



# Drillship의 전선구조해석 시스템에 대하여

김 성 찬\*                      서 용 석\*

전선 구조 해석법은 선박에 작용하는 파랑 하중을 실 해상 상태에서 구하고 이를 직접 선체 구조 모델에 적용하여 선체의 구조적 안전성을 평가하는 방법으로 기존의 선급 룰보다 진일보한 해석 방법이며 특히 drillship 이나 FPSO(Floating Production, Storage and Offloading System) 등과 같이 특수한 목적을 갖는 선박의 설계에 적합한 해석방법이다. 본 해석은 선박에 작용하는 파랑 하중을 구하는 내항 성능 해석, 설계과를 구하기 위한 장,단기 해석, 파랑 하중을 선체 구조 모델에 적용하는 방법 그리고 유한 요소 모델에 대한 구조 해석등으로 나눌 수 있으며 각각은 고유한 해석 과정을 갖고 있다. 현재 본 해석법을 이용한 선체 구조 해석은 전 세계에 걸쳐 진행중이며 이의 유용성이 입증되어 국내의 다른 조선소에서 개발중에 있다. 본 연구에서는 당사에서 선체 전선 구조 해석 시스템으로 개발한 직접 구조 해석 기법에 대해 기술하고 이를 drillship에 적용한 예를 살펴보았다.

## 1. 서      론

최근 선박의 대형화, 경량화에 대한 요구가 증대

하면서 선박의 해석 방법이 기존의 선급에서 제시하고 있는 룰에 의한 해석에서 점점 선박의 작업 환경을 고려한 직접 해석법으로 적용되고 있다. 특히 drillship이나 FPSO 등과 같이 기존의 선박과 다른 특징을 갖는 선박의 경우에는 선급의 룰 외에 직접 해석법으로 해석을 수행하여 그 결과를 설계에 반영하여야 한다.

직접 해석법은 선박에 작용하는 하중을 작업 환경을 고려하여 직접 구하고 이를 전선 유한 요소 모델에 적용한 후, 응력과 좌굴 관점에서 선박의 안전성을 평가하는 일련의 구조 해석 기법을 의미한다. 이 외에도 최근에는 피로 강도가 중요한 문제가 되어 마찬가지로 직접 해석법의 일종인 스펙트럴 피로 해석을 포함하여 선박의 구조적인 안전성을 평가하고 있다.<sup>1)</sup>

직접 해석법은 크게 내항 성능 해석, 장,단기 해석, 전선 구조 응력 해석, 상세 해석 및 좌굴 해석으로 나눌 수 있고 피로 해석이 포함되는 경우에는 피로 수명 평가법 등이 있다.<sup>2)</sup>

Fig. 1은 선박의 전선 해석 시스템에 대한 흐름도를 나타내고 있다.

본 연구에서는 당사에서 개발한 선체 구조의 직접

\* 삼성중공업 조선플랜트연구소 구조연구 파트

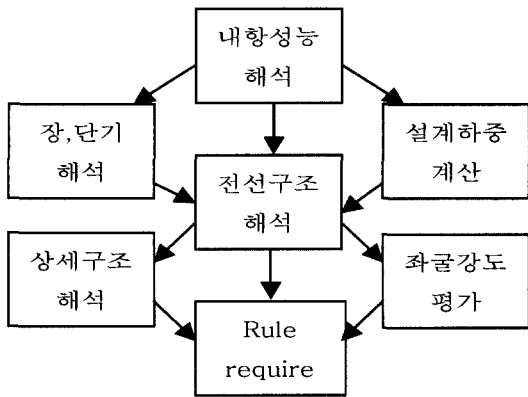


Fig.1 Flowchart of direct structural analysis for ship structures

해석법을 소개하고 특수선의 일종인 drillship에 대해 그 적용 예를 살펴보고자 한다.

