

eLoran Signal Standard Inspection Process Development

Pyo-Woong Son, Kiyeol Seo, Tae Hyun Fang[†]

Maritime Safety and Environmental Research Department, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 35764, Korea

ABSTRACT

In order to mitigate the vulnerability of the satellite navigation system against radio frequency interference, South Korea has been developing advanced terrestrial navigation system (eLoran) technology since 2016. The eLoran system synchronizes the transmission time of the pulse used in the existing Loran-C system with UTC and transmits correction information that can improve the position error. The eLoran system is known to reduce the position error of about 460 m of the existing Loran-C system to 20 m, and for this, the transmitter must be able to transmit eLoran signals according to more stringent standards. For this reason, an international standard that further developed the Loran-C signal standard established by US Coast Guard was established by Society of Automotive Engineers (SAE) International. In this paper, based on the analysis of the SAE9990 document, the international standard for eLoran transmission signals, a standard inspection process was produced to check whether the eLoran transmitter is transmitting signals in accordance with the standard.

Keywords: eLoran, signal standard, terrestrial navigation, GNSS

1. INTRODUCTION

위성항법시스템의 전파 교란 및 기만 공격에 대한 취약점을 보완하기 위해, 우리나라는 2016년부터 첨단 지상파항법시스템 (eLoran) 기술개발을 진행하고 있다 (Son et al. 2020). eLoran 시스템은 기존에 사용하던 Loran-C 시스템의 성능을 개량한 것으로, 송신기의 시각동기화, 전파 신호의 지연오차 보상 등을 통해 사용자가 20 m 수준의 위치정보를 획득할 수 있도록 고안되었다 (Son et al. 2018).

Loran-C 시스템은 세 개 이상의 송신국이 정해진 시간 순서에 따라 차례로 신호를 송출하고, 사용자는 서로 다른 두 송신국의 신호에 대한 도착시간 차이를 이용해 쌍곡선 항법으로 위치를 계산한다. 여기서 정해진 시간 순서 내에서 신호를 가장 먼저 송출하는 송신국(중국) 신호는 국제표준시(UTC)에 동기화 되고, 나머지 송신국(미국)은 각 중국에서의 주국 신호 도착시간을 기준으로 시각 동기화 되어있다 (USCG 1994). 그러나 Loran-C 신호는 100 kHz 주파수를 사용하는 지상파 신호이기 때문에 전파 경로의

환경변화에 따라 신호전파시간이 변하고 (Rhee & Seo 2013), 중국의 신호 송출 시각이 일정하지 않게 되어 사용자의 위치 오차가 커질 수 있다. Loran-C 시스템은 약 460 m의 위치 오차를 나타내는 것으로 알려져 있다 (Goo et al. 2007, Park & Son 2019).

eLoran 시스템에서 보다 높은 위치 정확도를 제공하기 위해, 각 송신기의 신호 송출 시각을 동기화 하는 것뿐만 아니라 신호의 모양과 전송 규칙에 관한 엄격한 제어가 필요하다. 이런 이유로 보다 엄격한 eLoran 신호 규격에 대해 최근 Society of Automotive Engineers (SAE) International (2018)에 의해 표준이 제정되었다. 본 논문에서는 송출되는 eLoran 신호의 규격에 대한 국제표준 (SAE9990)에 대한 분석을 바탕으로, eLoran 송신기가 표준에 맞게 신호를 송출하고 있는지 검사할 수 있는 규격 검사 과정을 개발하였다. 본 검사 과정에서는 신호 규격 검사를 위한 안전 점검, 검사 가능 장비 확인 등 제반 준비사항에 대한 내용도 포함하고 있다. 본 논문에서 개발한 eLoran 신호 규격 검사 과정을 활용한다면 보다 체계적으로 eLoran 송신기 제조 및 성능 검증을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

