

광대역 단일빔형성을 위한 비선형배열의 지향 특성

Directivity Characteristics of Non-Linear Array for Wide-Band One-Shot Beamforming

도 경 철*, 손 경 식**

(Kyeong Cheol Dho*, Kyung Sik Son**)

요 약

본 연구에서는 상대적으로 적은 센서 수에 의한 음향측정을 목적으로, 광대역 단일빔형성을 위한 비선형배열 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘은 공간 샘플링 이론에 따라, 고주파수 대역에서는 등간격으로 센서를 배열하고 고주파수 이하 주파수대역에서는 고주파수 대역 센서 개수를 함수로 인접 센서간 간격을 비선형 배열한다. 시뮬레이션 결과, 제안 비선형배열은 센서 수 감소에도 불구하고 선형배열과 유사한 지향지수 평균 및 분산을 나타내었다. 또한 -2dB점에서 6.8° 이상의 빔폭을 가지고 지향각에 따른 지향지수 변화가 미소하였다. 따라서 상대적으로 적은 센서 수를 갖도록 본 논문에서 제안한 비선형배열 알고리즘이 음향측정 목적으로 유용함을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper proposes an algorithm to design the non-linear array so as to form efficiently the one-shot beam with relatively less sensors for acoustic measurement. In this algorithm, according to the spatial sampling theory the part for high frequency(HF) band has equispaced sensor array and the sensor distances below the HF band are decided as a function of number of HF sensors. As the results of the simulations, the mean and variances of directivity index(DI) of non-linear array which has less sensors are similar to those of linear array, and the DI variation for beam steering angle is very small. And the beam width at -2dB point is 6.8°. Thus it is confirmed that the design algorithm for non-linear array which is proposed to have less sensors can be efficiently used in acoustic measurement.

I. 서 론

수중음향 측정(measurement)은 음원(source)의 왜곡없는 수신에 궁극적인 목적이다. 선박통행량 및 산업활동의 증가로 배경소음(background noise)이 점차 높아지고 있는 환경에서, 측정하고자 하는 음원의 방사소음(radiated noise) 준위는 상대적으로 낮아지는 추세이다. 그러므로 저소음 음원의 음향측정을 위하여는 센서배열(sensor array)에 의해 지향지수(directivity index, DI)를 높여 신호대잡음비를 증대시키도록 해야 한다[1].

지향지수는 일차적으로 센서 수를 늘림으로서 증대된다[1-3]. 그러나 센서 수를 늘리면 그 만큼 하드웨어 및 소

프트웨어 부담도 함께 늘어난다. 따라서 지향지수는 증가시키되 센서 수는 감소시킬 수 있는 기법을 개발하거나, 센서 수는 줄이더라도 최소한 지향지수는 저하되지 않는 알고리즘을 개발해야 한다.

특히 음향측정에서는 다중센서로부터의 원시신호(raw signal)를 높은 샘플율에 의해 깨끗하게 녹음하고 측정 정확성 여부를 측정과정에서 실시간 파악하여야 한다. 이를 위하여는 측정 신호의 음질을 측정현장에서 실시간 분석해야 하므로, 표적에 대한 정확한 빔지향, 표적과의 정밀 거리 산출, 배열구배 보상 및 음향징표(acoustic signature) 식별 등을 동시에 수행해야 한다. 그러므로 이와 같은 신호 처리 요구를 수용하기 위하여는 배열의 센서 수 감소에 의한 하드웨어 및 소프트웨어 부담의 경감이 절실하다.

지향지수를 유지하면서 센서 수를 줄이고자 하면 센서 간격을 넓혀야 한다[3-5]. 그러나 전형적인 삼입형 선형배

*국방과학연구소

**부산대학교 공과대학 전자공학과

접수일자 : 1998년 9월 16일

열(Nested Linear Array, NLA)에서 센서간격을 넓히면 측정 주파수 대역이 낮아지게 된다. 따라서 센서간격이 넓어져도 측정주파수 대역은 낮아지지 않도록 빔을 형성하여야 한다.

일반적으로 음향측정에서는 표적음원이 근거리에 위치하므로 부엽(side-lobe)준위는 원음측정을 방해하지 않는 수준으로만 낮추어도 충분하고[6], 음원의 물리적 크기를 수용하기 위하여 빔폭은 적절하게 넓혀준다. 따라서 측정용 빔형성에서는 가중상수에 의한 부엽준위 또는 빔패턴 조정기능이 필요없으므로 탐지빔(detection beam)[7-10]에서와 같이 옥타브 대역별로 빔을 나누어 형성하지 않아도 된다. 이를 이용하여, 배열 내 모든 센서를 동시에 사용하여 한번에 빔을 형성시키는 단일빔형성(one-shot beamforming) 알고리즘이 음향측정용으로 제안되었다 [11].

단일빔형성에서는 각 센서의 위치에 따라 수신주파수 범위를 달리하여 광대역을 수신하므로, 수신주파수 제어 목적의 주파수 종속 가중치(frequency-dependent weighting)가 가중상수로 이용된다. 전형적인 NLA 선형배열에서 형성된 단일빔(one-shot beam)은 지향지수가 균일하고 빔폭이 넓어 음향측정용으로 유용함이 확인된 바 있다[11]. 선형배열에서의 센서간격은 인접 센서간의 간격으로서 동일 옥타브 대역 내에서는 동일간격으로 구성된다. 그리고 옥타브 대역별 빔형성에서는 옥타브 내의 동일 센서간격을 이용하여 시간지연을 보상한다[7-10]. 그러나 단일빔형성 기법에서는 각 센서의 위치에 따라 수신주파수 범위를 달리하여 광대역을 수신하므로, 기준센서로부터 임의의 센서까지의 거리가 센서간격이 된다. 즉 단일빔형성은 각 센서마다 센서간격이 서로 다르게 적용되는 알고리즘이다[11]. 이는 센서간격에 크게 구애됨이 없이 단일빔형성 기법이 적용가능함을 의미한다.

