

수중 환경 소음 모델이 적용된 의사 스펙트럼 시간영역 법 합성환경 수중음향채널 모델링 및 시뮬레이션

김장은^{1,2*} · 김동길¹ · 한동석^{2†}

The Modeling and Simulation for Pseudospectral Time-Domain Method Synthetic Environment Underwater Acoustics Channel applied to Underwater Environment Noise Model

Jang-Eun Kim · Dong-Gil Kim · Dong-Seog Han[†]

ABSTRACT

It is necessary to analyze underwater acoustics channel(UAC) modeling and simulation for underwater weapon system development and acquisition. In order to analyze UAC, there are underwater acoustics propagation numerical analysis models(Ray theory, Parabolic equation, Normal-mode, Wavenumber integration). However, If these models are used for multiple frequency signal analysis, they are inaccurate to calculate result of analysis effectiveness and restricted for signal processing and analysis. In this paper, to overcome this problem, we propose simple/multiple frequency signal analysis model of the Pseudospectral Time-Domain Method synthetic environment UAC applied to underwater environment noise model as like as realistic underwater environment. In order to confirm the validation of the model, we performed the 9 scenarios simulation(4 scenarios of single frequency signal, 4 scenarios of multiple frequency signal, 1 scenario of single/multiple frequency signal like submarine radiated noise) for validation and confirmed the validation of this model through the simulation model.

Key words : Underwater Acoustics Channel, M&S, Pseudospectral Method, Underwater Environment Noise Model

요약

수중환경에서 운영되는 무기체계 획득을 위한 설계/개발을 진행하기 위해 수중음향채널 모델링 및 시뮬레이션을 통한 분석은 필수적이다. 일반적으로 수중음향채널 분석을 위해 사용되는 수중음향 전파 수치해석 모델은 음선이론 법, 정규방식 법, 포물선방정식 법, 파수적분 법이 있으나 다중 주파수 분석일 경우 유효성과 신호처리 및 분석에 제한적이다. 본 논문은 단일 및 다중 주파수 분석 및 신호처리 및 분석이 용이한 기존 의사 스펙트럼 시간영역 법 수중음향 수치해석 모델에 수중환경 소음 모델을 적용하여 실제 수중환경과 유사한 합성환경 수중음향채널을 모델링 하였다. 이렇게 구현된 합성환경 수중음향채널 모델의 유효성을 확인하기 위해 단일 주파수 신호 시나리오 4가지 다중 주파수 신호 시나리오 4가지 및 잡수합 기동에 따른 방사소음 분석 시나리오 시뮬레이션을 통해 의사 스펙트럼 시간영역 법 합성환경 수중음향채널 모델 유효성을 확인하였다.

주요어 : 수중음향채널, 합성환경, 의사 스펙트럼 법, 수중 환경 소음 모델, 모델링 및 시뮬레이션

Received: 16 May 2016, Revised: 27 June 2016,
Accepted: 11 July 2016

- 1) Defense Agency for Technology and Quality
- 2) School of Electronics Engineering, Kyungpook National University

* **First Author** : Jang-Eun Kim
E-mail: jekim@dtaq.re.kr

† **Corresponding Author** : Dong-Seog Han
E-mail: dshan@knu.ac.kr

1. 서론

대한민국 국방부 국방전력발전업무훈련에서 정의한 화력무기체계(유도무기 : 수중유도무기) 및 감시·정찰무기체계(수중감시장비 : 음탐기, 어뢰음향대향체계, 수중감시체계)와 같이 다양한 수중환경에서 운영되는 수중 무기체계 획득과 기존에 개발된 수중 무기체계 임무 공간 확대를 위한 성능개량 등 고객의 요구가 과거와 달리 다

가오는 미래전에 대비하여 효과적이고 빠른 개발 완료로 전환되고 있다. 이렇게 제한적인 시간요소 문제를 해결하고 고객의 요구를 충족시키기 위해 가상 환경 요소가 적용된 수중음향채널 합성환경 모델링 및 시뮬레이션 분석이 필수적이다¹⁾. 일반적으로 수중음향채널 분석을 위해 사용되는 수중음향 전파 수치해석 모델은 음선이론(Ray theory)법 수중음향 모델, 포물선 방정식(Parabolic equation)법 수중음향 모델, 정규방식(Normal-mode)법 수중음향 모델, 파수적분(Wavenumber integration)법 수중음향 모델이 사용된다. 4가지 모델은 단일 주파수 분석에 용이하나 다중 주파수 분석에 제한적이다²⁾. 이러한 이유로 본 논문에서 제안하고자 하는 수중음향채널 모델은 단일/다중 주파수 분석이 용이할 뿐만 아니라 수중음향 전파를 실시간으로 확인할 수 있는 의사 스펙트럼 법 수치해석 모델에 수중환경 소음 모델을 적용하여 실제 수중환경과 유사한 합성환경 수중음향채널 모델을 구현하였다. 이렇게 수중 환경 소음 모델이 적용된 의사 스펙트럼 법 합성환경 수중음향채널을 기반으로 잠수함 기동에 따른 방사소음 분석 시나리오를 포함한 9가지 시뮬레이션 확인을 통해 단일 및 다중 주파수 분석 유효성을 확인한다.

서론에 이어 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 의사 스펙트럼 법 적용 필요성 및 합성환경 수중음향채널 모델 구현 순서에 대하여 설명한다. 3장에서는 의사 스펙트럼 수중음향 전파 및 수중 환경 소음 수학적 모델에 대한 이론적 배경에 대하여 설명하고 4장에서는 구현된 스펙트럼 법 합성환경 수중음향 전파 모델을 9가지 시나리오에 대한 단일/다중 수중음향 신호에 대한 시뮬레이션 결과 보인다. 마지막으로, 5장에서는 결론 및 향후 연구방향을 제시하고자 한다.

2. 연구방향

2.1 수중음향채널 모델 및 구현 방향 연구

수중음향채널은 지상채널과 달리 신호 전달을 위해 전파와 대신 음파를 사용하며, 음파의 경우 주파수 증가에 따른 전달손실의 증가로 낮은 주파수 대역 신호를 사용한다³⁾. 수중음향 채널에서 음파 전달에 대한 해석 및 분석은 파동방정식 수치해석 방법을 통해 알 수 있다. 이러한 수치해석 방법 기반으로 연구된 다양한 수중음향 모델이 있으며, 수중음향 모델은 단일 주파수 신호 전달 모델과 다중 주파수 신호 전달 모델 2가지로 구분할 수 있다. 먼저 단일 주파수 신호 전달 모델은 적은 수치해석

계산량을 통해 고주파 영역 해를 쉽게 구하고 분석 확장성이 유용한 음선이론 법과 수평 방향 환경 변화에 의한 음파 전달 현상에 대해 효과적으로 해를 구할 수 있는 포물선 방정식 법이 있다. 이어서 여러 층의 유체/탄성체가 복합적으로 구성된 수중환경에 대한 해를 구할 수 있는 정규방식 법과, 고체/유체 복합 구성 적층 매질 수중환경에 대한 정확한 해를 구할 수 있는 파수적분 법 4가지가 있다²⁾. 그리고 다중 주파수 신호 전달 모델은 시간영역에서 물체에 의한 근거리 산란 문제 해를 구할 수 있는 델타함수 근사 기반인 유한 차분 시간영역(Finite Difference Time-Domain)법과 스펙트럴 함수 근사 기반 의사 스펙트럼 시간영역(Pseudospectral Time-Domain) 법 2가지가 있다⁴⁾. 일반적으로 수중환경에서 운용되는 무기체계 설계에 앞서 수중음향채널 실시간 음파 전파 추이 및 음향신호를 분석하기 위해 시간영역 분석과 다양한 주파수 신호를 분석할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 수중음향 모델은 다양한 주파수 신호를 처리할 수 있는 모델이어야 하며, 수중음향채널 환경 분석을 위한 공간격자가 유한 차분 시간영역 법에 비해 상대적으로 적고 연산시간이 상대적으로 빠른 의사 스펙트럼 시간영역 법을 사용해야 한다⁴⁾. 그러나 수중음향 수치해석 모델은 수중음향 전파에 대한 물리적 현상을 수치적으로 계산된 결과로 수중 환경에 대한 소음 현상을 고려된 것이 아니다. 이러한 이유로 수중 환경 소음이 존재하는 실제 수중음향채널과 유사한 수중 환경을 구현하기 위해 자연적 요소에 의해 발생하는 수중 환경 소음 중 수중음향채널에 가장 큰 영향을 주는 주변 소음(Ambient Noise)을 고려해야 한다⁵⁾.

