

판 구조물의 소음 제어를 위한 압전가진기와 감지기의 최적 설계

°김재환*, 고범진**, 최승복*, 정재천*

Optimal Design of Disk Shaped Piezoelectric Actuator and Sensor for Noise Control of Plate Structure

°Jae-Hwan Kim*, Bum-Jin Ko**, Seung-Bok Choi*, Chae-Cheon Cheong*

ABSTRACT

Optimal design of disk shaped piezoelectric actuator and sensor mounted on the plate structure is studied for the control of noise radiated from the structure. The sensor signal is returned to the actuator through negative gain. Finite element modeling is used for the plate structure and the disk shaped piezoelectric sensor and actuator. The objective function is the total radiated sound power and the design variables are the locations and sizes of the piezoelectric actuator and sensor. The optimal design is performed at the resonance and the off resonance frequency and the results show good noise reduction.

1. 서론

자동차나 비행기 또는 건물 등의 구조물로부터 복사되는 소음은 생활환경을 저해하며 이를 개선하기 위한 연구가 많이 진행되어 왔다.

구조물의 소음제어에는 수동적인 방법과 능동적인 방법이 있다. 수동적인 방법이란 구조물의 재질이나 형상을 잘 설계해서 복사되는 소음을 줄이는 것으로서 제진재를 구조물 표면에 부착시키는 것이 한 예이다. 능동적인 방법은 구조물에 가진기를 부착시켜서 소음원이 되는 구조물의 진동에너지를 흡수하도록 하거나 이 에너지를 다른 곳으로 전달하는 방법이다. 구조물에 부착시키는 가진기로는 여러 가지 형태의 것들을 생각할 수 있지만 최근에는 압전소자를 구조물에 부착시켜서 구조 소음을 제어하는 연구가 활발하다[1, 2, 3].

압전소자는 전기를 가하면 변형이 발생하는 converse effect와 반대로 힘을 가하면 전기 신호를 발생시키는 direct effect의 압전효과를 가지고 있어서 여러 분야에 가진기와 감지기로 사용되어 왔다. 대표적인 재료로서는 압전 세라믹(piezo ceramics)인 PZT(lead zirconate titanate)과 압전폴리머 계통인 PVDF(polyvinylidene fluoride)가 있다. PZT는 압전효과가 우수하며 안정된 성질을 갖고 있어서 가진기에 많이 쓰이고 있다. 그리고 PVDF는 PZT가 취

성이 있는 것과는 달리 변형이 자유로우며 필름형상으로 만들어서 쉽게 부착시킬 수 있으나 압전효과가 PZT보다는 떨어지며 온도에 따라 성질이 변하는 단점이 있다. 따라서 PVDF는 감지기에 많이 이용되고 있다.

압전소자를 구조물에 부착시켜서 구조 소음을 제어하는 방식의 장점은 가진기와 감지기가 소형이고 경량이라서 구조물의 강도를 크게 변화시키지 않는 것과 적절한 제어기를 구조물에 같이 통합할 수 있다는 것이다. 이렇게 압전감지기, 가진기 그리고 제어기가 구조물에 통합되었을 때 주위의 변화에 상응하는 응답을 하는 지능구조물(Smart Structures)을 만들 수 있다. 바야흐로 이러한 지능구조물을 개발함으로써 구조 소음제어에 새로운 전기를 마련할 수 있을 것이다.

압전가진기와 감지기가 부착된 구조물을 통한 소음제어에 대한 연구는 이론과 실험적인 면으로 많이 있었다. 이론적인 접근은 주로 판구조물에 압전가진기나 감지기가 부착되었을 때 이것을 모델링하는 방법과 과연 얼마만한 크기의 압전소자를 어디에 붙여서 어떤 제어 알고리즘을 사용하는 것이 좋은가 하는 것에 대한 것이다. 실험적인 연구는 이론적인 연구의 결과나 경험적인 지식을 가지고 설계한 결과를 실제로 구현해 보고 검증해 보는 것이다.