그러나, 센서간격을 임의 배열하면 각 센서의 수신주파수가 달라지므로 지향지수는 그때마다 달라진다. 따라서 인접 센서간 간격에 관계없이 단일빔형성이 적용은 되지만, 그렇다고 센서간격을 임의대로 선정하면 빔지향성에 혼란을 야기시킬 수 있어 임의 설정은 곤란하다. 결과적으로, 목적하는 지향지수 및 빔패턴을 고려하여 센서간격은 신중하게 선정하되, 단일빔형성을 위하여 인접 센서간 간격이 굳이 등간격일 필요는 없다는 뜻이 된다. 이는 인접 센서간 간격의 적절한 조정이 가능함을 의미하고, 따라서 이를 이용하여 배열 내 센서 수 감소가 가능함을 알 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 단일빔형성의 센서간격 개념을 이용하여 선형배열 센서간격을 비선형화하되, 지향지수를 저해하지 않는 범위 내에서 배열의 총 센서 개수를 줄여 하드웨어 및 소프트웨어 부담을 절감시키는 비선형배열 알고리즘을 제안하고자 한다.

II. 광대역 단일빔형성과 센서간격

2.1 광대역 단일빔형성 기법

광대역 단일빔형성 기법은 배열내 센서를 동시에 사용하여 빔을 형성시킨다. 센서배열이 좌우대칭형인 경우에, 시간 t 에서 지향각 θ 에 대한 광대역 단일빔 $B(t, \theta)$ 는 식(1) 및 그림 1의 알고리즘에 의해 형성된다[11].

$$B(t, \theta) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{(N-1)/2} p_n A_n s_n(t - \tau_n) \quad (1)$$

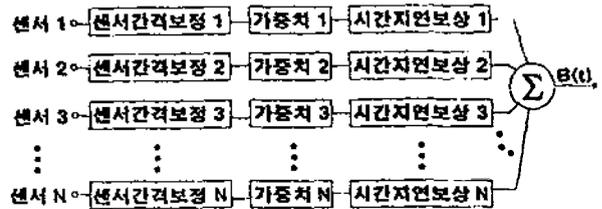


그림 1. 광대역 단일빔형성 알고리즘
Fig. 1. Wide-band one-shot beamforming algorithm.

식(1)에서 $s_n(t - \tau_n)$ 는 배열중심센서와의 시간지연 τ_n 가 보상된 센서 n 의 수신신호이다. N 은 배열의 총 센서 수이고, p_n 은 센서간격에 대한 센서 n 의 보정상수로서 $p_n = d_n/d_0$ 로 주어진다. 여기서 d_0 는 최소 센서간격이고, d_n 는 센서 n 과 센서 $n-1$ 과의 간격을 나타낸다. 식(1)에서 A_n 은 식(2)의 가우시안 함수로 주어지는 주파수종속 가중치이다.

$$A_n(f) = \exp[-(f \sigma_n)^2 / 2] \quad (2)$$

식(2)에서 f 는 각주파수이고 σ_n 은 분산이다. 배열중심을 기준으로 빔을 형성시킨다고 가정하여, 식(2)에서 가우시안 함수의 평균은 0으로 적용하였다. 배열 중심으로부터 센서 n 까지의 거리를 X_n 으로 두면 가중치가 갖는 분산의 폭 σ_n 은 $\sigma_n = k X_n / c$ 로 주어진다. 여기서 k 는 가우시안 함수의 진폭과 관련한 임의 상수이고 c 는 매질 내에서의 음파전달 속도이다. 결과적으로 단일빔형성의 가중치 A_n 은 식(3)과 같이 센서간격과 각 센서의 수신 주파수에 따라 센서마다 상이하게 적용된다.

$$A(n, f, k) = \exp[-(f k X_n / c)^2 / 2] \quad (3)$$

주파수대역 50Hz ~ 12800Hz에 대한 광대역 단일빔의 지향지수를 예로 들면 그림 2와 같다. 그림 2는 옥타브대역 당 17개 센서를 가진 NLA 선형배열의 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 선형배열에서의 지향각에 따른 광대역 단일빔 지향지수는 수신주파수 대역에서 균일값을 가

저, 전형적인 옥타브 대역별 빔 보다 음향축정 측면에서 우수하다[11].

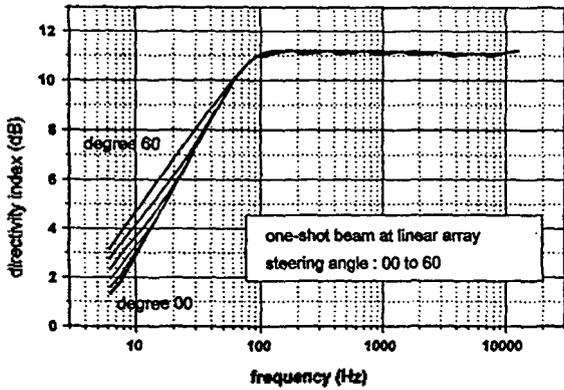
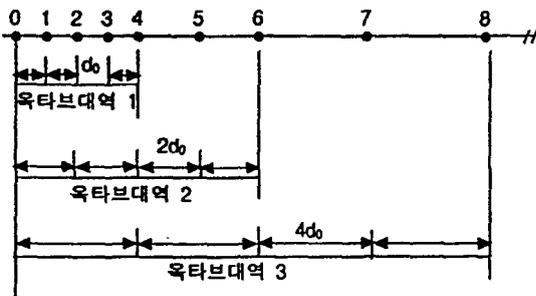