2.2 수중 환경 소음 모델이 적용된 의사 스펙트럼 합성환경 시간영역 법 수중음향채널 모델 구현 순서

수중 환경 소음 모델이 적용된 의사 스펙트럼 법 합성환경 수중음향채널 모델링과 시뮬레이션을 위해 다음과 같은 순서로 모델을 구현하였다. 먼저 실제 수중음향 채널 환경에서 정지/이동 물체의 음향 발생원과 다양한 주파수 신호를 다루기 위해 의사 스펙트럼 법 기반으로 수중음향 전파 모델을 구현하였다. 이어서 수중 환경 소음 중 주변 소음 특성을 구현하기 위해 미 워싱턴 대학교 응용 물리 연구소 소음 모델 기반 수중환경 소음을 구현하였으며, 실제 환경에서 사용되는 수중청음기의 열 소음 모델을 적용하여 수중음향채널 모델 환경을 그림 1과 같이 구현하였다.

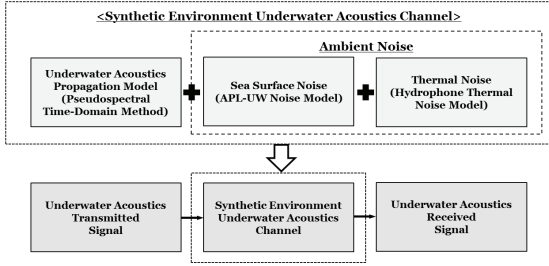


Fig 1. Proposed pseudospectral time-domain method synthetic environment underwater acoustics channel model

3. 의사 스펙트럼 시간영역 법 수중음향채널 합성환경 모델

3.1 의사 스펙트럼 법 모델

의사 스펙트럼 법을 이용한 수중음향 파동 구현을 위해 뉴턴의 운동 법칙 기반으로 파동 방정식을 아래 식으로 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$\rho \frac{\partial v(r,t)}{\partial t} = -\nabla p \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \gamma(r)c^2(r)p(r,t) \\ = -\rho(r)c^2(r)\nabla \cdot v(r,t) + f_s(r,t) \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 p 는 압력, v 는 입자속도, ρ 은 밀도, c 는 음향속도, γ 는 흡수계수, f_s 는 체적 근원 밀도, r 은 거리, t 는 시간, ∇ 는 벡터 미분 연산자를 의미한다. 식 (2)에서 흡수계수는 복소파수를 사용하여 감쇠계수 형태로 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$k(r,w) = w/c'(r,w) + i\alpha(r,w) \quad (3)$$

여기서 k 는 복소파수, c' 는 분산파속도, α 는 감쇠계수, r 은 거리, w 는 각주파수 이다. 여기서 연산량이 높은 2차 편미분 방정식을 식 (1)과 (2)로 의사 스펙트럼 법을 적용하면 1차 편미분 방정식으로 근사하여 연산량을 줄일 수 있다. 단, 1차 편미분 방정식 근사로 인한 두루마리 현상(wraparound effect)을 제거하기 위해 PML(perfectly matched layer)를 적용해야 하며, PML이 적용된 의사 스펙트럼 법 모델 식은 아래와 같다⁶⁻⁷⁾.

$$a_\eta \rho \frac{\partial v_\eta}{\partial t} + w_\eta \rho v_\eta = -\frac{\partial p}{\partial \eta} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_\eta \rho \frac{\partial p^{(\eta)}}{\partial t} + (a_\eta \gamma c^2 + w_\eta \rho v_n) p^{(\eta)} + w_\eta \gamma c^2 \int_{-\infty}^t p^{(\eta)}(r,t') dt' \\ = \rho c^2 \frac{\partial v_\eta}{\partial \eta} + a_\eta f_s^{(\eta)}(r,t) + w_\eta \int_{-\infty}^t f_s^{(\eta)}(r,t') dt' \quad (5) \end{aligned}$$

여기서 η 는 x, y, z 직교좌표계, a_η 는 PML 매질 실 계수 인자, w_η 는 PML 매질 고유 손실, p 는 압력, v 는 입자속도, c 는 음향속도, ρ 는 밀도, γ 는 흡수계수, r 은 거리, t 은 거리, w 는 각주파수이며, 본 식을 이용하여 시간에 따른 압력을 이용해 신호처리 및 분석을 수행할 수 있다⁵⁾.

3.2 수중 환경 소음 모델

수중음향채널의 합성환경 구현을 위해 적용된 소음 모델은 미 워싱턴 대학교 응용 물리 연구소 소음 모델과 수중청음기 열소음 모델이다. 미 워싱턴 대학교 응용 물리 연구소 소음 모델은 다음 식으로 표현할 수 있다^{5,8)}.

$$NL_{\text{Surface}} = 41.2 + 22.4 \log(v) - 15.9 [\log(f) - 3] \quad (6)$$

여기서 v 는 풍속, f 는 주파수를 의미하며, 대기온도와 해수온도 차이는 $\Delta T < 1^\circ\text{C}$, 풍속은 $v \geq 1\text{m/s}$ 를 가정한다. 이어서 수중청음기 열소음 모델은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$NL_{\text{Thermal}} = -75 + 20 \log f - 10 \log \eta \quad (7)$$

여기서 f 는 주파수, η 는 수중청음기 효율($\eta < 1$)를 의미하여 최종 수중 환경 소음 모델 식은 다음과 같다⁵⁾.

$$NL = NL_{\text{Surface}} + NL_{\text{Thermal}} \quad (8)$$

4. 의사 스펙트럼 시간영역 법 수중음향채널 합성환경 모델 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 시나리오

구현된 의사 스펙트럼 시간영역 법 합성환경 수중음향채널 합성환경 모델 유효성 확인을 위한 시뮬레이션 시나리오는 아래 표1과 같이 단일 주파수 신호 4가지, 다중 주파수 신호 4가지, 단일/다중 주파수 신호를 포함한 잠수함 방사소음 분석 1가지 등 총 9가지 형태로 구분하여

