

Taguchi Method를 이용한 모바일 폰용 마이크로스피커의 음향 특성 향상 설계

Application of Taguchi Method to Robust Design of Acoustic Performance in Mobile Phones

이 홍 주* · 황 건 용† · 황 상 문* · 권 중 학* · 김 태 순*

Lee Hong-Joo, Hwang Sang-Moon, Hwang Gun-Yong, Kwon Joong-Hak and Kim Tae-Soon

Key Words : Micro-speaker, Coupling, Finite Element Method, Acoustic Characteristics, SPL, Taguchi Method

ABSTRACT

With the growth in electronics and the remarkable advance in wireless communication technology, mobile devices, such as mobile phones and PDAs are incessantly improved in their diverse functional performance. Lighter weight and smaller size has been gradually accomplished by recent circuit integration technology resulting in rapid growth in the number of mobile phone subscribers. Driven by customer demand, recent mobile devices are fully capable of realizing a variety of dazzling multimedia effects powered by electro-acoustic parts that have become one of the generic components. However, This paper also presents an oval micro-speaker, that is expected to show an excellent performance within limited space of mobile phone, and its performance design has been suggested as well. Finally, a statistical approach to achieve high characteristic and performance is suggested by Taguchi method to identify a certain relationship between a mobile phone and a micro-speaker.

1. 서 론

전기 전자 기술의 발달로 인한 휴대전화, WAP 폰, PDA, 웹 패드 등과 같은 이동통신 단말기의 성능은 지속적인 향상을 가져오고 있다. 특히 회로 집적 기술의 발달은 이동통신 단말기의 소형화, 고성능화, 다기능화를 가져왔고, 이는 사용자층의 저변 확대를 더욱 가속화시키고 있다. 그러나 대부분 부품들은 회로 집적 기술과 생산 기술의 향상으로 스피커 자체의 성능의 향상은 이루어 졌다. 그러나 그림 1.1에서 보듯이 실제로 특성이 좋은 마이크로 스피커를 개발하였더라도 양산되고 있는 단말기에 장착시 원하는 특성이 나오지 않는 문제를 가지고 있다.

이에 본 논문에서는 유한요소법을 이용해서 전자기계, 기

계 진동계, 음향계 및 이들의 연성 해석을 통해 마이크로 스피커 해석의 이론적 해석을 유도하고 통계적 실험계획법(Experiments Design)의 한 분야인 다구찌(Taguchi) 기법을 사용하여 단말기와 마이크로 스피커의 연계특성을 규명하였다. 이를 통해 마이크로 스피커 설계 방법을 제시하고자 한다.

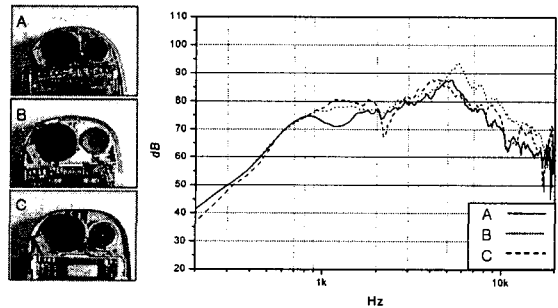


그림 1.1 단말기에 따른 동일 스피커의 다른 특성

† 황건용, 영산대학교 정보통신학과
E-mail : gyhwang@ysu.ac.kr
Tel: (055) 380-9458, Fax: (055) 380-9249

* 부산대학교 기계설계공학과

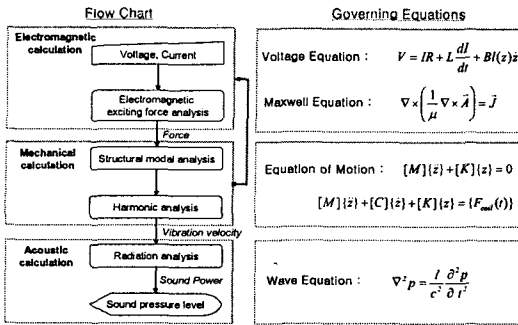


그림 2.1 연성해석에 대한 Flow chart

2. 마이크로 스피커의 설계

2.1 마이크로 스피커의 연성 특성 해석 방법

실제 다이내믹 시스템은 보이스코일과 영구자석으로 대표되는 전자기적 부분과 다이어프램의 기계적 부분으로 구성되어 있다. 또한 이 두 부분은 서로 연성되어 있고 이 연성특성을 정확하게 분석해야 실제 시스템의 해석이 가능하다.

