

압전-구조-음향 연성계의 압전 액츄에이터 최적설계

⁰왕세명*, 이강훈**

Shape Optimization of Piezoelectric Materials for Piezoelectric-Structure-Acoustic System

Semyung Wang*, Kanghoon Lee**

ABSTRACT

Recently, piezoelectric materials have attracted considerable attention because of its self-sensing and actuating properties. To model smart structures, numerical modeling of structures with piezoelectric devices is essential. As many factors affect the performance of smart structures, optimization of these parameters is necessary. In this paper, the shape design sensitivity analysis of the 3D piezoelectric and structural elements is developed and shape optimization is performed. For the evaluation of the sensitivity, the finite element method is used. For the shape sensitivity, the domain velocity field is calculated. An acoustic cavity model is presented as a numerical example to study the feasibility of the formulation. The continuum sensitivity is compared with the results of the finite difference method by ANSYS. And the sequential linear programming (SLP) algorithm is used as the optimization algorithm.

1. 서론

최근 들어 지능구조물은 여러 가지 장점들로 인해 많은 관심을 끌고있다. 여러 종류의 지능구조물 중에서 압전 재료는 다양한 응용분야에서 센서와 액츄에이터로서 그 효용성을 증명 받아왔다. 지능 구조물을 설계하는데 있어 액츄에이터의 수, 위치, 크기, 액츄에이터에 가해지는 제어 이득 등의 많은 인자들이 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 최선의 성능을 얻기 위해서는 이러한 인자들을 최적으로 설계하는 것이 필요하다. 압전 시스템을 모델링, 해석, 최적화하는 많은 연구가 진행되어 왔다. 압전 변환기를 설계하기 위해 많은 연구자들이 수치적으로 또는 실험적으로 해석하는데 헌신하였다. 70년대부터 압전 구조물을 모델링하는데 유한요소법(FEM)이 사용되었다.

압전 구조물에 대한 유한요소해석(FEA)의 가장 기본이 되는 참고자료는 Allik et al.^[1]의 연구결과이다. 구조물에 설치된 액츄에이터의 최적위치에 대한 연구는 최근 20여년간 수행되어왔다. Igusa et al.^[2]은 출력제한 제어계의 액츄에이터와 센서의 최적 위치와 이득의 최적설계에 대한 효과적인 방법을 제시하였다. 몇몇 논문들은 분산 액츄에이터의 최적위치에 대해 다루고 있다.

Clark 과 Fuller^[3]는 능동 구조소음 제어에서의 압전 액츄에이터의 위치와 PVDF 센서의 크기와 위치에 대한 연구를 수행하였다. 조화 가진력에 의한 단순지진된 사각평판의 음향 응답을 계산하기 위해 해석적인 모델이 사용되었으며 해석결과를 실험에서 얻은 결과와 비교하였다. Wang et al.^[4]는 적응 LMS 제어계에서의 압전 액츄에이터의 최적위치를 최적화하는 문제에 대한 식을 제안하였다. 최근에 와서 Varadan et al.^[5] 과 Kim et al.^[6]은 원형 혹은 사각 압전 액츄에이터가 부착된 평판 구조물이 평판 아래의 소음원에 의해 발생된 음향장에 의해 가진될 때 공간으로 방사되는 소음을 줄이기 위한 최적설계에 대해 연구하였다. 설계민감도 해석에 대한 연구는 두 가지 서로 다른 접근방법으로 진행되어왔다. 하나는 설계민감도를 위해 이산 구조 유한요소 모델을 이용하는 것이다. 이산 설계 민감도 해석에는 유한차분법, 반해석적, 해석적인 방법의 3 가지 방법이 있다. Haftka et al.^[7]은 유한차분법을, Pedersen et al.^[8]은 반해석적인 방법을 사용하였다. Haug and Choi^[9]는 구조상태 방정식에 대한 변분식을 이용하여 선형탄성구조물에 대한 구조 설계민감도 이론을 개발하였다. 형상설계변수에 대해서는 구조물의 성능을 측정하기 위한 구조물의 변화를 관련 짓기 위해 연속체 역학의 물질미분개념이 도입되었다. 연속 설계민감도해석을 사용하여 형상설계 민감도식은 변위, 응력, 스트레인, 영역 형상 변화와 같은 물리

* 광주과학기술원

** LG-EDS 제조.엔지니어링 사업부

적인 양들의 적분형태로 표현할 수 있다.

