

다차원 스펙트럼 해석법을 이용한 차실내 운전자석 진동전달경로 규명에 관한 연구

A Study on Vibration Transfer Path Identification of Vehicle Driver's Position by Multi-dimensional Spectral Analysis

이 유 엽* · 박 상 길** · 오 재 응†

You-Yub Lee, Sang-Gil Park and Jae-Eung OH

(2007년 6월 14일 접수 ; 2007년 7월 4일 심사완료)

Key Words : Multi-dimension Spectral Analysis(다차원 스펙트럼해석법), Suspension System(현가장치), FRF(주파수응답함수), Partial Coherence Function(부분기여도함수), Multiple Coherence Function(다중기여도함수), Coherent Output Spectrum(기여출력스펙트럼), Shielding Effect(차단효과)

ABSTRACT

In this study, transfer path identification and output estimation are simulated by multi-dimension spectral analysis method(MDSA). Multi-input/single-output system give expression the vehicle suspension which each inputs are correlated reciprocally. In case of correlating with inputs, the system needs separating the each input signal by MDSA. Main simulations are about finding effective input by coherent output spectrum and selecting optimal input's number by multiple coherence function. Also, by shielding transfer path of each input, transfer path characteristic is identified in terms of overall integrated contribution level.

1. 서 론

차실내 운전석에서 느끼게 되는 진동은 주로 0~25 Hz 사이의 저주파 진동으로 주행시 운전자에게 피로감을 주고 특히 상하, 좌우로의 진동은 승차감을 저감시키는 원인이 되기도 한다⁽¹⁾. 이는 노면 가진 진동이 바퀴를 통해 전달되는 노면 가진력이 주원인이 되어 나타나기 때문이다. 따라서, 진동원의 전달경로를 파악하는 것은 진동 저감대책마련을 위한 기본적인 일이며, 진동원이 존재하는 부위에서 어떤 전달경로를 통해 운전자에게 전달되는가를 알아내는 것은 중요하다. 여기서, 자동차 주행시

에 네바퀴의 현가장치를 통해 발생하는 진동원을 규명하기 위하여, 현가장치를 통과한 신호를 4개의 입력으로 정하고, 운전석에서의 진동을 출력으로 하는 4입력/단일 출력계로 모델링을 하였다⁽²⁾. 이들 신호를 통한 다차원 스펙트럼 해석법을 사용하여 입력과 출력사이의 기여관계를 알아보고 4지점에서의 전달경로 특성을 규명해 본다. 또한 특정 전달경로를 차단했을 때의 효과를 분석하여 진동원의 규명 및 저감에 대해서 알아보는 것을 이 연구의 목적으로 한다⁽³⁻⁶⁾.

2. 다차원 스펙트럼 해석법

여러개의 입력이 전달경로간의 상호 간섭작용에 의해 출력으로 나타나는 경우를 Fig.1과 같이 다입력/단일출력모델로 구성하였다^(7,8).

이러한 계의 출력의 파워스펙트럼을 구하면 다음

† 교신저자: 정희원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : jeoh@ihanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0452, Fax : (02) 2299-3153

* 정희원, 호원대학교 자동차기계공학부

** 정희원, 한양대학교 기계공학과

과 같이 나타난다.

$$S_{yy}(f) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^q H_j^*(f) H_i(f) S_{ji}(f) + S_m(f) \quad (1)$$

또한, 식 (1)에서 입력간의 상호작용이 없는 경우로 가정할 수 있다면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{yy}(f) = \sum_{i=1}^q |H_i(f)|^2 S_{ii}(f) + S_m(f) \quad (2)$$

이러한 경우에는 출력에 대한 어떤 입력의 기여를 $|H_i(f)|^2 S_{ii}(f)$ 에 의해 계산할 수 있다. Fig. 1과 같은 계의 경우 입력상호간의 상관에 의해 원래의 출력스펙트럼 항보다 크게 나타나게 되는데, 주파수 응답함수법으로 계산할 경우에는 상호간의 상관에 의한 항이 중복되어 나타나기 때문에 각각의 입력과 출력 사이의 기여 출력스펙트럼만으로는 출력에 더 많은 영향을 미치는 입력을 파악하기 어렵게 된다. 따라서, 입력들 사이에 상호상관이 존재하는 다입력/단일출력계의 경우로 생각하여 입력들 사이의 상관 성분들을 제거한 Fig. 2와 같은 조건 다입력/단일출력계로 모델링 한다. 조건 다입력/단일출력계의 모델링은 $x_1(t)$ 가 $x_2(t)$ 에 영향을 주며, $x_1(t)$ 와 $x_2(t)$ 가 $x_3(t)$ 에, 같은 방법으로 $x_1(t)$ 부터 $x_{(i-1)}(t)$ 까지가