Table 1. Underwater acoustics channel(uac) model simulation scenarios

Order	Confirmation Subject	Simulation Scenario	Transmitter Environment	UAC Noise	UAC Multipath	Confirmation Method
1	Single Frequency Signal (No Bandwidth Signal)	Underwater Acoustics Signal Transmission and Reception Environment ※ Tx frequency : 500Hz	Fixed	×	×	Frequency Spectrum Analysis
2		Underwater Acoustics Signal Transmission and Reception Environment ※ Tx frequency : 500Hz ※ APL-UW Noise : beaufort scale 1,5,9	Fixed	○	×	Time-Domain Analysis + Frequency Spectrum Analysis
3		Underwater Acoustics Signal Transmission and Reception Environment ※ Tx frequency : 500Hz / Tx Velocity : 20KN	Movable	×	×	Time-Domain Analysis + Frequency Spectrum Analysis
4		Underwater Acoustics Signal Transmission and Reception Environment ※ Tx frequency : 500Hz	Fixed	×	○	Time-Domain Analysis
5	Multiple Frequency Signal (Bandwidth Signal)	Underwater Acoustics Signal Transmission and Reception Environment ※ Tx frequency : 450-550Hz	Fixed	×	×	Frequency Spectrum Analysis
6		Underwater Acoustics Signal Transmission and Reception Environment ※ Tx frequency : 450-550Hz ※ APL-UW Noise : beaufort scale 1,5,9	Fixed	○	×	Time-Domain Analysis + Frequency Spectrum Analysis
7		Underwater Acoustics Signal Transmission and Reception Environment ※ Tx frequency : 450-550Hz / Tx Velocity : 20KN	Movable	×	×	Time-Domain Analysis + Frequency Spectrum Analysis
8		Underwater Acoustics Signal Transmission and Reception Environment ※ Transmitted signal Type : Gaussian Pulse	Fixed	×	○	Time-Domain Analysis
9	Single and Multiple mixed Frequency Signal (Submarine Radiated Noise)	Moving Submarine Environment (Anti-Submarine Warfare) ※ Submarine Radiated Noise Generation ※ Submarine Velocity : 20KN ※ APL-UW Noise + Thermal Noise (beaufort scale 1,5,9)	Movable	○	○	Time-Domain Analysis + Frequency Spectrum Analysis + DEMON Analysis

진행 하였다.

시나리오 1~4는 단일 주파수 수중음향 신호에 대한 수중환경 소음, 이동송신기 및 다중경로 의사 스펙트럼 시간영역 법 합성환경 수중음향채널 모델 유효성 확인을 위한 것이며, 수중음향 환경 정보는 아래 그림 2~3와 같다.

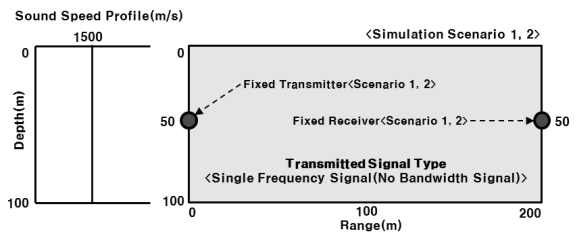


Fig 2. UAC channel environment simulation scenario 1,2

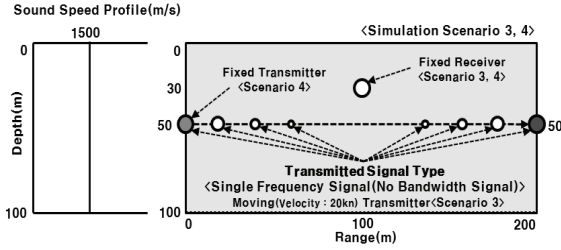


Fig 3. UAC environment simulation scenario 3,4

먼저 시나리오 1에서 고정 송신기 단일 주파수 수중음향 신호에 유효성 확인을 위해 다음 식으로 모델된 음향 신호를 송신한다.

$$T(t) = \sum_{i=1}^I A_i \cos(2\pi f_i t + \phi) \quad (9)$$

여기서 A_i 는 음압준위, f_i 는 주파수, t 는 시간 그리고 ϕ_i 는 위상변위를 의미하며, $A_{500} = 100 \text{ dB}$, $f_{500} = 500 \text{ Hz}$, $t = 0 \sim 10 \text{ s}$, $\phi = 2\pi \times U$, U 는 균등 확률변수이다. 이어서 수신기에 수신된 음향 신호 시간영역 분석은 다음 식과 같다⁹⁾.

$$R(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_m(t) T_m[t - \tau_m] + n(t) \quad (10)$$

여기서 α_m 는 n 번째 경로 감쇠 인자, T_m 는 m 번째 경로 송신 음향 신호, τ_m 는 m 번째 경로 지연시간, n 은 소음이며, $M=1$, $n=0$, α_m 와 τ_m 은 수중음향채널 환경에 따라 계산된 의사 스펙트럼 결과로 설정된다. 이어서 수신 신호에 대한 주파수 영역 분석을 위해 고속 푸리에 변환을 사용하며 다음 식과 같다⁹⁾.

$$F(e^{jw_n T_s}) = \sum_{n=0}^{L-1} R(n T_s) e^{-jw_k T_s n} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (11)$$

여기서 R 은 수신 음향 신호, T_s 는 표본화률, n 은 수신 데이터 샘플수, 분석에 필요한 주파수는 $w_k = 2\pi k / N T_s$ 으로 결정되며, R 은 0~15초 간 수신된 n 샘플 음향 신호, $N = 8192$, $T_s = 1/N$ 로 설정하였다.

시나리오 2는 시나리오 1과 동일한 환경에서 미 워싱턴 대학교 응용 물리 연구소 소음 모델 적용 유효성 확인을 위해 보퍼트 계급(beaufort scale) 1(풍속 : 0.1 m/s),

5(풍속 : 9.15 m/s), 9(풍속 : 22.6 m/s)에 대한 소음이 적용된 식(10)에 대한 시간영역 신호와 수신 신호대 소음에 대한 주파수 영역 신호를 식(11)로 확인한다.

시나리오 3은 이동 송신기 단일 주파수 수중음향 신호에 대한 유효성 확인을 위해 주파수 500 Hz 신호를 식(9)로 모델된 음향신호를 송신한다. 이어서 수신기에 수신된 음향 신호 시간 영역 신호와 주파수 영역 신호 분석 및 주파수 확산 효과를 식(10)과 식(11)을 통해 확인하고 도플러 효과에 의한 주파수 변동 분석은 다음 식과 같다⁵⁾.

$$\delta f = \frac{v_m}{c} \frac{r}{\sqrt{r^2 + h_{\min}^2}} f_0 \quad (12)$$

여기서 δf 는 주파수 변동, v_m 는 이동 송신기 속도, c 는 음향 속도, r 은 이동 송신기 이동거리, h_{\min} 는 송신기와 수신기의 최소 거리, f_0 는 송신 주파수를 의미하며, 매개 변수에 대한 세부 조건은 시나리오 1과 동일하다.

시나리오 4은 고정 송신기 단일 주파수 수중음향 신호에 대한 다중경로 유효성 확인을 위해 주파수 500 Hz 신호 식(9)로 모델 된 음향신호를 7주기를 송신한다. 이어서 수중음향채널의 해표면과 해저면의 물리적 요소에 의해 다중경로로 수신기에 수신된 시간 영역 신호와 주파수 영역 신호 분석 및 주파수 확산 효과를 식(10)과 식(11)을 통해 확인한다. 식(10)에 대한 변수는 M 과, α_m , τ_m 은 계산된 의사 스펙트럼 결과로 설정되고, n 은 0을 가정한다.

시나리오 5~8는 다중 주파수 수중음향 신호에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 수중음향채널 모델 유효성 확인을 위한 것이며, 수중음향 환경 정보는 아래 그림 4~5와 같다.

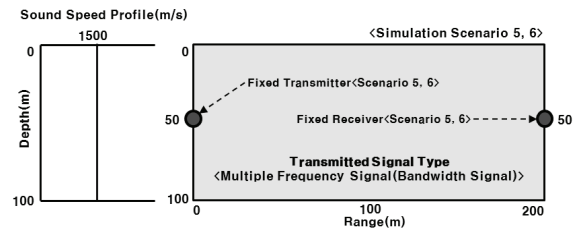


Fig 4. UAC environment simulation scenario 5,6

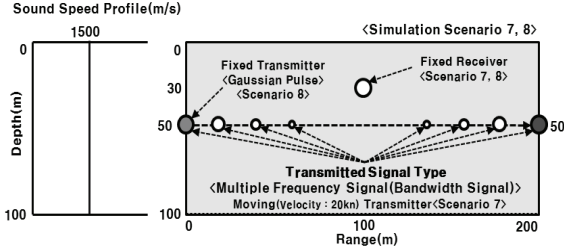


Fig 5. UAC environment simulation scenario 7,8

먼저 시나리오 5에서 고정 송신기 다중 주파수 수중음향 신호에 대한 수중환경 소음, 이동송신기 및 다중경로 유효성 확인을 위해 식 (9)로 모델 된 송신 음향신호에 대한 주파수는 $f_{450 \sim 550} = 450 \sim 550Hz$ 이며, 나머지 변수 및 분석방법은 시나리오 1과 동일하다.

