

변수모델을 이용한 전달경로분석법(OPAX)과 전달률 함수를 사용한 전달경로분석법(OTPA)을 사용한 승차감 저해요인분석

Analysis of the Cause of Hindrance for Ride Quality with OPAX and OTPA

김 종 식* · 신 광 수* · 최 상 일* · 임 세 빈* · 김 진 동* · 이 상 권†

Jongsik Kim, Kwangsoo Sin, Sangil Choi, Sebin Im, Jindong Kim and Sangkwon Lee

(Received June 30, 2014 ; Revised October 24, 2014 ; Accepted November 14, 2014)

Key Words : Vibro-acoustic Reciprocity(음향진동 상반원리), OPAX(operational path analysis with eXogeneous inputs : 변수모델을 사용한 전달경로분석), OTPA(transfer path analysis : 전달률 함수를 사용한 전달 경로분석), Ride Quality(승차감), TPA(transfer path analysis : 전달경로분석법)

ABSTRACT

The ride quality investigation is on-going topic in the car industry since its global standard has not evaluated and it is difficult to point out one part that hinders the ride quality. Since the traditional transfer path analysis that is widely used in car industry to investigate the ride quality requires a lot of test time to process the full data so that there are problems to conduct in industry. Based on these disadvantages, new approaches have developed such as OPAX(operational path analysis with eXogeneous inputs) and OTPA(operational transfer path analysis) for last decades. The OTPA only requires the operational data for evaluate the contribution of vibration sources and the OPAX has advantage of using parametric model to estimate the operating load and needs a minimum set of extra tests with excitation. In this paper, for evaluating the hindrance of ride quality two methods are used and the result is compared with another result of a car having higher ride quality.

1. 서 론

자동차 산업의 발전에 힘입어 자동차의 주행성능이 향상됨에 따라, 이러한 주행성능뿐만 아니라 승차감 또한 자동차의 주요 평가요인이 되었다. 승차감은 운전자와 동승자가 느끼는 주관적인 부분으로 시트를 통해 전해지는 차체의 진동에 따라 몸으로

느끼게 되는 안락한 느낌을 칭한다⁽¹⁾. 이러한 진동은 주행 중인 노면의 상태가 타이어와 현가장치, 서스펜션을 통해 시트로 전해지는 것과 구동장치에서 발생하여 변속기를 거쳐 sub-frame을 통해 시트로 전해지는 것으로 구분할 수 있다.

각 가진원으로부터 발생한 진동은 앞서 말한 경로를 통해 복합적으로 최종 시트에 전달되어 운전자와 동승자가 승차감에 대한 판단을 하게 되는데, 이

† Corresponding Author ; Department of Mechanical Engineering,
Inha University
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr
Tel : +82-32-860-7305, Fax : +82-32-868-1716
* Member, Department of Mechanical Engineering

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

러한 각 경로에 대한 최종 진동의 기여도를 판별하기 위해 전달경로분석법(transfer path analysis)이 널리 사용되어 왔다.

하지만 이 전달경로분석법의 경우, 복잡한 실험절차로 인해 많은 시간이 소요되고, 까다로운 측정 조건들 때문에 실제 산업현장에서 사용하기에 어려운 단점이 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위한 새로운 접근방식들이 연구되어 왔으며, 이러한 연구가 진행됨에 따라 M.H.A. Janssens^(2,3), A.N.Thite⁽⁴⁾에 의해 전달률과 주성분 분석을 사용하여 전달경로분석을 하는 연구가 진행되었고, 일본 혼다社의 연구개발팀의 Yoshida는 가진 실험없이 전달경로분석법을 수행하는 OTPA(operational path analysis)⁽⁵⁾방법을 고안하였고 LMS社의 Peter Gajdatsy는 기존의 TPA에서 힘을 예측하기 위해 부가적으로 설치하는 indicator의 수를 줄인 OPAX(operational path analysis with exogeneous inputs)⁽⁶⁾방법을 개발하였다.

이 두 가지 방법은 기존의 TPA에서 단점으로 꼽히던 복잡한 실험절차를 줄여 실험시간을 대폭 단축하였다. 현재 승차감에 대한 국제표준은 정확하게 존재하지 않기 때문에 이 연구에서는 두 가지의 새로운 전달경로분석법을 이용하여 승차감이 우수한 참고차량(A-car)의 모든 진동 전달경로에 대한 실차 평가 및 계측 분석을 통해 승차감이 우수한 주된 원인을 파악하고 이를 대상차량과 비교하여 대상차량(B-car)의 승차감 저해요인을 파악하고 그 원인을 분석하고자 한다.

