
凹형 압전 트랜스듀서의 최적 지향성합성과 진동해석

조기량* · 곽두성* · 김 온* · 김천석*

Optimal Directivity Synthesis and Vibration Analysis of 凹-type Piezoelectric Transducer

Ki-ryang Cho* · Doo-sung Kwak* · On Kim* · Chun-suk Kim*

요 약

본 논문에서는 압전평면판에 홈을 파 형성한 凹형 선형배열음원과 최적화 알고리즘을 조합한 적응 지향성합성 시스템의 2차원 지향성합성 문제를 수치적으로 검토하였다.

임의로 설정한 목적 지향성을 실현하기 위하여 먼저, 선형배열 진동자의 최적 진동 변위량은 최적화 알고리즘인 DFP (Davidon-Fletcher-Powell) 법을 이용하여 계산하고, 다음에, 계산된 진동 변위량을 구동하기 위한 최적 전위의 계산은 유한요소법과 DFP법을 이용하여 행했다. 또한, 유한요소법을 이용하여 凹형 압전 트랜스듀서의 2차원 진동해석을 행했다.

ABSTRACT

This paper carried out numerical calculation about the directivity synthesis problem in two dimension of adaptive ultrasonic transducers. Adaptive system for directivity synthesis is constructed by multi-electrode array on the surface of only one piezoelectric ceramic plate combined with optimal algorithm.

In order to realize the desired directivity that is established arbitrarily, the optimal vibrational displacement is calculated by optimal algorithm (DFP method). Secondly, the optimal voltage of electrodes which is correspond to the calculated vibrational displacement is calculated used by finite element method and DFP method. And, the vibration analysis in two dimension of piezoelectric transducer carried out by means of finite element method.

Key Words

선형배열음원, 최적화 알고리즘(DFP법), 유한요소법(FEM), 최적 지향성합성, 진동해석

1. 서 론

컴퓨터 기술의 발전과 더불어 계산음향학[1-2]이 하나의 분야로 자리매김한 이후, 음향공학 분야에서 수치 시뮬레이션의 응용, 특히 초음파 진동자를 이용한 장치의 설계·해석에 유한요소법[3]이 널리 이용되고 있다.

초음파 트랜스듀서, 그 중에서도 압전진동자를 이용한 초음파진동자의 해석에 수치 시뮬레이션이 사용되게 된 배경에는 다양한 계산 소프트웨어의 개발, 반도체기술의 급속한 발전, 하드웨어로서의 고속, 대용량 계산기의 사용을 들 수 있다. 게다가, 근래에는 최적화 알고리즘[4]을 이용한 적응 시스템의 등장과 함께 SONAR, 의료진단이나 어군탐

사, 비파괴검사 등의 광범위한 분야에서 사용되고 있는 초음파 트랜스듀서 또한 여러 가지 기능을 갖는 적응형 트랜스듀서[5-7]로 발전되고 있다.

본 논문에서는 압전평면판에 일정한 간격으로 홈을 파 형성한 凹형 선형배열음원과 최적화 알고리즘을 조합한 적응 지향성합성 시스템의 2차원 지향성합성 문제를 수치적으로 검토하였다.

임의로 설정한 목적 지향성에 대응하는 선형배열음원의 최적 진동 변위량 계산은 DFP법을 이용하여 행하고, 다음에, 기계적으로 결합되어 있는 압전 선형배열음원의 최적 전위의 계산(계산된 진동 변위량을 구동하기 위한)은 유한요소법과 DFP법을 이용하여 공진주파수(52 kHz)와 공진주파수에서 멀지 않은 주파수(2kHz)에서 행했다. 또한, 최적 전위를 각각의 음원에 가한 때의 배열음원에 대한 2차원 진동해석(진동 모드, 등전위 분포)도 행했다. 단, 진동해석을 행하는 경우에 압전 배열음원의 전기 및 기계적인 손실은 고려하지 않는 것으로 했다.

II. 凹형 선형배열음원에 의한 지향성합성

그림 1과 같이 배열음원에서 멀리 떨어진 원주상에 위치한 관측점 m 에서의 음압 p_m 은 배열음원의 위치와 관측점의 방위에 관계하는 s_{mn} 과 이들 음원의 변위분포 w_n 의 선형결합으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

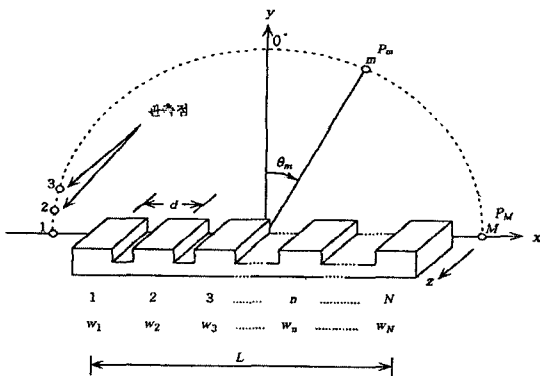


그림 1. 선형배열음원과 관측점
Fig. 1 Linear array and observation point

$$p_m = \sum_{n=1}^N s_{mn} w_n \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

여기에서,

$$s_{mn} = \exp(jkd \frac{2n - N - 1}{2} \sin \theta_m) \quad (2)$$

$$w_n = A_n \exp(-j\phi_n) \quad (3)$$

이다. 식(1)~(3)에서

A_n, ϕ_n : n 번째 음원의 변위량 및 위상

N, M : 배열음원수 및 관측점수

θ_m : y 축을 중심으로 한 관측점까지의 방위각
($-90^\circ \leq \theta_m \leq 90^\circ$)

k : 파수(= $w/c = 2\pi/\lambda$, w 는 각주파수, c 는 음속 그리고 λ 는 파장)

d : 음원사이의 배열간격

이다. 식(1)은 아래의 식(4)와 같이 행렬을 이용함에 따라 보다 간단하게 표현할 수 있다.