본 연구는 압전가진기와 감지기가 붙은 판재로

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 대학원

부터 복사되는 소음을 줄이기 위한 이론적인 연구로서 압전감지기에서 얻어진 전기 신호는 적절한 부이득(negative gain)을 거쳐서 압전가진기에 인가된다(Fig. 1). 하중 조건은 평판의 밑에서 정해진 분포를 갖는 소음의 음압이 작용하는 것으로 본다. 이 음압분포는 실제로는 어떤 소음원을 판재를 써서 박스의 형태로 완전히 막았을 때의 음압 분포에 해당한다. 그러나 이 음압 분포는 박스가 탄성체이기 때문에 공간 내에 있는 매질과 탄성체인 판재를 연계해서 풀어야 완전하게 구해질 수 있다. 이 과정은 계산량이 많고 시간이 많이 걸리는 작업이다. 따라서 본 연구에서는 여러 형태의 분포를 갖는 음압 형태를 가정해서 이러한 소음의 음압 형태가 작용할 때 압전 지능구조물의 소음 감소를 연구함으로써 압전 지능 구조물의 설계 결과에 대한 유용성을 검토한다[3].

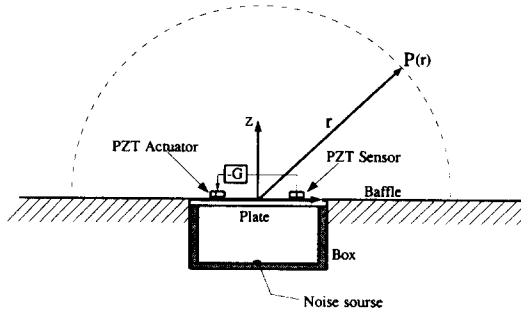


Fig. 1 Piezoelectric Smart Structure

압전소자가 부착된 판재의 모델링에는 여러 가지의 방식이 있다. 예를 들면 단순 굽힘 변형 모델[4], 대칭형의 박판 압전 쉘 모델[5], 등가 단일층 이론(equivalent single layer theory)이나 층이론(layerwise theory)을 사용한 모델[6, 7], 그리고 3차원-셸-천이요소의 결합을 이용한 유한요소법[8] 등이 있다. 이 들에 대한 장단점은 참고문헌 8, 9에 언급이 되어 있다. 기존 연구에 의하면 3차원-셸-천이요소의 결합을 이용한 유한요소법을 사용하여 압전지능형 판재구조물을 모델링했을 때 그 정확도가 실험에 의해 입증되었다[9]. 일반적으로 압전지능구조물은 소음제어에 있어서 판재의 구조물이 많이 쓰이고 여기에 압전소자를 한 면에 붙여서 많이 사용한다. 그리고 판재의 형태도 임의의 형상일 수 있다. 이러한 지능구조물의 모델링에는 유한요소법이 적합하다. 본 연구에서는 3차원-셸-천이요소의 조합을 이용한 유한요소법을 사용한다.

소음제어에 응용되는 압전 지능구조물의 설계는 여러 가지 인자가 복합적으로 작용하므로 간단하지 않다. 예를 들어, 압전감지기나 가진기를 사용할 때 어느 크기의 몇 개를 어느 곳에 부착시키는 것이 좋은가 하는 것을 결정하기란 그리 쉽지 않다. 왜냐하면 감지기의 신호는 적절한 제어기를 통하여 가진기에 전해지기 때문이다.

