한국음향학회지 제43권 제1호 pp. 39～48 (2024)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.43, No.1 (2024)
https://doi.org/10.7776/ASK.2024.43.1.039

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

혼 입구에서의 음향 리액턴스에 근거한 자동차용 트럼펫 혼의 설계 연구

A study on the design of a trumpet horn for automobiles based on acoustic reactance at the horn throat

이준수,[1] 김웅지,[1] 김대현,[2] 유동욱,[2] 문원규[1†]

(Junsu Lee,[1] Woongji Kim,[1] Daehyun Kim,[2] Dongwook Yoo,[2] and Wonkyu Moon[1†])

[1]포항공과대학교 기계공학과, [2]인팩 혼 설계실

(Received September 20, 2023; revised October 20, 2023; accepted November 13, 2023)

초 록: 자동차용 경음기는 운전자 간의 의사소통 수단이자 보행자에게 사전에 경각심을 불러일으키는 부품으로서 안전상 중요한 역할을 한다. 유한 요소 방법과 전기 회로 모델을 활용한 자동차용 경음기의 모델링 연구와 혼의 음향학적 특성을 분석한 연구들이 수행되었으나, 트럼펫 혼의 작동 주파수 설계 방법에 대한 연구는 미비하다. 본 논문에서는 트럼펫 혼의 진동부가 결정되었을 때, 쉘의 음향 리액턴스에 따른 작동 주파수를 예측하는 설계 방법을 제시하고자 한다. 음향부에서는 지수 혼과 도파관이 결합된 혼에 대해 다루었고, 임피던스 튜브 실험을 통해 도파관의 입구 음향 리액턴스는 해석 결과와 유사함을 확인했다. COMSOL Multiphysics 유한 요소 수치 해석 모델을 이용하여 자동차용 경음기의 공진 주파수를 예측했고, 음압 실험을 통해 설계된 혼의 작동 주파수를 측정하여 설계 방법을 검증했다. 음압 실험은 홀더를 제외하고 DC 전압을 12 [V] 인가하여 반무향실 환경에서 측정한 결과, 설계 작동 주파수와 비교하여 수 [Hz] 내에서 정확하게 공진이 발생했다. 본 논문에서는 혼의 음향 리액턴스 관점에서 자동차용 트럼펫 혼의 설계 방법을 살펴보았고, 혼을 포함한 시스템을 설계할 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어: 자동차용 경음기, 트럼펫 혼, 음향 리액턴스, 혼 입구, 임피던스 튜브, 작동 주파수

ABSTRACT: A car horn serves a crucial safety role as a means of communication between drivers and a part that alerts pedestrians in advance. While previous studies have utilized finite element method and electric circuit model to simulate and analyze characteristics of the car horns, there remains a lack of research on design methods of a trumpet horn. This paper presents a design approach that predicts the operating frequency based on the acoustic reactance at the throat of the horn, once the vibrating part is determined. We deal with a horn combining both an exponential horn and a waveguide in the acoustic section, and confirm that the acoustic reactance at the horn throat measured by impedance tube experiment agrees well compared with the numerical result obtained using the finite element method. The resonance frequency of the car horn is predicted using the COMSOL Multiphysics finite element numerical analysis model, and the proposed design method is validated by measuring the operating frequency of the designed horn in a sound pressure experiment. As a result, the resonance measured in a semi-anechoic chamber environment by applying a DC voltage of 12 [V] excluding the holder occurs accurately within a few [Hz] of the design operating frequency. This paper discuss the design method of a trumpet horn from the perspective of the horn's acoustic reactance, and is expected to be useful for designing horn systems.

Keywords: Car horn, Trumpet horn, Acoustic reactance, Horn throat, Impedance tube, Operating frequency

PACS numbers: 43.38.Ja, 43.58.Bh

†**Corresponding author:** Wonkyu Moon (wkmoon@postech.ac.kr)
Department of Mechanical Engineering, Pohang, University of Science and Technology (POSTECH), 77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongsangbook-do 37673, Republic of Korea
(Tel: 82-54-279-2184, Fax: 82-54-279-2887)

Copyright ⓒ2024 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

자동차용 경음기는 운전자 간의 의사소통 수단이자 보행자에게 경적음을 발생시켜 사전에 경고를 전달하는 부품이다. 보행자에게 경각심을 주지 못할 정도로 소리가 작을 경우를 대비하여 특정 주파수 대역에서 최소 음압을 만족하도록 규제하고 있고,[1] 최근 전기 자동차 시장의 규모가 성장함에 따라 자동차용 경음기의 관심도 증가하고 있다.

트럼펫 혼의 구조는 Fig. 1과 같고, 각 부품들은 Table 1과 같이 구성된다. 트럼펫 혼은 크게 진동부와 음향부로 나뉠 수 있고, 트럼펫 혼에 12 ~ 13 [V]의 전압이 인가되면, 코일의 중간에 위치한 폴이 자화되어 진동판의 중앙에 부착된 아마추어를 자기력으로 잡아당긴다. 이때 아마추어에 연결된 다이어프램도 함께 아래 방향으로 잡아당겨진다. 다이어프램이 정해진 점 간극(자속 발생 전 armature와 spring 간의 거리) 이상으로 움직일 때, 전류가 차단되는 구조를 가지고 있고, 다이아프램의 탄성력에 의해 원래의 위치로 복원된다. 위 방향으로 올라가는 과정에서 다시 코일에 전류가 공급되어 다이어프램을 잡아당기고, 이러한 과정이 반복되면서 음압이 형성된다.[2] 음향부에서는 진동부에서 생성된 음향을 쉘을 통해 증폭하는 역할을 한다. 쉘은 다이어프램과 매질 사이의 음향 임피던스를 더욱 잘 매칭시켜주므로 특정 주파수에서의 음압이 공기 중으로 잘 방사될 수 있도록 해주고, 결과적으로 원하는 음향 특성을 얻을 수 있다.

