

# 지게차의 주관적 음질평가와 Zwicker 음질지수의 상관관계 및 전달경로분석법(OTPA)을 활용한 음질 기여도 분석

## A Study on Contribution Analysis using Operational Transfer Path Analysis based on the Correlation between Subjective Evaluation and Zwicker's Sound Quality Index for Sound Quality of Forklifts

김범수<sup>1</sup> · 양순용<sup>2\*</sup>

Beom Soo Kim and Soon Yong Yang

Received: 11 Mar. 2016 Accepted: 25 Apr. 2016

**Key Words** : Forklifts(지게차), Sound Quality(음질), Contribution Analysis(기여도 분석), Subjective Evaluation(주관적평가), Loudness(라우드니스), Sharpness(샤프니스), OTPA(Operational Transfer Path Analysis, 전달함수를 사용한 전달경로분석)

**Abstract**: Recently, drivers have begun to regard comfort in the cabin as one of the most important factors in construction equipment like forklifts. Accordingly, it has become more important to design a forklift cabin with a better sound quality as well as lower sound level, which can make a driver more comfortable. In this paper, the correlation between subjective evaluation and Zwicker's sound quality index was analyzed through a blind test by a few workers in forklifts and other construction equipment in several countries. Correlation analysis showed that Loudness and Sharpness were ranked in sequence, and tendencies were different from country to country. Also, contribution analysis for Loudness and Sharpness using operational transfer path analysis (OTPA), which is widely used in the field of noise, vibration, and harshness (NVH), was performed. However, Loudness and Sharpness cannot be used with OTPA directly because there are no linear relationships between the sources and receivers. In this paper, both are calculated by applying the DIN 45631 method with a contribution rate (%) of 1/3 Octave Sound Pressure Level by OTPA method in addition to considering spectral masking.

### 기호 설명

$z$  : critical band rate, Bark

$f$  : frequency, Hz

$N$  : total loudness, sone

$N'$  : specific loudness, sone/Bark

$S$  : total sharpness, acum

$F$  : fluctuation strength, vacil

$R$  : roughness, asper

$\Delta L$  : temporal masking depth

$R$  : roughness, asper

$Y$  : output matrix

$X$  : input matrix

$H$  : transfer function matrix

$Y_S$  : synthesized output matrix

p-value: significance probability

\* Corresponding author: soonyy@ulsan.ac.kr

1 Reliability Assessment Department, Hyundai Heavy Industries, Ulsan, Korea

2 Department of Mechanical Engineering, Ulsan University, Ulsan, Korea

Copyright © 2016, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### Subscripts

SPL: Sound Pressure Level (dB)

OTPA: Operational Transfer Path Analysis

## 1. 서 론

과거 건설장비 및 지게차 관련 산업 분야에서 각 제조사들의 소음 규제 대응을 위한 연구가 많이 진행되어 왔다. 중장비 차량은 특성상 엔진에 의한 소음뿐만 아니라 각종 유압소음과 큰 하중을 받는 동력전달장치 및 작업장치 등의 기계소음으로 인해 자동차에 비해 매우 큰 소음을 발생시킨다. 제조사들의 많은 노력으로 과거보다 소음 레벨이 크게 낮아졌으나, 이제는 감성적인 음질에 대한 불만 혹은 호감을 표현하는 시대가 되었다.

지금까지 소음 규제에 사용되어 온 음압 레벨(Sound Pressure Level, SPL)만으로는 감성음질을 정량화 하기에는 역부족이다. 청감을 고려한 A 가중치 SPL값이 같더라도 전혀 다른 음색을 가진 소리를 인간의 귀는 쉽게 구분해 낼 수 있다. 이러한 인간이 이해하는 주관적인 느낌을 정량화하려는 노력이 과거부터 연구되어 왔다. 그 중 대표적인 것이 Zwicker 음질 지수이다.<sup>1)</sup> Loudness, Sharpness, Fluctuation Strength 및 Roughness 지수들이 주관적인 느낌과 어떠한 관계가 있는지 미리 준비한 샘플 음원으로 여러 나라의 업계 종사자들에게 Blind Test를 실시하여 음질 지수와 주관적 평가결과와의 상관관계를 분석하였다. 또한, 국가별로 문화적 배경에 의한 주관적 평가가 차이가 있다는 연구 결과처럼<sup>2)</sup> 국가별 성향 차이도 t-검정을 통하여 분석하였다.

