

타이어 종류에 따른 차량 실내 소음의 Mahalanobis Distance 를 이용한 음질인덱스 구축

정재은* · 양인형* · 박군동* · 이유엽** · 오재응***†

* 한양대학교 기계공학과, ** 호원대학교 자동차기계공학과, *** 한양대학교 기계공학부

Sound Quality Evaluation Based on the Mahalanobis Distance for the Interior Noise of Driving Vehicles with Various the Tire Type

Jae-Eun Jeong*, In-Hyung Yang*, Goon-Dong Park*, You-Yub Lee** and Jae-Eung Oh***†

* Dept. of Mechanical Engineering, Seoul, Hanyang Univ.,

** Division of Automotive Mechanical Engineering, Gunsan, Howon Univ.,

*** School of Mechanical Engineering, Seoul, Hanyang Univ.

(Received July 6, 2010 ; Revised October 7, 2010 ; Accepted October 8, 2010)

Key Words: Sound Quality Index(음질인덱스), Mahalanobis Distance(마할라노비스 거리)

초록: 사람이 소리를 듣는 것은 다분히 감정적이고 주관적으로 이루어진다. 따라서 소음 측정의 척도로 주로 사용되는 dB(A)와 같은 청감을 고려한 수치로 표현하기 어렵기 때문에 때와 장소, 차량에 따라 주관적이고 사람의 감정에 맞는 주관적 척도가 요구된다. 즉, 평가하고자 하는 음질인자 항목들은 독립적 관계가 아닌 서로 상관관계의 특성을 고려하여 음질 평가를 수행해야 한다. 그러므로 인간의 청감에 가깝고 정확한 음질 평가를 위해서는 음질인자 별 다변량 분석이 필요하다. 본 연구에서는 차량 주행 소음을 대상으로 특성인자간 상관관계를 고려해 시스템을 분석할 수 있는 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance,MD)를 통해 음질 인덱스를 구축하고자 한다.

Abstract: The reduction of vehicle interior noise has been the main interest of NVH engineers. The driver's perception of the vehicle noise is strongly affected by the psychoacoustic characteristics of the noise and the SPL. The existing methods to evaluate the SQ for vehicle interior noise are linear regression analysis of subjective SQ metrics by statistics and the estimation of subjective SQ values by neural network. However, these methods strongly depend on jury tests, this leads to difficulties. To reduce the important of the jury tests, we suggest a new method using the Mahalanobis distance for SQ evaluation. And, the optimal characteristic values that influenced the results of sound quality evaluation on the basis by main effect. Finally, we developed a new method based on the MD method to evaluate sound quality. The result of noise evaluation revealed that the sound quality could be well improved by changing the structural characteristics of the vehicle.

1. 서론

종래 차량 개발은 성능에만 의존하는 기계라는 개념이었으나, 최근 소비자들의 안락하고 쾌적한 환경에 대한 요구가 증가하며, 차량은 단순 기계가 아닌 생활의 문화공간 매개체로 자리잡아가고 있다. 이와 관련해 과거에는 차량에서 발생하는 소리에 대해 음압 레벨의 저감에 한하여 다루었으나 최근에는 소음 저감과 함께

소비자들의 요구에 맞는 쾌적하고 듣기 좋은 소리를 제공하기 위해 많은 연구가 진행 중이다.

사람이 소리를 듣는 것은 다분히 감정적이고 주관적으로 이루어진다. 따라서 소음 측정의 척도로 주로 사용되는 dB(A)와 같은 청감을 고려한 수치로 표현하기 어렵기 때문에 때와 장소, 차량에 따라 주관적이고 사람의 감정에 맞는 주관적 척도가 요구된다. 따라서, 인간의 감성적 측면인 음질을 평가하기 위해서는 음질인자 사이의 비선형 특성을 고려해야 한다. 즉, 평가하고자 하는 음질인자 항목들은 독립적 관계가 아닌 서로 상관관계의 특성을 고려하여 음질 평가를 수행해야 한다. 그러므로 인간의 청감

† Corresponding Author, jeoh@hanyang.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

에 가깝고 정확한 음질 평가를 위해서는 음질인자별 다변량 분석이 필요하다. 본 연구에서는 차량 주행 소음을 대상으로 특성인자간 상관관계를 고려해 시스템을 분석할 수 있는 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance, MD)를 통해 음질 인덱스를 구축하고자 한다. 그리고 가상음원을 제작하여 로드노이즈의 목적 주파수 별 음질 영향도를 분석하고 음질 개선을 위한 방향을 설정한다. 초기 음원과 최적 음원의 음질 지수 비교를 통해 음질 지수가 향상된 것을 검증하고 실제 구조 변경에 따른 차량 실내 소음의 음질개선 검증을 수행한다.

