

쌍곡선 주파수 변조신호 기반 매체접속지연에 자유로운 AUV 위치추정

김 성 렬*, 유 영 환^o

MAC Delay-Free AUV Localization Based on Hyperbolic Frequency Modulation Signal

Sungryul Kim*, Younghwan Yoo^o

요 약

수중위치추정에서 참조노드들의 전송사이에 발생하는 MAC(Medium Access Control) 지연은 수중 위치추정 성능열화의 요인이다. 특히, AUV(Autonomous Underwater Vehicle)와 같이 그 대상이 이동성을 가질 경우, MAC 지연은 측위를 위해 전송된 패킷의 수신시간 차이를 발생시키므로 측위 정확도를 현저하게 저하시킨다. MAC 지연의 영향을 분석하기 위해 본 논문은 시간측위 기반 위치추정 알고리즘의 크레머-라오 하한(Cramer-Rao low bound, CRLB) 정의한다. 또한 MAC 지연이 위치추정에 미치는 영향을 제거하기 위해 다중화 기술을 접목한 수중 위치추정을 제안한다. 다중화를 위해 높은 시간 상관성을 가지는 쌍곡선 주파수 변조(hyperbolic frequency modulation, HFM) 신호를 사용한다. 다중화를 통해 참조노드들은 MAC 지연 없이, 즉 동시전송이 가능해지며 결과적으로 MAC 지연이 위치추정에 미치는 영향을 제거한다. 모의실험 결과는 이동체 위치추정에서 제안 시스템이 MAC 지연 고려가 없는 기존 시스템에 비해 더욱 안정적이고 높은 추정성능을 제공함을 보인다.

Key Words : communication, signal processing, Neutral systems, Communication Sciences, Network

ABSTRACT

Medium Access Control(MAC) delay which occurred between the anchor node's transmissions is one of the error sources in underwater localization. In particular, in localization for moving platform, e.g., AUV(Autonomous Underwater Vehicle), the MAC delay significantly degrades the ranging accuracy because of the differ packet reception times. In this paper, to analyze the impact of MAC delay, we define the Cramer-Rao Low Bound (CRLB) for the ToA-based localization. Furthermore, we introduce underwater localization combined with multiple access technology to decouple the impact of MAC delay from the localization. Toward this goal, we adopt hyperbolic frequency modulation (HFM) signal which has high-temporal correlation characteristic. Owing to the multiplexing ability, the anchor nodes can transmit their packet without MAC delay, i.e., simultaneous transmission is possible, leading to the remove the impact of MAC delay. The simulation results show that the proposed system provides high and stable localization performance as compared with the existing system that ignores the impact of MAC delay.

* 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

• First Author : (ORCID:0000-0003-2752-3787)Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, xmfhxm12@pusan.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-2813-6116)Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, ymomo@pusan.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-12-382, Received December 13, 2017; Revised February 1, 2018; Accepted February 2, 2018

I. 서론

해양은 많은 난제들이 존재하는 통신영역이다. 하지만 천혜의 보고인 바다 속을 탐험하기 위해 수중통신 기술은 날로 발전하고 있다. 특히, AUV(Autonomous Underwater Vehicle)와 같은 수중 이동체는 유연한 네트워크 구축, 탐사범위의 확장등과 같은 장점으로 인해 수중통신응용에 다양하게 활용되고 있다. AUV는 지정된 임무를 수행하기 위해 스스로 바다 속을 탐험해야하므로 자신의 위치를 실시간으로 파악하는 것이 중요하다¹⁾. AUV는 기본적으로 관성장치를 통해 이용하여 자신의 궤적을 추적할 수 있으나 초기 위치 설정 및 누적오차 갱신을 위해 외부정보를 이용하여 자신의 위치를 파악해야 한다. 이로 인해 수중위치추정 기술은 AUV시스템 운용의 중요한 요소기술이지만 수중통신 채널의 가변성, 제한적인 네트워크 자원 등과 같은 난제로 인해 여전히 도전과제로 남아있다²⁻⁴⁾.

수중 위치추정에는 다양한 오차원이 있지만 본 연구에서는 기존연구에서 다루지 않았던 다중접속지연(Multiple Access Delay)으로 인한 위치추정 오차에 주목한다. 위치추정은 자신의 위치를 알고 있는 다수의 참조노드가 전송한 정보를 바탕으로 이루어진다. 이때 참조노드들은 패킷 충돌을 피하기 위해 매체접근제어(media access control, MAC) 프로토콜을 사용하게 되고 이는 참조노드 전송 간 시간차이, 즉 다중접속지연을 발생시킨다. 참조노드의 전송시간이 상이하더라도 수중에 배치된 추정대상의 위치가 고정되어 있다면 동일한 위치에서 모든 패킷을 수신하기 때문에 다중접속지연은 문제 되지 않는다. 그러나 AUV와 같이 이동성을 가진 노드의 위치를 추정할 경우, 패킷의 수신 위치는 매 수신마다 다르며, 결국 이전에 받은 패킷으로부터 유도된 측위의 정확도는 떨어지게 된다. 이러한 문제는 전송지연이 길어질수록, AUV의 속도가 빠를수록 더욱 심화된다. 이로 인해 다중접속지연이 위치추정에 미치는 영향은 해결해야 할 도전과제로 여러 연구들에서 언급되고 있으나 이에 대한 연구는 미미하다^{2,5,6)}.

본 논문에서는 참조노드의 동시전송을 보장하여 다중접속지연으로부터 위치추정정확도를 보호하는 수중 위치추정을 제안한다. 다중접속지연을 제거하기 위한 근본적인 해결방안은 모든 참조노드가 동시에 자신의 패킷을 AUV에게 전달하는 것이다. 여러 다중접속 기술 중, 본 논문은 주파수 분할 다중 접속기술 중 하나인 쌍곡선 주파수 변조신호(hyperbolic frequency modulation, HFM)를 활용한다. HFM신호는 하나의

심볼 주기(symbol duration) 동안 전송 주파수를 변화시키는 비선형 주파수 신호의 일종이다. HFM신호의 높은 시간상관성은 중첩된 다수의 신호를 분리하는, 즉 다중화(Multiplexing)를 지원한다^{7,8)}. 결국 제안 시스템은 HFM신호를 활용하여 참조노드 신호의 동시전송을 보장하므로써 MAC 지연으로 인한 이동체 위치추정의 성능열화를 개선한다.

본 논문의 기여는 크게 두 가지이다.

- 1) 대부분의 연구들에서 간과된 MAC 프로토콜의 영향 및 수중 이동체의 이동성이 위치추정에서 미치는 영향을 분석한다.
- 2) 다중접속기술을 접목한 이동체 위치추정 시스템을 소개한다. 측위의 정확도 향상에만 초점을 맞춘 기존 연구와 달리, 참조노드의 통신 방식까지 고려함으로써 통합적이고 실용적인 이동체 위치추정 시스템을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 다중접속 지연이 수중 이동체 위치추정에 미치는 영향을 파악한다. III장에서는 위치추정 알고리즘의 크레머-라오 하한(Cramer-Rao lower bound, CRLB)을 정의하여 다중접속지연으로 인한 위치추정 성능열화를 이론적으로 분석한다. IV장에서는 HFM신호 기반 다중화 방법을 설명하고 이를 위치추정에 적용하는 방안을 설명한다. V장에서 모의실험을 통해 제안방법의 성능을 평가하고 향후과제를 통해 본 논문을 마무리한다.

