

# 표면 반사파가 존재하는 수중에서 근접 음향 홀로그래피의 적용 가능성 연구

김시문, 최영철, 임용곤  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

## Study on the Applicability of Nearfield Acoustic Holography to Underwater Acoustic Fields with Surface Reflections

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

### 요약

표면 반사파가 존재하는 무향수조 내에서 근접 음향 홀로그래피의 적용 가능성을 살펴보기 위하여 여러 변수의 변화에 따른 음장 예측 수치해석을 수행하였다. 수직 배열 센서 및 수평 배열 센서를 이용하는 경우에 대해 해석하였으며 수직 배열센서를 이용하여 한 면에서 측정하는 경우 표면 반사파에 의한 영향은 무시할 만큼 작은 것을 확인하였다. 수평 배열센서를 이용하는 경우에는 표면 반사파의 영향이 상대적으로 크게 나타나 반사파를 고려하기 위해 두개의 측정면에서의 음압값이 필요하며 직접파와 반사파를 모두 고려하는 경우 음압 예측치의 오차가 적게 나타남을 알 수 있었다.

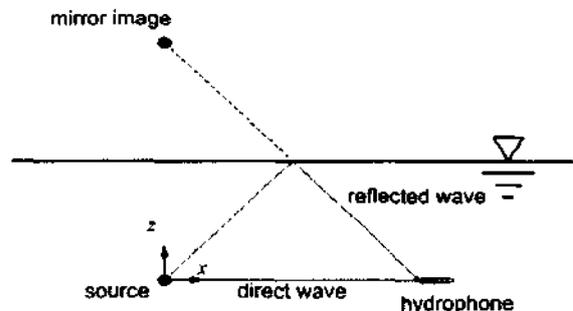
사 특성을 해석하고 음장을 예측하는 시스템을 개발 중이다. 본 무향수조는 네 벽면과 바닥면에 흡음판이 설치되어 있지만[7] 표면에서는 위상이 반전된 반사파가 발생하기 때문에[8] 원칙적으로는 반사파를 고려한 해석이 이루어져야 한다.

이와 같이 위상 반전된 표면 반사파가 존재하는 공간(그림 1)에서 빔형성기법에 관한 연구가 수행된 바 있으나[9] 음향홀로그래피 방법의 적용에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 위상 반전된 반사파가 존재하는 공간에서의 음향 홀로그래피 기법의 적용 가능성을 검증하고자 수직 배열 센서를 이용한 기존의 홀로그래피 방법과 수평 배열 센서를 이용한 두 평면 홀로그래피 방법의 예측 오차에 관한 수치해석을 수행하고 있다.

### 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 3차원의 음장 분포를 예측할 수 있어 소음원의 방사 특성 해석이 가능하다.

한국해양연구원에서는 무향수조 내에서 소음원의 방



### 2. 기본 이론

음장의 한 주파수 성분은 파수 성분의 적분 형태로 표

현이 가능하며 카티잔 좌표를 이용하는 경우

$$P(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \bar{P}(k_x, k_y) e^{i k_x x} e^{i k_y y} e^{i k_z z} \quad (1)$$

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

$$\bar{P}(k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \bar{P}(x, y, z_h) e^{-i k_x x} e^{-i k_y y} e^{-i k_z z_h} \quad (2)$$

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  $z$ 축 방향으로 전파하는 성분만이 존재한다는 가정 하에서 유도된 식으로서 반사파가 존재하지 않는 공간에서만 적용이 가능하다. 그러나 반사파에 의해 음의  $z$ 축 방향으로 전파하는 성분이 존재하는 경우 음압은

$$P(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \bar{P}^+(k_x, k_y) e^{i k_x x} e^{i k_y y} e^{i k_z z} + \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \bar{P}^-(k_x, k_y) e^{i k_x x} e^{i k_y y} e^{-i k_z z} \quad (3)$$

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

$$\begin{pmatrix} \bar{P}^+ \\ \bar{P}^- \end{pmatrix} = \frac{1}{(2\pi)^2} \begin{bmatrix} e^{i k_x x_h} e^{-i k_y y_h} \\ e^{i k_x x} e^{-i k_y y} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \iint P(x, y, z_h) e^{-i k_x x} e^{-i k_y y} dx dy \\ \iint P(x, y, z) e^{-i k_x x} e^{-i k_y y} dx dy \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

### 3. 수치해석

측정 배열센서가 수직인 경우와 수평인 경우에 대해 음향홀로그래피 수치해석을 수행하여 예측 오차를 살펴 보았다.

