

음향센서 정확도 시험을 위한 모의신호 발생기 설계 기법

이용곤^o, 이상국, 박형욱, 김웅범
국방과학연구소

Design of Acoustic Signal Generator for Accuracy Test of Underwater Acoustic Sensors

Yong-Gon Lee, Sang-Kuk Lee, Hyung-Ook Park, Eung-Bum Kim
Agency for Defense Development

yongon@sunam.kreonet.re.kr, lsk6835@sunam.kreonet.re.kr, lennox@sunam.kreonet.re.kr,
ebkim@sunam.kreonet.re.kr

요약문

음향센서의 정확도 시험을 위해서는 사전 약속된 모의신호를 발생하는 기준 음향센서, 즉 모의신호 발생기가 필요하다. 모의신호 발생기는 정확도 시험의 기준이 되므로 위치가 정확하게 산출되어야 하고, 발생시키는 모의신호는 시험 목적에 부합되도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 모의신호 발생기의 위치 추정 및 모의신호 발생을 위한 설계 기법을 제안하고, 제안 기법에 대한 위치 추정 알고리즘을 시뮬레이션으로 고찰한다.

I. 서론

음향센서 정확도는 음향센서가 수신 음향의 방위 및 거리를 얼마나 정확하게 분석하느냐 하는 정도를 의미한다. 음향센서의 수신기능 또는 탐지가능이 정확하지 않으면 시험 결과에 큰 오차를 유발시키며 소나와 같은 음향센서에서는 탐지 오차를 크게 유발시킨다.

그러므로 음향센서 정확도는 항상 측정되어야 하고 필요시에는 오차값이 보정되도록 해야 한다. 1960년대 부터 미국에서는 음향센서 특히 합정 부착 소나의 정확도를 시험하여 왔다. 미국은 해저에 기준 음향센서를 설치하고 피측정 음향센서와 기준 음향센서와의 거리/방위를 외부에서 계측하여, 피측정 음향센서의 실제 탐지 방위/거리와 비교하여 정확도를 분석하고 있다. 여기서 기준 음향센서는 피측정 음향센서가 송신하는 음향을 수신한 다음 수신 신호를 송신하거나 임의의 신호를 모사하여 송신하는 모의신호 발생기이다. 모사되는 신호는 목적하는 시험 조건을 충족시키도록 설계되어야 한다.

미국은 해양 조건이 양호하여 모의신호 발생기를 주로 해저에 고정시켜 운용한다. 그러나 우리 나라 해역은 이와 같이 모의신호 발생기를 고정시켜 놓을 만한 해역환경을 갖지 못하므로, 모의신호 발생기를 이동형으로 운용해야 한다. 그러나 이렇게 하면 음향센서 정확도 시험의 기준이 되는 음향센서가 지속적으로 움직이는 상황이 되므로 모의신호 발생기의 위치를 정확하게 산출함이 매우 중요하다.

본 연구에서는 음향센서 정확도 시험에 사용되는 모의신호 발생기의 신호 발생 개념을 설계하고 모의신호 발생기의 수중위치를 추적하기 위한 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 이론적으로 시뮬레이션 된다.

II. 음향센서 정확도 시험

음향센서 정확도 시험은 그림 1의 개념으로 수행된다. 피측정 음향센서가 바라보는 모의신호 발생기의 방위/거리와, 이들의 기하학적 관계를 외부에서 계측한 방위/거리와의 차이가 곧 정확도이다.

그림 1의 모의신호 발생기는 피측정 음향센서가 송신하는 음향을 받아 재송신하거나, 자생적으로 신호를 만들어 송신한다. 전자가 능동모드이고 후자가 수동모드이다. 모의신호 발생기의 송신 신호는 음향센서 정확도 시험 개념과 직접적인 관련이 있으므로, 음향센서 정확도 시험 개념을 충분히 고려하여 설계되어야 한다.

