

# 이동통신 단말기용 통합 영구 자석 형태의 마이크로스피커 개발

## Development of Combined Permanent Magnet Type Microspeakers Used for Mobile Phones

이홍주† · 황상문\*\* · 권중학\*\* · 황건용\* · 양용창\*\*

Hwang, Hong-Joo Lee, Sang-Moon Hwang, Joong-Hak Kwon, Gun-Yong Hwang and Yong-Chang Yang

**Key Words** : Broadband(광대역), Finite-element Method (FEM, 유한요소법), Magnetic Circuit(자기회로), Microspeaker(마이크로스피커).

### ABSTRACT

In mobile phones of multimedia era, microspeakers of high quality sound are essential parts to generate human voice in speaker phone and MP3 song player. In this paper, two types of microspeakers, outer permanent magnet (PM) and combined PM type, are analyzed using electromagnetic, mechanical, acoustical and their coupling analysis. For performance comparison, voice coil diameter is chosen as a design parameter to change excitation position and magnet volume for both types. For combined PM type, sound pressure level (SPL) is improved due to increased PM volume compared to outer PM type. Also, with the decreased voice coil diameter for combined PM type, the 1st resonant mode of the diaphragm is more efficiently excited due to concentrative excitation, resulting in lower and broader frequency range. Therefore, it can be said that the combined PM type microspeakers are more advantageous for high performance microspeaker which are essential for multimedia era.

### 1. 서 론

20세기 후반 이동통신 단말기의 대중화와 전기·전자 기술의 발전 및 IMT-2000 사업으로 이동통신 장비는 많은 발전을 이루었다. 이러한 기술의 발달과 통신기기의 폭발적인 수요로 인하여 차세대 이동통신 단말기에서는 화상통신 뿐만 아니라 TV, 캠코더, MP3 기능이 탑재되기 때문에 이를 만족시키는 고성능의 음향특성을 지닌 마이크로스피커가 절실히 필요하다. 그러나 기계적인 동특성을 가지는 진동모터와 마이크로스피커와 같은 기계 및 음향 부품들은 소형화, 경량화의 커다란 방해 요인으로 남아 있다. 특히 본 논문에서 논의하고자 하는 이동통신기기의 음성 호출용으로 사용되는 마이크로스피커의 경우 초소형화시 고성능의 음향 특성을 구현하기가 어렵다. 이러한 기계적 동특성을 지니는

부품들은 그 구조에는 큰 변화가 없었으나 최근 고에너지 영구자석의 상용화, 미소 구조물의 성형 기술의 발달로 인하여 지속적으로 소형화, 경량화 및 고성능화 되어 가고 있다.

본 논문에서의 연구목적은 앞의 연구배경에서 언급한 전기·전자 기술 및 음향 재생 기술을 만족시키는 음향 부품 개발을 이동통신 단말기용 마이크로스피커에 적용시키고자 한다. 기존의 마이크로 스피커의 내부구조와 다른 Combined Magnet type의 새로운 형태의 자기회로를 채택하여 마이크로스피커의 성능의 척도가 되는 음압(音壓)과 저주파 대역의 음향 특성을 개선시켜 기존의 형태와 비교하였으며, FEM(Finite Element Method) 해석을 통하여 고성능의 마이크로스피커의 설계 및 개발에 관한 연구를 수행하였다.

전자기계에서는 축방향에 대해 완전 대칭인 원형의 마이크로스피커의 두 가지 형태의 자기회로를 2차원으로 모델링하고 공극에서의 자속밀도와 다이어프램(Diaphragm)에 가진력으로 가해지는 전자기력을 FEM으로 해석하였으며 두 가지 자기회로 형태에 대한 각각의 자속밀도와 전자기력을 서로 비교하였다. 진동계에서는 전자기적 힘이 가해진 다이

† 부산대학교 기계설계공학과  
E-mail : honz75@pusan.ac.kr  
Tel : (051)510-3204, Fax : (051)582-3104

