

Hybrid TPA 를 이용한 파워트레인 구조기인 실내소음 예측

Prediction of Interior Noise by Excitation Force of Powertrain Based on Hybrid Transfer Path Analysis

✉ 김성종¹, 이상권¹

✉ Sung Jong Kim¹ and Sang Kwon Lee¹

¹ 인하대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Inha Univ.)

✉ Corresponding author: kimsungjong@hotmail.com, Tel: 032-860-8776

Manuscript received: 2008.3.21 / Revised: 2008.9.11 / Accepted: 2008.9.17

In early design stage, the simulation of interior noise is useful for the enhancement of the noise, vibration and harshness (NVH) performance in a vehicle. The traditional transfer path analysis (TPA) technology cannot simulate the interior noise since it uses the experimental method. In order to solve this problem, in this paper, the hybrid TPA is developed as the novel approach. The hybrid TPA uses the simulated excitation force as the input force, which excites the flexible body of a car at the mount point, while the traditional TPA uses the measured force. This simulated force is obtained by numerical analysis for the FE (finite element) model of a powertrain. The interior noise is predicted by multiplying the simulated force by the vibro-acoustic transfer function (VATF) of the vehicle. The VATF is the acoustic response in the compartment of a car to the input force at the mount point of the powertrain in the flexible car body. The trend of the predicted interior noise based on the hybrid TPA very well corresponds to the measured interior noise, although there is some difference due to not only the experimental error and the simulation error but also the effect of the air-borne path.

Key Words: Powertrain (파워트레인), Force Prediction (가진력 예측), FEM (유한요소법), Structure Borne Noise (구조기인 소음), Vibro-acoustic (구조-음향)

1. 서론

자동차 NVH 기술은 승차감 향상을 목표로 차량 연구 개발단계에서 매우 중요한 요소가 되고 있다. 차량 NVH 성능에 영향을 미치는 진동 소음 요인은 파워트레인, 타이어, 바람, 차체 및 서스펜션, 흡배기 요인 등과 같이 매우 다양하다. 그 중에서도 차량 실내 소음에 지대한 영향을 끼치는 것은 파워트레인이라 할 수 있다.¹ 따라서 파워트레인에 의해 발생하는 실내소음을 저감하거나 예측하는 다양한 연구가 계속되어 왔다.^{2,3} 파워트레

인에 기인한 실내 소음은 두 가지 경로를 가지고 있는데, 하나는 파워트레인 자체의 소음이 공기를 매개로 전달되는 공기기인 소음이고, 다른 하나는 파워트레인 진동이 차체 구조를 통해 전달되는 구조기인 소음이다. 구조기인 소음을 파악하는 방법에는 실험적 연구를 통한 전달경로 해석법(TPA: transfer path analysis)이 있다.^{4,5} 이 TPA 기술은 가진원을 파악하는데 매우 유용한 방법이지만, 실험적인 방법으로 소음 저감을 위한 구조 변경이 용이하지 않아 저감 대책으로서의 한계가 있다.⁶ 본 연구는 실험적 방법과 해석적 방법이 결합된 Hybrid TPA 기법을 이용하여 실내 소음을 예측하였다. 기

존의 TPA 기법은 차체 구조-음향 전달함수(VATF: vibro-acoustic transfer function)와 마운트에 작용하는 가진력과 곱으로 실내 소음을 계산하게 되는데, 이 때 가진력을 실험적으로 측정하는 것은 매우 어렵다. 하지만, Hybrid TPA 는 시험적으로 측정하기 어려운 차체 가진력을 해석적인 방법으로 예측하는 기술로써 가진력을 정확히 예측하기 위해서는 파워트레인 자체의 진동 특성을 반영하고 있는 해석 모델이 필요하다. 따라서, 실제의 파워트레인 진동 소음 특성을 나타내는 유한요소 모델을 이용하여 가진력을 추정하고 실내 소음을 예측함으로써 실제 파워트레인의 구조 설계 및 소음 저감 대책을 마련할 수 있다.

파워트레인 구조진동에 따른 실내 소음 예측을 위한 첫 번째 논문은 파워트레인 가진력 해석에 관한 연구이며, 본 논문은 Hybrid TPA 기법을 이용해 실내 소음을 예측하는 두 번째 논문으로써 앞서 예측된 가진력을 시험적인 방법을 통해 비교 및 검증하였다. 이 가진력은 파워트레인 마운트 시스템 절연부의 전, 후에서 변위를 측정하고 마운트 고무의 동적 복소 강성을 측정하여 얻을 수 있는데, 마운트 절연 고무의 동적 복소 강성은 전기 가진기와 동은 흡진기로 구성된 고무 강성 측정 시스템을 이용한다. 또한, Hybrid TPA 를 이용하여 차량 실내 소음을 예측하는데 있어서도 기존의 TPA 와 마찬가지로 차량의 구조-음향 전달 함수가 필요하며, 이 전달 함수는 구조-음향 상반 원리를 이용하여 측정할 수 있다.^{7,8} 최종적으로 Hybrid TPA 를 통해 예측된 실내 소음은 주행시험을 통해 측정된 실내 소음과 비교하여 검증하였다.