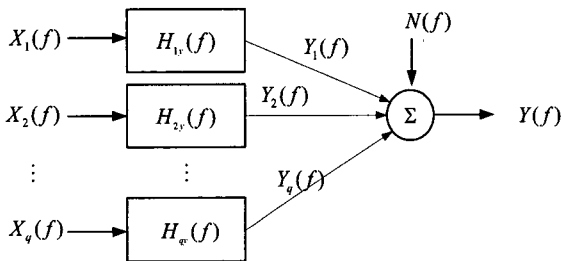


Fig. 1 Correlated multi-input/single output model

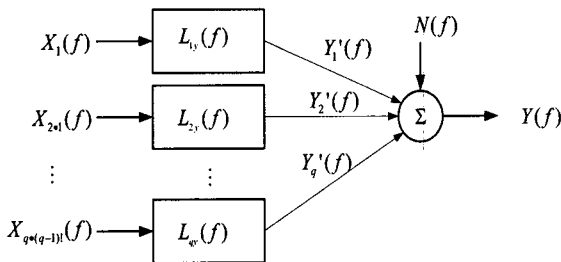


Fig. 2 Conditioned multi-input/single output model

$x_i(t)$ 에 영향을 미친다는 가정에 의한 모델링이다. $x_{i(i-1)}(t)$ 는 $x_1(t)$ 부터 $x_{(i-1)}(t)$ 까지의 선형효과가 $x_i(t)$ 로부터 제거된 신호를 나타낸다. 따라서 잔차스펙트럼은 다른 입력들이 출력에 기여하는 선형적인 효과를 제거한 스펙트럼을 나타내며, r 차의 잔차스펙트럼은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_{ii,r}(f) &= S_{ii(r-1)}(f) - L_{ri}(f) \cdot S_{rr(r-1)}(f) \\ &\quad (i = 2, 3, \dots, q \quad i > r) \\ S_{ij,r}(f) &= S_{ij(r-1)}(f) - L_{rj}(f) \cdot S_{ir(r-1)}(f) \\ &\quad (i, j = 2, 3, \dots, q \quad i, j > r) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $L_{rj}(f)$ 는 입력간 및 입출력간의 상관성분을 제거시킨 경우의 입력간 및 입출력간의 최적전달 함수이며, 다음과 같은식으로 나타낼 수 있다.

$$L_{rj}(f) = \frac{S_{rj(r-1)}(f)}{S_{rr(r-1)}(f)} \quad (i = 2, 3, \dots, q \quad i > r) \quad (4)$$

다입력/단일출력에서 입력간 상관성분의 존재로 최적전달함수를 사용한 조건 다입력/단일출력계로 모델링한 경우, i 번째 입력이 출력에 기여한 정도를 부분 기여도함수로 나타낸다.

$$\gamma_{iy,r}^2 = \frac{|S_{iy,r}(f)|^2}{S_{ii,r}(f) S_{yy,r}(f)} \quad (5)$$

이 함수는 입력간의 상관관계를 해석적으로 없앤 뒤에 구할 수 있는 일반기여도함수로 생각할 수 있다. 다중기여도함수는 식 (6)과 같이 정의되며, 구성된 입출력계에서 사용된 입력들이 적절히 고려되었는지를 나타내는 함수로 보통 0.9 이상의 값을 가질 때 타당하다고 판단한다.

$$\gamma_{y,x}^2 = 1 - \frac{S_m}{S_{yy}} \quad (6)$$

한편, 조건 다입력/단일출력 모델에서 입력들이 출력에 차지하는 파워량을 산출하여 다른 모든 입력이 야기하는 선형적인 효과를 제거할 때, 특별한 입력의 순수한 영향에 의해 생기는 출력에서의 파워량을 알기 위해 식 (7)과 같은 특정입력의 출력에 대한 순수한 기여량을 나타내는 기여출력스펙트럼을 사용

