

음향라디오시티법을 이용한 잔향수조 음장 해석과 실험검증

김국현[†]
동명대학교 조선해양공학부

Acoustic Field Analysis of Reverberant Water Tank using Acoustic Radiosity Method and Experimental Verification

Kookhyun Kim[†]
School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University

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.

The acoustic power is a major acoustical characteristic of an underwater vehicle and could be measured in a reverberant water tank. In order to obtain accurate measurement results, the acoustic field formed by the sound source should be investigated quantitatively in the reverberant water tank. In this research, the acoustic field of a reverberant water tank containing an underwater sound source has been analyzed by using an acoustic radiosity method one of the numerical analysis methods suitable for the acoustic analysis of the highly diffused space. The source level of the underwater sound source and acoustical properties of the water tank input to the numerical analysis have been estimated by applying the reverberant tank plot method through a preliminary experiment result. The comparison of the numerical analysis result with that of the experiment has verified the accuracy of the acoustic radiosity method.

Keywords : Acoustic radiosity method(음향 라디오시티법), Reverberant tank plot method(잔향수조도법), Underwater sound source(수중음원), Acoustic power(음향파워), Source level(음원레벨), Acoustic experiment(음향실험)

1. 서론

음향파워(acoustic power)는 잠수정과 같은 수중음원의 주요 음향특성에 해당하며, 잔향수조(reverberant water tank)에서의 실측을 통해 정량적으로 산정이 가능하다(Li et al., 2014) 음향파워를 정도 높게 산정하기 위해서는 잔향수조 자체의 음향학적 특성 파악이 선행되어야 한다. 이를 위해 다양한 음향시험기법과 수치해석기법이 상호 보완적으로 활용되고 있다.

잔향수조의 음향특성 해석을 위한 수치해석기법으로는 유한요소법(finite element method), 경계요소법(boundary element method), 음선추적법(acoustic ray tracing method), 빔추적법(beam tracing method), 통계적에너지해석법(statistical energy analysis method), 에너지 흐름해석(energy flow analysis), 음향라디오시티법(acoustic radiosity method) 등이 있으며, 관심주파수의 범위, 기하학적 형상, 음향학적 경계조건등 음향 문제 특성을 고려하여 선별적으로 적용되고 있다(SavioJa and

Svensson, 2015). 이 중에서 음향라디오시티법은 음향공간을 구성하는 벽면을 이상적인 확산 반사면으로 가정하므로 확산음장(diffused sound field) 형성이 용이한 고주파수 음향 해석에 적합하며(Kuttruff, 2009; Nosal and Hodgson, 2002; Siltanen et al, 2007), 순차적 연산에 대한 병렬처리(parallel processing) 알고리즘 구현이 용이해 연산비용 측면에서도 유리하다(Carr et al., 2003).

한편, 상기 수치해석기법의 정확도는 음원특성, 매질특성, 경계조건 등의 음향파라미터에 전적으로 의존한다. 이는 음원특성이 음원레벨(source level), 지향성(directionality) 등으로, 매질특성과 경계조건이 음속, 잔향시간, 흡음률 등으로 수치해석모델에 반영되기 때문이다. 음향파라미터들은 음향실험결과에 대해 잔향시간법(reverberation time method), 잔향수조도법(reverberant tank plot method) 등을 기반으로 추정 가능하다(Kim, 2019). 잔향시간법은 사전에 파악된 잔향시간 데이터를 이용해 음원레벨을 추정하는 기법이며(Cochard, 2000), 잔향수

조도법은 잔향공간 내 음압 데이터군을 이용해 음원레벨과 잔향 시간, 흡음률 등을 추정하는 기법이다(Hazelwood and Robinson 2007).

본 연구에서는 고주파수 수치해석기법인 음향라디오시티법을 이용해 잔향수조의 음장해석을 수행한다. 이 때, 대상수조의 주파수별 음원레벨과 잔향시간 데이터는 음향실험 결과를 이용해 잔향수조도법을 기반으로 산출한다. 또한 수치해석결과는 음향실험의 수음점별 음압레벨과의 비교를 통해 검증한다. 검증된 수치해석모델을 활용해 대상수조의 음장해석을 수행하고 그 음장 특성을 고찰한다.

2. 이론

본 연구에서는 잔향수조의 음향장 해석을 위해 고주파수 해석기법인 음향라디오시티법(Kim, 2018)을 적용하고 잔향수조의 음향특성 산정을 위해 잔향수조도법(Hazelwood and Robinson, 2007)을 적용한다. 본 장에서는 독자의 이해를 돕기 위해 해당 기법에 대한 기본 이론을 요약기술하였다.

2.1 음향 라디오시티법

음향 라디오시티법에서는 음원에 의한 벽면 유기 음향라디오 시티(acoustic radiosity)를 산정하고 벽면간 음향 에너지 교환에 의한 누적 음향라디오시티 산정한 후, 이로부터 수음점에서의 음압을 계산한다.

