

전자기파의 감쇄신호를 이용한 무인 잠수정의 도킹시스템 개발

Docking System for Unmanned Underwater Vehicle using Reduced Signal Strength Indicator

이 기 현, 김 진 현*

(Gi-Hyeon Lee¹ and Jinhyun Kim¹)

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

Abstract: According to increasing the importance of underwater environments, the needs of UUV are growing. This paper represents the mechanism and algorithm of UUV docking system with 21-inch torpedo tubes for military submarines as a docking station. To improve the reliability of the docking, torpedo tubes launch a wired ROV and next the ROV combined with UUV is retrieved. For estimating the relative position between the ROV and UUV, in this paper, combining RF sensors and vision system is proposed. The RSSI method of RF sensors is used to estimate the distance and the optical image is combined for the directional information.

Keywords: underwater docking, unmanned underwater vehicle, RF, RSSI

I. 서론

인간이 무한한 자원의 보고인 바다를 개척함에 있어서 가장 어려운 것은 수중 환경에 의한 수중 작업의 제약이라 할 수 있다. 이를 극복하기 위해 수중 무인 잠수정(UUV: Unmanned Underwater Vehicle)의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 무인 잠수정은 사람이 접근하기 힘든 환경에서 장시간 작업을 가능하게 하여, 수중자원 탐사, 해저 케이블 부설, 해저 유전 개발 등 민간 상업분야에서 활용도가 높아지고 있고, 무엇보다 군사적 목적으로도 활용이 가능해 새로운 무기 체계로 관심을 받고 있다. 기존에 사람이나 유인잠수정으로 작업하는 것에 비해 비교적 적은 비용으로 위험한 환경까지 접근할 수 있으며, 한 척의 모선과 적은 인력으로 다수의 UUV를 운용하여 효과적인 작업이 가능하다[1].

이러한 작업에 사용되는 자율구동 무인 잠수정(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)은 무선, 자율 조종이 가능한 수중 이동체로 정의할 수 있다. AUV는 조종 및 통신, 전원 공급을 위한 케이블이 없어 넓은 운용 범위를 가지는 장점이 있지만, 수중에서는 통신 수단이 매우 제한적이고 AUV 내부의 공간상의 제약으로 전원에 한계가 있어 장기적인 운용을 위해서는 모선이나 도킹 스테이션 등 지원시설과의 정보 교환 및 전력공급 등이 필요하다. 이러한 작업은 AUV를 인양하지 않고 수중에서 수행하는 것이 더 효율

적이므로 수중에서 AUV와 지원시설간의 물리적 연결을 위하여 수중 도킹 기술이 필요로 된다.

지상에서는 GPS, 영상정보, 레이저, 초음파 센서 등 위치 추정에 사용 가능한 센서가 수중에서보다 비교적 많고 이러한 센서를 바탕으로 한 로봇의 위치 추정 및 자율 주행을 위한 여러 알고리즘이 개발되고 있다[2]. 또한 자율 이동 로봇에 대한 관심이 높아지면서 비교적 저가이면서 높은 성능을 보이는 위치 추정 시스템에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[3,4]. 반면 수중에서는 위치 정보를 얻을 수 있는 수단이 크게 제한되어 정확한 위치 정보를 얻어 로봇을 제어하는데 많은 제약이 따르게 된다.

일반적으로 원거리에서 근거리까지 유도하는 Homing 과정에서 UUV의 수중항법에 사용되는 위치 추정 방법은 관성센서(IMU: Inertial Measurement Unit), DVL (Doppler Velocity log), Gyro등을 이용한 추측항법(deadreckoning), 초음파센서를 이용하여 거리, 각도를 계산하여 위치를 추적하는 LBL (Long Base Line), USBL (Ultra Short base Line) 등의 초음파 항법, 초음파 센서와 관성센서를 융합하는 복합항법 등이 있다. 하지만 수중 도킹을 위해서는 비교적 빠르고 정확하게 위치, 자세 등을 추정할 필요가 있는데, 위와 같은 방법들은 주로 원거리에서 사용되며 갱신 주기가 길고 근거리에서 정확하게 UUV의 위치를 파악하기 어렵다 [5-9]. 이에 본 논문에서는 현재 연구되고 있는 RF (Radio Frequency) 센서의 감쇄신호(RSSI: Reduced Signal Strength Indicator)를 사용한 거리 추정방법을 활용하여 도킹하는 방식을 제안하고, 특히 군용 잠수함에서의 도킹 시스템의 구성에 대해 고려하고자 한다.

또한 기계적인 측면에서 기존의 도킹 방식을 적용할 경우, 이미 개발되어 있는 장비 시스템의 변경이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 군용 잠수함의 어뢰발사관을 도킹 스테이션으로 사용하는 방법을 제안한다. 군용 잠수함의 어

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 6. 1., 수정: 2012. 7. 30., 채택확정: 2012. 8. 8.

