

# 동해 천해환경에서 수중 통신 프레임 설계를 위한 상관 대역폭과 상관 시간의 산출

## Coherence Bandwidth and Coherence Time for the Communication Frame in the Underwater of East Sea

최 동 현\*, 김 현 수\*, 김 남 리\*, 김 성 일\*\*, 정 재 학\*

(Donghyun Choi\*, Hyeonsu Kim\*, Namri Kim\*, Seongil Kim\*\*, Jaehak Chung\*)

\*인하대학교 전자공학부, \*\*국방과학연구소

(접수일자: 2010년 3월 22일; 수정일자: 2010년 5월 3일; 채택일자: 2010년 7월 16일)

원활한 수중 디지털 통신을 위해 데이터 신호는 물리계층 단위의 프레임으로 전송되고, 채널 추정을 위한 프레임 내의 파일럿 간격은 수중 통신 환경에 맞게 설계되어야 한다. 본 논문은 주파수와 시간에 따른 수중 채널 변화에 관련된 상관 대역폭과 상관 시간에 대하여 기술하고 실제 동해 천해환경에서의 실험을 통해 상관 대역폭과 상관 시간 값을 산출하였다. 그리고 파일럿 간격의 변화에 따른 실제 수중 통신의 비트 오류율 변화를 구함으로써 산출한 결과가 적절함을 보였다.

**핵심용어:** 수중 음향 통신, 상관 대역폭, 상관 시간, 전송 파일럿

**투고분야:** 음향 통신기술 분야 (6.2)

For effective underwater digital communications, a frame structure is used, which includes pilots in time and frequency domains for channel estimation at a receiver. To estimate channel precisely, the each pilot should be located less than coherence time and coherence bandwidth. This paper measured underwater communication environments to provide coherence time and coherence bandwidth. Based on the measurement, the paper exhibits the calculated coherence time and coherent bandwidth is adequate by computer simulations.

**Keywords:** Underwater Acoustic Communication, Coherence Bandwidth, Coherence Time, Transmission Pilots

**ASK subject classification:** Acoustic Communications (6.2)

### 1. 서론

수중에서의 통신 전송 대역폭 효율성을 높이기 위해 1990년 대 초부터 동기식 변조 기법인 위상 천이 변조 기법을 이용한 디지털 통신에 대한 연구가 진행되고 있다 [1-2]. 그러나 동기식 변조 기법은 수중에서의 채널이 다중 경로로 음파가 전달됨에 따라 주파수 영역에서 빠르게 채널이 변화하는 주파수 선택적 페이딩 현상과 송수신기의 상대적인 이동과 해수면 변동에 따른 시간 선택적 페이딩 현상을 보여 채널 추정에 의해 전송 신뢰도가 변화한다 [3].

일반적으로 위상 천이 변조 기법을 이용한 디지털 통신에서 송신 데이터는 자원 할당의 목적을 위해 물리적인

단위의 프레임으로 나뉘어져 전송된다. 수신단에서는 전송된 데이터를 복호하기 위해 같이 수신된 파일럿을 이용하여 채널 추정을 한다. 이 파일럿간의 간격은 수중 채널 환경에서의 상관 대역폭과 상관 시간을 반영하여 주파수 및 시간 영역에서 적절히 설정되어야 한다 [4].

상관 대역폭과 상관 시간은 주파수 영역과 시간 영역에서 채널이 변화하지 않는다고 가정할 수 있는 대역폭과 시간으로 나타내어지고, 해양에서의 이러한 상관관계들을 산출하고자 하는 노력들이 이뤄지고 있다 [5-7]. 그러나 현재 한반도 근해의 해양 환경에서의 수중 채널 변화의 상관관계에 대한 연구는 미진한 실정이다.

본 논문은 한반도 동해시 인근 해역에서 실제 송수신기를 이용하여 수행한 수중 통신 실험을 통해 다중 경로에 의한 채널 시간 응답 특성을 측정하여 상관 대역폭을 구하고 해류의 흐름에 따라 위치가 변화하는 송수신기의 도플러 천이를 측정함으로써 상관 시간을 산출하였다.

책임저자: 최 동 현 (redsea2002@naver.com)  
402-751 인천광역시 남구 용현동 253 인하대학교 전자공학부  
(전화: 032-860-7421; 팩스: 032-868-3654)

이렇게 산출된 상관 시간을 기준으로 파일럿의 위치를 변화시키고 이에 따르는 비트 오류율 (BER; Bit Error Ratio)을 구함으로써 본 논문에서 산출한 상관관계가 적절함을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 전송 방식에 따른 프레임 구조에 대해 설명하고 제 3장에서는 전송 프레임 설계시 파일럿 배치에 필요한 상관 대역폭과 상관 시간에 대해 기술하였다. 제 4장에서는 실제 동해시 인근 천해 해역에서 실행한 실험의 환경에 대해 설명하고 실험 결과로 측정된 채널 응답 특성, 도플러 천이값을 통해 상관 대역폭과 상관 시간을 산출하여 파일럿 간의 간격에 따라 변화되는 비트 오류율 성능을 보여 산출된 상관 시간이 적절함을 보였다. 그리고 마지막으로 제 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 통신 프레임 구조

실제 디지털 통신에서 데이터는 연속적인 데이터로 송신되지 않고 일반적으로 기본적인 물리 단위인 프레임으로 나뉘어 송신된다. 그림 1은 시분할 듀플렉싱 방식 (TDD; Time Division Duplexing)이용시 프레임 단위의 데이터가 전송되는 과정을 나타내고 있다.

