

로드노이즈 성능 예측을 위한 현가장치 하드포인트의 가진력 직접 측정법에 대한 실험적 평가

Experimental Evaluation of Direct Measurement for Excitation Forces Acting on the Hard-points of Suspension System to Predict Road-noise Performance

강 연 준[†] · 김 희 수^{*} · 송 현 진^{*} · 이 강 덕^{**} · 김 형 건^{**}

Yeon June Kang, Heesoo Kim, David P. Song, Kang-duck Ih and HyungGun Kim

(Received December 30, 2014 ; Revised February 23, 2015 ; Accepted February 23, 2015)

Key Words : Road Noise(로드노이즈), Cleat(크리트), TPA(transfer path analysis), Suspension Rig Tester(현가장치 리그 테스터)

ABSTRACT

NVH engineering has become a hot issue due to radical technology changes and development in automotive industry since customers' expectations and needs for their vehicle is taken to a higher level. However, the source identification and quantification of the road noise within a vehicle is still not at the level where it needs to be to meet their expectations due to its' complex transfer path and difficulties in path optimization. The primary focus of this research is on direct force obtaining method at suspension hard points using suspension test rig. Directly obtained forces at suspension to body mounting points are critical and crucial for determining the effects of design changes of the suspension has on road noise performance. Direct force obtaining method has its limitation in sensor installation within an actual vehicle therefore, many has been indirectly calculating forces using full matrix inversion method or dynamic stiffness method. In this study, to circumvent this limitation, a suspension rig is used. Then, the suspension rig is verified through a comparative analysis of its dynamic behavior between the actual vehicle by cleat test on chassis dynamometer.

1. 서 론

주행 중인 차량의 차실 내에는 다양한 종류의 소음이 발생한다. 이러한 소음은 크게 공기기인 소음(air-borne noise)과 구조기인 소음(structure-borne noise)으로 구분된다. 공기기인 소음으로는 풍절음,

타이어 패턴소음, 흡기소음 등이 있고 구조기인 소음으로는 동력 전달계 소음, 로드노이즈 등이 있다. 소음 저감 기술에 대한 다양한 연구가 진행되어 공기기인 소음은 흡차음재를 이용한 대책 등이 사용되고 있으며 동력 전달계 소음도 공진회피와 마운트의 동특성 개선 등의 방법이 사용되고 있다. 이와 같은 소음저감 기술의 발달로 인하여 실내 소음에서 로드

[†] Corresponding Author ; Member, School of Mech. and Aero. Eng., Seoul National University
E-mail : yeonjune@snu.ac.kr
Tel : +82-2-880-1691, Fax : +82-2-888-5950

^{*} Member, School of Mech. and Aero. Eng., Seoul National University

^{**} NVH Research Lab 1, Hyundai Motor Group

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

노이즈의 중요성이 새롭게 대두되었으나 로드노이즈의 경우 성능 검토와 개선이 주로 차량 개발 공정의 후반에 이루어지고 있기 때문에 많은 제약 조건으로 인하여 성능 향상에 어려움을 겪고 있다.

로드노이즈는 타이어와 거친 노면의 상호작용에 의해 발생하는데 기존의 연구에서는 너클(knuckle)을 가진원으로 설정하고 운전석 귀 위치를 응답지점으로 설정하여 다차원 스펙트럼 분석법을 적용하여 입출력 간의 관계를 분석하거나⁽¹⁾ 전달경로분석법(transfer path analysis)을 이용하여 로드노이즈를 예측하는 방식을 사용하였다⁽²⁾. 하지만 타이어부터 응답점까지를 하나의 경로로 보기 때문에 실험 가능한 차량이 제작된 후에야 성능 평가와 현가장치의 설계 변경이 로드노이즈에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 로드노이즈는 엔진 소음과는 달리 소음원인 타이어와 노면이 차체에 직접적으로 연성되지 않고 현가장치를 통해 연성된다. 따라서 로드노이즈의 소음수준을 예측하고 저소음화 대책을 마련하기 위해서 현가장치가 노면에 의해 발생하는 진동을 차체에 어떻게 전달하는지 연구해야 할 필요성이 있다.

