마이크로스피커에서 공명진동수와 Q_{TS} 사이의 연관성

오세진[†]

주성대학 음향제작과

Relationship Between the Resonance Frequency and Q_{TS} for Microspeaker

Sei-Jin Oh[†]

Department of Sound Production, JuSeong University

(2011년 6월 1일 접수 : 2011년 6월 28일 최종수정 : 2011년 6월 28일 채택)

Abstract Micro speakers are used to reproduce sound in small electric and information and communications devices, such as cellular phones, PMPs, and MP3 players. The acoustical properties and sound quality, which are changed due to the decreased size of the speaker, are often adjusted varying the type and thickness of the diaphragm. The most widely used diaphragm material is thin polymer. It was previously reported by the author of this paper that the resonance frequency of a micro speaker is changed by the type and thickness of a polymer diaphragm. In this paper, the frequency response near the resonance frequency of a micro speaker was studied as functions of the type and thickness of the polymer diaphragm. While $R_{\max}$ and R_{DC} were affected by the type and thickness, an analysis of the electrical impedance curve revealed that $R_o (= R_{\max}/R_{DC})$ and Δf were not changed. Thus, Q_{TS} which was function of R_o , Δf , and the resonance frequency, is only related to the resonance frequency. The increase of the resonance frequency led to a proportional rise of Q_{TS} . The change of the frequency response near the resonance frequency was not dependent on the type or thickness of the polymer diaphragm, but was affected by the resonance frequency.

Key words micro-speaker, resonance frequency, Q_{TS} , electric impedance, frequency response.

1. 서 론

디지털 시대를 맞이하여 많은 소형전자정보통신기기(스마트폰, MP3, PMP...)들이 사용되고 있다. 이들 소형제품들은 음향재생장치에 대한 크기의 감소를 필연적으로 요구하고 있다. 스피커의 크기가 감소할 경우에 공명진동수가 높아지거나 출력이 감소하여 음질이 떨어질 수 있다. 이처럼 스피커의 크기감소에 따른 음질의 열화를 억제하기 위하여 많은 노력을 하고 있다.¹⁻⁶⁾

소형전자정보통신기기용 마이크로스피커의 진동판은 거의 대부분이 폴리머 계통의 재질을 사용하고 있다. 이런 과정에서 폴리머의 종류 또는 두께를 변화시켜가며 마이크로스피커의 음향특성을 조정하기도 한다. 이처럼 진동판의 종류 또는 두께가 달라졌을 경우에 재료의 영률과 밀도 또는 스티프니스(stiffness)의 차이에 의해 공명진동수와 같은 음향특성이 변한다는 것은 이미 보고된 바 있다.³⁻⁴⁾ 이러한 공명진동수의 변화가 마이크로스피커의 음

질과 주파수특성에도 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 마이크로스피커의 공명진동수가 음질 또는 주파수특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 이론적 배경

스피커에 입력되는 전기임피던스(Z_{input})는 아래의 식들과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_{input} = R_{input} + jX_{input}$$

$$(X_{input} = X_L - X_C)$$

$$Z_{input} = \sqrt{R_{input}^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{X_L - X_C}{R_{input}} \right]$$

여기서 R_{input} , X_{input} , X_L , X_C 그리고 ϕ 는 입력저항, 입력리액턴스, 유도성 리액턴스, 용량성 리액턴스 그리고 위상을 각각 의미한다. 스피커의 기계적 공명진동수(f_o)에

[†]Corresponding author
E-Mail : seijin@jsu.ac.kr (S. -J. Oh)

서는 유도성 리액턴스(X_L)와 용량성 리액턴스(X_C)의 크기가 동일하여 입력리액턴스(X_{input})가 소멸된다. 따라서 보이스 코일의 DC저항(R_{DC})과 운동임피던스(Z_{MOT})에서의 저항성분만이 남게 된다(Fig. 1). 주파수가 지속적으로 증가함에 따라서 용량성 리액턴스는 감소하고, 보이스 코일에서의 인덕턴스로 인한 유도성 리액턴스가 증가하게 된다. 따라서 공명주파수 근처에서는 주로 운동임피던스의 저항성분이 그리고 주파수가 높아지면서 보이스 코일에 의한 인덕턴스가 중심이 된다(Fig. 1). 여기서, 보이스 코일의 DC저항은 주파수에 관계없이 항상 일정한 값으로 모든 주파수에서의 전기임피던스에 기여하게 된다.

공명주파수 부근에서의 주파수특성에 대해 살펴보면 Fig. 2와 같다. $Q(=Q_{TS})$ 값이 1보다 클 경우에는 언더 댐핑(under damping)이라고 부르고, 1보다 작으면 오버 댐핑(over damping)이라고 한다.

Q_{TS} 값은 공명진동수 근처에서의 전기임피던스 특성에 의하여 아래와 같이 결정된다. 우선, R_0 를 최대 임피던스(R_{max})와 보이스 코일의 직류저항(R_{DC} , 본 연구에서는 20~30Hz에서의 임피던스 값으로 대치함)의 비율로 식(1)처럼 정의한다. 그리고 최대 임피던스(R_{max})로부터 3dB가 감소되는 임피던스(R_1 또는 R_2) 값을 식(2)로부터 얻을 수 있다.

$$R_0 = \frac{R_{max}}{R_{DC}} \quad (1)$$

$$R_1 = R_2 = \sqrt{R_0} \cdot R_{DC} \quad (2)$$

따라서 식(2)로부터 구해진 임피던스(R_1 또는 R_2)값을 갖는 두 개의 주파수를 공명주파수 전(f_1)과 후(f_2)에서 결정할 수 있다. 이처럼 공명진동수(f_0)와 이들 주파수(f_1 & f_2) 그리고 R_0 를 이용하여 기계적 $Q(=Q_{MS})$ 값을 구하게 된다. 그리고 Q_{MS} 값을 식(4)와 식(5)에 대입하여 전기적 $Q(=Q_{ES})$ 값과 전체 $Q(=Q_{TS})$ 값을 각각 결정하게 된다.

Fig. 1. The Electrical Input Impedance as a function of frequency.

Fig. 2. The frequency response near f_0 as a function of Q_{TS} .

$$Q_{MS} = \frac{f_0 \cdot \sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} \quad (3)$$

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS}}{R_0 - 1} \quad (4)$$

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS} \cdot Q_{ES}}{Q_{MS} + Q_{ES}} = \frac{Q_{MS}}{R_0} \quad (5)$$

만약 Q_{TS} 값을 알게 되면, 공명진동수 부근에서의 주파수특성을 예측할 수 있으므로 스피커의 음질을 판단할 수 있게 된다(Fig. 2).

2.2 실험 방법

본 연구를 위하여 지름이 16 mm이고, 두께가 3.6 mm이며, 공칭 임피던스가 8Ω인 마이크로스피커를 사용하였다. 이 때 진동판의 종류는 폴리머 중에서 PEI, PET와 PPS로 선정하였으며, 각 종류들의 두께를 16 μm, 19 μm, 25 μm, 30 μm 그리고 38 μm으로 변화시켰다. 그리고 실험결과에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 동일한 조건의 샘플을 3개씩 제작하여 분석하였다.

마이크로스피커를 무향실 안에 설치된 1,000cc의 정사각형 배플박스 전면부에 부착하였다. 그리고 주파수가 20Hz부터 20kHz의 사인파를 신호발생기로부터 발생시켰다. 이 음향신호는 B&K 2716C의 파워앰프를 거치면서 0.1W로 증폭된 후에 마이크로스피커 샘플들로 입력되었다. 그때 마이크로스피커와 마이크로폰(1/2인치, B&K 4191) 사이의 거리는 10 cm를 유지하도록 하였다. 마이크로폰으로부터 나온 음향신호는 IEC 60268-5의 규격에 따라 오디오 분석기(B&K 3560C)를 통해 분석되었다.

3. 결과 및 고찰

마이크로스피커의 진동판에 사용되는 재질 또는 두께

와 기계적 공명진동수 사이에서의 관계는 이미 알려져 있다.^{3,4)} 이처럼 폴리머의 재질과 두께에 따른 주파수특성을 Figs. 3~5에 나타내었다. 이들에서 보면, 주파수가 2 kHz 이상일 때의 주파수특성이 그 이하인 경우에 비하여 작게 변화되고 있음을 알 수 있다. 이는 폴리머의 종류 및 두께의 변화가 2kHz 이상의 주파수특성에 큰 영향을 주지 않는다고 할 수 있다. 그러나 2kHz 이하에서의 주파수특성은 이들의 영향을 크게 받는다고 할 수 있다. 이처럼 진동판의 종류 및 두께의 변화에 따라 크게 달라지는 2kHz 이하에서의 주파수특성은 Fig. 2에 나타난 공명주파수 근처에서의 Q_{TS} 값에 따른 주파수특성으로 설명할 수 있다. 왜냐하면, Q_{TS} 값은 공명진동수 근처에서의 주파수특성을 결정하기 때문이다. 예를 들면, 본 연구에 사용된 모든 진동판의 종류에서 두께가 증가함에 따라 공명진동수 근처에서의 언더 댐핑의 발생이 커져서 Q_{TS} 값이 증가하는 것을 Figs. 3~5에서 볼 수 있다.

Fig. 3. The frequency response of micro-speaker as a function of the thickness of PEI diaphragm.

Fig. 4. The frequency response of micro-speaker as a function of the thickness of PET diaphragm.

진동판의 두께가 16 μm 인 PEI로 제작된 마이크로스피커를 사용하여 측정한 전기임피던스 특성을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6으로부터 결정된 R_{max} 와 R_{DC} 를 식(1)에 대입하여 R_0 를 구한 후에 다시 식(2)을 활용하여 $R_1(=R_2)$ 을 얻었다. 그리고 $R_1(=R_2)$ 값을 이용하여 Fig. 6에서 f_1 와 f_2 를 결정하였다. 이 값들을 다시 식(3)에 대입하여 기계적 Q_{MS} 값을 얻을 수 있었다. 그리고 Q_{MS} 값을 활용하여 전기적 Q 값인 Q_{ES} 값을 구한 후에, 식(5)를 이용해 전체 Q 값인 Q_{TS} 값을 얻을 수 있었다. 이러한 계산을 각 샘플별로 실시하여 모든 샘플들에 대한 Q_{TS} 값을 얻었으며, 그 값들을 Table 1에 나타내었다.

Q_{TS} 값을 결정하는데 필요한 R_0 와 f_1 과 f_2 사이의 대역폭을 의미하는 Δf 를 Table 1에서 살펴보면, 각 진동판의 종류별로 두께에 따른 이들의 변화가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 다시 말하면, PEI의 경우에 R_0 는 1.76~1.87 Ω 에 그리고 Δf 는 173Hz와 181Hz 사이에 놓여 있다. 따라서

Fig. 5. The frequency response of micro-speaker as a function of the thickness of PPS diaphragm.

Fig. 6. The impedance curve for PEI(16 μm) diaphragm.

Table 1. The measured values of parameters as functions of diaphragm kind and thickness.

Material	Thickness (μm)	R_{Max} (Ω)	R_{DC} (Ω)	R_0 (Ω)	$R_{f_1 \& f_2}$ (Ω)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	Δf (Hz)	f_0 (Hz)	Q_{MS}	Q_{ES}	Q_{TS}
PEI	16	13.75	7.32	1.87	10.03	392	565	173	472	3.74	4.26	1.99
	19	13.75	7.35	1.87	10.05	470	642	173	551	4.38	5.03	2.34
	25	13.05	7.33	1.78	9.78	554	731	177	638	4.81	6.16	2.70
	30	13.10	7.30	1.79	9.77	672	853	181	760	5.62	7.08	3.13
	38	12.90	7.31	1.76	9.71	884	1,059	175	968	7.35	9.61	4.16
PET	16	13.05	7.37	1.77	9.81	400	584	184	486	3.51	4.56	1.98
	19	13.20	7.42	1.77	9.90	520	698	178	605	4.53	5.81	2.55
	25	13.15	7.37	1.78	9.84	683	862	179	769	5.73	7.31	3.22
	38	12.25	7.38	1.65	9.51	1,054	1,248	194	1147	7.61	11.54	4.59
PPS	16	13.30	7.42	1.79	9.93	342	531	189	430	3.05	3.84	1.70
	19	13.10	7.47	1.75	9.89	579	757	178	666	4.95	6.57	2.83
	25	13.15	7.39	1.78	9.86	704	877	173	786	6.06	7.78	3.41
	38	12.75	7.41	1.72	9.72	1,007	1,192	185	1097	7.79	10.79	4.52

Table 2. The statistical analysis for R_0 and Δf as functions of diaphragm kind and thickness.

Material	Thickness	Measured Value	R_0			t-Value	Significance Probability	Standard Deviation/Average
			Average	Variance	Standard Deviation			
PEI	16	1.87	1.81	0.0022	0.047	0.1711	0.8724	2.6%
	19	1.87						
	25	1.78						
	30	1.79						
	38	1.76						
PET	16	1.77	1.74	0.0029	0.054	0.0809	0.9401	3.1%
	19	1.77						
	25	1.78						
	38	1.65						
PPS	16	1.79	1.76	0.0008	0.028	0	1	3.2%
	19	1.75						
	25	1.78						
전체	38	1.72	1.78	0.0029	0.0054	-0.2952	0.7729	3.0%

($\alpha = 0.01$)

각 진동판의 종류별로 두께에 따른 측정값들을 이용하여 R_0 과 Δf 에 대한 평균, 분산 그리고 표준편차를 SPSS 12.0을 이용해 통계적으로 살펴보았다(Table 2, 3).

PEI 진동판의 경우에 두께별로 측정된 R_{max} 와 R_{DC} 로부터 얻은 R_0 값들의 평균은 1.81로 나타났고, 이 측정값들 사이의 분산과 표준편차는 0.0022와 0.047로 주어졌다. 여기서 R_0 의 평균값(= 1.81)에 대한 유의성을 평균검증(t-test)을 통해 다시 확인하였는데, 이 때의 유의확률(p)이 0.8724로 주어졌음을 Table 2에서 보여준다. 신뢰도를 99%까지 높일 수 있도록 유의수준(α)을 0.01로

한 상태에서 유의확률(= 0.8724)이 유의수준(= 0.01)에 비하여 높기 때문에 비유의적이라고 할 수 있다. 이는 R_0 의 평균값이 1.81이라는 것에 대한 정당함을 다시 확인하여 주는 것이다. 그리고 R_0 값에 대한 분산과 표준편차들이 매우 작은 것으로 보아서 측정된 R_0 값들이 평균값에 매우 가깝게 산포되어 있다는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 평균값에 대한 표준편차의 비율이 2.6%에 불과하다. 이는 평균값으로부터 멀리 떨어져 있는 R_0 값이라고 하여도, 평균값의 크기에 불과 2.6% 정도만 벗어나 있다는 것이다. 따라서 R_0 의 평균값과 측정값들 사이에 존

Table 3. The statistical analysis for R_0 and Δf as functions of diaphragm kind and thickness.

Material	Thickness	Measured Value	Measured Value	Average	Δf		t-Value	Significance Probability	Standard Deviation/Average
					Variance	Standard Deviation			
PEI	16	1.87	173	175.80	8.96	2.99	0	1	1.7%
	19	1.87	173						
	25	1.78	177						
	30	1.79	181						
	38	1.76	175						
PET	16	1.77	184	183.75	17.83	4.22	0	1	2.2%
	19	1.77	178						
	25	1.78	179						
	38	1.65	194						
PPS	16	1.79	189	181.25	38.47	6.20	0	1	3.4%
	19	1.75	178						
	25	1.78	173						
전체	38	1.72	185	179.92	20.77	4.55	0.0017	0.9987	2.5%

($\alpha = 0.01$)

재하는 작은 차이는 마이크로스피커 샘플을 제작하는 과정에서 발생하는 오차 또는 단순한 실험적 측정오차 정도로 취급할 수 있게 된다. 이는 폴리머의 재질이 동일한 가운데 두께의 변화는 R_{max} 와 R_{DC} 값을 다소 바꿀 수 있어도, 그들의 비율로 주어지는 R_0 값에는 아무런 영향을 주지 않는다고 말할 수 있다. 이러한 결과는 PET와 PPS의 재질에서도 PEI와 동일하게 나타났다.

Table 2의 재질에서 “전체”라고 표시되어 있는 경우는 폴리머 진동판의 종류와 두께에 관계없이 위와 동일한 해석의 결과이다. 다시 말하면, 폴리머의 종류와 두께에 관계없이 13개의 모든 샘플들에 대한 R_0 값의 평균은 1.78로 주어졌고, 이들 측정값 사이의 분산과 표준편차는 0.0029와 0.054로 얻어졌다. 그리고 R_0 값들로부터 결정된 평균값에 대한 유의확률이 유의수준보다 큰($p > \alpha$) 것으로 나타나 비유의적임을 평균검증(t-test)에서 보여주었다. 이 결과는 폴리머의 종류와 두께에 관계없이 R_0 의 평균값이 1.78이라는 것에 대해서도 정당하다는 것을 다시 한번 뒷받침해 주는 것이다. 뿐만 아니라, 평균에 대한 표준편차의 비율이 불과 3%에 해당하고 있다. 이는 R_0 의 평균값으로부터 측정값 사이의 편차가 평균적으로 불과 3%정도로써, 단순히 실험적 측정오차나 스피커 제작과정에서의 미미한 차이로 여겨질 수 있음을 말해주는 것이다. 따라서 R_{max} 와 R_{DC} 값의 비율로 주어지는 R_0 는 PEI, PET, PPS의 종류와 그들의 두께에 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

공명진동수에서 발생하는 최대임피던스(R_{max}) 값에서

3dB가 감소된 임피던스($R_1 = R_2$)를 갖는 주파수(f_1 & f_2)들 사이의 대역폭(Δf)을 진동판의 종류 및 두께에 따라 조사하였다(Table 3). 우선, PEI에서 두께에 따른 Δf 값들의 평균, 분산 그리고 표준편차는 175.8Hz, 8.96 그리고 2.99로 주어졌다. 평균검증(t-test)에서 유의수준(α)을 0.01로 한 가운데 평균에 대한 유의확률(p)이 1로 주어졌다(Table 3). 이는 유의확률이 유의수준보다 높기 때문에 비유의적임으로써, PEI의 두께를 변화시켜가며 측정한 Δf 값들의 평균이 175.8Hz임을 다시 확인해 주는 것이다. 그리고 분산과 표준편차와 평균값 사이의 비율이 높지 않은 것으로 나타났다. 다시 말하면, Δf 의 평균에 대한 표준편차의 비율이 단지 1.7%에 불과함이 Table 3에 나타나 있다. 이는 Δf 의 평균과 각 측정값 사이의 차이가 거의 없다는 것으로써, PEI의 두께가 달라진다고 하여도 Δf 값에는 변화가 일어나지 않음을 의미한다. 이러한 PEI에서의 결과는 PET와 PPS에서도 동일하게 나타나기 때문에, 세 종류의 모든 재질에서 Δf 값은 두께에 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

Table 3의 재질에서 “전체”라고 표시되어 있는 Δf 값을 보면, 평균이 179.92Hz로 주어져 있다. 이에 대한 신뢰성을 평균검증(t-test)을 통해 다시 확인한 결과로써, 유의확률이 유의수준을 넘어서기 때문에 비유의적이라고 할 수 있다. 그리고 표준편차가 불과 4.55로써 평균값에 비하여 매우 작은 값을 가진다. 이는 각 측정값들이 평균값에 매우 집중적으로 모여 있음을 보여주는 것이다. 그들 사이의 차이를 살펴보면, 표준편차는 평균값의 크기에 불과

Fig. 7. The comparison between the normalized resonance frequency and Q_{TS} curves for PEI diaphragm.

Fig. 9. The comparison between the normalized resonance frequency and Q_{TS} curves for PPS diaphragm.

Fig. 8. The comparison between the normalized resonance frequency and Q_{TS} curves for PET diaphragm.

2.5% 정도로써 R_0 값의 경우보다 더 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 평균값으로부터 각 측정값 사이의 오차는 R_0 에서와 같이 실험적 측정오차 또는 스피커 제조과정에서의 오차라고 볼 수 있을 것이다. 따라서 f_1 과 f_2 사이의 대역폭인 Δf 값은 PEI, PET, PPS의 종류와 두께에 관계없이 일정하다는 것을 알 수 있었다.

위에서 설명한 바와 같이, R_0 와 Δf 는 진동판의 종류 또는 두께에 영향을 받지 않는 하나의 상수처럼 취급될 수 있다. 이러한 결과를 기계적, 전기적 그리고 전체 Q 값을 정의하는 식(3)~(5)에 적용하게 되면, 기계적 Q_{MS} 은 기계적 공명진동수(f_0)에만 비례하게 된다. 그리고 전기적 Q_{ES} 와 Q_{TS} 들은 Q_{MS} 에만 의존하기 때문에 공명진동수에 비례하게 된다.

본 연구에 사용된 진동판의 재질과 두께에 따른 Q_{MS} , Q_{ES} 와 Q_{TS} 값들을 Table 1에 나타내었다. 각 진동판의 재질별로 두께가 증가함에 따라서 공명진동수, Q_{MS} , Q_{ES} 와

Q_{TS} 값들도 동시에 증가하였는데, 특히 Figs. 7~9에 나타난 공명진동수와 Q_{TS} 사이의 비례관계는 위에서 설명한 이론적으로 예상과 정확하게 일치하였다.

진동판의 재질별로 두께에 따라 실제로 측정된 공명진동수(f_0)들을 선형적으로 피팅(linear fitting)하였다. 뿐만 아니라, 전기임피던스 곡선으로부터 얻어진 R_{max} , R_{DC} , f_1 , f_2 그리고 f_0 로부터 결정된 Q_{TS} 값을 공명진동수에서와 같이 선형적으로 피팅하였다. 이 공명진동수와 Q_{TS} 를 피팅한 직선들 사이의 관계를 얻기 위하여, 진동판의 두께가 16 μm 일 때의 값들로 각각을 정규화(normalization)시켰다. Figs. 7~9는 세 가지 종류의 진동판에 대한 피팅 직선들의 비교를 나타낸 것이다.

PEI와 PPS로 제작된 진동판의 경우에 공명진동수와 Q_{TS} 의 피팅 직선들이 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 뿐만 아니라, PET의 경우에서도 진동판의 두께가 증가하면서 이들 사이의 차이가 다소 증가하고는 있지만 그 차이가 크지를 않아서 이들이 서로 유사하다고 할 수 있다. 실제로 실험적 측정오차나 스피커의 제작과정에서 발생하는 오차를 감안하면 이들이 매우 유사하다고 해도 큰 무리는 없는 것으로도 판단된다. 따라서 세 가지 종류의 진동판에서 공명진동수와 Q_{TS} 가 서로 거의 동일한 거동을 보이고 있다는 것을 말해준다. 이 결과를 얻기 위해서는 R_0 와 Δf 들이 진동판의 종류와 두께에 관계없이 일정한 값을 가져야 한다는 것을 식(3~5)으로부터 알 수 있다. 뿐만 아니라, 진동판의 종류와 두께에 관계없이 R_0 와 Δf 값이 일정하다는 것에 대해 이미 위에서 설명한 바 있다. 따라서 폴리머 재질을 진동판으로 사용하는 마이크로스피커의 경우에 R_0 와 Δf 는 폴리머의 종류나 두께에 관계없이 일정한 값을 갖기 때문에 Q_{TS} 는 공명진동수에만 선형적으로 정비례하게 된다.

4. 결 론

마이크로스피커에서 진동판의 재질로 많이 사용되는 폴리머의 종류와 두께를 변화시키게 되면 공명진동수를 포함하여 주파수특성이 변하게 된다. 전기임피던스 특성에 대한 분석으로부터 R_{max} 와 R_{DC} 의 값들은 진동판의 종류 및 두께에 의해 달라지지만, 이들 사이의 비율(R_0)이 변하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, Δf 도 그들에 의해 변하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 Q_{TS} 로 지시되는 공명주파수 부근에서의 주파수특성은 단지 공명진동수에만 관계되는 것으로 드러났다. 따라서 폴리머 진동판의 경우에 종류와 두께에 관계없이 일정한 R_0 과 Δf 값을 가지며, 공명진동수가 증가할 때에 Q_{TS} 도 동시에 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. M. R. Gander, J. Audio Eng. Soc., **34**(9), 627 (1986).
2. M. R. Gander, J. Audio Eng. Soc., **29**(1), 10 (1981).
3. S. -J. Oh, Kor. J. Mater. Res., **20**(12), 640 (2010) (in Korean).
4. S. -J. Oh, Sae Mulli, **52**(6), 536 (2006).
5. S. -M. Hwang, H. -J. Lee, J. -H. Kim, G. -Y. Hwang, W. -Y. Lee and B. -S. Kang, IEEE Trans. Magn., **39**(5), 3259 (2003).
6. G. -Y. Hwang, H. -G. Kim, S. -M. Hwang and B. -S. Kang, IEEE Trans. Magn., **38**(5), 2376 (2002).