

자동차의 실내소음에 대하여

이 정 권

(한국과학기술원 기계공학과 교수)

1. 머리말

전세계적인 경쟁적 공업화 및 문명사회의 급속한 고도화에 따라, 자동차는 이제 수송수단으로서 가장 중요한 역할을 하고 있다. 일반 대중의 수입 증대와 기술수준의 눈부신 향상으로 인하여, 자동차 사용자들은 점점 더 안전하고 안락한 내부 환경을 갖는 자동차를 선호하게 되었다. 이는, 물건이나 다수의 사람들을 수송하는 수단이라는 종래의 개념에서, 수송 수단은 물론 이거니와 한 개인만의 사생활로서의 공간 및 여가용 수단 또는 쉬는 공간의 개념으로 차의 목적이 전환되고 있음을 의미한다⁽¹⁾. 같은 맥락에서, 안전도, 안락도, 독특한 외형 및 편의성이 강조 될수록 일반적으로 차량의 가격은 상승되며, 이러한 차량을 소유하고 있는 사람의 재력과 신분을 과시하는 수단의 하나라는 것도 부인할 수 없는 현실이다. 일반대중이 이용하는 차량의 경우에도, 온도, 공기 순환, 먼지, 조명, 공간 활용성, 소음, 진동 등 환경 안락도의 기본적인 인자들에 대한 관심이 매우 높아져서, 이러한 점들이 대폭 개선된 차량은 시장에서 큰 인기를 끌고 있다. 한편으로, 산업화 사회의 찌꺼기인 각종 환경 오염에 대한 인간

의 혐오감, 법적 규제, 녹색운동과 같은 환경 캠페인 등의 확산에 따라, 소음 문제는 배기가스 문제와 더불어 사회의 관심 초점이 되고 있다. 이와 같은 환경 위기 의식 및 관심의 고조에 파생되어, 차량에 있어서는 특히 내부 정숙도에 대한 수요자의 요구가 심화되고 있고, 구매자의 선택 기준으로서, 자동차 제작자의 설계 목표로서 또, 차량판매 전략의 강조점의 주요 항목중 하나로서 이 내부 소음의 정숙도가 거론되고 있다.

그러나, 불행하게도 내부의 정숙화는 차량의 또다른 진화 목표들인 경량화, 고효율화 및 고속안정주행화 등의 성능과 일반적으로 서로 상충적인 관계를 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 이 문제점을 해결하기 위해, 자동차 제작 회사들의 설계부서나 NVH(Noise, Vibration and Harshness) 부서에서는 종래의 선형적 개발방식을 탈피하고 설계 및 개발 단계에서 미리 내부 소음의 극소화를 위한 해석적, 실험적 방법을 동원하고 있으며, 각 회사마다 성취하여야 할 가장 중요한 일들 중 하나로서 여기고 있어서 우수한 인력들을 배치하고 있다. 국내에서도 각 회사마다 저소음화를 위한 설계, 개발, 개선작업에 열심히 노력을 경주하고 있으나, 아직 외국의 우수한 제

작자들과 비교하여 시설, 장비, 경험있는 인력 등의 조건이 열세에 놓여 있어서, “싼 가격으로 이룩한 정숙한 실내”라는 국제 경쟁력을 갖추기에는 더 과감하고 많은 투자가 이루어져야 한다. 또, 설계, 조립, 개발을 수행하는 자동차 제작회사 뿐만 아니라, 엔진 부품, 구동계, 흡배기계, 방진요소, 내외장재, 타이어, 현가계, 철판 등을 제조하는 부품회사들도 구조, 재질, 제진, 공차, 발란스, 안정성 등의 기술 개선에 노력을 함께 기울여야만 최종적으로 조용한 차를 만들어 낼 수 있다.

“사자처럼 용맹하고, 표범처럼 날쌔며, 양처럼 조용한” 자동차라는 말이 뜻하는 바와 같이, 여러가지 서로 상반성을 갖고 있는 차량 정숙화 작업에는 보이지 않는 상대와 대치하는 NVH 엔지니어들의 피나는 노력과 세심한 주의 및 신기술 습득/적용을 위한 능동적인 자세가 요구되고 있고, 또 이를 지원하는 학계와 연구소 인력의 적극적인 “고통 분담”이 필요하다. 추후의 내부 소음 정숙화 작업에는 비단 소음의 절대량 저감뿐만 아니라, 음향의 질적 수준까지도 요구되고 있으므로, 이의 연구 및 적용에 대한 각계의 참여가 절실하다. 또한, 자기회사 혼자만의 성을 쌓고 기술적 담보를 이루고 있는 편

협한 생각에서 벗어나, 국내 차량의 국제적 경쟁력을 제고하기 위해서 서로의 경험을 주고 받으며 기술력 향상을 함께 도모하고, 기술의 사회전수에도 앞장서는 전향적 자세가 모든 자동차 기술인의 마음에 파급되어야 한다.

이 글에서는 차량의 내부 정숙도에 관계된 각종 소음원들의 특성들에 관하여 간략히 서술하고자 한다. 각종 소음원들의 발생기제를 이해하는 것은 소음제어 작업의 기초이고, 수동적 대책(passive control)을 세울 때에는 소음원 특성 외에도 차실내로의 전달경로를 확실히 파악하여야 한다. 여러 소음원이 복합적으로 작용하여 내부 소음을 형성하는 경우가 대부분이므로, 주 기여 인자를 빠른 시일 내에 알아내기 위하여는 정확한 현상 파악 작업이 필요하다. 이 글에서는 이러한 현상파악 작업을 수행하

기 위해 자동차 회사의 NVH 엔지니어가 알아야 할, 또, 항상 일의 대상으로 삼고 있는 사실에 대하여 일반인이 알기 쉽게 요약해서 소개한다.

2. 소음원 및 전달 특성

자동차는 수많은 부품으로 이루어져 있고, 또 엔진 및 사시의 부품들은 대개 운동을 하고 있으므로, 엔진의 운동 및 차량의 주행에 따라 여러가지 형태의 특성을 갖는 소음을 방출하게 된다. 방사된 소음은 내부 탑승 공간으로 전달되는 형식에 따라 특성이 변경되어 승객의 귀에 전달되게 된다.

2.1 주파수별 음원 특성

그림 1은 4 실린더, 4행정기관을 갖는 차량에 있어서 대표적인 주요 소음원에 대한 주파수 대역 특성을

보여주고 있다. 이 중 내부 소음의 크기에 가장 큰 영향을 미치는 것은 부밍(booming) 소음으로서, 그 원인은 근본적으로 엔진에서의 폭발과 관계된다. 4기통 엔진의 경우 크랭크 축이 1회전 할 때마다 폭발이 2회씩 일어나므로, 결국 엔진회전수에 관계된 주파수를 기본 주파수로 할 때 2차 고조파(harmonic) 성분이 되며, 이는 순음(pure tone)의 주파수 특성을 갖고 있다. 이 소음이 구조적 경로나, 공기전파 경로를 통하여 차실 내부로 전달되었을 때 차실 내부 공동의 공명 주파수와 일치하는 경우에는 매우 큰 음압(sound pressure)의 증가가 생기게 되며, 이를 부밍 현상이라고 일컫는다. 이외에도, 흡배기계에 쓰이는 관의 공명에 의해 발생하는 2차 및 그 이상의 고조파 성분, 도로의 요철에 따른 가진에 의해 차체 판넬이 공진을 하는 경