한다.

$$S_{y_i(n-1)}(f) = \gamma_{y_i(n-1)}^2(f) S_{y(n-1)}(f) \quad (7)$$

3. 진동원 규명 시뮬레이션

이 연구에서는 스프링-댐퍼계의 수동형 현가장치를 자동차 현가계의 2자유도 선형역학 모델(1/4 모델)⁽⁹⁾ 기초로 하여 운전석에서 느끼게 되는 승차감에 영향을 주는 진동주파수 성분을 알아보고 질량과 강성계수를 통해 입력을 구성하였다⁽¹⁰⁻¹¹⁾. 출력은 운전석에서의 신호로 가정하였다. 여기서 운전석의 승차감에 큰 영향을 주는 차량의 차체 진동 모드를 bounce와 bending으로 나누어 보고 각각의 모드에 대한 고유진동수를 알아보았는데 그 값은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 bounce는 3.56 Hz, 1st bending 15.10 Hz, 2nd bending 16.70 Hz로 각각 구분할 수 있으며 전체적인 응답은 이 3개의 고유진동수를 합친 것이다.

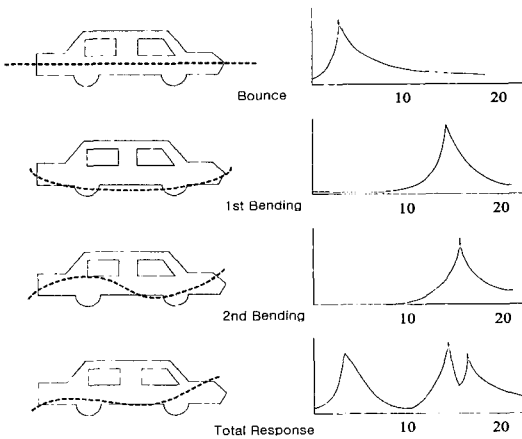


Fig. 3 Each frequency of basic vibration mode

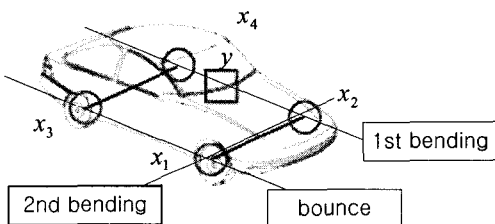


Fig. 4 Modeling of input components

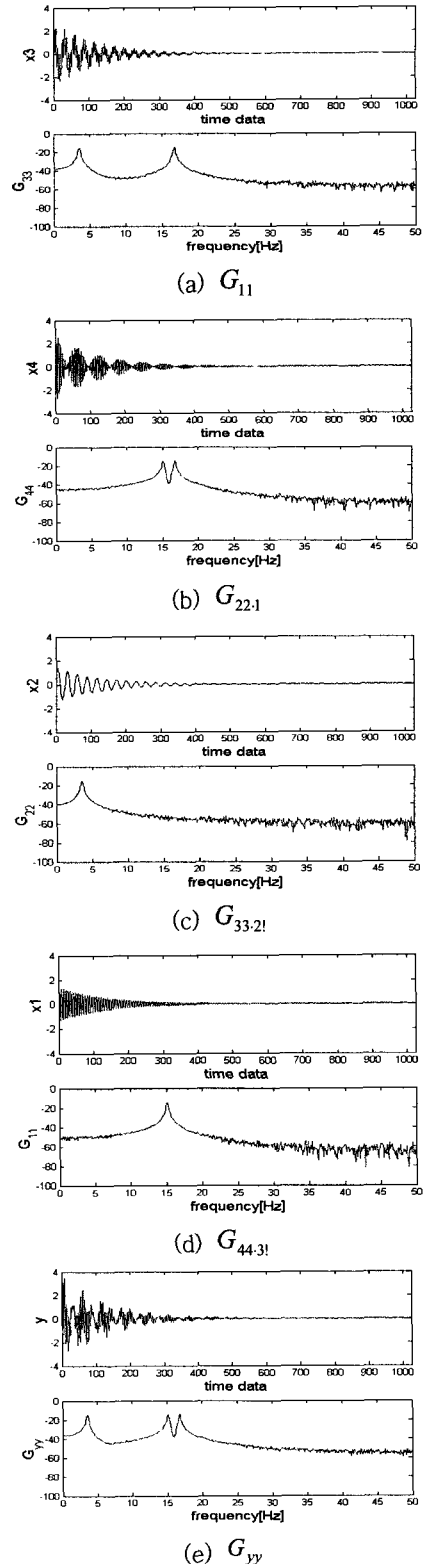


Fig. 5 Time and auto spectrum of inputs/output

Fig. 4와 같이 자동차의 4개의 바퀴에서 발생하는 진동 모드를 임의로 선정하여 구성하여 보았다. 네 개의 바퀴에서의 신호를 입력으로, 운전자석의 신호를 가상으로 설정하여 출력으로 가정하고 시뮬레이션을 실행하였다.

네 개의 입력 사이에는 상호간에 기여관계가 존재한다. 이때 입력간의 상관관계가 없는 시스템을 구성하기 위하여 잔차스펙트럼 시뮬레이션을 거쳐 G_{11} , G_{22} , G_{33} , G_{44} , G_{yy} 를 각각 구해보면 Fig. 5와 같다. 앞서 설명된 Fig. 3과 비교해 보면 각 위치별로 고유진동수를 1개 또는 2개씩 보유하고 있으며 출력에 영향을 미치는 주요 입력요소를 나타낸다.

한편 각 입력과 출력 사이의 일반기여도 함수를 계산해보면 Table 1과 같다. 입력간 및 입출력간의 기여관계가 높으므로 MDSA를 적용할 수가 있음을 알 수 있다.

