

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 35 卷 第 3 號 1998年 8月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 35, No. 3, August 1998

## 부유식 해양구조물의 직접구조해석 시스템 개발

박성환\*, 이정렬\*\*, 임채환\*

### Development of a Direct Structural Analysis System for Floating Type Ocean Structures

by

Seong-Whan Park\*, Jeong Youl Lee\*\*, and Chae Whan Rim\*

#### 요 약

본 논문에서는 부유식 해양구조물의 보다 신뢰성 있고 정도 높은 구조안전성 평가를 위한 직접 구조해석시스템을 개발한다. 본 시스템은, 3차원 패널법에 기초한 강체운동해석 모듈, 자동하중변환기능(LOADGEN)과 범용 유한요소해석 프로그램(NASTRAN)이 결합된 구조해석 모듈, 그리고 장단기 스펙트럼해석에 기초한 통계해석 모듈 등의 3 주요모듈로 구성되어 있다. 본 논문에서는 시설계과정에 있는 PILOT 부유식 해상플랜트에 개발된 시스템을 적용하고, 그 결과를 2차원 스트립법에 기초한 해석결과에 비교/검토함으로써 본 해석법의 유용성을 확인하고자 한다.

#### Abstract

The aim of the present study is to develop a direct structural analysis system for more reliable and effective structural safety estimation of floating type ocean structures. In this system, the following three modules are included; i.e., a rigid body motion analysis module based on the three dimensional panel method, a structural analysis module, and a stochastic analysis module based on short and long term spectral analysis techniques. The structural analysis module consists of the general purpose finite element analysis program NASTRAN and the automatic load data generation program LOADGEN.

As an illustrative example, the developed system is applied to structural design of a PILOT Barge Mounted Plant(BMP). Results of the structural analysis are compared with those obtained using a two dimensional strip method.

---

접수일자: 1998년 6월 18일. 재접수일자: 1998년 8월 3일

\* 정회원, 한국기계연구원.

\*\* 정회원, 한국선급

1. 서론

육지 공간의 활용이 사회적 경제적 측면에서 점점 어려워지고 절대공간도 점차 부족하여짐에 따라 넓은 해양으로 눈을 돌리게 되었으며, 해양공간 이용이라는 측면에서 해양구조물의 이용 검토와 건조 사례가 늘어나고 있는 추세이다. 이렇게 제한된 해양구조물은 기존의 해양의 자원 탐사와 시추를 위한 해양구조물로부터 선착장, 화물 선적장, 거주 시설, 발전소, 소각장, 또는 길이가 수 km에 이르는 해상공항 등으로 그 기능도 매우 다양화되고 있다.

해양구조물이 해상에서 제 기능을 발휘하려면 의도하는 위치에 구조물이 고정되어 있어야 하며 구조물에 작용하는 하중에 대해서도 그 일생 동안 견뎌야 한다. 해양구조물에 작용하는 파도, 바람, 해류, 조류 및 유빙 등의 여러 환경하중 중에서도 파랑하중은 해양구조물의 구조적 안전성을 판단하는 최대 설계하중 혹은, 구조물의 피로 수명과 관련한 반복 주기하중의 원인으로 나타나는 바, 이의 정확한 고려는 해양구조물의 설계에 있어서 가장 기본적이면서도 핵심적인 사항이라 할 수 있다.

본 연구에서는 저자들이 기수행한 바 있는 연구 결과[1]인 파랑 운동해석 프로그램, 하중변환 프로그램, 구조해석 프로그램 등을 장단기 파랑관측 자료에 기초한 통계해석 기능과 연결함으로써 부유식 해양구조물에 대한 직접구조해석 시스템을 구축한다. 직접구조해석 시스템은 기존의 선박에 관한 직접구조해석 시스템[2,3]과 그 기능상 혹은 적용되는 요소기술 등에 있어서 많은 부분이 일치하고 있으나 적용되는 운동해석 프로그램이 3차원 패널법에 기초하고 있으므로 폰튼형 혹은 반잠수식형 등의 임의 형상의 해양구조물에 적용이 가능하고, 계류력 등의 효과가 포함될 수 있다는 특징이 있다.

