

1. 머리말

감성적인 측면에서 좋은 차량의 개발을 위해 차량의 음질은 매우 중요한 역할을 하고 있다.

저소음화 기술 발달로 차량의 실내 음압 레벨은 점차적으로 낮아지고 있지만 경우에 따라서는 낮은 음압의 차량이 항상 좋은 느낌을 주지 못하는 것을 개발 engineer들이 깨닫게 되었다. 그러기에 최근 차량 NVH 개발은 좋은 음질(sound quality)의 차량개발이라는 목표를 추구하고 있다.

본 논문에서는 승용차의 음질개발이라는 주제로 차량개발에 적용되는 음질개발기술과 응용 사례를 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 소음을 표현하는데 음압(Sound Pressure Level)으로 충분인가?

차량의 소음 개발에 가장 많이 사용되는 표현단위는 dBA이다. 이 단위는 음압의 물리량을 log 스케일로 표현하면서 1 kHz 순음 40 phon과 동일한 loudness를 갖는 등청감 곡선을 기초하여 보정한 단위이다. 인간 청각은 소리의 압력 변화에 선

형적으로 반응하는 것이 아니라 보다 복잡하게 반응한다. 즉, masking, binaural, nonlinear 등의 특성을 가지고 있다. 소리에 대한 여러 가지 느낌을 표현하기 위하여 많은 parameter들이 개발되었다. loudness, sharpness, roughness 등이 그 대표적인 값들이다.

차량 개발의 입장에서 보면 차량 소음의 여러 가지 느낌을 표현할 수 있는 적절한 engineering 단위가 필요하게 된다. 차량의 문 닫힘 음의 좋고 나쁨을 표현하거나, 주행 실내음의 시끄러움, 힘찬 느낌이나, 고급감등을 표현할 수 있는 공학단위가 필요하게 되었다. 차량개발에 있어서 주관적인 느낌을 점수로 표현하지만 평가자의 기준에 따라, 그 날 기분 등에 따라 그 편차가 발생하므로 보다 객관적인 기준이 요구된다. 이와 같은 필요성 때문에 차량에서 발생하는 소리에 대한 음질지수(sound quality index) 개발이 필요하다.

2.2 음질 지수(Sound Quality Index) 소개

음질지수개발은 주관평가점수를 표현할 수 있는 공학적 함수를 정의하는 과정이다. 일반적으로 많이 사용되는 방법으로는 소리에 대한 느낌을 점수로 부여하고 측정된 음에 대한 여러 가지 객관인자(혹은 심리음향인자)를 계산하여 통계학적인 방법이나, 인공신경망이론을 적용하여 적절한 함수를 정의하는 것이다. 대표적인 주행실내소음

* E-mail : dc.park@hyundai-motor.com

음질지수로는 영국의 Mira사에서 개발한 CRP (composite rate of preference)가 있다.⁽¹⁾

$$CRP = \sqrt{L_A^2 - 1.5(HF)^2 + 0.5(SB)^2}$$

여기에서

L_A : overall A-weighted sound level in dB

HF (high frequency factor) : A-weighted sound level in dB minus SIL

SB (spectrum balance) : low frequency factor minus SIL

LF (low frequency factor) : engine주 폭발주 파수 아래의 옥파브 level의 산술평균

SIL (speech interference level) : 1, 2, 4 kHz 옥파브 밴드 level의 산술평균이다.

다음은 오스트레일리아의 AVL사에서 개발한 실내소음의 luxury, powerfulness, sportiness에 대한 음질 지수이다.⁽²⁾

$$luxury = f(\text{ArticulationIndex, Tonality, Evenness})$$

$$powerfulness = f(\text{CEO, REO}_{power}, \text{Tonality, } \frac{\Delta rpm}{\Delta t})$$

$$sportiness = f(\text{REO}_{sport}, \text{Tonality, } \frac{\Delta rpm}{\Delta t})$$

여기에서

CEO : combination of relevant engine orders

REO : ratio of engine orders to background noise)이다.

