

마이크로 스피커 다이어프램의 진동해석

Vibration Analysis of Micro Speaker Diaphragm

홍도관* · 우병철** · 안찬우*** · 한근조***

D. K. Hong, B. C. Woo, C. W. Ahn and G. J. Han

Key Words : Characteristic Function(특성함수), Natural Frequency(고유진동수), Analysis of Means(평균분석), Table of Orthogonal Array(직교배열표), Micro Speaker Diaphragm(마이크로 스피커 다이어프램), Design of Experiments(실험계획법)

ABSTRACT

This study uses a characteristic function to explain correlations between the objective function and design variables. Analysis of means and table of orthogonal array were carried out. The change of shape of diaphragm, thickness of diaphragm and voice coil weight based on the table of orthogonal array is made. Therefore this study carried to decide shape of diaphragm, voice coil weight and thickness of diaphragm for minimizing 1st natural frequency and maximizing 2nd natural frequency of diaphragm using design of experiments and characteristic function with constraints. we showed improved design factors that minimized 1st natural frequency and maximized 2nd natural frequency of diaphragm.

1. 서 론

마이크로 스피커용 다이어프램은 A社에서 제작, 판매되는 모델이며 다이어프램은 보이스 코일과 직결 되어져 있다. 멜로디 칩으로 인하여 음이 16화음에서 64화음으로 변화함에 따라서 저음 특성이 많이 강조되기 때문에 이에 맞게 1차 고유진동수를 낮추고 1, 2차 고유진동수 사이의 대역범위를 넓게 하면서 그 사이에 음압이 높고 일정하게 되는 형태의 고출력, 고음압의 특성을 가지는 것이 마이크로 스피커의 설계과제이다. 마이크로 스피커를 제조하는 제조사 입장에서 보면 가장 먼저 설계해야 할 부분이 다이어프램의 고유진동수를 어느 주파수 대역에 놓을 것인가가 가장 우선적인 문제가 된다. 또한 다양한 다이어프램의 형상에 따라서 1, 2차 고유진동수가 어떻게 변화하는가에 대한 설계정보는 필수적이다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하지 않고, 실험적으로 다양한 제품에 대한 1, 2차 고유진동수에 대한 설계 경향을 모두 파악하기가 쉽지 않으며, 1차 고유진동수를 낮은 대역에 설계하고 2차 고유진동수를 높은 대역에 설계하기는 어려우며 많은 시간과 비용이 소모된다.

따라서, 마이크로 스피커 다이어프램에 대한 보다 체계적

인 설계를 위하여 다이어프램의 형상을 나타내는 변수와 다이어프램의 두께 및 보이스 코일의 무게 등을 설계변수인 인자로 선정하고, 실험계획법⁽¹⁻⁴⁾의 일종인 직교배열표를 이용하여 행렬실험을 수행하였다. 1, 2차 고유진동수를 일정 주파수 대역에 설계하기 위하여 제한조건 형태의 별첨함수로 정의하고 목적함수인 특성함수에 대해서 평균분석을 통해서 최적해를 구하였다. 산업현장에서 설계 시 설계변수들에 대해서 필수적으로 고려해야 되는 사항인 1, 2차 고유진동수의 주파수 대역 설계를 보다 쉽게 사용할 수 있는 설계 방법을 제시하였다.

2. 설계이론

2.1 유한요소해석

유한요소는 등방성, 등질성, 선형탄성으로 가정하였으며 본 연구에 사용된 프로그램은 ANSYS Ver. 9.0을 사용하였다. 유한요소는 기하 모델의 특징에 맞도록 다이어프램을 나타내는 셀요소와 다이어프램에 붙어 있는 보이스 코일을 나타내는 질량요소를 사용하였다. Fig. 1은 유한요소모델을 나타내며, 유한요소모델에 사용된 요소는 8,197개와 절점의 수는 7,637개로 구성되어있다. 구속조건은 다이어프램이 마이크로 스피커에 고정되는 부분을 X, Y, Z 방향의 병진변위와 회전변위를 구속하였다. 다이어프램에 사용된 재료는 폴리에틸렌 나프탈레이트인 PEN를 사용하였으며, 이 재료는 우수한 차단성과 열적, 전기적, 기계적 특성에 뛰어난 성능

