

## 통계해석법에 의한 폰툰식 VLFS 의 피로강도해석

박성환<sup>†\*</sup>, 한정우\*, 한승호\*, 하태범\*\*,  
이홍구\*\*, 홍사영\*\*\*, 김병완\*\*\*, 경조현\*\*\*

한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부\*, 한국선급 기술연구소\*\*  
해양안전시스템연구소 해양시스템개발부\*\*\*

### Fatigue Strength Analysis of Pontoon Type VLFS Using Spectral Method

Seong-Whan Park<sup>†\*</sup>, Jeong-Woo Han\*, Seung-Ho Han\*, Tae-Bum Ha\*\*, Hong-Gu Lee\*\*, Sa-Young Hong\*\*\*, Byoung-Wan Kim\*\*\* and Jo-Hyun Kyoung\*\*\*

System Engineering Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials\*  
Research and Development Center, Korean Register of Shipping\*\*  
Maritime and Ocean Engineering Research Institute (MOERI), KORDI\*\*\*

#### Abstract

The fatigue strength analysis of VLFS is carried out by using a 3-dimensional plate finite element model with a zooming technology which performs the modeling of wide portions of the structure by a coarse mesh but the concerned parts by a very fine mesh of t by t level. And a stepwise substructure modeling technique for global loading conditions is applied which uses the motion response of the global structure from 2-D plate hydro-elastic analysis as the enforcing nodal displacements of the concern 3-D structural zooming model. Seven incident wave angles and whole ranges of frequency domains of wave spectrum are considered. In order to consider the effect of breakwater, the modified JONSWAP wave spectrum is used. Applying the wave data of installation region, the long-term spectrum analysis is done based on stochastic process and the fatigue life of the structure is estimated. Finally some design considerations from the view point of fatigue strength analysis of VLFS are discussed.

※Keywords: VLFS(초대형 부유식 해양구조물), Fatigue strength(피로강도), Pontoon(폰툰), Spectral method(통계해석법), Hydro-elastic analysis(유탄성해석).

## 1. 서론

일반적으로 VLFS 구조물 특히, 폰툰식(pontoon type) VLFS 구조물은 유탄성 거동의 관점에서 설계되는 것이 상식이다. 이는 해상공항, 물류터미널 혹은 해상 리조트 등과 같이 대면적 갑판을 요구하는 구조물의 실제 설치대상지역을 일정한 수심 범위 내로 상정하는 경우, 강체 거동에 근거한 구조설계 보다는 유탄성 거동에 근거한 구조설계가 구조물의 안전성을 담보하면서도 경제적인 설계가 가능하기 때문이다. 저자 등은 이러한 유탄성 거동에 근거한 폰툰식 VLFS 구조물의 구조초기 설계 과정에 대해서 이미 관련한 논문을 발표한 바도 있다(이탁기 등 2004, 박성환 등 2005)

폰툰식 VLFS 구조물에 대하여 구조설계를 수행하는 경우, 이제까지는 구조물의 운동응답 안전성, 수명 주기내 최대 설계파 조건에 대한 구조적 안전성, 각종 비상하중 상태에 대한 구조 안전성 등의 관점에서 설계가 수행되어 왔다. 그러나 이러한 VLFS 구조물이 보통 50년 내지 100년 정도의 장기 수명이 요구되는 구조물이고, 구조물의 설계 근거가 유탄성 거동에 기초한다는 관점에 비추어 볼 때 구조물의 장기 하중에 대한 피로 안전성도 설계 초기에 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

추정하건대 폰툰식 VLFS 구조물내 피로강도 해석이 요구되는 위치는 주요 종통재가 주요 횡부재와 연결 되는 부위, 혹은 구조물의 건조 단계에서 해상 접합이 요구되는 부위, 돌핀 계류 등 계류장치 연결 부위, 기타 응력 집중이 예상되는 부위 등일 것이다. 이러한 위치는 관련 부위의 구조 상세가 선행되어야만 실제 피로해석의 수행이 가능하다는 문제점이 있으며, 사실 또 이로 인하여 관련 연구가 부족한 것이 사실이다. 즉, 많은 VLFS에 관한 연구가 구조물의 초기 성능인 유탄성 해석에만 집중된 측면이 있으며, 설계파 개념에 근거한 구조설계에 집중되고 있다(홍사영 등 2004, KIM et al. 2005, TRAM 1996-2000, Shigeru et al. 1996). 그러나 전술한 바와 같이 구조 수명이 50년 이상의 장기 수명이 요구되고, 보통의 선박 및 해양 구조물의 설계 개념과는 달리 유탄성 거동에