II. 문제정의

2.1 다중접속지연의 영향

다중접속지연을 다루기 이전, 측위를 위한 메시지 교환방식에 대해 살펴볼 필요가 있다. 메시지 교환 방식은 측위를 위해 패킷을 전송하는 주체에 따라 즉, 전송 주체가 참조노드인지 수중노드인지에 따라 구분된다.

그림 1은 참조노드 A_1 , A_2 , A_3 을 이용하여 목적노드 S 의 위치를 추정하는 모습을 나타낸다. 그림 (a)와 같이 목적노드가 패킷을 전송하는 경우, 이를 수신한 모든 참조노드는 위치추정을 수행할 대표 참조노드에게 수신정보를 전달한다. 예에서 A_2 가 대표노드로 선정되었다고 가정하면 A_1 과 A_3 은 자신의 수신정보를 A_2 에게 전달한다. 수집정보를 바탕으로 A_2 는 목적노드의 위치를 추정하고 이를 다시 수중에 배치된 목적노드에게 알린다. 이 방법은 수중의 목적노드가 전송을 시도할 때, 다른 노드와 채널점유를 위해 경쟁할 필요가 없으므로 다중접속지연이 발생하지 않는다. 그러나 이러한 방식은 대표 참조노드가 다른 참조노드들

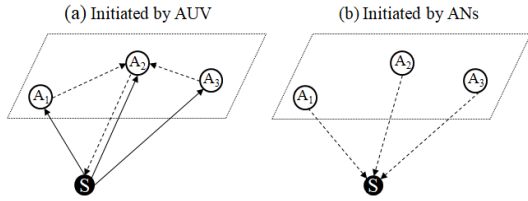
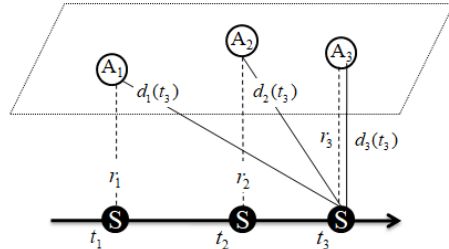


그림 1. 측위를 위한 패킷 전송 주체에 따른 통신방법.
Fig. 1. Transmission scheme for the ranging according to the transmission source.

로부터 수신정보를 획득하기 위해 추가적인 통신이 요구된다. 특히 다수의 목적노드가 자신의 위치추정을 위해 개별적인 패킷을 전송할 경우, 전체적인 주파수 효율이 급격하게 떨어진다. 반면 그림 (b)와 같이 참조노드가 측위를 위한 패킷을 전송하면 이를 수신한 모든 목적노드는 일괄적으로 자신의 위치를 추정할 수 있다. 또한 대표노드가 수신정보를 수집하는 추가적인 전송 단계가 생략된다.

위치추정에 참여하는 참조노드의 개수를 N_a , 위치추정을 수행하는 목적노드의 개수를 N_u 라 하면, 위치추정을 위해 수중에서 발생하는 통신횟수는 목적노드가 주체일 경우 $2N_u$, 참조노드가 주체일 경우 N_a 이다. 만약 목적노드가 전송주체인 경우, 위치를 추정하려는 목적노드의 수가 많을수록 위치추정을 위한 채널 점유하는 시간이 증가하게 되고 이는 가용 대역폭이 대단히 제한적인 수중통신에는 적합하지 않다. 따라서 수중 환경에서는 측위를 위해 참조노드가 전송하는 방식이 더욱 선호된다^[7]. 다만, 이러한 메시지 교환방식에서는 참조노드가 충돌회피를 위해 서로 다른 시간에 전송을 시도하게 되므로 전송지연이 불가피하다.

그림 2는 수중 이동체 S의 위치추정을 위해 참조노드들이 시분할 다원접속(time division multiple access, TDMA)을 상황을 나타낸다. 참조노드 A1, A2, A3은 자신에게 할당된 시간슬롯에서 차례대로 패킷을 전송한다. 이때 i 번째 참조노드가 전송한 패킷의 수신시간을 t_i , 이를 통해 추정된 거리를 r_i 로 표기하고 임의의 시간 t 에서 수중노드와 i 번째 참조노드 사이의 실제거리는 $D_i(t)$ 로 나타낸다. 수중 이동체는 위치추정을 위해 요구되는 최소의 참조노드로부터 패킷을 수신한 뒤, 이를 바탕으로 자신의 위치를 추정할 수 있다. 목적노드가 참조노드 t_3 시점에서 위치추정을 수행한다고 가정하면 위치추정에 사용될 추정거리벡터는 $[r(t_1) r(t_2) r(t_3)]$ 가 된다. 설명의 단순화를 위해 거리측정오차가 없다고 가정 할 경우, 마지막에 수신한



----- Measured distance,	$R = [r_1, r_2, r_3]$
— Actual distance,	$D(t_3) = [d_1(t_3), d_2(t_3), d_3(t_3)]$
Measurement error vector =	$[d_1(t_3) - r_1, d_2(t_3) - r_2, d_3(t_3) - r_3]$

그림 2. MAC 지연 및 수중노드의 이동에 따른 측위오차.
Fig. 2. The ranging error caused by the MAC delay and node's mobility.

패킷으로 유추된 거리 $r(t_3)$ 는 실제거리 $D(t_3)$ 와 동일하지만 나머지 두 측위 값, 즉 $r(t_1)$ 과 $r(t_2)$ 는 목적노드의 이동으로 인해 실제거리와의 차이를 가지게 된다 ($r(t_1) \neq D(t_1), r(t_2) \neq D(t_2)$). 예를 통해 거리측위의 오차가 없는 최적의 환경에서도 목적노드가 이동할 경우 전송지연에 의해 측위오차 및 위치추정 오차가 발생함을 알 수 있다.

2.2 높은 전송지연

비록 전송지연이 발생하더라도 그 크기가 작다면 이는 위치추정 성능열화에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 수중환경에서는 아래에 열거된 특성으로 인해 소량의 데이터를 보내는 데에도 상당히 긴 시간이 요구된다.

1) 낮은 전송률: 수중통신 시스템이 사용할 수 있는 가용 대역폭은 상당히 제한적이다. 더욱이 AUV에 설치된 음향모뎀은 도플러 효과에 매우 민감하기 때문에 직교주파수분할(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)과 같이 높은 전송률을 제공하는 변조기법을 사용하는 것이 쉽지 않다. 따라서 지상통신에 비해 높은 전송지연이 발생한다.

2) 느린 전파속도: 수중에서 음속은 압력, 온도, 염도에 따라 달라지지만 일반적으로 약 1500m/s로 간주된다. 일반적으로 수중통신에서의 통신거리는 수 km까지 고려하므로 느린 전파속도는 전송지연의 한 요인이다.

3) 프리앰블(preamble): 신호 감지 및 패킷 동기화를 위해 음향모뎀에서는 필수적으로 프리앰블을 전송한다. 여기서 주목할 사실은 수중통신에서 사용하는 프리앰블은 무시할 수 없을 만큼의 시간동안 지속된다는

것이다. [9]는 수중 통신에 널리 사용되는 ATM 시리즈 Teledyne Benthos Modem에서 프리앰블이 약 1.5 초 동안 지속됨을 지적하고 있으며, 이는 매체접근제어 프로토콜설계에서도 간과해선 안 될 요인임을 밝힌바 있다.

결론적으로 참조노드가 전송되는 패킷의 크기와 상관없이 다중접속지연에 의한 위치추정 성능열화는 불가피하다.

