Transactions of the KSNVE, 24(2) : 108~116, 2014
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.24.2.108

한국소음진동공학회논문집 제24권 제2호, pp. 108~116, 2014
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

차량 윈도우 리프트 음질 고급감 향상을 위한 음질 지수 제작 및 개선에의 응용

The Development and Application of Sound Quality Index for the Improving Luxury Sound Quality of Road Vehicle Power Window System

김 성 현*·박 동 철†·조 현 호**·성 원 찬**·강 연 준***
Seonghyeon Kim, Dong Chul Park, Hyeonho Jo, Weonchan Sung and Yeon June Kang

(Received November 12, 2013 ; Revised February 6, 2014 ; Accepted February 6, 2014)

Key Words : Window Lift System(윈도우 리프트 시스템), Sound Quality Analysis(음질 분석), Subjective Evaluation(주관적 평가), Multiple Linear Regression Analysis(다중 선형 회귀 분석), Sound Quality Index(음질 지수)

ABSTRACT

With the increasing the importance of emotional quality of vehicle, the sound quality of systems with electric motor components has become increasingly important. Electric motors are used for windows, seats, sun roof, mirrors, steering columns, windshield wiper and climate control blowers, etc. In this paper, a study was conducted to identify sound quality factors that contribute to customer's satisfaction and preference of the window lift system. Jury test for subjective evaluation was carried out and sound quality index was developed. Averaged sound pressure level and sharpness were significant factors when glass moves down. Also, maximum loudness at stop section and averaged loudness were significant factor when glass moves up. Next, noise source identification was carried out using beam forming method during glass transferred section and impulsive noise at stop section. Several improvement methods were applied using the source identification result. And finally, the degree of sound quality improvement was judged using sound quality index.

1. 서 론

차량 개발 기술의 발전에 따라 차량 NVH(noise, vibration and harshness) 기술 또한 설계, 해석, 제어 그리고 시험 평가 등 전 영역에서 고도화를 이루고 있다. 이에 따라 차량의 진동, 소음 품질은 과거 대비 비약적인 향상을 거두고 있고 진동, 소음 레벨 저감의 목표를 넘어 소비자의 감성 만족도를 향상시키는 음질(sound quality) 관점으로 연구 개발 방향의 비중이 높아지고 있다.

차량 음질 연구는 엔진과 변속기를 명칭하는 파워트레인(powetrain)을 대상으로 많은 연구들이 진행되었고, 이에 따라 엔진음의 객관적, 주관적 분석 기법

† Corresponding Author ; Member, Hyundai Motor Company
E-mail : dc.park@hyundai.com
Tel : +82-31-368-0877, Fax : +82-31-368-1381
* Member, Hyundai Motor Company
** Member, Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Seoul National University
*** Member, School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2013 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

그리고 주관적 선호도를 표현하는 음질 지수(sound quality index) 구축에 대한 많은 연구 결과들이 국내외에서 도출되었다[1,2]. 이와 아울러 노면 소음(road noise) 및 공력 소음(wind noise)등에 대한 연구도 활발히 진행되어 주행음(driving sound)에 대하여는 음질 관점 연구가 성숙되고 있다고 할 수 있다. 주행음에 대한 음질 수준이 높아지고 차량의 전체적인 품질이 향상됨에 따라 차체, 의장 그리고 전장품들에 대한 음질 중요성이 증대되고 있는데, 이는 차량 전체적인 감성 품질 완성도 향상을 위해서라 할 수 있다. 차체, 의장 부품들은 주로 모터에 의해 구동되며 윈도우 리프트(window lift), 센트럴 도어 락(central door lock), 선 루프(sun roof), 윈드 실드 와이퍼(windshield wiper), 전동 시트(power seat), 아웃 사이드 미러(outside mirror) 등의 부품 류가 이에 속한다. 이 연구에서는 모터에 의해 구동하는 윈도우 리프트 시스템을 대상으로 연구를 진행하였다.

