정적인 항법 서비스를 제공할 수 있도록 시스템을 개량해야 한다.

**2.2 KPS 현황**

한국형 위성항법 시스템인 KPS는 한반도와 주변 지역에 위성항법 서비스를 제공하고 국가적 차원에서 독립적인 항법능력을 확보하려는 목적으로 시작되었다. Fig. 2와 같이 정지궤도 위성 3기와 경사궤도 위성 5기를 포함하여 총 8기의 위성으로 구성될 예정이며, 이를 통해 일반 서비스부터 센티미터급까지 다양한 정밀도의 항법 서비스를 제공할 계획이다. KPS의 성공적인 구축과 운영은 한국의 항법 독립성 뿐만 아니라, 자율주행차, 드론, 스마트 시티, 정밀 농업 등 4차 산업혁명의 핵심 인프라가 될 것이다. 이를 통해 국가적인 차원에서의 안정적인 PNT 정보체계 확보는 물론, 국민 생활의 질 향상에도 기여할 것이다 (MOSICT 2024, UNOOSA 2024).

KPS는 미국, 러시아, 유럽, 중국 등이 운영하는 전지구 위성항법 시스템과는 달리, 한반도와 주변 영역에 초점을 맞춘 지역 위성항법 시스템이다. KPS는 지역 위성항법 시스템이 갖는 기술적 도전과제를 안고 있다. 한반도 지역의 사용자 기준으로 북쪽 하

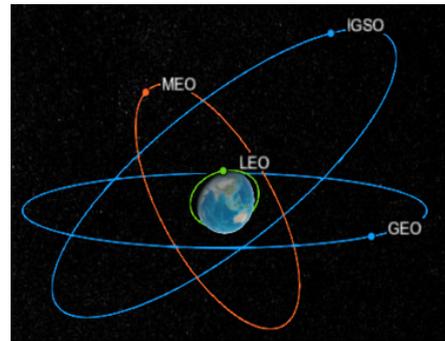


Fig. 3. Comparison of GNSS satellite orbits.

늘에서는 가시 위성이 확보되지 않아 KPS 단독 항법 수행한다면 성능이 일부 제한될 것으로 예상된다. 이를 극복하기 위해 추가적인 위성 배치나 기술적 개선이 필요하다.

**2.3 LEO PNT 현황 및 기술적 특징**

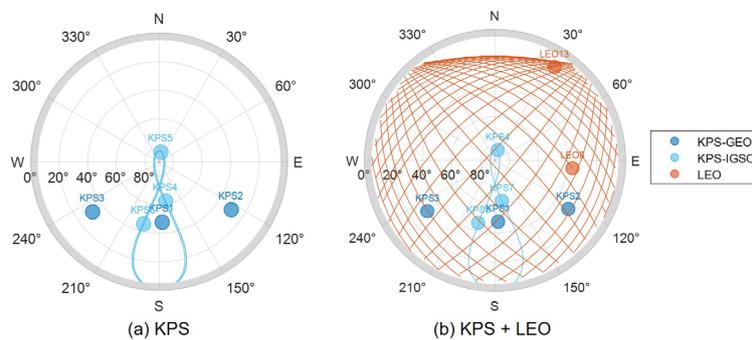
LEO PNT는 기존의 위성 시스템에 의존하는 PNT 기술의 한계를 극복하는 연구로, LEO 위성을 활용하여 GNSS의 가용성과 정확성을 향상한다. Fig. 3과 같이 LEO 위성은 기존 GNSS 대비 지표면에 더 근접하여 낮은 전력으로 높은 수신 강도를 확보할 수 있고 통신 지연을 낮춘다. 또한 저궤도 위성의 빠른 기하학적 변화는 다중경로 오차를 감소시키고 도심 지역에서의 GNSS 신호 단절 문제를 개선할 수 있다. 이러한 기술적 진보는 다양한 LEO PNT 활용 방안으로 나타났다. 기존 통신 위성 신호를 활용하는 signal of opportunity, 통신 위성 신호를 일부 변경하는 fused LEO PNT, 순수 PNT 목적의 purposed built LEO PNT 등의 새로운 접근 방식을 가능하게 했다. 이는 GNSS와 차별화된 LEO PNT의 특징을 강조하며, 도심 환경에서의 항법 정확도 및 안정성 확보에 기여할 것으로 기대된다 (Ferre et al. 2022, Prol et al. 2022, Seok et al. 2023).

**2.4 국내 위성항법 개발 방향**

우리나라는 KASS 정식 서비스를 시작하였고 더불어 KPS 개발에 착수하였다. 여기에 LEO PNT를 보강하여 다중계층 항법 (GNSS/RNSS/SBAS + LEO PNT) 시스템을 구성하면 한반도 및

**Table 2.** Comparison of the GNSS project launch and system operation.

| Types of system | Country    | Year of project launch / Operation | Remarks      |   |
|-----------------|------------|------------------------------------|--------------|---|
| GNSS /RNSS      | GPS        | USA                                | 1973 / 1995  |   |
|                 | GLONASS    | Russia                             | 1976 / 1996  |   |
|                 | BeiDou     | China                              | 1994 / 2020  |   |
|                 | Galileo    | EU                                 | 1999 / 2020  | Development started about 50 years late                               |
|                 | QZSS       | Japan                              | 2003 / 2018  |   |
|                 | NavIC      | India                              | 2006 / 2018  |   |
|                 | KPS        | Korea                              | 2022 / 2035  |   |
| SBAS            | WAAS       | USA                                | 1996 / 2003  |   |
|                 | EGNOS      | EU                                 | 1996 / 2009  | 14 years behind as of the time of operation                           |
|                 | KASS       | Korea                              | 2014 / 2023  |   |
| LEO PNT         | Xona       | USA                                | 2019 / -     | Currently no operation system. 5 years apart from first project start |
|                 | FutureNAV  | EU                                 | 2022 / -     |   |
|                 | CentiSpace | China                              | 2018 / -     |   |
|                 | -          | Korea                              | Not Launched |   |



**Fig. 4.** Skyplot comparison between KPS alone and KPS+LEO.

주변지역에서 고품질의 위성항법 서비스를 제공할 수 있다. LEO 위성 기반의 KASS, KPS 감시체계 구성이 가능하고, GNSS 위성 궤도 및 시각 오차 추정 성능을 향상시켜 KASS와 KPS 운용 개선 효과를 얻을 수 있다.

Table 2는 위성항법 시스템의 개발 착수와 운용 시점을 비교한 표이다. 위성항법 선진국의 GNSS/RNSS 개발 착수 시점을 비교했을 때 약 50년, SBAS 운용 개시 기준으로 약 14년가량 늦다. 이에 반해 LEO PNT는 다소 짧은 약 5년가량의 시차가 존재한다. KASS, KPS가 해외 선진국 시스템에 비해 후발 주자지만, 최근 연구되는 LEO PNT에 연구 개발 역량을 집중한다면 국내 위성항법 환경에 최적화된 고유 시스템을 구축함으로써 해외 선진국 대비 위성항법 기술 격차 해소 및 세계적 경쟁력 확보가 가능할 것이다. 해외 연구 추세에 발맞추어 신속히 LEO PNT 연구에 착수하여 항법 연구의 다각화 및 신규 항법 기술을 발굴해야 하며, 나아가 국내 실정에 부합하는 핵심 항법 기술의 연구/개발에 자원을 투입하여 선진국 수준의 항법 기술력을 확보하려는 노력이 필요하다.

### 3. 국내 다중계층 LEO PNT 도입 분석

KPS, KASS와 LEO PNT로 통합하여 다중계층 항법을 구성함으로써 한국의 위성항법 기술을 세계적 수준으로 끌어올릴 수 있는 기회가 될 것이다. 이번 장에서는 국내 LEO PNT 도입의 이점

과 활용 시나리오에 대해 살펴본다.

#### 3.1 국내 위성항법 체계에 LEO PNT 도입 이점

KPS와 KASS로 구성된 국내 위성항법에 LEO PNT 도입은 한국의 위성항법 시스템에 혁신적인 변화를 가져올 것이다. 근본적으로 LEO 위성이 RNSS의 가시위성 배치 제약을 해소하여 PNT 성능을 향상한다. 또한 LEO 위성을 통한 GNSS 신호 감시는 지상 감시국에 비해 더 많은 위성을 동시에 감시할 수 있는 장점을 가지고 있다. GNSS 위성의 궤도 결정과 시각 오차 추정 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 이는 전체 위성항법 시스템의 신뢰성과 정확성을 높이는 데 기여할 것이다. 이번 절에서는 국내에 LEO PNT 도입의 이점에 대하여 살펴본다.