지금까지 보면 압전가진기를 사용했을 경우 소음을 저감시킬 수 있는 가능성을 보이고 어느 곳에 얼마만한 크기의 가진기를 붙이는 것이 좋은가에 대한 연구가 있었다[1, 3, 10, 11]. 여기서 제어기는 고려하지 않은 open loop 상태에서 압전가진기에 가해야 할 전압을 변수로 선택하였다. 감지기 역시 고려되지 않았고 소음의 신호는 알고 있는 것으로 가정하여 여기에 대하여 180°의 위상차를 두고 가진기를 작동시키는 것으로 하였다. 대체적인 결과는 소음의 가진 주파수가 구조물의 공진주파수와 같을 때에는 매우 큰 소음저감을 보이며 구조물의 공진주파수와 다를 때에는 압전가진기의 위치와 크기를 조절함으로써 팔목할 만한 소음저감을 보였다. 그러나 실제적인 시스템의 성능향상을 위해서는 감지기와 가진기 그리고 제어기가 동시에 고려되어 설계되어야 한다. 최근에 이러한 문제 즉, 제어기와 구조물의 통합된 설계(integrated design of structure and control system)에 대한 연구가 활발하다[12, 13, 14]. 이러한 통합된 설계 문제에 있어서 지금까지 대개는 간단한 구조물의 모델, 예를 들면 보 또는 평판에 판재보다 얇은 압전소자가 양쪽에 붙어서 순수 굽힘 모델같이 다루기 쉬운 모델이 많이 채택되었다. 이러한 모델은 실제의 경우와는 거리가 있으며 여러 가지 형상을 가질 수 있는 보통의 판재 구조물을 모델링하는 데에는 유한요소 모델을 사용하는 것이 유리하다. 원판형 압전가진기 및 감지기가 부착된 판구조물의 유한요소 모델로서 본 연구에서는 압전소자 및 그와 접한 판재는 압전소자용 3차원 요소를 사용하고 넓은 영역을 차지하는 판구조물은 쉘 요소를 이용하며 이 쉘 요소와 3차원 요소는 천이요소로서 연결시키는 방식을 채택한다.

Fig. 1은 원판형 압전감지기와 가진기가 부착된 판구조물을 나타낸다. 먼저 알루미늄 평판이 반무향면에 완전 고정되어 있고 판재의 아랫면에는 소음원으로부터 나오는 음압이 작용한다. 이 음압의

형태는 임의의 형태라고 가정하고 압전 지능구조물을 설계한 후 다른 형태의 음압을 적용시켜서 설계 결과의 유용성을 검증한다. 이 음압에 의해 판재가 진동을 하게 되고 이 때 부착된 압전 감지기는 판재의 진동을 감지하며 판재는 소음을 외부로 복사하게 된다. 감지기의 신호는 간단한 제어기인 부이득(negative gain)을 거쳐서 압전가진기에 전해지게 되고 이 가진기는 판재의 진동을 억제하게 되어 판재로부터 복사되는 소음을 줄이게 된다. 이 때에 압전가진기, 감지기 그리고 이득(gain)은 판재로부터 복사되는 에너지를 줄이도록 최적으로 설계되어야 한다.

따라서 최적 설계 과정에 있어서 목적 함수는 판재에서 복사되는 소음에너지이고 설계 변수는 제어기의 이득, 압전감지기와 가진기의 위치, 지름, 두께를 택하였다. 소음의 가진되는 주파수는 먼저 구조물의 공진주파수와 비공진 주파수를 택하였고 이 두 주파수에서 복사되는 소음에너지를 최소화하는 최적설계를 행하였다.

2. 모델링

2.1 유한요소모델

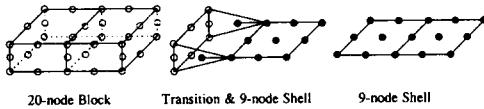


Fig. 2 3-D, Transition and shell elements

원판형 압전감지기와 가진기가 평판의 한 면에 부착된 구조물의 모델링을 위하여 유한요소중에서 Fig. 2와 같은 3차원요소, 셸요소 그리고 천이요소를 사용하였다. 20절점 3차원 요소는 압전소자와 그와 인접한 판재를 위해 쓰였고, 9절점 셸요소는 대부분의 판재 부분을 모델링하기 위해 쓰였으며 13절점 천이 요소는 이 두가지 요소를 연결하는데 사용되었다. 각 요소에 대한 유한요소식은 본 논문에서는 생략한다[8, 15, 16]. 3차원 요소는 압전소자를 모델링 하는데 쓰였는데 압전소자는 변위와 전기장이 연계되어 있어서 다음과 같은 유한요소식을 갖게 된다.

