

Design Considerations for KPS Navigation Message

Jae Hee Noh¹, Deok Won Lim², Moon Beom Heo², Gwang Hee Jo¹, Sang Jeong Lee^{1†}

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

²Satellite Navigation Team, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

The navigation message is composed of the information contained in the message and the structure for transmitting this information. In order to design a navigation message, considerations in terms of message content and message structure must be elicited. For designing a Korea Positioning System (KPS) navigation message, this paper explains performance indicators in terms of message structure and message content. Most of the performance analysis of GNSS navigation messages already in operation was performed only for Time-to-first-fix-Data (TTFFD). However, in the navigation message, the message content is composed of Clock-Ephemeris Data (CED) and additional information. So, this paper proposes a new performance indicator $R_{\text{Non-CED}}$ that can be analyzed from the viewpoint of receiving additional information along with an explanation of TTFFD focusing on the CED reception time. This paper analyze the performance in terms of message structure using these two performance indicators. The message structures used for analysis are the packetized message protocol like GPS CNAV and the packetized and fixed pattern message protocol like GPS CNAV-2. From the results, it is possible to proffer how KPS navigation messages can have better performance than GPS navigation messages. And, these two performance indicators, TTFFD and $R_{\text{Non-CED}}$, can help to design the minimum TTFF required performance of KPS navigation messages.

Keywords: KPS, navigation message design, message structure

1. INTRODUCTION

미국, 러시아, 유럽, 중국, 일본, 인도 등의 우주 기술 강국들은 자국의 독자적인 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)을 구축하려는 노력을 꾸준히 해왔으며, 현재는 기존 시스템을 현대화하는 작업을 진행하고 있다. 한국도 차후 국가사회 인프라 망의 독립성, 안정성, 보안성 등의 이유로 한국형 위성항법시스템(Korea Positioning System, KPS) 개발을 추진하고 있다. KPS 항법신호는 기존 GNSS 항법신호들과 주파수 호환 및 상호 운용성을 보장하면서도 독자 운용이 가능한 신호체

계로 설계해야 한다. 이를 위해 항법신호를 구성하는 각 구성 요소들에 대한 설계가 필요하며, 최적의 성능을 얻을 수 있는 조합에 대한 연구가 필요하다. 항법신호의 구성요소는 크게 항법에 필요한 정보를 제공하는 항법메시지, 메시지 전송 과정에서 발생한 오류를 정정할 수 있는 오류정정부호, 신호의 대역확산 및 위성의 식별에 필요한 대역확산코드, 항법메시지/확산 코드/반송파를 혼합하기 위한 변조기법으로 나눌 수 있다. 이 중 항법메시지는 사용자의 위치, 속도, 시간을 계산할 수 있는 정보를 제공할 뿐만 아니라 사용자 위치의 정확도를 향상하기 위한 다양한 부가 정보들도 제공한다. 미국의 GPS, 유럽의 Galileo, 중국의 BeiDou Navigation Satellite System (BDS), 인도의 Navigation Indian Constellation (NavIC)에서 서비스 중인 신호들은 각각 고유한 항법메시지 구조를 가지고 있다. GPS와 BDS의 legacy 신호인 GPS L1 C/A와 BDS BII는 고정된 형태의 항법메시지 구조를 채택하였으나, 현대화 신호에서는 메시지를 타입 별로 정의하고 유연하게 방송하기 위해 패킷 단위의 메시지 구조를 도입했다 (IS-GPS-200J 2018, IS-GPS-800E 2018, BeiDou ICD 2016, BeiDou ICD 2017a, 2017b). NavIC의 항법메시지도 메시지를 타입 별로 정의하고 유연하게 방송하기 위한 메시지 구조를 채택했으며, Galileo

Received Nov 16, 2020 Revised Dec 02, 2020 Accepted Dec 07, 2020

[†]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>

Deok Won Lim <https://orcid.org/0000-0002-5154-8063>

Moon Beom Heo <https://orcid.org/0000-0001-9674-9937>

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

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

의 항법메시지는 2 채널을 동시에 활용할 수 있는 방식으로 설계되었다 (Galileo ICD 2016, NavIC ICD 2017).

위성항법시스템의 항법메시지 구조를 결정하기 위한 세부 설계 파라미터는 메시지 내용, 메시지 프레임 구조, 데이터 전송률, 데이터 전송량이 있다. Time-to-first-fix-Data (TTFFD)는 항법메시지를 구조적인 관점에서 분석하기 위해 일반적으로 사용되는 성능 지표이며, 이는 수신기가 최초 항법 시작까지 걸리는 시각을 나타내는 Time-to-first-fix (TTFF)를 결정하는 요소 중 하나이다 (Anghileri et al. 2013, Hein et al. 2010). TTFF에 가장 크게 영향을 주는 것은 항법메시지의 주요 파라미터인 Clock-Ephemeris Data (CED)가 메시지 구조에 의해 어떻게 분배되어 전송되는지이다. 항법메시지를 구조적인 관점에서 분석한 연구들은 대부분 CED 파라미터 수신 시간만 고려하여 TTFFD를 분석했다 (Anghileri et al. 2013, Hein et al. 2010). 그러나 항법메시지 내용은 CED와 CED 외의 항법 성능 개선에 도움을 주는 부가 정보로 구성이 된다. 그러므로 항법신호를 설계하는 단계에서 CED 수신 시간과 부가 정보 수신 시간을 모두 분석할 수 있는 성능 지표를 고려해야 한다.

본 논문에서는 KPS의 항법메시지 설계를 위해 메시지 구조에 따른 해석적 TTFFD 뿐만 아니라 부가 정보 수신 측면에서 분석 가능한 지표를 제시한다. 이를 이용하여 KPS 항법메시지 구조 후보군들에 대한 성능 분석을 수행한다. 이 논문은 2장에서 기존 위성항법시스템들의 항법메시지 구조에 대해 비교 및 분석한다. 3장에서는 항법메시지 설계 시 고려해야 할 분석 파라미터들에 대해 서술하고, 항법메시지 구조 관점에서 분석할 성능 지표에 대해 서술한다. 4장에서는 3장에서 서술한 성능 지표를 활용하여 항법메시지 구조에 따른 성능을 분석하고, 5장에 결론을 서술한다.

2. 기존 위성항법시스템의 항법메시지 구조

GPS는 GPS IIA와 GPS IIR 위성으로부터 L1 주파수의 C/A 코드를 가지는 항법신호를 제공했으며, 고정된 형태의 legacy GPS 항법메시지를 함께 제공했다. 2005년 이후부터는 GPS 현대화 계획에 따라 민간용 L2C 신호, 군용 M-code 신호를 시작으로 L5, L1C 등의 현대화 신호를 제공하고 있다. GPS legacy 항법메시지는 총 25개의 프레임으로 구성되며, 각 프레임은 5개의 subframe으로 구성된다. GPS legacy 항법메시지는 최소 정보 단위가 word이며, 1개의 word는 30 bits 길이를 가진다. GPS Legacy 항법메시지는 고정된 형태의 구조를 가지기 때문에 기존에 설계된 데이터 이외의 새로운 데이터를 추가하는데 제약적이다 (IS-GPS-200J 2018). GPS의 현대화 항법신호인 GPS L2C/L5는 GPS Legacy 항법메시지의 단점을 극복하기 위해 패킷 단위의 메시지를 채택했다. 패킷 단위의 항법메시지는 항법 데이터들을 메시지 타입으로 정의하여 관리한다. 이때, 각각의 메시지들은 방송 주기를 두고 유연하게 방송된다. 이러한 특성 덕분에 고정된 메시지와 다르게 새로운 데이터 추가 및 방송이 용이하다. GPS L2C/L5 신호의 항법메시지 구조는 GPS CNAV라 불리며 최소 정보 길이는 300 bits이다. 항법메시지 전체 길이는 고정되어 있지 않고

최적의 성능을 제공할 수 있도록 메시지가 시퀀스되어 임의로 방송된다. GPS L2C/L5 신호를 설계한 이후, GPS는 더 정확하고 수신 성능이 우수한 GPS L1C 신호를 설계하였다. 그리고 TTFF 성능을 향상하기 위해 고정된 형태의 GPS Legacy 항법메시지와 패킷 단위의 GPS CNAV를 상호 결합한 형태의 항법메시지 구조를 채택하였다. GPS L1C 신호의 항법메시지 구조는 GPS CNAV-2라 불리며, 1개의 프레임은 길이는 1,800 bits이고, 1개의 프레임은 3개의 subframe으로 구성되어 있다. GPS CNAV-2는 subframe 1, 2를 통해 위성의 시각 정보 및 궤도력 정보를 제공하고 subframe 3을 통해 CED 이외의 부가 정보를 제공한다.

