

반전력빔폭을 이용한 전방향성 안테나의 수중 환경 수직 평면 감쇠 모델

Underwater E-plane Attenuation Model of Omnidirectional Antenna Using Half Power Beam Width (HPBW)

곽 경 민, 박 대 길, 김 영 현, 정 완 균, 김 진 현*
 (Kyungmin Kwak¹, Daegil Park², Younghyeon Kim¹, Wan Kyun Chung², and Jinhyun Kim^{1,*})

¹Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology

²Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology

Abstract: In this paper, we use the characteristics of electromagnetic waves underwater attenuation for estimating linear distance between a transmitting node and receiving node, and research underwater vertical plane attenuation model for constructing the underwater localization system. The underwater localization of 2 dimensional with the plane attenuation model in the horizontal plane (H-plane) was proposed previous research. But for the 3 dimensional underwater localization, the additional vertical plane (E-plane) model should be considered. Because the horizontal plane of omnidirectional antenna has the same attenuation tendency in x-y plane according to the distance, whereas in vertical plane shows an irregular pattern in x-z plane. For that reason, in the vertical plane environment, the attenuation should be changed by the position and inclination. Hence, in this paper the distance and angle between transmitting and receiving node are defined using spherical coordinate system and derive an antenna gain pattern using half power beam width (HPBW). The HPBW is called a term which defines antenna's performance between isotropic and other antennas. This paper derives omnidirectional antenna's maximum gain and attenuation pattern model and define vertical plane's gain pattern model using HPBW. Finally, experimental verifications for the proposed underwater vertical plane's attenuation model was executed.

Keywords: HPBW, underwater localization, RF localization, antenna pattern, omni-directional antenna, RSS, directivity

I. 서론

수중 환경에서 로봇을 활용한 무인 작업을 수행하기 위해서는 수중 로봇의 상대적 또는 절대적인 위치를 파악할 수 있는 능력이 요구되며, 이를 해결하기 위해 현재까지 다수의 수중 위치 추정 연구가 진행된 바 있다[1,2]. 가장 기본적으로 로봇 자체의 항법센서(INS)를 활용하는 방법이 있으며, 도플러 속도 로그(DVL : Doppler Velocity Log), 측면주사초음파(Side-scan sonar)를 이용하는 방법과 같이 지형 지물 또는 선박에 설치된 노드 까지 초음파의 반사파가 도달하는 시간(TOA: Time of arrival)을 이용하여 노드 간 거리를 알아내는 방법[3], 광학센서(Vision)를 이용하여 특정 지점의 표식을 검출하여 위치를 알아내는 방법, 전자기파의 수중신호감쇠를 이용한 거리 추정을 사용하는 방법[4] 등이 있다. 이 가운데 수중 전달 성능이 좋은 초음파를 사용하는 DVL을 이용한 방법과[5] 그림 1의 베이스라인(Baseline) 시스템 등이 많이 사용되고 있다.

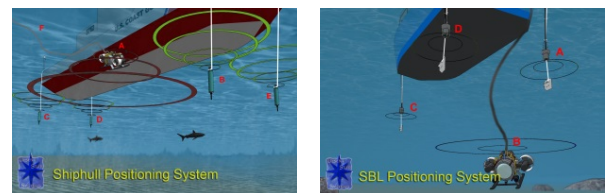


그림 1. 초음파를 이용한 베이스라인 시스템[6].
 Fig. 1. Baseline systems with ultrasonic sensors [6].

초음파 위치 추정 시스템은 현재 널리 사용되고 입증된 시스템으로서 넓은 범위에서 선박과 로봇 사이의 위치를 상대적으로 추정하기 위해 사용된다. 그러나 수중 초음파의 사용은 연근해(shallow water) 환경이나 복잡한 구조물 등이 설치된 지역에서는 다중 경로(mutli path) 효과가 발생하기 때문에 추정 정밀도가 떨어지거나 잘못된 정보가 얻어지는 경우도 발생한다[3]. 또한 높은 정밀도가 요구되는 구조물 시공 등 매니플레이터나 작업 툴을 사용하는 근거리 작업에서는 사용이 불가능하다는 단점이 있다.

이에 대한 대안으로 전자기파의 신호감쇠를 이용하여 구조화된 환경이나 근거리에서 수중 위치를 추정할 수 있는 기법에 대한 연구가 진행되었으며, 수중에서 전자기파의 거리와 매질에 따른 신호감쇠 연구[7-11], 수중 거리 감쇠 모델 및 2차원 위치 인식에 대한 연구[12] 결과들을 통해 전자기파를 이용하여 실험 수조 내에서 수 cm 수준의 위치추정이 가능한 것을 확인하였다. 그러나 제한된 전자기파 감쇠를 이용한 위치 추정은 그림 2에서 전방향성 안테나의 수평 평면

* Corresponding Author

Manuscript received August 16, 2015 / revised October 5, 2015 / accepted October 6, 2015

곽경민, 김영현, 김진현: 서울과학기술대학교 기계공학과
 (kyungmin1983@seoultech.ac.kr/daos8489@seoultech.ac.kr/jinhyun@seoultech.ac.kr)

박대길, 정완균: 포항공과대학교 기계공학과
 (daegilpark@postech.ac.kr/wkchung@postech.ac.kr)

※ 본 논문은 한국과학기술원 국방무인화 기술 특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원 및 산업통상자원부 기술혁신사업(로봇산업원천기술개발사업 No. 10043928) 으로 지원된 연구임.

