높은 음압에서의 내부 확장관형 음향 공명기의 설계를 위한 실험적 음향 임피던스 모델

An Empirical Acoustic Impedance Model for the Design of Acoustic Resonator with Extended Neck at a High Pressure Environment

박 순 홍[†] · 서 상 현*

Soon-Hong Park and Sang-Hyun Seo

(Received August 24, 2012 ; Revised November 2, 2012 ; Accepted November 2, 2012)

Key Words : Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공명기), Acoustic Resonator(음향 공명기), High Pressure Environment(높은 음압 환경), Acoustic Impedance(음향 임피던스), Launch Vehicle(발사체)

ABSTRACT

An empirical acoustic impedance model of acoustic resonators with extended neck at a high sound pressure environment is proposed. The acoustic resonator with extended neck into its cavity is appropriate for the launcher fairing application because the length of neck does not increase the total height of the resonator. This enables one to design slim and light acoustic resonators for launch vehicles. The suggested acoustic impedance model considers the incident pressure and geometric variables(the neck length, the perforation ratio and the hole diameter) in terms of non-dimensional variables. Several acoustic resonators with extended neck are manufactured and their wall impedances are measured according to the pre-defined incident pressure levels. Effects of non-dimensional variables on the non-linear acoustic impedance are investigated so that a simple non-linear impedance model for the launcher fairing application can be proposed. It is demonstrated that the estimated acoustic resistance and acoustic length correction show reasonable agreement with the measured ones within the range of design parameters for launcher fairings.

1. 서 론

위성 발사체 페이로드 페어링(payload fairing) 내부의 저주파수 음향 하중을 저감하기 위해 음향 공명기(acoustic resonator) 배열을 이용하려는 노력이 국내외에서 시도된 바 있다⁽¹⁻³⁾. 위성 발사체용 음향 공명기의 설계를 위해서는 다음과 같은 점이 반드시 고려되어야 한다.

먼저, 130 dB 이상의 높은 입사 음압 환경에서 작동하여야 하므로 작동 음압 환경에서의 음향 임피던스의 변화를 고려하여야 한다. 형상 측면에서 보면, 페어링 내부 유효 체적을 최대로 하기 위해 가능하면 낮은 높이를 가지는 형상이 요구된다(일반적으로 높이가 100 mm 내외임.). 그리고, 경량화를 위해 얇게 제작하여야 하므로 음향 공명기 구조의 진동에 의해 목표한 음향 공명 특성이 변화하지 않도록 설계하는 것도 필요하다. 특히, 100 Hz 부근의

[†] Corresponding Author ; Member, Korea Aerospace Research Institute
E-mail : shpark@kari.re.kr
Tel : +82-42-860-2093, Fax : +82-42-860-2233
* Member, Korea Aerospace Research Institute

[‡] Recommended by Editor Jin Oh Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

저주파수 흡음을 위해서는 음향 공명기의 목의 면적을 감소시키거나, 목의 길이 또는 체적을 증가시켜야 하는데, 목의 면적이 작아지면 음향 레지스턴스가 크게 증가하여 흡음 성능이 감소하므로 목의 길이 또는 체적을 증가시켜 공명주파수를 낮추어야 한다. 높은 음압에서의 비선형 음향 임피던스 특성이 비교적 알려진 천공판(orifice plate)형상^(4,5)은 목 길이의 증가에 따라 판 두께도 크게 증가하므로 가용 체적이 감소하며, 중량도 크게 증가하는 단점이 있다. 또한 목이 공동 외부로 돌출된 공명기는 높이의 제한으로 목의 길이를 증가시키는데 한계가 있다. 따라서, 페이로드 페어링에 적용되는 공명기 형상은 Fig. 1과 같이 공명기의 목을 공동 내부로 확장한 형태(resonator with extended neck)가 바람직하다. 이와 같은 공동 내부 확장관형 공명기를 다룬 기존 문헌들^(6,7)은 목의 형상 변화에 따른 공명주파수의 예측, 즉 낮은 음압에서의 음향 리액턴스(acoustic reactance)에만 관심을 두고 있다. 높은 음압에서의 음향 공동의 소음 제어를 위해서는 흡음 성능을 좌우하는 음향 레지스턴스(acoustic resistance)특성의 파악이 필수적이며⁽¹⁾, 정확한 공명주파수 예측을 위해 음향 리액턴스의 변화도 고려되어야 한다.

