



흡음재특성에 따른 차량 실내 음질 예측 기술

Sound Quality Prediction of Interior Noise according to the Characteristics of Sound-absorbing Materials

이 건 희* · 백 지 선* · 안 강 현* · 이 상 권† · 김 근 영**
Kunhee Lee*, Jisun Back*, Kanghyun An*, Sang Kwon Lee† and Keunyoung Kim**

(Received June 25, 2019 ; Revised September 18, 2019 ; Accepted September 18, 2019)

Keywords : Interior Noise Prediction Model(실내소음 예측모델), Vehicle(자동차), Sound-absorbing Material(흡음재), Sound Quality Index(음질평가지수)

ABSTRACT

In the early design stage, prediction of the sound quality of interior noise is useful for the NVH development of a car according to the characteristics of the absorbing material. This paper presents a method to predict the quality of interior sound in a car cabin when the acoustic characteristics of absorption materials are changed. Firstly, a model to predict the interior sound of a virtual car is proposed based on a signal processing tool. Secondly, two sound quality indexes are developed that are used to estimate the sound quality according to seven different absorbing materials. Finally, the results are validated with experimental works. These processes can be successfully applied to the development of optimal absorbing materials for the improvement of the NVH in a car.

1. 서 론

차량 실내에는 노면소음, 풍절음, 엔진 소음 등 다양한 소음이 들어온다. 자동차 회사에서는 이런 다양한 소음을 줄이기 위한 많은 연구들을 오랜 기간 동안 계속하여 왔고 그 결과, 많은 소음저감 기술이 개발되었다. 최근의 연구는 소음저감 기술과 더불어 차량의 음질 향상에 대한 기술을 개발하고 있다. 차량의 음질에 관한 연구는 음질을 객관적으로 평가를 위한 음질인덱스의 개발과 평가 인덱스를 이용한 음질 개선에 대한 내용으로 구성된다. 개발된 음질 인덱스는 부밍 인덱스⁽¹⁻³⁾, 럽블링 인덱스⁽⁴⁾, 노면 소음 인덱스⁽⁵⁾, 와인 소음 인덱스⁽⁶⁾ 등 다양한 소음에 대한 인덱스에 관한 것이다.

최근에는 흡차음재 최적화를 통한 엔진음 음질 개선에 관한 연구가 수행되고 있다⁽⁷⁾. 그러나 흡차음재 특성 변화로 인한 차량 실내소음의 음질변화에 대한 연구는 아직 부족한 점이 있다. 따라서 이 연구의 내용은 차량 개발의 초기 단계에 흡음재료의 특성 변화에 따른 실내소음의 음질변화를 예측하는 기술에 관한 것이다. 먼저 흡음재료에 따른 음질을 예측하기 위해서는 실내소음을 예측하는 모델이 필요하다. 차량의 실내소음을 예측하기 위한 모델로서는 FEM 및 BEM 기법이 오랫동안 사용되어왔다. 이러한 기술은 차량에 대한 상세한 모델을 개발해야 함으로 많은 시간과 경비를 필요로 한다. 따라서 이 연구에서는 음향 ray tracing 기법과 신호처리 기법을 기반으로 한 실내소음 예측 모델을 개발하고자 한다. 또한 예측 모델을 이용하여 흡음재료의

† Corresponding Author ; Member, Dept. of mechanical Eng., Inha University

E-mail : sankwon@inha.ac.kr

* Dept. of mechanical Eng., Inha University

** Perceived materials research team, Hyundai Motors

‡ Recommended by Editor Jun Hong Park

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

변화에 대한 실내소음의 변화를 예측한다. 예측된 소음에 대한 음질관련 주관적 청음 평가를 실행하고, 음질요소를 계산하여 청음평가 결과와 음질요소의 상관관계를 분석하여 음질인덱스를 개발한다. 마지막으로 개발된 인덱스는 다양한 흡음재가 적용된 SUV차량에서 측정된 실내소음에 대하여 음질 평가를 실시한다. 이 연구를 위하여 7가지의 흡음재가 적용되었으며 각 흡음재는 서로 다른 흡음률과 음향 특성을 가지고 있다.

