

다차원 스펙트럼 해석법을 이용한 로드노이즈의 전달경로 해석 및 실내음압 예측

박상길* · 강귀현* · 황성욱** · 오기석** · 노국희** · 오재응†

Transfer Path Analysis and Interior Noise Estimation of the Road Noise Using Multi-Dimensional Spectral Analysis Method

Sang-Gil Park, Kwi-Hyun Kang, Sung-Uk Hwang, Ki-Seok Oh, Kuk-Hee Rho, Jae-Eung Oh

Key Words : MDSA(다차원해석법), FRF(주파수응답함수), TPA(전달경로해석), Road noise(도로소음), PCF(부분기여도함수), MCF(다중기여도함수)

Abstract

This paper presents a the method for estimating the noise source contribution on the road noise of the vehicle in a multiple input system where the input sources may be coherent with each other. By coherence function method, it is found that the biggest part of the noise source in the road noise is generated by structural vibration on the mechanical-acoustic transfer functions of vehicles. This analysis is modeled as four input/single output system because the noise is generated with four wheels that mechanism of the road noise is very complicated. The coherence function method is proved to be useful tool for identifying of noise source. The overall levels of the interior noise be coherence function method are compared with those measured and calculated by the frequency response function approach using mechanical excitation test. The experimental results have shown a good agreement with the results calculated by the coherence function method when the input sources are coherent strongly each other. The estimation of the road noise indicates that significant coherent can be achieved in the vehicle interior noise.

기호설명

$S_{ii}(f)$: i 신호의 자기스펙트럼
 $S_{ij}(f)$: i 신호와 j 신호의 상호스펙트럼
 $S_{ii-r!}(f)$: 잔류스펙트럼
 $L_{iy}(f)$: 최적 전달함수
 $\gamma_{iy-r!}^2(f)$: 부분기여도함수

1. 서론

차실내 소음은 전달경로 특성에 따라 구조기인 소음과 공기기인 소음으로 구분할 수 있다. 이러한 차실 소음을 저감하기 위해서는 소음 및 진동원의 특성 해석과 함께 전달경로에 대한 해석이 필요하다.

차량 주행 중 실내 소음에 영향을 미치는 구조기인 소음은 노면의 요철이 타이어를 가진시키고, 가진 진동이 차체에 전달되어 부밍노이즈 유발시킨다. 따라서, 진동원의 전달경로를 파악하는 것은 운전자에게 영향을 미치는 구조기인 전달 특성을 파악하여 진동 저감대책마련을 위한 기초적인 연구이다.

† 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : jeoh@hanyag.ac.kr
TEL : (02)2220-0452 FAX : (02)2299-3153

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** (주) 넥센타이어

차량 주행시 네 바퀴의 현가장치를 통해 발생하는 진동원을 규명하기 위해 현가장치의 진동신호 4 개를 입력으로 정하고, 운전석의 소음을 출력으로 하는 4 입력/단일출력계로 모델링 하였다. 이들 신호는 데이터 취득 시 진동원 사이의 상관관계가 존재할 경우 많으므로 시스템의 해석이 복잡해 진다. 입력 신호가 여러 개인 경우 이에 대한 해석으로 종래에는 주파수 응답함수법(Frequency Response Function; FRF)이 많이 사용되었다. 하지만, 이 방법은 각각의 입력원이 서로 영향을 미치지 않는 독립적 특성을 나타내는 경우에만 사용하는 단점이 있다. 따라서, 입력원간의 상관성분을 제거하여 순수한 입력원의 기여 정도를 알 수 있는 다차원 스펙트럼 해석법(Multi-Dimensional Spectral Analysis; MDSA)을 적용하는 것이 좋다.

다차원 해석법은 오재웅⁽¹⁻³⁾등을 통해 많은 기계구조물의 진동·소음 전달경로 해석을 위해 적용된 방법이다. 부분기여도함수(Partial Coherence Function; PCF), 다중기여도함수(Multiple Coherence Function; MCF), 부분기여 출력스펙트럼(Partial Coherence Output Spectrum) 등을 통해 가상적인 입력원에 의한 가상 기여함수를 적용하여 정량적인 기여량을 예측하는 방법⁽⁴⁾이 이루어졌다.

본 연구에서는 다차원 스펙트럼 해석법을 이용하여 입력원과 출력사이의 기여관계를 알아보고 각 4 지점의 전달경로 특성을 규명한다. 또한 각 전달경로의 특성을 이용한 실내 음압 예측값을 실제 측정값과 비교하여 다차원 해석법의 유용성을 검증한다.

