

# 서해 천해역에서 수온 변화에 따른 채널 환경 분석

김길용\*, 김계원°, 김민상\*, 정태건\*, 고희림\*

## An Analysis of Underwater Acoustic Channel Environment According to Water Temperature Change in the Shallow Water of The West Sea

Kil-Yong Kim\*, Kye-Won Kim°, Min-Sang Kim\*, Tae-Geon Jeong\*, Hak-Lim Ko\*

### 요 약

본 논문에서는 충남 태안군 근해에서 2017년 3월, 8월, 11월 수행한 OFDM 시스템 기반 수중 음향 통신 실험으로 얻은 실측 데이터를 통해 최대 초과 지연 확산을 구하였다. 그리고 이를 통해 상관대역폭을 구하여 계절별 수온 변화에 따른 수중 채널 특성을 분석하였다. 분석한 결과 표층에서 수온 변화가 심했던 3월의 경우, 임계치 -10dB일 때와 -15dB일 때의 최대 초과 지연 확산 값은 수온이 일정한 분포를 보였던 8월 및 11월의 데이터와 비교했을 때 크게 나타났다. 또한 이에 따라 상관대역폭도 3월의 경우, 임계치 -10dB 및 -15dB일 경우 모두 8월 및 11월의 데이터와 비교했을 때 상대적으로 좁게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Acoustic channel, UAC, OFDM, Delay spread, Coherence bandwidth

### ABSTRACT

In this paper, the maximum excess delay spread is obtained from the measured data obtained from the underwater acoustic communication experiment based on the OFDM system performed in March, August, and November 2017 in Taean - Gun, Chungnam. Then, coherence bandwidth was obtained and the underwater channel characteristics were analyzed according to seasonal temperature changes. As a result of the analysis, the maximum excess delay spread was longer in March when the water temperature changed significantly in the surface layer compared to the data of August and November when the water temperature was constant in both the -10dB and -15dB thresholds. As a result, it can be seen that the coherence bandwidths are relatively narrow in March when the threshold values are -10dB and -15dB, respectively, when compared with the data in August and November.

### I. 서 론

수중 음향 통신 기술은 해양 데이터의 수집, 해양

공해 감시, 해양 탐사 및 전술 모니터링 응용 프로그램 등 여러 분야에 접목 가치가 있어 활발한 연구가 진행 중이지만 여러 가지 환경적 요인으로 인한 제약

※ 본 연구는 2018년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다.(분산형 수중 관측 제어망 개발)

• First Author : (ORCID:0000-0001-6126-4972)Hoseo University, Oceanic IT Convergence Technology Research Center, kykim@hoseo.edu, 정희원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-3173-1351)Hoseo University, Oceanic IT Convergence Technology Research Center, kwkim@hoseo.edu, 종신회원

\* Hoseo University

논문번호 : 201806-0-068-SE, Received April 18, 2018; Revised June 18, 2018; Accepted June 18, 2018

조건으로 시스템 설계에 많은 어려움이 따르는 통신 분야로 알려져 있다<sup>1)</sup>.

또한 수중 장거리 무선 통신에 있어서 전자파는 해수에서 전달이 어렵기 때문에 수중 통신을 가능하게 하는 가장 확실한 매체로서 음파가 사용된다. 수중 음향 채널은 제한된 대역폭 및 다중 경로, 매체의 굴절 특성, 빠른 시간 변화 등의 특성을 가지기 때문에 채널 모델링이 매우 어렵다. 그리고 음파는 약 1500m/s의 매우 낮은 속도로 전파하고 송신주파수, 수온, 염도, 저질 등에 의해 경로 변화가 심하다. 따라서 수중 음향 통신 시스템에 육상통신 기술을 접목하기 위해서는 수중 음향 채널에 대한 이해가 필수적이다<sup>2,3)</sup>.

특히 음속 프로파일은 해수의 온도, 염분 및 깊이에 따라 다르다. 음속은 수온이 낮아질수록 감소하고 높아지면 증가하는 특성을 가지고 있다. 그리고 일반적으로 깊은 수심의 바다에서 수온은 모든 계절에 거의 동일한 분포를 보이는 것으로 알려져 있다. 하지만 실험을 수행했던 서해 연안의 경우 평균 20~50m의 비교적 얇은 수심으로, 계절에 따른 수온 변화 경향이 뚜렷하게 나타난다. 수온은 음속의 입력 함수로서 수온의 변화에 따라 음속도 변화하게 되고, 음속의 변화에 따라 음파의 전달 경로도 변하기 때문에 결과적으로 수중 음향 채널 환경에도 영향을 미쳐 통신 성능을 좌우하기 때문에 수온 변화가 음속 프로파일 및 수중 채널 환경에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 있다고 할 수 있다<sup>4,7)</sup>.