Received Mar 12, 2021 Revised Mar 24, 2021 Accepted Mar 25, 2021

[†]Corresponding Author

E-mail: thfang@kriso.re.kr

Tel: +82-42-866-3625 Fax: +82-42-866-3609

Pyo-Woong Son <https://orcid.org/0000-0002-6834-9247>

Kiyeol Seo <https://orcid.org/0000-0002-1462-6720>

Tae Hyun Fang <https://orcid.org/0000-0001-7680-9875>

2. ELORAN SIGNAL OVERVIEW

2.1 The Equation of eLoran Pulse

eLoran 펄스는 100 kHz 주파수 대역의 반송파를 변조시킨 형

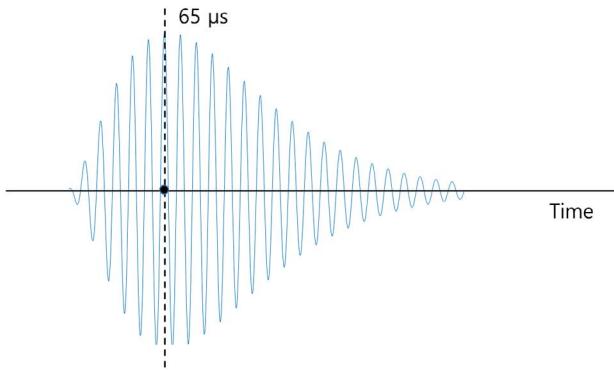


Fig. 1. eLoran pulse visualization.

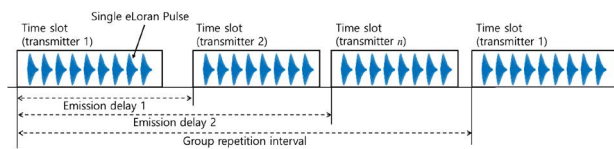


Fig. 2. eLoran pulse transmission process.

태로 반복해서 송출된다. 변조 방식은 식 (1)과 (2) 같이 65 μs 이전 지점에서는 가파르게 상승하는 형태이며, 이후에는 감쇠하는 방식으로 500 μs 지점까지 특정 수준 이하로 낮아져야 한다. eLoran 펄스 모양은 Fig. 1과 같다.

$$i(t) = 0; \text{ for } t < \tau \tag{1}$$

$$i(t) = A(t - \tau)^2 \exp\left(\frac{-2(t - \tau)}{65}\right) \sin(0.2\pi t + PC); \text{ for } \tau \leq t \leq 65 + \tau \tag{2}$$

여기서 A 는 $i(t)$ 의 피크 값에 대한 규격화 상수 (normalization constant), t 는 μs 단위의 시간, τ 는 μs 단위의 Envelope-to-Cycle Difference (ECD)이다. PC 는 phase-code이며 정위상의 경우에는 0이고, 역위상의 경우에는 π 이다.

2.2 eLoran Pulse Group Transmission

eLoran 시스템에서는 최소 3개 이상의 eLoran 송신기가 하나의 그룹을 이루어 신호를 송출하기 때문에, 서비스 영역 내에서 그룹 내 송신기의 신호가 겹치는 것을 방지하기 위해 각 송신기에 정해진 타임 슬롯을 할당한다. Fig. 2와 같이 n 개의 송신기가 미리 정해진 시간 순서에 따라 한 번에 8개의 eLoran 펄스를 송출한다. 이 중 수신기가 항법을 위해 사용하는 펄스는 처음 2개뿐이며, 나머지 6개의 eLoran 펄스는 원칙적으로 신호 획득, 추적, 그리고 데이터 변조 과정에서만 활용된다. 추가적으로 데이터 전송을 위해 9번째 펄스를 추가하여 송출하는 경우도 있다 (Lo et al. 2007).

그룹 내에서 처음 신호를 송출하는 송신기를 기준으로 각 송신기에 할당된 신호 송출 시작을 Emission Delay (ED)라고 하며, 전체 그룹의 신호 송출이 반복되는 주기를 Group Repetition

Table 1. eLoran pulse group phase codes.

