

Quality Assessment of GPS L2C Signals and Measurements

Seonghyeon Yun¹, Hungkyu Lee^{2†}

¹Department of Eco-Friendly Offshore Plant FEED Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

²School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

ABSTRACT

A series of numerical experiments with measurements observed at continuously operating reference stations (CORS) of the international GNSS services (IGS) and the national geographical information institute of Korea (NGII) have been intensively carried out to evaluate the quality of pseudo-ranges and carrier-phases of GPS L2C signal obtained by various receiver types, benign and harsh operational environment. In this analysis, some quality measures, such as signal-to-noise ratio (SNR), the magnitude of multipath, and the number of cycle slips, the pseudo-range and carrier phase obtaining rate were computed and compared. The SNR analysis revealed an impressive result that the trend in the SNR of C/A and the L2C comparably depends upon type of receivers. The result of multipath analysis also showed clearly different tendency depending on the receiver types. The reason for this inconsistent tendency was seemed to be that the different multipath mitigation algorithm built-in each receiver. The number of L2C cycle slip was less than P2(Y), and L2C measurements obtaining rate was higher than that of P2(Y) in three receiver types. In the harsh observational environment, L2C quality was not only superior to P2(Y) in all aspects such as SNR, multipath magnitude, the number of cycle slips, and measurement obtaining rate, but also it could maintain a level of quality equivalent to C/A. According to the results of this analysis, it's expected that improved positioning performance like accuracy and continuity can be got through the use of L2C instead of existing P2(Y).

Keywords: L2C, measurement quality, SNR, multipath, cycle slip

1. INTRODUCTION

측위·항법 서비스의 정확도, 연속성, 강건성(robustness) 향상을 위해 Global Positioning System (GPS)에 대한 현대화(modernization)가 추진 중이며, 2005년 Block IIR-M을 시작으로 IIF와 III 등 현대화 위성의 궤도 배치가 지속되고 있다. 민간 사용자 측면에서, GPS 현대화에 대한 가장 큰 기대는 새로운 측위 신호, 특히 L2C, 취득이다. 이에 따른 이중 주파수 관측데이터 사용은 전리층 영향의 대폭 축소를 Single Point Positioning (SPP) 정확도 향상을 가능케 한다. 뿐만 아니라, 반송파 기반 이중주파수 Real-Time-Kinematic (RTK) 측위에서도 기존 P2(Y) 대신 L2C를 사용할 때 불량한 관측환경에서 위성신호 취득 성능 향

상으로 연속성 향상을 기대할 수 있을 것이다 (Rizos et al. 2005, Hegarty 2014).

GPS L2C는 L2 반송파 동조 민간용 신호로 2005년 Block IIR-M에 의해 서비스를 시작한 이래 2021년 1월 현재 총 23기의 위성이 송출하고 있어 (NAVCEN 2021), 이를 활용한 측위 알고리즘 구현이 필요한 시점이다. 새로운 관측데이터를 포함하는 측위 알고리즘 구현을 위해서는 통계모형화(stochastic modeling) 등을 위해 그 특징을 파악해야 한다. Simsky et al. (2006)은 Septentrio 수신기 PolARx2C로 취득한 데이터의 Signal-To-Noise Ratio (SNR), 의사거리 다중경로와 잡음 크기, 그리고 Differential Code Biases (DCB)를 분석했다. 그 결과 L2C와 C/A 품질이 유사하며, 특히 다중경로 저감 알고리즘 적용은 L2C 의사거리 품질 향상에 영향을 미칠 수 있음을 보였다. al-Fanek et al. (2007)은 L2C 신호 특징을 고찰하고, Novatel OEMV3 수신기 취득 데이터의 SNR, 다중경로, 신호 취득 성능을 비교했으며 DCB를 추정하는 바 있다. 실험 결과 L2C의 SNR과 신호취득 성능이 C/A와 유사한 것과 달리, L2C 다중경로는 낮은 고도각에서 C/A에 비해 불량했으며 고도각이 높아질수록 그 차이가 줄어드는 것을 확인했다. Sukeeva et al. (2007)은 Trimble R7, NetRS, NetR5 수

Received Feb 18, 2021 Revised Feb 23, 2021 Accepted Feb 26, 2021

†Corresponding Author

E-mail: hkyulee@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3777 Fax: +82-55-285-9491

Seonghyeon Yun <https://orcid.org/0000-0002-7135-0046>

Hungkyu Lee <https://orcid.org/0000-0002-7127-9702>

신기로 취득한 C/A, P2(Y), L2C의 SNR과 다중경로 크기를 비교하였다. 이 연구에서 주목할 점은 R7과 NetRS 취득 L2C 다중경로가 C/A에 비해 불량한 반면, NetR5로 취득한 L2C 다중경로는 C/A와 유사하다는 사실로 그 이유를 다중경로 저감 알고리즘 적용 여부에 따른 것이라 보고했다. De Agostino et al. (2008)은 Topcon NET-G3과 Trimble NetR5 수신기 취득 L2C와 C/A의 신호 강도에는 차이가 없으나 다중경로 크기는 위성 고도각과 의사거리 종류에 따라 상이한 것으로 분석하였다.

앞서 살펴본 바와 같이 L2C 품질 분석 연구들은 Block IIR-M 궤도 배치 초기 1 ~ 6기 위성에서 해당 신호를 송출할 당시에 대해 제한적으로 수행한 것이다. 따라서 2021년 1월 현재 궤도 상에 배치된 GPS 위성 31기 중 23기(74%)가 L2C 신호를 송출하는 환경 변화를 고려해 이 신호를 포함한 측위 알고리즘 개발 등을 위하여 추가적 분석이 요구되는 시점이다. 뿐만 아니라, 기존 연구에 추가해 상이한 다중경로 환경에서 L2C 의사거리는 물론 이로부터 취득한 반송파에 대한 품질 점검이 고정밀 측위 응용분야를 위해 필요하다. 따라서, 본 연구 목적은 GPS 현대화 위성 23기가 송출하는 L2C 신호로부터 취득한 관측데이터의 품질을 분석하는 것이다. 이를 위해 3가지 수신기 Trimble NetR9, Septentrio PolaRx5TR, Topcon NET-G3A가 취득한 데이터를 International GNSS Services (IGS)와 국토지리정보원으로부터 확보해 SNR, 의사거리 다중경로 크기, 사이클 슬립 발생 빈도, 데이터 취득율을 계산·비교하였다. 특히 국토지리정보원 데이터는 관측환경을 양호와 불량으로 구분했으며, 그 차이를 정량적으로 분석했다.

