

# Piezofilm 을 이용한 저주파 평면 스피커의 설계

황준석\* · 이성\* · 김승조\*\*

## Design of Low Frequency Flat Speaker by Piezofilm

Joon-Seok Hwang, Sung Lee and Seung Jo Kim

KEY WORDS : Flat speaker, Piezofilm, Boundary element method, Finite element method, Genetic algorithm

### ABSTRACT

In this study, experimental verification of performance of flat speaker has been conducted. The piezofilm (PVDF) actuator has been designed to prevent the distortion of sound and make the frequency response of radiated sound flat. The electrode pattern of piezofilm actuator is optimized to satisfy the design objective. The formulation of design method is based on the coupled finite element and boundary element method and electrode pattern is optimized by genetic algorithm. The flat speaker with optimized piezofilm actuator has been manufactured. The sound pressure level at the distance of 50cm is measured using microphone and compared with the result of numerical simulation.

### 1. 서 론

음은 진동매체가 귀에 주는 자극에 의하여 생기는 감각이다. 음(Sound) 또는 음파(Sound Wave)란 음원(source)에서 발생한 진동이 공기압의 주기적인 변화를 일으켜서 조밀파의 형태로 전파(Propagation, 傳播) 되는 현상을 말한다. 음원은 고체에 대한 기계적 충격일 수도 있고 공기를 진동케 하는 기압일 수도 있다. 인간이 경험하는 전달 매체는 보통 공기이며, 이를 공기 전달음(Airborne Sound)이라고 한다. 음을 발생시키는 장치 중의 하나가 스피커이다.

일반적인 스피커의 음향 발생 과정은 콘 형태의 진동판을 피스톤 운동으로 진동시켜 음을 생성한다. 이와 같은 음향 발생 방법은 스피커의 두께를 얇게 하는데 한계가 있다. 만약 이러한 음향 발생 방법을 변화시킬 수 있다면 스피커의 두께를 더 얇게 할 수 있을 것이다.

최근의 다양한 신소재의 개발은 구조물의 소음과 진동제어 분야에서 많은 발전을 가능하게 했다. 이런 물질들 중에 Piezofilm(PVDF)은 유연하며, 얇은 종이 형태로 제작할 수 있어 복잡한 형상의 구조물에 쉽게 부착하여 이용할 수 있다는 장점 때문에 지능 구조물 시스템에서 작동기와 감지기로서 널리 사용되고 있다.

최근의 연구에서 PVDF의 각도와 전극 형태의 최적화를 통한 2차원의 modal transducer를 이용하여 능동 진동 제어를 위한 지능 구조물시스템에서 감지와 작동기의 설계 방법이 제안되었고<sup>1</sup> 이를 응용한 스피커 설계 개념이 제안되었다<sup>2</sup>.

본 연구에서는 저주파 평면 스피커를 설계하고 실험을 통해 스피커의 성능을 검증하였다. 유전자 알고리즘을 사용하여 PVDF 전극 형상을 최적화하였고 유한요소법과 경계요소법을 연계한 수치 모델을 이용하여 음압을 계산하였다. 스피커의 성능 검증을 위해 50cm의 거리에서 음압을 측정하여 수치적 계산과 비교해 보았다.

\* 서울대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 서울대학교 항공우주공학과

## 2. 수치적 모델링

### 유한요소 정식화

압전 재료를 포함하는 평판 구조물의 해석을 위해 유한 요소법을 사용하였다. 사용된 요소는 1차 전단 변형 이론(first order shear deformation theory)<sup>3</sup>을 사용한 9 절점 Mindlin 판 요소이며, 한 절점에 5 개의 자유도 ( $u, \varphi_x, v, \varphi_y, w$ ) 를 갖는다. 이산화된 전체 시스템의 운동방정식은 아래식과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}_a \mathbf{V}_a \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{M}$ 은 전체 질량 행렬,  $\mathbf{K}$ 는 전체 강성 행렬,  $\mathbf{F}_a$ 는 단위 전압당 압전 작동력 행렬,  $\mathbf{V}_a$ 는 입력 전압, 그리고  $\mathbf{u}$ 는 각 절점에서의 변위를 의미한다.  $\mathbf{F}_a$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{F}_{aj}^{(i)} = \int_{V_j} \frac{\mathbf{B}_i^T \mathbf{e}}{t_j} dV_j \quad (2.a)$$

$$\mathbf{F}_a^{(i)} = \sum_j \mathbf{S}(i, j) \mathbf{F}_{aj}^{(i)} \quad (2.b)$$

여기서  $\mathbf{B}_i$ 는 면내 변형도 보간 행렬이고  $\mathbf{e}$ 는 압전 상수 벡터이다.  $\mathbf{S}(i, j)$ 는  $i$ 번째 요소의  $j$ 번째의 전극패턴을 나타낸 것으로 해당 요소에서의 전극의 유/무로 표현되는데, 전극이 있는 부분만이 압전 효과를 낼 수 있다. 유효 전극인 경우에는 1이고 무효 전극일 때는 0으로 나타나는 이진벡터로 본 연구에서의 설계변수가 된다. 본 연구에서는 한 요소당 4개의 전극부위로 나누었다.

