

잔향 수조에서의 시간 이력 수음 신호 간 교차상관을 이용한 수중 음속 계측 방법에 관한 실험적 검증

이주엽¹·김국현²·박성주²·조대승^{1,3,†}
부산대학교 조선해양공학과¹
동명대학교 해양모빌리티학과²
부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터(GCRC-SOP)³

Experimental Validation on Underwater Sound Speed Measurement Method Using Cross-Correlation of Time-Domain Acoustic Signals in a Reverberant Water Tank

Joo-Yeob Lee¹·Kookhyun Kim²·Sung-Ju Park²·Dae-Seung Cho^{1,3,†}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University¹
Dept. of Marine Mobility, Tongmyong University²
Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants(GCRC-SOP), Pusan National University³

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.

Underwater sound speed is an important analysis parameter on an estimation of the underwater radiated noise (URN) emitted from vessels. This paper aims to present an underwater sound speed measurement procedure using a cross-correlation of time-domain acoustic signals and validate the procedure through an experiment in a reverberant water tank. For the purpose, time-domain acoustic signals transmitted by a Gaussian pulse excitation from an acoustic projector have been measured at 20 hydrophone positions in the reverberant water tank. Then, the sound speed in water has been calculated by a linear regression using 190 cross-correlation cases of distances and time lags between the received signals and the result has been compared with those estimated by the existing empirical formulae. From the result, it is regarded that the presented experimental procedure to measure an underwater sound speed is reliably applicable if the time resolution is sufficiently high in the measurement.

Keywords : Underwater Radiated Noise(URN, 수중방사소음), Underwater sound speed(수중 음속), Experimental validation(실험적 검증), Cross-correlation(교차상관), Time-domain acoustic signal(시간 이력 음향 신호)

1. 서론

선박의 수중방사소음(Underwater Radiated Noise, URN)은 함정의 스텔스 성능에 영향을 미치는 핵심 설계 인자이다. 또한, 최근에는 해양 생물의 보호 등을 위해 상업용 선박으로부터 방사되는 수중 소음에 대한 규제와 지침이 논의되고 있다 (IMO, 2014, 2023a, b). 상기의 동향에 따라 저소음 선박 건조를 위해 설계 단계에서부터 정도 높은 선박 수중방사소음 평가가 요구되며, 이를 위한 많은 수치적·실험적 연구가 수행되고 있다 (Duan et al., 2020; Lee et al., 2023).

선박 수중방사소음 평가를 위한 대표적인 수치적 접근법으로

서 상대적으로 낮은 주파수 영역에 대해서는 유한요소법 및 경계요소법 등이 적용되며 (Wu and Chen, 2017), 비교적 높은 주파수 영역에 대해서는 통계적 에너지 해석 및 파워흐름해석 방법 등이 활용되고 있다 (Bae et al., 1993). 한편, 이와 같은 선박 수중방사소음 해석에 있어서 구조물의 접수 효과를 고려한 진동 수준, 수중 음향파워 및 음향방사효율 등을 정도 높게 평가하기 위해서는 핵심 해석 인자 중 하나인 수중 음속의 엄밀한 반영이 요구된다. 또한, 선박 수중방사소음에 대한 실험적 연구에 있어서 수중 음속은 간이식을 활용하여 경험적으로 평가할 수 있으나, 계측 환경을 보다 엄밀하게 반영한 수중방사소음 측정을 위해서는 별도의 수중 음속 계측이 필요하다. 아울러, 수중 음속은 소나(SONAR) 기술을 활용한 미지 수중 소음원의 식별 및 위치

탐색(source identification and localization) 등의 결과 오차 범위를 결정짓는 중요한 분석 인자로 고려된다.