일반 선박과는 달리 부유식 해양구조물에 관해서는 선급 규정과 같은 것이 없기 때문에 부유식 해양구조물에 작용하는 파랑하중을 정확하게 추정하고, 이에 대한 구조응답 및 구조안전성을 보다 합리적으로 도출할 수 있는 이러한 직접구조해석

시스템의 확보는, 해양구조물의 초기/기본 설계 단계에서 핵심적인 요소기술의 하나라 하지 않을 수 없다.

이하에서는 본 시스템을 구성하는 각 해석 모듈의 기본 원리와 기능 등에 관하여 간단히 기술하고자 한다. 또한, 시설계 과정에 있는 실험용 해상플랜트(BMP)[4]에 본 해석 시스템을 직접 적용한 결과와, 2차원 스트립법 파랑하중 추정법에 기초한 해석결과를 비교 검토한다.

2. 직접구조해석 시스템

2.1 개요

Fig. 1은 본 연구에서 개발된 부유식 해양구조물의 직접구조해석 시스템의 구성도를 나타내고 있다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 본 해석 시스템은 3차원 파랑하중 운동해석 모듈, 하중 생성/변환 모듈 및 구조해석 모듈, 통계해석 모듈 등으로 구성되어 있다. 이하에서는 각 모듈의 기능을 간략히 설명한다.

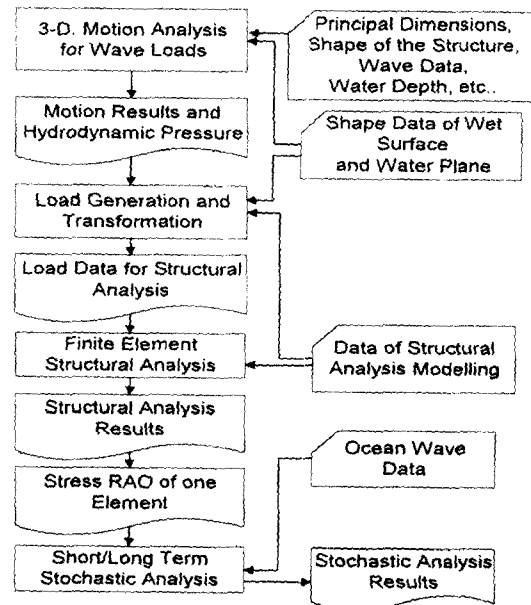


Fig. 1 Flow of the direct structural analysis system for floating type ocean structures

## 2.2 운동해석 모듈

본 모듈은 유한수십에서 임의 형상의 3차원 해양구조물에 작용하는 파랑하중, 운동응답 및 파랑표류력을 계산하는 기존의 범용 운동해석 프로그램[5]을 이용한다. 본 프로그램은 선형중력과 이론 및 선형 포텐셜법에 기초한 것으로서, 물체 표면에 소오스와 더블렛을 분포시키고 주어진 소오스의 분포밀도로부터 더블렛의 분포 밀도를 구하는 개량된 Green 적분방정식을 이용하여 속도 포텐셜을 구하는 방법을 사용하고 있다. 구해진 속도 포텐셜로부터 베르누이 방정식을 이용하여 물체 표면의 압력을 구하게 되는데, 이때 유체 정압력은 경계치 문제에서 부력과 상쇄되며, 2차항 압력은 입사파의 주파수를 갖는 파랑하중과는 무관하므로 전체 포텐셜의 일차 시간 미분항으로 나타나는 선형 압력항만을 고려한다.

