

경계배치법(Boundary Collocation Method)에 의한 근거리 음장 자료로부터 원거리 음장의 예측 ; 최적 측정점 개수의 결정

Far-Field Sound Field Estimation from Near-Field Sound Field Data Using
Boundary Collocation Method ; Decision of Optimum Points of Measurement

김 원 호*, 윤 중 락**
(Won Ho Kim*, Jong Rak Yoon**)

요 약

본 논문은 근거리 음장 측정 자료로부터 원거리 음장 예측을 위한 기술에 대한 것이다. 음원의 음장 분포 특성은 원거리에서 측정된 자료의 해석으로 이루어지는 것이 일반적 방법이나, 음향수조 또는 무향실과 같은 제한된 공간에서는 근거리 영역에서 측정이 이루어지는 경우가 발생한다. 따라서 근거리 영역에서의 측정으로부터 원거리 음장이 예측되어야 한다. 이 경우 음원을 둘러싼 근거리 음장의 측정점수는 원거리 음장 예측치의 정확도와 자료 처리의 계산량과 상관된다. 기존 연구 결과는 최적측정점수는 음원의 kL 에 비례하고 음원의 기하학적 형태 또는 지향특성에 따라 kL 의 의존성이 다르게 나타난다고 되어 있으나 정확한 기준이 없다. 따라서 본 논문에서는 최적측정점수에 대한 기준을 유도하기 위해 Helmholtz 적분식과 Green 함수를 근간으로 한 원거리 음장 예측 기술인 경계배치법(Boundary Collocation Method)을 분석하여 최적측정점수는 kL 이 증가함에 따라 $0.54kL$ 로 수렴한다는 결과를 얻었다. 기존의 연구 결과 보다 최적측정점수를 1/2 정도로 줄였다.

ABSTRACT

This paper describes the far-field estimation using the near-field measurement data. Measurement in far-field region gives us the acoustical characteristics of the source but in general measurement is made in near-field such as acoustic water tank or anechoic chamber, so far-field acoustical characteristics of the source should be predicted from near-field data. In this case, the number of measurement points in the near field which relates to the accuracy of the predicted field and the amount of data processing, should be optimized. Existing papers say that measurement points is proportional to kL and depends on geometry and directivity of the source. But they do not give us any definite criterion for the required number of measurement points. Boundary Collocation Method which is one of the far-field prediction methods, is analyzed based on Helmholtz integral equation and Green function and it has been found that the number of measurement points is optimized as $0.54kL$ which is about one half of the existing results.

I. 서 론

파장에 대한 음원의 기하학적 크기 (방사면의 최대 면적)의 비보다 작은 거리에서는 방사면을 구성하고 있는 인접된 소자(element) 들간의 간섭에 의해 거리에 따른 음압 준위는 규칙성이 없으며, 음원 전방 1m에서의 음압 준위로 보상할 수가 없다. 따라서 측정 자료로부터 임의의 점의 원

음장을 예측하기 위해서는 원거리 영역에서 측정이 이루어지는 것이 일반적이다.[1] 따라서 원거리 영역 측정을 위해서는 호수 또는 바다와 같이 무한한 공간이 요구되지만 주변 선박, 바람, 파도 등에 의한 배경 잡음 등으로 인해 실험을 위한 제약 요소가 많이 수반되므로 음향 수조 또는 무향실과 같은 실험 조건을 효과적으로 제어할 수 있는 공간에서 이루어지고 있다. 따라서 음원의 크기 또는 주파수가 높은 경우에는 원거리 음장 조건을 만족하지 못 하므로 이들 근거리 측정 자료로부터 원거리 음장 특성을 예측할 필요가 있다. 이러한 근거리 음장 해석 방법

* 국방과학연구소

** 부경대학교 정보통신공학과

접수일자: 1999년 2월 23일

들은 1950년대 이후 활발히 연구가 수행되어 왔으며^[2-11] 그중 Butler의 경계배치법(Boundary Collocation Method)^[11]은 비교적 간단한 방법으로 원거리 음장 예측 결과도 우수한 것으로 알려져 있다.

