비닐하우스 아치구조의 모달실험

Modal Testing of Arches for Plastic Film-Covered Greenhouses

조순호¹⁾

Cho, Soon Ho

국문 요약 >> 비닐하우스를 구성하는 세장한 강재 파이프 아치의 정적좌굴 하중을 결정하고 전체구조성능을 평가하기 위하여 수직하중을 단계별로 부가하고 고정해머 및 이동센서 형식을 취한 일련의 충격하중 진동실험을 수행하였다. 수직 및 수평보조재가 없는 내부아치의 거동 조사에 보다 중점을 두었으며, 측정한 입력-출력 진동기록에 대하여 최신 개발된 고급판별법인 PolyMAX법을 적용하여 고유진동수, 모드형태 및 감쇠율 등과 같은 모달계수를 추출하였다. 이러한 실험결과는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행한 다양한 조건의 해석결과와 비교하였으며, 상당히 일치된 경향을 나타냈다. 하지만, 내력의 38%정도에 해당하는 수직하중의 부가에 따른 고유진동수의 감소는 미미한 것으로 나타났다. 이와 관련하여 본 연구의 아치와 같이 매우 세장한 구조물의 현장 진동실험 및 시스템판별 해석을 수행하는데 있어서 예상되는 여러 문제점을 신중하게 토의하였다.

주요어 아치, 고유치해석 좌굴, 입력-출력 모달실험, 유한요소해석, 모달계수, 비닐하우스, 설하중, 강재 파이프, 시스템판별

ABSTRACT >> To determine the static buckling loads and evaluate the structural performance of slender steel pipe-arches such as for greenhouse structures, a series of modal tests using a fixed hammer and roving sensors was carried out, by providing no load, then a range of vertical loads, on an arch rib in several steps. More attention was given to an internal arch where vertical and horizontal auxiliary members are not placed, unlike an end arch. Modal parameters such as natural frequencies, mode shapes and damping ratios were extracted using more advanced system identification methods such as PolyMAX (Polyreference Least-Squares Complex Frequency Domain), and compared with those predicted by commercial FEA (Finite Element Analysis) software ANSYS for various conditions. A good correlation between them was achieved in an overall sense, however the reduction of natural frequencies due to the existence of preaxial loads was not apparent when the vertical load level was about up to 38% of its resistance. Some difficulties related to the field testing and parameter extraction for a very slender arch, as might arise from the influences of neighboring members, are carefully discussed.

Key words Arches, Eigen buckling, Experimental modal testing, Finite element analysis, Modal parameters, Plastic film-covered greenhouse, Snow loading, Steel pipes, System identification

1. 서 론

우리나라 비닐하우스 등과 같은 농촌시설물 구조는 특별한 공학적인 설계절차를 거치지 않고 경험적인 방법, 제작의 편이성 혹은 경제적 이유에 따라 영구적이 아닌 임시시설 성격의 구조물로 건축되어 온 것이 사실이다. 하지만, 최근 일련의 폭설로 인한 피해가 심각해짐에 따라, 더 이상 원

시적 방법으로는 국민의 평안 및 안정에 기여할 수 없는 상황에 까지 도달하여, 정부에서는 이에 대한 근본적인 대책을 마련하기에 이르렀다. 본 연구는 이러한 노력의 일환으로 수행된 연구내용의 일부를 기술하고 있다.

현재 상용되고 있는 비닐하우스는 강재 파이프로 구성된 아치구조, 단순철물을 사용한 접합방식, 단순 매립기초, 필름커버 사용 등을 대표적인 특징으로 들 수 있다.¹⁾ 폭설에 의한 이러한 구조물의 파괴형상은 그림 1과 같이 아치구조의 휨 혹은 전체좌굴 등에 의하여 우선 발생함을 알 수 있는데, 파괴를 유발하는 핵심인자를 보다 명확히 도출하고, 이에 따른 구조물의 수직 하중지지능력을 결정하기 위하여서는 현재의 시설구조물이 포함하는 구조상태(접합상태, 기초

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

본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 12. 7 / 수정일 2010. 2. 18, 게재확정일 : 2010. 2. 18)

(a) 휨 형식 파괴

(b) 좌굴 형식 파괴

〈그림 1〉 비닐하우스 시설물의 피해사례

상태, 아치종류)하에서 과다 혹은 불균형 적설하중 등에 의하여 파괴될 수 있는 전체구조물의 파괴양상을 실제와 가깝게 재현할 수 있는 실험방법의 개발이 요구된다.

