

# 경로 모델에 따른 공기기인 소음 전달 경로 분석법 특성 분석

## The Characteristics of Airborne Noise Transfer Path Analysis Methods according to Path Models

변재환\*·김윤재\* 강연준†·강구태\*\*·권오준\*\*·홍진철\*\* ·

Jae Hwan Byun, Yoon Jae Kim, Yeon June Kang, Koo Tae Kang, O Jun Kwon and Jin Chul Hong

**Key Words :** Transfer Path Analysis (전달 경로 분석법), crosstalk effect (누화 효과), Air-borne noise (공기 기인 소음), Matrix Inversion Method(역행렬법), Pressure transmissibility (음압 전달률)

### ABSTRACT

In this paper, a comparison about two representative Transfer Path Analysis(TPA) methods for air-borne noise based on, matrix inversion method and pressure transmissibility, are presented on the view point of crosstalk effect between sources. In order to assess accuracy of two methods according to path models between virtual airborne noise sources, experiments are made for two cases, weak and strong crosstalk effect condition, by using acrylic vehicle model. Based on this assessment, the paper presents a reasonable application criteria for TPA method according to the circumstances of air-borne noise sources.

### 1. 서 론

전달 경로 분석법(Transfer Path Analysis)은 차량, 선박, 항공기 등을 비롯하여 가전제품에 이르기까지 다양한 분야에 적용되고 있다. 기계 시스템에서 발생하는 소음은 크게 구조기인 소음(Structure-borne noise)과 공기기인 소음(Air-borne noise)으로 구분되며 힘 또는 체적속도로 정의되는 물리적 가진력 및 소음원의 크기를 추정하고 각 가진점 및 소음원과 목표점 사이의 전달 관계를 고려함으로써 각 소음 전달경로의 기여도를 판단하는 것이 전달 경로 분석법의 주된 과정이다.

자동차의 경우 실험적 방법으로 측정 가능한 전달함수와는 달리 시스템 구동 상태에서 구조기인 소음의 가진력 및 공기기인 소음원의 체적속도를 직접적으로 측정하기에 많은 어려움이 따른다<sup>(1)</sup>. 이를 위해 일반적으로 주파수 응답 함수(Frequency Response Function)법이 사용되며, 측정점의 응답을 통해 가진력 및 소음원의 크기를 간접적으로 추정한다. 소음원의 특성에 따라 구조기인 소음의 경우 동장성법, 역행렬법 등의 방법이 주로 사용되며, 공기기인 소음의 경우 격자법, 인텐서티법, 역행렬법 등 다양한 방법이 사용되고 있다. 그러나 각 방법을 정확하게 적용하기 위해

소음원의 전달 특성에 대해서 전달 경로 분석 이전에 정확하게 파악하는 것이 선행되어야 한다.

일반적으로 소음 전달 경로 모델은 두 가지로 구분될 수 있다. 하나는 각 소음 전달 경로가 서로 고립되어 상호간 전혀 영향을 주지 않는 경우로서 차량의 경우, 엔진 마운트와 같이 엔진 구동 중 엔진 측 응답이 차체 측 응답보다 무시할 수 있을 만큼 큰 경우 가진력 추정 결과가 다른 마운트의 힘 입력에 거의 영향을 받지 않는 경우를 예로 들 수 있다. 다른 하나는 각 소음 전달 경로가 상호 관련성(누화효과, crosstalk effect)이 큰 경우를 들 수 있다. 즉, 다수의 소음원과 전달 경로가 존재할 경우로서 상호 에너지 전달이 용이하게 일어나는 경우이다. 예를 들어 서브프레임에 연결된 앞, 뒤 롤 마운트의 경우 두 마운트의 경로가 감쇠가 아주 작은 철재 재질로 연결되어 있으므로 가진력 추정을 시에 두 마운트에 작용하는 가진력의 영향을 모두 고려해 주어야 한다.

위와 같이, 구조기인 소음원 및 전달 경로는 물리적 형태가 비교적 분명하다는 점에서 경로 모델에 따른 다양한 기법들이 연구되고 있다<sup>(1~6)</sup>. 반면 공기기인 소음원은 그 형태와 크기등의 다양성과 소음원 주변의 환경적인 영향으로 인해 소음원과 경로 모델링에 많은 어려움이 따르며, 소음원 크기 추정에도 많은 오차요인이 발생한다. Moorehouse 와Seiffert는 4 개의 단극 가상 음원을 통해 공기기인 소음원을 모델링 하였으며<sup>(7)</sup>, 엔진과 같은 단일 소음원에 대해Bobrovnskii와 Pavic은 소음원의 체적을 고려하여 주변 환경의 영향을 받지 않는 음원 임피던스(Source impedance)

† 교신저자; 서울대학교 차세대 자동차 연구센터  
E-mail : yeonjune@snu.ac.kr  
Tel : (02) 880-1691, Fax : (08) 880-1692

