

Status and Technological Survey of Navigation Satellite Systems

Yongrae Kim, Jeongrae Kim[†], Jong Yeoun Choi



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.

위성항법시스템 위성체 운용 현황 및 기술 동향

김용래¹, 김정래^{1*}, 최종연²

Status and Technological Survey of Navigation Satellite Systems

Yongrae Kim¹, Jeongrae Kim^{1*}, Jong Yeoun Choi²

¹Department of Aerospace Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

²Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, South Korea

ABSTRACT

This investigation primarily focuses on the generational characteristics of satellites utilized in the existing Global Navigation Satellite System (GNSS) and Regional Navigation Satellite System (RNSS), with a central emphasis on comparing the operational status of the latest generation satellites. Variations among satellite generations in physical attributes, energy consumption, and timekeeping are observed, enabling an exploration of the developmental trends over successive generations. Through a comparative analysis of the latest generation satellites, particularly in terms of performance, this study aims to furnish essential insights into the satellites employed within each system. Consequently, it will contribute to a foundational understanding of the past, present, and future GNSS satellites.

Keywords: GNSS, satellite bus, satellite specifications, power system, atomic clocks

주요어: 위성항법시스템, 위성버스, 위성체 제원, 전력계, 원자시계

1. INTRODUCTION

Global Navigation Satellite System (GNSS)은 여러 국가에서 운용 중인 다수의 항법위성에서 제공하는 위치 및 시각동기정보를 통해 지구 전역에서 위치, 속도, 시간 등을 정확하게 결정하는 시스템이다. 이를 대표하는 미국의 Global Positioning System (GPS)은 1978년 군용 목적으로 개발된 Block I 위성을 시작으로 지속적인 성능 개량을 수행하여 Block II, IIA, IIR 위성을 차례로 발사하였다. GPS의 현대화 계획은 2005년 Block IIA/IIR 위성의 기술을 기반으로 하여 제작된 Block IIR-M 위성의 발사로 시작되었으며, 이후 Block IIF 및 III 위성의 발사를 통해 진행되었다. 현재는 현대화 계획에 따른 차세대 Block IIIF 위성의 발사가 예정되어 있다. EU의 Galileo와 러시아의 GLONASS도 현대화를 통해 위성체의 성능을 개량하고 있고, 차세대 위성에 대한 계

획을 수립하여 운용 준비 중에 있다. 중국은 지역위성항법시스템인 BDS-1을 시작으로 현재 전 지구 위성항법시스템인 BDS-3를 MEO, IGSO, GEO 세 종류의 위성을 통해 운용하고 있다.

Regional Navigation Satellite System (RNSS)은 GNSS와 동일한 정보를 제공하지만, 서비스 영역이 특정 지역 및 국가로 한정되어 있다. 일본의 QZSS와 인도의 NavIC은 각각 7대의 IGSO/GEO 위성을 통해 서비스를 제공하며, 시험 위성의 기술과 경험을 바탕으로 제작된 위성을 사용한다.

위성체는 위성의 핵심 구조 및 운영 시스템을 포함하는 표준화된 플랫폼인 위성 버스를 기반으로 제작되며, 다양한 장비 및 기능이 추가된다. 위성체의 구성 요소로는 운영 환경에 따른 임무 요구를 충족하는 질량 및 부피 등의 제원, 태양 전지 및 전원 공급과 관련된 전력 시스템, 데이터 송수신에 사용되는 통신 시스템을 비롯하여 자세 제어 및 안정화, 열 제어 등의 시스템이 존재한다.

위성항법시스템의 운용 및 기술 동향에 관한 선행 연구는 개발 및 운용 현황, 계획, 신호에 대한 내용이 주를 이루고 있다. Kim (2003)은 GPS와 GLONASS의 위성체 특성을 비교하고 GPS, GLONASS, Galileo 개발 현황을 정리하였다. 이 외에도 2000년대 초 GPS를 중심으로 기술 현황과 현대화를 정리한 연구가 수행되었다 (Rizos et al. 2005, Nam et al. 2007). Ha & Chun (2010)

Received Dec 11, 2023 Revised Jan 12, 2024 Accepted Feb 02, 2024

*Corresponding Author

E-mail: jrkim@kau.ac.kr

Tel: +82-2-300-0110

Yongrae Kim <https://orcid.org/0009-0004-9306-048X>

Jeongrae Kim <https://orcid.org/0000-0001-5070-7336>

Jong Yeoun Choi <https://orcid.org/0000-0001-6014-0812>

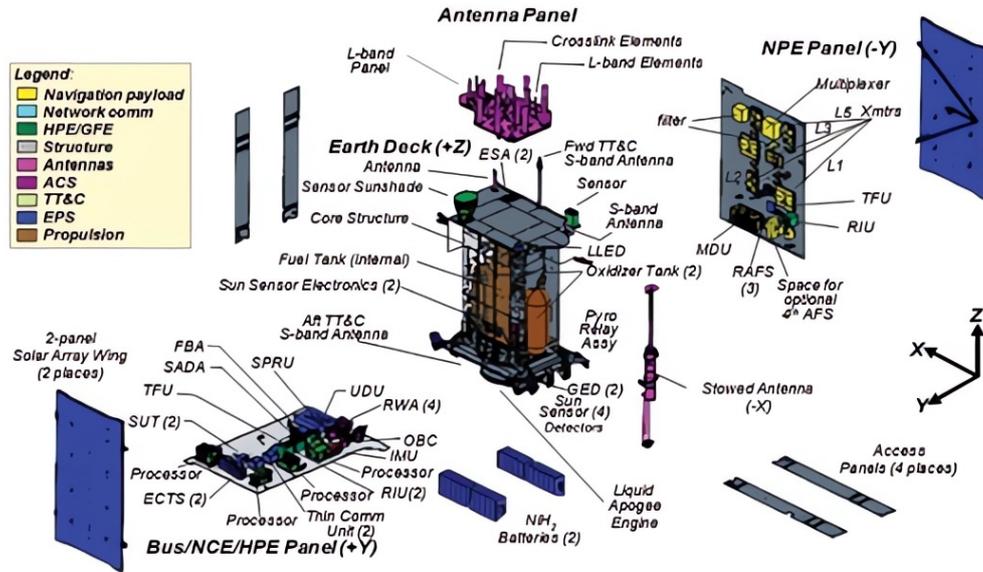


Fig. 1. GPS Block III satellite decomposition (Marquis & Shaw 2011).

은 발사 정보를 포함한 운용 현황을 정리하고, 각 시스템의 궤도, 주파수, 좌표계 및 시간계에 대한 연구를 수행하였다. Rizos (2014)는 기존 연구 내용을 토대로 기술 개발 현황을 업데이트하고 항법성능을 비교하였다. 최근 연구는 기존에 개발 중이던 위성항법시스템의 운용이 시작됨에 따라 각 시스템의 운용 현황 및 미래 계획에 대한 내용이 주를 이루고 있다 (Hein 2020, Yu et al. 2020, Lee et al. 2021). Steigenberger et al. (2020)은 GPS Block별 위성체의 제원을 비교하고 GPS Block III 위성의 성능을 Galileo-FOC 위성체와의 비교를 통해 분석하였다.