종래의 재하실험에 의하여 비닐하우스와 같은 매우 세장한 구조물의 수직하중 지지능력 혹은 전체좌굴하중을 결정하기에는 재하 및 측정방법 등에 심각한 어려움이 발생하여 현실적으로 거의 불가능하다. 이러한 이유로 세장한 아치구조에 대한 현재까지의 좌굴실험은 주로 소형모델을 제작하여 실험실내에서 이루어져 왔으나, 이 경우 역시 실제 구조물의 지지 및 접합조건을 제대로 묘사하고 있다고 보기 힘들다.⁽²⁾ 따라서 본 연구에서는 진동이력 계측에 근거하여 수직하중에 의한 실물 아치구조의 전체좌굴하중을 결정할 수 있는 비파괴형식의 실험방법 개발 및 이의 검증을 위한 관련 수치해석법의 개발을 주요목표로 한다.

이러한 목적 외에도 본 연구에서 개발하고자 하는 진동계측에 의한 구조물의 성능평가기술은 전체구조물의 수직 및 수평방향 강성결정, 동적거동을 결정하는 특성치 추출, 기초부의 고정 및 연결부의 접합상태 등과 같은 불확정 구조변수(Uncertain Structural Parameters)를 결정하여 보다 합리적인 해석모델의 구축하고, 필요시 손상정도를 감지하여 구조물의 건강상태를 상시 평가할 수 있다.⁽³⁾

2. 배경이론

2.1 설하중

일반적으로 설계 설하중은 지리학적 위치에 따른 i) 지표면 설하중(Ground Snow Load) 결정, ii) 지붕의 노출, 내부 온도 조건, 구조물의 기능에 따라 지표면 설하중을 평지붕 설하중으로 변환, iii) 지붕의 경사도 고려, iv) 부분작용

〈그림 2〉 아치형 지붕의 균등 및 불균등 설하중 분포

(Partial) 및 불균형(Unbalanced) 설하중 고려, v) 이동(Drift) 설하중 고려, vi) 강우에 대한 추가영향 고려 등 일련의 절차를 거쳐서 산정한다.⁽⁴⁾

부분 설하중이 작용하는 경우 전 스패에 걸쳐 하중이 균일하게 작용하는 경우 보다 지지부재에 발생하는 응력은 감소하나, 지붕에 더욱 심각한 응력상황을 초래할 수 있다. 또한, 불균형 설하중이 작용하는 경사지붕의 경우에도 바람방향 후면지붕에는 평지붕에 작용하는 하중의 2배 정도가 작용하게 되어 역시 동일한 상황을 유발할 수 있다(그림 2).

아직까지도 설하중 산정에는 다양한 지역을 포함하는 장기간 측정데이터의 부족으로 높은 불확실성이 존재하는데, 특히 눈의 밀도(대략 240kgf/m^3), 예외적인 폭설, 경사지붕에 따른 형상계수, 바람 혹은 비 등 다른 하중과의 상호작용 등이 이에 해당한다.

2.2 좌굴하중과 단변방향 진동

구조물의 선형좌굴하중과 고유진동수는 각각 강성 혹은 강성 및 질량에 관계 할지라도 동일한 고유치 문제(Eigenvalue Problem)로 부터 그 해를 산정할 수 있다. 이러한 점에 착안하여, 기존의 몇몇 연구자들은 구조물의 좌굴하중을 결정하기위하여 구조물의 고유진동수(Natural Frequency)를 측정한 바 있다.⁽⁵⁾ 스패 중앙에 질량이 집중된 단순지지 조건의 선형부재에 대하여 진동계측 실험을 수행한 결과, 아래와 같은 근사식을 제안하였다.