이 연구에서는 국내에서 생산된 2000 cc급 중형 차량을 사용하였고 500 Hz이하의 주파수 대역을 관심주파수로 설정하였다. 현가장치가 진동을 어떻게 전달하는지 분석하기 위해서 현가장치 리그 테스트를 이용하여 하드 포인트의 가진력을 직접 측정법으로 측정하였다. 그리고 리그 테스트를 이용하여 측정한 힘과 실제 차량에서 추정된 힘을 비교하여 차이점을 분석하였다. 관심주파수를 500 Hz 이하의 영역으로 설정한 것은 구조기인에 의한 로드노이즈가 500 Hz이하의 주파수 대역에서 주로 발생하기 때문이다⁽³⁾.

2. 관련 이론

2.1 전달경로분석(transfer path analysis)

전달경로분석법은 복잡한 시스템에서 소음원 또는 진동원이 다양한 경로를 통하여 전달되는 경우에 입력의 세기와 각 경로에 의한 기여도를 정량화/시각화하기 위하여 광범위하게 사용되는 방법이다. 소음 저감 연구를 할 때는 각 부품이 공진을 일으키지 않는 것이 중요하지만 여러 가지 부품이 함께 조립 되면 구속조건이 변하기 때문에 모드 주파수가 변할

수 있으며 부시와 같이 진동 절연을 하는 이음새에 의하여 전달되는 진동이 크게 변화할 수 있기 때문에 복잡한 시스템의 전달 특성을 더 정확하게 파악하기 위해서는 전달경로분석이 필요하다. 로드노이즈의 경우 타이어와 노면의 상호작용에 의해 발생하는 진동이 현가장치를 통하여 전달되기 때문에 차체뿐 아니라 댐퍼와 서브프레임, 각종 암(arm)류 부품이 영향을 미치기 때문에 전달경로분석이 중요하다. 구조기인 소음에 의한 전달경로분석에 사용되는 이론식은 다음과 같다.

$$P_{receiver}^{operation} = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N F_i \times \frac{P_{receiver}}{F_i} \quad (1)$$

여기서 $P_{receiver}^{operation}$ 는 응답점에서 발생하는 구조기인 소음을 의미하고, F_i 는 i 번 경로의 입력점에 작용하는 가진력, $P_{receiver}/F_i$ 는 i 번 경로의 입력점과 응답점 사이의 구조-음향 전달함수(vibro-acoustic transfer function)를 의미한다. 전달경로분석의 핵심은 구동 중에 각 입력점에 작용하는 가진력을 구명하는 것과 각 경로의 구조-음향 전달함수를 정확하게 파악하는 것이다. 가진력을 구명하는 방법은 힘 센서(force transducer)를 이용하여 측정하는 직접법과 진동의 가속도를 측정하여 가진력을 추정하는 간접법으로 나누어진다. 직접법은 입력점에 힘 센서 또는 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하여 직접 측정하는 방법과 헤르츠 충격 이론(Hertz impact theory)을 이용하여 가진력을 계산하는 방법이 있다. 측정위치에 센서를 설치하는 것은 많은 경우에 측정 대상의 구조 변경이 불가피하기 때문에 비용과 시간 소요가 커서 널리 사용되지 못하고 있으며 계산을 하는 방법은 노면 형상을 스캔해야 할 필요가 있기 때문에 사용하기 어려운 점이 있다⁽⁴⁾. 이러한 이유로 가진력 구명에는 진동가속도를 이용한 간접적 추정이 광범위하게 사용되고 있다. 전달경로분석 수행 절차에서 사용되는 간접 추정의 대표적인 방법으로는 동강성법(dynamic stiffness method)과 역행렬법(matrix inversion)이 있다. 동강성법의 이론식은 다음과 같다.

$$F_i(\omega) = K_i(\omega) \frac{(a_{i,a}(\omega) - a_{i,p}(\omega))}{-\omega^2} \quad (2)$$