잔향수조의 벽면을 N 개의 평면다각형으로 모델링하면 i -번째 요소에 유기되는 음향라디오시티 $B_i(t)$ (Watt/m²)는 식 (1)로 산정할 수 있다. 이 식에서 첫째 항은 음원으로부터 벽면으로의 직접성음분을, 둘째 항은 벽면 간의 간접음 성분에 해당한다.

$$B_i(t) = \frac{\rho_i}{A_i} \int_S \frac{W(\bar{r}_s, t - R_{si}/c) \cos \theta_{si}}{4\pi R_{si}^2} e^{-\eta R_{si}} dS_i \quad (1)$$

$$+ \frac{\rho_i}{A_i} \sum_{S_j=1}^N \int_{S_j} F_{ij} B_j(t - R_{ij}/c) e^{-\eta R_{ij}} dS_j dS_i$$

여기서, ρ_i 는 i -번째 평면 다각형 S_i 의 파워반사계수(power reflection coefficient)로써, 1에서 흡음률(absorption coefficient, α_i)을 뺀 값이다. A_i 는 i -번째 평면 다각형의 면적(m²)을 나타내며, $W(\bar{r}_s, t)$ 는 \bar{r}_s 에 위치한 음원의 음향파워(acoustic power, Watt), θ_{si} 는 음원과 i -번째 평면 다각형의 법선벡터가 이루는 각(rad), R_{si} 는 음원과 평면 다각형 상의 임의위치 간 거리(m), R_{ij} 는 i -번째 평면 다각형과 j -번째 평면 다각형 상의 임의 위치 간 거리(m), η 는 공간 내부 매질에 의한 감쇠계수(damping coefficient), t 는 시간(s), c 는 음파 전달속도(m/s)이다. 한편, F_{ij} 는 i -번째 평면 다각형과 j -번째 평면 다각형 간의 형상인자(shape factor 또는 form factor)로써, 식 (2)에 의거 산정한다.

$$F_{ij} = \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R_{ij}^2} dS_j dS_i \quad (2)$$

여기서, θ_i 와 θ_j 는 i -번째 평면다각형과 j -번째 평면다각형 상에 각각 위치한 임의 점을 연결한 선과 i -번째 및 j -번째 평면 다각형 각각의 법선벡터가 이루는 각(rad)을 의미한다.

수음점 위치 \bar{r}_r 에서의 순간 음향인텐시티(instantaneous acoustic intensity) $I(\bar{r}_r, t)$ 는 식 (3)에 의거 산정하며, 식 (4)으로부터 수음점에서의 음압레벨(sound pressure level) L_p 을 계산한다.

$$I(\bar{r}_r, t) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^N \int_S \frac{B_i(t - R_{ri}/c) \cos \theta_{ri}}{R_{ri}^2} e^{-\eta R_{ri}} dS_i \quad (3)$$

$$+ \frac{W(\bar{r}_s, t - R_{sr}/c)}{4\pi R_{sr}^2} e^{-\eta R_{sr}}$$

$$L_p(\bar{r}_r, t) = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2(\bar{r}_r, t)}{p_o^2} \right) = 10 \log_{10} \left(\rho_o c \frac{I(\bar{r}_r, t)}{p_o^2} \right) \quad (4)$$

여기서, ρ_o 는 매질 밀도(kg/m³), p_o 는 기준음압(1μPa)이며, R_{ri} 와 R_{sr} 는 각각 수음점과 평면 다각형 상의 임의위치 간 거리(m), 음원과 수음점 가 거리(m)이다.

2.2 잔향수조도법

잔향음장 내 무지향성 수중음원이 존재하는 경우, 식 (5)와 같이 임의 수신점에서의 전체 음장은 직접음장과 잔향음장의 합으로 가정할 수 있다(Kinsler, 1982).

$$p_t^2 = p_d^2 + p_r^2 = S^2 \left(\frac{1}{r^2} \right) + p_r^2 \quad (5)$$

여기서, p_t , p_d , p_r 는 각각 전체음장, 직접음장, 잔향음장에서의 음압 (Pa)을 의미하여, S 는 음원출력(source output, Pa), r 은 음원과 수음점간의 거리(m)이다.

한편, 음향실험에서 음원과 수음점간 거리에 따른 음압을 측정하고, 이를 거리제곱의 역수(1/r²)와 음압의 제곱(p_r^2)을 가로-세로축으로 하는 그래프에 표시한 후, 이에 대응하는 선형 회귀식을 산출하여 함께 도시하면 Fig. 1에 예시된 잔향수조도를 작성할 수 있다. 이 때, 선형회귀식의 기울기와 절편은 각각 음원 출력 S^2 과 잔향음장의 음압제곱 p_r^2 에 해당하므로, 이를 이용해 음원레벨뿐 아니라 식 (6)과 식 (7)에 의거 흡음면적(absorption area), 잔향시간 등의 음향파라미터도 함께 산정할 수 있다(Hazelwood & Robinson 2007).

$$A = 16\pi \frac{S^2}{p_r^2} \quad (6)$$

$$T_{60} = 55.26 \frac{V}{cA} \quad (7)$$

여기서, A 와 T_{60} 은 흡음면적(m^2)과 잔향시간(sec)이며, V 는 잔향수조의 체적(m^3), A 는 흡음면적($=\alpha A_s, m^2$), α 는 흡음률, A_s 는 잔향수조의 자유수면을 제외한 내부 표면적(m^2)이다.

