



음향블랙홀 파동 전달 특성을 이용한 굽힘진동 저감용 충돌 댐퍼

Impact Damper for Reduction of Flexural Vibrations using Wave Propagation Property of Acoustic Blackholes

성 연 옥* · 정 성 영* · 양 원 석** · 박 준 홍†

Yeonuk Seong*, Seongyoung Jeong*, Wonseok Yang** and Junhong Park†

(Received August 1, 2019 ; Revised September 17, 2019 ; Accepted September 17, 2019)

Key Words : Acoustic Blackhole(음향블랙홀), Reflection Coefficient(반사계수), Impact Damper(충돌댐퍼)

ABSTRACT

To mitigate noise radiation of home appliances in audio frequency ranges, viscoelastic damping materials with the constrained layer are widely used although their performance degrades after exposure to heat and moisture. In this study, the impact damper system incorporating acoustic black-hole structure is used to implement similar damping performance. The reflection coefficient for the proposed structure was evaluated by experimentation on the beam structure. For various beam configurations, we validated enhancement of impact damper performance when the acoustic blackhole structure was used in the beam structure. The performance was also predicted by numerical simulations for verification. The impact damper with acoustic blackhole beam showed effective damping performance in the wide frequency bands. The proposed damping system allows effective vibration and noise reduction without influence from heat exposures.

1. 서 론

가전기기 사용이 증대됨에 따라, 소음저감에 대한 필요성이 증가하고 있다. 가전기기 사용 중에 순음, 잡음 그리고 충격성 소음 등이 발생하며 거주공간에 위치함으로써 사용자에게 미치는 영향이 크다. 제작 비용 및 크기가 작고, 기기에서 발생하는 소음 및 진동을 효율적으로 저감하는 새로운 수단에 대한 필요성이 커지고 있다. 기존 가전 기기에는 주로 흡음재와 제진

재가 다양한 형태로 적용되고 있다. 이러한 수동 소자는 가전기기에서 발생하는 광대역 소음저감에 효율적이다. 최근 음향블랙홀과 제진재가 함께 적용되었을 때, 진동 저감효과가 효율적으로 증대되는 것을 보여주었다⁽¹⁾. 소재의 분자구조 특성을 이용한 신소재, 유체압을 이용한 속업서버 그리고 공진 현상을 방지하기 위한 동흡진기가 다양한 형태로 제시되고 있다⁽²⁾. 주 진동계의 주요 주파수 진동 저감에 우수한 성능을 갖는다. 새로 개발되는 가전제품이나 공장의 기계들이 가지는 특성들이 점차 복잡해지고 여러 부가 성능들

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University
E-mail : parkj@hanyang.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

** Department of Automotive Engineering, Korea National University of transportation

‡ Recommended by Editor Soo Il Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이 추가되면서 감쇠의 목적이 되는 주파수대역이 넓어지고 있다. 따라서 기존 사용된 감쇠구조보다 더 효율적인 감쇠 구조가 요구되고 있다. 아스콘과 같은 소재를 사용하면서 성능은 향상되었으나, 온도변화에 따른 경화현상으로 수명이 짧아지거나, 발암물질이 포함되는 등의 문제점들이 발생하고 있다^(3,4).

이 연구에서는 점탄성 소재 사용을 최소화하면서 효율적으로 발생하는 소음 및 진동을 감쇠 하는 방법을 제시한다. 음향블랙홀에서의 파동 전달에 의한 진동과 충돌댐퍼 간의 상호작용에 의해 진동에너지의 소산을 증대시킨다. 충돌댐퍼의 성능이 음향블랙홀에 의해 증가하는 현상을 이론 및 실험을 통해 검증하고, 점탄성 소재의 사용 없이 광대역에서 진동이 저감되는 현상을 검증한다.