윈도우 리프트 시스템은 글라스(glass) 승하강 메커니즘 및 최적 설계 그리고 고장 모드 등을 주제로 많은 연구가 진행되었다[3~7]. 통상 새로운 설계안 또는 메커니즘의 검증 시 소음 수준을 검토하는 정도의 연구들이 대부분이라 할 수 있다. 윈도우 리프트 작동음의 음질 관련 연구로 Penfold[8]는 12개의 샘플을 대상으로 소리의 변동감(fluctuation feeling)과 와인(whine) 소음 등에 대하여 청음 평가를 수행하였다. 그 결과로 모터 토널 성분의 변동 특성과 300 Hz~2500 Hz 대역 라우드니스(band passed loudness)를 인자로 하여 선형 회귀 모델(linear regression model)을 구성하였다. 또한 Zhang[9]은 의미분별법(semantic differential method)을 사용한 청음 평가를 수행하고 평가 어휘들에 대한 주성분 분석(principle component analysis)을 수행하였다. 분석 결과 주성분은 점잖은(gentle), 조용한(quite) 등과 같은 음의 강도(intensity)로 표현할 수 있는 제 1성분, 일정한(steady)과 같은 모터 톤(motor tone)의 피치 변화(pitch variation)에 관한 제 2성분 그리고 날카로운(sharp)과 같은 샤프니스(sharpness)의 제 3성분이 도출되었다. 또한 편안함(pleasantness)에 대하여 쥬비커 파라미터(Zwicker's parameter)를 이용하여 다중 회귀 모델을 구성하였고 라우드니스와 러프니스(roughness)가 주요하다는 결론을 도출하였다. 앞의 연구들은 청음 평가를 통한 음질 지수를 도출하여 주관적인 선호 음질 특성을 이해하는데 많은 도움이 되었지만, 이를 실제 구현하기 위한 후속 연구 등은 다뤄지지 않고 있어 음질 지수의 실제 적용 시 다소 미흡한 점이 있다.

이에 이 연구에서는 음질 지수 개발 및 이를 활용한 소음 특성 분석 및 개선 연구를 실시하여 음질 향상을 실제적으로 구현하였다. 먼저 윈도우 리프트 작동 시 발생되는 소음에 대하여 주관적(subjective), 객관적(objective) 음질 평가를 통해 음질 특성을 분석하고 이를 토대로 음질 개선 방향 도출 및 음질 지수를 제작하였다. 다음으로 빔 포밍 법(beam forming method)을 이용한 음장 가시화(sound field visualization) 기법을 통해 음질 요소에 주요한 부품을 도출하였다. 이는 개선 대상을 찾는데 주요하게 작용하였고 이를 바탕으로 해당 부품에 대한 개선을 실시하였다. 마지막으로 앞서 도출된 음질 지수를 개선안에 적용하여 개선 정도를 음질 관점에서 정량적으로 평가하였다.

2. 윈도우 리프트 구조 및 메커니즘

윈도우 리프트의 일반적인 구조는 Fig. 1과 같다[10]. 윈도우 리프트는 도어 트림과 외부 패널 사이의 Fig. 2와 같이 도어 모듈에 부착되어 있다. 글라스는 모듈 내 장착된 레일에 따라 와이어에 의해 상하로 이동하게 되며 와이어는 풀리(pulley)와 와이어를 감고 푸는 드럼(drum)과 연결되어 있다. 레일의 형상에 따라 글라스 승하강 궤적이 결정되며 모터 단품 성능 및 와이어의 구조에 따른 글라스 승하강 성능이 주요하게 결정된다. 또한 글라스는 도어 프레임에 부착된 가느다란 막대 모양의 글라스 런(glass run)과 접촉하고 있다. 글라스 런은 글라스와 프레임 사이의 기밀과 수밀을 유지하고 주행 중 또는 도어를 닫을 시 글라스의 진동을 흡수하는 역할을 한다. 승하강 시 소음 관점에서 살펴보면 모터 단품 성능 및 고정부의 마운팅(mounting) 특성 그리고 이를 지지하는 패널 동특성에 따라 모터 음색이 주요하게 작용한다. 그리고 레일의 구배(gradient) 및 글라스 런의 접촉 형상과 동특성 등에 따라 글라스 마찰음의 음색이 주요하게 결정된다.

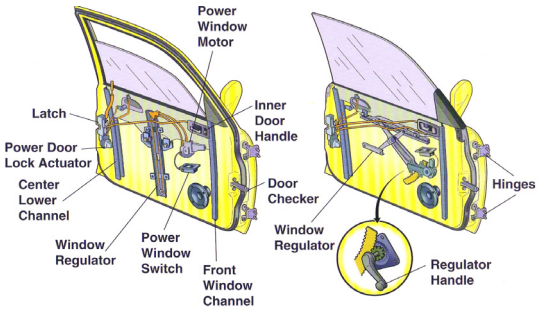


Fig. 1 The schematic of window lift system in door module(electric power and manual window type)

(a) Door module

(b) Window regulator

Fig. 2 Module panel and window regulator of typical door module structure

3. 윈도우 리프트 소음 특성

글라스 승하강 소음은 동작 시작 및 끝단에서의 충격음과 글라스 이송 구간의 이송음으로 구성되어 있다. 충격음은 글라스가 런에서 이탈 및 구속 시 발생하는 전 주파수 대역의 특성으로 나타나고 이송음은 글라스 이동에 따라 모터 토널음(tonal noise) 및 글라스와 런 사이의 마찰음의 특성으로 나타난다. Fig. 3은 글라스 승하강 시 소음 레벨 특성을 나