여기서  $\Delta t$ 는 채널 추정에 이용되는 파일럿 심볼 및 데이터 심볼의 길이이고  $T_d$ 는 파일럿 사이에 연속된 데이터 심볼들로 구성된 데이터 시퀀스의 길이이다.

그림 1과 같이 여러 개의 파일럿 심볼과 데이터 심볼들로 구성되는 프레임 구조는 정해진 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위해 하나의 주파수 대역에 하나의 심볼을 전송하는 단일 반송파 (Single Carrier) 기법과 하나의 주

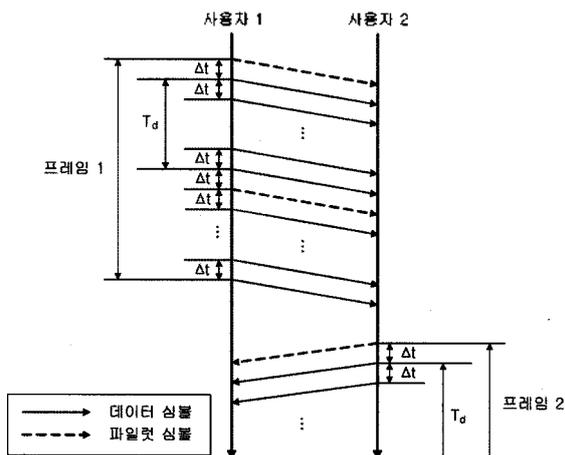


그림 1. 통신 프로토콜  
Fig. 1. The protocol for the communication.

파수 대역을 여러 개의 반송파로 나누어 여러 심볼을 보내는 다중 반송파 (Multi Carrier) 기법으로 나뉜다.

단일 반송파 기법에서의 프레임 구조는 그림 2와 같이 하나의 프레임이 시간상에서  $M$ 개의 슬롯으로 나뉜다. 여기서 첫 번째 슬롯은 프리앰블, 파일럿과 데이터 심볼로 구성되고 나머지 슬롯은 파일럿과 데이터 심볼로 구성된다. 프리앰블은 신호 동기화 및 채널 추정에 이용되고 파일럿은 전송된 데이터 심볼들을 복호하기 위한 채널 추정에 이용된다.

그림 2에서  $\Delta t$ 는 단일 데이터 심볼의 길이이고  $T_d$ 는 파일럿 간의 간격이고 파일럿 사이에 위치한 연속적인 데이터 심볼들로 구성된 데이터 시퀀스의 길이이다.

단일 반송파 기법에서 프레임 내부의 파일럿간의 간격 ( $T_c$ )은 이동하는 송수신기로 인한 수중 시변 채널이 거의 변화하지 않는다고 가정할 수 있는 시간인 상관 시간 ( $T_c$ )을 기준으로 결정한다. 식 (1)과 같이 파일럿의 간격을 상관 시간보다 짧게 설정하여야 수신단에서 등화시 채널 추정 오류에 의한 성능 열화를 막을 수 있다.

$$T_c \geq T_d \tag{1}$$

여기서 상관 시간 ( $T_c$ )은 최대 도플러 천이 값 ( $f_D$ )에 반비례하는 관계 ( $T_c \propto 1/f_D$ )를 갖는다 [8].

다중 반송파 기법에서의 프레임 구조는 하나의 주파수 대역을 여러 개의 주파수 대역으로 나누고 이 때의 프레임을 그림 3과 같이 프리앰블, 파일럿 그리고 데이터 심볼들로 구성한다. 프리앰블과 파일럿의 역할은 단일 전송 주파수 기법에서와 동일하다. 파일럿은 단일 반송파 기법과는 달리 프레임이 차지하는 주파수와 시간 영역에

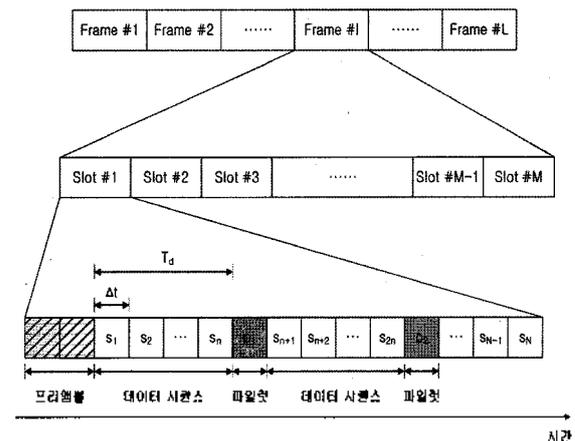


그림 2. 단일 반송파 기법의 프레임 구조  
Fig. 2. A frame of the single carrier modulation.

