한국항해항만학회지 제43권 제1호
J. Navig. Port Res. Vol. 43, No. 1 : 23-32, February 2019 (ISSN:1598-5725(Print)/ISSN:2093-8470(Online))
DOI : http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2019.43.1.23

ToA 측정치를 이용하는 Loran-C 다중 체인 측위 방법

† 김영기 · 황태현* · 김동현** · 서기열*** · 박상현****

*,**,***,****,† 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양환경안전연구본부

Loran-C Multiple Chain Positioning using ToA Measurements

† Youngki Kim · Tae Hyun Fang · Don Kim** · Kiyeol Seo*** · Sang Hyun Park****

*,**,***,****,† Korea Research Institute of Ships & Ocearn Engineering, Daejeon 305-343, Korea*

요 약 : 본 논문에서는 체인을 선택하지 않고 수신된 모든 Loran-C 신호를 이용하여 위치를 측정하는 방법을 제안하였다. Loran-C 수신기는 여러 체인 중 하나만을 선택하여 해당 체인에 속한 송신국 신호만을 위치 측정에 사용한다. 이에 따라 수신기가 위치를 계산하기 위해 사용하는 신호의 수는 일반적으로 3~5개로 제한된다. 만약 더 많은 신호를 사용하여 위치를 측정할 수 있다면 수신기의 측위 성능은 정확도와 가용성 측면에서 향상될 것이다. 다음으로 제안하는 방법의 유효성 여부를 확인하기 위해 실측 시험을 수행하였다. 육상 정지측위 시험 결과를 분석함으로써 제안하는 방법으로 위치 측정이 가능함을 확인하였다. 또한, 해상 이동측위 시험 결과는 일반적인 Loran-C 수신기가 위치를 측정할 수 없는 상황에서 다중 체인 ToA 측위 방법으로 위치를 측정한 하나의 예시를 보여준다.

핵심용어 : Loran, eLoran, 신호전달시간, 다중 체인, 측위

Abstract : *In this paper, we proposed a multi-chain Time of Arrival (ToA) positioning method to estimate positions using all received Loran-C signals from multiple chains without constraining to a single chain. Conventionally, we have to choose only one chain among several available chains for position estimation using Loran-C. Therefore, the number of signals to be used for positioning is limited to three to five. In general, if more signals are used for positioning estimation, its performance tends to be improved in terms of accuracy and availability. To validate the proposed method for multi-chain Loran-C, we firstly carried out a static positioning test in land. By analyzing the test results, we confirmed that the proposed method works well under a multi-chain Loran-C scenario. Subsequently, another mobile positioning test was conducted on board a vessel under a practical application scenario. From this second test, we successfully demonstrated that the multi-chain ToA positioning method even in situations where the conventional single-chain Loran-C approach fails for positioning.*

Key words : *Loran, eLoran, ToA, Multiple Chain, Positioning*

1. 서 론

Loran-C는 1940년대부터 사용된 전파항법시스템이다. 육상에 고정된 여러 송신국에서 특정한 신호를 송신하면 수신기는 그 신호를 수신한다. 그리고 신호 수신지점의 위치를 측정하여 사용자에게 제공한다. Loran-C 신호는 100kHz 펄스파이며 지표면을 따라 전파된다.

1960년대 위성항법시스템의 등장 이후 그 필요성은 감소하였으나 위성항법 신호에 비해 Loran-C 신호가 전파간섭에 강인함이 알려진 후에는 Loran-C 시스템을 활용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

국내에서는 Loran 신호가 전달되는 과정에서 발생하는 오차요소 중 하나인 ASF(Additional Secondary Phase Factor)를 제거함으로써 시스템의 성능을 향상시키고자 하는 연구가 수행되었다. 전통적인 Loran-C 시스템의 신호전달시간차(TDoA, Time Difference of Arrival)에 대한 ASF를 산출하고 적용하여 측위 오차를 개선한 결과를 보인 연구(Goo et al., 2007)가 있었고 ToC(Time of Coincidence)가 없는 로란신호로부터 신호전달시간(ToA, Time of Arrival)에 대한 ASF를 측정하는 기법을 개발한 연구가 있었다(Yang et al., 2010).

국제적으로는 Loran-C의 성능 향상에 더하여 시각원으로 사용하고자 하는 연구가 수행되었다. 대표적으로 Loran-C를 eLoran(enhanced Loran)으로 개선시키기 위한 연구가 있었다. 국제로란협회(ILA, International Loran Association)에 따르면 Loran-C와 eLoran의 주요한 차이는 Loran-C 신호에 데이터 채널을 추가하여 시각동기를 위한 정보, 보정정보, 신호 무결성 정보 등을 방송하는 것이다. 이러한 방법으로 eLoran은 Loran-C보다 향상된 측위 성능과 함께 시각정보를 제공하는

† Corresponding author : 정회원, ykkim@kriso.re.kr 042)866-3676
(주) 이 논문은 "ToA 측정치를 이용하는 Loran-C 다중 체인 측위 방법"이란 제목으로 "2018년 한국항해항만학회 추계학술대회 논문집 (경주 더케이호텔, 2018.11.08-09, pp.97-99)"에 발표되었음.

기능을 갖는다(ILA, 2007). eLoran 시스템의 성능을 평가하기 위한 시스템의 목표와 아키텍처 그리고 데이터 표본을 제시한 연구가 있었고(Peterson, 2003) eLoran이 시각동기 목적으로 사용될 수 있음을 보인 연구가 있었다(Roth et al., 2005).

영국과 아일랜드의 일반 등대국(GLAs, General Lighthouse Authorities of the United Kingdom and Ireland)은 eLoran 프로토타입 서비스를 운영한 바 있다(GLAs, 2012). 이 서비스는 영국 Humber 강 출입항로에서 10m(95%) 측위정확도를 달성하였다(Offermans et al., 2015). 또한, 2013년과 2014년에 미국에서 수행된 eLoran 시각동기 시험 결과는 1㎲의 정확도를 보였다(Offermans et al., 2017).

이와 같이 Loran-C 시스템을 활용하기 위한 다양한 연구가 수행되었으나 Loran-C 체인 간의 시각동기 여부와 상관없이 복수의 체인을 함께 활용함으로써 이득을 얻고자하는 연구는 찾아보기 어렵다.

Loran-C 시스템을 구분하는 단위는 체인인데, 이 체인은 펄스 신호 송신 주기가 같은 특정 송신국 집단을 의미한다. 하나의 Loran-C 체인은 주국이라 불리는 1개의 송신국과 종국이라 불리는 2~4개의 송신국으로 구성된다. 주국이 먼저 신호를 송신하면 그 신호를 수신한 여러 종국은 각기 정해진 시간 후 신호를 송신한다. 하나의 체인에 속한 모든 송신국이 일정한 간격을 유지하며 일련의 송신을 완료하면 다시 주국이 신호를 송신하게 되는데, 주국이 신호를 한 번 송신한 시점부터 다음 신호를 송신하기까지 걸리는 시간 간격을 GRI(Group Repetition Interval)라 한다. 하나의 체인에 속한 모든 송신국의 GRI는 동일하며, 전 세계 모든 체인은 서로 다른 고유한 GRI를 가진다. GRI의 단위는 마이크로초(㎲)인데, 이 GRI를 10으로 나눈 값을 GRI 지정자라 하며 Loran 체인을 식별하는 기호로 사용한다. 이와 같은 방법으로 하나의 Loran-C 체인에 속한 모든 송신국은 해당 체인 주국의 신호 송출 시각을 기준으로 동기를 맞추게 된다(USCG, 1992).