\* 정회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 정회원, 현대자동차

와 차폐음압(Blocked pressure)을 통해 등가 구형 소음원 기법으로 소음원의 크기를 모델링하였다<sup>(8)</sup>. P.J.G van Linden등은 복잡한 형상과 높은 모우드 밀도를 갖는 엔진 방사면을 주파수별 음파의 반파장보다 작은 여러 부분의 점파원의 집합으로 가정 한 후 주행시 각 면에서 발생하는 체적속도를 추정하는 방법을 제시하였다<sup>(9)</sup>. 그러나 실차의 경우 엔진, 흡배기, 펌프 및 벨트 등의 수 많은 소음원 들이 반잔향 특성을 갖는 협소한 공간에 설치되어 있어, 소음원 및 전달 경로 모델 구분에 어려움이 있다. 따라서 엔지니어가 선정한 경로 모델링에 따라 분석을 위한 실험량이 상이하며, 경로 기여도 분석 및 합성 결과 역시 큰 차이를 보일 수 있다.

본 논문에서는 공기기인 소음원에 대해 경로 모델링에 따른 전달 경로 분석 결과를 비교하여 대략적인 모델 선정 기준을 제시하고, 일반적으로 사용되는 역행렬법을 이용한 전달 경로 분석법과 음압 전달률(Pressure transmissibility)을 이용한 방법 에 따른 각 방법의 장단점을 비교 검토하였다.

## 2. 공기기인 소음 전달 경로 분석법

### 2.1 전달 경로 모델

전달 경로 분석을 통해 소음원의 구동 상태의 크기 및 목표점에 대한 각 소음원의 기여도를 추정할 수 있다. 전달 경로 분석법을 적용하기 위하여 소음원의 위치를 파악하고 전달 경로를 모델링 하는 과정이 선행되어야 한다.

소음 전달 경로 모델은 Fig. 1 과 같이 두 가지 방법으로 모델링 할 수 있다.  $n$  개의 소음원에 대해 대응하는 전달함수로 표현된  $n$  개의 전달 경로를 통하여 목표점의 응답이 나타난다. 각 소음원에서 목표점까지의 전달 특성을 실험적으로 추정하기 위하여 전달함수를 측정하고 전달 경로 분석법을 통해 소음원의 구동 중 크기를 추정하기 위해 소음원의 개수와 동일 혹은 그 이상의 측정점에 설치된 마이크로폰을 소음원의 구동 중 음압을 측정한다. 이때 각 소음원에 의해서 발생한 음압이 각 측정점에 미치는 영향에 따라 경로간 상호 관련성을 판단한다.  $i$  번째 소음원에 의해서  $j$  번째 측정점에서 형성된 음압이 무시할 만큼 작다면 각 경로가 독립된 것으로 보는 것이 가능하고  $i$  번째 소음원의 특성은 오직  $i$  번째 측정점에서 측정된 음압을 통하여 추정하는 것이 가능하다. 그러나 실제로는 Fig.1 의 점선으로 표시된 것과 같이

소음원과 측정점들은 서로 영향 받게 되어, 각 측정점에 누화현상이 발생하게 된다. 누화 현상의 정도와 이에 따른 누화 효과 고려 여부에 따라서 전달 경로를 독립된 경우와 연성된 경우로 모델링 할 수 있다.

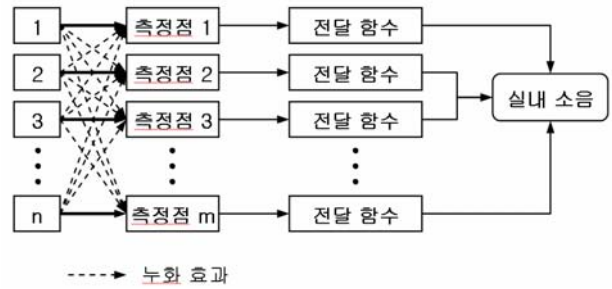


Fig.1 The Concept of Transfer Path Analysis

### 2.2 역행렬법을 이용한 공기기인 소음원의 체적속도 추정

앞에서 설명한 바와 같이 각 측정점에서 발생한 누화효과를 고려하기 위하여 주파수 응답 함수 행렬을 구성하고 해당 행렬을 역행렬 연산을 통하여 구동 중 소음원의 크기 즉, 공기기인 소음의 경우 소음원의 체적 속도를 추정할 수 있다.  $n$  번째 측정점에서 측정된 음압은 각 소음원의 영향에 의한 결과이며, 입력에 대한 출력의 상관관계를 나타내기 위해 주파수 응답 함수를 이용하여 입출력의 관계를 표현 가능하다.  $n$  개의 공기기인 소음원에 대해  $m$  개 측정점이 존재할 경우 식 (1)과

$$\begin{aligned}
 P_1^{oper} &= \frac{P_1}{q_1} \cdot Q_1^{oper} + \frac{P_1}{q_2} \cdot Q_2^{oper} + \dots + \frac{P_1}{q_n} \cdot Q_n^{oper} \\
 P_2^{oper} &= \frac{P_2}{q_1} \cdot Q_1^{oper} + \frac{P_2}{q_2} \cdot Q_2^{oper} + \dots + \frac{P_2}{q_n} \cdot Q_n^{oper} \\
 &\vdots \\
 P_m^{oper} &= \frac{P_m}{q_1} \cdot Q_1^{oper} + \frac{P_m}{q_2} \cdot Q_2^{oper} + \dots + \frac{P_m}{q_n} \cdot Q_n^{oper}
 \end{aligned} \quad (1)$$

