

# 부재의 강체 정보를 이용한 부밍 소음의 해석

○ 황 우석\*, 이 두호\*\*

## Analysis of Booming Noise using Rigid Body Information of Parts

Woo Seok Hwang and Doo Ho Lee

### ABSTRACT

While the booming occurs in a cabin, the powertrain and subframes which are the main sources and paths of the booming, show the rigid body motions. This paper presents a technique to predict the booming noise in a car using the rigid body information of the important parts. The rigid body information comes from the CAD data, from which we can predict the response of the complex system. Since the mechanism of this technique is very similar to the finite element formulation, we can apply it to the complex system with ease.

### 1. 서론

자동차의 진동소음 성능은 자동차의 품질을 좌우하는 중요한 요소들 중의 하나이다. 구조 진동에 의하여 발생하는 차실의 부밍 소음은 발생 가능성이 높으므로 자동차의 개발 단계에서부터 반드시 고려해야 한다. 부밍 소음의 발생 원인과 전달 과정은 매우 복잡하므로 이를 분석하고 저감하기 위하여 다양한 기법들이 사용된다[1].

진동소음을 분석하기 위한 방법은 크게 실험적인 방법과 수치 해석을 포함한 해석적인 방법으로 나눌 수 있다. 최근 들어 유한요소법 등을 이용한 수학적 모델과 실험적으로 구한 모델을 결합한 복합 모델(hybrid model)을 사용하여 보다 정확하고 빠른 해석을 하기 위한 시도들이 행해지고 있다[2-5]. Steyer 등은 동강성을 이용하여 차량의 진동소음현상을 해석하고, 그 정확도를 개선하기 위하여 특이치 필터의 효과를 살펴 보았다[2,3]. Bregant 등은 실험으로 구한 전달 함수만을 이용

하여 부분 구조 해석을 하였으며[4], Wyckaert 등은 노면 소음의 해석을 실시하였다[5].

전달 함수를 이용한 부분 구조 해석에서는 전체 구조물을 기진력을 포함하는 부분과 응답부를 포함하는 부분으로 나누고, 각 부분 구조에서의 전달 함수를 이용하여 전체 구조물의 응답을 예측한다. 각 부분 구조에서의 전달 함수는 실험적으로 혹은 해석적으로 구할 수 있다. 이 방법의 장점은 각 개발 단계에서 사용이 가능한 모델을 선택하여 사용할 수 있다는 점이다.

참고문헌 [6]에서는 전달 함수를 이용한 부분 구조 해석을 중형 승용차 실내의 부밍소음 예측에 적용하였다. 응답 부위를 포함하는 승용차의 차체(trimmed body)를 하나의 부분 구조물로 정의하여, 이에 대한 가격 시험(impact test)으로 실험 모델을 구성하였다. 또한 주요 진동/소음원인 엔진/변속기부(Powertrain) 및 이를 지지하는 중앙 부재(Center Member), 가로 부재(Cross Member)를 하나의 부분 구조물로 두고, 이를 MSC/NASTRAN을 사용하여 유한 요소 모델로 작성하였다. 그러나, 부밍 현상이 3000RPM이내의 구간에서 발

\* 대구대학교 자동차·산업·기계공학부

\*\* 국민대학교 자동차공학전문대학원

생하고 있고, 진동 소음원을 포함하는 부분 구조는 이 구간에서 강제 운동을 하고 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서는 강제 운동만이 일어나는 부재들의 상세한 유한요소 모델을 만들기보다는 각 부재들의 강제 정보만을 이용하여 부밍을 해석할 수 있는 간단한 해석 방법을 개발하였다. 각 부재의 강제 정보와 연결점의 좌표를 이용하여 연결점 간의 전달 함수를 계산하고, 유한요소법의 어셈블링 기법을 이용하여 전체 계의 응답을 계산할 수 있는 시스템 방정식을 유도하여 시스템의 응답을 예측하였다.

