

< 논 문 >

압전지능구조물의 최적설계를 위한 민감도 해석

Sensitivity Analysis for Optimal Design of Piezoelectric Structures

김 재 환*

Jae-Hwan Kim

(1997년 9월 30일 접수 ; 1998년 1월 15일 심사완료)

Key Words : Sensitivity Analysis(민감도해석), Finite Element Modeling(유한요소모델링), Piezoelectric Smart Structures(압전지능구조물), Noise Control(소음제어)

ABSTRACT

This study aims at performing sensitivity analysis of piezoelectric smart structure for minimizing radiated noise from the structure. The structure consists of a flat plate on which disk shaped piezoelectric actuator is mounted, and finite element modeling is used for the structure. The finite element modeling uses a combination of three dimensional piezoelectric, flat shell and transition elements so thus it can take into account the coupling effects of the piezoelectric device precisely and it can also reduce the degrees of freedom of the finite element model. Electric potential on the piezoelectric actuator is taken as a design variable and total radiated power of the structure is chosen as an objective function. The objective function can be represented as Rayleigh's integral equation and is a function of normal displacements of the structure. For the convenience of computation, all degrees of freedom of the finite element equation is condensed out except the normal displacements of the structure. To perform the design sensitivity analysis, the derivative of the objective function with respect to the normal displacements is found, and the derivative of the normal displacements with respect to the design variable is calculated from the finite element equation by using so called the adjoint variable method. The analysis results are compared with those of the finite difference method, and shows a good agreement. This sensitivity analysis is faster and more accurate than the finite difference method. Once the sensitivity analysis program is used for gradient-based optimizations, one could achieve a better convergence rate than non-derivative methods for optimal design of piezoelectric smart structures.

1. 서 론

압전지능구조물(Piezoelectric Smart Structures)

이러한 압전 감지기와 작동기 그리고 제어기가 구조물에 함해져 있는 새로운 개념의 구조물로서 구조물의 거동을 감지하여 감지된 신호가 제어기를 거쳐 가진 기로 적절하게 인가될 때 주위환경의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 능력을 갖는 구조물이다. 최근에 이에 대한 연구가 외국은 물론 국내에서도 매

* 정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

우 활발하다. 이러한 지능구조물의 응용에는 매우 많은데, 그중에서 자동차 및 비행기 등의 실내 내부 패널을 압전지능구조물로 만들어서 능동적으로 실내 소음을 제어하는 연구가 진행되고 있다^(1,2). 그러나 이러한 응용분야에 사용될 압전지능구조물을 설계하는 것은 그리 쉽지는 않다. 왜냐하면 이러한 구조물이 소음저감의 성능을 내기 위해서는 구조물에 붙여지는 압전가진기 및 감지기의 크기, 위치 및 인가되는 전압등이 최적으로 설계되어야 하기 때문이다. 구조물의 성능에 미치는 가진기 및 감지기의 영향은 매우 복잡하기 때문에 컴퓨터를 이용한 최적설계를 통하여 그 성능을 향상시킬 수 있다.

압전지능구조물은 유한요소법을 사용하여 전기장과 기계적 변위장의 연성된 효과를 완전하게 해석할 수 있다. 이러한 해석을 가지고 압전지능구조물의 최적설계를 행하는 데는 설계변수에 대한 목적함수의 변화를 계산하는 것이 필요하다. 이것은 설계변수를 변화시켰을 때 얼마만큼 목적함수가 변화하는가를 따지는 것으로서 크게 두 가지의 방법이 있다. 첫째는 목적함수를 설계변수로 미분한 값을 필요로 하지 않는 non-derivative 최적화 방법을 쓰는 것이다. 이 방법은 쉽게 쓸 수 있는 장점은 있지만 최적설계의 결과가 수렴하는데 많은 시간이 걸리는 단점이 있다. 둘째는 목적함수를 설계변수로 미분한 값을 사용하는 gradient-based 최적화 방법이 있는데 이것은 빠른 수렴성을 보이는 반면에 민감도해석(sensitivity analysis) 즉, 목적함수를 설계변수로 미분한 값이 필요하다.

