

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

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

김성현* · 박동철† · 조현호** · 성원찬** · 강연준**

Seong-Hyeon Kim, Dong-Chul Park, Hyeon-Ho Jo, Won-Chan Seong
and Yeon-June Kang

Key Words : Window Lift (윈도우 리프트), 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, 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. Noise source identification was carried out for the reduced the loudness and sharpness during glass transferred section and impulsive noise at stop section, Using the source identification result, several improvement points were applied. And finally, the degree of sound quality improvement was judged using sound quality index.

1. 서 론

차량 개발 기술의 발전에 따라 NVH (Noise, Vibration and Harshness) 기술 또한 설계, 해석 제어 그리고 시험 평가 등 전 영역에서 고도화를 이루고 있다. 이에 따라 차량의 진동, 소음 수준은 과거 대비 비약적인 발전을 거두고 있고 진동, 소음 레벨 저감의 목표를 넘어 소비자의 감성 만족도를 향상시키는 음질 (Sound Quality) 관점으로 연구 개발 방향이 전향되고 있다. 차량 음질 연구는 엔진과 변속

기를 명칭 하는 파워트레인 (Power train)을 대상으로 많은 연구들이 진행되었고, 이에 따라 엔진음의 객관적, 주관적 분석 기법 그리고 주관적 선호도를 표현하는 음질 지수 (Sound Quality Index) 구축에 대한 많은 연구 결과들이 국내외에서 도출되었다. 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 전기 모터의 구동에 의해 동작하며 윈도우 리프트 (Window Lift), 선 루프(Sun Roof), 센트럴 도어 락 (Central Door Lock), 윈드 실드 와이퍼

† 교신저자; 정회원, 현대자동차
E-mail : dc.park@hyundai.com
Tel : 031-368-0877, Fax : 031-368-1381

* 현대자동차
** 서울대학교 기계항공공학부

(Windshield Wiper), 전동 시트 (Power Seat), 아웃 사이드 미러 (Outside Mirror) 등의 부품 류가 이에 속한다. 본 연구에서는 파워 윈도우 (Power Window)라 칭하는 모터에 의해 구동하는 윈도우 리프트 시스템을 대상으로 연구를 진행하였다.

윈도우 리프트 시스템에 대한 연구는 글라스 (Glass) 승하강 메커니즘 및 최적 설계 그리고 고장 모드 관련 연구가 주로 진행되었다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 통상 새로운 설계안 또는 메커니즘의 검증 시 소음 수준을 검토하는 정도의 연구들이 대부분이라 할 수 있다. 음질 관련 연구로 Penfold⁽⁶⁾ 등은 12개의 샘플을 대상으로 소리의 변동감 (Fluctuation)과 와인(Whine) 소음 등에 대하여 청음 평가를 수행하였다. 그 결과로 모터 토널 성분의 변동 특성과 300 ~ 2500 Hz 대역 라우드니스 (Band Passed Loudness)를 인자로 선형 회귀 모델 (Linear Regression Model)을 구성하였다. 또한 Zhang⁽⁷⁾ 등은 의미 분별법 (Semantic Differential Method)을 사용한 청음 평가를 수행하여 윈도우 리프트의 음질 특성을 표현할 수 있는 어휘들을 분류하였다. 주성분 분석 (Principle Component Analysis) 결과 음의 강도 (Intensity), 모터 톤 (Tone)의 피치 변화 (Pitch Variation) 그리고 샤프니스 (Sharpness)로 분류되었다. 또한 편안함 (Pleasantness)에 대하여 지니커 파라미터 (Zwicker's Parameter)를 이용하여 다중 회귀 모델을 구성하였고 음의 강도 관련 인자가 가장 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 본 연구에서는 음질 지수 개발 및 이를 활용한 소음 특성 분석 및 개선 연구를 실시하여 음질 향상을 실제적으로 구현하였다. 먼저 윈도우 리프트 작동 시 발생하는 소음에 대하여 주관적 (Subjective), 객관적(Objective) 음질 평가를 통해 음질 특성을 분석하고 이를 토대로 음질 개선 방향 도출 및 음질 지수를 제작하였다. 다음으로 빔 형성 법 (Beam Forming Method)을 이용한 음장 가시화 (Sound Field Visualization) 기법을 통해 음질 요소에 주요한 부품을 도출하였다. 이는 개선 대상을 찾는 데 주요하게 작용하였고 이에 대한 개선을 실시하였다. 마지막으로 앞서 도출된 음질 지수를 개선안에 적용하여 개선 정도를 음질 관점에서 정량적으로 평가하였다.