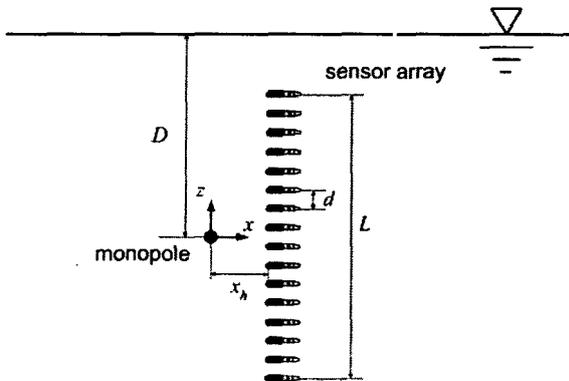


그림 2 수직 배열센서를 이용한 음향홀로그래피 수치해석의 좌표설정 및 변수 설명

### 3.1. 수직배열 센서

그림 2와 같이 수중에 단극음원이 수심  $D$ 에 위치해 있고 측정거리  $x_h$ 만큼 떨어져 있는 곳에서 센서간의 간격이  $d$ 인 수직배열 센서를 이용하여 음압을 측정하는 경우에 변수를 변화시켜 가면서 오차를 살펴보았다.

그림 3~6은 각각 음원의 깊이, 제로 패딩의 크기, 센서 간격, 측정면의 위치를 변화시켜 가면서 얻은 결과로 반사파에 의한 영향이 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

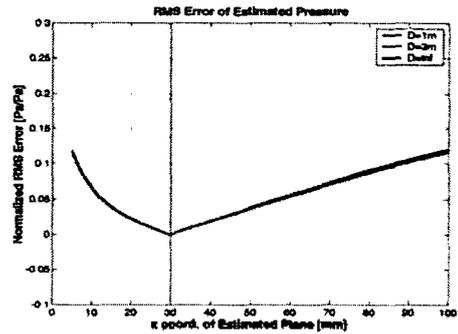


그림 3 음원의 깊이에 따른 예측오차 (주파수: 10kHz, 센서 간격: 30mm, 제로 패딩: 0%, 측정 위치: 30mm)

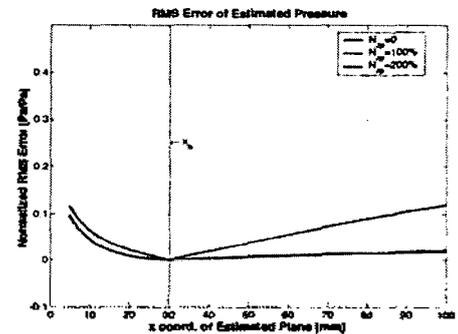


그림 4 제로 패딩의 크기에 따른 예측오차 (주파수: 10kHz, 센서 간격: 30mm, 음원 깊이: 1m, 측정면 위치: 30mm)

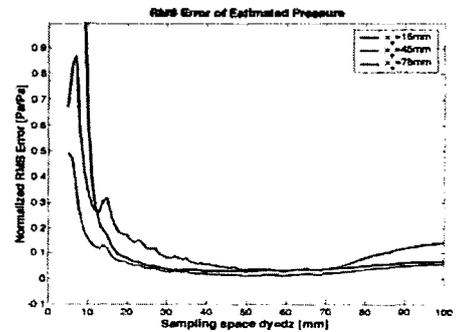


그림 5 센서 간격에 따른 예측 오차 (주파수: 10kHz, 제로 패딩: 0%, 음원 깊이: 1m, 측정면 위치: 30mm)