판구조물로부터 방사되는 소음제어를 위한 최적설계에 대한 연구는 많이 있었다. 대개는 판재의 두께나 재질을 변화시키는 것에 대한 연구가 많이 행되었으며^(3,4) 이에 대한 민감도해석이 수행되었다⁽⁵⁾. 최근에는 방사소음제어를 위해 판구조물의 형상(configuration)을 최적화하는 연구와^(6,7) 민감도해석에 있어서 CAD를 이용하여 형상의 설계변수를 매개변수화하여 사용한 경우가 있었다⁽⁸⁾. 그러나 이들 모두는 판구조물을 대상으로 한 소음제어를 위한 최적설계들로서 압전지능구조물을 대상으로한 것은 없었다.

압전 구조물에 대한 형상의 민감도 해석을 매개변수법(adjoint variable method)을 사용하여 구한 경우가 있다⁽⁹⁾. 여기서 압전체의 일차원 모델을 예제로 택하여 이론적인 민감도해석을 보였다. 그러나 이것은 대개 유한요소법이나 경계요소법과 같은 수치적인 방법으로 판재와 압전 작동기나 감지기가 붙은 압전구조물을 해석하는 것을 생각할 때 실제와

는 거리가 있다.

따라서 본 연구에서는 소음제어를 위한 압전지능구조물의 유한요소 모델에 있어서 최적설계시 필요한 민감도해석을 하고자 한다. 구조물은 사각 평판을 고려하였고 압전요소는 한 개의 원판형 세라믹을 택하였다. 다른 연구들에서는 대부분 사각형의 압전소자를 택한것에 반하여 모델링하기에도 번거로운 원판형 압전소자를 택한 이유는 사각 압전소자는 주로 두 방향으로 굽힘을 줄 수 있지만 원형 가진기는 원주 어느 방향으로나 굽힘변형을 줄 수 있어서 효과적으로 판재의 진동을 억제할 수 있기 때문이다. 목적함수는 판재에서 방사되는 음향파위를 잡았고 설계변수로는 압전요소에 가해지는 전압을 택하였다.

2. 압전지능구조물의 모델링

본 연구는 평판에 원형 압전 가진기 및 감지기가 부착된 삼차원 압전 지능구조물에서 복사되 나가는 소음에너지 저감을 위한 최적설계의 민감도해석을 위한 것이다. 평판은 사각 박판으로서 반사가 없는 반무한 평면에 모든 모서리가 완전 고정되어있으며 판의 밑에는 일정한 크기의 음압이 작용한다(Fig. 1). 소음원으로부터 나오는 음압은 판구조물을 가진하고 판구조물에 붙은 압전요소는 감지기 혹은 가진기로 사용되어서 판구조물의 진동을 줄임으로서 판으로부터 방사되는 소음을 줄이게된다.

압전지능구조물의 유한요소모델은 세 가지의 유한요소를 조합하여 사용한다. 즉, 전기장과 변위장의 연성된 효과를 정확하게 나타내는 3차원 압전요소를 압전재료 영역에 사용하고 평판 쉘요소를 판구조물에 사용하며 이 두가지 유한요소를 천이요소로서 연결하여 압전지능구조물을 모델링한다(Fig. 2). 이러한 모델링 방식은 압전재료를 정확하게 모델링할 수 있는 동시에 판요소를 사용함으로써 유한요소

