

해수면에 의한 신호 응답 강도의 시변동성 특성이 적용된 벨홉 기반의 수중음향 통신 채널 모델링 및 수동 시역전 통신 응용

Underwater Acoustic Communication Channel Modeling Regarding Magnitude Fluctuation Based on Ocean Surface Scattering Theory and BELLHOP Ray Model and Its Application to Passive Time-reversal Communication

김준석, 고일석*, 이용식

(Joonsuk Kim, Il-Suek Koh*, and Yongshik Lee)

연세대학교 전기전자공학과, *인하대학교 전자공학과

(접수일자: 2012년 9월 28일; 수정일자: 2012년 11월 13일; 채택일자: 2013년 1월 7일)

초 록: 본 논문은 시변 해수면을 생성하고 KA(Kirchhoff Approximation) 기반으로 산란계수를 시물레이션하여 결정론적 모델인 벨홉 임펄스 응답에 적용함으로써 시변동성 채널을 생성한다. 1D Pierson-Moskowitz 해수면 스펙트럼과 가우시안 상관 함수를 이용하여 일정한 속도로 변화하는 시 변동성 해수면을 사용하였다. 산란계수는 벨홉의 채널 임펄스 응답의 신호 응답 강도에 적용한다. 실제 실측 데이터에서 해수면 반사 성분을 분리하여 시 변동성 특성에 대한 도플러 파워 스펙트럼을 구하고, 해수면 산란계수 시물레이션의 결과와 비교하여 해수면에 사용된 가우시안 상관 함수의 상관 시간을 추정하였다. 최종적으로 생성된 시변동성 채널에 수동 시역전 통신 시나리오를 가정하고 기법을 적용하여 비트에러율 및 채널응답 상관계수 시물레이션을 수행하였다.

핵심용어: 해수면, 산란, 벨홉, 시 변동성, 시역전, 통신, 채널, 랜덤 프로세스

ABSTRACT: This paper represents generation of time-varying underwater acoustic channels by performing scattering simulation with time-varying ocean surface and Kirchhoff approximation. In order to estimate the time-varying ocean surface, 1D Pierson-Moskowitz ocean power spectrum and Gaussian correlation function were used. The computed scattering coefficients are applied to the amplitudes of each impulse of BELLHOP simulation result. The scattering coefficients are then compared with measured doppler spectral density of signal components which were scattered from ocean surface and the correlation time used in the Gaussian correlation function was estimated by the comparison. Finally, bit-error-rate and channel correlation simulations were performed with the generated time-varying channel based on passive time-reversal communication scenario.

Key words: Ocean surface, BELLHOP, Time-domain fluctuations, Time-reversal, Communication, Channel, Random process

PACS numbers: 43.30.Re

1. 서 론

수동 시역전 기술은 수신 신호로부터 채널 정보를

수신하여 시역전 기법을 사용하여 수중 채널에서 발생하는 다중경로 페이딩을 감소시키는 기술로, 채널 정보를 얻기 위하여 사용되는 m-sequence와 같은 프로브(probe)신호와 실제 정보를 담고 있는 데이터 신호를 하나의 세트에 전송하여 프로브 신호의 채널

†Corresponding author: Il-Suek Koh (ikoh@inha.ac.kr)
Department of Electronic Engineering, Inha University, 708 Hightech, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 402-751, Republic of Korea
(Tel: 82-32-860-8426, Fax: 82-32-868-3654)

