

수중 위치 추정을 위한 3차원 전자기파 센서 노드 개발

Development of 3-Dimensional Sensor Nodes using Electro-magnetic Waves for Underwater Localization

곽 경 민, 김 진 현*
(Kyung Min Kwak¹ and Jinhyun Kim¹)

¹Seoul National University of Science and Technology

Abstract: In this paper, we discuss a 3-dimensional localization sensor node using EM waves (Electromagnetic waves) with RSSI (Received Signal Strength Indicator). Generally EM waves cannot be used in underwater environment, because the signal is highly attenuated by the water medium according to the distance. Although the signal quickly reduces in underwater, the reducing tendency is very clear and uniform. Hence EM waves have possibility as underwater distance sensors. The authors have verified the possibility by theory and several experiments, and developed calibration methods in case of linear and planer environment. For 3-dimensional localization in underwater, it must be known antenna's radiation pattern property in electric plane(called E-plane). In this paper, we proceed experiments to verify attenuation tendency with z axis movement, PLF (Polarization Loss Factor) and ILF (Inclination Loss Factor) with its theoretical approach.

Keywords: underwater localization, RF, RSSI, antenna, electro-magnetic waves

I. 서론

최근 지상에서의 사물 혹은 사람의 위치를 추정하기 위해 다양한 기법이 개발되고 있다. 지상에서의 위치 추정은 GPS, 레이저, RF (Radio frequency), 비전 카메라 등을 이용하여 다양한 방법을 통해 상대적으로 정확한 위치를 추정함으로써 일상생활을 보다 편리하고 유효하게 이루어 주고 있다. 이런 이유로 지상에서의 위치 추정은 추정 방법 뿐 아니라 시스템의 소형화, 정확성, 낮은 비용으로 높은 성능을 보이는데 대한 연구가 여러 방면으로 진행되고 있다 [1]. 이에 반해 수중 환경에서의 위치 추정(underwater localization)은 민간 연구용, 군사용, 자원 개발 등 필요성이 다양한 분야에 걸쳐 매우 빠르게 증가하고 있지만, 수중이라는 환경적인 제약으로 인해 사용 가능한 센서가 제한되는 한계가 있다. 공기 중에서 가장 널리 사용되고 있는 GPS 센서는 수중에서는 급격한 감쇠 현상으로 인해 사용이 불가능하다. 현재 수중 위치 추정을 위한 주요한 방법으로 수중 초음파를 이용한 Baseline이 시스템이 널리 사용되고 있다[2,3]. Baseline 시스템은 그림 1과 같이 주로 센서 노드간의 거리를 기준으로 수중으로 초음파를 방사하여 들

아오는 음파의 TOA (Time of Arrival)방식을 이용하여 거리를 추정, 로봇의 위치를 파악한다. 원거리 추정에 용이한 LBL (Long Base Line) 방식과 근거리 추정에 용이한 SBL (Short Base Line) 시스템이 있다. 하지만 수중 구조물, 항만 시설, 수조 등, 구조화된 공간에서는 다중경로에러, 장애물에 의한 불완전한 데이터로 인해 초음파 센서를 활용한 정밀 추정은 다소 어려움이 있다. 이를 개선하고 정확한 위치 추정과 소형화된 시스템을 구성하고자 전자기파를 이용한 구조화된 환경에서의 수중 위치추정 시스템 개발이 진행된 바가 있다[4-6].

[4]에서는 그림 2와 같이 전자기파의 공기 중 및 수중 신호감쇠 특성을 살펴보고, 이를 바탕으로 수중 정밀 위치 추정 가능성을 보여주었다. 공기 중에서의 전자기파는 최단 거리 신호와 더불어 반사 혹은 굴절되어 들어오는 신호가 감쇠 없이 안테나로 유입되기 때문에 거리에 의한 영향보다는 주변 환경 특성에 따라 신호 감쇠가 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 공기 중에서는 신호 감쇠 특성을 활용한 거리 센서로는 사용이 적합하지 않다는 것을 알 수

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 12. 3., 수정: 2012. 12. 26., 채택확정: 2012. 12. 31.

곽경민, 김진현: 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

(supermaxx@seoultech.ac.kr/jinhyun@seoultech.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학기술원 국방무인화 기술 특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원, 지식경제부 '산업원천기술개발사업'의 일환인 "수중 인공 구조물의 국소지역 정밀 탐사가 가능한 1.0 m 위치오차를 갖는 수중 로봇 자율유형 기술 개발" 과제(10043928)의 지원 및 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO. 2011-0014003).

