

음향측정을 위한 빔형성에서의 최적 가중상수 설계 기법

An Algorithm on Optimum Weighting Design in Beamforming for Acoustic Measurement

도 경 철*, 손 권*, 이 용 곤*, 손 경 식**

(Kyeong Cheol Dho*, Kweon Son*, Yong Gon Lee*, Kyung Sik Son**)

요 약

본 논문에서는 선형배열을 이용하여 음향을 측정하기 위한 새로운 빔형성 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은, FIR 필터 설계기법에 의해 가중상수 및 원하는 빔패턴을 설정하고 이를 초기치로 사용하여 원하는 빔패턴과의 오차가 최소가 되도록 가중상수를 최적화시킨다. 전 주파수에서의 지향지수 균일성 유지를 위해 옥타브대역을 부대역으로 세분하고 의사역행렬에 의해 전달행렬을 정방행렬화하여 각 부대역별로 최적화를 수행한다. 시뮬레이션 결과 제안 알고리즘이 선형배열에서 음향측정에 적합한 빔패턴 및 지향지수를 형성시켜 음향측정에 유용함을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a new beamforming algorithm for acoustic measurement by using the nested linear array. In this algorithm, the weighting is optimized by minimizing the LMS error with the initial value obtained by FIR filter design algorithm. The optimization process is applied to each sub-band, which is divided from the octave band, to produce the uniform directivity index. For the optimization, pseudo inverse matrix is used for the transfer matrix. As the simulation results, it is found that the proposed algorithm can get the desired beam pattern and uniform directivity index so as to be used efficiently for the acoustic measurement by using a nested linear array.

1. 서 론

음향측정의 궁극적인 목적은 원하는 음향을 왜곡없이 녹음하는 일이다. 그러므로 수중배경소음이 높은 환경에서 저준위 음원의 음향측정을 위하여는 센서배열에 의한 배열이득[1,2]을 이용하여 신호대잡음비를 높여야 하고 음원의 물리적인 크기를 포함하도록 빔폭은 적절하게 넓혀줘야 한다. 또한 음원의 모든 부위에서 생성되는 음향을 균일이득으로 측정하기 위해 빔의 주엽은 구형파 형태를 유지하고 전 주파수 대역에서 지향지수(directivity index)를 균일하게 함이 이상적이다[3].

그러나 옥타브 대역별로 센서가 등간격 배치된 삼입형 선형배열에서의 전형적인 옥타브 대역별 빔[1,2]은 배열과의 수직방향에서 좁은 빔폭을 가지고 주파수에 따라 빔폭이 변한다. 그리고 옥타브대역 양 끝의 주파수가 2배 차이남에 따라 옥타브 양 끝단의 지향지수 역시 3dB 차이를 가져 균일하지 못하다. 이는 주파수영역에서 역곡선으로 보상이 가능 하지만 너무 방대한 계산량을 필요로 한다.

이를 극복하고 주엽 빔폭의 일정 유지를 위한 한 방법으로 적응 빔형성기법[5,6]이 적용될 수 있다. 이는 관심 방향으로 최대 배열특성을 유지하고 비 관심 방향의 에너지를 최소화하여 유한 범위의 주파수에서 상대적으로 일정한 주엽 빔폭을 유지한다. 그러나 연속적인 주파수에서의 일정한 주엽 빔폭 유지가 어렵고 시간에 따라 배열이득이 변하여 음원의 절대값 산출이 어려우므로 탐지용으로 용도가 제한된다.

광대역 단일빔형성(one-shot beamforming)기법[3]은 배열 내 모든 센서를 동시에 사용하여, 음향측정에 매우 유용한 빔폭 및 지향지수를 갖도록 빔을 1회에 형성시킨다. 단일빔형성기법은 센서간격의 영향을 크게 받지 않으므로 선형배열 보다는 센서 수를 감소시킨 비선형배열에서 성능이 매우 우수하다.

Ward[7]는 센서간격과 개별센서에 적용되는 가중상수를 다차원(multi-dimensional) 최적화시킴으로서 관심 주파수 대역에서의 빔폭이 일정하도록 알고리즘을 제안하였다. 이는 주파수와 독립적으로 일정한 가중상수를 사용하는 대신에 센서간격을 최적으로 조정한다. 그러나, 공기중에서 소수의 마이크를 이용하여 일정 대역 음향신호를 획득하는 경우에는 이 알고리즘이 유용하지만 광대역 음향측정

* 국방과학연구소

** 부산대학교 공과대학 전자공학과

접수일자: 1999년 7월 1일

에는 설계된 빔패턴 특성이 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 실용화되어 있는 대부분의 센서 배열이 선형배열로 구성되어 있으므로, 선형배열을 이용한 빔형성에서 원하는 빔패턴과 균일 지향지수를 획득하기 위한 새로운 알고리즘을 제안한다. 본 연구에서는 주파수 대역에 따라 가중상수를 변화시키면 빔패턴이 달라질 수 있음을 이용하여, 센서간격은 일정 등간격으로 유지시키는 대신 센서간격에 의해 설정되는 옥타브대역을 부대역(sub-band)으로 세분화하고 각 부대역에 대하여 빔폭을 일정하게 유지시키도록 가중상수를 최적화함으로써 원하는 빔패턴과 균일 지향지수를 획득하고자 한다.