2. OTPA, OPAX 방법

2.1 OTPA method

OTPA(operational transfer path analysis) 분석 방법은 기존의 TPA의 단점을 보완하기 위해 고안된 방법이다. 물리적으로 격리된 경로의 전달함수를 구하기 위한 가진실험을 필요로 하지 않아 실험 시간이 대폭 줄어드는 장점이 있는 반면, 주행 데이터만을 사용하여 구해진 전달률이 시스템의 고유 특성이 아니기 때문에 엔지니어가 전달경로를 선정함에 따라 분석결과가 많은 영향을 받는다. OTPA의 시스템 모델은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_i(w) = \sum_j H_{ij}(w) X_j(w) \tag{1}$$

$Y(f)$ 는 시트위치에서 측정된 출력벡터
 $X(f)$ 는 진동원 위치에서 측정된 입력벡터
 $H(f)$ 는 전달률 함수(transmissibility)

각 입력, 출력 벡터들은 입력과 출력 측정에 이용되는 진동, 힘, 음압 등으로 구성될 수 있고 각각의 입력과 출력 지점에서 측정이 된다. OTPA의 경우 전달함수를 측정하지 않기 때문에, 가진 지점과 전달경로 사이에 물리적 고립 없이도 가진만 존재하면, 모든 전달경로를 계산 할 수 있다. 즉, m 개의 출력과 n 개의 입력이(or DOF) 있는 경우

$$[y^{(1)} \dots y^{(m)}] = [x^{(1)} \dots x^{(n)}] \begin{bmatrix} H_{11} \dots H_{n1} \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ H_{1m} \dots H_{nm} \end{bmatrix} \tag{2}$$

로 나타내어질 수 있으며, 입력과 출력의 관계를 선형이라고 가정한다면, 주행 데이터의 각 출력과 입력의 상태가 변하더라도, 구동상태에서의 매 순간의 입력과 출력은 전달률 함수로 표현될 수 있다. 즉 몇 개의 주행 데이터가 각기 다른 조건으로 구성되어 있다면, 각 조건을 블록으로 만들어 쌓아 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_1^{(1)} \dots y_1^{(n)} \\ \vdots \quad \dots \quad \vdots \\ y_s^{(1)} \dots y_s^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} \dots x_1^{(m)} \\ \vdots \quad \dots \quad \vdots \\ x_s^{(1)} \dots x_s^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} \dots H_{n1} \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ H_{1m} \dots H_{nm} \end{bmatrix} \tag{3}$$

또는

$$Y = XH \tag{4}$$

가 된다.

전달률 함수(transmissibility)를 구하기 위해 X 의 역행렬을 구할 경우, 불량 조건(ill-condition) 문제가 발생할 수 있는데, 이를 해결하기 위해 특이값 분해(singular value decomposition) 기술을 사용해야 한다. 특이값 분해를 통해 역행렬의 불량 조건 문제뿐만 아니라, 또 다른 신호처리 기법인 주성분 분석(principal component analysis)을 추가로 사용하여, 입력 벡터들 사이의 cross talk가 제거된 비관련 성분들(uncorrelated quantities)로만 구성된 전달률 함수를 구할 수 있다. 즉 X 가 SVD로 표현하면 식(5)로 표현가능하다.

$$X = U \Sigma V^T \tag{5}$$

U 는 $m \times m$ 단위행렬이고, Σ 는 $m \times r$ 대각성분이 영이 아닌 주성분으로 구성된 대각행렬이다. V^T 는 V 의 켈레진치행렬로써, $r \times r$ 단위행렬이다. 이렇게 분해된 X 는 전달률 함수 H 를 구하는데 사용된다.

$$\tilde{H} = V \Sigma^{-1} U^T Y \tag{6}$$

여기서 Σ^{-1} 는 노이즈가 제거된 주성분으로 구성된 대각행렬이다. 이렇게 구한 전달률 함수와 입력벡터들을 곱하여 타겟에서의 기여도를 예측할 수 있다.

$$X \tilde{H} = \tilde{Y} \tag{7}$$

이러한 OTPA방법은 시스템의 특성인 전달함수를 구하지 않고 주행 데이터만을 사용하여 전달률을 사용함에 따라 몇 가지 오류가 발생할 수 있는데, 전달률을 구하는 과정에서 의사 역행렬(pseudo inverse)을 구하는 과정을 거치는 과정에서의 계산상의 오차가 생기는 경우가 있으며, 각각의 입력 지점 사이의 상관성이 있는 경우에도 오류가 발생할 수 있다. 또한 전달률을 계산할 때 사용된 주행 데이터를 기여도를 분석할 때도 사용할 경우 중요한 경로가 누락되었다고 예측된 결과의 합은 실제 측정된 결과와 항상 유사한 값을 나타내는 단점이 있다.

