

# 플로팅 구조물의 동적특성에 관한 연구

## Study on the Dynamic Characteristics of a Floating Structure

박수용<sup>\*</sup> · 송화철<sup>\*\*</sup> · 김은혜<sup>\*\*\*</sup> · 정근후<sup>\*\*\*\*</sup> · 조성훈<sup>\*\*\*\*\*</sup> · 김세철<sup>\*\*\*\*\*</sup>

Park, Soo-Yong · Song, Hwa-Cheol · Kim, Eun-Hye · Jung, Keun-Hoo · Cho, Sung-Hoon · Kim, Se-Cheol

### 요 약

구조시스템의 동적 특성은 구조 모델 업데이트, 구조 헬스 모니터링, 구조 제어 분야에서 기초자료로 활용되기 때문에 많은 연구자들의 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 부유식구조물의 축소모형을 대상으로 진동실험을 수행하였으며, 측정된 실험데이터로부터 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 실험에서 구한 진동특성 결과는 유한요소 모델의 결과와 비교하였으며, 측정된 모드형상과 수치해석으로 계산된 모드형상의 상관관계를 수록하였다.

**keywords** : 부유식 구조물, 모달 테스트, 고유진동수, 모드형상

### 1. 서 론

고유 진동수, 감쇠, 모드 형상과 같은 구조 시스템의 동적 특성은 많은 연구자들에 의해 구조 모델 업데이트, 구조 헬스 모니터링, 구조 제어 분야 등에 광범위하게 사용 되어져 왔다(Brincker et al., 2000; Gentile and Bernardini; 2008). 구조물의 동적 응답을 측정하는 시험으로는 강제 진동 시험과 상시 진동 시험 두 가지 방법이 있다. 강제 진동 시험은 정확성과 편리함 때문에 가장 많이 쓰이는 일반적인 방법이다.

강제 진동 시험에서는 입력 하중을 직접 측정하기 때문에, 전달함수는 입력 하중과 출력 응답으로부터 직접 구할 수 있다. 그러나 상시 진동 시험에서는 출력 응답만을 측정할 수 있기 때문에 전달함수와 모달 매개변수를 얻는 과정은 강제 진동 시험보다 훨씬 복잡하다. 구조물의 동적 특성을 파악하기 위한 진동 시험은 빌딩, 교량 등 여러 종류의 구조물에 적용되어 왔지만, 부유식구조물에 적용한 사례는 거의 없다. 본 논문의 목적은 물 위에 떠 있는 강제 박스 축소모형 구조물에 대한 모달 특성, 즉 고유 진동수와 이에 상응하는 모드형상을 제시하는 것이다. 본 논문의 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 절차를 수행하였다. 첫째, 부유식 강제 모형 구조물을 대상으로 강제 진동 시험을 수행하였다. 둘째, 측정된 데이터를 주파수 영역으로 치환하여 전달함수를 구한 후 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 마지막으로 유한요소 모델을 생성한 후 자유진동 해석을 통하여 고유치와 모드형상을 구하였으며, 실험에서 구한 값과 비교하여 고유진동수와 모드형상에 대한 상관관계를 분석하였다.

\* 정회원 · 한국해양대학교 해양건축공학과 부교수 sypark@hhu.ac.kr

\*\* 정회원 · 한국해양대학교 해양건축공학과 교수 song@hhu.ac.kr

\*\*\* 한국해양대학교 해양건축공학과 석사과정 keheyda@naver.com

\*\*\*\* 한국해양대학교 해양건축공학과 석사과정 eng040808@naver.com

\*\*\*\*\* 한국해양대학교 해양건축공학과 학부과정 pilot1031@naver.com

\*\*\*\*\* 한국해양대학교 해양건축공학과 학부과정 reality@nate.com

## 2. 부유식 구조물의 동적 실험

### 2.1. 동적 실험 및 분석

그림 1은 수조의 물위에 떠 있는 구조물(강재 박스) 전경을 나타낸다. 수조의 크기는 1.5m (길이) \* 1m (폭) \* 0.5m (높이)이다. 실험체인 강재박스는 내부가 비어 있는 육면체로 상부판, 하부판, 4개의 측면판으로 구성된 6개의 강재판으로 이루어져 있다. 모든 판들의 두께는 0.0029m이고, 그림 2에 강재 박스의 외부 치수를 나타내었다.