본 논문에서는 GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, QZSS 및 NavIC 등 주요 GNSS 및 RNSS에 사용되는 최신 위성체를 포함한 주요 위성체 및 버스에 대한 분석을 수행하였다. 각 시스템별 위성체의 개발 연혁을 살펴보고 위성체의 H/W 특성 및 제원을 비교하였다. 또한 가장 최근에 발사된 위성체의 운용 현황, 궤도를 살펴보고 위성체의 제원, 전력계 및 원자시계에 관한 비교를 수행하였다.

2. 시스템 개요 및 운용 현황

2.1 GPS

GPS는 미국 Department of Defense (DoD)에 의해 개발된 위성항법 시스템으로, 1978년 첫째 시험 위성 발사를 시작으로 1993년에 24대의 위성(4개의 궤도면, 각 궤도면에 6대 배치)을 모두 궤도에 위치시킨 후 시험 운용을 거쳐 1995년에 Full Operational Capability (FOC)를 선언했다 (Yu et al. 2020).

2023년 7월을 기준으로 운용 중인 GPS 위성체는 지속적인 현대화를 통해 Block IIR (6대), IIR-M (7대), IIF (12대) 및 Block III (6대)로 구성되어 있다. Block IIR, IIR-M은 각각 1997~2004년, 2005~2009년 사이에 발사되었고 최장 수명은 약 26년, 18년이

다. Block IIF는 2010년부터 2016년까지 발사되었고 최장 수명은 13년이다. Block III는 2020년부터 운용을 시작하였다 (Anderson 2022, Navigation Center 2023).

Lockheed Martin사에서 개발한 Block IIR은 Block II 및 IIA를 대체하기 위해 제작되었고, Block IIR-M은 이의 개선된 버전으로 L2C와 M코드가 추가되었다. 이들은 동일한 AS-4000 위성 버스를 사용하며, 10년의 설계수명을 갖고 있다. 부피는 2.1×2.0×2.1 m³이며, 궤도질량은 1,080 kg이다. 태양 전지판 전개 시 너비는 11.4 m로 1,140 W의 전력을 생산한다 (Steigenberger et al. 2020, Navipedia 2023).

Boeing North American사의 Block IIF는 Block IIA를 대체하기 위해 제작되었고, 설계수명은 이전 세대보다 증가한 12년이다. 이전 세대와 비교하여 부피는 약 7% 증가한데 비해 궤도질량은 51% 증가하였으며, 태양 전지판 전개 너비와 생성 전력 또한 각각 53%, 71%씩 증가하여 높은 성능 발전을 이끌어냈다 (Steigenberger et al. 2020, Navipedia 2023).

현재 운용 중인 Lockheed Martin사의 Block III는 A2100M 위성 버스를 사용하였고 설계수명이 15년으로 증가하였다. 부피 및 궤도질량은 각각 68%, 32%씩 증가한데 비해 태양 전지판 전개 너비는 2.5 m 감소하였지만, 고효율의 Ultra Triple Junction (UTJ) 셀을 사용하여 생성전력이 크게 향상되었다 (Steigenberger et al. 2020, Steigenberger & Montenbruck 2022, Navipedia 2023). Fig. 1은 GPS Block III 위성의 분해도로 2개의 태양 전지판과 배터리 등의 구성 요소를 보여준다. 또한 Block IIR / IIR-M, IIF, III 위성체의 주요 특성은 Table 1과 같다.

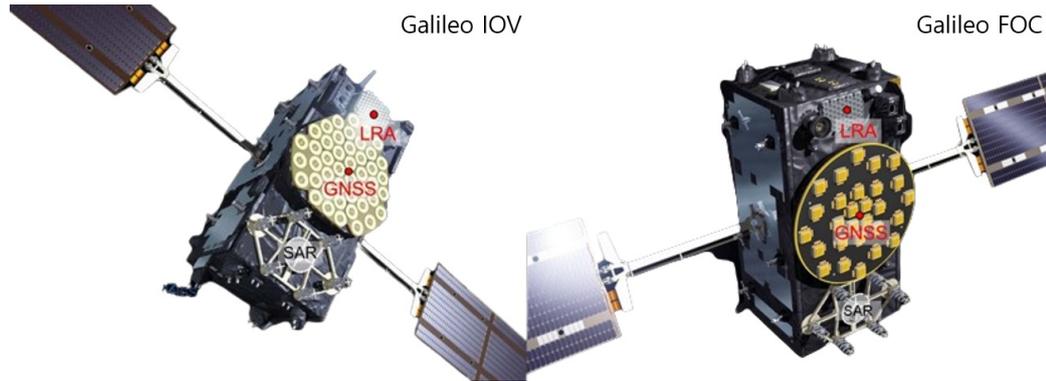
차세대 Block IIIF는 Block III의 위성 버스인 A2100M을 Lockheed Martin사의 Collaborative Human Immersion Lab (CHIL)에서 개량한 LM2100 버스를 사용한다. Block IIIF 위성체의 설계수명은 Block III와 동일한 15년이지만 임무에 따라 최대 21년까지 고려될 수 있다. 탑재체는 최소 300 kg에서 최대 1,275 kg까지 탑재할 수 있으며 소비전력도 최소 1,400 W에서 최대

Table 1. GPS satellite specifications.

Block	IIR / IIR-M	IIF	III
Design lifespan (years)	10	12	15
Average lifespan (years)	21 / 16	10	3
Volume (m ³)	2.1×2.0×2.1	2.5×2.1×1.8	1.8×2.5×3.4
On orbit mass (kg)	1,080	1,633	2,161
Solar panel width (m)	11.4	17.5	15
Power Generation capacity (W)	1,140	1,952	4,480

Table 2. Galileo satellite specifications.

Block	Galileo-IOV	Galileo-FOC
Design lifespan (years)	12	12
Volume (m ³)	2.7×1.2×1.1	2.5×1.2×1.1
Launch mass (kg)	730	732.8
Generation capacity (W)	1,980	1,900

**Fig. 2.** Galileo satellites (Steigenberger et al. 2015).

16,000 W까지 설계될 수 있다. LM2100 버스의 가장 큰 특징은 알루미늄 허니콤 패널로 구성된 원기둥 형태의 구조를 사용한다는 것이다 (RSDO 2023).

2.2 Galileo

Galileo는 유럽의 독자적인 전 지구 위성항법 시스템으로 1999년에 개발과 구축이 시작되었으며, 예산 문제와 민간 투자 부족으로 인해 원래의 구축목표인 2008년에서 큰 지연을 겪어 FOC 달성 시기가 늦춰지게 되었다 (Lee et al. 2021). Galileo는 2016년에 Initial Operational Capability (IOC)를 달성하였고 2025년 FOC를 달성할 예정이다 (EoPortal 2023).