수중 음속 평가에 관한 연구로서 Del Grosso (1974)는 수중 염도, 온도 및 압력 정보를 활용하여 음속을 계산하는 간이식을 제시하였다. Chen and Millero (1977)는 고압 조건에서의 수중 음속을 보다 정도 높게 계산할 수 있는 경험식을 제안하였다. Coppens (1981)는 염도 및 온도만을 활용한 수중 음속 평가식을 고안하고, 이의 유효성을 검토하였다. Mackenzie (1981)는 수온 $-2\sim 30^{\circ}\text{C}$, 염도 $30\sim 40\%$, 수심 $0\sim 8\text{km}$ 의 범위에서 적용 가능한 9개 항 구성의 수중 음속 계산식을 제시하였다. Fofonoff and Millard Jr (1983)는 수중 음속을 포함한 해수의 특성 파악 기법을 검토하고, 이에 관한 사항을 UNESCO 기술 보고서로 저술하였다. Wong and Zhu (1995)는 기존 제시된 간이식의 산정 계수를 IPTS-68에서 ITS-90으로 변경된 국제 온도 표준에 맞추어 재계산하고, 이를 활용하여 재평가한 수중 음속을 기존 연구 결과와 비교하였다. 또한, Kinsler et al. (2000)은 증류수 및 해수에서의 수중 음속 평가 간이식을 기술하였다. Leroy et al. (2008, 2009)은 수온, 염도, 수심 및 위도 정보를 활용하여 전 해역에서 적용 가능한 음속 계산식을 제안하고, 기존 간이식 결과와의 비교를 통해 유효성을 검토하였다. 아울러, Kil (2021)은 황해(Yellow sea) 중앙부에서 측정한 심도별 수온 및 염도를 활용하여 Medwin (1975)의 간이식을 통해 계산한 수중 음속의 시간 이력 변화를 도출하고 등음속층 및 음파통로의 형성 환경을 파악하는 등의 장기간 모니터링 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 선박 수중방사소음 평가를 위한 핵심 인자인 수중 음속을 정도 높게 평가할 수 있는 실험적 절차를 제시하고, 이의 유효성을 잔향 수조에서의 계측 결과 및 경험식에 기반한 추정치의 비교를 통해 검증하였다. 이를 위해 잔향 수조 내의 수중 음향 송신기(acoustic projector)로부터 방사된 Gaussian pulse 가진 신호를 서로 다른 20개 위치에서 수음하였다. 또한, 이들 시간 이력 수음 신호 간의 교차상관(cross-correlation)을 이용하여 190개 경우에 대한 수음 시간 차(time lag)를 계산하고, 각 계측 데이터쌍의 수음 지점 간 거리 및 시간 차를 활용한 선형회귀분석을 통해 수중 음속을 평가하였다. 아울러, 수중 음속 계측 결과를 2개 간이식 기반의 추정치와 비교하여 제시한 실험 절차의 적용성과 타당성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 매질 내 음속

본 연구에서 매질 내 음속은 식 (1)에 나타난 바와 같이 산정하였다.

$$c_i = \Delta d_i / \Delta t_i \quad (1)$$

여기서, c_i 는 i -번째 계측 데이터쌍($\Delta t_i, \Delta d_i$)으로부터 평가된 음속, Δd_i 는 i -번째 계측 데이터쌍의 수음점 간 거리, 그리고 Δt_i 는 i -번째 계측 데이터쌍의 수음 시간 차를 나타낸다.

2.2 교차상관(Cross-correlation)

교차상관은 서로 다른 이산 신호 간의 상관 계수를 평가하여 상호 유사도를 평가하는 신호 처리 기법이다. 임의 이산 신호 $x(n)$ 및 $y(n)$ 의 정규화 교차상관계수 $\gamma_{xy}(l)$ 은 식 (2)에 나타난 바와 같이 정의된다 (Ingle and Proakis, 2012).

$$\gamma_{xy}(l) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(x(n) - \bar{x})(y(n-l) - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

여기서, N 은 교차상관에 활용된 데이터 개수, σ 는 표준 편차, 그리고 기호 $\bar{}$ 는 이산 데이터의 산술 평균을 의미한다. 이때, 정규화 교차상관계수가 최대가 되는 인수 l 로부터 i -번째 계측 데이터쌍의 수음 시간 차 Δt_i 는 식 (3)에 나타난 바와 같이 산정할 수 있다.

$$\Delta t_i = t_s \times \arg \max [\gamma_{xy,i}(l)] \quad (3)$$

여기서, $\arg \max [\]$ 는 출력값이 최대가 되는 인수를 반환하는 함수 그리고 t_s 는 계측 샘플링 속도(sampling rate)이다.

