

진동판의 빗살주름무늬 형상에 따른 마이크로스피커의 음향특성에 관한 연구

이태근⁺, 김병삼*, 조태제⁺⁺
(논문접수일 2008. 8. 7, 심사완료일 2008. 12. 1)

A Study on the Acoustical Properties of Micro-speaker according to Comb Teeth Shape of the Diaphragm

Tae-Keun Lee⁺, Byoung-Sam Kim*, Tae-Jea Cho⁺⁺

Abstract

There are many factors which affect the acoustical properties of a micro-speaker. Among the factors, the shape of the diaphragm is considered in this study. As an investigating method, the finite element methods and measurement techniques applied to study the acoustical properties according to diaphragm shape. In order to vary the stiffness of the diaphragm, the some patterns of comb teeth, such as the angle and the number of comb teeth, are applied to diaphragm. We can confirm that the change of the stiffness by the changing diaphragm shape affects the vibration and sound properties of the speaker. As a result, the reduction of the angle of the comb teeth increases the diaphragm stiffness and shifts the resonance frequency to a higher frequency range. The number of the comb teeth is related to the stiffness of the edge part.

Key Words : Micro-speaker(마이크로스피커), Diaphragm(진동판), Acoustic impedance(음향 임피던스), Resonance frequency(공진 주파수), Mode shape(모우드 형상)

1. 서론

스피커는 증폭기로부터 들어오는 전기적인 형태의 에너

지를 소리라는 음향에너지로 변환시키는 에너지 변환기기 또는 변환장치라고 말할 수 있다. 이는 음향에너지를 전기적인 형태의 에너지로 전환시키는 마이크로폰과는 정반대의

* 교신저자, 원광대학교 기계자동차공학부 (anvkbs@wonkwang.ac.kr)
주소: 570-749 전북 익산시 신용동 344-2

+ 광원택(주) 기술연구소

++ 동국대학교 대학원

에너지 변환기이다. 스피커의 일반적인 원리는 영구자석 내부의 보이스 코일에 전류를 보내어 전류의 방향에 따라 코일을 전후로 움직이도록 하고, 그 끝에 원형 판을 부착하여 그 판이 전후로 움직이면 공기의 진동이 생겨 소리가 나오도록 하는 것이다. 스피커는 신호의 주파수와 전류의 힘에 따라 높고 낮은 소리, 작고 큰 소리가 다르게 나며 그 크기는 스피커 내부에 있는 진동판의 움직이는 거리에 따라 결정된다.

스피커는 크게 스피커 유닛의 종류와 구조에 따라 분류할 수 있다. 또한 스피커의 유형은 스피커가 장착되는 곳과 활용되는 장소에 따라 자동차용, 가정용, 전사용, 미시 음향 변환(micro acoustic transducer)용, 멀티미디어용 등으로 나뉠 수 있다. 이 중에서 마이크로스피커는 휴대폰, 노트북 PC 등에 적용되는 소형 스피커류를 통칭하는 것으로 보통 지름 5cm 이하의 것을 말하며, 특히 수요가 많은 휴대폰에는 지름 2cm 이하의 제품이 사용되고 있다.

스피커를 이루고 있는 중요한 부품 중의 하나는 진동판으로서, 스피커에서 진동을 일으켜 음원을 재생하는 가장 핵심적인 역할을 하는 부품이다. 일반적으로 원추형 모양을 하고 있기 때문에 콘 페이퍼라고 불리우고 있다. 보이스 코일(voice coil)의 진동을 전달 받아 공기의 압축변동으로 음파를 만든다. 진동판은 스피커의 재생음질의 대부분을 좌우하며 그 재질, 두께, 형상에 따라 음질, 음색 등 재생 주파수 특성이 변화된다. 지금까지 고품질스피커에 대한 많은 연구 결과들이 발표되었지만 이들의 대부분은 일반 스피커에 대한 연구이며, 마이크로스피커에 관련된 연구들은 상대적으로 많지 않은 실정이다⁽¹⁻⁸⁾.