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

여기에서,

$\{P\}$: 지향성 벡터

$[S]$: 형상 행렬

$\{W\}$: 변위 벡터

를 나타낸다.

본 논문에서와 같이 어느 일정한 형상의 배열음원과 최적화 알고리즘을 이용하여 목적으로 하는 최적의 지향성합성을 실현하는 경우, 배열음원의 형상이 바뀌지 않으므로 식(4)에서의 형상 행렬 $[S]$ 는 일정하게 된다. 따라서 지향성 벡터 $\{P\}$ 는 배열음원의 변위 벡터 $\{W\}$ 만에 의해 지배되기 때문에 변위 벡터 $\{W\}$ 를 변화시키면 지향성 제어·합성이 가능하게 된다.

III. 압전 배열음원의 2차원 유한요소해석

압전진동체는 전계에 의해 내부에 응력이 발생하고, 기계적인 왜곡이 가해지면 그 표면에 전하가 나타나는 기계계와 전기계가 결합하고 있는 단성

체로서 이와 같은 압전탄성체를 지배하는 압전기 본식은 기계계와 전기계의 연립방정식으로 되며, e 형식[8]을 이용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{T\} &= [c^E]\{S\} - [e]\{E\} \\ \{D\} &= [e]^T\{S\} + [\epsilon^S]\{E\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서,

$\{T\}$ 는 응력 벡터, $\{S\}$ 는 왜곡 벡터, $\{D\}$ 는 전기변위 벡터, $\{E\}$ 는 전계 벡터, $[c^E]$ 는 $\{E\}=0$ 인 때의 stiffness tensor, $[e]$ 는 압전왜곡 tensor, 그리고 $[\epsilon^S]$ 는 $\{S\}=0$ 인 때의 유전 tensor 이다. 이와 같이, 압전진동체는 왜곡응력장에서 문제로 되는 변위 u 와 힘 f 외에 전위 ϕ , 전하 Q 가 관계한다. 이 때, 압전진동장의 범함수는 다음과 같이 다음 식으로 된다.

$$\mathcal{L} = U - T - H - W \quad (6)$$

여기에서,

U 는 왜곡 에너지, T 는 운동 에너지, H 는 정전 에너지, 그리고 W 는 외부로부터 변위, 구동력, 전위 그리고 전하가 주어짐에 따라 행해지는 일을 나타내고 있다.

2차원 유한요소법에서는 왜곡 에너지 응력장 및 정전장을 3각형 2차요소로 분할한 것을 나타내고 있다. 요소 내의 변위 $\{u\}$ 및 전위 포텐셜 ϕ 를 내삽하는 2차 내삽함수를 가정하면, 각 요소 e 의 왜곡 에너지 U_e , 운동 에너지 T_e , 정전 에너지 H_e , 그리고 외부로부터 행해지는 일 W_e 는 다음과 같이 된다.

$$U_e = \frac{1}{2} \{d\}_e^T [K]_e \{d\}_e + \frac{1}{2} \{d\}_e^T [P]_e \{\phi\}_e \quad (7)$$

$$T_e = \frac{1}{2} w^2 \{d\}_e^T [M]_e \{d\}_e \quad (8)$$

$$H_e = -\frac{1}{2} \{d\}_e^T [P]_e \{\phi\}_e + \frac{1}{2} \{\phi\}_e^T [G]_e \{\phi\}_e \quad (9)$$

$$W_e = \{d\}_u^T \{F\}_u + \{d\}_f^T \{\hat{F}\}_f + \{\hat{\phi}\}_p^T \{Q\}_p + \{\phi\}_r^T \{\hat{Q}\}_r \quad (10)$$

여기에서,

$[K]_e$ 는 요소의 강성 행렬, $[P]_e$ 는 요소의 전기·

기계결합 행렬, $[G]_e$ 는 요소의 정전 행렬, $[M]_e$ 는 요소의 질량 행렬, $\{d\}_e$ 는 요소의 변위 벡터, w 는 각주파수, $\{F\}$ 는 외력 벡터, $\{\phi\}$ 는 전위 벡터, $\{Q\}$ 는 전하 벡터, 그리고 \wedge 는 규정치를 각각 나타낸다. 이상과 같이 분할된 삼각형 요소에 대하여 범함수를 구하면

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_e &= U_e - T_e - H_e - W_e \\ &= \frac{1}{2} \{d\}_e^T ([K]_e - w^2 [M]_e) \{d\}_e \\ &\quad + \{d\}_e^T [P]_e \{\phi\}_e - \frac{1}{2} \{\phi\}_e^T [G]_e \{\phi\}_e \\ &\quad - \{\hat{d}\}_u^T \{F\}_u - \{d\}_f^T \{\hat{F}\}_f \\ &\quad - \{\hat{\phi}\}_p^T \{Q\}_p - \{\phi\}_r^T \{\hat{Q}\}_r \end{aligned} \quad (11)$$

