고층건물의 자연 진동실험 및 시스템판별

Ambient Vibration Testing and System Identification for Tall Buildings

조순호¹⁾

Cho, Soon Ho

국문 요약 >> 구조물의 특성을 결정하기 위하여 18층 규모의 사무용 건물 3동에 대하여 자연진동 조건하에서 동적특성실험을 수행하였다. 대상건물은 기본적으로 보-기둥 골조시스템에 횡하중을 보다 효율적으로 지지하기 위하여 추가적으로 코어가 배치된 혼합 구조형식을 나타낸다. 매층마다 측정된 일련의 진동기록으로부터 고유진동수, 모드형태 및 감쇠율 등과 같은 모달계수를 추출하기 위하여 최신 주파수 및 시간영역-기반 응답의존 시스템판별법인 FDD, pLSCF 및 SSI를 적용하였다. 3방법에 의하여 추출한 결과는 대체로 일치하였으나, 초기 FE 해석결과와 비교하여 저차 3개 고유진동수는 대략 1.2~1.7배나 되는 단단한 거동을 나타냈다. 진동응답으로부터 추출된 값, 기준에서 제시하는 약산식 및 FE해석에 의하여 산정된 고유주기를 비교하여 보면, FE결과가 가장 유연한 거동을 예측하였으며, 높이를 변수로 하는 약산식이 추출된 값에 가장 근접한 결과를 나타냈다. 이러한 차이는 현재의 실험 추출치에는 콘크리트 균열 등과 같은 강성저감 요인을 포함하고 있지 않으며, 또한 FE 해석치는 비구조체 및 사용된 재료의 실제성능 등과 관련된 강성증가 요소를 포함하고 있지 않기 때문이다.

주요어 동적 특성치, 유한요소해석, 자연진동, 응답의존 모달해석, 시스템판별, 고층건물

ABSTRACT >> Dynamic response measurements from natural excitation were carried out for three 18-story office buildings to determine their inherent properties. The beam-column frame system was adopted as a typical structural form, but a core wall was added to resist the lateral force more effectively, resulting in a mixed configuration. To extract modal parameters such as natural frequencies, mode shapes and damping ratios from a series of vibration records at each floor, the most advanced operational system identification methods based on frequency- and time-domain like FDD, pLSCF and SSI were applied. Extracted frequencies and mode shapes from the different identification methods showed a greater consistency for three buildings, however the three lower frequencies extracted were 1.2 to 1.7 times as stiff as those obtained using the initial FE models. Comparing the extracted fundamental periods with those estimated from the code equations and FE analysis, the FE analysis results showed the most flexible behavior, and the most simple equation that considers the building height as the only parameter correlated fairly well with test results. It is recognized that such a discrepancy arises from the fact that the present tests exclude the stiffness decreasing factors like concrete cracking, while the FE models ignore the stiffness increasing factors, such as the contribution of non-structural elements and the actual material properties used.

Key words Dynamic properties, Finite element analysis, Natural vibration, Operational modal analysis, System identification, Tall buildings

1. 서론

고층건물 혹은 유사 대형구조물을 자연환경 혹은 미래제

난으로부터 안전하게 보존하기 위하여서는 무엇보다도 관련 구조물의 구조안정성을 확보하여야 한다. 이를 위하여서는 현재 구조물이 보유하고 있는 건강상태 혹은 구조적 성능을 우선적으로 파악 혹은 진단하여야 하며, 그 다음에는 시간지속에 따른 재료의 열화(Deterioration) 혹은 주변 환경변화 등에 기인한 구조손상으로부터 야기될 수 있는 전체 구조물의 성능저하를 지속적 혹은 주기적으로 파악 혹은 예측할 수 있어야 한다. 그 결과, 평가된 구조물의 성능이 기준조건을 만족하지 못할 경우에는 적절한 성능향상 대책을 수립하여, 향후 발생 가능한 극단적인 사고를 사전에 방지

¹⁾ 정회원·광주대학교 건축학과, 교수
(교신저자: gaza@gwangju.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2012. 3. 30 / 수정일 2012. 5. 21 / 게재확정일 : 2012. 5. 22)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

할 수 있다. 이러한 접근방법은 지진과 같은 외부충격에 대하여서도 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 최소한으로 요구되는 보강의 필요성 및 정도, 구조물의 거동 특성 등을 결정할 수 있는 기본 자료를 제공한다. 따라서 현재의 구조물상태가 어떠한지를 진단하고, 또한 향후에는 어떻게 진전되어 갈 것인지에 대하여 사전에 예측하는 구조물성능평가 기술은 구조물의 안정성을 확보하기 위한 전체과정 중에서 가장 핵심적인 영역이다.

최근 들어 건축 및 토목 관련분야에서는 가속도계(Accelerometer), 레이저 광선(Laser Beam) 혹은 광섬유 센서(Fiber Optic Sensor) 등과 같은 첨단센서 및 기기를 사용하여 상시 및 원거리 계측을 수행하고, 이로부터 획득한 불규칙 데이터에 고급 시스템판별이론(System Identification)을 적용하여 구조물의 국부 혹은 전체 상태를 체계적 및 과학적으로 예측하는 기술에 상당한 노력을 경주하고 있다.

대상구조물에 대한 일련의 진동기록은 구조물에 대한 정보를 충분히 포함하고 있으므로, 이러한 기록데이터에 적절한 수학적 방법을 적용하여 처리하면 고유진동수(f), 모드 형태(ϕ) 및 감쇠비(ξ) 등과 같이 구조물에 유용한 정보를 추출해 낼 수 있다. 또한, 실측된 정보는 구조물이 실제로 어떻게 거동하는가에 대한 정보를 제공함으로써, 설계 시 구조해석단계에서 가정한 구조물의 거동에 대한 오류 내지는 부정확성 여부를 판단할 수 있게 하여, 향후 건설될 유사 건축물에 대하여 보다 안전하고 효율적인 구조설계를 달성할 수 있게 한다.

