

조립과정이 스피커의 전기 및 음향특성에 미치는 영향

Effects of Electrical and Acoustical Variations for Loudspeaker due to Fabrication Processes

박 석 태*

Seok-Tae Park

Key Words : Thiele-small Parameter(틸 레-스몰 매개변수), Loudspeaker(라우드스피커), Electrical Impedance(전기 임피던스), Acoustic Radiation(음향 방사), Acoustic Frequency Response(음향 주파수 응답), Acoustical Variation(음향 편이), Known Mass Parameter Identification Method(알려진 질량 매개변수 규명법)

ABSTRACT

In this paper, it was analyzed the characteristics of electrical and acoustical variations for loudspeaker due to fabrication processes. First, mass of each components of loudspeaker was measured by electric precision scale and performed statistical analysis. Second, Thiele-Small parameters of sample loudspeakers produced by unskilled students were identified by known mass parameter identification method using electrical impedance method and investigated on the variations of each parameter. Electrical impedance tests and acoustic frequency responses were measured on sample loudspeakers and variations were examined to grasp relationship between components variation and fabrication processes. Main factors to effect the changes of electrical impedance were concluded by fabrication processes errors not by components of loudspeaker

1. 서 론

라우드스피커를 생산하는 경우에 제품의 균질성을 결정하는 요인들은 크게 두 가지로 표현할 수 있다. 첫째는 각 부품을 생산할 때의 균질성이고 두번째는 조립과정에서의 조립의 균질성이다. 첫번째 요인은 부품들을 자동 생산라인에 의해 제작함으로써 어느 정도 보장 받을 수 있다. 두번째 요인도 자동 조립라인을 사용하여 균질한 제품을 얻을 수 있다. 따라서, 외국 바이어들은 국내 생산업체에서 생산한 제품의 품질을 판정하는 기준으로 자동생산 및 조립라인에 의한 생산품인지에 따라 제품 균질성의 유무를 판정하며 제품 균질성 정도에 따라 제품의 질을 평가하여 제품가격을 결정하려고 한다. 주성대학 음향공학과 교과과정에는 학생들이 라우드스피커 부품들을 사용하여 스피커를 제작하는 실습과정이 있다. 본 논문은 학생들을 지도하는 과정에서 제작된 라우드스피커의 균질성을 평가하고자 하였다. 조립에 사용한 부품들은 자동생산으로 만들어 진 것으로 제품의 균질성이 있다고 볼 수도 있었으나 조립과정은 미숙련자들에 의한 수작업으로 행해졌으므로 균질성을 보장 할 수 없을 수도 있었다. 부품들의 균질성은 질량을 측정하여 질량의 분포도를 분석하여 평가하였다. 그러나, 각 부품들의 균질성이 있다 하여도 조립 과정에서

불균질성이 발생할 수도 있다. 이를 파악하기 위하여 전기 임피던스와 음향응답특성을 측정하여 각각 이 측정값들의 변화와 상호관계를 고찰하여 조립과정의 편이가 이들 특성에 미치는 영향을 분석함으로써 조립과정 오차가 제품품질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 즉, 조립과정의 편이에 따른 라우드스피커의 전기 임피던스 및 음향응답특성의 변화를 고찰하여 부품의 균질성이 있을지라도 조립에 따라 특성들이 어떻게 변화하는지를 고찰하고자 하였다.

각 부품들의 편이를 통계분석하고 각 부품들의 물리적 특성들의 편이와 제작과정의 조립오차에 따른 전기 임피던스 특성변화를 시뮬레이션으로 예측하고 이를 검증하기 위하여 시험결과와 비교하였다. 실제 제품 제작과정에서 전기 임피던스에 영향을 주는 요인은 재료의 특성 편이보다는 조립오차에 따른 것으로 추정되며 이러한 조립 오차가 전기임피던스에 미치는 영향을 분석하고자 하였다 또한, 조립오차로 인한 전기 임피던스 변화가 스피커 매개변수에 미치는 영향을 분석하여 어느 매개변수가 크게 영향을 받는 것인가를 규명하여 조립오차에 따른 매개 변수 추정오차를 분석하고자 하였다. 한편, 제작된 라우드스피커 들에 대한 음향응답특성을 시험으로 구한 결과를 분석하여 조립오차에 의한 음향응답특성을 분석하였다.