* 한국전기연구원 메카트로닉스 연구그룹

E-mail : dkhong@keri.re.kr

Tel : (055) 280-1429, Fax : (055) 280-1547

** 한국전기연구원 메카트로닉스 연구그룹

*** 동아대학교 기계공학과

을 가지고 있으며, PEN 재료에 대한 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

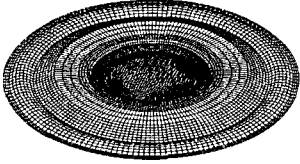


Fig. 1 Finite element model of initial diaphragm

Table 1 Mechanical property of PEN

Material	PEN
Item list	
Density(kg/m ³)	1,360
Elastic Modulus(GPa)	7.46
Poisson's Ratio	0.3

Fig. 2는 다이어프램의 형상을 변수로 나타내고 있으며, 실제 제작된 초기모델의 치수는 Table 2의 2수준이며, 다이어프램에 부착된 보이스 코일의 무게는 0.013 g이다.

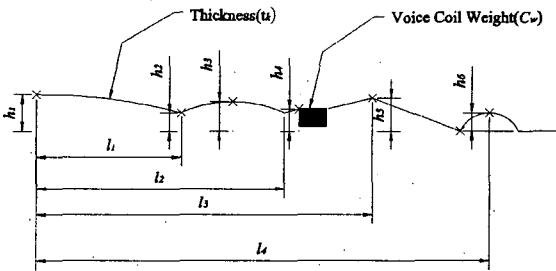


Fig. 2 Factors of micro speaker diaphragm

2.2 특성 함수

직교배열표는 최적설계에서 정의되는 제한조건함수를 고려할 수 없으므로 제한조건이 있는 문제의 경우 제한조건을 고려하기 위하여 벌칙함수 $P(x)$ 로 정의하며, 원래 반응치와 제한조건의 위배량을 포함하는 벌칙함수가 포함된 목적함수인 특성함수 $\Psi(x)$ 가 정의된다. 마이크로 스피커 다이어프램의 최적설계 문제로 정식화하면 다음과 같다.

$$P_1(h_1, \dots, t_k) = \alpha \cdot \text{Max} \left[0, \frac{f_{1st_max}}{f_{1st_o}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$P_2(h_1, \dots, t_k) = \beta \cdot \text{Max} \left[0, \frac{f_{2nd_o}}{f_{2nd_max}} - 1 \right] \quad (2)$$

$$\Psi(x) = \frac{f_{1st_max}}{f_{1st_o}} + \frac{f_{2nd_o}}{f_{2nd_max}} + \sum_{i=1}^2 P_i(h_1, \dots, t_k) \quad (3)$$

직교배열표의 각 실험에서 1, 2차 고유진동수의 제한조건의 유용성이 포함될 수 있도록 특성함수를 정의한다. 먼저 식(1)은 각 실험에서의 1차 고유진동수가 제한조건인 초기 고유진동수를 만족시킬 경우에는 벌칙함수가 최대값인 0을 가지게 되며, 제한조건을 위배할 경우 $\alpha(f_{1st_max}/f_{1st_o} - 1)$ 만큼의 최대값을 갖게 된다. 여기서, α 는 벌칙함수의 기여도를 조절하는 벌칙계수이다. 벌칙계수 값이 너무 크게 되면 반응치의 최소화가 의미가 없고, 반대로 너무 작게 되면 구한 최적수준이 불용영역에 있을 확률이 높게 된다. 따라서 적절하게 잘 조절해야 한다. 식(2)는 2차 고유진동수에 대한 벌칙함수를 정의하고 있으며, 식(3)은 1, 2차 고유진동수와 제한조건이 고려된 벌칙함수들을 모두 포함하는 특성함수 $\Psi(x)$ 로 정의 된다.