2. OVERVIEW OF L2C MEASUREMENTS

현대화 프로그램으로 새로운 모델의 GPS 위성 개발과 궤도 배치가 지속되고 있다. 그 첫번째는 Block IIR-M로 2005년부터 2009년까지, 두 번째는 IIF로 2010년에서 2016년까지 그리고 가장 최근에는 III와 IIIF가 2018년부터 배치되고 있다. Table 1은 2021년 1월 현재 GPS 위성 배치 현황으로 운영 중인 31기 중 23기가 현대화 위성이며 이들 모두 L2C 신호를 송출한다 (NOAA 2021, NAVCEN 2021). 이를 참조할 때 L2C 송출 위성 수는 최소 24대의 위성이 필요한 Full Operational Capability (FOC)에 매우 근접해 이 신호를 활용한 측위 알고리즘 구현이 필요한 시점임을 확인할 수 있다.

L2C는 C/A와 함께 민간 사용자용이나, 단일 코드인 C/A와 상이하게 2개로 이루어진 특징이 있다. Civil Moderate (CM)과 Civil Long (CL)이 L2C를 구성하는 두 개의 코드로 이들의 특징을 C/A와 비교해 Table 2에 정리했다. CM 코드는 10,230 칩의 길이와 511.5 kHz의 칩률(chip rate)을 가지며 20 msec마다 반복되는 반면, CL 코드는 767,250 칩 길이, CM 코드와 동일한 511.5 kHz의 칩률, 그리고 1.5 sec의 반복 주기를 갖는다(Fontana et al. 2001). 이와 함께 CM 코드는 25 bps의 항법 메시지에 의해 변조되어 있으나 CL 코드는 그렇지 않으며, 두 코드 모두는 Time Division Multiplexing (TDM) 기술에 의해 동시에 전송되어, 응용 분야에 따라 두 코드를 각각 혹은 함께 사용할 수 있다 (Song et al. 2011).

Table 1. Status of GPS satellites in operation as of January 2021.

Satellite model	Legacy	Modernization		
	Block IIR	Block IIR-M	Block IIF	Block III/IIIF
Number	8	7	12	4

Table 2. Characteristics of C/A and L2C code (Fontana et al. 2001, Cho et al. 2004).

Signal	Band Code	L1	L2		
		C/A	CM	CL	CM & CL
Frequency (MHz)		1575.42		1227.60	
Chip rate (MHz)		1.023	0.5115	0.5115	1.023
Code length (chips)		1,023	10,230	767,250	1,534,500
Duration		1 msec	20 msec	1.5 sec	1.5 sec
Bit rate		50 bps	25 bps	No message	50 sps

두 코드 동시 취득의 칩률은 C/A의 그것과 동일해 의사거리 다중경로와 잡음의 크기가 유사할 것으로 예상할 수 있다 (Simsy et al. 2006, al-Fanek et al. 2007, Sukeova et al. 2007). CM과 CL 코드는 기존 C/A에 비해 그 길이가 각각 10배, 75배 길어 교차 상관 특성이 우수하며, 이에 따라 L2C 데이터의 취득 성능이 C/A에 비해 우수할 뿐만 아니라 신호의 간섭 등에 강인한 것으로 알려져 있다 (Song et al. 2011). 특히, CL 코드는 항법 메시지에 의해 변조되어 있지 않아 실내나 수풀 아래 등 관측환경이 불량한 상황에서의 데이터 취득 성능이 뛰어나 기존의 P2(Y)를 사용하는 이중주파 수신기가 L2C를 대신 취득한다면, 관측환경에 영향을 적게 받는 측위가 가능할 것이라 예상된다 (Fontana et al. 2001, Cho et al. 2004). 하지만 CM과 CL 코드의 긴 길이 때문에 데이터 취득에 걸리는 시간이 C/A에 비해 크게 증가할 수 있음에 유의해야 한다 (Lim et al. 2006).

3. RESULTS OF QUALITY ASSESSMENT

3.1 Data and Quality Measures

GPS 관측데이터 품질에 영향을 미칠 수 있는 수신기 종류와 관측환경에 따른 분석을 위해 Table 3과 같이 IGS 3점과 국토지리정보원 상시관측점 6개소 데이터를 확보해 모두 RINEX 3.02 형식으로 변환하였다. 표에서와 같이 GPS 수신기는 Trimble NetR9, Septentrio PolaRx5TR, Topcon NET-G3A 3가지 종류이며, 이들은 각각 TRM59800.00, JAVRINGANT_DM, TPSCR, G3 안테나가 연결되어 있다. 모든 안테나는 초크링(choke-ring) 형식으로 데이터 품질에 미치는 영향은 제한적인 것으로 판단하였다. IGS 데이터는 실시간 네트워크의 Network Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP)으로 직접 저장했으며, NetR9, Polarx5TR, NET-G3A수신기 설치 관측점에 대해 2021년 1월 4일부터 6일까지 매일 GPST 기준 08시부터 5시간 분량 데이터를 각각 획득했다. 반면, Table 3의 국내 관측점 6개소는 2021년 1월 4일 24시간에 대한 것을 국토지리정보원 GNSS 데이터 센터로부터 바이너리 파일을 직접 확보했으며, NGII (2019)를 참조해 관측환경을 ‘양호(benign)’한 것과 ‘불량(adverse)’한 것으로 구분해 분석하였다. 본 연구의 분석에 사용한 GPS L2C 관측데이터는

Table 3. Testing cases about receiver types and observation environment.

