

Performance Analysis of GNSS Navigation Messages in the Structure Viewpoint

Jae Hee Noh¹, Gwang Hee Jo¹, Jang Yong Lee², Sang Jeong Lee^{1†}

¹Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Agency for Defense Development, Daejeon 34602, Korea

ABSTRACT

In GNSS, the structure of the navigation message has been improved to increase the flexibility of data addition and transmission, and the robustness of message reception in a low SNR environment. GNSS signals currently being broadcast have a different message structure from each other, and the structure can be largely classified into the fixed structure, the packetized structure, and the packetized and fixed pattern structure. This paper analyzes the features of these three types of structures and compares the performance using the indicators. It can be seen that the performance after adopting the packetized structure is superior to those of other structures. In particular, there has been remarkable improvement in terms of the message management and transmission efficiency.

Keywords: navigation message, structure, packet, GNSS

1. 서론

Global Navigation Satellite System (GNSS) 신호는 일반적으로 신호의 대역 확산 및 위성의 식별에 필요한 대역확산코드, 항법에 필요한 정보를 제공하는 항법메시지, 변조를 위한 반송파로 구성된다. 이 중 항법메시지는 위성의 위치, 속도 계산을 위한 궤도력 정보와 시각 정보, 그리고 사용자 위치 정확도를 향상시키기 위한 부가 정보를 제공한다.

미국의 Global Positioning System (GPS), 유럽의 Galileo, 중국의 BeiDou Navigation Satellite System (BDS), 인도의 Navigation Indian Constellation (NavIC)에서 서비스 중인 신호들은 모두 고유한 항법메시지 구조를 가지고 있다. 이 중, 항법메시지 구조 변화는 3 가지로 분류할 수 있는데, 첫 번째는 GPS L1 C/A 신호, BDS BII 신호, Galileo E1 OS 신호에서 채택한 고정형 구조 (BeiDou ICD 2016, Galileo ICD 2016, IS-GPS-200J 2018), 두 번

째는 GPS L2/L5 신호, BDS B2a 신호, Galileo E5a 신호에서 채택한 패킷 구조 (Galileo ICD 2016, BeiDou ICD 2017a, IS-GPS-705E 2018), 세 번째는 GPS L1C 신호, BDS B1C 신호, NavIC SPS-L5/S 신호에서 채택한 혼합 구조이다 (BeiDou ICD 2017b, IS-GPS-800E 2018, NavIC ICD 2017).

고정형 구조는 방송할 항법 데이터가 서브프레임 (subframe) / 워드 (word) 별로 고정이 되어 있고, 방송 순서도 정해져 있다. 이러한 특징으로 인해 새로운 데이터를 추가할 때 데이터의 위치를 자유롭게 선택할 수 없다는 한계가 있다. GPS L1 C/A 신호와 BDS BII 신호의 항법메시지를 구성하는 5개의 서브프레임은 방송 순서가 정해져 있고, Time-to-first-fix (TTFF)에 필요한 Clock & Ephemeris Data (CED)는 1-3번 서브프레임을 통해 수신할 수 있다. Galileo E1 OS 신호의 항법메시지를 구성하는 15개 워드도 방송 순서가 정해져 있으며, 1-4번 워드를 통해 CED를 수신할 수 있다. 이러한 순서는 CED를 방송하고 있는 서브프레임 또는 워드 수신 중 오류가 발생했을 때, CED를 방송하지 않은 나머지 서브프레임 또는 워드를 무조건 수신한 이후에 다음 시점의 CED를 수신할 수 있음을 의미한다.

이후, 위성항법시스템의 현대화가 진행되면서 항법메시지는 항법 데이터 추가와 전송 방식 설계의 유연성 (flexibility)을 높이고, 항법메시지의 수신 오류를 줄이기 위한 구조로 발전하였다. 패킷 구조에서는 메시지의 유연성을 향상시키기 위하여 항법 데이터를 종류 별로 분류하고 각각의 데이터에 타입 ID를 부여하

Received Mar 21, 2022 Revised Apr 08, 2022 Accepted Apr 17, 2022

†Corresponding Author

E-mail: eesjl@cnu.ac.kr

Tel: +82-42-825-3991 Fax: +82-42-823-5436

Jae Hee Noh <https://orcid.org/0000-0002-6314-738X>

Gwang Hee Jo <https://orcid.org/0000-0001-8732-9770>

Jang Yong Lee <https://orcid.org/0000-0002-5652-3084>

Sang Jeong Lee <https://orcid.org/0000-0002-9400-5157>

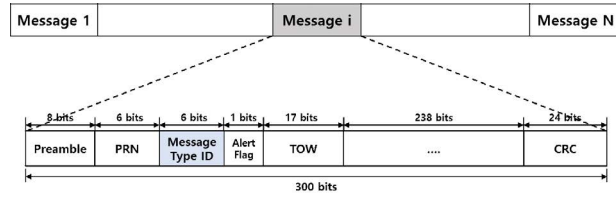


Fig. 1. Message structure of the GPS L5 signal (IS-GPS-705E 2018).

였다. 이렇게 분류한 데이터는 타입 별로 전송 주기를 설정함으로써 필요에 따라 유연하게 스케줄링 할 수 있다. 이러한 메시지 구조의 변화로 CED, 알마낙 (almanac), 전리층 보정 정보 외에 CED 보정 정보, 타 위성항법시스템 간의 시각 오프셋, 지구 자전 상수 등 항법 정확도 향상을 위한 다양한 부가 정보를 제공할 수 있게 되었다. 또한, 항법메시지의 견고성을 향상하기 위하여 오류정정부호를 적용하였고, 정확도를 향상시키기 위하여 CED의 정밀도를 높이고 추가적인 위성 궤도 파라미터를 제공한다.

최근에는 항법메시지의 CED 수신 시간을 줄이고, 단위 시간당 방송하는 유효 비트 수를 향상하기 위해 혼합 구조가 등장했다. 이 구조를 적용한 GPS LIC 신호와 BDS BIC 신호는 1-2번 서브프레임을 통해 CED를 방송하고, 3번 서브프레임을 통해 타입 ID로 정의된 부가 정보를 방송한다. 1번 서브프레임에 시각 정보, 2번 서브프레임에 방송 궤도력 정보를 할당함으로써 다른 방식보다 CED를 방송하기 위해 필요한 서브프레임 개수가 적어 CED 수신 시간을 효과적으로 줄일 수 있다. 그리고 혼합 구조는 CED의 데이터 오류율을 낮추기 위해 각 서브프레임 별로 다른 오류정정부호를 사용한다.

항법메시지 성능 지표에 대한 기존 연구를 살펴보면, Anghileri et al. (2010)가 항법메시지 구조 분석을 위해 Tim-to-first-fix-data (TTFFD) 개념을 도입했고, Anghileri et al. (2013)는 기존에 제시한 TTFFD 개념을 포함해서 전송 효율 (Capacity), 정확도 (Accuracy), 견고성 (Robustness), 적시성 (Timeliness) 등 4 가지 관점의 성능 지표를 제시하였다. 또한, Zhou et al. (2014)는 TTFFD 관점에서 GPS와 Galileo 항법메시지 구조를 비교 및 분석하고, TTFFD를 줄일 수 있는 핵심 요소를 제시하였다.

기존에 연구된 항법메시지 성능 지표는 부가 정보 송·수신에 대한 분석은 배제하고 CED 송·수신에만 초점이 맞춰져 있다. 항법메시지는 고정형 구조에서 패킷 구조와 혼합 구조로 발전하면서 다양한 부가 정보가 추가되었고, 새로운 정보를 추가하기 위한 연구도 진행되고 있다 (Fernández-Hernández et al. 2014, Anderson et al. 2017). Barker et al. (2000)도 새로운 데이터 추가를 위해 유연성을 고려한 항법메시지의 구조와 전송 방식의 필요성을 제기하였다. 그러나, 항법메시지에서 가장 중요한 성능 지표는 위치 정확도와 TTFF이기 때문에 부가 정보를 무분별하게 늘릴 수 없고, 부가 정보를 추가했을 때 기존 항법메시지에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 전체 메시지 중 부가 정보가 차지하는 비율, 부가 정보를 추가하는데 소요되는 오버헤드에 대한 분석 지표를 제시한다. 그리고 기존에 연구된 항법메시지 성능 지표와 제시한 성능 지표를 이용하여 항법메시지의 성능을 구조 별 특징과 함께 종합적으로 분석한다.

Table 1. GPS L5 message content.

