

동해 천해환경에서 수심에 따라 변화하는 위상 변동의 특성과 상관관계 분석

The Characteristics of Phase Variation by Depth of Water Column and the Correlation between Channels of Vertical Array Receiver at East Sea

최 동 현*, 김 현 수*, 김 남 리*, 김 성 일**, 정 재 학*
(Dong-Hyun Choi*, Hyeon-Su Kim*, Nam-Ri Kim*, Seong-Il Kim**, Jae-Hak Chung*)

*인하대학교 전자공학부, **국방과학연구소

(접수일자: 2009년 12월 8일; 수정일자: 2010년 2월 18일; 채택일자: 2010년 2월 19일)

실제 해양환경에서 수직 배열 트랜스듀서들의 위상 변동 특성과 각 트랜스듀서간의 상관관계를 구하는 것은 수중에서의 통신 기법을 결정하는데 중요하다. 본 논문은 동해시 인근 천해 해역에서 시간에 따라 이동하는 탐침 음원에서 전송하여 수직 배열 트랜스듀서들에 수신된 탐침 신호들을 기반으로 수심에 따라 달라지는 수신 신호의 위상 특성을 분석하였다. 그리고 트랜스듀서간의 거리와 송수신기간의 거리를 바꿔가면서 각 트랜스듀서간의 상관관계를 분석하였고 상관관계 변화에 따르는 이론적인 통신 전송 용량 변화를 구하였다.

핵심용어: 수중 음향 통신, 위상 변동 특성, 트랜스듀서간의 상관관계

투고분야: 음향 통신기술 분야 (6.2)

It is important to determine the communicational method that knows the characteristic of phase variation along transducers formed array within the water column in actual underwater environment and the correlation between transducers. This paper analyzes the characteristic of phase variation that vary on different locations by probe signals that transmitted from a probe source and received along transducers. This paper calculated the theoretical transmission capacities by the analyzation of the correlation between transducers through changing the distance between transducers and the distance between a probe source and transducers.

Keywords: Underwater Acoustic Communication, Phase Variation, Correlation Between Transducers

ASK subject classification: Acoustic Communications (6.2)

1. 서론

실제 해양 환경에서는 해수면과 해저면에서의 음파의 다중 경로 산란 및 굴절로 인한 심볼 간의 간섭이 발생하고, 각각의 심볼은 해수면 변동 및 송수신기의 이동 여부에 따라 도플러 천이가 발생된다. 이것은 주파수 대역과 시간에 걸쳐 채널이 변화함을 의미한다 [1-2]. 이와 같은 시변 수중 채널 환경에서의 위상 변동 특성 분석에 대한 연구가 이루어져 왔다 [3-5]. 그리고 수중 해양환경에서

수직 배열 트랜스듀서들을 이용한 통신시 다이버시티 기법의 가용 여부에 대한 정보를 제공하는 수신 신호들간의 상관관계에 대한 연구가 이루어져 왔다 [6-7]. 그러나 한반도 인근 해양환경에서의 실제 실험을 통한 수중 채널의 위상 변동 특성 분석과 수신신호간의 상관관계 분석에 대한 연구는 현재 미진한 실정이다.

본 논문은 한반도 동해시 인근 해역에서 해류 흐름 변화에 의한 수직 배열 트랜스듀서의 위상 변화를 측정하고, 이로부터 이동 속도를 산출하였다. 이 결과를 GPS의 데이터와 비교하여 실측값의 정확성을 보였다. 그리고 수신된 탐침신호를 통해 송수신기간의 거리와 수직배열 형태를 이루는 트랜스듀서간의 거리에 따른 수신 신호간

의 상관관계를 계산하고 이론적인 전송 용량을 구했다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 시간과 주파수 대역에 걸쳐 변화하는 수중 채널 환경에 대해 기술하였고, 제 3장에서는 송수신기간의 거리와 수직배열 형태를 이루는 트랜스듀서간의 거리에 따르는 상관관계 변화에 대해 기술하였다. 제 4장에서는 실제 동해시 인근 천해 해역에서 실행한 실험 환경과 실험 결과들을 기술하였다. 그리고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 수중 음향 채널 환경

II 장에서는 위상 변동 특성을 분석하고 트랜스듀서들 간의 상관관계에 따른 이론적인 전송 용량을 분석하기 위해 해수면 변동 및 송수신기의 이동 등에 의한 도플러 채널 환경과 송수신기간의 거리와 트랜스듀서들의 간격에 따른 트랜스듀서들간의 상관관계에 대해 설명한다.

2.1. 도플러 채널 환경

수중에서 위상 변동을 일으키는 수중 채널 환경의 두 가지 요인은 해수면 변동과 송수신기의 상대적인 이동이다. 그림 1은 시간적으로 지연되어 수신되는 여러 개의 음파가 해수면 변동과 송수신기의 이동에 의해 각기 다른 위상 변화를 겪음을 보이고 있다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 다중 경로를 겪은 음파들은 시간이 t_1 에서 t_2 로 변화함 ($t_1 < t_2$)에 따라 달라지는 해수면에 의해 각기 다른 위상을 가진 신호 h_{t1} 과 h_{t2} 의 채널 특성을 가진다. 이 때의 송신기로부터 수신기까지 전송되는 i 번째 다중 경로 신호의 위상 값은 식 (1)을 통해 추정할 수 있다.