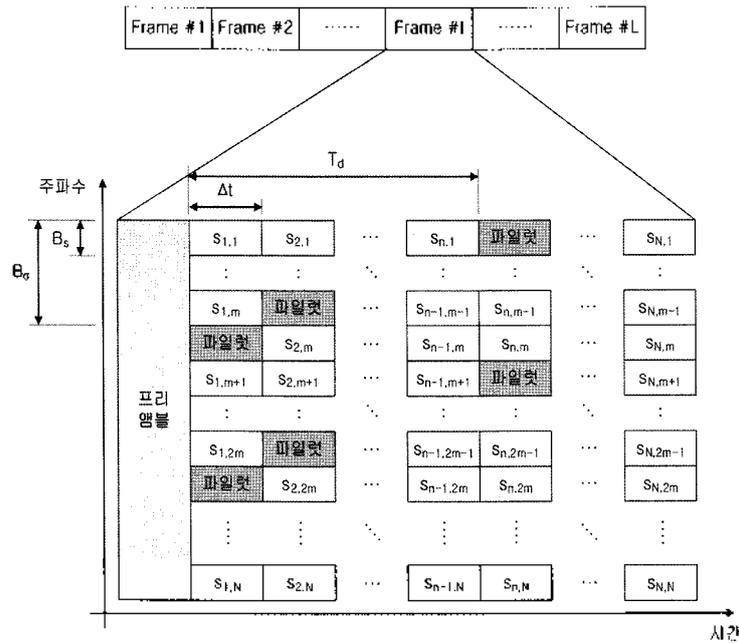


그림 3. 다중 반송파 기법의 프레임 구조  
Fig. 3. A frame of the multi carrier modulation.

길게 배치된다. 파일럿의 간격은 주파수 영역에서는 상관 대역폭 이하로 설정하고 시간 영역에서는 상관 시간 이하로 설정한다. 그림 3에서  $B_d$ 는 주파수 상에서 파일럿 사이의 데이터 시퀀스가 차지하는 대역폭이고,  $B_s$ 는 하나의 심볼이 차지하는 대역폭을 말한다.

다중 반송파 기법에서는 다중 경로에 의한 주파수 선택적 페이딩 채널이 발생하므로 전송 주파수 대역 내의 파일럿들 간의 간격을 설정하는 데 주파수 대역에서 채널이 변화하지 않는다고 가정할 수 있는 상관 대역폭 ( $B_c$ )을 고려해야 한다. 식 (2)와 같이 파일럿 간의 간격을 상관 대역폭보다 작게 설정했을 때 수신단에서 등화시 채널 추정 오류에 의한 성능 열화를 막을 수 있다.

$$B_c > B_d \tag{2}$$

여기서 상관 대역폭 ( $B_c$ )은 채널의 RMS (Root Mean Square) 지연 확산 ( $\sigma_r$ ) 값에 반비례 ( $B_c \propto 1/\sigma_r$ )하는 관계를 갖는다 [8].

그러므로 전송 기법에 따라 달라지는 프레임 내부의 시간과 주파수 상에서 파일럿 간의 간격은 통신 채널 환경에 따른 채널의 상관 시간과 상관 대역폭보다 작게 설정되어야 한다. 다음 III장에서 수중 환경 채널에서의 상관 시간과 상관 대역폭을 산출하는 방법에 대해 설명한다.

### III. 수중 통신 채널에서의 상관 대역폭과 상관 시간

수중 통신에서 상관 대역폭과 상관 시간을 결정하는 환경적 요소는 각각 해수 경계면에서의 산란 및 굴절, 해저면 매질 반사에 따른 다중 경로 채널 환경과 해수면 변동 및 송수신기의 이동 등에 의한 도플러 천이 환경으로 구분할 수 있다.

#### 3.1. 상관 대역폭 산출

상관 대역폭에 영향을 미치는 다중경로 채널 환경은 그림 4에 도시한 것과 같이 음파 전달 특성에 영향을 주는 다른 환경변수들을 배제하고 수중환경을 단순화시킨 해양 도파관 모델을 주로 사용한다. 해양 도파관에서의 음장은 식 (3)과 같이 주파수 영역에서의 Helmholtz 파동방정식으로 표현할 수 있다 [9].

$$\nabla^2 G(w) + k^2 G(w) = -\frac{\delta(r - r_s)\delta(z - z_s)}{2\pi r} \tag{3}$$

여기서  $(r_s, z_s)$ 는 음원의 위치,  $(r_r, z_r)$ 는 일정 시간 후의 음원의 위치,  $(r, z)$ 는 트랜스듀서의 위치,  $\delta$ 는 Kronecker 델타함수이고,  $k^2 - w^2/c^2$ 는 음속  $c$ 와 각주파수  $w$ 로 계산되는 전파상수이다.  $G(w)$ 는 주파수 영역의

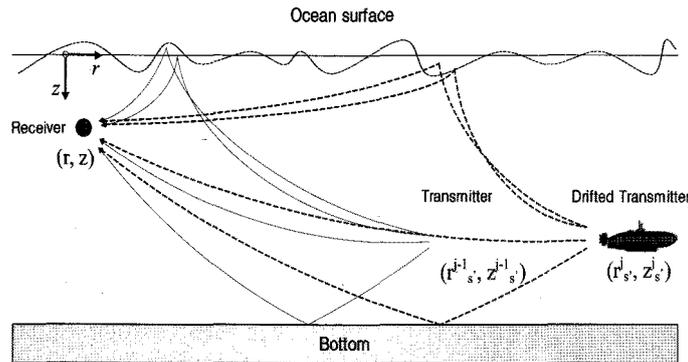


그림 4. 해양 채널 환경에서의 음선 경로  
Fig. 4. A ray tracing where Underwater acoustic channel environment.