2.3 선형회귀(Linear regression)

회귀분석은 임의 이산 분포 데이터를 대표하는 최적 함수의 계수를 결정하는 방법이며, 1차 다항 함수에 대한 선형회귀식은 이산 데이터쌍(x_i, y_i)을 활용하여 식 (4)에 나타난 바와 같이 행렬의 형태로 정의할 수 있다.

$$\{y\} = [X] \{\alpha\} + \{\epsilon\} \quad (4)$$

여기서, $\{\epsilon\}$ 는 선형회귀분석에 따른 오차 벡터를 나타낸다. 또한, $\{\alpha\}$, $\{y\}$ 및 $[X]$ 는 각각 선형회귀 계수 벡터, 이산 데이터 벡터 및 행렬로서 식 (5) ~ 식 (7)에 나타난 바와 같다.

$$\{\alpha\} = \{\alpha_1 \alpha_2\}^T \quad (5)$$

$$\{y\} = \{y_1 y_2 \cdots y_{n-1} y_n\}^T \quad (6)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_{n-1} & x_n \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

여기서, α_1 및 α_2 는 각각 회귀 직선의 절편 및 기울기를 나타내며, 상첨자 T 는 행렬 혹은 벡터의 전치를 의미한다. 이때, 선형회귀 계수 벡터 $\{\alpha\}$ 는 식 (8)에 나타난 바와 같이 산정할 수 있다.

$$\{\alpha\} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (8)$$

한편, 선형회귀분석 결과의 적절성은 식 (9)에 나타난 결정 계수 R^2 을 산정하여 검토할 수 있다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - (\alpha_1 + \alpha_2 x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

여기서, n 은 이산 데이터쌍의 개수를 나타낸다.

3. 수중 음속 평가 간이식

본 연구에서는 수온, 염도, 수심 또는 수압을 변수로 갖는 2개 수중 음속 간이 평가식에 기반하여 수중 음속을 추정하고, 후술할 수중 음속 계측 절차 기반의 실험 결과와 비교·검토하였다. 이를 위한 Mackenzie (1981) 및 Kinsler et al. (2000)의 간이식은 식 (10) 및 식 (11)에 각각 나타내었다.

$$c = 1448.96 + 4.591 T - 5.304 \times 10^{-2} T^2 + 2.374 \times 10^{-4} T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 \times 10^{-2} D + 1.675 \times 10^{-7} D^2 - 1.025 \times 10^{-2} T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13} TD^3 \quad (10)$$

여기서, c 는 수중 음속 (m/s), T 는 섭씨 수온 (°C), S 는 염도 (%), 그리고 D 는 수심 (m)을 나타낸다.

$$c = 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2)(P_G/100) \quad (11)$$

여기서, t 는 섭씨 수온 (°C)을 100으로 나눈 값을 의미하며, P_G 는 계기 압력 (bar)을 나타낸다.

4. 수중 음속 실험

4.1 수중 음속 계측 절차

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 서로 다른 수음 위치에서 측정된 시간 이력 음향 신호 간의 교차상관을 이용한 수중 음속 계측 절차를 제시하였다. 이때, n 은 시간 이력 음향 신호 계측 횟수 그리고 C 는 조합 연산자로서 식 (12)에 나타낸 바와 같이 정의한다.

$$C_{(n,2)} = \frac{n!}{2!(n-2)!} \quad (12)$$

4.2 실험 환경

수중 음속 계측을 위한 실험 구성도는 Fig. 2에 나타내었고, 길이×폭×수심이 각각 5.0m×3.5m×1.47m인 잔향 수조 내 거치된 수중 음향 송신기(Neptune Sonar D/17) 및 수중 청음기(B&K type 8103)는 Fig. 3에 나타내었다.

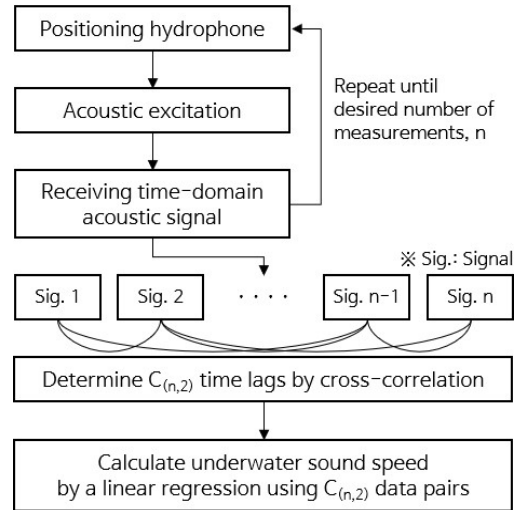


Fig. 1 Procedure for underwater sound speed measurement using the cross-correlation of acoustic signals

