 <p style="text-align: center;">특집 수송기계의 소음진동 저감</p>	<h2 style="margin: 0;">통계적 에너지 해석법을 이용한 자동차의 공기기인 소음 해석</h2> <p style="margin: 10px 0 0 0;">임종윤* (한국ESI)</p>
--	--

1. 머리말

자동차의 실내 소음을 전달경로로 살펴 보면, 크게 구조기인 소음(structure-borne noise)과 공기기인 소음(air-borne noise)으로 나눌 수 있는데, 그림 1에서 보듯이 중주파수 대역 이상에서는 자동차 실내 소음의 대부분은 공기기인 소음이 지배적이다. 이러한 중주파수 대역 이상에서의 자동차 실내 소음해석은 기존의 전통적인 유한요소법(FEM) 또는 경계요소법(BEM)을 적용하기에는 한계가 있다. 자동차의 실내 공간에서, 중주파수 대역 이상에서는 각 1/3 옥타브 대역에서 수백 또는 수천 개 이상의 음향 공진모드로 인해 매우 큰 모드 중첩이 발생하여, 경계조건이나 해석대상의 작은 변화에 대해서도 모드가 급격하게 변하게 되는 불확실성이 증가하기 때문이다. 이를 유한요소법 또는 경계요소법 등을 이용하여 해석할 경우에는 그 계산시간이 매우 오래 소

요되고 모드 거동 등의 결과에 의미를 부여하기 힘들어 실용적으로 적용하기 곤란하며, 보통 200 또는 300 Hz 이상의 자동차의 실내 소음해석은 기존의 방법을 적용하지 않는다. 자동차의 공기기인 소음 해석을 위해 적합하고 성공적으로 사용되고 있는 방법은 통계적 에너지 해석법(SEA : statistical energy analysis)이다. 통계적 에너지 해석법은 full vehicle의 실내 소음해석뿐만 아니라 dash, floor, door, roof 등의 공기기인 소음의 주요 component의 음향 성능해석에도 사용된다. 또한 자동차의 공기기인 소음을 제어하기 위해 다양한 흡차음재가 사용되는데, 이 흡차음재의 적절한 모델링을 통계적 에너지 해석법과 연계함으로써 흡차음재를 고려한 소음 해석이 가능하게 되어, 흡차음재의 설계 및 최적화 등에도 사용되고 있다.

2. 자동차 공기기인 소음해석의 SEA 적용

2.1 적용 분야

자동차의 공기기인 소음해석을 위해 SEA를 적용하는 데에 있어서 다음과 같이 크게 3가지로 구별할 수 있다. 첫째는 full vehicle에 대해 적용하는 것으로, 소음개선, 민감도 해석, 흡차음재의 비용이나 무게 저감을 목표로 한다. 이 경우에는 해석 조건을 스피커 등을 이용한 이상적인 음원(ideal load)을 사용하거나 실제 작동 중인 음원(operating load)을 사용할 수도 있는데, 이상적인 음원은 SEA 모델의 검증 및 민감도 해석에 주로 사용되며, 작동 음원은 음원의 기여도 분석 및 sound package 설

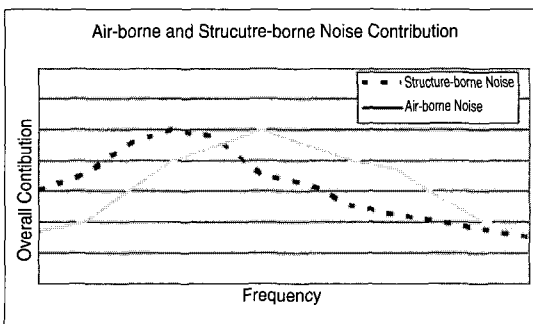


그림 1 자동차 실내의 공기기인 소음이 지배적인 주파수 영역

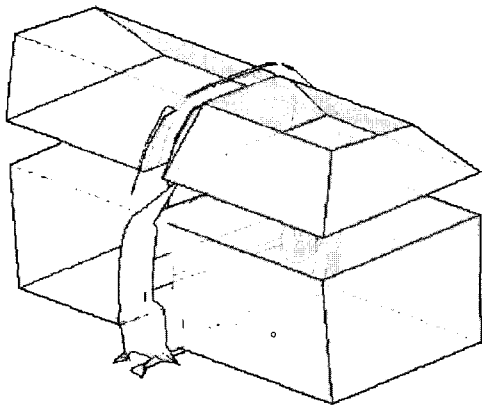


그림 2 자동차 도어의 음향성능 평가를 위한 SEA 모델링

계에 사용된다. 둘째는 component level에서 SEA를 적용하는 것으로 그 component에 사용되는 음향재료의 비교, 재료의 최적화 등을 해석 목표로 하게 된다. 이 경우에는 해석조건이 보통 전달손실 또는 소음저감 등이 되며 전달 손실을 해석적으로 계산하는 과정을 VTL(virtual transmission loss)이라고도 한다. 보통 해석대상인 자동차 component는 dash, floor, door, roof 등의 차실내 공간을 둘러싸고 있는 것으로 흡차음재의 종류, 적용 부위 등을 고려하면서 모델링을 할 수 있다. 그림 2는 자동차 도어의 소음저감 또는 전달손실을 해석적으로 구하기 위한 SEA 모델링의 한 예를 보여주고 있다. 그리고 셋째는 full vehicle을 대상으로 sound package을 최적화하는 것으로 차실내 소음, sound package의 무게, 비용 등을 목적함수로 하여 최적화 소프트웨어를 이용하여 최적의 sound package를 선정하는 것을 목표로 한다. SEA는 계산시간이 매우 빠르므로 full vehicle에 대해서도 짧은 시간에 수십만의 반복계산이 가능하므로 해석 S/W와 연계기능이 가능한 최적화 소프트웨어를 이용하게 된다.