\* 영산대학교 네트워크공학부

\*\* 부산대학교 기계설계공학과

$$F_{coil} = \oint I dl \times B \quad (2.3)$$

여기서,  $I$ ,  $l$ ,  $B$ 는 각각 보이스코일의 전류, 코일길이, 자속밀도이고,  $I$ 는 등가회로 전압방정식부터 식(2.4)와 같이 구할 수 있다.

$$V = IR + L \frac{dI}{dt} + B(z) \dot{z} \quad (2.4)$$

여기서  $V$ ,  $R$ 와  $L$ 는 전압, 보이스코일 저항과 인덕턴스(Inductance)이다. 보이스코일 운동은 역기전력(BEMF, Back Electro Motive Force),  $B(z) \dot{z}$ 을 발생시킨다. 여기서  $l$ ,  $z$ 와  $\dot{z}$ 는 보이스코일길이, 보이스코일 변위와 속도이다.

### 2.3 진동계 해석

자유 진동 해석에서 비감쇠 구조물 전체의 진동 운동방정식을 행렬로 표현하면 다음과 같다.<sup>(4)</sup>

$$[M]\{\ddot{z}\} + [K]\{z\} = 0 \quad (2.5)$$

여기서,  $[M]$ 과  $[K]$ 는 각각 질량행렬과 강성행렬이며,  $\{z\}$ 는 각 질점에서의 변위 벡터로서 두 번 미분한 것은 가속도를 나타낸다.

강제 진동 해석에서는 시간에 따라 급격하게 변화하는 전자기적 가진력이 작용할 때 구조물의 동적 응답 특성해석이 필요하다. 따라서 유한요소법을 이용하여 가진력의 패턴에 의한 구조물의 과도 특성을 해석하기 위한 방법 중 모드 중첩법(Mode Superposition Method)은 다음과 같다.

동적하중 가진력에 의한 구조물의 동적 응답 특성을 위하여  $n$ 차의 자유도에 대한 시간 함수에 따른 응답은 식(2.6)와 같다.

$$[M] \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} \ddot{y}_i(t) + [C] \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} \dot{y}_i(t) + [K] \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} y_i(t) = \{F(t)\} \quad (2.6)$$

여기서  $y_i$ 는 응답,  $\{\phi_i\}$ 는  $i$  번째 모드의 모드형상계수,  $\{F(t)\}$ 는 전자기 힘을 포함한 구동벡터이다.

실제 다이내믹 시스템은 보이스코일과 영구자석으로 대표되는 전자기적 부분과 다이어프램의 기계적 부분의 연성으로 되어 있으며, 이 연성특성을 정확하게 분석해야 실제 시스템의 해석이 가능하다.

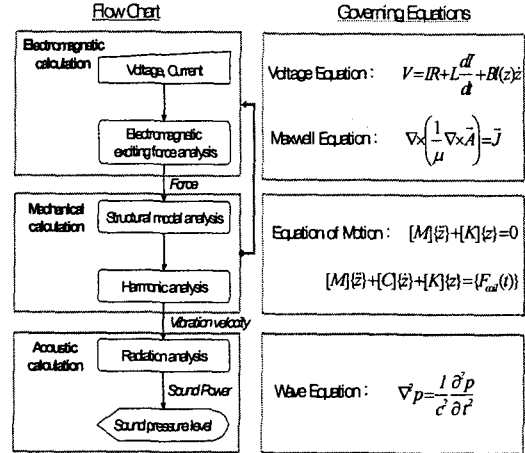


그림 2.2 연성해석에 대한 Flow Chart

역기전력의 변화는 전압방정식에 의해 구해지는 전류의 변화를 야기 시키며, 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. 본 논문에서는 이러한 연성특성을 파악하여 최종적인 시스템의 특성을 구현하였으며 이를 순서대로 나타내면 그림 2.2과 같이 나타낼 수 있다.

### 2.4 음향계 해석

자유 음향 영역에서 음향파의 전달은 선형 파동 방정식으로 나타내면, 식(2.7)로 표현할 수 있다.<sup>(5)(6)</sup>

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 b}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

여기에서,  $c$ 와  $p$ 는 공기중의 음파속도 (즉, 음속)와 음향 소리 압력 (Acoustic Sound Pressure)을 나타낸다.