2. 윈도우 리프트 구조 및 메커니즘

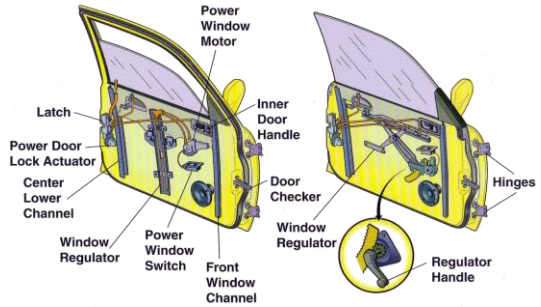


Fig. 1 The structures of window lift system in door module (power and manual window type)

윈도우 리프트의 일반적인 구조는 Fig. 1과 같다⁽⁸⁾. 파워 윈도우의 경우 도어 모듈 내 장착된 모터가 구동하여 와이어(Wire)를 이용, 글라스를 승하강 시키는 메커니즘으로 작동한다. 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 성능 및 와이어의 구조에 따라 글라스 승하강 성능이 주요하게 결정된다. 승하강 시 소음 관점에서 살펴보면 모터 레귤레이터 (Motor Regulator)의 성능 및 고정부의 마운팅 (Mounting) 특성 그리고 이를 지지하는 패널의 동특성에 따라 모터 음색이 주요하게 작용하며 레일의 구배 (Gradient)와 글라스와 도어 패널 사이의 글라스 런 (Glass Run)의 특성 등에 따라 글라스 마찰음의 음색이 주요하게 결정된다 할 수 있다.

3. 윈도우 리프트 소음 특성

글라스 승하강 시 소음 특성은 시작 및 끝단에서의 충격음과 글라스 이송 구간의 이송음으로 구성되어있다. 충격음의 경우 글라스가 런에서 이탈 및 구속 시 발생하는 전 주파수 대역에 걸쳐 넓은 특성으로 나타나고 이송음의 경우 글라스 이동에 따라 모터 토널음 (Tonal noise) 및 글라스와 런 사이의 광대역 마찰음의 특성으로 나타난다. Fig. 2는 글라스 승하강 시 소음 레벨 특성을 나타내고 Fig. 3은 주파수 특성을 나타낸다. 승하강 시 전체적인 소음 특성은 유사하지만 수직 방향으로 글라스가 이동함에 따라 모터 부하의 차이 그리고 레일 구배 형상 및 도어 패널의 구속 등에 따라 모터 토널 성분 및 시작 및 끝단의 충격음 등의 특성에 차이가 발생한다.

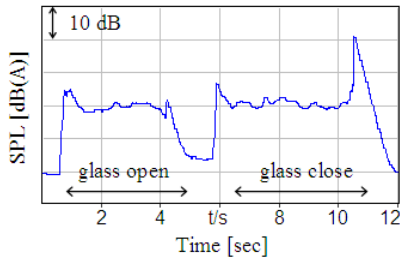


Fig. 2 Sound pressure level profile along the time

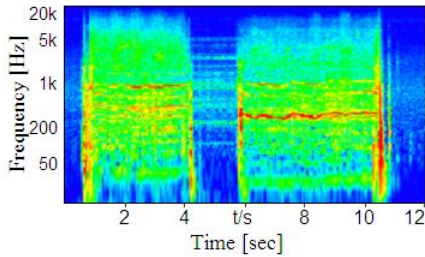


Fig. 3 Time vs. Frequency characteristics during glass open and close procedure

3. 음원 녹음 및 주관적 음질 평가

3.1 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 녹음하였다⁹⁾. 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.

3.2 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.

평가 방법은 하나의 어휘에 점수를 부여하는 레이팅 법 (Rating Method)를 사용하였고 “고급스러움”에 대하여 10점 척도를 적용하였다. 청음 평가 시 일반적으로 발생할 수 있는 현상 및 판단 오류들은 다음과 같다¹⁰⁾.