건물과 같은 대형 건축/토목구조물은 자연 진동원을 가진 원인으로 고려하는 것이 회피할 수 없는 상황인데, 이에 따라

지난 수십 년 동안 응답기록만(Output-Only or Operational)을 사용하는 시스템판별기법에 대한 집중적 연구의 결과로 현재 이 분야는 어느 정도 성숙단계에 와있다.⁽¹¹⁾

본 연구는 완성단계 혹은 입주직전에 있는 18층 규모 사무실용도의 철골 혹은 콘크리트와의 복합건물 3동에 대하여 수행한 모달실험 및 판별해석결과를 기술한다. 현재까지 개발된 응답의존 시스템판별기법 중 최신 주파수 및 시간영역 기법을 적용하여 해석을 수행하였으며, 또한 이의 장단점을 비교 및 분석하였다. 판별결과는 설계단계에서 사용한 초기 유한요소해석(FE) 및 기준에서 제시하는 약산식에 의한 예측결과와도 비교하였으며, 이에 따라 현행 내진설계와 관련된 기술적 사항에 대하여 토의하였다.

2. 건물개요 및 측정방법

광주, 상무지역에 위치한 SIB는 지하 4층 및 지상 18층 규모로 합성기둥과 강재보를 사용하여 철골조 구조형식을 취한 건물이다. 대표적 평면 크기는 33m×36m이며 지상으로부터 옥탑까지의 높이는 84.4m이다. 지하층에는 약간 확장된 면적(43m×46.2m)의 주차시설을 포함하고 있으며 철골조와 콘크리트옹벽을 복합한 구조이다. 또한, 지상 저층부에는 바닥의 상당부분이 제거된 중간층을 포함하고 있다. 하지만, 건물 중앙에는 전 층에 걸쳐 콘크리트 코어(두께=250mm)가 배치되어 있어 엄밀한 의미에서는 완전 골조식의 건물이 아니며, 철골 모멘트골조 및 콘크리트 코아벽체가 병행된 혼합구조이다. 지상부 평면 및 전체건물형상은 그림 1과 같다. 기초부의 바닥판은 거의 정사각형에 가까우

(a) Overall View

(b) Typical Floor Plan

〈그림 1〉 SIB 건물

며(유효지내력 $f_e = 1\text{MPa}$), 사용된 재료의 강도는 각각 콘크리트 $f_{ck} = 27 \sim 30\text{MPa}$, 철근 $f_y = 240 \sim 400\text{MPa}$, 강재 $F_y = 300 \sim 330\text{MPa}$ 이다. 구조 대칭성은 대체로 양방향에서 모두 유지되고 있으나, 밀도가 매우 높은 고유진동수 분포가 예상된다. 측정은 내부마감공사를 진행하는 단계에서 이루어졌다.

광주, 첨단지역에 위치하고 있는 또 다른 공공업무용 건물인 GILC는 전체적인 의미에서 콘크리트 골조형식이나, 부분적으로 철골 보 및 합성기둥을 사용하고 있으며, 그림 2에서 보는 바와 같이 2개의 고층부 및 저층 연결부를 포함하는 대규모 복합건물이다. 측정은 한정된 케이블 길이 때문에 콘크리트만으로 건설된 지하 2층 및 지상 18층 타워부분에서만 실시하였다. 타워의 평면크기는 $18.6\text{m} \times 49.2\text{m}$ 이며, 기본적으로 골조형식이나 좌측단 중앙부에 코아벽체(두께=300 mm)가 배치되어 있으며, 지상으로 부터의 높이는 80m이다. 전체평면 혹은 타워부분의 평면만을 고려하더라도

양방향에서 구조 대칭성은 유지하지 않고 있다. 따라서 휨 및 비틀림의 혼합모드가 전체거동에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 2개 지하층에는 주차시설을 포함하고 있으며, 기초의 유효지내력은 $f_e = 0.2 \sim 0.42\text{MPa}$ 이다. 사용된 재료의 강도는 각각 $f_{ck} = 24 \sim 27\text{MPa}$, $f_y = 400 \sim 500\text{MPa}$, $F_y = 240 \sim 330\text{MPa}$ 이며, 측정은 내부마감공사를 진행하는 단계에서 이루어졌다.

광주, 상무지역에 위치하고 있는 GIAB는 지하 3층 및 지상 16층 규모로 합성기둥과 철골보를 사용하여 철골조 구조형식을 취한 사무용 건물이다. 대표적 평면크기는 $50.1\text{m} \times 29.4\text{m}$ 이며 지상으로부터의 높이는 74.4m이다. 지하층은 $78.4\text{m} \times 49.8\text{m}$ 의 확장된 면적을 확보하고 있으며, 철골조와 콘크리트 옹벽을 혼합한 구조이다. 하지만, 평면 좌측부 모서리에는 콘크리트 코아벽체(두께=250mm)가 배치되어 있어 엄밀한 의미에서는 완전철골조의 건물이 아니며, 철골

〈그림 2〉 GILC 건물

〈그림 3〉 GIAB 건물

모멘트골조 및 콘크리트 코아벽체가 혼합된 구조이다. 한편, 건물정면의 좌측부 철골기둥은 상부 층으로 갈수록 바닥 면적이 줄어드는 경사진 입면을 표현하기 위하여, 1층에서 15층까지 경사지게 배치되었다. 지상부 평면 및 전체건물형상은 그림 3과 같다. 매트기초의 유효지내력은 $f_e = 0.5\text{MPa}$ 이며, 사용된 재료의 강도는 각각 $f_{ck} = 24 \sim 30\text{MPa}$, $f_y = 400\text{MPa}$, $F_y = 235 \sim 325\text{MPa}$ 이다. 좌측 하단 모서리 부분의 Setback 형태 및 좌측 상단 모서리 부분에 배치된 코아의 영향으로 대체로 구조 대칭성은 양방향에서 유지되고 있지 않다. 따라서 휨 및 비틀림 혼합모드 및 밀접하게 배치된 주파수 분포가 예상된다. 측정은 내부마감공사를 진행하는 단계에서 이루어졌다.