한편 입력의 크기 변경에 따라 일반기여도 함수가 어떻게 변화하는가를 살펴보면 Fig. 6에서 입력의 크기가 0.1~0.9로 변하지만 입력 크기의 변화는 기여도함수에 영향을 미치지 않고 있는데 이는 입력의 주파수 성분만이 기여도함수에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

Table 1 Mean value of ordinary coherence function

γ_{12}^2	γ_{13}^2	γ_{14}^2	
0.9444	0.8944	0.9075	
γ_{23}^2	γ_{24}^2	γ_{34}^2	
0.9008	0.9274	0.8662	
γ_{1y}^2	γ_{2y}^2	γ_{3y}^2	γ_{4y}^2
0.9665	0.9642	0.9297	0.9123

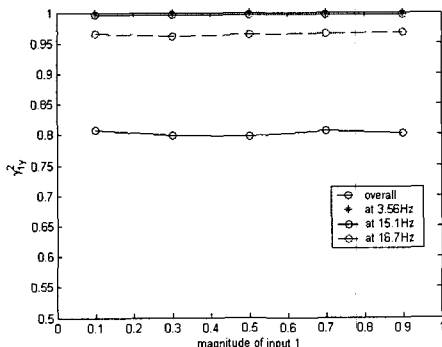


Fig. 6 Trend of ordinary coherence function as input's magnitude change

4. 전달경로특성 및 출력 예측시뮬레이션

4.1 기여출력스펙트럼에 의한 기여순서결정

Table 2는 기여출력스펙트럼을 전 주파수 영역에 대해 적분한 레벨 값을 나타낸다.

표에 나타낸 바와 같이 각 입력 기여순서는 입력 1 > 입력 2 > 입력 3 > 입력 4의 순서임을 알 수 있다. 이 결과는 각 입력원 사이의 상관관을 제거하여 계산한 기여출력스펙트럼을 적분한 수치로 각 진동원의 기여순서를 결정할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 입력개수변경에 따른 다중기여도함수의 변화

앞선 Fig. 5에서 입력 3과 입력 4는 각각 입력 1과 입력 2에 포함되어 있는 주파수 성분이었다. 즉 입력

Table 2 Overall level values estimated by coherence function approach

		Contribution measured output [dB]
$\int G_{yy} df$		116.50
Coherent output spectrum	$\int \gamma_{y,x}^2 G_{yy} df$	116.36
	$\int \gamma_{1y}^2 G_{yy} df$	108.42
	$\int \gamma_{2y+1}^2 G_{yy-1} df$	102.11
	$\int \gamma_{3y+2}^2 G_{yy-2} df$	86.35
	$\int \gamma_{4y+3}^2 G_{yy-3} df$	80.16

