

# 음향전달함수(ATF)를 이용한 부밍 소음 취약부 예측 연구 The Prediction of Weak Point about Vehicle Booming Noise Using the Acoustic Transfer Function

황광현† · 오혁진 · 최승찬 · 서진관\* · 홍석길\*\*

K.H. Hwang, H.J. Oh, S.C. Choi, J.K. Suh and S.G. Hong

**Key Words** : Acoustic Transfer Function (음향전달함수), Acoustic Cavity(음장), Finite Element Model(유한요소모델), Vibro-Acoustic Sensitivity(진동-음향감도)

## ABSTRACT

The noise and vibration have been evaluated by using the finite element model in the vehicle developing stage. The sound pressure of the vehicle compartment is predicted by the acoustic cavity model coupled with the body structure. In general, the structural model has been focused to study in the improvement of the noise. It is not easy to treat the structural model, instead the acoustic cavity model is relatively simple and aids in root cause analysis of vibro-acoustic issues. Therefore, the acoustic transfer function of the cavity is more efficient for finding out the main contribution parts of the vehicle booming noise. And examples about the run-up booming noise demonstrate the validity of the AFT analysis for improving the vibro-acoustic sensitivity.

## 1. 서 론

해석은 차량 개발 과정에서 큰 역할을 해왔다. 진동소음 분야에서 200Hz 까지 유한요소 모델에 의한 수치해석의 적용이 일반화되었고, 해석 기법들은 차량개발 과정의 시행착오의 시간을 줄이고, 정확한 계산, 원인 분석과 대책을 구하는 것이 중요한 과제이다. 진동소음 해석은 대부분은 구조계에 대한 공진해석이며, 200Hz 영역에서 수천 개의 구조 공진모드를 가지는 반면, 음향계는 수십 개의 공진모드를 가진다.<sup>(1)</sup> 이에 대하여 음향계는 직접적인 개선 대상이 아니므로, 음향계의 활용이나 문제 원인 분석을 다룬 자료도 적어, 상대적으로 그 중요성을 소홀히 해왔다.

차량의 음향계는 승객의 거주 공간과 트렁크 공간을 포함하는 실내 음장이다. 해석 분야의 실내 음장에 대한 연구는 모델의 정확성 향상에 대한 연구가 많이 진행되었고,<sup>(2)-(4)</sup> 음장의 활용 관점에는 구조부문과 연성을 통한 음향감도에 대한 연구가 수행되어 왔다.<sup>(5)-(6)</sup> 음향감도의 경우는 시험적인 TPA(Transfer Path Analysis)나 ASQ(Acoustic Source Quantification)방법을 활용하면 소음 저감을 위한 원리 연구에 효과적이다.<sup>(7)</sup> 해석 프로그램을 이용한 실내 음장의 기여도 분석 방법에는 구조-음향 연성 해석을 기반으로 음향모드 기여도 해석, 패널 기여도 해석, 음향 절점 기여도 해석 등이 있다. 일반적으로 차량 소음 저감을 위한 해석은 구조-음향감도해석 또는 실측하중을 활용한 부밍 소음 해석을 수행하고 있다. 이는 실제현상을 표현하는 발전된 방법이지만, 구조해석의 모델의 복잡성으로 원인 분석에 어려움이 있고, 해석 시간이 다소 소요되는 방법이다.

† 교신저자; 정회원, 현대자동차, 진동소음해석팀

E-mail : rayhwang@hyundai.com

Tel : 031-368-0395, Fax : 031-368-8219

\* 현대자동차, 진동소음해석팀

\*\* 현대자동차, 차량해석실

따라서 본 연구는 실내 음장의 특성을 이해하고,

그 활용도를 높이고자 하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 실내 음장의 음향전달함수(Acoustic Transfer Function, 이하 ATF)의 계산 방법을 확립하고, 과거 개발 차량들의 구조기인 부밍 소음 개선 사례 연구를 통하여 ATF 분석의 활용도를 모색하였다. 그리고 실제 부밍 발생 차량의 ATF 분석을 통하여 취약부를 확인하고, 구조 개선을 통하여 음향감도 개선 과정을 적용해 보았다.