원거리에서의 음장 특성을 정확히 예측하기 위해서는 근거리에서의 측정점수가 충분히 많을수록 만족된 결과를 얻을 수 있다. 그러나 측정 지점수가 증가하면 비현실적이고 비경제적이므로 최소의 측정으로 정확한 예측 결과를 얻을 수 있는 최적 측정점수에 대한 기준이 필요하다. 이러한 최적 측정점수는 음원의 주파수와 크기의 함수인 kL 에 비례한다. 즉 kL 이 커지게 되면 지향성이 커지게 되는데^[12] 이 경우 근거리 음장의 공간적인 음장 특성의 변화가 커지게 된다. 따라서 근거리 음장의 공간적인 샘플링 자료로부터 원거리 음장을 예측하기 위해서는 이러한 변화에 대응될 수 있도록 측정되어야 한다. 본 논문에서는 경계배치법을 비교적 단순한 배열 형태인 선배열 음원에 적용하여 원거리 음장의 예측을 위한 근거리 음장 측정을 수행함에 있어 최적 측정점수에 대한 기준을 제시하고자 한다.

II. 선배열 음원의 음장 해석

일반적으로 음압에 대한 Helmholtz 적분식은 다음과 같이 기술할 수 있다.^[9]

$$P(p) = \frac{1}{4\pi} \iint \left[-ik\rho c u(s_0) g(R) + P(s_0) \frac{\partial}{\partial n_0} g(R) \right] ds_0 \quad (1)$$

여기서, $g(R)$; 자유 공간에서의 Green 함수

- p ; field 지점
- s_0 ; 음원 지점
- R ; field 지점과 음원 지점 간의 거리
- u ; 법선 방향의 속도
- k ; 파수 (wave number)
- ρ ; 전파 매질의 밀도
- c ; 전파 매질 내에서의 음속
- n_0 ; 법선 방향

그리고 파동 함수의 전개는 Green 함수를 전개하므로서 구할 수 있으며, 축 대칭이고 구형 함수에 대한 Green 함수는 다음과 같이 주어 진다.^[11]

$$g(R) = ik \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) j_m(k r_i) P_m(\cos \theta_i) \times h_m(kr) P_m(\cos \theta) \quad (2)$$

여기서, m ; 상수

$j_m(k r_i)$; $k r_i$ 값을 갖는 1종 spherical Bessel function

$P_m(\cos \theta)$; $\cos \theta$ 값을 갖는 m 차의 Legendre polynomial

$h_m(kr)$; kr 값을 갖는 spherical Hankel function
 $= j_m(kr) + i y_m(kr)$

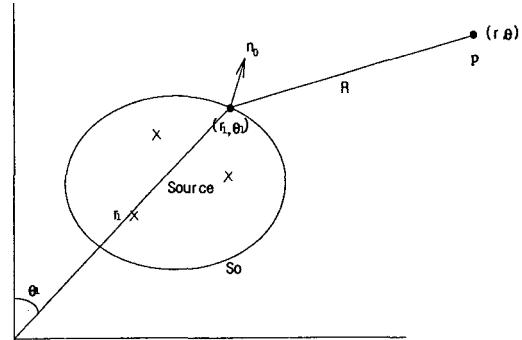


그림 1. 임의 형태의 음원과 음장 지점 p
 Fig. 1. Arbitrary shaped sound source and acoustic field point p.

