

차량 아이들 감성진동 평가를 위한 진동평가지수의 연구

Development of Vibration Index for the Objective Evaluations of Idle

Vibration Quality in a Passenger Car

박홍석* · 이상권[†] · 윤기수** · 이민섭**

Hong-Seok Park, Sang-Kwon Lee, Gi_Soo Yoon and Min Sup Lee

Key Words : ride quality(승차감), correlation(상관도), jury evaluation(주관적 평가), MLR(다중선형회귀 분석), whole body vibration(전신진동)

ABSTRACT

Driver's feeling is variously affected by lots of components such as engine, frame, wheels, and seats during the operation of automobiles. The main objective of this research is to identify the correlation between subjective evaluation and vibration metrics that was set by ISO to investigate development of the car vibration quality index using multiple linear regressions (MLR). A previous research related with automotive vibration quality used the method of calculating acceleration values of the point of a seat, a seat back, foot as RMS for objective evaluation. The automotive comfort is determined by RMS values. In comparison with the previous research, this study includes not only the vibration metrics, but also subjective values by jury evaluation. By indentifying the correlation between subjective evaluation and vibration metrics, the automotive vibration quality index is developed through MLR. Based on the results of this study, the proposed the automotive vibration quality index which developed through MLR will be helpful to obtain objective and reliable automotive comfort values.

1. 서 론

소비자에 대한 자동차의 구매력을 증대하기 위해서 차량진동에 기인하는 안락감 개선에 많은 연구가 지속되고 있다⁽¹⁻³⁾. 특별히 최근 자동차의 국제 경쟁력이 치열해 짐에 따라서 안락감에 대한 중요성은 더욱 증가하고 있다. 실제 차량에서는 진동이 운전자에게 동시에 입력됨으로 다중 입력에 대

한 진동 값을 이용하여 승차감에 대한 객관적인 표현이 필요하다. 본 연구를 통하여 이러한 다중 입력 진동에 대한 통합적 차량 진동에 대한 주관적 평가와의 상관관계를 Fig. 1 과 같은 방법으로 정립하여 기존 전신 진동 이론에서 다루는 진동에 대한 표현을 자동차의 안락감 평가에 대한 표현으로 보다 구체적으로 정립하고자 한다. Fig. 1 은 실제 차량의 아이들 상태에서 운전자들이 주관적인 감성 진동을 평가하고, 다른 한편으로 시트, 바닥, 등받이에 센서를 부착하여 진동을 측정하고 측정된

[†] 교신저자; 인하대학교 음향진동신호처리연구실

E-mail : sangkwon@inha.ac.kr

Tel : (032)860-7305, Fax : (032)868-1716

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 현대기아 자동차 남양연구소

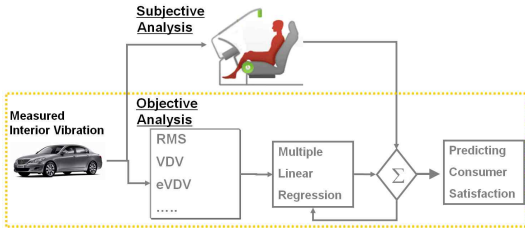


Fig. 1 Design progress for vibration ride quality index

진동을 통하여 인체 진동 이론을 적용한 진동요소 (vibration metrics)를 얻는다.

개발된 진동요소와 감성평가 실험과의 관계를 다중 선형 회귀 분석 (multiple linear regress analysis)을 통해 정립하고 통합적인 진동 안락감 인덱스 (vibration comfort quality index)를 개발한다. 개발된 안락감 인덱스는 실제 차량 평가를 통하여 검증한다.

2. 전신 진동 이론

2.1 국제 표준

인체에 전신 진동이 전달되면 인체는 다양한 반응을 한다. 그 중 건강과 안락감에 대한 연구가 비교적 집중적으로 연구되고 있다. 전신 진동을 측정하고 평가하기 위한 다양한 국제 표준안들이 발표되었으며, 대표적인 것으로는 ISO 2631-1 와 BS 6841 표준안 등이 있다⁽⁴⁾.

① British Standard BS 6841 (1987)

ISO 2631(1985)에 반대하여 진동과 반복적인 충격을 고려할 수 있는 일반화된 측정 및 평가방안을 제시하고 있다. 일반화 된 전신 피폭 진동 및 충격에 대한 측정/평가 필요성에 따라 6 종류의 주파수 가중함수, 가속도 실효값(rms) 값 및 전신 피폭 지수 (VDV), 저 주파수 대역 (0.1~0.5Hz)의 떨림 증상에 대한 평가 방안 또한 제시하고 있다. 이와 같이 일반화된 전신 피폭 진동 측정 및 평가 방안은 일반 산업계에서 ISO 표준 보다 높은 선호도와 신뢰도를 가지고 있다.

