

# 10kHz 반송파를 사용한 서해안 수중 채널환경 분석

김민상\*, 고크림\*, 김계원\*, 이태석\*, 임태호°

## Underwater Channel Environment Analysis Using 10Khz Carrier Frequency at the Shore of West Sea

Min-sang Kim\*, Hak-lim Ko\*, Kye-won Kim\*, Tae-seok Lee\*, Tae-ho Im°

### 요약

본 연구는 10kHz의 반송 주파수를 사용하여 서해안의 수중 채널 환경 측정과 분석을 목표로 하여 충청남도 당진군 장고항 인근 해역에서 측정을 수행하였으며, 수평채널 환경을 측정하기 위해 송신기와 수신기 사이의 이격거리를 10m~4000m까지 다르게 하였고, 수직 채널 측정은 송신측 선박과 수신측 선박을 접선시켜 고정된 후 송신기와 수신기의 입수 깊이를 다르게 하여 측정을 수행하였다. 측정 데이터를 바탕으로 실험해역의 전력 지연 프로파일(Power delay profile)을 분석하여 상관대역폭(Coherence bandwidth)을 추정하였으며, 수신된 tone신호의 주파수 변화를 통한 도플러 주파수를 분석하여 상관시간(Coherence time)을 추정 하였다. 따라서 본 연구는 향후 수중 채널 환경에서 원활한 통신과 통신의 신뢰성 확보를 위한 수중통신용 프레임 설계 연구를 수행하는 기반연구가 될 것으로 기대된다.

**Key Words** : Underwater Channel, Coherence Time, Coherence Frequency, Doppler Spread, Delay Spread

### ABSTRACT

This study was carried out near the waters of Jango port, Dangjin-gun, Chungcheongnam-do by utilizing 10kHz carrier frequency, for the purpose of measurement and analysis of underwater channel environment of the Western sea. For the measurement of horizontal channel environment, the separation distance between transmitter and receiver is made differently in the range between 10m and 4000m. Meanwhile, for the measurement of vertical channel environment, transmission and receiving side ships are fixed as contacted each other and measured differently depending on their depth of submergence. In this study, the Coherence Bandwidth and the Coherence Time were estimated by analyzing the Power delay profile of the real sea based on the measured data, and analyzing the doppler frequency through frequency conversion of received tone-signal, respectively. This study is expected to become a base study in carrying out the frame design for underwater communication to improve the communication and secure the reliability of communication in future underwater channel environment.

※ 이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중 관측·제어망 개발)

◆ First Author : Hoseo University Department of Information and Telecommunication Eng., minsang@hoseo.edu, 정희원

° Corresponding Author : Hoseo University Department of Oceanic IT Eng., taehoi@hoseo.edu, 정희원

\* Hoseo University Department of Information and Telecommunication Eng., 정희원

논문번호 : KICS2015-11-377, Received November 25, 2015; Revised January 6, 2016; Accepted January 15, 2016