Type	Message data	Maximum transmission interval [s]
10	Ephemeris data - part 1	24
11	Ephemeris data - part 2	24
12	Reduced almanac	600
13	Clock differential correction	900
14	Ephemeris differential correction	900
15	Text	As required
30-37	SV clock	24
30	IONO & Group delay	144
31	Reduced almanac	600
32	EOP	900
33	UTC	44
34	Differential correction	900
35	GGTO	144
37	Midi almanac	3600

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 위성항법시스템의 항법메시지의 구조에 대해 분석한다. 3장에서는 기존에 연구된 항법메시지 성능 지표를 서술하고, 새로운 항법메시지 성능 지표를 제시한다. 4장에서는 2장에서 정리한 항법메시지 구조 별 특징과 3장에서 정리한 성능 지표를 활용하여 항법메시지의 성능을 분석하고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 항법메시지 구조 분석

2.1 고정형 구조

최초의 민간용 항법신호인 GPS L1 C/A 신호, 중국의 첫 번째 민간용 신호인 BDS B1I, Galileo E1 OS 신호는 고정형 구조의 메시지 구조를 채택해 민간용 항법 서비스를 제공하고 있다 (BeiDou ICD 2016, Galileo ICD 2016, IS-GPS-200J 2018). 고정형 구조의 항법메시지는 항법 데이터가 서브프레임 또는 워드 별로 고정되어 있다. 예를 들면, 1번 서브프레임에 시각 정보와 상태 정보가 정의되어 있고, 2-3번 서브프레임에 방송 궤도력, 4-5번 서브프레임에 전리층 보정 정보, UTC data, Almanac이 정의되어 있다. 이미 지정된 데이터 외에 새로운 데이터를 추가하기 위해서는 “Reserved bits”를 활용해야 하는데 “Reserved bits”의 위치 및 비트 수가 고정되어 있고, 이 비트 수가 방송 주기도 영향을 준다는 제약이 있다.

항법메시지는 위성의 CED를 더 정밀하게 표현하고, 기존에 제공하는 정보 (전리층 보정 파라미터, Coordinated Universal Time (UTC) 시각 변환 파라미터, 알마낙 등)와 함께 CED 보정 정보, Earth Orientation Parameter (EOP), Galileo-GPS Timing

Table 2. Relationship between CED length, information bit length, and number of packets.

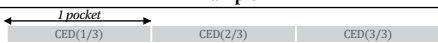


Case	Description	Example	# of packet
1	Size of CED > (Length of information bits) 2		3
2	Size of CED > (Length of information bits) 1		2
3	Size of CED < (Length of information bits) 1		1



Fig. 2. Navigation message broadcasting schedule - GPS L2/L5, BDS B2a.

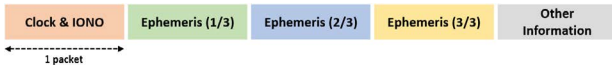


Fig. 3. Navigation message broadcasting schedule - Galileo E5a.

Offset (GGTO)를 추가적으로 제공하고 있다. 이외에도 사용자 인증 기법을 민간용 신호에도 적용하기 위한 다양한 연구도 진행되고 있다 (Fernández-Hernández et al. 2014, Anderson et al. 2017). 이처럼 항법메시지의 구조는 기본적인 항법 데이터를 제공하는 것과 함께 사용자 인증 서비스를 구현할 수 있는 유연성을 갖춘 구조로 발전하고 있다.

2.2 패킷 구조

항법메시지는 고정형 구조의 단점을 보완하기 위해 데이터 전송 단위 중 하나인 패킷을 도입하였다. 패킷 구조는 인터넷 프로토콜과 유사한 패킷화된 메시지 기반 포맷을 가지며, 일반적으로 헤더, 페이로드 (데이터), 트레일러로 구성되고 트레일러에 Cyclic Redundancy Check (CRC) 비트가 담긴다. 이러한 구조적 특성을 따라 패킷 구조는 GPS L1 C/A 신호와 BDS BII 신호에서 오류 검출을 위해 적용했던 패리티 검사를 순환 중복 검사 (CRC)로 변경하였다. 또한, 항법메시지의 견고성을 향상시키기 위해 오류정정부호도 함께 적용하였다. 패킷 구조는 데이터를 종류 별로 분류하고, 분류한 데이터에 타입 ID를 부여한다. 타입 ID 별 항법 데이터는 각각의 방송 주기를 갖고 유연하게 방송된다 (Galileo ICD 2016, BeiDou ICD 2017a, IS-GPS-705E 2018).

패킷 구조를 적용한 신호로는 GPS L2, L5 신호, BDS B2a 신호, Galileo E5a 신호가 있다 (Galileo ICD 2016, BeiDou ICD 2017a, IS-GPS-705E 2018). Fig. 1은 패킷 구조의 항법메시지를 갖는 대표적인 신호인 GPS L5 신호의 메시지 구조를 도시한 것이며, GPS L5 신호의 Interface Control Documents (ICD)에 정의된 메시지 타입, 종류, 방송 주기는 Table 1에 정리하였다 (IS-GPS-705E 2018).

패킷 구조는 데이터를 타입 ID로 분류하여 관리하는 특성 덕분에 고정형 구조보다 새로운 데이터를 추가하는 것이 용이하다. 패킷 구조는 메시지 타입 별 길이가 정해져 있기 때문에 해당 길이에 맞춰서 데이터를 방송해야 한다. 이로 인해 항법 수행에 필요한 CED 파라미터를 여러 개의 패킷 (GPS and BDS called

frame, Galileo called Page)에 나누어 전송하고 있는 상황이다. CED를 방송하는데 필요한 패킷의 개수는 CED 길이와 패킷 내에 할당된 헤더, CRC를 제외한 정보 비트의 길이에 영향을 받는다. CED 길이, 정보 비트 길이, 패킷 개수 사이의 관계는 Table 2에 정리하였다.

그러나, CED를 패킷 길이에 맞춰 정확하게 1/2, 1/3, 1/4 등으로 분배하기가 어렵고, 결국 어떤 메시지도 할당되지 않은 “Reserved bits”가 발생한다. 이에 패킷 구조의 메시지는 “Reserved bits”를 방지하기 위해 CED를 분배하고 남은 공간에 부가 정보 (UTC 시각 변환 파라미터/GGTO/전리층 보정 정보/축소된 알마나 정보)를 할당하여 방송하고 있다. Figs. 2-3에 패킷 구조의 항법메시지들의 CED 분배 방식과 방송 스케줄을 정리하였다. GPS L2/L5 신호와 BDS B2a 신호의 항법메시지 방송 스케줄은 Fig. 2에 정리하였고, Galileo E5a 신호의 항법메시지 방송 스케줄은 Fig. 3에 정리하였다 (Galileo ICD 2016, BeiDou ICD 2017a, IS-GPS-705E 2018).

Figs. 2와 3에 정리된 것처럼 패킷 구조의 항법메시지는 설계한 패킷 길이에 맞춰 CED를 분배해야 하기 때문에 방송 궤도력과 시각 보정 정보가 분리되어 방송되고 있고, 이로 인해 방송 궤도력을 방송하기 위한 패킷과 시각 보정 정보를 방송하기 위한 패킷이 각각 필요하게 되었다. 만약, Fig. 2에서 CED를 2개의 패킷에 분배할 수 있었으면 수신기의 CED 수신 시간이 줄어들고, TTFF도 향상되었을 것이다. 이처럼 패킷 구조의 메시지는 새로운 데이터 추가에 용이하다는 장점이 있지만 CED를 정확하게 원하는 패킷 개수만큼 분배해서 방송하기 어려워 TTFF가 CED 전송에 필요한 패킷 개수에 영향을 받는다는 단점이 있다.

2.3 혼합 구조

패킷 구조의 단점을 보완하기 위해 GPS LIC 신호는 CED 정보를 1-2번 서브프레임에 고정시키고, 3번 서브프레임을 통해 부가 정보를 방송하는 방식인 혼합 구조가 등장했다 (IS-GPS-800E 2018). GPS LIC 이후에 설계된 신호인 BDS BIC도 이 방식의 구조를 채택하여 항법 서비스를 제공하고 있다 (BeiDou ICD 2017b, IS-GPS-800E 2018). 또한, NavIC SPS-L5/S 신호도 혼합 구조를 채택하여 사용하고 있다 (NavIC ICD 2017). 현재까지 설계된 혼합 구조는 크게 2가지 방식으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 GPS LIC 신호와 BDS BIC 신호에서 채택한 서브프레임 별로 길이를 다르게 설계하여 1-2번 서브프레임을 통해 CED를 제공하고 3번 서브프레임을 통해 CED 이외의 부가 정보를 제공하는 방식이다. 두 번째는 NavIC SPS-L5/S 신호에서 채택한 방식으로 항법메시지의 1-2번 서브프레임은 동일한 구조로 가지며 CED 정보만을 포함하고, 3-4번 서브프레임이 동일한 구조로 CED 외의 부가 정보들을 제공하는 구조이다. Figs. 4와 5에 GPS LIC 신호의 항

Table 3. Characteristics of GNSS navigation message.

