Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol.53, NO.5, May 2016 http://dx.doi.org/10.5573/ieie.2016.53.5.047
ISSN 2287-5026(Print) / ISSN 2288-159X(Online)

논문 2016-53-5-6

소나 송신신호 설계를 위한 최적 주파수 분석

(Optimum Frequency Analysis for Sonar Transmit Signal design)

김 선 호*, 정 장 원*, 온 백 산*, 임 성 빈**, 서 익 수***

(Sunho Kim, Jangwon Jung, Baeksan On, Sungbin Im©, and Iksoo Seo)

요 약

수중 환경에서는 특정한 대역이나 형태의 신호를 송수신함으로써 거리(range) 관점에서 높은 해상도를 얻는 것이 필요하다. 본 논문의 탐지 거리인 1 km 이내 근거리에서 미확인 원통형 물체를 탐지 및 식별하기 위해서는 능동소나에 사용되는 송신신호의 설계가 매우 중요하다. 최적의 소나 송신신호를 설계하기 위해서는 탐지 거리를 최대로 갖는 최적 주파수와 신호의 대역폭을 고려하여 개별 파라미터의 적절한 trade-off 값을 찾는 것이 필수 요건이다. 본 논문에서는 EE (Echo Excess) 최대화와 SNR 최대화의 관점으로 여러 파라미터들의 변화에 따라 다양한 조건에서 최적 주파수를 분석하였다. 또한 거리 해상도(range resolution)와 방위각 해상도(azimuth resolution)의 목표 성능을 만족시키는 관점에서 송신신호 파라미터 결정 연구를 수행하였다.

Abstract

In the underwater environment, high resolution can be achieved in the range direction by transmitting and receiving a signal of a particular band and/or waveform. The design of a transmit signal used in the active sonar is very important in order to detect a cylindrical object within a short distance less than 1 km, which is the detection distance of this paper. Designing a transmit signal optimal to a sonar requires appropriate selection of its center frequency and bandwidth, which allows the maximum detection distance of a sonar. In this paper, in terms of maximizing echo excess and signal to noise ratio (SNR), optimum frequency analysis is carried out under various conditions of diverse parameters. In addition, the investigation focused on the determinating a bandwidth is also performed for the purpose of satisfying the performance requirement of range resolution and azimuth resolution.

Keywords : 송신신호 설계, 최적 주파수, 능동 소나, 거리 해상도, 방위각 해상도

Ⅰ. 서 론

천해환경에서 능동소나를 사용하는 경우 표적신호를 효율적으로 탐지하기 위해서는 송신신호의 설계가 중요하다. 능동소나의 구동 주파수가 최적 주파수보다 높은 경우 수중 환경에서의 음파 흡수현상은 탐지거리를 감소시킨다. 반대로 구동 주파수가 최적 주파수보다 훨씬 낮은 경우에는 소나 방정식을 구성하는 다양한 파라미터의 값이 올바르게 구성되지 못해 역시 탐지거리를 단축시키는 원인이 된다. 일반적으로 탐지거리는 구동 주파수가 높아질수록 증가하지만 최대 탐지거리를 만족시키는 최적 구동 주파수 이상으로 주파수를 증가시키는 경우에도 최대 탐지거리는 증가하지 않는다. 이러한 최대 탐지거리의 한계 곡선들의 최고점을 이은 궤적 곡선은 원하는 탐지거리를 얻는데 사용되며 능동소나에 사용하는 최적의 주파수를 결정하기 위한 주요 정보를 제공한다. 또한 최적 주파수를 선택하기 위해서는 주파수 선택에 의한 능동소나 시스템의 최소성능지표와 전달손실의 변화 정보를 미리 알고 있어야 한다[1~4].

다양한 주파수의 변화에 의한 탐지거리의 계산이 전달

* 학생회원, 숭실대학교 일반대학원 정보통신공학과 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)
** 정회원, 숭실대학교 전자정보공학부 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)
*** 정회원, 국방과학연구소 (SONAR Systems PEO, Agency of Defences and Developments)
© Corresponding Author(E-mail : sbi@ssu.ac.kr)
※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD140004DD)
Received ; April 6, 2016 Revised ; April 15, 2016
Accepted ; May 2, 2016

조건 및 표적 조건에 따라 이루어질 때 최적 주파수 역시 동일하게 모든 소나 파라미터의 주파수 변화에 좌우되며, 특별히 흡수계수(absorption coefficient)의 변화에 민감하다. 최적 주파수는 매우 뾰족한 형태는 아니지만, 여러 옥타브의 주파수 구역에 걸쳐 퍼져있는 넓은 폭의 최대 주파수의 최고점이다. 최적 주파수는 탐지거리 이외에 탐지속도 및 진행시간과 같은 변수로 정의할 수 있다[5].