BDS-2 항법신호인 B1I, B2I, B3I 신호는 GPS Legacy 항법메시지 구조와 마찬가지로 고정된 형태의 메시지 구조를 가진다. BDS B1I, B2I, B3I 신호의 항법메시지는 D1 항법메시지, D2 항법메시지로 구분된다. BDS D1 항법메시지는 중궤도 위성과 경사지 구동기궤도 위성이 송신하는 항법신호로부터 수신할 수 있고 총 36,000 bits 길이를 가진다. D2 항법메시지는 정지궤도 위성이 송신하는 항법신호로부터 수신할 수 있고 총 180,000 bits 길이를 가진다. 2 개의 항법메시지는 각각 50 bps, 500 bps 전송률로 전송되며, 최소 정보 단위는 word이고 길이는 30 bits이다 (BeiDou ICD 2016). BDS-3 항법신호는 GPS 현대화 신호처럼 고정된 항법메시지가 새로운 데이터를 추가하는데 제약적이라는 한계를 극복하기 위해 패킷 개념을 도입하였다. BDS B1C 신호에 적용된 항법메시지 구조는 GPS CNAV-2와 유사한 형태(고정된 형태의 메시지와 패킷 단위의 메시지가 상호 결합된 형태)를 가지며, 오류정정부호와 subframe 1, 3의 길이만 다르다. BDS B2a 신호에 적용된 항법메시지 구조는 GPS CNAV와 유사한 형태를 가지며, 적용되는 오류정정부호만 다르다.

Galileo E5a 신호의 항법메시지는 F/NAV라고 불리며, 최소 정보 단위가 page이다. 1개의 page는 256 bits 길이를 가지고, 5개의 page가 1개의 subframe을 구성한다. 1개의 frame은 12개의 subframe으로 구성되어 있다. 각 페이지의 항법메시지 정보는 페이지 타입에 따라 정해지고, 홀 수 번째 subframe은 1, 2, 3, 4, 5번 페이지로 구성되며 짝 수 번째 subframe은 1, 2, 3, 4, 6번 페이지로 구성된다. 항법메시지 내용은 타입으로 정의되어 관리되지만 각 시점마다 보내야 하는 메시지가 정해져 있기 때문에 고정된 형태의 메시지 구조를 가진다. Galileo E1B, E5b-I 신호의 항법메시지는 I/NAV라고 불리며, 1개의 frame이 24개의 subframe으로 구성된다. 1개의 subframe은 15개의 페이지로 구성된다. I/NAV 메시지는 홀수 페이지와 짝수 페이지가 차례대로 번갈아 송신되며, 홀수와 짝수 페이지는 독립적으로 구분된 항법메시지를 제공하는 것이 아니라 함께 디코딩해야 유효한 데이터를 사용할 수 있도록 설계되어 있다. 이러한 특성으로 인해 I/NAV 항법메시지는 2채널(E1B, E5b-I)을 동시에 활용하여 항법메시지 수신 시간을 절반으로 줄이는 효과를 볼 수 있다.

NavIC의 항법메시지는 현재 SPS-L5, SPS-S 신호를 통해 제공되고 있으며, 1개의 마스터 프레임은 4개의 subframe으로 구성되어 있다. NavIC의 항법신호에 적용된 항법메시지 구조는 GPS CNAV-2와 유사하게 고정된 형태의 메시지와 패킷 단위의 메시지가 상호 결합된 형태의 구조를 가진다. 항법메시지의 subframe 1과 subframe 2는 동일한 구조를 가지며 CED 정보만을 포함한

Table 1. 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	50	50	D1(50) D2(500)	50	50	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	Parity check	Convolutional code	BCH / LDPC	Parity check	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	Fixed + Packetized	Fixed	Packetized	Fixed + Packetized	Fixed	Fixed	Fixed + Packetized

다. Subframe 3과 subframe 4는 동일한 구조를 가지고 있고, 이를 통해 CED 외의 부가 정보들을 방송할 수 있다. 항법메시지의 최소 정보 단위는 subframe이며 292 bits의 길이를 가진다.

본 장에서 서술한 기존 위성항법시스템의 항법메시지 구조 변화는 Table 1과 같이 요약할 수 있다. GPS, BDS, NavIC은 모든 항법신호에 대해서 단일 채널만을 활용하여 항법메시지를 수신하도록 설계가 되어 있으며, Galileo는 L1 대역과 L5 대역이 2채널을 이용하여 항법메시지를 수신할 수 있도록 설계가 되어 있다. 공개서비스용 KPS 항법신호는 단일 채널을 이용하여 메시지를 수신하는 것을 목표로 하고 있기에 단일 채널을 활용하고 있는 GPS, BDS, NavIC의 항법메시지 구조를 참고하여 항법메시지를 설계할 필요가 있다. 다양한 서비스 및 정보 제공을 위해 고정된 형태의 메시지 구조보다는 새로운 메시지 추가가 자유로운 패킷 단위의 메시지 구조 또는 상호 결합형 메시지 구조를 활용하는 것이 바람직하다.

3. 항법메시지 설계 시 고려 사항

항법메시지는 메시지 안에 포함되는 내용과 이 내용의 전송 방법을 결정하는 메시지 구조로 구성된다. 본 장에서는 새로운 위성항법시스템의 항법메시지를 설계할 때, 메시지 내용적인 관점과 메시지의 구조적인 관점에서 각각 고려할 필요가 있는 사항들에 대해서 서술하였다.

3.1 메시지 내용 측면에서의 고려 사항

항법메시지의 내용 결정은 전송이 필요한 데이터의 양을 예측하기 위해 필수적이다. 항법메시지를 통해 전송되는 데이터 양의 결정은 메시지를 효율적으로 전송할 수 있는 프레임 구조를 설계하는데 도움이 된다. 항법을 수행하기 위해 필요한 주된 정보인 CED는 위성 궤도 모델과 위성 시각 모델을 통해 필요한 파라미터와 비트 수를 결정할 수 있다. 항법메시지에 담기는 파라미터들의 비트 수, 스케일 팩터, 유효 범위는 사용하는 모델과 긴밀한 관계를 가지기 때문에 모델이 결정되지 않으면 데이터의 양을 예측할 수 없다. 파라미터 값의 범위, 스케일 팩터와 요구 비트 수

사이의 관계는 식 (1)과 같다 (Van Dierendonck et al. 1978).

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

파라미터의 범위가 크고 스케일 팩터가 작을수록 CED의 정확도가 높아진다. CED의 정확도 증가는 위성 위치 정확도에 긴밀하게 연결되기 때문에 이는 곧 의사거리의 정확도에 영향을 준다. 그러나 현재 운용중인 위성항법시스템에서 설계한 CED 파라미터의 유효 범위, 스케일 팩터를 살펴보면 대부분 유사한 수준으로 설계되었다. 이는 파라미터의 스케일 팩터, CED의 정확도, 메시지 정보량, 위성 위치 계산 복잡도/신속도 등이 긴밀하게 연결되어 있기 때문에 CED 파라미터의 스케일 팩터를 무제한으로 낮출 수 없음을 의미한다. CED 파라미터들의 크기는 설계하려는 위성항법시스템이 요구하는 위성 궤도, 시각 및 항법 정확도에 따라 최적의 성능을 나타낼 수 있도록 설계되어야 한다. 만약 CED의 크기가 커지면 요구 비트 수가 증가하게 되고 이는 TTFFD 및 TTFF의 성능을 저하시킨다. 이뿐만 아니라 수신기가 저장해야 하는 데이터의 양도 증가하기 때문에 더 많은 메모리가 요구될 것이다. 항법메시지에 담길 메시지 내용을 설계하기 위해서는 각각의 서비스에 필요한 모델을 선정하고 위성항법시스템의 최소 요구 성능을 중심으로 다양한 관점에서 취사선택 관계를 분석해야 한다.

위성항법시스템의 항법메시지는 위성 위치 계산을 위한 위성 시각 및 궤도력 정보 이외에도 다양한 항법데이터들을 제공하고 있다. 시각 정보, 의사거리 관련 보정 정보, 항법 보정 정보, 위성 상태 정보 등이 포함되어 있으며, 일반적으로 항법메시지에 들어가는 구성 요소를 Table 2에 정리하였다 (Van Dierendonck et al. 1978).

GPS Legacy 항법메시지는 Table 2에 정리한 정보들로 항법메시지가 구성되어 있으며, 메시지의 구조가 고정되어 정해진 순서대로 항법메시지를 방송하고 있다. 최근에는 GPS Legacy 항법메시지와 다르게 메시지를 타입 별로 관리하여 새로운 타입의 메시지 정의 및 추가가 용이하도록 설계되고 있다. GPS CNAV, CNAV-2는 GPS Legacy 항법메시지에서 포함하고 있는 항법 정보들뿐만 아니라 위성 궤도력 정보와 시각 정보에 대한 differential correction 정보, 메시지 인증 관련 정보 등 항법 정확

Table 2. 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	-

도 개선에 도움을 주는 다양한 정보들을 제공하고 있다. 위성항법시스템의 발전으로 차세대 항법신호의 항법메시지는 기존의 항법메시지보다 더 다양한 정보를 제공한다. 비교적 최근에 설계된 신호들은 대부분 메시지를 타입 별로 관리하여 새로운 타입의 메시지 정의 및 추가가 용이하도록 설계되고 있다. 이러한 변화들에 유의하여, KPS의 항법메시지를 설계할 때 기본적인 항법 서비스 외에 어떤 서비스를 제공할 것인지, 메시지 내용들을 어떻게 관리하여 방송할 것인지에 대한 고민이 필요하다.