$$\frac{P}{P_{cr}} + \left[\frac{f_m}{f_0}\right]^2 = 1 \quad (1)$$

여기서 P =작용축력(압축 +), P_{cr} =좌굴하중, f_0 =축력이 없는 구조물의 단변방향 고유진동수, f_m =축력이 작용하고 있는 구조물의 고유진동수이다. 상기 식은 축력 작용하의 진동수(f_m)가 0일 될 경우, 이에 일치하는 축하중에서 정적좌굴이 발생함을 의미한다($P=P_{cr}$). 또한 $P=P_{cr}$ 은 진동모드와 좌굴모드가 일치하는 경우에만 성립하며, 그렇지 않은 경우에는 $P \geq P_{cr}$ 의 관계가 존재함이 그 후에 밝혀졌다. 따라서 두 개의 서로 다른 축하중 레벨에서 고유진동수를 각각 측정하면 하중-진동수 혹은 주파수 관계식을 사용하여 좌굴하중을 산정할 수 있게 된다. 하지만, 추후의 연구에 의하면 좌굴하중-진동수 관계는 좌굴모드와 진동모드가 일치하는 경우에만 선형관계가 존재하며, 구조물에 따라 다선형(Multi-linear) 혹은 아치구조의 경우 4차식(Polynomial) 관계도 존재하므로 적어도 서너개의 저차 고유진동수를 측정하여 Fitting하는 절차가 요구된다(그림 3).^{(6),(7)}

〈그림 3〉 아치의 좌굴하중-고유진동수 관계

2.3 좌굴 및 자유진동해석

실험적 접근방법과 병행하여 아치구조의 탄성 혹은 비선형 좌굴하중, 축력의 유무에 따른 고유진동수를 이론적으로 결정하기 위한 일련의 해석방법이 요구된다.

좌굴하중은 유한요소법에 근거한 고유치해석(Eigenvalue Analysis) 혹은 큰 변형(Large Deformation)을 포함하는 점증적(Incremental) 비선형해석 기법 등을 적용하여 결정할 수 있다.

고유치해석은 이상적인 구조물의 이론적 좌굴하중을 결정하며, 고전적 Euler 좌굴해석이라 알려져 있다. 주어진 하중 및 구속조건으로부터 고유치를 산정하며, 여러 대표적 경계조건의 구조물에 대하여 이미 도표화 된 값 들이 존재한다. 하지만, 실제구조물은 초기변형(Imperfection) 및 비선형성(Nonlinearity) 등을 포함하고 있으므로 이론적 고유치해석 값에 도달하기 이전에 좌굴이 발생하게 되어, 해석 결과의 판독에 특별한 주의가 요구된다.

아치구조의 자유진동해석은 일반 고유치해석에 의하여 수행한다. 하지만, 아치 Profile 및 하중조건 등에 따라 원형 아치 및 균일 Radial 방향 하중이 작용하는 경우를 제외하고는 Closed-form 해가 존재하지 않으며, 설사 존재하더라도 상당한 계산노력이 요구된다. 더욱이 축력이 작용하는 아치의 경우는 원형아치이더라도 관련미분방정식의 계수가 변수를 포함하므로 Closed-form 해가 존재하지 않아 Galerkin 법 등과 같은 수치해석법을 사용하여야 한다.^{(8),(9)}

상기에 설명한 아치구조에 대하여 좌굴하중 결정 및 축력 유무에 따른 자유진동해석은 ANSYS⁽¹⁰⁾ 등과 같은 상용 프로그램을 이용하여 실현할 수 있다.

그림 4와 같은 대표적인 내부 아치에 대하여 Eigen 혹은 비선형 좌굴해석, 재료의 비선형성을 고려한 소성해석, 축력이 작용하지 않는 경우의 자유진동해석 등을 수행하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 기초부의 지지조건은 고정인 경우와

〈표 1〉 ANSYS에 의한 좌굴 및 자유진동해석 결과

Modes	Eigenvalue Buckling Loads				Nonlinear Buckling Loads		Loads Considering Material Nonlinearity		Free Vibration Frequencies Without Preaxial Load	
	Loading in a Full Span at 5 Points		Loading in a Half Span at 4 Points		Loading in a Full Span (or in a Half Span)		Loading in a Full Span (or in a Half Span)			
	Fixed (N)	Pinned (N)	Fixed (N)	Pinned (N)	Fixed (N)	Pinned (N)	Fixed (N)	Pinned (N)	Fixed (Hz)	Pinned (Hz)
1	949	303	1,383	385	(905)	(380)	(400)	(337)	2.848	1.350
2	1,667	1,212	2,712	1,878	735	703	325	240	5.171	3.849
3	2,878	2,150	5,004	3,806					10.091	8.342
4	3,691	3,281	6,535	5,694					16.072	14.496
5	5,387	4,903	9,359	8,274					24.851	22.443
6	7,003	6,742	11,772	11,555					35.048	31.018

All values shown indicate a single point load.