정보를 토대로 시역전 기법을 적용한다.^[1,2] 따라서 수동 시역전 통신 성능은 프로브 신호가 통과한 채널과 데이터 신호가 통과한 채널의 상관도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 수중 채널 사이의 상관도는 채널의 변동을 일으키는 여러 원인들에 의하여 변동한다. 그 중에서 해수면 산란 성분은 무작위적인 시변 특성을 가지기 때문에, 산란된 성분의 신호 강도가 큰 경우 채널의 상관도에 매우 큰 영향을 끼친다. 해수면 산란과 같은 무작위적인 채널 특성은 대표적인 통신 채널 모델인 TDL(Tapped-Delay Line)에서 탭 파라미터의 변동으로 표현될 수 있다. 이러한 성질들은 일반적으로 확률 밀도 함수의 형태로 모델링되며, 레일리(Rayleigh) 혹은 라이시안(Rician)이 대표적이다.^[3] 또한 각 다중경로 성분에 대해서 시간의 진행에 따른 변동성 정도를 나타내는 상관 함수를 제공하거나, 대표적인 통신 채널 중 하나인 WSSUS(Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering) 채널의 도플러 파워 스펙트럼과 같은 정보를 제공해주어야 통신 성능에 대한 예측 및 시뮬레이션이 가능해진다.^[3-5] 널리 알려진 수중 채널 모델인 벨홉(BELLHOP) 모델은 음선 추적 기반의 수중 채널 모델로 음속 구조, 해저면 구조, 송수신기 위치 등 다양한 환경 파라미터를 고려하여 채널 응답을 계산할 수 있다.^[6-7] 최근 Siderius 와 Porter는 벨홉 모델을 기반으로 해수면 등으로 인한 시변 채널 응답 특성을 제공하는 VirTEX(Virtual Timeseries EXperiment)의 알고리즘을 제안하였다.^[8] 이 방법은 벨홉의 시뮬레이션 환경 중 해수면 구조 등을 일정한 시간 간격으로 변화시켜서 음선의 경로 및 산란에 시변 효과를 부여하고 결과적으로 변동성까지 고려한 채널의 경로 손실 등을 계산할 수 있다. 그러나 음선 추적 기반 모델에서 제공하는 채널 모델은 수많은 샘플을 요구하는 통신 시스템 시뮬레이션에 적용하기에 느리다는 단점이 있다. 예를 들어, 통신 시스템 시뮬레이션에서 신호의 변동성은 랜덤 프로세스 이론^[9]을 이용하여 생성하거나 변동성 생성기(fluctuation generator)^[9]등을 사용하는데, 보통 100만개 이상의 샘플에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한다. 음선 추적 시뮬레이션은 해수면 경계면, 음속 구조, 송수신기 위치 등과 같은 시뮬레이션 환경에 직접 변화를 주어 변동성을 생성

할 수 있지만, 대량의 샘플을 필요로 하는 통신 시뮬레이션에 약점을 가지고 있다.

본 연구진은 음선 추적 시뮬레이션을 채널의 평균 응답으로서 한번의 시뮬레이션만 수행하되, 해수면의 효과로 인한 각 다중 경로 성분의 신호 응답 강도 변동성을 독립적으로 생성하게 하는 방법을 제안한다. PM(Pierson-Moskowitz)^[10] 해수면 스펙트럼을 사용하면 생성되는 해수면은 풍속에 따라 파고, 형태 등이 변화한다. 또한, 해수면 생성에 일정한 상관 시간(correlation time)을 변수로 갖는 가우시안 파워 스펙트럼^[11]을 사용하여 상관 시간을 기준으로 시간에 따라 변화하는 해수면을 생성한다.^[12] 생성된 시변 해수면에 대한 해수면 산란 계수를 KA(Kirchhoff Approximation)^[11,13]을 이용하여 구하게 되면, 시간에 따라서 변동하는 산란 계수를 구할 수 있게 되고, 이 값을 신호 응답 강도의 변동성으로 모델링하였다.

또한, 해상에서 수중 음향 실험을 실시하여 해수면 반사 성분을 측정 후 도플러 파워 스펙트럼을 구하였으며, 모델링에 사용된 산란 계수의 파워 스펙트럼과 비교하였다. 마지막으로 시뮬레이션으로부터 얻어진 채널 응답에 시역전 기법을 적용하여 다중 경로 성분의 에너지를 통일성(coherent)있게 더하고, 비트에러율 시뮬레이션을 수행하였다.

II. 실측 실험을 통한 해수면 산란 성분의 도플러 특성 모델링

Fig 1은 본 논문에서 제안하는 수중 음향 채널 생성 방법을 나타낸 다이어그램이다. 채널 생성에 필요한 주요 입력은 총 4개로, 결정론적 채널 모델에 적용될 해저면 지형과 음속 구조, 통계적 채널 모델에서 사용될 시변 해수면 생성에 필요한 상관 시간(correlation length) l 과 해발 19.5 m에서의 풍속 $U_{19.5}$ 이다. 본 논문에서는 BELLHOP 모델을 사용하여 평균 채널 임펄스 응답을 생성한다. 일정한 시간 간격으로 해수면 $f(x; m \Delta t)$ 을 생성하고, 각각의 해수면 경계에 대해서 고유음선이 해수면과 이루는 입사각과 산란각 정보를 BELLHOP으로부터 받는다. 그리고 이 값들을 KA 산란 시뮬레이션(scattering simulation)