2. 신호처리 기반 실내음 예측

각 흡음재는 서로 다른 흡음률과 음향 특성을 가지고 있다. 이 장은 흡음재 변경에 따른 차량 실내 소음을 예측하는 모델 개발에 관한 것이다. 이 모델을 개발하기 위하여 다양한 신호처리 기법이 적용되었다. 엔진룸과 차량 실내의 green's function은 ray tracing 방법을 이용하여 계산되었다. Ray tracing을 위해서 사용된 상용 프로그램은 Virtual-Lab.(Siemens사, 독일)⁽¹¹⁾이다. 엔진룸에서의 green's function은 충격응답함수 1(IRF₁)로 정의되었으며 차량 실내에서의 green's function은 충격응답함수 2(IRF₂)로 정의되었다. 각 충격응답함수는 해당 부분에 부착되는 흡음재에 따라 변화한다. 그러므로 각 부분에 부착되는 흡음재의 특성이 바뀌면 green's function도 변화한다. 대시 판넬에서의 음압 감소는 삽입손실(IL)로 계산되었다. p₂는 엔진룸에서의 대시(dash) 판넬 측에서 음압 레벨이며 엔진 점음원과 충격응답함수 1 사이의 컨벌루션을 통해 계산되었으며 수식은 아래와 같다.

$$P_{2i} = q_1 \otimes IRF_i \tag{1}$$

$$IRF_1 = g(x_{dash,eng}, y_{engine}) \tag{2}$$

여기서 q₁은 엔진에서의 체적 음원이며 IRF_i는 i번째의 점음원과 대시판넬 사이의 공기전달함수를 의미한다. 엔진룸에서의 대시판넬 측에 평면파가 입력될 경우 이때의 삽입손실은 아래와 같다.

$$IL(\omega) = 10 \log \left(\frac{P_2(\omega)}{P_3(\omega)} \right) \tag{3}$$

여기서 P₂(ω)와 P₃(ω)는 p₂와 대시판넬 통과 후 음압 레벨인 p₃의 주파수 함수이다. 엔진이 운전하지 않는 경우에 엔진 룸과 차실내의 공기의 밀도와 음속은 상온에서 동일함으로 ρ₂c₂ ≅ ρ₃c₃라고 가정할 때, 음압

의 비는 아래와 같다.

$$\left| \frac{P_2(\omega)}{P_3(\omega)} \right| = 10^{IL(\omega)/20} \tag{4}$$

일반적으로 삽입손실은 차량 무향실에서 측정되며 위상 정보가 없다. 그러나 이 연구에서는 P₂(ω)와 P₃(ω) 사이의 공진이 존재하지 않아서 위상이 선형지연된다고 가정하고 P₃(ω)는 P₂(ω)의 크기와 위상을 이용하여 예측된다. 예측된 음압 P₃(ω)는 아래와 같다.

$$\hat{P}_3(\omega) = |P_2(\omega)| e^{j\angle P_2(\omega)} = \frac{|P_1(\omega)|}{10^{IL/20}} e^{j\angle P_2(\omega)} \tag{5}$$

여기서 ∠P₂(ω)는 P₂(ω)의 위상이다. 차량 실내 쪽의 대시판넬에서 예측된 음압은 역 푸리에 변환을 통해 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{p}_3(t) = \text{ifft}(\hat{P}_3(\omega)) \tag{6}$$

운전석에서의 음압은 대시 판넬에서의 소음원과 차량 실내의 충격응답함수간 컨벌루션으로 예측된다.

$$p_{4j}(t) = q_{3i} \otimes IRF_{2j} \tag{7}$$

$$IRF_{2j} = g(x_{dash,cabin}, y_{driveseat}) \tag{8}$$

여기서 q_{3i}는 대시판넬에서의 체적 음원으로 j는 대시판넬과 운전자의 사이의 j번째 공기전달 경로를 의미한다. 체적 음원은 다음과 같이 계산된다.

$$q_{3i} = u_{3i} A_{3i} = \frac{\hat{p}_{3i}(t)}{z} A_{3i} \tag{9}$$

Z는 차량 실내에서의 특성 임피던스이다. 최종 운전자 위치에서의 음압은 아래와 같이 계산된다.

$$\sum_{j=1}^N p_{4j}(t) = q_{3i} \otimes IRF_{2j} \tag{10}$$

Fig. 1은 이 방법에 대한 검증을 나타낸다. 이 실험에 사용된 엔진음은 엔진 완전 무향실에서 측정된 디젤엔진 소음이며 엔진의 운전 조건은 idle 상태이다.