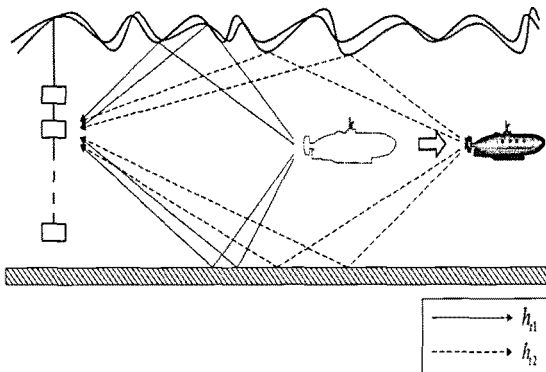


그림 1. 해수면 변동과 송수신기 이동에 따른 위상 변화
Fig. 1. Phase variation due to the varying sea surface and the varying transmitter.

$$\hat{\theta}_i(t) = \tan^{-1} \left\{ \frac{S_r^i(t+d_i)}{S_o(t)} \right\} \text{ (rad)}, 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

여기서 $S_o(t)$ 는 구간 T 동안의 송신된 심볼이고 $S_r^i(t+d_i)$ 는 송신된 심볼 $S_o(t)$ 가 지연 시간 d_i 이후에 i 번째 다중경로 채널을 통해 구간 T 동안 수신된 것이다. 도플러 천이는 이러한 추정 위상 값의 시간에 따른 변화를 통하여 얻을 수 있으며 평균 도플러 천이 \bar{f}_d 는 식 (2)와 같다 [8-9].

$$\bar{f}_d = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\Delta \hat{\theta}_i}{\Delta t} \frac{1}{2\pi} \quad (2)$$

여기서 $\Delta \hat{\theta}_i$ 는 시간이 t_1 에서 t_2 로 변하면서 다른 수신 심볼의 $\hat{\theta}_i$ 의 차이를 말하며, M 과 N 은 각각 다중 경로의 수신 심볼의 수를 의미한다. 그리고 Δt 는 심볼 간의 시간 간격이다.

식 (2)에서 나타낸 바와 같이 채널 응답의 위상 변화를 통해 얻은 도플러 천이는 다중 경로에 의해 전달된 각각의 음파가 겪은 도플러 천이값들의 합으로 쓸 수 있다. 또한 이 도플러 천이값을 이용하면 단일 채널에서 송수신기의 상대적인 이동 속도 \hat{v}_d 를 식 (3)과 같이 추정할 수 있다 [8-9].

$$\hat{v}_d = \frac{c \bar{f}_d}{f_c} \quad (3)$$

여기서 c 는 수중에서의 음파속도이고, f_c 는 전송신호의 반송 주파수이다.

2.2. 배열 트랜스듀서간의 상관관계

수직 배열 형태를 가지는 트랜스듀서들을 사용하는 수중 통신에서 전송 용량을 결정하는 것은 트랜스듀서간의 상관관계이다. 따라서 이러한 트랜스듀서간의 상관관계를 파악하는 것이 수중 통신 시스템 설계에 중요한 요소이다. 만일 트랜스듀서에 수신되는 신호간의 상관관계가 낮다면 다이버시티 이득 (Diversity Gain)과 배열 이득 (Array Gain)을 동시에 얻으며 수신 신호간의 상관관계가 높다면 배열 이득을 얻는다 [10]. 그러므로 상관관계의 특성에 따라 수신 방식을 결정할 수 있다. i 번째와 j 번째 트랜스듀서에 수신되는 신호들간의 상관 계수 (Correlation Coefficient) ρ_{ij} 는 식 (4)와 같다 [11].

$$\rho_{ij} = \frac{\int_B x_i(f) x_j^*(f) df}{\sqrt{\int_B x_i(f) x_i^*(f) df} \sqrt{\int_B x_j(f) x_j^*(f) df}} \quad (4)$$

여기서 $x_i(f)$ 와 $x_j(f)$ 는 수신 신호의 주파수 성분이고, *는 신호의 공액 복소수 (Complex Conjugate)이며, B 는 수신 신호의 주파수 대역폭이다. 또한 $0 \leq \rho_{ij} \leq 1$ 이다.

그림 2는 수중 환경에서 트랜스듀서들간의 상관관계가 변화하는 이유로서 배열 트랜스듀서들간의 채널이 변화함을 나타내고 있다.

그림 2에서 첫 번째 트랜스듀서와 두 번째 트랜스듀서 사이에는 다중 경로에 의한 서로 다른 위상을 가진 신호들이 수신되고 이 때문에 트랜스듀서간의 상관관계는 감소하게 된다. 그리고 트랜스듀서들 사이의 간격이 커질수록 위상 차이는 커져 상관관계가 더욱 감소하게 된다. 이러한 상관관계는 같은 트랜스듀서간의 간격을 가진 배열일지라도 거리에 따라 변화하게 된다.