한편 수중 채널 환경 분석을 위한 여러 가지 지표가 있는데, 그 중에서 상관대역폭은 직교 주파수 분할 다중화(OFDM; Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식과 같은 다중 반송파를 사용하는 시스템에서 부반송파의 간격을 결정하는 데에 중요한 요소이다.

본 연구에서는 OFDM 성능 실험을 통해 취득한 실측 데이터를 활용하여 채널 임펄스 응답을 얻고 이를 활용하여 최대 초과 지연 확산(Maximum Excess Delay Spread)값을 도출하였다. 또한 도출된 최대 초과 지연 확산 값을 이용하여 상관대역폭(Coherence Bandwidth)을 계산하였다.

## II. 최대 초과 지연 확산과 상관대역폭

상관대역폭은 채널이 모든 스펙트럼 성분을 거의 같은 이득과 선형적인 위상을 가지고 통과시키는 주파수의 범위에 대한 통계적인 표현으로 주파수적으로 채널이 균일한 특성을 보이는 대역폭이다.

일반적으로 상관대역폭은 최대 초과 지연 확산으로 계산이 가능하다. 최대 초과 지연 확산( $T_m$ )을 사용한 상관대역폭( $f_0$ )은 전력 지연 프로파일에서 수신 전력의 값이 최대치로 부터 일정 dB만큼 아래로 떨어지는 동안의 시간과 처음 도달 시간과의 차이로 추정이 가능하다. 그림 1의 실측 데이터를 통해 얻은 채널 임펄스 응답 그래프를 예로 들면, 임계치를  $-15dB$ 로 설정했을 때 최댓값에서  $-15dB$ 로 떨어지는 데에 약 2.5ms가 걸린 것을 확인할 수 있는데 이 때 2.5ms가 최대 초과 지연 확산 값이다.

상관대역폭( $f_0$ )은 최대 초과 지연 확산( $T_m$ )의 역으로 구할 수 있으며 아래의 식 (1)과 같다.

$$f_0 = \frac{1}{T_m} \tag{1}$$

본 연구에서는 임계치  $-10dB$  및  $-15dB$ 를 기준으로 최대 초과 지연 확산 값을 구하였으며 위의 식 (1)을 이용하여 상관대역폭을 도출하였다.

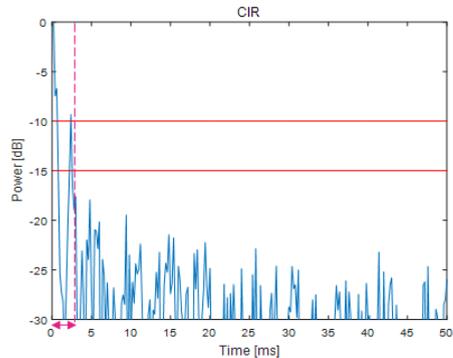


그림 1. 채널 임펄스 응답과 최대 초과 지연 확산  
Fig. 1. Channel impulse response and maximum excess delay spread

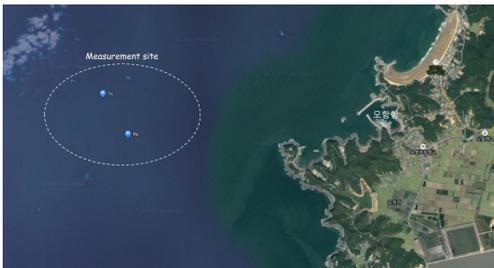
## III. 실험 환경

본 연구를 위한 음속 및 수중 음향 채널 데이터의 취득을 위해 충남 서해안 일대에서 실험을 수행하였다. 계절별 수온 변화를 알아보기 위해 3월에 충남 태안군 삼길포항 인근 해역에서, 8월과 11월에는 충남 태안군 모항항 인근 해역에서 실측한 데이터를 사용하였다. 실험을 수행한 해역의 위치 및 상세 GPS 좌표를 그림 2-(a)~(c)에 나타냈으며, 실험 해역의 수심, 송·수신 센서의 깊이, 송·수신 선박간의 거리 등의 설

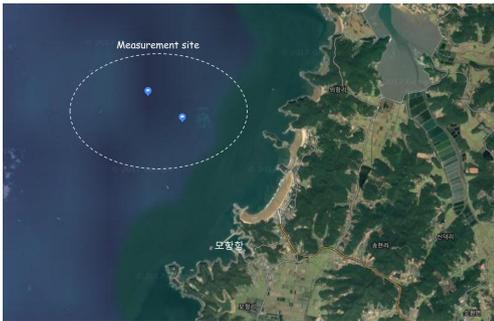
정을 그림 2-(d)에 나타냈다.