2. Hybrid 전달 경로 해석 이론

기존의 전달 경로 해석법(TPA)은 실험적인 방법을 통해 실내 소음을 예측하는 것이다.^{5,10} 이 방법은 진동 전달 경로에 따른 소음원을 파악하는 유용한 방법이지만, 소음 원인을 규명한 후, 소음 저감을 위한 파워트레인의 구조 변경이 필요할 경우, 저감 방안에 대한 소음 예측 기술이 필요하게 되는데, 이 때, Hybrid TPA 는 좋은 해결책이 될 수 있다. 차량 실내에서 발생하는 실내 소음의 전달 경로는 식(1)과 같은 수학적 관계를 통해 나타낼 수 있다.

여기서, 첫 번째 항은 구조기인에 의한 소음을, 두 번째 항은 공기기인에 의한 소음을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 p_j(\omega) &= \sum_i |p(\omega)|_i^{j\phi(\omega)_i} \\
 &= \sum_i |f_i(\omega)|^{j\phi_i} \left| \frac{p_j(\omega)}{f_i(\omega)} \right|^{j(\phi_p(\omega) - \phi_j(\omega))} \\
 &\quad + \sum_k |q_k(\omega)|^{j\phi_k} \left| \frac{p_j(\omega)}{q_k(\omega)} \right|^{j(\phi_p(\omega) - \phi_j(\omega))}
 \end{aligned} \tag{1}$$

또한, p_j 는 차량 실내 j 지점에서의 음압(sound pressure), f_i 는 전달 경로 상의 i 지점에 작용하는 가진력, q_k 는 전달 경로 상의 k 지점에서 공기기인에 의한 가진원, ϕ 는 각 입력점과 출력점에서의 위상을 나타낸다. 따라서 구조기인에 대한 기존의 전달 경로 해석법은 식(1)의 첫 번째 항을 이용하여 예측가능하며, 식(1)의 두 번째 항을 고려하지 않으면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_j(\omega) = \sum_{i=1}^n p_i(\omega) = \sum_{i=1}^n f_i(\omega) \times H_{ij}(\omega) \tag{2}$$

여기서, $p_i(\omega)$ 는 주파수 영역에서 i 번째 전달 경로에 의한 복소 음압값을 나타낸다. 식(2)에서 차체 구조-음향 전달 함수인 $H_{ij}(\omega)$ 는 구조-음향 상반원리를 이용하여 실험적으로 측정할 수 있다. 그리고 가진력 $f_i(\omega)$ 은 전달경로 해석법을 이용하여, 식(3)과 같이 상대변위와 동강성의 곱으로 계산된다.

$$f_i(\omega) = k^*(\omega) \times \Delta x(\omega) = k_i(\omega)[x_1(\omega) - x_2(\omega)] \tag{3}$$

여기서, $k_i(\omega)$ 는 동강성 측정기를 이용하여 얻은 마운트 고무의 복소 동적 탄성계수를 나타내며, $x_1(\omega)$ 와 $x_2(\omega)$ 는 차량 주행 중, 마운트 브라켓의 전, 후에서 측정된 변위를 나타낸다. 연구에 적용된 파워트레인은 Fig. 1 과 같이 E/G 마운트, F/R 마운트, R/R 마운트, T/M 마운트로 구성된 마운팅 시스템으로 구성되어 있으며, 이 마운트 시스템은 차량의 서브프레임과 서스펜션 프레임에 연결되어 있다. 따라서 이 4 개 마운트는 파워트레인 진동이 전달되어 실내 소음으로 발생하는 여러 전달 경로 중에서 가장 중요한 전달 경로라고 할 수 있으며, 절연 고무와 브라켓으로 구성되어 진동 에너지를 흡수하고, 파워트레인 자체의 무게를 지지하는 역할을 한다.

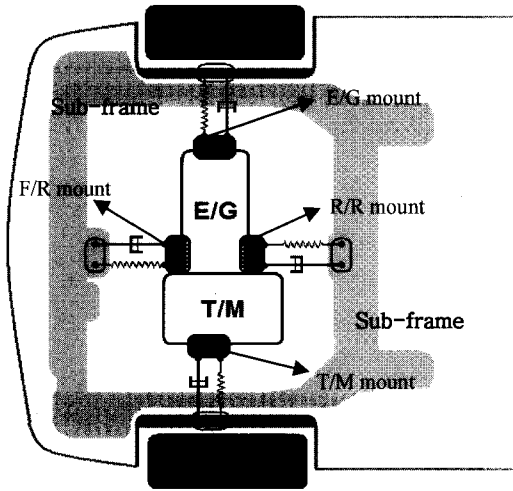


Fig. 1 Diagram for the powertrain mounting system of the test vehicle

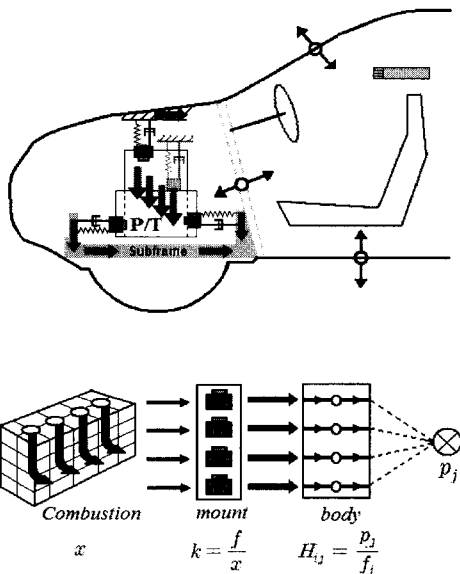


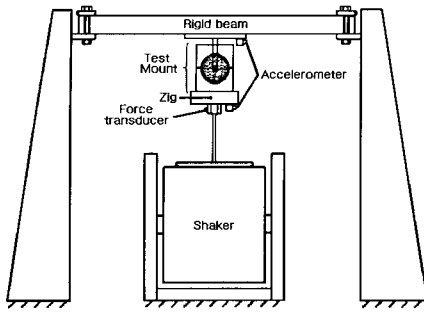
Fig. 2 Diagram of the hybrid transfer path analysis for using the FE model of a powertrain

실린더 내의 폭발에 의한 연소힘은 Fig. 2(a)와 같이 피스톤으로 전달되고, 실린더 블록과 파워트레인 전체로 전달되어 파워트레인 마운팅 시스템을 거쳐 차체로 유입된다. 여기서, 차체 가진력은 두 가지 방법을 통해 얻을 수 있는데, 첫 번째는 식(3)과 같이 실험적으로 측정하고, 수학적인 계산

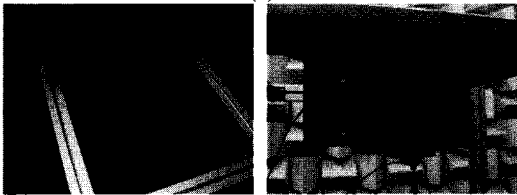
을 통해 추정하는 방법이다. 식(3)을 이용하기 위해서는 차량 주행 중 파워트레인 마운트 브라켓 전, 후에서 진동을 측정해야 하며, 이러한 실험적 방법을 통해 가진력을 얻는 기존 전달 경로 해석 방법과는 다르게, Hybrid TPA 는 Fig. 2(b)와 같이 파워트레인 가진력을 유한요소 모델을 이용한 CAE 기법으로 예측하는 것이다. Hybrid TPA 는 파워트레인에 의한 실내 구조기인 소음을 저감하기 위해 유한요소 모델을 이용하기 때문에 설계 변경을 다양하게 적용함으로써 파워트레인의 최적설계가 가능하다는 장점이 있다.

3. 파워트레인의 가진력

파워트레인의 가진력을 파악하기 위해서는 식 (3)의 마운트 고무 절연체 자체의 복소 동강성과 파워트레인 구동 중 마운트 고무 절연체의 동적 변위를 측정해야 한다. 마운트 고무 절연체의 동적 복소 강성 측정은 Fig. 3 과 같은 복소 강성 측정기를 구성하여 얻을 수 있는데, MB Dynamics 의 MODAL50A Shaker 를 이용하여 파워트레인 브라켓 부위를 가진하고, B&K 4507B0004 가속도계를 이용하여 동적 변위를 측정함으로써 복소 동강성 (complex dynamic stiffness)을 얻을 수 있다. Fig. 4 는 4 개 파워트레인 마운트의 x, y, z 축에 대한 복소 동강성 크기와 손실계수를 나타낸다. 여기서, 동강성의 크기와 손실계수는 파워트레인 진동 가진력에 대한 차체의 변형률을 나타내는 것으로, 입력 주파수에 대해 비선형적인 특성을 나타낸다. 또한, 차량 주행 중 파워트레 마운트 부분의 동적 변위는 Fig. 5 와 같이 마운트 고무 브라켓 전, 후에 ENDEVCO 65-10 가속도계를 부착하여 측정한 가속도를 두 번 적분함으로써 얻을 수 있는데, 주행 시험은 차량 무항실 샤시 다이내모에서 실시하였다. 이와 같이 파워트레인 가진력은 복소 동강성과 동적 변위의 곱(multiplication)으로 계산할 수 있으며, Fig. 6 과 같이 선행 연구인 CAE 기술을 통해 예측한 파워트레인 가진력과 비교 및 검증하였다.⁶ 두 가진력은 크랭크 샤프트 회전속도와 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 직렬 4 기통 2 행정 엔진의 주요한 진동 요소인 2 차 오더 성분과 그 조화성분인 4 차, 6 차 오더 성분이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 6 의 파워트레인 가진력은 4 절의 차체의 구조 음향특성과 연산을 통해 차실의 구조기인 소음으로 나타나

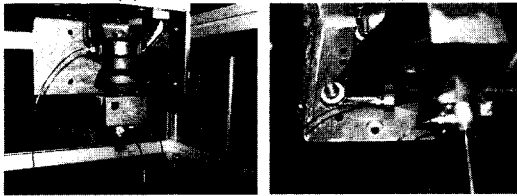


(a)



(b)

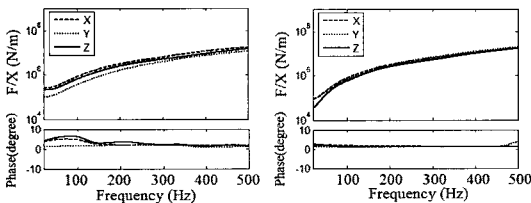
(c)



(d)

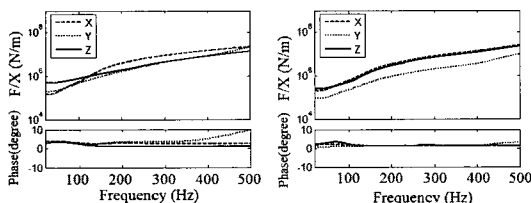
(e)

Fig. 3 Elastomer testing systems for measurement of dynamic stiffness (a) drawing for system (b) E/G mount (c) F/R mount (d) R/R mount (e) T/M mount



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 4 Complex dynamic stiffness measured by elastomer testing system: (a) E/G mount, (b) F/R mount, (c) R/R mount, (d) T/M mount

게 된다. 두 가진력 비교에 있어 약간의 오차가 발생하는 것은 시험 측정 오차와 유한요소 모델링에 대한 오차로 판단되며, 엔진의 2 차 오더 성분이 R/R 마운트에서 다소 차이를 보이고 있다. 하지만, 파워트레인의 진동에 의한 가진력 특성을 파악하고 예측하는데 있어 시험에 의존하는 기존의 전달경로 해석법을 대체할 수 있는 Hybrid 전달경로법을 이용하는 것은 매우 유용하리라 판단되며, 향후 다양한 연구를 통해 더욱 정확한 가진력 예측 결과를 기대할 수 있다.

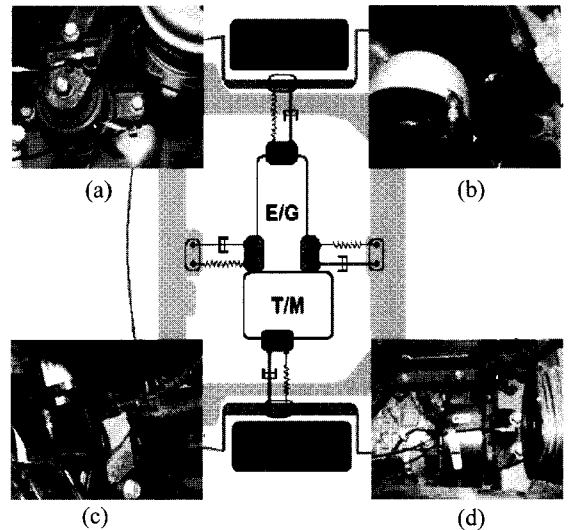


Fig. 5 Photograph for measurement points of acceleration at the powertrain mounts

4. 구조-음향 전달 함수

차량의 구조-음향 전달함수(vibro-acoustic transfer function)는 전달 경로에 작용하는 차체 가진력과 실내의 음향 응답비로 나타나며, 식(4)와 같다.

$$H_{ij}(\omega) = \frac{p_j(\omega)}{f_i(\omega)} \quad (4)$$

여기서, p_j 는 차량 실내에서 j 번째 지점에서 발생하는 음압, f_i 는 차체의 i 번째 지점에 작용하는 가진력을 나타낸다. 따라서 구조-음향 전달함수는 주파수 응답함수 특성으로 나타나며, 일반적으로 차량의 구조-음향 전달함수는 차체의 진동때문에 정확한 가진이 되지 않아 측정이 쉽지 않다.

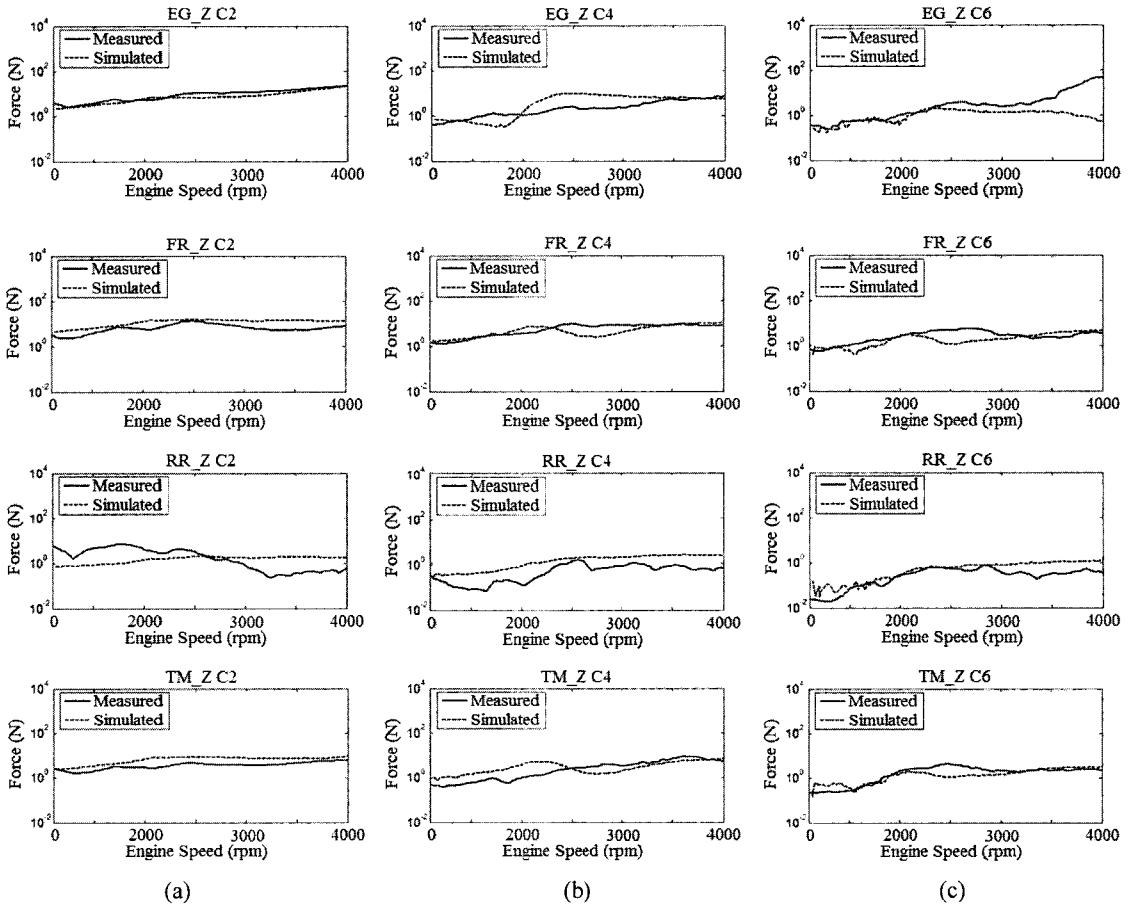


Fig. 6 Comparison between the measured excitation force and the simulated excitation force: (a) 2nd order component (b) 4th order component (c) 6th order component

따라서, 높은 신뢰성을 가진 구조-음향 전달함수를 측정하기 위해 본 연구에서는 구조-음향 상반원리(vibro-acoustic reciprocity)를 적용하였는데,⁷ 구조-음향 상반원리에 따른 전달함수는 식(5)와 같다.⁸

$$H_{ij} = \frac{v_i(\omega)}{q_j(\omega)} \quad (5)$$

여기서, $q_j(\omega)$ 는 차량 실내의 j 지점에서 음향 가진력의 크기를 나타내며, $v_i(\omega)$ 는 i 번째 전달경로에서의 진동 응답을 나타낸다. 우선, 구조-음향 상반원리의 적용 가능 여부를 확인하기 위해 측정이 가능한 E/G 마운트 브라켓 부위를 임펄스 해머로 가진하고, 차량 실내 앞 좌석에서 음압을 측정

하는 식(4)의 구조-음향 전달함수를 구하였다. 그리고 식(5)를 이용한 구조-음향 전달함수를 구하기 위해, Fig. 7 과 같이 LMS Q-source 를 차량의 앞 좌석 귀 위치에 설치하여 차체를 음향 가진하고, 마운트에서 진동 가속도(vibrational acceleration)를 측정함으로써 구조-음향 전달함수를 측정하였다. Fig. 8 에서 점선은 식(4)를 이용한 구조 음향 전달함수를 나타내고, 실선은 식(5)를 이용하여 측정한 구조-음향 전달함수를 나타내는데, 두 전달함수가 상당히 일치하는 것으로 보아 음향학적 상반원리(acoustic reciprocity)를 적용할 수 있음을 확인하였다. 따라서 Fig. 9 와 같이, 식(5)을 이용한 각 마운트의 x, y, z 방향에 대한 구조-음향 전달함수를 측정하여, 차실 구조 기인 소음을 예측하기 위한 하이브리드 전달 경로 해석법의 입력값으로 이용하였다.

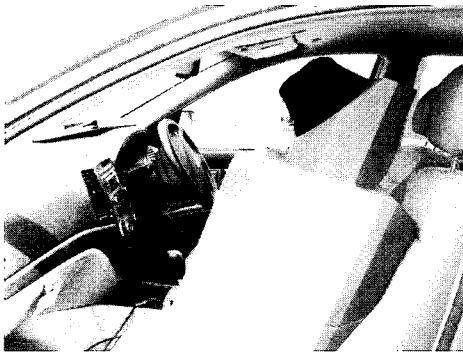


Fig. 7 Set up for equipment for the measurement of the vibro-acoustic transfer function in a test vehicle

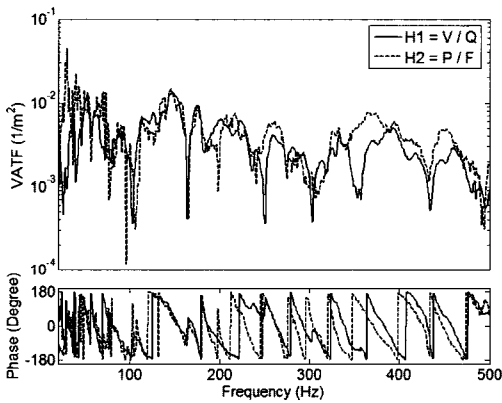


Fig. 8 Measured vibro-acoustic transfer function based on reciprocity theory

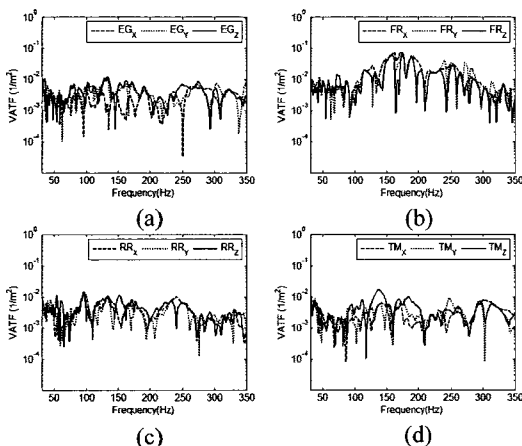


Fig. 9 Vibro-acoustic transfer functions measured at the powertrain mount (a) E/G mount (b) F/R mount (c) R/R mount (d) T/M mount

5. Hybrid TPA 를 이용한 실내 소음 예측

시험 차량의 구조기인 소음을 예측하기에 앞서 차량 실내에서 나타나는 소음의 특성을 파악할 필요가 있다. 따라서, 엔진 회전수 1000rpm 에서 4000rpm 까지 가속하는 상태에서 차량 앞 좌석 귀 위치에 B&K Type 4189 마이크로폰을 설치하고 실내 음압값(sound pressure level)을 측정하였다. 시험에 사용한 차량의 제원은 table 1 과 같다.

가속 주행 시험 결과는 3-D 해석기법인 소음 컬러맵(color map)분석을 통해 Fig. 10 과 같이 나타나며, 직렬 4 기통 2 행정 엔진의 주요 진동수인 2 차, 4 차, 6 차 오더 성분이 가속 전체 구간에서 지배적으로 나타남을 알 수 있다. Fig. 11 은 파워트레인 가진력으로 인해 발생하는 구조기인 소음의 합, 즉 Hybrid TPA 를 통한 소음과 주행시험을 통해 측정한 실내소음을 비교한 것이며, 저속 영역에서

Table 1 Specification of the powertrain

Powertrain	Specification
Displacement	2.2 L
Number of cylinder	4
Type of Fuel	Diesel
Balance shaft	Lanchester type
Transmission	Automatic
Vehicle type	SUV

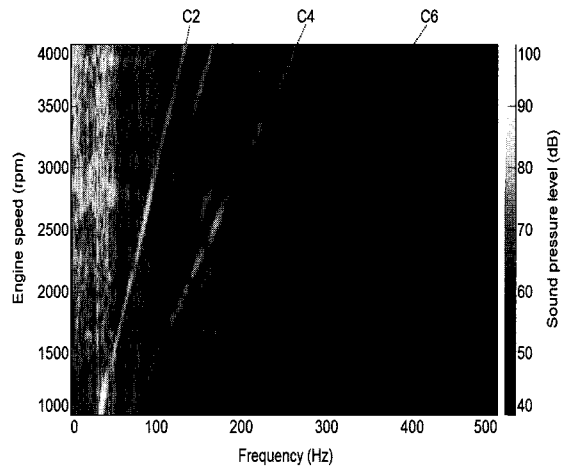


Fig. 10 Color map for the interior noise measured inside a test vehicle

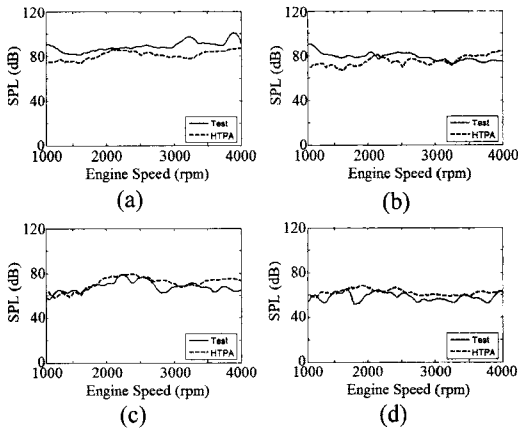


Fig. 11 Comparison between the direct measured interior noise and the predicted interior noise based on the hybrid TPA: (a) overall noise (b) 2nd order component (c) 4th order component (d) 6th order component

발생하는 차이는 흡배기계에 따른 소음, 고속 영역에서는 타이어 및 풍절음에 의한 공기기인 소음을 고려하지 않은 오차로 판단된다.^{9,10} 또한, Fig. 12는 TPA를 이용한 소음 예측치와 Hybrid TPA를 이용한 소음 예측치에 대한 파워트레인 마운트 기여도를 비교한 것으로, 상당히 정확한 예측 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

이와 같이, Hybrid TPA 기법을 이용하여 차량 실내에서 발생하는 구조기인 소음의 경향과 특성을 예측함으로써 파워트레인의 설계 최적화를 통해 실내 소음을 예측, 저감을 비롯하여 향후 음질 인덱스 연구에 적용할 수 있다.¹²

6. 결론

이와 같이, Hybrid TPA 기법을 이용하여 차량 실내에서 발생하는 구조기인 소음의 경향과 특성을

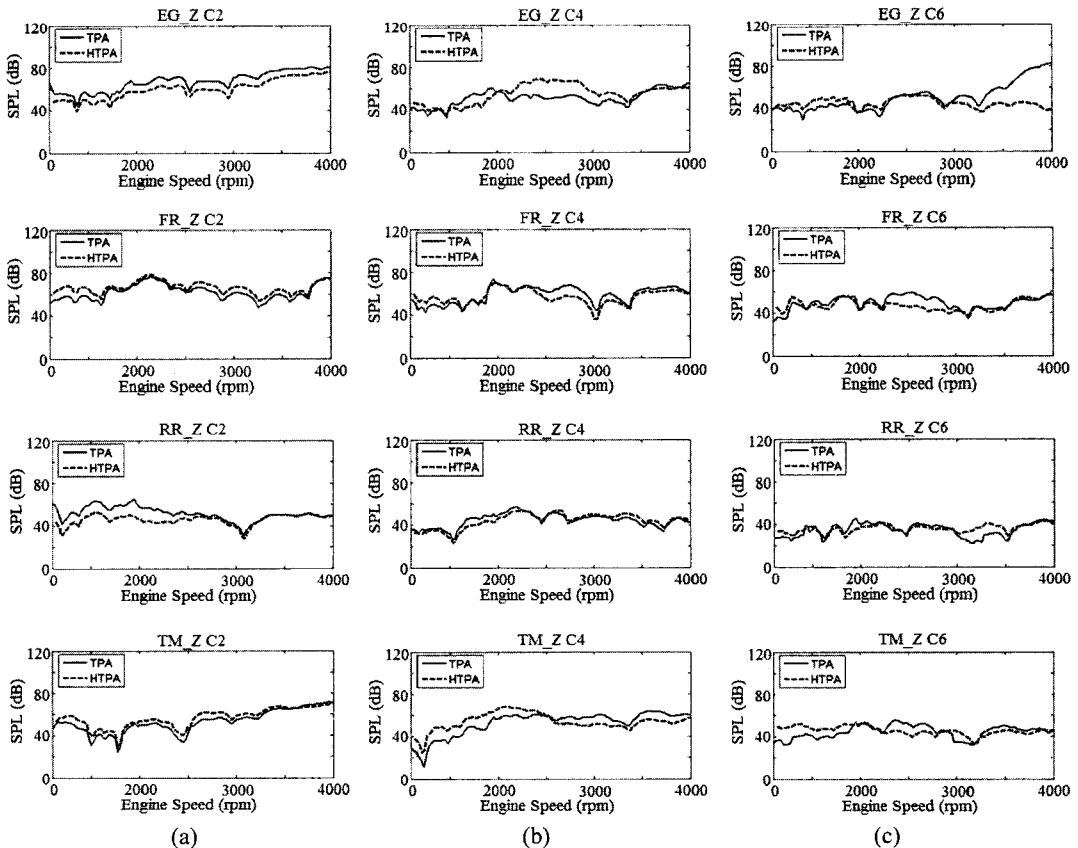


Fig. 12 Prediction of the interior noise based on the traditional TPA and Hybrid TPA for the harmonic components of the rotating speed of the crankshaft: (a) 2nd order component, (b) 4th order component, (c) 6th order component

예측함으로써 파워트레인의 설계 최적화를 통해 실내 소음을 예측, 저감을 비롯하여 향후 음질 인덱스 연구에 적용할 수 있다.¹² 본 논문에서는 파워트레인 구조진동에 기인하여 발생하는 소음을 Hybrid TPA 기법을 이용하여 예측하였다. 선행 연구에서 CAE 기법을 이용하여 예측한 파워트레인의 차체 가진력을 차량 주행 시험을 통해 검증하였으며, 이렇게 검증된 가진력을 바탕으로 파워트레인 마운트의 동적 복소 강성, 차체의 구조-음향 전달 함수를 측정하여 파워트레인 진동에 기인한 실내 소음을 예측하고 주행시험을 통해 측정한 결과와 비교하여 상당히 일치함을 확인하였다. 따라서, Hybrid TPA 기술을 통해 시험에 의존하는 기존의 전달 경로 해석법(Experimental TPA)을 대체 할 수 있음을 확인하였고, 차량 연구 개발 초기 단계에서 소음 최적 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 산업자문부 자동차기반기술개발사업의 핵심기반기술개발인 ‘파워트레인 진동 소음 시뮬레이션 기반기술개발(과제번호 : 100223237)’의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, S. K., Yeo, S. D., Kim, B. K. and Rho, I. H., “Weight Reduction and Noise Refinement of Hyundai 1.5Liter Powertrain,” SAE Paper No. 940995, 1994.
2. Seki, Y., Suzuki, T., Tsukahara, M. and Takahashi, Y., “How to Predict Powertrain Vibration at the Engine Mounting Points under Running Conditions,” SAE Paper No. 2001-01-1592, 2001.
3. Kim, S. J., Lee, J. Y. and Lee, S. K., “Noise Refinement of a Vehicle by Reduction the Axle Gear Whine Noise Based on Structural Modification Using FEM and BEM,” Int. J. Automotive Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 605-614, 2007.
4. Sakai, T. and Sakamoto, A., “Improvement of Engine Noise for the 2003 Accord using Hybrid CAE Technology,” SAE Paper No. 2003-01-1427, 2003.
5. Wyckaert, K. and Auweraer, H. V., “Operational Analysis, Transfer Path Analysis, Modal Analysis: Tools to Understand Road Noise Problem in Cars,” SAE Paper No. 951752, 1995.
6. Yi, S. J. and Seo, J. M. “Powerflow Simulation Software of the Automotive Powertrain through the Combination of the Component (II) : Development of the Automatic System Generation Module,” J. of KSPE, Vol. 21, No. 2, pp. 52-59, 2004.
7. Kim, B. G. and Ih, J. G., “In-Situ Estimation of an Acoustic Source in an Enclosure and Prediction of Interior Noise by Using the Principle of Vibroacoustic Reciprocity,” J. Acoustical Society of America, Vol. 93, No. 5, pp. 2726-2731, 1993.
8. Ko, K. H., Kook, H. S. and Heo, S. J., “New Technique in the Use of Vibro-Acoustical Reciprocity with Application to the Noise Transfer Function Measurement,” Int. J. Automotive Technology, Vol. 7, No. 2, pp. 173-177, 2006.
9. Lee, S. K., “Identification of a Vibration Transmission Path in a Vehicle by Measuring Vibrational Power Flow,” Proc. Instn. Mech. Engrs.(D), Vol. 218, No. 2, pp. 167-175, 2004.
10. Auweraer, H. V., Mas, P., Dom, S., Vecchio, A., Janssens, K. and Ponsele P. 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.
11. Lee, S. K. and Chae, H. C., “The Application of Artificial Neural Networks to the Characterization of Interior Noise Booming in Passenger Cars,” Proc. Instn. Mech. Engrs.(D), Vol. 218, No. 1, pp. 33-42, 2004.
12. Lee, S. K., Kim B. S. and Park D. C., “Objective Evaluation of the Rumbling Sound in Passenger Cars Based on an Artificial Neural Network,” Proc. Instn. Mech. Engrs.(D), Vol. 219, No. 4, pp. 457-469, 2005.