

근접장 음향 홀로그래피에 의한 수중 음원의 위치 추정

Positional Estimation of Underwater Sound Source Using Nearfield Acoustic Holography

김 원 호*, 윤 종 략**
(Won-Ho Kim*, Jong-Rak Yoon**)

*국방과학연구소 음향센서연구팀, **부경대학교 정보통신공학과
(접수일자: 2003년 3월 31일; 수정일자: 2004년 8월 9일; 채택일자: 2005년 2월 20일)

본 논문은 근접장 음향 홀로그래피를 이용한 수중 음원의 위치를 추정하는 기술에 대한 것이다. 수중 소음원의 식별에 적용 가능함을 실험으로 검증하고 그 결과를 기술하였다. 실험에 사용된 음원은 2개의 구형 센서로 구성되고 음원의 근거리 음압은 음원과 근접된 위치에 설정된 홀로그램 평면에서 측정된다. 측정된 음압에 대한 상호전력 스펙트럼으로부터 홀로그램 평면에서의 복소음압을 구하고 이를 공간 변환하여 음원 영역에서의 음장분포를 구하였다. 음원 영역에서의 음장분포 결과는 음원의 위치와 발생된 음원준위의 크기를 가시적으로 보여주며, 실험 결과는 음원의 위치와 음원준위의 상대적인 크기를 정확하게 추정하고 있어 근접장 음향 홀로그래피를 이용하여 수중 소음원의 위치 추정과 개별 소음원의 기여도 분석이 가능함을 확인하였다.

핵심용어: 공간 변환, 홀로그램 평면, 상호전력 스펙트럼, 근거리 음압, 음장

투고분야: 수중음향 분야 (5.1)

This paper describes the experimental study for the position estimation method of underwater sound source using the Nearfield Acoustic Holography. The result confirms that it can be used in the identification of underwater noise sources. The sound sources in the experimental work consists of 2 spherical projectors and the near-field sound pressure is measured in the hologram plane. From the cross-power spectra of the measured data, the complex sound pressures on the hologram plane is derived and its spatial transformation gives sound fields in a source region. The obtained sound fields in a source region showed that the position of each sound source and their relative source strength are exactly estimated. In conclusion, this technique can be applied for estimation of each source position and its relative strength contribution for the underwater multiple sound sources.

Keywords: Spatial transformation, Hologram plane, Cross-power spectrum, Near-field sound pressure, Sound field

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.1)

I. 서론

함정에서 발생하는 자체 소음 (self noise)은 적으로부터 자신의 위치를 노출시키게 되므로 소음원을 찾아내어 소음을 줄이거나 차폐시켜야 한다. 이러한 소음원은 함정의 엔진 등의 기계적 소음, 프로펠러 소음 등 다양한 복합음원에 의해 발생되며, 소음원 제어를 위해서는 소음을 유발하는 주요 내부 음원과 소음 경로를 진단해야

하며, 이를 위해 개별 소음원의 위치를 찾아내고 소음원의 음장 (sound field) 분포를 공간상의 영역으로 가시화할 필요가 있다.

수중 음원의 위치 추정법에는 빔 형성 방법 (beamforming method)을 이용한 수신 신호 도래각 추정법, 다중 경로 (multipath)를 갖는 수중 환경에서의 음파 전달 모델에 근거한 정합장 처리 (matched field processing) [1,2]에 의한 방법, 음향 인텐시티 (intensity) 방법[3] 그리고 근거리 음향 홀로그래피 방법(Near-field Acoustic Holography; NAH)[4-6] 등을 열거할 수 있다.

빔 형성 방법을 이용한 Bartlett 빔 형성기[7], Capon

책임저자: 김 원 호 (kwh0226@bclinc.com)
경남 진해시 우체국 사서함 18호 국방과학연구소 2체계본부 1부 8팀
음향센서연구팀
(전화: 055-540-6184; 팩스: 055-542-3737)

방법[8] 등의 방향 탐지 알고리즘과 정합장 처리 기법은 원거리에서 수신된 신호로부터 음원의 위치를 추정하는 기법으로 수중 위협 표적의 추적을 위해 사용되고 있으나, 소음원의 근거리 음장분포를 가시적으로 나타내기에는 적절치 못 하며, 음향 인텐시티법은 음파의 흐름을 가시적으로 표현 가능하여 자동차 및 항공기 등과 같은 여러 가지 기계 요소들의 다양한 복합 구조물에서 발생되는 소음이나 이상음 등의 위치를 추정하여 제어하고 진단하는데 응용될 수 있으나, 수중에서의 인텐시티 측정은 적합하지 않다.

