

## 기여도함수를 이용한 농업기계의 소음원 규명

# Vibration Source Identification of Agricultural Machinery Using Coherence Function

김우택            오재응  
정희원  
W. T. Kim        J. E. Oh

### SUMMARY

In this paper, time-frequency analysis and multi-dimensional spectral analysis methods are applied for source identification and diagnosis of non-stationary sound/vibration signals. Sound or vibration problems of general vehicle and agricultural machinery are under 500 Hz. So We used linearly increased chirp signals under 500 Hz. By checking the coherences on concerned time, for time-variant non-stationary signals, this simulation is very well coincident to expected results.

**Keywords** : Time-frequency Analysis, Coherence, MDSA, Source Identification, Non-stationary signal.

### 1. 서    론

농업기계의 발전속도가 빨라지고, 쾌적한 작업 환경에 대한 요구가 높아감에 따라 농업기계에서도 자동차의 경우와 같이 소음과 진동의 절감에 관한 관심이 높아지고 있다.

본 논문에서는 농업기계에서 발생하는 흡기 및 배기소음과 엔진소음 등이 운전석에 미치는 기여도를 평가하여 입력신호들에 대한 원인을 구명하고자 할 경우의 방법을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하고자 한다. 농업기계에 있어서의 실제 입력신호는 가속과 감속을 반복하는 작업이 많으므로 비정상적(non-stationary)인 경우가 많다. 이러한 비정상 입력신호에 대해 3입력/1출력 시스템을 구성하여 이들 입력이 출력에 미치는 영향을 시간-주파수 해석기법(TFA, Time-Frequency Analysis)과 다차원 스펙트럼 해석기법(MDSA, Multi-Dimensional Spectral Analysis)을 병행하여 검토했다.

이와 같이 복잡한 구조물일 경우에는 가진력과 구조물의 전달함수를 정확하게 파악하기 어려우므로 주파수 영역에서 해석하는 방법을 이용한다. 종래에는 주파수 응답함수(FRF)법을 많이 이용하였지만 이 방법은 각 진동/소음원의 입력간 신호들 사이에 상관관계가 존재하는 경우 매우 복잡하게 된다. 따라서 진동/소음 현상이 복잡하게 일어나는 실제계를 해석하는 경우 진동/소음원 간의 상관성분을 제거하여 각 부품들의 순수한 기여량을 알 수 있는 다차원 스펙트럼 해석법을 적용하게 된다. 다차원 해석법은 알고자 하는 관심주파수에서의 부품별 소음기여량을 추출해 낼 수 있고, 직접 측정할 수 없거나 곤란한 대상에 대해서도 소음기여량을 추출해 낼 수 있다.<sup>6)</sup>

MISO(Multiple-Input/Single-Output) 모델의 진동/소음원 규명시 입력원들간에 상호 상관이 존재하는 경우 이들을 무상관으로 변환하는 방법으로 부분기여함수(PCF, Partial Coherence Function)를 적

The article was submitted for publication in July 2001, reviewed in August 2001, and approved for publication by the editorial board of KSAM in November 2001. The authors are W. T. Kim, Graduate School, Dept. of Automotive Engineering, and J. E. Oh, Professor, School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea. The corresponding author is W. T. Kim, Graduate School, Dept. of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea. E-mail: <kwootack@ihanyang.ac.kr>

용<sup>1)~3),7)</sup> 하거나 가상적인 입력원에 의한 가상기여 함수를 적용<sup>4),5)</sup> 하는 방법 등이 정상신호에 대하여 이루어 왔다.

이상의 연구는 정상신호인 경우를 대상으로 하였으나, 대부분의 물리적인 현상은 비정상성을 가지고 있기 때문에 이에 대한 연구의 필요성이 제기되었다. 이에 따라 본 연구에서는 전체 시간자료에 대한 푸리에 변환을 하다 보면 시간 성분을 파악할 수 없게 되는 기존의 방법을 보완하고 시간-주파수 해석을 병행하여 비정상 신호의 진동/소음원을 규명하고자 한다.