2.2 OPAX

OPAX는 기존의 TPA의 단점을 보완하기 위해 나온 또 다른 방법이다. 단순화된 변수를 사용한 모델(parametric model)을 이용해 가진력을 구함으로써 기존의 TPA에서 필요한 인디케이터의 개수를 선택적으로 정할 수 있어 실험시간을 대폭 줄여 편의성을 두었다. OPAX의 시스템 모델은 기존의 TPA모델과 같으며,

$$y_k(w) = \sum_{i=1}^n F_i(w) H_{F,ki}(w) + \sum_{j=1}^r Q_j(w) H_{Q,ki}(w) \tag{8}$$

식(8)과 같이 표현 가능하다. 여기서 F_i 는 구조 가진력, Q_j 음향 가진력, $H_{F,ki}$ 와 $H_{Q,ki}$ 는 각각의 구조와 음향 가진력으로부터 타겟까지의 전달함수이다. OPAX에서는 위의 구조 가진력과 음향 가진력이 변수를 사용한 함수로 표현하기 때문에, 위의 식(8)은 이러한 변수를 포함한 식으로 다시 표현이 가능하다.

$$y_k(w) = \sum_{i=1}^n H_{ki}(w) F_i(parameters, a_{ai}(w), a_{pi}(w)) + \sum_{j=1}^r H_{ki}(w) Q_j(parameter, p_j(w)) \tag{9}$$

$$u_q(w) = \sum_{i=1}^n H_{qi}(w) F_i(parameters, a_{ai}(w), a_{pi}(w)) + \sum_{j=1}^r H_{qi}(w) Q_j(parameter, p_j(w)) \tag{10}$$

여기서 H_{ki} 와 H_{qi} 는 각각의 가진력 위치에서부터 타겟 그리고 인디케이터에 대한 전달함수이다. 그리고 y_k 와 u_q 는 각각 타겟과 인디케이터의 오더(order) 데이터이다. 이러한 변수를 사용함으로써 OPAX의 계산은 실제 변수보다 방정식의 개수가 많은 과잉결정(over-determined)상태의 방정식을 해결하는 과정이 되며, 모델의 변수를 구함으로써 가진력을 구할 수 있다. 이 때, 각 구조 가진력과 음향 가진력은 각각 선형 또는 비선형으로 표현될 수 있는데, 구조 가진력의 변수모델이 선형인 경우

$$F_i(w) = K_i(w) \frac{(a_{ai}(w) - a_{pi})}{-w^2} \tag{11}$$

여기서,

$$K_i(w) = -m_i w^2 + j c_i w + k_i \tag{12}$$

비선형인 경우,

$$K_i(w_{z,\min} < w < w_{z,\max}) = k_{z,i} \tag{13}$$

선형으로 표현 될 경우, SDOF(single degree of freedom model)이라고 하며, m_i , c_i 그리고 k_i 는 각각 마운트의 물리적 의미를 가진다. 비선형으로 표현될 경우, multi-band model이라고 하며 임의의 주파수 영역 z 를 정하여, 각 영역당 마운트의 복소강성을 상수로 예측하는 방법이다. 이 변수 모델은 타겟 지점과 각 가진력의 위치에서의 주행데이터와 이전에 측정된 전달함수를 가지고 최소자승법(least square method)을 이용하여 예측 가능하며, 변수모델 사이에 이미 알고 있는 관계들을 포함시키거나 인디케이터 또는 다른 주행조건들을 추가로 사용함으로써, 더 정확한 변수들을 계산 할 수 있다. 이렇게 구해진 변수들을 위의 관계식에 넣음으로써 타겟

지점에 대한 각 경로들의 기여도들이 예측가능하다.