## I. 서론

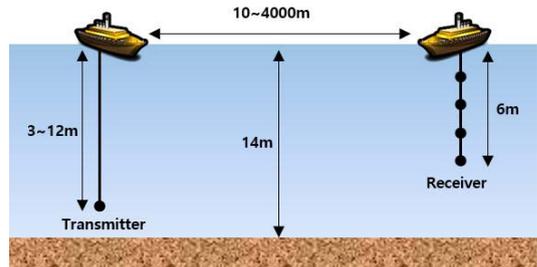
최근 선진국에서는 해양기술개발과 해양영토의 주권강화, 재난방지 등을 위해 ‘수중 사물 인터넷 (IoUT:Internet of Underwater Things)’ 개발을 목표로 연구가 활발히 진행 중이다<sup>[1]</sup>. 특히 미국과 유럽은 1985년 수중통신모뎀이 개발된 후 해양관측, 국방감시를 위해 다양한 프로젝트가 현재까지 진행되고 있다. 따라서 수중에서 연구 및 탐사의 효율을 향상시키기 위하여 통신을 사용한 원격 장비의 활용은 점차 증가하는 추세이다. 하지만 수중 채널환경은 육상의 채널환경과는 크게 상이하며, 수중 채널에 대한 표준모델이 아직까지 제시되지 않은 시점에서 육상의 발전된 이동통신 방식을 수중에 적용하기 위해서는 수중 채널환경에 대한 분석은 매우 중요하다. 수중 채널환경은 바람과 파도 해류에 의해 급변하며, 수온, 염분, 수압 등의 영향으로 기하학적인 음속 분포를 갖는다. 따라서 신호원에서 전송된 신호는 해수면이나 해저면에 반사되어 다중경로로 전달이 됨에 따라 주파수 영역에서 빠르게 채널이 변하는 주파수 선택적 페이딩이 발생하며, 조류나 해류 그리고 송수신기의 이동에 의해 시간 선택적 페이딩이 발생하게 되므로 정확한 채널 추정과 보상이 수행되어야만 수중에서 신뢰성 있는 통신이 가능하다<sup>[2]</sup>. 일반적으로 채널 보상을 위해 수신단에서는 수신된 신호의 파일럿을 이용하여 채널을 추정하며, 파일럿의 간격은 수중 채널 환경의 상관대역폭과 상관시간을 고려하여 설정해야 한다. 따라서 전 세계적으로 수중 채널 환경에서 상관대역폭과 상관시간에 대한 연구가 진행되고 있으며<sup>[3]</sup>, 국내에서도 동해안과 남해에서 실측을 통한 상관대역폭과 상관시간에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있다<sup>[4]</sup>. 하지만 현재까지 서해안의 수중 채널환경에 대한 연구 사례가 미비하므로 본 연구는 충청남도 당진군 장고항 인근 해역에서 측정을 수행하였으며, 송신센서와 수신센서의 깊이와 거리를 다르게 하여 다양한 실측 환경에서 데이터를 수집하여 측정 지역의 상관대역폭과 상관시간에 대한 분석을 진행 하였다.

## II. 측정환경

본 연구의 측정은 그림 1.(a)에 보이는 바와 같이 충청남도 당진군 장고항 인근 해역인 37°01'48.52"N-126° 36'41.69"E에서 수행되었으며, 그림1.(b)에는 측정 환경을 나타내었다. 측정은 송신선박과 수신선박 사이의 거리를 10m~4000m까지 다



(a) The experimental locations



(b) The geometry and the setup of the experimental system

그림 1. 측정 장소 및 측정 환경

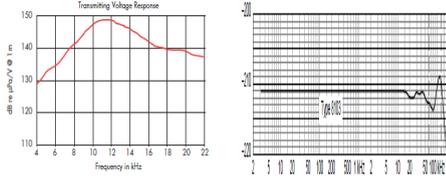
Fig. 1. The experimental locations and setup of the experimental system

르게 하여 측정을 하였고, 이때 정확한 측정거리 유지를 위하여 휴대용 GPS를 사용하여 송신선박과 수신선박의 거리를 점검하였다. 또한 측정 지역의 수심은 측정선박 내부의 어군탐지기를 사용하여 약 13~16m 정도의 수심을 유지하여 측정을 수행 하였다. 이미 잘 알려져 있듯이 서해는 동해와 남해에 비하여 탁도가 높고 조수 간만의 차가 크다. 따라서 간조와 만조가 발생하는 시간에는 원하는 위치에 정박하여 측정하기가 불가능하기 때문에 수직 채널환경 측정은 송신선박과 수신선박을 접선시킨 후 두 선박을 줄로 고정시킨 후 측정 하였으며, 수평 채널환경 측정에서 수신선박은 해상의 고정 부이(Bouy)에 고정 시키고 송신선박은 정해진 이격거리로 이동하여 측정하였다. 또한 측정환경 유지를 위해 송신센서와 수신센서의 입수 깊이나 송신전력을 다르게 전송해야 하는 시점마다 GPS좌표와 수심을 점검하여 측정위치를 교정하였다.