본 프로그램의 입력자료로는 부유체 주요제원, 형상자료, 무게중심, 회전반경, 수심, 계류특성치, 입사파 정보 등이며, 그 출력자료로는 단위 파고당 각 운동 성분의 크기 및 가속도, 부유체 각 위치에서의 유체 동압력의 크기가 주어진 파 주파수 및 입사각에 대응하여 나타난다.

## 2.3 하중 변환/생성 모듈

하중 변환/생성 모듈은 참고문헌[1]에서 상세히 기술한 바와 같이 유한요소 형상모델이 주어지는 경우, 파랑하중 운동해석 모듈로부터 계산되어진 파랑 동압력 및 운동해석 결과를 유한요소 구조해석 모델용 절점 작용하중 자료로 변환시키는 기능을 가진다. 본 프로그램은 부유체의 자중과 부력에 의해 야기되는 정적 평형상태 및 파랑 동압력과 부유체 운동 관성력에 의해 만족되어지는 동적 평형상태 각각에 대하여 유한요소 구조해석 모델용 절점 작용하중 자료를 제공할 뿐만 아니라, 자중, 부력, 동하중의 작용중심, 관성모멘트, 각 station 별 수평, 수직 굽힘모멘트, 비틀림모멘트 분포 등을 계산하여 준다. 입력자료로는 운동해석 결과와 함께, 유한요소 구조형상 모델, 대상 부유체의 중량분포 자료 등이 필요하다.

참고문헌[1]에서 자세히 기술한 바와 같이 파랑

하중 운동해석 모듈로부터 계산되어진 파랑 동압력 및 운동해석 결과를 유한요소 구조해석 모델용 절점 작용하중으로 치환하는 과정에는 필연적으로 불평형력이 나타나므로 이를 해소하는 것이 역학적으로 중요한 문제이다.

상기의 불평형력을 해소하는 방법은 앞의 연구[1]를 보완하여 다음과 같이 수행되었다. 즉,

- 부유체 운동해석 프로그램의 결과에서 주어진 강제 운동의 변위 및 가속도에 구조해석 모델로부터 산정된 각 절점절량의 곱한 값 즉, 관성력을 기준으로 하여 파랑외력을 수정하는 방법을 근간으로 한다.
- 먼저 전후, 좌우, 수직의 세 방향(x, y, z 방향)에 관한 하중의 전체 크기를 일치시키기 위하여 각 방향에 대한 전체 관성력의 크기와 파랑외력의 크기를 비교한 후, 그 오차만큼을 초기의 유체동압력 분포에 일률적으로 가해 주는데, 이때, 압력의 분포형태는 변화시키지 않고, 각 절점의 절대 크기만을 변환시키는 방식을 적용한다.
- 부유체의 x 축 방향 수직 굽힘 모멘트( $M_x$ )를 일치시키기 위하여 관성력 및 파랑외력에 대한 길이 방향 모멘트를 선미면( $x=0$  면)을 기준으로 각각 계산한 후, 그 오차에 대하여 파랑외력을 수정한다. 수직 굽힘 모멘트는 다음의 (1)식으로 주어지나, 여기서  $F_x$ 에 기인한 모멘트의 크기는 무시할 수 있으므로,  $F_z$  즉, 수직방향의 부가압력만을 가해 줌으로써 모멘트의 평형이 만족되도록 한다. 이때의 부가 압력은 순수모멘트 만을 발생시키는 압력분포로 가정되며, 수직방향의 분포력의 크기에는 영향을 미치지 않는 형태로 가정된다.

$$M_x = yF_z - zF_y$$

$$M_y = -x F_z + z F_x \quad (1)$$

$$M_z = x F_y - y F_x$$

여기서,  $F_x, F_y, F_z$  는  $x, y, z$  각 방향의 분포력을 의미하며,  $M_x, M_y, M_z$  는 부유체의  $y$  축 방향과  $x$  축 방향 수직 굽힘 모멘트 및 비틀모멘트를 의미한다.