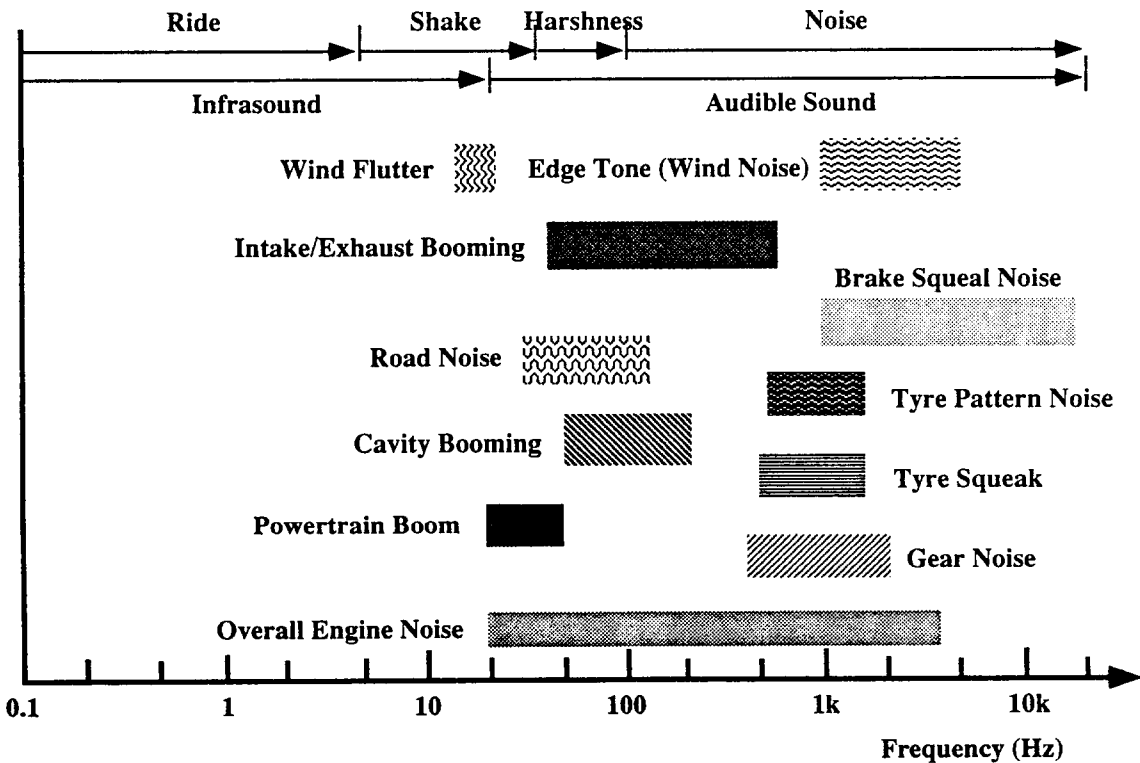


그림 1 Frequency characteristics of noise for 4 cylinder, 4 cycle engines

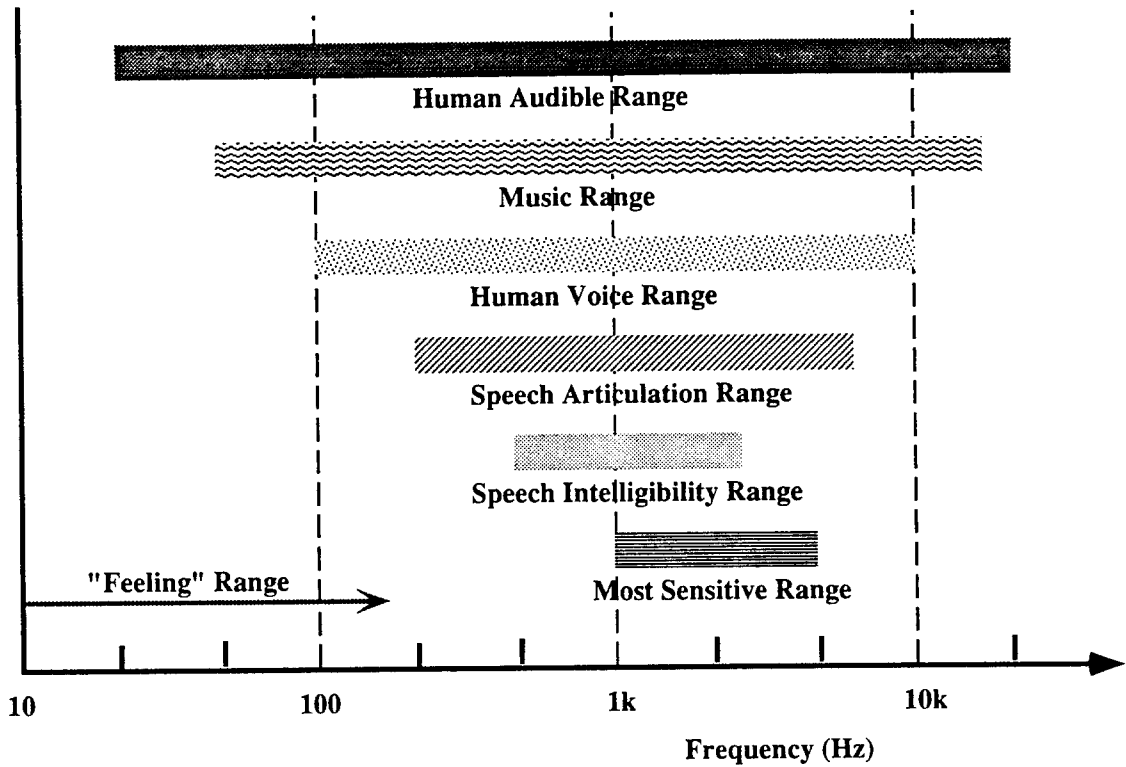


그림 2 Frequency range of sounds related to human hearing and speech

우, 동력 전달계의 공진에 의해 발생하는 성분, 창문이 열려 있을 때 바람이 입구에서 저주파수로 큰 진폭을 갖고 압력이 변동되는 경우, 현가계 및 배기계의 공진에 의한 경우 등에 있어서도 그 크기가 정상 영역보다 약 3dB 이상 큰 경우에는 일반적으로 부밍이라고 불리워진다.

그림 2에는 이러한 차량 소음의 주파수 영역과 비교하여, 내부 탑승자의 청감 특성과 관련된 주파수 영역을 보여주고 있다. 소음이란 근본적으로 인간이 듣기 싫어하는 소리이며, 차량 내부 공간이 점점 일상 생활과 같은 수준의 정속도가 요구되는 목적으로 쓰여가는 점을 고려하면, 그림 2에 표시된 음악, 언어 소통, 민감도에 관계된 주파수 영역은 매우 큰 의미를 갖는다고 할 수 있다^(2,3).

2.2 전달 방법에 따른 분류

모든 소음제어 작업에서와 마찬가지로, 자동차 실내 소음은 그 전달순서에 따라 음원, 전달경로, 수음자(receiver)로 분류할 수 있고, 전달경로 또는 전달 기제(mechanism)에 따라 공기 기인 소음(air-borne noise)과 구조 기인 소음(structure-borne noise)으로 나뉘게 된다. 엔진을 음원으로 하여 예를 들면, 엔진의 진동력이 마운팅, 동력전달계, 현가계 등과 차대 멤버 구조를 통해 내부공간을 둘러싸고 있는 차체 판넬에 전달되면, 차체 판넬의 진동 및 음향 방사 특성에 의해 내부 공간으로 소리의 형태로서 전달된다. 이러한 전달 형식을 갖는 소음을 구조 기인 소음이라고 정의한다. 또, 엔진의 실린더 블럭, 오일 팬, 밸브 커버, 기어 박스 케이싱 등에서 직접 방

사된 소음은 엔진실 구조나 노면 등에서 반사된 후 대시(dash)판넬이나 바닥면 등을 통과해 차실 내부로 전달되는데, 이러한 전달 형식을 갖는 소음을 공기 기인 소음이라고 정의한다. 이렇게 소음의 형식을 굳이 분류하는 이유는 그 형식에 따라 소음제어 대책을 수행하는 방법의 개념이 다르기 때문이다.