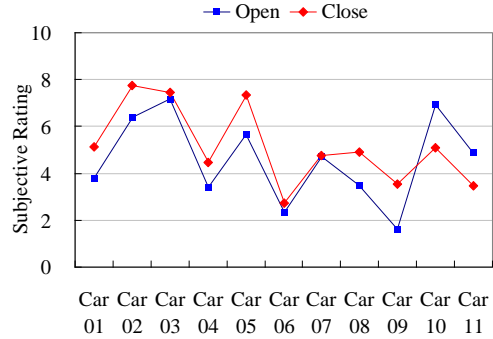


Fig. 4 Mean value of the subjective evaluation result

- (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

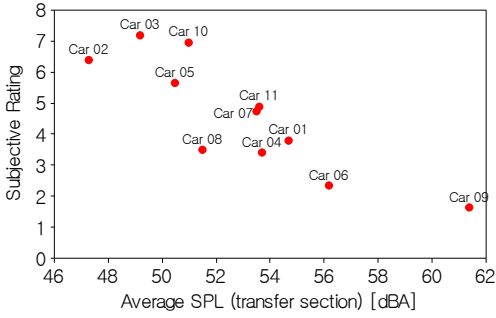
위와 같은 현상에 의해 발생하는 오류를 최소화하기 위해 평가자에게 사전 교육을 실시하였다. 또한 음원의 순서를 랜덤으로 배치하고 평가한 음에 대해 점수 순서대로 음을 재정렬하고 반복 청음 및 재평가 실시하게 하여 첫 음 또는 선행 음원을 기준으로 판단하는 오류를 최소화 하였다¹¹⁾.

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. Fig. 4는 평가 결과의 평균값을 나타내고 있다.

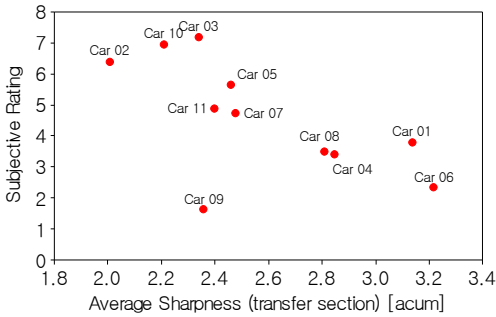
4. 음질 인덱스 개발

4.1 음질 메트릭 분석

평가에 사용한 음원에 대해 HEAD acoustics사의 ArtemiS 12.01 S/W를 이용하여 각각의 음질 요소 (Sound metrics)를 계산하여 주관적 평가 결과와의 상관도 (Correlation)를 검토하였다. 주비커 파라미터와 충격 특성을 나타내는 큐토시스 (Kutosis), 크레스트 팩터 (Crest Factor)등을 계산 하였다. 이 중 라우드니스는 시작 및 끝단의 충격 소음 구간에서는 DIN



(a) Subjective rating vs. averaged SPL



(b) Subjective rating vs. averaged sharpness

Fig. 5 Scattering plot of averaged SPL and sharpness for - open condition

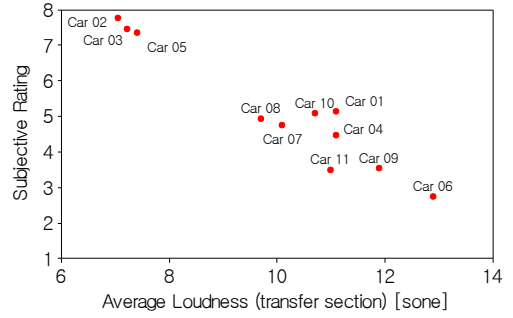
45631/A1 방법을 이용하여 계산하였고 글라스 이송 구간에 대하여는 ISO 532B 방법을 이용하여 계산하였다. 또한 음의 특성 상 동작 시간의 영향을 확인하기 위해 동작 시간도 함께 계산하였다. 상관 분석 결과 승하강 시 모두 음의 크기와 관련된 인자와 샤프니스 관련 인자의 상관도가 높은 것으로 나타났으며 Fig. 5-6은 인자 중 높은 상관성을 갖는 음질 요소를 보여주고 있다.

