

< 기술논문 >

제진재의 최적배치를 이용한 차량공조시스템의 음질개선

오재응[†] · 황동건^{*} · 박상길^{*} · 윤태건^{*} · 심현진^{*} · 이정윤^{**}

(2005년 12월 6일 접수, 2006년 3월 18일 심사완료)

Improvement of Sound Quality for the Vehicle HVAC System Using Optimum Layout of Damping Material

Jae-Eung Oh, Dong-Kun Hwang, Sang-Gil Park, Tae-Kun Yoon, Hyoun-Jin Sim and Jung-Youn Lee

Key Words : HVAC(공조시스템), Psychoacoustics(심리음향), Sound Quality(음질), Regression Analysis(회귀분석), Damping Material(제진재), DOE(실험계획)

Abstract

The reduction of the Vehicle interior noise has been the main interest of NVH engineers. The driver's perception on the vehicle noise is affected largely by psychoacoustic characteristic of the noise as well as the SPL. In particular, the HVAC sound among the vehicle interior noise has been reflected sensitively in the side of psychology. In previous study, we have developed to verify identification of source for the vehicle HVAC system through multiple-dimensional spectral analysis. Also we carried out objective assessments on the vehicle HVAC noises and subjective assessments have been already performed with 30 subjects. In this study, the linear regression models were obtained for the subjective evaluation and the sound quality metrics. The regression procedure also allows you to produce diagnostic statistics to evaluate the regression estimates including appropriation and accuracy. Appropriation of regression model is necessary to R^2 value and F-value. And testing for regression model is necessary to independence, homoscedesticity and normality. Also we selected optimum layout of damping material using Taguchi method. As a result of application, sound quality is improved more quietly, powerfully, even though costly, and smoothly.

1. 서론

최근까지 자동차의 실내의 소음에 관한 연구는 소음 레벨의 저감에 초점을 맞추어 진행되어왔다. 그러나 인간의 청감 기능은 분석하기 힘들 정도로 복잡하기 때문에 많은 비용을 지불하여 만들어낸 저감 방법이 큰 효과를 가져오지 못하고 있으며, 예상치 못한 차량 주소음의 저감에 따라 지금까지 마스킹 되었던 2차 소음들에 의한 문제점도 소음 연구의 대상에 되고 있다. 또한 경우에 따라서 음압이 낮음에도 불구하고 높은 음압의 소음보다 향

상 좋은 느낌을 주지 못하고 있다. 특히, 자동차 실내 소음의 경우 소음 저감 기술 개발로 인해 엔진, 타이어 소음 등이 많이 개선되었으나 마스킹 되었던 2차 소음 특히, 차량 공조 소음과 같은 소음들이 운전자의 인식 레벨로 포함되고 있으며, 이러한 소음들이 연구대상이 되고 있다.

차량 공조 소음은 전체 소음 레벨에 비해 크지 않지만 운전자의 감정을 날카롭거나 불쾌하게 만드는 등 주관적인 인지에 많은 영향을 주고 있다. 이에 따라 자동차 개발 엔지니어는 소음 저감뿐만 아니라 좋은 음질 개발이라는 새로운 목표를 추구하고 있다.

이러한 목표에 의해 소리에 대한 여러 가지 느낌을 객관적으로 표현한 많은 인자들이 개발되었으며, 대표적으로 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 러프니스(roughness) 등을 들 수 있다.

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0452, FAX : (02)2299-3153

^{*} 한양대학교 기계공학부

^{**} 회원, 경기대학교 기계시스템디자인공학부

이와 같이 다양한 주관적 느낌을 점수로 표현하려 노력하고 있으며, 통계학적인 방법을 이용해 주관적 느낌을 함수로 표현한다.⁽¹⁻⁴⁾

본 연구에서는 차량공조시스템(HVAC)의 소음을 획득하여 객관적 음질 평가와 주관적 음질 평가를 통해 얻은 결과를 바탕으로 상관관계가 높은 인자를 이용한 회귀모형을 추정하였다. 또한 선행 연구⁽⁵⁾를 통해 다차원 해석법 및 음향인텐시티 실험 결과 블로워의 기여도가 가장 크다는 결과를 얻었으므로 블로워 소음을 제어하기 위해 제진재를 부착하였다. 제진재의 효과적인 사용을 위해 실험계 획법으로 제진재의 최적위치를 선정하여 음질의 향상 여부를 검증하였다.