이 외에도 차량제조사나 연구기관에서 발표된 주행소음이나 여러 가지 작동 음에 대한 많은 음질 지수들이 있다.

2.3 음질지수 개발과정

(1) 청음평가

음질지수 개발을 위한 과정으로 청음평가를 실시하게 된다. 그 방법으로는 크게 pair comparison 법, rating법, ranking, SDM(semantic differential methods)법 등이 있다. 표 1은 각 방법의 특징과 장단점이다.

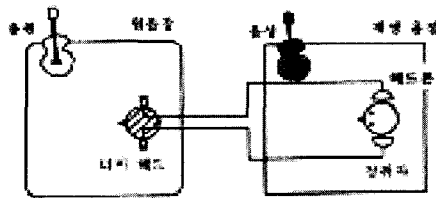
평가음과 평가집단의 특징에 따라 적절한 방법을 선택하여야 한다. 실차를 주행/작동하여 청음평가를 수행하는 것이 가장 정확한 방법이나 동시에 많은 차량을 평가하기 힘들고, 경우에 따라서는 평가음 이외의 요소(brand image, 시각적, 촉각적 요소 등)에 의해 주관평가 점수가 왜곡된다. 또한 초보자의 경우, 음의 기억이 오래가지 못하고 평가기준이 모호하기에 보다 쉬운 청음평가법으로 실시하여야 한다. 청음평가의 필수 조건으로 평가음을 가장 유사하게 재생하여야 그 결과를 신뢰하게 된다. 청음평가를 위한 평가음 재생방법으로는 (a) binaural 녹음과 headphone을 통한 재생 방법과 (b) binaural 녹음을 speaker를 통한 재생 방법 (c) 다중 microphone을 통한 녹음과

표 1 청음평가법 비교

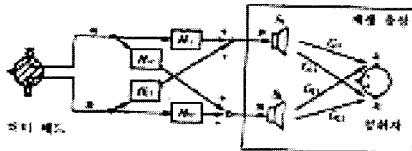
	Pair comparison	Rating	Ranking
시행방법	두음을 차례로 들려 주어 선호하는 음을 선택하게 한다.	음에 대한 주관 느낌에 점수를 부여한다.	일련의 음의 선호 순서로 차례를 부여한다.
장점	초보자도 쉽게 평가 가능	빠른시간에 평가 가능. 전문가에 적합	초보자도 쉽게 평가 가능
단점	복잡한 과정을 통하여 주관평가 점수화가 가능. 평가에 많은 시간 필요함	평가자의 기준에 따라 평가점수가 다르다. 초보자의 평가가 어렵다.	평가음의 선호 순서만 결정. 주관평가점수화가 어렵다.

다중 speaker를 통한 재생방법이 있다. 차량 음질 개발에는 계측의 편의성과 객관화된 물리량(SPL, loudness 등) 계산을 위하여 (a)의 방법을 많이 사용하고 있다.

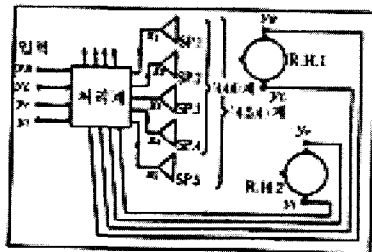
그림 1은 실차와 상기에서 서술한 (a)와 (c) 재생 방법을 통하여 여러 가지 차량 발생음에 대해 평가한 결과 비교이다. 주관 평가는 NVH개발자를 대상으로 수행하였다. 그 결과를 보면 특징적인 단품 작동음에 대해서는 비교적 일치된 평가를 내렸지만 주행소음과 같이 복잡한 시간 변동적인 음에 대해서는 청음방법에 따라 조금씩 다른 평가를 내렸다. 이는 그 음에 대한 평가자의 판단 기준이 서로 조금씩 다르며 재생방법이 실차 상황과 정확히 일치하지 않음에 기여한다. 많은 자동



(a) Binaural 재생법



(b) Transaural 재생법



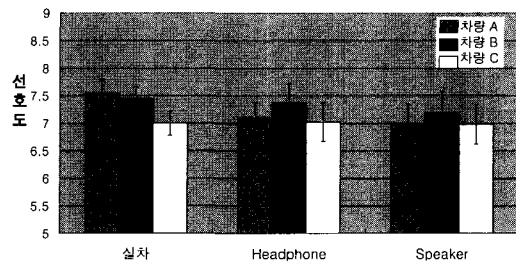
(c) 다채널녹음 재생법

그림 1 청음평가를 위한 녹음/재생법 비교

차 개발회사에서는 보다 정확한 차량 음의 재생을 위하여 많은 노력을 기울이고 있다.