##### 3.1.1 국내 위성항법 독립성 강화

우리나라에서 KPS 위성 궤적을 skyplot으로 표현하면 Fig. 4a와 같다. 지상 사용자 관점에서 GEO 위성은 특정 위치에 고정되고, IGSO 위성은 경사각과 이심률에 의해 '8'자형 궤적을 그린다. 위성 궤도의 특성으로 인해 북쪽 하늘에 가시위성을 배치하는 것이 제한된다. 이에 반해 LEO PNT를 도입하면 Fig. 4b와 같이 LEO 궤적이 북쪽 하늘을 보완하여 가시위성 배치가 향상되어 PNT 성능이 개선된다. 이는 KPS, LEO 구성만으로 우수한 PNT 성능을 발휘할 수 있으므로 한국 위성항법 시스템의 독립성과 독

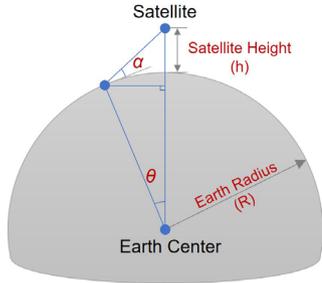


Fig. 5. Coverage geometry with respect to cap angle  $\theta$ , elevation angle  $\alpha$ , and altitude  $h$ .

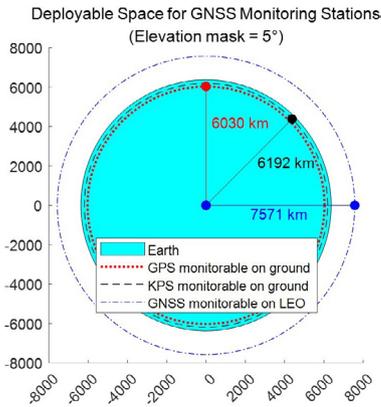


Fig. 6. GPS, KPS signal observable radius from ground and LEO satellites.

자 운용성을 강화하는 효과를 얻을 수 있다.

### 3.1.2 GNSS 감시국 우주영역 확장

GNSS 감시국을 국내에 설치할 경우, 최대 이격 가능한 범위는 강원 고성에서 제주 마라도로 직선거리 약 640 km이다. 이 경우 제한적인 범위의 GNSS 위성만 감시할 수 있어 PNT 성능을 충분히 확보하기 어려우므로 해외 감시국이 필수적이다. 이론적으로 최대 이격 가능한 지상 감시국은 Fig. 5와 Eqs. (1, 2)로 계산된다. 지구 반지름을  $R$ , 위성 고도를  $h$ 로 정의하고, 위성 신호가 수신 가능한 최소 위성 각도를  $\alpha$ 로 설정한다. 이때, 위성 기준으로 최대 이격 가능한 각도는  $\theta$ 이며, Eq. (1)과 같이 계산된다 (Ferre et al. 2022, Prol et al. 2022). Eq. (1)을 기반으로 두 감시국의 최대 이격 가능한 직선 거리는 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{R}{R+h} \cos \alpha \right) - \alpha \quad (1)$$

$$distance = 2 \cdot R \sin \theta \quad (2)$$

여기서  $\alpha=5^\circ$ 를 기준으로 이격 가능한 감시국의 최대 거리를 계산하여 Fig. 6으로 나타냈다. GPS 위성을 관측할 경우 12,061 km이고, KPS는 12,384 km이다. 이에 반해 1,200 km의 LEO 위성이 감시국 역할을 수행하는 것으로 가정하면, 이격 거리는 15,142 km로 범위가 1.22-1.25배 확장(국내 감시국 설치 대비 23.7배 개선)된다. 실제 운용 환경에서는 최대 이격 가능한 장소의 지리적/정

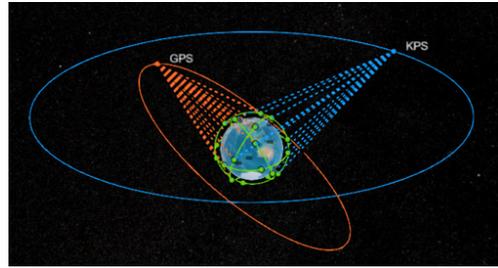


Fig. 7. Observation of GPS and KPS signals from LEO satellites.

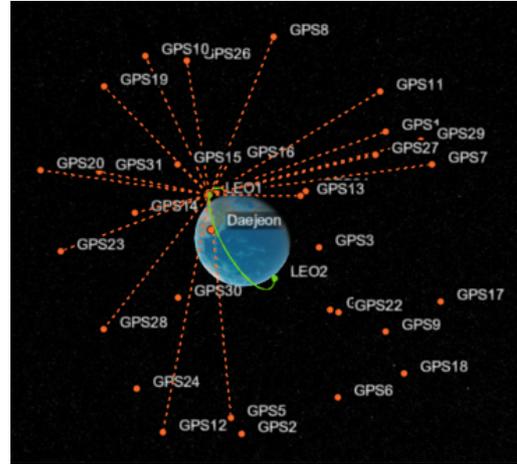


Fig. 8. Example of observable GPS satellites from a single LEO satellite.

Table 3. Number of observable GPS satellites.

|                  | Ground station | 1 LEO | 2 LEOs |
|------------------|----------------|-------|--------|
| Mean #satellites | 9.8            | 20.6  | 31     |
| Min. #satellites | 7              | 16    | 31     |
| Max. #satellites | 13             | 24    | 31     |

치적 상황이 고려되어야 하므로 이보다는 이격 거리가 짧아진다. LEO 위성을 GNSS 감시국으로 활용하면 이러한 제약없이 보다 광범위한 영역에서 신호 감시가 가능하다. 이를 통해 GNSS 궤도 추정, 위성 시각오차 추정이 가능하다. 결론적으로 Fig. 7과 같이 GNSS 감시국의 범위를 LEO로 확장하여 GNSS 및 KPS의 정밀 궤도 및 시각 추정을 가능하게 하므로 PNT 성능을 향상시킨다.

### 3.1.3 전지구 연속 감시 체계 확보

LEO 위성으로 GPS 신호를 Fig. 8과 같이 감시할 수 있으며, Table 3은 LEO 위성(1,200 km 가정)과 지상 감시국이 관측할 수 있는 GPS 위성의 수를 분석한 결과이다. 지상 감시국에서는 평균적으로 9.8개의 GPS 위성을 관측할 수 있는 반면, 단일 LEO 위성은 평균 20.6개의 위성을 관측할 수 있다. LEO 위성이 지상 감시국보다 두 배 이상의 많은 위성을 감시할 수 있으며, 두 개의 LEO 위성을 180도 간격으로 배치할 경우 모든 GPS 위성을 동시에 감시 가능하다. 지상 시스템과 LEO 위성 간의 연결성 확보를 위해 해외 지상국(1-2개) 또는 통신 위성을 활용한다면, 소수의 LEO 위성만으로도 모든 GPS 위성을 충분히 감시할 수 있다. 또

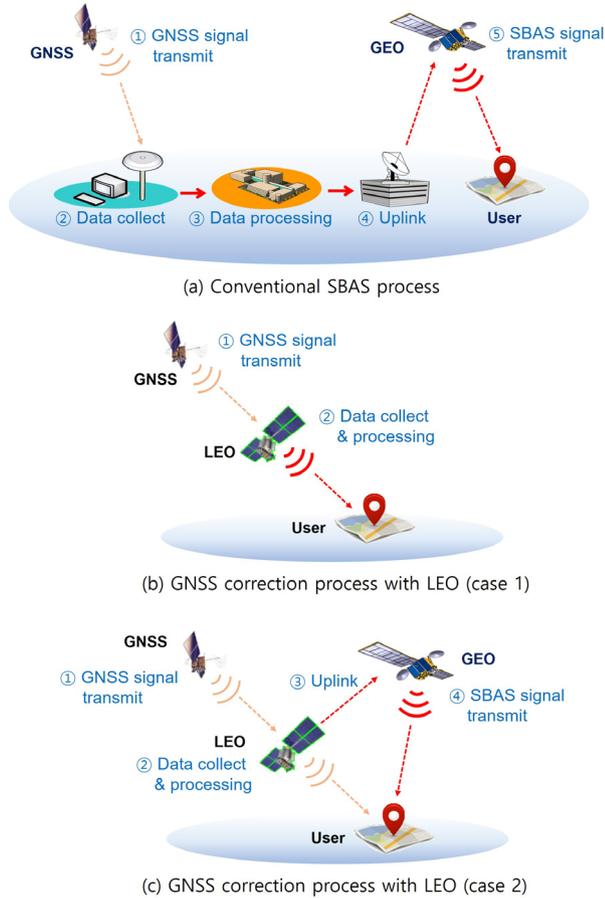


Fig. 9. GNSS correction process: (a) conventional SBAS, (b) new method utilizing LEO satellite, (c) the other case of new method utilizing LEO satellite.