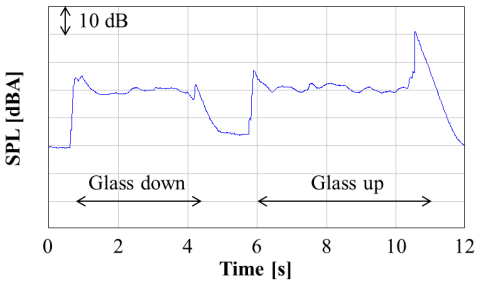


Fig. 3 Overall sound pressure level profile

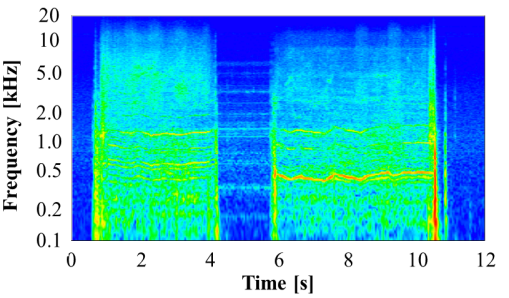


Fig. 4 Time vs. Frequency characteristics

타내고 Fig. 4는 주파수 특성을 나타낸다. 글라스 승강과 하강의 전체적인 소음 특성은 유사하다. 하지만 수직 방향 글라스 이동에 따른 모터의 부하 차이 그리고 레일 구배 형상과 도어 패널의 구속 등에 따라 모터 토널 성분 및 시작 및 끝단의 충격음 등의 특성 변화가 발생하고 이로 인해 열림/닫힘 시 음색의 차이가 발생한다.

4. 음원 녹음 및 주관적 음질 평가

4.1 차량 실내 음원 녹음

청음 평가를 위한 음원은 소형차부터 대형차에 걸쳐 11차종에 대하여 실내 운전석 위치에서 측정하였다. 청음 시 양이 효과(binaural effect)를 고려하기 위해 HEAD acoustics사의 SQuadriga를 사용하여 바이노럴(binaural) 형태로 녹음하였다[11]. 타 소음에 대한 유입을 방지하고 순수한 윈도우 리프트만의 소리를 측정하기 위해 녹음은 반무향실에서 엔진이 정지된 상태에서 진행하였다. 녹음된 음원은 HEAD acoustics사의 ArtemiS S/W를 이용하여 분석되었다.

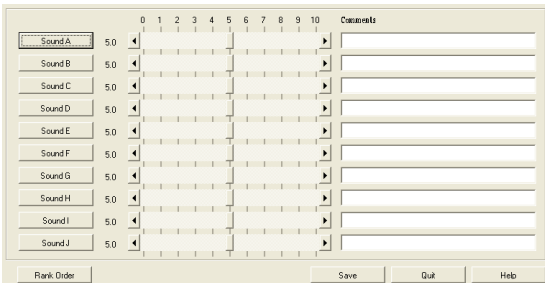
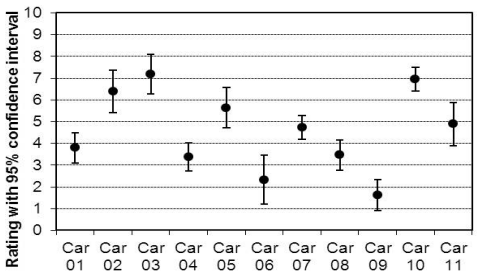
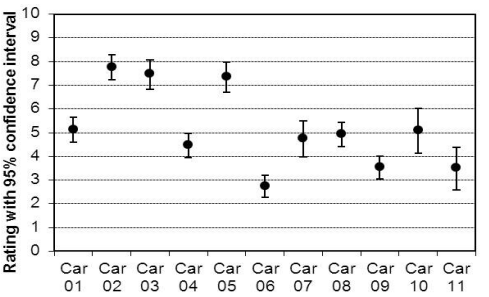


Fig. 5 Test program using the rating method



(a) Window open



(b) Window close

Fig. 6 Result of subjective test on open and close condition

4.2 주관적 음질 평가

주관적 평가는 청력에 이상이 없는 20~30대 성인 남녀 약 20명을 대상으로 HEAD acoustics사의 PEQ V와 고성능 헤드폰을 사용한 재생 시스템(playback system)을 이용하여 실시하였다. 청음 평가는 승강과 하강에 대해 각각 실시하였다.