반면에 1984년 Maynard[4]가 제안한 근거리 음향 홀로그래피 (Near-field Acoustic Holography; NAH) 방법은 음원 근처에서만 존재하는 감쇄파 (evanescent wave)를 1960년대 중반에 발표된 음향 홀로그래피 (acoustical holography) 이론에 도입함으로써 음원이 존재하는 영역에서의 음장 해석이 가능하게 되었다. 감쇄파는 음원으로부터 음이 방사 후 음원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 급격히 감소하여 원거리에서는 나타나지 않는 음파이기 때문에 음원 영역에서의 음장 분포를 해석하기 위해서는 감쇄파의 측정이 중요하다. 따라서 음원 근처의 근거리 음장을 측정하여 음원 영역에서의 음장 분포 해석이 가능하며, 소음원의 위치 추정 및 기여도 분석에 활용할 수 있다.

그리고 상호전력 스펙트럼 (cross-power spectrum)을 음장 해석에 도입[9-11]함으로써 정상상태의 음원의 경우에는 홀로그래프 평면에서의 동시 측정의 제한점을 해소하게 되었다. 음원 영역에서의 음장 해석을 위해 NAH 기술과 상호전력 스펙트럼을 접목한 근거리 음압의 공간 변환 이론과 모의시험 결과를 제시[12]하였으며, 이를 근거로 한 수중 음원의 위치 추정에 적용하기 위한 실험을 본 논문에서 수행하였다. 음원 위치의 추정을 위한 음원 영역에서의 음장 분포를 구하기 위해서는 음원을 둘러싼 폐곡면 상에서의 음장 측정이 요구되나, 이를 실험적으로 구현하기에는 어려움이 많기 때문에 음장 측정을 위한 홀로그래프 평면은 평면으로 구성하고, 근거리 영역에서만 존재하는 감쇄파를 측정하기 위하여 홀로그래프 평면은 음원에 최대한 근접한 위치에 배치하여야 한다. 음원은 동일한 종류의 구형 트랜스듀서 2개를 배열하고 홀로그래프 평면을 구성하는 하이드로폰과 기준 하이드로폰은 음향 간섭을 최소화할 수 있도록 크기가 작은 소형의 하이드로폰을 선택하였다. 이러한 하이드로폰 들을 배열한 선배열 센서를 상하와 좌우로 이동하여 홀로그래프 평

면을 구성하고, 홀로그래프 평면에서의 상호전력 스펙트럼을 측정하여 공간 변환함으로써 음원의 위치와 개별 음원의 기여도를 추정하였으며, II장에서는 실험을 위한 구성도 살펴보고 III장에서는 실험 결과를 제시하였다.

II. 수중 음원의 위치 추정을 위한 실험

수중에 있는 음원의 위치를 추정하기 위한 측정 시스템의 구성도는 그림 1과 같다. 여기서 음원은 구형 트랜스듀서인 ITC1001 (직경 10.795 cm, 그림2 참조) 2개를 사용하였다. 배열 간격 d_s 는 20 cm, 수심은 2.54 m로 같은 깊이에 설치하고 음원으로부터 7.2 cm (Z_0) 떨어진 지점에 홀로그래프 평면을 구성하였다. 음원 위치의 추정을 위해서는 음원으로부터 거리가 멀어질 수록 급격히 감소하는 감쇄파를 측정하는 것이 중요하므로 음원과 홀로그래프 평면과의 거리는 최대한 음원 근처에 설치하였다. 기준 하이드로폰과 홀로그래프 평면을 구성하는 하이드로폰 들은 하이드로폰 들간에 음향 간섭을 최소화할 수 있도록 크기가 작아야 하며, 따라서 본 논문의 실험에서는 직경 0.95 cm, 길이 2.5 cm인 B&K8103을 사용하였다. B&K8103은 100 kHz 이하의 주파수에서는 수평과 수직면상에서 1 dB 이내의 무지향성 빔 (beam) 특성을 갖고 있어 홀로그래프 평면 내의 위치에 따른 지향 특성에 의한 영향을 무시할 수 있다. 홀로그래프 평면의 하이드로폰 배열 간격은 음원의 크기에 대한 해상도와 공간상의 엘리어상을 고려하여 3.5 cm로 하였으며, 배열 수는 가로 25 지점, 세로 25 지점으로 총 625 지점으로 구성하였다. (홀로그래프 평면의 크기; 84 cm x 84 cm) 7개의 B&K8103 하이드로폰을 7 cm 간격으로 선배열을 구성 (그림 3 참조)하였으며 선배열 센서를 상하, 좌우로 이동하여 홀로그래프 평면을 구성하였다. 상하 이동을 위해 선배열 지지봉 4곳에 고정구와 연결편을 제작하였으며, 수평 이동을 위해서 이동 레일을 마련하였다. 기준 하이드로폰은 2개의 음원 센서 중심에 설치하여 기준 하이드로폰과 홀로그래프 평면에서의 하이드로폰 들에 대한 상호전력 스펙트럼을 측정하도록 하였다. 육상에서 센서들의 설치와 이동을 조정하기 때문에 실제 수중에 설치된 센서들의 위치는 오차를 포함할 수 있다. 본 논문의 실험에서 수심은 선배열 센서의 길이를 고려하면 최대 2.96 m로서 (육상부 센서 이동 레일까지는 약 4