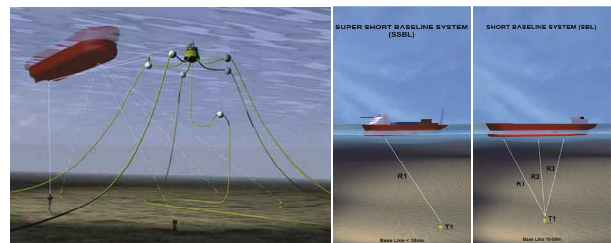
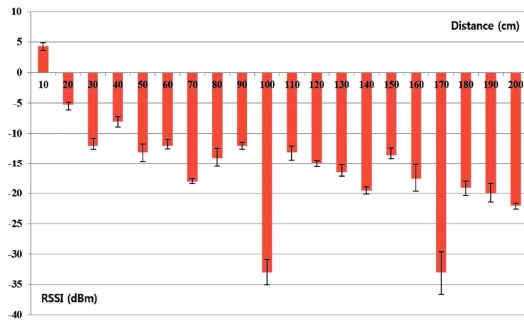


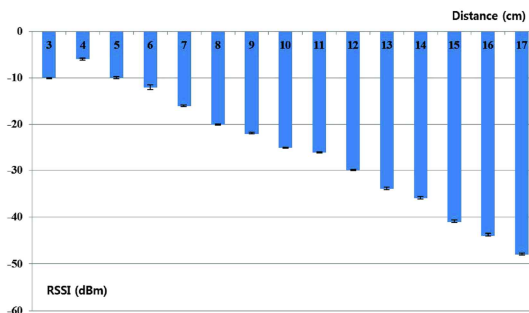
그림 1. 수중 초음파 기선(baseline) 방식 위치 인식 시스템 [2].

Fig. 1. Underwater baseline positioning system [2].

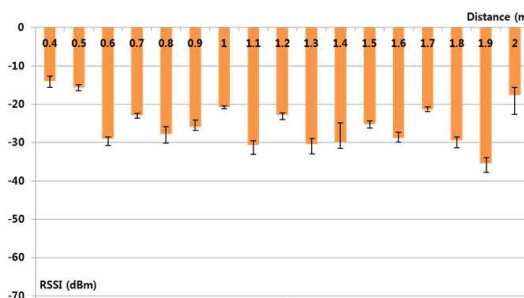
있다. 이와 반대로 수중 환경과 같이 매질에 의한 감쇠특성이 큰 영역에서는 최단 거리에서 입사되는 신호에 의한 영향을 가장 크게 받기 때문에 거리 데이터의 분해능(resolution)이 매우 높은 특성을 보이고, 이를 활용하여 cm 이하의 거리 오차를 보이는 실험이 수행된 것을 확인할 수 있다. 이 외에도 전자기파의 송신 세기에 따른 신호감쇠가 일어나는 정도를 확인하는 실험이 수행되었고[5], 거리에 따른 실험 결과 및 이론과의 비교 분석, 환경 요인 보정 방법, 공식화된 이론을 가지고 평면 위치 추정을 실험과 이론



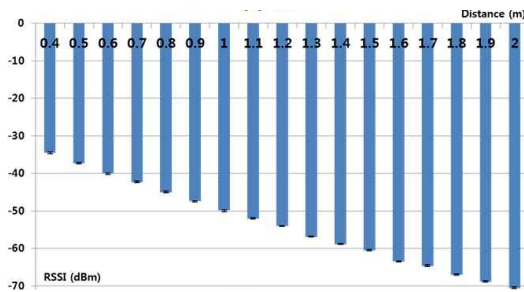
(a) 2.4GHz in air.



(b) 2.4GHz in water.



(c) 420MHz in air.



(d) 420MHz in water.

그림 2. 수중과 공기 중에서의 전자기파 감쇠 경향[4].
Fig. 2. EM wave attenuation during propagation in air and water [4].

적 검증에 대한 연구도 진행되었다[6]. 반면 수중 최대 도달 거리가 15m 정도인 것은 넓은 범위의 수중 영역에서 사용하기에는 단점이라고 할 수 있다. 하지만 원거리에서는 초음파와 같이 넓은 영역을 보장해주는 센서 시스템 또는 확장 칼만 필터(EKF: Extended Kalman Filter) 등을 이용한 자가 항법(self navigation)을 사용하다가 전자기파가 미치는 근거리에서는 정밀 추정을 수행하는 하이브리드 항법 구성을 통해 수중에서의 넓은 영역 및 정밀한 추정을 모두 달성할 수 있는 센서 시스템 구축이 가능하다고 판단된다.

