

The Power of "Mass Law"

김정태* · 김정수** · 김운경*** · 김석현****

J.T Kim, J.S Kim, W.K Kim, and S.H Kim

ABSTRACT

Whenever a noise problem of a product is concerned, a first step is to identify the energy transmission path whether it is an air-borne or a structure-borne. Depending on the characteristic of the noise path, tools on the noise reduction are different.

In this paper, an important aspect of the "mass law" in a noise transmission has been investigated. Since an air-borne has 20 dB/Decade, and a structure-borne 10 dB/Decade of a sound transmission loss due to a mass, an engineer who aims to have a light product design should have an enough knowledge on the mass law, especially, the sensitivity of the weight itself. A honeycomb plate is examined as a sample of a light structure to implement a mass law.

1. 서 론

소음 문제가 발생하면 가장 처음 부딪치는 난제는 소음원 특성에 대한 규명이라고 할 수 있다. 특히, 승용차나 철도차량 등과 같이 구조기인 소음과 공력기인 소음이 복합적으로 나타나는 경우, 이에 대한 영향력 있는 소음의 주파수 대역에 대한 검토가 선행되어야 한다.

구조기인 소음원과 공력기인 소음원의 구분은 보기에 따라 단순할 것 같으나, 기실 물리적으로 명확히 구분하는 것은 생각같이 쉽지 않다. 승용차의 경우, 500Hz 전후, 철도차량의 경우, 이보다 낮은 주파수 대역인 250Hz를 전후하여 구분되고 있긴 하나, 대상 시스템의 설계 특성에 따라 변화의 여지가 많은 게 현실이다.

소음의 발생원이 구조적인 진동에너지의 전달인지, 또는 공기의 가진에 의한 것 인지의 원인 분석에 따라, 소음을 저감시키는 공학적인 접근 방법은 달라진다. 우선, 높은 주파수 범위가 해당되는 공력 가진에 의한 소음에너지 전달의

경우에는 질량법칙(Mass law)이 지배적이다. 즉, 차음 구조체의 단위 면적당 질량 m 에 의해 20dB/Decade 값으로 소음을 저감시키므로 높은 주파수로 갈수록 쉽게 소음 크기가 줄어들게 된다. 이해 반해, 저주파수 대역에 해당되는 구조기인 소음은 가진점 모빌리티(Drive Point Mobility: DPM)가 지배적인 영향을 미친다. 가진점 모빌리티의 경우, 소음을 발생시키는 진동에너지의 전달크기가 질량변화당 10dB/Decade 특성을 가지고 있으므로 낮은 주파수 영역에서는 질량법칙 만한 소음저감 효과를 기대하기 어렵다.

공학적으로 소음 문제가 어려운 것은 대상 제품을 가볍게 만들어야 하는 현실에 있다. 무게가 가벼워지면, 질량법칙을 반대로 적용해야 하므로, 소음 측면에서 20dB/Decade가 가중치를 작용하여 소음 저감 효과를 기대하기 곤란하게 된다.

기계의 설계에서 대상 제품을 경량화하기 위한 방안 중 쉽게 채택되는 것이 기존의 강재를 알루미늄이나 복합재로 대체하는 접근이라고 할 수 있다. 문제는 이러한 경량 대체재의 밀도가 강재 대비 30% 수준, 또는 그 이하로 낮춰지게 되어 질량법칙의 잇점을 잃게 되는데 있다. 가령 고속철도 차량의 경우에는 경량화를 위해 기존의 철재 구조체를 알루미늄 재료로 바꾸어 설계하고 있다. 따라서, 동일한 차체 무게를 유지한다면, 질량법칙에 의거 9dB 값 만큼의 소음이 증가 한다고 쉽게 예상 할 수 있다.

단위 면적당 질량을 줄이는 경량화 설계방법중 Honeycomb 구조가 있다. 즉, 단위 면적당 질량을 낮추더라

* 정회원, 홍익대 기계공학과
E-mail : jtkim@hongik.ac.kr
Tel : (02) 320-1113

** 정회원, 홍익대 기계공학과

*** 정회원, 홍익대 대학원 기계공학과

**** 정회원, 강원대 기계공학과

도 굽힘강성(Bending Rigidity)을 증가시키므로써 최소한 구조재의 재료 역학적 특성을 향상시키고 소음 측면에서 이득이 있기를 바라는 방법이다.