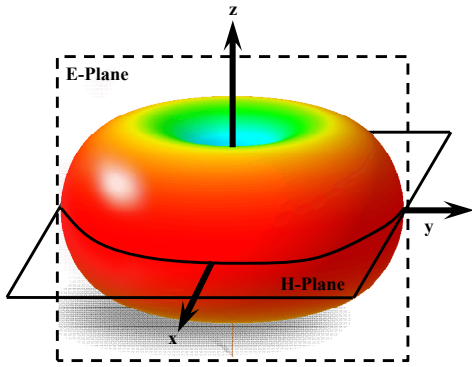


그림 2. 전방향성 안테나의 이득 패턴.

Fig. 2. Gain pattern of omnidirectional antenna.

(H-plane) 감쇠 모델을 이용하여 2차원 평면에서 도출되었으며, 3차원 위치 추정을 위해 필요한 수직 평면(E-plane)에 대한 신호 감쇠 모델은 제안된 바가 없다. 그림 2에서처럼 전방향성(omnidirectional) 안테나의 방사 이득 특성은 수평 평면에 대해서는 거리에 따라 일정한 진원에 가까운 특성을 보이지만, 수직 평면에 대해서는 거리에 따라 일정하지 않은 패턴을 보이기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 전자기파를 이용한 3차원 수중 위치추정 시스템을 위해 전방향성 안테나의 수직 평면 환경에서의 이득 패턴 모델을 정의하고, 이를 도출하기 위해 전방향성 안테나의 이득 패턴 결정 요소인 반전력빔폭(HPBW: Half Power Beam Width)을 이용하였다. 이를 통해 안테나의 수직 평면에 대한 이득 패턴을 분석하고, 이에 따른 지향성 모델 및 효율을 포함한 이득 모델을 제안하였다. 마지막으로 실험을 통해 수중 전방향성 안테나의 수직 평면 이득 패턴에 따른 감쇠 모델의 실효성을 검증하였다.

II. 전자기파의 수중 환경 감쇠 특성

전자기파의 송수신에 따른 감쇠는 크게 전자기파가 통과하는 매질과 전자기파 복사 및 안테나 특성에 따른 공진 면적에 의해 결정된다. 먼저 매질에 따른 감쇠 특성은 J. C. Maxwell [8,13]에 의해 제안된 수식 (1)과 같이 감쇠상수 α 에 따라 거리 R 에 대해서 기하급수적으로 감쇠하는 경향을 보여준다.

$$P_R/P_T = \exp(-\alpha R) \quad (1)$$

여기서 P_T 는 송신 에너지, P_R 은 수신 에너지를 의미하고, 감쇠상수 α 는 도전율 σ , 투자율 μ , 유전율 ϵ 에 의해 영향을 받는다. 도전율은 도체 매질 내에 분포된 자유전자의 수에 따라 얼마나 전기를 잘 흐르게 하느냐를 나타내는 값이며, 투자율은 매질 혹은 물질의 내부에서 자속이 얼마나 잘 통과되는지를 나타내고, 유전율은 전기장이 유전체를 통과할 경우 유전 분극 현상이 일어나 전기장에 대해 반대 방향으로 분극에 의한 전기장이 생기고 이로 인해 유전체 내의 전기장이 약해지는 비율을 나타내는 값이다. 결론적으로 매질을 통과하는 전자기파의 감쇠 비율은 세 가지의 상수로 구성되는 감쇠 상수에 의해 결정된다[13].

매질을 통과하면서 잃어버리는 에너지뿐 아니라 전자기파는 복사에 의한 영향으로 거리가 멀어짐에 따라 에너지 밀도가 낮아지고, 송신 및 수신 안테나의 특성에 의해서도 신호 감쇠가 일어난다. 이를 대표적으로 표현한 것이 FRIIS 공식이다. FRIIS에 의해 제안된 전자기파의 감쇠 모델은 수식 (2)와 같다[14].