2. 스피커 모델링

* 주성대학 음향과

E-mail : stpark@jsc.ac.kr

Tel : (043) 219-1202, Fax : (043) 219-1224

서론에서는 연구목적에 대하여 간략하게 기술하였다. 2 장에서는 라우드스피커 모델과 이를

구성하는 Thiele-Small(T-S) 매개변수를 기술하고자 한다. 또한, 3 장에서는 간단한 음향방사 모델을 제시하여 T-S 매개변수 변동에 따른 음향특성 변화를 고찰하고자 하였다. 4 장에서는 조립에 사용한 부품들의 질량을 측정하여 질량편이를 분석하였다. 이 데이터들을 제작한 스피커들을 대상으로 T-S 매개변수 규명법으로 구한 다이아프램계의 동적질량 결과들과 비교하여 조립 과정을 통하여 질량이 편이되는 정도를 비교 분석하였다. 또한, 서스펜션의 컴플라이언스(스프링 상수의 역수) 특성편이와 자기장 세기의 편이, Q 값, 공진주파수 및 민감도편이를 분석하였다. 라우드스피커는 Fig.1 과 같이 세 부분으로 구성되어 있다. Fig.1 에서 좌측부분은 전기임피던스 형태의 회로부분을 나타내며 가운데 부분은 기계적인 모빌리티 형태의 회로부분을 그리고 우측은 음향모빌리티 회로부분을 나타낸다.

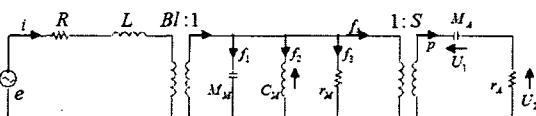


Fig.1 Electrical circuit representation for loudspeaker

단순 모델링의 경우에 전기회로 부분은 음성 코일의 저항과 인덕턴스로 구성되어 있으며 각각의 성분은 주파수에 독립적이라고 가정하여 모델링한다[1]. 기계적인 부분은 전기회로에 가한 전류에 따라 로렌츠 힘이 보빈에 작용하여 다이아프램부를 구동하게 된다. 이처럼 전기회로부와 기계회로부를 연결시키는 것은 변수는 로렌츠 힘인 $f = Bli$ 로 전기회로부와 기계회로부가 $Bl:1$ 인 변환장치로 구성된다. 기계회로부는 다이아프램부가 동일한 속도로 움직이므로 모빌리티 회로로 모델링된다. 다이아프램부는 서라운드와 스파이더 부분이 등가스프링의 역수인 등가 컴플라이언스 C_M 으로 작용하는 1 자유도계로 모델링되며 등가질량은 M_M 으로 표시된다. 이는 더스트 캡의 질량, 다이아프램의 질량, 보빈의 질량, 음성코일의 질량 및 서라운드와 스파이더의 동적 질량등의 영향이 포함된 등가 질량을 의미한다. 또한, 스파이더의 감쇠특성의 역수를 나타내는 값은 r_M 으로 표시된다. 한편, 기계회로부와 음향 회로부는 기계적인 힘이 음향적인 힘으로 변환되어 변환부는 다이아프램의 유효단면적 비인 $1:S$ 인 변환장치로 구성된다. Fig.1 의 세 가지 회로를 하나의 등가음향 회로로 나타낼 수 있다.

기계적인 부분들과 음향적인 부분들이 등가전기회로소자와 같은 형태 또는 등가 음향회로소자와 같은 형태로 표시되어 전기회로를 분석하는 방법으로 라우드스피커의 음향특성을 예측할 수가 있다. 따라서, 각 소자를 규명하면 규명된 라우드스피커의 특성을 시뮬레이션으로 분석할 수 있다.

3. 음향방사 모델

2 장에서는 라우드스피커를 모델링하고 이를 구성하는 각 요소들에 대하여 기술하였다. 이 요소들을 알고 있다면 가진전압에 대하여 원형 박판형태의 라우드스피커의 부피속도를 구할 수 있다. 부피속도를 알 수 있다면 무한배풀에 장착된 원형강체 박판형 라우드 스피커의 음향 방사를 다음과 같이 예측할 수 있다[2]. 스피커의 반경이 a 이고, 공기밀도 ρ_0 , 소리속도 c , 원형 박판의 부피속도를 U_0 라 할 때에 거리 r 에서 측정한 음압은 $r >> a$ 일 때에, 즉, 원거리에서의 원형 강체박판의 음압은 식(1)과 같다.

$$p(r, \theta, t) = j\rho_0 c \frac{U_0}{\pi r} kae^{j(\omega t - kr)} \int_a^r e^{jka \sin \theta \cos \phi} \sin \phi d\phi \quad (1)$$

식(1)은 식(2)로 표현할 수 있다.

$$p(r, \theta, t) = j \frac{\rho_0 c}{2} U_0 \frac{a}{r} e^{j(\omega t - kr)} \left[ka \left(\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right) \right] \quad (2)$$