또한, 전체적으로 음질의 주관적 느낌과 상관관계 높게 나타난 Loudness와 Sharpness의 기여도 분석을 위해 최근 NVH 연구에 많이 사용되고 있는 전달경로분석법인 OTPA(Operational Transfer Path Analysis)를 활용하는 방법을 고안하였다. OTPA를 적용하기 위해서는 입력과 출력의 관계가 선형적이어야 하는데, Loudness 및 Sharpness 값을 그대로 적용하기에는 불가능하다. 하지만, 1/3 Octave SPL값으로 Specific Loudness를 계산하여 이것으로 전체 Loudness를 계산하는 DIN 45631의 방법에서 착안하여 OTPA로 구해진 각 입력의 1/3 Octave Band의 주파수별 기여율(%)을 Spectral Masking을 고려하여 DIN 45631 계산법<sup>3)</sup> 따라 적용하면 Loudness 및 Sharpness의 기여도 분석이 가능함을 간이 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

## 2. 음질 평가 지수 및 기여도 분석법

### 2.1 Zwicker 음질 지수<sup>1)</sup>

본 논문에서는 음질 평가 방법으로 Zwicker 음질 지수를 활용하였다. 음질 지수로 Loudness, Sharpness, Fluctuation Strength, Roughness등이 있으며, 각각 음의 크기, 날카로움, 변동강도, 거칠기를 나타낸다.

Zwicker 음질 지수는 임계대역률(Critical band rate)을 사용하는데, 가청 주파수 대역(20~20kHz)에서 노이즈에 의한 마스킹 영향을 받지 않는 최소 대역폭으로 24개의 임계대역을 만든 것으로 다음과 같은 식(1)로 나타낸다.

$$\frac{z}{Bark} = 13 \tan^{-1} \left( \frac{0.76f}{kHz} \right) + 3.5 \tan^{-1} \left( \frac{0.76f}{kHz} \right)^2 \quad (1)$$

Loudness는 인간이 느끼는 소리의 크기를 청각의 능력에 따른 음의 크기로 표현한 것이다. 가청 주파수 대역 중 인간이 들을수 있는 음의 크기는 주파수별로 임계치가 다르며, 주파수별로 실제 음의 크기와 인간이 느끼는 상대적인 음의 크기도 다르다. 주파수에 관계없이 인간이 느끼는 음의 크기를 phon이라 정의하며, 1kHz의 40 dB 음의 크기를 1 sone이라 정의한다. 그 상관관계는 식(2)와 같다.

$$S_t = 2^{\frac{(P-40)}{10}} \text{ or } P = 40 + 10 \log_2 S_t \quad (2)$$

임계대역별 Loudness를 Specific Loudness,  $N'$ , 라 하며 전체 Loudness값,  $N$ , 을 계산하기 위해서 식(3)와 같이 적분하여 구한다.

$$N = \int_0^{24Bark} N' dz \quad (3)$$

Sharpness는 심리적으로 더 거슬리는 고주파 영역에 가중치를 두어 전체 음의 크기 중 고주파 소음이 차지하는 비중을 표현한 날카로움의 정량적 지수이다. 3kHz이상, 16 Bark 이상 영역부터 24 Bark까지 가중치를 점진적으로(1~4) 부여하며, 식(4)와 같다.  $g(z)$ 는 가중치 함수이다.

$$s = 0.11 \frac{\int_0^{24Bark} N' g(z) z dz}{\int_0^{24Bark} N' dz} acum \quad (4)$$

Fluctuation Strength와 Roughness는 Loudness, Sharpness와 달리 시간에 따른 진폭 변화에 대한 음

의 흔들림을 평가하는 지표로, 이 2가지 지표의 구분은 변조 주파수(Modulation frequency)에 따라 나누어진다. Zwicker 이론에 의하면 변조 주파수 20Hz 이하의 소리와 그 이상의 소리는 다른 청감을 가지고 있다. 변조 주파수 20Hz 이하의 경우 소리의 흔들림을 느낄 수 있고, 그 이상은 소리의 거친 느낌을 준다. Fluctuation Strength는 변조 주파수가 4Hz일 때 최대가 되며, 식(5)와 같다.