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2} G_T G_R (\text{PLF}) \quad (2)$$

이 모델은 송수신 안테나의 성능을 나타내는 이득 G_T, G_R , 전자기파의 파장 λ , 송수신 안테나 사이의 거리 R , 편향손실인자(PLF: Polarization Loss Factor) 그리고 송수신전파의 세기 P_T, P_R 로 구성된다. 정리하면 FRIIS 공식에 따른 송신에너지의 감쇠는 안테나 사이의 거리 변화에 따른 복사면적의 감쇠, 안테나의 성능인자를 나타내는 이득, 그리고 안테나 간의 전파 진행 각도가 어긋남으로 인한 편향손실인자에 의해 영향을 받는다.

위 모델에서 안테나 사이의 거리와 편향손실인자에 의한 영향은 두 안테나의 위치와 자세에 따라 정해지지만, 안테나의 이득 패턴은 사용되는 안테나에 따라 크게 달라진다. 안테나 이득 패턴은 전자기파 에너지 밀도가 같은 지점을 연결하여 표현하며, 이론적으로 총 에너지량이 같을 경우 안테나에 따라 에너지 밀도 분포가 달라지는 효과이다. 그러나 FRIIS 모델에서는 안테나의 이득에 대해서는 자세한 분석을 제시하지 않고 있다. 등방성 안테나를 사용하는 경우에는 안테나 이득이 3차원 모든 방향에 대해 동일하기 때문에 상수로 취급할 수 있다. 그러나 현실적으로 등방성 안테나를 제작하는 것이 어렵고, 등방성 안테나가 아닐 경우 3차원 환경에서 안테나의 상대 위치에 따라 안테나 이득 패턴의 영향을 크게 받기 때문에 이에 대한 고려가 필수적이다. 예를 들어 전방향 다이폴(dipole) 안테나의 경우에는 도넛 형태의 이득 패턴을 보이기 때문에 그림 3의 a에 위치한 노드같이 수직으로 송수신 안테나가 배열되면 동일한 거리에서 동일한 신호감쇠를 보여주는 등방성(isotropic) 안테나와 달리 신호를 전혀 수신하지 못하는 경우도 발생한다. 따라서 보다 정확한 전자기파 신호 감쇠 모델을 구현하기 위해서는 사용 안테나의 이득 특성과 안테나 사이의 상대 자세에 대한 영향을 고려해야 한다.

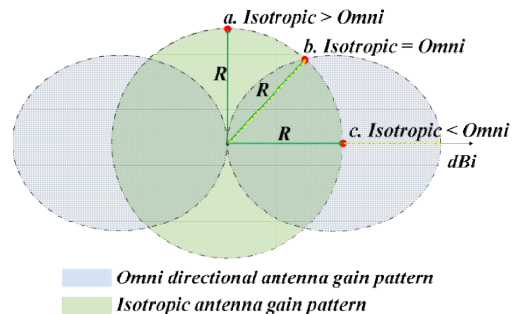


그림 3. 등방성 안테나와 전방향성 안테나 이득 비교.

Fig. 3. Gain comparison between isotropic and omnidirectional antennas.

III. 수직 평면에 따른 감쇠 인자

수직 평면 상의 전자기파 감쇠 효과를 분석하기 위해서 우선 안테나 사이의 상대 위치 인자에 대한 정의가 필요하다. 3차원 공간에서 그림 4와 같이 거리 R 와 각도 θ, φ 를 이용하는 구면 좌표계는 거리에 따른 감쇠가 주요한 전자기파의 감쇠를 설명하기에 적합한 좌표계이다. 등방성 안테나의 경우 이론적으로 모든 방향과 각도에 대해서 일정하게 전자기파가 방사되기 때문에 감쇠 효과는 각도에는 영향을 받지 않고 거리에 따라에서만 감쇠가 일어나고, 기존 2차원 평면에서의 모델[12]을 그대로 적용할 수 있다. 전방향성 안테나의 경우에는 방위각인 φ 에 대해서는 일정하지만 그림 5에서와 같이 고도각 θ 에 대해서는 안테나의 이득 패턴에 따라 감쇠 정도가 달라지기 때문에, 안테나의 수직 평면 이득 패턴 모델은 안테나 사이의 거리와 더불어 고도각을 포함해야 한다.

이와 유사하게 그림 6과 같이 송수신 안테나가 같은 높이에 있지만 한쪽 안테나가 기울어질 경우에도 이득 패턴 모델

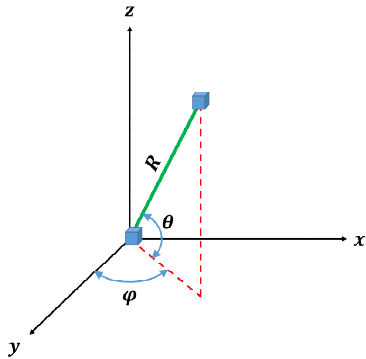


그림 4. 구면 좌표계.
Fig. 4. Spherical coordinate.

