

## 장기간 상시계측을 통한 감쇠율 평가

### Damping Ratio Evaluation Using Long-Term Ambient Vibration

김 용 철\*  
Kim, Yong Chul

윤 성 원\*\*  
Yoon, Sung-Won

#### Abstract

The identification of damping ratios in buildings is a well-known problem and appears to be of important and crucial interest in the safety and serviceability design. When compared to an estimation of the stiffness, i.e. natural frequency, and mass, the damping ratio is the most difficult quantity to determine. Many previous studies have examined the characteristics of damping ratios from ambient vibration, but the measurement time is roughly within 2 hours. In this paper, characteristics of damping ratios and natural frequencies of 4 story RC building were investigated using long-term ambient vibration. Free vibrations were obtained using random decrement technique, and damping ratios were evaluated by the envelop function, continuous wavelet transform, and logarithmic decrement. It was found that although the natural frequencies show little variations with time, the damping ratios show some variations with time and the largest variations found in the damping ratios obtained from the continuous wavelet transform. The damping ratios from the envelop function showed the smallest mean and standard deviation. And the probability distribution of damping ratios seems to follow the logarithmic normal distribution.

**Keywords :** Long-term ambient vibration, Damping ratio, Envelop function, Continuous wavelet function, Logarithmic decrement

#### 1. 서론

감쇠율은 고유진동수와 함께 건물의 진동 특성을 결정하는 중요한 변수이다. 건물의 진동 특성 변화에 근거하여 건물의 안전성과 사용성을 평가할 때 감쇠율과 고유진동수, 경우에 따라서는 모드형상을 종합적으로 고려할 필요가 있지만, 그 중 감쇠율은 감쇠를 유발시키는 요인이 많기 때문에 정확하게 평가할 수 없다. 건물의 진동 특성을 파악할 경우, 상시진동데이터를 사용하는 경우가 많다. 상시진동데이터를 이용할 경우, 계측 시간은 대략 30분 전후로 3, 4회 계측을 반복하는 것이 일반적으로, 건물의 고유진동수에 대해서는 계측별 편차가 심하지 않지만, 감쇠율에 대해서는 편차가 크기 때문에 감쇠율을 정량적으로 그리고 정성적으로 정확히 분석

하기에는 어려운 점이 많다. 이론적으로 감쇠율을 평가할 수 있는 방법은 없기 때문에 실측 데이터에 의존할 수 밖에 없지만, 감쇠율은 진폭 의존성과 구조물의 종류, 그리고 지반의 영향 등에 의해 매우 복잡한 성향을 보인다.

실측 데이터로부터 감쇠율을 구하는 방법으로, 이용하는 데이터를 대상으로 분류하면 상시진동데이터와 풍응답데이터 그리고 지진응답데이터와 같이 자연 현상으로부터 발생하는 진동을 계측하는 방법과, 가진기를 이용한 가진과 인력가진 등 인공적으로 발생시킨 진동을 계측하는 방법이 있다. 또, 평가 방법으로는 진동수영역에서 정의된 함수(예를 들어, 스펙트럼)를 이용하여 평가하는 방법과 시간영역에서 정의된 함수(예를 들어, Random Decrement Technique(이하, RD법))를 이용하여 평가하는 방법이 있다. 기존 연구에서도 인력가진으로 구한 자유진동파형을 대상으로 하프파워법<sup>1)</sup>과 대수감소법<sup>2)</sup>에 의해 진동 특성을 평가하였고, 또 상시진동데이터를 대상으로 Frequency Domain Decomposition

\* 교신저자, 정회원, 동경공예대학교 건축학과 부교수, 공학박사  
Tokyo Polytechnic University  
Tel: +81-(0)46-242-9521 Fax: +81-(0)46-242-9521  
E-mail: kimyc@arch.t-kougei.ac.jp

\*\* 정회원, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사  
Seoul National University of Science and Technology

(FDD)과 Stochastic Subspace Identification(SSI)<sup>3)</sup>에 의해 건물의 고유진동수와 감쇠율을 평가하였다. 그러나 대부분의 기존 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 2시간 전후의 실측 데이터를 사용하고 있고, 장기간 계측된 데이터를 대상으로 한 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 4층 철근 콘크리트 건물을 대상으로 장기간 계측된 상시진동데이터를 이용하여 감쇠율과 고유진동수를 검토하였다. RD법을 사용하여 자유진동파형을 구한 후, 감쇠곡선의 포락선과 웨이브렛 변환, 그리고 대수감소법을 이용하여 감쇠율을 평가하였다.