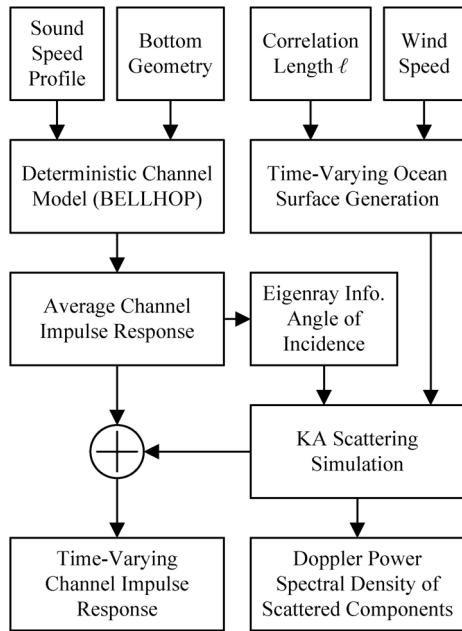


Fig. 1. Diagram of method for generating impulse responses with time-varying magnitude fluctuation based on BELLHOP and KA scattering simulation.

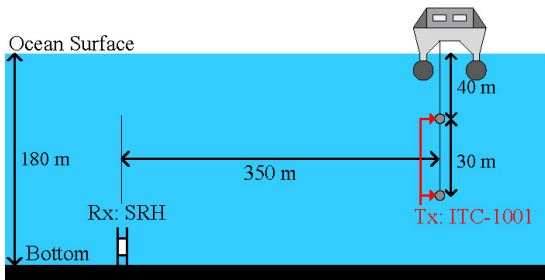


Fig. 2. Diagram of underwater experiment performed on the East Sea of Korea in 2011.

에 적용하면 $t = m\Delta t$ 에서의 산란 계수를 얻을 수 있다. 이 산란 계수를 평균 채널 임펄스 응답에 적용하는 것으로 변동성 채널을 생성할 수 있으며, 산란 성분의 도플러 스펙트럼 밀도를 시뮬레이션 하여 실측 데이터와 비교할 수 있다.

본 연구진은 해수면에 산란된 음파 신호를 WSSUS 모델의 산란 함수로 표현할 때, 도플러 파워 스펙트럼 특성을 파악하기 위하여 2011년 실측 실험을 수행하였으며 실험 개요를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 3은 해상 실험 중 측정된 음속 구조를 나타낸다. 수심 20 m부터 40 m까지 형성된 수온약층을 피

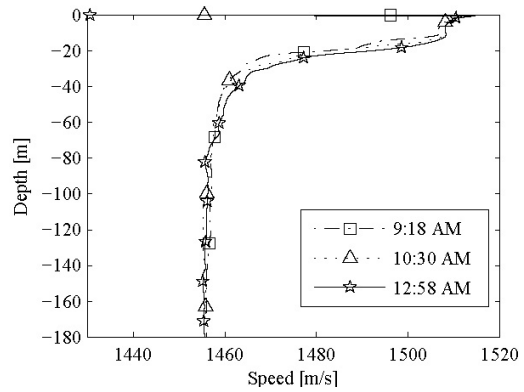


Fig. 3. Sound speed profile measured during experiment in 2011.

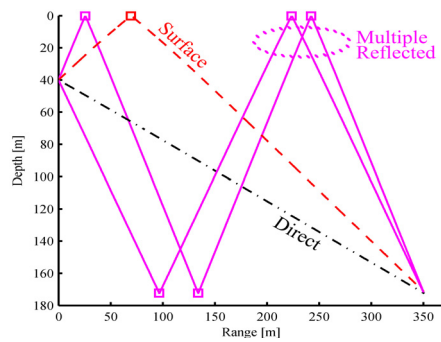


Fig. 4. Ray simulation result of BELLHOP where depth of the transmitter is 40 m.

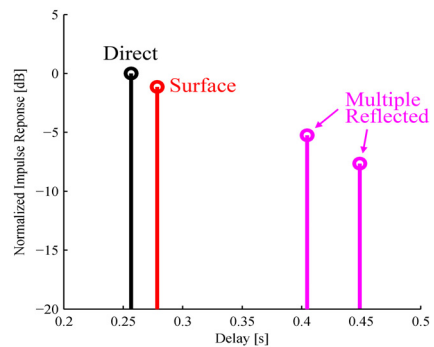


Fig. 5. Path-loss simulation result of BELLHOP where depth of transmitter is 40 m.