2. 다차원 스펙트럼 해석법

여러개의 입력이 전달경로 사이의 상호 간섭작용에 의해 출력으로 나타나는 경우를 Fig. 1 과 같이 다입력/단일출력 모델로 구성하였다.⁽⁵⁾ 이러한 계의 출력 스펙트럼을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{yy}(f) = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q H_{iy}^*(f) H_{jy}(f) S_{ij}(f) + S_m(f) \quad (1)$$

또한, 식(1)에서 입력간 상관관계가 없는 경우로 가정하면 출력 스펙트럼은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

Fig. 1 과 같은 계의 경우 입력간 상관관계에 의해 원래의 출력스펙트럼 항보다 크게 나타나게 되는데, 주파수 응답함수법(FRF)으로 계산할 경우에는 입력간 상관관계에 의한 항이 중복되어 나타나기 때문에 각각의 입력과 출력 사이의 기여출력 스펙트럼만으로는 출력에 더 많은 영향을 미치는 입력원을 파악하기 어렵게 된다. 따라서, 입력원들 사이에 상호상관이 존재하는 다입력/단일출력계의 경우로 생각하여 입력들 사이의 상관성분들을 제거한 Fig. 2 와 같은 조건 다입력/단일출력계로 모델링 한다. 실제 기계시스템의 경우 입력원들의 상관성분을 제거하여 각각의 입력원들이 순수하게 출력에 기여하는 정도를 정량적으로 알 수 있도록 분석하는 다차원 스펙트럼 해석법을 이용해야 한다. 그러므로 각각의 입력에서 상관성분이 제거된 후의 스펙트럼을 잔류 스펙트럼(Residual spectrum)이라고 하며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{ii-r}(f) = S_{ii-(r-1)}(f) - L_{ri}(f) \cdot S_{rr-(r-1)}(f) \quad (i = 2, 3, \dots, y \quad i > j)$$

$$S_{ij-r}(f) = S_{ij-(r-1)}(f) - L_{rj}(f) \cdot S_{ir-(r-1)}(f) \quad (i, j = 2, 3, \dots, y \quad i, j > r)$$

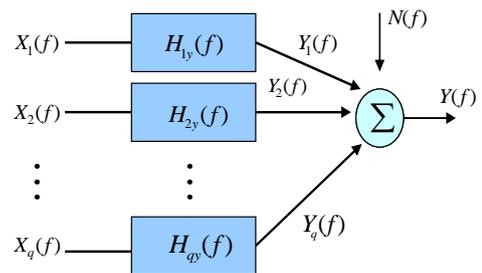


Fig. 1 Correlated multi input/single output model

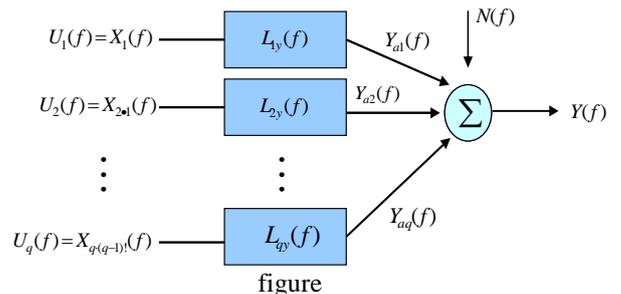


Fig. 2 Conditioned multi input/single output model

여기서, $L_{rj}(f)$ 는 입력간 및 입출력간의 상관성분을 제거시킨 경우의 최적(Conditioned)전달함수이며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_{rj}(f) = \frac{S_{rj \cdot (r-1)!}(f)}{S_{rr \cdot (r-1)!}(f)} \quad (4)$$

$$(i = 2, 3, \dots, y \quad i > j)$$

다입력/단일출력에서 입력간 상관성분의 존재로 최적전달함수를 사용한 조건 다입력/단일출력계로 모델링한 경우, i 번째 입력이 출력에 기여한 정도를 부분기여도함수(PCF)라고 하며, 다음과 같이 나타낸다.