2.2 공기기인 소음의 전달경로 - Area Junction

SEA의 입장에서 소음의 전달경로는 하부시스템 사이의 junction을 통해 전달되는데, 공기기인 소음은 area junction을 통해 전달된다고 할 수 있다. 따라서 공기기인 소음에 대한 해석을 위해서는 point 및 line junction에 의한 연성손실계수는 무시하고 area junction만을 고려하여 해석하여도 되며 이럴 경우 계산시간이 더욱 빨라

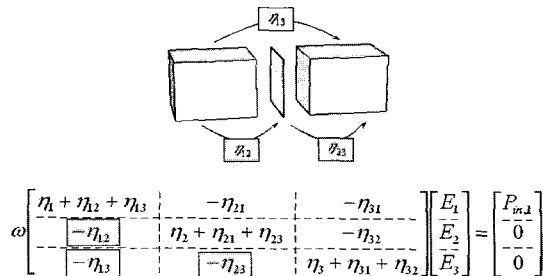


그림 3 Area junction에서의 연성손실계수

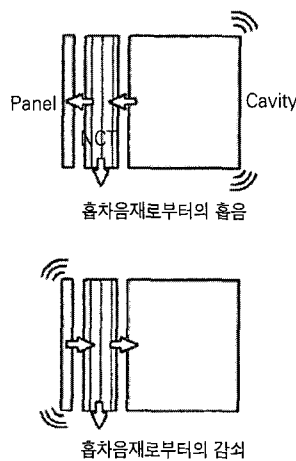
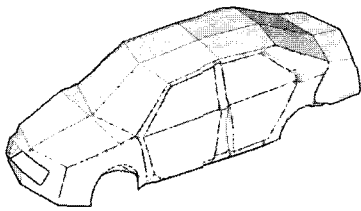
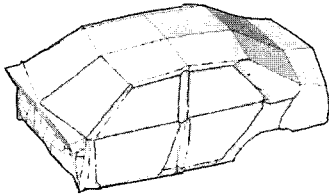


그림 4 Area junction에서의 흡차음재 적용

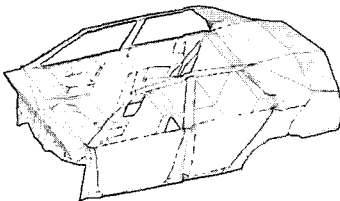
지게 된다. 특히 point 및 line junction에 의한 연성손실계수를 무시하는 것은 공기기인 소음을 고려한 sound package 최적화 등을 위해 수만 또는 수십만 번의 반복계산을 빠른 시간 내에 할 수 있게 해준다. 구조 하부시스템과 음향 하부시스템 사이의 area junction을 통한 소음 전달은 구조물의 공진에 의한 음향 하부시스템으로의 전달(resonant path transmission), 질량 법칙에 의한 비공진 전달(non-resonant path transmission), 그리고 작은 틈새에 의한 소음 전달(acoustic leak) 등의 3가지로 나누어 살펴 볼 수 있다. Resonant path에 의한 소음 전달은 구조물의 공진에 의한 방사효율에 의존하여 구조물의 방사 에너지가 전달되는 것으로 구조물의 방사효율의 계산이 필요하게 된다. 그러나 일반적으로 임의의 구조물의 정확한 방사효율은 경계요소법 또는 FEA-SEA 연성법 등을 이용하여 구할 수 있기 때문에, 일반적인 SEA에서는 이 구조물을 평판으로 등가화하여 근사적으로 계산하게 된다. Resonant path에 의한 소음 전달이 지배적인



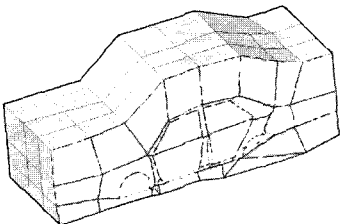
(a) 구조 하부시스템



(b) 차실 내부의 음향 하부시스템



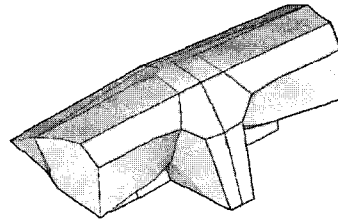
(c) 구조물 내부의 음향 하부시스템



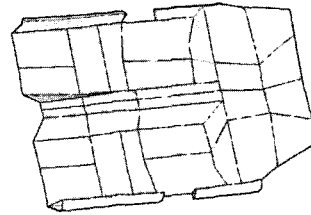
(d) 외부의 음향 하부시스템

그림 5 전형적인 4-도어 세단의 SEA 모델

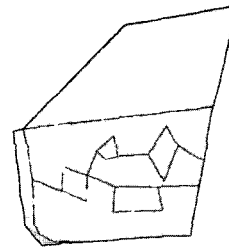
경우에는 구조물의 진동을 줄이는 것이 필요하므로 구조물의 감쇠를 높이기 위한 작업이 필요하다. Non-resonant path에 의한 소음 전달은 구조물의 공진과는 관계없이 구조물의 단위 길이당 질량에 의존하여 소음이 전달되는 것이다. 일반적으로 이러한 질량 법칙에 따른 소음 전달은 저주파수 대역에서 지배적으로 나타나게 된다. Non-resonant path에 의한 소음 전달이 지배적인 경우는 구조물의 진동을 줄이는 것은 큰 효과가 없고 구조물의 단위 길이당 질량을 키우거나 이중 또는 다중 벽 구조물로 하는 것이 필요하다. Acoustic leak에 의한



(a) Dash



(b) Floor



(c) Door

그림 6 자동차 component의 구조 SEA 모델

소음 전달은 area junction에 매우 작은 면적을 가지는 틈이 있는 경우, 이 틈을 통해 소음 전달이 이루어지는 것으로 pass-throughs, access hole, grommet, gap, grillage 등이 그 예이다. Acoustic leak에 의한 소음 전달은 주로 고주파수 대역에서 지배적으로 나타나며 이를 저감하기 위해 acoustic leak을 줄이기는 것이 필요하다. 그림 3은 일반적인 acoustic cavity-panel-acoustic cavity에서의 area junction에 대한 연성손실계수를 보여주고 있다.

