

평판 작동기의 최적화를 통한 평면 스피커 설계

김승조*, 황준석**

*서울대학교 항공우주공학과, **서울대학교 대학원 항공우주공학과

Flat Speaker Design by Optimization of Plane Actuator

Seung Jo Kim*, Joon-Seok Hwang**

* Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

**Graduate student, Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

*seungjok@plaza.snu.ac.kr, **jover@gong.snu.ac.kr

ABSTRACT

In this study, a design method using plane actuator is developed to make new speaker system, whose shape is much thinner than that of conventional loudspeaker. Piezofilm (PVDF) is used as plane actuator of flat speaker. To avoid the distortion of sound radiated from flat speaker, the frequency response of radiated sound to be flat is taken as the design objective. The electrode pattern and orientation angle of piezofilm actuator is optimized to satisfy the design objective. The formulation is based on the coupled finite element and boundary element method. Genetic algorithm is used in the optimization process, which is useful in the optimization of discrete design variables. Frequency response with optimized piezofilm actuator is made flat enough to satisfy the design objective. For the enhancement of sound power, double-layered piezofilm actuators are also considered. The sound power with double-layered actuator becomes larger than that with single-layered actuator as expected.

1. 서론

스피커는 큰 형태의 진동판의 왕복운동을 이용하여 소리를 발생시킨다. 일반적인 스피커의 경우는 moving-coil-driving unit 을 이용하여 진동판을 움직이게 한다. 그러나 이러한 기존의 음향발생법에 사용되는 driving unit 은 일정한 두께를 가지게 되므로 스피커 전체의 두께는 어느 정도 이상은 얇아지지 못한다.

최근 지능구조물 시스템의 발달로 인해 압전재료가 구조물의 진동, 소음제어의 분포형 감지기, 작동기의 재료로 많이 사용되고 있다. 압전재료중에서 압전필름(PVDF)은 유연성, 가공의 용이성 및 압전상수의 이방성 등으로 인해 분포형 감지기 또는 작동기의 재료로 많이 사용되고 있다.

압전필름을 이용한 최근의 연구[1]를 보면, 압전필름의 전극형상 및 적층각의 최적화를 통해 이차원 모달 변환기를 설계하고, 이를 이용한 지능구조물의 진동 제어에 관한 연구가 수행되었다. 모달변환기는 구조물의 진동제어 시 하드웨어의 한계 및 모델링의 오차를 고려하여 특정한 몇 개의 모드만을 제어할 경우에 발생하는 비제어 모드에 의한 진동제어 폐회로 시스템의 불안정, 즉 스피로버[2]를 방지하기 위해 도입되었다. 이와 같은 개념의 바탕은 압전필름의 전극형상 및 적층각의 최적화를 통해 구조물의 모달특성을 조절함으로써 설계목적에 맞는 구조제어 시스템을 설계할 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 기존에 제시된 압전필름 작동기의 전극형상과 적층각의 최적화를 통해 평판형 스피커의 설계기법을 제시하였다. 구조물과 음장을 연계한 해석을 위해 유한요소-경계요소에 바탕을 둔 수치해석 모델을 이용하여 정식화를 수행하였다. 평판형 스피커의 성능의 지표로서 관심주파수 영역에서의 주파수 응답함수에 공진 및 반공진이 나타나지 않도록 하였다. 작동기의 설계는 유전자 알고리즘[3]을 이용한 최적화를 통해 설계목적에 만족하도록 하는 방향으로 이루어졌다.

2. 평판 스피커의 설계 기준

스피커의 설계에 있어서 많은 경우 원하는 설계 목적에 맞는 주파수응답특성을 얻도록 이루어진다.[4] 음향은 구조물의 진동에 의한 공기 중의 압력의 변화로 발생되어진다.[5] 그러므로 구조물의 진동에 의한 음향, 즉 방사음향은 구조물의 진동 특성과 밀접한 연관이 있다. Fig. 1 에 구조물의 진동에 의해 방사되는 음향의 주파수응답특성을 나타내었다.