- 동일한 방법으로 부유체의  $y$  축 방향 수직 굽힘 모멘트( $M_x$ )를  $y=0$  면을 기준으로 계산하여 일치시킨다.
- 부유체의 비틀모멘트( $M_z$ )는 선수미 방향의 분포력 ( $F_x$ )와 선수측면 분포력 ( $F_y$ )의 기여도를 동일하다고 가정하여 불평형 모멘트의 수정치를 가상 분포력으로 가해준다.

2.4 구조해석 모듈

구조해석 모듈은 범용 유한요소 프로그램인 NASTRAN을 활용한다. 구조물의 유한요소 형상 모델링은 대상 구조물에 대하여 XL 혹은 PATRAN을 이용하여 수행되어 지며, 작용하중 및 경계조건 등은 하중 변환/생성 모듈의 결과를 이용한다.

2.5 통계해석 모듈

본 통계해석 모듈은 크게 불규칙 해상상태에 대한 단기예측 프로그램과 장기예측 프로그램으로 구성된다.

단기예측 프로그램은 St. Dennis-Pierson의 선형 중첩 이론에 근거하여 불규칙 해상상태에 관한 파 스펙트럼이 주어지고 대상 구조물의 규칙파에 관한 응답(여기서는 구조해석의 결과인 응력)이 주어지는 경우, 주어진 해상상태에 관한 응답의 통계적 특성치를 구할 수 있게 된다. 본 연구에서는 1966년 ISSC에서 표준 스펙트럼으로 채택된 Modified Pierson-Moskowitz Spectrum[2]을 파 스펙트럼으로 사용한다. 단기해석의 결과로서는 RAO 및 응답 스펙트럼, 응답 스펙트럼의 표준편차, 면적, 평균값, 응답 스펙트럼의 폭에 대한 수정계수 등이 파일사각 및 대상 파주기(zero-upcrossing period) 별로 얻어진다.

단기 예측된 응답의 통계 특성치는 결국 파 스

펙트럼이 정의된 단기 해상상태에서의 값이다. 즉, 유의파고( $H_s$ )와 파 주기( $T_z$ )가 일정하게 주어진 단시간 내의 해상상태에 관한 통계치이다. 그러나, 선박 혹은 부유구조물이 그 수명 동안 겪게 되는 해상상태는 단기 해상상태가 순차적으로 혼합되어져 나타나는 장기 해상상태에 관하여 그 구조적 안전성을 검토할 필요가 있다. 이를 위해서는 단기 해상상태의 빈도 분포, 소위, 파랑 빈도 자료 (Wave data, Wave scatter diagram)를 고려한 장기 응답 예측을 수행할 필요가 있다.

특정한 응답에 관한 장기예측은 계산된 단기 해상상태에서의 응답에 대한 확률 분포와 해상 관측 자료(wave data)로 주어지는 각 해상상태의 발현 확률을 적분하는 다음의 식으로 표현되어 진다.

$$Q(x > x_0) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} p(x > x_0) p(H_s, T_z) p(\theta) dH_s dT_z d\theta \tag{2}$$

여기서,  $Q$  는 확률 수준 (probability level) 또는, 응답치  $x$  가 기준치  $x_0$  를 초과할 확률을 의미하며,  $p(x > x_0)$  는 응답의 Rayleigh 분포를,  $p(H_s, T_z)$  는 해상 관측자료로부터 주어지는 각 해상상태의 발현 확률을,  $p(\theta)$  는 부유체와 파의 조우각에 대한 확률을 의미한다.

본 해석 모듈에는 BMT data와 Walden data가 입력되어 있으며, 적용대상 해역의 장기해상 관측 자료가 주어지는 경우 이를 고려할 수 있도록 프로그램화 되어 있다. 장기예측의 결과로서는 주어진 확률수준에 대한 각 조우각 별, 혹은, 모든 조우각을 고려한 경우에 대한 해당 응답치를 얻을 수 있다.