이러한 공기기인 소음 전달의 통로인 area junction에 흡차음재를 붙임으로써 공기기인 소음 전달의 정도를 조절할 수 있는데 이러한 흡차음재를 noise control treatment(NCT)라 한다. 음향 하부시스템만 고려한 경우, 그 경계에서 NCT를 적용한 경우에는 음향 하부시스템의 감쇠가 추가되어 잔향시간이 달라지게 된다. 구조 하부시스템만 고려한 경우, 그 경계에 NCT를 적용한 경우에는 구조 하부시스템의 감쇠가 추가되며 또한

NCT의 질량이 구조 하부시스템에 비해 작지 않을 경우에는 reactive impedance도 추가된다. 일반적으로 area junction은 구조 하부시스템과 음향 하부시스템의 연결 부위에서 생기며 이 junction에 NCT를 적용하는 경우에는 음향 하부시스템에서는 흡음이 추가되고 구조 하부시스템에서는 감쇠가 추가되어 resonant path에 의한 연성손실계수를 변화하게 한다. 그림 4는 panel과 cavity가 접한 면에서의 area junction에 흡차음재를 적용하였을 때, cavity에서는 흡음이 증가하게 되고 panel에서는 감쇠가 추가되는 것을 보여주는 것이다.

2.3 SEA 모델링 및 검증을 위한 시험

자동차의 공기기인 소음 해석을 위한 SEA 모델링을 비교적 상세하게 하는 경우, 4-door sedan type의 자동차에 대해, 구조 하부시스템은 약 300~400여개, 음향 하부시스템은 약 100여 개로 이루어진다. 구조 하부시스

템은 실내 공간을 감싸고 있는 dash, floor, roof, door, wind shield, seat 등과 함께 wheel house, trunk part, front part, fender, hood 등을 모델링 하나 엔진 및 구동 장치는 모델링 하지 않는다. 음향 하부시스템은 실내 공간을 front, rear, cargo, upper/lower/foot area, driver/passenger side 등으로 나누고, door, seat, dash 등에서의 내부 음향 공간도 모델링 한다. 실외 공간은 green house 공간, under floor, wheel house 공간과 함께 자동차 외형을 둘러싸고 있는 일정 공간도 세분하여 모델링 한다. 그림 5는 전형적인 4-door sedan의 구조 하부시스템, 음향 하부시스템을 보여 준다. 또한 주요 component의 음향성능 평가를 위한 구조 하부시스템 모델링도 그림 6에서 보여주고 있다.

공기기인 소음 해석을 검증하기 위해 전술한 바와 같이 보통 2가지의 loading 조건에 따라 시험을 하게 된다. 이상적인 loading에서는 스피커를 음원으로 이용하게 되는데, 엔진 noise 검증을 위해서는 스피커를 엔진 룸에 설

