

지상과 통합항법 서비스의 성능예측 시뮬레이션 툴 개발

손표웅* · 한영훈** · 이상현*** · † 박상현

*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임연구원, **한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 기술원,

***한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 연구원, † 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

Development of the Simulation Tool to Predict a Coverage of the R-Mode System

Pyo-Woong Son* · Younghoon Han** · Sangheon Lee*** · † Sanghyun Park

*Senior Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

**Junior Engineer, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

***Junior Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea
† Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

요 약 : 위성항법시스템의 취약성에 따른 보완 시스템의 필요가 높아지면서, eLoran 시스템이 가장 현실적인 대안으로 인정받고 있다. 우리나라도 서해 일부 지역에서 eLoran 시스템의 테스트베드 구축 사업을 진행 중에 있다. 전 해양지역에 안정적인 서비스를 제공하기 위해서는 추가적인 송신국 설치가 필요하지만. 여러가지 현실적인 이유로 인해 추진되기 어렵다. 이런 문제를 해결하기 위해 기존의 NDGNSS 기준국과 AIS 기지국을 활용한 측위기술이 개발되고 있다. 이미 운영 중인 NDGNSS 기준국, AIS 기지국을 활용하면 전 해상에서 보다 높은 정확도의 탄력적 항법시스템 운용이 가능해질 수 있다. 그렇기 때문에 각 시스템이 통합운영 되었을 때의 성능을 예측하는 것은 중요하다. 본 논문에서는 eLoran 시스템과 전국의 NDGNSS의 해양기준국, AIS 기지국을 활용한 지상과 통합항법시스템의 성능을 예측할 수 있는 시뮬레이션 툴을 제작하였다. ITU에서 배포한 송출 주파수와 거리에 따른 신호 세기, 대기잡음 등을 고려해 Cramer-Rao Lower Bound로 수신 신호의 측정 거리 오차를 계산하였다. 추가적으로, 실제로 전국의 NDGNSS 해양기준국에서 수집된 DGPS 신호 정보를 통해 300 kHz 신호의 연평균 대기잡음을 추정해 시뮬레이션 결과를 보다 정확하게 하였다. 해당 결과는 추후 진행될 지상과통합항법시스템 개발에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 이로란, 중파 DGNSS, 지상과 항법시스템, 성능예측 시뮬레이션, 지상과 통합항법 시스템

Abstract : The eLoran system is considered the best alternative because the vulnerability of satellite navigation systems cannot be resolved as perfect. Thus, South Korea is in the process of establishing a testbed of the eLoran system in the West Sea. To provide resilient navigation services to all waters, additional eLoran transmitters are required. However, it is difficult to establish eLoran transmitters because of various practical reasons. Instead, the positioning with NDGNSS/AIS source can expand the coverage and its algorithm with applying continuous waves is under development. Using the already operating NDGNSS reference station and the AIS base station, it is possible to operate the navigation system with higher accuracy than before. Thus, it is crucial to predict the performance when each system is integrated. In this paper, we have developed a simulation tool that can predict the performance of terrestrial integrated navigation system using the eLoran system, maritime NDGNSS station and the AIS station. The estimated phase error of the received signal is calculated with the Cramer-Rao Lower Bound factoring the transmission power and the atmospheric noise according to the transmission frequency distributed by the ITU. Additionally, the simulation results are more accurate by estimating the annual mean atmospheric noise of the 300 kHz signal through the DGPS signal information collected from the maritime NDGNSS station. This approach can further increase the reliability of simulation results.

Key words : eLoran System, MF-DGNSS, Terrestrial Navigation System, Coverage Simulation, R-mode System

1. 서 론

위성항법시스템의 약한 신호세기로 인한 취약성으로 인해

지상파를 활용한 세 가지의 항법시스템(eLoran, NDGNSS, AIS)을 통합해 운영하는 것에 대한 연구가 진행되고 있다 (ACCSEAS Project, 2014a). 이 중에서, eLoran 시스템은 이미 해외에서 시범운영을 마친 바 있고 (Offermans et al.,

† Corresponding author : 정희원, shpark@kriso.re.kr 042-866-3681

* 정희원, pwson@kriso.re.kr 042-866-3693

** 정희원, yhhan@kriso.re.kr 042-866-3686

*** 정희원, sangheon@kriso.re.kr 042-866-3691

(주) 이 논문은 “지상과 통합항법 서비스의 성능예측 시뮬레이션 툴 설계”란 제목으로 “2019 한국해양과학기술협의회 춘계공동학술대회 논문집(제주 국제컨벤션센터, 2019.5.15-17, pp.210-212)”에 발표되었음.

