

# The Power Amplifier Control Design of eLoran Transmitter

Pyo-Woong Son, Kiyeol Seo, Tae Hyun Fang<sup>†</sup>

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

## ABSTRACT

In this paper, a study was conducted on the power amplifier control required to design an eLoran transmitter system using a low-height antenna. The eLoran transmitter developed during the eLoran technology development project conducted in Korea used a small 35 m antenna due to the difficulty of securing a site for antenna installation. This antenna height is very low compared to the height of 750 m which is required for eLoran 100 kHz signal transmission without any radiation loss. In the case of using such a small antenna, not only the radiation efficiency of the transmission is lowered, but also the power module control must be performed more precisely in order to transmit the eLoran standard signal. The equivalent RLC circuit of the transmitter system was implemented and transient analysis was conducted to derive the input required voltage for satisfying the output requirement. The voltage waveform was also generated by the RLC circuit analysis to generate the eLoran signal. Furthermore, we suggest power width modulation method to control eLoran power amplifier module more sophisticatedly.

**Keywords:** eLoran, eLoran transmitter, small eLoran antenna, PA control

## 1. INTRODUCTION

Global Navigation Satellite System (GNSS)를 통해 사용자가 정확한 자신의 위치와 시간을 효율적으로 계산할 수 있게 되면서 다양한 서비스가 운영되고 발전해 왔다 (EC & GSA 2020). 자율주행자동차, 무인 로봇 등 상업용 서비스뿐만 아니라 증권거래소, 통신망, 주요 보안시설 등 국가 주요 시설 운영을 위해서도 정확한 위치 및 시각정보를 안정적으로 확보하는 것은 매우 중요하다 (LE 2017). 그러나 GNSS는 20,000 km 고도의 위성에서 송신되는 미약한 전파신호를 이용하고, 신호 생성에 관한 알고리즘이 모두 공개되어 있기 때문에 전파 교란 및 기만에 취약할 수 있다 (Park & Son 2019).

위치 및 시각 정보가 산업 전반에 미치는 중요성이 커지면서 GNSS에 대한 높은 의존도가 갖는 잠재적 위험성도 점점 높아짐에 따라, 이를 경감시키기 위한 다양한 노력들이 연구되어 왔다 (Kang et al. 2019, Lee et al. 2019, Son et al. 2020). GNSS 시스

템 차원에서는 보다 전파교란에 강인한 신호 설계를 통해 Binary Offset Carrier (BOC) 신호를 이용하는 L1C, L2C 등의 신호를 송신할 수 있는 서비스를 확대해가고 있다 (Yoo et al. 2016). 사용자 입장에서는 특정 방향의 신호를 탐지하고 제거하는 빔포밍 기법을 사용하거나 (Choi 2016), Inertial Measurement Unit (IMU)와 같은 외부 센서와의 융합을 사용해 GNSS에 대한 전파교란이나 기만을 감지하는 방안이 연구된 바 있다 (Fang et al. 2020).

하지만 근본적으로 GNSS의 전파 교란 및 기만에 대한 취약성을 해결하기는 매우 어렵기 때문에 별도의 보완항법시스템에 대한 필요성이 요구되고 있다. International Maritime Organization (IMO), International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA)와 같은 국제기구에서는 GNSS를 보완할 수 있는 전파항법시스템으로 고출력의 저주파 신호를 사용하는 첨단 지상파항법시스템 enhanced LORAN (eLoran)을 권장하고 있다 (IALA 2017). eLoran 시스템은 기존에 운영하던 Loran-C 시스템의 송신 시스템을 Coordinated Universal Time (UTC)에 시간 동기화하고, 기존 펄스 신호에 별도의 데이터 채널을 추가하여 전송된 보정 정보를 이용해 사용자가 20 m 이내로 자신의 위치를 계산할 수 있도록 한다 (Son et al. 2018).