같이 나타낼 수 있다. 여기서,  $P_i^{oper}$  와  $Q_i^{oper}$  는 각각  $i$  번째 측정점에서 시스템의 구동 중 측정된 음압과 소음원의 체적속도를 의미하며,  $(p_i/q_j)$  는  $j$  번째 소음원과  $i$  번째 소음원간의 주파수 응답 함수를 의미한다. 식(1)의 우항을 행렬식으로 표현하고 양변에 주파수 함수 행렬을 역행렬을 곱하면 식 (2)와 같이 구동 중 소음원의 체적속도를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Q_1^{oper} \\ Q_2^{oper} \\ \vdots \\ Q_n^{oper} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 & p_1 & \dots & p_1 \\ q_1 & q_2 & \dots & q_n \\ p_2 & p_2 & \dots & p_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_m & p_m & \dots & p_m \\ q_1 & q_2 & \dots & q_n \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} P_1^{oper} \\ P_2^{oper} \\ \vdots \\ P_m^{oper} \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 때, +는 Penrose-Moore pseudo inverse<sup>(10)</sup>를 의미하며 일반적으로  $m \geq n+3$ 의 수준의 과결정 행렬 방정식을 통해 잡음(Noise)에 대한 최소 자승해를 얻을 수 있다. 일반적으로 역행렬법을 이용하여 구동 중 소음원의 크기를 추정할 경우에 주파수 응답 함수의 역행렬 과정에서 주파수 응답 함수에 포함된 노이즈에 의해서 역행렬 계산의 정확도가 떨어질 수 있다. 이로 인해 역행렬 계산의 부정확성이 측정점에서 측정한 음압에 포함된 노이즈를 증폭시킬 수 있으므로 TSVD (Truncated Singular Value Decomposition), Tikonov regularization과 같은 다양한 행렬 정규화 방법이 사용되기도 한다<sup>(11)</sup>.

$i \neq j$ 인 항들은 측정부 이외의 소음원들에 의한 누화 효과를 의미하며, 이 항들의 무시 여부에 따라 전 역행렬법(Full Matrix Inversion Method)와 부분 역행렬법(Driving Point Inversion Method)로 구분할 수 있다.

식(2)를 이용하여 구동 중 소음원의 체적속도를 추정 후 식 (3)와 같이 목표점에서의 소음을 합성 할 수 있다.

$$P_{rec}^{oper} = \sum_{i=1}^m [H_{ri} \cdot Q_i^{oper}] \quad (3)$$

이 때,  $H_{ri}$ 는  $i$  번째 소음원과 목표점 사이의 주파수 함수이고,  $P_{rec}^{oper}$ 는 구동 중 목표점에서의 음압이 된다.

만약, 각 경로간의 누화 효과를 무시하여 앞서 설명한 부분 역행렬법을 이용하는 경우, 목표점에서의 음압 예측은 식 (4)와 같으며, 행렬 정규화를 통한 구동중 소음원 크기 추정은 불가능하다.

$$P_r^{oper} = \sum_{i=1}^n P_i^{oper} \cdot (H_{ii})^{-1} \cdot H_{ri} \quad (4)$$

## 2.3 음압 전달률을 이용한 공기기인 소음 전달 경로 분석

소음원의 체적속도를 추정하는 역행렬법과 달리, 각 소음원의 크기는 해당 측정점의 음압으로 정의한다. 공기기인 소음원으로 인한 차실내 음압은 식 (7)과 같이 정리된다.

$$P_{air}^{res}(t) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{p_r}{p_i} \right) * p_i^{oper} \quad (7)$$

$(p_r/p_i)$ 는  $i$  번째 공기기인 소음원과 차실내 응답점 사이의 음압 전달률로 정의하며, \*은 컨볼루션 적분(Convolution Integral) 연산자이다.

그러나 식 (1)에서와 같이, 실제 측정되는 음압은 주변의 모든 소음원들의 영향을 받기 때문에 물리적 측면에서 소음원의 크기를 대표한다고 할 수 없다. 뿐만 아니라 자유 음장 조건이 아닌 환경에서 측정되는 음압은 소음원의 체적속도를 대표할 수 없다는 한계로 인해 물리적으로 타당하지 않다.

