

## 직교배열표를 이용한 마이크로 스피커용 다이하프램의 성능개선에 관한 연구

홍도관\*(한국전기연구원), 우병철(한국전기연구원), 안찬우(동아대학교)

### A Study on Performance Improvement of Diaphragm for Micro Speaker using Table of Orthogonal Array

D. K. Hong(KERI), B. C. Woo(KERI) and C. W. Ahn(Mech. Eng. Dept., Dong-A Univ.)

#### ABSTRACT

On this study, we improved diaphragm for micro speaker performance using Taguchi method in discrete design space. The design of diaphragm has an effect on performance of micro speaker such as, thickness of diaphragm, shape of diaphragm, etc. Therefore this study carried to decide shape of diaphragm and thickness of diaphragm for minimizing 2nd natural frequency of diaphragm using Taguchi method. we showed improved design factors that minimized 2nd natural frequency of diaphragm. Also, 2nd natural frequency of diaphragm for micro speaker is reduced up to 37 percent maintaining twist mode shape. From the results of ANOVA, 2nd natural frequency of diaphragm for micro speaker have an effect on position of the outer curved shape and thickness of diaphragm.

**Key Words :** Diaphragm for micro speaker (마이크로 스피커용 다이하프램), ANOM (Analysis of Means : 평균분석), ANOVA (Analysis of Variance : 분산분석), Table of Orthogonal Array (직교배열표), Design of Experiments (실험계획법)

#### 1. 서론

스피커의 메카니즘은 앰프로부터 음성전류가 흐르면 영구 자석장 내에서 변조된 전자기장이 작동하여 영구자석과 서로 인력과 척력이 바뀌면서 기계적인 운동을 함으로써 진동판이 움직이는 형태로 구동된다. 즉, 앰프에서 나오는 전류의 신호를 사람의 귀로 듣고 식별할 수 있는 음성 신호로 바꾸어주는 역할을 하는데, 전기 신호가 없을 때는 정확히 원위치로 복귀를 시키는 서스펜션 능력과 댐핑능력은 매우 중요하다. 진동판이 많은 진동을 할 때, 댐핑능력이 좋지 않으면 계속해서 밀려들어오는 신호에 맞게 보이스 코일이나 진동판을 제대로 조절 해주지 못하는 현상이 발생하게 되며, 신호의 손실이 많이 생겨 음의 재생에 문제가 발생하게 된다. 사람의 가청 주파수는 20 ~ 20,000 Hz이며, 가장 이상적인 스피커는 가청 주파수영역대에서 감음이 없고 일정한 dB를 유지하는 것이다. 본 논문에서 사용된 마이크로 스피커용 다이하프램은 H사에서 실제로 제작, 판매되는 모델이며 AC 1.5 Volt용으로 최대 2.2 Volt 특성을 가지

고 있다. 다이하프램은 마이크로 스피커 드라이버의 진동판을 지칭하는 말로 각각의 다이하프램은 보이 스 코일과 직결 되어져 있다. 마이크로 스피커용 다이하프램의 제조사인 H사에서 다이하프램의 고유진동수 중에서 2차 고유진동수가 최소화 가 될수록 다이하프램의 성능이 향상되는 효과가 있다는 것을 실제 마이크로 스피커의 성능실험을 통해서 음질이 향상됨을 규명하였다.

따라서, 다이하프램의 성능개선을 위하여 다이하프램의 형상을 나타내는 변수와 두께 등을 설계변수인 인자로 선정하고, 실험계획법<sup>(1-3)</sup>의 일종인 직교배열표를 이용하여 행렬실험을 수행하였다. 평균분석<sup>(4, 5)</sup>을 통해서 최적해를 구하고, 분산분석을 이용하여 인자가 특성치인 다이하프램의 2차 고유진동수에 미치는 영향을 분석하였다. 이와 같은 방법을 이용하여 마이크로 스피커용 다이하프램의 성능향상을 위한 설계방법을 제시하였으며, 실제 산업현장의 설계단계에서 고려하여 적용한다면 보다 성능이 향상된 마이크로 스피커를 제작할 수 있으며 정량적으로 평가가 가능하다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 유한요소모델

유한요소는 등방성, 등질성, 선형탄성으로 가정하였으며 본 연구에 사용된 프로그램은 ANSYS Ver. 8.0을 사용하였으며 유한요소는 기하 모델의 특징에 맞도록 다이아프램을 나타내는 쉘요소(181)와 다이아프램에 붙어 있는 보이스 코일을 나타내는 질량요소(21)를 사용하여 유한요소 모델을 나타내었다. Fig. 1의 유한요소모델에 사용된 요소는 7,678개와 결절의 수는 7,754개로 구성되어 있다.