와 같이 되며, 모든 영역의 범함수 \mathcal{L} 은 분할된 삼각형 요소 전체의 합으로서

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \sum_e \mathcal{L}_e \\ &= \frac{1}{2} \{d\}^T ([K] - w^2 [M]) \{d\} \\ &\quad + \{d\}^T [P] \{\phi\} - \frac{1}{2} \{\phi\}^T [G] \{\phi\} \\ &\quad - \{\hat{d}\}_u^T \{F\}_u - \{d\}_f^T \{\hat{F}\}_f \\ &\quad - \{\hat{\phi}\}_p^T \{Q\}_p - \{\phi\}_r^T \{\hat{Q}\}_r \end{aligned} \quad (12)$$

로 주어진다. 첨자 u, r, p 는 각각 기계적 자유도 절점, 전극 이외의 전기적 자유도 절점, 전극에 관한 전기적 자유도 절점을 나타내고 있다.

본 논문은 우선, 목적 지향성에 대응하는 배열음원의 최적 변위분포를 계산하고, 다음에 이(계산된 최적 변위분포)를 만족하는 전위분포를 구하는 문제로서 이와 같은 조건을 고려하면, 계 전체의 범함수는 최종적으로

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \frac{1}{2} \{d\}^T ([K] - w^2 [M]) \{d\} \\ &\quad + \{d\}^T [P] \{\phi\} - \frac{1}{2} \{\phi\}^T [G] \{\phi\} \\ &\quad - \{\hat{\phi}\}_p^T \{Q\}_p - \{\phi\}_r^T \{\hat{Q}\}_r \end{aligned} \quad (13)$$

과 같이 된다. 여기에서, 절점 전위 벡터 $\{\phi\}$ 를 전극에 접합되어 있는 부분 $\{\phi\}_r$ 와 그 이외의 부분 $\{\phi\}_p$ 로 나누고, 또한 전기·기계결합 행렬 $[P]$ 와 정전 행렬 $[G]$ 를 이에 대응하도록 분할하면 계 전체의 범함수는

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{1}{2} \{d\}^T ([K] - w^2 [M]) \{d\} \\ & + \{d\}^T [[P]_{up} [P]_{ur}] \begin{bmatrix} \{\hat{\phi}\}_p \\ \{\phi\}_r \end{bmatrix} \\ & - \frac{1}{2} \{ \{\hat{\phi}\}_p^T \{\phi\}_r^T \} \begin{bmatrix} [G]_{pp} & [G]_{pr} \\ [G]_{pr}^T & [G]_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\hat{\phi}\}_p \\ \{\phi\}_r \end{bmatrix} \\ & - \{\hat{\phi}\}_p^T \{Q\}_p \end{aligned} \quad (14)$$

로 된다. 식(14)의 계 전체의 범함수 \mathcal{L} 에 $\{d\}$, $\{\phi\}$ 로 변분을 취하고, 주어진 배열음원의 전위값을 규정치로서 우변으로 이항하면, 손실을 고려하지 않은 경우의 구동 벡터형으로 표현된 이산화 연립방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [K] - w^2 [M] & 0 & [P]_{ur} \\ 0 & 1 & 0 \\ [P]_{ur}^T & 0 & -[G]_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{d\} \\ \{\phi\}_p \\ \{\phi\}_r \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} -[P]_{up} \{\hat{\phi}\}_p \\ \{\hat{\phi}\}_p \\ [G]_{pr}^T \{\hat{\phi}\}_p \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

IV. 목적 지향성에 대응하는 선형배열음원의 최적 변위량과 전위량 계산

본 논문에서는 목적 지향성에 대응하는 배열음원 각각의 최적 변위량 (목적 변위량)과 배열음원 사이의 기계적인 결합을 고려한 경우의 목적 변위량을 구동(만족)하는 최적 전위량을 계산하였다. 이들(목적 변위량, 최적 전위량)의 계산은 수렴과정에서 안정성이 확보되고 또한 수렴속도가 뛰어난 최적화 알고리즘인 DFP법을 이용하였다.

처음에, 목적 지향성에 대응하는 배열음원의 최적 변위량을 구하는 방법으로서 우선, 임의의 초기 변위량을 각각의 배열음원에 가하여 식(4)의 지향성 $\{P\}$ 를 계산하고, 목적 지향성 $\{Z\}$ 와의 i 회제 반복과정에서의 오차 벡터 $\{\epsilon\}_i$ 를 식(16)과 같이

한다.

$$\{\epsilon\}_i = \{Z\} - \{P\}_i \quad (16)$$

목적 지향성 $\{Z\}$ 는 일반적으로 어느 일정한 방향에서의 크기만을 주기 때문에 본 논문에서는 식(16)의 오차 벡터에 대해서도 크기만을 고려하는 것으로 한다. 따라서 2승평균오차(목적함수 1이라고 한다) E_i^2 은

$$E_i^2 = \frac{1}{M} \{\epsilon\}_i^T \{\epsilon\}_i \quad (17)$$

로 된다. 목적함수 1이 최소치(이상적으로는 0)가 되도록 반복계산과정에서 변위 벡터 $\{W\}_i$ 를 조정하면, 그 때의 변위 벡터 $\{W\}_i$ 는 구하려고 하는 배열음원의 최적 변위량으로 된다. 변위 벡터 $\{W\}_i$ 를 조절하기 위한 구배(gradient) 벡터 $\{\nabla\}_i$ 는 다음과 같이 정의한다[9].

