한국음향학회지 제20권 제5호 pp. 54~60 (2001)

휴대폰용 복합소자의 등가회로 해석

Equivalent Circuit Analysis of the Multi-functional Device for Mobile Telephones

이 영 진*, 윤 양 기**, 임 종 인***, 노 용 래****
(Youngjin Lee*, Yanggi Yoon**, Jongin Im***, Yongrae Roh****)

*대구과학대학 정보전자통신계열, **한국전기전자시험연구원, ***포항산업기술연구원, ****경북대학교 기계공학부
(접수일자: 2001년 2월 6일; 수정일자: 2001년 6월 14일; 채택일자: 2001년 6월 21일)

본 논문에서는 휴대폰용 부저, 진동자 기능이 하나의 소자로 통합된 다기능 복합소자의 특성을 해석하기 위한 등가회로 해석법을 연구하였다. 전형적인 복합소자 제품에 대하여 부저, 진동 모드에 각각에 대한 등가회로를 구성하여 그 특성을 계산하였다. 이를 위해 우선 복합소자의 각 모드에 대한 동작원리를 규명하고, 그 원리에 따른 등가회로를 구성하여 복합소자의 동작특성을 시뮬레이션 할 수 있는 해석툴을 완성하였다. 해석법의 타당성은 그 결과를 실험결과와 비교함으로써 밝혔고, 계산 결과와 실제 측정결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.
핵심용어: 복합소자, 부저, 등가회로
투고분야: 전기음향 분야 (3.1)

This paper investigates the equivalent circuit analysis method for the multi-functional device in mobile telephones, which works both as a buzzer and a vibrator in a single unit form. With a representative multi-functional device, we construct the corresponding equivalent circuits for the buzzer mode and the vibrator mode of the device, respectively, and analyze the performance of each of the modes. For proper construction of the circuit, we analyze the structure and operation mechanism of the device, and develop a computer simulation tool to simulate the behavior of the device. Validity of the analysis method is verified through comparison of the analysis results with experimental measurement results, which shows good agreement between the two sets of data.
Keywords: *Multi-functional device, Buzzer, Equivalent circuit*
ASK subject classification: *Electro-acoustics (3.1)*

I. 서 론

최근의 이동통신용 휴대폰은 인터넷, 멀티미디어 등 여러 가지 기능의 복합화 및 경박·단소화의 경향으로 급속하게 발전하고 있으며, 필수적인 각종 전자부품의 초소형화와 함께 여러 개의 전자부품을 하나로 묶는 이른바 부품 복합화의 경향으로 진행되고 있다[1-7]. 그 중 휴대폰의 부저, 진동자 및 스피커의 기능을 하나로 통합한 다기능 음향 복합부품은, 전체적인 회로구성을 더욱 작게 하고, 조립시간 및 비용을 절감할 수 있게 하며, 경량, 각 모드간의 우수한 독립성, 내구성, 고출력 등의 많은 장점을 가지고 있다. 복합소자의 개념이 도입된 것은 1996년부터로 미국의 Motorola사에서 벨과 스피커를 통합한 복합체를 제시하면서 시작되었다[3,4]. 같은 시기 일본의 NAMIKI사에서는 진동체를 복합체에 적용하였으며 기본적으로 진동체와 부저음을 선택적으로 발생시킬

책임저자: 이영진 (yjlee@ecom.taegu-c.ac.kr)
702-723 대구시 북구 태전동 390번지
대구과학대학 정보전자통신계열
(전화: 053-320-1160; 팩스: 053-320-1159)

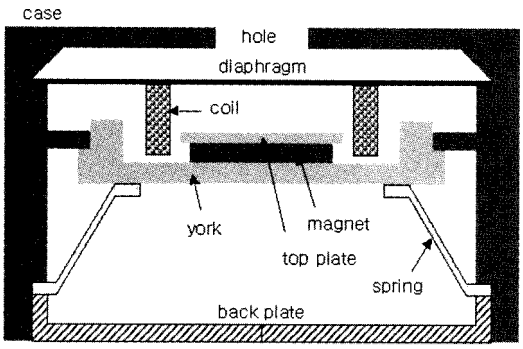


그림 1. 전형적인 복합소자의 도면
Fig. 1. Schematic view of a typical multi-functional device.