보다 편리한 청음평가 및 결과 정리를 위하여 여러 가지 방법들이 개발되고 있다. 최근에는 internet을 통한 청음평가 결과 수집 방법이 소개되고 있다.⁽³⁾ 그림 3은 headphone을 이용한 재생방법을 보여주고 그림 4는 영국의 Ricardo사

2단 급가속 실내소음



Door-lock 작동음

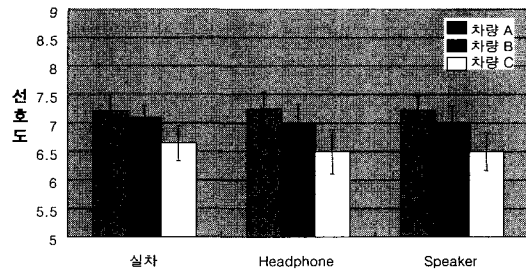


그림 2 평가음 재생법에 따른 주관평가 결과 비교



그림 3 Headphone 청음평가 장면

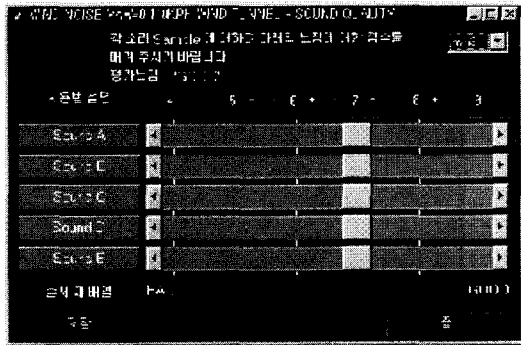


그림 4 자동화된 playback & data 수집 program

에서 개발된 자동화된 청음평가 및 data 수집 program⁽⁴⁾의 모습을 보여준다.

(2) Sound Quality Metrics

차량의 소음개발에 이용되는 객관인자로는 음압에 기초를 둔 dBA, dBC, loudness 등이 있고 대화와 관련이 있는 AI(articulation index), PSIL, SIL 등이 있으며 엔진음과 관련있는 공학인자인 CRP, SB, HFF, order balance 등이 있다. 이외에 time에 기초를 둔 impulsiveness, Kurtosis 등과 심리음향에 기초를 둔 loudness, sharpness, roughness, fluctuation strength 등이 있다. 이중 Zwicker와 Stevens VI의 loudness는 ISO에 표준화되었지만 나머지 많은 인자들은 표준화 되어 있지 않다. 그러므로 계산시에나 상용 program에서 제공하는 계산값 사용에는 주의가 요구된다. 또한 필요에 의하여 공학적인 인자를 새로이 정의 하기도 한다. 음질지수를 개발함에 보다 의미 있는 결과를 도출하기 위해서는 이들 인자의 의미에 대한 정확한 이해가 필요하다.

(3) 주관인자와 객관인자 Correlation

청음평가 및 통계적인 처리과정을 통하여 얻은 주관인자와 여러가지 객관인자의 상호 관계를 얻기 위하여 회귀분석 등의 통계학적인 방법이나 인공신경망회로 기법을 이용한 방법이 사용된다. 먼저 여러 객관인자들 중 의미를 갖는 인자를 파악

