

## 해양설비용 정밀 모니터링 센서의 개발 및 특성 분석

(The Development and Characteristics Analysis of High Precision Monitoring Sensor for the Marine Installation)

조정환\* · 고성원

(Jeong-Hwan Cho · Sung-Won Ko)

### Abstract

This paper proposes the new high precision monitoring sensor for the Marine Installation. Among variety of sensor network systems, wireless information transmission through the marine is one of the enabling technologies for the development of future marine-observation systems and sensor networks. Applications of marine monitoring range from oil industry to aquaculture, and include instrument monitoring, pollution control, climate recording, prediction of natural disturbances. For these marine applications to be available, however, the provision of precise location information using monitoring sensor is essential. In this paper, the dynamic characteristics for obtaining the location information of monitoring sensor is analyzed. The theoretical and experimental studies have been carried out. The presented results from the above investigation show considerably excellent performance for the Monitoring for the Marine Installation.

Key Words : Marine Sensor, Marine Monitoring, DIFAR, Underwater Sensor

### 1. 서 론

하드웨어 기술개발 및 다양한 응용 가능성으로 인하여 센서 네트워크 시스템이 주목 받고 있다. 최근 다양한 응용분야 중에서 같이 해상 및 수중의 센서 네트워크 시스템에 대한 관심이 증대되고 있다[1].

특히 센서 네트워크 시스템을 해상 및 수중에 적용하여 해양 탐사, 해양 방위산업, 해양 플랜트 및 해양 풍력발전소, 조력발전소와 같은 해양설비의 보호에서도 적용이 연구되고 있다. 이러한 해양 네트워크 시스템의 핵심 장치인 해양 모니터링 센서는 수중음파 탐지용 하이드로폰을 이용하여 일정 수심에서 저주파 5~2,400Hz의 음향신호를 수신하여 신호의 세기와 함께 신호의 방향을 감지하는 수중 음향센서이다[2].

해양 센서네트워크는 지상에서의 센서 네트워크에 비해 노드의 가격이 비싸고 설치가 용이하지 않기 때문에 네트워크의 강건성과 신뢰성을 높일 수 있는 아

---

\* 주저자 : 김포대학교 항공전기전자과 교수  
\* Main author : Professor, Dept. of avionics, Kimpo College  
Tel : 031-999-4142, Fax : 031-999-4775  
E-mail : jhcho@kimpo.ac.kr  
접수일자 : 2013년 8월 30일  
1차심사 : 2013년 9월 4일  
심사완료 : 2013년 9월 23일

키택처로 설계되어야 한다[3].

본 연구에서는 수중의 음파를 감지하여 음파가 발생된 음원의 방위를 감지하는 DIFAR(Direction Finding and Ranging) 방식의 고감도 고성능의 정밀 해양 모니터링 센서를 개발하고 동적 특성을 분석한다.

또한 신뢰성을 높이고 개발 대상인 해양 모니터링 센서를 시험할 수 있는 시험장치를 설계하여 제작하였고 이를 활용하여 개발된 해양 모니터링 센서의 성능 특성을 측정하였다. 시제품의 시험결과 개발목표인 수신감도와 수신방향성 특성이 개발 목표를 만족시키는 것을 확인하였다.

## 2. 해양 모니터링 센서의 특성 분석 및 설계

### 2.1 해양 모니터링 센서의 원리

많은 센서 네트워크 시스템의 다양한 응용 중에서, 해양에서의 무선정보전송과 네트워크 시스템은 그림 1과 같이 구성되어 있으며 미래 해양관측시스템과 센서네트워크 개발을 가능하게 하는 중요 기술 중의 하나이다[4].