수 있는 장치를 개발하였다[6]. 이후 1997년에 이르러서는 진동시 발생하는 내부충돌을 해결하기 위한 연구가 본격적으로 이루어지고[7], 동시에 진동의 크기를 향상시키기 위하여 영구자석의 재질, 자화방향 등에 대해 연구가 주종을 이루었다[7]. 또한 조립의 간편화를 위한 많은 아이디어가 제시되었으며, 1998년 이후에는 주로 효율성의 증가와 소형화를 위해 스프링과 영구자석의 위치, 구조 등을 변화하는 연구가 주로 이루어졌다.

이러한 음향 복합소자를 해석하기 위해서는 파동방정식을 이용한 수식을 직접 유도하여 사용하거나, 등가회로로 변환하여 해석하는 방법, 또는 유한요소 해석법 등을 사용할 수 있다. 이 중 수식을 이용하는 것은 가장 정확한 방법이긴 하지만 복잡한 구조에 대해서는 적용이 거의 불가능하며, 유한요소해석의 경우 정확하게 특성을 분석할 수 있으나 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이에 비해 등가회로 해석법은 기계적인 구조를 간단하게 전기회로로 변환하여 그 특성을 해석하는 방법으로서, 빠르고 쉽게 특성을 해석할 수 있는 장점을 가진다. 본 논문에서는 기존의 등가회로 해석법을 이용하여 휴대폰용 음향 복합소자의 특성을 해석하기 위한 등가회로 해석법을 제시하고자 한다. 기존의 여러 제품 중 부저음 및 진동을 발생시키는 전형적인 복합소자 제품에 대하여 각각의 부저, 진동 동작모드에 대한 등가회로를 구성하여 그 특성을 계산하고, 실험 결과와 비교함으로써 본 연구에서 제시한 등가해석법의 타당성을 밝히고자 한다. 본 연구에서 제시한 복합소자의 등가회로 해석법은 타제품의 특성을 구하고 설계하는 데에도 그대로 이용될 수 있으며, 나아가 타 음향소자의 특성분석 및 설계에도 응용하여 적용할 수 있을 것이다.

II. 복합소자의 구조

부저의 기능과 진동체의 기능을 담당하는 일반적인 복합소자는 그림 1과 같은 구조로 구성되어 있다. 크게 부저음을 발생시키는 부분인 다이아프램 (diaphragm), 케이스, 코일, 자석, 상부판 (top plate)과, 진동을 발생시키는 부분인 요크부 (요크, 자석), 스프링, 하부진동판 (back plate)으로 이루어진다. 부저음을 발생시키는 원리에 대해 살펴보면 다음과 같다. 케이스는 내부구조물의 고정 및 외부충격 방지 등의 역할을 하며 윗부분에 작은 직경의 구멍을 두어 공기 흐름을 용이하게 함으로써 발생된 소리의 원활한 방출을 돕는다. 부저음을 직접 발생시키는 다이아프램은 얇은 금속 또는 플라스틱 재질로 구성되어 진동의 높은 품질계수를 제공하며 아래에 부착되어 있는 코일과 함께 부저음의 기본 공진주파수를 형성한다. 코일은 자석과의 상호작용으로 다이아프램의 상하운동을 가능하게 하며 일반적으로 회전수가 많을수록 큰 힘을 일으킬 수 있다. 자석 위에 위치한 상부판과 아래에 있는 요크는 자화가 용이한 재료를 주로 사용하는데 상부판의 크기를 자석보다 조금 크게 하여 코일 간의 간격을 짧게 함으로써 높은 자속밀도를 형성시켜 다이아프램의 진동 효율을 높인다. 이상의 구조에 의해서 입력단으로부터 인가된 전기신호는 코일과 자석간의 Lorentz 힘을 발생시키고 이 힘에 의해 코일과 붙어있는 다이아프램이 상하운동을 하게 되어 부저음을 발생시키며, 통상 1~2 kHz