Testing cases	Station ID	Types of hardware		Types of L2C measurements	
		Receiver	Antenna (radome)	Pseudo range	Carrier phase
Receiver type (CASE 1)	ASCG	Trimble NetR9	TRM59800.00 (NONE)	C2X	L2X
	BRUX	Septentrio PolaRx5TR	JAVRINGANT_DM (NONE)	C2L	L2L
	FRDN	Topcon NET-G3A	TPSCR.G3 (NONE)		
Observational environment (CASE 2)	DOND, SEJN, WULJ (Benign)	Trimble	TRM59800.00	C2X	L2X
	CHCN, INCH, KWNJ (Adverse)	NetR9	(SCIS)		

NetR9은 CM과 CL 혼합 코드 그리고 PolaRx5TR와 NET-G3A는 CL 코드로부터 추출한 것이며, RINEX 버전 3.02 데이터 표기법 (IGS 2013)을 따라 전자의 의사거리와 반송파는 각각 C2X, L2X, 후자는 C2L와 L2L로 표현할 수 있다. 또한 해당 표기법에 따르면 L1 C/A는 CIC와 LIC, P2(Y)는 C2W와 L2W로 각 신호의 의사거리와 반송파를 표기하므로, 이후 본문에서는 해당 표기법을 준용하여 각 데이터를 나타냈다.

GPS 관측데이터 품질 평가에는 SNR, 의사거리 다중경로 크기, 사이클 슬립 (Cycle Slip) 발생 빈도, 데이터 취득율을 그 척도로 사용하였다. 다중경로는 잡음을 포함해 Eqs. (1)과 (2)로 계산했으며 (al-Fanek et al. 2007, Sukeova et al. 2007), 사이클 슬립 빈도는 University NAVSTAR Consortium (UNAVCO)의 GNSS 관측데이터 점검 및 편집 툴(tool)인 TEQC로 점검하였다 (Estey & Wier 2014). 또한, LIC와 CIC 취득 개수에 대해 L2L, L2X, L2W 그리고 C2L, C2X, C2W 수의 비율을 각각 계산해 데이터 취득 성능을 비교했다.

$$dM_1 = P_1 - \frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_1 + \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_2 = P_1 - 4.0915\phi_1 + 3.0915\phi_2 \quad (1)$$

$$dM_2 = P_2 - \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_1 + \frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_2 = P_2 - 5.0915\phi_1 + 4.0915\phi_2 \quad (2)$$

여기서, dM_m 는 다중경로, P_i 와 ϕ_i 는 각각 m 단위의 의사거리와 반송파이며 f_i 는 주파수이다. 아래 첨자 i 는 반송파 대역에 따라 1 (1575.42 MHz)과 2 (1227.60 MHz)로 구분했다.

3.2 Results and Discussions

3.2.1 Impact of receiver type

Table 3에서 IGS 관측점의 서로 다른 3가지 수신기로 취득한 GPS 관측데이터 품질을 평가했다. 서로 다른 수신기에서 추적한 기존(legacy)과 현대화 위성의 신호강도 분석을 위해 시간에 따른 SNR과 위성 연직각 변화를 Figs. 1과 2에 각각 도시하였다. 기존 위성의 SNR을 도시한 Fig. 1에서 PolaRx5TR로 취득한 PRN 13 신호강도를 보면 C/A가 모든 고도각에 대해 P2(Y)보다 높으며, 90°에서는 5 dbHz에 불과했던 차이가 고도가 낮을수록 커져 5° ~ 10° 구간에서 약 20 dbHz에 달하였다. NetR9과 NET-G3A로 취득

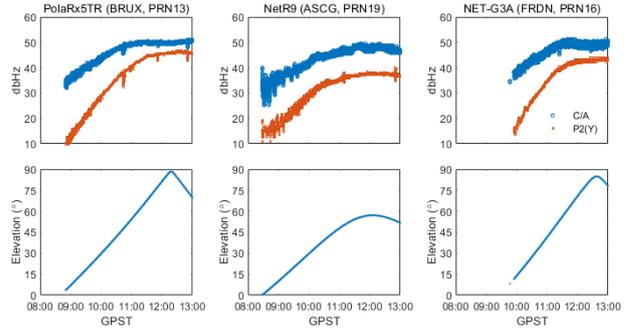


Fig. 1. SNR and satellite elevation angles of GPS legacy SVs.

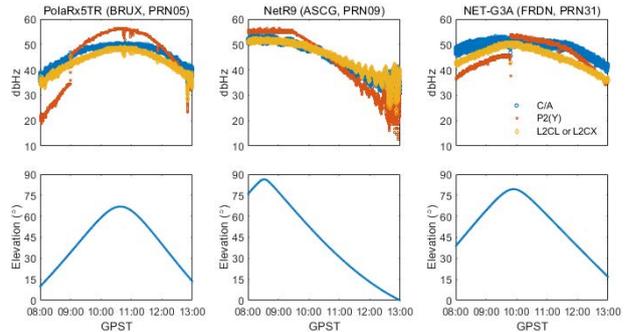


Fig. 2. SNR and satellite elevation angles of GPS modernized SVs.

한 PRN 19, PRN 16 SNR에서도 유사한 경향을 관찰할 수 있으며, 이는 민간용 수신기가 P2(Y) 신호를 비코드(codeless) 방식으로 추적하기 때문이다. 반면, Fig. 2의 PolaRx5TR 취득 PRN 5 신호 강도를 보면 Fig. 1에서 살펴본 바와 달리 P2(Y) SNR이 고도각 약 35° 부근에서 급격한 증가해 C/A보다 높은 구간이 있는 것을 확인할 수 있다. NetR9으로 추적한 PRN 19 SNR에는 P2(Y)의 점프는 나타나지 않으나 C/A보다 높은 구간이 존재한다. 반면, NET-G3A 취득 PRN 31 신호강도는 관측기간 내에 P2(Y)의 점프가 있으나 다른 두 수신기 결과와 달리 C/A보다 높은 값을 갖지는 않았다. 현대화 위성은 전파 방해(jamming) 등에 저항하기 위해 고강도의 P(Y) 신호를 전송할 수 있는 송출기를 탑재하고 있으며, 제어부문으로부터 명령을 받아 대서양-아프리카-유럽-아시아-태평양 상공을 지날 때 높은 세기의 신호를 송출하기 때문에 이와 같이 P2(Y) SNR의 점프 및 C/A보다 높은 경우가 나타난다 (Esenbuğa & Hauschild 2020, Steigenberger et al. 2020). 또한 Fig. 2는 현대화 위성에 대한 것으로 L2CL과 L2CX 신호강도를 함께 나타내고 있다. PolaRx5TR과 NET-G3A가 취득하는 L2CL 신호강도는 C/A보다 약간 작았으나 연직각 증가에 따라 그 차이가 감소했다. 반면, NetR9 취득 L2CX 신호강도는 전체 관측기간에 대해 C/A와 동등한 수준이었다. 이들 세 수신기에서 취득한 L2CL, L2CX SNR은 P2(Y)와 달리 C/A의 그것과 전반적으로 유사한 것을 시계열을 통해 확인할 수 있다.

