

# OTPA방법을 이용한 철도차량 실내 소음 기여도 분석 연구

## A Study on Interior Noise Contribution Analysis of Trains based on OTPA Method

정재덕\*·홍석윤†·송지훈\*\*·권현웅\*\*\*·노희민\*\*\*\*·김준곤\*\*\*\*  
Jae-Deok Jung, Suk-Yoon Hong, Jee-Hun Song, Hyun-Woung Kwon,  
Hee-Min Noh and Jun-Kon Kim

(Received December 14, 2015 ; Revised February 1, 2015 ; Accepted November 27, 2015)

**Key Words** : OTPA(운행중전달경로분석법), Structure-borne Noise(구조전달소음), Air-borne Noise(공기전달 소음), Interior Noise(실내 소음)

### ABSTRACT

The sensitivity of interior noise that the passengers perceive is comparatively high in the train, and structure-borne and air-borne types of noises come into the train. In this paper, to analyze contributions of these noise sources operational transfer path analysis(OTPA) is used. OTPA has some advantages of executing the contribution rates of several sources simultaneously, and in this work, 29 points are measured while running. Transfer functions between reference measurement points and response measurement points are calculated by the singular value decomposition(SVD) and Principal component analysis(PCA) method, and the frequency characteristics of the noise source are successfully derived. Also the interior noise is predicted and compared with measurement data to show the reliability.

### 기호 설명

$f(j\omega)$  : 힘  
 $H(j\omega)$  : 전달함수  
 $\tilde{H}(j\omega)$  : 특이값 분해와 주성분 분석이 완료된 전달함수  
 $p(j\omega)$  : 음압

$\Sigma$  : 특이값으로 구성된 대각행렬  
 $U$  : 유니터리 행렬  
 $u(j\omega)$  : 변위  
 $V^T$  : 유니터리 행렬  $V$ 의 전치행렬  
 $X(j\omega)$  : 소음점에서 측정된 데이터  
 $X^+$  : 의사역행렬  
 $Y(j\omega)$  : 수음점에서 측정된 데이터  
 $Z$  : 주성분 스코어  
 $Y_s(j\omega)$  : 수음점의 응답합성 행렬

† Corresponding Author ; Member, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University  
E-mail: syh@snu.ac.kr

\* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

\*\* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University

\*\*\* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Koje College

\*\*\*\* Korea Railroad Research Institute

‡ Recommended by Editor Hung Soo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

## 1. 서 론

철도차량의 속도가 점점 증가함에 따라 차량실내 소음이 중요해지고 있다. 철도차량 실내의 소음을 효과적으로 저감하기 위해 우선 실제 주행 중인 차량의 실내 소음 특성을 도출하는 것이 필요하다. 철도차량 운행에 있어 주요 소음원으로 차량 휠, 차량 전동기 등에 의해 발생하는 구조 소음과 난류에 의해 발생하는 유동 소음이 있다. 이러한 각 소음원들의 크기와 특성을 파악하기 위해 전달경로분석법(transfer path analysis, TPA)을 사용하였다.

소음원들은 각각의 전달경로를 통해 실내로 소음이 유입되며, 이러한 소음원들이 실내 소음에 미치는 영향을 연구하는 방법이 전달경로분석법이다. 전통적인 전달경로분석법은 각 전달경로 별로 분리되어 있어야 하고 인공적인 가진력을 통해 한 번에 하나의 경로에 대해서 실험을 반복하기 때문에 많은 시간이 소요된다<sup>(1)</sup>.