본 논문에서는 압전체와 구조물에 대한 연속형상설계 민감도 해석을 개발하였으며 형상최적설계를 수행하였다. 설계 민감도식은 연성계의 변분식을 해석적으로 미분하여 유도되었으며 연속체 역학의 물질미분식을 사용하였다. 설계 민감도의 계산을 위해 설계 민감도 식을 이산화하고 상용 FEA 결과와 비교하기 위해 선형 형상함수를 사용하였다. 영역 속도장은 등매개변수 mapping 법과 경계변위법을 이용하여 구하였다. 식의 타당성을 보이기 위해 사각 평판 모델과 음향공간 모델의 두 가지 수치예제를 제시하였다. 결과의 정확성을 증명하기 위해 계산된 민감도는 ANSYS를 이용한 유한차분법에 의한 결과와 비교하였다. 자동적으로 목적함수를 최소로 하는 설계 변수 벡터를 구하기 위해 최적설계 알고리즘으로 순차선형프로그램 알고리즘을 사용하였다.

2. 시스템 모델링

최근 수년간 능동 압전 구조물에 대한 연구는 주로 해석적이거나 이론적인 접근에 초점을 맞춰왔다. 범용 압전 유한 요소에 대한 연구는 그다지 많이 이루어지지 않았다. 본 장에서는 압전체와 유연한 평판사이의 상호작용을 모델링하여 평판진동과 그와 연관된 음향방사를 제어하기 위해 유한요소식을 기술한다. 이 모델은 압전체/평판/음향계의 동특성을 시뮬레이션하고 제어하기 위해 사용된다. 그림 1은 압전체/평판/음향계의 유한요소를 간략히 표현한 것이다. 이 요소는 압전 슬리드 요소, 사각 구조 평판 요소, 음향요소로 이루어져 있다. 각각의 요소에 대한 지배방정식을 아래에 기술하였다.

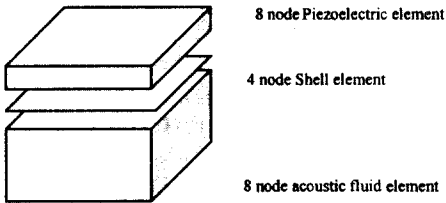


그림 1. The finite element of the PZT/plate/cavity

2.1 압전 액츄에이터

선형 압전 이론에 의해 압전계의 운동 방정식을 얻을 수 있다. 본 장에서는 연성계의 전형적인 해석 모델과 미분 방정식을 제시하였다. 조화 운동 방정식은 조화 변수의 복소수 표현에 의해 얻을 수 있다.

$$-\omega^2 m(x)z(x) + i\omega Cz(x) + A_{zz}z(x) + A_{zz}\phi(x) = f(x), x \in \Omega \quad (1)$$

$$A_{zz}z(x) + A_{zz}\phi(x) = q(x), x \in \Omega \quad (2)$$

식 1은 순압전효과에 대한 미분방정식이며 식 2는 역압전효과에 대한 미분방정식이다. 순압전효과는 압전체료가 기계적인 힘/압력에 대해 전기적인 전하/장을 발생시키는 현상이다. 반대로 역압전효과는 전기적인 전하/장에 의해 기계적인 응력이나 스트레인을 발생시키는 현상이다. 판의 영역은 Ω 로 나타내었다. 구조물의 질량효과 $m(x)$ 는 공간좌표 $x = [x^1, x^2, x^3]^T$ 의 함수이며, 구조물의 변위 벡터는 $z(x, t) = [z^1, z^2, z^3]^T$ 로 나타내었다. 시간 t 에 대해 전기적 포텐셜은 $\phi(x, t)$ 로 표현되며 선형 동차 미분 연산자 C 는 구조물위 감쇠효과를 의미한다. 동차 연산자 A_{zz} , A_{zz} , and A_{zz} 는 각각 구조물의 탄성, 기전연성, 유전 효과와 관련되어 있다. 식 1의 우변에 나타난 벡터 $f(x)$ 는 구조물에 가해진 분산력이며, 식 2의 벡터 $q(x)$ 는 가해진 전기장에 의한 분산 전하이다.

