

승용차 운전대 소음의 라우드니스와 불확도 평가

Evaluation of Loudness and Its Uncertainty for Steering Wheel Noise of a Car

최상민* · 이용봉** · 정성수†

Sang Min Choi*, Yong Bong Lee and Sung Soo Jung†

(Received June 16, 2022 ; Revised August 8, 2022 ; Accepted August 30, 2022)

Key Words : Steering Wheel Noise(운전대 소음), SPL(음압레벨), Sound Quality(음질), Loudness(라우드니스), Uncertainty(불확도)

ABSTRACT

Loudness is one of the most important parameters in sound quality. In this study, Zwicker’s loudness (standardized in ISO 532-1) for steering wheel noise of a car is evaluated. In addition, a measurement uncertainty model is proposed and the uncertainty is evaluated because it is recommended to evaluate the uncertainty in all measurements possible. The main components of the uncertainty are calibration values of the sound pressure measurement system and measurement repeatability. The results show that the uncertainty in the loudness is 2.3 %. This is a lower value than the ISO 532-1 recommended value of 5 %.

기 호 설 명

- N : 라우드니스 [sone]
- N_m : 라우드니스 반복측정
- δN_{cal} : 라우드니스 측정시스템 교정량 보정
- δN_{cod} : 라우드니스 프로그램 coding

1. 서 론

자동차는 생활에 있어 필수품이 되었으며 소음저감을 위한 많은 연구와 투자가 이루어졌다. 과거에 비해 정온한 것은 사실이지만 소음이라는 것이 주관적이기 때문에 가장 큰 소음원에 대한 감음을 한 경우라도 그 다음으로 큰 소음이 성가심을 주기 때문에 소음 저감을 위한 연구가 지속되고 있다. 소음은 실

제 귀의 청력손실, 난청 등 신체적인 영향뿐만 아니라 사람의 심리에도 영향을 미치기 때문에 음질 (sound quality) 평가는 거의 모든 분야에서 고려하는 평가량이라고 해도 과언이 아니다.

자동차의 종류는 다양하지만 가장 큰 비중은 아마도 승용차일 것이다. 차량의 주행소음⁽¹⁾, 실내소음⁽²⁾, 도어 소음⁽³⁾ 등을 비롯하여 이제는 각 부품에 대한 S&R(squeak and rattle) 소음에 대해서도 음질평가를 하고 있다. 음질평가에서 라우드니스는 가장 중요한 인자 중 하나로 소음신호 측정, 1/3 옥타브 밴드별 음압레벨, 라우드니스 등의 일반적인 과정을 통해 산출된다. 라우드니스 산출 방법은 Zwicker와 Moore-Glasberg 모델을 적용하는 것이 대표적이며 ISO532-1⁽⁴⁾과 ISO532-2⁽⁵⁾에 각각 규정되어 있다.

라우드니스는 대부분의 자동차 회사에서 필수적으

† Corresponding Author ; Member, Korea Research Institute of Standards and Science, Senior Researcher
E-mail : jss@krisss.re.kr

* Kongju National University, Senior Researcher
** Samwoo ANC, Researcher

‡ Recommended by Editor Cheol Ung Cheong
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

로 평가하고 있는데, GM사의 경우는 S&R 소음에 대해 자체 시험절차인 GMW14011⁽⁶⁾에 따라 평가하고, 차종에 따라 라우드니스에 대한 한도값을 설정한 후 실제 측정결과와 비교함으로써 합격 여부를 판정하고 있기 때문에 중요한 평가량이다. 한편, 교정 혹은 시험과 같은 모든 측정에 있어 불확도 평가를 하는 것이 국제적인 추세이기 때문에 ISO 표준도 불확도 모델 평가 가이드⁽⁷⁾에 기초하여 재개정 되고 있다.

이처럼 소음 평가에 있어 라우드니스가 중요함에도 불구하고 라우드니스 평가에 따른 불확도를 제시한 연구는 거의 없다. ISO 532-1의 라우드니스 평가에서도 1 kHz 주파수 대역에 대해서만 소음계를 사용할 경우 불확도를 약 5% 정도로 개념적으로 추정할 뿐 불확도 모델이 없기 때문에 연구자들이 1/3 옥타브 밴드 전체를 포함하는 불확도 값을 산출하기란 쉽지 않다. 이에 이 연구는 ISO 532-1에 따른 라우드니스 산출 시 수학적인 모델과 이의 불확도 모델을 제시함에 목적을 두었다. 운전대 소음을 대상으로 라우드니스를 산출하고 이에 따른 측정 불확도를 이 연구에서 제안하는 불확도 모델을 적용하여 산출하였다.

