

초고층건축물 풍진동 모니터링 기술

Wind Induced Vibration Monitoring for High-rise Buildings

최 선 영* · 조 지 성** · 이 중 인*** · 김 현 배**** · 김 홍 진***** · 박 제 우***** · 유 은 중*****
Choi, Sun-Young · Jo, Ji-Seong · Lee, Jong-In · Kim, Hyun-Bae · Kim, Hong-Jin · Park, Je-Woo, Yu, Eun-Jong

요 약

본 논문에서는 실제 건설중인 초고층건축물을 대상으로 상시 풍하중을 이용한 풍진동 모니터링을 통해 고유주기와 감쇠비를 예측하고 이를 설계단계에서의 구조해석 및 가정에 의한 고유주기 및 감쇠비와 비교하였다. 이를 위해 시공중 풍진동계측을 실시하여 고유주기와 감쇠비를 측정하고, 시공단계를 고려한 구조해석모델을 통해 고유주기와 감쇠비가 유사하도록 모델을 수정한 후 이를 바탕으로 완공단계에서의 구조해석모델을 재구성하였다. 이 완공단계에서의 구조해석모델을 바탕으로 완공후의 고유주기 및 감쇠비를 예측하고 이를 설계단계에서의 값과 비교하였다. 향후 이러한 실계측 및 분석을 충분히 축적된다면 초고층설계시의 보수적인 가정사항들을 개선시키고, 풍동실험에 의한 풍진동 산정시의 정확성을 크게 향상시킬 것으로 기대된다.

keywords : wind-induced vibration, vibration monitoring, 고유주기 및 감쇠비 측정

1. 서 론

최근 들어 국내·외에서 초고층건축물의 수가 증가하고 있다. 이러한 초고층건축물의 구조적 성능은 여러 입주자와 이용자에게 큰 영향을 미치나, 설계는 현재까지 주로 구조해석과 축소된 모델에 의존하여 이루어지고 있다. 특히, 구조해석 소프트웨어와 풍동실험기술이 급속히 발전하고 있으나, 이들에 의한 정확성과 유효성은 실제의 성능을 바탕으로 개선할 필요가 있다. 한편 초고층건축물 실측모델에 의한 현실적으로 불가능하므로 실제 초고층건축물의 성능을 모니터링하여 현재의 설계 관행과 해석모델에 의한 접근방법을 검증하고 개선하는 것이 가장 현실적인 방법이라 할 수 있다(Kareem e al, 2006). 이러한 실제 건축물을 사용한 모니터링에 있어 가장 중요한 계측대상중의 하나는 풍진동에 영향을 미치는 고유주기 및 감쇠비이며, 이를 계측하기 위한 강제가진은 현실적으로 불가능하므로 상시의 풍하중에 의한 진동을 계측하여 활용하는 방법이 현실적이다.

2. 상시 풍진동을 이용한 시스템 식별기법

- * 정희원 · 포스코건설 기술연구소 사원 sunyoung@poscoenc.com
- ** 정희원 · 포스코건설 기술연구소 차장 meshless@poscoenc.com
- *** 포스코건설 기술연구소 부장 jilee@poscoenc.com
- **** 포스코건설 기술연구소 소장 kimhb@poscoenc.com
- ***** 정희원 · 경북대학교 건축공학과 교수 hjk@knu.ac.kr
- ***** 경북대학교 건축공학과 석사과정
- ***** 한양대학교 건축공학부 교수 eunjongyu@hanyang.ac.kr

시스템 식별(System Identification)기법이란 구조물에서 계측된 입력과 출력치의 관계를 수학적 모델(parametric model) 또는 스펙트럼 해석을 통해 구조물의 동특성을 파악하는 기법을 의미한다. 동특성은 동적거동에 영향을 끼치는 구조물의 고유한 특성으로서 고유진동수, 감쇠비, 모드형상 등이 포함된다. 동특성은 구조물이 가지는 강성, 질량, 감쇠특성의 함수로써 동특성이 다르면 동일한 외부입력에 의해 나타나는 동적거동이 달라진다. 즉, 고유진동수와 유사한 주파수 성분을 가지는 외부입력이 가해질 경우 동적거동은 크게 증폭이 일어나며 그 증폭비율도 그 모드의 감쇠비에 따라 달라진다. 따라서 개념적으로 볼 때 시스템 식별기법은 구조물에 가해지는 입력과 출력의 비율로부터 구조물의 각 모드별 증폭비율을 분석하고 이로부터 고유진동수의 위치 및 감쇠비, 모드형상을 추출하는 기법이다(그림 1).

