



하이브리드 음전달 모델을 이용한 ISO 및 선급별 수중방사소음 전달 특성 분석

고병준^{1,†}·이철원¹·이지은¹·이근화²
(주)에이엘¹
세종대학교 국방시스템공학과²

Analysis of Underwater Radiated Noise in Accordance with the ISO Standard and Class Notations Using the Hybrid Sound Propagation Model

Byungjun Koh^{1,†}·Chul Won Lee¹·Ji Eun Lee¹·Keunhwa Lee²
AL Co., Ltd.¹

Department of Defense Systems Engineering and Ocean Systems Engineering, Sejong University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

As considerable interests in noise emission from the ships have been increased, International Maritime Organization (IMO) standardized the Underwater Radiated Noise (URN) measurement process of commercial ships in deep seas by enacting the related ISO standard ISO 17208-1 and classification societies responded with the enactment or revision of corresponding notations. According to this trend, a new hybrid underwater sound propagation model based on underwater sound propagation theories was developed and its accuracy on analysis was verified through the result comparison with the results of other generally used models. Using the verified model, each URN propagation characteristics adjusted by the correction methods proposed in the ISO standard and class notations were analyzed and compared in two assumed URN measurement cases. The results showed that the effects of transmission loss corrections in the circumstances with less bottom reflections generally similar but they had rather large differences in the model analysis results with bottom-reflection-dominant conditions. It was concluded that the deep consideration of effective bottom-reflection-correction method should be made in future revisions of ISO standard and class notations.

Keywords : Underwater Radiated Noise(URN, 수중방사소음), Hybrid sound propagation model(하이브리드 음전달 모델), URN measurement result correction(수중방사소음 측정 결과 보정)

1. 서론

인류의 지속적인 발전을 위하여 해양 환경 보존과 함께 해양 자원을 이용할 수 있도록 평형수 문제 해결과 같이 해양 환경 및 해양 생물 보호를 위하여 IMO에서는 일반 상선 운항 시 선체로부터 수중으로 방사되는 소음 수준을 제한하기 위하여 지속적인 노력을 기울여왔다. 먼저 1974년 The International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) 및 그에 따른 IMO 내 위원회 협의를 통하여 2012년 11월 30일 Resolution MSC.344(91)을 채택하였다. 이에 따른 후속 조치로서 International Organization for Standardization (ISO) (2016)에서는 상선에 대한 심해에서의 수중방사소음 측정 방법 및 측정치 평가를 위한 보정 방법 등을

정의한 ISO 17208-1을 2016년에 제정하였고, 천해에서의 측정 방법 및 측정치 평가를 위한 보정 방법 등을 정의한 ISO 17208-3은 현재 검토 중으로 ISO/CD 17208-3을 통해 현재까지 검토된 내용을 확인할 수 있다. 이렇게 선박의 수중방사소음 측정 및 분석에 대한 국제표준이 수립됨에 따라 기존에 국가, 기관, 조직 등으로 개별적으로 수립하고 적용하던 선박 수중방사소음 측정 및 분석은 해당 기준에 따라 수행되고 분석되어야 한다. 또한 이에 따라 기준에 선주의 요구가 없는 경우에는 단순히 참고 자료 수준에서 선박 건조 후 측정되던 선박의 수중방사소음은 선박 인도를 위하여 필수적으로 만족해야 하는 기준으로 선박 설계 단계에서 사전에 해석되고 준비되어야 하는 설계 필수 요소로 적용되어야 할 가능성이 매우 크며 각 선급에서는 이에 필요한 기

준, 즉 notation을 제정하거나 개정하여 발표하고 있다. American Bureau of Shipping (ABS) (2022)에서는 심해 측정 기준인 ISO 17208-1뿐만 아니라 천해 측정 및 분석에 관한 내용도 포함하여 2022년 7월에 수중방사소음 측정 관련 notation인 UWN 및 UWN+를 발표하였다. 일반적으로 가장 영향력이 큰 선급인 Det Norske Veritas (DNV) (2010, 2019)에서는 관련 notation인 SILENT Class Notation을 2010년에 발표했고 최신 개정 내용은 확인되지 않지만, 수중방사소음 측정 방안에 대한 Class Guideline을 2019년에 ISO 17208-1 내용을 반영하여 발표한 바 있다. 또한 한국 선급 (Korean Register, 2021)에서도 관련 notation인 URN을 2021을 제정해서 발표한 바 있다. 이러한 추세에 따라 설계 단계에서 사전에 선박의 수중방사소음을 예측할 수 있는 정밀한 해석 모델 및 방안 개발에 대한 필요성이 높아지고 있다.

ISO (2016) 및 ABS (2022), DNV (2019), KR (2021) 등 각종 선급 규정에 따르면 수중방사소음 측정은 10 Hz에서 최소 20 kHz, 최대 50 kHz까지 진행되어야 하므로 이에 대한 해석도 규정된 주파수 대역 전체에서 수행할 수 있어야 한다. 일반적으로 수중에서의 음전달 해석에 대해서는 주파수 대역에 따라 다른 해석 모델이 이용되고 있다. 저주파수 대역에서는 Tappert (1977, p. 224-287)가 제안한 포물선 방정식(Parabolic Equation, PE)을 이용한 PE model, 그리고 고주파수 대역에서는 광학(optics)에서 기반하여 음파 wavefront의 진행 방향 vector를 하나의 음향 줄기, 즉 ray로 가정하여 음파의 전달 해석을 수행하는 음선이론에 기반한 Ray model이 이용되고 있다. PE model은 Helmholtz 방정식의 저주파수 해인 Hankel function을 이용하며 그 수치 해석시 유한요소법(FEM)/유한미분법(FDM)을 사용함으로써 일반적으로 10^3 order 주파수 아래의 저주파 대역에서 수렴성을 가진다. 반면에 Ray model은 고주파수 근사해인 Ray series를 이용함으로써 일반적으로 10^3 order 주파수 이상의 고주파 대역에서 수렴성을 가진다. 그리고 이에 기반한 해석용 프로그램은 대표적으로 PE model을 기반으로 하여 Collins (1999)가 개발한 RAM, 그리고 Ray model을 기반으로 하여 Porter (2011)가 개발한 BELLHOP이 있다. 이와 같은 해석용 프로그램은 기본적으로 학술적인 연구에 그 주된 목적을 두고 있으므로 ISO 17208-1에서 제시하고 있는 10 Hz에서 50 kHz까지의 전체 주파수 대역에서의 해석을 고려하고 있지 않아 연구에 필요한 해석 조건에 기반한 주파수 대역에서 따라 별도로 해석 프로그램을 사용하고 있으며, 수중 음향에 전문적인 지식을 가지고 있는 사람들만 주로 사용할 수 있을 정도로 비전문가를 위한 사용자 환경을 갖추고 있지 않아 조선소와 같이 해석 수행 인원이 일상적으로 사용하지 못하는 환경에 있는 경우에 정확한 해석 수행이 어려울 수 있다. 그러므로 이러한 주파수 의존성을 고려하여, 본 연구에서는 ISO (2016)에서 URN 측정주파수 대역으로 제시한 전 주파수 대역에서 하나의 해석 프로그램을 사용하여 PE model과 Ray model을 구동할 수 있고, 더 쉬운 사용자 이용 환경 및 해석 결과의 시각화를 제공하는 하이브리드 음전달 모델을 개발하였다. 그리고 규정 간의