변분식은 Riesz 정리를 이용하면 얻을 수 있다. 식 1과 2에 각각 허용 가상 상태 $\bar{z}, \bar{\phi}$ 를 곱하고 영역에 대해 적분을 취한 다음 정리한다. 변분식을 부분적분하여 다음의 식을 얻었다.

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} [-\omega^2 m z + i\omega Cz + A_{zz}z + A_{zz}\phi] \bar{z} \, d\Omega \\ & + \iint_{\Omega} [A_{zz}z + A_{zz}\phi] \bar{\phi} \, d\Omega = \iint_{\Omega} f \bar{z} \, d\Omega \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 구조 음향 연성계

선형 음향-탄성 이론에 의해 구조음향 연성계의 운동방정식을 얻을 수 있다. 변분식을 얻기 위한 모든 과정은 2.1 장의 방법과 유사하다.

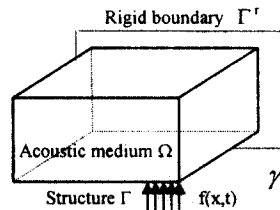


그림 2. Structural-acoustic system

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} [-\omega^2 m z + i\omega Cz + A_{zz}z] \bar{z} \, d\Omega \\ & + \iint_{\Omega} \left[-\frac{\omega^2}{\beta} p \bar{p} + \frac{1}{\rho^0} \nabla p \nabla \bar{p} \right] d\Omega - \omega^2 \iint_{\Omega} \bar{p} z \, n \, d\Gamma \\ & = \iint_{\Gamma} f \bar{z} \, d\Gamma + \iint_{\Omega} \bar{p} z \, n \, d\Gamma \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 유한 요소식

연속체 모델에 대한 조화 운동 변분식 식 3 과 식 4 는 유한 요소를 사용하여 이산화하고 각각의 요소에 대해 형상함수와 절점 변수를 도입하면 선형 대수 방정식의 조합으로 간략화 할 수 있다. 전기적 포텐셜 $\phi(x)$, 구조물의 변위 $z(x)$, 음압 $p(x)$ 는 이산화 된 모델의 각각의 요소에 대한 형상함수와 절점 변수에 의해 근사화 된다.

$$\begin{aligned} z(x) &= N_z(x)\bar{z} \\ \phi(x) &= N_\phi(x)\bar{\phi} \\ p(x) &= N_p(x)\bar{p} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $N(x)$ 형상함수 행렬이며 \bar{z} , $\bar{\phi}$ 와 \bar{p} 는 요소의 절점 변수 벡터이다. 식 5 를 변분식 식 3 과 식 4 에 치환하고 각 항들을 적분하면 다음과 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$-\omega^2 \begin{Bmatrix} M_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ M_\phi & 0 & M_p \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ \phi \\ p \end{Bmatrix} + i\omega \begin{Bmatrix} C_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ \phi \\ p \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} K_z & K_\phi & K_p \\ K_\phi & K_\phi & 0 \\ K_p & 0 & K_p \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ \phi \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ q \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

3. 형상 설계 민감도

구조물의 정하중시 변분식은 다음의 형태로 나타난다.¹⁹⁾

$$a_\Omega(z, \bar{z}) = \iint_{\Omega} c(z, \bar{z}) d\Omega = \iint_{\Omega} \bar{z} f d\Omega = \ell_\Omega(\bar{z}) \quad (7)$$

여기서 $c(\cdot, \cdot)$ 는 변분식의 적분항에 의해 정의된 쌍일차의 사상이다. 식 7 의 1 차 변분식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [a_\Omega(z, \bar{z})]' &= a_\Omega(z, \bar{z}) + a'_\Omega(z, \bar{z}) \\ &= \ell_\Omega(\bar{z}) + \ell'_\Omega(\bar{z}) = \ell'_\Omega(\bar{z}) \end{aligned} \quad (8)$$

물질 미분을 사용하면 식 8 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[a_\Omega(z, \bar{z})]' = a_\Omega(z, \bar{z}) + a'_\Omega(z, \bar{z}) - a_\Omega(\nabla z^T V_\Omega, \bar{z}) - a_\Omega(z, \nabla \bar{z}^T V_\Omega) + a''_\Omega(z, \bar{z}) \quad (9)$$

여기서 $a''_\Omega(z, \bar{z}) = \iint_{\Omega} \text{div}[c(z, \bar{z}) V_\Omega] d\Omega$ 이다.