그림 1에서 (r_i, θ_i) 는 음원 지점, (r, θ) 는 음장 지점으로 (2)식을 (1)식에 대입하면 음장 지점 p의 음압은 다음과 같이 전개된다.

$$P(p) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{ik(2m+1)}{4\pi} \times \int_S \left\{ -ik\rho c u(s_0) j_m(k r_i) P_m(\cos \theta_i) + P(s_0) \frac{\partial}{\partial n_0} [j_m(k r_i) P_m(\cos \theta_i)] \right\} ds_0 \times h_m(kr) P_m(\cos \theta) \quad (3)$$

또한 식(3)은 다음과 같이 간략히 표현할 수 있다.

$$P(p) = \sum_{m=0}^{\infty} b_m h_m(kr) P_m(\cos \theta) \quad (4)$$

따라서 (3)식과 (4)식으로부터 음원의 특성 상수인 b_m 은 다음 식으로 주어진다.

$$b_m = \frac{ik(2m+1)}{4\pi} \times \int_S \left\{ -ik\rho c u(s_0) j_m(k r_i) P_m(\cos \theta_i) + P(s_0) \frac{\partial}{\partial n_0} [j_m(k r_i) P_m(\cos \theta_i)] \right\} ds_0 \quad (5)$$

여기서, 식(4)를 살펴보면 b_m 을 구하면 임의의 거리와 방위의 음장점의 음압을 구할 수 있음을 알 수 있다. 또한 식(4)는 선형 방정식이므로 측정 자료로부터 b_m 을 구하기 위해서는 m 의 최대 차수는 측정점수와 일치하게 된다. 식(5)는 축 대칭이고 구형파 함수를 갖는 일반적인

경우이며, 여기서 선배열 음원의 경우로 해석하면 다음과 같다.

선배열 음원은 $\theta_i = 0^\circ$ 인 축 상에 놓여 있으므로 $P_m(\cos \theta_i) = 1$ 이 되고, r_i 에 대한 법선 방향의 증분이 없으므로 두 번째 항은 제거된다. 그리고 면 적분은 선 적분으로 변환되므로

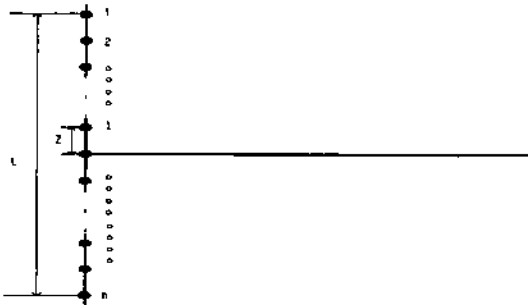
$$b_m = (2m+1) \sum_i a_i j_m(k r_i) \quad (6)$$

여기서, $a_i = \frac{k^2 \rho c u(s_0)}{4\pi}$ 로서 음원에 대한 음압 진폭 상수를 나타낸다.

III. 수치 해석

식(4)로부터 알 수 있듯이 음원의 음장분포는 b_m 을 알고 있으면 음원과 음장 지점 간의 거리와 방위 정보로부터 구할 수 있으므로 근거리 측정 자료로부터 구한 b_m 으로부터 임의 지점의 음장 특성의 예측이 가능하게 된다. 본 논문에서 가정한 음원의 음원 위치는 원점을 기준으로 하여 등 간격으로 배열되어 있고 음원의 진폭은 배열을 구성하고 있는 모든 점음원이 동일 진폭을 갖는 경우의 선배열 음원으로 가정하였다. 선배열을 구성하고 있는 점음원의 수가 홀수 개인 경우와 짝수 개인 경우로 구분하면 다음과 같이 b_m 의 특성이 해석된다.

1. 점음원의 수가 홀수 개로 등간격 배열된 선배열 음원 ($n > 2$)



식(6)에서 r_i 은 원점에서 l 번째 점음원까지의 거리로서 $\left(\frac{n+1}{2} - l\right) Z$ 가 되며 여기서 Z 는 배열 간격이며, n 은 음원을 구성하고 있는 배열수가 된다.

그리고 Bessel 함수의 특성은

$$j_m(-kZ) = (-1)^m j_m(kZ) \quad (7-1)$$

$$j_m(0) = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 0, & m \neq 0 \end{cases} \quad (7-2)$$

이므로 식(7-1)으로부터 b_m 은

$$b_m = (2m+1) \left\{ a \left[(-1)^m + 1 \right] \sum_{l=1}^{(n-1)/2} j_m \left[\left(\frac{n+1}{2} - l \right) kZ \right] + j_m(0) \right\} \quad (8)$$

이 되고, 식(7-2)를 이용하여 b_m 을 정리하면 다음과 같다.