하여 송신기 2개를 각각 40 m와 70 m에 위치시켰다. 본 논문에서는 송신기가 40 m인 경우의 데이터를 사용하였다. 실험에 사용된 신호의 중심 주파수는 16 kHz이며 대역폭은 4 kHz인 m-sequence를 사용하였다. Fig. 2의 실험 환경과 Fig. 3의 음속 구조를 벨홉 시뮬레이션에 입력하여 해수면 시뮬레이션을 수행하여

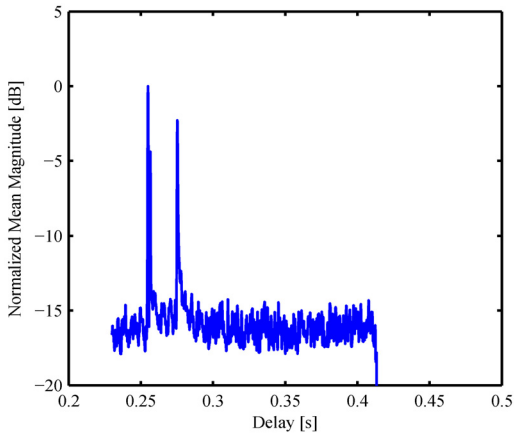


Fig. 6. Mean channel impulse response from experiment where transmitter was located at 40 m below from ocean surface.

Fig. 4와 5의 결과를 얻었으며, 실측 평균 임펄스 응답을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 4-6을 비교 분석하여, 실측 실험 데이터로부터 해수면 반사 성분을 분리하였다. 해수면으로부터의 반사 성분을 시간에 대한 함수 $A(t)$ 라 하면 해수면 반사 성분에 대한 자기 상관 함수(autocorrelation function)는 식(1)로 표현할 수 있으며 광의의 정상성(Wide-sense stationary) 조건을 가정하여 (2)로 표현할 수 있다.

$$R_A(t_1, t_2) = \langle A(t_1)A^*(t_2) \rangle \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R_A(t_1, t_2) &= R_A(t_2 - t_1) \\ &= R_A(\tau) = \langle A(t)A^*(t + \tau) \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

식(2) 자기 상관 함수를 가우시안 상관 함수^[11]로 가정하고, 푸리에 변환을 취하여 식(3)과 같이 파워 스펙트럼으로 나타낼 수 있다.

$$\Psi(k) = l\sqrt{\pi} \exp\left(-\frac{k^2 l^2}{4}\right) \quad (3)$$

식(3)에서 k (rad/s)는 각 주파수(angular frequency)이고, l 은 해수면 산란 성분의 상관 시간을 의미한다. 본 연구진은 실측 데이터로부터 복원된 채널 응답 데이터로부터 해수면 산란 성분의 도플러 파워 스펙트럼을 구하고, 실측 데이터에 대응되는 최적의 해

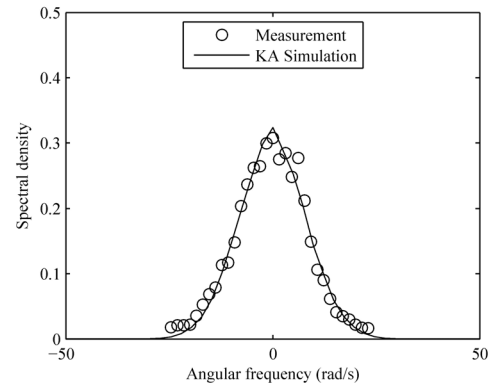


Fig. 7. Comparison of Doppler power spectrums of scattered component from ocean surface: measurement vs. KA simulation.

수면 산란 성분 상관 시간을 시뮬레이션으로부터 추정하였다. 시뮬레이션 결과와 실측 데이터를 Fig. 7에 비교하였다.

실측 실험으로부터 추정된 해수면 산란 성분의 상관 시간은 $l = 5$ 인 가우시안 파워 스펙트럼으로 모델링 되었다. 식(3)에서 상관 시간 l 인 가우시안 파워 스펙트럼은, l 초 후의 상관 계수가 e^{-1} 이 되므로, 위 실험 결과에서 해수면 산란 성분은 5초 이후의 상관도가 약 $e^{-1} \approx 0.368$ 으로 이해할 수 있다.

III. KA 기반의 해수면 산란 성분 생성 및 시변 특성 생성

본 장에서는 해수면 산란 성분 크기의 통계적인 모델링을 위한 시뮬레이션의 배경 이론을 설명한다. 본 논문에서는 1D 해수면을 이용하여 시뮬레이션을 진행한다.

해수면 산란 성분의 크기 변동성을 모델링 하기 위하여 MoM^[11,12]과 KA^[11,13]기반의 거친 표면 산란(rough surface scattering) 이론을 적용한다. MoM이란 선형편 미분방정식의 경계조건문제를 푸는 수치해석 방법이다. 정확도에 있어서 MoM이 KA보다 정확하지만 역행렬 계산으로 인하여 시뮬레이션 사이즈가 커지게 되면 $O(N^3)$ 의 복잡도 만큼 연산량이 증가한다.

