

항만 케이슨 구조모형의 동적응답특성 분석 Dynamic Response Analysis of Harbor Caisson Structure Model

이소영¹, 홍동수², 김정태³, 이진학⁴
So-Young Lee¹, Dong-Soo Hong², Jeong-Tae Kim³ and Jin-Hak Yi⁴

1. 서 론

최근 대규모 항만 건설 및 항만 리모델링사업이 활발하게 진행되고 있다. 특히 최근 부산 북항 리모델링 사업을 통해 기존 항만의 노후화된 구조물을 어떻게 리모델링하여야 할 것인가에 대한 문제가 제기되고 있다. 항만구조물의 리모델링을 위해서는 먼저 기존 구조물의 건전성 평가가 필요하며, 그 결과를 바탕으로 구조물의 노후화 정도를 평가하여 보수·보강 계획이 수립되어야 한다. 일반적으로 대형 중력식 항만구조물의 손상 유형은 사석 유실, 부등침하 및 뒷채움재 손실 등에 의한 구조 불안정성 발생, 콘크리트 염해 및 피로균열에 의한 구조노후화, 그리고 극치 외력에 의한 손상 등으로 구분된다.

항만구조물의 건전성 평가는 일반적으로 외관 조사 및 국부 비파괴검사와 같은 현장조사를 통하여 수행되고 있다. 하지만 이와 같은 평가방법은 많은 시간과 장비 및 인력을 필요하다는 문제점을 가지고 있다.

한편, 진동기반으로 구조건전성을 평가하는 여러 기법들이 연구되고 있으며, 대형 토목구조물 분야에 대한 연구가 수행되고 있다. 현재까지의 연구는 주로 교량과 건물 등의 육상구조물에 적용되어왔으며, 복잡한 경계조건과 동적 구조거동을 하는 항만구조물에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 중력식 항만구조물의 대표적인 형식인 케이슨 구조모형의 동적응답 특성을 실험적으로 분석하고자 한다. 이를 통해 차후 항만구조물의 손상검색 모델의 개발에 필요한 기초자료를 얻고자 하였다. 이를 위해 첫째, 항만 케이슨 모형 구조물을 제작하였다. 둘째, 수치해석을 통하여 케이슨 구조모형의 동적응답특성을 분석하였다. 셋째, 실제 가진 실험을 통해 케이슨 구조모형의 동적 응답을 측정하여 상관계수(Correlation Coefficient, CC), 주파수 응답비보증지수(Frequency Response Ratio Assurance Criterion, FRRAC), 고유진동수 변화, 모드보증지수(Modal Assurance Criterion, MAC)를 이용하여 구조모형의 동적응답 특성을 분석하였다.

2. 진동응답 특성 및 분석 기법

2.1 주파수 응답함수

일반적으로 주파수영역에서의 입력하중과 구조물응답 사이의 관계로부터 다음과 같은 주파수응답함수(Frequency response function, FRF)를 얻을 수 있다.

$$H(f) = \frac{V(f)}{U(f)} = \frac{1}{-m(2\pi f)^2 + ic(2\pi f) + k} \quad (1)$$

여기서, $U(f)$ 와 $V(f)$ 는 각각 주파수 영역으로 변형된 외력과 변위이다 그리고 m, c 및 k 는 각각 구조물의 질량, 감쇠 및 강성이다.

1 발표자: 부경대학교 해양공학과 석사과정

2 부경대학교 해양공학과 박사과정

3 교신저자 : 부경대학교 해양공학과 교수

4 한국해양연구원 항만·연안공간연구사업단 선임연구원

주파수응답함수의 상관계수

구조물의 두 위치에서 측정된 두 개의 독립된 주파수응답함수 $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 가 다. 이 두 함수를 확률변수로 취급하면 두 주파수응답함수간의 상관계수 $\rho_{H_1H_2}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다 (Bendat와 Piersol, 1993).

$$\rho_{H_1H_2} = \frac{E[H_1(f)H_2(f)] - \mu_{H_1}\mu_{H_2}}{\sigma_{H_1}\sigma_{H_2}} \quad (2)$$

여기서, σ_{H_1} 과 σ_{H_2} 는 각 주파수응답함수의 표준편차이다. 식 (2)의 우항의 분자항은 두 주파수응답함수간의 공분산을 나타내는 것이다. μ_{H_1} , μ_{H_2} 는 각 주파수응답함수의 평균을 나타낸다. 또한 식 (2)와 같은 상관계수는 $-1 \leq \rho_{H_1H_2} \leq 1$ 의 관계를 만족하며, 만약 $\rho_{H_1H_2}$ 값이 0이라면 두 주파수응답함수 사이에는 상관성이 없음을 의미한다.