마이크로 스피커의 진동에 의한 Sound Power는 식(2.8)와 같이 계산된다.

$$W_{rad}(f) = \rho_0 c S_{rad} \sigma_{rad}(f) \langle V_0^2(f) \rangle \quad [W] \quad (2.8)$$

여기에서,  $f$ ,  $\rho_0$ ,  $S_{rad}$ 와  $\sigma_{rad}$ 는 각각 고유주파수, 공기 밀도, 다이어프램에 의한 소리방사 표면적과 방사율을 나타낸다. 방사율은 식(2.9)과 같다.

어프램의 응답 특성을 예측하기 위한 강제 진동해석과 고유 주파수 및 모드 형상을 도출하기 위한 자유 진동해석을 수행하고, 다이어프램의 형상변화를 설계변수로 정하여 1차 고유주파수 및 진동변위의 진동특성을 도출하였다. 그리고 코일과 자석의 전자기계 부분과 다이어프램의 진동계는 서로 연성되어 있기 때문에 이러한 연성특성을 고려하였으며, 음향계에서는 설계를 통해 제작되어진 고성능 마이크로스피커를 실험을 통하여 SPL(Sound Pressure Level)을 도출함으로써 FEM<sup>(1)</sup>을 통해 도출된 결과의 타당성을 검증하였다.

## 2. 마이크로스피커의 이론적 해석 방법

### 2.1 마이크로 스피커의 작동 원리 및 내부구조

이동통신 단말기용 마이크로스피커(Microspeaker)는 일반적으로 라우드 스피커와 전자기적, 기계적 구조에는 큰 차이가 없으며, 전류가 흐르는 도체가 자계(磁界)속에 있으면 힘을 받는다는 플레밍의 왼손 법칙에 의하여 여러 주파수가 포함된 전기적 에너지인 전류신호가 보이스코일(Voice Coil)에 인가되면 보이스코일은 전류의 세기와 주파수의 크기에 따라 기계적 에너지인 전자기력을 발생시키고, 보이스코일에 부착되어 있는 다이어프램에 가진력에 의하여 진동을 발생시켜 최종적으로 인간의 귀가 인지할 수 있는 소정 크기의 음압(音壓)을 발생시키게 된다. 그림 2.1은 앞의 마이크로스피커의 작동원리를 도식화한 그림이다. 이동통신 단말기에 있어서 음압이 크지 않고, 인간의 귀에 밀착시켜 소리를 듣는 것은 다이내믹 리시버(Dynamic Receiver)라고 하며, 음압이 크고 인간의 귀로부터 소정의 거리를 두고 사용하는 것들을 마이크로스피커라고 한다.

이와 같은 마이크로 스피커의 자기회로는 철금속 성분으로 된 요크, 영구자석 및 탐플레이트를 이용하여 요크와 탐플레이트 사이의 공극 내에 있는 보이스코일에 직각으로 자속(Magnetic Flux)이 쇄교할 수 있도록 설계되어 있으며, 입력신호에 의해 상하로 전자기력인 가진력이 보이스코일에 발생하며, 보이스코일 정착되어 있는 다이어프램이 진동하여 음압을 발생시킨다. 다이어프램은 상하 진동 시에 우수한 응답성과 좌굴 현상을 제거하기 위해 강성을 다양한 형상의 굴곡으로 주게 되며, 다이어프램의 형상은 주파수 특성에 영향을 주는 설계변수로 작용한다.

