

# 직접법과 반복법(LMS법)의 합성 알고리즘을 이용한 직선배열 점음원의 적응 지향성 합성 SIMULATION

正會員 조 기 량\*

## Adaptive Directivity Synthesis Simulation of Point Source Array using Algorithm Combined Directive and Recursive Method(LMS Method)

Ki Ryang CHO\* *Regular Member*

### 요 약

본 논문에서는 점배열 음원에 의한 초음파 트랜스듀서의 목적 지향성에 대한 Beamforming을 직접법과 반복법인 LMS법의 합성 알고리즘을 이용하여 목적 지향성에 대한 최적 지향성 합성을 수치 계산하였다. 하나의 System으로 여러 가지 조건에 대한 지향성 합성의 실험을 목적으로 하였으며, 목적 지향성으로는 임의로 설정한 반치각의 준 이상 Beam과 방사 방향의 회전에 대한 준이상 Beam을 설정하여 지향성 합성을 시뮬레이션 하였다. 수치 계산에는 PC(CPU:80486DX2, RAM 16Mbyte)를 이용하였으며, 수치 계산 결과, 제안한 방법이 LMS법에 비해 훨씬 빠른 지향성 합성을 나타내고, 또 직접법만으로는 불가능한 적응 제어도 가능함을 확인했다.

### ABSTRACT

A numerical simulation is carried out on the directivity synthesis of ultrasonic transducers by point source array. Directive method with combined LMS(Least-Mean-Square) method is practiced by means of a iterative method to realize the desired directivity. The directivity of quasi-ideal beam with a beam width and a direction arbitrary specified was chosen. On the numerical result, Proposed algorithm shows higher speed of calculating simulation than that of LMS method, and make adaptive control, which enables the desired directivity. Numerical simulations are carried out by PC(CPU:80486 DX2, RAM 16Mbyte).

\*여수수산대학교 전자통신공학과  
Department of Electronic Communication Engineering, Yosu  
National Fisheries Univ.  
論文番號:96123-0416  
接受日字:1996年 4月 16日

## I. 서 론

의료 진단이나 어군 탐지, SONAR, 비파괴 검사 등 여러 분야에서 폭 넓게 사용되고 있는 초음파 트랜스듀서<sup>(1-6)</sup>에 요구되는 성능은 그 용도에 따라 다양하지만, 공통의 성능으로서 지향성이 있다. 목적에 맞는 지향성을 실현하기 위한 지향성 합성은 초음파 트랜스듀서 System의 설계상 중요한 위치를 차지하고 있다. 초음파 방사 직선 배열 점음원에 의해 목적 지향성을 실현하는 방법으로 이제까지 반복법인 LMS(Least-Mean-Square)법<sup>(7)</sup>, DFP(Davidon-Fletcher-Powell)법<sup>(8)</sup>, 그리고 직접법<sup>(9)</sup> 등이 보고되고 있다. 그러나 LMS, DFP법과 같이 우선 각각의 음원에 임의의 초기치를 가하고, 반복 알고리즘에 의해 음원의 최적 무게 분포를 결정하는 반복법은 적응 제어에 의해 Mainlobe의 반치각이나 일정 Level 이하로의 Sidelobe level을 실현시킬 수 있으나, 실제의 계산에서는 반복에 따라 목적으로 하는 최적 지향성 합성에 이르기까지의 수렴 시간이 길다는 것이 문제점으로 된다. 게다가 LMS법의 경우 음원에 가하는 무게 분포의 초기치가 해의 근방에 적당하게 설정되지 않을 때에 수렴이 보장되지 않고<sup>(10-11)</sup>, 또 Step parameter의 크기에 따라 수렴 시간이 길게 되거나, System의 불안정이나 발산을 일으키게 된다. 또한 직접법은 한 번의 계산에 의해 음원의 무게 분포를 구하기 때문에 수렴에 이르는 속도는 반복법에 비해 매우 빠르게 되나, 적응 제어는 불가능하다. 최적 지향성 합성 문제에서는 무엇보다도 단시간 내에 최적의 무게 분포를 구하여 목적 지향성을 합성하는 수렴 시간 문제 및 수렴 과정에서의 발산, 불안정 등의 요인을 제거하는 System의 안정성 문제는 지향성 합성을 위한 System 구축에 있어서 매우 중요하다. 그리하여 실현 속도가 빠르고, 적응 제어가 가능한 알고리즘의 개발이 최적 지향성 합성 문제에 요구된다. 일반적으로 주어진 음원의 무게 분포로 지향성을 합성하는 것은 順問題로 용이하게 계산할 수 있으나, 설정된 목적 지향성을 합성하기 위해서는 그 반대로 최적의 무게 분포를 구하는 逆問題로 취급할 수 있다<sup>(12)</sup>. 본 논문에서는 목적 지향성 합성을 LMS법, DFP법, 직접법에서와 마찬가지로 역문제로 취급하고, 수렴 시간 및 System 안정도의 문제점을 고려하여 먼저 직접법을 이용하여 목적 지향성 합

성을 위한 무게 분포(근사해)를 구하고, 이를 다시 LMS 알고리즘(해의 근방에 설정하면 매우 빠른 속도로 수렴이 가능)에 적용하여 LMS법 보다 수렴 속도가 빠르고, 안정한 System의 구축, 또한 직접법에서는 불가능한 적응 제어의 실현을 가능하게 함을 목적으로 했다.