본 논문에서는 천해환경에서 효율적인 탐지를 위한 최적 송신신호의 설계 파라미터 결정 연구를 수행한다. 먼저 송신신호의 최적 주파수를 선택하기 위해 전통적인 송신신호 설계 기법인 초과신호 (EE; Echo Excess) 최대화와 신호잡음비율 (SNR) 최대화의 관점에서 분석을 수행한다. 또한 이를 기반으로 거리 해상도 (RR; Range Resolution)과 방위각 해상도 (AR; Azimuth Resolution)의 목표성능을 만족시키기 위한 최적 설계 파라미터를 제안하고자 한다. 모의실험 환경은 천해의 광대역 근거리 탐지를 가정하며, 탐지거리는 1 km내외로 하고 표적의 크기는 4×20 m로 설정하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 주어진 환경에서 EE 최대화와 SNR 최대화의 관점에서 탐지 거리에 따른 최적 주파수를 선택하기 위한 분석을 수행한다. 3장에서는 탐지 목표의 거리 해상도와 방위각 해상도 관점에서 송신신호의 파라미터를 결정하고, 4장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 최적 주파수 분석

광대역 소나 시스템은 협대역 시스템과 비교하여 높은 거리 정확도, 최소 탐지 거리 향상, 신호 대 잡음비 이득, 강한 도플러 내성, 낮은 신호 차단 확률과 같은 장점을 가진다. 그러나 이러한 장점들은 필연적으로 신호처리 과정에서 연산 복잡도를 증가시키며, 대역폭이 커질수록 잡음 또한 함께 증가한다. 또한 최대 탐지거리와 사용가능한 주파수 대역에는 한계가 있기 때문에 목표 성능을 만족시키는 최적의 주파수 대역을 선정하여야 한다.

1. Echo Excess 최대화

일반적으로 주변 소음(ambient noise)은 주파수에 반비례하며, 일정한 방사전력을 갖는 고정된 크기의 전송 배열(transmitter array)에서 소스 레벨은 주파수에 비례한다. 또한 주파수와 비례해 매질의 흡수율도 증가한다.

표 1. 소나 방정식의 주파수 종속형 파라미터
Table 1. Frequency-dependants parameters of sonar equation.

sl	$c_1 f^i$
tl	$c_2(r)\,10^{[\alpha(f)r/10]}$
ts	$c_3 f^j$
nl	$c_4 f^k$
di	$c_5 f^m$

따라서 이렇게 서로 반대되는 가정에서 최적 중심주파수를 찾기 위해서는 고려하는 주파수 범위 내에서 EE를 최대화 하는 주파수를 찾는 것이 중요하다. 최적 주파수는 매질, 표적 및 장치파라미터와 마찬가지로 탐지거리의 함수로 표현할 수 있다. EE는 다음과 같다[5].

$$EE = SL - 2TL + TS - (NL - DI) - DT \tag{1}$$

SL은 소스 레벨, TL은 전달 손실, TS는 목표 강도, NL은 배경 잡음, DI는 방향성 지수, DT는 탐지 문턱값을 의미한다. 위 식을 데시벨 스케일을 제거하여 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ee = (sl\ ts\ di)/(tl^2\ nl\ dt) \tag{2}$$

EE를 주파수 관점에서 최대화하기 위해 주파수 종속형 파라미터를 표 1에 정리하였다.
각각의 계수 c_n은 주파수 종속 계수이며 $c_2(r)$은 주파수에 독립적인 spreading loss이다. $\alpha(f)$는 흡수 손실(absorption loss)을 의미한다. 식 (2)에 주파수 종속형 파라미터를 대입하면 ee는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$ee = A f^{i+j+m-k-p}\, 10^{-[2\alpha(f)r/10]} \tag{3}$$

계수 $A = (c_1 c_3 c_5)/(c_2^2 c_4 c_6)$ 이며, 주파수의 지수항을 구하기 위해서 다음과 같은 추가적인 가정이 필요하다. i는 균일 방사 전력을 갖는 고정크기 송신 어레이로 일반적으로 $i = 2$의 값을 갖는다. j는 일정 목표 강도로 $j = 0$을, k는 주변 소음 스펙트럼을 의미한다. m은 주파수 독립적 수신기 배열의 방향 지수로 $m = 0$의 값을, p는 주파수 독립적 수신기 이득으로 $p = 0$과 같이 가정할 수 있다. 지수항을 $n = i + j + m - k - p$와 같이 정의하면 ee는 다음과 같이 간략하게 표현된다.