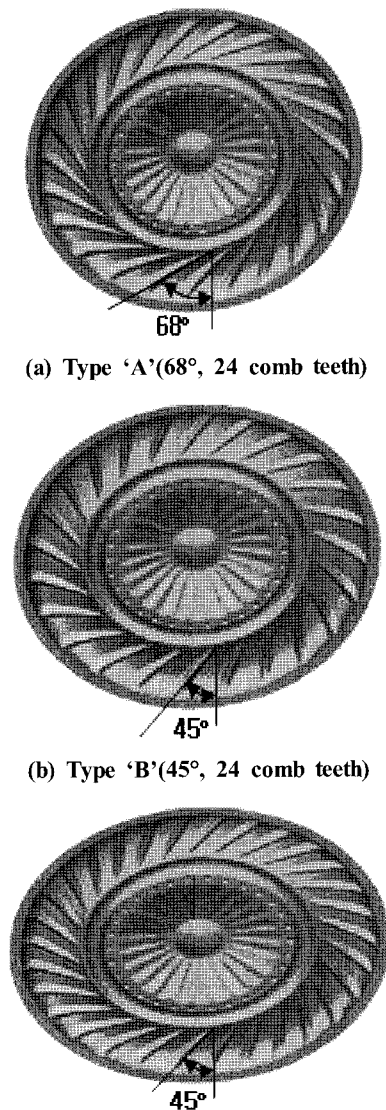
S. J. Oh는 진동판 재질, 후면기공의 면적, 그림상의 구멍이 음향특성이나 임피던스에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였고⁽²⁻⁴⁾, D. K. Hong 등은 진동판의 형상, 두께 및 보이스코일의 무게를 고려하여 1, 2차 고유진동수를 일정주파수 대역에 설계하기 위한 설계방법을 제시하였다⁽⁵⁾.

마이크로스피커의 음향특성에 영향을 미치는 많은 인자들이 존재하고 있으며, 본 연구에서는 이 인자 중에서 빗살주름무늬를 가지는 진동판의 형상중 빗살주름무늬의 각도와 개수에 따른 특성을 고찰하였다. 이를 위해서 유한요소법 및 실험을 통해 검증하고자 하였다.

2. 유한요소해석

진동판의 형상 변화에 따른 변위 및 진동모드를 분석하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소는 등방성, 균일성, 선형탄성으로 가정하였으며, I-deas를 이용하여 3D 모

델링 및 해석을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 마이크로스피커의 3가지 진동판을 나타내고 있으며 진동판의 강성을 변화시키기 위하여 형상을 변화시켰다. 이를 위하여 진동판의 두께는 모두 동일하게 하고 빗살주름무늬 형상의 각도와 개수를 변경하였다. 'A'형상의 빗살주름무늬 형상의 각도와 개수는 각각 68도, 24개이며, 'B'형상은 45도, 24개, 'C'형상은 45도, 30개로 설계하였다. Fig. 2는 유한요소



(a) Type 'A'(68°, 24 comb teeth)
 (b) Type 'B'(45°, 24 comb teeth)
 (c) Type 'C'(45°, 30 comb teeth)
Fig. 1 The shape of diaphragm

Table 1 Mechanical properties of PI(Polyamide)

Properties	Value
Elastic Modulus(GPa)	3.0E9
Mass Density(kg/m ³)	1,400
Poisson's Ratio	0.33

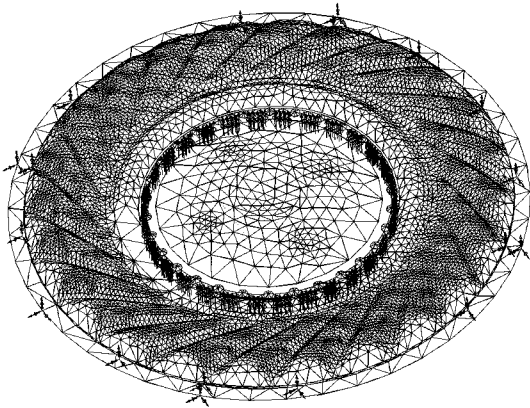


Fig. 2 Finite element model of diaphragm

모델로서 유한요소는 쉘(shell)요소로 하고, 구속조건으로 진동판이 고정되는 부분(에지부)의 세 방향 병진변위와 회전변위를 고정하였다. 진동판의 재질은 폴리아미드, 두께는 0.025mm, 보이스 코일(voice coil)로 부터의 힘은 0.06N으로 하였다. Table 1은 폴리아미드의 기계적 특성을 나타낸다.

