

## 역주파수응답함수를 이용한 자동차 실내 소음 기여도 분석

전인열\*, 이정권\*, 김병훈\*\*, 박봉현\*\*

### Noise Source Ranking in an Automotive Vehicle Using the Inverse FRF Method

(In-Youl Jeon, Jeong-Guon Ih, Byung-Hoon Kim, Bong-Hyun Park)

#### ABSTRACT

The identification of location and strength distribution of extended noise sources is important in the practical noise control engineering, especially in the viewpoint of dealing with the inherent nature of noise problem in question. For noise source ranking inside an automotive vehicle, the window method has been mainly used due to its simplicity. However, time and cost drawbacks in the measurement and inaccuracy due to low-frequency tunneling and lack of phase information have been a serious problem in using this method. In this study, the inverse FRF method was employed to carry out the noise source ranking inside an automotive vehicle and it was also used to predict the interior sound pressure with the change of sound insulation materials. As a result, it was found that the source contribution of vehicle panels could be successfully identified in comparison with the window method. The sound pressure at driver's ear position was predicted based on the obtained data and was compared with the measured data. The agreement in spectral trends was acceptable and their difference in level was within 3 dB above 500 Hz.

### 1. 서론

자동차 실내 소음은 소음원의 특성에 상관없이 공기 기인이나 구조 기인에 의해서 차체 패널을 경유하여 형성되는데 차체 패널을 통한 소음은 수음자에 대하여는 가장 직접적인 소음원이라고 볼 수 있다. 따라서 적절한 소음 제어를 위해서는 소음원 규명이 선행 되어야 하는데 일반적으로 차음 패널을 이용하여 패널의 소음 기여도를 실험적으로 쉽게 규명하는 창문법(window method)이 많이 사용이 되어 왔다. 이 방법은 저주파 소음 성분의 차음 패널 투과 및 패널 간의 상호 간섭 효과를 무시하기 때문에 정확도가 떨어지는 단점이 있다[1].

본 연구에서는 역주파수응답함수 (Inverse Frequency Response Function)를 이용하여 자동차 실내 소음 기여도를 분석하고자 한다[2-3]. 창문법은 음장 내의 기준점의 음압에 대한 기여도만을 분석할 수가 있다. 이에 비해 Inv-FRF 방법은 음원과 음장 사이의 주파수응답함수와 실차가 운전 중 일 때 측정된

음압을 이용하여 기여도를 예측할 수 있고, 음장 내 기준점에 상관없는 차체 패널의 순수 기여도를 규명할 수 있다. 그리고 음원과 음장 사이의 전달 함수를 측정하면 거의 대부분의 음장 음압의 예측도 가능하다. 기여도 분석 결과를 검증하기 위하여 실차가 운전 중일 때 측정 음압과 예측 음압을 비교하도록 한다. 또한 차체에 차음재를 장착하였을 때 실내 음압에 미치는 효과를 살펴보기 위하여 차음 조건에 따른 패널의 기여도 변화를 살펴본다. 마지막으로 차체의 패널들이 실내 기준점 음압에 미치는 영향을 파악하며 이 결과를 창문법 결과와 비교한다.

### 2. 기본 이론

Inv-FRF 방법은 경계면 상의 음원과 음장 음압 사이의 전달 경로를 이용하는 방법으로써 선형 시스템이라고 가정하면, 그림 1(a)와 같은 상황에서 가상 음원과 음압 사이에는 다음과 같은 관계식을 갖는다:

\* 한국과학기술원 기계공학과 NOVIC센터 음향연구실

\*\* (주) NVH Korea

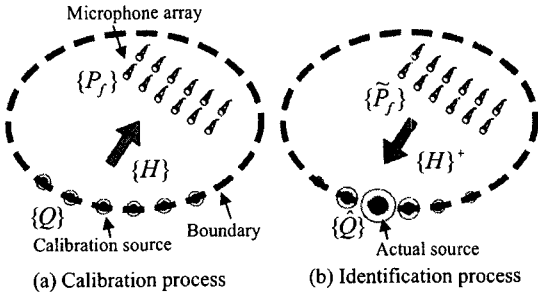


그림 1. Inv-FRF 방법의 개념도.