시나리오 6는 시나리오 5과 동일한 환경에서 미 워싱턴 대학교 응용 물리 연구소 소음 모델 적용 유효성 확인을 위해 보퍼트 계급(beaufort scale) 1(풍속 : $0.1m/s$), 5(풍속 : $9.15m/s$), 9(풍속 : $22.6m/s$)에 대한 소음이 적용된 식(10)에 대한 시간영역 신호와 수신 신호 대 소음 대한 주파수 영역 신호를 식(11)로 확인한다.

시나리오 7은 이동 송신기 다중 주파수 수중음향 신호에 대한 유효성 확인을 위해 주파수 $450 \sim 550Hz$ 를 가지는 식 (9)로 모델 된 음향신호를 송신한다. 이어서 수신기에 수신된 음향 신호 시간 영역 신호와 주파수 영역 신호 분석 및 주파수 확산 효과를 식 (10)과 식(11)을 통해 확인하고 도플러 효과에 의한 주파수 변동 분석 식(12)로 확인한다.

시나리오 8은 고정 송신기 다중 주파수 수중음향 신호에 대한 다중경로 유효성 확인을 위해 다음 식과 같이 가우시안 변조 사인 펄스로 모델 된 음향신호를 송신한다^[10].

$$T(t) = Ae^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \phi) \quad (13)$$

여기서 A 는 음압준위, α 는 대역폭 인자, τ 도착시간, f_c 는 중심주파수 t 는 시간 그리고 ϕ 는 위상변위를 의미하며, $A=100dB$, $\alpha=100,000$, $f_c=500Hz$, $\phi=0^\circ$ 로 설정하였다. 이어서 다중경로로 수신기에 수신된 음향 신호 시간 영역 신호와 주파수 영역 신호 분석 및 주파수 확산 효과를 식 (10)과 식(11)을 통해 확인한다. 식 (10)에 대한 변수는 M 과, α_m , τ_m 은 계산된 의사 스펙트럼 결과로 설정되고, n 은 0을 가정한다.

마지막 시나리오는 잠수함 기동에 따른 다양한 주파수 수중음향 신호가 혼재된 방사소음 분석 결과와 J.S. Kim et al.(2012)의 데몬(DEMON) 분석 결과 비교를 통해 유효성 확인을 확인하며, 수중음향 환경 정보는 그림 6와 같다.

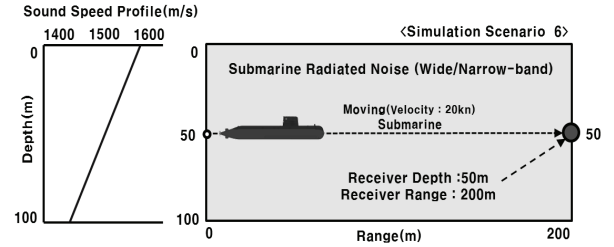


Fig 6. UAC environment simulation scenario 9

다양한 주파수 수중음향 신호 주파수에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 수중음향채널 모델에 수중 환경 소음 모델이 적용된 합성환경에 대한 성능 분석을 위해 그림 6의 수중음향채널 환경에서 잠수함 기동에 의해 발생하는 다양한 방사소음은 다음 식으로 나타낼 수 있다^[11].

$$s(t) = s_R(t) + s_T(t) + s_C(t) \quad (14)$$

여기서 $s_R(t)$ 는 잠수함 기동에 의해 발생하는 광대역 방사 소음 $s_T(t)$ 는 잠수함 기계류에서 발생하는 토널 신호, $s_C(t)$ 는 잠수함 프로펠러의 회전에 의해 발생하는 캐비테이션 소음이며, $s_R(t)$ 에 대하여 주파수 영역으로 표현된 다음 식으로 나타낼 수 있다^[5,11].

$$S_R(f) = \begin{cases} N_{SL} + \alpha & 0 \leq f \leq 100 \\ N_{1K} + \alpha - 20 \log(f/1,000) & 100 \leq f \end{cases} \quad (15)$$

여기서 S_{SL} 는 $100Hz$ 까지 발생하는 잠수함 방사소음, S_{1K} 는 $1kHz$ 방사소음, α 는 잠수함 속도 증가에 따른 노이즈 증가 값이며, 모의 대상 잠수함을 전기 잠수함으로 고려하여 $S_{SL}=100dB$, $S_{1K}=80dB$, $\alpha=1.5dB/kn$ 로 설정하였다. 이어서 $s_T(t)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$s_T(t) = \sum_{j=1}^J A_i \cos(2\pi f_j t + \phi_j) \quad (16)$$

여기서 J 는 토널 개수, A_i 토널 신호 음압준위, f_i 는 토

널 신호 주파수, ϕ_i 는 위상변위이며, $J=3$, $A=100dB$, $f=2,116, 2,211, 2,270 Hz$, $t=0 \sim 2 s$, $\phi=2\pi \times U$ 이다. 이어서 $s_C(t)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$s_C(t) = \left(1 + \sum_{i=1}^I m_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \right) v(t) \quad (17)$$

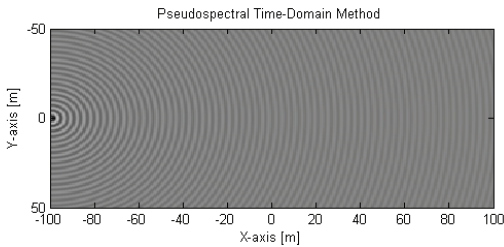
여기서 I 는 하모닉 차수, m_i 는 변조지수, ϕ_i 는 위상변위, $v(t)$ 는 광대역 캐비테이션 소음이며, $I=2$, $m=0.5$, $f_0=21.125Hz$, $t=0 \sim 10 s$, $\phi=2\pi \times U$ 이다. 앞서 정의된 조건에 의해 발생된 잠수함 방사소음을 잠수함 식별 소나분석 기법인 TPSW(Two-Pass Split-Window) 알고리즘 기반 데몬 처리 기법 분석 결과를 통해 확인한다^[12]. 그리고 수중환경 소음 발생 조건은 보퍼트 계급 1(풍속: $0.1m/s$), 5(풍속: $9.15m/s$), 9(풍속: $22.6m/s$)과 수중 청음기 효율은 0.5로 가정한다.

4.2 시뮬레이션 실행 및 결과 분석

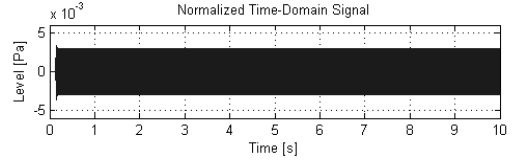
4.2.1 단일 주파수 신호 분석

단일 수중음향 주파수 신호에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 합성환경 수중음향채널 모델 유효성 확인을 위해 그림 2의 수중음향채널 환경에서 송신기로부터 송신된 단일 주파수 신호가 수중음향채널을 통과한 후 수신기에 수신된 신호에 대한 결과는 그림 7~10과 같다.