2015), 국내에서 2016년부터 선박해양플랜트연구소를 중심으로 서해 일부지역에서 테스트베드를 구축하는 사업을 진행 중이다(Son et al., 2018a). Nationwide Differential Global Navigation Satellite System (NDGNSS)와 Automatic Identification Systems (AIS)는 현재 항법용으로 운영되고 있는 것은 아니지만, NDNSS의 경우 유럽에서 일부 시스템의 변경을 통해 항법이 가능하도록 시도한 바 있으며 (ACCSEAS Project, 2014b, ACCSEAS Project, 2014c), AIS에 대하여는 최근 중국에서 활발하게 항법용으로 연구하고 있다 (Zheng et al., 2016).

eLoran, NDNSS, AIS 시스템은 송신국의 배치나 신호 출력, 주파수 등 서로 다른 특징을 보이고 있으며 상호 보완적인 관계로 통합하여 사용하면 효과적인 항법시스템으로서 기능할 수 있다. 본 논문에서는 세 시스템의 특징과 장단점에 대해 각각 서술하고, 통합 사용시 얻을 수 있는 항법성능에 대해 예측하는 시뮬레이션 툴을 제작하는 과정에 대해 설명한다. 또한 시뮬레이션 결과를 다양한 시나리오를 기반으로 도출하고, 그에 대한 분석을 수행한다. 특히 본 논문에서는 전국의 DGNSS 기지국에서 수집한 실신호 데이터를 기반으로 한 잡음 모델을 적용해 기존의 다른 성능예측 시뮬레이션 툴보다 정확한 예측이 가능하다는 장점이 있다.

다음에 나올 2절에서는 eLoran, NDNSS, AIS 시스템의 특징에 대한 소개를, 3절에서는 지상과 통합항법 시뮬레이션 툴이 동작하는 과정에 대해 자세하게 설명한다. 4절에서는 여러 가지 시나리오를 바탕으로 지상과 통합항법 시스템의 예측 성능 결과를 분석한다. 마지막으로 5절에서는 본 논문의 내용을 결과적으로 정리한다.

2. 지상과 통합항법 시스템 구성요소

2.1 eLoran 시스템

GNSS에 대한 의존성을 낮추면서 전파교란에 강인할 수 있는 조건을 모두 만족시킬 수 있는 eLoran 시스템은 가장 현실적인 보완항법 시스템으로 인정받고 있다 (Grant et al., 2009). eLoran 시스템은 기존에 사용되던 Loran-C 시스템의 성능을 향상시킨 것으로, 각 송신국이 모두 Universal Coordinated Time (UTC)에 동기화되고 Loran Data Channel (LDC)를 통한 메시지 전달이 가능하다는 특징이 있다 (ILA, 2007).

Loran-C 시스템은 100 kHz의 고출력 펄스기반의 신호를 이용하는데, 수신기는 펄스 신호를 수신해 크기 값이 음수에서 양수로 전환되는 세 번째 지점을 기준으로 신호의 Time of Arrival (TOA)를 계산한다 (RTCM SC 127, 2016). 다만 기존의 Loran-C 시스템에서는 수신기 시각정보와 Loran-C 송신국 시각정보를 동기화 시킬 수 없기 때문에 각 송신국이 정해진 시간 간격으로 신호를 송출하고, 그 도착시간 차이로 쌍곡선 항법을 사용해 측위한다.

eLoran 시스템에서는 모든 송신국이 UTC 시각 동기화 되

고, LDC를 통해 수신기가 송신국의 시각정보와 동기화 될 수 있기 때문에 신호의 TOA를 계산할 수 있고, GNSS와 같은 방식으로 위치를 계산할 수 있다. 이로 인해 기존의 Loran-C 시스템에서는 서로 정해진 시간 간격에 따라 신호를 송출하기로 미리 약속된 송신국들의 신호로만 측위가 가능하다는 한계를 극복하고, 수신한 모든 송신국의 신호들을 동시에 위치 계산에 활용할 수 있는 큰 장점이 있다. 또한 보정기준국을 통해 전파 신호의 주요 오차원인을 보상하는 방법으로 사용자가 약 20 m 이내의 측위 정확도를 가질 수 있도록 한다(Son et al., 2018b, Son et al., 2019).

현재 한국에서는 eLoran 테스트베드 구축사업을 진행하고 있으며, 2019년까지 인천에 eLoran 시험 송신국을 설치할 예정이다. 그렇게 되면 현재 운영 중인 한국, 중국, 러시아의 Loran-C 시스템을 eLoran 시스템으로 활용 가능하다. 하지만 현재의 eLoran 시스템 구성으로는 20 m이내의 측위 성능을 제공할 수 있는 지역이 서해 일부로 제한적이다. 서비스 지역을 확장하기 위해서는 추가적인 송신국 설치가 필요하지만 부지 확보에 현실적으로 어려움이 있는 한계가 있다.

2.2 MF-DGNSS

GNSS를 보다 정확하게 사용하기 위해 각 위성으로부터의 신호에 대한 오차 정보를 이용하는 NDNSS가 운영되고 있다. 국립해양측위정보원에서는 17개의 NDNSS 기준국 및 감시국을 운영하면서 생성된 Differential Differential Global Navigation Satellite System (DGNSS) 정보를 약 300 kHz 대역의 비콘과 인터넷 네트워크, 그리고 스마트폰 기반으로 제공하고 있다. 이 중 비콘을 통해 보정정보를 송출하는 방식을 MF-DGNSS라고 부르며 이 신호를 약간의 변형을 통해 항법에 이용할 수 있도록 하는 기술이 개발되고 있다.