## 2. 본 론

### 2.1 음향전달함수(ATF)

구조기인 소음은 Fig.1과 같이 엔진과 서스펜션에서 발생한 진동이 차체 구조로 전달되고, 차체 패널의 진동이 공기를 가진 하여 발생한 파동이 승객의 귀로 전파되어 소음을 느끼게 된다. Fig.2에서 실내 음장에서 승객이 느끼는 음압은 차체 패널에 수직인 진동과 음장 내의 전달함수의 관계 식(1)로 표현 할 수 있다.

$$p = \sum \left( \frac{P}{Q_n} \right) \cdot (a_n A_n) \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 실내 음압,  $Q$ 는 체적속도(volume velocity),  $P/Q$ 는 실내 음장의 음향전달함수,  $a_n$ 는 패널의 수직방향의 속도이고,  $A_n$ 는 패널의 면적이다.

### 2.2 ATF 활용성 검토

#### (1) ATF 활용 시나리오

차체 구조-음향감도 해석은 구조와 음장 간 연성 현상을 재현한 해석 방법이며, 해석적으로 발전된 방법이다. 반면 각 모델의 신뢰성이 부족할 경우 해석자가 인과관계를 판단하기 어려움이 있다. 여기에 착안하여 음장 모델을 기반으로 실내 소음 취약부 검토에 활용하는 방법을 검토하였다. 패널 진동은 패널간 진동 크기와 위상 차이의 신뢰성이 중요하지만, 실내 음장 모델은 구조모델에 비하여 상대적으로 모델이 단순하고, 모델 크기도 작으며, 해석 시간도 짧다. 음장 모델을 기반으로 하는 경우는 식(1)에서 패널 진동의 영향은 배제한 실내 음장의 영향만을 고려한다. 따라서 입력 하중에 따라 경향에 차이가 있을 것으로 판단하였다. 이에 입력하중의 상태에 따른 ATF의 활용성을 검토하기 위하여,

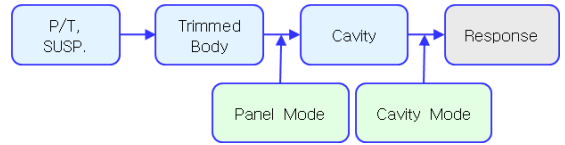


Fig.1 The transfer path of the acoustic response

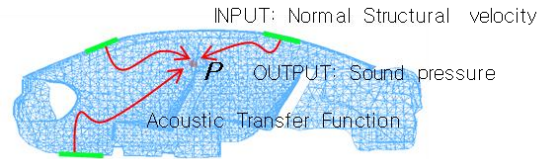


Fig.2 Acoustic Transfer Function

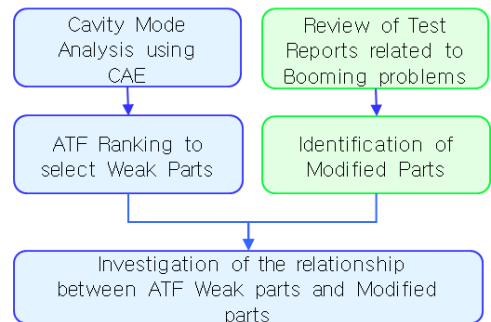


Fig.3 Scenario of the ATF application study

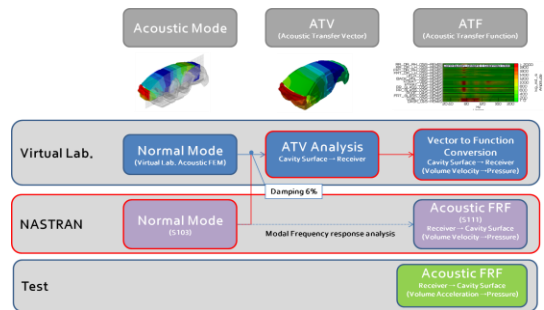


Fig.4 Acoustic Mode, ATV and ATF

Fig.3 과 같이 음장 해석을 통하여 취약부를 찾고, 과거 여러 가지 부밍 사례에서 검토된 부위를 비교하였다. 이를 통하여 부밍 사례 중 ATF의 활용성이 높은 사례를 분류하였다.