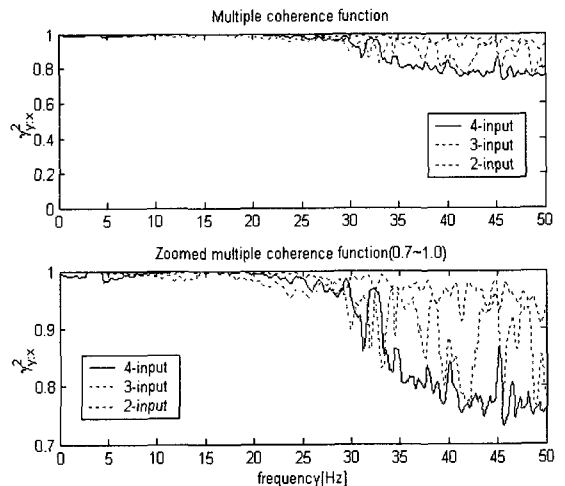


Fig. 7 Multiple coherence function when number of inputs is reduced

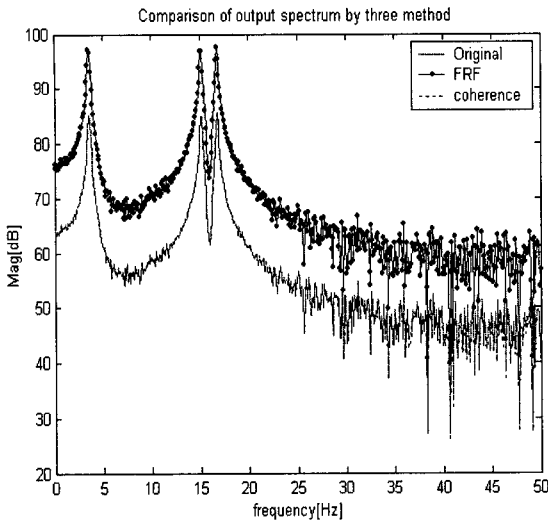


Fig. 8 Comparison between FRF approach and coherence function approach

3 또는 입력 3과 입력 4가 동시에 제거된 경우의 다중기여도함수도 모두가 Fig. 7에(2-input)나타낸 바와 같이 1에 가까운 값이 되었다. 즉 출력에 큰 영향을 미치지 않는다는 결론인데 이것을 통해 고려한 입력들을 제거해 보면서 다중기여도함수를 비교해보면 어떤 입력이 출력을 표현하는데 있어서 불필요한 입력인지를 찾아내는데 유용한 수단으로 활용할 수 있다.

4.3 FRF법과 MDSA에 의한 출력예측 시뮬레이션

Fig. 8에서 나타난 것은 FRF법에 의한 출력 예측에서 입력간의 상관을 고려하지 않는다면 원래의 출력보다 더 큰 출력이 나올 것이다. 그러나 입력간의 상관을 고려하면 이 경우의 FRF법에 의한 출력 예측치는 기여도함수에 의해 계산된 출력 예상값과 거의 일치함을 알 수 있다.

4.4 FRF법에 의한 전달경로 차단효과

FRF법에 의해서 얻어진 총 레벨 값과 원래의 결과를 비교해보면 Table 3과 같다. 표에 나타난 바와 같이 입력1의 전달경로가 차단되었을 때($H_1=0$) 가장 큰 레벨의 변화 즉, 출력치 값이 가장 적게 나타남을 알 수 있다. FRF법을 이용하여 각 입력이 출력에 전달되는 경로의 유효한 차단효과를 해석적으로 규명하여 전달경로의 특성을 파악할 수 있었다.