3.2 메시지 구조 측면에서의 고려 사항

항법메시지를 구조적인 관점에서 분석하기 위한 가장 중요한 성능 지표는 TTFF를 구성하는 요소 중 하나인 TTFFD이다. TTFFD는 항법메시지의 주요 파라미터인 CED가 메시지 구조에 의해 어떻게 분배되어 전송되는지에 가장 큰 영향을 받는다. 수신기가 최초 항법을 시작하기까지 걸리는 시간을 의미하는 TTFF는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다 (Hein et al. 2010).

$$TTFF = T_{warm-up} + T_{acq} + T_{track} + T_{CED} + T_{PVT} \quad (2)$$

여기서 $T_{warm-up}$ 은 수신기의 셋팅 시간, T_{acq} 는 신호 획득 시간, T_{track} 는 코드 및 반송파 위상 추적 시간, T_{CED} 는 CED 획득 시간, T_{PVT} 는 항법해 연산 시간을 의미한다. T_{CED} 는 최초 항법 시 필요한 데이터를 수신하는 데에 걸리는 시간인 TTFFD이다 (Hein et al. 2010, Anghileri et al. 2013). TTFFD는 메시지 프레임 구조와 CED 데이터가 얼마나 많은 (서브)프레임에 분배되어 전송되는지에 따라서 성능이 달라진다. 또한, 수신기가 항법메시지를 수신하기 시작한 시점이 메시지 프레임의 어느 지점인지에 따라 TTFFD가 달라진다. 이러한 이유들로 인해 TTFFD를 특정한 값으로 나타내기 어렵고 Probability density function (PDF)와 Cumulative distribution function (CDF)를 이용하여 통계적인 방법으로 분석한다. PDF, CDF는 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간을 계산한 결과를 통해 도출할 수 있으며, TTFFD는 CDF에서 확률이 95%인 지점에 해당하는 시간으로 정의한다. 이 지점에 해당하는 시간은 해당 시간 내에 수신기가 95%의 확률로 CED 획득이 가능함을 의미한다 (Hein et al. 2010, Anghileri et al. 2013). 패킷 단위의 메시지 구조는 각각의 항법데이터들의 최대 전송 주기가 정해져 있고, 서비스 제공자가 메시지를 타입 별로 스케줄을 설계한다. TTFFD 계산 시에 CED의 방송 스케줄이 어떻게 설계

되었는지, 사용자가 메시지를 읽기 시작한 시점이 메시지의 어느 시점 인지 여에 따라 값이 달라진다. 그렇기에 TTFFD는 1개의 패킷에서 헤더와 CRC 비트를 제외한 비트 길이와 CED 크기의 관계에 따른 CED 전송 방법의 변화에 영향을 받는다.

3.1절에서 언급했듯이 항법메시지는 CED로만 구성되어 있는 것이 아니라 CED 외의 부가정보(UTC/전리층/상태 정보 등)도 함께 구성되어 있다. 따라서 항법메시지 구조를 설계할 때, CED를 신속하게 제공하는 방법뿐만 아니라 i 번째 CED와 $(i+1)$ 번째 CED 데이터가 전송되는 간격 동안에 방송 가능한 부가 정보의 크기도 고려해야 한다. 부가정보를 보내기 위한 비트는 항법 정확도 개선에 도움을 주는 보정 정보나 항법메시지 인증과 같은 새로운 서비스를 제공할 때도 활용이 가능하다. 그렇기에 항법메시지 설계 단계에서 위성항법시스템을 통해 제공할 부가 정보의 종류 및 부가 정보 전송에 활용 가능한 비트 크기에 대한 고려가 필요하다. CED의 총 비트 수와 메시지 프레임 길이를 알면 식 (3)과 같이 CED 최대 전송 간격 동안 전송되는 부가 정보의 비율을 계산할 수 있다.

$$R_{Non-CED}[\%] = \frac{\text{Lenght of frame of non-CED [bits]}}{\text{Maximum broadcast interval of CED [s]} \times \text{Data rate [bps]}} \times 100 \quad (3)$$

위에서 언급한 2가지의 고려 사항을 고려했을 때, 패킷 단위의 메시지에서 패킷 길이를 CED가 한 번에 실릴 수 있도록 설계하면서 데이터 전송률을 높이는 방법은 가장 단순하게 TTFFD와 $R_{Non-CED}$ 을 향상시킬 수 있는 방법이다. 그러나 위성항법신호는 단순히 메시지를 빠른 시간에 전달하기 위한 목적으로 설계되는 신호가 아니기 때문에 항법메시지의 데이터 오차율(Bit Error Rate, BER)과 수신 성능을 고려하지 않고 데이터 전송률만을 높일 수 없다. 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. 확산 이득은 데이터 전송률 대비 칩 전송률의 비로 식 (4)와 같이 정의할 수 있다 (Langley 1997).

$$\text{Processing Gain} = 10 \log \frac{\text{Chip Rate}}{\text{Data Rate}} \quad (4)$$

일반적으로 항법메시지의 데이터 전송률이 낮을수록 확산 이득이 증가하여 신호의 신호 대 잡음비(Signal to Noise, SNR)가 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 오류정정부호를 사용하는 Galileo I/NAV와 Galileo F/NAV 항법 메시지 중 더 낮은 데이터 전송률이 적용된 Galileo F/NAV 항법 메시지의 데이터 오차율이 더 낮다. 그러나 데이터 오차율은 항법메시지에 어떤 오류 검출 방법을 사용하는지, Forward Error Correction (FEC)를 지원하는지에 따라서 동일한 데이터 전송률에서도 성능이 달리 나타나기 때문에 데이터 전송률을 높이기 위해서 어떤 오류정정부호를 사용할 것인지에 대한 고민도 필요하다.

4. 항법메시지 구조에 따른 성능 비교

논문의 2장을 통해 현재 운용중인 위성항법시스템들의 항법 메시지 구조 변화를 보았을 때, 2채널을 활용하는 Galileo를 제외한 항법메시지 프레임 구조는 GPS CNAV와 같은 패킷 단위의 메시지 구조 또는 GPS CNAV-2와 같은 상호 결합된 형태의 메시지 구조로 발전하고 있다. 본 논문에서는 KPS의 항법메시지를 패킷 단위의 메시지 구조 또는 상호 결합된 방식의 메시지 구조로 설계했을 때의 메시지 구조에 따른 해석적 TTFFD와 $R_{Non-CED}$ 의 성능을 비교 및 분석하였다.

4.1 패킷 단위의 항법메시지 구조

패킷 단위의 항법메시지는 헤더, 데이터, CRC로 구성되어 있으며, 그 구조는 Fig. 1과 같다. 헤더는 일반적으로 메시지 시작 지

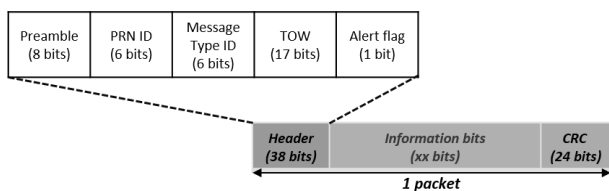


Fig. 1. The message structure of the packetized message protocol.

Table 3. Cases of the message broadcasting schedule.

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

점을 판단하기 위한 Preamble, 위성 PRN 정보, 메시지 타입 정보, 메시지 생성 시각을 포함한다. 아직 KPS의 항법메시지 구성 내용과 오류정정부호를 설계하는 단계이기 때문에 본 논문에서는 헤더와 CRC 길이를 현재 GPS CNAV에 정의된 길이와 동일하게 적용했다. 패킷 단위의 항법메시지는 타입 별로 정의된 메시지들이 각각 최대 전송 주기가 정해져 있고, 그 주기에 맞춰 메시지 방송 스케줄이 설계되어 있다 (IS-GPS-200J 2018).

