

표준 마이크로폰 감도 교정을 위한 진동막의 모달 파라미터 측정 Modal Parameter Estimation of Membrane for Standard Microphone Sensitivity Calibration

권 휴상, 서 상준, 서 재갑, 박 준홍

Hyu-sang Kwon, Sang-jun Suh, Jae-gap Suh and Jun-hong Park

Key Words : Microphone(마이크로폰), Diaphragm system(진동막 계), Electrostatic actuator(정전기력 가진기)

ABSTRACT

Equivalent volume estimation of the coupler and two coupled microphones has a key role in standard microphone pressure calibration. The equivalent volume of the microphone is determined by the dynamic characteristics of the diaphragm system and front cavity. Therefore the modal parameters of diaphragm system - natural frequency and damping factor - should be measured explicitly for the estimation of the equivalent volume. The diaphragm system is composed of the vibrating diaphragm, back slit behind diaphragm, pressure equalization vent, and front cavity which are acoustically coupled. In the measurement, the electrostatic actuator was used to excite the system with the swept sine, and the frequency response was obtained. The close actuator in front of the diaphragm must influence the radiation impedance of the system, and then the modal parameters. From the measured frequency response, the natural frequency and the damping factor could be estimated with the Complex exponential method based on the Prony model and the zero crossing real and imaginary plot.

1. 서 론

음향의 표준을 확립하고 그 소급성을 유지하기 위해서는 음향 측정의 표준이 되는 마이크로폰의 음압 감도를 절대적으로 측정하고 이를 확인해 나가는 연구가 지속적으로 필요하다. 이를 위하여 국가 표준기관에서는 마이크로폰의 절대 감도를 측정하여 측정의 표준을 확립하고 다른 나라들과 상호 비교를 통하여 측정의 정밀도를 확인한다. 음향에 관련된 모든 측정은 이 표준 마이크로폰의 절대 감도로부터 소급하여 결과에 대한 정확도를 가지게 되므로 마이크로폰의 표준을 확립하고 이를 유지하는 일은 음향 관련 측정이 나 연구에서 매우 중요한 기반이 됨을 알 수 있다.

마이크로폰의 절대 감도를 측정하는 방법으로는 3개의 마이크로폰을 이용하는 가역교정 방법이 표준으로 되어 있다. 이는 두 개의 마이크로폰을 쌍으로 두고 하나는 음원으로

로 다른 하나는 측정용으로 하여 각 마이크로폰의 감도를 결정하는 방법이다. 이러한 가역교정의 원리는 작은 체적의 결합기(coupler)를 사용하는 압력교정이나 무향실에서 측정하는 자유음장 교정에서 모두 사용되는 기본 원리이다. 마이크로폰의 가역교정에서는 각 마이크로폰의 전기적인 신호 비와 함께 측정조건을 표현하는 물리적인 양으로 감도가 결정되는데 압력교정의 경우에는 등가체적, 그리고 자유음장 교정에서는 음향중심 사이의 절대적인 거리로 이를 표현하고 있다. 그러므로 마이크로폰 절대교정의 정밀도를 향상시키기 위해서는 이와 같은 등가체적과 음향중심에 대한 정밀 측정이 중요한 요인이 된다. 또한 자유음장 교정의 경우에는 마이크로폰의 방사 임피던스가 저주파에서 작기 때문에 방사음압이 작고 이에 따라 측정이 용이하지 않다. 그러므로 이 방법은 주로 수 kHz 이상의 고주파 대역에서 사용하며 아직까지 세계적으로도 일반화되어 있지 않으며 많은 나라에서 결합기를 사용한 압력교정으로 국가의 표준을 확립, 유지하고 있다.

마이크로폰의 압력교정에서 마이크로폰의 등가체적을 결정하기 위한 중요한 요인중의 하나로는 마이크로폰 진동막 계의 고유 진동수와 감쇠계수를 들 수 있으며 이를 측정하여 정확히 결정하는 것이 본 연구의 주요 목적이다. 그런데 마이크로폰의 진동막은 그 구조적인 특성상 장력이 강하

* 표준과학연구원
E-mail : hyusang@kriss.re.kr
Tel : (042) 868-5057, Fax : (042) 868-5643

게 걸리는 얇은 막으로 되어 있으며 쉽게 손상이 가게 설계되어 있다. 또한 음향 신호를 측정하는 본래의 목적에 따라 일반적인 소음 진동의 대상 구조물에 비해 고유 진동수가 높은 주파수에 있으며 감쇠 또한 크게 설계되어 있다. 이러한 독특한 구조적인 특성은 고유 진동수와 감쇠라는 기본적인 모달 파라미터의 측정을 용이하지 않게 한다. 본 연구에서는 이러한 특성을 가지는 마이크로폰의 진동막을 가진하는 실험적인 방법론에 대한 고찰과 함께 측정된 마이크로폰의 응답 신호로부터 진동막 계의 고유 진동수와 감쇠계수를 추정하는 방법과 그 결과를 소개하고자 한다.