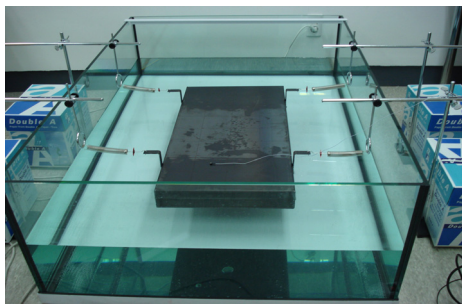


그림 1 수조 내 실험 구조물

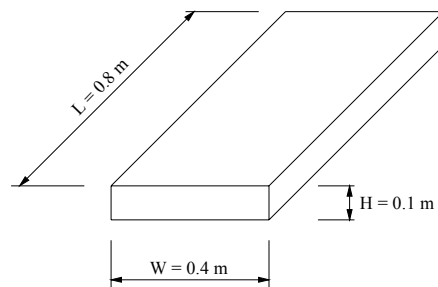
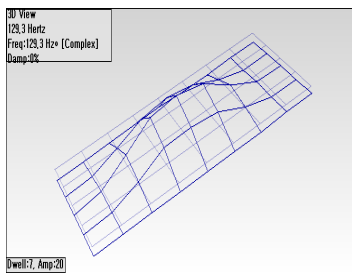
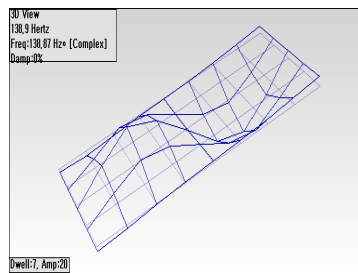


그림 2 강재 상자 구조물의 크기

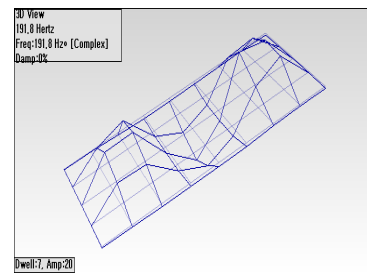
부유식 구조물의 진동특성을 구하기 위하여 모달 임팩트 테스트를 수행하였으며, 한 개의 가속도계를 고정점에 부착하고 해머 충격을 이동하면서 고정응답과 이동 입력충격을 계측하였다. 모달 실험을 수행하기 위해 사용된 장치는 충격 해머, ICP 가속도계 (Kistler 8778A500), 4 채널 동적 신호 분석기 (LMS SCM V-4), 노트북 컴퓨터로 구성된다. 응답 가속도계는 강재 상자 상판에 고정하여 사용하였으며, 총 45개의 노드점을 강재 상판에 표시하여 실험을 수행하였다. 45개의 주파수 응답함수 (FRF)를 고정 응답, 이동 입력 실험으로부터 계측하였다. 주파수 응답함수는 응답 가속도와 충격 해머에서 나온 시간 영역데이터를 주파수 영역으로 변환하여 생성하였으며, 각 충격 위치에서 측정된 주파수 응답함수는 3번의 충격 응답 측정치의 평균 값을 사용하였다. 계측한 주파수 응답함수로부터 모드분석 프로그램인 ME'scope Version 5.0(2009)를 사용하여 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 이때 모드형상은 피크 피킹 방법(Ewins, 1984)을 적용하여 추출하였으며, 그림 3에 나타내었다.



(a) Mode 1(129.3 Hz)



(b) Mode 2(138.87 Hz)



(c) Mode 3(191.8 Hz)

그림 3 실험 모드 형상

## 2.2. 유한 요소 모델

강재 박스 부유식 구조물의 유한 요소 모델은 측정된 모달 매개 변수의 비교를 위해 상용 소프트웨어 프로그램(ABAQUS, 2001)을 사용하여 생성하였다. 강재 박스와 물 사이의 상호작용은 Z축 방향 861개의 축 스프링들(강재 박스의 하부판에서 균등 분포)을 사용하여 모델링하였다. 계류 시스템은 Y축 방향 및 X축 방향으로 각각 2개의 축 스프링으로 모델링하였다. 고유진동수와 이에 상응하는 모드형상을 구하기 위하여 자유진동 해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 강재 박스의 상부판의 모드형상을 나타낸다.

