

# 언커플시스템의 파라메트릭 모델링

윤문철\*, 김종도\*\*, 김광희#

## Parametric Modelling of Uncoupled System

Moon-Chul Yoon\*, Jong-Do Kim\*\*, Kwang-Heui Kim#

### ABSTRACT

The analytical realization of uncoupled system was introduced in this study using times series and its spectrum analysis. The *ARMAX* spectra of time series methods were compared with the conventional *FFT* spectrum. Also, the response of second order system uncoupled was solved using the Runge-Kutta Gill method. In this numerical analysis, the displacement, velocity and acceleration were calculated. The displacement response among them was used for the power spectrum analysis. The *ARMAX* algorithm in time series was proved to be appropriate for the mode estimation and spectrum analysis. Using the separate response of first and second mode, each modes were calculated separately and the response of mixed modes was also analyzed for the mode estimation using several time series methods.

**Key Words** : Uncoupled System(언커플시스템), *FFT*(고속푸리에변환), Parametric Model(파라메트릭 모델), Spectrum(스펙트럼), Time Series(시계열), 1st Mode(1차모드), 2nd Mode(2차모드), Mixed Mode(혼합모드)

## 1. 서 론

시스템은 일반적으로 언커플 및 커플시스템의 두 경우로 나누어 연구가 되고 있다. 그러나 이에 대한 연구는 응답 구하는 것에 제한이 되어있고 구체적인 결과는 없는 상황이다. 또한 구체적인 결과의 하나인 스펙트럼 분석에 있어서도 주로 *FFT*에 의한 연구에 국한 되어있다. 그러나 스펙트럼 분석에 이용할 수 있는 또 다른 방법인 시계열 모델 스펙트럼의 적용은

없는 실정이다. 시계열 모델링에 대한 연구는 주로 S. M. Wu<sup>[1]</sup>가 주로 가공시스템에 적용하여 연구가 되어 왔으나 현재는 예전과 같이 활발하지 못하고 있는 실정이다. 그 이유로는 그 적용 한계를 극복하는데 좋은 아이디어가 없어서인 것으로 사료된다. 따라서 수학적으로 정의해놓고 그 시스템을 분석하는 방법인 시계열 모델링은 적용 아이디어에 따라 그 연구 가치가 확대된다고 할 수 있다. 최근 연구 중 의미 있는 연구는 K. Kanazawa<sup>[2]</sup>의 연구로 그는 2 자유도의 커플시스템과 언커플시스템에서 *ARMAMA* 시계열 모델을 이용하여 고유모드를 구하는 방법을 제시하였다. 최근 시계열에 대한 왕성한 연구는 L. Ljung<sup>[3,4]</sup> 등이 있으며 이들 연구는 주로 필수적인 신호처리에 그 초점을 맞추고 있다. 시계열 연구방법 중 스펙트

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 대학원

# 교신저자 : 부경대학교 기계공학부

khk@pknu.ac.kr

럼에 대한 연구는 S. M. Kay<sup>[5]</sup>가 많은 연구를 하였다. 시스템의 고유모드를 분석하는데 기존에 FFT 스펙트럼을 이용하여 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나 FFT 방법보다는 시계열 모델링은 수학식에서 모델링과 더불어 바로 스펙트럼을 구하고 고유모드를 구할 수 있다는 장점이 있다. 이 고유모드 계산은 절삭역학의 채터 연구에 필수적인 파라메터이고 이 고유모드를 구하여야 채터 역학을 연구하여 채터의 안정영역을 구할 수 있다. 이 안정영역에 대한 연구는 Y. Altintas<sup>[6]</sup>가 많은 연구를 하였으며 S. L. Oh<sup>[7]</sup>는 이 영역을 실험데이터를 분석하여 경계영역을 구하는 방법을 제시하고 있다. 따라서 이 시계열의 고유모드 및 스펙트럼 분석으로 그 언커플시스템에 대하여 체계적인 결과를 얻는 것도 이들 연구를 위하여 상당의 의미가 있다고 할 수 있다.

한편, 이들의 연구는 기존의 FFT 방법으로 연구하였으며 각 시계열 방법으로 언커플시스템에 적용하여 각 방법의 장단점을 규명하는 것은 이 분야의 응용연구에 매우 필요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 시계열 방법을 이용하여 언커플시스템에 적용하였고 1차 및 2차 모드 계산을 수행하여 각 모드 계산 및 언커플시스템에 적용, 그 타당성을 입증하고자 한다.