주파수응답비보증지수

식 (1)의 주파수응답함수로부터 주파수응답비보증지수가 유도된다. k 번째 고유진동수 ω_k 를 가지는 조화하중을 고려하면, 같은 시간에 두 점에 가해지는 조화하중에 의한 주파수응답비는 다음 식과 같다.

$$\frac{V_i(\omega_k)}{V_{i+1}(\omega_k)} = \frac{\sum_{j=1}^m H_{i,j}(\omega_k) U_j(\omega_k)}{\sum_{j=1}^m H_{i+1,j}(\omega_k) U_j(\omega_k)} = \frac{H_i(\omega_k)}{H_{i+1}(\omega_k)} \quad (3)$$

따라서 두 점 ($i, i+1$)에서의 응답의 주파수응답비(frequency response ratio, FRR) 함수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} FRR_{i,i+1} &= \frac{S_{i,i}(\omega_k)}{S_{i,i+1}(\omega_k)} \\ &= \frac{E[V_i(\omega_k)V_i(\omega_k)]}{E[V_i(\omega_k)V_{i+1}(\omega_k)]} = \frac{H_i(\omega_k)}{H_{i+1}(\omega_k)} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $S_{i,i+1}(\omega_k)$ 와 $S_{i,i}(\omega_k)$ 는 각각 상호 스펙트럼 밀도 함수와 자기 스펙트럼 밀도 함수를 나타내며, $E[\cdot]$ 는 평균을 의미한다. 서로 다른 두 구조물의 주파수응답비의 일관성을 이용하여 다음 식과 같은 주파수응답비보증지수를 정의한다.

$$FRRAC(b,d) = \frac{\{FRR_b^T FRR_d\}^2}{\{FRR_b^T FRR_b\} \{FRR_d^T FRR_d\}} \quad (5)$$

여기서, 하첨자 b, d 는 서로 다른 구조물을 의미하며, $FRRAC$ 값이 1에 근접하다면 두 상태가 거의 일치함을 나타내며, 1보다 작은 값을 가진

다면 변화가 발생함을 나타낸다.

2.3 고유진동수 및 모드형상

식(1)의 주파수응답함수로부터 고유진동수 및 모드형상, 감쇠계수와 같은 모드특성치를 추출할 수 있다. 모드 특성치의 변화를 감지하여 구조강성 및 질량 같은 구조특성치의 변화를 감지할 수 있다.

본 연구에서는 고유진동수의 변화로부터 대상 구조모형의 구조상태 변화를 추정하고자 하였으며, 모드형상의 변화는 서로 다른 모드형상의 직교특성을 이용하여 손상유무를 판단하는 기법인 모드보증지수로부터 구조상태 변화를 추정하고자 하였다. 만일, 두 모드가 같다면 1의 스칼라 값이 계산되며, 일치하지 않는다면 1보다 작은 값이 계산된다. 이와 같은 모드보증지수는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$MAC(\phi_i, \phi_i^*) = \frac{[\phi_i^T, \phi_i^*]^2}{[\phi_i^T, \phi_i^*][\phi_i^{*T}, \phi_i]} \quad (6)$$

여기서, ϕ_i 와 ϕ_i^* 는 각각 손상, 비손상 상태의 i 번째 모드형상을 나타낸다.

3. 케이스 구조모형의 동적 실험

3.1 구조모형의 제원

항만 케이스 구조물의 동적거동을 분석하기 위해 3개의 같은 크기 및 형상, 치수를 가지는 철근 콘크리트구조의 케이스 모형을 제작하였다. 모형의 치수는 가로 120cm, 세로 110cm, 높이 130cm 이다. 제작된 모형의 형상은 Fig. 6과 같으며, 제작된 구조모형은 실제 항만 케이스의 약 1/20 정도의 크기이다.

3.2 수치해석 모델의 고유치 해석

케이스 구조모형의 수치적인 동적거동분석을 위하여 Fig. 1과 같은 유한요소모델을 이용하여 고유치해석을 수행하였다. 유한요소모델은 3차원 solid 요소로 모델링 하였다. 경계조건으로써 Free-Free 지점조건을 적용하기 위해 Fig. 2와 같이 윗면의 4개 절점에 대하여 수직 현을 연결하여 각 방향의 변위를 구속하였다.

수치 모드해석으로부터 3개의 모드형상을 분석하였다. Fig. 3은 FE 모델의 모드형상 및 고유진동수를 보여준다.