2. 충돌체와 음향블랙홀의 상호충돌에 의한 진동저감

2.1 충돌 댐퍼가 있는 빔 모델링

충돌 댐퍼는 충돌체와 진동 저감이 요구되는 구조체의 상호 진동 연성에 의해 비탄성 효과로 전달되는 진동 에너지를 마찰 및 열에너지, 음향에너지로 소산 시킴으로써 진동 감쇠가 발생하게 한다. 이런 충돌댐퍼가 음향블랙홀형상을 가진 보와 충돌을 하게 되면 음향블랙홀이 없는 경우보다 더 큰 에너지 소산을 유도할 수 있다. 충돌이 일어나기 위해서는 초기 발생되는 진동의 크기가 중요하고 따라서 진동에너지가 응집되는 음향블랙홀로 인하여 충돌체에 더 큰 충돌

을 일으킬 수 있게 된다. 이를 통하여 광대역 주파수 범위에 대해 효율적인 감쇠 효과를 가져올 수 있다. 충돌댐퍼는 감쇠 효과의 극대화를 위해 주 진동계 전체 면적에 분포할 때 큰 저감효과를 가져올 수 있으나 음향블랙홀이 적용된 보의 경우 음향블랙홀 영역에만 적용하여 큰 저감효과를 가져올 수 있다. 음향블랙홀이 구성된 보의 횡방향 진동방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$EI = \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

여기서 E 는 보의 탄성계수, I 는 관성모멘트, ρ 는 보의 밀도이며 A 는 보의 단면적을 각각 나타낸다. x 와 t 는 각각 보의 진동에 대한 위치와 시간 변수를 나타낸다. w 는 보의 변위를 나타내고 다음과 같은 조화함수형태의 해를 가질 수 있다.

$$\hat{w}(x) = Ae^{-ik_0x} + Be^{ik_0x} + Ce^{\hat{k}_0x} \tag{2}$$

충돌에 대한 운동량 보존법칙은 다음과 같이 표현된다.

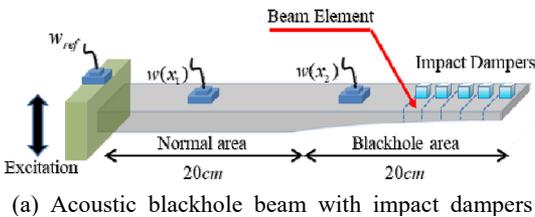
$$m\dot{v}_{i-1} + \rho A L \dot{w}_{i-1} = m\dot{v}_i + \rho A L \dot{w}_i \tag{3}$$

여기서 m 은 충돌체의 질량이며 ρ 는 주진동계의 밀도, A 는 단면적을 나타낸다. \dot{v} 와 \dot{w} 는 충돌체와 음향블랙홀이 구성된 보 요소들 각각의 충돌 속도를 각각 나타낸다. 이때 충돌체와 충돌체 지점의 빔 요소의 충돌에 의한 진동에너지 소산은 다음과 같은 반발계수로 계산된다.

$$e\dot{v}_{i-1} + e\dot{w}_{i-1} = \dot{v}_i + \dot{w}_i \tag{4}$$

여기서 e 는 충돌에 따른 반발계수를 나타내고 식 (3)과 식 (4)를 연립함으로써 충돌 전후의 속도를 계산할 수 있다.

2.2 음향블랙홀에서의 진동 전달 및 반사계수
음향블랙홀은 구조체의 단면 두께가 지수 법칙에

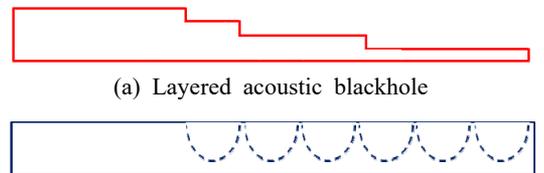


(a) Acoustic blackhole beam with impact dampers



(b) Impact mechanism between impact damper and beam element

Fig. 1 High pass filter along additional time delay



(a) Layered acoustic blackhole

(b) Spherical acoustic blackhole

Fig. 2 Two types of blackholes

따라 감소하면서 진행파가 반사되지 않도록 설계된 구조이다. 음향블랙홀 형상에 대한 지수 법칙은 다음과 같이 나타낸다⁽⁵⁾.

