

# 해사업무용 비동기식 R-mode를 위한 AIS-TWR 성능 평가

† 심우성 · 이상정\*

† 선박해양플랜트연구소 책임연구원, \*충남대학교 전자공학과 교수

## Evaluation of AIS-TWR for Maritime Asynchronous R-mode

† Woo-Seong Shim · Sang-Jeong Lee\*

† Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering, Daejeon, Republic of Korea

\*Chung-Nam National University, Daejeon, Republic of Korea

**요 약** : 국제해사기구의 e-Navigation 전략에 포함된 PNT서비스의 신뢰성 향상을 위해 GNSS 부재 시에도 활용 가능한 해사업무용 비동기식 R-mode인 AIS-TWR 기법을 제안하고 성능을 평가하였다. 기존 정밀 동기에 기반을 둔 동기식 측위 기법과 달리 동기가 되어 있지 않은 경우에도 메시지 교환을 통해 거리 측정이 가능하도록 AIS시스템 사양에 따른 동작 시나리오 제안 및 오차 요인을 분석하고 관련 식과 알고리즘을 도출하였다. 제안 기법의 성능 평가를 위해 추정 가능 한계를 나타내는 크래머-라오 하한을 제시하였으며 3km의 정적 환경에 놓인 두 AIS 시스템을 대상으로 AIS-TWR 기법에 의한 시뮬레이션 결과 참 값 대비 약 41m의 추정 오차를 보였다.

**핵심용어** : 신뢰 가능한 PNT, 선박자동인식시스템, 양방향 측위, e-Navigation, 크래머-라오 하한

**Abstract** : To enhance the reliability and/or resilience of the PNT service included in the e-Navigation strategy of the IMO, the evaluation of the AIS-TWR method for the asynchronous R-mode for maritime service, which is available even in the absence of the GNSS, is described. For the AIS-TWR, which is capable of ranging through message exchange even without high precision synchronization, the operation scenario and the error factors according to the AIS system specifications are proposed and analyzed. Cramer-Rao Lower Bound is presented for the performance evaluation of the AIS-TWR algorithm. A simulation by AIS-TWR method of two AIS systems in a 3 km static environment shows estimation error of about 41m compared to the real value.

**Key words** : Resilient PNT, AIS, Two-way Ranging, e-Navigation, CRLB

### 1. 서 론

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 지난 2006년부터 논의를 시작하여 선박의 안전한 통항, 해양 환경 보호 등을 목표로 규제와 시스템 도입을 골자로 하는 현행 방식의 안전 확보 체계를 지양하고 항해 및 통신 기술의 현대화, 인간공학적인 장비 및 시스템 설계 방식 도입, 신뢰 가능한 PNT 서비스 도입을 주요 내용으로 하는 e-Navigation 전략 이행 계획을 2014년 최종 승인하였다.(IMO, 2014)

현재 운용 중인 GPS(Global Positioning System)와 같은 위성항법 시스템에 의해 전 지구 어디에서나 해사 업무에 필요한 정확도와 가용성을 갖는 PNT정보를 획득할 수 있으나 지상에서의 낮은 수신 신호 세기, 고의적인 재밍 신호의 간섭 등 다양한 시스템 취약성으로 인해 지속가능하고 신뢰할 수

있는 신뢰도 확보에는 한계가 있다.

신뢰 가능한 또는 회복 가능한 PNT로 불리는 Resilient PNT는 GNSS(Global Navigation Satellite System)가 제공하는 PNT 정보의 취약성을 고려하여 GNSS 제공 정보가 사용 불가능한 경우에는 백업 시스템으로써의 기능, GNSS 제공 정보가 사용 가능한 경우에도 신뢰성 확보를 위한 잉여 정보로서의 기능을 수행하는 개념적 용어이다.

Resilient PNT를 구현하기 위한 시도는 GNSS정보에 Loran, 또는 eLoran 신호와 IMU(Inertial Measurement Unit) 정보를 융합하는 정보 융·복합 관점에서의 성능 개선 노력이 주류를 이루어 왔다. 최근에는 해상에서 사용 가능한 다양한 전파 신호를 사용자의 필요에 따라 사용하는 SooP(Signal of opportunity)개념을 적용하는 사용자 선택 신호 기반 측위 개념으로까지 발전하고 있다.(Johnson, G, et, al, 2014)

† Corresponding author : 일반회원, pianows@kriso.re.kr 042)866-3662

\*일반회원,

(주) 이 논문은 “해사업무용 AIS-기반 비동기식 R-mode 기법 평가”란 제목으로 “2017 공동학술대회 한국항해항만학회논문집(부산 벅스코, 2017.4.19-20, pp.58-59)”에 발표되었음.