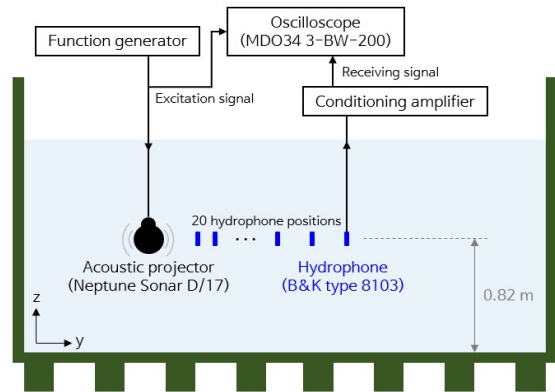


Fig. 2 Experiment configuration

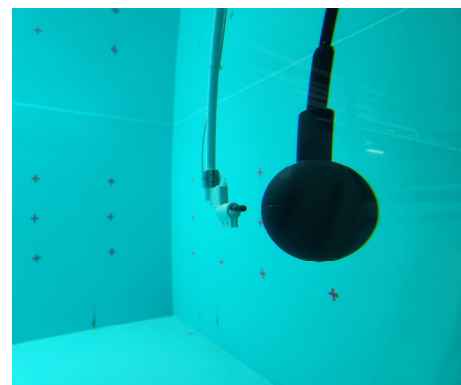


Fig. 3 Acoustic projector and hydrophone in the reverberant water tank

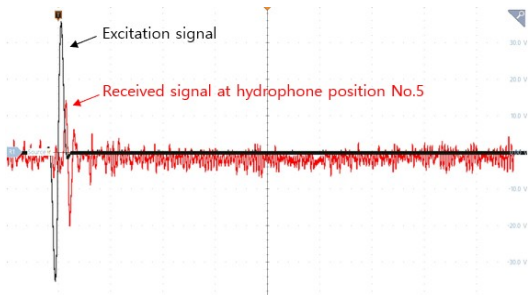
4.3 수중 음속 계측

Fig. 1에 나타낸 실험 절차에 따라 잔향 수조 내 수중 음속을 계측하기 위해 수중 음향 송신기로부터 가장 가까운 수중 청음기 위치를 원점으로 설정하여 20개의 수음점 위치를 선정하였고, 이들의 좌표는 Table 1에 나타내었다. 이때, 수중 음향 송신기 및 원점에 해당하는 1번 수음점에 위치한 수중 청음기의 음향 중심

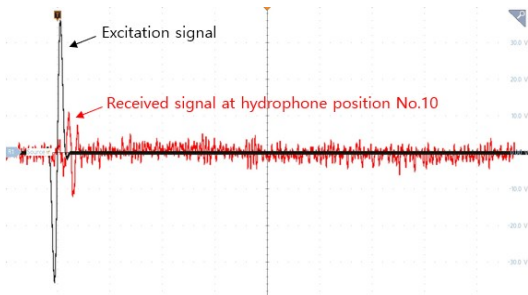
(acoustic center) 간 거리는 주사 신호의 파장을 고려하여 240mm로 설정하였다. 한편, 수중 음향 송신기로부터 방사되는 주사 신호의 형태는 식 (13)에 나타낸 Gaussian-modulated sinusoidal pulse 함수로 모델링하였다. 또한, 수중 송신기로 전달된 주사 함수 모니터링 신호 및 수중 청음기에서 측정된 시간 이력 수음 신호는 Fig. 4에 예시하였다.