평가는 Ricardo사의 RISA S/W를 이용하여 하나의 어휘에 점수를 부여하는 레이팅 법(rating method)을 사용하였고 “고급스러움”에 대하여 10점 척도를 적용하였다. Fig. 5는 청음 평가를 수행한 프로그램을 나타낸다. 청음 평가 시 일반적으로 발생할 수 있는 현상 및 판단 오류들은 다음과 같다[12].

(1) Primary Effect: 사전의 자극과 정보가 이후의 자극에 대한 인지와 판단에 영향을 미침

(2) Recency Effect: 최근의 직접적인 자극이 이후의 판단에 영향을 미침

(3) Central Judgment Effect: 평가 결과에 대해 확신이 없는 평가자가 본인의 책임을 회피하기 위해 평균적인 중간 값을 선택

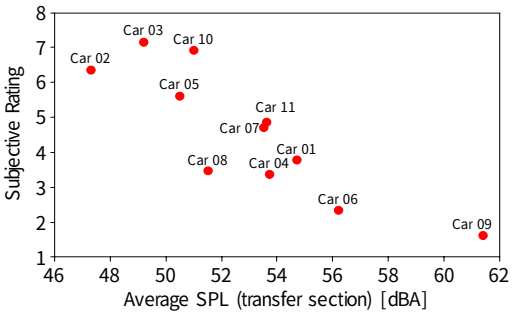
(4) Ceiling Effect: 평가 시 상대적으로 점수 척도의 최상/최하 범위에 선택

위와 같은 현상에 의해 발생하는 오류를 최소화하기 위해 평가자에게 사전 교육을 실시하였다. 또한 음원의 순서를 랜덤으로 배치하고 평가한 음에 대해 점수 순서대로 음을 재정렬하고 반복 청음 및 재평가를 실시하게 하여 첫 음 또는 선행 음원을 기준으로 판단하는 오류를 최소화 하였다[12]. 청음 평가 결과는 평가 결과의 분산을 박스 플롯(box-plot) 등으로 검토하여 이상점(outlier)을 검토하였다. 소수의 이상점으로 나타나는 평가 결과는 평가에 대한 진지성이 떨어지거나 선호 취향이 일반적이지 않다고 판단하여 제거하였다. 평가 점수의 평균과 평가자들의 상관 계수의 평균을 검토한 결과 열림, 닫힘 조건 모두 약 80 % 정도로 평가 결과는 신뢰할 수 있다고 할 수 있다. Fig. 6은 평가 결과의 산술 평균(●) 및 95 % 신뢰 구간(bar)을 나타내고 있다.

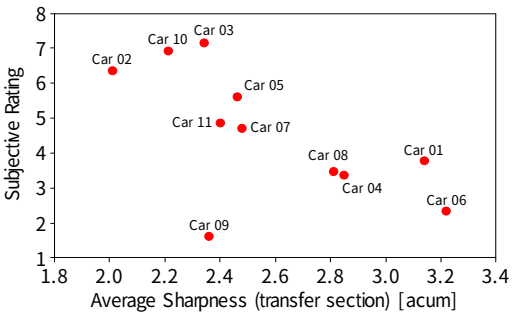
5. 음질 인덱스 개발

5.1 음질 요소 분석

평가에 사용한 음원에 대해 HEAD Acoustics사의 ArtemiS 12 S/W를 이용하여 각각의 음질 요소(sound quality metric)를 계산하여 주관적 평가 결과와의 상관도(correlation)를 검토하였다. 쥬비커 파라미터와 충격 특성을 나타내는 큐토시스(Kutosis), 크레스트 팩터(crest factor), 청음 모델 임펄시브니스(hearing model impulsiveness) 등을 계산하였다. 이 중 라우드니스는 신호의 시변(time-varient) 특성을 고려하기 위해 DIN 45631/A1 방법을 이용하여 계산하였다. 또한 음의 특성 상 동작 시간의 영향을 확인하기 위해 동작 시간도 함께 계산하였다. 상관분석 결과 승하강 시 모두 음의 크기와 관련된 인자와 샤프니스 관련 인자의 상관도가 높은 것으로 나