식 9 에서 $a'_\Omega(z, \bar{z})$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a'_\Omega(z, \bar{z}) = -a_\Omega(\nabla z^T V_\Omega, \bar{z}) - a_\Omega(z, \nabla \bar{z}^T V_\Omega) + a''_\Omega(z, \bar{z}) \quad (10)$$

식 8 로부터 $a_\Omega(z, \bar{z}) = \ell_\Omega(\bar{z})$ 라는 사실을 이용하면 식 7 의 1 차 변분은 다음과 같다.

$$a_\Omega(z, \bar{z}) = \ell'_\Omega(\bar{z}) - a'_\Omega(z, \bar{z}) \quad (11)$$

다음으로 적분형으로 표현될 수 있는 일반적인 함수를 생각해 보자.

$$\psi_r = \iint_{\Omega} g(z_r, \nabla z_r) d\Omega \quad (12)$$

여기서 $\nabla z = [\nabla z_1 \nabla z_2 \nabla z_3]^T$ 이며 g 는 그 변수에 대해 연속적으로 미분가능하다. 식 12 에 변분을 취하면

$$\begin{aligned} \psi' &= \psi'_\Omega \\ &= \iint_{\Omega} [g_z z' + g_{v_z} \nabla z' + \nabla g^T V_\Omega + g \text{div} V_\Omega] d\Omega \\ &= \iint_{\Omega} [g_z z'_\Omega + g_{v_z} \nabla z'_\Omega + \nabla g^T V_\Omega + g \text{div} V_\Omega] d\Omega \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $g_{v_z} = [\partial g / \partial z_1 \partial g / \partial z_2 \partial g / \partial z_3]$ 이다. 물질미분을 사용하면 식 13 은

$$\begin{aligned} \psi' &= \iint_{\Omega} [g_z z' + g_{v_z} \nabla z' - g_z \nabla z^T V_\Omega - g_{v_z} \nabla(\nabla z^T V_\Omega) \\ &\quad + \nabla g^T V_\Omega + g \text{div} V_\Omega] d\Omega \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 z 와 ∇z 는 속도장에 의존한다. 여기서의 목적은 ψ' 에 대한 명시적인 표현을 속도장의 형태로 구하는 것이며 그러기 위해 식 14 우변의 처음 두 항의 z 를 제거하고 속도의 형태로 다시 표현하는 것이 필요하다.

z 을 제거하기 위해, 식 14 의 z 을 가상변위 $\bar{\lambda}$ 로 치환하고 에너지 쌍일차형 중 $\bar{\lambda}$ 를 포함하는 항을 묶는 보조변수식을 도입해야 한다.

$$\begin{aligned} \psi' &= \ell'_\Omega(\bar{\lambda}) - a'_\Omega(z, \bar{\lambda}) \\ &\quad - \iint_{\Omega} [g_z (\nabla z^T V_\Omega) + g_{v_z} \nabla(\nabla z^T V_\Omega)] d\Omega \\ &\quad + \iint_{\Omega} [\nabla g^T V_\Omega + g \text{div} V_\Omega] d\Omega \end{aligned} \quad (15)$$

이렇게 하여 우변은 상태 z 와 보조변수 $\bar{\lambda}$ 가 정의되면 계산 가능하게 된다.

압전체/평판에 대한 정적 평형상태 방정식의 변분식은 다음과 같이 표현된다.

$$a_\Omega(z, \bar{z}) = \iint_{\Omega} [S^T(z) T(\bar{z}, \bar{\phi}) - E^T(\phi) D(\bar{z}, \bar{\phi})] d\Omega = \ell_\Omega(\bar{z}) \quad (16)$$

$$\{T_j\} = [c] \{S_j\} - [e] \{E_j\} \quad (17)$$

$$\{D_j\} = [e] \{S_j\} - [\epsilon] \{E_j\} \quad (18)$$

여기서 $\{T_{ij}\}$ 다음 두가지 효과에 의해 발생한 응력 벡터이다.: 1) 기계적 효과 2) 전기적 효과; $\{D_j\}$ 는 전기적 변위 벡터이다. 또한 $[c]$ 는 탄성계수 행렬; $[e]$ 는 압전 상수 행렬; $[\varepsilon]$ 은 유전상수 행렬이다. 전체 에너지는 탄성 에너지, 유전 에너지, 압전 연성 에너지의 합이 된다. 따라서 에너지 쌍일차형은 다음과 같다.