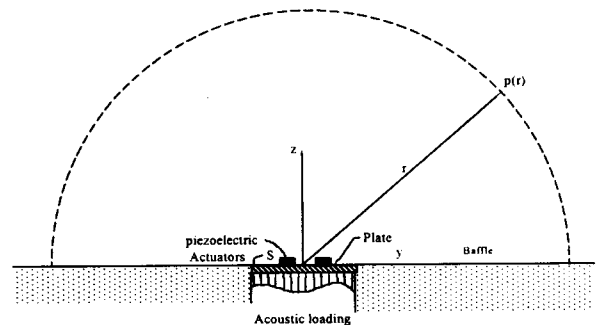


Fig. 1 Piezoelectric smart structure

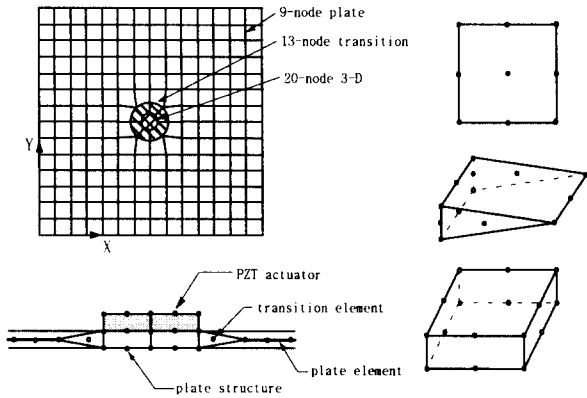


Fig. 2 Combination of three kinds of elements

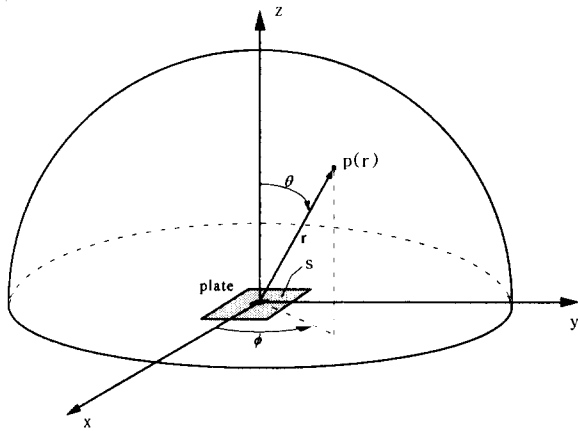


Fig. 3 Radiated sound pressure from the plate structure

모델의 자유도를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이 방식에 대한 자세한 연구는 이미 있었으며⁽¹⁰⁾ 여기서는 기존의 연구결과를 그대로 사용하였다.

평판에 디스크형 압전소자가 부착된 압전지능구조물이 반무한한 평면위에 놓여 있다고 가정하고 이 구조물로부터 방사되는 소음 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Fig. 3).

$$W_{tot} = \int_{\Gamma} \frac{|p(r)|^2}{2\rho c} d\Gamma \quad (1)$$

여기서 ρc 는 공기의 고유 임피던스이고 r 은 평판상에서 방사에너지를 나타내는 반구까지의 거리 그리고 Γ 는 반구상의 면적을 말한다. 원음장에서의 음압은 Rayleigh 적분에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$p(r) = -\frac{\rho \omega^2}{2\pi} \int_S u(r_s) \frac{e^{ikR}}{R} dS \quad (2)$$

여기서 $R = |r - r_s|$ 이고 r_s 는 평판, S 상의 거리이며 $u(r_s)$ 는 평판 상의 수직변위를 나타낸다. 이 $u(r_s)$ 는 압전재료가 부착된 구조물의 유한요소 방정식을 풀어서 구할 수 있는데 압전재료 구조물의 유한요소 방정식은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{uu} - \omega^2 M & K_{u\psi} \\ K_{\psi u} & K_{\psi\psi} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U \\ \Phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ Q \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 K_{uu} 는 압전재료의 강성 행렬, M 은 질량행렬, $K_{u\psi}$ 는 압전 연성행렬, $K_{\psi\psi}$ 는 유전행렬을 각각 나타내며 U 는 변위 그리고 Φ 는 압전재료의 전기장을 유한요소의 절점에서 나타낸다. 변위 U 는 평판상의 수직변위 $u_s = u(r_s)$ 와 그렇지 않은 변위 u_{ns} 에 해당하는 절점값들로 나눌 수 있다. Φ 는 가진기의 전극에서는 주어진 값을 갖게 되고 압전감지기의 전극과 압전재료 내부에서는 미지수의 값을 갖게 된다. F 는 구조물에 작용하는 절점력으로서 평판 아래에 작용하는 음압하중에 의한 것이다. 근본적으로 식 (3)은 압전재료와 비압전재료의 구조물에 동일하게 적용시킬 수 있다. 단지 비압전재료에서는 $K_{u\psi}$ 와 $K_{\psi\psi}$ 가 없고 K_{uu} 및 M 은 평판요소, 삼차원 고체요소 또는 천이요소에 맞게 구성된다는 것이 다르다. 따라서 평판 및 천이요소에서는 회전 자유도가 U 에 포함되어야 한다. 평판 및 천이 요소에 대한 자세한 내용은 참고문헌에 있다⁽¹⁰⁾.