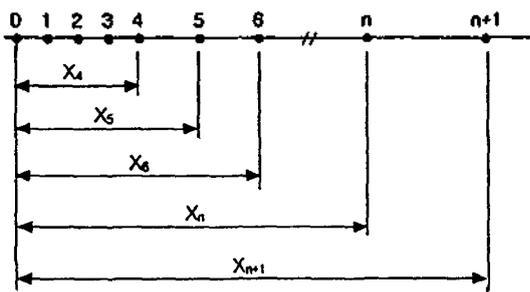
그림 2. 선형배열에서의 지향각에 따른 광대역 단일빔 지향지수
Fig. 2. DI of wide-band one-shot beam of NLA, as variation of beam steering angle.

2.2 단일빔형성 기법의 센서간격

전형적인 NLA 선형배열에서 센서간격은 옥타브 대역 별 동간격으로 구성된다. 그림 3(a)의 예에서와 같이 센서



(a)



(b)

그림 3. 빔형성을 위한 센서간격 개념
(a) 선형배열의 일반적인 센서 구성
(b) 단일빔형성 적용시의 선형배열 센서간격 개념
Fig. 3. Concept of the sensor distance for beamforming;
(a) general sensor configuration of NLA,
(b) sensor configuration concept of NLA for one-shot beamforming.

간격 d_0 는 해당 옥타브대역의 최대 축정주파수 f_{max} 에 의해 $d_0 \leq c/(2f_{max})$ 로 주어진다. 옥타브대역 1에서는 d_0 , 옥타브대역 2에서는 $2d_0$ 로 인접 센서간 간격이 옥타브대역 내에서 각각 동일하다.

그러나 단일빔형성 기법에서는 배열중심과의 간격이 곧 센서간격이 된다. 그림 3(b)에서와 같이 기준센서로부터 임의의 센서 n 까지의 거리 X_n 가 센서간격으로서, 전형적인 옥타브 대역별 빔형성에서의 센서간격과는 정의가 다르다. 선형배열을 예로 든 그림 3(b)에서 X_n 과 X_{n+1} 은 서로 다르고, 더욱이 선형배열 개념에서의 동일 옥타브대역이 내려 하더라도 X_n 와 X_n 역시 서로 다르다.

위의 예에서와 같이, 단일빔형성은 센서간격 X_n 가 서로 다르게 적용되는 알고리즘이다. 이는 센서간격에 크게 구애됨이 없이 단일빔형성 기법이 적용가능함을 의미하므로, 단일빔형성 기법 적용을 위해 그림 3(a)와 같은 옥타브 대역별 동간격의 센서배열이 반드시 필요하지는 않음을 알 수 있다. 그러나, 서론에서 밝힌 바와 같이 센서간격을 임의의 배열하면 각 센서의 수신주파수가 달라지고 지향지수 또한 그 때 마다 달라지므로, 센서간격을 임의대로 설정함에 따른 빔지향성 혼란을 방지하기 위하여 센서간격은 목적하는 지향지수 및 빔패턴을 고려하여 신중하게 선정하여야 한다.

서론에서 언급한 바와 같이, 단일빔형성 적용을 위하여 인접 센서간 간격이 반드시 동간격일 필요가 없음을 인접 센서간 간격의 적절한 조정이 가능함을 의미한다. 따라서 이를 이용함으로써 배열 센서 수 감소가 가능해짐을 알 수 있다. 예를 들어 그림 4는 이를 나타낸다. 배열의 1/2만 표시한 그림 4에서 계단식으로 증가하는 선형배열의 인접 센서간 간격을 곡선형과 같이 증가하도록 조정한다면 동일 배열길이를 유지하면서도 적어도 4개 이상의 센서가 줄어들게 된다. 따라서 센서간격을 비선형으로 잘 조정하면, 광대역 단일빔의 지향지수를 원하는 수준으로 유지하면서도 센서 수 감소가 가능함을 알 수 있다.

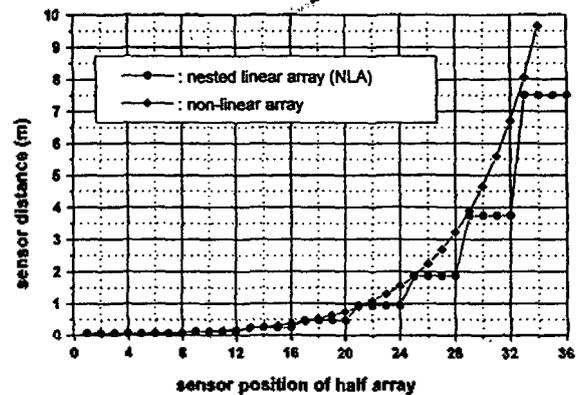


그림 4. 전형적인 NLA 선형배열과 비선형배열의 센서간격 예
Fig. 4. Example of sensor inter-distance of the NLA and the non-linear array.

III. 비선형 센서배열 기법 제안

3.1 비선형 센서배열 개념

본 연구에서는 선형배열의 센서간격을 비선형화시켜, 지향지수를 저해하지 않는 범위 내에서 배열의 총 센서 개수를 줄이는 방법을 제안하고자 한다.

그림 4의 예에서 센서간격을 많이 넓히면 센서 개수를 많이 줄일 수 있다. 그러나 센서 수를 줄이는 만큼 지향지수가 영향을 받게 된다[1-3]. 따라서 선형배열 센서간격의 비선형화는 다음의 3가지를 고려하여 수행되어야 한다.