본 논문에서는 임의의 반치각 및 방사 방향, 그리고 Sidelobe level이  $-30\text{dB}$  이하가 되도록 설정된 준이상 Beam<sup>(13)</sup>을 목적 지향성으로 하여 최적 지향성 합성을 Simulation하였다. 수치 계산은 PC(CPU:80486DX2, RAM 16Mbyte)를 이용하였으며, LMS법과 직접법에서 문제가 되는 수렴 속도, System 안정도, 적응 제어에 대해 본 논문에서 제안한 수법의 수치 계산 결과와 비교하였다. 그 결과 LMS법에서 문제가 되는 수렴 속도, System 안정도의 문제점에 대해 확실하게 개선됨을 확인하였고, 직접법에서는 불가능한 적응 제어에 의한 Sidelobe level의 어느 일정치 이하로의 제어도 가능함을 확인했다.

## II. 직선배열 점음원의 지향성 합성

한 개의 점음원으로 부터 방사되는 음파는 구면 상으로 퍼지며, Fig. 1과 같이 자유 공간에 배열 길이  $L$ 인 일직선상에  $N$ 개의 점음원을 일정한 간격  $d$ 로 배열할 때, 음원 배열로부터 멀리 떨어진 원주상의 원지점에 위치한 관측점  $m$ 에서의 음압  $P_m$ 은

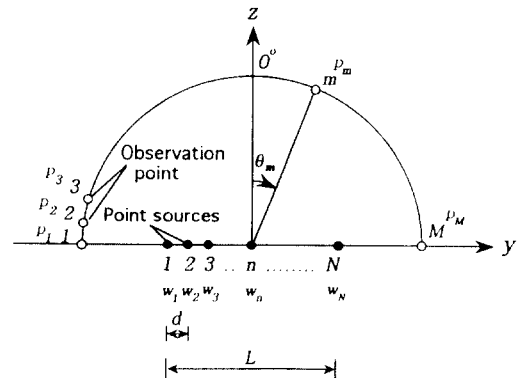


그림 1. 직선 배열 음원  
Fig. 1 Point source array

$$P_m = \sum_{n=1}^N S_{mn} W_n \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

라 주어진다<sup>(14)</sup>. 여기에서

$$S_{mn} = e^{jkn d \sin \theta_n} \quad (2)$$

$$W_n = A_n e^{-j\phi_n} \quad (3)$$

이다.

(2), (3)식에서  $A_n$  및  $\phi_n$ 은 각각  $n$ 번째 점음원의 진폭 및 위상이고,  $nd$ 는 직배열 음원의 중심으로부터  $n$ 번째 점음원까지의 거리이다. 또한  $k$ 는 음파정수( $=\omega/c=2\pi/\lambda$ ,  $c$ 는 음속,  $\lambda$ 는 파장),  $m$ 과  $n$ 은 각각 관측점 수 및 점음원수, 그리고  $\theta_m$ 은  $z$ 축을 중심으로한 관측점까지의 방위각(본 논문에서는  $z$ 축의  $0^\circ$ 를 중심으로  $-90^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지 나타내고 있다)이다. (1)식은 행렬식으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{P\} = [S] \{W\} \quad (4)$$

(4)식에서 모든 관측점에서의 지향성 벡터  $\{P\}$ 는 점음원의 위치와 관측점의 방향에 관계하는 형상 행렬  $[S]$ 와 점음원을 구동하는 무게 벡터  $\{W\}$ 와의 선형 결합으로 표시할 수 있다. (4)식에서

$$\{P\} = \{p_1 \ p_2 \ \dots \ p_M\}^T \quad (5)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{M1} & S_{M2} & \dots & S_{MN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\{W\} = \{w_1 \ w_2 \ \dots \ w_N\}^T \quad (7)$$

이다. 행렬  $[S]$ 는 음원의 형상과 관측점의 방향에 관계하고,  $\{W\}$ 는 음원 진동 속도의 진폭 및 위상에 관계하기 때문에 각각 형상 행렬 및 무게 벡터라고 한다. (4)식에서 형상 행렬  $[S]$ 를 일정하다고 하면, 지향성 벡터  $\{P\}$ 는 무게 벡터  $\{W\}$ 에 의해 지배되며, 음원의 무게 분포(음원의 진폭 및 위상 분포)를 적절하게 조정함에 의해 목적 지향성에 대한 Beamforming을

실현시킬 수 있다.

### III. 최적 지향성 합성을 위한 직접법과 LMS법의 합성 알고리즘

Fig. 1의 각 방향에서의 목적 지향성을  $z_1 \ z_2 \ \dots \ z_M$ , 음원의 형상과 관측점의 방향에 관계하는 형상 행렬을  $S_{11} \ \dots \ S_{MN}$ , 그리고 음원의 무게 분포를  $w_1 \ w_2 \ \dots \ w_N$ 이라고 하면 목적 지향성과 형상 행렬, 음원의 무게 분포와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{11}w_1 + S_{12}w_2 + \dots + S_{1N}w_N &= z_1 \\ S_{21}w_1 + S_{22}w_2 + \dots + S_{2N}w_N &= z_2 \\ &\dots \\ S_{M1}w_1 + S_{M2}w_2 + \dots + S_{MN}w_N &= z_M \end{aligned} \quad (8)$$

(8)식에서  $w_1 \ w_2 \ \dots \ w_N$ 은 목적 지향성을 실현하기 위한 무게 분포이며, 이를 행렬과 벡터를 이용하여 다시 쓰면 (9)식과 같이 된다.

$$SW = Z \quad (9)$$

가우스 소거법을 이용하여 목적 지향성  $Z$ 를 실현시키기 위해서는 형상 행렬  $S$ 를  $n \times n$ 의 정방 행렬로 하지 않으면 안되기 때문에, 형상 행렬의 전치 행렬을 (10)식과 같이 양변의 좌측에 곱하고, 좌변의  $S^T S$ 를  $n \times n$  정방 행렬로 만든다.

$$S^T S W = S^T Z \quad (10)$$

(10)식의  $S^T S$ 로부터 계산된 정방 행렬을  $A$ ,  $W$ 를  $x$ , 그리고  $S^T Z$ 를 계산하여  $b$ 라고 하고, 이 정방 행렬  $A$ 의 LU분해를 실행함에 의해 (10)식을  $Ax = b$ 로 하여,  $x$ 의 값을 구한다. 이때  $x$ 는 목적 지향성에 대응하는 무게 분포로 된다.