평판상의 수직변위 u_s 에 해당하는 절점변위를 U_s 라고 한다면 보간함수 N_s 를 사용하여 다음과 같이 u_s 를 나타낼 수 있다.

$$u_s = N_s(\xi, \eta) U_s \quad (4)$$

따라서 원음장에서의 음압은 절점변위 U_s 를 사용할 때

$$p(r) = G U_s \quad (5)$$

여기서

$$G = -\omega^2 \rho \int_S \frac{e^{ikR}}{2\pi R} N_s dS \quad (6)$$

따라서 방사되는 소음 에너지는 다음과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$W_{tot} = \frac{1}{2\rho c} \int_{\Gamma} p(r) \cdot p(r)^* d\Gamma$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2\rho c} \int_{\Gamma} (G U_s)^T (G U_s)^* d\Gamma \\
 &= \frac{1}{2} U_s^T B U_s^* \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서 위첨자 *는 공액복소수(complex conjugate)을 나타내고

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{1}{\rho c} \int_{\Gamma} G^T G^* d\Gamma \\
 &= \frac{1}{\rho c} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} G^T G^* \sin \theta r^2 d\phi d\theta \quad (8)
 \end{aligned}$$

S에 대한 면적분은 유한요소의 적분에 일반적으로 사용하는 가우스 적분을 사용하여 해당되는 요소의 윗면에 대해서 수행하고 Γ 에 대한 면적분은 식 (8)에서 보듯이 $d\phi$ 와 $d\theta$ 를 변화시켜 가면서 반구상의 격자 중심, 한 점에서 구한 $p(r)$ 값을 가지고 적분을 수행한다.

3. 민감도해석

원음장에서 방사되는 소음 에너지를 최소화하기 위해서는 부착된 압전가진기의 전기장, 위치 및 형상을 변화시키게 된다. 이 들 중에서 전기장은 가장 쉽게 변화시킬 수 있는 것으로서 일정한 가진기의 위치에서 전기장에 대한 목적함수의 변화율을 계산할 수 있으면 가진기의 위치에 따라 전기장의 변화에 민감한 곳을 찾을 수 있다. 목적함수를 방사 음향 파워로 잡고 설계변수를 압전소자에 인가되는 전압 (b_1)으로 잡았을 때 설계변수에 대한 목적함수의 변화율은 식 (7)을 설계변수 b_i 에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d W_{tot}}{d b_i} = U_s^T B \frac{\partial U_s^*}{\partial b_i} + \frac{1}{2} U_s^T \frac{\partial B}{\partial b_i} U_s^* \quad (9)$$

식 (3)은 상태 방정식으로서 상태변수는 변위 U 와 전기장 Φ 로 이루어져있다. 식 (9)에서 행렬 B 는 구조물 및 압전재료의 유한요소 행렬이 적분된 형태로서 b_1 에 대해서는 무관하지만 다른 설계변수들, 예를 들면 압전 가진기의 configuration을 나타내는 반지름, 두께, 위치등에 대해서는 관계가 있다. 따라서 압전소자의 크기나 위치의 설계변수를 변화시켰을 때 방사소음에너지의 목적함수가 변화하는 것을 나타내는 민감도해석이 쉽지 않게 된다.