서론에서 언급한 바와 같이 모의신호 발생기의 위치 추정이 정확도 시험에서 매우 중요하다. 만약 모의신호 발생기가 해저에 고정되어 있다면, 그림 2와 같이 별도의 교정용 음향센서가 모의신호 발생기를 중심으로 원

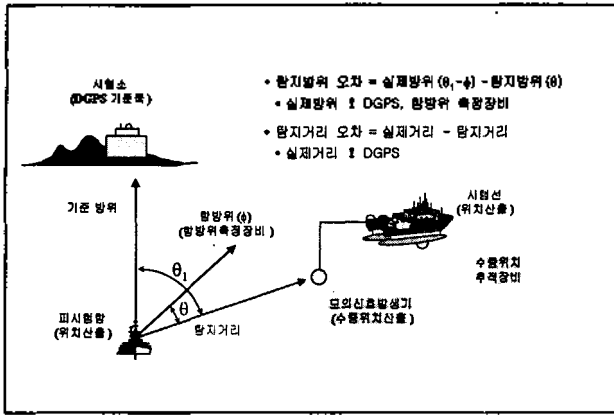


그림 1. 음향센서 정확도 시험 개념

을 그리면서 펄스를 송신하고 모의신호 발생기가 그 신호를 받는 시간차이에 의해 위치를 각각 산출한 다음 평균하여 정확한 위치를 추출한다. 이 때 위치 추정을 위한 교정용 음향센서의 위치는 GPS에 의해 산출한다.

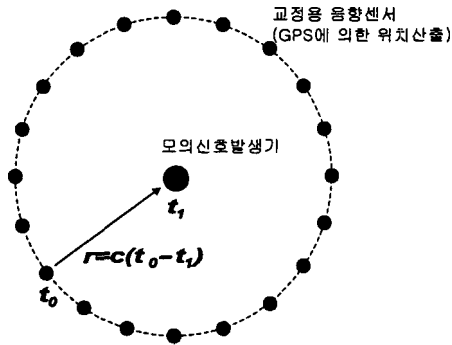


그림 2. 해저고정형 모의신호 발생기의 위치 산출

그림 2와 같은 해저 고정형 모의신호 발생기 운용을 위해서는 적정 시험해역이 유지와 가까운 거리에 있어야 하고 어선 등에 의해 방해받지 않아야 한다. 그러나 우리 나라 해역은 해마다 수개월 동안 태풍의 영향을 받고 어선 또는 통행 선박의 영향을 많이 받으므로 연안 해저에 모의신호 발생기를 고정 설치하고 육지와 신호케이블을 연결하여 운용하기란 사실상 불가능하다. 그러므로 그림 3과 같이 모의신호 발생기를 시험선에서 부설 운용하는 이동형 방식을 취해야 한다.

그림 3의 이동형 모의신호 발생기는 수중에서 위치가 고정되지 못하고 계속 변하게 된다. 이는 음향센서 정확도 시험의 기준이 움직인다는 의미이므로 모의신호 발생기의 위치를 실시간으로 정확하게 산출해야 한다.

결과적으로 음향센서 정확도 시험을 위한 이동형 모의신호 발생기 설계의 주요 변수는 시험 개념에 따른 모의 신호를 설계하고 모의신호 발생기의 위치를 정확

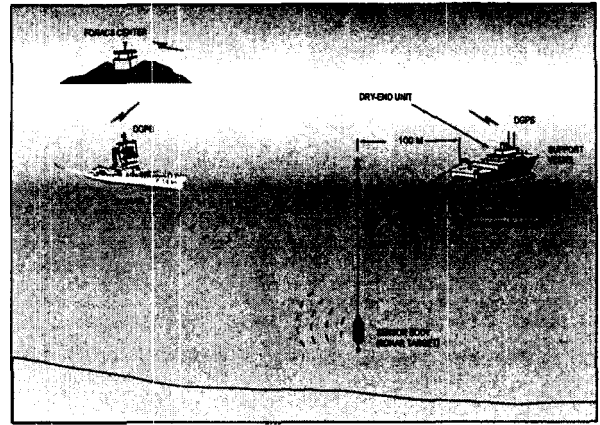


그림 3. 이동형 모의신호 발생기 운용 개념

하게 산출하는 일이다.

III. 모의신호 발생기 설계

1. 신호 발생 개념 설계

모의신호 발생기의 신호 발생 개념은 능동모드와 수동모드 크게 두 가지로 구분된다. 이 가운데 수동모드는 모의신호 발생기가 임의의 신호를 송신하고 피측정 음향센서가 이를 수동적으로 수신하는 개념이다. 모의신호는 주로 음원의 송신음향 또는 방사소음을 모사하거나, 녹음된 임의의 신호를 송신하도록 설계한다 여기서 음원은 피측정 음향센서가 원래의 목적으로 운용하면서 수신하는 음향표적을 의미한다.