그림 3은 트랜스듀서들간의 간격은 같지만 송수신기간의 거리가 변화함에 따라 채널이 변화함을 보이고 있다.

그림 3에서 송수신기간의 거리가 증가함에 따라 반사 또는 굴절에 의해 지연되어 도달하는 간접파가 줄어들게 되고 크기는 작지만 직접적으로 도달하는 신호인 직접파가 수신된다. 그러므로 수신되는 간접 신호가 감소할수록 트랜스듀서에 수신되는 신호간의 상관관계는 증가하게 된다.

2.3. 수중 채널의 이론적인 전송 용량

각 트랜스듀서의 수신 신호들간의 상관 계수들로 이루어진 행렬을 R_r 이라하면 MISO 채널에서의 신호 대 잡음비 (SNR; Signal to Noise Ratio)에 대한 비트 전송률은

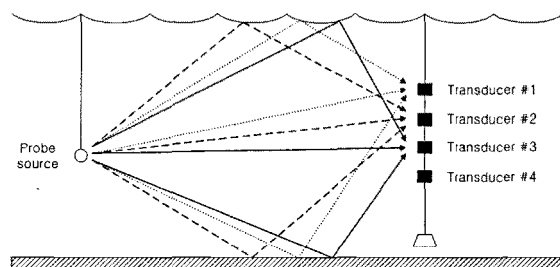


그림 2. 트랜스듀서간의 채널 변화
Fig. 2. The channel variation for different transducers.

식 (5)를 통해 계산할 수 있다 [12].

$$C = \log_2 \det(I_{M_R} + \rho R_r^{1/2} H H_w^H R_r^{H/2}) \quad (5)$$

여기서 M_R 은 트랜스듀서의 수이고 ρ 는 신호 대 잡음비이다. H_w 는 채널간의 상관관계가 전혀 없는 열벡터 채널로 크기는 $M_R \times 1$ 이다. 또한 $(\cdot)^H$ 는 허미션 (Hermitian) 행렬이다.

다음 III장은 이러한 수중 음향 채널 환경에서의 신호의 위상 변동 특성과 수신 신호간의 상관관계를 측정하기 위해 동해시 인근 천해 해역에서 실행한 실험의 환경과 결과를 기술하였다.

III. 해상 실험 환경 및 결과

3.1. 실험 환경

실제 수중 환경에서 트랜스듀서들의 위상 변화와 상관관계를 측정하기 위하여 동해시 인근 해역에서 실험을 실행하였고, 그림 4는 동해시 인근 해역에서 실행한 실험의 모식도이다.

그림 4에 나타낸 바와 같이 실험 해역은 동해시 인근의

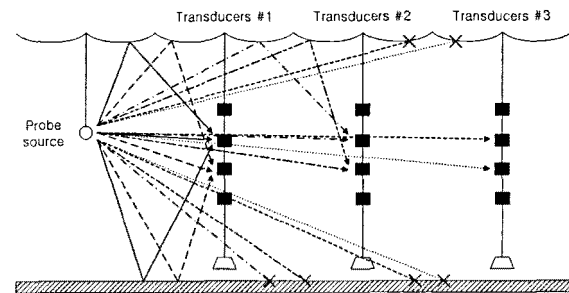


그림 3. 송수신기간 거리에 따른 채널 변화
Fig. 3. The channel variation for different distances between a transmitter and receivers.

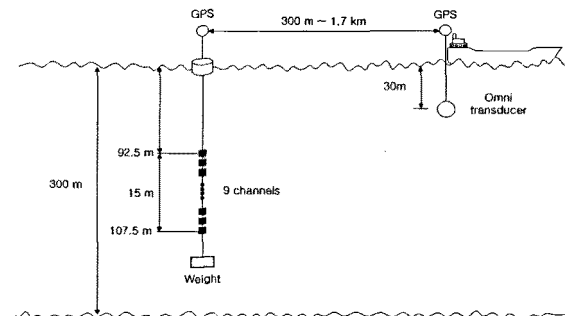


그림 4. 동해 해상실험 모식도
Fig. 4. Description of the experiment at East sea.

수심 300 m 지역이고 표류상태였다. 실험시에 송신기의 심도는 30 m, 수신기로 사용된 트랜스듀서들은 92.5 m에서 107.5 m까지 9개로 이루어졌고 각 트랜스듀서들간의 간격은 1.875 m이다.

위상 변동 특성의 분석 실험에서는 수평거리 300 m, 400 m, 800 m, 1 km에서 데이터 신호를 전송하였으며 해상 송수신기 모두에 GPS를 설치하여 1 sec 단위로 위치 정보를 측정함으로써 송수신기의 상대 속도 변화를 관측하였다. 또한 데이터 신호의 변조방식은 BPSK (Binary Phase Shift Keying)이고 신호의 수식 표현은 식 (6)과 같다.