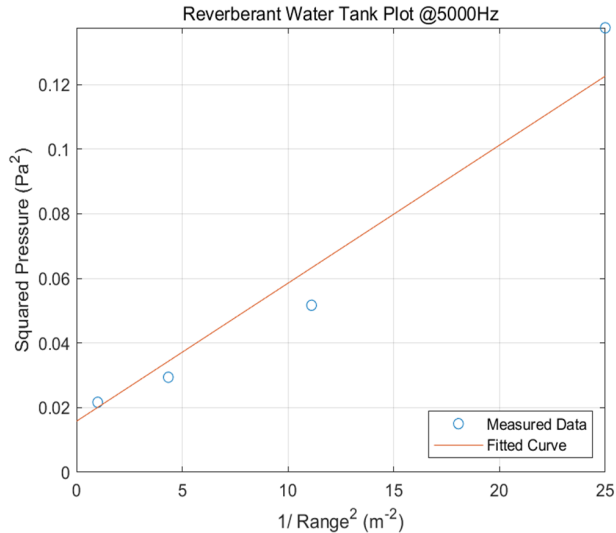


Fig. 1 Example of reverberant tank plot

3. 음향실험

수치해석에 필요한 음향파라미터인 음원의 음향파워와 대상수조의 파워반사계수 산정하고 수치해석기법의 정확도를 검증하기 위해 음향실험을 수행하였다. 대상수조 및 실험장비의 구성은 하기와 같다.

3.1 잔향수조

잔향수조는 강화유리 관측창, 탄성지지 다리구조 등을 포함한 보강판(stiffened steel plate) 구조로 제작되었으며, 그 형상은 Fig. 2의 사진과 같다. 잔향수조의 크기는 내부 공간 기준으로 길이 5m, 폭 3.5m, 높이 1.95m이며, 1.47m 깊이의 청수

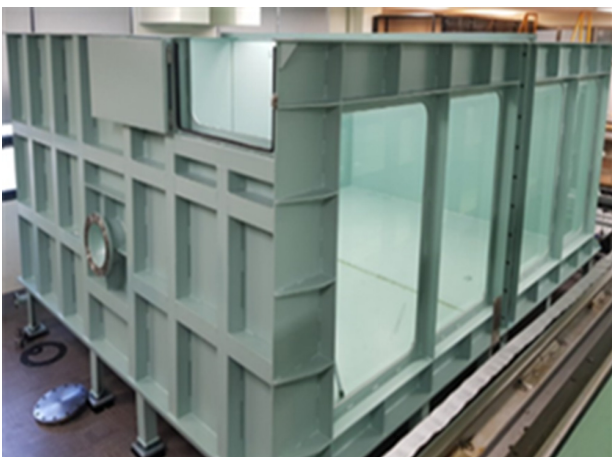


Fig. 2 Reverberant water tank(Park et al., 2019)

(fresh water)로 채워져 있다. 해당 깊이에서의 체적은 25.725 m^3 이며, 자유수면을 제외한 내부 표면적은 42.29 m^2 이다.

3.2 실험장비 구성

실험장비는 Fig. 3와 같이 송신기(transmitter)와 수중청음기(Hydrophone), 앰프(power & conditioning amplifier), 주파수 분석기 등으로 구성하였다.

송신기는 단극음원(monopole sound source) 센서를 채택하고 길이방향 0.5m, 폭방향 및 수심방향 정중앙에 고정하였다. 이 때, 송신 신호로 백색신호(white signal)를 사용하였다. 수중청음기는 음원과 동일한 깊이와 폭방향 위치를 유지한 상태에서 길이방향으로 총 10개 지점으로 이동하면서 음향실험을 실시하였다. Table 1은 음원과 수중청음기의 길이방향 이격 거리를 나타낸 것이다.

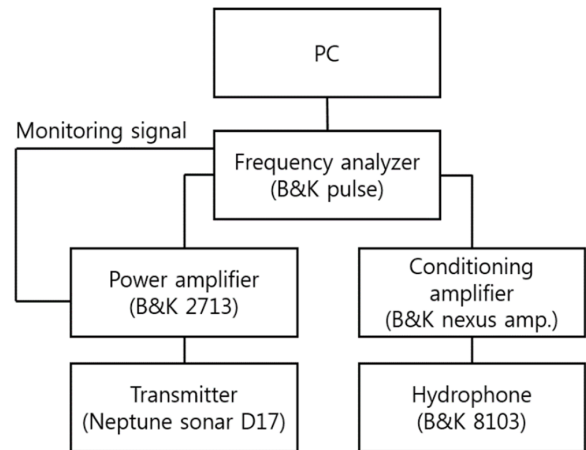


Fig. 3 Configuration for acoustic experiment facilities

Table 1 Hydrophone distance apart from the transmitter

No.	Distance (m)	No.	Distance (m)
1	0.099	6	0.305
2	0.128	7	0.410
3	0.148	8	1.021
4	0.202	9	2.168
5	0.277	10	3.037

3.3 음향실험 결과

상기 구성에 따라 음향실험을 실시하였으며 그 결과는 1/3 옥타브 밴드 필터를 사용하여 주파수 별 음압레벨(sound pressure level)로 분석하였다. 이 때, 주파수범위는 중심주파수 기준으로 2.5~20 kHz이다. 수중청음기 위치와 주파수에 따른 음압레벨은 Fig. 4에 도시한 바와 같다.