2. 시험방법 및 결과

2.1 운전대 소음 측정 방법

자동차의 S&R 소음은 대상체에 따라 다양하게 측정 위치가 결정되는데 이 연구에서는 GMW14011에 따라 승용차의 운전대에서 발생하는 소음을 대상으로 하였다. GMW14011에 따라 Fig. 1처럼 실차 조건과 동일하게 가진기 지그에 운전대를 차량 바퀴방향과 나란하게 설치하고 8 Hz ~ 100 Hz 주파수 범위의 PSD(power spectral density) 가진 프로파일을 이용하여 랜덤가진을 하였다. 소음은 1/2 인치 마이크로폰(MP)으로 운전대 중심부에서 15 cm 떨어진 곳에서 측정하였다. 마이크로폰, 마이크로폰 전치증폭기, 데이터 획득 보드(HEAD Artemis System) 그리고 PC 등으로 구성되는 소음 측정시스템은 1/3 옥타브 밴드별로 사전에 교정하였다. 전장부품전용 단축 무소음 가진 시스템(NFEC-2020-08-264234)으로 진동을 발생시키고 마이크로폰으로 소음신호를 모니터링 하면서 안정된 신호를 확인한 후 1회당 60초 시간으로 총 10회 반복 측정하였다. 일반적으로 1회 측정시간이 10초 이상이면 된다. 획득된 음압신호를 FFT 분석을 통해 1/3 옥타브 밴드별로 음압레벨을 구하고 ISO 352-1

에 따르는 Zwicker의 정상상태의 N10(신호의 90%) 라우드니스 값을 산출하였다.

2.2 소음 측정 결과

이 시험에 앞서 GMW14011에서 요구하는 시험 장비와 지그만을 설치하여 가진기 작동 시 배경소음을 측정하였다. Table 1에 배경소음에 대한 음압레벨(SPL, sound pressure level)을 정리하였으며 이에 대한 라우드니스는 1.16 sone으로 GMW14011에서 요구하는 기준값인 1.50 sone 이내로 시험조건을 만족하였다. 장비를 작동시키지 않을 경우 시험실 자체에 대한 배경소음은 0.88 sone으로 측정되었다.

다음은 운전대를 설치한 후 총 10회 측정된 음압신

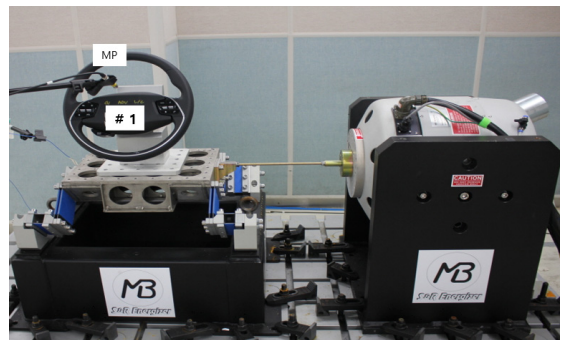


Fig. 1 Steering wheel noise measurement picture

Table 1 Measured background noise

Frequency (Hz)	SPL (dBA)	Frequency (Hz)	SPL (dBA)
25	-79.22	630	21.75
31.5	-71.67	800	23.27
40	-62.31	1000	21.85
50	-48.65	1250	20.45
63	-36.56	1600	19.84
80	-28.90	2000	18.34
100	-25.08	2500	17.55
125	-18.13	3150	19.35
160	-10.73	4000	18.28
200	0.60	5000	14.67
250	10.22	6300	10.49
315	16.10	8000	9.43
400	18.91	10 000	8.32
500	20.98	12 500	7.00

Table 2 Measured steering wheel noise

Frequency (Hz)	SPL (dBA)	Frequency (Hz)	SPL (dBA)
25	-69.62	630	28.29
31.5	-61.64	800	30.45
40	-43.82	1000	33.43
50	-31.89	1250	28.12
63	-26.15	1600	27.23
80	-15.07	2000	27.14
100	-9.60	2500	32.46
125	-13.14	3150	26.62
160	-6.01	4000	21.45
200	0.70	5000	19.25
250	10.35	6300	16.45
315	16.58	8000	18.45
400	19.44	10 000	14.76
500	22.75	12 500	9.08