이러한 TPA의 단점을 개선하기 위해 운행 중 여러 소음원의 기여도를 한 번에 도출할 수 있는 operational transfer path analysis(OTPA)가 개발되었다. Janssens<sup>(2)</sup>와 Thite<sup>(3)</sup>에 의해 전달률과 주성분분석을 사용하여 전달경로분석 연구가 진행됐고, 혼다 R&D 센터<sup>(4)</sup>에서 OTPA가 시작됐다. Klerk<sup>(5)</sup>는 타이어 소음 기여도 분석을 OTPA를 통해서 분석하였고, Jakob<sup>(6)</sup>은 차량의 실내 소음에 대한 엔진 및 구동축 각각의 소음 기여도를 분석하였다. 또한, OTPA는 자동차뿐만 아니라 철도 분야에서도 사용되고 있다. Alex<sup>(7)</sup>는 RBe4/8 철도차량에 대해서 주행 시 진동 및 소음분석을 하였다.

이 논문에서는 국내에서 처음으로 OTPA방법을 통해 실제 운행 중인 철도차량 각 부위에 서피스 마이크로폰(surface microphone)과 가속도센서(acceleration sensor)를 부착하여 관심주파수 전체에서의 기여도를 산출하였다. 이러한 과정을 통해 최종 계산된 수음점의 값과 계측 데이터를 비교함으로써 계산결과와 신뢰도를 확인하였다.

## 2. OTPA 이론

OTPA는 소음점(reference measurement point)과

수음점(response measurement point)에서의 측정된 데이터를 이용하여 특이값분해(singular value decomposition, SVD)와 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 시행한다<sup>(8)</sup>.

소음점과 수음점의 관계가 선형(linear)이라고 가정하면 수음점의 압력은 다음과 같다.

$$Y(j\omega) = X(j\omega)H(j\omega) \tag{1}$$

여기서,  $Y(j\omega)$ 는 수음점에서 측정된 데이터이고  $X(j\omega)$ 는 소음점에서 측정된 데이터,  $H(j\omega)$ 는 전달함수(transfer function)이다. 그리고 수음점과 소음점은 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$Y = \begin{bmatrix} u_y \\ f_y \\ p_y \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} u_x \\ f_x \\ p_x \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서,  $u(j\omega)$ 는 변위,  $f(j\omega)$ 는 힘,  $p(j\omega)$ 은압이다.

TPA뿐만 아니라 OTPA와 같은 전달행렬법의 핵심은 전달함수의 도출이다.  $Y(j\omega)$ 와  $X(j\omega)$ 를 알고 있기 때문에 두 행렬이 모두 정방행렬일 경우 다음 식과 같다.

$$H = X^{-1}Y \tag{3}$$

그러나 대부분의 경우  $X$ 가 정방행렬이 아니기 때문에 의사역행렬(pseudo-inverse)을 이용하여 전달함수를 도출한다.

$$H = (X^T X)^{-1} X^T Y = X^+ Y \tag{4}$$

여기서,  $X^+ = (X^T X)^{-1} X^T$ 는 의사역행렬이다.

의사역행렬을 산출할 때 측정 시 주변소음으로 인해 상당한 오차를 포함하기 쉽다. 그러므로 의사역행렬을 도출하기 전에 특이값분해와 주성분분석을 시행하게 된다.

### 2.1 특이값분해

특이값분해의 사용목적은 첫 번째로 앞에서 언급한 것처럼 의사역행렬을 구하기 위해서이다. 두 번째로는 소음원간의 간섭현상(cross-talk)과 주변 소음의 영향을 제거하기 위해 사용된다. 소음점

(X)의 데이터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X = U\Sigma V^T \tag{5}$$

여기서 U는 유니터리(unitary) 행렬이고, Σ는 특이값(singular values)으로 구성된 대각행렬(diagonal matrix)이다. 그리고 V<sup>T</sup>는 유니터리 행렬 V의 전치행렬이다. U, Σ, V<sup>T</sup>는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$X^T X = V\Sigma^T U^T U\Sigma V^T = V(\Sigma^T \Sigma)V^T \tag{6}$$

$$X X^T = U\Sigma V^T V\Sigma^T U^T = U(\Sigma \Sigma^T)U^T \tag{7}$$

식 (6)의 경우 V는 고유벡터(eigenvector) 행렬이고 Σ<sup>T</sup>Σ는 X<sup>T</sup>X의 고윳값(eigenvalue)으로 이루어진 정방 대각행렬이다. 식 (7)의 경우 U는 고유벡터 행렬이고 ΣΣ<sup>T</sup>는 X X<sup>T</sup>의 고윳값으로 이루어진 정방 대각행렬이다.