본 논문에서는 근거리 정밀 추정을 위한 3차원 위치 추정 센서를 개발하기 위해 안테나 특성[8,9] 및 송수신 안테나 배치에 따른 영향 분석, 복합 항법 활용 방법에 대한 연구를 진행한다. II 장에서는 선형 거리 추정과 평면 위치 추정에 대한 선행 연구를 통해 정밀 추정 가능성을 확인하고, 이를 3차원 추정으로 이끌기 위한 실험방법을 제시한다. III 장에서는 실제 환경에서 제한된 움직임을 가지는 수평/수직 이송 장치와 수중 RF (Radio Frequency) 안테나를 이용하여 이득 특성에 따른 신호 감쇠 경향을 파악하였다. 마지막으로 IV 장에서는 결론 및 앞으로의 연구 방향에 대해 제시하고자 한다.

II. 선행 연구 내용 및 연구 목적

1. 선형 거리 추정 방법

선형 거리 추정은 무지향성 안테나를 이용한 센서 노드의 롤(roll)과 피치(pitch)를 억제한 알루미늄 가이드를 따라 센서 노드로 가정한 송신 안테나(transmitting antenna)와 수신 안테나(receiving antenna)사이의 거리를 조절하여 얻은 결과를 안테나의 이득과, 신호세기, 주파수, 매질 특성, 보상 계수 등에 의해 나온 이론 모델(1,2)과 비교(그림 3)하여 검증을 진행하였다[6].

$$S_R = -20 \log_{10} R - 20 \alpha R \log_{10} e + \delta \quad (1)$$

$$\delta = 10 \log_{10} G_T + \log_{10} G_R + 20 \log_{10} \frac{c}{4\pi f n} + \Delta \delta \quad (2)$$

그림 3과 같이 실험 결과는 약 3.5 m 이내에서 -80 ~

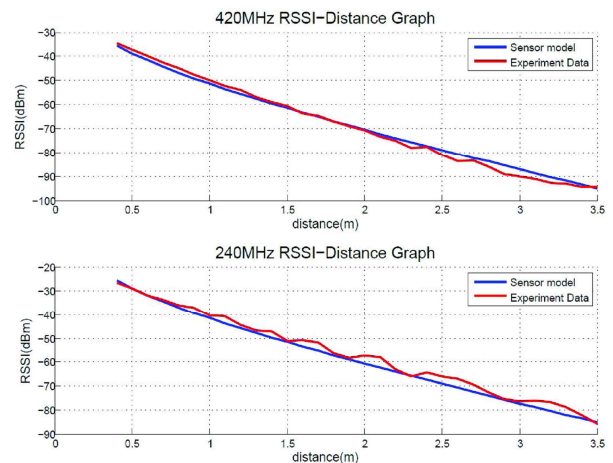


그림 3. 이론식과 실험값을 이용한 거리 추정 데이터 비교[6].
Fig. 3. RSSI comparison results: experiment and theory.

-90 dBm의 최소 신호강도를 보여준다. 현재 보유하고 있는 측정 장비(NI-PXI5660)의 측정 가능 범위는 -110 dBm까지이며, 따라서 최대 측정 가능 거리는 4.5 m 정도로 예측된다. 또한 방사 신호 출력 증가, 주파수 변경, 최적 안테나 설계 등의 방법을 활용하면 실제로는 10 m 이상의 거리까지 측정이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 실험 프레임워크를 보강 없이 지지할 수 있는 최대 길이가 3.5m 정도이며, 전자기파의 감쇠 경향을 알아보기 위한 실험이기 때문에, 3.5 m 범위 내에서 실험을 진행하였다. 그림 3의 결과를 통해 실험데이터와 이론데이터의 일관성을 확인할 수 있다. 이는 전자기파의 감쇠 신호를 이용한 정밀 거리 추정이 가능할 수 있음을 보여준다.

2. 평면 위치 추정 방법

평면 위치 추정 방법은 거리 추정으로 증명한 이론 모델을 이용하여, 다수의 거리 추정 데이터를 UWSN (Underwater Wireless Sensor Network)기반으로 구성하여, 동일한 깊이에 있는 다수의 센서노드와, 로봇 센서 노드간의 직선거리에서 발생하는 각 노드간의 거리데이터를 노드 간의 거리로 환산한다. 이를 그림 4와 같은 삼각 측량법을 이용하여 이동하는 로봇 센서 노드의 위치가 지역 센서 노드 대비 위치한 지점을 알 수 있다[6,7].

표 1, 그림 5의 결과를 보면, 평면 위치 추정(3 m×3 m)에서의 오차는 0.02 m 수준의 위치 오차로 매우 정밀하게 추정이 가능한 것을 알 수 있다. 이는 구조화된 환경에서 근거리 평면 위치 추정 센서 시스템으로 사용이 가능함을 보여준다.