Green 함수로서 수중 채널의 임펄스 응답이다.

탐침 음원 (PS; Probe Source)이 신호  $x(t)$ 를 송신할 때, 수중채널  $g(t) = \mathcal{J}^{-1}\{G(w)\}$ 을 통과하여 트랜스듀서에 도착하는 시간영역의 신호  $y(t)$ 는 주파수 영역의 식을 역푸리에 변환하여 얻을 수 있다.

$$y(t) = \int G(w)X(w)e^{-iwt}.dw, \quad (4)$$

여기서  $X(w)$ 는  $x(t)$ 의 주파수 영역의 표현이다.  $y(t)$ 는 수중채널의 다중경로를 포함할 때 다중 경로 전파에 의한 시간 지연을 갖는 신호 성분들을 갖게 된다. 따라서 고유음선 (eigen ray) 경로 관점에서 분석했을 때 송신 신호  $x(t)$ 가 이상적인 임펄스 신호라면 수신신호는 그림 5와 같은 지연 프로파일 (delay profile)을 갖는 형태를 나타낸다 [10].

그림 5에서 볼 수 있듯이 수신 신호는 각각 다른 크기와 지연시간을 갖는 지연 프로파일들로 구성된다. 이 때  $k$ 번째로 수신되는 지연 프로파일의 크기를  $a_k$ 라 하고 지연

시간을  $\tau_k$ 라 하면 지연 시간의 평균값 ( $E[\tau]$ )과 분산값 ( $E[\tau^2]$ )은 식 (5)~(6)과 같이 구할 수 있다.

$$E[\tau] = \left( \sum_{k=0}^{N-1} a_k \tau_k \right) / \sum_{k=0}^{N-1} a_k \quad (5)$$

$$E[\tau^2] = \left( \sum_{k=0}^{N-1} a_k \tau_k^2 \right) / \sum_{k=0}^{N-1} a_k \quad (6)$$

식 (5)~(6)을 통해 계산한 지연 시간의 평균값과 분산값을 이용하면 식 (7)과 같이 RMS 지연 시간을 계산할 수 있다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{E[\tau^2] - E[\tau]^2} \quad (7)$$

마지막으로, 식 (7)에서 구한 RMS 지연시간을 통해 식 (8)과 같이 상관 대역폭 ( $B_c$ )을 산출할 수 있다.

$$B_c = \frac{1}{\sigma_\tau} \quad (8)$$

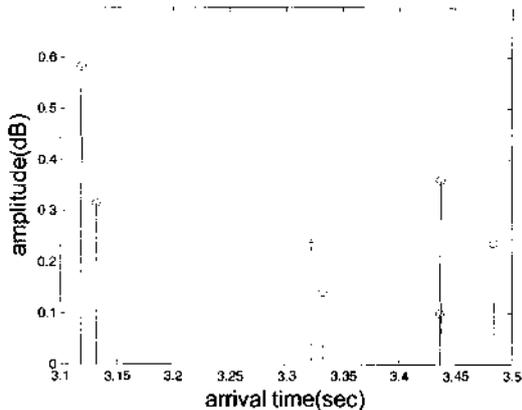


그림 5. 수중 채널 응답의 예  
Fig. 5. Example of channel response in underwater.

### 3.2. 상관 시간 산출

상관 시간에 영향을 미치는 것은 도플러 천이이다. 도플러 천이의 첫 번째 원인은 해수면 변동에 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 음파는 시간이 변화함에 따라 달라지는 해수면에 의해 시간에 따라 변화하는 위상을 갖는다. 두 번째 요인은 송수신기의 상대적인 이동이다. 그림 4에서와 같이 송신된 음파는 이동하는 수신기에 의해 시간에 따라 변화하는 위상 특성을 보인다.

이렇게 해수면이 변화하고 송수신기가 상대적으로 이동하는 환경에서 수신기로 전송되는 신호의 위상 값은

식 (9)와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\theta}(t) = \tan^{-1} \left\{ \frac{S_s(t+d)}{S_o(t)} \right\} \text{ (rad)}, 0 \leq t \leq \Delta t \quad (9)$$

여기서  $S_o(t)$ 는 구간  $\Delta t$  동안의 송신된 심볼이고  $S_s(t+d)$ 는 송신된 심볼  $S_o(t)$ 가 지연 시간  $d$  이후에 구간  $\Delta t$  동안 수신된 것이다.

도플러 천이(Chirp)는 시간에 따른 채널의 위상 변화를 통하여 얻을 수 있으며 평균 도플러 천이  $\bar{f}_d$ 는 식 (10)과 같다 [11-12].

$$\bar{f}_d = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\Delta \hat{\theta}_j}{\Delta t} \frac{1}{2\pi} \quad (10)$$

여기서  $\Delta t$ 는 심볼 간의 시간 간격을 의미하며,  $\Delta \hat{\theta}_j$ 는  $(j-1)\Delta t$ 에서  $j\Delta t$ 의 시간 동안 탐침 음원의 위치가  $(r_{s,j-1}^{-1}, z_{s,j-1}^{-1})$ 에서  $(r_{s,j}^{-1}, z_{s,j}^{-1})$ 로 이동하고 해수면이 변동할 때의 위상 차이를 말한다.  $N$ 은 수신된 심볼의 수를 의미한다.