근거하여 구조물이 설계된다는 관점에 비추어 피로강도 해석 결과는 설계 초기단계에서도 매우 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 1000 x 500 m 크기의 해상 물류터미널 구조물에 대하여 초기 구조설계를 수행하고, 이를 대상으로 하여 피로 강도 해석을 수행한다. 피로 강도 해석은 선저 및 갑판의 종통재가 횡격벽 혹은 주요 횡 강도부재와 만나는 부위만을 대상으로 하며, 관련 위치의 구조 상세는 대형 유조선 설계에 사용되는 상세구조 형태를 활용한다. 피로강도 해석 기법은 선박 및 해양구조물에 사용되는 spectral method 에 근거한 직접구조해석 기법을 활용하며, 선박에서와 달리 설치 해역 내 방파제 효과 및 연안 해역 wave spectrum 의 효과를 고려한다. 관심 영역내 응력 집중부 hot-spot 응력을 구하기 위하여 t x t 수준의 fine mesh 와 주요 구조 부재 coarse mesh 를 동시에 수행하는 zooming 기법에 의한 유한요소 모델링을 이용하여 관심 위치의 응력전달 함수를 구하며 유탄성 해석으로부터 계산된 변위를 해석 모델의 경계 조건으로 가해주는 2 단계 부분구조해석 모델을 이용하여 하중해석을 수행한다. 전체 하중해석은 wave 의 입사각과 전체 주파수 영역에 대해 계산을 수행하며, 통계해석에 사용된 wave 스펙트럼으로는 방파제 효과를 고려한 JONSWAP 스펙트럼을 활용한다. 장단기 통계해석을 통하여 피로강도를 최종적으로 평가하며 그 결과를 설계 관점에서 고찰한다.

## 2. VLFS 구조설계

### 2.1 기본계획 및 unit 분할

피로강도 해석 기법을 적용하는 대상 VLFS 구조물은 남해 가덕도 해역 설치를 가정한 해상물류터미널이다(홍사영 등 2004). 아래는 대상 물류터미널의 기본계획 및 제원을 보이고 있다.

- 구조형식: pontoon type
- 주요제원:  $L \times B \times D = 1000 \times 500 \times 6$  m  
Mean draught = 2.0 m
- 보조시설

- . 방파제
- . 돌핀계류 시스템
- . Access
- 구조물 수명: 50 년

본 초대형 구조물을 일체로 건조하는 것은 불가능하므로 국내 조선소의 yard 건조능력을 고려하여 Fig. 1 에서 보이는 바와 같은 유니트 분할계획을 실시한다. 한 개 유니트 크기는 그림에서 보이는 바와 같이 250x40x6 m 이고, 전체 구조물은 50 개의 유니트로 구성된다.

2.2 설계파 및 하중 조건

Table 1 은 상갑판 시설물에 의한 갑판 설계 하중과, 정상 및 태풍 조건하에서의 선저, 선측 등에 작용하는 설계파 하중 조건을 나타낸다.

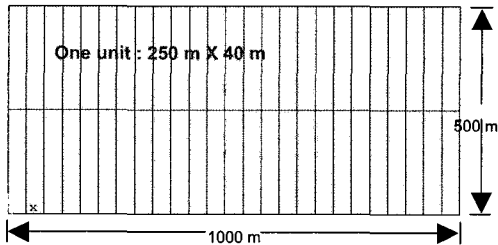


Fig. 1 Plan of unit division.

Table 1 Design load condition for side & bottom.