그림 3에는 후륜 구동형 차량에서의 소음원과 소음 전달경로들을 간략히 보여주고 있다⁽⁴⁾. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 차체 판넬, 내장재(trim), 공간으로 이루어져 있는 차실은 구조 및 공기 기인 소음이 승객의 귀에 도달되는데 있어서 최종적인 전달함수 역할을 하게 되므로, 이와 같은 복합적 조건의 차실에 대한 분석은 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

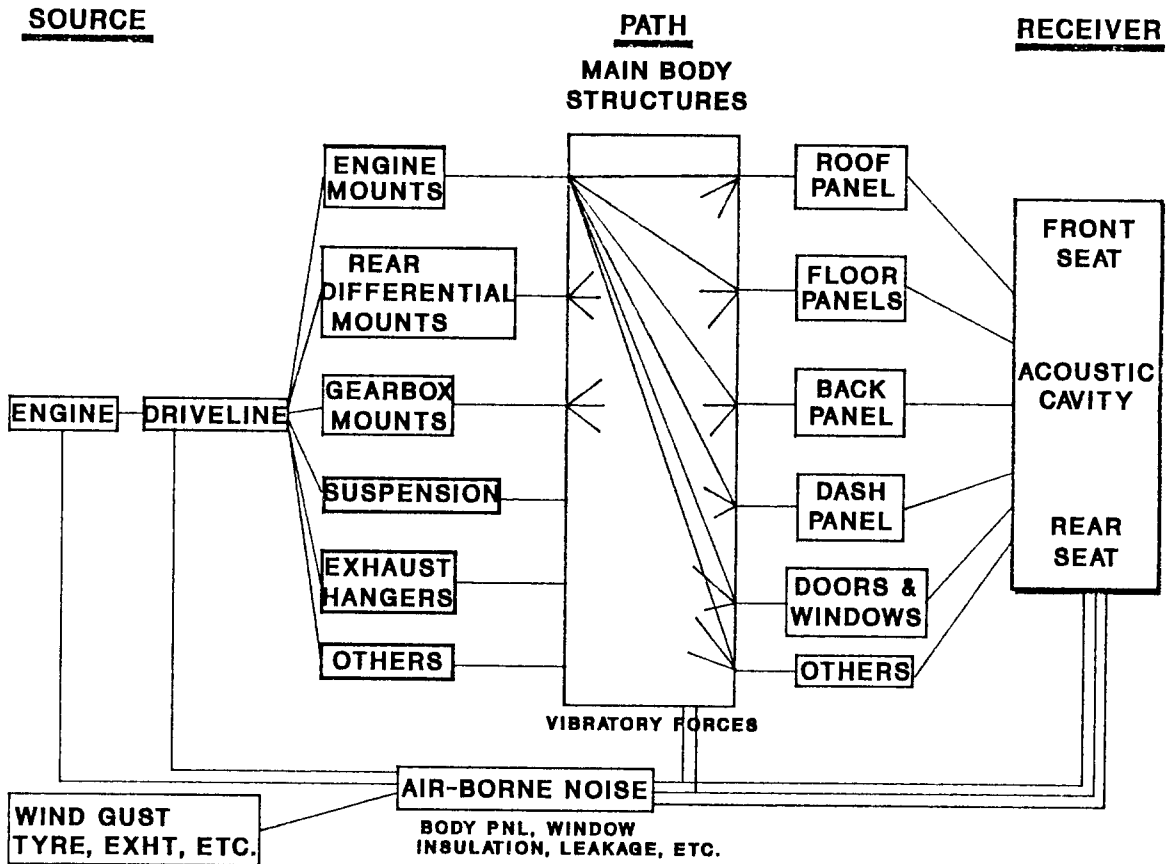


그림 3 Noise generation and transmission characteristics for rear-wheel drive cars

그림 4에는 이들 소음의 전달경로를 좀 더 개략적으로 보여주고 있다⁽⁵⁾. 여기서 특기할 만한 사실은 작은 틈새에 의한 공기 기인소음의 전파이다. 이러한 틈새들은 대시 판넬에 붙어 있는 클러치 케이블, 조향 축, 속도계 케이블, 가속기 케이블, 전기 배선 묶음, 공기 조화용 구멍, 제동기 푸시로드(push rod) 등 엔진실과 연결되는 부품용 마개(grommet)류의 틈새 및 좌우측 후사경과의 연결부위, 문짝과 유리창의 틈새, 페인트 배출용 구멍, 환기공 등을 의미한다. 이러한 틈새들이 적절히 밀봉되지 못하면, 이들이 마치 새로운 음원이 된 것처럼 되어 실내 소음에 지대한 영향을 미친다. 따라서, 다른 소음 제어 대책들의 효용성을 제한

하지 못하게 하기 위해, 초음파나 음향 인텐시티 측정용 탐침자 등을 이용하여 그 위치 및 크기를 판단한후, 적절히 밀폐하여야 한다.

2.3 발생 부위별 음원 및 전달 특성

그림 3에서 볼 수 있듯이, 차량의 수많은 소음원 중에서 특히 몇가지는 차실 소음에 매우 큰 기여를 하여서, 이들의 특성을 이해하는 것은 소음제어의 기초적 중요성을 갖는다.

(1) 엔진 소음

엔진에 의해 발생하는 진동은 왕복 피스톤에 의해서 화학적 에너지를 회전운동으로 변환시키는 기계에 의해 발생된다. 엔진 진동을 유발하는 힘은 연소력, 왕복력, 회전

우력의 3가지로 크게 분류할 수 있다.

엔진의 연소에 의해 발생된 하부 방향의 힘은 크랭크 축을 중심으로 하는 출력토크를 낳고, 엔진 본체를 반대방향으로 돌리게 하는 반대 토크를 생기게 한다. 실린더 중심선에 대한 실제 힘은 가스 압력과 관성력을 산술적으로 합친 결과와 같다. 따라서, 순 출력 토크는 엔진 회전에 따라 변동하게 되고, 그에 따라 엔진에 대한 반동 토크도 역시 변동하게 된다. 플라이 휠로 엔진 출력 토크를 부드럽게 하여도 반동 토크는 여전히 변동을 하게 된다. 이 반동 토크가 엔진 마운팅을 통해 차체 구조로 전달되어 구조기인 소음을 유발하게 된다. 또, 크랭크 축의 토크는 그 자체의 비