2. 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance)

마할라노비스 거리(Mahalanobis Distance)는 다차원의 단위공간으로서 마할라노비스 공간을 정의하고 임의의 대상이 그 공간으로부터 얼마나 떨어져 있는가를 거리로 나타낸 것이다. 마할라노비스 공간의 식은 다음과 같다.^(4,5)

$$D^2 = \frac{Z_1^2}{V(Z_1)} + \frac{Z_2^2}{V(Z_2)} = \frac{u_1^2 + u_2^2 - 2\rho u_1 u_2}{1 - \rho^2} \quad (1)$$

$$(Z_1, Z_2 : \text{변수 } Z_1 = \frac{u_2 + u_1}{\sqrt{2}}, Z_2 = \frac{u_2 - u_1}{\sqrt{2}})$$

$$u_1, u_2 : \text{표준화변량 } u_1 = \frac{x_1 - \mu_1}{\rho_1}, u_2 = \frac{x_2 - \mu_2}{\rho_2}$$

x_1, x_2 : 변수, V : 분산, ρ : 상관계수)

일반적으로 모집단 내(정상)속하면 마할라노비스 거리는 보통 0~2 정도의 범위 안에 존재한다.

정상그룹을 정의하고 마할라노비스 거리를 계산하는 과정은 그림과 같다.



Fig. 1 Flow chart of MTS

3. 차량 주행 소음의 음질 인덱스 구축

3.1 정상그룹 및 특성인자 선정

주행 소음의 음질 평가를 위해 판단 기준이 되는 표준 집단을 만들기 위하여 80kph의 등속 주행모드에서 거친노면과 매끈한 노면을 4회 왕복한 데이터를 정상 그룹으로 선정하여 측정하였다.

이번 실험에서 사용한 타이어는 wrap type의 1겹으로 제작한 것으로 Fig. 1은 타이어의 단면을 나타낸 그림이다.

음질 평가를 위해 고려한 특성인자는 음압레벨 중 로드노이즈 평가를 위한 C보정 음압레벨 이외에 대표적인 객관적 음질인자인 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 러프니스(roughness), 변동강도(fluctuation)를 선정하여 5개의 객관인자를 구성하였다. 또한, 차량 실내 소음을 표현할 수 있는 형용사들 중 사전조사를 통해 성가신(annoyance), 시끄러움(loud)과 같은 상위 2개의 형용사를 선정하여 주관적 음질 인자로 구성하였다. 이를 통해 총 특성인자는 7개로 구성되었고, 각 특성인자 항목에 맞게 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다.⁽¹⁻³⁾

객관적 음질평가는 Head Acoustics사의 상용 음질 분석 프로그램인 ArtemiS 9.0을 사용하였고, 주관적 음질 평가는 청음평가 방법으로 7점척도를 기준으로 점수가 높을수록 인자에 대해서 ‘그렇다’, ‘매우 그렇다’로 평가하도록 하였다. 청음평가는 청력에 이상이 없는 40명의 남녀 학생을 대상으로 수행하였으며 실제에 가까운 음원을 들려주

Table 1 The characteristic data of reference group

No.	SPL(C)	Loudness (Sone)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)	Fluctuation (vacil)	Annoyance	Loud
1	77.4	7.47	0.435	0.637	0.0334	5.0	3.6
2	77.9	7.55	0.437	0.635	0.0333	5.1	3.8
3	79.1	8.05	0.444	0.659	0.0334	5.2	4.3
4	78.7	7.97	0.443	0.661	0.0335	5.0	4.2

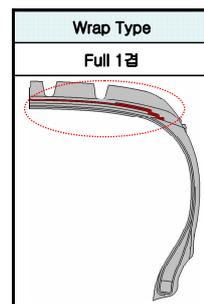


Fig. 2 The tire construction of the wrap type

Table 2 The mean and variance of values

	SPL(C)	Loudness (Sone)	Sharpness(acum)	Roughness(asper)	Fluctuation(vacil)	Annoy-ance	Loud
평균	78.3	7.76	0.440	0.648	0.0334	5.0	4.0
표준편차	0.7542	0.2923	0.0044	0.0142	0.0001	0.1031	0.3198