3. 실제 차량 주행 계측 및 기여도 분석

3.1 주행 계측 및 주파수응답함수 측정

주행 중인 차량의 진동기여도를 분석하기 위하여 실제 도로에서 승차감 우수 차량(A-car)과 실제 대상 차량(B-car)의 실차 주행 실험을 진행하였다. 두 대상차량은 배기량 약 5000 cc의 동급 차량이며, 주행 조건은 국내 고속 주행에 부합하는 아스팔트 노면상에서 110 KPH로 선정하였고, 정속 주행함에 따라 각각의 주요 가진원은 엔진 및 노면에 닿는 타이어나고 가정하고 목표가 되는 출력지점은 차량의 프레임에서 운전석 시트로 연결되는 운전석의 시트레일로 설정하였다. 진동 전달경로라고 생각되는 모든 곳(파워트레인(PT), 트랜스미션 마운트(TM), 전면 서브 프레임(FS), 후면 서브 프레임(RS), 속업쇼버(SA))과 출력 지점으로 설정한 시트레일에 총 27개의 3축 가속도계를 부착하였으며 LMS SCADAS mobile과 Test Lab을 이용하여 가속도 신호를 수집하였다. 센서의 위치는 Fig. 1과 같다. 진동 전달경로는 Fig. 2와 같이 가정하였으며, 시트 진동에 대한 기여도가 가장 높은 경로를 찾기 위하여 각 경로를 해당 가진원으로 가정하여 다중 입력 단일 출력으로 모델링 하였다.

OPAX 방법에 필요한 가진실험을 통한 주파수응답함수는 선형시스템에 대한 상반원리에 의해 시트(i)와 각 가진원(k) 그리고 인디케이터(q) 사이의 전달함수 H 는 각각 $H_{ik}=H_{ki}$ 그리고 $H_{iq}=H_{k/q}$ 와 같이 표현되므로, 시트레일에서 임팩트 해머를 사용하여 가진하여 가진력에 대한 각 가진원 그리고 인디케이터로의 주파수응답함수를 얻는다. 실제 주행 실험은 가속도 센서를 부착한 상태에서 도로를 실제 주행하면서 측정하였다.

3.2 OPAX, OTPA를 이용한 기여도 분석

가진 실험을 통해 구해진 주파수응답함수와 실제 주행실험을 통해 측정된 데이터를 LMS社의 Test Lab의 소프트웨어를 사용하여 OPAX 방법을 통해 기여도를 분석하였고, 앞서 전개된 OTPA이론에 따라 OTPA 알고리즘을 MATLAB으로 직접 코딩한 프로그램을 이용하여 OTPA를 통한 기여도를 각각

분석하였다. 실제 차량에서 승차감에 가장 크게 기여하는 주파수 대역은 수직 진동에 대하여 ISO 및 NASA⁽⁷⁾ 등의 연구보고에서처럼 인체에 영향을 주는 주파수 범위로써 0 Hz~30 Hz 미만이다. 따라서, 기여도 분석의 대상 주파수는 승차감 우수 차량(A-car)과 실제 대상 차량(B-car)의 시트레일에서 수집한 가속도 데이터의 5 Hz~25 Hz 범위의 PSD (power spectrum density)를 Fig. 3에 나타내어 이를 비교하고, 대상 차량의 PSD가 높은 주파수 14 Hz를 선정하여 기여도 분석을 진행하였다.

승차감에 영향을 주는 5 Hz~25 Hz 구간에서 대상 주파수 14 Hz에 대한 승차감 우수 차량과 대상차량의 OPAX 방법을 통한 기여도분석 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 OTPA 방법을 통한 기여도 분석결과 Fig. 6과

