

# 수중음향통신 링크 해석

최영철\* · 변성훈\* · 임용곤\*

Underwater Acoustic Communication Link Analysis

Youngchol Choi\* · Sung-hoon Byun\* · Yong-kon Lim\*

## 요 약

수중음향통신 링크는 육상에서의 통신 링크와 비교했을 때, 물과 공기라는 매질의 차이, 음파와 전자기파라는 전달 파의 차이로 인하여 링크 해석에 있어서 수중음향통신 환경 고유의 특성을 고려한 링크 해석이 필요하다. 본 논문에서는 수중에서 음파를 이용한 무선통신의 매질로서 바다 속을 경로 손실, 흡음, 환경 잡음 측면에서 수중음향통신 링크 예산 수립에 적합하도록 음향학 기반의 지식을 해석하고 고찰하였다. 우리나라 연안에서의 흡음 계수 및 잡음 레벨에 대해서 분석하고 흡음 계수 및 잡음 레벨을 고려한 수중음향통신 주파수 대역 선정 방법을 제시하였다. 또한, 수중음향채널 링크 해석 결과의 적용 예로서 수중음향통신 시스템에서 널리 사용되고 있는 주파수 대역 중에서 25kHz 중심 주파수를 사용하고 전송 속도 10kbps, 목표 전달 거리 1km, 목표 비트 오율  $10^{-3}$ 인 QPSK 수중음향통신 시스템의 천해 동작환경을 고려한 이상적인 AWGN 환경에서의 링크 예산 수립 예를 보였다.

## ABSTRACT

The electro-magnetic wave propagates through the air in the terrestrial communications, but the acoustic wave propagates through the seawater in the underwater acoustic communication(UAC). It makes the differences between the UAC link and the well known air communication links. In this paper, we have studied path loss, absorption and ambient noise of the ocean as a medium for UAC. We have analyzed the absorption coefficient and ambient noise level of the coastal area of South Korea and suggested a strategy for the selection of the frequency band by considering the absorption coefficient and ambient noise level. Also, we present an illustrative example of a link budget for the QPSK UAC system which has carrier frequency 25kHz, bit rate 10kbps, range 1km and BER  $10^{-3}$  in the shallow water environment with an ideal AWGN assumption.

## 키워드

수중음향통신링크, 링크예산, 흡음 계수, 환경 잡음, 링크 마진

## I. 서 론

수중에서 무선 통신은 전자기파가 아닌 음파를 이용하는데, 이것은 수중에서 전자기파는 급격한 감쇠로 인하여 통신 수단으로 사용하는데 많은 제약조건이 따르지만, 음파는 수중에서 전자기파에 비해서 상대적으로

원거리까지 전파 가능하기 때문이다. 수중에서 음파를 이용한 무선 통신인 수중음향통신에 대한 연구는 무인 잠수정과 모선 사이의 통신을 중심으로 발전해왔다. 수중음향통신 초기에는 도플러 효과 및 다중경로 페이딩 현상에 강연한 특성을 지니는 주파수 천이 변조 방식을 많이 이용하였으나 대역폭 효율 저하로 인한 전송 속도

증기의 어려움으로 인하여 최근에는 고속 전송을 위한 위상 천이 변조 방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1, 2]. 국내에서도 병렬 DSP와 실시간 운영체제를 이용한 위상 천이 변조 방식의 디지털 수중음향통신 시스템 개발 사례가 있으며[3] 현재 다자간 통신이 가능한 수중음향 무선통신망 구현을 위한 연구가 진행 중이다.

[4]. 수중음향통신 시스템은 육상에서 전자기파를 이용하는 통신 시스템과 다르게 법에 의해서 주파수 사용이 엄격히 제한되어있지 않고, 또한 정해진 표준이 없어서 수중음향통신 시스템마다 사양과 동작 환경이 모두 다르다.

의성 통신 또는 휴대폰 등과 같은 공기 중에서의 통신 시스템의 경우에 링크 예산 수립 과정이 체계적으로 정립되어 있으나[5] 수중음향통신의 경우에는 채널의 특성이 주파수에 따라서 변동 폭이 크고 잡음, 흡음 등과 같은 특성이 각각에 대해서만 분석되어 있으며 소나 방정식이라는 단일 식으로 모델링하고 있어서 기존의 공기 중의 링크 해석 방식을 그대로 적용할 수 없다. 또한 수중음향통신 링크는 육상에서의 통신 링크와 비교했을 때, 물과 공기라는 매질의 차이, 음파와 전자기파라는 전달 파의 차이로 인해서 링크 해석에 있어서 수중음향통신 환경 고유의 특성을 고려한 링크 해석이 필요하다.