이 논문에서는 높은 음압 환경에 있는 위성 발사체 페어링 내부의 저주파 소음 저감을 위한 내부 확장관형 음향 공명기의(Fig. 1) 비선형 음향 임피던스 모델을 제안하였다. 높은 음압에서의 비선형 음향 임피던스 모델을 위해 음향 공명기 표면에서의 입사 음압(indicent pressure)을 포함하여, 공명기 형상 설계 인자들에 대해 차원 해석법(dimensional analysis)⁽⁸⁾을 적용하여 무차원 변수를 도출하고, 음향 임피던스 측정을 통해 음향 레지스턴스 및 음향 보정 길이에 대한 실험식을 제안하였다. 제안된 비선형 음향 레지스턴스는 실제

설계치 범위인 공극률 2~4%에서 약 20% 내의 실용적 오차 허용 범위 내로 레지스턴스를 예측하고 있다. 또한 음향 보정 길이식(acoustic length correction)도 10% 내의 오차 범위(공명주파수는 약 2% 이내의 오차 범위)에서 예측할 수 있었다.

2. 내부 확장관형 공명기의 제작 및 비선형 음향 임피던스 측정

내부 확장관형 공명기의 목의 직경을 d , 길이를 l_N , 공명기의 높이를 D , 정사각형 단면의 한 변의 길이를 a 로 표기하자. 이때 공극률(perforation ratio, PR or σ)은 $\sigma = \pi d^2 / 4a^2$ 으로 정의된다(Fig. 1). 음향 공명기를 발사체에 적용하기 위해서는 가능하면 가볍게 제작하여야 하는데, 이 경우 목이 형성되는 판넬이 얇아(탄소 섬유 라미네이트를 이용하여 두께 1 mm 내외로 제작) 판넬-음향 공동의 공진에 의해 음향 공명에 의한 흡음 성능을 감소시킬 수 있다. 따라서, 굽힘 강성을 증가시킬 수 있도록 판넬에 리브(rib)를 추가한 형태의 공명기 판넬을 제작하였다. 리브로 보강된 실물형 크기의 공명기 판넬(420×420 mm²)은 유한요소 해석을 수행하여, 판넬 진동에 의한 공진이 공명기의 음향 공진(70~150 Hz 목표)보다 2배 이상 높음(352 Hz)을 확인하였다(리브가 없는 경우는 50 Hz). 이 경우 판넬 진동이 헬름홀츠 공명의 흡음 특성에 미치는 영향은 미미할 것으로 예상되었다.

공명기의 가진 음압이 증가함에 따라 변화하는 비선형 음향 임피던스를 파악하여 설계에 반영하기 위해 다양한 목 직경 및 목 길이를 가지는 공동 내부 확장관형 공명기를 제작하고, 임피던스 측정을 통해 설계 모델을 제시하고자 하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 공명기의 단면 크기는 260×260 mm², 전체 높이는 100 mm로 고정하고, 4종의 목 반경 20 mm, 26 mm, 33 mm, 40 mm(각각 공극률로 1.86 %, 3.14 %, 5.06 %, 7.43 %)에 대해 무차원 변수를 고려하여 목 반경 별로 최대 5종의 목 길이를 가지는 내부 확장관형 공명기를 제작하였다. 여기서, 목의 직경 및 길이는 차원 해석을 통해 고음압에서의 임피던스의 실험적 모델링을 수행할 수 있도록 하였다. 즉, 고정된 공극률에서 l_N/d 의 변화 및 고정된 l_N/d 에서의 공극률의 변화에 따른 임피던스

Fig. 1 Helmholtz resonator with extended neck

변화를 볼 수 있도록 치수를 결정하였다.