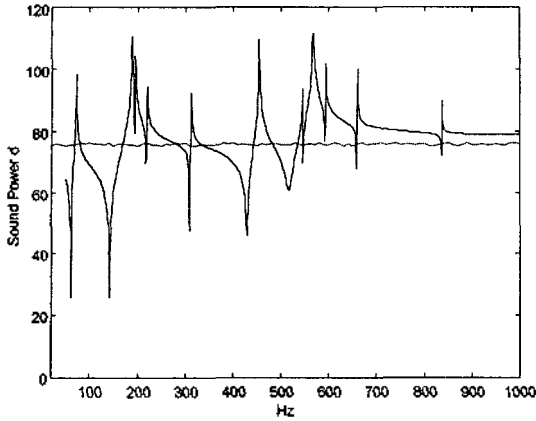


Fig.1 An example of frequency response of sound radiated from vibrating structures

Fig.1에서 알 수 있듯이 방사음향의 주파수특성에는 구조물의 공진, 또는 반공진에 의한 peak와 valley가 발생하고, 이는 방사음향의 음질을 떨어뜨리는 주요원인이다. 성능이 우수한 스피커는 넓은 주파수 영역에 걸쳐서 주파수응답함수가 평평한 형태로 나타난다.(Fig.1의 점선으로 표시) 그러므로 본 연구에서는 관심주파수 영역에서의 주파수응답함수가 평평해지도록 하는 것을 스피커의 설계기준으로 삼았다.

3. 수치해석 모델링

유한요소 모델링

스피커 진동판의 진동은 얇은 판의 진동으로 모델링할 수 있다. 압전작동기를 포함하는 평판의 유한요소 정식화를 수행하였다. 복합재료평판의 해석을 위해 고전적층판이론과 일차전단변형이론을 고려한 9절점 Reissner-Mindlin 판요소를 이용하였다. 각 절점당 3개의 변위와 2개의 회전각을 자유도로 고려하였다. 판 요소의 변위는 아래와 같이 절점($i=1\sim9$)에서의 자유도로 보 간된다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \mathbf{N} \left[\dots u_0^i \quad \phi_y^i \quad v_0^i \quad \phi_x^i \quad w_0 \quad \dots \right]^T = \mathbf{N} \mathbf{u} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{N} 과 \mathbf{u} 은 각각 변위 보간 행렬과 변위 벡터이다.

변형도는 아래와 같이 표현되며,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \mathbf{B}_I \mathbf{u}, \quad \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \mathbf{B}_S \mathbf{u} \quad (2)$$

위 식에서 \mathbf{B}_I , \mathbf{B}_S 은 각각 면내, 면외전단 변형도보간행렬이다.

각 유한요소의 관련 행렬을 조합하면 다음과 같은 질량행렬(\mathbf{M})과 강성행렬(\mathbf{K})을 얻는다.

$$\mathbf{M} = \sum \int_V \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \sum \left(\int_V \mathbf{B}_I^T \mathbf{D}_I \mathbf{B}_I dV + \kappa \int_V \mathbf{B}_S^T \mathbf{D}_S \mathbf{B}_S dV \right) \quad (4)$$

판구조물에 일체화된 압전작동기는 Fig.2의 예시처럼 4개의 영역으로 나뉘어진다.

각 전극 영역에 의한 작동력은 다음과 같이 얻어진다.

$$\mathbf{F}_{aj}^{(i)} = \int_{V_j} \frac{\mathbf{B}_I^T \mathbf{e}}{t_j} dV_j \quad (5)$$

하나의 유한요소에 작용하는 작동력은 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_a^{(i)} = \sum_j \mathbf{S}(i, j) \mathbf{F}_{aj}^{(i)} \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{S}(i, j)$ 는,

$$\mathbf{S}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } j\text{-th electrode segment is remained} \\ 0, & \text{if } j\text{-th electrode segment is removed} \end{cases}$$

\mathbf{S} 는 압전작동기의 전극형상으로 정의되고 본 연구에서의 설계변수이다.

이상의 식을 종합하여 압전작동기를 포함하는 복합재료 평판의 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F}_a \mathbf{V}_a \quad (7)$$

여기서 \mathbf{V}_a 는 압전작동기에 가해지는 전압이다.

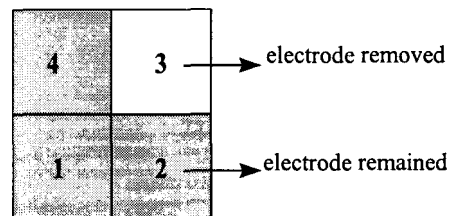


Fig. 2 An example of dividing the segments of the electrode in an element

음장 해석 모델링

평판 구조물의 진동에 의한 주파수 영역에서의 음압은 다음과 같은 방정식 및 경계조건을 만족하는 포텐셜

함수를 도입함으로써 구할 수 있다.[6]

$$[\nabla^2 - k^2]\varphi(x, y, z, \omega) = 0 \quad (8)$$

경계조건 :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \begin{cases} (-i\omega) w(x, y, \omega), & x \in A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