Station/ Pulse	Group A								Group B							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-
2	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+
3	+	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+
4	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-
5	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-
6	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+

Interval (GRI) 라고 한다 (Lo et al. 2009). ED와 GRI는 그룹 내 모든 송신기의 신호가 서비스 영역 내에서 겹쳐서 수신되지 않도록 충분한 시간 간격을 고려하여 설정되어야 한다.

2.3 Pulse Group Phase Coding

사용자가 임의의 위치에서 각 송신국에서의 신호를 구분할 수 있도록 각각의 eLoran 펄스의 위상을 변조하여 신호를 송출하고 이를 phase coding이라고 한다 (Swaszek et al. 2008). Phase coding의 효과를 극대화 하기 위해 한 송신기는 연속된 2개의 GRI 동안 서로 다른 패턴으로 phase coding을 수행하는데, 이를 각각 phase code의 Group A와 Group B로 구분한다. 결과적으로, eLoran 송신기는 2개의 GRI를 주기로 같은 패턴의 신호를 송출하게 되는데 이 단위를 Phase-code Interval (PCI)라고 한다. Loran-C 시스템을 위한 신호 규격 (USCG 1994)에서는 주국과 종국으로 구분하여 총 2개의 phase code만을 사용하였다. 하지만 eLoran 시스템에서는 Table 1와 같이 최대 6개의 phase code를 사용할 수 있다.

3. ELORAN SIGNAL INSPECTION PREPARATION

3.1 eLoran Transmitter Interface Check

eLoran 신호의 규격 점검을 위해서는 먼저 eLoran 송신기의 인터페이스에 대한 점검이 필요하다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 eLoran 신호 생성 시작과 phase code를 생성하고 전달하는 eLoran 신호생성기 (Exciter), Low Voltage Differential Signal (LVDS) 인터페이스를 통해 수신한 정보로 증폭 모듈을 제어하는 모듈 증폭기, eLoran 안테나에 송출되기 전에 세부적인 튜닝과 잡음을 제거하는 대역 통과 필터와 출력 매칭 단계로 구분할 수 있고, 각 단계에서의 상태를 랙 인터페이스 (Rack interface)를 통해 최종적으로 송신기 원격 제어를 위한 송신기 제어 유닛 (Transmitter control unit)에 전달한다.

3.2 Safety Environment Check

eLoran 송신기의 인터페이스 점검을 마친 후, 실제 신호 송출 및 규격 검사에 앞서 안전과 관련된 주변 환경 점검이 진행되어야 한다. 송신기 전원이 꺼진 상태에서 모든 송신기 시스템의 구성품이 기계적으로 잘 연결되었는지 확인한 후, 과전압을 감지해

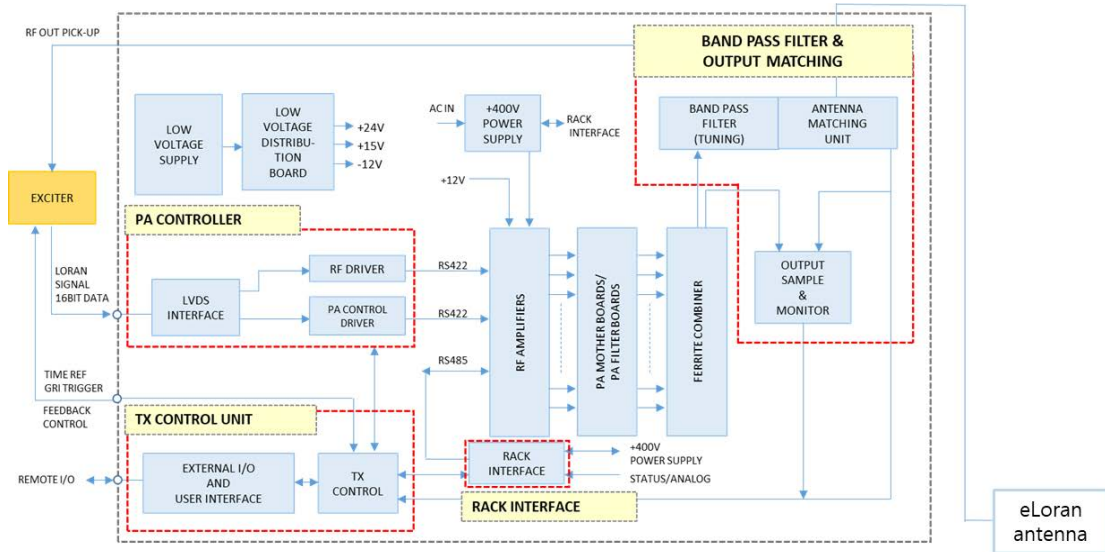


Fig. 3. eLoran transmitter interface diagram.