## 2. RD법 및 감쇠율 산출 방법

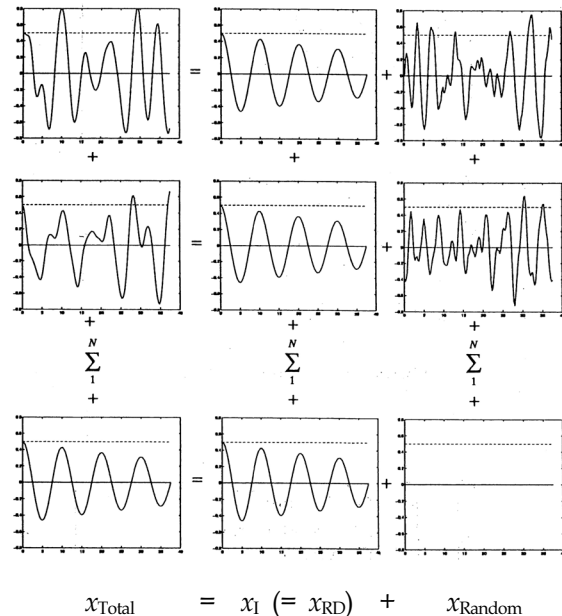
### 2.1 기본 원리

RD법은 감쇠율을 구할 경우 자주 사용되는 방법으로, 1960년대 말에 Cole에 의해 제안된 후<sup>4)</sup> 건축/토목 분야를 비롯해 매우 광범위한 분야에서 적용되고 있다. RD법의 기본 개념은 특정 초기값(표준편차나 그 배수)으로 정의된 샘플의 앙상블 평균(이하, RD파형)이 자기상관함수와 일치함을 이용한 것으로, 더욱이 건물의 응답이 정상 가우스과정이라면 RD파형은 자유진동파형과 일치하기 때문에, 자유진동실험과 동등한 결과를 얻을 수 있다.

불규칙 하중에 의한 구조물의 전체 응답  $x_{Total}$ 은 식 (1)과 같이 초기 조건(초기 변위나 초기 속도)에 의한 응답  $x_1$ 과 불규칙 하중에 의한 응답  $x_{Random}$ 으로 나누어 생각할 수 있다.

$$x_{Total} = x_1 + x_{Random} \approx x_1 (= x_{RD}) \quad (1)$$

일정한 초기 조건(초기 변위나 초기 속도)으로부터 구한 다수의 샘플을 앙상블 평균하면 불규칙 하중에 의한 응답  $x_{Random}$ 은 소멸되어( $\sum x_{Random} = 0$ ), 초기 조건에 의한 응답만 남게 된다. <Fig. 1>에 임의의 초기 변위로부터 구한 자유진동파형을 구하는 RD법의 기본 개념<sup>5)</sup>을 나타내었다.



<Fig. 1> Random decrement method<sup>5)</sup>

건물 옥상에서 계측한 상시진동데이터를 이용할 경우, 고유진동수를 중심으로 한 밴드패스 필터를 행함으로써 고유진동수 성분만을 대상으로 한 RD파형을 구할 수 있다.

### 2.2 RD법에 영향을 주는 인자

RD법에 의해 감쇠율을 평가할 때 영향을 주는 인자는 다음과 같다.

#### 1) 밴드패스 폭

일반적으로 밴드패스 폭이 넓으면 고유진동수 이외의 성분이 RD파형에 포함되기 때문에 감쇠율은 과대평가 되고, 폭이 좁으면 감쇠율을 과소평가가 된다.

#### 2) 감쇠율 평가에 사용된 사이클 수

건물 옥상에서 계측한 상시진동데이터의 경우, 정상성(Steady-state)을 유지한다고 할 수 있기 때문에 RD파형의 사이클 수를 10 정도까지 사용하여도 결과에는 큰 영향이 없으나, 정상성이 약하고 계측 시간이 짧은 데이터를 사용할 경우 5 사이클 전후부터 RD파형에 노이즈가 포함되어, 사이클 수가 많으면 감쇠율은 과대평가 되고, 적으면 감쇠율을 과소평가가 된다.

3) 초기 조건 설정 방법<sup>6)</sup>

초기 조건을 설정하는 방법으로 식 (2)와 같이 여러 가지가 있다. 특정 진폭 ( $x_T$ ) 이상의 피크값만을 이용함으로써 비선형시스템에도 적용 가능함과 동시에 진폭 의존성을 평가할 수 있다는 장점이 있다.

i) Positive level crossing

$$x_T = \{x_D = a\} \tag{2a}$$

ii) Positive points

$$x_T = \{a \leq x_D < b\} \tag{2b}$$

iii) Zero crossing with positive slope

$$x_T = \{x_D = 0, x_V > 0\} \tag{2c}$$

iv) Positive local extremum

$$x_T = \{a \leq x_D < b, x_V = 0\} \tag{2d}$$

식 (2a)~(2d)의 Positive는 Negative로 바꾸어 생각할 수 있고, Positive 조건으로 정의된 샘플과 Negative 조건으로 정의된 샘플을 동시에 사용함으로써 RD파형의 신뢰성을 높일 수도 있다.