2. 청음평가

청음평가에 사용된 차량은 국내 유수의 자동차 회사에서 생산된 승용대형차이며, 제어 대상 음원은 공회전(idle)상태의 에어컨 모드 중 사용빈도가 가장 많은 단수를 선정하여 녹음하였다.

본 연구에서는 Head Acoustic사의 Artemis프로그램을 이용하여 객관적 음질 분석을 수행하여 Table 1에 나타내었다. 그리고 객관적 음질인자에 해당하는 3가지 용어와 자동차 음질평가용어를 바탕으로⁽⁶⁾ 한 공조시스템을 대표할 수 있는 용어 2가지를 추가하여 5개의 용어에 대해 주관적 음질 평가를 수행하였다. 5개의 평가용어는 “Quiet(1점)-Loud(7점)”, “Soft(1점)-Sharp(7점)”, “Smooth(1점)-Rough(7점)”, “Powerful(1점)-Unsatisfactory(7점)”, “Expensive(1점)-Cheap(7점)”이다.

3. 상관과 회귀분석

3.1 상관분석

상관분석(correlation analysis)은 둘 또는 그 이상의 변수들 사이의 관계를 규명하기 위해서 산점도(scatter plot)를 작성해 봄으로써 두 변수 사이의 관계를 시각적으로 대략 파악할 수 있지만, 이러한 방법은 객관성과 일관성이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 이를 보완하기 위한 방법으로 회귀분석(regression analysis)을 수행하였다.

Table 1 The overall value of each sound metrics

	SPL (dB(A))	Loudness (soneGF)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)
Value	50.6	6.29	1.62	0.738

객관적 음질 분석과 주관적 음질 평가로 나타난 음질 인자 별 상관분석의 결과는 Table 2 과 같다. 각 인자들 사이에 0.7 이상의 높은 상관관계⁽⁷⁾를 갖고 있는 인자를 제시하였고, 회귀모형을 보다 정확하게 표현하기 위한 음질 인자로 선택하였다.

3.2 회귀모형의 적합성

회귀분석은 변수들간의 함수적인 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석방법이다. 이러한 함수 모형으로부터 독립변수의 변화로 종속변수의 변화를 예측할 수 있다.

회귀모형은 F-값과 결정계수(coefficient of determination)를 통해 설정된 모형이 얼마나 적합한지를 판단할 수 있다. F-검정은 분산분석의 F-값이 기각치 보다 크게 되거나 유의차 수준(significant difference, 5%의 유의수준인)이 0.05보다 작을 시 귀무가설이 기각된다. 즉, 평균값들은 유의적으로 다르고 설정된 모형의 효과가 실제로 있다고 판단한다. R-square 는 결정계수로서 1에 가까울수록 추정된 회귀선 주위에 데이터가 밀집되어 있어 그 수치만큼 회귀선에 의하여 설명되는 비율을 나타낸다.

Table 3는 본 연구의 분산분석 결과를 나타낸 표이다. 5개 회귀모형 모두 유의차 수준이 0.05보다 작으며, R-square 는 0.5이상의 값을 나타내므로 추정된 회귀모형은 유용한 것으로 생각 할 수 있다.

Table 2 The coefficients of correlation between sound metrics and subjective rating

	L - L	S - S	R - R	P - L	E - L
Coefficient of correlation	0.761	0.888	0.715	0.766	0.899

L: Loudness, S: Sharpness,
R: Roughness, P: Powerful
E: Expensive

Table 3 Regression procedure: ANOVA

	L - L	S - S	R - R	P - L	E - L
F-value	13.70	10.46	37.19	9.59	20.01
Significant difference	0.004	0.009	0.001	0.011	0.012
R-square	0.803	0.788	0.711	0.709	0.723