	GPS			BDS			Galileo		NavIC
	LNAV	CNAV	CNAV2	D1/D2	BCNAV	BCNAV2	I/NAV	F/NAV	-
Signal	L1 C/A	L2C/L5	L1C	B1I	B1C	B2a	E1/E5b	E5a	SPS-L5 / SPS-S
Data rate [bps]	50	25/50	50	D1 (50) D2 (500)	50	100	125	25	25
Total bits of message [bits]	75,000	Arbitrary	1,800	D1 (36,000) D2 (180,000)	1,800	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	1,168
Error correction code (ECC)	Parity check	Convolutional code	BCH / LDPC	BCH	BCH / LDPC	Convolutional code	Convolutional code	Convolutional code	Convolutional code
Add new message	Limited	Free	Free	Limited	Free	Free	Limited	Free	Free
Structure type	Fixed	Packetized	Mixed pattern	Fixed	Mixed pattern	Packetized	Fixed	Packetized	Mixed pattern

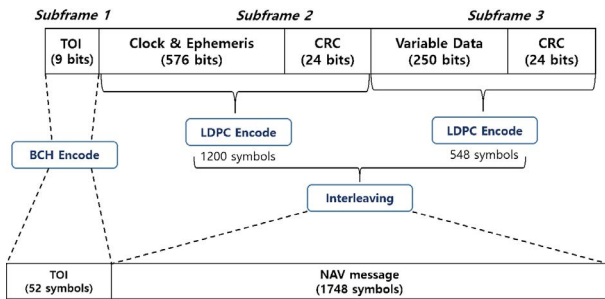


Fig. 4. Message structure of the GPS L1C signal (IS-GPS-800E 2018).

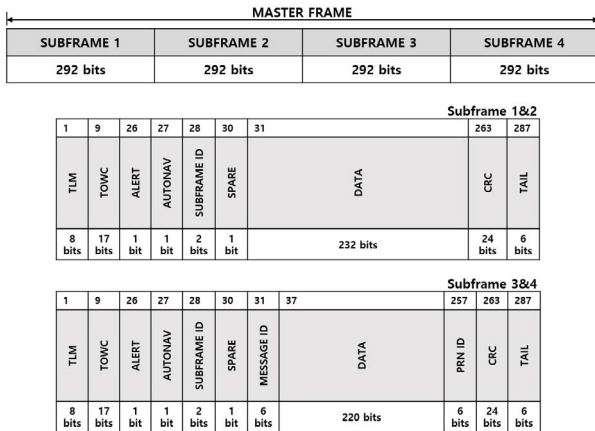


Fig. 5. Message structure of the NavIC SPS-L5/S signal (NavIC ICD 2017).

법메시지 구조와 NavIC SPS-L5/S 신호의 항법메시지 구조를 보였다 (NavIC ICD 2017, IS-GPS-800E 2018).

GPS L1C 신호와 BDS B1C 신호에서 채택한 혼합 구조의 또 다른 특징은 서브프레임마다 서로 다른 오류정정부호를 적용한다는 것이다. 이는 항법을 수행하는데 가장 중요한 데이터인 CED가 포함된 서브프레임에 오류정정능력이 우수한 코드를 적용함으로써 Signal to Noise (SNR)이 낮은 신호 수신 환경에서 Bit Error Rate (BER) 향상하기 위한 것이다. 그리고 인코딩 이후 심볼 단위의 메시지 프레임 길이가 항법신호의 secondary code와 동일한 길이로 설계되어 항상 동일한 TTFFD 성능을 보장한다 (Noh et al. 2020). 그러나, 이 방식의 혼합 구조는 항법메시지의 프레임 동기화를 위해 secondary code를 필수적으로 설계해야 하기 때문에 신호가 계층 구조를 가져야 한다는 제약 조건이 있

다. 반면에 NavIC SPS-L5/S 신호에서 채택한 혼합 구조는 모든 서브프레임에 동일한 오류정정부호 적용하고 있다. 그리고 프레임 동기를 위한 프리앰블이 헤더 비트에 포함되어 있기 때문에 secondary code가 필수적으로 요구되지 않는다.

본 장에서 서술한 위성항법시스템의 항법메시지 변화는 Table 3과 같이 요약할 수 있다. 위성항법시스템의 항법메시지 구조는 크게 3가지 형태로 분류할 수 있고, 항법메시지 구조는 유연성, 견고성, 적시성, 전송 효율을 향상시키기 위해 다양한 형태로 발전하고 있다. 이 중 가장 주목해야 할 부분은 항법메시지의 유연성, 적시성, 전송 효율을 높이기 위해 패킷을 도입했고, 견고성을 높이기 위해 오류제어부호를 적용했다는 것이다.

3. 항법메시지 성능 지표

본 장에서는 항법메시지 성능을 분석하기 위한 성능 지표에 대해 서술한다. 분석에 활용한 성능 지표는 총 6가지이며, Anghileri et al. (2013)가 제시한 4가지 성능 지표 (Efficiency Factor, Accuracy, TTFFD, Robustness)와 이 논문에서 제시하는 부가 정보를 고려한 2가지의 성능 지표 (Data Bandwidth Overhead, Ratio of Non-CED parameter)를 포함한다.

3.1 Efficiency Factor

Efficiency Factor는 단위 시간 동안 전송 가능한 유효 비트를 의미하며, 이는 항법메시지 구조에 따라 신호가 전송 가능한 유효 데이터의 양을 분석할 수 있는 지표이다. Efficiency factor는 Eq. (1)과 같이 정의하며, 여기서 effective bit rate은 Eq. (2)와 같이 정의한다. 1초 동안 전송 가능한 effective bit의 비율은 Eq. (1)을 통해 알 수 있으며, 이 비율이 높을수록 단위 시간당 사용자 수신할 수 있는 정보 비트 수가 많다는 것을 의미한다.

$$\text{Efficiency factor [\%]} = \frac{\text{Effective bit rate [bps]}}{\text{Data Rate [bps]}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Effective bit rate [bps]} = \frac{(\text{Len}_{min}) - (\text{Len}_{Ex}) [\text{bits}]}{\text{Len}_{min} [\text{sec}]} \times \text{Data rate} \quad (2)$$

여기서 Effective bit rate는 메시지의 최소 정보 길이 중 preamble, message type, parity, CRC 등을 제외한 정보의 비율

을 의미한다. Eq. (2)에서 Len_{min} 은 메시지 최소 정보 단위의 길이를 의미하고, Len_{E_k} 은 프리앰블, 패리티, CRC를 합친 길이를 의미한다.

3.2 Accuracy

항법메시지 정확도는 항법메시지를 통해 방송되는 정보들의 정밀도와 정확도를 나타내는 지표이다. 항법메시지 정확도는 각 정보들을 구성하는 파라미터의 유효 범위와 스케일 팩터에 영향을 받으며, 이 중 스케일 팩터는 해당 파라미터의 민감도 (sensitivity)에 따라 결정된다. Van Dierendonck et al. (1978)는 GPS L1 C/A 신호를 대상으로 GPS LNAV에 포함되는 파라미터의 민감도, 스케일 팩터, 유효 범위를 결정하는 방법에 대해 제시하였다. 예를 들면, GPS L1 C/A 신호의 위성 시계 오차 보정 계수들을 데이터화 함으로써 발생하는 위성 시각 오프셋 Residual sum of squares (RSS) 오차의 최대값이 0.59 ns라는 사실로부터 위성 시계 오차 보정 계수 중 하나인 a_0 의 민감도는 Eq. (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial \Delta t_{SV}}{\partial a_0} = 1 \tag{3}$$

Eq. (3)에 의해 a_0 의 스케일 팩터는 파라미터의 민감도 (0.59 ns)보다 작은 수로 설계해야 한다. 예를 들어, a_0 의 스케일 팩터를 2^{-30} 로 설계하면, 민감도보다 큰 값 (9.3×10^{-10})을 가지기 때문에 a_0 의 스케일 팩터로 부적절하다. 그러나, a_0 의 스케일 팩터를 2^{-31} 로 설계하면, 민감도보다 작은 값 (4.7×10^{-10})을 가지므로 a_0 의 스케일 팩터를 2^{-31} 로 결정할 수 있다.