기존의 GPS CNAV 메시지 스케줄링 방식을 참고하여 CED 크기와 정보 비트 길이에 따른 메시지 방송 방법을 선정하였다. CED 크기와 정보 비트 길이 관계에 따라 총 3 가지의 스케줄링 방법이 설계 가능하며, 이는 Table 3에 정리하였다. 첫 번째 방법은 CED의 크기가 정보 비트 길이보다 2배 이상 큰 경우이며, 이 경우에는 CED가 총 3개의 패킷에 분배되어 방송이 된다. 두 번째는 CED의 크기가 정보 비트 길이의 2배 이하이면서 1배 초과인 경우이며, 이때 CED는 총 2 개의 패킷에 분배되어 방송된다. 마지막은 subframe의 정보 비트 길이가 CED 크기보다 작은 경우이며, 이 때 CED는 1개의 패킷을 통해 방송된다.

본 논문에서는 Table 4와 같은 실험 환경에서 TTFFD와 $R_{Non-CED}$ 의 성능을 분석했다. 패킷 길이와 CED 크기 조합 별 TTFFD 계산 과정을 도출하기 위해 Table 4에 필요한 인덱스를 함께 정의하였다. 데이터 전송률은 현재 GPS CNAV 메시지에서 사용하고 있는 전송률을 기준으로 정했다. 분석에 사용할 CED의 길이의 범위는 현재 운용중인 위성항법시스템 간의 CED 길이 비교 결과를 통해 선정하였다. Table 5는 위성항법시스템 별로 설계한 CED 길이를 메시지 구조에 따라 구분하여 정리한 표이다.

TTFFD 성능 분석을 위해서는 PDF 및 CDF 계산이 필요하기 때문에 먼저 항법메시지 프레임 구조 후보군의 CED 획득 시간을 메시지 수신 시작 시점에 따라 계산하는 과정이 필요하다. 메시지 수신 시작 시점에 따른 메시지 획득 시간이 구해지면, 메시지 획득 시간에 대한 PDF를 계산하고 PDF를 기반으로 메시지 획득 시간의 CDF를 도출한다. Fig. 2는 CED 크기(a)가 420 bits, 패킷 길이(b)가 300 bits, 데이터 전송률(c)이 50 bps인 경우 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간 도식한 결과이다. 이때, 1 개의 패킷 안의 정보 비트 길이(d)는 238 bits이고, CED 전송 스케줄은 Table 3에 정리한 케이스 중 case 2에 해당한다.

Fig. 2에서 P1에 해당하는 시점은 수신기가 수신한 첫 번째 메

Table 4. Parameter setting for performance analysis.

Parameter	Range	Index
Length of CED	420-480 bits	a
Length of the packet	300-500 bits	b
Data rate	50 bps	c
Length of information bits in 1 packet	238-538 bits	d
Broadcast interval the parameter of non-CED	-	e

Table 5. Comparison the length of CED for each GNSS.

Length of CED [bits]									
Fixed message protocol			Packetized message protocol			Packetized and fixed pattern message protocol			
GPS LNAV	QZSS LNAV	BDS D1/D2	GPS CNAV	QZSS CNAV	BDS BCNAV2	GPS CNAV2	QZSS CNAV2	BDS BCNAV1	NavIC
412	412	433	477	477	481	477	477	481	420

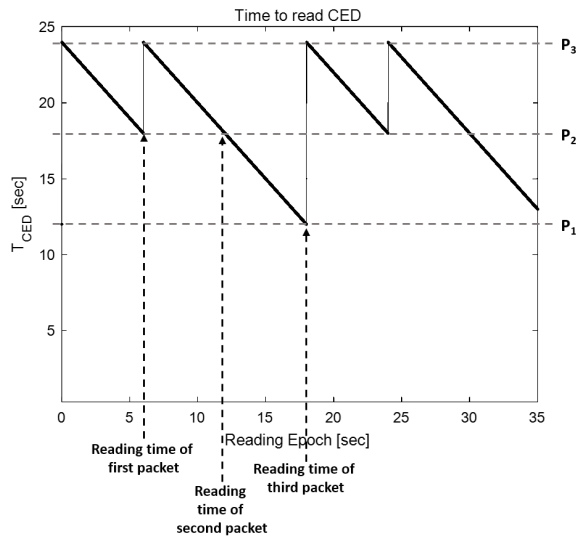


Fig. 2. Time to read CED as a function of the reading epochs in the case of error free data.

시지 비트가 첫 번째 CED 정보가 담긴 패킷의 시작점과 정확히 일치하는 경우에 해당한다. 이 시점은 식 (5)와 같이 계산이 가능하다. 여기서 $\lceil \frac{a}{d} \rceil$ 에 해당하는 부분은 CED 크기(a)와 패킷의 정보 비트 길이(d)에 따라 CED가 몇 번 분배되어 전송되는지를 나타낸다.

$$P_1 = \frac{b}{c} \times \left\lceil \frac{a}{d} \right\rceil \quad (5)$$

P_2 에 해당하는 시점은 수신기가 수신한 첫 번째 메시지 비트가 두 번째 CED 정보가 담긴 패킷의 시작점과 정확히 일치하는 경우에 해당한다. 이때 P_2 에 해당하는 시점은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 식 (5)와는 다르게 $\lceil \frac{a}{d} \rceil + 1$ 에서 1이 더해지는 이유는 Table 3에서 정리한 것처럼 CED 정보가 담긴 패킷들 다음에 방송되는 패킷에는 필수적으로 Non-CED 정보를 보내야하기 때문이다.

$$P_2 = \frac{b}{c} \times \left(\left\lceil \frac{a}{d} \right\rceil + 1 \right) \quad (6)$$

P_3 에 해당하는 시점은 수신기가 수신한 첫 번째 메시지 비트가 두 번째 CED 정보가 담긴 패킷의 두 번째 비트인 경우이다. 이때 수신기는 현재 수신한 패킷의 메시지 비트를 버릴 수 없기 때문에 이 부분을 고려하여 CED 획득 시간을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_3 = \left(\frac{b}{c} - \frac{1 \text{ bit}}{c} \right) + \frac{b}{c} \times \left(\left\lceil \frac{a}{d} \right\rceil + 1 \right) \quad (7)$$

Fig. 2와 같은 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간을 나타내는 그래프에 대한 수식을 Table 2의 3가지 경우에 대해서 정리하면 식 (8-10)과 같이 나타낼 수 있다.

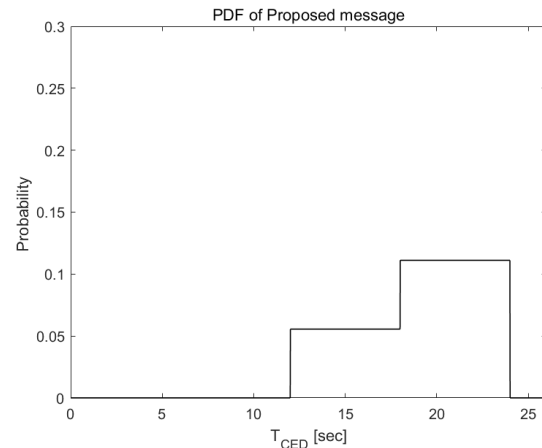


Fig. 3. PDF of the time to read the CED in the case of error free data.

$$T_{CED,case1} = \begin{cases} P_1, & t = 0, t = \frac{b}{c} \times ([a + d] + 1) \\ \frac{P_2 - P_3}{\left(\frac{b}{c} - \frac{1}{c}\right)} t + \left(P_3 - \frac{P_2 - P_3}{d \times \left(\frac{b}{c} - \frac{1}{c}\right)} \right), & 0 < t \leq \frac{b}{c} \\ \frac{P_2 - P_3}{\left(\frac{b}{c} - \frac{1}{c}\right)} t + \left(P_3 - \left(\frac{b}{c} + \frac{1}{c} \right) \times \frac{P_2 - P_3}{\left(\frac{b}{c} - \frac{1}{c}\right)} \right), & \frac{b}{c} < t \leq \frac{2b}{c} \\ \frac{P_3 - P_3}{\left(\frac{2b}{c} - \frac{1}{c}\right)} t + \left(P_3 - \left(\frac{2b}{c} + \frac{1}{c} \right) \times \frac{P_3 - P_3}{\left(\frac{2b}{c} - \frac{1}{c}\right)} \right), & \frac{2b}{c} < t \leq \frac{4b}{c} \end{cases} \quad (8)$$

$$T_{CED,case2} = \begin{cases} P_1, & t = 0, t = \frac{b}{c} \times ([a + d] + 1) \\ \frac{P_2 - P_3}{\left(\frac{b}{c} - \frac{1}{c}\right)} t + \left(P_3 - \frac{P_2 - P_3}{d \times \left(\frac{b}{c} - \frac{1}{c}\right)} \right), & 0 < t \leq \frac{b}{c} \\ \frac{P_3 - P_3}{\left(\frac{2b}{c} - \frac{1}{c}\right)} t + \left(P_3 - \left(\frac{b}{c} + \frac{1}{c} \right) \times \frac{P_3 - P_3}{\left(\frac{2b}{c} - \frac{1}{c}\right)} \right), & \frac{b}{c} < t \leq \frac{3b}{c} \end{cases} \quad (9)$$

$$T_{CED,case3} = \begin{cases} P_1, & t = 0, t = \frac{b}{c} \times ([a + d] + 1) \\ \frac{P_1 - P_3}{\left(\frac{b}{c} - \frac{1}{c}\right)} t + \left(P_3 - \left(\frac{1}{c} \right) \times \frac{P_1 - P_3}{\left(\frac{b}{c} - \frac{1}{c}\right)} \right), & 0 < t \leq \frac{2b}{c} \end{cases} \quad (10)$$

Fig. 2를 도식하기 위해 설정한 환경과 동일한 환경에 대한 메시지 획득 시간의 PDF는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. PDF는 Fig. 2를 통해 관측되는 그래프의 선형 구간이 reading epoch 동안 몇 번 나타나는지 카운트를 하여 계산한다. Fig. 2와 동일한 환경에서 메시지 획득 시간의 PDF를 도식한 결과는 Fig. 3과 같다.

