

Compensation Method of eLoran Signal's Propagation Delay and Performance Assessment in the Field Experiment

Pyo-Woong Son¹, Tae Hyun Fang¹, Sul Gee Park², Younghoon Han¹, Kiyeol Seo^{1†}

¹Maritime Safety and Environmental Research Department, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 35764, Korea

²Maritime PNT Research Office, Daejeon 35764, Korea

ABSTRACT

The eLoran system is a high-power terrestrial navigation system that is recognized as the most appropriate alternative to complement the GNSS's vulnerability to radio frequency interference. Accordingly, Korea has conducted eLoran technology development projects since 2016. The eLoran system developed in Korea provides 20 m positioning accuracy to maritime user in Incheon and Pyeongtaek harbor. To accurately calculate the position with the eLoran signal, it is necessary to apply a compensation method that mitigates the propagation delay. In this paper, we develop the compensation method to mitigate the eLoran signal propagation delay and evaluate the positioning performance in Incheon harbor. The propagation delay due to the terrain characteristics is pre-surveyed and stored in the user receiver. Real-time fluctuations in propagation delay compared to the pre-stored data are mitigated by the temporal correction generated at a nearby differential Loran station. Finally, two performance evaluation tests were performed to verify the positioning accuracy of the Korean eLoran system. The first test took place in December 2020 and the second in April 2021. As a result, the Korean eLoran service has been confirmed to provide 20 m location accuracy without GPS.

Keywords: eLoran, the propagation delay, additional secondary factor, position accuracy

1. INTRODUCTION

enhanced LORAN (eLoran) 시스템은 기존에 사용하던 Loran-C 시스템의 성능을 크게 두 가지 관점에서 개선하여 사용자가 20 m의 위치 정확도를 제공받을 수 있도록 개발되었다 (Son et al. 2018a). 첫 번째는 모든 eLoran 송신기의 신호 송출 시점을 Universal Coordinated Time (UTC)에 동기화 하여 신호 송출 시각을 보다 정밀하게 추정할 수 있게 된 것이다. 두 번째는 기존에 송출하던 신호 배열에 하나의 펄스 신호를 추가하여 실시간

으로 생성되는 보정 정보를 사용자에게 전달해 사용자가 보다 정밀한 위치를 계산할 수 있도록 하는 것이다.

eLoran 시스템은 고출력의 지상파 신호를 이용하기 때문에, 약한 신호 세기로 인한 취약성을 갖고 있는 Global Navigation Satellite System (GNSS)에 위치 및 시각 정보(Position, Navigation, and Timing; PNT)를 의존하는 많은 응용분야에 탄력적인 PNT 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다 (Son et al. 2020). 특히, 주변 상황을 탐지하고 인식할 수 있는 환경이 매우 제한적인 해상에서는 그 활용 가치가 더욱 높을 것으로 기대된다. 실제로 한국의 서해지역에서는 2010년부터 북한으로부터의 도적인 GNSS에 대한 전파 교란 공격이 탐지되었고, 해당 기간에 많은 어선들이 조업을 할 수 없었다.

이런 이유로, 해양수산부는 해상에서 보다 탄력적인 PNT 정보를 제공하기 위해 2016년부터 2020년까지 eLoran 기술을 개발하여 서해 북부 지역에 테스트베드를 구축하고 그 성능을 확인하고자 하였다 (Son et al. 2018b). 이를 위해 인천에 신규 eLoran 송신국을 임시로 설치하고, 인천항과 평택항 인근에 각 1개의 보정 기준국을 설치해 주변 해상에서 20 m의 위치정확도를 제공할 수

Received Oct 12, 2021 Revised Dec 16, 2021 Accepted Dec 23 2021

†Corresponding Author

E-mail: kyseo@kriso.re.kr

Tel: +82-42-866-3684 Fax: +82-42-866-3609

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

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

Sul Gee Park <https://orcid.org/0000-0002-8620-8413>

Younghoon Han <http://orcid.org/0000-0002-0054-3094>

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

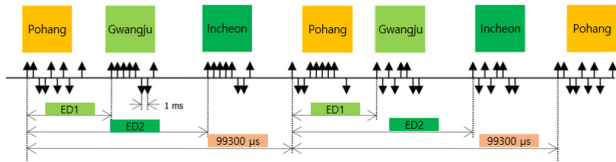


Fig. 1. The signal transmission process of Korean Loran system.