## 2. 이론적 배경

Fig.1은 여러 개의 부분 구조물로 구성된 일반적인 구조물을 나타낸다. 부분 구조 A, B, C와 D는 연결점 i, j, k, l에서 그림과 같이 연결되어 있다. 부분 구조 A와 B에 가해진 외력에 의하여 부분 구조 B와 C의 임의점에서 응답을 예측하고자 한다. 부분 구조 B를 분리하면 Fig.2와 같다. 전달 함수의 정의와 선형 시스템의 중첩 원리를 이용하면 점 i에서의 가속도  $a_i^B$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$a_i^B = H_{ii}^B R_i^B + H_{ij}^B R_j^B + H_{ik}^B R_k^B + H_{il}^B R_l^B + H_{is}^B F_s^B \quad (1)$$

여기서,  $H_{ij}^B$ 는 j점을 가진했을 때 i점의 가속도를 나타내는 전달함수,  $R_j^B$ 는 j점에서의 내력이며,

$F_s^B$ 는 s점에 작용하는 외력이다. 상첨자 B는 부분 구조 B에서의 값을 의미한다. 반력은 부분 구조간의 상대 변위와 연결 강성의 곱으로 표현할 수 있으므로 j점에서의 내력이며 j점을 가진했을 때 i점의 응답을 나타내는 전달함수,

$$R_i^B = K_i(u_i^A - u_i^B) \quad (2)$$

이며, 다른 연결점에서의 내력도 마찬가지로 방법으로 표현할 수 있다. 이를 식(1)에 대입하여 정리하면

$$a_i^B - H_{ii}^B K_i u_i^A + H_{ii}^B K_i u_i^B + H_{ij}^B K_j u_j^B - H_{ij}^B K_j u_j^D + H_{ik}^B K_k u_k^B - H_{ik}^B K_k u_k^C + H_{il}^B K_l u_l^B - H_{il}^B K_l u_l^C = H_{is}^B F_s^B \quad (3)$$

이다. 마찬가지로 방법으로 부분 구조 A의 모든 연결점에 대하여 식(3)과 같은 관계를 구할 수 있다. 외력이 없는 부분 구조 C에 대하여 위의 방법을 적용하면

$$a_i^C - H_{ii}^C K_i u_i^B + H_{ii}^C K_i u_i^C - H_{ik}^C K_k u_k^B + H_{ik}^C K_k u_k^C = 0 \quad (4)$$

과 같이 우항이 0이다. 위의 관계는 어떤 요소에 대하여 그 요소에 포함된 절점간의 관계를 보여주는 유한요소 정식화의 과정과 매우 유사하다. 전체 구조물의 변위를 하나의 변위 벡터로 표시하고 식(3) 및 (4)와 같은 절점간의 관계를 행렬식으로 표현하는 과정은 유한 요소법의 어셈블링 기법을 사용한다. 이와 같은 과정을 거쳐 다음과 같은 행렬식을 구한다.

$$\{a\} + [H]\{u\} = \{F\} \quad (5)$$

여기서,

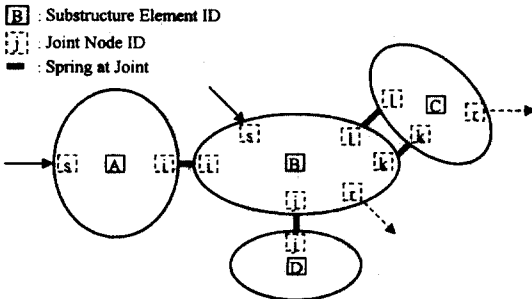


Fig.1 Complex System for FRF Based Element Formulation

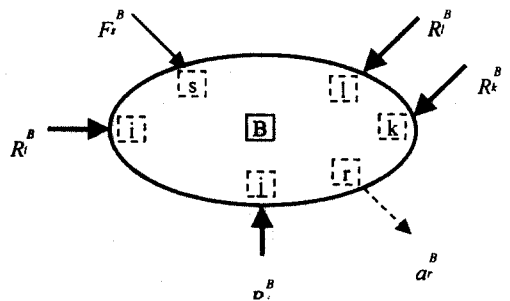


Fig.2 Free Diagram of Substructure B

$$\begin{aligned} \{a\} &= \{a_i^A \quad a_i^B \quad a_j^B \quad a_j^D \quad a_k^B \quad a_k^C \quad a_i^B \quad a_i^C\}^T \\ \{u\} &= \{u_i^A \quad u_i^B \quad u_j^B \quad u_j^D \quad u_k^B \quad u_k^C \quad u_i^B \quad u_i^C\}^T \quad (6) \\ \{F\} &= \begin{Bmatrix} H_{is}^A F_s^A & H_{is}^B F_s^B & H_{is}^B F_s^B & 0 \\ H_{ks}^B F_s^B & 0 & H_{is}^B F_s^B & 0 \end{Bmatrix}^T \end{aligned}$$

이다. 가속도와 변위와의 관계를 이용하면

$$\{a\} = -\omega^2 [I] \{u\} \quad (7)$$

이므로, 이를 식(5)에 대입하면

$$([H] - \omega^2 [I]) \{u\} = \{F\} \quad (8)$$

이다. 식(8)은 8개의 미지수를 갖는 8개의 연립 방정식이므로 이의 해를 구하면 전체 시스템에서 각 절점들의 변위를 계산할 수 있다.