파라미터의 유효 범위는 최악의 예상 값이나 파라미터에 허용되는 가장 큰 값을 기준으로 결정한다. 파라미터의 스케일 팩터와 유효 범위가 결정되면, Eq. (4)를 이용하여 요구 비트 수를 결정할 수 있다 (Van Dierendonck et al. 1978).

$$\frac{\text{Effective range of Parameter}}{\text{Scale factor of Parameter}} = 2^{(Bits-1)} \tag{4}$$

항법메시지를 구성하는 정보의 양은 파라미터들의 요구 비트 수를 결정함으로써 계산할 수 있다. 스케일 팩터가 작아지면 더 작은 수까지 표현이 가능해서 accuracy가 향상되지만, 그만큼 전송 요구되는 데이터의 양이 증가하기 때문에 overhead가 증가하여 다른 성능에 영향을 준다.

3.3 TTFFD

항법메시지의 가장 중요한 성능은 정해진 시간 내에 필요로 하는 정보를 제공할 수 있는 능력이며, 이를 판단할 수 있는 주요한 지표는 TTFFD이다. TTFFD는 TTFF를 구성하는 요소 중 하나이며, 수신기가 최초 항법을 시작하기까지 걸리는 시간을 의미하는 TTFF는 Eq. (5)와 같이 표현할 수 있다 (Anghileri et al. 2010, 2013).

$$TTFF = T_{warm-up} + T_{acq} + T_{track} + TTFFD + T_{PVT} \tag{5}$$

여기서 $T_{warm-up}$ 은 수신기의 셋팅 시간, T_{acq} 는 신호 획득 시간, T_{track} 는 코드 및 반송파 위상 추적 시간, TTFFD는 CED 획득 시간, T_{PVT} 는 항법해 연산 시간을 의미한다. TTFFD는 메시지 패킷/(서브)프레임의 길이와 CED가 얼마나 많은 패킷/(서브)프레임에 분배되어 전송되는지에 따라 성능이 달라지며, 수신기의 항법메시지 수신 시작 시점에도 영향을 받는다. 이처럼 TTFFD는 다양한 요소의 영향을 받기 때문에 하나의 수식으로 계산이 불가능하여 통계적인 방법을 통해 계산할 수 있다. TTFFD는 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간을 계산한 결과를 통해 Probability density function (PDF)와 Cumulative distribution function (CDF)를 계산하고, CDF에서 확률이 95%인 지점에 해당하는 시간으로 정의한다 (Anghileri et al. 2010, 2013).

CED 획득 시간은 CED 전송에 필요한 패킷/(서브)프레임 개수에 영향을 받으며, 이는 항법메시지 구조에 따라 달라진다. 항법메시지 구조 별 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간을 계산하는 방식은 Noh et al. (2020)에 자세히 서술되어 있다. Noh et al. (2020)는 메시지 수신 시점에 따른 CED 획득 시간을 고정형 구조, 패킷 구조에 적용할 수 있는 계산식과 혼합 구조에 적용할 수 있는 계산식으로 나누어 서술하고, 그에 따른 PDF, CDF를 계산하였다. 고정형 구조와 패킷 구조의 TTFFD는 CED 전송에 필요한 패킷/(서브)프레임 개수에 따라 영향을 받으며, 혼합 구조의 TTFFD는 프레임 수신에 필요한 총 시간과 항상 유사한 값을 갖는다.

3.4 Robustness

항법메시지의 전송 용량과 TTFFD를 가장 단순하게 높이는 방법은 데이터 전송률을 높이는 것이다. 그러나 위성항법신호는 단순히 메시지를 빠른 시간에 전달하기 위한 목적으로 설계되는 신호가 아니기 때문에 항법메시지의 BER과 수신 성능을 고려하지 않고 데이터 전송률만 높일 수 없다. 따라서 데이터 전송률을 높이기 위해서는 데이터 전송률과 데이터 오차율 사이의 상관 관계에 대한 분석이 필요하다. 항법메시지의 데이터 전송률이 높아지면 단위 시간당 데이터 전송량이 많아져 신호 이득이 낮아지게 되고 이로 인해 데이터의 오차율이 높아진다. 그리고 데이터 전송률은 수신기의 확산 이득에 영향을 주며 이는 신호 추적 성능에 영향을 미친다.

일반적으로 항법메시지의 데이터 전송률이 낮을수록 확산 이득이 증가하여 신호의 SNR이 높아지고 수신기의 신호 추적 성능을 향상시킨다. Anghileri et al. (2013)에서 Additive White Gaussian Noise (AWGN) 환경에서 GPS, Galileo의 데이터 복조 성능을 비교한 결과를 보면, 같은 오류제어부호를 사용하는 Galileo I/NAV와 Galileo F/NAV 항법메시지 중 더 낮은 데이터 전송률이 적용된 Galileo F/NAV 항법메시지의 데이터 오차율이 더 낮다. 그러나 데이터 오차율은 항법메시지에 어떤 오류정정부호를 사용하는지에 따라서 동일한 데이터 전송률에서도 성능이 달리 나타나기 때문에 데이터 전송률을 높이기 위해서 어떤 오류정정부호를 사용할 것인지에 대한 연구가 필요하다.

Table 4. Contents of conventional GNSS Navigation message.

Data	Function
Satellite clock correction & ephemeris	Calculation of satellite's position and system time
System time reference	Calculation of transmission time
Almanac parameters	Select visible PRN / Reducing doppler search bin
Broadcast group delay parameters	Estimation group delay
Ionospheric correction	Estimation ionospheric delay
GNSS time offsets	Time offset about another system
GNSS time to UTC conversion parameter	Calculation UTC time
Signal-in-space accuracy (SISA) / User range accuracy (URA)	-
Health status parameters	-

3.5 Data Bandwidth Overhead

위성항법시스템의 항법메시지는 위성 위치 계산을 위한 위성 시각 및 궤도력 정보를 필수적으로 제공한다. 그리고 서비스 제공자의 필요에 따라 다양한 부가 정보를 CED와 함께 제공한다. 일반적으로 항법메시지에는 시각 정보, 의사거리 관련 보정 정보, 항법 보정 정보, 위성 상태 정보 등이 포함되어 있다. 일반적으로 항법메시지에 들어가는 구성 요소를 Table 4에 정리하였다 (Anghileri et al. 2013).

위성항법시스템 서비스 제공자는 현대화를 통해 항법메시지에 더 다양한 부가 정보 (CED 보정 정보, EOP 정보, GGTO 정보)를 제공하고 있다. 그리고 최근에는 현대화된 민간용 신호에 사용자 인증 기법을 적용하는 연구들을 수행하고 있다 (Fernández-Hernández et al. 2014, Anderson et al. 2017).

항법메시지를 통해 제공하는 정보의 종류가 증가하는 것은 메시지를 통해 방송해야 하는 데이터 양이 증가한다 것을 의미한다. 한정된 데이터 대역폭을 가지는 시스템에서 데이터 양의 증가는 오버헤드 증가를 야기한다. 데이터 양, 항법메시지 구조와 오버헤드의 관계는 Eq. (6)을 통해 파악할 수 있다.

$$Overhead_{NAV} = N * Latency [sec] + \frac{Total\ size\ of\ message\ [bits]}{Effective\ bit\ rate\ [bps]} \quad (6)$$

여기서 N 은 전송된 메시지 개수를 의미하고, $Latency$ 는 수신기가 인터페이스를 통해 전송되는 첫 번째 비트를 처리하는 데까지 걸리는 시간을 의미한다. 위성항법시스템은 제한된 데이터 대역폭을 가지고 있고, 제한된 대역폭에서 제공하려는 데이터의 양의 무분별한 증가는 메시지의 오버헤드를 야기한다. 그러므로 더 다양한 정보를 제공하기 위해서는 메시지를 효율적으로 관리할 수 있는 메시지 구조에 대한 연구가 필요하다.

3.6 Ratio of Non-CED parameter

기존에 항법메시지를 분석한 연구들은 대부분 CED 파라미터 수신 신속도 관점에서만 분석해 왔다 (Anghileri et al. 2010, 2013, Zhou et al. 2014). 그러나, 항법메시지는 CED로만 구성되어 있는 것이 아니라 CED 외의 부가정보 (UTC/전리층/상태 정보 등)도 함께 구성되어 있다. 또한 최근에는 항법시스템이 발전함으로써

Table 5. Comparison of the effective bit rate of message structure.