각기 다른 수신기가 설치된 BRUX, ASCG, FRDN 관측점의 SNR을 연직각 10° 간격으로 구분해 평균과 표준편차를 계산하여 Fig. 3에 나타내었으며, 수신기 종류와 고도각에 따라 상이한 경향을 보인다. PolaRx5TR는 10° ~ 30° 구간에서 L2CL과 C/A의

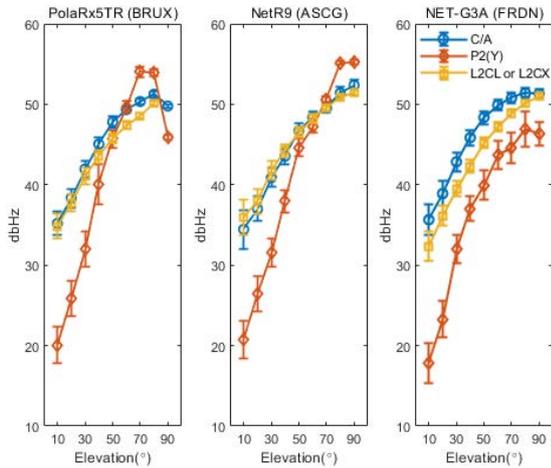


Fig. 3. SNR statistics of three receiver types at different elevation angles.

SNR이 비슷하다가 40°부터 L2C SNR이 C/A에 비해 약간 낮아진 후 80° 부근에서 다시 유사해진다. NetR9 취득 L2CX 신호강도는 앞서 살펴본 바와 같이 전체 고도각에 대해 C/A와 큰 차이가 없으나, 60°를 기준으로 저고도에서는 C/A보다 크고, 그 이상의 고도에서는 C/A보다 약간 작았다. NET-G3A의 결과에서 L2CL의 SNR은 90°를 제외하면 C/A 보다 낮았다. P2(Y)는 PolaRx5TR과 NetR9이 유사한 경향을 보여 10° ~ 40° 구간에서 다른 신호보다 그 강도가 약하나 50° 이상에서는 C/A와 L2CL, L2CX와 유사하거나 높았고 연직각 80° 부근에서 그 크기가 55 dbHz에 달했다. 반면, NET-G3A의 P2(Y) 신호강도는 다른 두 수신기 결과와 달리 고도각이 높아지더라도 다른 두 신호의 SNR보다 높아지지 않았다. 이와 같은 내용을 종합할 때 Fig. 3의 결과로부터 C/A 신호 강도는 L2CL, L2X의 그것에 비해 높거나 유사하며, 신호분석에 사용한 수신기 모두는 낮은 고도각에서 L2CL, L2CX 신호강도가 P2(Y)에 비해 높은 것을 알 수 있다.

각기 다른 수신기 3대가 취득한 C/A, P2(Y), L2CL, L2CX의 SNR 평균과 표준편차를 계산해 Fig. 4에 오차막대로 나타냈다. 앞서 Fig. 3에서 살펴본 바와 같이 PolaRx5TR과 NET-G3A로 취득한 L2CL SNR이 C/A에 비해 낮은 반면, NetR9의 L2CX 신호 강도는 C/A와 유사한 수준이었다. P2(Y) 신호강도는 3가지 수신기에서 다른 두 신호에 비해 낮았으며, 특히 NET-G3A의 경우 그 차이가 상대적으로 컸다. Fig. 4의 결과에 따르면 수신기와 신호 종류에 따라 신호강도 경향이 달랐지만, L2CL과 L2CX가 P2(Y) 보다 전반적으로 높은 SNR 값을 가지는 점은 모든 수신기가 동일하였다. 또한, NetR9의 L2CX와 나머지 두 수신기의 L2CL을 비교할 때 전자가 후자에 비해 높은 특징을 보였다.

수신기에 따른 데이터 취득 성능 비교를 위해 계산한 의사거리와 반송파 취득율, 사이클슬립 빈도를 Table 4에 요약했다. 여기서 데이터 취득율은 의사거리 C1C와 반송파 L1C 기준 C2L, C2X, C2W 와 L2L, L2X, L2W 수 비율이다. 3 관측소 모두 양호한 환경에서 고성능 수신기로 데이터를 취득해 관측데이터 취득율이 약 97% 이상으로 높으며, L2C 의사거리(C2L & C2X)와 반송파(L2L & L2X) 종류에 따른 차이가 나타나지 않았다. 세 기준점 모두 C2L, C2X와 L2L, L2X 취득율이 C2W와 L2W 보다 높

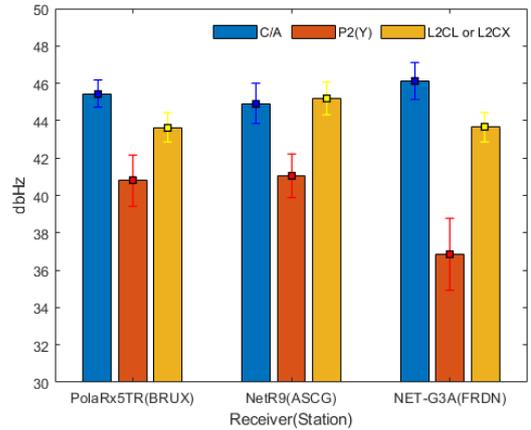


Fig. 4. SNR statistics of the three IGS stations equipped with PolaRx5TR, NetR9, and NET-G3A receivers.

Table 4. The number of cycle slips and data acquisition rates at IGS stations.