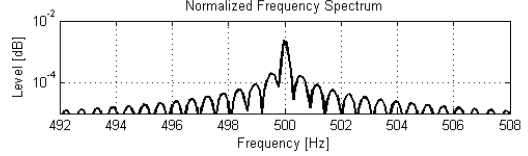
시나리오 1 시뮬레이션 결과 $500Hz$ 로 송신된 단일 주파수 신호에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 전파 형상은 단일 주파수 신호 파장 형태로 진행되고 있음을 그림 7(a)로 확인할 수 있다. 이어서 수신기에 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과는 그림 7(b)이며, 주파수 영역 분석 결과 송신 신호의 송신 주파수와 동일한 $500Hz$ 신호가 수신된 것을 그림 7(c)를 통해 확인했다.



(a) PSTD propagation configuration



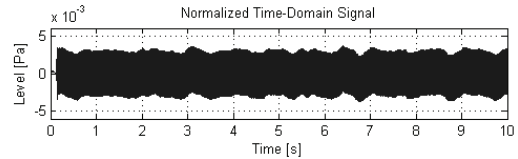
(b) Normalized Time-Domain Signal



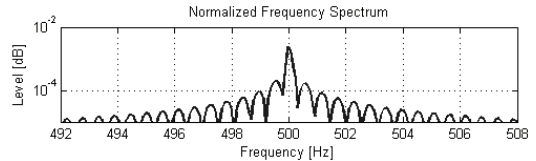
(c) Normalized Frequency-Domain Signal

Fig 7. Scenario1 simulation results

시나리오 2 시뮬레이션 결과 보퍼트 계급 1(풍속: $0.1 m/s$) 수중 환경에서 $500Hz$ 로 송신된 단일 주파수 신호가 수중음향채널 통과 후 수중 환경 소음 영향으로 수신 신호 변동을 그림 8(a)의 시간 영역 결과로 확인할 수 있으며, 주파수 영역 분석결과 송신신호 대비 수중 환경 소음이 낮아 $500Hz$ 단일 주파수 신호 준위가 높은 것을 그림 8(b)를 통해 확인했다.



(a) Normalized Time-Domain Signal



(b) Normalized Frequency-Domain Signal

Fig 8. Scenario2 simulation results(beaufort scale : 1)

보퍼트 계급 5(풍속: $9.15m/s$) 수중 환경에서 $500Hz$ 로 송신된 단일 주파수 신호가 수중음향채널 통과 후 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과 송신신호 대비 수중 환경 소음 증가로 송신 신호가 소음에 묻혀 수중 환경 소음 신호 형상이 보이는 것을 그림 9(a)를 통해 확인했다. 이어서 주파수 영역 분석 결과 송신 신호 대비 수중 환경 소음 증가를 그림 9(b)를 통해 확인했다.

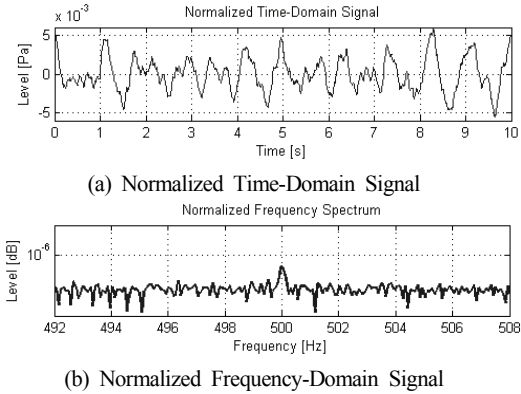


Fig 9. Scenario2 simulation results(beaufort scale : 5)

보퍼트 계급 9(풍속 : $22.6m/s$) 수중 환경에서 $500Hz$ 로 송신된 단일 주파수 신호가 수중음향채널 통과 후 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과 송신신호 대비 수중 환경 소음 증가로 송신 신호가 소음에 묻혀 수중 환경 소음 신호 형상을 보이는 것을 그림 10(a)를 통해 확인했다. 이어서 주파수 영역 분석 결과 수중 환경 소음 증가로 인해 송신 신호가 소음에 가려진 것을 그림 10(b)를 통해 확인했다.

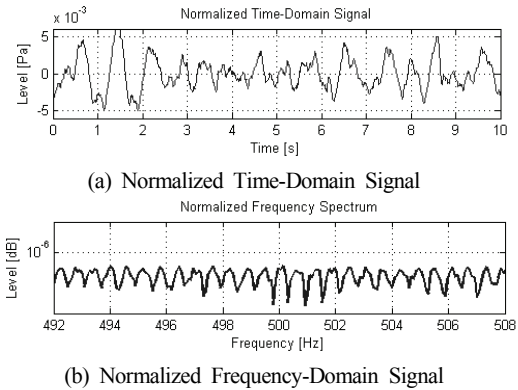


Fig 10. Scenario2 simulation results(beaufort scale : 9)

단일 수중음향 신호 주파수에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 수중음향채널 모델에서 이동 물체에 대한 도플러 효과와 다중경로 효과 유효성 확인을 위해 그림 3의 수중음향채널 환경에서 송신기로부터 송신된 단일 주파수 신호가 수중음향채널을 통과한 후 수신기에 수신된 신호에 대한 결과는 그림 11,12와 같다.

시나리오 3 시뮬레이션 결과 이동 송신기로부터 $500Hz$ 로 송신된 단일 주파수 신호에 대한 의사 스펙트럼 시

간영역 법 전파 형상은 그림 11(a)와 같다. 이어서 수신기에 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과는 이동 송신기 수신기에 가까워짐에 따라 신호 크기가 증가하고, 멀어짐에 따라 감소하는 것을 그림 11(b)로 확인 했으며, 주파수 영역 분석결과 송신기 이동속도에 따른 도플러 효과가 중심 주파수로 부터 $\pm 3.4125Hz$ 주파수 확산 발생을 그림 11(c)를 통해 확인했다^[13-14].

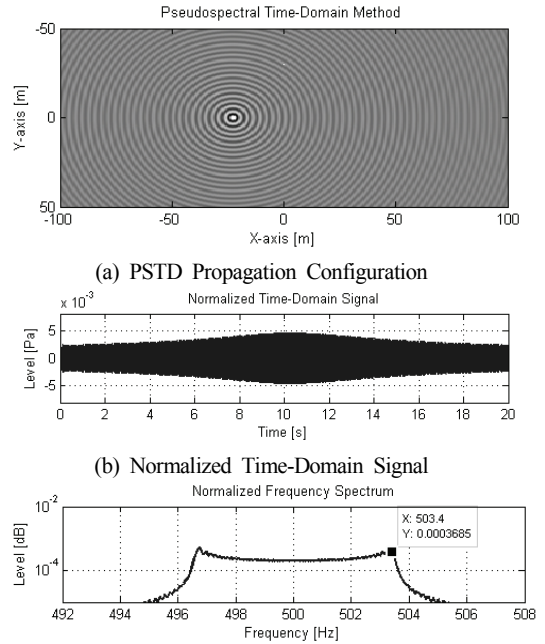
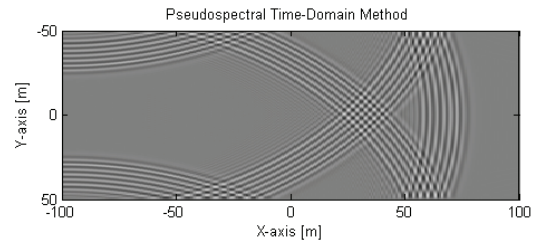


Fig 11. Scenario3 simulation results

시나리오 4 시뮬레이션 결과 수중음향채널 다중경로 환경에서 $500Hz$ 7주기 단일 주파수 신호에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 전파 형상은 그림 12(a)이며, 송신 신호는 그림 12(b)와 같다. 이어서 수신기에 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과 해표면과 해저면의 반사에 의해 수신되는 잔향 효과를 그림 12(c)로 확인 했으며, 주파수 영역 분석결과는 그림 12(d)와 같다.