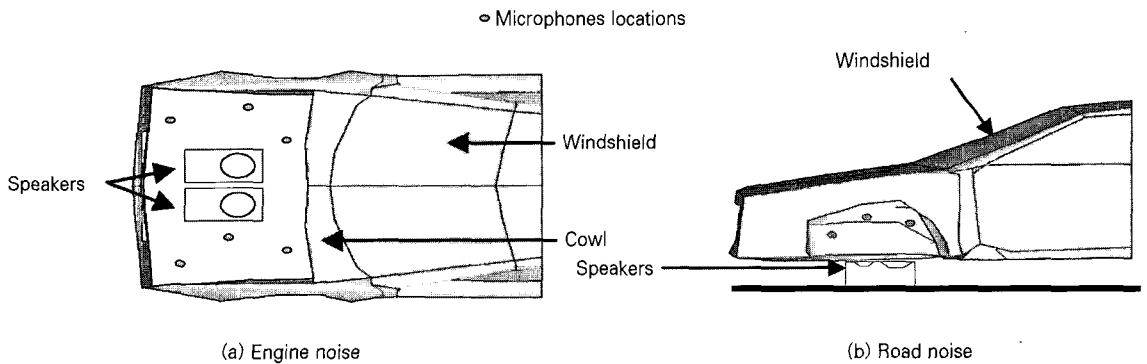


그림 7 이상적인 loading test에서의 스피커 및 스피커 음압의 측정위치

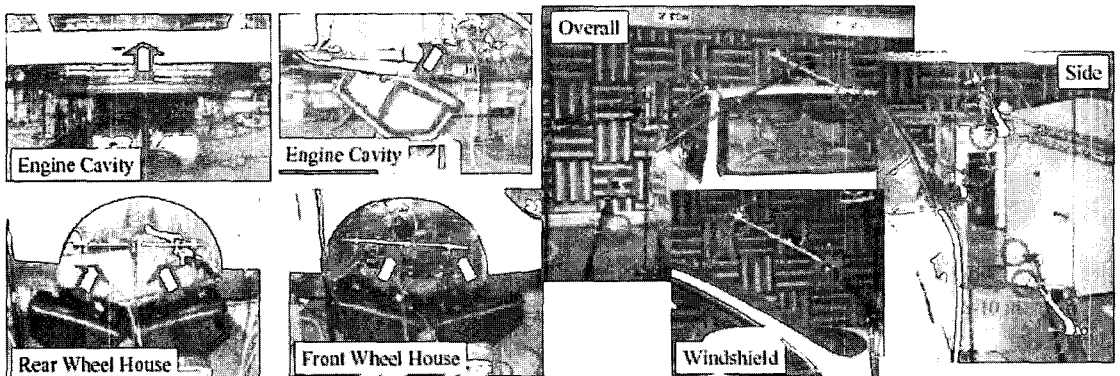
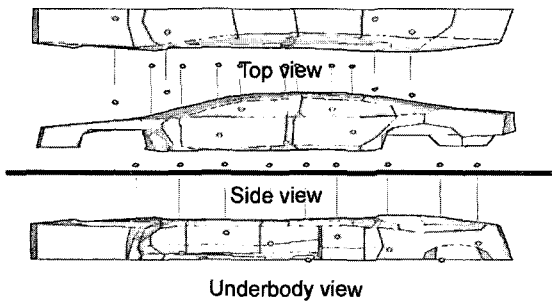
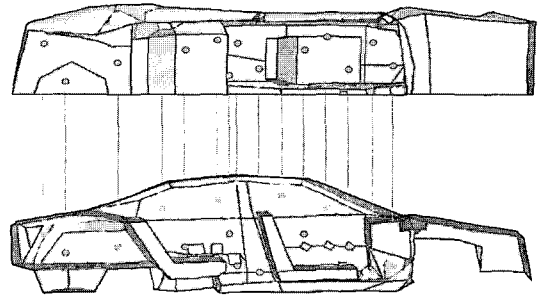


그림 8 이상적인 loading test에서의 스피커 및 외부 마이크로폰의 위치



(a) 차량 외부의 음압 측정위치



(b) 차량 내부의 음압 측정위치

그림 9 SEA 해석의 입력 데이터 및 시험의 검증을 위한 차량 내/외부의 음압 측정위치

치하고, road noise 검증을 위해서는 스피커를 wheel house에 설치한다. 이 때 엔진 또는 타이어는 자동차로부터 분리한다. 스피커는 주파수 응답이 100 ~ 10000 Hz에서 3 dB 이내에 들도록 평탄하고 그 파워가 100 dB@1 m 이상인 스피커 시스템을 사용한다. 그림 7은 엔진 룸 및 wheel house 공간에서 스피커와 스피커의 음압을 측정하기 위한 마이크로폰의 위치를 보여준다. 또한 그림 8에는 반무향실에서 자동차의 엔진 룸 또는 wheel house에 스피커 시스템을 설치하고 자동차 외곽을 따라 여러 위치에서 마이크로폰을 설치하여 소음을 측정하는 것을 보여주고 있다. 작동 음원을 가지고 시험을 할 경우에는 4-wheel chassis dynamometer를 이용하게 되는데, engine noise 검증을 위해서는 구동기어를 중립으로 하고 일정한 속도로 엔진을 가동하여 시험하는 것이며, road noise 검증을 위해서는 구동기어를 중립인 상태에서 엔진을 끄고 coarse roll을 이용하여 4개의 타이어를 구동하여 시험하는 것이다. Coarse roll을 사용하는 것은 충분한 크기의 road noise를 발생시켜 차실내 소음의 크기를 키우게 함으로써 잡음 대 신호비를 향상시키기 위해서이다. 그림 9는 자동차의 공기기인 소음의 해석과 시험과의 검증을 위해, 해석의 입력 데이터로 사용되는 음원 및 검증을 위한 소음 데이터를 자동차의 실외 및 실내의 여러 곳에서 측정하는 전형적인 위치를 보여준다.

3. 자동차 공기기인 소음해석의 SEA 과정

3.1 다층 음향재료

일반적으로 full vehicle 또는 자동차 component에는

공기기인 소음의 제어를 위해 다양한 종류의 흡차음재가 부착된다. 이러한 흡차음재는 조금 더 자세히 살펴보면 보통 1개의 재료로 되어 있지 않고 여러 개의 재료가 층으로 쌓여있는 것을 볼 수 있는데, 이를 다층 음향재료(multi-layered acoustic material)라고도 한다. 다층 음향재료는 각 층의 음향재료를 적절한 재료로 구분하고 각 재료에 맞는 물성치를 필요로 하게 되는데, 소음 제어를 위해 사용되는 흡차음재는 탄성계수, 프와송비 등으로 대표되는 구조물과는 다른 거동을 하게 된다. 특히 기공이 많은 흡음재의 경우는 기공(pore)과 구조체(frame) 사이의 연성이 발생하여 이를 같이 고려하여 음향해석을 하게 된다. 이 지배방정식을 Biot's equation이라 하는데, 이 식에는 porosity, flow resistivity, tortuosity, viscous & thermal characteristic length, bulk density, bulk modulus, structural loss factor, Poisson's ratio 등의 Biot property가 필요하게 된다. 이러한 Biot property는 다양한 시험장비에 의해 측정할 수 있는데, 최근에는 impedance tube에 의한 음향재료의 흡음률 데이터를 이용하여 Biot property를 해석적으로 규명해주는 방법이 많이 사용되고 있으며 이를 inverse method라고도 한다. 시험장비에 의해 Biot property를 구하기 위해서는 여러 종류의 시험장비가 필요하고 특정 Biot property 대해서는 시험의 편차 및 일관성이 떨어지는 문제가 있는 반면에, impedance tube의 흡음률 데이터를 이용하여 해석적으로 구하는 것은 비교적 간편하고 빠른 시간 내에 구할 수 있는 장점이 있기 때문에 inverse method의 사용은 Biot property를 규명하는데 매우 필요한 방법이 되고 있다.