의사역행렬을 특이값분해로 표현하면 다음과 같다.

$$X^+ = V\Sigma^{-1}U^T \tag{8}$$

식 (8)을 식 (4)에 대입하면 다음 식과 같이 전달 함수를 도출할 수 있다.

$$\tilde{H} = V\Sigma^{-1}U^T Y \tag{9}$$

그러나 아직 소음원간의 간섭영향과 주변소음에 의한 영향은 아직 제거되지 않은 상태이므로 특이값분해 이후 주성분 분석을 시행하게 된다.

### 2.2 주성분 분석

주변소음과 같이 계산 시 악영향을 주는 성분들을 제거하기 위해서 주성분 분석이 시행된다.

$$Z = X V = U\Sigma \tag{10}$$

여기서, Z는 주성분 스코어(scores) 행렬이다. 이 단계에서 각각의 주성분 스코어를 전체 주성분 스코어의 합으로 나누어 기여도(contribution)를 평가하여 상대적으로 낮은 주성분을 0으로 바꾸어 간섭현상과 주변소음의 영향을 낮춘다.

### 2.3 응답 합성

간섭현상과 주변소음이 제거된 전달함수를 사용하여 수음점에서의 응답을 구할 수 있다.

$$Y_s(j\omega) = X(j\omega) \cdot \tilde{H}(j\omega) \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} y_1^{(1)} & \dots & y_1^{(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_r^{(1)} & \dots & y_r^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & \dots & x_1^{(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_r^{(1)} & \dots & x_r^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1m} & \dots & h_{nm} \end{bmatrix} \tag{12}$$

여기서, Y<sub>s</sub>(jω)는 주파수영역에서 수음점의 응답합성 행렬이고 X(jω)는 주파수영역에서 소음점 계측 데이터 행렬이다. 그리고 H̃(jω)는 주파수영역에서 특이값분해와 주성분 분석이 완료된 전달함수를 나타낸다. 그리고 식 (12)의 x, y, h는 각각 Y<sub>s</sub>(jω), X(jω), H̃(jω)의 성분을 나타낸다. m, n은 수음점과 소음점의 개수를 나타내고, r은 측정블럭(measurement blocks)을 나타낸다.

### 3. 철도차량 주행 데이터 계측

이 연구는 부산을 출발해 신경주 방향으로 운행하는 열차에 대해 계측을 실시하고 이를 분석하였다.

수음점의 위치는 Fig. 1과 같이 승객의자 높이로 설정하였다. 소음점의 측정포인트는 29개이며, 5개 마이크로폰과 24개의 가속도 센서로 구성되어있다. Table 1은 수음점을 제외한 각 소음점들의 위치와 사용된 센서를 나타내고 Fig. 2는 주요 소음원들에 가속도센서와 마이크로폰이 설치된 장면이다.