국내에서는 중국에서 운영하는 GRI7430 체인과 GRI8390 체인 그리고 대한민국과 러시아에서 운영하는 GRI9930 체인에 속한 여러 Loran-C 송신국에서 송출한 신호를 수신하는 것이 가능하다. 그런데 Loran-C 수신기는 여러 체인 중 하나만을 선택하여 해당 체인에 속한 송신국 신호만을 위치 측정에 사용한다(USCG, 1992). 이에 따라 수신기가 위치 측정에 사용하는 신호의 수는 하나의 체인에 속한 송신국의 수로 제한되며 일반적으로 3~5개이다.

본 논문에서는 체인을 선택하지 않고 수신된 모든 Loran-C 신호를 이용하여 위치를 측정하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법을 이용하면 위치를 측정하기 위해 보다 많은 신호를 이용할 수 있으므로 수신기 측위 성능이 정확도와 가용성 측면에서 향상될 것으로 기대된다.

또한, 제안하는 방법은 복수의 전통적인 Loran-C 체인을 하나의 eLoran으로 개선하기 위해 체인 간의 시각을 동기 시킬 필요가 없는 새로운 eLoran을 개발하는데 활용할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 체인 간의 시각동기 여부와 관계없이 ASF를 측정할 수 있는 기술이 필요하지만 서로 다른 체인의 시각동기를 유지하는데 필요한 비용을 절약할 수 있을 것으로 기대된다.

eLoran을 구성하는 모든 송신기는 하나의 시각원에 동기를 맞춘다(ILA, 2007). 영국의 eLoran은 다수 Loran-C 체인을 기반으로 개발되었는데 이들 체인은 전통적인 Loran-C가 아닌 NELS(Northwest European Loran-C System)에 소속된 체인이었다(Offermans et al., 2015). NELS 송신기는 전통적인 Loran-C 송신기를 eLoran 송신기로 개선하기 위해 필요한 현대화된 시각동기 장치를 이미 보유한 상태였다(GLAs, 2006). 그리고 체인과 상관없이 약 100㎱(σ)의 정확도로 프랑스 Brest 협정세계시(UTC, Coodinated Universal Time)에 동기되어 있었다(Jorgensen, 2000).

구체적인 방법은 2장에서 기술한다. 다음으로 제안한 방법의 유효성 여부를 확인하기 위해 수행한 육상 정지측위 시험과 해상 이동측위 시험의 방법과 결과를 3장에서 기술한다.

2. Loran-C 다중 체인 ToA 측위 알고리즘

본 논문에서 제안하는 ToA 측정치를 이용하는 Loran-C 다중 체인 측위 방법은 잘 알려진 반복 최소제곱법에 의한 위치 계산 방법에 기초한다. 다른 점을 기술하면 아래와 같다.

첫째, 수신기가 제공하는 원시 ToA 측정치를 조절한 다음 위치 계산에 사용한다. 조절하는 양은 모든 측정치에 동일하다. 구체적 방법과 이러한 방법의 필요성은 2.1에 기술한다.

둘째, Loran-C 신호는 지상파이기 때문에 대기와 지표 상태에 영향을 받아 신호 전달이 지연된다. 지연된 양은 모델로 추정하여 보상한다. 또한, 반복 최소제곱법을 수행함에 있어서 거리 계산은 측지 방법으로 결정한다.

셋째, 체인 간의 시스템 시 차이가 위치 측정에 영향을 미치지 않도록 각 체인에 대한 수신기 시계 오프셋을 각기 따로 추정하여 제거한다.

2.1 수신기 시계 오프셋과 GRI에 의한 ToA 측정치 변화

Coding Delay (CD)는 각 송신국 신호가 겹쳐지는 것을 방지하기 위한 목적으로 모든 종국에 고유하게 부여하는 값이고 Emission Delay (ED)는 주국의 신호 송출 시점과 각 종국의 신호 송출 시점 사이의 시간 간격이다. ED는 CD에 주국 신호가 해당 종국에 도착하기까지 걸리는 시간을 합한 값과 같다. 첫 번째 종국에 허용되는 최소 CD는 11,000㎲ 이고 다음 종국의 CD는 이전 종국의 신호 송출과 겹쳐지지 않도록 정한다(Dickinson., 1959). 각 종국 신호는 8개의 펄스 그룹으로 구성되며 각 펄스 간의 간격은 1,000㎲이다. 따라서 하나의 그룹을 모두 전송하는데 7,000㎲가 필요하고 다른 종국과 겹치지 않기 위하여 1,000㎲를 추가한다. 이에 따라 일반적으로 종국과 다음 종국은 최소 8,000㎲ 이상의 간격을 두고 신호를 송출한다.

전파가 8,000μs 동안 나아가는 거리는 약 2,400㎞이므로 근처 하나의 체인에 속한 모든 송신국으로부터 2,400㎞ 이내에 위치한 지점에서 신호를 수신하면 각 송신기로부터 수신지점까지 실제 전파가 전달되는 시간은 8,000μs 미만이다. 이 지점에서는 송신국 간 신호 송출 시간 간격보다 신호전달시간이 작으므로 송신국들이 일련의 순서로 송출한 신호가 그 순서의 변화 없이 차례대로 도착할 것이다.

이와 같은 이유로 해당 지점에 수신기를 설치하고 그 수신기로부터 ED가 보상되지 않은 원시 ToA 측정치를 획득하면 그 값이 송신국 신호 송출 순서대로 크리라고 기대할 수 있다.

그러나 실제 원시 ToA 측정치를 살펴보면 주국 신호에 대한 ToA 측정치가 부국 신호에 대한 ToA 측정치보다 더 큰 경우도 종종 발생한다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 원시 ToA 측정치가 수신기 시계의 성능에 따라 일정하지 않고 지속적으로 변화하는 수신기 시계 오프셋(RCO, Receiver Clock Offset)을 포함하기 때문이다. 실제 신호전달시간과 ED에 이 RCO를 더한 값이 GRI보다 크거나 음수가 되면 수신기는 그 값을 해당 GRI로 나눈 후 나머지를 원시 ToA 측정치로 내어준다. Fig. 1은 수신기 시계 오프셋과 GRI에 의한 ToA 측정치 변화를 설명하는 그림이다. 첫 번째 시점에 주국과 두 부국 신호에 대한 원시 ToA 측정치는 일반적인 값을 가지지만 두 번째 시점에 수신기 시계 오프셋이 증가하여 Z국 신호에 대한 원시 ToA 측정치가 GRI 범위를 넘어선다. 수신기는 GRI 보다 큰 원시 ToA 측정치가 아닌 GRI로 나눈 나머지 값을 내어준다.