RD법에서 중요한 것은 초기 조건에 사용될 값 (식 (2)의  $a$ 와  $b$ )을 어떻게 정의하는가 하는 것이다. 초기값을 작게 하여 양상불 평균의 샘플 수를 늘릴수록 깨끗한 RD파형을 구할 수 있지만, 노이즈가 완벽하게 제거되지 않기 때문에, 일정한 샘플 수를 확보할 수 있을 뿐만 아니라 노이즈도 제거될 수 있는 일정한 크기의 초기값을 사용하지 않으면 안 된다. 일반적으로  $a$ 는 표준편차 ( $\sigma_x$ )의 배수를,  $b$ 는  $\infty$ 를 사용한다.

본 연구에서는 식 (2a)를 이용하여 RD파형을 구하였다. 고유진동수의 약  $[0.7 \sim 1.15]f$ 에 대해 밴드 패스 필터를 행한 후, 최적화 개념에 의한 초기값<sup>7)</sup>  $a = \sqrt{2} \sigma_x$ 를 사용하여 RD파형을 구하였다. RD파형으로부터 감쇠율을 평가할 때 몇 번째 사이클까지 사용해야 하는가는 정확하게 정해지지 않았지만, 정상성이 유지된 상시진동데이터를 이용한다는 점을 감안하여 처음 10개 사이클(처음 10개의 피크값)에 대해 감쇠율을 구하였다. 이 때 양상불 평균을 위한 샘플 수는 모든 경우에 있어서 2,000개 이상이였다.

2.3 감쇠율 산출 방법

본 연구에서는 3가지 방법으로 감쇠율을 구하였다.

먼저, RD파형의 피크값에 대해 식 (3)으로 정의된 감쇠곡선의 포락선을 이용하여 감쇠율을 구하였다.

$$x(t) = e^{-\zeta \omega t} \tag{3}$$

여기서,  $\omega$ 와  $\zeta$ 는 고유진동수와 감쇠율로, 최소승법으로 RD파형의 피크값과 가장 유사한 회귀곡선을 구함으로써 감쇠율을 평가하였다.

두 번째 방법으로는 RD파형의 웨이브렛 변환을 이용하여 감쇠율을 평가하였다. 계측된 신호를 진동수축으로만 전개하여 시간에 대한 정보를 알 수 없는 푸리에 변환과는 달리, 웨이브렛 변환은 계측된 신호를 진동수별로 시간축으로 전개함으로써 특정 진동수의 발생 시점 및 지속 시간을 알 수 있다. 웨이브렛 변환은 기본이 되는 웨이브의 크기(Scaling, 진동수특성의 변화)를 변화시키거나 시간축상으로 이동(Translation, 시간특성의 변화)시킴으로써 시간에 따른 구조물의 진동수 특성을 분석할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 Morlet 웨이브(식 (4a), (4b))를 기본 웨이브로 사용하여, 식 (4c)와 같이 웨이브렛 변환을 이용하였다.

$$\psi(t) = \left( \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{t^2}{2}} \right) e^{im_0 t} \tag{4a}$$

$$s = \frac{\eta_0}{\omega} \tag{4b}$$

$$Wx(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt \tag{4c}$$

여기서,  $\tau$ 와  $s$ 는 Translation과 Scaling을 나타내는 변수이고,  $\psi^*$ 는  $\psi$ 의 켈레복소수이다. 웨이브렛 변환 결과는 복소수이기 때문에, 특정 시각에 대한 절대값을 진동수를 축으로 표현하면 일반적으로 사용되는 스펙트럼을 구할 수 있다. 구조물의 고유진동수를 알고 있다면 웨이브렛 변환을 통한 감쇠율의 평가는 매우 간단하다. 건물의 고유진동수에 해

당하는 진동수에 대해 특정 시각에 대한 웨이브렛 변환의 절대값( $|Wx(t_i, f)|$ )은 원래 신호의 특정 시각에 대한 진폭( $x(t_i)$ )에 비례하기 때문에 대수감쇠율에서 사용되는 식을 그대로 사용할 수 있다 (식 (5))<sup>8)</sup>. 즉,

$$x(t_i) = K|Wx(t_i, f)| \tag{5a}$$

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{|Wx(t_i, f)|}{|Wx(t_i + mT, f)|} \tag{5b}$$

$$\zeta = \frac{\delta^2}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \tag{5c}$$

여기서,  $x(t_i)$ 는 특정 시각  $t_i$ 에서 원래 신호의 값,  $K$ 는 비례상수,  $|Wx(t_i, f)|$ 는 건물의 고유진동수  $f$ 와 특정 시각  $t_i$ 에 해당하는 웨이브렛 변환의 절대값,  $m$ 은 임의의 정수,  $f$ 와  $T$ 은 건물의 고유진동수와 고유주기,  $\zeta$ 는 감쇠율이다.