Index	Type of measurement	Receiver (station)		
		Septentrio PolaRx5TR (BRUX)	Trimble NetR9 (ASCG)	Topcon NET-G3A (FRDN)
Obs. rate (%)	C2L or C2X	100.24	99.62	99.82
	C2W	99.77	97.94	96.93
	L2L or L2X	100.26	99.62	99.82
	L2W	99.79	97.94	96.93
No. of cycle slips	L2L or L2X	36	510	8
	L2W	49	700	317

은 것을 확인할 수 있으며, 특히 PolaRx5TR을 사용하는 BRUX에서는 C2L과 L2L 수가 C1C와 L1C에 비해 많았다. 사이클슬립은 PolaRx5TR의 경우 L2L이 L2W에 비해 근소하지만 적게 발생했고, NetR9은 다른 두 수신기에 비해 높은 빈도로 발생했으나, L2X가 L2W에 비해 현저히 적은 것을 알 수 있다. NET-G3A 역시 L2L이 L2W보다 적은 수의 사이클슬립이 발생했으며, 그 차이가 3 수신기 중 가장 컸다. 이를 통해 L2C가 P2(Y) 보다 데이터 취득 성능이 우수한 것을 알 수 있으며, 그 이유는 장애물 영향을 많이 받는 낮은 고도에서 L2CL, L2CX 신호강도가 P2(Y)에 비해 10 dbHz 이상 높기 때문일 것이다.

위성 연직각에 따른 C1C, C2W, C2L와 C2X의 다중경로와 관측잡음 특징을 살펴보기 위해 서로 다른 수신기에서 취득한 데이터의 다중경로 계산 예를 Fig. 5에 도시했다. 세 수신기 모두 천정각 증가에 따라 다중경로와 잡음이 증가하는 전형적인 특징을 보여주고 있다. PolaRx5TR 취득 PRN 5의 C1C와 C2L 다중경로 크기가 유사한 경향을 보이는 것과 달리 NetR9의 PRN 9에 대한 C1C는 C2X에 비해 상대적으로 크며, NET-G3A의 PRN 31로부터 취득한 C1C는 반대로 C2L에 비해 약간 작았다. C2W 다중경로는 다른 두 의사거리의 그것에 비해 전반적으로 작았다.

3가지 수신기의 의사거리 다중경로를 고도각 10° 간격으로 구분해 계산한 평균과 표준편차를 Fig. 6에 나타낸 것이다. PolaRx5TR 취득 C2L과 C1C 다중경로는 Fig. 5에서 확인한 바와 같이 전체 고도각 구간에서 비슷한 반면, NetR9의 C2X는 C1C에 비해 그 크기가 작았고 NET-G3A로 취득한 C2L 다중경로는 반대로 모든 고도각에 걸쳐 C1C보다 컸다. C2W의 다중경로는 세

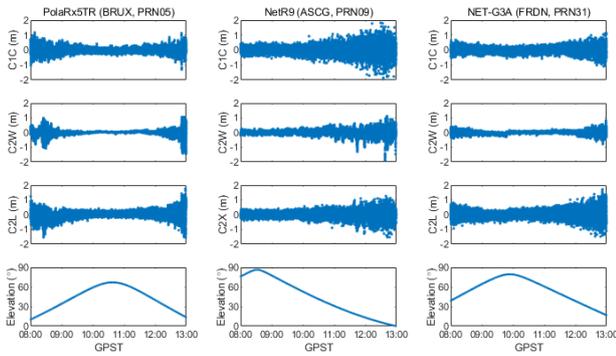


Fig. 5. Multipath and satellite elevation angles of GPS modernized SVs.

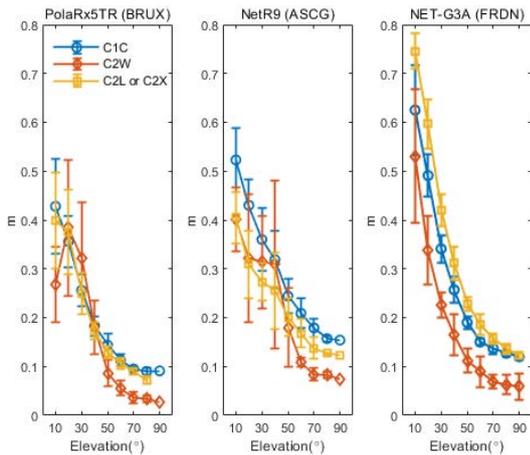


Fig. 6. Multipath of three receiver types at different elevation angles.

수신기에서 경향이 달랐으나 전반적으로 다른 두 의사거리에 비해 작게 나타났다. 다중경로와 잡음은 그 칩률에 영향을 받기 때문에 (Hofmann-Wellenhof et al. 2001), Table 2에 정리한 신호 특징에 따르면 CM · CL 코드를 동시에 수신해 코드 칩률이 C/A와 동일한 NetR9의 C2X 다중경로는 C1C와 유사하고, CL 코드만 수신해 그 칩률이 C/A 보다 낮은 PolaRx5TR, NET-G3A의 C2L 다중경로는 C1C보다 그 크기가 클 것이라 예상했으나 수신기에 따라 그 경향이 크게 달랐다. 선행 연구자들의 보고에 따르면, 그 원인은 수신기 내장 다중경로 저감 알고리즘과 그 적용 여부에 따른 것으로 유추된다 (Simsy et al. 2006, Sukeova et al. 2007, Jia et al. 2016).

실험에 사용한 3개 관측점 취득 의사거리 C1C, C2W, C2L와 C2X의 다중경로 평균과 표준편차를 계산해 Fig. 7에 도시했으며, 앞서 확인한 바와 같이 수신기 종류에 따른 다중경로 경향을 확인할 수 있다. PolaRx5TR의 C1C와 C2L 다중경로 크기가 유사한 수준인 반면, NetR9 취득 C2X는 C1C보다 작게, NET-G3A의 C2L는 반대로 C1C 보다 컸고, C2W 다중경로 크기는 모든 기준점에서 가장 작게 계산되었다. 이러한 결과를 종합했을 때, 수신기 내장 다중경로 저감 알고리즘에 따라 의사거리 기반 측위 정밀도가 달라질 수 있어, L2C 의사거리(C2L, C2X)를 사용 시 주의가 필요할 것을 알 수 있다.

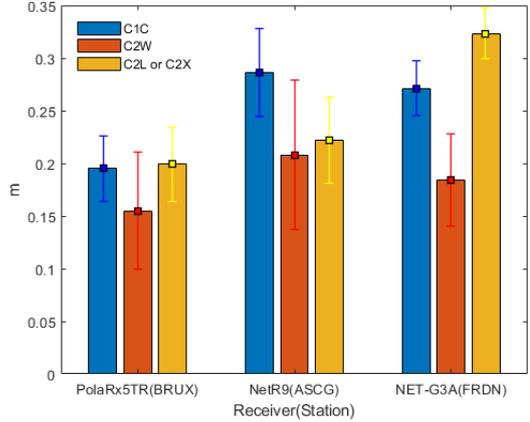


Fig. 7. Multipath statistics of the three IGS stations equipped with PolaRx5TR, NetR9, and NET-G3A receivers.