Fig. 1 Location of response point

**Table 1** Measuring position of each sensor

Sensor	Measurement position	Sensor	Measurement position
Surface microphone	Outdoor window noise	Acceleration sensor	Windows side 1
Surface microphone	Outdoor ceiling noise	Acceleration sensor	Windows side 2
Microphone	Connection noise	Acceleration sensor	Window lower side 1
Microphone	Vehicle wheel noise	Acceleration sensor	Window lower side 2
Surface microphone	Traction motor	Acceleration sensor	Interior side 1
Acceleration sensor	Center pivot vertical	Acceleration sensor	Interior side 2
Acceleration sensor	Center pivot horizontal	Acceleration sensor	Floor section 1 vertical
Acceleration sensor	Bogie vertical	Acceleration sensor	Floor section 1 horizontal
Acceleration sensor	Bogie horizontal	Acceleration sensor	Floor section 2 vertical
Acceleration sensor	Traction motor vertical	Acceleration sensor	Floor section 2 horizontal
Acceleration sensor	Traction motor horizontal	Acceleration sensor	Floor section at the pivot vertical
Acceleration sensor	Vertical damper vertical	Acceleration sensor	Floor section at the pivot horizontal
Acceleration sensor	Vertical damper horizontal	Acceleration sensor	Floor section at the damper vertical
Acceleration sensor	Center pivot vertical	Acceleration sensor	Floor section at the damper horizontal
Acceleration sensor	Center pivot horizontal		



(a) Outdoor ceiling noise



(b) Vehicle wheel noise



(c) Traction motor vertical and horizontal vibrations



(d) Bogie vertical and horizontal vibrations

**Fig. 2** Location of each reference measurement point

### 4. 철도차량 기여도 분석

2장의 이론을 바탕으로 수음점의 소음레벨계산과 그에 대한 각 소음점들의 기여도를 산출하였다.

Figs. 3~7에서 볼 수 있듯이 주파수에 따른 각 소음원 기여도를 알 수 있다. 29개 채널에 대해서 종합적으로 분석을 하였다.

실외천장소음이 가장 큰 기여도를 나타냈고 그 다음으로 차량 휠 소음, 실외유리창 소음, 견인전동기 좌우, 견인전동기 상하, 견인전동기 소음, 대차좌우, 대차상하, 차량 연결부 소음, 유리창측면1, 유리창측면2, 센터피봇 상하, 센터피봇 좌우, 유리창쪽 하부측면2, 유리창쪽 하부측면1, 수직댐퍼 상하, 수직댐퍼위치 차체바닥 상하, 차축좌우, 피봇진동위치 차체바닥 상하, 바닥진동2 상하, 차축좌우, 바닥진동1 상하, 측면2, 측면1, 피봇진동위치 차체바닥 좌우, 수직댐퍼위치 차체바닥 좌우, 바닥진동2 좌우, 바닥진동1 좌우, 측면2 순으로 나타났다. Fig. 3을 보면 315 Hz 이하에서는 실외천장소음이 더 높은 기여도를 나타냈고 400 Hz 이상에서는 차량 휠소음의 기여도가 높다는 것을 알 수 있다. 실외 유리창 소음의 경우 같은 난류소음이지만 실외천장소음보다 낮은 기여도를 기록했다. 실외 유리창측이 상대적으로 천장에 비해서 형상이 단순하여 난류가 덜 발생하는 것으로 생각된다. 견인전동기의 경우 상하방향과 좌우방향 모두 400 Hz와 800 Hz에서 비슷한 수치의 상대적으로 높은 기여도를 기록하는 것으로 볼 때

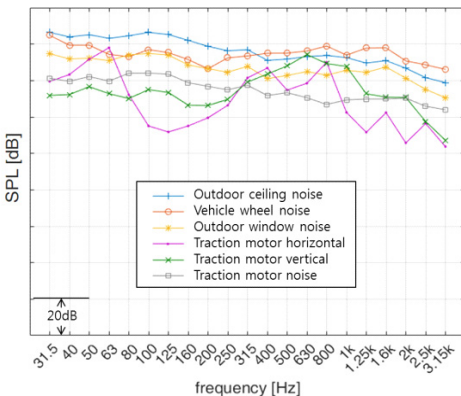


Fig. 3 Interior noise contribution of each reference measurement point ( I )