$$F = \frac{0.008 \int_0^{24Bark} \left(\frac{\Delta L}{dB} Bark\right) dz}{\left(\frac{f_{mod}}{4Hz}\right) + \left(\frac{4Hz}{f_{mod}}\right)} vacil \quad (5)$$

Roughness는 변조 주파수가 70Hz일 때 최대가 되며, 식(6)과 같다.

$$R = 0.3 \frac{f_{mod}}{kHz} \int_0^{24Bark} \frac{\Delta L_E(z) dz}{\frac{dB}{Bark}} asper \quad (6)$$

## 2.2 전달경로 분석법 (OTPA)<sup>4)</sup>

각 입력의 1/3 Octave Band에서의 기여도 분석을 위해 본 논문에서는 Operational Transfer Path Analysis(OTPA)를 활용하였고, 이는 4장에서 언급할 Loudness, Sharpness의 기여도 분석을 위한 하나의 과정이다. 입력과 출력의 측정 결과들로 구한 전달함수를 이용한 분석법으로 과거 TPA 분석법처럼 전달경로마다 중간 과정을 별도로 측정할 필요가 없어 시험 시간 및 데이터 분석 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다. 다만, 결과에 대한 신뢰도 측면에서는 전달함수에 의한 계산 결과이므로 TPA보다는 불리할 수 있고, 데이터에 오류가 있을 시에도 실제 측정된 출력결과와 전달 함수에 의한 합성결과가 유사하게 나와 잘못된 결론을 내릴 수도 있다. 그럼에도 불구하고 빠르고 간단하게 기여도 분석이 가능하므로 유용한 분석법이다.

기본적인 OTPA 시스템 모델은 식(7)과 같다.

$$Y(j\omega) = X(j\omega)H(j\omega) \quad (7)$$

$Y(j\omega)$  : 출력, 운전석 귓전에서의 Sound Pressure

$X(j\omega)$  : 입력, 소음원에서의 Sound Pressure

$H(j\omega)$  : 전달 함수 (Transfer function)

시험 조건별로 출력과 입력을 블록으로 구성할 수 있으며 r개의 조건일 경우 식(8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} y_1^{(1)} & \dots & y_1^{(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_r^{(1)} & \dots & y_r^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & \dots & x_1^{(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_r^{(1)} & \dots & x_r^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{1m} & \dots & H_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

X의 역행렬을 구하면 전달 함수 H를 구할 수 있지만, 대부분의 경우 역행렬이 존재하지 않는 경우가 많다. 이럴 경우 식(9)와 같이 최소자승법에 의한 의사역행렬(pseudo-inverse)을 구해서 계산할 수 있다.

$$H = (X^T X)^{-1} X^T Y = X + Y \quad (9)$$

입력(X)의 의사역행렬(pseudo-inverse)

최소자승법을 풀기 위해 조건수 r이 측정 DOF, m보다 커야 한다. ( $r > m$ )

입력간에 cross-talk 성분 및 노이즈를 제거 하기 위해 SVD (Singular Value Decomposition)과 PCA (Principal Component Analysis) 기법을 사용한다.

이렇게 구해진 전달함수를 다시 입력 값에 곱하면 식(10)과 같이 출력의 합성 결과를 얻을 수 있다.

$$Y_s(j\omega) = X(j\omega)\tilde{H}(j\omega) \quad (10)$$

여기서 각 입력(소음원)들에 전달 함수를 곱한 값이 곧 기여도 값이 되고, 기여도에 따라 합산된 값이 최종 출력값이 된다. 4장에서는 이 기여도 값을 출력 값 대비 백분율로 환산한 기여율(%)을 사용했다.

## 3. 주관적 평가와 음질지수의 상관관계 분석제어기 설계

### 3.1 실험 준비 및 방법

음질의 주관적 평가와 음질 지수의 상관관계 분석을 위해 Blind Test를 Table 1과 같이 6개 국가(지역)의 중장비 업계 종사자들을 대상으로 실시하였다.