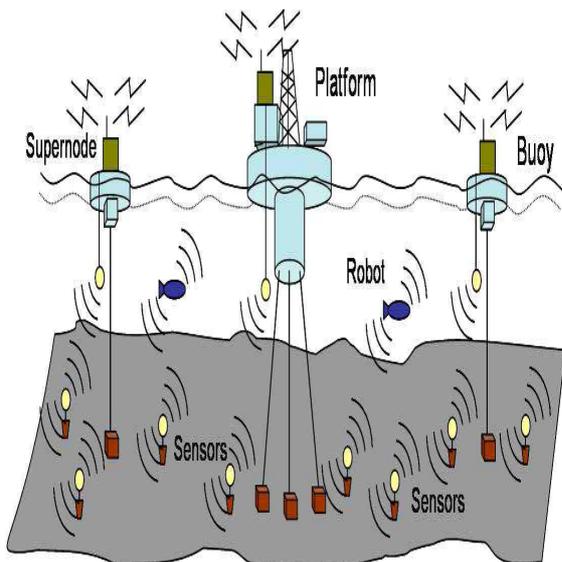


그림 1. 해양 센서 네트워크시스템  
Fig. 1. Mmarine sensor network system

그중에서 해양 모니터링의 응용은 석유산업, 수산양식, 설비모니터링, 환경오염의 통제, 기후변화의 기록, 자연 재해의 예측에 이르기까지 다양하다. 이때 해양 모니터링 센서는 그림 2과 같이 구성되고 있으며 수중의 음파를 감지하여 음파가 발생된 음원의 방위를 감지하는 기법으로 DIFAR 하이드로폰이라고도 한다. 구조는 입력되는 음향에 대하여 방향성을 가지도록 제작한 방향성 센서(Directional sensor)가 위치한 상부 캡(Cap)과 입력되는 음향에 대하여 모든 방향에서 동일한 특성을 가지는 전방향성 센서(Omnidirectional sensor)가 위치한 하부 컵(Cup)으로 이루어져 있다.

전방향성 센서는 하부 컵의 내면에 접착되어 있으며 이는 수중의 음향을 감지하는 역할을 한다. 즉 수중의 소리를 그대로 전달하는데 이는 일반적인 수중의 수동형(Passive) 소나와 동일한 기능이다. 수중의 음향은 압력의 형태로 하이드로폰의 컵에 전달되며 전달된 압력에 상응하는 전압이 컵의 내벽에 접착된 압전 세라믹 소자에 발생하며 이를 최종적으로 소리로 변환하여 사람의 귀로 듣게 되는 방식이다.

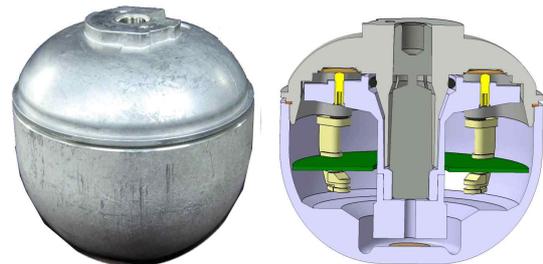


그림 2. 해양 모니터링 센서의 내외부 구조  
Fig. 2. Internal and external structure of marine monitoring sensor

방향성 센서는 상부 캡에 위치하며 압전세라믹 소자를 사용한 것은 동일하지만 압전세라믹 소자로부터 발생한 전압을 이용하여 하이드로폰에 전달된 음향의 음원을 탐지하는 기능을 수행하게 된다. 압전 세라믹 소자로 이루어진 방향성 센서의 배치도는 그림 3에 나타나 있다.

하이드로폰 상부 캡의 방향성 센서는 압전 세라믹 소자 총 4개로 구성되어 있는데 그중 마주 보고 있는

2개의 센서를 합쳐서 각각 “cosine센서”와 “sine센서”로 구분한다. 하이드로폰이 수중에 전개되어 위치하면 하이드로폰의 Cosine 센서는 자북(magnetic north)과  $\theta$ 만큼의 각도를 유지하게 되는데 이 각도는 하이드로폰 내의 기판에 조립된 플럭스게이트(fluxgate) 센서가 감지하게 된다.

