

근거리 음장 측정을 통한 원거리 음장 예측에 관한 스피커 실험

김태진* 손근영* 신현옥** 윤종락*

* 부경대학교 정보통신공학과

** 부경대학교 해양생산관리학과

Far-Field Radiated Noise From Near-Field Measurement

Tae-Jin Kim* Keun-Young Son* Hyun-Oak Shin** Jong-Rak Yoon*

* Dept. of Telematics Engr., Pukyong University

** Dept. of Marine Production Management, Pukyong University

요 약

근거리음장 측정으로부터 원거리음장을 예측할 수 있는 이론적 모델 및 실험적 연구가 수행되고 있다. 본 논문에서 채택한 방법은 Helmholtz 적분식의 간단한 모델로써 단일주파수 코히어런트 음원의 근거리측정음장으로부터 원거리음장 예측이 가능한 기술이다. 이러한 단일 주파수, 코히어런트 음원의 원거리 수평방향지향성을 예측하기 위한 모델식 및 무향실에서 수행한 검증실험 결과를 소개한다. 제안된 방법은 일반 소음원은 물론 잠수함 등의 수평방향 지향성의 예측에 적용가능하다고 판단된다.

1. 서 론

근거리음장 측정으로부터 공간의 임의 위치에 대한 음장을 예측하고자 하는 기술은 많은 연구자들의 연구 대상이다. 특히 군용의 소나에 대한 원거리음장 특성은 음향표적체의 탐지성능을 좌우하게 되고 잠수함 등의 원거리 방사소음 특성은 피탐지성능을 결정하게 된다. 그러나 파장에 반비례하고 음원의 크기에 비례하는 원거리 음장 영역에서 음원 고유의 음장특성을 측정하기 위해서는 음장공간의 경계조건이 엄밀히 정의되어야 할 뿐만 아니라 배경잡음이 낮아야한다. 70년대까지의 연

구는 주로 군용의 소나, 잠수함 방사소음의 근거리음장 측정을 통한 원거리음장 예측에 관한 연구가 주 관심대상이었고 80년대 이후에는 원거리음장 예측은 물론 음원의 진동특성을 예측하고자 하는 근거리 음향 홀로그래피(Near-field Acoustic Holography) 기술이 발전하게 되어 진동소음 제어분야에 응용되고 있다. 음향장비 제작사인 B&K의 STSF(Spatial Transformation of Sound Fields) 시스템은 NAH 및 원거리음장을 예측할 수 있는 마이크로폰 배열시스템으로 공기중의 진동소음 특성 분석기이다. 그러나 새로 개발된 이러한 배열시스템을 잠수함을 위시한 함정이나 소나의 원거리음장 예측에 적용하는데는 여러 가지 제약이 따른다. 즉 많은 수의 배열센서가 필요하고 무상관 소음원의 개수에 좌우되는 기준마이크로폰의 개수에 대한 기준을 설정하기 어렵다. 아울러 측정환경조건이 열악한 해양환경에서 복잡한 측정시스템을 구현하는 것은 실용상 제한점을 갖는다.

본 연구에서는 음원이 단일주파수로 구동되고 코히어런트하다고 가정하고 또한 잠수함 등의 방사소음 지향성은 피탐지 성능을 결정하는 수평방향특성이 중요하다고 가정하여 음원의 수평방향 지향성을 해석하기 위한 Helmholtz 적분방정식의 적용기술을 소개하고 스피커 실험을 통해 검증하였다.