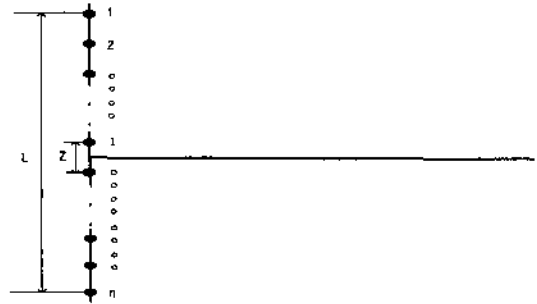
1) $m = 0$ 인 경우

$$b_0 = a \left\{ 2 \sum_{l=1}^{(n-1)/2} j_0 \left[\left(\frac{n+1}{2} - l \right) kZ \right] + 1 \right\} \quad (9)$$

2) $m \neq 0$ 인 경우

$$b_m = \begin{cases} 0 & m ; \text{odd } (1, 3, \dots) \\ 2(2m+1) a \sum_{l=1}^{(n-1)/2} j_m \left[\left(\frac{n+1}{2} - l \right) kZ \right] & m ; \text{even } (2, 4, \dots) \end{cases} \quad (10)$$

2. 점음원의 수가 짝수 개로 등간격 배열된 선배열 음원 ($n \geq 2$)



1) $m = 0$ 인 경우

$$b_0 = 2a \sum_{l=1}^{n/2} j_0 \left[\left(\frac{n+1}{2} - l \right) kZ \right] \quad (11)$$

2) $m \neq 0$ 인 경우

$$b_m = \begin{cases} 0 & m ; \text{odd } (1, 3, \dots) \\ 2(2m+1) a \sum_{l=1}^{n/2} j_m \left[\left(\frac{n+1}{2} - l \right) kZ \right] & m ; \text{even } (2, 4, \dots) \end{cases} \quad (12)$$

여기서 음원의 크기 $L = (n-1)Z$, 즉 $Z = \frac{L}{n-1}$ 이므로 b_m 은 주파수와 음원 크기의 무차원 함수인 kL 및 m 값에 따른 Bessel 함수의 특성에 의존하고 있음을 알 수 있다. 그러나 값의 범위는 배열수 n 에 무관함을 보인다. 표1은 $kL = 12.6$ 이고 3개의 점음원으로 구성된 선배열 음원에 대한 b_m 특성으로 m 이 13 이상에서는 b_m 이 0이 되어 음장 예측 계산 결과에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그리고 kL 이 증가하면 b_m 이 0이 되는 m 또한 증가하고 있음을 식(9) ~ 식(12)의 계산 결과로부터 알 수 있다.

표 1. 배열수 $n=3$ 이고 $kL = 12.6$ 인 선배열 음원의 b_m 특성

Table 1. b_m characteristics of line array source ; $n=3$, $kL = 12.6$.

m	b_m	m	b_m
0	1.000	13	0.000
1	0.000	14	0.001
2	-0.760	15	0.000
3	0.000	16	0.000
4	3.347	17	0.000
5	0.000	18	0.000
6	2.797	19	0.000
7	0.000	20	0.000
8	0.800	21	0.000
9	0.000	22	0.000
10	0.120	23	0.000
11	0.000	24	0.000
12	0.011		

따라서 b_m 이 0이 되는 최적측정점수를 보다 명확히 살펴 보기 위해 b_m 의 누적($\sum b_m$) 특성을 해석하였다. (그림 2, 그림 3) 그림 3은 kL 이 251로 일정한 상태에서 배열수 n 을 변화했을 때의 b_m 의 누적 특성으로써 누적된 b_m 이 일정한, 즉 기울기가 0인 m 의 위치는 배열수에 상관 없이 동일한 지점에서 나타남을 알 수 있다. 즉 최적측정점이 되는 m 은 kL 만의 함수로 주어진다. 그림3은 배열수 $n=50$ 으로 고정 상태에서 kL 이 변화했을 때의 $\sum b_m$ 특성이다. 그림은 $\sum b_m$ 이 m 및 kL 의 함수가 되고 있음을 보이고 있고, kL 값이 주어지는 경우 이 값은 특정 값에 수렴함을 보인다.