측정에는 총 8개(Channels)의 Gurlap사 Force-Balanced형 가속도계(CMG-5U; 100Hz, 5V/g Sensitivity, 130dB, $g=9.8\text{m/sec}^2$)가 사용되었으며, 이중 2개는 고정용 기준센서이고, 나머지 6개는 이동용 센서로서, 매 Setup당 2개층 단위를 포함한다. 이렇게 하여 매층 당 3개의 자유도(x, y, θ)에 대한 기록을 확보할 수 있었다. 센서의 설치위치는 공간의 폐쇄성 및 보유하고 있는 케이블의 가용길이, 접근 및 이동의 용이성 등을 고려하여 결정하였다. 센서의 High Gain Option($\pm 0.05g$) 및 DAQ(Data Aquisition)의 Gain계수를 73.5까지 할 경우 1,470배까지 증폭된 신호를 획득할 수 있었으며, LMS사의 Pimento(24bit A/D Converter 포함)를 통하여 획득할 수 있는 분해능은 $0.00016\mu g$ 이다. DAQ 및 Control센터의 위치는 처음에는 건물의 2/3 높이(Setup 1~5) 및 그 후에는 1/3 높이에 해당하는 층(Setup 6~9)으로 이동하였으며, 기준센서는 모든 Setup에 공통으로 최상층 바닥에 2방향으로 상시 설치하였다. 지붕층으로 부터 시작하여 지상 2~3층에 이르기 까지 2개층 단위로 측정을 수행하였으며, 그 결과 SIB, GILC 및 GIAB는 각각 총 9개, 8개 및 6개의 Setup을 획득할 수 있었다. Pimento에서 제공하는 50Hz Sampling Rate 및 Analog Anti-Aliasing Filter, $\pm 0.136\text{V}$ Input Range Option을 사용하였으며, 매 Setup당 대략 30~40분 정도 측정하였다. 최종 센서의 감도가 100V/g 인 점을 감안할 때 실제 입력되는 미세진동의 크기는 대략 $0.05 \sim 0.1\text{mg}$ 에 해당한다.

3. 시스템판별법

응답의존 시스템판별법은 입력진동에 대하여 변수는 미결정적 이나, 거동은 결정적인 특성을 갖는 백색잡음(White Noise)이라는 가정으로 부터 출발한다. 입력진동에 대한 이

러한 정보의 부족은 단위 모달질량 혹은 유사방법에 의하여 획득한 모드형태를 스케일링 할 수 없다는 점이다. 그럼에도 불구하고, 이러한 시스템판별기법은 구조물의 동적거동을 이해하고 구조성능을 정의하는데 충분한 정보를 제공하고 있으며, 더 나아가서는 스케일이 된 모드형태를 획득할 수 있는 새로운 형태의 혼합된 방법의 개발을 위하여 꾸준히 발전해 나가고 있다.^{(5),(15)} 일반적으로 변수모델에 근거한 응답의존 판별법은 시스템의 실제 모델차수를 모르기 때문에 연속적으로 모델차수를 변화시켜 일련의 모달계수를 산정하고, 일련의 모달 선택기준에 의하여 안정화도(Stability Diagram)를 작성하여 거짓모드를 구별한다. 거짓모드는 한정된 진동기록 데이터 수, 비선형성 및 비백색 잡음(Colored Noise)의 내재 등에 기인한다.

본 연구에서는 주파수영역 판별법으로 FDD(Frequency Domain Decomposition), pLSCF(Polyreference Least-Squares Complex Frequency Domain), 시간영역판별법으로는 DATA-SSI(Data-Driven Stochastic Subspace Identification)를 적용하였다. 이러한 시스템판별법은 MATLAB기반 MACEC 및 AReTEMIS 프로그램에 비교적 잘 반영되어 있다.^{(16),(18)} 각 판별법에 대한 보다 자세한 내용은 참고 문헌 [11] 및 [12]와 같다.

3.1 주파수영역법

FDD는 종래의 Peak-Picking(PP)법의 향상된 버전으로 신호의 잡음을 감소시키고 인접 주파수 들을 쉽게 판별하게 하는 특이치 분해법(Singular Value Decomposition)을 사용한다.⁽⁶⁾ 측정된 응답기록에 DFT(Discrete Fourier Transform)를 사용하여 스펙트럴 밀도 행렬을 우선 산정하고, 이에 특이치 분해법을 적용하여 매 주파수선에 해당하는 성분을 분해한다. 그 결과, 1-자유도에 해당하는 일련의 자기 스펙트럴 밀도함수(Auto Spectral Density Function)를 획득할 수 있는데, 이러한 접근방법은 입력진동이 백색잡음이며 시스템의 감쇠율이 작다는 가정에 근거한다. 또한, 인접모드형태가 직교방향일 경우에 보다 실제에 가까운 거동을 묘사할 수 있다. 특이치 분해에서 특이치 벡터는 모드벡터로 간주되며, 고유진동수는 개개 독립 1-자유도 자기 스펙트럴 밀도함수에 IDFT(Inverse)를 적용하여 시간영역으로 전환한 후 산정한다. 따라서 고유진동수 및 감쇠율은 각각의 1-자유도 자기상관함수의 Crossing Time 및 Logarithmic Decrement 방법에 의하여 결정할 수 있다.