2. Helmholtz 적분방정식 모델링

그림 1과 같이 음원을 둘러싼 폐곡면 S (S_1+S_2)를 가정하면 원거리 음장위치 P점의 음압 $p(r)$ 은 Helmholtz 적분방정식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$p(r) = \iint_S \left[p(Q) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{jkr}}{4\pi r} \right) - \left(\frac{e^{jkr}}{4\pi r} \right) \frac{\partial p(Q)}{\partial n} \right] dS \quad (1)$$

여기서, $p(Q)$: Q점에서의 복소음압,
 n : Q점에서의 외향법선

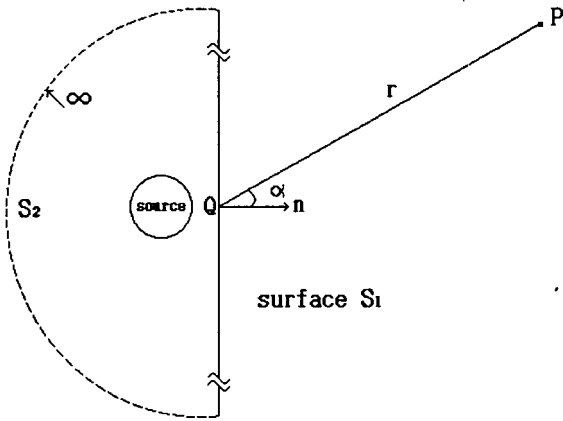


그림 1. Helmholtz 적분방정식을 설명하는 음원 및 수신점의 기하학적 모식도

또한 폐곡면 S 상에서 음파의 진파면은 평면으로 가정하고 원거리음장위치에서 r 이 크다고 가정하면

$$\frac{\partial p(Q)}{\partial n} \approx jk p(Q) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{jkr}}{4\pi r} \right) \approx \frac{jk}{4\pi r} e^{jkr} \frac{\partial r}{\partial n} = -j \frac{ke^{jkr}}{4\pi r} \cos \alpha \quad (3)$$

따라서 식(2),(3)으로부터 식(1)은 다음과 같이 주어진다.

$$p(r) = \left(\frac{-jk}{4\pi r} \right) \iint_S (1 + \cos \alpha) e^{jkr} p(Q) dS \quad (4)$$

식(4)를 실제 문제와 관련하여 $p(r)$ 의 음압을 얻기 위해서는 그림 1과 같이 S_2 의 거리를 무한대로 하면 Sommerfeld 방사조건에 의해 S_2 면에 대한 기여도는 무시되고 근거리 위치에 있는 S_1 에 대해서만 해석하면 될 것이다. 또한 S_1 면을 그림 2와 같이 사각평면의 실제 측정 구간으로 제한하면 사각평면의 크기에 의해 원거리 음장은 오차를 갖게 되지만 충분히 크게하면 실제의 원거리음장 특성을 얻을 수 있을 것이다. 그림 2와 같이 측정구간을 제한하면 식(4)는 다음과 같이 주어진다.

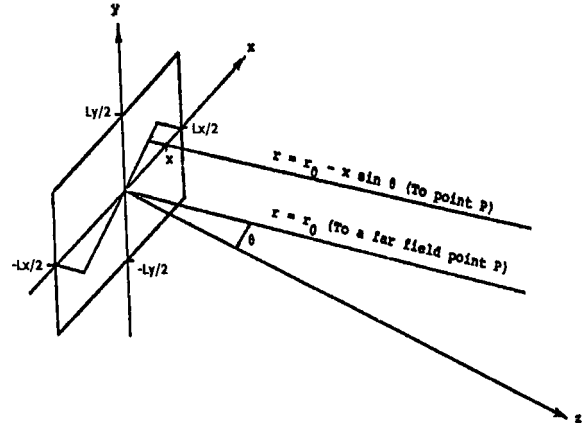


그림 2. 원거리음장 위치 P점의 음압을 예측하기 위한 근거리음장 측정영역

$$\begin{aligned} p(r) &= \frac{-jk}{4\pi r} \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} p(x, y, 0) (1 + \cos \theta) e^{jkr} dy dx \\ &= \frac{-jk}{4\pi r} (1 + \cos \theta) \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} e^{jkr} \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} p(x, y, 0) dy dx \\ &= \frac{-jk}{4\pi r} (1 + \cos \theta) \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} p(x) e^{jkr} dx \\ &\approx \frac{-jk}{4\pi r_0} e^{jkr_0} (1 + \cos \theta) \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} p(x) e^{-2\pi \left(\frac{\sin \theta}{\lambda} \right) x} dx \\ &= \frac{-jk}{4\pi r_0} e^{jkr_0} (1 + \cos \theta) \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} p(x) e^{-2\pi s x} dx \quad (5) \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } p(x) = \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} p(x, y, 0) dy \quad (6)$$