동강성법은 입력점과 응답점 사이의 주파수 응답 함수만을 파악하면 된다는 장점이 있으며 진동 절연 성능을 직관적으로 파악할 수 있다는 장점을 갖지만 계산에 정확한 동강성이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 역행렬법의 이론식은 다음과 같다.

$$F(\omega) = [H(\omega)]^{-1} \times a(\omega) \tag{3}$$

역행렬법은 동강성을 모르는 경우에도 사용할 수 있으며 입력점들 간의 주파수 응답함수도 측정해야 하기 때문에 대상의 전달 특성을 더 자세히 알 수 있다는 장점이 있으나 주파수 응답함수의 측정에 많은 시간이 소요된다는 단점을 갖고 있으며 입력점 간의 거리가 가까운 경우에는 주파수 응답 행렬이 불량조건 행렬(ill-conditioned matrix)이 되어 수치 오차가 발생할 수 있다는 위험성을 가지고 있다.

이 연구는 직접 측정법을 사용하여 종래의 간접 추정법보다 높은 정확도로 가진력을 측정하고 하드 포인트의 가진력을 분석하여 로드노이즈 연구에 활용하기 위한 것이다. 직접 측정법을 사용하기 어려운 이유는 힘 센서를 부착하기 어렵기 때문인데 특수하게 설계된 리그 테스터에 현가장치를 직접 조립하여 문제를 해결하였다.

3. 가진력 측정 실험

3.1 현가장치 리그 테스터의 특징

현가장치의 가진력을 측정하기 위해 사용한 리그 테스터 장치는 Fig. 1과 같다. 실험 차종에 따라서

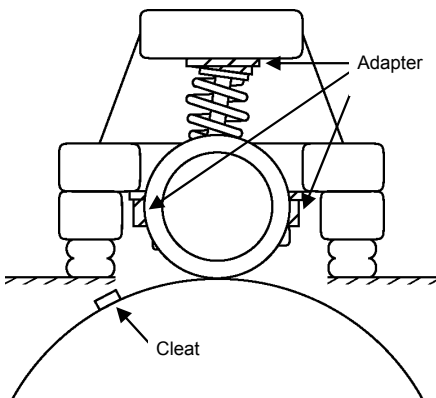


Fig. 1 Schematic diagram of suspension rig tester with chassis dynamometer

리그 테스터를 각각 제작하여 실험을 하는 방법은 비용과 시간 소요가 크기 때문에 실제 현장에서 사용할 수 없다. 이를 해결하기 위해서 리그 테스터는 프레임과(base frame)과 어댑터 블록(adaptor block)으로 분리되어 있다. 기본 프레임은 실제 차량에 비하여 아주 강한 강성을 갖는다. 차종과 상관없이 프레임을 공통으로 사용하기 때문에 특정 차종의 차체 특성을 반영하지 않고 강체처럼 거동하도록 설계되었기 때문이다. 어댑터 블록은 차종에 따라 다양하게 변화하는 현가장치의 하드 포인트에 대응하기 위한 것으로 실험 차량에 따라 어댑터 블록을 별도로 제작하여 프레임과 조립하여 사용한다.

구동 실험에서 크리트(cleat)를 이용해 가진력을 측정하고 분석한 이유는 타이어에 임펄스(impulse) 형태의 가진을 발생시켜 관심주파수 대역을 모두 가진하기 위해서이다. 이 실험에서 크리트에 의한 가진은 주로 차량의 주행방향(X-direction)과 수직 방향(Z-direction)으로 가해지며 횡방향의 가진은 거의 이루어지지 않는다. 실험에 사용된 크리트의 단면은 25 mm×10 mm로 제작되었다. 크리트의 높이가 10 mm이면 차체 거동과 상반위상을 갖는 진동(out-of-phase vibration)의 영향, 축의 거동 등이 다양하게 반영되기 때문이다⁵⁾.