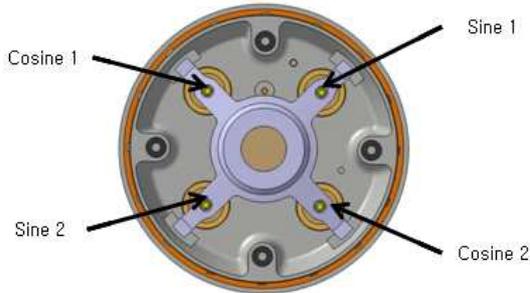


그림 3. 방향성 센서의 배치도  
Fig. 3. Profile of directional sensor

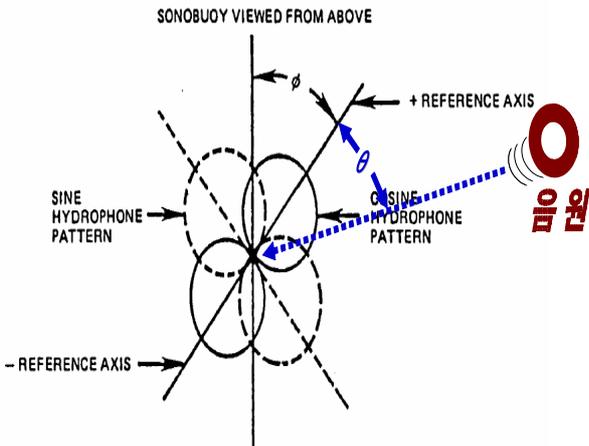


그림 4. 방향성 센서의 음원 측정  
Fig. 4. Measurement of sound source to direction sensor

수중에서 안정된 하이드로폰에 음향이 전달되면 방향성 센서의 진동자 구조에 의하여 그 음원의 도래각도  $\theta$ 의 크기에 따라 cosine센서와 sine센서의 변위에 차이가 발생하게 된다. 즉 그림 4에서  $\theta$ 가  $0^\circ$ 일 때는 cosine센서의 변위가 최대 발생하고 sine센서의 변위는 이론적으로 발생하지 않게 된다.  $\theta$ 가  $45^\circ$ 일 경우

에는 cosine센서와 sine센서의 변위가 동일하게 발생되고,  $\theta$ 가  $90^\circ$ 일 때는 sine센서의 변위가 최대 발생하고 cosine센서의 변위는 이론적으로 발생하지 않게 된다. 이러한 특성을 이용하여 음원의 도래각  $\theta$ 는 아래의 식으로 산출하게 된다[5].

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sin\theta}{\cos\theta}$$

## 2.2 해양모니터링 센서의 설계특성

수중의 음파를 감지하여 음파가 발생된 음원의 방위를 감지하는 DIFAR 방식의 고감도 고성능의 정밀 해양 모니터링 센서를 그림 5와 같이 개발하였고 Military Specification for AN/SSQ-53D Sonobuoy, MIL-S-81487E(AS)[6]에서 제시하는 최종 성능목표는 아래와 같다.

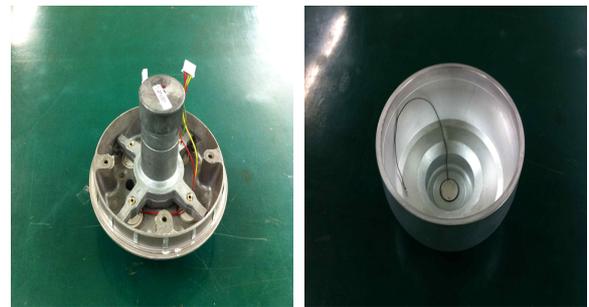


그림 5. 개발된 해양 모니터링 센서  
Fig. 5. Developed marine monitoring sensor

### 2.2.1 전방향성 센서의 수신감도

하이드로폰 전방향성 센서의 수신 감도특성은 주파수에 따라서 평탄한 특성을 가지므로 1개의 주파수에서 감도를 측정하면 된다. 시험규격은  $-190\text{dBv/uPa} \pm 3\text{dB} @ 1\text{kHz}$ 이다.

### 2.2.2 방향성 센서의 수신감도

방향성 센서의 수신감도 특성은 주파수에 따라서 다른 특성을 가지므로 특정되는 몇 개의 주파수에서 감도측정이 필요하다. 시험규격은  $-202\text{dBv/uPa} \pm 3\text{dB} @ 1\text{kHz}$ 이다.

2.2.3 전방향성 센서의 지향특성

전방향성 센서는 전 방위에서 수신되는 음향신호를 모두 탐지하도록 되어 있으며  $\pm 1\text{dB}$ 이하의 오차특성으로 규정되어 있다. 기구적으로 전방향성센서는 원형의 대칭구조를 가지고 또한 저주파에서 사용되므로 거의 평탄한 무지향 특성을 보유하게 된다. 시험규격은 진원  $\pm 1\text{dB} @ 1\text{kHz}$ 이다.

2.2.4 방향성 센서의 지향특성

이 특성은 DIFAR 하이드로폰의 가장 중요한 특성으로 이 특성에 의하여 DIFAR 하이드로폰이 방향을 측정할 수 있다. 방향성 센서는 sine축과 cosine축으로 구성된 2방향의 센서로 구성된다. 이 두 축 간의 센서 출력의 편차는  $\pm 1\text{dB}$ 이내이다. 시험규격은  $\pm 1\text{dB} @ 1\text{kHz}$ 이다.

3. 해양 모니터링 센서 시험결과

압착 조립된 해양 모니터링 센서의 성능시험을 위하여 해양 모니터링 센서 시험장치를 참고문헌 [6]이 제시하는 신뢰성 시험사양을 만족하도록 그림 6과 같이 설계하고 제작하였다. 제작된 시험장치를 무향실에 설치하고, 음원 발생장치를 이용하여 음향을 발생시킨 후에 해양 모니터링 센서로부터 출력되는 신호를 수신하여 참고문헌 [7]의 교정계수(Calibration Factor) 조건을 만족하는 정확도를 확인하고 특성을 시험하였다.