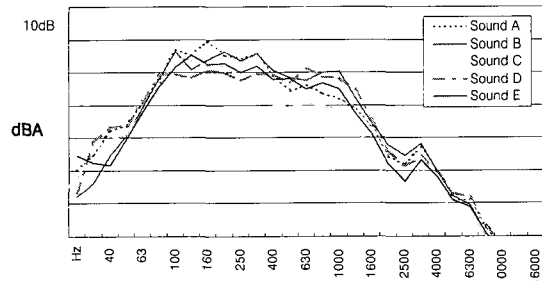


그림 5 풍절음의 1/3 octave band 분석결과

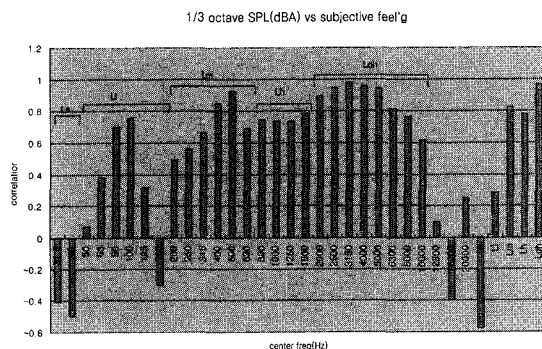


그림 6 풍절음 1/3 octave band소음과 주관평가의 상관도

하고 그 인자들을 함수로 주관인자를 표현하면 음질지수가 만들어지게 된다. 여러가지 경험을 통하여 적절한 객관인자를 선택하는 것이 가장 중요하다. 또한 상관도 분석 과정에서 그 느낌을 주관하는 중요한 요인을 파악하게 된다. 그림 5,6은 풍절음에 대한 음질지수 개발과정에서 도출된 주관평가와 1/3옥타브밴드 소음과의 상호 관계를 나타낸 것으로, 풍절음이 2 kHz~10 kHz band가 중요하다는 것을 보여준다. Overall sound pressure level의 측면에서는 100~1 kHz대역의 소음이 중요하지만 음질측면에서는 2 kHz~10 kHz 대역이 중요함을 보여준다.⁽⁵⁾

인공신경망이론을 이용한 음질지수 개발법으로는 그림 7과 같이 인공신경망 학습과정을 통하여 첫번째 layer와 두번째 layer의 최적 가중합수

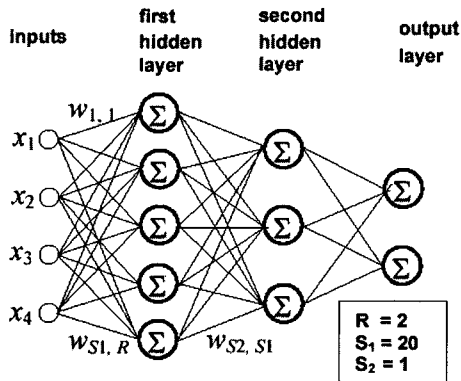


그림 7 인공 신경망 회로의 구성도

W_i 를 찾게 된다. 이 방법은 자동화된 program을 통하여 함수를 만들 수 있고 많은 학습과정을 통하여 보다 정확한 결과를 도출할 수 있지만 가중 함수들이 표면적으로 드러나지 않으므로 주관결과에 기여하는 각각의 객관인자의 영향도를 파악하기 어렵기에 공학적인 정보를 얻기 힘든 단점이 있다. 최근의 연구로는 brake squeal 소음을 파악하기 위해 이 방법이 사용된 연구결과⁽⁶⁾가 있고, 차량의 booming 소음 index개발을 위하여 상기의 방법을 적용한 결과⁽⁷⁾가 있다.

Sporty Sound Muffler 개발

승용차의 주행소음개발에 있어서 배기계는 소음 제어의 중요한 역할을 하고 있다. 특히 sports car와 같은 차량의 경우, 보다 powerful하며 dynamic한 느낌을 추구하게 된다. 이와 같은 느낌을 주는 가장 중요한 요소는 차량의 가속감과 함께 sporty한 배기계의 토출음이다. 배기토출음은 크게 limousine sound와 sporty sound로 분류된다. 이러한 배기토출음의 특성에 따라 소리의 느낌이 달라지게 된다.