차이점 검토를 위하여 가상 음원의 URN 측정 해양 환경에서의 음전달을 해당 하이브리드 음전달 모델을 이용하여 구하고 각 규정 적용 시, 해당 결과와 규정에서 제시하고 있는 전달 손실 보정 값을 비교하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 위에서 설명한 배경에 따라 개발된 하이브리드 음전달 모델의 이론적 배경을 설명할 것이며, 3장에서는 해당 모델을 이용한 해석 결과의 정확도를 기존 해석 모델의 결과와 비교하여 검증할 것이다. 그리고 이러한 결과를 바탕으로 4장에서는 수중방사소음 측정 예제를 바탕으로 ISO 및 선급별 수중방사소음 규정 분석 및 각각의 규정을 이용할 때 어떠한 차이점이 발생하는지 확인할 것이다. 마지막으로 5장에서는 본 연구에 대한 결론을 제시할 것이다.

2. 하이브리드 음전달 모델의 이론적 배경

포물선 방정식법은 Tappert (1977)에 의하여 수중음 전달 현상 해석에 처음으로 도입된 이래 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히 이 방법은 컴퓨터 자원의 효율적 이용 측면에서 음전달 문제의 지배 방정식인 타원형의 Helmholtz 방정식을 포물선 방정식의 형태로 근사하여 깊이 방향으로의 해를 구한 후, 그 결과를 바탕으로 다음 거리에 대한 해를 구하는 방식으로 수치 적용의 관점에서 타원형의 방정식이 음장 전체를 한 번에 풀기 위해 갖춰야 할 기억용량보다 훨씬 적은 기억용량으로써 문제를 해결할 수 있다는 장점이 있다. 또한 각각의 거리에 대해 독립적으로 풀기 때문에 거리 의존 문제에 쉽게 적용할 수 있다.

포물선 방정식 모델의 유도는 Lee (1999)에 의해 아래와 같이 제시되었다. 먼저 원통 좌표계(r, θ, z)를 사용한 축대칭 환경에서 시간 항을 제외한 음압 P 는 식 (1)의 Helmholtz 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + k^2 P = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 음압 P 를 angle 함수와 매질, 즉 해수의 reference wavenumber k_0 를 이용하여 $P = p H_0^{(1)}(k_0 r)$ 이라고 정의하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + (k^2 - k_0^2) p \right] H_0^{(1)}(k_0 r) + 2 \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial H_0^{(1)}(k_0 r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} H_0^{(1)}(k_0 r) = 0 \quad (2)$$

식 (2)에 식 (3)의 Hankel 함수의 원거리 근사식을 대입하면 식 (2)는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_0^{(1)}(k_0 r) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 r}} e^{i(k_0 r - \pi/4)} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + 2ik_0 \frac{\partial p}{\partial r} + k_0^2(1 + Z)p - k_0^2 p = 0 \quad (4)$$

여기서, 미분연산자 Z는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$Z = k_0^{-2} \left[\rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} + k^2 - k_0^2 \right] \quad (5)$$

식 (4)를 식 (5)의 미분연산자를 이용하여 인수분해 형태로 나타내면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial r} + ik_0 + ik_0 \sqrt{1+Z} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} + ik_0 - ik_0 \sqrt{1+Z} \right) p \\ &= ik_0 \left(\frac{\partial}{\partial r} \sqrt{1+Z} - \sqrt{1+Z} \frac{\partial}{\partial r} \right) p \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 우변은 교환적(commutative)이라는 가정에서 무시할 수 있다. 수중음이 음원을 중심으로 바깥 방향으로 확산하고 있으므로 음원 방향, 즉 안쪽으로 들어오는 파의 영향이 적다면, 식 (6)에서 음원으로부터 멀어지는 파는 식 (7)과 같은 포물선 형태의 식을 만족한다.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = ik_0 (\sqrt{1+Z} - 1)p \quad (7)$$

본 하이브리드 음전달 모델에서는 거리 종속 해양에서의 음전달 풀이법으로 주로 이용되고 있는 식 (7)의 포물선 방정식에 대한 고차 해의 해석코드를 작성하고 이들에 대한 수치해석을 수행하였다. 깊이 방향 연산자의 선형 근사방법으로는 Padé 근사법의 곱 형태를 이용(Collins, 1989)하였으며, Galerkin 방법을 이용(Huang, 1988)하여 수치해를 구하였다. 거리 방향 연산자는 음해법인 Crank-Nicolson 법(Nakamura, 1993), 초기해로는 자체 초기해(Self-starter)를 이용(Collins, 1992)하였다. 이러한 해석 방법은 원거리에서 유효한 PE model이 가능한 근거리에서도 수렴이 될 수 있도록 해주는 장점이 있다. PE method의 근사에 이용되는 reference wavenumber 결정 방법으로는 Rayleigh 이론을 이용(Pierce, 1985)하고 거리 방향 정합으로는 $\sqrt{\rho c}$ 법을 이용(Porter et al., 1991)하였다.

Ray model은 일반적으로 음파의 파장이 수중보다 짧은 공기 중 소음해석에 많이 이용되는 기법이지만, 대상 주파수 대역이 올라가 음파의 파장이 관측 혹은 해석 공간의 해상도보다 충분히 짧아진다면 수중에서도 적용할 수 있다. 즉, 수중에서의 음파의 전달이 파동에 의한 에너지 전달보다는 마치 빛이 전파되는 것과 같은 효과를 가진다고 물리적으로 가정할 수 있는 조건에서 적용할 수 있다. Ray model에서는 기본적으로 빛의 굴절이론인 Snell's Law에 기반하여 음의 wavefront를 기준으로 음이 음원으로부터 고유 음선을 따라 진행하며 매질의 음향 임피던스 차이가 발생하는 경계면을 기준으로 반사, 굴절하는 등 그 전달 경로를 추정하여 음선 사이의 간격을 기준으로 각 지점에서 음향 준위를 추정한다.

본 하이브리드 음전달 모델에서는 Ray model에서 가장 중요한 요소인 해석 음향공간 경계에서의 음의 반사율과 해양 환경 내 음향 임피던스 경계를 결정해주는 음속 분포를 주요 변수로 입력할 수 있다. 경계조건에 있어서 해수면은 완전 반사 조건으로 적용했으며, 해저면은 시간에 따른 변화가 없다는 가정하에 해양 지리 정보의 대표적인 해저면 재질을 선정해서 각 대륙값을 해석을 수행할 때 사용자가 선정하면 자동으로 해당 값을 기준으로 해석이 수행될 수 있도록 하였다. 또한 수중 굴절률에 영향을 주는 음속 분포는 해석 기반으로 training set을 생성 후 인공지능을 이용하여 학습 후 예측값 분석 시 자동으로 확률적으로 가장 유력한 값을 이용하도록 구성할 예정이나, 여기에서는 임의의 값을 사용하였다.