이 기술은 기존의 시스템을 최대한 이용해 적은 비용으로 높은 정확도의 항법이 가능한 신호를 송출할 수 있다는 것이 장점이지만, 각 송출 신호의 시각동기가 외부로부터 필요하다는 단점이 있다. 일반적으로 송출 신호의 시각 동기 방법은 GNSS를 활용한 방법을 사용하지만, GNSS에 대한 의존도를 줄이려는 본래의 목적을 고려했을 때 다른 시각 동기화 방법이 필요하다. 한국은 시각 동기 정보를 제공할 수 있는 eLoran 시스템을 구축 중이고 이를 활용해 송출 시각을 동기화 할 수 있다는 측면에서 MF-DGNSS를 이용한 측위 기술의 활용 가치가 더 높아질 수 있다.

게다가 MF-DGNSS는 해양지역에서 특히 항만 입출항 및 협수로 통항 선박의 안전운항을 위해 운영되는 만큼, 한국의 주요 해양과 항만지역이 서비스 가능하도록 운용되고 있다. 그렇기 때문에 MF-DGNSS의 신호원을 항법에 사용할 수 있다면 eLoran 시스템만으로 커버할 수 없는 주요 해양 및 항만 지역에서 보다 높은 성능의 항법 서비스 제공이 가능할 것으로 기대된다.

2.3 AIS 시스템

AIS는 해상에서의 안전을 위해 Very High Frequency (VHF) 대역의 전파신호를 통해 여러 선박정보 및 운항정보를 상호교환 할 수 있는 시스템이다. 현재 한국에서는 총 44개소의 AIS 기지국이 운영되고 있으며, 해양경찰청이 3개소, 해양수산부가 41개소를 담당하고 있다. 이 중 총 42개 기지국이 송수신이 가능한 기지국이며, AIS를 이용한 항법기술이 개발되면 반경 수십 킬로미터 이내에서 사용자에게 추가적인 신호이용기회를 제공할 것으로 기대된다.

AIS 신호를 항법신호로 활용하기 위해서는 DGNSS와 마찬가지로 송출 신호를 시각동기 시키는 것이 중요한데, 역시 eLoran 시스템을 활용해 시각동기하는 것을 고려해 볼 수 있다. DGNSS의 300 kHz 전파신호가 밤에는 skywave의 영향으로 정확도가 낮아지기 때문에 AIS 시스템을 이용한 항법신호는 밤 시간에 지상파 통합항법시스템의 성능을 보장해 줄 수 있는 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

3. 성능예측 시뮬레이션 툴 개발

일반적으로 항법시스템의 성능을 평가할 때 정확도, 가용성, 연속성, 무결성 등을 고려할 수 있다. 본 논문에서 개발한 지상파 통합항법 시스템의 성능예측 시뮬레이션 툴에서는 정확도에 관한 성능을 예측하는 것으로 한정되어 있다. 구체적인 사용자 혹은 시스템 요구조건 등이 설정되면 다른 요소들도 추가적으로 고려될 수 있다. 또한 본 시뮬레이션 툴은 한국의 연안 및 바다에서의 항법 성능을 예측하기 위한 것으로, 육지에서의 지형 및 유효대지도전율과 같이 육상에서의 성능예측에 필요한 파라미터는 반영되지 않았다.

3.1 지상파 통합항법 성능예측 시뮬레이션 툴의 구조

본 논문에서 개발한 성능예측 시뮬레이션 툴은 Fig. 1과 같은 구조로 동작하도록 설계되었다. 사용자가 시뮬레이션 수행을 위해 eLoran/MF-DGNSS/AIS 기지국의 구성을 선택하면, 위도 32 - 40 도, 경도 121.5 - 133.5 도 내에서 각 송신국들로부터의 신호세기를 예측한다. 또한 신호대 잡음비 계산을 위해 각 시스템에서 사용하는 신호 주파수에 맞는 대기잡음을 추정한다. 위 지역에서의 신호대 잡음비가 산출되면, Cramer-Rao Lower Bound (CRLB)를 이용하여 SNR에 따른 Time Of Arrival (TOA) 추정의 오차분산을 추정하게 된다.

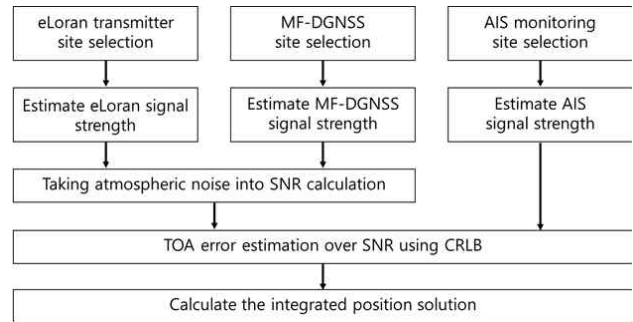


Fig. 1 Operation process of the R-mode simulation tool to predict accuracy coverage

마지막으로 시뮬레이션에서 사용된 각 송신국의 기하학적 배치와 SNR의 문턱값 제한을 이용해 Horizontal Dilution Of Precision (HDOP)을 계산하고, 최종적으로 정확도 성능을 예측할 수 있다.