Galileo-IOV는 GSAT0101부터 GSAT0104까지 총 4대로 구성되어 있다. 이 중 GSAT0104를 제외한 나머지 세 위성은 현재 운용 중이다. Galileo-FOC는 GSAT0201부터 GSAT0224까지 총 24대의 위성으로 구성되어 있으며, 그 중에서 4대는 사용이 불가능한 상태이다 (EUSPA 2023). Galileo-FOC는 GSAT0201~0214까지 Batch 1, GSAT-0222까지 Batch 2, GSAT-0223부터 추후 발사될 GSAT-0234까지의 위성을 Batch 3로 분류한다 (Wikipedia 2023).

Astrium에서 개발한 Galileo-IOV는 설계수명이 12년이며, 부피는 2.7×1.2×1.1 m³이다. 발사질량은 GPS 위성체의 궤도질량보다 작은 730 kg이며, 생성전력은 1,980 W이다 (Bartolome et al. 2014).

OHB system AG에서 개발한 Galileo-FOC는 smartMEO 위성 버스를 사용하며 설계수명이 Galileo-IOV 위성체와 동일한 12년이다. 부피는 2.5×1.2×1.1 m³으로 이전 세대보다 약 8% 감소하였지만 발사질량은 2.8 kg 증가한 732.8 kg이다. 생성전력은 1,900 W로 Galileo-IOV보다 80 W 감소하였지만, 다른 특성과 마찬가지로

거의 유사한 모습을 보인다. Galileo-IOV, FOC 위성체의 주요 특성은 Table 2와 같다. Fig. 2는 Galileo-IOV, FOC 위성의 형상을 나타내는데, 앞서 언급한대로 안테나 형상을 제외한 나머지 부분이 거의 유사한 것을 볼 수 있다 (Bartolome et al. 2014).

2.3 GLONASS

GLONASS는 소련 최초의 위성항법 시스템인 Cicada를 대체하기 위해 소련 국방성이 개발한 위성항법 시스템으로, 현재는 러시아가 운용 중이다. 이 시스템은 미국의 GPS와의 경쟁을 목표로 1970년대에 개발 및 구축을 시작하여 1995년 설계 궤도에 24개의 위성을 모두 배치하여 FOC를 선언하였다. 하지만 구조적인 붕괴로 정상 운용되지 않다가 2011년 12월, 다시 FOC를 선언하였다 (Lee et al. 2021).

GLONASS는 현재 GLONASS-M과 그 다음 세대인 GLONASS-K 위성으로 이루어져 있다. 2023년 7월을 기준으로 운용 중인 GLONASS-M 위성은 2007년 10월에 발사된 Kosmos 2433을 시작으로 총 21대이며, 가장 최근에는 Kosmos 2564 위성이 2022년 11월에 발사되어 정상적으로 궤도에 안착하였다. GLONASS-K 위성은 2011년 2월에 발사된 Kosmos 2471을 시작으로 2022년 10월에 발사된 Kosmos 2559까지 총 4대가 궤도에 올라가 있다. 그중 가장 마지막에 발사된 Kosmos 2559는 현재 시험 중에 있다.

ISS Reshetnev에서 개발한 GLONASS-M은 Ekspress-K 위성 버스를 기반으로 한다. 설계수명은 7년이며 부피는 2.7×2.7×3.0 m³이다. 발사 및 탑재체 질량은 각각 1,415 kg, 250 kg이며 실리콘 전지로 구성된 태양 전지판을 총 8개 사용하여 1,250 W의 전력을 생산한다. 이 중 탑재체 소비전력은 580 W이다 (Nikolay 2015).

GLONASS-K는 GLONASS-M과 동일한 Ekspress-K 위성 버



Fig. 3. GLONASS satellites (Nikolay 2015).

Table 3. GLONASS satellite specifications.

Block	GLONASS-M	GLONASS-K
Design lifespan (years)	7	10
Volume (m ³)	2.7×2.7×3.0	1.4×2.5×3.1
Launch mass (kg)	1,415	962
Payload mass (kg)	250	260
Solar cells	Silicon	Single junction GaAs
Solar panel	8	4
Generation capacity (W)	1,250	1,600
Payload consumption (W)	580	750
Atomic clocks	2 Cs	2 Cs + 2 Rb

Table 4. BDS-3 satellite specifications.

Orbit	MEO	IGSO	GEO
Satellite bus	DFH-3	DFH-3B	
Design lifespan (years)	12	12	
Volume (m ³)	2.55×1.10×1.23	2.25×1.01×1.22	
Launch mass (kg)	2,200	4,200	4,600
Propellant mass (kg)	-	2,300	3,050
Generation capacity (W)	3,000	6,200	6,800

스를 기반으로 하며, 설계수명은 3년이 증가하였다. 탑재체 질량이 250 kg인 GLONASS-M에 비해 GLONASS-K는 260 kg로 4% 증가하였고, 발사질량은 962 kg로 약 47% 감소하였다 (Nikolay 2015). 단일 결합 갈륨-비소 태양전지로 구성된 4개의 넓은 태양 전지판을 사용하여 생성전력이 1,600 W로 증가하였고, 원자시계는 2개의 세슘 원자시계와 2개의 루비듐 원자시계를 함께 사용하도록 변경되었다 (Kossenko et al. 2012). GLONASS-M, K의 주요 특성은 Table 3에 정리하였다.

GLONASS-K2는 GLONASS-K의 뒤를 잇는 차세대 위성으로 설계수명은 GLONASS-K와 동일한 10년이다. 위성체 질량은 962 kg에서 1,645 kg으로 크게 증가하였으며 부피는 1.4×2.5×6.0 m³으로 GLONASS-K보다 두 배 증가하였다 (높이가 3.0 m에서 6.0 m로 증가, 너비와 폭은 동일함). 삼중 결합 갈륨-비소 태양전지를 사용하고 태양 전지판의 수가 8개로 변하면서 (1×8로 GLONASS-M과 배치가 다름) 생성전력이 4,370 W까지 늘어났다. 원자시계는 GLONASS-K와 동일하게 2개의 세슘 원자시계와 2개의 루비듐 원자시계를 사용한다 (Kossenko et al. 2012, Nikolay 2015). Fig. 3은 각 GLONASS 위성체의 형상을 나타내는데, 전체적인 크기, 형상 및 태양 전지판 배열이 다른 것을 확인할 수 있다.