$$\{\nabla\}_i = \left\{ \frac{\partial E_i^2}{\partial w_{1i}} \quad \frac{\partial E_i^2}{\partial w_{2i}} \quad \dots \quad \frac{\partial E_i^2}{\partial w_{Ni}} \right\}^T \quad (18)$$

식(18)의 구배 벡터의 계

산은 차분근사를 이용하는 계산하는 방법과 식(16)의 오차공식을 이용하여 직접적으로 계산하는 해석적인 방법[7]이 있으나, 본 논문에서는 해석적인 방법을 이용하여 계산하는 것으로 하였다. 이 경우, 목적함수 1은 식(16)의 오차벡터 $\{\epsilon\}_i$ 를 이용하면

$$E_i^2 = \frac{1}{M} (\{Z\}^T \{Z\} - 2 \{P\}_i^T \{Z\} + \{P\}_i^T \{P\}_i) \quad (19)$$

이 된다. 이를 이용하여 식(18)에서 정의된 구배 벡터를 해석적으로 계산하면

$$\left\{ \frac{\partial E_i^2}{\partial w_{ni}} \right\} = - \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\{\epsilon\}_i}{\{P\}_i} \{P\}_i \{\bar{S}\}_{mn} \quad (20)$$

이다. 여기에서, n 은 n 번째 배열음원을 나타내고, $\bar{}$ 는 복소공액(complex conjugate)을 나타낸다. 이와 같이하여 목적 지향성에 대응하는 배열음원의 최적 변위량을 계산하여 이를 목적 변위량으로 설정한다.

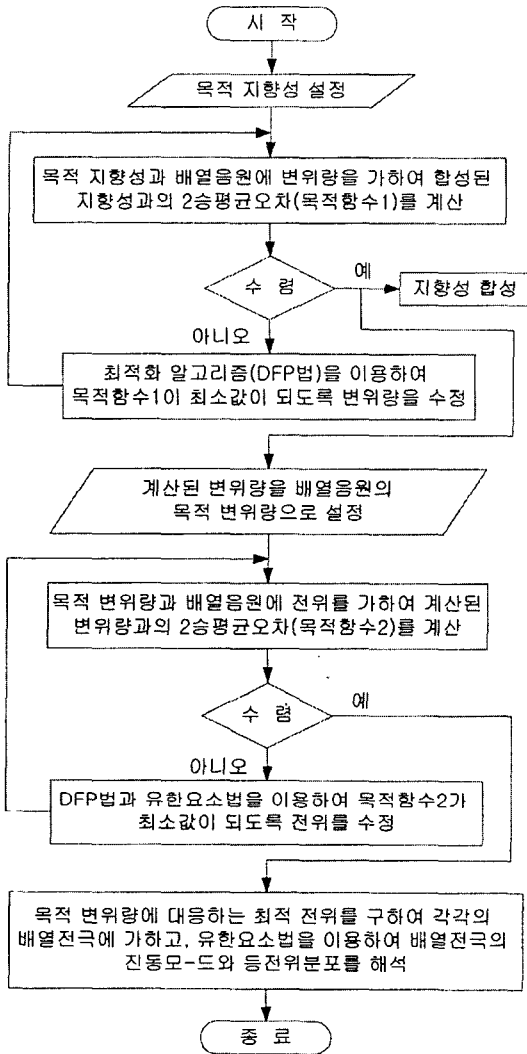


그림 2. 목적 지향성에 대응하는 최적 변위량과 전위량 계산을 위한 흐름도

Fig. 2 Flowchart to calculate the optimal vibrational displacement and optimal voltage which corresponds to desired directivity

다음에, 설정된 목적 변위량을 얻기 위한 배열음원의 최적 전위량은 목적 변위량과 초기 전위를 가하여 구해진 변위량과의 2승평균오차(목적함수 2라고 한다) E_2^2 가 최소가 되도록 DFP법과 유한요소법을 이용하여 계산한다. 단, 연산과정에서 구배 벡터의 계산은 중심차분법을 이용하였다. 그림 2는 이상의 연산순서를 나타낸 흐름도이다.

V. 최적화 수법을 이용한 최적 변위량, 전위량의 계산과 유한요소법에 의한 2차원 진동해석 예

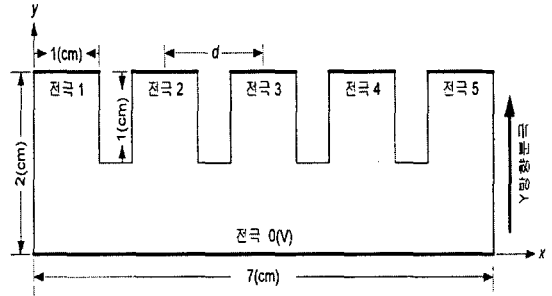


그림 3. 선형배열음원 모델
Fig. 3 Linear array model

그림 3은 두께 2(cm), 길이 7(cm)의 단일 압전평판에 0.5(cm) 간격으로 깊이 1(cm), 폭 0.5(cm)의 홈을 파 5개의 부분전극을 형성한 선형배열음원의 모델을 나타낸 것이다. 이 모델에 대한 요소분할은 x 방향 14, y 방향 4 (요소수 96, 절점수 75)로 했다.