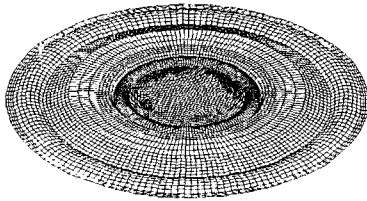


Fig. 1 Finite element model of initial diaphragm

구속조건은 다이아프램이 마이크로 스피커에 고정 되는 부분을 X, Y, Z 방향의 병진변위와 회전변위를 구속하였다. 다이아프램에 사용된 재료는 폴리에틸렌 나프탈레이트인 PEN를 사용하였으며, 이 재료는 우수한 차단성과 열적, 전기적, 기계적 특성에 뛰어난 성능을 가지고 있으며, PEN 재료에 대한 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. Fig. 2는 다이아프램의 형상을 변수로 나타내고 있으며, 실제 제작된 초기모델의 치수는 Table 3의 2수준이다. Table 2는 마이크로 스피커의 재원을 나타내며, 보이스 코일의 무게는 0.11 g이다.

Table 1 Mechanical property of PEN

Item list	Material	PEN
Density(kg/m <sup>3</sup> )		1.360
Elastic Modulus(MPa)		74.58e3
Poisson's Ratio		0.3

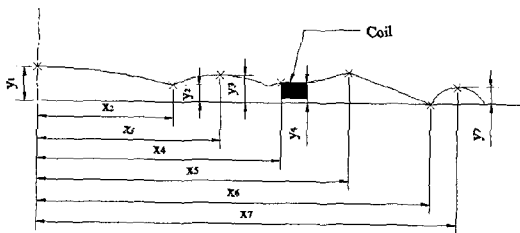


Fig. 2 Factors of diaphragm for micro speaker

Table 2 Resource of micro speaker

Item list	Model	micro speaker
Sound pressure level(dB)		92 ± 3
Rated(Max.) input(Watt)		0.4(0.6)
Impedance(Ω)		0.3 ± 15 %
Resonant frequency(Hz)		700
Distortion		Max, 10 %

### 2.2 진동해석

유한요소해석에서 비감쇠 자유진동에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

선형계에 대해서 자유진동은

$$\{u\} = \{u_0\} \cos \omega t \quad (2)$$

형태의 조화거동을 보이고, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$([K] - \omega^2[M])\{u_0\} = \{0\} \quad (3)$$

유용해를 갖기 위해서는 식 (2)의  $([K] - \omega^2[M])$  행렬식이 zero이어야 한다.

$$[[K] - \lambda[M]] = 0 \quad (4)$$

여기서  $\lambda = \omega^2$ 이고, 식 (4)에서 고유치  $\lambda$ 는 계의 고유진동수를 나타내며, 고유벡터  $u$ 는 모드형상을 나타낸다.

$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu)}$ 는 등방성재료의 굽힘강성으로 무차원 진동수매개변수는 식 (5)와 같다.

$$\lambda_1 = \frac{\omega l^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho h}{D}} \quad (5)$$

여기서,  $E$ : 탄성계수,  $t$ : 판의 두께,  $\nu$ : 프와송비,  $l$ 는 판의 길이,  $\rho$ 는 밀도이다.

### 2.3 직교배열표를 이용한 실험계획법

본 연구에서는 이산설계공간에서 보다 효율적인 설계를 수행하기 위하여 직교배열표를 도입하게 되었으며, 직교배열표를 사용하는 경우 인자의 조합에 대해 일부실시법을 사용하여 최소한의 해석 횟수로 전조합실시법과 유사한 계산결과를 얻을 수 있다. 따라서 이산설계공간에서 직교배열표를 이용하여 다이아프램의 성능개선을 위한 설계를 수행하고자 한다. Table 3은 Fig 2에서 다이아프램의 형상을 나타낸 11개의 변수와 두께를 모두 인자로 하여 인자의 수준을 3수준으로 설정하여 나타내었다. 직교배열표는 혼합직교배열표  $L_{36}(2^1 \times 3^{15})$ 를 사용하였으며, 각 수준에서의 값을 결정한 후 혼합직교배열표를 이용하여 행렬실험을 수행하였다. 평균분석을 통해서 최적해를 구하고 행렬실험의 각 행의 결과와 비교하여 우수한 해를 최적해로 선정한다. 최적수준을 선정하기 위해서는 평균의 주효과와 분산분석을 이용

하여 설계인자가 설계값에 미치는 영향을 분석하였다. 다이어프램의 2차 고유진동수가 작을수록 좋은 망소특성(smaller-then-better type)분석에 준하여 실행하였다. 직교배열표상에 특성치인 다이어프램의 2차 고유진동수를 목적함수로 하고 평균을 최소화하는 인자의 조건을 찾아내었다. 또한 분산분석을 통해서 유의한 인자와 유의하지 않은 인자를 95% 신뢰구간으로 선정하여 설계단계에서 유의한 인자만 고려하도록 선별, 제시하였다.