마지막으로 대수감소법에 의한 감쇠율은 식 (6)을 이용하였다.

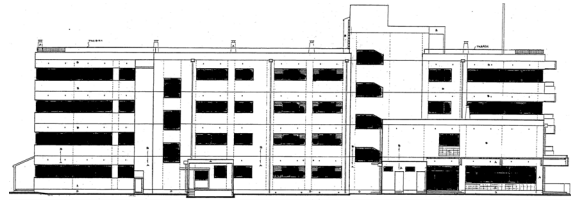
$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \ln \left( \frac{X_i}{X_{i+j}} \right) \tag{6}$$

여기서,  $j$ 는 사이클 수,  $X_i$ 와  $X_{i+j}$ 는  $t_i$ 와  $t_{i+j}$ 에서의 피크값이다.

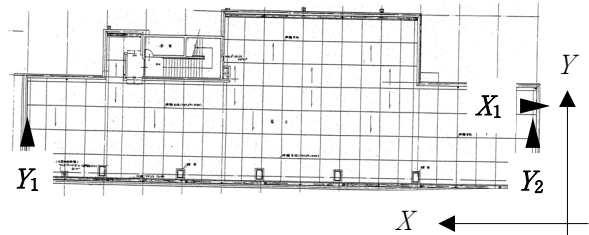
### 3. 계측 건물

상시진동은 지상 4층 철근 콘크리트 건물 옥상에서 계측하였다. 계측 건물의 입면 몇 옥상에서의 가속도계의 설치 위치를 <Fig. 2>에 나타내었다.

건물의 장변 방향을 X축, 단변 방향을 Y축으로 하여 X축 방향으로는 1개의 가속도계를, Y축으로는 2개의 가속도계를 설치하여, 건물의 비틀림 방향에 대한 건물의 진동 특성도 평가할 수 있도록 하였지만, 본 연구에서는 수평 방향만을 대상으로 하였다. 건물 옥상에 설치된 가속도계는 서보형 가속도계로, 기본 사양을 <Table 1>에 정리하였다.



(a) Elevation



(b) Roof floor

<Fig. 2> Target building and positions of accelerometer at roof

<Table 1> Specification of accelerometers

Model	Servo-accelerometer AS-301C1W5
Measurement frequency	~250Hz
Measurement range	±2000gal
Sensitivity	5mV/gal
Allowable maximum acceleration	30G (within 0.1s)
Mass	About 250g

계측은 매 시각 정시를 기준으로 10분 간 계측한 후 계측된 데이터를 1개의 파일로 저장되도록 설정하였다. 따라서 하루에 계측된 10분 데이터는 144 (24×6)개이고, 2017년 4월 1일부터 15일 간 계측된 데이터 총 2,160(144×15)개를 사용하여 건물의 고유진동수와 감쇠율을 평가하였다. 샘플링 주파수는 200Hz이고, 건물의 양 끝에서 계측된 가속도를 건물의 도심 위치의 가속도로 변환하였다.

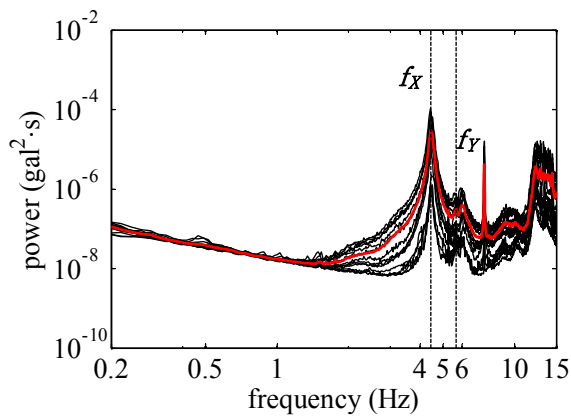
데이터 해석 방법은 다음과 같다. 먼저 계측된 데이터에 0.1~50Hz의 밴드패스 필터를 행한 후, 파워스펙트럼해석으로부터 각 방향의 고유진동수를 구하였다. 그 후 고유진동수를 중심으로 한 밴드패스 필터를 다시 행한 후 고유진동수 성분에 대한 시간이력데이터를 추출하였다. 여기에 앞에서 설명한 RD법을 적용하여 RD파형을 구한 후, 감쇠율을 평가하였다.