$$a_{\Omega}(z, \bar{z}) = a_{\Omega}^e(z, \bar{z}) + a_{\Omega}^d(\phi, \bar{\phi}) + a_{\Omega}^{e1}(z, \bar{\phi}) + a_{\Omega}^{e2}(\phi, \bar{z}) \quad (19)$$

$$a^e_{\Omega}(z, \bar{z}) = \iiint_{\Omega} [S^T(z)[c]S(\bar{z})]d\Omega \quad (20)$$

$$a^d_{\Omega}(\phi, \bar{\phi}) = - \iiint_{\Omega} [E^T(\phi)[\varepsilon]E(\bar{\phi})]d\Omega \quad (21)$$

$$a^{e1}_{\Omega}(z, \bar{\phi}) = - \iiint_{\Omega} [S^T(z)[e]^T E(\bar{\phi})]d\Omega \quad (22)$$

$$a^{e2}_{\Omega}(\phi, \bar{z}) = - \iiint_{\Omega} [E^T(\phi)[e]S(\bar{z})]d\Omega \quad (23)$$

여기서 첨자 e 는 탄성효과를, d 는 유전효과를, c 는 연성효과를 나타낸다.

형상 설계 민감도

관성 에너지의 변분식은 다음과 같다.

$$d_{\Omega}(z, \bar{z}) = -\rho\omega^2 \iiint_{\Omega} [z^T \bar{z}]dV \quad (24)$$

형상 설계 속도장이 포함된 에너지 쌍일차형의 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [d_{\Omega}(z, \bar{z})]' &= -\rho\omega^2 \iiint_{\Omega} [(z - \nabla z^T V)^T \bar{z} + z^T (\bar{z} - \nabla \bar{z}^T V) \\ &\quad + \text{div}(z^T \bar{z} V)]dV \\ &= -\rho\omega^2 \iiint_{\Omega} [z^T \bar{z} - (\nabla z^T V)^T \bar{z} - z^T (\nabla \bar{z}^T V) \\ &\quad + \nabla^T(z^T \bar{z})V + z^T \bar{z} \text{div} V]dV \\ &= -\rho\omega^2 \iiint_{\Omega} [z^T \bar{z} + z^T \bar{z} \text{div} V]dV \end{aligned} \quad (25)$$

식 15 와 25 로부터 전체 에너지 미분은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\psi' = -[d(z, \bar{z})]' - [a_{\Omega}(z, \bar{z})]' \quad (26)$$

$$\begin{aligned} [a_{\Omega}(z, \bar{z})]' &= [a_{\Omega}^e(z, \bar{z})]' + [a_{\Omega}^d(z, \bar{z})]' \\ &\quad + [a_{\Omega}^{e1}(z, \bar{z})]' + [a_{\Omega}^{e2}(z, \bar{z})]' \end{aligned} \quad (27)$$

식 27 은 탄성, 유전, 압전 현상에 대해 형상 설계 속도장이 포함된 에너지 쌍일차형을 포함하고 있다.

4. 예 제

압전/구조/음향 연성계의 형상 설계 민감도의

타당성을 검증하기 위해 음향 cavity 모델을 사용하였다. 0.4 mm × 0.3 m × 0.3 m 의 얇은 알루미늄 평판이 가장자리가 고정되도록 0.3 m × 0.3 m × 0.75 m 의 음향 cavity 에 부착되어 유연한 면을 이루고 있다. cavity 의 나머지 다섯 면은 1.2cm 두께의 두꺼운 아크릴 판으로 구성하였다. 평판의 중심에 압전체를 부착하였다. 압전체의 크기는 0.05 m × 0.05 m × 0.003 m 이다. 모든 가장자리는 고정되었으며 조화가진력을 평판의 중심 노드에 작용하였다. 유한요소 모델과 물성치는 그림 3 과 표 1 에 보였다.

