



SIEMENS

Ingenuity for life

Siemens Digital Industries Software

하이브리드 및 전기 자동차의 음향 거동 해결

source-transfer-receiver 방법을 사용해 소음,
진동 및 충격 문제 방지

개요

전기차는 내연 엔진 (ICE) 차량보다 훨씬 소음이 적지만, 그 나름의 NVH (소음, 진동, 충격) 문제가 있습니다. 고주파 소음은 거슬리다는 인식이 있으며, 풍절음이나 타이어 소음과 같이 내연 엔진 차량에서는 가려져 들리지 않던 소음이 전기차에서는 두드러집니다. 또한, 저속 주행 시 소음이 없다는 점은 자동차 OEM사와 규제 기관이 보행자 안전, 특히 시각 장애인들의 안전과 관련해 신경 써야 하는 부분이기도 합니다. 본 백서에서는 각 문제를 source-transfer-receiver 구성 요소로 나눠 복잡한 NVH 문제를 해결하는 방법을 설명합니다. 이 방법을 사용하면 뒤늦게 발생하는 설계 문제의 근본 원인을 파악하고, 후반에 설계를 변경할 수 있는 가능성이 있습니다.

소개

지난 10년간 친환경 교통 수단의 필요성이 증가하면서 다양한 새로운 파워트레인 및 차량 설계가 생겨났습니다. 파워트레인 전기화는 미래 자동차 산업이 CO₂ 배출 감축 목표를 달성하는 데 핵심 요소 중 하나입니다. 여기에는 고유한 특성과 성능, 제약이 기존 ICE 차량과 상당히 다른 새로운 컨셉 사용도 포함됩니다. NVH 거동도 마찬가지입니다. 전기 자동차는 ICE 구동 차량보다 훨씬 더 조용하지만, 내부 소음은 여러 결합된, 독립적인 기본 주파수가 있는 거슬리는 고주파 소음 구성 요소로 나타납니다. 새로운 전력 전자 장치, 특히 PWM (Pulse Width Modulation) 컨트롤이 포함돼 특정 사운드 변조 패턴이 생성됩니다. 동시에 풍절음이나 타이어 소음과 같은 기존 광대역 소음원은 물론, 오일 펌프, HVAC, 교류 발전기 또는 변속기 시스템과 같은 다양한 다른 구성 요소에서 방출되는 거슬리는 소음이 더 이상 내연 엔진의 자체 소음으로 가려지지 않습니다. 이러한 가림 효과가 덜해지면서 차량 성능과 품질에 대한 사용자 인식에

부정적인 영향을 미칠 수 있는 복잡한 사운드 시그니처가 생겨났습니다. 또한, 주행 거리와 성능을 최대화하면서 배터리 비용을 완화해 수용 가능한 NVH 성능을 달성하는 것은 차량 경량화를 한계까지 밀어부치는 작업이 필요해 점점 더 어려워지고 있습니다.

내부 소음 외에도 외부 소음에 대한 전기화 영향도 중요한 관심사입니다. 한편으로 전기화는 환경 소음 공해를 상당 부분 줄일 수 있는 수단으로 여겨집니다. 그러나 또 다른 한편으로는 소음이 없는 전기차의 특성 상 보행자와 기타 취약한 도로 사용자 (특히 시각 장애인), 내연 엔진 차량이 쉽게 존재를 인식할 수 없어 도심 지역에서 위험한 상황을 유발할 수 있다는 위험도 있습니다. 이 문제에 대한 해법은 소음 공해를 최소화하면서 보행자들에 경각심을 줄 수 있는 경고음을 갖춘 차량을 개발하는 것입니다. 증가하는 NVH 문제의 복잡성이 그림 1에 요약돼 있습니다.