3. 하이브리드 음전달 모델 검증

앞에서 설명한 내용에 따라 개발된 하이브리드 음전달 모델의 검증을 위해 대표적인 해양 환경 모델에 따라 해석 해양 환경을 설정하고 본 모델과 RAM, 그리고 BELLHOP 해석 결과를 비교하였다. RAM 및 BELLHOP은 수중음향 해석을 위한 학술 연구용으로 개발되었으며 그 유효성은 그동안 다수의 연구결과를 통하여 검증되었다. 이러한 프로그램과의 동일한 해양 환경에서의 음전달 특성 해석 결과 비교를 통하여 하이브리드 음전달 모델의 정확성을 비교하고 평가할 수 있다. 적용된 기본 알고리즘은 해당 프로그램과 개발된 모델에서 동일하므로 그 결과를 주파수 및 해석 환경별로 검증하는 것으로 목표로 하였다. 심해 환경을 가정하여 해저면을 설정하지 않고 해수면의 영향만을 고려한 Half-Infinite model, 평평한 해저면을 가지는 천해 환경을 가정한 Pekris Wave-guide Model, 그리고 경사진 해저면을 가지는 천해 환경을 가정한 Jensen and Kuperman Model을 이용하였다. 다만 Jensen and Kuperman Model은 BELLHOP의 모델 생성 문제로 인하여 저주파 대역 해석 비교에만 이용되었다.

해석에 사용된 Half-Infinite Model의 환경 정의는 Fig. 1과 같다. 주파수는 해석에 따라 저주파수에서는 10 ~ 100 Hz, 고주파수에서는 1 ~ 10 kHz까지 변경되었다.

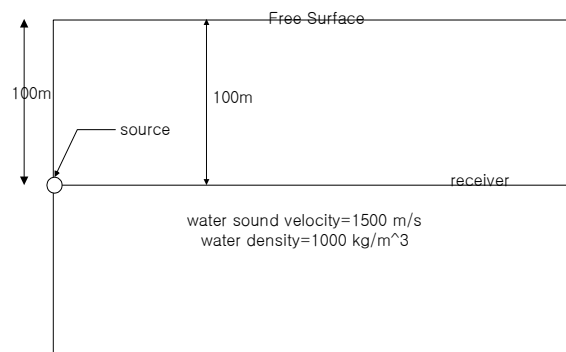


Fig. 1 Environmental definition of Half-Infinite Model

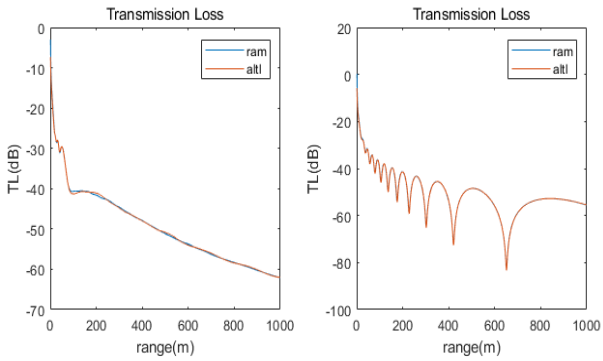


Fig. 2 Analysis results comparison with RAM using Half-Infinite Model at 10 Hz and 100 Hz

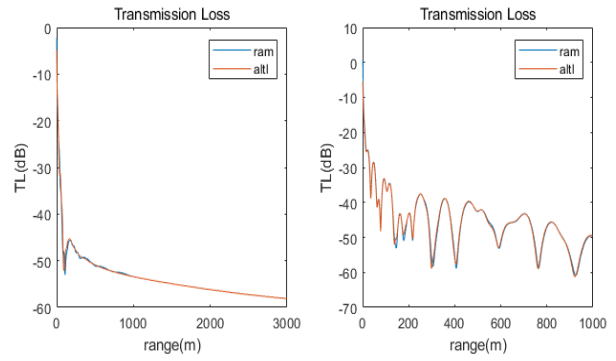


Fig. 5 Analysis results comparison with RAM using Perkis Wave-guide Model at 10 Hz and 100 Hz

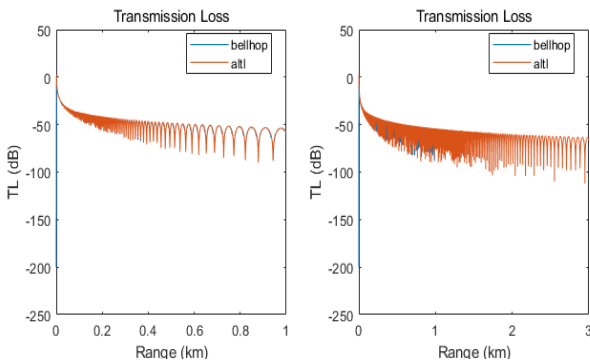


Fig. 3 Analysis results comparison with BELLHOP using Half-Infinite Model at 1 kHz and 10 kHz

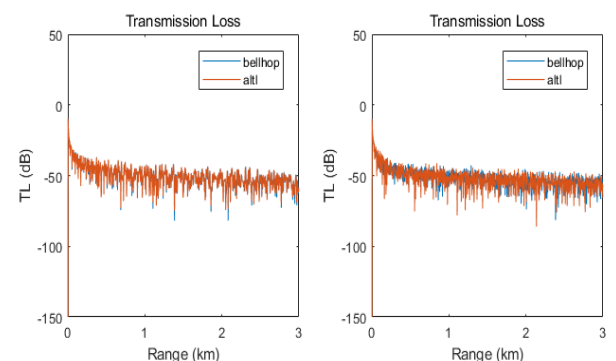


Fig. 6 Analysis results comparison with RAM using Perkis Wave-guide Model at 1 kHz and 10 kHz

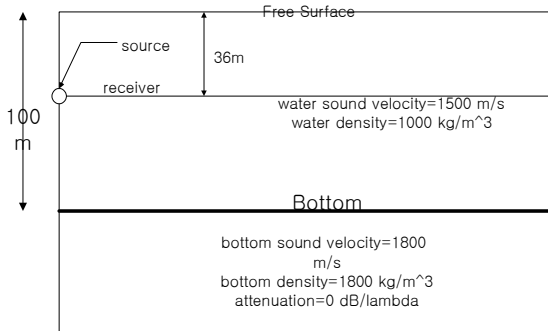


Fig. 4 Environmental definition of Perkis Wave-guide Model

Fig. 2와 3은 Fig. 1의 해양 환경 모델을 이용한 해석 결과 비교로 Fig. 2에서는 10 Hz와 100 Hz에서의 RAM과의 해석 비교 결과를, Fig. 3에서는 1 kHz와 10 kHz에서의 BELLHOP과의 해석 비교 결과를 보여주고 있다.

한편 해석에 사용된 Perkis Wave-guide Model의 환경 정의는 Fig. 4와 같다. 주파수는 해석에 따라 저주파수에서는 10 ~ 100Hz, 고주파수에서는 1 ~ 10 kHz까지 변경되었다.

Fig. 5와 6은 Fig. 4의 해양 환경 모델을 이용한 해석 결과 비교로 Fig. 5에서는 10 Hz와 100 Hz에서의 RAM과의 해석 비교 결과를, Fig. 6에서는 1 kHz와 10 kHz에서의 BELLHOP과의 해석 비교 결과를 보여주고 있다.

