강제진동해석을 통한 케이슨 구조-지반 경계의 진동응답 분석

Vibration Response Analysis of Caisson Structure-Foundation Interface using Forced Vibration

이 소 라* • 이 소 영** • 김 정 태*** • 김 헌 태**** • 박 우 선***** • 이 진 학******

Lee So-Ra • Lee So-Young • Kim Jeong-Tae • Kim Heon-Tae • Park Woo-Sun • Yi Jin-Hak

요 약

항만 구조물의 건전성 평가 기술의 개발을 위한 기초 연구로서, 강제진동해석을 통하여 케이슨 구조-지반 경계부의 손상에 대한 진동응답을 분석하고자 한다. 이를 위해 세 단계의 연구를 수행하였다. 첫째, 케이슨 구조물의 진동특성 분석을 위해 시간영역기반의 AR(auto-regressive)모델을 선정하였다. 둘째, 모형 케이슨 구조물을 대상으로 진동응답 계측실험을 수행하였으며, AR-모델을 통해 진동특징을 실험적으로 분석하였다. 셋째, 대상 케이슨 시스템의 유한요소모델을 구성하고, 구조-지반 경계부의 손상에 따른 동적응답 특성의 변화를 수치적으로 분석하였다. 이를 위해 강제진동을 모사 하였으며, 구조-지반 경계부의 강성 변화에 따른 케이슨 구조물의 진동응답의 변화를 분석하였다.

keywords : 진동응답, 강제진동, 케이슨, 자기회귀 모델(Auto-Regressive Model)

1. 서 론

최근, 국내의 해안 및 해양 공사에 케이슨을 이용한 시공사례가 늘고 있다(건설교통부, 1998; 홍원표 등, 2000). 그러나 케이슨식 방파제를 포함한 기존의 항만시설은 10년이상 노후화된 구조물이 많고, 설계파랑 이상의 파랑 내습 시 재해위험에 노출되어 있는 상태이다(황인섭 등, 2007). 일반적으로 구조물 자체에 대한 건전성 평가기법은 토목, 건축 분야에서 많이 개발되고 있으나, 항만구조물의 경우, 구조체 대부분이 지반이나 해수에 둘러싸여 있으며, 이러한 경계조건의 변화는 항만구조물의 안정성을 위협하는 요인이다.

본 논문에서는 항만 구조물의 건전성 평가 기술의 개발을 위한 기초 연구로서, 강제진동해석을 통하여 케이슨 구조-지반 경계부의 손상에 대한 진동응답을 분석하고자 한다. 첫째, 케이슨 구조물의 진동특성 분석을 위해 시간영역기반의 자귀회귀(AR)모델을 선정하였다. 둘째, 모형 케이슨 구조물을 대상으로 진동응답에 대한 AR모델 기반 진동특징을 분석하였다. 셋째, 대상 케이슨 시스템의 유한요소모델을 구성하고, 구조-지반 경계부의 손상에 따른 동적응답 특성의 변화를 수치적으로 분석하였다.

* 학생회원 • 부경대학교 해양공학과 석사과정 200513985@pknu.ac.kr

** 학생회원 • 부경대학교 해양공학과 박사과정 lsy84@pknu.ac.kr

*** 정회원 • 부경대학교 해양공학과 교수 idis@pknu.ac.kr

**** 정회원 • 부경대학교 해양공학과 교수 htkim@pknu.ac.kr

***** 정회원 • 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원 wspark@kordi.re.kr

****** 정회원 • 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원 yijh@kordi.re.kr

2. 자기회귀(auto-regressive, AR)모델

AR 모델은 Sohn과 Farrar(2001)에 의해 구조건전성 모니터링을 위해 적용된 바 있다. 이들 연구를 바탕으로 본 연구에서는 AR계수의 변화를 이용하여 강제진동을 통하여 지반의 강성변화에 따른 케이슨 구조물의 진동응답을 모니터링 하고자 한다. AR모델은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{v}(t) = \sum_{j=1}^{a} \varphi_j \ddot{v}(t-j) + e(t) \quad (1)$$

여기서, $\ddot{v}(t)$는 시간 t에서 계측된 가속도 이력이며, φ_j는 AR 계수, a는 AR 모델의 차수, $e(t)$는 예측오차이다. AR 계수의 다변량 이상치(outlier)분석을 위하여 식(2)의 Mahalanobis 자승거리(MSD)를 이용하였다.