최근 들어 MIMO(Multiple-Input and Multiple-Output) FRF(Frequency Response Function)를 주요데이터로 사용

하고 최소자승법칙(Least-Squares)에 근거하여 미지변수를 결정하는 새로운 비반복계산의 주파수영역 변수산정법이 소개되었다.^{(7),(14)} Polymax 혹은 pLSCF라 불리는 이 방법은 그동안 실무에서 널리 사용되어온 시간영역 판별법인 pLSCE(pLS Complex Exponential)법과 매우 유사하다. 주요절차는 주파수, 감쇠율 및 참여율에 근거한 안정화도 산정, 사용자가 선택한 안정극점(Pole)을 이용하여 최소자승 단계에서 모드형태를 결정하는 내용 등을 포함한다. 이 기법의 최대장점은 주어진 시스템차수의 함수로서 시스템 Pole 및 참여계수를 매우 안정되게 판별할 수 있다는 점이며, 그 결과 안정화도를 판독하기가 SSI에 비하여 훨씬 용이하다. 이러한 특성은 향후 모달중첩이 심한 고차 혹은 큰 감쇠율이 예상되는 경우에 안정화도로부터 자동으로 Pole을 선택하는 절차에 적용될 수 있다.

3.2 시간영역법

SSI는 응답기록으로부터 불확정적 상태-공간모델을 판별함으로서 불확정 실현문제(Stochastic Realization)를 취급한다.^{(8),(9),(19)}

DATA-SSI 방법은 응답데이터에 QR분해 및 SVD, 최소자승법칙 등과 같은 강력한 수치기법을 적용하여 상태-공간 모델을 유도한다. DATA-SSI는 미래응답 행공간을 과거응답 행공간에 투영함으로서 응답간의 변동치를 산정하는 과정을 요구하지 않는다. 실제로 변동치 산정과 투영은 밀접한 관계에 있으며, 이 두 작업은 잡음을 제거하는 역할을 한다. 투영은 큰 Block Hankel 행렬의 QR분해로부터 수행한다. 단지 다음 논리에서 요구되는 R계수 값만 산정하므로 상당한 데이터의 축소가 이루어진다. 그 다음 SVD를 수행하

게 되는데, 이러한 분해는 시스템 및 해당행렬의 열 혹은 행공간 차수를 결정한다. DATA-SSI에 SVD를 적용하기 바로 이전에, 해당 데이터행렬에 가중치를 주는 방법에 따라 유사방법이 존재한다. 이러한 가중치는 판별될 판별모델의 상태-공간 기초벡터를 결정한다. 그 대표적인 예로 CVA(Canonical Variate Analysis), PC(Principal Components) 혹은 UPC(Unweighted Principal Components) 등을 들 수 있다. 실무 적용에 있어 이 세 가지 방법은 모달계수 산정과 관련된 정확도에는 무시할 만한 차이를 나타낸다. 본 연구에서는 UPC방법을 사용하였다.

4. 시스템관별 결과 및 분석

상기 총 3개의 주파수 및 시간영역 시스템관별기법을 적용하여 SIB, GILC 및 GIAB 건물에 대하여 추출한 모달계수는 표 1, 2 및 3과 같다. 비교를 위하여 설계단계에서 사용한 FE모델에 의하여 예측된 고유진동수도 포함하였다.⁽¹⁰⁾

미변수 모델인 FDD는 SVD에 의하여 잡음이 크게 감소하고 보다 명확한 모드형태를 제공하고 있어 PP보다는 개선된 방법이기도 하나, 역시 주요 Peak를 선택하는데 있어 해석자의 의지를 배제할 수는 없다. 이와 같은 주관적 요소를 경감시키기 위하여, 최근에는 Dynamic Headroom, Modal Coherence, Mode Shape Correlation Criteria 등 일련의 기준을 사용하여 자동적으로 신뢰성 있게 Peak를 선택할 수 있는 접근방법이 소개되고 있다.⁽⁴⁾ 그림 4는 FDD에 의하여 산정된 대상건물의 스펙트럴 밀도행렬에 대한 특이치 분포를 나타낸다.

pLSCF를 적용하기 위하여 Setup당 8개의 센서, 1024개의 데이터에 대하여 평균화에 의한 Correlation 함수를 계산

〈표 1〉 여러 시스템관별법에 의하여 추출된 모달계수(SIB)

Modes	Analyzed by FE		FDD			pLSCF			DATA-SSI			Description
	f(Hz)	x/y/ θ	f(Hz)	$\xi(\%)$	Mea/Ana	f(Hz)	$\xi(\%)$	Mea/Ana	f(Hz)	$\xi(\%)$	Mea/Ana	
1	0.3804	y	0.510	1.19	1.341	0.510	0.63	1.341	0.512	2.31	1.345	1st y bending
2	0.4062	x	0.693	1.0	1.706	0.692	0.64	1.704	0.688	2.65	1.694	1st x bending
3	0.4868	θ	0.897	0.85	1.843	0.897	0.57	1.843	0.899	1.7	1.847	1st θ torsion
4	1.6685	$x > \theta$	2.391	1.19	1.433	2.390	1.05	1.432	2.389	1.5	1.432	2nd y bending
5	1.8890	$x < \theta$	2.65	0.86	1.403	2.653	0.85	1.404	2.65	1.34	1.403	2nd x bending
6	2.1563	y	2.78	1.03	1.289	2.781	0.83	1.290	2.779	1.33	1.289	2nd θ torsion
7	3.5354	$x > \theta$	4.742	1.49	1.341	4.698	1.12	1.329	4.774	2.68	1.350	3rd θ torsion
8	3.8021	$x < \theta$	5.486	0.6	1.443	5.411	0.99	1.423	5.492	2.87	1.444	3rd x bending
9	5.2117	x	5.637	0.77	1.082	5.878	1.14	1.128	5.654	2.54	1.085	3rd y bending
Mean / COV			1.431 / 0.157			1.433 / 0.151			1.432 / 0.156			

x corresponds to East-West direction.