2.4 BeiDou

현재 운용 중인 BeiDou는 BDS-2와 BDS-3 두 개의 세대로 나뉜다. BDS-2는 2010년 8월에 IGSO-1 위성이 운영 단계로 진입하면서 시작되었다 (CSNO 2023). GEO 위성 5대와 MEO, IGSO 위성 30대로 초기 설계를 하였으나 BDS-3로 시스템이 확장되면서 MEO 위성 24대, IGSO/GEO 위성 각 3대를 합쳐 총 30대를 운용하는 것으로 변경되었다 (Yu et al. 2020). BDS-3 이전에 발사된 BDS-2 위성들은 현재 모두 운영 중이다. BDS-3는 2015년 3월에 실험 목적으로 발사된 BDS-3S로 시작되었고, 이어서 2016년

3월에는 BDS-2의 IGSO-6 위성이 운영 단계로 전환되었다. 이후 2017년 11월과 2019년 12월 사이에 24대의 BDS-3 MEO 위성이 발사되었다. 2020년 6월과 2023년 5월에 발사된 BDS-3 GEO-3, 4 위성은 현재 테스트 단계에 있다 (CSNO 2023).

한편 BeiDou는 다른 GNSS와 달리 MEO, IGSO, GEO로 이루어진 세 가지 궤도를 사용한다. 따라서 BDS-3에 사용된 위성 버스는 궤도에 따라 MEO 버스인 DFH-3, IGSO/GEO 버스인 DFH-3B로 나뉜다. 두 위성 버스는 모두 China Aerospace Science and Technology Corporation (CASC)에서 제작하였다. BDS-3 MEO, IGSO, GEO 위성체의 주요 특성은 Table 4에 정리하였다.

BDS-3 MEO 위성체의 설계수명은 12년이다. 부피는 2.55×1.10×1.23 m³이고 발사질량은 2,200 kg이다. 생성전력은 3,000 W로 다른 GNSS에서 사용하는 위성체의 생성전력보다 약 1.5~3배 가량 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. BDS-3 IGSO, GEO 위성체는 MEO 위성체와 동일한 설계수명을 갖고있다. 부피는 MEO 위성체의 약 80% 수준이지만 발사질량은 약 2배 가량의 차이를 보인다. 생성전력 또한 MEO 위성체의 2배 이상이지만 부피를 제외한 모든 부분에서 GEO 위성체가 IGSO 위성체보다 큰 값을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다 (EoPortal 2023). 3장에서 기술되는 위성체의 제원, 전력계, 원자시계에 대한 내용은 가장 최근에 발사된 BDS-3 GEO-4 위성체와 DFH-3B 위성 버스를 기준으로 하였다.

2.5 QZSS

QZSS는 2010년 9월 11일 발사된 QZS-1을 시작으로 2017년 6월, 8월, 10월에 QZS-2, 3, 4가 순차적으로 발사되었다. 최근에는 QZS-1을 대체하는 QZS-1R이 2021년 10월 26일 발사되었고 추후 QZS-5, 6, 7을 발사하여 2025년 FOC를 달성할 예정이다.

QZS-1 위성은 2006년 12월 18일에 발사된 Mitsubishi사의 Engineering Test Satellite-8 (ETS-8) 위성의 버스를 기반으로 제작되었다. 기존의 ETS-8은 10년의 설계수명을 가지고 있었지만 QZS-1은 12년의 설계수명을 갖고 발사되었다. 약 4,100 kg의 발사질량, 1,800 kg의 건조질량을 갖고 있고 최대 320 kg의 탑재체

Table 5. QZSS satellite specifications.

Satellite	QZS-1	QZS-2, 4	QZS-3	QZS-1R
Design lifespan (years)	12	15	15	15
Volume (m ³)	2.9×3.0×6.0	2.9×2.4×6.2	2.4×2.4×5.4	2.9×2.4×5.4
Launch mass (kg)	4,100	4,000	4,700	4,000
Dry mass (kg)	1,800	1,180	1,215	1,600
Payload mass (kg)	320	475	475	370
Solar panel width (m ²)	25.3	19	19	19

Table 6. NavIC satellite specifications.

Satellite	IRNSS-1A	IRNSS-1I
Design lifespan (years)	12	12
Volume (m ³)	1.6×1.5×1.5	1.8×1.6×1.7
Launch mass (kg)	1,432	1,425
Dry mass (kg)	614	596
Generation capacity (W)	1,660	1,671

Table 7. GNSS and RNSS operational status.

Block	GPS Block III	Galileo-FOC	GLONASS-K	BDS-3	QZS	IRNSS
Launched	6	18	5	32	4	9
Operating	6	16	3	30	4	7
Recent launch	2023. 01. 18.	2021. 12. 05.	2022. 10. 10.	2023. 05. 17.	2021. 10. 26.	2018. 04. 12.
Name	GPS III SV 06	GSAT0223, GSAT0224	GLONASS-K1 No. 17 Kosmos 2559	BDS-3 GEO-4	QZS-1R	IRNSS-1I
Launch vehicle	Falcon 9 Block 5, Space X	Soyuz VS26	Soyuz 2.1b Fregat	Long March 3B	H-IIA 202	PSLV-C41
FOC	1995. 07. 17.	2025 (Planned)	2011. 12. 08.	2020. 06. 23.	2025 (Planned)	2018. 04. 27.

를 탑재할 수 있다. 태양 전지판 전개 시 너비는 25.3 m이며 생성 전력은 최대 5,300 W이다 (EoPortal 2023).

QZS-2부터 QZS-4까지의 위성에 사용된 DS2000 버스는 기존의 ETS-8을 개선시켜 15년의 설계수명을 갖고 있다. 비슷한 시기에 발사된 QZS-2, 3, 4의 위성체는 궤도에 따라 일부 다른 형상을 가진다. IGSO 위성인 QZS-2, 4의 경우 GEO 위성인 QZS-3보다 부피가 약 39% 크지만 QZS-3는 2개의 반사판을 추가로 탑재하고 있고, GEO 위성의 특성상 고정된 위치를 유지하기 위한 궤도 조정을 위해 연료를 더 많이 탑재하여 발사질량 자체는 700 kg 큰 것을 확인할 수 있다 (Cabinet Office 2019a, 2019b, 2021). 공통적으로 2개의 3단 접이식 태양 전지판을 가지고 있고, 전개 시 너비 또한 동일하다. QZS-1R의 경우 QZS-2, 4와 동일한 DS2000 버스를 사용하여 부피는 동일하지만, 건조질량이 420 kg 더 크다 (Cabinet Office 2022b, EoPortal 2023). QZS-1R, 2, 3, 4 위성체의 주요 특성은 Table 5에 정리하였다.

2.6 NavIC

인도의 NavIC은 2013년 7월 1일에 발사된 IRNSS-1A를 시작으로 IRNSS-1I까지 총 9회의 발사를 진행하였다. 이 프로젝트는 L5 및 S 대역에 항법신호를 송출하는 시스템으로 개발되었으며, 2016년에 FOC를 선언하였다 (Lee et al. 2021).