Table 1 The number of country-specific experiment

Korea	China	USA	Belgium	Latin America	Southeast Asia	Total
8	18	5	8	3	3	45

그리고, 각기 다른 톤급, 엔진, Cabin Type 등을 고려한 5대의 엔진식 지게차 모델로 엔진 RPM 조건 및 Cabin Door 조건을 다르게 하여 14가지의 샘플 음원을 녹음 및 음질 지수 계산을 Table 2와 같이 준비

하였다. 녹음된 WAV파일 형식의 샘플 음원을 평가지와 각국의 피실험자들에게 보내어 14가지 음원에 대한 음질 지수를 모르는 상태에서 0(매우 나쁨)~10점(매우 좋음)으로 샘플별로 상대평가를 실시하였다.

Table 2 Experimental sample sound quality index

No	model	Loud-ness	Sharp-ness	Fluctuation Strength	Rough-ness
1	A	24.4	2.26	0.269	0.474
2	B	29.3	2.52	0.169	0.402
3	C	37.9	2.01	0.237	0.413
4	C	37.6	2.36	0.120	0.330
5	D	45.9	1.90	0.176	0.289
6	D	27.5	1.97	0.203	0.321
7	E	20.9	1.45	0.170	0.220
8	A	57.4	3.05	0.095	0.370
9	B	60.6	3.14	0.094	0.351
10	C	79.7	3.69	0.096	0.360
11	C	87.8	2.98	0.101	0.329
12	D	75.9	3.43	0.137	0.327
13	D	70.4	3.07	0.136	0.266
14	E	50.9	2.31	0.130	0.310

### 3.2 실험 결과 분석

Blind Test를 통한 개인별 주관적 평가 결과를 Table 3과 같이 미니탭 상용 프로그램을 이용하여 통계분석 및 Ryan-Joiner 정규성 검정을 실시하였다. P-value가 0.05이하인 결과는 귀무가설을 기각하여 정규분포를 따르지 않는다고 판단되어 상관관계 분석시 제외시켰다. 그외, 국가별로도 같은 방법으로 통계 분석 및 정규성 검정을 실시하였다.

Table 3 Statistical analysis of the results of the subjective evaluation of the entire sample

N	No	Sample mean	Median	Variance	Standard deviation	p-value
45	1	6.37	7.00	7.19	2.68	>0.10
	2	6.35	7.00	6.14	2.47	>0.10
	3	5.08	5.00	6.26	2.50	>0.10
	4	3.24	3.00	5.05	2.24	>0.10
	5	4.86	5.00	5.89	2.42	>0.10
	6	7.93	8.00	2.60	1.61	>0.10
	7	8.17	10.00	8.64	2.94	<0.01
	8	4.00	4.00	5.36	2.31	>0.10
	9	4.35	4.00	7.32	2.70	>0.10
	10	1.55	1.00	2.57	1.60	>0.10
	11	3.11	3.00	6.28	2.50	0.04
	12	0.97	0.00	2.52	1.58	>0.10
	13	4.60	4.00	6.60	2.57	>0.10
	14	8.40	9.00	4.24	2.06	0.03

정규분포 모집단으로 가정하여 정규성을 가진 결과 값들의 중앙값을 사용하여 샘플들의 음질 지수와 피어슨 상관관계 분석을 실시하였다. 상관관계 분석은 SPSS 프로그램을 이용하였고, Table 4와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

전체 표본에 대한 결과로 Loudness는 -0.857로 매우 높은 음의 상관관계를 보였으며, Sharpness도 -0.757로 다음으로 높은 음의 상관관계를 보였다. 반면, Fluctuation Strength와 Roughness는 유의 확률이 0.05보다 많이 높아 귀무가설을 기각할 수 없으므로 본 실험결과로는 상관관계를 증명하기 어려운 것으로 판단된다. 동남아와 중남미 지역은 전체 표본에는 포함시켰으나, 표본수 부족 및 비정규성의 이유로 국가별(지역별) 분석은 별도로 실시하지 않았다.