〈그림 4〉 전체 Setup 및 실험방법

핀절점인 경우로 나누어 고려하였으며, 작용하중은 아치 리브의 전 스패 5개 점(절점 4, 8, 12, 16 및 20)에 균일하게 작용하는 경우와 불균등하중을 묘사하기 위한 1/2 스패의 4개 점(절점 16, 18, 20 및 22)에 작용하는 경우로 구분하였다(그림 4).

Eigen 좌굴 및 자유진동해석의 1차 모드는 횡이동 모드인데 비하여, 전 스패에 하중이 작용하는 아치의 비선형 좌굴 및 재료의 비선형해석결과는 수직방향 변형모드가 지배적임에 주의할 필요가 있다. 전 스패에 균일하게 하중이 작용하고 지지점이 고정인 경우에는 아치작용보다는 골조작용이 우세하여 휨모멘트에 의하여 거동이 지배되고 있으나, 지지점이 핀인 경우에는 하중형태에 상관없이 대체로 1차 모드의 좌굴거동도 중요한 파괴요소를 알 수 있다. 특히, 전스패에 수직하중이 균등하게 작용하더라도 초기변형, 바람 등과 같은 수평하중에 의하여 횡이동이 발생할 수 있으므로, 횡방향 1차 모드의 좌굴을 완전 배제할 수는 없다. 한편 자유진동해석에 의하면 지지점이 핀인 경우 고유진동수가 크게 감소됨을 알 수 있는데, 이는 해당모드에 일치하는 구조물의 전체강성이 급격하게 감소함을 의미한다.

3. 충격햄머에 의한 모달실험

3.1 시험체

전술한 접근방법의 타당성을 검토하기 위해 실제 비닐하우스 시설물 아치구조를 제작, 설치하여 충격햄머에 의한 모달실험 및 해석을 수행하였다. 시험체로 제작된 비닐하우스

구조는 2008년 농림수산식품부 고시 내재해기준 시설물⁽¹⁾에서 제안하는 07-단동-3으로서 길이 10.0m, 폭 7.0m, 높이 3.4m, 적설심 50cm 및 풍속 36m/sec를 지지하도록 설계되었다. 본 시험체는 실제 현장에서 농민들 혹은 시공업자가 직접 제작하여 사용하는 경우를 나타내므로, 정부에서 제안하는 내재형 구조와는 사뭇 다르다(전체 아치의 기하학적 형상, 부재간의 접합상태, 가로대의 수, 기초부 지지상태 등). 제작된 시설물 구조의 전체형상 및 관련 상세는 그림 4와 같다. 아치는 직경(ϕ) 31.8mm, 두께(t) 1.5mm, 가로대 및 대각선재는 직경 25.4mm, 두께 1.5mm의 강재 파이프(SPVHS)를 각각 사용하였다.

현재는, 아치구조의 전체좌굴하중을 결정하기 위한 휨모드 고유진동수 및 모드형태, 관련성능을 산정하는 것이 주요목적이므로, 햄머에 의한 향타 및 센서부착작업을 용이하게 하기 위하여 비닐외피는 씌우지 않았다. 향후, 본 시험체는 손상감지를 위한 진동실험, 실제 적설하중 측정, 정적하중 재하에 의한 파괴실험 등 다양한 시나리오에 따라 지속적으로 실험을 수행하는데 사용될 예정이다.

수직방향 좌굴하중 혹은 구조성능을 결정하기 위한 진동계측실험은 경계조건이 다른 장소에 위치하는 2개의 2D아치를 대상으로 하였다(그림 5). Arch 1은 단부아치로서 면내에 수직 및 수평 보조재가 격자로 배치되어 있어, 내부아치보다는 강성 및 강도가 클 것으로 예상된다. Arch 2는 내부에 위치한 아치로서 수평가로대는 연결되어 있으나, 대각선재 및 면내 수직 및 수평보조재가 없는 순수 아치에 가까운 형태를 취하고 있다.

(a) 전체 시험체 형상

〈그림 5〉 실험대상 비닐하우스 아치구조

수차례에 걸친 예비실험을 수행한 후 단부에 위치하는 Arch 1은 면내의 수평 및 수직보조재의 영향으로 본 연구에서 획득하고자하는 아치구조의 고유진동수, 모드형태, 감쇠율 등의 모달계수를 신뢰성 있게 추출할 수 없음을 확인하였다. 따라서 이후에는 더 이상 실험을 진행하지 않았으며, 여기에서는 내부에 위치하는 순수 아치 형태인 Arch 2에 대한 모달실험만을 기술한다.

