

상시진동의 Stationarity와 동적특성의 평가

Stationarity of Ambient Vibration and the Evaluation of Dynamic Properties.



윤성원
Yoon, Sung-Won

1. 서론

상시진동 데이터를 계측할 경우에는 교통진동, 기계진동, 바람 등의 외부 노이즈가 입력데이터에 혼합되어 장기간의 양질의 데이터를 얻기 힘든 경우가 있다. 이 경우에 데이터의 Stationarity를 검토하여 계측된 데이터의 질을 평가할 수 있다. 이를 위하여 여기서는 reverse arrangement test의 방법을 간단히 다루고자 한다.

또한 감쇠율의 평가에는 주파수영역과 시간영역에서의 해석이 있다. reverse arrangement test를 거친 상시진동 데이터를 주파수 영역은 하프파워법(Half Power Banded Method)으로 예로 들어 설명하였다. 시간영역에 대해서는 RD(Random Decrement)법에서 구한 자유진동파형을 대수감소법과 Hilbert Transform의 두가지 방법을 통한 진동특성을 소개하였다. 예제 해석에 사용한 대상건물은 16층의 국내 RC조 아파트를 선정하였다. 이 기사는 2006년 노틀담대 토목공학과 보고서인 "Analysis of korean reinforced concrete building data"의 일부분을 발췌 요약한 것이다.

2. Stationarity의 개요

상시진동 데이터의 시계열데이터는 reverse arrangement test (Bendat and Piersol 1986)에 의하여 Stationarity를 검토할 수 있다. 즉, 랜덤변수 x 의 시행에 대하여 변수 A 가 $i < j$ 의 조건에서 $x_i > x_j$ 를 만족한다고 하자. 만일 $x_i > x_j$, $h_{ij}=1$, $A_i = \sum h_{ij}$ 라 하면 reverse arrangements의 전체 횟수 $A = \sum A_i$ 이다. 예를 들면 $x_1=5$, $x_2=3$, $x_3=8$, $x_4=9$ 라 할 때 $A_1=2$ 이다. 왜냐하면 x_3 와 $x_4 > x_1$ 이기 때문이다. 같은 방법으로 x_3 과 $x_4 > x_2$ 이므로 $A_2=2$ 이고, $x_4 > x_3$ 이기 때문에 $A_3=1$ 이다. 따라서 전체 $A=5$ 이다. 이 A 값은 $[A_4; 1-\alpha/2 < A < A_4; \alpha/2]$ 조건을 만족하는 영역에서 산정하게 되며, α 는 level of significance이고 4는 랜덤시행의 횟수이다. 여기서는 reverse arrangements는 100 points에 대하여 실시하였고, level of significance는 0.05이므로 $\alpha/2$ 는 0.025이다. 그러므로 reverse arrangements의 수는 2145과 2804 사이이어야 한다

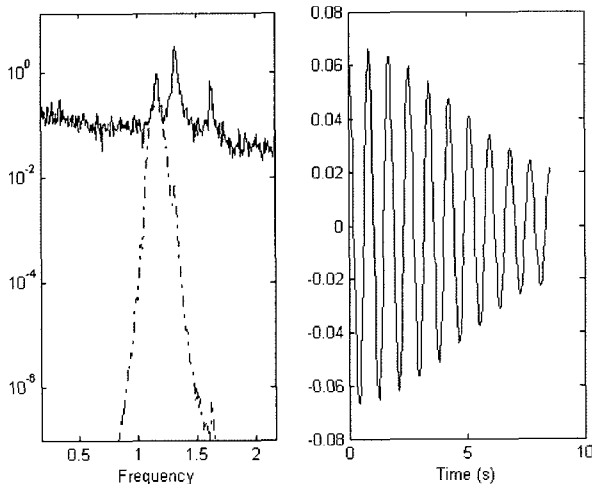
3. 진동수와 감쇠율의 평가

진동수와 감쇠율을 하프파워법과 RD법으로 산정

* 정희원, 서울산업대 건축학부 부교수

하였다. 하프파워법은 각 센서의 스펙트럼 피크에서 진동수와 감쇠율을 평가하였다. 감쇠율과 진동수 값이 4개의 센서에서 측정되면 이 값들의 변동계수(Coefficient of Variation)를 고려하면서 평균값을 사용하였다. 스펙트럼의 피크의 크기를 기재하여 각 센서의 기여도를 산정하는데 도움이 되도록 하였다.