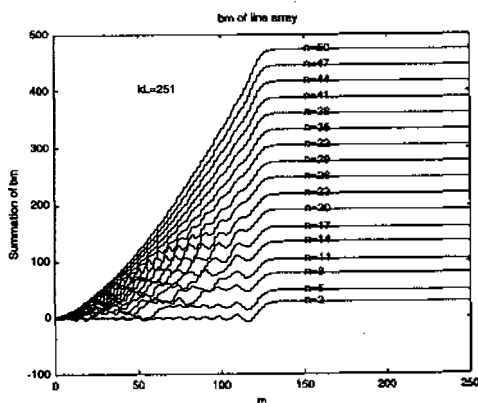


그림 2. 배열수 n 에 따른 선배열 음원의 b_m 누적 특성 ($kL = 251$)

Fig. 2. Cumulative characteristics of b_m with respect to number of line array elements n ($kL = 251$).

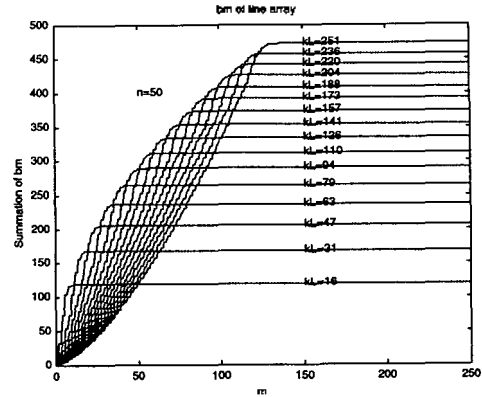


그림 3. kL 에 따른 선배열 음원의 b_m 누적 특성 ($n=50$)

Fig. 3. Cumulative characteristics of b_m with respect to kL of line array elements n ($n=50$).

따라서 $\frac{\sum b_m}{\sum b_m} = 1 - \alpha$ 를 정의하고 이때의 음향측상

음압준위(Sound Pressure Level ; SPL)를 구하여 음압준위의 최종 수렴치의 범위를 설정하고 이때의 α 값을 구하면 α 값에 따른 최적측정점수를 구할 수 있다. 그림 4는 α 가 10^{-1} 에서 10^{-5} 의 범위에서 선배열 음원의 최적측정점수이다.

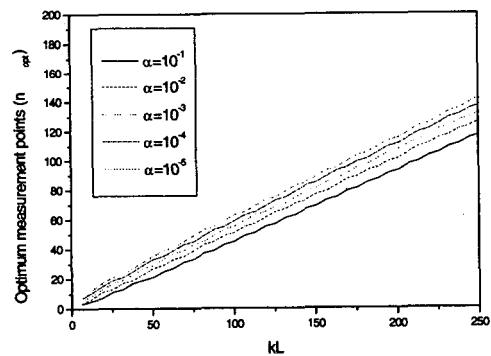


그림 4. kL 에 따른 선배열 음원의 최적측정점수 ($\alpha = 10^{-1} \sim 10^{-5}$)

Fig. 4. Optimum measurement points as a function of kL ($\alpha = 10^{-1} \sim 10^{-5}$).

α 가 감소할수록 최적측정지점수는 증가하고 있으며, 표 1의 조건인 $kL = 12.6$ 일 때 α 에 따른 최적측정지점수와 음향측상 음압준위의 차이는 표 2와 같다.