II. 선형배열에서의 음향측정을 위한 빔형성

선형배열에서의 전형적인 옥타브 대역별 빔형성기법은 대부분의 소나와 레이더가 탐지 목적으로 채택하고 있으며 이론적으로도 잘 정립되어 있다[1,2]. 옥타브 당 센서 N개를 가진 선형배열에서 임의 옥타브대역 q의 전형적인 지연-합(delay-sum) 빔 $B_q(t, \theta)$ 는 식 (1)에 의해 형성된다. 여기서 ω_n 과 $s_n(t)$ 는 센서 n의 가중상수와 수신신호를 각각 나타낸다. 시간지연(time delay) τ_n 은 기준센서와 센서 n과의 신호수신 시간차이다.

$$B_q(t, \theta) = \sum_{n=1}^N \omega_n s_n(t - \tau_n) \quad (1)$$

식 (1)에서 가중상수 ω_n 는 주파수에 관계없이 옥타브 대역 내 센서 순서에 의해 동일하게 주어진다. 옥타브대역을 Q개 가진 선형배열의 최종 빔 $B(t, \theta)$ 는 식 (1)에 의해 형성된 각 옥타브대역 빔을 식 (2)와 같이 선형 합산 하므로써 완성된다.

$$B(t, \theta) = \sum_{q=1}^Q B_q(t, \theta) \quad (2)$$

센서배열과의 수직방향을 0° 로 기준하는 경우, 빔패턴 함수 $p(u)$ 는 임의 방위 θ_m 에서 식 (3)과 같이 주어진다 [10]. u 는 파장 λ 에 대한 정현파 빔폭 $u = \sin(\theta_m) \lambda$ 을 나타내고, d 는 옥타브대역의 센서간격이다.

$$p(u) = \sum_{n=1}^N \omega_n e^{-j2\pi n u d} \quad (3)$$

예를 들어 그림 1은 수동소나에서 주로 사용하는 돌프-체비셰프(Dolph-Chebyshev) 가중상수를 적용하는 경우 센서 배열과의 수직방향 빔패턴을 나타낸다. 3200Hz와 1600Hz에 대한 그림 1에서 빔폭은 주파수에 따라 상이하다. 즉 3200Hz와 1600Hz의 -3dB점 빔폭은 6.587° 및 13.3086° 로서, 주파수 증가에 따라 빔폭이 좁아 짐을 알 수 있다.

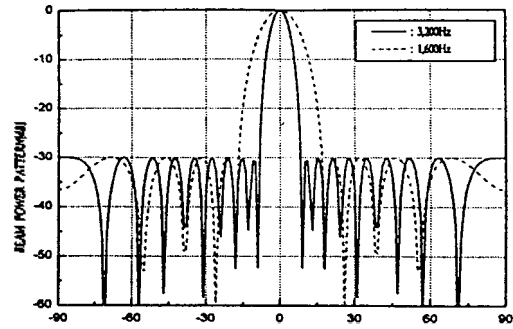


그림 1. 전형적인 지연-합 빔의 빔패턴 예
Fig. 1. An example of the beam pattern by the conventional delay-sum beam.

선형배열의 모든 옥타브대역에 동일한 가중상수를 적용하여 빔을 형성시킬 경우, 주파수 f에 따른 지향지수 $DI(f)$ 는 식 (4)에서와 같이 빔형성에 사용한 센서 개수 N과 해당 옥타브대역 최대주파수 f_{max} 와의 함수로 주어진다.

$$DI(f) = 10 \log[(N-1)/f f_{max}] \quad (4)$$

옥타브대역의 최저주파수는 최대주파수의 1/2이다. 따라서 옥타브대역 양 끝의 지향지수 차이는 3dB가 된다. 그림 2는 이를 증명하고 있다. 이와 같은 지향지수 변화는 음향측정에서의 직접적인 오차 요인으로 작용한다.

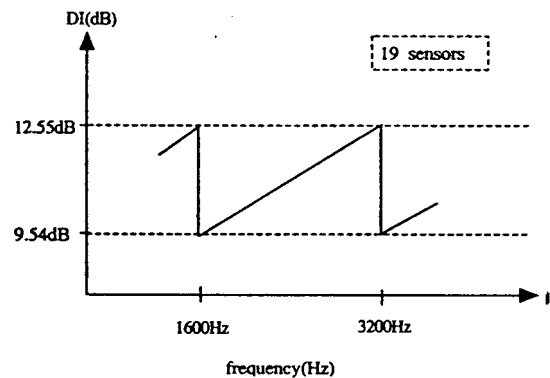


그림 2. 선형배열에서 주파수에 따른 지향지수 변화 예
Fig. 2. An example of DI as frequency variation at nested linear array.