Table 4 Correlation of the subjective evaluation and quality index of country

Diagnosis	Item	Korea	China	USA	Belgium	Total
Loud Ness	Pearson Correlation coefficient	-.648*	-.206	-.731**	-.564	-.857**
	Significance level (Both sides)	.043	.625	.007	.090	.001
Sharp Ness	Pearson Correlation coefficient	-.841**	.179	-.683*	-.479	-.757**
	Significance level (Both sides)	.002	.671	.014	.162	.007
Fluctuation Strength	Pearson Correlation coefficient	.529	.180	.512	.382	.652
	Significance level (Both sides)	.116	.670	.089	.276	.330
Roughness	Pearson Correlation coefficient	.085	.182	.250	.084	.328
	Significance level (Both sides)	.815	.666	.434	.817	.324

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (Both).

\* . Correlation is significant at the 0.05 level (Both).

미국과 벨기에는 Loudness-Sharpness순으로 상관관계가 높았고, 한국은 Sharpness-Loudness순으로 상관관계가 높은 결과를 보였다. 즉, 한국인은 시끄러운 소리보다 날카로운 소리를 더 싫어하는 경향을 보였다. 중국은 상대적으로 많은 표본 수에도 불가하고 본 실험으로는 상관관계 증명이 어렵거나, 개인별 취향차이가 큰 것으로 판단된다.

Table 5 Compare trends of the country through the t-test

Division	Korea	China	USA	Belgium	Total
Korea	1	0.269	0.517	0.382	0.457
China	0.269	1	0.456	0.534	0.350
USA	0.517	0.456	1	0.616	0.608
Belgium	0.382	0.534	0.616	1	0.604
Total	0.457	0.350	0.608	0.604	1

국가별로 두 집단간의 성향 차이를 t-검정을 통해서 확인해 보았다. 14개의 항목의 유의수준 (p-value)의 값들을 평균한 값을 대표값으로 하여 국가간 음질 선호도 혹은 성향 차이를 Table 5와 같이 알아 보았다. p-value가 0.05이하 이면 귀무가설을 기각하고, 국가간의 차이가 있다는 의미가 되므로 평균값이 1에 가까울수록 귀무가설에 따라 국가간의 차이가 없다는 의미로 볼 수 있다. 결과에서 미국과 벨기에가 비슷한 성향을 보이고 전체 집단과도 유사성이 있다. 한국은 미국과 유사성이 있으나, 전체 집단과는 유사성이 상대적으로 낮다.

본 실험에서 국가별로 조금씩 다른 경향을 보이긴 하지만, 전체 표본 분석 결과 Loudness, Sharpness 순으로 주관적 음질 평가와 상관 관계가 높은 것으로 사료된다.

#### 4. OTPA를 이용한 음질 기여도 분석

##### 4.1 실험 및 음질 기여도 분석 과정

Loudness와 Sharpness가 음질 평가에서 매우 중요한 지수임을 3장에서 확인하였다. 음질 기여도 분석을 위하여 소형 엔진식 지게차를 대상 장비로 준비하고, Figure 1과 같은 위치에 각각 소음을 측정하였다.



Fig. 1 Measurement position of the noise

운전석 소음(출력)을 제외한 소음 기여도가 높을 것으로 추정되는 엔진, 팬, 펌프, 밧손, 액슬, 흡기구, 배기구등의 7개의 소음원(입력)을 선정하였다. 실험은 무향실이 아닌 암소음 48±2 dB인 야외공간에서 실시하였다.

1/3 Octave SPL의 OTPA 분석을 위해 Idle 상태에서 800 ~ 2500 rpm 까지 입력과 출력의 1/3 Octave SPL 데이터를 취득하였다.