표 2. $kL = 12.6$ 일 때 α 에 따른 최적측정점수와 음향 축 상 음압 준위의 차이

Table 2. SPL difference in acoustic axis with respect to α ($kL = 12.6$).

α	Optimum measurement points	SPL difference in acoustic axis (dB)
10^{-1}	5	3.466
10^{-2}	7	0.387
10^{-3}	9	0.021
10^{-4}	11	0.008
10^{-5}	13	0

따라서 음향 축 상 음압 준위 오차를 0.5dB 이하로 설정한다면 α 는 10^{-2} 보다는 작아야 하고, 표 1에서 해석되는 바와 같이 0dB의 오차, 즉, 정확히 음향 축 상 음압 준위를 얻기 위해서는 측정점수는 13이상이어야 함을 보인다. 그림 5는 $\alpha = 10^{-5}$ 인 경우로 설정하여 kL 에 따른 최적측정점수를 보인다.

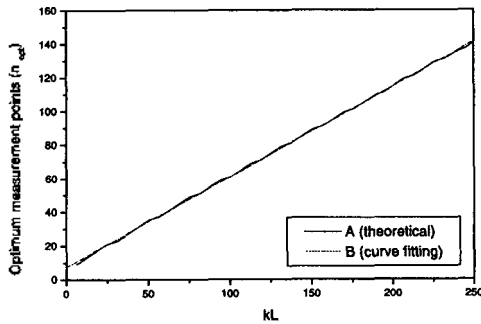


그림 5. kL 에 따른 선배열 음원의 최적측정점수 ($\alpha = 10^{-5}$)
Fig. 5. Optimum measurement points as a function of kL ($\alpha = 10^{-5}$).

그림 5에서 A는 계산 결과이고 B는 curve fitting 결과로서 최적측정점수는 다음 식으로 주어진다.

$$n_{opt} = 7.34615 \pm 0.2437 + (0.53533 \pm 0.00165)kL \quad (13)$$

즉, 최적측정점수는 약 0.54의 비례상수로 kL 에 비례하며, kL 이 작은 경우에는 최적측정점수는 kL 보다 증가하여야 하나 kL 이 비례 상수에 비해 상대적으로 커지는 경우 최적측정점수는 약 $0.54kL$ 로 결정됨을 보인다.

IV. 실험 및 결과

식(13)의 검증을 위하여 적용한 선배열 음원은 B&K8103 3개를 배열하여 구성하였으며, 측정 방법은 다음과 같다.

음향수조의 벽면 등에 의한 반사파 분리를 위해 tone burst 신호에 의한 펄스기법을 사용하였으며, 음원을 둘러싼 근거리에서 음장을 측정하기 위해 rotator를 이용하여 음원(방사면은 $\theta_1 = 0^\circ$ 인 축상에 위치)을 회전시켰다. 그리고 회전 방위각 및 거리를 측정하고 방위각에서의 복소 음압을 측정하였다. (그림6) 여기서, 복소음압은 수신기를 통해 얻어진 수신 신호를 FFT처리하여 음압의 크기와 위상을 구하였으며, 근거리 음장 측정을 위한 수신기의 위치는 등간격으로 하였다. 그리고 음원에서 발생된 신호를 모든 방위에서 동시에 측정하여야 하나, 수신기의 수량이 많아야 하고 수신기 들의 전기-음향 변환 특성이 동일하거나 특성이 보정(calibration)되어 환산이 가능해야 하는 등 현실적인 제약 요소가 많이 수반된다. 그러나 음원에서 발생된 신호는 시간에 따른 변화가 없기 때문에 수신기는 한 지점에 고정하고 음원을 회전시키므로서 수신기 들이 배열된 상태와 동일한 효과를 얻을 수 있었다.