이기현, 김진현: 서울과학기술대학교 기계공학과

(leegihyeon@gmail.com/jinhyun@seoultech.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었음. 또한 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0014003).

퇴발사관을 직접 도킹 스테이션으로 사용할 경우 별도의 개조가 필요하지 않지만, 회수 시 입구가 좁고, AUV와 잠수함과의 상대속도 때문에 도킹이 쉽지 않은 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 어퇴발사관에서 도킹용 유선 ROV (Remotely Operated Vehicle)를 진수하여 잠수함 외부에서 AUV와 ROV를 도킹시킨 후 ROV와 함께 AUV를 회수하는 방식을 제안하고, 삼변측량 기법을 이용하여 AUV의 회수를 위해 필요한 ROV와 AUV의 RF센서의 개수와 배치에 대해 고려한다.

II. 수중 도킹 시스템

수중에서 AUV의 정보 교환, 전원 공급을 위한 수중 도킹기술은 수중 이동체의 주요 연구분야 중 하나이고, 여러 방법들이 시도되어 왔다[1]. UUV의 호밍(homing), 도킹(docking) 과정은 크게 도킹 스테이션 근처로 유도되는 호밍 과정과 도킹 스테이션과 결합하는 도킹 과정으로 나눌 수 있다[10]. 그림 1과 같이 원거리에서 미리 정의된 거리(D)까지 이동하는 과정을 호밍, D 이내에서 정밀한 위치 제어 및 결합이 진행되는 과정을 도킹 과정으로 정의할 수 있다. 이러한 분류의 이유는 센서로부터 얻는 정보와 제어 방식이 크게 달라지기 때문이다. 호밍 과정에서는 장애물 회피 등과 같은 경로 계획에 의한 제어 방식이 사용되고, 정확한 자세보다는 대략의 위치 정보가 사용된다. 반면 도킹 과정에서는 위치 정보 뿐 아니라 자세 정보도 중요해지고 빠른 센서 정보와 높은 해상도를 바탕으로 한 정밀한 위치 제어가 수행되어야 한다.

수중 도킹 기술에 대한 연구는 도킹 스테이션까지 AUV를 유도하기 위해 도크와 AUV 간의 상대위치와 자세를 얻는 방법에 대한 연구와 AUV를 도킹 스테이션까지 유도한 후에 스테이션과 AUV 간의 전기적 및 기계적 결합 기술에 대한 연구로 나누어질 수 있다[1].

일반적으로 수중에서의 거리를 측정하기 위하여 초음파 센서를 사용한다[11]. 초음파 센서로 구성된 USBL의 경우 발신기(transmitter)를 장착한 도킹 스테이션과 수신기(receiver)를 장착한 잠수정의 상대거리를 초음파의 위상차를 통해 거리를 측정한다. 이 방법의 경우 3,000 m 이상의 원거리에서

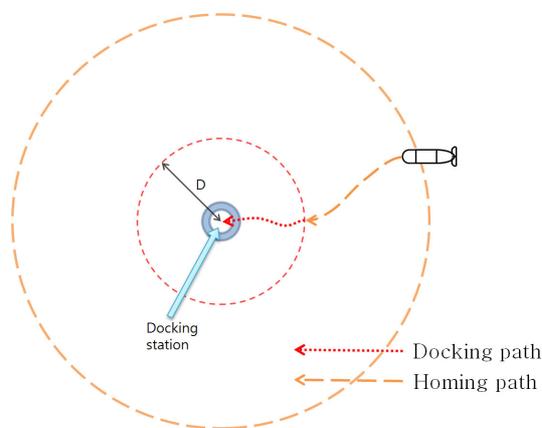


그림 1. 유도 및 도킹 경로 [10].
Fig. 1. Homing and docking path [10].

서도 사용이 가능하다. 하지만 업데이트 주기가 길고, 해수 환경과 주변의 장애물, 다른 음향 소스 등 오차가 발생할 여지가 많으며 거리가 매우 가까울 경우 해상도가 낮다는 단점이 있어 도킹 과정의 위치 추정에는 부적합하다. 또한 잠수함의 경우 소나를 사용하여 표적 탐지, 소음원 식별 등 이미 다른 용도로 사용되고 있기 때문에 추가적으로 초음파 센서를 사용하는 것은 최소화하는 것이 바람직하다.