실험에 사용된 차량은 SUV 차량이며 엔진을 탈거하고 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에서 보여주는 바와 은 엔진 무향실에서 측정된 소음을 스피커를 통하여 엔진 룸에서 재생하였다. 그리고 운전석에서 실내소음을 측정하여 측정된 소음과 예측된 소음을 비교하였다. 결과는 Fig. 1(c)와 Fig. 1(d)이 같았다. 이때 사용된 차

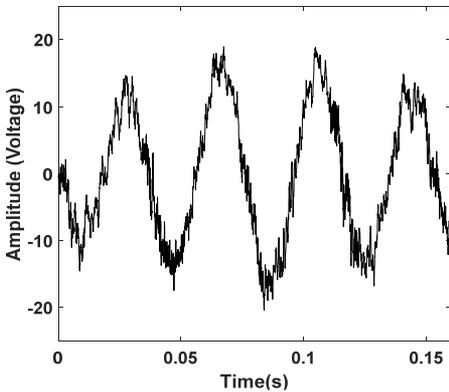
량 흡음재료에 대한 흡음 특성은 기존의 차량에 적용된 흡음 특성을 사용하였다. 주파수 분석 결과는 저주파 성분은 거의 유사함으로 100 Hz 이상 고주파 성분을 위주로 표시하였다. 이 결과에 의하면 고주파 성분에서 예측과 측정사이의 차이는 다소 있으나 전반적인 경향은 일치한다.

3. 신호처리 기반 실내음 예측

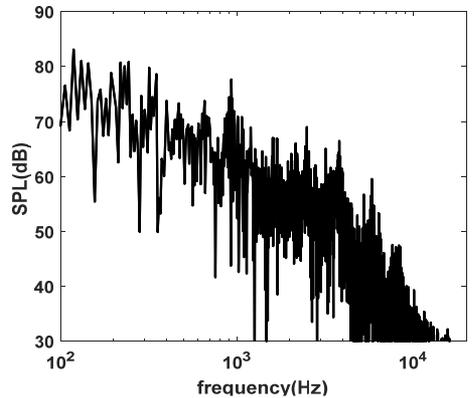
제 2장에서 개발된 소음예측 모델을 적용하기 위해서 7개의 흡음 특성이 다른 재료를 선택하였다. 모델에서 제시한 ray tracing을 이용한 충격응답함수를 계산하기 전에 각 흡음재의 흡음계수를 임피던스 관 분석을 통해 예측하였다. 흡음재의 각 특성은 Table 1에 제시되어 있다.

Table 1 Properties of the absorption materials

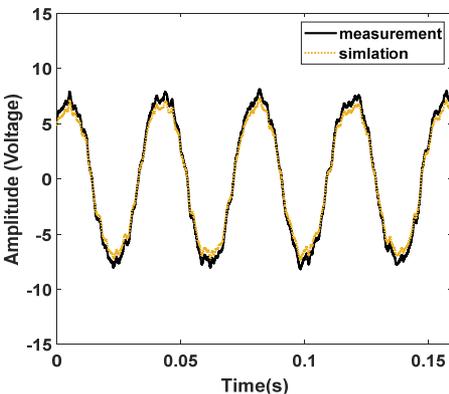
	Absorption coefficient at 2 kHz	Bulk density (kg/m ³)	Flow resistivity (Ns/m ⁴)	Porosity
A	0.854	72.9	36483	0.953
B	0.358	19.4	618477	0.973
C	0.583	29.8	10357	0.97
D	0.846	66.7	40540	0.948
E	0.504	17.1	162273	0.968
F	0.429	8.8	10900	0.99
G	0.909	27.1	35483	0.953



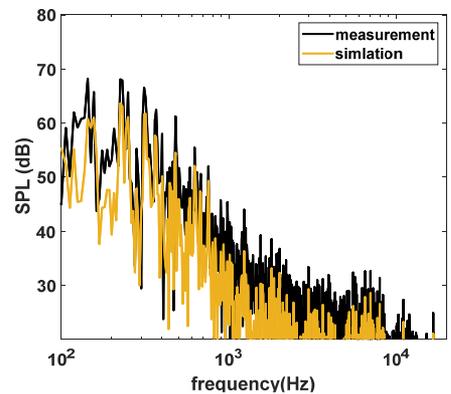
(a) Time history of the measured engine sound



(b) Spectrum of the measured interior sound (100 Hz high pass)



(c) Comparison between time history of the measured interior sound and that of the simulated interior sound



(d) Comparison between spectrum of the measured interior sound and the simulated interior sound (100 Hz high pass)

Fig. 1 Description of data used for this study

Fig. 2는 이 연구에 사용된 7개의 흡음재료에 대한 흡음율을 각 주파수 영역에서 나타낸다.