일반적으로 지상에서의 통신 채널은 유선 통신의 경우에 전선 또는 광섬유이고 무선 통신의 경우에는 공기인데, 수중음향통신은 해수와 해수면이나 해저면 등과 같은 경계면 및 각종 해양 구조물 등이 채널을 구성하고 있다. 육상에서의 통신 링크와 수중음향통신 링크의 가장 큰 차이점은 수중음향 채널에서 발생하는데, 수중음향통신 링크를 해석함에 있어 수중음향 채널에서는 바다 고유의 '환경잡음', 음향신호가 구 모양으로 방사되는 기하학적인 특성으로 인한 '경로 손실', 해수 매질에서 발생하는 흡음 특성을 설명하는 '흡음'을 고려해야 한다[6].

본 논문에서는 남해 및 동해 연안의 데이터를 기준으로 수온, 염도, 깊이 변화가 흡음 계수에 미치는 영향에 대해서 분석하고, 환경 잡음에 대한 고찰을 통하여 우리나라 연안에 맞는 수중음향통신 링크를 해석하기로 한다. 또한 링크 해석 결과를 바탕으로 25kHz 주파수 대역을 사용하는 목표 비트 오율  $10^{-3}$ , 전송거리 1km, 전송 속도 10kbps인 QPSK 수중음향통신시스템의 링크 예산 수립 예를 보일 것이다.

## II. 수중음향통신 링크의 전송 손실

채널에서 발생하는 '전송 손실'은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 음향신호 전달 과정의 기하학적인 특성에 의한 경로 손실과 매질(해수)의 특성에 의해서 발생하는 흡음 현상이다.

자유 공간에서 수중음향통신 링크의 전달 손실( $TL$ : Transmission Loss)은 다음과 같이 표현할 수 있다[6].

$$TL = 20\log d + \alpha d \times 10^{-3} \text{ dB} \quad (1)$$

여기에서  $d$ (단위: m)는 전송 거리이고  $\alpha$ (단위: dB/km)는 흡음 계수이다. 위 식 우변에서 첫 번째 항목은 경로 손실이고 두 번째 항목은 해수 매질에 의해서 발생하는 흡음에 관한 항목이다.

천해는 도파관을 형성하여 경로 손실이 자유공간에서와 달리  $10\log ddB$ 이다. 음파 수신 전력 관점에서는 이 식을 적용하는 것이 맞지만, 통신에서는 직접파 이외의 경로들은 시간 지연을 가지고서 수신되는 다중 경로로 인식되므로 자유공간에서의 경로 손실 식으로 계산해야 한다. 다중경로 성분들은 적용하는 신호처리 기법에 따라서 제거될 수도 있고 보강 간섭 효과가 나타나도록 할 수도 있는데, 이것은 신호를 수신한 후에 신호처리 기법에 따라서 달라지므로 자유공간에서의 경로 손실 식을 고려하는 것이 옳다. 즉 천해와 심해 모두 링크예산 측면에서 경로 손실 식은 같게 된다.

현재까지의 이론 연구 및 측정 결과와 가장 근접한 해수의 흡음 계수  $\alpha$ 는 다음과 같다[7].

$$\alpha = A_1 P_1 \left( \frac{f^2}{f_1^2 + f^2} \right) f_1 + A_2 P_2 \left( \frac{f^2}{f_2^2 + f^2} \right) f_2 + A_3 P_3 f^2 \quad (2)$$

위 식 우변은 차례대로 봉산, 황화마그네슘, 점성에 의한 흡음을 나타낸다. 점성의 영향은 물 고유 특성에 의한 것이고 10kHz 미만 주파수에서는 봉산의 영향이 지배적이며 10kHz 이상 100kHz 미만에서는 황산마그네슘의 영향이 지배적이다. 계수들은 음속  $c(m/s)$ , 수온  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), 염도  $S(\text{‰})$ , 깊이  $D(m)$ 의 함수로써 다음과 같다.