그림 2.(a)에는 측정에서 사용된 CTG사의 ITC-1007 송신 트랜스듀서와 송신 트랜스듀서의 Transmitting voltage response를 나타내었으며, 그림 2.(b)에는 수신 하이드로폰 B&K 8103의 사진과 해당 모델의 수신 주파수 특성이 보인다. 수신 하이드로폰의 경우 4개의 하이드로폰을 선형으로 배열하였으며,



(a) Transducer(ITC-1007)&Transmitting voltage response



(b) Hydrophone(B&K-8103)&receiving frequency character

그림 2. 측정에 사용한 트랜스듀서와 하이드로폰  
Fig. 2. Transducer and hydrophone for measurement

각 수신센서 간의 간격은 반송주파수의 반 파장으로 배열하여 측정환경 분석 시에 빔 형성기법을 사용하여 다중경로 신호의 도래각(AOA: Angle of Arrival) 추정이 가능하도록 하였다.

그림 3에는 송신선박과 수신선박 내부에 설치된 측정 장비가 보인다. 측정용 PC는 NI PXI-8119를 사용하였으며, 함수발생 보드는 NI PXI-5122를 사용하였다. 송신 앰프는 B&K 2713을 사용하였으며, 측정 거리에 따라 수직채널 환경 측정에서 송신전력은 50W를 사용하였고, 수평 채널환경 측정에서는 주로 100W를 사용하여 측정을 수행 하였다.

수신측에 사용한 측정용 PC는 송신측과 동일한 모델을 사용하였으며, 수신 앰프는 B&K NEXUS Type 2692, 데이터 수집보드는 NI PXI-6115를 사용하여 측정을 수행하였다. 수신된 신호는 오실로스코프와 time capture 기능이 있는 시뮬레이터를 통해 복수개의 하이드로폰에 수신되는 데이터를 실시간으로 점검 및 저장이 가능하다. 표 1에는 측정에 사용된 송신 파라미터를 정리하였다.



(a) 송신측 측정 장비 (b)수신측 측정 장비

그림 3. 측정선박 내부의 장비  
Fig. 3. Equipments setting for measurement

표 1. 측정 파라미터  
Table 1. Measurement parameter

	PN	cos
Bandwidth	5kHz	-
Modulation	BPSK	-
Carrier frequency	10kHz	
TX sampling frequency	1Mbps	
RX sampling frequency	200kbps	

본 연구의 측정은 서해의 수중 채널 환경 분석을 위해 수행 되었다. 측정은 10kHz의 반송주파수를 사용하여 PN과 tone신호를 전송하였으며, PN sequence의 경우 변조방식은 BPSK, 대역폭은 5kHz로 전송하였다. 이때 송신 sampling은 1Mbps, 수신 sampling은 200kbps로 하였다. 또한 송신 신호에 사용된 pulse shaping filter길이는 10으로 설정하였고, 필터의 roll-off factor는 0.35의 raised cosine 필터를 사용하여 서해 수중 채널 측정을 수행하였다.

### III. 채널 환경 분석

수중 음향통신에서 수중 채널의 신뢰성 확보와 원활한 통신을 수행하기 위해서는 수중 채널환경에 적합한 프레임 설계가 이루어져야 한다. 일반적으로 통신프레임 설계에서는 채널의 상관대역폭과 상관시간을 통해 데이터 프레임에 사용될 파일럿 구간과 보호구간의 길이를 설정 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실험역 채널의 상관대역폭과 상관시간에 대한 분석을 수행하기 위하여 기존의 실험역 측정 연구<sup>5,6)</sup>를 기반으로 수집된 데이터를 사용하여 전력 지연 프로파일과 도플러확산을 추정하였다.

#### 3.1 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 지연확산(Maximum Excess Delay Spread)과 실효 지연확산(RMS Delay Spread) 2가지 방식으로 계산이 가능하기 때문에 본 연구에서는 서해안 채널환경의 상관대역폭을 최대 초과 지연확산과 실효 지연확산 방식으로 분석하였다.

최대 초과 지연확산( $T_m$ )을 사용한 상관대역폭( $f_0$ )은 전력 지연 프로파일에서 수신 전력의 값이 최

대치로 부터 일정 dB만큼 아래로 떨어지는 동안의 시간과 처음 도달 시간과의 차이로 추정이 가능하며 상관대역폭은 최대 초과 지연확산의 역으로 아래와 같이 정의된다.