3.3 회귀모형의 정확성

설정된 모형을 보다 정확하게 판단하기 위해서는 선형회귀분석 모형의 독립성(independence), 등분산성(homoscedasticity), 정규성(normality)의 가정들을 반드시 검정해야 한다.⁽⁸⁾ 독립성 판단은 Durbin-Watson 계수로 하며, 1부터 4까지의 값 중 2에 가까울수록 오차들끼리 서로 독립임을 의미한다. 정규성은 잔차에 대한 정규 확률도를 작성하여 직선의 형태로 표현되는지를 시각적으로 판단하고, 등분산성은 잔차들이 0을 중심으로 랜덤하게 분포하면 오차항의 등분산성에 대한 가정을 만족하게 된다.⁽⁹⁾ 따라서 본 논문에서는 5개의 회귀 모형 중 'Loudness-Loud'의 모형에 대한 예시⁽⁵⁾를 보이며 회귀모형의 정확성을 검증하고자 한다. Table 4는 오차항의 독립성을 판단하기 위한 Durbin-Watson 계수이다. Durbin-Watson 계수가 2에 가까우므로 오차항들 사이에 무자기상관 즉, 오차들끼리 서로 독립임을 알 수 있다. Fig. 1은 등분산성과 정규성을 판단하기 위한 것이며, Fig. 1(a)는 잔차들의 등분산성을 나타낸 것으로 잔차들이 시각적으로 랜덤하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있어 등분산성을 만족한다. 그리고 Fig. 1(b)는 정규성을 나타내는 것으로서 잔차들이 직선을 중심으로 선형적으로 분포하는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. Table 4와 Fig. 1과 같은 방법으로 5개 회귀모형의 정확성을 검증하였으므로 추정된 회귀식들은 정확하다고 판단할 수 있다.

3.4 회귀모형의 추정

회귀모형에 대한 적합성과 정확성을 바탕으로 Table 5와 같이 회귀 모형식을 추정하였다.

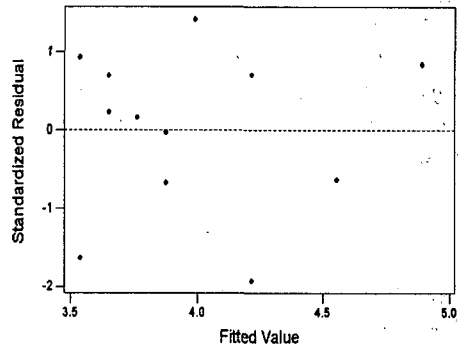
Fig. 2는 앞에서 검증한 'Loudness-Loud'의 회귀모형을 보여준다. 실선은 회귀식이며, 점선은 95%의 신뢰구간을, 1 점 쇄선은 95% 예측구간을 의미한다.

4. 실험계획법을 이용한 음질개선

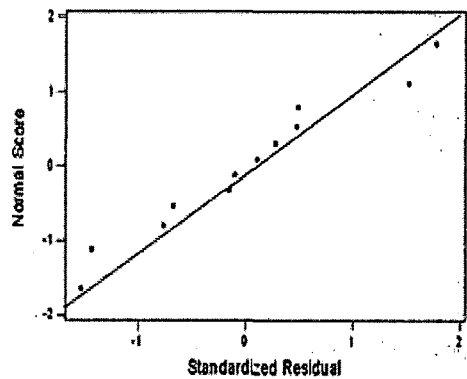
차량공조시스템(HVAC)에 대한 다차원 해석법의 기여도 분석 결과, 블로워의 진동기여도가 가장 크며, 음향인텐시티 측정결과에서도 블로워에 주 소음원이 존재⁽⁵⁾하는 것을 확인하였다. 따라서 본 실험에서는 저렴한 비용으로 블로워를 제어하기 위해 제진재 부착을 고려하였으며, 블로워의 진동을 제어함으로 소음저감 및 음질향상이 될 것으로 판단하였다.

Table 4 Testing for independence using Durbin-Watson statistic

	L - L	S - S	R - R	P - L	E - L
Durbin - Watson statistic	2.42	2.92	2.16	2.03	2.10



(a) Testing for the homoscedasticity.



(b) Testing for the normality

Fig. 1 Testing for regression equation of 'Loudness-Loud'

Table 5 Estimated regression equations of selected by 5 subjective vocabularies

	Estimated regression equation
Loud	$-0.12082 + 0.68827 \times \text{loudness}$
Sharp	$23.2110 - 11.3068 \times \text{sharpness}$
Rough	$3.2717 + 1.58854 \times \text{roughness}$
Powerful	$0.63088 + 0.56437 \times \text{loudness}$
Expensive	$-0.3002 + 0.75845 \times \text{loudness}$

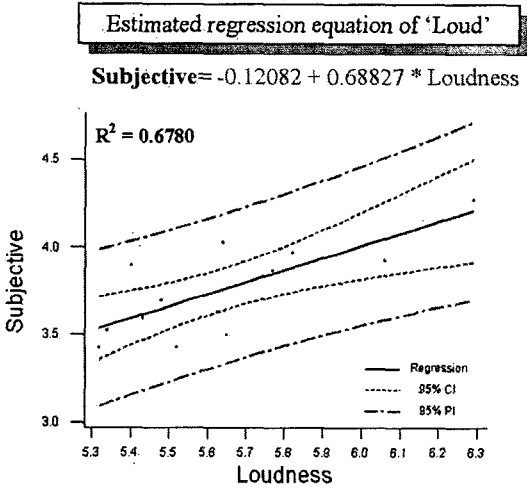


Fig. 2 Estimated regression equation of 'Loudness-Loud'