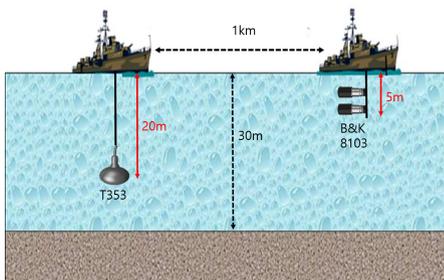
(a) Near the Samgilpo port, March 2017  
 Tx : 36°47'17.9"N, 126°06'42.7"E  
 Rx : 36°48'17.1"N, 126°06'56.4"E



(b) Near the Mohang port, August 2017  
 Tx : 36°46'49.1"N, 126°04'34.8"E  
 Rx : 36°46'25.9"N, 126°04'52.6"E



(c) Near the Mohang port, November 2017  
 Tx : 36°48'39.4"N, 126°06'22.8"E  
 Rx : 36°48'17.8"N, 126°06'57.5"E



(d) Experimental Scenario

그림 2. 실험 장소 및 환경  
 Fig. 2. Experimental locations and environment

실험 해역의 수심은 약 30m이고 저질은 모래로 되어 있으며 송·수신 센서는 각각 20m, 5m 깊이로 하였고 송·수신 선박간의 거리는 1km로 고정하였다. 정확한 선박간의 거리 유지를 위하여 송·수신 선박 모두 앵커를 내려 고정하였고, Garmin사의 GPS를 사용하여 수시로 두 선박간의 거리를 확인하였다.

그림 3에서는 송신 선박과 수신 선박 각각에 구성된 시스템을 보여주고 있다. 주요 장비로는 송·수신단



그림 3. 선박 내부에 구성된 송·수신 시스템  
 Fig. 3. Transceiver system constructed inside ship

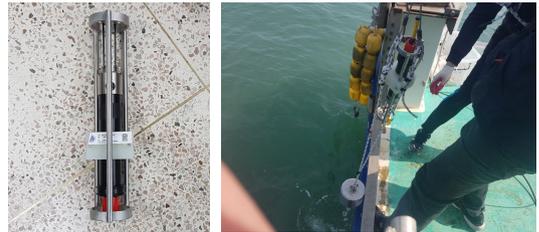


그림 4. 실험에 사용된 SVP  
 Fig. 4. SVP used in experiments



(a) Neptune T353 for 10~14kHz(UL0), 16~20kHz(UL1)

(b) Neptune T101 for 60~70kHz(UL2)



(c) Neptune T170 for 3~8kHz(DL)

(d) B&K 8103

그림 5. 송신 트랜스듀서(a~c) 및 수신 하이드로폰(d)  
 Fig. 5. Transmitting transducers(a~c) and receiving hydrophones(d)

각각에 증폭기, 데이터 수집기(DAQ), 오실로스코프, 전원 차단을 대비한 UPS, 노트북 등이 있다. 그리고 그림 4에 보이는 장비는 음속 프로파일 수집을 위한 SVP(Sound Velocity Profiler)이다.

그림 5에 보이는 장비는 실험에 사용된 송신용 트랜스듀서(a~c) 및 수신용 하이드로폰(d)이다. 트랜스듀서는 본 연구에서 사용하는 uplink 및 downlink 주파수 대역에 맞는 트랜스듀서를 사용한다.

#### IV. 수중 채널 환경 분석 결과

OFDM 시스템 성능 실험으로 취득한 데이터의 preamble부를 활용하여 최대 초과 지연 확산 및 상관대역폭을 도출하여 수중 채널 환경을 분석하였다. OFDM 시스템에서 사용한 주요 파라미터들은 하단 표 1에 명시하였다. 그리고 여기서 도출된 결과를 이용하여 계절에 따른 수온의 변화가 수중 채널 환경에 미치는 영향을 분석하였다. 분석을 위해 서해 태안 천해역에서 3월, 8월, 11월 세 차례 SVP를 사용하여 취득한 수온 및 음속 프로파일 데이터를 활용하였으며 취득한 데이터를 이용하여 분석한 수심에 따른 수온

및 음속의 변화 그래프를 그림 6에 나타내었다.