RD법(random decrement technique)은 이 방법을 적용하기 전에 원하는 모드만을 필터링을 통하여 추출하였다(<그림 1>). 그리고 나서 부분평균 트리거(local averaging trigger)기법을 적용하였다. 부분평균 트리거 기법은 Kijewski-Correa(2003)에 의하여 처음으로 사용되었고, 선택된 트리거에 RD법이 쉽게 반응할 수 있도록 하였다. 이 방법은 개요는 local extrema trigger level을 설정하고 트리거는 시계열파형의 표준편차 σ 를 이용하여 $[0.85, 0.9, 1, 1.1, 1.15]\sigma$ 의 다섯가지 트리거를 사용하였다. 이 다섯가지 트리거 조건에 대하여 감쇠율과 진동수를 산정하였고 평균값을 사용하였다. 이때에 주의해야 할 사항은 변동계수가 너무 큰 데이터는 신뢰성을 감안하여 제거해야 한다. <표 1>은 국내 건물 16층의 콘크리트 벽식 아파트에 대하여 적용한 결과의 예이다. 이 때 주목해야 할 사항은 각 트리거 레벨의 감쇠율이 각각 다르다는 사실이다. 만일 1.0σ 의 트리거를 사용하면 Hilbert Transform에 의한 감쇠율은 1.4%이고 평균값은 1.3%이다. 따라서 평균값을 사용하면 트리거 조건에 따른 민감도를 다소 완화할 수 있다. 여기서 얻어진 평균 고유진동수와 감쇠율은 최종적으로 4개의



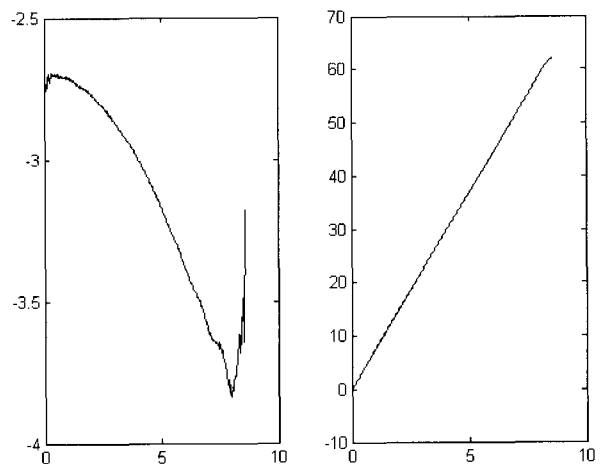
<그림 1> 모드의 필터링과 자유진동파형의 결과

<표 1> RD법의 부분평균을 이용한 해석 결과

Trigger	blocks	ζ_{HT}	ζ_{LD}	$f_n_{HT}(\text{Hz})$	$f_n_{LD}(\text{Hz})$
1.5σ	166	1.0%	0.8%	1.17	1.16
1.1σ	144	1.4%	1.1%	1.17	1.16
σ	108	1.4%	1.1%	1.17	1.16
0.9σ	116	1.5%	1.3%	1.17	1.16
0.85σ	94	1.1%	0.9%	1.18	1.18
Average:	126	1.3%	1.1%	1.17	1.17

센서를 평균하여 건물 전체의 동적특성으로 사용하였다.

RD법에서 자유진동파형에서 동적특성을 구하는 방법은 여러 가지가 있다. 이 중에서 Hilbert Transform (HT) (<그림 2>) 에서 구한 파형을 이용하여 진동수는 위상각의 선형 fit에서 구할 수 있고, 감쇠율은 amplitude 파형의 자연로그의 선형 fit에서 구할 수 있다(Kijewski and Kareem 2003). <그림 2>의 RD법의 편차를 감안하고, Hilbert Transform 의 end effects를 고려하여 1~4개 사이클의 파형만을 사용하였다. 이 방법은 대수감소법(LD) 보다 변동계수가 작고 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있다. 이 대수감소법 역시 자유진동 파형의 1~4 사이클에서 산정하였다.



<그림 2> Hilbert Transform의 Magnitude (Left) 와 위상각 (Right)

4. 예제 해석

4.1 Stationarity의 검토

16층 RC조 아파트에 대하여 검토한 결과 96%의

<표 2> Stationarity 검토 예

RC12	sen 1	sen 2	sen 3	sen 4	sen 5
block size	100	100	100	100	
α	0.05	0.05	0.05	0.05	
number of blocks	471	471	471	471	
number of stationary block	428	443	467	471	452
Percent stationary	91%	94%	99%	100%	96%

stationarity를 보이고 있으며 상세한 결과는 <표 2>와 같다. 4개소의 센서에 대하여 91%~100%의 stationary를 보이며 평균 96%의 stationarity이다.