한, 위성 자율 운용 기술과 위성 간 통신 기술(Inter Satellite Link, ISL)을 결합함으로써, LEO 위성을 이용해 SBAS 기준국의 역할을 수행하여 해외 GNSS 기준국 확장의 어려움을 극복할 수 있다 (Won et al. 2024). Li et al. (2019), Hauschild & Montenbruck (2021), Michalak et al. (2021)는 LEO PNT를 구성하는 저궤도 위성의 정밀 궤도 결정이 가능함을 확인하였으며, 이를 확장하여 LEO 위성을 기준국으로 활용 가능할 것이다.

3.1.4 새로운 GNSS 보강 개념 도입

복수의 LEO로 GNSS 위성 신호를 감시하면, 궁극적으로는 가시성 제약 없이 모든 GNSS 위성을 연속적으로 모니터링할 수 있으므로 위성 궤도 및 시각 오차 추정 성능을 향상시킬 수 있다. LEO 궤도 내에서는 대류층 오차, 다중경로 오차의 영향이 없고, 전리층 오차가 미미하므로 위성의 궤도와 시각오차 추정이 지상보다 용이하다. LEO에서 추정된 위성 궤도 및 시각 오차가 사용자에게 제공되고, 사용자가 이중 주파수 수신기를 사용하면 Precise Point Positioning (PPP) 구현이 가능하다. 이와 더불어, 해당 보정 정보는 SBAS DFMC 서비스의 핵심 정보로 신개념 SBAS 구현도 가능하다.



Fig. 10. Proposed LEO PNT utilization scenario.

LEO PNT의 도입은 SBAS의 경보 시간을 단축시키는 데도 중요한 역할을 한다. Fig. 9a는 기존의 SBAS 신호 처리 및 방송 단계를 나타낸다. GNSS 신호가 방송된 이후 기준국, 중앙처리국, 위성통신국, GEO 위성 및 사용자에 이르는 5단계를 거친다. 이에 비해 LEO 위성을 활용할 경우 Figs. 9b,c와 같이 "GNSS-LEO-User"로 신호 처리 과정을 대폭 단축시킴으로써, 위험 상황 발생 시 사용자에게 보다 신속하게 경보를 전달할 수 있다. 이는 항공기나 선박과 같이 실시간 무결성 정보가 필수적인 분야에서 Time-to-Alert을 단축하는 큰 이점을 제공한다. 더불어, 그동안 지상에서 수행하던 보정정보 계산을 LEO 위성에서 수행하게 되므로, 지상 시스템의 업무가 감소되어 시스템 운영에 집중할 수 있게 된다.

3.2 다중계층 LEO PNT 운용 개념

다중계층 LEO PNT는 GNSS(KPS 포함)와 LEO 위성을 통합하여 사용자에게 더욱 정밀하고 신뢰성 높은 항법 서비스를 제공한다. LEO 위성은 GNSS 신호를 수집하고, 위성 간 통신을 통해 정밀 궤도와 시간을 결정하며, 이를 기반으로 GNSS 오차 정보를 생성하여 사용자에게 제공한다. 사용자는 GNSS 신호와 LEO 위성에서 제공하는 보정 정보를 융합하여 보다 정확한 PNT 정보를 획득할 수 있다. Fig. 10은 LEO PNT 중심의 다중계층 운용 개념을 보여준다. 다음은 보다 세부적인 운용 흐름에 대해 기술한다.

- ① GNSS 신호 수신: LEO 위성은 GNSS 위성으로부터 신호를 수신한다. 이 신호는 위성의 궤도 및 시각 정보를 포함하며, LEO 위성은 이를 기반으로 초기 데이터를 수집한다.
- ② 상호 위성 링크(ISL)를 통한 데이터 교환: LEO 위성 간에 상호 위성 링크(ISL)로 각 위성은 수신한 GNSS 신호와 자체적으로 측정된 데이터를 다른 위성으로 교환한다. 이 과정을 통해 각 위성의 궤도 및 시각 정보가 공유된다.
- ③ 정밀 궤도 결정 및 시각 동기화: 상호 데이터 교환을 바탕으로 LEO 위성은 정밀 궤도 결정을 수행하며, 위성 간 시각을 동기화 한다. 이를 통해 각 위성의 위치와 시각 정보의 정확도가 높아진다.
- ④ GNSS 위성의 궤도 및 시계 오차 추정: LEO 위성은 수신한 GNSS 신호를 분석하여 GNSS 위성의 궤도 및 시계 오차를 추정한다. 이후 GNSS 신호의 정확도 및 신뢰성을 향상시킬 수 있는 보강 정보를 생성한다.
- ⑤ GNSS 보정 정보 및 LEO PNT 신호 방송: LEO 위성은 생

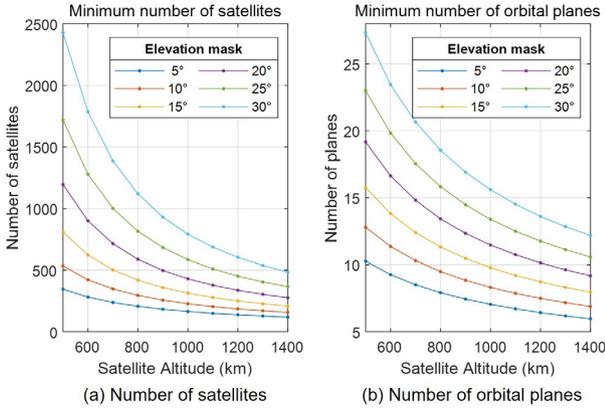


Fig. 11. Minimum number of satellites and orbital planes to ensure visibility of four satellites.

성된 GNSS 보강 정보와 LEO 궤도, 시각 정보를 포함한 PNT 신호를 사용자에게 방송한다. 이 신호는 사용자 수신기로 직접 전달된다.

- ⑥ 사용자 PNT 정보 활용: 사용자는 수신한 GNSS와 LEO 신호를 기반으로 자신의 PNT 정보를 계산한다. GNSS와 LEO의 통합된 데이터를 통해 사용자는 더욱 정밀하고 신뢰성 높은 PNT 정보를 얻을 수 있다.

이와 같은 다중계층 LEO PNT의 운용 개념과 흐름은 위성의 상호 통신 및 정밀한 데이터 교환을 통해 GNSS 신호의 보정 정보를 생성하고, 사용자가 이를 활용하여 더욱 정확한 항법 서비스를 받을 수 있도록 한다. 이를 통해 항법 시스템의 성능과 신뢰성을 극대화할 수 있다.

### 4. LEO PNT 구성 방안

현재 개발 중인 다수의 LEO PNT 사례는 수백기의 위성으로 독립적인 PNT 서비스 제공을 고려한다. 한정된 우주 궤도 자원의 평화적이고 효율적인 사용과 더불어, 중복 개발 방지, 위성 충돌 방지 등을 위해 소수의 위성으로 LEO PNT 구성이 적절하다. Fig. 11은 Prol et al. (2022)이 제시한 LEO PNT의 위성 고도와 elevation mask angle에 따른 최소 필요 위성 수와 궤도면 수를 보여 준다. 독립적인 LEO PNT 시스템을 구성하려면, 수백~수천기의 위성이 필요하며, 궤도 포화 및 충돌 확률 증가 이슈를 유발할 것이다.