Table 3 Factor and level

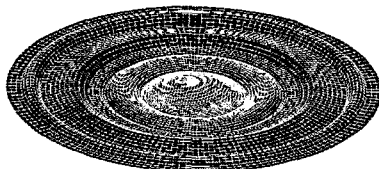
Factor \ Level	1	2	3
$y_1$	0.45	0.5	0.55
$x_2$	2.1	2.2	2.3
$y_2$	0.15	0.2	0.25
$x_3$	2.6	2.7	2.8
$y_3$	0.4	0.45	0.5
$y_4$	0.2	0.3	0.4
$x_5$	4.5	4.6	4.7
$y_5$	0.4	0.45	0.5
$x_6$	5.7	5.8	5.9
$x_7$	6.095	6.195	6.295
$y_7$	0.195	0.245	0.295
$t$	0.0171	0.019	0.0209

### 3. 결과 및 고찰

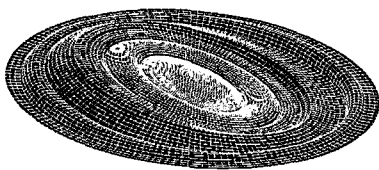
#### 3.1 초기모델

Table 4 Natural frequency of diaphragm

Mode	Frequency	Natural frequency(Hz)
1		1256.76
2		4791.86



(a) 1st bending mode shape



(b) 2nd twist mode shape

Fig. 3 Mode shape of initial diaphragm model

실제로 H社에서 제작, 판매하는 마이크로 스피커용 다이어프램의 초기모델에 대한 진동해석결과를 Table 4에 나타내었으며, 진동모드형상을 Fig 3에 나타내었다. 1차 진동모드는 굽힘모드가 발생하였으며, 2차 진동모드는 비틀림모드가 발생하였다. 초기모델에서 발생하는 조건을 그대로 유지하면서 다이어프램의 성능개선을 하고자 하였다. 따라서 다이어프램의 설계 시에 관심모드인 2차 진동모드가 비틀림모드가 발생하는 조건하에서 인자들의 설정이 요구되며, 이를 고려하여 Table 3에 각 인자들의 수준에 따른 값을 설정하였다.

#### 3.2 평균분석

Table 5 Factors affecting 2nd natural frequency

Factor	Effect		
	1	2	3
$y_1$	*4586.58	4757.95	4656.72
$x_2$	4775.20	4681.37	*4544.69
$y_2$	4675.73	*4624.32	4701.22
$x_3$	*4524.79	4600.72	4875.74
$y_3$	*4613.12	4627.32	4759.82
$y_4$	4858.02	4586.37	*4556.88
$x_5$	4782.98	4769.99	*4448.28
$y_5$	4473.67	*4730.00	4797.59
$x_6$	*4365.87	4703.50	4931.88
$x_7$	5056.52	4631.56	*4313.18
$y_7$	*4506.08	4713.08	4782.11
$t$	*4498.01	4596.20	4907.05

\* : Optimum level

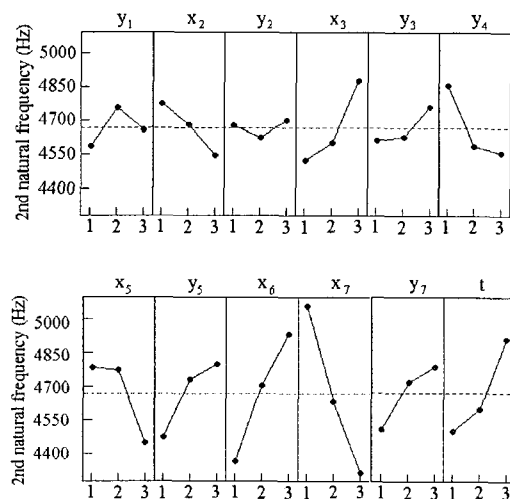


Fig. 4 Illustration of factor effect for 2nd natural frequency

Table 5는 망소특성인 특성치의 결과로 2차 고유진동수에 대한 인자의 효과와 편차(deviation) 및 기여율(percentage contribution)을 나타낸 것이다. 예를 들어 인자  $y_1$ 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  $y_1$ (1 수준),  $x_2$ (3 수준),  $y_2$ (2 수준),  $x_3$ (1 수준),  $y_3$ (1 수준),  $y_4$ (3 수준),  $x_5$ (3 수준),  $y_5$ (2 수준),  $x_6$ (1 수준),  $x_7$ (3 수준),  $y_7$ (1 수준),  $t$ (1 수준)이며 Table 5에 \*표시로 나타내었다. Fig 4는 통계소프트웨어인 MINITAB R13<sup>(6)</sup>을 이용하여 2차 고유진동수에 대한 특성치의 영향도 분석을 한 것이며 이때 평균은 다른 인자들의 모든 수준에 대해서 균형화 된 것이다.