2. 마이크로폰의 특성과 모달 계수 측정

2.1 마이크로폰의 구조적 특성과 가진 방법

음향 측정용으로 사용되어지는 마이크로폰은 그 작동 원리 등에 따라 다양한 종류가 있지만 감도 및 주파수 응답 특성이 우수하여 일반적으로 계측기로 널리 사용되는 것으로는 콘덴서 형 마이크로폰이 있다. 음향 분야의 표준기로 사용되는 마이크로폰은 콘덴서형으로 그 구조는 그림 1 과 같다.

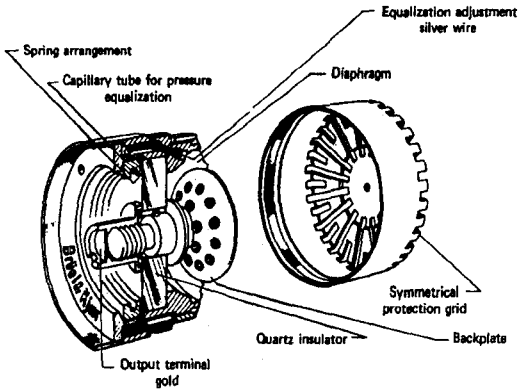


Fig. 1 Sketch of condenser microphone cartridge

그림 1 에서 알 수 있듯이 마이크로폰은 공기의 압력 변화에 따라 진동하는 얇은 진동막과 Backplate, 그리고 압력 보정 구멍 등으로 구성되어 있다. 외부에서 가해지는 압력은 진동막에 가진력으로 작용하여 이를 떨게 하여 전기적인 신호를 발생시킨다. 그런데 진동의 측면에서 외부의 가진에 대한 진동 응답을 고려하면 물론 진동막의 진동 응답 특성이 가장 중요하겠지만 이와 함께 진동막 전면 공동의 공기층과 후면 틈새의 공기층 영향, 압력 보정 구멍을 통한 공기 흐름의 저항 등이 모두 영향을 주게 된다는 사실을 알

수 있다. 그러므로 이러한 모든 구조적인 특성을 포함하여 진동막 계를 1 자유도 진동계로 모델링하고 그 고유 진동수와 감쇠를 실험적으로 정확히 측정하는 것이 중요하다.

진동 응답 특성을 측정하기 위해서는 먼저 가진에 대한 고려가 필요하다. 그런데 마이크로폰의 경우 진동막의 크기가 작으며 또한 장력이 크고 얇기 때문에 가진이 쉽지 않다. 특히 접촉식 가진의 경우에는 진동막에 쉽게 손상을 입히기 때문에 실제로 적용하기 어려우며 대신 비접촉 가진 방법을 생각하여야 한다. 비접촉에 의한 가진으로는 먼저 음압에 의한 가진 방법을 들 수 있다. 이를 위해서 마이크로폰의 주파수 응답 특성을 고려할 때 수십 kHz 의 고주파 대역까지 일정한 음압을 발생시켜야 하는데, 이는 마이크로폰을 음원으로 사용하는 경우에 가능하다. 그런데 자유음장의 경우에 마이크로폰의 구조적인 특성에 의한 방사 임피던스가 저주파에서 작고 주파수에 따라 변하기 때문에 사용이 어려우며 대신에 결합기를 이용한 가진이 필요하다. 그러나 이 방법 역시 측정이 쉽지 않으며 음원으로서의 마이크로폰 역시 비슷한 대역의 주파수 응답 특성을 가지고 있으므로 넓은 주파수 대역까지의 가진이 어렵다.