식 (9)의 첫째 항에서 $\frac{\partial U_s^*}{\partial b_i}$ 는 직접 구하기가 쉽지 않다. 따라서 상태 방정식 (3)의 형태를 다음

과 같다고 보자.

$$K(b) U_s = \hat{F} \quad (10)$$

이것은, 나중에 설명하겠지만, 식 (3)을 U_s 의 자유도만 남기고 축약한 형태이다. 윗 식의 양변을 설계변수로 미분을 취하면

$$\frac{\partial K}{\partial b_i} U_s + K \frac{\partial U_s}{\partial b_i} = \frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i}$$

이 되고 Adjoint 변수를 다음과 같이 도입하면⁽¹¹⁾

$$\lambda = U_s^T B K^{-1} \quad (11)$$

목적함수의 민감도는 결국 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\begin{aligned}
 \frac{d W_{tot}}{d b_i} &= \lambda^T \left[\frac{\partial \hat{F}}{\partial b_i} - \frac{\partial K(b)}{\partial b_i} U_s \right] \\
 &+ \frac{1}{2} U_s^T \frac{\partial B}{\partial b_i} U_s^* \quad (12)
 \end{aligned}$$

여기서 Adjoint 변수 λ 는 식 (11)을 다음과 같이 풀 후에 식 (12)에 대입한다.

$$K \lambda = U_s^T B \quad (13)$$

식 (12)에서 문제는 $\frac{\partial K}{\partial b}$ 를 어떻게 구하는가 하는 것이다. 판요소에서 두께의 변화에 따른 강성행렬의 변화는 쉽게 구할 수 있다. 그러나 설계변수를 압전요소의 반지름, 두께 및 위치로 잡았을 때 설계변수가 변함에 따라 유한요소의 크기가 변화하게 되고 따라서 강성 행렬이 달라지기 때문에 이것을 구하는 것이 간단하지 않다. 본 연구에서는 설계변수가 가진기의 전기장일 때를 논의한다.

설계변수가 가진기의 전기장일 때

설계변수가 가진기에 인가되는 전기장일 때 ($b_1 = \Phi_g$)를 생각하자. 식 (3)에서 상태 변수는 U 와 Φ 이고 변위 U 는 다시 Rayleigh 적분에 사용되는 평판상 수직변위 U_s 와 그 이외의 변위 U_{ns} 로 나눌 수 있고 Φ 는 전극에서 주어진 전기장 값 Φ_g 와 미지수인 그 이외의 값 Φ_{ng} 로 나눌 수 있다. 따라서 상태 방정식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_{ns} \\ U_s \\ \Phi_{ng} \\ \Phi_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{ns} \\ F_s \\ 0 \\ Q \end{pmatrix} \quad (14)$$

여기서 $K_{11}, K_{12}, K_{21}, K_{22}$ 는 식 (3)에서

$K_{uu} - \omega^2 M$ 을, $K_{13}, K_{14}, K_{23}, K_{24}$ 는 $K_{u\phi}$ 를 그리고 $K_{33}, K_{34}, K_{43}, K_{44}$ 는 $K_{\phi\phi}$ 를 각각 나누는 것이다. F_s, F_{ns} 는 평판 밑면에 작용하는 음압으로 인한 절점력이고 Q 는 전극에 가해지는 절점전하를 나타내므로 전극이 아닌 절점에서는 그 값이 없다. 윗 식에서 Φ_g 는 주어진 값이므로 우측으로 이항을 하면 다음과 같이 정리가 된다.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_{ns} \\ U_s \\ \Phi_{ng} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{ns} \\ F_s \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} K_{14} \\ K_{24} \\ K_{34} \end{pmatrix} \Phi_g \quad (15)$$

이 식은 실제로 풀어야 할 압전 지능 구조물의 유한 요소식이다. 이식을 풀 때 외력과 가진기의 전기장에 의해 발생하는 감지기의 신호와 구조물의 거동을 구할 수 있다. 목적함수 W_{tot} 는 U_s 에 대한 함수이므로 윗 식에서 U_s 만 남기고 축약을 하면,

$$K_{22} U_s = F_s - K_{21} U_{ns} - K_{23} \Phi_{ng} - K_{24} \Phi_g$$

또는

$$K_{22} U_s = \tilde{F} \quad (16)$$

여기서

$\tilde{F} = F_s - K_{21} U_{ns} - K_{23} \Phi_{ng} - K_{24} \Phi_g$. 이것은 식 (10)을 나타내는 것으로서 이 식을 풀어서 U_s 를 구하고 식 (7)에 의하여 음향 방사 에너지를 구할 수 있다.