가진력을 직접 측정하기 위하여 현가장치의 각 하드 포인트에 힘 센서를 부착하였는데 고무부시가 있는 마운트의 경우 Fig. 2와 같이 부시의 양 끝단에 볼트의 정렬을 유지하기 위하여 어댑터 링(adaptor ring)을 부착하고 차체와 연결되는 부분에도 힘 센서의 정렬을 위한 홈을 만들어 체결하였다. 솔리드 마운트에도 마찬가지로 힘 센서의 정렬을 위하여 어댑터 링을 사용하여 부착하였다. 또한, 실험 결과의 정합성을 확보하기 위하여 고무 부시로 연결되어 있는 하드 포인트는 Fig. 3과 같이 가속도계를 액티브 사이드와 패시브 사이드 양측에 부착하여 동강성법을 이용한 간접 측정도 함께 실시하였다. 동강성은 부시 공급업체로부터 제공받은 값을 사용하였고 이 값은 50 Hz부터 측정된 값으로 50 Hz 이하의 가진력은 비교할 수 없었다.

이 실험에는 차대 동력계에 의한 제한사항이 존재한다. 일반적으로 로드노이즈가 발생하는 속도는 60~80 km/h로 알려져 있으나 실험에 사용된 차대 동력계 롤러의 직경이 충분하지 못하여 이 속도로

구동 실험을 했을 때 두 인접한 가진 사이의 시간 간격이 좁아서 크리트 가진에 의한 진동이 다음 크리트의 가진이 들어오기 전에 모두 사라지지 않고 서로 간섭하게 된다. 또한 차대 동력계 롤러의 직경이 작아 60 km/h로 구동할 경우 해상도가 낮아지는 문제가 발생한다. 따라서 두 임펄스 사이에 충분한 시간 간격을 확보하고 1 Hz의 해상도로 분석하기 위하여 주행속도를 30 km/h로 설정하여 측정과 분석을 진행하였다.

Fig. 4는 전륜 현가계의 부시 중 한 지점에서 측정

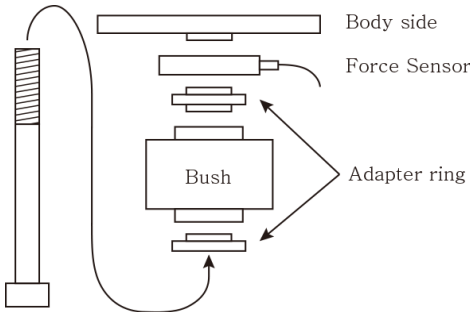


Fig. 2 Experimental setup to measure the excitation force acting on bush using force sensor

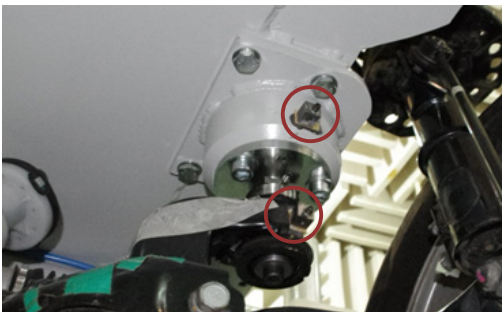
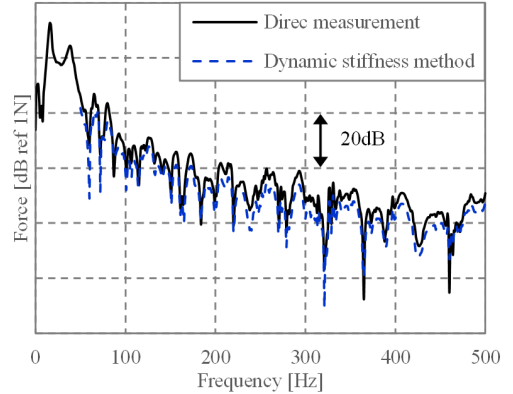


Fig. 3 Experimental setup to calculate the excitation force acting on bush using dynamic stiffness method

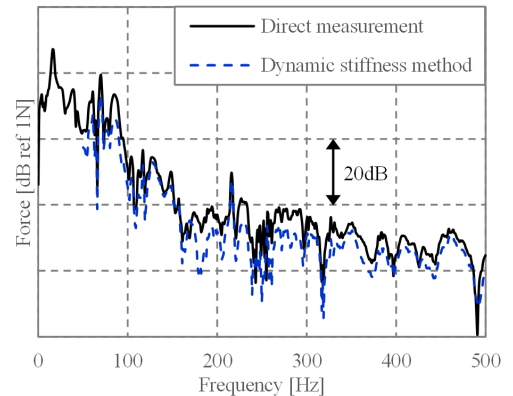
Table 1 Devices of excitation force measurement