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{\phi u}^T & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} U \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 M 과 K_{uu} 는 질량과 강체 행렬이고 $K_{u\phi}$ 는

압전 행렬 그리고 $K_{\phi\phi}$ 는 유전 강성 행렬이다. U 는 변위 그리고 Φ 는 전기장을 나타내며 F 와 Q 는 절점에 작용하는 힘과 전하행렬을 의미한다. 위의 식을 적용함에 있어서 압전소자와 판재 구조물간에 구별이 없다. 왜냐하면, 판재를 나타내는 9절점 셸요소와 13절점 천이요소에는 $K_{u\phi}$ 와 $K_{\phi\phi}$ 가 없고 따라서 Φ 가 없으며 U 는 u_x, u_y, u_z 변위 뿐만 아니라 회전 성분인 θ_x, θ_y 가 있게 된다.

각 절점에 대해서 말하면 압전소자에 해당하는 절점은 u_x, u_y, u_z 의 변위와 ϕ 의 전기장의 자유도를 갖게 되고 일반적인 고체 요소부분은 u_x, u_y, u_z 의 변위만 있으며 셸요소 및 천이요소로 모델링된 판재부분은 u_x, u_y, u_z 및 θ_x, θ_y 의 회전성분이 존재하게 된다. 따라서 전체행렬은 기술적으로 전술한 각 절점의 자유도에 따라 구성된 포인터행렬에 의해서 다른 각 요소 행렬이 합쳐 짐으로써 이루어진다. 이렇게 구성된 포인터행렬을 이용함으로써 전체 행렬의 폭을 줄일 수 있었다[16].

감지기에서 받은 신호는 부이득을 거쳐서 다음과 같이 가진기에 전해진다.

$$\phi_{actuator} = -G\phi_{sensor} \quad (2)$$

여기서 G 는 이득값이다. 유한요소식에서 이 조건식은 $\phi_{actuator}$ 와 ϕ_{sensor} 의 포인터위치를 같게 잡아서 유한요소의 조합과정에서 처리하였다.

2.2 음압 하중

구조물에 작용하는 음압 분포를 정확하게 구하기란 그리 쉽지 않다. 따라서 같은 크기의 소음 에너지를 갖는 음압 형태를 가정하여 판구조물의 아래에 작용하는 것으로 하였다. 기존의 연구에서 사용했던 균일 분포, 랜덤 분포, 0차 Bessel 분포, 1차 Bessel 분포 그리고 음향학적으로 강체 상자 내부면에 발생하는 음압 분포 등을 본 연구에서도 이용하였다[3].

2.3 자동 요소 생성

원판형 압전 감지기와 가진기의 위치를 변화시키기 위해서는 유한요소를 자동적으로 생성하는 기능이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기초 연구에 의해 개발된 자동 요소 생성 프로그램을 사용하였다[16]. 이 프로그램은 압전소자와 그 근처를 요소틀(element template)을 사용하여 압전소자의 위치에 따라 이 틀을 움직여서 나머지 영역에서

자동적으로 격자를 생성하는 프로그램이다.