총 9회의 발사 중 2017년 8월 31일에 발사된 IRNSS-1H는 위성 분리 시 방열판이 열리지 않아 위성이 로켓 상단부에 걸려 사용이 불가능한 상태가 됐다. IRNSS-1A 위성은 현재 사용 불가 상태이며, IRNSS-1H를 제외한 IRNSS-1B~1I 위성은 모두 운용 중이다 (EoPortal 2023).

NavIC은 현재 IRNSS-1A부터 IRNSS-1I까지의 위성으로 구성되어 있다. 모든 IRNSS 위성은 I-1K 위성 버스를 사용하며, 위성마다 약간의 차이가 존재한다. IRNSS-1A 위성체는 발사질량이 1,432 kg이고 건조질량은 614 kg이며 이는 위성에 따라 수 kg 단위의 차이가 있다. 부피는 1.6×1.5×1.5 m³이며 위성에 따라 차이가 있다. 두개의 태양 전지판은 1,660 W의 전력을 생산한다 (EoPortal

2023, U R Rao Satellite Centre 2023). 초기 위성인 IRNSS-1A와 가장 최근 위성인 IRNSS-1I의 주요 특성은 Table 6에 정리하였다.

3. 각 부문별 비교

3.1 최근 발사 및 운용 현황

현재 운용 중인 버전과 위성 수, 최근 발사 날짜와 위성의 이름, 발사체 및 FOC 시기를 Table 7에 정리하였다. 2023년 7월을 기준으로 총 6대의 GPS Block III 위성이 운용 중이다. 이 중에서 가장 최근에 발사된 GPS Block III SV06은 2023년 1월 18일에 Space X사의 Falcon 9 Block 5 발사체를 사용하여 플로리다에서 발사되었다 (Everyday Astronaut 2023a). Galileo-FOC는 2014년 8월 22일의 첫 발사에서 두 위성이 궤도에 도달하지 못해 사용 불가능 상태가 되었지만 2015년 이후 여러 차례의 성공적인 발사로 Galileo-FOC는 총 22대의 위성이 운용 중이다 (EUSPA 2023). 가장 최근에 발사된 Galileo-FOC 위성은 GSAT0223, GSAT-0224이며, 이는 두 개의 위성체를 한 번에 발사할 수 있는 Soyuz VS26 발사체에 의해 2021년 12월 5일 프랑스 기아나 우주센터에서 발사되었다 (Arianespace 2023b). GLONASS-K는 현재 발사된 5대 중 3대를 운용하고 있으며, 가장 최근에 발사된 GLONASS-K1 No. 17 Kosmos 2559 위성은 2022년 10월 10일 Soyuz 2.1b 발사체를 사용하여 러시아 북서부 Plesetsk Cosmodrome에서 발사되었다 (NASA Spaceflight 2023). 비교적 최근에 발사된 중국의 BDS-3 GEO-4 위성은 2023년 5월 17일 Long March-3B 발사체를 사용하여 쓰촨성 지방에서 발사되었다 (XinhuaNet 2023). 일본은 원래 2023년 H-III 로켓 발사 성공 후 QZS-5를 발사하려 했지만, 실패함에 따라 현재까지는 QZS-1R이 가장 최근에 발사된 위성이다. QZS-1R 위성은 2021년 10월 26일 H-IIA 202 발사체를 사용하여 다네가시마 우주 센터의 요시노부 발사 단지에서 발사되었다 (Everyday Astronaut 2023b). 인도는 2018년 4월 12일에 발사된 IRNSS-1I 위성을 마지

Table 8. System specific orbits.

System	GPS	Galileo	GLONASS	BeiDou	QZSS	NavIC
Orbit	MEO	MEO	MEO	MEO / IGSO / GEO	IGSO / GEO	IGSO / GEO
Planes	6	3	3	3 / 3 / 1	2 / 1	2 / 1
Semimajor axis (km)	26,560	29,600	25,500	27,878 / 42,164 / 42,164	42,164	42,164
Eccentricity (°)	<0.02	<0.02	<0.01	<0.01	0.075 / 0	0.0002
Inclination (°)	55	56	64.8	55 / 55 / 0	43 / 0	29 / 0
Period	11h 56m	14h 04m	11h 15m 44s	12h 53m 24s / 23h 56m 04s	23h 56m 04s	23h 56m 04s
Height (km)	20,200	23,616	19,100	21,528 / 35,786 / 35,786	35,786	35,786

Table 9. Satellite specifications.

Block	GPS Block III	Galileo -FOC	GLONASS -K	BDS-3	QZS	IRNSS	
Satellite bus	A2100M	smartMEO	Exspress-K	DFH-3B	DS2000	I-1K	
Manufacturer	Lockheed Martin	OHB system AG	ISS Reshetnev	CASC	Mitsubishi Electric	ISRO	
Design lifespan (years)	15	12	10	12	15	10	
Mass (kg)	Launch	3,679	733	962	4,600	4,000	1,425
	On orbit	2,161	700	750	2,950	2,370	889
	Dry	1,630	660	-	1,550	1,600	596
	Payload	750	300	260	450	370	100
Volume (m ³)	1.8×2.5×3.4	1.2×1.1×2.7	1.4×2.5×3.1	2.2×2.4×3.6	2.9×2.4×5.4	1.8×1.6×1.7	

막으로 FOC를 달성하였으며, Satish Dhawan Space Centre에서 PSLV-C41 발사체를 사용하여 발사하였다 (ISRO 2023b).

3.2 궤도

Table 8은 각 시스템의 궤도 특성을 나타내고 있다. GNSS에 속한 GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou는 현재 MEO 위성을 사용하고 있다. 그 중 BeiDou는 IGSO와 GEO 위성을 포함하여 궤도를 구성하고 있다 (Lee et al, 2021, IAC 2023b). MEO 위성의 궤도면은 GPS를 제외한 나머지 시스템이 동일하게 3개를 사용하고 있지만 GLONASS의 경우 경사각이 높아 고위도에서 유리하다. GPS의 경우 위성 주기가 11시간 56분으로 하루 동안 두 번 궤도를 돈다. 또한 궤도면당 위성을 최소 4기씩 배치하여 총 24기의 위성을 사용한다. Galileo의 경우 주기가 14시간 4분으로 10일 동안 17번 궤도를 돌 수 있다. 항상 6-8개의 가시위성을 확보할 수 있고, 그에 따른 HDOP 및 VDOP는 각각 1.3, 2.3으로 확인된다.

RNSS에 속한 QZSS와 NavIC은 IGSO, GEO 위성을 운용하고 있고, 주기 또한 하루로 동일하다. QZSS의 경우 Quasi-Zenith Orbit (QZO)을 사용하는데, 해당 궤도는 이심률이 다른 시스템보다 높고, NavIC의 IGSO보다 경사각 또한 훨씬 높다는 특징이 있다 (ISRO 2023a, Cabinet Office 2022a).