LMS법에서는 우선 직접법을 이용하여 얻은 무게 분포를 초기 무게 분포로 형상 행렬  $[S]$ 와 곱함에 의해 지향성  $\{P\}$ 를 계산하고, 이를 목적 지향성  $\{Z\}$ 와의 차를 낸다. 그리고 이를 다시 2승 평균 오차로 하여 이것이 최소가 되도록 무게 분포  $\{W\}$ 를 조정한다.  $i$ 번째의 반복에서 각 관측점으로 부터 계산된 지향성

의 오차 벡터  $\{\epsilon_{mi}\}$ 는 (11)식과 같이된다.

$$\{\epsilon_{mi}\} = \{Z_m\} - \{|P_m|_i\} \quad (11)$$

(11)식에서  $m, i$ 는 각각 관측점수 및 반복 횟수를 표시하고 있다. 그리고 목적 지향성  $\{Z\}$ 는 크기만을 고려하였기 때문에, 오차 벡터에 대해서도 크기만을 고려하고 있다. 따라서 2승 평균 오차<sup>(15-16)</sup>  $E_i^2$ 은

$$\begin{aligned} E_i^2 &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \{\epsilon_{mi}\}^T \{\epsilon_{mi}\} \\ &= \frac{1}{M} (\{Z_m\}^T \{Z_m\} - 2\{|P_m|_i\}^T \{Z_m\} + \{|P_m|_i\}^T \{|P_m|_i\}) \end{aligned} \quad (12)$$

(12)식과 같이된다. 반복 과정에 따라 이 2승 평균 오차인 목적 함수가 최소치가 되도록 무게 벡터  $\{W_i\}$ 를 조정하면, 이 때의  $\{W_i\}$ 를 조절하기 위한 Gradient 벡터  $\{V_i\}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\{V_i\} = \left\{ \frac{\partial F}{\partial w_{1i}} \quad \frac{\partial F}{\partial w_{2i}} \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial w_{ni}} \right\} \quad (13)$$

(13)식에서

$$\frac{\partial F}{\partial w_{ni}} = -\frac{2}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\partial \{|P_m|_i\}}{\partial w_{ni}} \{\epsilon_{mi}\} \quad (14)$$

(14)식에서

$$\frac{\partial \{|P_m|_i\}}{\partial w_{ni}} = \begin{Bmatrix} p_1 S_{1n} & p_2 S_{2n} & \dots & p_M S_{Mn} \\ |p_1|_i & |p_2|_i & \dots & |p_M|_i \end{Bmatrix} \quad (15)$$

(15)식에서  $n$ 과  $i$ 는 각각 점음원수와 공액 복소수를 표시한다. 이와 같이하여 Gradient 벡터  $\{V_i\}$ 가 구해지면, LMS 알고리즘에서 현재의 무게 분포  $\{W_i\}$ 가 새로운 무게 분포  $\{W_{i+1}\}$ 로 변하는 과정은 (16)식과 같이 정의된다<sup>(17)</sup>.

$$\{W_{i+1}\} = \{W_i\} - \mu \{V_i\} \quad (16)$$

(16)에서  $\mu$ 는 Step parameter라고 하여 목적 함수  $F$ 의 수렴 속도와 System의 안정성에 관계하기 때문에 문제에 대응하여 적절하게 선택할 필요가 있다. 일반적

으로 목적 함수  $F$ 가 수렴하기 위한 필요 충분 조건은 다음 식으로 표시된다.

$$0 < \mu < \frac{1}{\text{tr}[R]} \quad (17)$$

$$[R] = [S]^T [S] \quad (18)$$

(18)식에서  $\text{tr}[R]$ 은  $R$ 행렬의 대각 요소(diagonal elements)의 합이다.

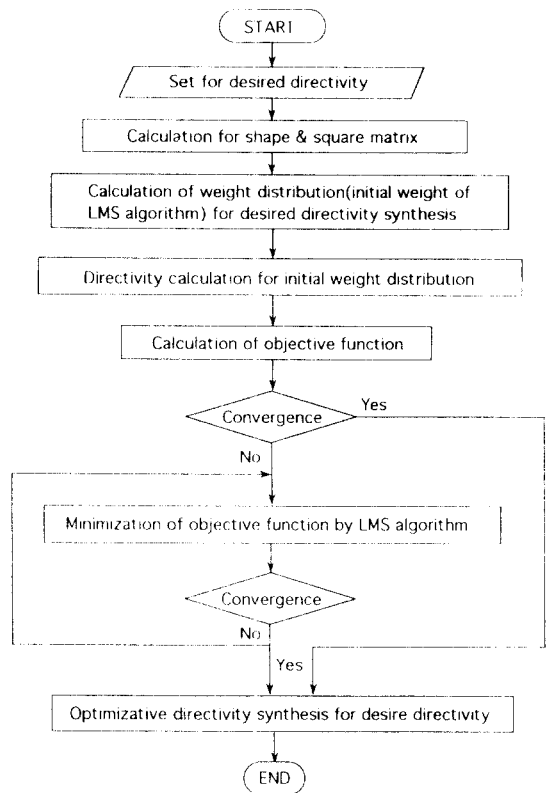


그림 2. 직접법과 LMS법의 합성 알고리즘에 의한 지향성 합성 흐름도

Fig. 2 Flowchart for directivity synthesis by directive method and LMS method

Fig. 2는 직접법과 LMS법의 합성 알고리즘에 의한 지향성 합성의 과정을 나타낸 흐름도 이다. 여기에서 지향성 합성을 평가하기 위한 목적 함수  $F$ 는 목적 지향성  $\{Z_m\}$ 과 계산에 의해 합성된 지향성  $\{P_m\}$  값에

대한 전관측점에서의 오차의 2승 평균으로 정의하여 dB로 표시했다.