3. 최적설계

최적 설계 과정에서 목적함수는 판재에서 복사되는 전체에너지를 잡았다. 이 에너지는 판재로부터 r 거리만큼 떨어진 곳에서의 압력 $P(r)$ 을 Helmholtz 적분방정식에 의해 알 때[3] 다음과 같이 r 을 반지름으로 하는 반원구 상에서의 적분을 통하여 구할 수 있다.

$$W_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{|P(r)|^2}{2\rho c} r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (3)$$

여기서 ρ 는 음향매질의 밀도, c 는 음의 속도, θ 와 ϕ 는 구좌표계의 각도를 나타낸다. 원판형 압전가진기와 감지기가 부착된 판재의 복사소음을 줄이기 위해서는 여러가지 설계 변수가 고려될 수 있다. 예를 들면 압전가진기 및 감지기의 갯수, 위치, 크기, 그리고 단순한 부이득 제어기를 사용할 때 이득값 등이 해당된다. 본 연구에서는 원판형 압전가진기와 감지기를 각각 1개씩 사용하였고 설계 변수는 다음과 같이 택하였다.

- $b_1 = G$ (부이득)
- $b_2 = x_1$ (압전가진기의 x 좌표값)
- $b_3 = y_1$ (압전가진기의 y 좌표값)
- $b_4 = x_2$ (압전감지기의 x 좌표값)
- $b_5 = y_2$ (압전감지기의 y 좌표값)
- $b_6 = r_1$ (압전가진기의 반지름)
- $b_7 = r_2$ (압전감지기의 반지름)
- $b_8 = t_1$ (압전가진기의 두께)
- $b_9 = t_2$ (압전감지기의 두께)

제한조건식으로는 설계 변수의 상한 및 하한을 다음과 같이 제한하는 조건을 택하였다.

$$L_i \leq b_i \leq U_i, \quad i=1, \dots, 9 \quad (4)$$

여기서 b_i 는 i 번째 설계 변수이고 L_i 와 U_i 는 이 변수에 대한 하한 및 상한치이다. 또 다른 제한 조건으로는 압전 소자의 유한 요소를 포함하는 요소들끼리 서로 겹치지 않는 조건을 고려하였다.

이렇게 해서 전체 9개의 설계 변수와 20개의 제한조건식을 전체복사음 에너지의 목적함수를 최소화하는데 사용하였다. 해석 과정을 설명하면 먼저 주어진 음압하중 상태에서 가진주파수를 단일 주파수라고 가정하고 압전 감지기의 신호에 부이득을 곱한 값을 압전가진기에 인가했을 때의 평판의 거동을 전술한 유한요소법을 사용하여 구하였

다. 그래서 평판의 윗면의 수직방향 변위로부터 Helmholtz 적분식을 이용하여 $p(r)$ 을 구하고 이 값을 수식(3)에 대입하여 최적설계의 목적함수인 W_{tot} 를 구한다.

최적화 과정은 제한조건식을 제한조건이 없는 최적화문제로 순차적으로 푸는 SUMT(Sequentially Unconstrained Minimization Technique)을 사용하는 PCON프로그램을 사용하였다[17].

4. 결과

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 반무향 평면에 놓인 알루미늄 평판을 고려하였다. 판재의 크기는 30Cm×30Cm이고 두께는 0.8mm이고 네 변에서 완전구속되어 있는 것으로 보았다. 원판형 압전가진기와 감지기는 PZT-5의 재료를 사용하였다. 이 압전형구조물을 해석하기 위해 3차원 압전요소-셀 요소-천이요소를 복합적으로 사용한 유한요소법을 사용하였다. 판재에 작용하는 음압 하중은 2Pa의 음압이 일정하게 작용하는 것으로 간주하고 최적설계를 수행했으며 최적설계를 가지고 다른 하중조건을 시험하여 보았다.

먼저 판재의 4번째 공진주파수인 270Hz에서 최적설계를 수행하였다. 이 때에 각 설계변수의 한계는 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} 0 < b_1 < 150 \\ 50\text{mm} < b_2, b_3, b_4, b_5 < 250\text{mm} \\ 5\text{mm} < b_6, b_7 < 15\text{mm} \\ 0.5\text{mm} < b_8, b_9 < 1.5\text{mm} \end{aligned}$$

Table 1은 270Hz에서 최적설계를 수행한 결과이다.