감쇠율은 RD파형의 처음 10개의 피크를 이용하여 감쇠곡선의 포물선과 가장 잘 일치하는 회귀곡선을 구함으로써 평가함과 동시에, 처음 10개의 피크에 해당하는 RD파형을 웨이브렛 변환한 후 감쇠율을 평가하였다. 그리고 대수감소법으로는 식 (6)의  $j$  를  $j = 1$ 에서  $j = 9$ 까지 변화시켜 총 45개의 평균으로 감쇠율을 구하여, 평가 방법에 따른 감쇠율의 변화를 검토하였다.

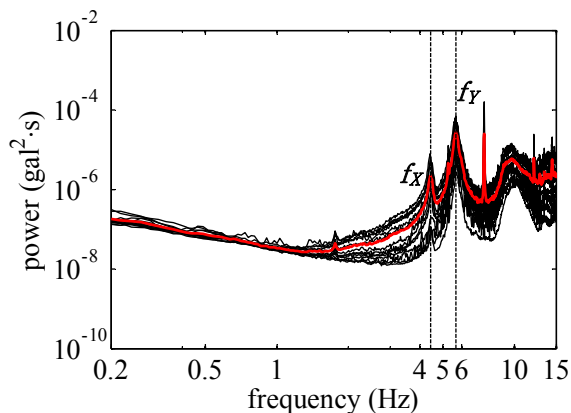
## 4. 해석 결과 및 고찰

### 4.1 고유진동수

<Fig. 3>에 옥상평면 중심에 대한 가속도의 파워스펙트럼을 나타내었다.



(a) X-axis



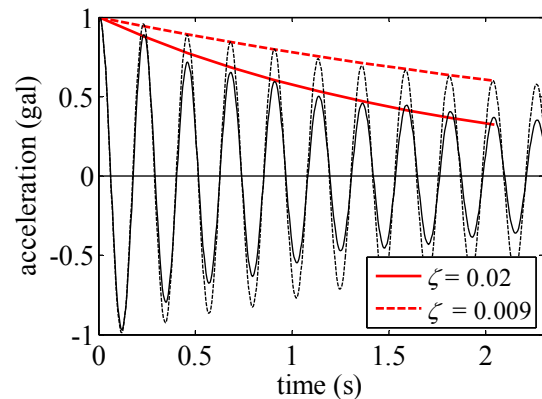
(b) Y-axis

<Fig. 3> Power spectra of accelerometers at roof center

10분 계측데이터에 대한 파워스펙트럼을 검은색 선으로, 그리고 모든 파워스펙트럼에 대한 평균값을 빨간색 선으로 나타내었다. 각 방향의 고유진동수에 해당하는 진동수에서 명확한 피크가 나타났고, X방향의 고유진동수는  $f_x = 4.4\text{Hz}$ , Y방향의 고유진동수는  $f_y = 5.7\text{Hz}$ 임을 알 수 있다. 기존 연구에서와 같이 고유진동수는 계측별 편차가 작고, 모든 계측데이터에서 동일한 진동수에 피크가 나타났다.

### 4.2 감쇠율

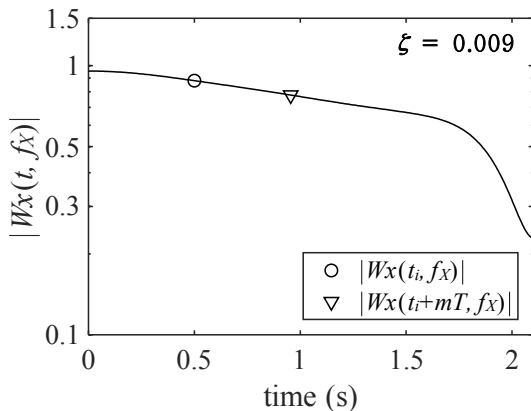
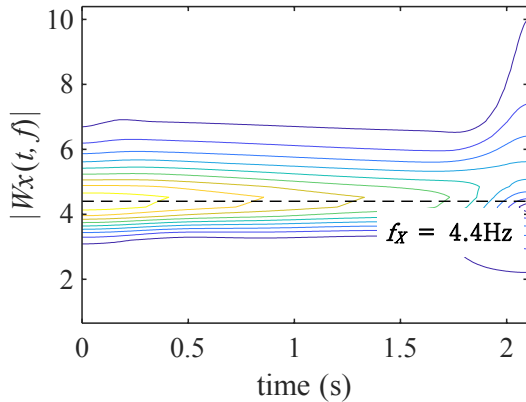
<Fig. 4>에 10분 계측데이터에 대한 RD파형과 RD파형의 피크값을 이용하여 구한 감쇠곡선의 포락선의 예를 나타내었다. 식 (3)의 감쇠율은 최소자승법으로 RD파형의 피크값과 가장 오차가 작은 값으로 구하였고, 모든 경우에 있어서 피크값과 회귀곡선으로부터 구한 값의 상관계수는 95% 이상이었다. <Fig. 5>에 <Fig. 4>의 감쇠율이 0.9%인 경우의 웨이브렛 변환에 의한 절대값의 윤곽선(Contour)과  $f_x = 4.4\text{Hz}$ 에 있어서의 절대값의 변화를 나타내었다( $m = 2$ ). 고유진동수에 대한 절대값은 0.3초부터 1.3초 사이에서는 일정한 비율로 감소하였기 때문에,  $t_i$ 와  $t_i + mT$ 를 0.3초부터 1.3초 사이에서 설정하면 감쇠율에는 거의 차이가 없음을 확인하였다.



