

마이크로 스피커 다이어프램의 형상설계에 관한 연구

A Study on the Shape Design of Micro Speaker Diaphragm

홍도관* · 우병철** · 김동영*** · 안찬우†

Do Kwan Hong, Byung Chul Woo, Dong Young Kim and Chan Woo Ahn

(2004년 12월 17일 접수 ; 2005년 6월 20일 심사완료)

Key Words : Micro Speaker Diaphragm(마이크로 스피커 다이어프램), Table of Orthogonal Array(직교배열표), ANOM(analysis of means : 평균분석), Characteristic Function(특성함수), S/N Ratio(신호대 잡음비)

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 design variables 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 variables.

1. 서 론

마이크로 스피커용 다이어프램은 A社에서 제작, 판매되는 모델이며 다이어프램은 보이스 코일과 직결되어 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 놓

을 것인가가 가장 우선적인 문제가 된다. 또한 다양한 다이어프램의 형상에 따라서 1, 2차 고유진동수가 어떻게 변화하는가에 대한 설계정보는 필수적이다. 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 체계적인 설계를 위하여 다이어프램의 형상을 나타내는 변수와 다이어프램의 두께 및 보이스 코일의 무게 등을 설계변수인 인자로 선정하고, 실험계획법^(1~6)의 일종인 직교배열표를 이용하여 행렬실험을 수행하였다. 1, 2차 고유진동수를 일정 주파수 대역에 설계하기 위하여 제한조건 형태의 별칙함수로 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 설계방법을 제시하였다.

† 책임저자 : 정희원, 동아대학교 기계공학과
E-mail : cwahn@dau.ac.kr
Tel : (051)200-7643, Fax : (051) 200-7656

* 정희원, 한국전기연구원(KERI)

** 한국전기연구원(KERI)

*** 정희원, 동명중공업 기술연구소

2. 설계이론 및 방법

2.1 유한요소해석

유한요소는 등방성, 균질성, 선형탄성으로 가정하였으며 이 연구에 사용된 프로그램은 ANSYS Ver. 9.0을 사용하였다. 유한요소는 기하 모델의 특징에 맞도록 다이아프램을 나타내는 셀요소와 다이아프램에 붙어 있는 보이스 코일을 나타내는 질량요소를 사용하였다. Fig. 1은 마이크로 스피커 모델을 나타내며, Fig. 2는 유한요소모델을 나타낸다. 유한요소모델에 사용된 요소의 수는 8,197개이며, 절점의 수는 7,637개이다. 구속조건은 다이아프램이 마이크로 스피커에 고정되는 부분을 X, Y, Z 방향의 병진변위와 회전변위를 구속하였다. 다이아프램에 사용된 재료는 폴리에틸렌 나프탈레이트인 PEN계를 사용하였으며, 이 재료는 우수한 차단성과 열적, 전기적, 기계적 특성에 뛰어난 성능을 가지고 있다. PEN계 재료에 대한 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

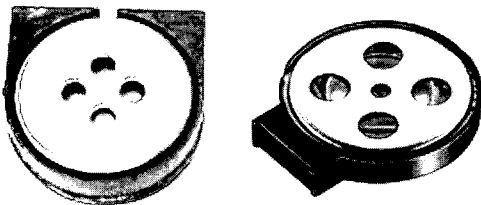


Fig. 1 Micro speaker model

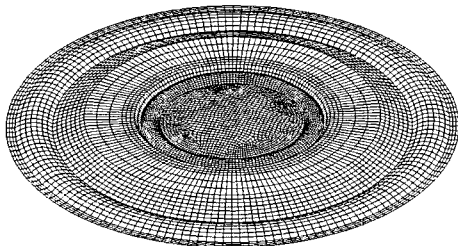


Fig. 2 Finite element model of initial diaphragm

Table 1 Mechanical property of PEN

Property	Value
Density (kg/m ³)	1,360
Elastic modulus (GPa)	7.46
Poisson's ratio	0.3

Fig. 3은 다이아프램의 형상을 변수로 나타내고 있으며, 실제 제작된 초기모델의 치수는 Table 2의 2수준이며, 다이아프램에 부착된 보이스 코일의 무게는 0.013 g이다.