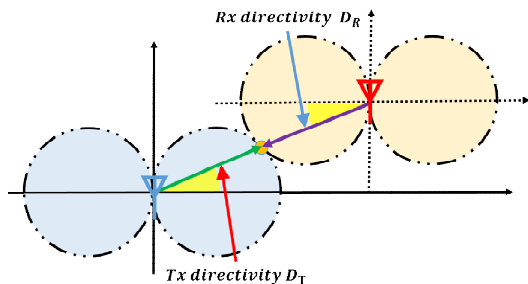


그림 5. 고도각에 따른 이득 패턴.
Fig. 5. Gain pattern with elevation angle.

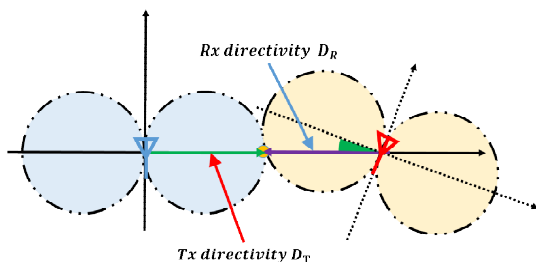


그림 6. 기울어짐각에 따른 이득 패턴.
Fig. 6. Gain pattern with inclination angle.

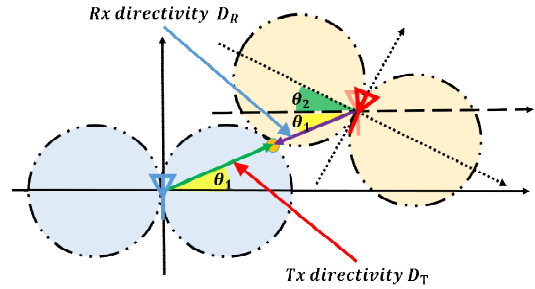


그림 7. 수직 평면에서의 안테나 이득 감쇠 인자.
Fig. 7. Attenuation factor in the E-plane of antennas gain pattern.

은 변하게 된다. 따라서 이를 기울어짐각에 의한 효과로 정의할 수 있다.

이러한 효과들을 반영한 전방향성 안테나의 수직 평면에서의 이득 패턴을 구하기 위해서 이 논문에서는 그림 4의 구면 좌표계 x-z평면 상의 각 θ 에 해당하는 고도각을 θ_1 으로, 그림 6에서 나타낸 기울어짐각을 θ_2 로 그림 7과 같이 정의하였다. 즉, 전방향성 안테나의 수직 평면에서의 이득 패턴은 θ_1, θ_2 각각의 의한 효과와 θ_1, θ_2 가 동시에 작용하는 효과로 인해서 감쇠가 일어나는 것으로 정의할 수 있다.

IV. 전방향성 안테나의 수직 평면 이득 패턴 모델

앞서 III절에서는 전방향성 안테나의 수직 평면 이득 모델을 표현하기 위한 방법으로 구면 좌표계와 수신 안테나의 기울어짐 각도를 감쇠 인자로 제안하였다. 이번 절에서는 제안된 요소들에 대한 감쇠 모델을 반전력빔폭을 이용하여 도출하고자 한다.

수식 (2)에서 주어진 FRIIS모델에서 안테나 이득 모델 $G_T G_R$ 은 수식 (3)과 같이 주변 매질에 따른 송수신 안테나의 효율($e_T e_R$)과 지향성($D_T D_R$) 모델로 표현할 수 있다[14].

$$G_T G_R = e_T e_R D_T D_R \quad (3)$$

수식 (3)에서 송수신 안테나의 수직 평면 이득 모델을 송신 및 수신 안테나에 따른 개별 모델($e_T D_T, e_R D_R$)로 나누고 수직 평면에 따른 개별 지향성 D 에 대한 모델을 수식 (4)와 같이 최대 지향성(D_{max})과 단일 안테나의 수직 위치 변화에 따른 패턴모델(U)을 이용하여 나타낼 수 있다[14].

$$D = D_{max} U \quad (4)$$

최대 지향성은 상수로 표현되며 전방향성 송신 안테나 기준 패턴 각이 90도 일 때 최대 세기로 전자기파를 송신한다. 이를 구하기 위해서는 안테나의 개별 특성인 반전력빔폭(HPBW, 단위: Degree)을 통해 수식 (5)와 같이 수학적으로 표현할 수 있다[14].

$$D_{max} = \frac{101}{\text{HPBW}(\text{Deg.}) - 0.0027 (\text{HPBW}(\text{Deg.}))^2} \text{dB} \quad (5)$$

반전력빔폭이란 그림 8의 안테나의 지향성 패턴에서 가장 파워가 센 지점인 a의 신호세기 크기가 1일 때 세기가 절반으로 줄어드는 지점 b 사이의 각도를 의미한다.