압전가진기의 위치는 대각선 위치인 (100, 100)에서 (61.8, 124.7)로 움직였고 압전 감지기의 위치는(200, 200)에서 (243, 180)으로 움직였다. 이들의 위치는 대각선에서 중심으로 오면서 바깥쪽으로 나가는 경향을 보였는데 이는 모서리 부분이 음의 복사에 큰 영향을 미치는 사실을 감안할 때 타당

Table 1. Optimal design result at $f=270\text{Hz}$

	초기조건	최적설계결과
b_1 (G)	30	1.92
b_2 (x_1)	100mm	61.8mm
b_3 (y_1)	100mm	124.7mm
b_4 (x_2)	200mm	243.0mm
b_5 (y_2)	200mm	180.2mm
b_6 (r_1)	10mm	13.9mm
b_7 (r_2)	10mm	13.8mm
b_8 (t_1)	1mm	1.38mm
b_9 (t_2)	1mm	1.38mm
목적함수(dB)	35.06	15.45

하다고 생각된다. 원판형 압전가진기와 감지기의 크기는 커지는 경향을 나타냈다.

이렇게 해서 최적적으로 설계를 한 결과 약 20dB의 소음감소를 얻을 수 있었다. 이 결과는 종전에 두 개의 원판형 압전가진기를 최적적으로 설계했을 때 얻은 24dB보다 작은 값이다[18]. 그 이유는 여기서는 한 개의 원판형 가진기만을 사용했으므로 소음 감소가 적은 것은 당연하다. 앞으로 두 개의 압전가진기와 한 개의 감지기만을 사용했을 때를 연구해 볼 필요가 있다.

Fig. 3은 270Hz에서 초기조건 상태일 때 판재의 윗면에서의 수직 변위의 크기를 판재의 윗면에서의 수직 변위의 크기를 나타낸다. Fig. 4는 최적설계를 행한 결과에서 판재의 윗면에서의 수직 변위의 크기를 나타낸다.

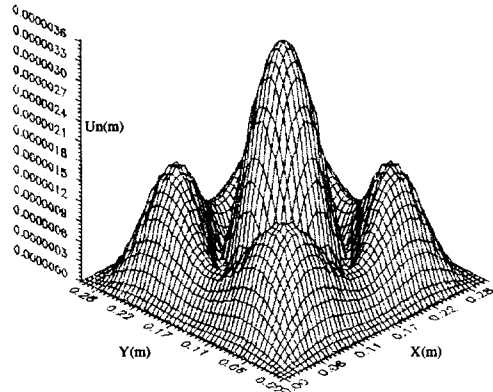


Fig. 3 Normal displacements at top of the plate : Initial, f=270Hz

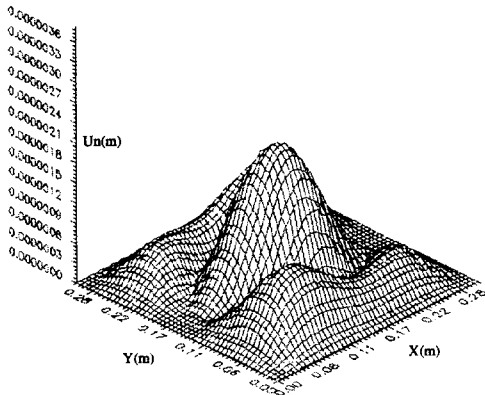


Fig. 4 Normal displacements at top of the plate : Optimal, f=270Hz

최적설계를 행할 때 음압하중은 일정한 형태로 가정을 하였다. 따라서 음압하중의 분포가 달라졌을 때 최적설계결과의 유용성을 보여야 한다.

Table 2는 이 결과를 나타낸다. 랜덤, Bessel 0차, Bessel 1차 그리고 음향학적으로 강제인 상자 내부에 소음원이 놓였을 때의 음압분포를 가했을 때의 소음감소를 구하였다. 각기 다른 음압분포를 구할 때 판재에 작용하는 음압의 에너지가 같게 놓고 각각의 음압분포를 구하였다.

