

# 이동통신 단말기용 통합 영구 자석 형태의 마이크로스피커 개발

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

황 상 문\* · 이 흥 주† · 권 중 학\*\* · 황 건 용\*\*\* · 양 용 창\*\*

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

(2005년 11월 10일 접수 ; 2006년 2월 6일 심사완료)

**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 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 화상통신뿐만 아니라 TV, 캠코더, MP3

기능이 탑재되기 때문에 이를 만족시키는 고성능의 음향특성을 지닌 마이크로스피커가 절실히 필요하다. 그러나 기계적인 동특성을 가지는 진동모터와 마이크로스피커 같은 기계 및 음향 부품들은 소형화에 따른 성능 저하가 현저하므로 이동통신 단말기의 소형화, 경량화의 커다란 방해 요인으로 남아 있다. 특히 이 논문에서 논의하고자 하는 이동통신기기의 음성 호출용으로 사용되는 마이크로스피커의 경우 초소형화시 고성능의 음향특성을 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.

이 논문에서는 앞의 연구배경에서 언급한 전기·전

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

\* 정희원, 부산대학교 기계설계공학과

\*\* 부산대학교 기계설계공학과

\*\*\* 영산대학교 네트워크공학부

자 기술 및 음향 재생 기술을 만족시키는 음향부품 기술을 이동통신 단말기용 마이크로스피커에 적용시키고자 한다. 기존의 마이크로스피커의 내부구조와 다른 통합영구자석형의 자기회로를 채택하여 마이크로스피커의 성능의 척도가 되는 음압(音壓)과 저주파 대역의 음향 특성을 개선시켜 기존의 형태와 비교하였으며, 유한요소법을 이용한 전산해석을 통하여 고성능의 마이크로스피커의 설계 및 개발에 관한 연구를 수행하였다.

전자기계에서는 축방향에 대해 완전 대칭인 원형 마이크로스피커의 자기회로를 2차원으로 모델링하고 공극에서의 자속밀도와 진동판에 가진력으로 작용하는 전자기력을 유한요소법으로 해석하였으며 두 가지 자기회로 형태에 대한 각각의 자속밀도와 전자기력을 서로 비교하였다. 진동계에서는 전자기력이 가해진 진동판의 응답 특성을 예측하기 위한 강제 진동해석과 고유주파수 및 모드 형상을 도출하기 위한 자유 진동해석을 수행하고, 코일 내경변화에 따른 1차 고유주파수 및 진동변위의 진동특성을 도출하였다. 그리고 전자기계와 진동계는 서로 연성되어 있기 때문에 이러한 연성특성을 고려하였다. 진동계에서 유한요소법<sup>(1)</sup>으로 구한 각 요소의 속도를 수치적으로 계산하여 실험을 통해 얻어진 데이터와 비교함으로써 시뮬레이션의 타당성을 검증하였다.

## 2. 마이크로스피커의 이론적 해석 방법

### 2.1 마이크로스피커의 작동 원리 및 내부구조

이동통신 단말기용 마이크로스피커는 일반적으로 라우드 스피커와 전자기적, 기계적 구조에는 큰 차이가 없다. '전류가 흐르는 도체가 자계(磁界)속에 있으면 힘을 받는다'는 플레밍의 왼손 법칙에 의하여 여러 주파수가 포함된 전기적 에너지인 전류신호가 보이스코일에 인가되면 보이스코일은 전류의 세기와 주파수의 크기에 따라 기계적 에너지인 전자기력을 발생시킨다. 이 힘은 보이스코일이 부착되어 있는 진동판에 가진력으로 작용하여 진동을 발생시키고 최종적으로 인간의 귀가 인지할 수 있는 소정 크기의 음압을 발생시키게 된다. Fig. 1은 마이크로스피커의 작동 원리를 도식화한 그림이다. 이와 같은 마이크로스피커의 자기회로는 요크, 영구자석 및 탐플레이트를 이용하여 공극 내에 있는 보이스코일에 직각으로 자속

