

진동기록 계측에 의한 구조물의 건전도 평가 및 적용 예

Vibration-Based Structural Health Monitoring Techniques and Application Examples

조 순 호*
Cho, Soon Ho

요 약

본 논문은 최근 이슈가 되고 있는 대형 건축/토목구조물에 대한 동적계측, 시스템관별, 모델향상 등을 통한 건전도 평가기법에 대하여, 현재까지 개발된 혹은 개발되고 있는 기술사항 들을 소개한다. 특히, 가속도계를 사용하여 의도하는 진동기록을 획득하기 위한 합리적인 Hardware Chain 구성, 이로부터 신뢰성 있는 동적 구조성능치를 추출하기 위한 다양한 고급 모달해석기법 및 보다 자세한 구조정보 획득 및 손상감지 등을 위하여 실험치와 유한요소 해석치를 일치시키는 모델향상기법에 대하여 기술하였다. 또한 이러한 기술들을 실제 구조물인 고층건물 및 비닐하우스 아치구조에 적용하였으며, 이러한 경험에 근거하여 현 모니터링 기술의 문제점 및 향후 개선방향 등을 토의하였다.

keywords : 가속도계, 동적계측, 시스템관별, 모델향상

1. 서 론

기 건설된 구조물의 건강상태를 조사하기 위하여서는 i) 획득가능한 모든 정보로부터 초기 FE(Finite Element) 해석모델구축, ii) 설정한 FE모델로부터 모달계수 산정, iii) 실제 구조물에 대한 동적계측실험 수행, iv) 계측된 진동기록으로부터 모달계수 추출, v) FE결과와 실험결과와의 비교, vi) 불확실성이 높거나 향상시켜야 할 구조변수 선택, vii) FE 해석모델향상, viii) 향상된 FE모델과 실험결과와의 비교 등의 절차를 포함하며, 필요시 상기과정을 반복수행 하여야한다. 본 연구는 단계 iii)~viii)에 중점을 두고 있으며, 잡음이 많고 저주파수 성격을 나타내는 대형구조물을 대상으로 한다.

가속도계를 사용하여 42층 고층건물의 응답기록을 획득하였으며, 이에 시간 및 주파수영역의 응답의존 시스템관별법을 적용하여 동적 성능치를 추출하였다. 또한 유한요소해석 결과와 실험결과를 일치시키기 위하여, 일련의 변수를 변화시켜 해석모델의 향상을 시도하였다. 비닐하우스 구조를 형성하는 세장한 아치구조의 정적좌굴하중을 결정하기 위하여 햄머 가격에 의한 일련의 충격실험을 수행하였다. 이로부터 획득한 입력-출력기록에 진동기록 또는 응답의존 시스템관별법을 적용하여 동적 성능치를 추출하였으며, 이를 FE해석 결과와 비교하였다.

2. 측정시스템, 시스템관별 및 모델향상

건물 및 교량 등과 같은 대형구조물은 구조물에 가진력을 추가하기가 현실적으로 매우 어렵기 때문에 자

* 정희원 • 광주대학교 건축학과 교수 gaza@gwangju.ac.kr

연환경진동- 바람, 주변교통 혹은 거주자의 활동- 등에 의존한 실험 및 시스템관별법을 전적으로 사용한다. 초고층건물 등은 측정주파수 범위가 1Hz 미만, 진동크기가 1 μg 이하 이고 크기변화가 심하다. 따라서 동적범위가 크고 관심 주파수 범위에서 안정적이며 센서간의 거동이 매우 유사한 Force-Balanced형 가속도계를 주로 사용한다. 센서 설치위치, 케이블 배치, 저주파수 Sampling이 가능하고 이에 대한 Analog Anti-Aliasing Filter를 구비한 기록장치(DAQ)의 선택에 특별한 주의가 요구된다. 구조물의 동적 특성치를 추출하기 위한 시스템관별법도 응답기록만을 사용하는 관별법(Operational)을 사용하여야하는데, 이는 Unscaled된 모드형상을 제공한다는 점에서 기존의 입력-출력기록을 사용하는 관별법(Experimental)과 다르다.