$$A_1 = \frac{8.86}{c} \times 10^{0.78 \times pH - 5} \text{ dB/Km}$$

$$P_1 = 1$$

$$f_1 = 2.8 \times \left( \frac{S}{35} \right)^{1/2} \times 10^{4-1245/\theta} \text{ KHz}$$

$$\theta = 273 + T$$

$$c = 1412 + 3.21 \times T + 1.19 \times S + 0.0167 \times D$$

$$A_2 = 21.44 \times \frac{S}{c} (1 + 0.025 \times T) \text{ dB/Km/KHz}$$

$$P_2 = 1 - 1.37 \times 10^{-4} \times D + 6.2 \times 10^{-9} \times D^2$$

$$f_2 = \frac{8.17 \times 10^{8-1990/\theta}}{1 + 0.0018 \times (S-35)} \text{ KHz}$$

$$A_3 = 4.937 \times 10^{-4} - 2.59 \times 10^{-5} \times T$$

$$+ 9.11 \times 10^{-7} \times T^2$$

$$- 1.5 \times 10^{-8} \times T^3, \quad T \leq 20^\circ\text{C}$$

$$= 3.964 \times 10^{-4} - 1.146 \times 10^{-5} \times T$$

$$+ 1.45 \times 10^{-7} \times T^2$$

$$- 6.5 \times 10^{-10} \times T^3, \quad T > 20^\circ\text{C}$$

$$P_3 = 1 - 3.83 \times 10^{-5} \times D + 4.9 \times 10^{-10} \times D^2$$

여기에서  $pH$ 는 수소이온 지수이다.

표 1은 국립해양조사원의 한국해양환경도에서 거제도, 속초, 동해, 울진(죽변), 포항 울산 등 우리나라 남해 및 동해 근해 지역의 깊이에 따른 온도 및 수온의 변화 범위이다[8]. 수심 100m 정도에서는 계절 변화에 따라서 수온 및 염도가, 지역마다 기본 값이 다를 뿐, 거의 일정 했다. 하지만 표층에서는 계절 변화에 따라서 수온 및 염도 변화가 매우 커다. 전체적으로 수온은  $0^\circ\text{C}$ 와  $30^\circ\text{C}$  범위 내에서 변화하고 염도는 30‰과 35‰ 범위 내에서 변화하는 것을 알 수 있다. 대부분의 수중음향통신 시스템들이 수km 이내 전송을 목표로 10kHz에서 100kHz 대역의 주파수를 사용하므로, 이 주파수 대역을 중심으로 표 1과 식 (2)를 이용하여 우리나라 남해 및 동해 연안의 수온 및 염도 변화에 따른 흡음 계수의 변화에 대해서 분석 하자.

표 1. 남해/동해 지역의 온도 및 염도 분포  
Table 1 Temperature and salinity of south sea and East sea

깊이(m)	염도(‰)	수온( $^\circ\text{C}$ )
0	31~34.6	5~23
50	33.5~33.5	4~17
100	34~34.5	2~12

그림 1은 온도가 흡음 계수에 미치는 영향을 고찰하기 위하여  $0^\circ\text{C}$ 와  $30^\circ\text{C}$ 의 수온에서 염도가 30‰과 35‰ 일 때의 흡음 계수를 그린 것이다. 그림에서 고정된 수온에서 온도 변화가 흡음 계수에 미치는 영향은 매우 작으며 주파수가 증가할수록 커지고, 온도에 의한 흡음 계수의 변화 범위를 보면 20kHz에서는 2dB 이내, 50kHz에서는 3dB 이내, 100kHz에서는 5dB 이내이며 주파수가 증가 할수록 변동 폭이 커진다.

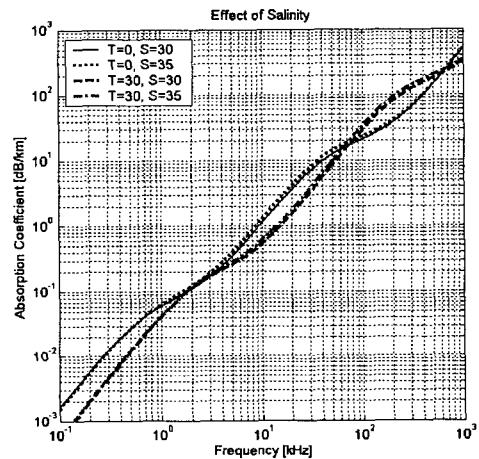


그림 1. 온도가 흡음 계수에 미치는 영향  
Fig. 1 Effect of salinity in the absorption coefficient