일반적으로 수중방사소음은 광대역과 협대역으로 구성되므로, 모의신호 발생기 수동모드의 가장 기초적인 발생 신호는 펄스와 톤의 협대역 신호이다. 여기에 배경소음을 고려한 광대역 신호가 포함된다. 음향센서 원래 목적의 표적 방사소음은 주로 녹음된 신호를 사용한다. 수동모드에서는 데몬특성이 고려되어 설계된다.

능동모드 모의신호는 피측정 음향센서가 송신하는 음향을 모의신호 발생기가 수신한 시각에 임의의 신호를 송신하는 방식이다. 이 때 모의신호 발생기가 송신하는 신호 형태는 첫째, 피측정 음향센서가 송신한 신호 그대로 재송신, 둘째, 피측정 음향센서가 송신한 신호를 편집한 신호 송신, 셋째, 피측정 음향센서가 송신한 신호와는 무관한 신호 송신 등이 고려된다. 첫 번째의 경우 시험 효율화를 위해 수신 신호의 원형과 동일한 깨끗한 신호를 송신하기도 한다. 두 번째로 수신 신호 편집은 시간지연, 파형 변화 및 증폭/감쇠 측면에서 설계된다. 세 번째는 음향센서의 송신신호는 단지 동기화를 위한 신호에 불과하여 모의신호 발생기는 수신 신호 형태와는 상관없이 사전 약속된 신호만을 송신한다. 모의신호 발생기의 송신신호 형태는 표 1과 같이 정리된다.

표 1. 모의신호 발생기의 송신 신호 설계

| 송신모드 | 모의 신호 | 비 고 |
|------|---------------------------|-------------------|
| 수동 | 협대역 신호 | 펄스/토널 |
| | 협대역/광대역 합성 | 데몬 신호 포함 |
| | 표적 방사소음 | 녹음신호 |
| 능동 | 음향센서 송신 신호 재송 | 수신 그대로, 또는 녹음된 신호 |
| | 음향센서 송신 신호 편집 재송 | 시간지연, 파형, 증폭/감쇄 등 |
| | 음향센서 송신 신호와 무관한 임의의 신호 송신 | 음향센서 송신 신호는 동기 역할 |

2. 모의신호 발생기 위치 추정

이동형 모의신호 발생기의 위치추정에서 고려하여야 하는 주요 요소들은 1) 근거리 위치 추적 효율성, 2) 위치추정 정확도 만족 가능, 3) 시험선 설치 및 운용 가능성 등이다. 여기서 1)번은 그림 3에서 모의신호 발생기와 위치추정용 센서와의 거리가 약 200m 이내임을 고려하여 운용인원 및 운용시간이 최소화될 수 있는 방식이어야 함을 말한다. 그러므로 시험선 선저에 위치추정용 센서를 고정하는 단거리 기준선 추적 방식(SBL) 또는 초단거리 기준선 추적 방식(USBL)이 가능하다. 3)번은 운용 플랫폼인 시험선에 고정 부착하거나 시험준비단계에서 쉽게 설치 가능한 방식을 요구하므로, 3개 이상의 센서를 시험선 선저에 고정/부착하는 SBL 방식 보다는 1개의 센서배열을 부설/회수형으로 운용하는 USBL 방식이 유리하다.

USBL 방식 위치추정을 위해 본 연구에서는 그림 4의 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 위상스펙트럼을 이용하여 센서간 수신신호의 도달시간차에 해당하는 위상차를 계산함으로써 신호 도달각과 센서배열의 기하학적인 관계에 의해 신호 도달방향(DOA)을 추정한다. 즉, 그림 5에서와 같이 두 위치추정 센서의 수신신호 $r_1(t)$ 와 $r_2(t)$ 에 대해 이들의 상호스펙트럼 $S_{12}(f)$ 와