## 2. 내항성능해석(Seakeeping Analysis)

해상을 항해하는 선박은 선박에 작용하는 파랑에 의해 운동을 하게 되고 이로 인해 파랑동하중을 받는다. 이러한 파랑 하중을 실제 파랑 조건하에서 계산하기는 거의 불가능하므로 다음과 같은 가정을 통해 실제 파랑 조건을 구현하고 있다.

- 1) 실제 파랑은 단순 조화파의 합으로 표시할 수 있다.
- 2) 파고와 선박 응답은 비례한다.

실제 선박에 작용하는 파는 모든 방향에서 임의의 길이를 갖는 파가 가능하지만 이를 모두 고려할 경우에는 해석이 너무 방대하므로 선박과 파의 조우각, 파장 등을 이산화하여 표현한다. 대부분의 경우에는 조우각도를 15도 또는 30도 간격으로, 그리고 파장의 크기는 주파수를 기준으로 0.2에서 1.5rad/sec를 0.05rad/sec 간격으로 취하고 있다. 파장( $\lambda$ )과 주파수의 관계는 심해(deep sea)의 경우 다음과 같이 표현된다.<sup>3)</sup>

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} \quad (1)$$

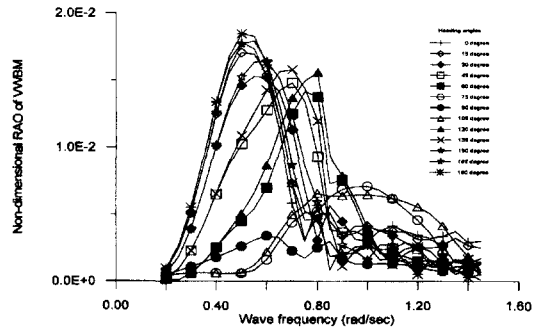


Fig. 2 Vertical bending moment RAO

여기서  $g$  : 중력가속도  
 $\omega$  : 주파수(rad/sec)

내항 성능 해석은 2차원 스트립 이론(2-D strip theory)이나 3차원 패널 방법(3-D panel method)이 이용되며, 선체가 강체라는 가정하에 각각의 파에 대해 선박의 6자유도 운동 및 파랑 동압력 그리고 굽힘 모멘트나 전단력등과 같은 파랑 단면력을 계산한다.

구조적으로 관심있는 하중에 대해 단위 파고를 갖는 여러 파에 대한 결과를 나타낸 것을 전달함수(transfer function, RAO)라 하며 전달 함수에는 수직 굽힘 모멘트 전달 함수, 가속도 전달 함수 등 여러가지 전달 함수를 구할 수 있다.

Fig. 2는 수직 굽힘 모멘트에 대한 전달 함수의 한 예를 나타내고 있다.

이러한 전달 함수는 선박의 하중 적재 조건에 따라 다르며 직접 해석법에서 고려하는 선박의 하중 조건은 다음과 같다.

- a) Ballast condition
- b) Full loading condition
- c) Partial loading conditions

실제 선박 구조를 설계할 경우에는 모든 하중 적재 조건하에서 임의의 단면력에 대해 강도가 만족되도록 해야 한다. 직접 해석법에서 고려하는 단면력을 특히 설계 인자(Dominant Load Parameter)라고 하며 대표적인 설계 인자로는 중앙 단면에서의 수직 굽힘 모멘트, 선수부에서의 가속도, 1/4, 1/2

그리고  $3/4L$ ( $L$ : 선박의 길이)에서의 파랑 비틀 모멘트, 최대 rolling angle 등이 있다.

### 2.1 단기 해석(Short Term Analysis)

내항 성능 해석은 규칙파에 대한 선박의 거동을 나타내고 있지만 실제 선박은 불규칙 해상 상태에서 거동하고 있다. 따라서 규칙파에 대한 결과를 불규칙 해상 조건하에서 나타내야 한다. 이를 위해서는 확률 통계적인 방법이 필요하며 다음과 같은 가정을 기초로 한다.