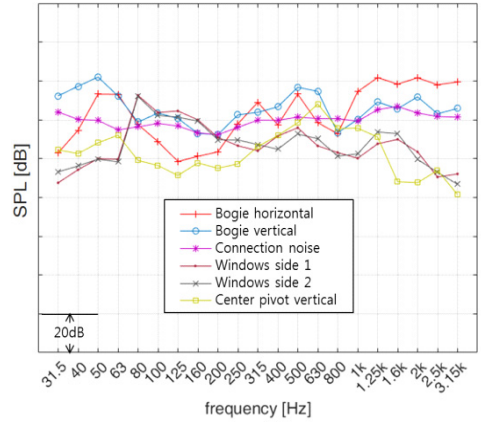


Fig. 4 Interior noise contribution of each reference measurement point ( II )

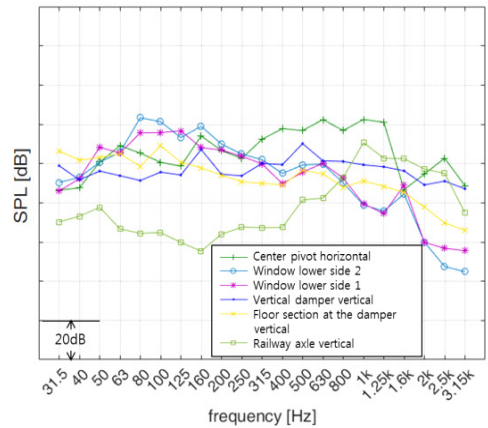


Fig. 5 Interior noise contribution of each reference measurement point ( III )

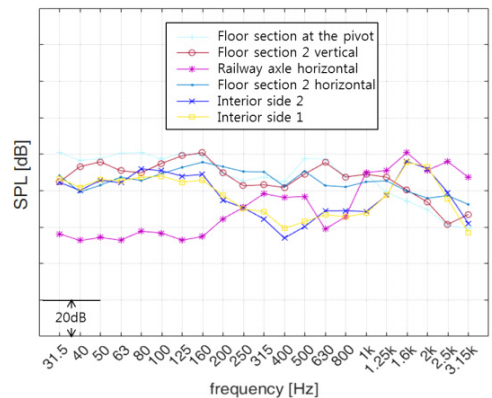


Fig. 6 Interior noise contribution of each reference measurement point ( IV )

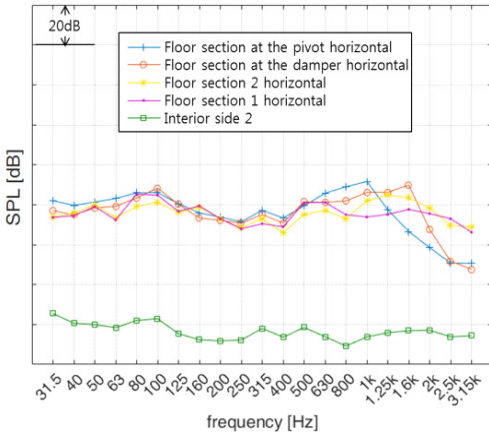


Fig. 7 Interior noise contribution of each reference measurement point (V)

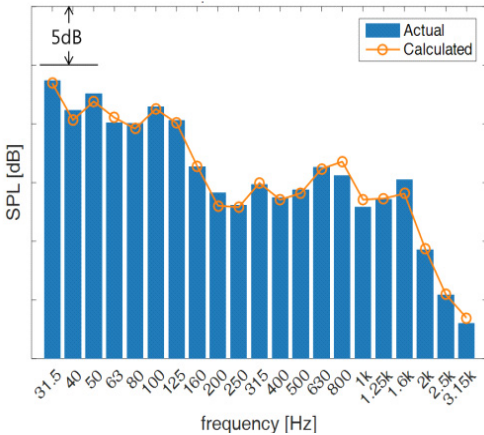


Fig. 8 Comparison of the measuring result and calculated by response synthesis at the response point

이는 견인전동기의 고유특성으로 생각된다. 그리고 Figs. 4~7은 기여도가 높은 순서대로 배치를 하였다.