3.2 SEA 적용과정

자동차의 공기기인 소음해석을 위해 SEA를 적용하는 경우 보통 다음의 과정을 통해 진행하게 된다.

- Full vehicle 또는 component에 사용되는 흡차음재를 다층 재료로 분리한다. 다층 재료의 각 층을 적절한 재료, 즉, fiber, foam, air-gap, elastic structure 등으로 정의한다. Fiber 또는 foam 등의 기공성 음향재료인 경우에는 재료를 적절히 잘라서 시편을 만들어 biot property를 구한다. Impedance tube를 이용해 해석적으로 Biot property를 구하는 경우에는 재료를 impedance tube에 맞도록 시편을 만들고 impedance tube test를 통해 흡음률을 얻고 이 데이터로부터 Biot property를 규명한다.
- 분석된 각 재료의 물성치 및 biot property를 가지고 다층 재료의 음향특성을 해석적으로 구한다. 다층 재료의 음향특성을 해석적으로 구하는 방법에는 전달행렬법(trasfer matrix method), 유한요소법 등이 있는데, 공기기인 소음 해석을 위해서는 모델링이 용이한 전달행렬법이 많이 사용된다. 해석적으로 구해지는 다층 재료의 음향특성은 총합흡음률 및 전달손

실이 된다.

- Full vehicle 또는 component를 SEA로 모델링 할 때, 해석적으로 구하기 어려운 입력데이터가 있는데, 그것은 구조 하부시스템의 감쇠손실계수(damping loss factor)이다. 이 감쇠손실계수는 시험을 통해 구해야 하는데 보통 impact hammer를 이용하여 진동 응답의 감쇠율(decay rate)을 측정함으로써 구한다. 1/1 옥타브 또는 1/3 옥타브 대역에 대한 시간영역에서의 감쇠율을 분해하여 몇 가지의 smoothing algorithm을 통해 감쇠율 곡선을 부드럽게 한 후 감쇠계수를 구하게 된다.
- CAD 또는 FEM의 mesh 데이터로부터 full vehicle 또는 component의 SEA 모델링을 수행한다. 전술한 바와 같이, 공기기인 소음 해석의 경우, area junction이 가장 중요하므로 area junction을 기준으로 하여 구조 하부시스템을 정의한다. 또한 구조 하부시스템에 부착되는 흡차음재의 configuration에 맞춰 구조 하부시스템을 정의할 필요가 있다. 이제 다층 재료의 흡음률 및 전달손실 등의 음향특성 데이터를 대응하는 area junction의 흡차음재에 할당하고, 구조 하부시스

