

Single-Run FRF 측정을 통한 실차 모달 시험 및 모드맵 검증

Full Vehicle Modal Testing using Single-Run FRF Measurement and Mode Map Validation

이근수† · 정승균* · 김증한*

Keunsoo Lee, Seungkyun Jung and Jeunghan Kim

Key Words : FRF(Frequency Response Function, 주파수응답함수), Full Vehicle Modal(실차모달), Mode Map(모드맵), 일체형 차체(BFI, Body Frame Integral), Structural Feel

ABSTRACT

Finding reasonable flexural modes from the full vehicle modal testing has always been a difficult job to N&V engineers due to FRF inconsistency, nonlinearity, heavy damping and, in many cases, interactions between global body structural modes and massive isolated/non-isolated subsystem modes. This paper provides a brief overview of the mode map validation using single-run FRF measurement with highly sensitive accelerometers for the full vehicle modal analysis and then it can be used to characterize the vehicle's global/local vibration performances, especially customer perceived "structural feel" typically below 40Hz.

1. 서론

차량개발 시 개발단계에 따라 해석과 병행하여 다양한 모달시험을 하게 되며 통상 Body Structure, Trimmed Structure 그리고 Full Vehicle에 대해 단계별 검증을 하게 된다. 최종 단계인 실차에서의 Global/Local 동특성은 소비자가 주행시 인지하게 되는 Smooth Road Shake, Structural Feel, Rough Road Shake 그리고 Ride 등 네 가지의 차량진동 특성 특성을 결정하며 이는 2절의 모드맵을 이용하여 Balancing 및 Tracking 할 수 있다. 모드맵의 최종적인 검증(Validation)시 많은 부분을 실차 모달 시험으로 할 수 있으며 이때 1st Full Vehicle Flexure 모드는 차량의 전체적인 강성 측면의 승차감을 결정짓는 Structural Feel에 직접적으로 영향을 준다.

따라서 실차 모달 시험으로부터 차량의 Modal Parameter를 정확히 추출하는 것은 개발 및 검증시 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나 많은 경우에서처럼 차체 구조상에 제한된 몇 개의 센서를 이용한 Multiple-Run 모달 시험 시 FRF의 Inconsistency, 비선형성, 과도한 댐핑 그리고 특히 차체와 측정되지 않은 주요 서브시스템들과의 상호작용으로 인해 실차의 Global Mode를 판단하기가 쉽지 않다.

이에 본 논문에서는 다수의 고감도 가속도계를 이용하여 실차 상태의 기존의 차체골격 및 Structural Feel에 영향을 주는 모든 서브시스템들의 FRF를 한번에 측정하여 Curve Fitting시 오류를 줄였으며, 이를 통해 차체와 서브시스템간 상호작용의 보다 정확한 이해 및 비교적 정교한 모드맵 검증이 가능함을 보였다. 모드맵의 정확한 검증은 차기 프로그램의 차량진동성능 설정에 매우 중요하다.

† GM Daewoo Auto & Technology, NVH Team

E-mail : keunsoo.lee@gmdat.com

Tel : (032) 590-6309, Fax : (032) 590-6002

* GM Daewoo Auto & Technology, NVH Team

2. 모드맵 (Mode Map)

모드맵은 차량개발 시에 요구되는(Target) 실차의 모달 특성을 Fig. 1과 같이 시각화 해놓은 그래프 틀이며, 다양한 노면과 주행모드에서 소비자가 인지하는 차량 진동성능(Vibration Performance)에 대한 최적화를 목표로 차량에서 발생하는 저주파수 대역의 주요 고유진동수의 최적 위치를 정의하고 있다.

모드맵에는 차량의 진동특성 인자들과 함께 차량 운전 중 필연적으로 주어지는 Source 및 이러한 가진을 주로 증폭시키는 Path가 있으며, Path는 다시 파워트레인 강체모드와 같이 튜닝이 가능한 항목(Tunable)과 현가모드와 같이 비교적 튜닝이 어려운 항목(Constrained)으로 나눌 수 있다. 마지막으로 Source 및 Path의 주파수와 가능한 분리되도록 튜닝해야 하는 Receiver 항목이 있다. 이는 주로 차체의 유연모드(Flexural Mode)와 소비자가 직접 접촉/인지(Visible Vibration 포함)하는 부위의 Structural Vibration이 해당된다.