3. 구조해석예

본 절에서는, 현재 한국기계연구원 주관으로 시 설계되고 있는 실향해역 해상 시험플랜트[4]를 대상으로, 본 연구에서 개발된 직접구조해석 시스템을

적용하여 실제 구조안전성을 검토하여 본다. 대상 시험 플랜트는 길이가 30 m, 폭 22 m의 일종의 소형 바아지이며, 국부강도만을 만족하면 구조물 전체의 구조안전성은 충분히 확보되리라 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 구조해석결과에 의한 구조안전성 판단 여부보다 본 연구에서 개발된 해석시스템의 유용성, 효율성등의 관점에서 해석결과를 분석하고자 한다. 또한, 그 계산결과를 2차원 스트립법에 의한 구조해석 결과와 비교 검토한다.

3.1 구조해석 모델링

본 해석대상 실험역 해상 시험플랜트의 주요제원은 길이 30 m, 폭 22 m, 깊이 2 m, 흘수 1.8 m의 상자형 구조물이며, 주갑판 상부에 상부구조물이 주갑판으로부터 4 m 높이까지 비연속적으로 설치되어있다. Fig. 2는 대상 시험 플랜트의 중앙단면도를 나타내고 있다.

Fig. 3은 모델링된 유한요소 구조해석 모델을 나타낸다. 모델링 범위는 주갑판 이하에 대하여 통상의 선체 구조해석 모델과는 달리 전폭 모델로 함으로써 선수과, 선미사과 등 모든 경우의 하중에 대하여 동일한 경계조건의 설정이 가능하도록 한다.

보강판으로 구성된 모든 구조재, 즉, 갑판, 종격벽, 횡격벽, 종거어더, 트랜스버스 및 스트링거는 유효 두께를 갖는 판 요소로 이상화하며, 갑판보 및 판에 부착된 보강재 등은 보요소로 이상화한다. 또한, 구조모델링에서 누락된 국부부재(브래킷 및 보강재)등의 질량효과는 경하상태에서의 재료의 비중을 수정함으로써 그 효과를 고려한다. 전체 부유구조물은 중통보강재의 간격을 고려하여 폭방향으로는 21개의 종단면을, 길이방향으로는 21개의 횡단면을, 높이방향으로는 3개의 상하단면으로 분할한다. 그 결과 모델의 전체 절점 수는 1764개이며, 판 요소와 보 요소는 각각 2600개, 480개로 나타났다.

한편, 강제 운동을 방지하기 위한 경계조건은 부유체의 선저면과 좌우 선측면의 모든 절점에 가상의 스프링을 추가하는 형태로 하고 있는데, 이

때 적용되는 스프링 상수의 크기는 강제 변위에 따라 가상부력이 발생한다는 가정하에 부력에 상응하는 크기로 한다.