각 흡음재의 흡음계수는 차량 해석 모델에 적용되었다. 흡음 계수는 연산량을 고려하여 5 kHz까지의 값이 사용되었으며 2 kHz 부근에서 흡음재 사이의 차이가 명확한 것을 볼 수 있다. 이를 통해 엔진룸과 차량 실내에서의 충격응답함수를 ray acoustic 이론에 의하여 계산하였다. 운전석에서의 음압을 예측하기 위해 디젤엔진에서 계측된 음원과 엔진룸 및 차량 실내에서의 충격응답함수가 컨벌루션에 의해 계산되었다. 엔진 음원과 엔진룸의 충격응답함수를 컨벌루션 한 후 이에 대하여 대시판넬의 삽입 손실을 적용하였다.

Fig. 3은 7가지 흡음재에 대하여 예측 모델을 이

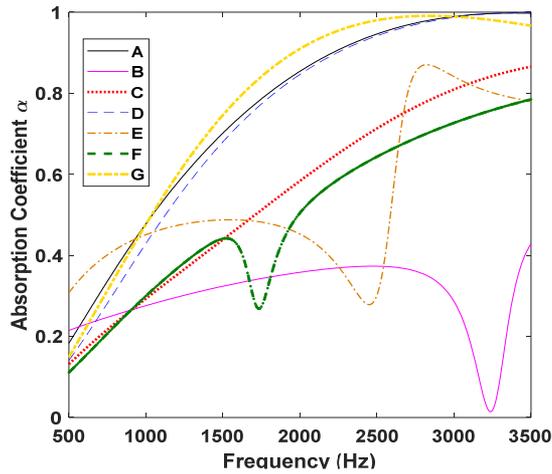


Fig. 2 Absorption coefficient for 7 absorbing materials

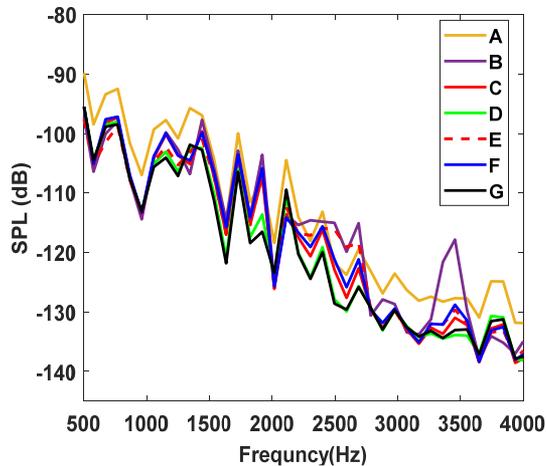


Fig. 3 Power spectrum density of 7 predicted interior sounds

용하여 예측된 실내소음에 대한 스펙트럼이다. 각 흡음재를 적용한 음압은 서로 다른 경향을 보인다. 흡음재 A를 적용한 소음의 음압은 타 흡음재 소음보다 높으며 흡음재 B를 적용한 소음의 음압은 3500 Hz 주변에서 특히 높은 것을 볼 수 있다.

4. 모델 이용 음질 인덱스 개발

4.1 청음평가

이 연구에서의 주관적 음질 평가는 N. Otto et al.⁽⁸⁾이 제시한 음향 평가 방법을 기반으로 수행되었다. 청각 테스트에서 일반적인 청각 능력을 가졌다고 판단된 30명(남자 24명, 여자 6명, 20대~40대)을 대상으로 실시하였다. 총 7개의 음원을 기준으로 평가되