그림 6. 시험장치  
Fig. 6. test equipment

3.1 전방향성 센서의 시험결과

전방향성 센서의 수신감도는 주파수에 상관없이 평탄한 특성을 가지므로 그림 7과 같이 1kHz의 주파수에서 감도를 측정하였다.

또한 전방향성 센서의 지향특성을  $5^\circ$  간격으로 측정하였으며 그 결과는 수신감도 ( $-190.5\text{dBV}/\mu\text{Pa}$ ), 지향특성( $0.2\text{dB}$  편차)이 측정되었다.

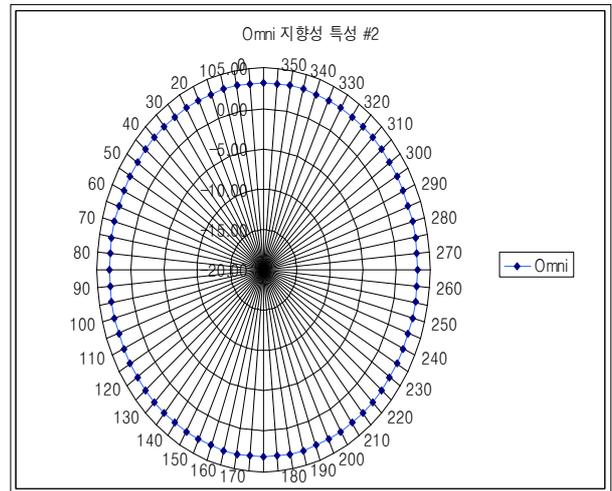


그림 7. 전방향성센서의 시험결과  
Fig. 7. Test result of omni-directional sensor

3.2 방향성 센서의 시험 결과

표 1. 방향성 센서의 감도특성  
Table 1. Sensitivity characteristics of directional sensor

주파수 (Hz)	감도(dB)	시료 #1	시료 #2	시료 #3
100	$-202\text{dBV}/\mu\text{Pa} \pm 3\text{dB}$	-204	-203	-204
350	$-196\text{dBV}/\mu\text{Pa} \pm 3\text{dB}$	-197	-194	-194
600	$-196\text{dBV}/\mu\text{Pa} \pm 3\text{dB}$	-196	-194	-193
800	$-198\text{dBV}/\mu\text{Pa} \pm 3\text{dB}$	-198	-197	-198
1000	$-202\text{dBV}/\mu\text{Pa} \pm 3\text{dB}$	-202	-202	-202

방향성 센서의 수신감도는 표 1과 같이 100, 350, 600, 800, 1000Hz의 대표적인 주파수에서 감도 특성을

측정하여 각 주파수에서의 응답특성이 목표 성능을 만족하는지를 확인하였다.

방향성 센서의 수신방향성을 그림 8과 같이 비교시험 5°간격으로 측정한 결과를 분석하면, 45°에서의 지향성 특성은 최대값 대비하여  $-3 \pm 1\text{dB}$  이내이어야 하는데 시험결과 그 편차가  $-0.06 \sim +0.26$ 이었다.

또한 영점(Null)에서의 지향성 특성은 최대값 대비  $-25\text{dB}$  이상 차이가 있어야 하는데, 그 차이가  $-30.81 \sim -34.69$ 로서 목표 성능을 만족하고 해양 모니터링 센서의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 그림 9는 이러한 동적특성을 측정하는 장면이다.