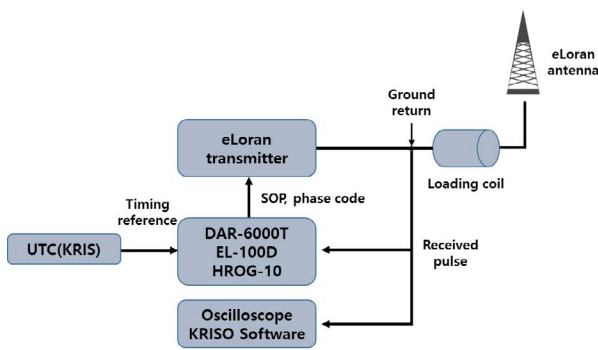


Fig. 4. Equipment construction for eLoran signal inspection.

기계적으로 차단하는 인터록 (Interlock) 시스템의 정상 유무를 확인한다. 송신기 시스템에 적절한 전압을 제공할 수 있는지 검사 현장의 전원 공급 현황을 확인하고, 낙뢰 보호장치, 아크 (Arc) 감시 시스템, 그리고 각 증폭 모듈의 전압 및 전류 감시시스템의 정상 유무를 최종적으로 확인해야한다.

3.3 Equipment Settings

eLoran 신호 규격 점검을 위해서는 각 항목을 검사할 수 있는 검사장비를 다음 Fig. 4와 같이 구성해야 한다. DAR-6000T (DARBS 사), EL-100D (KRIS), HROG-10 (SpectraDynamics 사)로 구성된 시스템을 이용하면 한국표준과학연구원 (KRIS)로부터 UTC (KRIS) 기준시각정보를 제공받아 생성된 GRI 생성 기준 시각 (SOP)과 안테나의 대지 귀로 (Ground return) 지점에서 출력된 eLoran 펄스의 송출 시각을 비교할 수 있다. 또한 eLoran 개별 펄스에 관한 규격과 그룹 전송에 관한 규격 검사도 앞서 언급한 시스템에서 수행할 수 있다. SAE9990에서 정의하는 표준 규격은 총 10가지 항목이고, 이 중 “Zero-crossing Times and Tolerances Within a Pulse” 항목에 대해서는 검사 가능한 장비가

없어 별도로 오실로스코프와 신호 샘플링 및 누적 분석이 가능한 MATLAB 기반의 소프트웨어 (KRISO)가 요구된다.

4. ELORAN SIGNAL STANDARD

본 장에서는 SAE9990 문서에서 정의된 eLoran 신호 규격에 대한 각 항목에 대해 설명한다. 모든 신호 규격은 eLoran 신호의 ECD가 정상 범위 (-2.5 μs ~ 2.5 μs) 내에 있고, 정위상의 phase-code인 신호 (PC = 0)를 대상으로 하며 1초 동안의 신호를 누적한 결과를 기반으로 한다.