III. 크레머-라오 하한 기반 위치추정성능분석

위치추정 연구에서 크레머-라오 하한(Cramer-Rao low bound, CRLB)는 제안하는 위치추정 시스템의 성능을 평가하기 위해 사용되는 하나의 척도이다. 본 장에서는 위치추정기술에 대한 CRLB를 정의하여 MAC 지연 및 이동체의 속도가 위치추정 성능에 미치는 영향을 이론적으로 분석한다.

3.1 위치추정 기술

측위 방법 중 가장 대표적인 방식은 ToA (Time of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival), AoA (Angle of Arrival)이다^[10]. 그러나 특별한 하드웨어에 의존하지 않고 송수신 시간정보만을 이용하는 ToA나 TDoA가 가장 많이 사용된다. 사용하는 기술과 상관없이 MAC 지연은 모든 측위에서 오차를 발생시키므로 본 장에서는 가장 많이 사용되는 측위기술인 ToA를 사용하는 위치추정을 고려한다. 또한 참조노드는 TDMA를 기반으로 전송을 시도한다고 여긴다.

임의의 시간 t 에서 위치추정대상인 AUV의 위치를 $[x(t_N) y(t_N) z(t_N)]^T$ 라 표기하면 i 번째 참조노드와 목적노드 사이의 거리 $d_i(p(t))$ 는 식(1)과 같다.

$$d_i(p(t)) = \sqrt{(x(t) - x_i)^2 + (y(t) - y_i)^2 + (z(t) - z_i)^2} \quad (1)$$

식 (1)로 결정되는 두 노드사이의 거리측정을 위해 참조노드는 전송시간 및 자신의 위치를 포함하는 패킷을 AUV에게 전송하고 이를 수신한 AUV는 송수신시간차이를 이용하여 목적노드까지의 거리를 추정한다. 즉, 식(2)에 의해 거리측위가 수행된다.

$$r_i(t_i) = \frac{t_i^r - t_i^t}{c} \quad (2)$$

여기서 t_i^t 와 t_i^r 는 각각 송신과 수신시간을, c 는 수중에서의 음속을 나타낸다. 실제 환경에서 거리측정은 음속의 가변성, 음선(sound ray)의 굴절과 같이 예측 불가능한 변수로 인해 오차가 발생하게 되지만 MAC 지연문제의 명확성을 위해 본 장에서는 이를 무시한다.

참조노드가 N 개의 참조노드부터 패킷을 수신한 후 위치추정을 수행한다고 가정하면, 위치추정이 수행되는 시간은 t_N , 그때 측정된 거리는 $\mathbf{R}=[r_1(t_1) r_2(t_2) \dots r_N(t_N)]^T$ 이 되고 찾고자 하는 최종 위치는 $[x(t_N) y(t_N) z(t_N)]^T$ 이다. 따라서 목적노드는 거리측위를 바탕으로 아래와 같은 식을 세울 수 있다.

$$\mathbf{R} = \mathbf{D}(\mathbf{p}(t_N))^T \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{D}(\mathbf{p}(t_N))^T$ 은 식(4)와 같다.

$$\mathbf{D}(\mathbf{p}(t_N)) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x(t_N) - x_1)^2 + (y(t_N) - y_1)^2 + (z(t_N) - z_1)^2}, \\ \sqrt{(x(t_N) - x_2)^2 + (y(t_N) - y_2)^2 + (z(t_N) - z_2)^2}, \\ \dots \\ \sqrt{(x(t_N) - x_N)^2 + (y(t_N) - y_N)^2 + (z(t_N) - z_N)^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(3)에서 측정된 거리 벡터 \mathbf{R} 과 실제 거리벡터 \mathbf{D} 간의 차의 합을 최소로 하는 한 점이 수중노드의 추정 위치가 된다. 실제 환경에서는 측위에 오차를 포함하고 있으므로 위 방정식의 해를 찾는 문제는 오차를 포함하는 관찰모델에서 최적의 해를 찾는 비선형 최소자승 방법으로 해결 가능하며, 본 논문에서는 이를 위해 가장 널리 쓰이는 방법 중 하나인 Gauss-Newton 알고리즘을 이용하여 AUV의 위치를 결정한다.

3.2 크레머-라오 하한

CRLB는 관측모델에 포함된 추정 파라미터에 대한 총 정보량을 의미하는 피셔 정보 행렬(fisher information matrix, FIM)의 역행렬로 정의된다^[11]. 추정 파라미터가 $[x(t_N) y(t_N) z(t_N)]^T$ 와 같이 벡터일 경우 FIM은 식(5)와 같이 행렬의 형태로 나타낸다.

$$\mathbf{I}(\mathbf{p}) = \left[\frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{p}(t_N))}{\partial \mathbf{p}} \right]^T \mathbf{C}^{-1} \left[\frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{p}(t_N))}{\partial \mathbf{p}} \right] \quad (5)$$

여기서 \mathbf{C} 는 가우시안 분포를 따르고 서로 비상관인

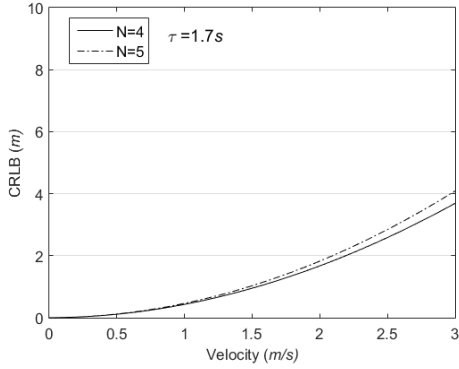


그림 3. AUV의 움직임에 따른 CRLB(네트워크 크기: 300m, MAC 지연:1.7초)

Fig. 3. The ranging error caused by the MAC delay and node's mobility(network size: 300m, MAC delay: 1.7s)

거리측정 오차의 분산을 포함하는 대각행렬로 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{C} = \text{diag}[\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_N^2] \quad (6)$$

거리측정 오차는 위치추정을 수행하는 시점 t_c 에서의 참조노드와 목적노드 사이 간 실제거리와 측위벡터의 차분이므로 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{D}(\mathbf{p}(t_N))^T - \mathbf{R}^T = [e_1, e_2, \dots, e_N] \quad (7)$$

AUV의 속도와 MAC 지연에 따른 측정오차벡터 \mathbf{E} 를 파악하기 위해 시간 t 에서 x, y, z 축에 대한 AUV의 속도를 $\mathbf{V}(t) = [v_x(t), v_y(t), v_z(t)]$ 로, i 번째 참조노드와 $i+1$ 번째 참조노드의 전송사이에 발생하는 MAC 지연을 τ_i 라 하면 i 번째 패킷의 수신위치는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} x(t_i) &= x(t_1) + \int_{t_1}^{t_N} v_x(t) dt, \\ y(t_i) &= y(t_1) + \int_{t_1}^{t_N} v_y(t) dt, \\ z(t_i) &= z(t_1) + \int_{t_1}^{t_N} v_z(t) dt, \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 패킷 수신시간 t_i 은 식 아래와 같이 정의된다.

$$t_i = t_1 + \sum_{j=2}^{i-1} \tau_j, i \in \{2, 3, \dots, N\} \quad (9)$$

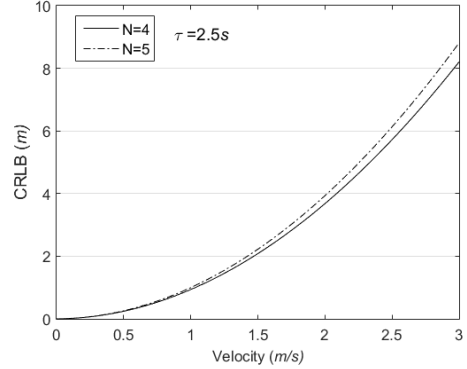


그림 4. AUV의 움직임에 따른 CRLB(네트워크 크기: 1500m, MAC 지연:2.5초)