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{18} & 12 \leq t < 18 \\ \frac{2}{18} & 18 \leq t < 24 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (11)$$

Table 4에 정리한 실험 환경에 대해서 식 (8-10)을 이용하여 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간을 계산한 후에 메시지 획득 시간의 PDF를 계산할 수 있으며, 이는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 이때, PDF는 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간을 도식했을 때 관측되는 그래프의 선형 구간이 reading epoch 동안 몇 번 나타나는지 카운트를 하여 계산한다.

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\text{The number of section which is } P_1 \leq y < P_2}{\frac{b}{c} \times (|a+d|+1)} & P_1 \leq t < P_2 \\ \frac{\text{The number of section which is } P_2 \leq y \leq P_3}{\frac{b}{c} \times (|a+d|+1)} & P_2 \leq t \leq P_3 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (12)$$

통계적으로 성능을 판단하기 위해 PDF 계산 결과를 기반으로 메시지 획득 시간의 CDF를 도출한다. CDF의 95% 확률 지점이 TTFFD에 해당하며, CDF의 95% 확률 지점을 계산하기 위한 식은 식 (13)과 같다. 식 (11)에서 계산한 PDF로부터 계산한 CDF와 95% 지점을 도기한 결과는 Fig. 4와 같다.

$$F(T) = \int_{-\infty}^T f(t)dt = 0.95 \quad (13)$$

위에서 서술한 CED 획득 시간, 메시지 획득 시간의 PDF, 메시지 획득 시간의 CDF를 계산하는 일련의 과정을 통해 TTFFD 추정 가능성이 가능하다. Table 3에 정리한 실험 환경에 대해서 TTFFD 성

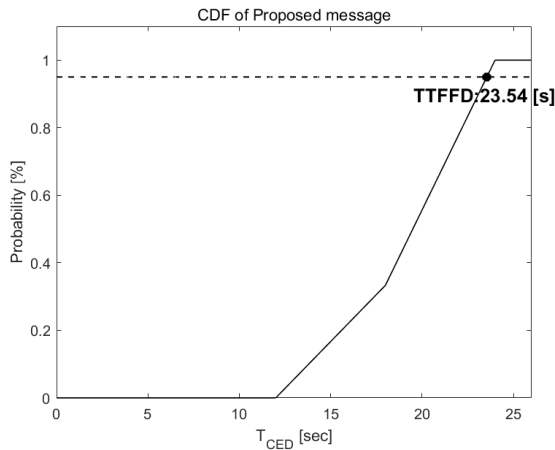


Fig. 4. CDF of the time to read the CED in the case of error free data.

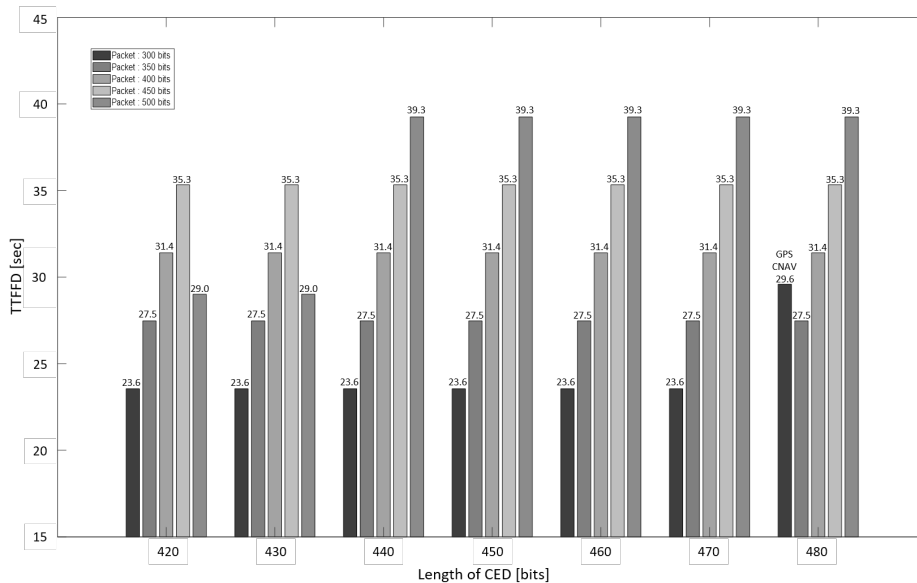


Fig. 5. TTFFD according to lengths of the CED and packet.

능을 분석한 결과는 Fig. 5와 같으며, $R_{Non-CED}$ 에 대한 분석 결과는 Fig. 6에 정리했다. 그림에서 바 그래프는 5개씩 7 그룹으로 형성되어 있으며, 그룹 당 바 그래프는 패킷 길이가 300, 350, 400, 450, 500 bits 인 순서로 도시했다.

Figs. 5와 6의 결과를 보면 패킷 길이가 길어질수록 TTFFD와 $R_{Non-CED}$ 가 증가하는 추세를 보인다. 그러나 CED의 길이가 420, 430 bits이면서 패킷 길이가 500 bits인 경우와 CED 길이가 480 bits이면서 패킷 길이가 300 bits인 경우는 예상과 다른 결과를 보였다. 이 중 CED 길이가 480 bits이면서 패킷 길이가 300 bits인 경우는 현재 GPS CNAV의 성능에 해당한다. GPS CNAV는 29.6 초의 TTFFD 성능을 가지며 19.8%의 $R_{Non-CED}$ 성능을 가지는 항법 메시지이다.

만약 KPS의 최소 TTFFD 요구 성능을 GPS CNAV와 유사한 30 초로 둔다면 GPS CNAV보다 패킷 길이가 더 긴 350 bits로 설계 하여도 CNAV보다 우수한 성능을 가진다. 그리고 KPS는 NavIC과 같이 지역위성항법시스템을 고려하고 있기 때문에 NavIC과 비슷한 CED 길이(420/430 bits)로 설계가 될 때, 패킷 길이를 500 bits로 설계한다면 TTFFD는 30초 요구 성능을 만족하면서 $R_{Non-CED}$ 의 성능이 CNAV의 2배 이상으로 향상된다. 논문에서 제시한 분석 결과를 통하여 패킷 단위의 항법메시지 구조는 항법 성능에 직접적인 영향을 주는 CED의 정확도 측면과 항법 성능 향상에 도움을 주는 부가 정보의 비중 측면에서 취사선택하여 TTFFD 최소 요구 성능을 설계할 수 있다.

4.2 상호 결합된 형태의 메시지 구조

상호 결합된 형태의 메시지 구조는 GPS CNAV-2, NavIC의 항법메시지 구조가 대표적이다. GPS CNAV-2 포맷의 항법메시지의 하나의 프레임은 총 3개의 서브프레임으로 구성되어 있고 첫 번째 서브프레임에는 시각 정보, 두 번째 서브프레임에는 CED가

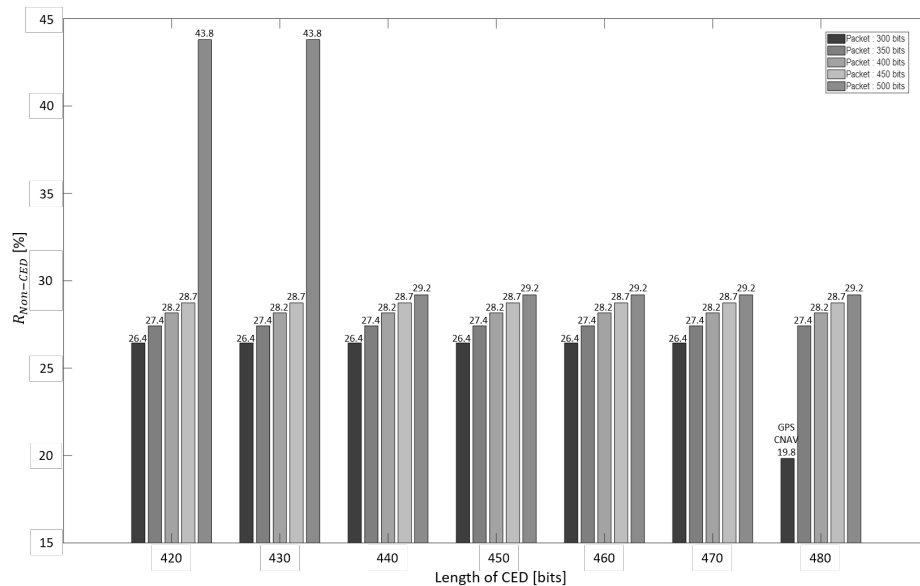


Fig. 6. $R_{Non-CED}$ according to lengths of the CED and packet.