첫째, 센서간격을 비선형화하더라도 공간적인 샘플링 이론은 준수되어야 한다. 즉, 주엽 가까이 복제 주엽 (grating lobe) 발생을 방지하기 위하여 측정주파수의 반파장 이하로 센서간격을 구성한다[4].

둘째, 음향축정이 가능한 지향지수가 유지되어야 한다. 센서간격을 지나치게 넓게 비선형화하면, 센서 수는 그만큼 많이 감소시킬 수 있으나 지향지수도 따라서 감소하게 된다[1,2]. 그러므로 음향축정에 지장이 없을 정도로 비선형화를 유도하므로써, 원하는 지향지수는 보장하여야 한다.

셋째, 고주파수 수신을 위한 좁은 센서간격 부터 설정한다. 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 단일빔형성을 위한 센서간격은 중심으로부터 넓어지는 개념이므로, 좁은 센서간격을 먼저 설정하여야 이후의 센서간격을 결정할 수 있다.

그러므로 본 논문에서는 위의 조건들을 고려하여, 비선형배열 알고리즘 기본 개념을 그림 5와 같이 제안한다. 그림 5에서 각 센서들은 배열중심센서 0을 기준으로 좌우 대칭되게 배열한다. 이는 식(1)을 적용하기 위함이다[12]. 그림에서는 수신주파수의 반파장 이하로 센서간격을 구성하고, 좁은 센서간격의 고주파수용 센서를 배열 중심부에 배치하여 고주파수대역을 형성한다. 고주파수대역 센서가 등간격 배치되는 이유는 다음 3.2절에서 설명한다.

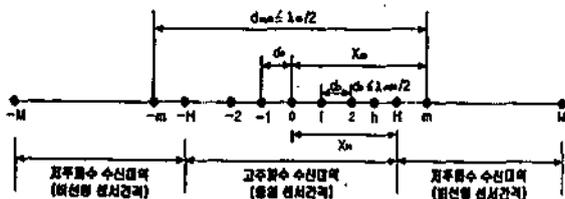


그림 5. 비선형 센서배열 기본 개념
Fig. 5. Basic concept of non-linear sensor configuration.

3.2 고주파수 대역의 센서 수 및 센서간격

그림 3(b)와 같이, 단일빔형성을 위한 센서간격은 중심으로부터 넓어지는 개념이다. 그러므로 저주파수는 대부분의 센서들이 중복 수신하여 지향지수를 높일 수 있지

만, 고주파수는 센서간격이 좁은 일부 센서에 의해서만 수신되어 지향지수가 낮아질 우려가 있다. 따라서 고주파수 대역에서 일정 수준의 지향지수 확보를 위해서는 고주파수 수신 센서의 개수 H를 일정량 보장하여야 한다. 원하는 지향지수를 얻기 위한 센서 개수는 선형배열에서 약 식으로 지향지수[1,2]를 구하는 $DI = 10 \log [(H-1)/f_{max}]$ 에 의해 임의로 정한 다음, 비선형배열 설계 후 획득되는 지향지수를 참고하여 새로 조정한다. 여기서 f_{max} 는 최대 측정주파수를 의미한다.

만약 인접 센서간격을 처음부터 d , $d(>d)$, $d(>d)$ 방식으로 넓혀간다면, 센서간격이 넓어짐과 역으로 각 센서의 수신 주파수 범위가 낮아져서 궁극적으로는 고주파수 대역의 지향지수가 낮아지는 효과가 초래된다. 따라서 고주파수 대역에서의 센서간격 확대는 지양해야 한다. 이와는 반대로, 고주파수 대역의 인접 센서간격을 d , $d(<d)$, $d(<d)$ 방식으로 좁히므로써 센서 수 감소가 가능하겠지만, 이는 물리적으로 어려운 점이 있다. 센서는 그 자체의 기계적인 크기를 가지고 센서가 수신한 신호를 신호처리단까지 전송하기 위한 신호선(signal cable)이 센서에 붙여져야 할 뿐만 아니라 센서는 매우 낮은 소리를 감지하기 때문에 센서와 가까운 곳에 고성능 전치증폭기 (pre-amplifier)를 배치시켜야 한다[8,9]. 따라서 고주파수 대역의 센서간격을 좁게 배치하고 싶어도 무한정으로 좁게 배치하기는 어렵다. 그림 5에서 d_0 는 이와 같은 물리적 조건을 고려하여 배치 가능한 인접 센서간 최소간격으로 간주하고, 인접 센서간격을 이 보다 더 줄이기는 어렵다고 보아야 한다. 결과적으로 고주파수 대역에서 인접 센서간격을 넓혀 나갈 수도 없고 줄이기도 어렵기 때문에 자연적으로 등간격으로 센서가 배치된다. 그리고 이는 선형배열과 동일 방식으로 고주파수 대역 센서들이 배열됨을 의미한다.

기준센서와 첫 번째 센서와의 간격 d_0 는 최소 센서간격으로서 공간 샘플링 이론에 따라 $d_0 \leq c/(2f_{max})$ 가 된다. 그리고 동일한 d_0 간격으로 일정 개수의 센서가 배열되므로, 고주파수 대역의 배열길이 X_{H_0} 는 고주파수 센서 개수 H와 최소 센서간격 d_0 와의 곱 $d_0 H$ 로 주어진다. 따라서 수신주파수 대역의 최소 파장 λ_{min} 은 식(4)로 표현된다.

$$\lambda_{min} = c/f_{max} = 2X_{H_0}/H \tag{4}$$

3.3 고주파수 대역 이하 주파수대역의 센서간격

측정하고자 하는 최대주파수와 원하는 지향지수에 따라 고주파수 대역의 센서간격 d 와 고주파수 대역 센서 수 H가 정해지고 이들에 의해 고주파수 대역의 배열길이 X_{H_0} 가 설정된 다음, 고주파수 대역 배열길이 X_{H_0} 를 기준으로 고주파수 대역 이하 주파수대역의 센서간격이 설계된다. 이는 고주파수 대역 이하 주파수대역의 센서간격이 H에 의해 달라짐을 의미한다. 따라서 고주파수 대역 이하

주파수대역의 센서간격을 H의 함수로 나타낼 수 있으면 고주파수 대역은 인접 센서간 간격 d_0 에 의해, 다른 모든 센서간격과 총배열길이는 H로 각각 나타낼 수 있게 된다.