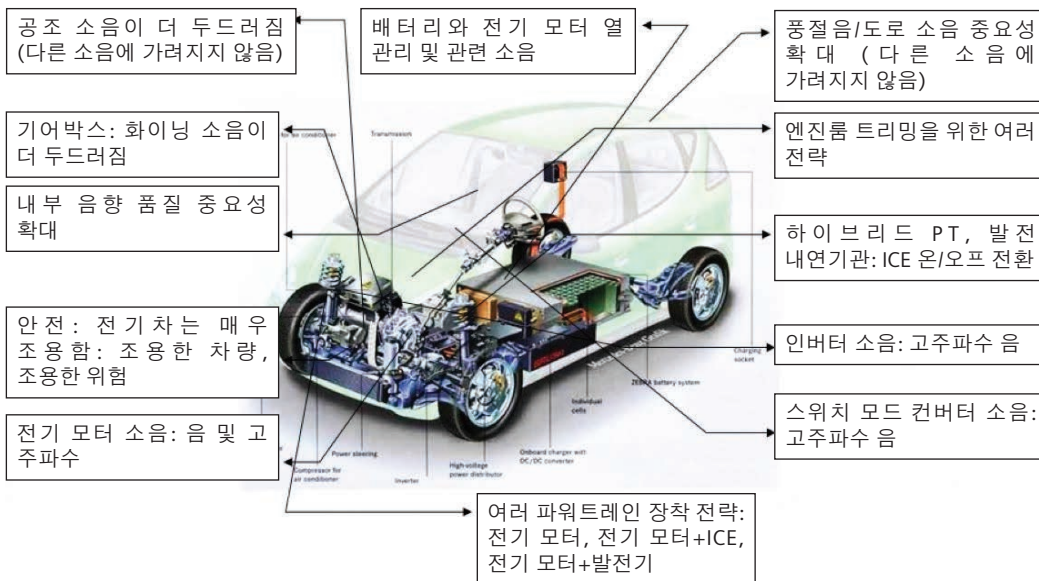


그림 1: 하이브리드 및 전기 자동차의 NVH 문제

Source-transfer-receiver 방법

앞서 설명한 복잡한 NVH 문제를 해결하는 가장 좋은 방법 중 하나는 각 문제를 source-transfer-receiver 구성 요소로 나누는 것입니다. 이 방법을 사용하면 세 가지 개별 설계 측면이 제공되며, 어느 한 측면에서 업데이트가 이뤄지면 전반적으로 반영됩니다.

Source

내연 엔진은 차량 소음의 주 유발원으로 여겨지며, 이런 내연 엔진이 장착되지 않는 전기차는 소음 수준이 현저히 낮은 편입니다. 그러므로 전기차의 노이즈 시그니처는 내연 엔진 차량과 사뭇 다르며, 훨씬 더 복잡합니다. 몇 가지 극명한 차이점이 그림 2에 나와 있습니다.

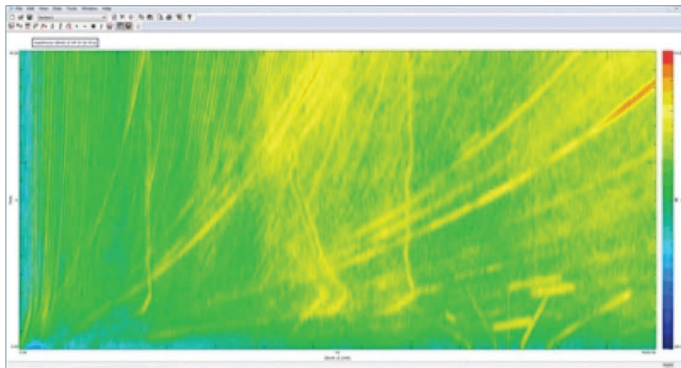


그림 2: 하이브리드 전기차 (HEV)의 노이즈 시그니처.

우선 하이브리드와 전기차에는 전기 모터, 전력 전자 등과 같은 새로운 소음원 구성요소가 있다는 점을 인지해야 합니다. 이들 구성요소는 기존 내연 엔진 차량에 비해 다양한 작동 및 소음 특성을 갖고 있습니다. 또한 전기 모터의 회전 속도를 제어하기 위해 펄스 폭 변조 기술을 사용하는 가변 속도 드라이브 (VSD) 인버터로 인한 변조 현상도 새로운 문제입니다. VSD 변조는 한 쌍의 엔진 속도 증속 측파대로 둘러싸인 하나 이상의 중앙 반송파 주파수로 구성된 노이즈 풋프린트에서 일반적인 고조파 구조를 노출합니다. 또한 전기 주행 및 회생 제동시

자기장으로 인해 고주파 음이 발생합니다. 이러한 소음 특성은 거슬림을 주며, 차량 내부에 화이닝 소음이나 웅웅거리는 소음을 유발합니다. 내연 엔진이 소음을 가려주는 효과가 없어 변속기, HVAC, 팬, 오일 펌프 및 타이어와 같은 여러 다른 소스 구성 요소의 소음이 상대적으로 크게 들립니다. 이 모든 소음원이 한데 모이면 상당히 심각해질 수 있으며, 설계 해석 단계에서 이를 반영해야 합니다.

하이브리드 및 전기차에 있어 마찬가지로 어려운 점은 속도가 급격히 빨라지는 등 엔진 부하 가속 중의 급격한 엔진 속도 변화와 같은 과도 현상입니다. 또한 차량 가속 및 제동 중에 전기 화이닝 소음의 큰 진폭 변화가 발생해 시그니처 분석이 더욱 어려워집니다. 가장 일반적인 예로는 하이브리드 차량에서 빈번히 일어나는 내연 엔진 시동 켜고 끄기 소음과 전력 냉각 장치 스위칭 소음이 있습니다.

