

# 경험 모드 분리법을 이용한 감쇠 진동 신호의 분석

## Analysis of Damped Vibration Signal Using Empirical Mode Decomposition Method

이 인 재† · 이 종 민\* · 황 요 하\* · 허 건 수\*\*

Injae Lee, Jong Min Lee, Yoha Hwang and Kunsoo Huh

(2004년 10월 6일 접수 : 2005년 1월 27일 심사완료)

**Key Words** : Empirical Mode Decomposition(EMD, 경험 모드 분리법), Hilbert-huang Transform(HHT, 힐버트 후앙 변환), Intrinsic Mode Function(IMF, 내부 모드 함수), Damping(감쇠)

### ABSTRACT

Empirical mode decomposition(EMD) method has been recently proposed to analyze non-linear and non-stationary data. This method allows the decomposition of one-dimensional signals into intrinsic mode functions(IMFs) and is used to calculate a meaningful multi-component instantaneous frequency. In this paper, it is assumed that each mode of damped vibration signal could be well separated in the form of IMF by EMD. In this case, we can have a new powerful method to calculate natural frequencies and dampings from damped vibration signal which usually has multiple modes. This proposed method has been verified by both simulation and experiment. The results by EMD method which has used only output vibration data are almost identical to the results by FRF method which has used both input and output data, thereby proving usefulness and accuracy of the proposed method.

### 1. 서 론

데이터 분석에 가장 일반적으로 사용되는 FFT (fast fourier transform)를 이용한 방법들은 안정된 선형 구간의 무한 반복이란 가정으로 인해 비정상적이거나 비선형인 데이터에 적용할 경우 스펙트럼 (spectrum)에서의 번짐(leakage)이 많이 발생하므로 데이터의 수가 너무 적거나, 비정상적일 경우 또는 지진파 등과 같이 순간적으로 존재하는 데이터에 대해서는 적용이 어려웠다. 이와 같은 비선형적이거나

비정상적인 데이터를 분석하기 위한 방안의 하나로 최근 연구되고 있는 경험 모드 분리법(empirical mode decomposition, EMD)과 힐버트-후앙 변환 (hilbert-huang transform, HHT)은 Huang<sup>(1)</sup> 등에 의해 1998년 발표되었으며, 바람의 흐름이나 지진의 표면파, 바다의 파도 현상 등 자연현상의 비선형적인 데이터 분석에 최초로 적용되었다.

HHT는 시계열(time series) 데이터를 내부 모드 함수(intrinsic mode function, IMF)로 분리하여 시간-주파수-에너지 형태로 나타내어 분석하는 방법이고, IMF는 각 주기에서 영 교차(zero-crossing) 하고, 하나의 모드에 관해 다른 복잡한 파형을 포함하지 않은 진동 성분을 가진 파형이다. 이때, 시계열 데이터에서 IMF들을 분리해 내는 경험적인 방법을 EMD라고 하며 일반적으로 EMD는 시계열 데이터를 HHT에 적용하기 위한 전처리 과정에 사용된다.

† 책임저자: 정희원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구소센터  
E-mail : nlinjae@kist.re.kr

Tel : (02) 958-5669, Fax : (02) 958-5659

\* 정희원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구소센터

\*\* 한양대학교 기계공학부

현재 EMD와 HHT는 수 십년 동안 측정된 극지방 빙하의 상태 분석<sup>(2)</sup>과 바다에서의 파도 변화 분석<sup>(3)</sup>에 처음 적용되었다. 생물학적인 분야에서는 혈압의 변화 분석<sup>(4)</sup>에 적용되었으며, 토목과 건축 분야에서는 빔<sup>(5)</sup>이나 빌딩<sup>(6)</sup>과 같은 구조물의 진동 감쇠비를 구하는데 적용되었다. Yang<sup>(7,8)</sup> 등은 단순한 모드와 복잡한 모드에 적용해 보았으며, Leisk<sup>(9)</sup> 등은 외팔보에 적용하여 고유 진동수를 구하는 연구를 했다. 또한, Chen<sup>(6)</sup> 등은 근접한 주파수를 가지는 시스템에 적용하여 우수한 결과를 얻었다. 기계분야에서는 기계상태 감지나<sup>(9)</sup> 베어링 결함 진단<sup>(10)</sup>에 적용되었다. 이와 같이 EMD는 현재 다양한 분야에 적용되고 있으나 구조물에 적용한 경우는 시뮬레이션이나 간단한 실험장치를 사용한 경우가 대부분이다.