여기서 A 는 평판의 넓이, k 는 파수이다.
 φ 는 그런 함수를 이용하여 구할 수 있다.

$$\varphi(x, y, z, \omega) = \int_A G(x, y, z|x', y', 0)(-i\omega)w(x', y', \omega)dx' dy' \quad (10)$$

위 식에서 G 는 다음과 같이 표현된다.

$$G(x, y, z|x', y', 0) = -\frac{e^{i\omega R}}{2\pi R} \quad (11)$$

여기서 , $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$

방사음압은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p(x, y, z, \omega) = i\omega\rho\varphi(x, y, z, \omega) \quad (12)$$

ρ 는 공기의 밀도이며, p 는 주파수영역에서 표현되는 음압이다.

식(12)와 식(9)를 경계요소법을 이용하여 이산화하면 다음과 같은 행렬방정식을 얻는다.

$$\mathbf{p} = \mathbf{G} \mathbf{v}_n \quad (13)$$

\mathbf{p} 와 \mathbf{v}_n 는 각각 절점에서의 음압과 수직 방향속도이다. 경계요소 이산화에는 4 절점 사각형요소를 이용하였다.

음향파워

방사음향의 주파수응답을 구하기 위해 음향파워를 계산한다. 방사음향의 음향파워는 다음의 식으로 표현된다.[7]

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_A \text{Re}[p^* v_n] dA \quad (14)$$

여기서 * 는 켈레복소수를 의미한다.

4. 최적화 과정

모달좌표변환

전술한 바와 같이 방사음향의 주파수 특성은 구조물의 진동특성과 밀접한 연관이 있다. 그러므로 모달좌표계로 변환된 식을 이용하는 것이 효과적이다. 모달좌표계로 변환된 구조물의 진동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{A}\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{F}_s \mathbf{V}_s \quad (15)$$

여기서 \mathbf{u} 는 $\mathbf{u} = \mathbf{\Phi}\boldsymbol{\eta}$ 를 만족하는 모달좌표, $\mathbf{\Phi}$ 는 M-정규화된 고유벡터행렬이고, \mathbf{A} 는 고유치로 이루어진 대각행렬이다.

식(15)에서 $\mathbf{\Phi}^T \mathbf{F}_s$ 는 단위전압당의 모달작동력으로 정의되는 양으로서, 전체 작동력 \mathbf{F}_s 의 각 모드에 대한 기여도로 해석할 수 있다. 그러므로 모달작동력을 조절함으로써 방사음향의 주파수특성을 제어할 수 있다.

압전작동기의 설계

압전작동기의 설계최적화 과정은 모달작동력($\mathbf{\Phi}^T \mathbf{F}_s$) 을 최적화하는 과정으로 설명할 수 있다. 즉, 원치않는 peak 에 해당되는 진동모드인 불필요모드의 모달작동력을 최소화한다. 최적화에 이용된 성능지수는 다음과 같다.

$$\text{Maximize: } J = \min(\|\mathbf{\Phi}_w^T \mathbf{F}_s\|) - \max(\|\mathbf{\Phi}_v^T \mathbf{F}_s\|) \quad (16)$$

여기서 $\mathbf{\Phi}_w^T, \mathbf{\Phi}_v^T$ 는 각각 필요모드와 불필요모드의 고유벡터 행렬이다. 필요모드는 성능향상에 도움이 되는 모드를 고려하기 위해 도입되었다.

전술한 바와 같이 압전작동기의 설계는 전극형상 $S(i,j)$ 를 결정하는 이산화된 문제이므로 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하였다. 전극형상은 가로,세로 방향으로 12 개씩 총 144 개의 영역으로 나누어지고 적층각은 5 자리 이진수로 이산화하였다. 그러므로 설계에 사용된 설계변수의 갯수는 한장의 압전작동기에 대해 149 개이다. 아래, 위에 부착된 압전작동기는 동일한 설계형상을 이용하고, 분극방향만 반대로 하여 급험저동이 잘 일어나도록 하였다.