3.3 위성체 제원

위성체의 질량은 발사질량 (launch mass), 궤도질량 (on orbit mass), 건조질량 (dry mass), 페이로드질량 (payload mass) 총 4가지로 나눌 수 있다. 발사질량은 위성이 발사되기 전에 발사체에 탑재되는 총 질량을 나타내고, 이는 발사 시 필요한 연료, 추진체, 전자장비 등 여러 부속물의 무게를 포함한다. 궤도질량은 로켓이 궤도에 도달했을 때의 총 질량을 나타내는 값으로, 발사질량에 포함되는 여러 부속물의 무게를 제외하고 위성 운용에 필

요한 연료를 포함한 질량을 나타낸다. 건조질량은 연료가 탑재되기 전 위성의 질량을 의미하고, 이는 위성의 구조, 센서, 통신 장비 등의 핵심 구성요소들의 총 질량을 나타낸다. 페이로드질량은 센서, 통신장비 등이 포함된 위성 탑재체만의 질량을 나타낸다. Table 9는 각 위성체의 위성 버스, 제작자, 설계수명 및 제원을 나타낸다.

설계수명은 위성의 기능과 특성, 운용 환경 및 사용된 기술에 따라 달라진다. GPS Block III와 QZS 위성의 경우 설계수명이 15년으로 가장 길었고, GLONASS-K와 IRNSS 위성의 설계수명이 10년으로 가장 짧았다. 하지만 동일한 위성체를 사용하는 NavIC을 제외한 나머지 시스템에서는 이전 세대보다 길어진 설계수명을 가진 위성을 운용하고 있다.

발사 및 궤도질량이 가장 큰 BDS-3의 GEO 위성은 발사질량이 4,600 kg, 궤도질량이 2,950 kg으로 궤도로 위성을 올리기 위한 연료가 전체 발사질량의 36%를 차지한다. 이는 NavIC의 IRNSS-II 위성과 비슷한 비율이지만 발사 및 궤도질량이 약 3배 이상 차이가 난다. 발사질량에 대한 궤도질량의 비율이 가장 작은 것은 GPS Block III와 QZS 위성으로 각각 궤도 도달을 위한 연료의 비율이 발사질량의 41, 42%에 달하고, 이 두 위성의 질량은 BDS-3 IGSO 다음 QZS, GPS Block III 순으로 크다. 발사질량에 대한 궤도질량의 비율이 가장 작은 것은 Galileo-FOC 위성이다. Galileo-FOC 위성의 발사질량은 733 kg, 궤도질량은 700 kg으로 모든 위성체 중에서 가장 가볍다 (Nikolay 2015, Steigenberger et al. 2020, Cabinet Office 2022b, EoPortal 2023, Lockheed Martin 2023, Russian Space Web 2023, Spaceflight101 2023, Arianespace 2023a, OHB 2023, U R Rao Satellite Centre 2023).

3.4 전력계

전력 시스템은 생성전력 (generation capacity), 평균 전송전력 (average transmission), 탑재체 소비전력 (payload consumption)

Table 10. Satellite power system.

	Block	GPS Block III	Galileo-FOC	GLONASS-K	BDS-3	QZS	IRNSS
Solar cells	Width (m)	15	14.67	7.2 (GLONASS-M)	11.7	18.9	10 (Approx)
	Area (m ²)	28.52	10	16.96	35.4	29.8	7.74
Power system	Generation capacity (W)	4,480	1,900	1,600	6,800	6,300	1,670
	Average transmission (W)	300	135	265	310	460	120
	Payload consumption (W)	1,500	1,100	750	4,000	2,000	900
	Battery	Ni-H2	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Li-ion
	Battery capacity (Wh)	20,000	10,000	-	-	17,500	12,000

Table 11. Satellite atomic clocks.

Block	GPS Block III	Galileo-FOC	GLONASS-K	BDS-3	QZS	IRNSS
Atomic clocks	Rb	Rb / PHM	Rb / Cs	Rb / H-Maser	Rb	Rb
Number of atomic clocks	3	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2	3

등에서 다양한 성능 차이가 나타난다. 생성전력은 위성체의 태양 전지판에서 생산되는 전력으로, 보통 End of Life (EoL) 성능을 나타낸다. 이는 위성의 수명이 끝날 때까지 일정한 수준의 전력을 지속해서 생산할 수 있다는 것을 의미한다. 평균 전송전력은 위성이 지구와의 통신을 위해 사용하는 전력의 평균값을 나타낸다. 평균 전송전력에 영향을 미치는 요인에는 전송 대역폭 및 주파수, 전송 거리, 통신 기술 및 안테나 특성 등이 있다. 탑재체 소비전력은 위성의 주요 임무를 수행하는 탑재체가 동작 중일 때 소비되는 전력을 나타낸다. Table 10에 정리된 각 시스템들의 태양 전지판과 전력 시스템에는 몇 가지 공통점과 차이점이 있다.

태양 전지판의 경우, GPS Block III, Galileo Batch 3, GLONASS-K, BeiDou-3 IGSO, QZS, 그리고 IRNSS 모두 알루미늄 허니콤 구조를 사용하고 있으며, 이들은 각각의 접이식 구조와 전개 길이, 전개 넓이에서 차이를 보인다. 전력 시스템에서는 생성 전력, 평균 전송 출력, 페이로드 소비 전력 등에서 다양한 성능 차이가 나타난다. 또한, Ni-H2와 Li-ion 배터리가 주로 사용되며, 배터리 용량에서도 각 시스템 간에 차이가 있다. 이러한 차이와 공통된 특성들은 각 위성에 운용 목적 및 탑재체에 따라 설계된 것으로 해석할 수 있다.

생성전력과 궤도질량의 비율은 평균 2.2 : 1이며, Galileo-FOC가 2.7 : 1로 가장 높았고, IRNSS가 1.9 : 1로 가장 낮았다. 생성전력이 가장 큰 것은 BDS-3로 위성의 수명이 끝날 때까지 6,800 W의 전력을 생산할 수 있다. BDS-3의 태양 전지판 전개 넓이는 35.4 m²로 이또한 모든 시스템 중에서 가장 큰 모습을 보인다. 평균 전송전력은 QZS와 BDS-3 GEO 위성이 가장 높고, 이는 평균 전송전력에 영향을 미치는 요소 중 하나인 전송 거리의 영향을 받은 것으로 볼 수 있다. 탑재체 소비전력이 가장 큰 것은 BDS-3로 생성전력의 약 59%를 소모한다. 비슷한 생성전력을 가진 QZS는 약 32%로 생성전력에 비해 가장 작은 비율을 가진다 (Nikolay 2015, Seko et al. 2003, Steigenberger & Montenbruck 2022, Zhao et al. 2022, Arianespace 2023a, EoPortal 2023, Lockheed Martin 2023, OHB 2023, Russian Space Web 2023, U R Rao Satellite Centre 2023).