풍속에 따른 해수면 특성은 널리 알려진 PM (Pierson-Moskowitz) 해수면 파워 스펙트럼을 사용하였다.^[10,11]

$$W_{PM}(k_x) = \frac{a_0}{\pi k_x^3} e^{-\frac{\beta g^2}{k_x^2 U_{19.5}^4}} \quad (4)$$

위 수식에서 $a_0 = 0.0081$, $\beta = 0.74$ 이고 g 는 중력가속도이고 9.81 m/sec^2 이다. $U_{19.5}$ 는 해발 19.5 m에서의 풍속이다. 해수면을 $z = f(x)$ 라 하고, 가우시안 랜덤 프로세스라 가정하면, 해수면의 자기상관함수는 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_f(x_1, x_2) = \langle f(x_1)f(x_2) \rangle \quad (5)$$

해수면을 길이 $2L$ 에 대한 주기함수로 정의하면 해수면 $z = f(x)$ 를 DFT식으로 표현할 수 있다.

$$f(x) = \frac{1}{2L} \sum_n c_n e^{-\frac{j2\pi nx}{2L}} \quad (6)$$

식(4)와 (5)는 푸리에 변환 관계에 있으므로, 식(6)을 식(5)에 대입하여 식(4)와 비교하면, 식(6)의 각각의 푸리에 계수는 평균이 0이고 분산이 식(4)의 관계 식으로 표현되는 독립 복소 가우시안 랜덤 변수 (independent complex Gaussian random variable)로 표현된다. 식(6)에서 푸리에 계수에 사용될 가우시안 랜덤 변수를 상관 시간 ℓ 을 갖는 복소 가우시안 프로세스 (complex Gaussian process)로 대체하면 시변 해수면을 생성할 수 있다.^[8,11,12]

생성된 해수면에서의 산란계수는 일반 키르히호프의 해 (General Kirchhoff solution)를 통해 다음식으로 계산할 수 있다.^[13]

$$\rho = \frac{\sec\theta_i}{2L} \frac{1 + \cos(\theta_i + \theta_s)}{\cos\theta_i + \cos\theta_s} \int_{-L}^L e^{j\vec{v} \cdot \vec{r}} dx \quad (7)$$

여기서 \vec{v} 와 \vec{r} 은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{v} = \frac{2\pi}{\lambda} [(\sin\theta_i - \sin\theta_s)\hat{x} - (\cos\theta_i + \cos\theta_s)\hat{z}] \quad (8)$$

$$\vec{r} = x\hat{x} + f(x)\hat{z} \quad (9)$$

식(7)에서 $2L$ 은 생성된 유한한 해수면의 길이를 나타내며, λ 는 파장의 길이를 나타낸다. 입사각과 산란각은 θ_i 와 θ_s 로 표현하였으며, \hat{x} 와 \hat{z} 는 각각 x 축과 z 축의 단위벡터이다. KA 방식의 산란 시뮬레이션의 검증에 위해서 보다 정확한 수치방법인 MoM 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

Fig. 8에서, 극단적인 접지각 (grazing angle)을 제외한다면 KA의 결과가 제시된 풍속 및 주파수에서 MoM에 거의 근접한 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 벨훅 모델의 음선 추적 결과로부터 음파의 해수면 산란각과 입사각을 추정하고, 해상 실험에서 측정된 평균 풍속 4 m/s를 KA 시뮬레이션에 입력 후 크기 변동성에 대한 확률 분포 함수를 Fig. 9에 비교하였다.

Fig. 9에서 실측 결과와 허용 가능한 범위 내에서 잘 일치하는 것으로 보인다. 식(7)의 KA 산란 계수는 경계면이 평평한 (flat) 경우에 대해 입사각과 산란각

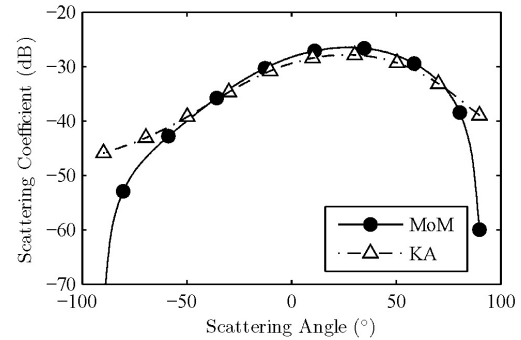


Fig. 8. Scattering coefficients $\langle |\rho|^2 \rangle$ of KA and MoM where the angle of incidence is 30° and $U_{19.5}$ is 4 m/s.