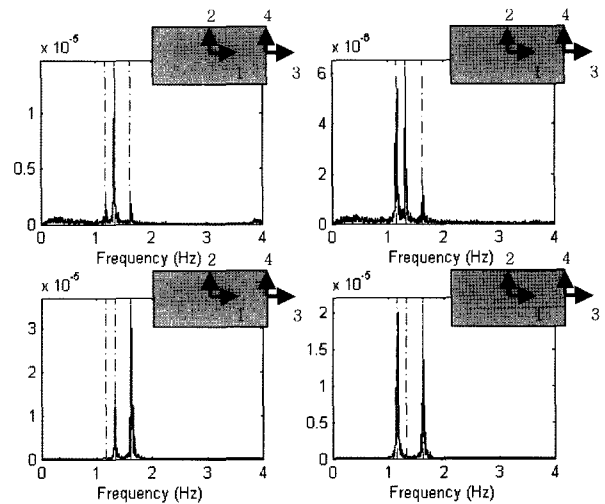
4.2 동적특성의 평가

4.2.1 진동계측

상시진동계측을 실시하였고, 서보가속도계의 측정 범위는 아파트건물의 진폭 범위가 $0.01\sim 0.3\text{ mm/s}^2$ 영역에 있기 때문에 최대측정범위를 0.1g 로 설정하였다. 센서의 위치는 옥상 정 중앙에 장변(센서 1)과 단변방향(센서 2)으로 각각 1개씩 설치하였고, 단부에도 장변(센서 3)과 단변방향(센서4)으로 한 개씩 센서를 설치하여 총 4채널로 동시계측을 실시하였다. 샘플링간격은 50Hz 로 하였고, LPF의 차단진동수는 10Hz 로 선정하였다. <사진 1>은 진동계측 장면이다 (Yoon S. W. et al 2003, 2004).

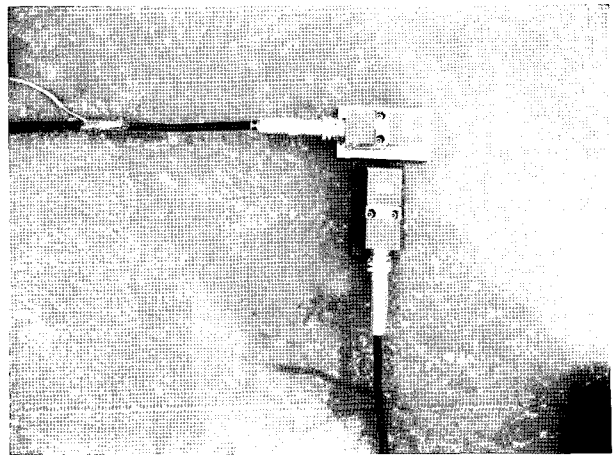
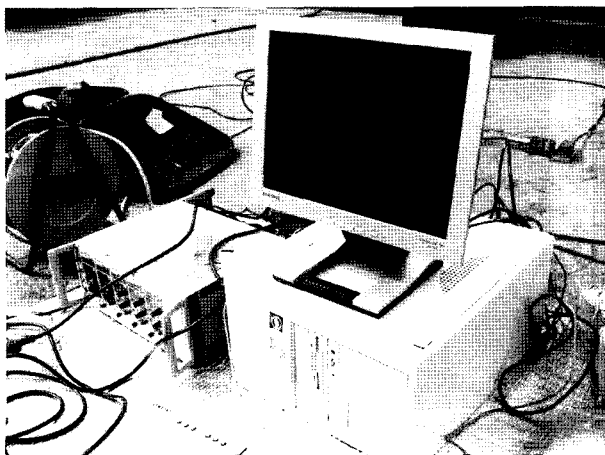
4.2.2 동적특성

건물의 중앙과 단부에서 동시에 계측을 실시하여, 장변, 단변, 비틀림의 동적특성을 해석하였다. <그림 3>과 같이 하프파워법은 센서1, 센서 2, 센서 3에서 장변의 고유진동수 1.33Hz 의 피크를 확인하였다. 단변의 고유진동수는 센서 1, 2, 4에서 1.17Hz 를 확인하였고, 비틀림진동수도 모든 센서에서 1.63Hz 에서 피크를 확인하였다. 또한 감쇠율은 <표 3>과 같이 장변, 단변, 비틀림 감쇠율의 평균치로서 각각 0.6% , 0.7% , 0.6% 이다. 감쇠율의 산정시에는 데이터 양 등을 고려하여 앙상블의 데이터 수를 8192로 하였고, 20회 평균스펙트럼을 이용하였다.