### 2.2 전자기계 해석

마이크로스피커의 전자기장을 이론적으로 해석하기 위해 철의 자기투자율(Magnetic Permeability)은 무한대이고, 자기포화는 일어나지 않는다고 가정한다. 영구자석 및 보이스코일을 포함한 마이크로 스피커의 전자기장은 식(2.1)의 Maxwell의 전자기 방정식으로부터 구할 수 있다.<sup>(2)(3)</sup>

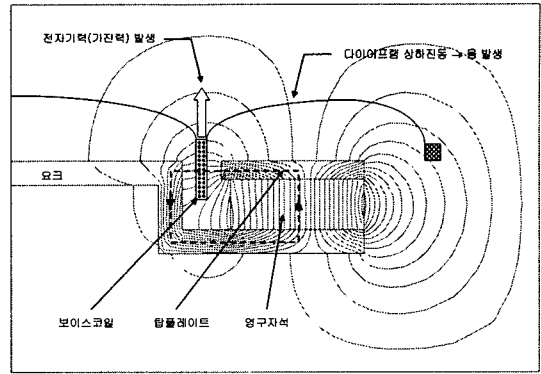


그림 2.1 마이크로 스피커의 구동원리

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = J_0 - \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (2.1)$$

여기서  $\mu$ 는 물질 자기 투자율(Magnetic Permeability),  $J_0$ 는 전류밀도(Current Density),  $M$ 은 자기모멘트(Magnetic Moment)를 말한다.

마이크로스피커의 탐플레이트는 영구자석 영역의 대부분의 자속 흐름을 한정된 반경방향 간극 안에 집중시킬 수 있도록 도와준다. 다이어프램에 붙어있는 보이스코일로부터 연속적으로 전류가 흐르게 되면, 다이어프램의 운동은 주로 축 방향으로 진동한다. 전자기 시스템 지배방정식은 식(2.1)의 Maxwell 방정식으로부터 파생된다. 자속의 흐름인 자속 밀도를 벡터로 표시하면 식(2.2)와 같다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \mu \times \vec{H} \quad (2.2)$$

여기서  $\vec{A}$ 는 자기 벡터 포텐셜 (Magnetic Vector Potential),  $\vec{H}$ 는 자기장의세기(Magnetic Intensity),  $\mu$ 는 물질의 자기 투자율(Magnetic Permeability)을 말한다. 자기 투자율  $\mu$ 는  $\mu_0 \times \mu_r$ 으로써,  $\mu_0$ 는 진공 중에 투자율로 모든 매질에서 투자율의 기준이 되며  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$ 이다.  $\mu_r$ 는 영구자석의 자기 투자율을 말한다.

영구자석에 의한 자속밀도(Magnetic Flux Density) 분포와 코일에 의한 영향만을 고려하면 주 관심 대상인 전자기력, 즉 가진력을 구할 수 있다. 전자기 시스템 해석을 통하여 마이크로 스피커에 가진되는 코일의 부분에서 축방향으로 운동하는 힘을 구하고자 한다. 우선 보이스코일에 전류가 공급되면 영구자석에 대해 상대적으로 밀거나 당기는 힘, 즉 가진력이 발생한다. 공극에서의 자속밀도 및 코일의 전류와 가진력  $F_{coil}$ 의 관계는 Lorentz 방정식에 의해 식(2.3)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{rad}(f) = \frac{k^2 a^2}{1 + k^2 a^2} \quad (2.9)$$

여기에서, Wave Number  $k$ 는  $k = 2\pi f/c$ ,  $a$ 는 다이어프램 반경이다.

소리의 크기는 흔히 압력의 크기로 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  $d$ 에 대한 음압(SPL)은 식(2.10)로 표현된다.

$$L_p(d) = L_w - 20 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) - 8 [dB] \quad (2.10)$$

여기에서,  $d_0$ 와  $L_w$ 는 일반화된 변위와 Sound Power Level을 말하고 식으로 나타내면 식(2.11)과 같다.

$$L_w(d) = 10 \log_{10} \left( \frac{W_{rad}}{10^{-12}} \right) [dB] \quad (2.11)$$

### 3. 설계변수에 따른 성능 비교

그림 3.1의 (a) 마이크로스피커는 기존의 이동통신 단말기에 사용되는 대표적인 자기회로 형태의 Outer Magnet type 마이크로스피커의 자기회로이고 (b)는 본 논문에서 제시하고자 하는 Combined Magnet type 마이크로스피커의 자기회로이다. 단말기용 음향부품의 경우 원음에 더 가깝게 구현하기 위해서는 더 낮은 1차 고유주파수와 더 높은 음압을 필요로 하게 된다. 그러나 Outer Magnet type 마이크로스피커의 기존의 음향특성으로는 만족하기 힘들며, 성능을 만족시키기 위해 Outer Magnet type 마이크로스피커의 직경과 두께를 증가시키면 소형화, 경량화의 단말기 추세에 역행하게 된다. 이에 본 논문에서는 마이크로스피커의 두께는 3.3mm, 직경은  $\phi 15$ 로 제한하고 코일 반경  $W$ 를 설계변수로 하여 해석하고 그 결과를 비교 하였다.