Table 1 Coordinates of hydrophone positions (x=0, z=0)

Hydrophone position No.	y(mm)	Hydrophone position No.	y(mm)
1	0	11	75
2	5	12	85
3	10	13	95
4	15	14	105
5	20	15	115
6	25	16	125
7	35	17	135
8	45	18	145
9	55	19	155
10	65	20	165



(a) Hydrophone position No.5



(b) Hydrophone position No.10

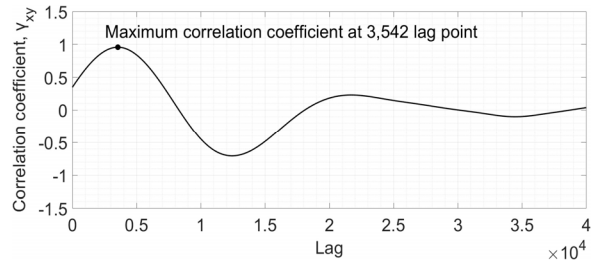
Fig. 4 Examples for acoustic excitation and received signals

$$G(t) = \sin [2\pi f(t - \tau)] e^{-\frac{(t - \tau)^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

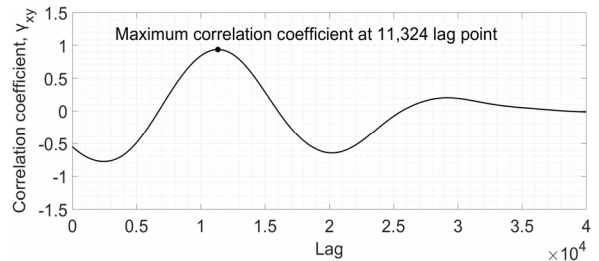
여기서, $G(t)$ 는 Gaussian pulse 함수, t 는 시간, 그리고 τ 는 피크 중심의 지연 시간을 나타내며, σ 는 Gaussian 함수의 피크 폭을 제어하는 변수로서 본 연구에서는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 2개의 뚜렷한 가진 피크 신호가 나타나도록 3×10^{-5} s로 적용하였다. 또한, f 는 정현파의 주파수로서 선박 수중방사소음의 평가 관심 주파수 영역 및 잔향 수조의 Schroeder 주파수가 4kHz

임을 고려하여 8kHz로 적용하였다. 한편, 수중 음속 계측에 있어서 시간 분해능에 의한 오차를 최소화하기 위해 이산 데이터의 샘플링 속도는 활용한 오실로스코프(MDO34 3-BW-200)의 최대 제공치인 200MHz를 적용하였고, 이에 따른 계측 시간 간격은 4ns이다.

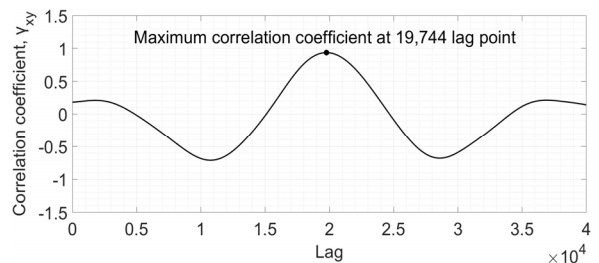
상기 Fig. 4에 예시한 바와 같이 20개 수음점 위치에서 계측한 시간 이력 음향 신호를 활용하여 Fig. 5에 예시한 바와 같이 상호 간의 교차상관계수를 산정하였다. 또한, 이들 각각에 대해 교차상관계수가 최대가 되는 인수로부터 산정한 수음점 간 거리별 수음 시간 차 및 수중 음속 평가 결과의 범위는 Table 2에 나타내었다.



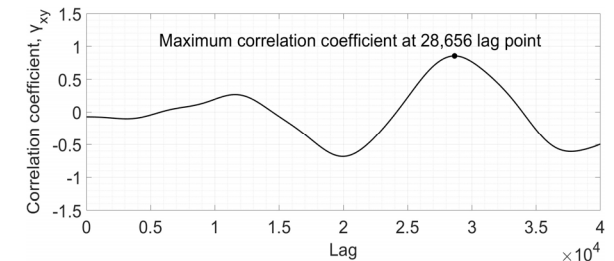
(a) Hydrophone position No.1 and No.5



(b) Hydrophone position No.1 and No.10



(c) Hydrophone position No.1 and No.15



(d) Hydrophone position No.1 and No.20

Fig. 5 Normalized correlation coefficients for two time-domain acoustic signals obtained at specific hydrophone positions

Table 2 Ranges for time lags on the received signals and underwater sound speed evaluation results