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\omega_c t + \phi_i(t)], \quad 0 \leq t \leq T \quad (6)$$

여기서 E 는 심볼 당 에너지로 실험에서는 그 크기가 3,9905 kPa였고, T 는 심볼 주기로 실험에서는 1 msec로 하였다. 또한 $\omega_c = 2\pi f_c$ 는 반송파 주파수이다.

표 1은 수평거리 300 m에서 1 km까지 실행한 4개의 실험의 GPS 정보를 이용한 거리와 이동 속력을 나타낸다.

여기서 직선 거리 (R)는 탐침 음원으로부터 트랜스듀서까지의 거리이며, 이동 속력 (V)은 송수신기에 위치한 GPS로 인한 측정 속력이다. 또한 이동 방향은 탐침 음원이 트랜스듀서로부터 멀어지는 방향이 부호 +, 그 반대 방향이 - 이다. 실험에서 전송한 프레임 구조는 연속된

표 1. 실험 거리에 따르는 송수신기의 이동 속력
Table 1. Velocity variations of experiments.

	직선 거리(R)	이동 속력(V)	이동 방향
실험 1	300 m	0.1502 m/s	+
실험 2	400 m	0.0653 m/s	+
실험 3	800 m	0.2371 m/s	+
실험 4	1 km	0.2218 m/s	-

표 2. GPS로 측정된 속도에 대한 데이터
Table 2. The data about velocities that estimated by GPS.

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

심볼 시퀀스로 구성하였으며 총 2048개의 심볼을 모두 채널 추정 심볼로 구성하였다.

표 2는 GPS로 측정된 속도에 대한 데이터이다.

여기서 거리 (E)는 탐침 음원으로부터 트랜스듀서까지의 동쪽으로는 거리를 나타내고, 거리 (N)은 북쪽으로는 거리를 나타낸다.

수신 신호간의 상관관계를 분석하는 실험에서는 수평거리 300 m, 1 km, 1.7 km에서 각각 10회씩 총 30회에 걸쳐 탐침 신호를 전송하였다. 탐침 신호는 Hamming Window를 거친CW (Continuous Wave) 신호가 사용되었다. 또한 데이터 신호와 탐침 신호는 모두 7 kHz의 반송파 주파수를 사용하였다.

3.2. 이동 속도에 따른 위상 변동 특성 변화

3.1절의 실험 환경에서 송수신기간의 거리를 변화시키면서 그림 5~8과 같이 위상 변화를 측정하였다. 그림 5~8은 실험 1부터 실험 4까지의 수심 92.5 m에 위치한 1번 채널의 수신신호로부터 얻어낸 시간에 따른 추정 채널의 위상 변화를 나타내고 있다.

그림 5~8의 가로축은 msec 단위의 시간이고, 세로축은 위상값으로 단위는 라디안 (rad)이다. 위상이 선형적으로 변화하는 부분은 송수신기의 위치 이동에 따른 위상 변동이고, 적은 값의 무작위적인 분포를 띄고 위상이 변화하는 부분은 해양 수면과 주변환경 변화에 따른 위상 변동으로 추정된다. 또한 송신기가 트랜스듀서로부터 멀어지게 되면 수신 채널의 위상값은 감소하고, 반대로 트랜스듀서로부터 가까워지게 되면 수신 채널의 위상값은 증가한다.

그림 5에서 위상 변동의 기울기가 약 1228 msec에서 -3,1740 rad/sec로부터 -5,7560 rad/sec로 변화함을 볼 수 있는데, 이는 추정 채널을 구하는 시간 내에 송신기의 속도가 증가하여 발생한 결과로 추정된다. 또한 구간 내 평균적인 위상 변동의 기울기는 -4.4650 rad/sec 이다.

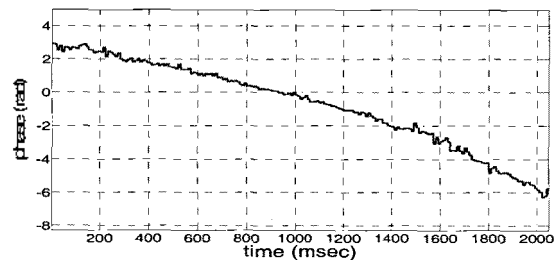


그림 5. 실험 1의 단일추정채널의 위상변화
Fig. 5. Phase variation of a single estimated channel at experiment 1.

그림 6에서는 위상 변동의 기울기가 약 434 msec에서 -0.5875 rad/sec 로부터 -1.4769 rad/sec 로 변화하게 되고, 약 1350 msec에서 -2.1250 rad/sec 로 한 번 더 변화하게 된다. 이는 송신기 속도는 점차 증가했음을 알 수 있다. 또한 이 때의 구간 내 평균적인 위상 변동의 기울기는 -1.4169 rad/sec 이다.

그림 7에서는 위상 변동의 기울기가 약 840 msec에서 -10.4169 rad/sec 로부터 -8.3585 rad/sec 로, 다시 약 1504 msec에서 -7.4782 rad/sec 로 감소되는 방향으로 변화하게 되고 이것은 송신기의 이동 속도가 추정 채널을 구하는 시간 내에서 변동했음을 알 수 있다. 이 때의 구간 내 평균적인 위상 변동의 기울기는 -8.7512 rad/sec 이다.