$$t(x) = \epsilon x^n \tag{5}$$

여기서 x 는 보의 길이 방향 좌표를 나타내고 따라서 나타내어진다. 보의 한 쪽에서 가진 되어 발생한 진동파는 전달되면서 단면이 변화하는 형상 부분에서 반사되지 않고 길이 방향으로 계속 진행하게 되고 주파수 별 진동에너지가 누적되어 한 방향으로 영구적인 진행을 하는 구조이다. 결국 진동체의 끝에서 두께가 0이 되는 경우 최종적으로 진동이 반사되지 않고 한곳에 응집이 된다. 그러나 두께가 매우 작은 구조물은 제작에 한계가 있어서, 진동에너지는 다시 반사되어 나오게 된다. 음향블랙홀의 이런 단점을 보완하기 위해, 음향블랙홀에 제진재를 추가하여 진동을 감쇠하는 연구가 있다⁽⁶⁾. 이 연구에서는 충돌 댐퍼를 이용하여

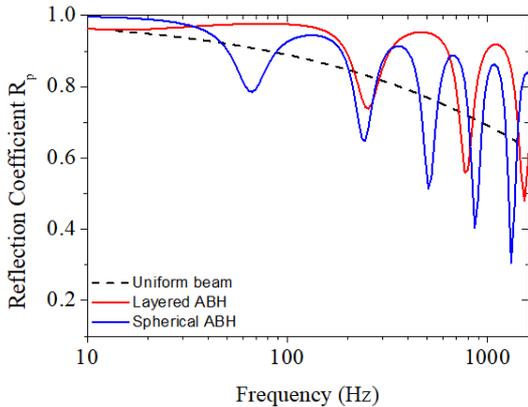


Fig. 3 Reflection coefficients for various beam shape

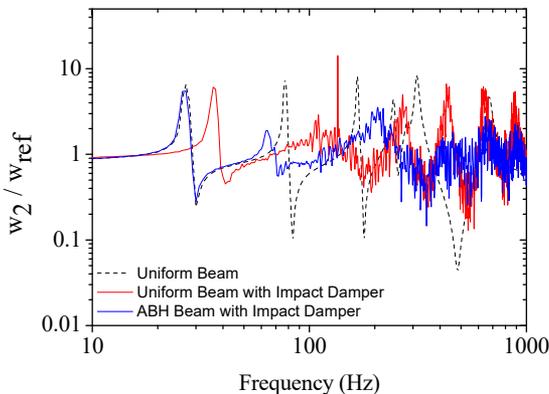


Fig. 4 Calculated transfer functions depending on whether or not impact dampers attached

감쇠 요소를 적용시킴으로써 진동 저감을 효율적으로 향상 시키고자 한다. 음향블랙홀 형상의 빔에서 진동이 반사되는 정도를 나타내는 지표인 반사 계수를 구하고 이를 통해 특정 형상에 따른 진동의 응집 정도를 구할 수 있다. Fig. 1은 반사 계수를 구하기 위한 수학적 모델을 적용하기 위해 전체 길이 0.36 m를 가지고 동시에 0.18 m 지점부터 블랙홀 형상을 가진 외팔보를 형상화한 것이다. 빔의 폭은 0.03 m, 두께는 0.003 m로 설정하였다. 0.12 m와 0.24 m 위치에서의 변위값을 토대로 하여 반사 계수를 위한 연립방정식을 도출하였다. 빔의 위치에 대한 해를 가진점의 변위값으로 나누어 식 (6)을 통해 전파 및 소멸 반사 계수를 만든다. 여기서 k_b 는 주파수와 연관된 파수를 나타낸다. 0.12 m의 가속도계와 0.24 m 위치의 각각에 대한 고정단의 가속도계의 비율은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\hat{w}(x_1)}{\hat{w}_{ref}} = \frac{Ae^{-i\hat{k}_b x_1} + Be^{i\hat{k}_b x_1} + Ce^{\hat{k}_b x_1}}{A+B+C} \tag{6a}$$