지금까지 시도된 해양 분야 Resilient PNT를 위한 'R-mode' 구현 연구는 해상이동업무용 서비스 대역의 통신 업무용 전파를 활용하는 동기식이다. 한 예로, Johnson(2014)은 GNSS 오차 정보를 사용자에게 전달하기 위한 MF대역의 DGNSSS 기준국 서비스에 대해 3곳 이상의 기준국을 정밀 시각에 동기 시켜 이를 수신한 수신기가 삼각 측량으로 측위를 하는 방식을 연구하였다. 또한 육상에 기지국을 갖고 있는 VHF대역의 AIS 서비스에도 동일한 방식을 적용해 가능성 연구를 수행한 바 있다.

이러한 동기식 측위는 육상에 위치한 기준국 시스템이 UTC등의 정밀 시각에 동기를 유지하고 있어야 한다. 또한 기존 수신기의 하드웨어적, 소프트웨어적 수정이 필요하기 때문에 당장의 대안이 되기에는 상당한 시간이 소요될 것이므로 보다 현실적인 접근 방안 제시가 필요하다.

이러한 배경에서 본 논문에서는 해사업무에 활용 가능한 비동기식 R-mode를 위해 AIS를 기반으로 양방향 메시지 교환 측위 기법을 적용하는 AIS-TWR 기법을 제안하여 기본 성능에 대해 평가하였다.

2장에서는 TWR(Two-way ranging) 기법을 AIS에 적용하기 위한 동작 시나리오 및 고려해야 할 오차 요인 분석을 통해 활용 가능성을 검토한다. 3장에서는 AIS-TWR의 기본 성능 파악을 위해 기본 알고리즘 및 관계 식 등의 기본 설계를 제시하고 관련 식으로부터 추정 파라미터에 대한 크래머-라오 하한을 유도한다.(Mengali, 20013) 4장에서는 3장의 결과를 활용하여 AIS의 현재 사양에 기반을 둔 AIS-TWR 기법의 시뮬레이션 결과를 제시하고 5장에서 결론 및 향후 연구 방향을 제시하였다.

## 2. 동작 시나리오 및 오차 분석

### 2.1 AIS-TWR 동작 시나리오

양방향 메시지 교환에 의한 거리 측정 기법인 TWR은 JTIDS(Joint Tactical Information Distribution System)와 같은 상대항법 기법에서 사용하는 RTT 메시지를 이용한 두 시스템의 시각 동기를 기반으로 신호 지연 시간을 추정하는 방식과 두 시스템의 시각 동기가 없는 상황에서도 적용 가능한 방식을 고려할 수 있다. 시각 동기가 없는 경우에는 각 시스템의 자체 클럭에 따른 시스템 내부의 지연시간을 활용하여 두 시스템간의 신호 전파 지연시간을 계산할 수 있다. Fig.1에 따라 TWR에 의한 전파 지연 시간은 식 (1)과 같이 정리할 수 있다.

$$t_p = \frac{1}{2}(TR_i - TR_s) \tag{1}$$

여기서  $TR_i$ 는 TWR의 Interrogator(시스템 간 거리를 계산하는 측) 시스템이 계산 절차 동안 내부적으로 카운트 하는

시간이며,  $TR_s$ 는 TWR의 Reply 시스템이 메시지를 수신한 뒤, 회신까지의 시스템 내부 지연 시간이며 해상에서의 전파 송신 지연은 송수신 시스템 양방향으로 동일하다고 가정한다.

식 (1)은 TWR 계산식을 보인 것으로 여기에는 송신측 시스템의 신호 송신은 지정된 시점, 즉 AIS slot의 시작점에서 정확히 이루어지며 두 시스템의 내부 지연 및 클럭 오차 등은 동일하다는 가정이 있다. 즉, AIS에 TWR을 적용하는 과정에서 TDMA 슬롯과 전파 전송 시점의 불일치, 시스템 클럭 오차, 시스템 내부 신호처리 오차 등의 고려가 필요하다.

