

자동차 임팩트 사운드에 대한 주관적 평가 및 차량 개발에 응용

The Estimation of Subjective Evaluations for Impact Sound and Analysis of the Effects for Parts of a Car

나은우* · 박상원* · 김호욱* · 이상권† · 이경희** · 신영곤** · 배병국**

Eun-Woo Na, Sang-Won Park, Ho-Wok Kim, Sang-Kwon Lee, Kyung-Hoi Lee, Young-Gon Shin, Byung-kook Bae

Key Words : Impact noise(충격소음), Sound metrics,(음질요소), Car(자동차), Subjective evaluation(주관 평가), Wavelet transform(웨이블렛 트랜스폼)

ABSTRACT

Impact noise is induced in a car when it is driven on a harsh road or over some bumps. This noise occurs with the very high level of sound, which affects passengers in some way or other. Although it is impossible to clearly remove such noise. It is necessary to research an improvement in sound quality for impact noise. A new sound metric for impact sound is presented in the previous work. This metric is verified by comparison between mean subjective ratings and several sound metrics. In this paper, more objective attributes are considered, which are the attributes expressing the level and modulation of sound. Three sound metrics are employed to get impact sound indexes for each course by the method of multiple linear regressions. The indexes are verified by considering the correlation between the estimated values from the multiple linear regressions and the mean subjective ratings by evaluators. Also, the subjective ratings on the indexes are estimated for the case in which some parts of suspension system are changed. The estimated ratings represent more reasonable or acceptable ratings. Thus, such indexes can be used for modification of the parts of suspension system under considering a good sound quality.

1. 서 론

임팩트 소음은 자동차가 거친 노면을 주행하거나, 과속방지턱을 지나갈 때 발생한다(Fig. 1). 특히 임팩트 소음은 순간적으로 높은 레벨의 소음이 발생하기 때문에 승객의 승차감에 커다란 영향을 끼치게 되며, 차량의 소음 특성에 있어 고려하게 되는 중요한 특성이다. 이러한 노면 상태에 의한 임팩트 소음과는 별도로 Diesel knocking 이나 Door lock sound 와 같은 임팩트 소음에 대한 연구는 일부 진행 중 이지만[1-2], 도로상태에 따른 임팩트 소음 연구는 아직 미비하며, 이에 따라 기존에 존재하는 음질 요소를 단순히 적용하기에는 한계가 있다. 그러므로 임팩트 소음에 대한 새로운 접근방법이 필요하며, 특히 임팩트 소음에 대한 사람의 주관적인 느낌을 합리적이고 객관적으로 추정할 수 있는 적절한 음질요소의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 기존에 존재하는 음질요소 보다 충격감 특성을 조금더 정확히 나타낼 수 있는 음질요소인 HFEC (High

Frequency Energy Contribution) 를 개발하여 라우드니스, 변동강도, 리프니스와 같은 음질요소와 비교하였다. 라우드니스는 심리음향학에서 음압에 대한 사람의 느낌을 계산한 양이며, 변동 강도와 리프니스는 소리의 변조에 대한 사람의 느낌을 분석한 것이다[3-4]. 연구에 사용한 자동차 임팩트 소음은 서로 다른 4 곳의 시험 코스에서 녹음하였으며, Fig. 2 에서 확인할 수 있다. 각 코스에 별로 녹음된 충격 소음을 평가하기 위해 약 30 명의 청음평가인

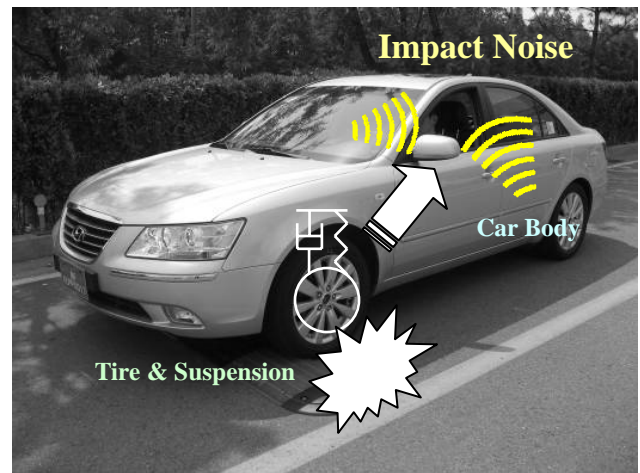


Fig. 1 Impact noise occurred by the speed bump on the road.