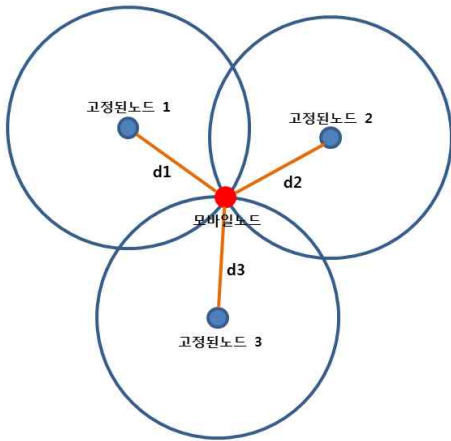


그림 4. 삼각 측량법.
Fig. 4. Triangulation.

표 1. 평면 위치 추정 결과.

Table 1. The results of planer localization.

2D localization	Condition 1	Condition 2
Actual position	[1.270, 2.503]	[1.270, 2.503]
Mean position	[1.293, 2.528]	[1.283, 2.517]
Error (mean-actual)	0.0273 m	0.0196 m
RMS error	0.0473 m	0.0409 m
Max. error	0.1132 m	0.1163 m
Min. error	0.0023 m	0.0057 m

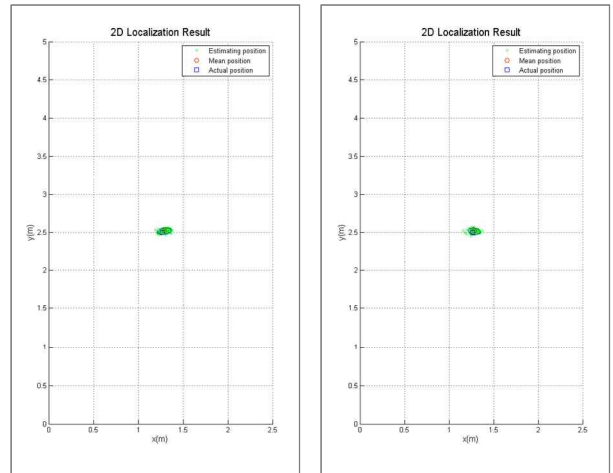


그림 5. 평면 위치 추정 실험 및 결과[7].

Fig. 5. Planer localization experimental result [7].

그림 5에서 위치 추정을 위한 기준점 설정은 수조에 설치한 프레임의 한쪽 모서리를 0, 0으로 설정하고 실험을 진행하였다.

3. 3차원 위치 추정을 위한 연구

앞서 언급한 거리 추정과 평면 위치 추정은, 그림 6에 표시한 안테나의 H-plane 영역만을 이용한 것으로 전 방향에 대해 유사한 특성으로 인해 추정 데이터를 안정적으로 얻을 수 있었다. 이 데이터를 바탕으로 2차원 평면을 교차시켜 [10]과 같은 실험이 진행된 바 있다. 하지만 3차원 추정을 위해서는 x축과 z축으로 이루어지는 E-plane 영역까지 정확하게 고려해야만 위치 추정이 가능하다.

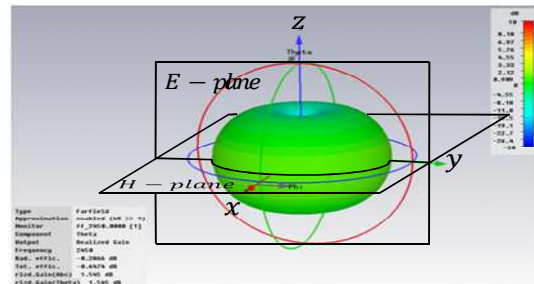


그림 6. Omni-direction 안테나의 E-plane와 H-plane.

Fig. 6. E-plane and H-plane in omni-directional antenna.

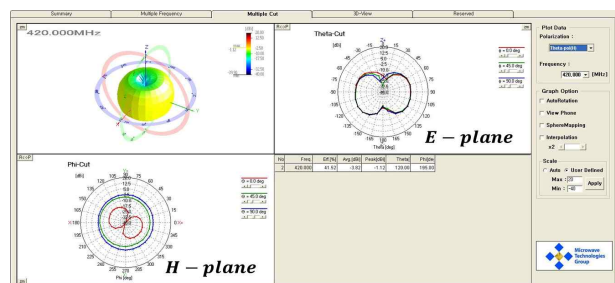


그림 7. 420 MHz 0 dBi 안테나 테스트 자료.

Fig. 7. 420 MHz 0 dBi antenna test documents.