항법위성의 적정 궤도를 선정하는 가장 중요한 고려 사항은 충돌 회피를 위한 위성 기동 최소화이다. 운영 비용 절감 및 위성 수명을 연장시키는 중요한 요소이다. 더불어 충돌 회피 기동은 방송되는 항법 위성의 궤도 변수의 변경 작업을 유발하고 이는 PNT 서비스의 가용성 저하로 이어지므로 궤도 설계가 중요하다. 이러한 관점에서, 위성 밀도가 낮고 안정적인 운용이 가능한 고도를 선택하는 것이 필요하다. 국내에서는 소수의 위성으로 KPS와 KASS를 통합하는 다중계층 LEO PNT 구성을 제안한다. 이번 장에서는 소수 위성으로 국내 다중계층 LEO PNT를 구성함에 있

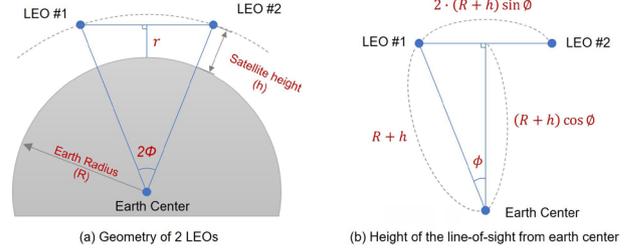


Fig. 12. Satellite geometry to calculate the height of line-of-sight vector of two adjacent LEO satellites.

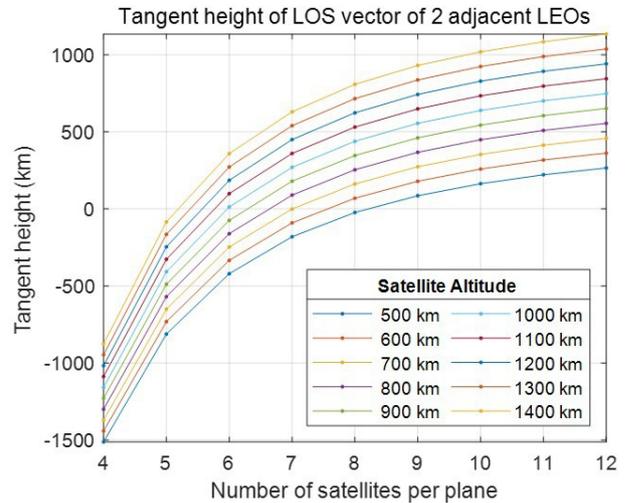


Fig. 13. Height of the line-of-sight vectors of two adjacent LEO satellites from the ground surface.

어서 적정 궤도 요소를 도출한다.

#### 4.1 위성 고도

위성의 고도는 낮을수록 전파 지연 및 감쇄에 있어서 이점이 있으나, 항법 위성 관점에서는 많은 수의 위성이 필요하여 일부 단점으로 작용한다. Table 1과 같이 현재 LEO PNT에서는 다양한 위성 고도가 고려되고 있다. 본 연구에서는 소수의 위성으로 국내 다중계층 LEO PNT 구성을 목표로 하고 있으므로 저궤도 중 높은 고도를 고려한다. 또한 지구 관측 및 통신 위성이 밀집된 1,000 km 이하의 고도를 회피하는 전략이 필요하다. 이러한 고려 사항을 바탕으로 해외 LEO PNT 개발 사례 중 높은 고도를 사용하는 OneWeb (2024)의 1,200 km 고도를 분석 대상으로 선정하였다. 위성 고도는 요구되는 항법성능과 개발 및 제작 비용 규모, 정책적 결정 등을 추가 고려한 연구를 통해 재검토가 필요하다. 현재는 이러한 정보가 제한되어 면밀한 검토가 불가하므로 해외 사례에 기반한 위성 고도로 선정하였다.

#### 4.2 단일 궤도면 내의 위성수

동일한 궤도면을 공전하는 위성은 위성 간의 간격이 일정하게

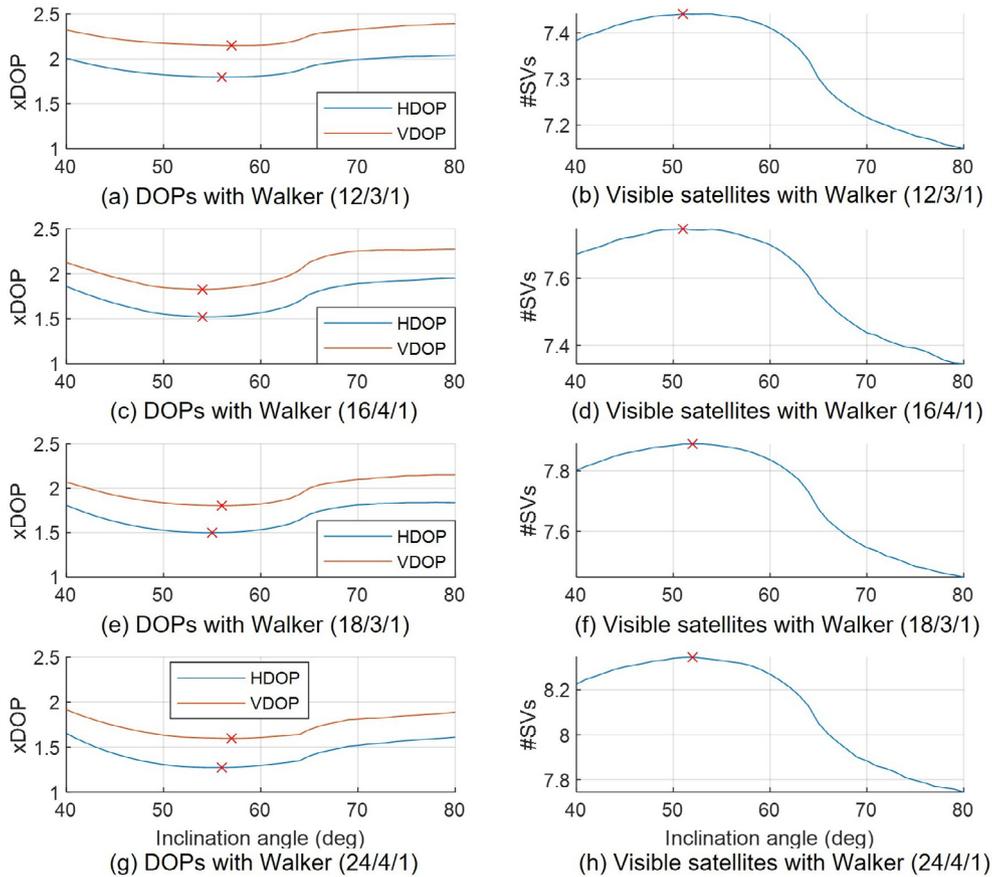


Fig. 14. DOPs and visibility analysis according to change of inclination angle.

유지되거나 그 변화가 작다. 이러한 특징은 ISL에 기반한 위성 궤도 및 시각의 상대 오차 추정에 있어서 유리한 조건으로 작용한다. 이를 위해 동일 궤도면 내에서 인접한 위성 간의 가시성 분석을 수행하였다. Fig. 12는 인접한 두 LEO 위성의 기하학적 관계를 나타낸다. 두 위성이 지구 중심과 이루는 각도의 1/2을  $\phi$ 로 정의하면, 위성 시선벡터의 지표면에서 높이( $r$ )는 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$r = (R + h) \cos \phi - R \tag{3}$$

위성이 500-1400 km 범위에 있고, 궤도면 내에서 위성들은 동일한 간격으로 분포한다고 가정하였다. 이때 궤도면 당 위성 수를 4-12개로 변경하며  $r$ 을 계산하면 Fig. 13의 분석 결과를 얻는다. 인접한 두 위성 간의 가시성 확보를 위해서는 궤도면 내에 최소 6개 이상의 위성을 배치해야 한다. 5개 이하의 위성을 배치할 경우, 모든 고도에서 두 위성 간의 가시성은 확보될 수 없다. 결과적으로 최소한 1100 km 이상의 고도에서 궤도면 내에 6개 이상의 위성이 필요하다.

결과 해석은 동일 궤도면 내에 위치한 위성 간의 가시성 확보에 한정되어 분석되었다. 동일 궤도면 내의 위성간 거리 제약 조건을 고려하지 않는다면, 다른 궤도면의 위성 간의 통신도 고려 가능하나 오차 추정 과정이 복잡한 단점이 존재한다.