2.2 제한조건을 고려한 특성함수

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 다이아프램의 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, 2

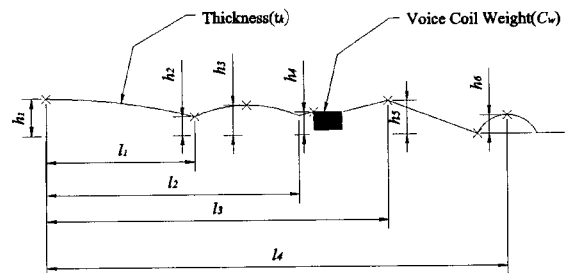


Fig. 3 Factors of micro speaker diaphragm

차 고유진동수와 제한조건이 고려된 벌칙함수들을 모두 포함하는 특성함수 $\Psi(x)$ 로 정의 된다.

2.3 실험계획법

이 연구에서는 이산설계공간에서 보다 효율적인 설계를 수행하기 위하여 직교배열표를 도입하였으며, 직교배열표를 사용하는 경우 인자의 조합에 대해 일부실시법을 사용하여 최소한의 해석 횟수로 전조합실시법과 유사한 계산결과를 얻을 수 있다. Table 2는 Fig. 3에서 다이어프램의 형상을 나타낸 10개의 변수와 다이어프램의 두께 및 보이스 코일의 무게를 모두 3수준 인자로 나타내었다. Table 3의 직교배열표는 교호작용은 구하지 않고 3수준의 열들 사이의 교호작용은 3수준의 다른 열들에 고르게 나누어져 있는 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/N비(신호대 잡음비)를 이용하여 설계인자가 설계값에 미치는 영향을 분석하였다. 신호대 잡음비는 이차식으로 주어지는 품질손실함수(quality loss function)로부터 유도된 값으로서 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도이다. 이 연구에서는 1, 2차 고유진동수의 제한조건이 고려된 특성함수가 작을수록 좋은 망소특성(smaller-than-better type)분석에 준하여 실행하였다. 사용한 신호대 잡음비는 다음과 같다.

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

여기서, n 은 동일한 인자 수준조합에서의 반복측정회수이며, y_i 는 그때의 각각의 해석값이다. 따라서 직교배열표상에 특성치의 목적함수를 고려하여 신호대 잡음비를 최대화하는 설계변수의 조건, 즉 잡음하에서도 성능 특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 접근하는 설계변수의 조건을 찾았다.

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

Table 2 Parameter values for each factor and level

Factor	Level	1	2	3
	h_1	$a - 0.02$	a	$a + 0.02$
h_2	$b - 0.02$	b	$b + 0.02$	
h_3	$c - 0.02$	c	$c + 0.02$	
h_4	$d - 0.02$	d	$d + 0.02$	
h_5	$e - 0.02$	e	$e + 0.02$	
h_6	$f - 0.02$	f	$f + 0.02$	
l_1	$g - 0.2$	g	$g + 0.2$	
l_2	$h - 0.2$	h	$h + 0.2$	
l_3	$i - 0.2$	i	$i + 0.2$	
l_4	$j - 0.2$	j	$j + 0.2$	
c_w	$k - 0.0022$	k	$k + 0.0022$	
t_k	$l - 0.002$	l	$l + 0.002$	

3. 결과 및 고찰

3.1 초기모델 해석결과

A社에서 제작된 다이어프램의 초기모델에 대한 진동해석 결과를 Table 6에 나타내었으며, Fig. 4에는 1, 2차 진동모드를 나타내었다. 정량적인 분석을 위하여 Table 2에 정의된 설계인자의 각 수준의 조합에 대해서 Fig. 4의 초기 모델에 대한 1, 2차 진동모드형상을 유지하도록 하였다. Table 2에 정의된 설계인자들의 수준을 잘못 설정하게 되면 2차 모드형상이 초기모델의 2차 모드형상과 다르게 발생하여 설계인자에 대한 정량적인 분석이 어렵게 된다. 따라서 각 설계인자마다 적절한 수준간격과 직교배열표를 이용한 각 실험에서 2차 모드형상을 체크해야 한다.