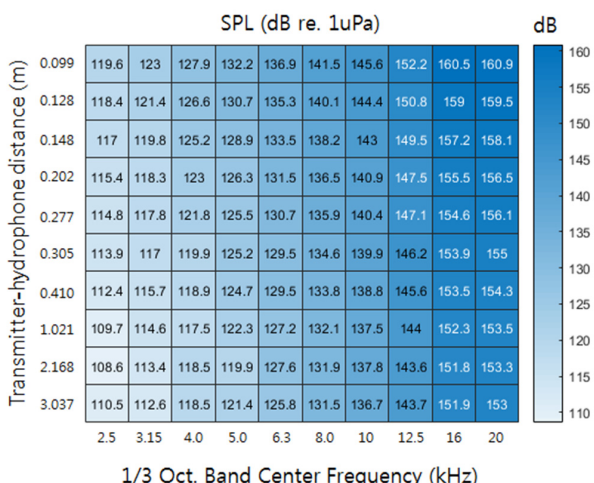
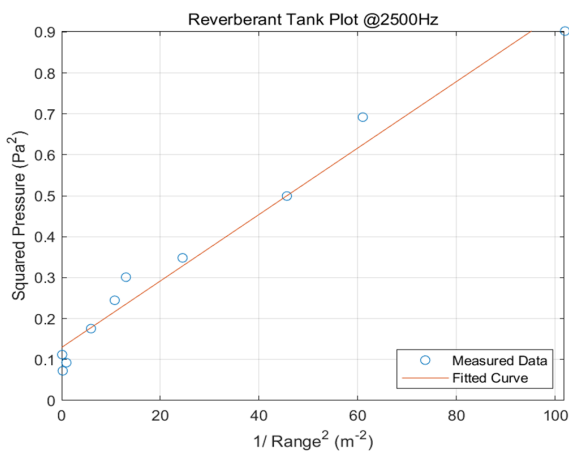


Fig. 4 Measured sound pressure level

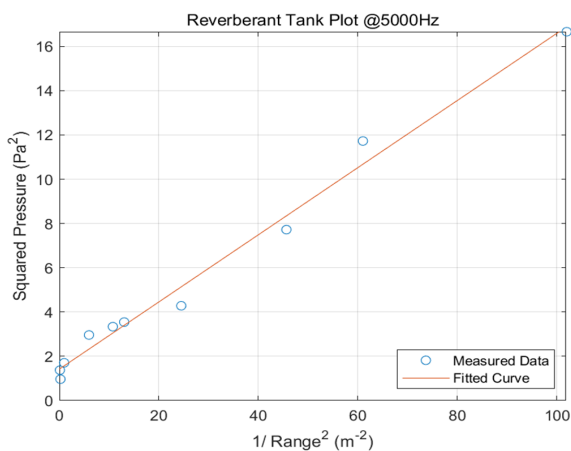
3.4 음향파라미터 산정

Fig. 2의 음압레벨 데이터를 이용해 주파수별 잔향수준도를 작성하였으며, 이로부터 대상수조의 음원출력과 잔향시간을 산정하였다.