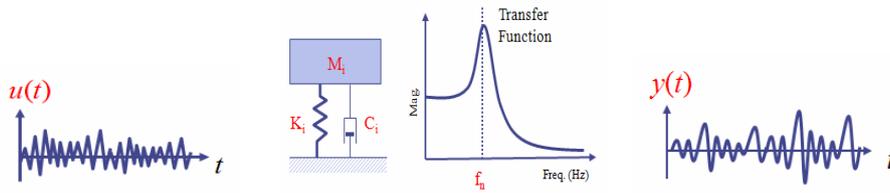


그림 1. 시스템 식별의 개념도

시스템식별기법은 크게 시간영역기법과 주파수영역기법으로 구분할 수 있다. 기본적인 시스템 식별은 먼저 응답함수를 추정하고 응답함수로부터 모달 파라미터를 추출하는 두 단계의 과정으로 이루어진다. 또한 구조물에 가해지는 입력(외력)과 출력(반응치) 모두를 알 수 있을 때(즉 계측 가능 할 때)를 대상으로 하는 시스템 식별기법을 Input-Output System Identification이라고 하고, 자연 진동을 받는 구조물과 같이 입력치의 계측이 불가능할 때의 시스템 식별기법을 Output-only System Identification 이라고 한다. Output-only System Identification에서는 입력과 출력의 주파수별 비율 즉, 응답함수를 정확히 구할 수 없으므로 외력을 백색잡음이라고 가정하고 동특성을 분석한다. 이러한 시스템식별 기법을 개략적으로 정리하면 그림 2와 같다. 본 논문에서는 여러 종류의 시스템식별 기법중 가장 신뢰성이 높고 정확한 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려진 확률론적 부분 공간 시스템 식별법 (Stochastic Subspace system identification)을 사용하였다.

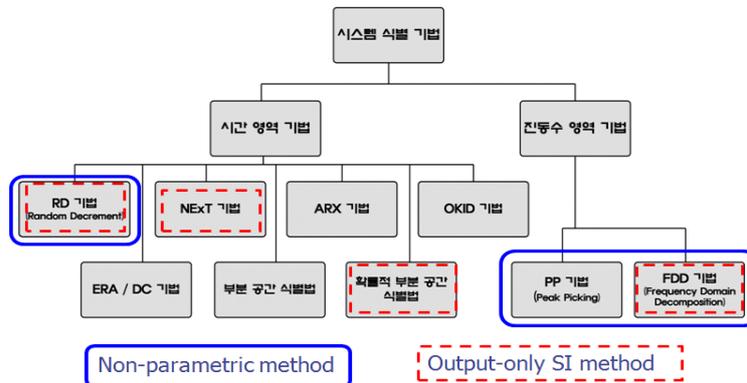


그림 2. 시스템 식별기법의 분류

3. 확률론적 부분공간 시스템 식별법 (Stochastic Subspace system identification)

확률론적 부공간 규명법(SSI)은 응답값의 상관행렬을 요소로 가지는 블록 행렬행렬을 SVD함으로써 모드계수를 추정하는 방법으로, 행렬 행렬을 구성하는 방법에 따라 SSI-BR (Balanced Realization)과 SSI-CVA (Canonical Variate Analysis)로 나눌 수 있다. 우선 확률론적 이산상태방정식은 다음의 식 (1)과 같이 하중을 랜덤정규분포하중으로 고려한 경우를 표현한 방정식이며, 이로부터 상호상관행렬($\mathbf{R}(k)$)을 구하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}\mathbf{z}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{z}(k) + \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{z}(k) + \mathbf{v}(k)\end{aligned}\quad (1)$$

$$\mathbf{R}(k) = E[\mathbf{y}(k+m)\mathbf{y}(m)^T] = \mathbf{C}\mathbf{A}^{k-1}E[\mathbf{z}(m+1)\mathbf{y}(m)^T] = \mathbf{C}\mathbf{A}^{k-1}\mathbf{G}\quad (2)$$

여기서, $\mathbf{G} = E[\mathbf{z}(m+1)\mathbf{y}(m)^T]$ 이며, $\mathbf{w}(k)$ 와 $\mathbf{v}(k)$ 는 각각 서로 상관관계가 없는 랜덤 정규분포 하중벡터와 관측변수에 대한 노이즈벡터이다. 식 (2)와 같은 상호상관행렬을 요소로 갖는 블록 행렬행렬을 구성하면, 이는 식 (3)의 마지막 등호관계와 같이 가관측성 행렬과 확장 가제어성 행렬(extended controllability matrix)로 분해할 수 있음을 알 수 있고, 이는 행렬 행렬을 Q-R 분해함으로써 실현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\mathbf{H}_{n_1, n_2}^{SSI} &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \cdots & \mathbf{R}_{n_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}_{n_1} & \cdots & \mathbf{R}_{n_1+n_2-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}\mathbf{G} & \cdots & \mathbf{C}\mathbf{A}^{n_2-1}\mathbf{G} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n_1-1}\mathbf{G} & \cdots & \mathbf{C}\mathbf{A}^{n_1+n_2-2}\mathbf{G} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n_1-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \cdots & \mathbf{A}^{n_2-1}\mathbf{G} \end{bmatrix} = \mathbf{O}_{n_1} \mathbf{C}_{n_2}^{ext}\end{aligned}\quad (3)$$

여기서,

$$\mathbf{O}_{n_1} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n_1-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{n_2}^{ext} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \cdots & \mathbf{A}^{n_2-1}\mathbf{G} \end{bmatrix}\quad (4)$$

