

어레이 마이크로폰용 광대역 소형 위상교정기의 설계 Design of the broadband and compact phase-calibrator for array microphones

주형식*·김양한**
Hyeong Sick Ju, Yang-Hann Kim

Key Words: Array microphone(어레이 마이크로폰), Phase calibration(위상교정), Design parameter(설계변수)

ABSTRACT

Pressure distribution is measured by array microphones to identify noise sources in the space. For example, beam-forming method or acoustic holography use phase information to identify the source. Therefore, the phase is significant information to correctly identify the source position. However, due to the microphone characteristics and measuring systems, measured signals always have errors, which make the identification difficult. Therefore, phase calibration of microphones is needed. Duct and speaker systems are generally used as calibrators. Acoustic characteristics of the calibrator are, of course, functions of many parameters of the system: i.e. duct size, frequency, and microphone spacing. In this paper, design parameters which effect on the performance and size of the calibrators are considered. Then the parameters would be applied to design and real product of the phase-calibrator.

1. 서론

빔형성 방법과 음향홀로그래피 방법은 다수의 마이크로폰을 사용하여 공간상의 음압분포를 측정함으로써 소음원을 규명하는 대표적인 방법들이다. 마이크로폰을 통해 신호를 측정할 때, 측정값에는 마이크로폰 자체의 특성과 신호측정 시스템의 특성 등으로 인해 오차가 함께 측정된다. 이러한 오차는 신호의 위상을 왜곡시키는 주요한 원인이 되고, 따라서 정확한 소음원의 위치 추정을 어렵게 만든다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 덕트에서 평면파를 만들어 두 마이크로폰 사이의 위상을 보정하는 방법이 주로 사용되어 왔다.⁽¹⁾ 그런데 실험실 등에서 자체 제작하여 사용되는 기존의 위상교정기들은 부피가 크고, 측정 가능한 영역이 저주파 영역이며, 마이크로폰 장착에 어려움이 있다. 본 논문에서는 덕트의 크기 및 형상, 그리고 마이크로폰 마운팅의 구조와 위상교정기의 성능과의 관계에 따라 위상교정기의 설계변수를 규명하고, 이를 통하여 크기를 소형화하면서 고주파 영역까지 측정 가능한 위상교정기를 설계하는 방법에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 마이크로폰 위상교정의 이론적 배경

2.1 두 개의 마이크로폰을 이용한 위상교정방법
기준 마이크로폰 1에 대해 위상 부정합이 있는 마이크로폰 2의 위상신호는 두 마이크로폰간의 전달함수를 이용하여 교정할 수 있다.⁽¹⁾ 이 전달함수 $\hat{H}_{12}(f)$ 는 두 마이크로폰을 평면파의 동일음장에 위치시키고 기준 마이크로폰의 자기스펙트럼 밀도함수 $\hat{S}_{11}(f)$ 와 두 마이크로폰의 상호스펙트럼 밀도함수 $\hat{S}_{12}(f)$ 의 비를 이용하여 측정할 수 있다

$$\hat{H}_{12}(f) = \frac{\hat{S}_{12}(f)}{\hat{S}_{11}(f)} \quad (1)$$

이때, 두 마이크로폰의 위상차 $\phi_2(f)$ 는 식(2)와 같이 나타내어 진다.

$$\phi_2(f) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[\hat{H}_{12}(f)]}{\text{Re}[\hat{H}_{12}(f)]} \quad (2)$$

주파수영역에서 마이크로폰 2를 통해 측정된 음압신호를 $\hat{P}_2(f)$ 라 할 때, 마이크로폰 1과의 상대적인 크기 및 위상차가 교정된 음압신호 $\hat{P}'_2(f)$ 는 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{P}'_2(f) = \frac{\hat{P}_2(f)}{\hat{H}_{12}(f)} \quad (3)$$

* 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : petra00@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과

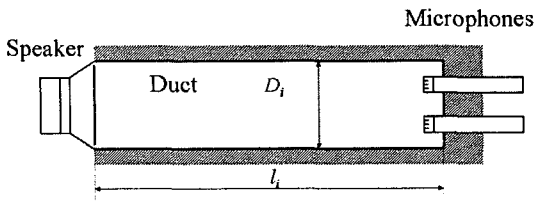


Fig. 1 Duct and speaker system for measuring transfer function between two microphones.