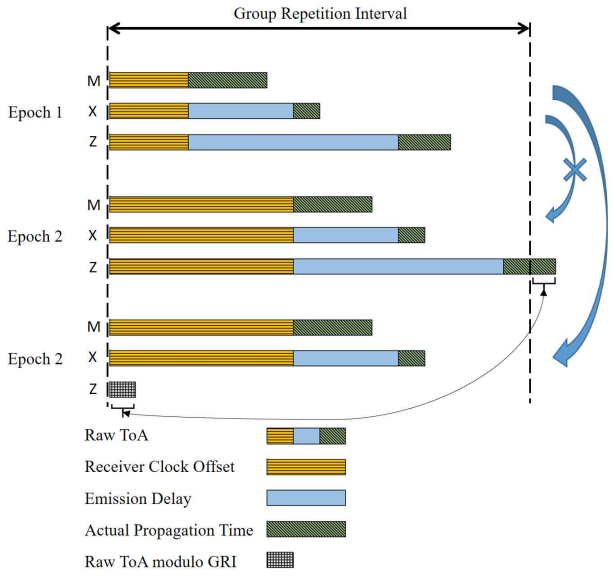

Fig. 1 Changes in raw ToA measurement with increasing receiver clock offset

수신기 시계 오프셋을 제거하면 이러한 현상이 해결될 것으로 보인다. Fig. 1의 첫 번째 상황처럼 일반적인 경우에는 2.3에서 설명할 최소제곱방법으로 수신기 시계 오차를 바르게 추정하여 제거할 수 있다. 그러나 두 번째 상황과 같은 경우에는 최소제곱방법을 이용하면 수신기 시계 오차를 바르게 추정하지 못 하여 최종적으로 결정된 위치가 매우 큰 오차를 포함하게 된다.

따라서 본 논문에서는 임의의 시간 오프셋을 부여함으로써 모든 수신신호에 대한 원시 ToA 측정치를 조절하여 Fig. 1의 첫 번째 상황처럼 일반적인 경우로 복원시키고자 하였다.

구체적으로 먼저 원시 ToA 측정치에 임의의 시간 오차를 부여한다. 이 값을 GRI로 나눈 후 그 나머지를 취하여 조절된 ToA 측정치를 구한다. 그리고 이 조절된 ToA 측정치가 특정 조건을 만족시키지 못 하면 다시 처음으로 돌아가서 추가적인 시간 오차를 부여하는 과정을 반복한다. 각 체인별 신호에 대한 ToA 측정치 크기순서가 신호 송출 순서와 동일하면 조건을 만족하는 것으로 보고 반복을 종료한다. 이 과정을 통해 조절된 ToA 측정치는 임의의 시간 오차가 부여되었으나 그 양은 체인을 구분하지 않고 수신된 모든 ToA 측정치에 동일하기 때문에 추후 위치를 측정하는 과정에서 제거된다.

2.2 의사거리 오차

전파항법시스템의 ToA 측정치는 여러 원인에 의하여 발생하는 다양한 오차를 포함한다. 그러나 여러 오차 성분을 큰 범위로 분류하면 식 (1)과 같은 분류가 가능하다.

$$ToA_M = ToA_T + TE_T + TE_R + PD \quad (1)$$

ToA_M은 수신기가 측정한 원시 ToA 값이고 ToA_T는 실제 ToA 값이다. TE_T는 신호 송출 시각 오차이고 TE_R은 신호 수신 시각 오차이다. PD는 전파가 전달되는 동안 발생한 지연 시간이다.

식 (1)에 대비한 Loran-C ToA 측정치 오차를 식 (2)와 같이 정리하였다.

$$ToA_A = ToA_T + B_I + O_{ED} + N_T + B_R + N_R + PF + SF + ASF \quad (2)$$

식 (1)의 ToA_M에 해당하는 값은 2.1의 결과인 조절된 ToA 측정치 ToA_A이다. ToA_T는 신호전달시간의 참값이다. B_I는 2.1에서 임의로 부여한 시간 오차이다. TE_T는 ED에 의한 시간 오프셋 O_{ED}와 송신 잡음 N_T로 간주한다. Loran-C 송신국은 지상국이며 시스템은 자체적으로 항상 시계 오차를 조절하기 때문에 바이어스 성분의 송신 시각 오차가 거의 발생하지 않을 것으로 사료되기 때문이다. 또한 TE_R는 수신기 시계 오프셋에 의한 바이어스 B_R 그리고 수신 잡음 N_R을 의미한다. PD는 PF (Primary Phase Factor), SF (Secondary Phase Factor) 그리고 ASF로 구분된다. PF는 전파가 대기 중에서 전달되는 속도가 진공 중에서 전달되는 속도보다 약간 느려지기에 발생하고 SF는 해수면 위로 전달될 때 더욱 느려지기 때문에 발생한다. ASF는 PF와 SF 이외의 요소에 의해 발생

하는 지연을 의미한다(RTCM, 2016).

ED는 명목상 정해진 상수이기 때문에 O_{ED}는 완전히 제거된다. 다음으로 식 (3)과 같이 의사거리(PR, Pseudorange)를 구한다. c는 전파 전달속도이며 $299.792458m/us$이다.

$$PR = c \times (ToA_A - O_{ED}) \tag{3}$$

PR에 포함된 PF와 SF에 의해 거리 오차는 모델을 이용하여 보상할 수 있다. 본 논문에서는 RTCM(Radio Technical Commission for Maritime Service)의 eLoran 수신기가 갖추어야 하는 최소 성능 표준 문서에 제시된 Brunavs 모델을 이용한다(RTCM, 2016). 이 모델은 식 (4)와 같이 신호 전달 거리를 입력으로 받고 신호가 입력된 거리를 나아가는 동안 발생하는 위상 지연을 출력한다.

$$\rho = C_1 + C_2 S + (C_3 S + C_4) e^{C_5 S} + \frac{C_6}{1 + C_7 S + C_8 S^4} + \frac{2.277}{S} \tag{4}$$

S는 입력 변수로 미터 단위의 거리 값에 10^{-5}을 곱한 값이다. $C_{1\sim5}$는 계수로 $C_1 = -111$, $C_2 = 98.20$, $C_3 = -13.51$, $C_4 = 112.8$, $C_5 = -0.254$이다. ρ는 출력 변수로 미터 단위의 위상 지연을 나타낸다.

위치를 계산하기 위해 반복최소제곱법을 수행하는 과정에서 매 반복마다 발생하는 예측된 위치와 신호 송신 지점 사이의 측지 거리를 식 (4)에 입력하고, 그 결과 획득한 위상 지연을 해당 측지 거리에 적용하여 의사거리 예측치를 구하고 그 의사거리 예측치를 식 (3)의 의사거리와 비교하여 오차를 추정하는 방법으로 PF와 SF에 의한 거리 오차를 보상한다.

이와 같은 과정을 통해 식 (2)의 오차 성분 중 O_{ED}와 PF, SF가 제거된다. 남아있는 오차 성분 B_I, N_T, B_R, N_R 그리고 ASF는 최종적인 측위 결과에 영향을 미칠 수 있다. B_I는 모든 측정치에 동일한 크기의 오차로 작용하기 때문에 위치 측정 과정에서 추정되어 제거될 것이다. 그러나 B_R은 동일한 체인에 속한 송신국 측정치에만 공통이며 서로 다른 체인 속한 송신국 측정치에는 서로 다르게 작용하기 때문에 다중 체인 신호를 이용하여 위치를 측정하기 위해서는 B_R이 적절한 방법으로 제거되어야 한다. B_I와 B_R을 제거하는 과정은 2.3에 기술한다. 식 (2)의 오차 성분 중 최종적으로 본 논문의 방법으로 결정한 위치에 영향을 미치는 성분은 N_T과 N_R 그리고 ASF이다.