② 주파수 가중함수 및 곱셈인자

BS 표준안은 12 축에 대하여 각각의 주파수 가중함수를 모두 정의하고 있다. 각 진동 축에

Table 1 Frequency weighting function and axis multiplying factor

Input Position	Axis	Frequency weighting		Axis multiplying factor
		BS 6841	ISO 2631-1	
Seat	X	W_d	W_d	1.00
	Y	W_d	W_d	1.00
	Z	W_b	W_k	1.00
	Rx	W_e	W_e	0.63
	Ry	W_e	W_e	0.40
Seat back	X	W_c	W_c	0.80
	Y	W_d	W_d	0.50
	Z	W_d	W_d	0.10
Feet	X	W_b	W_k	0.25
	Y	W_b	W_k	0.25
	Z	W_b	W_k	0.40

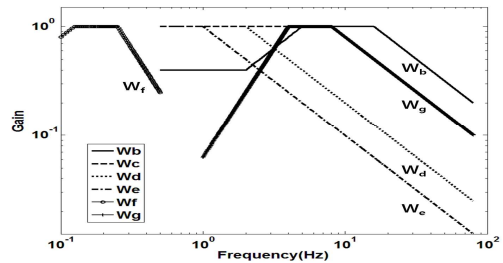


Fig. 3 Asymptotic approximations to frequency weightings for whole body vibration as defined in BS 6841

대하여 적용 가능한 디지털 및 아날로그 필터를 제안한다. 그리고 Fig.3은 주파수 가중함수를 나타낸다. Table 1에서는 각 축 방향에 대한 주파수 가중치에 대한 ISO 2631-1 과 BS 6841 표준안의 차이점을 보여준다.

2.2 진동요소 (vibration metrics)

본 연구에서는 차량의 안락감 평가를 위하여 전신 진동에 사용되는 다양한 진동 요소들을 선형적으로 통합한 인덱스를 개발하는데 아래의 진동요소들을 사용하고자 한다.

① 피크 투 피크 (Peak-to-Peak, PTP)

진동 가속도 값의 최대치와 최소값의 차이로 진동의 특성을 표현한다. 진동 신호의 최대 진폭 크기 차이로 진동의 과도적 특성에 적용할 수 있다.

$$Peak - to - peak = a_{max} - a_{min} \quad (1)$$

② 실효값 (Root Mean Square, RMS)

인체가 느끼는 진동은 식 (2)과 같이 인체에 전달되는 가속도의 평균의 실효값 (rms)으로 나타낼 수 있다.

$$r.m.s = \left[\frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2)$$

$a_w(t)$: 주파수 가중화된 가속도 값
T: 측정 시간 (second)

③ 진동 피폭 값 (Vibration Dose Value, VDV)

진동 피폭 값은 가속도의 사승근 평균(RMQ)을 사용하는 방법으로, 사승근 평균에 측정 시간을 곱하여 구한다. 충격 진동이나 과격한 간헐적 진동과 같이 짧은 피폭 시간을 갖는 진동에 대해서는 기존의 실효값 평가 방법을 사용할 경우에는 최대 피크치 보다 상대적으로 낮은 실효값을 부여한다는 한계점을 지적하고 있다. 따라서 그러한 경우에는 실효값이 아닌 진동 피폭 값을 이용한 평가 방안을 제안하고 있다.

$$RMQ = \left[\frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} a_w^4(t) dt \right]^{1/4} \quad (3)$$

$$VDV = \left[\int_{t=0}^{t=T} a_w^4(t) dt \right]^{1/4} \quad (4)$$

$a_w(t)$: 주파수 가중화된 가속도 값
T: 측정 시간 (second)

④ 전력 밀도 함수 (Power spectrum density)

차량진동에 있어서 기본 오더(1c: 엔진 회전 주파수 성분), 주 오더(main order)진동이 중요하기 때문에 BS6841 진동요소에 추가하여 분석 하였다.

$$power\ spectrum\ density = \frac{1}{T} |A_w(f)|^2 \quad (6)$$

$A_w(f)$: 주파수 가중화된 가속도 값
T: 측정 시간 (second)

⑤ 요소 승차감 지수 (Component Ride Value, CRV)

각 접촉부별 측정축, 즉 12개의 측정 축에 대해서로 독립적으로 승차감에 기여하는 양을 정량화한 것을 요소 승차감 지수라 한다.

$$Component\ Ride\ Value = m_i \times \left[\int P_{ii}(f) \cdot W_i^2(f) df \right]^{1/2} \quad (5)$$