식 (10)과 같이 각 트랜스듀서에서 채널 응답의 위상 변화를 통해 얻은 평균 도플러 천이 값들 중 그 차이의 절대값이 가장 큰 평균 도플러 천이 값들을 이용하면 상관 시간을 식 (11)과 같이 산출할 수 있다 [13].

$$T_c = \frac{1}{4 \max_{i,j} |\bar{f}_d^i - \bar{f}_d^j|} \quad (11)$$

따라서 수중 채널의 상관 대역폭과 상관 시간은 각각 수중에서의 다중 경로 채널 환경과 도플러 천이 환경에 의해 결정된다.

### IV. 해상 실험 환경 및 결과

본 장에서는 수중 통신 프레임 내 파일럿들 간의 간격 설정을 위해 실행한 해상 실험을 통해 상관 대역폭과 상관 시간을 산출하였으며, 파일럿 간의 간격에 따른 비트 오류율 변화를 보임으로써 산출한 상관관계를 검증하였다.

#### 4.1. 해상 실험 환경

실험 해역은 그림 6에 나타난 바와 같이 동해시 인근의 수심 300 m 지역이고 송신기로 이용된 탐침 음원은 표류 상태였다. 그리고 수평거리 300 m, 400 m, 800 m, 1 km에서 총 4회에 걸쳐 7 kHz의 반송파 주파수를 갖는 탐침 신호와 데이터 신호를 전송하였으며 신호 전송시 탐침 음원의 표류 속력은 표 1에 나타난 바와 같다. 탐침 음원의 심도는 30 m, 수신기로 사용된 수직 배열센서(VLA: Vertical Linear Array)의 채널들은 92.5 m에서 107.5 m까지 24개로 이루어졌다.

실험에 사용된 탐침 신호는 상관 대역폭 산출을 위한 것으로 식 (12)와 같이 Hamming Window를 거친 CW (Continuous Wave) 신호가 사용되었다.

$$p(t) = w(t) * s(t) \quad (12)$$

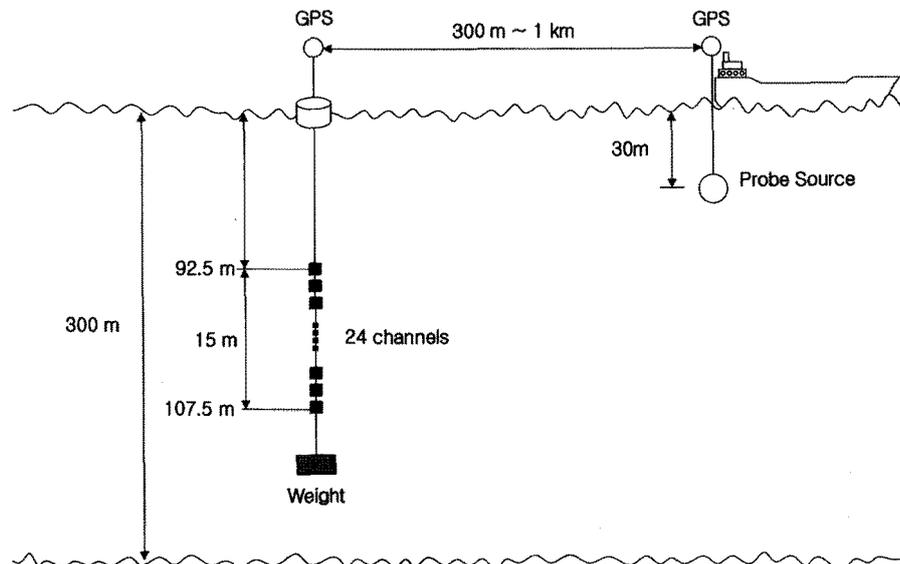


그림 6. 동해 해상실험 모식도  
Fig. 6. Description of the experiment at East sea.

식 (12)에서 \*는 갈삼 연산이고, Hamming Window와 CW 신호에 관한 식은 식 (13)과 식 (14)를 사용하였다.

$$w(t) = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{t}{N}\right), 0 \leq t \leq N \quad (13)$$

$$s(t) = \sin(2\pi f_c t) \quad (14)$$

여기서  $N$ 은 윈도우의 길이이다. 그리고  $f_c$ 는 반송파 주파수를 나타낸다.

또한 상관 시간 산출을 위해 실험에 사용된 랜덤 시퀀스의 변조 방식은 BPSK (Binary Phase Shift Keying)이며 수식 표현은 식 (15)와 같다 [8].

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{\Delta t}} \cos[w_c t + \phi_i(t)], 0 \leq t \leq \Delta t, \quad (15)$$

$$\phi_i(t) = \pi i, i = 1, 2.$$

여기서  $E$ 는 심볼 당 에너지로 실험에서는 3.9905 kPa를 사용했고,  $\Delta t$ 는 심볼 주기로 실험에서는 1 msec로 설정하였다. 또한  $w_c = 2\pi f_c$ 는 반송파 주파수로 실험에서는 7 kHz가 사용하였다. 랜덤 시퀀스는 단일 반송파 기법을 이용하여 전송하였다.