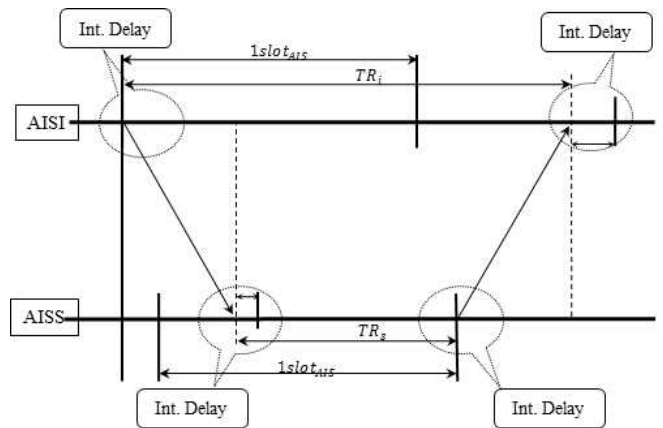


Fig. 1 AIS-TWR concept diagram

AIS-TWR은 다음의 순서로 동작한다. Fig. 1에서 AISI 시스템은 지정된 슬롯의 시작과 함께 메시지를 송신한다. AISS에 도착한 신호를 복조하는 동안 시스템 내부 지연이 발생하고 이후 AISS가 회신 메시지를 송신하기까지 대기 시간이 발생한다. 이후 신호의 변조를 통한 회신 메시지 송신 후, AISI 시스템의 신호 수신 및 식 (1)에 의한 두 시스템 간 신호 전파 지연 시간 추정이 이루어진다.

### 2.2 오차 요인 분석

AIS 시스템은 신호의 송신과 수신 시 신호처리 과정에서 지연 시간이 발생하는데 여기에는 전파 신호 송신을 위한 RF 송신 대기상태 수립 시간과 데이터의 변조 및 복조 등을 위한 신호처리 지연 시간이 포함된다. Han, et, al(2004)의 연구에 따르면 300μs이내에 12.5W의 출력에 도달할 수 있고, 상용 AIS 데이터 처리 칩셋 사양(C.M. Pic, 2016)에 따르면 데이터 변조/복조 시스템 신호처리에 의한 내부 지연은 약 800μs, 즉 AIS 1slot에 해당하는 256bit 중, 8bits에 해당한다.

Table 1 TOA calculation parameter(C. M. Pic, 2016)

AIS data field	bits	Ticks(24kHz)
Tx rise time	8	20
Preamble	24	60
Start flag	8	20
Internal delay	8	20
Total		120

데이터 신호 처리 이후에 가장 큰 오차 발생 요인은 회신 메시지의 전송까지 걸리는 시간이며 이는 AIS 타임 슬롯에 맞추어야 하는 AIS-TWR의 경우 큰 오차 요인이 된다. 일반적인 TWR 문제에서 전송 대기로 인한 지연 시간은 짧아야 하며 길수록 자체 클럭 오차 누적으로 인해 전체 지연시간의 측정 오차가 증가하기 때문이다.(Baba, 2011) 시스템 클럭 오차로 인한 시간 오차는 클럭 표류 오차(drft), 노화 오차(aging) 및 안정도를 포함한 식 (2)와 같다.(Chu, 2012)

$$t_{err}(t) = t_{err}(0) + drift * t + \frac{1}{2} aging * t^2 + \int_0^t \sigma_y(t) dt \quad (2)$$

이 외에도 시스템 클럭 해상도에 의한 지연 시간 오차도 고려해야 한다. 이는 신호의 실제 수신 시각 대비 샘플링을 위한 디지털 클럭의 해상도에 의한 인지 시각의 차이를 말하며 이로 인한 오차도 추정 식에 반영한다.(Wang, et. al, 2010)

### 3. 기법 알고리즘 및 크래머-라오 하한

#### 3.1 AIS-TWR 알고리즘

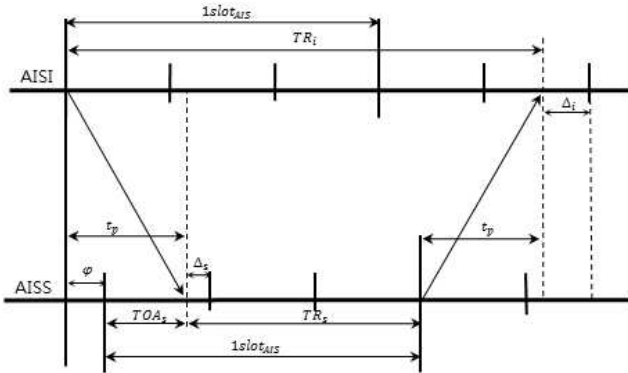


Fig. 2 Timing diagram of AIS-TWR

Fig. 2에서 AISI 시스템의 신호 전송 후, AISS 시스템에 신호 도착 시각 대비 클럭 해상도에 의한 오차를  $\Delta_s$ 로 나타내었고 같은 AISI의 오차를  $\Delta_i$ 로 표현하며 모두 정규분포를 갖는 랜덤 변수로 가정한다. Fig. 2에서 두 시스템의 슬롯이 서로 일치하지 않는 것으로 표현되었는데 AIS-TWR은 두 시스템의 동기가 맞지 않는 경우에도 동작 가능해야 하기 때문이다.