〈표 2〉 여러 시스템판별법에 의하여 추출된 모달계수(GILC)

Modes	Analyzed by FE		FDD			pLSCF			DATA-SSI			Description
	f(Hz)	x/y/ θ	f(Hz)	$\xi(\%)$	Mea/Ana	f(Hz)	$\xi(\%)$	Mea/Ana	f(Hz)	$\xi(\%)$	Mea/Ana	
1	0.3793	y	0.593	1.2	1.563	0.593	0.8	1.563	0.592	1.53	1.561	1st y bending
2	0.4151	x	0.726	1.18	1.749	0.726	0.75	1.749	0.725	1.32	1.747	1st x bending
3	0.5110	$y < \theta$	0.903	0.88	1.767	0.903	0.61	1.767	0.909	1.59	1.779	1st θ torsion
4	1.0769	$x < \theta$	2.374	1.13	2.204	2.372	1.02	2.203	2.353	2.77	2.185	2nd x bending + y bending
5	1.4115	$x < y$	2.667	1.4	1.889	2.681	0.7	1.899	2.675	1.26	1.895	2nd x bending + θ torsion
6	1.5070	$y > \theta$	3.593	2.0	2.384	3.586	1.44	2.380	3.585	2.55	2.379	2nd y bending + θ torsion
7	1.7458	x	4.254	1.89	2.437	4.259	1.39	2.440	4.282	3.18	2.453	3rd x bending
8	1.9898	$y < \theta$	5.064	1.60	2.545	5.041	1.37	2.533	5.02	2.73	2.523	3rd y bending + θ torsion
9	2.4019	$y < \theta$	5.481	1.2	2.282	5.649	1.02	2.352	5.469	2.92	2.277	3rd θ torsion
Mean / COV			2.091 / 0.169			2.098 / 0.170			2.089 / 0.168			

x corresponds to East-West direction.

〈표 3〉 여러 시스템판별법에 의하여 추출된 모달계수(GIAB)

Modes	Analyzed by FE		FDD			pLSCF			DATA-SSI			Description
	f(Hz)	x/y/ θ	f(Hz)	$\xi(\%)$	Mea/Ana	f(Hz)	$\xi(\%)$	Mea/Ana	f(Hz)	$\xi(\%)$	Mea/Ana	
1	0.3607	x	0.473	1.87	1.311	0.473	0.84	1.311	0.498	3.24	1.381	1st x bending
2	0.5471	$x < y$	0.625	1.42	1.142	0.625	0.65	1.142	0.626	1.5	1.144	1st y bending
3	0.6387	$x < \theta$	0.718	1.43	1.124	0.718	0.74	1.124	0.701	3.07	1.098	1st θ torsion
4	1.2011	x	1.552	1.06	1.292	1.551	0.71	1.291	1.559	1.63	1.298	2nd x bending
5	2.2432	$x < y$	2.377	1.18	1.060	2.376	1.02	1.059	2.377	1.77	1.060	2nd y bending
6	2.4006	y	2.8	2.58	1.166	2.805	1.46	1.168	2.808	2.55	1.170	2nd θ torsion
7	2.8924	$x > \theta$	3.577	1.7	1.237	3.578	1.23	1.237	3.578	2.47	1.237	3rd x torsion
8	3.6524	$x > \theta$	4.752	0.81	1.301	4.743	1.82	1.299	4.764	3.72	1.304	3rd y bending
9	4.9117	y	5.253	1.6	1.069	5.331	1.49	1.085	5.24	3.03	1.067	3rd x bending + θ torsion
Mean / COV			1.189 / 0.083			1.191 / 0.081			1.195 / 0.096			

x corresponds to East-West direction.

〈그림 4〉 FDD에 의한 특이치 분포(SIB)

하고, 이에 DFT를 적용하여 Correlogram을 산정하였다. 안정화도를 작성하는데 있어 pLSCF는 과다한 모델차수 때문에 발생하는 수학적 거짓모드가 부방향 감쇠율을 갖도록 유도하므로 보다 명확한 안정화도를 제공한다. 그림 5는 pLSCF에 의하여 산정된 대상건물의 대표적인 안정화도를 나타낸다. 여기서 $\oplus$ 는 주파수, 모드벡터 및 감쇠비에 대한 기준을 모두 만족하는 안정 Pole을 표시한다.

SSI는 Block행렬의 행의 수를 나타내는 모델차수를 선택하는데 있어, 실제 모델차수는 예상되는 모드수의 2배이나 경험상 이보다 훨씬 큰 모델차수를 제공하는 것이 보다 정확하게 시스템을 묘사할 수 있는 것으로 인식되고 있다.⁽¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 모델차수 100을 대체로 사용하였으며, 이는 그림 7의 우측에 표시되어 있는 SSI 입력행렬의 특이치 분포에서 확인할 수 있듯이 시스템을 묘사하기에 충

분한 수의 부공간(Subspace)을 포함하고 있다. 또한 1%차이 고유진동수, 5%차이 감쇠율 및 1%차이 모드벡터를 선택기준으로 사용하여 그림 6과 같이 안정화도를 작성하였다. SSI의 상태-공간모델은 해석적으로 파워 및 교차스펙트럼의 표현으로 변환하여 선택된 모델의 정확도를 검증하는데 사용할 수 있다. 그림 7은 GILC 건물의 대표적 측정기록에 대하여 SSI모델 변환 및 일반 절차에 의하여 산정된 파워스펙트럼을 비교하고 있는데, 좋은 일치를 나타내고 있다.