시스템관별은 시간기록 자체를 직접 사용하는 시간영역기반 관별법(Time-domain based)과 시간기록에 DFT (Discrete Fourier Transform)를 적용하여 Periodogram 혹은 Correlogram 등을 먼저 산정하고 이로부터 다시 FRF(Frequency Response Function)를 산정하여 기본데이터로 사용하는 주파수영역기반(Frequency-domain based) 관별법으로 구분한다. 이외에도 SDOF vs. MODF (Single 혹은 Multi-Degree of Freedom) 방법, 국부 vs. 전체계수 산정모델, Single vs. Multiple 입력 모델, 모달 vs. 직접모델, Low order complete vs. High order incomplete 모델, Real vs. Complex mode shapes 등과 같이 다양한 방법으로 분류할 수 있다. FDD(Frequency Domain Decomposition), PolyMAX(Polyreference Least-Squares Complex Frequency Domain) 및 SSI(Stochastic Subspace Identification) 등이 최신훈 소개된 고급관별법으로 알려져 있다.

동적계측으로 획득한 실험결과(모달계수, 주파수 응답함수 등)는 구조물의 대표적 물리적 특성(질량, 강성 및 감쇠성능)을 나타내는데, 이러한 물리적 정보가 초기의 FE와 같은 순수해석모델로부터 예측한 값과 잘 일치하지 않을 경우에는 2가지 가능성이 존재 한다. 첫째는 FEM 해석모델에 가정된 전제조건이 실제 상황과 일치하지 않거나, 두 번째는 구조물에 어떤 피해가 발생하여 열화된 경우이다. 전자 및 후자는 보다 신빙성 있는 해석모델을 구축하기 위하여, 주요 구조성능치(고유주파수, 모드순서 및 모드형태)에 대한 FE모델과 실험결과와의 Match를 시도한다. 이와 같이 실험결과와 해석결과의 일치를 위하여, i) 주요변수 선택, ii) 이를 변화시켜 해석 및 실험결과와의 비교, iii) 변화정도 파악 등의 반복을 통하여, 최적의 해를 찾아내는 일련의 과정을 모델향상(Model Updating)이라 한다. 대형구조물의 경우 최적화이론(Numerical Optimization)에 근거한 자동모델향상기법이 주로 사용되는데, 특히 변수의 수가 많고 문제의 규모가 크므로 계산상의 비효율성, 수치해석상의 Ill-Conditioning 등이 심각한 쟁점으로 대두된다.

3. 적용 예- 고층건물

평촌에 위치하며, 120.8m×82.2m 크기의 저층부와 162m 높이의 타워를 갖고 있는 42층 철근콘크리트 건물(DLA)에 대하여 동적계측실험을 수행하였다. 총 8개의 Force-Balanced형 가속도계(CMG-5U; 100Hz 고유진동수, 5V/g Sensitivity, 130dB Dynamic range)가 사용되었으며, 이중 2개는 고정용 기준센서이고, 나머지 6개는 이동용 센서로서, 매 Setup당 2개층 단위를 포함한다. 센서의 High Gain Option($\pm 0.05\text{g}$) 및 DAQ의 Gain계수를 80까지 할 경우 1,600배까지 증폭된 신호를 획득할 수 있으며, RogaDAQ16(16bit A/D Converter 포함)를 통하여 획득할 수 있는 분해능은 0.038 μg 이다. 100Hz Sampling rate, 16배 Oversampling, 40Hz Cutoff frequency & 8th Order Butterworth Digital Anti-Aliasing Filter를 사용하였으며, 매 Setup당 대략 30~40분 정도를 측정하였다. 센서의 감도가 100V/g인 점을 감안할 때 실제 입력되는 미세진동의 크기는 대략 0.05~0.1mg ($g=9.8\text{m/sec}^2$)에 해당한다.

여러 다양한 주파수 및 시간영역 시스템판별기법을 적용하여 DLA 건물에 대하여 모달계수를 추출한 결과는 표 1과 같으며, 총 10개의 모드를 판별할 수 있었다. 또한 고유진동수에 중점을 두고 비균열단면 고려, 지하구조물의 횡구속, 부재단부의 강역, 질량감소 및 동적탄성계수 사용 등과 같은 일련의 수동모델향상을 시도하였다.