그러므로 이러한 오차를 줄이기 위하여는 측정신호 분석 시에 지향지수 변화를 주파수영역에서 보정하여야 하지만 너무 방대한 계산량을 필요로 한다. 그러나 만약 옥타브대역을 부대역으로 세분화한다면 부대역 양 끝단의 주파수 차이는 2보다 적으므로 이에 따른 지향지수 변화 역시 줄일 수 있다. 이는 그림 3에서 설명된다.

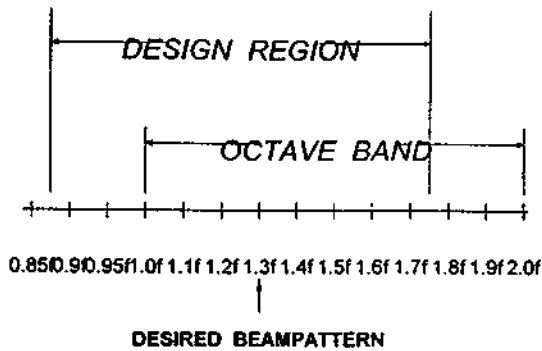


그림 3. 옥타브대역의 세분화 예
Fig. 3. An example of dividing the octave band to sub-band.

옥타브대역이 10개의 부대역으로 세분화된 그림 3의 예에서 각 부대역 양 끝의 주파수 차이는 1/10이므로 이에 대응하는 지향지수 차이는 0.3dB로 10배 줄어든다. 만약 부대역을 30개로 분할한다면 각 부대역 양 끝의 지향지수 차이는 0.1dB로 줄어들게 된다. 즉, 각 부대역 내의 지향지수 차이는 옥타브대역 내의 지향지수 차이 보다 옥타브대역 세분화 수에 반비례하여 줄어든다. 이는 그 만큼 지향지수가 균일해짐을 의미한다.

그러나 각 부대역의 주파수 범위가 서로 상이하므로, 동일한 가중상수를 적용하는 경우 식 (3)의 빔패턴은 각 부대역마다 서로 달라진다. 서로 다른 부대역에서도 빔패턴을 동일하게 유지하기 위해서는 결과적으로 가중상수를 각 부대역별로 다르게 적용할 수 밖에 없다. 이는 가중상수를 주파수에 따라 다르게 설계하여야 함을 의미한다.

III. 주파수 대역별 가중상수에 의한 빔형성기법 제안

선형배열에서의 음향측정용 빔이 주파수와 관계없이 일정한 빔폭을 가지고 지향지수를 균일하게 유지하기 위하여는, 앞서 고찰한 바와 같이 옥타브대역을 부대역으로 세분화하고 각 부대역별로 빔을 형성하되 가중상수를 부대역별로 별도 적용시켜야 한다.

그러므로 본 연구에서는 식 (5)와 그림 4의 알고리즘을 제안한다. 식 (5)에서 P는 임의 옥타브대역이 갖는 부대역 개수이고 p는 부대역의 순번이다. ω_{np} 는 부대역 p에서의 센서 n에 대한 가중상수를 의미한다. 본 알고리즘에서의 최종 빔은, 전형적인 옥타브 대역별 빔형성과 같이 식 (5)를 식 (2)에 적용시켜 각 옥타브대역별로 선형합산하므로서 형성된다.

$$B_s(t, \theta) = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \omega_{np} s_n(t - \tau_n) \quad (5)$$

본 연구에서 제안하는 알고리즘에서 ω_{np} 는 빔패턴을 원하는 형상으로 만드는 역할을 한다. 그러므로 ω_{np} 은 각 부대역에서 최적으로 설정되어야 한다.

그림 4. 주파수 대역별 가중상수에 의한 옥타브 q에서의 빔형성
Fig. 4. Beamforming with frequency dependent weighting at octave-band q.

IV. 임의 빔패턴을 위한 가중상수 최적화 기법

4.1 LMS를 이용한 최적 가중상수 설계 기법 제안

임의의 주파수대역에서 원하는 빔패턴을 형성시키기 위하여 본 연구에서는 그림 5의 최적 가중상수 설계 기법을 제안한다. 제안 알고리즘은 원하는 빔패턴과 형성된 빔패턴과의 오차가 최소화되도록 가중상수를 최적화한다.

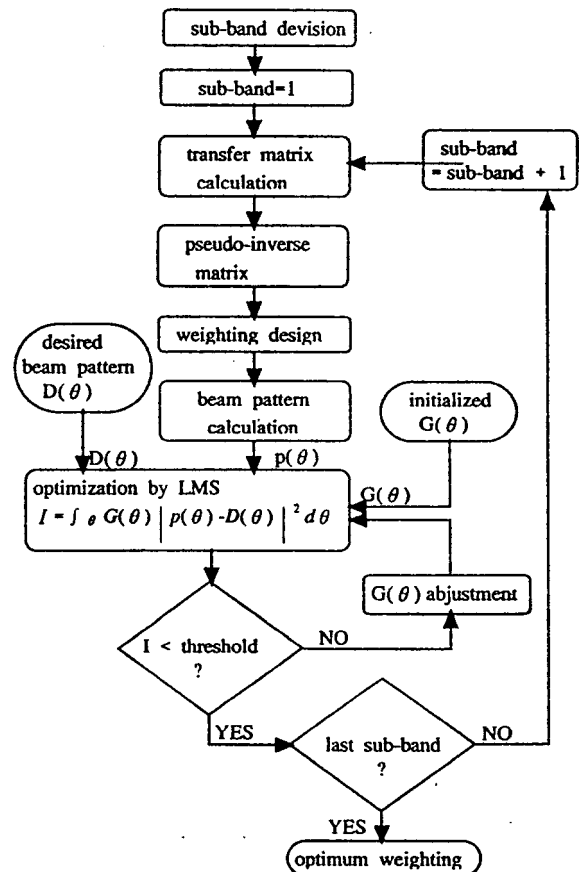


그림 5. LMS를 이용한 최적 가중상수 설계 알고리즘
Fig. 5. Algorithm for optimum weighting design by using LMS.