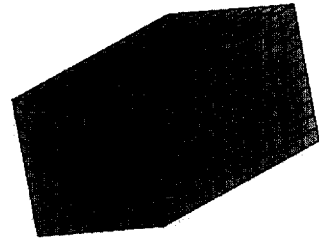


그림 3. An Acoustic Cavity Model

표 1. Problem Description

| | |
|------------------------------|--|
| •Dimension | |
| PZT | 0.05 m*0.05 m*0.003 m |
| Plate | 0.3 m*0.3 m*0.0004 m |
| •Material Properties | |
| Young's Modulus | E = 64 E9 [Pa] |
| Density | ρ = 7700 [kg/m ³] |
| Poisson Ratio | ν = 0.34 |
| Relative dielectric constant | 4700 |
| Piezoelectric constant | |
| d ₃₁ | =-300E-12 |
| d ₃₃ | =600E-12 |
| d ₁₅ | =550E-12 |
| • Problem | |
| Loading | : Harmonic concentrated force at center node |
| Performance | : Acoustic Pressure at the cavity center |

민감도 계수의 정확성을 검증하기 위해 cavity 중앙의 절점에서의 음압을 계산하였다. 정확한 유한차분법 계산을 위해 수렴도 시험을 수행하였으며 표 2-4 와 같이 연속 민감도 결과와 비교하였다. 유한 차분법 결과는 기존 계의 변위와 수정된 계의 응답과의 차이를 계산하였다.

최적화를 수행하기 전에 표준 설계 최적화 모델이 필요하다. Cavity 에 부착된 압전 액츄에이터의 형상을 최적화하기 위해서 목적함수를 최소화하는 2 차의 벡터 $x=[x_1 \ x_2]^T$ 를 구하는 것으로 표준 모델을 설정하였다. 설계 변수 x_1 은 x 축과 y

축으로의 변화를 의미하며 설계변수 x_2 는 z 방향으로의 변화를 의미한다.

목적함수 $F(x)$ 는 cavity 중앙 절점 위치에서 처음 세 고유진동수에서의 음압의 제곱의 합으로 하였으며, 제한조건은 다음과 같이 정하였다.

$$g_i(x) = (V(x)/V_0) / 1.2 - 1.0 \leq 0 \quad (28)$$

여기서 $V(x)$ 는 현재 설계의 부피이며 V_0 는 초기 설계의 부피이다. 초기 설계는 x_1 이 x, y 방향 길이의 절반인 0.025m 였으며 두께 x_2 는 0.003m 였다.

초기 부피는 $0.0000075m^3$ 였다. 최적화 결과는 그림 4-5 에 보였다.

최적화 과정은 11 연산 후에 종료하였고, 압전 액츄에이터의 부피가 늘어나고 목적함수는 감소하였다. 압전 패치의 최종 설계는 $0.025185 \times 0.025815 \times 0.0035474$ m 이다. 부피는 초기 부피보다 20% 증가하였으며 목적함수는 0.53%로 감소하였다.

표 2. Sensitivity Verification for a PZT patch mounted on a cavity (x direction)

| Perturbation δd | Original response $\psi(d)$ | Perturbed Response $\psi(d+\delta d)$ | FDM $\Delta\psi$ | Continuum ψ' | Accuracy $\psi'/\Delta\psi$ |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|
| 10% | | -2.3389E-01 | 1.9700E-01 | | 110.13% |
| 1% | -2.5359E-01 | -2.5138E-01 | 2.2100E-01 | 2.1696E-01 | 98.17% |
| 0.1% | | -2.5337E-01 | 2.2293E-01 | | 97.32% |

표 3. Sensitivity Verification for a PZT patch mounted on a cavity (y direction)

| Perturbation δd | Original response $\psi(d)$ | Perturbed Response $\psi(d+\delta d)$ | FDM $\Delta\psi$ | Continuum ψ' | Accuracy $\psi'/\Delta\psi$ |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|
| 10% | | -2.3307E-01 | 2.0520E-01 | | 105.22% |
| 1% | -2.5359E-01 | -2.5130E-01 | 2.2900E-01 | 2.1592E-01 | 94.29% |
| 0.1% | | -2.5336E-01 | 2.3029E-01 | | 93.76% |