Distance (mm)	Number of cases	Range of time lags(μ s)	Underwater sound speed(m/s)
5	5	3.25~4.24	1,179.2~1,537.5
10	18	4.90~8.45	1,183.2~2,042.5
15	4	10.29~11.00	1,363.6~1,458.0
20	16	12.15~15.54	1,286.7~1,646.4
25	3	17.52~17.73	1,409.9~1,427.3
30	14	18.42~22.76	1,318.1~1,628.3
35	3	24.05~25.23	1,387.1~1,455.2
40	13	25.64~30.17	1,325.9~1,560.3
45	3	30.38~32.35	1,390.9~1,481.2
50	12	32.43~35.71	1,400.2~1,541.7
55	3	37.66~38.58	1,425.5~1,460.4
60	11	39.72~43.83	1,368.9~1,510.7
65	3	42.61~45.42	1,431.0~1,525.4
70	10	46.10 ~ 51.60	1,356.6~1,518.6
75	3	50.96~51.66	1,451.7~1,471.6
80	9	54.31~59.22	1,350.8~1,473.1
85	3	58.16~58.80	1,445.6~1,461.6
90	8	60.23~63.97	1,406.9~1,494.2
95	3	65.33~66.02	1,439.0~1,454.2
100	7	68.33~71.10	1,406.5~1,463.5
105	3	72.13~73.35	1,431.5~1,455.7
110	6	74.64~77.21	1,424.6~1,473.8
115	3	78.01~79.78	1,441.5~1,474.1
120	5	80.99~84.39	1,421.9~1,481.6
125	3	85.50~87.21	1,433.3~1,462.1
130	4	89.46~91.89	1,414.7~1,453.1
135	3	93.22~94.73	1,425.1~1,448.1
140	3	96.57~98.17	1,426.1~1,449.8
145	3	100.45~101.53	1,428.1~1,443.5
150	2	104.48~104.61	1,433.9~1,435.6
155	2	107.33~108.07	1,434.3~1,444.1
160	1	112.19	1,426.1~1,426.1
165	1	114.62	1,439.5~1,439.5

아울러, 상기 수음점 간 거리별 수중 음속 평가 결과의 산술 평균 및 표준 편차는 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Averages and standard deviations for underwater sound speed evaluation results

Distance(mm)	Average(m/s)	Standard deviation(m/s)
5	1,388.7	132.3
10	1,503.7	227.3
15	1,416.5	40.9
20	1,464.4	94.3
25	1,416.2	9.6
30	1,476.5	77.0
35	1,425.3	34.8
40	1,444.6	58.4
45	1,437.5	45.2
50	1,460.5	40.3
55	1,441.1	17.8
60	1,443.5	39.2
65	1,463.6	53.5
70	1,439.3	48.0
75	1,459.2	10.8
80	1,439.6	39.0
85	1,451.4	8.8
90	1,442.7	25.2
95	1,444.8	8.2
100	1,446.0	18.6
105	1,444.8	12.3
110	1,449.6	19.6
115	1,457.2	16.4
120	1,445.8	22.2
125	1,447.1	14.4
130	1,440.0	17.2
135	1,440.3	13.2
140	1,435.8	12.4
145	1,434.2	8.2
150	1,434.7	1.2
155	1,439.2	7.0
160	1,426.1	-
165	1,439.5	-

한편, 수음점 간 거리 및 수음 시간 차로 구성된 190개의 이산 데이터쌍을 활용한 선형회귀분석 결과는 Fig. 6에 나타내었고, 이를 통해 잔향 수조 내 수중 음속은 1,437.4m/s로 평가되었다.

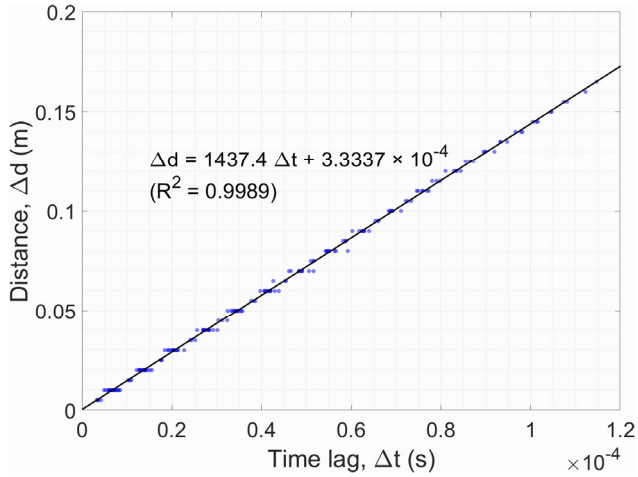


Fig. 6 Linear regression result to evaluate underwater sound speed in the reverberant water tank