## 2. 이 론

### 가. 시간-주파수 해석

함수  $\phi(t) \in L^2(R)$ 가 실수값을 갖는 창함수이면, 곱  $f_b(t) = x(t)\phi(t-b)$  은  $t=b$ 부근에서  $x(t)$ 의 정보를 포함하게 된다.

시간변수  $b$ 를 변경함에 따라 창함수를 시간축 상으로 움직일 수 있고 다른 구간들에 대해서도 함수  $x(t)$ 의 국부적인 특징을 해석할 수 있게 된다.

창함수에서 가장 중요한 두 개의 매개변수는 이 함수의 중심(center)과 폭(width)이다. 일반적인 창함수  $\phi(t)$ 의 경우, 중심  $t^*$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$t^* = \frac{1}{\|\phi(t)\|^2} \int t |\phi(t)|^2 dt \quad (1)$$

또, RMS 반경  $\Delta_\phi$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta_\phi = \frac{1}{\|\phi(t)\|^2} \left[ \int (t-t^*)^2 |\phi(t)|^2 dt \right]^{1/2} \quad (2)$$

이와 유사하게 중심이  $\omega^*$ 이고 RMS(root mean square) 반경이  $\Delta_\phi$ 인 주파수창  $\Phi(\omega)$ 도 정의할 수가 있다.

$$\omega^* = \frac{1}{\|\Phi(\omega)\|^2} \int \omega |\Phi(\omega)|^2 d\omega \quad (3)$$

$$\Delta_\phi = \frac{1}{\|\Phi(\omega)\|^2} \left[ \int (\omega-\omega^*)^2 |\Phi(\omega)|^2 d\omega \right]^{1/2} \quad (4)$$

단시간 푸리에 변환(STFT, Short-time Fourier

Transform)은 위와 같은 시간 창을 이용하게 된다.

시간  $t=b$  부근에서 주파수 성분을 추정하고자 하면 STFT는 다음의 식과 같다.

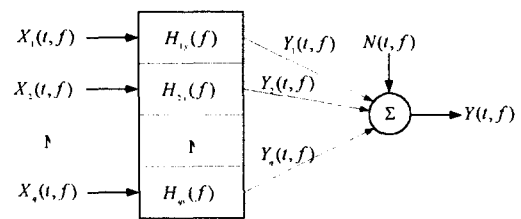
$$STFT_\phi(b, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\phi_{b,\xi}^* dt \quad (5)$$

여기서,  $\phi_{b,\xi}(t) = \phi(t-b)e^{j\xi t}$ 이다.

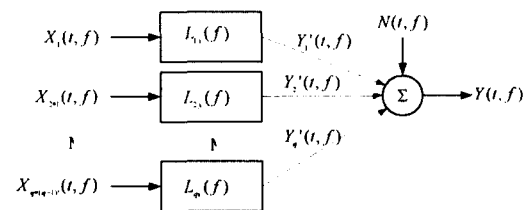
### 나. 다차원 해석

예로서 그림 1과 같은 3입력 1출력 시스템을 고려하여 설명한다. 그림 1 (a)는 다중입력과 출력사이에 입력간의 상관성이 존재하는 경우이고, (b)의 경우는 입력간의 상관성을 제거한 후의 모형을 나타내고 있다.

그러나 실제계와 같이 입력성분들이 상호간에 상관관계를 가지고 있다면, 주파수 응답함수  $H$ 를 기존의 방법으로는 추정하기가 어렵다. 따라서 이처럼 입력간에 상관성이 존재하는 경우는 그림 1의 (b)와 같이 조건(잔차) 스펙트럼을 갖는 입력성분들로 변환하여 입력간의 상관성을 제거하여야 한다. 잔차 파워와 잔차 상호 스펙트럼 밀도함수는 다음의 식(6)에 의해 구해진다.