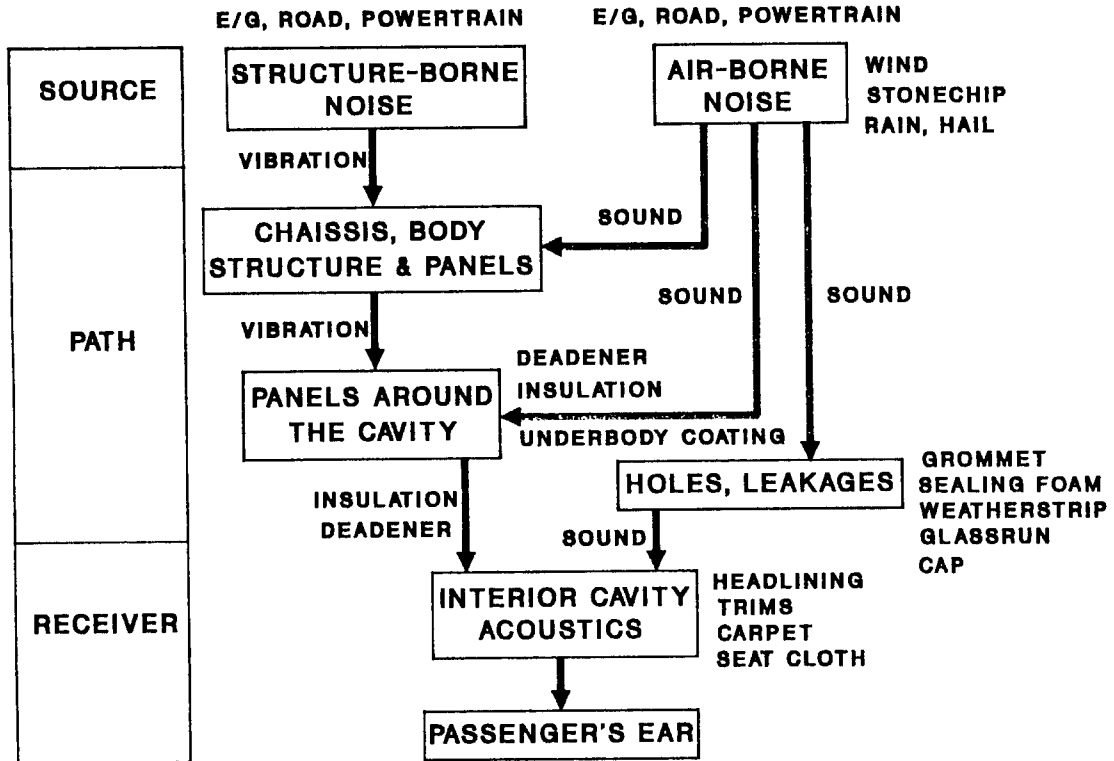


그림 4 A schematic model for vehicle interior noise

틀림 진동을 가하게 된다.

다수의 실린더를 가진 엔진은 여러개의 단일 실린더가 합쳐진 형태로 생각할 수 있다⁽⁶⁾. 각 요소들은 왕복 질량에 의해 불평형력을 갖게 되고, 이에 따라 엔진 회전수에 관계된 1차의 성분과 모든 고조파 성분이 유발된다. 이 1차 왕복 불평형은 왕복 질량에 상당하는 질량을 갖는 추(weight)에 의해 이론적으로는 완전히 상쇄시킬 수 있다. 그러나, 이러한 방법에 의해서는 수평 방향의 불평형을 다시 받게 되는데, 4기통 기관의 경우에는 폭발 순서를 잘 조정함으로써 해서 이 피치(pitch) 모멘트를 상쇄할 수 있으나, 2차의 수직력을 2배로 만들게 된다. 이 성분이 차량 실내 소음에 지대한 영향을 미치는 점은 이미 설명한 바 있다. 이 성분이 엔진속도의 제곱에 비례한다는 점은 여러 의미를 내포하고 있다. 6

기통 엔진의 경우에는 작용하는 힘 및 모멘트가 2차까지 모두 상쇄가 가능하며, 4기통 엔진보다 훨씬 부드럽고 조용한 결과를 낳고, 이에 비해 3기통 엔진의 경우에는 근본적인 수직 불평형력은 없으나 1차와 2차의 불평형 모멘트를 갖고 있어서 소음진동 면에서 불리하다.

요즈음의 엔진들은 대개가 고속 회전을 하게 되므로, 아주 작은 질량에 의한 불평형에 의해서도 어마어마한 관성 효과를 초래하여서, 회전부위 뿐만 아니라 지지구조에도 큰 진동 레벨과 심각한 응력을 발생시킬 수 있다. 따라서, 모든 돌아가는, 왕복하는 부품들은 동적으로 적절한 평형을 유지시켜 주는 것이 가장 근본적인 문제라 하겠다. 한 부품을 생산해 낼 때에는 그 부품을 구성하는 작은 부품들에 대해 모두 하나하나 평형을 잡고, 조립 후에도 다시 전체에 대해 평

형을 잡아야 회전력에 의한 효과를 최소화 할 수 있다.

또한, 폭발적인 연소과정에서 유발된 주기적 변형에 따른 엔진 구조의 과도 진동과 밸브의 충격, 피스톤과 실린더의 충돌 등에 의한 기계적 소음이 발생한다⁽⁷⁾. 이러한 소음 성분들은 엔진구조 자체에 의해 대부분의 에너지가 소실된다. 연구결과⁽⁸⁾에 의하면, 폭발에 의한 압력 변동은 엔진구조에 의해 약 70~130dB 정도나 저감됨을 보인다. 일반적으로, 주철은 알루미늄 합금보다 높은 감쇠 레벨을 지니므로 훨씬 좋은 감쇠 성능을 보인다. 엔진구조에 쓰이는 주철은 감쇠층이 입혀진 얇은 철판과 거의 대등한 정도의 감쇠율을 갖기 때문에, 엔진 구조표면에 감쇠를 더하여 진동을 줄이고자 하는 작업은 소용이 없고, 강성을 증가시키려는 노력은 어느 정도의 효과를 내기 위하여는

상당한 정도의 가격 상승을 감수하여야 한다. 따라서, 설계단계에서의 최적화된 동적구조 변경 작업이 매우 유망한 결과를 낼 수 있다.⁽⁹⁾

이 외에도, 발전기, 파워 스티어링 펌프, 오일 펌프, 압축기, 냉각용 송풍기 등의 엔진 보기류 등도 마운팅이나 평형이 적절치 않을 때에는 순음 성분의 소음을 발생시킨다.

(2) 흡, 배기계 소음

팽창과정 중 배기 밸브가 열리고 고압의 가스가 관으로 이루어진 배기계로 밀려나갈 때, 배기계 구조와 미관 출구를 통해 소음이 방사된다. 가장 주된 소음 성분은 엔진 회전수의 1차 및 2차 성분이나, 관의 길이에 의한 공명에 따라 때로는 4차, 6차, 8차, 10차 등의 고조파 성분도 상당한 크기를 지니는 수도 종종 있다. 고속회전시에는 밸브시트(valve seat)를 통한 배기 가스의 난류특성에 의해서 소음 스펙트럼이 백색잡음(white noise) 형태가 되므로, 협대역 성분은 훨씬 덜 중요하게 된다. 반사형 또는 반사-소실형 소음기로서 배기 소음을 감쇠시키게 되는데, 최근의 동향은 다른 소음 레벨의 저감과 발맞추어 좀 더 배기 소음을 줄이기 위해 매우 복잡한 경로의 배치를 갖는 구조의 소음기를 장착하게 되는데, 이 경우 과도한 배압에 의한 엔진 파워의 손실을 최소화하여야 한다⁽¹⁰⁾. 또한, 배기계의 길이가 상당히 길기 때문에 고유 모우드에 의한 진동이 생기며, 이 진동이 행거를 통해 바닥 판넬의 진동을 유지시키지 않도록 행거의 위치를 진동 모우드의 절점에 놓도록 하여야 한다.