3. 실험방법 및 결과

본 연구에서 사용된 마이크로스피커는 지름이 15mm, 두께 25 μ m,이며 공칭임피던스가 8 Ω 이다. 해석에 사용된 진동판의 형상을 가진 스피커를 제작하여 특성 측정에 이용하였다.

3.1 음압특성

음압특성을 파악하기 위해 Fig. 3과 같은 실험장치를 이용하였다. 마이크로스피커를 무향실안에 설치된 정사각형 배플 전면에 부착하고 20Hz부터 20kHz까지의 정현파를 신호발생기로부터 발생시켰다. 이 음원은 파워증폭기(B&K 2716C)를 거치면서 0.1W로 증폭된 후에 마이크로폰에 입력하게 된다. 이 때 마이크로스피커와 마이크로폰(B&K 4191) 사이의 거리는 10cm를 유지하도록 하였다. 마이크로폰으로부터 나온 신호는 오디오분석기(B&K 2012 audio analyzer)를

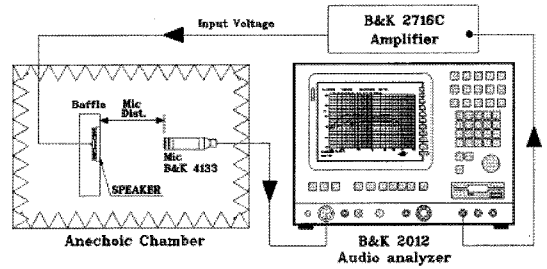


Fig. 3 Schematic diagram of measuring system for sound pressure level

통해 분석하였다.

3.2 스피커 특성변수

스피커는 전기적 회로로 해석이 가능하며 전기회로에서의 저항과 인덕턴스는 스피커에서 공기의 저항과 질량으로 표현 할 수 있다.

여기서 저항은 파워를 열로써 소비하는 역할을 하지만, 인덕턴스는 자기장 안에 에너지를 저장하고 파워를 소비하지는 않는다. 그리고 저장된 에너지가 다시 회로의 내부에너지로 돌아오기도 한다. 스피커의 특성변수는 임피던스, 스피커의 공기질량, 진동판의 유효질량, 스피커의 컴플라이언스, 구동세기, 보이스 코일의 질량 및 인덕턴스, 저항, 스피커극성, 진동판의 가속도 그리고 틸-스몰 매개변수(thiele-small parameter) 등으로 구분할 수 있다. 이들 값들은 각각의 수식을 이용하여 계산하거나 측정하기도 한다. 본 연구에서는 Fig. 4 및 Table 2와 같은 KLIPPEL 장비를 이용하여 스피커의 특성변수들을 파악하였다.

20~20kHz의 사인파(sine wave)가 디스토션 분석기로부터 발생되고, 이 신호는 파워모니터를 통해 증폭된 후 스피커에 입력된다. 스피커에서 발생된 진동신호 및 전류신호를

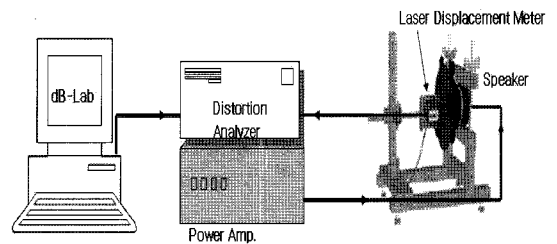


Fig. 4 Schematic diagram of measuring system for the speaker parameters(KLIPPEL System)

Table 2 The components of KLIPPEL system

Items	Model	Manufacturer
Analysis S/W	dB-Lab	KLIPPEL GmbH
Signal Generation & Data Converter	Distortion Analyzer	KLIPPEL GmbH
Power Amp.	DYNACORD S1200	DYNACORD
Laser Displacement Meter	ANR 1282	Matsushita Electric Works

분석함으로써 스피커의 특성 및 등가 전기회로를 구성할 수 있다.