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

이 함수는 입력간의 상관관계를 해석적으로 없앤 후 계산할 수 있는 일반기여도함수로 생각할 수 있다. 식 (5)를 이용하여 입력간 및 입출력간의 상관성분을 제거하여 계산된 다중기여도함수(MCF)는 다음과 같이 된다.

$$\gamma_{y:q!}^2 = 1 - (1 - \gamma_{1y}^2)(1 - \gamma_{2y \cdot 1}^2) \dots (1 - \gamma_{qy \cdot (q-1)!}^2) \quad (6)$$

구성된 입출력계에서 사용된 입력들이 적절히 고려되었는지를 나타내는 함수로 보통 0.9 이상의 값을 가질 때 타당하다고 판단할 수 있다.()

실제로 진동원을 검출하려면 입력원의 출력에 대한 순수한 기여량을 계산할 필요가 있으므로 실제 측정값에 의한 출력스펙트럼과 기여도함수와 의 기여출력 스펙트럼(Coherent output spectrum)을 이용하게 된다. 식 (7)과 같이 특정입력의 출력에 대한 순수한 기여량을 나타내는 부분기여 출력스펙트럼을 사용한다.

$$S_{yi \cdot (n-1)!}(f) = \gamma_{iy \cdot (n-1)!}^2(f) S_{yy \cdot (n-1)!}(f) \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 전주파수 영역에 걸친 각 진동원의 기여관계를 파악하기 위하여 기여출력 스펙트럼의 적분한 레벨(Integrated level)을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_i = (0 \sim f) = \int_0^f \gamma_{iy \cdot (n-1)!}^2(f) S_{yy \cdot (n-1)!}(f) df \quad (8)$$

식 (8)로부터 누적된 레벨에 대해서 대수합을 구하면 총레벨(overall level)이 된다.

3. 실험

실험에 사용된 차량은 국내에서 생산된 2000cc 급 중형차량이고, 실험 개략도는 Fig. 3 과 같다. 실내 운전석 소음(B&K Type 4189)을 출력값으로 하고, 각 현가장치의 너클부에서 측정된 3 축 진동 가속도신호(PCB Type 356)를 입력원으로 구성하였다. 운전 모드는 80kph 정속모드이며, 로드노이즈가 잘 발생될 수 있도록 노면 입자가 10mm 이상의 거친 노면에서 주행 시험을 수행하였다. 3 번 이상의 왕복주행 실험으로 시험간 오차가 3dB 이내의 신호를 이용하여 분석하였다.

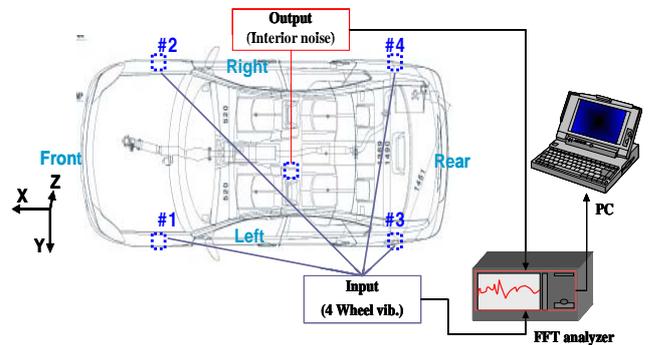


Fig. 3 The experimental set up for the MDSA

4. 실험결과 및 고찰

4.1 목적주파수 선정 및 일반기여도 함수

운전석에서 측정된 주행중 실내 음압의 스펙트럼은 Fig. 4 와 같으며, 이를 바탕으로 목적주파수를 선정하여 입력간 상관관계를 Table 1 에, 입출력의 상관관계를 Table 2 에 나타내었다.

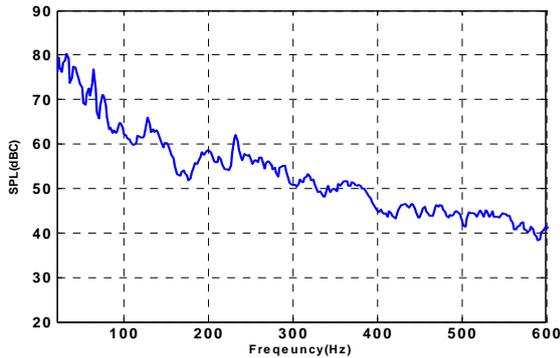


Fig. 4 C-weighted SPL of the driver's ear position under 80kph

다차원 스펙트럼 해석의 이론적 가정에 있어서 가장 중요한 입력간의 상관관계 (γ_{ij}^2) 및 입출력간의 상관관계 (γ_{iy}^2)를 알아볼 필요가 있다. 특히 입력간의 일반기여도 함수값은 입력들끼리 서로 독립적인가 혹은 상호간에 상관관계가 존재하는가를 판단하는데 매우 중요하다.⁽⁶⁾