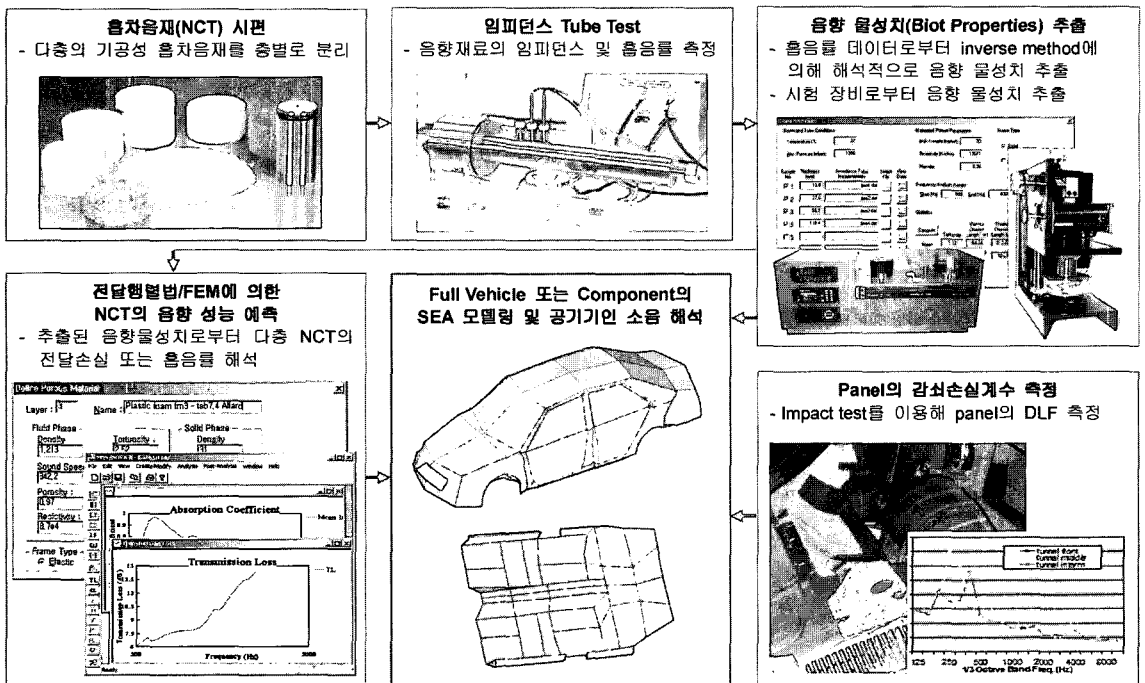


그림 10 Full vehicle 또는 component의 공기기인 소음 해석의 SEA 적용과정

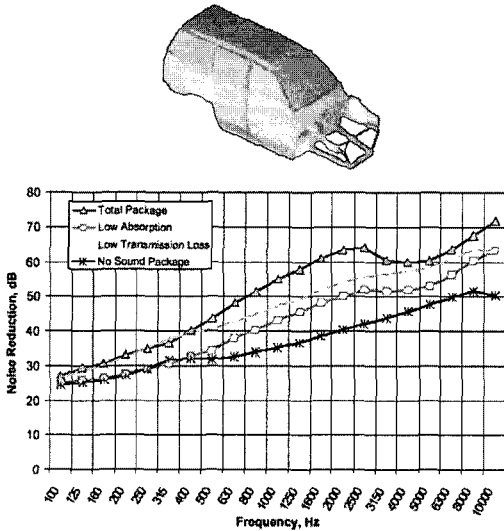


그림 11 Minivan의 sound package에 따른 소음 감소 해석

템의 감쇠손실계수를 대응하는 구조 하부시스템에 부여한다. 이때 grommet, sealing, speaker, seat, window edge 등은 특별히 취급되어 측정된 감쇠손실계수를 적용하거나 acoustic leakage, mass law 전달 등으로 모델링 하여야 한다. 또한 다층 재료의 음향특성을 따로 해석적으로 구하지 않고 SEA tool 안에서 다층 재료를 Biot property 를 비롯한 여러 물성치로 모델링 하여 SEA 에 바로 적용할 수 있다. 이 경우에는 biot property 및 두께 등의 physical property의 변화, 다층 재료의 층의 변화 등에 따른 민감도 해석을 수행할 수 있고, 나아가 sound package의 최적화 해석을 하는데도 적용할 수 있는 장점이 있다.

그림 10에는 full vehicle 또는 자동차 component의 공기기인 소음 해석을 SEA로 적용할 때 진행되는 과정이 잘 나타나 있다. 이와 같이, 자동차 또는 component에서의 공기기인 소음을 SEA를 이용하여 해석적으로 예측하기 위해서는 흡차음재의 물성치 데이터, 구조물의 감쇠손실계수 등의 다양한 데이터 확보가 선행되어 SEA 모델에 적절히 반영되어야 한다.

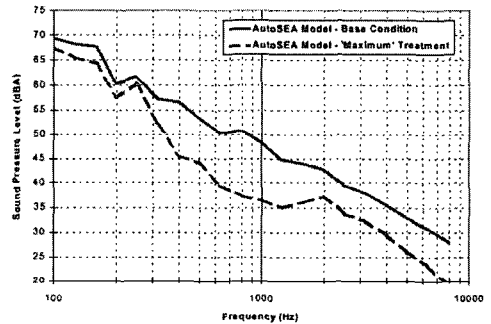
4. 자동차 공기기인 소음해석의 SEA 적용 예

그림 11은 minivan type의 full vehicle 에 대해, sound package의 효과를 관찰하기 위해 낮은 흡음률을 가지는

■ "Maximum" Treatment

- ◇ All leakages removed
- ◇ Increased absorption of all areas except headliner, door panels, and carpet by 30%
- ◇ 20mm cut foam and 4 kg/m² heavy layer added to dash sheetmetal
- ◇ 20mm cut foam and 4 kg/m² heavy layer added to engine cover
- ◇ Foam absorber on door and side panels increased from 3mm to 20mm
- ◇ Absorption of headliner increased 40%
- ◇ Floor treatment changed from 12mm needled fiber and 2.5 kg/m² heavy layer to 20mm foam and 4 kg/m² heavy layer

(a) Maximum NCT를 위한 각 대책



(b) Maximum NCT의 효과

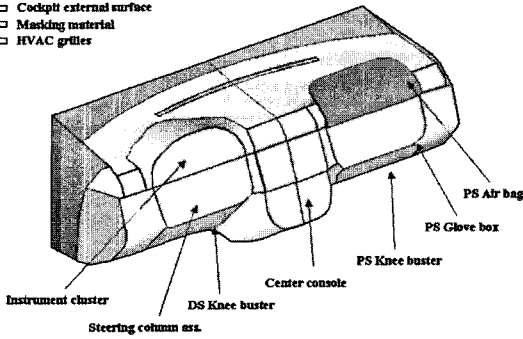
그림 12 Full vehicle의 maximum NCT 적용에 대한 SEA

차음재(barrier)를 적용한 경우, 낮은 전달손실을 가지는 흡음재(absorber)를 적용한 경우에 대한 기여도 분석을 한 것이다. 운전자 쪽의 wheel house로부터 운전자 실내 공간으로부터 소음 감소를 각 경우에 대해 그래프로 나타내었다. 그래프에서 보듯이 sound package의 효과가 400 Hz 이상에서 현저하게 나타나며, 전달손실이 낮은 흡음성의 재료가 흡음률이 낮은 차음성의 재료보다 소음 감소에 더 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

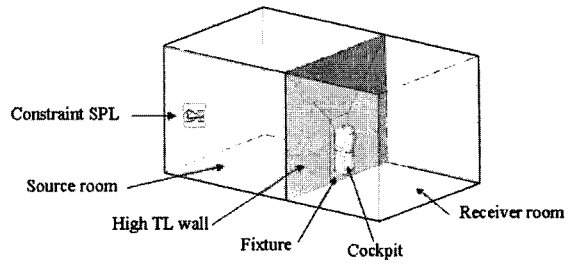
그림 12는 full vehicle에 대해 모든 leakage를 제외하고 최상의 sound package를 적용한 경우(maximum NCT)를 base condition과 SEA 해석을 통해 비교한 것을 나타낸 것이다. 그림 12의 왼쪽에 maximum NCT를 위한 여러 대책이 나타나 있는데, 개별적인 대책에 의한 각각의 기여도 상대적으로 작지만 모두 적용한 경우에는 그 효과가 크다는 것을 왼쪽의 그래프에서 알 수 있다.