<그림 3> 상시진동 파형의 파워스펙트럼

(센서위치: 1 2
3 4)



<사진 1> 진동계측장비 설치현황

<표 3> 하프파워법에 의한 동적특성

RC12	sen 1	sen 2	sen 3	sen 4	avg	CoV
long fn	1.33	1.33	1.33		1.33	0.00%
long ζ	0.6%	0.6%	0.6%		0.6%	0.00%
peak	1.42E-05	6.22E-06	1.74E-05			
short fn	1.17	1.17		1.17	1.17	0.00%
short ζ	0.7%	1.3%		0.6%	0.7%	14.03%
peak	2.54E-06	5.39E-06		2.01E-06		
torsional fn	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	0.00%
torsional ζ	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	2.96%
peak	1.94E-06	1.85E-06	3.55E-05	2.12E-06		
N _{FFT}	8192	8192	8192	8192		

<표 4> RD법에 의한 동적특성

RC12					
Sensor 1	blocks	ζ_{HT}	ζ_{LD}	$f_n_{HT}(Hz)$	$f_n_{LD}(Hz)$
short	126	1.3%	1.1%	1.17	1.17
long	143	0.9%	0.6%	1.33	1.34
torsional	181	0.4%	0.3%	1.63	1.62
Sensor 2	blocks	ζ_{HT}	ζ_{LD}	$f_n_{HT}(Hz)$	$f_n_{LD}(Hz)$
short	126	0.9%	0.7%	1.17	1.16
long	130	0.9%	0.7%	1.33	1.34
torsional	167	0.5%	0.4%	1.63	1.62
Sensor 3	blocks	ζ_{HT}	ζ_{LD}	$f_n_{HT}(Hz)$	$f_n_{LD}(Hz)$
short	120	1.2%	0.9%	1.17	1.16
long	132	0.8%	0.6%	1.33	1.33
torsional	166	0.4%	0.3%	1.64	1.63
Sensor 4	blocks	ζ_{HT}	ζ_{LD}	$f_n_{HT}(Hz)$	$f_n_{LD}(Hz)$
short	102	1.1%	0.8%	1.17	1.17
long					
torsional	172	0.5%	0.4%	1.64	1.63
average	blocks	ζ_{HT}	ζ_{LD}	$f_n_{HT}(Hz)$	$f_n_{LD}(Hz)$
short	119	1.1%	0.9%	1.17	1.16
CoV	9.68%	13.07%	17.12%	0.20%	0.14%
long	135	0.9%	0.6%	1.33%	1.34
CoV	5.24%	5.41%	5.62%	0.34%	0.61%
torsional	172	0.5%	0.3%	1.63	1.63
CoV	4.07%	14.06%	18.24%	0.13%	0.49%

Hilbert Transform을 이용하여 얻어진 자유진동 파형에서 구한 고유진동수는 <표 4>와 같이 장변, 단변, 비틀림 각각 1.33hz, 1.17Hz, 1.63Hz로서 대수 감소법의 경우와 거의 같은 값을 보이고 있다. 반면에 감쇠율의 경우는 Hilbert Transform과 대수감소법(LD)가 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. Hilbert Transform에서는 장변, 단변, 비틀림이 각각 0.9%, 1.1%, 0.5%이며, 대수감소법의 경우는 0.6%, 0.9%,

0.3%를 보이고 있다.

5. 결 론

고유진동수의 경우는 주파수영역(하프파워법)이나 시간영역(RD법)의 어느 방법을 사용해도 거의 비슷한 값을 보임을 알 수 있다. 그러나 감쇠율의 경우는 해석방법에 따라 큰 차이가 있다. 특히 RD

법에서 얻은 자유진동과형에서 감쇠율 평가시에는 Hilbert Transform에 의한 방법이 대수감소법에 의한 결과보다 변동계수가 다소 작아 신뢰도가 높은 방법으로 사료된다. 또한 양질의 동적특성을 얻기 위해서는 계측된 상시진동 데이터의 Stationarity를 필히 해야 함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Bendat, J and Piersol, A. (2000) Random Data Analysis and Measurement Procedures. John Wiley & Sons, Inc, New York, NY.
2. Erwin S., Kijewski-correa T., S. W. Yoon, (2006), "Analysis of korean reinforced concrete building data", Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame. Report, Nov.
3. Kijewski, T. and Kareem, A. (2003), "Wavelet Transforms for System Identification: Considerations for Civil Engineering Applications," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 18: 341-357.
4. Kijewski-Correa. T. (2003) Full-Scale Measurements and System Identification: A TimeFrequency Perspective, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame.
5. Yoon, S.-W., Ju, Y.-K. and Kim, S.-B. (2003) "Vibration Measurements of Tall Buildings in Korea," Proceedings of 11th International Conf. on Wind Engineering, Lubbock, TX, 2-5 June.
6. Yoon, S-W. and Ju, Y.-K. (2004) "Dynamic Properties of Tall Buildings in Korea," Council on Tall Buildings and Urban Habitat Conf., Seoul, Korea, 11-13 October.