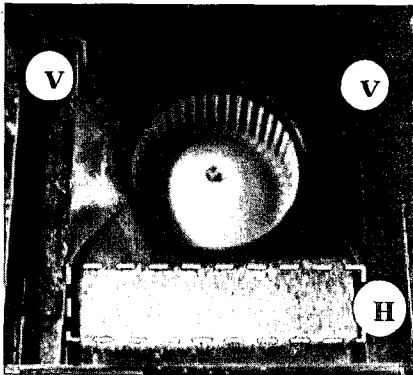


Fig. 3 Sectional diagram of blower

제진재의 비용 및 최적 부착위치를 선정하기 위한 변수로 제진재의 부착 위치 및 길이 등의 인자가 있으며, 효과적인 실험 횟수 및 개선을 위해 실험계획법(DOE)을 이용하였다. 소음 측정은 동일한 조건의 3번의 반복 실험을 통해 노이즈 인자를 고려하였다. 블로워의 평면도는 Fig. 3과 같으며, 제진재 부착 위치 및 길이를 고려한 6개의 인자는 Table 6에 제시하였다. V(수직위치), H(수평위치), VW(수직너비), VL(수직길이), HW(수평너비), HL(수평길이)이다. V, H의 수준은 제진재의 부착위치에 따른 것으로 F(Front), C(Center), B(Back)이고, VW, VL, HW, HL의 수준은 제진재의 길이 변화에 따른 것으로 모두 3수준으로 정하였다.

실험은 Table 7과 같은 6인자 3수준의 L_{18} 직교 배열표를 이용하였으며, 교호 작용은 없는 것으로

Table 6 Control factors and their levels

	Level 1	Level 2	Level 3
V	Front	Center	Back
H	Front	Center	Back
VW	1.5 cm	2.0 cm	3.0 cm
VL	12 cm	18 cm	24 cm
HW	10 cm	15 cm	20 cm
HL	4 cm	6 cm	8 cm

Table 7 Orthogonal arrays and factors assignment

No.	V	H	VW	VL	HW	HL
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	2	1	1	2	2	3
5	2	2	2	3	3	1
6	2	3	3	1	1	2
7	3	1	2	1	1	2
8	3	2	3	2	2	3
9	3	3	1	3	3	1
10	1	1	3	3	3	2
11	1	2	1	1	1	3
12	1	3	2	2	2	1
13	2	1	2	3	3	3
14	2	2	3	1	1	1
15	2	3	1	2	2	2
16	3	1	3	2	2	1
17	3	2	1	3	3	2
18	3	3	2	1	1	3

가정하였다.

5. 제진재의 최적 위치 선정

망소특성의 파라메타 설계를 위해 이미 선정한 제어인자와 노이즈 인자를 바탕으로 S/N 비를 구했으며, Fig. 4 과 같이 주효과(Main effects) 분석 결

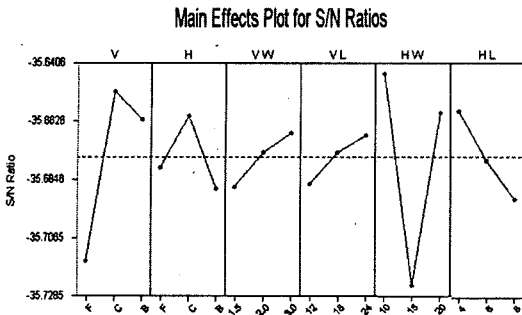


Fig. 4 The main effect plot for S/N ratio of SPL

Table 8 The overall value of SPL and each sound metrics

	Original	After	Difference
SPL(dB(A))	50.6	48.4	-2.2
Loudness (soneGF)	6.29	5.11	-1.8
Sharpness (acum)	1.62	1.71	+0.09
Roughness (asper)	0.738	0.711	-0.027

과를 확인할 수 있다. S/N 비의 효과가 큰 인자는 HW, V, HL 순서이므로 이를 바탕으로 예상되는 제진재의 최적 부착조건은 V(수직위치)는 Center, H(수평위치)는 Center, VW(수직너비)는 3cm, VL(수직길이)는 24cm, HW(수평너비)는 10cm, HL(수평길이)는 4cm로 예상된다.