그림 2는 온도가 흡음 계수에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 온도가 35‰일 때, 온도 변화에 따른 흡음 계수를 그린 것이다. 수온이  $0^\circ\text{C}$ 와  $30^\circ\text{C}$  사이에서 변화한다는 가정 하에  $0^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  경우에 대해서 흡음 계수를 도시하였다. 그림으로부터 수온 변화에 의한 흡음 계수의 변화 범위는 20kHz에서는 2dB 이내, 50kHz에서는 5dB 이내, 100kHz에서는 10dB 이내이고 그림 1과 마찬가지로 주파수가 증가할수록 그 변동 폭이 커진다. 그림 1과 그림 2를 비교하면 온도보다는 온도에 의해서 흡음 계수가 더 큰 폭으로 변화함을 알 수 있다. 또한 5kHz에서 50kHz 사이에서는 수온이 증가할수록 흡음 계수가 감소하지만 이와 반대로 100kHz에서 400kHz 사이에서는 수온이 증가할수록 흡음 계수가 증가한다. 수온은 계절변화에 따라서 그리고 온도는 강우량에 따라서 표층에서 변화가 심하고 깊어지면 거의 변화하지 않는다. 따라서 심해에서 운용되는 수중음향통신 시스템

의 경우에는 흡음 계수의 변동 폭을 고려하지 않아도 되지만, 천해에서 운용되는 수중음향통신 시스템은 흡음 계수가 기후 변화에 따라서 그 변동 폭이 크다는 점을 고려해야 한다.

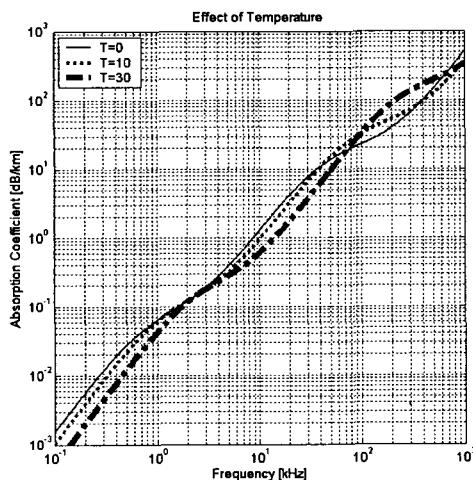


그림 2. 온도가 흡음 계수에 미치는 영향  
Fig. 2 Effect of temperature in the absorption coefficient

그림 3은 표 1을 바탕으로 남해 및 동해 연안의 흡음 계수의 변화 범위를 보여주고 있다. 일점 쇄선은 깊이가 0m, 점선은 깊이가 50m, 실선은 깊이가 100m인 경우이다. 주파수 변화에 따른 흡음 계수의 변동 폭을 보면 10kHz에서는 1dB/km 이내, 20kHz에서는 2dB/km 이내, 30kHz에서는 3.5dB/km 이내, 50kHz에서는 5dB/km 이내로 비교적 작지만, 주파수가 증가할수록 변동 폭이 커져서 100kHz에서는 흡음 계수의 변동 폭이 15dB/km로 매우 커진다. 따라서 수중음향통신 시스템을 설계할 때 주파수 대역 선정에 있어서 주파수 대역이 높아지면 흡음 계수 변동 폭이 커져서 환경 변화에 따라서 통신 시스템의 성능 변화가 커진다는 점을 고려해야 할 것이다. 또한 흡음 계수의 최고값을 보면 20kHz에서는 4dB/km이지만 100kHz에서는 35dB/km로 매우 커지는데, 이것은 100kHz 주파수 대역은 20kHz 주파수 대역과 같은 통신 성능을 얻기 위해서 매 km당 30dB 높은 전력을 요구함을 의미한다. 즉 목표 전송 거리와 가용한 송신 전력에 따라서 주파수 대역 선택에 제약을 받는다.