이러한 연성특성을 파악하여 최종적인 시스템의 특성을 구현하고 이를 실험과 비교하여 그 정당성을 검증하였다.

식(1)은 전자기계에서 보이스코일에 걸리는 힘으로, B, L, I는 자속밀도, 보이스코일의 길이, 보이스코일에 흐르는 전류를 나타낸다. 식(2)는 다이어프램의 기계적 운동 방정식으로 M, C, K는 질량, 감쇠, 강성을 나타낸다. 식(3)은 전압 방정식으로 V, R, λ는 각각 인가 전압, 코일의 저항, 자속 쇄교량을 나타낸다. 또한, dλ/dI, dλ/dx는 각각 인덕턴스(Inductance), 스피드턴스(Speedance)를 나타낸다.

$$F_{coil} = \oint IdL \times B \quad (1)$$

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \{F_{coil}(t)\} \quad (2)$$

$$V = IR + \frac{d\lambda}{dt} \frac{dI}{dt} + \frac{d\lambda}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

식(1)의 보이스코일에 작용하는 힘은 식(2)의 기계 진동 시스템의 가진력을 결정하게 되는데 이는 식(3)에서 결정된 코일에 흐르는 전류에 의해 결정된다. 단, 이 전류를 결정하는 전압방정식 식(3)을 살펴보면 기계방정식 식(2)의 해인 다이어프램의 속도에 의해 역기전력이 결정되고 이에 의해 코일에 흐르는 전류가 결정되게 된다. 따라서 위 3개의 식이 서로 연성되어 있으며 이는 당연히 고려되어져야 한다.

다시 말해, 역기전력의 변화는 전압방정식에 의해 구해지

는 전류의 변화를 야기시키며, 전류의 변화로 인해 코일에 작용하는 힘이 변화하게 된다. 코일에 작용하는 힘이 변하게 되면 코일의 속도 또한 변하게 된다. 그러면, 또다시 역기전력에 영향을 미치게 되므로 이러한 반복과정을 통해 수렴하는 코일에 흐르는 전류를 최종해로 취하고 이에 의해 결정된 코일에 걸리는 힘을 가진력으로 최종적인 다이어프램의 진동특성을 분석한다. 이를 순서대로 나타내면 그림 2.1과 같이 나타낼 수 있다.

자유 음향 영역에서 음향파의 전달은 선형 파동 방정식으로 나타내면, 식(4)로 표현할 수 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4)$$

여기에서, c와 p는 공기중의 음파속도 (즉, 음속)와 음향 소리 압력 (Acoustic Sound Pressure)을 나타낸다.

마이크로 스피커의 진동에 의한 Sound Power는 식(5)와 같이 계산된다.

$$W_{rad}(f) = \rho_0 c S_{rad} \sigma_{rad}(f) \langle V_0^2(f) \rangle [W] \quad (5)$$

여기에서, f, ρ₀, S_{rad}와 σ_{rad}는 각각 고유주파수, 공기 밀도, 다이어프램에 의한 소리방사 표면적과 방사율을 나타낸다. 방사율은 식(6)과 같다[1].

$$\sigma_{rad}(f) = \frac{k^2 a^2}{1 + k^2 a^2} \quad (6)$$

여기에서, wave number k는 k = 2πf/c, a는 다이어프램 반경이다.