선박해양플랜트연구소는 2016년부터 1곳의 eLoran 임시 송신국을 구축하고 인천항과 평택항에 보정기준국을 포함한 테스트베드를 설치하여 eLoran 관련 기술을 개발해 왔다. eLoran 송신국은 일반적으로 Top-Loaded Monopole (TLM) 안테나와 송

Received Jun 07, 2021 Revised Jul 28, 2021 Accepted Aug 04, 2021

<sup>†</sup>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>

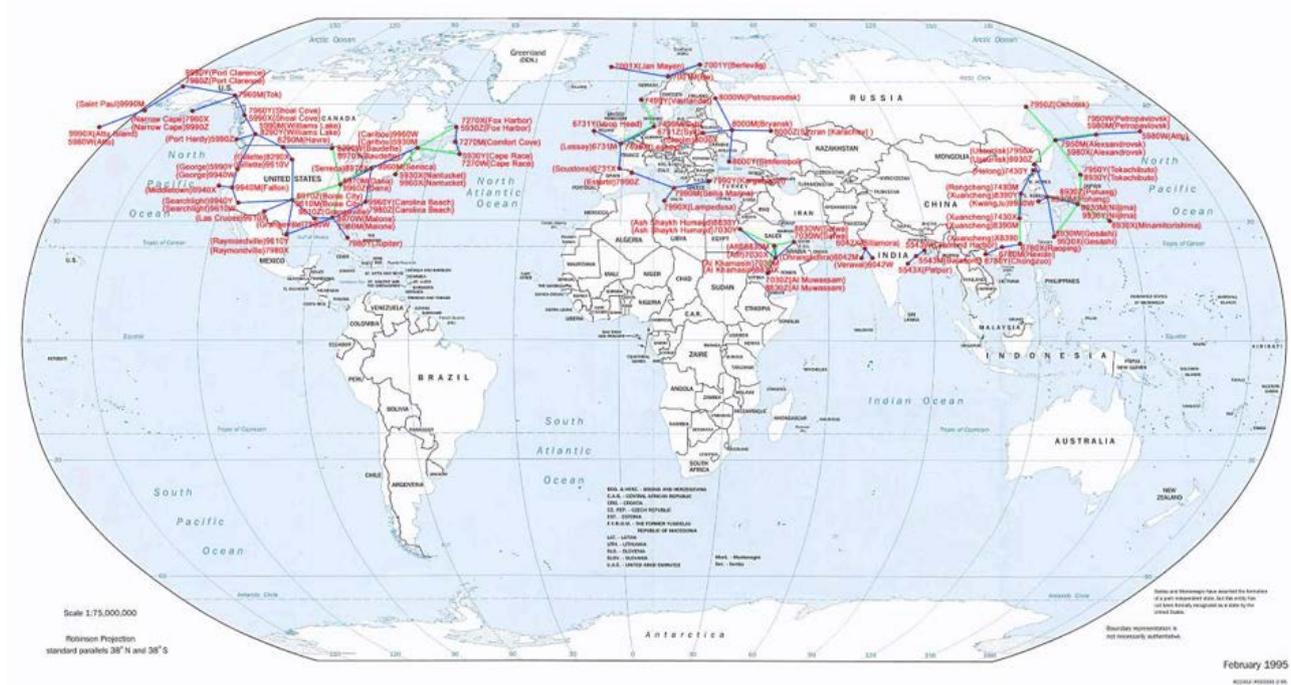


Fig. 1. LORAN antennas around the world.