4.1 Half-Cycle Peak Amplitudes and Ensemble Tolerance

eLoran 펄스는 100 kHz 주파수의 반송파 신호를 이용해 생성하기 때문에 10 μs 주기로 각각 최대값과 최소값을 갖는데, 그것을 모두 반주기 최대값이라고 정의한다. 식 (2)를 통해 GRI의 첫 번째 펄스에서 처음 8개 반주기 최대값을 전체 신호의 최대값에 대해 규격화하고, 이를 I_N 으로 정의한다. 측정된 eLoran 펄스의 반주기 최대값을 측정 신호의 최대값에 대해 규격화 한 값을 S_N 이라고 하면, 식 (3)과 같이 $I_N - S_N$ 의 제곱평균제곱근 (root mean square) 값에 대해 검사한다.

$$\left[\frac{\sum_{N=1}^8 (I_N - S_N)^2}{8} \right]^{1/2} \leq 0.01 \quad (3)$$

4.2 Half-Cycle Peak Amplitudes and Individual Tolerance

4.1절에서와 같은 방식으로 GRI의 첫 번째 펄스에서 처음 13개 반주기 최대값에 대해 각각 개별적으로 식 (4)와 (5)를 만족하는

Table 2. Zero crossing times and tolerances.

Zero crossing (μs)	Time (μs)	Tolerance (μs)
5	-25	± 1000
10	-20	± 100
15	-15	± 75
20	-10	± 30
25	-5	± 20
30	0	Time reference
35	5	± 20
40	10	± 30
45	15	± 50
50	20	± 50
55	25	± 50
60	30	± 50

지 확인한다. 위 2개 항목에서 검사하는 내용은 수신기가 eLoran 신호를 식별하는데 있어서 가장 중요한 ECD, Standard Zero Crossing (SZC) 판별에 영향을 미치는 요인에 대한 규격 검사에 해당한다. 검사 영역은 펄스 시작시점부터 펄스 크기의 최대값을 갖는 $65 \mu\text{s}$ 지점까지에 대한 것으로 “pulse leading edge에 대한 검사”로 통용되어 불리기도 한다.

$$|I_N - S_N| \leq 0.03 \quad 1 \leq N \leq 8 \quad (4)$$

$$|I_N - S_N| \leq 0.10 \quad 9 \leq N \leq 13 \quad (5)$$

4.3 Pulse Trailing Edge

GRI의 첫 번째 신호의 반주기 최대값을 1로 규격화 했을 때, 신호의 시작 시각 기준 $500 \mu\text{s}$ 이후의 모든 값이 0.0014 이하가 되어야 한다. 이 항목은 한 번 생성된 eLoran 펄스가 다음에 생성되는 펄스에 영향을 주지 않도록 충분히 감쇄 되었는지를 판단하기 위한 것이며, 수식으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$i(t) \leq 0.0014; \quad \text{for } t \geq 500 \mu\text{s} \quad (6)$$

4.4 Zero Crossing Times and Tolerances within a Pulse

본 항목은 신호 수신시각을 정밀하게 추정하기 위해 SZC 근처에서 정확한 주파수로 신호를 생성하는 것을 검사하기 위함이다. eLoran 신호는 100 kHz 반송파를 기반으로 생성되기 때문에 $5 \mu\text{s}$ 마다 영점을 교차하게 되고, 신호 생성 후 $30 \mu\text{s}$ 지점을 SZC라고 한다. Table 2과 같이 SZC를 기준으로 각 영점 교차점의 시각 (Zero Crossing Times)을 정의하고, 기준 시각 대비 오차 허용 범위를 만족하는지 확인해야 한다. 또한 $60 \mu\text{s}$ 이후 지점에서는 각 영점 교차점에서 기준 시각 대비 허용오차 범위가 $\pm 100 \text{ ns}$ 이내여야 하고, $25 \mu\text{s}$ 지점과 $35 \mu\text{s}$ 지점의 시각 오차의 합은 $\pm 5 \text{ ns}$ 이내, $20 \mu\text{s}$ 지점과 $40 \mu\text{s}$ 지점의 합은 $\pm 5 \text{ ns}$ 이내여야 한다.

4.5 Spectrum

eLoran 신호는 전체 에너지의 99%가 90 kHz 에서 110 kHz 주

파수 사이에 분포되어야 한다. 그러므로 ITU-R M.589-3에 따르면 eLoran 신호의 90 kHz 이하 주파수 성분과 110 kHz 이상 주파수 성분이 각각 0.5% 미만이 되어야 한다 (ITU 2001).