그림 3.2는 마이크로스피커의 자기회로 및 2D flux line을 나타낸다. 그림 3.3의 자속밀도를 Outer Magnet 및 Combined Magnet type 간에 비교하여 보면 Outer Magnet type의 경우  $w$ 값이 작아짐에 따라 자석의 부피증가로 인하여 자속밀도가 상승함을 알 수 있으며 Combined Magnet type의 경우  $w$ 의 값의 변화에 따라 거의 비슷한 자속밀도 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고 두 type의 자속밀도 값은 20%~40%정도 차이가 나며 이것은 음압의 크기와 저주파 음향특성에 많은 영향을 미칠 것이다. 그림 3.4은 각 형태의 마이크로스피커에 대한 전자기력 해석결과를 나

타낸다. 결과를 분석하면 자속밀도와 마찬가지로 Outer Magnet type보다 Combined Magnet type의 경우 전자기력이 20%~40% 증가함을 알 수 있다. 전자기력인 가진력이 마이크로스피커의 성능을 1차적으로 좌우하므로 결과적으로 본 논문에서 제시한 Combined Magnet type 마이크로스피커의 성능이 크기와 두께가 동일한 경우 Outer Magnet type 마이크로스피커를 포함한 다른 형태의 것들보다 뛰어나함을 알 수 있다.

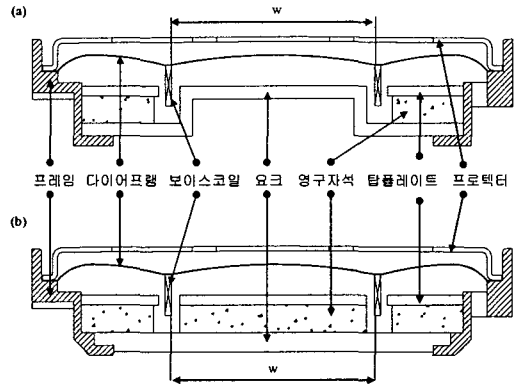
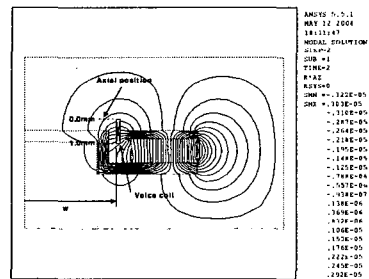
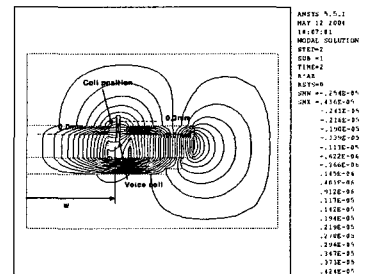


그림 3.1 마이크로스피커의 구조. (a) Outer PM type. (b) Combined PM type.