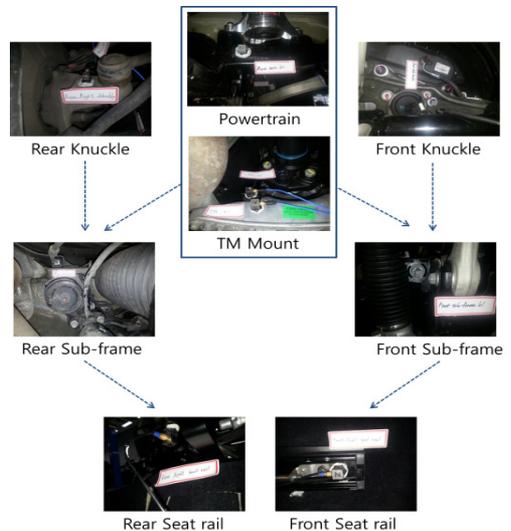


Fig. 1 The location of sensors

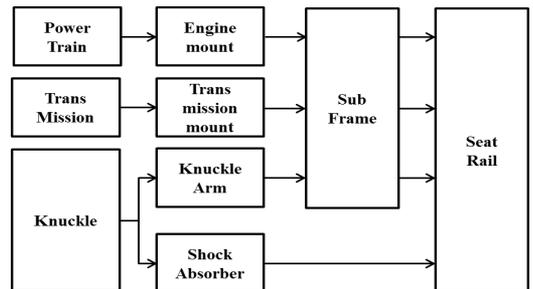


Fig. 2 Multi-input/single output modeling for vibration path analysis of car

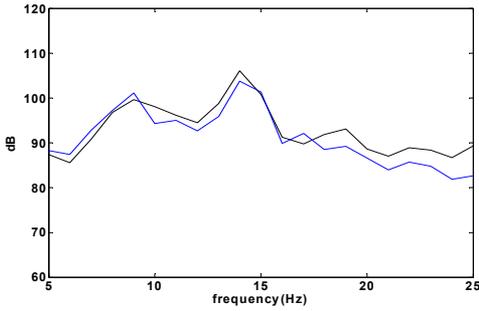


Fig. 3 Power spectrum density of front seat rail (A-car: dashed line, B-car: solid line)

Fig. 7에 각각 막대그래프로 나타내었다. 여기서 measure는 직접 측정된 출력 지점 값이고 total은 출력 지점에 대한 각 지점의 기여도를 전부 합(sum)한 것이다. 1,2,3,4는 순서대로 차량의 전면좌측, 전면우측, 후면좌측, 후면우측 위치를 나타낸다. 각 결과는 승차감 우수차량 대비 대상차량의 기여도가 높은 가진원을 비교하였으며 승차감에 대한 절대적 표준은 존재하지 않기에, 각 방법의 결과에 따른 대상차량의 기여도 중 가장 높은 가진원의 진동 레벨 값의 95%에 해당하는 값을 선정하였다. 이러한 기준을 적용한 후 각 그림으로부터, 대상차량의 트

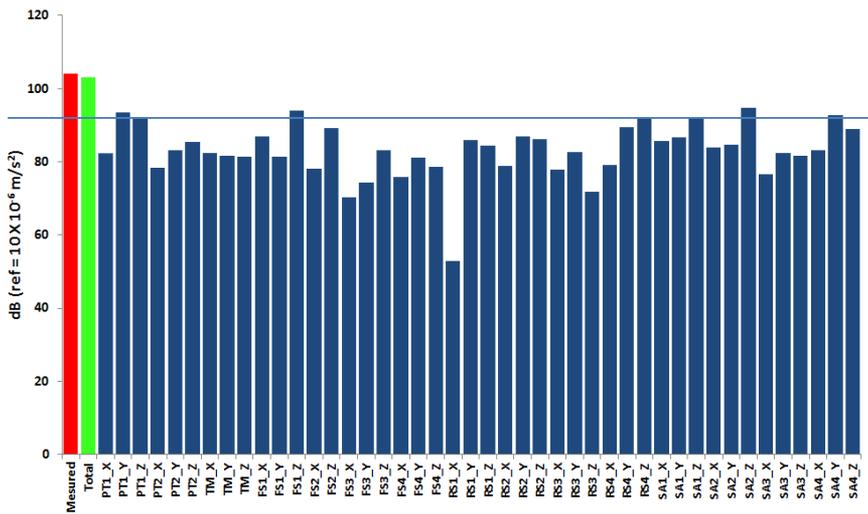


Fig. 4 The individual bars show the main path contribution of A-car at 14 Hz by OPAX

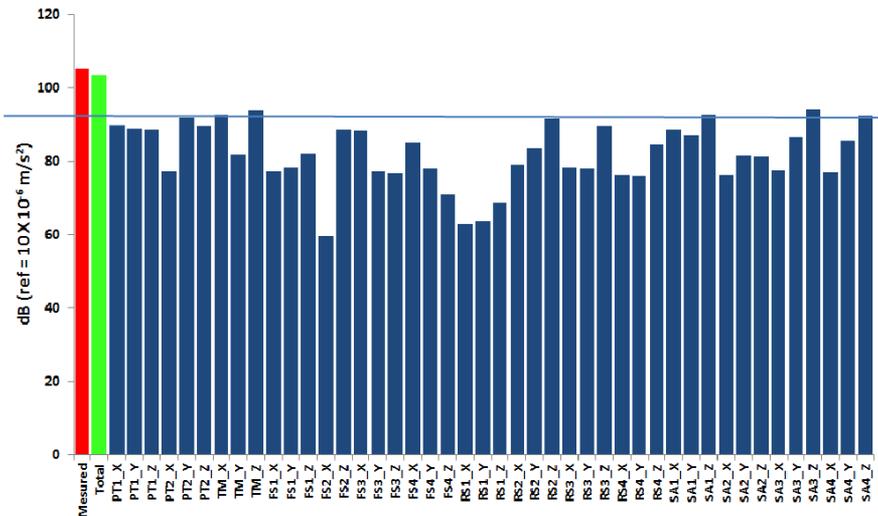


Fig. 5 The individual bars show the main path contribution of B-car at 14 Hz by OPAX