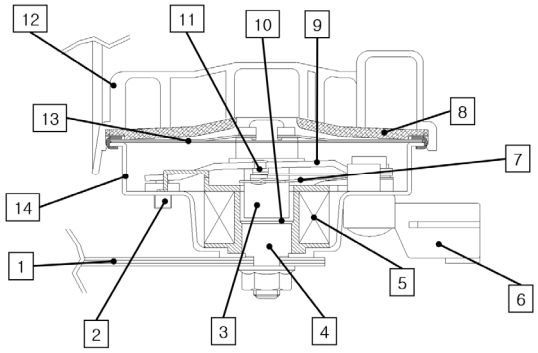

Fig. 1. Structure of the trumpet horn.

Table 1. Element of the trumpet horn.

No.		No.	
1	Holder	8	Shell cover
2	Wrench bolt	9	Stand
3	Armature	10	Air gap
4	Pole	11	Point gap
5	Coil	12	Shell
6	Connector	13	Diaphragm
7	Spring	14	Body

자동차용 경음기의 모델링에 대한 선행 연구로는, 트럼펫 혼 전기혼을 1차원 단순 진동 모델로 근사한 시도가 있었고,[3] Finite Element Method(FEM)과 Electrical Circuit Model(ECM)을 활용하여 매개 변수와 작동 주파수 간의 상관 관계를 파악한 사례가 보고되었으나,[4] 실험과 해석의 정합성 결과를 제시하지 않았다. Lemaitre *et al.*[5]과 Sa와 Park[6]은 자동차용 경음기의 진동부를 moving coil 혼 드라이버로 사용한 경우, 라우드 스피커 시스템처럼 정량적으로 Thiele and Small's model로 표현하여 이론적으로 규명하고 실험적으로 검증했다. 하지만, 보이스 코일 방식은 신호에 의해 응답 특성이 결정되므로 트럼펫 혼의 모델링에 적용할 수 없다. 그리고 Mede *et al.*[2]는 자동차용 경음기의 전기-기계 요소들을 수학적으로 모델링하여 구동 원리를 밝혔고, 입력 전압과 작동 주파수 간의 관계를 이론적, 실험적으로 입증했다. 하지만, 해당 논문은 트럼펫 혼이 아닌 디스크 혼만을 다루었고, 음향부의 증폭 구조물인 쉘을 고려하지 않았다.

음향부인 쉘에 대해서 Bängtsson *et al.*[7]은 흡음 계수를 최소화하도록 혼의 모양을 최적화했고, 단일 주파수뿐만 아니라 두 개 이상의 multi frequency에 대해서도 다루었다. 그리고 Boundary Element Method (BEM)를 활용하여 기본 주파수와 파라미터(쉘의 길이, 혼 입구의 너비, 혼 출구의 너비) 간의 상관 관계를 파악한 연구 또한 수행된 바 있다.[8] Bonfiglio와 Pompoli[9]는 임피던스 튜브 실험을 통해 FEM과 실험값 사이의 정합성을 검증했고, 이 FEM을 활용하여 자동차용 경음기의 Sound Pressure Level(SPL)을 증가시키는 shape optimization 연구를 진행했다. 임피던스 튜브 실험에서 흡음 계수가 최소가 되는 주파수에서는 반사가 적게 일어나므로 방사 음압이 가장

클 것이라고 예상했고, SPL을 증가시키기 위해서 흡음 계수가 최소가 되는 주파수와 fundamental working frequency가 잘 커플되어 있어야 한다고 기술했다.[9] 혼의 임피던스를 포함한 혼의 이론은 Olson[10]에 의해 이미 잘 정립되어있고, Finite horn에 대한 전기적 유사성 또한 Mawardi[11]에 의해 정리되었다. 하지만, 앞선 연구들은 진동부의 특성을 고려하지 않은 음향부만의 특성들에 대한 연구들이며, 트럼펫 혼의 작동 주파수를 설계할 수 없다는 한계를 지닌다.

본 논문에서는 트럼펫 혼에 인가되는 전압을 12 [V]로 설정하여 진동부는 특정 주파수로 진동하는 steady state로 가정했고, Mede *et al.*[2]의 논문을 제외하고는 모든 논문에서 주파수 도메인에서 모델링했으므로 유효한 가정이라고 간주한다. 앞서 살펴본 바와 같이, 국내외에서 FEM과 ECM을 활용하여 자동차용 경음기에 대한 모델링 연구들이 많이 진행되었고,[3-6] 혼의 음향학적 특성을 분석한 연구 또한 수행된 바 있다.[7-10] 하지만, 트럼펫 혼의 작동 주파수를 설계하는 연구는 미비한 실정이므로 본 논문에서는 트럼펫 혼의 진동부가 결정되었을 때, 쉘의 음향 리액턴스에 따른 진동부의 기계적 특성을 분석하여 작동 주파수를 설계하는 방법을 제시하고자 한다.

II. Theoretical background

2.1 Webster's horn equation

혼(horn)은 음원으로부터 효율적인 소리를 방사하기 위하여 단면적을 점진적으로 증가시킨 음향관으로, 관에서 공간으로 음이 방사될 때 점진적인 단면 변화를 통해 임피던스 매칭을 유도하기 위한 구조로 되어 있다. 혼은 방사 효율을 개선할 뿐만 아니라 높은 지향성의 원거리 음장 응답 특성을 갖도록 해주므로 널리 활용되어왔다.