Vehicle Vibration Performance Parameters	Frequency [Hz]	
	Structural Feel	Smooth Road Shake
	Primary Ride	Rough Road Shake
Source	Idle 1st Order	Idle 1.5 Order
Powertrain	Propshaft 1st Order (XX-YY MPH)	
Driveline	Tire / Wheel 1st Order (XX-YY MPH)	
Tires / Wheels	12 Mile Road @ XX MPH (Road Input Decreases As Frequency Increases)	
Road	Path	
Suspension	Front Suspension Fore/Aft	
Exhaust	Rear Hop / Front Hop/Tramp	
Acoustic Cavity	Axle Shaft Bending	
Powertrain	Rigid Body	
Non Isolated Comp. >5kg	Flexure Modes	
Isolated Comp. >5kg	No Modes	
Receiver	Pitch	
Unoccupied Seat	Roll	
Full Vehicle Flexure	Yaw	
Panels	Bounce	
Steering System	Battery, Spare Tire, Bumpers, Fuel Tank, Etc	
Instrument Panel	Radiator/Condenser Rigid Body Modes	
	Lowest Seat Mode	
	1st Flexure Mode	
	Flexure Modes	
	Column Vertical	
	Lateral	
	Lowest Mode	

Fig. 1 Example Mode Map

3. 실차 모달 시험 및 모드맵 검증

최적화된 시험과 이를 통한 모드맵 검증을 위하여 실차 상태에서 Fig. 2와 같은 Geometry에 대해 실차 모달 시험을 수행하였다. 132개의 고감도 3축 가속도계와 3곳의 가진을 하여 총 1191개(396×3+3)의 Single-Run FRF 측정을 하였다. 비선형성을 최대한 배제하기 위해 Fig. 3(A)와 같이 가진력을 최소화(통상적인 가진력의 1/10 수준) 하였으며 이는 고감도 센서(1V/g)를 사용함으로써 가능하다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 Coherence나 Reciprocity 모두 최상의 결과를 나타내고 있다.

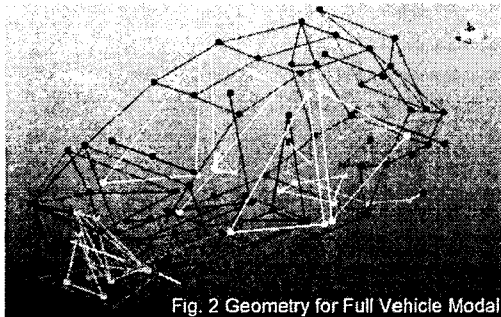


Fig. 2 Geometry for Full Vehicle Modal

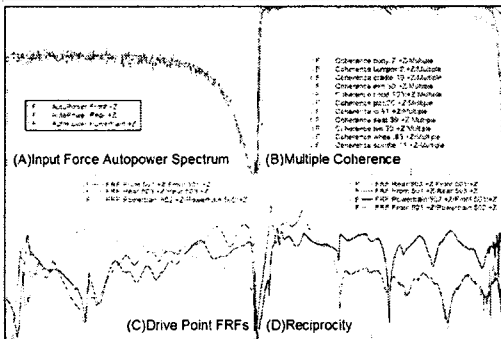


Fig. 3 Input Force/Coherence/Drive Point FRF/Reciprocity

측정된 1191개의 FRF로 LMS PolyMAX 방법을 사용하여 Curve-Fitting을 하였다(Fig. 4). 일반적인 Multiple-Run 실차 모달에 비해 FRF Consistency가 훨씬 개선 및 안정되었음을 알 수 있다.