이 논문에서는 선형 시스템의 감쇠 진동신호에 EMD를 적용할 경우 구해지는 IMF가 각각의 진동 모드를 독립적으로 나타낼 것이라는 가정하에 각 IMF에서 고유 진동수와 감쇠비를 정확히 측정하는 방법을 제시하고 이를 시뮬레이션과 실험으로 검증하였다.

일반적으로, 구조물의 특성을 정확히 알아내기 위해서는 입력과 출력 신호를 이용하여 주파수 응답 함수(frequency response function, FRF)를 구하여 사용한다.<sup>(11)</sup> 그러므로 입력 신호를 알 수 없는 상황에서는 관찰된 출력신호 만으로는 정확한 진동 특성을 구하기가 매우 어렵다. 출력신호가 한 두 개의 고유 진동수 만을 포함하고 있을 경우는 분석이 가능하지만 다수의 고유 진동수가 포함된 경우는 각 모드를 분리해 내기가 일반적으로 매우 어렵다. 이 논문에서는 EMD의 특성상 다수의 모드를 포함하는 복잡한 출력 신호의 경우도 EMD를 사용하면 각 모드 별로 분리가 가능할 것이라 가정하고, 다수의 모드가 섞여 있는 감쇠진동의 출력신호만으로도 정확히 감쇠비를 구할 수 있는 방법을 제시하며 이를 실험 데이터로 입증하였다.

이 논문에서는 우선 IMF와 EMD에 관하여 간략히 설명하고, EMD를 적용하는 과정에서 발생하는 다양한 문제점들에 대한 해결책을 설명하였다. 그리고, 이전의 방법<sup>(5~8)</sup>과 같이 EMD 결과로 나온 IMF들에 HHT를 적용하지 않고, 각 IMF에 대수감소법(logarithmic decrement)<sup>(12)</sup>을 적용하여 감쇠비를 구하고, IMF 극점들의 주기의 평균으로 고유 진동수를

구하였다.

시뮬레이션에서는 서로 다른 감쇠비와 고유 진동수를 가진 신호들을 혼합하여 만든 데이터에 EMD를 적용하여 각 IMF로 분리해 내고, 앞에서 제안한 방법을 통해 감쇠비와 고유 진동수를 구하여 이론값과 비교하였다.

실험에서는 현장에서 사용되고 있는 대형 쇄석기 롤러에 적용하였다. 임팩트 해머로 롤러에 입력 신호를 주고, 롤러에 설치한 가속도 센서에서 출력신호를 받았다. FRF방법을 사용하는 상용 프로그램으로 쇄석기 롤러의 고유 주파수와 감쇠비를 구하였다. 그리고 가속도 센서에서 나온 출력신호만을 가지고, EMD를 사용하여 각 모드 별로 분리된 IMF에서 고유 주파수와 감쇠비를 구하여 상용 프로그램의 결과값과 비교하였다. 그 결과 각 모드에서 거의 동일한 결과 값을 얻을 수 있었으며, 감쇠 출력 신호만 측정이 가능한 구조물의 진동 특성 분석에 EMD의 적용이 가능함을 입증하였다.

## 2. 경험 모드 분리법의 소개

### 2.1 내부 모드 함수의 정의

Fig. 1의 굵은 실선이 IMF 파형의 한 예인데, IMF 파형은 물리적으로 순간적인 주파수범위에서 국부적(local)으로 극대값과 극소값의 데이터의 크기가 0에 관하여 대칭인 상태를 말한다. 그러므로 IMF는 다음 두 조건을 만족시켜야 한다.<sup>(1)</sup>

- ① 데이터의 극값(extrema)의 수와 영 교차의 수는 같거나 1만큼 차이가 나야 한다.
- ② 모든 포인트에서 상, 하단 포락선(envelope)의 평균값은 0이다.