3.2 신호세기 예측

본 성능예측 시뮬레이션 툴에서 고려하는 eLoran/MF-DGNSS/AIS 시스템은 서로 다른 주파수와 출력의 신호를 사용한다. International Telecommunications Union (ITU)에서는 각 신호의 주파수 별로 거리에 따라 신호가 어떻게 감쇠하는지 연구한 자료를 발표하고 있다.

eLoran 시스템에서 사용하는 100 kHz 신호와 MF-DGNSS의 경우 ITU-R P.368.7 (GROUND-WAVE PROPAGATION CURVES FOR FREQUENCIES BETWEEN 10 kHz AND 30 MHz)의 그림 1 - 11을 참조해 신호세기를 예측하였다. 다만 ITU 문서에서의 결과는 신호출력이 1 kW일 경우의 값이기 때문에 다음 식 (1)을 활용하여 신호 출력의 변동에 대해 보상하였다.

$$SS_{eff} = SS_{1kW} + 10 \cdot \log_{10} P_{eff} \quad (1)$$

여기서, SS_{eff} 는 송출전력을 고려한 예측신호 세기, SS_{1kW} 는 1 kW를 기준으로 산출된 신호세기, P_{eff} 는 송출전력(kW)이다.

eLoran 시스템의 경우 현재 운영 중인 포항, 광주 송신국의 송출전력은 각각 150 kW, 50 kW으로 알려져 있으며, 앞으로 구축 예정인 아라뱃길 시험 송신국, 소청도 신규 송신국의 경우 각각 1 kW, 10 kW으로 알려져 있다. 이를 반영하여 계산한 eLoran 시스템의 신호세기는 다음 Fig. 2와 같다.

MF-DGNSS의 경우, 국제항로표지협회(IALA)에서 각 송신국마다 Nominal range라는 파라미터를 특정 거리와 신호세기로 구분해 공개하고 있는데 이는 일정 거리에서 신호세기가 특정한 값이 되도록 운영되고 있다는 의미이다.

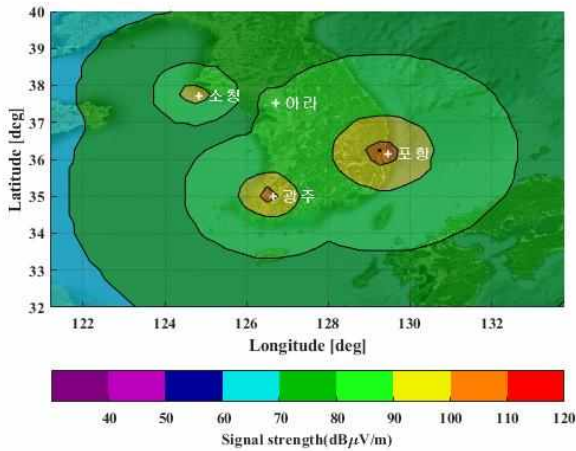


Fig. 2 Signal strength prediction results of eLoran transmitters that is in operation or to be installed

이를 활용해 IALA의 GUIDELINE 1119 (MARINE BEACON COVERAGE PREDICTION)에서는 실제 송출 전력에 따른 신호세기를 예측하는 방법을 제시하고 있다. 본 논문에서는 IALA GUIDELINE 1119에서 제안한 방법으로 한국의 MF-DGNSS 기준국의 거리에 따른 신호감쇠를 다음 Fig. 3과 같이 계산하였다.

한국의 MF-DGNSS 해양기준국의 Nominal range는 185 km에 40 dBµV/m로, 송출전력이 1 kW일때를 기준으로 하는 위 그래프(Fig. 3)에서는 185 km에 해당하는 신호세기 값이 약 63 dBµV/m 임을 확인할 수 있다. 그렇다면 한국 MF-DGNSS의 해양기준국의 신호세기는 송출 전력이 1 kW인 신호 세기 대비 약 23 dBµV/m의 오프셋을 가짐을 알 수 있다. 이런 과정을 거쳐 우리나라의 11 곳의 해양 MF-DGNSS 기준국의 신호세기를 예측하면 Fig. 4와 같다.

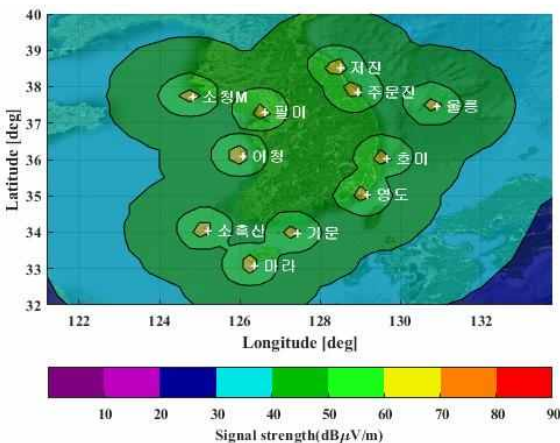


Fig. 3 Estimation of signal attenuation according to distance of MF-DGNSS reference station in Korea

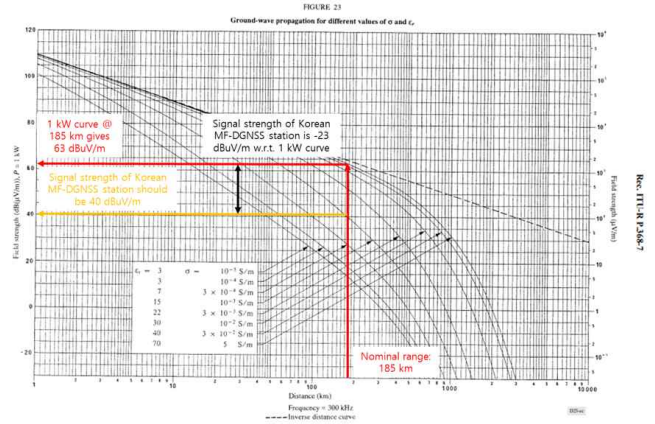


Fig. 4 Signal strength prediction results of maritime MF-DGNSS transmitters in South Korea