2.4 차량의 Sound Quality 개발 사례

그림 8은 limousine sound와 sporty sound의 배기토출음의 대표적인 모습을 보여준다. 엔진의

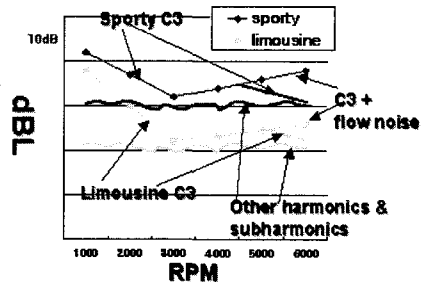


그림 8 자동차의 배기음 특성관련 선도 표시

Sample 1	평가위차							FRT LH Q.	FRT RH Q.	RR LH Q.	RR RH Q.	외부Q
	1	2	3	4	5	6	7					
Quiet(조용하다)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	Loud(시끄럽다)
Weak(약하다)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	Powerful(힘차다)
Smooth(부드럽다)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	Rough(거칠다)
Heavy(무겁다)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	Buoyant(경쾌하다)
Tinny(강종소리나)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	Throaty(목직한)
Clear(깨끗하다)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	Muddled(흐릿명명하다)
선호도	이상적이지 않다	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	이상적이다
가속감	나쁘다	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	좋다
Boom'g 성	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	없다
충명:	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	없다

그림 9 Sporty sound 배기계 주관평가표

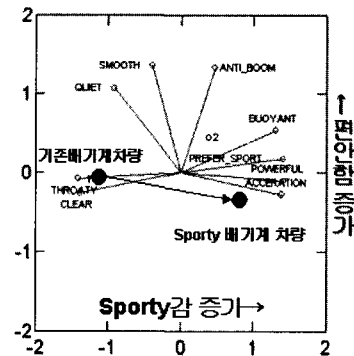


그림 10 Sporty sound 차량의 주관 평가(psychoacoustic map)

주 폭발성분음은 파워감을 지배하고 주 폭발성분의 2차 하모닉음은 경쾌감을 지배한다고 알려져 있고 좋은 배기음은 이들 성분의 적절한 조화에 의해서 이루어진다. 이와 같은 여러 연구들의 결과와 개발자들의 경험으로부터 적절한 튜닝을 실시하여 sporty sound 배기계를 결정하게 된다. 그림 9와 같은 평가 기준에 의하여 튜닝된 차량의 음질을 주관평가하고 factor 해석 등의 통계적인

분석을 통하여 최종적으로 그림 10과 같은 결과를 얻었다. 즉 기존의 차량에 비하여 편안함의 느낌은 조금의 감소가 있었지만 sporty감은 많은 증가가 있음을 알 수 있다.

청음 평가를 이용한 자동차 Outside Mirror의 Mimic 소음 개선⁽⁸⁾

차량 고속 주행시 발생하는 소위 mimic 소음은 접이식 outside mirror의 접합부에서 발생하는 이음(異音)으로서 예민한 승객에게 지적된다. mimic 소음은 2 kHz이상의 고주파 영역에서 특정 대역에 간헐적으로 발생하는 소음이며, 시간에 대해 앙상블 에버리지를 하는 일반적인 분석 방법으로는 나타나지 않는다. 그러나 주의 깊은 청취에 의해 그 존재를 분명히 느낄 수 있기에 적절한 분석법이 요구된다. 본 사례에서는 일반적인 분석법에서 나타나지 않는 차이를 표현하기 위하여 청음 평가를 통해 주관점수를 도출하여 그 점수에 미치는 설계 변수들의 기여도를 파악하여 mimic 소음 개선에 활용한 예이다. mimic 소음의 원인으로 추정되는 네 가지 인자로는 (A) folding gap의 균일도, (B) mirror housing 과 frame 간의 gap, (C) folding gap 상하간 단차의 영향, 그리고 (D) mirror 조립과정에서 생기는 회전을 설정하여 다꾸찌 시험 계획법에 의거 실험 샘플을 제작하여 녹음한 뒤, 청음 평가를 통하여 주관점수를 얻었다.