그림 13은 자동차 cockpit module의 다양한 configuration에 대해 전달손실을 SEA를 통해 해석하고 시험과의 비교, 검증한 것을 나타낸 것이다. Cockpit module을

- Component modeled as experimental TL
- Cockpit external surface
- ▨ Masking material
- ▤ HVAC grilles



(a) Cockpit module의 SEA 모델



(b) Cockpit module의 전달손실을 구하기 위한 SEA 모델

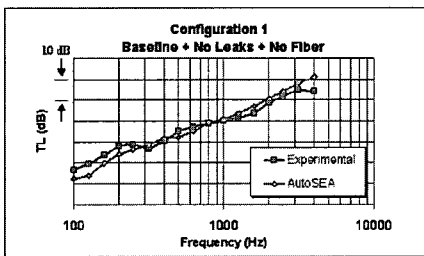


Figure 3: Transmission loss of configuration 1

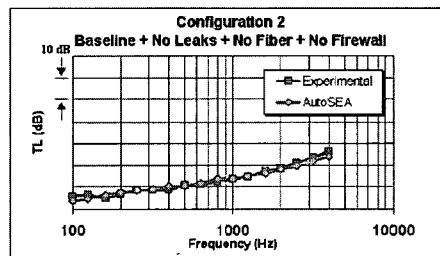


Figure 4: Configuration 2 (same as 1 + no firewall)

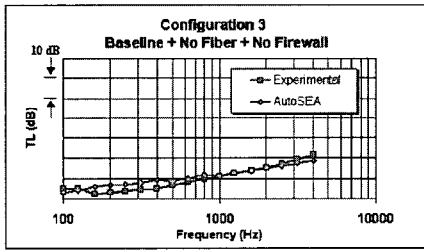


Figure 5: Configuration 3 (Same as 2 + leaks)

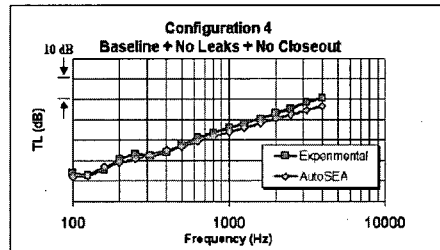


Figure 6: Configuration 4 (Drasfic change)

(c) 다양한 configuration에 대한 cockpit module의 전달손실 해석 및 시험과의 비교

그림 13 Cockpit module의 전달손실 해석을 위한 SEA 적용

적절한 구조 및 내부 음향 하부시스템으로 모델링 하고, 시험에서 적용되는 것과 마찬가지로 source room 및 receiver room을 cockpit module 전후에 연결함으로써 SEA를 통한 전달손실을 해석적으로 구현할 수 있다. Firewall의 유무, leak의 유무, sound package의 유무 등의 다양한 cockpit module의 configuration에 대해 SEA 해석을 수행한 결과와 시험과의 비교가 그래프에 나타나 있으며, 모든 configuration에 대해 시험과 해석이 좋은 일치도를 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 14는 rear door system의 glass material에 따른 전달 손실을 SEA로 해석한 것을 나타낸 것이다. 2종의 일반

glass와 2종의 laminated glass를 사용한 경우 rear door system의 전달손실을 비교한 것이 그래프에 나타나 있다. Door에 사용된 acoustic pad에 관계없이 laminated glass가 일반 glass에 비해 2000 Hz 이상에서 향상된 전달손실을 보이고 있다. 또한 acoustic pad는 두께를 4배로 크게 증가시킨 경우에도 전달손실에는 큰 영향을 끼치지 않는다는 것도 알 수 있다.

그림 15는 minivan type의 자동차에 대해 공기기인 road noise에 대해 SEA 해석 결과를 시험과 비교하여 나타낸 것이다. 스피커 시스템을 운전자 쪽의 wheel house에 설치한 이상적인 loading 조건에 대해, 운전자 귀

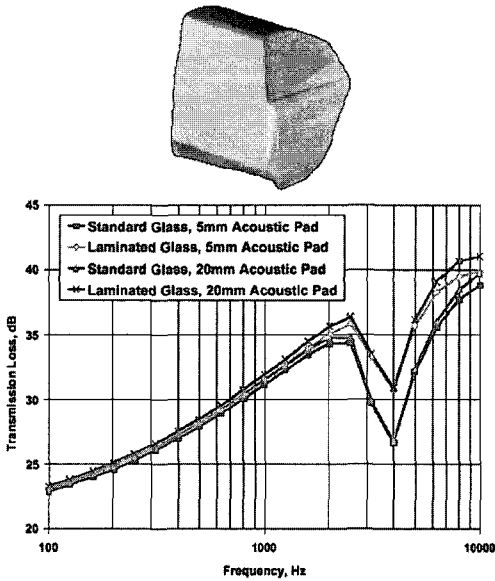
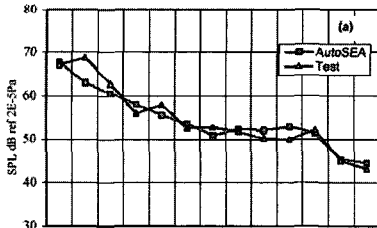
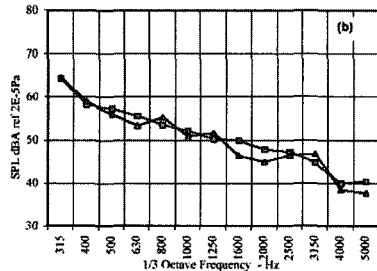