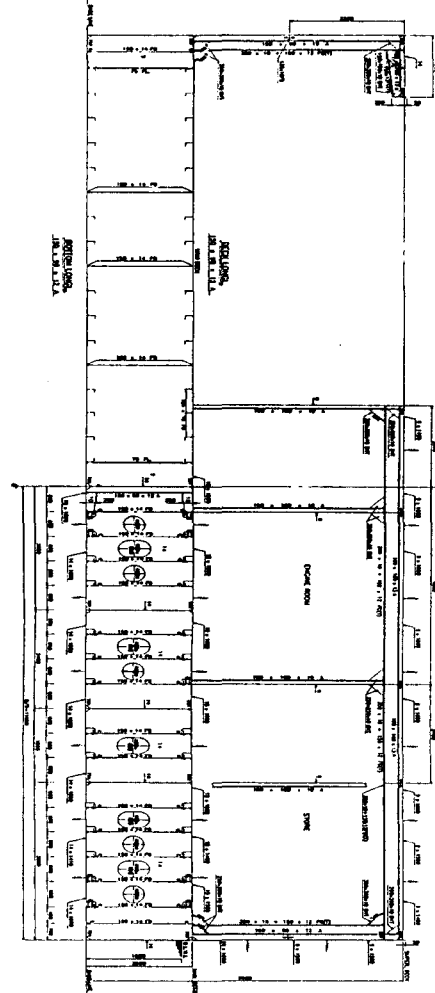


Fig. 2 Midship section of BMP pilot plant

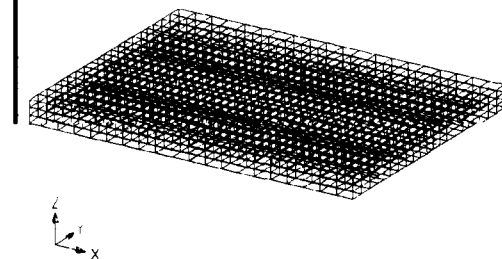


Fig. 3 Finite element model of BMP pilot plant

3.2 구조해석 결과

(1) 정하중 해석 결과

대상 시험 플랫폼에 관하여 정, 동하중 상태를 분리하여 해석이 수행되어졌다. Fig. 4는 정적하중상태에서 시험 플랫폼의 길이 방향으로 분포하고 있는 종굽힘 모멘트를 나타낸다. 대상 플랫폼의 중앙부에 위치한 집중 질량의 영향으로 중앙부에 큰 새김 모멘트가 발생함을 알 수 있다. 한편, Fig. 5(a)와 5(b)는 각각 선저부와 갑판부의 중앙선부(centerline), 좌현측, 우현측에 걸리는 축방향 응력의 길이방향 분포를 나타낸다. 갑판과 선저부에는 거의 같은 크기의 압축 및 인장 응력이 발생함을 알 수 있고, 플랫폼 중앙부에서는 양 선측에 비해 중앙선부의 응력 두배 이상으로 나타난다.

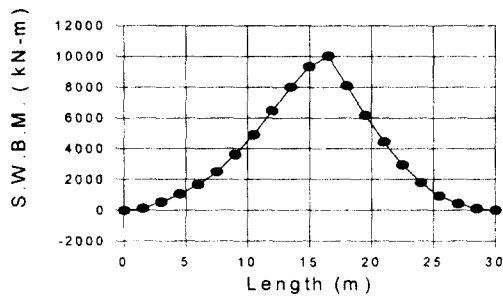


Fig. 4 Vertical still water bending moment distribution

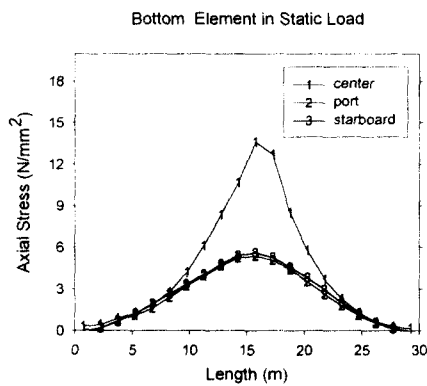


Fig.5(a) Axial stress distributions in bottom side elements under static loading condition

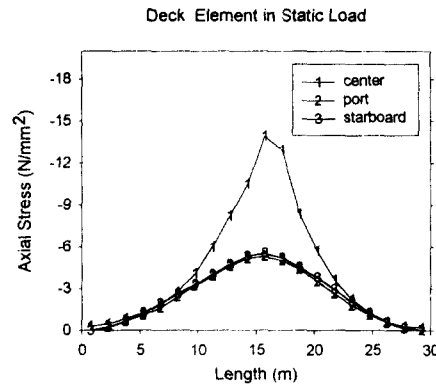


Fig.5(b) Axial stress distributions in deck side elements under static loading condition

이는 중앙부의 집중질량의 영향과 센타거더에 걸리는 shear lag의 효과가 중첩된 결과로 사료된다. 한편, 응력의 실제 크기는 전항에서 예상한 바와 같이 매우 작음을 알 수 있다.