음압 전달률의 논리적인 한계에도 불구하고, 각 소음원간 누화 효과를 무시함으로써 역행렬법과 같은 복잡한 계산과정이 불필요해진다. 따라서 음압 전달률을 유한 충격 응답 (Finite Impulse Response)형태로 역푸리에 변환 후 식 (7)과 같이 컨볼루션 적분을 통해 시간영역의 결과를 합성할 수 있다는 장점이 있다<sup>(12)</sup>. 따라서 응답점의 합성 소음을 재생할 수 있으며, 재생 효과를 극대화하기 위하여 차실내 응답점에서는 인공홍상(Artificial head)등을 사용하여 2 채널 스테레오 녹음을 하기도 한다. 실험적 측면에서, 누화 효과를 무시하기 때문에 음향 전달함수의 상반성을 이용하여 음압 전달률을 측정하며 이로 인해 역행렬법에 비해 실험량을 현저히 줄일 수 있다<sup>(13)</sup>. 이와 같은 특징들로 인해, 사람이 듣는 것과 유사한 환경에서 이뤄진다는 장점을 바탕으로 최근 차량 음질 평가에 널리 사용되고 있기도 하다.

## 3. 실험 방법 및 실험 결과

### 3.1 실험 방법

일반적으로 역행렬법의 경우, 전달함수의 기준 신호로서 체적속도를 사용하는 것과 달리, 본 논문에서는 스피커에 인가된 전압 신호를 기준 신호로 사용하였다. Kim등이 제안한 방법으로서,

구조 음향 상반성 원리를 이용하여 등가의 음원 강도를 추정하는 방법이다<sup>(14)</sup>.

따라서 식 (1)은 아래의 식 (5)와 같이 대체되며

$$\begin{aligned}
 P_1^{oper} &= \frac{p_1}{v_1} \cdot v_1^{oper} + \frac{p_1}{v_2} \cdot v_2^{oper} + \dots + \frac{p_1}{v_n} \cdot v_n^{oper} \\
 P_2^{oper} &= \frac{p_2}{v_1} \cdot v_1^{oper} + \frac{p_2}{v_2} \cdot v_2^{oper} + \dots + \frac{p_2}{v_n} \cdot v_n^{oper} \\
 &\vdots \\
 P_m^{oper} &= \frac{p_m}{v_1} \cdot v_1^{oper} + \frac{p_m}{v_2} \cdot v_2^{oper} + \dots + \frac{p_m}{v_n} \cdot v_n^{oper}
 \end{aligned} \quad (5)$$

각 소음원의 크기는 추정은 식 (6)과 같이 계산된다. Penrose-Moore pseudo inverse 를 통해 잡음에 대한 최소자승해를 구하였으며, 이를 위해 목표점을 사용하여 1 개 초과 ( $m = n + 1$ )의 과결정 행렬 방정식을 구성하였다.

$$\begin{bmatrix} v_1^{oper} \\ v_2^{oper} \\ \vdots \\ v_n^{oper} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_1}{v_1} & \frac{p_1}{v_2} & \dots & \frac{p_1}{v_n} \\ \frac{p_2}{v_1} & \frac{p_2}{v_2} & \dots & \frac{p_2}{v_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{p_m}{v_1} & \frac{p_m}{v_2} & \dots & \frac{p_m}{v_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} P_1^{oper} \\ P_2^{oper} \\ \vdots \\ P_m^{oper} \end{bmatrix} \quad (6)$$

위에서 구한  $v^{oper}$  를 바탕으로 식(7)과 같이 목표점의 응답을 예측할 수 있다.

$$P_{rec}^{oper} = \sum_{i=1}^m \left[ \frac{p_r}{v_i} \cdot v_i^{oper} \right] \quad (7)$$

음압 전달률을 이용한 방법의 경우 Head Acoustics 사의 Artemis 8.0 을 이용하여 시간영역의 전달 경로 분석을 하였으며, 방법별 특성 비교를 목표로 하였기에 두 방법 모두 목표점에서 한 개의 마이크로폰을 사용하였다. 음원과 측정용 마이크로폰은 10cm 의 거리로 정면 설치하였으며, B&K 4942-A-021 확산형 마이크로폰을 사용하였다. 한편 아크릴 모형차 실내의 높은 음향 모드 밀도로 인해 두 방법의 결과 비교는 500 Hz 이하의 범위에서 도시하였다.