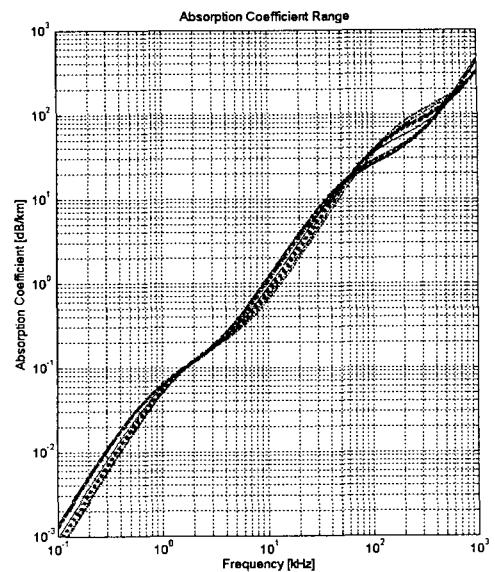


그림 3. 남해/동해 연안의 흡음 계수 변화  
Fig. 3 The absorption coefficient range of South sea and East sea

수중음향통신 신호도, 다른 통신 신호들과 마찬가지로, 반송 주파수를 중심으로 대역폭을 가지는데, 그림 3에서 보는 바와 같이 흡음 계수가 주파수의 함수이므로 대역폭 내에서 주파수마다 감쇠 크기가 다르다. 예를 들어 25kHz 반송 주파수에 대역폭 5kHz인 수중음향통신 시스템을 고려했을 때, 그림 3에서 흡음 계수는 이론적으로 최저 주파수와 최대 주파수 사이에 4dB 만큼의 차이가 존재하는 주파수의 함수이다. 따라서 수중음향통신 시스템의 수신기는 이러한 주파수 선택적 채널 변동 현상을 보상할 수 있어야 한다. 하지만 수중음향통신에 있어서 주파수의 함수로써 묘사되는 흡음 계수가 통신 성능에 미치는 영향 및 그 보상 방법에 대한 결과는 아직 발표되고 있지 않다. 목표 비트 오율을 만족하면서 제한된 전송 전력으로 전송 속도를 증가시키려면 대역폭을 증가시켜 하는데, 흡음 계수가 주파수의 함수라는 사실은 수중음향통신에서 전송 속도 증가에 어려운 요인 중의 하나이다.

### III. 수중음향통신 링크의 잡음

바다에서 발생하는 환경잡음은 수심에 따라서 ‘심해 잡음’과 ‘천해 잡음’으로 분류할 수 있다. 심해 잡음과 천해 잡음의 가장 큰 차이점은, 심해 잡음은 주파수 변화에 따른 잡음 레벨이 일관성 있게 잘 정리되어 있으나, 해안가, 만, 항만 등과 같은 천해의 잡음은 측정 장소와 주변 환경 변화에 따라서 변화의 폭이 상대적으로 크다는 것이다.

심해 잡음은 극 저주파의 경우를 제외하면 주파수 대역별로 잡음원 및 그 레벨이 잘 알려져 있다. 그림 4는 풍속을 5knot부터 35knot까지 5knot씩 증가시켰을 때의 심해 잡음 레벨이다[9]. 풍속이 증가할수록 잡음 레벨이 상승한다. 가장 낮은 풍속 레벨을 보이고 있는 그래프가 5knot에 해당하며 그 위로 풍속이 5knot씩 증가된 그래프이다. 잡음 레벨은 1kHz에서 50kHz 사이의 주파수 대역에서 풍속에 의한 영향을 가장 크게 받고 풍속이 두 배 증가하면 잡음 레벨은 6dB 증가한다. 잡음 레벨의 단위는 dB re 1 $\mu$ Pa이지만 본 논문에서는 편의상 re 1 $\mu$ Pa를 생략하고 dB로 표시하기로 하자. 50kHz 대역의 잡음 레벨은 20dB에서 풍속에 따라서 최대 40dB까지 증가한다. 그림 4로부터 풍속이 5knot 이하인 경우에는 50kHz 대역에서 잡음 레벨이 가장 낮음을 알 수 있다. 따라서 잡음 레벨만 생각한다면 심해 수중음향통신을 위한 주파수 대역은 20kHz ~ 100kHz 대역이 잡음 변동 폭이 5dB 이하로서 좋으며 그 중에서도 50kHz 대역이 가장 최적이다.