- a) 파는 Narrow-banded 정상상태 과정을 따른다.
- b) 파의 elevation은 정규 분포를 갖는다.
- c) 파고의 분포는 Rayleigh 분포를 한다. 이는 응답 또한 Rayleigh 분포를 따른다는 것을 의미한다.

단기 해석은 30분에서 3시간 정도의 특정한 불규칙 해상 상태에서 선박의 응답을 확률 통계적인 방법으로 구하며 결과는 고려중인 응답(예를 들면 수직 굽힘 모멘트)의 분산(variance)이다. 특정한 해상 상태는 주기와 파고에 의해 결정되며 특히 파 주기는 zero-crossing 주기( $T_z$ )나 peak 주기( $T_p$ ) 그리고 파고는 유의 파고(significant wave height,  $H_s$ )에 의해 결정된다. 그리고 zero-crossing 주기와 유의 파고에 의해 결정된 특정한 해상 상태의 에너지는 파 스펙트럼에 의해 나타내며 대표적인 파 스펙트럼은 Pierson-Moskowitz 스펙트럼과 JONSWAP 스펙트럼이 있다. 식 (2)는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼을 나타내고 있다.

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{2\pi}{T_z} \right)^4 H_s^2 \omega^{-5} \exp \left[ -\frac{1}{\pi} \left( \frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-4} \right], \omega > 0 \quad (2)$$

단기 해석에 의해 선박의 응답(예: 수직 굽힘 모멘트)에 대한 분산(variance)은 다음과 같이 계산된다.

$$m_i = \int_0^{\infty} \omega^i S_{\eta}(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega \quad (3)$$

- 여기서  $\omega$  : 파 주파수(rad/sec)
- $S_{\eta}(\omega)$  : 파 스펙트럼
- $H(\omega)$  : 선박 응답의 RAO

### 2.2 장기 해석(Long-term Analysis)

단기 해석은 하나의 해상 상태에 대해서 선박의 응답을 구하지만, 실제 해상은 여러 해상 상태가 존재한다. 장기 해석은 다양한 해상 상태의 발현 빈도를 고려하여 선박의 일생에 한 번 발생할 응답량을 구한다. 해상 상태의 발현 빈도는 Wave scatter diagram으로 정의되며 대표적인 것은 Walden wave data, BMT wave data 등이 있다. Table 1은 wave scatter diagram의 예를 나타내고 있다.

장기 해석을 통해 선박의 구조 설계에 기준이 되는 설계 하중은 다음 식을 적용하여 구한다.

$$\frac{1}{n_A} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K W_{ijk} \exp \left\{ \frac{-x_0}{\sqrt{m_0(H_{Si}, T_{Zj}, \mu_k)}} \right\} \quad (4)$$

여기서

- $n_A$  : 선박의 일생동안 발생하는 응답량의 총 회수(20년  $\approx 10^8$ )
- $W_{ijk}$  : 해상 상태의 발현 확률
- $H_{Si}, T_{Zj}, \mu_k$  : 유의파고, zero-crossing주기, 조우각도
- $m_0(H_{Si}, T_{Zj}, \mu_k)$  : 한 해상상태에서 응답의 분산
- $x_0$  : 일생에 한 번 발생하는 응답량(설계조건)

Table 1 An example of wave scatter diagram

Tp(s)/Hs(m)	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25
7	1.04	7.59	0.15			
9	0.94	19.38	13.56	0.41		
11	0.64	9.62	14.29	3.23	0.22	
13	0.83	8.61	5.93	1.05	0.12	
15	0.15	2.96	4.91	0.99	0.19	0.15
17		0.86	1.49	0.30		
19		0.18	0.21			

### 2.3 설계 파 결정<sup>4)</sup>

장, 단기 해석을 통해 설계 하중이 결정되면 결정된 설계 하중이 선박에 실제로 발생하도록 설계 파를 선체 구조 모델에 적용하여 한다. 설계 파는 여러 가지로 정의할 수 있지만 가장 일반적인 방법은 설계 응답의 RAO에서 최대값을 나타내는 조우 각도와 파장을 결정하고 설계파고는 다음 식을 적용하여 구한다.

$$\text{설계파고} = \frac{\text{Long-term value}}{\text{Maximum RAO value}} \times 2 \quad (5)$$

이렇게 결정된 설계 파에 대해 다시 한 번 내향 성능 해석을 수행하여 파랑 동압력과 관성력을 구하고 이를 선체 구조 모델에 적용하여 선체에 발생하는 응력을 이용하여 응력 평가와 좌굴 평가를 수행한다.