(a) Three-input/one-output system (with mutually coherent inputs)



(b) An alternative system of (a) (with mutually incoherent inputs)

Fig. 1 MISO(three-input/one-output) system.

$$S_{\ddot{y}\cdot 1} = S_{\ddot{y}} - L_{1j} S_{\ddot{x}_1} \quad (6)$$

여기서  $S_{\ddot{y}\cdot 1}$ 은 상호 스펙트럼 밀도함수인  $S_{\ddot{y}}$ 로부터 입력  $x_1$ 의 선형성분을 제거한 후 얻어지는 잔차 스펙트럼 밀도함수이며,  $L_{1j}$ 는 상관성을 제거한 경우의 주파수 전달함수이다. 모든 스펙트럼으로부터 입력  $x_2$ 의 선형효과를 제거한 경우의 잔차 스펙트럼 밀도함수는 다음의 식으로 구해진다.

$$S_{\ddot{y}\cdot 12} = S_{\ddot{y}\cdot 1} - L_{2j} S_{\ddot{x}_2\cdot 1} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 주파수 응답함수  $L$ 은 다음의 식(8)로부터 구한다.

$$L_{ij} = S_{\ddot{y}\cdot (i-1)} / S_{\ddot{y}\cdot (i-1)j} \quad (8)$$

$i, j = 1, 2, 3, 4; y = x_i; j \geq i$

이상의 식들을 이용하여 일반기여도함수(OCF, Ordinary Coherence Function)은 다음의 식(9)와 같이 정의된다.

$$\gamma_{ij}^2 = |S_{ij}|^2 / (S_{ii} \cdot S_{jj}) \quad (9)$$

$i, j = 1, 2, 3, y$

또한, 부분기여도함수 (PCF, Partial Coherence Function)는 다음의 식 (10), (11)로 정의된다.

$$\gamma_{2y\cdot 1}^2 = |S_{2y\cdot 1}|^2 / (S_{22\cdot 1} \cdot S_{yy\cdot 1}) \quad (10)$$

$$\gamma_{3y\cdot 12}^2 = |S_{3y\cdot 12}|^2 / (S_{33\cdot 12} \cdot S_{yy\cdot 12}) \quad (11)$$

입력과 출력사이의 다중기여도함수(MCF, Multiple Coherence Function)은 다음의 식 (12)와 같다.

$$\gamma_{yx}^2 = 1 - (1 - \gamma_{iy}^2)(1 - \gamma_{2y\cdot 1}^2)(1 - \gamma_{3y\cdot 12}^2) \quad (12)$$

이 다중기여도함수는 선정된 입력들이 출력에 얼마나 기여하고 있는지를 판단하는데 이용된다. 즉, 선정된 입력들의 위치 및 입력원의 수를 정하는 기본이 된다.

상관 출력 파워스펙트럼은 잔차 스펙트럼 밀도함수가 특정한 입력원  $x_i$  하나만의 성분이 어느

정도 인지를 나타내기 때문에 소음원의 평가에 유용하게 사용된다.

각 입력원  $x_i$ 에 의한 상관 출력 파워 스펙트럼은 다음의 식(13)-(15)로부터 구해진다.

$$\phi_1 = \gamma_{1y\cdot 23}^2 \cdot S_{yy\cdot 23} \quad (13)$$

$$\phi_2 = \gamma_{2y\cdot 13}^2 \cdot S_{yy\cdot 13} \quad (14)$$

$$\phi_3 = \gamma_{3y\cdot 12}^2 \cdot S_{yy\cdot 12} \quad (15)$$

각 입력원의 출력에 대한 기여도를 평가하여 입력원의 순서를 정하였다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

#### 가. 입력신호의 선정

자동차와 농업기계의 소음에서 문제가 되는 주파수의 범위가 500Hz 이하이므로 대부분의 계측 장비가 알리아싱(aliasing)을 피하기 위하여 2.56배의 샘플속도를 가지므로, 1,024개의 데이터를 0.8초(1024/(500×2.56)) 동안 다음의 그림 2와 같이 선정하였다. 이들 입출력은 시간에 따라 주파수가 선형적으로 변화하는 chirp 신호를 이용하였으며,  $x_1$ 은 0~0.4초 사이에 주파수가 0~250Hz까지 변화하고,  $x_2$ 는 0.2~0.6초 사이에 50~300Hz까지 변화하며,  $x_3$ 은 0.4~0.8초 동안 100~350Hz까지 주파수가 선형적으로 변하며, 출력  $y$ 은 이들 3개 입력의 합으로 정하였다.