또한, 시간이력 수음 신호로부터 직접음에 의한 피크치를 식별하기 어려운 경우엔 수음점 간 수음 시간 차 산정이 어려우므로, 수중 소음원으로부터 주사된 직접음에 의한 피크치가 배경 소음 및 잔향음 수준 대비 큰 지점에서의 시간이력 수음 신호만을 교차상관에 반영해야 할 것으로 판단한다. 아울러, 계측의 효율성을 위해 간이식 기반의 매질 내 음속 산정 결과 및 계측 시간 간격을 활용하여 음속 계측 결과의 표준 편차가 낮은 수음점 간 거리를 사전에 추정할 수 있을 것으로 판단한다.

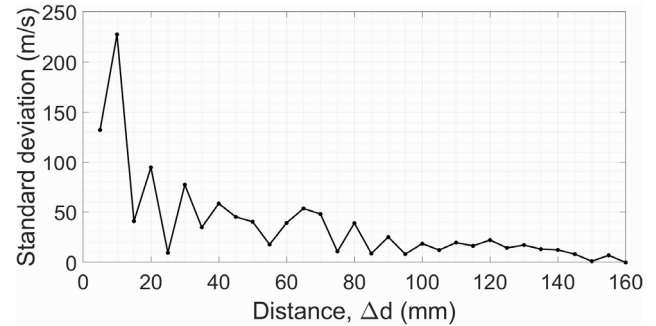


Fig. 7 Standard deviations of underwater speeds of sound depending on the distances between receivers

4.4 계측 결과 검토

Fig. 1에 나타난 실험 절차로부터 평가한 잔향 수조 내 수중 음속과 Mackenzie (1981) 및 Kinsler et al. (2000)의 간이식으로 산정한 수중 음속을 Table 4에 함께 나타내었다. 이때, 간이식의 변수로서 수온, 염도, 수심 및 수압은 실험 환경을 고려하여 각각 11°C, 0‰, 0.65m 및 0.0638bar로 설정하였다.

Table 4 Underwater sound speeds evaluated by experiment and empirical methods

Method	Underwater sound speed(m/s)	Difference(%)
Experiment	1,437.4	-
Mackenzie (1981)	1,450.4	0.90
Kinsler et al. (2000)	1,450.7	0.93

상기의 결과를 통해 본 연구에서 적용한 계측 절차에 따른 수중 음속 평가 결과는 기존 간이식에 의한 수중 음속 산정 결과와의 차이가 1% 미만으로서 상호 간의 부합성이 매우 높음을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 7에 나타난 바와 같이 수음점 간 거리가 가까울수록 수중 음속 계측 결과의 표준 편차가 커지는 경향을 보임을 확인할 수 있는데, 이는 식 (14)에 나타난 바와 같이 수음 시간 차가 작을수록 시간 해상도에 의한 계측 오차가 커지기 때문인 것으로 판단한다.

$$\Delta d_i / (\Delta t_i + t_s) < c_i < \Delta d_i / (\Delta t_i - t_s) \quad (14)$$

5. 결론

본 논문에서는 선박 수중방사소음 해석 및 실험적 연구에 있어서 접수 구조물의 진동 수준, 음향파워 및 음향방사효율 평가 등의 핵심 인자 중 하나인 수중 음속을 정도 높게 측정할 수 있는 실험적 절차를 제시하고, 잔향 수조에서의 수중 음속 계측 결과를 간이식 기반의 추정치와 비교하여 제시한 수중 음속 계측 절차의 적용성과 타당성을 검토하였다. 상기의 결과를 통해 본 연구에서 적용한 실험 절차를 활용하면 기존 간이식에 의한 평가 방법 대비 1% 미만의 차이로서 정도 높게 수중 음속을 측정할 수 있음을 확인하였다. 또한, 수중 음속 계측에 있어 선정한 수음점 간 거리에 따라 계측 시간 해상도에 의한 측정 오차가 커질 수 있음을 확인하였고, 정도 높은 수중 음속 계측을 위해서는 계측기의 샘플링 속도를 고려한 수음 지점의 선정이 필요하다고 판단한다.