마지막으로 해석에 사용된 Jensen and Kuperman Model의 환경 정의는 Fig. 7과 같다. 주파수는 10 ~ 100 Hz 범위에서 진행되었다. Fig. 8은 그림 7의 해양 환경 모델을 이용한 해석 결과 비교로 10 Hz와 100 Hz에서의 RAM과의 해석 비교 결과를 보여 주고 있다.

이상에서 알 수 있는 것처럼 개발된 해석 프로그램에 사용된 하이브리드 음전달 모델을 이용한 해석 결과는 기존에 보편적으로 이용되고 있는 RAM 및 BELLHOP을 이용한 해석 결과와 매우 유사한 것을 확인할 수 있으며, 모델의 해석 알고리즘의 적합성이 입증되었다고 할 수 있다.

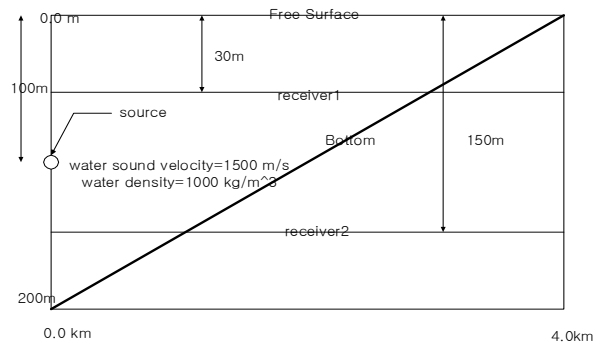


Fig. 7 Environmental definition of Jensen and Kuperman Model

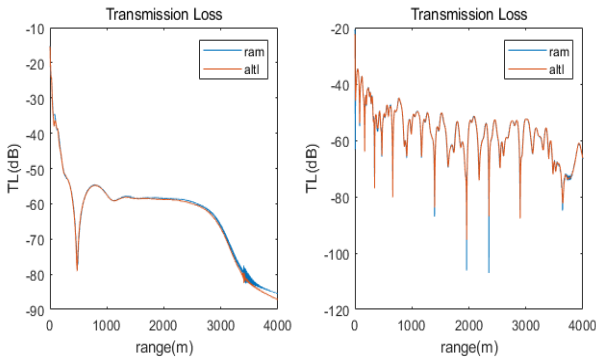


Fig. 8 Analysis results comparison with RAM using Jensen and Kuperman Model at 10 Hz and 100 Hz

4. ISO 및 선급별 수중방사소음 규정 분석 및 해석

ISO 17208-1 및 ABS, DNV, KR 등 각국 선급의 수중방사소음 규정에는 계측기 설정 방법, 계측 시 선박 운용 방법 등 많은 내용을 포함하고 있다. 본 논문에서는 이 중 수중에서의 음전달 분석과 관련된 내용을 정리하고 각 방법을 동일한 측정조건에 대입했을 때 측정결과에 어떠한 차이점이 발생하는지 개발된 하이브리드 음전달 모델을 이용하여 해석하고 비교할 것이다.

먼저 ISO 17208-1에서는 배경소음 보정에 앞서서 배경소음과 함께 측정된 신호와 배경 신호 간의 차이를 식 (8)과 같이 계산하도록 하고 있다.

$$\Delta L = L_{p_{s+n}} - L_{p_n} = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{s+n}^2}{p_n^2} \right) \text{dB} \tag{8}$$

여기서 ΔL 는 the signal-plus-noise-to-noise level difference for each 1/3 octave band이고, $L_{p_{s+n}}$ 와 L_{p_n} 는 각각 배경소음과 함께 측정된 신호의 root-mean-square (rms) sound pressure level (SPL), 배경소음의 rms SPL이다. p_{s+n} 과 p_n 는 각각 배경소음과 함께 측정된 신호의 rms sound pressure 및 배경소음의 rms sound pressure이다.

이렇게 계산된 ΔL 가 10 dB보다 크면 배경소음 보정은 불필요하며, 3 dB보다 작으면 측정된 자료는 폐기되어야 한다. 만일 ΔL 가 3 dB에서 10 dB 사이이고 배경소음의 변동이 심하지 않으면 측정된 값은 식 (9)에 따라 배경소음 보정을 수행한다.

$$L_p' = 10 \log_{10} \left[10^{(L_{p_n}/10)} - 10^{(L_n/10)} \right] \text{dB} \tag{9}$$

앞에서 설명한 방법에 따라 배경소음이 보정된 자료는 directivity, 케이블 민감도, 앰프 게인 등에 대한 다양한 보정이 이루어져야 하는데 이를 민감도 보정이라고 한다. 이 보정은 식 (10)에 따라 이루어져야 하고 이 보정 값은 측정 동안 일정하게 유지되어야 한다.

$$L_p'' = L_p' + A_{SEN} \tag{10}$$

여기서 A_{SEN} 은 다양한 수중 청음기 민감도 보정이다. 여기에는 하이드로폰의 민감도(sensitivity) 보정, 케이블 및 프리앰프 적용에 따른 전기적 신호 저감 보정 등이 포함되며 일반적인 음향, 진동 측정 시 이루어지는 보정 방법과 동일하다. 자세한 해당 절차는 ISO 17208-1에서 normative reference로 제시한 IEC 60565의 최신 개정판인 IEC 60565-1 및 60565-2를 참조해서 진행되어야 하며, 이는 일반적으로 신호 보정기(calibrator)를 이용하여 측정 소프트웨어 내에서 자동으로 이루어지는 경우가 많으며 그렇지 않은 경우에는 측정 소프트웨어 내에서 센서의 민감도를 조정해서 측정된 신호 값의 전기적 손실을 최소화해야 한다.

식 (10)에 의해서 민감도 보정까지 이루어지면 수면 기준으로 CPA 거리에서 측정된 신호는 1 m 거리에서의 SPL 값으로 보정되어야 하므로 식 (11)에 따라 거리 보정이 이루어진다.

$$L_{RN}(r, h_i) = L_p'' + 20 \log_{10} \left(\frac{d_{Total}}{d_{ref}} \right) \text{dB} \tag{11}$$

여기서 $L_{RN}(r, h_i)$ 는 i 번째 수중 청음기에서 r 번째 측정에서 측정된 수중방사소음의 SPL이다. d_{Total} 은 i 번째 수중 청음기와 CPA 지점에서의 선박의 거리로 식 (12)에 따라 구해지며, d_{ref} 는 reference 거리로 1m이다.

$$d_{Total} = \sqrt{d_{Horz}^2 + d_{Vert}^2(h_i)} \tag{12}$$

여기서 d_{Horz} 는 CPA 지점에서의 선박과 계측기 부이까지의 수면 상 거리, d_{Vert} 는 부이에서 i 번째 수중 청음기까지의 거리로 수중 청음기의 수심에 해당한다.

그러면 식 (13)에 의해서 r 번째 측정 시 측정값이, 그리고 식 (14)에 의해서 최종 선박의 수중방사소음 준위가 계산된다.

$$L_{RN}(r) = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{i=1}^3 10^{L_{RN}(r, h_i)/10 \text{ dB}}}{3} \right] \text{dB} \tag{13}$$

$$L_{RN} = \frac{\sum_{r=1}^m L_{RN}(r)}{m} \tag{14}$$

여기서 m 은 총 계측 횟수로 4 혹은 20이다. 2는 좌현 혹은 우현만 계산할 때 해당한다.