이를 보완하기 위하여 카메라를 사용한 광학 유도방법 [12,13], 전자기장을 이용한 유도방법[14] 등이 연구되었다. 광학 유도방법의 경우 광학 비콘이나 특별한 이미지 패턴을 사용하여 거리를 추정한다. 광학 비콘을 사용하는 방법은 그림 2와 같이 비콘에 배치된 LED 조명 배열에 따라 거리와 자세를 측정하고, 이미지 패턴을 사용할 경우 그림 3, 4와 같이 빛이 아닌 SSL (Self Similar Landmark)이라는 패턴을 통해서 거리정보와 각도 정보를 추정한다. 광학 유도방법은 간단하고 정확하며 빠른 업데이트 속도를 가지지만 카메라의 시각에 도킹 스테이션이 위치하거나 탁도, 주변의 광량 등에 영향을 받아 사용할 수 없는 경우가 발생한다.

이와 다르게 전자기장을 이용한 유도방법은 그림 5와 같

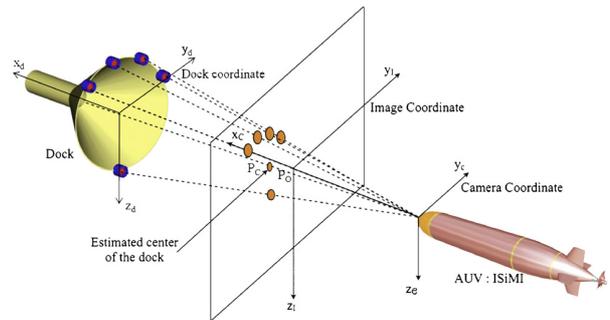


그림 2. 비전 시스템의 좌표계 [12].
Fig. 2. Coordinates of the vision system [12].

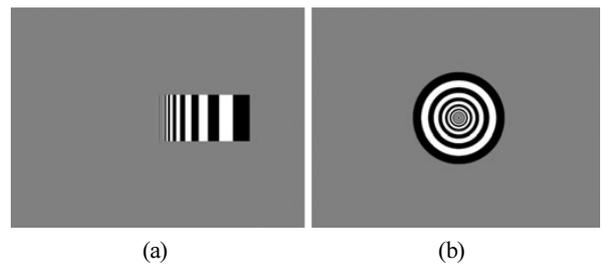


그림 3. Self Similar Landmark [13].
Fig. 3. Self Similar Landmark [13].

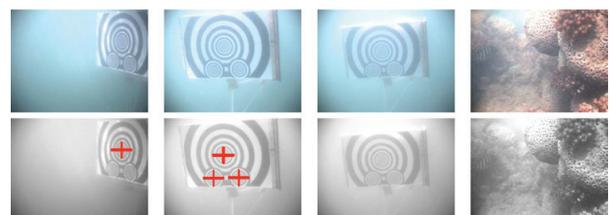


그림 4. 해양 환경에서 SSL 검출 [13].
Fig. 4. SSL detection in marine environment [13].

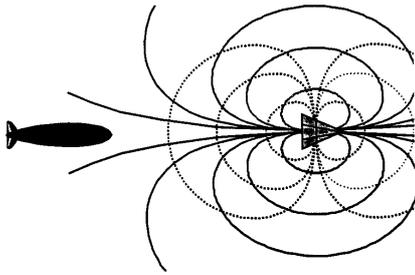


그림 5. 자기력선과 독으로 구성된 EM 유도 시스템의 개략도 [14].

Fig. 5. Schematic of EM homing system showing field lines and the dock [14].

이 도킹 스테이션에 설치된 EM (Electro-Magnetic) 발신기에서 발생시키는 전자기장의 세기와 위상차를 AUV에 설치된 수신기로 측정하여 제어하는 방법이다. 전자기장은 발신기의 용량에 따라 다르지만 20~30 m의 거리에서 사용이 가능하다. 모든 수중환경에서 강한 특성을 보이고, 근접할수록 정밀한 위치 정보를 획득할 수 있는 장점이 있지만, 시스템이 크고 복잡해지는 단점이 있다.

스테이션과 AUV의 결합방식으로는 케이지(cage)를 사용하는 방식[5,6], 훅(hook)을 사용하는 방식[7], 원뿔형의 유도 부를 사용하는 방식[8], 보잉社의 로봇 팔(robotic arm)을 이용한 방식 등을 사용한 예가 있다.

III. RF의 RSSI를 이용한 거리측정 방법[15]

수중에서는 공기 중에 비해 전자기파의 신호 세기가 거리에 따라 균일하게 감쇠하는 특성이 있고, 음파나 빛을 이용하는 방법보다 주변 환경변수에 영향이 상대적으로 적기 때문에 분해능이 높고 정밀한 거리 추정이 가능할 것으로 예상된다. 이에 수중에서 거리에 따른 전자기파의 감쇠성질을 이용하여 거리를 추정하는 연구가 진행된 바 있다.