3.2 특성함수

제한조건이 있는 문제에서 직교배열표의 사용은 제한조건이 없는 문제와 동일하게 직교배열표에 의한 해석법이 사용되지만 제한조건의 유용성이 포함될 수 있도록 평가추정식의 작성이 요구된다. Table 4는 Table 3의 실험결과를 바탕으로 인자에 대한 수준을 대응시켜 제한조건을 고려하는 식 (3)의 특성함수의 결과를 나타낸 것이다. 식 (1)과 식 (2)의 1, 2차 고유진동수에 대한 벌칙함수의 벌칙계수를 적절하게 조절하여 나타내었으며, 이 결과로 특성함수를 이용하여 평가특성치에 대한 제한조건을 고려한 인자의 최적수준을 결정하였다.

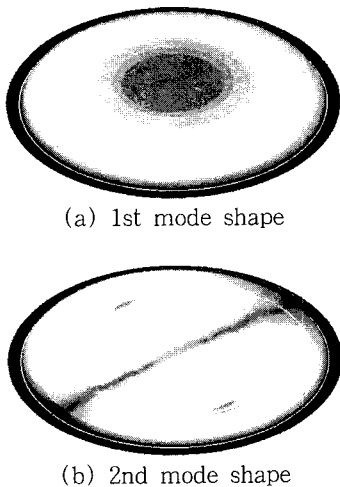


Fig. 4 Mode shape of micro speaker diaphragm

3.3 평균분석

Table 5는 망소특성인 특성치에 대한 결과로 인자의 효과와 편차(deviation) 및 기여율(percentage contribution)을 식 (4)의 신호대 잡음비로 나타낸 것이다. 평균분석을 하는 방법을 예로들면 인자 h_1 1수준 효과의 경우는 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34에 해당되는 특성치의 전체 평균으로부터 그 인

Table 4 Table of orthogonal array $L_{36}(2^1 \times 3^{12})$

Exp.	Characteristic function	S/N ratio
1	2.156	-6.673
2	2.019	-6.104
3	2.042	-6.203
4	1.996	-6.003
5	2.135	-6.589
6	2.143	-6.620
7	2.111	-6.490
8	1.893	-5.542
9	2.188	-6.801
10	2.008	-6.054
11	2.170	-6.727
12	1.996	-6.005
13	2.188	-6.799
14	2.006	-6.044
15	2.121	-6.529
16	2.103	-6.457
17	2.072	-6.326
18	2.171	-6.734
19	2.084	-6.377
20	2.053	-6.248
21	2.062	-6.284
22	1.920	-5.664
23	2.161	-6.691
24	2.047	-6.224
25	2.023	-6.119
26	2.019	-6.101
27	2.168	-6.720
28	2.237	-6.991
29	2.113	-6.499
30	1.946	-5.782
31	2.063	-6.288
32	2.106	-6.470
33	2.088	-6.395
34	1.957	-5.834
35	2.185	-6.790
36	2.139	-6.603

자 수준에 의한 결과의 편차로 평가된다. 동일한 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.

Table 5 Factors affecting S/N ratio of 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	-6.32921	*-6.26451
c_w	-6.67409	-6.33434	*-6.05664
t_k	*-6.30057	-6.31779	-6.44670

* : Optimum level

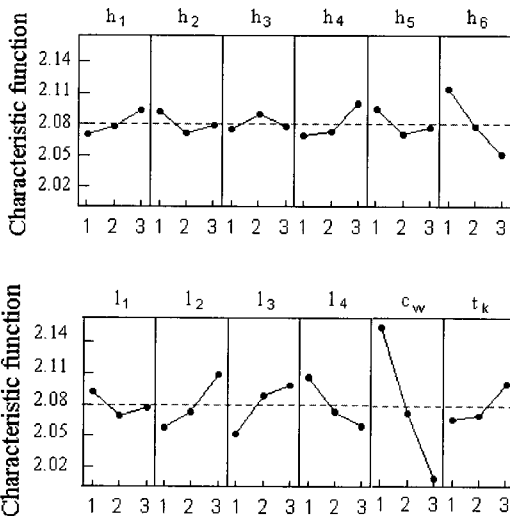


Fig. 5 Illustration of factor effect for the characteristic function

Table 6 Comparison of initial with optimum model

Mode	Model	Natural frequency(Hz)	
		Initial	Optimum
1		1085.9	967.8
2		4410.6	4454.7