이러한 혼에 대해 Webster's horn equation은 혼의 지름이 파장에 비해 작다고 가정할 때, 점진적으로 단면적이 변하는 혼을 따라 전파되는 소리에 대한 근사식으로서 Eq. (1)과 같이 주어진다.[10]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial}{\partial x}(\ln S)\frac{\partial p}{\partial x}-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}=0, \tag{1}$$

여기서 x, $p(x,t)$, $S(x)$, c, t는 음파가 진행하는 축, 혼의 단면에서 평균한 음압, 혼의 단면적, 음속, 시간을 의미한다. 혼의 종류에 따라 쌍곡선 혼, 지수 혼, 원뿔 혼, 도파관 등이 있다. 이 중 지수 혼과 도파관은 음향 임피던스의 이론 해가 알려져 있어서, 본 논문에서는 이 두 혼을 선정하였다.

2.2 Impedance

임피던스는 입력 변수(전압 또는 음압)와(전류 또는 입자 속도) 비율로 정의되고, Table 2 와 같이 다양한 물리 영역에서 정의된다.

혼 내부에서 plane wave로 가정할 수 있다면, 혼의 단면적 S에 대해 음압 p가 동일하므로 $p_{av}=p$, $q=Su$, $F=pS$가 된다. 이 경우, 아래의 식을 만족하고, 전기-기계-음향과 같이 다물리 현상을 함께 고려할 때 유용하게 사용될 수 있다. 본 논문에서는 임피던스의 허수부인 리액턴스 관점에서 설계했다.

$$Z_{ac}=\frac{p}{Su}=\frac{Z_{sp,ac}}{S}. \tag{2}$$

Table 2. Definition of the impedance in various physical domains.

	Definition	Description	Unit
Electrical impedance	$Z_{ele}=\frac{V}{I}$	Ratio of the voltage to the current in circuit	[V/A] [Ω]
Acoustic impedance	$Z_{ac}=\frac{p_{av}}{U}$	Ratio of the sound pressure averaged over that surface to the volume velocity of the fluid through the surface	[Pa·s/m^3] [N·s/m^5] [kg/(m^4·s)]
Specific acoustic impedance	$Z_{sp,ac}=\frac{p}{u}$	Ratio of the pressure at a point to the particle velocity at the point	[Pa·s/m] [N·s/m^3] [kg/(m^2·s)]
Characteristic specific acoustic impedance	$Z_0=\rho c$	Product of density of the medium and propagation speed of the medium	[Pa·s/m] [N·s/m^3] [kg/(m^2·s)] [Rayl]
Mechanical impedance	$Z_{mech}=\frac{F}{u}$	Ratio of the force acting on a specified area to the particle velocity of that area	[N·s/m] [kg/s]

$$Z_{mech} = \frac{pS}{u} = Z_{sp,ac}S. \tag{3}$$

2.3 Acoustic impedance of waveguide and exponential horn

도파관 입구와 개구부에서의 음향 임피던스는 각각 Z_t, Z_m이라고 할 때, 두 음향 임피던스 사이의 관계식은 Webster's horn equation에서 유도된 Eq. (4)로 나타낼 수 있다.[10]

$$Z_t = \frac{\rho c}{S}\frac{SZ_m\cos(kL) + j\rho c\sin(kL)}{jSZ_m\sin(kL) + \rho c\cos(kL)}, \tag{4}$$

여기서 ρ, k, c, S, L은 매질의 밀도, 파수, 매질의 전달 속도, 도파관의 단면적, 도파관의 길이를 나타낸다.

지수 혼은 중심축 상의 거리 x에 따라 단면적 $S(x)$가 지수적으로 변화하는 혼으로 정의되고, 차단주파수 이상에서 주파수 응답 특성이 평탄하다는 특징이 있다. Eq. (5)에서 계수 m을 나팔 상수라고 하고, 나팔 상수가 클수록 단면적이 빨리 넓어지는 혼을 의미한다.

$$S(x) = S_t e^{mx}, \tag{5}$$

여기서 S_t는 지수 혼의 입구에서의 단면적을 의미한다. 지수 혼의 입구와 개구부에서의 음향 임피던스는 각각 Z_t, Z_m이라고 할 때, 두 음향 임피던스 사이의 관계식은 Eq. (6)로 나타낼 수 있다.[10]

$$Z_t = \frac{\rho c}{S_t}\frac{S_m Z_m\cos(bL+\theta) + j\rho c\sin(bL)}{jS_m Z_m\sin(bL) + \rho c\cos(bL-\theta)}, \tag{6}$$

여기서 $\theta = \tan^{-1}(a/b)$, $a = m/2$, $b = \frac{1}{2}\sqrt{4k^2 - m^2}$.

지수 혼과 도파관이 결합된 혼에 대해서 음향 임피던스를 계산할 수 있으므로 진동부의 기계적 특성을 반영하여 목표하는 작동 주파수가 되도록 설계하고자 한다. 지수 혼 입구의 음향 임피던스를 다음 절에서 제시하는 과정에 따라 COMSOL로 계산한 뒤, Eqs. (4)와 (6)에 대입하여 확인하는 계산 과정을 부록에 제시하였다.

III. Design method

본 논문에서는 Fig. 2와 같이 진동부가 결정되었을 때, x_2에서의 음향 리액턴스를 변화시켜가며 x_1에서의 속도가 최대가 되는 주파수를 찾고자 했다. 속도가 최대가 되는 주파수에서 아마추어의 기계 리액턴스가 0이 되어 시스템의 공진이 발생할 것이라 가정했다. 이후, Fig. 3과 같이 목표로 하는 x_2에서의 음향 리액턴스를 가지도록 음향부의 혼을 설계했다.