## 2. 파라메트릭 모델

본 연구에서는 언커플시스템의 고유모드 및 스펙트럼을 시계열 모델링법을 이용하여 분석하고자 하였다.

### 2.1 ARMAX(n,m,l,nk) 모델

ARMAX모델은 잡음의 입력과 독립적인 새로운 입력을 고려하여 다음과 같이 정의되며 여기서  $A(z)$ 은 자동회귀변수부이고  $B(z)$ ,  $C(z)$ 은 각각 해당 입력의 이동평균 변수부가 된다.<sup>[1,3-4,11]</sup>

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + C(z)a(t) \quad (1)$$

여기서,

$$A(z) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}$$

$$B(z) = 1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m}$$

$$C(z) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_lz^{-l}$$

$a_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )는 자동회귀변수,  $b_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ )는 이동평균변수이며  $z^{-1}$ 는 지연연산자(backshift operator),  $a(t)$ 는 백색잡음(white noise)으로  $E[a(t)] = 0$  및  $E[a(t) \cdot a(t-u)] = \delta_a^2 \cdot u$ 을 만족한다. 또한  $u$ 는 Kronecker delta 함수이다.

### 2.2 언커플시스템의 고유모드

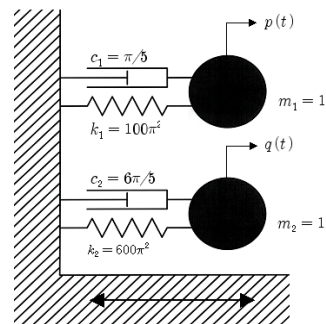
위에서 정의된 시계열 모델의 경우 각 전달함수의 자동회귀 부분인 분모 항에서 고유진동수와 감쇠계수를 계산할 수 있다. 분모 항에서 인수분해된 짝  $(1 - \lambda_i \cdot z^{-1})(1 - \lambda_i^* \cdot z^{-1})$ 로부터 각각의 한 개의 고유진동수와 감쇠계수를 구하게 된다. 시스템에서 측정된 실험데이터의 샘플링 주기를  $T_s$ 라 하면 이 시스템의 고유진동수와 감쇠계수는 각각 다음과 같이 표현된다.<sup>[1]</sup>

$$w_i = \frac{abs(\ln(\lambda_i))}{T_s} \quad (2)$$

$$\zeta_i = -\cos(\text{angle}(\ln\lambda_i)) \quad (3)$$

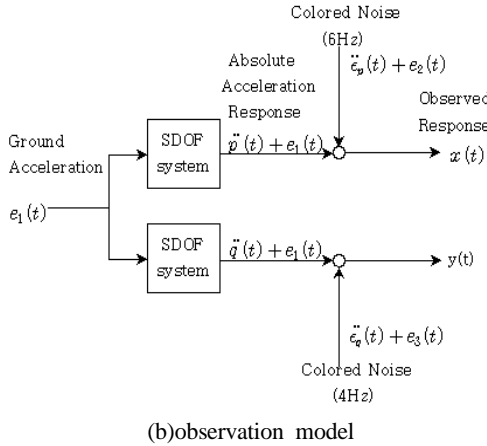
## 3. 시뮬레이션

### 3.1 언커플시스템



Ground Acceleration  $e_1(t)$

(a) system model



**Fig. 1 Simulation model of uncoupled system**

언커플시스템의 시스템 모델과 신호를 고려한 관찰모델은 아래의 Fig. 1과 같이 나타 낼 수 있다. 이 언커플시스템의 이론적인 고유특성은 Table 1과 같이 낼 수 있다. 두 출력은 독립적이며 서로 다른 특성을 가진다. 예를 들면,  $x(t)$  와  $y(t)$  의 각 출력은 각각 고유 주파수가 5 Hz와 12.25 Hz의 서로 다른 모델의 신호특성을 갖게 된다.