### 3. Drillship 의 전선 구조 해석<sup>5)</sup>

앞에서 기술한 전선 구조 해석 방법을 당사에서 건조한 drillship에 대하여 적용하고 그 과정을 확인하였다.

해석 대상 선박의 제원은 다음과 같고

- Length BP : 219.40m
- Breadth(mld) : 42.00m
- Depth(mld) : 19.00m
- Draft(operating) : 12.00m

전선 구조 모델은 Fig. 3과 같다.

본 선박에 대해 고려한 하중 적재 조건은 다음과 같고

- a) Operating condition
- b) Survival condition
- c) Transit condition

그에 따른 설계 인자는 다음을 고려하였다.

- Still water condition
- 중앙 단면에서의 수직 굽힘 모멘트

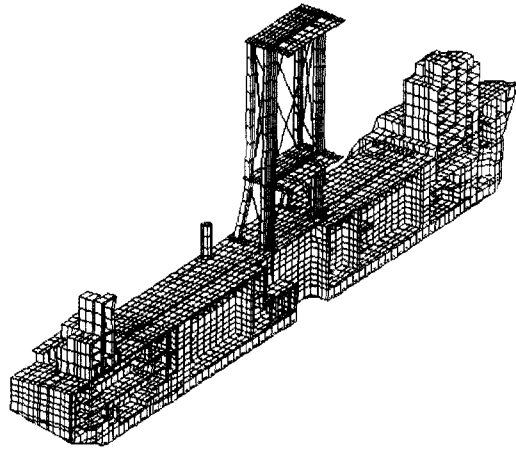


Fig. 3 3-D global finite element model(half)

- 선수부에서의 수직, 수평가속도
- 1/4, 3/8, 1/2, 5/8, 3/4L 에서의 비틀 모멘트
- 최대 roll angle

#### 3.1 모델링 및 경계 조건

전선 모델은 Fig. 3과 같이 거주구 및 derrick support를 포함하며, 판 요소와 beam 요소를 이용하여 모델링하고 길이 방향으로는 web frame 간격으로 그리고 폭과 깊이 방향으로는 2 내지 3개의 longitudinals 간격으로 모델링한다.

자중과 관성력 및 부력과 파랑 동압력에 의해 힘의 평형을 유지해야 하며 불평형력은 전체 배수량을 기준으로 대칭 하중의 경우에는 1%, 비대칭(asymmetric)하중의 경우에는 2% 이내로 제한한다.

본 연구에서는 반쪽 모델을 이용하므로 중앙 단면인 대칭면을 기준으로 하중 조건에 따라 대칭과 비대칭 경계 조건을 적용한다. 작용 하중도 마찬가지로 대칭 하중과 역대칭(anti-symmetric) 하중을 작용시킨다.

Table 2는 대칭 및 역대칭 하중에 대한 하중 조합 및 경계 조건을 나타내고 있다.

#### 3.2 평가 기준

전선 구조 모델에서 응력과 좌굴을 평가하는 부위는 다음과 같다.