배열중심에서 H번째 센서와 (H-1)번째 센서간 간격 ($X_H - X_{H-1}$)은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_H - X_{H-1} \leq \lambda_m/2 = X_H/H \quad (5)$$

배열중심으로 부터 i번째 센서까지의 간격 X_i 와 (i-1)번째 센서까지의 간격 X_{i-1} 과의 비를 R로 나타내는 경우, $R=X_i/X_{i-1}$ 은 인접 센서간 간격의 비이므로 이를 이용하여 센서간격을 계속 연장시킬 수 있다. 여기서 i는 설명을 위한 임의의 정수이다. 인접 센서간 간격의 비 $R=X_i/X_{i-1}=X_H/X_{H-1}$ 가 H의 함수로 표현된다면 H의 함수에 의해 센서간격 확장이 가능해진다. 이를 위해 먼저 식(5)의 양변을 X_{H-1} 로 나누어 식(6)으로 표시한다.

$$X_H/X_{H-1} - 1 \leq (X_H/X_{H-1})/H \quad (6)$$

식(6)에서 $X_H/X_{H-1}=R$ 을 대입하고, R에 관하여 정리하면 식(6)은 식(7)로 표현된다. 곧 인접 센서간 간격의 비 R을 고주파수 대역 센서 개수 H의 함수로 나타낼 수 있다.

$$R \leq H/(H-1) \quad (7)$$

R이 인접 센서간 간격의 비이므로 고주파수 대역 이하 주파수대역의 센서간격은 식(7)을 이용하여 확장한다. 먼저 배열중심으로부터 $m=H$ 이후 센서까지의 길이를 센서별로 각각 구하면 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} X_{m-H} &= d_0 H \\ X_{m-H+1} &= d_0 H R \\ X_{m-H+2} &= d_0 H R^2 \\ X_{m-H+3} &= d_0 H R^3 \\ &\dots \\ X_{m-H+i} &= d_0 H R^{i-1} \quad (m > H) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)에서 $m=H+1$ 부터의 센서간격은 비선형 함수이다. 식(9)는 $m=H+1$ 이후 부터의 이와 같은 인접 센서간 간격 d_m 을 표현하고 있다.

$$\begin{aligned} d_m &= X_m - X_{m-1} \\ &= d_0 H (R - 1) R^{m-H} \quad (m > H) \end{aligned} \quad (9)$$

식(7)에서 $R=H/(H-1)$ 인 경우를 선정하면 $m=H+1$ 부터의 인접 센서간 간격 d_m 을 나타내는 식(9)가 식(10)으로 단순화 된다.

$$d_m = d_0 R^{m-H} \quad (m > H) \quad (10)$$

식(10)은 식(7)의 조건식 가운데 $R=H/(H-1)$ 을 고려하였으므로, 배열을 가장 길게 설정하는 경우에 해당된다. 이는 센서간격을 비선형화하여 센서 개수를 줄이고자 하는 본 연구목적과 반대되는 가정으로서, 제안 알고리즘의 연구결과 가운데 가장 나쁜 결과가 됨을 의미한다. 그러므로 본 연구에서는 $m=H+1$ 이후 부터의 인접 센서간 간격비를 $R=H/(H-1)$ 로 가정한 식(10)을 인접 센서간 간격으로 간주하여 시뮬레이션한다.

3.4 고주파수 센서개수와 배열길이

본 연구에서 제안하는 비선형배열 알고리즘은 고주파수 대역 센서간격 d_0 와 식(10)의 센서간격을 이용하는 것으로 요약된다. 제안 알고리즘을 이용하여 센서 수에 따른 배열길이의 1/2을 최소 센서간격 d_0 로 표준화시켜 표현하면 그림 6과 같다. 그림에서 HF는 고주파수 센서 수를 의미한다. 배열길이는 센서 수에 따라 로그함수적으로 증가하며, HF에 따라 배열길이가 크게 달라지므로 고주파수 대역 센서 개수 설정에는 신중을 기하여야 함을 알 수 있다. 이는, 3.1절에서 언급한 바와 같이 고주파수 대역 부터 설계하여야 함을 뒷받침한다.

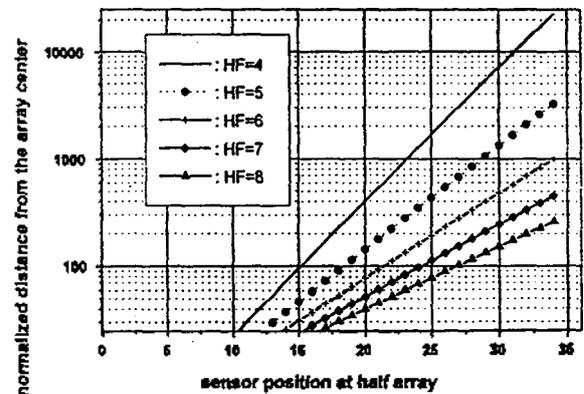


그림 6. 비선형배열의 표준화된 배열길이 (우측 1/2)
Fig. 6. Normalized array length of non-linear array (right half).