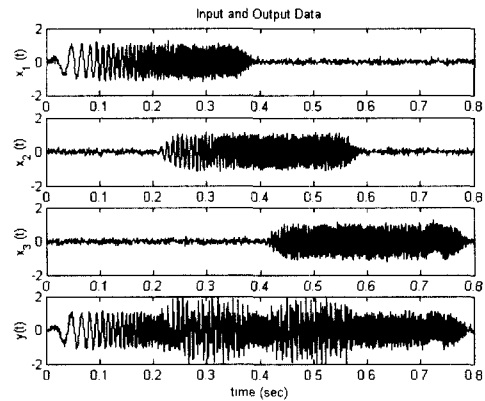


Fig. 2 Input and output signals.

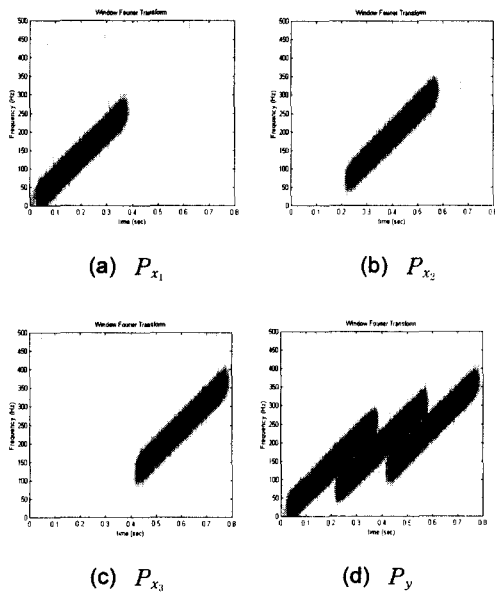


Fig. 3 Spectrogram of three-input and one-output.

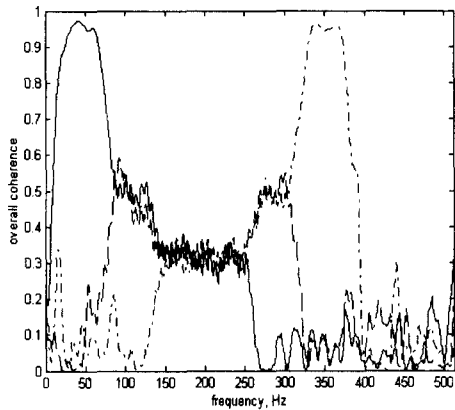


Fig. 4 Overall coherence.  
( $x_1$ :—,  $x_2$ :---,  $x_3$ :-.-)

그림 3은 입력 3개와 출력 1개에 대한 Spectrogram(STFT의 에너지밀도)을 나타낸다.

나. 시간 변화에 따른 기여도의 변화

그림 4는 전구간에 대한 기여도를 나타내고 있다. 입력신호에서 알수 있듯이 0~50Hz부근은  $x_1$  이 그리고 350~400Hz에서는  $x_3$ 가 출력에 크게

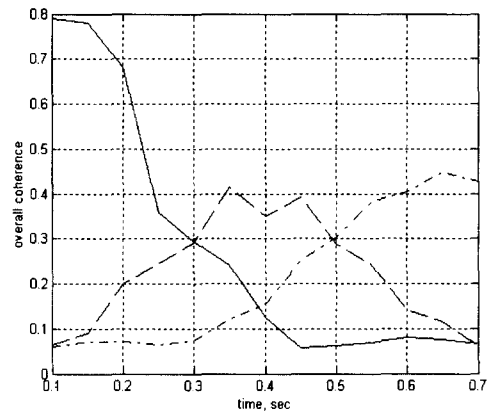


Fig. 5 Coherence distribution with time.  
( $x_1$ :—,  $x_2$ :---,  $x_3$ :-.-)

기여함을 알 수 있다.