민감도 해석은 식 (12)에 의하여 구할 수 있고 이에 필요한 Adjoint변수 λ 를 구해야 하는데 이것은 식 (13)에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{22} \lambda = B U_s^T \quad (17)$$

그리고 $b_1 = \Phi_g$ 이므로 설계변수에 대한 강성행렬의 변분은 영이 되고, 목적함수의 B행렬의 변분 역시 영이 되므로 설계 민감도는

$$\frac{d W_{tot}}{d b_i} = \lambda^T \frac{\partial \tilde{F}}{\partial b_i}$$

이 되는데, 여기서 $\frac{\partial \tilde{F}}{\partial b_i} = -K_{24}$ 이므로, 따라서

$$\frac{d W_{tot}}{d b_i} = -\lambda^T K_{24} \quad (18)$$

이 된다.

4. 해석 결과

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 반무향 평면에 놓인 알루미늄 평판을 고려하였다. 판재는 알루미늄 박판으로서 크기는 30cm × 30cm이고 두께는 0.8mm이며 네 변에서 완전 구속되어있다. 한 개의 원판형 압전가진기를 평판에 부착시켰으며 재료는 PZT-5를 사용하였다. 이 압전구조물을 해석하기 위해 3차원 압전요소-셀요소-천이요소를 복합적으로 사용한 유한요소법을 사용하였다. 이때에 압전가진기의 위치에 따라 자동적으로 격자생성을 하는 것이 필요한데, 기존 연구에 의해 개발된 압전소자와 그 근처를 요소들(element template)을 사용하여 압전소자의 위치에 따라 이 틀을 움직여서 나머지 영역에서 자동적으로 격자를 생성하는 프로그램을 사용하였다⁽¹²⁾. 판재에 작용하는 음압 하중은 1Pa의 음압이 일정하게 작용하는 것으로 간주하였으며 실제 최적설계 단계에서는 기존의 연구에서 사용하였던 방법, 즉, 같은 크기의 소음에너지를 갖는 여러가지의 음압 형태를 가정하여 판구조물의 아래에 작용하는 것으로 한다⁽¹³⁾.

본 연구에서는 기존 연구에서 개발한 유한요소해석 프로그램⁽¹⁰⁾과 연계해서 설계 민감도해석 프로그램을 직접 개발하였다. 개발된 유한요소 해석 프로그램에서는 압전요소의 구성방정식을 어떤 가정 없이 사용하므로 정확하게 압전요소의 연성효과를 계산할 수 있다. 압전재료에는 기계적인 감쇠효과뿐만 아니라 전기적인 감쇠효과가 있는데, 이러한 압전재료 및 구조물의 감쇠효과는 재료의 성질을 나타내는 행렬을 복소수로 잡아서 고려하였다. 전극에서는 같은 전기장을 가져야 하는데, 이 제한 조건은 유한요소의 조립과정에서 포인터 행렬을 사용하여 해결하였다. 절점 및 요소 그리고 경계조건은 기존 연구에서 개발된 자동생성 프로그램을 그대로 사용하였다. 본 연구에서 택한 예제는 521개의 절점과 총 112개의 2차요소를 사용하였는데, 2차요소에는 9절점 평판요소, 13절점 천이요소 그리고 20절점의 삼차원 고체 및 압전 요소들이 사용되었다.

방사소음 에너지를 목적함수로 잡고 가진기에 인가되는 전기장의 크기를 설계변수로 잡았을 때 설계 민감도를 구한 것을 Table 1에 나타내었다. 가진 주파수는 평판의 첫 번째 고유진동수인 75 Hz와 두 번째 고유진동수(270Hz) 사이인 150 Hz, 200 Hz 그리고 두 번째 고유진동수보다 높은 300 Hz를 택하였다. 인가되는 전압은 10 V, 압전 가진기

Table 1 Sensitivity analysis results.