Table 3 The standardization of values

No.	SPL(C)	Loudness (Sone)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)	Fluctuation (vacil)	Annoy-ance	Loud
1	-1.10712	-0.991972	-1.019049	-0.792693	-0.240192	-0.8489	-1.1334
2	-0.52373	-0.718325	-0.679366	-0.933616	-1.200961	0.6063	-0.5081
3	1.10712	0.9919725	1.0190493	0.7926926	0.2401922	1.0914	1.0532
4	0.52373	0.7183249	0.6793662	0.9336158	1.2009612	-0.8488	0.5862

기 위해 Noisebook 시스템을 사용하였다.

3.2 데이터의 표준화

앞 절에서 분석한 데이터를 바탕으로 정상그룹 데이터의 단위를 무차원화 하기 위해 데이터의 표준화를 수행하였다. 7 개의 특성인자는 각각 다른 결과값과 경향을 가지고 있으므로 이를 동일한 기준에서 비교하기 위한 분석 절차이다. Table 2 의 정상그룹에 대한 평균과 표준편차를 이용하여 식 (2)를 바탕으로 데이터를 표준화하여 Table 3 과 같이 나타내었다.

$$Z_j = \frac{x_j - \bar{X}_j}{\sigma_j} \quad (2)$$

3.3 상관행렬 구성 및 마할라노비스 거리(MD) 계산

특성인자들 간의 상관관계를 파악하기 위해 표준화된 데이터를 바탕으로 각 특성인자들 간의 상관계수를 계산하여 Table 4 에 정리하였다. 상관행렬은 정상그룹을 나타내는 기초 항목으로 추후 비정상 그룹의 식별능력을 확인하는 단계에서 다시 한번 적용된다.

앞에서 측정된 데이터를 바탕으로 식 (1)에 따라 정상그룹에 대한 마할라노비스 거리(MD)를 계산하여 Table 5 에 정리하였다. 이때 정상그룹 MD의 분포는 0~2 범위 안에 존재하는데, 다구찌 박사가 제안한 정상그룹의 MD 값 범위에 만족하므로 정상그룹 선정이 합당하다고 판단할 수 있다.

3.4 비정상 그룹의 선정 및 식별능력 확인

비정상 그룹의 시험차량은 기존 정상그룹과 동일한 차량 및 주행모드에서 소음을 측정하였으며, Steel belt 타이어로 측정한 소음 데이터를 대상으로 적용하였다. 특성인자들 또한 정상그룹과 동일하며, 객관적 음질평가와 청음평가 역시 동일한 방법으로 수행하였다.

비정상 그룹의 데이터에 대하여 정상그룹의 MD 를 계산하는 방법과 마찬가지로 데이터를

Table 4 The correlation matrix

	SPL(C)	Loudness (Sone)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)	Fluctuation (vacil)	Annoy-ance	Loud
SPL(C)	1	0.983	0.989	0.909	0.425	0.458	1
Loudness (Sone)	0.983	1	0.997	0.971	0.587	0.293	0.986
Sharpness (acum)	0.989	0.997	1	0.959	0.554	0.32	0.992
Roughness (asper)	0.909	0.971	0.959	1	0.763	0.058	0.918
Fluctuation (vacil)	0.425	0.587	0.554	0.763	1	-0.594	0.447
Annoyance	0.458	0.293	0.32	0.058	-0.594	1	0.436
Loud	1	0.986	0.992	0.918	0.447	0.436	1

Table 5 The MD of each signals

No.	MD
1	1.1873
2	1.2355
3	1.1507
4	1.5296

Table 6 The standardization of values

SPL(C)	Loudness (Sone)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)	Fluctuation (vacil)	Annoy-ance	Loud	MD
81.5	10.4	1.32	1.09	0.0474	4.3	4.6	31

표준화시키고, Table 4 의 상관행렬을 이용하여 비정상 그룹의 MD 를 계산하였다. Table 6 은 비정상 그룹의 특성인자 별 측정값과 MD 를 나타내고 있다. 비정상 그룹의 MD 는 정상 그룹의 MD 와 비교하여 큰 차이를 보여줌으로써 확실한 분별력이 확인되었다. 즉, MD 계산을 통해 NVH 성능에 대한 차이를 정량적으로 판단이 가능하다.