신기로 구성되는데, 안테나 설치를 위해서는 안테나 높이만큼의 평활한 방사성 접지 공간이 필요하다. 이상적으로 손실 없이 eLoran 신호를 송출하기 위한 안테나를 높게 세우고, 필요한 부지를 확보하는 것이 현실적으로 매우 어렵다. 실제로 연구개발 과정에서 구축한 eLoran 임시 송신국도 부지 확보의 어려움 때문에 안테나 높이가 제한될 수밖에 없었다. 이렇게 낮은 높이의 안테나를 사용하게 되면 안테나의 물리적 특성으로 인한 대역폭이 신호 생성을 위한 요구 대역폭보다 좁아 정상적인 신호를 송출하기 어려울 뿐만 아니라, 짧은 안테나 길이로 인한 임피던스 부정합으로 인해 발생하는 반사파로 인한 펄스 규격 부정합, 송신 효율 저하 등이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 좁은 안테나 대역폭으로 인해 발생하는 펄스 규격 부정합 문제를 해결하기 위해 eLoran 신호 송출을 위한 송신기 전원 증폭 모듈 제어 방안에 대해 연구하였다. 먼저 2장에서는 eLoran 송신기에 사용되는 안테나에 대해 분석하고 등가회로를 구성한다. 3장에서는 송신국 시스템의 등가 회로에 대한 과도 해석을 통해 요구조건을 만족하는 전원 증폭 모듈의 사양을 정하는 방법을 도출하고, 보다 정밀한 eLoran 펄스 생성을 위해 펄스 폭 변조 (PWM: Pulse Width Modulation) 방식을 제안하였다. 마지막으로 4장에서는 본 논문에 대한 결론을 서술한다.

## 2. ELORAN ANTENNA ANALYSIS

### 2.1 The Overview of eLoran Antenna

Long Range Navigation (LORAN) 시스템은 대서양과 태평양에서 비행기와 선박의 항법에 사용하기 위해 1960년대부터 미군

이 개발하고 사용하였다 (Frank 1982). 그 후로 전파 신호의 위상 변화를 추적하는 기술이 비약적으로 상승함에 따라 신호의 가용 수신 범위가 약 1,000 km 이상까지 증가하였다. 전 지구적인 범위에 보다 정밀한 위치 정확도를 제공하는 GNSS가 널리 보급되기 전까지 LORAN 시스템은 먼 해상과 항공 영역에서 선박과 항공기의 항법을 지원하는 용도로 사용되었다.

Fig. 1은 주요 해양과 항공 영역에서의 항법을 지원하기 위해 설치된 약 80여개의 LORAN 송신국의 분포를 나타낸 것이다. United State Coast Guard (USCG)에 따르면 미국에는 총 24개의 LORAN 송신국이 설치되어 있으며 항법 서비스의 커버리지 분석에 따라 각 송신국 별 신호 송출 전력이 다르게 설정되어 있고, 또한 신호 송출에 사용하는 안테나 형태와 높이도 다양하다 (USCG 2009).

일반적으로 LORAN 시스템에 사용하는 안테나의 종류는 크게 TLM, Sectionalized Loran Tower (SLT), Top Inverted Pyramid (TIP) 등으로 나눌 수 있으며, 방사효율이 가장 좋은 TLM 형식의 안테나를 가장 많이 사용하고 있다 (Gailey 1987). eLoran 시스템에서 사용하는 안테나는 LORAN 시스템에서 사용하는 안테나를 그대로 활용 가능하기 때문에 본 논문에서 설계하고자 하는 eLoran 송신기는 TLM 안테나를 이용한다고 가정한다.

### 2.2 Radiation Resistance

일반적으로 안테나의 전기적 길이가 길수록 안테나를 통한 방사 효율이 증가하는데, 손실 없이 신호를 모두 방사하려면 안테나의 전기적 길이가  $\lambda/4$  ( $\lambda$  = wavelength) 이상이 되어야 한다. eLoran 시스템의 경우 100 kHz의 주파수를 사용하기 때문에 안테나의 전기적 길이는 최소 750 m가 되어야 한다. 하지만 이렇