<Fig. 4> Example of RD signal for two different damping ratios (X-axis)

<Fig. 6>에 15일 간 계측된 데이터를 이용하여 3가지 방법으로 구한 감쇠율의 변화를 나타내었다(X축). 계측일에 따라 약간의 변동은 있지만, 감쇠곡선의 포락선(Fig. 6 (a))으로 구한 감쇠율의 전체

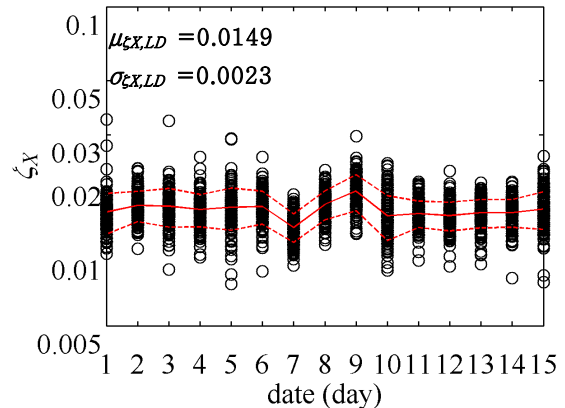
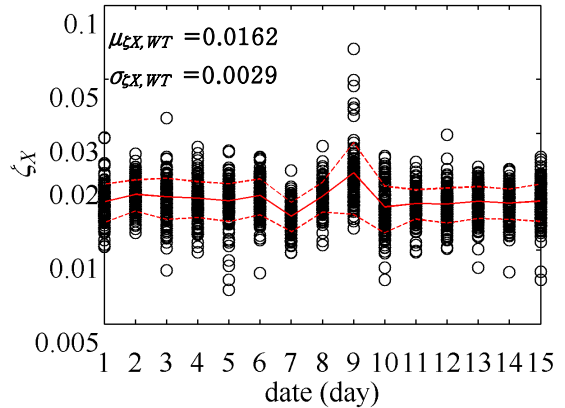
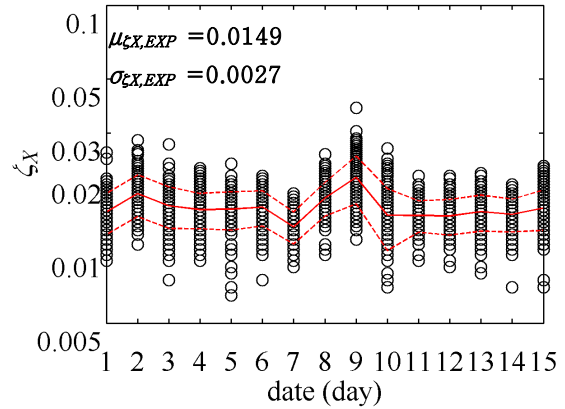
평균은 약 1.5%, 웨이브렛 변환(Fig. 6 (b))으로 구한 감쇠율의 전체 평균은 약 1.6%, 대수감소법(Fig. 6 (c))으로 구한 감쇠율의 전체 평균은 약 1.5%로, 대체로 일정한 값을 보였다. 전체 감쇠율에 대한 표준편차는 웨이브렛 변환으로 구한 경우가 제일 컸고, 대수감소법으로 구한 경우가 제일 작았다.



<Fig. 5> Example of absolute values from wavelet transform (X-axis)

<Fig. 7>에 Y축에 대한 감쇠율의 변화를 나타내었다. 감쇠율의 평균값은 2.2%에서 2.6% 사이로, X축의 감쇠율보다 다소 큰 값을 보였고, 감쇠율의 평가 방법에 의한 차이도 X축보다 컸다. X축과 마찬가지로 웨이브렛 변환으로 구한 감쇠율이 제일 컸지만, 대수감소법으로 구한 감쇠율은 웨이브렛 변환에 의한 값에 가까운 값을 보였다. 감쇠율의 표준편차에 있어서는 대수감소법으로 구한 감쇠율이 제일 컸고, 감쇠곡선의 포락선으로 구한 감쇠율의 표준편

차가 제일 작음을 알 수 있었다.