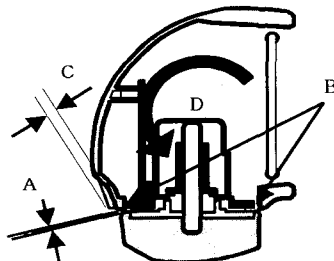


그림 11 Outside mirror에서 mimic 소음 발생의 원인으로 추정된 인자

Mimic 소음은 일반적인 소음 분석법인 소음스펙트럼이나, SPL과 loudness등을 통해서는 분별력이 없다. 즉 계산을 토대로 얻어진 변화량은 SPL의 경우 0.04 dB, 그리고 loudness의 경우 0.06 Sone 정도이다. 이러한 metric량을 다꾸찌 방법에 적용하였을 때, 각 인자별 해상도가 매우 낮아 mimic 소음을 평가하기에는 적합하지 않아 미소한 변화에 의한 차이를 분별하기 위하여 청음 평가결과를 사용하게 되었다.

그림 12는 청음평가에 의해 판별된 각 인자의 영향도를 분석하여 바 그래프로 나타낸 것이다. 우선 영향도가 가장 큰 인자는 A(folding gap 산포)와 B(frame과 housing 간의 gap)의 교호작용인 것으로 판별되었다. 횡풍이 있는 조건에서는 인자 A의 영향이 가장 크며, 인자 B의 영향은 그 자체로는 작지만 인자 A와 인자 B의 교호작용에는 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 결과적으로 mimic 소음의 개선을 위해서는 인자 A와 B에 관련된 사항을 개선해야 함을 알 수 있다. 본 사례는 일반적인 소음분석법으로 접근이 어려운 경우 청음평가를 통한 해결의 예를 보여 준다.

연료 주입구 Door Open 음의 음질분석⁽⁹⁾

승용차의 연료 주입구 open mechanism은 wire를 이용한 수동 system과 solenoid나 motor

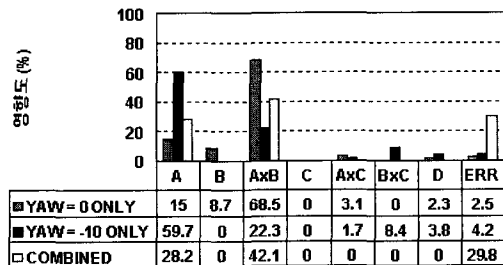


그림 12 횡풍 0도, 15도에서 각 인자의 영향도 분석결과

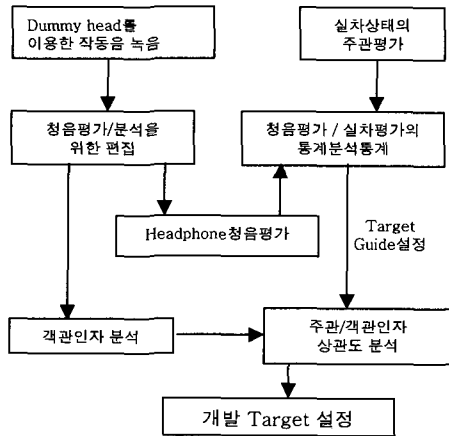


그림 13 연료 주입구 음질 연구 과정

를 이용한 전동 system이 있다. Wire를 이용한 system은 구조가 단순하며, 소음이 거의 발생하지 않지만 차체 floor에 작동 레바를 부착하여야 하기에 운전자가 작동을 위하여 몸을 숙여야 한다. 그러므로 고급차에서는 작동의 편의성을 위하여 전동방식이 채택되고 있다. 이 방식은 어느 정도의 충격음이 발생할 수 있으며 경우에 따라서는 차체의 울림으로 증폭되어 값싼 작동음으로 나타날 수 있다. 그러므로 차량 개발과정에서 차량등급에 맞는 작동음으로 개발함이 중요하다. 본 사례에서는 차량의 연료 주입구 door open system을 개발함에 있어서 감성적인 측면에서 기준이 될 수 있는 개발 목표 설정을 위한 연구이다. 본 과정에서 연료 주입구 작동음의 음질에 대한 주관평가를 실시하였다. 또한 주관평가에 미치는 객관인자(sound quality metrics)를 분석하여 음질지수를 개발하였고 개발 target을 설정하였다.