4. 실험계획법 기반 최적 가상 음원 도출

4.1 실험계획법 인자 및 수준 결정

실제 구조 변경을 통한 목적 주파수 별 음질 개선을 수행하기 전에 가상 음원을 이용하여 목적 주파수가 음질 변화에 영향을 미치는지 검토할 필요가 있다. 4 개의 목적 주파수를 대상으로 소음 레벨의 감소에 의한 음질 향상 시뮬레이션을 수행하여 타당성을 검토한 후, 실제 구조 변경을 통한 음질 향상 평가를 수행하면 부품 제작에 따른 비용 및 시간을 절약 할 수 있다. 그리고 4 개의 목적 주파수에 대해 여러 수준의 레벨을 저장하는 실험계획을 하면 경우의 수가 기하급수적으로 증가하게 된다. 이것은 현실적으로 불가능하므로 실험계획법을 사용하여 보다 효과적으로 실험횟수를 감소시켰다.

청음평가에 사용될 가상 음원을 제작하기 위해 실험계획법의 인자는 4 개의 목적 주파수 별 너클 진동 데이터로 Table 7 에 정의하였다. 소음 제작에

사용된 수준은 원음의 크기를 100%로 가정하고 1/3 씩 크기 감소로 0%까지 총 4 수준으로 설정하였다. 선정된 수준은 Table 8 과 같이 정의하였다.

4 인자, 4 수준의 완전 배치법을 사용하여 실험을 실시할 경우 총 64 번의 실험을 필요로 한다. 이는 경제적, 시간적으로 비효율적이므로 이를 효과적으로 개선하기 위해 L16 직교배열표를 사용하여 실험에 적용하였으며 직교배열표는 Table 9 에 나타내었다. 직교배열표에 의해서 각 대역에 필터를 이용하여 해당 주파수의 음압 레벨을 100%(원음) 부터 0%까지 변화시켜 Table 9 와 같이 총 16 개의 가상음원을 제작하고 3 절의 음질 평가 방법과 동일한 프로세스로 MD 값을 계산하였다. MD 가 작을수록 좋은 음질 지수를 나타내는 것이므로 실험 계획법의 목적함수를 망소특성으로 설정하여 분석하였다.

Table 7 The target frequency and factors

Factor	Frequency (Hz)
A(RR)	33.0
B (FL)	63.0
C (RR)	76.1
D(RR)	126.2

Table 8 The control factors and their levels

Level No.	1	2	3	4
%	100%	66%	33%	0%

Table 9 The orthogonal array and factors assignment

Experiment No.	Factor				MD
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	31
2	1	2	2	2	51
3	1	3	3	3	40
4	1	4	4	4	27
5	2	1	2	3	43
6	2	2	1	4	44
7	2	3	4	1	26
8	2	4	3	2	23
9	3	1	3	4	46
10	3	2	4	3	24
11	3	3	1	2	44
12	3	4	2	1	31
13	4	1	4	2	33
14	4	2	3	1	29
15	4	3	2	4	28
16	4	4	1	3	38

4.2 음질 영향도 주효과 분석

실험 결과에 대하여 각 인자의 수준 변화(목적 주파수 별 음압 레벨 감소)에 따라 음질인자의 특성이 어떠한 경향을 나타내는지 분석하기 위해 주효과 분석을 실시하였다. MD 의 망소 특성으로 Fig. 3 과 같이 목적 주파수에 따른 주효과 결과 그래프를 나타내었다. 4 개의 목적 주파수 중 126.2Hz 를 제외한 3 개의 주파수에서 음압 레벨을 저감한 4 수준의 경우에서 MD 값이 감소하는 망소 특성을 나타내었다. 즉, 126.2Hz 의 경우는 음압 레벨을 저감 시 음질 지수가 더 커지는 특징을 보여주고 있다. 따라서, 음질 향상을 위한 가상 음원의 최적 조합은 126.2Hz 만 1 수준이고, 그 외의 목적 주파수는 4 수준으로 규명되었다. 이와 같은 음질 영향도 결과에 따른 최적의 가상 음원을 제작하여 마할라노비스 음질 지수의 변화를 알아 볼 필요가 있다.