제작한 시편들에 대해 가진 음압을 증가시켜가면서 임피던스 튜브를 이용하여 음압의 변화에 따른 임피던스를 측정하였다. 임피던스 튜브의 단면은 공명기 단면과 동일한 크기로 제작하였으며, 2개의 마이크로폰을 이용⁽⁹⁾하여 공명기 표면에서의 평균 임피던스를 측정하였다. 가진 음압은 5단계로 나누어 가진하였는데, 입사 음압(incident pressure, p_i)을 정의하기 위해 실험 전 보정 실험 단계에서 마이크로폰이 표면에 삽입된 아크릴 후판을 임피던스 튜브 끝단에 부착하고 파워 앰프의 입력 전압과 이에 해당하는 가진 음압을 기록하였다. 여기서 측정된 가진 음압은 입사 음압의 2배에 해당하는 값(blocked pressure)으로서 튜브 끝단에 설치되는 음향 공명기의 유무 및 형상 변화 등에 관계없는 값이다. 이후 음향 공명기를 임피던스 튜브 끝단에 설치한 후, 정의된 가진 레벨을 이용하여 음향 임피던스를 계측할 수 있었다. 가장 낮은 가진 레벨로부터 6 dB씩 증가시키면서 약 24 dB까지 증가시켰다. 목표 공명주파수를 대부분 포함하는 100 Hz-1/3 옥타브 대역 음압은 가장 낮은 레벨일 때 125 dB이었으며, 가장 높은

가진 레벨일 때 148 dB로서 위성 발사체 페어링 내부의 음압 수준을 충분히 포함할 수 있도록 하였다.

3. 내부 확장관형 공명기의 비선형 음향 임피던스 모델

3.1 비선형 음향 레지스턴스 모델

측정 결과를 이용하여 내부 확장관형 공명기 설계를 위한 실험적인 비선형 음향 임피던스 모델을 제시하였다. 높은 음압에서의 공명기 표면 임피던스(wall impedance, Z_{nl})를

$$Z_{nl} = R_{nl} + X_{nl} \quad (1)$$

와 같이 레지스턴스 (R_{nl})와 리액턴스 (X_{nl})로 나누어 표현하면, 레지스턴스는 음압이 낮은 경우의 선형 레지스턴스 (R_l)와 음압의 증가에 의해 더해지는 비선형 레지스턴스의 증분(ΔR_{nl})으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{nl} = R_l + \Delta R_{nl} \quad (2)$$

여기서, 비선형 레지스턴스의 증분은 실험적으로 모델링 할 수 있는데, Buckingham Pi theorem⁽⁸⁾에 의해 다음과 같은 무차원수의 함수로 표현 가능하다.

$$\frac{\Delta R_{nl}}{\rho_0 c_0} = f\left(\frac{d}{l_N}, \frac{d}{a}, \frac{u_0}{c_0}\right) \quad (3)$$

여기서, ρ_0 는 공기의 밀도, c_0 는 음속을 나타내며, u_0 는 공명기 목에서의 입자 속도를 표현한다. 입자 속도 u_0 (rms)는 입사 음압 p_i (rms)과 식 (4)와 같은 관계가 있다.

$$\frac{u_0}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma}{1 - \sigma^2} \times \left(\sqrt{0.25 + \frac{2\sqrt{2} p_i}{\rho_0 c_0^2} \frac{1 - \sigma^2}{\sigma}} - 0.5 \right) \quad (4)$$

식 (4)는 높은 음압 영역에서 음압과 입자 속도가 선형 관계에 있지 않은 경우, 목에서의 입자 속도를 베르누이의 법칙(Bernoulli's law)을 이용하여 구하고, 공명기 표면에서의 입사 음압과의 관계를 등가 음향 회로(equivalent acoustic circuit)를 이용하면 구해낼 수 있다⁽¹⁰⁾.