음압이 “0” 되는 각도를 구하기 위하여는

$$J_1(ka \sin \theta) = J_1(j_{lm}) = 0 \quad (3)$$

$$\text{즉, } \theta = \sin^{-1} \frac{j_{lm}}{ka} \quad (4)$$

식(3)을 만족하는 해에서 음압의 꼴이 생긴다. 음향 방사형태를 나타내는 식(2)는 식(5)로 표현 할 수 있다.

$$|p(r, \theta, t)| = 20 \log_{10} \left(\frac{\rho_0 c U_0 \frac{a}{r} \left[ka \left(\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right) \right]}{p_{ref} \sqrt{2}} \right), \text{ dB} \quad (5)$$

식(5)에서 $p_{ref} = 20 \mu Pa$ 이다.

라우드스피커의 T-S 매개변수 데이터를 제작자가 제공하든가 또는 시험으로 규명할 수 있다면 라우드스피커 모델을 이용하여 라우드스피커 표면의 부피속도를 구할 수 있고 부피 속도로부터 임의의 거리 및 임의의 각도에서의 음압을 예측할 수 있다. Fig.2(a)는 주파수 1kHz 인 경우에 원형 박판의 지향특성을 Fig.2(b)는 주파수 5kHz에서의 지향특성을 식(5)에 의해 구한 결과를 각각 나타냈다. 반지름 0.09m인 원판인 경우에 1kHz에서는 무지향성 특성을 보이지만 5 kHz에서는 지향각도 27.7 도와 58.3 도 위치있는 사람 귀에는 소리가 매우 작게 들리게 됨을 보여주고 있다. 본 논문에서는 간략성을 위하여 선형영역에서의 매개변수만을 고려하였고 각 매개 변수들은 주파수에 독립적이라 가정하였다. 실제 경우에는 각 매개 변수들이 주파수 종속적이며 주파수가 높아짐에 따라 다이아프램부의 거동도 하나의 일체로 움직이지 않고 분할질량 형태로 움직인다[3]. 상용 소프트웨어들에서는 이러한 것들을 보정하여 실제 시험결과와 전산시뮬레이션 결과가 잘 일치하도록 조정하고 있다.

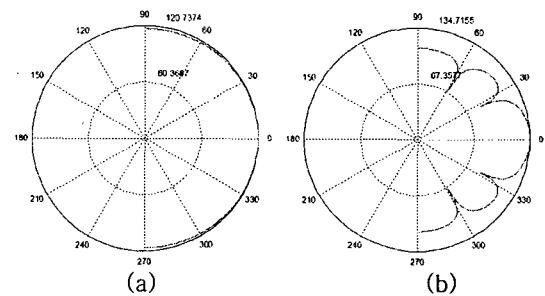


Fig.2 원형박판의 음향방사특성, dB @반무한 평면, (a) 1kHz, (b) 5kHz

4. 조립편이 분석

라우드스피커의 구성부품은 다음과 같다. 더스트 캡, 다이아프램, 서라운드, 보빈, 음성코일, 스파이더, 폴 피스, 윗판, 자석, 프레임, 터미널 등이다. 이중에서 실제로 움직이는 것은 더스트 캡, 다이아프램, 서라운드, 보빈, 음성코일, 스파이더들로 이들을 다이아프램부라 부른다. 폴 피스, 윗판, 자석은 자기회로부를 구성하며 폴피스와 윗판사이에서 음성코일이 부착된 다이아프램부가 움직인다. 움직이는 각 부분들은 전자저울로 측정하여 구할 수 있으며 T-S 매개변수를 규명하여 동가질량을 구할 수 있다. 서라운드와

스파이더부의 동가스프링 상수와 감쇠계수들은 측정장비로 구할 수 있으나 실제 라우드스피커 제작시에 장착되는 방법 및 위치편이에 따라 그 값이 크게 바뀔 수 있다. 모델링시에는 음성코일의 중심이 자기력의 중심에 있다는 가정을 한다. 실제 조립과정에서 평형위치가 자기장 중심이 아닌 곳에서 평형상태를 이루어 스프링 상수등이 예측 결과와 다르게 나올 수 있으며 이로 인하여 공진 주파수가 이동하며 음향특성이 바뀔 수도 있다. 이러한 것들은 다음 장에서 기술하였다. 전자저울(AND 사 제품, 모델명 HM-202, 측정 범위 최대 200g, 분해능 0.1mg)을 사용하여 43 개의 라우드스피커 샘플에 대하여 질량을 측정하였다. 다이아프램 질량의 평균값은 9.9321g, 표준편차는 0.2665g 이었고 99% 신뢰도 구간에 측정치들이 존재하였다. 질량분포는 평균값을 기준으로 -4.8%에서 6.6%내에 있음을 보였다. 다른 부품들, 예를 들면, 보빈, 스파이더, 더스트 캡, 자석, 프레임에 대해서도 측정된 질량값들이 각각 99% 신뢰도안에 존재함을 알 수 있었다.