† 교신저자; 정희원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7305, Fax : (032) 868-1716
* 인하대학교 기계공학과
** 현대자동차

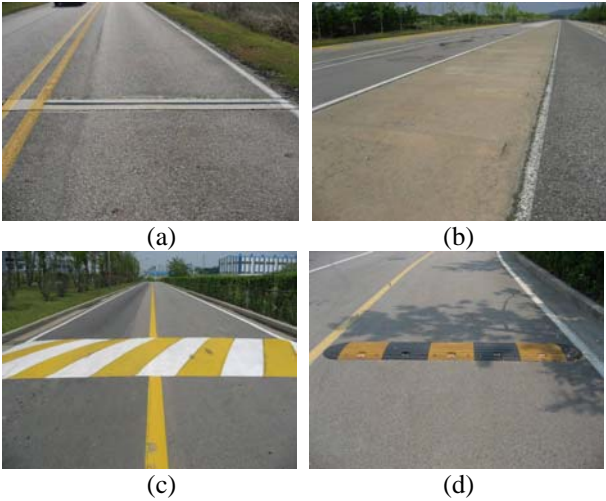


Fig. 2 Pictures of test courses (a) course 1: impact bar, (b) course 2: continuous bandy road, (c) course 3: broad bump, (d) course 4: narrow bump.

원을 선정하여 주관적 평가를 진행하였다. 청음평가 방법으로는 다양한 방법[10,11]이 있으며 이번 연구에서는 레이팅 (rating method) 방법을 이용하였다. 청음평가 결과는 각 코스별로 녹음된 소음 신호에 대한 평가자의 주관적인 느낌에 기초하며, 이 주관적 평가결과와 음질요소를 이용하여 음질 인덱스를 제작하였다. 이러한 음질 인덱스는 인공신경망 회로(Artificial neural network, ANN) 또는 다중선형회귀 분석(Multiple linear regressions, MLR) [5-8]을 통해 얻을 수 있다. 즉, 음질 인덱스는 ANN 또는 MLR을 이용하여 구성할 수 있으며, Fig. 3에서 주관적 평가를 예측하는 인덱스 개발 과정을 확인할 수 있다. 이번 연구에서는 임팩트 소음 인덱스를 결정하기 위해 MLR을 사용하였으며, 각각의 테스트 과정에서 채택한 음질요소는 라우드니스, HFEC, 변동 강도, 리프니스이다. 최종적으로 제작된 임팩트 소음 인덱스는 실제 주관 평가치와 MLR에 의한 주관 평가 추정치를 비교하여 검증하였다. 음질 인덱스를 이용해 계산된 추정값과 실제 주관 평

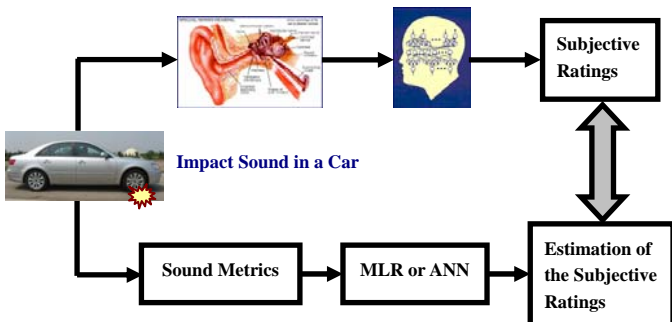


Fig. 3 Process for the estimation of the subjective ratings by using sound metrics.

가값 사이의 상관도 제공값은 각 코스 별로 88 퍼센트 이상의 값을 보인다. 이 값은 인덱스의 추정치가 타당하다는 것을 의미한다. 이에 따라 개발된 인덱스를 이용해 자동차의 서스펜션 계통 부품을 변경해가며 각각의 음질을 비교하였다. 변경된 부품에 의한 주관 평가 추정치 결과는 임팩트 소음 인덱스를 이용하여 확인할 수 있으며, 개발된 임팩트 소음 인덱스가 적절하고 합리적인 추정치를 계산할 수 있는지를 검증한 후, 자동차의 서스펜션 시스템 부품 변경에 대한 임팩트 음질 변화에 대한 연구에 적용하였다.