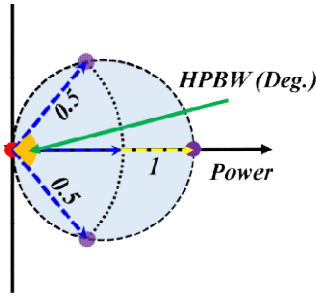


그림 8. 반전력빔폭 개념도.

Fig. 8. Conceptual diagram of half power beam width.

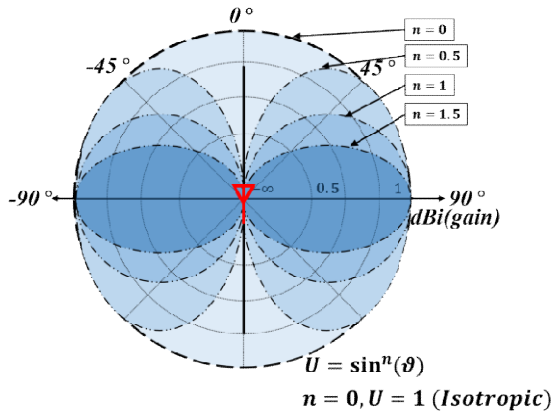


그림 9. n값에 따른 지향성 패턴 특징.

Fig. 9. Directivity characteristics according to “n.”

최대지향성이 지향성 모델의 최대 점(가장 강한 신호를 방사하는 지점)을 구하기 위한 상수 배수의 역할을 한다면 안테나의 패턴 모델은 실제 전방향성 안테나의 빔폭의 크기와 모양을 결정한다. 안테나의 패턴 모델 U 는 수식 (6)과 같이 표현된다[14].

$$U = |\sin^n(\theta)|, 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (6)$$

수식 (6)에서 n 은 안테나의 패턴 형태를 결정짓는 요소이며 그림 9과 같이 0에 가까울수록, 이상적인 등방성 안테나의 형태로 나타나고, 커질수록 신호세기가 특정 영역에 집중되는 현상을 보여준다. 이를 구하기 위해서는 앞서 언급한 반전력빔폭 값을 이용하여 수식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$0.5 = \left| \sin^n \left(90 - \frac{\text{HPBW}(\text{Deg.})}{2} \right) \right| \quad (7)$$

수식 (3)-(7)을 이용하면 단일 전방향성 안테나의 이득 모델에 대해 수식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = |D_{m \text{ ax}} \sin^n(\theta)| \quad (8)$$

수식 (8)의 모델을 수식 (3)의 안테나별 지향성에 적용시키면 수식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며, 이 모델을 수직 평면 패턴에 따른 감쇠 모델로 정의할 수 있다.

$$D_T D_R = |D_{Tm \text{ ax}} \sin^{n_T}(\theta) | |D_{Rm \text{ ax}} \sin^{n_R}(\theta) | \quad (9)$$

지금까지 FRIIS 공식의 이득 패턴 모델에 근거하여 수중 안테나 모델을 제안하였다. 그러나 수식 (9)에서 제안한 이득 모델의 θ 은 수직 평면의 z 축을 기준으로 회전에 따른 이득을 표현하지만, 두 안테나의 회전 및 위치 파악을 앞서 설명한 구면 좌표계를 이용하여 표현하려면 기준점의 수정이 필요하다. 따라서 두 안테나의 회전 각도에 따른 변화를 측정하기 위해서는 안테나의 방사 패턴에 해당하는 각도인 그림 8의 θ 를 x 축으로부터 회전 각도인 $90 - \theta_1$ 으로 표현 해하고 수식 (10)과 같이 주어진다.

$$D_T D_R = |D_{Tm \text{ ax}} \cos^{n_T}(\theta_1) | |D_{Rm \text{ ax}} \cos^{n_R}(\theta_1) | \quad (10)$$

수식 (10)은 그림 5와 같이 동일 거리 상 자체 회전 없이 전방향성 안테나 간의 높이 차이에 의한 고도 각을 이용하여 지향성 패턴 모델로 표현할 수 있다. 여기에 그림 7과 같이 수신 안테나의 자체 회전까지 고려하면 수식 (11)과 같이 최종적인 지향성 패턴 모델로 나타낼 수 있다.

$$D_T D_R = |D_{Tm \text{ ax}} \cos^{n_T}(\theta_1) | |D_{Rm \text{ ax}} \cos^{n_R}(\theta_1 + \theta_2) | \quad (11)$$

수식 (11)의 이득 패턴에 안테나의 효율을 적용하면 FRIIS의 송수신 안테나 이득 G_T, G_R 을 수직 평면 전 방향에 대해 나타낼 수 있는 모델을 수식 (12)와 같이 도출할 수 있다.

$$G_T G_R = e_T e_R |D_{Tm \text{ ax}} \cos^{n_T}(\theta_1) | |D_{Rm \text{ ax}} \cos^{n_R}(\theta_1 + \theta_2) | \quad (12)$$

수식 (12)를 통해 전방향성 안테나의 수직 평면 이득에 따른 감쇠 모델을 정의하였다. 이 모델은 향후 3차원 위치 추정을 위해 전자기파의 감쇠를 이용할 때 송수신 안테나 사이의 수직 높이 차이 및 기울어짐 각에 따른 인자를 보정하기 위해 활용할 수 있으며, 이를 통해 3차원 수중 위치 인식 시스템 구성이 가능하다.