(2) 동하중 해석 결과

동하중 상태에 관해서는 최종적으로 응력에 관한 장기예측 결과를 구하게 된다. 장기예측 결과를 구하기 위해서는 앞 절에서 서술한 바와 같이 단기해상 상태에 관한 스펙트럼해석이 필요하다. 본 연구에서는 파장수 16개와 0도에서 180도 간의 7개의 조우각에 관한 스펙트럼 해석을 수행하였다. 스펙트럼 해석을 통해 부유체의 각 자유도별 운동 스펙트럼, 혹은 굽힘모멘트, 비틀림모멘트 등의 설계 하중에 관한 스펙트럼 등을 얻을 수 있는데, Fig. 6은 그 결과의 일례로서 대상 플랫폼의 중앙단면에 걸리는 수직굽힘 모멘트에 관한 응답 스펙트럼을 보이고 있다.

한편, Fig. 7은 응력에 대한 장기예측 해석의 대표적인 결과로서, 대상 플랫폼 갑판의 중앙선부(centerline)에 위치한 각 요소의 축응력 분포를 나타내고 있다. 본 계산의 기준이 된 장기 예상 발현 확률은 20년 수명을 기준으로  $10^{-8}$  으로 설정되었다. 한편, 실제 설치 해역에 대한 파랑 자료가 없기 때문에 본 계산에서는 Walden의 복대

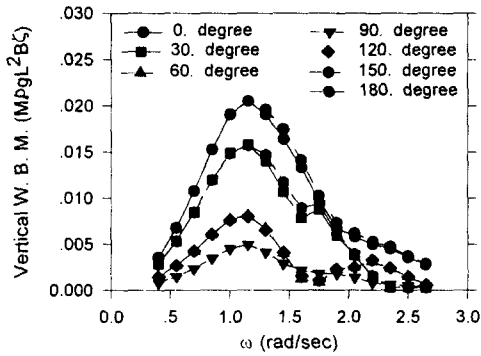


Fig. 6 Spectrum of vertical wave induced bending moment at midship

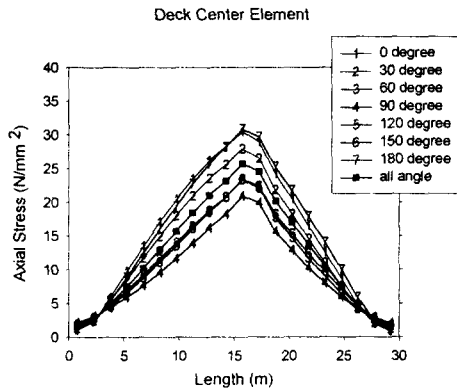


Fig. 7 Axial stress distribution at deck center elements by the long term spectrum analysis

서양 자료중 전지역의 모든 계절을 고려한 자료를 선택하였다. 계산의 결과는 예상한 바대로 매우 작은 응력값이었으며, 그 크기는 정하중 상태의 약 20 배 이다.

또한, 본 해석 결과를 기존의 선박을 대상으로 하는 직접구조해석 시스템의 결과와 비교하여 보았다. 비교된 직접구조해석 시스템은 2차원 스트립법에 근거한 운동해석 모듈을 가지고 있다. Fig. 8 은 Fig. 7 에서 보인 갑판의 중앙선부(centerline)에 위치한 각 요소의 축응력 분포로서, 전체적으로 본 해석의 결과가 2차원 시스템의 결

과보다는 약간 큰 값을 주고 있으나 거의 동일함을 알 수 있다.

한편, Fig. 9 는 갑판의 중앙단면부의 선폭방향 요소에 관한 축응력 분포로서 두 해석의 결과가 거의 동일함을 알 수 있다.