Device	Device name
Excitation source	Cleat (710 mm×25 mm×10 mm)
Accelerometer	PCB 260A02 ICP triaxial
Force transducer	PCB 356A15 ICP triaxial
FFT analyzer	LMS Test.lab 12A
Data acquisition module	LMS SCADAS III

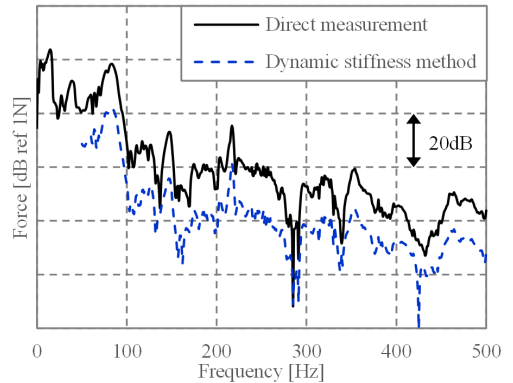
한 힘을 나타낸 것이다. Table 2는 X방향과 Z방향의 대표적인 공진주파수와 그 주파수에서 두 방법 간의 차이를 나타낸 결과이다. X방향의 경우 힘



(a) X-direction



(b) Y-direction



(c) Z-direction

Fig. 4 Comparison of measured forces acting on the front left bush of front subframe between direct measurement and dynamic stiffness method

센서를 이용하여 측정한 결과와 동강성법을 통해 계산한 결과를 비교해 볼 때, Table 2에 나타난 것처럼 공진주파수가 일치하며 이때, 평균적으로 4.90 dB의 차이를 보인다. Y방향도 이와 유사한 결과가 나타났다. 그러나 Z방향의 경우, 다른 방향과 마찬가지로 두 측정에서 공진주파수는 일치하지만 동강성법을 이용한 추정값이 직접 측정한 값에 비하여 평균적으로 14.5 dB 만큼 작게 측정되어 X, Y방향에 비하여 크기에서 큰 차이가 나타난다. 이러한 차이는 부시 공급업체에서 제공한 동강성과 실제 부시의 동강성의 차이로 인하여 발생할 수 있으며 차량과 서스펜션 리그 테스트의 동적 거동이 완벽하게 일치하지 않기 때문에 발생하는 것으로 추정된다. 또한, 두 측정 간의 상관계수는 X, Y, Z방향에서 각각 0.99, 0.97, 0.98로 나타난다. 따라서 두 측정의 결과가 매우 유사하다는 사실을 알 수 있다.

Table 2 Level difference of measured forces between direct measurement and dynamic stiffness method at the front left bush of front sub-frame

X-direction		Y-direction	
Frequency	$\Delta N(\text{dB})$	Frequency	$\Delta N(\text{dB})$
66	5.57	64	13.52
80	6.12	84	16.35
87	6.97	104	19.71
92	4.51	127	15.08
101	7.11	148	17.41
127	3.21	174	17.51
157	4.73	204	15.30
172	4.61	217	14.10
190	2.84	244	15.84
205	5.22	248	16.59
215	4.67	273	16.93
248	4.81	285	14.66
273	5.20	295	15.11
281	4.90	304	13.97
285	5.24	331	10.41
326	4.66	354	14.85
331	4.61	380	13.84
409	3.91	420	8.99
458	5.56	429	5.99
484	3.45	460	13.75
Average	4.90	Average	14.50

3.2 차량 실험과의 가진력 비교

현가장치 리그 테스트는 앞서 언급한 대로 차체의 특성을 반영하지 않고 강체처럼 작용하도록 설계되었기 때문에 측정된 가진력과 실제 차량에서 작용하는 가진력에 차이가 존재한다. 이 차이를 분석하기 위하여 대조군으로서 실제 차량을 차대 동력계에 Fig. 5와 같이 설치하고 현가장치 리그 테스트와 동일한 조건하에서 가진력 측정 실험을 수행하였다.