소리는 흔히 압력의 변화로 설명된다. 그 단위는 파스칼 Pa를 쓰게 되는데 많은 응용분야에서는 음압(SPL: Sound Pressure Level)을 대수적인 비율인 dB단위로 표시된다. 만약, 다이어프램의 다른 소리원이 없고 표면 근처에 반사 소리도 없다면, 변위 d에 대한 음압(SPL)은 식(7)로 표현된다.

$$L_p(d) = L_w - 20 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - 8 [dB] \quad (7)$$

여기에서, d₀와 L_w는 일반화된 변위와 Sound Power Level을 말하고 식으로 나타내면 식(8)과 같다[2].

$$L_w(d) = 10 \log_{10} \left(\frac{W_{rad}}{10^{-12}} \right) \quad [dB] \quad (8)$$

음압특성을 야기하는 다이어프램의 진동특성은 각각의 응답점의 속도들이 유기적으로 연관된다. 따라서 각각의 노드의 모든 속도를 다이어프램 전체의 속도로 나타내어 지는데 면적 속도의 개념이 필요하다. 이는 한 요소를 구성하는 4개의 노드점을 이용, 이를 평균하여 해당 요소의 속도라고 가정하고 이를 면적에 대해 적분하는 것이다. 이로써 각각의 노드의 속도는 합리적으로 음압특성에 연관되어진다.

기계 진동계에서 다이어프램의 형상에 따른 진동특성 분석을 통해 설계한 마이크로 스피커의 음향계 실험결과와 FEM 음향계 해석결과가 일치함을 검증하였다.

그림 2.2는 최종설계안인 마이크로 스피커의 음향계 실험값과 FEM 해석값을 비교한 것이다. 저주파영역에서는 비교적 일치하지만 고주파영역에서는 유한요소 해석의 한계를 볼 수가 있었다. 본 논문에서는 마이크로 스피커의 크기가 기존의 스피커에 비해 상대적으로 매우 작으므로 주위는 완전 baffle되어 있고, 음원이 하나의 점이라는 가정하에서 해석하였다. 그러나, 실제로는 직경이 15mm 정도 되며 그 안의 내부 구조가 음향 특성에 영향을 미칠 수 있다. 다이어프램이 진동함에 따라 공기가 유동하게 되며, 이것을 돕기 위해 프레임이나 요크에는 통기구가 뚫려 있다. 이러한 통기구의 크기나 위치, 개수 등은 공기의 유동에 밀접한 관련이 있으며, Acoustic Impedance, Acoustic Stiffness 등에 영향을 주어 해석치와의 차이를 발생하게 된다.

실제 덕트에서 보면 공기의 유동에 의해서 정재파와 같은 현상이 일어나며, 그로 인해 또 다른 공진 현상이 생기게 된다. 특히, 고주파일수록 파장이 짧아 더 많은 점에서 공진이 발생한다. 마이크로 스피커에서도 마찬가지로 이와 같은 현상으로 저주파에서는 별 영향이 없으나, 고주파에서는 큰 영향을 미쳐 실험치와 해석치와의 차이가 발생하며, 특히 실험치의 경우 고주파에서 크게 떨어지는 현상을 가지게 된다.

그림 2.3은 마이크로 스피커의 음압을 측정하는 장비의 구성도를 보여주며, 그림 2.4는 마이크로 스피커의 음압을 측정하는 실험장비 시스템의 사진이다.

측정 장비는 Audio Analyzer 전용 장비인 B&K Pulse System(3560C)를 사용하였으며, Pulse System에서 가청 영역의 white noise 신호를 재생하여 이 신호를 Power Amp.에서 증폭한다. 증폭된 신호는 1000cc baffle box내에 장착된 마이크로 스피커로 재생되며 그 때 재생된 음을 10cm 떨어진 Microphone으로 입력을 받아서 Pulse System에서 FFT 분석하여 SPL 그래프가 Monitor로 보여진다. 일반적으로 마이크로 스피커의 경우 0.1W 혹은 0.3W 기준으로 측정하며, 음압은 800Hz, 1kHz, 1.2kHz, 1.5kHz의

음압 평균으로 나타낸다.