3.2 측정장비 및 예비실험

실험에 사용된 센서는 ICP Type의 1축-가속도계로서 PCB 393A03(1V/g, 0.3~1,000Hz, $\pm 5g$)이며, 충격해머는 ICP Type의 Force sensor가 내장된 PCB 086D20 (0.23mV/N, $\pm 22,000N$)이다. 데이터획득장치(Data Acquisition, DAQ)는 16ch의 벨기에 LMS⁽¹¹⁾의 Pimento로서 24bit, 50~50,000Hz 까지 다양한 Sampling rate, 0.316~10Volt 까지 4단계의 Input range 등의 사양을 보유하고 있다. 특히 건축/토목구조물의 경우 Low sampling 및 이에 따른 Analog anti-aliasing filter의 구비가 필수적인데 대체로 이를 잘 만족시키고 있다. 사용된 측정 장비에 대한 전체구성은 그림 6과 같다.

실제 실험에 들어가기 전에 기기의 Calibration 및 DAQ의 적정 범위설정을 위하여 사무실내에서 수십 번에 걸쳐 모의실험을 수행하였으며, 또한 현장에서도 구조체의 대칭성을 검토하기 위한 Symmetry check, 사용된 재료의 탄성 성능 검토하기 위한 Reciprocity check, 구조체의 선형성을 조사하기 위한 Linearity check 및 전체시스템의 안정성 검토를 위한 Repeatability check 등 일련의 예비실험을 수행한 후에야 비로소 본 실험에 돌입할 수 있었다.

〈그림 6〉 측정장비 Configuration

3.3 실험방법

아치구조의 고유진동수 및 모드형태를 결정하기 위한 본 실험은 그림 4에서 보는 바와 같이 고정된 한점(절점 2)에서 수평방향으로 충격을 가하고, 수평 및 수직방향 6개의 가속도계를 1 Setup으로 하여 10번을 반복측정한 후, 다음 두 절점으로 2조의 센서를 이동하는 방법을 택하여 전체 10 Setups을 구성하여 한 개의 아치에 대한 실험을 완료하였다.

절점 2에 위치한 1조의 센서는 측정기록에 대하여 현재의 입력-출력 모달판별법 뿐만 아니라 응답의존 모달판별법(Operational identification)을 적용할 시 각 Setup 간의 스케일을 결정하는 기준센서로서, 고정위치에서 매 Setup에 공통으로 포함되어 있다.

센서의 부착면이 곡면인 관계로 곡면에 센서를 부착할 수 있는 특별장치를 제작하여 아치리브에 나사로 고정하였다(그림 7). 한 절점에서 센서는 X, Y방향으로 나사로 고정하여 부착물에 연결하였으며, 이를 위하여는 부착물에 회전

〈그림 7〉 Zig를 사용한 센서부착

〈그림 8〉 수직하중 부가장치

이 자유로운 Zig의 설치가 요구되었다. 햄머 팁은 저주파에 적합한 Soft 재질을 사용하였으며, 대략 햄머력의 크기는 100~200N을 유지하였고, 이에 따른 가속도의 크기는 20m/sec^2 정도였다.

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⁽¹¹⁾ Option을 사용하였다. 매 충격마다 관련센서에 대하여 Autopower Spectrum(APS), Frequency Response Function(FRF) 및 Coherence Function (COH) 등을 산정하여 기록하였다. 최종적으로는 1 Setup에서 10번의 가격에 의한 기록 중 평균된 FRF 값만이 시스템판별 혹은 모달해석의 입력데이터로 사용되며, 본 실험과 같이 고정 햄머법을 채택한 경우, 각 Setup으로 부터 획득한 주파수응답함수(FRF) 값은 전체시스템 FRF행렬의 수직열을 구성한다.

아치구조에 축력을 유발하기 위하여서는 아치리브의 일정한 5지점에 와이어로프를 연결하여 추를 매달아 수직하

중을 부가하였다. 수직하중은 각각의 지점에 부착한 Precision 매달림 저울(Kamosita산, 100kgf 용량, 500g 오차)에 의하여 측정/조절하였으며, 와이어로프의 수평 흔들림을 최소화하기 위하여 H형 보 Loader에 수직바를 연결하여 최소한의 여유를 가지고 지반에 매립하였다(그림 8).