5. 설계결과 및 수치해석

단순 지지된 20×20cm [0₂] Graphite/Epoxy 복합재료 평판에 압전필름작동기를 위와 아래에 각각 한장씩 붙여서 진동판을 구성하였다. (Fig. 3 참조)

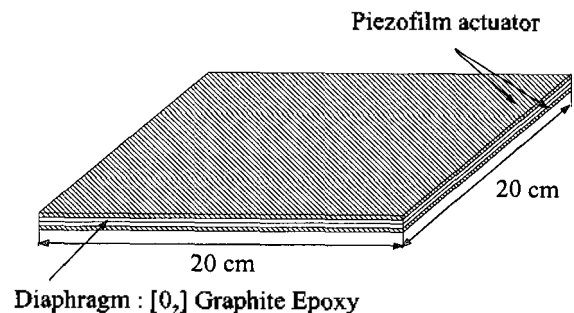


Fig. 3 The configuration of flat speaker

해석에 사용된 복합재료와 압전필름(PVDF)[8]의 물성치를 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다.

Table 1 Material properties of Graphite/Epoxy

E_1 (Gpa)	122.5
E_2 (Gpa)	7.929
G_{12} (Gpa)	0.329
ν_{12}	3.585
ρ (kg/m ³)	1600
thickness (m)	0.125×10^{-3}

Table 2 Material Properties of piezofilm (PVDF)[8]

E (Gpa)	3.0
G (Gpa)	1.128
ν	0.33
ρ (kg/m ³)	1780
thickness (m)	52×10^{-6}
d_{31} ((m/m)/(V/m))	2.3×10^{-11}
d_{32} ((m/m)/(V/m))	3×10^{-12}

압전작동기에 가해지는 전압은 ± 400 로 정하였다. 주파수 해석을 수행하는 관심주파수 영역은 저음역 영역인 20~200Hz 으로 설정하였다.

필요모드와 불필요모드의 선정

진동해석의 경우는 상대적으로 많은 진동 에너지를 가지는 몇몇 저차모드만 고려하는 것이 일반적이다. 하지만 진동에 의한 방사음향에 관한 해석의 경우, 진동 에너지가 많은 모드의 음향방사 특성이 항상 좋은 것은 아니다.[9] Fig. 4.에 전영역의 전극이 유효한($S(i,j)=1$) 압전작동기에 의한 방사음향의 주파수특성을 나타내었다. Table 3 에 진동판의 고유진동수를 나타내었다. Fig. 4 와 Table 3 을 비교해보면, 진동모드의 1,3,9,10 차 모드에 해당하는 영역에서 peak 가 생기므로 방사특성이 다른 모드에 비해 좋은 것을 알 수 있다. 그러므로 방사음향의 특성에 대한 해석에서는 이와 같이 방사특성이 좋은 모드를 고려해야 한다.

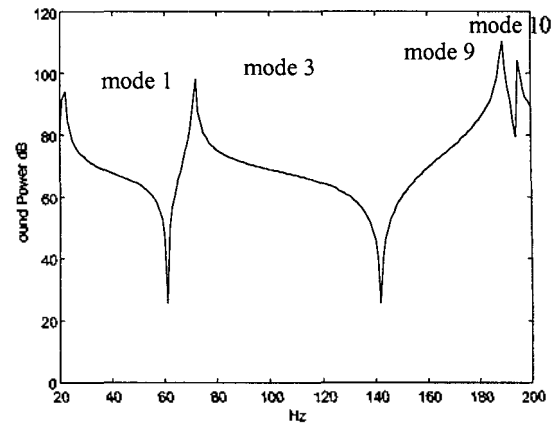


Fig. 4 Frequency response in the case of the piezofilm actuator with fully covered electrode

Table 3 Natural frequency of flat speaker

Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)
<u>1</u>	<u>24.1</u>	6	123.3
2	41.5	7	123.7
<u>3</u>	<u>74.7</u>	8	164.4
4	88.9	<u>9</u>	<u>186.8</u>
5	99.7	<u>10</u>	<u>196.3</u>

압전작동기의 설계 결과

우선, 1 차 모드를 필요모드로, 3 차 모드를 불필요모드로 선정하여 설계최적화를 수행하였다. 1 차 모드를 필요모드로 선정한 이유는 1 차모드의 모드 형상이 음향방사에 최적인 형상이므로 불필요모드로 선정할 경우 전체 음향파워 크기에 영향을 미치기 때문이다. 최적화 과정을 통해 설계된 압전작동기의 전극형상과 방사음향의 주파수 특성을 각각 Fig. 5 와 Fig. 6 에 나타내었다.