이상적인 안테나의 조건인 등방성 안테나에서는 E-plane 영역과 H-plane 영역의 방사 특성이 동일하다. 가능한 최대의 성능을 내기 위해 그림 7과 같은 0 dBi에 가까운 안테나를 주문 제작하여 실험에 사용하였다.

III. 3차원 위치 추정을 위한 안테나 특성 연구

3차원 위치추정을 위해 E-plane 영역의 신호 감쇠특성을 알아보기 위해서 III 장에서는 다음과 같은 실험을 진행한다. 첫째, 동일한 거리에서 안테나의 수직 이동에 따른 경향, 둘째, 로봇의 롤 각도(roll angle)에 따른 안테나 편향각에 따른 손실 인자(PLF: Polarization Loss Factor), 셋째, 로봇의 피치 각도(pitch angle)에 따른 안테나의 기울어짐 불일치에 따른 손실 인자(ILF: Inclination Loss Factor)를 알아보고자 한다. 이중에서 ILF는 본 논문에서 처음으로 제시된 내용이며, 이론식을 제안하고 실험을 통해 검증을 수행하였다.

우선 이를 실험하고 진행할 구조화된 환경은 표 2, 3와 같다.

1. 동일한 거리에서 안테나의 수직이동에 따른 감쇠 경향

표 2. 실험 환경 특성.

Table 2. Characteristics of experimental environment.

	변수	변수 값
안테나	안테나의 송수신계인	3 [dBi]
	송신 파워	10 [mW]
	송신 주파수	420 [MHz]
실험수조 특성(민물)	전기전도도	0.071681 [1/m]
	투자율	7.2797×10^{-10} [F/m]
	유전율	1.2566×10^{-6} [H/m]
	굴절률	8.8

표 3. 실험 환경 구조 특성.

Table 3. Characteristics of experimental structure.

	Model	Characteristics
시스템	NI-5660 Signal generator	270 kHz-2.7 GHz
	NI-5670 Vector signal analyzer	RF signal generate 10 dBm to -110 dBm analysis
실험 수조	KIRO Engineering Basin	8 m(Width), 7 m(Depth) 12 m(Height)

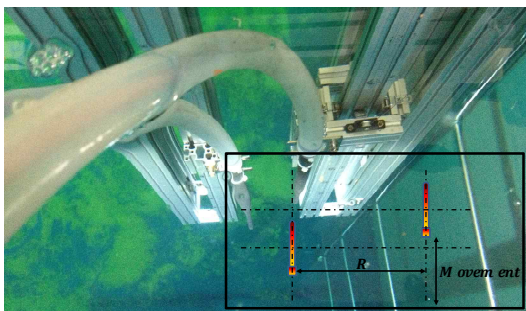
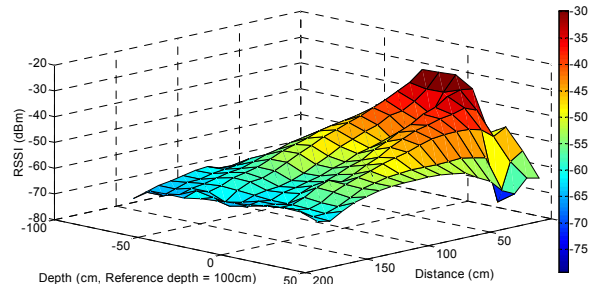


그림 8. 수직 이동 송수신 노드 프레임.

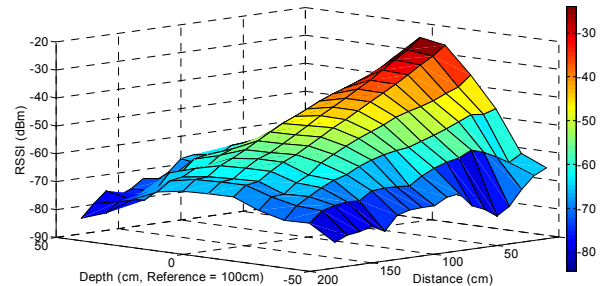
Fig. 8. Experimental frame for vertical movement TX and RX nodes.

3차원 입체 추정을 위해 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법은 평면 데이터와 z축 데이터를 조합하여 추정하는 방식이다. 이를 위해 그림 8과 같은 수직 이동 실험 세트를 이용하여 깊이에 따른 신호 감쇠를 확인한다.