앞선 실험과 마찬가지로 동강성을 이용하여 계산한 결과이기 때문에 50 Hz 이하의 영역은 비교할 수 없었다. X방향의 경우 350 Hz 이하의 주파수 영역에서 측정 결과가 3~5 dB 내외로 유사하게 나타나지만 그 이상의 주파수 영역에서는 큰 차이가 발생하였다. Y방향의 경우 320 Hz 이하의 영역에서 유사한 결과가 나타나고 그 이상의 영역에서는 10 dB 정도로 차이가 크게 벌어졌다. Z방향의 경우 300 Hz 이하의 영역에서는 유사한 결과가 나타나지만 300~380 Hz의 영역에서 공진점과 반공진점의 위치가 달라

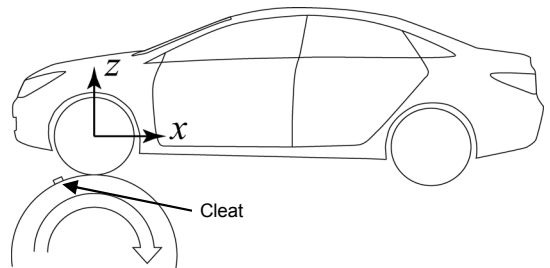


Fig. 5 Schematic diagram of cleft experimental setup for vehicle



Fig. 6 Experimental setup to calculate the excitation force acting on bush using dynamic stiffness method

지고 380 Hz 이상의 주파수 영역에서는 10 dB 정도
의 큰 차이가 나타났다. 이러한 차이가 나타나는 원
인은 리그 테스터와 차체 간의 상이한 특성 때문으로

추정된다. 리그 테스터는 서스펜션을 부착하는 것을
주목적으로 설계되었기 때문에 차체의 거동을 반영
하고 있지 못하다. 리그 테스터는 높은 강성으로 인
하여 700 Hz 이하의 주파수 영역에서 유의미한 공
진을 일으키지 않게 설계되었지만 실제 차량에서는
이러한 주파수 영역에서 각종 부품의 공진에 의한
영향이 있을 수 있다. 가진력은 Fig. 7에서 나타난
바와 같이 주파수가 커질수록 크기가 작아지기 때문
에 주파수가 커질수록 이러한 차체 거동의 영향이
커져서 오차가 발생하는 것으로 추정되나 더 엄밀한
분석을 위해서 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각
된다. 또한, 현가장치 리그 테스터의 경우 질량이 실
제 차에 비하여 크기 때문에 질량의 영향으로 피크의
위치가 5 Hz 내외로 낮아지는 경향성을 발견할 수 있
는데 Fig. 7의 (b)를 보면 타이어 캐비티 공진(tire
cavity resonance)에 의한 노이즈에 해당하는 221 Hz
의 피크가 현가장치 리그 테스터를 이용한 실험에서
는 216 Hz로 이동했음을 명확하게 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 로드노이즈 성능 예측을 위하여
현가장치의 하드 포인트에 작용하는 가진력을 측정
하기 위하여 현가장치를 특수하게 설계된 장치를 사
용하였다. 이 장치를 이용하여 가진력을 측정하고
실제 차량에서 계산한 가진력과 비교하여 다음과 같
은 결론을 얻었다.

현가장치 리그 테스터를 이용한 직접 측정법은
동강성법을 적용할 수 없는 솔리드 마운트에도 사용
할 수 있고 역행렬법에서 나타날 수 있는 수치적인
오차를 갖지 않기 때문에 간접적인 방법에 비해 신
뢰도 높은 측정을 할 수 있다.

측정한 가진력과 실제 차량에서 측정한 가진력의
공진점과 반공진점의 위치가 300 Hz 이하의 영역에
서 흡사하게 나타났으나 현가장치 리그 테스터의 무
게와 차량의 무게 차이로 인하여 공진점과 반공진점
의 주파수에 5 Hz 내외의 변화가 생겼다.