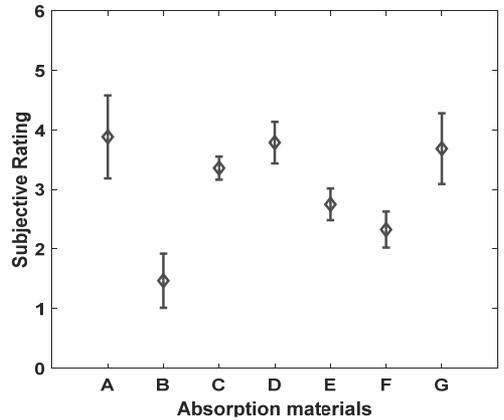


Fig. 4 'Pleasantness' result of 7 predicted interior sounds

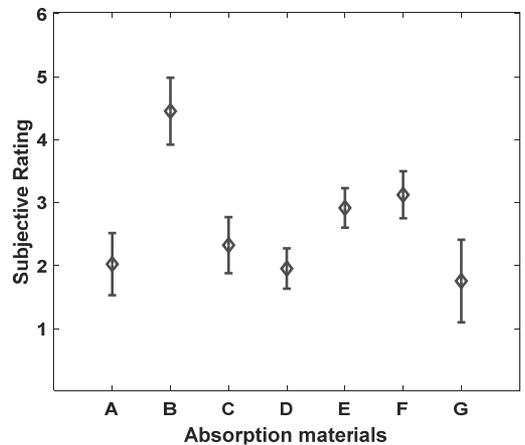


Fig. 5 'Powerfulness' result of 7 predicted interior sounds

있으며 플레이백 장비 및 헤드폰을 이용하여 평가하였다. 이 연구에서는 각 음원은 ‘powerfulness’와 ‘pleasantness’이라는 질의어에 대하여 0점부터 5점까지의 점수 구간을 이용하여 평가되었다. 이들 질의어는 차량의 음질 평가에 많이 사용되고 있다. 평가의 원활한 진행을 위하여 피험자들은 기준 소음 신호에 의해 훈련되었다. Fig. 4는 ‘pleasantness’에 대한 평가 결과이며 Fig. 5는 ‘powerfulness’에 대한 평가 결과이다. 이 결과에 의하면 일반적인 차량 실내 음질 평가에서 나타나는 현상인 *powerfulness*와 *pleasantness*의 역비례 관계를 흡음재료 A와 흡음재료 B의 청음 평가 결과를 통하여 알 수 있다.

4.2 음질 인덱스 개발

소리에 대한 음질의 객관적 평가를 위해서는 소리에 대한 심리음향 매개변수를 선택해야 한다. 이러한

매개변수를 음질 요소라 불리는데, 이 연구에서는 기본적으로 많이 사용되는 음질요소인 라우드니스, 샤프니스, 러프니스, 토널리티를 사용하였다. 이들 음질 요소와 주관적인 청음평가 결과와의 상관성을 분석을 하였다. 상관성 분석을 위해서 식 (11)에서 보여주는 바와 같이 피어슨 상관분석(12) 관계식을 이용하였다.

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{X_i - \bar{X}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2}} \cdot \frac{Y_i - \bar{Y}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y})^2}}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

상관성 분석결과 상관계수 값이 높은 주요 음질요소를 음질 인덱스개발에 사용하였다. 상관계수는 -1인 음의 상관계수와 1의 양의 상관계수 사이의 값을 가지며 두 변수 사이의 선형 상관도를 보여준다. 이 논문에서 변수 X는 음질 요소이며 변수 Y는 역동성

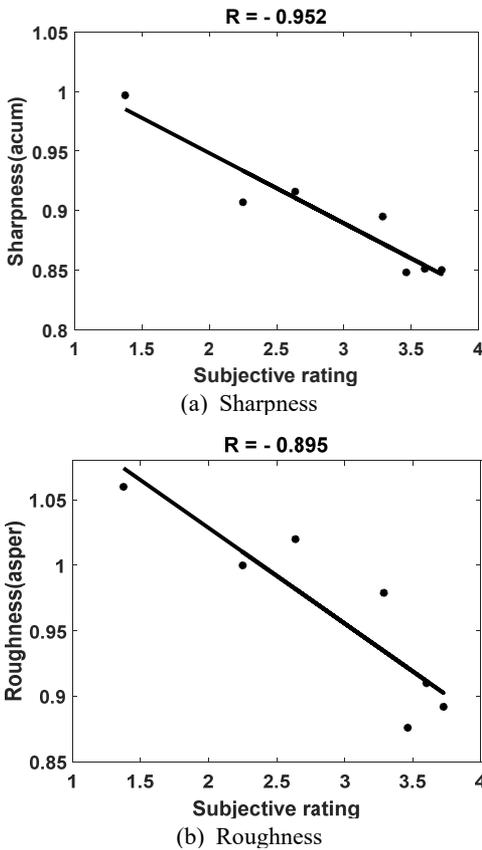


Fig. 6 Correlation coefficients between sound metrics and subjective rating of “pleasant” perception for interior sounds