AIS 시스템은 161.975, 162.025 MHz의 신호를 이용하고 ITU-R P.370-7에서 해당 주파수 대역의 거리에 따른 신호감쇠에 대한 정보를 찾을 수 있다. 하지만 실제로 운영되고 있는 AIS 시스템의 신호세기를 예측하려면 앞의 두 시스템과 마찬가지로 ITU 문서에서 제공하는 값에서 실제 AIS의 송출전력인 12.5 W에 대한 보상값을 식 (1)을 활용하여 반영해야 한다. 또한, AIS 시스템의 신호는 앞의 두 시스템과 달리 파장이 짧아 송수신자 사이에 존재하는 장애물에 큰 영향을 받는다. 그렇기 때문에 AIS 신호의 송수신자의 높이가 수신자의 신호세기에 큰 영향을 미치고 그 영향은 다음 식 (2)와 같다.

$$Height\ gain\ (dB) = \frac{c}{6} \cdot 20 \log_{10} \frac{h_2}{10} \quad (2)$$

여기서, c 는 전파 경로의 유형에 따른 상수이고, h_2 는 수신기의 송신기에 대한 상대적인 높이이다. 본 시뮬레이션에서는 전파 경로를 해양으로, 수신기의 송신기에 대한 상대 높이를 10 m로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 위와 같은 과정을 거쳐 신호 송출이 가능한 우리나라의 총 42개 AIS 기지국의 신호세기를 계산하면 Fig. 5와 같다.

3.3 잡음 모델을 고려한 신호대 잡음비 계산

eLoran 시스템의 100 kHz의 무선신호는 대기를 전파하면서 전기적 잡음이 섞이게 된다. ITU의 전신인 Consultative Committee on International Radio (CCIR)는 그동안의 대기의 전기적 잡음을 측정된 데이터를 이용해 external antenna noise factor (F_a)라는 변수에 대한 통계자료를 발표한 바 있다 (CCIR, 1963). F_a 는 특정 계절 및 시각에 무손실 안테나로 수신되는 전파 신호의 세기를 의미하는데, 이는 위치, 시간, 계절 등에 따라 변화하기 때문에 일정한 상수 값을 갖는 것이 아니라 확률변수로 존재하게 된다. ITU에서는 90%에 해당하는 F_a 를 배포하고 있으며 본 시뮬레이션 툴에서는 95% 수준의 잡음을 사용하기 때문에 식 (3)을 통해 95%의 F_a 를 계산하였다 (Lee, 2007).

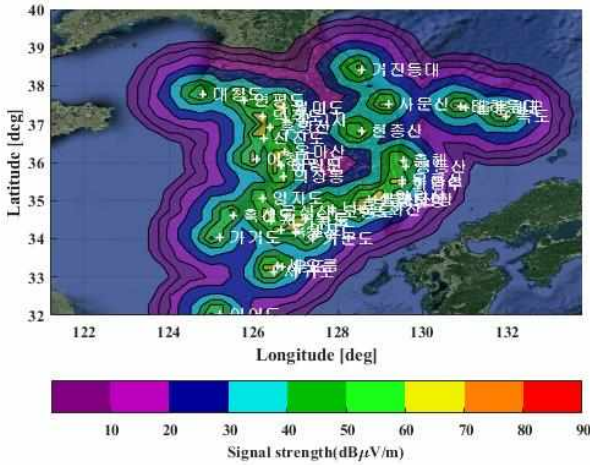


Fig. 5 Signal strength prediction results of AIS stations in South Korea

$$F_{a,95\%} = F_{am} + D_u \cdot \text{norminv}(95/100,0,1)/\text{norminv}(90/100,0,1) \quad (3)$$

$F_{a,95\%}$ 를 이용하면 식 (4)를 통해 우리가 알고자하는 대기 잡음, 즉 Envelop noise voltage를 계산할 수 있다 (CCIR, 1963).

$$E_n [\text{dB} (\mu\text{V}/\text{m})] = F_{a,95\%} + 20\log_{10}f_{\text{MHz}} + 10\log_{10}b - 95.5 \quad (4)$$

위의 식 (4)를 통해 eLoran의 대기잡음에 대해 계산할 수 있고 위의 eLoran 신호세기에 대기잡음을 반영해 얻은 신호대 잡음비는 Fig. 6과 같다.

MF-DGNSS에서 사용하는 약 300 kHz의 무선 전파 또한 eLoran과 마찬가지로 대기잡음에 의한 영향을 크게 받는다. CCIR Report 322-2를 이용해 eLoran의 대기잡음을 계산하는 것과 유사한 방식으로, 그리고 ITU-R P.372-13에서 제공하는 각 주파수 별 대기잡음의 수준 차이를 반영해 MF-DGNSS의 송신국별 주파수에 따른 대기잡음을 계산하였다. 그 결과 국내 해양기준국 11개소의 신호대 잡음비는 Fig. 7와 같다.

