

# TPA 연계 CAT 를 통한 고속버스 부밍 개선 Interior Booming Improvement of Coach Bus by CAT being linked with TPA

이 태 훈† · 김 기 성\* · 안 상 도\* · 김 유 겸\*  
Taehoon Lee , Kisung Kim , Sangdo Ahn and Yukyeom Kim

## 1. 서 론

고속버스는 약 45 명의 승객을 태우고 주로 중장거리를 오가는 교통수단이다. 따라서 차실내 전 부분에 걸쳐 안락함과 정숙성이 담보되어야 한다. 본 논문은 고속버스의 실내 가속부밍 개선시 이루어졌던 일련의 과정과 그 과정 속에 도입되었던 TPA 연계 CAT 수행과정을 소개하는데 목적이 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 TPA 를 이용한 CAT 기법

#### (1) 구조기인소음

차량 실내에서 발생하는 부밍소음을 원인별로 구분하면 구조기인 소음(structure-borne noise)과 공기기인 소음(air-borne noise)으로 구분할 수 있다. 대형버스의 구조기인 부밍소음은 파워트레인 자체에 의해 발생하는 진동 성분이 마운트, 액슬, 부시 등의 전달 경로를 따라 차체를 가진함으로써 실내에서 부밍소음의 형태로 나타나는 소음을 뜻한다.

PY 고속버스에서 문제된 부밍의 경우, 기초시험을 통해 구조기인소음으로 파악되었으며 이를 전달경로 해석법을 이용하여 규명하기 위해서는 차체로 유입되는 가진력을 명확히 파악해야 했다.

#### (2) Transfer Path Analysis

구조기인 소음의 전달 경로 해석법의 가진력 추정과정은 직접 측정을 통한 직접법과 수학적인 방법을 통해 소음원을 추정하는 간접법이 있다. 동강성법을 이용하여 가진력을 추정하기 위해서는 전달 경로상에 마운트나 부시 등의 동강성(dynamic stiffness)과 전달 경로 부품의 상대변위의 곱으로 추정한다. 여기서 동강성은 정밀한 동강성 측정기를 이용하여 측정하며, 상대변위는 주행중에 측정된 변위를 이용하여 가진력을 계산한다. 그리고 역행렬법중 full matrix inversion method 는 소음원들간의 간섭 효과를 고려하여 행렬의 비대각 항들까지 모두 고려한 방법이다. 여기서, 각 전달경로 사이의 전달함수행렬은 입력점 이너턴스 시험(IPI: input point inertance)을 통해 구할 수 있으며, 주행 중 각 전달경로에서 측정된 가속도(acceleration)와의 곱으로 추정할 수 있다. 하지만, 대부분의 차량에서 차체 구조상의 문제로

전달 경로상의 지점을 법선방향으로 정확히 가진할 수 없다는 한계가 존재함에 따라 음향학적 상반 원리(acoustic reciprocity)를 적용하여 실내 음원 측정점에서 차체를 충분히 가진할 수 있는 라우드 스피커(loudspeaker)로 가진하고, 전달 경로상의 지점에서 가속도를 측정하여 구조-음향 전달 함수를 측정할 수 있다.

#### (3) 동강성법과 역행렬법의 합성

Full matrix inversion method 또는 dynamic stiffness method 에 의해 문제되는 부밍소음의 주전달경로가 파악되고, 그 소음이 공기기인소음을 무시할 수 있을 정도로 구조기인소음이 지대하며, 추정된 전달경로지점상의 주요한 몇 개 지점의 동강성값이 비교적 정확하게 구할 수 있다면, 식(1)과 같이 소음은 기존 역행렬법과 동강성법을 합성하여 재구성할 수 있다.

$$p = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{p_{ear}}{F_i} \right\} \times \{F_{mi} + F_{si}\} \quad (1)$$

여기서,  $F_{mi}$ 는 full matrix inversion 법에 의해 추정된 force 이고,  $F_{si}$ 는 dynamic stiffness 법에 의해 추정된 force 이다. 이와 같이 합성식으로 추정된 force 를 통해 계산되어진 소음이 기존 full matrix inversion 법 또는 dynamic stiffness 법에 의해 구해진 소음들과 비교하여 동등하다는 것이 컴퓨터 시뮬레이션에서 검증된다면, 이 근거를 가지고 전달경로상 임의 지점의 물리적 특성 또는 연결특성을 변경할 수 있고, 차량소음 개선 여부를 시제품 제작장착 평가 이전단계에서 컴퓨터를 통해 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있다. 이는 곧 해석적 접근이 아닌 순수 시험 Data 를 이용하여 구현하는 CAT(Computer Aided Testing) 라고 볼 수 있으며, 이러한 시험 프로세스는 차량 평가자에게는 여러가지 면에서 시간과 노력을 줄일 수 있는 긍정적 효과를 가져온다.

### 2.2 TPA 연계 CAT 실시예

#### (1) PY 고속버스 실내부밍 TPA 결과

부밍의 원인을 파악하기 위해 먼저 파워트레인 및 액슬부의 Modal Test 및 Running Mode Analysis 를 수행하였다. 여기서 부밍의 원인으로 추정되는 진동모드가 파악되었으며 그림 1 와 같다.

† 이태훈 ; 현대자동차

E-mail : caplee@hyundai-motor.com

Tel : (031) 368-6154, Fax : (031) 368-6149

\* 현대자동차

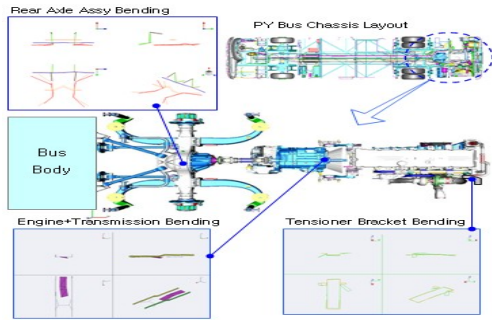


그림 1. 부밍문제모드

파악된 진동모드의 개선을 위해서는 액슬과 연결된 리어 서스펜션계와 파워트레인(엔진+트랜스미션)의 구조 및 강성 변경이 불가피하다. 그러나 현실적 해법을 찾기 위해 전달경로변경의 방안을 모색하게 되었으며 TPA 를 이용하여 문제부밍의 주 전달경로가 Radius Rod 부로 파악되었고 그림 2 과 같은 결과가 도출되었다.

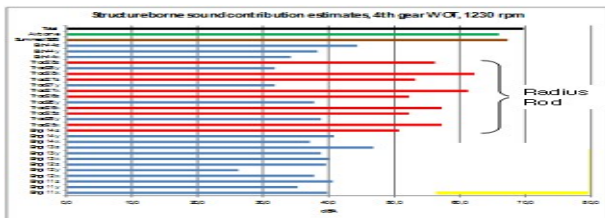


그림 2. 문제부밍 전달경로 분석결과

### (2) Synthetic TPA 를 이용한 CAT

본 연구에서는 설계 또는 해석부분의 도움없이 기존 TPA 를 통해 얻어진 data 와 시험장비만을 이용하여 관심부의 특성변경 효과파악과 개선방향 설정을 하기 위한 기초시험을 컴퓨터로 수행하는 것에 집중하고자 한다. 이용된 컴퓨터 프로그램은 LMS 사의 Virtual Lab 이다. 그림 3 은 실제 문제가 되는 실내부밍의 C3 성분과 full matrix inversion 법에 의해 계산된 C3 성분을 보여준다. 예상했던 바와 같이 예측된 실내부밍은 실제소음과 아주 양호한 correlation 이 됨을 보여준다.

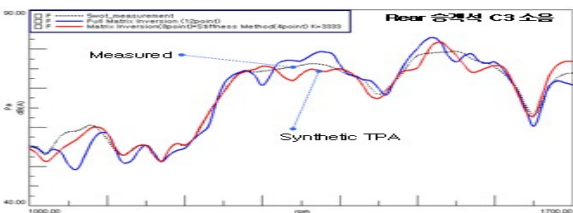


그림 3 예측 vs Full Matrix Inversion vs 합성

TPA 합성을 위해 도입할 stiffness 법에 대해서도 기존 측정소음과 비교한 결과 양호한 correlation 이 있음을 확인하였고 이를 토대로 두가지 방법의 합성을 통한 Synthetic TPA 법에 의한 소음예측을 시도하였다. 본 연구는 Stiffness 법으로 구해야 할 force 로는 Radius Rod 부 전달경로만으로

한정하였다. 이미 구해진 구조-음향 전달함수를 이용하여 full matrix inversion 법에 의해 8 개 전달경로의 force 를 구하고, 나머지 4 개의 전달경로상의 force 는 실험을 통해 구해진 동강성을 바탕으로 각 경로의 가속도 계측으로 구해진다. 이러한 과정을 통해 얻어진 synthetic TPA 예측 실내부밍 소음성분이 그림 3 에 나타나 있다. 그림 3 의 결과는 TPA 합성법에 의해 CAT 가 가능함을 보여주는 좋은 예가 될 수 있다. 즉, 해석 데이터의 이용 없이 순수한 시험 데이터와 시험 Tool 을 이용하여 문제부의 기계적 성질의 변경효과를 예측할 수 있었다는 사실이다.

### (3) Radius Rod Bush 특성치 변경 실차시험

본 연구는 이러한 예측을 검증하기 위해 CAT 에 사용되었던 초기 및 개선 특성치를 지닌 시제품을 직접 제작하여 검증절차를 진행하였다. 개선시제품의 제작과정에서는 단순 시제품이 아닌 양산을 고려한 부품을 개발하기 위해 내구성도 고려하여야만 했다. 이러한 개발품의 실차시험 효과는 그림 4 에서 볼 수 있다.

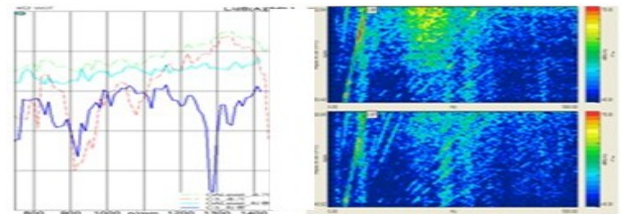


그림 4. Radius Rod 특성치 변경효과

그림 4 에서 신규 Radius Rod Bush 의 성능은 문제부밍을 충분히 저감할 수 있을 만큼 효과가 크게 나타남을 알 수 있으며, 이를 통해 주 전달경로의 진동절연 증대로 실내부밍이 크게 개선됨이 검증되었다.

## 3. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) TPA 를 통해 고속버스 부밍의 원인모드와 주 전달경로를 파악할 수 있었다.
- (2) 기존 TPA 기법을 이용하여 구조기인소음측면 합성 TPA(Synthetic-TPA)를 CAT 로 수행하였다.
- (3) 실내부밍을 개선하기 위해 내구성이 담보된 신규 Radius Rod Bush 를 개발하여 특허기술을 확보하고, NVH 사양 최적화 기반을 갖추게 되었다.

## 참고문헌

1. Auweraer, H.V., "Transfer Path Analysis in Critical Path of Vehicle Refinement:the Role of Fast, Hybrid and Operational Path Analysis ", SAE Paper No.2007-01-2352, 2007.
2. "Virtual Lab" Manual., LMS, 2008.