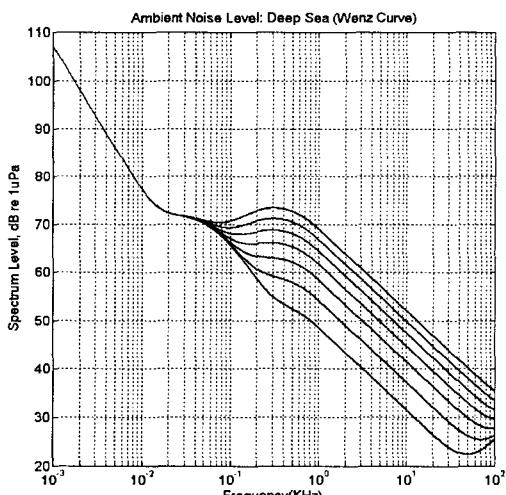


그림 4. 풍속 변화에 따른 심해 잡음 레벨  
Fig. 4 Ambient noise level of deep sea

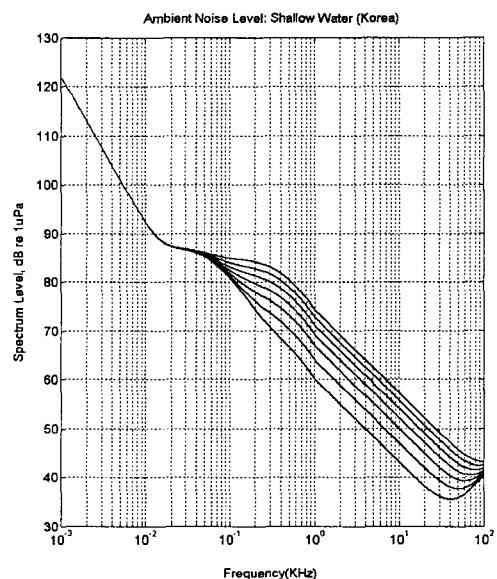


그림 5. 우리나라 연안의 풍속 변화에 따른 잡음 레벨

Fig. 5 Ambient noise level of shallow water at Korean waters

그림 5는 우리나라 연안의 풍속 변화에 따른 잡음 레벨이다[9]. 그림 4와 마찬가지로 풍속을 5knot부터 35knot까지 5knot씩 증가시킨 것으로서 가장 낮은 풍속 레벨을 보이고 있는 그래프가 5knot에 해당하며 그 위로 풍속이 5knot씩 증가된 그래프이다. 이 그림은 우리나라 연안의 9년간 잡음 레벨 측정 결과를 이용하여 Wenz 식을 변형한 것이다. 측정 결과는 7~10dB의 표준편차가 존재하는데, 천해 잡음은 심해 잡음과 달리 측정하는 시간과 장소에 따라서 그 변화폭이 매우 큼을 알 수 있다.

그림으로부터 50kHz 영역의 잡음 레벨이 5knot 이하의 풍속에서 심해 잡음 레벨보다 15dB 정도 크며, 강한 풍속에서는 약 5dB 정도 잡음 레벨이 증가함을 알 수 있다. 그림 5로부터 천해에서의 수중음향통신은 잡음 레벨만을 고려했을 경우에, 풍속이 약한 경우에는 30kHz에서 50kHz 사이 주파수 대역이 최적임을 알 수 있다.

실제 바다 환경 잡음은 바람의 속도나 선박에 의한 영향 등과 같은 잘 알려진 영향 이외에도 해양 생물체 등과 같은 일시적인 소음원이나 음과 전달 환경의 변화 등에 의해서 5~10dB 정도의 변동성이 항상 존재한다. 해안가는 사람의 활동으로 인해서 밤보다 낮에, 주말보다 주중에 잡음 레벨이 크다. 해양 생물체 잡음 중에서는 새우

가 가장 중요하다. 새우가 내는 소음은 1kHz에서 50kHz 영역에서 백색 잡음의 형태를 보이는데, 소음 레벨이 60~70dB에 이른다. 날씨가 환경 잡음에 미치는 영향 중에서 바람의 속도와 함께 강우량이 중요하다. 강한 폭우가 내리는 경우에 비가 내리지 않는 경우보다 잡음 레벨이 20~30dB 정도 증가한다. 수심이 깊을수록 환경 잡음은 감소하는데, 고주파에서 환경 잡음의 주 원인은 해수면에서 발생하기 때문이다. 수심 600m 정도까지 환경 잡음이 가장 크게 감소하는데 그 크기는 5~10dB 정도이다. 깊이가 그 이상이 되면 깊이에 따른 영향은 크게 나타나지 않는다. 해양 환경 잡음은 통계적으로 Gaussian 확률 분포로 가정하는 것이 가장 적합한데, 이것은 매우 많은 종류의 서로 독립적인 환경 잡음원이 존재하여 잡음의 크기가 통계적으로 Gaussian 분포를 따르기 때문이다.