Table 1 에서 보는 바와 같이 Front Left(#1)와 Rear Left(#3)의 상관관계, Front Right(#2)와 Rear Right(#4)의 상관관계가 0.5 이상의 값이 나타내고 있다. 입출력간의 상관관계도 Table 2 에서 보는 바와 같이 주파수 특성에 따라 0.5 이상의 상관관계를 나타내고 있다. 이처럼 입력간 및 입출력간 상관이 존재하고 있으므로 다차원 스펙트럼 해석이 적용 가능하다는 것을 알 수 있다.

4.2 각 진동원과 실내 소음의 기여관계

각 진동원(입력원)의 실내 소음(출력)에 대한 부분기여도함수(PCF)값을 Table 3 에 나타내었다. 전체 출력 소음에 미치는 각 진동원별 부분기여도 함수값의 순서는 목적주파수에 따라 레벨이 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 부분기여도 함수값이 전체 출력에 대한 입력성분의 기여 정도를 의미하는 것은 아니므로 결과의 해석에 주의하여야 한다.

그리고 선정된 입력원들이 출력값에 대한 기여도가 어느 정도 인지를 정량적으로 알아보고, 모델링의 적합성에 대한 이론적 가정 및 결과를 검증하기 위해서는 다중기여도함수(MCF)값이 0.5 이상의 높은 값이 요구된다.⁽⁷⁾ Table 4 에서 보는 바와 같이 본 연구에서 선정한 대부분의 목적주파수에서 MCF 결과가 높은 값을 나타내고 있는 것으로 보아 각 입력원들이 출력에 반영하는

정도가 높은 것으로 판단된다. 단, 33Hz 와 63Hz 의 MCF 값은 상대적으로 작은 값이 나왔는데, 휠의 진동원 외에 다른 입력원이 존재할 것으로 예상된다.

Table 1 The ordinary coherence function among the 4 wheel input signals

Frq. (Hz)	γ_{12}^2	γ_{13}^2	γ_{14}^2	γ_{23}^2	γ_{24}^2	γ_{34}^2
15.3	0.139	0.963	0.187	0.108	0.952	0.167
22.1	0.036	0.376	0.075	0.067	0.805	0.041
33.0	0.391	0.513	0.088	0.196	0.652	0.126
63.0	0.196	0.911	0.131	0.137	0.792	0.097
76.1	0.151	0.392	0.106	0.163	0.834	0.320
126.2	0.051	0.572	0.142	0.051	0.202	0.371
232.3	0.281	0.339	0.195	0.279	0.068	0.018

Table 2 The ordinary coherence function among input and output signals

Frq. (Hz)	γ_{1y}^2	γ_{2y}^2	γ_{3y}^2	γ_{4y}^2
15.3	0.417	0.490	0.512	0.581
22.1	0.597	0.077	0.584	0.229
33.0	0.221	0.057	0.245	0.255
63.0	0.567	0.117	0.366	0.079
76.1	0.090	0.831	0.299	0.892
126.2	0.056	0.426	0.352	0.636
232.3	0.373	0.546	0.698	0.088

Table 3 The partial coherence function among input and output signals

Frq. (Hz)	γ_{1y}^2	γ_{2y-1}^2	$\gamma_{3y-1,2}^2$	$\gamma_{4y-1,2,3}^2$
15.3	0.581	0.664	0.124	0.367
22.1	0.597	0.336	0.523	0.281
33.0	0.255	0.237	0.251	0.707
63.0	0.167	0.631	0.016	0.243

76.1	0.892	0.592	0.221	0.076
126.2	0.636	0.326	0.112	0.787
232.3	0.698	0.408	0.527	0.398

Table 4 The multiple coherence function at the target frequencies

Function	$\gamma_{y:x}^2$						
	15.3	22.1	33.0	63.0	76.0	126.2	232.3
Frq. (Hz)	15.3	22.1	33.0	63.0	76.0	126.2	232.3
Value	0.92	0.91	0.88	0.88	0.97	0.95	0.95

각 입력원의 출력에 대한 기여량을 정량적으로 알아보기 위해서 전주파수 영역에서 적분한 부분기여 출력스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. 각 입력원 사이의 상관성을 고려하여 계산한 부분기여 출력스펙트럼을 적분함으로써 각 입력원의 기여순위를 보다 쉽게 결정할 수 있었다.