그림 5는 시간의 변화에 따라 각 입력신호가 출력에 어떻게 기여하는지를 파악하기 위하여 각 시간별 전 주파수 구간에 대한 기여도의 평균값을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시간이 증가해 감에 따라 0~0.3초 구간에서는  $x_1$ 에 의한 기여도가 가장 크게 나타났고, 0.3~0.6초 구간에서는  $x_2$ 가 그리고 0.6초 이상의 구간에서는  $x_3$ 에 의한 기여도가 가장 크게 나타남으로써 시간의 변화에 따라 물리적 특성이 변화하는 비정상 신호의 기여도변화를 파악할 수 있었다.

다. 기여도 함수와 상관 출력 파워 스펙트럼 밀도 함수

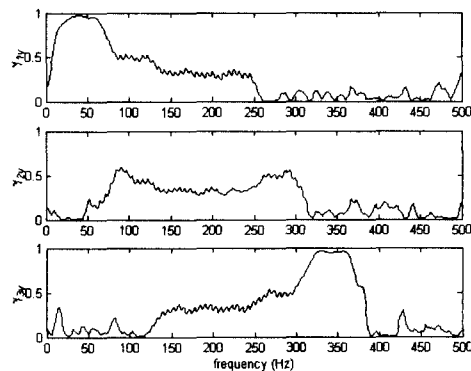


Fig. 6 Ordinary coherence function.

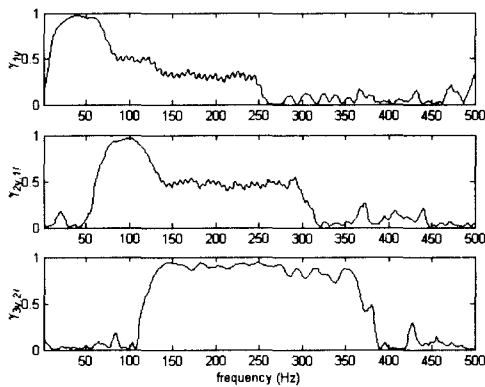


Fig. 7 Partial coherence function.

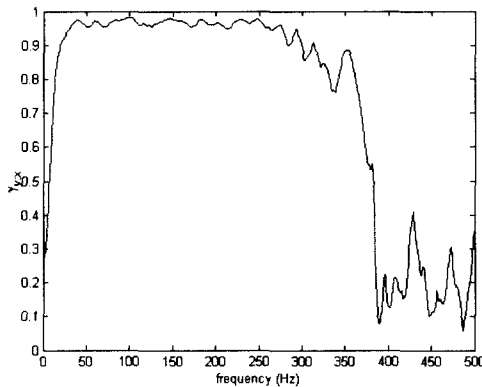


Fig. 8 Multiple coherence function.

그림 6과 그림 7 및 그림 8은 OCF, PCF 및 MCF의 그래프이다. OCF의 경우 입력간에 상관성이 존재하여  $x_2$  성분이 다른 입력에 묻혀 낮은 기여도 값을 갖고 있는 반면에, 입력성분간의 상관성을 제거한 PCF의 경우에는 각 성분의 기여도가 신뢰성을 갖는 범위( $\gamma \geq 0.8$ )를 보이고 있다. 이들 3-입력원에 의한 출력의 MCF(그림 8)의 경우 출력의 주파수 범위인 0~350Hz 구간에 대해 1에 가까운 기여도 함수값을 나타내어, 이들 3입력원만으로도 출력의 예측이 충분함을 알 수 있다.

끝으로, 그림 9는 주파수에 따른 누적 잔차 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있는 것은 출력의 파워 스펙트럼은 350Hz이하에서는  $x_1$ 에 의한 성분이 대부분이며, 그 이후로는  $x_{2.1}$ 에 의한 성분이 대부분임을 알 수 있다.