IV. 비선형배열 광대역 단일빔 지향성

4.1 시뮬레이션 사양

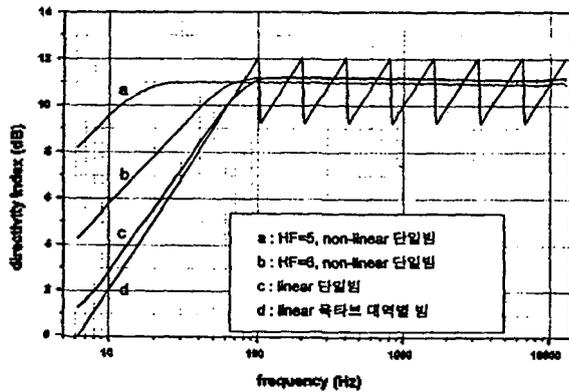
위의 제3장에서 제안한 비선형배열이 갖는 광대역 단일빔 지향특성을 고찰하기 위하여 시뮬레이션을 수행하고, 옥타브대역 당 17개 센서를 갖는 50Hz~12800Hz의 전형적인 NLA 선형배열과 시뮬레이션 결과를 비교한다. 이는 길이 120m 배열과의 비교를 의미하므로 배열길이가 이와 비슷한 경우를 기준으로 한다. 가우시안 가중치는 -

3dB점의 폭을 갖도록 $k=0.530020726$ 으로 한다.

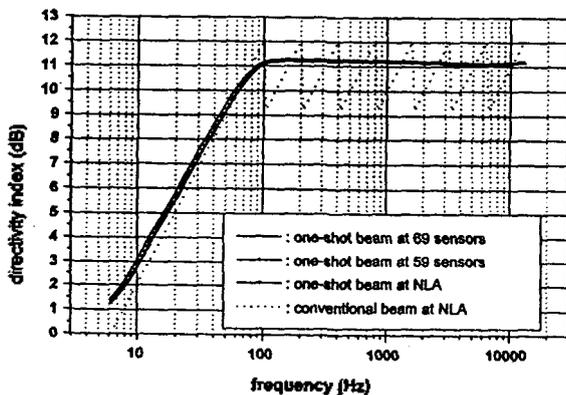
측정 최대주파수 12800Hz의 최소 센서간격이 $d=5.859375\text{cm}$ 임을 고려하면 120m에 상응하는 배열은 그림 6에서 규준화 길이 1024에 해당하여, 센서개수 $34 \times 2 + 1 = 69$ 개 및 고주파수 센서 6개의 HF=6인 경우와 센서개수 $29 \times 2 + 1 = 59$ 개 및 고주파수 센서 5개의 HF=5인 경우이다. 이들은 배열길이 각각 115.906m 및 124.077m로서, 센서 69개인 경우는 센서 수와 배열길이 모두가 줄어들었고 센서 59개인 경우는 센서 수만 14개 감소되었다.

4.2 지향지수

동일하게 73개의 센서를 보유하는 경우, $k=0.530020726$ 에 대한 선형배열과 비선형배열의 배열 수직방향 광대역 단일빔 지향지수는 그림 7(a)와 같다. 먼저, 비선형배열의 경우에도 광대역 단일빔 지향지수가 균일함을 그림에서 보여준다. 저주파수 대역의 지향지수는 선형배열 보다 비



(a)



(b)

그림 7. 지향각 0도의 광대역 단일빔 지향지수 비교

- (a) 73개 센서에 대한 선형배열 및 비선형배열 비교
- (b) 59개 및 69개 센서 비선형배열과 73개 센서 선형배열 비교

Fig. 7. Comparison of DI of wide-band one-shot beam at 0 degree; (a) comparison of linear and non-linear array with 73 sensors, (b) comparison of nonlinear array with 59 or 69 sensors and linear array with 73 sensors.

선형배열의 경우에 더욱 우수하다. 그리고 비선형배열의 경우에는 고주파수대역 센서 개수가 적을수록 낮은 주파수 대역까지의 측정이 가능하여 우수하다. 그림 7(b)는 고주파수 센서 6개를 포함한 69개 센서의 비선형배열과 고주파수 센서 5개를 갖는 59개 센서의 비선형배열에 대한 지향지수를 나타낸다. 센서 수를 줄였음에도 불구하고 73개 센서의 선형배열과 유사한 지향지수를 가져, 광대역 단일빔 3가지가 그림상으로는 겹쳐져 보인다. 이는 본 연구에서 제안한 비선형배열이 적은 센서를 가지고도 유사한 성능으로 음향추정에 적용될 수 있음을 의미한다.

그림 8은 지향각 변화에 따른 비선형배열 지향지수 변화를 보여준다. 일반적으로 음향추정은 배열 수직방향(0도)으로부터 60도 이내에서 측정하므로 60도까지 시뮬레이션하였다. 그림에서 보는 바와 같이 지향각이 변하더라도 지향지수는 크게 변하지 않는다. 이는 음향추정 측면에서 바람직한 결과이다. 그림 8을 정량적으로 분석하면 표 1과 같다. 센서 59개 비선형배열의 지향지수 분산이 0.1675dB 이하로 매우적이고 73개 센서의 선형배열 보다 안정되어 있다. 지향지수 평균 역시 우수함을 표 1에서 알 수 있다.