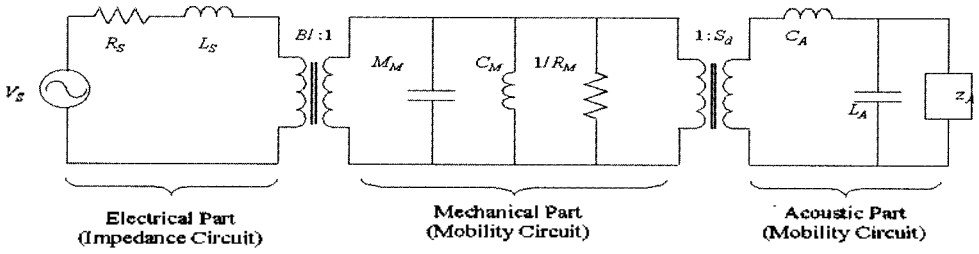


그림 2. 복합소자의 부저 모드에 대한 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the multi-functional device for the buzzer mode.

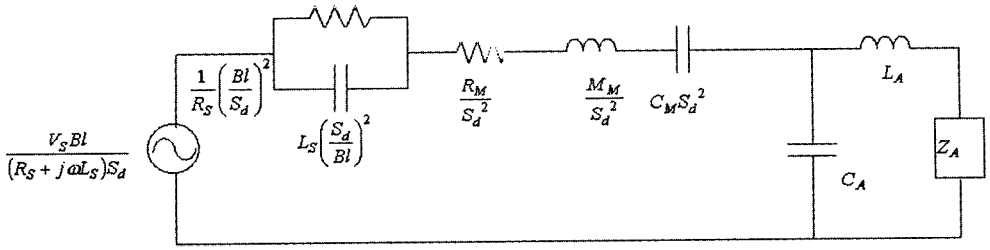


그림 3. 단순화된 부저 모드 등가회로
Fig. 3. Simplified equivalent circuit of the multi-functional device for the buzzer mode.

의 주파수를 사용한다.

두 번째로 진동을 발생시키는 원리 및 각 부품의 역할은 다음과 같다. 발생된 Lorentz 힘에 의해 다이아프램이 움직이지 않고 자석과 요크 (york)로 이루어진 요크부가 상하로 움직이게 된다. 이 때 케이스의 돌출부와 요크 간의 경계는 이 상하운동이 원활히 일어나도록 해주며, 요크 밑에 부착된 스프링은 그 스프링 상수값과 요크부의 질량과의 관계에서 진동의 주파수를 결정하게 된다. 또한 이 스프링은 하부 진동판으로 에너지를 전달하는 역할도 동시에 하며, 하부 진동판은 이렇게 전달된 에너지를 최종적으로 휴대폰에 전달해주는 부하역할을 해준다. 진동의 에너지 공급은 앞에서의 부저 모드와 같이 코일과 자석 간의 Lorentz 힘에 의해 이루어지나 부저 모드의 주파수와는 다른 100~200 Hz 사이의 주파수 대역을 사용한다. 즉 입력신호의 주파수에 따라 부저 모드와 진동 모드를 구분하여 사용할 수 있다.

III. 복합소자의 등가회로 구성

3.1. 부저 모드 등가회로 구성

이러한 부저 동작을 등가회로로 구현하는 방법은 다음과 같다. 부저모드의 동작상태는 크게 전기신호의 입력부와 기계적 운동을 하는 진동부, 그리고 발생된 음을 나타내는 음향 부하부로 구분할 수 있다. 전기 입력부는 입력전원과 코일로 이루어져 있으며, 진동부는 다이아프램과 지지부로, 음향 부하부는 상부케이스와 다이아프램간의 빈 공간와 공기의 음향 임피던스로 구분할 수 있다. 이들을 결합하여 임피던스 유사 등가회로 (impedance analog equivalent circuit)로 표시하면 그림 2와 같고, 이 등가회로는 다시 크게 다섯 부분으로 표현할 수 있다. 전압원과 그 내부저항으로 구성되어 외부로부터 에너지를 공급하는 전기 입력부가 있고, 공급된 전기에너지가 기계적인 진동으로 변환되는 전기-기계 변압기가 그 우측에 설치된다. 다음으로 기계적 진동을 묘사하기 위한 질량 (M_M), 스프링 (C_M), 댐퍼 (R_M)로 구성된 기계 진동부, 다시 진동이 음향으로 변환되는 기계-음향 변압기, 그리고 음향을 묘사하는 부분들이 우측에 연속적으로 추가된다. 이렇게 구성되는 등기회로에서 우선 전기 입력단의 변수는 다음과 같다.