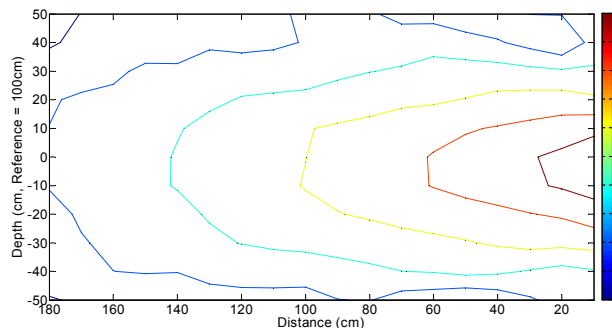
수직 이동 실험 결과 선형 이동에 대해서는 거리 추정 실험과 마찬가지로 일정한 감쇠 특성을 보였지만, 깊이 방향에 있어서 그림 9(a)와 같이 송수신 안테나의 깊이가 동일한 지점에서 주변 데이터보다 감쇠가 더 일어나는 것을 확인하였다. 이러한 현상이 안테나의 제조 및 수중 특성에 영향을 받을 수 있다고 가정하고, 안테나의 파장/주파수 공식을 이용하고 송신 주파수를 재 정의하여 얻은 결과를 그림 9(b)에 도식하였다. 이 결과는 거리에 따른 감쇠 특성뿐 아니라 깊이에 따른 감쇠 특성도 어느 정도 일정한 경향을 나타낸다는 것을 보여준다. 이러한 깊이 방향에 따른 감쇠는 안테나의 이득 패턴에 따라 상이하게 나타날 수 있기 때문에 사용하기가 어렵다. 그림 9(c)는 (b)그래프를 x-z평면인 E-plane 단면으로 표현한 것이다. 이는 앞서 그림 7과 비교하면 전 방향 특성보다는 지향적인 특성을 나타낸다. 3차원 위치추정을 위해서는 모든 방향에 있어서 동일한 감



(a) 420 MHz 3D figure.



(b) 573 MHz 3D figure.



(c) 573 MHz contour figure.

그림 9. 수직 이동에 따른 실험 결과.

Fig. 9. Experimental result of vertical movement.

쇠를 가지는 안테나가 추정에 유리하다. 이런 이유로 등방성에 가까운 패턴을 가진 안테나의 필요성이 요구되고, 그렇지 않을 경우 안테나 특성에 대한 사전 분석 및 거리 추정 알고리즘이 추가적으로 이루어져야 한다.

2. 로봇의 롤 각도(roll angle)에 따른 PLF 효과

전자기파의 감쇠 특성은 이득 및 방향성에 영향을 받기 때문에 앞서 실험했던 그림 9와 같은 결과를 볼 수 있었다. 또한 실제 수중 환경에서 활용할 경우 무인 잠수정에 장착된 안테나와 센서 노드의 안테나가 동일한 각도를 유지한다고 보장할 수는 없다. 그림 10과 같이 무인 잠수정의 롤 각도가 발생하는 경우 감쇠특성이 어떻게 바뀌는지 정의하고 이에 대한 적절한 보정이 필요하다. FRIIS 전송 방정식 [6,7]에서는 이를 PLF (Polarization Loss Factor)라고 정의하고, 두 안테나 사이의 롤 각도를 변수로 PLF 인자를 식 (3)과 같이 나타내었다. 이를 실험적으로 검증하기 위해서 주문제작한 420 MHz 0 dBi(0.2 dBi≅0 dBi) 안테나를 이용하여 실험을 수행하였다.

$$PLF = \cos^2 \phi (\phi = x \text{ 축 회전 각도}) \quad (3)$$

실험 장치는 그림 11과 같이 송수신 안테나 사이의 거리를 100 cm으로 유지한 상태에서 안테나의 회전에 따른 감쇠현상을 파악해 보았다. 측정 결과는 그림 12와 같이 식

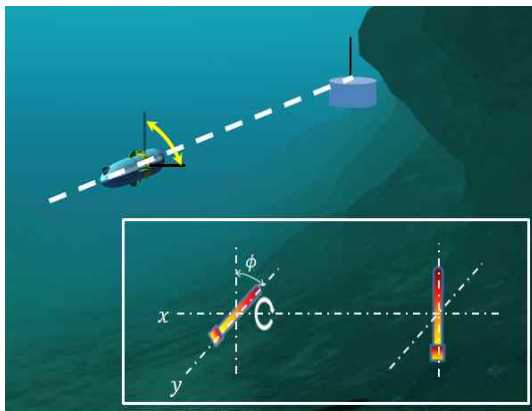


그림 10. 로봇의 롤 각도에 따른 감쇠.
Fig. 10. Attenuation by polarization effect.