$$s = \frac{\sin \theta}{\lambda}$$

식(5)에서 적분식은 푸리에 변환식이다. 이 식을 $D(s)$ 로 정의하면

$$D(s) = \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} p(x) e^{-2\pi s x} dx = D \left(\frac{\sin \theta}{\lambda} \right) = F(\theta) \quad (7)$$

또한 식(5)에서 $\frac{-jk}{4\pi r_0} e^{jkr_0}$ 는 거리에 따라서 변화하는 양으로 원거리 음장의 음압특성을, 그외의 성분 $(1 + \cos \theta)D(s)$ 는 각도에 따라 변화하는 양으로 원거리음장의 지향특성을 나타낸다.

실제의 측정시스템은 y 축 방향으로 N개의 센서가 Δy 간격으로 위치한 배열을 사용하고 x 축 방향으로 Δx 간

격으로 측정한다고 가정하면 식(6) 및 식(7)의 이산화 표시식은 다음식으로 주어진다.

$$p(x_i) = \sum_{n=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} p(x_i, n), \quad i = -\frac{M}{2} \sim \frac{M}{2} \quad \left(M = \frac{L_x}{\Delta x} \right) \quad (8)$$

$$D(m) = D\left(j2\pi\left(\frac{\sin\theta_m}{\lambda}\right)\right) = D\left(j\frac{2\pi m}{N\Delta x}\right) \quad (9)$$

$$= \sum_{i=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} p(x_i) e^{-j2\pi m i M}, \quad m = -\frac{M}{2} \sim \frac{M}{2}$$

식(8)로 주어지는 $p(x_i, n)$ 는 각 측정점의 복소음압이므로 진폭 및 위상이 측정되어야 한다. 음원이 stationary 하고 코히어런트하다고 가정하면 진폭은 측정센서로부터, 위상은 임의의 측정공간에 위치한 기준 센서와의 위상으로 구하거나 동일주파수의 전기적 신호와의 위상으로부터 구할 수 있다.

3. 실험 및 고찰

2장에서 소개된 근거리 음장 측정자료로부터 원거리 음장의 지향특성을 해석하는 Helmholtz 적분방정식 모델을 실험적으로 검증하였다. 그림 3은 마이크로폰 5개를 사용할 때의 스피커 진동면 및 측정공간을 표시한다. 사용주파수는 2 kHz ($\lambda \approx 17\text{cm}$), 측정면과 스피커 진동면과의 거리는 2cm 및 4cm로 하였다. x축의 센서간격 Δx 는 2cm로 하였고, Δy 는 5cm로 하였다. 그림에서 스피커 진동면은 직경 12cm로 측정면의 중심에 위치한다.

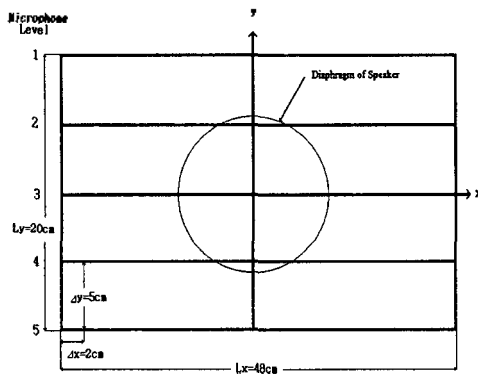


그림 3. 스피커의 원거리음장 예측을 위한 근거리음장 측정영역 및 센서간격

실험은 부경대학교 음향진동공학연구소의 무향실 (5.1m×6.8m×3.8m)에서 수행하였으며 사용된 마이크로폰은 B&K Type 4130 이다.