수중에서 거리에 따른 송수신 안테나간의 신호 세기의 차이를 RSSI (Reduced Signal Strength Indicator)를 이용하여 측정하고 이를 이론적으로 추정하기 위해 안테나와 매질에 따른 특성을 고려하여 센서 모델과 계수 보정(calibration) 기법을 제시하는 방식을 사용하였다.

이에 따르면 수중에서 거리에 따른 전자기파의 감쇠를 안테나의 영향을 표현하는 FRIIS 방정식과 Maxwell 방정식의 감쇠 특성을 이용하여 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{c^2}{(4\pi R)^2 (nf)^2} G_T G_R e^{(-2\alpha R)} \quad (1)$$

- P_R : 수신 파워
- P_T : 송신 파워
- G_T : 안테나 수신 이득
- G_R : 안테나 송신 이득
- λ : 파장
- R : 안테나 사이의 거리
- α : 감쇠 상수

이를 환경적인 요인에 따라 주어지는 값들을 환경변수 δ 를 표현하여 dBm으로 나타내면 센서 모델은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$S_R - S_T = -20 \log_{10} R - 20\alpha R \log_{10} e + \delta \quad (2)$$

또한 수중과 공기 중에서의 환경변수 δ 를 동일한 값으로 보고 이를 이용하여 계수 보정을 수행한다.

실제 실험 결과 420 MHz, 240 MHz의 주파수 대역에서의 결과가 그림 6과 같았다.

이러한 결과를 바탕으로 2차원 위치 인식 실험이 수행된 바 있다[15]. 그림 7과 같은 너비 2.5 m, 길이 6 m의 시험대에 4개의 고정된 노드와 하나의 모바일 노드로 구성된 수중 센서네트워크를 구성하여 모바일 노드의 위치를 추정하는 방식으로 수행되었고 사용된 전자기파의 송신 전력은 10 mW, 송신 주파수는 420 MHz이며, 실험 결과는 그림 8과 같다.

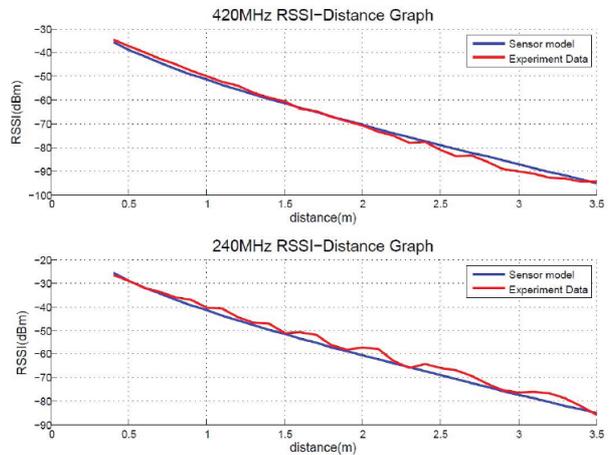


그림 6. Calibration을 포함한 센서 모델과 실험값 비교 [15].
Fig. 6. Comparison of experiment data and sensor model with calibration [15].

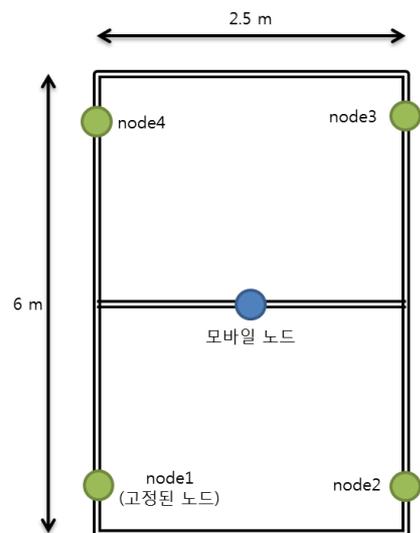


그림 7. 구조화된 환경의 설치 [15].
Fig. 7. Setup the infrastructure-based localization [15].

표 1. 실험 조건 및 결과 [15].

Table 1. Experiment condition and result [15].

	실험 1	실험 2	실험 3	실험 4
실제위치	$\begin{bmatrix} 1.270 \\ 2.503 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.270 \\ 2.503 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.270 \\ 2.903 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.530 \\ 1.805 \end{bmatrix}$
추정위치	$\begin{bmatrix} 1.293 \\ 2.518 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.283 \\ 2.517 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.303 \\ 2.843 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.551 \\ 1.840 \end{bmatrix}$
최대오차	0.1132 m	0.1163 m	0.2316 m	0.1168 m
최소오차	0.0023 m	0.0057 m	0.005 m	0.0029 m
RMS오차	0.0473 m	0.0409 m	0.0804 m	0.0582 m