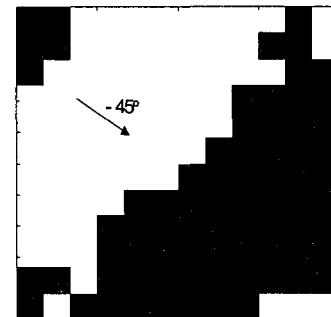


Fig. 5 The designed electrode pattern of piezofilm actuator (mode 1 wanted, mode 3 unwanted)

Fig. 6 과 Fig. 4 를 비교해보면, 3 차 모드에 해당되는 peak 가 거의 없어졌음을 알 수 있다. 그러나 6 차 와 8 차에 해당되는 모드의 영향이 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 전 영역이 유효한 압전작동기는 6 차, 8 차 모드를 제대로 가진할 수 없었으나 Fig. 5 과 같이 설계된 압전작동기는 6 차, 8 차 모드들을 가진하게 되고 이러한 불필요한 모드에 의해 음향이 방사되는 것이다.

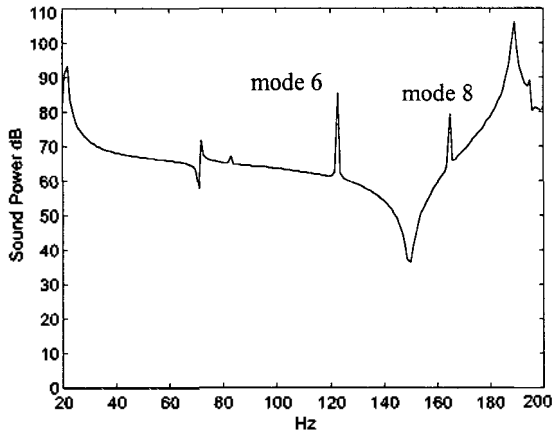


Fig. 6 Frequency response by the designed piezofilm actuator (mode 1 wanted, mode 3 unwanted)

그러므로 1 차 모드를 필요모드로, 3,6,8,9,10 차 모드를 불필요모드로 하는 최적설계를 수행하였다. Fig. 7 과 Fig. 8 에 설계된 압전작동기의 전극형상과 방사음향의 주파수특성을 나타내었다. Fig. 8 에서 보듯이 주파수 특성이 설계기준을 만족함을 알 수 있다.

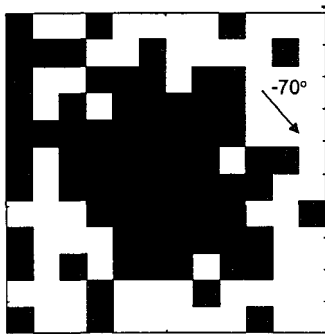


Fig. 7 The optimal electrode pattern of piezofilm actuator (mode 1 wanted, mode 3,6,8,9,10 unwanted)

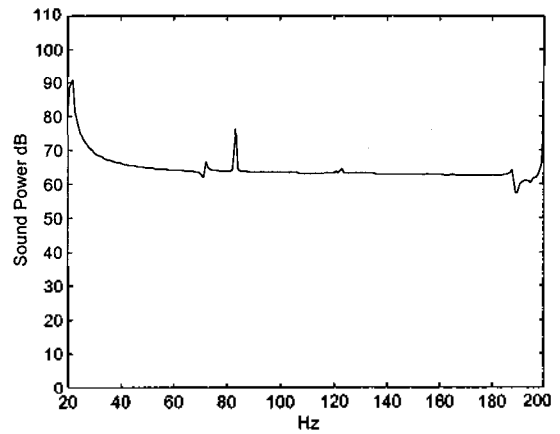


Fig. 8 Frequency response by the optimal piezofilm actuator (mode 1 wanted, mode 3,6,8,9,10 unwanted)

큰 음향파워를 얻기 위해 아래, 윗면의 압전필름을 각각 두 장씩 사용하는 이중압전작동기를 이용한 설계를 수행하였다. Fig. 9 에 압전작동기의 전영역이 유효전극인 경우에 대한 음향파워의 주파수 특성을 나타내었다. Fig. 9 로부터 이중압전작동기를 이용하는 경우에는 1 차 모드를 필요모드로, 3 차와 8 차 모드를 불필요모드로 선정한 설계 최적화를 수행하였다. 최적화 수행의 결과로서 Fig. 10 과 Fig. 11 에 설계된 압전작동기에 의한 주파수특성과 전극형상을 각각 나타내었다. Fig. 10 에서 보듯이 이중압전작동기의 결과는 단층압전작동기와 비교하여 약 6dB 의 음향파워 증가를 얻었다.