이러한 모든 요소를 고려할 때, 하이브리드 전기차의 노이즈 시그니처는 단일 RPM과 관련된 제한된 저차 고조파 구성요소 세트가 주로 소음을 유발하는 내연 엔진 관점에서 개발된 기술로는 처리할 수 없는 더 높은 수준의 복잡성을 필요로 합니다. 이에 따라 새로이 적용되는 방법은 결합되거나 독립적인 기본 주파수 (다중 회전 속도, 2차 구성 요소)를 가진 여러 그룹의 차수 및 변조 구성요소로 구성되며 간격이 가깝고 교차 차수인, 특히 과도 작동 조건에서 빠른 차수 프로파일을 갖춘 여러 그룹의 차수 및 변조 구성요소로 구성된 복잡한 고조파 구조를 처리해야 합니다.

Transfer

급격히 달라진 전기 파워트레인의 노이즈 시그니처는 여러 소음원에서 소음을 느끼는 지점 (예: 운전자의 귀)에 이르는 소음 전달 과정을 설명하기 위한 여러 기술과 모델을 필요로 합니다. 주된 문제는 훨씬 더 높은 소음원 주파수 범위와 관련이 있으므로, 전파를 설명하고 모델링하는 데 사용되는 공식을 재고해야 합니다.

이러한 HEV 문제의 관점에서 재고해야 할 핵심 실험 기술은 TPA (Transfer Path Analysis)입니다. TPA는 운영 데이터 및 주파수 응답 함수 (FRF) 측정에 기반해 소음원에서 소음을 느끼는 지점으로의 구조 전달 및 공중 전달 경로를 파악할 수 있는 실험 기술입니다. 이 방법은 1980년대부터 존재했으며, 기존 내연 기관 차량에서 두드러졌던 저주파 차수 구성요소에만 초점을 맞췄습니다. 그러나 하이브리드 전기차는 새로운 과제를 제시합니다. 첫째, TPA 방법은 HEV에서 두드러진 역할을 하는 고주파수를 처리할 수 있어야 합니다. 기존 TPA 방법은 특정 임계값 이상의 주파수에서 분해되는 것으로 보이며, 이는 주로 FRF 위상 동작의 큰 변동성때문입니다. 이로 인해 에너지, 전력 기반 TPA 공식 개발이 필요합니다. 둘째, HEV의 복잡한 소스 시그니처는 의사 도메인 TPA 공식에 직면합니다. 이런 시간 영역 방식을 활용해 대상 응답에 대한 소스 경로 기여도의 청각화 및 음질 분석이 가능합니다.

예시 (1): EV 경량 NVH 설계

전기차 (EV)가 일반적으로 내연 엔진 차량보다 조용하다는 사실은 자동차 제조사가 차체의 음향 처리 및 구조 보강의 질량을 줄일 수 있는 기회를 제공합니다. World Auto Steel에서 개발한 전기 모터가 장착된 경량 철강 차체인 미래 철강 차체 (FSV)의 컨셉트 설계 단계에서 주요 고려 사항이 무엇인지 파악하기 위한 연구가 수행되었습니다 [1].

측정은 동일한 차체를 공유하는 두 소형차에서 이뤄졌으며, 각각 내연 엔진과 전기 모터를 탑재했습니다. 결과는 전기 모터 소음의 장단점을 파악하고 FSV의 NVH 목표를 도출하기 위한 시작점으로 사용되었습니다. 내연 엔진 버전에 비해 전기차는 고속에서 들리는 고립된 고주파 피크를 제외하고, 운전자의 귀 위치에서 훨씬 낮은 음압 수준을 보여줬습니다. 이 피크는 차량이 최고 속도로 주행할 때 약 3,500Hz 정도입니다. 그림 3은 런업 중 로그 주파수 스펙트럼을 보여줍니다. 2,000Hz 이상의 스펙트럼을 가진 모터 차수 (np)의 배수에서 차수 $4 * np$ 는 가장 큰 진폭에 도달합니다. 기어 박스 차수 (gp)는 np에 가깝습니다. 런업 중 다른 음량은 내연 엔진 차량의 음량보다 훨씬 낮았지만, 그림 4와 같이 고음 $4 * np$ 및 $8 * np$ 톤으로 인해 선명도가 더 높았습니다. 그러나 선명도보다 더 두드러진 것은 TTNR (tone-to-noise ratio) 및 PR (prominence ratio)과 같은 음조 측정치였습니다. 전달 경로 분석은 $4 * np$ 함량이