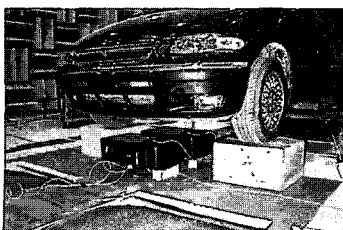
그림 14 Rear door system의 전달손실 해석을 위한 SEA 적용



(a) 운전자 귀 공간에서의 실내소음

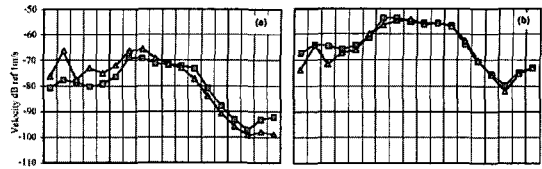


(b) 아래 쪽 화물적재 공간에서의 실내소음



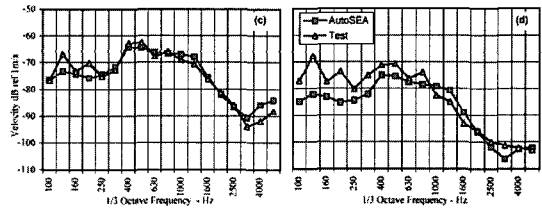
(c) Minivan의 ideal loading 시험

그림 15 Minivan의 ideal loading에 대한 SEA 해석과 시험과의 비교



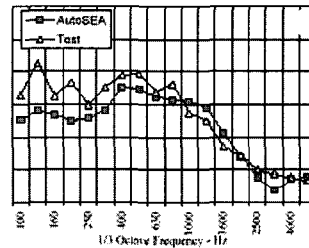
(a) Front floor에서의 진동

(b) Front fender에서의 진동



(c) Dash panel에서의 진동

(d) Rear tunnel에서의 진동



(e) 운전자 귀 공간에서의 실내소음

그림 16 구조기인 road noise에 대한 SEA 해석과 시험과의 비교

주위의 공간 및 아래 쪽의 화물적재 공간에서의 실내 소음을 시험과 비교, 검증한 것이 그래프에 나와 있다. 그래프에서 보듯이 300 Hz 이상의 주파수 대역에서 SEA 해석은 시험과의 좋은 일치도를 보이고 있다.

그림 16은 4-door sedan type의 자동차에서 road noise의 구조기인 소음 및 진동에 대해 SEA 해석과 시험을 비교한 것이다. 구조기인 소음 및 진동을 SEA 해석에 성공적으로 적용하기 위해서는 실험적 SEA를 사용하여 point 및 line junction에서의 연성손실계수, 모드 밀도, 감쇠손실계수를 추출하여 해석적인 SEA에 적용하는 hybrid SEA를 사용하게 된다. 진동에 대한 그래프에서 보듯이, 250 Hz 이상에서 rear tunnel에서는 상대적으로 차이가 났지만 front floor, front fender, dash panel 등에서 해석과 시험이 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 구조기인에 의한 실내소음도 공기기인에 의한 실내소음 보다는 일치도가 떨어지지만 400 Hz 이상에서는 비교적 좋은 일치도를 보인다고 할 수 있다.

5. 맺음말

자동차 또는 자동차 component의 공기기인 소음을 해석하고 예측하는 방법으로 SEA는 미국, 일본, 유럽 등의 자동차 제작사 및 부품업체에서 매우 활발하게 사용되고 있으며 정규적인 해석과정으로 자리잡고 있다. 특히 고성능과 저중량을 요구하는 최근의 sound package 선정에 있어 SEA는 sound package의 설계 및 최적화에 있어 반드시 필요한 적용방법이 되었다. Full vehicle에서의 공기기인 소음 및 자동차의 주요 component의 전달손실 예측에 SEA의 성공적인 적용이 알려지면서 국내의 자동차 제작사 및 sound package 공급업체 등에서도 수 년 전부터 SEA 적용을 하고 있으나 궁극적인 적용단계인 설계 및 최적화까지는 아직 이르지 못하고 있는 실정이다. 흡차음재의 물성치 데이터 및 구조물의 감쇠손실계수 등의 다양한 데이터의 확보, SEA에 대한 지속적인 기술 및 경험의 축적, 검증을 위한 시험절차의 체계적인 마련, SEA 경험자 및 전공자의 확충을 통해 설계 단계에서 SEA를 효과적으로 적용할 수 있게 될

것으로 생각한다.

자동차의 공기기인 소음해석에 있어 SEA가 성공적으로 적용할 수 있는 반면에 구조기인소음해석에는 SEA를 쉽게 적용하기 어려운 점이 있었다. 실험적 SEA를 통해 주요 하부시스템의 SEA 변수를 추출하여 해석적인 SEA에 적용을 해야 하는 어려운 점이 있었다. 그런데 최근에 FEM과 SEA를 연성하여 중주파수 대역을 해석적으로 모델링하고 해석할 수 있는 방법이 개발되었다. FE-SEA라고 불리는 이 방법을 적용하면, 저주파수 대역은 기존의 FEM, 고주파수 대역은 기존의 SEA, 그리고 중주파수 대역은 새로운 FE-SEA를 적용하게 된다. 즉 이 방법에서는 FEM에서의 모드 거동, SEA가 가지는 평균적인 응답을 모두 취할 수 있으며, 공기기인 소음뿐만 아니라 구조기인 소음/진동 해석에도 매우 효과적으로 적용할 수 있는 장점이 있다. 이 새로운 방법은 미국, 일본, 유럽의 자동차, 항공기, 철도차량, 흡차음재 업체 등을 통해 다양한 경로로 그 유용성이 확인되고 있으며, 소음/진동 해석분야에 있어 새로운 지평을 열 것으로 기대된다. 