서로 다른 시스템관별법에 의하여 추출된 고유진동수 및 모드형태는 대체적으로 세 건물 모두에 대하여 매우 일치된 결과를 나타내고 있으나, 감쇠율은 사용된 관별법에 따라 다양한 차이를 나타내고 있다(표 1, 2 및 3). 또한, 실험으로부터 추출한 고유진동수는 FE해석결과와 비교하여 대략 1.2~2.1배 정도의 큰 값을 나타내고 있다. 3개의 건물 중 콘

〈그림 5〉 pLSCF에 의하여 산정된 안정화도(SIB)

〈그림 6〉 SSI에 의하여 산정된 안정화도(SIB)

〈그림 7〉 SSI모델 변환에 의하여 산정된 파워 스펙트럼(GILC)

〈그림 8〉 SIB 건물의 추출된 모드형태

크리트구조의 사용비율이 가장 높은 건물 순으로 차이가 클 수 있는데(GILC, SIB, GIAB순), 이는 콘크리트 재료의 균열특성 및 비균일성으로 말미암아 구조성능에 보다 높은 불확실성이 내재되어 있기 때문이다.

특히, GILC 건물은 2개의 콘크리트 고층부가 저층부 철골조에 의하여 연결되는 복잡한 구조특성을 나타내고 있는데 연결부의 다이어프램작용 정도 등 해석 모델링상의 불확실성이 존재하여 실험결과와 가장 큰 차이를 나타내고 있다. 한편 그림 8, 9 및 10은 FDD에 의하여 추출한 3개 건물의 3-D 모드형태를 보여주고 있다. 매층 당 3개의 자유도(x, y, θ)에 대한 측정결과로부터 강제운동을 가정하여 전체 혹은 부분 건물의 이동을 묘사할 수 있다. 모든 건물에

〈그림 9〉 GILC 건물의 추출된 모드형태

〈그림 10〉 GIAB 건물의 추출된 모드형태

있어 저차 3개 모드는 2개의 이동 및 비틀림 모드가 독립적으로 변갈아가며 발생하여 FE해석결과와 잘 일치하고 있으나, 그 이후 고차모드에서는 모드순서가 서로 일치하지 않으며, 또한 수평이동과 비틀림 모드가 상당히 혼합된 양상을 나타내고 있다. 한편, 평면 및 입면상의 구조물의 비대칭성, 물리적 및 해석상 기준좌표 설정의 상이성 등으로 인하여, FE 해석결과에는 수평이동 간에도 상당한 혼합을 나타내는 모드가 있는데, 실험결과에는 주요모드를 판별하지 못할 정도의 수평이동 간의 혼합은 관측되지 않았다. 이러한 점 및 신뢰성 있게 실제모드를 선택하기 위하여서는 실험으로부터 모드형태를 추출하여 도식화하는 과정이 반드시 필요하다. 이는 더 나아가서 위치 및 정도 추적이 가능한 Level 2 및 3의 손상감지를 위한 모델향상 해석의 기준응답으로 사용할 수 있다.

5. 기준식과의 주기비교 및 수동모델 향상

구조물의 고유진동수 혹은 주기는 현행 내진설계절차에서 지진력의 크기를 결정하는 중요한 변수중의 하나이다.^{(1),(3),(17)} 기준에서는 이전 지진발생 시 측정한 진동기록에 근거하여 건물높이, 벽체량 등을 주요변수로 하는 약산식을 제시하고 있다. 일반적으로 모멘트골조 구조에서는 약산식에 의하여 산정된 주기가 실제주기보다 작으며, 전단벽 구조에서는 실제주기보다 더 큰 주기를 예측하는 경향이 있는 것으로 인식되고 있다. 하지만 제시된 약산식이 실제 손상을 포함한 건물만을 대상으로 하였는지 혹은 어느 정도의 손상을 포함하는 건물을 기준으로 하였는지에 대하여서는 분명하지 않다. 또한, 적용범위를 철골 모멘트골조, 콘크리트 모멘트골조 및 기타구조로 광범위하게 구분하고 있어 실제 적용에 있어서는 해석자의 상당한 주관이 요구된다. 이러한 점에서, 향후 기준식은 비손상 및 손상상태를 구별할 수 있도록 표시하여 제안하는 것이 바람직 할 것으로 판단

된다. 이는 계측기술의 발달로 현재는 손쉽게 동적실험을 수행할 수 있으므로 비손상상태의 고유진동수를 신뢰성 있게 결정할 수 있기 때문이다.