Table 2. The effect of different loading at the optimal result

하중조건	복사소음에너지
A (constant)	15.45 dB
B (random)	13.01 dB
C (Bessel 0)	12.58 dB
D (Bessel 1)	15.25 dB
E (Hard Box)	14.67 dB

모든 음압하중 분포에서 최적설계 때 고려했던 일정음압분포의 결과와 비교하여 만족한 결과를 보였다.

비공진주파수에서 소음 감소의 가능성을 알아보기 위해 310Hz에서 최적설계를 수행하였다(Table 3). 일반적으로 비공진주파수에서의 복사 소음은 어느 특정한 고유 모드만이 아니라 여러 개의 고유 모드가 영향을 미치기 때문에 큰 소음저감을 얻기가 쉽지 않다. 최적설계의 결과에 의하면 약 3dB정도의 소음저감을 보였다. 원판형 압전가진기와 감지기는 모두 대각선의 위치에서 벗어나지 않고 모서리쪽으로 이동하였으며 원판의 크기 및 두께는 증가하였다. 판재의 대칭성을 고려하였을 때 두 개의 압전가진기를 사용한다면 효율적인 소음감소를 이룰 수 있을 것으로 보인다.

Table 3. Optimal design result at f=310Hz

	초기조건	최적설계결과
b_1 (G)	30	3.8
b_2 (x_1)	100mm	76.8mm
b_3 (y_1)	100mm	72.8mm
b_4 (x_2)	200mm	232.2mm
b_5 (y_2)	200mm	230.7mm
b_6 (r_1)	10mm	13.6mm
b_7 (r_2)	10mm	13.9mm
b_8 (t_1)	1mm	1.39mm
b_9 (t_2)	1mm	1.37mm
복사손실수(dB)	40.1	37.0

Fig. 5는 310Hz에서 초기조건일 때 판재의 윗면에서 발생하는 수직방향 변위의 크기를 나타낸 것이고 Fig. 6은 이 주파수에서 최적설계의 결과이다.

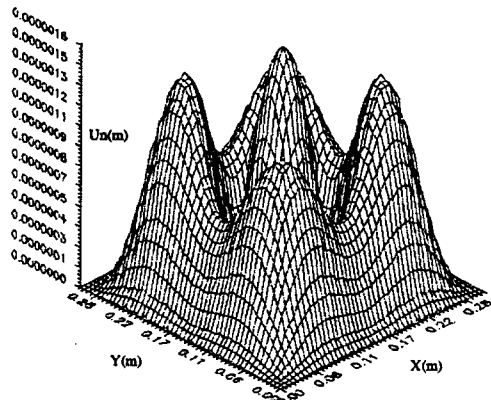


Fig. 5 Normal displacements at top of the plate : Initial, $f=310\text{Hz}$

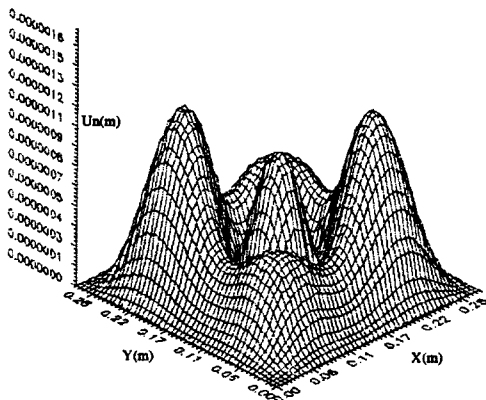


Fig. 6 Normal displacements at top of the plate : Optimal, $f=310\text{Hz}$

5. 결론

원판형 압전가진기와 감지기가 부착된 판구조물에서 복사되는 소음 저감을 위한 압전가진기 및 감지기의 최적설계를 행하였다. 구조물 및 가진기, 감지기는 유한요소법으로 모델링 하였고 소음 저감을 위한 최적의 감지기, 가진기 위치, 크기 그리고 이득을 구하였다. 최적설계결과 구조물의 공진주파수에서는 괄목할 만한 소음 저감을 보였으며 비공진주파수에서는 미약한 소음 감소를 얻었다. 비공진주파수에서는 여러 개의 가진기를 사용했을 때 큰 소음 저감을 얻을 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