#### IV. 제안된 합성 알고리즘에 의한 최적 지향성 합성 시뮬레이션

지향성 합성에 대한 초음파 트랜스듀서를 설계할 때에 고려해야 할 중요한 사양으로서 Main lobe의 반치각 및 Sidelobe level이 있다. 일반적으로 설계 사양에서는 Sidelobe level이 몇 dB이하이면 양호하다고 하는 허용 범위만이 지정된다. 여기에서는 본 논문에서 사용한 알고리즘에 이러한 설계 조건을 추가한 경우의 지향성 합성에 대하여 검토한다.

본 논문에서는 목적 지향성  $\{Z_m\}$ 과  $i$ 회재의 반복에서 계산된 지향성  $\{P_{mi}\}$ 과의 오차  $\{\epsilon_{mi}\}$ 를 (11)식을 이용하여 평가한다. 이 경우  $\{P_{mi}\}$ 가  $\{Z_m\}$ 보다 크거나 작아도 오차는 증대되는 방향으로 평가된다. 따라서 (11)식에서 Sidelobe level이 허용 범위 내에 있어도 오차가 과대 평가될 염려가 있다. 이런 경우에 대처하기 위하여 어느 관측점에서 지향성이 다음의 사양을 만족하고 있으면 그 관측점의 오차를 완화한다고 하는 방법을 채택한다.

1. Mainlobe에서는 지정한  $-3\text{dB}$  반치각내에서 감도의 Ripple이  $-3\text{dB}$ 이내
2. Sidelobe에서는 미리 정한 값 이하

이상과 같은 오차 평가의 유효성을 확인하기 위하여 준 이상 Beam을 예로 하여 합성을 시도했다. 이상 Beam은 지향각내에서는 감도가 일정하고 그밖의 각도에서는 감도가 없다고 하는 지향성으로 정의된다. 그러나 이상 Beam은 물리적으로 실현 불가능하기 때문에, Sidelobe level이 미리 정한 일정치 이하라면 준 이상 Beam으로서 근사적으로 실현되었다고 가정한다. 목적 지향성 합성에 대한 수치 계산은 전부 배정도(Double precision)로 행하였다.

##### IV-1. 설정한 임의의 반치각, Side lobe level에 대한 지향성 합성 시뮬레이션

본 절에서는 하나의 System으로 다수의 Beam쪽에 대한 지향성 합성의 구현을 위하여, 반치각을 변화시키면서 목적 지향성에 대한 합성을 시도했다. Beam의 방사 방향을 음원 배열의 중심으로 고정된  $10^\circ, 30^\circ$

의 반치각을 갖는 준이상 Beam을 임의의 목적 지향성으로 설정하였으며, 목적 함수값이  $-100\text{dB}$  이하를 나타내면 최적 지향성 합성을 위한 수렴이 완료되었다고 가정하여 반복과정을 종료하였다. 또한 Side-lobe level이  $-30\text{dB}$ 이하로 되면 적응 제어를 끝내는 것으로 했다. 목적 지향성에 대한 Beamforming을 수치적으로 검토하기 위하여 음원의 배열 길이  $L=5.0\lambda$ , 음원수  $N=15$ (음원 간격  $0.357\lambda$ ), 관측점수  $M=181$ 개로 하여 지향성 Pattern, 수렴 속도 등에 대하여 본 논문에서 제안한 방법과 LMS법을 서로 비교, 검토하였다. 수치 계산에서 최대 반복 횟수는 300회로 하였다. 단 LMS법을 이용한 경우에는 음원 배열의 초기 무게 분포로서 점음원 배열의 중심(8번째 음원)에만 진폭 1을 가하고 그 나머지는 전부 0으로 하였으며, 위상 분포는 음원의 전부를 0으로 하였다. 초기 무게 분포를 설정하는 것은 LMS법을 이용하여 목적의 지향성 합성을 행하는 때에 수렴의 가능 여부, 수렴 속도를 결정하는 것으로서 적절한 음원의 초기 무게 분포를 설정하는 것은 매우 중요하다. 제안한 수법에서는 직접법에서 목적의 지향성에 대한 음원의 무게 분포를 구하고, 이를 음원의 초기 무게 분포로 LMS법에 가하기 때문에 별도로 초기 무게 분포를 설정할 필요가 없다는 특징이 있다.

Fig. 3, 4는 임의로 설정한 반치각  $10^\circ, 30^\circ$ 의 목적 지향성에 대한 최적 지향성 합성 예이다. 반치각  $10^\circ$

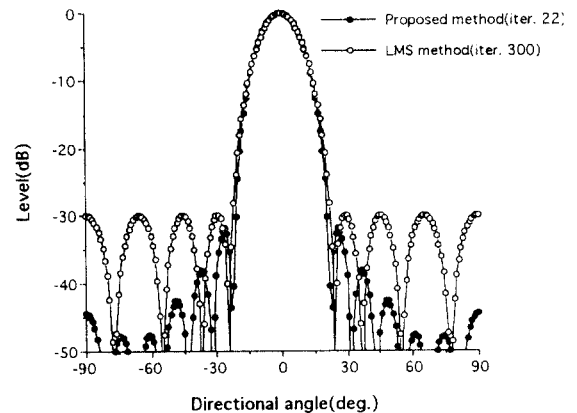


그림 3. 準理想 Beam의 합성(반치각  $10^\circ$ )  
Fig. 3 Synthesis of quasi-ideal beam (beamwidth  $10^\circ$ )

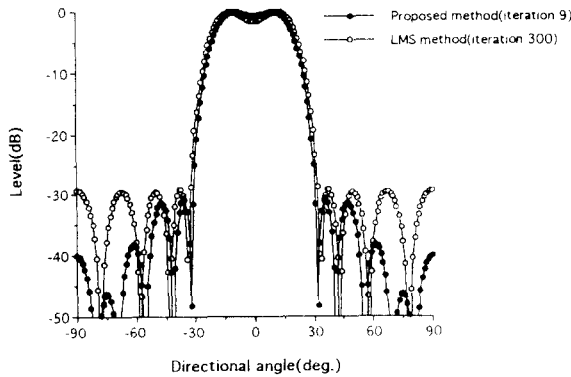


그림 4. 準理想 Beam의 합성(반치각 30°)  
Fig. 4 Synthesis of quasi-ideal beam (beamwidth 30°)

의 Mainlobe에 대해 LMS법에서는 반복 횟수 300회, 그리고 제안한 방법에서는 반복 횟수 22회째(수렴 완료)에서 얻어진 결과이며, 반치각 30°의 Mainlobe에 대해서 LMS법에서는 반복 횟수 300회, 그리고 제안한 방법에서는 반복 횟수 9회째(수렴 완료)에서 얻어진 결과이다. 위의 결과에서 보면 목적 지향성에 대해 두 방법 모두 만족한 지향성 Pattern을 나타내고 있으며, Sidelobe level의 크기는 LMS법에서는 거의 -30dB 근방, 제안된 방법에서는 -30dB이하를 나타내고 있음을 알 수 있다. 반복 과정에서의 Step parameter  $\mu$ 는 반치각 10°에 대해 두 방법 모두 0.075로

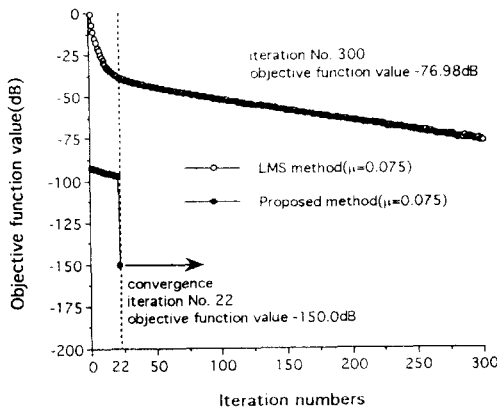


그림 5. 그림 3의 Beamforming에 대한 수렴 과정  
Fig. 5 Convergence process for the beamforming of fig. 3

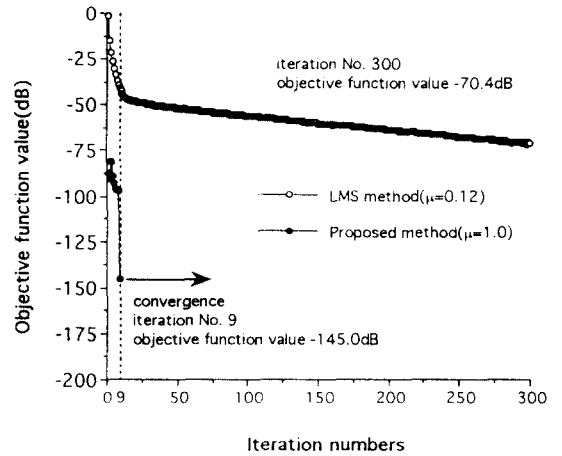
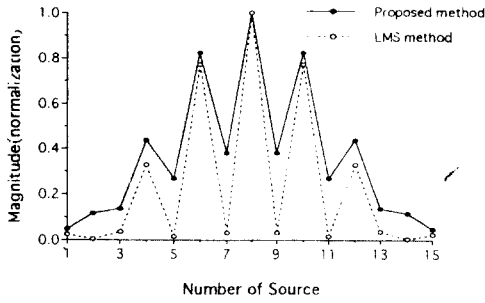


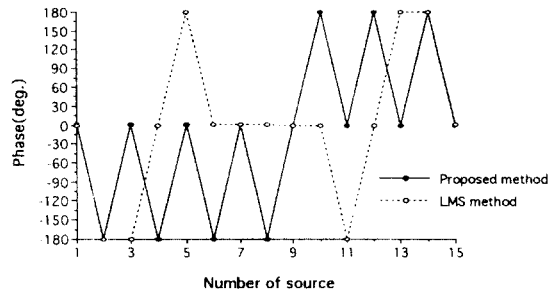
그림 6. 그림 4의 Beamforming에 대한 수렴 과정  
Fig. 6 Convergence process for the beamforming of fig. 4

하였으며, 반치각 30°에 대해 LMS법의 경우 수렴 과정에서의 System의 불안정 및 발산을 피하기 위하여 Step parameter  $\mu=0.12$ , 제안된 방법에서는  $\mu=1.0$ 으로 하여 계산했다.

Fig. 5, 6에는 반치각 10°, 30°의 목적 지향성에 대한 최적 지향성 합성의 수렴 과정을 나타냈다. LMS법에서는 반복 횟수 300회에서 목적 함수 값이 -70dB 정도를 나타내고 있으나, 제안된 방법에서는 반복 횟수 9~22회에서 -145~150dB를 나타내어 LMS법에 비해 매우 빠른 속도로 목적 지향성에 대한 최적 제어가 가능함을 알 수 있다. Fig. 7, 8은 fig. 3, 4의 최적 지향성 합성을 위한 최적의 무게 분포를 나타낸 것으로, 진폭 분포의 경우 최대치를 1로 정규화 시켰으며, 위상 분포는 -180°~180°까지로 표시했다. 반치각을 달리한 두개의 Model들에 대하여 두 가지의 방법을 이용하여 수치 계산한 결과, 계산 시간은 반치각 10°와 30°에 대해 본 논문에서 제안한 방법으로는 각각 1.81초와 0.99초가 소요되었으며, 또 LMS법으로는 300회 반복에서 동일하게 19.80초가 소요되어 본 논문에서 제시한 방법이 훨씬 빠르게 지향성 합성이 가능함을 알 수 있다.

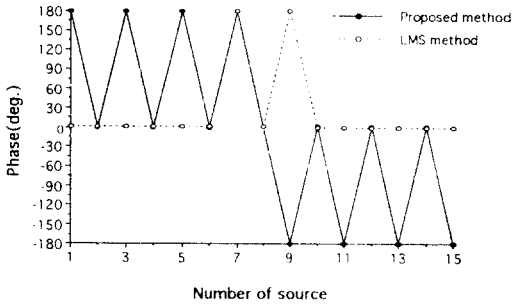


a) Magnitude distribution



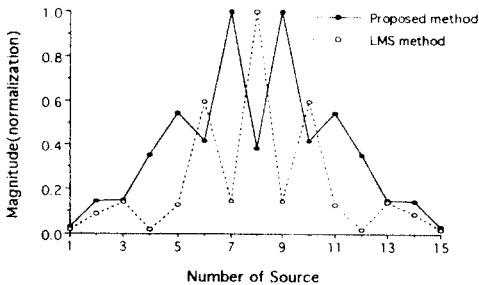
b) Phase distribution

그림 8. 그림 4의 Beamforming에 대응하는 무게 분포  
Fig. 8 Weight distribution which corresponds to beamforming of fig. 4



b) Phase distribution

그림 7. 그림 3의 Beamforming에 대응하는 무게 분포  
Fig. 7 Weight distribution which corresponds to beamforming of fig. 3



a) Magnitude distribution

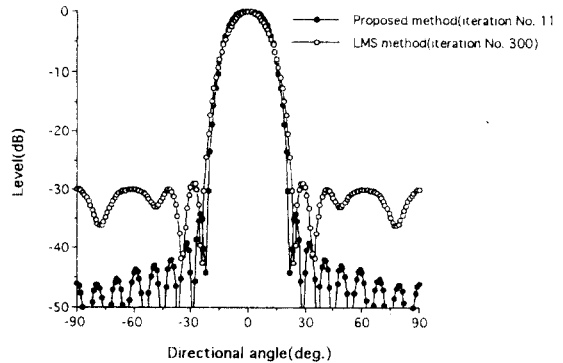


그림 9. 準理想 Beam의 합성 (반치각 10°, 목적 지향성의 방사 방향 0°)

Fig. 9 Synthesis of quasi-ideal beam (beam width 10°, emission angle of desired directivity 0°)

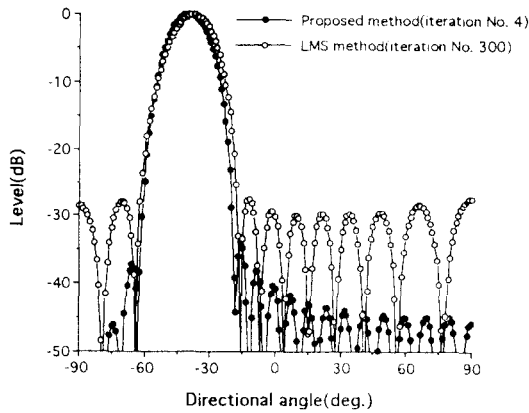


그림 10. 準理想 Beam의 합성 (반치각 10°, 목적 지향성의 방사 방향 -40°)  
 Fig. 10. Synthesis of quasi-ideal beam (Beam width 10°, emission angle of desired directivity -40°)

음원의 배열 길이  $L = 5.0\lambda$ , 유원수  $N = 20$ (음원간 간격  $0.263\lambda$ ), 관측점수  $M = 181$ 로 하여 지향성 Pattern, 수렴 속도 등에 대하여 본 논문에서 제안한 방법과 LMS법을 서로 비교, 검토하였다. 수치 계산에서 최대 반복 횟수는 300회로 하였다. 단 LMS법을 이용한 경우에는 음원 배열의 초기 무게 분포로서 집중원 배열의 중심 2음원(10, 11번째 음원)에만 진폭 1을 가하고 그 나머지는 전부 0으로 하였으며, 위상 분포는 음원의 전부를 0으로 하였다. Step parameter  $\mu$ 는 반치각 10°에 대해 두 방법 모두 0.03으로 하였으며, 40° 회전된 Beam에 대해서는 모두 0.045로 하였다. 물론 Step parameter  $\mu$ 의 결정은 수렴 과정에서의 System의 불안정 및 발산을 피하기 위하여 적절한 값을 선정하였다. Fig. 9, 10은 위의 Model에 대한 지향성 합성 결과로, 0°의 경우 LMS법은 300회의 반복 과정, 그리고 제안된 알고리즘에서는 11회 반복후(수렴 완료)에 얻은 결과이다. 여기에서 LMS법과 제안된 방법 모두 설정된 반치각과 Side lobe level은 -30dB이하를 만족시키고 있으나, 제안된 방법으로 합성된 지향성이 훨씬 목적으로한 지향성에 가깝다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11, 12는 목적 함수의 수렴 과정을 나타낸 것으로 LMS법은 300회 반복에서 Beam의 방사 방향이 0°인 경우 -71.77dB, 방사 방향이 40°회전된 경우에