실험의 검증에 위해서 최적조건에 따른 확인 실험을 한 결과와 원래 상태에서 HVAC의 객관적 음질분석을 수행한 결과를 Table 8에 비교하여 나타내었다. 실험 결과 음압은 2.2dB(A), 라우드니스는 1.8 soneGF, 러프니스는 0.027asper 감소하였으며, 샤프니스는 0.09acum 증가하였다.

Table 8에서 제시한 것과 같이 원래 상태와 최적 조건에서 얻은 객관적 음질요소 분석 값을 Table 5의 회귀모형에 적용하여 주관적 점수를 예측하고, 그 점수 차이를 Table 9와 같이 정리하였다. 주관적 점수는 7점으로 갈수록 부정적인 의미를 나타내며, 1점으로 갈수록 긍정적인 결과를 의미한다.

실험계획법을 이용하여 제진재의 최적 부착위치를 선정하고 실험한 결과, 소음저감뿐만 아니라 더욱 조용하고, 부드럽고, 성능 좋고, 고급스런 이미지로 음질이 향상된 것으로 확인되었다.

Table 9 Comparison of the subjective points between original and after noise by damping patch

	Original	After	Difference	Remark
Loud	4.21	3.39	-0.82	Quiet(1)-Loud(7)
Sharp	4.89	3.88	-1.01	Soft(1)-Sharp(7)
Rough	4.44	4.40	-0.04	Smooth(1)-Rough(7)
Powerful	4.18	3.51	-0.67	Powerful(1)-Unsatisfactory(7)
Expensive	4.47	3.58	-0.89	Expensive(1)-Cheap(7)

6. 결론

본 연구에서는 차량 공조시스템의 소음원에 대해 주관적 평가와 객관적 평가의 결과를 바탕으로 회귀모형을 추정하였고, 또한 실험계획법을 이용한 제진재의 최적 부착위치를 선정하여 음질 향상 여부에 관한 결론을 다음과 같이 얻었다.

(1) F-값과 결정계수를 통해 회귀모형의 적합성을 검증하였고, 잔차들의 독립성, 등분산성, 정규성을 통해 회귀모형의 정확성을 검증하였다.

(2) 제진재의 최적위치 선정을 위해 6 인자 3 수준의 L_{18} 직교 배열표를 이용하여 실험을 하였으며, 예상된 최적조건은 V(수직위치)는 Center, H(수평위치)는 Center, VW(수직너비)는 3cm, VL(수직길이)는 24cm, HW(수평너비)는 10cm, HL(수평길이)는 4cm 이다. 검증을 위한 객관적 음질분석 결과 음압, 라우드니스, 러프니스는 감소하였고 샤프니스는 증가하였다.

(3) 최적조건에 의한 실험 결과값을 추정된 회귀모형에 적용한 결과, 제진재 부착 이전 보다 더욱 조용하고, 부드럽고, 성능 좋고, 고급스런 이미지로 음질이 향상되는 결과를 얻었다.

참고문헌

- (1) Zwicker E. and Fastl H., 1990, "Psychoacoustics

- Facts and Models,” Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 61~267.
- (2) Park, D. C. and Chung, S. G., 2002, “Development of Interior Sound Quality on a Passenger Car,” *Journal of the KSNVE*, Vol. 12, No. 5, pp342~349.
- (3) Hur, D. J., Cho, Y., Kim, H. S., Lee, G. S. and Park, T. W., 2000, “Model Development and Analysis of the Car Interior Sound Quality,” *Journal of the KSNVE*, Vol. 10, No. 2, pp. 254~260.
- (4) Im, D. H., 1999 “A Study on the Assessment of Product Sound Quality : Application to Vacuum Cleaners,” the Degree of Master of Engineering, KAIST.
- (5) Oh, J. E., Hwang, D. K., Aminudin bin Abu, Lee, J. Y. and Kim, S. S., 2004, “Coherent Analysis of HVAC Using the Multi-Dimensional Spectral Analysis,” *Journal of KSPE*, Vol. 22, No. 8, pp. 143~150.
- (6) Tako Hiromoto, 2001, “Sound Quality Study and its Application to Car Interior and Exterior Noise,” Spring Annual Conference, *KSNVE*, pp. 19~26.
- (7) Kang, B. S. and Kim K. S., 2003, “Modern Statistic Analysis,” Muyok Pub., pp 394~396.
- (8) Park, S. H., 2003, “Modern Design of Experiments,” Minyoungsa., pp 234~237
- (9) Yi, S. B., 2002, “Design of Experiment Exercise Examples,” Eretec, pp 88~90.