$$f_0 = \frac{1}{T_m} \quad (1)$$

하지만 최대 초과지연 확산 방식의 경우 같은  $T_m$  을 갖는 채널이라 할지라도 서로 다른 전력 지연 프로파일을 가질 수 있기 때문에 상관대역폭을 도출하는 최선의 지표는 아니다. 따라서 본 연구에서는 초과 지연확산 방식에 추가적으로 실효 지연확산 방식을 사용하여 상관대역폭을 도출 하였다. 일반적으로 실효 지연확산 방식의 경우 식(2)에 보이는 바와 같이 RMS(Root-Mean-Square) 값을 사용하여 계산하며,

$$\sigma_\tau = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (2)$$

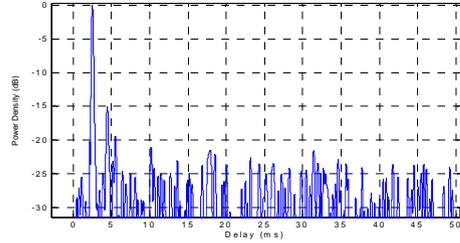
여기에서  $\bar{\tau}$ 는 평균 초과 지연이며,  $(\bar{\tau})^2$ 는 평균의 제곱이다. 실효 지연확산 방식에서 상관대역폭을 채널의 복소 주파수 전달 함수가 최소 0.9 이상의 상관 값을 갖는 주파수 범위라 한다면, 상관대역폭은 다음과 같이 근사적으로 주어지교<sup>[7]</sup>.

$$f_0 \approx \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (3)$$

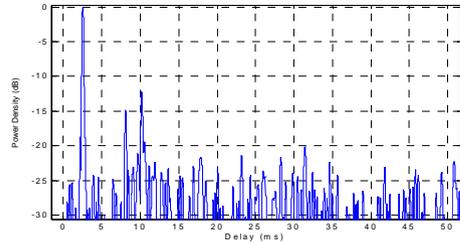
동기 대역폭을 채널의 복소 주파수 전달 함수가 최소 0.5 이상의 상관 값을 갖는 주파수 범위라 한다면, 상관대역폭은 다음과 같이 근사적으로 주어진다<sup>[8]</sup>.

$$f_0 \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (4)$$

식 (1)~(4)에서 보이는 바와 같이 최대 초과 지연확산과 실효 지연확산은 수신신호의 지연 시간과 지연 신호의 크기에 따라 결정되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 측정 데이터의 전력 지연 프로파일 (Power Delay Profile) 분석을 통해 실효역의 수중 채널환경에서 수신된 다중경로 신호의 지연시간과 크기를 확인하였으며, 이 결과를 토대로 최대 초과 지연확산과 실효 지연확산을 추정하였고, 수직과 수평채널 환경의 상관대역폭을 도출하였다.



(a) Power delay profile(Tx:3m, Rx:6m)



(b) Power delay profile(Tx:12m, Rx:6m)

그림 4. 수직 채널환경에서의 전력 지연 프로파일  
Fig. 4. Power delay profile in verticality channel environment

그림 4의 전력 지연 프로파일은 수신된 데이터와 송신에 사용한 PN code를 정합필터(Matched filter)에 통과시킨 출력이며, 수신된 기준 신호(직접파)의 전력을 0dB로 설정한 후 지연신호들의 전력을 기준신호에 비례하게 전력을 설정하였다. 측정 신호 분석결과 수직 채널환경에서의 수신 신호는 평균적으로 서로 다른 각도에서 2개의 신호가 수신되었는데 이는 서해의 해저면이 진흙으로 이루어져 있기 때문에 해저면 반사파 성분은 대부분 손실되어 직접파와 해면 반사파 성분만 수신되는 것을 도래각 분석을 통해 확인 할 수 있었다. 따라서 송신센서의 수심을 깊게 하였을 경우 송신신호가 해면에서 반사되어 수신센서에 수신되는 거리가 증가하여 직접파에 비하여 수신되는 시간이 증가 되어 최대 초과지연 확산과 실효지연 확산 값이 커지게 된다. 표 2, 3에는 전력 지연 프로파일에서 유효신호의 임계값에 따른 실효역 환경의 초과 지연확산과 실효 지연확산, 상관대역폭을 정리 하였다.