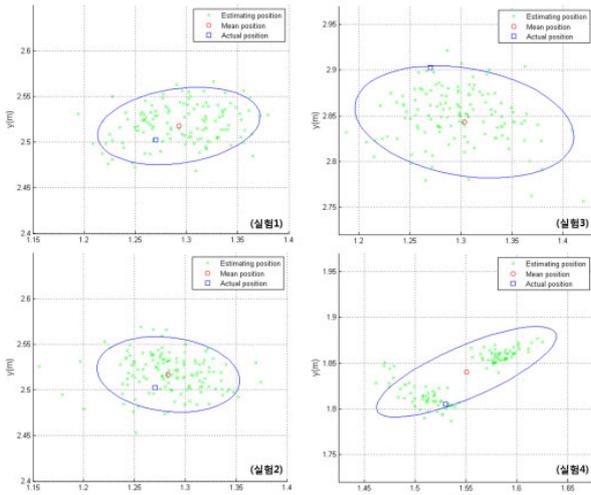


그림 8. 위치 추정 실험 결과 [15].

Fig. 8. Localization experiment result [15].

IV. 도킹 시스템

일반적으로 공간상에서 삼변측량기법을 사용하여 위치를 측정할 때는 4개 이상의 기준선이 필요하고, RF센서의 특성상 계수 보정이 필수적이므로 이를 위해 최소한 잠수함 측에 4개, UUV 측에 2개 이상의 RF 센서 노드가 필요하다. 기준노드가 많을수록 더 정확한 거리를 추정할 수 있지만 기준노드의 증가는 설치비용, 연산량의 증가로 이어지고, UUV에 불필요한 외부 구조물을 설치하게 되므로 기준노드가 더 적을수록 유리하다. 따라서 잠수함 측에 4개의 RF 발신기, UUV 측에 2개의 RF 수신기와 계수 보정을 위한 1개의 RF 발신기를 배치하는 것이 적당할 것으로 생각된다.

RF 센서의 특성상 안테나를 사용하여 전자기파를 주고 받게 되고, 이때 안테나의 방사특성은 위치 추정에서 중요한 요소가 된다. 일반적으로 다이폴안테나의 방사패턴은 그림 9와 같이 도넛모양으로 공간상에서 이상적인 구 형태가 아니지만 xy평면상으로는 비교적 원형의 방사패턴을 가진다. 따라서 그림 10과 같이 UUV가 z축에 근접해 있다면 xz, yz평면상에서의 위치를 각각 측정하여 비교적 적은 오차를 가지는 위치 정보를 얻을 수 있을 것이다. 호밍과정에서 UUV가 도킹 지점 전방까지 유도 되어 있다고 가정하면 UUV의 방향을 알고 있으므로, 그림 10과 같이 도킹스테이션에 xz, yz 평면에 수직으로 각각 두 개의 안테나를 배치하여 xz, yz 평면상의 위치를 추정할 수 있다.

이 경우 그림 11과 같이 UUV가 중심축에 가까워질수록

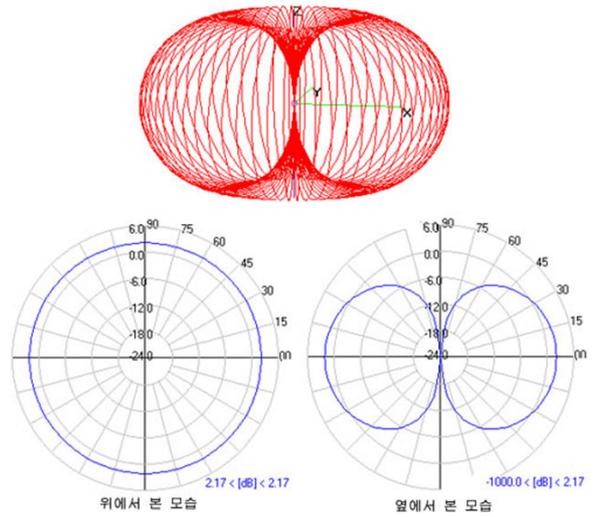


그림 9. 다이폴 안테나의 방사특성 [16].

Fig. 9. Typical radiation pattern of dipole antenna [16].

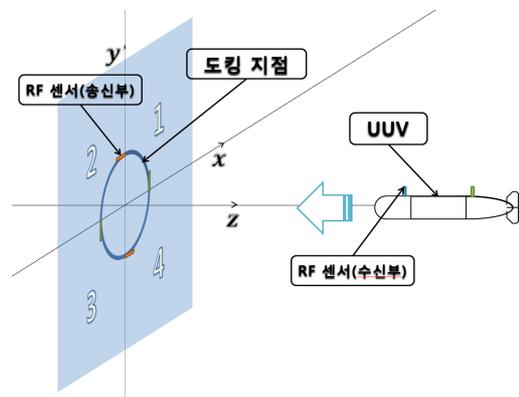


그림 10. UUV의 진행 방향 및 도킹 시스템 개략도.