있도록 하고자 했다.

본 논문에서는 eLoran 시스템을 이용해 20 m의 위치 정확도를 계산할 수 있도록 보정정보 생성 및 적용 방법을 제안하고, 그 결과에 대한 성능을 평가한다. 먼저, 지형과 같은 공간적인 영향에 따라 발생하는 지연 오차를 실측하고 지도 형태로 저장하여 사용자가 보정할 수 있도록 하였다. 또한, 서비스 지역 근방의 보정기준국에서 실시간으로 잔여 오차를 측정하여 사용자가 활용할 수 있도록 보정 정보를 생성하고 Loran Data Channel (LDC)을 통해 방송하였다. 마지막으로 두 번의 실 해역 시험(2020년 12월, 2021년 4월)을 통해 한국의 eLoran 시스템의 측위 정확도 성능을 평가하였다.

2. ELORAN SYSTEM POSITIONING METHOD

2.1 The Sequence of eLoran Signal Transmission

eLoran 시스템은 3개 이상의 지상에 위치한 송신국에서 정해진 시간 순서에 따라 반복적으로 고출력의 장파 신호를 송출하면, 사용자는 신호 수신 시각을 이용해 자신의 위치를 계산할 수 있도록 설계되었다 (SAE International 2018). 한국은 기존에 운영되는 2개의 포항, 광주 Loran-C 송신국의 신호 송출 시각을 UTC에 동기화하고, 인천에 1개의 신규 eLoran 송신국을 설치하였다. 3개의 송신국은 일정 시간 간격을 기준으로 신호를 반복해서 송출하게 되는데, 이 시간 간격을 Group Repetition Interval (GRI)라고 하며 한국의 경우 99300μs를 기준으로 한다 (Son et al. 2021).

조금 더 자세하게 설명하자면, Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 포항, 광주, 인천 송신국은 99300μs마다 정해진 시각을 기준으로 신호를 송출하게 된다. 가장 먼저 신호를 송출하는 포항 송신국은 1958년 1월 1일 0시(UTC)를 기준으로 GRI마다 신호를 송출하고, 광주와 인천 송신국은 포항 송신국이 신호를 송출한 후 일정 시각 이후에 신호를 송출하게 된다. 여기서 광주와 인천 송신국의 신호 송출 시각과 포항 송신국의 신호 송출 시각의 차이를 Emission Delay (ED)라고 한다.

사용자는 각 송신국으로부터 신호를 수신하게 되면, 신호의 반복주기를 이용해 GRI를 추정하고, 1 ms 간격의 9개 펄스 그룹을 탐지하여 포항 송신국으로 인식한다. 그런 후에 ED를 고려하여 차례로 8개 펄스 그룹을 탐지하여 각 송신국으로부터의 신호를 구분할 수 있다. 여기서, 각 송신국 간 ED는 서비스 커버리지 내에서 사용자의 위치에 상관없이 정해진 순서대로 신호를 수신할 수 있도록 충분한 시간 차이를 두고 설계되었다. 포항 송신국 신호를 기준으로 나머지 송신국들의 신호 도착 시각을 계산하고

정해진 ED를 고려하면, 사용자와 각 송신국 간의 거리를 전파하며 발생하는 시간 (Time of Arrival; TOA)을 계산할 수 있다. 결론적으로, 사용자는 널리 알려진 GNSS에서와 같이 삼변측량법 기반 측위 알고리즘을 사용하여 자신의 위치를 계산할 수 있다 (Son et al. 2018c).