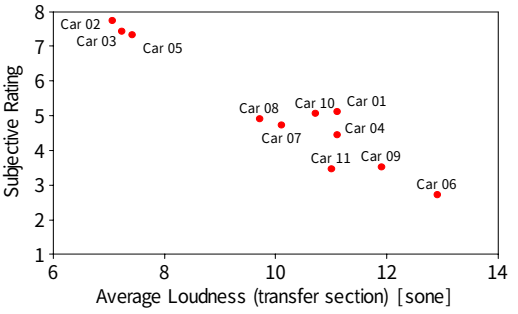


(a) Subjective rating vs. averaged SPL

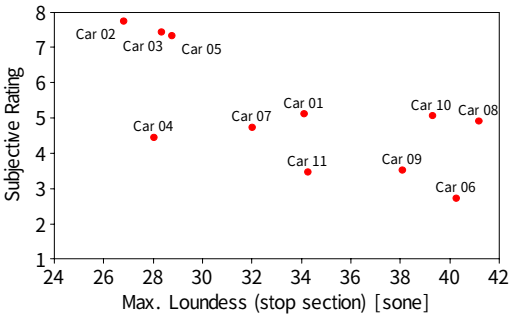


(b) Subjective rating vs. averaged sharpness

Fig. 7 Scattering plot of averaged SPL and sharpness at transfer section – open condition



(a) Subjective rating vs. averaged loudness



(b) Subjective rating vs. max. loudness

Fig. 8 Scattering plot of averaged loudness at transfer section and max. loudness at stop section – close condition

타났다. Figs. 7~8은 높은 상관성을 갖는 음질 요소를 보여주고 있다. Average라고 표기된 계산값은 이송 구간의 평균값을 나타낸다.

5.2 음질 인덱스 제작

음질 메트릭 분석 결과와 주관적 평가 결과와의 관계를 규명하기 위해 다중 선형 회귀 분석을 이용하여 음질 인덱스를 제작하였다. 다중 선형 회귀식의 기본 형태는 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_1 x_2 + \ldots, R^2 \quad (1)$$

여기서 y값은 "고급스러움"에 대한 주관적 평가 결과 값이고, x_1, x_2 등은 각 인자에 해당하는 음질 메트릭을 나타낸다. β_0값은 선형 모델의 y절편을 나타나고 β_1, β_2 등은 각 인자의 계수를 나타낸다. 그리고 R^2는 도출된 회귀식의 적합성(goodness of fit)을 나타내는 결정 계수로 0부터 1까지의 범위를 가지며 1에 가까울수록 높은 설명력을 나타낸다[13].

회귀 분석은 범용 통계 프로그램인 Minitab ver. 16을 이용하여 단계적 회귀 분석(stepwise regression analysis)을 통해 이루어졌다. 분석 결과 열림/닫힘 조건에 대해 2개의 인자가 변수로 구성되고 구성된 회귀식의 결정 계수 R^2는 열림 조건에서 80 %, 닫힘 조건에서 93 %로 높은 설명력을 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 회귀 모델의 통계적 유의성을 검증하기 위해 분산 분석(ANOVA)을 실시하였다. 회귀 모델의 p-value는 열림 조건 0.001, 닫힘 조건 0.000으로 유의 확률 95 %하에 회귀 모델이 통계적으로 유의함을 확인하였다. Tables 1, 2는 회귀 모델의 계수를 나타낸다.

Table 1 Coefficients of the regression model – open condition

Model	Coefficient	
	Unstandardized	Standardized
Constant	27.16	3.75
Avg. SPL	-0.35	0.08
Avg. sharpness	-1.66	0.77

Table 2 Coefficients of the regression model – close condition

Model	Coefficient	
	Unstandardized	Standardized
Constant	14.24	0.88
Max. Loudness	-0.03	0.02
Avg. Loudness	-0.84	0.07

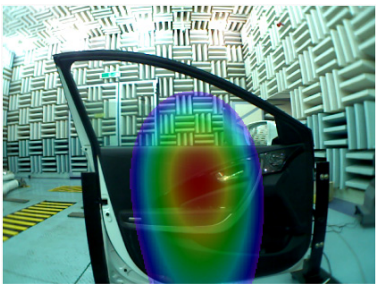
열림 조건의 경우 이송구간 평균 음압 레벨과 샤프니스가 인자로 도출되었다. 표준화 계수의 크기를 비교해보면 음압 레벨에 비해 샤프니스에 대한 기여가 큰 것으로 나타났다. 닫힘 조건의 경우 끝단 충격음 즉, 글라스 상승 말기 충격음의 라우드니스와 이송 구간 평균 라우드니스가 인자로 도출되었으며 이송 구간의 라우드니스의 기여가 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 음질적으로 영향을 주는 가장 주요한 요소는 글라스 이송 구간의 음의 높이와 크기 그리고 상승 말단 충격음의 크기인 것을 알 수 있었고, 음질 개선을 위해서는 이를 주요하게 개선하여야 하는 것을 확인하였다.