표 2,3서 보이는 바와 같이 임계값이 -3dB/-6dB/-10dB인 경우에는 초과 지연확산과 실효 지연확산의 변화가 거의 보이지 않는다. 이는 그림 4에 보이는 바와 같이 지연신호의 크기가 임계값보다 작게 수신되기 때문에 지연신호 성분이 초과 지연확산과 실효 지연확산의 변화에 영향을 주지 못하기 때문이다. 하지만 임계값을 -20dB로 설정 하였을 경우 송신센

표 2. 수직 채널환경에서의 최대 초과지연 확산과 상관대역폭  
Table 2. Maximum excess delay spread & coherence bandwidth in verticality channel environment

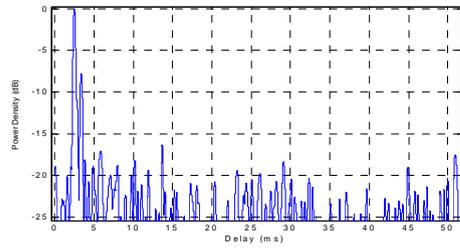
Parameter	Threshold value [dB]	Depth(Tx/Rx) [m]		
		3/6	6/6	12/6
Maximum excess delay spread (average) [ms]	-3	0.111	0.109	0.109
	-6	0.153	0.149	0.152
	-10	0.195	0.188	1.714
	-20	3.296	6.568	8.600
Coherence bandwidth [Hz]	-20	303.398	152.253	116.279

표 3. 수직 채널환경에서의 실효지연 확산과 상관대역폭  
Table 3. RMS delay spread & coherence bandwidth in verticality channel environment

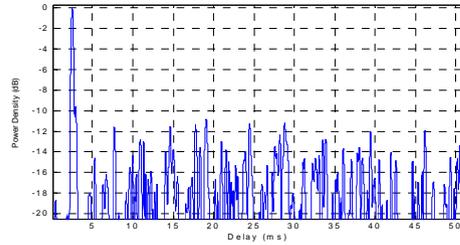
Parameter	Threshold value [dB]	Depth(Tx/Rx) [m]		
		3/6	6/6	12/6
RMS delay spread (average) [ms]	-3	0.050	0.049	0.049
	-6	0.059	0.058	0.059
	-10	0.055	0.053	0.506
	-20	0.296	0.907	1.422
Coherence bandwidth (상관값 0.5) [Hz]	-20	675.676	220.507	140.647
Coherence bandwidth (상관값 0.9) [Hz]	-20	67.568	22.051	14.065

서의 수심이 3m/ 6m/ 9m인 경우에 최대 초과지연 확산은 3.296ms/ 6.568ms/ 8.600ms였으며, 상관대역폭은 303.398Hz/ 152.253Hz/ 116.279Hz로 분석 되었다. 또한 실효 지연확산은 송신센서의 수심이 3m/ 6m/ 9m이고 실효 지연확산이 0.296ms/ 0.907ms/ 1.422ms 일 때, 상관값이 0.5인 경우 상관대역폭은 675.676Hz/ 220.507Hz/ 140.647Hz였으며, 상관값이 0.9인 경우 상관대역폭은 67.568Hz/ 22.051Hz/ 14.065Hz 였다. 즉, 수직 채널환경 측정데이터 분석 결과 송신센서의 수심이 깊어짐에 따라 해면반사파가 직접파에 비하여 수신센서에 수신되는 시간이 커지게 되므로 최대 초과지연확산과 실효 지연확산이 커짐에 따라 상관대역폭이 감소하게 되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 5에는 수평 채널환경에서의 전력 지연 프로파일을 나타내었다. 수평 채널환경에서 전력 지연 프로파일을 수직 채널환경과 비교하였을 때 지연신호 성분의 전력이 크게 감소하였으며, 특히 3500m의 경우 직접파를 제외하고는 대부분 잡음성분의 신호만 존재



(a) Power delay profile(distance:500m)



(b) Power delay profile(distance:3500m)

그림 5. 수평 채널환경에서의 전력 프로파일  
Fig. 5. Power delay profile in horizontality channel environment

하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 측정데이터 분석 결과 수중 채널의 잡음레벨은 평균적으로 송신기와 수신기 사이의 거리가 증가함에 따라 수신신호의 크기가 작게 수신되어 잡음레벨이 상대적으로 증가 하는 것을 확인 하였다. 즉, 서해의 잡음레벨은 동해나 남해에 비해 평균적으로 높게 형성되어 있으므로 타 기관에서 상관대역폭 분석을 위해 사용한 -20dB의 임계값을 서해 채널환경에 적용하게 되면 잡음 신호성분이 임계값을 넘게 되어 최대 초과지연 확산과 실효 지연 확산 값의 분석에 오차가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 500m~3500m환경에서 각 거리별 잡음레벨을 고려하여 초과지연 확산과 실효지연 확산을 구하기 위한 유효신호의 임계값을 약 -11~-15dB 범위 내에서 설정한 후 최대 초과지연 확산과 실효지연 확산에 대한 분석을 수행하였다.