랜스미션 마운트(TM)와 후면 좌측 속업 쇼버의 기여도가 승차감 우수 차량 대비 높게 나타남을 확인할 수 있다.

B차량에 대한 두 분석 결과의 상이한 점은 OTPA방법의 경우 상대적으로 트랜스미션 마운트의 z방향의 기여도가 높게 나타난 반면, OPAX방법의 경우 트랜스미션 마운트의 z방향뿐만 아니라 x방향

의 기여도도 높게 나타났다. 이는 OTPA의 경우 시스템의 특성인 전달함수를 사용하지 않고 선형이라 가정된 전달률을 기여도 분석에 사용함으로써 정속 주행 상태에서 상대적으로 진동레벨이 큰 z방향의 기여도가 다른 성분에 비해 높게 예측된 것이다. 또한 A차량의 경우에도, B차량과 유사하게 OTPA 분석시엔 SA1_Z와 SA4_Z 경로의 기여도가 높게

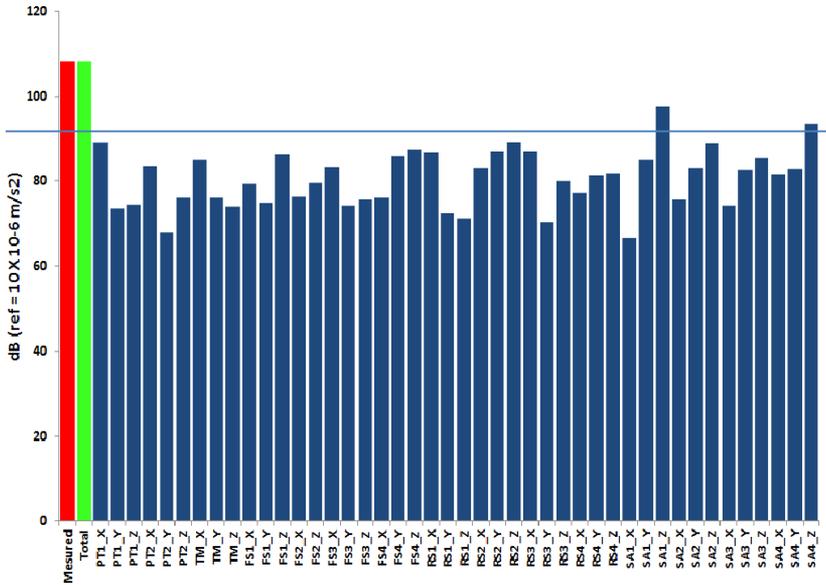


Fig. 6 The individual bars show the main path contribution of A-car at 14 Hz by OTPA

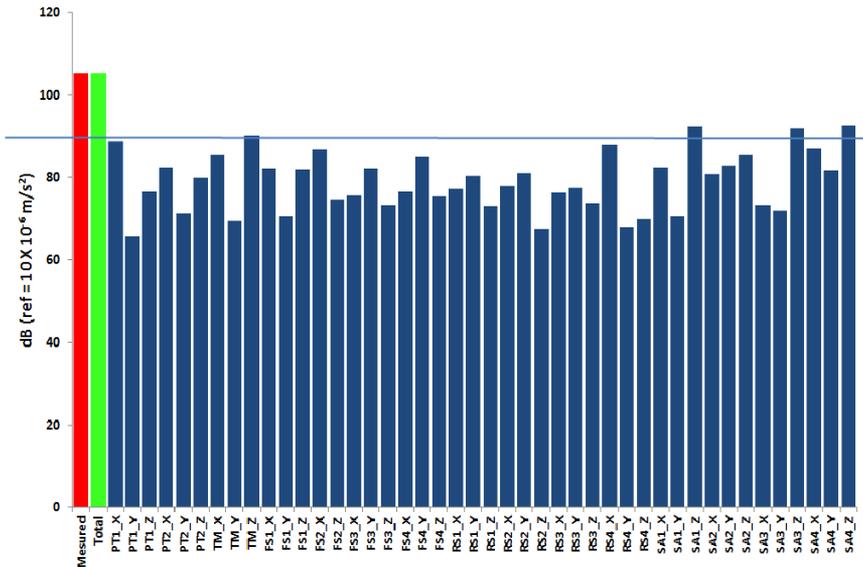


Fig. 7 The individual bars show the main path contribution of B-car at 14 Hz by OTPA