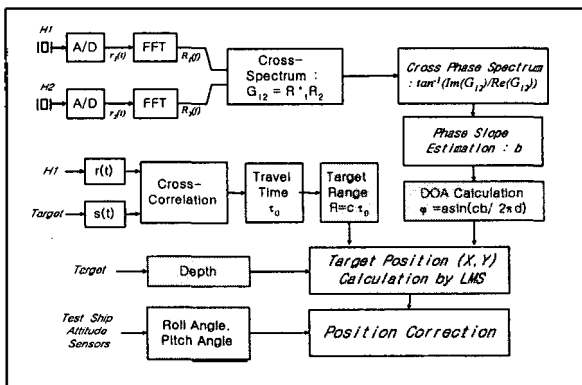


그림 4. USBL의 위치추정 알고리즘

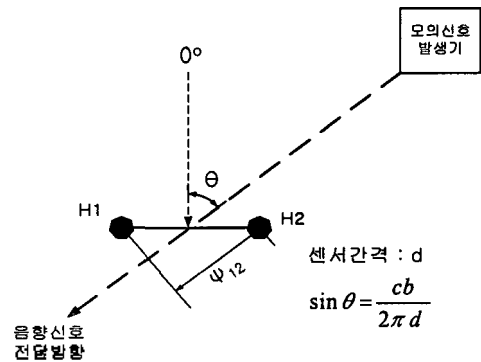


그림 5. 두 위치추정센서와 수신신호의 도달방향 관계

상호위상스펙트럼은 다음의 식(1)과 식(2)로 표현된다.

$$S_{12}(f) = S_1(f)^* S_2(f) \tag{1}$$

$$= |S_{12}(f)| e^{j\phi_{12}(f)}$$

$$\phi_{12}(f) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[S_{12}(f)]}{\text{Re}[S_{12}(f)]} \right) \tag{2}$$

여기서, $S_1(f) = FT(r_1)$, $S_2(f) = FT(r_2)$, *은 공액을 의미한다. 두 수신신호간 시간지연 τ_{12} 는 주파수 영역에서 식(1)의 위상성분으로 나타나므로, 위상스펙트럼은 식(3)과 같이 시간지연이 기울기인 선형 관계를 갖는다.

$$\phi_{12}(f) = 2\pi\tau_{12}f \tag{3}$$

그러므로 식(2)에 의해 추정된 위상스펙트럼은 신호 주파수 성분들에 대해 위상기울기를 선형 최소자승오차법(LMS)에 의해 유도하면 다음의 식(4)와 같다.

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i \phi_{12,i}}{\sum_{i=1}^N f_i^2} \tag{4}$$

위의 b_{12} 를 이용하여 식(5)의 시간지연 추정치와 식(6)의 신호도달방향(DOA) 추정치를 계산할 수 있다. 여기서 c 는 수중음속, d 는 위치추정용 수신센서간 거리이다.

$$\tau_{12} = \frac{b_{12}}{2\pi} \tag{5}$$

$$\theta_{12} = \sin^{-1} \left(\frac{cb_{12}}{2\pi d} \right) \tag{6}$$

본 연구에서는 식(6)에 의한 위치 추정을 위해 그림 6과 같이 한 반복주기(PRI) 내에 여러 개의 부속펄스가 존재하도록 설계하였다. PRI는 위치추정 거리에 의해 결정되고, 펄스 형상은 위치추정 대상의 속도, 수면반사 조건, 운용 플랫폼에 의한 신호반사 조건 등을 고려하여 결정되므로, 부속 펄스 길이가 짧은 다중펄이 단일 펄보다 반사영향을 적게 받을 것으로 판단할 수 있다.

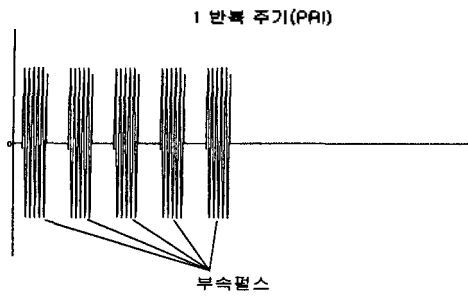


그림 6. 제안한 다중펄스의 펄스형상 설계

IV. 모의신호 발생기 위치 추정 시뮬레이션

USBL 추정기법의 특성상 방위추정 성능이 위치추정 성능을 직접적으로 좌우하기 때문에 본 연구에서는 방위 추정에 초점을 맞추고 시뮬레이션을 수행한다.

시뮬레이션을 위한 펄스는 중심주파수 20kHz의 연속파를 사용하고 입사각은 30도로 하였다. 다중펄스의 경우에는 부속펄스를 10개로 하였으며 실제 운용환경을 고려하여 신호대 잡음비는 -5dB ~ 10dB로 설정하였다.