이 쇄교할 수 있도록 설계되어 있다. 입력신호에 의해 발생한 상하방향의 전자기력은 진동판을 진동시켜 음압을 발생시킨다. 진동판은 상하 진동 시에 우수한 응답성과 좌굴 현상을 제거하기 위해 다양한 형상의 굴곡으로 강성을 주게 되며, 진동판의 형상은 주파수 특성에 영향을 주는 설계변수로 작용한다.<sup>(2)</sup>

### 2.2 전자기계 해석

요크와 탐플레이트에 사용된 철의 재질은 SPCC이고 FEM에 사용된 BH 곡선은 Fig. 2와 같다. 영구자석 및 보이스코일을 포함한 마이크로스피커의 전자기장은 식 (2.1)의 Maxwell의 전자기 방정식으로부터 구할 수 있다.<sup>(3, 4)</sup>

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

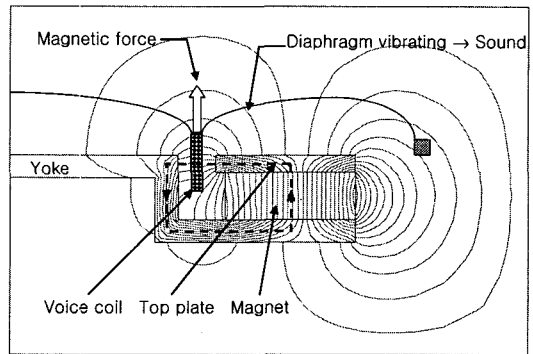


Fig. 1 Operating Principle of microspekers

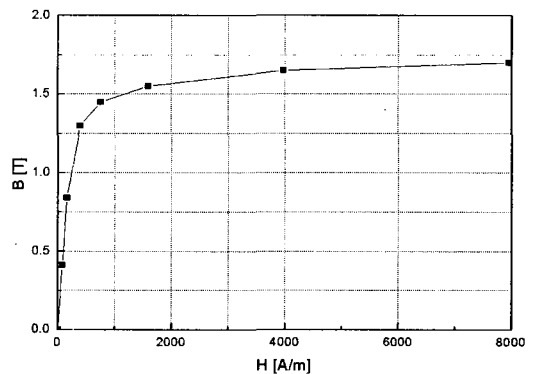


Fig. 2 B-H curve of steel(SPCC)

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

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

여기서  $J_0$ 는 전류밀도(current density),  $M$ 은 자화 벡터(magnetization vector),  $\vec{A}$ 는 자기 벡터 포텐셜 (magnetic vector potential),  $\mu$ 는 물질의 자기 투자율(magnetic permeability)을 말한다. 자기투자율을  $\mu$ 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 상대 자기투자율을 말한다.

영구자석에 의한 자속밀도(magnetic flux density) 분포와 코일에 의한 전류의 영향만을 고려하면 주 관심 대상인 전자기력, 즉 가진력을 구할 수 있다. 전자기 시스템 해석을 통하여 마이크로스피커에 가진되는 코일의 축방향으로 작용하는 힘을 구하고자 한다. 유한요소법으로 전자기장을 해석하기 위해 식 (2.1)과 식 (2.2)으로부터 자속밀도를 구하였다. 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS를 사용하였으며, 자속밀도는 영구자석, 요크, 탑플레이트가 관계되므로 자기세기에 영향을 줄 수 있는 부품의 부분만 포함시켰고, 그 외의 부분들과 자유공간은 비자성체이므로 공기로 적용하여 각각에 따른 물성치를 부여하였다. 해석할 전자기회로는 원형의 완전한 대칭구조이므로 2차원으로 단면의 1/2만 모델링을 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 경계조건은 Fig. 3과 같이 축대칭 부분을