### 3.2 누화 효과가 작은 경우

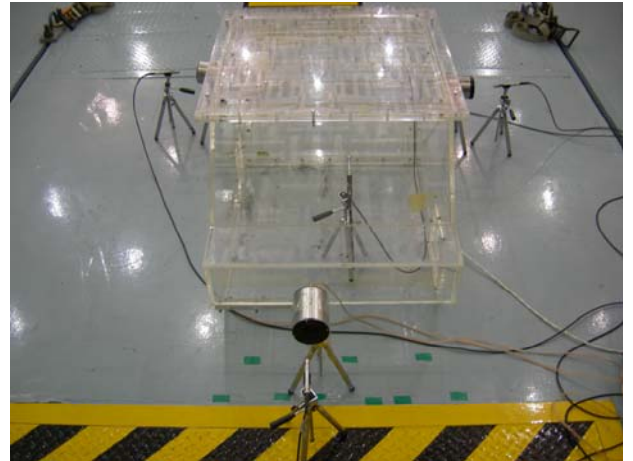


Fig.1 Experiment Set-up for Weak Crosstalk

Fig.1 에서와 같이 모형 차량 외부 세 곳에 가상 음원을 설치하였으며, 발생한 주행 신호는 표 1 과 같다. 음원 1 과 2 는 하나의 파형 발생기를 통해 병렬 연결하였으며 앰프 이득을 동일하게 설정하여 동일한 음원크기를 만들었다. 음원 3 은 별도의 파형 발생기를 사용하여 신호의 종류와 크기를 달리 설정하였다.

음원간 누화 정도는 식(2)의 전달함수 행렬에서 비대각 성분과 대각 성분의 차이를 통해서 판단할 수 있다.

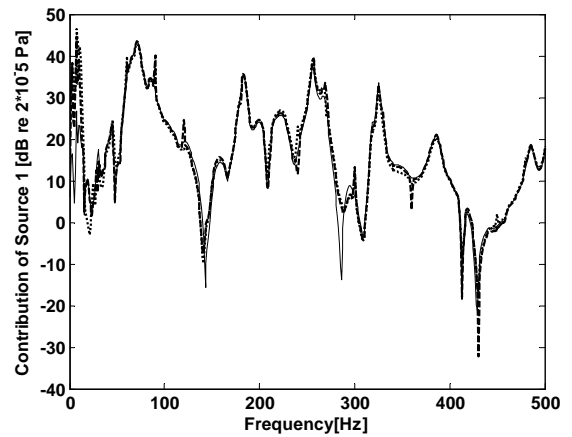


Fig.2 Contribution of Source 1  
Exact(—); MIM(- - ); Pressure Transmissibility(.....)

Fig.1 의 실험 구성의 경우 대각 성분은 비대각 성분대비 최소 20 dB 이상의 차이를 보이고 있으며 음원간 측정점에 대한 누화 효과는 미비하다 판단 할 수 있다.

한편 주행 신호가 서로 상이한 음원 1 과 음원 3 에 의한 실내 응답의 기여도는 Fig.2 와 Fig.3 과 같이 모두 타당한 결과를 보여준다.

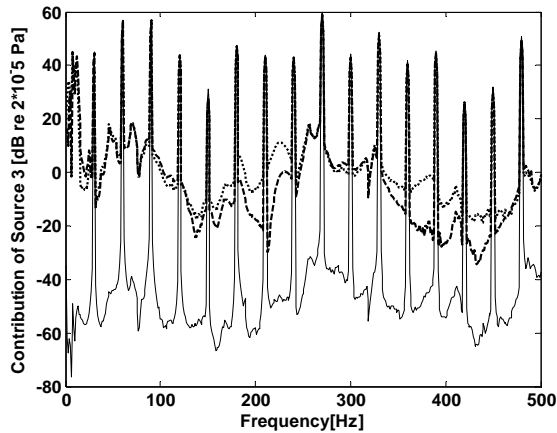


Fig.3 Contribution of Source 3  
Exact(—); MIM(- - ); Pressure Transmissibility(.....)

Table 1 Operating Source Voltage Signal

음원	주행 신호	인가 전압(Vpp)
음원 1	1Hz 펄스	11.78 V
음원 2	1Hz 펄스	11.78 V
음원 3	30Hz 펄스	7.38 V

Fig.4 는 역행렬법과 음압 전달률을 이용한 방법을 통한 목표점 응답 추정의 결과를 보여주고 있다. 두 방법 모두 측정치 대비 각 피크에서 0.2 dB 이내 수준의 정밀도를 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 실차의 경우 흡기와 배기, 타이어 소음 등과 같이 공간적으로 원거리에 떨어져있거나, 차체에 의해서 차폐되어 있는 경우 두 방법 모두 타당한 결과를 보일 것으로 추론할 수 있다.

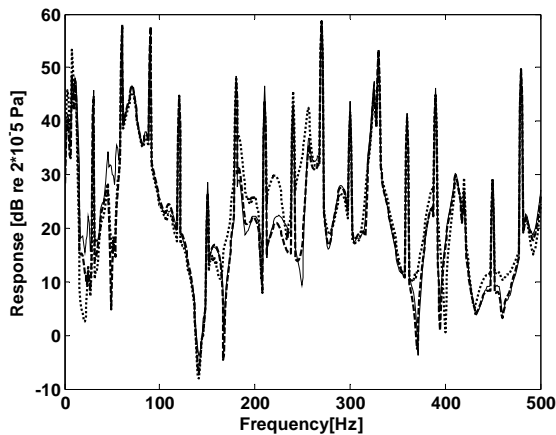


Fig.4 Comparison Results  
Exact(—); MIM(- - ); Pressure Transmissibility(.....)