Fig. 2에 나타난 두 시스템 간 신호 지연 시간의 추정 식은 다음과 같다.(Wang, et, al, 2010)

$$\hat{t}_p = t_p + \frac{\Delta_i T_i + \Delta_s T_s}{2} \quad (3)$$

앞서 오차 요인 분석에서 언급한 시스템 클럭 오차 반영을

위해 식 (1)을 (3)의  $t_p$ 에 대입하고 식 (2)의 클럭 오차를 각 시스템별로  $\epsilon_i$ 와  $\epsilon_s$ 로 나타내어 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\hat{t}_p = t_p + \frac{1}{2} \left\{ TR_i \epsilon_i - TR_s \epsilon_s + \Delta_i T_i (1 + \epsilon_i) \right\} + \Delta_s T_s (1 + \epsilon_s) \quad (4)$$

#### 3.2 AIS-TWR 크래머-라오 하한

GNSS 등의 정밀 시각 동기를 획득하지 못한 상황에서도 AIS 메시지 교환만으로 거리 정보를 얻기 위한 AIS-TWR의 시스템 간 전파 전송 지연 시간 추정 성능 평가를 위해 크래머-라오 하한을 유도한다. CRLB는 unbiased estimator인 경우, 추정하고자 하는 파라미터를 조건으로 관측 값들의 조건부 확률밀도함수를 바탕으로 Fisher정보 함수를 구하고 아래 식 (5)에 대입하여 구할 수 있다.

$$Var(\hat{t}_p - t_p) \geq CRLB(t_p) = - \frac{1}{E \left\{ \frac{\partial^2 \ln \Lambda(\Theta | t_p)}{\partial^2 t_p} \right\}} \quad (5)$$

먼저 AIS-TWR의 구하고자 하는 파라미터인 신호 지연 시간을 위한 확률밀도함수를 구하기 위해 식 (1)을 (3)에 대입하고 식 (6)과 (7)로 분리한다.

$$\hat{t}_p = \widehat{TR}_i + \Delta_i T_i \quad (6)$$

$$\hat{t}_p = -\widehat{TR}_s + \Delta_s T_s \quad (7)$$

앞서 랜덤 변수로 가정한  $\Delta_i$ 와  $\Delta_s$ 를 이용하여 정규분포 PDF식을 이용한  $\hat{t}_p$  추정 likelihood 함수를 다음과 같이 유도한다.

$$\Lambda(\hat{t}_p, \mu, \sigma^2) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \right)^N \cdot \exp \left\{ - \frac{1}{2\sigma^2} \left[ \sum_{k=1}^N \left( \frac{\hat{t}_p - \widehat{TR}_i}{T_i} - \mu \right)^2 + \sum_{k=1}^N \left( \frac{\hat{t}_p + \widehat{TR}_s}{T_s} - \mu \right)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

여기서  $\Delta_i$ 와  $\Delta_s$ 는 동일한 평균과 분산  $\mu, \sigma^2$ 를 갖는 것으로 가정하며 N은 반복된 메시지 교환에 따른 누적 계산 회수이다.

식 (5)에 식 (8)을 대입하여 정리하면 다음의 식 (9)를 얻을 수 있으며 식 (4)에서 고려한 클럭 오차를 추가하여 정리하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$CRLB(t_p) = \frac{T_s^2 T_i^2 \sigma^2}{(T_s^2 + T_i^2) N} \quad (9)$$

$$CRLB(t_p) = \frac{T_s^2 T_i^2 (1 + \epsilon_i)^2 (1 + \epsilon_s)^2 \sigma^2}{\{T_s^2 (1 + \epsilon_s)^2 + T_i^2 (1 + \epsilon_i)^2\} N} \quad (10)$$