#### (2) ATF 분석 방법

음장 모델을 활용한 ATF의 계산은 Fig.4와 같이 NASTRAN 또는 Virtual Lab 소프트웨어를 활용한다. NASTRAN의 경우 진동-음향 상반성을

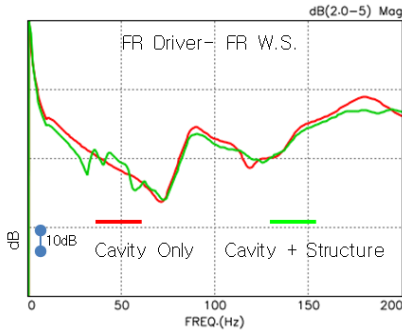


Fig.5 ATF coupled with structure

이용하여, 전석과 후석에서 음향으로 가진 하여 음장 경계면의 음압을 계산하다. 이는 시험의 음향가진과 동일하게 비교할 수 있다. 반면 Virtual Lab은 음장의 노말모드를 활용하여 ATF(Acoustic Transfer Vector)를 구하고, 벡터에서 개별 전달함수를 추출 할 수 있다. 여기서 가진 위치는 Fig.2와 같이 경계면에서 음향으로 가진하여 전석과 후석의 귀 위치의 음압을 계산한다. 선형 진동 해석에서 진동-음향 상반성이 성립하여 가진 위치와 응답위치가 변경되는 경우 경향은 일치한다.

ATF를 음장 모델만 이용해서 구하는 경우 구조모델과 연성해서 구하는 경우와 약간의 차이가 발생한다. Fig.5는 전석 음향가진에 의한 FR W.S.까지의 ATF를 구조와 연성하지 않은 경우와 구조와 연성한 경우를 비교하였다. 20~50Hz의 차이를 보이고 전체적인 경향에는 큰 차이가 없어, 음장 모델만으로 ATF 해석이 유용함을 알 수 있다.

### (3) 실내 음장 형태별 ATF분석

음장 모델을 이용하여, 세단형과 박스형 형태의 음장에 대하여 ATF 분석을 실시하였다. 세단형 차량의 경우 전석 가진 시 120Hz, 170Hz에서 공진피크들이 발생한다. 주요 취약부위는 Dash, FR glass, Cowl, P/Tray 패널들이다. 후석 가진 시는 80Hz, 119Hz, 140Hz 등에서 Dash, Cowl이 취약부로 판단된다. Fig.6은 세단형 음장에서 전석 가진 시 168Hz영역에 대한 ATF의 순위를 보여 준다. ATF 검토 시 Dash, P/Tray, RR glass(bottom) 패널이 주요 취약한 부위다.

소형 박스형 음장의 경우는 전석 가진의 경우 88Hz와 181Hz에서 Dash, FRT glass가, 후석 가진의 경우 62Hz, 120Hz, 181Hz 대역에서 Dash, RR-FLR, T/gate등이 취약부로 분석되었다. Fig. 7은

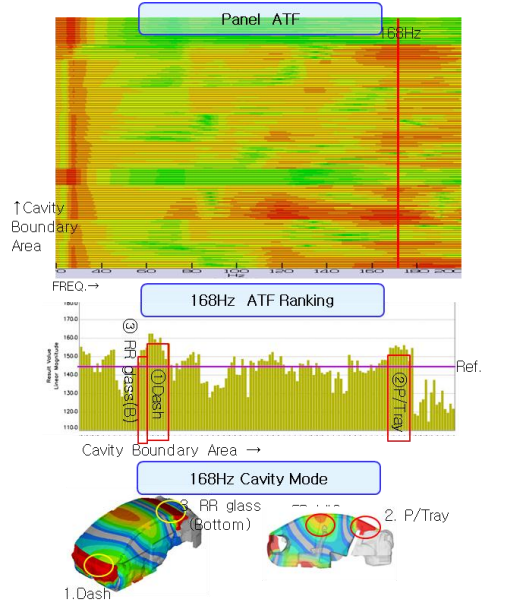


Fig.6 Weak boundary of the sedan by ATF(FR)

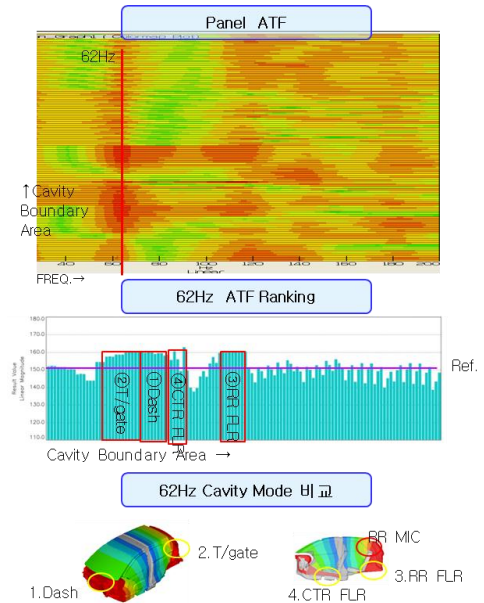


Fig.7 Weak boundary of the box car by ATF(RR)

박스형 음장에서 후석 가진 시 62Hz 영역의 ATF 순위를 보여준다. Dash, T/gate, RR FLR가 주요한 취약부로 판별된다. ATF의 취약부는 각각의 음장 모드에서도 확인할 수 있다.

### (4) 부밍 개선 사례 분석

과거 개발된 차종에 대하여 아이들, 직결역,

고단저속, 가속과 로드 부밍 등에 대한 문제 주파수와 문제 부위에 대하여 조사 검토하였다.

아이들 부밍의 경우는 30~50Hz영역에서 발생되어, 음장 모드와 연계성이 적고, 아이들 주파수와 패널 공진이 부밍의 원인으로 판단된다. 음향감도 제어인자는 아이들 영역 진동수와 각 패널간 공진 회피가 필요할 것으로 판단된다.

직결역 부밍의 경우도 30~50Hz 영역의 문제로 서스펜션과 패널 공진이 원인으로 판단되어, 직결영역에서의 모드 회피가 필요하다.

가속 부밍의 경우 60~180Hz에서 발생되고, 주 개선 부위가 FR roof rail, FR glass, Cowl, Dash 등이다. 이는 ATF가 취약한 유사한 패널의 진동개선을 통하여 부밍 소음을 저감시켰다. 또한 가속 부밍의 개선 부위가 S/MBR, FR Strut 등 인 경우도 있는데, 이 경우는 진동 전달 경로상의 개선으로 부밍 개선이 수행된 것으로 판단된다. 따라서 가속 부밍의 경우는 ATF분석을 통한 개선이 가능할 것으로 판단된다.

### 2.3 ATF 분석의 활용

부밍 소음 개선이 검토된 차량의 해석 모델을 이용하여, ATF 분석을 실시하여 가속 부밍의 개선 가능성을 파악하였다.

70Hz와 130Hz에서 가속 부밍이 발생하는 중형차량에 대하여 ATF분석을 실시하였다. 부밍의 원인은 실내 음장과 차체 모드 연성에 의한 패널 진동이 음향감도 증폭이 발생한 경우이다.<sup>(7)</sup>

실내 음장에 대한 모드 해석과 ATF 분석으로 전/후석 가진 시의 음장 경계면의 취약부를 Fig. 8과 같이 파악하였다. 그리고 전/후석 음향 가진에 의한 구조물의 ODS를 검토하여 문제부위의 움직임을 확인하였다. 전석 가진 시 70Hz, 130 Hz의 ATF의 감도가 낮았다. 이는 전석 운전자의 귀 위치가 음장 노달 포인트에 위치에 기인한 것으로 판단된다. 후석 가진 시의 ATF는 Dash, Cowl, FR Glass하단, P/tray, RR glass, Roof RR rail이 취약하였다.

70Hz와 130Hz영역에서 ATF가 취약한 FRT Glass, P/Tray부에 대하여, 초기 차량(A)와 개발 차량(B)에 대하여 음향감도 및 진동감도를 비교해 보았다. 이는 실내 음장의 ATF분석으로 개선 부위를 파악할 수 있지만, 실내 음장 자체가 개선의 대상은

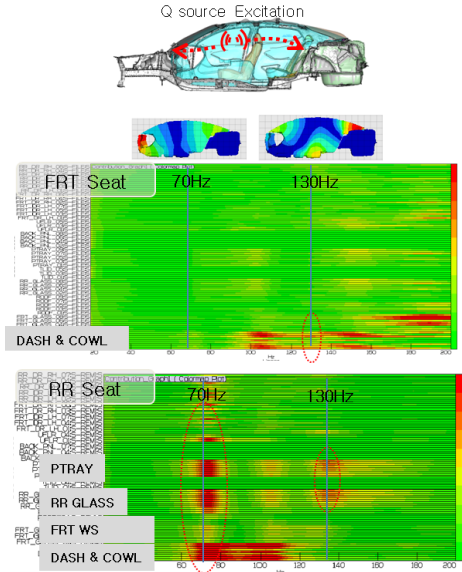


Fig.8 A-Car ATF Analysis

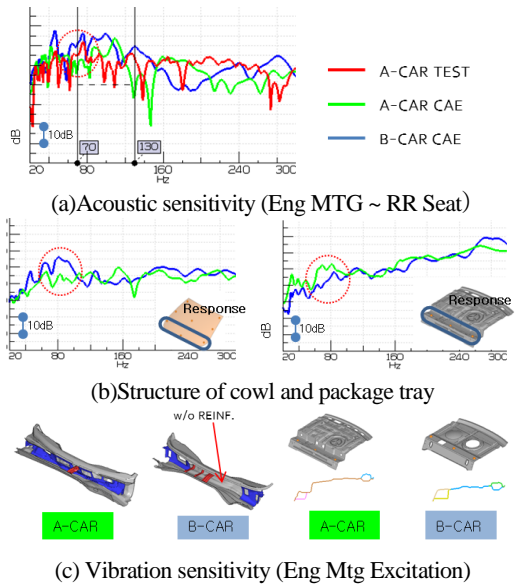


Fig.9 Comparison of acoustic and vibration

될 수 없으므로, ATF의 취약부분의 구조진동감도 개선을 통하여 음향감도 개선여부를 파악하는 것이 목적이다.

Fig.9에서 70Hz의 음향감도가 초기차량(A)대비 개발차량(B)가 불리하다. 이에 취약부로 파악된 FR Glass 하단과 P/Tray부의 진동감도를 비교해 보았다. 이 경우 Glass 하단의 진동감도는 초기 차량(A) 대비 개발차량(B)가 불리하였다. 반면

P/tray의 경우는 개발차량(B)의 진동감도는 양호하였다. 개발차량(B)의 음향감도개선을 위하여 FR Glass 하단의 Cowl 구조에 대하여 원리 해석을 수행하였다.

Fig.10(a)과 같이Cowl에 대하여 보강재를 적용한 강성강화와 매스증가를 부여하여 진동감도와 후석의 음향감도 개선 여부를 확인하였다. Fig.10(b)에서 강성과 매스증가를 통하여 70Hz의 진동감도가 변화함을 알 수 있다. 또한 이에 대한 음향감도 개선됨을 알 수 있다. 강성강화의 경우 70Hz 감도가 개선되나, 80Hz감도는 다소 불리해 졌다. 이는 70~80Hz에서 ATF가 불리하나, 강성개선으로 공진대역을 완전히 벗어나지 못한 것으로 판단된다.

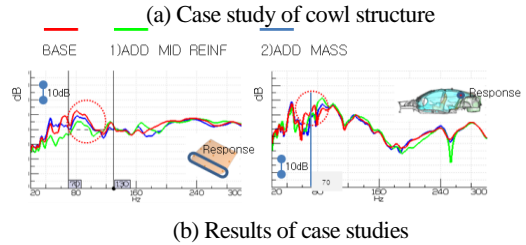
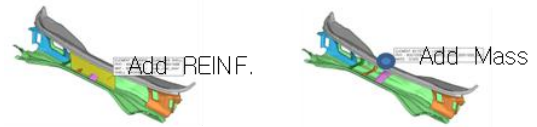


Fig.10 Effect of modified cowl structure

### 3. 결 론

실내 음장의 음향전달함수(ATF)을 분석하여 취약한 주파수와 음장 경계면을 판정하였다. 구조-음향 연성을 하지 않으므로 생기는 단점도 있지만, 비교적 단순한 해석을 통하여 취약부를 판단할 수 있었다.

ATF 분석의 활용성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ATF 분석을 실시하여 실내 음장별 경향을 파악하였다. 음장의 전후 모드가 발생하는 주파수가 주로 취약하며, 음장 형태별 동일 특징을 가지나, 음장의 크기에 따라 공진주파수 대역이 변화함을 알 수 있었다.

(2) 과거 개발 차량의 부밍 발생 사례 분석과 ATF분석을 비교하여, 가속 부밍의 경우가 ATF분석을 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

(3)가속부밍 발생 사례에서 ATF분석으로 파악된 취약한 부위의 개선을 통하여, 구조-음향감도 개선을 확인 할 수 있었다. 이를 통하여 선행단계에서 음장 특성을 미리 파악하고, 구조물의 비연성 설계 검토가 필요함을 알 수 있었다.

(4) 하중 전달 경로를 고려하여, 차체 입력점을 가진하여 구조-음장을 연성해석을 하는 것이 일반적이나, 선형 동적 해석의 구조-음향 상반성을 활용하여 응답점의 음향가진 해석으로 패널 등의 거동을 파악 할 수 있다.

(5) 향후 과제는 음장 해석 모델 해석 정확성을 검토/개선을 수행하고, ATF분석을 활용하여 패널간 음장간 모드맵 구성하여 실내 음장 형태별 특성을 데이터베이스화 하고자 한다.

### 참 고 문 헌

- (1) Maruyama, S., Iba, S., Saito, M., Yoshimura, T., 2012, "Development of acoustic leakage element for modeling the gaps between interior trim parts of cabin", Preprints of JSAE Scientific Lecture Series, No. 45-12
- (2) Oh, H.J., Lee, J.Y., Jo,H.W.,2011, "A Study of Cavity modeling for reliable noise prediction in the passenger car" Hyundai Motor Group Conference, VN-2011-004
- (3) Kavarana, F., Schroeder, A., 2012, "A Practical CAE Approach to Determine Acoustic Cavity Modes for Vehicle NVH Development" SAE 2012-01-1184
- (4) Iba, S., Maruyama, S., Shimada, H., 2013, "A New Modeling Technique of Large Trim Part Air Passages for an Accurate Acoustic Model", SAE 2013-01-1996
- (5) Kim, T.C., Kang, S.J. and Seo, J.B.,1992, "Noise reduction of a vehicle acoustic cavity sample using coupled Structural-Acoustic Finite element analysis" , Proceedings of the KSNVE Conference, p141~146.
- (6) Jeong, J.D., Yoo, S.W., Choi, H.G., Park, D.C., Lee, J.M., 1997, "A Study on the Noise Reduction Method of Vehicle Interior Noise Using the Sensitivity Analysis for Structural-Acoustic System" KSAE Conference 97380249
- (7) Min, J. M., Lee, M.S., Baek, H.S., Lee, M.S., 2013, "A Parameter Study for Vibro-Acoustic Sensitivity", KSAE13-B0335