Effective bit rate [bps]								
Fixed			Packetized			Mixed pattern		
GPS	BDS/D1	Galileo	Galileo	GPS	BDS	NavIC	GPS	BDS
LNAV	NAV	I/NAV	F/NAV	CNAV	BCNAV2	NAV	CNAV2	BCNAV
38.7	35.5	178.0	42.8	43.7	88.0	43.7	47.3	47.3

위성항법신호를 통해 제공하는 서비스의 종류가 많아졌다. 따라서 항법메시지 구조를 설계할 때, 부가 정보의 전송 효율에 대해서도 함께 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 CED의 최대 전송 주기를 기준으로 부가 정보의 전송 효율을 분석할 수 있는 지표인 Eq. (7)과 같이 제시한다. 일반적으로 부가 정보는 CED보다 낮은 주기를 가지고 방송되므로 R_{NCED} 는 CED의 최대 전송 주기 동안 전송 가능한 부가 정보의 비율로 계산한다. 이 비율이 높을수록 사용자가 단위 시간당 제공받을 수 있는 부가 정보량이 많다는 것을 의미한다.

$$R_{NCED}[\%] = \frac{Lenght\ of\ frame\ of\ non-CED\ [bits]}{Maximum\ broadcast\ interval\ of\ CED\ [s] \times Date\ rate\ [bps]} \times 100 \quad (7)$$

4. 항법메시지 구조에 따른 성능 비교

본 장에서는 3장에서 정리한 6가지의 성능 지표를 이용하여 항법메시지 구조 별 성능을 분석하였다. 항법메시지 구조 별 성능은 Efficiency Factor, Accuracy, TTFDD, Robustness, Data Bandwidth Overhead, Ratio of Non-CED parameter순으로 분석하였다.

4.1 Efficiency Factor

항법메시지 구조 별 Efficiency Factor를 분석하기 위해 먼저 항법메시지 별 effective bit rate를 계산하였으며, 그 결과는 Table 5에 정리하였다.

Effective bit rate는 단위 시간당 전송된 유효 비트 수를 나타내는 지표이기 때문에 데이터 전송률의 영향을 많이 받는다. 그래서 Galileo I/NAV 메시지 (250 sps)가 가장 높은 비율을 가지며, 그 다음으로 높은 데이터 전송률을 갖는 BDS BCNAV2 메시지 (100 bps)가 두 번째로 높은 비율을 가진다. 메시지 구조 별로 성능을 분석하면, 고정형 구조가 가장 낮은 비율을 가지고, Galileo I/NAV (250 sps) 메시지와 BDS BCNAV2 (100 bps) 메시지를 제외한 패킷 구조와 혼합 구조는 비슷한 비율을 가진다. Effective bit rate는 메시지의 최소 정보 길이와 데이터 전송률의 차이가 적고, 메시지의 (서브)프레임/페이지에서 Len_{EX} 가 차지하는 비율이 작을수록 높은 성능을 가질 수 있다. 패킷 구조, 혼합 구조는 고정형 구조에서 채택한 패리티 검사 대신 CRC와 오류정정부호를 사용하여 Len_{EX} 의 비율을 줄임으로서 effective bit rate를 향상시켰다. 각 메시지 별 최소 정보 길이에서 Len_{EX} 가 차지하는 비율은 Table 6에 정리하였다.

Effective bit rate 분석 결과를 바탕으로 항법메시지 구조 별 efficiency factor는 Fig. 6에 보였다. Efficiency factor는 하나의 (서브)프레임/페이지 내에서 effective bit rate의 비율을 나타내

Table 6. Comparison of the Len_{ex} of message structure.

Ratio of in the minimum (sub)frame/page length								
Fixed			Packetized			Mixed pattern		
GPS LNAV	BDS D1 NAV	Galileo I/NAV	Galileo F/NAV	GPS CNAV	BDS BCNAV2	NavIC NAV	GPS CNAV2	BDS BCNAV
0.23	0.29	0.29	0.14	0.13	0.12	0.13	0.05	0.05

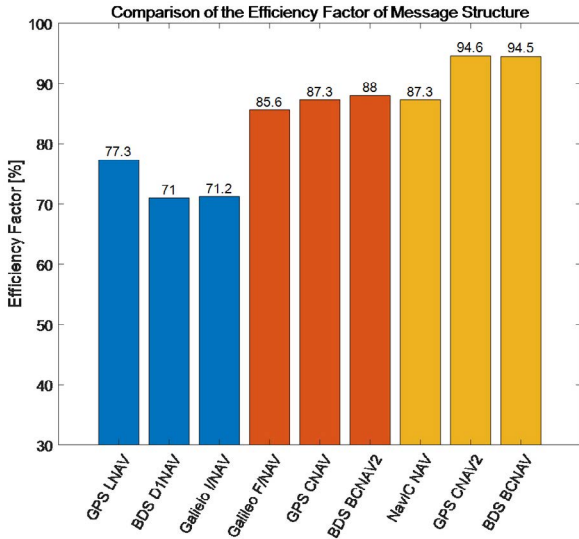


Fig. 6. Comparison of the efficiency factor of each message structure.

는 지표로서 데이터 전송률과 effective bit rate의 차이가 적을 수록 우수한 성능을 가진다. Fig. 6에 도시한 efficiency factor 성능 분석 결과를 보면, 동일한 시스템 내에서 메시지 구조가 발전함으로써 efficiency factor 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. GPS를 예시로 분석하면, GPS LNAV 메시지 (50 bps)에서 GPS CNAV 메시지 (50 bps)로 구조가 발전함으로써 efficiency factor는 12% 향상되었다. 그리고 GPS LNAV 메시지 (50 bps)에서 GPS CNAV2 메시지 (50 bps)를 비교하면, GPS LNAV 메시지 (50 bps) 대비 GPS CNAV2 메시지 (50 bps)의 efficiency factor는 15.4% 향상되었다. 반면에 Galileo I/NAV 메시지 (250 sps)는 항법메시지 중 데이터 전송률과 effective bit rate 사이의 차이가 크기 때문에 efficiency factor 성능은 다소 낮게 나타난다.

4.2 Accuracy

항법메시지 별 CED에 대한 정확도는 각 항법메시지에서 설계한 파라미터의 요구 비트 수, 스케일 팩터의 비교를 통해 파악할 수 있다. GPS LNAV와 GPS CNAV의 CED 변화는 Table 7에 정리하였다.

GPS LNAV와 GPS CNAV에서 공통적으로 제공하는 파라미터를 비교했을 때, GPS CNAV에서 방송 중인 파라미터의 스케일 팩터가 더 작은 값으로 설계된 것을 알 수 있다. 파라미터의 스케일 팩터가 작을수록 더 정교한 숫자까지 표현이 가능하기 때문에 높은 정확도를 가진다고 판단할 수 있다. 항법메시지 구조 별로 현재 설계된 CED 크기는 Table 8에 정리하였다.

Table 7. CED parameters of GPS signals.

	GPS LNAV		GPS CNAV/CNAV2	
	Scale factor	Bits	Scale factor	Bits
a_{l0}	2^{-31}	22	2^{-35}	26
a_{l1}	2^{-43}	16	2^{-48}	20
a_{l2}	2^{-55}	8	2^{-60}	10
t_{oc} / t_{oe}	2^4	16	300	11
\sqrt{A}	2^{-19}	32	-	-
e	2^{-33}	32	2^{-34}	33
ω	2^{-31}	32	2^{-32}	33
Δn	2^{-43}	16	2^{-44}	17
M_0	2^{-31}	32	2^{-32}	33
Ω_0	2^{-31}	32	2^{-32}	33
$\dot{\Omega}$	2^{-43}	24	-	-
i_0	2^{-31}	32	2^{-32}	33
i_{dot}	2^{-43}	14	2^{-44}	15
C_{uc}	2^{-29}	16	2^{-30}	21
C_{us}	2^{-29}	16	2^{-30}	21
C_{rc}	2^{-5}	16	2^{-8}	24
C_{rs}	2^{-5}	16	2^{-8}	24
C_{ic}	2^{-29}	16	2^{-30}	16
C_{is}	2^{-29}	16	2^{-30}	16
IODE	-	8	-	-
Δa	-	-	2^{-9}	26
a_{dot}	-	-	2^{-21}	25
$\Delta\Omega_{dot}$	-	-	2^{-44}	17
Δn_{dot}	-	-	2^{-57}	23
Total bits		412		477

Table 8. Comparison of the total size of CED parameters.