2.2 덕트를 이용한 전달함수 측정방법

평면파를 이용한 마이크로폰의 전달함수 측정을 위해서는 무향실에서 자유 음장을 구현하거나 덕트와 스피커 시스템을 이용할 수 있다. 무향실 측정법은 고주파 영역까지 전달함수를 구할 수 있으나, 무향실 내에 마이크로폰을 장치하는 것이 번거롭고, 다른 측정장비와 함께 휴대, 이동할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 실험실 단위의 교정을 위해서는 Fig.1 과 같은 덕트와 스피커 시스템을 이용하게 된다. 이 시스템을 이용한 측정법은 강제로 이루어진 덕트의 한쪽 끝단에 두 개의 마이크로폰을 장착시키고 마이크로폰으로 동일한 음장을 측정하여 두 마이크로폰의 전달함수를 구하는 방법이다. 덕트를 이용한 음향교정기의 성능은 덕트의 치수와 마이크로폰 마운팅 구조에 달려있으므로, 이를 제어함으로써 고주파까지 측정 가능한 소형 위상교정기를 설계할 수 있다.

3. 소형 위상교정기의 설계

3.1 위상교정기의 기능적 요구사항과 설계변수

1 장 과 2.2 절에서 각각 기존의 위상교정기와 무향실 측정을 통한 위상교정방법의 문제점들을 언급하였다. 이러한 문제점들을 보완하는 위상교정기를 설계하기 위해서 설계공학의 관점에서 위상교정기의 기능적 요구사항 (Functional Requirements: FRs)과 이에 따른 설계 변수 (Design Parameters: DPs)를 Table 1 과 같이 규정하고자 한다. 그리고 설계의 제약조건으로는 가공의 편이성을 고려할 수 있다.

설계란 설계의 제약조건에 위배되지 않는 상황에서 상호 독립적인 설계 변수들을 선정하고 이를 조정하여 기능적 요구사항을 만족시키는 최적의 해를 찾는 과정이라 할 수 있다.⁽²⁾ 이에 따라 위상교정기 설계에 사용될 각 설계변수들의 물리적 의미를 살펴보고자 한다.

Table 1 Functional requirements and design parameters of the phase calibrator.

No.	Functional Requirements(FRs)	Design Parameters(DPs)
1	Minimize the calibrator	Volume of the calibrator
2	Measure the high frequency range	Cutoff frequency
3	Convenience for measuring	Microphone Mounting

(1) 교정기의 부피 (DP_1)

교정기의 형상을 원형 덕트로 가정할 때, 교정기에 부착된 스피커의 부피를 제외한 교정기의 부피는 다음 식과 같이 주어진다.

$$V_c = \frac{\pi D_o^2}{4} l = \frac{\pi(D_i + 2t)^2}{4} l \quad (4)$$

V_c : 교정기의 부피, D_o : 덕트 외경
 D_i : 덕트 내경, t : 덕트 두께
 l : 덕트 길이

(2) 차단주파수 (DP_2)

차단주파수는 덕트의 지름방향에 대해 첫 번째 모드가 걸려 더 이상 덕트의 길이방향으로 평면파가 전파될 수 없게 되는 주파수를 의미한다.⁽³⁾ 이 차단주파수는 음속 a_0 이 일정하다고 가정할 때 다음 식과 같이 주어진다.

$$f_c = \frac{1.84}{\pi D_i} a_0 \quad (5)$$

(3) 마이크로폰 장착 (DP_3)

마이크로폰 장착은 마이크로폰의 마운팅 구조에 달려있다. 마이크로폰이 Fig. 2(a)와 같이

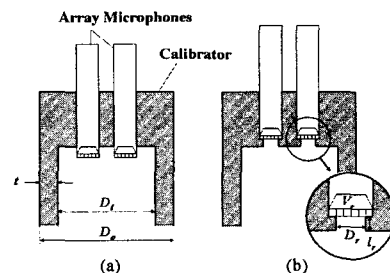


Fig. 2 Microphone mounting of the calibrator (a) Tube-case type. (b) Flush mounting.