4.2 FIR필터 설계기법을 이용한 원하는 빔패턴 설계

본 연구에서 제안한 그림 5의 알고리즘을 수행하기 위하여는 원하는 빔패턴의 형상을 먼저 설계하고 이를 최대한 만족시키는 가중상수를 구하여야 한다.

주변 소음이나 방향성 간섭신호에 대해 상대적으로 코히어런트(coherent) 특성을 지닌 신호음이 매질을 통해 전달되면서 생긴 시간지연을 보상해주는 공간필터(spatial filter)인 빔형성기와 주파수 영역을 다루는 필터(temporal filter)는 동일한 개념이다. 이는 식 (3)의 빔패턴 함수와 식 (6)의 필터 주파수 응답함수(filter frequency response)에서 쉽게 알 수 있다[7,9].

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j\omega n} \quad (6)$$

식 (6)에서 N은 필터 차수이고, h(n)은 n번째 필터 계수이다. 식 (3)의 ud는 식 (6)의 f에 대응됨을 알 수 있다. 이를 이용하면 필터의 통과대역(pass band) 차단주파수 f_p 에서의 센서간격, 빔폭 및 파장과의 관계를 식 (7)과 같이 도출할 수 있다.

$$f_p = ud = d \sin \theta / \lambda \quad (7)$$

원하는 빔폭, 센서간격 및 측정신호 파장을 선정하면 식 (7)에 의해 빔패턴을 위한 주파수대역을 선정할 수 있다. 그리고 식 (6)의 FIR필터 계수 h(n)을 적절하게 선정하고 이를 식 (3)의 가중상수 ω_n 대신 사용하여 빔을 형성시킨다면, 식 (7)로 설정된 주파수대역에서 빔패턴의 주엽을 원하는 형상으로 만들 수 있다. 여기서 FIR필터 설계기법은 저지대역(stopband)에서 최소 에너지를 갖도록 Adams[9]가 제안한 알고리즘 등이 적용된다.

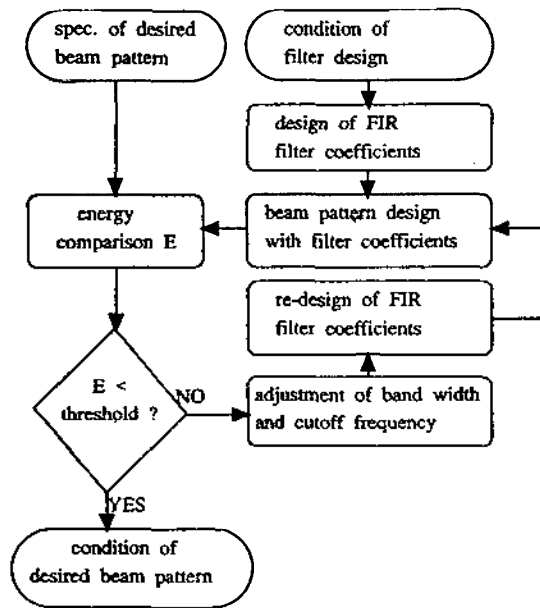


그림 6. FIR필터 설계기법에 의한 원하는 빔패턴 설정 기법
Fig. 6. Design of the desired beam pattern by FIR filter design algorithm.

이를 요약하면 그림 6과 같다. FIR필터 설계에 의한 빔패턴 최적화 알고리즘을 나타내는 그림 6으로 계산된 빔패턴 결과가 원하는 형상과 다른 경우, 설계자는 통과대역 차단주파수 f_p 를 임의의 조절하여 원하는 빔패턴에 가깝도록 한다. 여기서 차단주파수 f_p 는 그림 3의 옥타브대역 세분화 주파수 가운데 한 가지로 한다.

예를 들어 설계주파수 3200Hz에서의 -2dB점 빔폭을 7.38°로 하여 원하는 빔패턴을 그림 7 및 그림 8과 같이 설계할 수 있다. 본 예에서는 이상적인 구형파 형태의 빔패턴에 근접한 원하는 빔패턴 생성을 목적으로 옥타브대역 최고주파수의 1.3배인 1.3f에서 원하는 빔패턴을 설계하였다. 비교를 위하여, 균일 부엽분위 및 최소 주엽빔폭을 갖는 돌프-체비셰프 가중상수의 빔패턴은 그림에서 점선으로 나타내었다. 그림 7과 그림 8의 센서 수는 각각 19개와 25개이다. 센서간격 d가 고정된 상태에서 센서 수가 증가하면 주엽빔이 구형파에 가까워짐을 이들 그림에서 알 수 있다. 그러나 센서 수 증가에 따른 하드웨어 및 소프트웨어적인 부담을 감수해야 한다.