2.2 eLoran Signal Propagation Delay

2.1절에서 언급했듯이, 사용자가 자신의 위치를 계산할 때는 3개 이상의 송신국으로부터 각 송신국 신호의 TOA 정보를 이용한다. 여기서 TOA 정보는 송신국에서 송출된 신호가 사용자 수신기에 도착하기까지의 모든 시간을 포함하는데, 이를 수식으로 나타내면 Eq. (1)과 같다.

$$TOA = \frac{D}{c} + PF + SF + ASF + \varepsilon \quad (1)$$

여기서, D 는 송신국과 사용자 간의 거리, c 는 빛의 속도, PF 는 Primary Factor, SF 는 Secondary Factor, ASF 는 Additional Secondary Factor, ε 는 수신기 내부 지연오차 등과 같은 오차를 포함한 기타 지연오차이다 (Lo et al. 2009). PF 는 전파가 대기를 통해 전파하며 발생하는 지연 오차를 말하며, SF 는 전파가 해수면을 통해 전파하며 발생하는 지연 오차, 그리고 ASF 는 전파가 지표면을 통해 전파하며 발생하는 지연 오차를 말한다. 이 중 PF 와 SF 는 모델링을 통해 쉽게 보상이 가능하지만 ASF 는 예측이 어려워 실측을 통해 보정하는 방법을 사용하며, ASF 를 얼마나 적절하게 보정하는지가 eLoran 시스템의 위치 정확도 성능과 직접적으로 연결된다.

eLoran 시스템을 이용해 사용자가 20 m 이내의 정확도로 위치를 계산하기 위해서는 ASF 에 대한 보정이 필수적이다. ASF 는 지표면의 고도, 지형, 유효대지도전율에 따라 달라지기 때문에 시간에 따라 변하지 않는 요소와 실시간으로 변화하는 요소로 구분할 수 있다 (Rhee et al. 2021). 전자의 경우 전파 경로의 공간적인 영향에 따라 정해진다는 의미에서 공간적 ASF 라고 정의하며, 후자의 경우 날씨, 계절 등과 같이 시간적 요소에 따라 변한다는 의미에서 시간적 ASF 라고 정의한다. 여기서 공간적 ASF 는 시간에 따라 변화하지 않기 때문에 펄스프린팅 방식으로 실측을 통해 격자 지도 형태로 저장하여 사용자에게 제공하고 (Son et al. 2019), 시간적 ASF 는 근처의 보정기준국에서 실시간으로 생성한 보정정보를 통해 보정할 수 있다 (Park et al. 2020).

2.3 ASF Correction Algorithm

ASF 를 측정하기 위해서는 UTC에 동기된 1 Pulse Per Second (PPS) 신호와 정밀한 10 MHz 신호를 사용해야 하기 때문에 GNSS 혼련된 원자 시계(루비듐급 이상)를 사용한다. Eq. (1)에서 PF , SF 모두 송신국과 사용자의 거리인 D 에 기반한 모델링으로 제거하기 때문에 ASF 를 계산하기 위해서는 ε 와 D 를 정확하게 알아야 한다. ε 는 장비 자체의 고유한 값들로 이루어져 있으므로 정확히 제거할 수 있고, D 는 고정밀 GNSS 수신기를 이용해 최대

1 m 이내의 정확도를 갖도록 할 수 있다. 거리에 기반한 PF, SF의 모델링은 Eq. (2)와 같고, Eq. (1)을 ASF에 대해 정리하면 Eq. (3)과 같다.

$$PF + SF = -111 + 98.2D - 13.51De^{-0.254D} + \frac{2.277}{D} \quad (2)$$

여기서, D 의 단위는 m이다.

$$ASF = TOA - \frac{D}{c} - (PF + SF) - \epsilon \quad (3)$$

일반적으로 ASF를 보정하기 위해서는 먼저 시간적 ASF를 측정해야 하고, 이를 위해 고정된 위치에서 장시간 ASF를 측정할 수 있는 환경을 갖추어야 한다. 시간적 ASF는 장시간 동안 측정된 ASF 값 중 대표 ASF를 설정한 후, 실시간으로 측정된 ASF 값과 대표 ASF의 차이를 통해 Eq. (4)와 같이 계산한다. 대표 ASF으로는 일반적으로 Eq. (5)와 같이 1년동안 측정된 ASF의 평균값을 사용하며, 이는 한정된 LDC의 대역폭을 효율적으로 사용하기 위해 시간적 ASF 절대값의 최대값을 최소화해야 하기 때문이다.

$$ASF_{Temporal} = ASF_{Measured} - ASF_{Nominal} \quad (4)$$

$$ASF_{Nominal} = ASF_{1year-measured} \quad (5)$$

여기서, $ASF_{Temporal}$ 는 시간적 ASF, $ASF_{Measured}$ 는 실시간 측정된 ASF, $ASF_{Nominal}$ 는 대표 ASF, $ASF_{1year-measured}$ 는 1년간 측정된 ASF를 말한다.