### 3.3 누화 효과가 큰 경우

누화 효과를 극대화하기 위하여 세 개의 스피

커를 모형차 트렁크 내부에 설치하였으며 가한 주행 신호의 종류 및 크기는 앞의 표 1의 경우와 같다.

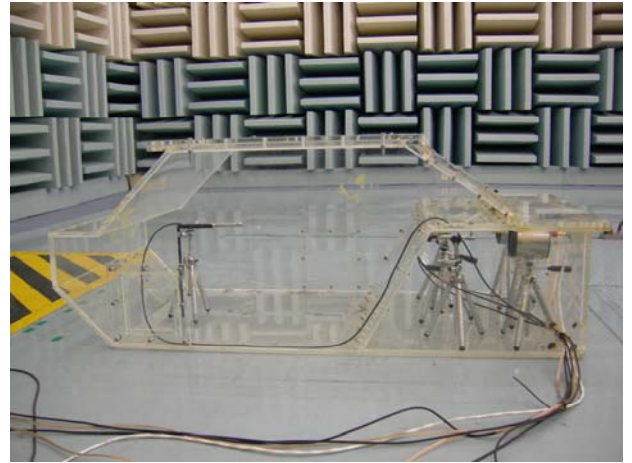


Fig.5 Experiment Set-up for Strong Crosstalk

전 주파수 영역에서 전달 함수 행렬의 대각 성분과 비대각 성분의 차이는 0 ~ 15 dB 이내이며, 특히 차실내 주요 음향 모드가 발생하는 주파수 부근에서 2.5 dB 이내의 차이를 나타내어, 높은 누화도를 보였다.

음원 1 과 음원 3 의 차실내 응답에 대한 기여도는 각각 Fig.6, Fig.7 과 같다. 음원 1 은 주행신호로서 1Hz 의 펄스가 발생하였지만, 음압 전달률을 이용한 방법의 경우 음원 3 의 주파수 성분들이 나타났다. 이는 명백한 누화 효과의 영향으로 소음원 추정 오차가 크게 발생함을 확인할 수 있다.

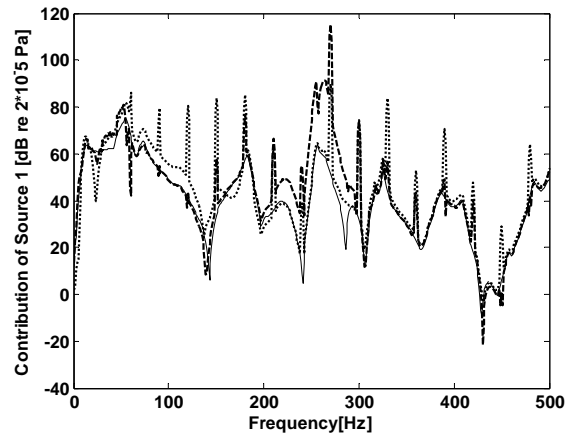


Fig.6 Contribution of Source 1  
Exact(—); MIM(- - ); Pressure Transmissibility(.....)

Fig.7 에 나타난 바와 같이, 음원 3 은 나머지 음원과 다른 주행 신호를 발생하였기 때문에 두 방법 모두 30Hz 의 조화 성분에 대해 동일한 수준의 추정 결과를 보이고 있다. 하지만 이를 제외한 주파수 성분에서 음원 1 과 음원 2 에 의한 누

화 효과로 인해, 음압 전달률을 이용한 방법은 역행렬법에 비해 최대 약 40 dB의 과응답 추정을 보임을 확인할 수 있다. 이와 같은 경향은 특히 약 250 Hz 이하의 저주파 대역에서 두드러지며, 실차 적용시 부밍음등의 대역에 해당한다는 점에서 고려되어야 할 부분이다.

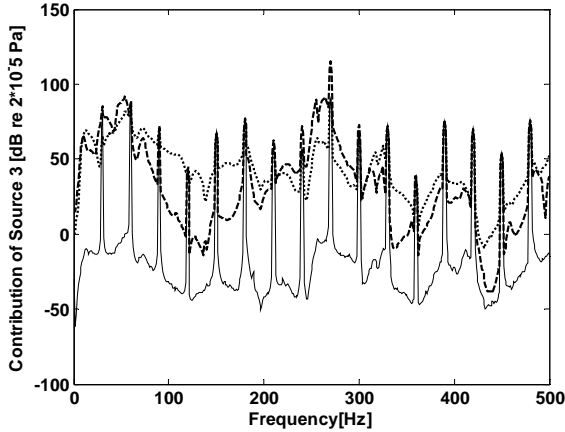


Fig.7 Contribution of Source 3  
Exact(—); MIM(- -); Pressure Transmissibility(.....)