한편 국립해양측위정보원에서는 해양기준국 11개소, 내륙 기준국 6개소를 운영하고 있으며 이를 총 17개의 감시국에서 상시 감시 중이다. 이렇게 취득한 감시 데이터를 종합해 DGNSS 연간운영보고서를 발간한다. 본 연구에서는 각 감시

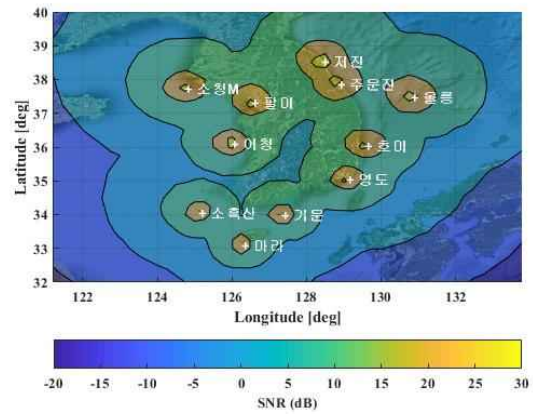


Fig. 6 The SNR of the MF-DGNSS signal based on the noise prediction model

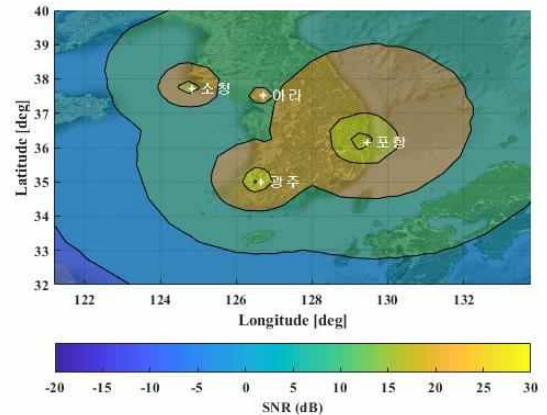


Fig. 7 The SNR of the eLoran signal based on the noise prediction model

국에서 2017년에 실측 및 취득한 데이터를 활용해 ITU 데이터를 기반으로 한 예측값의 신뢰성을 판단하는데 사용하였다.

Table 1은 2017년 DGNSS 연간운영보고서의 연평균 신호대 잡음비 데이터와 ITU 데이터를 기반으로 하는 예측값을 비교한 결과이다. 일반적으로 연평균 데이터는 95%의 확률로 잡음을 추정된 것보다 더 좋은 값을 가짐을 확인할 수 있다. 일부 송신국의 신호대 잡음비 값이 예측값보다 떨어지는 것은

Table 1 Comparison of the annual average SNR data received from the MF-DGNSS reference station in 2017 and the predicted SNR at the 95 % noise level

Reference station	SOCH	PALM	EOCH	GAGE	GEOM	MARA	YNDO	HOMI	ULLE	JUMN	JEOJ
Monitoring station	MLDO	ANHN	HGDO	DANG	SEOI	GASA	SORI	JUKB	DOKD	SOKC	SOKC
Annual SNR in 2017 (dB)	21.8	17.53	10.66	12.83	20.76	15.81	11.58	20.67	14.07	23.74	18.3
Predicted SNR at 95% level (dB)	1.8	15.3	4.6	6.2	7.1	5.5	6.8	13.5	16.11	22.8	25.3

신호세기 자체의 문제, 전파 경로상의 지형 문제 등이 예상되며 실제 운영 현황에 대한 정보가 주어진다면 더욱 정밀한 잡음 예측이 가능해질 것으로 기대된다. 본 시뮬레이션에서는 95% 수준의 잡음과 동시에 Table 1에서의 연평균 잡음값을 동시에 활용해, 95% 수준의 정확도 및 연평균 정확도를 모두 예측하였다.

3.4 HDOP 계산과 측위정확도 예측

각 신호 소스의 송신국 선택이 완료되고 신호대 잡음비를 예측하고 나면, 송신국의 기하학적 배치와 신호대 잡음비의 문턱값으로 인해 결정되는 Horizontal Dilution of Precision (HDOP)와 신호대 잡음비를 통해 계산되는 오차분산을 이용해 측위 정확도를 예측할 수 있다. HDOP는 송신국과 수신기의 기하학적 위치에 의해 결정되며 수평위치 정확도를 결정짓는 중요한 요소이다.

수신기의 위치에서 각 송신국간의 방위각을 θ_i 라고 하면, 기하행렬 G 는 식 (5)와 같이 구성된다.

$$G = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \theta_i & \sin \theta_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \theta_N & \sin \theta_N & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

HDOP는 기하행렬 G 를 이용해 식 (6)와 같이 구할 수 있다.

$$H = (G^T G)^{-1}, \quad HDOP = \sqrt{H_{1,1} + H_{2,2}} \quad (6)$$

수신한 N 개 신호의 오차분산을 각각 σ_i 라고 하면, 각 신호의 오차분산은 예상 신호대 잡음비를 이용해 Cramer-Rao Lower Bound (CRLB) 추정식에 대입하여 구할 수 있다. (ACCSEAS Project, 2014c). 가중행렬 W 는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$W = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & & 0 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_i^2 & & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (5)와 식 (7)을 활용해 식 (8)과 같이 TOA 기반의 측위 오차의 공분산 행렬을 구할 수 있다.