$$P_f(\omega) = H(\omega)Q(\omega). \quad (1)$$

여기서,  $P_f(\omega)$ 는 음장 음압,  $Q(\omega)$ 는 가상 음원, 그리고  $H(\omega)$ 는 주파수응답함수를 나타낸다. 만약 그림 1(b)처럼 실제 음원이 작동할 경우에 대해서 음압을 측정하면 다음과 같이 음원을 예측할 수가 있다:

$$\hat{Q}(\omega) = H^+(\omega)\tilde{P}_f(\omega). \quad (2)$$

여기서,  $H^+(\omega)$ 는  $H(\omega)$ 의 pseudo-inverse 이고,  $\tilde{P}_f(\omega)$ 는 실제 음원에 대한 측정 음압,  $\hat{Q}(\omega)$ 는 예측된 음원의 정보이며 가상 음원의 선형 조합으로 표현이 된다. 만약 음원과 임의의 음장 사이의 전달 함수를 측정하면 다음과 같이 음압을 예측할 수가 있다:

$$\hat{P}_f(\omega) = G(\omega)\hat{Q}(\omega). \quad (3)$$

여기서,  $G(\omega)$ 은 가상 음원과 임의의 음장 사이의 주파수응답함수, 그리고  $\hat{P}_f(\omega)$ 는 예측된 음장 음압이다. 위 식(3)으로부터  $i$ 번째 단위 패널의 기여도  $\hat{Q}_i(\omega)$ 가 얼마만큼 음장 점의 음압에 기여하는지 세분화하여 계산할 수가 있다. 위의 과정은 단순하게 계산이 가능하기 때문에 창문법에서의 차음 패널 탈거 과정이 필요가 없다는 장점이 있다. 대상 패널의 개수가 많아 질수록 실험 시간 많이 소요되기는 하지만 창문법에 비해서 대상 패널의 수를 많게 할 수 있어서 패널의 기여도를 좀더 세밀하게 관찰 할 수가 있다.

### 3. 실차 패널 기여도 분석

Inv-FRF를 이용하여 기여도 분석을 수행할 대상 차량은 2L 자동 변속 중형급 차량이며, 반무향실 샤시 다이내모실에서 실험을 수행하였다. 각 패널의 기여도를 예측하기 위하여 차량의 상태는 그림 2처럼 내장

재를 모두 탈거하고 대쉬 부분의 작은 구멍들을 밀폐 처리하였다. 가상 음원으로 4인치 스피커를 사용하였으며 음원이 분포할 위치는 그림 3처럼 총 36개로 선정하였다. 여기서 유리창과 트렁크 부분은 상대적으로 기여도가 낮기 때문에 제외하였다. 가상 음원에 대한 주파수응답함수의 측정은 마이크로폰 어레이 지그를 이용해서, 운전석 바닥, 조수석 바닥 그리고 뒷좌석 좌, 우측 등 총 96개의 위치에서 측정하였다. 따라서 주파수응답함수의 사이즈가  $96 \times 36$ 이며, 전달 함수의 특성과 연관이 있는 최대/최소 특이치 비인 조건수 (condition number)는 그림 4와 같다. 저주파 영역에서는 실내 공간에 모드가 발생되어서 해가 불안정하다. 따라서 조건수가 100 이하에서 안정성이 보장이 되므로 400 Hz 이상 주파수 영역에 대해서 실험 결과가 유효하다 [4].

패널의 순수 기여도 예측을 위해서 먼저 trim류가 없는 bare 조건 하에서 2단 기어 3500, 4000, 4500 RPM 정속 주행하였을 때 음장 음압을 측정하였다. 그 후 차음재 장착 효과를 파악하기 위해서 PET (40t)와 Hard layer (4t)로 이루어진 차음재를 차체 패널에 부착한 최대 차음 조건 하에서 음압을 측정하였다. 각각의 조건에 대해서 기여도를 계산하고 RPM 별 결과를 평균하였다.