현재까지, 수직하중을 변화시켜가면서 전체 4경우의 아치에 대하여 충격햄머에 의한 강제진동실험을 수행하였으나, 본 연구에서는 그 중 대표적 경우인 축력이 작용하지 않는 아치(P0)와 $P1=5 \times 150\text{N}$ 의 수직하중이 작용하는 아치의 진동실험에 대해서만 기술한다. P1은 대략 파괴하중의 38%에 해당된다.

4. 실험결과 및 토의

현장에서 획득한 신호는 판별기법을 적용하기 이전에 Decimation, Detrend, High- 혹은 Low-pass filtering 등의 단계가 요구된다. 축력이 없는 경우 Arch 2에서 연속 측정된 충격력 및 가속도 시간이력응답 및 이에 DFT(Discrete Fourier Transform)를 적용하여 획득한 APS, COH 및 FRF는 각각 그림 9 및 10과 같다.

내부아치에 대한 충격햄머 실험으로부터 획득한 입력 및 출력기록을 사용하여 고유진동수(f), 모드형태(ϕ) 및 감쇠율(ξ) 등과 같은 구조성능을 추출하기 위한 일련의 모달해석을 수행하였다.

LMS사의 TestLab⁽¹¹⁾에서 제공하는 모달해석은 표준방법인 PLSCE(Polyreference Least-Squares Complex Exponential) 및 PolyMAX(Polyreference Least-Squares Complex Frequency Domain) 등인데, 충격실험 모듈로부터 획득한 Block Time 데이터에 일련의 수학적 계산을 통하여 가공한 FRF를 최종적으로 저장하고, 이를 모달해석의 입력데이터로 사용하고 있다. 그 후에는 선택된 데이터에 대하여 Pole 및 모드형태 산정, 안정화도(Stability Diagram) 작성 및 실제 Pole 선택, Animation 등 일련의 단계를 거쳐 구조성능을 추출하고, 최종적으로 실험과 이론으로 획득한 FRF의 관계를 MAC(Modal Assurance Criterion) 등을 통하여 검증하고 있다.

PLSCE법^{(12),(13)}은 주파수응답함수(FRF) 대신에 충격응답함수(Impulse Response Function)를 기본데이터로 사용하는 시간영역 판별법으로서 구조물 전체에 대한 Pole 및 모달 참여계수 등을 산정한다. 모드형태는 이미 산정된 고유진동수 및 감쇠율 값을 시간 혹은 주파수 영역에 근거한 일련의 방정식에 대입하여 Least-Squares 의미에서 산정한다.

〈그림 9〉 햄머 및 센서의 기록

〈그림 10〉 대표적인 FRF

〈표 2〉 충격실험으로부터 추출한 모달계수

Modes	Description	Without Preaxial Loads (P0)				With Preaxial Loads (P1)			
		Analyzed by ANSYS		Extracted by PolyMAX		Analyzed by ANSYS		Extracted by PolyMAX	
		Fixed (Hz)	Pinned (Hz)	Frequency (Hz)	Damping Ratio (%)	Fixed (Hz)	Pinned (Hz)	Frequency (Hz)	Damping Ratio (%)
1	1st Lateral	2.848	1.350	2.916	2.71	2.624	0.959	2.774	-
2	1st Vertical	5.171	3.849	5.169	2.05	4.940	3.605	4.888	-
3	2nd Lateral	10.091	8.342	10.001	1.14	9.806	8.056	10.446	1.27
4	2nd Vertical	16.072	14.496	18.807	0.27	15.729	14.176	17.927	0.42
5	3rd Lateral	24.851	22.443	24.607	1.0	24.472	22.090	24.572	0.9
6	3rd Vertical	35.048	31.018	33.852	0.26	34.661	30.649	33.075	0.99

(a) 1차 모드(2.916Hz)

(b) 2차 모드(5.169Hz)