6. 개선안 도출 및 검증

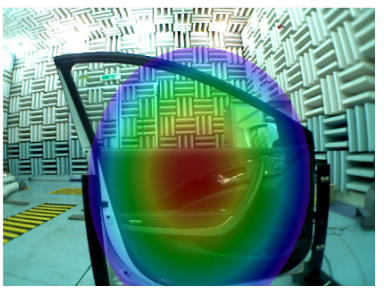
6.1 음장 가시화

음질 평가와 음질 인덱스 도출을 통해 주관적 선호도를 개선시키기 위한 방향을 설정하였다. 이의 효용성을 증대 시키기 위하여 개선안을 도출하고 검증하였다. 개선안 도출을 위해 먼저 빔 형성법을 이용하여 관심 주파수 대역에서 소음의 발생 위치를 확인하였다. 음장 가시화는 0.5 kHz~4 kHz의 측정 범위를 갖는 SM Instrument사의 30채널 나선형 어레이 타입의 음향 카메라를 사용하여 측정하였다.

글라스 이송 구간의 소음은 약 1.5 kHz 이하 대역의 부밍성 음색과 2.0 kHz 이상의 마찰음으로 구분할 수 있다. 이에 따라 빔 형성 측정 결과의 주파수 범위를 2.0 kHz 전후로 구분하여 분석하였다. 측정 결과 부밍성 음색은 Fig. 9와 같이 패널에 장착된 모터의 방사음 또는 가진에 기인한 패널의 구조소음이 주요하다는 것을 알 수 있었고, 고주파 대역의 마찰음은 Fig. 10(a)와 같이 글라스와 런 사이에서 주요하게 발생함을 확인하였다. 또한 글라스 상승

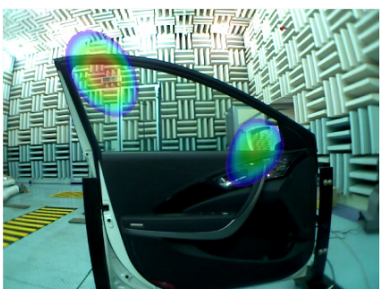


(a) Glass open

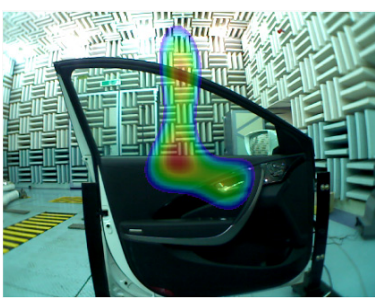


(b) Glass close

Fig. 9 Sound visualization for motor booming noise



(a) Glass open/close

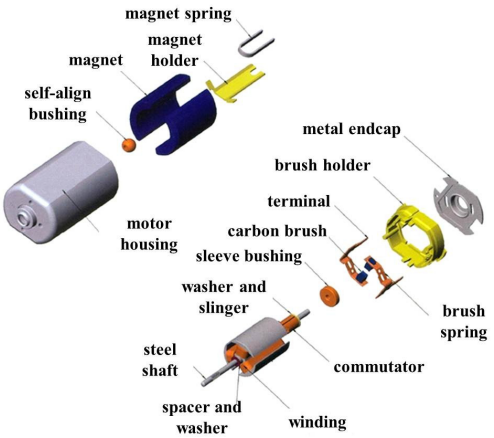


(b) Glass stop at end position

Fig. 10 Sound visualization for friction noise (a) and impulse noise at end position (b)

말단 충격음의 경우 패널 상하단의 위치에서 주요하게 발생하는 것을 알 수 있었다.

(a) Appearance of window motor



(b) Configuration of DC brushed motor[14]

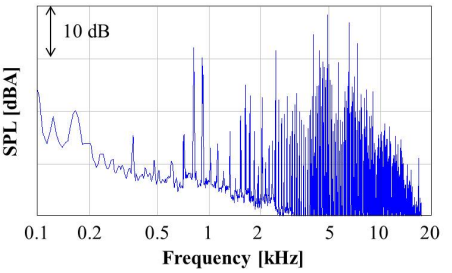
Fig. 11 DC Motor for power window

6.2 개선안 적용 및 검증

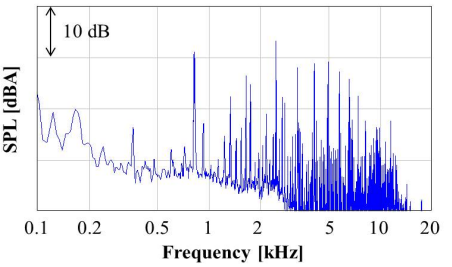
음질 지수 도출 결과와 음장 가시화 결과를 통해 열림 조건에서는 이송 구간의 음량(SPL)과 샤프니스의 개선이 필요하며 이를 위해서는 모터 방사음(음량 개선) 및 브러시 마찰음, 글라스 마찰음(샤프니스)의 개선이 필요함을 확인하였다. 또한 닫힘 조건에서는 이송 구간의 음량과 글라스 상승 말단 충격음이 주요하므로 패널 상하단의 글라스 충격 개선이 필요한 것을 알 수 있었다. 이에 따라 모터 소음 개선, 흡음 성능 개선, 상·하단 패널 충격 저감을 위한 개선안을 적용하여 결과를 검토 하였다.