마지막으로 그림 8에서는 추정 채널을 구하는 시간 동안 위상 변동의 기울기가 5.4274 rad/sec 로 일정하게 나타났고 이는 송수신기간의 속도 변화가 일정하게 일어났음을 알 수 있다.

3.3. 추정 속도와 GPS 측정 속도의 비교

본 절은 깊이에 따라 달리 위치한 9개의 채널에서의 추정 속도들을 그림 9를 통해 보였고 표 3을 통해 추정 속도들의 평균값과 GPS에서 측정한 이동 속도와 비교하였다.

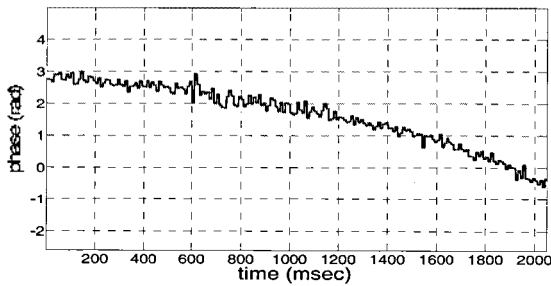


그림 6. 실험 2의 단일추정채널의 위상변화
Fig. 6. Phase variation of a single estimated channel at experiment 2.

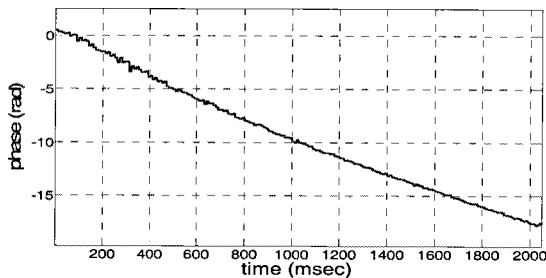


그림 7. 실험 3의 단일추정채널의 위상변화
Fig. 7. Phase variation of a single estimated channel at experiment 3.

그림 9는 수심에 따른 추정 속도의 변화를 나타내었다. 그림 9의 가로축은 추정 속도이고 세로축은 해수면으로부터의 깊이이다. 그림 9에서 나타난 바와 같이 각 수신기의 이동 속도는 수심에 따라 불규칙하게 변화하고 있다. 이것은 수심에 따라 다른 해류 속도로 인해 트랜스듀서들이 위치가 변화하기 때문이다.

표 3은 트랜스듀서들의 수신 신호를 통해 산출된 평균 추정 속도의 정확성을 알아보기 위해 수면 위 GPS에서 측정된 이동 속도와 비교하였으며, 오차는 $|\text{평균 추정 속도} - \text{실측 속도}| / (\text{실측 속도}) \times 100 (\%)$ 로 계산하였

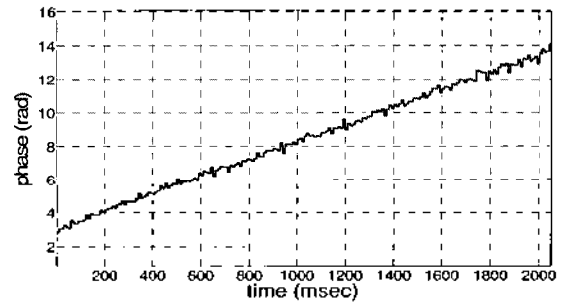


그림 8. 실험 4의 단일추정채널의 위상변화
Fig. 8. Phase variation of a single estimated channel at experiment 4.

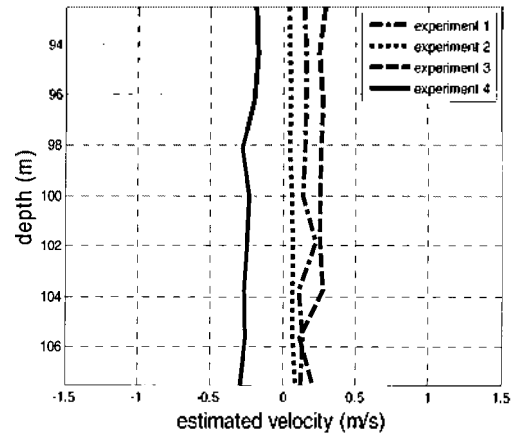


그림 9. 트랜스듀서 위치에 따른 추정 속도 변화
Fig. 9. Variation of the estimated velocity for each transducer.

표 3. 평균 추정 속도와 GPS에서의 측정 속도의 비교
Table 3. Comparison between the estimated average velocity and the velocity based on GPS's data.

	실험 1	실험 2	실험 3	실험 4
직선 거리 (m)	300	400	800	1000
실측 속도 (m/s)	0.1502	0.0653	0.2371	-0.2218
평균 추정 속도 (m/s)	0.1755	0.0700	0.2544	-0.2558
오차 (%)	14.42	7.28	7.29	15.33

다. 여기서 평균 추정 속도는 실험별 9개의 채널에 대한 추정 속도들의 평균값이다.