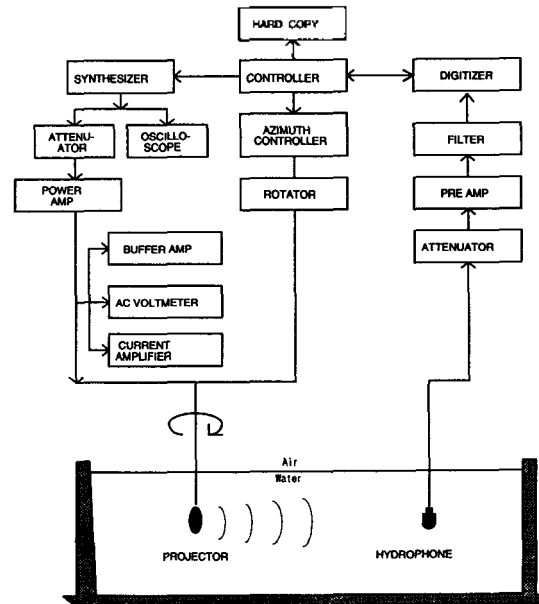


그림 6. 근거리 음장 측정 구성도
Fig. 6. Block diagram of near-field measurement set up.

표 3. 측정 대상 음원 및 측정 거리
Table 3. Measured source and geometric configuration.

Source type	Frequency	Array length (L)	kL	Measurement distance		Minimum far-field distance
				Near-field	Far-field	
Line array	5kHz	59cm	12.6	0.5m	4.8m	1.2m

그림7은 선배열 음원의 음장 분포 실측 및 예측 결과로서 근거리 0.5m와 원거리 4.8m에서의 측정 자료와 근거리 0.5m에서 측정한 자료로부터 원거리 4.8m로 예측한 결과를 비교한 것이다. 비교 결과는 거의 일치하고 있음을 알

수 있으며, 그림8은 측정 지점수의 변화에 따른 예측 결과를 비교하였다. 측정지점수 n 은 7개, 13개 그리고 25개로 하였으며 7개인 경우에는 0°와 180°근방에서 오차가 있으나 측정 지점수가 증가하면서 13개인 경우부터 일치하고 있다. (표 1 및 표 2 그리고 식 (13)의 결과와 일치)

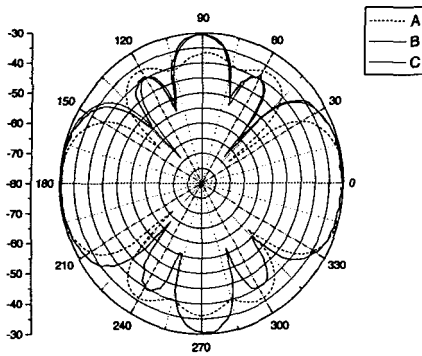


그림 7. 선배열 음원의 음장 분포 실측 및 예측 결과
(A: 근거리 0.5m에서 실측, B: 원거리 4.8m에서 실측, C: 0.5m에서 4.8m로의 예측)

Fig. 7. Comparison of measured and estimated acoustic field in the case of line array source.
(A: measured in 0.5m near-field, B: measured in 4.8m far-field, C: estimated from 0.5m near-field data to 4.8m far-field).

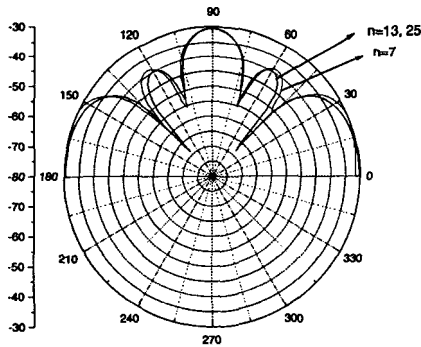


그림 8. 측정점수에 따른 예측 결과 비교
Fig. 8. Comparison of real far-field and estimated far-field with respect to number of measurement points.

V. 결 론

근거리에서 측정된 음장분포 자료를 활용하여 원거리에서의 음장분포를 예측하기 위해서는 근거리에서의 측정점수를 최적화하는 것이 필요하다. 이러한 최적측정점수는 주파수(f)와 크기(L)의 함수인 kL 에 비례하나 음원의 기하학적 형태 또는 지향 특성에 따라 kL 의 의존성이 다르게 나타난다.