V. 안테나의 수직 위치에 따른 모델 검증 실험

앞서 IV절에서 제안한 모델을 검증하기 위해 수조환경에서 실험을 진행하였다. 공기 중에서 안테나의 방사패턴을 알아보기 위해서는 거대한 무반사실이 필요하지만, 수중 환경에서는 매질에 의한 큰 감쇠 효과로 인해 전자기파의 반사가 거의 이루어지지 않기 때문에 적당한 크기의 수조에서 실험을 진행할 수 있다.

실험을 진행한 수조 및 기구는 그림 10과 같이 구성되어 있다. 실험을 위한 장비는 National Instruments 사의 벡터 스펙트럼 분석기(vector spectrum analyzer)와 신호 발생기(signal generator)를 이용하였다. 실험은 두 안테나의 수직 위치변화 각도에 따른 영향(ELF: Elevation Loss Factor)과 단일 안테나의 회전에 의한 영향(ILF: Inclination Loss Factor)을 알아보기 위해 적합한 장치를 구성하고 진행하였다.

$$D_T = 1.3002 \cos^{19.3709}(\theta_1) \quad (13)$$

$$D_R = 1.3002 \cos^{19.3709}(\theta_1 + 0) \quad (14)$$

실험은 그림 13의 수조 환경에서 진행되었고, 이 수조의 매질 값은 표 1에 나타나 있다. 또한 이 실험에는 수직 이동

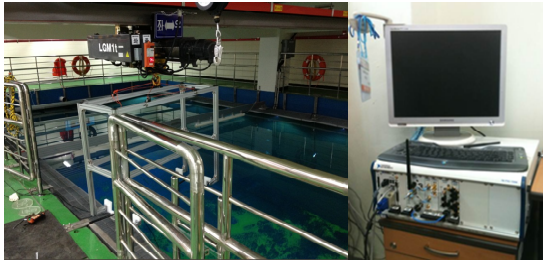


그림 10. 실험 환경 및 장비.

Fig. 10. The experiment environment and equipment.

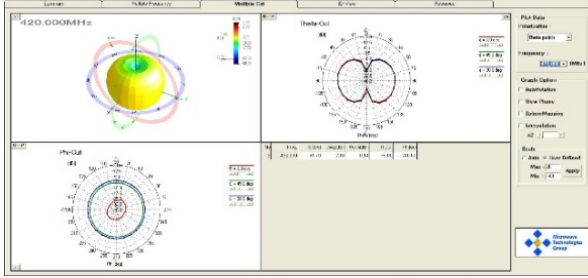


그림 11. 제작 안테나의 무반사실 실험 패턴 결과.

Fig. 11. The result of antenna's pattern in un-echoic chamber.

표 1. 실험 수조내의 환경 변수.

Table 1. Environment variables in experiment basin.

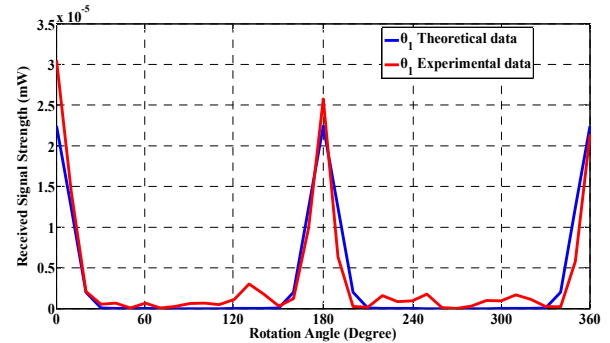
	요소	특성치
수질 특성	도전율 (σ)	0.075 (l/m)
	투자율 (μ)	1.2566×10^{-6} (H/m)
	유전율 (ϵ)	7.2797×10^{-10} (F/m)
	보정 요소	-18.23 (dB)
안테나 성능	송신안테나 이득 (G_T)	0.14 (dBi)
	수신안테나 이득 (G_R)	0.14 (dBi)
	송신안테나 세기 (S_T)	10 (dBm)
	반전력 빔폭	110.451 (deg.)
	안테나 이득 상수 (n)	19.3709



그림 12. 수직 위치변화에 따른 각도 변화 실험 방법.

Fig. 12. The experiment method for vertical position.