(1) 선형변수측정(Linear Parameter Measurement)

Fig. 5는 KLIPPEL 장비에서 사용되는 스피커의 전기적/기계적 파라미터를 측정하기 위한 측정도이다. 스피커 단자의 전압 $u(t)$ 와 전류 $i(t)$ 를 측정하고 임피던스(impedance)는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$Z(f)=U(f)/I(f) \tag{1}$$

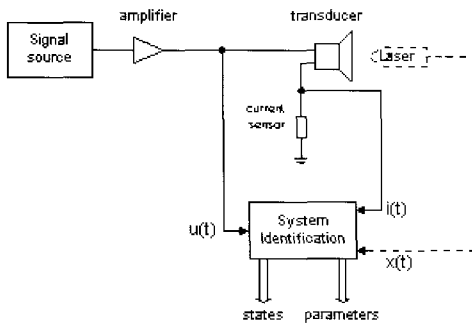


Fig. 5 Block circuit of linear parameter measurement

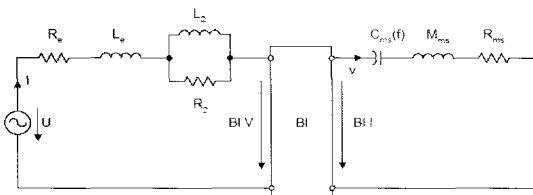


Fig. 6 Electro-mechanical equivalent circuit for linear speaker model

Table 3 The components of linear speaker model

Electrical Parameters	Symbol	Parameters
	R_c	Electrical voice coil resistance
	L_e	Voice coil inductance at low frequencies
	L_2	Para-inductance at high frequencies
	R_2	Resistance due to eddy currents
Mechanical Parameters	Symbol	Parameters
	BI	Force factor
	C_{ms}	Mechanical compliance of driver suspension
	M_{ms}	Mechanical mass of driver diaphragm assembly including air load and voice coil
	R_{ms}	Mechanical resistance of total-driver

기계적 인자는 레이저 변위센서(laser displacement sensor)를 이용하여 정의되며, 이로부터 전달함수를 측정할 수 있다.

$$Hx(f)=X(f)/U(f) \tag{2}$$

식 (2)에서 $X(f)$ 는 보이스 코일의 변위이고 $U(f)$ 는 스피커 단자의 전압이다. Fig. 6과 Table 3은 각각 실험으로부터 얻어진 값을 이용하여 구성할 수 있는 선형 스피커 모델 및 이 모델에 대한 전기적/기계적 인자에 대한 정의를 나타낸다.

(2) LSI(Large Signal Identification) 측정

LSI는 일반 동작 조건하에서 스피커의 인자와 상태를 정의한다. 큰 진폭에서 스피커는 재생된 음에서의 왜곡성분을 발생시키는 비선형 및 시변(time-variant)시스템 거동을 하게 된다. 이에 대한 여러 인자와 상태정보를 규명하기 위해서 Fig. 7 및 Table 4와 같은 등가회로도를 정의하게 된다. 이 모델을 이용하여 스피커에 대한 구조, 인자, 상태정보를 특성화할 수 있다.

모든 인자들이 결정된 후에 기계적인 손실계수는 식 (3)으로 정의된다.

$$Q_{ms}(x) = \frac{1}{2\pi f_s(x)R_{ms}(x)C_{ms}(x)} = \frac{2\pi f_s(x)M_{ms}(x)}{R_{ms}(x)} \tag{3}$$

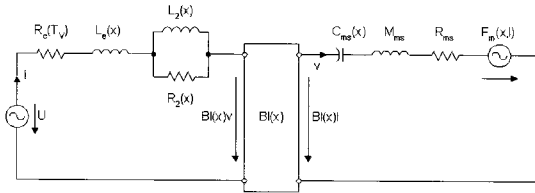


Fig. 7 Electro-mechanical equivalent circuit for LSI

Table 4 The components of LSI

	Symbol	Parameters
	Electrical Parameters	$R_e(T_v)$
$L_e(x)$		Voice coil inductance
$L_2(x)$		Para-inductance of the voice coil
$R_2(x)$		Resistance due to eddy currents
T_n		Temperature of the voice coil
Mechanical Parameters	Symbol	Parameters
	$BI(x)$	Force factor
	$C_{ms}(x)$	Mechanical stiffness of driver suspension
	M_{ms}	Mechanical mass of driver diaphragm assembly including air load and voice coil
	R_{ms}	Mechanical resistance of total-driver losses
	$F_m(x,l)$	Reluctance force

식 (3)에서 $f_s(x)$ 는 고유진동수, $R_{ms}(x)$ 는 기계적 저항, $M_{ms}(x)$ 는 이동부 질량이다.

4. 고찰

4.1 해석결과

세 가지 형상의 진동판에 대한 최대 변위를 고려하면 'A' 형상의 진동판의 최대 변위가 가장 크고 'B'와 'C' 형상의 최대 변위는 유사함을 볼 수 있다(Fig. 8). 이는 빗살주름무늬의 각도가 클 수록 강성이 감소함을 나타내고(type 'A'), 빗살주름무늬의 개수에 대한 강성은 영향은 크지 않음을 볼 수 있다(type 'B', 'C'). 이는 빗살주름무늬의 각도가 작을 수록 보이스코일로부터 작용하는 힘을 중앙으로부터 예지부

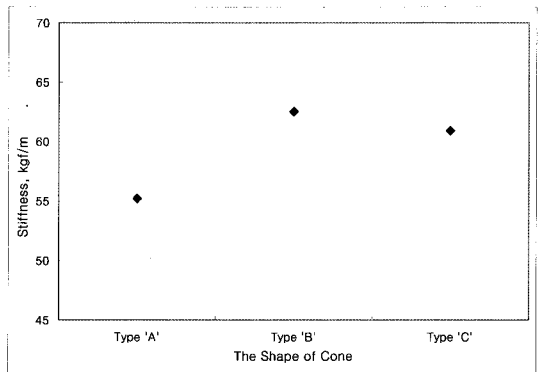
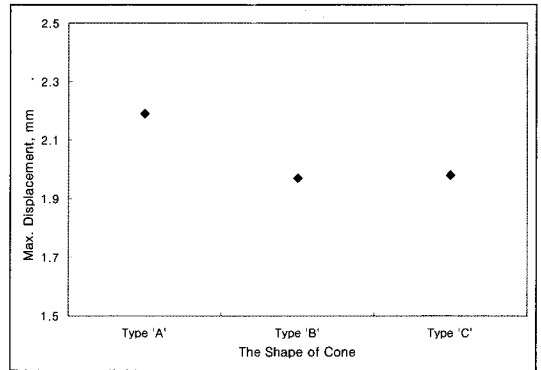


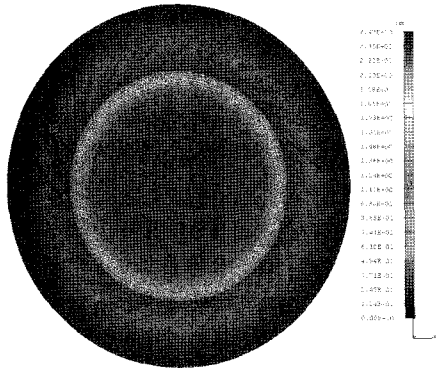
Fig. 8 Max. displacement & stiffness for 3 different shapes of diaphragm

Table 5 The natural frequency for 3 different shapes of diaphragm

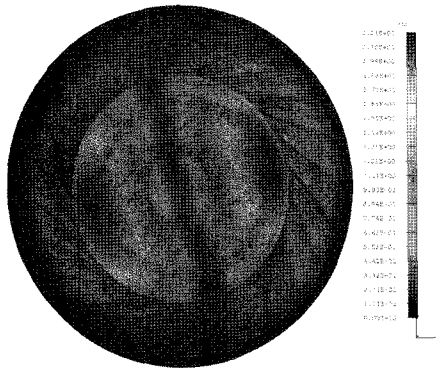
Mode	Natural Frequency(Hz)		
	Type 'A'	Type 'B'	Type 'C'
1	1470	1550	1520
2	2250	2200	2080
3	5320	5650	5600

까지 균일하게 분포시키기 때문이다.

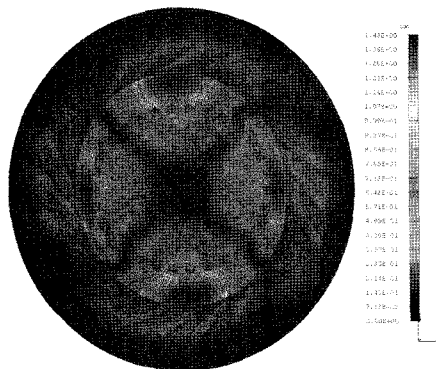
Fig. 9는 진동판에 대한 진동모드를 나타낸다. 3종류의 진동판 모두 동일한 진동형상을 가지고 있고 진동판의 형상에 따라 고유진동수가 변화하고 있다. 강성에 대한 영향으로 'B', 'C' 형상의 1차 고유진동수가 'A' 형상의 고유진동수 보다 고주파수 대역에 위치하고 있다(Table 2). 강성의 영향에 대한 결과는 최대변위의 결과와 일치하고 있음을 볼 수 있다.



(a) 1st mode shape



(b) 2nd mode shape



(c) 3rd mode shape

Fig. 9 Mode shape of diaphragm

4.2 음압특성

Fig. 10은 본 연구에 사용된 세 가지 진동판 형상에 대한 음압특성 곡선이다. 진동판 강성의 영향에 따라 'A'형상 대비 'B', 'C'의 음압특성이 고주파대역으로 이동하고 있음을

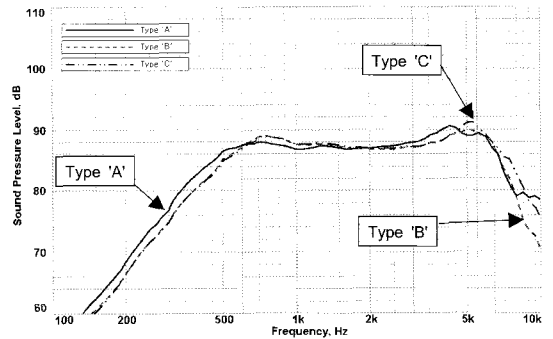


Fig. 10 Sound pressure level for 3 different shapes of diaphragm

볼 수 있다.

공진주파수는 스피커 재료의 고유진동수와 외력(전기에너지) 사이에 공명이 일어나는 주파수를 의미한다. 최저 공진주파수와 최고 공진주파수 등의 두 가지 공진주파수가 존재하는데, 일반적으로 최저 공진주파수를 의미하고 최저 공진주파

수에서 임피던스가 최대가 된다. 'A'형상의 공진주파수 610Hz, 'B'와 'C'형상은 각각 650Hz, 670Hz로서 강성의 차이에 따라 공진주파수도 변화함을 알 수 있었다. 폴리머 진동판재질의 마이크로 스피커의 공진주파수는 진동계의 질량보다는 에지부의 강성에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있기 때문에 에지부의 강성은 'C'형상이 가장 큰 것으로 나타났다. 이 결과로부터 빗살주름무늬의 개수가 클수록 에지부의 강성이 증가함을 확인할 수 있다.

스피커의 진동판에서 공진이 발생하면 이러한 공진은 스피커의 재생음내에 잡음으로 혼입되어 재생음의 충실도를 저하시키게 된다. 공진주파수가 높으면 스피커의 재생가능주파수 대역을 공진주파수 이하로 설정함으로써 공진의 영향을 회피할 수 있다. 따라서 진동판으로서 높은 강성을 가지고, 공진주파수가 높은 것이 재생음의 충실도 향상에 유리하다⁽⁹⁾.

4.3 선형 변수 측정

Fig. 11~13은 스피커의 전기적/기구적 인자를 정의하는 LPM(Linear Parameter Measurement)을 통한 실험결과를 보여준다. 스피커에 인가되는 전압에 대한 보이스코일의 변위를 정의하는 전달함수와 전류에 대한 인가전압의 비를 의미하는 임피던스는 자기장의 세기 및 전기적 인자와 관련 있으므로 진동판 형상은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석

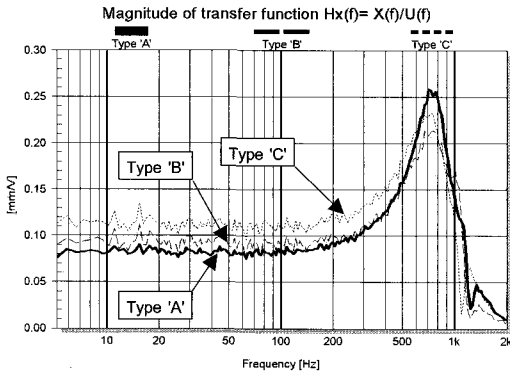


Fig. 11 Transfer function for 3 different shapes of diaphragm

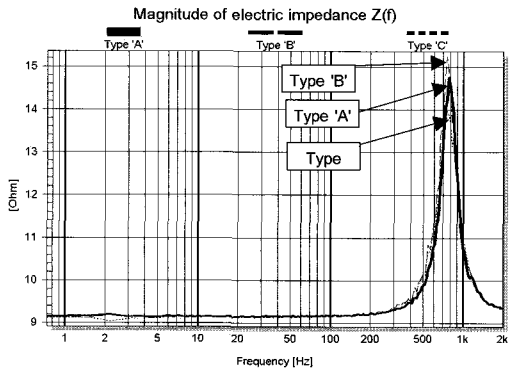


Fig. 12 Impedance for 3 different shapes of diaphragm

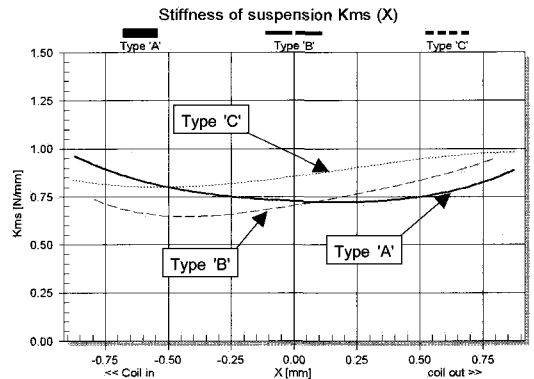


Fig. 14 Stiffness for 3 different shapes of diaphragm

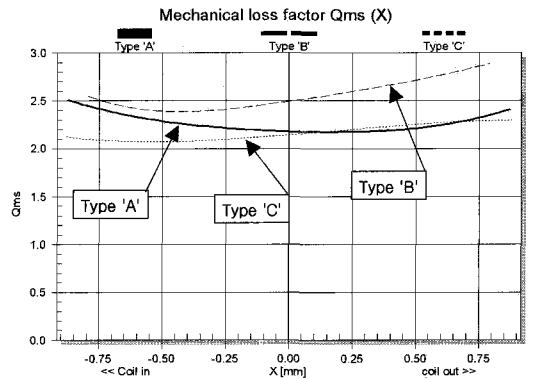


Fig. 15 Mechanical loss factor for 3 different shapes of diaphragm

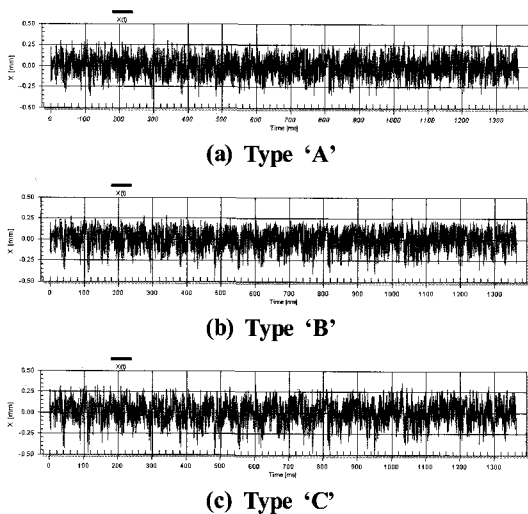


Fig. 13 Voice coil displacement for 3 different shapes of diaphragm

된다(Fig. 11, 12). Fig. 13은 3가지 진동판에 대한 보이스코일의 변위를 나타낸다.

4.4 LSI 측정

Fig. 14~15는 진동판 형상변화에 따른 LSI 특성을 보여주고 있다. 진동판 형상변화에 강성차이에 의해 유연도(강성의 역) 차이를 볼 수 있다. Type 'C'의 강성이 가장 큰 것으로 분석되고(Fig. 14), 이는 기계적 저항의 증가를 의미하며 이에 따라 기계적 손실계수(댐핑계수의 역)가 Type 'C'가 가장 작은 값을 보여 감쇠계수가 가장 큼을 확인할 수 있다(Fig. 15).

5. 결론

스피커에서 진동을 일으켜 음원을 재생하는 가장 핵심적

인 역할을 하는 부품인 진동판의 형상에 대한 연구를 수행하기 위하여 유한요소법과 음압 및 특성파라미터 측정을 수행하였다.

- (1) 진동판의 빗살주름무늬 각도를 45도, 68도로 변경시킨 경우, 45도인 진동판의 강성이 크고, 이에 따라 공진주파수도 고주파로 이동함을 확인할 수 있었다.
- (2) 폴리머 진동판재질의 마이크로 스피커의 공진주파수는 진동계의 질량보다는 에지부의 강성에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 에지부의 강성은 빗살주름무늬의 개수가 클수록 강성이 증가함을 확인할 수 있다.
- (3) 스피커의 재생음에 대한 충실도 향상을 위해서 진동판은 높은 강성을 가지고 공진주파수가 높은 것이 유리하기 때문에, 폴리머 진동판재질의 마이크로 스피커의 공진주파수를 고주파수 대역으로 이동시키기 위해서는 진동판에 형성된 빗살주름무늬의 각도를 감소시키고 개수를 증가시키는 방향으로 설계하는 것이 효과적임을 검증할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Klippel, W., 2000, Diagnosis and Remedy of Nonlinearities in Electrodynamical Transducers, Presented at the 109th Convention of the Audio Engineering Society, Los Angeles, September 22~25, preprint 5261.
- (2) Oh, S. J., 2006, "Studying Acoustical Properties of Micro-Speaker as a Function of Diaphragm material," *Transactions of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 25, No. 15, pp. 222~228.
- (3) Oh, S. J. and Esther, E., 2007, "Analysis of the Relation Between Micro-Speaker with the Back Holes and the Ducted Speaker-System," *Transactions of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 26, No. 3, pp. 115~122.
- (4) Oh, S. J., 2006, "Studying the Acoustic Impedance as a Function of Hole Area of Grille for Micro-Speaker," *Transactions of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 23, No. 3, pp. 101~106.
- (5) Hong, D. K., Woo, B. C., 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.
- (6) Park, S. T., 2004, "Hybrid Computational Analysis of Microspeaker for Mobile Phone," *Acoustical Society of Korea, Conference*, Vol. 23, No. 2(s), pp. 495~498.
- (7) Park, S. T., 2007, "Thiele Small Parameters Estimation for Pseudo Loudspeaker within 10mm Grade Circular-type Microspeaker," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 1112~1118.
- (8) Kim, J. H., Kim, J. T., Kim, J. O. and Kim, J. K., 1997, "Acoustic Characteristics of a Loudspeaker obtained by Vibration and Acoustic Analysis," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 21, No. 10, pp. 1742~1756.
- (9) Tadao, S., 2008, Speaker, Diaphragm for Speaker and Suspension, Patent Application Number KR-10-2008-7006547.