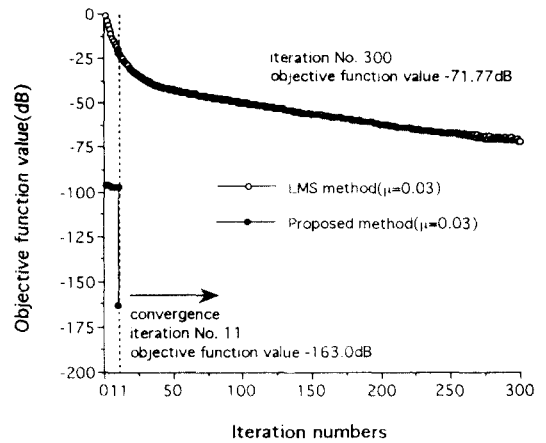


그림 11. 그림 9의 Beamforming에 대한 수렴 과정  
 Fig. 11. Convergence process for the beamforming of fig. 9

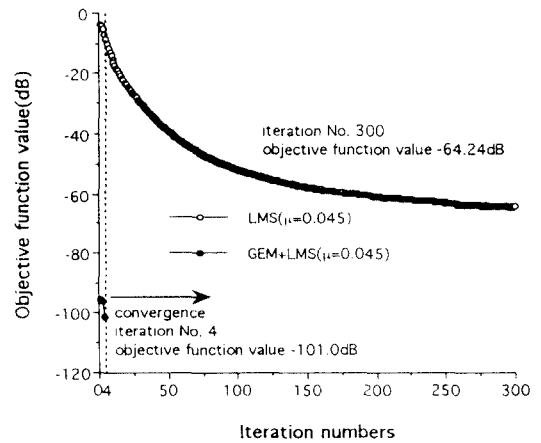
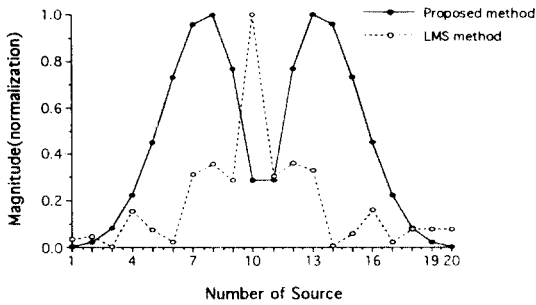


그림 12. 그림 10의 Beamforming에 대한 수렴 과정  
 Fig. 12. Convergence process for the beamforming of fig. 10

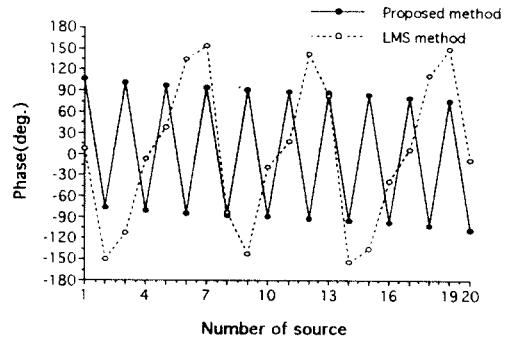
-64.24dB이고, 본 논문에서 제안한 방법의 경우에는 0°의 경우 11회 반복에서 -163.0dB, 40° 회전된 경우 4회 반복에서 -101.0dB를 나타내어, 본 논문에서 제안한 알고리즘이 LMS법에 비해 수렴에 이르기까지의 과정이 매우 빠름을 알 수 있다.

Fig. 13, 14는 fig. 9, 10의 각각의 Beam에 대응한 음원의 무게 분포로서, 진폭 분포는 최대치 1로 정규화(Normalization) 시켰으며, 위상 분포는 -180°에서

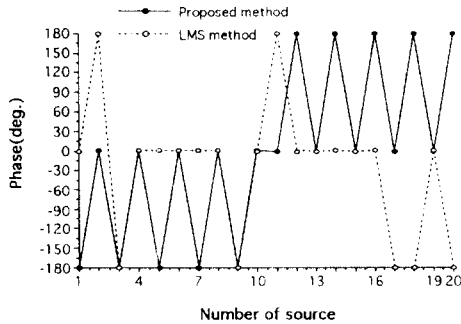




a) Magnitude distribution

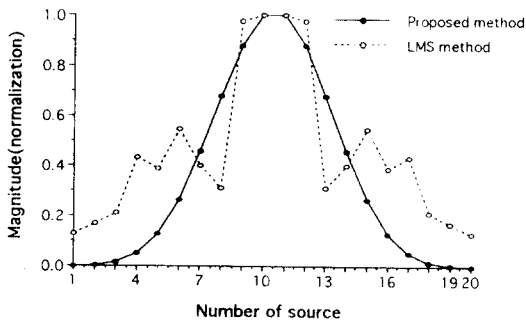


b) Phase distribution



b) Phase distribution

그림 13. 그림 9의 준이상 Beam에 대응하는 무게 분포  
Fig. 13. Corresponding Weight distribution to quasi-ideal beam of fig. 9



a) Magnitude distribution

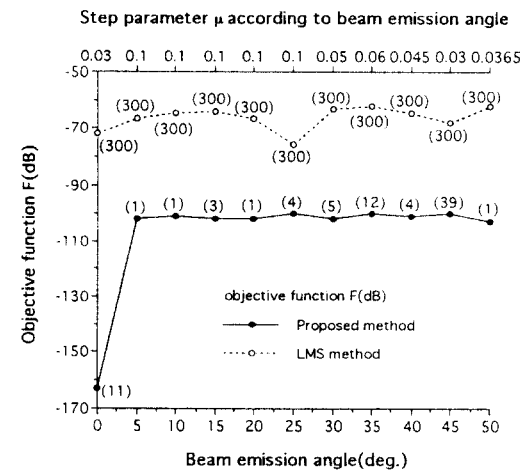


그림 15. Beam 방사각에 대한 목적 함수값의 변화.  
Fig. 15. Change of objective function value to beam emission angle.