본 논문에서 진행한 유한 요소 수치 해석은 모두 COMSOL Multiphysics 6.0(COMSOL, Inc., Burlington, MA, USA)을 이용해서 수행했으며, 2D 축대칭 모델은 3D CAD 모델에서 추출했다. 해석 시 경계 조건

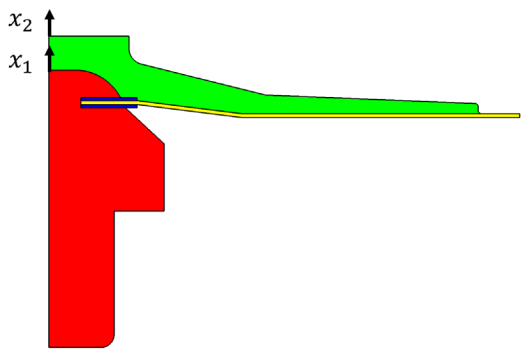

Fig. 2. (Color available online) Configuration of vibration parts; armature (red), diaphragm (yellow), acoustic domain (green), rivet washer (blue).

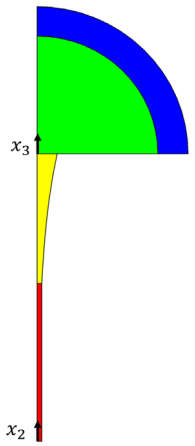

Fig. 3. (Color available online) Configuration of acoustic parts; waveguide (red), exponential horn (yellow), acoustic domain (green), perfect matching layer (blue).

Table 3. Material properties used in the simulation.

Material	Density [kg/m^3]	Young's modulus [Pa]	Poisson's ratio
Diaphragm	7,650	278.8e9	0.25
Armature	7,570	200e9	0.25
Rivet washer	7,480	200e9	0.25

은 Fig. 2에서 다이어프램의 끝부분을 고정단으로 설정하였고, 아마추어는 x_1 축으로 진동하도록 힘을 인가하였다. 음향부 혼의 기하 형상은 INFAC 혼 시스템 사의 혼을 분석한 결과, 도파관 영역과 개구부로 갈수록 면적이 점진적으로 넓어지는 영역으로 구분할 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 음향부 혼의 기하 형상을 Fig. 3과 같이 도파관과 지수 혼이 결합된 혼으로 사용하였다. Fig. 3에서 지수 혼의 개구부 주변의 경계 조건은 soft boundary로 설정하였다. hard boundary로 설정할 경우, 유효 길이가 길어지는 효과가 생겨 음향 임피던스의 특성이 바뀌게 된다.[12,13] 시뮬레이션 상에서 공기의 밀도와 음속은 각각 1.2 [kg/m^3], 343 [m/s]를 설정했고, 물성치는 아래의 Table 3과 같다. Endevco - 2302 - Modal hammer를 활용한 모달 실험에서 공진 주파수는 351 [Hz]로 측정되었으나, 음압 실험에서 작동 주파수가 370 [Hz]로 측정되었다. 이러한 차이는 바디 내부의 공기 스프링 효과와 점간극의 스프링 강성에 기인하는 것으로[4] COMSOL 모델링 시 다이어프램의 강성을 증가시켜 동일한 기계적 특성을 갖도록 모델링했다. 트럼펫 혼은 아마추어의 위치에 따라 스위치의 on/off가 결정되므로 작동 주파수는 아마추어와 다이어프램의 진동 특성과 밀접한 관련이 있다.

Fig. 2의 x_2에서의 음향 리액턴스를 변화시켜 아마추어의 속도가 최대로 되는 주파수를 찾고자 했다. 아마추어의 속도가 최대가 될 때, 아마추어에서의 기계 리액턴스가 0에 가까워져 시스템에서 공진이 발생한다. Fig. 4는 음향 리액턴스를 양수로 파라미터 스윕한 결과이며, Fig. 5는 음수로 파라미터 스윕한 결과이다. Fig. 4와 Fig. 5의 그래프에서 x축은 주파수를, y축은 음향 리액턴스를, z축은 $\log_{10}(|v_1|)$를 나타낸다. 여기서 v_1은 아마추어의 속도이다. 수치 해석 시 CPU는 Intel® Xeon® Processor E5-2687W v2를, RAM은 256 [GB] 사양의 PC를 활용하였다. Fig.

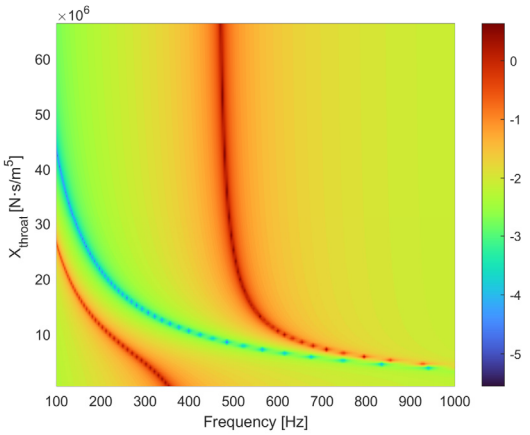

Fig. 4. (Color available online) 2-dimensional contour plot of center velocity at armature; positive acoustic reactance case.