그림 6 상단의 수온 변화 그래프를 살펴보면 3월의 경우 표층에서의 온도 변화가 약 15°C 정도 나타난 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상이 발생한 이유는 실험이 진행된 3월의 경우 낮과 밤의 기온 차가 급격하여, 실험이 수행된 오후 12시경에는 저층의 수온은 아직 낮은 데에 비해 표층 수온은 급격히 상승하였기 때문이다.

그리고 그림 6 하단의 음속 변화 그래프를 보면 수온이 변화하는 데에 따라서 음속 또한 변화하는 경향을 확인할 수 있다. 수온의 변화는 음속의 변화를 일으키게 되고, 또한 음파의 전달 경로의 변화도 일으키게 되는데, 이는 음선의 전달 경로에 영향을 미치기 때문에 채널 임펄스 응답이 크게 변화하게 된다<sup>7)</sup>.

수중에서 음파의 전달은 음속의 수직/수평적 구조와 연관이 있고 특히 해양에서의 음속은 수온( $T$ , °C), 염분( $S$ , psu; practical salinity unit), 수심( $D, m$ )에 의해 정의되며 아래의 식 (2)와 같다<sup>8)</sup>.

$$c(T, S, D) = 1449.2 + 0.016D + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) \quad (2)$$

하단의 표 2에는 실측 데이터를 이용한 분석 결과를 나타내었다. 표층에서 수온 변화가 심했던 3월의 경우, 수온이 일정한 분포를 보였던 8월 및 11월의 데이터와 비교했을 때 최대 초과 지연 확산 값은 임계치  $-10dB$  기준으로 약 6.2~6.5ms 가량 길게 나타난 것을 볼 수 있고,  $-15dB$  기준으로 보았을 때는 약 17.5~18.1ms의 큰 차이를 보였다. 따라서 상관대역폭도 3월의 경우, 8월 및 11월의 데이터와 비교했을 때 임계치  $-10dB$ 를 기준으로 402~491Hz 가량 좁게 나타났고, 임계치  $-15dB$  기준으로 보면 약 157~184Hz 좁게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

표 1. OFDM 파라미터  
Table 1. Parameters of OFDM system

	Uplink			Downlink
	UL0	UL1	UL2	DL
Frequency range [kHz]	10~14	16~20	60~70	3~8
Bandwidth [kHz]	4		10	5
Sampling factor	1.25		1	1
Sampling frequency [kHz]	5		10	5
FFT size	512		1024	512
Subcarrier spacing[Hz]	9.7656		9.7656	9.7656
CP length [ms]	22.6		22.6	22.6
OFDM symbol length [ms]	125		125	125
Number of guard subcarriers	Left	54	14	6
	Right	53	15	7
DC subcarriers	3		3	3
Number of using subcarriers	400		992	496

표 2. 분석 결과  
Table 2. Analysis results

	threshold	March	August	November
maximum excess delay spread[ms]	-10dB	8.0889	1.9022	1.6276
	-15dB	22.5042	4.9689	4.3756
Coherence bandwidth [Hz]	-10dB	123.6261	525.6975	614.3993
	-15dB	44.4360	201.2516	228.5400