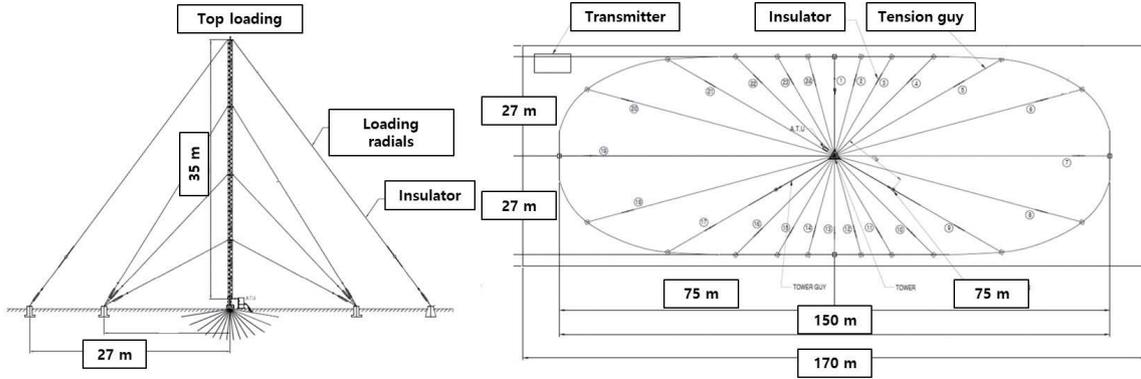


Fig. 2. eLoran antenna and radial resistance design of Incheon testbed.

게 높은 안테나를 설치하기 위한 넓은 부지를 확보하는 것은 현실적으로 어렵다. 그렇기 때문에 짧은 단축형 안테나를 사용하면서 방사 효율을 높이기 위해 정관 (Top loading), 지선 (Loading radials), 그리고 방사형 접지를 활용하는데, 정관과 지선은 안테나의 용량성 임피던스를 향상시켜 안테나의 전기적 길이를 증가시키고 방사형 접지는 안테나의 대지 도전율을 향상시킨다. 만약 충분한 방사형 접지 반경을 확보한다면, 안테나의 전기적 길이 ( $L_{eff}$ )는 물리적 높이의 절반이 되고, 방사 저항( $R_r$ )은 Eq. (1)과 같이 계산할 수 있다 (Devaney et al. 1966, Riaz 1987).

$$R_r = 160\pi^2 (L_{eff} / \lambda)^2 \quad (1)$$

예를 들어 Eq. (1)에 따르면, 인천에 구축한 eLoran 시험송신국의 35 m 높이의 TLM 안테나는 Eq. (1)에 의해 약 0.05Ω의 방사저항을 갖는다. 실제로는 완벽한 접지면을 구현하기 어렵기 때문에 TLM 안테나의 전기적 길이는 물리적 높이보다 작을 수 있고, 실제 방사저항은 이론적인 수치의 약 80% 수준으로 0.04Ω의 방사저항을 갖는다고 가정한다.

Fig. 2는 인천 시험송신국에 구축한 35 m 높이의 TLM 안테나의 설계도이다. 인천 시험송신국의 경우, 부지 확보의 어려움으로 일반적인 eLoran 안테나 높이보다 크게 낮은 높이의 안테나를 설치하여 사용 중이다.

### 2.3 The Equivalent Circuit of eLoran Antenna

일반적인 eLoran 안테나의 높이는  $h \ll \lambda / 4$ 이기 때문에 방사저항이 낮고 용량성 리액턴스가 크기 때문에 임피던스 정합을 위해 추가적으로 튜닝 코일을 연결하여 사용하고, 이를 등가회로로 구현하면 Fig. 3과 같다 (Hardy 2008). 여기서  $L_c$ ,  $R_c$ 는 각각 튜닝 코일의 유도성 리액턴스, 저항 성분을 의미하며,  $I_a$ 는 등가회로에 흐르는 전류량이다.  $L_a$ ,  $C_a$ ,  $R_r$ ,  $R_g$ 를 각각 안테나의 유도성 리액턴스, 용량성 리액턴스, 방사저항, 그리고 대지손실 저항이라고 하면, 안테나의 입력 임피던스  $Z$ 는 Eq. (2)와 같다.

$$Z = R_r + R_g + j\omega L_a + \frac{1}{j\omega C_a} \quad (2)$$

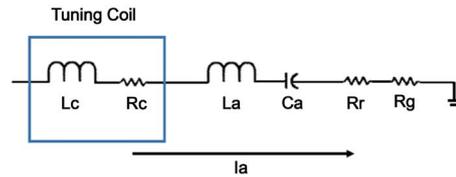


Fig. 3. Equivalent circuit of eLoran antenna with tuning coil.