(1) 모터 방사음 개선

DC 모터에서 발생하는 대표적인 진동, 소음 특성은 브러시(brush)와 정류자(commutator)사이의 동적 상호 작용에 의한 코깅 토크(cogging torque) 및 마찰음, 구동 시 회전자(amature)에서 발생하는 공력 소음, 전자기적 가진에 의한 프레임의 방사 소음 그리고 축과 베어링계의 소음 등을 들 수 있다. 브러시 소음의 경우 브러시의 재질 및 정류자의 편심량 및 표면 조도, 원주 속도 등에 기인하며 모터 소음에 가장 주요한 특성으로 나타난다. 이에 따라 본 연구에서는 브러시 접촉부 특성을 변경한 개선품을 제작하고 평가하였다. Fig. 11은 윈도우 모터 외관과 주요 구조 및 구성을 나타낸다. 개선품에 대한 소음 평가 결과 Fig. 12와 같이 고주파 대역의 마찰음 특성과 함께 약 800 Hz 대역의 토널 특성을 개선시킴을 확인할 수 있었다.



(a) Original

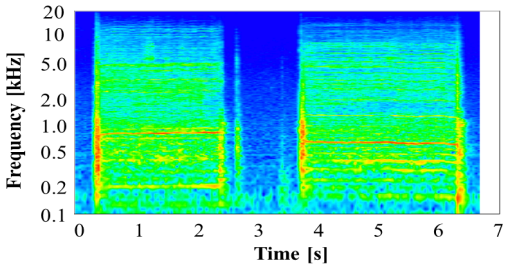


(b) After improvement

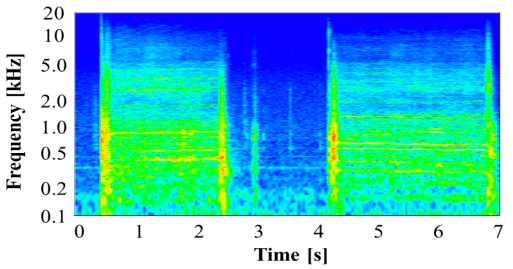
Fig. 12 Improvement result of motor noise

(2) 고주파 대역 및 상승 말단 충격음 개선

글라스 승하강 시 고주파 대역의 음색은 모터 소음 및 글라스와 런 사이의 마찰음에 기인하다. 이에 따라 도어 트림 내 흡음 패드의 면밀도와 두께를 증대하여 흡음 성능을 향상시켰다. 또한 글라스 런의 마찰 특성을 줄이기 위해 리브(rib) 각도를 감소시킨 개선 샘플을 제작하여 평가하였다. 이와 아울러 글라스 상승 말단 시 발생하는 충격음을 개선하기 위해 글라스 런 상단부에 폼(foam)을 추가하여 충격 완충 시키는 구조를 적용하였다. Fig. 13은 개선품에 대한 평가 결과를 나타낸 것으로 0 s~3 s 구간은 글라스 열림 조건, 4 s~7 s 구간은 글라스 닫힘 조건을



(a) Original



(b) After improvement

Fig. 13 Improvement result for friction noise of high frequency region, motor tonal and impact noise

Table 3 Sound quality index after applied modification

Factor	Differential value
Avg. SPL	- 3.7 dB
Avg. sharpness	- 0.3 acum
Index value	+ 1.8 score

나타낸다. 2 kHz 이상 고주파 대역의 소음과 약 7 s 구간에서 발생하는 글라스 상승 말단 충격음이 개선됨을 확인할 수 있었다.

최종적인 개선 결과는 Table 3과 같으며 음질 지수 또한 1.8점이 향상됨을 확인할 수 있었다.

7. 결 론

이 연구에서는 윈도우 리프트 시스템에 대하여 음질 지수를 제작하고 주요 소음원 규명 및 개선안을 발굴하여 최종적으로 음질 향상을 도모하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 음질 지수 개발 결과, 열림 구간에서는 이송 구간의 음압 레벨과 샤프니스가 주요하고, 닫힘 구간에서는 이송 구간 라우드니스와 글라스 상승 말단 충격음의 라우드니스가 주요하다.