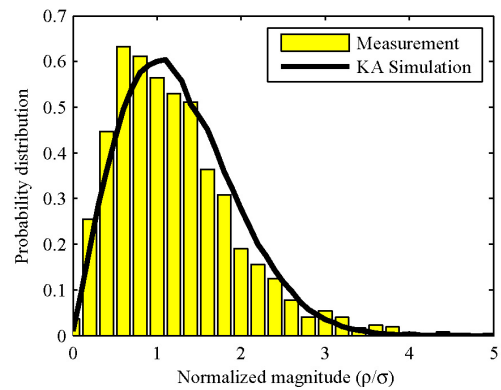


Fig. 9. The comparison of the probability distribution functions for the magnitude fluctuation of the scattered components from the ocean surface.

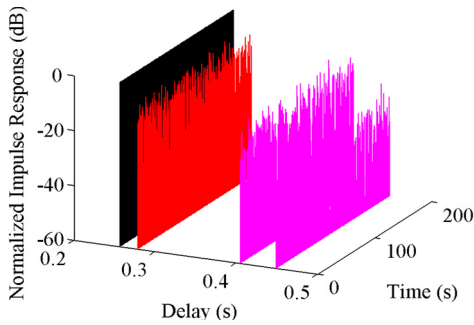


Fig. 10. The generated channel impulse responses based on BELLHOP and KA scattering simulations.

이 값을 같은 파동의 세기로 정규화된 파동의 비율이다.^[13] Fig. 4와 5는 평평한 해수면에 대한 결과이므로, 해수면에 반사된 횡수에 따라서 정규화된 산란 계수를 벨흡 모델에 곱하여 변동성을 생성하고 아래 식과 같이 표현한다.

$$A_i(t) = B_i \prod_{k=1}^n \frac{\rho_k(t)}{\sqrt{E\{\rho_k(t)^2\}}} \quad (10)$$

식(10)에서 B_i 는 벨흡과 같은 결정론적 채널 모델에서 제공하는 임펄스 응답의 i 번째 신호 강도를 의미하며, $\rho_k(t)$ 는 생성된 해수면 산란 계수이다. 해수면에 여러 번 산란되는 경로 성분의 경우, 산란 지점이 멀리 떨어져 있으면 확률적으로 독립이므로 곱으로 표현한다. 산란 계수의 곱으로 경로 성분의 평균 파위가 변하지 않도록 모든 산란 계수는 각 rms 파워로 정규화 하였다. Fig. 10은 Fig. 5의 임펄스 응답에 대해 KA 시뮬레이션을 적용하여 시간에 따라 나열한 것으로, 직접파 성분의 경우 변동성이 모델링되지 않았으므로 일정한 크기를 나타낸다. 반면에 해수면에 한 번 이상 반사된 성분들은 변동성이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

IV. 생성된 임펄스 응답을 이용한 시역전 통신 BER 및 채널 상관도 시뮬레이션

본 장에서는 실측 데이터와 본 연구진의 모델링 기법으로 생성한 채널 모델을 기준으로 시역전 기법

을 적용하고, BER 시뮬레이션을 진행한다. 또한 시역전 통신에서 중요한 파라미터인 채널 상관도(channel correlation)^[1]를 구한다. 송신기와 수신기 사이의 채널 응답을 $h(t, \tau)$ 라고 하면 시각 t 에서 시역전 신호는 식(11)으로 표현할 수 있다.^[1,2]

$$s(t, \tau') = h^*(t, -\tau) * h(t, \tau) \quad (11)$$

위 식에서 $*$ 는 τ 영역에서의 합성곱(convolution)을 의미하며 h^* 는 h 의 복소수 공액(complex conjugation)을 의미한다. 시역전 통신 시 BER 측면에서 성능 향상을 보이는 것^[14]을 시뮬레이션 하기 위하여 시역전 기법으로 다중 경로 성분의 에너지와 직접파가 모두 동일성 있게 더해질 때의 BER과 직접파만을 사용할 때의 BER을 비교하였다. 시뮬레이션에서는 단일 송신기와 수신기가 사용되는 SISO 환경을 가정하였으며, 변조기법으로는 BPSK를 사용하였다. BPSK의 BER은 식(12), (13)와 같이 표현된다.^[15]

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (12)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (13)$$