### 3.3 분산분석

Table 5는 다이아프램의 형상을 나타낸 11개의 변수와 두께 등 모든인자에 대한 다이아프램의 2차 고유진동수에 대한 분산분석의 결과를 나타내고 있다. 반경방향의 외각부 곡선위치를 나타내는  $x_7$ ,  $x_6$ 와 다이아프램의 두께  $t$ 는 다이아프램의 2차 고유진동수에 많은 영향을 미치고 있으며, 반경방향의 보이스 코일부착위치인  $x_5$ 와  $y_5$ 는 95% 신뢰구간에는 들지 않지만 신뢰구간을 90%로 설정한다면 고려할만한 인자가 된다. 그 이외의 인자들은 2차 고유진동수를 최소화하는데 기여하지 않은 인자들이 된다. 따라서, 성능개선을 위한 다이아프램의 재설계에 유의한 인자만을 고려하면 된다.

Table 5 Analysis of variance for 2nd natural frequency

Factor	S	$\psi$	V	$F_0$	P
$y_1$	178132	2	89066	0.73	0.506
$x_2$	322475	2	161238	1.31	0.308
$y_2$	36825	2	18413	0.15	0.862
$x_3$	818264	2	409132	3.33	0.074
$y_3$	156166	2	78083	0.64	0.548
$y_4$	661399	2	330700	2.69	0.112
$x_5$	862757	2	431378	3.51	0.066
$y_5$	700811	2	350406	2.85	0.100
$x_6$	1946060	2	973030	7.93	0.007
$x_7$	3337987	2	1668993	13.59	0.001
$y_7$	495236	2	247618	2.02	0.179
$t$	1094338	2	547169	4.46	0.038
Error	1350563	11	122778		
Total	11961012	35			

평균분석을 통해서 얻은 최적수준일 때 성능개선된 2차 비틀림 고유진동수는 3016.78 Hz이다. 이와

같은 방법으로 성능개선된 다이아프램 모델의 2차 고유진동수는 초기모델의 2차 고유진동수의 약 37%가 감소되는 성능개선의 효과를 볼 수 있었다.

## 4. 결론

마이크로 스피커용 다이아프램의 성능개선을 위하여 다이아프램의 형상을 나타내는 변수와 두께 등을 설계변수인 인자로 선정하고, 실험계획법의 일종인 직교배열표, 평균분석, 분산분석을 이용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마이크로 스피커용 다이아프램의 성능개선을 위하여 실험계획법을 이용하여 성능개선에 많은 영향을 미치는 설계인자에 대한 통계적 분석이 가능하였다.

2. 성능개선된 다이아프램은 초기모델의 2차 고유진동수의 약 37% 감소되는 성능개선의 효과를 볼 수 있었다. 또한 2차 고유진동수에 큰 영향을 미치는 설계인자로는 반경방향의 외각부 곡선위치와 다이아프램의 두께임을 알았다.

3. 향후 전자기해석을 통해서 전자기력을 구하고, 이를 조화력으로 하여 조화응답해석으로 실제 조화응답변위를 구해볼 것이며, 또한 음향해석을 통해서 성능개선된 마이크로 스피커용 다이아프램 모델을 검증할 것이다.

## 참고문헌

1. Phadke, M. S., *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, 1989.
2. 홍도관, 최석창, 안찬우, "특성함수를 이용한 제한조건이 있는 천장크레인의 강건최적설계," 한국정밀공학회지, 제21권, 제2호, pp. 160-167, 2004.
3. Taguchi, G., Crowdhury, S., "Robust Engineering : Learn How to Boost Quality While Reducing Cost & Time to Market," McGraw-Hill, 1999.
4. Ramakrishnan, B., Rao & S. S., "A Robust Optimization Approach Using Taguchi's Loss Function for Solving Nonlinear Optimization Problems," ASME, Vol. 1, pp. 241-248, 1991.
5. G. J., Park, W. J., Hwang, W. I., Lee, "Structural Optimization Post-Process Using Taguchi Method," JSME, Series A, Vol. 37, pp. 166-172, 1994.
6. MINITAB User's Guide #2, "Data Analysis and Quality Tool," MINITAB Inc., 2000.