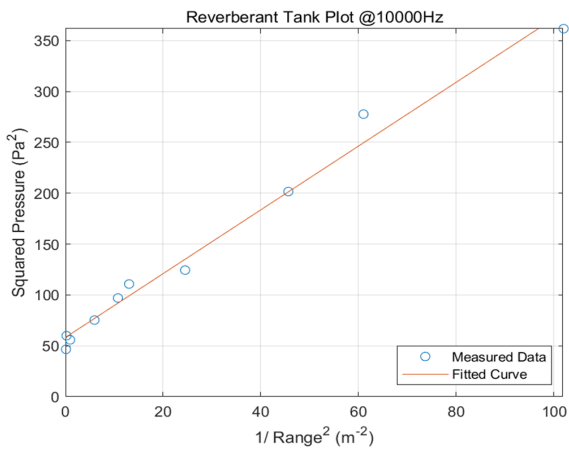
Fig. 5는 1/3 옥타브 중심주파수별 잔향수준도 중에서 2.5,



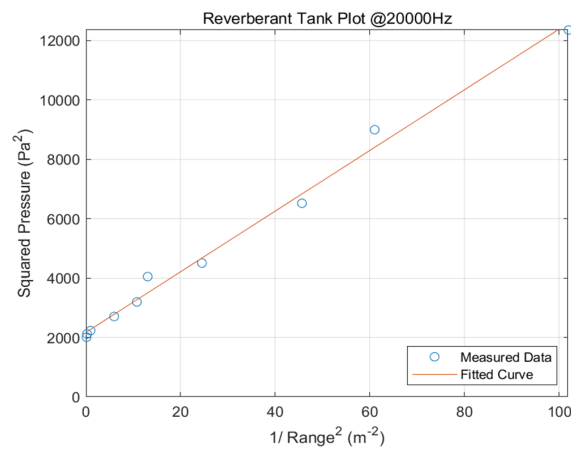
(a) 2.5kHz



(b) 5kHz



(c) 10kHz



(d) 20kHz

Fig. 5 Reverberant tank plot

5, 10, 20 kHz에 대해 대표 도시한 것이다. 선형회귀식을 이용해 기울기에 해당하는 음원출력 S 와 절편값에 해당하는 잔향음장 음압 p_r 을 산정하였다.

Fig. 6은 수중청음기 위치에 따른 음압레벨을 측정값(Measured Data), 추정 직접음장(Estimated data(Direct field)), 추정 잔향음장(Estimated data(Reverberant field))을 Fig. 5와 대응되도록 도시한 것이다. 참고로, '☆' 표시는 직접음장과 잔향음장이 동일한 음압레벨을 갖는 위치를 표시한 것이다.

Table 2 Source level of monopole sound source by 1/3 octave band center frequency

1/3 oct. band center freq. (Hz)	Source level (dB re. $1\mu Pa^2 \cdot m^2$)	1/3 oct. band center freq. (Hz)	Source level (dB re. $1\mu Pa^2 \cdot m^2$)
2,500	99.1	8,000	121.0
3,150	102.3	10,000	125.0
4,000	107.6	12,500	131.5
5,000	111.8	16,000	139.7
6,300	116.4	20,000	140.1

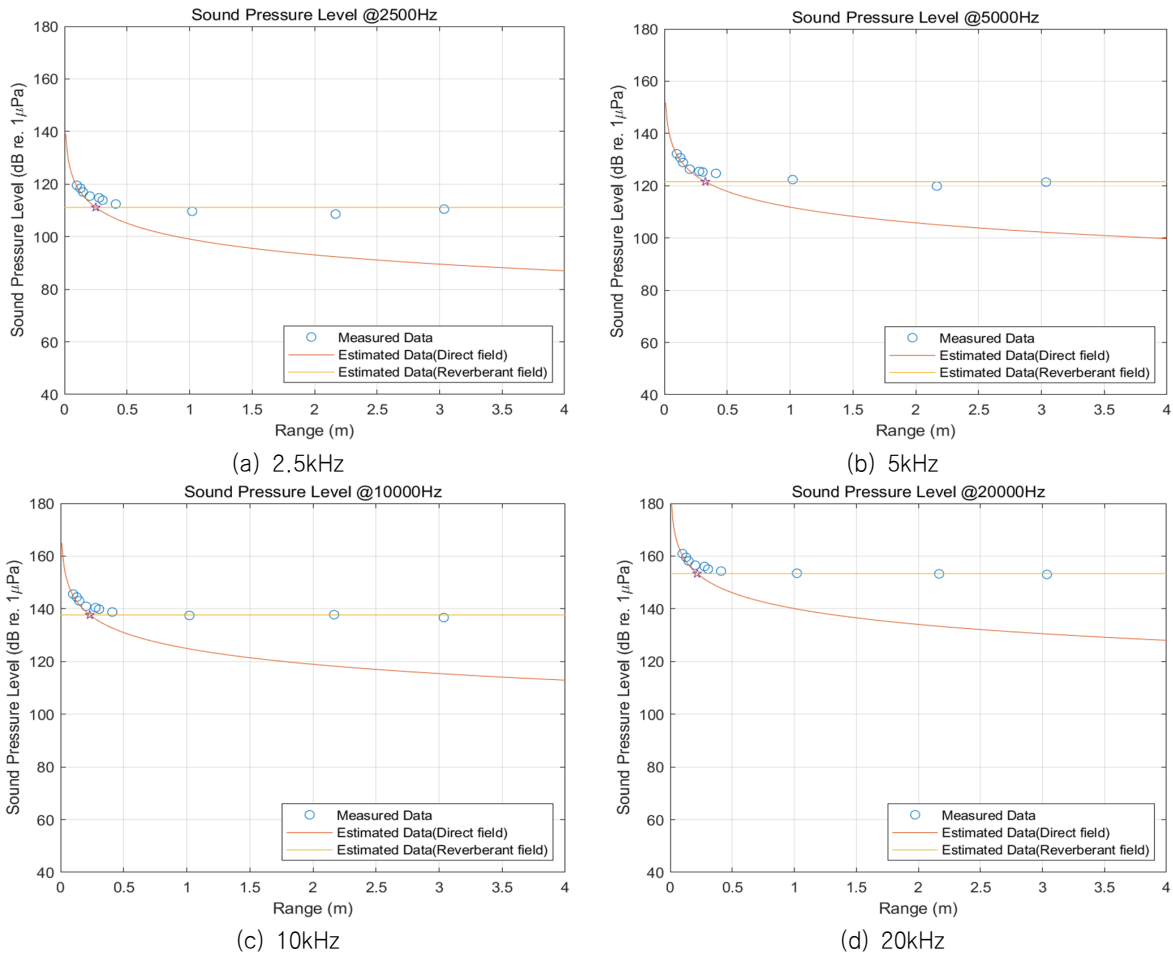


Fig. 6 Sound pressure level by range

Table 3 Power reflection coefficients by 1/3 octave band center frequency of the reverberant water tank