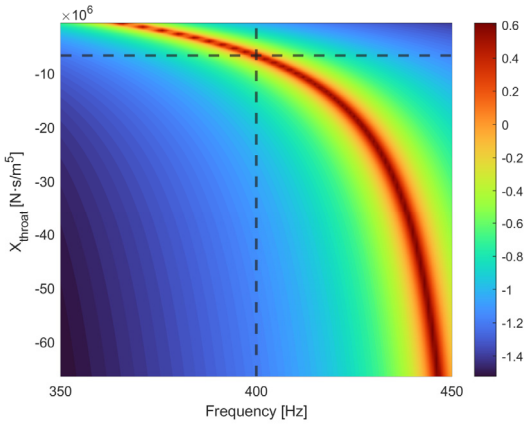

Fig. 5. (Color available online) 2-dimensional contour plot of center velocity at armature; negative acoustic reactance case.

4와 Fig. 5의 결과를 얻고자 각각 2 h 51 min 48 s, 45 min 48 s의 계산 시간이 소요되었다. 동등한 ECM으로 만들 경우, 다소 정확도는 떨어지나 1 min 내로 contour 그래프를 계산할 수 있었다.

Figs. 4와 5에서 붉은색으로 표시된 부분이 아마추어의 속도가 최대가 되는 지점들을 의미한다. 가령 400 [Hz]의 작동 주파수를 갖도록 설계하고자 하는 경우, Fig. 5의 점선과 같이 도파관의 입구 음향 리액턴스가 -6.64×10^6 [N·s/m^5]가 되도록 한다. COMSOL의 최적화 기능을 활용하여 음향 리액턴스를 만족하도록 혼의 기하 구조(도파관의 길이, 지수 혼의 길이, 지수 혼의 나팔관 상수)를 결정했고, Eqs. (4)와 (6)을 통해 재확인하였다. 설계된 혼의 SPL은 Fig. 6과 같

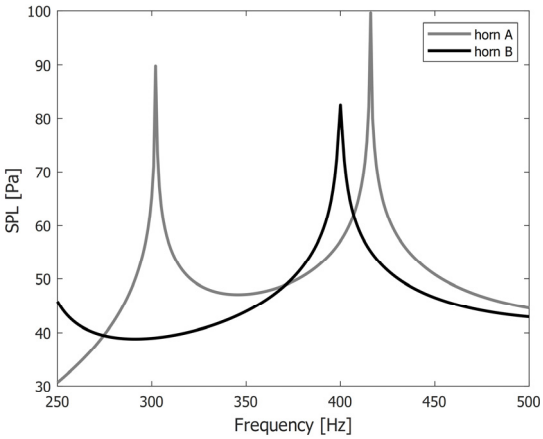

Fig. 6. SPL at 1 [m] from mouth calculated by COMSOL FEM; horn A (gray), horn B (black).

고, 혼 A는 302 [Hz], 혼 B는 400 [Hz]에서 공진이 발생하는 것으로 계산되었다. 혼 A는 지수 혼으로만 구성되었고, 지수 혼 길이와 나팔관 상수는 각각 0.3275 [m], 6.5593과 같다. 혼 B의 도파관 길이, 지수 혼 길이, 나팔관 상수는 각각 0.21438 [m], 0.176 [m], 16.464과 같다.

IV. Experimental results

4.1 Impedance tube 실험

자동차용 경음기 설계를 위해 음향 임피던스를 측정한 선행 연구들이 다수 있고,[5,6] 설계된 혼 B에 대해 모델의 정합성을 확인하고자 음향 임피던스를 측정했다. 실험에 사용된 장비는 아래와 같다.

- 임피던스 튜브 반지름 6.25 [mm], 길이 270 [mm]
- Brüel & Kjær pressure-field 1/2" microphone type 4192
- Brüel & Kjær 1/2" microphone preamplifier type 2669-L
- Brüel & Kjær NEXUS conditioning amplifier type 2690
- SR785 Dynamic Signal Analyzer
- semi-anechoic chamber 3 [m] × 3 [m] × 2 [m]

음향 임피던스 튜브의 구조와 실물은 각각 Fig. 7과 Fig. 8과 같다. 임피던스 튜브 내부에는 plane wave가 형성되어야 하므로 3 [kHz]까지 측정한다고 가정할 때, 임피던스 튜브의 반지름 r_{tube}, 임피던스 튜브의 길이 l_{tube}, 마이크로폰 사이의 거리 s는 아래의 조

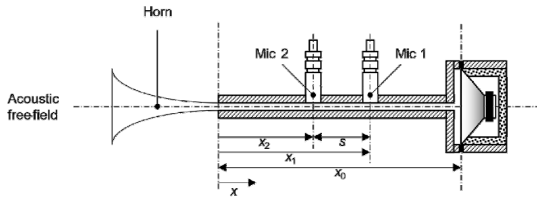

Fig. 7. Schematic diagram of impedance tube.

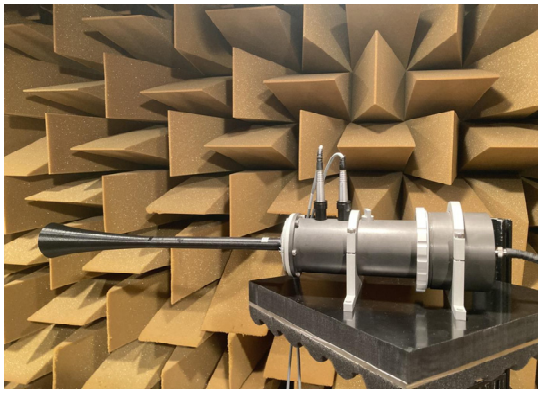

Fig. 8. (Color available online) Experiment setup of impedance tube.