식 (9) 또는 (10)은 AIS-TWR을 수행하는 두 시스템의 클럭 오차 및 클럭 해상도 오차를 반영한 CRLB이며 식 (1)의 성립에 필요한 가정 중 실제 고려가 필요한 수신 시스템의 신호 추적 및 데이터 검출 필터의 추정 성능 반응을 위한  $var_{prop}$ 를 구한다. 이를 위해 AIS가 사용하는 GMSK 모듈레이션과 동일한 성능을 갖는 CPM 모듈레이션에 대한 modified CRLB 유도 식을 활용하였다.(Mengali, 2013)

$$MCRB(\tau) = \frac{T^2}{8\pi^2 L_0 \xi \left(\frac{E_s}{N_0}\right)} \quad (11)$$

여기서  $\tau$ 는 신호 추적 필터가 추정하는 두 시스템 간 신호 전송 지연 시간,  $T$ 는 샘플링 주기,  $L_0$ 는 관측하는 총 비트수,  $E_s$ 는 데이터 심벌 당 에너지,  $N_0$ 는 잡음 레벨을 의미한다.

또한 상수  $\xi \cong C_2 h^2 T \int_{-\infty}^{+\infty} g^2(t) dt$ 로 정의되며  $C_2$ 는 AIS의 데이터 심벌이 갖는 값으로 결정되는 상수이고  $h$ 는 modulation index,  $g(t)$ 는 변조기 주파수 응답으로 결정된다.

AIS-TWR은 시스템 클럭 오차 요인을 감안한 추정 성능  $var_{clk}$ 와 두 시스템 간 신호 추적 및 데이터 검출 필터의 추정 성능인  $var_{prop}$  요소는 상호 독립적이므로 AIS-TWR을 위한 신호 지연 시간의 총 추정 하한은 식 (13)로 정의할 수 있다.(Wen, Chen, Sethares, 2008)

$$Var(\hat{t}_p) = \frac{1}{N} (2var_{prop} + var_{clk}) \quad (13)$$

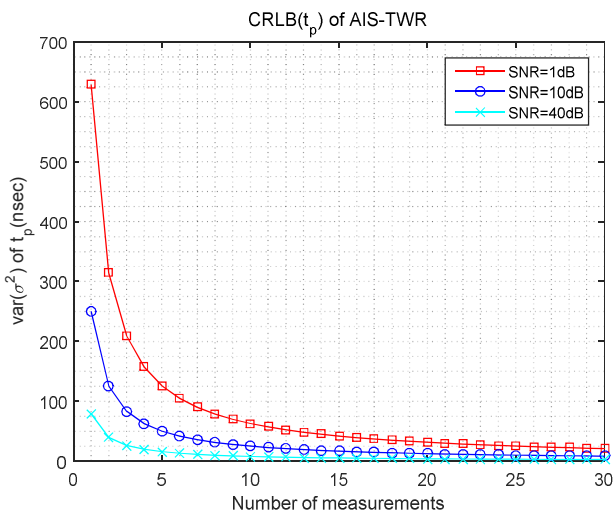


Fig. 3 CRLB of propagation delay estimation(var.)

식 (13)을 활용하여 오차 저감을 위한 반복 계산 회수 및 수신 신호의 SNR에 따른 신호 전송 지연 시간 추정 하한(분

산)을 구한 것이 Fig. 3이며 이를 거리(표준편차)로 환산하여 나타낸 것이 Fig. 4이다.

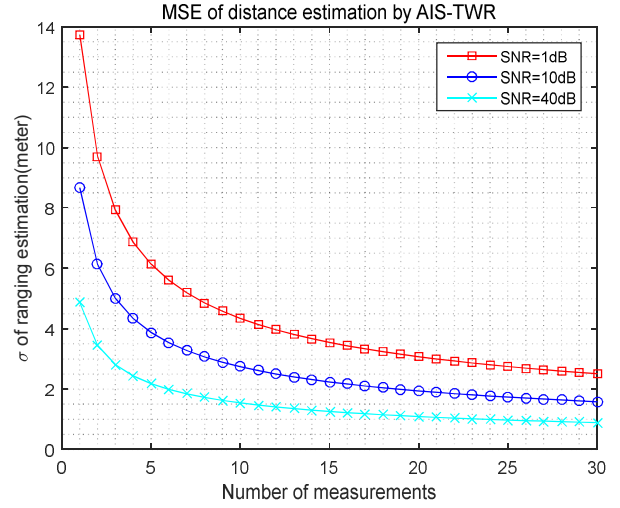


Fig. 4 CRLB of ranging estimation(std. deviation)

### 3.3 메시지 추가 정의 및 기타 설계 고려사항

TWR 기법은 두 시스템이 각 시스템 자체 클럭에 의해 측정된 시각을 공유하여 시스템 간 신호 전송 지연 시간을 측정해야 하므로 AIS-TWR에서도 전송 메시지에 회신하는 시스템의 지연 시간과 클럭 오차 정보를 전송해야 한다.