보정기준국은 실시간으로 시간적 ASF를 수집하고 근처의 사용자에게 전송할 보정정보를 생성한다. 특이값 검출 알고리즘을 통해 순간적인 오차를 유발할 수 있는 시간적 ASF 측정치는 제거하고, 10분 동안의 누적 평균을 통해 잡음의 효과를 최대한 억제한다.

$$ASF_{Correction} = \overline{ASF_{10minute-Temporal}} \quad (6)$$

여기서, $ASF_{Correction}$ 는 보정기준국에서 생성한 보정정보이며, $\overline{ASF_{10minute-Temporal}}$ 는 특이값 검출 알고리즘을 통과한 최근 10분간 $ASF_{Temporal}$ 의 평균값이다.

LDC는 약 30 bps의 전송률로 데이터를 전달하기 때문에, eLoran 시스템에서 필요한 다른 정보들과 함께 모든 송신국의 시간적 ASF를 사용자에게 전달하려면, 보정정보를 전송하는 주기를 최적화해야 한다. 현재 eLoran 보정정보는 약 1분 마다 갱신하도록 되어있다. 데이터 전송률을 향상시킬 수 있는 LDC 메시지 설계방법과 더불어 보정정보 전달 주기에 관한 최적화에 대한 부분은 추가적인 연구가 필요한 부분이다.

공간적 ASF는 Eq. (1)에서 측정된 ASF에서 근처의 보정기준국으로부터 수신한 ASF 보정정보 간 차이 값으로부터 얻을 수 있으며 Eq. (7)과 같다. 다만, 보정기준국과 사용자 위치에서의 실시간 ASF 변화는 서로 높은 상관관계를 가져야 하고, 상관관계가 낮

을수록 eLoran 서비스의 위치 정확도는 낮아지게 된다. 그러므로 서비스 커버리지 내에서 ASF 변화의 상관관계가 높은 곳에 보정 기준국을 설치하는 것은 매우 중요하다.

$$ASF_{Spatial} = ASF_{Measured} - ASF_{Correction} \quad (7)$$

여기서, $ASF_{Spatial}$ 는 공간적 ASF이다.

위에서 측정된 공간적 ASF를 이용해 일정한 간격의 격자마다 대푯값을 계산하고, 격자 지도 형태로 만들어 사용자에게 배포한다. 공간적 ASF 지도 내 각 격자의 대푯값을 만드는 방법에 대해서는 일반적으로 양선형보간법 (Bilinear interpolation)을 역으로 이용하는 방법을 사용하지만, 보다 정밀한 대푯값을 생성하기 위해 Universal kriging과 같은 다양한 방법이 시도된 바 있다 (Son et al. 2019). 배포된 공간적 ASF 지도는 사용자 수신기에서 양선형보간법을 이용해 자신의 위치에서의 공간적 ASF를 추정하는데 사용되고, 자세한 과정은 eLoran 수신기에 관한 표준을 다루는 Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) SC-127 (RTCM 2017)에 기술되어 있다.

eLoran 서비스에서 목표로 하는 위치 정확도를 확보할 수 있는 범위를 보정기준국의 유효범위라고 한다. 일반적으로 유효 범위는 보정기준국 반경 30 km 이내로 알려져 있으나, 우리나라와 같이 지형이 복잡해 전파 경로가 크게 변할 수 있는 곳에서는 유효 범위가 작아질 수 있다. 공간적 ASF를 측정할 때 ASF 보정정보를 적용했기 때문에, 사용자는 공간적 ASF 지도를 통해 공간적 ASF를 추정하고, 실시간으로 수신한 ASF 보정정보를 적용하여 자신의 위치를 정확하게 계산할 수 있다.