**Table 1 Eigenvalues and eigenvector of uncoupled system**

|               | Eigenvalues |                | Eigenvectors<br>$\{\phi_p, \phi_q\}$ |
|---------------|-------------|----------------|--------------------------------------|
|               | Freq. (Hz)  | Damp.          |                                      |
| <i>System</i> |             |                |                                      |
| 1st mode      | 5           | 1/100          | {1,0}                                |
| 2nd mode      | $5\sqrt{6}$ | $\sqrt{6}/100$ | {0,1}                                |
| <i>Noises</i> |             |                |                                      |
| $\epsilon_p$  | 4           | 5/1000         | —                                    |
| $\epsilon_q$  | 6           | 5/1000         | —                                    |

Table 1은 시뮬레이션 하려하는 언커플시스템의 고유주파수와 감쇠계수를 나타내고 있다. 1차 모드에서는 고유주파수가 5 Hz 이고 이 때 감쇠계수가 0.01이다. 2차 모드의 고유주파수는 12.25 Hz이고 이때의 감쇠계수는 0.025 인 경우이다. 따라서 위 조건을 만족하는 언커플시스템의 지배 방정식은 식(4)와 같이

나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \ddot{p}(t) \\ \ddot{q}(t) \end{Bmatrix} + \frac{\pi}{5} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 6 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{p}(t) \\ \dot{q}(t) \end{Bmatrix} + 100\pi^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 6 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} e_1(t) \\ e_1(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

그리고 언커플시스템의 관찰모델에서 백색잡음을 입력으로 하여 나타나는 출력신호와 칼라잡음과의 관계는 다음의 식(5)~(8)로 나타낼 수 있다.2)

$$\ddot{\epsilon}_p(t) + 0.12\pi\dot{\epsilon}_p(t) + 144\pi^2\epsilon_p(t) = -e_2(t) \quad (5)$$

$$\ddot{\epsilon}_q(t) + 0.08\pi\dot{\epsilon}_q(t) + 64\pi^2\epsilon_q(t) = -e_3(t) \quad (6)$$

$$x(t) = (\ddot{p}(t) + e_1(t)) + (\ddot{\epsilon}_p(t) + e_2(t)) \quad (7)$$

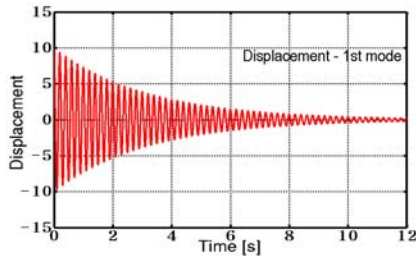
$$y(t) = (\ddot{q}(t) + e_1(t)) + (\ddot{\epsilon}_q(t) + e_3(t)) \quad (8)$$

즉 언커플시스템의  $p(t)$  와  $q(t)$  은 기준 지면에 서 2-자유도 진동시스템의 독립된 변위 응답을 나타 내며  $\epsilon_p(t)$  와  $\epsilon_q(t)$  은 칼라잡음,  $x(t)$  와  $y(t)$  은 출력 실험치,  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$  와  $e_3(t)$ 는 평균이 0 이 고, 일정한 분산 값을 갖는 백색잡음이다. 이 모델의 물리적 의미는 지면에서의 가속도  $e_1(t)$  가 독립적 인 1 자유도의 두 시스템에 입력으로 가해지고 있으며 이 각각의 시스템 출력인 변위  $x(t)$  와  $y(t)$  의 가속도 성분인  $\ddot{p}(t) + e_1(t)$ 와  $\ddot{q}(t) + e_1(t)$  로 주어진 다. 이 가속도 출력은  $\ddot{\epsilon}_p(t) + e_2(t)$ 와  $\ddot{\epsilon}_q(t) + e_3(t)$  의 칼라잡음과 합쳐져 실험 출력 신호가 나타나게 되는 것을 나타내며 식(4) 는 감쇠항, 질량항 및 강성항 의 매트릭스가 대각행렬 이외의 항이 없으므로 각각 의 독립적인 두 식으로 나타나게 되며 Runge - Kutta - Gill 방법에 의한 수치해석으로 그 변위, 속도 및 가속도 신호를 구할 수 있고 구한 신호 중 변위신호는 시계열 분석 신호로 이용하여 시스템의 스펙트럼을 구하는데 이용하게 된다. 물론 속도나 가속도 성분의 신호를 분석하여도 고유모드 분석에서는 거의 같은

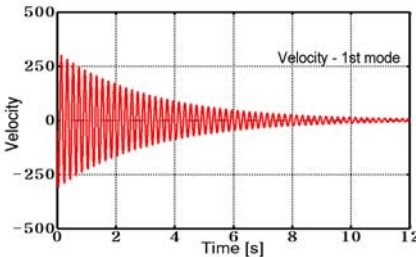
결과를 얻었으므로 본 연구에서는 변위 신호를 분석 신호로 사용하였다.