Fig. 10. The direction of UUV and docking system schematic.

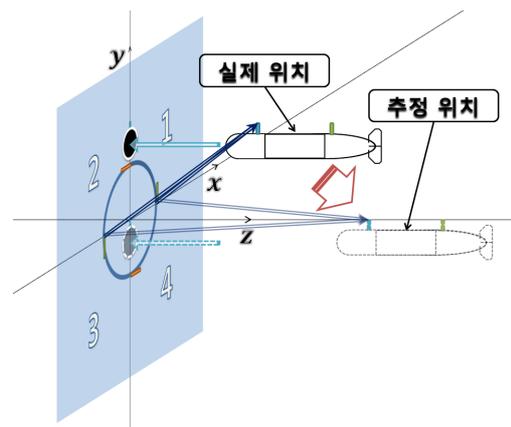


그림 11. x축에 설치된 RF sensor에서의 위치 오차.

Fig. 11. Position error of the sensor mounted on the x-axis.

정확도가 더 높아지게 되고, 중심축에서 멀어질 경우 다이폴 안테나의 방사특성 때문에 위치오차가 커지게 된다.

또한 전자기파는 해수환경에 따라 전혀 다른 특성을 보이기 때문에 위치센서로 사용하기 위해서는 센서 모델에서

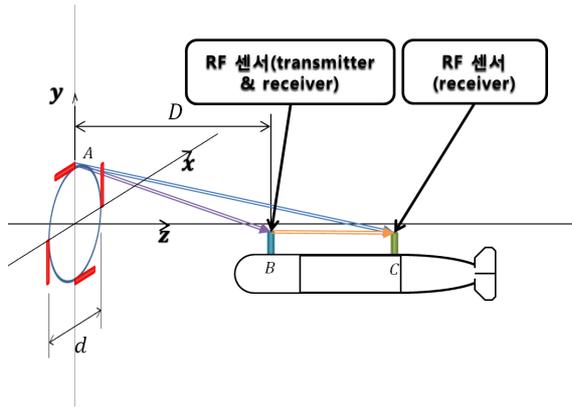


그림 12. 도킹 스테이션과 UUV에 배치된 RF sensor간 거리.
Fig. 12. Sensor node deployment of UUV and a docking station.

환경변수 δ 를 계수 보정할 필요가 있다. 이를 위하여 UUV에 두개의 RF 센서를 그림 12와 같이 배치하면 식 (2)에서부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$(S_R - S_T)_{R_{AB}} = -20\log_{10}R_{AB} - 20\alpha R_{AB}\log_{10}e + \delta \quad (3)$$

$$(S_R - S_T)_{R_{AC}} = -20\log_{10}R_{AC} - 20\alpha R_{AC}\log_{10}e + \delta \quad (4)$$

$$(S_R - S_T)_{R_{BC}} = -20\log_{10}R_{BC} - 20\alpha R_{BC}\log_{10}e + \delta \quad (5)$$

식 (3)-(5)에서 $(S_R - S_T)$ 로 표현되는 항은 RF 센서에 의해 측정되는 값이고, R_{BC} 는 UUV에 설치된 센서간의 거리이므로 알고 있는 값이다. 또한 도킹 스테이션에 배치된 안테나 사이의 거리보다 도킹스테이션에서 UUV까지의 거리 D 가 충분히 멀다면 $R_{BC} \approx R_{AC} - R_{AB}$ 로 가정할 수 있다.

따라서 식 (3)-(5)에서 환경변수 δ 와 R_{AB} , R_{AC} 를 결정할 수 있다. 환경변수는 해수 및 주변 환경에 의해 결정되므로 D 가 가장 클 때 계수 보정을 수행하는 것이 유리할 것으로 생각된다.

다이폴 안테나의 방사패턴이 이상적이라고 가정하고 그림 13과 같이 영역을 정의하면 UUV와 도킹 스테이션과의 위치를 xy 평면상에서 그림 14와 같이 크게 2가지 경우로 나눌 수 있다. 그림 14에서 y 축에 설치된 RF 센서는 1, 2번으

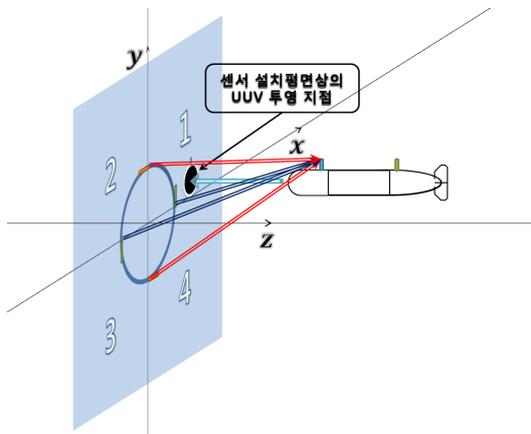


그림 13. xy 평면상 영역 정의.
Fig. 13. Area definitions over the xy plane.