(a) PSTD Propagation Configuration

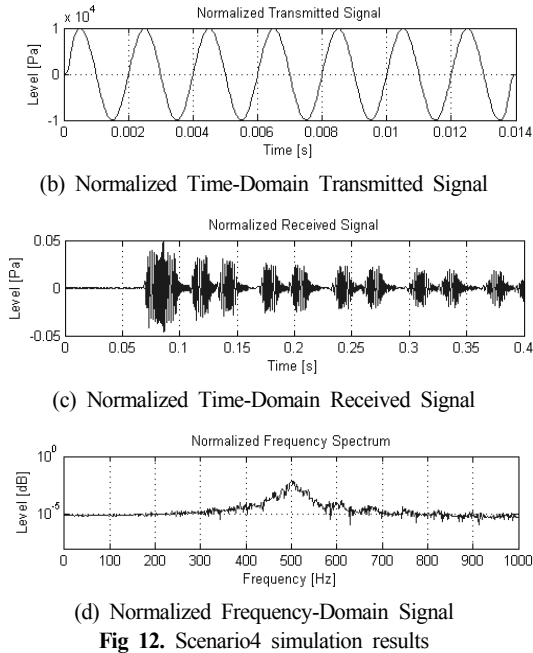
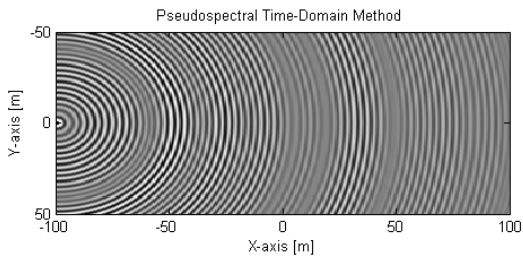


Fig 12. Scenario4 simulation results

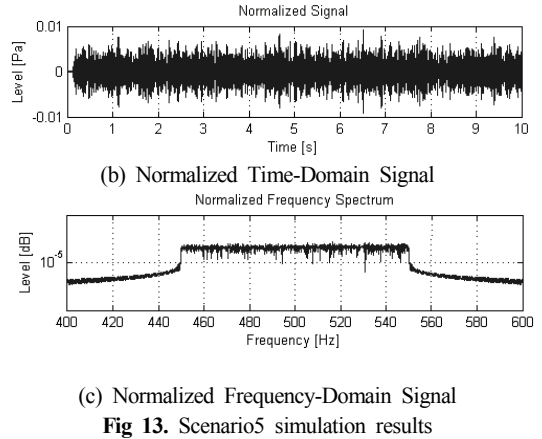
4.2.2 다중 주파수 신호 분석

다중 수중음향 주파수 신호에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 수중음향채널 모델 유효성 확인을 위해 그림 4의 수중음향채널 환경에서 송신기로부터 송신된 다중 주파수 신호가 수중음향채널을 통과한 후 수신기에 수신된 신호에 대한 결과는 아래 그림 13~16과 같다.

시나리오 5 시뮬레이션 결과 450~550 Hz로 송신된 다중 주파수 신호에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 전파 형상은 다중 주파수 신호 파장이 혼합되어 진행되고 있음을 그림 13(a)로 확인했다. 이어서 수신기에 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과는 그림 13(b)이며, 주파수 영역 분석결과 송신 신호의 송신 주파수와 동일한 450~550 Hz 신호가 수신된 것을 그림 13(c)를 통해 확인했다.

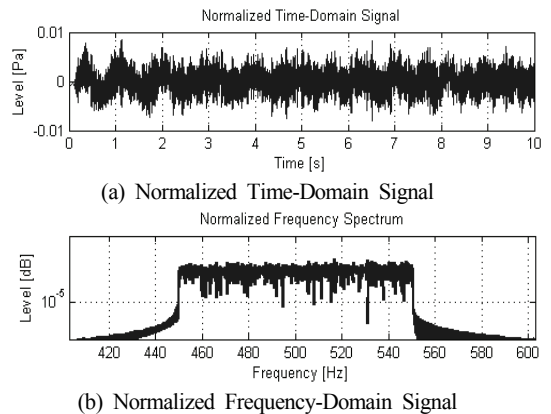


(a) PSTD Propagation Configuration



(c) Normalized Frequency-Domain Signal
Fig 13. Scenario5 simulation results

시나리오 6 시뮬레이션 결과 보퍼트 계급 1(풍속 : 0.1 m/s) 수중 환경에서 450~550 Hz로 송신된 다중 주파수 신호가 수중음향채널 통과 후 수중 환경 소음과 수신 신호와 함께 수신된 시간 영역 결과 수중 환경 소음의 영향으로 그림 13(b) 대비 신호 변동이 발생함을 그림 14(a)를 통해 확인 할 수 있으며, 주파수 영역 분석결과 송신신호 대비 수중 환경 소음이 낮아 450~550 Hz 주파수 신호 준위가 높은 것을 그림 14(b)를 통해 확인했다.



(b) Normalized Frequency-Domain Signal
Fig 14. Scenario6 simulation results(beaufort scale : 1)

보퍼트 계급 5(풍속 : 9.15 m/s) 수중 환경에서 450~550 Hz로 송신된 다중 주파수 신호가 수중음향채널 통과 후 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과 송신신호 대비 수중 환경 소음 증가로 송신 신호가 소음에 묻혀 수중 환경 소음 신호 형상을 보이는 것을 그림 15(a)를 통해 확인했다. 이어서 주파수 영역 분석 결과 송신 신호 대비 수중 환경 소음 증가를 그림 15(b)를 통해 확인했다.

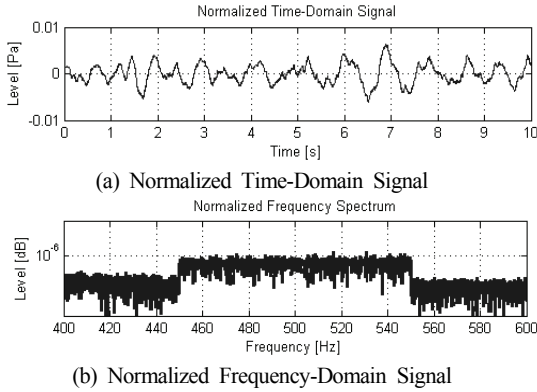


Fig 15. Scenario6 simulation results(beaufort scale : 5)

보퍼트 계급 9(풍속 : 22.6m/s) 수중 환경에서 450~550Hz로 송신된 다중 주파수 신호가 수중음향채널 통과 후 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과 송신신호 대비 수중 환경 소음 증가로 송신 신호가 소음에 묻혀 수중 환경 소음 신호 형상을 보이는 것을 그림 16(a)를 통해 확인했다. 이어서 주파수 영역 분석 결과 수중 환경 소음 증가로 인해 송신 신호가 소음에 가려진 것을 그림 16(b)를 통해 확인했다.

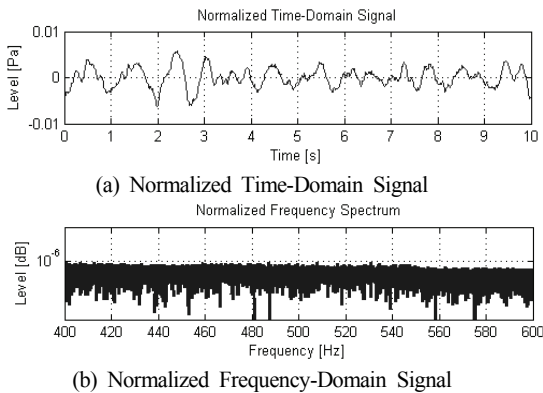


Fig 16. Scenario6 simulation results(beaufort scale : 9)

다중 수중음향 신호 주파수에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 수중음향채널 모델 이동 물체에 대한 도플러 효과와 다중경로 효과 유효성 확인을 위해 그림 5의 수중 음향채널 환경에서 송신기로부터 송신된 다중 주파수 신호가 수중음향채널을 통과한 후 수신기에 수신된 신호에 대한 결과는 아래 그림 17,18와 같다^[13-14].