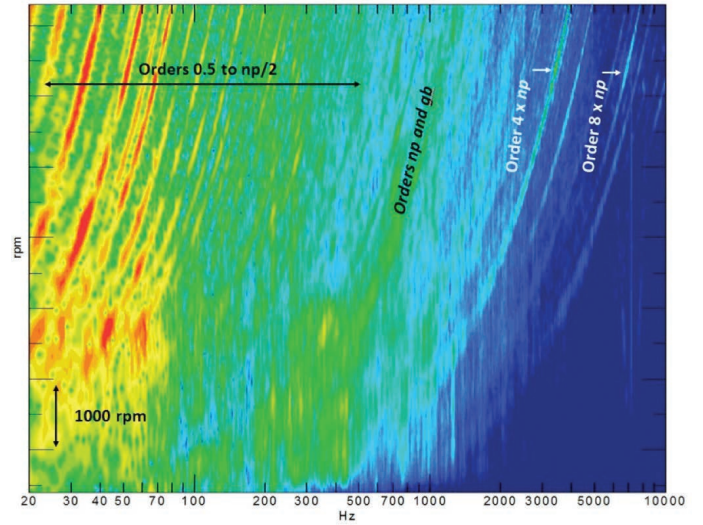


그림 3: 전기 자동차 런업 스펙트럼.

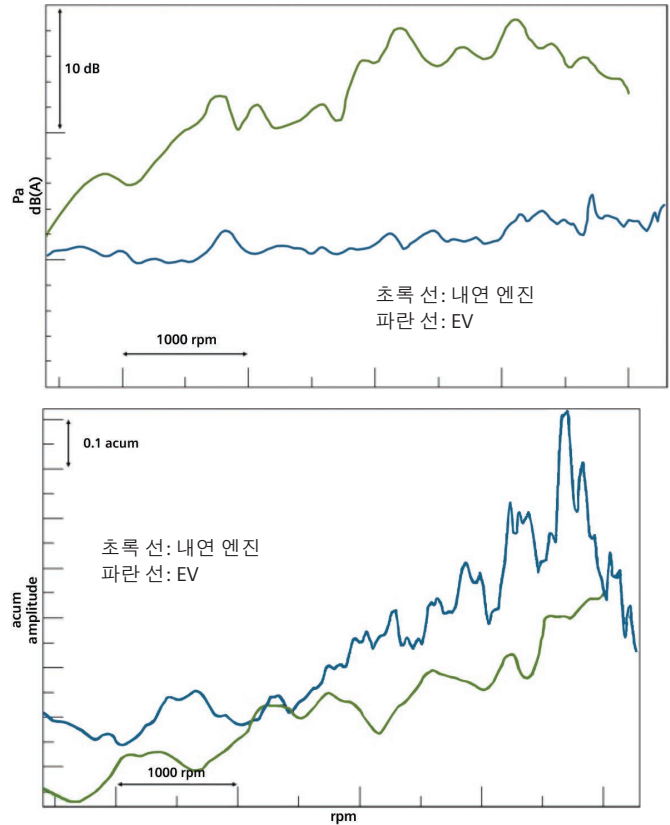


그림 4: 런업 메트릭 소리 크기 (up); 런업 메트릭 소리 선명도 (down)

본질적으로 영향을 받는 주파수 범위에서 공기로 전달된다는 것을 보여줬으며, 최선의 해결책은 강도와 안전 제약 내에서, 전체 차체 중량을 낮출 기회가 있는 선에서 전용 및 선별적 방음 포장재를 사용하는 것입니다. 이를 위해 그림 5와 같이 응답 스펙트럼에 기반해 소음 목표를 설계했습니다.

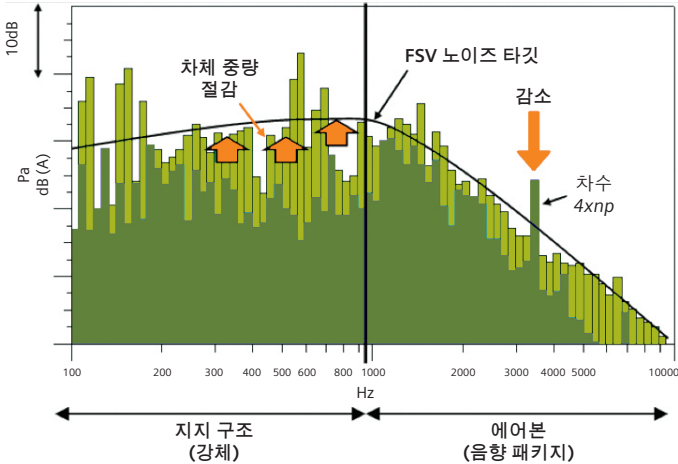


그림 5: 스펙트럼 목표치 설정을 위한 EV 및 ICE 소음 반응 비교.