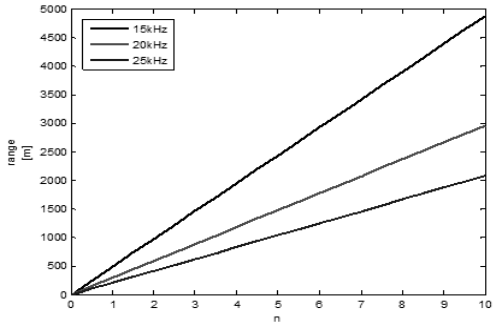


그림 1. 주파수가 고정인 경우, n값 변화에 따른 최대 탐지거리

Fig. 1. Maximum detection range for the values of n with frequencies of 15 kHz, 20 kHz, and 25 kHz.

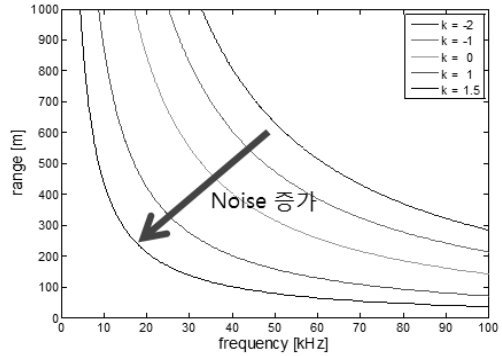


그림 2. 주변 소음의 변화에 따른 주파수-탐지거리 관계

Fig. 2. Relationship between frequency and detection range for various k.

$$ee = Af^n 10^{-[2\alpha(f)r/10]} \tag{4}$$

식 (4)를 편미분해 거리 r에 관한 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$r = \frac{5n}{f\partial\alpha(f)/\partial f ln(10)} \tag{5}$$

탐지거리 r에 대해 n값 변화의 영향을 확인하기 위해 주파수를 15 kHz, 20 kHz, 25 kHz로 고정한 뒤 탐지거리의 변화를 그림 1에 나타내었다. 일반적으로 고려되는 $n=3$ 환경에서 15 kHz의 주파수를 사용하는 경우 1,500m의 탐지거리를, 20 kHz의 주파수를 사용하는 경우 1,000m 내외, 25 kHz의 주파수를 사용하는 경우는 500m 인근의 탐지거리를 얻을 수 있다.

다음으로 n의 내부 파라미터의 영향을 고려한다. 우선 주변 소음의 영향을 분석한 후 목표 강도의 영향을 함께 고려하여 모의실험을 수행하였다. n값에 영향을 주는 파라미터 중 $i=2$, $j=0$, $m=0$, $p=0$으로 고정하고, 최대 탐지거리에 주변 소음이 미치는 영향을

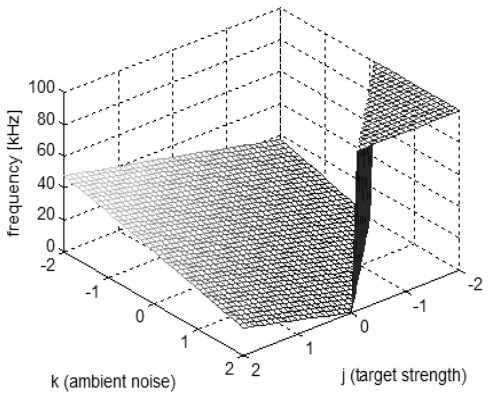
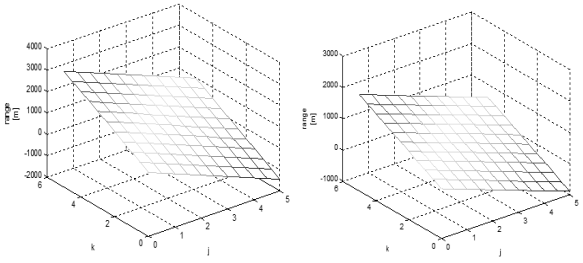
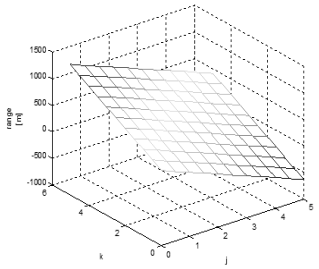


그림 3. 거리 1000 m 고정인 경우, 표적강도와 주변소음의 변화와 최적 주파수 (i=2, m=0, p=0)

Fig. 3. Optimum frequencies for various target strengths and ambient noise level when distance r = 1000 m.