최적수준의 조합을 분석해보면, 다이어프램의 높이를 나타내는 설계인자인 경우 높이가 낮은 1수준이나 초기 모델의 설계 값인 2수준일 경우 기여도가 높았다. 보이스 코일의 반경방향 위치를 나타내는 l_2 의 설계인자는 반경중심에 가까운 1수준일 경우 기여도가 높았다. 그리고 보이스 코일의 무게를 나타내는 c_w 는 초기 모델보다 20% 무게가 더 나가는 3수준으로 보이스 코일의 무게가 클수록 기여도가 높았다. 마지막으로 다이어프램의 두께를 나타내는 t_k 는 두께가 얇을수록 기여도가 높음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 통계소프트웨어인 MINITAB R13⁽⁷⁾을 이용하여 다이어프램의 특성함수에 대한 특성치의 영향도 분석을 한 것이며, 이때 평균은 다른 인자들의 모든 수준에 대해서 균형화 된 것이다. 식 (1)의 벌칙함수로 주어진 1차 고유진동수를 1050 Hz 보다 작도록 하고, 식 (2)의 벌칙함수에서 2차 고유진동수를 4450 Hz 이상이 되도록 제한조건을 고려하였다. 벌칙계수는 벌칙함수의 제한조건이 고려될 수 있도록 적절히 조절하여 적용하였다.

이때 특성함수에 대한 평균분석을 통해서 얻은 설계인자들의 최적수준 조합 결과, 1차 고유진동수는 967.8 Hz이며, 2차 고유진동수는 4454.7 Hz가 된다. Table 6에 초기모델과 최적모델의 1, 2차 고유진동수를 비교하여 나타내었다. 초기모델에 비교하여 1, 2차 고유진동수의 대역폭이 넓어진 것을 알 수 있으며 이와 같이 다양한 다이어프램의 형상에 따라서 1, 2차 고유진동수를 일정 주파수 대역에 설정하여 원하는 설계방향으로 설계가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Table 3의 직교배열표에 있는 총 실험 결과들과 평균분석을 이용한 결과를 비교하여 보드나운 쪽을 최적해로 선정하였다.

4. 결 론

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, 1, 2차 고유진동수의 제한조건을 고려한 특성함수와 직교배열

표 및 평균분석으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마이크로 스피커용 다이어그램에 대한 체계적인 설계를 위하여 직교배열표를 이용하여 행렬실험을 수행하였으며, 1, 2차 고유진동수를 일정 주파수 대역에 설계하기 위하여 제한조건 형태의 별칭함수로 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 이산설계공간에서의 강건최적설계”, 대한기계학회 논문집 A권, 제 22 권, 제 5 호, pp. 728~737.

(2) 이정욱, 박준성, 이권희, 박경진, 2001, “직교배

열표를 이용한 이산공간에서의 최적화 알고리즘 개발”, 대한기계학회논문집 A권, 제 25 권, 제 10 호, pp. 1621~1626.

(3) 홍도관, 최석창, 안찬우, 2004, “특성함수를 이용한 제한조건이 있는 천장크레인의 강건최적설계”, 한국정밀공학학회논문집, 제 21 권, 제 2 호, pp. 160~167.

(4) 홍도관, 김동영, 안찬우, 2005, “엔드밀 가공시 진동, 표면거칠기, 절삭온도에 미치는 최적가공조건에 관한 연구”, 한국소음진동공학학회논문집, 제 14 권, 제 12 호, pp. 1322~1329.

(5) 김정호, 김준태, 김진오, 민진기, 1997, “진동/음향 해석에 의한 스피커의 음향특성 연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제 21 권, 제 10 호, pp. 1742~1756.

(6) 김준태, 김정호, 김진오, 1998, “직접방사형 스피커의 음향특성 해석 및 설계”, 한국소음진동공학학회 논문집, 제 8 권, 제 2 호, pp. 274~282.

(7) MINITAB User's Guide #2, 2000, “Data Analysis and Quality Tool,” Minitab Inc.