### 4. 변위 신호의 분석 및 고찰

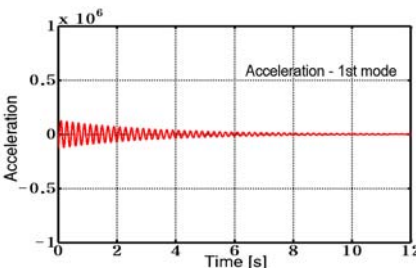
Fig. 1은 언커플시스템의 경우이고 식(4)로 표현되고 고유모드가 두개 이므로 각 모드에 의하여 변위 응답이 있게 되고 1차 모드에 의한 변위, 속도 및 가속도 성분을 구한 결과가 각각 Fig. 2의 (a), (b), (c)이다. 그리고 이 응답 중 변위응답을 이용하여 FFT 및 시계열모델의 ARMAX 모델로 스펙트럼을 구한 결과 Fig. 2의 (d) 및 (e)와 같이 얻을 수 있었다. 이때의 샘플링 데이터 수는 2625개이고 샘플링 주파수는 200Hz로 하여 분석하였다.



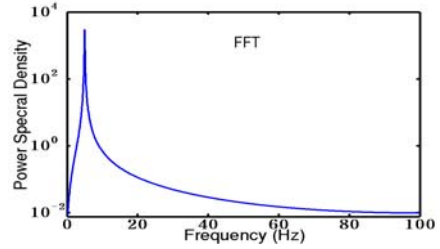
(a) Displacement



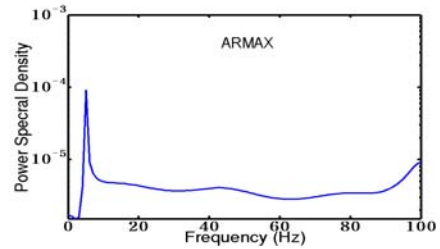
(b) Velocity



(c) Acceleration



(d) FFT power spectrum



(e) ARMAX

Fig. 2 Simulated 1st mode response of displacement, velocity and acceleration and their power spectra for uncoupled system

Table 2 Natural frequency of uncoupled system (1st mode)

| mode                  | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AR(10) ( $\omega_i$ ) | 4.9999 | 5.0000 | 47.080 | 70.441 | 89.450 |
| ( $\xi_i$ )           | 0.0039 | 0.0039 | 0.0904 | 0.0972 | 0.0963 |
| AR(10) (burg)         | 4.9008 | 4.9415 | 5.1472 | 65.318 | 87.911 |
|                       | 0.0036 | 0.0065 | 0.0000 | 0.1010 | 0.0847 |
| AR(10) (ls)           | 5.0000 | 31.959 | 50.168 | 72.127 | 90.069 |
|                       | 0.0039 | 0.1756 | 0.1392 | 0.1228 | 0.1270 |
| AR(10) (yw)           | 5.0783 | 26.070 | 47.506 | 68.735 | 89.915 |
|                       | 0.0078 | 0.2409 | 0.2210 | 0.2019 | 0.1839 |
| AR(10) (gl)           | 4.7859 | 5.0110 | 5.1572 | 65.305 | 87.917 |
|                       | 0.0092 | 0.0143 | 0.0116 | 0.0987 | 0.0829 |
| AR(10) (ivar)         | 4.9999 | 27.779 | 46.635 | 63.063 | 93.105 |
|                       | 0.0039 | 0.0376 | 0.0435 | 0.0188 | 0.0076 |
| ARX-ls(10,5,1)        | 5.0000 | 31.987 | 50.185 | 72.243 | 90.119 |
|                       | 0.0039 | 0.1757 | 0.1394 | 0.1236 | 0.1287 |
| ARX-iv4(10,5,1)       | 4.9997 | 44.069 | 90.119 | 96.353 | 111.60 |
|                       | 0.0039 | 0.1054 | 0.1287 | 0.9660 | 0.9071 |
| ARMAX(10,5,3,1)       | 5.0000 | 19.965 | 46.310 | 76.984 | 90.119 |
|                       | 0.0039 | 0.4748 | 0.2739 | 0.2297 | 0.1287 |
| BJ(5,3,10,1) (c/d)    | 4.9999 | 32.547 | 49.713 | 72.250 | 90.012 |
|                       | 0.0039 | 0.1834 | 0.1450 | 0.1260 | 0.1310 |
| BJ(5,3,10,1) (b/f)    | 5.0000 | 27.709 | 41.789 | 69.560 | 87.492 |
|                       | 0.0039 | 0.3691 | 0.0067 | 0.0848 | 0.0196 |
| OE(5,10,1) (b/f)      | 5.0000 | 27.709 | 41.630 | 65.259 | 89.577 |
|                       | 0.0039 | 0.3691 | 0.0026 | 0.0291 | 0.0164 |