표 4. Sensitivity Verification for a PZT patch mounted on a cavity (z direction)

| Perturbation δd | Original Response $\psi(d)$ | Perturbed Response $\psi(d+\delta d)$ | FDM $\Delta\psi$ | Continuum ψ' | Accuracy $\psi'/\Delta\psi$ |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|
| 10% | | -2.1934E-01 | 3.4250E-01 | | 111.02% |
| 1% | -2.5359E-01 | -2.4970E-01 | 3.8900E-01 | 3.8024E-01 | 97.75% |
| 0.1% | | -2.5319E-01 | 3.9845E-01 | | 95.43% |

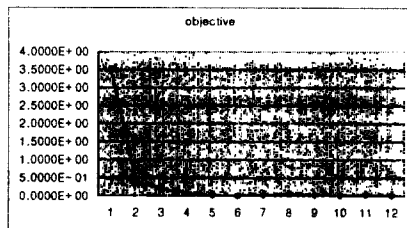


그림 4. History of Objective Function

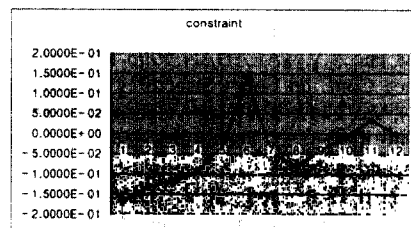


그림 5. History of Constraint

5. 결론

본 논문에서는 압전재료의 형상 설계 민감도

식이 유도되었으며 이 식은 유한요소법에 기반하여 수치적으로 계산되었다. 유한요소법은 해석적으로 풀 수 없는 복잡한 모델의 해석을 가능하게 하므로 유도된 식은 실제 장치에 적용될 수

있다.

계산된 형상 설계 민감도는 최적설계에 이용되었다. 순차 선형 프로그램(SLP) 알고리즘을 최적화 알고리즘으로 사용하였다. 유한 요소 해석, 민감도 해석, 최적화에 이르는 모든 과정을 자동화하기 위해 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

개발된 식과 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 압전-구조-음향 연성계에 대한 예제를 제시하였다. 연속체 방법으로 계산된 민감도 결과와 유한차분법으로 계산된 결과를 비교하였으며, 그 결과 계산된 연속 설계 민감도가 정확하다는 것을 알 수 있다.

후기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적설계 신기술 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] H. ALLIK and T.J.R. HUGHES 1970 Int. J. Num. Meth. Eng., 2, pp. 151-157, Finite Element Method for Piezoelectric Vibration
- [2] T. IGUSA, K. XU, P. WARNITCHAI AIAA-93-1660-CP, Optimal Locations and Gains of Sensors and Actuators for Feedback Control
- [3] L.R. CLARK and C.R. FULLER 1992 J. Acoust. Soc. Am., 92(3), pp. 1521-1533, Optimal Placement of Piezoelectric Actuators and Ployvinylidene Fluoride Error Sensors in Active Structural Acoustic Control Approaches.
- [4] B.T. WANG, R.A. BURDISSOA. and C.R. FULLER 1994 " J. Intell. Mat. Sys. Str. 5, pp.67-77, Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Structural Acoustic Control
- [5] V.V. VARADAN, J. KIM, and V.K. VARADAN 1995 J. of Acoust. Soc. Am., 97(5), Pt.2, 1pNS3, Optimal design of enclosures for active noise control and isolation
- [6] J. KIM and V.V. VARADAN 1995 Proc. of North America Conf. on Smart Structures and Materials (SPIE), Vol. 2442, San Diego, California, February, Optimal design of enclosures for active noise control and isolation
- [7] R.T. HAFTKA and R.V. GRANDHI 1986 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 57, No. 1, pp. 91-106 Structural Shape Optimization - A Survey
- [8] P. PEDERSEN, G. CHENG, and J. RASMUSSEN 1987 Technical University of Denmark, DCAMM, Rept. 367, On Accuracy Problems for Semi-analytical Sensitivity Analyses
- [9] K.K. CHOI and E.J. HAUG 1983 Journal of Structural Mechanics, Vol. 11, Feb., pp. 231-269,