에 따른 신호감쇠 경향을 최소화 하기 위해 그림 11과 같이 0dBi인 등방성 안테나의 패턴에 가깝게 주문 제작된 안테나를 사용하였다. 이 안테나를 동일거리 수직 위치 변화에 따른 결과를 얻기 위해 그림 12와 같이 두 안테나의 회전을 통해 동일한 효과를 얻을 수 있으면서도 보다 편리한 실험을 진행할 수 있게 그림 13과 같이 구성하였다. 이에 따른 송수신 안테나의 회전 θ_1 에 따른 결과는 수식 (13), (14)의 최종 지향성 모델과 거리 모델[12]을 사용하였다. 수식 (13), (14)는 실험에 사용한 안테나의 최대 지향성을 무차원 수로 변환하고, 추가적인 안테나 자체의 회전 θ_2 이 없다는 전제 하에, 수식 (5)-(9)를 이용하여 구한 n 을 적용한 안테나의 최종 지향

그림 13. 송 수신 안테나의 회전 각 (θ_1)에 의한 감쇠 실험 장치.Fig. 13. The experiment equipment for θ_1 rotation.그림 14. 각도 θ_1 회전에 따른 실험 결과.Fig. 14. Experiment result for θ_1 rotation.

성 모델이다. 여기에 표 1의 매질 변수를 대입하여 효율, 매질에 따른 감쇠, 안테나의 복사 등의 변수를 거리 모델[12]을 적용하여 이론 값을 그림 14의 청색 선으로 표현하였다.

이에 대해 수조환경에서 얻은 실험결과를 보게 되면, 0도와 180도일 때 신호의 세기가 뚜렷하고 90도와 270도에서는 신호가 거의 사라지는 것을 알 수 있다. 이는 모델과 매우 유사한 감쇠 패턴을 보여준다. 또한 급격한 감쇠가 일어나는 구간의 경향 역시 제안한 모델과 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인하였다. 그러나 실험 값에서는 이론 값과는 다르게 중간 중간 불규칙한 패턴을 보이는 구간이 다소 발생하였고, 이러한 현상은 안테나의 반사, 회절, 굴절의 특성과, 실험 수조 주변의 장비에서 발생하는 간섭파의 효과에 의한 것으로 추정된다.

또 다른 수직면 회전에 의한 감쇠요소인 수신 안테나의 독립적인 회전 θ_2 에 따른 감쇠 영향을 확인하기 위해서, 그림 15와 같이 앞선 실험과 동일한 환경에서 수신 안테나의 회전만 이용하여 실험을 진행하였다. 수신안테나의 회전 각도 θ_2 에 의한 감쇠의 경우는 앞선 이론 모델에서 적용된 동일한

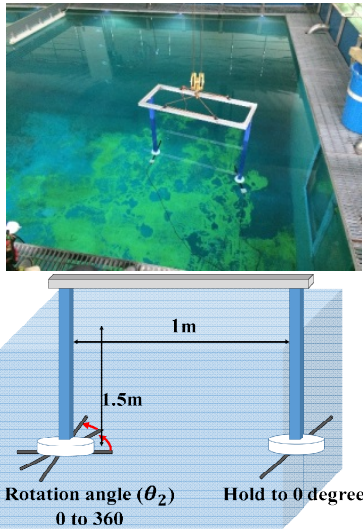


그림 15. 수신 안테나 회전 각도 θ_2 에 의한 감쇠 실험 장치.
Fig. 15. The experiment equipment for θ_2 rotation.

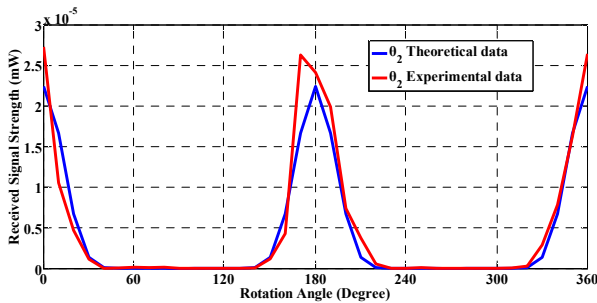


그림 16. 각도 θ_2 회전에 따른 실험 결과.
Fig. 16. Experiment result for θ_2 rotation.

변수를 가지는 수식 (15), (16)에 $\theta_1 = 0$ 을 적용하여 그림 16의 이론 값과 같이 표현될 수 있다.

$$D_T = 1.3002 \cos^{19.3709} (0) \quad (15)$$

$$D_R = 1.3002 \cos^{19.3709} (0 + \theta_2) \quad (16)$$

그 결과 이론에서 구한 모델과 실험을 통해 얻은 결과가 유사하다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 앞서 제안한 수직 평면 상의 위치에 따른 안테나 이득 모델이 유효함을 확인하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 수중 3차원 위치 추정 시스템 구축을 위해 전방향성 안테나의 수중 환경 수직 평면에서의 이득 감쇠 모델을 제안하였다. 송수신 안테나 사이의 고도 각과 기울어짐 각도를 이용하여 수직 평면 상의 지향성 모델을 정의하였다. 이를 위해 Friis 공식의 이득 모델에 대한 분석을 진행하였고, 반전력빔폭의 빔 패턴 특성을 이용하여 안테나의 지향성 모델을 결정하는 상수를 구하였다. 이를 적용하여 전방향성 안테나의 수중 환경에서의 지향성 모델을 획득하였고, 실제 실험을 통해 얻어진 결과를 통해 제안한 모델의 타당성을 검증하였다. 이는 전방향성 안테나의 수직 평면에 해당하는 수중 감쇠 패

턴 모델이 실제 환경에서 사용 가능함을 보여주는 결과이다.