굽힘 강성의 증가는 소음 측면으로 보자면 낮은 주파수 영역에 있는 고유 진동수를 높은 쪽으로 끌어 올려, 저주파수에서 예상할 수 있는 투과 손실을 최대한 높이고 자 하는 노력이라고 볼 수 있다. 그러나, 허니컴 구조의 대체효과는 높은 주파수로 갈수록 질량 법칙이 존재하는 물리적 현상을 벗어 날 수는 없는 것이다. 즉, 허니컴 구조는 그 단면에 대한 형상을 최적설계하여도 공력 기인 소음원이 영향을 주는 주파수 대역에서는 소음저감측면에서 전혀 도움이 되지 못하는 재료로 전락하게 된다.

본 논문에서는 구조물의 경량화 설계시 고려되어야 할 소음 측면에서의 물리적 현상을 설명하고, 특히 질량법칙이 지배하는 자연현상을 기술하고자 한다.

2. 공력기인 소음의 저감:질량법칙

닫혀진 공간에 있는 음향에너지가 구조재를 통해 바깥쪽으로 전달(또는 그반대)되는 경우, 구조재의 음향전달특성을 기술하는 공학적 용어로 차음값 TL(Transmission Loss)이 있다.

차음값은 다시 음향에너지파가 수직이거나 난반사의 구분에 따라 여러 가지 값으로 구분된다. 기본적으로, 차음값 TL은 질량법칙(Mass Law)로 알 수 있듯이, 대상구조재가 가지고 있는 단위 면적당 질량 m 과 대상 주파수 f 에 의해 결정된다.

질량법칙 측면에서 보면, 인류가 강철재료를 기계 요소에 사용해 오고 있는 현실은 현명한 선택인 것처럼 보인다. 구조강도 측면에서 영율(Young's Modulus) E 값이 크므로 높은 응력에 견딜 수 있고, 더욱이, 단위 면적당 질량(또는 밀도)은 7.9로 여타 재료에 비해 높은 값을 가지고 있다. 따라서, 강재는 질량법칙을 적용하는 차음성능 측면에서 무척 유리한 재료라 할 수 있다.

문제는 기계의 경량화 추세에 따라 철재류의 대체 재료가 사용된다는 점이다. 최적설계를 통해 신제품을 개발하려다 보니 경량화를 시켜야 에너지 효율과 성능이 높아지게 된다. 따라서, 최근의 기계설계는 경량화와는 싸움이라고 해도 지나침이 없다. 소음의 문제는 여기에서부터 출발한다. 경량화는 질량법칙의 적용을 받는 구조물의 차음특성을 취약하게 만드는 천적이기 때문이다. 경량화를 위해 채택되는 알루미늄이나 복합소재는 밀도가 강재의 1/3수준, 또는 그 이하이다. 따라서 질량법칙에 의하면, 이러한 구조재 사용에 따른 차음특성의 저감은 통상,

$$\Delta(TL) = 20 \log 3$$

이므로, 9dB 만큼 소음이 증가하게 된다.

이때, 차음을 보상하기 위한 방법으로

- (1) 재료의 두께를 증가시키거나
- (2) 허니컴 구조로 변화

하는 두 가지 접근이 있다.

이 방법은 구조재의 강성을 증가시켜 높은 응력에 버틸 수 있는 조건을 만들어 준다. 소음 측면에서 보면 위의 방법 중 두께를 키우는 방법은 단위 면적당 질량을 원 상태로 복귀시켜 질량법칙의 효과를 누리는데 있다고 할 수 있다. 한편, 허니컴 구조는 “강하면서도 가볍게”를 목표로 제작되는 제품이라고 할 수 있다. 과연 허니컴 구조는 재료의 강성을 증가시키면, 가벼워진 만큼 질량 법칙에서 잃어 버렸던 차음 효과를 보상할 수 있을까?