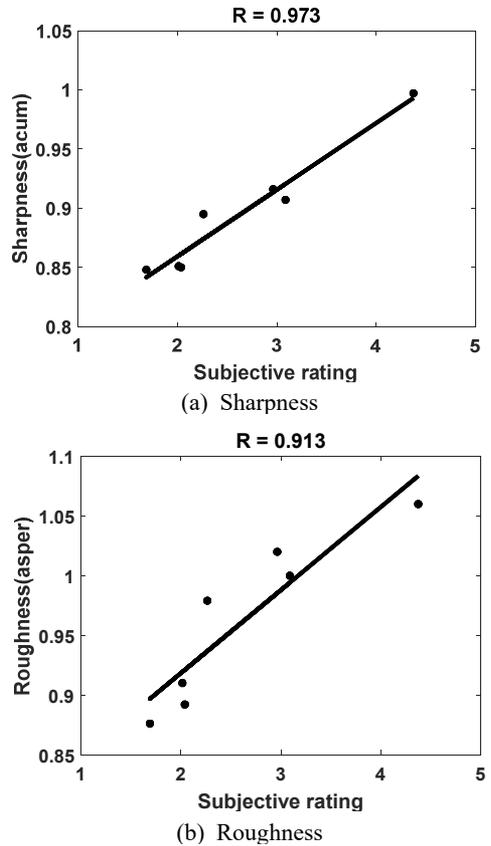


Fig. 7 Correlation coefficients between sound metrics and subjective rating of “powerful” perception for interior sounds

(powerfulness) 및 정숙성(pleasantness)에 대한 주관적 음질 평가 값을 의미한다. Table 2는 음질요소와 청음평가에 사용된 질의어에 대한 청음평가 결과와의 상관계수를 나타낸다.

상관성 분석 결과에 의하면 샤프니스와 러프니스가 상관성이 높다. 재료특성에 다른 라우드니스의 변화가 상대적으로 크지 않고 유사한 값을 나타내기 때문에 라

Table 2 Correlation coefficient between sound metrics and jury evaluation

Query	Sharpness	Roughness	Loudness	Tonality
Pleasant	-0.95	-0.89	-0.26	-0.31
Powerful	0.97	0.82	0.16	0.24

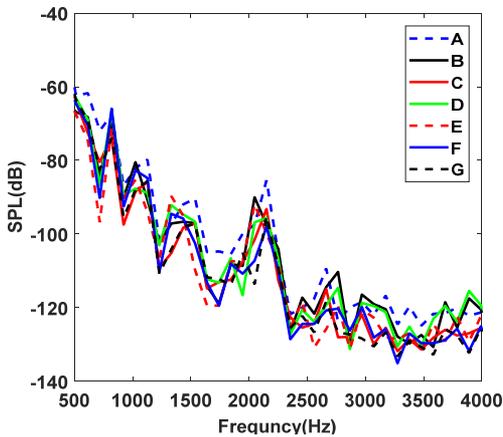


Fig. 8 Power spectrum density of 7 interior sounds measured inside of a test SUV car

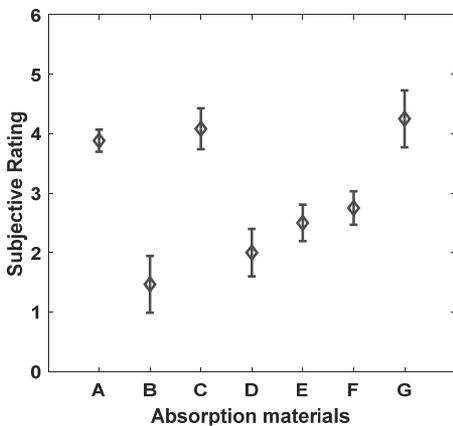


Fig. 9 'Pleasantness' result of 7 recorded interior sounds

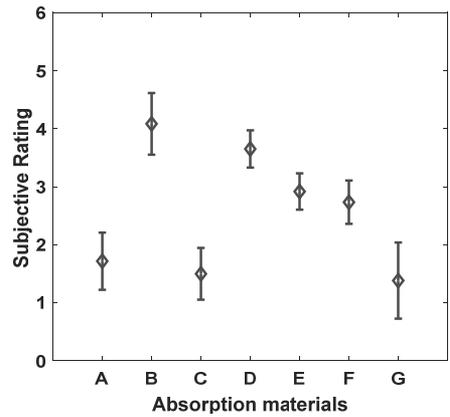


Fig. 10 'Powerfulness' result of 7 recorded interior sounds

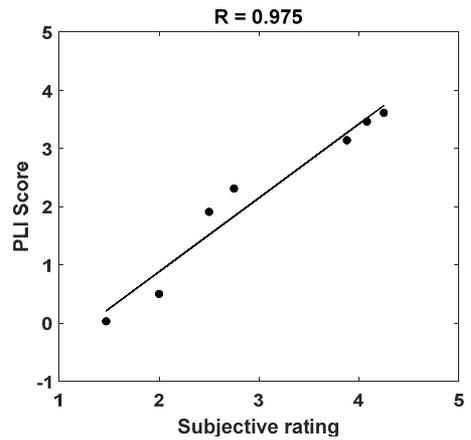


Fig. 11 Correlation coefficients between pleasant index score and subjective rating for 'pleasant' perception