상기의 실험 절차는 잔향 공간뿐만 아니라 자유 음장에서의 수중 음속 평가를 위해서도 적용 가능하며 수중은 물론 공기 중의 음속 또한 정도 높게 측정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 잔향 음장 내 수중 음속 계측을 위해 수음 지점의 1차원적 배열만을 검토하였으나, 수음 지점을 방향성만 달리하여 2차원 및 3차원적 배열로 하더라도 동일한 방법론으로 수중 음속을 정도 높게 계측할 수 있다고 판단한다. 아울러, 잔향 음장에서의 계측 데이터를 통해 직접음 및 반사음의 영향을 분석하여 음향 공간의 특성도 파악할 수 있을 것으로 사료한다. 한편, 수음점의 개수가 많아질수록 계측에 소요되는 시간 및 연산 부담이 증가하므로, 수중 음속 계측 결과의 정도를 확보할 수 있는 최소한의 수음 지점 개수에 관한 최적화 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 논문은 조선해양플랜트글로벌핵심센터의 관리 하에 2023년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원(No. 19-106-804-016(KRIT-CT-23-018), 잠수함 첨단함형 특화연구실)과 부산광역시의 대학혁신연구단지조성사업 중 “동명대학교 대학혁신연구단지조성사업”의 지원(IURP2301)으로 수행된 연구 결과입니다.

References

- Bae, S.R., Jeon, J.J. and Lee, H.G., 1993. Waterborne noise prediction of the reinforced cylindrical shell using the SEA technique. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 3(2), pp.155–161.
- Chen, C.T. and Millero, F.J., 1977. Speed of sound in seawater at high pressures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62(5), pp.1129–1135.
- Coppens, A.B., 1981. Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 69(3), pp.862–863.
- Del Grosso, V.A., 1974. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4), pp.1084–1091.
- Duan, J., Zhang, L., Da, L., Sun, X. and Chen, W., 2020. A hybrid algorithm of underwater structure vibration and acoustic radiation-propagation in ocean acoustic channel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, pp.680–690.
- Fofonoff, N.P. and Millard Jr, R.C., 1983. *Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater*. UNESCO Technical Papers in Marine Sciences No.44.
- Ingle, V.K. and Proakis, J.G., 2012. *Digital Signal Processing Using MATLAB*. 3rd Ed. Cengage Learning: United States of America.
- International Maritime Organization (IMO), 2014. *Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life*. IMO, London, IMO MEPC.1/Circ.833.
- International Maritime Organization (IMO), 2023a. *Addressing underwater noise from ships—draft revised guidelines agreed. 30 January 2023*, URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/Pages/WhatsNew-1818.aspx> [Accessed 17 October 2023].
- International Maritime Organization (IMO), 2023b. *Marine Environment Protection Committee (MEPC 80), 3–7 July 2023: 6. Addressing underwater noise—revised guidelines adopted*, URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-80.aspx> [Accessed 17 October 2023].
- Kil, B.J., 2021. A result of prolonged monitoring underwater sound speed in the center of the Yellow Sea. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 40(3), pp.183–191.
- Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders, J.V., 2000. *Fundamentals of Acoustics*. 4th Ed. John Wiley and Sons, Inc: United States of America.
- Lee, J.Y., Kim, K.H., Park, S.J. and Cho, D.S., 2023. Applicability and reliability of an experimental method measuring underwater acoustic radiation efficiency of floating box-type plate structures in a reverberant water tank. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15, 100553.
- Leroy, C.C., Robinson, S.P. and Goldsmith M.J., 2008. A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), pp.2774–2782.
- Leroy, C.C., Robinson, S.P. and Goldsmith M.J., 2009. Erratum: A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(4), pp.2117.
- Mackenzie, K.V., 1981. Nine-term equation for sound speed in the oceans. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3), pp.807–812.
- Medwin, H., 1975. Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58(6), pp.1318–1319.
- Wong, G.S.K. and Zhu, S., 1995. Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), pp.1732–1736.
- Wu, H. and Chen, P., 2017. Application of coupled FEM/BEM on the analysis of underwater radiated noise of a surface ship induced by hull vibrations. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(2), pp.196–204.



이주엽

김국현

박성주

조대승