4.6 Timing of Pulse Group

모든 eLoran 송신국에서 송신하는 GRI 내 첫 번째 eLoran 펄스의 SZC에서, Zero Crossing Times가 UTC 시각을 기준으로 $\pm 25 \text{ ns}$ 이내를 만족하는지 10초 지수이동평균을 이용하여 검사한다.

4.7 Timing Stability of Transmitted Signal

4.6절의 항목을 만족시키면서, 동시에 1초 지수이동평균을 이용하였을 때에는 $\pm 100 \text{ ns}$ 이내여야 한다. 마지막으로 5초 지수이동평균을 이용하여 영점 교차점의 시각이 20분 동안 최대 최소의 변화가 $\pm 10 \text{ ns}$ 범위 이내를 만족해야 한다. 4.6절과 4.7절은 eLoran 신호 규격이 새롭게 제정되면서 추가된 항목으로, Loran-C 신호 규격에는 존재하지 않았다. eLoran 시스템은 모든 송신국의 신호 송출 시각이 UTC에 동기화 되어야 하므로 위와 같은 시각 제어에 관한 항목이 추가되었다.

4.8 Pulse-to-Pulse Amplitude Tolerance

eLoran 신호가 GRI 내에서 8개의 eLoran pulse를 반복 송출하고, 수신기는 해당 신호를 누적하여 항법 결과를 도출하거나 데이터 복조를 진행하기 때문에 GRI 내에서 일관성 있는 신호 송출이 중요하다. 다음의 세 항목은 GRI 내에서 eLoran 펄스 생성의 일관성에 대해 검사를 수행하며, 가장 먼저 신호 크기의 일관성 확인한다. eLoran 신호의 GRI 내 첫 번째 8개 eLoran 펄스 크기가 최대 최소의 변화가 $\pm 5\%$ 이내여야 하며 수식으로 나타내면 식 (7)과 같다.

$$\left[\frac{\max(I_{peak,i}) - \min(I_{peak,i})}{\max(I_{peak,i})} \right] \times 100 \leq 5 \quad (7)$$

4.9 Pulse-to-Pulse ECD Tolerance

앞서 2.2절에서 설명하였듯이 GRI 내에서 8개의 연속된 eLoran 펄스 중 처음 2개의 펄스만 활용하여 항법해를 계산한다. 본 항목에서는 2개의 연속된 GRI로 구성된 PCI 내에서 항법용으로 사용하는 개별 eLoran 펄스의 ECD가 전체 eLoran 펄스의 평균 ECD와 비교하여 $0.5 \mu\text{s}$ 이내의 오차범위를 갖는지를 확인한다.

4.10 Pulse-to-Pulse Timing Tolerance

GRI 내 첫 번째 eLoran 펄스의 SZC는 나머지 2번째에서 8번째까지의 eLoran 펄스의 시각에 대한 기준이 되어야 한다. GRI 내에서 각 eLoran 펄스는 $1000 \mu\text{s}$ 간격으로 송출되는 것을 고려했을 때, GRI 내 번째 eLoran 펄스의 SZC는 첫 번째 eLoran 펄

스의 SZC와 식 (8)과 같은 시간 차이를 가져야 한다.

$$(N-1) \times 1000 \mu s \pm 25 ns \quad (8)$$

5. CONCLUSIONS

본 논문에서는 eLoran 신호에 관한 표준을 참조하여 eLoran 신호 규격을 검사하기 위한 항목을 설정하였다. 추가적으로 규격 검사를 수행하기 위한 제반 환경 준비에 대해서도 함께 수립하였다. 본 논문을 통해서 도출한 eLoran 신호 규격 검사 항목은 총 10가지 항목이며, 각 항목의 검사 방법에 대해 설명하였다. 국제적으로 eLoran 시스템 구축에 관심을 갖는 국가가 늘어나면서, eLoran 송신기 시스템의 성능 검증에 대한 표준 마련도 요구되고 있다. 본 논문의 결과는 eLoran 송신 신호 규격을 검사할 수 있는 표준 검사 방안을 더욱 체계화하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부 국가연구개발과정 “첨단 지상파항법시스템 (eLoran) 기술개발”으로 수행된 연구결과입니다 (PMS4020).