2.3 실험 계획법

본 연구에서는 이산설계공간에서 보다 효율적인 설계를 수행하기 위하여 직교배열표를 도입하였으며, 직교배열표를 사용하는 경우 인자의 조합에 대해 일부실험법을 사용하여 최소한의 해석 횟수로 전조합실험법과 유사한 계산결과를 얻을 수 있다. Table 2는 Fig 2에서 다이어프램의 형상을 나타낸 10개의 변수와 다이어프램의 무게 및 보이스 코일의 무게를 모두 3수준 인자로 나타내었다.

Table 2 Factor and level

Level	1	2	3
Factor			
h_1	0.48	0.5	0.52
h_2	0.23	0.25	0.27
h_3	0.38	0.4	0.42
h_4	0.28	0.3	0.32
h_5	0.43	0.45	0.47
h_6	0.23	0.25	0.27
l_1	1.8	2.0	2.2
l_2	3.2	3.4	3.6
l_3	4.4	4.6	4.8
l_4	5.6	5.8	6.0
c_w	0.011	0.0132	0.0154
t_k	0.017	0.019	0.021

Table 3의 직교배열표는 혼합직교배열표 $L_{36}(2^1 \times 3^{12})$ 를 사용하였으며, 설계변수의 후보값들 중에서 초기 설계값을 기준으로 수준값을 선정하여 행렬실험을 수행하였다. 평균분석을 통해서 최적해를 구하고 행렬실험의 각 행의 결과와 비교하여 우수한 해를 최적해로 선정한다. 최적수준을 선정하기 위해서는 기본적으로 S/N비를 이용하여 설계인자가 설계값에 미치는 영향을 분석하였다. S/N비는 이차식으로 주어지는 품질손실함수(quality loss function)로부터 유도된 값으로서 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도인데,

본 연구에서는 1, 2차 고유진동수의 제한조건이 고려된 특성 함수가 작을수록 좋은 망소특성(smaller-then-better type) 분석에 준하여 실행하였다. 사용한 S/N비는 다음과 같다.

$$\text{망소특성} : S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

여기서, m 은 동일한 인자 수준조합에서의 반복측정회수이며, y_i 는 그때의 각각의 해석값이다. 따라서 직교배열표상에 특성치의 목적함수를 고려하여 S/N비를 최대화하는 설계변수의 조건, 즉 잡음하에서도 성능 특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 접근하는 설계변수의 조건을 찾아내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초기모델 해석결과