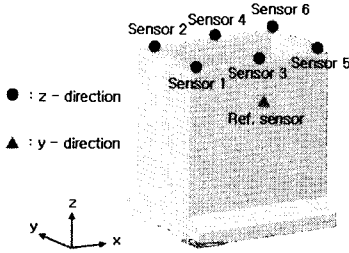


Fig. 1. Caisson structure model and FE model

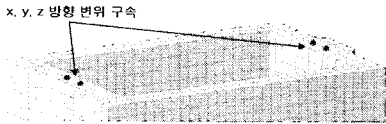
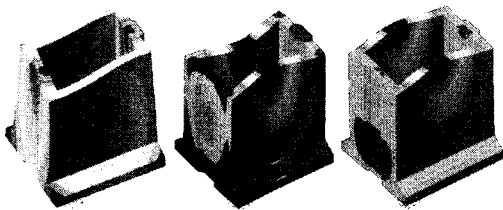


Fig. 2. Boundary condition (Free-Free)

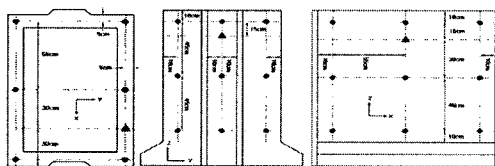


(a) Mode 1 : 80.41Hz
(b) Mode 2 : 233.77Hz
(c) Mode 3 : 235.85Hz

Fig. 3. Mode shape of FE model

3.3 동적실험

구조모형의 동적응답특성을 실험적으로 분석하기 위하여 다음과 같이 가속도 응답 계측 실험을 구성하였다. 실험에는 총 12의 가속도 센서(PCB 393B04)를 사용하여 Fig. 4와 같이 3개의 Reference 센서를 3축 방향으로 각각 1개씩 설치하였다. 또한 Roving Test로 x축과 y축 방향으로 9개의 센서, z축 방향으로 6개의 센서를 사용하였다. Fig. 5와 같이 가속도 응답은 PCB Signal conditioner (Model 481A03), Terminal Block과 DAQ card를 Laptop과 연결하여 MATLAB을 이용하여 1kHz의 샘플링 주파수로 계측하였다. 가진은 고무 해머를 이용한 충격가진으로 수행되었다. 케이스의 경계조건은 Free-Free 조건으로 크레인과 강봉, 파워 벨트를 이용하여 적용하였다.



(a) z-direction (b) x-direction (c) y-direction

Fig. 4. Orientation of accelerometer sensors

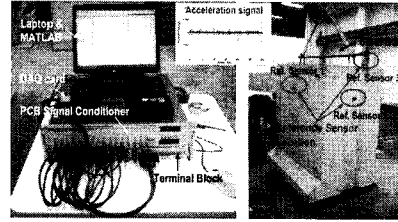
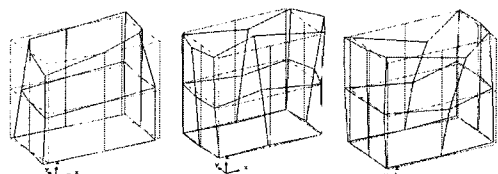


Fig. 5. Acceleration Measurement System.

4. 케이스 구조모형의 동적응답분석

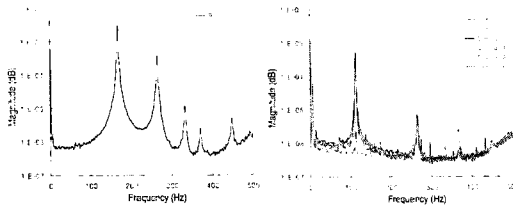
구조 모드해석의 상용 프로그램인 ARTeMIS를 이용하여 해석되었으며, 주파수 영역 분해법(frequency domain decomposition)으로부터 주파수 응답함수를 구한 후, Peak picking법을 이용하여 케이스 구조모형에 대한 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. Fig. 6과 Table. 1은 실험을 통해 추출된 고유진동수와 모드형상을 보여준다. Table 2는 모드보증지수를 이용한 케이스 모형의 동적응답분석을 보여준다. 상관계수와 주파수응답비보증지수는 소수의 센서를 이용한 분석기법으로 현장 적용시 센서부착이 용이한 조건을 고려하여 Fig. 1과 같이 y축 방향의 하나의 Reference 센서와 z축 방향의 6개의 센서를 이용하여 케이스 모형의 동적응답분석을 수행하였다.

상관계수는 케이스 모형에 부착된 서로 다른 위치의 주파수응답함수으로부터 상관성을 분석하였다. 분석은 각 케이스에 대한 Reference 센서를 기준으로 z축 방향을 6개의 센서 이용하였다. Fig. 7은 Caisson 3의 주파수응답함수를 보여주며, Fig. 8은 전체 Caisson에 대한 상관관계를 분석한 결과를 보여준다. 주파수응답비보증지수는 케이스 모형에 부착된 두 개의 센서의 주파수응답비를 이용하여 다른 케이스 간의 동적응답특성을 분석하였다. 먼저, Reference 센서와 z축 방향의 6개의 센서를 각각 조합하여 총 6개의 케이스로 선정하였다. 다음으로, 선정된 케이스를 이용하여 Caisson 1과 Caisson 2, Caisson 1과 Caisson 3 사이의 주파수응답비보증지수를 계산하였다. Fig. 9는 선정된 케이스의 예로 Reference 센서와 Sensor 1 및 Sensor 3 간의 주파수응답비를 보여준다. Fig. 10은 주파수응답비보증지수를 계산한 결과를 보여준다.