(a) 주파수 15 kHz 고정 (b) 주파수 20 kHz 고정



(c) 주파수 25 kHz 고정

그림 4. 표적강도와 주변소음의 변화와 고정 주파수에 따른 최대 탐색거리 (i=2, m=0, p=0)

Fig. 4. Maximum detection range for various target strengths and ambient noise levels for frequencies of 15 kHz, 20 kHz, and 25 kHz.

확인하기 위해 k값을 변화시켜 가며 모의실험을 수행하였다. 그림 2에서 주변 소음 변화에 따른 거리별 최적 주파수 값의 변화를 확인할 수 있다. k 값이 작아질수록 동일한 탐지거리를 획득하기 위한 필요 구동 주파수의 크기가 증가한다.

그림 3에서는 거리 r을 1,000m로 고정한 경우 표적강도인 j와 주변소음 k의 관계에 따른 최적 주파수 값을 확인할 수 있다. 목표 강도가 증가하면 탐지에 필요

한 주파수 값이 증가하고, 주변소음의 증감은 일정 한계까지는 주파수와 반비례 관계를 갖는다. 그러나 특정 한계 이상으로 주변 소음이 증가하는 경우 탐지가 불가능하다. 이는 송신신호의 최적 주파수 결정을 위해 반드시 고려되어야 하는 사항이다.

더해서 주파수를 각각 15 kHz, 20 kHz, 25 kHz로 고정한 상태에서 표적강도 j와 주변소음 k의 관계에 따른 최대 탐색 거리를 그림 4에 보였다. 선택한 주파수는 대략 1 km 거리에서 파라미터들의 변화에 따라 최대 EE를 갖는 주파수 대역 중 임의로 선정하였다.

본 절에서는 EE를 최대화 하는 관점에서의 거리에 따른 최적 주파수 선택 문제를 분석하였다. 주어진 환경과 파라미터의 변화에 따라 최적 주파수의 선택은 단일 값이 아닌 일정한 범위를 갖는 대역대로 판단할 수 있다. 1 km 이내의 근거리 탐지를 수행할 때 일반적으로 20 kHz의 구동 주파수를 사용할 수 있으나 환경 파라미터의 변화에 따라 상대적으로 더 높거나 더 낮은 주파수를 선택할 수 있다. 따라서 소나시스템의 송신신호를 설계할 때 수중 환경변수의 변화에 맞추어 분석결과를 활용하여 최적 주파수를 결정할 수 있다.

2. SNR 최대화 관점

최적 주파수 선택을 위해서는 소나 방정식을 구성하는 모든 파라미터의 변화를 고려해야 하나, 현실적으로 발생할 수 있는 모든 상황을 가정하고 적용하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 절에서는 주요 변수인 흡수 손실에 관한 추가적인 분석을 수행하고, 천해 환경에서 주요 잡음요소로 작용하는 해수면 환경변화의 원인인 풍속변화에 의한 주변 소음의 영향을 살펴본다.

가. 신호의 감쇄

수중에서의 신호의 감쇄 (attenuation)를 보다 엄밀하게 정의하면 위에 언급한 흡수 손실뿐 아니라 분산 손실 (spreading loss) 또한 고려될 수 있다. 그 감쇄식은 다음과 같다[6].

$$10\log(A(l,f)/A_0) = k10\log l + l10\log\alpha(f) \qquad (6)$$

위의 식 (6)의 우변은 분산 손실과 흡수 손실의 합으로 구성된다. l은 거리, f는 주파수이다. k 는 기하학적 확산인자 (geometry of propagation)를 의미하며 $k=1$ 인 경우 신호의 확산은 원통모양이며, $k=2$ 인 경우 구 형태의 확산이 이루어진다. 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 $k=1.5$의 값을 사용하였다.