$$\frac{\hat{w}(x_2)}{\hat{w}_{ref}} = \frac{Ae^{-i\hat{k}_b x_2} + Be^{i\hat{k}_b x_2} + Ce^{\hat{k}_b x_2}}{A+B+C} \tag{6b}$$

두 개의 센서 위치에 대한 변위값을 각 식에 적용하고 A 로 나누어 B 에 대한 비율을 R_p , C 에 대한 비율을 R_e 로 하여 두 개의 미지수로 표현하고, 여기서 R_p 는 진행파에 대한 반사계수를 나타내며 음향블랙홀의 형상에 따른 진동 집적도는 R_p 를 기준으로 판단할 수 있다. 식 (6a)와 식 (6b)를 연립함으로써 R_p 와 R_e 를

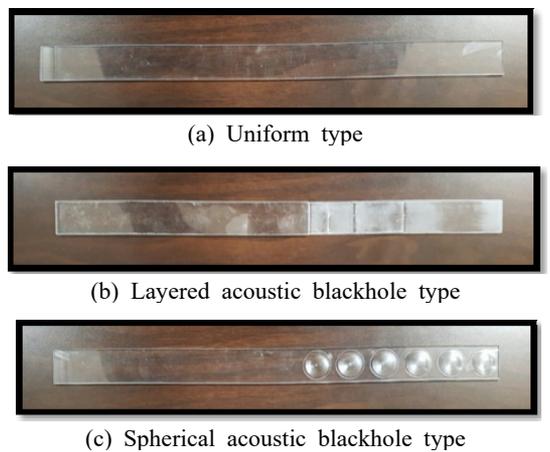


Fig. 5 Various acrylic beam with acoustic blackhole and impact damper to measure reflection coefficient

도출한다⁽²⁾. 최적의 형상을 도출하기 위해 여러 형상에 대해 이론적 결과를 도출하였다. 점차 얇아지는 형상의 적층형(layered) 음향블랙홀과 반구 형태로 파여져서 배열된 반구형(spherical) 음향블랙홀을 각각 블랙홀 구역에 적용하여 균일한(uniform) 빔과 비교하였다. 적층형 블랙홀의 경우 ϵ 과 n 은 각각 0.05, 0.7이고 반구형 블랙홀의 경우 2, 0.03이다. Fig. 3은 Fig. 2에 나타난 여러 형상에 적용하여 실험적으로 도출한 반사 계수 비교 결과이다. Fig. 2의 적층형 빔과 반구형 빔의 경우, 길이 400 mm 및 두께 3 mm의 빔으로 구성하였으며 적층형 음향블랙홀 빔의 경우 중간부분은 2 mm, 1 mm 그리고 끝 단은 0.5 mm 두께로 구성하여 음향블랙홀을 구현하였다. 반구형 형태의 음향블랙홀 빔은 25 mm의 지름과 깊이 3 mm를 가진 형태로 구성하였다. Fig. 1과 같이 장비를 시편을 설치하여 반사계수를 도출하였다. 실험결과를 통해 음향블랙홀이 적용되지 않은 경우보다 적층형 음향블랙홀의 경우가 더 낮은 반사 계수가 나타났고, 반구형 음향블랙홀이 적층형 음향블랙홀보다 더 뛰어난 진동응집현상을 보였다. 따라서 반구형 음향블랙홀에 충돌댐퍼를 적용할 경우 적층형 음향블랙홀에 충돌댐퍼를 적용한 경우보다 충돌 시 감쇠 효과를 더 크게 가져올 수 있다.