실험대상 건물에 대하여 기준에서 제시하는 대표적인 약산식을 적용하여 고유주기를 예측한 결과는 표 4와 같다. FE 해석치 및 자연진동 실험 추출치를 기준으로 비교한 결과도 포함하였다. 사용된 약산식은 대상건물을 각각, 골조, 기타 및 벽체구조로 고려하였을 경우와, 단순히 건물 높이만을 고려한 경우로 구분하였다. 비교결과에 의하면 대상구조물은 기타 혹은 전단벽 구조로 분류하기 보다는 골조구조로 보는 것이 타당한 것으로 판단된다. 또한, 약산식은 손상을 어느 정도 고려하고 있으므로 자연진동 실험으로 추출한 값보다 대체로 큰 값을 나타내고 있다. 예측치 중 FE 해석결과가 가장 유연한 거동을 나타내고 있으며, 반면에 건물 높이만을 변수로 하는 약산식이 가장 자연진동 실험치에 근사함을 알 수 있다. 이는 호주기준에서 제시하는 건물높이만을 변수로 하는 약산식은 지진 발생시 진동기록 보다는 자연진동에 의하여 측정한 기록에 근거하여 유도되었기 때문이다.⁽¹⁷⁾

실험 및 FE 해석결과와의 일치를 위하여, 고유진동수에 중점을 두고 GILC건물에 대하여 비균열 단면, 지하구조물의 횡구속, 부재단부의 강역, 질량감소 및 동적탄성계수 사용 등 일련의 강성증가 혹은 질량저감요소를 고려하여 단계적으로 수동모델향상을 시도하였다. 상기요소를 선택하게 된 배경은 참고문헌 [2]에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

일련의 모델향상에 대한 고유진동수 변화는 표 5와 같으며, 적어도 저차 3개 모드에 대하여 10%이내의 오차범위로 접근할 수 있었다. 기본모델은 30% 질량감소, 35% 콘크리트강도 증가 및 모델링상의 정미한 수정 등을 포함한다. 모델향상을 위하여 고려한 여러 가능한 요소 중에 코아벽체의 비균열 단면 및 콘크리트의 동적탄성계수의 영향이 가장 지

〈표 4〉 약산식에 의하여 산정된 고유주기의 비교

		DATA-SSI (sec)	FEM (sec)	$T=0.085 \text{ or } 0.073 H^{3/4}$ (sec)	$T=0.049 H^{3/4}$ (sec)	$T=0.0743 H^{3/4} / \sqrt{A_c}$ (sec)	$T=H/46$ (sec)
SIB	x	1.961	2.629	2.346	1.352	1.523	1.81
	y	1.445	2.462	2.346	1.352	1.149	1.81
GILC	x	1.689	2.636	1.953	1.311	1.335	1.736
	y	1.379	2.409	1.953	1.311	1.097	1.736
GIAB	x	2.008	2.772	2.153	1.241	1.376	1.614
	y	1.597	1.828	2.153	1.241	1.296	1.614
Mean / COV			1.479 / 0.157	1.302 / 0.155	0.791 / 0.167	0.776 / 0.059	1.046 / 0.173

〈표 5〉 모델항상에 의한 고유진동수의 변화(GILC)

Modes	Extracted (Hz)	Initial FE (Hz)	Updated FE (Hz)					Error (%)
	DATA-SSI	Cracked, full mass, and free lateral restraints	Base(0.7 Mass + 1.35 Concrete strength)(1)	(1) + Uncracked sections(2)	(2) + Ignoring substructure (3)	(3) + Rigid offsets (4)	(4) + 1.25 Elastic modulus(5)	
1	0.592	0.3793	0.4289	0.4905	0.5187	0.531	0.5854	1.1
2	0.725	0.4151	0.4678	0.54	0.5689	0.5875	0.6488	10.5
3	0.909	0.511	0.5779	0.669	0.6921	0.7084	0.7767	14.6
4	2.353	1.0769	1.2275	1.4096	1.5908	1.6328	1.8108	23.0
5	2.675	1.4115	1.5932	1.8355	1.9201	1.9628	2.1485	19.7
6	3.585	1.507	1.6973	1.9337	2.0505	2.0867	2.3023	35.8
7	4.282	1.7458	1.9775	2.2899	2.3415	2.3908	2.6214	38.8
8	5.02	1.9898	2.2548	2.5959	2.6749	2.7269	2.9998	40.2
9	5.469	2.4019	2.7038	3.1089	3.1513	3.1911	3.4896	36.2
Increase in average to initial for each separate case			13.1	17.0	6.5	3.0	14.0	

배적이며, 각각 평균 17% 및 14%의 고유진동수의 증가를 가져왔다. 지하층 무시, 보 단부의 강역지역 고려에 의하여 고유진동수가 각각 7% 및 3% 증가 하였으며, 기본모델에 의한 증가는 13%이다. 기본적으로 강성과 질량의 영향은 동일하게 지배적이지만, 시공의 질에도 의존하는 강성에 대한 불확실성이 상대적으로 더 높을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구는 자연진동 실험 및 고급 응답의존 시스템판별 기법을 사용하여 초고층건물의 주요 구조정보를 신뢰성 있게 결정하고, 이에 근거하여 설계 시 가정한 구조물의 거동과 실험으로부터 추출한 거동을 비교, 분석하여 향후 내진 설계 및 손상감지와 관련된 기술적 고려사항들을 검토하는데 있다. 이를 위하여 유사규모 및 사무실용도의 18층 건물 3동에 대하여 동적계측실험을 수행하였으며, 또한 계측된 진동응답에 대하여 다양한 판별법을 적용하여 추출한 값, FE 해석결과 및 기준에서 제시하는 약산식에 의하여 산정한 고유주기 등을 비교, 분석하였다. 본 논문의 결론은 아래와 같다.

1. FDD, pLSCF 및 DATA-SSI 등과 같은 응답의존 시스템판별법을 사용하여 고층건물의 동적성능을 신뢰성 있게 추출할 수 있다. 하지만, FDD와 같은 비변수 모델은 실제 Peak를 선택하는데 있어 해석자의 주관적 판단을 완전히 배제할 수 없다. 이에 반하여 변수모델인 pLSCF 및 DATA-SSI는 안정화도를 작성하여 실제모드를 판별

하므로 주관적 요소를 최소화하고 있다. 더욱이 시간영역기반 DATA-SSI는 주파수영역기법에 고유한 Leakage 문제 등을 원천적으로 배제하므로 보다 정확한 정보를 제공한다.