3. ELORAN POSITIONING PERFORMANCE EVALUATION

3.1 Campaign I – Spatial ASF Map Survey (Dec. 2020)

본 연구에서는 eLoran 시스템의 측위 성능에 가장 큰 영향을 미치는 공간적 ASF 보상 방안에 대한 성능 평가를 위해 2020년 12월 9일에 공간적 ASF를 측정하고, 이를 이용해 2021년 4월에 해당 지역에서 eLoran 시스템을 이용한 위치 정확도 성능을 평가하였다. 먼저 공간적 ASF를 정확하게 측정하기 위해 인천에 시간적 ASF를 수집할 수 있는 보정기준국을 설치하였고, 선박의 구조물로 인한 다중경로오차 잡음을 최소화하기 위해 Fig. 2와 같이 선수에 eLoran E-field 안테나를 설치하였다. 이번 실험에서는 안테나 위치에 따라 신호의 값이 차이를 갖는지 확인하기 위해 다수 안테나를 설치하였지만, 일반적으로는 1개의 안테나만 설치하여도 충분하다. 또한 정밀한 기준위치 획득을 위해 3 cm (95%) 위치정확도 성능을 갖는 NovAtel 사의 TerraStar-C PRO 제품을 사용하였다.

측정된 공간적 ASF는 2장에서 언급했듯이 일정한 간격의 격자 지도 형태로 각 격자마다 다양한 보간방법을 통해 대푯값을 정해 저장하고, 사용자는 자신의 위치에 따른 공간적 ASF를 추정하여 사용할 수 있다. 본 연구에서는 공간적 ASF 지도의 격자 간

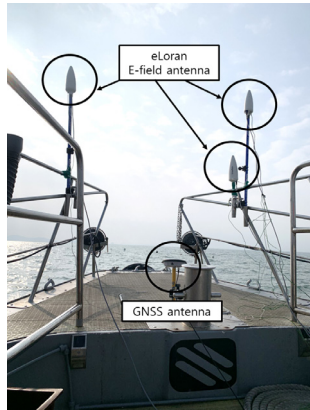


Fig. 2. The antenna installation configuration of the eLoran spatial ASF map survey campaign.

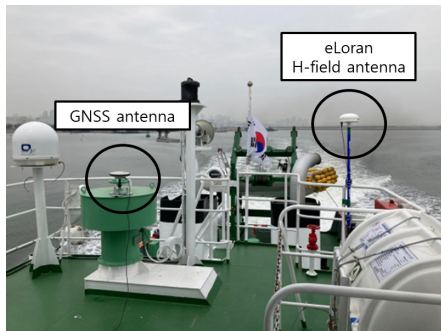


Fig. 3. The antenna installation configuration of the performance assessment campaign.

격을 5 km로 설정하고 양선형 보간방법을 통해 대푯값을 설정하였다. RTCM SC-127에 따른 공간적 ASF 지도의 표준 격자 간격은 500 m이지만, 이번 연구에서 수행한 공간적 ASF 측정 영역을 500 m 간격의 격자 지도를 저장하기에는 UrsaNav 사의 eLoran 수신기 메모리 용량이 부족했기 때문에 격자 간격을 넓혀 데이터 양을 줄일 수밖에 없었다. 보다 넓은 영역에서 공간적 ASF 지도를 사용하기 위해서는 ASF 지도 저장을 위한 eLoran 수신기의 메모리 용량을 충분히 확보할 필요가 있다.

3.2 Campaign II- Performance Assessment (Apr. 2021)

eLoran 시스템의 ASF 측정 및 보상 방법의 성능을 확인하기 위해 3.1절에서 측정하고 제작한 공간적 ASF 지도를 이용해 측위 정확도를 분석하였다. 국립해양측위정보원의 협조를 얻어 관공선에 Fig. 3과 같이 eLoran H-field 안테나와 GNSS 안테나를 설치하였고, eLoran E-field 안테나는 3.1절에서와 같은 이유로 선수의 높은 곳에 설치하였다.

본 실험은 인천 보정기준국에서 생성하는 실시간 보정정보의 유효범위로 알려져 있는 반경 30 km 범위 내에서 실험하기 위해, 인천의 자월도 부근에서 출발하여 인천 보정기준국까지 직선거리로 경로를 설정하였다. 또한 공간적 ASF 지도의 성능 차이를 확인하기 위해 공간적 ASF가 측정된 지역과 아닌 지역을 모두 포

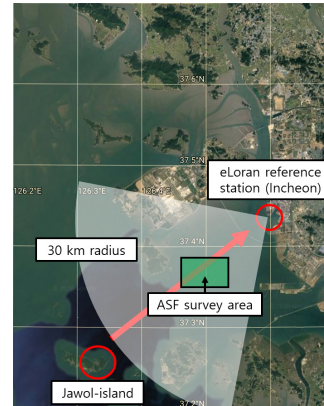


Fig. 4. Geometrical relationship of the performance assessment area and the ASF map survey area.