반면 역행렬법의 경우 270 Hz 부근에서 과응답 추정이 되고 있다. 측정점 1 과 측정점 3 에서 해당 주파수 성분의 음향 모드가 발생하였으며, 이로 인해 전달 함수 행렬의 특이값(Singular value)이 증가하여 기여도 추정시 오차 증폭의 영향을 발생하였기 때문이다.

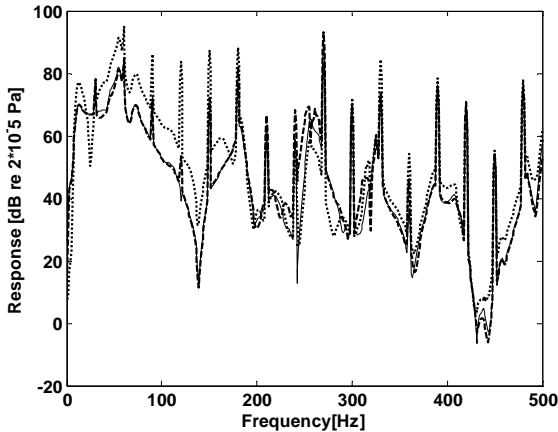


Fig.8 Comparison results  
Exact(—); MIM(- -); Pressure Transmissibility(.....)

합성 응답의 결과에서도 두 방법은 기여도 추정 결과와 유사한 경향을 보여준다. 음압 전달률을 통한 전달 경로 분석의 경우 약 200 Hz 이하의 영역에서 최대 40 dB 이상의 과응답 추정을 보이고 있으며, 음원 3 에 의한 누화 효과가 응답 합성 결과에도 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 한편 역행렬법의 경우 앞서 기여도 추정의 결과와 달리 270 Hz 부근에서 3 dB 이내 수준의 응답 추

정을 보이고 있다. 경로별 기여도의 위상으로 인한 결과이며 전 주파수 영역에서 우수한 결과를 보이고 있다.

#### 4. 누화 효과 영향 인자

$n$  개의 소음원 대해 누화 효과를 고려한  $i$  번째 측정점의 음압  $P_i^{measured}$  는 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_i^{measured} &= H_{1i}q_1 + H_{2i}q_2 + \dots + H_{ii}q_i + \dots + H_{ni}q_n \\ &= P_i^{actual} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{P_k}{P_i} \cdot P_k^{actual} \end{aligned} \quad (8)$$

$P_i/P_k$  는  $k$  번째 측정점과  $i$  번째 측정점의 음압전달률로서 실험적으로 측정하며,  $P_k^{actual}$  은  $k$  번째 소음원 단일 구동시 측정되는 음압으로 가정한다. 이 때,  $r_{i,j}^{actual} = |P_j^{actual}/P_i^{actual}|$  로서 소음원 단독구동시 각 측정점의 음압비를 정의하고 식(8)을 복소 형태로 다시 쓰면 식 (9)와 같다.

$$P_i^{measured} = \tilde{p}_i^{actual} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \left| \frac{\tilde{p}_i^{actual}}{\tilde{p}_k^{actual}} \right| \cdot \tilde{p}_k^{actual} \cdot r_{i,k}^{actual} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_k + \varphi_{i,k})} \quad (9)$$

$\varphi_i$  는  $i$  번째 소음원의 위상이며,  $\varphi_{i,k}$  는 측정점  $i, k$  간의 음압전달률의 위상차로서 정의한다. 따라서 식 (10) 을 얻을 수 있으며,

$$P_i^{measured} = \tilde{p}_i^{actual} \left( 1 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \left| \frac{\tilde{p}_i^{actual}}{\tilde{p}_k^{actual}} \right| \cdot r_{i,j}^{actual} \cdot e^{j(\varphi_k + \varphi_{i,k} - \varphi_i)} \right) \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)} \quad (10)$$

$$CE(\omega) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \left| \frac{\tilde{p}_i^{actual}}{\tilde{p}_k^{actual}} \right| \cdot r_{i,j}^{actual} \cdot e^{j(\varphi_k + \varphi_{i,k} - \varphi_i)} \quad (11)$$

$CE(\omega)$  는 누화도를 판단하는 근거로서 정의할 수 있으며, 식 (11) 의  $|\tilde{p}_i^{actual}/\tilde{p}_k^{actual}|$  은 소음원이 위치한 공간의 잔향 특성,  $r_{i,j}^{actual}$  는 소음원들간의 상대적 크기,  $e^{j(\varphi_k + \varphi_{i,j} - \varphi_i)}$  는 소음원들간 위상 특성을 의미한다. 즉, 측정점에 미치는 누화 효과는 각 소음원이 위치한 공간의 잔향 특성에 영향을 받으며,  $r_{i,j}^{actual} > 1$  과 같이 소음원의 크기가 주변 소음원에 비해 상대적으로 작을수록 해당 측정점의 누화 현상은 증가함을 Fig.6 을 통해 확인할 수 있었다. 또한 각 소음원간의 위상차로 인해  $CE(\omega)$  는 양수 혹은 음수의 전 범위를 포괄하여

소음원 크기 추정시 과응답 추정(Over-estimation) 혹은 과소응답 추정(Under-estimation) 모두 발생할 수 있다.