Total size of CDE parameters [bits]								
Fixed			Packetized			Mixed pattern		
GPS LNAV	BDS D1 NAV	Galileo I/NAV	Galileo F/NAV	GPS CNAV	BDS BCNAV2	NavIC NAV	GPS CNAV2	BDS BCNAV
412	433	428	428	477	481	410	477	481

GPS와 BDS는 현대화를 수행하면서 시간 정보의 스케일 팩터를 줄이고, 추가적인 위성 궤도력 정보를 제공함에 따라 CED 크기를 증가시켰다. Galileo는 I/NAV 메시지와 F/NAV 메시지에 동일한 CED 파라미터를 적용하였으며, NavIC은 상대적으로 작은 요구 비트 수를 할당하고 있다. 항법메시지의 정확도는 실제 위성의 궤도를 얼마나 정확하게 계산할 수 있는지도 함께 분석을 해야 하기 때문에 본 논문에서 정의한 CED 정확도가 절대적인 지표는 아니다. 다만, 분석 결과를 통해 위성항법시스템의 발전과 함께 위성항법시스템은 이전보다 더 정밀한 CED 정보를 제공하고 있다는 사실을 파악할 수 있다.

4.3 TTFFD

항법메시지 구조 별 TTFFD를 분석한 결과는 Fig. 7에 정리

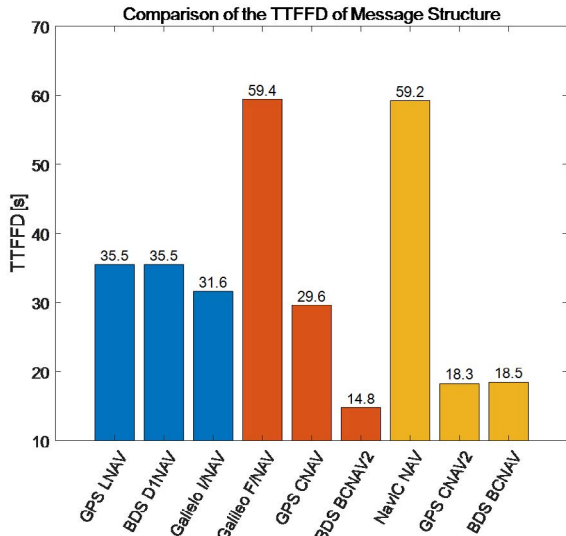


Fig. 7. Comparison of the TTFFD of each message structure.

하였다. TTFFD 성능은 메시지의 구조와 CED가 어떻게 분배되어 방송되는지에 대한 영향이 가장 크다. TTFFD 성능에 그 다음으로 영향을 많이 주는 요소는 항법메시지의 데이터 전송률이다. CED를 방송하는데 동일한 패킷 개수, 길이와 전송 방식을 갖는 GPS CNAV (50 bps)와 BDS BCNAV2 (100 bps)를 비교하면, BCNAV2의 데이터 전송률이 CNAV의 2배이기 때문에 TTFFD가 약 0.5배로 나타난다.

GPS CNAV (50 bps)는 CED 방송 후 부가 정보를 방송하기 위해 하나의 패킷을 사용하고, GPS LNAV (50 bps)는 2개의 서브프레임을 사용하기 때문에 LNAV의 CED 전송 주기가 CNAC보다 길어져 LNAV의 TTFFD가 증가하는 결과를 야기했다. GPS LNAV (50 bps)와 유사한 메시지 전송 방식을 갖는 Galileo F/NAV (25 bps)의 데이터 전송률은 LNAV의 0.5배이기 때문에 TTFFD가 2배 증가하는 결과가 나타났다.

GPS CNAV2와 BDS BCNAV의 혼합 구조는 TTFFD를 개선하기 위해 고정형 구조와 패킷 구조의 단점을 보완한 구조이기에 동일한 데이터 전송률 (50 bps)을 갖는 항법메시지 중 가장 우수한 성능을 가진다. 그러나, 이 혼합 구조에서 보장하는 TTFFD를 달성하기 위해서는 신호가 계층 구조를 가져야 한다는 제약 조건이 있다. 그리고 혼합 구조를 갖지만 메시지 스케줄링 방식이 GPS CNAV와 유사한 NavIC NAV (25 bps)의 데이터 전송률은 CNAV의 0.5배이기 때문에 TTFFD가 2배 증가하는 결과가 나타났다.

4.4 Robustness

항법메시지 구조에 따른 견고성을 분석하기 위해 각 구조에 대한 데이터 복조 성능을 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 8에 도시하였다. 이때, 데이터 복조 성능은 AWGN 채널에서 데이터 오류율이 10^{-2} 인 경우를 기준으로 비교하였다.

Fig. 8에 도시한 AWGN 채널에서 데이터 오류율이 10^{-2} 일 때 요구되는 C/N_0 분석 결과를 보면, 50 bps의 데이터 전송률을 갖는

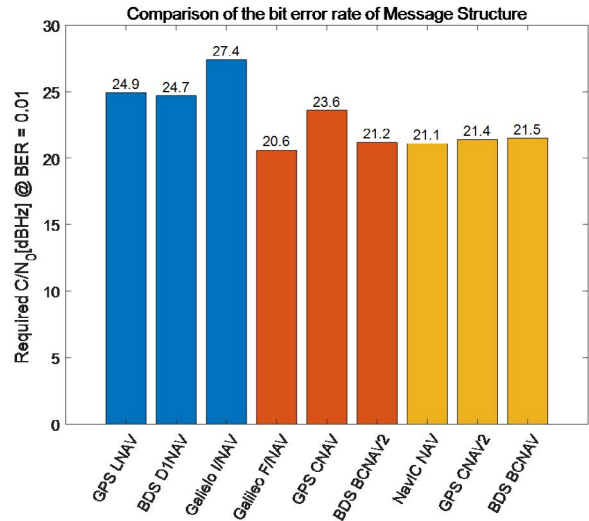


Fig. 8. Comparison of the bit error rate of each message structure.

항법메시지 (GPS LNAV, BDS D1 NAV, GPS CNAV, GPS CNAV2, BDS BCNAV) 중에서 오류정정부호가 적용되지 않은 GPS LNAV의 요구 C/N_0 크기가 가장 높게 나타났다. 그리고 1/2-rate convolutional code가 적용된 항법메시지 (Galileo I/NAV, GPS CNAV, Galileo F/NAV, NavIC NAV) 중 데이터 전송률이 가장 높은 Galileo I/NAV의 요구 C/N_0 크기가 가장 크고, 데이터 전송률이 낮아짐에 따라 필요한 수신 신호의 C/N_0 의 크기가 낮아지는 것을 확인했다. Low-Density Parity Check (LDPC) code가 적용된 항법메시지 (BDS BCNAV2, GPS CNAV2, BDS BCNAV)의 성능은 거의 비슷하게 나타났다. Fig. 8의 결과를 통해 항법메시지에 오류정정부호를 적용하는 것이 메시지의 견고성 측면에서 효과적이라는 것을 알 수 있다.

4.5 Data Bandwidth Overhead

위성항법시스템의 항법 성능 향상을 위해 항법메시지를 통해 사용자에게 많은 정보를 제공할 수 있다. 하지만, 위성항법신호의 설계 목적이 단순히 데이터를 전달하는 것이 아니기 때문에 메시지 양이 늘어남으로써 발생할 수 있는 오버헤드에 대한 분석도 필요하다.

항법메시지 구조 별 오버헤드를 분석하기 위해서는 몇 가지가정이 필요하다. 본 논문에서는 성능 분석을 위해 항법메시지의 한 주기에 해당하는 데이터 세트인 메시지 프레임이 위성으로부터 모두 동일하게 2번 방송되었다고 가정하고, Latency는 15 ms로 가정하여 항법메시지 구조 별 오버헤드를 Fig. 9에 도시하였다. 오버헤드 계산 시, 고정형 구조를 제외한 메시지 구조는 메시지의 총 길이가 정해지지 않았기 때문에 각 신호의 ICD에 정의되어 있는 메시지를 활용하여 메시지 총 길이를 설정하였다.

Fig. 9에 정리한 수치는 현재 방송중인 메시지를 기준으로 메시지 별 오버헤드를 계산한 것이다. 동일한 시스템 내에서 메시지 구조 별로 비교하면 메시지 구조가 발전함으로써 data bandwidth overhead도 함께 감소하는 결과를 보인다.