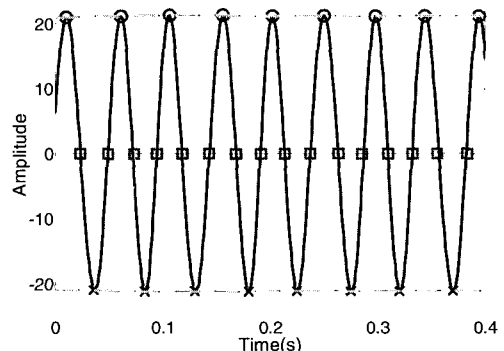


Fig. 1 Example of IMF

첫 번째 조건은 물리적으로 국부적인 영역에서 상, 하 극값의 수가 대칭이 되도록 만드는데 필요한 조건이다. 두 번째 조건은 이상적으로 데이터의 국부적 평균을 0으로 만들기 위한 것인데, 비 정상적인 신호의 경우에는 데이터의 국부적 평균을 0으로 만드는 것이 불가능하다. 그러므로 위와 같은 국부적인 대칭 조건 대신에 시계열 데이터의 극대값과 극소값을 구하여 상, 하단 포락선을 만들고, 국부적으로 두 포락선의 평균을 0으로 만드는 방법을 사용한다. 이 방법을 사용하면 잡음이 심한 데이터와 같이 나쁜 조건에서 측정된 순간적인 주파수도, 잡음이 적은 좋은 조건을 통해 측정하여 분석한 시스템의 물리학적 결과와 일치함을 보인다.<sup>(7,8)</sup>

그러므로 IMF는 각 주기에서 영 교차하고, 국부적으로 다른 복잡한 파형을 포함하지 않은 진동 성분을 가진 파형을 말한다.

Fig. 1에서 굵은 실선은 하나의 IMF를 나타내고, 'o' 기호는 극대값, 'x' 기호는 극소값을 나타낸다. 상, 하단의 점선은 극값들을 연결한 포락선이다. 가운데 '□' 기호는 IMF가 각 주기마다 영 교차하는 것을 보인다. 가는 실선은 상, 하단의 포락선들의 평균으로 모든 시간에 관하여 0에 수렴하고 있다.

## 2.2 경험 모드 분리법 과정

EMD는 IMF를 구하는 경험적 방법이며, IMF를 구하는 순서는 다음과 같다.

① 주어진 데이터  $x(t)$ 를 식 (1)과 같이  $s_1(t)$ 로 놓이고,  $k$ 를 1로 놓는다.

$$s_1(t) = x(t) \quad (1)$$

②  $s_1(t)$ 의 모든 국부적 극대값들로 상단 포락선을 고차 스플라인(spline)을 사용하여 구한다.

③ ②와 같이 모든 국부적 극소값들로 하단 포락선을 구한다. 이때, 모든 데이터들은 상, 하단 포락선 사이에 존재하여야 한다.

④ 상, 하단 포락선의 순간 평균인  $m_k(t)$ 를 구하고, 식 (2)와 같이  $s_k(t)$ 와  $m_k(t)$ 의 차로  $h_{nk}(t)$ 를 구한다.  $h_{nk}(t)$ 에서 아래첨자  $n$ 은  $n$ 번째 IMF를 나타내고,  $k$ 는 IMF를 구하기 위해 반복 계산한 횟수를 나타낸다.

$$h_{nk}(t) = s_k(t) - m_k(t) \quad (2)$$

⑤  $h_{nk}(t)$ 가 2-1절의 IMF의 두 조건을 모두 만족하지 않으면  $k$ 를 1 증가시킨 후  $h_{nk}(t)$ 를  $s_k(t)$ 로 두고 위의 ②, ③, ④의 과정을  $h_{nk}(t)$ 가 IMF의 두 가지 조건을 모두 만족할 때까지 반복한다.

$h_{nk}(t)$ 가 IMF의 두 조건을 모두 만족하면  $h_{nk}(t)$ 은 식 (3)과 같이  $x(t)$ 의  $n$ 번째 IMF,  $c_n(t)$ 가 된다.

$$c_n(t) = h_{nk}(t) \quad (3)$$

⑥ 식 (4)와 같이  $s_1(t)$ 에서  $n$ 번째 IMF 성분인  $c_n(t)$ 를 뺀 나머지(residual)를  $r_n(t)$ 라 정의한다.

$$r_n(t) = s_1(t) - c_n(t) \quad (4)$$

⑦ 이 나머지 값  $r_n(t)$ 를  $s_1(t)$ 로 하고  $n+1$ 번째 IMF,  $c_{n+1}(t)$ 를 구하기 위하여  $n$ 을 1 증가시키고, 위의 ②, ③, ④, ⑤, ⑥ 과정을 반복한다.

$r_n(t)$ 가 더 이상 IMF조건을 만족할 수 없거나, 진동성분이 거의 없는 경우 반복과정을 멈춘다.