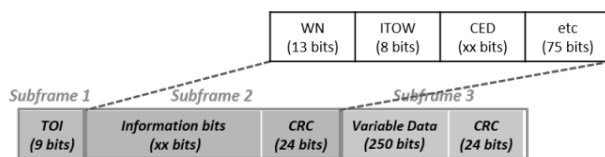


Fig. 7. The message structure of the packetized and fixed pattern message protocol.

고정되어 전송된다. 세 번째 서브프레임을 통해 부가 정보가 타입별로 정의되어 방송 스케줄에 맞춰 방송된다. NavIC의 항법메시지는 하나의 프레임은 총 4개의 서브프레임으로 구성되어 있고 첫 번째와 두 번째 서브프레임을 통해 CED가 방송되고, 나머지 2개의 서브프레임을 통해 부가 정보가 타입별로 정의되어 방송 스케줄에 맞춰 방송된다. GPS CNAV-2 포맷의 항법메시지 구조는 Fig. 7과 같다 (IS-GPS-800E 2018).

상호 결합된 형태의 구조를 가지는 메시지는 인코딩 이후 심볼 단위의 메시지 프레임 길이가 항법신호의 secondary code와 동일한 길이로 설계되어 프레임 동기가 필요하지 않기 때문에 기존의 항법메시지들과 다르게 프리앰블 비트가 존재하지 않는다. 상호 결합된 형태의 구조를 가지는 메시지는 신호 수신 시작 이후 첫 번째로 수신한 메시지의 수신 시점이 두 번째 서브프레임의 중간 지점이라면, 두 번째 들어오는 메시지의 프레임 전체를 읽을 필요 없이 놓친 앞부분만 읽으면 된다. 그렇기 때문에 항상 동일한 TTFFD 성능을 보장하게 된다. Fig. 8은 GPS CNAV-2 포맷 메시지의 수신 시점에 따른 메시지 획득 시간을 도출하는 방법을 보여준다.

이러한 상호 결합된 형태의 구조가 가지는 독특한 특징으로 인해 항법메시지의 TTFFD를 계산 방법이 기존의 항법메시지 구조와 다르다. 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간을 계산한 그래프가 고정된 구조, 패킷 단위의 구조를 가지는 항법메시지와 다르게 동일한 시간을 가지는 구간이 길게 나타난다. 이러한 특성으로 인해 메시지 획득 시간의 PDF, CDF의 형태도 달

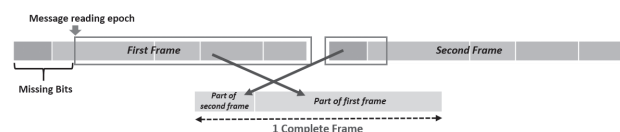


Fig. 8. A method of the time to read CED from GPS CNAV-2 message as a function of the reading epochs.

라지게 된다. 그러나 Fig. 8과 같은 방식의 계산이 실현 가능하기 위해서 몇 가지 조건을 만족해야 한다. 첫 번째는 첫 번째 서브프레임과 두 번째 서브프레임에 실려 방송되는 파라미터 정보가 항상 동일해야 한다. 두 번째는 CED 업데이트 주기 이전의 시간동안 늘 동일한 값의 CED 정보를 제공해야 한다. 마지막으로 항법신호의 secondary code 길이가 인코딩 이후 메시지 프레임 길이와 동일해야 한다는 것이다. 세 가지 조건 중 하나라도 만족하지 않는다면 상호 결합된 구조의 항법메시지에서 보장하는 TTFFD 성능이 도출되지 못한다.

본 논문에서는 Table 6과 같은 실험 환경에서 상호 결합된 구조의 항법메시지에 대한 TTFFD와 $R_{Non-CED}$ 을 분석했다. 상호 결합된 구조의 항법메시지는 부가 정보에 대한 스케줄링만 필요하기 때문에 메시지 스케줄링에 대한 고려는 하지 않았으며, 인코딩 기법은 GPS L1C와 동일하다고 가정하고 TTFFD 성능 분석을 수행하였다. 프레임 길이와 CED 크기 조합 별 TTFFD 계산 과정을 도출하기 위해 Table 6에 필요한 인덱스를 함께 정의하였다. 데이터 전송률은 현재 GPS CNAV-2 메시지에서 사용하고 있는 전송률을 기준으로 정했다.

Fig. 9는 CED 크기(a)가 480 bits, 메시지 프레임 길이(b)가 900 bits, 데이터 전송률(c)이 50 bps, 두 번째 서브프레임이 600 bits(e)인 경우 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간 도출한 결과이다.

Fig. 9에서 P_1 에 해당하는 시점은 수신기가 수신한 첫 번째 메시지 비트가 정확히 첫 번째 서브프레임의 시작점인 경우에 해당

Table 6. Parameter setting for performance analysis.

Parameter	Range	Index
Length of CED	420~480 bits	a
Length of the frame	850~1,200 bits	b
Data rate	50 bps	c
Length of subframe 1	9 bits	d
Length of subframe 2	550/600 bits	e
Length of subframe 3	274~674 bits	f
Broadcast interval the parameter of non-CED	-	g

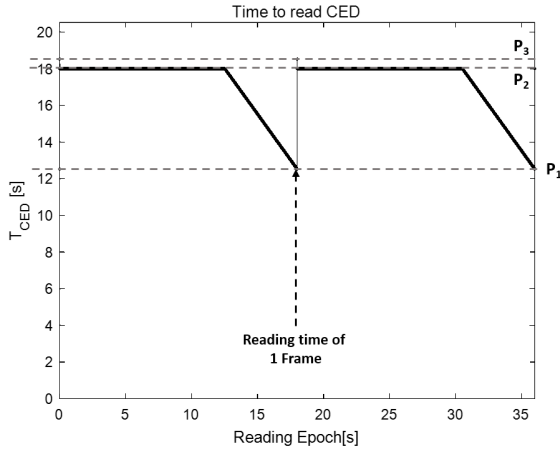


Fig. 9. Time to read CED as a function of the reading epochs in the case of error free data.

한다. 이 시점은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다. 고정된 구조와 패킷 구조가 상호 결합된 형태의 메시지는 각 서브프레임에서 전송되는 메시지 종류가 정해져 있기 때문에 CED가 포함되는 첫 번째, 두 번째 서브프레임의 길이에 가장 큰 영향을 받는다.

$$P_1 = (d + e)/c \quad (14)$$

P_2 에 해당하는 시점은 수신기가 수신한 첫 번째 메시지 비트가 두 번째 서브프레임의 시작점 이후부터 CRC 비트 직전 사이의 지점인 경우에 해당한다. 이 시점은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 중요한 점은 현재 시점과 다음 시점의 위성 궤도력 정보 사이에 궤도력 정보 갱신이 발생하지 않았다는 가정을 두어야 한다.

$$P_2 = b/c \quad (15)$$

P_3 에 해당하는 시점은 수신기가 수신한 첫 번째 메시지 비트가 첫 번째 서브프레임의 두 번째 비트인 경우에 해당한다. 첫 번째 서브프레임은 시각에 대한 정보를 제공해주기 때문에 현재 시점의 시각 정보를 제대로 수신하지 못했다면, 다음 시점의 시각 정보를 수신해야 한다. 이때 수신기는 현재 수신한 패킷의 메시지 비트를 버릴 수 없기 때문에 이 부분을 고려하여 CED 획득 시간을 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_3 = (d + b)/c \quad (16)$$

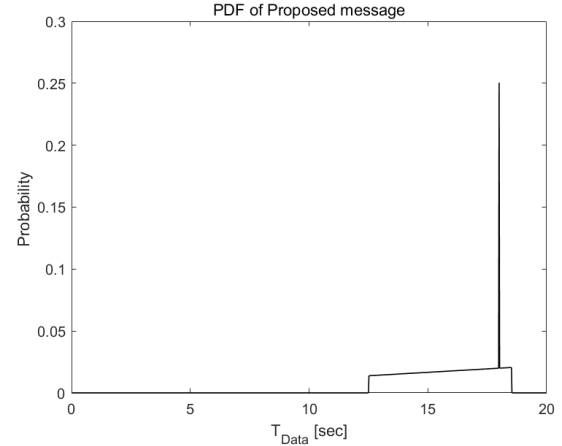


Fig. 10. PDF of the time to read the CED in the case of error free data.