로 정의하고, x 축에 설치된 RF 센서는 3, 4번으로 정의한다. 도킹 스테이션의 RF 센서로부터 UUV의 안테나까지 연결된 화살표는 도킹스테이션과 UUV를 잇는 가상의 벡터들을 xy 평면상에 투영한 길이이다. 만약 y 축에 설치된 1, 2번 센서의 값에 차이가 생길 경우 UUV가 xz 평면에서 떨어졌다고 추정할 수 있고, 3, 4번 센서의 값에 차이가 생길 경우 yz 평면에서 떨어졌다고 추정할 수 있다.

Case 1은 UUV가 x 축이나 y 축 상에 위치할 경우이다. 1, 2번 센서 값이 같고, 3, 4번 센서의 값만 차이가 생기면 UUV가 x 축 상에 위치한다고 추정할 수 있고, 반대로 1, 2번 센서의 값만 차이가 생기면 y 축 상에 위치한다고 추정

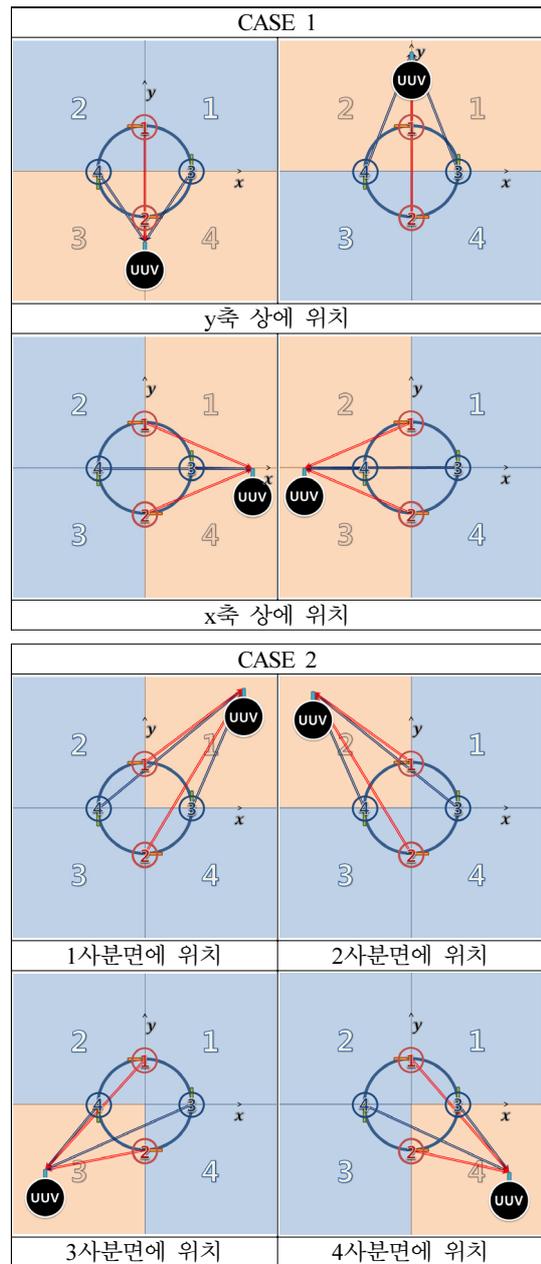


그림 14. 센서 값에 따른 UUV의 추정 위치.
Fig. 14. The estimated position of UUV according to the sensor values.

할 수 있다. 이러한 경우 x , y 축에 설치된 센서 중 차이가 생긴 값은 안테나 패턴에서 원형인 부분의 값으로 생각할 수 있으므로 비교적 정확한 위치정보를 얻을 수 있게 된다.