Table 3 Calibration results of noise measurement system

Frequency (Hz)	Correction level (dBA)	Uncertainty (dB)	Frequency (Hz)	Correction level (dBA)	Uncertainty (dB)
25	-0.1	0.5	630	0.2	0.2
31.5	-0.1	0.5	800	0.2	0.2
40	-0.1	0.5	1000	0.0	0.2
50	0.1	0.5	1250	0.0	0.2
63	0.1	0.5	1600	0.0	0.2
80	0.1	0.5	2000	0.0	0.2
100	0.1	0.5	2500	0.0	0.2
125	0.1	0.3	3150	0.0	0.2
160	0.1	0.3	4000	-0.4	0.3
200	0.1	0.3	5000	-0.4	0.3
250	0.2	0.2	6300	-0.4	0.3
315	0.2	0.2	8000	-1.3	0.5
400	0.2	0.2	10 000	-1.3	0.5
500	0.2	0.2	12 500	-1.3	0.9

호에 대해 1/3 옥타브 밴드별로 평균한 음압레벨을 Table 2에 정리하였다. 한편, 소음(라우드니스) 측정 시스템에 대한 1/3 옥타브 밴드별 음압레벨 교정값과 불확도는 Table 3과 같다. Table 3에서 보정레벨은 기준 신호음에 대해 교정된 기준 마이크로폰으로 측정된 기준 음압레벨과 소음 측정시스템에서 지시하는 음압레벨의 차이이다. 즉, 이 소음 측정시스템으로 측정할 경우 각 주파수 대역마다 보정레벨 만큼 음압레벨

Table 4 Estimated loudness and its correction

Data set	N_m (sone)	$N_m + \delta N_{cal}$ (sone)	δN_{cal} (sone)
Lp1	2.449	2.432	-0.017
Lp2	2.574	2.559	-0.015
Lp3	2.484	2.469	-0.015
Lp4	2.561	2.544	-0.017
Lp5	2.517	2.499	-0.018
Lp6	2.505	2.491	-0.014
Lp7	2.569	2.556	-0.013
Lp8	2.514	2.501	-0.013
Lp9	2.485	2.468	-0.017
Lp10	2.534	2.516	-0.018
Average	2.519	2.503	-0.016

측정에 변동성을 내포하게 되는 것이다. 이들 보정레벨을 고려하여 10회 측정 시 각 회수마다 라우드니스와 라우드니스 보정값을 계산하면 Table 4와 같다. 여기서 N_m 은 라우드니스 반복측정 값이고 δN_{cal} 은 라우드니스 측정시스템 교정량 보정값이다.

3. 라우드니스 불확도 평가

3.1 라우드니스 수학적 모델

라우드니스 산출 모델은 식 (1)과 같다.

$$N = \delta N_{cal} + \delta N_{cod} + N_m \text{ [sone]} \tag{1}$$

식 (1)의 첫 번째 항인 δN_{cal} 은 측정시스템의 교정 결과로서 제시되는 보정 영향, δN_{cod} 은 ISO 532-1에서 규정한 Zwicker 라우드니스 모델의 프로그램 coding 항 그리고 N_m 는 반복 측정에 대한 항으로 여기서는 10회 측정값이 적용된다.

3.2 합성표준불확도 평가식

식 (1)로부터 라우드니스 산출 시 합성표준불확도의 평가식은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$u_c(N) = \sqrt{u^2(\delta N_{cal}) + u^2(\delta N_{cod}) + u^2(N_m)} \tag{2}$$

3.3 요인별 불확도 평가

불확도는 크게 N_m 의 A형 불확도와 δN_{cal} 와 δN_{cod} 의 B형 불확도로 구분할 수 있으며 각 항목별 모델과

결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 측정시스템 교정값에 대한 보정 (δN_{cal})

Table 3의 음압레벨 측정시스템의 교정에 따른 보정레벨이 라우드니스에 미치는 영향은 식 (3)과 같으며 ISO 532-1의 방법으로 계산하면 -0.016 sone을 얻게 된다(식 (4)).

① 라우드니스 보정에 따른 추정값, δN_{cal}

$$N_m(L_{p_{25}} + \delta L_{p_{25cal}}, \dots, L_{p_{16k}} + \delta L_{p_{16k cal}}) = N_m(L_{p_{25}}, \dots, L_{p_{16k}}) + \delta N_{cal} \quad (3)$$

$$\delta N_{cal} = N_m(L_{p_{25}} + \delta L_{p_{25cal}}, \dots, L_{p_{16k}} + \delta L_{p_{16k cal}}) - N_m(L_{p_{25}}, \dots, L_{p_{16k}}) = -0.016 \text{ [sone]} \quad (4)$$

여기서 $L_{p_{25}}$ 는 1/3 옥타브 밴드별 측정된 음압레벨, $\delta L_{p_{25}}$ 는 측정시스템의 교정에 따른 보정값 그리고 아래첨자는 25 Hz 등의 주파수 대역을 뜻한다.