4.2 음질 인덱스 제작

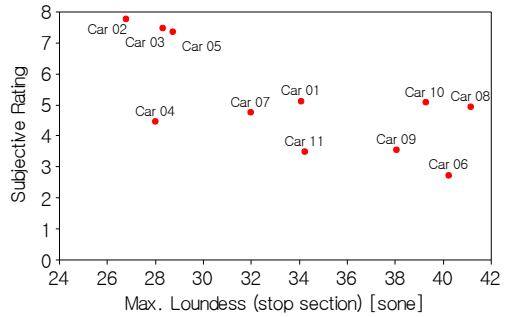
음질 매트릭 분석 결과와 주관적 평가 결과와의 관계를 규명하기 위해 다중 선형 회귀 분석을 이용하여 음질 인덱스를 제작하였다. 다중 선형 회귀식의 기본 형태는 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots, R^2 \quad (1)$$

여기서 y 값은 “고급스러움”에 대한 주관적 평가결과 값이고, x_1, x_2 등은 각 인자에 해당하는 음질 매트릭을 나타낸다. β_0 값은 선형 모델의 y 절편을 나타내고 β_1, β_2 등은 각 인자의 계수를 나타낸다. 그리고 R^2 는



(a) Subjective rating vs. averaged loudness



(b) Subjective rating vs. max. loudness

Fig. 6 Scattering plot of averaged loudness at transfer section and max. loudness at stop section – close condition

도출된 회귀식의 적합성 (Goodness of fit)을 나타내는 결정 계수로 0부터 1까지의 범위를 가지며 1에 가까울수록 높은 설명력을 나타낸다⁽¹¹⁾. 회귀 분석은 범용 통계 프로그램인 Minitab ver. 16을 이용하여 단계적 회귀 분석 (Stepwise Regression Analysis)을 통해 이루어졌다. 분석 결과 열림/단힘 조건에 대해 2개의 인자가 독립 변수로 구성되고 구성된 회귀식의 결정 계수 R^2 는 열림 조건에서 80%, 단힘 조건에서 93%로 높은 설명력을 나타냄을 알 수 있었다. 회귀 모델의 통계적 유의성은 분산 분석을 통해 유의 확률 95%하에 통계적으로 유의함을 확인 하였다. Table 1, 2는 분산 분석 결과이고 Table 3, 4는 회귀 모델의 계수를 나타낸다.

Table 1 Result of variance analysis – open condition

Model	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
Regression Model	28.23	2	14.11	19.68	0.001
Residual	5.74	8	0.72		
Sum	30.97	10			

Table 2 Result of variance analysis – close condition

Model	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
Regression Model	27.30	2	13.65	60.70	0.000
Residual	1.61	8	0.20		
Sum	29.91	10			

Table 3 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 4 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 도출되었으며 표준화 계수의 크기를 보면 음압 레벨에 비해 샤프니스에 대한 기여가 큰 것으로 나타났다. 닫힘 조건의 경우 끝단 충격음 즉, 글라스 상승 말기 충격음의 라우드니스와 이송구간 평균 라우드니스가 인자로 도출되었고, 이송구간의 라우드니스의 기여가 큰 것으로 나타났다.

이와 같이 음질적으로 영향을 주는 가장 주요한 요소는 글라스 이송 구간의 음의 높이와 크기인 것으로 알 수 있었고, 음질 개선을 위해서는 이를 주요하게 개선하여야 하는 것을 확인하였다.

5. 개선안 도출 및 검증

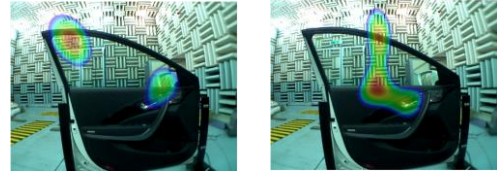
5.1 소음 원인 분석

음질 평가와 인덱스 도출을 통해 주관적 선호도를 개선시키기 위한 방향을 설정하였지만 실제적으로 중요한 점은 이를 실제로 구현하는 것이다. 음질 개선안을 도출하기 위해 먼저 빔 형성법 (Beam forming method)를 이용하여 관심 주파수 대역에서 소음의 발생 위치를 확인하였다. 음장 가시화는 0.5 ~ 4 kHz의 측정 범위를 갖는 SM Instrument사의 30 채널 나선형 어레이 타입의 음향 카메라를 사용하여 측정하였다.



(a) glass open

(b) glass close

Fig. 7 Sound visualization for motor booming noise

(a) glass close

(b) glass stop at end position

Fig. 8 Sound visualization for friction noise (a) and impulse noise at end position (b)

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. 7과 같이 패널에 장착된 모터 레귤레이터의 방사음 또는 가진에 기인한 패널의 구조 소음이 주요하다는 것을 알 수 있었고, 고주파 대역의 마찰음은 Fig. 8과 같이 글라스와 런 사이에서 주요하게 발생함을 확인하였다. 또한 글라스 상승 말단 충격음의 경우 패널 상하단의 위치에서 주요하게 발생하는 것을 알 수 있었다.