3. 구조기인 소음의 저감:가진점 모빌리티

구조적인 소음은 저주파 대역의 소음 에너지에 영향을 크게 미친다. 구조적인 소음은 가진되는 진동 에너지가 연결 부위를 통해 전달되므로 외부손실계수 (η_c) 와도 관련이 있게 된다.

연결 부위에 전달되는 진동에너지는 가진점 모빌리티의 값에 의해 지배를 받게 된다. 통계에너지 해석법(SEA)의 이론에 의하면 평판 구조의 가진점 모빌리티 G 는

$$G = \frac{1}{8K C_l m_s}$$

로써 표현 된다. 여기서, K 는 $h/\sqrt{12}$, C_l 은 음속, m_s 는 단위 면적당 질량, h 는 두께를 가리킨다.

따라서 질량에 반비례해서 모빌리티 값이 결정됨을 알 수 있다.

한편, 연결부를 통해 전달되는 진동에너지 π 는

$$\pi \propto 10 \log G$$

로 표현될 수 있으므로 결과적으로 구조기인 소음의 에너지원은 $10 \log m$ 으로 결정됨을 알 수 있다.

즉, 구조 기인 소음의 에너지원 π 는

$$\pi \propto 10 \log m$$

이므로, 질량 증가당 소음 효과는 10dB/Decade가 될 것이다. 이러한 특성은 질량법칙의 20dB/Decade에 비해 기울기가 절반 값에 불과하다. 따라서, 질량을 줄여 정량화 시키는 설계의 경우, 구조기인 소음은 공력기인 소음에 비해 소음측면에서의 민감도는 훨씬 떨어지게 된다. 가령 차체 바닥을 강재에서 알루미늄의 재질로 변경시키더라도, 공력기인 소음은 9dB 차음손실을 예상할 수 있는 것에 비해, 구조기인 소음은

$$A(TL) = 10 \log 3$$

으로 4.7dB로 반감됨을 알 수 있다.

따라서, 철도차량이나 승용차의 설계단계에서 대차상부 또는 현가장치와 연결되는 구조물은 가급적 가진점 모빌리티 G 를 증가시켜 구조기인 소음원이 전달될 수 있는 에너지를 최대한 차단시켜야 한다. 즉, 대차상부 또는 현가장치에 붙어있는 구조물은 강재로 유지되던가, 재료를 두껍게 만들어 국부적인 가진점 모빌리티를 낮추어야 구조기인 소음의 영향을 피할 수 있다.

4. 허니컴 구조에 대한 검토

허니컴 구조는 재료의 내부에 공간을 두어 최소한의 재질로 굽힘 강성을 증가시키는 방법이라고 할 수 있다. 고체역학에서 접근하는 구조 강도 측면은 배제하고, 차음 특성 측면에서 허니컴 구조를 검토하여 보자.

우선, 허니컴 구조의 두께를 h_v 라고하여 보자. 철도 차량에 적용되는 허니컴 구조중에서 재질은 알루미늄, 두께는 40mm 인 바닥재와 벽체가 있다. 이에 해당되는 재료만의 두께 h_m 은 9mm이다. 순 재료의 두께는 1/4이상 축소된 값이 된다. 한편, 허니컴 구조 40mm와 동일한 굽힘 강성을 가지는 알루미늄 평판은 22.4mm가 되어야 한다. 허니컴 구조로 가공하면서 강도가 250% 증가 하였음을 알 수 있다.

한편, 알루미늄으로 구성된 허니컴 구조의 차음 성능은 저주파 대역에서는 강성이 지배하지만, 고주파 대역으로 올라가면 질량 법칙 영역에 포함하게 된다.

본 연구실에서 실험한 데이터를 보면, 허니컴 구조는 600Hz 대역이상에서는 비록 편차는 있으나 질량 법칙을 따라가는 특성을 보여주고 있다. 물론, 400mm 허니컴 구조의 질량은 9mm 두께의 평판에 비해 질량법칙 구간에서 TL특성은 손해를 보게 된다.

그 이유는 허니컴 구조를 만들기 위해 빈 공간을 보강재가 걸쳐져 있는 관계로 소음 전달 측면에서 불리하기 때문이다.