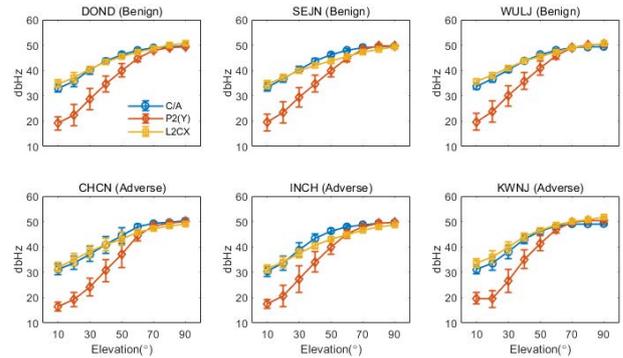


Fig. 8. SNR of each observational environment at different elevation angle.

3.2.2 Impact of observational environment

IGS 관측점을 이용한 실험으로 서로 다른 3가지 수신기에 대한 관측데이터 품질 분석을 수행했으나 이들은 모두 양호한 환경에 위치하고 있어 관측환경에 따른 평가가 이루어지지 않았다. 따라서 NGII (2019)를 통해 다중경로 환경을 파악한 국토지리정보원 상시관측점을 관측환경에 따른 품질 분석에 활용하였다. 국토지리정보원 대부분의 상시관측점에 설치된 수신기 NetR9은 CM과 CL 혼합코드를 획득하기 때문에 앞서 Table 2에서 살펴본 바와 같이 C/A와 L2C 칩률이 동일해 의사거리 다중경로 크기는 유사하나 L2C 코드길이가 C/A에 비해 길어 전자의 데이터 취득 성능이 우수할 것으로 예상된다. 이를 실험을 통해 확인하고자 두 가지 상이한 관측환경으로 구분한 국토지리정보원 상시관측점 6개소 관측데이터 품질을 앞서 언급한 지표를 사용해 평가하였다.

불량한 환경에서의 신호강도를 분석하고자 6개 관측소 3개 신호에 대한 SNR 평균과 표준편차를 연직각 10° 간격에 대해 계산하여 Fig. 8에 도시했다. 양호한 환경에 위치한 관측소 DOND, SEJN, WULJ의 SNR 변화를 보면 L2CX와 C/A 신호강도가 전체 연직각에 대해 동등한 수준이고 70° 이상의 높은 고도각을 제외하면 P2(Y) 보다 높아 앞서 IGS 기준점 중 NetR9을 사용하는 ASCG의 SNR 경향과 유사한 것을 알 수 있다. 반면, 불량한 관측 환경에 대한 신호강도는 양호한 환경의 그것과 유사한 경향을 보

Table 5. Cycle slip and rate of the number of measurements for each NGII station.

Environment	Station	Benign			Adverse		
		OND	SEJN	WULJ	CHCN	INCH	KWNJ
Obs. rate (%)	C2X	99.47	99.83	100.00	96.85	96.95	98.41
	C2W	97.72	98.89	99.81	94.36	94.70	97.43
	L2X	101.44	100.58	101.12	98.91	99.52	101.00
	L2W	98.34	99.14	99.85	95.26	95.84	98.16
No. of cycle slip	L2X	24	3	0	160	68	57
	L2W	100	68	23	370	268	168

이며 70° 이상 고고도에서는 두 환경에 대해 SNR이 동등한 수준이나 연직각 감소에 따라 장애물 영향 증가로 신호강도가 비교적 크게 감소하였다. 이에 따라 양호한 환경과 비교할 때 고도각 10°에서 3가지 측위 신호 모두 약 5 dbHz 낮았으며, 특히 CHCN, INCH의 P2(Y)는 20 dbHz보다 낮아졌다. 이러한 결과 통해 불량한 환경에서 C/A, P2(Y), L2C의 저고도 위성에 대한 신호 취득 성능 저하, 다중경로와 잡음 크기 증가를 예상할 수 있다.

불량한 관측환경에 대한 데이터 취득 성능을 평가하기 위해 사용한 국내 6개 관측소 데이터 취득율과 사이클슬립 발생 빈도를 Table 5에 요약하였다. 양호한 환경에 대한 결과를 보면 세 관측점의 C2X, C2W, L2X, 그리고 L2W 취득율이 약 98% 이상으로 매우 높았다. 여기서 주목할 만한 점은 C2X, L2X가 C2W, L2W에 비해 취득율이 높았을 뿐만 아니라 일부 관측소에서는 C1C, LIC 보다 그 수가 많다는 것이다. 불량한 관측환경에서는 C2X, C2W, L2X, L2W 모두 데이터 취득율이 하락했으나 C2W, L2W에 대한 값이 비교적 크게 감소한 것과 달리 C2X, L2X는 C1C, LIC와 유사한 수의 데이터를 획득한 것을 알 수 있다. 양호한 환경에서의 결과와 달리 C2X, L2X가 C1C, LIC 데이터 수 보다 적게 획득한 것으로 나타나며, 이는 Table 2에 나타난 바와 같이 L2C 코드 길이가 C/A보다 길기 때문에 데이터 취득까지 오랜 시간이 걸린 점, 위성 신호 추적 알고리즘 영향 등 복합적인 원인에 의한 것으로 의심된다. 양호한 환경에 위치한 관측점 사이클슬립 발생 수는 L2X가 L2W에 비해 적었으며, 관측환경이 불량해짐에 따라 L2X와 L2W 모두 사이클슬립 빈도가 높아졌으나 L2W가 상대적으로 크게 증가하였다. 이는 Fig. 8의 저고도에서 L2CX와 P2(Y)의 SNR 감소를 통해 예상한 바와 같이 관측환경이 불량해짐에 따라 증가하는 장애물 등의 영향이 그 원인이라 판단된다. 본 연구의 관측 환경에 따른 데이터 취득 성능을 비교한 결과에 따르면 L2C는 C/A와 유사한 성능을 보일 뿐만 아니라 P2(Y)에 비해 우수했다. 따라서 P2(Y) 대신 L2C 사용은 이중 주파 측위 연속성 향상에 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 하지만 이 결과는 고성능 수신기와 안테나를 사용해 얻은 것이기 때문에 저가형 수신기의 경우 데이터 취득 성능이 본 연구 결과와 다를 수 있음에 유의할 필요가 있다.