건을 만족해야 한다.[14]

$$r_{tube} < \frac{0.58c_0}{2f_u} = \frac{0.58 \times 343\,[m/s]}{2 \times 3\,[\mathrm{kHz}]} \approx 33\,[\mathrm{mm}]. \quad (7)$$

$$l_{tube} > 4r_{tube} = 132\,[\mathrm{mm}]. \quad (8)$$

$$s < \frac{0.45c_0}{f_u} = \frac{0.45 \times 343\,[m/s]}{3\,[\mathrm{kHz}]} \approx 51\,[\mathrm{mm}]. \quad (9)$$

설계와 측정을 위한 이론은 ISO 10534-2에 근거하였고, normal incident complex reflection과 음향 특성 임피던스는 Eq. (10)과 같다.[14] 2.2절에 살펴본 바와 같이 plane wave로 가정하여 음향 임피던스를 계산하였다.

$$r = \frac{H_{12} - e^{-ik_0 s}}{e^{ik_0 s} - H_{12}} e^{2ik_0 x_1}, \quad Z = \rho c_0 \frac{1+r}{1-r}, \quad (10)$$

여기서 H_{12}, k_0, s, x_1은 각각 Mic 1과 Mic 2에서 측정된 음압 사이의 전달 함수, 파수, 마이크로폰 사이의 거리, 임피던스 튜브의 출구에서 Mic 1까지의 변위 (Fig. 7 참고)를 의미한다.

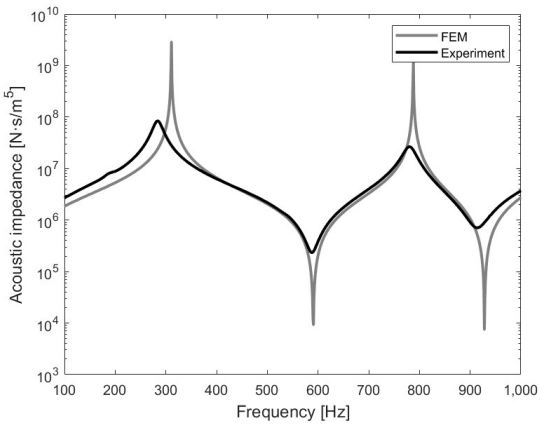

Fig. 9. Acoustic impedance at throat of designed horn; 2D-axisymmetric FEM result (gray), Experiment result (black).

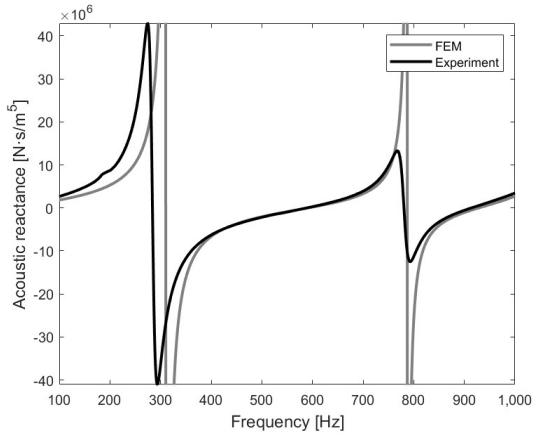

Fig. 10. Acoustic reactance at throat of designed horn; 2D-axisymmetric FEM result (gray), Experiment result (black).

혼 B에 대한 COMSOL의 시뮬레이션 결과와 임피던스 튜브 실험에서 측정한 음향 임피던스는 Fig. 9과 같이 서로 유사함을 확인했다. 실제 환경에는 감쇠 영향이 존재하지만, 유한 요소 해석에는 감쇠 영향을 포함하지 않았기 때문에 정점과 골짜기에서 급격하게 변화하였다. 3.1절에서 도파관의 입구 음향 리액턴스가 -6.64×10^6 [N·s/m^5]가 되도록 목표를 삼았고, Fig. 10에서 볼 수 있듯이 설계된 혼의 입구 음향 리액턴스는 -6.28×10^6 [N·s/m^5]로 측정되었다.

4.2 SPL 측정 실험

예측한 공진 주파수가 발생하는지 두 가지 혼에 대해 음압을 측정하여 FEM 결과와 비교했다. 홀더의 영향은 해석에서 고려하지 않았으므로 실험 시에도 동일하게 홀더를 제외하고 음압을 측정했다. 실험 장비는 4.1 절과 동일하고, 전원 공급을 위하여 Keysight사의 Autoranging DC Power Supply E36231A를 사용하였다. 실험 셋팅은 Fig. 11과 같이 구성하여 32 [kg] 석정반에 트럼펫 혼을 고정하였고, DC 12 [V]를 인가하여 1 [m] 거리에서 마이크로폰으로 음압을 측정하였다. Fig. 6과 Fig. 12에서의 결과를 Table 4와 같이 정리할 수 있고, 상대오차 1 [%] 미만으로 예측할 수 있었다. 샘플들 간의 오차도 있었으나, 수 [Hz]의 오차 범위를 벗어나지 않았다.

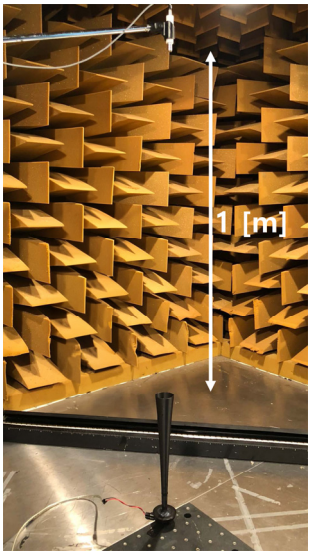

Fig. 11. (Color available online) Experiment setup for measuring SPL.