② 라우드니스 보정 표준불확도, $u(\delta N_{cal})$

δN_{cal} 의 표준불확도는 식 (5)와 같이 표현할 수 있으며 ISO 532-1을 적용하면 0.026 sone으로 계산된다.

$$u(\delta N_{cal}) \approx \frac{N_m[L_{p_{25}} + u(\delta L_{p_{25cal}}), \dots, L_{p_{16k}} + u(\delta L_{p_{16kcal}})] - N_m[L_{p_{25}} - u(\delta L_{p_{25cal}}), \dots, L_{p_{16k}} - u(\delta L_{p_{16kcal}})]}{2} = 0.026 \text{ [sone]} \quad (5)$$

③ 확률분포

음압레벨 측정시스템 교정 성적서로부터 신뢰수준 (confidence level) 약 95 %에서 포함인자(coverage factor) k 가 2로 주어졌으므로 정규분포를 적용한다.

④ 감도계수, $c_{\delta N_{cal}}$
식 (1)의 수학적 모델로부터

$$c_{\delta N_{cal}} = \frac{\partial N}{\partial \delta N_{cal}} = 1 \quad (6)$$

⑤ 기여량, $u_{\delta N_{cal}}(N)$

$$u_{\delta N_{cal}}(N) = c_{\delta N_{cal}} \times u(\delta N_{cal}) = u(\delta N_{cal}) = 0.026 \text{ [sone]} \quad (7)$$

⑥ 자유도, $\nu_{\delta N_{cal}}$

음압레벨 측정시스템 교정성적서의 결과를 100 % 신뢰하고, 정규분포를 가지므로 자유도는 무한대(∞)를 적용한다.

(2) 프로그램 코딩에 의한 영향 δN_{cod}

δN_{cod} 은 ISO 532-1 부속서 E에서 제시하고 있는 것처럼 무시할 수 있기 때문에 0으로 하였다.

(3) 라우드니스 반복 측정 N_m [sone]

총 10회 반복 측정에 따른 불확도 평가량은 다음과 같다.

① 추정값(\bar{N}_m)

$$\bar{N}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{m_i} = 2.519 \text{ [sone]} \quad (8)$$

② 표준불확도, $u(N_m)$

- 표준편차(s)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{m_i} - \bar{N}_m)^2}{n-1}} = 0.039 \text{ [sone]} \quad (9)$$

- 표준불확도, $u(N_m)$

$$u(N_m) = \frac{s}{\sqrt{n}} = 0.012 \text{ [sone]} \quad (10)$$

③ 확률분포

10회 반복측정을 실시하므로 t-분포를 적용한다.

④ 감도계수, c_{N_m}

$$c_{N_m} = \frac{\partial N}{\partial N_m} = 1 \quad (11)$$

⑤ 기여량, $u_{N_m}(N)$

$$u_{N_m}(N) = c_{N_m} \times u(N_m) = u(N_m) \quad (12)$$

⑥ 자유도, ν_{N_m}

$$\nu_{N_m} = n - 1 = 10 - 1 = 9 \quad (13)$$

(4) Zwicker 라우드니스, N

최종적으로 라우드니스를 산출함에 있어 추정값과 불확도는 식 (14)로 정리할 수 있다.

① 추정값

식 (1)로부터 계산한다.

$$N = \delta N_{cal} + \delta N_{cod} + N_m \\ = -0.016 + 0 + 2.519 = 2.503 \text{ [sone]} \quad (14)$$

② 합성표준불확도, $u_c(N)$

식 (2)로부터 계산한다.

$$u_c(N) = \sqrt{u^2(\delta N_{cal}) + u^2(N_m)} \\ = 0.029 \text{ [sone]} \quad (15)$$

③ 유효자유도, ν_{eff}

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^A(N)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^A(N)}{\nu_i}} = 266 \quad (16)$$

④ 확률분포

유효자유도가 10 이상으로 크므로 정규분포를 적용한다.

⑤ 포함인자(k)

유효자유도가 10 이상으로 크므로 정규분포로 가정하여 포함인자 2를 적용한다.