일단 모든 변위가 계산되면 이로부터 원하는 점의 응답을 계산할 수 있다. 부분 구조 B에서 R 점의 응답은 식(1)을 유도했을 때와 마찬가지로 전달 함수의 정의와 선형 시스템의 중첩원리를 사용하여 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$a_R^B = H_{Ri}^B R_i^B + H_{Rj}^B R_j^B + H_{Rk}^B R_k^B + H_{Ri}^B R_i^B + H_{RS}^B F_s^B \quad (9)$$

식(9)에서의 내력은 식(2)의 내력과 같으므로

$$\begin{aligned} a_R^B &= H_{Ri}^B K_i u_i^A + H_{Ri}^B K_i u_i^B + H_{Rj}^B K_j u_j^B \\ &\quad - H_{Rj}^B K_j u_j^D + H_{Rk}^B K_k u_k^B - H_{Rk}^B K_k u_k^C \\ &\quad + H_{Ri}^B K_i u_i^B - H_{Ri}^B K_i u_i^C + H_{RS}^B F_s^B \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)과 같이 표현할 수 있다. 이를 행렬식으로 쓰면

$$\{a_R\} = [H_R] \{u\} + [H_{RS}] \{F_S\} \quad (11)$$

이다. 식(8)에서 구한 변위를 식(11)에 대입하면 부분 구조상의 임의의 점에서 응답을 계산할 수 있다.

### 3. 간단한 사다리 구조물의 응답

Fig.3의 사다리 구조물은 4개의 부분 구조들로 이루어져 있으며, 각 부분 구조물은 스프링에 의하여 연결되어 있다. 절점 9에 가해진 외력에 의하여 절점 10에 발생하는 응답을 계산하고자 한다. 2절에서 유도한 전달함수 요소법에 의하여 방정식을 구하면 식(8)과 같이 표현된다. 여기서,

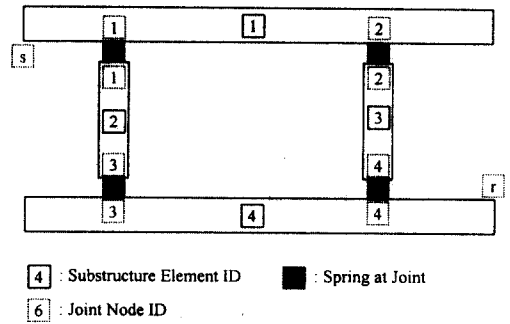


Fig.3 FRF Based Element Model for Raddle

$$\{u\} = \{u_1^1 \quad u_2^1 \quad u_2^2 \quad u_3^2 \quad u_3^3 \quad u_4^3 \quad u_4^4 \quad u_4^4\}^T \quad (12)$$

$$\{F\} = \{H_{1s}^1 F_s^1 \quad 0 \quad H_{3s}^3 F_s^3 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T$$

이다. 부분 구조 4의 절점 r의 응답은 식(11)과 같이 표현되며, 응답점이 하나이고 부분 구조 4에는 외력이 가해지지 않으므로 각 행렬은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \{a_r\} &= \{a_r^4\} \quad [H_{RS}] = 0 \quad (13) \\ [H_R] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & H_{rs}^4 K_s & -H_{rs}^4 K_s & H_{rs}^4 K_s & -H_{rs}^4 K_s \end{bmatrix} \end{aligned}$$

위와 같이 식(8)과 (11)의 각 행렬을 구한 후 이를 풀어서 전체 시스템의 응답을 예측하였다. 이 방법의 타당성을 검증하기 위하여 똑같은 구조물을 MSC/NASTRAN으로 모델화하여 전체 시스템의 응답을 계산한 후 본 논문에서 제시한 방법에 의하여 계산한 결과와 비교하였다.

절점 s에 단위 힘을 가하였을 때, 절점 r의 가

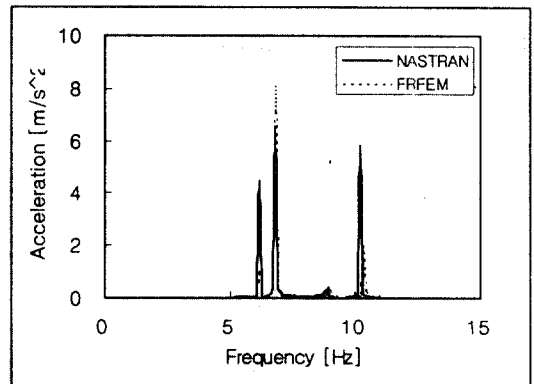


Fig.4 Response at point r Excited at point s in z-direction

속도를 계산하면 이는 입출력간의 전달 함수와 같다. Fig.4에서 절점 s를 z방향으로 가진 했을 때 z 방향 응답을 볼 수 있으며, 이를 MSC/NASTRAN 을 이용한 해석 결과와 비교하였다. 공진이 일어나는 주파수 대역은 일치하나 응답의 수치를 정확하게 예측하지는 못하였다.

#### 4. Booming 해석

차실내 부밍 소음을 해석하기 위하여 다음과 같은 방법으로 전달 함수 요소 모델을 만들었다.

부분 구조 A는 엔진 기진력을 포함하는 엔진/변속기부이고, 부분 구조 B와 C는 각각 이를 지지하는 중앙 부재(Center Member)와 가로 부재(Cross Member)로 구성된다. 부분 구조 D는 차실내 소음을 응답으로 하는 차체이다. Fig.5는 부분 구조 모델의 구성도이다. 부분 구조 A는 1, 2, 3, 4의 4개 연결점에서 엔진 마운트로 부분 구조 B와 D에 연결된다. 부분 구조 B는 5점과 6점에서 고무 부쉬로 부분 구조 D와 C에 연결되며, 부분 구조 C는 7, 8, 9, 10점에서 부분 구조 D에 연결된다. 연결점 전후의 절점이 각 부분 구조마다 존재하므로 총 절점 수는 20개이다. 각 절점은 3방향 변위를 가지므로 3개의 자유도를 가지므로 총 연결 자유도는 60이다.

전달 함수 요소법에 사용되는 각 행렬을 2절의 이론에 따라 구한다. 이를 위하여 먼저 전달 함수들을 구해야 하는데, 부분 구조 A, B, C는 관심 영역에서 강제 운동을 하므로 강제 전달 함수를

계산한다. 부분 구조 D는 복잡한 구조물이고, 실차가 있으므로 실험을 통하여 전달 함수를 측정한다. 시험 차량에서 부분 구조 A, B, C에 해당하는 부품들을 탈거한 후, 연결점을 각 자유도 방향으로 가격하였다. 이 때, 각 연결점에는 3축 가속도계를, 뒷좌석에는 마이크로폰을 장착하여 전달 함수를 측정하였다. 측정한 전달 함수는 크게 두 가지인데, 하나는 변위 계산시 사용할 부분 구조 D에서 연결 자유도 21개 사이의 전달 함수이고 다른 하나는 응답 계산시 사용할 연결 자유도 21개와 뒷좌석 좌우 소음간의 전달 함수이다.

다음으로 연결부 고무 마운트의 강성 [K] 를 고무 특성 시험기를 이용하여 실험적으로 측정하였다. 고무 마운트의 강성은 가진 주파수와 가진 변위에 따라 변하므로, 실차 주행시 주파수 변화에 따른 고무 마운트 전후의 상대 변위를 측정하였다. 이를 가진 변위의 기준으로 주파수를 일정 구간에 대하여 증가시키면서 강성을 측정하였다.

이상의 단계를 통하여 식(8)과 (11)의 정식화를 완성하였다.

본 논문에서는 엔진 폭발 기진력에 의하여 차실내에 발생하는 소음을 해석하고자 하므로, 엔진의 작동력을 계산하였다. 엔진 작동력은 크랭크/피스톤 부분에서 발생하는 불균형 수직력과 관성력, 각가속도 및 가스 압력에 의한 토오크가 중요한 성분이다. 본 연구에 사용된 엔진의 데이터를 이용하여 수직력과 토오크를 계산하였다[7].

MATLAB을 이용하여 위의 모든 과정을 반영할 수 있는 해석 프로그램을 작성하여 뒷좌석에서의 소음을 예측하였다. Fig. 6은 실내 소음 계산 결과와 실차 주행시 측정된 소음 레벨을 보여준다.

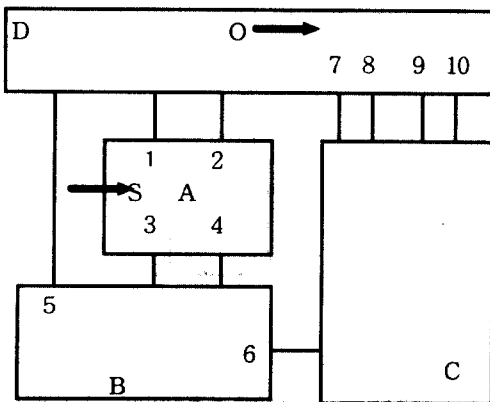


Fig.5 Model for Booming Analysis

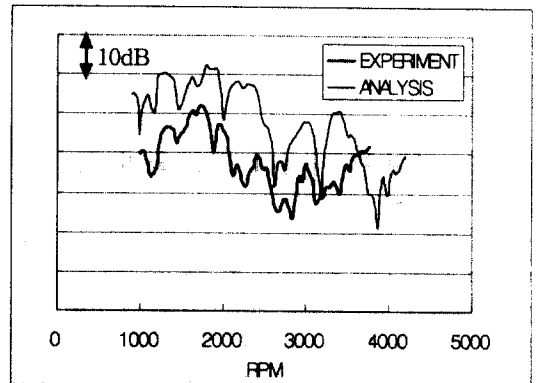


Fig.6 Comparison of Booming Noise Level

소음 레벨은 시스템의 공진점에서 피크를 나타내며 1800RPM 부근에서 최대치를 갖는다. 전체적인 형태는 유사하다고 볼 수 있으나, 2200RPM 부근에서 실험치와 다른 큰 피크가 나타나며 전체적인 소음 레벨이 대체적으로 높다.

## 5. 토론

강체 운동이 포함된 복잡한 구조물의 부분구조 해석을 위하여 각 부재의 강체 전달 함수를 계산한 후 이를 합성하여 전체 구조물의 응답을 계산하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 간단한 사다리형 구조물의 동적 응답 및 자동차의 실내 소음을 해석한 결과 공진이 일어나는 주파수 대역은 일치하나 응답의 수치를 정확하게 예측하지는 못하였다. 이에 대한 원인 분석과 개선을 계속 진행할 예정이다.

둘째, 복잡한 구조물의 일부가 강체 운동을 하는 경우, 이러한 부분은 CAD 시스템이 제공하는 강체 정보만으로 전체 시스템의 해석이 가능하다.

셋째, 제시된 전달함수 합성법은 그 구조가 유한요소법과 유사하여 운동 방정식의 체계적인 구성이 가능하다. 이는 단품 단계에서의 해석이나 실험으로부터 구한 전달 함수를 유용하게 이용하여 전체 시스템의 구성을 가능하게 하리라 기대된다.

## 참고문헌

1. Lee, D.-H., Hwang, W.-S. and Kim, M.-E., Booming Noise Analysis in a Passenger Car using a Hybrid-Integrated Approach, SAE Paper No.2000-01-0723, 2000.
2. Steyer, G.C. and Lim, T.C., "Practical Considerations of Vehicle Noise and Vibration Simulation Using an Improved Dynamic Impedance Method," SAE Paper No.931313, 1993.
3. Matsui, T., Suzuki, K., Mori, K and Steyer, G.C., "An Improved Dynamic Impedance Method for Dynamic Analysis of a Vehicle," SAE Paper No.931214, 1993.
4. Bregant, L., Otte, D. and Sas, P., "FRF Substructure Synthesis : Evaluation and Validation of Data Reduction Method," Proceedings of the 13rd IMAC, Nashville, 1995.
5. Wyckaert, K., Brughmans, M., Zhang, C. and Dupont, R., "Hybrid Substructuring for Vibro-acoustical Optimization : Application to Suspension -Car Body Interaction," International Noise and Vibration Conference, Traverse City, 1997.
6. 황우석, 이두호, 전달함수를 이용한 부밍 소음의 부분구조해석, 한국소음진동공학회 1999년도 추계학술대회 논문집, pp.819-823, 1999.
7. 엔진 마운트계 해석 및 설계 기술개발, 삼성 자동차 보고서, 1997.