이를 통해 1,000Hz 미만 주파수 범위에서 NVH 목표 상한을 완화하는 방식으로 더 조용한 전기차 구동계를 활용한 영리한 설계로 중량을 상당히 줄일 수 있다는 결론이 나왔습니다. 예를 들어 모터 마운트와 탑승 공간 사이의 신체 소음 전달 함수 (NTF)는 플랫폼 NVH 목표를 손상시키지 않고 상한을 올릴 수 있습니다. 한편, 전기 모터에서 발생하는 고주파 순음 노이즈는 특수 흡음 소재와 같은 특별 조치가 필요한 문제를 발생시킵니다. 주요 주파수에서 소음을 3 데시벨 (dB) 줄이려면 약 1kg의 무게를 줄여야 하며, 이는 방음 포장의 다른 부분의 중량 감소에 비하면 미미한 수준입니다. 이에 대한 자세한 내용은 SAE 자료에서 확인할 수 있습니다. [2]

Receiver

인식과 특별히 거슬리는 부분에 대한 관측이 HEV의 NVH 성능 요구사항을 구성합니다. 이는 전기 파워트레인의 소음 수준이 낮지만, 음향 엔지니어는 이러한 기대치를

충족하기 위한 만만치 않은 과제를 해결해야 함을 의미합니다. 연소 엔진 소음이 주는 마스킹 효과가 없기 때문에 여러 화이닝 고주파 음과 그 외 주관적으로 불쾌한 소음이 나타나며, 제어할 수 없는 소리 섞임이 발생합니다. 또한 유향 상태일 때 공조기, 파워 스티어링 펌프, 진공 펌프 및 팬과 같은 액세서리 소음이 상당히 두드러지며, 강한 음색적 특징을 띠 수 있습니다.

쾌적함 외에도 내부 소음의 동적 느낌은 브랜드별 사운드 설계에 있어 중요한 특징입니다. 전기 자동차 내부 소음의 부하 의존성은 일반적으로 내연 엔진 차량보다 낮기 때문에 동적인 느낌이 덜할 수 있지만, 이는 잘 알려진 전기 모터의 빠르고 강력한 토크 빌드에 맞지 않습니다.

기존 차량과 달리 주행 조건은 내연 엔진의 작동 상태와 연계되지 않는 경우가 많습니다. 예를 들어 연소 엔진은 차량이 최대 부하에서 가속중일 때 일정한 속도로 작동할 수 있습니다. 더 놀라운 점은 빈번한 시동 켜기/끄기 및 회생 제동 중 발생하는 화이닝 소음입니다. 하이브리드 차량의 이러한 예기치 않은 현상은 운전자의 방향 감각 손실을 일으킬 수 있습니다. 차량 설계 팀은 앞으로 이런 문제를 해결하고 고객의 요구를 충족하는 브랜드 사운드를 설계해야 합니다.

예시 (2): EV 보행자 경고 시스템

HEV의 중요한 소음 문제로 점차 그 비중을 더해가는 NVH 주제는 조용한 도로 주행 차량의 외부 소리와 취약한 도로 사용자 (VRU)의 안전 간 관계입니다. 특히 20km 미만의 저속인 경우, 타이어 소음이 나기 전에는 엔진 소음이 나지 않아 인식할 만한 차량 근접 경고가 없으면 도로 사용자에게 위험을 초래할 수 있습니다.

이 주제는 궁극적으로 차량 설계 요구사항에 반영돼 표준 차량 엔지니어링 프로세스에서 다뤄야 하므로, 이러한 설계 작업을 지원하고 구현할 수 있는 표준 소프트웨어 툴이 제공돼야 합니다. 본 백서에서는 두 가지 주요 과제를 다룹니다.

첫 번째 과제는 감지 가능하고 위치 추적이 가능하며, 차량으로 인식할 수 있는 적절한 VRU 경고음의 심리 음향 설계 및 합성으로 보행자와 주변 상황에 미치는 불편함을 최소화하는 것입니다. 이를 위해서는 외부 사운드 인식 영역 자체, 분석, 관련성 평가, 다양한 사운드 구성 요소

모델링 및 대상 사운드 합성에 대한 연구가 필요하며, 이를 통해 매개변수화된 평가 연구를 수행할 수 있습니다. 그림 6에 Nissan Leaf 공개 데이터 세트의 노이즈 시그니처 예시가 있습니다.