식 (3)의 블록 행렬 행렬 ($\mathbf{H}_{n_1, n_2}^{SSI}$) 대신 다음과 같이 역변환이 가능한 가중치 행렬 \mathbf{W}_1 과 \mathbf{W}_2 를 블록 행렬 행렬의 전후에 곱한 후, 이를 SVD하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\mathbf{W}_1 \mathbf{H}_{n_1, n_2}^{SSI} \mathbf{W}_2 &= \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} \approx \mathbf{U}_1 \Sigma_1 \mathbf{V}_1^T \Leftrightarrow \mathbf{W}_1 \mathbf{O}_{n_1} \mathbf{C}_{n_2}^{ext} \mathbf{W}_2 \\ \text{where } \mathbf{O}_{n_1} &= \mathbf{W}_1 \mathbf{U}_1 \Sigma_1^{1/2}\end{aligned}\quad (5)$$

최종적으로, 식(5)의 관계를 이용하면, \mathbf{O}_{n_1} 행렬에서 각각 아래와 위로 한 블록을 뺀 나머지 행렬 $\mathbf{O}_{n_1-1}^\uparrow$ 와 \mathbf{O}_{n_1-1} 로부터 시스템 행렬 \mathbf{A} 를 아래와 같이 구할 수 있고(식 (6)), 그 결과로부터 고유진동수, 모드감쇠비 및 모드벡터를 Eigen-system Realization Algorithm(ERA)에서와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{O}_{n_1-1}^\uparrow = \mathbf{O}_{n_1-1} \mathbf{A}\quad (6)$$

$$\mathbf{O}_{n_1-1}^\uparrow = \begin{bmatrix} \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n_1-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{O}_{n_1-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n_1-2} \end{bmatrix}\quad (7)$$

마지막으로, 이산상태방정식에 대한 고유주파수, 모드감쇠비, 모드형상 등의 모드계수는 시스템행렬 \mathbf{A} 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{A}\Psi = \mathbf{M}\Psi \quad (\mathbf{M} = \text{diag}(\mu_1, \dots, \mu_N) \in \mathbf{R}^{N \times N} \text{ and } \Psi = [\Psi_1 \ \cdots \ \Psi_1] \in \mathbf{R}^{N \times N})\quad (8)$$

따라서, 연속상태방정식의 고유치(λ_k), 고유진동수(ω_k)와 모드감쇠비(ξ_k) 및 계측자유도에서의 실제 모드 벡터(ϕ_k)는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_k = \frac{1}{\Delta t} \ln \mu_k, \quad \xi_k = -\text{Re}(\lambda_k) / |\lambda_k|, \quad \omega_k = -\text{Im}(\lambda_k) / \sqrt{1 - \xi_k^2}, \quad \phi_k = \mathbf{C}\Psi_k \quad (9)$$

4. 상시진동을 이용한 초고층건물의 동특성 계측

3장의 확률론적 부분공간 시스템 식별법을 활용하여, 실제 송도에 건설중인 건물을 대상(그림 3, 표 1)으로 동특성 추정을 실시한 결과는 표 2와 같다.



그림 3. 계측대상 건물 및 계측사진

표 1 계측대상 건물의 동적특성(해석모델)

동특성항목	기호	사옥동	임대동
높이(m)	H	184.6	184.6
총질량(ton)	Mt	45,487	50,354
X방향 1차 모드 질량(ton)	Mx	15,586	14,794
Y방향 1차 모드 질량(ton)	My	13,464	13,422
Z방향 1차 모드 질량 관성 모멘트(ton-m2)	Mz	4,862,669	4,728,524
X방향 1차 고유진동수(Hz)	nx	0.2521	0.2627
Y방향 1차 고유진동수(Hz)	ny	0.2369	0.2420
Z방향 1차 고유진동수(Hz)	nz	0.4242	0.4471
감쇠비(%)	ζ	1%	1%

표 2 풍진동 계측결과 (사옥동)

구분	고유진동수(Hz)		감쇠비 (%)	
	실측	해석모델	실측	해석모델
1차모드	0.3041	0.2521	1.28	1.0
2차모드	0.3331	0.2369	0.79	1.0
3차모드	0.3670	0.4242	0.12	1.0

계측결과(표 2)에 의하면 1,2차 모드는 실제 구조물이 더 강성이 큰 것을 알 수 있다. 앞으로 지속적인 계측을 통해 풍속에 따른 감쇠비와 고유진동수의 변화를 분석할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2009년 국토해양부 첨단도시개발사업 초고층 복합빌딩 사업단의 연구비 지원으로 이루어진 것으로, 국토해양부의 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Overschee, P. V. and Moor, D.(1991) Subspace Algorithms for the Stochastic Identification Problem, *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control, Brighton, U.K.*, pp.1321 ~1326.
- Kareem, A. (2006) Validating Wind-Induced Response of Tall Buildings: Synopsis of the Chicago Full-Scale Monitoring Program, *Journal of Structural Engineering*, New York.
- Juang, J. N. (1994) Applied System Identification, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ, USA, .