$P_{ii}(f)$: i 축의 전력밀도함수

$w_i(t)$: i 축의 주파수 가중함수

$m_i(t)$: i 축의 곱셈인자

3. 차량진동 측정 및 주관적 평가

3.1 차량진동 측정

자동차 진동에 대한 진동 안락감 인덱스를 제작하기 위해서는 우선 다양한 차종의 진동 측정이 필요하다. 본 연구에서는 총 9대의 차량을 이용하였으며 LMS사의 SCADAS Mobile SCM05와 Test_lab을 사용하여 아이들 상태의 진동을 측정하였다. 측정 시 주의할 점은 차량에서의 인체진동 측정은 인체와 진동 표면 사이의 주된 접촉면을 사용하는데 그것은 다음과 같다. 시트 표면에서의 측정은 좌골의 용기 부분 아래(즉 엉덩이 뼈 밑)에서 해야 하고 시트의 등 부위에서 진동 측정은 상체를 주로 지지하는 부분에서 이루어져야 한다. 또한 발에서의 측정은 발을 가장 많이 지지하는 표면에서 이루어져야 한다.

이때 주의 할 점은 다음과 같다. 직접 측정할 수 없는 곳의 진동은 회전중심 또는 무게중심에서 측정을 하되, 차량의 단단한 부분에서 측정해야 한다.

Table 3 General Information for specification of 9 test cars

Name	Engine type	T/M type
Car A	I3	Manual
Car B	I3	Auto
Car C	I3	Auto
Car D	I4	Auto
Car E	I4	Auto
Car F	I4	Auto
Car G	I6	Auto
Car H	I6	Auto
Car I	I6	Auto



Fig. 4 Photo illustration for the sensor location and driver position for the vibration measurement

또한 시트의 등 부위에서의 측정은 신체의 접촉되는 부분에서 하는 것이 더 좋지만 실제 측정 시 어려울 경우에는 등받이 뒷면의 시트 프레임에서 측정해야 한다. 이 위치에서 측정하였다면 의자 재료의 전달률을 보정해야 한다. 실제 차량의 진동을 재현하기 위하여 70kg의 사람이 운전석에 착석한 상태로 진동을 측정하였다. Fig. 4는 실제 시험 차량의 센서 위치를 사진으로 보여주며, ISO 2631-1에 의거하여 운전석의 시트, 등받이, 발판에서의 진동을 각각 3축 가속도 센서를 사용하여 “차량 기어 중립 및 에어컨 작동상태(N ON)”에서의 아이들상태 진동을 측정하였다. Table 3은 본 연구에서 사용한 차량의 정보를 나타낸다. 차량 A만이 수동 기어이고 그 외의 차량은 자동 변속 기어를 탑재하고 있다.

3.2 질의어

자동차 진동 인덱스를 제작하기 위해서는 각각의 차량 진동에 대한 평가를 할 수 있는 질의어가 필요하다. 본 실험의 목적은 차량 진동에 대한 객관적 평가와 주관적 평가의 상관성을 확인하는 것이기 때문에 질의어는 안락감 즉, “불편하다/안락하다”로 정하였고, Table 4와 같은 평가지를 이용하여 감성진동평가를 진행하였다.

3.3 주관적 감성진동 평가 방법

차량진동의 주관적인 평가를 위해서 일반적으로 자동차회사에 사용되는 질의어로 안락감을 선정하고, 레이팅 방법(Rating Method)을 사용하여 진동 측정된 9대의 차량에 대한 주관적 감성진동 평가를 수행하였다.⁽⁵⁾ 감성진동 평가에는 자동차 엔지

니어 11명, 일반인 19명으로 총 30명의 인원이 참석하였다. 이 중 남성은 26명, 여성은 4명이고 20~52세의 연령 분포를 가진다. Rating 방식은 1점에서 5점 방식을 사용하였다. 특히 일반인 평가자에게는 평가 기준을 설정하기 위해 차량 F의 진동을 3점으로 설정한 후 나머지 차량에 대하여 상대적으로 평가하도록 하였다. 실험을 종료한 후 개인의 평가 결과 값과 평가자 전원의 평균 값 사이의 상관계수를 구하여 특별히 낮은 값을 가지는 사람이 없는지를 확인 하였다. 그 후에 참가자의 주관적 평가 값을 사용하여 평균을 구한 후 이를 각 차량의 승차감 평가값으로 선정 하였다. Fig. 5는 주관적 평가의 평균치와 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 실선이 평균치를 의미하며, 점선은 95% 신뢰 구간을 의미한다. 3기통 차량의 진동이 일반적으로 승차감이 불리함을 나타내며 6기통 진동의 안락감이 우수하다. 4기통의 경우는 차량의 상태에 따라서 6기통과 유사한 안락감을 가진다.