Fig. 11에서 시역전 통신의 경우 다중 경로 성분 에너지의 이득으로 인하여 근소하게 낮은 BER을 보이는 것을 확인하였다. 이는 단일 송수신기 환경에서

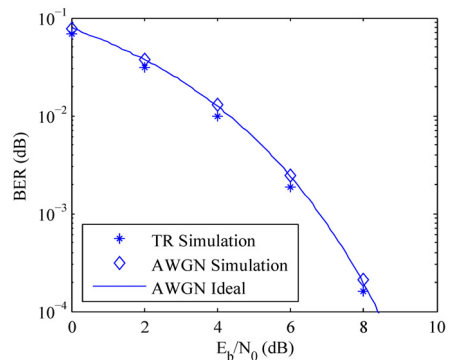


Fig. 11. The BER simulation: time-reversal vs. awgn, BPSK modulation was assumed.

지역전 기법을 이용하여 통신하는 경우 일반적인 통신 방식에 비하여 적은 양의 이득을 얻기 때문으로 사료된다.^[16]

해수면 생성에 사용된 풍속과 상관 시간이 채널의 상관계수에 끼치는 영향을 확인하기 위하여 파라미터를 변경해가며 식(14)에 나타낸 채널의 정규 상관계수를 계산하였다.

$$R_{hh}(t) = \langle h^*(t'+t)h(t') \rangle \quad (14)$$

식(14)에서 t' 은 임의의 시간을 의미하며 앞에서 채널의 광의의 정상성 특성을 가정하였으므로, 채널의 상관도는 시간 차이 t 에만 연관된다. h^* 는 h 의 복소 공액(complex conjugate)을 의미한다. Fig. 12는 상관 시간 ℓ 을 5초로 고정하고 풍속에 따른 채널 응답의 정규 상관계수를 나타낸 것이다. 풍속이 증가할수록 채널의 상관계수가 빠르게 감소한다. 이는 동

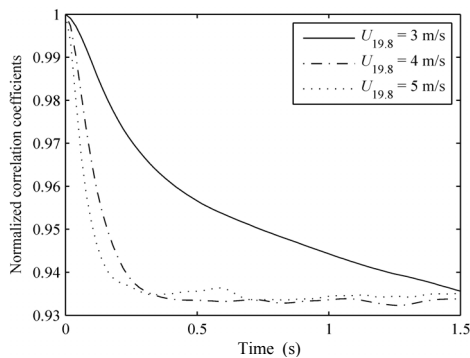


Fig. 12. Normalized correlation coefficients of channel response where $\ell = 5$.

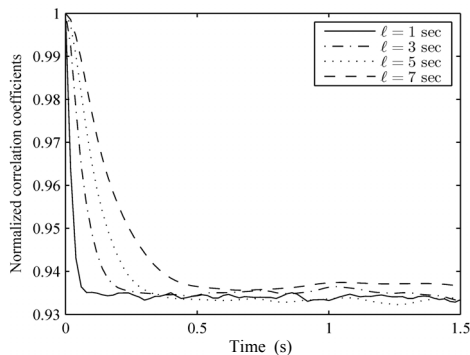


Fig. 13. Normalized correlation coefficients of channel response where windspeed is 4 m/s.

일한 속도로 변화하도록 생성된 해수면에서, 풍속이 클수록 해수면의 파고가 더 크기 때문에 산란계수가 더 빨리 감소하는 것으로 풀이된다. Fig. 13은 풍속을 4 m/s로 고정시키고 상관 시간을 변화시켰을 때 채널의 상관계수를 나타낸 것이다. 동일한 파고를 갖는 해수면에서 상관 시간을 감소시킬수록, 해수면이 빠르게 변화하므로 채널의 상관도가 빠르게 감소하는 것으로 판단된다. Fig. 12와 13 모두 상관계수가 비교적 높은 값을 유지하는 이유는 생성된 채널에서 비교적 큰 파워를 갖는 직접파와 해저면 반사 성분의 변동성이 적용되지 않기 때문으로 해석된다.