2. 임팩트 소음 인덱스에 대한 음질 요소

2.1 라우드니스(Loudness)

라우드니스는 주관적으로 느끼는 소리의 크기를 의미하는 청감으로 정의된다. 라우드니스를 계산하기 위한 여러 모델[3-5]이 제안되었으며, 본 논문에서는 Zwicker 모델[3]을 사용한다. 라우드니스는 폰(phon)과 손(sone)의 단위를 가지고 있다. 1 손은 1kHz에서 40 dB를 가지는 순음의 라우드니스 값이다. Fig. 4에서 모든 코스의 15개 충격음을 측정할 라우드니스 값을 확인할 수 있으며, 라우드니스 최대치는 약 18.5sone이다. 이 라우드니스 레벨에서 평균 주관 평가치는 약 8.8이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 충격감에 대한 주관 평가치는 라우드니스에 비례하여, 평균 주관 평가치와 라우드니스의 상관도는 약 94%이다.

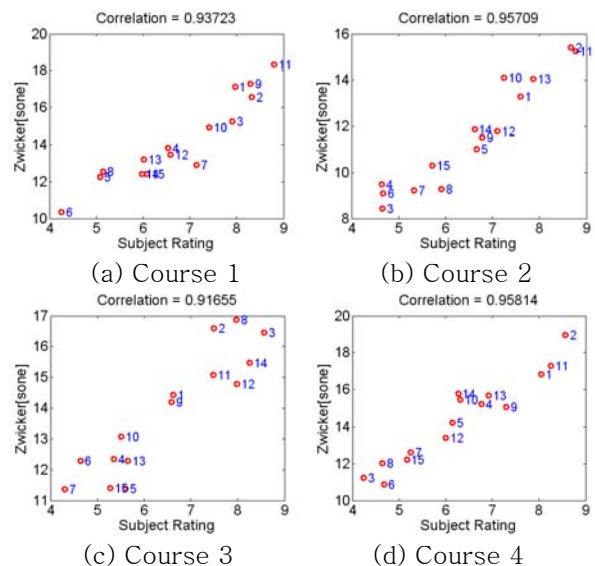


Fig. 4 Loudness using Zwicker's method and the subjective rating of 15 passenger cars for 4 impact courses.

2.2 변동강도(Fluctuation Strength)

20Hz 미만으로 진폭 또는 주파수가 변조되는 소음의 경우에는 정상 상태의 소음에 노출되어 있는 경우보다 짜증스러운 느낌을 갖게 된다. 이와 같은 청감을 변동강도라고 정의하며 단위는 Vacil 을 사용한다. 1 vacil 은 1kHz 의 순음이 4Hz 의 변조 주파수로 100%의 크기 변조될 때의 변동 강도를 나타낸다. 변동강도 계산 모델은 Fastl 과 Zwicker[3]에 의해 제안되었다. 각각의 코스에서 녹음된 15 개 충격음의 변동강도 값은 Fig. 5 에서 확인할 수 있으며, 변동강도와 임팩트 소음의 충격감에 대한 사람의 인식은 어느 정도 관련이 있음을 알 수 있다.

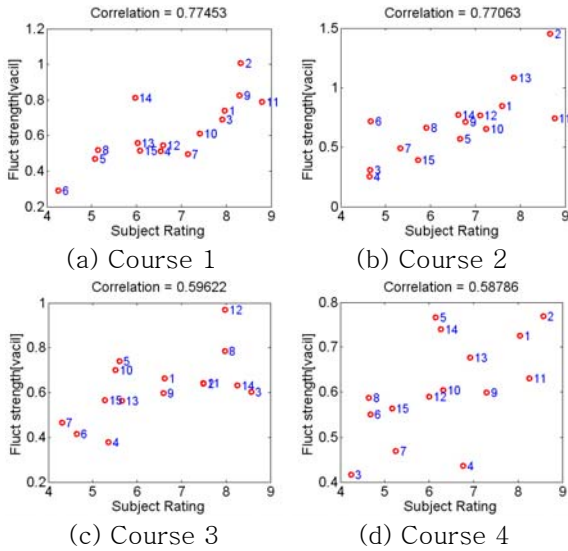


Fig. 5 Fluctuation strength and the subjective rating of 15 passenger cars for 4 impact courses.