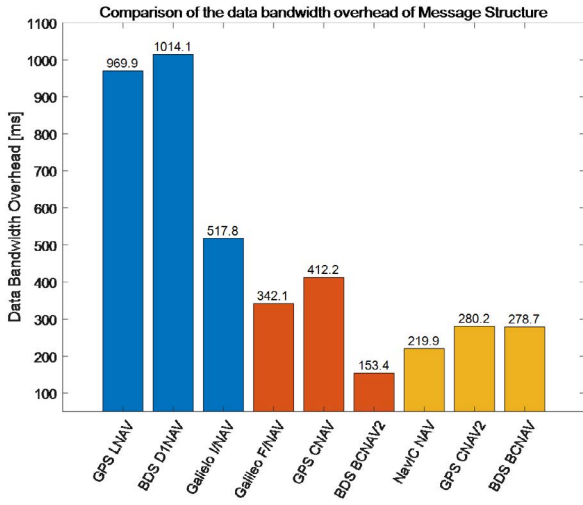


Fig. 9. Comparison of the data bandwidth overhead of each message structure.

고정형 구조가 다른 항법메시지 구조 대비 오버헤드가 크게 발생하는 이유는 마스터 프레임(master frame)의 방송 스케줄이 정해져 있고, 서브프레임 별로 파라미터의 위치가 할당되어 있기 때문에 메시지 전송 방식을 유연하게 변경할 수 없기 때문이다. 또한, 패킷 구조 이후에는 알마나크 크기가 감소하면서, 위성 별 알마나크를 방송하는데 필요한(서브)프레임/페이지의 개수가 줄어들어 마스터 프레임 길이도 함께 줄었다. 패킷 구조와 혼합 구조의 전체 메시지 크기는 유동적이기에 데이터 추가에 따라 마스터 프레임의 길이는 길어지게 된다. 하지만, 두 구조의 메시지 전체 크기를 GPS LNAV와 동일하게 가정하여도 effective bit rate이 고정형 구조보다 우수하기 때문에 오버헤드는 줄어드는 결과를 얻을 수 있다.

GPS를 예시로 분석하면, GPS LNAV의 data bandwidth overhead는 969 ms 수준이다. 그러나, GPS CNAV로 메시지 구조가 발전함으로써 GPS LNAV 메시지 대비 overhead가 58% 감소했다. GPS CNAV 메시지는 추가적인 메시지 타입이 정의되어 방송되어도 메시지 타입 하나당 26.8 ms 수준의 오버헤드 증가를 야기한다. 이는 GPS CNAV 메시지에 몇 가지의 새로운 메시지가 추가되어도 GPS LNAV 메시지보다 오버헤드 작게 유지할 수 있다는 것을 보여준다. GPS CNAV2 메시지는 GPS LNAV 메시지 대비 오버헤드가 71% 감소하고, GPS CNAV 메시지 대비 29% 감소했다.

GPS CNAV2 메시지는 추가적인 메시지 타입이 정의되어 방송되어도 메시지 타입 하나당 19.0 ms 수준의 오버헤드 증가를 야기한다. 현재 GPS CNAV와 GPS CNAV2 메시지는 현재 ICD에 동일한 종류의 메시지들을 정의하고 있음을 생각했을 때, 오버헤드 관점에서 더 큰 이득을 가진다는 것을 알 수 있다.

4.6 Ratio of Non-CED parameter

항법메시지 구조 별 R_{NCEd} 성능 분석 결과는 Fig. 10에 보였다. R_{NCEd} 성능은 메시지 방송 스케줄 내에서 CED의 최대 전송 주기

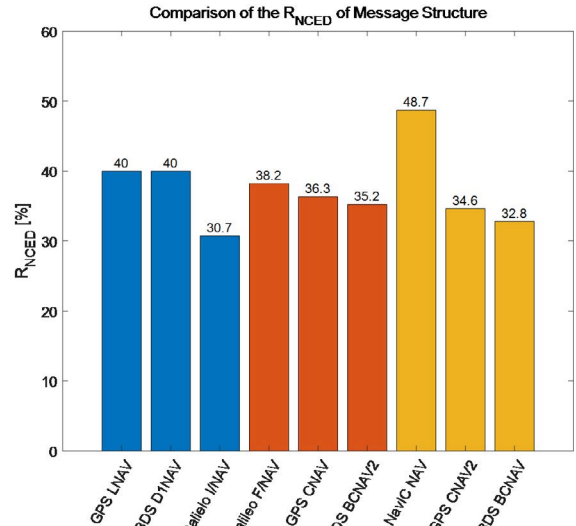


Fig. 10. Comparison of the R_{NCEd} of each message structure.

동안 얼마나 많은 부가 정보를 보낼 수 있는지에 영향을 많이 받는 지표이다. GPS, BDS의 항법메시지 구조가 부가 정보보다는 CED를 효율적으로 송신할 수 있는 방향으로 발전했기 때문에 GPS, BDS 모두 항법메시지 변화와 함께 R_{NCEd} 가 줄어드는 결과를 보였다. 반면, NavIC은 하나의 프레임 주기(\approx Master frame) 안에 CED를 보내는 프레임 개수와 부가 정보를 보내는 프레임 개수가 거의 동일하게 설계가 되어있어 다른 항법메시지보다 높은 R_{NCEd} 을 보였다.

항법메시지 구조에 따른 성능을 종합적으로 분석해보면 Tables 9, 10과 같이 정리할 수 있다. 항법메시지 구조를 구성하는 설계 파라미터는 Table 9에 정리하고, 항법메시지 구조에 따른 성능 분석 결과는 Table 10에 정리하였다. 위성항법시스템의 현대화를 통해 항법메시지의 구조에 패킷이 도입되었고, 그에 따라 항법메시지 성능이 대부분 향상되었다.

세부적으로 살펴보면, effective bit rate 지표는 데이터 전송률이 높은 Galileo I/NAV가 가장 높게 나타났으며, efficiency factor 지표의 경우엔 Len_{EX} 비율이 가장 낮은 GPS CNAV2, BDS BCNAV가 높게 나타났다. Data bandwidth overhead 지표의 경우 데이터 전송률은 Galileo I/NAV에 이어 2번째로 높으면서 total message size가 적은 BDS BCNAV2가 가장 작게 나타났으며, R_{NCEd} 지표는 CED 방송 주기동안 송신되는 메시지의 총 비트 수 중 부가 정보가 포함된 비트 수의 비율이 가장 높은 NavIC NAV가 가장 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. TTFD 지표는 데이터 전송률이 2번째로 높으면서 CED 방송 주기가 짧은 BDS BCNAV2가 가장 낮게 나타났다. Required C/N_0 지표는 동일한 부호율을 갖는 convolutional code를 적용한 Galileo I/NAV, Galileo F/NAV, GPS CNAV, NavIC NAV 중 데이터 전송률이 상대적으로 낮은 Galileo F/NAV와 NavIC NAV가 낮게 나타났으며, 두 항법메시지 중 최소 정보 길이가 더 작은 Galileo F/NAV의 성능이 더 우수하게 나타났다. 그리고 Required C/N_0 지표는 동일하게 300 bits 길이의 최소 정보 길이를 갖는 GPS CNAV, BDS BCNAV2 중에서도 LDPC code를 사용하는 BDS BCNAV2가 더 우수하게 나타났다.

Table 9. Summary of navigation message design parameters.

Design parameter	Type	Fixed			Packetized			Mixed pattern		
		GPS LNAV	BDS D1 NAV	Galileo I/NAV	Galileo F/NAV	GPS CNAV	BDS BCNAV2	NavIC NAV	GPS CNAV2	BDS BCNAV
Minimum frame length		300 bits	300 bits	250 symbols	500 symbols	300 bits	300 bits	600 symbols	883 bits	878 bits
Data rate		50 bps	50 bps	250 sps	50 sps	50 bps	50 bps	50 sps	50 bps	50 bps
Len_{EX}		68 bits	87 bits	72 symbols	72 symbols	38 bits	36 bits	76 symbols	48 bits	48 bits
Total message size		37,500 bits	36,000 bits	92,160 symbols	14,640 symbols	18,000 bits	13,500 bits	9,600 bits	13,245 bits	13,170 bits
Length of non-CED		600 bits	600 bits	1,152 symbols	478 symbols	436 bits	422 bits	584 symbols	311 bits	295 its
Minimum broadcast interval of CED [sec]		30	30	30	50	24	12	48	18	18

Table 10. Summary of navigation message performance indices.

