

무향수조 내 음향 홀로그래피를 이용한 음장가시화 시스템 개발

김시문, 최영철, 임용곤
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Development of a Sound Visualization System for an Anechoic Tank Using Acoustic Holography

Sea-Moon Kim, Youngchol Choi, and Yon-Kon Lim
KRISO/KORDI, {smkim, ycchoi, yklim}@kriso.re.kr

요약

소음원 또는 방사음장을 가시화하기 위하여 소음원을 둘러싸는 한 면에서의 음압측정을 통해 임의의 3차원 공간상의 음향 물리량을 예측하는 음향 홀로그래피 방법이 사용되고 있으며 이때 반사파가 존재하지 않는 기본 가정을 만족해야 한다. 반사파가 존재하는 경우에는 반사파를 보정하거나 또는 반사파의 음장이 미치는 영향이 무시할 만큼 작다고 가정하여 음장 예측이 가능하게 된다. 최근 해양연구원에서는 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 수중음장을 가시화하는 시스템을 개발하였으며 시스템 검증용 위해 무향수조 내 단순음원을 이용하여 음장예측을 수행하였다. 무향수조 표면에는 흡음처리기가 되지 않아 표면 반사파가 존재하나 해석 결과 반사파의 영향이 작은 경우에는 반사파를 무시하고 음장해석의 수행이 가능함을 확인하였다.

1. 서론

수중에서 음원의 위치를 추적하기 위한 방법으로 빔형성기법이 널리 사용되고 있으며 적용 알고리즘으로는 위상지연합, 최소분산법, MUSIC 등이 존재한다[1-3]. 빔형성기법은 음원이 원거리에 있는 경우 평면파 가정을 하여 입사각을 예측하거나 근거리에 존재하는 경우에는 구면파 가정을 하여 음원의 위치를 예측하므로[4] 음원으로부터 나오는 복잡한 방사 형상을 관측할 수 없다는 단점이 존재한다. 이에 반해 음향 홀로그래피 방법[5,6]은 음원을 둘러싸는 면에서의 음압 측정을 통해 3차원

의 음장 분포를 예측할 수 있어 소음원의 방사 특성 해석이 가능하다.

한국해양연구원에서는 수중 소음원 분석을 위해 무향수조 내에서 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 소음원의 방사 특성을 해석하고 음장을 예측하는 시스템을 개발하였다. 한국해양연구원 무향수조는 네 벽면과 바닥면에 흡음판이 설치되어 있지만[7] 표면에서는 위상이 반전된 반사파가 발생하기 때문에[8] 원칙적으로는 반사파를 고려한 해석이 이루어져야 하나 반사파의 영향이 작은 경우에는 이를 무시하고 예측하는 것이 가능하다[9].

본 논문에서는 개발된 시스템의 검증을 위하여 프로그램 수치해석 결과를 비교하였으며 실제로 단순 음원을 이용한 음장 가시화를 수행한 결과에 대하여 논하고자 한다.

2. 음향 홀로그래피 기본 이론

개발된 시스템의 알고리즘은 평면파의 조합으로 표현되는 평면 음향 홀로그래피를 사용하고 있다. 음장의 한 주파수 성분은 파수 성분의 적분 형태로 표현이 가능하며 카티잔 좌표를 이용하는 경우

$$P(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \hat{P}(k_x, k_y) e^{ik_x x} e^{ik_y y} e^{ik_z z} \quad (1)$$

와 같이 표현된다[10]. 여기서 P 는 공간상의 음압분포를 \hat{P} 는 파수성분을 의미한다. 이때 \hat{P} 는 한 평면에서의 음압 분포 $P(x, y, z_k)$ 로부터

$$P(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy P(x, y, z_0) e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} e^{-ik_z z_0} \quad (2)$$

와 같이 얻을 수 있다. 따라서 한 평면에서의 음압 측정치로부터 식 (2)에 의해 파수성분을 구하면 식 (1)에 의해 임의의 위치에서의 음장 예측이 가능하다. 식 (1)은 양의 z축 방향으로 전파하는 성분만이 존재한다는 가정 하에서 유도된 식으로서 반사파가 존재하지 않는 공간에서만 적용이 가능하다. 그러나 반사파에 의해 음의 z축 방향으로 전파하는 성분이 존재하는 경우 음압은

$$P(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \tilde{P}^+(k_x, k_y) e^{ik_x x} e^{ik_y y} e^{ik_z z} + \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \tilde{P}^-(k_x, k_y) e^{ik_x x} e^{ik_y y} e^{-ik_z z} \quad (3)$$

와 같이 표현된다. 이때 두 평면에서 측정된 음압분포 값을 식 (3)에 대입한 후 공간 푸리에 변환을 수행하면

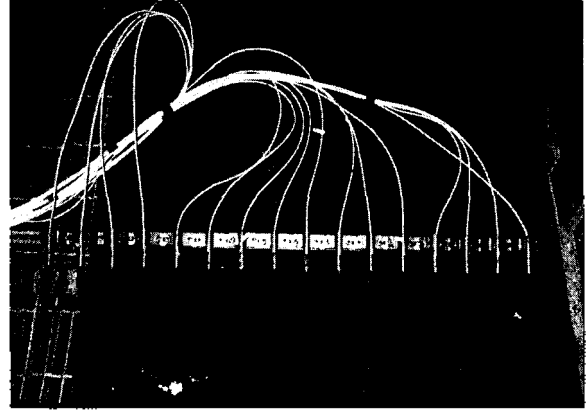
$$\begin{bmatrix} \tilde{P}^+ \\ \tilde{P}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{(2\pi)^2} \begin{bmatrix} e^{ik_z z_0} & e^{-ik_z z_0} \\ e^{-ik_z z_0} & e^{ik_z z_0} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \int \int P(x, y, z_0) e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dx dy \right. \\ \left. \int \int P(x, y, z_0) e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dx dy \right\} \quad (4)$$

와 같이 파수성분을 구할 수 있으며 이를 식 (3)에 대입하면 임의의 위치에서 음압 예측이 가능하다.

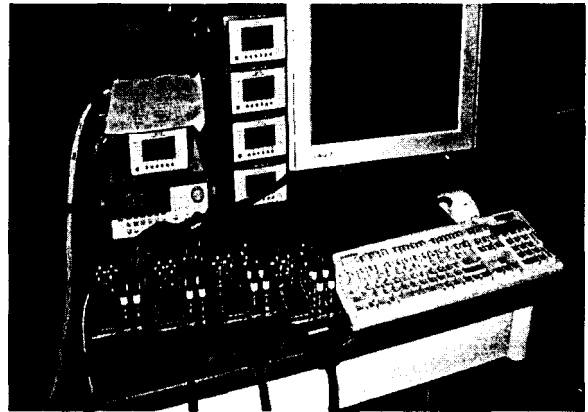
3. 시스템 구성

수중 음장 가시화 시스템은 수직배열 센서, 음향신호 측정 및 수집 장치 등의 하드웨어 부분(그림 1)과 음압 측정 및 음장예측 신호처리 소프트웨어 부분(그림 2)으로 구분된다. 수중음향 센서로는 B&K Type 8103을 사용하고 있으며 신호수집 장치는 NI의 PXI-6115 모델을 사용하고 있다. PXI-6115는 최대 10MHz의 샘플링률로 4 채널 측정이 가능하며 기준센서와 16채널 배열센서 신호측정을 위해 총 5개(채널 수 20개)가 사용된다.

신호 수집 및 데이터 저장 프로그램은 LabVIEW를 이용하여 작성하였으며 신호처리는 Matlab을 이용하여 작성하였다. 신호수집 프로그램의 GUI는 데이터 수집 장치의 채널 관련 설정부분, 주파수 설정 부분, 수중 음향 파라미터 설정 부분, 측정 데이터 그래프 출력 부분 등으로 구성되어 있다. 저장되는 데이터는 자기 및 상호 스펙트럼, 주파수 응답 특성, 상관함수 등이다. 음향 홀로그래피를 이용한 음장 예측 프로그램의 GUI는 공간 창문함수 및 필터, 예측 평면 설정 부분과 결과 그래프 창을 보기 위한 단추 집합 부분 등이 존재한다. 센서 간격 및 음향 특성 물리량은 측정시 저장된 데이터를 가져와서 사용한다.



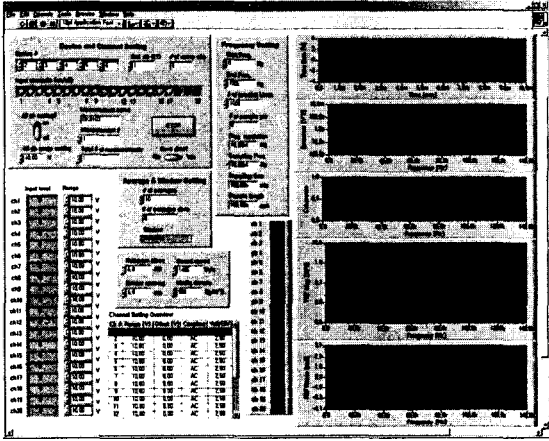
(a) 배열센서 사진



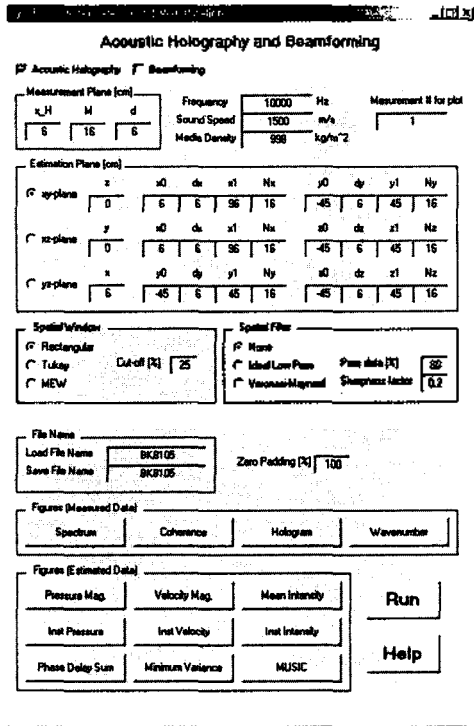
(b) 신호측정 및 데이터저장 장치
그림 1. 수중음장 가시화 시스템 하드웨어

4. 무향수조 실험 및 결과

음장 가시화 시스템의 검증은 위하여 실제 실험을 수행하여 음장가시화를 수행하였다. 소음원으로는 단순음원(B&K Type 8105)를 사용하였으며 배열센서는 6cm 간격으로 총 16개를 사용하였다. 그림 3은 실험장치 개요도의 측면도 및 상면도를 나타내며 그림 4는 무향수조 내 실험 장면을 보여주고 있다. 소음원은 5, 10, 15kHz의 조화가진과 랜덤 신호를 사용하였다. 그림 5~7은 조화가진의 경우에 대한 음장 및 음향 인텐시티 예측 결과를 나타낸다. 소음원이 중앙에서 방사되는 형상을 볼 수 있으며 주파수가 증가할수록 방향성이 존재하는 것을 알 수 있다. 랜덤 가진의 경우에 10kHz 이하의 성분은 SNR이 작아 결과 분석이 불가능하였으며 15kHz 성분의 경우에는 조화가진과 매우 유사한 결과를 얻었다.



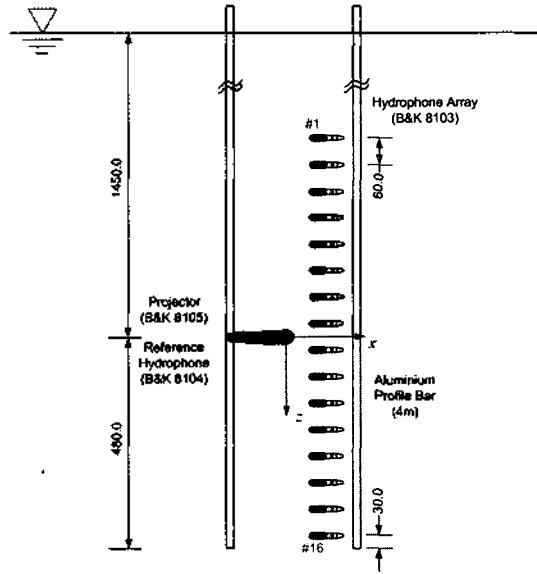
(a) 음압 측정 및 저장 프로그램



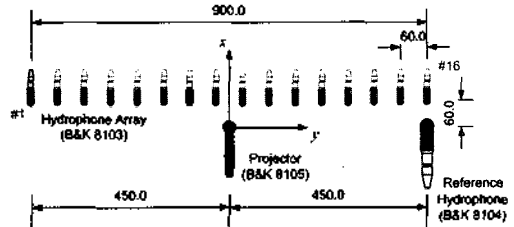
(b) 음장 예측 신호처리 프로그램
 그림 2. 수중음향 홀로그래피 신호 수집 및 음장 예측 프로그램 GUI 화면

5. 결론

한국해양연구원에서는 무향수조 내에서 배열센서를 이용하여 음장을 예측하는 시스템을 구성하여 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 3차원 음장을 가시화 하는 신호수집 및 신호처리 프로그램을 개발하였다. 시스템 검증을 위해서 실제로 무향수조 내에서 단순 음원을 이용하여 음장을 예측하는 실험을 수행하였으며 표면 반사파의 영향이 직접파에 비해 상대적으로 작아 예상된 결과를 얻을 수 있었다.



(a) 측면도



(b) 상면도

그림 3. 단순 음원을 이용한 무향수조 내 수중 음향 홀로그래피 실험 장치 개요도 (단위: mm)

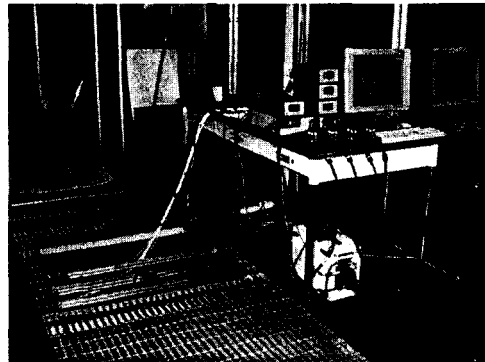
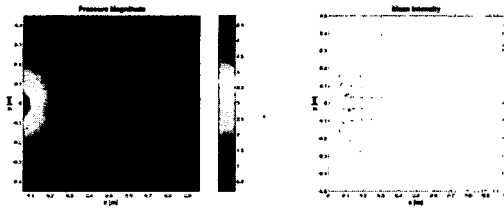


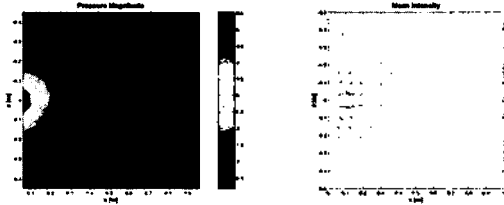
그림 4. 무향수조 내 수중 음장가시화 실험 장면 사진

후기

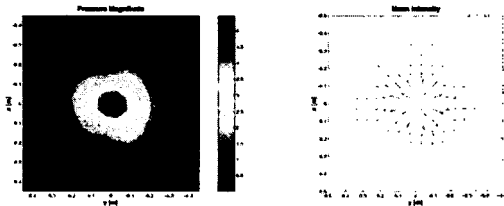
본 연구결과는 한국해양연구원에서 수행한 기본연구 사업인 “해양개발을 위한 설계엔지니어링 기술고도화 연구”와 “수중 3차원 퓨전영상 생성탐지 및 전송기술 개발” 과제 연구결과의 일부임을 밝힌다.



(a) xy-plane

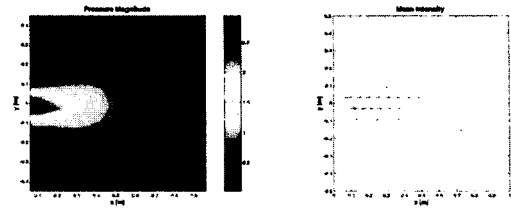


(b) xz-plane

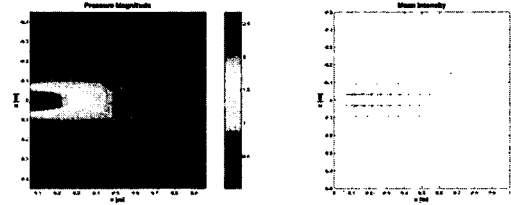


(c) yz-plane

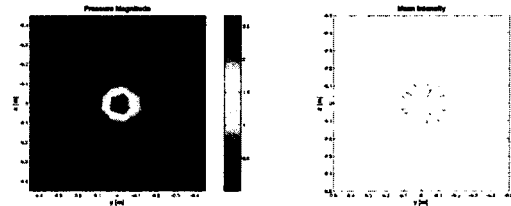
그림 5. 예측 음압 및 음향 인텐시티 (주파수: 5kHz)



(a) xy-plane

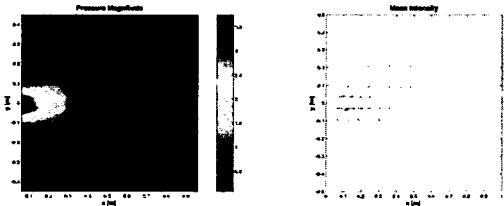


(a) xz-plane

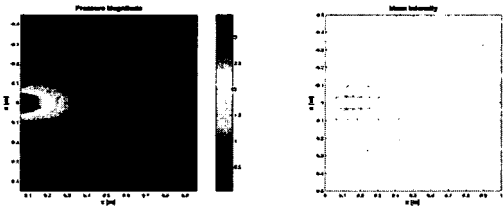


(c) yz-plane

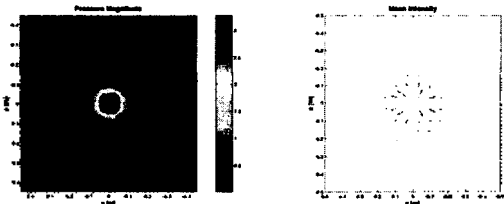
그림 7. 예측 음압 및 음향 인텐시티 (주파수: 15kHz)



(a) xy-plane



(b) xz-plane



(c) yz-plane

그림 6. 예측 음압 및 음향 인텐시티 (주파수: 10kHz)

참고문헌

1. S. Pillai, Array Signal Processing, Springer-Verlag, New York, Chap. 2, 1989.
2. T. Shan and T. Kailath, "Adaptive beamforming for coherent signal and interference," IEEE Transactions on ASSP, Vol. ASSP-33, No. 3, pp. 527-530, 1985.
3. R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and signal parameter estimation," IEEE Transactions on AP, Vol. AP-34, No. 3, pp. 276-280, 1986.
4. J.-W. Choi and Y.-H. Kim, "Spherical Beam-forming and MUSIC methods for estimation of location and strength of spherical sound sources," Mechanical systems and signal processing, Vol. 9, No. 5, pp. 569-588, 1995.
5. J. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, "Nearfield acoustic holography (NAH): I. Theory of generalized holography and the development of NAH," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78, No. 4, pp. 1395-1413, 1985.
6. W. A. Veronesi and J. D. Maynard, "Nearfield acoustic holography (NAH): II. Holography reconstruction algorithms and computer implementation," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 81, No. 5, pp. 1307-1322, 1987.
7. 임용곤 외, 수중 음향수조 시험기법 개발, 한국해양연구원 연구보고서, 2001.
8. 김시문, 최영철, 이종무, 박종원, 임용곤, "한국해양연구원 무향수조의 음향학적 특성 조사를 위한 실험 연구," 선박해양기술, 제 34호, 55-64, 2002. 8.
9. 김시문, 최영철, 임용곤, "표면 반사파가 존재하는 수중에서 근접 음향 홀로그래피의 적용 가능성 연구," 한국음향학회 춘계학술발표대회 논문집, 제 23권 제 1(s)호, pp. 163-166, 2004.
10. 김시문, 음향 홀로그래피에서 파라미터들이 음상 예측에 미치는 영향에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, 1994.