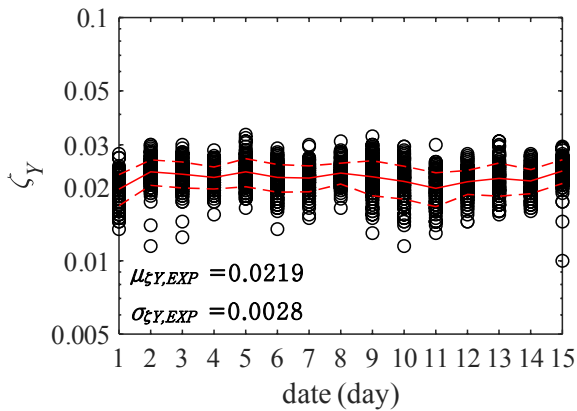


<Fig. 6> Comparison of damping ratios from various methods (X-axis)

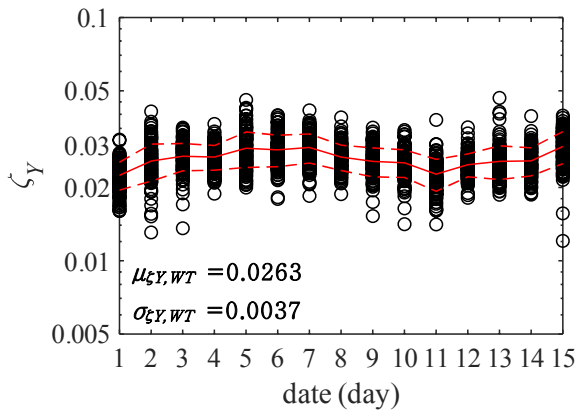
<Fig. 6> Comparison of damping ratios from various methods (X-axis)

<Fig. 6>과 <Fig. 7>로부터 감쇠곡선의 포락선으로 구한 감쇠율이 웨이브렛 변환이나 대수감소법으로 구한 감쇠율보다 다소 작게 평가됨을 알 수 있었

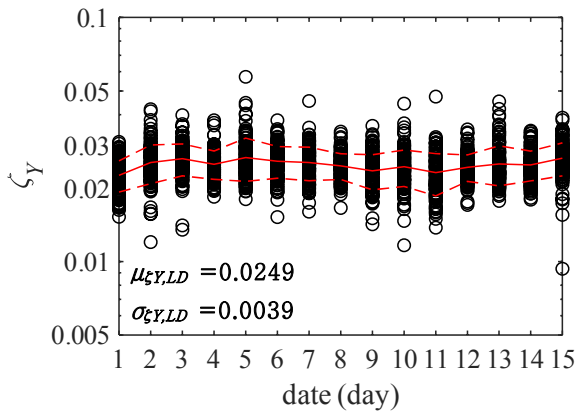
고, 계측별 변동도 작음을 알 수 있었다.



(a) Damping ratio from envelop function



(b) Damping ratio from wavelet transform

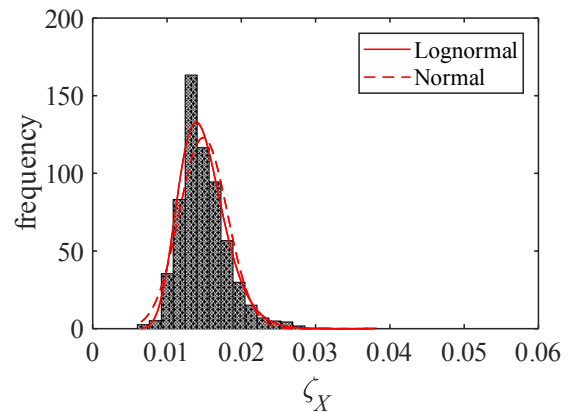


(c) Damping ratio from logarithmic decrement

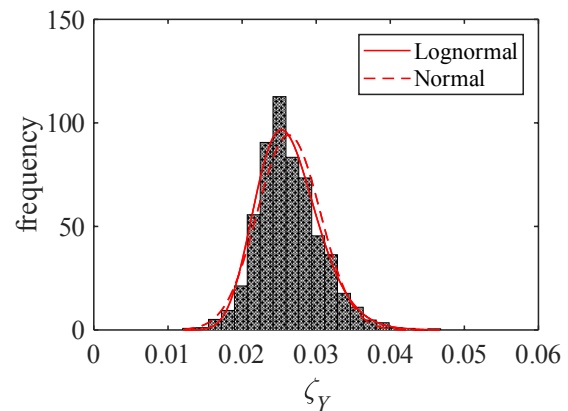
<Fig. 7> Comparison of damping ratios from various methods (Y-axis)