Case 2는 y 축에 설치된 1, 2번 센서와 x 축에 설치된 3, 4번 센서에서 측정된 값이 모두 차이가 있으므로 xz , yz 평면에서 떨어져있다고 판단할 수 있다. 이 경우 다시 각 센서의 값을 비교하여 그림 14에서와 같이 4가지 경우로 구분할 수 있다. 이 경우 z 축에서 멀리 떨어질수록 안테나 패턴에 의한 오차가 커지게 되지만, 각 센서 값의 차이가 줄어들도록 제어입력을 주면 z 축 상에 UUV가 위치하도록 제어할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 수중에서 근거리 거리 추정에 유리한 RF의 위치 추정 방식을 사용한 도킹 방법을 제안하였다. 이에 수중에서 RF 센서를 사용하여 거리를 추정하는데 있어 필수적인 RF 센서 및 안테나의 배치, 계수 보정 방법, 센서 측정값에 따른 UUV의 위치 및 제어방법에 대해 고려하였다. 안테나의 방사특성을 고려하여 위치 추정 시 오차범위가 작아지도록 x , y 축에 각각 두 개의 안테나를 배치하여 xz , yz 평면상의 위치를 추정하고, UUV에 설치된 두 개의 RF 센서를 사용하여 환경변수에 의한 오차를 줄이기 위한 계수 보정 방법을 제안하였다. 마지막으로 센서 값에 따라 UUV가 어느 영역에 위치할지 추정하고 이에 따른 유도방법에 대해 고려하였다. 앞서 전자기파의 RSSI를 사용한 위치 추정에 관한 연구에서 근거리에서 계수 보정을 수행한 결과가 실제 거리 값과 오차가 크지 않아 우수한 성능을 보일 것으로 기대된다.

실제로 RF 센서를 사용하여 실험을 수행하기 위해서는 넓은 공간이 요구되는데 적당한 수준의 수조, 이동체 등 실험환경을 갖추는데 어려움을 겪고 있다. 3차원 공간상에서의 위치 추정 연구가 진행 중에 있으며 이후 넓은 수조에서 가상의 도킹스테이션에 RF 센서를 배치하고 3차원 상에서 RF 수신기를 임의로 움직여 위치를 추정하는 실험을 수행할 예정이다.

참고문헌

[1] B. H. Jeon, "Unmanned deep-sea submersible in the world 'AUV,'" *Science & Technology (in Korean)*, no. 458, pp. 80-83, Jul. 2007.

[2] S. E. Yu and D. E. Kim, "Analysis on occlusion problem of landmark-based homing navigation methods," *Journal of institute of control, robotics and systems (in Korean)*, vol. 17, no. 6, pp. 596-601, Jun. 2011.

[3] 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.

[4] Y.-H. Kim, U. K. Song, and B. K. Kim, "Development of precise localization system for autonomous mobile

robots using multiple ultrasonic transmitters and receivers in indoor environments," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 4, pp. 353-361, Apr. 2011.

[5] H. Singh, M. Bowen, F. Hover, P. LeBas, and D. Yoerger, "Intelligent docking for an autonomous ocean sampling network," *Oceans1997*, pp. 1126-1131, Oct. 1997.

[6] H. Singh, J. G. Bellingham, F. Hover, S. Lerner, B. A. Moran, K. von der Heydt, and D. Yoerger, "Docking for an autonomous ocean sampling," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 498-514, Oct. 2001.

[7] T. Fukasawa, T. Noguchi, and T. Kawasaki, "MARINE BIRD, a new experimental AUV with underwater docking and recharging system," *Oceans2003*, vol. 4, pp. 2195-2200, 2003.

[8] R. S. McEwen, B. W. Hobson, L. McBride, and J. G. Bellingham, "Docking control system for a 54-cm-diameter (21-in) AUV," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 550-562, Oct. 2008.

[9] B. H. Jun, P. M. Lee, and Y. K. Lim, "Trends in the cruising-type AUVs technologies," *Korean Society for Precision Engineering (in Korean)*, vol. 26, no. 5, pp. 14-22, May 2009.

[10] P. A. Wilson, "Autonomous Homing and docking tasks for an underwater vehicle," *McMc'09*, Oct. 2009.

[11] B. Allen, T. Austin, N. Forrester, R. Goldsborough, A. Kukulya, G. Packard, M. Purcell, and R. Stokey, "Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology," *Proc. of IEEE Oceans 2006*, pp. 1-6, Sep. 2006.

[12] J. Y. Park, B. H. Jun, P. M. Lee, and J. H. Oh, "Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera," *Ocean Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 48-61, Jan. 2009.

[13] A. Negre, C. Pradalier, and M. Dunbabin, "Robust vision-based underwater homing using self-similar landmarks," *Journal of Field Robotics*, vol. 25, no. 6-7, pp. 360-377, 2008.

[14] M. D. Feezor, F. Yates Sorrell, P. R. Blankinship, and J. G. Bellingham, "Autonomous underwater vehicle homing/docking via electromagnetic guidance," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 515-521, Oct. 2001.

[15] D. G. Park, K. M. Kwak, W. K. Chung, and J. H. 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.

[16] www.benchbee.co.kr



이 기 현

2012년 서울과학기술대학교 기계공학과 학사. 2012년~현재 동 대학원 석사과정 재학중. 관심분야는 Underwater Robots.



김 진 현

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.