식 (8)에서 (14)까지의 단계를 거쳐서 계산된 선박의 수중방사소음 준위를 단일 monopole 음원의 source level로 변환하고자 할 때에는 식 (15)와 같이 해수면에서 발생하는 Lloyd's Mirror Effect를 고려한 ISO 17208-2에서 제시하고 있는 방법을 이용할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_s &= L_{RN} + \Delta L_s \\ &= L_{RN} - 10 \log_{10} \left(\frac{2(kd_s)^4 + 14(kd_s)^2}{14 + 2(kd_s)^2 + (kd_s)^4} \right) \text{dB} \end{aligned} \tag{15}$$

여기서 $k = 2\pi f/c$ 로 f 는 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수, c 는 음속, 그리고 d_s 는 소리가 기원한 것으로 여겨지는 음원의 명목상 깊이이다.

ABS에서도 ISO 17208-1에서 제시하고 있는 것과 같이 측정된 값에 대한 보정을 수행하도록 하고 있다. 배경소음 보정, 민감도 보정 방법은 앞에서 설명한 ISO 17208-1 방법과 같다. ABS에서는 만일 수중 청음기가 해저면으로부터 0.2 m 이내 높이에 설치되어 있다면 해저면 반사 영향 보정으로 5 dB 감소를 제시하고 있다. 거리 보정의 경우, 심해 측정에서는 식 (11)의 ISO 17208-1에서 제시된 방법과 동일하다. 천해 측정에서는 식 (16)에서 제시된 방법을 쓰게 되어 있다.

$$L_{RN}(r, h_i) = L_p'' + N \log_{10} \left(\frac{d_{Total}}{d_{ref}} \right) + \alpha \log_{10} \left(\frac{d_{Total}}{d_{ref}} \right) dB \quad (16)$$

여기서 N 은 해당 해역에서 정밀한 해석이나 음향공간 측정을 통하여 결정된 확산 계수인데 별도의 특정 값이 없으면 18을 적용한다. α 는 해수의 흡음 계수인데, 측정되거나 해석 결과가 없다면 Table 1의 값을 이용한다.

그 외에 최종 수중방사소음 계산 방법은 식 (10) 및 (11)와 같이 ISO 17208-1에서 규정한 것과 같다.

DNV에서는 ABS와 같이 자세하게 보정 방법에 대해서 정의하고 있지 않지만, 관련 규정을 살펴보면 Table 2와 같이 정리할 수 있다. 거리 보정의 경우, 이론적으로 전달 손실 값이 수중음이 완벽한 구형 확산을 하면 $20 \log_{10}(d_{Total}/d_{ref})$, 원통형 확산 일 경우에는 $10 \log_{10}(d_{Total}/d_{ref})$ 이기 때문에 두 가지 확산에 대한 절충안이라고 이해할 수 있다.

KR에서도 ISO 17208-1 및 ABS와 같은 보정 방법을 사용하고 있다. 다만 거리 보정의 경우에는 수심에 따라 적용 조건에 일부 차이가 있다. 기본적으로 측정된 전달 손실 값을 이용하게 되어 있으나 그 값이 없는 경우에는 수심 100 m 이상에서는 식 (11)과 같은 보정 방법을, 수심 100 m 미만에서는 식 (17)의 보정 식을 이용한다. 이는 DNV에서 표 2에서 적용한 것과 유사하게 수심 100 m 이상에서는 구형 확산이 이루어지고, 수심 100 m 미만에서는 구형 확산과 원통형 확산이 혼재되어 발생한다고 일반적으로 가정하므로 이를 반영한 것이다. 다만 천해, 심해의 구분이 없이 같은 거리 보정 식을 적용하고 있는 DNV가 다른 두 선급의 예를 보았을 때, 특이한 경우라고 할 수 있다.

Table 1 Sound absorption coefficient of sea water (ABS)

Frequency (f)	α
10 Hz - 10 kHz	0
10 - 100 kHz	$2.5 \times 10^{-12} f^2 + 3.6 \times 10^{-8} f$

Table 2 List of measurement value corrections (DNV)

Context	Correction values
Distance correction	Measured Transmission Loss (TL) or $18 \log_{10}(d_{Total}/d_{ref})$
Surface reflection correction	-5 dB
Bottom reflection correction	-5 dB, when hydrophone height not exceeding 0.2m above the bottom
Background noise correction	> 10 dB, no action 5 ~ 10 dB, the background noise to be subtracted from source noise level on a power basis 3 ~ 5 dB, the source of background noise to be investigated and if possible removed. If impractical to remove the source of background noise, background noise can be subtracted from source noise level. < 3 dB, the source of background noise be investigated and if possible removed. If impossible to remove the source of background noise, the results will not be valid. If the excessive background noise occurs over a limited part of the frequency range, data can be presented for the remaining part of the spectrum with a statement of the reason for the lack of data in the frequency range blocked by background noise. Later assessment will then determine if the measured results can be accepted or not.

$$L_{RN}(r, h_i) = L_p'' + 19 \log_{10} \left(\frac{d_{Total}}{d_{ref}} \right) dB \quad (17)$$

이상에서 알 수 있는 것처럼 수중방사소음 측정값의 보정 방법은 ISO 17208-1에서 규정된 방법을 각 선급에서 준용하고 있는 것을 알 수 있다. 다만 주로 거리 보정에 있어서는 각 선급에서 유효하다고 판단한 수중에서의 음향 확산에 대한 이론 차이로 인하여 일부 차이가 있다. 그리고 해수면에서의 반사 보정은 DNV만 적용하고 있으며, 해저면 반사 보정은 ABS와 DNV에서 수중 청음기가 해저면에 근접해 있는 경우에만 적용하게 되어 있다.

그러므로 같은 계측 환경에서 측정된 선박의 수중방사소음 계측값을 각 규정에 따라 보정했을 때 어떠한 차이점이 있는지 분석해보았다. 여기서 계측값은 앞에서 검증한 하이브리드 음전달 모델을 이용하여 계산한 수중음 전달 손실 값을 통하여 추정하였다. 각 규정에서 공통으로 해당하는 측정조건을 적용하여 같은 측정 환경에서 계측값이 측정될 수 있도록 하였으며, 각 심해 및 천해 환경에서 해석 및 결과 비교를 진행하였다.