음원의 기계적 경계조건은 배열음원(압전체)의 밑바닥 부분만 y 방향에 대해 고정경계조건, 이외의 부분은 $x-y$ 방향으로 무한하게 넓어지는 자유경계조건으로 설정하고, 전기적 경계조건은 배열음원의 밑바닥에 0(V)의 기준전위를 설치하고 이외의 부분은 자연경계조건으로 했다.

압전재료는 일본 Tokin사의 NEPEC6를 이용하는 것으로 하였다.

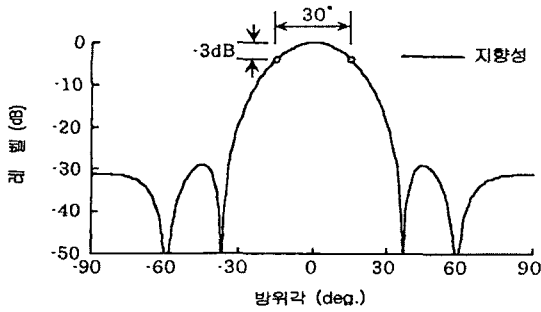
5.1 목적 지향성에 대응하는 최적 변위량 계산

목적 지향성은 배열음원의 중심방향(0°)으로 방사하는 반치각 30° 의 준이상 빔(quasi-ideal beam)을 임의로 설정했다. 단, 부엽의 크기는 실용성을 고려하여 -30(dB)이하로 설정하는 것으로 하였다.

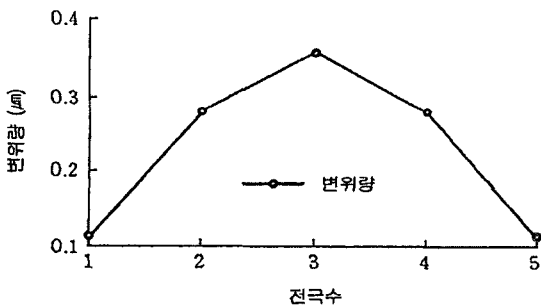
배열음원은 길이 $L=2.0(\lambda)$, 음원수 $N=5$ (음원 간격 $d=0.5(\lambda)$)로 하고, 관측점은 $M=181$ 로 등간격(1° 간격)으로 배치하는 것으로 가정하였다.

계산과정에서 DFP법과 같이 반복계산에 의해 최적해를 구하는 최적화 알고리즘은 초기치를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 가운데(3번째) 음원에만 $0.01(\mu m)$ 의 초기 변위량을 가하고, 그 이외의 음원에는 변위를 가하지 않은 것(초기 변위량 0)으로 설정하였다. 단, 최적해를 구하는 DFP법의 수렴특성상 반복계산회수는 최대 100회로 설정하

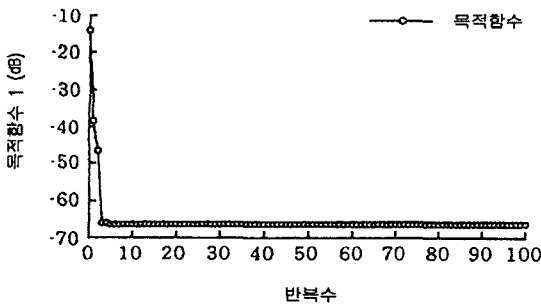
고, 그 이상의 반복은 하지 않는 것으로 하였다. 또한, 반복계산과정에서 DFP법의 수렴판정조건[10]을 만족하면 수렴되었다고 간주하여 반복계산을 종료하였다.



a) Synthesis of quasi-ideal beam (beam width 30°)



b) vibrational displacement which corresponds to desired directivity



c) Convergence of objective function 1

그림 4. 목적 지향성합성과 대응 변위량, 목적함수1의 수렴과정

Fig. 4 Desired directivity synthesis, vibrational displacement and convergence process of objective function 1

그림 4에는 목적 지향성에 대응하는 배열음원의 최적 변위량을 DFP법을 이용하여 얻은 계산결과와 반복계산과정에서의 목적함수 1의 수렴과정, 그리고 얻어진 변위량을 식(1)에 가한 때의 합성된 지향성 패턴을 나타내고 있다. 목적 지향성과의 오차의 정도를 나타내는 목적함수 1 (그림 4(c))은 반복과정에 따라 급격하게 감소하여 반복수 6회째에서 -66.46(dB)를 나타내고, 그 이후의 반복과정에서 전혀 변하지 않기 때문에 반복수 6회째에서 수렴이 완료됨을 알 수 있다. 그림 4(a)의 지향성 패턴은 반복 6회째에서 얻어진 변위량을 이용하여 합성된 것으로서 이 변위량은 목적 지향성을 만족하는 최적 변위량임을 알 수 있다.

5.2 최적 변위량을 만족하는 최적 전위량 계산

그림 3과 같은 배열음원의 경우, 일반적으로 각 음원 사이의 홈에는 고무 등으로 채운다. 그러나 단일 압전평판 위에 구성된 음원형태상 음원사이는 기계적으로 결합하고 있다. 따라서 x방향의 변위는 부근의 다른 음원에 영향을 미친다. 이와 같이, 배열음원 사이에 기계적인 결합이 있는 경우, 공진주파수에서는 전체로서 특정 모드-가 정해지기 때문에 임의의 절점변위분포에 대해 전위분포를 구할 수 없게 된다. 본 절에서는 이러한 사항을 고려한 경우의 목적 절점변위분포를 만족하는 배열음원의 최적 전위분포를 DFP법과 유한요소법을 이용하여 구하였다. 단, 계산조건으로 초기치는 배열음원의 3번째 음원에만 1(V)의 전위를 가하고, 나머지 음원에는 전위를 가하지 않는 것으로 설정했다.