IMF로 분리된 성분들은 식 (5)와 같이 IMF 성분들  $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$ 와 그때까지의 나머지  $r_n(t)$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (5)$$

즉, 시계열에서 데이터를 각 IMF와 나머지로 분리할 수 있고, 분리된 값들을 통해 원래의 데이터를 합성할 수도 있다.

## 3. 경험 모드 분리법의 문제점 및 해결

EMD를 이용하여 IMF를 구하는 과정에는 다양한 문제점이 존재한다. 데이터의 극값을 정하는 것과, IMF조건에 따른 반복 횟수와 0값 처리 문제, 포락선을 그릴 경우 스플라인의 선택과 끝단을 처리하는 문제 등이다.

이 논문에서는 데이터의 국부적인 범위에서 상, 하 극값을 정하는 문제는 데이터의 전후 3개의 데이터의 기울기 변화를 통해 구하였다. 또한, 동일 데이터 값의 반복이 있을 경우 그 중간 값을 극값으로 정의하였다.

0값 처리 문제는 IMF조건을 만족하기 위해 EMD 과정을 반복하는 계산과정에서 필요로 한다. 상, 하 포락선의 평균값의 범위를 정하여 계산 시간의 단축을 위해서다. 그 이유는 오차범위 이내의 값으로 인한 계산의 무한 반복을 막기 위함이다. Huang역시 이러한 문제점을 해결하고자 반복과정에서 나온 두  $h_{nk}(t)$ 와  $h_{n(k-1)}(t)$  사이의 표준편차(standard deviation)값을 기준으로 반복을 멈추었다.<sup>(1)</sup> 이 논문에서는 계산 시간을 단축하기 위하여 데이터가 가지는 극값의 절대값 중 최소인 것의 1/100으로 0 값을 정하였다. 계산된 값이 그보다 작아질 경우 그 값을 '0'이라 보고 그 결과로 IMF를 정의했다.

이 논문에서는 포락선을 그릴 때 극대값과 극소값을 지나는 큐빅 스플라인 보간법(cubic spline interpolation)을 사용하여 포락선의 데이터 수와 주어진 데이터의 수를 일치시켜 데이터간의 계산을 원활하게 하였다.

포락선 끝단 처리의 문제는 EMD의 반복과정에서도 발생하지만, IMF를 정의한 후 원래의 데이터에서 IMF값을 뺀 경우에도, 나머지 값의 어느 한쪽이 발산하게 된다. Fig. 2는 몇 개의 모드를 가지는 감쇠 진동 신호의 시작단에 일반적인 큐빅 스플라인 보간법을 사용한 경우를 나타낸다.

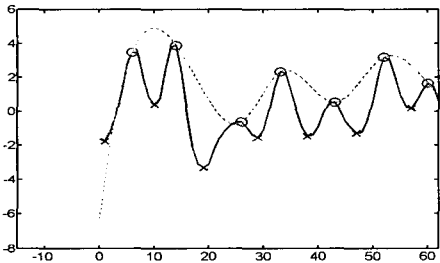


Fig. 2 End part problem of cubic spline interpolation

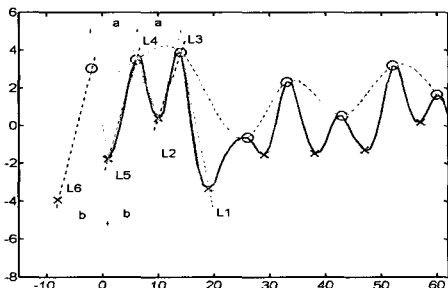


Fig. 3 Suggest method for additional maxima and minima points

실선은 감쇠 진동 신호를 나타내고, 'O'기호는 극대값, 'x' 기호는 극소값, 파선(dash)은 상단포락선, 점선(dot)은 하단 포락선을 나타낸다. 감쇠 신호의 경우, Fig. 2에서 보는바와 같이 시작점 부근에서 상, 하 포락선이 교차하는 문제점이 발생된다. 이는 첫번째 극점 이전의 극점에 대한 정보가 없기 때문이다. 따라서 이전의 극점에 대한 가상의 점을 정해주어야 하는데, 데이터의 특성에 따라 여러가지 방법들이 사용된다. 이 논문에서는 Fig. 3과 같은 방법으로 가상적인 극점을 양 끝단에 주어 데이터가 포락선 안에 들어가도록 하였다. 그래프의 선과 기호들은 Fig. 2와 같다.