이러한 어려움을 해결하기 위한 가진 방법으로 정전기력을 이용하는 가진기를 들 수 있다. 이는 진동막 가까이에 대전판을 두고 여기에 전압을 가함으로써 정전기력을 발생시켜 진동막을 가진시키는 방법이다. 이는 상대적으로 높은 주파수 범위까지 일정한 가진 특성을 가지고 있기 때문에 마이크로폰의 진동막을 가진하는 좋은 방법이라 할 수 있다. 그런데 이 방법은 큰 정전기력을 발생시키기 위하여 넓은 대전판을 진동막에 가까이 두어야 하기 때문에 진동막 전면의 공기층의 흐름에 큰 영향을 주게 되며 이는 결국 진동막 계의 주파수 응답을 왜곡시키는 결과를 가져오게 된다. 그러므로 이러한 가진기의 설계와 측정방법의 연구를 통하여 주파수 응답의 왜곡을 최소화하는 연구가 필요하다 하겠다. 본 연구에서는 정전기력 가진기를 이용하여 그림 2 와 같이 실험을 수행하고 결과를 고찰하였다.

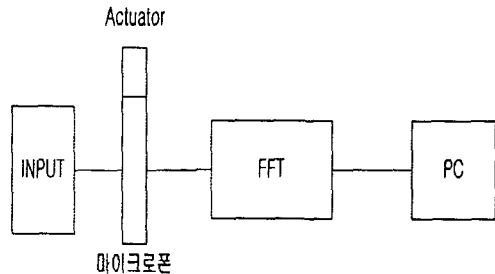


Fig. 2 Brief diagram for experimental procedure

2.2 진동막 계의 주파수 응답 특성 측정과 분석

강제 진동의 주파수 응답 곡선의 특성과 모달 계수의 추정엔 진동 해석의 기본으로써 많은 연구가 있었으며 또한 그 방법 역시 잘 알려져 있다. 그러나 마이크로폰은 넓은 주파수 범위에서 일정한 감도를 구현하기 위하여 그 구조적인 특성을 높은 고유 진동수와 큰 감쇠로 설계하였다. 그 결과 수십 kHz 의 주파수 영역에서도 어드미턴스(Admittance)의 차이가 수 dB 이내로 되어 있기 때문에 일반적인 주파수 응답 해석과는 다른 고유한 해석 방법이 요구된다고 할 수 있다.

일반적인 진동 응답 해석에서 설명하는 간단한 모달 계수 추정 방법으로는 피크치를 가지는 주파수를 고유 진동수로 하고 피크값에서 3 dB 감소하는 주파수의 차이에 의해 감쇠값을 찾는 방법을 들 수 있다. 이 방법은 단순하고 간단하게 고유 진동수와 감쇠값을 결정할 수 있는 방법이지만 상대적으로 오차가 크고 감쇠값이 작다는 가정하에서 적용이 가능하다. 다른 방법으로 Nyquist선도를 이용하여 모달원을 그리고 이로부터 고유 진동수와 감쇠를 결정하는 방법이 있는데 이 역시 마이크로폰과 같은 진동계에서는 사용이 적당하지 않다. 시간영역에서의 해석 방법으로는 단위 응답함수(Impulse Response Function)를 이용하는데, 먼저 이 함수의 envelope를 사용하여 감쇠를 구하는 방법을 들 수 있다. 그러나 이 역시 감쇠가 큰 경우에 정확한 추정이 어렵다는 사실을 알 수 있다.

본 연구에서는 시간영역에서의 단위 응답함수를 이용한 복소 지수법을 사용하여 계수 추정을 수행하였다. 이를 위하여 높은 주파수 대역까지 주파수 응답 함수를 측정하고 이를 역 푸리에 변환하여 Prony 모델에 근거한 복소 지수 함수 모델로부터 모달 계수를 최소 자승법으로 계산하였다. 이는 마이크로폰과 같이 자유도가 정해져 있는 경우에는 적용이 쉽고 정확하다는 장점이 있지만 감쇠가 큰 경우에 넓은 주파수 범위의 측정이 필요하며 주파수 응답 곡선의 왜곡이 적어야 한다는 전제 조건을 필요로 한다. 그러므로 이와 달리 감쇠가 큰 계에서 저주파 및 고유 진동수의 응답을 이용하여 계수를 추정하는 방법을 이용하였다. 이를 위하여 1 자유도계 진동계의 어드미턴스를 구해보면 다음과 같다.

$$X = \frac{F_0}{k} \frac{1}{(1-r^2) + j2\xi r} = \frac{F_0}{k} \frac{(1-r^2) - j2\xi r}{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}$$

$$\text{Re}(X) = \frac{F_0}{k} \frac{(1-r^2)}{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}$$

$$\text{Im}(X) = \frac{F_0}{k} \frac{-2\xi r}{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2} \quad (3)$$

여기서 r 은 고유 진동수에 대한 주파수의 비로써 이 값에 따라 어드미턴스는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\text{Re}(X) \approx \frac{F_0}{k}, \quad \text{Im}(X) \approx 0 \quad \text{when } r \approx 0$$

$$\text{Re}(X) \approx 0, \quad \text{Im}(X) \approx -\frac{F_0}{k} \frac{1}{2\xi r} \quad \text{when } r \approx 1$$

$$\eta = 2\xi = \frac{-\text{Im}(X)_{r=1}}{\text{Re}(X)_{r=0}}$$

결국 어드미턴스의 실수부가 0 인 점, 즉 위상이 90도인 주파수를 고유 진동수로 추정하고 이때의 허수부와 저주파 극한의 실수부의 비로써 감쇠계수를 추정할 수 있다.