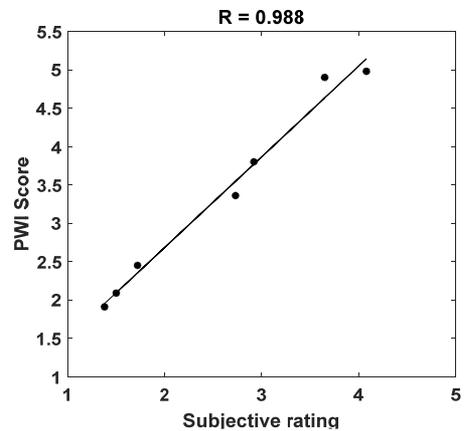


Fig. 12 Correlation coefficients between pleasant index score and subjective rating for interior sounds about 'powerful' perception

우드니스와의 상관성은 낮다. 특히 흡음재의 변화는 실내 소음에 미치는 영향이 저주파 특성보다 고주파 특성에 관계함으로 샤프니스의 영향이 큼을 알 수가 있다. Fig. 6은 음질요소와 주관적 청음평가 값 중 ‘pleasant’에 대한 상관계수를 나타내며, Fig. 7은 powerful에 대한 상관성을 보여준다. 여기서 acum과 asper는 샤프니스와 러프니스를 나타내는 측정 단위이다.

음질 인덱스 개발을 위해서 다중회귀분석 기술을 이용하였다. 이 기술은 두 개 이상의 알려진 값으로부터 임의의 변수의 값을 예측하는 통계적인 방법이다. 음질요소와 주관적 음질 평가 사이의 상관분석 이후 다중회귀 분석을 통하여 음질 인덱스를 개발하였다. 상관성 분석 결과 샤프니스와 러프니스가 주관적 청음평가와의 상관성 높음으로 샤프니스와 러프니스가 음질요소로 선정되었으며 다중회귀분석 결과 식 (12), (13)과 같이 음질 인덱스 얻었다.

$$\text{Pleasantness} = 10.0 \times \text{Sharpness} - 0.64 \times \text{Roughness} + 18.59 \quad (12)$$

$$\text{Powerfulness} = 13.70 \times \text{Sharpness} + 1.09 \times \text{Roughness} - 17.40 \quad (13)$$

5. 실차 실험 적용

5.1 실험 과정

제 4장에서 개발된 모델의 실차에 적용성을 검증하기 위해서 7개의 실험용 시편을 제작하여 실차에 적용하였다. 차량실험을 진행하기 위해 실험용 SUV 차량의 엔진을 탈거하여 엔진 룸 공간을 확보하였다. 무향실에서 측정된 디젤 엔진 소음을 엔진룸에 설치된 스피커를 통하여 재생하였다. 실험용 흡음재는 대시판넬 전면에 부착 변경하면서 차량 실내소음을 측정하였다.

5.2 실험 분석

Fig. 8은 실험을 통해 측정된 7개 흡음재에 대한 실내소음이다. 측정된 7개의 실내소음의 PSD(power spectrum density)를 보면 서로 비슷한 레벨을 보이며 이는 라우드니스가 비슷한 것을 의미한다. 측정된 실내소음에 대한 음질요소로 계산하여 음질인덱스에 적용하고, 또한 주관적 음질 평가를 통해 개발된 인덱스를 검증하였다.

5.3 청음평가

청음평가는 4장에서 시행한 방법과 동일한 방법을 사용하였으며, 청음평가자는 다른 사람으로 구성되었다. 청음평가 인원도 35명으로 구성되었으면 전문가와 일반학생으로 구성되었다.

정숙함(pleasant)과 역동성(powerful)에 대한 각각의 청음평가 결과는 Fig. 9와 Fig. 10에 보여준다. 이 결과에 따르면 제 4장에서 얻어진 청음평가 결과와 유사하게 두 질의에 대한 역 비례관계를 나타내고 있다.

5.4 인덱스와 청음평가 상관성 검증

실험용 흡음재 변경에 따른 실내소음에 대한 샤프니스와 러프니스를 구하여, 식 (12)와 식 (13)에 대입하여 음질인덱스를 이용한 흡음재 변화에 따른 음질 수준을 예측하였다.