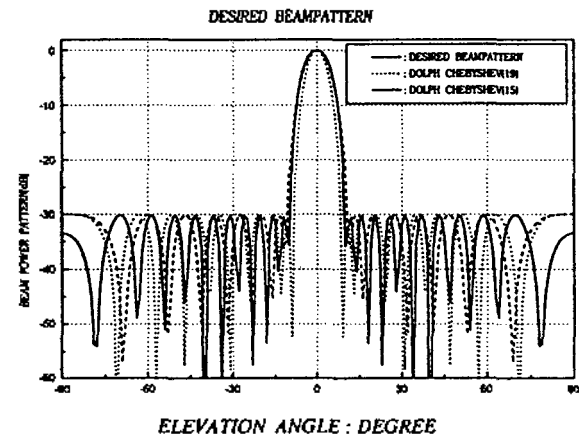


그림 7. FIR필터 설계기법에 의한 센서 19개의 최적 빔패턴
Fig. 7. Optimum beam pattern on 19 sensors by FIR filter design algorithm.

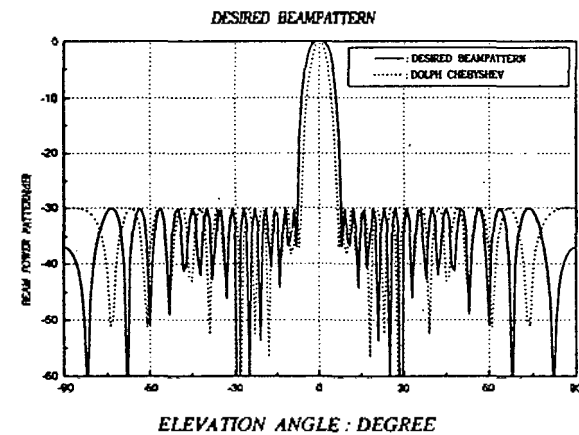


그림 8. FIR필터 설계기법에 의한 센서 25개의 최적 빔패턴
Fig. 8. Optimum beam pattern on 25 sensors by FIR filter design algorithm.

한편, 그림 7의 원하는 빔패턴이 1.3f를 중심으로 설정 되었으므로 그림 3의 부대역 가운데 빔패턴은 0.9f~1.7f를 설계영역으로 형성된다.

4.3 의사역행렬을 이용한 가중상수 초기치 설정

식 (3)의 빔패턴은 주파수 f_i 에서 식 (8)과 같이 표현 할 수 있다. 여기서 P_i , S_i 및 W_i 는 주파수 f_i 에서의 빔패턴, 전달행렬(transfer matrix) 및 가중상수를 각각 나타낸다. 그리고 N 은 센서 수이고 M 은 빔패턴 측정점이다.

$$[P_i]_{M \times 1} = [S_i]_{M \times N} [W_i]_{N \times 1} \quad (8)$$

센서간격이 동일한 배열의 경우 그림 3의 설계영역 0.9f~1.7f에 대하여 전달행렬 S_i 는 각 부대역에서 동일한 행렬이다. 임의 주파수 f 에서 원하는 빔패턴 P 를 만족하는 가중상수 W 는 $W = P \times S^{-1}$ 에 의해 구하여야 하지만, 전달행렬 S 가 정방행렬이 아니므로 식 (8)에 의해 직접 구할 수는 없다. 따라서 식 (9)와 같이 의사역행렬(pseudo-inverse matrix)을 이용하여 구하여야 한다.

$$W_i = [[\bar{S}_i^T S_i]^{-1} \bar{S}_i^T] P_i \quad (9)$$

식(9)에서 $\bar{\quad}$ 는 복소공액, T 는 전치행렬(transpose matrix), $^{-1}$ 는 역행렬을 각각 의미한다. 그림 7의 원하는 빔패턴을 생성시키도록 식 (9)의 의사역행렬 기법으로 가중상수를 구하고 이를 각 부대역에 동일하게 적용시켜 빔패턴을 계산하면, 원하는 빔패턴을 생성한 1.3f 부근의 1.4f에서는 그림 9와 같이 주엽빔에서 원하는 빔패턴과 상당히 유사하다. 그러나 0.9f에서는 빔패턴이 상당히 일그러짐을 그림 10에서 볼 수 있다.

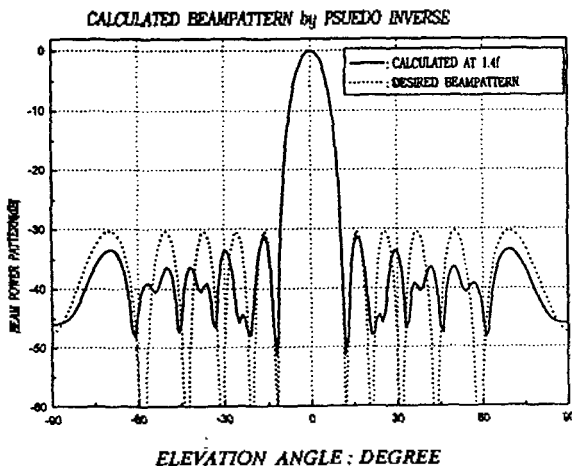


그림 9. 1.4f에서 의사역행렬 방식으로 구한 빔패턴
Fig. 9. Beampattern of 1.4f by pseudo inverse matrix.