일반적인 TWR 기법의 오차는 반복적인 메시지 수신에 의한 누적 계산으로 저감해야 한다. 누적 계산을 위한 반복적 메시지 송수신은 점유 슬롯을 늘려 채널 로드가 증가된다. 즉, 최대한 작은 반복 계산 회수 내에서 필요한 오차 한계를 얻을 수 있어야 한다.

## 4. 시뮬레이션 및 평가

AIS-TWR 기법은 동적 특성이 높지 않은 해상 환경을 감안하여 일정한 거리에 정지한 두 AIS 시스템에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 2.2절에서 분석한 오차 요인들을 반영하기 위해 Fig. 2의 AISI와 AISS 시스템 각각 2차례의 신호 처리로 인한 시스템 내부 지연이 있는 것으로 가정한다. 단, 신호 처리의 대부분이 고정된 논리 회로에 따라 일정하게 수행되는 점과 경험적 지식을 바탕으로 지연 시간의 가변적인 부분은 총 지연 시간의 2%만 랜덤 변수로 가정하였다. 또 다른 오차 요인으로 2.1절에서 가정했던 AIS 슬롯 시작점과 전파 송신 시점이 일치하지 않는 synchronization jitter가 있는데 이를 감안하기 위해 AIS에서는  $\pm 3bits$ 를 할당하였고 이 오차 요인도 시뮬레이션에 반영하였다.

신호 전송 지연 시간 추정에 활용할 식은 식 (4)를 기반으

로 반복 계산하는 식 (14)를 활용한다. 또한 일반적인 TWR기법과 같이 두 AIS 시스템이 근접 한 상황, 즉,  $\hat{t}_p \approx 0$ 인 경우의 계산 값을 시스템 오차 오프셋으로 설정하여 반복 계산 시 보정 값으로 반영하였다.(Wang, 2010)

$$\hat{t}_p = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N \left\{ \begin{aligned} &TR_i^k(1 + \epsilon_i^k) - TR_s^k(1 + \epsilon_s^k) \\ &+ \Delta_i^k T_i(1 + \epsilon_i^k) + \Delta_s^k T_s(1 + \epsilon_s) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

식 (14)에서  $T_i, T_s$ 는 각각 AISI, AISS시스템의 샘플링 주 기(1/9,600bps),  $\epsilon_i, \epsilon_s$ 는 각 시스템의 클럭 오차,  $\Delta_i, \Delta_s$ 는 0 과 1사이의 값을 갖는 랜덤 변수이다.

두 AIS 시스템이 각각 AISI, AISS 역할로 3km 떨어져 있는 경우를 가정하고, 누적 반복 계산 70회까지 수행하였다.