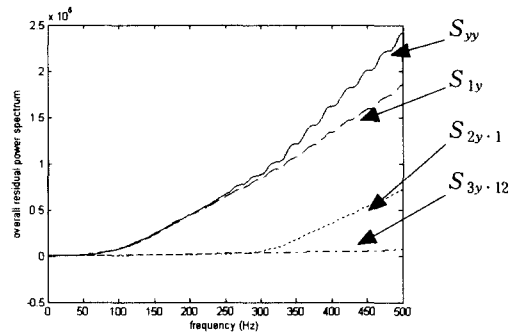


Fig. 9 Overall residual spectrum.

#### 4. 요약 및 결론

1) 시간의 변화에 따라 변화하는 입력신호들을 대상으로 시간에 따른 기여도 변화를 chirp신호를 이용하여 해석해 보았다. 기존의 FFT 방법에서는 시간적 변화를 파악할 수 없었으나, 본 연구에서는 STFT를 적용하여 기여도 평가를 수행함으로써 chirp 입력원의 소음원을 규명할 수 있었다.

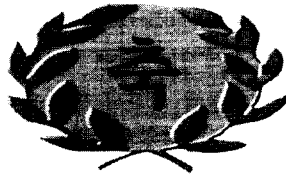
2) 주파수 전 구간에 대하여 시간의 변화에 따른 기여도를 조사한 결과 0~50Hz 부근은  $x_1$ 이 그리고 350~400Hz에서는  $x_3$ 가 출력에 크게 기여함을 알 수 있었고, 각 시간별 전 주파수 구간에 대한 기여도는 시간이 증가해 감에 따라 0~0.3초 구간에서는  $x_1$ , 0.3~0.6초 구간에서는  $x_2$ , 0.6초 이상의 구간에서는  $x_3$ 에 의한 기여도가 가장 크게 나타남으로써 시간의 변화에 따라 물리적 특성이 변화하는 비정상신호의 기여도변화를 파악할 수 있었다.

3) 일반기여도 함수를 이용한 방법에서는 입력간의 상관성이 존재하여 출력에 영향을 미치지 않았던 것처럼 보이던 입력이 부분기여도 함수를 이용하여 상관성을 제거한 결과 출력에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었으며, 이를 통하여 입력간에 상관성이 존재하는 경우에는 부분기여도 함수를 이용하는 것이 타당함을 알 수 있었다.

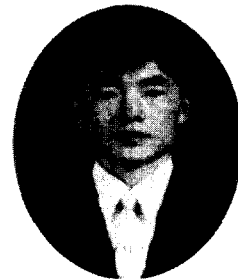
#### 참고 문헌

1. Bendat, J. S. and A. G. Piersol. 1993. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc.

2. Bendat, J. S. and A. G. Piersol. 2000. Random Data Analysis and Measurement Procedures. 3rd Ed. John Wiley & Sons, Inc.
3. Oh, J. E. 1983. Applications of Multi-Dimensional Spectral Analysis for Noise Source Identification on Mechanical Structures. Thesis for doctor's degree. Tokyo Institute of Technology.
4. Park, J. S. and K. J. Kim. 1994. Source Identification Using Multi-Input / Single-Output Modeling and Causality Checking of Correlated Inputs. Journal of Vibration and Acoustics 116:232-236.
5. Price, S. M. and R. J. Bernhard. 1986. Virtual Coherence: A Digital Signal Processing Technique for Incoherent Source Identification. Proceedings of the 4th International Modal Analysis Conference:1256-1262.
6. Robertson, A. N., K. C. Park and K. F. Alvin. 1998. Extraction of Impulse Response Data via Wavelet Transform for Structural System Identification. Trans. of the ASME 120(1):252-260.
7. Wang, M. E. and M. J. Crocker. 1983. On the Application of Coherence Techniques for Source Identification in a Multiple Noise Source Environment. Journal of the Acoustical Society of America 74(3):861-872.



## 학 위 취 득



성 명 : 조 희 근 (曹喜根)

생 년 월 일 : 1969년 6월 20일

취 득 학 위 명 : 공 학 박사

학 위 수여 대학 : 아주대학교

학 위 취득년월일 : 2001년 2월

학 위 논 문 : 열·탄·소성·크립 및 고유치 구속조건을 고려한 다학제간 설계 최적화 방법 개발