여기서 안테나의 리액턴스 성분을  $X$ 라고 정의하면,  $X$ 는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있고, Eq. (3) 양변을 주파수로 미분하면 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X = \omega L_a - \frac{1}{\omega C_a} \quad (3)$$

$$\frac{dX}{d\omega} = L_a + \frac{1}{\omega^2 C_a} \quad (4)$$

$X$ 와 주파수에 대한 리액턴스의 기울기 ( $\frac{dX}{d\omega}$ )는 안테나 실측을 통해 알 수 있고, Eqs. (3)과 (4)를 Eqs. (5)와 (6)과 같이 변형하여  $L_a$ ,  $C_a$ 를 구할 수 있다.

$$L_a = \frac{1}{2} \left( \frac{dX}{d\omega} + \frac{X}{\omega} \right) \quad (5)$$

$$C_a = \frac{2}{\omega^2 \frac{dX}{d\omega} - \omega X} \quad (6)$$

eLoran 안테나는 날씨, 온도, 기압 등에 따라 실시간으로 임피던스가 변화하기 때문에 송출되는 신호를 일정하게 유지하려면, 가변형 유도성 임피던스로 구성된 Automatic Tuning Unit (ATU)를 추가적으로 안테나 튜닝코일에 연결하여 사용해야 한다. ATU를 통해 안테나 등가회로는 일정한 임피던스를 유지할 수 있고, 만약 ATU에서 조절 가능한 범위 이상의 임피던스 변화가 발생하면 송신기는 이를 탐지하여 경고 발생 및 송출을 중단하게 된다.

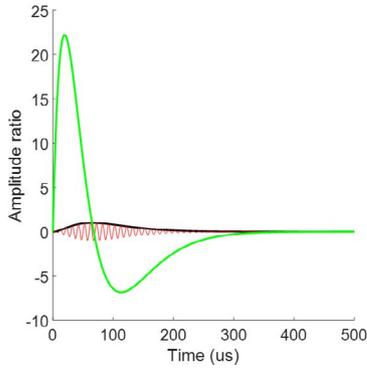


Fig. 4. A Transient analysis result.

### 3. ELORAN TRANSMITTER DESIGN

#### 3.1 Transient Analysis

송신기의 등가회로에 흐르는 전류  $I_a$ 는 eLoran 펄스의 정의에 따라 생성되어야 하고 100 kHz 주파수의 반송파를 제외한 포락선은 Eq. (7) 과 같다.

$$I_a(t) = t^2 e^{-at} \left( t \text{ is time in seconds; } a = -\frac{2}{65} \right) \quad (7)$$

Fig. 3의 RLC 회로에서 eLoran 펄스의 포락선 모양으로 전류를 생성하기 위한 전압  $V(t)$ 는 Eq. (8)와 같고, Eq. (7)을 이용해 다시 정리하면 Eq. (9)와 같다.

$$V(t) = I_a(t)(R_r + R_g + R_c) + 2(L_a + L_c) \frac{dI_a(t)}{dt} \quad (8)$$

$$V(t) = (4(L_a + L_c)t - 2a(L_a + L_c)t^2 + (R_r + R_g)) \quad (9)$$

여기서 주목해야할 점은, 전원 증폭 모듈에서의 전압과 안테나에서 송출되는 전류가 선형적인 관계가 아니기 때문에 두 물리량의 최대값이 서로 다른 순간에서 발생한다는 것이다. 즉, 단순히 Eq. (7)의 전류에 전체 송신국 시스템의 저항을 곱한 만큼의 전압이 필요한 것이 아니라는 것이다. 안테나에서  $I_a(t)$  만큼의 전류를 송출하기 위해서는  $I_a(t)$ 와  $V(t)$ 의 각 최대값의 비율 (TVF: Transient Voltage Factor) 만큼의 전압이 전원 증폭 모듈에 인가되어야 한다 (Hardy 2008). Fig. 4는 인천 시험송신국에 설치한 안테나에서의 TVF를 위해 과도 해석을 한 결과이다.