표 1 여러 시스템판별법에 의하여 추출된 모달계수(DLA)

Mode s	Initial FE		PP f (Hz)	FDD f (Hz)	pLSCF		COV		COV/Ref		DATA		DATA/Ref		Description
	f (Hz)	y			f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)	
1	0.147	y	0.317	0.322	0.321	0.66	0.314	1.49	0.312	1.12	0.319	1.55	0.309	1.33	1st y bending
2	0.191	x	0.416	0.420	0.418	0.76	0.415	1.29	0.417	1.55	0.415	1.30	0.417	1.47	1st x bending
3	0.238	θ	0.476	0.469	0.470	0.55	0.472	0.64	0.471	0.50	0.471	0.65	0.471	0.51	1st θ torsion
4	0.665	y	1.013	1.016	1.013	0.78	1.012	0.87	1.014	0.79	1.012	0.82	1.014	0.81	2nd y bending
5	0.683	x	1.287	1.289	1.286	0.75	1.285	0.81	1.287	0.76	1.285	0.83	1.288	1.44	2nd x bending
6	0.736	θ	1.392	1.406	1.396	0.67	1.409	0.70	1.399	0.90	1.407	0.71	1.401	0.95	2nd θ torsion
7	1.278	$x \approx \theta$	2.100	2.109	2.103	0.45	2.099	0.43	1.986	0.53	2.100	0.48	2.135	0.78	3rd y bending
8	1.406	$x \approx \theta$	2.417	2.412	2.408	0.77	2.438	0.83	2.393	0.66	2.409	1.05	2.393	0.77	3rd x bending
9	1.632	y	2.649	2.500	2.653	0.35	2.656	0.80	2.652	0.84	2.652	0.89	2.654	0.65	3rd θ torsion
10	2.031	$\theta \approx x$	3.345	3.340	3.505	0.25	3.353	1.10	3.355	1.11	3.374	1.03	3.342	0.94	4th y bending

x direction corresponds to North-South direction.

4. 적용 예- 세장한 아치구조

비닐하우스를 구성하는 세장한 강재파이프 아치의 정적좌굴하중을 결정하고 전체구조성능을 평가하기 위하여 수직하중을 단계별로 부가하고, 고정햄머 및 이동센서 형식을 취한 일련의 충격진동실험을 수행하였다. 실험에 사용된 센서는 ICP Type 1축 PCB 393A03(1V/g)이며, 충격햄머는 ICP Type PCB 086D20 (0.23mV/N)이다. 데이터획득 장치는 16ch LMS사 Pimento이며 24bit, 50~50,000Hz까지 다양한 Sampling rate, 0.316~10Volt 등의 사양을 보유하고 있다. Sampling frequency=200Hz, Input range = 3.16V(센서) 및 10V(햄머), Pretrigger=1%, Force window = Rectangular 10%, Exponential window = Decay constant 0.25, Block resolution= 1,024 등의 LMS의 TestXpress Option을 사용하였다. 계측한 입력-출력 진동기록에 대하여 최근에 개발된 고급판별법인 PolyMAX 및 FDD법을 적용하여 고유진동수, 모드형태 및 감쇠율 등과 같은 모달계수를 추출하였다(표 2). 이러한 실험결과는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행한 다양한 조건의 해석결과와 비교하였으며, 상당히 일치된 경향을 나타냈다(그림 1).

표 2 PolyMAX와 FDD에 의하여 추출한 모달계수의 비교

Modes	No preaxial load								Preaxial load (P=5x150N)						
	FE Analyzed	Extracted by PolyMAX			Extracted by FDD			FE Analyzed	Extracted by PolyMAX			Extracted by FDD			
		f (Hz)	f (Hz)	ξ (%)	test / analyzed	f (Hz)	ξ (%)		test / analyzed	f (Hz)	f (Hz)	ξ (%)	test / analyzed	f (Hz)	ξ (%)
1	2.848	2.916	2.71	1.024	2.924	1.4	1.027	2.624	2.774	-	1.057	2.945	1.4	1.122	
2	5.171	5.169	2.05	1.000	5.259	0.8	1.017	4.940	4.888	-	0.990	-	-	-	
3	10.091	10.001	1.14	0.991	13.360	0.3	1.324	9.806	10.446	1.27	1.065	13.250	0.3	1.351	
4	16.072	18.807	0.27	1.170	20.600	0.2	1.282	15.729	17.927	0.42	1.140	20.400	0.1	1.297	
5	24.851	24.607	1.0	0.990	26.630	0.2	1.072	24.472	24.572	0.9	1.004	26.550	0.2	1.085	
6	35.048	33.852	0.26	0.966	35.470	0.3	1.012	34.661	33.075	0.99	0.954	33.430	0.6	0.964	
Average		1.023			1.122			Average		1.035			1.164		