Fig. 4. The ranging error caused by the MAC delay and node's mobility(network size: 1500m, MAC delay: 2.5s)

단방향으로 움직이는 AUV의 최소/최고 속도가 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 라면 거리측정오차의 하한은 AUV의 속도가 v_{\min} 일 때, 상한은 AUV속도가 v_{\max} 일 때 각각 결정된다. AUV의 속도 v 가 v_{\min} 부터 v_{\max} 까지 동일한 확률로 나타난다고 가정하고 AUV의 속도가 v 일 때 발생하는 거리측정 오차벡터를 E_v 로 표시하면, 식 (7)에 나타난 거리측정오차벡터 \mathbf{E} 에 대한 평균 E_μ 는,

$$E_\mu = \frac{1}{(v_{\max} - v_{\min})} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} E_v dv \quad (10)$$

이 되고 오차벡터의 분산 E_σ

$$E_\sigma = \frac{1}{(v_{\max} - v_{\min})} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} (E_v - E_\mu)^2 dv \quad (11)$$

이 된다.

유도된 AUV의 속도 및 MAC지연에 따른 거리측정 오차의 분산을 식 (5)에 대입하면 FIM을 정의할 수 있다. 앞선 설명과 같이 CRLB는 FIM의 역행렬과 동일하므로 최종적으로 식 (12)로 정의된다.

$$\text{CRLB}(\mathbf{p}) = [\Gamma^{-1}(\mathbf{p})]_{1,1} + [\Gamma^{-1}(\mathbf{p})]_{2,2} + [\Gamma^{-1}(\mathbf{p})]_{3,3} \quad (12)$$

정의한 CRLB를 이용하여 MAC 지연 및 AUV의 속도가 ToA기반 위치추정 성능에 미치는 영향을 이론적으로 분석하기 위해 상용 AUV의 일반적인 속도인 0에서 3m/s 속도의 범위로 움직이는 AUV의 위치추정을 고려한다. AUV가 배치된 깊이는 네트워크 크기

의 절반으로 결정한다. 위치추정에 참여하는 참조노드는 수표면에 정사각형 형태로 배치되어 있으며 네트워크 크기는 300m와 1500m인 경우를 고려한다. 그림 3은 300m의 크기의 네트워크에서 MAC 지연 τ 를 1.7초로 설정했을 경우 계산되는 CRLB를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 AUV의 속도가 증가함에 따라 위치 추정 성능이 감소한다. 이는 AUV의 속도가 증가할수록 패킷 간 수신시간의 차가 증가하면서 이전에 수신한 패킷을 바탕으로 수행된 측위의 결과가 부정확해지기 때문이다.

앞서 언급한 바와 같이 MAC 지연의 길이는 전송보호를 위해 통신 거리에 비례하여 증가되어야 한다. 네트워크 크기를 1500m로, MAC 지연을 2.5초로 변경한 후 계산한 CRLB가 그림 4에 나타난다. 늘어난 MAC 지연으로 인해 AUV의 이동속도가 동일하더라도 앞선 실험 대비 이론적 추정오차가 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다. 수중환경에서는 장거리 통신이 빈번히 사용되므로 느린 전파속도로 인한 MAC 지연의 증가는 불가피하다.

두 실험에서 한 가지 주목할 사실은 위치추정에 참여하는 참조노드의 개수가 많을수록 오히려 위치추정 성능이 떨어진다는 것이다. 이는 참조노드가 제공하는 정보의 양이 증가함에 따라 추정성능이 개선되는 일반적인 상황과 상반된 결과다. 참조노드의 개수가 증가할수록 이전 패킷의 수신시간과 위치추정 수행 시점의 차이가 커지므로 위치추정 성능은 더욱 열화된다. 다시 말해, MAC 지연은 참조노드의 다양성에 기인한 추정 정확도 향상을 저해하는 요인이다.

IV. 다중화 기술기반 AUV 위치추정

위치추정 성능에서 MAC 지연의 영향을 분리하는 궁극적 해결책은 모든 참조노드의 동시전송을 보장하는 것이다. 즉, 반송파 감지 다중접속 (carrier sense multiple access, CSMA)와 같은 경쟁 기반기술이 아닌 다중 접속 기반으로 전송이 이루어져야 한다. 다중 접속 기술은 크게 시 분할 다중접속(time division multiple access, TDMA), 코드 분할 다중접속(code division multiple access, CDMA), 주파수 분할 다중 접속(frequency division multiple access, FDMA)으로 구분된다. 대다수의 위치추정 연구에서는 TDMA를 사용하지만 이는 동시 전송을 제공 할 수 없는 한계를 지니므로 이동체 위치추정을 위한 전송방식으로는 부적합하다. 한편, CDMA를 기반으로 전송할 경우, 모든 참조노드가 서로 다른 코드를 이용하여 동시에 채널을

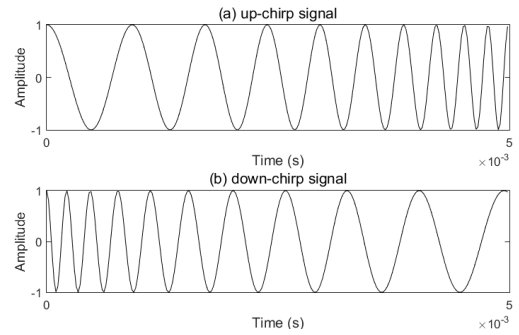


그림 5. HFM신호의 예. 신호주기: 5ms, 주파수 구간: [1, 5]kHz.
Fig. 5. An example of HFM signal. The symbol duration is 5ms and the frequency interval [1, 5]kHz.

사용할 수 있다. 그러나 CDMA는 정교한 송신 전력 제어를 요구하므로 이를 수중에서 구현하는 것은 자체가 난제이다.

한편 다중접속을 위해 참조노드 간 상이한 부채널을 사용하는 FDMA는 동시전송을 보장하는 동시에 낮은 구현 복잡도를 가지고 있다. 여기서 한 가지 고려사항은 수중통신은 도플러 이동에 취약하다는 사실이다. 수중환경은 상대적으로 낮은 음속으로 인해 도플러에 의한 신호왜곡이 크게 발생하므로 도플러에 강인한 신호 사용이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 도플러 불변(invariant) 특징을 가지는 비선형 주파수 신호의 일종인 HFM 신호를 활용한 다중접속 시스템을 제안한다.

4.1 쌍곡선 주파수 신호

HFM신호는 한 심볼 주기(symbol duration)동안 주파수가 변하는 비선형 주파수 변조신호의 일종이다. 비선형 주파수 신호는 주파수가 변하는 형태에 따라, LFM(linear frequency modulation), PFM(power frequency modulation), HFM(hyperbolic frequency modulation)등으로 분류할 수 있으며, 그 중 HFM신호는 도플러 천이에 강인한 성질로 인해 수중환경에서 신뢰성 있는 전송을 위해 자주 사용된다^[7,8]. HFM신호의 주파수는 그림 5와 같이 한 심볼 주기 T 동안 시작 주파수인 f_1 에서 끝 주파수인 f_2 까지 증가하며, 그 변화의 추이는 쌍곡선 형태를 띤다. 일반적으로 끝 주파수가 시작 주파수보다 클 경우, 즉 $f_1 < f_2$ 일 경우, up-chirp, 그 반대일 경우, down-chirp이라 부르며, up-chirp은 bit '1'을 전송할 때, down-chirp은 bit '0'을 전송할 때 사용된다. HFM신호의 정의는 식 (13)과 같다.

$$s(k, f_1) = A(t) \cos \left[\frac{2\pi}{k} \ln(1 + kf_1 t) + \theta \right], 0 < t < T \quad (13)$$

여기서 $A(t)$ 는 신호의 진폭, θ 는 초기 위상을 나타낸다. k 는 주파수 변화의 속도를 나타내는 처프율(chirp rate)로 아래의 식으로 정의되고

$$k = \frac{f_1 - f_2}{f_1 f_2 T}, \quad (14)$$

사용가능한 처프율의 총 집합은 $K = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ 라고 정의한다.

