파랑하중 및 지진하중을 받는 Steel Jacket의 동적해석

Dynamic Analysis of the Steel Jacket under Wave Force and Earthquake Force

김 문 영* 박 기 현** 신 현 목***
Kim, Moon- Young Park, Gi-Hyun Shin, Hyun-Mok

ABSTRACT

The reliability analysis is of great importance in their design since offshore towers are high-cost and high-risk structures. The design of platforms in the marine environment depends on results of the dynamic behavior of the structure during earthquakes and storm wave conditions. This paper presents results of an analytical study on evaluating dynamic response of steel jacket modelled by space frame elements. Program 『OFSPC』 for the linear and nonlinear dynamic analysis of steel jacket platform has been developed using FORTRAN 90 programing language through the present study. Free vibration and dynamic behaviors of steel jackets under regular and irregular wave and earthquake forces are investigated using this program.

1. 서 론

깊은 수심의 해양 환경에 접해 있는 고정식 해양 구조물을 설계할 때, 구조물의 동적 거동 해석은 설계 과정에서 가장 중요한 요소중의 하나이다. 그리고, 지반운동, 파랑(wave), 조류 및 풍하중 등이 작용하는 구조 시스템의 동적 응답, 동하중 및 응력 등을 실제적으로 구현하기 위해서는 광범위한 이론적 해석이 수행되어야 한다. 또한, 이들 구조물은 불규칙한 해양 상태에서 유체와 구조물의 상호작용, 지반과 구조물의 상호작용 등과 같은 복잡한 거동을 보이므로, 설계자는 이러한 문제들을 해결하기 위하여 동적문제에 대한 깊은 인식을 가져야 한다[1,5].

따라서, 본 연구에서는 고정식 steel jacket 해양 구조물의 동적해석을 위하여, 구조물을 공간 뼈대 요소로 모형화한다. 그리고 파의 스펙트럼식 표현방법을 이용한 불규칙한 파랑하중, 조류력, 부력 및 부가질량 등과 같은 실제와 유사한 해양환경을 쉽게 모형화할 수 있도록 한다. 또한, 지진 다발 지역에 위치한 해양구조물의 해석을 위하여 지진하중에 의한 동적해석을 수행하고, 구조물의 기하학적 비선형성을 고려하여 깊은 수심에서 큰 변위를 일으키는 해양구조물에 대한 해석이 가능하도록 프로그램을 개발한다. 이를 이용하여 해양구조물을 설계할 경우 구조적 안전성과 설계의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 유용한 자료를 제공하고자 한다.

* 성균관대학교 부교수
** 성균관대학교 석사과정
*** 성균관대학교 부교수, 정회원

2. 유한요소의 정식화

2.1 공간뼈대구조의 기하학적 비선형 해석

본 연구에서는 공간뼈대구조의 기하학적 비선형해석이 가능하도록 하기 위하여 Co-rotational updated Lagrangian formulation[2]을 적용한다. 비선형 공간뼈대요소는 2절점을 가지며 절점당 6개의 자유도를 허용한다. 축방향 변위 및 비틂 회전각은 선형변화를 가정하고, 두 방향의 횡변위는 3차 Hermitian 다항식으로 가정하며, 이러한 변위장을 이용하여 접선강도행렬을 산정한다. 구조물의 비선형 해석시 증분형식의 반복계산법을 적용해야 하며, 이러한 계산에서 변형된 상태에 대응하는 부재력 증분을 정확히 산정하는 것이 매우 중요하다. 증분변위로부터 6개의 강체운동선분과 6개의 순수변형성분을 분리시킨다. 부재의 증분 강체회전성분은 부재좌표계를 새로이 계산하는데 사용되며, 순수변형성분은 부재력증분을 산정하는데 이용된다. 이때 축방향 변형은 휨 및 비틂변형으로 인한 축방향의 상대적인 변위성분을 나타내는 Bowing 효과를 고려하여 계산한다.