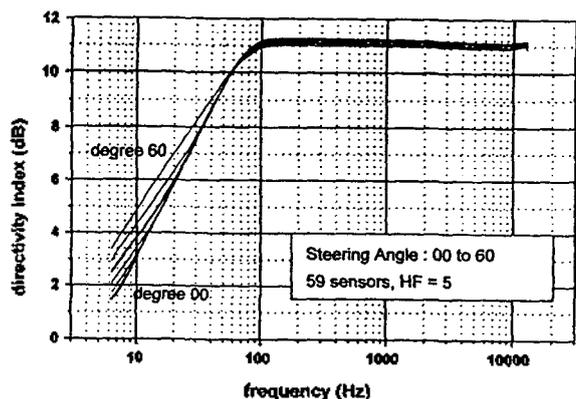
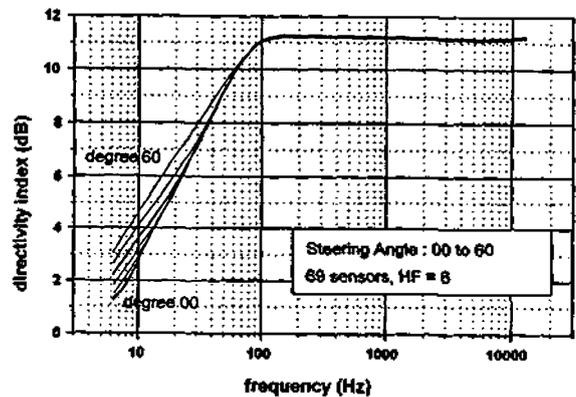


그림 8. 지향각에 따른 비선형배열 광대역 단일빔 지향지수

- (a) 고주파수 센서 6개를 포함한 총 69개 센서
- (b) 고주파수 센서 5개를 포함한 총 59개 센서

Fig. 8. DI of wide-band one-shot beam of non-linear array as variation of beam steering angle;

- (a) 69 sensors including 6 high frequency sensors,
- (b) 59 sensors including 5 high frequency sensors.

표 1. 지향각에 따른 지향지수 비교 (50~12800Hz)

Table 1. Comparison of DI as beam steering angle (50~12800Hz).

지향각	비선형배열 광대역 단일빔				선형배열 광대역 단일빔 (73개 센서)		선형배열 옥타브대별 빔형성 (73개 센서)	
	59개 센서		69개 센서		평균	분산	평균	분산
	평균	분산	평균	분산	평균	분산	평균	분산
0도	11.0976 dB	0.1675 dB	11.0830 dB	0.2203 dB	11.0584 dB	0.1965 dB		
10도	11.0792 dB	0.1644 dB	11.0760 dB	0.2192 dB	11.0472 dB	0.1953 dB		
20도	11.0513 dB	0.1604 dB	11.0693 dB	0.2174 dB	11.0427 dB	0.1939 dB		
30도	11.0072 dB	0.1553 dB	11.0596 dB	0.2148 dB	11.0288 dB	0.1899 dB		
40도	10.9407 dB	0.1495 dB	11.0292 dB	0.2087 dB	11.0015 dB	0.1836 dB	10.6301 dB	0.7526 dB
50도	10.8757 dB	0.1452 dB	10.9974 dB	0.2023 dB	10.9723 dB	0.1768 dB		
60도	10.8205 dB	0.1349 dB	11.0237 dB	0.1851 dB	11.0000 dB	0.1652 dB		

4.3 빔패턴

본 연구에서 제안한 비선형배열의 지향각 0도에 대한 광대역 단일빔 빔패턴은 그림 9와 같다. 전형적인 옥타브 대역별 빔에서의 -35dB와 비교하여 그림 9의 최대 부엽준위 -17.5dB는 큰 값이지만, 음향측정에서는 -5dB 정도 이하이면 유용하므로 [6] 그림 9의 부엽준위가 음향측정에 영향을 미치지 않는다.

지향각 60도까지의 빔패턴 변화는 그림 10에 나타내었다. 지향각이 변하더라도 부엽준위 또한 크지지 않음을 알 수 있다.

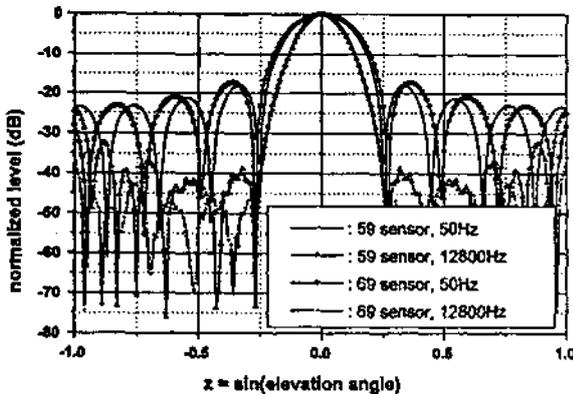


그림 9. 비선형배열의 광대역 단일빔 빔패턴(지향각 0도)
Fig. 9. Beam pattern of wide-band one-shot beam of non-linear array (beam steering angle 0°).

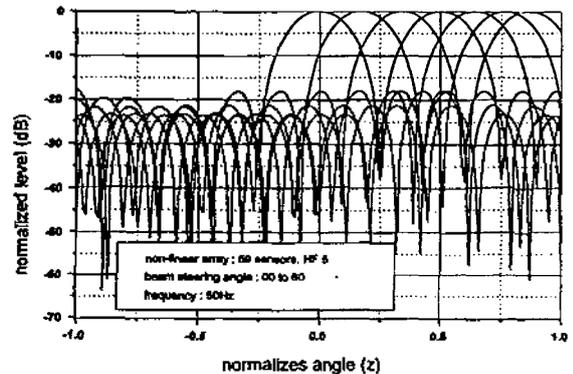


그림 10. 지향각에 따른 비선형배열의 광대역 단일빔 빔패턴
Fig. 10. Beam pattern of wide-band one-shot beam of non-linear array as variation of beam steering angle.