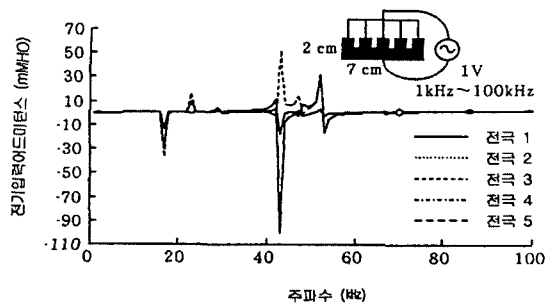
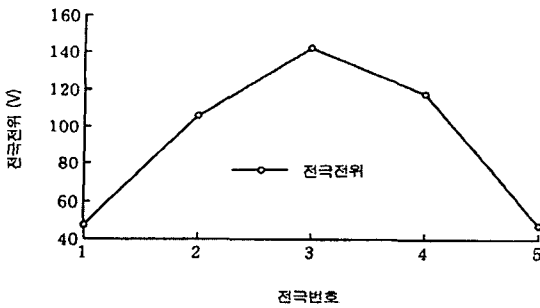


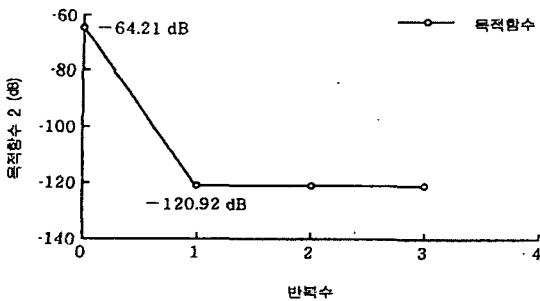
그림 5. 배열음원의 전기입력 어드미턴스
Fig. 5 Electric input admittance of linear arrays

그림 5는 모든 배열음원에 1(V)의 전위를 가하

여 구동시킨 때의 1(kHz)에서 100(kHz)까지의 주파수 범위에 대한 전기입력 어드미턴스의 변화를 나타낸 것으로 어드미턴스가 작은 2(kHz)와 최대로 되는 52(kHz)에서의 목적 절점변위분포를 만족하는 배열음원의 최적 전위분포를 구하고, 또한 이들을 이용하여 배열음원을 구동시킨 때의 2차원 유한요소법에 의한 진동해석을 행하였다. 단, 유한요소해석에 있어서 전기적, 기계적인 손실은 고려하지 않는 것으로 하였다.



a) electrical potential of linear arrays

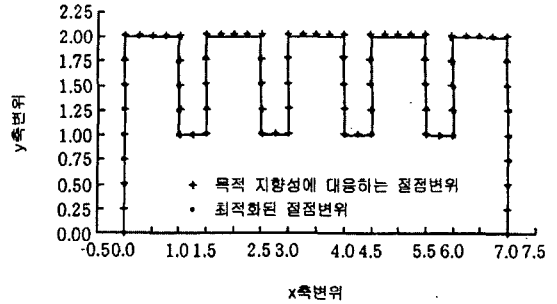


b) Convergence of objective function 2

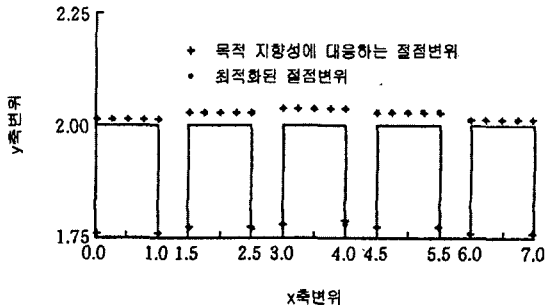
그림 6. 주파수 2(kHz)에서의 목적 변위량 실현을 위한 최적 전위량과 목적함수 2의 수렴과정

Fig. 6 Optimal electrical potential to realize the desired vibrational displacement and convergence process of objective function 2 in frequency 2(kHz)

그림 6은 주파수 2(kHz)에서의 배열음원 각각의 목적 변위량을 실현하기 위한 최적 전위량과 최적치에 이르기까지의 반복수에 대한 목적함수 2의 수렴과정을 나타낸 것으로 반복수 3회째(목적함수 : -120.92(dB))에서 DFP법의 수렴판정조건을 만족하여 반복계산이 종료됨을 알 수 있다.



a) Vibrational mode(nodal displacement which corresponds to desired directivity and optimized nodal displacement)



b) Enlargement figure of fig. a)

33333333	77777777	99999999	77777777	33333333
22222222	66666666	77777777	66666666	22222222
22222222	55555555	66666666	55555555	22222222
11111111	33333333	44444444	33333333	11111111
1111111111222222222222333332222222222211111111111				
000000001111111111111112222222111111111111110000000				
000				
000				