표 1은 수평 거리 300 m, 400 m, 800 m, 1 km에서 총 4회에 걸쳐 신호를 전송할 때의 탐침 음원의 위치에 대한 GPS 데이터이다.

표 1에서 거리 (E)는 탐침 음원으로부터 트랜스듀서까지의 동쪽으로의 거리를 나타내고, 거리 (N)은 북쪽으로의 거리를 나타낸다. 표 1의 GPS 데이터를 통해 실험별 신호를 전송시 탐침 음원의 트랜스듀서들에 대한 상대 속도를 구하면 표 2에 나타나 있는 것과 같다.

표 2에서 도플러 천이 값은 수직 배열센서의 24개 채널들의 위상 변화로부터 계산한 도플러 천이들의 평균값이다. 이동 방향은 탐침 음원이 트랜스듀서로부터 멀어지는 방향이 부호 +, 그 반대 방향이 - 를 나타낸다.

표 1. GPS로 측정된 속도에 대한 데이터  
Table 1. The data about velocities that estimated by GPS.

	실험 1	실험 2	실험 3	실험 4	
측정 시작	거리 (E)	136.53 m	204.10	536.38	988.44
	거리 (N)	241.04	296.06	552.91	-302.73
	시간	13:30:55	13:36:26	14:06:48	12:04:01
측정 종료	거리 (E)	136.60	204.14	536.54	988.23
	거리 (N)	241.04	296.11	553.08	-302.67
	시간	13:30:56	13:36:27	14:06:49	12:04:02

표 2. 실험 거리에 따르는 탐침음원의 이동 속도  
Table 2. moving velocities of a probe source for different distances between transducers and a probe source.

	수평 거리	탐침 음원의 이동 속도	추정된 평균 도플러 천이	이동 방향
실험 1	300 m	0.1502 m/s	0.8409 Hz	+
실험 2	400 m	0.0653 m/s	0.3356 Hz	+
실험 3	800 m	0.2371 m/s	1.2157 Hz	+
실험 4	1 km	0.2218 m/s	1.2250 Hz	-

#### 4.2. 실험 결과를 이용한 상관 대역폭 및 상관 시간 산출

본 절에서는 4.1절에서 기술한 해양 환경에서의 실험 결과인 24개의 채널 응답 특성과 위상 변화 특성을 통해 RMS 지연 확산 시간과 도플러 천이 값을 계산하고 이를 통해 상관 대역폭과 상관 시간을 산출하였다.

3.1절에서 설명한 바와 같이 상관 대역폭을 얻기 위해서는 수중에서의 채널 응답을 알아야 한다. 그림 7은 실험 1에서 24개의 트랜스듀서들의 시간 지연 채널 응답을 나타내고 있다. 그림 7의 24개의 채널 응답 특성 가운데 직접파와 간접파가 도달하는 시간의 간격이 가장 짧은 첫 번째 채널이 가장 큰 상관 대역폭을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 이러한 첫 번째 채널에 대한 상관 대역폭을 산출하였다.

첫 번째 채널 응답의 지연 프로파일들의 크기와 지연 시간들을 식 (7)~(9)에 이용하여 산출한 RMS 지연 시간은 약 6.6807 msec이다. 이렇게 구한 지연 확산 시간을 식 (10)에 이용하여 상관 대역폭을 약 149.68 Hz로 얻었다.

그리고 그림 8은 주파수 상에서의 수신 채널을 나타내었다.

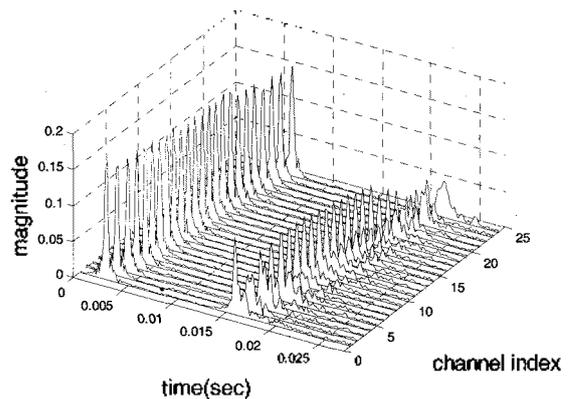


그림 7. 24개의 트랜스듀서들의 채널 응답 특성  
Fig. 7. The characteristic of channel response of 24 transducers.

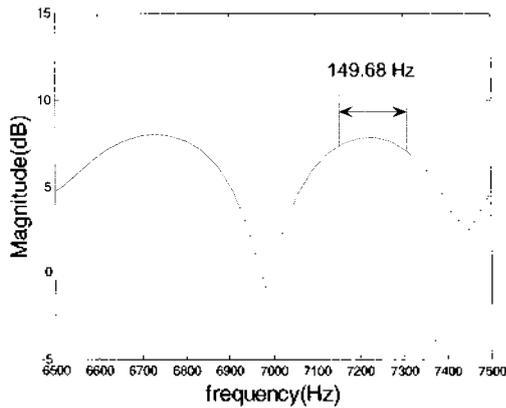


그림 8. 주파수 상에서의 단일 추정 채널  
 Fig. 8. The estimated channel of a single transducer in the frequency domain.