본 논문에서는 선배열 음원에 대한 최적측정점수를 고찰하였다. 여기서 선배열 음원은 등간격 배열이고 동일 진폭을 갖는 경우로 가정하였으며, 음압에 대한 Helmholtz 적분식과 Green 함수를 적용하여 해를 구하였다.

선배열 음원에 대한 원거리 음장 예측을 위한 최적측정점수에 대한 기준을 도출하였으며, 본문에서 기술한 바와 같이 최적측정점수는 kL 이 증가함에 따라 0.54 kL 로 수렴하여 기존의 결과표(kL 이상)[11] 보다 거의 반 이상으로 측정점수를 줄여도 정확한 음장 예측이 가능함을 보였다.

일반적으로 음원의 빔패턴 산출은 원거리에서의 근사식으로 구하나, 본 논문에서 도출한 b_m 산출식을 이용하면 원거리 뿐만 아니라 근거리 지역의 임의 거리에서의 빔패턴을 구할 수 있음을 첨언한다.

이와 더불어 선적분으로부터 면적분으로의 확장이 가능하므로 본 논문을 확장하면 평면 배열에 대한 음장 해석이 가능하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Robert J. Urick, Principles of Underwater Sound, (McGraw-Hill Book Company, New York, 1983), chap.4, pp. 72
2. J. Pachner, "On the Dependence of Directivity Patterns on the Distance from the Emitter", J. Acous. Soc. Am. Vol. 28, No. 1, pp. 86-90, 1956
3. C. W. Horton and G. S. Innis, Jr., "The Computation of Far-Field Radiation Patterns from Measurements Made near the Source", J. Acous. Soc. Am. Vol. 33, No. 7, pp. 877-880, 1961
4. D. D. Baker, "Determination of Far-Field Characteristics of Large Underwater Sound Transducers from Near-Field Measurements", J. Acous. Soc. Am. Vol. 34, No. 11, pp. 1737-1744, 1962
5. G. Chertock, "Sound Radiation from vibrating Surfaces", J. Acous. Soc. Am. Vol. 36, No. 7, pp. 1305-1313, 1964
6. W. J. Trott, "Underwater-Sound-Transducer Calibration from Nearfield Data", J. Acous. Soc. Am. Vol. 36, No.8, pp. 1557-1568, 1964
7. A. L. Van Buren, "Cylindrical Nearfield Calibration Array", J. Acous. Soc. Am. Vol. 56, No. 3, pp. 849-855, 1974
8. R. D. Marciniak, "A Nearfield, Underwater Measurement System", J. Acous. Soc. Am. Vol. 66, No. 4, pp. 955-964, 1979
9. A. L. Van Buren, "A 5- to 50-kHz Synthetic Cylindrical Nearfield Calibration Array", J. Acous. Soc. Am. Vol. 77, No. 5, pp. 1927-1932, 1985
10. A. L. Van Buren, "Near-Field Calibration Arrays for Acoustic Wavefield Determination", IEEE Trans. Instrumentation Meas. Vol. 41, No. 1, pp. 22-26, 1992
11. John L. Butler, "Solution of Acoustical-Radiation Problems by Boundary Collocation", J. Acous. Soc. Am. 48, pp. 325-336, 1970
12. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V.

Sanders, Fundamentals of Acoustics, (John Wiley & Sons, New York, 1982), chap.8, pp. 163 ~ pp. 197

▲김 원 호(Won Ho Kim) 1959년 5월 14일생



1984년 2월 : 단국대학교 전기공학과
(공학사)

1993년 2월 : 부경대학교 전자통신공
학과 (공학석사)

1984년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소
수중 음향센서연구실
(선임연구원)

※주관심분야: 센서 음장 해석 및 특성 평가, 수중음향

▲윤 증 락(Jong Rak Yoon)

한국음향학회지 제13권 제2호 참조
부경대학교 정보통신공학과 부교수