표 4, 5는 송신센서와 수신센서의 수평거리에 따른 초과 지연확산과 실효 지연확산 정리하였다. 수평 채널환경에서 임계값이 -3dB/ -6dB/ -10dB인 경우에는 수직 채널환경과 마찬가지로 초과 지연확산과 실효 지연확산의 변화가 거의 보이지 않는다. 하지만 측정 거리별로 잡음레벨을 고려하여 초과 지연확산과 실효 지연확산을 계산한 결과 송신센서와 수신센서의 수평거리가 500m인 경우 최대 초과지연 확산을 사용한 상관대역폭이 357.782Hz에서 송신 센서와 수신센서 사이의 이격거리가 3500m인 경우 5128.205Hz까지

표 4. 수평 채널환경에서의 최대 초과지연 확산과 상관대역폭  
Table 4. Maximum excess delay spread & coherence bandwidth in horizontality channel environment

Parameter	Threshold value [dB]	Distance [m]			
		500	1500	2500	3500
Maximum excess delay spread (average) [ms]	-3	0.149	0.154	0.124	0.143
	-6	0.204	0.218	0.270	0.196
	-10	2.482	0.287	0.584	0.288
optional value		2.795	1.495	0.395	0.195
Coherence bandwidth (1/MED) [Hz]	optional value	357.782	668.896	2531.646	5128.205

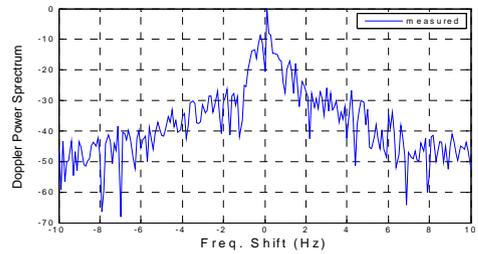
표 5. 수평 채널환경에서의 실효지연 확산과 상관대역폭  
Table 5. RMS delay spread & coherence bandwidth in horizontality channel environment

Parameter	Threshold value [dB]	Distance [m]			
		500	1500	2500	3500
RMS delay spread (average) [ms]	-3	0.068	0.070	0.056	0.065
	-6	0.080	0.085	0.104	0.077
	-10	0.534	0.081	0.156	9.688
optional value		0.343	0.172	0.156	0.072
Coherence bandwidth (상관값 0.5) [Hz]	optional value	582.988	1157.742	1282.051	2749.771
Coherence bandwidth (상관값 0.9) [Hz]	optional value	58.299	115.774	128.205	274.977

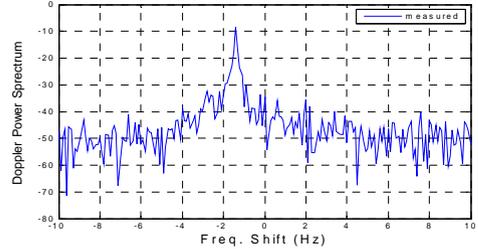
증가하였는데 이는 송신센서에서 수신센서까지의 거리가 증가함에 따라 신호의 굴절 및 흡수, 산란 등의 영향으로 직접파를 제외한 대부분의 신호들은 소멸된 것으로 추정되며, 따라서 초과 지연확산과 실효 지연 확산이 거리의 증가에 따라 점차 감소함을 알 수 있다.

### 3.2 도플러 확산

수중 통신의 전송률에 직접적인 관계를 갖는 채널의 상관시간은 다중 경로 채널 환경과 해류, 송수신기의 이동 등에 의한 영향을 받는다. 이러한 수중 채널 환경에서 통신의 전송효율을 높이기 위해서는 채널의 상관시간을 파악해야 하며, 이를 위해서는 도플러 확산에 대한 분석이 수행되어야 한다<sup>9)</sup>.