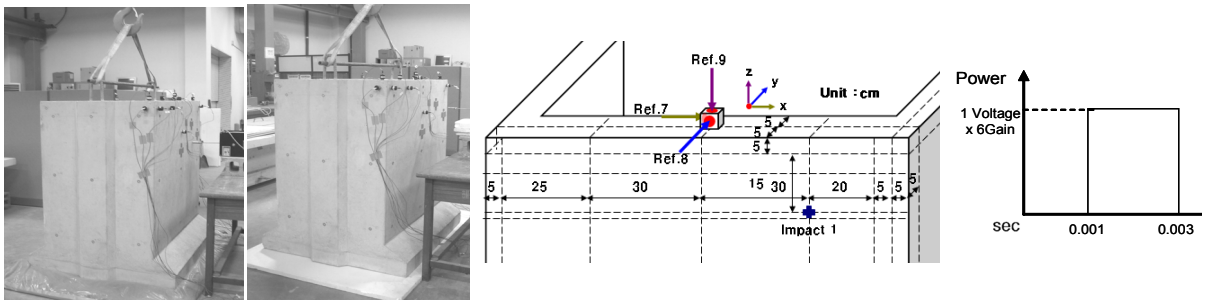
$$D_\zeta = (\varphi_\zeta - \overline{\varphi})^T S^{-1} (\varphi_\zeta - \overline{\varphi}) \quad (2)$$

여기서, D_ζ는 MSD이고, φ_ζ는 이상치 벡터, 즉 AR 계수이며, $\overline{\varphi}$는 n개의 데이터 세트의 평균 벡터, S는 공분산 행렬이다. 본 연구에서는 MSD를 이용하여 AR계수의 변화를 분석하였다.

3. 진동실험을 통한 케이슨 구조모형의 동적응답 특성 분석

진동실험을 통한 케이슨의 진동응답분석을 위하여 대상 모델로 모형 케이슨 구조물을 이용하였다. 안벽구조물 및 방파제 등의 건설에 사용되는 케이슨을 실제 부산신항만에 거치된 케이슨의 약 1/20 크기의 철근콘크리트 구조물로 가로 120cm, 세로 110cm, 높이 130cm이며, 벽면 및 바닥면의 두께는 10cm로 제작하였고 총 중량은 14.7kN이다.

모형케이슨의 동특성인 모드형상과 고유진동수를 추출하기 위하여 총 12개의 가속도 센서(PCB393B04)를 사용하였으며, 3개의 reference 센서를 3축 방향으로 각각 1개씩 설치하여 Roving Test로 신호를 계측하였다. 모형 케이슨의 구조-지반 경계부의 손상을 모사하기 위해 그림 1(a,b)과 같이 강성이 다른 두 가지 재료를 고려하였다. 가진은 그림 1(c)와 같이 impact1 위치에 충격을 가하였다. 케이슨의 모드해석을 위해 주파수영역 분해법(FDD)을 이용하여 고유진동수 및 모드형상을 추출(그림 2)하였다.