(1) C. R. Fuller, C. A. Rogers and H. H. Robert

Shaw, "Control of Sound Radiation with Active/Adaptive Structure," *J. of Sound and Vib.*, Vol. 157, No. 1, pp. 19-39, 1992.

(2) V. V. Varadan, X. Bao and V. K. Varadan, "Smart wall paper for noise suppression," *Proc. of North America Conf. on Smart Structures and Materials (SPIE)*, Vol. 2443, San Diego, California USA, 1995.

(3) J. Kim, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "Finite Element-Optimization methods for the active control of radiated sound from a plate structure," *Smart Materials and Structures*, 1995, Vol. 4, No. 4, pp. 318-326.

(4) E. K. Dimitriadis, C. R. Fuller and C. A. Rogers, "Piezoelectric Actuators for Distributed Vibration Excitation of Thin Plates," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 113, pp.100-107, January, 1991.

(5) H. S. Tzou and J. P. Zhong, "Theory on hexagonal symmetrical piezoelectric thick shells applied to smart structures," *ASME Structural Vibration And Acoustics*, DE-Vol. 34, 7-15, 1991.

(6) J. N. Reddy and Jr. D. H. Robins, "Structural theories and computational models for composite laminates," *Applied Mechanics Reviews*, 47(6), Pt.1, 147-170, 1994.

(7) J. A. Michell and J. N. Reddy, "A Refined Hybrid Plate Theory for Composite Laminates with Piezoelectric Laminae," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 32, No. 16, pp. 2345-2367, 1995.

(8) J. Kim, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "Finite element modeling of structures including piezoelectric active devices," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 1996, to be appeared.

(9) J. Kim, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "Finite Element Modeling of Smart Cantilever Plate and Comparison with Experiments," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 2, pp. 165-170, 1996.

(10) B-T. Wang, R. A. Burdisso and C. R. Fuller, "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Structural Acoustic Control," *J. Intell. Mat. Sys. Str.* 5, 67-77, Jan. 1994.

(11) S. J. Kim and J. D. Jones, "Optimal Design of Piezoactuators for Noise and Vibration Control," *AIAA J.*, Vol. 29, No. 12, pp. 2047-2053, 1991.

(12) R. A. Cranfield and L. Meirovitch, "Integrated Structural Design and Vibration Suppression Using Independent Modal Space Control," *AIAA J.*, Vol. 32, No. 10, pp. 2053-2057, 1994.

(13) C. Nam, Y. Kim and T. A. Weisshaar, "Optimal Sizing and Placement of Piezo Actuators for Active Flutter Suppression," *North Am. Conf. on Smart Structures and Materials*, (SPIE), Vol. 2443, San Diego, California USA, February 1995.

(14) R. V. Grandhi, "Structural and Control Optimization of Space Structures," *Computers & Structures*, Vol. 31, No. 2, pp. 139-150, 1989.

(15) K. S. Surana, "Transition finite elements for three-dimensional stress analysis," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 15, pp. 991-1025, 1980.

(16) J. Kim "Modeling and Design of Piezoelectric Smart Structures," Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University, December, 1995.

(17) C. H. Suh and Charles W. Radcliffe, *Kinematics and Mechanisms Design*, John Wiley & Sons, 1978.

(18) 김재환, "복수 압전가진기의 최적설계를 통한 판구조물의 소음제어," 한국소음진동공학회 1996년도 춘계학술대회 논문집 pp. 263-270.