Table 4 Questionnaire of the Subjective rating about which car is comfortable.

	Car A	Car B	...
Very uncomfortable	①	①	...
Somewhat uncomfortable	②	②	...
Neither	③	③	...
Somewhat comfortable	④	④	...
Very comfortable	⑤	⑤	...

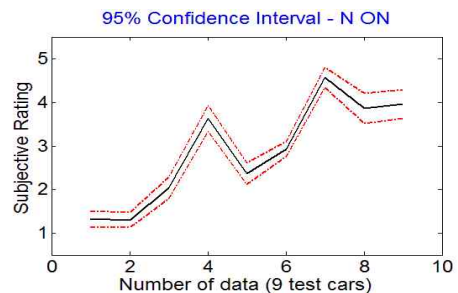


Fig. 5 Distribution of the subjective rating, mean value, and the confidence interval

Table 5 Mean and Variance value of the subjective rating about idle vibration of the test cars

No.	Name	Mean	Variance
1	Car A	1.333	0.222
2	Car B	1.300	0.207
3	Car C	2.033	0.429
4	Car D	3.633	0.663
5	Car E	2.367	0.448
6	Car F	2.933	0.177
7	Car G	4.567	0.399
8	Car H	3.867	0.882
9	Car I	3.967	0.786

4. 진동 요소와의 상관관계

4.1 실제 차량 진동에서의 상관도

본 절에서는 Fig.1 에서 보여주는 절차를 이용하여 진동 승차감 인덱스 제작에 필요한 진동 요소들을 선정하고자 한다. 운전자의 진동 승차감에 영향을 미치는 객관적인 진동요소는 2.2절에서 보여주는 바와 같이 매우 다양하다. 그래서 어떤 진동 측정점에서의 진동요소가 주관적인 진동 승차감에 가장 영향을 많이 주는가를 판단하여 선정하고자 한다. 이러한 진동 요소의 선정을 위해서 발바닥, 등받이, 시트 등에서 측정된 3축 방향의 진동요소들과 진동 승차감과의 상관도를 계산하였다. 두 연속형 변수 사이의 상관도를 다음과 같은 관계를 이용하여 구할 수 있다

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

r : 상관도

n : 연속 변수의 집합(X,Y)의 길이

X_i : 연속 변수 집합(X)의 i번째 변수

\bar{X} : 연속 변수 집합(X)의 평균

Y_i : 연속 변수 집합(Y)의 i번째 변수

\bar{Y} : 연속 변수 집합(Y)의 평균

상관도가 높은 진동요소는 진동 승차감 인덱스 제작에 필요한 입력 데이터로 사용된다.

Table 6 vibration metrics with high correlation

coefficient

vib_factor	vib_factor		
	seat_z	back_z	foot_z
Peak-to-Peak			foot_z
VDV			foot_z
1 C (1 st order)			foot_x

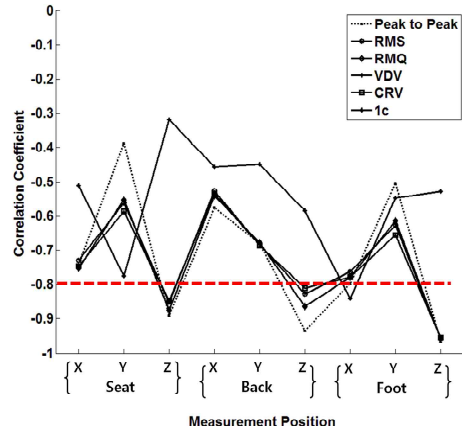


Fig. 6 Correlation between vibration metrics and subjective rating for vibration quality analysis

진동요소와 주관적 감성진동 평가치의 상관도를 Fig.6으로 나타내었다. 수직축은 상관도를 수평축은 진동 측정점과 방향을 나타낸다. 점선은 상관도가 80% 이상이 되는 진동 요소를 나타낸다. Fig. 6에서 상관도가 80% 이상인 측정점과 측정방향에 대해서 정리하면 Table 6과 같다. 이 결과에서 진동요소로서는 바닥 (foot) 과 등받이 (back), 시트(seat) 에서의 피크 값이 중요하며, 측정점에서는 바닥의 진동이 중요함을 나타낸다. 특히 대부분 z 방향의 값이 중요하며, 기본 오더 성분 (1c: 엔진 회전 주파수 성분)의 경우 바닥 x 방향의 진동이 상관도가 높음을 보였다. 시트 및 등받이 등에서 동일한 상관도가 갖는 경우 상관도가 가장 높은 진동 요소를 선택했다. 이것은 주요한 요소를 선택하여 분석하는 주성분해석(principle component analysis) 방식과 유사하다.