Frequency (objective fcn.)	Variations of design variable	Sensitivity		
		Finite difference	Analytical: Eq.(18)	Error (%)
75 Hz (0.9862e-5 W)	1 %	-0.13988e-6	-0.14013e-6	-0.18 %
	0.1 %	-0.14033e-6		0.14 %
150 Hz (0.1009e-6 W)	1 %	-0.37643e-6	-0.37963e-6	-0.84 %
	0.1 %	-0.37966e-6		0.01 %
200 Hz (0.24061e-8 W)	1 %	-0.24062e-8	-0.24845e-8	-3.15 %
	0.1 %	-0.25019e-8		0.70 %
300 Hz (0.36902e-6 W)	1 %	0.23241e-6	0.23180e-6	0.26 %
	0.1 %	0.22922E-6		-1.11 %

의 반지름은 10 mm, 두께는 1 mm로 각각 하였다. 가진기의 위치는 평판의 중앙으로 택했으며 음향 방사 파워를 계산하기 위해서 식 (8)에 쓰인 r 은 3 m로 하고 $d\phi, d\theta$ 는 각각 6°로 하였다. 본 연구의 민감도 해석결과를 유한 차분법을 사용했을 때의 결과와 비교하였다. 유한차분법에서 설계변수인 전기장의 크기를 변화시키면서 그 결과를 비교하였다. 본 연구의 해석 결과가 유한 차분법의 결과와 잘 맞는 것을 알 수 있다. 여기서 75 Hz부터 200 Hz 까지는 음(-)의 민감도를 보이는데 이는 전기장을 증가시켰을 때 음향방사 파워를 줄일 수 있다는 것을 나타낸다. 300 Hz에서 양(+)의 민감도는 전기장을 감소시켜야 음향 방사 파워를 줄일 수 있는 가능성이 있는 것을 의미한다.

민감도 계산에 소요된 시간은 SUN/Ultra workstation에서 8분 10초가 걸렸는데 이 시간은 유한 차분법을 사용하였을 때 걸린 시간(9분 20초)보다 1분 이상 작다. 따라서 본 민감도 해석을 사용함으로써 빠르게 목적함수의 변화율을 구할 수 있고, 도함수를 사용하는 최적화 알고리즘을 사용할 때에 최적값을 찾는 반복횟수를 줄일 수 있다.

본 연구에서 설계민감도를 전기장의 설계변수에 대해서만 구했는데, 실제적인 응용을 위해서는 압전 가진기의 위치, 반경 및 두께의 설계변수에 대한 민감도 해석이 필요하다. 그러나 이것을 위해서는

$\frac{\partial B}{\partial b_i}$ 및 $\frac{\partial K}{\partial b_i}$ 를 구해야 하는데, 이 과정이 간단하지 않다. 예를 들어 압전 가진기의 위치가 변하면, 자동 격자 생성 프로그램에서 요소의 구성이 바뀔 수 있다. 만일 요소구성이 바뀌지 않더라도 각

요소의 좌표가 모두 바뀌게 된다. 이렇게 각 요소의 좌표가 변한다면, 각 좌표의 변화에 대한 $\frac{\partial B}{\partial b_i}$ 및 $\frac{\partial K}{\partial b_i}$ 를 구해야한다. 이러한 구성(configuration)에 대한 최적화 민감도 해석에 대한 연구가 있었으며^(6,7,8,14) 앞으로 압전 지능 구조물에 대해서도 연구할 계획이다.

5. 결 론

본 연구에서는 평판에 원형 압전 가진기가 부착된 압전 지능구조물의 음향 방사파워를 줄이는 최적설계를 목적으로 한 민감도해석을 수행하였다. 압전 지능구조물의 유한요소모델은 판요소, 삼차원의 압전 및 고체요소 그리고 천이요소의 조합된 형태를 사용하였고 설계변수로는 압전가진기의 전기장, 목적함수는 구조물 표면에서 방사 되어 나가는 음향 파워를 잡았다. 목적함수는 판구조물의 수직변위에 따른 함수이고 Rayleigh의 적분식으로 나타내어지며 설계변수에 대한 민감도는 압전구조물의 유한요소식에 adjoint variable법을 사용하여 구하였다.