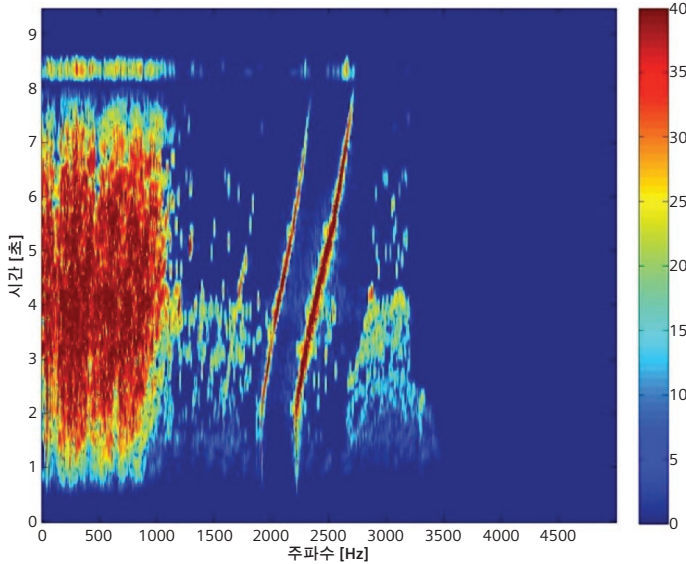


그림 6: 전기차 경고 음향 스펙트럼 (0-20 km/h)

그림 6을 보면 두 개의 신호 기여가 명확히 나타납니다. 첫 번째 기여 구성요소는 600Hz의 피크와 최대 100Hz의 중요한 기여를 갖는 광대역 저주파로 구성됩니다. 추가 광대역 그룹은 2,800-3,500Hz 범위에서 발견됩니다. 두 번째 기여는 속도에 의존하는 주파수가 있는 순수 조화

주파수가 특징입니다. 두 그룹이 발견되었습니다. 2000-2200Hz에서 두 개의 공칭 주파수를 가진 첫 번째 주 그룹과 특히 측정 창의 첫 번째 부분에서 활성화되는 3개의 공칭 주파수 1,100Hz, 1,350Hz 및 1,600Hz가 있는 두 번째 그룹입니다. 또한 다양한 신호 구성 요소에 대해 진폭 변조에 대한 엔벨로프 스펙트럼 분석 다이어그램과 FM 측파대에 대한 협대역 스펙트럼 분석을 통해 변조 연구를 수행했습니다. [3]

두 번째 과제는 위험 영역 밖에서 거슬림을 최소화하면서 경고 효과를 극대화하기 위해 차량 음원 구성 설계를 최적화하는 것입니다. 이를 위해서는 넓은 주파수 범위를 포괄하며, 차량과 환경 제약 조건을 모두 고려하는 사운드 전파 시뮬레이션 방법을 사용하는 것이 필수적입니다. 이 평가 기준은 다른 교통 수단이나 주변 환경과 같은 주변 마스킹 소음과 실제 차량 환경, 실제 도로 환경 등이 포함된 복잡한 음장을 지원해야 합니다. 또한 수치 계산부터 궁극적으로 평가 연구를 위해 소음을 느끼는 위치에서 실제 사운드 합성에 이르는 단계를 만들어야 합니다.

이 시나리오를 설명하기 위해 여러 가지 음향 시뮬레이션이 컨셉트 단계에서 수행되었습니다. 자동차 주변의 소음 수준과 소음원의 방향성을 다양한 구성으로 쉽게 평가할 수 있어 최적의 구성으로 이어지며, 구성 요소 및 사운드 시스템 사양을 도출할 수 있습니다. 다극 경계 요소 방법과 광선 추적 방법을 비롯한 다양한 방식이 있습니다. 본 백서에서 노이즈는 Simcenter 3D™ BEM (Boundary Element Method) 방법을 사용해 계산했으며, 차량 표면은 2D 요소를 사용해 이산화되었습니다. 대표적인