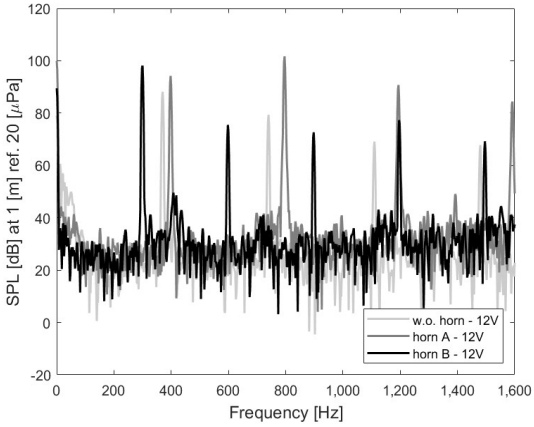

Fig. 12. SPL at 1 [m] from mouth measured by microphone; without horn (light gray), horn A (gray), horn B (black).

Table 4. Operating frequency of the designed horn system applied at 12 [V].

Type	Operating frequency [Hz]		Relative error [%]
	Simulation results	Experiment results	
w.o. horn	370	370	0
horn A	302	300	0.67
horn B	400	398	0.50

V. 결 론

본 논문에서는 트럼펫 혼에 인가되는 전압을 12 [V]로 가정했을 때, 쉘의 음향 리액턴스를 이용하여 작동 주파수를 예측하고 설계할 수 있는 방법을 제시하였다. 진동부는 작동 구간에서 특정 주파수로 진동하므로 주파수 영역 분석이 유효할 것이라 간주했고, 진동부가 결정되었을 때 음향부의 음향 리액턴스에 따른 아마추어의 속도를 분석하여 혼을 설계했다. 임피던스 튜브를 통해 원하는 작동 주파수가 되도록 하는 음향 리액턴스가 측정되는 것을 확인했고, 음압 실험을 통해 공진 주파수가 잘 예측되는 것 또한 확인했다. 두 가지 실험을 통해 모델의 유효성을 검증하였다. 본 논문에서는 혼의 음향 리액턴스 관점에서 작동 주파수 설계 방법을 살펴보았고, 혼을 포함한 트럼펫 혼 시스템을 설계할 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 2021년 인팩의 “쉘혼의 설계를 위한 등가회로 모델 및 그의 검증 기술 개발” 연구비 지원에 의한 연구임.

부 록

지수 혼 출구의 음향 임피던스를 COMSOL로 계산한 뒤, Eqs. (4)와 (6)에 대입하여 확인했고, 계산에 사용된 값은 아래와 같다.

Geometry : $R = 6.25 \times 10^{-3}\,[\mathrm{m}]$, $L_w = 0.21438\,[\mathrm{m}]$, $L_e = 0.176\,[\mathrm{m}]$, $m = 16.464$, $S = 0.1227 \times 10^{-3}\,[\mathrm{m}^2]$.

Material property : $\rho = 1.21\,[\mathrm{kg/m^3}]$, $c = 343\,[\mathrm{m/s}]$.

Wave number : $k = \dfrac{2\pi f}{c} = 7.3273\,[\mathrm{m}^{-1}]$.

여기서 R, L_w, L_e, m, S, ρ, c, k은 각각 도파관의 반지름, 도파관의 길이, 지수 혼의 길이, 나팔 상수, 도파관의 단면적, 매질의 밀도, 매질의 전달 속도, 파수를 나타낸다.

지수 혼의 입구 임피던스 $Z_{t,e}$는 Eq. (A1)과 같다. 식 (A.1)에서 $S_{t,e}$, $S_{m,e}$, $Z_{t,e}$, $Z_{m,e}$는 각각 지수 혼 입구의 단면적, 지수 혼 출구의 단면적, 지수 혼 입구의 음향 임피던스, 지수 혼 출구의 음향 임피던스를 나타낸다.

$$Z_{t,e} = \frac{\rho c}{S_{t,e}} \frac{S_{m,e} Z_{m,e} \cos(bL_e + \theta) + j\rho c \sin(bL_e)}{jS_{m,e} Z_{m,e} \sin(bL_e) + \rho c \cos(bL_e - \theta)}, \quad \text{(A1)}$$

여기서 $\theta = \tan^{-1}(a/b)$, $a = m/2 = 8.232$, $b = \frac{1}{2}\sqrt{4k^2 - m^2} = 3.7518j = jb'$ 이지만, b가 허수이므로 Eqs. (A2) ~ (A4) 관계식을 활용한다.

$$\tan^{-1} jA = \frac{1}{2} j[\ln(1+A) - \ln(1-A)]. \quad \text{(A2)}$$

$$\cos(A \pm jB) = \cos A \cosh B \mp j \sin A \sinh B. \quad \text{(A3)}$$

$$\sin jA = j \sinh A. \quad \text{(A4)}$$

Eqs. (A2) ~ (A4)를 Eq. (A1)에 대입하면, 지수 혼의 입구 임피던스는 Eq. (A5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{t,e} &= \frac{\rho c}{S_{t,e}} \frac{S_{m,e} Z_{m,e} A' - \rho c \sinh(b' L_e)}{-S_{m,e} Z_{m,e} \sinh(b' L_e) + \rho c B'} \\ &= \frac{1.21 \times 343}{0.1227 \times 10^{-3}} \frac{-288.679 - j3.661 \times 10^{-3}}{-15.349 \times 10^{-3} + j567.284} \\ &= 24.743 + j1.721 \times 10^6\,[\mathrm{N \cdot s/m^5}], \end{aligned} \quad \text{(A5)}$$

여기서

$A' = \cos\theta \cosh b' L_e - j \sin\theta \sinh b' L_e$,

$B' = \cos\theta \cosh b' L_e + j \sin\theta \sinh b' L_e$이다.