Table 4. LEO visibility analysis according to orbital plane and number of satellites under the condition of 1,200 km LEO altitude, 55° inclination, and 5° elevation mask (P: partially visible, O: visible at least 1 satellite).

| # Planes | Number of satellites per orbital plane |   |   |   |   |   |   |    |  |  |
|----------|--|---|---|---|---|---|---|----|--|--|
|          | 3                                      | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |  |  |
| 2        | P                                      | P | P | P | P | P | O | O  |  |  |
| 3        | P                                      | P | P | P | P | P | O | O  |  |  |
| 4        | P                                      | P | O | O | O | O | O | O  |  |  |
| 5        | P                                      | O | O | O | O | O | O | O  |  |  |
| 6        | O                                      | O | O | O | O | O | O | O  |  |  |
| 7        | O                                      | O | O | O | O | O | O | O  |  |  |
| 8        | O                                      | O | O | O | O | O | O | O  |  |  |

### 4.3 위성 경사각 (Inclination)

위성 궤도면의 경사각에 대해서 살펴본다. LEO 위성으로 PNT 서비스의 최대 효과를 얻을 수 있도록 서비스 대상 지역에서의 Dilution of Precision (DOP)와 가시위성 수를 분석하였다. 한국 지역에 KPS와 LEO 위성이 운영된다고 가정하였고, 대전을 기준으로 위성 수와 궤도면 수를 변경하여 각각의 경우에 DOP와 가시위성이 최대가 되는 경사각을 찾았다. Fig. 14는 경사각 분석 결과를 보여주며, 경사각 55도 부근에서 DOP와 가시위성이 우수하게 나타났다. DOP는 55-57도 지점이 우수하였고, 가시위성은 51-54도 부근이 우수하였다. 해당 구간 내에서는 두가지 지표 모

**Table 5.** Orbital parameters for LEO PNT and KPS.

| Orbital parameter    | LEO PNT                            | KPS                |   |
|----------------------|------------------------------------|--------------------|---|
|                      |                                    | GEO                | IGSO  |
| Number of satellites | 24                                 | 3                  | 4   |
| Semi-major axis      | 7,515 km                           | 42,164 km          | 42,164 km   |
| Inclination          | 55°                                | 0°                 | 43°   |
| Eccentricity         | 0                                  | 0                  | 0.075   |
| Constellation        | 24 satellites,<br>4 orbital planes | 78°E, 128°E, 178°E | Right ascension of ascending node:<br>218°, 128°, 38°, 308° |

두 근소한 변화를 보였으며, 종합해 보았을 때 한국 지역에서는 55도의 경사각이 적절하다고 판단된다.

**4.4 최소 가시위성 확보를 위한 궤도면 및 위성 수**

LEO PNT를 운용함에 있어서, 가장 중요한 사항 중에 하나는 지상과의 연결성이다. 국내 지상국과 연결되어 LEO에서 수행한 GNSS 모니터링 정보를 제공해야 한다. 추가적으로 위치 정확도 관점에서 한반도의 북쪽 하늘에 가시위성 확보가 필요하다. 종합하면, 지상국 기준으로 최소 1개 이상의 위성이 관측되어야 한다. Table 4는 LEO 고도 1200 km, 경사각 55도, elevation mask 5도 기준에서 궤도면과 궤도면 내 위성수를 변경하여, 최소 1개 이상의 위성이 확보되는지 여부를 분석한 결과이다. 궤도면이 2-3개인 경우, 궤도면 당 최소 9개 이상의 위성이 확보되어야 지상에서 1개 이상의 LEO 신호를 수신할 수 있다. 궤도면당 8개 이하의 위성을 배치하면, 4개 이상의 궤도면이 확보되어야 가시성이 보장된다.

4.2절의 분석결과에서 궤도면 내에 6개 이상의 위성이 필요한 점을 고려했을 때, 최소 위성으로 구성 가능한 조합은 궤도면 2개와 궤도면 당 위성 9개(총 18개 위성)이다. 그러나 이 조합은 지상국 연결성은 보장하나 북쪽 하늘의 가시성 확보가 일부 제한된다. 궤도면 2개를 제외한 차순위의 최소 위성 조합은 4개 궤도면과 궤도면 당 위성 5개 배치이다. 이경우는, 4.2절의 단일 궤도면 당 최소 위성 수(6개)를 만족하지 못한다. 따라서 최적 조합은 4개 궤도면에 6개 위성을 배치(총 24개 위성)하는 경우이다. 이에 본 연구에서는 해당 조합을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다.

**5. 시뮬레이션 및 분석**

**5.1 시뮬레이션 구성 및 환경 설정**

앞서 도출한 LEO PNT 궤도 요소를 바탕으로 KPS, KASS를 사용하여 항법을 수행하는 것을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 기본적으로 KPS 단독 사용하는 경우와 제안하는 다중계층 LEO PNT 경우에 대하여 결과를 도출하였다. 시뮬레이션은 Mathworks 사의 MATLAB과 Satellite Communications Toolbox (MATLAB 2024)을 사용하여 구현하였다. LEO 궤도요소는 4장의 분석 결과를 사용하였고, KPS는 Choi et al. (2020)의 궤도요소를 사용하였다. 시뮬레이션은 24시간 동안 60초 간격으로 수행되었으며 세부 궤도 요소는 Table 5와 같다.

**Table 6.** Signal in space error assumption for KPS and LEO satellites.

| Parameter               | Value    | Remarks |
|-------------------------|----------|---------|
| Target constellation    | LEO, KPS | -       |
| Satellite orbit & clock | 2.9 m    | 1σ      |
| Pseudo-range            | 4.3 m    | 1σ      |
| Elevation mask angle    | 5°       | -       |

기본적인 위성 가시성과 DOP 시뮬레이션을 수행하고 위치 정확도를 추정하였다. 이때, LEO, KPS 항법 신호의 오차는 Table 6과 같다. Hofmann-Wellenhof et al. (2008)이 정의하는 GPS error budget을 기준으로 설정하였다. 오차는 세부 error budget을 통합하여 위성 오차와 의사거리 오차로 단순화하여 시뮬레이션을 수행하였다. 현재 LEO와 KPS 정확한 오차 모델이나 실측 데이터가 없어 문헌 상의 GPS 오차 통계치를 동일하게 적용하였다.

**5.2 시뮬레이션 결과 및 분석**

**5.2.1 위성 가시성 및 DOP 분석**

전지구를 5도 간격의 격자로 구성한 후 각 격자점에서 24시간 동안의 가시위성 수와 DOP의 평균값을 계산하였다. Fig. 15는 이 평균값을 지도에 표현한 결과이다. Fig. 16은 대전을 기준으로 24시간 동안의 가시위성과 DOP 경향을 보여준다. KPS 단독으로 사용하는 경우와 KPS, LEO를 통합한 경우로 나누어 결과를 도출하였다.

Fig. 15를 살펴보면, KPS 단독 사용시 필리핀과 인도네시아 부근에서 가시성과 DOP가 가장 우수하다. 우리나라의 지리적 위치와 RNSS의 궤도 특성으로 불가피한 결과이다. 이에 비해, 제안하는 다중계층 LEO PNT는 한반도 주변으로 가시위성 및 DOP가 개선되는 것을 확인할 수 있다. DOP 결과를 살펴보면, LEO 추가로 4개 이상의 가시위성을 확보 가능한 범위가 넓어져 서비스 영역이 확장되었다.

Fig. 16에서 국내 PNT 성능 개선을 확인할 수 있다. KPS의 경우, 북쪽 하늘에 가시위성이 부족하여 DOP가 다소 불량하다. GPS의 HDOP이 1-1.5 수준인 것에 비해 KPS의 경우 HDOP=2.42, VDOP=2.86으로 2배가량 크다. 이에 비해 제안하는 다중계층 LEO PNT는 DOP가 1/2 수준으로 감소하였다. 다만, LEO 가시위성이 북쪽 하늘에 없는 경우, 일시적으로 DOP가 크게 나타나며, 이 시점에서는 KPS 단독 항법 수준의 성능을 보였다. 이부분은 PNT 정보 도출과정에서 LEO의 도플러 측정치를 활용하거나 필터를 도입하면 개선 가능하다. 또는 궤도 요소를 미세 조정하여 북쪽 하늘의 가시성을 향상할 수 있다.