상기한 관측환경에 따른 다중경로를 분석하기 위해 관측환경과 고도각 10° 간격으로 구분한 세 의사거리 다중경로 평균, 표준편차를 Fig. 9에 오차막대로 나타냈다. IGS 관측점 중 NetR9 취득 의사거리 다중경로 결과와 유사하게 C2X 다중경로가 전체 고도각에 대해 C1C 보다 작았으며, 불량한 관측환경에서도 그 양상이 유지되었다. 이는 L2C 신호 특징을 통해 예상한 바와 다른 결과지만, 선행 연구 (Simsky et al. 2006, Sukeova et al. 2007)와 본 연구의 수신기에 따른 품질 분석 결과를 통해 그 원인이 다중경

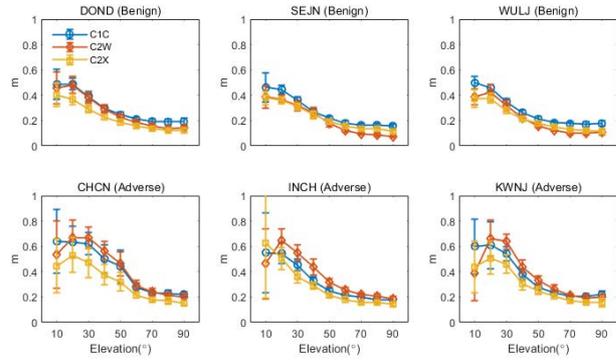


Fig. 9. Multipath of each observational environment at different elevation angle.

로 저감 알고리즘에 있음을 파악하였다. 관측환경이 불량하더라도 고도각 70° 이상에서는 장애물의 영향을 적게 받기 때문에 관측환경에 따른 다중경로 차이가 미미한 수준이나, 고도각이 낮아지며 관측환경 영향이 커지는 것을 확인할 수 있다. 특히 C2W 다중경로 증가 폭이 다른 의사거리에 비해 커, 고도각 50° 이하에서는 세 의사거리 중 가장 불량하였다. 관측환경에 따른 의사거리 다중경로 결과를 종합할 때, NetR9를 사용한다면 C1C 보다 정밀한, 특히 불량한 환경에서는 세 신호 중 가장 정밀한 C2X를 취득할 수 있어 L2C 사용이 의사거리 기반 측위 정확도 향상 측면에서 유리할 것으로 기대된다. 하지만 이는 다중경로 저감 알고리즘이 구현되어 있는 고성능 수신기와 안테나를 사용해 얻은 결과이기 때문에 저가형 수신기로 취득한 데이터 품질과 상이할 수 있어 이에 대한 추가 분석이 필요하다.

4. CONCLUSION

L2C 전송 위성 수가 2021년 1월 기준 23대로 FOC에 가까워짐에 따라 L2C 활용 측위 알고리즘 개발을 위해 해당 데이터 품질을 파악하는 기초연구가 필요한 시점이다. 이를 위해 본 연구에서는 서로 다른 종류의 수신기와 관측환경에서 취득한 L2C의 SNR, 의사거리 다중경로, 사이클슬립 발생 빈도, 그리고 데이터 취득율을 계산·분석하였고, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, Trimble NetR9으로 취득한 L2CX와 C/A의 SNR이 유사한 반면, Septentrio PolaRx5TR과 Topcon NET-G3A 경우 L2CL의 SNR이 C/A에 비해 약간 작았다. P2(Y)의 SNR은 수신기에 따라 고도각 80° 이상에서 다른 두 신호에 비해 높은 경우가 있었으나 전반적으로 세 신호 중 가장 낮았다. 장애물 영향이 작은 고고도에서는 양호·불량한 환경의 SNR이 유사했으나, 불량한 환경에서는 연직각 감소에 따른 SNR 하락폭이 커, 양호한 환경의 신호강도와 비교할 때 10°에서 약 5 dbHz 낮았다.

둘째, 관측데이터 취득 성능 분석을 위해 사이클슬립 발생 빈도와 데이터 취득율을 비교했다. 양호한 환경에서 C2L, C2X, C2W, L2L, L2X, 그리고 L2W 모두 98% 이상 높은 데이터 취득율을 보였으나, C2L, C2X, L2L, L2X가 C2W와 L2W 보다 약간 높았고, 전자의 경우 C1C와 LIC보다 많은 데이터를 취득하는 경

우가 있었다. 관측환경이 불량해짐에 따라 모든 데이터의 취득율이 감소했으나 C2X, L2X가 C1C, L1C와 유사한 수준을 유지하는 것과 달리 C2W, L2W는 현저히 낮아졌다. L2C 신호 특징 고찰을 통해 예상한 바와 달리 불량한 환경에서 C2X, L2X 취득 수가 C1C, L1C 보다 낮았으며, 그 이유는 C2X 코드 길이가 C1C에 비해 길어 데이터 취득까지 오랜 시간이 걸린 점, 수신기에 구현되어 있는 위성 신호 추적 알고리즘 등의 영향이라 판단된다. 사이클슬립은 L2L, L2X가 L2W에 비해 적게 발생했으며, 관측환경이 불량해짐에 따라 그 차이가 커졌다.

셋째, 다중경로는 수신기 종류에 따라 뚜렷이 다른 양상을 보였다. PolaRx5TR 취득 C2L과 C1C 다중경로는 동등한 수준이었으나, NetR9의 경우에는 C2X가 C1C보다 작게, NET-G3A는 반대로 C2L이 더 크게 계산되었다. 이는 각 수신기에 내장된 다중경로 저감 알고리즘 차이에 따른 결과로 보인다. 연직각 70° 이상에서는 위성 신호가 장애물에 영향을 적게 받아 관측환경이 불량하더라도 양호한 환경의 다중경로와 그 크기가 유사했으나 고도각 감소에 따라 불량한 환경에서의 다중경로가 크게 증가했다. 특히, C2W 다중경로 상승 폭이 다른 두 의사거리에 비해 커 50° 이하에서는 가장 큰 다중경로 값을 가졌다.