단일펄스와 다중펄스 각각에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 7 및 8과 같다. 표 2는 이를 상대적으로 비교하여 나타낸다. 그림과 표에서 보는 바와 같이 SNR -5dB에서 다중펄스의 오차가 1.21° 만큼 더 작지만 SNR이 10dB로 높아지면서 단일펄스의 오차와 0.2° 이하로 거의 차이가 없어진다. 이는 SNR이 낮은 경우에 다중펄스가 단일펄스보다 더 효과적임을 알 수 있다.

표 2. 단일펄스와 다중펄스의 방위추정 시뮬레이션 오차

| SNR (dB) 구분 | -5 | -2.5 | 0 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 단일펄 | 7.81 | 5.05 | 3.64 | 2.73 | 1.97 | 1.38 | 1.14 |
| 다중펄 | 6.60 | 4.57 | 3.71 | 2.34 | 2.00 | 1.50 | 1.33 |

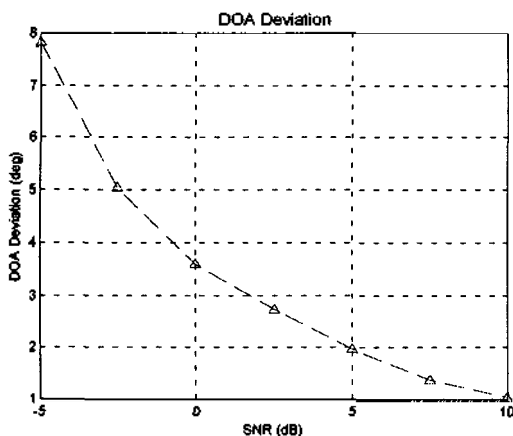


그림 7. SNR -5~10dB에 대한 방위추정편차(단일펄)

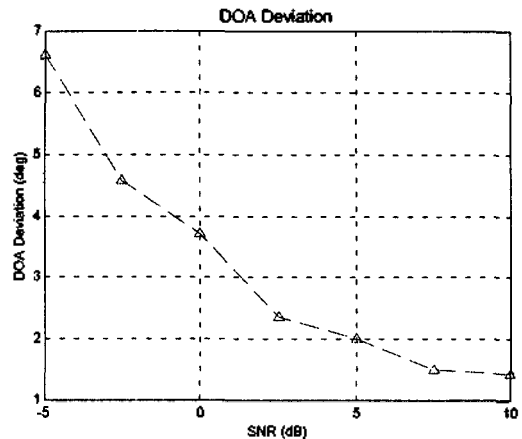


그림 8. SNR -5~10dB에 대한 방위추정편차(다중펄)

시뮬레이션 결과, SNR이 커짐에 따라 오차가 1.5° 이내로 낮아지므로 그림 4의 제안 알고리즘이 유용함을 확인할 수 있다.

V 결론

본 연구에서는 음향센서 정확도 시험을 위한 모의신호 발생기의 신호 발생 개념을 설계하고 위상스펙트럼에 의한 모의신호 발생기 위치추정 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘은 위상스펙트럼의 신호 주파수 성분들에 대해 위상기울기를 선형 최소자승오차법으로 최적화하였다. 단일펄스와 다중펄스에 대해 제안 알고리즘을 시뮬레이션한 결과 SNR이 낮은 경우에 다중펄스가 단일펄스보다 더 효과적이었으며, SNR이 7.5dB 이상에서 방위추정오차가 1.5° 이하로 낮아져 제안 알고리즘이 음향센서 정확도 시험에 유용함을 확인하였다.

참고문헌

1. 이용관, 이상국, 도경철 "위상스펙트럼에 의한 USBL 수중위치 추정기법 연구," 한국군사과학기술학회 1999년도 추계학술대회논문집, pp.174-179, 1999.
2. P. H. Milne, Underwater acoustic positioning systems, E. & F. N. Spon Ltd., London, 1983.
3. T. R. Stockton and M. W. McLennan, "Acoustic position measurement, an overview", Offshore Technology Conference 2172, pp.254-264, 1975.
4. A. H. Quazi, "An overview on the time delay estimate in active and passive systems for target localization", IEEE Trans. on ASSP., Vol ASSP-29, No.3, pp.527-533, 1981.
5. J. S. Bendat and A. G. Piersol, Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis 2ed, John Wiley & Sons Inc., Canada, 1993.