임의의 두 신호 $s(t; k_i)$, $s(t; k_j)$ 의 상호상관함수는 식 (15)로 정의한다.

$$\rho_{i,j} = \int_0^T s(t; k_i) s^*(t; k_j) dt \quad (15)$$

여기서 *는 켄레(conjugate)를 의미한다. 만약 신호의 에너지를 E_s 로 표현하면 다중 접속 시스템을 위해 모든 신호 쌍의 상호 상관은 신호주기, 즉 샘플링 시간에서 아래의 식을 만족해야 한다.

$$\rho_{i,j} = \begin{cases} E_s, & i = j \text{ (자기 상관)} \\ 0, & i \neq j \text{ (상호 상관)} \end{cases} \quad (16)$$

실제 통신에서는 주파수 천이, 신호 감쇄, 다중경로 페이딩 등으로 인해 자기 상관의 크기가 다소 감소하더라도 상호 상관에 비해 매우 크기 때문에 신호검출 정확도에는 영향을 미치지 않는다. 위 식을 만족하기 위한 처프율의 집합은 식 (15)를 닫힌 해의 형태로 변형 후 도출할 수 있으나 구체적인 증명은 기존의 비선형 주파수 신호 기반 다중접속시스템 관련연구에 나타나 있으므로 본 논문에서는 생략한다.

복조과정의 이해를 돕기 위해 [10,12], [12,14], [14,16], [16,18]kHz의 주파수를 사용하는 총 네 개의 신호 S1, S2, S3, S4을 심볼 주기 0.02초를 이용하여 생성하였다. 한편 이에 대응하는 정합필터는 각각 M1, M2, M3, M4로 표기한다. 만약 두 개의 서로 다른 참조노드로부터 각각 S1과 S3이 전송되었다고 가정하면, 수신신호는 S1+S3이 된다. 수신측에서는 총 네 개의 정합필터의 출력을 그림 6과 같이 획득할 수 있다. 그림 (a)와 (c)를 통해 알 수 있듯이 수신측에서는 오직 샘플링 시간인 0.02초에 나타나는 두드러진 결과를 통

해 중첩신호에서 전송된 신호를 분별하는 것이 가능하다.

4.2 위치추정 단계

제안하는 위치추정은 처프율분배, 측위, 위치추정 알고리즘 적용으로 진행된다.

다수의 참조노드 중 특정노드가 대표노드(representative-reference node, R-RN)로 선정되며 R-RN은 네트워크상에 존재하는 총 참조노드의 수를 알고 있다고 가정한다. R-RN은 참조노드의 수만큼 유일한 처프율을 생성한 다음 각각의 참조노드에게 하나씩 분배한다. 식 (14)을 통해 알 수 있듯이, T가 동일할 경우 처프율은 사용하는 시작주파수와 끝 주파수에 의해 결정된다. 다시 말해, 처프율을 생성하는 것은 전체 대역폭을 다수의 부채널로 분할하는 것으로 생각할 수 있다. 예를 들어 가용 대역폭이 [10, 20]kHz 인 통신 시스템에 총 5개의 참조노드가 있다고 가정하면 부채널을 [10-12], [12-14], [14-16], [16-18], [18-20]kHz로 나누고 각 부채널의 최소, 최대 주파수를 식 (14)에 적용하여 총 5개의 유일한 처프율을 생성할 수 있다.

한편, R-RN은 측위를 위한 전송시간 및 주기를 결정하여 모든 참조노드에게 알린다. 위치추정 주기는 AUV에 장착된 관성장치의 성능 및 조류에 의한 AUV의 표류정도에 따라 결정되어야 하며 누적오차가 많이 발생할수록 위치추정 수행주기는 짧아져야 한다. 그러나 위치추정을 위해 참조노드가 빈번하게 전송을 시도하면 대역폭 낭비를 가져올 수 있으므로 적절한 주기

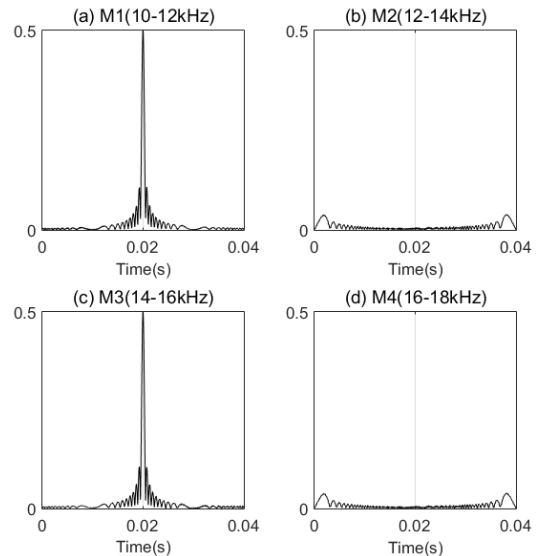


그림 6. 정합필터를 이용한 중첩신호 복조 예. Fig. 6. An example of demodulation of the signal overlap

설정이 요구된다.

모든 참조노드는 R-RN으로부터 수신한 전송시간 및 주기를 바탕으로 측위를 위한 패킷을 일제히 전송한다. 이 때, 각 참조노드는 R-AN으로부터 할당받은 처프율을 이용하여 신호를 생성한다. 전송되는 정보는 측위기술에 따라 달라질 수 있으나 본 연구에서는 시간측정기반 측위만을 고려하고 있으므로 전송 시간과 자신의 위치만 전달하면 된다.

AUV는 참조노드로부터 수신한 정보를 바탕으로 현재의 위치를 예측한다. 실제 환경에서는 측정결과에 오차가 포함되어 있으므로 앞선 설명과 같이 비선형 최소자승법을 이용하여 하나의 해를 도출해야하며 가장 일반적인 비선형 최소자승법 중 하나인 Gauss-Newton 알고리즘을 적용하여 AUV의 위치를 최종적으로 추정할 수 있다.

V. 모의실험

제안 시스템의 성능평가는 크게 두 가지로 구분된다. 먼저, HFM신호 활용하여 참조노드가 동시전송을 보장 받을 수 있는지를 검증한다. 이후 동시전송을 통해 위치추정 성능을 MAC 지연의 영향으로부터 분리시킬 수 있음을 보인다. 모의실험에 사용된 환경은 표 1에 정리되어 있다.

표 1. 모의실험 환경.
Table 1. Simulation environment.

Parameter	Value
Network size	300m, 1500m
Acoustic propagation speed	1500m/s
Sampling rate	44kHz
Preamble length	1.5s
Sub-channel bandwidth	2kHz
Number of ANs	3, 4, 5
Symbol duration	20ms
Number of available chirp rates	10
Number of bits per packet	100
Number of trials	1000

5.1 HFM신호기반 전송

참조노드가 MAC 지연 없이 동시에 전송할 수 있는지 검증하기 위해 총 10개의 참조노드가 네트워크에 배치된 환경을 고려한다. 전체 대역폭과 부채널 대역폭을 각각 [10, 30]kHz, 2kHz로 설정한 후 총 10개의 고유한 처프율을 생성하여 각각의 참조노드에게 할당한다.