그림 5는 bare 상태의 기여도 분석 결과를 나타내며 전체 주파수 영역에서 대해서 앞 좌석 바닥이나 대쉬 부분에서 기여도가 크게 나왔는데 이는 엔진이나 타이어 소음 등이 직접 실내 내부로 전파하기 때문에 발생된다. 또한 저주파 영역에서 기여도가 큰 이유는 자동차 실내 소음도가 고주파 영역보다 저주파 영역에서 크기 때문이다. 그림 6은 앞 좌석 바닥 부분의 기여도를 보여주고 있는데, bare 상태의 기여도가 최대

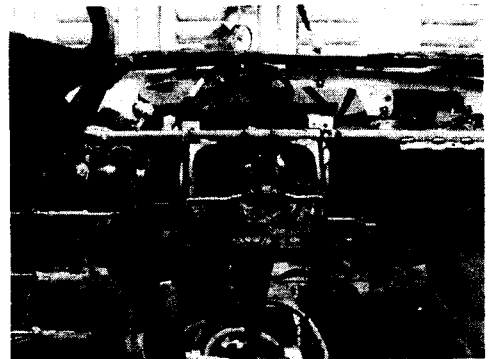


그림 2. 기여도 분석 대상 차량의 상태.

차음 상태의 기여도 보다 높게 나왔다. 이는 차체 패널에 차음재를 설치함으로써 패널을 경유하는 소음을 저감시킬 수 있다는 것을 의미하며, 기여도 분석을 통하여 차음재의 장착 위치 선택에 있어서 도움이 될 수 있다. 그림 7에서는 bare 상태일 때 500 Hz에서의 기여도를 나타내고 있으며 대쉬 부분의 기여도가 다른 부분에 비해서 크다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 실내 음압 예측

패널의 기여도 분석 결과를 바탕으로 가상 음원과 내부 음장 사이의 주파수 응답함수  $G(\omega)$ 를 측정하면, 식 (3)에 의해서 실내 음장 음압을 예측할 수 있다. 그림 8은 차체의 차음 상태에 따른 운전자 귀 위치에서 예측 음압과 측정 음압을 보여주고 있으며, 예측 값이 실측 값과 유사하다는 것을 알 수가 있다. 또한 차음재 사용으로 인한 운전자 귀 위치를 기준으로 한 소음 저감 효과는 bare 상태에서의 음압과 최대 차음 상태에서의 음압의 차이로 나타나게 되는데, 그림 9에 나타나 있다. 마찬가지로 예측 값과 실측 값의 전체적인 경향이 유사하다는 것을 알 수가 있다. 따라서 임의의 음장 점에서 차음재를 사용하여 실내 소음을 감소되는 양에 대해 Inv-FRF 방법을 이용하면 비교적 정확하게 예측이 가능하다는 것을 의미한다.

차음재의 사용으로 소음 감소 효과를 소음 방사 기여율을 이용하여 표현할 수가 있다. 이 기여율은 창문법을 이용한 기여도 분석 결과와 직접 비교를 할 수가 있으며 다음과 같이 정의가 된다:

$$C_{i,j} = \alpha \cdot \frac{L_{i,j} - L_{\max,j}}{L_{\text{bare},j} - L_{\max,j}} / \sum_j \left( \frac{L_{i,j} - L_{\max,j}}{L_{\text{bare},j} - L_{\max,j}} \right). \quad (4)$$

여기서, 아래첨자  $i$ 와  $j$ 는 각각 패널의 위치와 옥타브 주파수 대역의 순서를 나타내며,  $L$ 은 각 패널에 대한 소음 레벨,  $L_{\text{bare}}$ 는 bare 상태에서의 소음 레벨,  $L_{\max}$ 는 최대 차음 상태에서의 소음 레벨,  $C$ 는 소음 기여율이며,  $\alpha$ 는 기여율을 정규화 하기 위한 상수이다. Inv-FRF 방법과 창문법을 이용한 기여율 분석 결과는 각각 그림 10과 11에 나타나 있으며, 기준점을 운전자 위치와 뒷 좌석으로 설정하는데, 그 결과는 다음과 같이 정리 할 수 있다:

1. 전체 주파수 대역에서 대쉬 및 앞좌석 바닥 부분의 기여율이 전체 기여율의 절반 이상을 차지한다.

2. 음압 측정 점의 위치에 따라서 패널의 기여율이 다르다. 예를 들면 그림 10(b)처럼 package tray 또는 뒷좌석 바닥 패널 등이 뒷 좌석 음압에 영향을 미친다.

3. 창문법은 차음재의 특성으로 인하여 그림 11처럼 저주파 영역에서 기여율이 낮게 나온다.

#### 5. 결 론

본 연구에서 Inv-FRF를 이용하여 정속 주행 중인 자동차를 대상으로 기여도 분석을 수행하였다. 패널의 기여도 분석 결과 대쉬 부분과 앞 좌석 바닥 부분 음원의 세기가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었으며, 차음재 사용으로 인한 소음 감소 효과를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 따라서 Inv-FRF 방법을 응용하면 차음재의 종류 및 설치 위치를 결정하고 실내 기여도 변화를 예측하는데 있어서 도움이 될 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 BK21과 NRL 과제에서 일부 재정 지원을 받았으며, NVH Korea (주)의 지원에 감사 드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] M. J. Crocker, "Surface intensity, acoustic intensity and selective wrapping measurements for evaluations of diesel engine noise," *Proc. Internoise 82*, pp.103-107 (1982).
- [2] S. Dumbacher and D. Brown, "Practical consideration of the IFRF method technique as applied to noise path analysis and acoustic imaging," *Proc. IMAC*, pp. 1677-1685 (1997).
- [3] 전인열, 이정권, 김종혁, "역주파수 응답함수를 이용한 잔향성이 강한 음장에서의 소음원 규명 및 특성에 대하여," 한국음향학회 학술대회 논문집, pp. 281-284 (1999).
- [4] R. J. Mammone and R. J. Rothacker, "General iterative method of restoring linearly degraded images," *J. Opt. Soc. Am.*, 4, pp. 208-215 (1987).

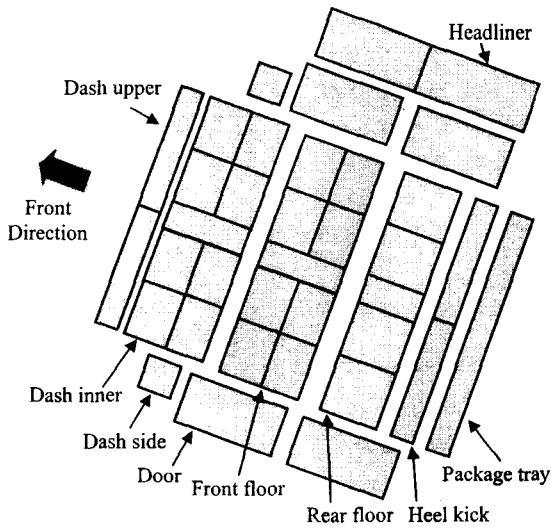


그림 3. 가상 음원의 분포.

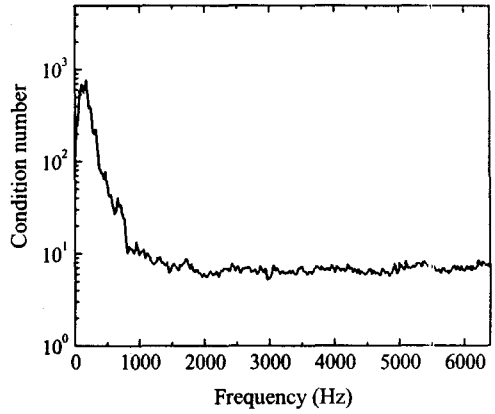


그림 4. 주파수응답함수의 조건수.

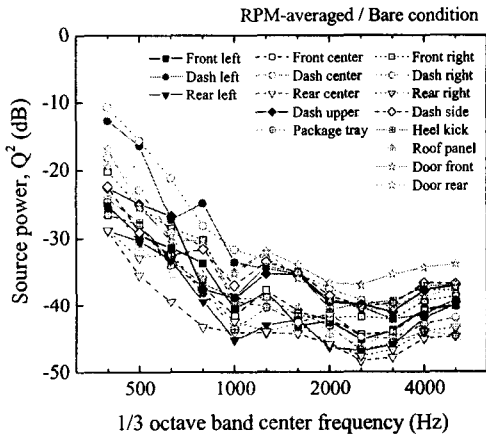


그림 5. Bare 조건에서 예측된 음원 크기.

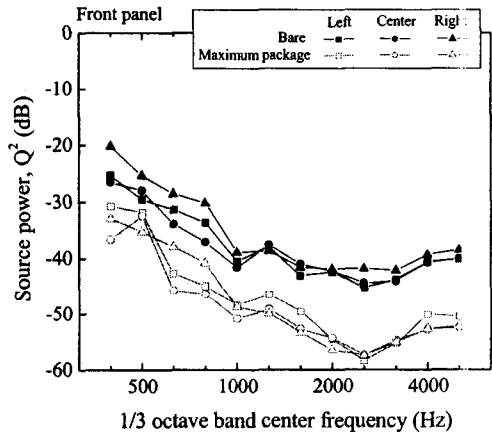


그림 6. 앞 좌석 바닥 패널에서 예측된 음원 크기.

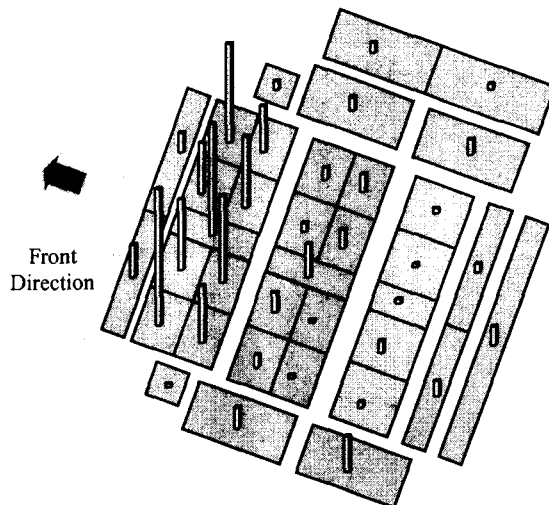


그림 7. 500 Hz band에서 예측된 음원의 크기

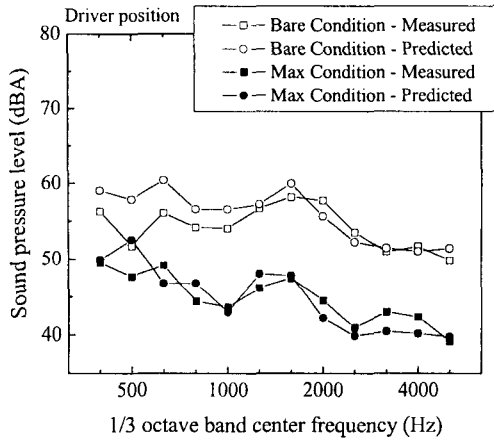


그림 8. 운전자 귀 위치에서의 음압 레벨.

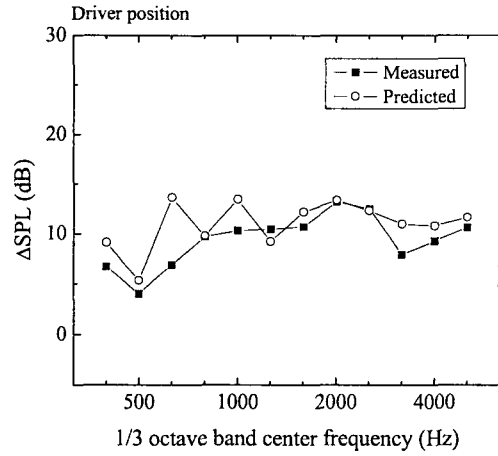


그림 9. 운전자 귀 위치에서의 음압 차이.

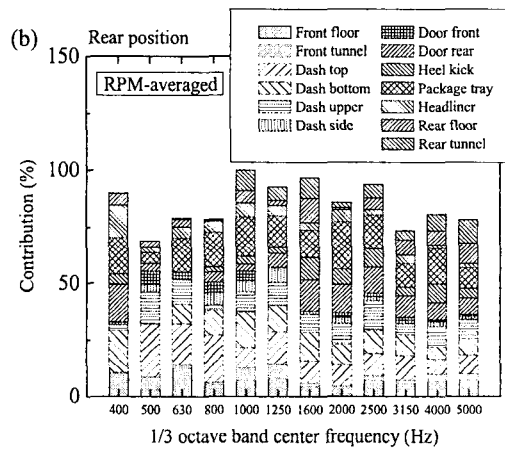
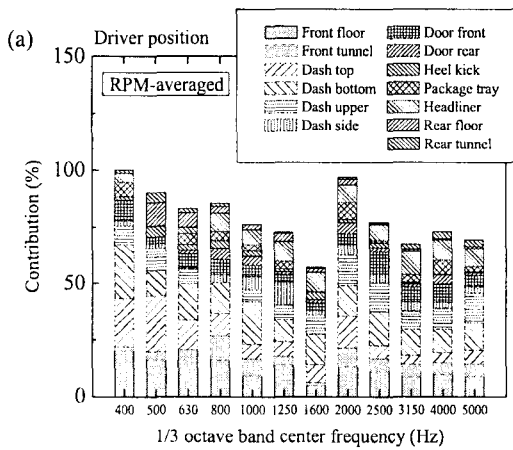


그림 10. Inv-FRF 방법을 이용한 소음 방사 기여율. (a) 운전석, (b) 뒷 좌석

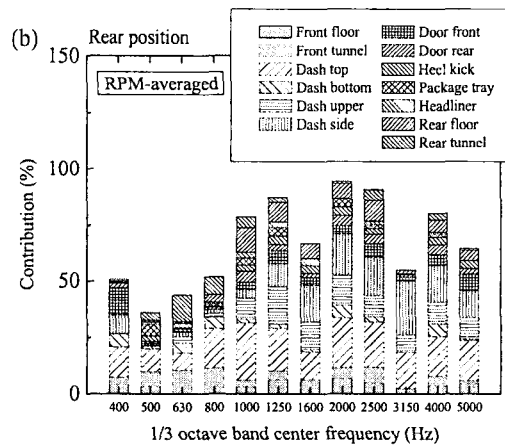
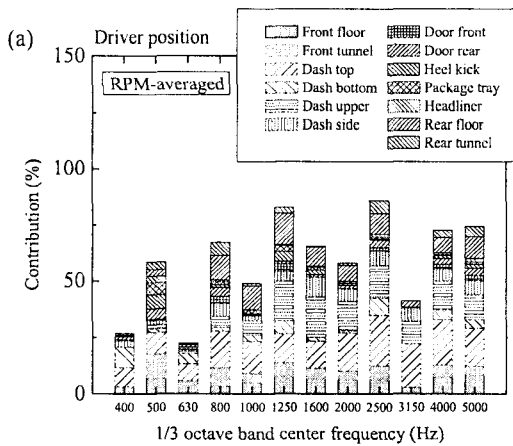


그림 11. 창문법을 이용한 소음 방사 기여율. (a) 운전석, (b) 뒷 좌석