m) 센서가 설치된 위치에서는 수 cm의 오차가 발생할 수 있으며, 이러한 위치 오차는 음원과 홀로그래프 평면간의 거리가 근접되어 있기 때문에 추정 결과에 오차로 작용할 수 있다. 설치 수직을 최대한 낮게 하면 수중에서의 위치 오차를 줄이는 것이 가능하나, 수면으로부터의 반사파의 영향으로 수면 근처에 센서 설치는 바람직하지 않다. 따라서 본 실험에서는 설치 및 이동 오차를 최소화하기 위해 기준 하이드로폰과 홀로그래프 평면을 구성하는 선배열 센서 아래에 무거운 추를 달아 가능한 수직으로 위치하도록 하여 육상과 수중에서의 위치가 가능한 동일하도록 하였다.

다수의 B&K8103 하이드로폰 들 중에서 홀로그래프 평면을 구성할 7개 하이드로폰을 선정하기 위해 먼저 공기 중에서 임피던스 측정으로 1차 선정하고 수중에서의 수신전압감도 (Receiving Voltage Response; RVS)를 측정 (측정 결과; 그림 4 참조) 하여 이중 RVS 특성이 유사한 것을 선정하였다. 음향 수조는 길이 18 m, 폭 10

m 그리고 깊이 10 m의 장방형 구조이며, 수조 벽면 등에서의 반사파 영향을 제거하기 위하여 펄스 폭이 2 ms 인 버스트 신호를 사용하였다. 신호발생기 (HP 3314A) 에서 음파를 발생하여 전력증폭기 (B&K2713A)를 통해 2개의 음원으로 분기하여 인가하였다. 그리고 기준 하이드로폰에서의 신호와 홀로그래프 평면을 구성하는 선배열 센서에서의 신호를 동시에 FFT 처리하여 상호전력 스펙트럼을 순차적으로 측정하였다. 하이드로폰 들의 수신감도가 동일하지 않으므로 상호전력 스펙트럼은 센서들의 주파수별 RVS 특성을 보상하여 센서들의 위치에서의 음압 준위 (sound pressure level)로부터 구하였다. 실험에 사용한 주파수는 10 kHz이며, 배열 간격 d 는 공간상의 엘리어싱 영향을 받지 않도록 3.5 cm로 하였다. ($d < Z_k$ 이고 $d \leq \lambda/2$ 의 Nyquist 조건[5]을 만족)

III. 실험 결과

II장에서 설명한 실험 구성에서의 실험 결과는 그림 5

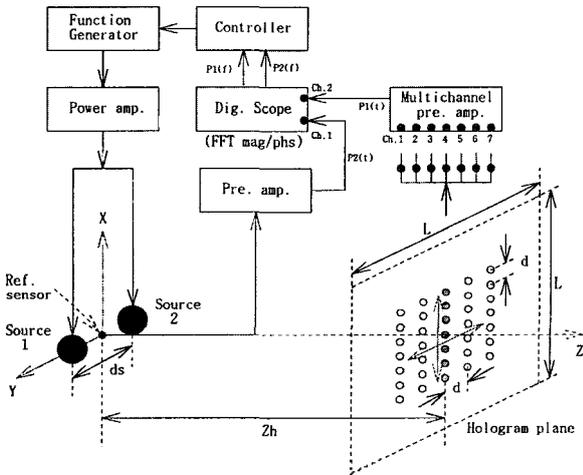


그림 1. 근거리 음장 측정 시스템
Fig. 1. Measurement system for sound field in near-field.