Table 3 Table of orthogonal array $L_{36}(2^{1 \times 3} 12)$

Exp	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	l_1	l_2	l_3	l_4	c_w	t_k	1st	2nd
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1004.6	4044.7
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1085.9	4410.6
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1171.9	4692.4
4	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	1123.0	4652.8
5	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	1	1207.5	4446.0
6	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	917.8	3944.4
7	1	1	2	3	1	2	3	3	1	2	2	3	1211.7	4573.1
8	2	2	3	1	2	3	1	1	2	3	3	1	950.9	4402.2
9	3	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	1159.5	4257.2
10	1	1	3	2	1	3	2	3	2	1	3	2	1027.0	4322.1
11	2	2	1	3	2	1	3	1	3	2	1	3	1102.7	4182.6
12	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1	1120.3	4636.6
13	1	2	3	1	3	2	1	3	3	2	1	2	1304.2	4701.2
14	2	3	1	2	1	3	2	1	1	3	2	3	1097.1	4472.4
15	3	1	2	3	2	1	3	2	2	1	3	1	869.7	3912.6
16	1	2	3	2	1	1	3	2	3	3	2	1	927.3	4016.8
17	2	3	1	3	2	2	1	3	1	1	3	2	1054.2	4256.5
18	3	1	2	1	3	3	2	1	2	2	1	3	1314.4	4844.2
19	1	2	1	3	3	3	1	2	2	1	2	3	1177.1	4521.4
20	2	3	2	1	1	1	2	3	3	2	3	1	938.6	4110.4
21	3	1	3	2	2	2	3	1	1	3	1	2	1161.4	4543.0
22	1	2	2	3	3	1	2	1	1	3	3	2	1011.6	4464.3
23	2	3	3	1	1	2	3	2	2	1	1	3	1215.8	4416.4
24	3	1	1	2	2	3	1	3	3	2	2	1	1050.1	4289.9
25	1	3	2	1	2	3	3	1	3	1	2	2	1050.8	4334.3
26	2	1	3	2	3	1	1	2	1	2	3	3	1143.5	4654.1
27	3	2	1	3	1	2	2	3	2	3	1	1	1076.9	4138.8
28	1	3	2	2	2	1	1	3	2	3	1	3	1352.1	4723.1
29	2	1	3	3	3	2	2	1	3	1	2	1	928.3	4002.6
30	3	2	1	1	1	3	3	2	1	2	3	2	1033.4	4444.4
31	1	3	3	3	2	3	2	2	1	2	1	1	1097.8	4356.6
32	2	1	1	1	3	1	3	3	2	3	2	2	1241.9	4762.7
33	3	2	2	2	1	2	1	1	3	1	3	3	935.2	4050.5
34	1	3	1	2	3	2	3	1	2	2	3	1	939.9	4270.3
35	2	1	2	3	1	3	1	2	3	3	1	2	1041.6	4051.8
36	3	2	3	1	2	1	2	3	1	1	2	3	1215.4	4464.3

A社에서 제작된 다이어프램의 초기모델에 대한 진동해석 결과를 Table 4에 나타내었으며, Fig. 3에는 1, 2차 진동모드를 나타내었다.

Table 4 Natural frequency of initial model

Mode	Frequency	Natural frequency(Hz)
	1	
2		4410.6



(a) 1st mode shape (b) 2nd mode shape

Fig. 3 mode shape of micro speaker diaphragm

3.2 평균분석

Table 5는 망소특성인 특성치에 대한 결과로 인자의 효과와 편차(deviation) 및 기여율(percentage contribution)을 나타낸 것이다. 예를 들어 평균분석을 하는 방법으로는 인자 h_1 의 1수준 효과는 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34에 해당되는 특성치의 전체평균으로부터 그 인자 수준에 의한 결과의 편차로 평가된다. 같은 방법으로 모든 인자와 수준에 그 효과를 계산할 수 있으며, 각 인자별 수준수의 효과를 비교하여 최적수준을 조합하면 h_1 (1수준), h_2 (2수준), h_3 (1수준), h_4 (1수준), h_5 (2수준), h_6 (3수준), l_1 (2수준), l_2 (1수준), l_3 (1수준), l_4 (3수준), c_w (3수준), t_k (1수준)이며 Table 5에 *표시로 나타내었다. 모든 인자에 대한 각 수준에서의 평균을 구한다.

Table 5 Factors affecting the characteristic function

Factor	Effect		
	1	2	3
h_1	*-6.31237	-6.34433	-6.40837
h_2	-6.40431	*-6.31332	-6.34744
h_3	*-6.33180	-6.38822	-6.34504
h_4	*-6.30579	-6.32324	-6.43604
h_5	-6.41371	*-6.31170	-6.33966
h_6	-6.49027	-6.34590	*-6.22890
l_1	-6.40352	*-6.31362	-6.34793
l_2	*-6.26129	-6.32726	-6.47652
l_3	*-6.23732	-6.38887	-6.43887
l_4	-6.47134	-6.3292	*-6.2645
c_w	-6.67409	-6.33434	*-6.05664
t_k	*-6.30057	-6.31779	-6.44670