3.4. 송수신기간의 거리 변화에 따른 트랜스듀서간의 상관 관계 변화와 이론적인 전송 용량 산출

본 절은 송수신기간의 거리를 달리 설정하여 실험하였을 때의 거리에 따른 상관관계와 트랜스듀서간 거리의 변화에 따른 상관관계의 변화를 구하였다. 그림 10~12는 송수신기간의 거리가 각각 300 m, 1 km, 1.7 km일 때 9개의 트랜스듀서들에 수신된 탐침 신호들의 크기를 나타내고 있다.

그림 10~12에서 볼 수 있듯이 송수신기간의 거리가 증가할수록 트랜스듀서들에 수신되는 신호의 지인 성분은 작아지게 되고, 간접파와 직접파간의 시간 차이도 줄어든다. 그리고 각 트랜스듀서간의 수신 신호 형태도 다음을 알 수 있다.

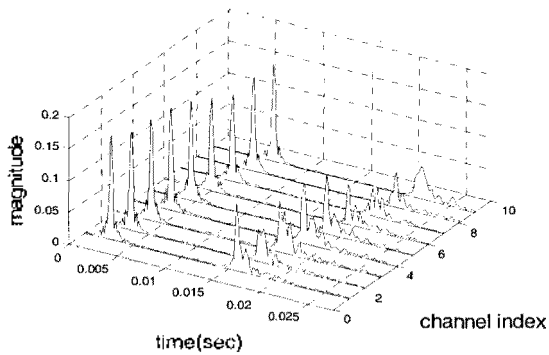


그림 10. 9개의 트랜스듀서에 수신된 탐침 신호들의 크기 (송수신기간의 거리 : 300 m)

Fig. 10. The amplitude of received probe signals for 9 transducers (The distance between transmitter and receiver : 300 m).

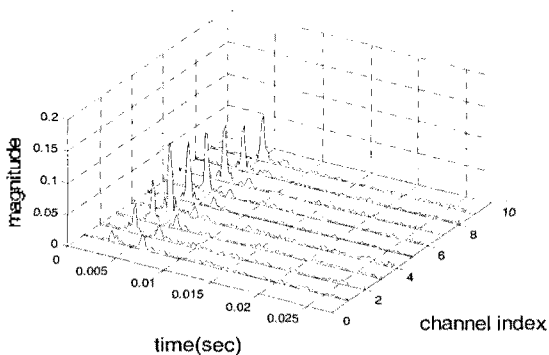


그림 11. 9개의 트랜스듀서에 수신된 탐침 신호들의 크기 (송수신기간의 거리 : 1 km)

Fig. 11. The amplitude of received probe signals for 9 transducers (The distance between transmitter and receiver : 1 km).

표 4~6은 송수신기간의 거리가 각각 300 m, 1 km, 1.7 km일 때의 모든 채널들에 대한 상관관계를 나타낸 것이다. 트랜스듀서간의 거리가 멀어질수록 상관관계가 적어짐을 알 수 있다.

거리에 따른 상관관계를 비교해보기 위하여 5번 채널과 다른 모든 채널과의 상관 계수를 그림 13에 보였다. 그림 13은 송수신기간의 거리가 각각 300 m, 1 km, 1.7 km일 때 채널 5의 수신 신호와 모든 채널의 수신 신호들과의 상관 계수이고 이 때의 상관 계수는 식 (4)를 통해 계산할 수 있다. 그림 13의 가로축은 트랜스듀서의 수심으로 단위는 m이고, 세로축은 상관 계수이다. 송수신기간의 거리에 따른 상관관계는 1 km일 때가 전체적으로 가장 적고 1.7 km일 때가 그 다음으로 크며, 300 m일 때가 가장 크다.

송수신기간의 거리에 따른 상관관계는 거리가 멀어질수록 수신기에 도달하는 간접 신호의 영향이 줄어들게

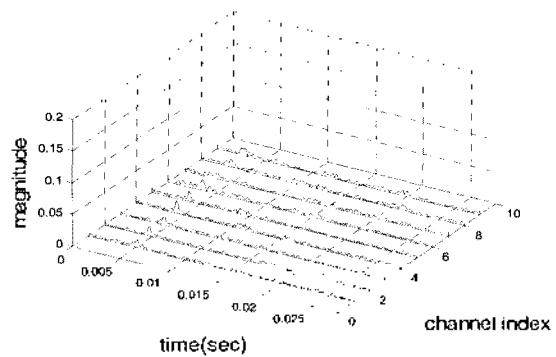


그림 12. 9개의 트랜스듀서에 수신된 탐침 신호들의 크기 (송수신기간의 거리 : 1.7 km)

Fig. 12. The amplitude of received probe signals for 9 transducers (The distance between transmitter and receiver : 1.7 km).