1/3 oct. band center freq. (Hz)	Power reflection coefficient (-)	1/3 oct. band center freq. (Hz)	Power reflection coefficient (-)
2,500	0.926	8,000	0.907
3,150	0.924	10,000	0.936
4,000	0.888	12,500	0.936
5,000	0.874	16,000	0.927
6,300	0.894	20,000	0.944

상기 결과를 이용해 음원출력과 잔향시간을 산정하였으며, 그 결과를 음원레벨과 음장 전체에 등가되는 파워반사계수로 환산하고 Table 2와 Table 3에 각각 정리하였다.

4. 수치해석

4.1 수치해석모델

수치해석모델은 잔향수조의 내부음장을 기준으로 그 제원과

음향학적 특성을 고려하여 768개의 평면삼각형으로 작성하고 (Fig. 7), 음향라디오시티법을 적용해 음장해석을 수행하였다. 이 때, 음파 전달 속도는 1,430m/s, 밀도는 1,000kg/m³, 매질 감쇠는 없는 것으로 가정하였다($\eta = 0$). 참고로, 수면은 완전 반사면으로, 잔향수조 벽면은 불완전 반사면으로 가정하였으며, Table 3의 파워반사계수를 반영하였다.

4.2 음원 및 수음점

음원으로는 음향실험과 동일하게 단극음원을 사용하였으며, 주파수 밴드별 음원레벨은 음향실험으로 도출한 Table 2의 값을 적용하였다. 음원의 위치는 음향실험에서와 동일하게 설정하였다.

수음점(receiver)은 수치해석결과 검증을 위한 배열과 잔향수조 음장해석을 위한 배열을 구분하여 설정하였다. 검증용 수음점 배열은 음향실험 시 수중청음기 위치와 동일하며, 잔향수조 음장해석용 배열은 길이-폭 평면 상에 벽면을 제외하고 길이 방향(range)으로 19개씩, 폭방향(cross range)으로 13개씩 공히 0.25m 간격으로 음원 깊이와 동일하게 균등 배치하였다 (Fig. 8).

4.3 수치해석결과 검증

수치해석은 2,500Hz ~ 20,000Hz 1/3 옥타브 밴드 중심주파수 구간에 대해 수행하였으며, 그 결과는 수중청음기 위치와 주파수에 따른 음압레벨로 Fig. 9에 도시하였으며, 수치해석결과와 음향실험결과와의 차이를 Fig. 10에 도시하였다.

수중청음기 위치와 주파수에 따라 경향은 잘 일치하고 있으며, 음향레벨의 차이도 평균 -0.1dB, 최대 1.7dB, 표준편차 0.56dB로 매우 우수한 정확도를 보이고 있다. 따라서 음향라디오시티법을 이용한 잔향수조의 음장해석이 유효함을 알 수 있다.

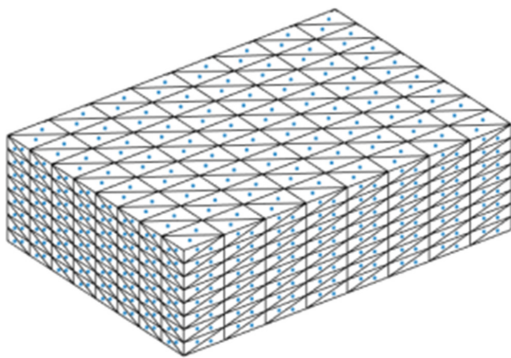


Fig. 7 Numerical model

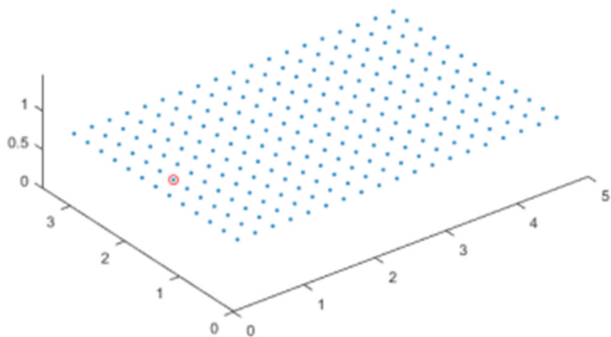


Fig. 8 Location of a monopole sound source(red open circle) and receivers(blue dots)

4.4 잔향수조 음장 해석

잔향수조 전체의 음장 분포를 검토하기 위해 Fig. 8의 수음정 배열에 대한 수치해석을 수행하였다.

Fig. 11은 잔향수조 정중앙(2.5m, 1.75m, 0.735m)에서의 음압레벨을 1/3 옥타브 밴드 중심주파수에 대해 도시한 것이다. 주파수가 증가함에 따라 음압레벨이 증가하며, 이는 음원레벨과 유사한 경향이다.