⑥ 측정불확도

신뢰수준 약 95 %, $k=2$ 에서,

$$U = k \times u_c(N) \\ = 2 \times 0.029 = 0.058 \approx 0.06 \text{ [sone]} \quad (17)$$

상대측정불확도로 표현하면,

$$\frac{U}{N} \times 100 = \frac{0.06}{2.50} \times 100 = 2.3 \text{ [%]} \quad (18)$$

⑦ 결과 표현

Zwicker 라우드니스 결과는 식 (19) 또는 식 (20)으로 표현할 수 있다.

$$N = (2.50 \pm 0.06) \text{ [sone]} \\ (\text{Confidence level } 95 \%, k=2) \quad (19)$$

$$N = 2.50 \text{ [sone]} \pm 2.3 \% \\ (\text{Confidence level } 95 \%, k=2) \quad (20)$$

불확도에 대한 총괄표와 결과에 대한 표현은 Table 5와 같다.

Table 5 Uncertainty budget

Uncertainty component	Estimation value [sone]	Standard uncertainty [sone]	Probability distribution	Sensitivity coefficient	Contributed amount [sone]	Degree of freedom
δN_{cal}	-0.016	0.026	Normal	1	0.026	∞
δN_{cod}	0	0	Rectangular	1	0	∞
N_m	2.519	0.012	t	1	0.020	9
N	2.503				0.029	266
Confidence level	95 %	k		2	UN	0.058
Results expression	(2.50 ± 0.06) [sone] or 2.50 [sone] ± 2.3 %					

4. 결 론

이 연구에서는 승용차의 운전대를 대상으로 GM사 시험절차서인 GMW14011에 따라 소음을 측정하고 ISO 532-1를 적용하여 Zwicker 라우드니스와 불확도를 평가하였다. 자동차 부품의 소음에 대한 라우드니스는 실제 차량에 대한 합격 여부를 판별하는 양이기 때문에 이에 대한 불확도 역시 중요하다. 어떤 기준값에 대해 불확도를 고려한 측정값이 기준값 이내이면 합격이지만 불확도로 인해 기준값을 초과하는 경우에는 합격 여부에 신중해야만 한다. 측정에 있어 불확도를 제시하는 것이 국제적인 추세이기 때문에 특히 시험기관들은 불확도 평가가 필수적이다.

현재의 ISO 532-1에는 라우드니스 평가에 따른 불확도 모델이 제시되어 있지 않기 때문에 불확도를 산출하는 것은 쉽지 않다. 따라서 이 연구에서는 정확한 불확도 모델을 제시하고 이에 따른 1/3 옥타브 밴드별로 불확도를 산출하였다. 운전대 소음을 대상으로 라우드니스와 불확도 평가 결과, 반복측정에 따른 A형 불확도에 비해 소음 측정시스템에 의한 B형 불확도의 영향이 다소 크게 나왔다. 소음 측정시스템의 교정에 따른 보정값을 라우드니스 평가에 고려할 경우, 라우드니스 측정 불확도는 2.3%로 평가되었으며 이것은 532-1에서 추정하는 5%와 비교할 때 약 절반 수준으로 측정 결과의 신뢰성이 2배 정도 향상되었다고 평가할 수 있다. 모든 측정에 있어 불확도 평가는 필수적임을 고려할 때 이 연구의 불확도 모델의 제시와 평가 방법들은 현장에서 실질적으로 활용할 수 있고 측정에 대한 신뢰성 향상에 기여함은 물론 차기 ISO 532-1의 개정 시 불확도 모델에 대해 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2020년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(2020R1A6C101A187).

References

- (1) Lee, S. M. and Lee, S. W., 2013, Psychoacoustical Analysis and Application of Electroencephalography (EEG) to the Sound Quality Analysis for Acceleration Sound of a Passenger Car, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 258~266.
- (2) Lee, J. K., Chai, J. B. and Jang, H. K., 2005, Study on the Evaluation of Sound Quality of a Vehicle Interior Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 945~953.
- (3) Shin, S. H., Cheong C. U. and Jung, S. S., 2007, Experimental Evaluation of Buzz, Squeak and Rattle Noise of Vehicle Doors and Its Prevention, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 12, pp. 1217~1222.
- (4) ISO 532-1, 2017, Acoustics-methods for Calculating Loudness – Part 1: Zwicker Method.
- (5) ISO 532-2, 2017, Acoustics-methods for Calculating Loudness – Part 2: Moore-Glasberg Method.
- (6) GMW14011, 2019, Objective Subsystem / Component Squeak and Rattle Test.
- (7) ISO/IEC Guide 98-3, 2008, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995).



Sang Min Choi is senior engineer in Kongju National University Future Automotive Intelligent Electronics Core Technology Center. His research interest includes BSR & NVH research.



Sung Soo Jung received M.S. and Ph. D. degree in Physics at Hankyong University of Foreign Studies. He is currently working at Korea Research Institute of Standards and Science as a senior researcher. His research interest are in the area of vibration

metrology, low frequency noise, and wind turbine noise.