흡기 소음도 배기 소음과 유사하게 흡입 밸브가 열리고 닫히는 주기적 운동에 의해 발생된다. 흡기 밸브가 열릴 때 흡기관 내의 공기

는 실린더에서 발생하는 급격한 압력 펄스 상승(소파)에 의해 압력 변동이 생기는데, 이 때 공기 진동은 실린더 내부 체적의 변화에 따라 다시 급격히 감쇠된다. 흡기 밸브를 닫게 되면 다시 압력 펄스의 상승(밀파)이 발생하는데, 이 경우에는 상대적으로 감쇠가 작게 압력 변동이 유지된다. 이러한 압력 변동의 주파수가 흡기계를 이루는 관의 길이에 의한 공명 주파수와 일치할 때 특히 매우 큰 소음이 방사된다⁽¹¹⁾. 공기 청정기의 체적이 어느 정도 반사형 소음기의 구실을 하게 되나, 헬름홀츠 공명기, 측지공명기, 단순 팽창형 소음기 등의 추가적인 반사형 소음기 요소의 장착이 요구되는 경우가 종종 있게 된다. 이 밖에 흡음계 구조를 통한 소음의 방사를 막기 위해 두께, 재질, 강성, 배치, 방진 등의 세부 사항에도 주의를 기울여야 한다.

(3) 구동계 소음

엔진의 파워가 바퀴로 전달되는 과정에서 구동계 소음이 발생된다. 전륜 구동형과 후륜 구동형과는 많은 부분이 다른 현상을 갖게 된다. 예를 들어, 후륜 구동형 차량은 추진축(propeller shaft)과 후륜축의 진동문제가 전륜 구동형보다 추가적으로 더 있다고 볼 수 있다.

트랜스미션 기어에 의한 소음생성 과정은 매우 복잡하고⁽¹²⁾, 각 기어 이빨의 굽힘 진동뿐만 아니라 기어 축의 굽힘 및 비틀림 진동과도 연관된다. 기어 소음은 기어의 종류와 가공 정밀도, 조립정도에 따라서도 다르고, 기어 케이싱 구조에 따라서도 상당히 다르게 된다. 기어의 메쉬(mesh) 주파수의 1차 및 2차 고조파가 기어 소음의 가장 중요한 주파수 성분으로 알려져 있으나, 이 외에도 이들의 차이의 정수배에 관계된 주파수들도 중요하다⁽¹³⁾.

전륜 구동형의 경우 사용되는 구동축의 각도의 범위가 상당히 넓어 정속 조인트(CV joint)를 쓰기 때문에 축의 어긋남에 의한 진동 성분은 없다. 그러나 이 결합부의 공차를 잘 못 선택하는 경우에는 듣기 매우 짜증나는 덜거덕 소리가 계속나게 되므로 조심하여야 한다. 후륜 구동형의 경우에는 후차축 전에 추진축이 더 붙어 있어서, 회전 속도에 따라 가진되는 불평형력에 의해 진동이 유발된다. 유니버설 조인트에서는 결합부의 큰 각도가 있는 경우에는 2차 고조파 형식의 가진이 생기게 된다^(14,15). 두개의 추진축을 이어서 쓰는 경우 요즈음에는 대개 정속 조인트를 중간에 장착하여, 후륜 차축과 엔진의 진동의 결합을 줄이는 축방향 컴플라이언스를 제공하고, 결합 각도를 약간 줄이는 역할을 시킨다. 결합 각도가 부적절할 때에는 발전시에 엔진 토크에 관계된 과도 진동(shudder) 및 저주파 소음이 발생할 수 있다. 이 외에도, 후륜 차축 피니언 노우즈(pinion nose)가 주행시 혹은 제동시에 피칭 운동을 하여 뒷쪽 추진축의 각도를 흔들리게 하는 과도 진동을 유발하여, 좋지 않은 진동뿐만 아니라, 차축 및 현가계의 진동을 발생시키므로써 내부 소음을 증가시키는 원인이 되기도 한다.

차축 소음은 대개 차동기어(differential gear)의 이빨이 맞물리는 운동에 따라 기어 소음으로 나타나거나, 이에 따른 가진에 의해 차축이 공진할 때 발생된다⁽¹⁶⁾. 이 소음은 협대역의 주파수 특성을 갖고 있어서 아주 작은 레벨이어도 매우 짜증나게 듣게 된다. 후륜 구동의 경우에는 차축의 질량과 강성을 조절하여 공진 주파수를 정상 작동 범위 이상으로 올리거나, 컨트롤 암(control arm) 부시(bush)

의 강성을 작게 하거나, 축 내부에 감쇠기를 장착하여 차축 소음을 줄이는 방법들이 유효하다.

(4) 도로 및 타이어 소음

타이어 제조과정 및 마모에 의해 발생하는 불평형, 공차, 반경 방향의 힘의 비균질성 등에 의한 가진과, 접촉 길이나 노면의 거칠기보다 훨씬 긴 파장을 갖는 노면의 비균질성 및 노면 거칠기에 따른 가진 등에 의해 타이어가 진동하게 된다⁽¹⁷⁾. 타이어 고유의 모드에 따른 진동에 따라 일부는 자체의 표면에서 소음으로 방사되고, 대부분은 (특히, 주로 400 Hz 이하) 현가계의 기계적 결합을 통하여 차체로 전달되며, 차체 판넬의 진동에 따라 내부에 소음이 유발된다. 이 전달량을 줄이기 위해 고무류의 부시를 쓰게 되는데, 부시는 입력과 차체 응답 특성을 고려하여 설치하여야 한다. 특히, 전륜 구동형의 차량의 경우에는 조향 및 조종 안정성을 해치지 않기 위해 너무 많은 절연연소를 써서는 안되고, 조향 랙(rack)이 상대적으로 유연한 구조인 대시에 붙어 있는 것이 보통이어서, 이러한 전륜 현가 설계 특성으로 인해 도로 소음이 발생되기 쉬운 구조로 되어 있다⁽¹⁸⁾.

거친 노면이나 돌기를 지나 갈 때에는 "thump" 소음이라 불리는 둔중한 소리와 충격 하쉬니스(harshness)라 불리는 거친 진동의 느낌을 받게 된다. 타이어가 불균일하게 거친 노면을 굴러갈 때에는 전·후 및 상부방향의 힘을 받게 되고, 타이어에 대한 연속적인 작은 충격이나, 단속적인 큰 충격 등에 의해서 광대역의 주파수를 갖는 가진이 발생된다. 이 중에서 타이어 구조 및 현가계의 감쇠를 피한 성분이 차체에 전달되어 소음을 유발시킨다. 특히, 요즈음 대부분의 차량에 쓰이는 래디얼(radial)

타이어는 대개 전후 방향의 강성이 다른 형식보다 크기 때문에, 현가계에서 이에 대한 대비를 하여야 한다.

타이어 소음은 타이어와 노면의 접촉부에서 발생한 소음 및 타이어 구조의 진동에 의해 방사된 소음이 공기 전달경로를 통해 차실내로 전달된 성분을 일컫는다⁽¹⁹⁾. 노면의 가진에 의한 트레드(tread)의 반경 방향 진동이 타이어 소음의 주된 원인으로 알려져 있다. 노면 접촉 부위의 끝단에 위치한 트레드의 급격한 가속도 역시 트레드를 가진시킨다. 이 외에도, 타이어 자체의 불균일성에 의해 주로 약 500 Hz 이하의 자려 진동이 발생될 수도 있다. 발생한 진동력은 타이어 구조 전체를 진동시켜서 소음을 방사시키는데, 특히 타이어 내부의 환형 공간의 공명과 연관된 주파수에서 매우 큰 소음이 유발된다⁽²⁰⁾. 한편, 블록과 홈으로 이루어져서 젖은 노면의 주행시 배수를 좋게 하는 목적의 트레드가 노면과 접촉하며 회전할 때, 홈에 있는 공기 부분은 하나의 공간을 형성하여서, 공간이 닫힐 때에는 압축되고, 공간이 열릴 때에는 갑자기 팽창되어 매우 큰 난류 및 소리를 발생시키게 된다. 이 때, 트레드의 다른 홈들과 연관되어 관을 형성하는 경우 공명이 생기고, 또, 작은 공간과 다른 홈 및 외기가 하나의 헬름홀츠 공명기로서 작동하기도 하는 매우 복합적인 기체에 의해 소위 패턴 소음이라 불리는 형태의 순음 소음이 발생된다. 매우 평탄한 노면상을 주행할 때에는 부착이 상당히 크기 때문에 접촉면의 끝단에서 스틱/슬립(stick/slip) 현상이 발생되는데, 종래에 가서는 고무 요소가 갑자기 이탈되기 때문에 고주파수의 접선 방향 진동을 유발시킬 수 있다. 타이어 제조업체들에서는