빨간색 선은 실제 eLoran 펄스의 파형이고, 검정색 선은 eLoran 펄스의 포락선, 그리고 초록색 선은 eLoran 펄스의 포락선을 생성하기 위한 전압 파형이다. 인천 시험송신국의 경우, TVF는 약 1:22이다. 즉, 1 A의 최대 전류값을 갖는 eLoran 펄스를 안테나에서 송출하려면 송신기는 22 V의 전압을 필요로 한다는 의미이다. 여기서 약 70 us 부근에서 필요한 전압의 값이 음수가 되는 것은 안테나에서 반사되어 들어오는 전력이 있기 때문에 이를 상쇄하기 위함이며, 이 역전원을 잘 저장했다가 다시 사용하는 것이 송신기 효율을 좌우하는 핵심 기술이 될 수 있다.

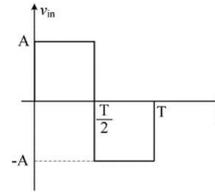


Fig. 5. Single power amplifier module control.

#### 3.2 Power Amplifier Specification

eLoran 송신기는 Class-D 방식의 반도체형 전원 증폭 모듈을 Fig. 5와 같이 A와 -A의 전압을 각각  $\frac{T}{2}$  ( $T = 10 \mu s$ ) 동안 인가하면서 동작한다. 만약 eLoran 송신기가 N개의 전원 증폭 모듈로 이루어졌다면 송신기의 최대 출력 전압은  $N \times A$ 가 된다.

eLoran 송신기의 신호 송출 능력은 유효 방사 전력 (ERP: Effective Radiated Power)에 따라 결정되는데, 이는 eLoran 펄스가 안테나 방사저항을 통해 송출되는 전력값을 의미한다. eLoran 송신국의 서비스 커버리지 범위에 따라 요구되는 ERP가 결정되고, Eq. (1)을 통해 안테나의 방사저항을 알고 있으므로 필요한 송신기의 전류 값 ( $I_{a\_rms}$ )을 Eq. (10)과 같이 구할 수 있다.

$$I_{a\_rms} = \sqrt{\frac{ERP}{R_r}} \quad (10)$$

송신기에서 허용 가능한 최대 출력 전압이 등가회로에서 요구되는 최고 전압보다 커야 하므로, Eqs. (11)과 (12)를 통해 ERP를 만족시킬 수 있는 최소 전원증폭 모듈의 수(N)를 구할 수 있다.

$$N \times A \geq I_{a\_rms} \times (R_r + R_g + R_c) \times \sqrt{2} \times TVF \quad (11)$$

$$N \geq \frac{I_{a\_rms} \times (R_r + R_g + R_c) \times \sqrt{2} \times TVF}{A} \quad (12)$$

예를 들어 평택항에서 eLoran 신호를 수신할 수 있도록 인천 시험 송신국의 요구 ERP는 800 W로 설정되었다고 가정하였을 때, 방사저항  $R_r$ 는 0.04이므로  $I_{a\_rms}$ 는 140 A가 된다. 만약, Class-D 방식의 전원 증폭 모듈의 최대 전압이 380 V, 송신국 시스템 전체의 저항이 1.49Ω, TVF가 22라면, 위의 예시 상황에서 필요한 N은 최소 18이다. 즉, 35 m의 TLM 안테나를 이용해 800 W의 ERP를 송출하기 위해서는 380V의 최대 전압을 인가할 수 있는 Class-D 방식의 전원 증폭 모듈이 18개 이상 필요하다는 뜻이다. 여기에 추가적으로 전원 증폭 모듈의 효율을 고려하여 약 10~20%의 추가적인 전원 증폭 모듈이 필요할 수 있다.