Table 2는 Fig. 2의 (a)의 변위응답을 이용하여 여러 가지 시계열 모델링 하여 각각의 고유모드와 감쇠계수를 구한 결과이다. 언커플시스템에서 1차 모드의 주파수는 정확하게 5 Hz로 계산되었다.

Fig. 3의 (a), (b), (c)는 같은 언커플시스템의 2차 모드에 의한 변위, 속도 및 가속도 성분을 구한 결과를 나타내고 있다. 수치해석 방법인 *Runge-Kutta-Gill* 방법을 이용하여 구하였고 마찬가지로 변위응답을 이용하여 *FFT* 및 시계열 모델의 *ARMAX* 모델로 스펙트럼을 구한 결과가 각각 Fig. 3의 (d) 및 (e)이다. 이때에도 샘플링 데이터 수는 1차 모드와 같이 2625개로 하였고 샘플링 주파수도 200 Hz로 되도록 하여 나타낸 결과이다. 구한 2차 고유모드의 주파수는 12.25 Hz로 정확하게 계산되었고 실제 모드와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

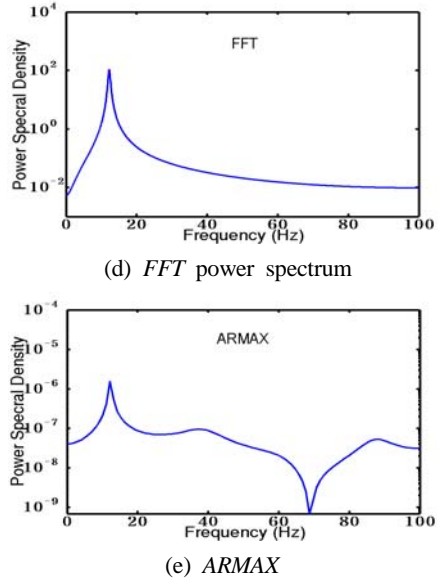
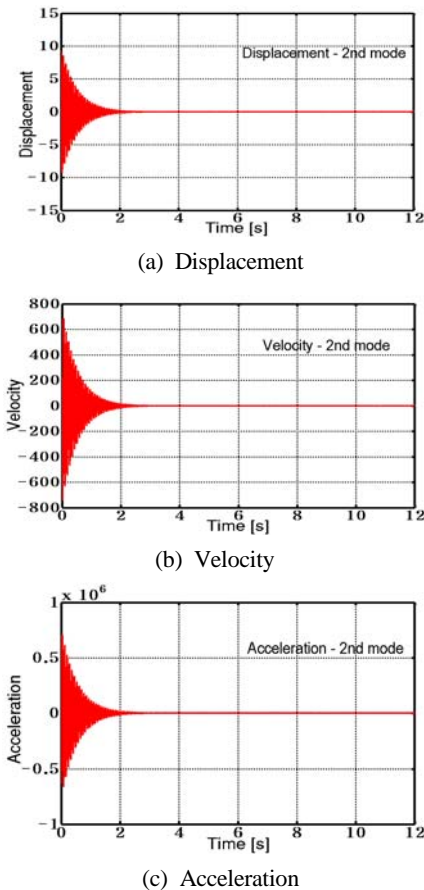
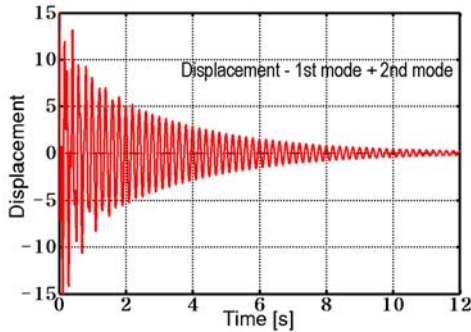