* : optimum level

Fig 4는 통계소프트웨어인 MINITAB R13⁽⁵⁾을 이용하여 다이어프램의 특성함수에 대한 특성치의 영향도 분석을 한 것이며, 이때 평균은 다른 인자들의 모든 수준에 대해서 균형화 된 것이다. 벌칙함수로 주어진 1차 고유진동수를 1050 Hz 보다 작도록 하고, 2차 고유진동수를 4450 Hz 이상이 되도록 제한조건을 고려하였다. 이때 특성함수에 대한 평균분석을 통해서 얻은 설계인자들의 최적수준 조합 결과, 1차 고유진동수는 967.8 Hz이며, 2차 고유진동수는 4454.7 Hz가 된다. 따라서, 초기모델에 비교하여 1, 2차 고유진동수의 대역폭이 넓어진 것을 알 수 있었으며 이와 같이 다양한 다이어프램의 형상에 따라서 1, 2차 고유진동수를 일정 주파수 대역에 두어 원하는 설계방향으로 설계가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고, Table 3의 직교배열표에 있는 총 실험결과들과 평균분석을 이용한 결과를 비교하여 보다 나은 쪽을 최적해로 선택해야 한다.

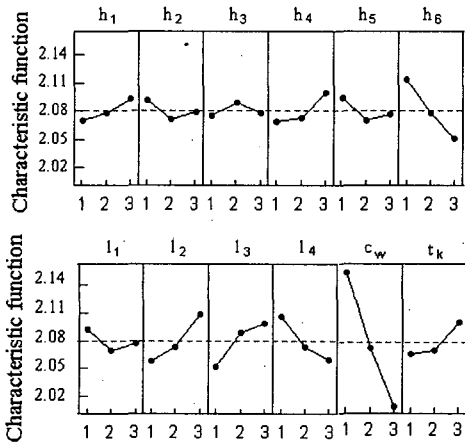


Fig. 4 Illustration of factor effect for the characteristic function

4. 결론

마이크로 스피커용 다이어프램의 1, 2차 고유진동수 사이의 주파수 대역폭을 넓게 하기 위하여 다이어프램의 형상을 나타내는 변수와 두께 및 보이스 코일의 무게 등을 설계변수인 인자로 선정하고, 실험계획법의 일종인 직교배열표와 평균분석을 이용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마이크로 스피커 다이어프램에 대한 체계적인 설계를 위하여 직교배열표를 이용하여 행렬실험을 수행하였으며, 1, 2차 고유진동수를 일정 주파수 대역에 설계하기 위하여 제한조건 형태의 벌칙함수로 정의하고 목적함수인 특성함수를 정의하여 특성함수에 대한 평균분석을 통해서 최적해를 도출할 수 있었다.

(2) 산업현장에서 마이크로 스피커 설계 시에 필수적으로 먼저 고려해야 되는 사항인 1, 2차 고유진동수의 주파수 대역 설계를 보다 효율적으로 사용할 수 있는 설계방법을 제시하였다.

참 고 문 헌

- (1) 이권희, 박경진, 1999, “제한조건이 있는 문제의 이산 설계공간에서의 강건최적설계”, 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제5호, pp. 728~737.
- (2) 이권희, 박경진, 1999, “제한조건이 있는 문제의 이산 설계공간에서의 강건최적설계”, 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제5호, pp. 728~737.
- (3) 홍도관, 최석창, 안찬우, 2004, “특성함수를 이용한 제한조건이 있는 천장크레인의 강건최적설계”, 한국정밀공학 회논문집, 제21권, 제2호, pp. 160~167.
- (4) 김준태, 김정호, 김진오, 1998, “직접방사형 스피커의 음향특성 해석 및 설계”, 한국소음진동공학회지, 제8권, 제2호, pp. 274~282.
- (5) MINITAB User's Guide #2, 2000, “Data Analysis and Quality Tool,” Minitab Inc.