파선 L1은 두번째 극대값과 세번째 극소값을 연결한 선이고, 파선 L2는 첫번째 극대값과 두번째 극소값을 연결한 선이다. 파선 L3은 두번째 극대값과 두번째 극소값을 연결한 선이고, 파선 L4는 첫번째 극대값과 첫번째 극소값을 연결한 것이다. 첫번째 극소값에서 L1, L2 기울기의 평균기울기를 가진 파선 L5를 긋고, 첫번째 극대값과 두번째 극대값의 x축 거리만큼 첫번째 극대값에서 좌측으로 이동한 수직선과 L5가 만나는 점을 가상 극대값으로 정한다.

새 극대점에서 L3, L4 기울기의 평균 기울기를 가진 파선 L6을 긋고, 첫번째 극소값과 두번째 극소값의 x축 거리만큼 첫번째 극소점에서 좌측으로 이동한 수직선과 만나는 점을 가상 극소점으로 정한다. 이 방법은 Schlurmann<sup>(13)</sup>이 제안한 방법에 L1과 L3을 추가하여 수정 제시한 방법으로, 감쇠 진동 신호에 적용하였을 때 모든 데이터가 상, 하 포락선 내부에 존재하도록 하여 포락선 끝단의 발산 문제를 해결할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션

구조물에 적용하기 전 3개의 모드를 가지는 감쇠 신호를 만들어 EMD를 적용해 보았다. Fig. 4에서 보인 바와 같이 주파수가 50 Hz, 감쇠비가 0.01인 (a)와 주파수가 150 Hz, 감쇠비가 0.003인 (b), 주파수가 300 Hz, 감쇠비가 0.002인 (c)를 합성하여 새로운 신호,  $x(t)$ 를 만들었다.

Fig. 5는 EMD를 사용하여  $x(t)$ 를 각 IMF로 분리한 결과를 보여준다. Fig. 5에서 보면 알 수 있듯이 EMD는 신호의 고주파 성분부터 분리한다. 나머지,  $r(t)$ 는 그 크기가 다른 IMF값들에 비해 매우 작고

진동성분이 거의 없으므로, 더 이상이 모드가 없음을 알 수 있다.

분리된 각 IMF들의 극점 사이의 간격의 평균을 통해 각 IMF의 주파수를 구하고 대수감소법을 적용해 감쇠비를 추정한 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 나타난 바와 같이 EMD를 사용하여 구한 결과값과 조합한 데이터들이 가지고 있던 값들이 거의 일치하는 결과값을 가진다.

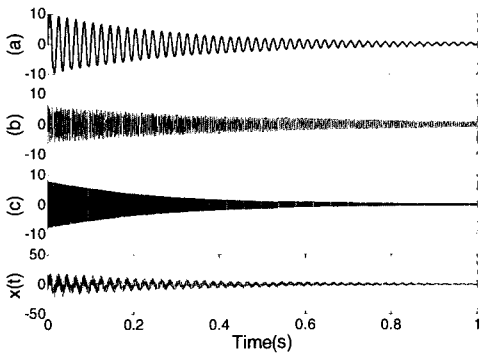


Fig. 4 Damped signal (a) 50 Hz,  $\zeta=0.01$  (b) 150 Hz,  $\zeta=0.003$  (c) 300 Hz,  $\zeta=0.002$   $x(t)$  signal (a) + (b) + (c)

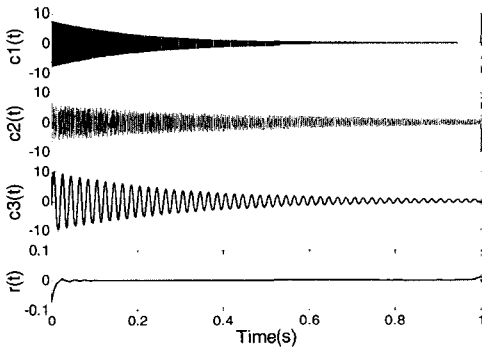


Fig. 5 IMF's and residual of 1. IMF 2. IMF 3. residual of  $x(t)$

Table 1 Theoretical values and estimated values of modes

	Theoretical values		EMD method results	
	Frequency [Hz]	Damping ratio (%)	Frequency [Hz]	Damping ratio (%)
Mode 1	50	1	50.0	1
Mode 2	150	0.3	150.1	0.3
Mode 3	300	0.2	300.1	0.2

따라서 EMD를 감쇠신호에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 실험

이 논문은 입력을 알 수 없는 구조물에 적용하기 위하여 제안되었으나, 그 성능을 평가하기 위하여 입, 출력 모두를 측정할 수 있는 구조물로 실험하였다. 구조물의 예로는 쇄석기 롤러를 선정하였다.