예측된 것을 확인할 수 있다. 이러한 두 차량에 대한 두 방법의 결과의 차이는, 기여도를 구함에 있어 접근법의 차이로 인한 것으로써, OTPA 방법의 경우, 기여도가 높은 지점은 간단히 목표 지점인 운전석 시트레일 지점과 해당 경로 사이의 가속도 비 혹은 그 사이에 계산된 전달률의 값이 높다는 것을 의미하고, OPAX 방법의 경우 각 기여도가 높은 경로에서, 인디케이터를 통해 계산된 힘의 크기가 크거나 측정된 전달함수의 영향으로 인한 것이라 추론할 수 있다. 이러한 오차는 두 방법론의 차이에 의해 기인하므로, 전달률과 전달함수를 비교하며 오차를 줄여나갈 수 있지만 이 연구의 목적은 두 방법의 비교를 통한 승차감 저해요인을 밝혀내는 것에 있으므로 이 부분에 대한 개선 연구는 향후 추가로 진행할 연구과제이다. 하지만 두 분석방법의 결과를 비교하였을 때, 승차감 우수차량인 A 차량 대비 B 차량의 승차감 저해경로를 공통적으로 찾아내었다고 볼 수 있다.

3.3 승차감 저해요인 분석

앞서 두 가지의 새로운 전달경로분석법을 통한 승차감 저해요인을 발견하였고 이에 대한 원인을 분석하게 위한 승차감저해요인에 대한 모드 해석을 수행하였다. 대상차량의 모든 경로에 대한 형상을 Fig. 8과 같이 구성하였다. 승차감 기여도 분석 대상 주파수인 14 Hz에서 첫 번째 모드가 발견되었고 그에 따라 해당하는 모드 형상을 상(phase) 0°과 phase 180°에 맞추어 Fig. 9와 10에 나타내었다.

다른 경로에 비해 기여도 분석에서 발견된 트랜스 미션의 마운트 부분의 거동이 큰 것을 확인할 수 있고, 이로 인해 승차감을 저해하는 요인 중 하나인 z축 방향의 트랜스미션을 특정할 수 있다. 또한, 기여도 분석에서 밝혀진 승차감 저해요인 중 나머지 하나인 후면 좌측 속업 쇼버는 실험에서 측정된 전

달함수로 표현된 모드 해석으로 확연하게 나타나지 않았기 때문에, 전달함수 외의 요인인 경로 지점에서의 힘의 영향을 확인하기 위해 OPAX 분석에서 인디케이터를 통해 구해지는 힘의 크기를 Fig. 11에 나타내었다. 그림을 통해, 후면 좌측 속업 쇼버에서의 높은 기여도는 주행 중 경로 지점에서 발생하는 힘의 영향인 것을 확인할 수 있다.