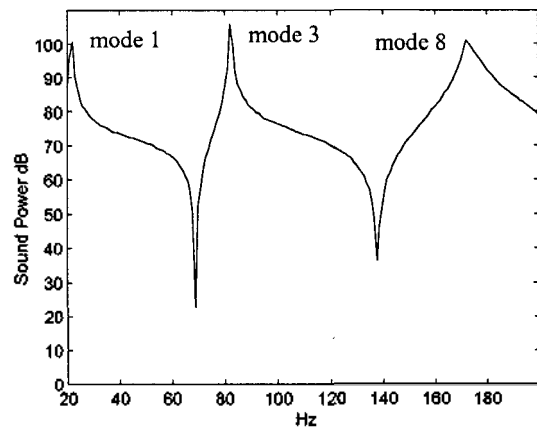


Fig. 9 Frequency response in the case of double-layered piezofilm actuator with fully covered electrode

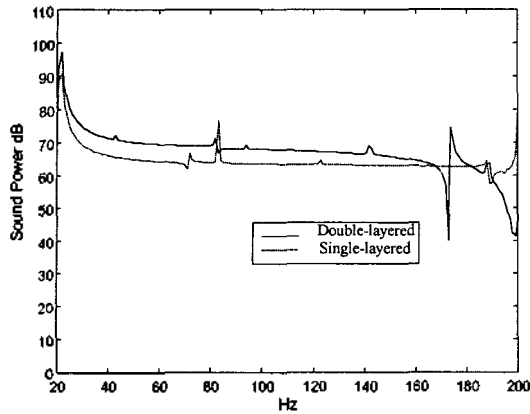


Fig. 10 Comparison of the single-layered piezofilm actuator and double-layered piezofilm actuator

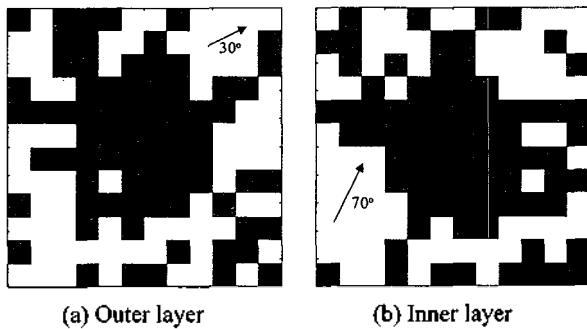


Fig. 11 The optimal electrode pattern of double-layered piezofilm actuator

6. 결론

본 연구에서는 평판 작동기를 이용한 평면형 스피커의 설계에 관한 연구를 수행하였다. 평판 작동기는 압전필름(PVDF)을 사용하였다. 구조-음향 연계시스템의 해석을 위해서 유한요소법과 경계요소법을 이용한 정식화를 수행하였다. 방사음향의 왜곡을 없애기 위해 주파수 응답이 평평해지도록 설계기준을 선정하였다. 압전필름의 전극형상과 적층각을 설계변수로 하여 유전자 알고리즘에 의한 최적화를 수행하였다. 설계된 평면형 스피커에 대한 수치해석 결과 설계기준에 부합하는 성능을 얻었다. 단층압전작동기의 특성을 개선하기 위해 이중압전작동기를 이용한 최적설계를 수행하였고 증가된 음향파워를 얻었다.

참고 문헌

- [1] Ryou, J. K., Park, K. Y. and Kim, S. J., "Electrode Pattern Design of Piezoelectric Sensors and Actuators using Genetic Algorithm," *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 2, 1998, pp. 227-233.
- [2] Balas, M. J., "Feedback control of flexible systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-23, no. 4, 1978, pp. 673-679
- [3] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithm in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989
- [4] Eargle, J. M., *Loudspeaker Handbook*, Chapman & Hall, 1997
- [5] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, 1982
- [6] Wu, S. F., and Maestrello, L., "Responses of Finite Baffled Plate to Turbulent Flow Excitations", *AIAA Journal*, Vol.33, No.1, 1995, pp 13-19
- [7] Kim, S. J., and Yoon, K. W., "Active Control of Sound Fields from a Composite Plate Using the Anisotropy and Shape of Distributed PVDF Actuators," *Journal of Sound & Vibration*, Vol.202, No.4, 1997, pp 461-476
- [8] Kynar Piezo Film Technical Manual, Pennwalt Corp., 1987
- [9] Fay, F., *Sound and Structural Vibration : Radiation, Transmission and Response*, Academic Press, 1985