2.3 러프니스(Roughness)

20Hz 이상으로 진폭 또는 주파수가 변조되는

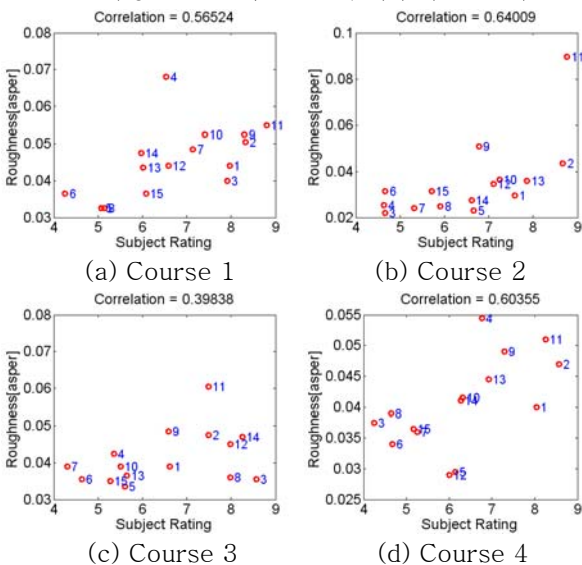


Fig. 6 Roughness and the subjective rating of 15 passenger cars for 4 impact courses.

소음의 경우에는 음의 크기 변화를 느끼지 못하며, 전체적으로 거친 느낌을 제공한다. 이와 같은 청감을 러프니스라고 정의하며, 단위는 asper 를 사용한다. 1 asper 는 1kHz 순음이 70Hz 의 변조 주파수로 100%의 크기 변조될 때의 거친 정도를 나타낸다. Fig. 6 에서 모든 코스의 15 개 충격음에 대해 계산된 러프니스 값을 확인할 수 있으며, 러프니스와 임팩트 소음의 충격감에 대한 인간의 인식이 관련이 있음을 알 수 있다.

2.4 HFEC(High Frequency Energy Contribution)

연속 웨이블릿 변환(Continuous Wavelet Transform-CWT)를 이용한 시간-주파수 분석은 임의의 시간에 발생하는 임팩트 신호의 분석과 탐지에 효과적으로 사용될 수 있다[9]. CWT 는 단순 주파수 변환으로는 불가능한 타임 이벤트 임팩트 신호 분석을 가능하게 하므로 임팩트 소음에 대한 음질요소 개발에 사용될 수 있다. 한편, 인간이 느끼는 충격감은 주로 높은 주파수대역의 음과 관련되어 있다. 본 연구에서는 소음 신호에서 특정 임계치를 넘는 임팩트 파트를 추출한 후에 높은 주파수대역의 영향도를 분석하는 음질요소를 개발했다. 임팩트 소음에 대한 음질요소를 계산하는 과정은 아래와 같다

(1) A-Weighting

A-Weighting 을 한 CWT 로부터 웨이블릿 계수의 M by N 행렬을 구한다.

(2) 임팩트 파트 추출

신호의 조건에 따르는 임팩트 영역을 추출할 수 있는 레벨의 임계치를 정한다. 신호의 임팩트 영역은 주어진 임계치보다 큰 진폭을 가진 신호의 구간과 관련이 있다. 임계치를 넘지 못하면 값이 0 이 되는 웨이블릿 계수인 M by N 행렬을 구한다.

(3) 임팩트 파트에 대한 Frequency-weighting

주파수 값을 추출된 웨이블릿 계수 제곱에 곱한다. 이 과정은 고주파수의 영향을 증가시킨다.