비선형배열 빔패턴의 빔폭은 표 2에 나타내었다. 음향 측정을 위한 빔폭은 음원의 물리적인 크기에 의해 결정되지만 표 2에서는 -2dB점을 기준으로 하여도 6.8도 이상의 넓은 빔폭을 가져 일반적인 음향측정에 유용하므로 -2dB점이 빔폭 기준으로 설정가능함을 보여준다. 이는 -3dB점을 빔폭 기준으로 설정하는 전형적인 옥타브 대역별 빔보다 적어도 1dB 이상 측정정확도가 향상됨을 의미한다. 결과적으로 그림 9 및 그림 10의 빔패턴은, 본 연구에서 제안한 비선형배열 알고리즘에 의해 59개 센서만 사용하더라도 73개 센서의 선형배열과 마찬가지로 광대역 단일빔형성에 의한 음향측정에 가용함을 보여준다.

표 2. 비선형배열의 광대역 단일빔 빔폭

Table 2. Beam width of wide-band one-shot beam of non-linear array.

빔폭 기준	센서 59개 (고주파수 센서 6개)		센서 73개 (고주파수 센서 5개)	
	50Hz	12800Hz	50Hz	12800Hz
-1.0 dB	8.0°	4.6°	7.4°	4.5°
-1.5 dB	9.2°	5.6°	8.5°	5.8°
-2.0 dB	11.0°	6.8°	10.2°	6.8°
-3.0 dB	13.2°	8.0°	12.4°	8.2°

V. 결론

본 연구에서는 상대적으로 적은 센서 수에 의한 음향 측정을 목적으로, 가우시안 가중치의 광대역 단일빔형성을 적용시키기 위한 비선형배열 기법을 제안하였다. 제안 알고리즘은, 센서 수를 줄임으로 인한 고주파수 대역의 지향지수 감소를 방지하기 위하여 고주파수 대역의 인접 센서간 간격은 측정 최대주파수 기준의 센서간격으로 동일하게 등간격 구성하고, 고주파수 대역 이하 주파수 대역의 인접 센서간 간격은 고주파수 수신용 센서 수를 합수로 센서간격을 비선형 배열하였다. 이 때 모든 센서간격은 공간 샘플링 이론이 지켜지도록 하였다.

제안 알고리즘의 비선형배열에 가우시안 가중치를 갖는 광대역 단일빔을 형성시킨 결과, 선형배열에 광대역 단일빔을 적용시킨 결과와 유사한 지향지수를 획득하면서도 비선형배열에 의하여 센서 수 감소가 가능함을 시뮬레이션으로 확인하였다. 특히 본 논문에서 제안한 알고리즘에 의해 설계된 59개 센서의 비선형배열과 옥타브 대역당 17개의 센서를 갖는 73개 센서의 선형배열을 비교하면, 제안 알고리즘의 비선형배열이 14개 적은 센서에도 불구하고 유사한 지향지수를 나타내었다. 또한 주파수에 상관없이 균일 지향지수를 갖는다는 광대역 단일빔 특성이 제안된 비선형배열에서도 유지되었으며, 60도 이내 지향각에서의 지향지수 변화가 0.1675dB로서 선형배열보다 안정적임이 입증되었다. 또한 제안된 비선형배열 빔패턴의 최대 부엽준위가 -17.5dB 이하이고 -2dB점 빔폭이 6.8도로서 음향측정에 유용한 빔특성을 나타내었다.

그러므로 본 연구에서 제안한 비선형배열에 의해 센서

수를 59개 사용하더라도 73개 센서의 선형배열과 유사한 지향특성을 가지므로써, 상대적으로 적은 센서 수에도 불구하고 선형배열과 유사성능을 보유한 제안 비선형배열 설계가 유용함을 확인하였다.

▲ 손경식

한국음향학회지 제16권 7호 참조

현재: 부산대학교 전자공학과 교수

참 고 문 헌

1. R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd ed., McGraw-Hill Inc., 1983
2. W. S. Burdic, Underwater Acoustic System Analysis, 2nd ed., Prentice-Hall Inc., 1991
3. R. E. Collin, F. J. Zucker, Antenna Theory, part I, McGraw-Hill Inc., 1969
4. B. D. Steinberg, Principles of Aperture and Array System Design, A Wiley-Interscience Publication, 1976.
5. D. H. Johnson, D. E. Dudgeon, Array Signal Processing : Concepts and techniques, PTR Prentice Hall Inc., 1993.
6. 도경철, 손경식, "수중음향측정 성능예측기준 설정을 위한 제안", 1997년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집, Vol.16, No.2(s), pp.371-374, 1997.
7. R. A. Mucci, "A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms", IEEE. Trans. on Acoust. Speech and Signal Proc., Vol.ASSP-32, No.3, pp.548-558, June 1984.
8. A.D.Waite, Sonar for Practicing Engineers, Ferranti Thomsom Sonar Systems, 1996
9. R. O. Nielsen, Sonar Signal Processing, Artech House Inc., 1991.
10. 강정원, 이원철, "수동형 비균질 선형 전인 배열센서를 이용한 입사각 및 도플러 주파수 동시 추정 기법", 한국음향학회지, 제17권 제2호, pp.32-42, 1998.
11. 도경철, 손경식, "가우시안 가중치에 의한 광대역 단일빔의 지향특성", 한국음향학회지, 제18권 제1호, pp.25-31, 1999.

▲ 도 경 철

한국음향학회지 제12권 3호 참조

1984년 2월: 부산대학교 전기기계공학과(공학사)

1986년 2월: 부산대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1995년 3월 ~ 현재: 부산대학교 대학원 전자공학과 박사과정

1986년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임연구원

* 주관심분야: 수중음향신호처리 및 수중추적신호처리