3.5 원자시계 운용 현황

Table 11에 각 시스템별 원자시계 운용 현황을 정리하였다. 모

든 시스템에서 공통적으로 루비듐 원자시계를 사용하지만, 일부 시스템은 수소 메이저, 세슘 원자시계 등을 추가로 사용한다.

GPS Block III 위성의 경우 같은 제작사의 이전 세대 위성인 Block IIR/IIR-M에서 사용된 시계보다 강화된 루비듐 원자시계를 사용하고 있다 (Lockheed Martin 2023). 총 4개의 슬롯이 장착되어 있으며, 그중 세 개의 슬롯에 루비듐 원자시계, 나머지 하나의 슬롯에 수소 원자시계(Hydrogen maser)를 장착하고 있다. 루비듐 원자시계의 주파수 안정성은 10,000초 동안 약 1×10^{-14} 이다. 수소 원자시계의 경우, Navigation Payload Element (NPE)에 포함되어 있지만 궤도 위에서의 새로운 주파수 표준을 위한 실험에 사용되는 용도이므로 Table 11의 운용 현황에서 제외하였다 (Marquis & Shaw 2011).

Galileo-FOC 위성의 경우 2개의 루비듐 원자시계와 2개의 수동 수소 메이저 원자시계 (Passive Hydrogen Maser, PHM)를 장착하고 있다 (EoPortal 2023). 루비듐 원자시계의 주파수 안정성은 10,000초 동안 5.1×10^{-14} 이하이며, PHM의 안정성은 30,000초 동안 4.5×10^{-14} 이하이다 (OHB 2023).

GLONASS-K 위성은 앞선 GPS Block III 및 Galileo-FOC와 루비듐 원자시계를 사용하는 것은 동일하나, 수소 원자시계 대신 세슘 원자시계를 사용한다 (Kossenko et al. 2012). 각 원자시계를 2개씩 탑재하고 있다. Glonass-K의 시계 안정성은 스펙 상으로 1×10^{-13} , 관측 상으로는 5×10^{-14} 으로 Galileo-FOC와 거의 비슷하다 (IAC 2023a).

BDS-3 위성의 경우 2개의 루비듐 원자시계를 사용하고 있고 (IAC 2023b), 실험 위성이었던 BDS-3S에서 최초로 수소 메이저 원자시계 운용에 성공하여 현재 일부 위성에서 사용 중에 있다. 루비듐 원자시계의 시계 안정성은 1×10^{-14} , 수소 메이저 원자시계의 시계 안정성은 1×10^{-15} 이다 (EoPortal 2023).

QZS 위성의 경우 2개의 루비듐 원자시계를 사용하고 있다. 전압 제어 크리스탈 오실레이터와 2개의 루비듐 원자시계로 구성된 시간 유지 및 주파수 합성 장치를 통해 높은 단기 및 장기 안정성을 확보할 수 있다 (Spaceflight101 2023).

IRNSS 위성은 3개의 루비듐 원자시계를 사용하고 있다. 하나는 주 시계로 사용되고, 나머지 두 개는 여분으로 남아있다. 여분의 시계는 주 시계가 고장났을 때 바로 사용할 준비가 되어있는 Hot redundant와 비활성 상태로 유지되는 Cold redundant로 분류된다. 시계 안정성은 10,000초 동안 5×10^{-14} 이다 (Rajaiah et al. 2017).

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 주요 GNSS 및 RNSS 시스템에 사용되는 위성체의 H/W 특성 및 제원에 대한 분석을 통해 각 시스템의 기술적 발전과 특징을 비교하였다. 미국의 GPS를 시작으로 EU의 Galileo, 러시아의 GLONASS, 중국의 BeiDou, 일본의 QZSS 및 인도의 NavIC까지 각 시스템의 위성체에 대한 연구를 수행하였다.

GPS의 경우, 40년 이상에 걸친 개발 기간 동안 Block II, IIR, IIR-M, IIF, III 및 III-F 등 다양한 세대의 위성체를 개발하면서 성능을 지속적으로 개선해왔다. Galileo의 경우, 공동 개발로 인한 시행착오와 성능 향상을 경험하면서 개발이 지연되었으며, GLONASS와 BeiDou도 초기 개발 단계에서 시행착오를 겪었다. 하지만 BeiDou는 단기간에 기술 수준을 향상시키고 급격한 성과를 거두었으며, QZSS와 NavIC은 지역적인 운용에 중점을 두고 발전하고 있다.

각 GNSS 시스템에 최신 위성체를 중심으로 궤도, 질량, 전력 시스템 등의 제원을 비교하고 분석하여 시스템 간의 공통점과 차이점을 분석하였다. 이러한 비교는 항법위성 개념 설계에 필요한 중요한 정보를 제공하고, 각 시스템의 운용 목표와 기술적 특성을 이해하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J.K.; formal analysis, Y.K. and J.K.; data curation, Y.K.; writing—original draft preparation, Y.K.; writing—review and editing, J.K.; project administration, J.K., J.C.; funding acquisition, J.C.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Anderson, C. H. 2022, Global positioning system status and modernization, in 2022 Civil GPS Service Interface Committee, Denver, CO, 19-20 Sep 2022.
- Arianespace, VA244 [Internet], cited 2023a July 24, available from: <https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2018/07/DDP-VA244-GB-final.pdf>
- Arianespace, VS26 [Internet], cited 2023b Feb 17, available from: <https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2021/11/VS26-launchkit-EN6.pdf>
- Bartolome, J. P., Maufruid, X., Hernandez, I. F., Lopez Salcedo, J. A., & Granados, G. S. 2014, GALILEO Positioning Technology (Berlin: Springer), pp.9-33
- Cabinet Office 2019a, QZS-2 SATELLITE INFORMATION,