3. 모바일 폰과 마이크로 스피커의 연계 특성 규명

3.1 SPL최대화를 위한 실험 및 분석 (1024Hz)

본 실험은 단말기와 마이크로 스피커가 결합시 소리의 크기가 가장 크게 느껴지는 1000Hz 부근의 1024Hz에서 SPL을 최대화하기 위한 방법을 도출하기 위한 문제로 계량 정특성 망대 문제라고 할 수 있다. 계량 정특성 망대 문제는 산포를 잡는 문제로 특성치가 클수록 좋은 경우이다. 본 실험에서 개선을 위한 정도를 나타내는 측정치로 위에서 언급한 SN비를 제시하는데, 각 인자에서 SN비가 큰 수준을 선택하여 최적의 조건을 결정하게 된다[3,4].

SN비는 높을수록 좋다. 제품의 특성에 따라서 SN비에 대한 정의는 다르지만, 평균이 같은 두 집단에서 분산이 작을수록 SN비는 높았다. 망대특성인 경우의 SN비 공식은 식(9)와 같다. 좋은 SN비란 개선의 정도를 수치로 정확하고 눈에 보이게 만들 수 있으면 된다.

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (9)$$

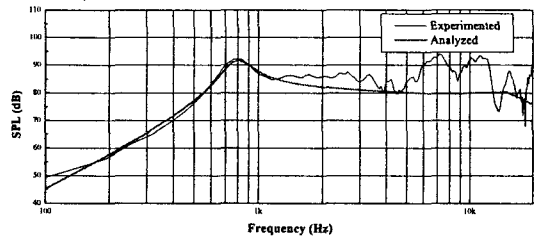


그림 2.2 실험치와 해석치의 비교

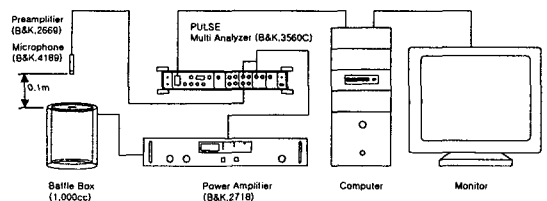


그림 2.3 마이크로 스피커의 음압 측정 장비 구성도

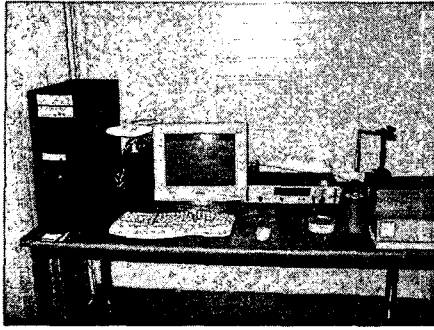


그림 2.4 마이크로 스피커의 음압측정 시스템의 사진

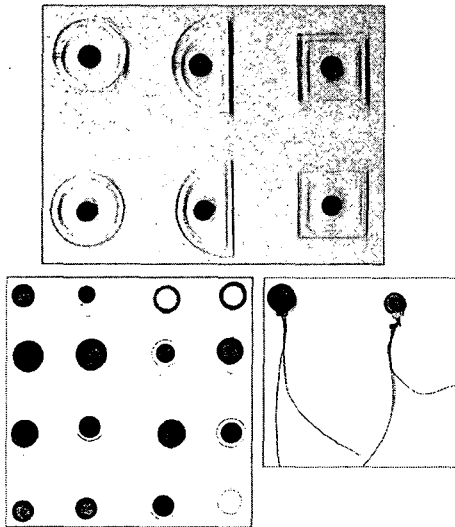


그림 3.1 실험을 위해 기제작, 또는 확보한 시료

표 3.1 실험배치를 위한 인자들의 구성

구분	표시	이름	1수준	2수준	3수준
제어인자	A	실험용 목합 밀폐정도	완전밀폐	반밀폐	X
	B	포론의 종류	포론A	포론B	X
	C	실험용 목합 형상	원통형	반원통형	육면체형
	D	실험용 목합 체적	10cc	5cc	3cc
	E	포론의두께	大	中	개방
	F	방음구의 크기	大	中	小
	G	스크린의 종류	스크린A	스크린B	없음
잡음인자	N	암소음	조음함	시끄러움	

(1) 단말기와 마이크로 스피커의 연계특성 규명을 위한 테마선정 (단계 1)

본 실험의 목적은 마이크로 스피커가 단말기 Set에 장착 시 주어진 조건에 따라 여러 실험 조건과 비교를 통하여 최대의 SPL을 낼 수 있는 최적의 조건을 도출하기 위함이다. 제시되어진 최적 조건은 단말기 목합 설계시 설계 표준 자료로 활용되어질 수 있다.