Performance Indices	Type	Fixed			Packetized			Mixed pattern		
		GPS LNAV	BDS D1 NAV	Galileo I/NAV	Galileo F/NAV	GPS CNAV	BDS BCNAV2	NavIC NAV	GPS CNAV2	BDS BCNAV
Effective bit rate [bits]		38.7	35.5	178.0	42.8	43.7	88.0	43.7	47.3	47.3
R_{LenEX} [%]		0.23	0.29	0.29	0.14	0.13	0.12	0.13	0.05	0.05
Efficiency factor [%]		77.3	71.0	71.2	85.6	87.3	88.0	87.3	94.6	94.5
Data bandwidth overhead [sec]		969.9	1014.1	517.8	342.1	412.2	153.4	219.9	280.2	278.7
R_{NCED} [%]		40.0	40.0	30.7	38.2	36.3	35.2	48.7	34.6	32.8
TTFDD [sec]		35.5	35.5	31.6	59.4	29.6	14.8	59.2	18.3	18.5
Required C/N_0 [dB-Hz]		24.9	24.7	27.4	20.6	23.6	21.2	21.1	21.4	21.5

5. 결론

본 논문에서는 위성항법시스템의 메시지 구조 변화를 분석하고 성능 지표를 이용하여 항법메시지 구조에 따른 성능을 분석하였다.

항법메시지의 성능 지표들을 통해 분석한 결과를 통해서도 항법메시지에 패킷을 도입한 이후에 모든 부분에서 성능이 향상되었음을 알 수 있다. 다만, 패킷 구조는 (서브)프레임/페이지의 길이에 맞춰 CED를 분배하여 방송하기 때문에 TTFDD가 패킷의 길이, CED를 전송하는데 필요한 패킷의 개수에 영향을 받는다. 혼합 구조는 고정형 구조와 패킷 구조의 단점을 보완한 구조이기 때문에 새로운 데이터 추가에 제약이 없고, TTFDD도 개선되었다. 그러나, 이 방식은 서브프레임마다 다른 오류 정정 부호를 적용하고 있어 신호 처리의 복잡도가 증가한다. 그리고 항법메시지의 프레임 동기를 위해 secondary code가 필요하여 신호를 계층 구조로 설계해야 한다는 제약 조건이 있다.

또한 본 논문에서 항법메시지 성능 분석을 위해 활용한 성능 지표는 항법메시지의 설계 파라미터 (데이터 전송률, 프레임/패킷 길이, CED 정보량, 오류정정부호 종류 등)에 영향을 받는다. 즉, 동일한 오류정정부호를 적용하여도 데이터 전송률에 따라 견고성이 달라질 수 있고, 동일한 프레임/패킷 길이를 가지는 항법메시지여도 데이터 전송률과 항법 데이터 배치에 따라 모든 성능 지표가 달라질 수 있다. 따라서, 항법메시지 설계 단계에서 다양한 경우에서 설계 파라미터와 성능 지표 간의 트레이드오프 (trade-off) 연구가 지속적으로 필요하다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국방과학연구소의 지원 (계약번호 UD210005SD)에 의해 수행되었습니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The Manuscript with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “conceptualization, J.Y. and S.J.; methodology, J.H.; software, J.H.; validation, J.H., G.H. and J.Y.; formal analysis, J.H.; investigation, G.H.; resources, J.H.; data curation, G.H.; writing—original draft preparation, J.H.; writing review and editing, J.Y.; visualization, J.H.; supervision, S.J.; project administration, J.Y.; funding acquisition, S.J.”. Authorship must be limited to those who have contributed substantially to the work reported.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Anderson, J. M., Carroll, K. L., DeVilbiss, N. P., Gillis, J. T., Hinks, J. C., et al. 2017, Chips-Message Robust Authentication (Chimera) for GPS Civilian Signals, In Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017), Portland, Oregon, September 2017, pp.2388-2416.
- Anghileri, M., Paonni, M., Fontanella, D., Eissfeller, B., & Hein, G. 2013, Assessing GNSS Data Message performance, *insideGNSS*, March/April 2013, pp.60-70.
- Anghileri, M., Paonni, M., Walne, S., Avila-rodri-quez, J., & Eissfeller, B. 2010, Ready to Navigate!-A Methodology for the Estimation of the Time-to-First-Fix, *insideGNSS*, March/April 2010, pp.47-56.
- Barker, B. C., Betz, J. W., Clark, J. E., Correia, J. T., Gillis, J. T., et al. 2000, Overview of the GPS M Code Signal, In Proceedings of the 2000 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Anaheim, CA, January 2000, pp.542-549.
- BeiDou ICD 2016, Beidou navigation satellite system signal in space interface Control Document, Open Service Signal (Version 2.1), China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608523308843290.pdf>
- BeiDou ICD 2017a, Beidou navigation satellite system signal in space interface Control Document, Open Service Signal B2a (Version 1.0), China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608518432765621.pdf>
- BeiDou ICD 2017b, Beidou navigation satellite system signal in space interface Control Document, Open Service Signal B1C (Version 1.0), China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608519640359959.pdf>
- Fernández-Hernández, I., Rijmen, V., Seco-Granados, G., Simón, J., Rodríguez, I., et al. 2014, Design Drivers, Solutions and Robustness Assessment of Navigation Message Authentication for the Galileo Open Service, In Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, Florida, September 2014, pp.2810-2827.
- Galileo ICD 2016, GALILEO Open Service-Signal in Space Interface Control Document (OS SIS ICD), Issue 1.3, European Space Agency / European GNSS Supervisory Authority. <https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS-SIS-ICD-v1.3.pdf>
- IS-GPS-200J 2018, Global Positioning System Directorate Systems Engineering & Integration Interface Specification, IS-GPS-200J, Navstar GPS Space Segment / Navigation user segment interfaces. USA: Navstar GPS Joint Program Office. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200J.pdf>
- IS-GPS-705E 2018, Global Positioning System Directorate Systems Engineering & Integration Interface Specification, IS-GPS-705E, Navstar GPS Space Segment / Navigation user segment interfaces. USA: Navstar GPS Joint Program Office. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705E.pdf>
- IS-GPS-800E 2018, Global Positioning System Directorate Systems Engineering & Integration Interface Specification, IS-GPS-800E, Navstar GPS Space Segment / User segment LIC interfaces. USA: Navstar GPS Joint Program Office. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800E.pdf>
- NavIC ICD 2017, Indian Regional Navigation Satellite System Signal in Space ICD for Standard Positioning Service Version 1.1, Isro Satellite Centre Indian Space Research Organization Bangalore. https://www.isro.gov.in/sites/default/files/irnss_sps_icd_version1.1-2017.pdf
- Noh, J. H., Lim, D. W., Heo, M. B., Jo, G. H., & Lee, S. J. 2020. Design Considerations for KPS Navigation Message, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 9, 305-317. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.4.305>
- Van Dierendonck, A. J., Russell, S. S, Kopitzke, E. R., & Birnbaum, M. 1978, The GPS Navigation Message, *Journal of the Institute of Navigation*, 25, 147-165. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1978.tb01326.x>
- Zhou, Y., Meng, Y., Tao, X., Wang, L., & Su, Z. 2014, GNSS Message Structure Optimization, In *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Volume II*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.15-24.



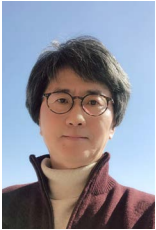
Jae Hee Noh is a Ph.D candidate in the Department of Electronics Engineering at Chungnam National University in Korea. She received B.S and M.S degrees from Chungnam National University, Department of Electronic Engineering in 2017 and 2019. Her research interests include GNSS receiver, anti-spoofing techniques and message authentication.



Gwang Hee Jo is a Ph.D candidate in the Department of Electronics Engineering at Chungnam National University in Korea. He received B.S and M.S degrees from Chungnam National University, Department of Electronic Engineering in 2017 and 2019. His research interest includes GNSS receiver, digital signal processing.



Jang Yong Lee is a principal researcher at Agency for Defense Development, Daejeon, Korea since 1997. He received his B.S, M.S degrees from Electronic Engineering at Chonnam National University in Korea. in 1995 and 1997. His research interests include digital communications and channel coding, satellite navigation system, anti-Jamming system.



Sang Jeong Lee is a professor in the Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Korea. He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Seoul National University, Korea, in 1979, 1981, and 1987, respectively. His research interests include GNSS receiver design and robust control.