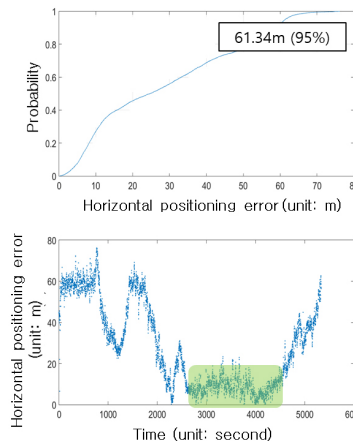


Fig. 5. The positioning accuracy during the performance assessment campaign; the cumulative distribution function of the horizontal positioning error (top) and the horizontal error over time (bottom).

함할 수 있도록 하였다. 본 항해 경로는 실제로 공간적 ASF를 측정한 Fig. 4의 초록색 영역과 측정값을 기반으로 외삽기법을 통해 추정된 값을 사용하는 영역으로 구성된다. 또한 실시간으로 인천 보정기준국으로부터 보정정보를 수신 받아 적용하였다.

약 1시간 30분 동안의 항해 결과, 측위 정확도의 누적확률오차와 시간에 따른 측위 정확도로 나타내면 Fig. 5와 같다. 처음 약 10분간의 정지 상태 후 출발하였으며, Fig. 4의 초록색 영역(ASF 측정 영역)에서의 측위 정확도는 Fig. 5에서도 마찬가지로 초록색으로 표시하였다. ASF를 실측했던 영역에서는 공간적 ASF의 정확도가 높아 수평위치오차가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있지만, 그 외 지역에서는 점점 정확도가 열화되는 것을 확인할 수 있다. ASF 실측 영역에서의 측위 정확도만을 따로 분석해보면 Fig. 6과 같다.

이를 통해 공간적 ASF가 실측된 영역 내에서는 4개월의 시간이 경과한 후에도 시스템 목표 성능인 20 m 내의 95% 측위 정확도를 만족할 수 있음을 확인하였다. 또한 실시간 보정정보가 측위 정확도에 미치는 영향을 확인하기 위해, 후처리를 통해 실시간 보정정보를 적용하지 않고 위치를 Fig. 7과 같이 계산하였다.

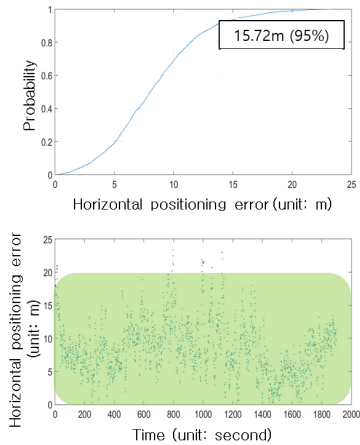


Fig. 6. The positioning accuracy in the ASF map survey area; the cumulative distribution function of the horizontal positioning error (top) and the horizontal error over time (bottom).

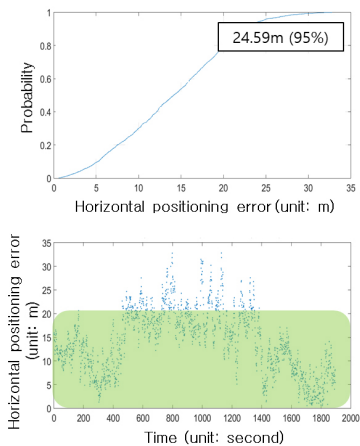


Fig. 7. The positioning accuracy without temporal ASF correction in the ASF map survey area; the cumulative distribution function of the horizontal positioning error (top) and the horizontal error over time (bottom).