단말기와 마이크로 스피커의 연계특성을 규명하여 최적 조건을 도출하기 위해서는 많은 제약조건들이 있을 수 있는데, 본 실험에서는 최적 조건에 영향을 줄 수 있는 10개의 제어인자들과 1가지의 환경요소인 잡음인자를 설정하였고, 그 중에서 가장 영향력이 클 것으로 예상되는 7개의 제어인자들과 1개의 잡음인자를 최종 실험에 사용하였다.

(2) 문제분석 및 주요 관련인자 분석 (단계 2)

실험에 의한 SPL 곡선에 영향을 줄 수 있는 인자들을 선정하여 제어인자와 잡음인자로 분류하였다. 단말기의 형상을 기초로 제작한 실험용 목합의 형상, 체적, 공명공간의 크기 등을 주요 제어인자로 선정하였으며, 잡음인자로 실험 시의 주변 소음 정도를 선정하였다. 그림 3.1은 실험을 위해 기제작하거나 확보한 시료들을 보여주고 있다.

(3) 특성치 및 인자 선정 (단계 3)

특성치(yi)는 실험 결과 그려지는 SPL 곡선에서 1024Hz 일 때의 SPL을 선정하였다. 본 실험에서 적용되는 다음 절에 언급되는 L36(22×35) 혼합 직교배열표를 사용하기 위해서 각각의 제어인자의 조건에 따라 1수준, 2수준, 3수준으로 나누었고, 총 7개의 제어인자를 최종으로 추출하였다.

(4) 실험배치 선정 (단계 4)

제어인자가 2수준 2개, 3수준 5개이므로 내측배열의 직교배열표는 L36(22×35)을 사용하였다. 외측배열의 잡음인자는 조용할 때와 시끄러울 때로 2수준으로 나누었다. 이들을 각각 다음 단계인 실험실시에서 30분 간격으로 2회 반복실험하였다. 표 3.1은 실험배치를 위한 인자들의 구성을 나타내고 있다.

(5) 실험실시 (단계 5)

모든 실험을 현실적인 문제에 맞추어 Random한 순서로 실험하였더니 표 3.2과 같은 실험 결과를 얻었다.

(6) 최적 조건 도출 (단계 6)

앞 선 실험 실시한 결과를 바탕으로 MINITAB R13을 이용하여 분석을 실시하였다. 분석을 통해서 그림 3.2와 같은 결과를 얻었다. 이를 통해 표 3.3에의 각 수준별 SN비 추정값과 최적 조건에서 추정값 비교를 할 수 있다.