Table 3 Comparison of integrated level values estimated by the FRF approach

	Contribution measured output[dB]	
	Frequency response function	
	$A = \int H_{1,y} ^2 G_{11} df$	108.76
	$B = \int H_{2,y} ^2 G_{22} df$	108.62
	$C = \int H_{3,y} ^2 G_{33} df$	108.56
	$D = \int H_{4,y} ^2 G_{44} df$	108.50
	$\int E(H_4 = 0) df$	114.48
	$\int F(H_3 = 0) df$	114.48
	$\int G(H_2 = 0) df$	113.23
	$\int H(H_1 = 0) df$	112.16

$$E = H_1 H_1^* G_{11} + H_1 H_2^* G_{12} + H_1 H_3^* G_{13} + H_2 H_1^* G_{21} + H_2 H_2^* G_{22} + H_2 H_3^* G_{23} + H_3 H_1^* G_{31} + H_3 H_2^* G_{32} + H_3 H_3^* G_{33}$$

Where, F , G & H are calculated above E

이 연구의 시뮬레이션에서는 입력 1의 영향이 가장 크고, 그 전달경로를 차단하는 것이 진동을 감소시키는데 효과적임을 알 수 있다.

5. 결론

자동차 현가장치를 m , k 값을 가지는 진동 1/4 모델로 구성하여 각 4 지점에서 발생하는 입력 간의 기여관계 및 전달특성을 파악하거나 진동원을 규명하였다. 이를 통해 자동차의 승차감 향상을 위해서 적용할 수 있을 것이라 생각된다. 이 연구에서 다차원 스펙트럼 해석법을 적용하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 시스템을 규명하는 데 있어서 입력간에 상관관계가 많이 존재할 경우에 다차원 스펙트럼 해석법을 이용하는 것이 효과적이다.

(2) 입력 성분의 크기 변화는 기여도함수에 영향을 미치지 않고, 그 입력이 어떤 주파수 성분을 가지고 있는가가 기여도함수에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

(3) 다중기여도함수를 이용하여 입력 개수 선정에 유용하게 사용할 수 있음을 알 수 있다.

(4) 전달 경로의 차단효과에 의해 각 입력의 출력에 대한 기여관계를 이용하여 운전석에 전달되는 진동을 감소시키기 위해 입력 1의 전달경로를 차단시

키는 것이 유효함을 알 수 있다.

후 기

이 연구는 호원대학교 교내학술연구비에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Ryu, K. C. and Kim, Y. E., 1995, "An Analysis of Passenger Discomfort According to Vertical Vibration and Pitching", Transactions of the KSAE, Vol.3, No.5, pp. 100~110.

(2) Kim, Y. K., et, al, 1997, "Transfer Path Identification of Road Noise ; Using Multiple Coherence Function and Relative Acceleration Z", Transactions of the KSAE, Vol. 5, No. 4, pp. 84~92.

(3) Song, C. G., 1990, "A Study on the Evaluation of Vibration Power Contribution of Vehicle Suspension by Using Multi-dimensional Spectral Analysis", Hanyang University Graduate School, Master Degree Thesis.

(4) Beck, M. Y., 1993, "Identification of Transmission Characteristics of Vibration and Acoustics for Engine-compartment : by Multi-dimensional Spectral Analysis", Hanyang University Graduate School, Master Degree Thesis.

(5) Oh, J.-E., et, al, 1997, "The Identification of

Generation Mechanism of Noise and Vibration and Transmission Characteristics for Engine System - The Source Identification and Noise Reduction of Compartment by Multidimensional Spectral Analysis and Vector Synthesis Method -", Transactions of the KSME(A), Vol. 21, No. 7, pp. 1127~1140.

(6) Hwang, D. G., et, al, 2004, "Coherent Analysis of Vehicle HVAC Using the MDSA(Multi - Dimensional Spectral Analysis)", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 999~1004.

(7) Bendat, J. S. and Piersolgy, A. G. 1980, Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley & Sons.

(8) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1986, Random Data : Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons.

(9) Song, C. G., et, al, 1990, "Performance Improvement of a Vehicle Suspension by Sensitivity Analysis", Transactions of the KSME, Vol. 14, No. 6, pp. 1474~1486.

(10) Metin Dede, "Ride and Shake Study of a Light Truck Vehicle by Using Test Data Based Computer Modal Synthesis", SAE Paper No. 841144.

(11) Lin, Y. and Zhang, Y., 1989, "Suspension Pptimization by a Frequency Domain" Equation Optimal Control Algorithm", JSV, Vol.133, No. 2, pp. 239~249.