심해와 천해의 구분 기준은 ISO 17208-1, ABS, DNV 그리고 KR 모두 수심 150 m로 설정하고 있다. 먼저 심해 계측 조건을 다음과 같이 설정하였다. 계측 부이에서 선박 운행 시 CPA까지의 거리는 ISO 17208-1과 ABS, DNV에서는 100 m 혹은 선박의 길이 중 큰 값으로 되어 있는 반면에 KR에서는 200 m 혹은 선박의 길이 중 큰 값으로 규정되어 있다. 그러므로 선박의 길이를

200 m로 설정하면 모든 규정에 부합되며, 이에 따라 ISO 17208-1 및 ABS, DNV 규정에 따라 수심을 선박 길이의 1.5배인 300 m로 설정하였다. 심해 측정에서는 총 3개의 수중 청음기를 설치하게 되는데 ISO 17208-1 및 ABS, DNV에서는 각 수중 청음기와 CPA 통과 시 선박 간의 각도가 각각 45도, 30도, 15도를 형성하도록 수중 청음기 설치 수심을 규정하고 있다. 이에 따라 설정된 수중 청음기의 수심은 200 m, 115 m, 54 m이다. KR에서는 각 수중 청음기 수심을 1번은 수면으로부터 40 m 이상, 1번과 2번, 그리고 2번과 3번 간의 수심 차이는 30 m 이상이어야 한다. 그러므로 수중 청음기 수심 54 m, 115 m, 200 m는 KR 규정을 만족하는 것을 알 수 있다. 이상에 따라 설정된 심해 수중방사소음 계측 조건은 관련 규정에 기반하여 직접 작성된 Fig. 9와 같다. 음원의 위치는 선박의 흘수를 5m로 잡고 해당 수심에 존재한다고 가정하였다. 수중방사소음 해석 주파수는 앞에서 검증을 위해 이용했던 것과 같이 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz로 설정하였다. 그리고 음속 분포는 수면 및 해저면에서 1500 m/s, 수심 100 m에서 1450 m/s 값을 가지도록 설정하였다. 그리고 이렇게 계산된 전달 손실 결과에 앞에서 이야기된 보정 방안을 적용하는데, 보정 내용을 보면 알 수 있는 것처럼 배경소음 보정, 수중 청음기 민감도 보정, 반복 횟수에 의한 보정은 해석 결과 보정에는 적용이 되지 않는다. 각 수중 청음기의 거리 보정 및 각 수중 청음기 결과 합산만 해당이 된다. 결국 심해 계측에서는 측정조건이 같으면 ISO 17208-1, ABS, KR이 같은 보정 방법을 사용하고 있으며, DNV에서는 식 (11)과 표 2에서 확인할 수 있는 것처럼 거리 보정 수식에 차이가 있다.

천해 해석을 위해서는 Fig. 9의 심해 해석과 동일한 선박이 천해 영역에서 운행하는 것으로 가정하고 Fig. 10과 같이 해석 조건을 설정하였다. 실질적으로 국내 조선소의 수중방사소음 계측 조건이 Fig. 9의 심해 조건에 부합하지 않으므로 관련 규정에 기반하여 직접 작성된 Fig. 10의 천해 조건이 더 현실적이다. 다만, 수심 100 m는 아래에서 제시된 각 선급에서 요구하는 수중 청음기 설치 조건에 동일하게 적용할 수 있는 조건을 설정하기 위해

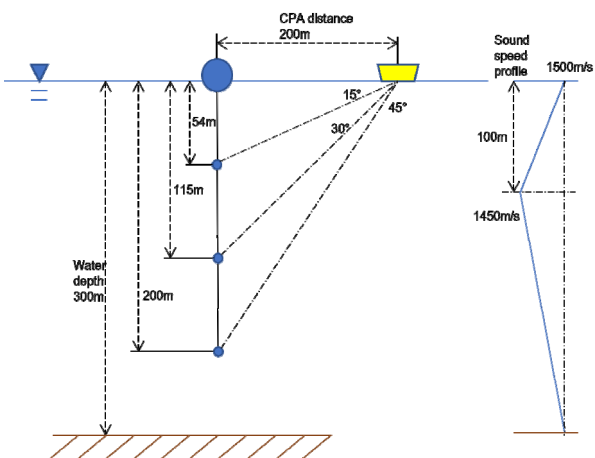


Fig. 9 Measurement condition set-up for deep water URN analysis

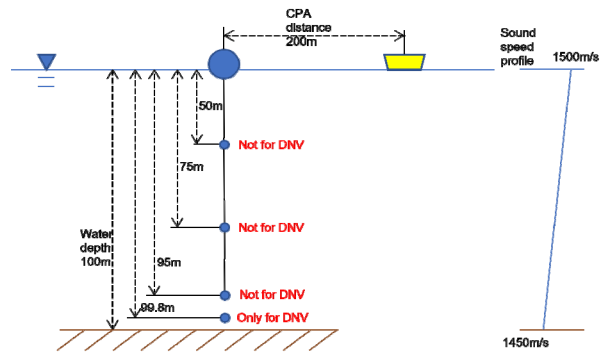


Fig. 10 Measurement condition set-up for shallow water URN analysis

이처럼 수심을 결정하였다. ABS에서는 가장 아래 수중 청음기는 해저면에서 5 m 이내, 그리고 나머지 두 개의 수중 청음기는 각각 수심 H에 대해 해저면으로부터 0.25 H와 0.5 H에 설치할 것을 요구하고 있다. 반면에 KR에서는 수면에서 3번 수중 청음기까지 간격이 각각 15 m 이상, 20 m 이상, 20 m 이상, 그리고 3번 청음기는 해저면에서 5 m 이상이 될 것을 요구하고 있어서 수심 100 m가 해당 두 조건을 공통으로 만족하는 최소 수심이다. 다만 DNV에서는 해저면에서 0.2 m 이내에 하나의 수중 청음기만을 설치하도록 하고 있으므로 별도로 수심 99.8 m에 단일 수중 청음기를 설치하였다. 천해 측정의 수심은 ABS과 KR에서는 60 ~ 150 m, DNV는 30 ~ 150 m로 설정하고 있으므로 해당 수심은 요구 조건을 만족한다. 특이사항으로 DNV에서는 천해 수심의 경우에 경사 해저면에서 측정하는 것으로 선호하고 있으나 Fig. 10과 같이 평평한 해저면도 수용 가능하다고 명시하고 있다. 그 외 해석 조건은 심해와 같다. 다만 음속 분포는 수면 및 해저면에서 1500 m/s, 해저면에 해당하는 수심 100 m에서 1450 m/s 값을 가지도록 설정하였다. 보정 시에는 앞에서 살펴본 것처럼 주로 거리 보정에서 차이점이 발생하며, 천해 측정에 대해서는 해당 ISO 규정인 ISO 17208-3이 아직 공식 발효 전이기 때문에 ISO 17208-1을 적용해보고 천해 조건을 적용하는 선급 규정과 어떤 차이가 있는지 확인해보았다.

본 연구에서 개발된 하이브리드 음전달 모델을 이용하여 해석을 수행하면 수중 청음기 수심에서 수평 거리(horizontal distance)에 따른 전달 손실 값을 알 수 있다. 여기에 각 규정에서 정의하고 있는 보정을 식 (18)과 같이 비교했을 때, 두 값의 차이가 0에 가까울수록 규정에서 정의하고 있는 보정 방법의 효과를 확인할 수 있다. 물론 각 규정은 측정 전 주파수 대역의 신호를 동시에 계측하고 균일한 보정 방법을 적용했으므로 주파수 별로 차이가 발생하는 전달 특성의 영향은 반영이 되어 있지 않다.

$$\Delta TL = TL_{analysis} - TL_{rule} \quad (18)$$

여기서 ΔTL 은 두 전달 손실 값의 차이, $TL_{analysis}$ 은 하이브리드 음전달 모델을 이용하여 계산된 전달 손실 값, 그리고

TL_{rule} 은 각 규정에서 정의된 거리 손실 보정 수식에 기반한 거리에 따른 보정 값이다. ΔTL 이 양의 값을 가지면 해석에서 구한 손실 값이 더 크며, 음의 값을 가지면 규정에서 제시한 보정 값이 더 큰 값을 가진다.