### 음장의 지배방정식

평판 구조물에서 주파수 영역에서의 음압(acoustic pressure)은 다음과 같은 방정식 및 경계조건을 만족하는 포텐셜 함수<sup>4</sup>를 도입함으로써 구할 수 있다.

$$[\nabla^2 + k^2]\varphi(x, y, z, \omega) = 0 \quad (3)$$

경계조건은

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \begin{cases} (-i\omega)w(x, y, \omega), & x \in A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

위의 식에서  $A$ 는 평판의 넓이,  $k$ 는 파수(wavenumber,  $\omega/c$ ),  $w$ 는 평판의 변위를 의미한다. 포텐셜 함수는 그린 함수(Green function)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\varphi(x, y, z, \omega) = \int_A G(-i\omega)w(x', y', \omega)dx'dy' \quad (5)$$

$$G(x, y, z | x', y', 0) = \frac{e^{-ikR}}{2\pi R} \quad (6)$$

여기서  $(x, y, z)$ 는 관측점의 위치이고,

$(x', y', 0)$ 는 가진점의 위치이며  $R$ 은 관측점과 가진점 사이의 거리를 나타낸다. 식(5)와 식(6)을 이용하여  $\varphi$ 를 구하면, 다음 관계식으로 음압을 계산할 수 있다.

$$p(x, y, z, \omega) = i\omega\rho\varphi(x, y, z, \omega) \quad (7)$$

식(7)에서  $\rho$ 는 공기의 밀도이며,  $p$ 는 주파수 영역에서 정의되는 음압이다.

### 경계 요소법의 적용

식(5)를 식(7)에 대입하여 경계 요소법을 적용 후 이산화하면 다음과 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{P} = \mathbf{G}\mathbf{w}_n \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{P}$ 와  $\mathbf{w}_n$ 은 각각 절점에서의 음압 및 수직 방향 변위 벡터이며,  $\mathbf{G}$ 는 음장과 구조물의 거동간의 연성관계를 나타내는 행렬이다. 사용된 경계 요소는 4 절점 사각형 요소이며, 행렬  $\mathbf{G}$ 의 대각 성분을 계산할 때 나타나는 특이 적분(singular integration)은 사각형 요소를 두 개의 삼각형 요소로 나누어 적분함<sup>5</sup>으로써 해결하였다.

### Piezofilm의 전극 형상 최적화

진동하는 구조물로부터 방사되는 음은 구조물의 모달 특성과 관계가 있다. 운동 방정식을 모달 방정식으로 변환하기 위해서 모달 좌표계를 도입하였다.

$$\mathbf{u} = \Phi\boldsymbol{\eta} \quad (9)$$

위의 식에서  $\Phi$ 은 고유벡터로 이루어진 모달 행렬,  $\boldsymbol{\eta}$ 는 모달 좌표계로 이루어진 벡터이다.  $\Phi$ 는 다음과 같이 정규화시킨다.

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi = \mathbf{I}, \quad \Phi^T \mathbf{K} \Phi = \Lambda \quad (10)$$

변환된 전체 시스템 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \Lambda\boldsymbol{\eta} = \Phi^T \mathbf{F}_a \mathbf{V}_a \quad (11)$$

위의 식에서  $\Phi^T \mathbf{F}_a$ 는 단위 전압당 모달 작동력으로 정의되며, 작동기의 설계를 위한 성능지수에 이용된다.

관심있는 영역에서 주파수 응답이 평활하게 나오게 하기 위해서 원하지 않는 모드는 억제되어야 한다. 따라서 원하지 않는 모드의 모달 작동력은 작아져야 한다. 모달 작동력을 이용한 형상 최적화의 성능지수는 다음과 같다.

$$\mathbf{J} = \min(|\Phi_w^T \mathbf{F}_a|) - \max(|\Phi_v^T \mathbf{F}_a|) \quad (12)$$

식(12)의 성능지수를 최대화하는 방향으로 최적화가 수행된다.  $\Phi_w^T, \Phi_v^T$ 는 각각 원하는 모드와 원하지 않는 모드의 고유벡터의 행렬이다. 최적화의 방법으로는 유전자 알고리즘<sup>6</sup>을 사용하였다. Piezofilm 작동기의 전극 조각은

(12×12=)144의 조각으로 구성되어 있다.