시나리오 7 시뮬레이션 결과 이동 송신기로부터 450~550Hz로 송신된 다중 주파수 신호에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 전파 형상은 그림 17(a)와 같다. 이

어서 수신기에 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과는 이동 송신기 수신기에 가까워짐에 따라 신호 크기가 증가하고, 멀어짐에 따라 감소하는 것을 그림 17(b)로 확인했으며, 주파수 영역 분석결과 송신기 이동속도에 따른 도플러 효과가 중심 주파수로 부터 ±3.4125 Hz 주파수 확산 발생을 그림 17(c)를 통해 확인했다

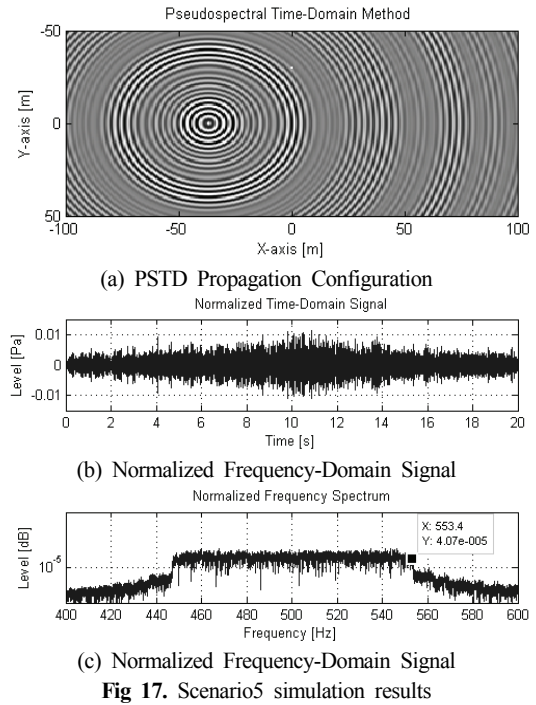
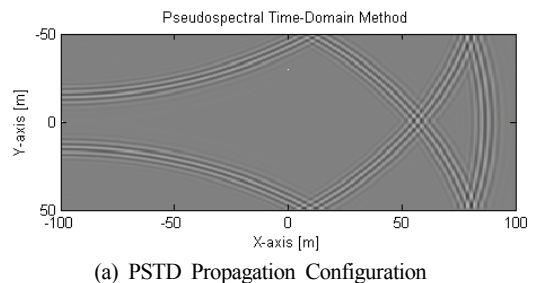


Fig 17. Scenario5 simulation results

시나리오 8 시뮬레이션 결과 수중음향채널 다중경로 환경에서 7주기 가우시안 펄스 신호에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 전파 형상은 그림 18(a)이며, 송신신호는 그림 18(b)와 같다. 이어서 수신기에 수신된 신호에 대한 시간 영역 결과 해표면과 해저면의 반사에 의해 수신되는 잔향 효과를 그림 18(c)로 확인 했으며, 주파수 영역 분석결과는 그림 18(d)와 같다.



(a) PSTD Propagation Configuration

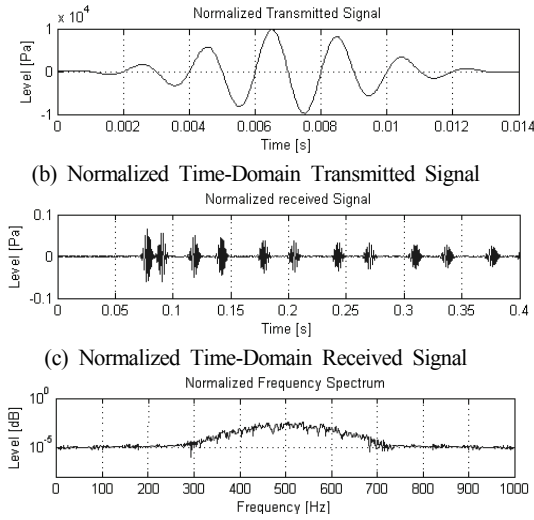
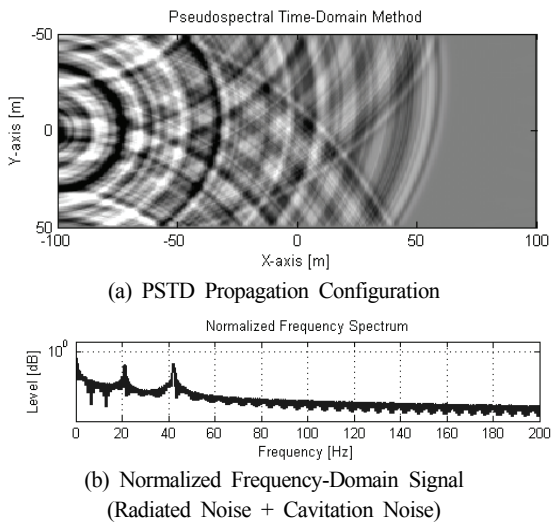


Fig 18. Scenario8 simulation results

4.2.3 단일/다중 혼합 주파수 신호 분석

잠수함 기동에 따른 방사소음 분석을 통해 단일/다중 혼합 수중음향 주파수 신호에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 합성환경 수중음향채널 모델에 대한 유효성 확인을 위해 그림 3의 수중음향채널 환경에서 잠수함 기동에 따라 단일/다중 혼합 신호로 구성된 방사소음이 다중 경로를 통해 수신기에 수신된 신호에 대한 결과는 아래 그림과 같다.



(a) PSTD Propagation Configuration
(b) Normalized Frequency-Domain Signal (Radiated Noise + Cavitation Noise)

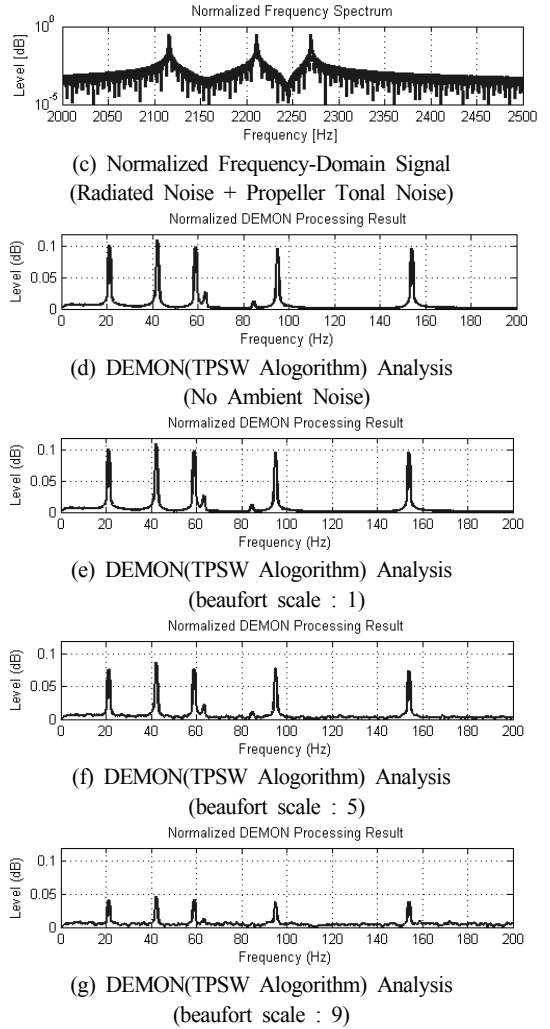


Fig 19. Scenario9 simulation results

시나리오 9 시뮬레이션 결과 음의음속 단면을 가지는 다중경로 환경에서 잠수함 방사소음에 대한 의사 스펙트럼 시간영역 법 전파 형상은 다양한 주파수 신호 파장이 혼합된 음향신호가 음의음속 단면 효과로 인해 깊이별 속도차를 가지고 음향이 진행되고 있음을 그림 19(a)을 통해 확인했다. 그림 19 (b)는 잠수함 방사소음과 캐비테이션 소음에 대한 주파수 분석 결과 방사소음은 식 (15)에 따라 저주파에서 고주파로 갈수록 소음 신호 준위가 낮아지는 것을 확인했으며, f_0 , $2f_0$ 에 대한 캐비테이션 소음을 확인했다. 그림 19 (c)는 잠수함 방사소음과 프로펠러 소음에 대한 주파수 영역 분석 결과 방사소음은 식 (15)에 따라 고주파 영역으로 소음 신호 준위가 낮으며,