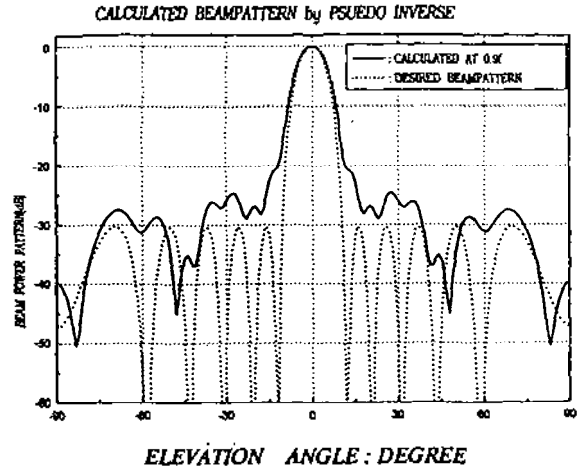


그림 10. 0.9f에서 의사역행렬 방식으로 구한 빔패턴
Fig. 10. Beampattern of 0.9f by pseudo inverse matrix.

그러므로 의사역행렬로 구한 가중상수는 각 부대역에 맞도록 다시 최적화되어야 한다. 이 때 각 부대역에서의 최적화를 위하여, 식 (9)에 의해 구한 가중상수를 초기로 활용한다.

4.4 LMS를 이용한 가중상수 최적화

그림 3의 각 부대역에서 그림 7의 원하는 빔패턴과 가장 가까운 빔패턴을 생성하기 위하여 식 (10)의 최소자승 최소화(least square minimization) 알고리즘을 사용한다. 여기서 θ 는 센서배열의 수직방향과 이루는 각이고 $p(\theta)$ 는 식 (3)의 빔패턴이다. $D(\theta)$ 는 그림 6의 방식으로 구한 그림 7의 원하는 빔패턴이다.

$$I = \int_0 G(\theta) |p(\theta) - D(\theta)|^2 d\theta \quad (10)$$

식 (10)에서 $G(\theta)$ 는 오차 최소화를 위한 제어이득이다. 임의의 부대역에서 원하는 빔패턴과 오차를 최소화시키는 가중상수를 구하기 위해서는 주엽과 부엽을 동일하게 취급할 수 없다. 즉, 빔패턴에 크게 영향을 미치지 않는 부엽과 천이영역(transition region)에서의 오차는 어느 정도 까지 허용할 수 있으나, 주엽에서의 오차는 빔패턴에 결정적인 영향을 주기 때문에 주엽은 가능한 한 빔패턴과 동일하게 하여야 한다. 그러므로 오차 최소화를 위한 제어이득 $G(\theta)$ 을 주엽에서 크게 하고 부엽 및 천이영역에서는 작은 값을 적용시켜야 함을 알 수 있다. 본 연구에서는, 이와 같이 오차 최소화를 위한 제어이득 $G(\theta)$ 설정을 위하여 지향각(steering angle)에 따라 주엽, 부엽 및 천이영역으로 분류한다. 이는 그림 11에 나타내었다.

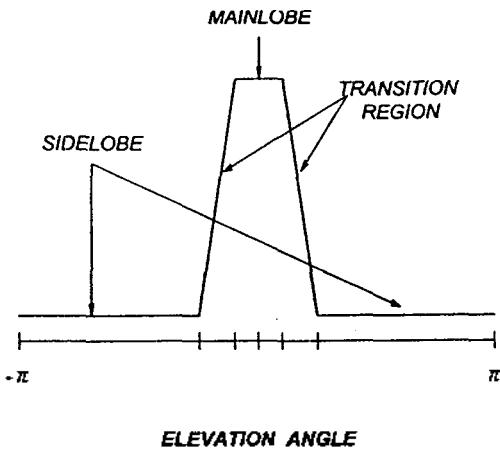


그림 11. 제어이득 설정을 위한 지향각 분할
Fig. 11. Division of steering angle for establishing the control gain.

V. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서는 설계 주파수가 3200Hz인 경우에 19개 센서를 사용하여 -2dB점 빔폭을 7.38°로 하는 빔패턴에 대하여 시뮬레이션한다. 빔패턴 대역 내의 모든 주파수에서 지향지수의 변화율이 0.3dB, 즉, ±0.15dB 이내를 사양으로 하여 옥타브 대역을 그림 3과 같이 10개로 분할하고 시뮬레이션한다.