위치추정은 총 1000회를 수행하였으며 매 수행마다 각 노드는 임의로 생성된 100개의 비트열을 전송한다. 참조노드가 전송한 신호는 통신거리에 따라 서로 다른 시간에 수신이 되므로 다수의 신호는 부분적으로 서로 겹치게 된다. 위치추정에 참여하는 참조노드는 매 위치추정마다 10개 중 임의로 선택되며 참조노드의 개수를 3개에서 5개까지 변화시키며 실험을 수행하였다. 성능평가에서 이상점 (outlier)을 제거하기 위해 비트 오류율 (bit error rate, BER)을 나타내는 그래프의 y축은 10^{-4} 까지만 표시한다.

그림 7과 같이 사용하는 측위기술과 상관없이 E_b/N_0 가 작을 경우, HFM신호기반 다중접속 기술은 높은 오류율을 나타낸다. 이는 HFM신호가 높은 시관 상관성을 가지더라도 잡음이 신호에 비해 클 경우 신호검출에서 오류가 발생할 수 있기 때문이다. 반면 E_b/N_0 가 증가할수록 비트 오류율은 점차 감소하고 E_b/N_0 가 일정 임계값 이상일 경우 오류율은 0에 수렴한다. 실험 결과를 통해 참조노드의 수가 증가하더라도 HFM 신호를 기반으로 다중화가 가능함을 확인할 수 있다.

실제 통신환경에서는 심볼 혹은 프레임(frame) 동기 문제로 인해 그림 6과 달리 샘플링 시간에서 다소 벗어난 위치에서 정점(peak)이 나타날 수도 있다. 뿐만 아니라 통신환경에서 발생하는 도플러 이동에 의해 신호가 왜곡될 경우에도 동일한 문제가 발생된다. 이미 프레임 동기 문제를 해결하기 위한 다양한 방법들을 사용할 수 있으나 본 연구에서는 간단하게 연구[12]에서 소개된 방법을 사용하여 프레임 동기 문제가 해결될 수 있음을 보인다. [12]는 프레임의 비동기 문제를 해결하기 위해 샘플링 시점에서만 정점을 찾는 것이

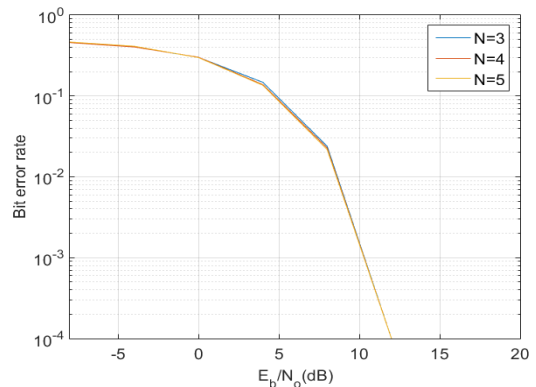


그림 7. E_b/N_0 에 따른 HFM기반 다중접속기술의 성능.
Fig. 7. The performance of HFM-based multiple access system with respect to E_b/N_0 .

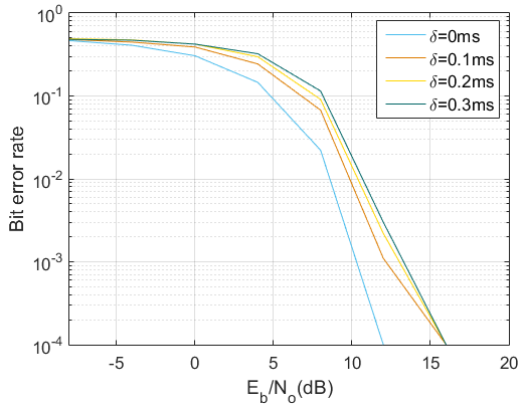


그림 8. E_b/N_0 에 따른 HFM기반 다중접속기술의 성능.
Fig. 8. The performance of HFM-based multiple access system with respect to E_b/N_0 .

아닌 샘플링 구간을 설정하여 그 구간에 발생하는 정점을 탐색하는 방법을 제안하고 있다. 본 연구에서도 이와 동일한 방법을 적용하였으며 탐색구간의 길이는 $T/10$ 으로 설정하였다. 총 네 개의 참조노드가 동시에 전송하는 상황에서 프레임 비동기 시간을 0.1ms에서 0.3ms로 변화하며 수행된 신호의 복조 결과가 그림 8에 나타난다. 그림과 같이 프레임의 동기가 어긋나더라도 E_b/N_0 가 일정 임계값을 넘어가면 다중화가 가능한 것을 확인할 수 있다. 다만 비동기의 시간이 커질수록 동일한 비트오류율을 달성하기 위해 요구되는 E_b/N_0 도 다소 증가한다. 이는 샘플링 구간에 정확한 복조를 방해하는 신호의 간섭 크기가 커지기 때문이다.

앞서 언급한 두 가지 실험을 통해 임계값 이상의 E_b/N_0 가 보장된다면 HFM신호를 위한 다중화가 가능함을 확인할 수 있다. 측위를 위한 참조노드의 전송 시, 높은 E_b/N_0 를 보장하는 가장 단순한 방법은 송신전력을 높이는 것이다. 저전력 통신을 지향하는 수중통신에서는 낮은 송신전력이 선호되지만 해수면에 배치된 참조노드는 태양광과 같은 지속적인 전력공급이 가능하므로 전력사용 제약에서 비교적 자유로우며 이로 인해 높은 전력으로 신호를 송신하는 것이 용이하다. 또한 참조노드와 AUV 간 통신은 가시선 (line of sight)이 보장되므로 반사손실에 의한 신호감쇄가 덜 할 것으로 기대할 수 있다.

5.2 위치추정 정확도

AUV를 포함한 수중 위치추정 기술에서는 전송지연이 위치추정에 미치는 영향을 간과하고 있으므로 참조노드가 사용하는 MAC프로토콜 및 참조노드의 전송방법에 대한 언급이 없는 실정이다. 다만 사용하는 MAC

프로토콜의 명시적 언급이 없을지라도 전송형태를 통해 유추해 볼 때 다수의 참조노드들은 TDMA 혹은 CSMA를 사용하여 자신의 패킷을 차례대로 전송함을 알 수 있다^{4,6,13-17}. 본 장에서는 참조노드가 차례대로 전송하는(sequential transmission) 기존방법과 동시전송(simultaneous transmission)을 사용하는 제안방법이 위치추정 정확도에 미치는 영향을 보인다. 또한 제안방법의 장점은 모든 측위방법에 동일하게 적용될 수 있음을 강조하기 위해 가장 대표적인 측위방법인 ToA와 TDoA를 각각 사용하였다. 모의실험환경은 정육면체 공간의 꼭짓점에 위치한 참조노드를 이용하여 수중에서 이동하는 AUV의 위치추정을 고려하고 있다.