코너링, 제동력, 배수력, 내구성 등의 다른 설계 변수들의 최적화와 함께 소음방사가 최소화된 타이어 패턴 및 구조를 설계하는데 큰 진보를 이루고 있어서⁽²¹⁾, 앞으로 내부 소음뿐만 아니라 강화되고 있는 외부소음 규제에 대처할 타이어의 출현을 기대한다.

(5) 바람 소리

차실에서 듣게 되는 바람소리는 차체 바깥부분을 흐르는 난류에 의한 것과, 문짝 틀 및 유리창 등에서 틈새가 불완전하게 막혔을 경우 그 부위로 공기가 출입하는 상황에 의해 발생하는 기체로 크게 분류할 수 있다. 차량 외부의 난류는 그 공기역학적 특성의 조합에 의해 광대역의 소음을 발생시키고⁽²²⁾, 또 좌우측 후사경이나 안테나와 같은 돌출 부위에는 와류가 생겨서 순음 성분의 소음을 발생시킨다. 후자의 경우에는 유체의 Strouhal수와 매우 밀접한 관계에 있는 주파수의 성분이 발생된다. 그러나, 어떠한 기체에 의한 바람 소리이건 간에 문짝과 유리창의 밀봉 상태에 따라 내부 소음의 발생 및 크기가 결정된다. 특히, 고속 도로상에서 또는 시속 약 80km를 넘는 차량 속도에서는, 문짝에 가까운 쪽에 있는 승객의 귀에 이 바람 소리가 그 어느 소음 보다도 훨씬 짜증나게 들리는 성분이므로, 밀봉에 대한 대단한 주의가 필요하다. 문짝의 웨더 스트립(weather strip), 유리창의 글라스 런(glass run), 환기구의 고무막 등은 매우 유연하게 설계하여야 표면 거칠기에 의한 작은 통로의 생성을 막을 수 있다. 연료 경제성을 확보하고 차형을 멋지게 보이기 위하여 공기역학적인 외형 설계를 하는 것이 추세이어서 난류 소음은 많이 줄었지만, 차량 밑바닥의 돌출 부위나 헤드 라이트와 후드 사이의 빈공간, 전면 유리창

의 가장자리 접촉부와 A-필라(pillar)가 만나는 부위 및 외장 트림 등에는 역시 많은 주의를 기울여야 한다.

2.4 음향 신호에 따른 특성

수 많은 부위와 서로 다른 형식의 발생 기제를 갖는 내부 소음을 들을 때, 특히 귀에 거슬리는 성분이 있다⁽²³⁾. 일정 회전수 또는 차량 속도에서만 들리는 순음 성분, 단속적으로 들리는 소리, 시간에 따라 비정상적으로 변하는 성분, 500 Hz에서 1 Hz 대역상에 있는 높은 레벨의 광대역음, 충격음, 비트음(beatting), 높은 레벨의 지속적 초저주파음 등이 이에 해당한다. 엔진 부밍과 같은 순음 성분은 그 크기가 아주 작아도 상당히 잘 간파할 수 있는 정도로 좋지 않은 성분이다. 내부 트림류가 헐겁거나 공진이 일어나 서로 부딪힐 때 나는 삐거덕 소리나 클러치 부위에서의 달가달 소리 등은 연속적이지 않게 나기 때문에 귀에 거슬린다. 난류에 의한 바람 소리와 같은 것은 계속 발생하지만 시간에 따라 변하는 신호이기 때문에 신경이 쓰인다. 타이어의 패턴 소음이나 제동시의 높은 피치의 소리는 순음에 가깝고, 인간이 가장 민감한 주파수 대역내에 있기 때문에 듣기에 몹시 거북하다. 도로 소음이나 고속 회전시의 엔진 소음 중 일부는 인간의 언어 소통에 매우 중요한 자음들이 위치해 있는 500 Hz 대역에 놓여 있어서, 탑승자 간의 대화에 지장을 초래하므로 탑승자가 목청을 높여야 하게 만드는 짜증스런 장면을 연출한다. 돌맹이 조각이나 빗물 등이 휠 하우스에 부딪힐 때 같은 상황에 있어서 판넬의 감쇠가 절절치 못 할 때는, 금속성의 소리가 짧은 시간내에 불규칙적으로 생겨서 내부 승객을 불쾌

하게 하고, 싸구려 차를 타고 있다는 느낌을 지울 수 없게 한다. 엔진 보기 등의 회전수가 엔진 회전수 및 그 2차 성분과 매우 가까울 때나, 자동 변속기의 오버드라이브(over drive)기어비가 잘 못 선택되었을 경우 등에서는 비트음이 생기게 되어서, 근본적으로 잘 못 설계되었거나, 무언가 고장난 듯한 느낌을 갖게 하는 등의 불안감과 불쾌감을 느끼게 한다. 주파수간의 차이가 약 7 Hz 이상 될 때에는 비트음이 아니고 “throbbing”이라 불리우는 매우 기분나쁜 저주파 등락 형태의 음을 듣게 된다⁽²⁴⁾.

일반적으로 “잡소리”라고 불리우는 소음들은 내부의 전체적인 소음 레벨과 관계없이 차량의 평판을 떨어뜨리는 역할을 한다. 예를 들면, 트림류에 쓰이는 플라스틱 부품의 마찰 및 간섭음, 배기 매니폴드나 소음기 근처에 위치하는 방열판의 진동음, 속도계 케이블의 소음, 속움서버나 스프링 씨트에서 나는 마찰 및 간섭음, 의자 하부의 스프링에서 나느 간섭음 등은 NVH 엔지니어들 뿐만 아니라, 각 부서의 설계 담당자들과 부품개발 부서의 인력, 품질관리 요원들, 부품 회사의 엔지니어들 모두가 합심하여 해결하고자 노력하여야 한다.