Table 1 Dimensional parameters of Helmholtz resonators with extended neck($a=260$ mm, $D=100$ mm)

	d (mm)	l_N (mm)	l_N/d	PR
HR_R20L024	40	24.3	0.61	0.0186
HR_R20L043	40	42.6	1.07	0.0186
HR_R20L050	40	50.0	1.25	0.0186
HR_R20L060	40	60.0	1.50	0.0186
HR_R26L024	52	23.9	0.46	0.0314
HR_R26L028	52	28.1	0.54	0.0314
HR_R26L032	52	31.7	0.61	0.0314
HR_R26L038	52	37.2	0.72	0.0314
HR_R26L055	52	55.4	1.07	0.0314
HR_R33L027	66	27.2	0.41	0.0506
HR_R33L040	66	40.3	0.61	0.0506
HR_R33L070	66	70.3	1.07	0.0506
HR_R40L049	80	48.8	0.61	0.0743
HR_R40L085	80	85.2	1.07	0.0743

한편, 목 끝단과 공동 바닥이 매우 가까운 경우라면 목 끝단에서의 토출된 유동이 직접 공동 바닥면에 부딪치면서, 복잡한 유동 현상이 추가로 발생하여 음향 레지스턴스 및 음향 보정 길이가 크게 증가하게 된다. 이 경우는 l_N/d 에 대한 복잡한 모델이 필요하게 된다. 제안된 모델은 이와 같은 점을 고려하고 있지는 않다. 위의 논의들로부터 페어링 음향 하중 저감을 위한 내부 확장관형 공명기의 비선형 음향 레지스턴스의 증분은

$$\Delta r_{nl} = C_0 \left(\frac{l_N}{d} \right)^m \sigma^n \left(\frac{u_0}{c_0} \right)^p \quad (5)$$

와 같이 간단한 형태로 모델링 할 수 있다. 여기서, $\Delta r_{nl} = \Delta R_{nl} / \rho_0 c_0$ 을 나타낸다.

각각의 시편에 대해 측정된 음향 레지스턴스 값들 중 공명주파수 부근에서의 값을 평균하고, 이를 각 무차원수에 대해 log-log 좌표계에서 최소 자승법(least-square fitting)에 의해 맞추어 직선의 기울기로 식 (5)의 지수 m , n , p 를 구하였다. 각각의 지수를 구할 때 고려하는 변수 이외의 변수들은 고정된 값으로 두었고, 그 결과를 Figs. 2~4에 나타내었다.

제한적인 설계 변수 범위 내에서, 최소 자승법에 의한 곡선 맞춤 결과를 살펴보면 공극률(Fig. 4) 및 목 내부의 입자 속도의 변화(입사 음압)(Fig. 3)에 따른 비선형 레지스턴스는 타 변수들의 변화에 무관하지만, l_N/d 의 변화에 따른 비선형 레지스턴스

(Fig. 2)는 공극률이 바뀔 때 따라 l_N/d 의 0.16승에서 0.26승까지 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 앞서 논의하였듯이, l_N/d 에 대한 좀 더 복잡한 형태의 모델이 필요할 수도 있음을 의미한다. 그러나, 이와 같은 모델을 제시하기 위해서는 매우 많은 경우들에 대한 실험을 수행하여야 하기 때문에 현실적으로는 어려움이 있다. 그리고, l_N/d 의 변화에 따른 비선형 레지스턴스의 증분값의 변화가 크지 않기 때문에 지수 m 을 주요 설계 인자가 포함되는 영역에서의 레지스턴스 예측치가 측정치에 가장 가까운 결과를 주는 값인 $m=0.21$ 로 선택하였다.