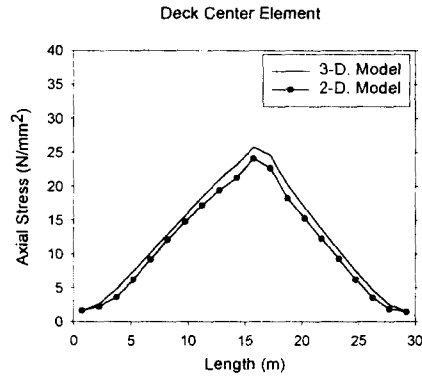


Fig. 8 Comparison of axial stress distribution for deck elements at centerline by using 2-D. and 3-D. models

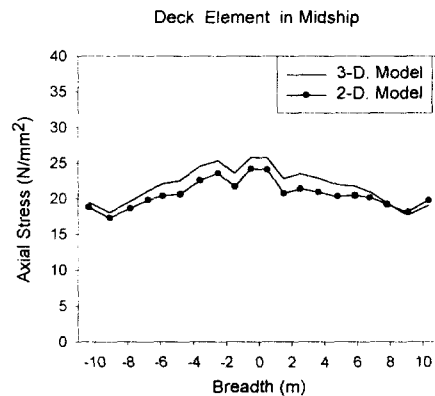


Fig. 9 Comparison of axial stress distribution for deck elements at midship by using 2-D. and 3-D. models

#### 4. 결론

본 연구에서는 파랑 운동해석 프로그램, 하중변

한 프로그램, 구조해석 프로그램 등을 장단기 파랑관측 자료에 기초한 통계해석 기능과 연결함으로써 부유식 해양구조물에 대한 직접 구조해석 시스템을 구축하였다.

본 시스템은 운동해석 프로그램이 3차원 패널법에 기초하고 있으므로 폰텐형 혹은 반잠수식형 등의 임의 형상의 해양구조물에 적용이 가능하고, 계류력 등의 효과를 포함시킬 수 있다는 특징이 있다. 또한, 전체 해석과정의 입출력자료에 관한 인터페이스가 개발되어 전 해석과정이 반자동적으로 수행된다. 전술한 계산에 있어서도 유한요소 구조해석 모델이 주어진 상황에서 전체 해석 공수가 약 4-5 man-day 정도로 매우 효율적이다. 한편, 본 해석 시스템을 직접 적용한 결과와 2차원 스트립법 파랑하중 추정법에 기초한 해석결과를 비교함으로써 본 해석방법이 응력값을 다소 과대 평가하고 있으나, 그 오차는 미소함을 확인하였다.

본 해석 시스템은 추후 대형 부유식 해양구조물의 건조, 설계시에 구조안전성을 판단하는 유용한 수단으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술처가 지원한 특정 연구사업 "해양공간이용 대형 복합플랜트 개발 (I), (II)"의 결과중 일부임을 밝힌다. 또한, 본 연구의 일부내용인 운동해석 프로그램에 관하여 기술적인 협조를 아끼지 않은 한국기계연구원 해양기술연구부의 홍사영 박사, 최윤락 박사에게 이 자리를 빌어 감사의 뜻을 전하는 바이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 임채환, 이정렬, 박성환, "3차원 파랑하중을 고려한 부유구조물의 구조해석", 대한조선학회 1997년도 춘계 학술대회 논문집, pp. 457-461, 1997년 4월.
- [2] 송재영, "파랑하중에 의한 선체구조의 직접강도해석 기법 개발 연구", 삼성중공업(주), 대우중공업(주), 한국선급 연구보고서 OR-11-95, 1995년.
- [3] 송재영, "직접계산법에 의한 고속 컨테이너선의 구조해석법 개발", 삼성중공업(주), 한국선급 연구보고서, 1991년 9월.
- [4] 정태영, "해양공간이용 대형 복합플랜트 개발", 한국기계연구원 <BMP 개발사업> 2차년도 중간연구 결과 발표회자료, 1997년 9월.
- [5] 홍사영, "해양공간이용 대형 복합플랜트 개발 (I) - 세부과제 II: 부유구조물 파랑응답 해석 기법 개발", 한국기계연구원 연구보고서 BSN373-1582.D, 과학기술처, 1996년 12월.