#### IV. 수중음향통신 링크 예산 수립 예

본 장에서는 앞 선 두 장에서 분석한 전송 손실과 환경 잡음 분석 결과를 이용해서 수중음향통신 링크 예산 수립 예를 보일 것이다.

수중음향통신 시스템은 장거리 전송의 경우에는 10kHz 미만의 주파수 대역을 이용하는데, 이러한 저주파 대역은 대역폭이 제한되어 데이터 속도를 증가시키기 어려우므로 고속의 수중음향통신 시스템은 전송 거리를 줄이고 수십kHz 주파수 대역을 사용한다. 본 논문에서는 천해 동작환경에서 잡음 레벨과 흡음 계수의 값 및 변동 폭 등을 고려하여 25kHz 중심 주파수를 사용하고 전송 속도 10kbps, 목표 전달 거리 1km, 목표 비트 오율  $10^{-3}$ 인 QPSK 수중음향통신 시스템의 이상적인 AWGN 환경에서의 링크 예산을 수립하도록 하겠다. 링크 예산 수립 과정에 송수신 센서 및 증폭기 관련 사항은 고려하지 않았다.

전달 거리가 1km이므로  $20\log 1000 = 60$ dB 경로 손실이 발생한다. 그림 3으로부터 우리나라 연안 지역의 25kHz 흡음 계수는 3~6dB/km인데, 가장 열악한 6dB/km를 고려하면 전달 거리가 1km이므로 흡음에 의한 감쇠는  $6\text{dB}/\text{km} \times 1\text{km} = 6\text{dB}$ 이다. 전송 속도 10kbps를 고려했으므로 전송 신호는 중심 주파수 25kHz를 중심으로 약 5kHz의 대역폭을 갖는 신호로 생각할 수 있고 그

림 4로부터 대역폭 내에서 흡음 계수가 ±2dB만큼 변화하는데, 링크 예산 수립 과정에서는 이와 같은 흡음 계수의 주파수 함수적 특성은 고려하지 않기로 한다.

기상 상태가 양호한 풍속 5knot 이하의 천해 해상 상태를 고려하면 환경 잡음은 그림 6으로부터 37dB이다. 전송 속도가 10kbps 이므로 수신 비트 에너지 대 잡음 비 ( $E_b/N_0$ )<sub>r</sub>는 수신 신호 전력 대 잡음 비  $P_r/N_0$ 보다 40dB만큼 작아진다.

이상적인 AWGN 환경에서 위상 동기 검파를 하는 QPSK 수신기는 비트 오율  $10^{-3}$ 을 위해서 비트 에너지 대 잡음 비 ( $E_b/N_0$ )<sub>req</sub>가 7dB 이상이어야 한다.

이제 송신 음압 레벨이 160dB re 1μPa @ 1m라고 하면 경로 손실 60dB, 흡음 손실 6dB이므로 수신 음압 레벨은 94dB이다. 환경 잡음이 37dB이므로  $P_r/N_0$ 는 57dB이고 ( $E_b/N_0$ )<sub>r</sub>는 17dB이다. 일반적인 구현 손실 3dB를 고려하면 링크 마진은 7dB이다. III장에서 설명한 바와 같이 우리나라 연안의 환경 잡음은 7~10dB의 표준편차가 존재하는데, 링크 마진 7dB는 이러한 잡음 전력의 불확실성을 보상할 수 있는 수준의 값이다. 그림 8은 링크 예산 수립 과정을 요약한 것이다.