〈그림 11〉 실험으로부터 추출한 저차 모드형태

PolyMAX법^{(14),(15)}은 LSCF(Least-Squares Complex Frequency Domain)의 향상된 버전으로 최근에 개발된 주피수 영역 기반 판별법이다. LSCF는 소위 Common-Denominator 모델에 근거하며, Iterative Maximum Likelihood법의 초기 값을 결정하기 위하여 소개되었다. 이러한 초기 값은 적은 노력으로 매우 정확한 모달계수를 제공하였는데, 기존의 산정법과 비교하여 특별히 우수한 점은 매우 깨끗한 안정화

도를 제공한다는 점이다. 시스템판별법에 대한 보다 자세한 설명은 후편논문을 참조하라.⁽¹⁶⁾

충격하중 및 응답진동기록에 PolyMAX 시스템판별법을 적용하여 추출한 고유진동수 및 감쇠비는 표 2와 같으며, 또한 저차 모드형태는 그림 11과 같다. PLSCE는 매우 산란된 안정화도를 나타내므로 더 이상 고려하지 않았는데, 이는 기계구조와는 달리 Noise가 많은 건축/토목 구조물에는 적

합하지 않은 것으로 판단된다. 한편, ANSYS를 사용한 유한요소해석으로부터 획득한 모드형태와 PolyMAX로부터 추출한 모드를 비교하였으며, 현재로서는 5~6차 모드까지 유효한 것으로 판단되었다. 모드형태에 대한 보다 자세한 설명은 후편논문에 기술하였다.⁽¹⁶⁾

본 연구의 시험체는 실구조물로서 진동실험을 수행하기에 이상화한 실험실 모델과는 다르다. 따라서 실제 구조물의 경계 및 구조조건을 잘 묘사하고 있는 반면에, 측정 대상인 단위아치에 여러 주변부재들이 연결되어 있어 독립된 아치만의 거동을 보다 분명하게 묘사하기에는 한계가 있다. 따라서 인접부재의 영향으로 단위아치의 고유진동수 이외에 인접부재의 거동을 나타내는 많은 고주파 진동수를 포함하고 있으므로, 안정화도에서 실제 아치의 모드를 선택하는데 특별한 주의를 요한다. 이를 위하여서는 인접부재를 포함한 보다 광범위의 측정을 고려할 수 있다.

한편, 본 연구에 사용된 충격해머는 건축/토목분야에서 흔히 사용하는 해머 중 낮은 주파수 범위(0~500Hz)를 보유하고 있는데, 인접부재 등에 의한 고주파수 영향을 최대한으로 배제하기 위하여서는 보다 낮은 주파수 범위를 나타내는 충격장치가 요구된다.

또한 가속도계 부착을 위한 고정장치 및 부가하중 측정을 위한 매달림 저울의 사용은 질량하중의 영향을 고려하여 최소한의 크기 혹은 규모로 설치하였음에도 불구하고 이의 영향을 완전히 배제할 수는 없었다.

보다 신뢰성 있는 단위 아치의 모달계수를 산정하기 위하여서는 전술한 모든 관련사항들에 대한 해결책을 고려하여 측정 작업이 수행되어야 하나, 이는 현실적으로 달성하기 매우 어려운 문제들이다. 그럼에도 불구하고 현재의 측정으로부터 추출한 구조물의 정보는 본 연구의 목적을 달성하기에 충분한 것으로 판단된다.

5. 결 론

진동계측에 의한 아치구조의 수직 혹은 수평방향 모드 좌굴하중 산정 및 성능평가 등과 관련하여 일련의 모달실험 및 유한요소해석을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 유도할 수 있었다.

1. 본 연구에서 구축한 일련의 Hardware chain(센서, 케이블, 충격해머, 데이터 습득장치), 현장에서 실시할 수 있는 간편 신호처리(Detrend, Decimation 및 Filtering 등) 및 해석(APS, COH 및 FRF 산정 등) 등을 통하여 신뢰성 있는 진동기록을 확보할 수 있다.