5. 감성진동 인덱스

감성진동 인덱스를 이용하면 추가적인 감성진동 평가 없이 특정 자동차 진동에 대한 사람의 주관적인 평가값을 예측할 수 있다. 이러한 진동인덱스 제작을 위한 기법으로 다중 선형 회귀 분석법 (Multiple Linear Regression) 을 이용하였다. 회

기 분석법에 사용되는 일반적인 관계식은 식 (8) 과 같다.

$$Y_i = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i \quad (8)$$

여기서

Y_i : i 번째 관측값에 대한 종속변수의 값

$\alpha, \beta_1, \dots, \beta_k$: 모집단 회귀 방정식의 회귀계수

x_{ki} : i 번째 관측값에 대한 k 번째 독립변수의 값

ε_i : i 번째 관측값에 대한 오차항을 나타내는 변수

이다.

회귀계수를 구하기 위해서 사용한 진동요소의 종류 및 방향은 Table 6 와 같은데 Peak to peak의 경우 Seat 의 Z방향의 상관도가 낮기 때문에 제외 하였다. 따라서 최종 4개의 진동 요소를 사용하여 최종인덱스 회귀계수를 구하였고, Table 7에 정리 하였다.

Fig. 10은 주관적인 감성진동 평가치와 감성진동 인덱스 출력과의 상관도를 나타낸다. 결정계수 (R^2)가 96 % 으로 매우 높은 상관도를 나타낸다. 따라서 감성 진동 인덱스는 감성진동 평가의 객관적인 지표로 사용할 수 있다.

이 인덱스의 검증을 위해서 인덱스 제작에 사용되지 아니한 새로운 차종을 추가하여 진동 실험을 실시했다.

Table 7 Index equation and each MR coefficient

$\hat{y}_i = a + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + b_3 x_{3i} + b_4 x_{4i}$				
a	b_1	b_2	b_3	b_4
6.157	-73.070	-14.842	-15.738	-84.176

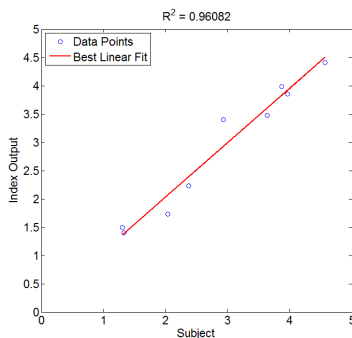


Fig. 10 Correlation between vibration index output and subjective rating for the production of vibration index

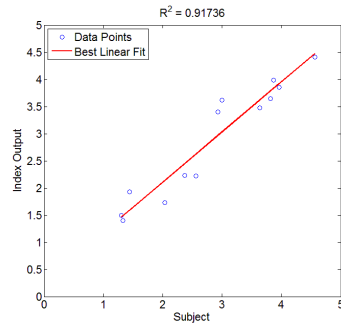


Fig. 11 Correlation between index output and subjective rating for the validation of vibration index

그 결과 Fig.11에서 결정계수가 91%의 높은 상관도를 나타내며 감성진동 인덱스의 유용성을 검증하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 오랫동안 사용되어온 실효치를 이용한 감성진동 평가지수 대신에 전신 진동요소를 이용한 새로운 감성진동 인덱스를 개발하였다. 사용된 진동 요소는 주관적 평가 결과와 진동 요소의 상관도를 계산하여 상관도가 80% 이상 되는 것을 적용하여 인덱스를 제작하였다. 그 결과 결정계수 (R^2)가 0.96임을 확인 하였다.

참고문헌

- (1) Wan-Sup Cheung, Young-Gun Cho, Se-Jin Park, 1997, "Investigation of Ride Value for Overseas and Domestic Passenger Cars", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp.342-329
- (2) Ajovalasit M, Giacomia J, 2003, "Analysis of variations in diesel engine idle vibration", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, Vol.217, No.D10, pp921-933
- (3) Shim.Y ., Kauh. S.K , Ha. K-P, "Evaluation of idle stability through in-situ torque measurement in automatic transmission vehicles", International Journal of Automotive Technology, Vol.12, pp 315-320
- (4) M. J. GRIFFIN, 1990, "Handbook of Human Vibration", Academic Press.
- (5) Norm Otto, Scott Amman, Chris Eaton, Scott Lake, "Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds", Journal of Sound and Vibration, Vol.35, pp.24-47, 2001.