결과적으로 허니컴 구조는 질량 법칙이 존재하는 주파수 대역에서는 단순 재료만을 사용할 때보다 소음 측면에서 이득이 없게 된다.

그렇다면, 허니컴 구조로 만들기 위한 복잡한 가공 공정을 거치면서 요소 부품을 비싼 재료를 사용했는데도 소음측면에서 전혀 이득이 없을까?

해답은 질량 법칙이 존재하는 주파수 대역보다 낮은 영역에 있다. 허니컴 구조는 재료 측면에서만 보면

“강성은 높이고, 무게는 가볍게”

를 지향해서 개발된 제품이다. 따라서, 최소량의 재료를 가지고, 두께를 최대한으로 벌려줌으로써, 재료가 가지고 있는 강성값은 높아지게 된다. 단순하게 가정해서 강성이 2배 증가했을때에 고유 진동수 ω_n 은 1.4배 증가한다. 따라서 차음 특성 곡선에서 최소값을 가지게 되는 댐핑 지배 영역의 주파수 값은 높은 주파수 대역으로 이동하게 된다. 따라서, 감쇠가 지배하는 영역이 올라가므로 자연히 감쇠영역 이전의 TL 특성은 증가하는 효과를 보게 된다.

실제로, 고속철도의 경우, 외부소음에너지중 차실에 가장 많이 투과되어 들어오는 소음대역은 250Hz 옥타브 밴드 영역인 200~400Hz 이다. 이러한 주파수 대역의 취약점은 허니컴 구조의 강성을 보강함으로써 이득을 볼 수도 있다. 따라서, 허니컴 구조를 고속철도 차체의 바닥 재료로 활용하는 것은 특정 주파수 대역에서만 효과를 볼 수 있다. 다만, 고유 진동수의 이동으로 인해, 감쇠영역이 나타나는 주파수 대역에서의 피해는 어쩔 수 없이 감수 하여야 한다. 이곳의 피해를 최소화시키기 위해서는 허니컴 구조에 댐핑재를 처리해야 한다.

5. 결론

철도 차량이나 승용차의 차실내 소음은 공력기인 소음과 구조기인 소음이 복합적으로 나타나는 특징을 가지고 있다. 이와 같은 소음원에 의한 영향은 차체 구조물의 물리적 특성을 올바르게 이해하고 있어야 효과적인 소음 방지 대책을 수립할 수 있다.

특히, 차량의 경량화를 위해 설계 단계에서 재료의 변경이나 두께 변화를 시도하는 경우, 질량 법칙과 가진점 모빌리티가 소음에 영향을 미치는 특성의 이해가 중요하게 된다. 공력기인 소음은 질량 증가가

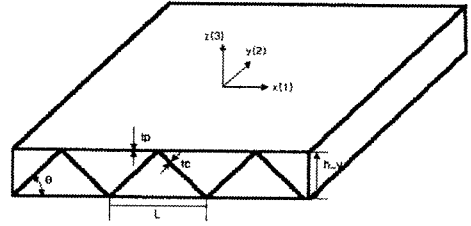
20dB/Decade 특성을 보이는 반면, 구조기인 소음은 10dB/Decade 특성을 가지고 있기 때문에 질량 변화가 미치는 주파수 대역별 특성은 판이하게 된다.

본 논문에서는 질량변화의 영향을 분석하는 사례로 알루미늄 허니컴 구조의 소음차단 특성을 검토하였다. 질량 법칙이 적용되는 600Hz이상의 경우, 허니컴의 형상이나, 단면특징은 소음에 전혀 도움이 되지 않는다. 단지, 해당재료가 가지고 있는 단위 면적당 밀도 값으로 TL 특성이 결정됨을 알 수 있다. 다만, 허니컴 구조와 같이 "강하고 가벼운" 재료는 강성 증가로 인해 저주파 대역에서 부분적으로 차음성능을 향상시킬 수 있는 영역은 존재한다.

구조물의 차음 성능에서 볼 수 있듯이, 질량법칙은 모든 재료에서 적용될 수밖에 없는 만고 불변의 진리이다. 복잡한 가공공정을 통해 단면의 형상을 바꾼다거나, 최적설계를 통해 적층 구조를 변경시키더라도, 이러한 노력은 특정 주파수 대역에서 국부적인 극대치를 추구하려는 협대역 소음저감대책이라고 할 수 있다.