한편 응용에 따라 AUV는 다양한 움직임 패턴을 가질 수 있으나 위치추정을 수행하는 수초의 시간 내에서는 급격한 방향전환이나 속도의 변화가 없다. 따라서 실험에서 고려하는 AUV는 단 방향으로 등속도 운동을 한다고 여긴다. 다시 말해, AUV의 x 좌표는 시간에 따라 변경되지만 나머지 좌표는 네트워크 크기의 절반으로 고정시켰다. MAC 지연이 위치추정에 미치는 문제를 명확히 보이기 위해 거리 측정에서는 오류가 발생하지 않는다고 가정한다. 한편, MAC 지연은 프리앰블의 길이, 전송거리에 따른 전파 지연, 전송 지연으로 결정되지만 전송지연은 다른 요소에 비해 그 크기가 매우 작으므로 무시하였다. 전파지연을 계산하기 위해 수중에서의 음속은 1500m/s로 근사하였고 프리앰블의 길이는 일반적으로 사용하는 1.5초로 설정하였다. 제시된 평균 제곱값 편차(root mean square error, RMSE)는 x 좌표를 무작위로 변경하여 수행한 1000번의 모의 실험 결과의 평균을 나타낸다. 구체적인 실험환경은 표 1에 명시되어 있다.

그림 9는 300m크기의 네트워크에서의 모의실험 결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 AUV의 속도가 높을수록 기존 시스템의 RMSE가 커진다. 반면, 다중화를 활용하여 MAC 지연의 영향을 제거한 제안 시스템은 AUV 이동에 관계없이 높고 안정적인 위치추정 정확도를 제공한다. 대부분의 연구에서는 측위예러를 완화하는 것에만 초점을 맞추고 있을 뿐 참조노드의 전송방식이 위치추정에 대한 미치는 영향은 전혀 고려하고 있지 않다. 그러나 실험결과는 실용적 시스템 설계를 위해 MAC 지연이 고려되어야 함을 나타낸다. 더 나아가 이동체 위치추정에서 다중화 기술 접목은 참조노드의 전송에 의한 측위를 가능하게 하므로 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있는 장점을 지닌다.

전파 지연은 통신 거리에 비례하기 때문에 참조노드와 AUV사이의 거리가 멀수록 충돌회피를 위한 MAC

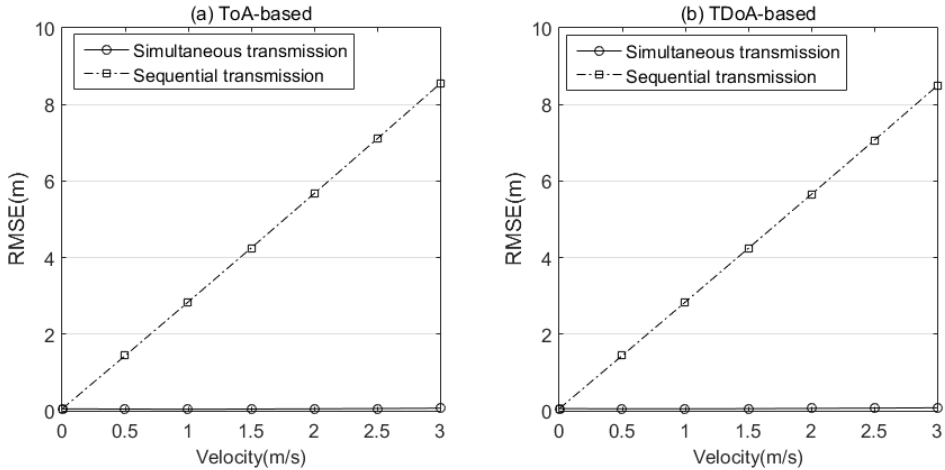


그림 9. AUV속도 및 MAC지연에 따른 위치추정 성능(네트워크 크기 300m)
 Fig. 9. Localization accuracy according to the AUV's velocity and MAC delay(Network size is 300m)

지연이 증가된다. 1500m크기의 네트워크에서 동일한 실험을 통해 도출된 RMSE가 그림10에 나타난다. 앞선 실험과 유사한 결과를 보이고 있으나 길어진 MAC 지연으로 인해 기존방법의 위치추정오차가 더욱 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 노드의 밀집도가 낮아 장거리 통신이 자주 사용되는 수중환경의 특성을 고려할 때, AUV의 속도가 작다고 하더라도 MAC 지연이 위치추정에 미치는 영향은 불가피함을 의미한다. 여기서 한 가지 눈에 띄는 점은 제안하는 위치추정을 사용하더라도 AUV의 속도가 빨라지면 위치추정 오차가 약간 증가한다는 것이다. 이는 각 참조노드가 전송한 패킷이 서로 다른 시간에 도착하는 지터(jitter)에서 의해서 발생하는 위치추정 오차이다. 이러한 지터는 마치

MAC 지연과 같은 역할을 하기 때문에 제안방법에서도 약간의 위치추정 오차가 발생한다. 그러나 지터의 영향은 MAC 지연에 비해 아주 미미하므로 추정성능에 큰 영향을 미치지 않는다.

한편, 일반적으로 위치추정에 참여하는 참조노드의 수가 많을수록 위치 예측에 활용되는 정보의 양이 증가하므로 위치추정 성능이 향상된다. 그러나 MAC 지연이 존재하는 경우, 위치추정에 소요되는 총 시간이 늘어남에 따라 참조노드의 다양성에 기인한 추정성능 향상을 기대하기 어렵다. 이를 검증하기 위해 새로운 척도인 참조노드 다이버시티 이득(diversity gain) $G(i,j)$ 를 정의한다. 여기서 G_i 는 총 i 개의 참조노드

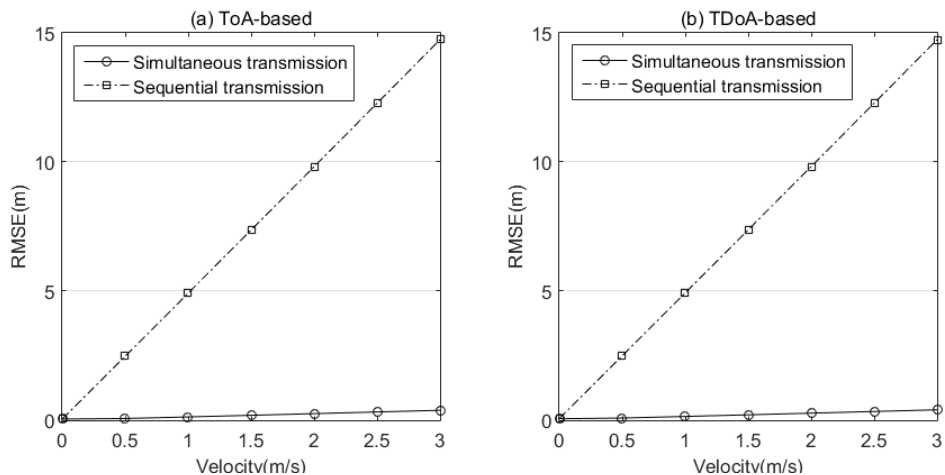


그림 10. AUV속도 및 MAC지연에 따른 위치추정 성능(네트워크 크기 1500m)
 Fig. 10. Localization accuracy according to the AUV's velocity and MAC delay(Network size is 1500m)

를 이용하여 수행된 위치추정의 RMSE를 나타내며 참조노드 다이버시티 이득 $G(i, j)$ 는 G_i/G_j 로 정의된다. 일반적으로 $j > i$ 의 경우, 동일한 시나리오에서 다이버시티 이득은 1보다 큰 값을 가진다.