(4) A-Weighting

여기 추출된 계수 제곱을 원래의 CWT 계수 제곱으로 나누고 계수 행렬의 모든 인덱스에 대하여 합한다. 마지막으로, 계산된 값을 최대 주파수로 나누어 준다. 결과값은 무차원이고 HFEC(High Frequency Energy Contribution)라 한다. HFEC 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$HFEC = \frac{1}{Freq_{max}} \sum_m^M \sum_n^N \frac{\overline{CWT_{m,n}^2} \cdot Freq_{m,n}}{CWT_{m,n}^2} \quad (1)$$

($\overline{CWT_{m,n}}$): Extracted CWT of high level)

Fig. 7 에서 A-weighting 후 계산된 CWT 계수와, Fig. 8 에서 추출된 후 주파수 웨이팅된 주파수 계수 행렬을 확인 할 수 있다. HFEC 의 검증은 충격감과 상관도를 비교함으로써 검증하였다. Fig. 9 에서 모든 코스에 대한 15 개 충격음에 대한 HFEC 값을 확인 할 수 있다. 이상에서 고려한 음질요소들이 임팩트 소음의 충격감 음질 인덱스를 구성하기 위해 사용되며, 각 코스별 선택된 음질요소들은 Table 1 에 요약 되어 있다. 상관도에 따라 3 가지 음질요소를 각각 선택하였고, 이 음질요소가 음질 인덱스를 제작하는데 MLR 의 입력값으로 사용된다

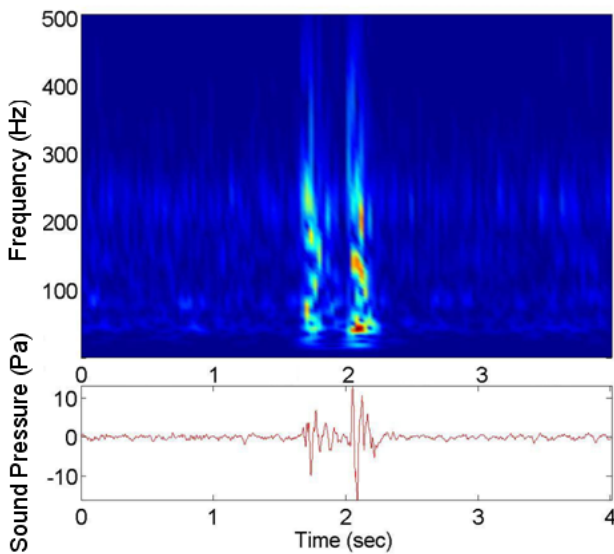


Fig. 7 A-weighted CWT for the impact noise

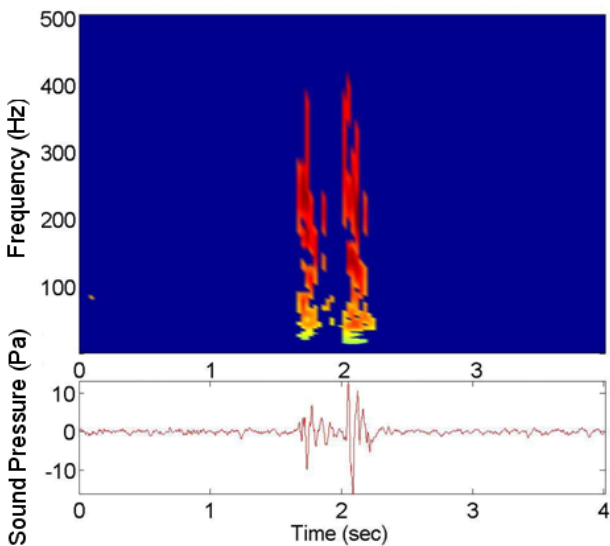


Fig. 8 Coefficients after weighting to the extracted coefficients by each frequency.

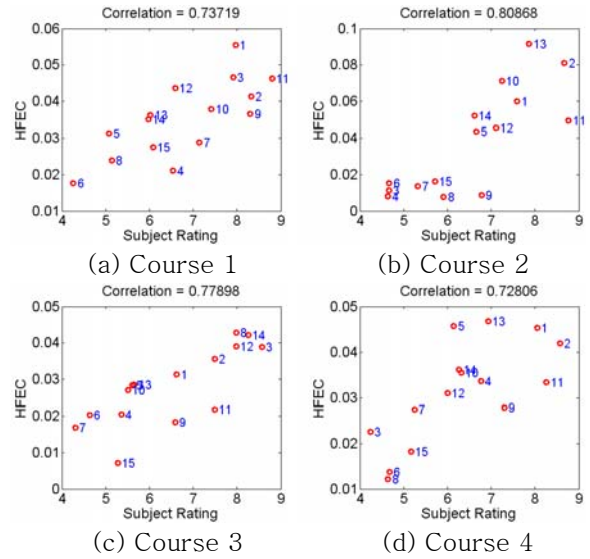


Fig. 9 HFEC and the subjective rating of 15 passenger cars for 4 impact courses.