$$H' = (G^T W^{-1} G)^{-1} \quad (8)$$

식 (8)에서 H' 의 대각 행렬 값을 이용해 식 (9)와 같이 측위 정확도를 계산할 수 있다.

$$\sigma_{95\%} = 2 \sqrt{H'_{1,1} + H'_{2,2}} \quad (9)$$

4. 해양지역에서의 시나리오별 지상과 통합항법 시스템의 성능예측

본 절에서는 앞에서 개발한 성능예측 시뮬레이션 툴을 통해 예측한 HDOP, 정확도 커버리지 등을 분석하기 위한 효과적인 시나리오를 설정하고, 해당 시나리오 별로 예측된 성능을 국제해사기구의 해양사용자 요구기준대비 분석한 후 그 결과를 정리한다.

4.1 시나리오 I (eLoran 단독)

본 시뮬레이션 툴에서는 eLoran 신호의 신호대 잡음비가 7 dB 이상인 경우에만 측위가 가능한 것으로 설정했다. 소정도 eLoran 송신국 신호세기는 각각 50 kW, 150 kW인 광주 및 포항 송신국에 비해 매우 약한 1 kW로, 측위를 위한 유효도 달거리가 짧아 20 m 커버리지가 서해 일부지역에서만 형성되는 것을 Fig. 8에서 확인할 수 있다.

4.2 시나리오 II (eLoran + MF-DGNSS)

eLoran 시스템 만으로 커버되지 않는 서남해, 남해, 동해 등을 커버하기 위해 MF-DGNSS 신호를 항법신호로 활용하게 되면 다음 Fig. 9과 같이 예상 측위정확도가 향상됨을 확인할 수 있다. MF-DGNSS 또한 신호대 잡음비가 7 dB 이상 수신된 경우에만 사용할 수 있도록 설정되었고, eLoran 만을 사용했을 때 커버리지 안에 포함되지 않았던 영역의 대다수가 포함되었다.

하지만 여전히 국제해사기구의 사용자 요구성능인 10 m 이내에 많은 지역이 포함되지 않는 것으로 보인다. 만약 대기 잡음의 연평균 데이터를 활용해 측위 성능을 예측한다면 Fig. 10과 같이 10 m 측위 성능에 대한 커버리지가 확대되는 것을 확인할 수 있다.

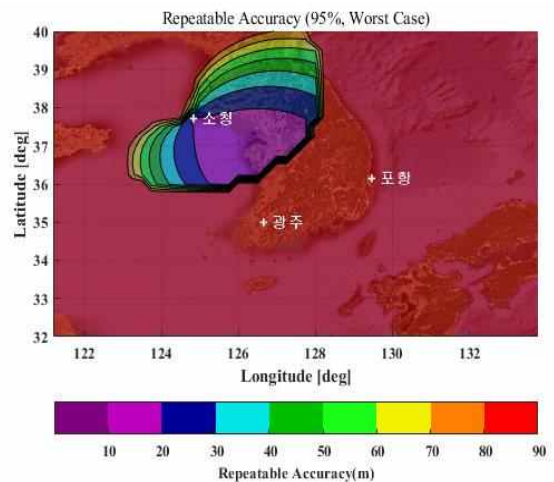


Fig. 8 Predicted repeatable accuracy in case of using eLoran signal only

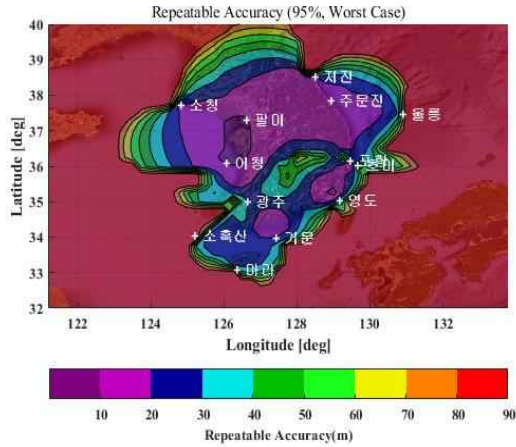


Fig. 9 Predicted repeatable accuracy in case of using eLoran + MF-DGNSS signal(95% noise level)

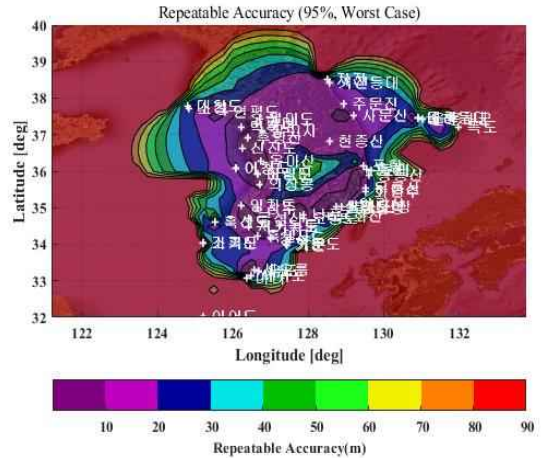


Fig. 11 Predicted repeatable accuracy in case of using eLoran + MF-DGNSS + AIS signal