$f = 2,116, 2,211, 2,270 \text{ Hz}$ 에 대한 프로펠러 소음을 확인했다. 그림 19 (d)~(g)는 수중 환경 소음이 없는 환경과 풍속에 따라 증가된 수중 환경 소음이 존재하는 수중 음향채널에서 잠수함 방사소음 기반 잠수함 식별 소나분석 기법인 TPSW(Two-Pass Split-Window) 알고리즘 기반 데몬 처리 분석 결과이다. 먼저 수중 환경 소음이 없는 수중음향채널에서 데몬 처리 결과 $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0$ 의 하모닉 주파수와 $f_3 - f_2, f_2 - f_1, f_3 - f_1$ 의 신호가 정상적으로 검출되는 것을 그림 19 (d)를 통해 J.S. Kim et al.(2012)와 동일한 결과를 확인했다. 이어서 수중 환경 소음이 증가하는 수중음향채널에서 데몬 처리 결과 보퍼트 계급 증가에 따라 신호 대 소음의 증가로 검출되는 주파수 신호 준위가 낮아졌지만 그림 19 (d) 결과와 같이 동일한 주파수 신호가 검출되는 것을 그림 19 (e)~(g)를 통해 확인했다.

5. 결론 및 향후 연구방향

수중유도무기, 음탐기, 어뢰음향대향체계 및 수중감시체계와 같은 여러 가지 다양한 수중환경에서 운영되는 수중 무기체계 획득과 기존에 개발된 수중 무기체계 임무 공간 확대를 위한 성능개량 등 과거와 달리 빠른 대응과 개발속도가 요구되고 있다. 이렇게 제한적인 시간 요소를 극복하고 고객의 요구를 충족시키기 위해 가상 환경 요소가 적용된 수중음향채널 합성환경 모델링 및 시뮬레이션을 통한 분석이 필수적이다.

본 논문은 위와 같이 수중환경에서 운영되는 수중 무기체계 획득을 효과적이고 고객에 대한 빠른 대응과 개발 위한 제한적인 시간 요소를 극복하기 위해 단일/다중 수중음향 신호를 효과적으로 다룰 수 있는 의사 스펙트럼 시간영역 법 합성환경 수중음향채널 모델을 제안하고 모델링과 시뮬레이션 수행하였다. 의사 스펙트럼 시간영역 법 합성환경 수중음향채널 모델 시뮬레이션 결과 수중 환경 소음이 존재하는 수중음향채널에서 단일 수중음향 신호와 다중 수중음향 신호에 대한 다중경로 특성 및 도플러 효과가 반영된 것을 확인할 수 있었으며, 대잠전 시나리오인 잠수함 방사소음에 대한 잠수함 식별 기법인 TPSW 알고리즘 기반 데몬 처리 분석 결과를 통해 제안된 스펙트럼 시간영역 법 합성환경 수중음향채널 유효성을 확인할 수 있었다. 향후 연구방향은 현재 의사 스펙트럼 시간영역 법 수중음향채널 합성환경 모델을 2차원 좌표 환경 분석체계에서 3차원 좌표 분석체계 확장과 분석 주파수 및 수중음향 분석 공간 확장에 따라 수치연산 중

가에 따른 계산시간 효율화 연구이다.

References

1. Republic of Korea Ministry of National Defense, "National Defense Military Force Development Task Instruction ", 2014
2. Finn B. Jensen, William A. Kuperman, Michael B. Porter and Henrik Schmidt, "Computational Ocean Acoustics, Second Edition", Springer, 2011
3. DTaQ, Technical Report DTaQ-10-2497-R, "The R&D Trends of Major Countries in Underwater Surveillance System", Defense Agency for Technology and Quality, 2010
4. Y.H Ha, "Pseudospectral time-domain modeling for rough surface scattering using a surface flattening transformation", Doctoral dissertation, Seoul National University, 2009.
5. Xavier Lurton, "An Introduction to Underwater Acoustics Principles and Application", Praxis Publishing Ltd, 2002.
6. Q. H. Liu, "The pseudospectral time-domain (PSTD) algorithm for acoustic waves in absorptive media", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 45, pp. 1044-1055, 1998.
7. Elston, Gareth R., and Judith M. Bell. "Pseudospectral time-domain modeling of non-Rayleigh reverberation: synthesis and statistical analysis of a sidescan sonar image of sand ripples", *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 29, pp. 317-329, 2004.
8. APL, Technical Report APL-UW TR 9407, "APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook", Applied Physics Laboratory, University of Washington, 1994
9. J.E. Kim, D.S. Han, "Effectiveness Analysis Tool for Underwater Acoustics Detection in Quasi-static Underwater Acoustics Channel based on Underwater Environmental Information DB", *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol 52 no.10, pp 148-157, 2015
10. R. Demirli, "Model-based estimation of ultrasonic echoes part I: Analysis and algorithms", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol.

- 48, pp. 787-802, 2001.
11. J.S. Kim, S.B. Hwang, and C.M. Lee, "A DEMON Processing Robust to Interference of Tonals", The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.31, No.6, pp. 384-390, 2012
 12. W. A. Struzinski and E. D. Lowe, "The Effect of Improper Normalization on the Performance of an Automated Energy Detector", *Journal of Acoustics Society of America*, vol. 78, no. 3, pp. 936-941, 1985.
 13. J.E. Kim, T.B. Shim, "Design of a robust underwater acoustic communication system over multipath fading channels." AIP Publishing, *ADVANCES IN OCEAN ACOUSTICS: Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Acoustics (OA2012)*, Vol. 1495. No. 1, 2012.
 14. Sklar, Bernard. "*Digital communications*". Vol. 2. NJ: Prentice Hall, 2001.



김 장 은 (jekim@dtaq.re.kr)

2011 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2013 숭실대학교 정보통신공학과 석사
2015 경북대학교 전자공학과 박사과정
2013 ~ 현재 국방기술품질원 연구원

관심분야 : 수중음향통신/신호처리/채널 모델링&시뮬레이션, 무기체계 체계공학, 신뢰성, 품질경영



김 동 길 (eastroad@gmail.com)

2006 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업
2008 경북대학교 전자공학과 석사
2015 경북대학교 전자공학과 박사
2014 ~ 현재 국방기술품질원 선임연구원

관심분야 : 네트워크 기반 제어, 필드버스, 고장대처 제어, 시스템 안전



한 동 석 (dshan@knu.ac.kr)

1987 경북대학교 전자공학과 학사
1989 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
1993 KAIST 전기 및 전자공학과 박사
1987 ~ 1996 삼성전자 기술총괄신호처리연구소 선임연구원
1996 ~ 현재 경북대학교 IT대학 교수
2006 ~ 2008 정보통신연구진흥원 디지털 TV/방송사업단 단장
2011 ~ 현재 경북대학교 ICT·자동차융합연구센터장

관심분야 : 통신신호처리, 지능형 교통시스템