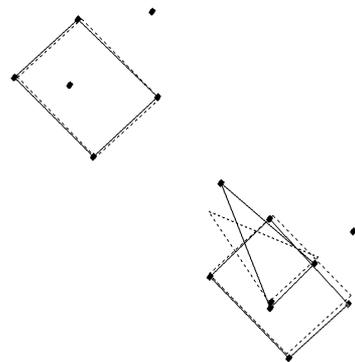


Fig. 9 Modal behavior of paths at phase 0°

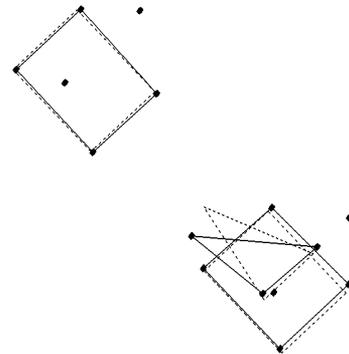


Fig. 10 Modal behavior of paths at phase 180°

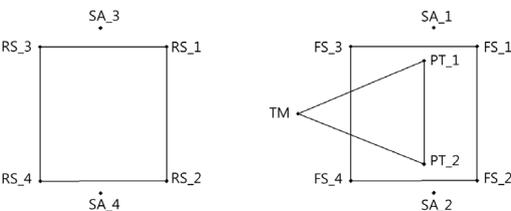


Fig. 8 Geometry for modal analysis

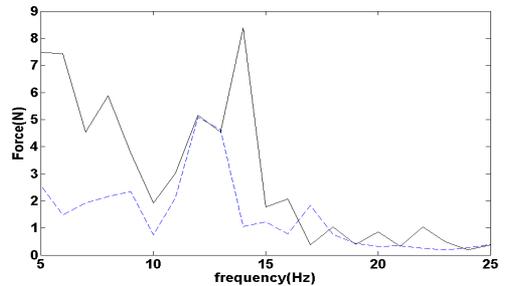


Fig. 11 Estimated forces at SA3_Z by OPAX method (A-car: dashed line, B-car: solid line)

5. 결 론

이 연구에서는 기존에 사용해왔던 전달경로분석 (transfer path analysis)의 단점을 보완한 새로운 방법인 OPAX방법과 OTPA방법을 사용하여 실제 차량에 대해 승차감을 저해하는 요인을 분석해보았다. 이 두 방법은 각각 기존의 방법에서 변수모델을 사용하여 가진력을 구하거나, 주행데이터만을 사용하여 실험을 통하여 구하는 주파수 응답함수 대신 전달률을 구함으로써 실험시간을 대폭 줄였으며, 두 방법을 비교하였을 때의 승차감을 저해하는 주요 가진원을 유사하게 찾아내었다. 또한 기여도 분석을 통한 주요 승차감 저해요인의 원인을 해석함으로써 승차감을 저해하는 특정 설계 변수를 특정 지을 수 있으며, 이러한 승차감의 저해 요인이 특정 경로와 목표 지점 사이의 전달함수의 문제, 혹은 주행 중 작용하는 힘의 크기에 있음을 확인할 수 있었다. 추후 이러한 설계 변수의 변경, 또는 개발을 통해 승차감 향상을 기대할 수 있다. 실제 차량의 승차감 평가의 경우, 어느 특정 경로를 정하고 분석하는 데에는 많은 어려움이 존재한다. 두 방법을 통하여 기존의 방법보다 더 짧은 실험 시간으로 승차감 저해 요인에 대한 신뢰할만한 결과를 확보함으로써 승차감 문제에 대한 빠른 대처방안으로 유용하게 사용할 수 있다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2010-0014260).

References

(1) Jang, H. K., Kim, S. H. and Jeong, Y. H., 2001, Development of Objective Vehicle Ride Index, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference pp. 450~454.
 (2) Janssens, M. H. A., Verheij, J. W. and Thompson, D. J., 1999, The Use of an Equivalent Forces Method for the Experimental Quantification of

Structural Sound Transmission, Journal of Sound and Vibration, Vol. 226, pp. 305~328.

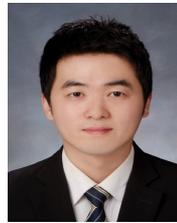
(3) Janssens, M. H. A., Verheij, J. W. and Thompson, D. J., 1999, The Use of an Equivalent Forces Method for the Experimental Quantification of Structural Sound Transmission in Ships, Journal of Sound and Vibration, Vol. 226, No. 2, p. 305.

(4) Thite, A. N. and Thompson, D. J., 2003, The Quantification of Structure-borne Transmission Paths by Inverse Methods, Part 2: Use of Regularization Techniques, Journal of Sound and Vibration, Vol. 264, No. 2, pp. 433~451.

(5) Kousuke, N. and Yoshida, J., 2006, Method of Transfer Path Analysis for Vehicle Interior Sound with No Excitation Experiment, Proc. FISITA.

(6) Karl, J. et al., 2011, OPAX: A New Transfer Path Analysis Method based on Parametric Load Models, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, No. 4, pp. 1321~1338.

(7) Leatherwood, J. D. and Baker, L. M., A User-oriented and Computerized Model for Estimating Vehicle Ride Quality, NASA Technical Paper, 2299.



Jong-Sik Kim is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for transfer path analysis and vibration design.



Sang-Kwon Lee was born in Pusan, Korea, in 1959, He studied mechanical engineering at the Pusan National University, Pusan, Korea for a bachelor's degree In 1998 he received a Ph.D. degree in signal processing at the ISVR (Institute of Sound and Vibration Research) of the University of Southampton in U.K. He has 11 years experiences in automotive noise control by working in Hyundai Motor co. and the Renault-Samsung Motor Company in Korea. In 1999, he moved to Inha University, Incheon, Korea.