2.2. 동적해석[3]

유체 동하중과 지진하중을 포함하는 구조물에 작용하는 외력들은 노드 점들에 집중하중으로 근사화되어 해석된다. 기본 운동 방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{R(t)\} \tag{2.2}$$

위의 방정식을 시간에 따른 구조물의 응답해를 구하기 위하여, 이번 연구에서는 시간 영역 해석법의 모드 중첩법(mode superposition method)과 직접 적분법(direct integration method)등으로 해석이 수행되었다.

2.2.1 부가질량

Steel jacket 구조물이 수중에서 동적 거동을 할 때 물체의 질량이 가속될 뿐만 아니라 주변의 유체 질량도 가속된다. 이러한 영향은 구조물 자체의 질량행렬에 동시에 가속되는 주변의 물의 질량이 포함되어 고려될 수 있다.

$$C_M = 1 + k_m \tag{2.3}$$

여기서 1은 동수압력에 대한 관성계수, k_m 은 유체에 의한 관성계수이다.

3. 하중의 모형화

3.1 파이론

1) 선형파이론(linear wave theory)

선형파 이론은 모든 파이론들 중에서 가장 단순하고 효율적인 파이론이다. 선형파이론을 유도하는데 기본 가정은 파고 H가 파장 L과 수심 d보다 매우 작은 경우이다(즉, H ≪ L, d). 이 가정은 자유수면 경계조건이 파의 2차 이상 고차 항들의 영향을 소거할 수 있도록 허용하고 있다. 파

의 수면 형상(wave profile)은 아래와 같다.

$$\eta(x,t)=\frac{H}{2}\cos(kx-\omega t) \tag{3.1}$$

수평, 수직방향으로의 물 입자의 속도와 가속도는 파의 수면 형상을 이용하여 구하게 된다. 파수(wave number) $k=2\pi/L$과 파의 각주파수 $\omega=2\pi/T$는 다음 분산 방정식을 만족해야 한다.

$$\omega^2=gk\tanh(kd) \tag{3.2}$$

2) Stoke 5차 파이론과 선형파이론의 비교[5]

Stoke 파이론은, 파장에 비해 비교적 작은 파고에 대하여 사용되는 선형파 이론과 달리 파장에 비해 큰 파고에 대해서도 적용될 수 있고, 상대 수심(relative depth: d/L)이 1/10 이상인 경우에 사용된다. 이러한 조건은 폭풍에 의해 높은 파도가 발생할 때 고정식 해양 구조물의 설계에서 고려되어 왔다. 그림 3.2는 선형 파이론에 의해 생성된 파와 Stoke 파이론에 의해 생성된 파의 수면형상을 비교한 것이며, 선형파는 정수면에서 파봉과 파저가 같은 높이차를 가지나, Stoke파는 정수면(0.0)에서 파봉까지의 거리가 파저까지의 거리보다 큰 것을 알수 있다.

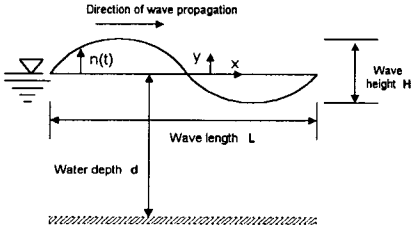


Fig. 3.1 Definition of wave parameter

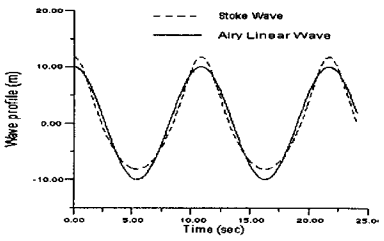


Fig. 3.2 Stoke's wave and Airy wave profile

3.2 파랑하중의 모형화

Steel Jacket과 같은 소규모 부재들로 이루어진 구조물에 대한 파랑하중의 모델링은 Morison 방정식을 사용한다. Morison 방정식은 일반적으로 파장에 비해서 구조물이 작을 때, 즉 유효길이 D(cylinder의 경우에는 지름)의 파장L에 대한 비 (D/L)가 0.2 이하일 때, 그리고 관성력이 점성 항력보다 크게 작용할 때 사용된다.