(a) Mode 1 (b) Mode 2 (c) Mode 3

Fig. 6. Mode shape of experimental model



(a) Reference sensor (b) Sensor 1 - Sensor 6

Fig. 7. Frequency response function

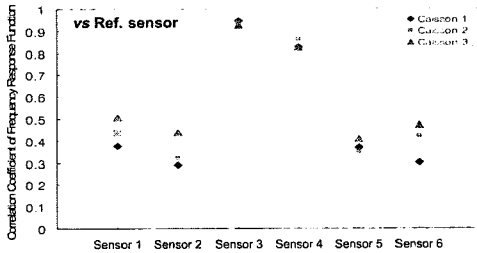
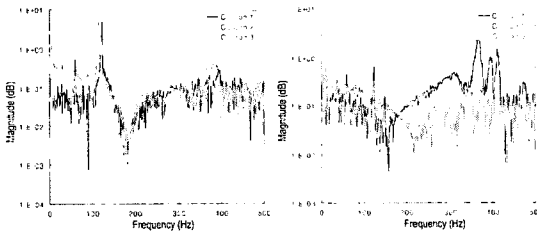


Fig. 8. Correlation coefficient for 3 Caissons



(a) Ref. sensor vs Sensor 1 (b) Ref. sensor vs Sensor 3

Fig. 9. Frequency response ratio

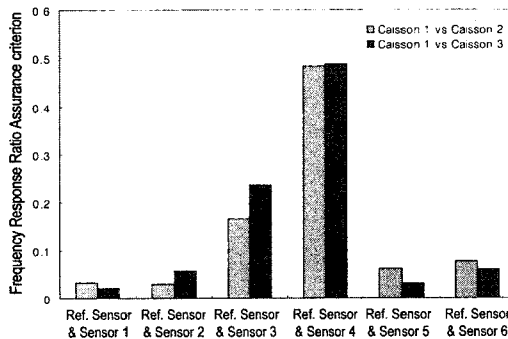


Fig. 10. FRRAC for 3 Caissons

Table. 1 Natural frequency of experimental test

Mode	Caisson 1	Caisson 2	Caisson 3
1	123.25	115.30	112.20
2	188	180.30	168
3	291.60	260.15	263.80

Table. 2 MAC value of total 3 caissons

Case	MAC value		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
MAC(1,2)*	0.9311	0.9106	0.8695
MAC(2,3)*	0.9272	0.9066	0.8809
MAC(1,3)*	0.9965	0.9507	0.9876

* ()안의 숫자는 caisson의 번호를 나타냄

5. 요약 및 결론

본 연구는 케이슨 구조모형의 동적응답특성 실험을 통해 항만구조물의 손상검색 모델 개발에 필요한 기초자료를 얻고자 하였다. 첫째, 항만 케이슨 모형 구조물을 제작하였다. 둘째, FE 모델과 케이슨 구조모형 모델에 대한 동적응답특성을 분석을 수행하였다. 두 모델간의 모드형상을 비교해본 결과 3개의 유사모드를 볼 수 있었으며, 모드형상에 대한 고유진동수 값은 상당한 차이를 보였다. 따라서 차후 FE 모델의 구조식별을 통한 model-updating이 필요하다. 셋째, 상관계수, 주파수 응답비 보증지수, 모드보증지수를 이용하여 케이슨 구조모형간의 동적응답 특성을 분석하였다. 모드보증지수의 경우, 케이슨 모형간의 유사한 동적응답특성을 가지는 것을 알 수 있었다. 하지만, 상관계수와 주파수응답비보증지수는 동적응답특성의 변화가 큰 것을 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 지원하는 항만리모델링 기반구조 연구사업의 일부로 수행되었으며, 케이슨 제작을 지원해주신 (주)삼성건설 부산신항 건설현장 김형섭소장님께 감사드립니다.

참고문헌

- 박재형, 김정태, 나원배, 이진학 (2007) 가속도 응답을 이용한 케이슨 식 항만구조물의 건전성평가, 2007년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp. 2138-2141.
- Bendat, J.S. and Piersol, A.G. (1993), Engineering applications of correlation and spectral analysis, Wiley, USA.
- Maia, N.M.M., Silva, J.M.M.,(1997), Theoretical and experimental modal analysis, Research Studies Press Ltd., England.