본 연구에서 제안한 그림 5의 알고리즘을 이용하여 각 부대역에서 최적 가중상수를 설계하고, 이를 이용하여 생성한 빔패턴은 그림 12 ~ 그림 14와 같다. 이들 그림에서, 새로 설정된 옥타브대역의 각 부대역에서 생성된 주엽빔은 원하는 빔패턴과 거의 동일한 형상을 유지하고 있다. 특히 구하고자 하는 영역의 끝부분인 0.9f 또는 0.95f에서도 빔패턴이 상당히 향상되었음을 알 수 있다.

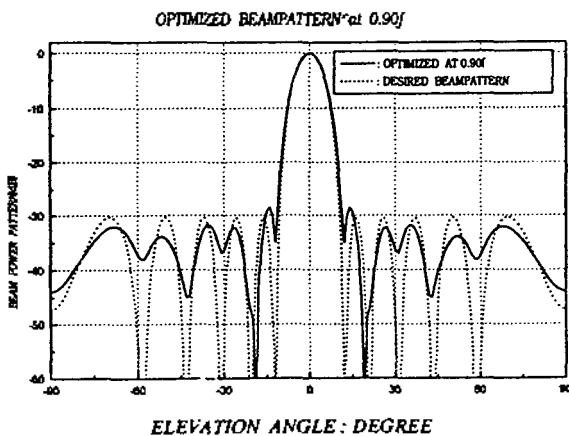


그림 12. 0.9f에서 최적화 방식으로 구한 빔패턴
Fig. 12. Beampattern of 0.9f by optimization algorithm.

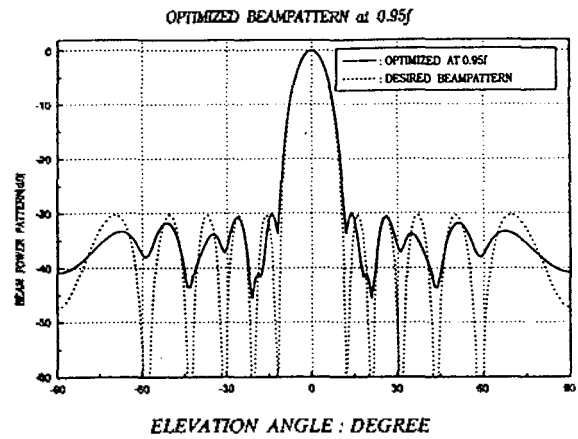


그림 13. 0.95f에서 최적화 방식으로 구한 빔패턴
Fig. 13. Beampattern of 0.95f by optimization algorithm.

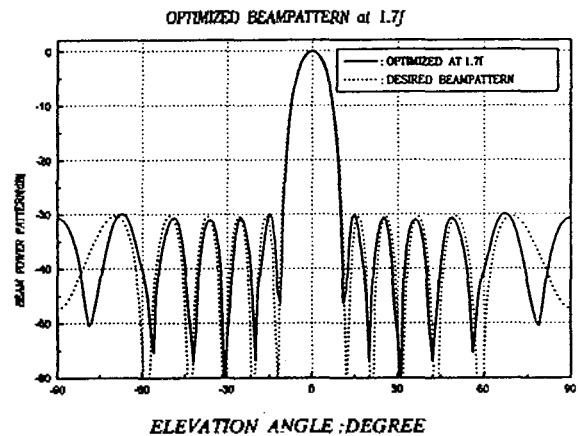


그림 14. 1.7f에서 최적화 방식으로 구한 빔패턴
Fig. 14. Beampattern of 1.7f by optimization algorithm.

지향지수는 무지향성 단일 수중청음기의 출력 소음전력과 지향성 배열의 출력 소음전력의 비로 정의된다. 각 부대역에서 생성한 최적 가중상수를 적용하여 주파수에 따른 지향지수 변화는 그림 15와 같다.

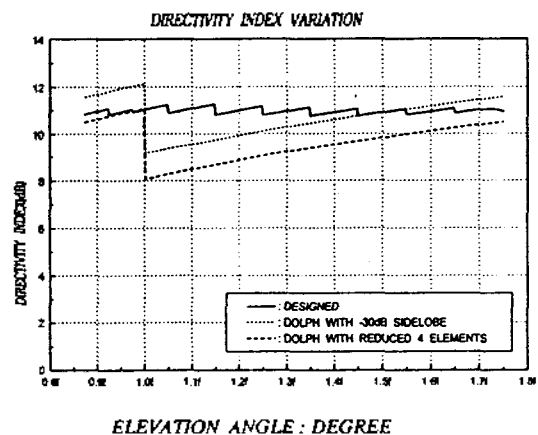


그림 15. 최적빔형성에 의한 지향지수
Fig. 15. Directivity index of optimization beamforming algorithm.