2.3 Loran-C 다중 체인 측위 방법

ToA를 이용하여 위치를 구하는 전파항법시스템 수신기는 여러 송신국 위치와 각 송신국 신호에 대한 의사거리 측정치를 이용하여 신호 수신 지점의 위치를 구한다.

Loran-C 시스템의 송신국은 육상에 고정되어 이동하지 않기 때문에 송신국 신호 송신 지점의 2차원 위치가 공표된다. 의사거리는 식 (5)와 같이 신호 송수신 지점 간 측지거리와 수신기 시계 오프셋 등가 거리의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_i = gd_i + ct_u \tag{5}$$

식 (5)의 ρ_i는 i번째 송신국 신호에 대한 의사거리이고 gd_i는 신호 수신 지점과 i번째 신호 송신 지점 간 측지거리이다. c는 전파 전달 속도이고 t_u는 수신기 시계 오프셋이다. gd_i을 구하기 위해서는 송신 지점의 2차원 위치와 수신 지점의 2차원 위치가 필요하다. 수신 지점의 위치는 미지수이므로 식 (5)의 미지수는 3개가 된다. 따라서 식 (5)를 풀기 위해서는 최소 3개 이상의 의사거리가 필요하며 이 문제는 3개의 미지수를 구하는 비선형 시스템의 해를 구하는 문제가 된다. 이 문제의 해는 선형화 기반 반복적 기법으로 구할 수 있다(Kaplan and Hegarty, 2005).

반복적 기법은 식 (6)과 같은 해를 갖는다. $delx$는 기 추정된 수신 위치와 수신기 시계 오프셋이 포함한 오차를 추정한 값이다. 초기 위치나 기 추정 위치에 $delx$를 보상함으로써 다음 회 위치를 결정한다. 추정된 위치가 사용자가 원하는 수준으로 수렴하면 반복을 종료하고 최종 위치로 결정한다. 구면 좌표를 이용하여 신호 관측 행렬을 구하는 방법과 해당 위도에서 지구 곡률을 고려하여 위치 오차를 조정하는 방법은 Groves(2013)의 방법을 참고하였으며 이는 식 (6), (8), (9)와 같다.

$$delx = TH^{-1} dely \tag{6}$$

$$dely = \begin{bmatrix} \rho^1 - \hat{\rho}_i^1 \\ \rho^2 - \hat{\rho}_i^2 \\ \rho^n - \hat{\rho}_i^n \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1/R_N(\hat{L}_i) & 0 & 0 \\ 0 & 1/[R_E(\hat{L}_i)\cos\hat{L}_i] & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$H = \begin{pmatrix} -\cos\psi_i^1 & -\sin\psi_i^1 & 1 \\ -\cos\psi_i^2 & -\sin\psi_i^2 & 1 \\ -\cos\psi_i^n & -\sin\psi_i^n & 1 \end{pmatrix} \tag{9}$$

$$delx = \begin{bmatrix} \widehat{L_{i+1}} - \hat{L}_i \\ \widehat{\lambda_{i+1}} - \hat{\lambda}_i \\ \widehat{b_{i+1}} - \hat{b}_i \end{bmatrix} \tag{10}$$

식 (7)의 ρ^n은 n번째 송신국에 대한 의사거리 측정치를 나

타내고 $\hat{\rho}_i^n$은 n번째 송신국에 대하여 i번째 반복으로 추정된 의사거리를 나타낸다. 식 (8)은 2차원 직교좌표계 상에서 계산된 위치 오차를 지구 곡률을 반영한 구면좌표계 상에서의 위치 오차로 변환하는 역할을 한다. $\hat{L}_i$는 추정된 사용자 위치의 위도이다. R_N은 해당 위도에서 남-북 방향으로의 자오선 곡률 반경이고 R_E는 동-서 방향으로의 거등권 곡률 반경이다. 식 (9)는 신호 관측 행렬을 나타낸다. 1행 1열은 추정된 사용자 위치를 중심으로 하는 국소평면좌표계 상에서 n번째 송신 지점으로 향하는 단위 벡터의 북쪽 방향 성분을 나타내고 1행 2열은 동일 단위 벡터의 동쪽 방향 성분을 나타낸다. $\psi_i^{(n)}$는 추정된 사용자 위치에서 n번째 송신국 위치로 향하는 측지선의 진북에 대한 방위각이다. 식 (10)의 $\hat{L}_i$과 $\hat{\lambda}_i$는 추정된 사용자 위치의 위도와 경도이고 $\hat{b}_i$는 추정된 수신기 시계 오프셋이다.

한편, 일반적으로 각 체인의 기준 오실레이터나 시스템 시각은 서로 동기 되어 있지 않기 때문에 서로 간의 펄스 신호 생성 시점도 다르다. 수신기 시계 오프셋은 시스템 시와 수신기 시의 차이 이므로, 두 체인의 시계가 동기 되지 않았다면 각 체인의 기준 시계는 다르며 이에 따라 수신기 시계 오프셋도 둘로 구분되어야 한다. 그런데 식 (7)~(10)을 보면 사용자 위도 경도와 함께 의사거리에 포함된 공통된 성분의 오차를 하나의 값으로 구하도록 설계되었기 때문에 이 방법을 이용하면 체인 별로 다른 수신기 시계 오프셋 B_R이 하나로 계산되며 나머지 성분이 위치 결정에 반영된다. 따라서 본 논문에서는 각 체인의 시스템 시의 차이가 최종적인 측위 결과에 영향을 미치지 않도록 식 (7)~(10)을 식 (11)~(14)로 확장하였다.

$$dely = \begin{bmatrix} \rho^{1,1} - \widehat{\rho_i^{1,1}} \\ \rho^{1,m} - \widehat{\rho_i^{1,m}} \\ \rho^{k,1} - \widehat{\rho_i^{k,1}} \\ \rho^{k,n} - \widehat{\rho_i^{k,n}} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1/R_N(\hat{L}_i) & 0 & 0\,0 \\ 0 & 1/[R_E(\hat{L}_i)\cos\hat{L}_i] & 0\,0 \\ 0 & 0 & 1\,0 \\ 0 & 0 & 0\,1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$H = \begin{pmatrix} -\cos\psi_i^{1,1} & -\sin\psi_i^{1,1} & 1\,0 \\ -\cos\psi_i^{1,m} & -\sin\psi_i^{1,m} & 1\,0 \\ -\cos\psi_i^{k,1} & -\sin\psi_i^{k,1} & 0\,1 \\ -\cos\psi_i^{k,n} & -\sin\psi_i^{k,n} & 0\,1 \end{pmatrix} \tag{13}$$

$$delx = \begin{bmatrix} \widehat{L_{i+1}} - \hat{L}_i \\ \widehat{\lambda_{i+1}} - \hat{\lambda}_i \\ \widehat{b_{i+1}^1} - \hat{b}_i^1 \\ \widehat{b_{i+1}^k} - \hat{b}_i^k \end{bmatrix} \tag{14}$$