V. 결론

지금까지 수중 음파 수동 지역전 통신 시스템 시뮬레이션을 위한 해수면 변동성을 고려한 벨흡 기반의 통계적 채널 생성 방법론을 제시하였다. 해수면 산란 계수 해석은 KA 방식을 사용하였으며, MoM과 비교하였다. Pierson-Moskowitz 파워 스펙트럼을 사용하였으며, 풍속 $U_{19.5}$ 의 값으로 평균 실측 데이터인 4 m/s를 사용하였다. 실측 데이터와 시뮬레이션으로부터 해수면 산란 성분의 크기 시 변동성을 나타내는 도플러 파워 스펙트럼을 구하였으며 이를 비교하였다. 또한 해수면 해석 방법을 기반으로 실측 데이터로 해수면 반사 성분의 도플러 파워 스펙트럼으로부터 상관 길이를 적용하여 시간의 변동성을 고려할 수 있는 방법을 제시함으로써, 지역전 통신 시스템 시뮬레이션에서 특히 필요로 하는 시 변동성 특성, 상관도 그리고 많은 샘플 생성이 가능한 빠른 속도의 채널 시뮬레이션 방법과 같은 요구를 충족시켰다. 또한 풍속과 같은 측정 가능한 물리적 환경 파라미터를 이용한 채널 생성이란 측면에서 많은 장점을 보유하고 있으며, 향후 다양한 시나리오에 대응될 수 있는 수중 채널 모델 제시를 위하여 보다 많은 실측 데이터를 반영하면 양질의 채널 데이터를 제공할 수 있을 것이라 기대한다.

감사의 글

이 논문은 방위사업청 및 국방과학연구소(계약번호 UD100002KD)와 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단(No.2011-0016802)의 지원을 받아 수행되었습니다. 이 논문(저서)은(는) 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. D. Rouseff, D. R. Jackson, W. L. J. Fox, C. D. Jones, J. A. Ritcey, and D. R. Dowling, "Underwater acoustic communication by passive-phase conjugation: theory and experimental results," *IEEE J. Ocean. Eng.* **26**, 821-831 (2001).
2. A. Song, M. Badiy, A. E. Newhall, J. F. Lynch, H. A. DeFerrari, and B. G. Katsnelson, "Passive time reversal acoustic communications through shallow-water internal waves," *IEEE J. Ocean. Eng.* **35**, 756-765 (2010).
3. M. Pätzold, *Mobile Fading Channels* (J. Wiley, Chichester, 2002).
4. P. A. van Walree, T. Jenserud, and M. Smedsrud, "A discrete-time channel simulator driven by measured scattering functions," *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **26**, 1628-1637 (2008).
5. A. Radošević, J. Proakis, and M. Stojanovic, "Statistical characterization and capacity of shallow water acoustic channels," *OCEANS 2009-Europe*, 1-8 (2009).
6. M. Porter et al., *Bellhopcode*, <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/index.html>.
7. B. Tomasi, G. Zappa, K. McCoy, P. Casari, and M. Zorzi, "Experimental study of the space-time properties of acoustic channels for underwater communications," *OCEANS 2010-Sydney*, 1-9 (2010).
8. M. Siderius and M. B. Porter, "Modeling broadband ocean acoustic transmissions with time-varying sea surfaces," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, 137-150 (2008).
9. H. Harada and R. Prasad, *Simulation and Software Radio for Mobile Communications* (Artech House, Norwood, 2002).
10. W. J. Pierson and L. Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii," *J. Geophys. Res.* **69**, 5181-5190 (1964).
11. L. Tsang, J. Kong, and K. Ding, *Scattering of Electromagnetic Waves, Theories and Applications* (John Wiley & Sons, New York, 2000).
12. L. Tsang, *Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical simulations* (John Wiley & Sons, New

- York, 2001).
13. P. Beckmann and A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces* (Artech House, Norwood, 1987).
14. G. F. Edelman, W. S. Hodgkiss, S. Kim, W. A. Kuperman, and H. C. Song and T. Akal, "Underwater acoustic communication using time reversal," *OCEANS 2001 4*, 2231-2235 (2001).
15. J. G. Proakis, *Digital Communications* (McGraw-Hill, Boston, 2001).
16. I.-S. Koh, "Time-reversal Channel Capacity in Rayleigh and Recean Environment," (in Korean) *J. Korea Info. Commun. Soc.* **34**, 243-250 (2009).

저자 약력

▶ 김 준 석 (Joonsuk Kim)



2009년: 연세대학교 전기전자공학부 학사
2009년~현재: 연세대학교 대학원 전기전자공학과 재학

▶ 고 일 석 (Il-Suek Koh)



1992년: 연세대학교 전자공학과 학사
1994년: 연세대학교 전자공학과 석사
2002년: The University of Michigan at Ann Arbor (Ph.D.)
2002년~현재: 인하대학교 전자공학과 부교수

▶ 이 용 식 (Yongshik Lee)



1998년: 연세대학교 전파공학과 공학사
2000년: University of Michigan, Ann Arbor, MI (MSEE)
2004년: University of Michigan, Ann Arbor, MI (Ph.D.)
2004년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 부교수