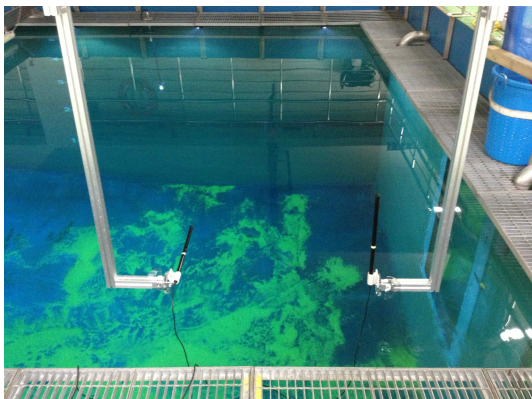


그림 11. PLF 영향을 확인하기 위한 실험 환경.
Fig. 11. Experimental environment for PLF.

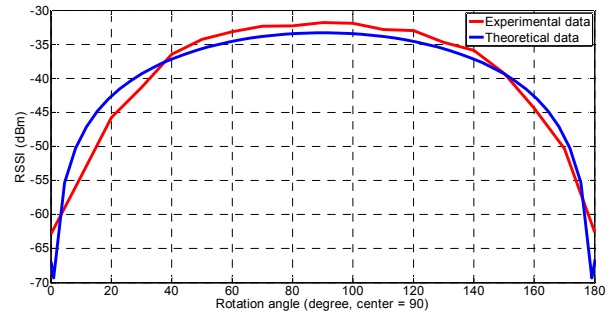


그림 12. 실제 측정된 데이터와 PLF 이론과 비교.
Fig. 12. Compare experimental PLF result and theoretical result.

(3)에서 제시한 결과와 매우 유사하게 나타남을 확인하였고, 이를 잠수정의 롤 각도에 따른 안테나 편향각 손실 인자로 적용할 수 있음을 보여준다.

3. 안테나의 피치 각도에 의한 ILF 효과

잠수정의 롤 각도에 따른 손실 요소가 PLF라면 잠수정의 수직 방향에 따른 피치 각도 요소에 대한 정의 역시 3차원 위치 추정을 위해서 고려되어야 한다. 무엇보다도 롤 각도에 의한 편향각 손실 요소(PLF)는 송수신 안테나가 동심축을 가지고 회전하는 반면 피치 각도에 의한 기울어짐 불일치 손실 요소(ILF)는 서로 다른 축을 가지고 회전하며 (그림 13), 이는 안테나의 패턴에 의한 영향을 크게 받는다. ILF는 본 논문에서 처음으로 제시하는 개념이다. 안테나의 기울기기에 따른 손실 요소는 공기 중에서는 전자기파를 이용한 3차원 위치 추정이 상대적으로 난해하기 때문에 연구되지 않았던 부분이다.

그림 13과 같이 로봇의 피치 각도 움직임에 따라 값의 변화를 그림 14와 같이 구조화된 환경에서 구현해 보았다. ILF 영향에 따른 결과는 송신 안테나와 수신 안테나를 동일한 조건 하에서(0-180도) 회전 시키면서 그림 15와 같이 얻을 수 있었다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 ILF에 의한 영향은 PLF 이상으로 신호 감쇠에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 아직까지 정확한 수학적, 물리적 의미는 규명하지 못하였으나, 안테나의 기울어짐에 의한 전자기파 수신 면적의 감쇠 및 안테나 길이 변화의 영향일 것으로 추정된다.

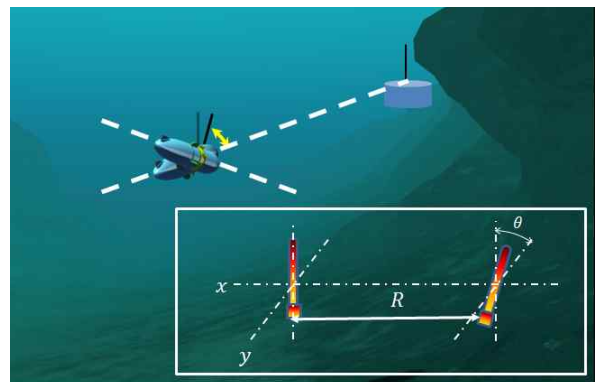


그림 13. 로봇의 피치 각도에 따른 ILF 감쇠.
Fig. 13. Attenuation by inclination effect.

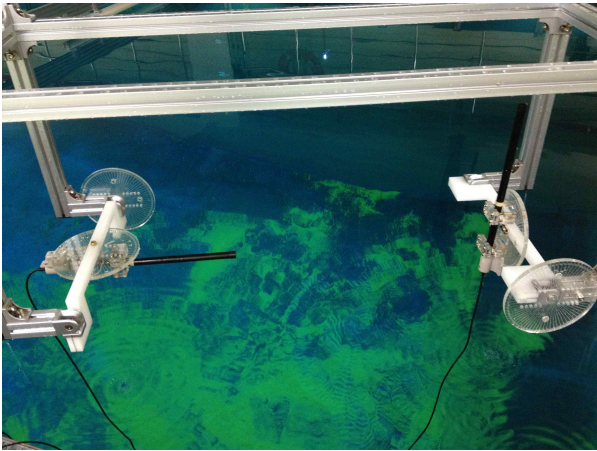


그림 14. ILF 확인을 위한 실험 환경.