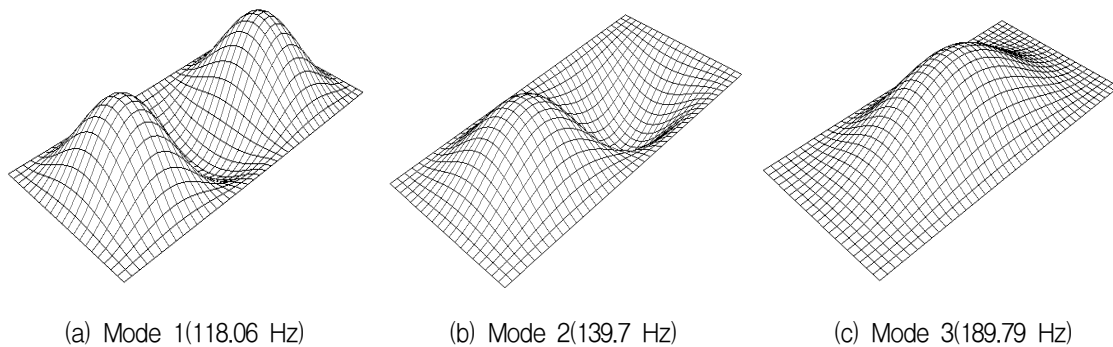


그림 4 유한요소 모델의 모드 형상

## 2.3. 모드 형상의 비교

주파수 응답함수에서 추출한 모드형상과 유한요소 모델에서 계산된 모드 형상을 비교하였다. 모드 사이의 상관성을 분석하기 위해, Modal Assurance Criteria(MAC)을 계산하였다(Ewins, 1984). 표 1에 45개의 자유도를 사용하여 유한요소 모델과 실험 모드형상 간의 MAC 수치들을 수록하였다. 표 1에서 나타난 바와 같이, 첫 번째 모드의 MAC 값은 0.9891로 거의 일치하고, 두 번째와 세 번째 모드들은 각각 0.9168 와 0.8640로 실험 모드와 매우 높은 상관 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

표 1 Modal Assurance Criteria(MAC)

		FE modes			
		Mode	1	2	3
	Mode	Frequency(Hz)	118.06	139.70	189.79
	1	129.30	0.9891	0.0001	0.0011
	2	138.87	0.0046	0.9168	0.0010
	3	191.80	0.0426	0.0000	0.8640

### 3. 결과 논의

부유식 구조물의 모드 형상은 일반 구조물의 모드형상 보다 더욱 복잡한 거동을 보여 준다. 그림 3에 나타난 실험모드에서는 순수 판의 굽힘 모드는 발생하지 않았다. 모드 1, 2, 3 모두 강제 거동이나 상하요동과 조합된 판의 굽힘 모드가 발생하였으며, 이런 현상들은 모드 형상의 애니메이션에서 확인할 수 있다. 첫 번째 유한요소 모델의 모드형상은 MAC 값이 0.9891로 첫 번째 실험모드와 거의 일치하지만 상대적으로 고유진동수 값에 비교적 큰 차이가 발생하였다. 첫 번째 실험 모드의 공진 주파수는 129.3 Hz 이고, 첫 번째 유한요소 모델의 고유진동수는 118.06 Hz 이다. 주파수 사이에 8.7%의 차이가 있다. 두 번째와 세 번째 유한요소 모델의 모드형상과 두 번째와 세 번째 실험 모드는 각각, 0.6% 와 1.0% 차이를 보여 준다. 이 차이의 주요 원인은 유한요소 모델의 모델링 오류 때문이다. 강제 박스의 하부와 물과의 상호작용은 유한요소 모델에서 단순히 선형 스프링 요소에 의해 대체되었고, 물에 의한 관성력, 감쇠력 및 복원력은 유한요소 모델에 고려하지 않았다.

### 4. 결론

본 논문의 목적은 부유식 강제 박스 구조물의 동적 특성을 추출하고 검증하는 것으로 강제 상판에서 모달 임팩트 테스트를 수행하여 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 총 3개의 모드를 0~200 Hz의 주파수 범위에서 추출하였고 그 결과를 유한요소 모델과 비교하였다.

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다. 첫째, 부유식 구조물의 동적 특성인 고유진동수와 모드형상은 유한요소 모델과 연계하여 실험적으로 구할 수 있다. 둘째, 본 연구에서 추출한 3개의 실험 모드형상을 해석 모델과 비교하여 MAC 값을 구한 결과 3개의 모드 모두 높은 상관성을 보여준다. 셋째, 실제 대형 부유식 구조물의 진동 특성을 추출하기 위하여 상시진동 측정 방법 및 모드 분석 기법이 개발되어야 하며, 구조물과 물 사이의 상호작용을 충분히 설명할 수 있는 유한 요소 모델의 정확성을 향상시키기 위한 노력이 요구된다.

### 감사의 글

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

### 참고문헌

- ABAQUS Version 6.2 User's Manual (2001). Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, RI.
- Brincker, R, Zhang, L, and Andersen, P (2000). "Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition," Proc 19th Int Modal Analysis Conf, IMAC, San Antonio, TX.
- Ewins, DJ (1984). "Modal testing: theory and practice," Research Studies Press, London, England.
- Gentile, C, and Bernardini, G (2008). "Output-only modal identification of a reinforced concrete bridge from radar-based measurements," NDT & E International, Vol 41, pp. 544-553.
- ME'scope TM (2009). "Version 5.0 Operating Manual," Vibrant Technology, Inc., Jamestown, California.