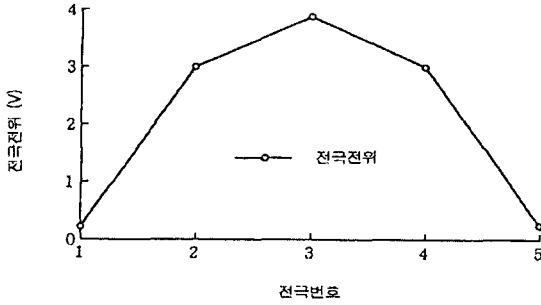
c) Equipotential distribution

그림 7. 주파수 2(kHz)에서의 배열음원의 진동모드 및 등전위분포

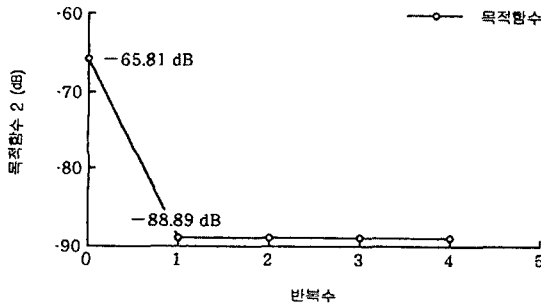
Fig. 7 Vibrational mode and equipotential distribution of linear array in frequency 2(kHz)

그림 7에는 그림 6의 전위량을 가하여 각각의 배열음원을 구동시킨 때의 진동모드(그림 7(b)는 (a)를 확대한 그림)와 0(0V)에서 9까지의 수치로 표시

된 등전위 분포를 나타내고 있다. 그림 7에서 •로 표시된 최적화 후의 절점변위는 +로 표시된 목적의 절점변위와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.



a) electrical potential of linear arrays



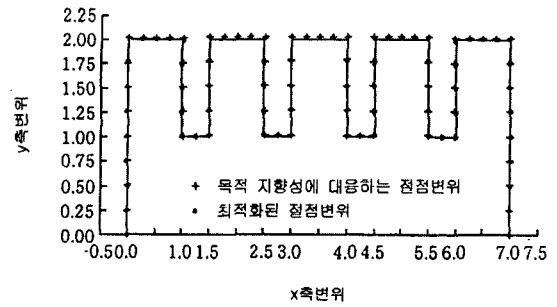
b) Convergence of objective function 2

그림 8. 주파수 52(kHz)에서의 목적 변위량 실현을 위한 최적 전위량과 목적함수 2의 수렴과정

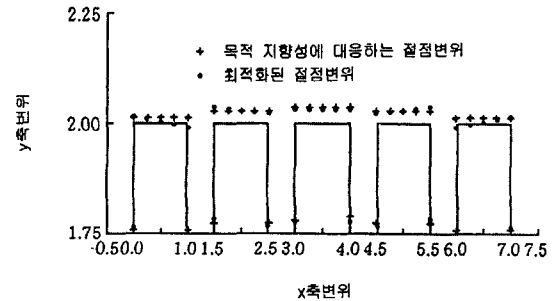
Fig. 8 Optimal electrical potential to realize the desired vibrational displacement and convergence process of objective function 2 in frequency 52(kHz)

그림 8과 9에는 어드미턴스가 큰 공진주파수 52(kHz)에서의 배열음원 각각의 목적 변위량을 실현하기 위한 최적 전위량과 반복수에 대한 목적함수 2의 수렴과정(반복수 4회째에서 -88.89(dB)), 그리고 진동모드 및 등전위 분포를 나타낸 것이다. 그림 8에서와 같이 배열음원의 공진주파수와 일치하는 주파수의 전위를 가하여 구동시키면 공진현상 때문에 주파수 2(kHz)의 경우와는 달리 낮은 전위를 가하여도 충분히 목적으로 하는 변위량을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 그림 9에서 알 수 있듯이 배열음원의 공진주파수 부근에서 배열음원을 구동시키면, 공진에 의한 영향을 받아 배열음원

의 내부에서 왜곡이 발생하고, 이 때문에 좌우의 음원이 안쪽으로 약간 경사지게 진동하는 모습을 나타낸다.



a) Vibrational mode(nodal displacement which corresponds to desired directivity and optimized nodal displacement)



b) Enlargement figure of fig. a)

00000000	44444444	55555555	44444444	00000000
11100001	54444334	22222222	43344445	11000011
22100112	57777654	23344332	45677775	22100112
22111356	46887531	23333332	13578864	65321122
2211235542457887531342133333312431357887542455321122				
2110122220246666532101123333211012356666420222210112				
1100001000123333221111112222111111223333210001000011				
000				

c) Equipotential distribution

그림 9. 주파수 52(kHz)에서의 배열음원의 진동모드 및 등전위분포

Fig. 9 Vibrational mode and equipotential distribution of linear array in frequency 52(kHz)

표 1. 전기입력 어드미턴스의 변화
Table 1. Change of electric input admittance

음원 번호	최적화전		최적화후	
	2(kHz)	52(kHz)	2(kHz)	52(kHz)
1	0.08	2.93	7.26×10^7	-1.51×10^{10}
2	0.08	31.30	4.19×10^8	-5.36×10^9
3	0.84	30.58	2.05×10^8	-1.20×10^{10}
4	0.08	31.30	2.61×10^8	1.31×10^{10}
5	0.08	2.93	-9.77×10^8	-2.10×10^{11}