Table 2 Symmetric and anti-symmetric loading and boundary conditions

Symmetric	Loading	$P_{sym} = (P_{port} + P_{stbd})/2$
	Centerline B.C.	$D_Y = R_X = R_Z = 0 (fixed)$
Anti-symmetric	Loading	$P_{sym} = (P_{port} - P_{stbd})/2$
	Centerline B.C.	$D_X = D_Z = R_Y = 0 (fixed)$
Stress combination	Port	$\sigma_{port} = \sigma_{sym} + \sigma_{anti}$
	Starboard	$\sigma_{stbd} = \sigma_{sym} - \sigma_{anti}$
Disp. combination	Port	$\delta_{port} = \delta_{sym} + \delta_{anti}$
	Starboard	$\delta_{stbd} = \delta_{sym} - \delta_{anti}$

$P_{port}, P_{stbd}$  : Port 및 starboard 의 하중  
 $D_X, D_Y, D_Z$  : x, y, z 방향의 병진 자유도  
 $R_X, R_Y, R_Z$  : x, y, z 방향의 회전 자유도

- Upper deck
- Inner bottom
- Bottom
- Side shell
- Inner longitudinal bulkhead
- Side longitudinal bulkhead
- Stringers(stress check only)
- Web frames(stress check only)

전선 구조 모델에 의한 응력 평가는 선급마다 그 기준이 다를 수 있지만 대부분은 재료의 항복 응력의 95%를 허용 응력으로 간주하고 있다.

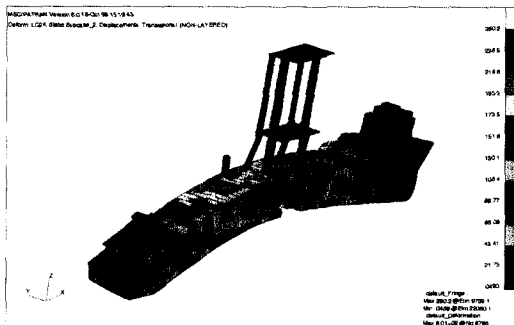


Fig. 4 Deflection of global coarse mesh model under hogging wave bending moment

### 3.3 3-D Global Coarse Mesh해석

Fig. 4는 hogging 상태의 수직 굽힘 모멘트를 설계 인자로 갖는 설계과를 구조 모델에 적용했을 때의 변위 결과이며 Fig. 5는 torsional moment를 설계 인자로 했을 때의 web frames의 응력 분포를 나타내고 있다.

### 3.4 상세 해석

전선 구조 해석 결과를 바탕으로 응력이 크게 나타나거나 특이한 구조 형상으로 응력의 분포를 정밀히 계산할 필요가 있을 때는 전선 구조 모델에서 관심 부위를 떼내어 상세 구조 모델을 만들어 상세 해석을 수행한다. 상세 구조 모델에 적용되는 하중은 전선 구조 해석의 결과인 강제 변위와 그 구조에 작용하는 국부 하중이다. 예를 들면 web 구조나 drillship에 존재하는 moonpool 주위의 응력 분포 등은 상세 구조 해석을 통해 확인한다.

Fig. 6은 web frame의 상세 응력 해석 결과를, 그리고 Fig. 7은 upper deck 부위에 있는 moonpool 주위의 응력 분포를 나타낸다.

### 3.5 좌굴 평가

전선 구조 모델 및 상세 구조 모델에 대해 좌굴 안정에 대한 평가를 수행한다. 평가 기준은 선급에서 제시하고 있는 좌굴 평가식을 적용하며 평가 대상 판은 보강재나 girder로 둘러 싸인 panel을 대상으로 한다.