Fig. 3으로부터 공명기 목에서의 속도의 증가와 비선형 레지스턴스의 증분은 정비례하는 관계가 있음이 확인되었다. 공극률의 영향은 공극률의 약 0.8승에

Fig. 3 Effects of particle velocity in the neck on the nonlinear resistance increment

Fig. 2 Effects of l_N/d on the nonlinear resistance increment

Fig. 4 Effects of perforation ratio on the nonlinear resistance increment

반비례하여 레지스턴스가 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 4 참조). 이는 공극률이 클수록 가진 음압의 증가에 따른 레지스턴스의 증가가 작음을 의미한다. 이와 같이 구한 지수들을 식 (5)에 대입하면 비례상수를 구할 수 있는데, $C_0=2.2$ 와 같다.

한편 음압이 낮은 경우의 선형 레지스턴스는 천공판(orifice plate) 형상의 경우에 다음과 같은 이론적 값⁽¹¹⁾이 있다.

$$r_l = \frac{R_l}{\rho_0 c_0} = \frac{1}{c_0 \sigma} \sqrt{8\nu\omega} \left(1 + \frac{l_N}{d} \right) \quad (6)$$

여기서, ν 는 동적 점성 계수(kinematic viscosity)이며, ω 는 각 주파수(radian frequency)를 나타낸다. 일반적으로 선형 레지스턴스 값은 음압 증가에 따른 레지스턴스 증가치보다 매우 작기 때문에 큰 오차 없이 확장관형 공명기에도 사용할 수 있다. 따라서, 높은 음압에서의 공동 내부 확장관형 공명기의 정규화된 비음향 레지스턴스(normalized specific acoustic resistance)는

$$r_{nl} = r_l + 2.2 \left(\frac{l_N}{d} \right)^{0.21} \sigma^{-0.8} \left(\frac{u_0}{c_0} \right)^{0.98} \quad (7)$$

과 같이 표현할 수 있다.

이 식을 이용하여 비선형 음향 레지스턴스를 예측해 본 결과는 Fig. 5와 같다. 먼저 공극률이 1.86 % (HR_R20L043) 및 3.14 % (HR_R26L055)인 경우는

Fig. 5 Estimation results of nonlinear acoustic resistance increment for $\sigma=1.86, 3.14$ and 5.06 % acoustic resonators with extended neck

20 % 내외의 상대 오차로 모델링이 되었으나, 공극률이 5.06 %로 큰 경우(HR_R33L070)는 120~130 dB 부근의 낮은 음압에서 상대 오차가 비교적 큼을 볼 수 있다. 그러나, 실제 페어링 내부에서 사용될 공명기의 공극률은 약 2~4 % 내외이며, 입사 음압이 130~140 dB 범위임을 고려한다면 관심 설계 범위 내에서 제안된 식을 이용하여 제안된 실험식을 이용하여 비선형 레지스턴스를 예측하는데 어려움은 없을 것으로 예상된다.

3.2 비선형 음향 리액턴스 모델

음향 공명기의 주요 설계 요소 중 공명주파수는 음향 리액턴스로부터 결정($X_{nl}=0$)할 수 있다. 천공판의 경우 비선형 리액턴스는 목의 길이에 추가되는 음향 보정 길이(acoustic length correction)의 변화로 모델링되는데⁽¹²⁾, 구멍 내의 입자속도에 반비례하는 항이 곱해져, 음압이 높을수록 공명주파수가 증가하는 현상을 표현한다. 이는 공명기 목을 질량으로 등가시킨 1자유도 진동계에서 음향 보정 길이에 해당하는 추가 질량항이 높은 입자 속도에 의해 감소하는 것을 의미한다. 따라서, 비선형 리액턴스는 목에서의 이너턴스(inertance)에서 음향 보정 길이에 변화를 주어 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$X_{nl} = j \frac{\omega \rho_0}{\sigma} (l_N + \delta_{nl}) + \frac{X_{l,cav}}{\sigma} \quad (8)$$