본 연구에서 해석적으로 구한 민감도를 유한 차분법을 이용하여 구한 민감도와 비교한 결과 서로 잘 맞음을 확인하였으며 유한 차분법보다 빠르고 정확하게 민감도를 구할 수 있었다. 이 민감도해석 프로그램은 유한요소해석 프로그램과 연결되어 있으며 목적함수의 도함수를 사용하는 최적화 기법을 사용할 때 민감도해석을 본 프로그램을 사용함으로써 최적화의 수렴성을 높일 수 있다.

보다 실제적인 응용을 위해서는 설계변수를 압전

가진거나 감지기의 크기 및 위치를 잡아야 하는데 이를 위해서는 유한요소의 구성변화에 따른 민감도 해석이 필요하다.

후 기

본 연구는 1996년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

본 논문에 대하여 좋은 제언을 해 주신 광주과학기술원의 왕세명 교수님께 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Clark, R. L. and Fuller, C. R., 1992, "Experiments on Active Control of Structurally Radiated Sound Using Multiple Piezoceramic Actuators," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, No. 6, pp. 3313~3320.
- (2) Silcox, R. J., Fuller, C. R. and Burdisso, R. A., 1995, "Concepts on An Integrated Design Approach to the Active Control of Structurally Radiated Noise (ASAC)," *Trans. Asme*, Vol.117, pp. 261~270.
- (3) Lamancusa, J. S., 1993, "Numerical Optimization Techniques for Structural-Acoustic Design of Rectangular Panels," *Computers & Structures*, Vol. 48, No. 4, pp. 661~675.
- (4) Belegundu, A. D., Salagame, R. R. and Koopmann, G. H., 1994, "A General Optimization Strategy for Sound Power Minimization," *Structural Optimization*, Vol. 8, pp. 113~119.
- (5) Salagame, R. R., Belegundu, A. D. and Koopmann, G.H., 1995, "Analytical Sensitivity of Acoustic Power Radiated From Plates," *J. Of Vibration And Acoustics*, Vol. 117, pp. 43~48.
- (6) Twu, S.-L. and Choi, K. K., 1992, "Configuration Design Sensitivity Analysis of Built-Up Structures Part I: Theory," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 35, pp. 1127~1150.
- (7) Phelan, D. G. and Harber, D. G., 1989, "Sensitivity Analysis of Linear Elastic Systems Using Domain Parameterization and a Mixed Mutual Energy Principle," *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 77, pp. 31~59.
- (8) 왕세명, 기성현, 1997, "소음/진동의 컨피규레이션 설계 민감도 연구," 한국소음진동공학회 1997년도 춘계학술대회 논문집, pp. 192~198.
- (9) Meric, R. A. and Saigal, S., 1991, "Shape Sensitivity Analysis of Piezoelectric Structures by the Adjoint Variable Method," *Aiaa J.*, Vol. 29, No. 8, pp. 1313~1318.
- (10) Kim, J., Varadan, V. V. and Varadan, V. K., 1997, "Finite Element Modeling of Structures Including Piezoelectric Active Devices," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 817~832.
- (11) Haug, E. J., Choi, K. K. and Komkov, V., 1986, Design Sensitivity Analysis of Structural Systems, Academic, New York.
- (12) Varadan, V. V., Kim, J. and Varadan, V. K., 1997, "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Noise Control," *J. of AIAA*, Vol. 35, No. 3, pp. 526~533.
- (13) Kim, J., Varadan, V. V. and Varadan, V.K., 1995, "Finite Element-Optimization Methods for the Active Control of Radiated Sound From a Plate Structure," *Smart Materials and Structures*, Vol. 4, pp. 318~326.
- (14) Wang, S.-Y., Sun, Y. And Gallagher, R. H., 1985, "Sensitivity Analysis in Shape Optimization of Continuum Structures," *Computers & Structures*, Vol. 20, No. 5, pp. 855~867.