해석에는 하이브리드 음전달 모델에 기반해서 구성된 소프트웨어를 사용하였으며, 해당 소프트웨어의 이용자 화면은 Fig. 11과 같다. 해석 환경 저장 및 호출, 그림 및 문서 형태로 해석 결과 저장 기능을 지원하며, 수신기 수심, 해석 주파수, 분석 모델 선택, PE model 근사 차수 설정, 소음원 수심, 최대 해석 거리 및 수심 설정 등 해석 환경 설정을 화면 내에서 수행할 수 있다. 결과 화면에서는 2차원 해석 대상 공간에서의 전체 음전달 특성, 전체 공간에서 커서 이동에 따른 수직/수평 공간상 음전달 특성, 그리고 설정된 수신기 수심에서의 수평 거리 변화에 따른 음전달 특성을 확인할 수 있다.

Fig. 12의 심해 해석 결과 비교를 참조하면 CPA 거리가 최소 100 m 이상이 되어야 한다는 점을 고려하면 저주파 대역에서는 규정의 보정 방법은 음의 전달에 따른 손실을 충분히 보상하지 않으므로 실제 값보다 차이가 나는 값으로 소음원의 소음 준위를 추정하게 될 것이다. 1 kHz 이상의 비교적 높은 주파수 대역에서는 ISO, ABS, KR 규정에 따른 보정 방법이 음전달에 의한 전달 손실을 일정 수준 보상해주는 것을 알 수 있다. DNV에서는 전반

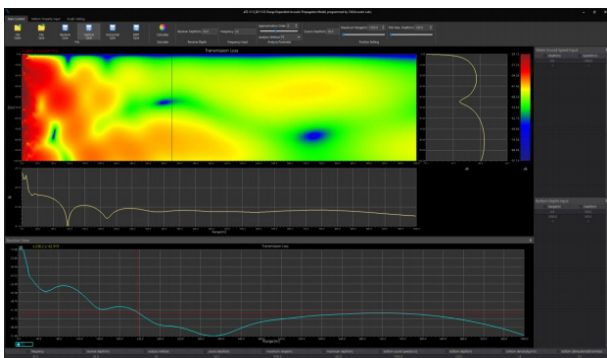


Fig. 11 Graphical User Interface (GUI) of underwater sound propagation analysis software based on the hybrid sound propagation model

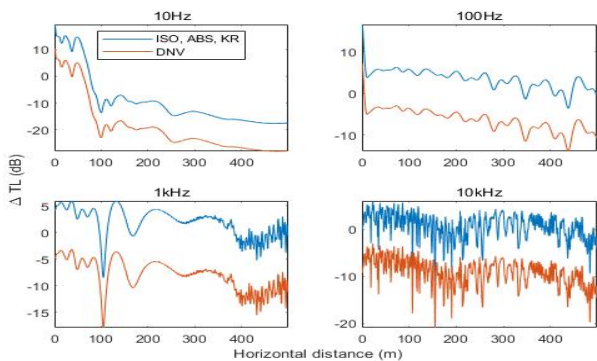


Fig. 12 Result comparison of deep water URN analysis at 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz and 10 kHz

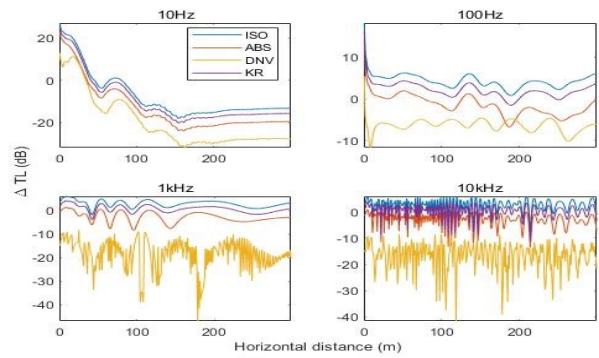


Fig. 13 Result comparison of shallow water URN analysis at 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz and 10 kHz

적으로 값이 다른 규정에 비해서 낮게 나오고 있어서 가능하다면 최신 개정 Notation과 Guideline을 참조하여 재계산을 수행해 보는 것이 더 바람직할 것으로 생각되는데, DNV만 해수면 반사 효과 보상 -5 dB를 고려하고 거리 보상 수식이 다르므로 이 영향이 큰 것으로 보인다. 이를 확인하기 위하여 10 Hz 성분에 대하여 하이브리드 음전달 모델을 이용한 해석 결과를 참조해보면 Fig. 14와 같이 해지면 반사에 의한 음향에너지 손실이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 규정에서는 식 (11), (16), (17) 및 Table 2에서 설명된 바와 같이 구형 및 실린더형 음향에너지 확산 손실 수식에 기반하여 전달 손실을 보정하므로 실제 전달되는 정도에 비하여 보다 큰 값을 보정한다고 할 수 있다. 이러한 영향으로 인하여 Fig. 12 및 13에서 해지면 반사가 발생하는 거리 이상에서는 보정된 전달 손실 값이 마이너스 값을 유지하는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 13의 천해 해석 결과 비교를 참조하면 역시 저주파 대역에서는 주파수에 따라 비교적 균일하게 크거나 작은 값을 보이고 있고, 고주파수 대역에서는 해석 결과의 평균값을 고려하면 보정 방법에 따른 보상이 어느 정도 효율적으로 판단된다. ABS의 경우에는 가장 아래 수중 청음기에서의 해지면 반사 효과 보상 -5 dB로 인하여 ISO, KR 값과 차이를 보인다. DNV는 가장 아래 단일 수중 청음기 측정값만 이용하므로 오차가 매우 큰데 다른 규정과 다르게 경사 해지면 측정을 선호하는 규정 요구 계측 환경에 의한 영향일 수 있으며, 또한 유일하게 해수면 및 해저

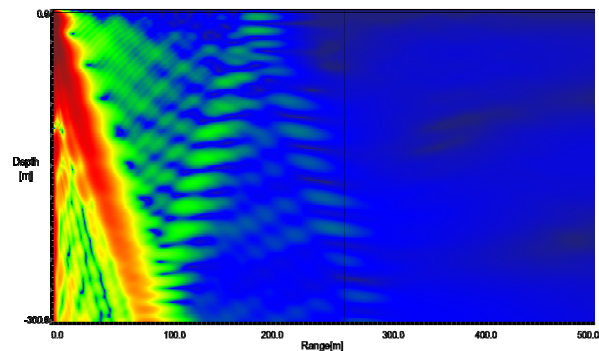


Fig. 14 TL analysis result using hybrid sound propagation model at 10 Hz with deep water condition

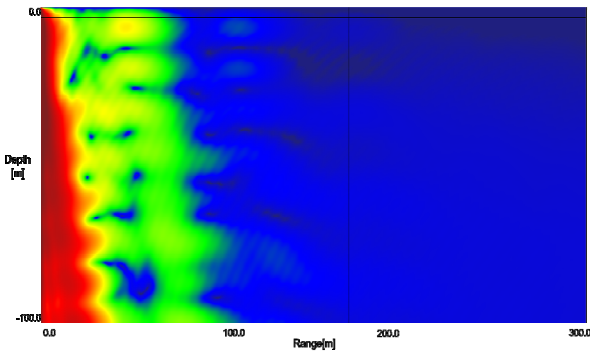


Fig. 15 TL analysis result using hybrid sound propagation model at 10Hz with shallow water condition

면 반사 효과 보상 -5 dB를 동시에 고려하므로 이러한 영향도 고려해야 할 것이다. 해당 해석 결과를 참조하면 KR의 보정 방법이 주로 고주파수 대역에서 비교적 효과적으로 보인다.

5. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 개발된 하이브리드 음전달 모델을 이용한 ISO 및 선급별 수중방사소음 전달 특성 분석을 진행하였다. ISO에서 ISO 17208-1을 제정하고 발표함에 따라 각 선급에서는 이에 따라 수중방사소음 보정 방법을 제정하였으므로 심해 측정조건에서는 전체적으로 큰 차이를 보이지 않는다. DNV 경우에는 최신 제정 내용이 확인되지 않아서 ISO 17208-1 제정 이전의 기준을 사용했기 때문에 다소 차이가 있는 것으로 판단된다. 실제 국내 수중방사소음 측정 환경에 부합하는 천해 측정의 경우에는 국제표준인 ISO 17208-3이 정식 발효가 되지 않았기 때문에 선급 규정 별로 다소 차이가 있지만 DNV를 제외하고 어느 정도 비슷한 수준을 보인다. 역시 DNV 기준은 측정 환경에 대한 정의도 다른 선급과 큰 차이를 보이고 있고 수중 청음기 설치 조건도 매우 다르므로 향후 보다 최신 규정에 따른 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 14 및 15의 10 Hz 해석 결과를 참조하면 저주파 대역에서는 고주파 대역보다 심해 및 천해에서 모두 해저면 반사 영향이 존재하는데, 음원의 위치, 수중 청음기의 위치, 음속 분포 등에 따라 해당 영향이 주요한 범위가 상이하지만, ISO 및 선급 규정에서는 이에 대한 효율적인 고려는 아직 없는 것으로 판단되며 이에 따른 결과는 Fig. 12와 13에서 볼 수 있는 것처럼 저주파 대역에서의 보정된 전달 손실 계산에서 확인이 된다. 고주파 대역에서는 확산 손실의 영향이 매우 커지므로 각 선급에서 제시하고 있는 거리 보정 방법이 상대적으로 주파수 대역이 높아질수록 효율적으로 전달 손실을 보상해주고 있는 것을 볼 수 있다. 다만 심해 조건이라고 하더라도 해저면의 영향이 완벽히 배제되는 것은 아니기 때문에 ABS에서 거리 보정에서 사용하는 것과 같은 주파수에 따른 해저면 보정 방법이 심해 및 천해 환경에서 모두 제시될 필요가 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서 제안된 해석 모델은 앞에서 기존의 해석 프로그램

과 비교해서 해석 성능상 정확도에 있어 매우 유사한 결과를 얻을 수 있음을 비교 검증을 통하여 입증하였다. 다만 기존 해석 프로그램과 같이 해석 주파수를 특정해서 해석을 수행하므로 ISO 및 선급 규정에서 요구하고 있는 광대역 주파수 분석을 위해서는 해석 대상 주파수 대역을 정의하여 그 결과를 1/3 옥타브 밴드 결과로 변환하여 제공해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 규정에서 제안하고 있는 거리 보정 방안을 중점으로 각각의 수중방사소음 전달 특성 분석을 진행했으므로 수심 및 해저지형 등에 있어서 규정에서 제안하고 있는 조건에 맞춰 단순화된 시나리오를 바탕을 비교 검증을 수행하였다. 향후 실해역에서의 측정 데이터가 충분히 확보되면 다양한 운행 시나리오 및 환경 조건에 따른 비교/분석이 가능할 것이다. 또한 실제 수중방사소음 측정에서는 총 4회의 측정값을 평균한 것을 평가에 이용하는데 ISO 17208-2를 기반으로 점음원으로 치환할 수 있으므로 이를 이용하여 변환된 값을 가상 음원으로 이용하여 해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 논문은 해양수산부 2021년도 해양산업 수주기술훈발사업 <인공지능을 이용한 하이브리드 음전달 모델 선박 수중방사소음 분석 프로그램 개발> 과제의 일환으로 작성되었습니다.

References

- American Bureau of Shipping (ABS), 2022. *Guide for the Classification Notation: Underwater Noise and External Airborne Noise*, ABS.
- Collins, M.D., 1989. A higher-order parabolic equation for wave propagation in an ocean overlying an elastic bottom, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86, 1459.
- Collins, M.D., 1992. A self-starter for the parabolic equation method, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 92, 2069.
- Collins, M.D., 1999. *User's Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0p* [online] (29 May 1999), URL: <http://staff.washington.edu/dushaw/AcousticsCode/ram.pdf> [Accessed 1 Sep 2022].
- Det Norske Veritas (DNV), 2010. *Rules for Classification of Ships, Part 6 Chapter 24, SILENT Class Notation*, DNV.
- Det Norske Veritas (DNV). 2019, *Class Guideline: Measurement procedures for noise emission*, DNV.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2020. *IEC 60565-1:2020 Underwater acoustics - Hydrophones - Calibration of hydrophones - Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones*, IEC.

- International Electrotechnical Commission (IEC), 2019. *IEC 60565-2:2019 Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration*, IEC.
- International Organization for Standardization (ISO), 2016. *International Standard ISO 17208-1 Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparisons purposes*, ISO.
- International Organization for Standardization (ISO), 2019. *International Standard ISO 17208-2 Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 2: Determination of source levels from deep water measurements*, ISO.
- Huang, D., 1988. Finite element solution to the parabolic wave equation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84, 1405.
- Korean Register (KR), 2021. *Guidance for Underwater Radiated Noise*, KR.
- Lee, C.W., 1999. *Higher Order PE Acoustic Modelling Using Galerkin's Method*, M.Sc., Seoul, Seoul National University.
- Nakamura, S., 1993. *Applied Numerical Method in C*, Prentice Hall.
- Pierce, A.D., 1985. The natural reference wavenumber for parabolic approximations in ocean acoustics, *Computers & Mathematics with Applications*, 11(7-8), pp.831-841.
- Porter, M.B., 2011. *The Bellhop manual and user's guide* [online] (31 January 2011), Available at: <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/HLS-2010-1.pdf> [Accessed 1 Sep 2022].
- Porter, M.B., Jensen, F.B. and Ferla, C.M., 1991. The problem of energy conservation in one-way models, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89, 1058.
- Tapper, F.D., 1977. *The parabolic approximation method, in Wave Propagation in Underwater Acoustic*, ed. by J.B. Keller & J.S. Papadakis, Springer-Verlag, New York.