2.5 주행 모드 및 엔진 회전수에 따른 소음 특성

차량 주행은 정차(idling), 급가속(wide open throttle acceleration), 완가속(part throttle acceleration), 정속(cruising), 감속(coast) 및 부분 감가속(floating) 등 6가지 모우드로 나눌 수 있다. 이외에도 시동을 끈 상태에서의 감속(coast down with ignition-off)의 주행 모우드가 있으나, 이는 주로 차량 시험용에서만 쓰이지 실제 상황에서는 안 쓰이는 모우드이므로

생략한다. 시동을 킬 때에는 연료 펌프에 의한 소음을 판별하기가 쉽고, 시동 후 정차 상태에서는 벨트 소음이나, 밸브 소음, 점화 코일, 송풍기 소음, 배기 음색 등을 판단하기에 좋고, 특히 트랜스미션 기어 및 클러치 계의 간섭음이 잘 들린다⁽²⁵⁾. 요즈음에는 자동 변속기를 부착한 차량의 판매 점유율이 늘어나서, 여름에 공기조화 장치를 켜 상태에서 “D”단에 기어가 놓여 있는 상태에서의 정차 소음(idle hum)도 상당히 큰 문제가 되고 있다. 젊거나, 조금한 운전자가 많이 사용하는 급가속 모우드 시에는 차량을 급히 빠른 속도로 올리기를 위하여 대개 최대 토크 영역 이상으로까지 엔진 회전수를 높이며, 각종 부품의 급격한 가속도 상승과, 엔진 마운팅 및 다른 방진계가 최대로 눌리거나 이완된 형태로 유지되는 점 등의 가장 열악한 조건에 의해 내부 소음이 크게 발생한다. 특히, 구동계의 심각한 진동을 유발하고, 흡배기계의 큰 공명 효과가 나타나며, 밸브 소음 및 피스톤 충격 등의 엔진 기계 소음도 크게 나타난다. 따라서, 저단 기어의 급가속인 경우에는 엔진의 폭발과 관계된 2차 성분이 매우 지배적인 형태가 된다. 특히, 요즈음에는 다른 음원이 상대적으로 많이 조용해진 이유로 해서, 크랭크 축의 굽힘 진동과 관련된 소위 “rumbling” 소음이 약 3000 rpm 이상에서 문제시 되는 경우도 생긴다⁽²⁶⁾. 완가속인 경우에는 이러한 점들이 상당히 작게 나타나나, 정상적인 운전자의 실제 시내 주행 모우드와 비슷하므로, 해당 차량의 실내 소음의 기준이 되는 매우 중요한 모우드라고 볼 수 있다. 정속 모우드에서는 고속인 경우에는 엔진 소음 뿐만 아니라 바람 소리, 타이어 소리 등이 매우 크게 들리게 된다. 저속 및

중속에서는 속도 및 엔진의 회전수에 따라 부밍 소음의 영향을 받기 쉽고, 기어 소음도 명확히 느낄 수 있다. 일부 자동차 전문 잡지류 등에서는 시속 100km에서의 내부 소음 레벨을 차량간의 비교 데이터로 삼는 경우도 있다. 감속 모드에서는 완가속 모드와 거의 비슷한 울의 감속도를 갖고 감속되는데, 타이어 및 구동계가 역으로 엔진을 구동하는 형식이므로, 엔진 제동 모드라고도 불리운다. 이 경우에는 급가속과 완가속의 중간 정도의 특성이 나타나고, 구동계에 의한 진동소음, 배기계에서의 맥동 소음, 차체 판넬의 진동 및 소음 방사 등을 느낄 수 있다. 특히, 기어 소음 및 구동축의 비틀림 진동에 의한 소음, 피니언 노우즈의 피칭에서 유발되어 현가계를 통해 전달되는 소음 등을 잘 파악할 수 있다. 부분 감가속 모드에서는 클러치의 과도 진동, 추진축 및 차축계의 과도 진동, 기어계의 과도 응답, 마운트의 유효성, 인젝션 소음 등을 잘 파악할 수 있는 모드이다.

2.6 차체 및 차실 공간의 소음진동 특성

차체 및 차체 판넬에서 방사되는 소음은 주로 저주파수 성분이 중요시 된다. 차체는 수 많은 중공축과 두께 약 0.7~0.8mm의 얇은 철판들이 매우 복잡한 형상, 크기, 접합의 형태로 이루어져 있어서, 모든 관련 주파수에 대해 진동력 전달, 소음 차단 성능 및 진동형태의 완전한 이해를 얻기는 힘든 일이다. 그러나, 전체적으로 승용차의 경우는 전후가 긴 구조로 되어 있으므로, 아주 낮은 주파수에서는 보의 굽힘 및 비틀림 진동과 유사한 형태의 진동 모우드가 큰 영향을 미친다. 10~30 Hz 범위에 관

련된 "shake"의 진동 형태는 언급하지 않겠지만, 차실 내부의 저차 부밍에 관계된 주파수 영역인 약 120 Hz 이하에서도 소음에 큰 영향을 미친다. 특히, 엔진룸과 A-필라가 만나는 부분등과 같이 구조가 꺾이게 되어 불리한 부분들은 저회전수, 저주파수 부밍에 영향을 미친다. 중주파수 대역에서는 링(ring) 모우드로 불리우는 차체 외형의 모우드가 내부 소음에 영향을 미치게 된다⁽²⁷⁾. 이러한 링 모우드는 차체 전후 방향의 단면에서 볼 때, 불규칙한 형태의 링과 같은 모우드의 진동을 하게 된다. 이 진동이 100~200Hz 내의 내부 음장의 공명과 연관될 때에는 매우 큰 소음이 생성된다. 이 밖에도, 차체 판넬은 국부적으로 판으로서의 진동을 하게 되는데⁽²⁸⁾, 판넬에는 대개 강성 증가의 목적으로 비드(beading)가 만들어져 있고, 형상은 샴시류, 배기관외 의자등의 배치와 형상에 맞추어져 있으며, 철판 위에는 제진재나 차음재가 붙어 있고, 작동 온도가 상당히 큰 범위를 가지고 있으므로 매우 복잡한 형태의 진동 양상을 띄게 된다. 각 판넬 요소에서의 중 및 고주파수 대역 음향에 대하여는, 감쇠용 재료의 부착 유무 이외에도 구조 진동 모우드의 형태에 따라 음향 방사 효율이 다르게 되므로, 그 특성을 충분히 감안하여야 한다⁽²⁹⁾.

내부 공간은 그 형상이 불규칙하고, 내장재의 음향 특성이 위치마다 다르며, 둘러싸고 있는 차체 판넬의 진동과 연성되어 있기 때문에, 음향 특성을 정확히 알아 내기가 쉽지 않다. 내부공간의 공명 주파수에서는 구조의 공진과 큰 입력이 수반되는 경우에 높은 레벨의 소음이 형성되므로 그 위치를 잘 파악하고 있어야 한다. 내부 공간의 공명은 피할 수 없는 물리적 현

상이므로, 외부 입력을 잘 조정하여 이를 회피하거나 가진을 억제시켜야 한다. 캠벨 선도(Campbell diagram)나 팬 차트(fan chart) 등과 같은 방법에 의해 모든 구조 공진 주파수를 모은 후에, 이들 주파수가 내부공명 주파수와 어느정도 근접해 있는가를 판단하여, 높은 소음의 원인을 찾아내고 변경 작업을 수행한다. 판넬의 진동과 내부 공명과의 연성관계에 의한 음장을 해석적으로 알아내는 방법으로는 유한요소법⁽³⁰⁾이나 경계요소법⁽³¹⁾을 이용하고, 차체 판넬에서 방사되는 음향 에너지의 흐름은 음향 인텐시티법⁽³²⁾이나 음향 홀로그래피⁽³³⁾ 등의 방법이 유망하다. 차체 판넬 각 부위의 내부 소음에 대한 기여도를 알아내고자 할 때에는 각 부위에 의한 효과를 탑승자의 귀의 위치에서 벡터적으로 합성하게 되므로, "어느 부위가 가장 큰 소음원이나?"라는 문제보다는 "주어진 소음 환경 및 작동조건에 있어서 어느 부위가 결과적인 소음에 대한 기여도가 가장 큰가?"라는 문제로서 생각해야 한다.