2. 모달실험 및 유한요소해석으로부터 결정한 고유진동수 및 모드형태를 비교한 결과 시험체로 제작된 현재의 비닐하우스 기초부의 지지조건은 고정단에 가까운 것으로 나타났다. 하지만 하중조건 및 진동모드가 증가함에 따라 고정도는 저하될 것으로 예상된다.
3. 제안된 PolyMAX 시스템판별법은 진동기록으로부터 요구되는 구조성능(고유진동수, 모드형상 및 감쇠율 등)을 신뢰성 있게 추출할 수 있는 것으로 확인되었다. 유한요소해석결과와도 대체적으로 일치하고 있는 것으로 나타났다. Periodogram에 대하여 PSD를 산정하는 PLSCE에 비하여 PolyMAX는 Autocorrelation에 대하여 PSD를 산정하므로 잡음이 많은 현재의 건축, 토목구조물에 보다 적합할 것으로 판단된다.
4. 안정 Pole을 선택하는데 있어, 관련된 모드형태를 반복적으로 도식하여 실제모드인지를 확인하는 절차가 반드시 필요하다. 이는 Noise가 많은 건축/토목구조물에는 흔히 나타나는 현상이며, 더욱이 현 구조물과 같이 인접부재의 영향을 완전히 배제할 수 없는 경우에는 더욱 그러하다.
5. 축력이 증가함에 따라 고유진동수는 감소하고 있으나, 현재까지는 그 차이가 상당히 미소한 것으로 나타났다. 추후 이에 대한 보다 자세한 검토가 요구된다. 특히 수직하중 부가에 의하여 어느 정도의 축력이 실제 아치리브에 작용하는지를 판독하는 것이 주요사항이 된다. 이는 아치형상과 관련된 골조작용의 기여정도와의 밀접한 관계가 있다.
6. 보다 신뢰성 있는 단위 아치의 모달계수를 산정하기 위하여서는 인접부재의 고차모드를 제거하기 위한 보다 적절한 주파수 범위의 해머 사용, 인접부재를 포함한 보다 광범위한 측정 등이 요구된다. 또한 가능하면 질량하중의 영향을 최소화하기 위하여 센서 고정장치 및 하중을 측정하기 위한 매달림 저울 등을 경량화 혹은 최소화하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#‘08지역기술혁신 B01-02)에 의하여 수행되었으며, 전 실험에 참여한 학부생 이승행, 이재호군에게 특별히 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. 농림수산식품부, “원예특작시설 내재해형 규격 설계도 시방서,” 제2008-76호, 2008.

2. Singer, J., Arbocz, J., and Weller, T., *Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures, Vol. 1, Basic Concepts, Columns, Beams and Plates*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1998.
3. Ewins, D. J., *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, UK, 2000.
4. ASCE, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures SEI/ASCE 7-05," Reston, Va., USA, 2006.
5. Lurie, A., "Lateral Vibrations as Related to Structural Stability," PhD Thesis, Caltech, Pasadena, California, USA, 1959.
6. Plaut, R. H., and Johnson E. R., "The Effects of Initial Thrust and Elastic Foundation on the Vibration Frequencies of a Shallow Arch," *J. of Sound and Vib.*, 78(4), 565-571, 1981.
7. Plaut, R. H., and Virgin, L. N., "Use of Frequency Data to Predict Buckling," *J. of Engrg. Mech., ASCE*, 116(10), 2230-2335, 1990.
8. Chidamparam, P., and Leissa, A. W., "Influence of Centerline Extensibility on the In-Plane Free Vibrations of Loaded Circular Arches," *J. of Sound and Vib.*, 183(5), 779-795, 1995.
9. Tufekci, A., and Arpacı, A., "Exact Solution of In-Plane Vibrations of Circular Arches with Account Taken of Axial Extension, Transverse Shear and Rotatory Inertia," *J. of Sound and Vibration*, 209(5), 845-856, 1998.
10. ANSYS, "Robust Simulation and Analysis Software, <http://www.ansys.com/>," Release 11.0, ANSYS Incorporated, USA, 2007.
11. LMS, "TestXpress Version 3A and TestLab Version 9A, Experimental notes and Manuals," Belgium, 2008.
12. Heylen, W., Lammens, S., and Sas, P., *Modal Analysis: Theory and Testing*, Dept. of Mech. Engrg., Katholieke Univ. Leuven, Heverlee, Belgium, 1995.
13. Hermans, H., and Van Der Auweraer, H., "Modal Testing and Analysis of Structures under Operational Conditions: Industrial Applications," *Mech. Systems and Signal Proc.*, 13(2), 193-216, 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. Cauberghe, B., "Applied Frequency-Domain System Identification in the Field of Experimental and Operational Modal Analysis," PhD thesis, Dept. of Mech. Engrg., Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 2004.
16. 조순호, "비닐하우스 아치구조의 모달계수 산정," *지진공학회 논문집*, 14(12), 67-74, 2010.