(a) Outer Magnet type 마이크로스피커



(b) Combined Magnet type 마이크로스피커

그림 3.2 2D Flux Line

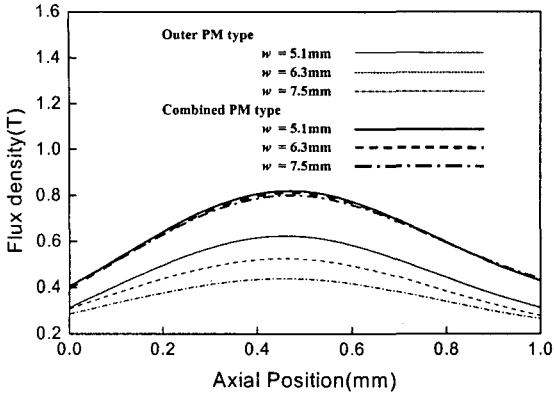


그림 3.3  $w$ 에 따른 각 형태의 마이크로스피커의 Magnetic Flux Density

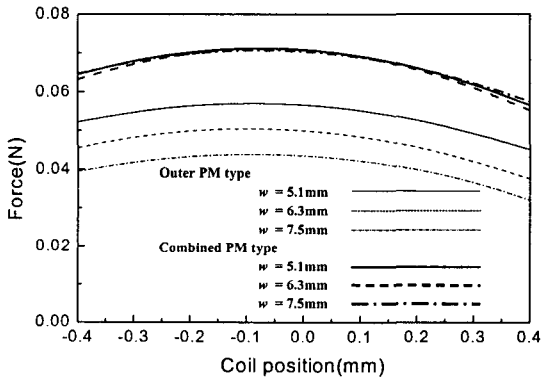


그림 3.4  $w$ 에 따른 각각의 마이크로스피커의 Magnetic Force

그림 3.5는 다이어프램의 형상 및 치수를 나타내며 그림 3.6은  $w=6.3\text{mm}$ 일 때의 축방향 1차 모드와 2차 모드의 각각의 모드 형상을 보여준다. 표 3.1은  $w$ 에 대한 축방향 1차 모드와 2차 모드의 주파수 값을 나타낸 것이다. 그림 3.6은 축방향으로만 운동하는 모드로 코일의 가진력의 방향과 동일하다. 그러므로 다른 주파수 모드에 비하여 상하 진동을 크게 일으키는 주요 모드로서 다이어프램의 동특성에 크게 영향을 끼친다. 반면에 원주방향의 모드는 코일의 운동 방향에 거의 영향을 주지 않는 모드로 다이어프램의 동특성에 그다지 영향을 주지 않는다. 그림 3.7은 Outer Magnet 및 Combined Magnet type 마이크로스피커에 대한 음향계 해석을 통한 SPL 그래프를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이  $w$ 가 작을수록 1차 고유주파수가 낮고 Outer Magnet type보다 Combined Magnet type이 음압이 4dB 정도 높음을 알 수 있다. 그림 3.8은 해석과 실험을 통한 SPL 곡선을 비교한 그래프를 나타낸다. 두 곡선이 거의 일치함을 알 수 있다. 하지만 고주파 영역에서는 유한요소 해석의 한계를 볼 수 있었다.

- Thickness : 0.03 mm
- Young's modulus : 2.0 Gpa
- Density : 1500 kg/m<sup>3</sup>

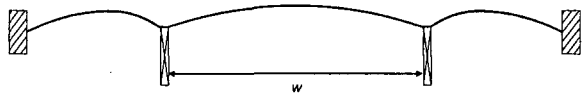
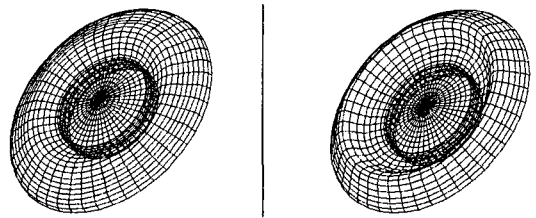


그림 3.5 다이어프램의 형상

표 3.1 축방향 모드의 고유 주파수

	1차 모드 (Hz)	2차 모드 (Hz)
$w=7.5\text{mm}$	991.78	5826.1
$w=6.3\text{mm}$	819.45	8433.4
$w=5.1\text{mm}$	645.26	12367.0