2.3 FEM 해석 기법을 이용한 충돌 이론에 따른 감쇠 결과

이론에 근거하여 충돌 댐퍼가 적용된 빔의 응답을 도출하기 위해, 1차원 무한 빔 요소에 충돌 댐퍼를 도입하여 충돌체와 보의 충돌 전후 속도와 반발계수에

의한 속도 변화를 변위에 반영하여 응답을 구한다. Euler-Bernoulli 빔의 각 요소와 충돌체의 충돌 후 최종 속도는 운동량보존 식 (3)과 충돌 운동을 나타내는 식 (4)를 연립함으로써 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{Bmatrix} w_i(t_c)^+ \\ v_i(t_c)^+ \end{Bmatrix} = \frac{1}{m + \rho AL_i} \begin{bmatrix} m - \rho AL_i e & \rho AL_i (1+e) \\ m(1+e) & \rho AL_i - m e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_i(t_c)^- \\ v_i(t_c)^- \end{Bmatrix} \tag{7}$$

여기서 첨자 +와 -는 충돌 전과 충돌 후 순간을 각각 나타내고 L_i 는 충돌이 일어나는 보의 요소 길이, t_c 는 충돌이 일어나는 시간을 나타낸다. 첨자 i 는 나뉘어진 보 요소 순서를 표현하며, 보는 40개의 요소로 각각 나뉘어졌다. 해당 보 요소와 충돌을 일으키는 충돌체의 질량은 m 으로 나타내어진다. 보 요소의 속도 해를 찾기 위해 Runge-kutta method를 도입하여 빔과 충돌체의 속도를 도출한다. 각각의 보 요소의 속도가 도출되면 각 보 요소에서의 시간 별 변위에 대해 FFT를 수행한다. 보 요소의 FFT수행에 따라 주파수 별 응답이 도출되면 고정단의 응답과 보 임의의 위치의 응답에 대한 비율을 통해 주파수 별 전달함수를 도출한다. Fig. 4는 충돌체가 빔에 충돌함에 따라 나타나는 감쇠성능을 유한요소법(FEM) 이론모델에 근거하여 계산된 응답을 전달함수로 표현한 것이다. 충

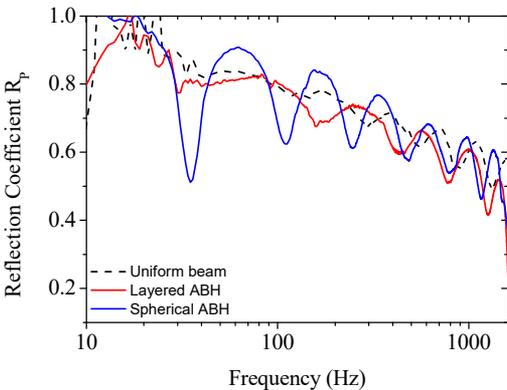


Fig. 6 Experimental results of reflection coefficient for two kinds of acoustic blackhole beams

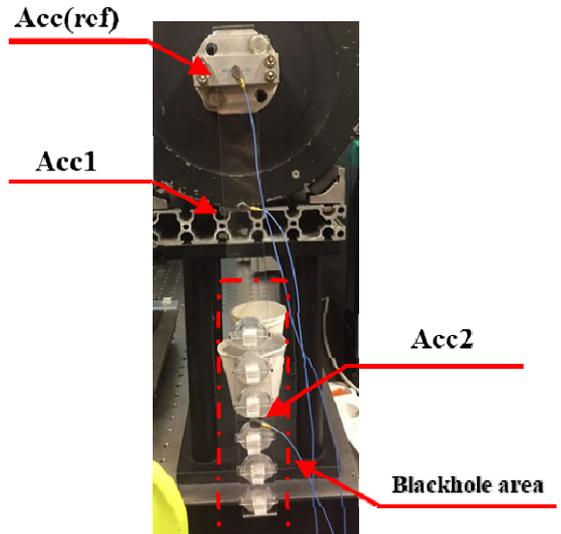


Fig. 7 Cantilever beam experiment setting with impact dampers applied with acoustic blackhole