3. 실험 및 결과

실험에서는 정전기력 가진기를 사용하여 마이크로폰의 진동막을 가진하고 응답을 측정하였다. 정전기력 가진기로는 B&K Type UA0033 을 사용하였는데 이는 B&K Type 4133, 4134, 4147 등의 마이크로폰에 사용 가능하다. 다른 종류의 마이크로폰에는 진동막과 그 전면부의 구조적인 차이 때문에 사용이 어려운데, 다른 종류의 마이크로폰을 가진하기 위하여 자체적으로 가진기를 제작하고 실험을 수행하였다. 실험은 Sine sweep방법을 이용하여 주파수 응답을 구했으며 복소 지수법과 실수부-허수부를 이용한 추정을 수행하였다.

먼저 복소 지수법을 이용한 추정에서는 주파수를 80 kHz 까지 sweep하며 주파수 응답을 구하고 이로부터 계수를 추정하였다. 측정 결과는 표 1과 같다.

Table 1. Experimental result of complex exponential estimation

마이크로폰	제작사	추정 고유 진동수 (kHz)	감쇠 계수 (η)	90도 위상의 진동수 (kHz)
B&K4166 (1)	B&K	10.9	1.33	11.0
B&K4166 (2)	B&K	10.2	1.31	9.7
B&K4180 (1)	자체	22.0	1.43	23.0
B&K4180 (2)	자체	17.4	1.17	14.5

측정은 각 마이크로폰에 대하여 4 회씩 실험을 수행하였고 이를 평균한 것이다. 측정 결과에서 계수 추정에 의한 고유 진동수 값과 주파수 응답 곡선의 90도 위상 주파수가 잘 일치하는 경우와 오차가 발생하는 경우가 있음을 알 수 있다. 이는 그림 3 와 4 에서 확인 할 수 있듯이 주파수 응답 곡선이 고주파에서 왜곡이 발생하기 때문이라고 생각되며 이는 가진기에 의한 진동막 계의 영향이라고 생각된다.

특히 이는 자체 제작한 가진기에 의한 실험결과 (그림 4)에서 왜곡이 심하며 고유 진동수 근처에서 문제를 야기한다는 사실을 알 수 있는데, 이는 다음의 실험으로부터 확인할 수 있다.

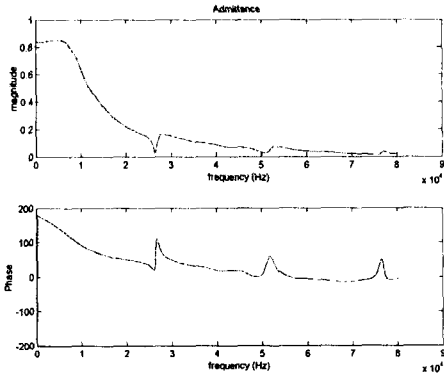


Fig. 3 Frequency response of B&K 4166 microphone with B&K UA0033 electrostatic actuator

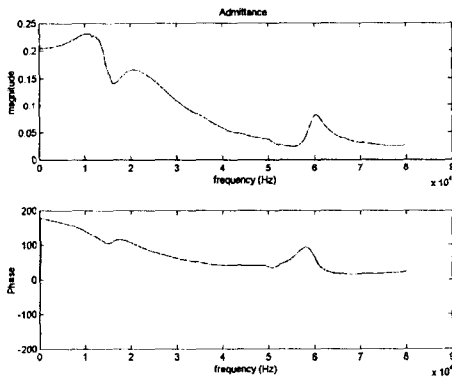


Fig. 4 Frequency response of B&K 4180 microphone with a manufactured electrostatic actuator

상용 가진기와 제작한 가진기의 특성 비교를 위하여 다음과 같이 동일한 마이크로폰에 대한 실험을 수행하였다. 실험은 B&K Type 4133 과 4134 에 대하여 수행하였다. 그림 5 와 6 은 B&K Type 4133 마이크로폰에 대한 주파수 응답 곡선의 차이를 보여주고 있다. 이로부터 자체 제작한 가진기는 고유 진동수 근처의 주파수 응답을 심하게 왜곡시킨다는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 가진기가 필연적으로 마이크로폰의 주파수 응답에 영향을 끼친다는 것을 의미하며 가진기의 구조적인 설계와 그 영향에 대한 해석과 연구가 필요하다는 사실을 알려준다.