Fig. 6과 같이 현장에서 사용되는 쇄석기 롤러에 가속도 센서를 부착하고, 임팩트 해머로 충격신호를 주었다.

실험에 사용된 임팩트 해머는 PCB사의 086D20을 사용하였고 가속도 센서는 B&K 사의 4370을 사용하였다. 비교를 위해 모드를 구하는데 사용된 상용 제품은 LMS사의 것으로, SCADAS-III(하드웨어)와, CADA-X 3.5.D(소프트웨어)를 사용하였다. 모드를 구할 때 사용한 기법은 CADA-X에 있는 MDOF (multi-degree of freedom) 해석법 중 주파수 영역에서의 복소 곡선 맞춤법(complex curve fitting)을

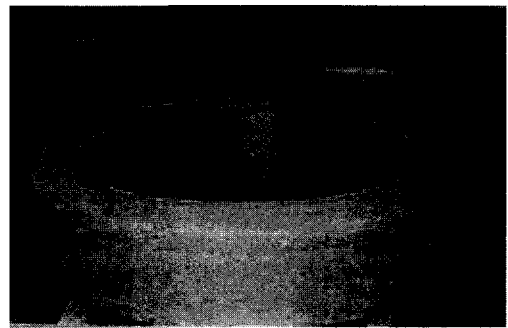


Fig. 6 Stone crusher roller

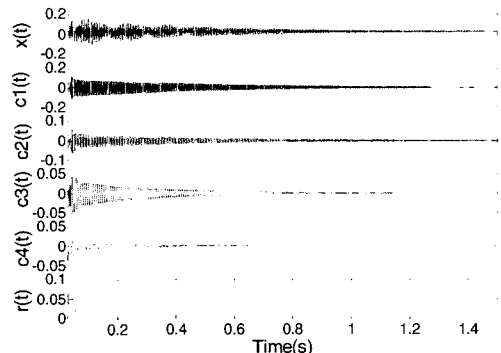


Fig. 7 Original data  $x(t)$ , IMF's ( $c_1(t)$ ,  $c_2(t)$ ,  $c_3(t)$ ,  $c_4(t)$ ) and residual ( $r(t)$ )

Table 2 Estimated values of modes

	LMS CADA-X		EMD method	
	Frequency [Hz]	Damping ratio(%)	Frequency [Hz]	Damping ratio(%)
Mode 1	134.23	0.341	134.39	0.321
Mode 2	217.44	0.230	217.69	0.163
Mode 3	329.75	0.108	329.72	0.105

사용하였다.<sup>(14)</sup>

IMF는 매 순간 단일한 주파수 성분만을 가지게 되므로 필터의 사용 없이 가속도 센서로부터 얻은 출력신호에 직접 EMD를 적용하여도 되나, 이 논문에서는 가장 중요한 3개의 모드에 집중하고자 출력신호에 500 Hz의 저대역 통과 필터를 적용하였다. 그 결과 Fig. 7의  $x(t)$ 를 구하였고, 여기에 EMD를 사용하여  $c_1(t)$ ,  $c_2(t)$ ,  $c_3(t)$ ,  $c_4(t)$ 의 IMF 성분들을 분리하였다.

그러나  $c_4(t)$ 는 IMF조건을 만족하여 EMD 결과로 분리되어 나왔으나 모드로 볼 수 없다. 그 이유는  $c_4(t)$ 의 진동 성분이 EMD과정에서 계산 시간을 줄이고자 일정한 값을 0으로 정하여 생기는 에러 값들의 누적으로 나타난 데이터이기 때문이다. 그러므로  $c_4(t)$ 는  $x(t)$ 에 내제된 IMF가 아니므로, 모드가 아니다.

따라서 EMD 결과가 고주파 성분부터 분리되어 나오므로  $c_3(t)$ 가 Mode 1,  $c_2(t)$ 가 Mode 2,  $c_1(t)$ 가 Mode 3라 정하였다.