인덱스 검증을 위해서 인덱스를 이용한 예측된 주관적 음질 수치와 청음평가를 통하여 평가된 주관적 수치에 대한 상관성을 비교분석 하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 PLI(pleasant index), PWI(powerful index)와 청음평가와의 상관성 분석 결과를 나타낸다.

6. 결론

이 연구에서는 해석적 방법과 주관적 음질 평가를 이용하여 흡음재에 대한 인덱스를 개발하였다. 먼저 ray analysis를 위한 차량 해석 모델이 개발되었다. 이 모델을 통해 디젤 엔진음과 2개의 충격응답함수를 컨벌루션 등의 신호처리 방법을 통해 운전석에서의 음압으로 예측되었다. 음질요소와 주관적 음질 평가 사이의 상관분석을 통하여 음질요소에 대한 인덱스를 개발하였으며 또한 흡음재의 물성치에 대한 상관분석을 통하여 흡음재 물성치의 인덱스를 개발하였다. 이를 검증하기 위하여 시험적인 측정을 실시하여 이에 대한 상관도를 분석하였다. 이 인덱스를 통해 차량 실내에서의 음질 개선 및 예측에 대한 시험적인 비용을 줄일 수 있다. 향후 연구 과제로는 차량에 실제 장착되는 흡음재 위치에 대한 인덱스 연구 및 해당 인덱스를 통한 신차종에 대한 음질 개선 및 개발 과정을 확립하는 것이 있다. 또한 시험차량과 동일한 해석적 방법을 통해 예측의 정확도를 높이는 연구도 필요하다.

후 기

이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1A2B5B02069400).

References

(1) Lee, S. K., Chae, H. C., Park, D. C. and Jung, S. K., 2003, Booming Index Development of Interior Sound Quality on a Passenger Car Using Artificial Neural Network, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 445~451.

(2) Lee, S. K., Chae, H. C., Park, D. C. and Jung, S. G., 2003, Booming Index Development for Sound Quality Evaluation of a Passenger Car, SAE Transactions, Vol. 112, No. 6, pp. 1766~1774

(3) Park, J. H. and Lee, S. K., 2012, Identification of Vehicle Booming Sound and its Objective Evaluation Using Psychoacoustic Parameters, International Journal of Vehicle Design, Vol. 58, No. 1, pp. 46~61.

(4) Lee, S. K., Kim, B. S., Chae, H. C., Jung, S. G. and Park, D. C., 2005, Sound Quality Analysis of a Passenger Car Based on Rumbling Index, SAE 2005 Noise and Vibration Conference, SAE Technical paper 2005-01-2481.

(5) Cho, H. Y., Lee, S. K., Hwang, S. W. and Han, J. H., 2014, Improvement of Tire Pattern Noise Estimation Using Adaptive Filter and Sound Quality Application Research, KSAE Annual Conference Proceedings, Vol. 2013, No. 11, pp. 682~683

(6) Kim, T. G., Lee, S. K. and Kim, S. J., 2007, Evaluation of Enhancement of Sound Quality of Axle Gear Based on Artificial Neural Network, ICSV 14, Cairns, Australia.

(7) Lee, K. H., Shin, T. J., Lee, S. K. and Kim, K.

Y., 2016, Influence of Absorption Materials on the Sound Quality in a Car, Korean Society Of Automotive Engineers, pp. 389~392

(8) Otto, N., Amman, S., Eaton, C. and Lake, S., 2001, Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds, Sound and Vibration, Vol. 35, No. 4, pp. 24~47.

(9) Allard, J. and Atalla, N., 1993, Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, Elsevier Applied Science

(10) ISO 10534-2, 1998, Acoustics- Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes-Part2.

(11) LMS Virtual. Lab, Siemens company.

(12) Jerome L. M., Arnold, W. and Robert, F. L., 2003, Research Design and Statistical Analysis, Mahwah.



Kunhee Lee is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for the application of sound-absorbing materials to automotive sound quality and optimizing sound-absorbing material package in the engine room.



Sang Kwon Lee studied in the Department of Mechanical Engineering at the Pusan National University, Pusan, Korea for B.S. In 1998, he received a Ph.D. degree in signal processing at the ISVR (Institute of Sound and Vibration Research) of the University of Southampton in U.K. He has continued the sound and vibration research in the department of mechanical engineering inha University since 1999. He worked in Hyundai Motor Company between 1984 and 1994 and researched Samsung Motor Company on 1998.