그림 2. 수중에 설치된 음원과 하이드로폰
Fig. 2. Sound sources and hydrophones installed in water.



그림 3. 홀로그래프 평면 내의 선배열 센서
Fig. 3. Line array sensor in hologram plane.

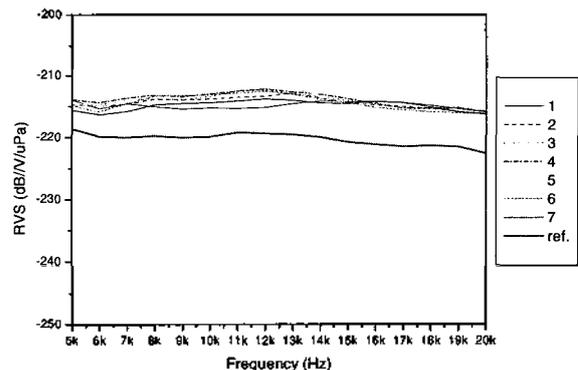


그림 4. B&K8103 하이드로폰 들의 수신전압감도
Fig. 4. Receiving voltage response of B&K8103 hydrophones.

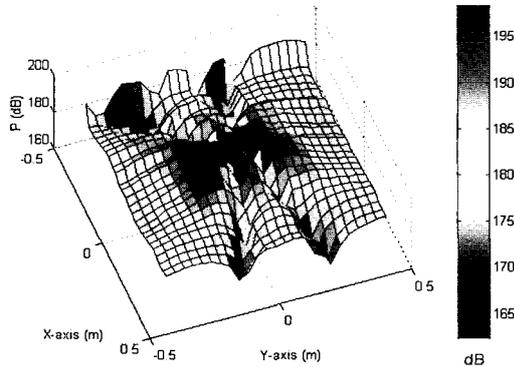


그림 5. 홀로그래프 평면에서의 음장분포(10 kHz)
 Fig. 5. Sound field on the hologram plane(10 kHz).

에서 그림 7과 같다. 그림 5는 홀로그래프 평면에서 측정된 상호전력 스펙트럼으로부터 구한 홀로그래프 평면에서의 음압에 대한 음장분포이며, 이로부터 구한 파수 영역에서의 결과는 그림 6과 같다. 그림 6과 7에서 (a)는 음장분포를 입체적으로 나타낸 그림이며, (b)는 평면 상에

나타낸 그림이다. 그림 6의 (b)에서 보는 바와 같이 방사원이 $k_0 = 41.9$ (주파수 10 kHz에 해당하는 파수)에서 형성됨을 알 수 있다. 방사원 내부의 음장은 원거리로 전파하는데 기여하는 성분으로 방사원을 형성하는 파수에서 가장 크게 나타나고, 방사원 외부의 음장은 근거리에서만 존재하는 감쇄파 성분으로 음원 영역에서의 음장분포를 추정하는데 기여하게 된다. 그림 6의 파수 영역에서의 음장분포를 음원 영역으로 이동 후 공간좌표에서의 음장분포로 변환하면 그림 7과 같다. 그림 7의 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이 2개의 음원이 구분되어 개별 음원의 위치를 보여주고 있으며, 각 음원에서 발생된 상대적인 음원준위(source level)의 크기를 비교할 수 있다. 음원준위가 다른 2개의 음원 중 +Y 축에 위치한 음원 1의 음원준위가 다소 작게 나타나고 있으며, 그림 7의 (b)에서 두 개의 점선으로 그린 원은 음원을 설치시의 예상된 위치를 나타내었는데, 실제 음원 1이 설치된 위치는 약 3cm 정도 가운데로 치우쳐져 있음을 알 수 있다. 이

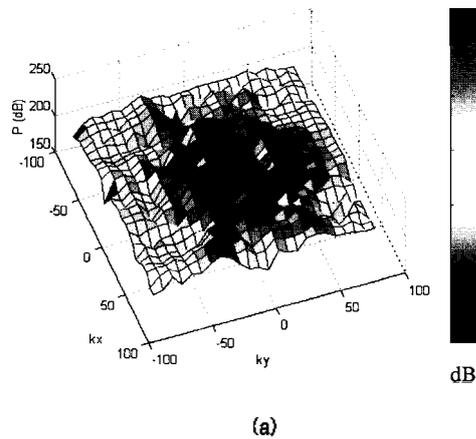


그림 6. 홀로그래프 평면의 파수 영역에서의 음장분포($k_0 = 41.9$).
 Fig. 6. Sound field on the wavenumber domain of hologram plane($k_0 = 41.9$).