Fig. 8은 수음점에서의 실제측정값과 응답합성을 통해서 계산된 결과를 비교하였다. 두 결과 차이가 가장 큰 주파수가 800 Hz로 그 차이가 1.19 dB이다. 즉 1.19 dB이내로 31.5 Hz~3015 Hz까지 두 결과가 잘 일치하여 각각의 기여도가 잘 반영됨을 알 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 주행 중 철도차량의 각 소음발생

원들이 실내소음에 미치는 기여도를 분석하였다. 기존의 TPA의 단점을 보완한 방법으로 OPA를 사용하였다. OPA해석 절차에 따라 특이값분해와 주성분분석을 시행하여 전달함수를 도출하였다.

실제 주행 중 총 29개의 소음원이라고 파악되는 곳에 5개 마이크로폰과 24개의 가속도센서를 설치하여 각각의 압력신호와 가속도 신호를 계측하였다. 수음점의 경우 계측결과와 응답합성계산을 통해서 구한 결과가 1.19 dB 이하로 잘 일치했다. 그리고 각 소음기여도의 경우 실외천장소음과 차량 휠소음이 실내에 미치는 기여도가 가장 큰 것으로 나타났다. 특히 315 Hz 이하에서는 실외천장소음이 더 높게 나타났고, 400 Hz 이상에서는 차량 휠소음의 기여도가 높게 나타났다.

주파수에 따른 실내소음 기여도분석을 통해 향후 소음원의 개선연구시 목표(target) 주파수 설정에 유용한 자료로써 활용하고, 이로 인하여 철도차량의 실내소음을 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 한국철도기술연구원의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Kim, J. S., Sin, K. S. et al., 2014, Analysis of the Cause of Hindrance for Ride Quality with OPAX and OPA, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 12, pp. 935~942.
- (2) Janssens, M. H. A., Verheij, J. W. and Thompson, D. J., 1999, The Use of an Equivalent Forces Method for the Experimental Quantification of Structural Sound Transmission, Journal of Sound and Vibration, Vol. 226, No. 2, pp. 305~328.
- (3) Thite, A. N. and Thompson, D. J., 2003, The Quantification of Structure-borne Transmission Paths by Inverse Methods, Part 2: Use of Regularization Techniques, Journal of Sound and Vibration, Vol. 264, No. 2, pp. 433~451.
- (4) Kousuke, N. and Yoshida, J., 2006, Method of

Transfer Path Analysis for Vehicle Interior Sound with No Excitation Experiment, Proc. FISITA.

(5) De Klerk, D. et al., 2009, Application of Operational Transfer Path Analysis on a Classic Car, International Conference on Acoustics, pp. 23~26.

(6) Putner, J. et al., 2012, Operational Transfer Path Analysis Predicting Contributions to the Vehicle Interior Noise for Different Excitations from the Same Sound Source, Proc. Internoise 2012, pp. 2336~2347.

(7) Sievi, A., Frank, S. et al., 2014, Operational Transfer Path Analysis for Validation of the Prediction Models for High-Speed Trains., ICSV 21, pp. 13~17.

(8) Toome, M., 2012, Operational Transfer Path Analysis: A Study of Source Contribution Predictions at Low Frequency, Chalmers University of Technology.



**Suk-Yoon Hong** received a Ph.D degree in Graduate program in Acoustics from Pennsylvania State University, USA in 1992. He worked for Institute for Advanced Engineering, Korea until 1997. He is currently a professor of Dep't of Naval Architecture and Ocean Engineering at Seoul National University, Korea.



**Jae-Deok Jung** received his B.S. degree in Department of Mechanical Engineering from The University of suwon, Korea, in 2009 and his Master's degree in 2011. He is currently a Ph.D. student of Dep't of Naval Architecture and Ocean Engineering at Seoul National University, Korea.