V_S: 입력 전압원
R_S: 입력 전압원의 내부 저항
L_S: 코일의 인덕턴스
B: 자속 밀도
l: Coil의 유효 길이

코일의 인덕턴스 및 자속 밀도는 통상적인 신호입력장치와 자석의 구조로부터 쉽게 알 수 있다. 다음으로, 다이

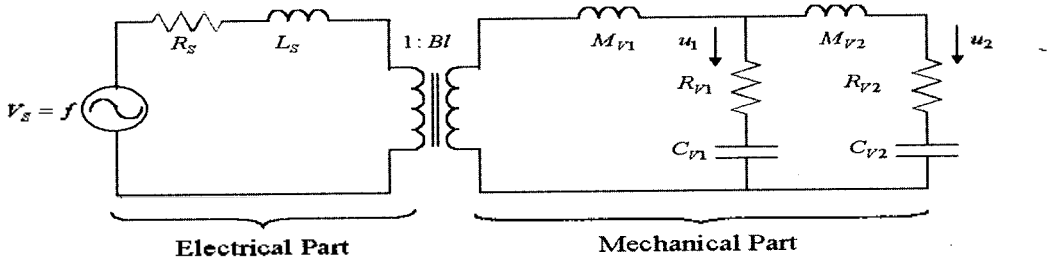


그림 4. 복합소자의 진동 모드에 대한 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit model of the multi-functional device for the vibration mode.

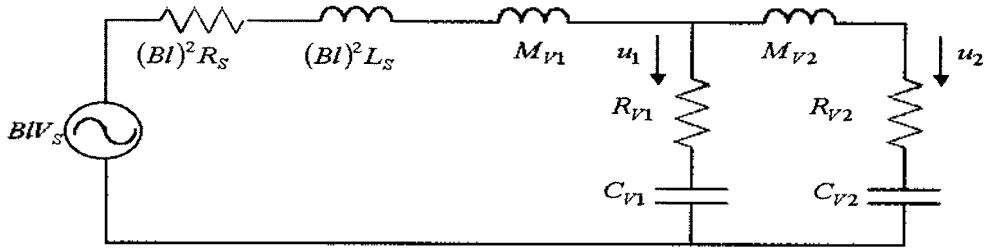


그림 5. 단순화된 진동 모드 등가회로
Fig. 5. Simplified equivalent circuit of the multi-functional device for the vibration mode.

아프램의 운동을 나타내는 기계적 진동부에 해당되는 변수들은 다음과 같다.

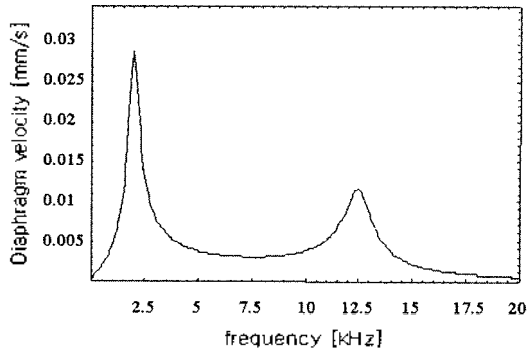
M_M: 진동체 질량 (다이아프램+ 코일)

C_M: 스프링 상수

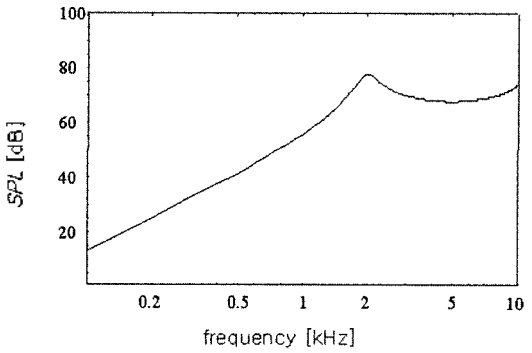
R_M: 진동손실

S_d: 다이아프램의 면적

위 값들 중 진동체의 질량과 다이아프램의 면적은 쉽게 구할 수 있다. 그러나 진동의 마찰, 전기-기계 변환 손실, 공기의 흡수성분 등으로 인한 진동 손실, R_M은 간단하게 구하기가 힘들며 복합소자의 진동특성을 측정하는 사전 실험을 수행하여 구해지는 품질계수와 등가회로 계산치를 비교하여 찾을 수 있다. 스프링 상수의 역수인 C_M의 경우, 다이아프램만의 스프링 상수는 수식으로 간단하게 구할 수 있지만 코일이 부착된 형태에 대한 C_M값은 일반적인 수식으로 표현할 수 없으므로 다이아프램과 코일부의 등가 영율로부터 계산한다.