돌체가 도입됨에 따라 200 Hz 이상 범위에서 진동이 감소되고, 반구형 음향블랙홀이 적용된 빔에 충돌체가 도입된 경우가 균일한 빔에 충돌체가 도입된 경우보다 200 Hz 이상 범위에서 더욱 크게 감소되는 것을 확인하였다. 이를 기반으로 음향블랙홀이 균일한 빔에 비해서 진동의 응집하여 충돌체와의 충돌에 의한 감소효과를 더 크게 가져올 수 있음을 확인하였다.

3. 음향블랙홀 반사 계수 측정 실험

다양한 형상의 음향블랙홀이 적용된 빔에서의 반사계수를 실험적으로 도출하기 위해 Fig. 5(a), 5(b)와 5(c)에 나타난 것처럼 총 길이 0.36 m, 두께 0.003 m, 폭 0.03 m의 아크릴 구조에 이론 형상과 동일하게 적용하여 가공 및 제작하였다. 고정단에서 변위가진을 인가하였으며 가속도계를 고정단에 개, 고정단으로부터 0.12 m 및 0.24 m에 각각 1개씩 총 3개의 가속도계를 설치하여 신호를 획득하였다. Fig. 9는 적층형, 반구형 음향블랙홀 형상이 연속적으로 배치된 경우에서 넓은 주파수대역에서 반사 계수가 크게 감소한 실험 결과이다. 적층형 음향블랙홀이 적용된 경우보다 반구형 음향블랙홀이 적용된 경우에서 더 낮은 반사 계수 결과가 도출되었고 이를 통해 반구 형태의 음향블랙홀이 연속적으로 배치된 경우가 진동 응집도

가 가장 큰 것으로 검증되었다. 이 결과를 기반으로 하여 반구형 음향블랙홀이 있는 부분에 충돌댐퍼를 적용할 경우, 음향블랙홀이 적용되지 않은 경우보다 감소 성능이 더 뛰어날 수 있다.

4. 충돌 댐퍼와 음향블랙홀의 상호작용에 따른 성능 실험 결과

음향블랙홀에 충돌 댐퍼를 적용하여 더 우수한 감소 성능을 구현할 수 있음을 고찰하기 위한 실험을 시행하였다. 블랙홀에 의한 감소 성능이 증폭되는 것을 확인하기 위해 음향블랙홀이 적용되지 않고 충돌 댐퍼만 적용된 구조와, 음향블랙홀이 함께 적용되면서 충돌 댐퍼가 동시에 적용된 구조물의 진동을 서로 비교하였다. Fig. 7은 충돌 댐퍼가 적용된 경우에서 음향블랙홀의 추가로 인한 감소 증가효과를 확인하기 위해 설치된 실험 구성을 나타낸다. 가진기를 이용하여 변위가진을 고정단에 가하고, 고정단에 가속도계를 설치하였으며, Fig. 8(b) 구성처럼 아크릴 보에 부착된 가느다란 구조물이 음향블랙홀의 가운데 부분과 충돌 되도록 설치된 충돌체를 지지하여 충돌이 일어나도록 된 구조이다. 주파수응답을 비교하기 위해 감쇠요소가 적용된 부분에 가속도계를 설치하여 음향블랙홀이 적용 유무에 따른 감쇠 정도를 각각 비교하였다. Fig. 8(a)는 충돌 댐퍼가 빔에 적용된 보의 개요도이다. 보의 진동으로 인해 충돌체와 연결된 구조물을 통해 충돌체에 진동이 전달되면 충돌체가 다시 보에 충격을 일으켜 에너지를 소산시키는 구조로 되어 있다. 빔의