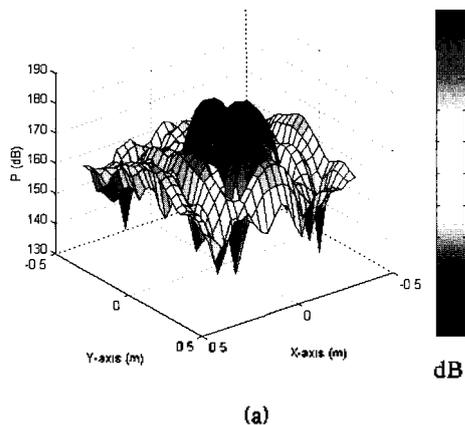


그림 7. 음원 영역에서의 음장분포(10 kHz)
 Fig. 7. Sound field on the source region(10 kHz).

러한 결과는 수중 소음원에 적용할 경우, 개별 소음원의 위치와 발생된 소음원의 음압 크기 추정 등의 기여도 분석이 가능함을 시사한다.

IV. 결론

이상과 같이 음원 근처의 근거리 음장을 측정하고 공간 변환 이론을 적용하여 수중에 위치한 음원의 위치를 추정하기 위한 실험을 수행하였다. 실험 결과는 음원의 위치와 음원준위의 상대적인 크기를 추정하고 있으며, 따라서 근거리 음압의 공간 변환 이론을 적용하여 수중 소음원의 위치 추정과 개별 소음원의 음압의 크기 분석 등의 기여도 분석이 가능함을 알 수 있다. 수중에서의 위치 오차를 줄이고 실험에 소요되는 시간을 줄이기 위해서는 다수의 하이드로폰 들을 평면 배열하여 홀로그래프 평면을 구성하는 것이 필요하며, 음원 위치의 정확한 추정을 위해서는 홀로그래프 평면의 크기, 홀로그래프 평면을 구성하는 하이드로폰 들의 간격과 음원과 홀로그래프 평면과의 거리에 대한 실제 현장에서의 적용을 위한 체계적인 정립과 합정의 방사소음 측정 등의 측정 시스템 구축의 현실적인 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and H. Schmidt, "Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem", *J. Acoust. Soc. Am.*, **83** (2), 571-587, 1988.
2. J. L. Krolik, "The performance of matched-field beamformers with mediterranean vertical array data", *IEEE Trans. Signal Processing*, **44** (10), 2605-2611, 1996.
3. T. Asturp, "Acoustic intensity and spatial transformation used to describe the sound field around a seismic vibrator", *Proc. of Nordic Acoustical Meeting*, 413-415, 1986.
4. J. D. Maynard, "Experimental study using nearfield acoustic holography of sound transmission through fuselage sidewall structures", *Progress Report*, Pennsylvania State Univ., 1984
5. J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, "Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH", *J. Acoust. Soc. Am.*, **78** (4), 1395-1412, 1985.
6. W. A. Veronesi, and J. D. Maynard, "Nearfield acoustic holography (NAH) II. Holographic reconstruction algorithms

and computer implementation", *J. Acoust. Soc. Am.*, **81** (5), 1307-1322, 1987.

7. M. S. Bartlett, "Smoothing periodograms from time series with continuous spectra", *Nature*, **161**, 686-687, 1949.
8. J. Capon, "High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis", *Proc. IEEE* **57** (8), 1408-1418, 1969.
9. H. G. Ferris, "Farfield radiation pattern of a noise source from nearfield measurements", *J. Acous. Soc. Am.* **36**, 1597-1598, 1964
10. Per Rasmussen, "Spatial transformation of sound fields", *Sound and Vibration*, 18-24, 1995
11. J. Hald, "STSF-A unique technique for scan-based acoustic holography without restrictions on coherence", *B&K Technical Review*, **1**, 1989.
12. 김원호, 윤종락, "근거리 음압의 공간 변환에 의한 음원의 음장 분포 해석", *한국음향학회지*, **22** (8), 660-669, 2003.

저자 약력

• 김 원 호 (Won-Ho Kim)



한국음향학회지 제22권 8호 참조
 현재: 국방과학연구소 울함산서연구원(선임연구원)
 ※ 주관심분야: 선서 음장 해석, 측정 기법, 수중 음향

• 윤 종 락 (Jong-Rak Yoon)

한국음향학회지 제21권 5호 참조
 현재: 부경대학교 정보통신공학과 교수