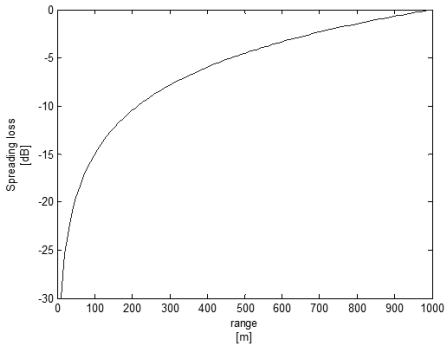


그림 5. 1km 이내 근거리에서의 분산손실 변화
Fig. 5. Spreading loss for distance less than 1 km.

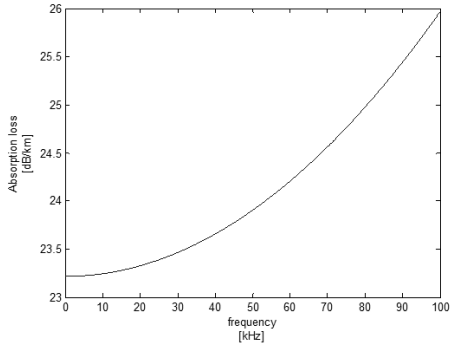


그림 6. 주파수 변화에 의한 단위거리 당 흡수손실 변화
Fig. 6. Absorption loss per unit distance with various frequencies.

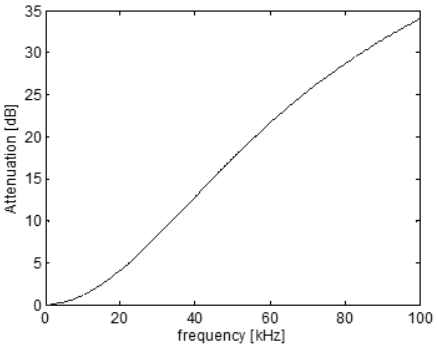


그림 7. 탐지거리 1km의 주파수 변화에 의한 신호의 감쇄
Fig. 7. Signal attenuation according to frequency changes with distance = 1km.

본 절에서는 목표 거리에 대한 주파수에 따른 감쇄값을 확인하기 위해 분산 손실과 흡수 손실을 개별적으로 분석하였다. 그림 5에서 1 km 이내의 근거리에서의 분산손실 값을 확인할 수 있다. 그림 6에서는 단위거리당 주파수 변화에 의한 흡수손실 값을 나타내었다. 단위거리는 1km로 설정하였다. 최종적으로 개별 분석한 분산 손실과 흡수 손실 값을 적용하여 목표로 하는 1 km 탐지 거리에서의 신호의 감쇄값을 그림 7에 보였다.

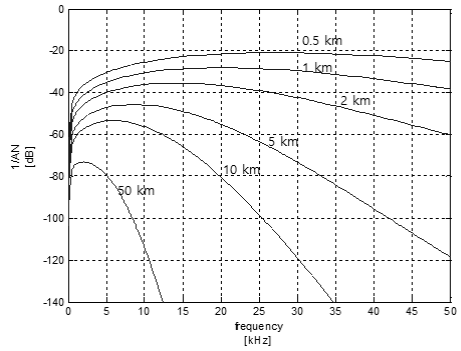


그림 8. 거리변화에 따른 주파수와 1/AN 값의 관계
Fig. 8. Relationship between 1/AN product and frequency with several ranges.

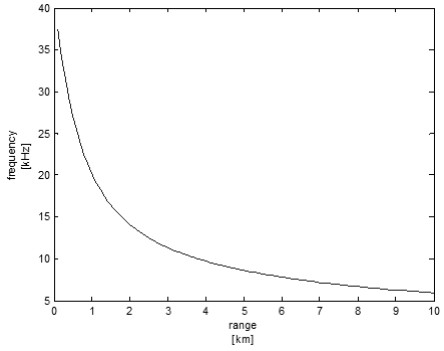


그림 9. 최대 SNR을 갖는 거리-주파수 관계
Fig. 9. Curve of frequencies with maximum SNR for each detection range.