Fig. 9와 같은 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간을 나타내는 그래프에 대한 수식을 정리하면 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \begin{cases} P_1, & t = 0, \quad t = \frac{b}{c} \\ \frac{P_3 - P_1}{(\frac{1}{c})} t + P_3, & 0 < t \leq \frac{1}{c} \\ \frac{P_2 - P_3}{(\frac{d}{c}) - (\frac{1}{c})} t + \left(P_3 - \left(\frac{1}{c} \right) \times \frac{P_2 - P_3}{(\frac{d}{c}) - (\frac{1}{c})} \right), & \frac{1}{c} < t \leq \frac{d}{c} \\ P_2, & \frac{d}{c} < t \leq \frac{d+e}{c} \\ \frac{P_2 - P_1}{(\frac{d+e}{c}) - (\frac{1}{c})} t + \left(P_2 - \left(\frac{d+e}{c} + \frac{1}{c} \right) \times \frac{P_2 - P_1}{(\frac{d+e}{c}) - (\frac{1}{c})} \right), & \frac{d+e}{c} < t \leq \frac{b}{c} \end{cases} \quad (17)$$

Table 6에 정리한 실험 환경에 대해서 메시지 획득 시간의 PDF는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (17)을 이용하여 Fig. 9와 같은 메시지 수신 시작 시점에 따른 CED 획득 시간에 대한 그래프를 도식한 후, 식 (18)과 같은 메시지 획득 시간의 PDF를 계산할 수 있다.

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\text{The number of section which is } P_1 \leq y < P_2}{(b/c)} & P_1 \leq t < P_2 \\ \frac{\text{he number of section which is } P_2 \leq y \leq P_3}{(b/c)} & P_2 < t \leq P_3 \\ \frac{(P_1 - (d/c))/(1/c)}{(b/c)} & t = P_2 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (18)$$

Fig. 9와 동일한 환경에서 메시지 획득 시간의 PDF를 도식한 결과는 Fig. 10과 같다. 이때, 상호 결합된 형태의 메시지는 Fig. 9에서 알 수 있다시피 특정 TCED 값이 지속적으로 유지되는 구간이 존재한다. 이런 현상으로 인해 Fig. 10과 같은 PDF가 도출된다.

PDF를 기반으로 각 메시지 획득 시간의 CDF를 도출하고, CDF의 95% 확률 지점을 계산하기 위한 식 (13)을 통해 TTFFD를 계산할 수 있다. Fig. 9와 동일한 환경에 대한 CDF와 95% 지점에 대해 도식한 결과는 Fig. 11과 같다.

위에서 서술한 CED 획득 시간, 메시지 획득 시간의 PDF, 메시지 획득 시간의 CDF를 도출하는 일련의 과정을 Table 6에 정

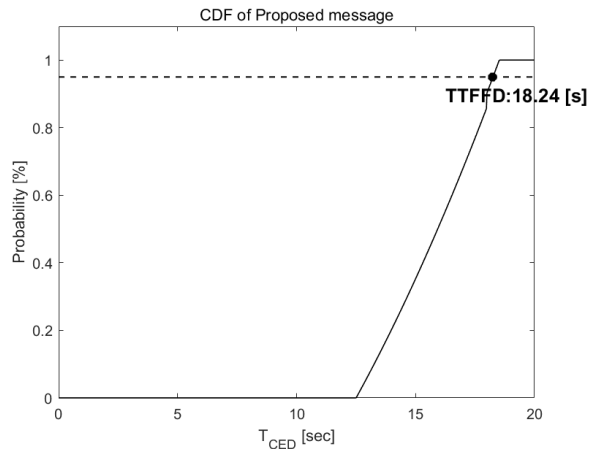


Fig. 11. CDF of the time to read the CED in the case of error free data.

리한 실험 환경에 대해서 TTFFD 성능을 도출한 결과는 Fig. 12와 같으며, $R_{Non-CED}$ 에 대한 분석 결과는 Fig. 13에 정리했다. 그림에서 바 그래프는 6개씩 7 그룹으로 형성되어 있으며, 그룹 당 바 그래프는 프레임 길이가 850, 900, 1000, 1100, 1200, 1300 bits 인 순서로 도시했다. 이때 상호 결합된 형태의 메시지 특성에 맞추기 위해 첫 번째, 두 번째 서브프레임을 통해 CED만 전송이 된다고 가정했다. 프레임 길이가 900 bits인 환경에서 CED 최대 길이인 480 bits를 두 번째 서브프레임이 충분히 수용할 수 있기 때문에 프레임 길이가 950-1200 bits인 구조의 두 번째 서브프레임 길이를 프레임 길이가 900 bits인 구조와 동일하게 두고, 세 번째 서브프레임의 길이만을 늘려 분석하였다.

Fig. 12에 도시한 TTFFD 결과를 보면 프레임 길이가 길어질수록 TTFFD가 증가하는 추세를 보인다. 그러나 $R_{Non-CED}$ 은 프레임

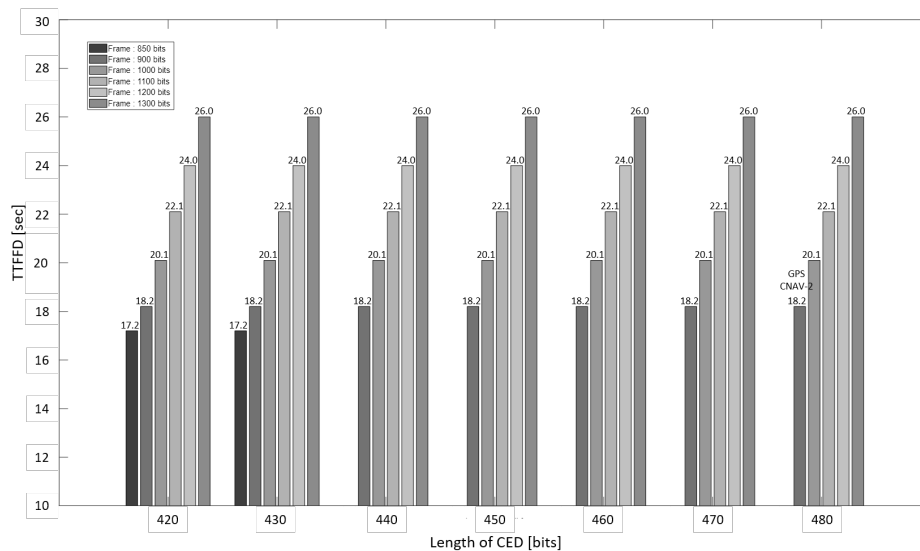


Fig. 12. TTFFD according to lengths of the CED and message frame.

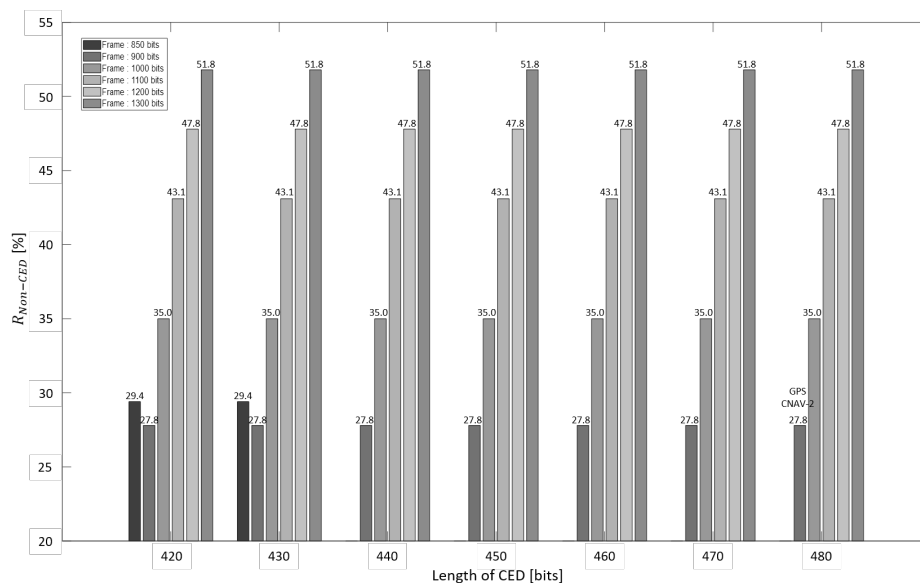


Fig. 13. $R_{Non-CED}$ according to lengths of the CED and message frame.