여기서, δ_{nl} 은 높은 음압에서의 음향 보정 길이를 나타내며, $X_{l,cav}$ 는 내부 확장관형 공명기의 컴플라이언스로서 다음 식과 같이 표현된다⁽⁷⁾.

$$X_{l,cav} = -j \sigma \rho_0 c_0 \frac{1}{k(l_c - \delta_{nl}) + (1 - \sigma)k(l_N + \delta_{nl})} \quad (9)$$

여기서, l_c 는 목 끝단과 공동 바닥 사이의 거리, 즉, $l_c = D - l_N$ 이다. 식 (9)를 식 (8)에 대입하고, $X_{nl}=0$ 의 조건을 이용하면 공명주파수($\omega = \omega_r$)를 측정하여 다음과 같이 δ_{nl} 의 측정치를 구할 수 있다.

$$\delta_{nl} = \frac{1}{2} \frac{D}{\sigma} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \left(\frac{\sigma}{D} \right)^2 \left(\frac{c_0}{\omega_r} \right)^2} \right) - l_N \quad (10)$$

낮은 미세 천공판의 경우, 높은 음압에서 음향 보정

Fig. 6 Effects of the perforation ratio on the acoustic length correction

Fig. 7 Effects of the distance between the neck end and the bottom of the cavity on the acoustic length correction

길이는 $\delta_{nl} = \delta / (1 + u_0 / \sigma c_0)$ ⁽¹²⁾와 같이 오리피스 내 입자 속도에 지배적인 영향을 받는 형태로 모델링되었고(δ : 낮은 음압에서의 보정 길이), 실험 결과를 잘 표현하였다. 그러나, 음향 공명기의 경우 구멍 면적이 상대적으로 크기 때문에 고려하는 음압 영역에서는 입자 속도가 크지 않으며, 음압에 따른 음향 보정 길이의 변화도 크게 나타나지 않았다. 이와 같은 점을 고려하면, 높은 음압에서의 음향 보정 길이를

$$\frac{\delta_{nl}}{d} = g\left(\sigma, \frac{l_c}{d}\right) = C_1 \sigma^q \left(\frac{l_c}{d}\right)^r \quad (11)$$

같이 두 개의 무차원수를 이용하여 모델링할 수 있다. 여기서, l_c 는 D 가 상수이므로 목 길이(l_N)와 동등한

Fig. 8 Estimation results of acoustic length corrections for $\sigma = 1.86, 3.14$ and 5.06 % acoustic resonators with extended neck

변수이며, 실험 설계의 편의를 위해 도입하였다. 각각의 무차원 변수의 지수 q 와 r 은 음향 레지스탕스의 경우와 마찬가지로 최소 자승법에 의한 곡선 맞춤으로 구하였다(Fig. 6 및 Fig. 7).

이들 결과로부터 높은 음압에서의 음향 보정 길이는

$$\frac{\delta_{nl}}{d} = 0.58 \sigma^{-0.08} \left(\frac{l_c}{d}\right)^{-0.17} \quad (12)$$

와 같이 표현할 수 있다.

식 (12)를 이용하여 예측한 음향 보정 길이와 측정된 음향 보정 길이는 Fig. 8에 비교하였다. 결과를 보면 약 10 % 이내의 상대 오차로 측정값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 가진 음압(목 내의 입자 속도)에 무관하게 모델링하였기 때문에, 식 (12)에 의한 예측치가 측정 결과처럼 음압이 높아짐에 따라 보정 길이가 감소하지는 않지만, 큰 오차 없이 공명주파수의 예측은 가능하다. 음향 보정 길이의 최대 오차는 약 10 % 정도 인데, 이 경우에도 공명주파수는 약 2 % 정도의 오차로 예측할 수 있기 때문에 실용적인 관점에서는 제한한 예측 모델을 유용하게 사용할 수 있다.