$$F=F_I+F_D=C_M\frac{\rho\pi D^2}{4}a+C_D\frac{\rho D}{2}u|u| \tag{3.3}$$

여기서, C_D :점성 계수, C_M :관성 계수, ρ = 유체의 밀도, D = 원형 실린더의 직경,

u, a = 유체의 속도 및 가속도

3.3 지진하중의 모형화

이번 연구에서는 인공지진 발생 프로그램인 SIMQKE를 사용하여, 정의된 임의의 응답 스펙트럼에 대한 다양한 형태의 지반 가속도를 생성하고, 이를 구조물 동적해석에 적용하였다. 1940년 미국 El Centro 지역의 최대 지반가속도가 중력 가속도의 0.347배의 남북 방향 지진파형이 얻어졌는데, 국내 시방서에서는 우리나라의 지역적 특성을 고려하여 최대 지반 가속도를 0.14g로 사용한다. 그림 3.3은 SIMQKE를 이용하여 생성된 지반의 지진 가속도 예와 입력된 목표 속도 응답 스펙트럼과 계산된 지진 가속도로 인한 속도 응답 스펙트럼을 비교하여 보여준다. SIMQKE의 입력 data에서 최대 지반가속도와 주파수 분포 상태는 목표 응답스펙트럼으로 제어하고, 시간대별 분포 상태는 포락함수(envelop function)으로 조정할 수 있다.

(a) acceleration (b) comparison of target response spectrum and generated response spectrum

Fig. 3.3 Artificial earthquake acceleration

3.4 지반 진동에 의한 운동 방정식

여러 가지 경계 조건을 통합하여 전체항을 비구속 자유도(free d.o.f)와 구속자유도(restraind d.o.f)로 구분하여 행렬형식으로 표현한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{FF} & M_{FR} \\ M_{RF} & M_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_F \\ \ddot{u}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{FF} & C_{FR} \\ C_{RF} & C_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_F \\ \dot{u}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{FF} & K_{FR} \\ K_{RF} & K_{RR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_F \\ u_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_F \\ F_R \end{Bmatrix} \tag{3.4}$$

여기서 아래 첨자 R은 지반 진동 작용점에 대응하는 자유도를 나타내고, 아래 첨자 F는 모든 다른 구조물의 자유도를 나타낸다. 지반진동 외에 작용하는 외력이 없다면 하중벡터 F는 영벡터이다. 그러면 free-free boundary를 가진 운동 방정식은 아래와 같다.

$$M_{FF}\,\ddot{u}_F + C_{FF}\,\dot{u}_F + K_{FF}\,u_F = -M_{FR}\,\ddot{u}_R - C_{FR}\,\dot{u}_R - K_{FR}\,u_R \tag{3.5}$$

4. 수치해석

4.1 후처리 프로그램

해석결과 분석을 쉽게 하기 위한 Visual Basic 프로그래밍 언어로 구현된 후처리 프로그램의 예를 그림 4.1에서 볼 수 있다.