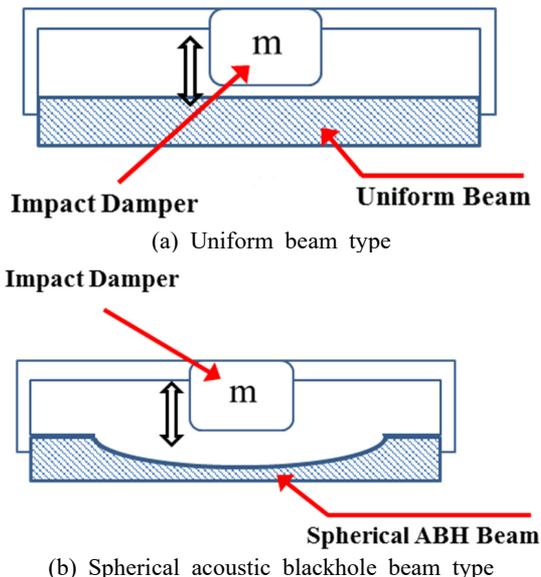


Fig. 8 Cross-section configuration of beam designed with impact damper

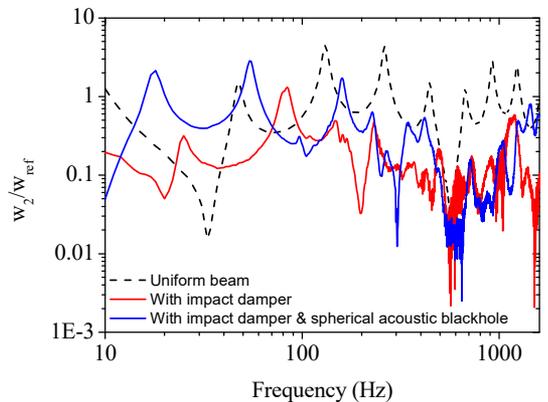


Fig. 9 Frequency responses of cantilever beams applied with impact damper and acoustic blackhole

두께가 얇아짐에도 충돌이 일어나는 상황에서 충돌체와 보의 상호 간극은 크지 않기 때문에 빔의 안정성에서 큰 문제가 발생하지는 않는다. 이 구조를 음향블랙홀이 적용된 Fig. 8(b)의 경우와 비교하여 음향블랙홀의 진동 응집에 따른 효율적인 감쇠 성능을 비교하였다. Fig. 9는 외팔보에 충돌댐퍼만 적용된 경우와 충돌댐퍼와 음향블랙홀이 함께 적용된 경우의 주파수응답 함수를 나타낸다. 각 실험을 통해 비교한 결과, 충돌댐퍼만 적용된 경우, 500 Hz 이상의 범위에서 크게 감소되는 것을 확인하였으며, 따라서 충돌 댐퍼가 빔에 적용되는 경우 감쇠 효과가 나타남을 확인하였다. 빔의 형상에 의한 특정 주파수 범위의 반사계수 특성이 충돌로 인하여 다른 주파수대역에서 충돌이 일어날 수 있고 그 해당 주파수에 대한 에너지가 충돌에너지로 감소할 수 있기 때문에 반사계수가 줄어든 주파수 대역과 일치하지 않을 수 있다. 500 Hz 이하의 범위에서는 질량추가에 의해 공진주파수가 변환되었으며 저주파수실험결과를 통해 음향블랙홀이 충돌 댐퍼가 적용된 부분에 적용한 경우 더 크게 줄어든 것을 확인하였으며, 따라서 음향블랙홀이 적용된 경우가 적용되지 않은 경우보다 진동에너지를 효율적으로 저감하였음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 주요 진동시스템에 대해 폭넓은 범위의 주파수 대역에서 구조물의 진동을 음향블랙홀을 적용함으로써 단순히 충돌 댐퍼만 설치한 경우보다 더 효율적인 진동 감쇠 시스템을 구성할 수 있음을 실험과 이론으로 검증하였다.