4. 결 론

발사체 페어링 내부의 저주파 소음 저감을 위하여 음향 공명기 어레이를 적용하는 경우, 단위 음향

공명기 형상으로 가장 적절한 형상인 내부 확장관형 음향 공명기의 설계를 위한 비선형 음향 임피던스 모델을 제안하였다. 발사체의 경우 음향 공명기가 높은 음압 환경에서 작동한다는 점을 고려하여, 음향 공명기 표면에서의 입사 음압과 공명기 목에서의 입자속도, 공극률, 목 길이 등의 형상 설계 인자를 차원 해석을 이용하여 무차원 변수로 표현하고, 가진 음압에 따른 비선형 음향 임피던스 측정치를 이용하여 비선형 음향 레지스턴스 및 음향 보정 길이에 대한 실험식을 제안하였다. 제안된 비선형 음향 레지스턴스 모델은 실제 설계 범위($\sigma=2\sim4\%$)내에서 음향 레지스턴스를 실용적인 오차 범위에서 예측하였다. 또한 음향 리액턴스로부터 유도된 음향 보정 길이식도 10% 내의 오차로 예측할 수 있어, 음향 공명기의 공명주파수를 잘 예측할 수 있음을 보였다. 제안된 비선형 음향 임피던스 모델을 이용한다면, 발사체 페어링 내부의 음향 환경에서 작동하는 음향 공명기 및 공명기 어레이의 설계가 가능하다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부 지원 “한국형발사체(KSLV-II) 개발사업”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Park, S.-H. and Seo, S.-H., 2012, Low-frequency Noise Reduction in an Enclosure by Using a Helmholtz Resonator Array, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 8, pp. 756~762.
- (2) Seo, S.-H., Park, S.-H., Jeong, H.-K. and Jang, Y.-S., 2011, Acoustic Analysis in the Payload Fairing of Launch Vehicle, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 12, pp. 1146~1151.
- (3) Troclet, B., Chemoul, B., Roux, P., Gely, D. and Elias, G., 1999, Synthesis of Vibroacoustic Studies Performed during Ariane 5 Program, 1er Colloque Europeen sur la Technologie des Lanceurs “Vibration des Lanceurs” Toulouse, France.
- (4) Ingard, U., 1953, On the Theory and Design of

Acoustic Resonators, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 25, No. 6, pp. 1037~1061.

(5) Hersh, A. S., Walker, B. E. and Celano, J. W., 2003, Helmholtz Resonator Impedance Model, Part 1: Nonlinear Behavior, AIAA Journal, Vol. 41, No. 5, pp. 795~808.

(6) Selamet, A. and Lee, I., 2003, Helmholtz Resonator with Extended Neck, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 113, No. 4, pp. 1975~1985.

(7) Kang, Z. and Ji, Z., 2008, Acoustical Length Correction of Duct Extension Into a Cylindrical Chamber, Journal of Sound and Vibration, Vol. 310, No. 4-5, pp. 782~791.

(8) Fox, R. W. and McDonald, A. T., 1985, Introduction to Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, New York, pp. 296~303.

(9) Seybert, A. F. and Ross, D. F., 1977, Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-microphone Random-excitation Technique, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1362~1370.

(10) Morse, P. M. and Ingard, K. U., 1968, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, New-York, pp. 758~760.

(11) Mechel, F. P. and Ver, I. L., 1992, Sound-absorbing Materials and Sound Absorbers, Noise and Vibration Control Engineering, edited by Beranek, L. L. and Ver., I. L., John Wiley & Sons, New-York, pp. 232~234.

(12) Maa, D.-Y., 1994, Microperforated Panel at High Sound Intensity, Proceedings of Inter-Noise 94, pp. 1511~1514.

Soon-Hong Park is B.S., M.S. and Ph.D. degrees from KAIST in 1994, 1996 and 2001, respectively. From 2001, Dr. Park has worked for Korea Aerospace Research Institute(KARI). He has experiences in acoustic protection

system design, satellite separation system design, vibro-acoustic analysis and structural vibration test for launch vehicles.