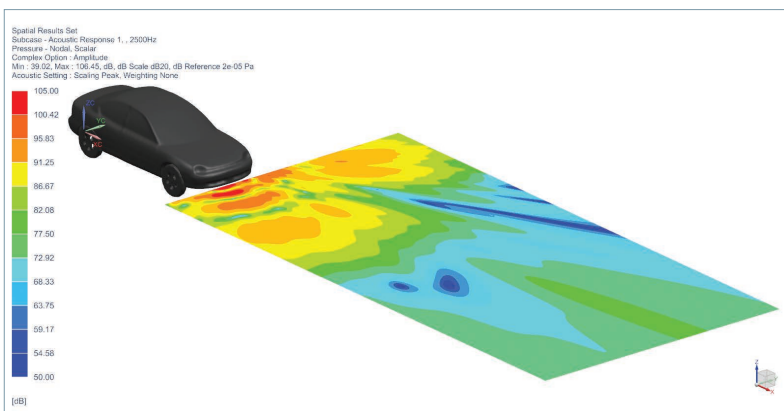
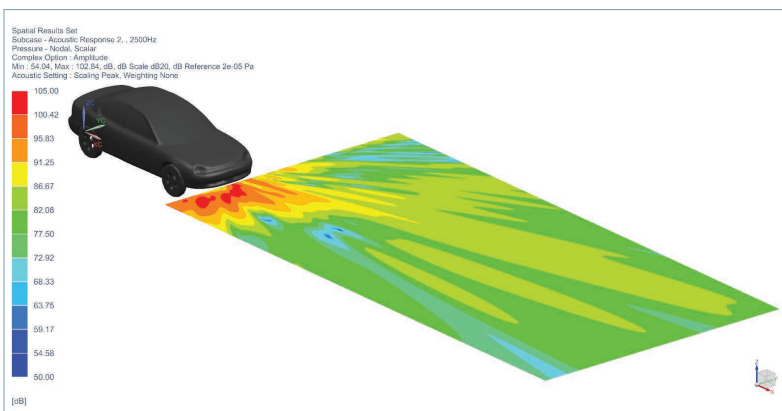


그림 7: 2,500Hz의 오른쪽 휠 하우징 (왼쪽)과 맨 오른쪽 범퍼 (오른쪽)의 음원 위치.

차종을 사용했습니다. 방출되는 소음을 포착하기 위해 정교한 마이크를 차량 상단에 장착했습니다. 대칭 평면은 노면 반사를 고려했습니다. 소스를 모델링하기 위해 단일 진폭을 갖는 100dB 모노폴을 정의했습니다. 음향 메시 크기 때문에 고속 다극 BEM으로 알려진 고급 BEM 솔버를 사용했습니다. 두 가지 음원 위치 (2,500Hz에서의 방화벽과 휠 하우스)에 대한 일반적인 결과가 그림 7에 나타나 있습니다.

또한 동일한 기술로 소리가 복잡한 교통 상황 속에 침투할지 여부를 결정할 수 있으며, 도로변에 주차된 차량 사이와 같이 보행자가 있을 것으로 예상되는 주요 위치에서

소리가 명확히 들리게 할 수 있습니다. 그림 8의 예시는 지정된 소스 위치에 대해 650Hz 및 2,500Hz의 소음이 같은 위치에서 같은 수준으로 들리지 않음을 보여줍니다. 이는 경고 소음 자체를 설계할 때 중요한 고려 사항입니다.

이러한 시뮬레이션 방법론은 환경이나 다른 트래픽 사용자에게 미치는 거슬림을 최소화하면서 위험 구역에서 최대 경고 효과를 낼 수 있는 적절한 음원 구성 설계를 위한 틀입니다. 실제 음향 인식 연구를 수행하려면 음향 시뮬레이션을 소스 신호 설계와 연결하고 실제 청취 테스트를 통해 주관적 인식과 알림/경고 수준 차원에서 해석이 이뤄져야 합니다.

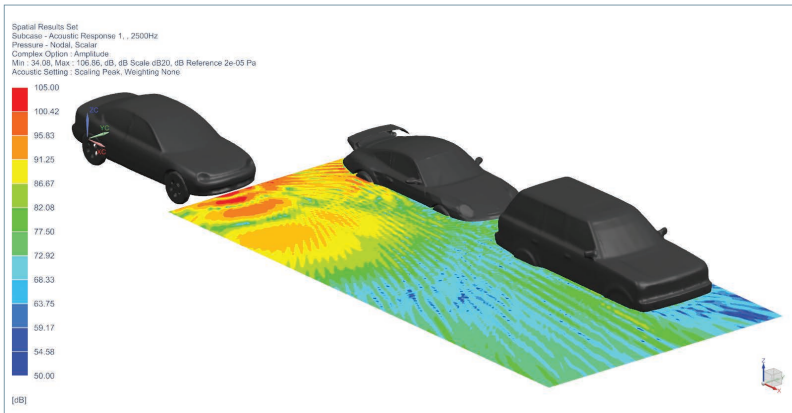
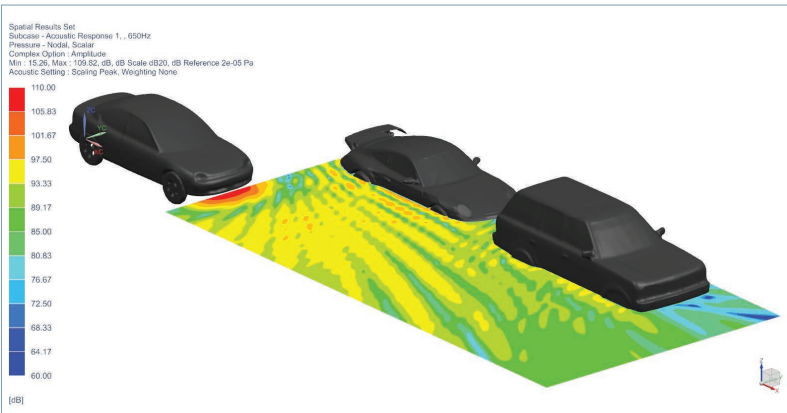