표 3.2 L36(22×35) 형 직교배열표

실험 번호	내측 배열							외측 배열			
	A	B	C	D	E	F	G	N1		N2	
								R1	R2	R1	R2
1	1	1	1	1	1	1	1	85.155	85.1776	84.8102	84.9613
2	1	1	2	2	2	2	2	86.4528	86.3384	86.0785	86.2967
3	1	1	3	3	3	3	3	71.5856	72.0901	72.0854	72.3914
4	1	1	1	1	1	1	2	84.9254	84.6351	84.6233	84.7001
5	1	1	2	2	2	2	3	86.2863	86.2104	86.2809	86.2276
6	1	1	3	3	3	3	1	73.3321	72.9888	72.3855	72.583
7	1	1	1	1	2	3	1	79.7942	79.7696	79.6533	79.5771
8	1	1	2	2	3	1	2	85.8358	85.7286	85.5674	85.6151
9	1	1	3	3	1	2	3	88.9699	88.5631	87.6836	87.4334
10	1	2	1	1	3	2	1	85.5983	85.4794	85.7103	85.4964
11	1	2	2	2	1	3	2	84.533	84.31	84.1925	84.0509
12	1	2	3	3	2	1	3	90.0092	89.9033	89.8133	89.9833
13	1	2	1	2	3	1	3	79.415	79.3126	79.1877	79.1573
14	1	2	2	3	1	2	1	87.1711	87.1289	87.1609	87.103
15	1	2	3	1	2	3	2	81.0004	81.1189	81.0947	81.1428
16	1	2	1	2	3	2	1	79.8704	80.1034	80.3212	79.9605
17	1	2	2	3	1	3	2	85.9408	85.6801	85.6151	85.566
18	1	2	3	1	2	1	3	84.8836	85.1915	84.9771	84.9655
19	2	1	1	2	1	3	3	90.1663	89.9804	89.7561	89.8229
20	2	1	2	3	2	1	1	81.4155	81.2254	80.8778	81.3498
21	2	1	3	1	3	2	2	87.0254	87.1156	87.0048	86.9065
22	2	1	1	2	2	3	3	89.9966	89.6733	89.5849	91.2433
23	2	1	2	3	3	1	1	74.6183	74.7712	74.3436	74.4124
24	2	1	3	1	1	2	2	87.4817	87.2692	87.246	87.1757
25	2	1	1	3	2	1	2	86.1964	84.0362	83.8218	84.0275
26	2	1	2	1	3	2	3	88.3593	88.422	88.4109	88.4297
27	2	1	3	2	1	3	1	87.0364	87.1628	87.1628	86.7388
28	2	2	1	3	2	2	2	83.761	83.6725	83.3996	83.5142
29	2	2	2	1	3	3	3	76.06	75.9777	75.9671	75.8974
30	2	2	3	2	1	1	1	90.1472	88.4234	85.4628	88.9578
31	2	2	1	3	3	3	2	63.8162	63.3154	62.8639	63.6214
32	2	2	2	1	1	1	3	86.9341	87.021	86.7994	86.8059
33	2	2	3	2	2	2	1	91.8014	91.6655	91.5595	91.6725
34	2	2	1	3	1	2	3	84.5152	84.3353	84.2555	84.3105
35	2	2	2	1	2	3	1	81.187	80.9971	81.2845	81.1242
36	2	2	3	2	3	1	2	78.7703	78.6587	78.4341	78.5296

(7) 재현 실험 및 표준화 (단계 7)

이제까지의 과정으로 얻은 최적 조건으로 다시 4회 실험 하였더니 SN비가 최적 조건과 거의 동일했다. 따라서 제시된 최적 조건은 타당하다고 할 수 있다. 이 결과를 정리하면 단말기와 마이크로 스피커가 결합시 1024Hz에서의 SPL을 최대화하기 위한 방법으로 표 3.4과 같이 표준화할 수 있었다.

3.2 1차 고유주파수 저하를 위한 실험 및 분석

단말기와 마이크로 스피커가 결합시 1차 고유 주파수를 저하시키기 위한 방법을 도출하기 위한 문제로 계량 정특성 망소 문제라고 할 수 있다. 망소 특성인 경우의 SN비 공식은 식 (10)과 같다. 그림 3.3과 표 3.5는 앞선 7단계의 실험과 동일하게 하여 특성치(yi) 입력부분에서 1차 고유주파수를 기록한 실험결과이다.

$$SN = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (10)$$

Main Effects Plot for S/N Ratios

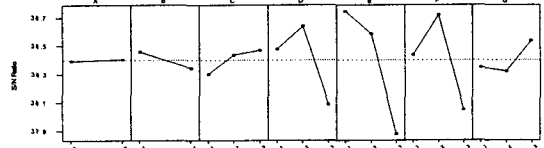


그림 3.2 SPL최대화를 위한 실험 및 분석 (1024Hz) 결과 그래프 (SN비)

표 3.3 각 수준별 SN비 추정값과 최적 조건에서 추정값 비교

	1수준	2수준	3수준(일부2수준)	최적
SN비	38.7511	39.0418	37.3579	39.5686

표 3.4 최적 조건시의 제어인자의 수준 (SPL 관점)