관벽 밀착상태(Flush mounting)가 되지 않을 경우 가진막과 관벽 사이의 공간격의 고유주파수에 의한 위상 부정합이 발생하게 된다.⁽⁴⁾ 그러나 관벽 밀착형 마운팅을 유지하면서 마이크로폰 장탈착을 용이하게 하려면 마이크로폰을 지지할 수 있는 탭이 있는 마운팅 구조를 제작해야 하나 이 경우 가공이 어려워져 가공 편이성이라는 설계 제약조건을 만족 시키지 못하게 된다. 따라서 마이크로폰 마운팅의 공명주파수가 위상교정기의 성능에 영향을 주지 않게 하면서, Fig. 2(b)과 같이 관벽 탈착형(Tube-case)으로 위상교정기의 제작할 필요가 있다. 이러한 관벽 탈착형 마운팅은 덕트 내에 헬름홀쯔 공명기가 있는 구조로 가정할 수 있으며 공명기의 공명주파수는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$f_r = \frac{a_0}{2\pi} \left[\frac{\pi D_r^2}{4V_r(l_r + \delta)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

- f_r : 공명주파수
- V_r : 마이크로폰의 그리드와 가진막 사이의 공간의 부피(마운팅 내부부피)
- l_r : 마운팅 입구에서 마이크로폰까지의 거리
- D_r : 마운팅의 입구직경
- δ : 공명기의 길이보정

3.2 설계변수들의 관계규명

설계변수들 간의 독립성을 유지시키기 위해서는 설계변수의 우선순위 규정이 필요하다. 이를 위해서 설계변수들 간의 관계를 규명해 보고자 한다.

식(4)와 식(5)를 보면 교정기의 부피는 덕트의 내경, 두께, 길이의 함수이지만, 교정기의 차단주파수는 덕트 내경 만의 함수이므로 DP_2 가 DP_1 보다 우선순위를 가짐을 알 수 있다.

다음으로 식(5)와 식(6)을 살펴보면 마이크로폰 마운팅에 의한 공명주파수는 마이크로폰 마운팅의 입구 직경의 함수이다. 마이크로폰 2 개가 나란히 덕트의 끝단에 위치하려면 $2D_r < D_i$ 의 관계가 성립해야 한다. 그런데 마이크로폰 마운팅의 입구직경은 마이크로폰의 직경에 따라 고정된 값으로 볼 수 있다. 또한, 마이크로폰의 그리드와 가진막 사이의 공간의 부피 또한 마이크로폰에 따라 일정하므로 마운팅의 공명주파수는 마운팅 입구에서 마이크로폰까지의 거리의 함수라고 할 수 있다. 만약 마운팅 공명주파수가 차단주파수보다

커지면 FR_2 가 원래의 설계변수인 DP_2 가 아닌 DP_3 에 의해 영향 받게 되므로 $f_c < f_r$ 를 만족시킬 필요가 있다. 따라서 주어진 차단주파수를 고려하여 마이크로폰 마운팅 구조를 설계해야 한다.

마지막으로 DP_1 나 DP_3 의 관계를 $l_r (\geq 3D_r)$ ⁽⁶⁾에 비해서 l_r 의 크기가 매우 작으므로 이 두 설계변수는 동등한 우선순위를 가진다. 따라서 어느 것을 먼저 설계해도 무방하다고 할 수 있다.

이를 요약하면 설계변수 DP_2 를 우선적으로 조정 한 후 DP_1 나 DP_3 를 조정할 필요가 있다.

4. 설계조건 적용 및 실험

4.1 위상교정기의 설계 및 제작

3장에서 제시한 설계조건과 우선순위를 고려하여 Table 2 와 같이 위상교정기의 치수와 성능을 결정하였다. 공명기의 길이보정에서 두 공명기의 상호영향은 무시하였으며, 소리의 속도는 340 m/s로 일정하다고 가정하였다. Table 2의 계산된 결과를 통해 $f_c < f_r$ 의 조건을 만족함을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 Fig. 3(a)와 같이 위상교정기의 형상을 결정하였고, Fig. 3(b)와 같이 실제 위상교정기를 Steel 재질로 제작하였다. 또한, 이동성을 고려해 혼 드라이브와 덕트 일체형으로 결합시켰으며, 소리의 누수를 막기 위해 연결부위에 개스킷, O 링(O-ring) 등을 사용하였다.

Table 2 Applied dimension values and results for the design of the compact phase calibrator.

Symbol	Dimension	Meaning
D_i	19 mm	Inner diameter of the duct
Cutoff frequency: $f_c = \frac{1.84}{\pi D_i} a_0 = 10.4 \text{ kHz}$		
D_r	6.6 mm	Diameter of the mounting open
V_r	16 mm ³	Inside volume of the mounting
l_r	0.3 mm	Mounting length
δ	0.00561 mm	Length corrector
Resonance frequency: $f_r = \frac{a_0}{2\pi} \left[\frac{\pi D_r^2}{4V_r(l_r + \delta)} \right]^{\frac{1}{2}} = 41.7 \text{ kHz}$		
l	100 mm	Duct length
t	5 mm	Duct thickness
Volume of duct: $V_c = \frac{\pi(D_i + 2t)^2}{4} l = 6.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$		

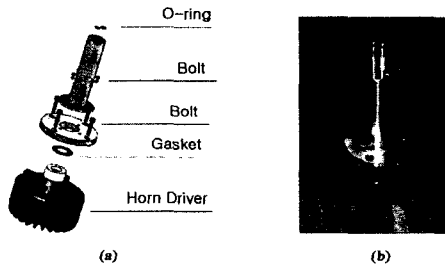


Fig. 3 Phase calibrator (a) Modeling. (b) Picture of the produced calibrator.