도파관의 입구 임피던스 $Z_{t,w}$는 Eq. (A6)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{t,w} &= \frac{\rho c}{S}\frac{SZ_{m,w}\cos(kL_w)+j\rho c\sin(kL_w)}{jSZ_{m,w}\sin(kL_w)+\rho c\cos(kL_w)} \\ &= \frac{1.21\times 343}{0.1227\times 10^{-3}}\frac{-0.111\times 10^{-6}+j0.415\times 10^{3}}{-211.215+j3.037\times 10^{-3}} \\ &= 95.536-j6.645\times 10^{6}\ [\mathrm{N\cdot s/m^5}]. \end{aligned} \tag{A6}$$

이 때, Eq. (A6)에서 지수 혼의 입구와 도파관의 출구는 서로 맞닿아 있으므로 $Z_{t,e}=Z_{m,w}, S_{t,e}=S$을 만족한다. 따라서, 혼 입구에서의 음향 리액턴스가 -6.64510^6 [N·s/m^5]로 계산되므로 Eqs. (4)와 (6)을 통해 음향 리액턴스를 재확인했다.

References

1. ECOSOC, “Uniform provisions concerning the approval of audible warning devices and of motor vehicles with regard to their audible warning signals,” UN (2018).
2. C. Medè, A. Doria, P. Munaretto, and J. SG Valdecasas, “Multi-physics phenomena influencing the performance of the car horn,” J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control. **38**, 544-557 (2019).
3. J.-W. Mo and H.-B. Cha, “Development of shell-type horn for automobiles” (in Korean), Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng. **2**, 92-95 (1992).
4. K.-H. Rim, S.-T. Park, C.-H. An, S.-K. Choi, and D.-W. Yoo, “Analysis of vibration and acoustic characteristics for a shell horn in a car” (in Korean), In Proc. Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng. Conf. 573-574 (2009).
5. G. Lemaitre, B. Letinturier, and B. Gazengel, “Model and estimation method for predicting the sound radiated by a horn loudspeaker-with application to a car horn,” Appl. Acoust. **69**, 47-59 (2008).
6. J. S. Sa and S.-T. Park, “A study on the acoustic modeling of horn - analysis and design of acoustic horn” (in Korean), rans. Korean Soc. Noise Vib. Eng. **24**, 537-548 (2014).
7. E. Bängtsson, D. Noreland, and M. Berggren, “Shape optimization of an acoustic horn,” Comput. Methods Appl. Mech. Eng. **192**, 533-1571 (2003).
8. H.-S. Kang, T. Shin, S.-K. Lee, and D. C. Park, “Design optimization of a dual-shell car horn for improved sound quality based on numerical and experimental methods,” Appl. Acoust. **90**, 160-170 (2015).
9. P. Bonfiglio and F. Pompoli, “A numerical approach for the analysis of car snail horn performance,” Noise Control Eng. J. **65**, 147-157 (2017).
10. H. F. Olson, *Elements of Acoustical Engineering*, (D. van Nostrand, Princeton, 1957), pp. 100-110.
11. O. K. Mawardi, “Generalized solutions of webster’s horn theory,” J. Acoust. Soc. Am. **21**, 323-330 (1949).
12. D. T. Blackstock, “Fundamentals of physical acoustics,” J. Acoust. Soc. Am. **109**, 1274-1276 (2001).
13. T. H. Hodgson and R. L. Underwood, “BEM computations of a finite-length acoustic horn and comparison with experiment,” WIT Trans. Built Environ. **25**, 213-222 (1997).
14. ISO 10534-2:1998, *Acoustics —Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes —Part 2: Transfer-function method*, 1998.

저자 약력

▸ 이 준 수 (Junsu Lee)

2018년 8월 : POSTECH 기계공학과 학사
2020년 8월 : POSTECH 기계공학과 석사
2020년 9월 ~ 현재 : POSTECH 기계공학과 박사과정

▸ 김 웅 지 (Woongji Kim)

2010년 2월 : 경희대학교 기계공학과 학사
2012년 8월 : POSTECH 기계공학과 석사
2012년 8월 ~ 2016년 10월 : 대우조선해양
2019년 8월 ~ 현재 : POSTECH 기계공학과 박사과정

▸ 김 대 현 (Daehuun Kim)

1997년 8월 : 부산대학교 기계공학과 학사
1999년 8월 : 연세대학교 기계공학과 석사
1999년 9월 ~ 2009년 3월 : 유니슨
2009년 6월 ~ 2015년 11월 : 삼성중공업
2016년 10월 ~ 현재 : 인팩혼시스템 혼설계실 책임 매니저

▸ 유 동 욱 (Dongwook Yoo)

2002년 2월 : 호서대학교 전기과 학사
2004년 2월 : 호서대학교 첨단기술 석사
2004년 3월 ~ 2008년 5월 : ㈜에이디티
2008년 6월 ~ 현재 : 인팩혼시스템 혼설계실 책임 매니저

▸ **문 원 규** (Wonkyu Moon)

1984년 2월 : 서울대학교 기계공학과 학사
1986년 2월 : KAIST 기계공학과 석사
1986년 1월 ~ 1990년 7월 : 한국원자력연구소
1995년 12월 : The University of Texas at Austin 기계공학과 박사
1996년 1월 ~ 1998년 2월 : 삼성종합기술원
1998년 2월 ~ 현재 : POSTECH 교수