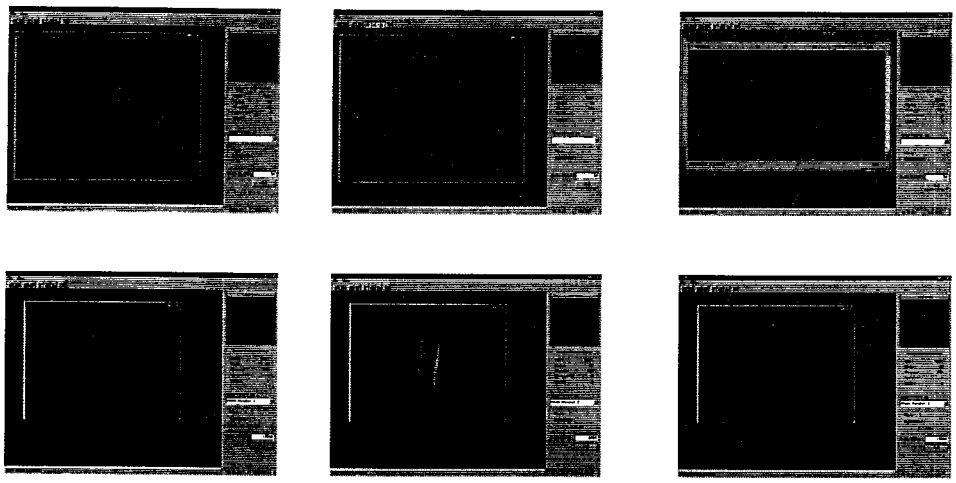


Fig. 4.1 post-processor

4.2 수치해석 예제

4.2.1 해석 모델

가상의 실제 steel jacket 모형의 부재에 지진하중 또는 파랑하중 작용할 때 동적 해석한 예를 제시하고, 해석 절차 및 입력 내용 및 결과에 대해 토의하고자 한다. 지진 data는 인공 지진 가속도 발생 프로그램에 의한 SIMQKE를 이용하여 세가지 형태의 입력 가속도를 사용하였다.

(표 4.1)

부 재 제 원	파 랑 환 경 정 보
♤ 절 점 수 : 98개	
♤ 요 소 수 : 260 개	♤ 평 균 수 심 : 175 m
♤ 높 이 : 190 m	♤ 파 고 : 20 m
♤ 정 상 부 폭 : 30 * 60m	♤ 파의 주파수 : 0.5 rad /sec
♤ 직 경 : 0.514~ 0.914m	(주기: 약 12.8초)(for regular wave)
♤ 단 면 적 : 0.361 ~ 0.547 m^2	♤ 해 수 밀 도 : 1020 kg/m^3
♤ 수직 부재 I : 0.0310 ~ 0.0338 m^4	♤ 총 해석시간 : 30초
♤ 브레이싱 I : 0.000529 m^4	♤ 증 분 시 간 : 0.05초
♤ 탄 성 계 수 : 2.1× 10^{10} kg/m^2	♤ 중력 가속도 : 9.8 m/sec^2
♤ 프 와 송 비 : 0.3	♤ 항력 계수(Drag Coefficient) : 1.0
♤ 밀 도 : 7800 kg/m^3	♤ 관성 계수(Inertial Coefficient): 2.0

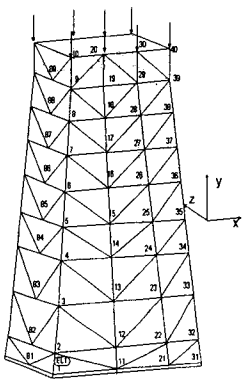
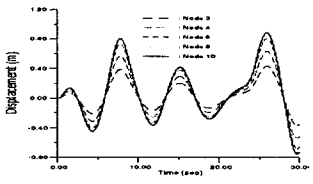


Fig 4.2 Analytical Model

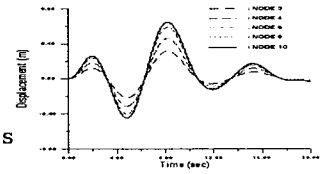
4.3.2 불규칙파를 받는 Steel Jacket의 동적해석

그림 4.3은 H_s=20m의 불규칙파를 받는 스틸자켓의 선형 및 비선형 해석결과를 보여준다. 그림

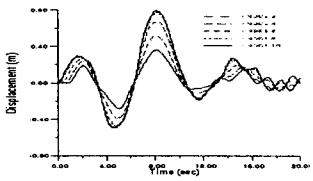
4.3(a)는 파의 진행 방향이 z축과 일치할 때 선형 해석 결과를 보여 주고 있다. 그림 4.3(b)와 (c)는 파의 진행 방향이 x축과 일치할 때 선형해석과 기하학적 비선형 해석 결과를 보여 주고 있다. 그림 .4.3(d)는 불규칙 파에 1.5m/sec 유속의 조류가 동시에 작용할 때 발생하는 x 방향 변위의 결과를 보여준다.