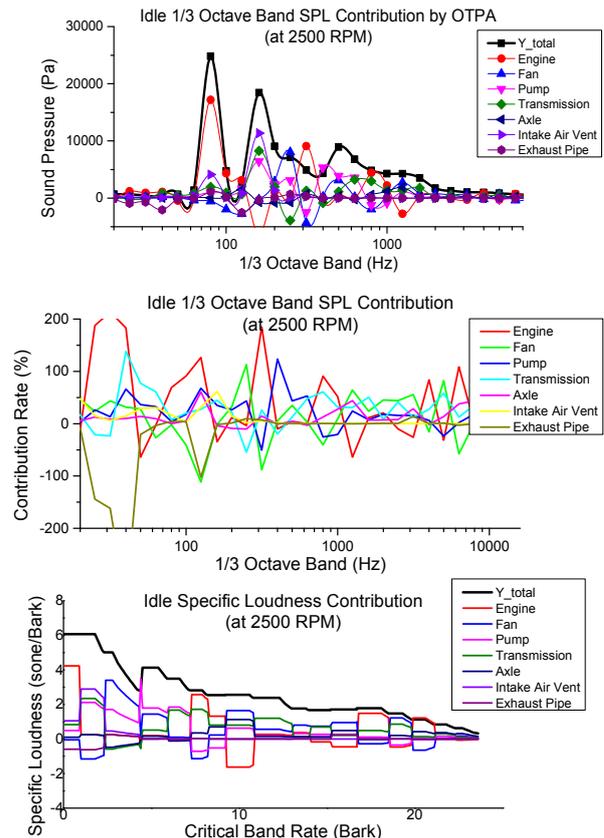


Fig. 2 Analysis process of the contribution of Specific Loudness utilizing a contribution of 1/3 Octave SPL

취득한 입력과 출력데이터를 행렬로 구성하여 매트랩 프로그램으로 OPA 분석을 실시하였고, Figure 2와 같이 2500 rpm에서의 Specific Loudness 기여도 분석 과정을 전개하였다. 먼저, OPA 분석을 통한 1/3 Octave Band SPL 기여도를 구하고, 각 기여도 값을 백분율(%)로 변환하였다. 이는 Specific Loudness로 전체 Loudness를 계산하는 DIN 45631의 계산의 기초 값이 1/3 Octave Band SPL 값인 점에 착안하여, 해당 Bark별 Specific Loudness는 1/3 Octave Band에서의 기여율(%)을 그대로 반영한다는 가정에 기반한 과정이다. 그리고, 1/3 Octave Band에서의 출력 SPL로 일반적인 Bark별 Specific Loudness 출력값

( $Y_{total}$ )을 미리 구한다. 본 연구에서는 LabVIEW의 Loudness 계산 모듈을 활용하였다.

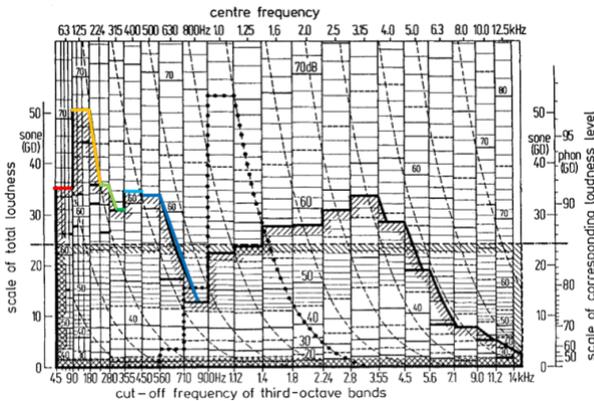


Fig. 3 Masking application example of Specific Loudness using a 1/3 Octave SPL and chart

이렇게 구해진 출력 Specific Loudness 값에 Figure 3 과 같은 Loudness 계산과정 중 하나인 Spectral Masking 을 반영하여 출력값에 1/3 Octave Band 기여율을 곱해 주면 Figure 2 마지막 그래프와 같이 Bark별 Specific Loudness의 기여도를 Figure 4와 같이 구할 수 있다.

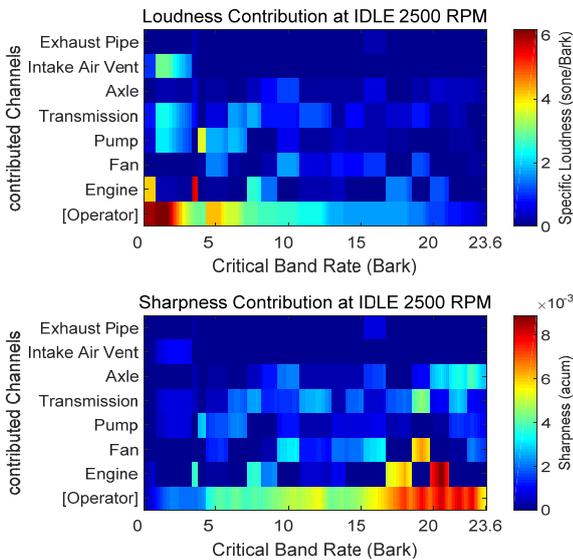


Fig. 4 Result of Loudness and Sharpness contribution analysis of Bark

입력별 Specific Loudness 기여도 결과로 동일하게 전체 Loudness 및 Sharpness를 식(3), (4)와 같이 계산 하면, 전체 Bark 영역에 대한 각 입력별 기여도를 Figure 5와 같이 구할 수 있다.