Solenoid 방식의 연료 주입구를 가진 차량 6대를 대상으로 실차 상태 및 headphone을 이용한 청음 평가 결과는 그림 14와 같다. 두 방법의 상관도는 97%로 나타났으며 청음평가점수의 평균이 0.2점 낮게 나타났다. 여러가지 sound quality metrics와 주관평가 결과의 상관도 분석

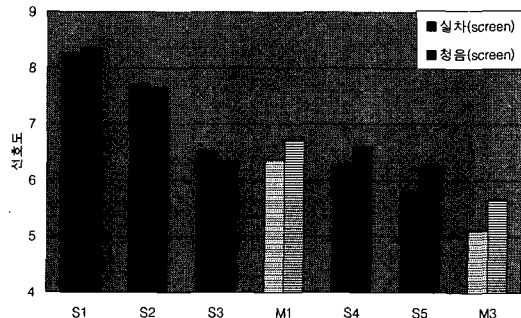


그림 14 연료 주입구 작동음의 실차/청음평가

시 Zwicker의 loudness와 가장 높은 상관도를 나타내었다. 실차 상태에서 개발 만족 수준인 7점을 기준으로 하여 개발 target을 설정할 수 있었으며 다음과 같은 sound quality index를 구할 수 있었다.

$$\begin{aligned} \text{연료주입구음질지수} &= f(\text{Loudness}) \\ &= a * \text{Loudness}(\text{soneGD}) + b \end{aligned}$$

2.5 승용차 음질개발의 연구방향

승용차의 음질개발을 위하여 많은 자동차 제조사와 관련 연구 기관에서는 소음 합성 기술과 Virtual car 기술 개발에 노력하고 있다.

(1) 소음 합성기술^(10, 11)

그림 15에서 보는 것과 소음합성기술은 사전에 부품의 변화나 소음전달 경로의 변화에 따른 소리의 변화를 합성하는 기술로 실내소음을 엔진 소음/tire 소음/흡배기소음 등으로 분리하여 최종적인 소음을 합성하는 방법이다. 각 소음의 전달 경로와 소음원을 분리하기 때문에 다른 음원(엔진)의 탑재에 따른 실내소음을 예측하고 주요 전달경로의 변화에 따른 실내음의 변화를 직접 들어 볼 수 있다. 이와 같은 기술 개발은 독일의 Headacoustics사, 벨기에 LMS사, 미국의 MTS사 등에서 활발히 진행되고 있다.

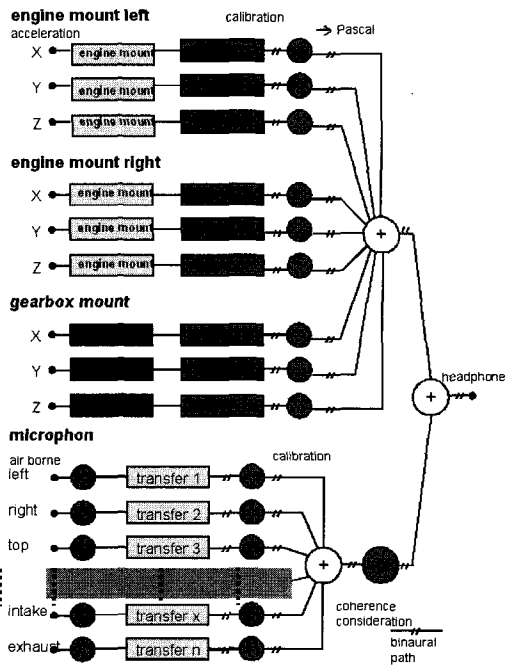


그림 15 소음합성기술

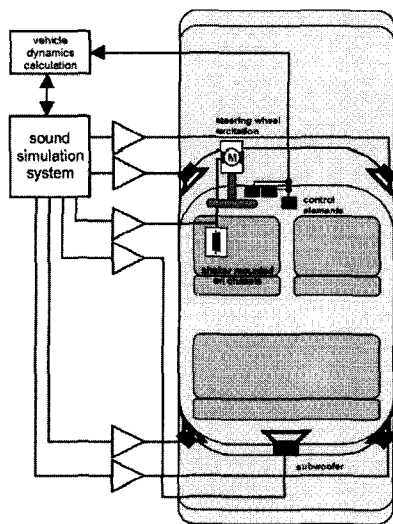


그림 16 Virtual car 개념도

(2) Virtual car 기술^(10, 11)