5. 결 론

수치적 해법을 통하여 임의의 형상을 가진 빔 형태에 대해 반사 계수를 구하고 그 중, 가장 반사 계수가 작은 형상을 가진 빔을 도출하였다. FEM 해석법을 통해 블랙홀이 적용된 빔에서의 충돌 댐퍼의 성능이 균일한 빔에 충돌 댐퍼가 적용된 경우보다 뛰어난 성능이 나타남을 이론적으로 도출하였다. 동일한 형상의 빔을 제작하여 실험을 통한 반사 계수를 도출한 결과 모델을 통한 결과와 일치한 경향을 보였다. 실제 음향블랙홀의 성능을 검증하기 위하여 음향블랙홀이 적용되지 않은 빔과 적용한 빔의 충돌 댐퍼 부착에 따른 주파수응답함수의 비교를 통해 음향블랙홀이 적용되고 충돌 댐퍼가 적용된 빔의 진동이 음향블랙홀이 적용되지 않고 충돌 댐퍼가 적용된 경우보다 더 큰 감쇠

를 보였다. 이런 결과를 토대로 하여 소음진동을 효율적으로 감쇠시킴에 있어서 광대역 소음의 저감이 점탄성 소재의 사용없이 구현 가능함을 증명하였다.

후 기

이 연구는 삼성전자(주)와 국토교통부 사회이슈해결연구개발사업의 연구비지원(19CTAP-C153014-01-0000)에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Krylov, V. V. and Tilman, F. J. B. S., 2004, Acoustic ‘Black Holes’ for Flexural Waves as Effective Vibration Dampers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 274, No. 3-5, pp. 605~619.
- (2) Yang, W., Seong, Y., Jeong, S. and Park, J., 2018, Vibration Reduction Using Meta-structures Composed of Tuned Dynamic Absorbers Employing Mass Impacts, *Composite Structures*, Vol. 183, pp. 216~220.
- (3) Wang, J. C. and Zeng, X., 2006, Influence of Temperature and Pressure on the Dynamic Properties of Rubber-modified Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 125~131.
- (4) Rajoria, H. and Jalili, N., 2005, Passive Vibration Damping Enhancement Using Carbon Nanotube-epoxy Reinforced Composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 14, pp. 2079~2093.
- (5) Jeon, W. and Lee, J. Y., 2016, Efficient Damping of Vibration Using an Acoustic Black Hole, *Proceedings of the KSNVE 2016 Annual Spring Conference*, pp. 202~203.
- (6) Liuxian, Z., 2016, Passive Vibration Control Based on Embedded Acoustic Black Holes, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 138, No. 4, 041002.



Yeonuk Seong received his B.S. from Mechanical Engineering from Hanyang University in 2014. He is Ph.D. course degrees in Acoustics and Vibration Laboratory at Hanyang University. His research interests include passive vibration damping using meta-materials



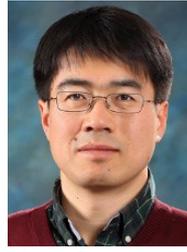
Seongyoung Jeong received his B.S. from Mechanical Engineering from Hanyang University in 2014. He is Ph.D. course degrees in Acoustics and Vibration Laboratory at Hanyang University His research interests include passive vibration

damping using meta-materials



Wonseok Yang received his Ph.D. from Mechanical Engineering from Hanyang University in 2017. He is assistant professor in Department of Automotive Engineering in Korea National University of transportation. His research inter-

ests include vibration damping using acoustic meta-structure and analysis in automotive systems.



Junhong Park received his B.S. and M.S. from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 1991 and 1993, respectively. He worked at the Samsung Electronics Co. Ltd. from 1993 to 1998. He received his

Ph.D. from Purdue University in 2002. He is currently a professor of Department of Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interests include signal processing, wave analysis, and noise control for improving damping, or machine learning performance including mechanical issue