기여도가 높은 소음원(입력)을 저감하면 효과가 더 클 것이라고 판단된다.

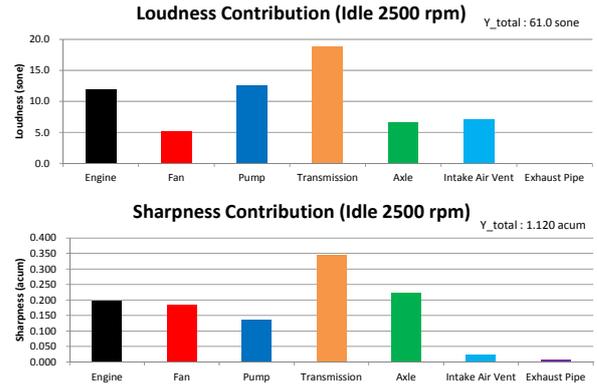


Fig. 5 Contribution of Loudness and Sharpness (2500 rpm)

#### 4.2 분석 결과 검증

Loudness 및 Sharpness의 기여도 분석 결과에 대하여 간단한 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 같은 장비에서 각 소음원(입력)의 SPL을 각 10dB씩 저감했을 때 전체 Loudness 및 Sharpness가 얼마나 저감되는지를 프로그램상으로 시뮬레이션 하였다. 먼저, 전달 경로의 변화가 없으므로 기초 데이터를 사용해 OTPA로 분석한 전달함수는 시뮬레이션간 모두 동일하다고 가정했다.

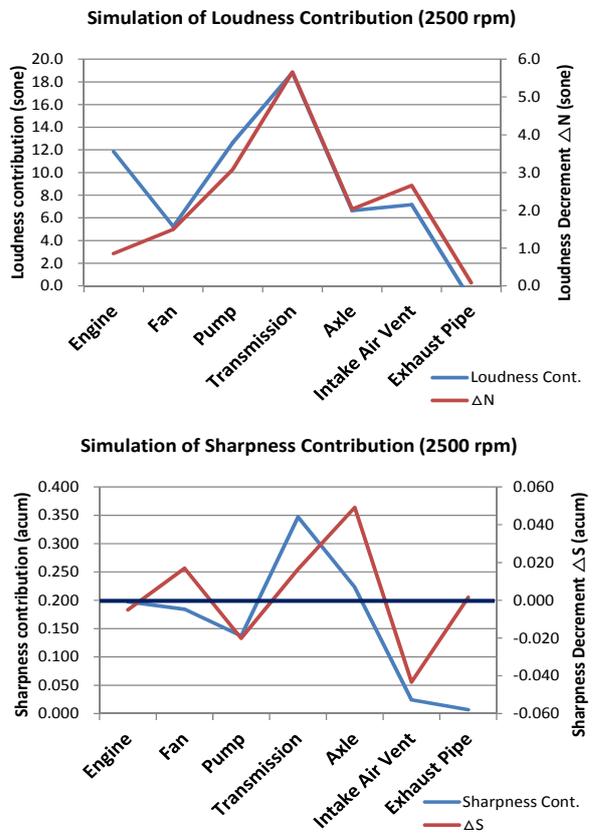


Fig. 6 Comparing the analytical results of the simulation and sound quality contribution

시뮬레이션 방법은 최초 구해진 전달함수를 그대로 두고 소음원(입력)별로 하나씩 1/3 Octave SPL 전 주파수영역에서 기초 데이터 값을 10dB씩 감산하여 가상으로 각 소음원에서 10dB씩 저감했다. 그리고, 가공된 데이터를 포함하여 전달함수를 이용한 가상의 출력(Operator 위치)의 1/3 Octave SPL을 도출한다. 이 값으로 전체 Loudness 및 Sharpness를 계산하여 이때 저감된 폭이 앞서 분석한 Loudness 및 Sharpness 기여도와 비례하는지 비교하였다.