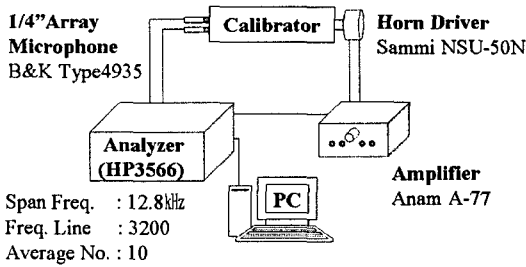


Fig. 4 Experimental setup

4.2 제작된 위상교정기의 성능실험.

제작된 마이크로폰 위상교정기의 성능을 실험하기 위해 Fig. 4 과 같이 실험장치를 구성하였다. 먼저 마이크로폰들의 기여도 함수(Coherence)를 Fig. 5 와 같이 측정하여 마이크로폰의 입력신호 간의 선형성이 있음을 확인하였다. 그리고 두 마이크로폰간의 전달함수의 크기 및 위상을 Fig. 6 과 같이 측정하였다. 5 kHz, 6 kHz, 8 kHz, 10 kHz에서 보이는 노이즈 현상은 어레이 마이크로폰이 안정적으로 측정 가능한 주파수 응답 범위(5kHz)초과 시 마이크로폰 특성에 의해 발생하는 것이며, 차단주파수인 약 10.4kHz 부근에서 공진현상이 일어남을 확인할 수 있었다. 또한 이 범위 내에서는 마운팅 구조의 공명주파수에 의한 영향이 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

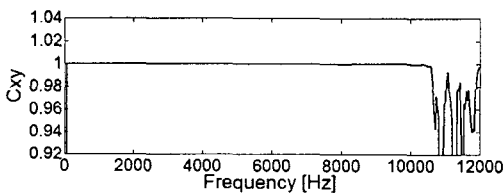


Fig. 5 Coherence function of the two signals measured by microphones.

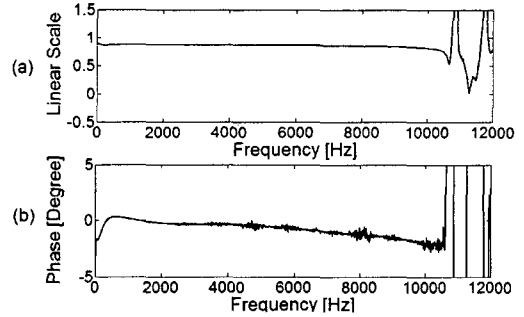


Fig. 6 Transfer function between two microphone signals (a) Magnitude of the transfer function. (b) Phase of the transfer function.

5. 결론

지금까지 덕트를 이용해서 고주파영역까지 측정 가능한 소형 위상교정기의 설계방법에 대해서 살펴보았다. 이를 위해서 먼저 위상교정기의 기능적 요구사항과 설계변수를 규정하고, 이들의 상호관계를 규명하였다. 그리고 설계변수들을 적용하여 실제 위상교정기를 설계 및 제작하고 그 성능을 확인하였다. 이 교정기는 혼 드라이버를 합친 전체 크기가 12 cm x 12 cm x 21 cm 로 소형이고, 약 10 kHz 의 범위까지 마이크로폰의 위상교정이 가능하다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부의 BK21 사업에 의해 지원에 의해 수행되었습니다. 지원에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- (1) A. F. Seybert, 1977, "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 61, No. 5., pp.1362~1370.
- (2) N. P. Suh, 2001, Axiomatic design: advances and applications, Oxford Univ. Press.
- (3) M. L. Munjal, 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (4) Seong-Woo Kang and Yang-Hann Kim, 1992, "Transmission loss measurement of silencer with two microphones and its error analysis," Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2(3), pp.181~192.
- (5) U. Ingard, 1953, "On the theory and design of acoustic resonators," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 25, No. 6, pp.1037~1061.
- (6) ASTM E1050, 1998, "Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system."