앞서 3.2절에서 설명한 바와 같이 상관 시간을 산출하기 위해서는 위상 변화를 통한 도플러 천이 값의 측정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 실험 1부터 실험 4까지 1번 채널에서의 위상 변화를 식 (10)에 적용하여 시간에 따라 변화하는 평균 도플러 천이 값들을 산출하였고 이 중 그 차이의 최대 절대 값들을 표 3과 같이 얻었다. 최대 절대 값들은 식 (11)에 적용해 그 결과 값 중 가장 작은 값을 상관 시간 ( $T_c$ )으로 산출하였고, 그 값은 166.5 msec이다.

4.3. 파일럿 위치에 따른 성능 변화

3.2절에서 설명한 바와 같이 수신단에서의 등화시 채널 추정에 의한 오류를 막기 위해 프레임 내 파일럿간의 간격은 산출된 상관 시간 ( $T_c = 166.5\text{msec}$ )보다 짧게 설정되어야 한다. 본 논문에서는 프레임 내 파일럿간의 간격을 64 msec, 128 msec, 256 msec, 512 msec로 각각 다르게 설정하여 비트 오류율의 측정을 위한 모의 통신 실험을 수행하였다. 이 때의 수신단에서의 추정 채널은 채널 추정 심볼인 파일럿에 의한 추정 채널 값들을 선형 보간(linear interpolation)하여 추정하였고, 등화기는

표 3. 실험별 1번 채널에 측정된 평균 도플러 천이값들 중 그 차이의 최대 절대값들

Table 3. The maximum absolute values of differences between estimated doppler shifts at the first channel over four experiments.

	수평 거리	최대 절대값	이동 방향
실험 1	300 m	1.0575 Hz	+
실험 2	400 m	0.4648 Hz	+
실험 3	800 m	1.4691 Hz	+
실험 4	1 km	1.5015 Hz	-

영점 강제 기법 (Zero Forcing)을 이용하였다.

그림 9과 그림 10은 각각 파일럿간의 간격을 산출된 상관 시간을 넘지 않도록 설정하였을 때 ( $T_d = 128\text{ msec}$ )와 상관 시간을 넘도록 설정하였을 때 ( $T_d = 512\text{ msec}$ )의 수신 신호의 정상도를 나타내고 있다. 이 두 그림을 비교하면 그림 9에 나타난 정상도의 심볼들에 비해 그림 10에 나타난 정상도의 심볼들이 채널 추정 오차에 의해 더 많이 회전된 것을 알 수 있다.

표 4는 실험을 통하여 산출한 상관 시간보다 파일럿간의 간격을 짧게 설정한 경우 ( $T_d = 64\text{ msec}$ ,  $128\text{ msec}$ )와 길게 설정한 경우 ( $T_d = 256\text{ msec}$ ,  $512\text{ msec}$ )에서의 비트 오류율 변화를 보였다.

표 4의 결과에서 프레임 내 파일럿 간의 간격을 수중 채널에서의 위상 변화를 통해 산출한 상관 시간 ( $T_c$ )인 166.5 ms보다 짧게 설정한 경우 ( $T_d = 64\text{ msec}$ ,  $128\text{ msec}$ )에서의 비트 오류율은 0.021과 0.031로 낮게 얻었고, 상관 시간보다 파일럿 간의 간격을 길게 설정한 경우

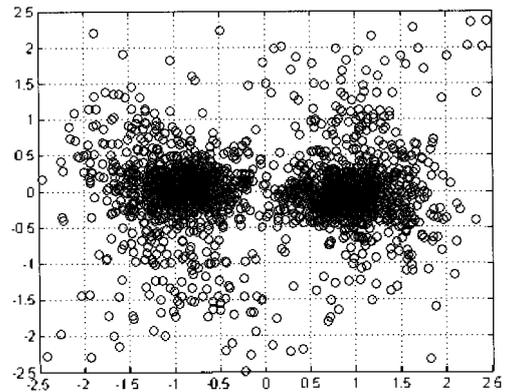


그림 9.  $T_d = 128\text{ msec}$  일 때의 수신신호의 정상도  
 Fig. 9. A constellation of received signal when  $T_d = 128\text{ msec}$ .

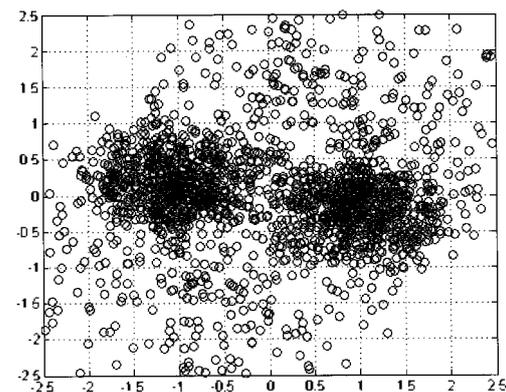


그림 10.  $T_d = 256\text{ msec}$  일 때의 수신신호의 정상도  
 Fig. 10. A constellation of received signal when  $T_d = 256\text{ msec}$ .

표 4. 프레임 내 파일럿간의 간격 ( $T_p$ )과 그에 따른 비트 오류율의 예

Table 4. An example of BERs according to different distances between pilots in a frame.