수신기 종류와 관측환경에 따른 C/A, P2(Y), L2C 품질을 분석한 본 연구 결과에 따르면, 양호한 관측환경에서 L2C 품질은 NET-G3A로 취득한 경우를 제외하고 다중경로, 데이터 취득 성능이 C/A와 유사 혹은 우수하였다. 이뿐만 아니라 불량한 관측환경에서 P2(Y) 품질에 비해 뛰어났으며 특히 데이터 취득 측면에서 향상된 성능을 보였다. 따라서 이중 주파 수신기를 사용하는 경우 P2(Y) 대신 L2C를 측위에 적용한다면 향상된 위치 결정 정확도와 연속성을 확보할 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서 확인한 바와 같이 수신기에 따라 데이터 품질이 다를 수 있으며, 앞서 보인 결과들은 고성능 수신기와 안테나로 획득한 데이터 품질이기 때문에 저가형 장비에 대해서는 그 결과가 상이할 수 있음에 유의할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research used Korean Continuously Operating Reference Stations (CORSs)' data provided from National Geographic Information Institute (NGII) of Korea.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H.L.; methodology, H.L.; software, S.Y.; validation, H.L.; formal analysis, S.Y.; investigation, H.L. and S.Y.; resources, H.L. and S.Y.; data curation, S.Y.; writing—original draft preparation, H.L. and S.Y.; writing—review and editing, H.L. and S.Y.; visualization, S.Y.; supervision, H.L.; project administration, H.L.; funding acquisition, H.L. and S.Y.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- al-Fanek, O., Skone, S., Lachapelle, G., & Fenton, P. 2007, Evaluation of L2C observations and limitations, in Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), Fort Worth, TX, 25-28 Sep 2007, pp.2510-2518
- Cho, D. J., Park, C., & Lee, S. J. 2004, An assisted GPS acquisition method using L2 civil signal in weak signal environment, Journal of Global Positioning Systems, 3, 25-31.
- De Agostino, M., Piras, M., & Porporato, C. 2008, The new L2C GPS code: signal and positioning quality analysis, in Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, 16-19 Sep 2008, pp.1649-1657
- Esenbuğa, Ö. G. & Hauschild, A. 2020, Impact of flex power on GPS block IIF differential code biases, GPS Solutions, 24, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00996-x>
- Estey, L. & Wier, S. 2014, Teqc tutorial: basics of teqc use and teqc products (Colorado, CO: UNAVCO Inc.)
- Fontana, R. D., Cheung, W., Novak, P. M., & Stansell, T. A. 2001, The new L2 civil signal, in Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001), Salt Lake City, UT, 11-14 Sep 2001, pp.617-631
- Hegarty, C. J. 2014, The modernized GPS civil signals [Internet], cited 2021 Jan 5, available from: <https://www.gps.gov/multimedia/presentations/2014/05/CSNC/hegarty.pdf>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. 2001, Global Positioning System: theory and practice, 5th rev. ed. (New York: Springer-Verlag/Wien)
- International GNSS Service (IGS) 2013, RINEX the receiver independent exchange format version 3.02
- Jia, Z., Chen, Z., Yu, P., Lin, M., & Liu, X. 2016, Comparison of the multi-path effect between Trimble R7 and Topcon NET-G3A, in 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 10-15 Jul 2016, pp.7465-7468. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730947>
- Lim, D. W., Moon, S. W., Park, C., & Lee, S. J. 2006, The fast

signal acquisition scheme for a GPS L1/L2C correlator, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 12, 765-772. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2006.12.8.765>

National Geographic Information Institute (NGII), 2019, A basic study on the introduction of new GNSS correction signal by the development of real-time positioning technology, National Geographic Information Institute Report, 11-1613436-000204-01. https://www.ngii.go.kr/kor/contents/view.do?sq=1221&board_code=contents_data

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Space segment [Internet], cited 2021 Jan 20, available from: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>

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, 12-16 Sep 2005, pp.1100-1113

Simsky, A., Sleewaegen, J. M., Nemry, P., & Hees, J. V. 2006, Signal performance and measurement noise assessment of the first L2C signal-in-space, in *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006*, San Diego, CA, 24-27 Apr 2006, pp.834-839. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2006.1650682>

Song, S. H., Park, J. W., Park, J. H., & Sung, T. K. 2011, Performance analysis of signal acquisition in L2C assisted GPS receivers, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 17, 61-67. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2011.17.1.61>

Steigenberger, P., Thielert, S., Esenbuga, Ö., Hauschild, A., & Montenbruck, O. 2020, The new flex power mode: from GPS IIR-M and IIF satellites with extended coverage area [Internet] cited 2021 Jan 25, available from: <https://insidegnss.com/the-new-flex-power-mode-from-gps-iir-m-and-iif-satellites-with-extended-coverage-area/>

Sukeova, L., Santos, M. C., Langley, R. B. Leandro, R. F., Nnani, O., et al. 2007, GPS L2C signal quality analysis, in *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of The Institute of Navigation (2007)*, Cambridge, MA, 23-25 Apr 2007, pp. 232-241. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=7253>

U.S. Coast Guard Navigation Center (NAVCEN), GPS constellation [Internet], cited 2021 Jan 20, available from: <https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>



Seonghyeon Yun is a Ph.D. candidate at the Department of Eco-Friendly Offshore Plant FEED Engineering, Changwon National University, Republic of Korea. He received B.S. and M.S., degrees from the same university in 2017 and 2019, respectively. His experience and research interests include GNSS signals, satellite-based positioning and navigation, tectonic and structural deformation monitoring, GPS/GNSS applications for geodetic science and engineering.



Hungkyu Lee is a professor at the school of civil, environmental and chemical engineering, Changwon National University, Republic of Korea, where he has been teaching and investigating subjects related to engineering geodesy and measurement systems since 2005. He obtained Ph.D. in satellite geodesy and navigation from the school of surveying and spatial information systems, The University of New South Wales, Australia in 2004. His experience and research interests include statistical theories for high precision of satellite-based positioning and navigation systems, modernization of geodetic infrastructure, and GPS/GNSS applications for geodetic science and engineering.