길이가 900 bits인 경우에 가장 낮은 성능을 보인다. 만약 프레임 길이가 950 bits, 1000 bits인 구조에서 두 번째 서브프레임 길이와 함께 CED 길이를 증가시켰다면, $R_{Non-CED}$ 은 프레임 길이가 길어질수록 감소했을 것이다. 그래프에서 CED 길이가 480 bits이면서 패킷 길이가 900 bits인 구조가 현재 GPS CNAV2의 성능을 보여준다. GPS CNAV2는 18.2 초의 TTFFD 성능을 가지며 27.8 %의 $R_{Non-CED}$ 성능을 가지는 항법메시지이다. 패킷 단위의 메시지 구조의 TTFFD 분석 결과(Fig. 5)와 비교했을 때, 전반적으로 상호 결합된 구조에서 훨씬 우수한 성능을 가진다.

만약 KPS의 최소 TTFFD 요구 성능을 4.1절과 동일하게 30초로 정한다면 GPS CNAV2에서 설계한 프레임 길이보다 더 긴 길이로 설계하면서 세 번째 서브프레임 길이도 함께 증가시켜 $R_{Non-CED}$ 를 향상시킬 수 있다. 그리고 KPS의 CED가 NavIC과 비슷한 CED 길이(420/430 bits)로 설계가 될 때, 프레임 길이를 850 bits로 설계한다면 TTFFD는 30초 요구 성능을 만족하면서 $R_{Non-CED}$ 의 성능이 CNAV2보다 우수한 결과를 도출할 수 있다. 상호 결합된 형태의 항법메시지 구조는 설계 목적이 메시지 프레임 길이와 항법신호의 secondary code 길이를 동일하게 설계함으로써 항상 보장된 TTFFD 성능을 제공하는 것이다. 이러한 설계 목적은 Fig. 12에서도 동일하게 나타났으며 두 번째 서브프레임의 길이와 세 번째 서브프레임의 길이를 적절히 타협하여 설계한다면 논문에서 제시한 $R_{Non-CED}$ 의 성능도 기존 위성항법시스템보다 향상할 수 있다. 패킷 단위의 메시지 구조를 분석한 결과에서 패킷 길이 후보군 중 가장 우수한 TTFFD 성능인 23.4초를 기준으로 했을 때, 상호 결합된 구조에서는 프레임 길이를 1,100 bits로 설계하면 TTFFD는 약 22.1초, $R_{Non-CED}$ 는 패킷 단위의 메시지보다 1.6배 우수한 성능을 가질 수 있다. 그러나 상호 결합된 형태의 메시지는 프레임 길이가 증가하는 만큼 항법신호의 secondary code도 길어져야 하기 때문에 패킷 단위의 메시지 구조처럼 단순히 메시지 길이와 스케줄링만 고려할 수 없고 항법신호 수신 성능 관점에서도 고려가 필요하다. 메시지 구조적인 관점만 분석했을 때 도출할 수 있는 결론은 새로운 항법 메시지 설계 시에 CED 만큼이나 부가 정보 전송량에 대해서 고려가 필요하다면 두 번째 서브프레임의 길이와 세 번째 서브프레임의 길이를 적절히 타협하여 설계할 필요가 있다는 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 KPS의 항법메시지 설계를 위해 현재 운용중인 위성항법시스템의 메시지 구조 변화와 메시지 설계 시 고려 사항들에 대해 서술하고, 항법메시지 메시지 프레임 구조에 따른 성능 분석을 수행했다. 분석에 활용한 항법메시지 구조는 현대화 항법 신호들에서 사용하고 있는 고정된 메시지와 패킷 단위의 메시지들의 구조가 상호 결합된 형태의 메시지 구조와 패킷 단위의 메시지 구조이다. 그리고 논문에서는 항법 성능에 직접적인 영향을 주는 CED 수신 시간뿐만 아니라 항법 성능 향상에 도움을 주는 부가 정보의 비중 측면에서 분석 가능한 지표를 제시하여 다양한 관점에서의 성능을 분석했다. 분석 결과는 동일한 CED 길이를 가지는 시나리오에 대해 패킷 단위의 메시지 구조보다 상호 결합된 형태의 메시지 구조가 평균적인 성능이 우수하게 나타

났으며, 이러한 결과는 상호 결합된 형태의 메시지 구조의 설계 목적이 메시지 프레임 길이와 항법신호의 secondary code 길이를 동일하게 설계함으로써 항상 보장된 TTFFD 성능을 제공하는 특성이 반영된 결과이다. 이 영향으로 상호 결합된 형태의 메시지 구조는 프레임 구조가 길어짐으로서 TTFFD가 비례해서 증가하는 결과를 보였다. 반면에 패킷 단위의 메시지 구조는 메시지가 전송되는 스케줄에 가장 큰 영향을 받기 때문에 패킷 길이 증가와 TTFFD 증가가 비례하지는 않았다. 논문에서 분석한 결과를 통해 만약 KPS가 NavIC과 같은 지역위성항법시스템을 고려하여 CED 길이를 NavIC과 비슷하게 설계한다면, TTFFD와 $R_{Non-CED}$ 의 성능 모두 GPS보다 향상된다는 것을 알 수 있다. 상호 결합된 형태의 메시지 구조는 CED의 크기보다 전체 프레임 길이에 더 영향을 많이 받기 때문에 패킷 단위의 메시지 구조보다 고려해 볼 수 있는 경우의 수가 제한적이다. KPS의 항법메시지 구조를 설계하기 위해서는 다양한 후보군과 성능 지표들을 두고 신중한 결정을 해야 하기 때문에 만약 상호 결합된 형태의 메시지 구조를 목표로 한다면, 두 번째 서브프레임의 길이와 세 번째 서브프레임의 길이를 적절히 분배하여 분석하는 것도 필요하다. 현재는 KPS가 신호 설계 단계이기 때문에 GPS 항법메시지 구조를 활용하여 구조적인 관점에만 초점을 맞춰 다양한 경우들에 대한 성능을 분석했다. 그러나 KPS의 항법메시지를 설계할 때, 구조적인 관점에서의 TTFFD 성능 외에도 내용 관점에서의 항법데이터 및 위성 위치 및 시각 정보 정확도에 대한 분석도 함께 수행되어야 한다. 그렇기에 KPS의 공개서비스용 항법신호의 항법메시지 설계 단계에서 각 고려사항들에 대한 취사선택 관계를 도출하고 다양한 관점에서의 성능 분석이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from “Fundamental Research for Korea Satellite Navigation System and Future Air Traffic Management” of the Korea Aerospace Research Institute funded by the Korea government(MSIT).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The Manuscript with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “conceptualization, M.B. and S.J.; methodology, D.W.; software, J.H.; validation, J.H., M.B. and D.W.; formal analysis, J.H.; investigation, G.H.; resources, J.H.; data curation, G.H.; writing—original draft preparation, J.H.; writing review and editing, D.W.; visualization, J.H.; supervision, S.J.; project administration, M.B.; 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

- Anghileri, M., Paonni, M., Fontanella, D., Eissfeller, B., & Hein, G. 2013, Assessing GNSS Data Message performance, *insideGNSS*, March/April 2013, pp.60-70
- 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 B1C (Version 1.0), China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608519640359959.pdf>
- BeiDou ICD 2017b, 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>
- European Space Agency (esa), GPS Navigation Message [Internet], last edited 2018 July 26 available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message
- European Space Agency (esa), Galileo Navigation Message [Internet], last edited 2020 Mar 26 available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Navigation_Message
- 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>
- Hein, G., Anghileri, M., Paonni, M., 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, 47-56.
- 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-800E 2018, GLOBAL POSITIONING SYSTEM DIRECTORATE SYSTEMS ENGINEERING & INTEGRATION INTERFACE SPECIFICATION, IS-GPS-800E, Navstar GPS Space Segment / User segment L1C interfaces. USA: Navstar GPS Joint Program Office. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800E.pdf>
- Langley, R. 1997, GPS Receiver System Noise, *GPS World - INNOVATION*, June 1997, pp.40-45
- 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
- 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>



Jae Hee Noh is a Ph.D candidate with 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, respectively. Her research interests include GNSS receiver, anti-spoofing techniques and message authentication.



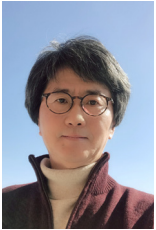
Deok Won Lim is a senior research engineer of the Satellite Navigation Team at the Korea Aerospace Research Institute, Korea. He received B.S and Ph.D. degrees from Chungnam National University, Korea in 2004 and 2011, respectively. His current interests include multipath mitigation techniques and jammer localization system.



Moon Beom Heo received a M.S. and Ph.D. degrees in mechanical and aerospace engineering from the Illinois Institute of Technology. He is currently a head of satellite navigation team in Korea Aerospace Research Institute, Korea. His work is focused on Global Navigation Satellite Systems (GNSS).



Gwang Hee Jo is a Ph.D candidate with 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, respectively. His research interest includes GNSS receiver, digital signal processing.



Sang Jeong Lee is a professor with 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.