한편 공학적인 의미에서, 잡음(Noise)의 범위를 오염되지 않은 신호의 크기 대비 10% 내외로 정의하므로  $|CE(\omega)| \geq 0.1$  일 경우 누화 효과를 고려해야 하는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

## 5. 결론

이 연구에서는 공기기인 소음원의 경로 모델에 따른 전달 경로 분석법을 비교 평가하였다. 또한 간단한 수학적 모델링을 통해 측정점에 발생하는 누화 효과 영향 인자를 살펴보았으며, 이를 통해 경로 모델 선정의 이론적 기준을 제시하였다.

각 전달 경로 분석법의 비교를 위해, 각 소음원간 누화 정도에 따라 평가가 이뤄졌으며, 누화 효과를 무시하는 경로 모델의 경우 전달 경로 분석의 결과는 크게 기여도 추정 및 응답 합성의 크기 오차와 기여도 추정시 주파수 성분 분석의 오류등이 발생함을 확인할 수 있었다. 특히 성분 분석의 오류의 경우, 목표점 응답을 조율하는 과정에서 소음원 및 경로 기여도 특성을 잘못 파악할 수 있는 문제점을 내재하고 있다는 점에서 경로 모델 선정과 전달 경로 분석법 선택에 주의를 요구한다.

이를 토대로, 실차의 경우 흡·배기 및 노면 소음등은 누화 효과를 무시한 경로 모델로 선정하여도 무리가 없으며, 엔진룸 내부에 위치한 각 소음원등은 누화 효과를 제거하기 위한 방법을 적용하는 것이 합리적이라고 추론할 수 있다. 향후 실차를 통한 기여도 분석 및 비교를 통해 보다 상세한 경로 모델 선정 기준을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 현대기아협동연구센터(HKCRC) 및 서울대학교 정밀기계연구소의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

(1) J.S de Franka Arruda, 2006, "Comparision of estimation techniques for vibro-acoustic transfer path analysis". Shock and Vibration. Vol.13, pp459~467.  
 (2) LMS International, 2000, "Transfer Path Analysis : The quantification and quantification of vibro-acoustic transfer

paths", Leuven, Belgium.

(3) Matthias Blau., 1999, "Indirect Measurement of Multiple Excitation Force Spectra by FRF Matrix Inversion : Influence of Errors in Statistical Estimates of FRFs and Response Spectra", ACUSTICA. Vol.85, pp.464~479.

(4) Y.R Kim, K.J Kim., 1999, "Indirect Input Identification by Modal Filter Technique", Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.13(6), pp.893~910.

(5) A.N Thite and D.J Thomson., 2003, "vThe quantification of structure-borne transmission paths by inverse methods. Part1: Improved singular value rejection methods", Journal of Sound and Vibration. Vol.264, pp.411~431.

(6) A.N Thite and D.J Thomson., 2003, "The quantification of structure-borne transmission paths by inverse methods. Part1: Use of regularization technique", Journal of Sound and Vibration. Vol.264, pp.433~451.

(7) G. Seiffert, 2006, "Chracterisation of an airborne sound source for use in a virtual acoustic prototype" Journal of Sound and Vibration. . Vol.296, pp 334~352.

(8) G. Pavic, 2003, "Modeling and characterization of airborne noise sources", Journal of Sound and Vibration. Vol.261, pp.527~555.

(9) P.J.G. Van der Linder and T. Keppens, 2001, "Determination of the noise contributions of engine surfaces" SAE 201-01-1482.

(10) Gilbert Strang, 1998, Linear Algebra and its Applications, Thomson Learning, Inc.

(11) A.T. Moorhouse, 2003, "Compensation for discarding singular values in vibro-acoustic inverse methods", Journal of Sound and Vibration. Vol.267, pp.245~252.

(12) K. Genuit, J. Poggenburg , 1999, "The Design of Vehicle Interior Noise Using Binaural Transfer Path Analysis" SAE NCV 19.

(13) Roland Sottek , 2003, "An Artificial Head which speaks from its Ears: Investigations on Reciprocal Transfer Path Analysis in Vehicles, Using Binaural Sound Source" SAE 03NVC-83.

(14) 김윤재, 변재환, 강연준, 강구태, 권오준, 홍진철 "구조-음향 상반성 원리를 이용한 공기기인 소음원의 강도 추정 및 소음 합성" 한국소음진동공학회, submitted.