- 실제모드를 선택하는데 있어서 대형 토목/건축 구조물은 고유진동수가 매우 낮고, 또한 자연 진동원의 세기가 약할 뿐 아니라, 수많은 원인의 잡음이 내포되어 있으므로 관련된 모드형태를 반복적으로 도식하여 확인하는 절차가 반드시 필요하다.
- 대상건물에 대하여 적용한 3개의 고급 판별법은 고유진동수 및 모드형태를 추출하는데 있어 매우 일치된 결과를 나타냈으나, 감쇠율에 있어서는 상당한 차이를 나타냈다. 이는 응답의존 실험만으로는 아직 신뢰성 있는 감쇠율을 예측하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다.
- 자연진동 실험으로 추출한 고유진동수와 초기 FE해석으로부터 획득한 고유진동수를 비교하여 보면, 대략 저차 3개 모드에서 1.2~1.7배 정도로 실험치가 더 큰 경향을 나타냈다. 콘크리트구조의 사용비율이 가장 높은 건물 순으로 차이가 크게 나타났다. 이는 무엇보다도 설계사무소에서 설정한 유한요소모델이 비구조요소의 무시, 균열단면 성능 사용 및 과다한 자중고려 등 실험조건과는 상당한 차이가 있는데 그 이유가 있다.
- 자연진동 실험치, FE 해석결과와 기준에서 제시하는 약산식으로부터 산정한 고유주기를 비교하여 보면 대상구조물은 기타 혹은 전단벽 구조로 분류하기 보다는 골조 구조로 보는 것이 타당하다. 예측치 중 FE 해석결과가 가장 유연한 거동을 나타내고 있으며, 반면 건물높이 만

을 변수로 하는 약산식이 가장 실험치에 근사한 것으로 나타났다.

6. GILC 건물의 실험 및 해석결과의 일치성을 위하여 고유진동수에 중점을 두고 몇몇 수동모델향상을 시도하였다. 비균열 단면성능, 지하구조물의 경계조건, 선요소 단부의 강역지역, 자중감소 및 콘크리트의 동적탄성계수 고려 등의 내용을 포함한다. 그 결과 허용할 정도의 일치를 획득하였으며, 가장 영향이 큰 요소는 비균열 단면성능 및 재료의 동적탄성계수 등이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사를 드린다(KRF-2008-521-D00506).

참고 문헌

1. 대한건축학회, *건설교통부 제정 건축물 하중기준 및 해설*, 2005.
2. 조순호, “초고층건물의 성능평가를 위한 응답의존 시스템관별 및 모델향상,” *한국지진공학회 논문집*, Vol. 12, No. 4, 19-33, 2008.
3. Applied Technology Council, *Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings ATC 3-06*, ATC, Redwood City, California, 1978.
4. Brincker R., Andersen P., and Jacobsen N. J., “Automated Frequency Domain Decomposition for Operational Modal Analysis,” *Proc., 25th Int. Modal Analysis Conf.*, Orlando, Florida, USA, 2007.
5. Brinker, R., and Anderson, P., “A way of getting scaled mode shapes in output only modal testing,” *Proc., 21st Int. Modal Analysis Conf.*, Kissimmee, Florida, USA, 2003.
6. Brinker, R., Zhang, L., and Anderson, P., “Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition,” *Proc., 18th Int. Modal Analysis Conf.*, San Antonio, Texas, USA, 2000.
7. Cauberghe, B., “Applied frequency-domain system identification in the field of experimental and operational modal analysis,” Ph.D. thesis, Dept. of Mech. Engrg., Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 2004.
8. Ho, B. L., and Kalman, R. E., “Effective construction of linear state variable models from input/output data,” *Regelungstechnik*, 14, 545-548, 1966.
9. Juang, J.-N., *Applied system identification*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1994.
10. Midas IT, “Midas/Gen: General Structural Design System for Windows, Online Manual, V.7.1.1 (R2),” Korea, 2006.
11. Peeters, B., and De Roeck, G., “Stochastic system identification for operational modal analysis: a review,” *J. Dyn. Syst., Meas., and Control*, ASME, 123(12), 659-667, 2001.
12. Peeters, B., “System identification and damage detection in civil engineering,” Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engrg., Katholieke Univ. Leuven, Heverlee, Belgium, 2000.
13. Peeters, B., and De Roeck, G., “Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis,” *Mech. Syst. Signal Process.*, 13(6), 855-878, 1999.
14. Peeters, B., Van Der Auweraer, H., Guillaume, P., and Leuridan J., “The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation,” *Shock and Vib.*, Special Issue dedicated to Prof. Bruno Piombo, 11, 395-409, 2004.
15. Reynders, E., and De Roeck, G., “Reference-based combined deterministic-stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis,” *Mech. Syst. Signal Process.*, 22(3), 617-637, 2008.
16. Reynders, E., and De Roeck, G., “What’s New in System Identification for Experimental and Operational Modal Analysis,” *Proc., Thematic Conf. on Comput. Meth. in Struct. Dyn. and Earthq. Engrg.*, Rethymno, Crete, Greece, 2007.
17. Standard Association of Australia, *Minimum design loads on structures, Part 4: Earthquake loads AS1170.4*, Sydney, Australia, 1993.
18. Structural Vibration Solutions, “ARTEMIS Extractor: Ambient Response Testing and Modal Identification Software, User’s Manual,” Demark, 2001.
19. Van Overschee, P., and De Moor, B., *Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996.