5. T-S 매개변수 및 전기임피던스 편이 분석

4 장에서는 전자저울을 사용하여 각 부품의 질량을 측정하였다. 이 값들이 99%신뢰도 구간안에 있음을 보였고 평균값을 중심으로 최대 $\pm 5\%$ 구간내에 있음을 나타냈다. 한편, 라우드스피커의 경우에 저주파수 영역에서 강성에 주된 역할을 하는 스프링 상수는 서라운드와 스파이더로부터 기인된다. 영률 측정기로 영률을 측정하여 스프링 상수를 측정할 수도 있으나 이 경우에 시편의 길이가 지그 특성상 7cm 이상 되어야 측정이 가능하였다. 이 조건을 만족할 수가 없어서 영률 측정기로 측정할수가 없었다. 측정할 수 있다고 하여도 이 값들은 정적 스프링 상수를 나타낸다. 라우드스피커는 소리를 발생할 때에 동적하중 상태의 스프링 상수가 동적거동을 지배하므로 동스프링상수를 측정 할 수 있는 동적특성 측정기가 필요하여 간접적인 방법으로 등가동적 스프링상수를 규명하였다. 2 장에서 라우드스피커 모델을 T-S 매개변수로 모델링하였고 T-S 매개변수를 규명하면 라우드스피커의 동적거동을 기술할수 있다고 언급한바 있다. 따라서, T-S 매개변수를 규명하여 얻은 동스프링 상수의 편이를 관찰하기로 하였다. 같은 부품이라도 경계조건에 따라, 즉, 조립상태

에 따라 동 스프링상수는 편차를 보일 것이라 예상되었고 이 결과가 음향응답특성에도 영향을 미칠 것이라 추측되었다. T-S 매개변수 규명법에 따라 [3,4] 9 개의 라우드스피커 샘플들에 대한 동가 동 스프링 상수의 역수인 컴플라이언스를 규명한 결과 이 값들이 99% 신뢰도 구간안에 존재함을 보였다. 규명된 컴플라이언스 값들은 평균값을 기준으로 -17%에서 24% 구간내에 존재함을 나타냈다. 규명된 힘 요소는 -22%에서 17% 구간내에 있고 기계적인 Q 값은 -9%에서 9% 구간내에 전기적인 Q 값은 -27%에서 52% 구간내에 그리고 전체적인 Q 값은 -22%에서 41% 구간내에 존재하였다. 공진주파수는 -5%에서 8% 구간내에 존재하였으며 다이아프램부의 질량은 -12%에서 12% 구간내에 존재하였다. 동가 음향부피는 -17%에서 24% 구간내에 존재하며 민감도는 -4%에서 2% 구간내에 있음을 보였다. Fig.3 은 포트박스에 라우드스피커를 장착한 상태에서의 전기 임피던스를 측정한 결과를 나타냈다. 포트박스에서는 포트공진으로 인하여 52Hz 부근에서 전기임피던스가 극소값이 된다. 이는 포트공진주파수를 나타내며 이 주파수에서는 라우드스피커의 다이아프램은 거의 움직이지 않으므로 음압에 기여하지 못하며 포트내의 공기가 급격하게 움직여서 음압에 기여하게 된다. 몇개의 시험데이터를 제외하면 대체적으로 같은 패턴을 보이고 있다. 제작된 라우드스피커들의 경우에 앞장에서 부품의 균질성이 확인되었는데도 이같은 차이를 보이는 것은 조립오차에 따른 것으로 추정되었다. 조립오차에 따라 영향 받을 수 있는 것은 스프링상수의 편이와 평형위치에서의 상하 비 대칭성 및 좌우 비대칭성 등을 들 수 있다. 상용소프트웨어를 사용하여 T-S 매개변수에 기초하여 전기 임피던스를 예측할때에 기본적으로 평형위치에서는 대칭성을 갖는다고 가정한다. 따라서, 상용 소프트웨어에서는 비 대칭성에 따른 특성을 예측 할 수 없다. 한편, 미숙련자들에 의해 제작된 라우드 스피커들의 전기임피던스 분포를 분석하는 것도 의미 있는 일이라 여겨졌다. 미숙련자들이 제작한 43 개 중에서 4 개는 특이한 전기 임피던스 특성을 보였다. 이는 제작시에 중대한 실수를 한 것으로 추측되었다. 제품을 확인해 보니 상하 평형 위치가 정상적인 위치에서 벗어난 경우와 다이아프램이 좌우 대칭위치에서 약간 벗어난 것으로 나타났다. 이러한 결과가 전기 임피던스 특성에 영향을 주었다는 결론을 얻었다.