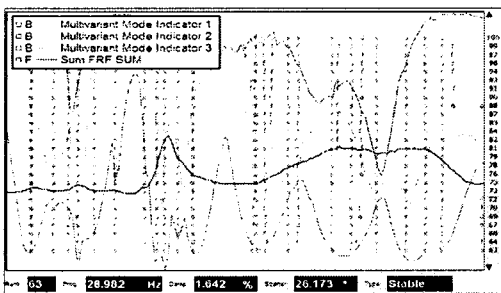


Fig. 4 Stabilization Diagram using LMS PolyMAX

Modeshape과 FRF로부터 차체와 서브시스템 또는 부품 간의 상호작용에 대한 면밀한 검토를 거친 후 Table 1과 같은 최종 결과를 얻었다. 이를 기초로 2절에서 설명한 Target Mode Map과 비교하여 실차에 대한 Validation을 수행할 수 있다. 특이할 만한 것은 차체만으로 Global Mode를 추출할 때는 전형적인 Bending 모드로 충분히 판단할 만한 모드가 존재했으나 모든 서브시스템을 포함할 경우에는 관심주파수인 40Hz 이내에서 Global Bending 모드가 없었다. 이는 실차와 같이 복잡한 시스템의 모달 시험 시에는 주요 서브시스템 간의 상호작용을 모두 파악해야만 시험차량에 대해 의미 있는 동특성을 추출할 수 있음을 의미한다.

No.	Hz	%	Description
8	11.6	4.9	Exhaust Lateral Bending, Powertrain Pitch
13	17.7	4.8	Exhaust Vertical Bending with Some Exhaust Lateral, Rear Seat Fore/Alt
14	18.6	1.3	Passenger Seat Lateral - Out of Phase with Driver, Exhaust Lateral, Rear Seat Fore/Alt
16	21.6	1.3	Passenger Seat Fore/Alt - Out of Phase with Driver, Seat Fore/Alt, Sjtaro Tire Vertical
17	21.9	1.0	Front Seats Fore/Alt - Out of Phase, Spare Tire Vertical, Battery Fore/Alt
18	22.5	1.5	Driver Seat Fore/Alt, Exhaust Lateral, Doors Lateral - In Phase, Rear Spindles Fore/Alt
19	23.0	3.1	Battery Fore/Alt with Some Lateral, Exhaust 2nd Vertical Bending, Front Seats Fore/Alt
20	28.3	2.7	Body Torsion, Spindle Tramp, Gate Twist, CRFM Fore/Alt, Column Vertical, Doors Lateral
21	29.0	2.2	Body Torsion, Column Vertical, Gate Twist, Spindle Tramp
23	31.2	3.4	Exhaust Vertical Bending with Some Lateral, Powertrain Lateral/Roll, Column Vertical
24	32.1	2.4	Column Lateral, Battery Fore/Alt, IP Vertical, Hood Vertical, Gate Fore/Alt, Doors Lateral
25	35.8	2.5	Column Vertical/Lateral, Hood Vertical, Tank Vertical, Rear Doors Lateral - Out of Phase

Table 1. Full Vehicle Modes Summary

4. 결론

최근의 일체형 차체를 갖는 차량에서는 구조적으로 한층 더 복잡해져서 실차 모달 시험시 기존의 범이론에 기초한 전형적인 모드형상을 정의하기가 힘들어졌으며, 특히 Structural Feel에 가장 영향이 큰 1st Full Vehicle Flexure의 경우 특히 그렇다. 따라서 차체와 파워트레인을 포함한 각종 서브시스템 모드의 상호 동적 간섭을 이해하는 것이 매우 중요하며, 이때 모든 관심 부위의 FRF를 한번에 측정하여 분석하는 것이 매우 유용함을 알 수 있었다. 일체의 셋팅이 되어 있으므로 차체나 부품의 구조강성을 바꿔가며 영향성에 대한 다양한 시험을 짧은 시간에 할 수 있는 장점도 있다. 가장 중요한 것은 차체 및 주요 서브시스템의 상호작용을 Modeshape 및 FRF로 확인하면서 Curve-fitting을 할 수 있기 때문에 차체가 강제모드에서 유연모드로 변해가는 과정을 확실히 판단할 수 있으며, 이를 통해 모드맵 검증을 보다 효과적으로 할 수 있다는 것이다.

참고 문헌

- (1) Fabio G. Ferraz et al., 2003, "Experimental Modal Analysis on Automotive Development", SAE 2003-01-3610
- (2) Jennifer M. Headley et al., 2007, "Validation of Vehicle NVH Performance using Experimental Modal Testing and In-Vehicle Dynamic Measurements", SAE 2007-01-2320