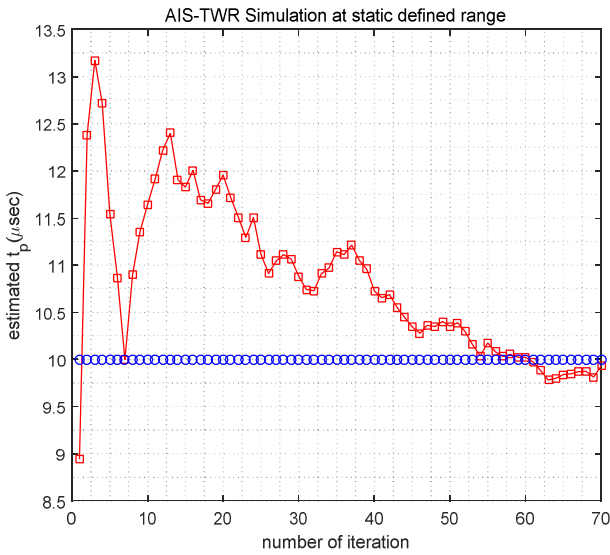


Fig. 5 Estimated propagation delay time vs iteration

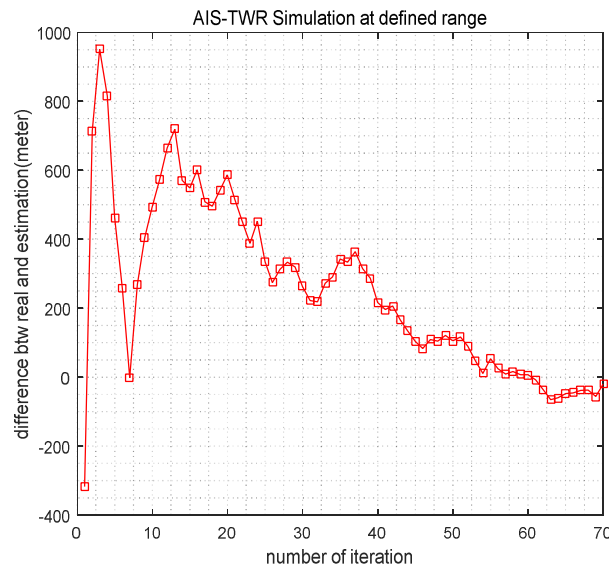


Fig. 6 Estimated distance vs iteration

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 추정된 지연 시간과 전파 속도를 기

준으로 변환한 거리 추정 값을 나타낸 것이다.

추정 식의 질적 평가를 위해 지연 시간의 Mean Square Error를 Fig. 7에, 거리에 대한 MSE를 Fig. 8에 나타내었다.

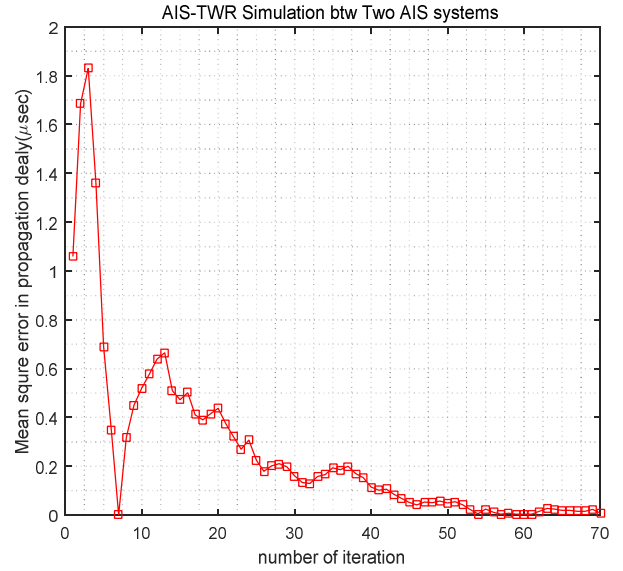


Fig. 7 MSE of estimation for propagation delay(μs)

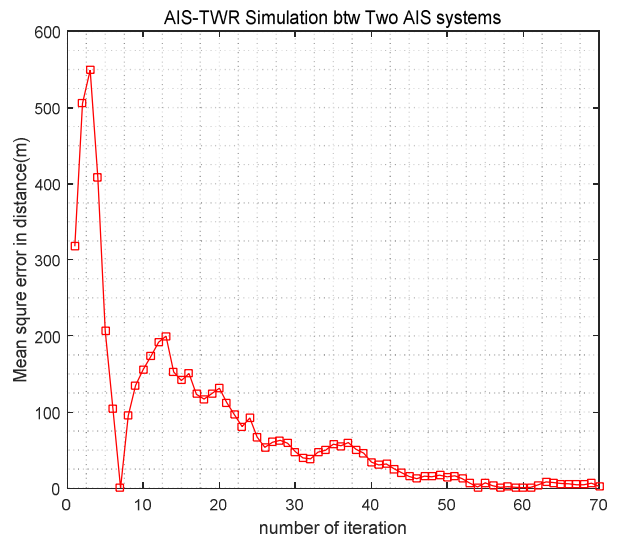


Fig. 8 MSE of estimated distance(m)

AIS-TWR은 현재의 AIS 사양을 그대로 활용한다는 가정을 갖고 있기 때문에 상당 수준의 반복 계산 이후에 일반적인 해상업무에 활용 가능한 수준의 오차 이내로 수렴함을 알 수 있다. 그러나 가변적인 변수 들이 시뮬레이션 내에 상당량이 포함되어 있기 때문에 점진적인 수렴 결과는 보여주지 못하고 있다. 시뮬레이션 계산 결과의 확률적 검증을 위해 반복 계산의 최종 결과가 아닌 각 계산 차수별 평균을 도출한다. Fig. 9는 AIS-TWR의 70회 반복 계산을 차수별로 5,000회 누적하여 각 계산 차수별 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