실제 차량에서 측정한 결과와 비교하였을 때 가
진력의 크기에서 차이가 발생하였으나 현가장치의
설계 변경이나 부시의 특성 변화에 따른 결과를 신
속하게 파악하는 방법으로 활용 가능할 것이라 생각
된다.

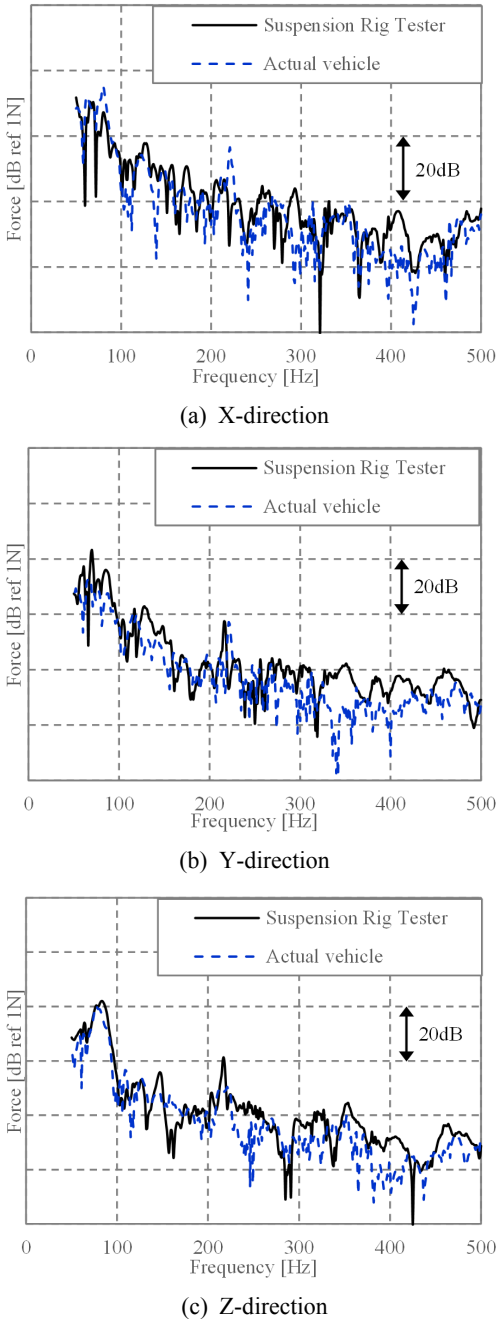


Fig. 7 Comparison of calculate forces acting on the front left bush of front subframe between suspension rig tester and actual vehicle

이 연구의 확장을 위해 하드 포인트의 가진력을 바탕으로 로드노이즈를 더 정확하게 예측할 수 있는 방법을 연구하고 있다.

후 기

이 연구는 2014년 현대자동차의 지원으로 수행된 연구내용입니다.

References

(1) Park, S. G., Kang, K. H., Hwang, S. W., Oh, K. S., Rho, K. H. and Oh, J. E., 2008, Transfer Path Analysis and Interior Noise Estimation of the Road Noise Using Multi-dimensional Spectral Analysis Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 1206~1212.

(2) Park, J. H., Hwang, S. W. and Lee, S. K., 2012, Road Noise Prediction Based on Frequency Response Function of Tire Utilizing Cleat Excitation Method,

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 8, pp. 720~728.

(3) Harrison, M., 2004, Vehicle Refinement: Controlling Noise and Vibration in Road Vehicle, SAE International, pp. 179~181.

(4) Fujikawa, T., Koike, H. and Oshino, Y., 2003, Relation between Road Roughness Parameters and Tyre Vibration Noise - Examination Using a Simple Tyre Model, Inter-noise Congress, pp. 862~865.

(5) Heißing, B. and Ersoy, M., 2011, Chassis Handbook, Springer Vieweg, Germany, pp. 267~268.



Yeon June Kang is a professor at School of Mech. and Aero. Eng., Seoul National Univ. He received his B.S., M.S. degree from Seoul National Univ. and Ph.D. for acoustics from the Purdue Univ. His research interests are acous-

tical materials, automotive NVH and sound quality of korean bell.