표 1은 선형배열음원(그림 3)의 모든 전극에 기준전위 1(V)를 가한 경우와 목적 변위량을 실현하기 위하여 DFP법과 유한요소법을 이용하여 계산된 최적 전위를 배열음원에 가한 경우의 주파수 2(kHz)와 52(kHz)에서의 전기입력 어드미턴스의 변화를 비교한 것이다. 두 주파수 모두 기준전위에 비해 최적 전위를 이용하여 구동한 경우가 훨씬 큰 전기입력 어드미턴스를 나타낸다. 이와 같이, 최적화 알고리즘인 DFP법과 유한요소법이 목적 변위량을 실현하기 위한 최적 전위의 계산에 유용함을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 전기-기계진동-음향의 결합체인 압전평판에 일정한 간격으로 홈을 파내어 형성한 인형 선형배열음원과 최적화 알고리즘을 조합시킨 적응형 지향성합성 시스템의 2차원 지향성합성 문제를 수치적으로 검토하였다.

목적 지향성합성을 위한 배열음원의 최적 변위량 계산은 최적화 알고리즘인 DFP법을 이용하였으며, 또한 음원사이의 기계적인 결합을 고려한 인형 배열음원의 최적 변위량(목적 지향성에 대응하는 변위량) 계산을 위하여 DFP법과 유한요소법을 이용했다. 수치계산 결과,

1. DFP법에 의해 계산된 목적 지향성에 대응하는 배열음원의 변위량을 이용하여 지향성합성을 행한 결과, 임의로 설정한 지향성을 만족한다.
2. DFP법과 유한요소법에 의하여 계산된 최적 전위량을 이용하여 배열음원의 공진주파수와 멀리 떨어진 주파수(2kHz)에서 음원을 구동시킨 경우에는 목적 변위량과 절점변위가 거의 일치함을 나타낸다.
3. 그러나 공진주파수에서 음원을 구동시킨 경

우, 목적으로 하는 변위량을 거의 만족하나, 공진에 의한 영향을 받아 배열음원 내부에 약간의 왜곡을 발생시키고, 이로 인해 바깥쪽 음원이 약간 안쪽으로 경사지게 진동함을 나타낸다. 이는 대국적 최적해를 구하여 구동시킴에 따라 다소 해결되리라 사료된다.

앞으로, 다양한 형태의 배열음원과 대국적 최적해로 수렴하는 유전적 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 조합한 적응 지향성합성 시스템 구축에 전념할 예정이다.

참고문헌

- [1] 加川幸雄, 1987, "計算音響學のすすめ-音響問題の数値シミュレーション(基礎編)-", 日本音響學會誌, 43券 1号, pp. 44-49.
- [2] 加川幸雄, 1987, "計算音響學のすすめ-音響問題の数値シミュレーション(應用編)-", 日本音響學會誌, 43券 2号, pp. 125-132.
- [3] 土屋隆生, 加川幸雄, 山淵龍夫, 1991, "有限要素法による集束トランスジューサの應答解釋", 日本電子通信學會論文誌, Vol. J74-A No. 7, pp.929-940.
- [4] 高橋 悟, 1992, "最適化手法のための數學," コンピュートロール, 39, コロナ社, pp. 113-117.
- [5] 曹基亮, 金千德, 土屋隆生, 加川幸雄, 2001, "直接法・反復法併用アルゴリズムによる超音波トランスジューサの最適指向性合成シミュレーション", 日本音響學會誌, 57券 10号, pp.649-655.
- [6] 조기량, 1995, "초음파방사 직선배열점음원의 최적지향성합성 SIMULATION", 한국통신학회지, 20권 7호, pp.86-92.
- [7] 조기량, 土屋隆生, 加川幸雄, 박규칠, 2001, "적응형 초음파 트랜스듀서의 지향성 최적화를 위한 구배계산법의 비교", 한국음향학회지, 20권 5호, pp.61-68.
- [8] ニューケラスシリーズ編輯委員會編, 1990, "壓電セラミックスの應用" 學獻社, 東京, pp. 31-37
- [9] 渡部 力, 名取 亮, 小國 力, 1989, "Fortran77による數値計算ソフトウェア," 丸善, 東京. pp.243-246.
- [10] 嘉納秀明, 1992, "システムの最適理論と最適化", コロナ社, 東京, pp. 91-98.

저자소개



조기량(Ki-Ryang Cho)

광운대학교 통신공학과 공학사
건국대학교 대학원 전자공학과
공학석사
일본 오카야마대학 자연과학연
구과 공학박사

현 여수대학교 전자통신공학과 교수
※관심분야 : 최적제어, 음향·진동해석



김 온(On Kim)

여수대학교 전자통신공학과 공
학사
여수대학교 대학원 전자통신공
학과 공학석사
여수대학교 대학원 전자통신공
학과 박사과정

현 프로닉스 대표이사
※관심분야 : 마이크로프로세서, 자동제어



곽두성(Doo-Sung Kwak)

여수대학교 수산공학과 수산학사
여수대학교 대학원 전자통신공
학과 석사과정

현 (주) 두경수산 대표이사
※관심분야 : 최적제어, 초음파
센서를 이용한 응용기기분야



김천석(Chun-Suk Kim)

광운대학교 응용전자공학과 공
학사
건국대학교 대학원 전자공학과
공학석사
경남대학교 대학원 전자공학과
공학박사

현 여수대학교 전자통신공학과 교수
※관심분야 : 전파공학, 수중통신