인간의 청각은 진동이나 시각 그리고 심리적인

상태에 따라 상호 영향을 주고받는다. 그러므로 차량의 음질에 대한 보다 깊은 연구를 위해서는 진동과 청각의 상호 작용에 대한 이해가 필요하다. 그와 같은 배경에서 차량의 진동과 소음, 그리고 시각적인 효과를 고려한 연구 장치가 "virtual car" 기술이다. 보다 실차와 유사한 느낌을 주기 위하여 다양한 구성과 simulation 기술이 개발되고 있다.

3. 맺음말

음질 개발은 감성적인 측면에서의 제품 개발을 의미한다. 유럽의 B사의 차량은 차량의 segment에 상관없이 B사의 실내음의 특징인 dynamic한 느낌을 가지고 있다. 또한 일본의 T사의 차량은 매우 정숙하며 깨끗한 실내소음을 보여주고 있다. 이처럼 향후의 차량 음질 개발은 그 회사의 고유한 특징과 image를 나타내는 "brand sound" 구현을 목표로 하고 있다. 즉 이제까지의 NVH 개발이 저소음화를 목표로 하였다면 향후 목표는 보다 좋은 소리와 좋은 brand image로 표현될 수 있다. 보다 좋은 소리가 어떤 소리며, 어떻게 그 소리를 구현할까 는 우리 engineer의 몫으로 남아 있다. 차량의 주행음을 비롯한 각종 작동음과 경고음들이 소음이 아니라 하나의 즐거운 음악이 되기 위하여 많은 노력이 요구된다.

참고 문헌

- (1) Fish, D.G.1992, "Vehicle Noise Quality-towards Improving the Correlation of Objective Measurements with Subjective Rating", I. Mech. E. 925186.
- (2) Biermayer, W., Thomann, S. and Brandl, F. 2001, "A Software Tool for Noise Quality and Brand Sound Development", SAE NVH Conf.,



2001-01-1573.

(3) Kobayashi, K. etc, 2002, "A New Questionnaire Using WWW System for Road Traffic Noise", Inter Noise 2002.

(4) Maunder, R. M. S. 1998, "An Interactive Subjective Assessment Method for Recorded Sound", ImechE 1998, pp. 345~354.

(5) 박동철, 이강덕, 정승균, 2002, "승용차 풍절음의 주관평가와 객관인자의 상관관계 분석", 한국소음진동공학회 2002 춘계학술대회논문집.

(6) Yi Dai, etc, 2002, "Neural Network Simulation of Subjective Response to Brake Squeal Noise", SQS 2002.

(7) Lee, S. K. etc, 2002, "Sound Quality Index Development for the Booming Noise of Automotive Sound Using Artificial Neural Network Information Theory", SQS 2002.

(8) 이정환, 이강덕, 정승균, 2002, "청음 평가를 이용한 자동차 OUTSIDE MIRROR 의 MIMIC 소음 개선", 음향학회 2001 추계학술대회 논문집.

(9) 박동철, 이동훈, 정승균, 2000, "연료주입구 Door open 음의 음질분석", 한국소음진동공학회 2000 춘계학술대회논문집.

(10) Kaus Genuit, 2002, "Prediction of Sound and Vibration Based on a Virtual Vehicle", InterNoise 2002.

(11) Patric Van de Ponselee, etc, 2002, "Virtual Car Sound Environment for Interactive, Real-time Sound Quality Evaluation", InterNoise 2002.

(12) Otto, N., Amman, S., Easton, C. and Lake, S. 1999, "Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds", SAE NVH Conf., 1999-01-1822.