(a)



(b)

Center frequency of buzzer mode : 2.14 kHz
SPL at peak frequency: 79 dB

그림 6. 부저 모드의 해석 결과: (a) 속도, (b) SPL
Fig. 6. Simulation results of the multi-functional device for the buzzer mode: (a) velocity, (b) SPL.

마지막 단인 음향부의 변수는 다음 세 가지로 둘 수 있다. 다이아프램의 수직 운동에 의해 발생된 음이 전파되는 공기의 음향 임피던스 Z_A, 케이스 상부에 있는 홀의 깊이와 홀 외의 공간에 의해 형성되는 음향 컴플라이언스 (compliance) (C_A)와 음향 질량 (acoustic mass) (L_A)이며 각각의 값은 다음 식들과 같이 표현된다[8].

$$Z_A = \rho_0 c \pi d_c^2 [R_1(2kd_c) + jX_1(2kd_c)] \quad (1)$$

$$C_A = \frac{V_A}{\rho_0 c^2} \quad (2)$$

$$L_A = \frac{\rho_0 l_c'}{S_c} \quad (3)$$

여기서, 세부 변수는 다음과 같다.

ρ_0: 공기의 밀도

c: 음속

d_c: 홀 반경

$R_1(x) = 1 - 2J_1(x)/x$

$X_1(x) = 2H_1(x)/x$

$J_1(x)$: 1차 Bessel 함수

$H_1(x)$: 1차 Struve 함수

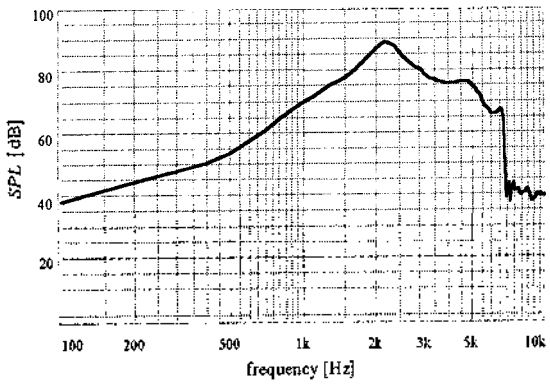
$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$: 파수

V_A: 폐공간 체적

$l_c' = l_c + 1.2d_c$: 홀 높이

S_c: 홀 면적

ω: 각 주파수 [rad/sec]



Center frequency of buzzer mode: 2.24 kHz
SPL at peak frequency: 89 dB

그림 7. 부저 모드 측정결과.
Fig. 7. Measurement results of the multi-functional device for the buzzer mode.

이상의 변수들로서 부저 모드 동작을 등가회로로 표현할 수 있다. 앞에서 구한 등가회로의 해석을 용이하게 할 수 있도록 등가회로를 단순화할 필요가 있다. 등가회로의 단순화는 변압기를 제거하고 각각의 차원을 일치시킴으로써 구할 수 있는데, 차원이 다른 각 단의 결합은 테브난-노턴 등가회로를 이용하여 간략화할 수 있다[8]. 그림 2의 부저모드에 대한 등가회로를 단순화시키면 그림 3과 같이 나타난다.

3.2. 진동 모드 등가회로 구성

진동 모드 등가회로는 진동의 가장 기본적인 형태인 단순진동자 (simple pendulum) 형태로 볼 수 있고, 진동체의 질량값에 해당하는 부분은 자석, 요크, 상부판, 스프링 질량의 총합이 되며, 스프링 상수는 스프링의 유연계수에서, 저항값은 진동손실로부터 구할 수 있다. 그러나 최종적으로 진동이 발생되어 출력으로 나타나는 하부진동판의 묘사가 단순 진동체로는 묘사가 불가능하다. 따라서 하부진동판을 고려할 수 있도록 수정하여 하부진동판을 독립적인 또 하나의 진동자로 둠으로써, 제 2자유도를 가지는 진동체로 묘사할 수 있다. 이러한 구조를 등가회로로 표현하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며, 그 세부 변수는 아래와 같이 나타난다.