#### 3.3 Voltage Waveform Based on PWM

기존의 eLoran 송신기는 Amplitude Modulation (AM) 방식으로 eLoran 펄스를 생성하는 것으로 알려져 있다 (Hardy 2008). AM 방식의 eLoran 펄스 생성 제어는 각 전원 증폭 모듈의 전압을 인가할 것인지에 대한 선택만 하기 때문에, 개별 전원 증폭 모듈의 전압이 커질수록 신호 생성을 위한 정밀한 제어가 어려워진다는 단점이 있다. 예를 들어, 전원 증폭 모듈의 인가 전압이 380 V

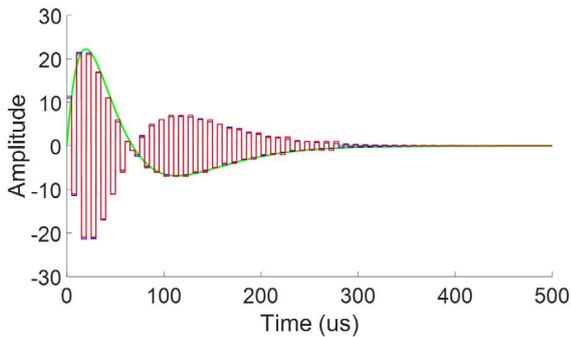


Fig. 6. The voltage output comparison at the network of transmitter using AM (blue) and PWM (red) theoretical desired output (green).

이고 개수가 24개라면, 송신기는 네트워크 출력에 인가되는 전압은 24 단계로만 제어가 가능하고, 각 단계별 제어 가능한 최소 출력은 380 V 인 것이다.

본 논문에서는 Class-D형 전원 증폭 모듈에서 지원하는 PWM 방식의 제어를 통해 보다 정밀한 eLoran 펄스 제어가 가능함을 보이고자 한다. PWM 방식은 일정한 주기로 듀티 사이클 (Duty cycle)을 제어함으로써 네트워크 출력을 제어하는 방식이다. Fig. 6은 전체 전원 증폭 모듈이 24개일때, AM 방식과 PWM 방식으로 각각 제어한 네트워크 출력의 결과를 시뮬레이션 한 것이다. 초록색 선이 eLoran 펄스 규격을 만족하기 위해 요구되는 네트워크 출력이고, 빨간색 선은 AM 방식으로 제어한 결과이며 파란색 선이 PWM 방식으로 제어한 것이다.

Fig. 7은 Fig. 6에서 생성한 AM 방식의 네트워크 출력과 PWM 방식의 네트워크 출력을 각각 요구 출력과의 차이를 시간에 따라 나타낸 것이다. AM 방식에 비해 PWM 방식이 보다 정밀한 출력 제어가 가능함을 확인할 수 있다. 기존의 AM 방식 송신기는 이런 문제점을 보완하기 위해 일부 구간의 반송파 주파수를 변경하는 방식을 사용하기도 하지만, 이는 추가적인 회로 구성이 필요할 뿐만 아니라 회로 내 주파수가 다양해지면서 발생하는 잡음 제거를 위한 필터링도 추가적인 노력이 필요하다. 본 논문에서 제안하는 PWM 방식의 제어는 보다 쉽게 정밀한 제어를 가능하게 하는 방법으로, eLoran 송신기 개발에 도움이 될 것으로 기대한다.

## 4. CONCLUSIONS

파장의 길이가 3 km인 eLoran 신호를 송출하기 위해 파장의 길이에 훨씬 못 미치는 짧은 길이의 안테나를 사용할 경우, 신호 송출 효율이 떨어질 뿐만 아니라 안테나로부터 반사되는 전류를 고려하여 전압 파형을 설계해야 한다. 본 논문에서는 짧은 길이의 안테나를 이용해 eLoran 송신국을 구축하기 위해 필요한 방사저항 분석, 전원 증폭 모듈 사양 설계, 전압 파형 생성 등에 관한 연구를 수행하였다. 안테나 높이에 따라 방사저항을 예측하고, 안테나 파라미터 측정을 통해 등가회로를 구성할 수 있다. 그리고 과도 해석을 통해 요구되는 ERP를 만족시키기 위한 전원 증폭 모듈의 사양을 설계할 수 있다. 또한 과도 해석에서 eLoran 파형을 생성하기 위한 전압 파형을 도출할 수 있다. 그리고 보다 세