(2) 윈도우 리프트 소음의 경우 1.5 kHz이하 부밍성 음색은 모터 방사음 및 패널 가진에 의한 영향이 주요하며 2.0 kHz이상 고주파 대역은 글라스와 런 사이의 마찰음이 주요하게 작용한다.

(3) 모터 브러시 소음 개선, 도어 트림 내 흡음 성능 개선 및 글라스 상승 말단 충격음 개선 등을 통해 효과적으로 음질 지수를 향상 시킬 수 있었다.

이 연구의 결과는 윈도우 리프트와 유사한 소음 특성을 갖는 선루프, 전동 시트 등과 같은 모터 부품류의 음질 향상 연구를 위해 활용될 예정이다.

References

(1) Lee, J. K., Cho, T. H., Seo, D. W., Lim, Y. S. and Won, K. M., 2012, A Development of Sound Quality Index of an Intake and Exhaust System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 234~243.

(2) Kwon, J. S., Kim, C. M., Kim, K. C. and Kim, J. T., 2011, Study on the Sound Quality Evaluation Method for the Vehicle Diesel Engine Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 10, pp. 883~889.

(3) Friedman, J. and Ghidella, J., 2006, Using Model-based Design for Automotive Systems Engineering - Requirements Analysis of the Power Window Example, SAE Technical Paper 2006-01-1217.

(4) Filley, M., 2006, Benefits of a New Concept Window Lift System in a Typically Constrained Door Environment, SAE Technical Paper 2006-01-1481.

(5) Choby, D., Jager, G., Johnstone, J. and Fenelon, P., 2004, An Efficient Light Weight all Plastic Dual Rack and Pinion Window Lift Mechanism for Automotive Vehicles, SAE Technical Paper 2004-01-0007.

(6) Kliffken, M., Becker, H., Lamm, H., Prüssel, H. et al., 2001, Obstacle Detection for Power Operated Window-Lift and Sunroof Actuation Systems, SAE Technical Paper 2001-01-0466.

(7) Singh, K., 1999, Experimental Assessment of

Door Window Glass Smooth Operation And Tracking, SAE Technical Paper 1999-01-3161.

(8) Penfold, J., 1997, Power Window Sound Quality - A Case Study, SAE Technical Paper 972017.

(9) Zhang, L. and Vértiz, A., 1997, What Really Affect Customer Perception? - A Window Regulator Sound Quality Example, SAE Technical Paper 971909

(10) http://hdabob.com/Windows.htm.

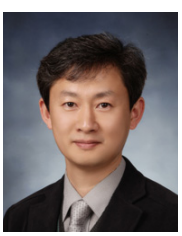
(11) HEAD Acoustics Application Note, Binaural Measurement, Analysis and Playback, HEAD acoustics, http://www.head-acoustics.de/.

(12) Klaus, G., 2010, Sound-Engineering im Automobilbereich, Chap. 4.

(13) Kim, S. H. and Park, D. C., 2013, The Preference Study of Vehicle Warning Sound Considering the Sale Region and Personal Preference based on Psychoacoustics, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 122~129.

(14) http://www.johnsonelectric.com/

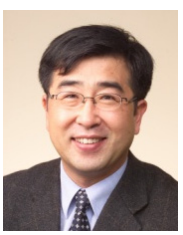
Seonghyeon Kim received the B.S. and M.S. degrees in Mechanical Engineering from Hanyang University, Korea in 2004 and 2006, respectively. Currently, He is a senior research engineer at Hyundai Motor Company. His research focuses on vehicle sound quality and sound designing.



Dong Chul Park received the B.S., M.S., Ph.D. degrees in Mechanical Design Engineering from Seoul National University, Korea in 1990, 1994, 1996, respectively. Currently, he is a research fellow at Hyundai Motor Company. His research focuses on vehicle sound quality and sound designing.

Hyeonho Jo is an Ph.D. candidate at department of Mechanical and Aerospace Engineering in Seoul National University. He received his B.S. degree and Masters in Biosystems Engineering from Seoul National University in 2008 and 2010, respectively. His research areas are sound quality of industrial products and human aural perception.

Weonchan Sung received B.S. degree in department of Mechanical Engineering in Hanyang University, Korea. He is now master course in department of Mechanical and Aerospace Engineering in Seoul National University, Korea. His research areas are Sound Quality of industrial products.



Yeon June Kang is a professor at department of Mechanical and Aerospace Engineering in Seoul National University. He received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering, Purdue University in 1994. His research areas are acoustical materials, automotive NVH and Sound Quality.