Table 1 Correlation between overall attributes for impulsive at each course.

Course No.	First	Second	Third
Course 1	Loudness	FS	HFEC
	0.9372	0.7745	0.7372
Course 2	Loudness	HFEC	FS
	0.9571	0.8087	0.7706
Course 3	Loudness	HFEC	FS
	0.9165	0.7790	0.5962
Course 4	Loudness	HFEC	Roughness
	0.9581	0.7281	0.6036

3. 임팩트 소음 인덱스 개발

음질 인덱스는 음질요소와 녹음된 소음의 주관적 평가치 사이의 상관성 모델링을 의미하며, ANN 과 MLR 기법은 음질 인덱스 모델링을 하기 위한 방법들이다. ANN 은 비선형 모델을 표현하기 위한 유용한 방법이나 많은 데이터가 필요하면, MLR 은 상대적으로 적은 수의 데이터가 필요하며 간단한 계산으로도 합리적인 결과를 얻을 수 있다. 이번 연구에서는 자동차 소음의 수가 각각의 코스별로 15 개 이므로 MLR(다중회기분석) 기법이 적합하며, 수학적 표현은 다음과 같다.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2)$$

Y_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 는 15 개 임팩트 소음에 대한 음질 인덱스이다. β_i 는 다중회기분석을 통해 결정

Table 2 Factors of sound quality index for impulsiveness at each course, using three objective attributes.

Course No.	a	b_1	b_2	b_3
Course 1	-0.802	0.481	0.764	7.341
Course 2	-0.302	0.570	-7.663	0.771
Course 3	-2.527	0.541	10.113	1.978
Course 4	-1.799	0.548	-2.098	6.246

된 웨이팅 계수이며, β_0 는 Y 축 절편이고 x_i 는 관련된 음질 요소이다. Table 2 에 각 코스에 대한 웨이팅 값을 표시하였으며, 이 웨이팅값이 자동차의 15 가지 임팩트 소음에 대한 음질 인덱스에 사용된다. β_0 와 β_i ($i = 1, 2, \dots, k$)는 Y_i 와 x_i 에서 측정되어야 하는 미지수이다. 측정된 미지수가 b_0 와 b_i ($i = 1, 2, \dots, k$)일 때 MLR 에 대한 평가 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + \dots + b_kx_{ki} \quad (3)$$

3 가지 음질요소가 사용될 때, Eq. (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + b_3x_{3i} \quad (4)$$

최종적으로 Eq.(4)를 통해 주관 평가치를 추정할 수 있다. Fig. 10 은 각 코스의 15 가지 음에 대한 주관적 평가와 음질 인덱스 결과 사이의 상관도이다. 세로 축은 인덱스 결과이고, 가로 축은 15 가지 임팩트 음에 대한 주관적 평가이다. 인덱스 결과와 주관적 평가 사이의 상관도의 제곱값은 0.88 이상이다.

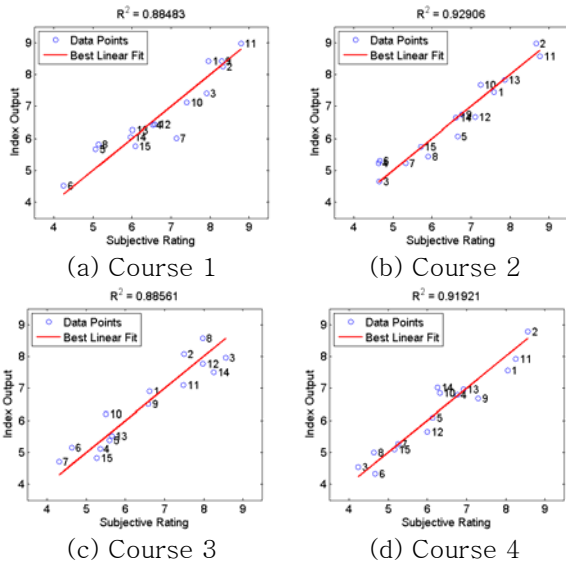


Fig. 10 Index outputs and subjective ratings of 15 passenger cars for 4 impact courses.