Table 2 는 EMD 결과로 나타난 IMF들을 분석한 값들과 상용 프로그램을 통해 얻은 결과값들을 비교한 것이다. 입력된 신호를 사용한 결과와 출력신호만으로 EMD에 적용하여 분석한 결과가 서로 비슷하다. 그러므로 EMD를 사용하면 출력신호만으로도 시스템의 특성을 계산할 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

이 논문에서는 감쇠 진동 신호에 EMD를 적용하면 IMF들이 각각의 진동 모드를 독립적으로 나타낼 것이라는 가정하에 IMF에서 고유 진동수와 감쇠비를 추정하는 방법을 제시하고 실험을 통해 검증하였다.

우선, 스플라인의 끝단 처리 문제는 감쇠신호에 적합한 해결법을 제안하여 데이터의 발산을 막고, 포락

선 안에 데이터가 들어가도록 하였다.

EMD를 사용하면, 데이터를 주파수 영역으로 변환시켜 대상 주파수를 선정하고, 밴드패스 필터를 거쳐서 분석하던 기존의 방법과 달리, 시간 영역에서의 데이터를 고주파 성분부터 차례로 분리해 내므로 신호 속에 내제된 성분을 특별한 변환함수를 사용하지 않아도 알아낼 수 있고, 이 논문에서 제안한 방법으로 분석이 가능함을 확인하였다. 또한, 구조물로부터 얻은 출력 신호만으로 구한 감쇠비와 고유 진동수가 입력된 신호로 얻은 결과값과 거의 일치함을 보여, EMD가 구조물의 해석에 유용하게 적용될 수 있다는 가능성을 확인하였다. 이 결과를 통해 다수의 진동모드를 가진 구조물의 해석에 있어서 입력 값을 알 수 없거나, 입력 값을 측정하기 힘든 경우 EMD가 유용하게 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) Huang N. et al., 1998, "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis," Proceedings, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 454, No. 1971 pp. 903~995.
- (2) Per Gloersen, 2003, "Comparison of Interannual Intrinsic Modes in Hemispheric Sea Ice Covers and Other Geophysical Parameters.", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 5, pp. 1032~1074.
- (3) Huang N. E. Z. Shen, S. R. Long, 1999, "A New View of Nonlinear Water Waves : The Hilbert Spectrum", Annual Review of Fluid Mechanics Vol. 31, pp. 417~457.
- (4) Wei Huang, Z. Shen, N. E. Huang and Cheng Fung., 1998, "Engineering Analysis of Biological Variables: An Example of Blood Pressure over 1 Day.", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 95, No. 9 p. 4816~4821.
- (5) Quek, S. T., Tua, P. S. and Wang, Q., 2003, "Detecting Anomalies in Beams and Plate Based on the Hilbert-huang Transform of Real Signals," Smart Materials and Structures, Vol. 12, No. 3, pp. 447~460.

- (6) Chen, J. and Xu, Y. L., 2003, "Identification of Modal Damping Ratios of Structures with Closely Spaced Modal Frequencies". *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 14, No. 4, pp. 417~434.
- (7) Jann N. Yang, 2003, "System Identification of Linear Structures Based on Hilbert-huang Spectral Analysis. Part 1: Normal Modes." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* Vol. 32, pp. 1443~1467.
- (8) Jann N. Yang, 2003, "System identification of Linear Structures Based on Hilbert-huang Spectral Analysis. Part 2: Complex Modes." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* Vol. 32, pp. 1533~1554.
- (9) Gary G. Leisk, 2001, "Application of the Hilbert-huang Transform to Machine Tool Condition/health Monitoring." AIP Conference Proceedings Vol. 615 No. B pp. 1711~1718.
- (10) Dejie Yu, 2003, "Application of EMD Method and Hilbert Spectrum to the Fault Diagnosis of Roller Bearings." *Mechanical Systems and Signal Processing*, No. 2.
- (11) 김경호, 박윤식, 2002, "주파수 응답함수를 이용한 부분구조 합성에서 모드자름 오차 보정에 관한 수치적 연구" *한국소음진동공학회논문집*, 제 12 권, 제 4 호, pp. 302~309.
- (12) James, M. L., 1994, *Vibration of Mechanical and Structural Systems*, Harper Collins
- (13) Torsten Schlurmann, 2004, "Performance and Limitations of the Hilbert-huang Transformation (HHT) with an Application to Irregular Water Wave", *Ocean Engineering* 31, pp. 1783~1834.
- (14) LMS International, 1993, *Modal Testing and Analysis, CADA-X 3.5.D, user Manual*.