구분	표시	이름	1수준	2수준	3수준
제어인자	A	실험용 육합 밀폐정도	완전밀폐	반밀폐	
	B	포논의 종류	포논 A	포논 B	
	C	실험용 목합 형상	원통형	반원통형	육연세형
	D	실험용 목합 재적	10cc	5cc	3cc
	E	포논의 두께	大	中	이(개방)
	F	방음구의 크기	大	中	小
	G	스크린의 종류	스크린 A	스크린 B	없음
검출인자	H	주위 환경	조용함	시끄러움	

Main Effects Plot for S/N Ratios

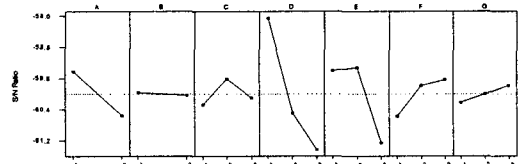


그림 3.3 1차 고유주파수 저하를 위한 실험 및 분석 결과 그래프 (SN비)

표 3.5 최적 조건서의 제어인자의 수준 (1st 고유주파수 관점)

구분	표시	이름	1수준	2수준	3수준
제어인자	A	실험용 목합 입체정도	완전입체	반입체	
	B	포론의 종류	포론 A	포론 B	
	C	실험용 목합 형상	원통형	반원통형	육면체형
	D	실험용 목합 체적	10cc	5cc	3cc
	E	포론의 두께	大	中	小(개방)
	F	방음구의 크기	大	中	小
	G	스크린의 종류	스크린 A	스크린 B	없음
집중인자	N	주위 환경	조용함	시끄러움	

4. 결 론

근래의 정보 통신 사회의 도래와 이에 부응하는 주변 산업의 성장은 기존에 사용되던 거의 대부분의 제품들의 소형화를 요구하고 있으며, 특히 이동통신 단말기에 사용되는 마이크로 스피커는 소형화의 필요가 크게 대두되고 있으나, 이를 위한 기초적인 연구조차 진행되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 라우드 스피커와는 구조 및 소재면에서 상이한 마이크로 스피커에 대한 전자기계, 진동계 및 음향계의 연성 해석을 통하여 설계방안을 제시하였다.

또한 실제로 특성이 좋은 마이크로 스피커를 개발하였더라도 양산되고 있는 단말기에 장착시 원하는 특성이 나오지 않을 수 있으므로 통계적 실험계획법(Experiments Design)의 한 분야인 다구찌(Taguchi) 기법을 사용하여 단말기와 마이크로 스피커의 연계특성을 규명하였다. 크게 테마 선정으로부터 최적 조건으로 표준화하기까지 7단계의

구성으로 실험 계획, 실시, 분석의 과정을 수행하였다. 그 결과 여러 실험 조건과 비교를 통하여 1024Hz에서 최대의 SPL을 낼 수 있는 최적 조건과 1차 고유주파수를 저하를 위한 최적 조건을 도출할 수 있었다. 제시되어진 최적 조건은 단말기 목합 설계시 설계 표준 자료로 활용되어질 수 있다.

후 기

본 연구 2004년도 산학협동재단 학술연구비에 의한 과제 의 일부로 연구 되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) L. E. Kinsler, *Fundamentals of Acoustics*. 1982. John Wiley & Son, USA
- (2) G. Y. Hwang, H. J. Lee, S. M. Hwang, B. S. Kang and S. K. Jeung, "Performance comparison between inner and outer permanent magnet type micro-speakers used for mobile phones," *Journal of Applied Physics*, vol.93-10, 2003, pp.8519-8521
- (3) A. N. Link and G. Tassej, "Propulsion system design optimization using the Taguchi method," *IEEE Trans. on Engineering Management*, vol.40-3, 1993, pp.315-322
- (4) S. Brisset, F. Gillon, S. Vivier and P. Brochet, "Optimization with experimental design: an approach using Taguchi's methodology and finite element simulations," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.37-5, 2001, pp. 3530-3533