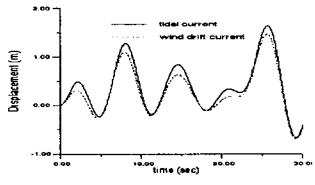
(a) Linear :: dz when wave direction = z axis



(b) Linear :: dx when wave direction = x axis



(c) Nonlinear :: dx when wave direction = x axis



d) dx of node 10 by irregular wave + 1.5m/sec current

Fig. 4.3 displacement response of steel jacket model by irregular wave

4.3.3 지진하중을 받는 steel jacket의 동적해석

입력 지진 가속도를 선정하기 위하여 인공지진 발생 프로그램인 SIMQKE를 사용하였다. 최대 지반 가속도 = 0.14g~0.6g, 진동 기간 = 20초, 가속도 생성 시간 간격 = 0.01초, 감쇠비 = 2%, 그리고 목표 응답 스펙트럼을 입력 값으로 하는 임의의 지진 가속도들을 생성하였다. 그리고, 응답 스펙트럼은 구조 시스템의 1~10차 모드까지의 고유 주기가 6초~15초까지 분포하므로, 장주기 파의 분포를 크게 정하였다.

이들 각각의 지진 가속도를 본 해석모델에 x, y, z 방향으로 각각 1.0, 0.3, 0.3 비율로 입력하여 해석하였다. 다음은 그림 4.4에 제시한 입력 응답 스펙트럼으로부터 생성된 3가지 지진 모델에 대하여 입력 지진 가속도의 시간이력과 해석 결과를 보여 주고 있다. SIMQKE의 입력 데이타는 inch 단위로 규정되고, 결과는 중력가속도에 대한 비의 값으로 계산된다.

(1) 그림 4.5은 최대 지반 가속도가 0.17g로써 국내 시방서의 최대 지진 가속도 0.14를 기준으로 하였고, 그림 4.4의 case 1에서 제시된 응답 스펙트럼으로부터 생성된 지진 가속도 시간 이력과 구조물 응답의 해석 결과이다. 그림 4.5(a)와 (b)에서 보는 바와 같이, 지진 데이터는 단주기파는 적고 장주기 지진파성분을 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. (2) 그림 4.6은 최대 가속도가 0.58g로써, 그림 4.4의 case 2에서 제시한 응답 속도 스펙트럼으로부터 생성된 지진 가속도 시간이력과 구조물 응답의 해석 결과이다. 그림 4.6(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이, 지진 데이터는 단주기파 성분이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림 4.7은 역시 그림 4.4의 case3에 제시한 속도 응답 스펙트럼에서 포락함수의 초기가속도 증가기간을 길게 되도록 조정(10초)하여 생성된

지진가속도에 대한 해석결과이다.

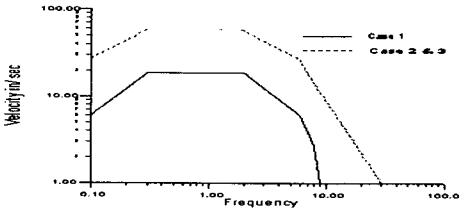
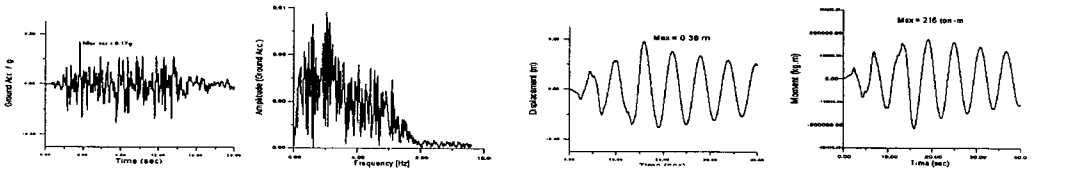
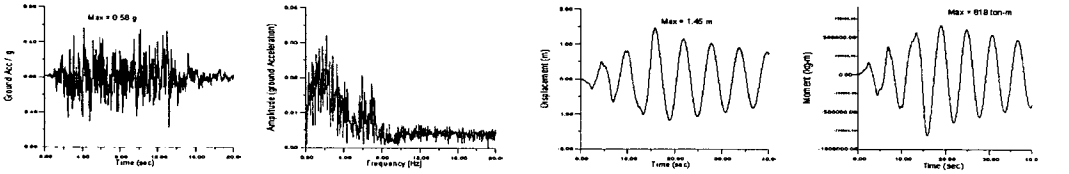