$C_{V1} = \frac{1}{k_{V1}}$: 스프링 유연계수 (4)

k_{V1} : 스프링 상수

M_{V1}: 질량 (자석, 요크, 상부판, 스프링)

R_{V1}: 스프링의 기계 저항

C_{V2}: 하부진동판의 유연계수

M_{V2}: 하부진동판의 질량

R_{V2}: 하부진동판의 기계 손실

M_{V1}에 외력 F가 전해져서 1차 진동이 발생하고 발생된 진동은 스프링을 통해 다시 하부진동판을 나타내는 M_{V2}에 전해져서 최종적인 진동이 발생한다. 위 변수 중 M_{V1}, M_{V2}는 무게 측정으로 알 수 있으며, 공기의 댐핑, 전자기 변환손실, 마찰 등에 의한 전체손실인 R_{V1}은 실험 결과와 비교하여 구할 수 있다. 마찬가지로 하부진동판의 손실을 R_{V2}로 나타내며, C_{V1}은 측정을 통해 알 수 있는 진동의 공진주파수를 이용하여 구할 수 있다. C_{V2}는 하부진동판의 등가 강성으로서 다음의 식 (5)를 통해 구할 수 있다.

$$k_{V2} = M_{V2}\,\omega_V^{\,2} = 4\pi^2 M_{V2} f_V^{\,2} \qquad (5)$$

여기서 f_V는 원판의 기본 공진주파수로서 표현할 수 있다[9]. 변압기를 제거하여 간략화시킨 등가회로를 그림 5에 나타내었다.

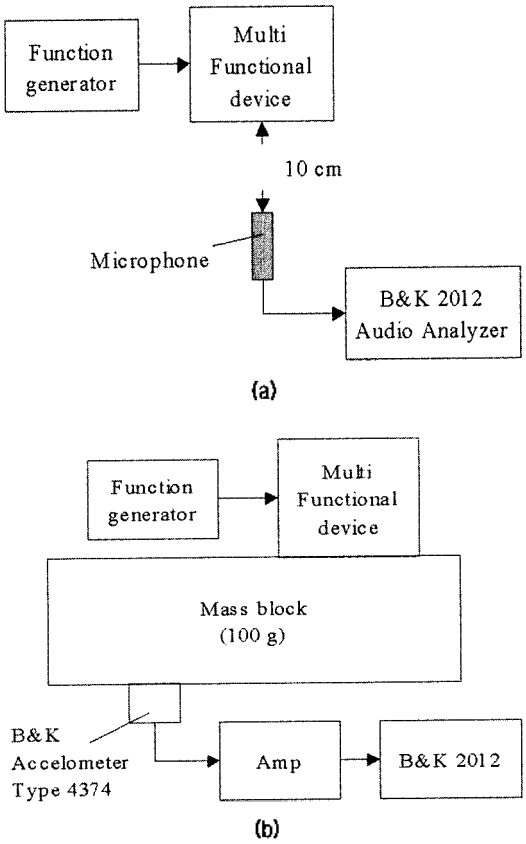
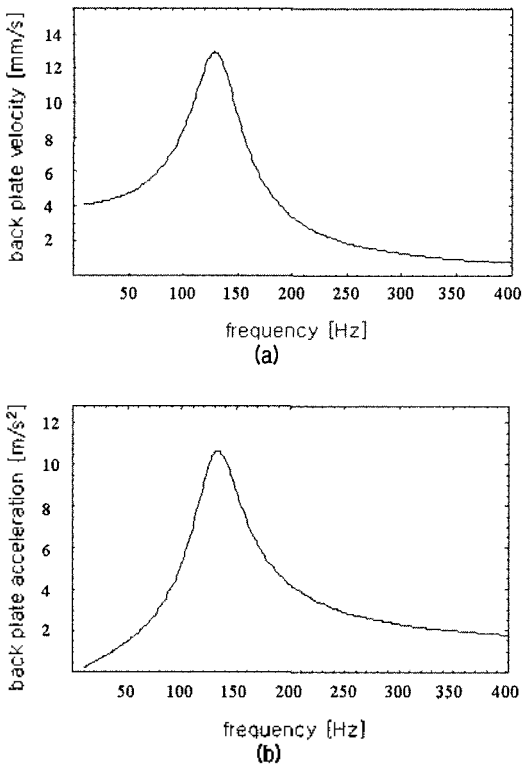


그림 8. 측정 개략도: (a) 부저 모드 (b) 진동 모드
Fig. 8. Schematic view of the measurement system: (a) buzzer mode, (b) vibration mode.