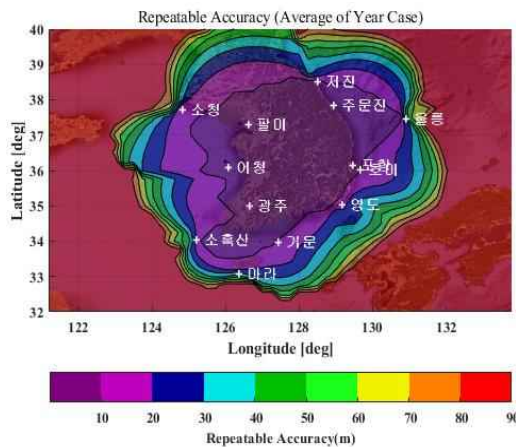


Fig. 10 Predicted repeatable accuracy in case of using eLoran + MF-DGNSS signal(with measured annual SNR)

4.3 시나리오 III (eLoran + MF-DGNSS + AIS)

잡음모델을 연평균 실측 데이터를 기반으로 했을 때 부산 근처의 일부 해안을 제외하고는 10 m 측위 성능이 제공될 것으로 예상되지만, MF-DGNSS의 경우 skywave 영향으로 밤 시간에는 성능이 크게 저하될 것으로 예상된다. 본 시뮬레이션 틀에서는 skywave의 영향에 대한 연구가 진행되지 않아 반영하지 못했지만, 밤 시간동안의 측위성능은 Fig. 9와 비슷한 수준으로 추정된다. 이런 점을 극복하기 위해 AIS의 신호를 통합항법에 활용할 수 있고, 그 예상 정확도는 Fig. 11과 같다.

5. 결 론

본 논문에서는 GNSS의 백업시스템으로 사용될 수 있는 지상과 통합항법 서비스의 성능을 예측하는 시뮬레이션 틀을 제작하였다. 현재 시범서비스를 준비 중인 eLoran 시스템을 중심으로, MF-DGNSS, AIS 시스템을 항법기능이 가능하도록 개량한 시스템을 통합해 사용하는 것을 계획하고 있다. 본 논문에서 개발한 시뮬레이션 틀은 기존에 가장 많이 쓰이는 추정방법을 활용하면서도 수집한 실제 자료를 적용함으로써 보다 신뢰할 수 있는 결과를 보여준다는 장점이 있다. 지상과 통합항법시스템의 사용 여부를 각 시나리오 별로 구분해 그 성능을 예측함으로써, 요구조건에 맞는 시스템 구축을 위해 필요한 것을 미리 준비할 수 있다는 점에서 추후 연구 방향이나 인프라 구축에 관한 정책 결정에 있어서 유용한 자료가 될 것으로 기대한다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양 정밀 임무수행용 GNSS/INS/eLoran 복합항법 기반기술 개발”에 의해 수행되었습니다(PES3110).

References

[1] ACCSEAS Project(2014a), Feasibility Study of R-Mode combining MF DGNSS, AIS, and eLoran Transmissions.
 [2] ACCSEAS Project(2014b), Feasibility Study of R-Mode using AIS Transmissions.
 [3] ACCSEAS Project(2014c), Feasibility Study of R-Mode

using MF DGPS Transmissions.

- [4] CCIR(1963), WORLD DISTRIBUTION AND CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC RADIO NOISE, Report 322.
- [5] Grant, A., Williams, P., Ward, N. and Basker, S.(2009), “GPS jamming and the impact on maritime navigation,” *Journal of Navigation*, Vol. 62, No. 2, pp. 173-187.
- [6] Int. Loran Assoc.(2007), Enhanced Loran (eLoran) Definition Document, Version 1.0
- [7] Lee, B.(2007), “Atmospheric Noise Mitigation for Loran,” Stanford University, Ph.D. dissertation.
- [8] Offermans, G., Johannessen, E., Bartlett, S., Schue, C., Grebnev, A., Bransby, M., Williams, P. and Hargreaves, C.(2015), “eLoran Initial Operational Capability in the United Kingdom . First Results,” in *Proc ION ITM*, Dana Point, CA, USA, pp. 27-39.
- [9] RTCM SC 127(2016), MINIMUM PERFORMANCE STANDARDS FOR MARINE eLORAN RECEIVING EQUIPMENT.
- [10] Son, P. W., Park, S. H., Seo, K., Han, Y. and Seo, J.(2018a) “Development of the Korean eLoran testbed and analysis of its expected positioning accuracy,” in *Proc IALA Conference*, Incheon, Korea.
- [11] Son, P. W., Rhee, J. H. and Seo, J.(2018b) “Novel Multichain-Based Loran Positioning Algorithm for Resilient Navigation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 54, No. 2, pp. 666-679.
- [12] Son, P. W., Rhee, J. H., Hwang J. and Seo, J.(2019), “Universal Kriging for Loran ASF Map Generation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 55, No. 4, pp. 1828-1842.
- [13] Zheng, K., Hu, Q. and Zhang, J.(2016) “Positioning Error Analysis of Ranging-Mode Using AIS Signals in China,” *Journal of Sensors*, vol. 2016, Article ID 6928961, p. 11.

Received 6 August 2019

Revised 21 October 2019

Accepted 6 November 2019