5. 초기 음원과 최적 음원의 음질 지수 비교 및 고찰

앞 절에서 제시한 음질 영향도 주효과 분석 결과를 바탕으로 수준과 레벨을 조합하여 최적의 가상 음원을 구축하였다. Wave 형태의 음원으로 청음 평가를 할 수 있도록 최적 음원을 제작하였다. Table 10 은 최적 음원을 이용하여 3.2 절의 객관적 음질평가 및 청음 평가 방법과 동일하게 수행하여 정리한 특성인자 데이터이고, 이에 따른 마할라노비스 음질 지수를 나타내었다. 비정상 그룹의 평가 대상이 되었던 Steel belt 타이어를 장착한 경우 MD 지수가 31 이었던 것에 비해 음질 지수가 상당히 향상된 것을 알 수 있다. 음질 목적 주파수의 경향에 따라 Steel belt 타이어의 내부 구조를 변경한다면 실내 음압 레벨의 차원이 아닌 음질 개선을 기대할 수 있다. 단, 시뮬레이션에 의해 구

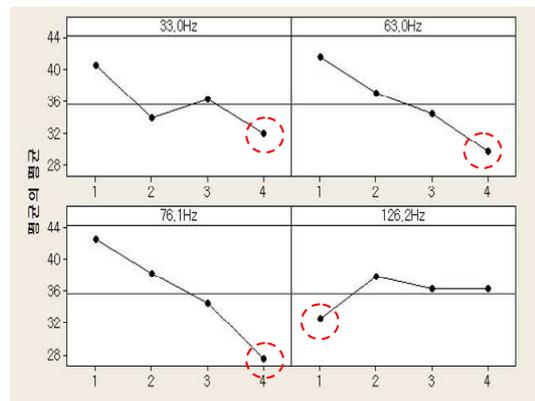


Fig. 3 The main effect for mean of MD

Table 10 The predicted MD of the optimal sound

SPL(C)	Loudness (Sone)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)	Fluctuation (vacil)	Annoy-ance	Loud	MD
78.2	8.7	0.875	0.801	0.0126	4.1	4.2	7

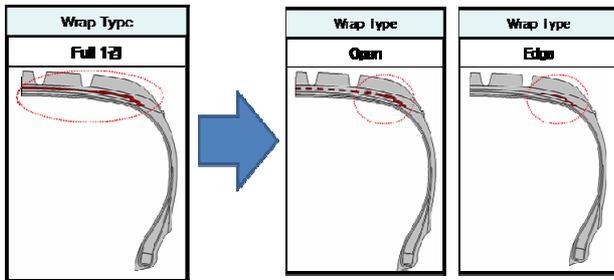


Fig. 4 The tire construction of the wrap type

측한 음원을 대상으로 평가한 음질 지수이므로 실제 구조 변경에 따른 음질 지수 변화는 예상보다 낮을 것으로 판단된다.

6. 구조 변경에 따른 음질 개선 검증

6.1 음질 개선을 위한 타이어 제작

본 절에서는 음질 목적 주파수의 경향에 따라 제작된 타이어를 장착하고, 실제 측정된 데이터를 이용하여 음질 개선을 검증하였다. 새로 제작한 타이어는 내부 재질을 Wrap 소재를 사용하여 기존 Steel belt 대비 가격 경쟁력이나 가공비가 저렴한 장점을 지니고 있다. 또한 강성 및 내구성도 우수하며, 타이어의 Belt 형태를 다양하게 변경하기 쉬워 타이어의 가진력을 쉽게 변경할 수 있다. 따라서 목적하는 주파수 대역으로 스펙트럼을 표현할 수 있다. Fig. 5.3 은 Wrap 으로 제작한 타이어 내부의 형상을 나타낸 것으로 Wrap Type 을 Open 형태, Edge 형태로 구분하였다.

6.2 음질 개선의 검증

30Hz 이하 영역은 노면 및 엔진 가진력에 의한 공통 주파수 특성을 나타내고 있는데, 앞 절에서 설명한 것과 같이 음질 영향도는 미미한 영역이다. 즉, 음질 영향도 순위에 따라 타이어의 내부 재질 및 구조를 Fig. 4 와 같이 변경하여 76.1Hz, 126.2Hz 주파수 대역의 공진 회피 설계를 통해 음질 개선을 수행하였다. 타이어 가진력과 차체의 공진에 의해 180Hz 영역의 주파수 특성이 발생하였는데, 이것 역시 음질 영향도가 미미한 영역이다. 단, Wrap type 의 타이어 장착으로 102Hz 와 233Hz 영역의 새로운 모드가 발생하였다. 종합적으로 판단해 보면 Steel belt 타이어 장착보다 Wrap type 타이어를 장착했을 때 실내 소음 특성이 다양하게