나. 풍속으로 인한 감쇄

주파수와 풍속에 의한 noise PDF 계산식은 다음과 같다[7].

$$10\log N_w(f) = 50 + 7.5w^{1/2} + 20\log f - 40\log(f+4) \tag{7}$$

여기서, w는 풍속(m/s)을 의미한다. 감쇄값 $A(l,f)$와 noise PDF 값을 이용해 일정 방사 전력 P를 가정하고 주파수-탐지거리 관점에서 SNR값을 계산할 수 있다.

$$SNR(l,f) = \frac{P/A(l,f)}{N(f)\triangle f} \tag{8}$$

Δf는 수신 잡음의 대역폭이며 l은 거리, P는 방사전력, $N(f)$는 풍속에 의한 noise PDF를 의미한다. 일반적으로 감쇄값을 나타내는 AN 곱 (AN product)과 noise PDF의 곱을 이용해 SNR을 최대화 하는 최적 주파수를 얻을 수 있다.

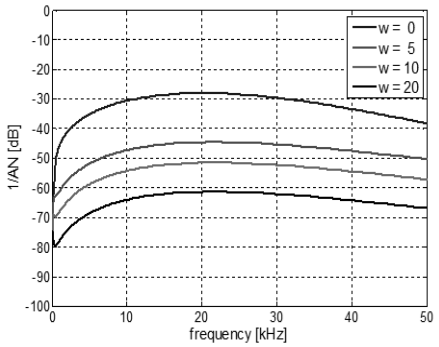


그림 10. 풍속변화 별 주파수와 1/AN 값의 관계 (탐지 거리 1 km)
Fig. 10. Relationship between 1/AN product and frequency with various wind speeds. (detection range = 1 km)

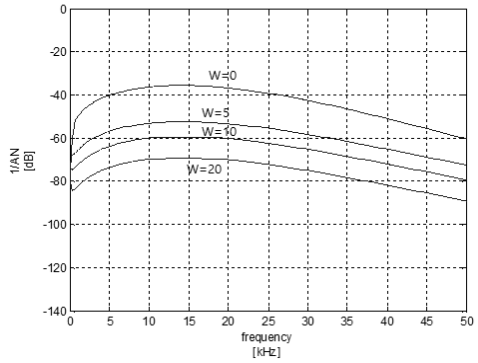


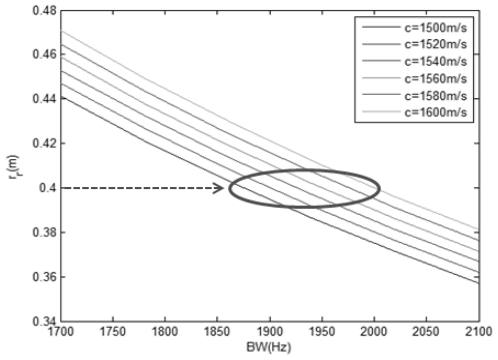
그림 11. 풍속변화 별 주파수와 1/AN 값의 관계 (탐지 거리 2 km)
Fig. 11. Relationship between 1/AN product and frequency with various wind speeds. (detection range = 2 km)

먼저 풍속의 영향이 존재하지 않는 경우, 거리 l이 주어지고 SNR의 크기를 최대로 하는 최적 주파수와 1/AN 값과의 관계를 그림 8에 나타내었다. 1/AN 값은 SNR의 크기와 비례관계이며 최대 탐지거리가 증가할수록 주파수의 증가와 더불어 최대 SNR 값이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 9에서는 주파수-거리 변화 관점에서 AN 곱을 통해 얻은 SNR이 최대값을 가지는 최적 주파수와 거리와의 관계를 나타내었다. 이를 통해 풍속이 0 m/s일 때, SNR 최대화 관점에서 접근하는 경우 본 연구의 탐지 목표거리인 1 km 내에서 약 18 kHz의 주파수를 선택하는 것이 최적화된 결과임을 확인할 수 있다.

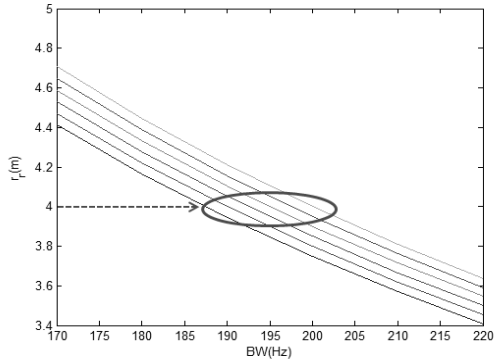
그림 10과 11은 각각 거리를 1 km와 2 km로 고정하고, 풍속을 0에서 20까지 변화시켜 가며 1/AN 값의 크기를 모의실험을 통해 얻은 결과이다. 풍속이 동일한 경우, 최대 탐지거리가 증가할수록 주파수의 크기 변화에 따라 최대 SNR 값이 상대적으로 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

표 2. 목표 RR과 음속 변화에 따른 최적 대역폭
Table2. Optimal bandwidth according to the sound velocities and target RR changes.