### 3. 스피커 설계 및 실험

#### 설계 결과 및 수치 해석

본 연구에서는 가로,세로의 길이가 15cm인 정사각형이며 단순지지 경계 조건을 가진  $[0_2]$ 의 Graphite/epoxy를 진동판으로 사용하였다. 가해진 전압은  $\pm 100V$ 이고 100~300Hz 사이의 주파수 응답을 계산하고 실험을 통해 검증하였다.

Fig 2.는 Piezofilm 작동기의 모든 전극이 유효 전극일 경우, 평면 스피커에서 각 주파수마다 발생하는 음향 파워를 나타낸 것이다. 20~350Hz 사이에 1,4,8,9 번 진동 모드에 의한 peak가 이루어졌다. 100에서 300Hz 사이에 4번 진동모드에 의한 음향파워가 peak이므로 1번 모드를 원하는 모드로, 4번 모드를 원하지 않는 모드로 선정하였다. Fig 3.은 첫번째 설계에 대한 주파수 응답이다. Fig 3.을 보면 4번 모드가 억제 되었으나 처음에 나타나지 않았던 6번 진동 모드에 의한 peak가 나타난다. 따라서 두 번째 설계는 4,6번 모드를 원하지 않는 모드로 설계 하였다. Fig 4.를 보면 245Hz 부근에서 valley가 생겼다. 이것은 해석 영역 바깥에 있는 peak와 해석 영역 안의 상관관계 때문에 나타나는 현상이므로 세번째 설계는 4,6,8,9번 모드를 원하지 않는 모드로 하였다. Fig 6.을 보면 관심있는 영역에서 주파수 응답이 뒝볼 수 있다. 따라서 세번째 설계가 최적화된 설계이고 Fig 5.은 최적화된 PVDF의 전극 형상이다.

#### 실험

최적화된 Piezofilm 작동기를 이용한 평면 스피커를 제작하였다. Fig 5.에 보이는 흰색 부분은 전극을 제거한 곳으로 화학적인 에칭 과정을 통해 최적화된 전극 형상을 만들었다. Piezofilm 작동기는 에폭시 접착제를 사용하여 복합재료 진동판에 부착하였다. 전체 실험장치 구성도는 Fig 7.과 같다. 전압 신호는 Sine sweep을 사용하였고 전압은 게인이 100V/V인 전압 증폭기를 사용하여 작동기에 공급하였다. 음압은 마이크로폰을 사용하여 스피커의 50cm 위에서 측정하였다. Fig 8.은 측정된 음압과 계산된 음압이다. 200~300Hz 사이에서 측정된 음압은 약 35~45dB이다.

### 4. 결론

본 연구에서는 작동기의 전극형상 최적화를 이용한 저주파 평면 스피커를 설계하고 실험을 수행

하였다. 작동기로는 Piezofilm을, 진동판으로는 복합재료를 이용하였다. 9절점 Mindlin 판 요소를 이용한 유한 요소법과 경계요소법을 연계하여 음압을 계산하였고 유전자 알고리즘을 통해 이산화된 전극 형상을 최적화하였다.

검증을 위해 스피커를 제작하였으며 스피커의 50cm 상단에서 음압을 측정하여 수치적 계산 결과의 값과 비교해 보았다. 계측 결과, 음압은 200~300Hz 사이에 35~45dB 정도가 나왔다. 아직 음압의 값이 상업적 스피커에 비교할 만큼 크지는 않다. 따라서 음압을 증가시키기 위해 복합재료의 적층 방법과 형태에 대한 연구와 Piezofilm 작동기를 여러장 적층했을 경우 등에 대한 다양한 연구가 필요하다.

### 후 기

본 연구는 교육부 기계분야 BK21 사업에 의해 지원되었습니다.

### 참고문헌

- (1) S. J. Kim, J. S. Hwang, and J. Kim, "System design of distributed modal transducer by adjusting spatial of distribution," *SPIE's 6th International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, California, U.S.A., March 2, 1999
- (2) Kim, S.J. and Hwang, J.S., "Design of Flat Sound Radiator by Pattern optimization of piezofilm Actuator", 10th ICAST, Paris, October, 1999
- (3) Ochoa, O.O. and Reddy, J.N., *Finite Element of composite Laminates*, Kluwer Academic Pub., 1992
- (4) Wu, S. F., and Maestrello, L., "Responses of Finite Baffled Plate to Turbulent Flow Excitaitons", *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 1, 1995, pp. 13-19
- (5) Hall, W. S., *The Boundary element Method*, Boston:Kluwer Academic Publishers, 1993
- (6) Goldgerg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989