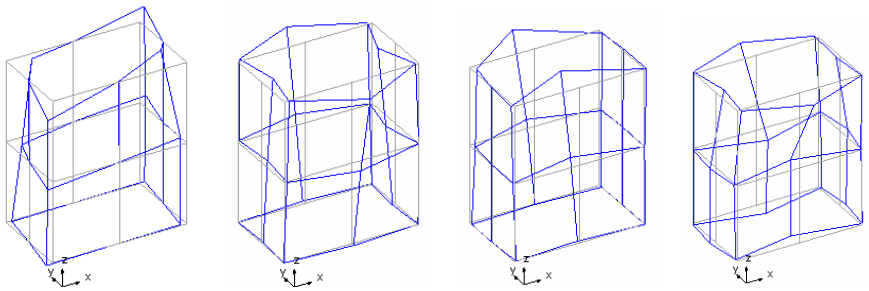


(a)Case 1 : 모래 (b) Case 2 : 스티로폼 (c) 가속도계 및 가진 위치 (c) 가진력 시간이력

그림 1. 진동응답분석을 위한 모형 케이슨의 실험 구성

시간영역기반의 모니터링 기법인 AR 모델을 이용하여 부분 모형케이슨의 구조-경계부의 변화에 대한 진동응답을 분석하였다. 식(1)을 이용하여 AR 모델 차수를 결정하가 위하여 진동실험을 통해 취득된 가속도 신호를 이용하여 부분 자기상관함수 해석(그림 3)을 통해 AR 모델의 차수를 30으로 선정하였다. 그림 4는

구조-지반 경계부의 변화에 따른 AR계수의 변화를 MSD를 통해 정량화한 것을 보여준다. 샌드 매트에서 스티로폼 블록으로 변화하는 경우, MSD값이 전체적으로 증가하였는데 그 중 x-방향과 y-방향의 결과가 z-방향에 대한 결과보다 상대적으로 큰 변화를 나타내었다.



(a) Mode 1(124.6Hz) (b) Mode 2(180.7Hz) (c) Mode 3(280.8Hz) (d) Mode 4(347.5Hz)

그림 2 모형 케이슨의 실험 모드 형상

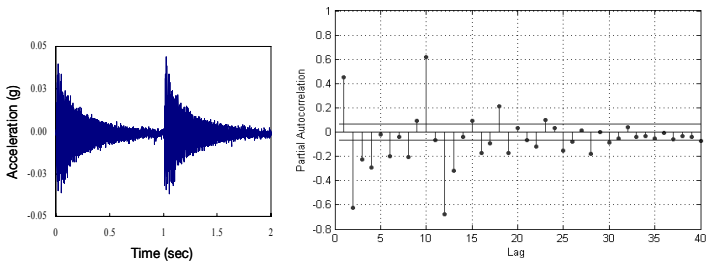


그림 3 가속도신호와 자기상관함수

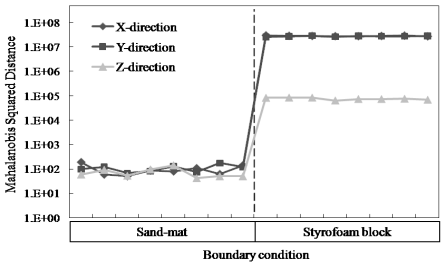
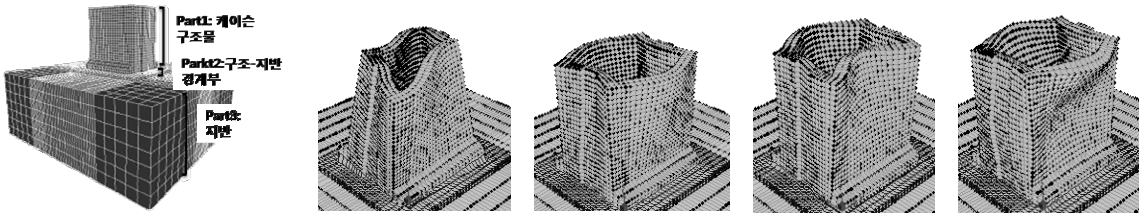