Center frequency of vibrator mode: 134 Hz
Acceleration at peak frequency: 10.6 m/s2

그림 9. 진동 모드의 simulation 결과: (a) 속도, (b) 가속도
Fig. 9. Simulation results for the vibration mode: (a) velocity, (b) acceleration.

IV. 복합소자의 특성 해석 및 검증

앞에서 구한 등가회로 해석방법의 타당성을 밝히기 상용제품 한 종류를 선택하여 등가회로에 필요한 값들을 분석하여 표 1에서 보인 값들을 구한 후 등가회로에 대입하였다. 완성된 등가회로를 이용하면 부저 및 진동 모드의 주파수 응답을 각각 구할 수 있으며, 세부적으로 부저 음의 공진 특성, 파워, 음압, SPL (sound pressure level), 그리고 진동의 속도, 가속도, 파워 등을 구할 수 있다

4.1. 부저 모드 해석 결과

그림 6에서는 부저 모드에 대한 해석 결과를 보이고 있다. 방사 음속과 SPL을 나타내고 있으며, 2.5 kHz 근처에서 중심주파수를 가진다. 12.5 kHz 근처에서 발생하는 피크는 케이스 상부의 홀에 의해 발생하는 것이지만, 사용 주파수인 2.5 kHz에 비해 월등히 높은 값을 가지므로 2.5 kHz에서의 동작 모드를 방해하지는 않는다. 통상적으로 복합소자의 음압은 다이아프램으로부터 10 cm의 거리에서 측정을 하며, 그에 해당하는 SPL은 계산상 약 80

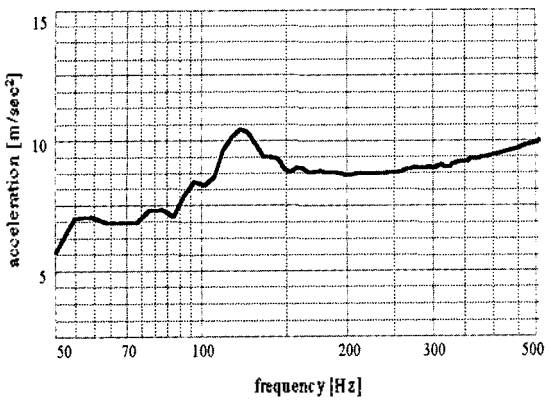
표 1.등가회로에 적용된 소자값
Table 1. The element values applied to the circuit.

등가회로 소자	값
V_S	0.8 V
R_S	50 Ω
L_S	15 μH
B	3.72 Wb
l	1.2 m
M_M	2.58 × 10^{-3} kg
C_M	0.24 × 10^{-3} N/m
R_M	1 × 10^{-3} kg/sec
S_d	0.15 × 10^{-3} m²
Z_A	(7.89 + j 17.35) × 10^{-3} rayl
C_A	3.92 × 10^{-13} m⁵/N
L_A	272 kg/m⁴
M_{V1}	2.13 × 10^{-3} kg
C_{V1}	5.56 × 10^{-3} N/m
R_{V1}	0.05 kg/sec
M_{V2}	0.19 × 10^{-3} kg
C_{V2}	1.46 N/m
R_{V2}	2 × 10^{-3} kg/sec

dB로서 그림 7에 나타낸 실제 부저 모드 측정결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 측정은 그림 8(a) 에 보인 것과 같이 오디오 분석기 (audio analyzer) (B&K Model 2012)와 마이크로폰을 사용하였으며, 0.8 V_{p-p}의 정현파를 입력단에 인가하였다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 복합소자의 부저 모드에 대한 등가해석 방법이 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있으며, 따라서 등가회로 해석법의 타당성이 검증됨을 알 수 있다.