Fig. 3 Simulated 2nd mode response of displacement, velocity and accelerometer and their power spectra for uncoupled system

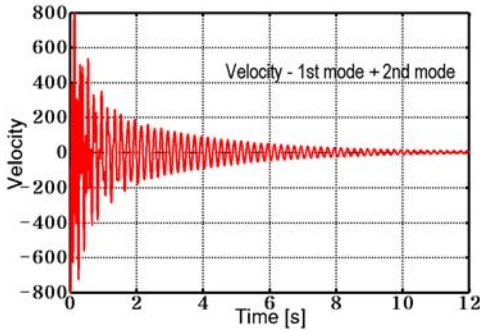
Table 3 Natural frequency of uncoupled system (2nd mode)

| mode                                | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <i>AR</i> (10) ( $\omega_i$ )       | 12.247 | 12.247 | 48.143 | 69.790 | 88.317 |
| ( $\xi_i$ )                         | 0.0151 | 0.0151 | 0.0790 | 0.1218 | 0.0666 |
| <i>AR</i> (10) ( <i>burg</i> )      | 11.175 | 12.255 | 12.772 | 13.606 | 86.464 |
|                                     | 0.0038 | 0.0252 | 0.0235 | 0.0064 | 0.1514 |
| <i>AR</i> (10) ( <i>ls</i> )        | 12.247 | 35.077 | 51.861 | 73.309 | 87.472 |
|                                     | 0.0151 | 0.2044 | 0.1707 | 0.2490 | 0.1157 |
| <i>AR</i> (10) ( <i>yw</i> )        | 12.319 | 26.196 | 47.570 | 68.773 | 89.937 |
|                                     | 0.0098 | 0.2444 | 0.2246 | 0.2051 | 0.1867 |
| <i>AR</i> (10) ( <i>gl</i> )        | 11.944 | 11.994 | 12.778 | 12.811 | 85.540 |
|                                     | 0.0155 | 0.0230 | 0.0129 | 0.0276 | 0.0512 |
| <i>AR</i> (10) ( <i>ivar</i> )      | 12.247 | 32.552 | 41.946 | 60.595 | 91.107 |
|                                     | 0.0151 | 0.1552 | 0.0611 | 0.1061 | 0.0483 |
| <i>ARX-ls</i> (10,5,1)              | 12.247 | 35.094 | 51.822 | 73.322 | 87.484 |
|                                     | 0.0151 | 0.2050 | 0.1707 | 0.2485 | 0.1157 |
| <i>ARX-ivar</i> (10,5,1)            | 12.247 | 58.990 | 80.508 | 83.764 | 107.90 |
|                                     | 0.0151 | 0.2333 | 0.2391 | 0.9440 | 0.8854 |
| <i>ARMAX</i> (10,5,3,1)             | 12.247 | 38.000 | 58.990 | 71.592 | 86.668 |
|                                     | 0.0151 | 0.2078 | 0.2333 | 0.0079 | 0.1401 |
| <i>BJ</i> (5,3,10,1) ( <i>c/d</i> ) | 12.247 | 34.986 | 52.687 | 74.486 | 87.071 |
|                                     | 0.0151 | 0.1889 | 0.1634 | 0.2703 | 0.1239 |
| <i>BJ</i> (5,3,10,1) ( <i>b/f</i> ) | 12.247 | 31.885 | 57.343 | 74.486 | 78.775 |
|                                     | 0.0151 | 0.0273 | 0.0637 | 0.2703 | 0.1055 |
| <i>OE</i> (5,10,1) ( <i>b/f</i> )   | 12.247 | 29.423 | 53.453 | 74.486 | 86.049 |
|                                     | 0.0151 | 0.1514 | 0.0129 | 0.2703 | 0.0049 |

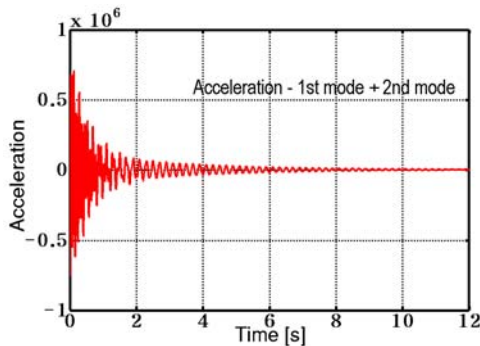
Table 3은 언커플시스템에서 2차 모드에 의한 변위, 속도, 가속도 응답 중 변위 응답을 시계열의 입력 신호로 하여 시계열 모델링 후 식(2), (3)을 이용하여 2차 모드 주파수를 계산한 결과이다. 2차 모드의 고유 모드와 감쇠계수가 정확하게 계산되고 있으며 Table 3의 첫 번째 컬럼에서 2차 모드를 잘 확인 할 수 있다. 즉 고유 모드가 각 알고리즘 모두 12.25 Hz 부근에서 비교적 잘 일치하게 계산되었다.