두 그림에서의 결과를 비교해보면, 실시간 보정정보는 약 10 m 정도의 위치 오차 성능에 기여하는 것을 확인할 수 있다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 선박해양플랜트연구소에서 2020년 eLoran 테스트베드 구축을 통해 시험 운영 중인 eLoran 시스템의 실험역 성능을 두 차례의 해상 실험을 통해 확인하였다. 인천에 실시간으로 시간적 ASF를 측정할 수 있는 보정기준국을 설치하고, 공간적 ASF를 실측하여 격자 지도 형태로 저장하였다. 공간적 ASF를 실측한 4개월 후, 해당 격자 지도를 이용해 자월도에서 인천 보정기준국까지 약 1시간 30분의 항해 경로에서 위치 정확도를 확인하였다.

공간적 ASF를 실측한 영역에서는 격자 지도의 공간적 ASF 보정 정확도가 높아 사용자가 20 m 이내의 측위 정확도를 확보할

수 있었지만, 실측 영역 밖에서는 외삽 기법의 부정확성으로 인한 정확도 열화를 확인할 수 있었다. 또한 실시간 보정정보는 약 10 m의 측위 정확도 향상에 기여함을 확인할 수 있었다. 두 차례의 해상 실험을 통해 본 논문에서 제안한 방법으로 eLoran 시스템을 운영하는 것이 목표 성능인 측위 정확도 20 m를 충분히 만족할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부의 지원으로 수행된 “첨단 지상파항법시스템 (eLoran) 기술개발 [PMS4020]” 과제와 “지상파 통합 항법시스템 (R-Mode) 기술개발 [PMS4710]” 과제로 수행된 연구결과입니다.

본 논문의 실험을 지원해 주신 국립해양측위정보원과 이삭 주무관님께 감사인사 드립니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

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

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- 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, in the Proc. Annu. Tech. Symp. Int. Loran Assoc., Portland, ME. https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/papers/Lo_ILA_2009_RTCM.pdf
- Park, J., Son, P.-W., Kim, W., Rhee, J. H., & Seo, J. 2020, Effect of outlier removal from temporal ASF corrections on multichain Loran positioning accuracy, in the proceedings of ICCAS, Busan, 13-16 Oct 2020
- Rhee, J. H., Kim, S., Son, P.-W., & Seo, J. 2021, Enhanced accuracy simulator for a future Korean nationwide eLoran system, IEEE Access, 9, 115042-115052. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3105063>
- RTCM 2017, Minimum performance standards for marine eLoran receiving equipment, RTCM SC-127

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, 193708-193716. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033215>

Son, P.-W., Park, S. H., Seo, K., Han, Y., & Seo, J. 2018b, Development of the Korean eLoran testbed and analysis of its expected positioning accuracy, in the proceedings of IALA Conference 2018, Incheon, 27 May- 02 June 2018.

Son, P.-W., Rhee, J. H., Han, Y., Seo, K., & Seo, J. 2018c, Preliminary study of multichain-based Loran positioning accuracy for a dynamic user in South Korea, in the proceedings of IEEE/ION PLANS, Monterey, CA, 23-26 Apr 2018.

Son, P.-W., Rhee, J. H., Hwang, J. H., & Seo, J. 2019, Universal kriging for Loran ASF map generation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 55, 1828-1842. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2876587>

Son, P.-W., Rhee, J. H., & Seo, J. 2018a, 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>

Son, P.-W., Seo, K., & Fang, T. H. 2021, eLoran Signal Standard Inspection Process Development, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 10, 153-158. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.2.153>



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.



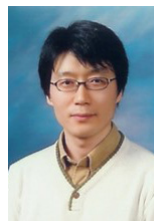
Tae Hyun Fang received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University, Busan, Korea, in 1994, 1998, and 2003, respectively. From 2004 to 2005, he was a visiting scholar at the Intelligent Transportation Research Center, Massachusetts Institute of Technology,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



Sul Gee Park is the general management team leader, maritime PNT research office and senior research engineer with Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. She received B.S. and M.S. degrees in Electronics Engineering from Chungnam National University, Republic of Korea. Her current research focus on PPP-RTK, eLoran system and integrity monitoring.



Younghoon Han received his B.S. and M.S. degrees in Electronics Engineering from Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea, in 2010 and 2012, respectively. He is currently a senior research engineer with the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, South Korea. His research interests include back-up PNT navigation technologies for maritime application especially as an eLoran and an R-Mode.



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.