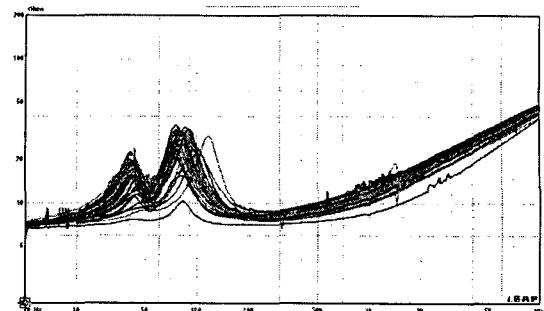


Fig.3 43 개 샘플 라우드스피커에 대해 측정한 전기 임피던스 곡선들@포트박스

6. 음향편이분석

Fig.4 에는 학생들이 제작한 43 개의 라우드스피커를 포트박스에 장착하고 그라운드 플레이 방법[3]으로 측정한 결과를 나타냈다. 민감도 분석을 하면 음압은 80.52 dB에서 90.66 dB 사이에 분포할 확률이 99%임을 보였다. Fig.4 에서는 93%의 제품이 이 범위내에 있음을 보이고 이 범위를 벗어나는 것은 3 개의 곡선으로 나타났다. 이것은 통상적인 조립과정에서 벗어난 결과로 나타난 것을 의미한다. 즉, 정상적인 표준작업으로 제작하지 않았다는 것을 뜻한다. Fig.3 과 Fig.4 를 고려하면 전기 임피던스에서의 이상 징후가 음향응답 특성에 반영되고 있음을 알 수 있다.

7. 결 론

43 개의 라우드스피커 샘플들을 미숙련 작업자들이 제작하였다. 라우드스피커의 부품들은 자동생산되어 균질성을 확보한 것으로 예측되었고 전자저울로 질량을 측정한 결과 균질성이 있다고 판명되었다. 이러한 부품들을 사용하여 미숙련자들이 제작한 라우드스피커들의 T-S 매개변수들은 매우 큰 편차를 나타냈으나 이 매개변수들로부터 예측된 민감도는 시험결과와 잘 일치함을 나타냈다. 각 매개변수들이 큰 편차를 나타내는 데도 민감도 결과가 잘 일치하는 이유는 매개변수들로 구성되는 라우드스피커 모델은 동적모델로서 매개변수들이 이 동적모델의 전체적인 특성을 잘 표현되도록 각 매개변수들이 최적으로 피팅되었다고 볼 수 있다. 민감도 시험결과에서 제작된 43 개의 라우드스피커들에서 80% 정도인 35 개 샘플들은 민감도가 3dB 이내에 있음을 보였고 93%인 40 개

샘플들은 허용한계 내에 있었다. 결론적으로 특수한 몇 가지 경우를 제외하면 부품의 균질성이 확보되면 미숙련자 들이 작업할 경우에도 93% 정도의 제품은 허용 한계내에 있음을 보였다.

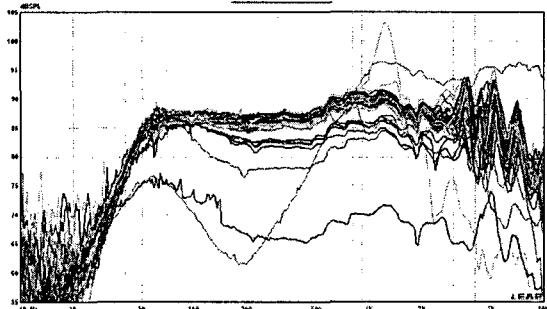


Fig.4 43 개의 라우드스피커에 대해 측정한 음향 응답특성 곡선들@포트박스

참 고 문 현

- (1) L.L.Beranek, 1993, Acoustics, the Acoustical Society of America
- (2) 박석태, 2002, "스피커 진동판 형상에 따른 음향 방사 해석에 관한 연구", SATIC 연구 보고서, 주성대학
- (3) LEAP EnclosureShop Reference manual, 2003, Release 5, LinearX Systems
- (4) 박석태, 2001, "진동판의 특성이 스피커 음향 특성에 미치는 영향에 관한 연구", SATIC 연구 보고서, 주성대학