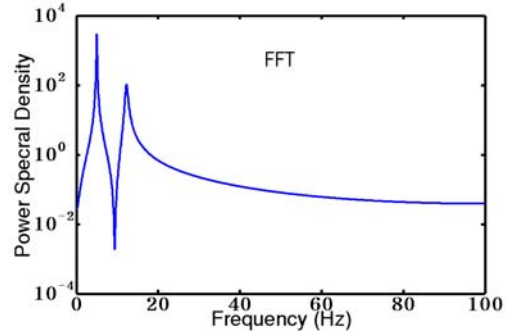
(a) Displacement



(b) Velocity



(c) Acceleration



(d) FFT power spectrum

Fig. 4 Simulated results of uncoupled system for mixed mode

Table 4 Natural frequency of uncoupled system (mixed mode)

| mode                        | 1st    | 2nd    | 3rd    | 4th    | 5th    |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AR(10) ( $\omega_i$ )       | 4.9832 | 5.0339 | 12.239 | 12.259 | 87.462 |
| ( $\xi_i$ )                 | 0.0221 | 0.0174 | 0.0158 | 0.0156 | 0.0727 |
| AR(10) ( <i>burg</i> )      | 4.9832 | 5.0294 | 6.8799 | 12.111 | 12.737 |
|                             | 0.0221 | 0.0006 | 0.0976 | 0.0040 | 0.0055 |
| AR(10) ( <i>ls</i> )        | 5.0000 | 12.247 | 47.124 | 66.671 | 90.319 |
|                             | 0.0039 | 0.0151 | 0.0944 | 0.1298 | 0.0728 |
| AR(10) ( <i>yw</i> )        | 6.3733 | 17.901 | 45.158 | 67.624 | 89.573 |
|                             | 0.1462 | 0.3216 | 0.2257 | 0.2025 | 0.1832 |
| AR(10) ( <i>gl</i> )        | 4.8988 | 5.8253 | 6.3733 | 12.004 | 12.524 |
|                             | 0.0083 | 0.0312 | 0.1462 | 0.0007 | 0.0001 |
| AR(10) ( <i>ivar</i> )      | 4.9999 | 6.3733 | 12.247 | 46.611 | 71.895 |
|                             | 0.0039 | 0.1462 | 0.0152 | 0.0270 | 0.0310 |
| ARX- <i>ls</i> (10,5,1)     | 5.0000 | 12.247 | 47.183 | 66.673 | 90.318 |
|                             | 0.0039 | 0.0151 | 0.0945 | 0.1297 | 0.0728 |
| ARX- <i>iv4</i> (10,5,1)    | 4.9997 | 5.0000 | 12.247 | 86.445 | 110.36 |
|                             | 0.0040 | 0.0039 | 0.0151 | 0.9045 | 0.8344 |
| ARMAX(10,5,3,1)             | 5.0000 | 12.247 | 35.525 | 55.901 | 89.128 |
|                             | 0.0039 | 0.0151 | 0.2164 | 0.1948 | 0.1643 |
| BJ(5,3,10,1) ( <i>c/d</i> ) | 5.0000 | 12.247 | 47.442 | 66.161 | 90.121 |
|                             | 0.0039 | 0.0151 | 0.0959 | 0.1299 | 0.0685 |
| BJ(5,3,10,1) ( <i>b/f</i> ) | 5.0000 | 12.247 | 40.485 | 64.876 | 87.148 |
|                             | 0.0039 | 0.0151 | 0.1544 | 0.0430 | 0.0357 |
| OE(5,10,1) ( <i>b/f</i> )   | 5.0000 | 12.247 | 41.031 | 72.152 | 75.404 |
|                             | 0.0039 | 0.0151 | 0.0130 | 0.0038 | 0.2879 |

Fig. 4의 (a), (b), (c)는 언커플시스템에서 1차 모드와 2차 모드가 같이 있는 혼합모드의 신호로서 그때의 변위, 속도, 가속도의 응답을 각각 보여 주고 있다. 이 응답은 마찬가지로 Runge-Kutta-Gill 방법을 이용하여 구하였고 두 모드가 중첩된 변위응답을 이용하여 FFT 스펙트럼을 구한 결과가 Fig. 4(d)이다.