본 논문의 결과를 바탕으로 향후 3차원 수중 전방향성 안테나의 거리 및 효율을 포함한 일반화된 전방향성 안테나 모델에 대한 연구를 진행할 것이다. 그리고 이러한 3차원 수중 감쇠 모델을 바탕으로 수중 3차원 위치 인식 시스템을 구축할 예정이다.

REFERENCES

- [1] Paull, L. Saeedi, S. Seto, M. Li, H., "AUV navigation and localization: A review," *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 38, no. 1, pp. 131-149, 2014.
- [2] Fallon, M. F. Folkesson, J. McClelland, H. Leonard, J. J., "Relocating underwater features autonomously using sonar-based SLAM," *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 38, no. 3, pp. 500-513, 2013.
- [3] X. Che, I. Wells, G. Dickers, P. Kear, and X. Gong, "Re-evaluation of rf electromagnetic communication in underwater sensor networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, no. 12, pp. 143-151, 2010.
- [4] D. G. Park, J. Kim, and W. K. Chung, "Simulated 3D underwater localization based on RF sensor model using EKF," *Proc. of Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (8th URAI)*, pp. 832-833, 2011.
- [5] B. Zerr, G. Mailfert, A. Bertholom, and H. Ayreault, "Sidescan sonar image processing for AUV navigation," *Proc. of Oceans 2005*, vol. 1, pp. 124-130, Europe, 2005.
- [6] Wikipedia images, "Method of operation of a short baseline acoustic positioning system for ROV".
- [7] Ahmed I. Al-Shamma'a, Andrew Shaw, and Saher Saman, "Propagation of Electromagnetic Waves at MHz Frequencies Through Seawater," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*, vol. 52, no. 11, pp. 2843-2849.
- [8] J. C. Lee and S. W. Nam, "Effective area of a receiving antenna in lossy medium," *Antennas and propagation, IEEE Transactions*, vol. 57, no. 6, pp. 1843-1845, Jun. 2009.
- [9] 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.
- [10] 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. 699-705, Aug. 2012.
- [11] K. M. Kwak and J. Kim, "Development of 3-dimensional sensor nodes using electro-magnetic waves for underwater localization," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 2, pp. 107-112, Feb. 2013.
- [12] D. G. Park, K. M. Kwak, W. K. Chung, and J. Kim, "Development of underwater distance sensor using EM wave attenuation," *International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe Germany, 2013.
- [13] H. Buck, "Engineering Electromagnetics 7th," McGraw-hill, Boston, 2006.
- [14] C. A. Balanis, "Antenna theory : Ch. 2 Basic parameter of antenna," John Wiley, New York, 2005.



곽 경 민

2011년 서울과학기술대학교 기계공학과 학사. 2013년 서울과학기술대학교 기계공학과 석사. 2013년~현재 서울과학기술대학교 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 Underwater Localization, RSSI, Underwater Robots.



박 대 길

2011년 서울과학기술대학교 기계공학과 학사. 2011년~현재 포항공과대학교 기계공학과 석박통합과정 재학중. 관심분야는 Underwater Sensors, SLAM, Underwater Localization, Underwater Robots.



김 영 현

2014년 서울과학기술대학교 기계공학과 학사. 2014년~현재 서울과학기술대학교 기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 Underwater robots, Underwater thruster, Underwater mems sensor.



정 완 군

1981년 서울대학교 기계설계학과 학사. 1983년 한국과학기술원 기계공학 석사. 1987년 한국과학기술원 로봇공학 박사. 1987년~1993년 POSTECH 기계공학과 조교수. 1988년 CMU 방문 교수. 1995년 U.C.Berkeley visiting scholar. 1993년~2000

년 POSTECH 기계공학과 부교수. 2000년~현재 POSTECH 기계공학과 정교수. 2009년~현재 IEEE Transactions on Robotics Editor. 관심분야는 SLAM, Navigation, Underwater robots, Medical Robotics, Minimally Invasive Surgery, Robust Controller.



김 진 현

1998년 포항공과대학교 기계공학과 학사. 2000년 포항공과대학교 기계공학과 석사. 2005년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사. 2005년~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 서울과학기술대학교 기계공학과 부교수. 관

심분야는 Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering robots, Neuro Robotics.