표 4. 9개 채널의 수신 신호간 상관 계수 (거리 : 300 m)

Table. 4. The correlation coefficients between 9 channels' received probe signals (The distance between a transmitter and receivers : 1.7 km).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0.87	0.83	0.76	0.69	0.60	0.52	0.50	0.46
2	0.87	1	0.86	0.81	0.75	0.66	0.59	0.56	0.52
3	0.83	0.86	1	0.88	0.82	0.74	0.68	0.63	0.59
4	0.76	0.81	0.88	1	0.88	0.81	0.76	0.70	0.65
5	0.69	0.75	0.82	0.88	1	0.86	0.82	0.77	0.71
6	0.60	0.66	0.74	0.81	0.86	1	0.88	0.83	0.78
7	0.52	0.59	0.68	0.76	0.82	0.88	1	0.89	0.86
8	0.50	0.56	0.63	0.70	0.77	0.83	0.89	1	0.91
9	0.46	0.52	0.59	0.65	0.71	0.78	0.86	0.91	1

표 5. 9개 채널의 수신 신호간 상관 계수 (거리 : 1 km)
Table. 5. The correlation coefficients between 9 channels' received probe signals (distances : 1 km).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0.56	0.21	0.03	0.10	0.12	0.09	0.06	0.04
2	0.56	1	0.55	0.18	0.01	0.09	0.12	0.10	0.09
3	0.21	0.55	1	0.55	0.18	0.03	0.12	0.15	0.12
4	0.03	0.18	0.55	1	0.53	0.12	0.04	0.12	0.12
5	0.10	0.01	0.18	0.53	1	0.49	0.16	0.03	0.09
6	0.12	0.09	0.03	0.12	0.49	1	0.49	0.17	0.03
7	0.09	0.12	0.12	0.04	0.16	0.49	1	0.52	0.18
8	0.06	0.10	0.15	0.12	0.03	0.17	0.52	1	0.50
9	0.04	0.09	0.12	0.12	0.09	0.03	0.18	0.50	1

표 6. 9개 채널의 수신 신호간 상관 계수 (거리 : 1.7 km)
Table. 6. The correlation coefficients between 9 channels' received probe signals (distances : 1.7 km).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0.76	0.59	0.46	0.37	0.28	0.18	0.11	0.03
2	0.76	1	0.77	0.58	0.46	0.37	0.27	0.17	0.09
3	0.59	0.77	1	0.78	0.58	0.47	0.36	0.24	0.14
4	0.46	0.58	0.78	1	0.78	0.58	0.46	0.34	0.22
5	0.37	0.50	0.58	0.78	1	0.79	0.58	0.46	0.33
6	0.28	0.37	0.47	0.58	0.79	1	0.76	0.57	0.45
7	0.18	0.27	0.36	0.46	0.58	0.76	1	0.74	0.57
8	0.11	0.17	0.24	0.34	0.46	0.57	0.74	1	0.74
9	0.03	0.09	0.15	0.22	0.33	0.45	0.57	0.74	1

되어 커지게 된다. 그러나 그림 13에서 볼 수 있듯이 거리가 300 m일 때의 수신 신호간의 상관관계가 전체적으로 다른 거리에서의 결과보다 높게 나왔다. 이 경우는 송수신기 사이의 거리가 가까울 때 신호의 변동 폭이 줄어들어 상관관계가 커지는 것으로 추정된다.

표 4~6의 상관 계수들을 이용하면 수중 채널의 이론적인 용량을 구할 수 있다. 수중 채널을 레일리 페이딩 (Rayleigh Fading)으로 가정하고 [13-14], 식 (5)에 표 4~6의 상관 계수들을 대입하면 그림 14와 같이 송수신기 간의 거리별 신호 대 잡음비에 따른 이론적인 수중 채널의 전송 용량을 구할 수 있다.

그림 14에서 볼 수 있듯이 다른 트랜스듀서의 수신 신호간의 상관 계수가 0일 때 즉, 수신 신호간의 상관관계가 없을 때의 신호 대 잡음비에 대한 비트 전송률을 기준으로 수신 신호간의 상관관계가 커질수록 신호 대 잡음비에 대한 비트 전송률 또한 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 거리에 따른 수중환경 변화에 맞춰 최적화된 수신기 구조를 설계할 필요가 있다.

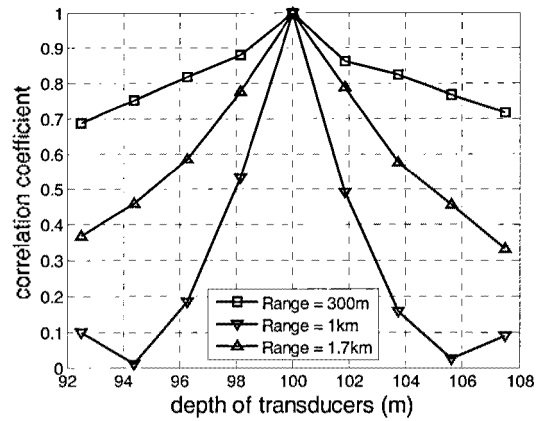


그림 13. 송수신기간의 거리에 따른 모든 채널의 수신 신호와 채널 5의 수신신호간의 상관 계수 (거리 : 300 m, 1 km, 1.7 km)

Fig. 13. The correlation between all channels' received probe signals and channel #5's received probe signal by different distances between a transmitter and receivers (distances between a transmitter and receivers : 300 m, 1 km, 1.7 km).