이때의 샘플링 데이터 수는 1차 모드와 같이 2625개이고 샘플링 주파수도 200 Hz로 하였다. 1차 모드인 5 Hz와 2차 모드인 12.25 Hz가 잘 나타나고 있으며 이 결과는 Table 4 의 시계열 분석법에 의한 모드와 잘 일치하고 있다.

Table 4 은 언커플시스템의 변위응답을 이용하여 시계열 모델을 이용하여 1차 및 2차 모드가 혼합된 혼성모드의 변위 신호 Fig. 4(a) 를 각각의 시계열 모델링 방법으로 모델링하여 식(2,3)으로 각각의 고유모드와 감쇠계수를 구한 결과이다. 시계열 방법 중 여러 가지 알고리즘의 모드 수치를 분석한 결과 1차 모드는 5 Hz, 2차 모드는 12.25 Hz 에서 계산되고 있음을 Table 4 에서 확인 할 수 있다. Table 에서는 모델의 AR 오차를 10차로 하여 5개의 모드를 계산할 수 있었고 그 중 실제모드를 선택할 수 있었다.

## 5. 결 론

여러 가지 시계열 알고리즘을 언커플시스템에 적용하여 그 시스템의 1차 및 2차 모드를 분석할 수 있었고 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시계열로 언커플시스템을 모델링하여 파워 스펙트럼분석으로 1차 및 2차 모드를 구하였고 언커플시스템의 응답 및 모드특성을 분석하였다.
2. 시계열 스펙트럼을 FFT 와 비교하여 볼 때 시계열 분석에 의해서도 언커플시스템의 고유모드를 정확하게 계산 할 수 있었고, 데이터수가 적고 약한 응답의 경우 그 고유 모드 검출이 보다 수월하였다.
3. 시계열 스펙트럼도 부드럽고 정확하게 표현할 수 있었고 고유모드의 이론적 식(2) 와 (3) 으로 표의 수치와 같이 비교적 정확하게 계산할 수 있었다.
4. 언커플시스템을 시계열 분석한 결과 ARMAX 모델이 적절하였고 스펙트럼 분석을 통하여 1차, 2차 및 혼합모드를 정확하게 구할 수 있었고 이는 가공시스템의 분석에 이용할 수 있다.

## 참고문헌

1. Pandit, S. M. and Wu, S. M., Time Series and System Analysis with Applications, John Wiley and Sons, 1993.
2. Kanazawa, K., Hirata, K., "Parametric Estimation of the Cross-Power Spectral Density," J. of Sound and Vibration, Vol. 282 pp. 1-35, 2005.
3. Ljung, L., System Identification - Theory for the User, Prentice Hall, 1999.
4. Ljung, L., Glad, T., Modeling of Dynamic Systems, Prentice Hall, 1999.
5. Kay, S. M., Modern Spectral Estimation: Theory and Application, Prentice Hall, 1990.
6. Altintas, Y., "Manufacturing Automation," Cambridge University, 2000
7. Oh, S. L., Chin, D. H., Yoon, M. C., Ryoo, I. I., Ha, M. K., "Chatter Mode and Stability Boundary Analysis in Turning," Journal of KSMTE, Vol. 14 No. 5, 2005.
8. Söderström, T. and Stoica, P., Instrumental Variable Methods for System Identification, Berlin:Springer Verlag, 1993.
9. Dilley, D. N., Bayly, P. V. and Schaut, A. J., "Effects of the Chisel Edge on the Chatter Frequency in Drilling," J. of Sound and Vibration, Vol. 281, pp. 423-438, 2005.
10. Insperger, T., Stépán, G., Bayly, P. V., Mann, B. P., "Multiple Chatter Frequencies in Milling Processes," J. of Sound and Vibration, Vol. 262, pp. 333-345, 2003.
11. Yoon, M. C., Kim, B. T., Kim, K. H., "Natural Mode Estimation of Cutting Dynamics with Time Series," J. of MPT, Vol. 156, pp. 1373-1382, 1994.