<Fig. 8>에 감쇠율의 확률밀도함수를 나타내었다. X축은 감쇠곡선의 포락선으로부터 구한 감쇠율을, Y축은 웨이브렛 변환으로부터 구한 감쇠율을 사용

하였다. <Fig. 8>로부터 알 수 있듯이 감쇠율은 정규분포를 따르기보다는 로그값이 정규분포를 따르는 대수정규분포에 가까운 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 세 방법으로부터 구한 감쇠율에 공통으로 보이는 경향으로, 상시계측으로 구한 감쇠율은 대수정규분포를 따름을 알 수 있었다.



(a) X-axis  
(Damping ratios from envelop function,  $\zeta_{X,EXP}$ )



(b) Y-axis  
(Damping ratios from wavelet transform,  $\zeta_{Y,WT}$ )

<Fig. 8> Probability density function of damping ratios

## 5. 결론

4층 철근 콘크리트 건물을 대상으로 장기간 계측된 상시진동데이터를 이용하여 감쇠율과 고유진동수를 검토하였다.

- 1) 각 계측별 고유진동수의 변화는 거의 없고, 본

연구에서 대상으로 한 건물의 경우, X축의 고유진동수는  $f_x = 4.4\text{Hz}$ , Y축의 고유진동수는  $f_y = 5.7\text{Hz}$ 였다.

2) 감쇠곡선의 포락선으로 구한 감쇠율의 평균값과 표준편차가 웨이브렛 변환과 대수감소법으로 구한 감쇠율보다 작음을 알 수 있었다. 이때, RD파형의 피크값과 회귀곡선으로부터 구한 값의 상관계수는 95% 이상이었다.

3) 웨이브렛 변환으로 구한 감쇠율이 다른 두 방법으로 구한 감쇠율보다 큰 값을 보임을 알 수 있었다.

4) 감쇠율의 확률밀도분포로부터, 상시진동으로 구한 감쇠율은 대수정규분포를 따름을 보임을 알 수 있었다.

5) X축의 감쇠율은 1.5~1.6%, Y축의 감쇠율은 2.2~2.6%로, 일반적으로 철근 콘크리트 건물의 설계에 사용되는 감쇠율보다 다소 작게 평가됨을 알 수 있었다. 본 연구에서는 상시진동을 대상으로 감쇠율을 평가하였으나, 감쇠율의 경우 진폭과 함께 감쇠율도 커지는 진폭 의존성도 고려해서 평가해야 할 필요가 있기 때문에 향후 지진 발생으로 인한 데이터를 사용하여 진폭 의존성 및 비선형성 등을 좀 더 세밀하게 검토해야 할 필요가 있을 것으로 고려된다.

### 감사의 글

본 연구는 동경공예대학교 2015년도 사립대학 전략적 연구기초형성 지원사업 - 차세대형 환경방재도시의 구축을 향한 기초연구, 카나가와현 아쓰기시를 모델케이스 - 의 연구 프로젝트로부터 지원을 받았다.

### References

1. Yoon, S. W., "Evaluation of damping ratio of low-rise buildings by alternating synchronized human excitation", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.19, No.21, pp.113~120, 2003

2. Yoon, S. W., "Damping ratios of reinforced concrete apartment for serviceability design of wind", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.20, No.8, pp.27~34, 2004

3. Park, S. A., Min, K. W., & Choi, J. S., "Ambient vibration analysis of Heunginjimun", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.27, No.5, pp.19~26, 2011

4. Cole, H. A., "On-the-line analysis of random vibrations", AIAA Paper No.68-288, 1968.

5. Kareem, A., & Gurley, K., "Damping in structures : Its evaluation and treatment of uncertainty", IWEF Meeting on Structural Damping, pp.23~49, 1995.

6. Kim, Y. C., "Aerodynamic damping ratio of super-tall buildings", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.30, No.8, pp.29~36, 2014

7. Rodrigues, J., & Brincker, R., "Application of the random development technique in operational modal analysis", Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, pp.191~200, 2005.

8. Nguyen, P. D., "Damping identification in multi-degree-of-freedom systems using the continuous wavelet transform", Vietnam Journal of Mechanics, Vol.27, No.1, pp.41~50, 2005

- Received : November 30, 2017
- Revised : December 13, 2017
- Accepted : December 13, 2017