4. 4 음질 인덱스 적용

임팩트 음질 인덱스는 각 코스별로 3 가지 음질요소를 사용하여 제작되었다. 이 음질 인덱스를 자동차의 몇몇 부품이 변경된 상황에 따라 발생하는 소음에 적용하여 임팩트 음질의 변화를 확인하였다.

4.1 차량 소음 녹음과 부품 변경

개발된 음질 인덱스를 적용하기 위해 차량의 서스펜션 부품을 변경해 가며 임팩트 소음을 녹음한 후 주관평가 값을 추정하였다. 변경 부품은 Fig. 11 과 같으며, 구체적인 정보는 Table 3 에 요약하였다. Case 1 (타이어 압력증가), Case 2 (인슐레이터 강성증가), Case 5 (트레일링암 부싱의 Void 제거)는 높은 충격 평가치가 예상되며, Case 3 (속업소버의 감쇠력 저감)은 낮은 충격 평가 결과를 보여 줄 것이다. 또한, 아무런 교체를 하지 않은 임팩트음을 기준치로서 평가 및 비교하였다.

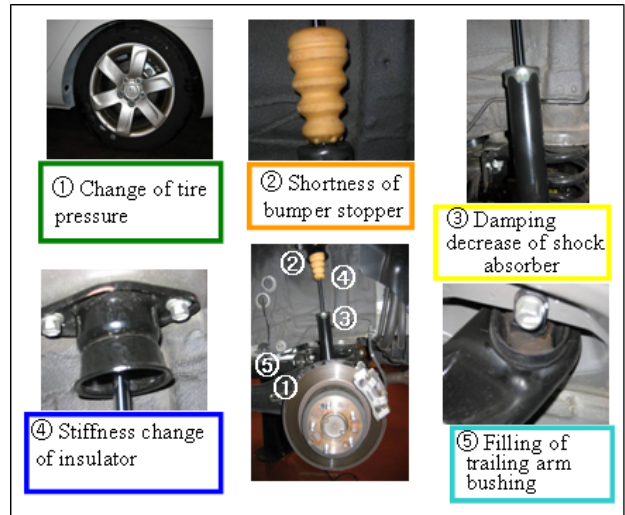


Fig. 11 Modification of parts in the suspension system of a car.

Table 3 Changed conditions for the parts of the vehicle.

No.	Modified Conditions
1	Reference
2	Tire Pressure: 40 psi (Reference: 33psi)
3	Stiffness of insulator: HS65 (Reference: HS55)
4	Decrease of damping for shock absorber
5	Shortening in the length of bump stopper
6	Filling of trailing arm bushing

4.2 부품변경에 대한 음질평가

이번 연구를 통해 각각의 주행 코스별로 임팩트 음질 인덱스를 제작하였고, 그 결과값은 Fig. 12 와 같다. 높은 타이어 압력은 타이어의 감쇠력을 감소시켜 큰 진동과 소음을 유발하고(Case 1), 높은 인슐레이터의 강성 또한 큰 진동과 소음을 유발한다.(Case 2). 또한, 트레일링암 부싱의 공극을 제거하는 것 또한 진동과 소음을 증가시킨다(Case 5). 이에 따라 Case 1, 2, 5에 대한 추정치는 높은 값을 보여준다. 그러나 Case 3은 충격평가에서 낮은 값을 나타내며, 이것은 속업소바의 댐핑이 증가하기 때문에 발생하는 자연스런 결과이다. 또한, Case 4에서는 대부분 코스에서 기준 소음의 충격감 추정치와 크게 다른 점이 보이지 않는다. 즉, 소음의 진폭이 충분히 크지 않다면 bump stopper의 길이는 임팩트 소음에 영향을 끼치지 않는다. 따라서, 개발된 음질 인덱스를 이용해 추가적인 청음 평가 없이 서스펜션 시스템의 임팩트 소음에 대한 음질 평가 및 개발/개선에 사용할 수 있다.