탑승자의 귀에 도달한 소음은 최종적으로 청감 특성에 의해 변형되어 사람이 느끼게 된다. 느끼게 되는 정도는 개인의 육체적, 정신적 상태에 따라 다르기 때문에 모든 사람의 주관에 맞게 판단할 수는 없으나, 일반적으로 숙련된 NVH 엔지니어의 귀의 특성과 그가 판단하는 구매자의 청감 기준과 선호도에 따라 등급이 결정된다. 가장 민감한 청력을 갖게 되는 나이는 20대 초반이고, 소음을 평가하고 개선 작업을 실제 수행하는 엔지니어들은 우리나라의 경우 대개 30대 후반에서 30대 중반 이하이며, 구매력이 가장 왕성한 나이는 30대 중반에서 50대 후반인 점은 하나의 모순으로서, 내부 소음 제어에 있

어서 또하나의 어려운 면을 보여 준다.

3. 맺는 말

이상과 같이 차실 내부 소음을 형성하는 각종 발생 형태 및 소음원, 전달 형식의 분류에 따라 특성을 간략히 살펴보았다. 각 소음원 및 전달경로의 특성을 확실히 이해하면, 현상을 파악하는 작업이나 소음제어 대책을 수립하는데 있어서 매우 효과적으로 대처할 수 있다. 이 글에서는 소음 저감 대책에 관하여 논하지는 않았지만, 소음발생 기제 (mechanism)에 대한 근본적 원리를 포함하고 있으므로 각 소음 문제에 대한 대책을 수립하는데 있어서 저감 방향을 설정하는 것은 실제 구조에 대한 기본 개념의 적용이라고 볼 수 있다.

한편, 차체의 용접 및 접착 상태, 부품의 제작 및 조립 상태, 철판 및 고무류의 제작 및 재료 상태 등에 의해서도 내부 소음의 특성이 상당히 틀려지게 되므로⁽³⁴⁾, 제품 및 공정의 설계자는 제작에 참여하는 인원의 숙련 상태에 관계없이 일정한 수준의 소음 품질이 확보될 수 있도록 최선의 노력을 기울여야 하고, 제작 근로자들도 세심한 정성을 쏟아야 일관성 있게 조용한 차를 생산해 낼 수 있다.

“마차가 올 때 함께 오고, 마차와 함께 멀어지며, 이것 없이는 마차가 움직일 수 없는 것은?”이라는 서양 수수께끼의 정답으로서 소음이 될 수 없는 날을 기대해 보며 이 글을 마친다.

참고 문헌

(1) R. Joos, 1989, "Vehicle Acoustics in the Nineties-Applying Theory to Practice," Proc. of Uni-

keller Conf., pp. E/1~E/2, Bruettisellen, Swiss.

(2) H. F. Olson, 1967, Music, Physics and Engineering, 2nd ed., Dover Publ., New York.

(3) H. Lord, W.S. Gatley and H. A. Evensen, 1980, Noise Control for Engineers, McGraw Hill, New York.

(4) C. Dickenson, 1987, "A Hybrid Approach to Driveline Noise Control," Noise & Vib. Control Worldwide, March, pp. 92~96.

(5) 이정권, 김인동, 이영섭, 1992, "차실내 소음 개선을 위한 차음재 및 제진재의 효과적 적용," 한국자동차공학회지, 제14권, pp. 68~78.

(6) M. Ogura, 1973, "Balancing of Single Cylinder Engine," 内燃機關, Vol. 12, pp. 71~83.

(7) T. Priede, 1979, "Problems and Developments in Automotive Engine Noise Research," SAE Paper 790205.

(8) M. F. Russel, D. C. Palmer and C. D. Young, 1984, "Measuring Diesel Noise at Source with a View to Its Control," Inst. Mech. Eng., Paper No. C142/84.

(9) N. Lalor and M. Petyt, 1982, "Noise Assessment of Engine Structure Designs by Finite Element Techniques," Proc. of Symposium on Engine Noise, pp. 211~244, Warren, U.S.A.

(10) M. L. Munjal, 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, New York.

(11) P. H. Smith, 1970, The Scientific Design of Exhaust and Intake Systems, G.T. Toulis & Co., Henley-on-Thames.

(12) D. B. Welbourn, 1979,

"Fundamental Knowledge of Gear Noise-A Survey," Inst. Mech. Eng., Paper No. C117/79.

(13) R. B. Randall, Cepstrum Analysis and Gearbox Fault Diagnosis, B & K Application Note.

(14) S.W.E. Earles and I. I. Esat, 1984, "Some Vibratory Characteristics of Hooke's Joint Drive-line Systems," Inst. Mech. Eng., Paper No. C8/84.

(15) A. H. Berker and B. J. Hoover, 1969, "Driveline Tuning for Quieter Vehicles," SAE Paper 690258.

(16) E. Abe and H. Hagiwara, 1975, "Advanced Method for Reduction in Axle Gear Noise," SAE Paper 750150.

(17) C. M. Harris, 1957, Handbook of Noise Control, McGraw Hill, New York.

(18) M. Shimizu, 1965, "Road Noise of Passenger Car," 自動車技術, Vol. 19, pp. 377~387.

(19) G. Rimondi, 1992, "Tire Contribution to Vehicle Noise Generation," Proc. 2nd Int. Conf. on Vehicle Comfort, pp. 955~975, Bologna, Italy.

(20) Y. Nakajima, I. Inoue and H. Ogawa, 1989, "Application of Boundary Element Method and Modal Analysis into Acoustic Problems of Tire," Meeting of Rubber Division, American Chemical Society, Paper No. 66, Detroit, U.S.A.

(21) K. Jost, 1992, "Tire Design and Development," Automotive Eng., Vol. 100, pp. 21~25.

(22) G. F. Romberg and R. G. Lajoie, 1978, "An objective Method of Estimating Car Interior Aer-

odynamic Noise," SAE PT-78/16.

(23) K. D. Kryter, 1962, Effects of Noise on Man, 2nd ed., Academic Press, New York.

(24) L. E. Kinsler and A. R. Frey, 1962, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, New York.

(25) Y. Kanbe, K. Yamamoto, Y. Sogou and H. Koga, 1985, "Method for Improvement of Rattling Noise in Manual Transmission," 自動車技術, Vol. 39, pp. 1378~1385.

(26) T. Kamiya, T. Atsumi and K. Tasaka, 1987, "Development of New Type of Crankshaft Pulley with Bending Damper," 自動車기술, Vol. 41, pp. 1557~1561.

(27) S. K. Jha and T. Priede,

1972, "Origin of Low Frequency Noise in Motor Cars," Proc. of 14th FISITA Conf., pp. 46~55, London, U.K.

(28) W. Stahel, 1981, "Reduction of Low Frequency Interior Noise through Application of Noise Control Material," Proc. of Unikeler Conf., Paper No. E13, Bruettisellen, Swiss.

(29) F. J. Fahy, 1985, Sound and Structural Vibration, Academic Press, London.

(30) 김석현, 이장무, 김중희, 1991, "승용차의 차실 음향 및 차체 진동에 관한 연구(II)," 대한기계학회논문집, Vol. 15, pp. 824~833.

(31) S. Suzuki, M. Imai and S. Ishiyama, 1986, "ACOUST/

BOOM-A Noise Level Predicting and Reducing Computer Code," Proc. BEM Conf., Vol. 8, pp. 105~144.

(32) 오재웅, 1993, "자동차에 있어서 소음 진동원 규명 및 전달 특성에 관한 연구 동향 및 추진방법," G7차세대 자동차 안전도 공통 기반기술 연구회, 2차 모임, 대전.

(33) J. Hald and K. B. Ginn, 1989, "Vehicle Noise Investigation Using Spatial Transformation of Sound Fields," Sound and Vib., April.

(34) L. A. Wood and C. A. Joachim, 1984, "Variability of Interior Noise Levels in Passenger Cars," Inst. Mech. Eng., Paper No. C136/84.