그림 4는 마이크로폰 5개를 사용한 실제실험의 구성도이다.

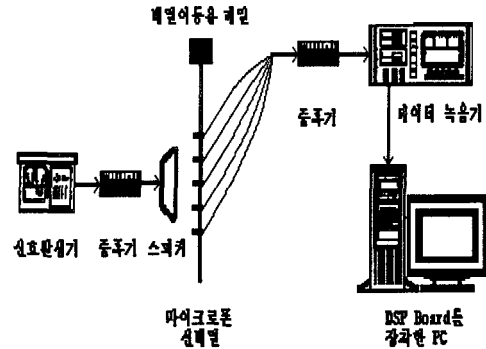


그림 4. 실험장치 구성도

그림 5는 사용된 마이크로폰 개수가 5개 일때의 $\Delta x = 2\text{cm}$, $\Delta y = 5\text{cm}$ 인 경우 근거리음장의 진폭특성과 위상 특성을 보이고 그림 6은 예측지향특성과 실제측정으로 구한 지향특성의 비교 결과이다. $\pm 1\text{dB}$ 이내로 잘 일치하는 결과이다.

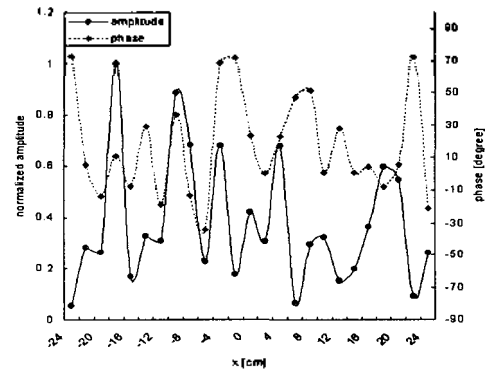


그림 5. 근거리음장의 각 측정점 진폭 및 위상특성 ($\Delta x = 2\text{cm}$, $\Delta y = 5\text{cm}$)

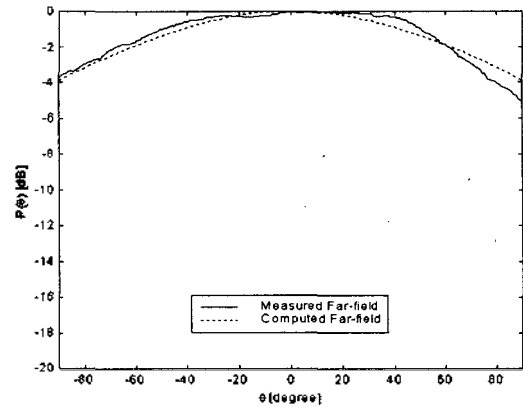


그림 6. 측정 및 그림 5의 자료를 이용한 예측 지향 특성의 비교

그림 7은 사용된 마이크로폰 개수 4개로 했을 때 즉 $\Delta x=2\text{cm}$, $\Delta y=6\text{cm}$ 인 경우의 근거리음장의 진폭특성과 위상특성을 보이고 그림 8은 이때의 예측지향특성과 실제 측정으로 구한 지향특성의 비교 결과이다. $\pm 1\text{dB}$ 이내로 잘 일치하는 결과이다.