Table 11 The predicted MD according to the tire type

	SPL(C)	Loudness (Sone)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)	Fluctuation (vacil)	Annoy-ance	Loud	MD
Wrap = open	79.9	9.5	0.66	0.785	0.0134	5.2	4.3	14
Wrap = edge	78.9	8.2	0.59	0.704	0.0135	5.0	4.1	11

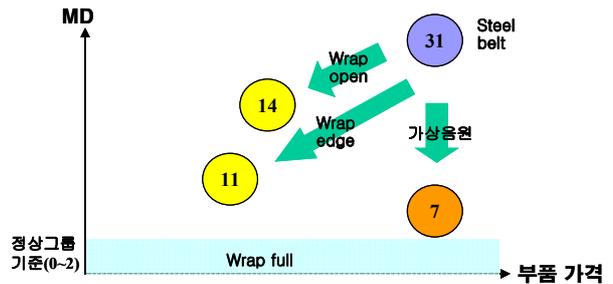


Fig. 5 The relations between SQ index and component price

나타났다. 이것은 소음 에너지가 특정 주파수에 집중되어 듣기 싫은 성분으로 발생하는 것이 아니라, 넓은 영역의 주파수 분포로 음질 측면의 영향이 더 크게 나타나는 것으로 설명할 수 있다.

Wrap type 타이어를 장착하고 측정한 실내 음압을 이용하여 마할라노비스 음질 인덱스에 적용한 결과를 Table 11 에 정리하였다. 음질 개선 판단 기준이 되는 Wrap full 형상의 음질 지수가 가장 우수하나 비용 및 연비 문제로 현실적으로 불가능한 내부구조이므로 open 과 edge 형상의 타이어를 제작하였다.

MD 음질 지수는 Wrap type 을 open 한 것보다 edge 형상으로 제작한 타이어를 장착했을 때 더 좋은 음질 지수를 나타내었다. 또한, Wrap edge 형상으로 제작한 타이어가 집중 하중 및 내구성을 향상시킬 수 있고, 제작 비용 측면에서도 우수한 특성을 나타내었다. 이를 바탕으로 MD 음질 지수와 부품 가격과 관계를 Fig. 5 와 같이 도시하였다. 최초 Steel belt 장착 시 31 이었던 음질 지수를 Virtual simulation 을 통해 최적 음원을 적용한 결과 MD 지수가 7 까지 향상 되었다. 타이어 구조 변경을 통해 음질 지수를 11 과 14 로 향상하였으나, 최적 가상 음원 대비 실제 음원의 음질 지수가 나쁘게 나타났다. 이는 실험 오차 등 잡음의 영향으로 시뮬레이션 음질 지수 보다 나쁘게 나타난 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 마할라노비스 지수를 이용한 주행 중 차량 실내소음의 음질인덱스 구축하여 정상그룹 대비

Steel belt Tire 장착 차량의 식별능력 확인

(2) Virtual simulation 을 통해 가상 음원을 제작하여 음질 영향도를 분석하고, 최적 음원을 도출하여 음질 지수 향상을 검증하였다.

(3) Wrap type 의 타이어 구조 변경을 통한 음질 개선 및 음질 인덱스의 타당성을 검증하였다.

참고문헌

- (1) Blommer, M., Eden, A. and Amman, S., 2005, "Sound Quality Metric Development and Application for Impulsive Engine Noise," SAE 2005 Noise and Vibration Conference and Exhibition, 2005-01-2482.
- (2) Cho, C. H., Kim, T. W. and Oh, J. E., 1995, "A Study on the Characteristics Analysis of Transmission Path for Vibration/Noise of Automobile," *Annual autumn conference of the KSAE*, pp. 365~371.
- (3) Park, S. G. and Oh, J. E., 2007, "Transfer Path Analysis and Interior Noise Estimation of the Road Noise Using Multi-dimensional Spectral Analysis Method," *Transaction of the KSNVE*, Vol. 18, No. 11, p.1206.
- (4) Lee, C.H., Sim, H.J. and Oh., J.E., December 2004 "Development of the Fault Diagnostic System on the Rotating Machinery Using Vibration Signal," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.21, No.12.
- (5) Taguchi, G., Chowdhury, S. and Wu, Y., 2000, *The Mahalanobis-Taguchi System*, John Willy & Sons.