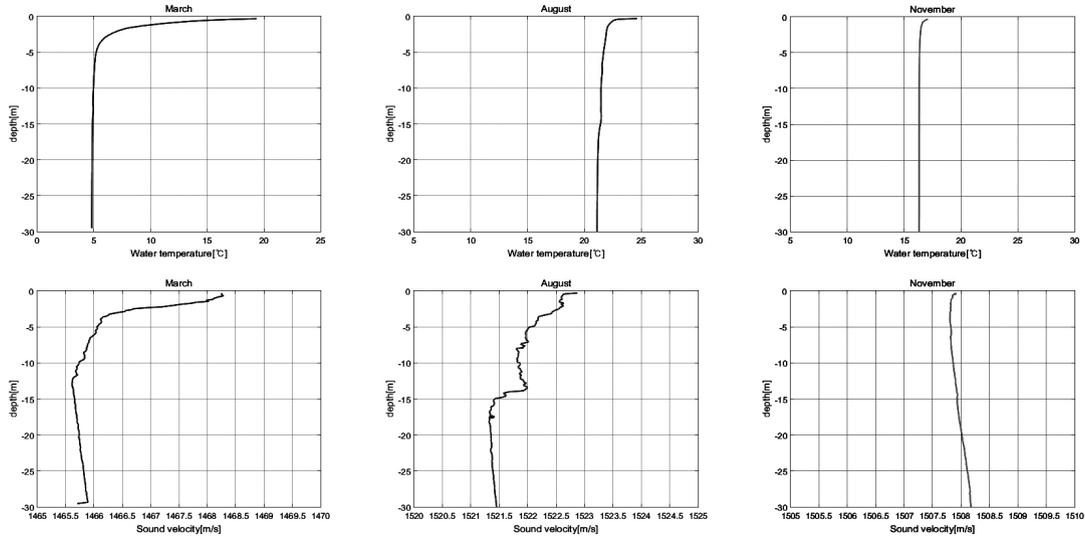


그림 6. 수심에 따른 월별 수온 및 음속의 변화  
 Fig. 6. Changes in water temperature and sound velocity by month

### V. 결론

본 논문에서는 서해 천해역에서 3월, 8월, 11월 세 차례의 실험을 통해 취득한 실측 데이터를 이용하여 최대 초과 지연 확산을 구하고 이를 이용하여 상관대역폭을 산출했다. 또한 SVP를 사용하여 얻은 데이터로 각 월별 수온 및 음속의 변화를 확인하였다.

분석 결과 3월의 경우 낮과 밤의 급격한 기온 차로 인한 표층과 저층의 수온 차이가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 최대 초과 지연 확산 및 상관대역폭을 각 월별로 비교했을 때, 급격한 수온 변화는 음속의 변화와 더불어 음선의 전달 경로에도 영향을 미쳐 수중음향통신 채널에도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 원활한 수중 음향 통신을 수행하기 위해서는 계절에 따른 수중채널 변화를 고려한 수중 음향 통신 시스템 설계가 필요할 것으로 사료된다.

### References

[1] M. Stojanovic and L. Freitag, "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, pp. 84-89, Jan. 2009.

[2] T. Rappaport, *Wireless Communications : Principles and Practice*, Prentice-Hall PTR, 2002.

[3] J. Han, Y. Son and K. Kim, "Performance Analysis of Acoustic Communication Using OFDM Modulation in Underwater", *J. KINPR*, vol. 34, no. 10, pp. 769-774, Dec. 2010

[4] Jens M. Hovem, *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices*, Intech, 2013.

[5] S. Oh, J. Na, T. Oh, J. Park, Y. Na and Y. Kim, "Temporal Variability of Acoustic Arrivals in the East Sea of Korea Using Tomographic Method", *J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 20, no. 5, pp. 92-99, Jul. 2001.

[6] Y. Na, Y. Kim, J. Choi and T. Shim, "Study on the Major Oceanographic Phenomena and Pressure Fields Variation of Underwater Acoustic Waves in Continental Shelf Areas", in *Proc. Acoustical Soc. Korea Conf.*, pp. 237-240, Seoul, Korea, Aug. 2000

[7] J. Kim, T. Bok, J. Bae, D. Paeng, C. Lee, and S. Kim, "Communication performance analysis according to seasons in west sea," *J. IEK*, vol. 48, no. 1, pp. 9-15, Jan. 2011.

[8] H. Medwin, "Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters," *J. Acoustical Soc. Am.*, vol. 58, no. 6, pp. 1318-1319, Dec. 1975.

**김길용 (Kil-Yong Kim)**



2009년 8월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
2012년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
2016년 10월~현재 : 호서대학교 해양IT융합기술연구소 연구원

<관심분야> smart antenna, 수중통신, 이동통신, 해양통신

**정태건 (Tae-Geon Jeong)**



2016년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
2018년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
2018년 3월~현재 : 호서대학교 정보통신공학과 박사과정

<관심분야> smart antenna, 수중통신, 이동통신

**김계원 (Kye-Won Kim)**



1997년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
1999년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
2011년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 박사  
2014년 10월~현재 : 호서대학교 해양IT융합기술연구소 조교수

<관심분야> smart antenna, 이동통신, 수중통신

**고학림 (Hak-Lim Ko)**



1983년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 졸업  
1986년 2월 : Fairleigh Dickinson Univ. 전기 및 컴퓨터공학과 석사  
1995년 8월 : North Carolina state Univ. 전기 및 컴퓨터공학과 박사

1996년~현재 : 호서대학교 정보통신공학부 교수

<관심분야> smart antenna, 이동통신, 수중통신, 해양통신

**김민상 (Min-Sang Kim)**



2008년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
2010년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
2013년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 박사  
2016년 3월~현재 : 호서대학교

해양IT융합기술연구소 조교수

<관심분야> 수중통신, 이동통신, 해양통신, 스마트 안테나 시스템