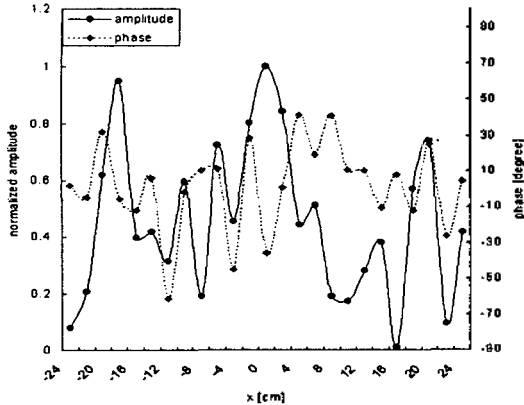


그림 7. 근거리음장의 각 측정점 진폭 및 위상특성 ($\Delta x=2\text{cm}$, $\Delta y=6\text{cm}$)

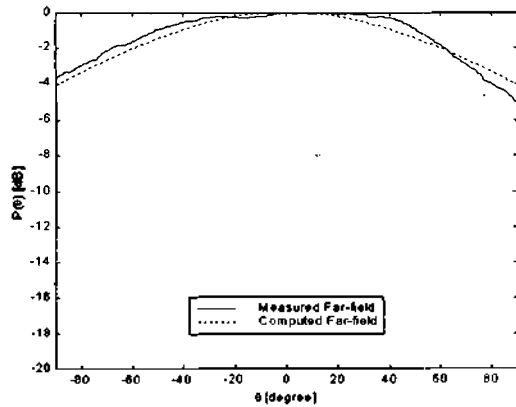


그림 8. 측정 및 그림 7의 자료를 이용한 예측 지향 특성의 비교

두 결과가 잘 일치하나 Δy 를 5cm로 한 결과에 비해 $\pm 90^\circ$ 근방으로 갈수록 오차가 심화되는 경향이다.

4. 결 론

Helmholtz 적분방정식의 간단한 모델을 이용한 원거리음장의 지향 특성 예측 결과는 $\pm 1\text{dB}$ 이내로 무향실에서 행한 스피커 실험결과와 잘 일치한다. 제안된 방법은 음원이 stationary하고 코히어런트한 경우 일반적인 음원에도 적용할 수 있다. 잠수함과 같이 이동중인

음원인 경우 단일 수직선배열을 사용하여 배열을 통과하는 위치의 수직방향 근거리 음장을 획득할 수 있으므로 이 기술의 적용이 가능하다. 그러나 특히 주의해야 할 문제점은 Doppler 효과로 이 문제가 효과적으로 해결된다면 강한 Tonal 특성의 단일 주파수를 선택하여 원거리 지향특성을 예측할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 수중음향특화연구센터의 연구비 지원에 의한 결과입니다.

참고 문헌

- [1]. Baker, D. D., "Determination of Far-Field Characteristics of Large Underwater Sound Transducers from Near-Field Measurements", JASA, Vol.34, pp.1737~1744, November 1962.
- [2]. Horton, C. W., & Innis, G. S., Jr., "The Computation of Far-Field Radiation Patterns from Measurements Made Near the Source", JASA, Vol.33, pp.887~880, July 1961.
- [3]. Maynard, J. D., & Williams, E. G. & Lee, Y., "Nearfield Acoustic Holography I: Theory of Generalized Holography and the Development of NAH", JASA, Vol.78(4), p.1395, 1985.
- [4]. Veronesi, W. A. & Maynard, J. D., "Nearfield Acoustic Holography (NAH) II: Holographic Reconstruction Algorithms and Computer Implementation", JASA, Vol.81(5), p.1307, 1987.
- [5]. Ginn, K. B. & Hald, J., "The Effect of Bandwidth on Spatial Transformation of Sound Fields Measurements", Internoise'87, Proceedings, p.1203, 1987.
- [6]. Hald, J., "Development of STSF with Emphasis on the Influence of Bandwidth Part I: Background and Theory", Noise-Con'88, Proceedings, p.529, 1988.
- [7]. Ginn, K. B. & Hald, J., "Development of STSF with Emphasis on the Influence of Bandwidth Part II: Instrumentation and Computer Simulation", Noise-Con'88, Proceedings, p.537, 1988.
- [8]. Goodman, J. W., "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill, New York, 1968.