Figure 6과 같이 Loudness 저감량은 분석된 기여도 결과와 비례함을 확인할 수 있다. 다만, 엔진의 경우 기여도만큼 저감 효과가 크지 않은데 엔진 소음에 의해 마스킹 되어 있던 Fan 소음이 상대적으로 크게 부각되어 저감 효과가 적은 것으로 판단되나 추가적인 연구가 필요하다. 한편, Sharpness는 Specific Loudness뿐만 아니라, 전체 Loudness 값에도 영향을 받기 때문에 기여도 분석은 정확하나, 개선 후 전체 Loudness가 큰 폭으로 줄어든다면 오히려, Sharpness는 상승할 수 있음을 확인하였다. 그러므로, Loudness 기여도가 낮고, Sharpness 기여도가 높을 시 개선 효과가 클 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 Blind Test를 통하여 음질의 주관적 평가와 Zwicker 음질지수의 상관관계를 분석하였고, 전체적으로 Loudness, Sharpness 순으로 주관적 느낌과 상관관계가 높다는 점과 국가별로도 성향차이가 있음을 확인하였다. 그리고, OPA 분석법과 DIN 45631의 Specific Loudness 계산법을 활용하여 중요한 음질지수인 Loudness, Sharpness의 기여도 분석 방법을 찾아내고, 간이 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 예측을 벗어나는 부분도 있지만, 대부분이 기여도와 저감량면에서 비례하는 모습을 보였다. 다만, Sharpness는 전체 Loudness 변화에 영향을 받으므로, Loudness 기여도를 함께 고려해야 기여도를 이용한 개선시 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 즉, Loudness 기여도는 낮으나, Sharpness 기여도가 높다면, 개선효과가 클 것이다.

음질 개선 측면에서 Loudness, Sharpness를 저감하기 위해 본 연구에서 제시한 방법으로 기여도 분석이 가능하고, 이 결과를 잘 활용한다면, 효율적인 음질 개선이 가능할 것으로 기대된다.

### References

- 1) H. Fastl and E. Zwicker, Psychoacoustics: facts and models 3rd ed., Springer, New York, 2007.
- 2) S. Kuwano, S. Namba, H. Fastl, A. Schick, "Evaluation of the impression of danger signals - comparison between Japanese and German subjects.", In: A.Schick, M. Matte (eds) Contributions to Psychological Acoustics, BIS, Oldenburg, pp 115~128, 1997.
- 3) DIN 45631, Calculation of loudness level and loudness from the sound spectrum - Zwicker method, Deutsches Institut Fur Normung E.V., 1991.
- 4) Noumura, Kousuke, and J. Yoshida, "Method of transfer path analysis for vehicle interior sound with no excitation experiment", Vol.31, FISITA, 2006.
- 5) KS I ISO 532, "Acoustics-Method for calculating loudness level", Korean Agency for Technology and Standards, 2014.
- 6) F. Hugo, "Psychoacoustic basis of sound quality evaluation and sound engineering", International Congress on Sound and Vibration 13, Vienna, 2006.
- 7) J.S. Bendat, "System Identification from multiple input/output data", Journal of Sound and Vibration, Vol, 49, No.3, pp. 293~308, 1976.
- 8) A. M. R. Ribeiro, J. M. M. Silva and N. M. M. Maia, "On the generalization of the transmissibility concept", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.24, No.1, pp 29~35, 2000.
- 9) D. de Klerk, A. Ossipov, "Operational Transfer Path Analysis: Theory, Guidelines and Tire Noise Application", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.24, No.7, pp 1950~1962, 2010.
- 10) J. Putner, H. Fastl, M. Lohrmann, A. Kaltenhauser, F. Ullrich, "Operational transfer path analysis predicting contributions to the vehicle interior noise for different excitations from the same sound source", International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Inter-Noise, Vol.41, p 2, 2012.
- 11) Noise, Vibration Handbook, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 1995.
- 12) Mihkel Toome, Operational transfer path analysis: A study of source contribution predictions at low frequency., Chalmers University of Technology, Göteborg, 2012.