Fig. 17은 대전지역에서 LEO 가시성 및 가시위성 수를 나타낸

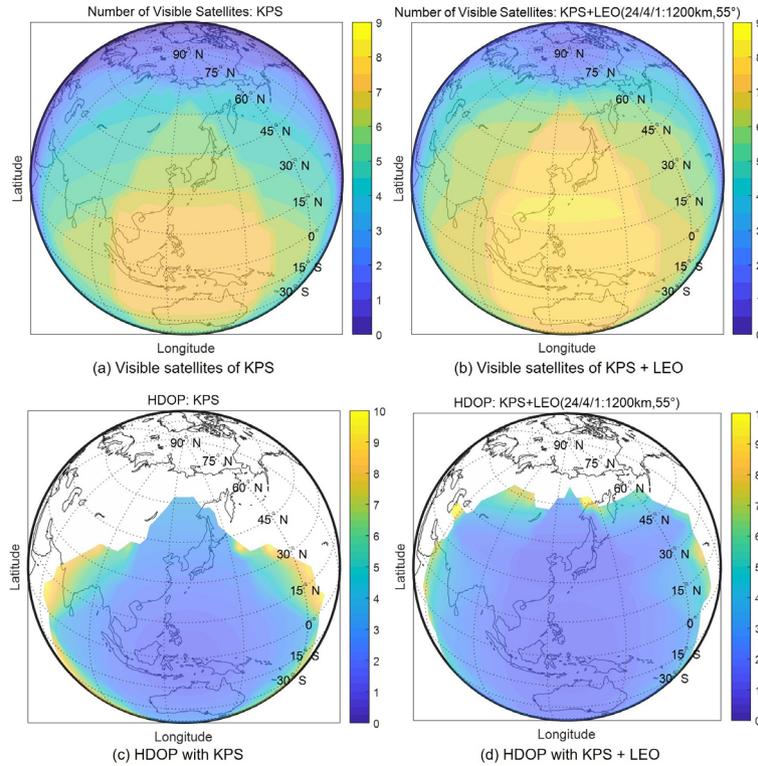


Fig. 15. Global view of satellite visibility and DOPs: KPS only (left) and KPS+LEO (right).

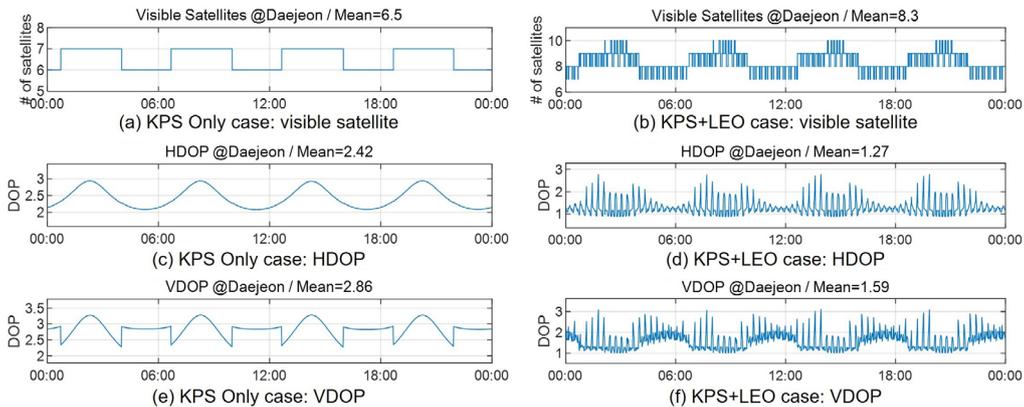


Fig. 16. Satellite visibility and DOPs comparison between KPS only and KPS+LEO cases.

다. Fig. 17a는 각 LEO 위성이 관측 가능한 시점을 보여주고, Fig. 17b는 시간 대별 가시위성 수를 나타낸다. LEO 위성은 1-3개가 관측되며 평균은 1.8개이다. 관측 가능한 시간은 최대 17분이며 평균은 14분이다. 모든 구간에서 항상 1개 이상의 LEO 위성을 관측할 수 있다. LEO 위성 간에 ISL로 통신이 가능하다면, 단일 지상국만으로 통신 단절 없이 LEO 위성군에 항상 연결될 수 있다. 지상 운용국을 최소 설치하여 운영이 가능하고, 해외로 GNSS 감시국을 확장하는 어려움을 해결하게 된다. 궁극적으로 지상국의 복잡성을 해소하며 운용 편의성을 크게 개선할 수 있다.

### 5.2.2 위치 오차 추정

Table 6에서 가정한 오차 모델을 기반으로 위치 오차 추정 성능을 시뮬레이션 하였다. Fig. 18은 KPS와 다중계층 LEO PNT의 위치 오차 추정 결과를 보여준다. KPS를 단독으로 사용하면 Fig. 2의 위성 배치 제약으로 북쪽 하늘의 가시위성 확보가 제한되어 남북 방향으로 오차가 크게 나타난다. KPS와 LEO PNT를 함께 사용하면 표준편차가 58% 수준으로 감소하였다. 본 시뮬레이션 결과는 KPS와 LEO 위성 신호의 정확한 오차 모델이 아니며, GPS 모델을 각 위성에 동일하게 적용하여 도출하였다. 이에 따

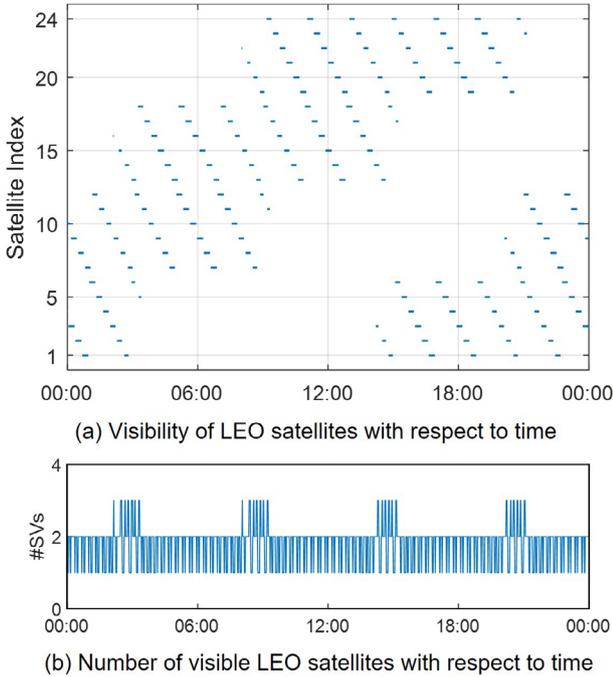


Fig. 17. LEO satellite visibility.

라 시뮬레이션 결과의 절대값 보다는 상대적인 개선 비율의 관점에서 해석하는 것이 바람직하다.

5.2.3 GNSS 감시 성능 분석

Fig. 19는 GPS 위성 1개를 국내 설치된 KASS 기준국으로 감시하는 경우와 LEO 위성으로 감시하는 경우에 대한 분석 결과이다. KASS 기준국은 국내에 조밀하게 배치되어 단일 GPS 위성과 이루는 기하학적 배치가 직선에 가까운 형태이다. Inverse DOP 개념으로 GPS 위성을 관측하면 HDOP은 수천, VDOP은 수만의 수치를 나타낸다. 이에 반해, Fig. 7과 같이 복수 LEO 위성으로 GPS를 관측하면 HDOP 평균이 약 2 수준으로 유의미한 값을 보인다. VDOP 평균이 약 27이나 지상 기준국 대비 획기적으로 개선된 수치이다.

지상 기준국으로 GNSS 신호를 감시할 경우, 관측 대상 위성이 제한적이고 위성의 운동에 따라 연속적인 관측이 불가능하다. 지상 기준국 분포가 제한되어 기하학적 배치가 불량하고 결국 DOP가 높아 위성 궤도 추정 오차가 불량 해진다. 이에 비해, 3.1절의 분석 내용과 같이 2개 이상의 LEO 위성을 확보하면 전체 GPS 위성의 연속적 감시가 가능하다. LEO 위성을 GNSS 감시국으로 활용하여 연속적인 GNSS 위성 관측이 가능하고, 동시에 넓은 감시국 배치가 가능하여 지상 대비 GNSS 감시 성능이 개선된다. 연속적으로 GNSS 신호 감시가 가능한 점은 KASS 시스템의 연속성과 가용성을 개선하는데 중요한 역할을 한다. 더불어, 국내에 한정적으로 배치된 기준국은 새롭게 관측되기 시작하는 위성의 보정정보를 제공하지 못하는 한계가 있으나, 제안하는 방법으로는 연속적인 신호 감시가 가능하여 초기 관측 위성에 바로 적용이 가능하다.