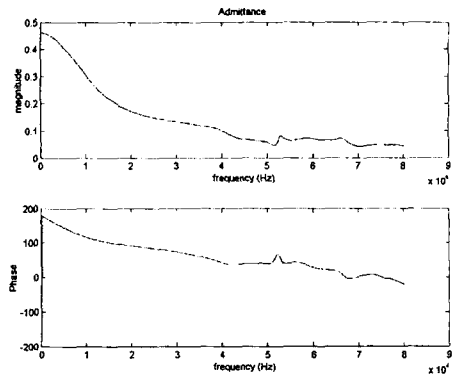


Fig. 5 Frequency Response of B&K 4133 microphone with B&K UA0033 electrostatic actuator

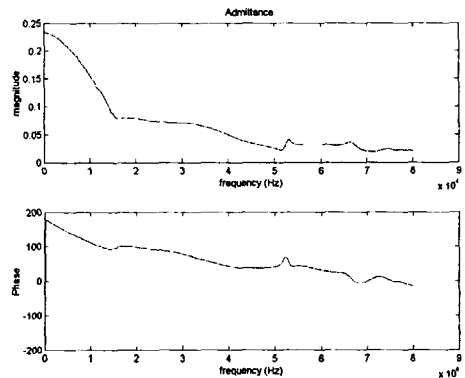


Fig. 6 Frequency response of B&K 4133 microphone with a manufactured electrostatic actuator

Table 2. Experimental result of real-imaginary zero-crossing estimation

마이크로폰	Real Part	Imag Part	감쇠계수(η)
B&K4133	447.89	-369.29	1.21
B&K4134	402.37	-369.81	1.09

다른 방법으로 저주파와 고유 진동수 근처의 어드미턴스를 이용하는 모달 계수 추정을 수행하였다. 실험은 상용 가진기 UA0033 을 이용하였으며 측정은 B&K Type 4133 과 4134 에 대하여 수행하였다. 측정은 각각 20 회씩 반복하여 측정하였으며 그 평균값으로부터 감쇠계수를 구하였다. 그 결과가 표 2 에 나타나 있다. 측정의 반복성은 우수하였

으며 고유 진동수 값도 일정하게 추정되는 사실을 확인할 수 있었다.

4. 실험 및 결과

마이크로폰 진동막 계의 진동 응답 특성에 대한 실험적 고찰을 통하여 고유 진동수와 감쇠계수를 결정할 수 있었다. 가진 방법으로는 정전기력 가진기를 사용하였는데 이는 필연적으로 진동막 계의 동적 특성을 변화시킬 수 있었고, 이는 자체적으로 제작한 가진기의 비교 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 그러므로 가진기 형상에 의한 진동막 계의 주파수 응답 왜곡에 대한 이론적, 실험적 해석과 고찰이 필요함을 확인하였다. 측정된 주파수 응답 신호는 복소 지수법과 실수-허수 그림으로부터 계수를 추출할 수 있었는데, 복소 지수법의 경우에는 측정하는 주파수의 범위가 넓고 주파수 응답의 왜곡에 의하여 오차가 존재한다고 생각된다. 마이크로폰과 같이 고유 진동수가 높고 감쇠가 큰 계에서는 실수-허수 그림에서 0 이 되는 주파수를 선정하여 값을 추정하는 방법이 유용하다 할 수 있다. 이러한 기본적인 고찰을 바탕으로 가진과 응답 해석에 대한 지속적인 연구와 해석이 필요함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) D. R. JARVIS., 1988, "The Accuracy of the Electrostatic Actuator Method of Determining the Frequency Response of Condenser Microphones," J. Sound Vibrat. 123(1), 63-70(1988)
- (2) George S. K. Wong etc, "API HANDBOOK OF CONDENSER MICROPHONES", CHAPTER 15.
- (3) B&K, "Technical Documentation - Microphone Handbook," Volume 1 Theory.
- (4) Maia, Silva., etc, 1998, "Theoretical and Experimental Modal Analysis," Research Studies Press Ltd.