그리고 전주파수 영역에서 적분하여 대수합을 계산한 총레벨은 Table 5에 나타내었다. Table 5에 나타낸 바와 같이 부분기여 출력스펙트럼의 값으로 판단할 때 실제 실험에 의해서 측정된 소음의 출력스펙트럼의 값과 기여도함수에 의해서 나온 출력스펙트럼의 차이는 실험시의 노이즈에 의한 영향과 실내 소음에 영향을 미치는 다른 입력원이 존재할 가능성이 있음을 알 수 있다. 하지만 그 값의 차이로 보면 고려한 입력원이 출력에 대부분의 영향을 차지하고 있음을 알 수 있다.

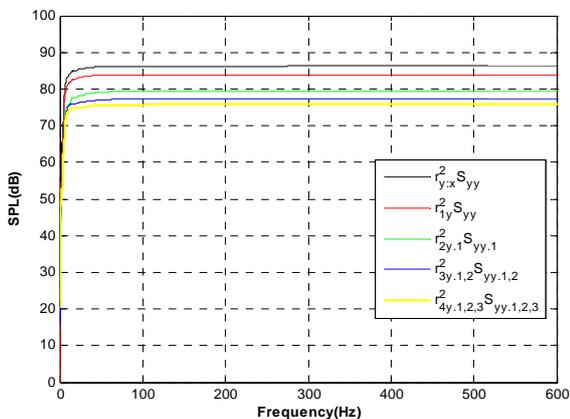


Fig. 5 Comparison of integrated energy contribution to the coherent output power spectrum

Table 5 Overall level contributions estimated by coherence function approach

Overall level		Output (dBC)
Measured level		86.4
Coherence Function	Total level	86.3
	$\int \gamma_{1y}^2 S_{yy} df$	83.9
	$\int \gamma_{2y,1}^2 S_{yy,1} df$	79.4
	$\int \gamma_{3y,1,2}^2 S_{yy,1,2} df$	77.3
	$\int \gamma_{4y,1,2,3}^2 S_{yy,1,2,3} df$	75.3

4.3 차체의 최적 전달함수 계산

본 실험의 데이터를 이용하여 주행모드의 차체 전달함수를 계산하였다. 각 휠의 진동 신호를 입력원으로 하고, 실내 음압을 출력으로 모델링한 구조 사이의 전달함수를 계산하였다. 그리고 전달함수 합성법⁸⁾을 이용하여 4개의 전달함수를 등가 전달함수로 합성하여 Fig. 6의 그래프처럼 하나의(등가) 전달함수 형태로 나타내었다. 시각적으로는 FRF 전달함수와 최적 전달함수의 차이를 구분하기 어려우므로, 진동 신호를 입력으로 하여 실내 음압을 예측한 값의 비교를 통해 전달함수 특성을 분석할 필요가 있다.

또한, 공통적으로 63Hz의 차체 전달함수 특성이 나타났는데, 이는 부밍노이즈 발생 가능성이 큰 주파수라고 할 수 있다. 즉, 4.2절에서 63Hz의 MCF 값이 상대적으로 작게 나타났는데, 추후 부밍노이즈를 입력원으로 추가하여 다차원 스펙트럼 해석을 할 필요가 있다.

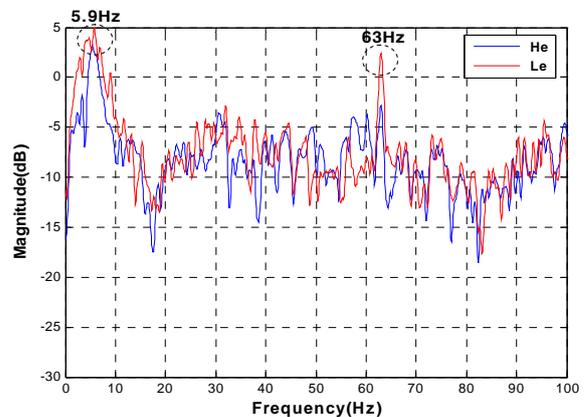


Fig. 6 Comparison between FRF and conditioned transfer function

4.4 실내 음압 예측

위의 절에서 계산된 FRF 전달함수와 최적 전달함수를 이용하여 실내 음압을 예측하였다. 실제 실내에서 측정된 음압 스펙트럼을 기준으로 하여 3 개의 음압 특성을 Fig. 7 과 같이 비교하였다. 측정값의 전 음압(Overall level)은 86.4dB(C), FRF 전달함수를 이용한 예측값은 89.5dB(C), 최적 전달함수를 이용한 경우는 86.2dB(C)로 최적 전달함수(L_e)를 이용하여 실내 음압을 예측했을 경우가 실제 측정값과 유사하게 나타났다. L_e 는 입력간 및 입출력간 상관관계를 고려하여 계산된 전달 함수이므로 측정값과 오차가 작게 나타난 것으로 사료된다.