Acoustic velocity	Target RR 0.4	Target RR 4
1,500 m/s	BW : 1,875 Hz	BW : 187.5 Hz
1,520 m/s	BW : 1,900 Hz	BW : 190 Hz
1,540 m/s	BW : 1,925 Hz	BW : 192.5 Hz
1,560 m/s	BW : 1,950 Hz	BW : 195 Hz
1,580 m/s	BW : 1,975 Hz	BW : 197.5 Hz
1,600 m/s	BW : 2,000 Hz	BW : 200 Hz



(a) 목표 RR= 0.4m

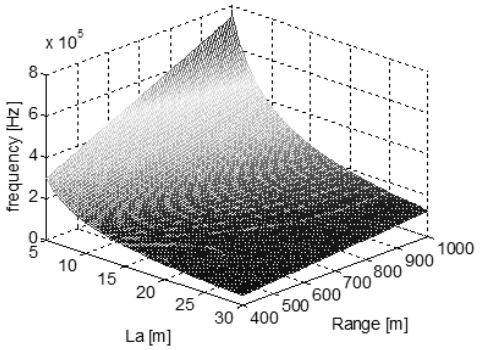


(b) 목표 RR= 4m

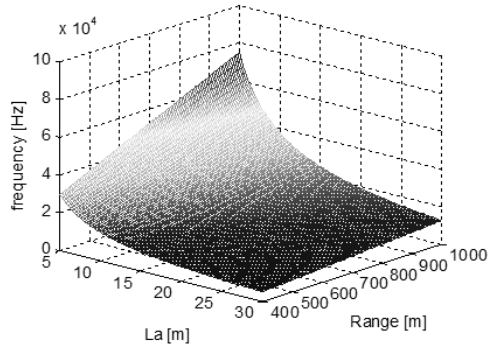
그림 12. 목표 RR과 음속 변화에 따른 최적 대역폭
Fig. 12. Optimal bandwidth for each sound velocity with RR = 0.4 m and 4 m.

Ⅲ. 거리해상도와 방위각 해상도

본 장에서는 최적송신신호 설계 측면에서 거리 해상도 RR (range resolution)과 방위각 해상도 AR (azimuth resolution)의 관점에서 모의실험을 통해 설계에 필요한 지표를 얻고자 한다. 먼저 거리 해상도의 경우 목표 해상도 RR을 만족시키는 관점에서 탐지거리를 1 km로 고정하고 수심 변화에 따른 음속을 고려하여 대역폭을 결정한다. 또한 방위각 해상도의 경우 최대 탐지거리를 1 km로 설정한 경우 목표 해상도 AR



(a) 목표 AR (0.4m 목표해상도 만족)



(b) 목표 AR (4m 목표해상도 만족)

그림 13. 목표 AR 별 안테나의 길이, 탐지거리, 주파수 관계
Fig. 13. Relationship of Antenna length, detection range, and frequency with AR = 0.4 m and AR = 4 m.

을 얻기 위한 안테나 길이, 사용주파수에 관한 분석 연구를 수행하였다.

탐지를 위한 목표 거리해상도를 결정하기 위해서는 다양한 형태와 크기를 갖는 목표물을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 탐지 목표의 크기를 4×20 m의 크기를 갖는 원통형 물체로 가정하였다. 이 경우 최대 거리해상도는 4 m가 되어야 하며 일반적으로 원활한 탐지를 위해서는 최대 거리해상도의 1/10 크기의 RR 값을 목표로 하여야 한다.

먼저 목표 거리 해상도를 만족하는 최적 대역폭(bandwidth)의 크기를 그림 12에 보였다. 그림 12. (a)는 목표 RR이 0.4 m인 경우, (b)에서는 목표 RR이 4 m인 경우의 최적 대역폭의 크기를 확인할 수 있다. 천해 수중환경의 수심을 고려하여 음속 c는 1,500 m/s, 1,520 m/s, 1,540 m/s 1,560 m/s, 1,580 m/s, 1,600 m/s로 각각 설정하여 최적 대역폭의 크기를 구했다. 정확한 값은 표 2에 정리하였다.