Fig. 12는 중심주파수 2.5, 5, 10, 20kHz에서의 음압레벨 분포를 contour map으로 도시한 것이다. 음원과 수음점의 거리에 따라 음압레벨이 감소하지만 거리가 커질수록 감소폭은 작아지고 있다. 이는 수음점이 음원과 가까울수록 직접음장이

지배적이며, 멀어질수록 잔향음장이 지배적이라는 일반론에 부합한다.

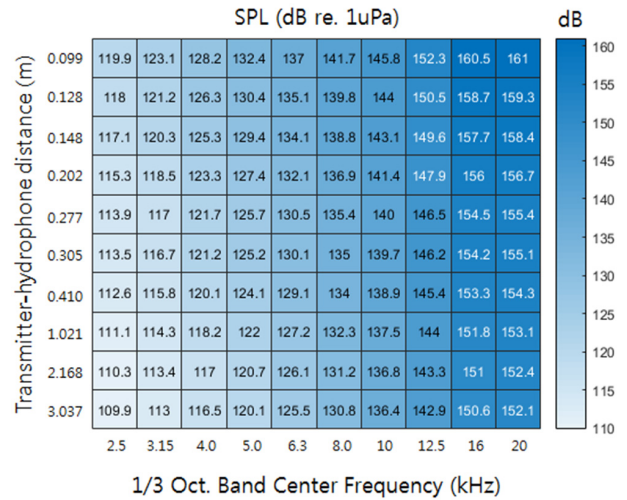


Fig. 9 Measured sound pressure level

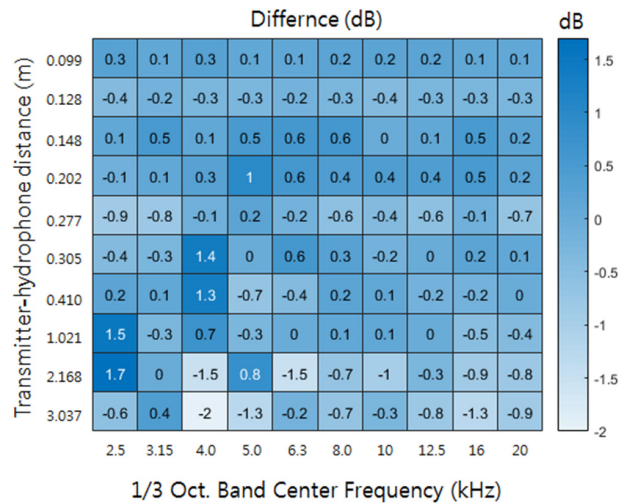


Fig. 10 Sound level difference between the measured and the calculated

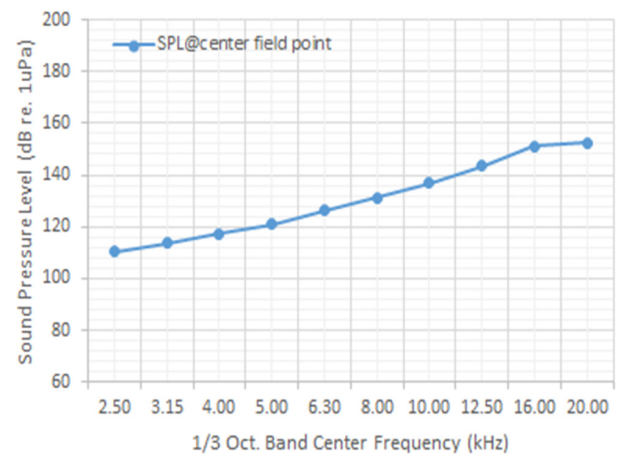


Fig. 11 Sound pressure level at the center field point

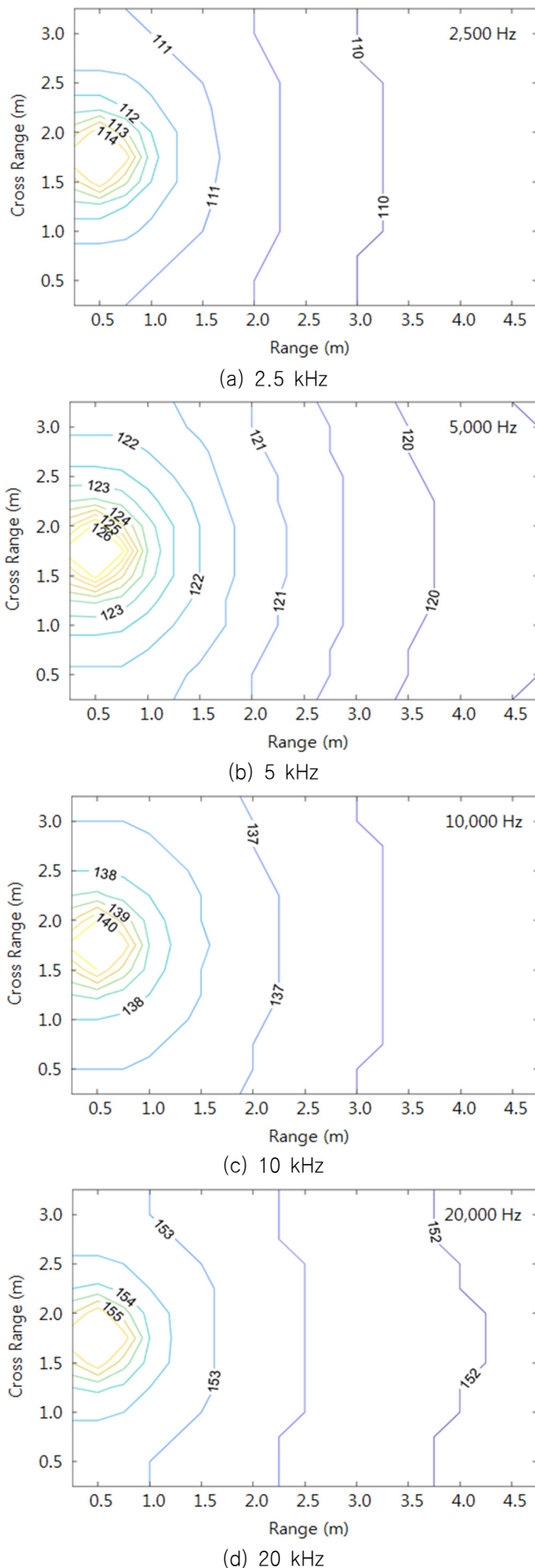


Fig. 12 Sound pressure level contour (dB re. $1\mu Pa$)

5. 결론

본 연구에서는 고주파수 음향 해석기법 중 하나인 음향라디오시티법을 이용해 잔향수조의 음장해석을 수행하였다. 수치해석모델에 반영할 음원레벨, 잔향시간 등의 음향파라미터는 대상 수조에 대한 음향실험을 수행하고 잔향수조도법을 기반으로 산정하였다. 음향파라미터 산출을 위해 실시한 음향실험에서와 동일한 음원과 수음점 조건에서 수치해석을 수행하고 그 결과를 거리별 음압레벨 실험결과와 비교하여 수치해석방법을 검증하였으며, 평균 0.1dB 수준으로 매우 우수한 정확도를 보였다. 추가로 잔향수조 내 음장 해석을 수행하고 주파수별 음장 분포를 검토하였다. 음원과 수음점의 거리에 따라 직접음장과 잔향음장의 지배영역이 구분되어 나타남을 확인하였다.

상기결과로부터 본 연구에서 적용한 음향라디오시티법 기반 수치해석기법이 잔향수조와 같은 잔향공간에서의 음장해석에 실무적으로 활용될 수 있음을 알 수 있다. 본 연구는 기하학적, 음향학적으로 단순한 음장에 대한 내용이므로 향후 보다 복잡한 음장공간에 대한 추가연구와 그에 따른 지속적인 개선 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후기

본 연구에 활용된 음향실험장치의 구성과 음향데이터 획득에 도움을 준 국방과학연구소 부설 해양기술연구원과 부산대학교 선체소음진동실험실에 감사합니다.

References

Carr, N.A., Hall, J.D., & Hart, J.C., 2003. GPU Algorithms for Radiosity and Subsurface Scattering. Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware, San Diego, California, USA, July 26–27, 2003.

Cochard, N., Lacoume, J.L., Arzelies, P., & Gabillet, Y., 2000. Underwater acoustic noise measurement. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25(4), pp.516–522.

Hazelwood, R.A. & Robinson, S.P., 2007. Underwater acoustic power measurements in reverberant fields. *IEEE Ocean 2007–Europe*, Aberdeen, UK, pp.1–6.

Kim, K., 2019. Experimental study on source level estimation techniques of underwater sound source in reverberant water tank. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(4), pp.358–363.

Kim, K., 2018. A study on room acoustic field analysis using radiosity method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(5), pp.394–400.

Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., & Sanders, J.V., 1982.

- Fundamentals of Acoustics*. 3rd Ed. John Wiley & Sons.
- Kuttruff, H., 2009. *Room Acoustics*. 5th Ed. Spon Press.
- Li, Q., Shang, D., & Tang, R., 2014. Sound source performance measurement take in reverberant tank with reverberation method. *ICSV 21*, July 2014, Beijing, China, pp.1-8.
- Nosal, E., & Hodgson, M., 2002. Preliminary experimental validation of the radiosity technique for predicting room sound fields. *Forum Acustium*, Seville, Spain, September 2002.
- Park, Y., Kim, K., Cho, D.S., & Lee, J.J., 2019. Numerical and experimental investigation on structure-acoustic coupling effect in a reverberant water tank. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(1), pp.94-101.
- SavioJa, L. & Svensson, U. P., 2015. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *Journal of Acoustical Society of America*, 138(2), pp.708-730.
- Siltanen, S, Lokki, T., Kiminki, S., & Savioja, L., 2007. The room acoustic rendering equation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(3), pp.1624-1635.



김국현