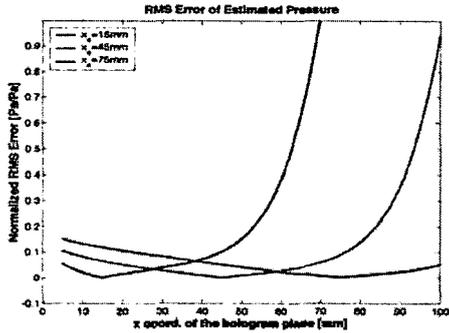


그림 6 측정면의 위치에 따른 예측 오차 (주파수: 10kHz, 제로 패딩: 0%, 음원 깊이: 1m, 센서 간격: 30mm)

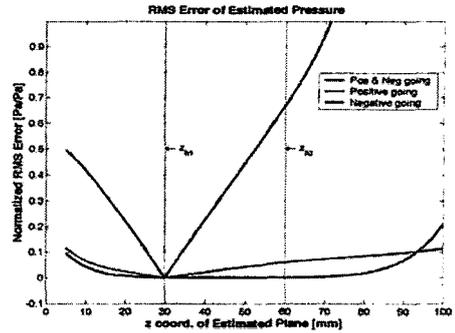


그림 8 파수성분의 고려 여부에 따른 예측오차 (주파수: 10kHz, 센서 간격: 30mm, 음원 깊이: 1m, 측정면 위치: 30mm, 60mm, 제로 패딩: 0%)

### 3.2. 수평배열 센서

그림 7과 같이 수중에 단극음원이 수심  $D$ 에 위치해 있고 측정거리  $z_{h1}$ 과  $z_{h2}$ 만큼 떨어져 있는 위치에서 센서간의 간격이  $d$ 인 수직배열 센서를 이용하여 음압을 측정하는 경우에 변수를 변화시켜 가면서 오차를 살펴 보았다.

그림 8은 파수성분 중 직접파만 고려하는 경우, 반사파만 고려하는 경우, 직접파와 반사파를 모두 고려하는 경우에 대한 오차 해석 결과로서 두 파수성분을 모두 고려하는 경우 오차가 최소가 되는 것을 알 수 있다. 그림 9~13은 직접파 및 반사파 모두를 고려하는 경우 음원의 깊이, 제로 패딩, 센서 간격, 측정면 위치, 측정면 사이의 간격에 따른 예측 오차를 나타낸다. 측정면에서 멀어질수록 예측 오차가 증가하는 현상이 나타나며 측정면 사이에서는 오차가 거의 존재하지 않는다.

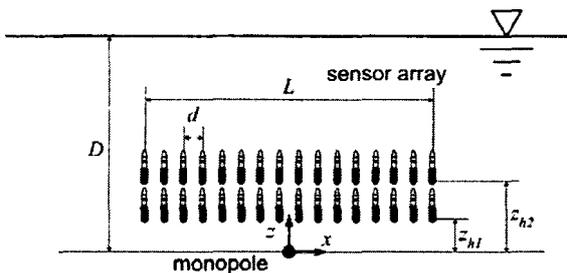


그림 7 수평 배열센서를 이용한 음향홀로그래피 수치해석의 좌표설정 및 변수 설명

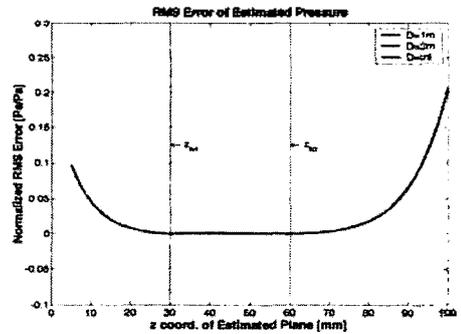


그림 9 음원의 깊이에 따른 예측오차 (주파수: 10kHz, 센서 간격: 30mm, 측정면 위치: 30mm, 60mm, 제로 패딩: 0%)