그림 4 케이슨의 구조-지반 경계부변화의 MSD 값

4. 유한요소해석을 통한 케이슨 구조모형의 동적응답 특성 분석

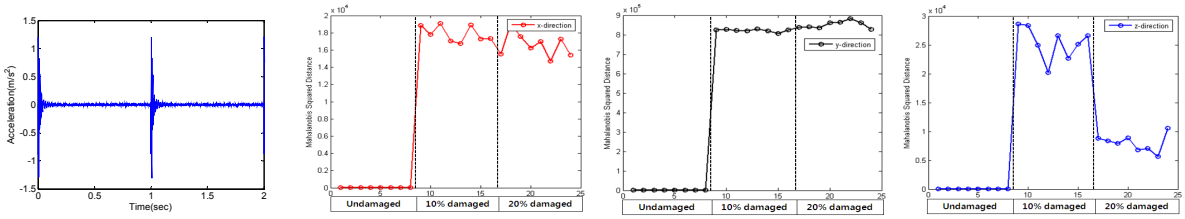
케이슨 구조모형의 기본모델에 대한 동적거동분석을 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소모델은 사용프로그램인 SAP2000을 이용하여 3차원 solid 요소로 모델링 하였으며 케이슨 본체, 사석 마운드, 지반의 세 부분으로 구성(그림 5(a))된다. 유한요소 모델의 재료 물성치는 케이슨 부분의 탄성계수 $E=28GPa$, 프아송비 $\nu=0.18$, 단위중량 $\rho=2.5KN/m^3$ 이고 구조-지반경계부의 탄성계수 $E=24GPa$, 프아송비 $\nu=0.3$, 단위중량 $\rho=1.765KN/m^3$이다. 케이슨과 사석 마운드의 연결부, 사석 마운드와 지반의 연결부는 shared joints를 사용하여 연결하였다. 구조-지반 경계부의 손상을 모사하기 위하여 탄성계수를 초기 값의 10%, 20%를 감소시켜 보았다. 그림 5는 수치해석을 통해 추출된 모드형상 및 고유진동수를 비교하여 보여준다. 이를 바탕으로 모형케이슨과 동일한 가진위치 및 형상을 가지고 크기는 y방향으로 10N을 가하여 가속도 응답신호를 추출하였으며, 응답신호의 10%의 노이즈를 추가하여(그림6(a)) 진동응답특성을 분석하였다.

진동실험과 마찬가지 방법으로 AR 모델의 차수를 30으로 선정하였다. 구조-지반 경계부의 변화에 대한 AR 계수의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 AR 계수에 의한 MSD(그림 6(b-d))를 구하였다.



(a)유한요소모델의 구성 (b) Mode 1(149.28Hz) (c) Mode 2(208.4Hz) (d) Mode 3(322.1Hz) (e) Mode 4(417.69Hz)

그림 5 수치해석을 통한 모드 형상



(a)가속도 응답 (b)x-방향 MSD (c)y-방향 MSD (d)z-방향 MSD

그림 6 AR 모델결과에 대한 Mahalanobis Squared Distance(MSD)

5. 요약 및 결론

항만 구조물의 건전성 평가 기술의 개발을 위한 기초 연구로서, 강제진동해석을 통하여 케이슨 구조-지반 경계부의 손상에 대한 진동응답을 분석하였다. 모형 케이슨 구조물을 대상으로 진동응답 계측실험을 수행하였으며, AR-모델을 통해 진동특징을 실험적으로 분석하였고 케이슨의 유한요소모델을 구성하고, 강제진동을 통하여 구조-지반 경계부의 강성변화에 따른 케이슨 구조물의 진동응답의 변화를 분석하였다. AR 모델결과에 대한 MSD는 y-방향에서 가장 큰 변화를 나타났지만 손상에 증가에 따른 변화는 크게 나타나지 않으며, z-방향에서 손상 증가에 따른 변화가 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 지원하는 항만리모델링 기반구축 연구사업의 일부로 수행되었으며, 연구에 참여한 대학원생은 BK21 프로그램의 지원을 받습니다.

참고문헌

홍원표, 박현구, 여규권, 정광민 (2000). “영종대교 주탑 하부구조의 설계와 시공에 대한 연구”, 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집, pp181-184.

황인섭, 홍성대, 김희대 (2007). “해외항만 태풍피해와 복구방안”, 대한토목학회지, 제55권, 제10호, pp103-110.

Sohn H., Farrar (2001). "Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals", Smart Materials and Structures, Vol.10, pp446-451.

이소영, 김정태, 김헌태 (2010). “사석마운드가 손상된 케이슨식 방파제의 진동기반 구조건전성 모니터링” 한국해양공학회지