그림 8: 650Hz (왼쪽) 및 2,500Hz (오른쪽)에 대한 방향성 분석.

결론

본 연구에서는 하이브리드 및 EV와 관련된 NVH 엔지니어링 프로세스의 주요 요소 중 일부에 대해 살펴보았습니다. 내연 엔진 구동 차량과 다른 여러 가지 새로운 과제가 있으며, 특정 기술 솔루션 뿐만 아니라 적응된, 새로운 엔지니어링과 테스트, 시뮬레이션 방법론이 필요함을 알 수 있습니다. 하이브리드 및 전기 자동차에 장착된 배터리 냉각 (팬) 및 변속기와 같은 보조 시스템은 저속에서 가려지지 않는 고음의 소음을 생성합니다. 소리 전달 수준에서 주요 영향은 소음원이 가진 고주파 특성에서 비롯되며, 차량 중량을 감소하는 추세가 이를 더욱 악화시킵니다. TPA 및 트림 바디 음향 시뮬레이션과 같은 고전적인 NVH 방법은 더 높은

주파수 범위를 처리하도록 확장됩니다. 소음을 느끼는 측면에서는 음향에 대한 주관적인 인식에 큰 비중을 둡니다. 소음원과 전달 경로의 음질 문제를 적절히 파악하고, 모델 기반 방식을 사용한 솔루션 엔지니어링을 구현하려면 물리적으로 적절한 고성능 음향 합성 방식을 개발해야 합니다. 하이브리드/전기차 설계에서 나타나는 또 다른 중요한 주제는 저속 주행 시 외부 소음이 없다는 점에 대한 적절한 대처법입니다. 제시된 방법은 차량 접근과 궤적, 속도를 도로 사용자에게 알리기 위해 차량 주행 중에 방출되는 의도적 경고음을 장착시키는 것입니다.

참조

1. Shaw, J., Kuriyama, Y., Lambriks, M., "Achieving a Lightweight and Steel-Intensive Body Structure for Alternative Powertrains," SAE Paper 2011-01-0425, 2011, doi:10.4271/2011-01-0425.
2. Florentin J., Durieux F., Kuriyama Y., Yamamoto T., "Electric Motor Noise in a Lightweight Steel Vehicle," SAE Paper 2011-01-1724, Proc. SAE NVH Conference 2011.
3. Van der Auweraer H., Janssens K., Sabbatini D., Sana E., De Langhe K., "Electric Vehicle Exterior Sound and Sound Source Design for Increased Safety," Internoise 2011, September 4-7 2011, Osaka, Japan.

Siemens Digital Industries Software

본사

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 972 987 3000

미주 지역

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 314 264 8499

유럽 지역

Stephenson House
Sir William Siemens Square
Frimley, Camberley
Surrey, GU16 8QD
+44 (0) 1276 413200

아태 지역

Unit 901-902, 9/F
Tower B, Manulife Financial Centre
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong
Kowloon, Hong Kong
+852 2230 3333

Siemens Digital Industries Software 소개

Siemens Digital Industries Software는 엔지니어링, 제조 및 전자 설계가 미래와 만나는 디지털 엔터프라이즈를 실현하기 위한 혁신에 박차를 가하고 있습니다. Siemens Digital Industries Software의 솔루션은 규모를 막론한 기업이 조직에 혁신을 촉진할 새로운 인사이트, 기회, 자동화 수준을 제공하는 포괄적 디지털 트윈을 생성하고 활용할 수 있도록 지원합니다. Siemens Digital Industries Software 제품과 서비스에 대한 자세한 사항은 sw.siemens.com을 방문하시거나 [LinkedIn](#), [Twitter](#), [Facebook](#) 및 [Instagram](#) 계정 팔로워를 통해 확인하실 수 있습니다. Siemens Digital Industries Software – Where today meets tomorrow.

siemens.com/software

© 2019 Siemens. 관련 Siemens 상표 목록은 [여기](#)서 확인할 수 있습니다. 기타 모든 상표는 해당 소유자에 귀속됩니다.

54809-83292-C17-KO 1/21 LOC