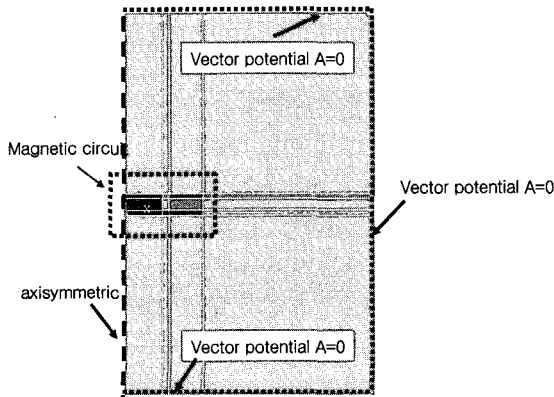


Fig. 3 Boundary condition of electromagnetic system

제외한 나머지 바깥경계 부분을 자유공간영역인 자기 벡터포텐셜이 0이 되도록 조건을 주었다. 모델링에서 자유공간영역은 반경방향으로 20 mm, 축방향으로 위아래 각각 20 mm씩 확보하였다. 2배의 영역을 자유공간으로 주었을 때와 비교하여 공극에서의 자속밀도에 대한 오차범위가 1%미만이다. 공극에서의 자속밀도 및 코일의 전류와 가진력  $F_{coil}$ 의 관계는 Lorentz 방정식에 의해 식 (2.3)과 같이 표현된다.

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

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

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

여기서  $V$ ,  $R$ 와  $L$ 는 전압, 보이스코일 저항과 인덕턴스(inductance)이다. 보이스코일의 운동은 역기전력(BEMF, back electro motive force),  $B(z)z$ 을 발생시킨다. 여기서  $z$ 와  $\dot{z}$ 는 보이스코일 변위와 속도이다.

### 2.3 진동계 해석

자유 진동 해석에서 비감쇠 구조물 전체의 진동 운동방정식을 행렬로 표현하면 다음과 같다.<sup>(5)</sup>

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

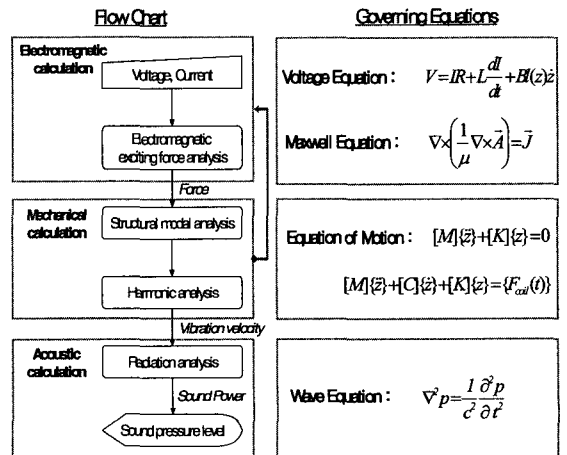


Fig. 4 Flow Chart of microspeakers analysis

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 위하여 모드 중첩법(mode superposition method)을 사용하였다.

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.

진동판의 모델링의 경우 메쉬(mesh)를 더욱 많이 나눌수록 정확도도 상승하나 계산시간과 오차의 정도를 고려하여 메쉬를 나누었다. 또한 메쉬의 형태가 대칭을 이루는데 주안점을 두었으며, 총 노드(node) 수는 2761개, 요소(element) 수는 2640개로 하였다. 실제 다이내믹 시스템은 보이스코일과 영구자석으로 대표되는 전자기적 부분과 진동판의 기계적 부분의 연성으로 되어 있으며, 이 연성특성을 정확하게 분석해야 실제 시스템의 해석이 가능하다. 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 진동판의 진동특성을 분석한다. 이 논문에서는 이러한 연성특성을 파악하여 최종적인 시스템의 특성을 구현하였으며 이를 순서대로 나타내면 Fig. 4와 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>(6,7)</sup>

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

여기에서,  $c$ 와  $p$ 는 공기 중의 음파속도와 음압을 나타낸다. 진동판을 원형판으로 가정하면 식 (2.7)을 식 (2.8)로 간략화할 수 있다. 음향 파위는 유한요소법을 통해 도출된 진동판 요소의 속도를 이용해 식 (2.8)과 같이 계산될 수 있다.