식 (11)~(14)에서 k는 각 체인의 번호를 의미하고 m은 첫 번째 체인의 신호수를 의미하며 n은 k번째 체인의 신호수를 의미한다. 식 (12)의 우변은 체인의 수가 k인 경우 $2+k$차 정사각 행렬이 된다. 이 행렬의 1행 1열과 2행 2열을 제외한 모든 원소는 동일한 크기의 단위행렬과 같다. 식 (13)의 우변은 총 의사거리의 수와 같은 행과 $2+k$개의 열을 갖는 행렬이다. 3열 이상의 열의 성분은 0 혹은 1이며, 각 행의 3~k열 성분의 합은 1이다. 각 행의 3~k열은 동일한 체인에 속한 의사거리에 대해서는 동일하고 서로 다른 체인에 속한 경우 서로 다르다. 식 (14)의 성분은 위도 오차와 경도 오차 그리고 각 체인 별 수신기 시계 오프셋의 오차이다.

식 (15)는 식 (11)~(14)를 통해 신호 수신 지점의 위치와 체인별 수신기 시계 오프셋을 갱신하는 구체적인 과정을 보여준다.

$$\begin{bmatrix} \widehat{L_{i+1}} \\ \widehat{\lambda_{i+1}} \\ \widehat{b_{i+1}^1} \\ \widehat{b_{i+1}^k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{L}_i \\ \hat{\lambda}_i \\ \hat{b}_i^1 \\ \hat{b}_i^k \end{bmatrix} + T(H^T H)^{-1} H^T \begin{bmatrix} \rho^{1,1} - \widehat{\rho_i^{1,1}} \\ \rho^{1,m} - \widehat{\rho_i^{1,m}} \\ \rho^{k,1} - \widehat{\rho_i^{k,1}} \\ \rho^{k,n} - \widehat{\rho_i^{k,n}} \end{bmatrix} \tag{15}$$

다중 체인을 이용하여 위치를 측정하기 위해서는 식 (15)와 같이 사용자 위치의 위도, 경도와 각각의 체인에 대한 수신기 시계 오프셋을 구하여야 하므로 k개의 체인으로 위치를 구하기 위해서는 최소 $2+k$개의 의사거리가 필요하다.

본 논문에서는 식 (11)의 $\widehat{\rho_i^{k,n}}$와 식 (13)의 $\psi_i^{k,n}$를 구하기 위해서 Vincenty (1975)의 방법을 이용하였다. $\widehat{\rho_i^{k,n}}$는 Vincenty의 방법으로 구해진 거리와 그 거리에 대한 위상 지연을 합하여 구한다. 위상 지연은 식 (4)와 같이 구한다. 식 (15)를 통해 구해진 체인별 수신기 시계 오프셋에서 2.1에서 부여한 임의의 시각 오차를 제거하여 최종적인 수신기 시계 오프셋을 구한다.

3. 시험 및 결과

제안하는 방법의 유효성을 확인하기 위해 두 가지 실측 시험을 수행하였다. 먼저 안테나가 육상에 고정된 상태로 위치를 측정하는 육상 정지측위 시험을 수행하였고 다음 해상에서 이동하며 위치를 측정하는 해상 이동측위 시험을 수행하였다.

여러 Loran-C 체인의 신호를 이용하여 위치를 측정하는 방법이 유효한지를 확인하기 위해서는 다양한 환경에서 수집된 신호를 이용한 시험이 필요하다. 그러나 이러한 방법을 수행하기 위해서는 많은 비용이 필요하기 때문에 본 논문에서는 1회의 정지 측위 시험에서 가능한 많은 송신국 신호에 대한 데이터를 수집하고 수집된 측정치를 신호별로 다양하게 조합하여 다양한 신호 수신 환경을 모사한 다음 제안하는 방법을 시험하였다. 다음으로 제안한 방법이 실제 항해 중인 선박의 선위결정에 사용될 수 있을지 여부를 확인하기 위해 선박에 수

신 장비를 탑재하고 해상에서 이동하면서 위치를 측정하는 해상 이동측위 시험을 수행하였다.

3.1 육상 정지측위 시험

육상 정치측위 시험은 2018년 7월 11일 약 12시간 동안 평택 Loran-C 감시국에서 진행되었다. 시험 장비로 Ursanav사의 UN152B 수신기와 안테나를 이용하였다. Fig. 2는 육상 정지측위 시험 수행 장소인 평택 Loran-C 감시국에 설치된 eLoran 안테나이다. 실험에는 안테나 마운트 좌측 H-Field 안테나가 이용되었다. 측정된 위치에 대한 정확도를 확인하기 안테나 기준 위치에 대한 정밀 측위를 수행하였다. Topcon의 GRS-1 장비를 이용하여 GPS/GLONASS 통합 VRS 방법으로 위치를 구하였다. 보정정보는 국토지리정보원의 NTRIP 서비스를 이용하였다.

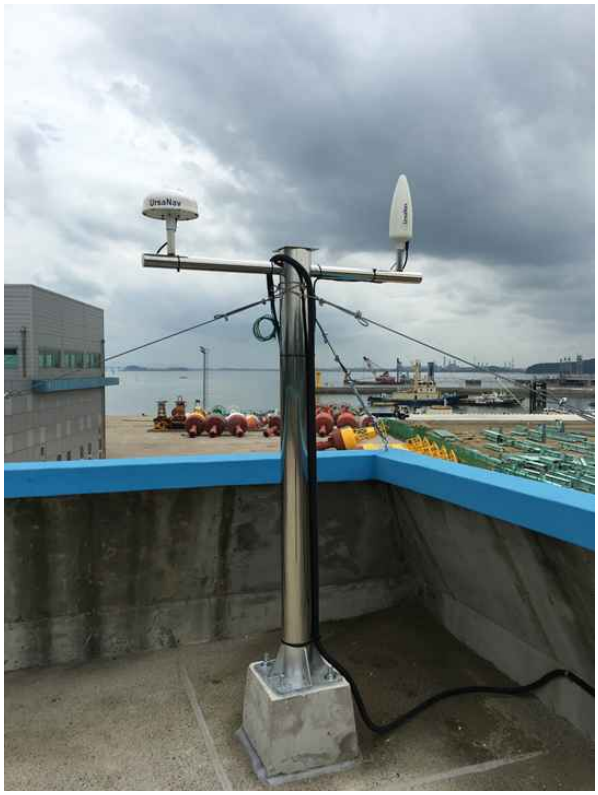

Fig. 2 eLoran Antenna(H) used in the static experiment

데이터를 수집하는 동안 GRI7430 체인의 M, X, Y 송신국 신호와 GRI8390 체인의 M, X, Y 송신국 신호 그리고 GRI9930 체인의 M, W, Z 송신국 신호를 수신하였다. 수신된 9개 송신국 신호 중 기저거리가 가장 먼 GRI8390 체인의 X국 신호와 GRI9930 체인의 Z국 신호는 품질이 좋지 않았기 때문에 이를 제외한 7개 신호에 대한 측정치를 이용하여 위치를 측정하는 시험을 수행하였다. 7개 신호 중 5~7개 신호를 취하는 모든 조합과 4개 신호를 취하는 조합 중 각 체인 별로 2개 이상의 신호를 취하는 모든 조합 그리고 단일 체인 3개 신호를 취하는 조합을 추가하여 총 37개 조의 신호 조합으로 위치를 측정하였다. Table 1은 37개 조 각각에 속한 신호를 나타낸다. 1조는 7개 신호를 취한 조합이고 2조는 7430M 제외 나머지 신호를 취한 조합이다.

Table 1 Loran signals used in each case

Case No.	No. Used STN	7430			8390		9930	
		M	X	Y	M	Y	M	W
1	7	O	O	O	O	O	O	O
2	6	X	O	O	O	O	O	O
3		O	X	O	O	O	O	O
4		O	O	X	O	O	O	O
5		O	O	O	X	O	O	O
6		O	O	O	O	X	O	O
7		O	O	O	O	O	X	O
8		O	O	O	O	O	O	X
9	5	X	X	O	O	O	O	O
10		X	O	X	O	O	O	O
11		X	O	O	X	O	O	O
12		X	O	O	O	X	O	O
13		X	O	O	O	O	X	O
14		X	O	O	O	O	O	X
15		O	X	X	O	O	O	O
16		O	X	O	X	O	O	O
17		O	X	O	O	X	O	O
18		O	X	O	O	O	X	O
19		O	X	O	O	O	O	X
20		O	O	X	X	O	O	O
21		O	O	X	O	X	O	O
22		O	O	X	O	O	X	O
23		O	O	X	O	O	O	X
24		O	O	O	X	X	O	O
25		O	O	O	X	O	X	O
26		O	O	O	X	O	O	X
27		O	O	O	O	X	X	O
28		O	O	O	O	X	O	X
29		O	O	O	O	O	X	X
30	4	X	X	X	O	O	O	O
31		X	O	O	X	X	O	O
32		X	O	O	O	O	X	X
33		O	X	O	X	X	O	O
34		O	X	O	O	O	X	X
35		O	O	X	X	X	O	O
36		O	O	X	O	O	X	X
37	3	O	O	O	X	X	X	X

Table 2는 각 조합의 신호에 대한 측정치를 이용하여 위치를 측정한 결과 HDOP, 위치 오차와 정밀도를 정리한 것이다. 실험결과 하나의 체인에 하나의 신호만 이용한 경우는 해

당 신호가 없는 경우와 동일한 결과를 보였다. 5, 6, 24 조는 공통적으로 GRI7430의 3개 신호, GRI9930의 2개 신호를 이용하였고 추가적으로 5조는 8390X, 6조는 8390Y를 이용하였으나 모두 동일한 위치 오차와 정밀도를 보인다. 이와 같은 현상은 '7, 8, 29', '9, 10, 15', '11, 12, 31', '16, 17, 33', '18, 19, 34', '20, 21, 35', '22, 23, 36' 그리고 '25, 26, 27, 28, 37'의 경우에도 동일하였다. 이러한 현상이 발생한 이유는 각 체인마다 2개 이상의 신호를 수신하여야 해당 체인에 대한 수신기 시계 오프셋을 유의미하게 추정하기 때문인 것으로 사료된다.

Table 2 Positioning result for each combination

Case No.	HDOP	East Error (meter)	North Error (meter)	2DRMS (meter)
1	1.02	509.52	180.50	14.76
2	1.02	318.54	294.67	16.71
3	1.02	544.98	108.22	15.85
4	1.60	285.52	-34.62	14.34
5	1.02	421.80	276.12	18.70
6	1.02	421.80	276.12	18.70
7	1.32	756.54	124.53	17.20
8	1.12	756.54	124.53	17.20
9	1.02	289.70	-41.43	15.77
10	1.60	289.70	-41.43	15.77
11	1.02	-201.68	758.80	30.46
12	2.04	-201.68	758.80	30.46
13	1.32	766.53	119.69	21.30
14	1.12	766.53	119.69	21.29
15	1.60	289.70	-41.43	15.77
16	2.82	-3382.76	5950.66	101.53
17	1.02	-3382.50	5950.41	111.48
18	1.32	759.51	117.32	18.14
19	1.12	759.51	117.31	18.14
20	1.60	281.34	-27.81	18.68
21	1.60	281.34	-27.81	18.68
22	Not enough transmitter station			
23	Not enough transmitter station			
24	1.02	421.80	276.12	18.70
25	1.32	750.07	130.56	21.18
26	1.12	750.07	130.56	21.18
27	1.32	750.07	130.56	21.18
28	1.12	750.07	130.56	21.18
29	2.36	756.54	124.53	17.20
30	1.60	289.70	-41.43	15.77
31	2.04	-201.68	758.80	30.46
32	2.36	766.53	119.69	21.30
33	2.82	-3382.71	5950.60	101.55
34	2.36	759.51	117.31	18.14
35	1.60	281.34	-27.81	18.68
36	Not enough transmitter station signal			
37	2.36	750.07	130.56	21.18

16, 17, 33 조는 정확도와 정밀도가 다른 조의 결과에 비하여 상대적으로 크게 측정되었다. 이 경우는 두 체인으로 각기 추정한 위치선의 교각이 작기 때문인 것으로 사료된다. ASF 보상 시 성능이 향상될 것으로 사료된다. 실제 항해 중에는 선위의 참값을 모르기 때문에 이렇게 오차가 큰 위치를 제공하면 위험할 수 있다. 그러나 이러한 경우 위치의 참값을 모르더라도 의사거리 잔차가 매우 크게 나타나기 때문에 이를 이용하여 큰 오차를 포함한 위치로 선위를 결정하는 상황을 피할 수 있다. 본 시험의 결과로는 의사거리 잔차의 절대값을 평균한 값이 1 ㎞를 넘는지 아닌지를 감시하는 방법으로 정확도와 정밀도가 상대적으로 나쁜지의 여부를 구분할 수 있었다.

22, 23, 36 조는 위치의 결정이 불가능하였다. 사용된 신호는 4~5개였지만, 유의미한 신호는 7430M, 7430X 그리고 8390M, 8390Y 신호로 4개였다. 그러나 7430M와 8390Y 신호는 중국의 Rongcheng 국에서 송신한 신호로 이들 신호의 송신 지점은 동일하다. 또한 7430X와 8390M는 중국의 Xuancheng 국에서 송신한 신호이다. 이들 조는 4개의 신호를 수신하였지만 실제 송신국이 2개였기 때문에 위치의 측정이 불가능하였음을 확인하였다.

그 외 모든 조의 결과는 일반적인 Loran-C 수준의 측위정확도와 정밀도를 보였다. 신호를 6~7개 사용한 경우의 정밀도는 약 15~19m 그리고 신호를 4~5개 사용한 경우의 정밀도는 약 16~21m로 나타났다.

Fig. 3은 GRI7430 체인의 M, X, Y국과 GRI8390 체인의 M, Y국 그리고 GRI9930의 M, W국 신호에 대한 측정치를 이용하여 위치를 측정한 결과를 보여준다. 위치 오차는 약 540.55 m 그리고 정밀도는 2DRMS 14.76m이다.

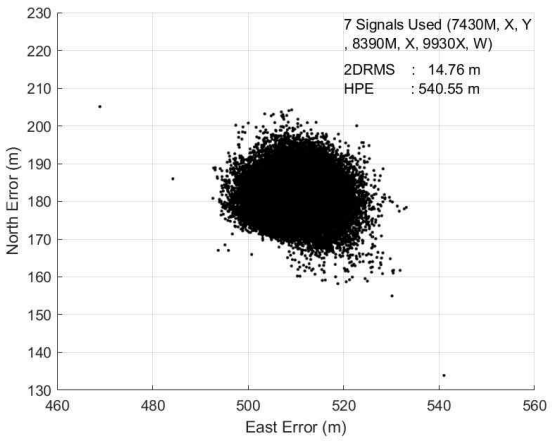

Fig. 3 Result of static positioning (Used Signals: 7430M, X, Y, 8390M, Y, 9930M, W)

Fig. 4는 GRI7430 체인의 M, X, Y국만 측정치만을 이용하여 위치를 측정한 결과이다. 위치 오차는 약 761.34m, 정밀도는 21.18m이다.

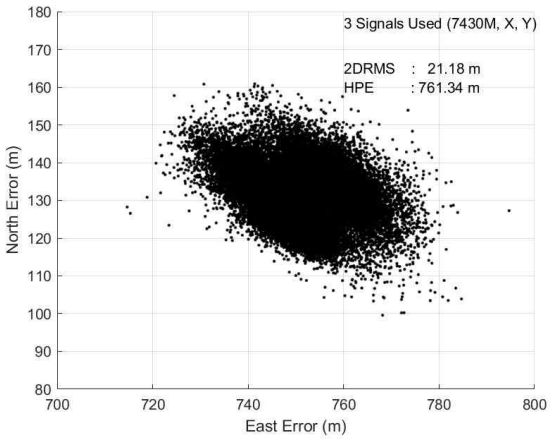

Fig. 4 Result of static positioning(Used Signals:7430M,X,Y)

3.2 해상 이동측위 실험

제안된 방법으로 측위하고 그 정확도를 확인하기 위해 이동식 안테나 파크를 구성하였다. 안테나 파크에 설치된 여러 안테나 마운트들은 서로 고정이 되어있기 때문에, 어느 하나의 점의 위치를 알고 헤딩을 알면 다른 한 점의 위치를 정확히 구할 수 있다. 이 플랫폼에 설치된 여러 안테나 마운트 중 하나에 eLoran 안테나를 설치하고 또 다른 하나에는 GNSS 안테나를 설치하였다. eLoran 안테나는 Loran-C 신호를 수신하여 ToA 측정치를 수집하는데 사용되었다. GNSS 안테나는 GPS와 GLONASS 원시데이터를 수집하는데 사용되었다. 수집된 GNSS 원시데이터는 근처 상시기준국 3곳에서 네트워크로 제공하는 보정정보와 함께 RTK 방식으로 위치를 계산하는데 사용되었다. 이렇게 측정된 GNSS RTK 위치는 제안된 방법으로 측정된 위치의 정확도를 확인하는데 사용되었다.

Fig. 5는 차량에 설치된 이동식 안테나 파크를 나타낸다.

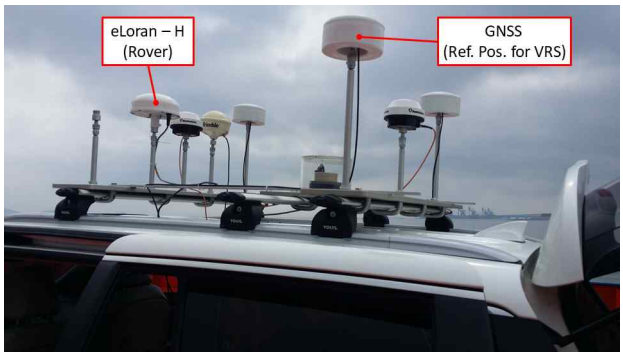

Fig. 5 Portable antenna park (eLoran and GNSS Antenna)

Loran-C 신호는 좌측 eLoran H-Field 안테나를 이용하여 수신하였고 우측 GNSS 안테나를 이용하여 GPS와 GLONASS 위성 신호를 수집하였다. 기준 위치 획득을 위한 안테나 파크를 차량에 설치하였고 해당 차량을 Fig. 6과 같이 선박에 싣고 실험을 수행하였다. 선박 해상측위 실험은 2018년 7월 11일 약 2시간 30분 수행되었다. 실험은 선박의 출항과 함께 시작되어 출항지 도비도항으로부터 동진하여 국화도 우측 해상에 도달하여 선회 1회전하기까지 수행되었다.

Fig. 6 Experimental vehicles on board the vessel

Fig. 7은 선박의 이동경로를 보여주는데 푸른 선은 GNSS RTK 방법으로 구한 위치를 나타내고 붉은 점은 Loran-C 신호를 수신하여 제안된 방법으로 구한 위치를 나타낸다. 제안된 방법으로 모든 실험구간에서 빠짐없이 위치를 측정하였음을 확인하였다. 선박이 항해하는 동안 수신이 가능했던 신호는 모두 6개였다. 그러나 수신된 신호는 GRI7430 체인의 송신국 M, X 그리고 GRI8390 체인의 송신국 M, Y 그리고 GRI9930 체인의 송신국 M, W로 3개의 체인 신호가 수신되었으나 각 체인 별로 2개씩 수신되었기 때문에 기존 Loran-C 단일 체인 측위 방법으로는 위치를 구할 수 없었다. 제안된 방법은 이러한 상황에서도 측위를 할 수 있었으므로 본 실험 결과는 가용성 향상의 예시라 할 수 있다.

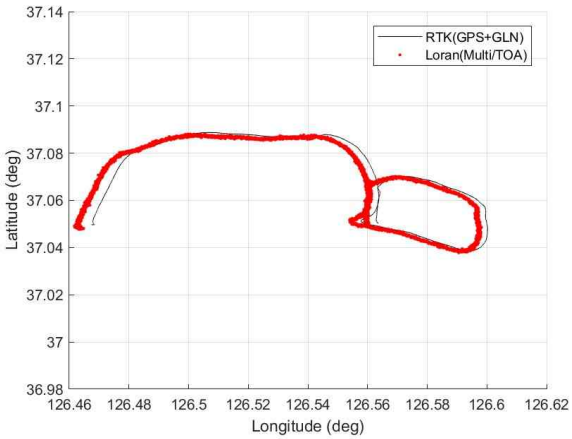

Fig. 7 Trajectory of the position measured using the proposed method

Fig. 8과 같이 해상 이동측위 시험 결과 정확도는 342.76m, 정밀도는 2DRMS 184.02m로 확인되었다. 정확도는 정지측위 실험의 경우와 유사한 수준이지만 정밀도는 정지측위 실험에 비하여 매우 크게 측정되었는데, 이것은 제안한 방법이 ASF를 보상하지 않기 때문인 것으로 사료된다.

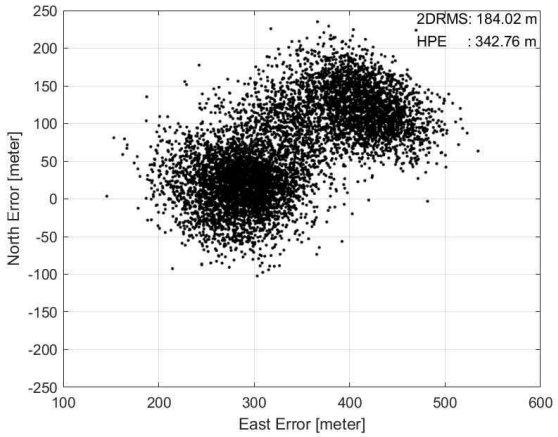

Fig. 8 Result of mobile positioning - Horizontal position error

Fig. 9는 시간의 흐름에 따라 변화하는 위치 오차를 동쪽 방향과 북쪽 방향 성분으로 나누어 나타낸 그림이다. 동쪽 방향으로의 오차는 이동 평균을 기준으로 2σ 57.97m이고 북쪽 방향으로의 오차는 이동 평균을 기준으로 2σ 56.85m 이다.

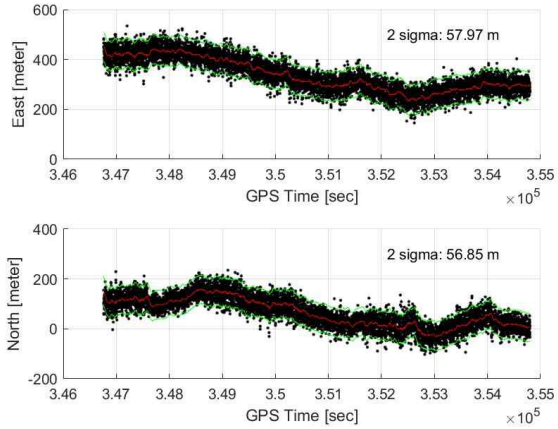

Fig. 9 Result of mobile positioning - East error and north error

4. 결 론

Loran-C는 수신된 여러 체인 중 하나의 체인을 선택하여 해당 체인에 속한 신호만을 이용하여 위치를 측정하는 시스템이다. 본 논문에서는 체인을 구분하지 않고 수신된 모든 신호를 이용하여 위치를 측정하는 방법을 제안하였다.

구체적으로는 먼저, 수신기 시계 오프셋의 변화와 GRI에 의한 ToA 측정치의 변화에 대응하는 방법을 설명하였다. 다음으로 ToA 측정치에서 ED와 PF, SF를 보상하는 방법을 설명하였다. 마지막으로 여러 체인의 시스템 시에 대한 수신기 시계 오프셋을 적절히 제거함으로써 Loran-C 다중 체인 신호를 이용한 측위 방법을 설명하였다.

제안된 방법의 유효성을 확인하기 위한 육상 정지측위 시험과 해상 이동측위 시험을 수행하고 그 결과를 제시하였다.

육상 정치측위 시험 결과 제안하는 방법으로 위치를 측정하기 위해서는 체인의 수에 2를 더한 수 이상의 송신 신호에 대한 측정치를 확보할 수 있어야 함을 확인하였다. Loran-C는 Dual 체인이 있음을 상기하여 최소 3개 이상의 실제 송신국이 있어야 함을 확인하였다. 또한, 상황에 따라 측위 정확도 품질이 매우 나빠질 수 있기 때문에 실제 항해를 위해서는 반드시 의사거리 잔차를 확인하거나 RAIM 등 방법을 이용하는 것이 필요함을 확인하였다. 해상 측위 실험을 통해 일반적인 Loran-C 수신기는 측위가 불가능한 경우에도 제안된 방법을 이용해서 측위를 수행할 수 있음을 확인하였다.

제안된 방법을 해상에서의 선위 결정에 활용하면 단일 체인 신호를 이용하는 경우에 비하여 보다 많은 신호를 사용함으로써 사용자로 하여금 정확도와 가용성 측면에서 더 좋은 성능을 제공할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 ASF를 보상하지는 않았는데 이 ASF는 신호를 수신하는 지역에 따라 큰 차이를 보이고 계절에 따라서도 변화하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서 수행된 실험 결과는 제안된 방법의 유효성 여부를 확인하기 위한 자료로서의 의의가 있고 제안된 방법의 정확도를 평가하기에는 부족하다. 추후 다양한 조건으로 실험을 수행할 필요가 있다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소(KRISO) 기본연구과제(PES3110)의 연구성과 중 일부입니다.

References

[1] Dickinson, W. T.(1959), Engineering Evaluation of the Loran-C Navigation System, Jansky & Bailey Inc.

[2] GLAs(2006), The Case for eLORAN, Research and Radionavigation General Lighthouse Authorities of the United Kingdom and Ireland.

[3] GLAs(2012), Radio Navigation Plan, General Lighthouse Authorities of the United Kingdom and Ireland.

[4] Goo, J. H. et al.(2007), "LORAN-C using and Position error improvement against being unable to use the

Global Positioning System(GPS)", The Journal of Korea Navigation Institute, Vol. 11, No. 1, pp. 1-8.

[5] Groves, P. D.(2013), Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems (Boston: Artech House), pp. 484-487.

[6] ILA(2007), Enhanced Loran (eLoran) Definition Document, International Loran Association.

[7] Jorgensen, T. H. and Hernes, G. M.(2000), "Loran-C integrated with satellite systems NELS status report", Proceedings of the IAIN World Congress In association with the U.S. ION Annual Meeting, pp. 339-343.

[8] Kaplan, E. D. and Hegarty, C. J.(2005), Understanding GPS, Principles and Applications (Norwood:Artech House), pp. 54-58.

[9] Offermans, G. et al.(2015), "eLoran Initial Operational Capability in the United Kingdom - First Results", Proceedings of the 2015 International Technical Meeting (ION ITM 2015), pp. 27-39.

[10] Offermans, G., Bartlett, S. and Schue, C.(2017), "Providing a Resilient Timing and UTC Service Using eLoran in the United States", Journal of The Institute of Navigation, Vol. 64, No. 3, pp. 339-349.

[11] Peterson, B., Dykstra, K., Carroll, K. and Narins, M.(2003), "Technology to Evaluate eLoran Performance", Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003), pp. 1327-1344.

[12] Roth, G. L. et al.(2005), "Enhanced or eLoran for Time and Frequency Applications", Proceedings of the 37th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, pp. 816-823.

[13] RTCM(2016), Minimum Performance Standards for Marine eLoran Receiving Equipment, Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM Paper 125-2016-SC127-112.

[14] USCG(1992), Loran-C User Handbook, Department of Transportation Publication, COMMANDANT PUBLICATION P16562.5.

[15] Vincenty, T.(1975), "Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with Application of Nested Equations", Survey Review, Vol. 23, No. 176, pp. 88-93.

[16] Yang, S. H. et al.(2010), "Inland ASF Measurement by Signal of the 9930M Station", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 34, No. 8, pp. 603-607.

Received 19 November 2018
Revised 5 January 2019
Accepted 7 January 2019