그림 15에서 설계된 빔형성기의 지향지수 변화율은 목표로 한 $\pm 0.15\text{dB}$ 를 0.05dB 상회하는 $\pm 0.2\text{dB}$ 로서, 좁은 빔폭을 갖는 일반 돌프-체비셰프 가중상수의 경우 보다 매우 향상되었음을 알 수 있다. 특히 최근접점에서 음원의 물리적인 크기를 충분히 포함하도록 빔폭을 넓힌 경우의 돌프-체비셰프 빔패턴 보다도 모든 주파수에서 매우 우수한 지향지수를 보유함을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는, 삼입형 선형배열을 이용하여 수중음향을 측정하기 위한 새로운 최적빔형성 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 알고리즘은, FIR필터 설계 방식으로 최적 가중상수와 주파수대역을 먼저 설정하고, 이를 초기치로 하여 최소사승오차를 최소화 하도록 가중상수를 최적화시킨다. 주파수와 무관하게 지향지수를 균일 유지하기 위하여 옥타브대역을 부대역으로 분할하고, 각 부대역별로 최적화를 수행한다. 최적화 과정에서 정방행렬이 아닌 전달행렬은 의사역행렬로 변경하여 계산한다.

본 논문에서는 제안한 알고리즘은, 설계 주파수가 3200Hz 인 경우에 19개 센서를 사용하여 -2dB 점 빔폭을 7.38° 로 하는 빔패턴에 대하여 시뮬레이션하였다. 빔패턴 대역 내의 모든 주파수에서 지향지수의 변화율이 0.3dB , 즉 $\pm 0.15\text{dB}$ 이내가 되도록 옥타브 대역을 10개로 분할하였다.

시뮬레이션 결과, 설정된 옥타브대역의 각 부대역에서 생성된 주엽빔은 원하는 빔패턴과 거의 동일한 형상을 유지 함을 확인 할 수 있었다. 특히 구하고자 하는 옥타브대역의 끝부분에서도 원하는 빔패턴과 유사하도록 빔패턴이 향상되었다.

지향지수 측면에서는, 목표로 한 $\pm 0.15\text{dB}$ 를 0.05dB 상회하는 $\pm 0.2\text{dB}$ 의 변화율을 가져, 좁은 빔폭을 갖는 일반 돌프-체비셰프 가중상수의 경우 보다 매우 향상됨을 확인 하였다. 또한 최근접점에서 음원의 물리적인 크기를 충분히 포함하도록 빔폭을 넓힌 경우의 돌프-체비셰프 빔패턴 보다도 모든 주파수에서 매우 우수한 지향지수를 보유함을 알 수 있다.

결과적으로, 제안 알고리즘은 센서 수를 늘리지 않고도 삼입형 선형배열을 이용하여 음향측정에 유용한 빔패턴 및 지향지수를 형성시킬 수 있다. 그러므로 본 연구의 제안 알고리즘이 음향측정에 유용함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. R. A. Mucci, "A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-32, No. 3, pp. 548-558, June 1984
2. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., 1983, McGraw-Hill, 1983
3. 도경철, 손경식, "광대역 단일빔형성을 위한 비선형배열의 지향 특성", 한국음향학회지 제18권 제3호, pp. 27-34 1999.

4. 도경철, 노정호, "광대역 신호를 위한 DFT 빔형성기법," 1989년도 한국음향학회 학술발표회 논문집, pp.202-205, 1989..
5. Otis Lamont Frost, III, "An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing," Proceedings of The IEEE, Vol. 60, No. 8, pp. 926-935, August, 1972.
6. 박영철, 차일환, 윤대회, "Adaptive Beamforming and Detection Algorithms Based on the Cholesky Decomposition of the Inverse Covariance Matrix," 한국음향학회지, 제12권, 2E호, pp.47-62, 1993.
7. Darren B. Ward, Rodney A. Kennedy, Robert C. Williamson, "FIR Filter Design for Frequency Invariant Beamformers," IEEE Signal Processing Letters, Vol. 3, No. 3, pp. 69-71, March 1996.
8. Darren B. Ward, Rodney A. Kennedy, Robert C. Williamson, "Theory and Design of Broadband Sensor Arrays with Frequency Invariant Far-field Beam Patterns," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 97, No. 2, pp. 1023-1034, Feb. 1995.
9. J. W. Adams, "FIR Digital Filters with Least-Squares Stopbands Subject to PeakGain Constraints," IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 39, No. 4, pp. 376-388, April 1991
10. Peter M. Clarkson, *Optimal and Adaptive Signal Processing*, CRC Press, 1993
11. C. L. Dolph, "A Current Distribution for Broadside Arrays which Optimizes the Relationship between and Side-lobe level," Proceeding IRE, Vol. 34, pp.335-348, June 1946.

▲도 경 철(Dho Kyeong-Cheol)

1984년 2월 : 부산대학교 전기기계공학과(공학사)
 1986년 2월 : 부산대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1999년 8월 : 부산대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1986년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
 ※주관심분야 : 수중음향측정, 수중음향신호처리, 수중추적

▲손 권(Son Kweon)

1988년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1991년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1991년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
 ※주관심분야 : 수중음향측정, 수중음향신호처리, 수중추적

▲이 용 곤(Lee Yong-Gon)

1993년 2월 : 한국해양대학교 해양공학과(공학사)
 1996년 2월 : 한국해양대학교 대학원 해양공학과(공학석사)
 1996년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원
 ※주관심분야 : 수중음향신호처리, 수중추적

▲손 경 식(Son Kyung-Sik)

한국음향학회지 제16권 7호 참조
 현재 : 부산대학교 전자공학과 교수