(a) 1차 모드 (b) 2차 모드

그림 3.6 다이어프램의 축방향 모드

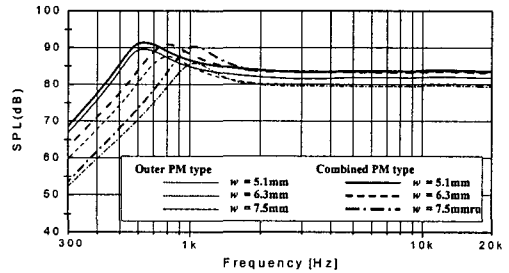


그림 3.7 마이크로스피커 type 별 SPL



그림 3.8 마이크로 스피커의 음압 측정 시스템의 사진

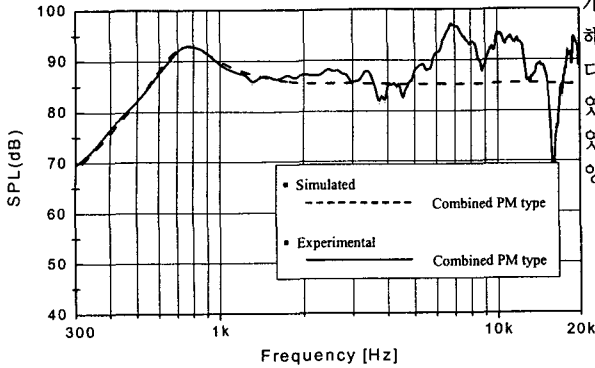


그림 3.9 w=6.3mm일 때의 해석치와 실험치의 SPL 비교

그림 3.9의 결과는 w=6.3mm 일 때의 결과로 이는 양산성을 고려한 결과이다. 다이어프램의 1차 고유진동수면에서는 w=5.1mm 일 때가 더 유리하지만 분할진동이 커 불량률이 높아 w=6.3일 때의 결과로 최적화 한 것이다.

그림 3.8은 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 0.1m 떨어진 Microphone으로 입력을 받아서 Pulse System에서 FFT 분석하여 SPL 그래프가 Monitor로 보여 진다. 일반적으로 마이크로 스피커의 경우 0.1W 기준으로 측정하며, 음압은 800 Hz, 1kHz, 1.2kHz, 1.5kHz의 음압 평균으로 나타낸다.

#### 4. 결론

IMT-2000사업으로 이동통신 단말기는 통화기능 외에 TV, 캠코더, MP3 기능이 탑재되기 때문에 언급된 기능을 충족시키는 고성능의 음향특성을 지닌 마이크로 스피커의 채용이 요구된다. 이에 본 논문에서는 높은 음압과 저주파 음향특성을 개선시키기 위해 새로운 형태의 자기회로를 채택한 고성능 마이크로 스피커에 대하여 전자기계, 기계계, 음향계로 나누어 해석을 하였으며, 해석의 결과에 따라 설계 및

개발에 관한 연구를 수행하였다. 전자기계와 기계·음향계 해석을 통하여 전자기력 향상을 위한 자기회로의 설계 및 다이어프램의 주파수 특성 향상을 위한 설계 기법을 제시하였으며, 해석을 통하여 실제 양산을 위한 제품설계를 수행하였다. 그림 4.1은 Combined Magnet type 마이크로 스피커의 양산용 제품 및 부품 사진이다

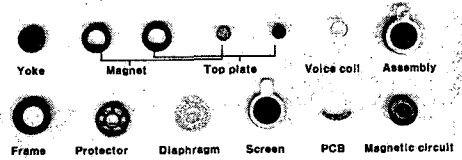


그림 4.1 Combined Magnet type 마이크로 스피커의 제품 및 부품 사진

본 논문의 결과 기존의 마이크로 스피커보다 음압 및 저주파 음향특성이 우수한 Combined Magnet type 마이크로 스피커를 개발하였다.

#### 후 기

본 연구는 2004년도 산학협동재단 학술연구비에 의한 과제의 일부로 연구 되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Logan, 1997, Logan의 유한요소법 첫걸음, 시그마프레스.
- (2) Clayton, R. Paul., Keith, W. W. and Syed, A.N., 2001, Introduction to Electromagnetic, 3rd Edition, Mc Graw-Hill.
- (3) Klaus, J., 1996, Finite Element Procedures, Bathe.
- (4) P. L. Timar, A. Fazekas, Noise and Vibration of Electrical Machines.
- (5) 이병호, 1999, 음향학 I, II, 민음사.
- (6) L. E. Kinsler, 1982, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons.