

전륜 차량의 부밍 소음 연구

Study on the Booming Noise of Front-wheel-drive Vehicle

정인수[†] · 한두희^{*}
Insoo Jung[†] and Doohee Han^{*}

(Received April 18, 2018 ; Revised June 19, 2018 ; Accepted June 19, 2018)

Key Words : Booming Noise(부밍 소음), Torque Fluctuation(토크 변동), Transfer Path Analysis(전달경로 분석)

ABSTRACT

A significant booming noise was in the low engine speed range of a front-wheel-drive vehicle. For this reason, occurred the engine speed at which the engine and transmission are directly connected could not be reduced as much as desired to improve the fuel economy. The problems of the vehicle related to the booming noise were analyzed using torque fluctuation of the drive shaft, transfer path analysis and operational deflection shape. The simulation was carried out to establish improvement measures for the mechanism of the identified booming noise.

1. 서 론

전세계적으로 환경보전을 위한 차량 배출가스 및 CO₂ 규제가 지속적으로 강화되고 있다. 이러한 규제를 달성하기 위해 엔진의 연소 효율 개선, 마찰 저감, 열 손실 저감 같은 열효율 향상, 차량 경량화 및 차량 전동화 등의 다양한 방법들로 연비를 개선하고 있다. 이들 중 엔진과 변속기의 직결 엔진 회전수를 최대한 낮추어 엔진 연비를 개선하는 방법이 있는데, 이번 연구 대상인 준중형 전륜 차량에서는 1200 r/min 영역에서 실내 부밍 소음(booming noise)이 크게 발생하여 원하는 만큼 엔진 회전수를 하향하지 못하는 문제점이 있었다. 부밍 소음은 차량 가속, 감속 혹은 정속 주행 시 특정한 엔진 회전수에 도달할 때 귀를 압박하는 소음 특성을 가지고 있는데, 일반적으로 엔진의 연소 가진이 차량의 구조로 전달되어 발생하는 구조기인 소음(structure-borne noise)과 엔진 방사음 및 흡배기 소음이 공기로 전달되어 발생하는 공기기인

소음(air-borne noise)에 의해 발생한다. 이 논문의 연구 차량에서 발생한 직결 부밍 소음은 기본적인 시험을 통해 구조기인 소음으로 조사되었다. 관련 연구 논문을 보면 엔진의 토크 변동에서 차량 전달경로 및 차체까지 다양한 연구⁽¹⁻⁷⁾가 진행되어 왔다. 하지만, 이번 논문에서 다룬 문제의 부밍 소음에 대한 개선 방향을 수립하기 위해서는 발생 원인에 대한 심층 연구가 필요하였다.

2. 본 론

2.1 부밍 소음 발생 영역과 현상

Fig. 1은 준중형 5도어 차량에서의 부밍 소음과 변속기 output rpm 변동량을 함께 나타낸 것이다.

그림을 보면, rpm 변동량이 큰 1430 r/min 대역(② 영역)에서의 부밍 소음보다는 rpm 변동량이 상대적으로 적은 1200 r/min 대역(① 영역)에서의 부밍 소음이 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해, rpm 변동량의 크기보다는 변속기와 연

[†] Corresponding Author, Member, Hyundai Motor Company
E-mail: isjung@hyundai.com
^{*} Hyundai Motor Company

[‡] Recommended by Editor Gi-Woo Kim
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

결되는 구동축(drive shaft)에서 차량 전달경로 및 차체까지 어떤 문제가 존재하고 있다고 판단하여 전달경로 조사를 진행하였다. 물론 가진 측면에서 rpm 변동량이 적을수록 부밍 소음이 개선될 것이다. 이를 확인하기 위해서 엔진에 대해 두 가지 원리 시험을 진행하였다. 첫 번째로 Fig. 2에 나타나 있는 것처럼, 엔진 토크를 베이스 대비 10%씩 저감하면서 부밍 소음의 변화를 살펴보았다.

시험 결과를 보면, 부밍 소음 저감 목표인 4 dB를 만족하기 위해서는 엔진 토크를 베이스 대비 40% 저감해야 한다는 것을 알 수 있다. 하지만, 차량의 동력 성능이 크게 악화되어 적용이 어렵다. 두 번째

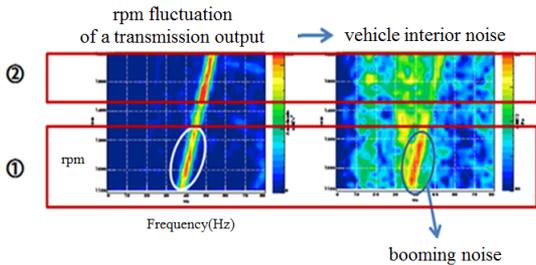
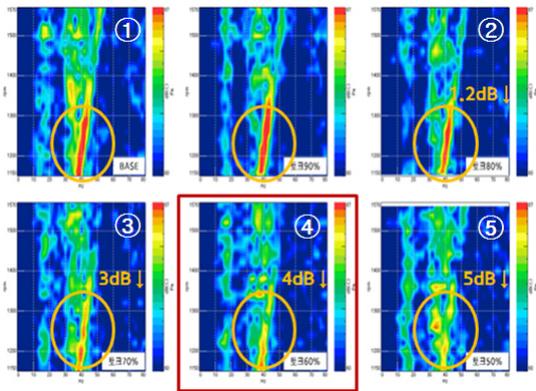


Fig. 1 Vehicle booming noise and rpm fluctuation



	Engine Torque	Noise reduction
①	Base	Level basis
②	80% (20% reduction compared to the base)	1.2 dB ↓
③	70% (30% reduction compared to the base)	3 dB ↓
④	60% (40% reduction compared to the base)	4 dB ↓
⑤	50% (50% reduction compared to the base)	5 dB ↓

Fig. 2 Changes of the booming noise when the engine torque is reduced

로 엔진 부품의 inertia 증가를 통해 엔진 rpm 변동량을 저감하면 어느 정도 부밍 소음이 개선될 지 Fig. 3과 같이 크랭크트레인의 inertia 변화에 따른 rpm 변동량을 해석으로 예측해 보았다. Inertia를 40% 증가하면, 베이스 대비 엔진 rpm 변동량이 24% 감소하였다. 이때 부밍 소음의 저감량은 경험적으로 대략 1 dB 정도일 것으로 추정된다. 또한, 이 대책은 무게 증가로 인한 연비 악화의 부작용도 발생할 수 있기 때문에 실제로 적용하기 어렵다.

그래서 변속기에서 다이내믹 댐퍼 튜닝, CPA (centrifugal pendulum absorber)⁽⁸⁾ 같은 부품을 이용해 엔진 rpm 변동량을 저감할 수 있으나, 재료비가 비싸기 때문에 시험 차량에서는 차량 전달경로 및 차체 문제점을 검토하여 부밍 소음을 개선하는 방향이 적절해 보였다. 그래서 토크 변동량 측정 및 주행 TPA(transfer path analysis) 평가를 실시하였다.

2.2 토크 변동량 측정 및 주행 TPA 평가

변속기 output rpm 변동량이 구동축에 전달되면서 나타나는 비틀림 진동이 차량 전달경로의 입력하중(input force)으로 작용하기 때문에 시험 차량의 구동축에서 스트레인 게이지(strain gauge)와 텔레메트리 장비를 사용해 토크 변동량을 측정하였다. 그 결과, Fig. 4와 같은 엔진 회전수에 따른 토크 변동량을 측정할 수 있었다.

결과를 보면, 토크 변동량의 최대값은 부밍 소음이 가장 크게 발생하는 1200 r/min 대역이 아닌

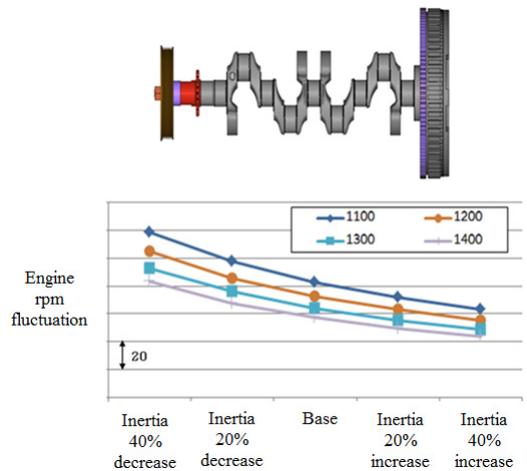


Fig. 3 Engine rpm fluctuation in case of engine inertia change

1430 r/min 대역에서 나타난다. 즉, 부밍 소음 최대값과 토크 변동량 최대값이 서로 다른 엔진 회전수에서 발생한다는 것을 알 수 있다. 이는 부밍 소음이 구동계 토크 변동량의 크기에 의해서만 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 부밍 소음에 영향을 주는 인자와 차체에 입력되는 실차 입력하중의 관계를 알아내기 위해 차량 TPA를 실시하였다. 여기서 부밍 소음은 실차 입력하중과 차량의 음향 전달함수의 곱으로 표현된다.

Fig. 5의 시험 결과를 보면, 문체의 부밍 소음이 발생하는 영역인 1232 r/min(41 Hz)에서 샤시계로 입력되는 실차 입력하중이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 차량 음향 전달함수(NTF, noise transfer function)를 보면 41 Hz에서의 전달함수 감도가 38 Hz보다 작다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 차량 음향 전달함수보다는 샤시계로 입력되는

실차 입력하중이 부밍 소음에 더 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 6에 나타나 있는 샤시계의 모드(mode) 특성에 의한 것으로 보인다. 즉, 41 Hz 대역의 토크 변동량이 샤시계의 모드에 영향을 받아 차체에 크게 입력되고, 그것이 부밍 소음을 유발한 것으로 판단된다.

2.3 부밍 소음 발생 메커니즘

샤시계의 입력 하중으로 인해 어떻게 차량에서 부밍 소음이 발생했는지를 확인하기 위해 실차 EMA (experimental modal analysis) 및 ODS(operational

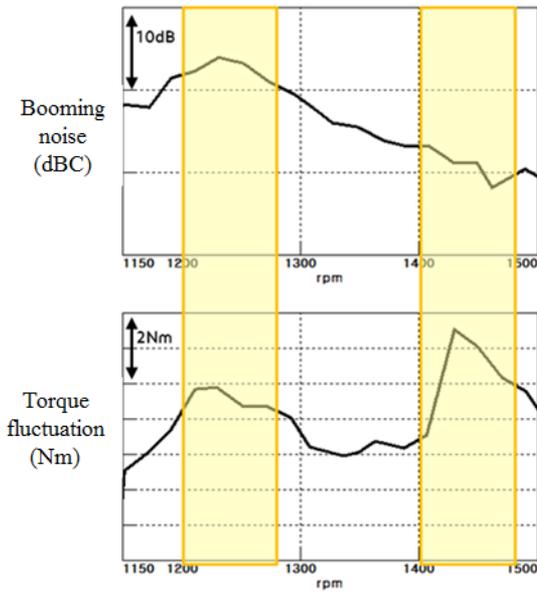


Fig. 4 Torque fluctuation measure during acceleration

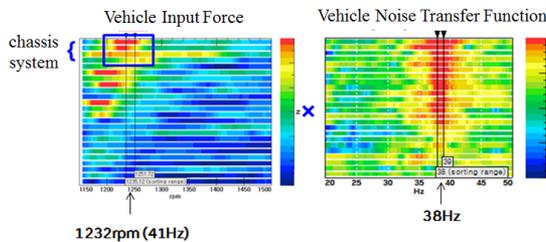


Fig. 5 Input force and noise transfer function

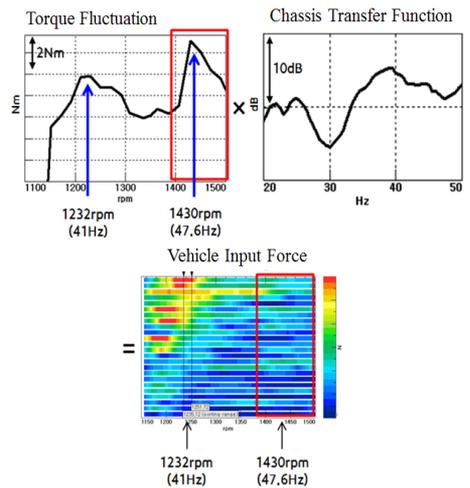


Fig. 6 Input force and torque fluctuation

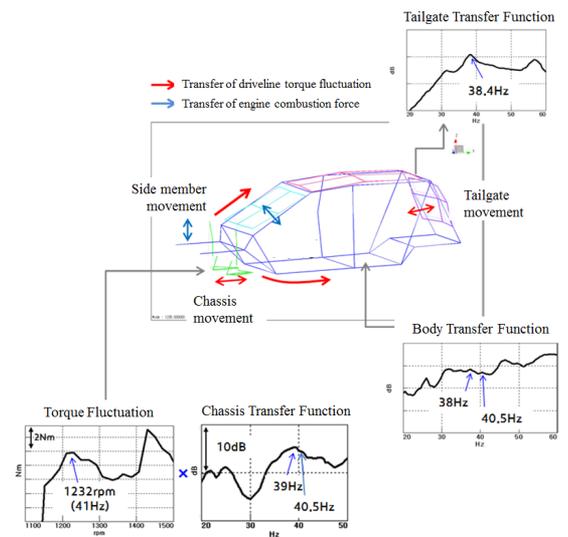


Fig. 7 EMA and ODS results

deflection shape) 평가를 통해 차량 거동을 분석하였다. Fig. 7에 간략하게 표시된 차량 거동을 보면, 부밍 소음 발생 시 샤시계 및 테일게이트(tailgate)가 차량 전후 방향으로 움직이는 것을 알 수 있다. 샤시계는 39 Hz, 41 Hz에서 불리한 진동 감도를 가지고 있고, 이 모드는 샤시계로 입력되는 구동축의 토크 변동량을 차량 전후 방향으로 증폭시켜 차체에 전달하는 역할을 하고 있는 것으로 확인되었다.

테일게이트는 차량 전후 방향으로 입력되는 구동축의 토크 변동량에 의해 펌핑(pumping)모드로 움직이며 부밍을 발생시키고 있었다. 또한 엔진 폭발력으로 발생한 입력하중은 차체의 사이드 멤버에 의해 증폭되고, 그것은 윈드실드(windshield)의 펌핑모드를 유발하여 부밍을 발생시키고 있었다. 이렇게 규명된 발생 메커니즘에 대한 개선 방향을 찾아내기 위해 해석을 진행하였다.

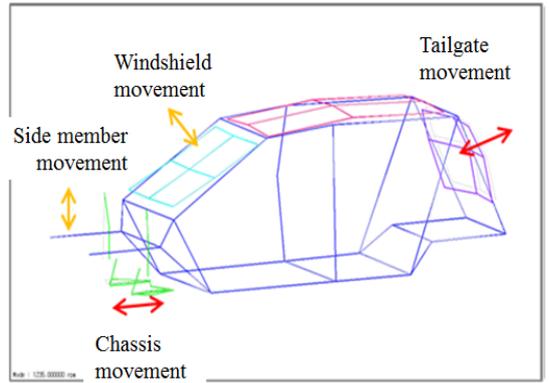
2.4 해석 기반 개선 방향 검토

구동축 토크 변동량과 파워트레인 마운트측 실차 입력하중 등의 데이터를 활용하여 시험과 해석의 상관성을 확보해 차량의 전체 거동 및 전달함수의 피크 발생 지점이 동일한 것을 확인하였다. Fig. 8은 시험과 해석의 ODS를 비교한 것이고, Fig. 9는 전달함수를 비교한 것이다.

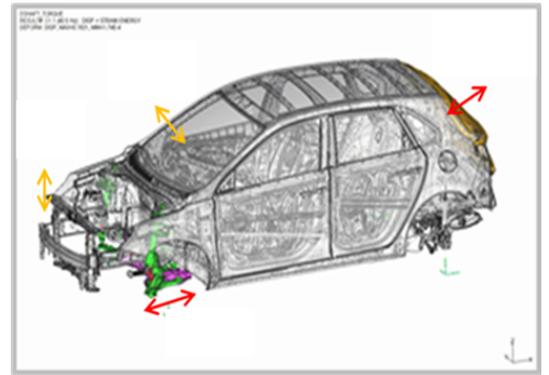
해석의 신뢰성을 확보한 후 해석 기반 원리 시험을 진행하였다. 먼저 샤시계의 모드를 제어하기 위해 Fig. 10과 Fig. 11에 나타나 있는 것처럼 타이어 중량 변화와 스트러트 부시(strut bush)의 강성을 증대하여 보았다. 타이어 중량 감소/증대에 따라 39 Hz ~ 41 Hz 대역의 공진주파수가 하향/상향되었으며, 부밍 소음은 7.4 dB ~ 9.3 dB 개선되었다.

또한 스트러트 상단 부시의 강성 증대의 경우 공진주파수가 44 Hz로 상향되면서 진동 감도가 10 dB 이상 개선되어 부밍 소음이 11 dB 개선되었다. 이를 통해 샤시계의 스트러트 거동 제어가 중요하다는 것을 확인할 수 있었다.

그 다음은 차체 해석을 진행하였다. 프런트 사이드 멤버의 강성을 증대한 경우 부밍 소음이 0.6 dB 밖에 개선되지 않지만, 언더 플로워 사이드 멤버 강성 부재, 에이프론(apron) 멤버 및 사이드 아웃터 레인포스 강성을 함께 증대시키면 부밍 소음이 4.2 dB 개선되는 것을 알 수 있었다.



(a) Test ODS



(b) Simulation ODS

Fig. 8 ODS comparison

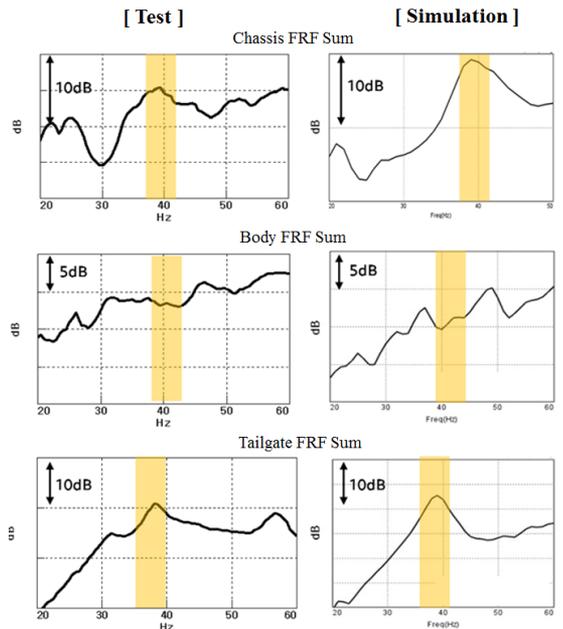


Fig. 9 Transfer function comparison

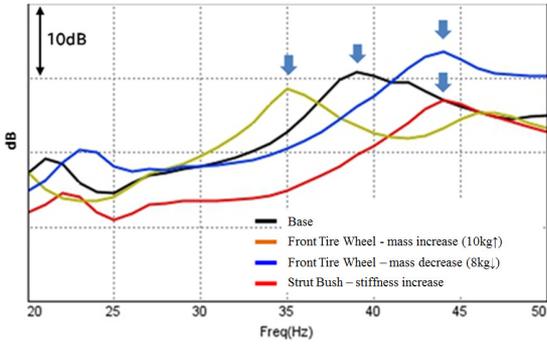


Fig. 10 Change of the transfer function according to sample types

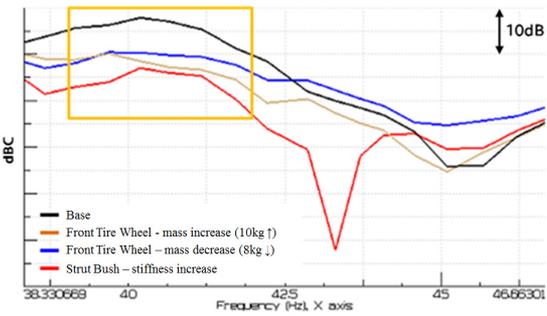


Fig. 11 Change of the booming noise according to sample types

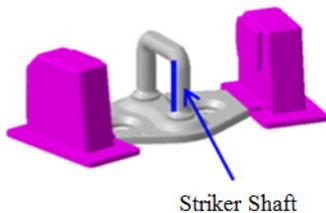
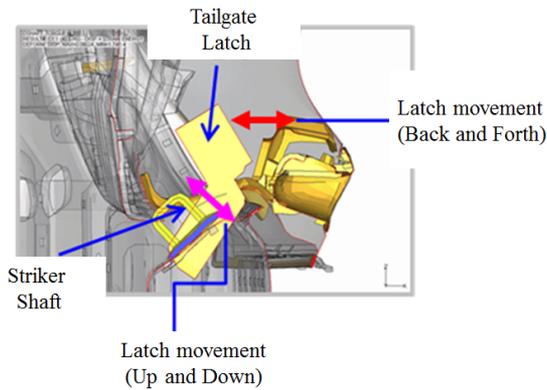


Fig. 12 Tailgate

마지막으로 테일게이트의 해석을 진행하였다. 테일 게이트의 모드를 분석해 보면, Fig. 12와 같이 래치 (latch)의 상하 거동 및 전후 거동을 볼 수 있다. 스트라이커 샤프트가 세워져 있어 래치가 스트라이커 샤프트와 결합 후 상하 거동이 발생하고, 전후 거동은 래치 마운팅 강성 부족으로 발생하는 것이다. 따라서 스트라이커 샤프트를 90° 회전시켜 가로 형태로 변경하고 래치 마운팅 부분의 강성을 올려 해석을 수행한 결과, 2.2 dB가 개선되는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

연비 개선을 위해 엔진과 변속기의 직결 엔진 회전을 하향하는데 문제가 된 차량 부밍소음에 대한 원인 분석과 개선 방향에 대한 연구를 진행하였다. 이 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 부밍 소음의 메커니즘은 다음과 같이 규명되었다. 첫째, 구동축 토크 변동량이 사시계 모드에 의해 증폭되어 테일게이트를 가진하여 부밍 소음을 발생시킨다. 둘째, 엔진 폭발력에 의한 입력하중이 차체 비틀림 모드에 의한 프런트 사이드 멤버 상하 거동으로 증폭되어 윈드셴드를 가진하게 되고 그것이 부밍 소음을 발생시킨다.

(2) 기존 단위 입력하중 해석으로는 예측하지 못했던 직결 부밍 소음을 예측할 수 있는 해석 프로세스를 확립하였고, 이를 통해 아래와 같은 개선 방향을 검토하였다. 첫째, 구동축 토크 변동량을 증폭시키는 사시계 모드 제어를 통한 실차 입력하중 저감 방안, 둘째로 사이드 멤버 강성 증대를 통한 윈드셴드 기인 부밍 소음 저감 방안, 마지막으로 스트라이커-래치 개선안으로 테일게이트 기인 부밍 소음 저감 방안이다.

References

(1) Jeong, M., Kook, H., Ko, K., Heo, S. and Kim, C. M., 2003, A Study on the Test Procedure to Identify the Noise Sources and the Design Improvements for the Reduction of the Interior Noise of Passenger Vehicles, Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers Annual Autumn Conference, pp. 786~791.

(2) Yoon, K. and Kwak, B., 2006, Improvement Techniques For Low Frequency Boom Noise of Sports

Utility Vehicles, Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers Annual Autumn Conference, pp. 977~982.

(3) Sun, J., Kim, Y. and Kim, I., 2007, Experimental Verification for the Cause of Lockup Booming Noise, Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers Annual Autumn Conference, pp. 840~845.

(4) Kim, K., Kang, C. and Jung, S., 2005, Refinement of the Interior Booming Noise Caused by the Lock-up Clutch in Automatic Transmission Vehicle, SAE Technical Paper 2005-01-2405, DOI: 10.4271/2005-01-2405.

(5) Sung, S., Chao, S., Lingala, H. and Mundy, L., 2011, Structural-acoustic Analysis of Vehicle Body Panel Participation to Interior Acoustic Boom Noise, SAE Technical Paper 2011-01-0496, DOI: 10.4271/2011-01-0496.

(6) Schulze-Fehrenbach, D., Rumpel, T. and Spengler, R., 2012, Low-speed Boom Noise -Escalating Relevance According to CO₂- Targets and High Torque Engines, SAE

Technical Paper 2012-01-1547, DOI: 10.4271/2012-01-1547.

(7) Gupta, G., Gautam, R. and Jain, C. P., 2014, Study of Coupling Behavior of Acoustic Cavity Modes to Improve Booming Noise in Passenger Vehicles, SAE Technical Paper 2014-01-1974, DOI: 10.4271/2014-01-1974.

(8) Swank, M. and Lindemann, P., 2011, Dynamic Absorbers for Modern Powertrains, SAE Technical Paper 2011-01-1554, DOI: 10.4271/2011-01-1554.



Insoo Jung studied mechanical engineering at Busan National University for Master of Science. Since 1993 he has been working for Hyundai Motor Company.

He became a research fellow in 2015. He is working on sound quality, engine condition diagnosis and NVH control.