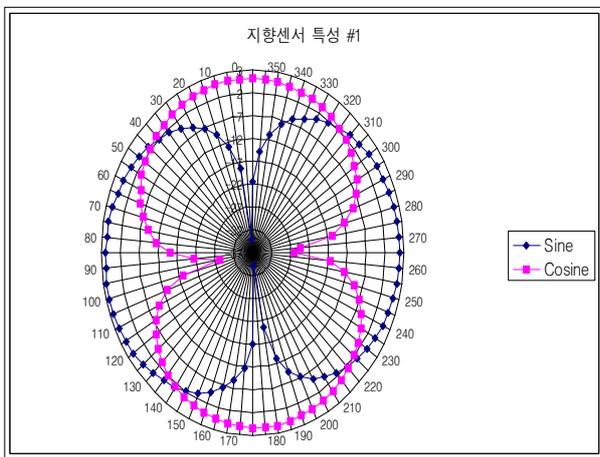


그림 8. 방향성 센서의 측정 결과  
Fig. 8. Test result of directional sensor

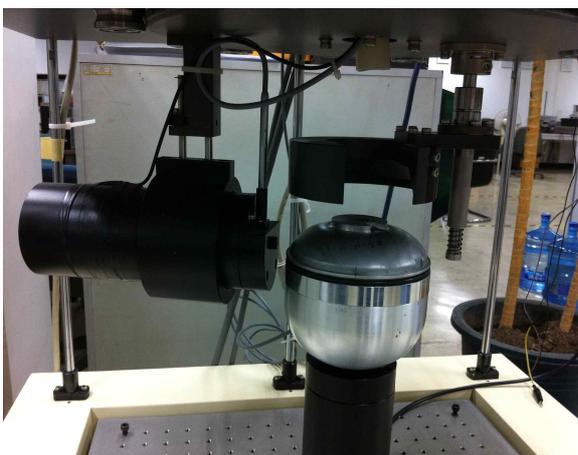


그림 9. 동적특성의 측정  
Fig. 9. Test of Dynamic Characteristics

#### 4. 결 론

본 연구에서는 해양 및 수중에 적용하여 해양 플랜트 및 해양 풍력발전소와 같은 해양설비의 보호에 사용되는 해양 모니터링 네트워크 시스템의 핵심 장치인 해양 모니터링 센서를 개발하여 음향특성을 측정하고 이를 분석하였다.

즉 수중에서 음향을 감지하며 그 음원에서 방출되는 특정주파수의 도래각도를 감지할 수 있는 구조로 이루어진 정밀 DIFAR 하이드로폰을 설계하고 개발하였다.

개발된 해양 모니터링 센서의 상부 캡과 하부 캡은 각각 제작 및 조립된 이후에 그 특성을 측정한 결과 목표 성능을 만족하였다. 특성 측정 후에 하이드로폰의 상부 캡과 하부 캡을 압착 조립하였고 이후의 성능은 신뢰성 향상을 위해 시험장치를 개발하여 Military Specification for AN/SSQ-53D Sonobuoy, MIL-S-81487E(AS)에 의해 확인하였다.

따라서 본 연구의 결과로 해양 및 수산업 분야의 핵심장치인 해양 모니터링 센서의 개발 및 시험평가 기술이 향상되어 미래 산업의 한 축을 담당할 센서분야의 기술력이 축적되고 각종 해양 센서의 개발 가능성을 높이는 계기가 될 것으로 판단된다.

향후에는 해양 모니터링 센서에 적용되는 전자부품의 개발기술을 확립하고 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술을 활용한 초소형 고성능의 정밀 해양 모니터링 센서의 개발이 필요하다고 분석된다.

본 논문은 2013학년도 김포대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

#### References

- [1] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," Ad Hoc Networks Journal, pp.257-79, March 2005.
- [2] J. Partan2, J. Kurose, and B. Levine, "A Survey of Practical Issues in Underwater Networks," 1st ACM International workshop on Underwater Networks, pp.17-24,

Sep. 25, 2006.

- [3] J. Heidemann, M. Stojanovic and M. Zorzi, "Underwater sensor networks: applications, dvances and challenges", Phil. Trans. R. Soc. A 2012 370, 158-175, 2012.
- [4] J. Heidemann, Y. Li, A. Syed, J. Wills and W. Ye, "Research Challenges and Applications for Underwater Sensor Networking", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2006), April 3-6, 2006.
- [5] Dahir H. Dini and Danilo P. Mandic, "An Enhanced Bearing Estimation Technique for DIFAR Sonobuoy Underwater Target Tracking", IEEE Sensor Signal Processing for Defence (SSPD 2012), pp.25-27, sept. 2012.
- [6] Military Specification for AN/SSQ-53D Sonobuoy, ML-S-81487E(AS). Naval Air Engineering Center, Systems Engineering and Standardization Department (SESD), Code 93, Lakehurst, NJ 08733.
- [7] Brian H. Maranda, Calibration Factors for DIFAR Processing, Defence Research Establishment Atlantic, Nov. 2001.

◇ 저자소개 ◇



**조정환 (趙正煥)**

1963년 12월 12일생. 1988년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1990년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2003년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 현재 김포대학교 항공전기전자과 교수. 산업계측제어 기술사. 본 학회 편수위원.



**고성원 (高成元)**

1960년 8월 6일생. 1983년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1985년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2008년 숭실대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 현재 김포대학교 인터넷정보과 교수.