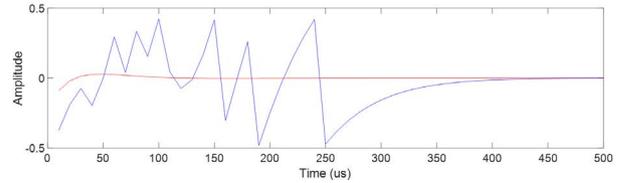


Fig. 7. The throughput residual comparison between AM (blue) and PWM (red).

밀한 전압파형 출력이 가능하도록 PWM 방식의 제어를 함께 활용하는 것을 제안하였다. 본 논문에서의 연구결과는 추후 신규 eLoran 송신국을 구축하는데 중요한 참고자료로 활용될 것으로 기대한다.

## ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부 국가 R&D 사업 “첨단 지상파항법시스템 (eLoran) 기술개발” (PMS4020)과 “지상파 통합 항법시스템 (R-Mode) 기술개발” (PMS4710)으로 수행된 연구결과입니다.

## 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

- Choi, C.-M. 2016, GPS anti-jamming using beamforming technique, *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 20, 451–456. <https://doi.org/10.6109/JKIICE.2016.20.2.451>
- Devaney, T. E., Hall, R. F., & Gustafson, W. E. 1966, Low-frequency top-loaded antennas, U. S. Navy Electronics Laboratory, NEL/REPORT 1381
- Fang, T. H., Kim, Y., Park, S. G., Seo, K., & Park, S. H. 2020, GPS and eLoran integrated navigation for marine application using augmented measurement equation based on range domain, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18, 2349–2359. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0287-y>
- Frank, R. L. 1982, *History of Loran-C*, Navigation, 29, 1–6

- Gailey, P. 1987, Modeling and measurement of electromagnetic fields near LORAN-C and OMEGA stations, Final report for LORAN/C OMEGA radiation exposure study
- Hardy, T. 2008, Next generation LF transmitter technology for (e)LORAN systems, in the proceedings of 2008 ILA meetings, London, 28-30 Oct 2008.
- International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse (IALA), 2017, The technical approach to establishing a maritime eLoran service, standard IALA Guideline G1125
- Kang, T., Lee, H., & Seo, J. 2019, TOA-based ranging method using CRS in LTE signals, *J. Adv. Navig. Technol.*, 23, 437-443. <https://doi.org/10.12673/JANT.2019.23.5.437>
- Lee, H., Kang, T., & Seo, J. 2019, Safety distance visualization tool for LTE-based UAV positioning in urban areas, *J. Adv. Navig. Technol.*, 23, 408-414. <https://doi.org/10.12673/JANT.2019.23.5.408>
- London Economics (LE) 2017, Economic impact to the UK of a disruption to GNSS, Showcase report
- 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>
- Riaz, M. 1987, A study of LF-top-loaded monopole antennas using numerical modeling techniques: comparison to scaled test model measurements, Master thesis, Naval Postgraduate School
- Son, P.-W., Park, S. G., Han, Y., & Seo, K. 2020, eLoran: Resilient Positioning, Navigation, and Timing Infrastructure in Maritime Areas, *IEEE Access*, 8, 193708-193716. <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>
- The European Commission (EC) & The European GNSS Agency (GSA) 2020, GNSS user technology report, Issue 3
- United State Coast Guard (USCG) 2009, Programmatic environmental impact statement on the future of the United States Coast Guard Loran range aids to navigation (LORAN-C) program, USCG-2007-28460
- Yoo, S., Yeom, D.-J., Jee, G.-I., & Kim, S. Y. 2016, A combined pseudo-random noise signal based advanced region correlation scheme for BOC(pn,n) modulated GNSS signals in repeat-back jamming environment, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 22, 977-983. <https://doi.org/10.5302/j.icros.2016.16.0165>



**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.



**Kiyeol 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.