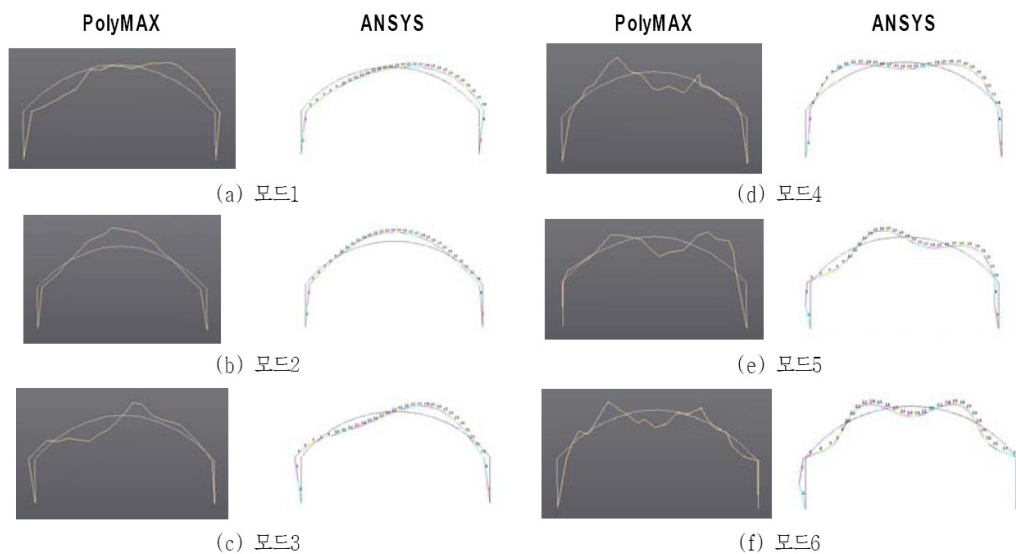


그림 1 실험 및 해석으로부터 획득한 모드형태의 비교 (P=0)

5. 결 언

고층건물의 경우 측정기록으로부터 추출한 모달 성능치와 초기 유한요소해석으로부터 산정한 값을 비교하여 보면 적어도 저차 3개의 고유진동수에서 2배정도의 차이가 났다. 이는 무엇보다도 설계사무소에서 설정한 유한요소모델이 비구조요소의 무시, 균열단면성능 사용 및 과도한 자중고려 등을 이유로, 실제 조건과는 상당한 차이가 있는데 그 이유가 있다. 실험 및 해석결과의 일치성을 위하여 고유진동수에 보다 중점을 두고 몇몇 수동모델향상을 시도한 결과, 허용할 정도의 일치를 획득하였으며, DLA의 경우 가장 영향이 큰 요소는 비균열 단면성능 및 재료의 동적탄성계수 등이다.

모달실험 및 FE해석으로부터 결정한 고유진동수 및 모드형태를 비교한 결과 시험체로 제작된 현재의 비닐하우스 기초부의 지지조건은 고정단에 가까운 것으로 나타났다. 축력이 증가함에 고유진동수는 감소하고 있으나, 현재까지는 그 차이가 미소한 것으로 나타났다. 추후 이에 대한 보다 자세한 검토가 요구된다. 보다 신뢰성 있는 단위아치의 모달계수를 산정하기 위하여서는 인접부재의 고차모드의 영향을 최소화하는 적절한 대책이 필요할 것으로 사료 되나, 이는 해결하기 힘든 비현실적인 문제이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-02)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드린다.

참고문헌

- Ewins, D. J. (2000). Modal Testing: Theory, Practice and Application, Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, UK.
- Heylen, W., Lammens, S., and Sas, P. (1995). Modal Analysis: Theory and Testing, Dept. of Mech. Engrg., Katholieke Univ. Leuven, Heverlee, Belgium.