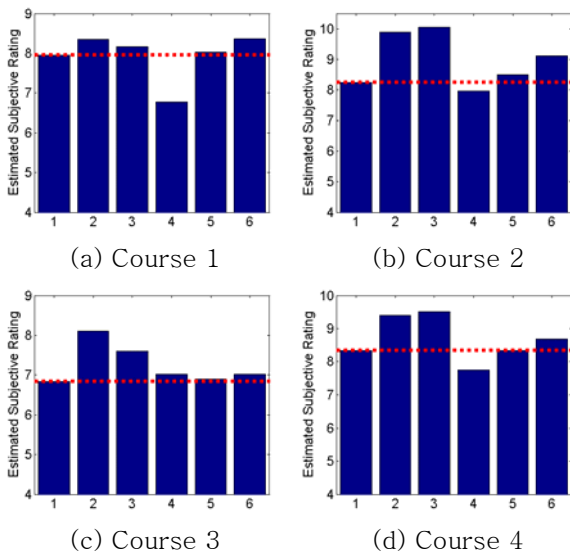


Fig. 12 Estimated subjective ratings using MLR when parts of suspension system are modified for each course (dashed line: reference rating).

※ Index of the number of x axis

- 1 : Reference(Normal)
- 2 : Tire pressure change : 33psi → 40psi
- 3 : Insulator change : HS55 → HS65
- 4 : Shock absorber damping decrease
- 5 : The length of bump stopper shortening
- 6 : Bushing void filling

5. 결 론

이 연구를 통해 라우드니스, 변동 강도, 러프니스, HFEC 와 같은 음질 요소를 이용해 음질 인덱스를 제작하였다. 또한 이 인덱스를 이용해 청음

평가 없이 주관적 평가를 진행할 수 있으며, 인덱스로 계산된 주관적 평가와 실제 주관적 평가 상관도의 제곱은 모든 코스에서 0.88 이상이었다. 이에 따라 임팩트 음질 인덱스를 사용하여 차량의 서스펜션 부품 변경에 의한 음질 개선효과의 평가에 성공적으로 적용할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Hamilton D., 1999, " Sound quality of impulsive noises: an applied study of automobile door closing sounds" , Publication of the Society of Automotive Engineers SAE 1999-01-1684.
- (2) P. Sellerbeck, C. Nettlebeck, R. Heinrichs, and T. Abels, 2007, " Improving Diesel Sound Quality on Engine Level and Vehicle Level - a Holistic Approach" , SAE 2007 Noise and Vibration Conference and Exhibition, May 2007, 2007-01-2372.
- (3) Zwicker, E. and Fastl, H., 1999, Psychoacoustics: Facts and Models, Springer-Verlag, Berlin, 2nd Edition.
- (4) Aures, W., 1985, " The Sensory Euphony as a Function of Auditory Sensations" , Acoustica, 58, pp.282-290.
- (5) Dillon, W. R., and Goldstein, M., 1984, Multivariate Analysis: Methods and Applications, John Wiley & Sons, New York.
- (6) Hatano S, Shin SH, Hashimoto, T., 2006, " Effect of visual scenery and seat-floor vibration to the perception of sound quality of car interior noise: part 2: multiple regression model for the sound quality evaluation" , In: Proceedings of the inter-noise, vol. 174.
- (7) Matr H., 1996. Neural Network Design. PWS Publishing Company.
- (8) Laux, P. C., 1998. Using Artificial Neural Networks to Model the Human Annoyance to Sound. Ph.D. Thesis School of Mechanical Engineering, Purdue University.
- (9) Lee, S. K. and White, P. R., 1998. " The Enhancement of Impulsive Noise and Vibration Signals for Fault Detection in Rotating and Reciprocating Machinery" , Journal of Sound and Vibration. 217(3), pp.485-505.
- (10) Norm Otto, Scott Amman, Chris Eaton, and Scott Lake, 2001, " Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds" , Sound and Vibration, vol.35, pp.24-47.
- (11) Murata, H., Tanaka, Takada H. and Ohsasa Y., 1993, " Sound Quality Evaluation of Passenger Vehicle Interior Noise" , Proceedings of the 1993 SAE Noise and Vibration Conference, Traverse City, Michigan, USA. SAE931347.