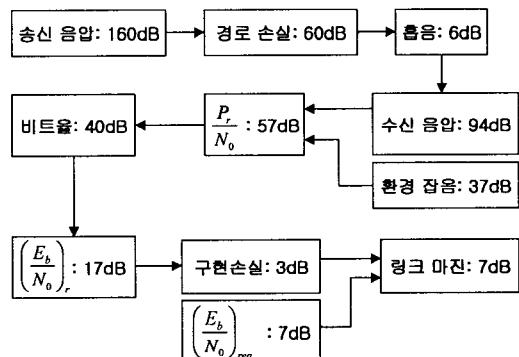


그림 8. 수중음향통신 링크 예산의 예  
Fig. 8 A link budget example for underwater acoustic communication

#### V. 결 론

본 논문에서는 수중에서 음파를 이용한 무선통신의 매질로서 바다 속을 경로 손실, 흡음, 환경 잡음 측면에서 수중음향통신 링크 예산 수립에 적합하도록 음향학

기반의 지식을 해석하고 고찰하였다. 우리나라 남해 및 동해 연안의 염도 및 수온 분포 데이터를 이용하여 우리 연안에서의 흡음 계수에 대해서 분석하고 흡음 계수를 고려한 주파수 대역 선정 방법에 대해서 논하였다. 우리나라 연안의 풍속 변화에 따른 잡음 레벨에 대해서 고찰하고 심해 잡음 레벨과 비교 분석하여 잡음 관점에서 주파수 대역 선정 방법을 제시하였고 기후 및 해양 생물체 등과 같은 환경 변화가 잡음 레벨에 미치는 영향에 대해서 요약하였다.

또한, 수중음향채널 링크 해석 결과의 적용 예로서 수중음향통신 시스템에서 널리 사용되고 있는 주파수 대역 중에서 25kHz 중심 주파수를 사용하고 전송 속도 10kbps, 목표 전달 거리 1km, 목표 비트 오율  $10^{-3}$ 인 QPSK 수중음향통신 시스템의 천해 동작환경을 고려한 이상적인 AWGN 환경에서의 링크 예산 수립 예를 보였다.

### 후 기

본 연구결과는 해양수산부 연구사업 “수중 무선통신 시스템 개발” 및 한국해양연구원 기본연구사업 “수중 3차원 퓨전영상 생성, 탐지 및 전송기술 개발” 과제 연구결과의 일부임을 밝힙니다.

### 참고문헌

- [1] D. Kilfoyle and A. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 25, pp. 4-27, Jan. 2000.
- [2] 최영철, 임용곤, “수중음향통신을 위한 광대역 FIR 범형성기,” 한국해양정보통신학회논문지 10권 12호 pp. 2151-2156, 2006.
- [3] 박종원, 고학림, 이덕환, 최영철, 김시문, 김승근, 임용곤, “QPSK 방식을 이용한 수중영상 정보전송 시스템의 DSP 구현 및 실해역 실험 연구,” 한국음향학회지 제23권 제2호 pp. 117-124, 2004.
- [4] 임용곤 외, 수중 무선통신 시스템 개발 과제 보고서, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 2005.

- [5] B. Sklar, Digital Communications, Prentice-Hall, 1988.
- [6] R. Urick, Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill, 1983.
- [7] M. Crocker, Encyclopedia of Acoustics, John Wiley & Sons, 1997
- [8] 국립해양조사원, 한국해양환경도, 1998.
- [9] 최복경, 김봉체, 김철수, 김병남, “한반도 주변해역 수중배경소음의 풍속과 선박분포에 따른 의존성 분석,” 한국음향학회지 제22권 제3호 pp. 233~241, 2003.

### 저자소개

#### 최 영 철(Youngchol Choi)



1998년 KAIST 전기및전자공학과  
(공학사)

2000년 KAIST 전기및전자공학과  
(공학석사)

2006년 12월 현재 한국해양연구원 연구원

※관심분야: 수중음향통신 및 신호처리

#### 변 성 훈(Sung-hoon Byun)



1998년 서울대학교 조선해양공학과  
(공학사)

2000년 서울대학교 조선해양공학과  
(공학석사)

2006년 12월 현재 한국해양연구원 연구원

※관심분야: 수중음향통신 및 신호처리



1979년 충남대학교 전기공학  
(공학사)

1984년 충남대학교 전기공학  
(공학석사)

1994년 아주대학교 전자공학(공학박사)

2006년 12월 현재 한국해양연구원 책임연구원

※관심분야: 수중음향통신, 수중 로봇, 해양 물류, 유비쿼터스, Ad-hoc 네트워크, 센서 네트워크