본 논문은 해양수산부 국가연구개발과정 “지상파 통합 항법시스템 (R-Mode) 기술개발”으로 수행된 연구결과입니다 (PMS4710).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, P.-W. Son; methodology, P.-W. Son, K. Seo; writing—original draft preparation, P.-W. Son, visualization, P.-W. Son and K. Seo, writing—review and editing, K. Seo, T. H. Fang, project administration, K. Seo and T. H. Fang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Goo, J.-H., Kang, G.-W., An, Y.-E., Han, S.-J., & Park, J.-A. 2007, LORAN-C using and position error improvement against being unable to use the Global Positioning System (GPS), *J. Adv. Navig. Technol.*, 11, 1-8.
- ITU 2001, Technical characteristics of methods of data transmission and interference protection for radionavigation services in the frequency bands between 70 and 130 kHz, ITU-R M.589-3
- Lo, S., Leathem, M., Offermans, G., Gunther, G. T., Peterson, B., et al. 2009, Defining primary, secondary, additional secondary factors for RTCM minimum performance specifications, *Proc. Annu. Tech. Symp. Int. Loran Assoc.*, Portland, ME. https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/papers/Lo_ILA_2009_RTCM.pdf
- Lo, S., Peterson, B., Enge, P., & Swaszek, P. 2007, Loran data modulation: extensions and examples, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 43, 628-644. <http://doi.org/10.1109/TAES.2007.4285358>
- Park, S. G. & Son, P.-W. 2019, Design for back-up of ship's navigation system using UAV in radio frequency interference environment, *J. Adv. Navig. Technol.* 23, 289-295. <https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.4.289>
- Rhee, J. H. & Seo, J. 2013, eLoran signal strength and atmospheric noise simulation over Korea, *J.Korean GNSS Society*, 2, 101-108. <https://doi.org/10.11003/JKGS.2012.1.1.007>
- SAE International 2018, Transmitted Enhanced Loran (eLoran) Signal Standard, SAE9990
- Son, P.-W., Park, S. G., Han, Y., & Seo, K. 2020, eLoran: Resilient Positioning, Navigation, and Timing Infrastructure in Maritime Areas, *IEEE Access*, 8, 193708. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033215>
- Son, P.-W., Rhee, J. H., & Seo, J. 2018, Novel multichain-based loran positioning algorithm for resilient navigation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54, 666-679. <https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2762438>
- Swaszek, P. F., Johnson, G., Shalae, R., & Hartnett, R. 2008, Loran phase codes, revisited, 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Monterey, CA, USA, 800-809, doi: 10.1109/PLANS.2008.4570107.
- USCG. 1994, Specification of the Transmitted Loran-C Signal, COMDTINST M16562.4A



Pyo-Woong Son received his B.S. degree in electrical and electronic engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2012, and his Ph.D. in integrated technology at Yonsei University, Incheon, South Korea. He is currently a senior researcher with the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, South Korea. His research interests include complementary positioning, navigation, and timing systems, including eLoran. Dr. Son was a recipient of the Graduate Fellowship from the Information and Communications Technology (ICT) Consilience Creative

Program supported by the Ministry of Science and ICT, South Korea.



Kiyool Seo is a principal researcher at the GNSS research center at the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). He received his Ph.D. degree in maritime information measurement engineering from the Mokpo National Maritime University, Republic of Korea. He

has been involved in the development of enhanced Loran (eLoran) systems. His research interests include resilient PNT system and integrity monitoring, GNSS reflectometry (GNSS-R), and precise positioning technology for maritime applications.



Tae Hyun Fang received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University, Busan, Korea, in 1994, 1998, and 2003, respectively. From 2004 to 2005, he was a visiting scholar at the Intelligent Transportation Research Center, Massachusetts Institute of

Technology, Cambridge, United States. Since 2005, he has been with Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Daejeon, Korea. His research interests include sensor fusion systems, PNT technology, and target tracking filter.