5.2 개선안 적용 및 검증

이송구간의 모터에 기인한 음량 및 고주파 음색을 개선하기 위해 가장 먼저 모터 단품에 대한 개선안을 적용하였다. 일반적으로 DC 모터의 경우 브러쉬 마찰에 의한 고주파 마찰음과 고정자/회전자의 상호 작용에 의한 코깅 토크 (Cogging Torque)에 의한 특성이 주요하게 나타나고 있다. 이에 따라 브러쉬 접촉부의 형상을 변경하여 개선품을 제작 평가하였다. 이와 아울러 도어 트림 내 흡음재를 변경하여 차음 성능을 강화하는 방안을 적용 검토하였다. Fig. 9는 모터 레귤레이터의 구조와 트림 내 부착한 흡음재를 나타내고 있다. 먼저 모터 단품의 특성을 개선하였을 때 Fig. 10과 같이 고주파 대역의 마찰음 특성과 함께 토크 리플 (Ripple)에 의한 패널 가진 특성을 개선시킴을 확인할 수 있었다. 또한, 트림 내 흡음 패드의 면밀도와 두께를 변경하여 차음 성능을 증대 시켜 개선 샘플을 평가하였다.

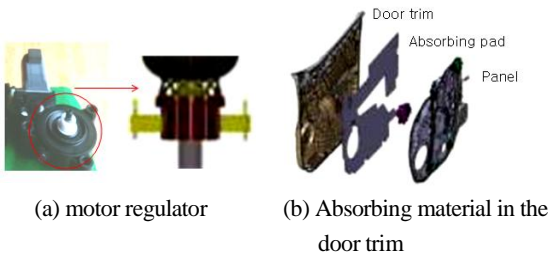


Fig. 9 Modification for reduced noise characteristics

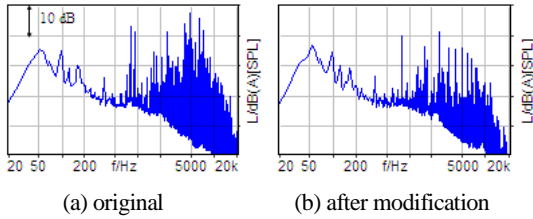


Fig. 10 Improvement result of motor noise

Table 5 Sound quality index after applied modification

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

개선 샘플에 대한 검토 결과, 승하강 시 평균적으로 음압 레벨 3.7 dB, 샤프니스 0.3 acum이 감소하였다. 음질 지수 또한 1.8 점이 상승하여 개선안이 효과적으로 적용되었음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 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 레귤레이터의 방사음 및 패널 가진에 의한 영향이 주하며 2.0 kHz이상 광대역은 글라스와 런 사이의 마찰음이 주요하게 작용한다.
- (3) 효과적인 음질 향상을 위해서는 도출된 음질 지수에 해당하는 음질 인자에 대한 개선이 필요하다

고 본 연구에서는 브러쉬 마찰 특성과 토크 리플 개선 그리고 도어 트림 내 차음 성능 개선 등을 통해 효과적으로 음질 지수를 향상시킬 수 있었다.

본 연구의 결과를 토대로 선 루프 및 전동 시트 등과 같은 모터 구동에 의한 작동음들에 대해 연구를 확대 적용하여 전체적인 음질 향상과 더불어 차량의 감성 품질 향상에 활용하고자 한다.

참 고 문 헌

- (1) 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
- (2) Filley, M., 2006, Benefits of a New Concept Window Lift System in a Typically Constrained Door Environment, SAE Technical Paper 2006-01-1481,
- (3) 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
- (4) 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
- (5) Singh, K., 1999, Experimental Assessment Of Door Window Glass Smooth Operation And Tracking, SAE Technical Paper 1999-01-3161,
- (6) Penfold, J., 1997, Power Window Sound Quality - A Case Study, SAE Technical Paper 972017
- (7) Zhang, L. and Vértiz, A., 1997, What Really Affect Customer Perception? - A Window Regulator Sound Quality Example, SAE Technical Paper 971909
- (8) <http://hdabob.com/Windows.htm>
- (9) HEAD acoustics Application Note, Binaural Measurement, Analysis and Playback, HEAD acoustics, <http://www.head-acoustics.de/>
- (10) Klaus Genuit, 2010, Sound-Engineering im Automobilbereich, chap. 4.
- (11) Kim, S.H., 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