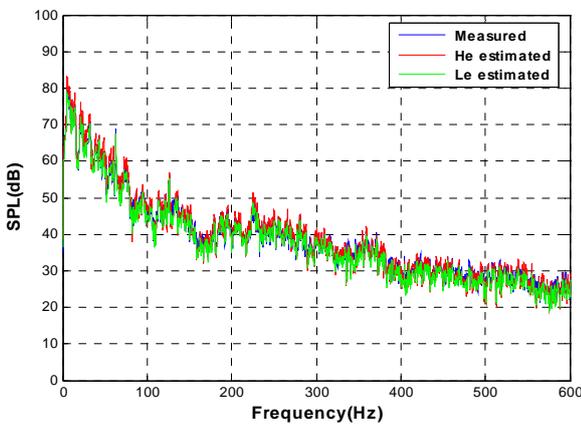


Fig. 7 Comparison of the interior noise estimation under the driving condition

5. 결론

본 연구에서는 차량 현가장치를 4 입력/1 출력 모델로 구성하여 각 4 지점에서 발생하는 입력간의 기여관계 및 전달특성을 규명 하였다. 또한, 로드노이즈를 예측하기 위해 다차원 스펙트럼 해석법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Multi input single output(MISO)시스템에서 입력들간의 상관관계가 존재하고 있을 때 입력원의 출력에 대한 기여 정도를 알아보기에 다차원 스펙트럼 해석법이 유효함을 검증하였다.

(2) 기여도 함수값을 통한 각 휠의 진동원 중 본 실험의 로드노이즈에 가장 큰 영향을 미치는 부위는 전방좌측의 휠 진동으로 규명되었다.

(3) 전달함수 합성법을 이용하여 5.9Hz, 63Hz 의 차체 전달함수 특성을 알 수 있었다.

(4) 실내 음압 예측은 입력간 및 입출력간 상관관계를 고려하여 계산된 최적 전달함수를 이용한 경우가 측정값과 거의 유사한 결과가 나타남을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 (주)넥센타이어 지원의 일부로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Oh, J. E., Suh, S. H. and Kang, M. S., 1986, "Application of Multi-Dimensional Spectral Analysis for Noise Source Identification on Gasoline Engine", *Trans. of the KSME*, Vol. 10, No. 4, pp. 442~449.
- (2) Sim, H. H., Lee, H. J., Lee, Y. Y., Lee, J. Y. and Oh, J. E., 2006, "Source Identification of Non-Stationary Sound Vibration Signals using Multi-Dimensional Spectral Analysis Method", *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 9, pp. 1154~1159.
- (3) Kim, H. S., Park, S. G., Kang, K. H., Lee, J. Y. and Oh, J. E., 2007, "The Analysis of Noise Contribution about Drum Washer under dehydrating Condition using Multi-Dimensional Spectral Analysis", *Trans. of the KSNVE*, Vol. 17, No. 11, pp. 1056~1063.
- (4) Bendat, J.S., and Piersol, A., G., 1980, "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis", John Wiley & Sons, Inc. 2nd Edition.
- (5) Bendat, J.S., and Piesol, A., G., 1986, "Random Data": Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, Wiley-Interscience, New York.
- (6) Oh, J.E., 1983 "Application of Multi-dimensional Spectral Analysis for Noise Identification on Mechanical Structures", Thesis of Doctor Eng. Tokyo Institute of Technology.
- (7) Song, C. G., Park, H., Oh, J. E. and Yum, S. H., 1990, "Performance Improvement of a Vehicle Suspension by Sensitivity Analysis", *Trans. of the KSME*, Vol. 14, No. 6, pp. 1474~1486.
- (8) Ren, Y. and Beards, C. F., 1995, "On Substructure Synthesis with FRF data", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 185, No. 5, pp. 845~866.