- Government of Japan National Space Policy Secretariat, SPI_QZS2_C
- Cabinet Office 2019b, QZS-4 SATELLITE INFORMATION, Government of Japan National Space Policy Secretariat, SPI_QZS4_C
- Cabinet Office 2021, QZS-3 SATELLITE INFORMATION, Government of Japan National Space Policy Secretariat, SPI_QZS3_C
- Cabinet Office 2022a, Quasi-Zenith satellite system performance standard, Government of Japan National Space Policy Secretariat, PS-QZSS-003
- Cabinet Office 2022b, QZS-1R SATELLITE INFORMATION, Government of Japan National Space Policy Secretariat, SPI_QZS1R_A
- CSNO, BDS constellation status [Internet], cited 2023 Feb 13, available from: <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>
- EoPortal, satellite mission catalogue [Internet], cited 2023 Feb 19, available from: <https://www.eoportal.org/satellite-missions>
- EUSPA, Galileo constellation status [Internet], cited 2023 Feb 16, available from: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>
- Everyday Astronaut, GPS III SV06 [Internet], cited 2023a Feb 13, available from: <https://everydayastronaut.com/gps-iii-sv06-falcon-9-block-5-2/>
- Everyday Astronaut, QZS-1R [Internet], cited 2023b Feb 20, available from: <https://everydayastronaut.com/qzs-1r-h-ii-a-202-2/>
- Ha, J. & Chun, S. 2010, Current status and development plan of global navigation satellite system, Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, 8, 46-53.
- Hein, G. W. 2020, Status, perspective and trends of satellite navigation, Satellite Navigation, 1, 1-22. <https://doi.org/10.1186/s43020-020-00023-x>
- IAC, about GLONASS [Internet], cited 2023a Nov 16, available from: https://glonass-iac.ru/en/about_glonass/
- IAC, BeiDou [Internet], cited 2023b Feb 19, available from: <https://glonass-iac.ru/en/guide/beidou.php>
- ISRO, IRNSS [Internet], cited 2023a Feb 19, available from: https://www.isro.gov.in/IRNSS_Programme.html
- ISRO, list of IRNSS navigation satellites [Internet], cited 2023b Feb 19, available from: <https://www.isro.gov.in/spacecraft/satellite-navigation>
- Kim, E. 2003, Development trends in navigation satellite system, Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, 1, 66-70.
- Kossenko, V., Crechkoseev, A., & Fatkulin, R. 2012, GLONASS space segment status & modernization, in ICG-7, Beijing, China, 4-9 Nov 2012. <https://www.unoosa.org/>

pdf/icg/2012/icg-7/wg/wga1-1.pdf

- Lee, S., Ryu, J. G., & Byun, W. J. 2021, Survey on navigation satellite system and technologies, *Electronics and Telecommunications Trends*, 36, 61-71. <https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360406>
- Lockheed Martin, GPS III fact sheet [Internet], cited 2023 Feb 16, available from: <https://www.yumpu.com/en/document/view/36732309/gps-iii-fact-sheet-lockheed-martin>
- Marquis, W. & Shaw, M. 2011, GPS III bringing new capabilities to the global community, *Inside GNSS*, 6, 34-48.
- Nam, G. W., Heo, M. B., & Sim, J. Y. 2007, Current status of satellite navigation system and augmentation system deployment, *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, 5, 65-74.
- NASA Spaceflight, Russian military launches GLONASS-K navigation satellite from Plesetsk [Internet], cited 2023 Feb 13, available from: <https://www.nasaspaceflight.com/2022/07/russian-glonass-k-launch>
- Navigation Center, GPS constellation [Internet], cited 2023 Feb 13, available from: <https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation>
- Navipedia, GPS space segment [Internet], cited 2023 Feb 13, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=GPS_Space_Segment&oldid=15458
- Nikolay, T. 2015, Space navigation in Russia: history of development, in 2015 United Nations/Russian Federation Workshop on the Application of Global Navigation Satellite Systems, Krasnoyarsk, Russian Federation, 18-22 May 2015.
- OHB, GALILEO European satellite navigation system (space segment) [Internet], cited 2023 Feb 20, available from: https://www.ohb.de/fileadmin/ohb/Downloads/190603_OHB-System_Galileo_FOC-Satellites_2019-05.pdf
- Rajaiah, K., Kamat, M., Nirmala, S., & Ratnakara, S. C. 2017, IRNSS/NavIC on-board clock characterization, *IJIRSET*, 6, 7301-7306.
- Rapid Spacecraft Development Office (RSDO), LM2100 datasheet [Internet], cited 2023 Feb 13, available from: https://rsdo.gsfc.nasa.gov/images/catalog-rapidIV/LM2100_Datasheet_v7.pdf
- Rizos, C. 2014, The future of global navigation satellite systems, University of New South Wales Technical Report, NSW 2052.
- Rizos, C., Higgins, M. B., & Hewitson, S. 2005, New GNSS developments and their impact on survey service providers and surveyors, In *Proceedings of SSC2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis: The national biennial Conference of the Spatial Sciences Institute*, Melbourne, Australia, 12-16 September 2005, pp.1-16.
- Russian Space Web, GLONASS-K [Internet], cited 2023 Feb 13, available from: https://www.russianspaceweb.com/uragan_k.html
- Seko, H., Sekine, K., Uchida, Y., Asaba, M., Hayashi, S., et al. 2003, Development of the DS2000 platform for GEO/HEO satellites, In *Proceedings of the 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit*, Yokohama, Japan, 15-19 April 2003, pp.1-6. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2003-2353>
- Spaceflight101, satellite library [Internet], cited 2023 Feb 20, available from: <https://spaceflight101.com/spacecraft>
- Steigenberger, P. & Montenbruck, O. 2022, IGS satellite metadata file description, *Metadata SINEX 1.00*, 1-20. <https://doi.org/10.57677/metadata-sinex>
- Steigenberger, P., Montenbruck, O., Dach, R., & Prange, L. 2015, Galileo satellite antenna modeling, in *European Geoscience Union General Assembly 2015*, Vienna, Austria, 12-17 April 2015.
- Steigenberger, P., Thielert, S., & Montenbruck, O. 2020, GPS III Vespucci: results of half a year in orbit, *Advances in Space Research*, 66, 2773-2785. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.026>
- U R Rao Satellite Centre, salient features of IRNSS 1I [Internet], cited 2023 July 25, available from: <https://www.ursc.gov.in/navigation/html/irnss-1i.jsp>
- Wikipedia, Galileo [Internet], cited 2023 Feb 13, available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation))
- XinhuaNet, China launches last BDS satellite [Internet], cited 2023 Nov 23, available from: http://www.xinhuanet.com/english/2020-06/23/c_139161359.htm
- Yu, S. S., Lee, J. H., & Kim, S. Y. 2020, Technology trends in satellite-based navigation system, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 26, 33-43.
- Zhao, Q., Guo, J., Wang, C., Lyu, Y., Xu, X., et al. 2022, Precise orbit determination for BDS satellites, *Satellite Navigation*, 3, 1-24. <https://doi.org/10.1186/s43020-021-00062-y>



Yongrae Kim received the B.S. degree in School of Aerospace and Mechanical Engineering from Korea Aerospace University, Korea, in 2023. He is currently an M.S student in Korea Aerospace University. His research interests include GNSS applications and navigation.



Jeongrae Kim is a professor in the Department of Aerospace Engineering at Korea Aerospace University, Korea. He received his Ph.D. in Aerospace Engineering from the University of Texas at Austin in 2000. His research interest includes satellite instrument simulations, orbit determ-

ination, GNSS ionosphere, SBAS, and GNSS applications.



Jong Yeoun Choi received his Ph.D. degree in Electronic Engineering from Chungnam National University, Korea and received his B.S. and M.S. degrees in Electronic Engineering from Kyungpook National University, Korea. He is a principal researcher at Korea Aerospace Research Institute (KARI).

He had participated in the development of satellite system for 20 years and has been working on the satellite navigation project.