Fig.4.4 Input response spectrum



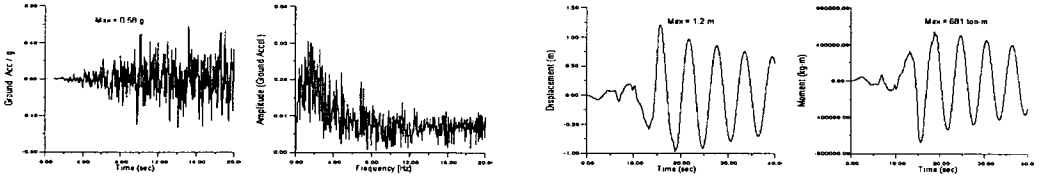
(a) ground acceleration (b) spectrum density (c) dx at NODE 10 (d) Moment 3 at element 1

Fig. 4.5 input ground excitation and response for seismic model 1



(a) ground acceleration (b) spectrum density (c) dx at NODE 10 (d) Moment 3 at element 1

Fig. 4.6 input ground excitation and response for seismic model 2



(a) ground acceleration (b) spectrum density (c) dx at NODE 10 (d) Moment 3 at element 1

Fig. 4.7 input ground excitation and response for seismic model 3

5 결 론

본 연구를 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 파랑하중은 직경이 비교적 작은 구조물에서 사용되는 Morison 방정식을 사용하여 계산하였고, JONSWAP 스펙트럼 또는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼으로부터 인공적인 불규칙 파형을 모형화할

수 있었다. 그리고, 선형 Airy 이론과 Stoke 5차 파이론 등으로 파의 속도와 가속도를 계산하여, 깊은 수심에서 파고의 높고 낮음에 따라 알맞은 파이론을 적용할 수 있도록 하였다. 또한, 다양한 해양환경하중을 표현하기 위하여 조류력, 부력(buoyant load), 온도하중(temperature load) 등을 쉽게 모델링할 수 있었다.

2) 과거 해양 구조물 설계에서 주로 사용된 2차원 평면 해석모델에서 계산되었던 모드 형상과 3차원 공간 해석모델에서 계산된 모드 형상과는 많은 차이점이 있음을 확인하였고, 이로써 3차원 해석의 중요성을 알 수 있었다

3) 해석결과를 입력데이터로 하는 후처리 프로그램(post processor)을 개발하여 사용자가 해석결과를 즉시 화면상으로 검토할 수 있으므로 해석결과의 분석에 소요되었던 시간과 노력을 절감시킬 수 있었다.

이상과 같이, 그 동안 우리 나라에서 해양 구조물의 설계에 있어 전문 인력과 해석 기술이 선진 외국에 비해 상대적으로 충분치 못했던 점을 감안할 때, 본 프로그램을 이용하여 보다 효율적인 방법으로 해양 환경을 모형화하고, 구조물을 해석하고 결과를 검토하는데 도움이 될 수 있으리라 생각된다.

감사의 글 : 본 연구는 과학기술처의 특정연구기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으며, 연구비를 지원해준 과학기술처에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. Tomas H. Dawson, "Offshore Structure Engineering", 1983, Prentice-Hall, New Jersey

2. 김문영, 안성원, "공간뼈대구조의 기하학적 비선형 유한요소해석", 1997, 한국전산구조공학회 논문집, pp. 201-211.

3. Weaver. W., Jr. and Johnston, P. R, "Structural Dynamics by Finite Element", 1987, Prentice-Hall, Inc.

4. Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W. and Schaaf, S. A., "The force exerted by surface waves on piles", 1950, Petrol. Trans. AIME 189, pp. 149-154.

5. Chakrabarti, S. K., Tam, W. A. and Wolbert, A. L., "Wave forces on a randomly oriented tube", 1975, In proceedings of the 7th Offshore Technology Conference, OTC 2190, Houston, Texas, pp. 433-477.