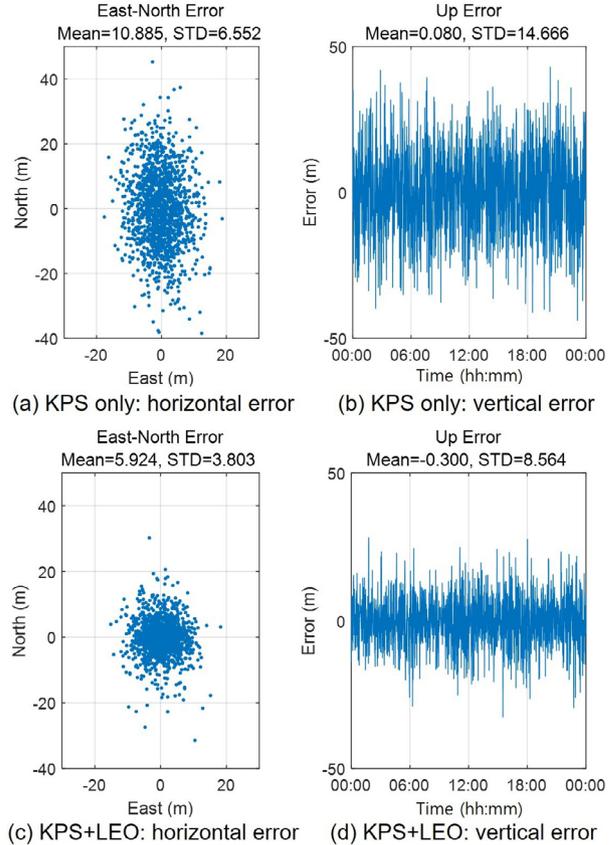


Fig. 18. Estimated position errors.

6. 논의 및 고찰

본 연구의 분석 및 도출된 결과를 바탕으로 고려사항을 정리하였다.

6.1 연구 결과 해석 및 향후 연구 방향

5장의 시뮬레이션 결과에서는 KASS 관점에서 향상되는 정량적 성능을 제시하지 못하였다. 제안하는 다중계층 LEO PNT 구성은 GNSS 감시 영역의 확장, 보강정보 생성 과정, 전파 단계의 단축 등 수치를 제시하기 어려운 방법적인 부분에서 개선이 이루어진다. 이에 따라, KASS 관점의 정량적 성능 분석이 제한되었다.

본 연구에서는 LEO 궤도 중심으로 다중계층 항법이 제시되었다. 우선적으로 궤도 시뮬레이션을 통해 시스템 구성 가능성을 검토하고 이후 임무 목적에 부합하는 주파수 선정 및 신호 설계가 진행되어야 한다. 이러한 흐름 상, 주파수와 신호 설계를 언급하는 것은 다소 제한적이므로 해당 내용을 본 논문에 포함하지 않는다.

다중계층 LEO PNT 궤도 설계 시에 LEO 위성의 궤도는 원궤도로 가정하였다. 한반도 지역의 PNT 성능 향상을 위해서는 타원 궤도가 유리하다. 현재 위성의 고도를 약식으로 1200 km 고도의 원궤도로 가정한 상황에서 세밀한 궤도 요소의 조정은 향후에 수행할 계획이다. 국내 최적화된 서비스 목표와 궤도 제한사항이

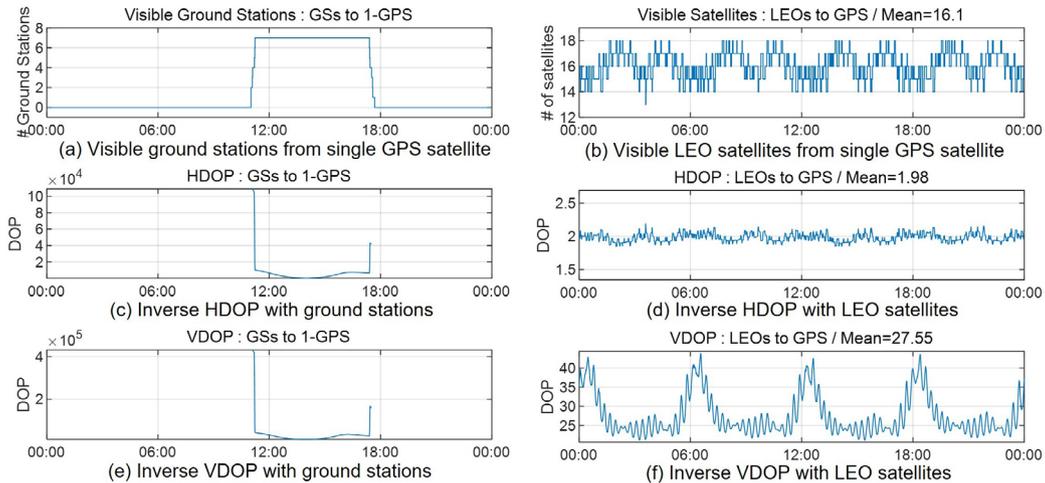


Fig. 19. Analysis of performance indexes of one GPS satellite as viewed from ground monitoring stations and LEO satellites.

구체적으로 정의된 후 위성 수, 고도, 궤도면, 경사각과 함께 이심률이 고려되어야 한다.

항법 도약을 위한 중요한 발판을 마련해야 한다.

### 6.2 국내 LEO PNT 도입 방향에 대한 고찰

우리나라 주변국의 LEO PNT 연구 동향을 주의 깊게 살펴보고 국내 위성항법 개발 전략 수립이 필요하다. 현재 세계 각국은 통신용 LEO 위성 및 LEO PNT 개발이 활발히 진행되고 있으며 중복 개발, 위성 궤도 포화, 위성 간 충돌 문제를 내포하고 있다. 한정된 우주 공간의 효율적 활용을 고려했을 때, PNT 목적으로 수백-수천 기의 위성을 중복 운용하는 것은 부적절하다. 더욱이 한 국형 위성항법을 전지구 위성항법이 아닌 지역 위성항법으로 개발하는 상황에서 LEO PNT 또한 한반도 중심의 서비스 제공이 가능하도록 개발하는 것이 바람직하다. 독립형 LEO PNT보다는 국내 여건을 반영하여 소수의 LEO 위성으로 KPS, KASS를 보강하는 다중계층 LEO PNT 방식이 적절하다.

### 6.3 정부 정책 제언

위성항법은 활용도가 높으나 수익성이 낮아 정부 주도로 개발하여 대국민 서비스를 제공해야 하는 공공재이다. 다중계층 LEO PNT는 국내 위성항법 PNT 성능 향상은 물론이고, 독립성과 자립성을 강화하여 국가 안보와 경제 발전에 중요한 역할을 한다. 국내 위성항법 발전을 위해서는 LEO PNT 연구 및 개발에 정부의 적극적인 지원과 투자가 필수적이다. 정부는 연구기관과 대학이 연구 및 개발을 수행하며 기술 검증할 수 있는 토대를 마련하고, 동시에 민간 기업의 참여를 유도하여 지속 가능한 위성 제작과 운영을 담당하게 함으로써, 연구/산업 생태계를 강화하고 글로벌 경쟁력을 높여야 한다. 나아가, 국제협력을 적극 모색하여 기술 교류와 공동 연구를 통해 최신 기술을 도입하고, 국제 기준에 부합하는 시스템을 개발해야 한다. 이러한 노력은 위성항법 선도 국가로 진입하는 기반을 마련할 것이며, 국가의 전략적 위치를 강화하고 국제 사회에서의 영향력을 확대할 것이다. 따라서, 정부는 LEO PNT에 대한 지속적인 관심과 투자를 통해 국내 위성

## 7. 결론

본 연구는 국내 위성항법 강화를 위한 LEO PNT의 적용 가능성을 탐색하였다. 최근 LEO PNT 개발이 전 세계적으로 활발히 진행되는 가운데, 국내에서는 KASS의 성공적인 개발 완료와 KPS의 개발 착수가 이루어졌다. 국내에서 아직 수행되지 않은 LEO PNT 연구를 바탕으로, KPS와 KASS를 보강할 수 있는 다중계층 LEO PNT 구성의 적절성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 제안하는 구성은 기존 시스템에 비해 향상된 PNT 서비스를 제공할 수 있음을 확인하였다. 특히, KPS와 KASS에 LEO PNT를 통합함으로써, 국내 위성항법 시스템의 전반적인 정확도 개선, 신규 보강항법 개념 도입, 감시국 배치 제약 해소, 운영 편의성 확보 등의 효과가 예상된다.