프레임 내 파일럿간의 간격 ( $T_p$ )	비트 오류율 (BER)
64 msec ( $< T_c$ )	0.021
128 msec ( $< T_c$ )	0.031
256 msec ( $> T_c$ )	0.082
512 msec ( $> T_c$ )	0.098

( $T_p = 256$  msec, 512 msec)의 비트 오류율은 0.082와 0.098로 높게 얻었다. 이 두 결과를 비교해보면 상관 시간보다 파일럿 간의 간격을 짧게 설정하는 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 더 작은 비트 오류율을 보였다. 이는 상관 시간보다 작게 파일럿간의 간격을 설정한 경우가 그렇지 않은 경우보다 채널 추정에 대한 오류가 줄어들게 되기 때문이다.

표 4의 결과와 같이 수중 통신의 경우 채널 추정을 위한 파일럿 심볼의 위치는 통신 프레임 설계의 기본이며 이를 위해 상관 대역폭과 상관 시간을 산출하는 것은 중요한 일임을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문은 실제 해양환경에서의 수중통신 프레임 설계 시 고려되어야 할 파일럿 간의 간격 설정을 위해 실제 해양환경의 주파수 및 시간 영역에서의 채널 변화에 대한 상관 대역폭과 상관 시간에 대해 설명을 하였다. 그리고 동해시 인근 천해 해역에서의 실험을 통해 상관 대역폭을 149.68 Hz, 상관 시간을 166.5 ms로 산출하였다. 수중 실험을 통해 산출한 상관 시간 기준으로 프레임 내 파일럿 간격을 변화시키기에 따른 비트 오류율을 보임으로써 산출한 상관관계가 적절함을 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 방위산업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다 (계약번호 UD100002KD).

### 참고 문헌

1. M. Stojanovic, J. A. Catipovic, and J. G. Proakis, "Adaptive multi-channel combining and equalization for underwater

acoustic communications," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 94, pp. 1621-1631, 1993.

2. M. Stojanovic, J. A. Catipovic, and J. G. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 19, pp. 100-111, 1994.

3. J. Catipovic, "Performance limitations in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. OE-15, pp. 205-216, July 1990.

4. M. Chitre, "Underwater acoustic communications in warm shallow water channels," Ph.D. Thesis, National University of Singapore, pp.76-88, 2006.

5. S. L. Adams, J. W. Doubek, "Frequency coherence and time coherence in random multipath channels," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 62, pp.286-294, 1977.

6. R. L. Culver, D. L. Bradley, "On the relationship between signal bandwidth and frequency correlation for ocean surface forward scattered signals," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 118, pp. 129-138, 2005.

7. T. C. Yang, "Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 120, pp. 2595-2614, 2006.

8. Bernard Sklar, *Digital Communications*, 2nd edition, Prentice-Hall PTR, pp. 960-971, 2001.

9. H. C. Song, Philippe Roux, W. S. Hodgkiss, "Multiple-Input-Multiple-Output coherent time reversal communications in a shallow-water acoustic channel," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 31, pp. 170-178, January 2006.

10. 김현수, 권양수, 이일신, 정재학, 김성일, "지역전 수중 디지털 통신 성능 분석," *한국음향학회 논문지*, vol. 34, no. 3, spp. 213-221, Feb. 2009.

11. Rodger E. Ziemer, William H. Tranter, *Principles of communications*, 5th edition, Science & Technology, pp. 124-127, 2002.

12. 최동현, 김현수, 김남리, 김성일, 정재학, "동해 천해환경에서 수심에 따라 변화하는 위상 변동의 특성과 상관관계 분석," *한국음향학회 논문지*, vol. 29, no. 3, pp. 165-172, Apr. 2010.

13. David Tse, Pramod Viswanath, *Fundamentals of wireless communication*, Cambridge University Press, pp. 30-34, 2005.

### 저자 약력

•최 동 현 (Donghyun Choi)



2009년: 인하대학교 전자공학과 (공학사)  
2009년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정  
※ 관심분야: 수중통신, MIMO-OFDM, IMT-Advanced

•김 현 수 (Hyeonsu Kim)



2008년: 인하대학교 전자공학과 (공학사)  
2008년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정  
※ 관심분야: 수중통신, MIMO, IMT-Advanced

•김 남 리 (Namri Kim)



2009년: 인하대학교 전자공학과 (공학사)  
2009년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정  
※ 관심분야: 수중통신, 차세대 이동통신

•김 성 일 (Seongil Kim)



1986년: 서울대학교 해양학과 (학사)  
1988년: 서울대학교 해양학과 (석사)  
2002년: University of California, San Diego (박사)  
1990년 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원, 한국음향학회  
이사, 편집위원  
※ 관심분야: 수중음향학

•정 재 학 (Jaehak Chung)



1988년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1990년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
2000년: University of Texas at Austin 전기전신학과  
(공학박사)  
2000년 ~ 2001년: University of Texas at Austin,  
post doctoral fellow  
2001년 ~ 2005년: 삼성종합기술원 수석연구원  
2005년 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 조교수  
※ 관심분야: cognitive radio, 차세대 이동통신, MIMO-  
OFDM, UWB, cross-layer 설계