동일한 네트워크 환경에서 위치추정에 참여하는 참조노드의 개수를 각각 네 개에서 다섯 개로 증가시킨 후 참조노드 다이버시티 이득, 즉 $G(4, 5)$ 를 측정하였다. 실제 환경에서 발생할 수 있는 거리 측정 오류를 고려하기 위해 1%의 거리측정 오차를 포함하였다. 그림 11과 같이 AUV의 속도가 느린 경우 두 방법 모두 다이버시티 이득이 1보다 크다. 그러나 AUV의 속도가 약 1.5m/s 이상일 때, 기존 위치추정의 다이버시티 이득은 1보다 작아지고 AUV의 속도가 증가함에 따라 점진적으로 감소한다. 참조노드의 수가 증가하면 측위를 위한 전체 패킷수신 시간이 더 길어지게 되고 이는 이전 패킷에 기록된 정보의 정확도가 점차 낮아지는 문제를 초래한다. 따라서 이동체 위치추정에서 MAC 지연을 제거하지 않을 경우 다양한 참조노드로부터 제공 받은 정보를 충분히 활용할 수 없다. 반면, 제안 시스템에서는 MAC 지연을 제거하므로써 참조노드 다이버시티 이득이 1이상으로 유지된다. 이는 AUV의 속도가 증가하더라도 위치추정에 참여하는 노드의 수가 많으면 많을수록 위치추정 정확도를 향상시킬 수 있음을 의미한다.

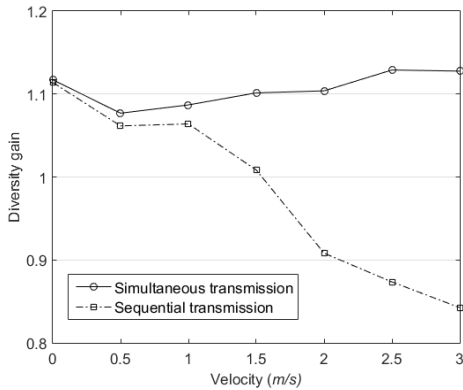


그림 11. AUV속도에 따른 참조노드의 다이버시티 이득.
Fig. 11. The diversity gain according to the AUV's velocity.

VI. 결 론

MAC 지연은 수중 위치추정에서 해결해야 할 난제이다. 본 연구는 수중위치추정, 특히 이동체 위치추정에서 MAC 지연이 미치는 영향을 분석하고 이를 해결

하기 HFM신호 기반 다중화 기술을 접목한 위치추정 시스템을 제시하고 있다. 제안된 전송방법은 모든 측위 기술과 접목 가능하며 이동체의 움직임이나 속도와 상관없이 안정적이고 정확한 위치추정을 가능하게 하였다.

위치추정 수행에 사용되는 참조노드의 수는 위치추정 정확도에 직접적으로 영향을 미치므로 전송신뢰성은 수중 위치추정에서 매우 중요한 척도가 된다. 본 연구에서는 HFM신호의 다중화 특성만이 강조되었으나 HFM신호는 움직이는 플랫폼 사이에서 통신할 때 가장 신뢰성 있게 전달할 수 있는 장점을 가진다. 향후 연구에서는 통신 신뢰성과 위치추정 성능 사이의 관계를 연구하여 AUV 위치추정에서 HFM신호 사용의 당위성을 더욱 강조할 것이다.

References

- [1] L. Paull, S. Saeedi, M. Seto, and H. Li, "AUV navigation and localization: A Review," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 131-149, Jan. 2014.
- [2] H. P. Tan, R. Diamant, W. K. G. Seah, and M. Waldmeyer, "A survey of techniques and challenges in underwater localization," *IEEE J. Ocean Eng.*, vol. 38, no. 14-15, pp. 1663-1676, Oct. 2011.
- [3] A. Caiti, A. Garulli, F. Livide, and D. Prattichizzo, "Localization of autonomous underwater vehicles by floating acoustic buoys: A set-membership approach," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 140-152, Jan. 2005.
- [4] R. Diamant, L. M. Wolff and L. Lampe, "Location Tracking of Ocean-Current-Related Underwater Drifting Nodes Using Doppler Shift Measurements," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 40, no. 4, pp. 887-902, Oct. 2015.
- [5] M. Bayat, N. Crasta, A. P. Aguiar, and A. M. Pascoal, "Range-based underwater vehicle localization in the presence of unknown ocean currents: Theory and experiments," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 122-139, Jan. 2016.
- [6] J. Li, H. Gao, S. Zhang, J. Chen, and Z. Liu, "Self-localization of autonomous underwater vehicles with accurate sound travel time

solution,” *Elsevier Computers & Electrical Eng.*, vol. 50, pp. 26-38, Feb. 2016.

[7] S. P. Sira, A. P. Suppappola, and D. Morrell, “Dynamic configuration of time-varying waveforms for agile sensing and tracking in clutter,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 7, pp. 3207-3217, Jul. 2007.

[8] M. Zhou, J. J. Zhang, and A. Papandreou-Suppappola, “Hyperbolic frequency modulation for multiple users in underwater acoustic communications,” *IEEE ICASSP*, pp. 3498-3502, Florence, Italy, May 2014.

[9] Y. Zhu, Z. Jiang, Z. Peng, M. Zuba, J. H. Cui, and H. Chen, “Toward practical MAC design for underwater acoustic networks,” in *IEEE Proc. INFOCOM 2013*, pp. 872-886, Turin, Italy, Apr. 2013.

[10] M. Erol-Kantarci, H. T. Mouftah, and S. Oktug, “Localization techniques for underwater acoustic sensor networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 12, pp. 152-158, Dec. 2010.

[11] S. Kay, *Fundamentals of statistical signal processing: Estimation theory*, 1st Ed., Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall Inc., 1993, Chapter 3, pp. 27-30, ISBN 978-0133457117.

[12] H. Lee, T. H. Kim, J. W. Choi, and S. Choi, “Chirp signal-based aerial acoustic communication for smart devices,” in *Proc. IEEE Conf. Computer Commun. (INFOCOM)*, Hong Kong, China, Apr. May 2015.

[13] X. Cheng, H. Shu, and Q. Liang, “A range-difference based self-positioning scheme for underwater acoustic sensor networks,” in *Proc. Int. Conf. WASA*, pp. 38-43, Chicago, IL, USA, Aug. 2007.

[14] X. Cheng, H. Shu, Q. Liang, and D. H. C. Du, “Silent positioning in underwater acoustic sensor networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 3, pp. 1756-1766, May 2008.

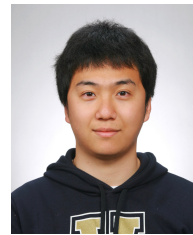
[15] Z. Zhou, J. Cui, and A. Bagtzoglou, “Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks,” in *Proc. 27th IEEE Conf. Comput. Commun.*, pp. 2198-2206, Phoenix, AZ, USA, Apr. 2008.

[16] A. Y. Teymorian, W. Cheng, L. Ma, X. Cheng, X.

Lu, and Z. Lu, “3D underwater sensor network localization,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 8, no. 12, pp. 1610-1621, Dec. 2009.

[17] W. Cheng, A. Thaeler, X. Cheng, F. Liu, X. Lu, and Z. Lu, “Time-synchronization free localization in large scale underwater acoustic sensor networks,” in *Proc. 29th IEEE Int. Conf. Distrib. Comput. Syst. Wksp.*, pp. 80-87, Montreal, QC, Canada, Jun. 2009.

김 성 렬 (Sungryul Kim)



2010년 : 부산대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
 2017년 : 부산대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)
 2017년~현재 : 부산대학교 전기컴퓨터공학부 연구원
 <관심분야> 수중네트워크, 사물인터넷, 장거리/저전력 통신

유 영 환 (Younghwan Yoo)



1996년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
 1998년 : 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
 2004년 : 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학박사)
 2004년~2006년 : 신시내티대학교 전기컴퓨터공학부 연구원
 2007년~현재 : 부산대학교 전기컴퓨터공학부 교수
 <관심분야> 지능형네트워크, 5G이동통신, 사물인터넷, 수중네트워크