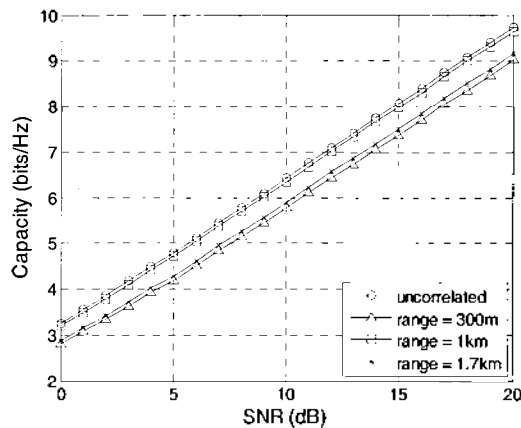


그림 14. 신호 대 잡음비에 따른 전송용량 비교
Fig. 14. A comparison by different SNRs.

VI. 결론

본 논문은 한반도 동해시 인근 해역에서 실제 송수신기를 이용하여 수중 실험을 수행한 결과를 바탕으로 수심에 따른 해류 흐름 변화에의 의해 달라지는 채널의 위상 변동 특성을 분석하였다. 이러한 위상 변화들로부터 수심별 송수신기의 상대적인 이동 속도를 계산하였고 그 평균 값을 송수신기에 위치한 GPS 위치 정보를 통하여 얻은 결과의 실측 속도와 비교하여 오차가 비교적 작은 값임을 확인하였다. 그리고 수직 배열 형태를 이루는 트랜스듀서에 수신되는 탐침 신호간의 상관관계들 트랜스듀서간의 거리와 송수신기간의 거리에 따라 분석하였다. 이 상

관관계를 통해 이론적인 전송 용량을 산출하였고 수신 신호들간의 상관관계가 증가할 경우 전송 용량이 줄어들음을 확인하였다.

참고문헌

1. G.Edelmann et al, "Underwater acoustic communication using time reversal," *Proc. of MTS/IEEE OCEANS'01*, vol. 4, pp. 2231-2235, Honolulu, Hawaii, Nov, 2001.
2. D. Kilfoyle and A. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry", *IEEE J. of Ocean Eng.*, vol. 25, pp. 4~27, 2000.
3. M. Stojanovic, Josko A. Catipovic, and John G. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 19, pp. 100-111, January 1994.
4. M. Johnson, L. Freitag, M. Stojanovic, "Improved Doppler tracking and correction for underwater acoustic communications," *IEEE ICASSP-97*, vol. 1, pp. 21-24, 1997.
5. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational ocean acoustics*, American Institute of Physics, New York, 1994.
6. M. Hawkes, "Acoustic vector-sensor correlations in ambient noise," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 26, no. 3, pp.337-347, 2007.
7. A. Abdi and H. Guo, "A correlation model for vector sensor arrays in underwater communication systems," *Proc. MTS/IEEE Oceans*, Quebec City, QC, Canada, 2008.
8. Rodger E. Ziemer, William H. Tranter, *Principles of communications*, 5th edition, Science & Technology, 2002.
9. 최동현, 김현수, 김남리, 김성일, 정재학, "동해시 인근 해역 수중통신채널의 위상 변동 특성," *한국음향학회 2009년도 추계학술발표대회 논문집*, 120-123쪽, 2009.
10. David Tse, Pramod Viswanath, *Fundamentals of wireless communication*, Cambridge University press, 2005.
11. Alberto Leon-Garcia, *Probability and Random Processes for Electronic Engineering*, Addison Wesley Longman, 2nd Edition, 1994.
12. A. Paulraj, R. Nabar, D. Gore, *Introduction to space-time wireless communications*, Cambridge University press, 2003.
13. 고일석, "Rayleigh와 Ricean 채널 환경에서 동작하는 시역전 통신 채널 용량," *한국통신학회 논문지*, 34권, 3호, 243-250쪽, 2009.
14. 유형하, 고일석, "Rayleigh 및 Ricean 채널 환경 내의 시역전 펄스의 공간 특성," *한국음향학회 2009년도 춘계학술발표대회 논문집*, 476-479쪽, 2009.

저자 약력

•최 동 현 (Dong-Hyun Choi)



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

•김 현 수 (Hyeon-Su Kim)



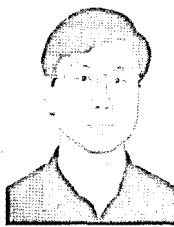
2009년: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2008년~현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정
※ 관심분야: 수중통신, MIMO, IMT-Advanced

•김 남 리 (Nam-Ri Kim)



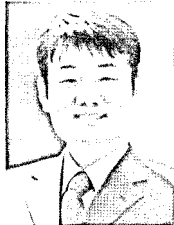
2009년: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2009년~현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정
※ 관심분야: 수중통신, 차세대 이동통신

•김 성 일 (Seong-Il Kim)



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

•정 재 학 (Jae-Hak Chung)



1988년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1990년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년: University of Texas at Austin 전기전산학과 (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