다음으로 목표 방위각 해상도를 만족시키기 위한 안테나 길이에 따른 탐지거리별 필요 주파수 분석 결과를 다음의 그림 13에 나타내었다. 거리 해상도의 경우와

동일하게 목표물 탐지에 대해 4 m와 0.4 m의 해상도를 만족시키는 방위각 해상도를 찾기 위한 모의실험을 수행하였다. 탐지 거리 1 km까지의 안테나의 길이와 구동 주파수와의 관계를 확인할 수 있다.

이상의 결과를 통해 탐지를 원하는 거리 내의 거리 해상도와 방위각 해상도를 얻어내기 위한 송신신호 보조 설계지표를 획득하였다.

Ⅳ. 결 론

수중 환경에서 1 km 이내 근거리에 위치한 미확인 원통형 물체를 탐지 및 식별하기 위해서는 능동소나에 사용되는 송신신호의 설계가 매우 중요하다. 본 논문에서는 소나의 송신신호를 설계함에 있어 여러 환경 파라미터를 고려하여 최적 주파수를 선정하고, 이 주파수에서 주어진 탐지거리에 도달할 수 있는 조건들을 살펴보았다. 또한 송신신호의 최적 주파수를 선택하기 위해 EE를 최대화 하는 관점, SNR을 최대화 하는 관점에서 분석하였다. 마지막으로 거리 해상도의 목표 성능을 만족시키는 관점에서 최적 대역폭을 확인하고, 방위각 해상도의 목표 성능을 만족시키기 위해서 송신 안테나의 길이, 탐지거리, 구동 주파수와의 관계를 분석하였다.

주어진 결과를 보았을 때 1 km 내외의 근거리 탐지를 수행하기 위해서는 약 18 kHz에서 20 kHz의 구동주파수를 사용해야 함을 알 수 있다. 최적 송신신호의 설계를 위해서는 선정된 최적 주파수를 기준으로 하여 탐지거리에 영향을 끼칠 수 있는 다양한 소나 파라미터를 목표 환경에 맞추어 선택하고 기준 성능을 달성하는데 있어 상호 trade-off 관계에 있는 파라미터 값을 적절하게 제어하는 것이 중요하다.

REFERENCES

[1] B. Katsnelson, V. Petnikov and J. Lynch, Fundamentals of Shallow Water Acoustics, Springer, 2012.
[2] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill, 1983.
[3] L. Berkhovskikh and Y. Lysanov, Fundamentals of Ocean Acoustics, Springer, 1982.
[4] S. Kay, “Optimal Signal Design for Detection of Gaussian Point Targets in Stationary Gaussian Clutter/Reverberation” IEEE Jour. of Selected Topics in Signal Processing, Vol. 1, No. 1, June 2007.
[5] R. O. Nielsen, Sonar Signal Processing, Artech House, 1991.
[6] M. Stojanovic, “On the Relationship Between Capacity and Distance in an Underwater Acoustic Communication Channel”, Proc. of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks, pp. 41-47, Los Angeles, USA, Sep. 2006.
[7] R. Coates, Underwater Acoustic Systems, Wiley, 1989.

저 자 소 개

김 선 호(학생회원)
2007년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2009년 숭실대학교 정보통신공학과 석사
2009년～현재 숭실대학교 정보통신공학과 박사과정 재학중
<주관심분야 : 수중신호처리, 통신신호처리, 생체신호처리, 선형·비선형 모델링>

온 백 산(학생회원)
2016년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2016년～현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정 재학중
<주관심분야 : 수중음향신호처리, 생체신호처리>

서 익 수(정회원)
1999년 명지대학교 전자전기공학과 학사
2001년 연세대학교 전기컴퓨터공학과 석사
2001년～현재 국방과학연구소 선임연구원
<주관심분야 : 수중음향신호처리, 소나 표적탐지 및 추적, 표적 식별>

정 장 원(학생회원)
2015년 연세대학교 정보통신공학과 학사
2015년～현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정 재학중
<주관심분야 : 수중음향신호처리, 생체신호처리>

임 성 빈(정회원-교신저자)
1986년 서울대학교 전자공학과 학사
1988년 서울대학교 전자공학과 석사
1994년 University of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 박사
1995년～현재 숭실대학교 전자정보공학부 교수
<주관심분야 : 수중신호처리, 비선형 신호처리, 통신시스템, 저장장치시스템>