그림 14. 그림 10의 준이상 Beam에 대응하는 무게 분포  
Fig. 14. Corresponding Weight distribution to quasi-ideal beam of fig. 10

180°까지로 나타내었다. Fig. 15는 Beam의 방사각에 따른 목적 함수  $F$ 의 변화를 중심각으로부터 5°간격으로 나타낸 것으로, 음원의 수 및 배열 거리, 관측점수는 IV-2와 같게 하였다. 방사 방향 55°이상은 실용상 별로 의미가 없기 때문에 나타내지 않았다. 또한 LMS 법과 제안한 방법과 같은 조건하에서 비교하기 위하여 Beam 방사 방향에 따른 Step parameter  $\mu$ 는 같은 값으로 했다. Fig. 15에서 보듯이 제안한 방법이 LMS 법에 비해 빠른 수렴 속도로 목적 지향성에 근접함을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 직접법과 LMS법을 합성한 알고리즘을 이용하여 직선 배열 음원에 의한 조음과 방사 트랜스듀서의 지향성 합성에 관하여 2, 3의 모델에 대해 수치적 검토를 통해 LMS법과 비교했다. 양 방법을 이용하여 최적 지향성 합성에 관하여 수치 실험을 행한 결과

- 1) LMS법의 경우에는 해의 근방에 적당한 초기치를 선정하지 않으면 수렴이 보장되지 않는다는 문제점이 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 방법에서는 목적 지향성 합성을 위한 무게 분포를 직접법을 이용하여 직접적으로 구하기 때문에 따로 초기치를 설정할 필요가 없다.
  - 2) 1)에서 목적 지향성 합성을 위해 직접법을 이용하여 구해진 무게 분포(최적치에 대한 근사치)는 직접적으로 LMS법에 초기치로서 가해지기 때문에 LMS 알고리즘 특성상 빠른 수렴 속도로 적응 제어가 가능한 최적 지향성 합성을 할 수 있다.
  - 3) 직접법에서는 한번의 계산에 의해 지향성 합성이 이루어지므로 적응 제어를 할 수 없다는 문제점이 있다. 그러나 제안한 방법에서는 우선 직접법을 이용하여 근사해를 얻고, 이를 반복에 따라 적응이 가능한 LMS법에 대입하여 최적 해를 구하기 때문에 적응 제어에 의해 최적 지향성 합성이 가능하게 된다.
  - 4) LMS법의 특성에서 Step parameter  $\mu$ 의 크기에 따라 최적해를 구하기까지의 수렴 속도와 System의 발산이나 불안정에 영향을 받기 때문에 이를 해결하기 위한 방법으로 직선 탐색에 있어서 알고리즘내에서 최적의 Step parameter를 계산하는 준 Newton법인 DFP법과 직접법의 합성 알고리즘을 제안한다. 이 방법을 이용하면 초기치와 Step parameter를 가할 필요가 없게 되어 System 안정도도 크게 개선된다고 사료된다.
- 등이 확인되었다.

## 참 고 문 헌

1. Clarence S. Clay & Herman Medwin, Acoustical Oceanography. A Wiley-Interscience Publication.

1977.

2. Robert J. Urick, Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill Book Co. 1983.
3. 泉 弘志, 電子セラミックス. 誠文堂新光社. 1990.
4. エレ-ケラスシリ-ズ編集委員會編, セラミックスの應用. 學獻社. 1989.
5. 谷腰欣司, 超音波とその使い方. 日刊工業新聞社. 1994.
6. 中村俊良, 超音波トランスジューサ. 日本音響學會誌, 47(3). pp. 196~200. 1991.
7. 上屋隆生・河野 宏・加川幸雄, 超音波送受波器の最適指向性合成シミュレーション. 日本シミュレーション學會誌, 12(1). pp. 61~69. 1993.
8. 曹基亮, 超音波放射 直線配列点音源의 最適指向性合成SIMULATION. 韓國通信學會論文誌, 20(7). pp. 1834~1840. 1995.
9. 조기량・이정남・이분수・이진선, 가우스 소거법을 이용한 조음과 트랜스듀서의 지향성 합성Simulation. 한국전자과학회지, 6(4). pp. 20~27. 1995.
10. 茨木俊秀・福島雅夫, 最適化プログラミング. 岩波書店. 1991.
11. 嘉納秀明, システムの最適理論と最適化. コロナ社. 1992.
12. 岡本良夫, 逆問題とその解き方. オ-ム社. 1993.
13. 笹倉豊喜, 超音波送受波器の最適設計. Computrol No. 39. pp. 106~112. 1992.
14. 城戸健一, 音響工学. コロナ社. 1991.
15. 大谷祐介・霜山龍一・加川幸雄, 境界要素モデルによる聲道形状同定の試み. 日本シミュレーション學會 第14回計算電気. 電子工学シンポジウム, Sess. V-7. pp. 271~276. 1993.
16. Ogura Eiji, 音聲スペクトルによる聲道形状同定のための最適化アルゴリズムに関する考察. 日本岡山大學大學院碩士卒業論文. pp. 11~13. 1994.
17. Bernard Widrow & Samuel D. Stearns, Adaptive Signal Processing. Prentice-Hall Inc. 1985.

조 기 량(Ki Ryang Cho)

정회원

한국통신학회지 제20권 제7호 참조