Fig. 14. Experimental environment for ILF.

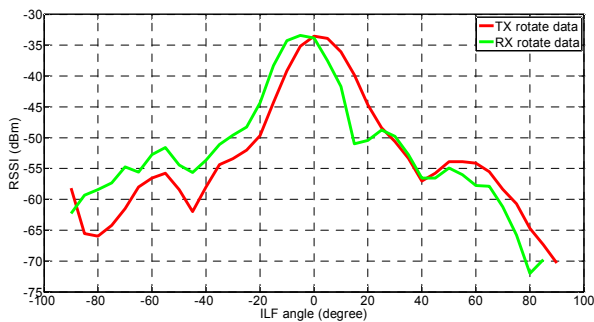


그림 15. 안테나 기울어짐 각도에 따른 신호 감쇠 경향.

Fig. 15. Experimental results according to TX and RX antenna inclination.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 전자기파를 이용한 수중 3차원 항법 센서 개발을 위한 기초 실험을 진행하고, 이에 따른 고려 요소, 가능성, 추정 방식에 대하여 설명하였다. 또한 실제로 구조화된 환경에서 3차원 추정 방법에 대한 실험을 진행하여 안테나의 기울어진 특성을 반영한 ILF 인자에 대한 새로운 모델을 제시하였다. 추후 UWSN 환경에서 3차원 위치 추정을 위해 보다 안정적인 특성을 가지는 추정 모델에 대한 검증은 추가하여 RF 및 내부 센서 기반 3차원 하이브리드 항법을 실험을 통해 구현할 계획이다.

참고문헌

- [1] T. K. Yang, W. Y. Choi, and J. M. Lee, "Localization of multiple robots in a wide area," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol 16, no. 3, pp. 293-299, Mar. 2010.
- [2] Kongsberg Maritime "Introductions of baseline systems," <http://www.km.kongsberg.com>.
- [3] Z. Yuyi, G. Zhenbang, W. Lei, Z. Ruiyong, and L. Huanxin, "Study of underwater positioning based on short baseline sonar system," *Proc. of International Conference on Artificial Intelligence and Computational*

Intelligence, Shanghai, China, vol. 2, pp.343-346, Nov. 2009.

- [4] S. J. Lee, K. M. Kwak, and J. Kim, "Development of two dimensional underwater localization system using RF sensors," *Proc. of the 7th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence 2010*, Busan, Korea, pp. 541-543, Oct. 2010.
- [5] K. M. Kwak, G. H. Lee, and J. Kim, "Developing underwater localization system with rssi," *Proc. of The 6th Korea Robotics Society Annual Conference (in Korean)*, Daegu, Korea, pp. 175-178, Jul. 2011.
- [6] D. G. Park, K. M. Kwak, W. K. Chung, and J. Kim, "Development of underwater distance sensor using EM wave attenuation," *Proc. of The 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013)*, Karlsruhe, Germany, will appear, May 2013.
- [7] D. G. Park, K. M. Kwak, W. K. Chung, and J. Kim, "Infrastructure-based localization system using underwater wireless sensor network," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol 18, no. 8, pp. 699-755. Aug. 2012.
- [8] H. T. Friis and N. J. Rumson, "Introduction to radio and radio antennas," *IEEE Spectrum*, vol. 8, no. 4, pp. 55-61, Apr. 1971.
- [9] D. C. Hogg, "Fun with the Friis free-space transmission formula," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 35, no. 4, pp. 33-35, Aug. 1993.
- [10] G. H. Lee and J. Kim "Docking system for unmanned underwater vehicle using reduced signal strength indicator," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol 18, no. 9, pp. 830-836. Sep. 2012.

곽경민



2011년 서울과학기술대학교 기계공학과 학사. 현재 서울과학기술대 학교 기계공학과 석사 과정 재학중. 관심분야는 Underwater Localization with RSSI, Underwater robots. Underwater thruster, battery.

김진현



1998년 포항공과대학교 기계공학과 학사. 2000년 포항공과대학교 기계공학과 석사. 2005년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사. 2005년~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 서울과학기술대학교 기계공학과 조교수. 관심분야는 Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering robots, Neuro Robotics.