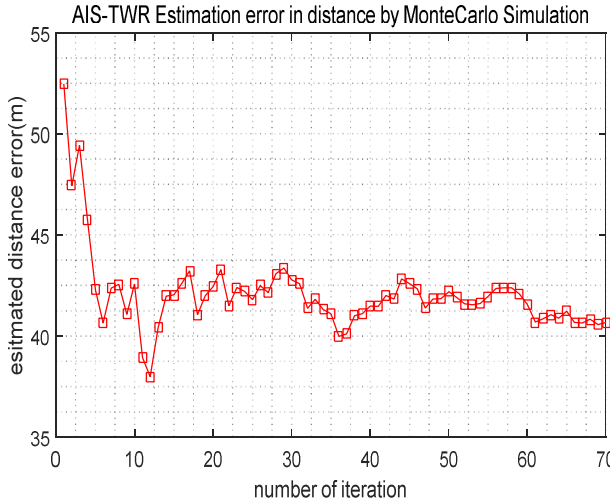


Fig. 9 AIS-TWR distance estimation(MonteCarlo)

### 5. 결론

신뢰 가능한 PNT서비스를 구현하기 위해 GNSS와 같은 위성항법시스템에의 의존도를 낮출 필요가 있다는 점과 전파 환경이나 해사 업무 상황에 따라 선택적 측위 신호 활용이 필요하다는 점, 특히 동기식 측위를 위한 육상 인프라에의 투자가 쉽지 않다는 현실적 대안 필요성 측면에서 AIS-TWR과 같은 비동기식 R-mode 기법을 제안하였다.

AIS시스템 내부의 신호처리 지연 오차, 클럭 기인 오차와 슬롯 길이, 지터 등의 TDMA사양으로 인한 다양한 오차 요인을 AIS 사양에 따라 분석하고 이를 반영하여 AIS-TWR 알고리즘에 따른 기초 시뮬레이션 결과를 보였다. 정확도 측면에서는 상당한 오류로 작용하는 상당한 길이의 AIS 슬롯 길이와 synchronization jitter 등의 큰 오차로 인해 수십 회 이상의 반복 계산 후에 의미 있는 계산 결과를 얻을 수 있었으며 확률적 검증을 위한 5,000회의 몬테카를로 시뮬레이션 결과 약 41m의 추정 오차를 보였다.

GNSS 또는 육상기지국의 정밀 동기에 의한 동기식 측위에 비해 상대적으로 낮은 정확도를 보였으나 GNSS가 부재하거나 동기신호를 확보할 수 없는 경우에 해상업무에 활용 가능한 가능성을 보였으며 향후 다양한 오차요인의 감소 방안을 접목하여 향상된 정확도 및 추정 성능을 보인다면 Resilient PNT의 한 대안으로 활용 가능할 것으로 기대한다.

### References

[1] Baba, A. I.(2011), "Calibrating time of flight in two way ranging", 7th international conference on mobile ad-hoc and sensor networks, pp.393-397.  
 [2] C. M. Pic.(2016), Data-sheet of Marine AIS data processor designed for limiter-discriminator based RF

systems.

[3] Chu, J.(2012), "Mixed One-way and Two-way Ranging to Support Terrestrial Alternative Position Navigation & Timing", 2012 ION GNSS.  
 [4] Han, J. R., Lee, J. H., Yeom, K. W.(2004), "The novel control circuit design and implementation for an AIS power amplifier module" Journal of KIEES, vol. 15, no. 3, pp. 251-257.  
 [5] IMO(2014), "Draft e-Navigation strategy implementation plan", NCSR Sum-committee 1/28 Annex 7.  
 [6] Johnson, G., Swaszek, P., Oltmann, J. H. and M. Hoppe(2014), "Feasibility Study of R-Mode using AIS Transmissions"  
 [7] Mengali, U.(2013), Synchronization techniques for digital receivers. Springer Science & Business Media.  
 [8] Wang, D., Kannan, R., Wei, L., and Tay, B.(2010), "Time of flight based two way ranging for real time locating systems," IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, pp. 199 - 205.  
 [9] Wen, C. Y., Chen, J. K. and Sethares, W. A.(2008), "Asynchronous two-way ranging using Tomlinson-Harashima precoding and UWB signaling," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2008, p. 26.

Received 07 December 2016  
 Revised 15 May 2017  
 Accepted 18 May 2017