향후 연구에서는 최적의 LEO 궤도 설계 및 LEO PNT 신호설계를 수행하고, prototype을 제작하여 기능을 검증하는 연구가 필요하다. 시스템 최적화, 다양한 환경에서의 성능 평가, 그리고 실제 운영 환경에서의 시험 과정을 거치며 완성도를 높여야 한다. 이러한 연구는 국내 위성항법 시스템의 국제 경쟁력을 강화하고, 다양한 산업 분야에서의 응용 가능성을 확대하는 데 기여할 것이다. 결론적으로, LEO PNT는 국내 위성항법 시스템의 성능을 보강하고, 국가적 차원에서 위성항법 자립성을 강화하는데 있어 유망한 기술로 평가된다. 국내 위성항법 도약을 위해 정부의 지속적인 관심과 지원을 바라며, LEO PNT 시스템의 실용화와 국제적인 협력을 촉진할 수 있기를 기대한다.

## ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 한국항공우주연구원의 자체연구사업인 "다중계층 항법 개념연구"의 지원을 받아 수행되었습니다.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, D.Won, E.Lee and C.Choi; methodology, D.Won and C.Choi; simulation, D.Won; validation, D.Won and C.Choi; formal analysis, D.Won, E.Lee and C.Choi; resources, D.Won; data curation, D.Won; writing—original draft preparation, D.Won and E.Lee; writing—review and editing, D.Won and E.Lee; visualization, D.Won; supervision, D.Won; project administration, D.Won; funding acquisition, D.Won & E.Lee.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- Choi, B.-K., Roh, K.-M., Ge, H., Ge, M., Joo, J.-M., et al. 2020, Performance Analysis of the Korean Positioning System Using Observation Simulation, *Remote Sensing*, 12, 3365. <https://doi.org/10.3390/rs12203365>
- Eissfeller, B., Pany, T., Dötterböck, D., & Förstner, R. 2024, A Comparative Study of LEO-PNT Systems and Concepts, *Proceedings of the ION 2024 Pacific PNT Meeting*, Honolulu, Hawaii, 15-18 April 2024, pp.758-782. <https://doi.org/10.33012/2024.19646>
- ESA, ESA kicks off two new navigation missions [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: [https://www.esa.int/Applications/Navigation/ESA\\_kicks\\_off\\_two\\_new\\_navigation\\_missions](https://www.esa.int/Applications/Navigation/ESA_kicks_off_two_new_navigation_missions)
- Ferre, R. M., Praks, J., Seco-Granados, G., & Lohan, E. S. 2022, A Feasibility Study for Signal-in-Space Design for LEO-PNT Solutions with Miniaturized Satellites, *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 3, 171-183. <https://doi.org/10.1109/JMASS.2022.3206023>
- Forbes, S. 2024, Blackjack [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: <https://www.darpa.mil/program/blackjack>
- Geely, Media Center - Zhejiang Geely Holding Group [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: <https://zgh.com/media-center/news/2024-09-03/?lang=en>
- Hauschild, A. & Montenbruck, O. 2021, Precise real-time navigation of LEO satellites using GNSS broadcast ephemerides, *Navigation*, 68, 419-432. <https://doi.org/10.1002/navi.416>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2008, *GNSS - Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more* (New York: Springer). [https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1_3)
- Iridium, Iridium Satellite Time & Location [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: <https://www.iridium.com/satellite-time-location>
- Kbidy, G., Adamski, G., & May, N. 2018, Design Concepts and Challenges for the Iridium NEXT Command and Control System, 2018 SpaceOps Conference, 28 May-1 June 2018, Marseille, France. <https://doi.org/10.2514/6.2018-2708>
- Li, B., Ge, H., Ge, M., Nie, L., Shen, Y., et al. 2019, LEO enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS) for real-time precise positioning services, *Advances in Space Research*, 63, 73-93. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.017>
- MATLAB, Satellite Communications Toolbox [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: <https://kr.mathworks.com/products/satellite-communications.html>
- Menzione, F. & Paonni, M. 2023, LEO-PNT Mega-Constellations: a New Design Driver for the Next Generation MEO GNSS Space Service Volume and Spaceborne Receivers, 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, USA, 24-27 April 2023, pp.1196-1207. <https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10140052>
- Michalak, G., Glaser, S., Neumayer, K. H., & König, R. 2021, Precise orbit and Earth parameter determination supported by LEO satellites, inter-satellite links and synchronized clocks of a future GNSS, *Advances in Space Research*, 68, 4753-4782. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.03.008>
- MOLIT, "Korea Augmentation Satellite Service (KASS) Launch" Opens Safer and More Efficient Sky Route [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: [https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?lcmspage=1&id=95089201](https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmspage=1&id=95089201)
- MOSICT, In the era of the space economy, Korea begins developing a satellite navigation system [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=112&pageIndex=&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3181928&searchOpt=ALL&searchTxt=>
- OneWeb, Government | OneWeb [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: <https://oneweb.net/solutions/government>
- Prol, F. S., Ferre, R. M., Saleem, Z., Valisuo, P., Pinell, C., et al. 2022, Position, Navigation, and Timing (PNT) Through Low Earth Orbit (LEO) Satellites: A Survey on Current Status, Challenges, and Opportunities, *IEEE Access*, 10, 83971-84002. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3194050>
- Ries, L., Limon, M. C., Grec, F.-C., Anghileri, M., Prieto-Cerdeira, R., et al. 2023, LEO-PNT for Augmenting Europe's Space-based PNT Capabilities, 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS),

Monterey, CA, USA, 24-27 April 2023, pp.329-337.  
<https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10139999>

Seok, H.-W., Cho, S., Kong, S.-H., Joo, J.-M., & Lim, J. 2023, A Survey on LEO-PNT Systems, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 12, 323-332. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.3.323>

Shannon, P. 2022, Leveraging a LEO Satellite Constellation for Accurate & Reliable PNT, 2022 National PNT Advisory Board, Redondo Beach, CA, November 16, 2022. <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2022-11/shannon.pdf>

TrustPoint, Precision GNSS | Trust Point [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: <https://www.trustpointgps.com>

UNOOSA, ICG Working Group Systems, Signals and Services [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/icg/working-groups/s.html>

Won, D., Lee, E., & Choi, C. 2024, Study on Development Strategy for Multi-layer PNT Integrated with LEO PNT, 2024 IPNT Conference, Nov 6-8 2024, Jeju, Korea, pp.109-111. <https://ipnt.or.kr/2024proc/164>

XONA, PULSAR | Xona Space Systems [Internet], cited 2024 Oct. 31, available from: <https://www.xonaspace.com/pulsar>

Xu, S., Yang, Q., Du, X., Xu, X., Zhao, Q., et al. 2024, Multi-GNSS Precise Point Positioning enhanced by the real navigation signals from CENTISPACE™ LEO mission, *Advances in Space Research*, 73, 4175-4186. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.01.017>



**Daehee Won** is a senior researcher at Korea Aerospace Research Institute (KARI). He is a project manager for the multi-layer PNT research and had developed the KASS Control Station while working at KARI. He received Ph.D. degree in Aerospace Engineering from Konkuk University (Rep. of Korea) for the research on navigation sensor integration and its performance analysis. He was a postdoctoral researcher at University of Colorado at Boulder for the development of navigation algorithm for low earth orbit satellite. His research interests include LEO PNT, Multi-layer PNT, GNSS augmentation and multi sensor integration.



**Eunsung Lee** received his Ph.D. degrees in Aerospace Engineering from Konkuk University, Korea in 2005. He is a principal researcher at the Korea Aerospace Research Institute and has been in charge of the development of KASS ground segments as well as SBAS satellite payload since 2014. His research areas include GNSS augmentation systems, fault detection of GNSS systems and orbit determination of satellites.



**Chulhee Choi** is a senior researcher in the Satellite Ground Station R&D Division at Korea Aerospace Research Institute (KARI). He received his B.S., and M.S. degrees in control and measurement engineering from Daegu University (Rep. of Korea), in 2009, and 2011, respectively. His current research interests include GBAS facility approval and SBAS ground system implementation and operation, the related precise positioning.