(a) Verticality channel environment



(b) Horizontality channel environment

그림 6. 수직 채널환경과 수평채널 환경의 도플러 확산 그래프  
Fig. 6. Doppler spread in underwater channel environment

도플러 확산은 송신센서와 수신센서가 해류, 파도 등에 의해 상대적인 움직임이 발생하여, 통신채널이 시간에 따른 변화를 겪게 되어 이것이 주파수 상에서 넓게 늘어지며 확산되는 효과를 말하며, 상관시간은 식 (5)에서 보는 바와 같이 도플러 확산의 역으로 표현이 가능하다<sup>10)</sup>.

$$T_0 = \frac{1}{f_d} \quad (5)$$

본 연구의 측정에서는 식(5)를 사용하여 상관시간을 추정하기 위하여 측정데이터 분석을 통해 도플러 확산을 구하였다. 그림 6은 서해 실험역에서 10kHz를 사용하여 전송한 tone 신호를 수직 채널환경과 수평채널 환경에서 수신한 데이터의 기저대역 신호를 나타내었다. 이상적인 채널환경에서 수신된 tone신호는 주파수 영역에서 임펄스로 표현되나 그림 6에 보이는 바와 같이 수중 채널 환경을 통과한 tone신호는 주파수 상에서 늘어지는 현상이 발생함을 확인 할 수 있다. 하지만 실험역 측정 데이터에서는 수중 채널환경에서 발생하는 다양한 잡음으로 인해 정확한 도플러 확산 범위 추정이 불가능하므로 본 연구에서는 수신된 신호의 주파수영역에서 전력이 약 -20dB 지점까지를 유효 도플러 확산 범위로 설정하였다.

표 6. 수직 채널환경에서의 도플러 확산과 상관시간  
Table 6. Doppler spread & coherence time in verticality channel environment

Parameter	Depth(Tx/Rx) [m]	
	3/6	12/6
Doppler spread (average) [Hz]	0.929	1.696
Doppler spread (maximum) [Hz]	1.23	2.53
Coherence time [s]	0.813	0.395

표 7. 수평 채널환경에서의 도플러 확산과 상관시간  
Table 7. Doppler spread & coherence time in horizontality channel environment

Parameter	Distance[m]			
	500	1500	2500	3500
Doppler spread (average) [Hz]	0.426	0.46	0.482	0.483
Doppler spread (Maximum) [Hz]	0.972	0.499	0.632	0.643
Coherence time [s]	1.029	2.004	1.582	1.555

측정 데이터 분석 결과 서해의 수직 채널환경과 수평 채널 환경에서의 최대 도플러 확산의 범위는 1.23~2.53Hz였으며, 각 측정 환경에 대한 평균 도플러 확산과 최대 도플러 확산을 사용하여 계산한 상관시간은 표 6,7에 정리하였다.

#### IV. 결론

서해는 탁도가 높고 조수간만의 차가 심하여 수중 통신을 통하여 신뢰성 있는 통신을 수행하기에는 동해나 남해에 비하여 매우 열악한 채널환경을 갖는다. 따라서 서해의 채널환경에 대한 분석과 지속적인 연구를 통해 서해에서 우수한 성능을 갖는 수중 통신기술이 개발된다면, 국내뿐만 아니라 전 세계의 어느 해역에서도 수중통신을 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 일반적으로 수중 채널환경에 신뢰성 있는 통신을 수행하기 위해서는 수중 채널 환경에 적합한 프레임 설계를 해야 하며, 이를 위해서는 수중 채널의 상관대역폭과 상관시간에 대한 분석이 반드시 필요하다. 따라서 본 연구는 서해의 채널환경 분석을 위하여 충청남도 당진시 장고항 인근해역에서 수집한 데이터를 사용하여 상관대역폭과 상관시간을 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 측정 데이터 분석결과 서해의 수직 채널환경에서 최대 초과지연 확산을 사용한 상관대역폭은 약 116~303Hz, 실효지연 확산(상관값이 0.9)을 사용한 경우의 상관대역폭은 약 14~68Hz로 추정되었다. 또한 수평채널환경에서 최대 초과지연 확산을 사