4.2. 진동 모드 해석 결과

그림 8에서는 진동 모드의 계산 결과를 나타내었으며, 130 Hz 근처에서 공진 특성을 나타내고 있다. 진동 발생 시 그 속도와 가속도의 계산결과를 보이고 있으며, 그림 9의 실제 가속도를 측정한 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 실험에 이용한 측정장비는 위에서와 마찬가지로 음압과 진동을 모두 측정할 수 있는 오디오 분석기 (B&K Model 2012)와 가속도계 (accelerometer) (B&K Type 4374)를 이용하였다. 실험을 통해 알 수 있는 C_{V1}과 C_{V2} 두 값은 표 1에서 나타낸 값들을 사용하였으며, 이는 두 스펙트럼의 품질계수 (quality factor)를 비교하여 설정하였고, 입력은 1 V_{p-p}의 정현파를 사용하였다.



Center frequency of vibrator mode: 128 Hz
Acceleration at peak frequency: 10.5 m/s^2

그림 10. 진동 모드 측정결과
Fig. 10. Measurement results of the multi-functional device for the vibration mode.

그림 8(b)에서 측정 개략도를 나타내었으며, 실제 휴대폰을 나타내는 100 g의 질량체를 이용하였다. 마찬가지로 진동 모드에서도 본 등가회로 해석법의 타당성이 검증됨을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 휴대폰용 부저, 진동자 기능이 하나의 소자로 통합된 다기능 복합소자의 특성을 해석하기 위한 등가회로 해석법을 제시하였다. 전형적인 복합소자 구조에 대하여 부저, 진동 동작모드에 대한 각각의 등가회로를 구성하여 그 특성을 계산하고, 실제 측정을 통한 소자 특성과 상호 비교함으로써 본 연구에서 제시한 등가해석법의 타당성을 밝혔다. 본 연구에서 제시한 등가회로 해석법은 유사한 구조의 모든 복합소자의 해석 및 설계에 이용될 수 있으며, 나아가 타 음향소자의 특성분석 및 설계에도 응용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. H. Hiroyoshi, O. Kazutoshi, N. Yoshibumi et al, Vibrating module, US Patent, No. 5682132, 1997.
2. B. A. Murray, Vibratory alerting device with audible sound generator, US Patent, No. 5619181, 1997.
3. Y. Saito, Integrated vibrating and sound producing device, US Patent, No. 5528697, 1996.
4. T. H. Tichy, Dual function transducer housing, US Patent, No. 5517574, 1996.
5. K. Ogura, Piezoelectric type pager, US Patent, No. 5229744, 1993.
6. 浜口後英, 報知機能を具えた機器, Japanese Patent No. 11-10082, 1998.
7. 陶山英夫, ペイジャー用振 アクチュエータ, Japanese Patent No. 10-94234, 1998.
8. L. L. Beranek, *Acoustics*, 975 Memorial Drive Cambridge MA, 1986.
9. P. M. Morse and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, New York, 1968.

저자 약력

● 이 영 진 (Youngjin Lee)
1995년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 경북대학교 센서공학과 (공학석사)
2001년 8월: 경북대학교 센서공학과 (공학박사)
2001년 3월~현재: 대구과학대학 정보전자통신계열 전임강사
※ 주관심분야: 표면탄성파소자, 초음파 트랜스듀서

● 윤 양 기 (Yanggi Yoon)
1998년 2월: 대구대학교 제어계측과 (공학사)
2001년 2월: 경북대학교 센서공학과 (공학석사)
2001년 6월~현재: 한국전기전자시험연구원 신뢰성관리과
※ 주관심분야: 수중음향, 센서 및 Actuator

● 임 종 인 (Jongin Im)
1986년 2월: 한양대학교 무기재료공학과 (공학사)
1989년 2월: KAIST 재료공학과 (공학석사)
1999년 2월: 경북대학교 센서공학과 (공학박사)
1991년: (미)Penn. State Univ. Material Research. (객원연구원)
1998년 1월~현재: 포항산업과학연구원 재료공정연구센터
※ 주관심분야: 센서 및 Actuator, MEMS, 전자재료 개발 및 응용

● 노 용 래 (Yongrae Roh)
한국음향학회지 제20권 제4호 참조