우리가 접하는 대부분의 기계에서 발생하는 소음은 광대역 주파수에 해당되고 있음을 볼 때, 소음 문제는 질량법칙이라고 하는 물리적 현상을 결코 벗어날 수는 없는 것이다.

부처님 손바닥을 볼 수만 있다면, 아마도 굵은 매직 펜으로 "질량법칙"이 쓰여져 있겠지.



($t_p / t_c \times h_m$, -각도: $3.0 \times 3.0 \times 40 - 30^\circ$)

Fig. 1 알루미늄 압출재의 구조

Table 1. 알루미늄 압출재 등가보정계수

	Factor	Thickness (mm)
Volume thickness(h_v)	—	40
Equivalent thickness(h_{eq})	$0.56h_v$	22.4
Material thickness(h_m)	$2t_p + t_c$	9.0
Steel thickness(h_s)	$0.34h_m$	3.0

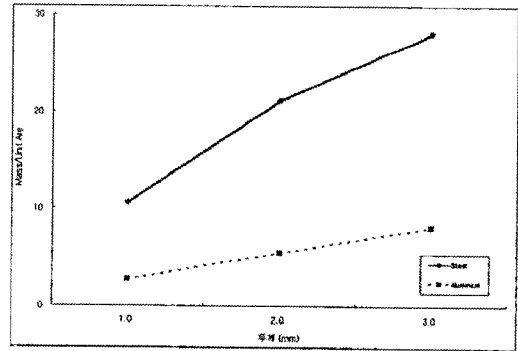


Fig. 2 재료의 두께에 따른 단위 면적당 질량

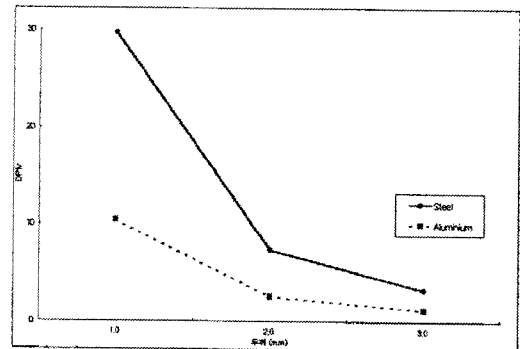


Fig. 3 재료의 두께에 따른 Mobility

Volume v.s. Cost

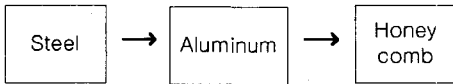


Fig. 4 재료 형상에 따른 비용 효과

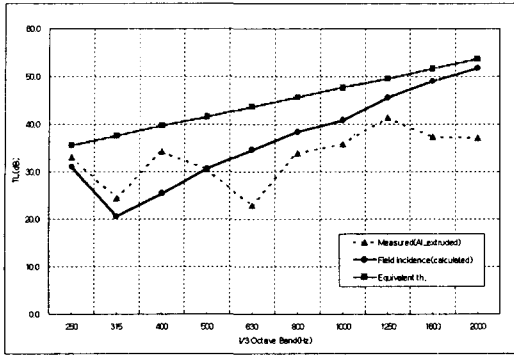


Fig. 5 등가 강성 두께 와 알루미늄 압출재의 차음특성 비교

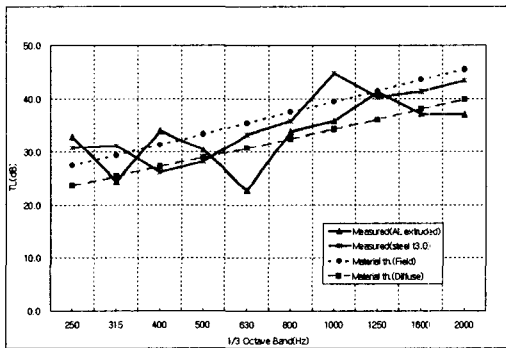


Fig. 6 순 재료 두께 와 알루미늄 압출재의 차음특성 비교