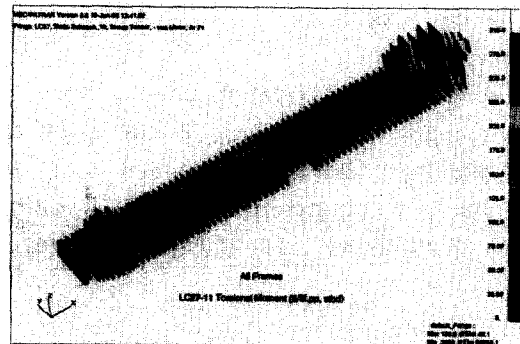


Fig. 5 Stress result of web frames under torsional moment

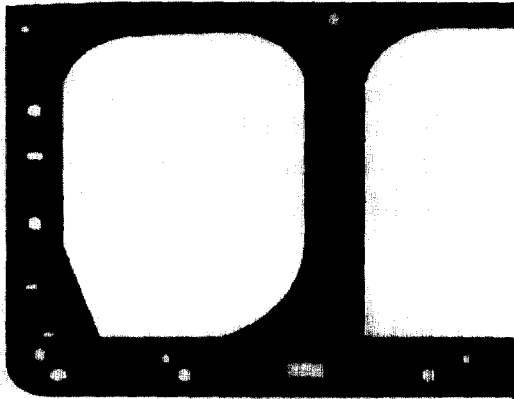


Fig. 6 Stress result of web frame

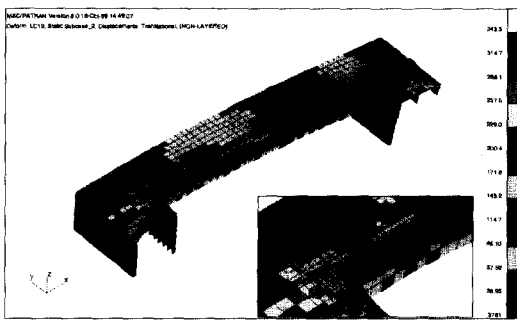


Fig. 7 Stress result in way of moonpool at upper deck

대부분 좌굴 평가는 선박의 부식을 고려하여 부식 마진(corrosion margin)을 뺀 판의 두께에 대해서 수행하며 판의 좌굴 응력을 정의할 때 이 부식 마진을 고려하여 허용 좌굴 응력을 설정한다.

#### 4. 결 언

본 연구에서는 당사에서 개발한 선체 구조의 직접 해석법을 기술하고 drillship에 대해 적용한 예를 살펴보았다. 직접 해석 기법은 현재 특수선 뿐만 아니라 유조선, 컨테이너선 등에도 적용되고 있으며 앞으로도 계속 더욱 발전된 이론을 토대로

개발되리라 예상된다.

현재의 직접 해석법의 추세는 파랑 하중을 계산하는 내항 성능 해석 부분이 선형 이론에서 비선형 이론으로 대체되는 경향을 보이고 있으며, 또한 선체를 강체가 아닌 탄성체로 이상화하여 springing 등과 같은 동적 하중에 대한 연구도 계속 진행되고 있다.

본 연구에서는 현재 큰 관심을 갖고 있는 피로 해석 부분에 대해서는 기술하지 않았으나 직접 해석법의 일환으로 스펙트럴 피로 해석법이 실선에 적용되고 있으며 당사에서는 많은 선박에 대해 이를 적용하여 설계에 반영하고 있다.<sup>6,7)</sup>

#### 참 고 문 헌

1. 서용석, 김재균, 장기복, 윤장호, "파랑 동하중을 고려한 선박의 전선 해석 시스템에 대하여", 대한조선학회 선박해양 구조연구회, 연구발표논문집, 1998년 여름
2. ABS, Analysis Procedure Manual for the Dynamic Loading Approach for Tanker, 1992
3. SNAME, Principles of Naval Architecture, Volume III, 1989
4. 삼성중공업, 대우중공업, 한국선급, "파랑 하중에 의한 선체 구조의 직접 강도 해석 기법 개발 연구", 산학 연구 보고서, OR-11-95, 1995
5. 윤장호, 김성찬, 김재균, 안정환, "Dynamic Loading Approach Structural Analysis for R&B FALCON Drillship", Report NO. TI-2204, 삼성중공업 조선플랜트연구소, 1999
6. 서용석, 윤장호, "73k B/C의 bottom longitudinal 피로해석 연구", 선박 해양 구조 연구회 논문집, 제13권, 제1호, 1999. 2
7. 윤장호, 김성찬, 김재균, 전민성, "Spectral fatigue Assessment for R&B FALCON Drillship", Report NO. TI-2204, 삼성중공업 조선플랜트연구소, 1999