용한 상관대역폭은 약 358~5128Hz, 실효지연 확산(상관값이 0.9)을 사용한 경우 상관대역폭은 약 58~274Hz로 추정되었다. 상관시간의 경우 수직 채널 환경과 수평 채널환경 사이의 규칙성을 찾지 못하였으나 서해의 최대 도플러 확산의 범위는 1.23~2.53Hz로 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 연구 내용은 서해 인근해에서 수중 음향 통신을 위한 통신 프레임을 설계하는데 적용될 수 있을 것으로 기대되며, 향후 계절별 측정과 송·수신단의 거리별 측정을 수행하여 다양한 서해 친해역의 채널환경 연구와 서해 친해역의 음선 모델링을 통해 실효지연 측정데이터 분석결과와 검증이 필요할 것으로 사료된다.

#### References

- [1] M. C. Domingo, "An overview of the internet of underwater things," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 35, no. 6, pp. 1879-1890, Nov. 2012.
- [2] H.-W. Jeon, S.-J. Lee, and H.-N. Lee, "Underwater channel analysis and transmission method research via coded OFDM," *J. KICS*, vol. 36, no. 5, pp. 573-581, May 2011.
- [3] B. Borowski, "Characterization of a very shallow water acoustic communication channel," *OCEANS 2009 MTS/IEEE*, pp. 1-10, Biloxi, MS, Oct. 2009.
- [4] D. Choi, H. Kim, N. Kim, S. Kim, and J. Chung, "Coherence bandwidth and coherence time for the communication frame in the underwater of east sea," *J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 29, no. 6, pp. 365-373, Aug. 2010.
- [5] S.-G. Kim, S.-M. Kim, and Y.-K. Kim, "Shallow water acoustic communication channel characteristic analysis using PN sequence with 25 kHz carrier at the shore of geojea island," *J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 26, no. 8, pp. 381-389, Jun. 2007.
- [6] C. Hwang and K. Kim, "Doppler frequency estimation for time-varying underwater acoustic communication channel," *J. KICS*, vol. 40, no. 1, pp. 187-192, Dec. 2014.
- [7] W. Y. C. Lee, *Mobile Cellular Communications*, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [8] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*, Chapters 3 and 4, Prentice Hall, Upper Saddle

River, New jersey, 1996.

- [9] T. C. Yang, "Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 120, no. 5, pp. 2595-2614, Nov. 2006.
- [10] B. Sklar, *Digital Communications*, Chapter 15, Prentice Hall, Upper Saddle River, New jersey, 2001.

**김 민 상 (Min-sang Kim)**



2008년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
 2010년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
 2013년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 박사  
 2013년~현재 : 호서대학교 정보통신공학과 박사 후 연구원

<관심분야> smart antenna, MIMO, 수중통신

**고 학 림 (Hak-lim Ko)**



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

1996년~현재 : 호서대학교 정보통신 공학과 교수  
 <관심분야> smart antenna, 이동통신, 수중통신, 해양통신

**김 계 원 (Kye-won Kim)**



1997년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
 1999년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
 2011년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 박사  
 1999년 3월~2003년 2월 : (주)텔웨이브 전임연구원

2003년 8월~2009년 8월 코라텍(주) 선임연구  
 2014년 10월~현재 호서대학교 산학협력단 조교수  
 <관심분야> smart antenna, 이동통신, 수중통신

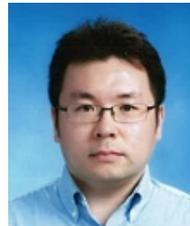
**이 태 석 (Tae-Seok Lee)**



2013년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업  
 2015년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 석사  
 2015년 3월~현재 : 호서대학교 정보통신공학과 박사과정

<관심분야> smart antenna, 이동통신, 수중통신

**임 태 호 (Tae-ho Im)**



2006년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 졸업  
 2008년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 석사  
 2012년 8월 : 중앙대학교 전자전기공학부 박사  
 2012년 7월~2015년 2월 : 삼성전자 DMC연구소 책임연구원

2015년~현재 : 호서대학교 해양IT융합기술연구소 조교수  
 <관심분야> 이동통신, 수중통신, 해양통신