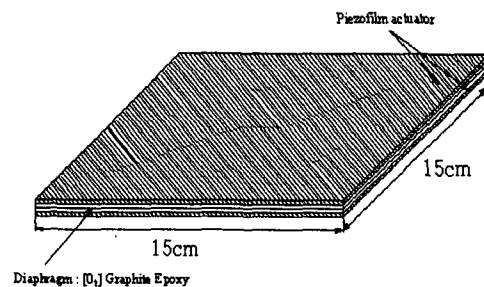


Fig 1. flat speaker의 형상

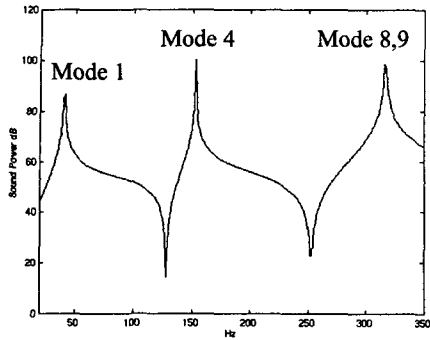


Fig 2. Frequency response in the case of the piezofilm actuator with fully covered electrode

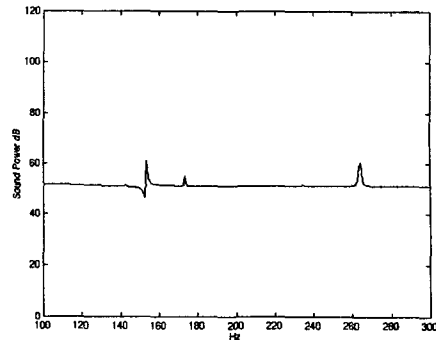


Fig 6. Frequency response by the optimal piezofilm actuator (mode 1 wanted, mode 4,6,8,9 unwanted)

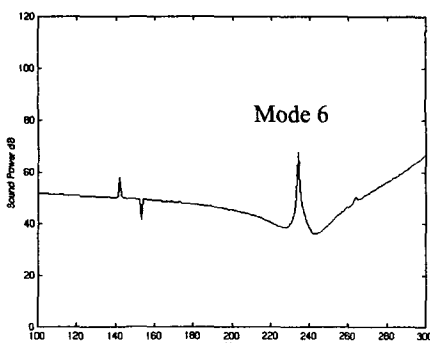


Fig 3. Frequency response by the designed actuator (mode 1 wanted, mode 4 unwanted)

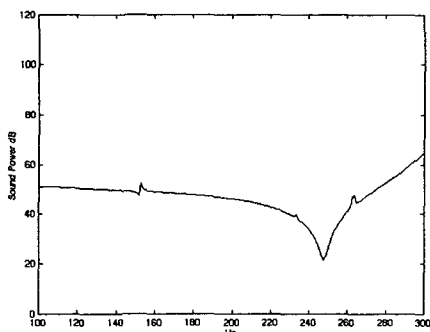


Fig 4. Frequency response by the designed actuator (mode 1 wanted, mode 4,6 unwanted)

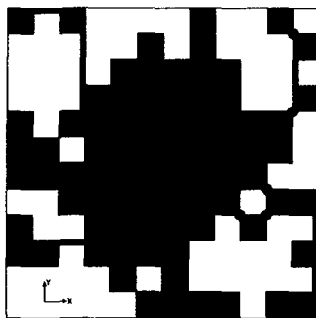


Fig 5. The optimal electrode pattern of piezofilm acuator

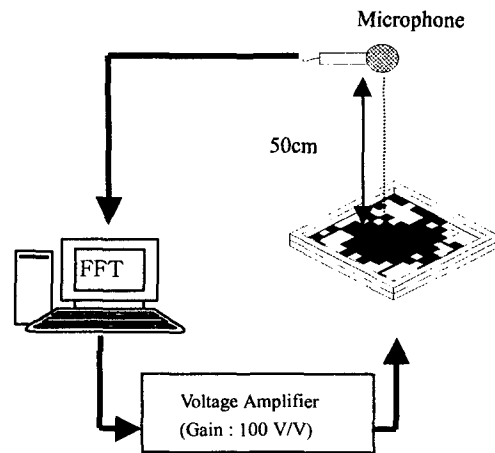


Fig 7. Configuration of Experimental instrument

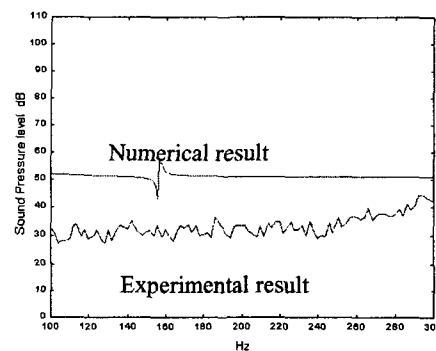


Fig 8. Comparison between experimental and numerical simulation