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

여기에서,  $f$ ,  $\rho_0$ ,  $S_{rad}$ 와  $\sigma_{rad}$ 는 각 주파수, 공기 밀도, 진동판에 의한 소리방사 표면적과 방사율을 나타낸다. 관심주파수영역인 저주파수대역이 2 kHz 미만이라고 하면 방사율은 식 (2.9)과 같다.

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

여기에서, 파수(wave number)  $k$ 는  $2\pi f/c$ 이고,  $a$ 는 진동판 반경이다.

만약, 진동판 외에 다른 음원이 없고 무한 배플상태라면 10 cm 거리에서의 음압레벨은 식 (2.10)로 표현된다.<sup>(7)</sup>

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{W_{rad}}{10^{-12}} \right) - 12 \text{ [dB]} \quad (2.10)$$

### 3. 코일내경에 따른 성능 비교

Fig. 5의 (a)는 기존의 이동통신 단말기에 사용되는 대표적인 자기회로 형태인 외륜영구자석형 자기회

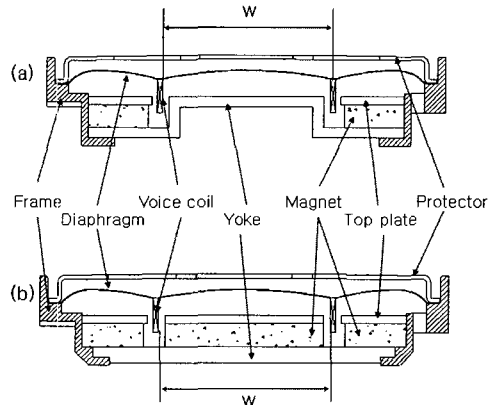


Fig. 5 Schematic of microspeaker (a) Outer PM type. (b) Combined PM type

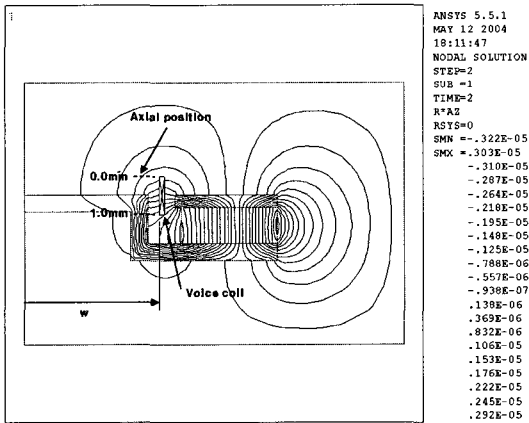
로이고 (b)는 이 논문에서 제시하고자 하는 통합영구 자석형 자기회로이다. 마이크로스피커의 경우 그 크기의 제약성 때문에 강자성체인 네오디움(NdFeB) 재질의 영구자석을 사용하고 있고 공극도 최소한의 크기로 설계되고 있다. 하지만 궁극적으로 영구자석의 크기를 크게 하지 않는 한 높은 음압을 유도하기는 어렵다. 통합영구자석형 자기회로 구조는 코일 내측의 잉여 공간을 영구자석으로 채우면서 공극의 높은 자속밀도를 유도하는 구조이다. 또한 코일 내경 크기변화에 대한 자석 부피변화도 거의 없어 설계의 유연성 측면에서 유리하다. 이에 이 논문에서는 선행 해석을 수행한 결과 코일의 반경에 대한 영향이 진동계에 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며 마이크로스피커의 두께는 3.3mm, 직경은  $\phi 15$ 의 크기를 가지며 코일 반경  $w$ 를 5.1mm, 6.3mm 7.5mm의 세 가지 경우에 대해 각각 해석하고 그 결과를 비교

하였다.

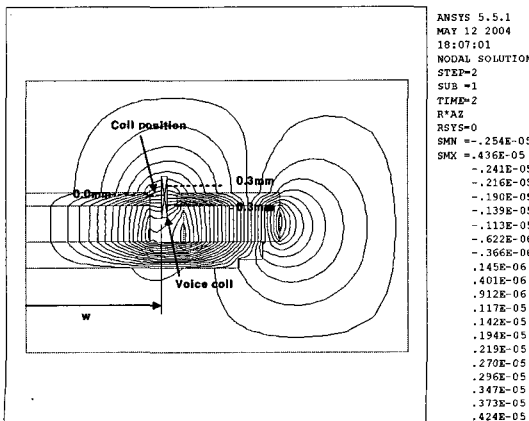
Fig. 6은 마이크로스피커의 자기회로 및 자속흐름도(fluxline)를 비교한 것이다. Fig. 7에서 외륜영구자석형 및 통합영구자석형 간에 자속밀도를 비교하여 보면 외륜영구자석형의 경우  $W$ 값이 작아짐에 따라 자석의 부피증가로 인하여 자속밀도가 상승함을 알 수 있으며 통합영구자석형의 경우  $W$ 의 값의 변화에 따라 거의 비슷한 자속밀도 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고 두 타입의 자속밀도 값은 20%~40% 정도 차이가 나며 이것은 음압의 크기에 많은 영향을 미칠 것이다. Fig. 8은 각 형태의 마이크로스피커에 대한 전자기력 해석결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 자속밀도와 마찬가지로 외륜영구자석형보다 통합영구자석형의 경우 전자기력이 20%~40% 증가함을 알 수 있다.

Table 1은 해석할 진동판의 물성치이다. Fig. 9는  $W$ 가 6.3mm일 때의 축방향 1차 모드와 2차 모드의 형상을 보여준다.

Table 2는  $W$ 에 대한 축방향 1차 모드와 2차 모드



(a) Outer magnet type



(b) Combined magnet type

Fig. 6 2D Flux line

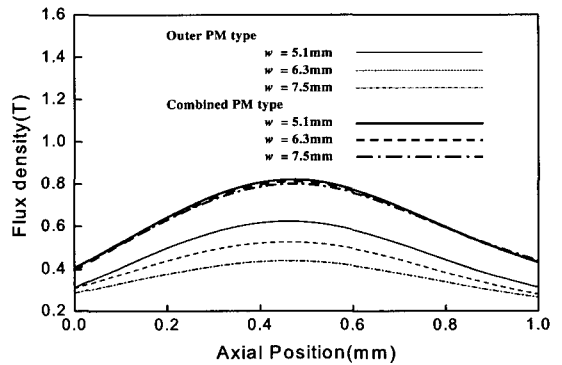


Fig. 7 Magnetic flux density at variable  $w$

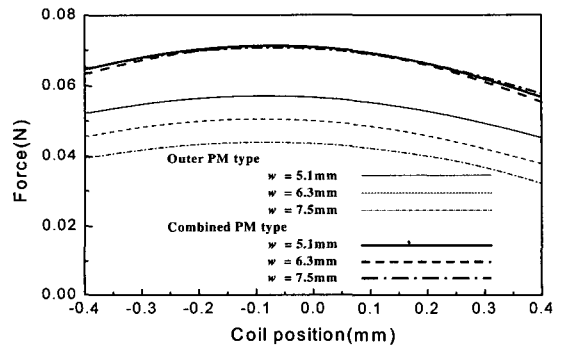


Fig. 8 Magnetic Force at variable  $w$

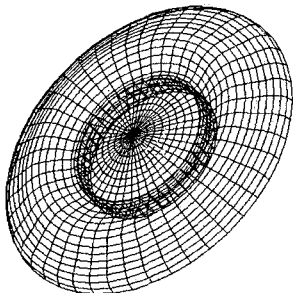
의 주파수 값을 나타낸 것이다. Fig. 9는 축방향으로만 운동하는 모드로 코일의 가진력 방향과 동일하다. 그러므로 다른 주파수 모드에 비하여 상하 진동을 크게 일으키는 주요 모드로서 진동판의 동특성에 크게 영향을 끼친다. Fig. 10은 W가 5.1일 때의 각 주파수에서의 전류값의 해석치를 나타낸 그림이다. 진동공진이 발생하는 주파수에서 속도가 커서 역기전력이 크게 발생하였기 때문이다. Fig. 11은 외륜자석형 및 통합영구자석형 마이크로스피커에 대해 식 (2.10)을

**Table 1** Diaphragm specification

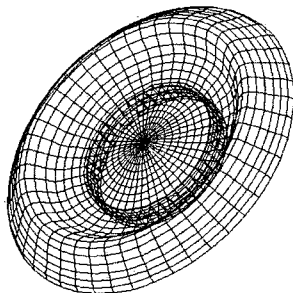
Material	PEI (polyetherimide)
Thickness	0.03 mm
Young's modulus	2.0 GPa
Damping ratio	0.2
Density	1500 kg/m <sup>3</sup>

**Table 2** Natural frequency of axial mode

w (mm)	First mode (Hz)	Second mode (Hz)
7.5	991.78	5826.1
6.3	819.45	8433.4
5.1	645.26	12367.0

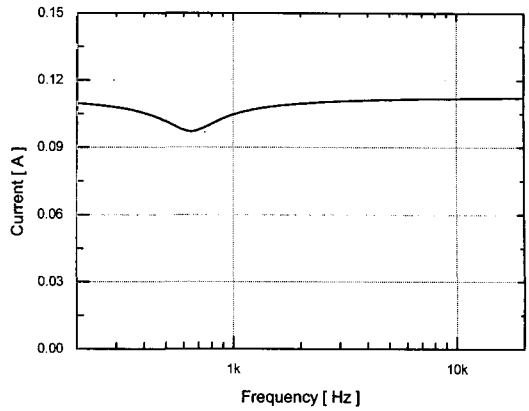


(a) First mode

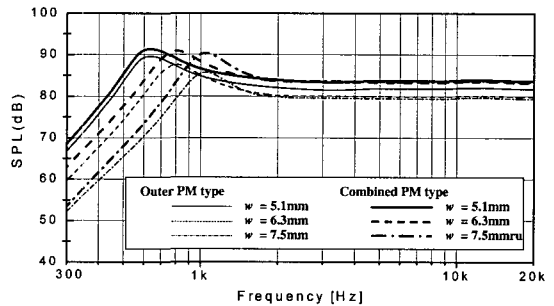


(b) Second mode

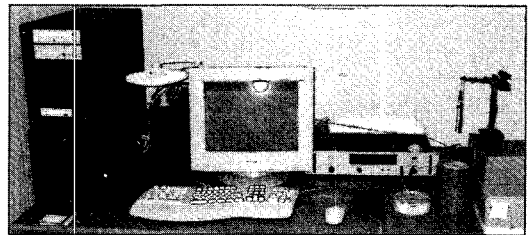
**Fig. 9** Axial modes of diaphragm



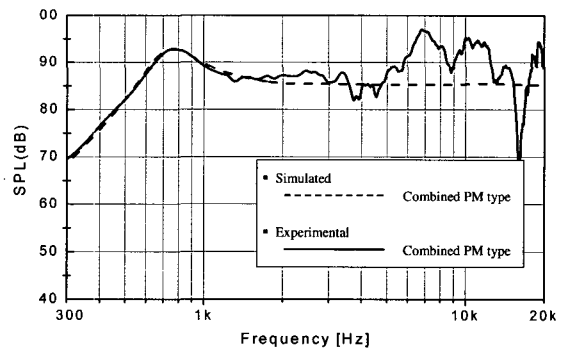
**Fig. 10** Current vs. frequency



**Fig. 11** SPL of microspeakers



**Fig. 12** Experimental setup for microspeaker SPL



**Fig. 13** SPL comparison between simulated model and experimental model when w is 6.3 mm

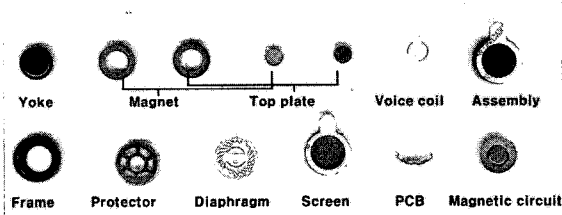


Fig. 14 Photograph of Combined Magnet type microspeaker

이용해 계산한 그래프를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이  $W$ 가 작을수록 1차 고유주파수가 낮고 외륜자석형보다 통합영구자석형이 음압이 4dB 정도 높음을 알 수 있다. Fig. 13은  $W$ 가 6.3 mm일 때의 해석과 실험을 통한 음압레벨 곡선을 비교한 그래프를 나타낸다. 관심 주파수 영역인 저주파 대역에서 계산된 값이 실험값과 잘 부합함을 알 수 있다. Fig. 12은 실험장비 시스템의 사진이다. 측정 장비는 오디오분석 전용 장비인 B&K Pulse System (3560 C)를 사용하였으며, 펄스시스템에서 가청 영역의 백색잡음신호를 재생하여 이 신호를 파워앰프에서 증폭한다. 증폭된 신호는 1000 cc 배플박스에 장착된 마이크로스피커로 재생되며 그 때 재생된 음을 10 cm 떨어진 마이크로폰으로 입력을 받아서 펄스시스템에서 FFT 분석하여 음압레벨 그래프가 모니터로 보여진다. 일반적으로 마이크로스피커의 경우 0.9 V 기준으로 측정한다.

#### 4. 결 론

IMT-2000사업으로 이동통신 단말기는 통화기능 외에 TV, 캠코더, MP3 기능이 탑재되기 때문에 언급된 기능을 충족시키는 고성능의 음향특성을 지닌 마이크로스피커의 채용이 요구된다. 이에 이 논문에서는 높은 음압과 저주파 음향특성을 개선시키기 위해 새로운 형태의 자기회로를 채택한 고성능 마이크

로스피커에 대하여 전자기계, 진동계로 나누어 해석을 하였으며, 두 시스템간의 연성관계를 고려하였다. 전자기계와 진동계 해석을 통하여 외륜영구자석형 마이크로스피커와 통합영구자석형 마이크로스피커를 비교 분석하였다. Fig. 14은 통합영구자석형 마이크로스피커의 양산용 제품 및 부품 사진이다.

이 논문의 결과 기존의 마이크로스피커보다 음압 및 저주파 음향특성이 우수한 통합영구자석형 마이크로스피커를 개발하였다.

#### 후 기

이 연구는 2001년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구정착금)에 의한 연구 되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Logan, 1997, First Course in the Finite Element Method, Sigmappress.
- (2) Hong, D. K., Woo, B. Cl, Kim, D. Y. and Ahn, C. W., 2005, "A Study on the Shape Design of Micro Speaker Diaphragm," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 7, pp. 775~780.
- (3) Paul, Clayton R, 1992, Introduction to Electromagnetic Compatibility, Wiley.
- (4) Bathe, Klaus-Jurgen, 1996, Finite Element Procedures, Prentice Hall.
- (5) Timar, P. L., 1989, Noise and Vibration of Electrical Machines, Elsevier.
- (6) Lee, B. -H., 1999, Acoustics, Minumsa.
- (7) Kinsler, L. E., 1982, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons.