다층 진동판으로 구동되는 평판 스피커

이한량, 김병남*, 오세진
주성대학 스피커음향기술혁신센터, 성균관대학교 물리학과 음향학연구실*

A Flat Loudspeaker driven by Multi-layer diaphragm

H.R. Yi, B.N. Kim* and S.J. Oh.
Speaker & Audio Technology Innovation Center, Juseong College, ChungBuk-Do 360-805, R.O.K.
*Acoustics Research Laboratory, Department of Physics, SungKyunKwan University, Suwon 440-746, Republic of Korea
hryi@jsc.ac.kr , bnkim@skku.ac.kr* , seijin@jsc.ac.kr

요약

스피커는 진동판의 크기와 형태 외에도 소재 또는 내부구조에 따라 구동 특성이 달라진다.

본 연구에서는 동일한 신호가 입력되는 두 진동판 사이에 공동을 형성시킨 경우, 다공성 흡음재를 삽입한 경우 스피커의 특성 변화를 관측하였다. 특히, 다공성 흡음재를 삽입한 경우, 다공성 물질의 체적을 동일하게 하고 진동판 표면 상태에 따른 영향과 진동판 상의 진동 전달 경로에 의한 영향을 제거하여 내부물질에 따른 특성의 변화를 측정하였다

1. 서론

스피커의 박형화에 따른 필요성으로 진동판의 형태를 콘(cone) 형태에서 평판 형태로 변환하는 연구 개발에 많은 노력들을 기울이고 있다. 그러나, 지금까지의 많은 노력에도 불구하고 현재까지 평판스피커의 성능은 기존 콘형 진동판으로 제작된 다이나믹 스피커에 비해 음향출력, 재생대역, 제조원가 등의 면에서 only 만족한 성능을 이루지 못하고 있다. 특히, 스피커의 출력 및 재생대역의 확장이라는 측면에서는 기존의 다이나믹 스피커에 비해 상당한 취약성을 보이고 있다.

또한 대부분의 진동판 관련 연구 결과들은 진동판의 재질에 의한 영향을 진동판의 탄성과 질량, 내부손실에 의한 것에 주안점을 두고 있다.[1][2]

본 연구는 평판 형태의 스피커 진동판 구조에서 연구 결과들과 관련하여 구체적인 형태를 갖는 내부구조물에 의한 스피커의 특성변화를 확인하고자 하였다. 특히, 스피커의 임피던스 변화를 측정하여 미세한 특성변화를 관측하고자 하였다.

2. 본론

2.1 시료

스피커 진동판의 내부구조 또는 구성 물질들에 따른 구동특성을 관측하기 위해 그림 1.과 같은 단면 구조의 스피커를 제작하였다.

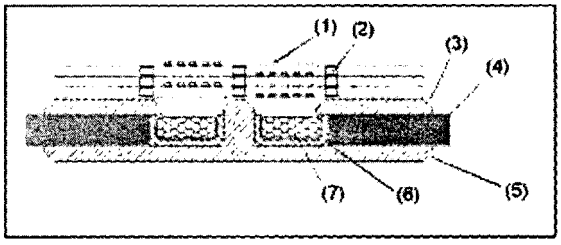

그림 1. 측정에 사용된 평판스피커의 구조도

(1)은 진동판으로 폴리이미드필름에 전해 동박을 적층하여 제조된 연성 회로기판(F.P.C.B)에 사진 1과 같이 보이스코일을 성형한 필름형 진동판이다.

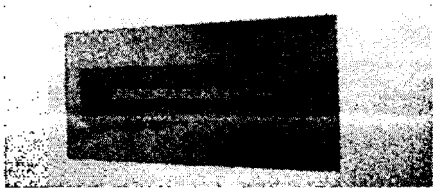

사진 1. 측정에 사용된 진동판

(2)는 진동판 사이에 간격을 확보하여 그 간격 내에 공기와 흡음재를 삽입할 수 있도록 한 진동판 분리용 격재이다. 이 간격을 유지하는 소재로는 두께 1㎜의 점착성을 가진 부틸고무를 사용하여 진동판의 진동이 외부로 전달되지 않도록 고정하였다. 또한, 사진 1의 진동판 뒷면에서 발생된 압력이 외부로 누설되는 것을 방지하도록 긴밀하게 부착하였다.

(3)과 (5)는 자기회로의 자극형성을 위한 위판과 아래판으로 재질은 일상적으로 사용되고 있는 탄소강 C45를 두께 2.5㎜로 가공하여 적용하였다.

(4)는 희토류 영구자석으로 Nd 35를 가로 20㎜, 세로 15㎜, 두께 5㎜로 제작된 기성품을 사용하였다.

(6)은 보이스코일에 전류에 의해 발생되는 왜곡, 특히 제2차 고조파 왜를 줄이기 위해 구리를 몸통 모양으로 가공하여 부착하였다. [3]

(7)은 진동판 뒷면의 압력에 의해 음명이 일어나는 것을 방지하기 위해 흡음재를 (6)의 구리 몸통 내에 채워 넣었다.

진동판 사이의 삽입률에 대한 것과 진동판의 전기적 연결 및 측정과정은 다음과 같다.

a. 측정을 위해 진동판 사이에 삽입하여 사용한 시료의 크기 및 무게는 표 1과 같다.

삽입률	크기 (㎜)	무게 (g)
공기(20℃)	가로 : 7	7×10^{-3}
발포 스티로폼	세로 : 82	0.016
P.E. 폼	두께 : 1	0.045

표 1

b. 본 측정에 사용된 진동판 한 장의 임피던스는 3.3 Ω으로 낮은 값을 갖고 있어 구동장치 상의 문제로 각 층을 구성하는 진동판의 전기신호 입력을 위한 연결은 한 층과 위층을 직렬로 연결하고, 그 다음의 위층도 연속하여 직렬로 연결하여 가면서 진동판이 4층을 이룰 때 까지 각 층 별로 측정을 하였다.

다음 매 층별로 누적 층을 형성하면서 측정을 한 후, 전기적 연결을 해체하고, 4개의 층이 누적된 상태에서 각 층별로 측정을 하였다.

c. 전기적 입력신호는 정현파를 주파수 대역별로 입력하였고, 진동판의 연결에 의한 임피던스 증가에 대한 영향을 배제하기 위해 입력은 1W로 고정하였다.

2.2 임피던스

일반적으로 다이나믹 스피커는 비가역적 발신기(anti-reciprocal transmitter)로 취급할 수 있고, 이에 대한 입력 전기저항은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다. [4]

$$Z_g = Z_{MB} + Z_{MOT} \qquad (1)$$

여기에서, $Z_{MB} = R_0 + j\omega L_0$이고, R_0, L_0는 스피커 저항과 인덕턴스이다. 그리고 $Z_{MOT} = R_{MOT} + jX_{MOT}$이고, 각 성분은 식(2)와 식(3)과 같다.

$$R_{MOT} = \frac{1/R}{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} \qquad (2)$$

$$X_{MOT} = \frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} \qquad (3)$$

여기에서, $R = \frac{\Phi_M^2}{R_m + R_r}$, $L = \Phi_M^2/s$, $C = \frac{m + X_r/\omega}{\Phi_M^2}$이다.

즉, 스피커에 입력되는 신호에 의해 보이스코일에 나타나는 임피던스의 변화는 Z_{MB} 보다는 Z_{MOT}에 의해 나타나는 것을 알 수 있다.

2.3 측정결과

다음의 그림 1~그림 3은 2.1의 시료에 대한 설명 중 b항과 c항에 따라 측정한 결과를 나타낸다. 여기에서, L1 은 자기회로 위판에 직접 접촉되어 있는 진동판을 의미하고, 그 위로 순서에 따라 L2, L3, L4로 층이 이루어 진다. 즉, 삽입률은 각 진동판 사이에 형성되는 3개 층으로 이루어져 있다. 따라서 그림 1~그림 3은 진동판들이 직렬로 연결되어 감에 따라 임피던스 값이 각 3, 6, 9, 12 Ω이 되고 코일의 권선이 늘어남에 따라 높은 주파수대역에서 상승곡선을 나타내게 된다.

그림 4~그림 6은 그림 1~그림 3의 결과에서 보이스코일이 직렬로 연결된 것에 의해 나타나는 영향과 진동판 적층에 의해 나타나는 영향을 구분하기 위해, 진동판 간에 직렬로 연결된 입력을 해체하고 진동판이 적층된 상태에서 개별적인 임피던스들 측정한 결과이다.

따라서 그림 1~그림 3은 임피던스 값이 3~12 Ω의 값들을 가지고 그림 4~그림 6은 임피던스 값이 3 Ω 근처에 있게 된다. 그림 1~그림 3에서는 진동판 중첩에 의한 영향이 크게 보이지 않으나, 그림 4~그림 6에서는 진동판의 적층과 삽입률에 의한 효과가 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

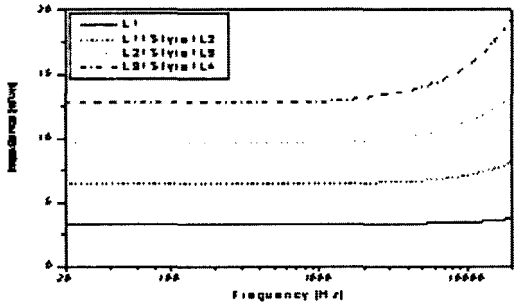

그림 1. 스티로폼을 진동판 사이에 삽입하면서 측정한 임피던스 응답특성

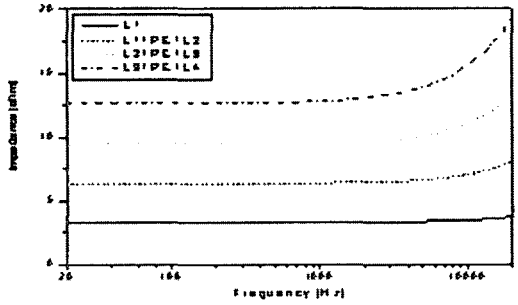

그림 2. PE폼을 진동판 사이에 삽입하면서 측정한 임피던스 응답특성

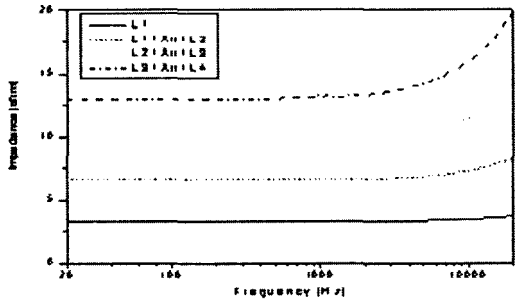

그림 3. 공기층을 진동판 사이에 두면서 측정한 임피던스 응답특성

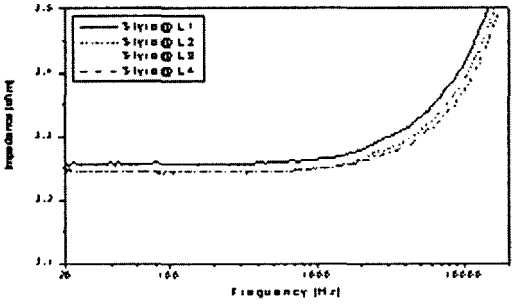

그림 4. 스티로폼을 진동판 사이에 삽입한 상태에서의 각 진동판 층의 임피던스 응답특성

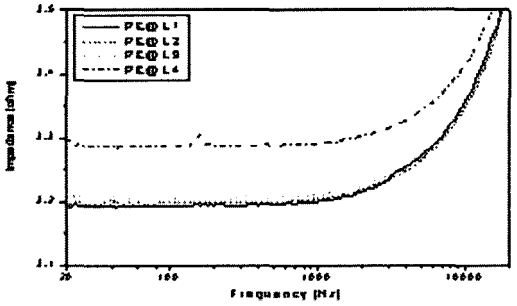

그림 5. PE폼 진동판 사이에 삽입한 상태에서의 각 진동판 층의 임피던스 응답특성

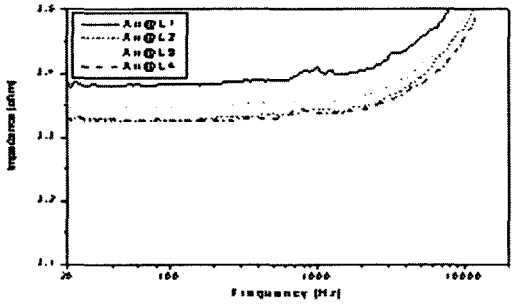

그림 6. 공기를 진동판 사이에 삽입한 상태에서의 각 진동판 층의 임피던스 응답특성 (삽입물이 없는 경우)

그림 4의 스티로폼을 삽입한 경우에는 각 층별 진동판의 임피던스 값이 큰 변화를 나타내고 있지 않으나, PE폼을 삽입한 경우의 그림 5와 삽입물이 없이 진동판이 간격만을 유지한 그림 6의 경우는 0.1 Ω까지의 변화폭을 보이고 있다. 특히, PE폼을 삽입한 경우 제1층에서 제3층까지의 진동판에서 임피던스 변화가 나타나지 않으나 제4층의 진동판에서, 외부로 노출된 진동판에서 상대적으로 큰 임피던스의 증가를 확인할 수 있다. 또한 그림 6의 공기층으로 삽입물이 이루어진 경우, 자기회로에 부착된 제1층의 임피던스가 상대적으로 큰 임피던스를 나타내고 있고, 나머지 진동판들은 상대적으로 낮은 임피던스를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

이러한 임피던스 변화를 상대적으로 비교하기 위해 그림 7~그림 10에서 진동판의 층별로 임피던스 특성을 비교하였다.

그림 7은 진동판에 부가된 삽입물들에 의한 영향을 비교하기 위해 진동판 1장을 자기회로에 부착하여 측정한 임피던스와 4층의 진동판 사이에 각 삽입물을 넣은 상태에서 제1층만의 임피던스를 측정한 결과이다.

그림 7에서 확인된 결과는 진동판 사이에 삽입물을 넣은 경우, 진동판 1장만으로 측정된 임피던스 값 보다 낮은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 즉, 식(2)와 식(3)에서 진동계의 질량 증가는 Z_{MOT}에 역 제곱으로 비례하는 것을 나타내고 있고, 스티로폼과 PE폼에 대한 결과들은 삽입물의 질량 증가에 따라 임피던스가 감소하는 결과를 나타내고 있다.

그러나, 공기를 삽입물로 한 경우, 즉 삽입물이 없이 진동판을 일정간격을 유지하면서 4층 구성한 경우에는 오히려 단일 진동판 만의 임피던스보다 상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 삽입물인 공기의 질량 증가에 따르는 영향보다는 진동판 층 사이의 공기에 의한 탄성요소가 더 큰 영향을 나타내는 것으로 고려된다. 즉, 식(3)에서 진동계의 강성(stiffness)이 증가할수록 X_{MOT}의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 스티로폼 또는 PE폼이 삽입된 경우보다는 공기층이 형성되어 있을 때 진동계의 컴플라이언스가 증가하고, 이에 따라 임피던스의 증가가 나타나는 것으로 고려할 수 있다.

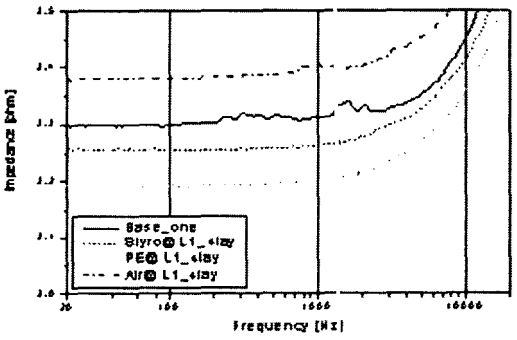

그림 7.

Base_one : 진동판 1장만으로 구성된 경우의 임피던스
Styro@L1_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 스티로폼이 삽입된 상태에서 제1층의 임피던스
PE@L1_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 스티로폼이 삽입된 상태에서 제1층의 임피던스
Air@L1_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 공기가 삽입된 상태에서 제1층의 임피던스

그림 8는 진동판 층이 2층을 이루고 있고, 진동판 사이에 삽입물이 있는 경우의 제2층만의 진동판에서의 임피던스를 진동판이 4층을 이루고 있고 삽입물이 있는 경우의 제2층만의 임피던스를 비교한 것이다. 이때, 같은 값의 수준에서 측정치를 비교하기 위해, 2층을 이루고 있는 경우의 임피던스 값은 제2층의 임피던스 값에서 제1층의 임피던스 값을 뺀 결과를 적용한 것이다.

그림 8에서 2층만으로 이루어진 진동판들의 경우 모두 진동판 1장만으로 측정된 임피던스의 값보다 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 4층으로 구성된 진동판의 제2층 진동판만을 측정한 경우, 스티로폼, PE폼을 삽입한 경우, 역시 진동판 1장만으로 측정한 임피던스 값보다 낮은 것을 알 수 있다.

그러나 4층을 이루고 있는 상태에서 제2층만의 임피던스 값이 2층을 이루고 있는 상태에서의 2층만의 임피던스 값보다 약 0.1 ~0.15 Ω 정도씩 상승한 결과를 나타내고 있다. 또한 공기층으로 이루어진 4층 진동판의 제2층은 진동판 1장만으로 측정된 경우보다 높은 것을 알 수 있다.

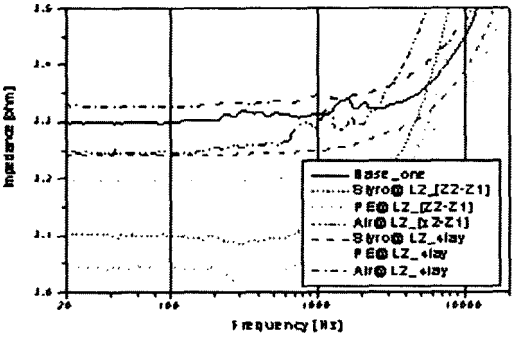

그림 8.

Base_one : 진동판 1장만으로 구성된 경우의 임피던스
Styro@L2_[Z2-Z1] : 2층을 이루고 있는 진동판 사이에 스티로폼이 삽입된 상태에서, 직렬로 연결된 진동판의 전체 임피던스 값에서 제1층의 임피던스 값을 뺀 결과
PE@L2_[Z2-Z1] : 2층을 이루고 있는 진동판 사이에 PE폼이 삽입된 상태에서, 직렬로 연결된 진동판의 전체 임피던스 값에서 제1층의 임피던스 값을 뺀 결과
Air@L2_[Z2-Z1] : 2층을 이루고 있는 진동판 사이에 공기층이 삽입된 상태에서, 직렬로 연결된 진동판의 전체 임피던스 값에서 제1층의 임피던스 값을 뺀 결과
Styro@L2_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 스티로폼 삽입 상태에서 제2층만의 임피던스
P.E.@L2_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 스티로폼이 삽입된 상태에서 제2층만의 임피던스

Air@L2_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 공기가 삽입 상태에서 제2층만의 임피던스

그림 9는 진동판 층이 3층을 이루고 있고, 삽입물이 있는 경우의 제3층만의 진동판에서의 임피던스를 진동판이 4층을 이루고 있고 삽입물이 있는 경우의 제3층만의 임피던스를 비교한 것이다. 이때, 3층을 이루고 있는 경우의 임피던스 값은 제3층의 임피던스 값에서 제1층 진동판과 제2층 진동판이 직렬로 연결되어 있는 상태의 임피던스 차를 적용한 것이다.

그림 9에서 3층만으로 이루어진 진동판들의 경우 모두 진동판 1장만으로 측정된 임피던스의 값보다 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 4층으로 구성된 진동판의 제3층 진동판만을 측정한 경우, 스티로폼, PE폼을 삽입한 경우, 역시 진동판 1장만으로 측정한 임피던스 값보다 낮은 것을 알 수 있다.

그러나 4층을 이루고 있는 상태에서 제3층만의 임피던스 값이 3층을 이루고 있는 상태에서의 3층만의 임피던스 값보다 약 0.1 ~0.15 Ω 정도씩 상승한 결과를 나타내고 있다. 또한 공기층으로 이루어진 4층 진동판의 제3층은 진동판 1장만으로 측정된 경우보다 높은 것을 알 수 있다.

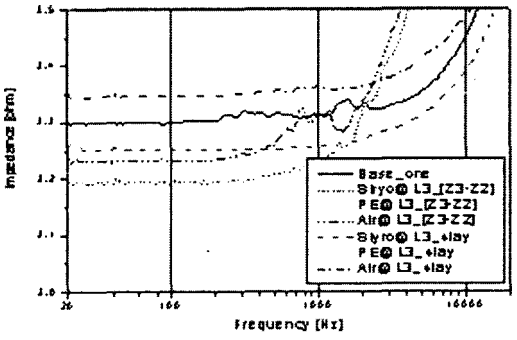

그림 9.

Base_one : 진동판 1장만으로 구성된 경우의 임피던스
Styro@L3_[Z3-Z2] : 3층을 이루고 있는 진동판 사이에 스티로폼이 삽입된 상태에서, 전체 임피던스 값에서 직렬 연결된 제1, 2층의 임피던스 값을 뺀 결과
PE@L3_[Z3-Z2] : 3층을 이루고 있는 진동판 사이에 PE폼이 삽입된 상태에서, 전체 임피던스 값에서 직렬 연결된 제1, 2층의 임피던스 값을 뺀 결과
Air@L3_[Z3-Z2] : 3층을 이루고 있는 진동판 사이에 공기층이 삽입된 상태에서, 전체 임피던스 값에서 직렬 연결된 제1, 2층의 임피던스 값을 뺀 결과
Styro@L3_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 스티로폼 삽입 상태에서 제3층만의 임피던스
P.E.@L3_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 스티로폼이 삽입된 상태에서 제3층만의 임피던스
Air@L3_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 공기가 삽입 상태에서 제3층만의 임피던스

그림 10은 진동판을 직렬로 연결하여 4층을 이루고 있고, 삽입물이 있는 경우의 제4층의 진동판에서의 임피던스를 진동판이 4층을 이루고 있고 삽입물이 있는 경우의 제4층만의 임피던스를 비교한 것이다. 이때, 직렬연결 상태의 4층을 이루고 있는 경우의 임피던스 값은 제4층의 임피던스 값에서 제1층 진동판부터 제3층 진동판까지 직렬로 연결되어 있는 상태의 임피던스 차이를 적용한 것이다. 그림 10에서 직렬로 연결된 4층 진동판들의 경우 모두 진동판 1장만으로 측정된 임피던스의 값보다 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 4층으로 구성된 진동판의 제4층 진동판만을 측정한 경우, 스티로폼, PE폼을 삽입한 경우, 역시 진동판 1장만으로 측정한 임피던스 값보다 낮은 것을 알 수 있다.

그러나 4층을 이루고 있는 상태에서 제4층만의 임피던스 값이 직렬로 연결 상태에서의 4층만의 임피던스 값보다 약 0.1 ~0.15 Ω 정도씩 상승한 결과를 나타내고 있다. 또한 공기층으로 이루어진 4층 진동판의 제4층은 진동판 1장만으로 측정된 경우보다 높은 것을 알 수 있고, PE폼이 삽입된 경우, 진동판 1장만의 임피던스 값에 접근하는 것을 확인할 수 있다.

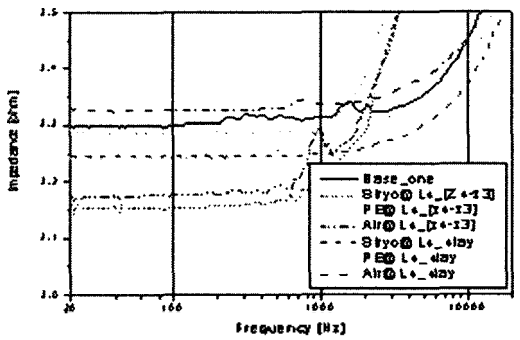

그림 10.

Base_one : 진동판 1장만으로 구성된 경우의 임피던스

Styro@L4_[Z4-Z3] : 4층을 이루고 있는 진동판 사이에 스티로폼이 삽입된 상태에서, 전체임피던스 값에서 직렬 연결된 제1, 2, 3층의 임피던스 값을 뺀 결과

PE@L4_[Z4-Z3] : 4층을 이루고 있는 진동판 사이에 PE 폼이 삽입된 상태에서, 전체 임피던스 값에서 직렬 연결된 제1, 2, 3층의 임피던스 값을 뺀 결과

Air@L4_[Z4-Z3] : 4층을 이루고 있는 진동판 사이에 공기층이 삽입된 상태에서, 전체 임피던스 값에서 직렬 연결된 제1, 2, 3층의 임피던스 값을 뺀 결과

Styro@L4_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 스티로폼 삽입 상태에서 제4층만의 임피던스

P.E.@L4_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 스티로폼이 삽입된 상태에서 제4층만의 임피던스

Air@L4_4lay : 진동판이 4층을 이루고 있고, 진동판 사이에 공기가 삽입 상태에서 제4층만의 임피던스

그림 7에서 그림 10까지의 결과를 살펴보면 4층이 형성된 상태에서, 진동판을 볼수 층과 짝수 층으로 구분한 경우에 미소하지만 홀 수 층의 임피던스 값이 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 구동되는 진동판 전면에 위치한 삽입물들이 부하(load)로서 작용하는 것으로 예측할 수 있고, 특정한 모드가 형성될 것을 기대할 수 있다.

다음의 그림 11은 진동판들을 직렬로 연결된 상태로 적층해가면서 측정한 임피던스의 주파수 1 kHz에서의 값을 비교한 것이다. 비교상의 편의를 위해 제2층의 임피던스 값은 제1층의 임피던스 값을 빼준 값으로 하였다.

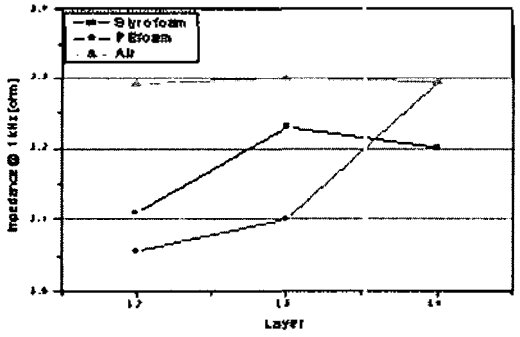

그림 11
1 kHz에서의 직렬연결 진동판의 층별 임피던스 변화

그림 11에서 나타나는 바와 같이 적층이 될수록 임피던스 값이 상승하는 경향을 나타내고 있고, 공기를 삽입물로 한 경우에 층간 임피던스 상승폭이 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 결과적으로 적층에 의한 임피던스 증가는 삽입물의 질량에 의한 영향이 주요하다는 것을 의미한다. 반면에 스티로폼과 PE폼의 경우 상대적으로 큰 임피던스 변화를 보이고 있다. 이것은 삽입물의 질량 외에도 삽입물의 탄성이 큰 영향을 나타내는 것으로 추측할 수 있다.

3. 결론

스피커 진동판의 내부구성 물질에 따라 진동계의 임피던스가 변화하는 것을 확인할 수 있었고, 질량과 탄성 요소가 이러한 변화에 중요 변수임을 확인할 수 있었다

또한 본 논문에서 사용한 방법은 스피커의 제조에서 소재에 의한 특성 변화를 완성품을 제조하기 전에 시험할 수 있는 방법이 될 수 있을 것이다.

향후, 진동판 간의유도전류에 의한 진동 특성 측정과, 각 삽입물 및 진동판 소재의 물성을 파악하여 정량적인 결과를 얻어야 할 필요가 있다.

참고문헌

1. F. J. M Frankort, "Vibration Patterns and Radiation Behavior of Loudspeaker Cones", An anthology of articles on loudspeakers from the pages of the Journal of the Audio Engineering Society Loudspeakers vol.2, pp.16-29, 1984

2. J. Nakajono, K. Shimada and Y. Tsuchiya, "Coaxial Flat-Plane Loudspeaker with Polymer-Graphite Honeycomb Sandwich Plat Diaphragm", Presented the 66th Convention of the Audio Engineering Society, Los Angeles, 1980 May 6-9

3. M. R. Gander, "Moving-Coil Loudspeaker Topology as an Indicator of Linear Excursion Capability", Presented the 64th Convention of the Audio Engineering Society, New York, 1979 November 2-5,

4. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J.V. Sanders, Fundamentals of Acoustics Third Edition, pp.359 - 363, Wiley, 1982,

*) 본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것입니다.