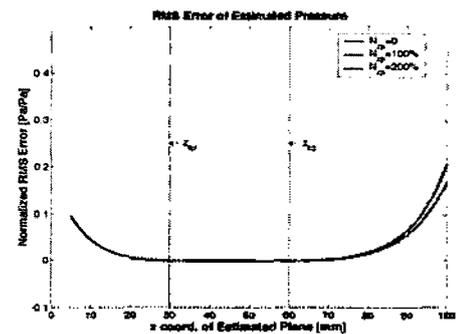


그림 10 제로 패딩에 따른 예측 오차 (주파수: 10kHz, 센서 간격: 30mm, 음원 깊이: 1m, 측정면 위치: 30mm, 60mm)

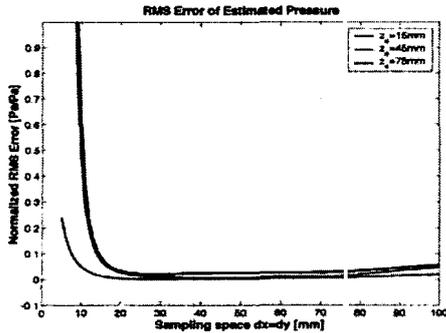


그림 11 센서 간격에 따른 예측 오차 (주파수: 10kHz, 음원 깊이: 1m, 측정면 위치: 30mm, 60mm, 제로 패딩: 0%)

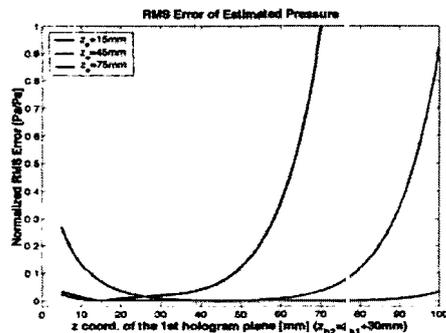


그림 12 측정면 위치에 따른 예측 오차 (주파수: 10kHz, 센서 간격: 30mm, 음원 깊이: 1m, 제로 패딩: 0%, 측정면 사이 간격: 30mm)

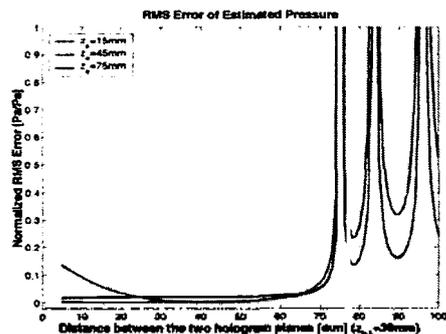


그림 13 측정면 사이의 간격에 따른 예측 오차 (주파수: 10kHz, 센서 간격: 30mm, 음원 깊이: 1m, 첫 번째 측정면 위치: 30mm, 제로 패딩: 0%)

#### 4. 결론

본 논문에서는 표면 반사파가 존재하는 무향수조에서 음향 홀로그래피 기법에 의한 음장 예측 성능을 검증하

기 위하여 수직 배열 센서와 수평 배열 센서를 사용하는 경우에 대한 오차 해석을 수행하였다.

수직 배열 센서를 사용하는 경우 오차는 거의 존재하지 않으며 수평 배열 센서인 경우도 측정면 근방에서의 예측 오차는 거의 존재하지 않음을 알 수 있었다.

결론적으로 무향수조에서 음향 홀로그래피를 이용한 음장 예측 및 소음원 특성 분석이 가능한 것을 확인하였으며 오차가 크게 나타나는 부분에서는 창문 함수 및 공간 필터링과 같이 오차 감소를 위한 연구가 필요함을 알 수 있었다.

#### 후기

본 연구결과는 한국해양연구원에서 수행한 기본연구 사업인 "해양개발을 위한 설계엔지니어링 기술고도화 연구" 과제 연구결과의 일부임을 밝힌다.

#### 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 근접장에서 소음원 추적," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 제 22권 제 1(s)호, pp. 461-466, 2003.
10. 김시문, 음향 홀로그래피에서 파라미터들이 음장 예측에 미치는 영향에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, 1994.