Item	Condition	Design loads	
Deck facilities	Design deck loads	2.0 ton/m <sup>2</sup>	
Water pressure height	Side wall at typhoon	4.0 m	
	Bottom at typhoon	6.0 m	
Wave condition within breakwater	Normal	Height	H <sub>1/3</sub> = 0.5 m
		Period	T <sub>1/3</sub> = 13.0 sec
	Typhoon	Height	H <sub>1/3</sub> = 1.0 m
		Period	T <sub>1/3</sub> = 13.0 sec

2.3 재료 및 설계 기준

물류터미널의 구조재료로서는 연강 (항복응력 = 235 MPa) 과 고장력강 (항복응력 = 315 MPa) 2 개가 고려되었다. 항복과 좌굴에 대한 안전율을 고려하여 허용응력은 재료 각각의 75% 항복응력으로 추정하였다. 각 부재에 대한 치수 산정식은 VLFS 한국선급 규정 초안(홍사영 등 2004)에서 주어진 구조부재 치수 (Hull scantlings) 식이 활용되었다. 주요 부재로는 갑판구조, 선측 및 종격벽 구조, 횡격벽 및 Web frame 구조, 그리고 선저구조 등이 있고 판 두께, 종늑골의 크기 등이 좌굴 강도와 함께 검토되었다. 이때, 모든 부재의 치수는 net scantling 기반의 값으로 나타내며, 충분한 부식 여유를 고려한다.

2.4 구조설계 결과

폰툰식 VLFS 의 유니트 구조는 갑판구조, 선측 및 종격벽 구조, 횡격벽 및 Web frame 구조, 그리고 선저구조 등으로 구성된다. Fig. 2 는 유니트 구조내 주요구조 부재 형상을 보이기 위하여 유니트의 반폭과 1 개 span 을 대상으로 형상화 한 것이다. 이들 주요부재에 대한 치수는 구조물 전체 유탄성 거동으로부터 유기되는 면내 압축, 인장, 전단 응력과 면외 설계하중을 반복적으로 고려하여 결정된다. 이러한 반복적인 절차를 통하여 구조물의 최적설계를 수행하는 방법과 관련 기술에 관해서는 이미 발표된 바 있다(박성환 등 2005, 이탁기등 2004). 기존의 연구된 방법을 기초로 도출된 최적 구조설계 결과는 다음과 같다.

- 유니트 40m 폭 내에 종격벽을 1 개 둔다.
- Trans. Web frame 을 5.5m 간격으로 unit 내에 46 개 (양 끝단 포함) 설치한다.
- Deck plate, Deck longitudinal, Bottom plate, Bottom longitudinal 는 고장력강을 사용하며, 그 이외에는 mild steel 을 재료로 사용한다.

Table 2 는 구체적인 설계 결과를 나타내며, 이로부터 얻어진 VLFS 전체 구조물의 경하중량, 단면 굽힘강성, 유효두께 등은 다음과 같다.

- Total light weight: 6439.7 ton x 80= 515,176 ton

- Longitudinal dir. effective thicknesses : 1.680 m
- Transverse dir. effective thicknesses : 1.602 m
- Longi. dir. bending moment of inertia : 15.075 m<sup>4</sup>
- Trans. dir. bending moment of inertia : 108.6 m<sup>4</sup>
- Effective thickness of primary members:
  - . deck=25.88 mm,
  - . bottom=25.88 mm,
  - . side of BHD of unit = 20.34 mm,
  - . Web Frame = 13. 50 mm

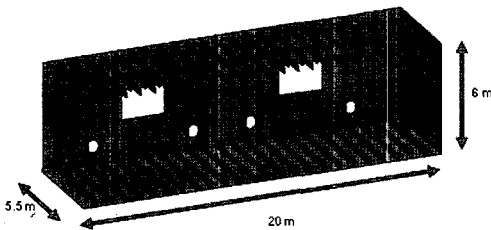


Fig. 2 Structural configuration of primary members of the unit

Table 2 Structural design result of a unit.

Web Space (m)		5.5
Longi. Space(m)		0.8
No. of Longi.(EA)		49
Sectional M. of Inertia (m <sup>4</sup> )	Longitudinal	15.075
	Transverse	108.55
Deck & Bottom	Thickness (mm)	18.0
	Stiffener sec. modulus(cm <sup>3</sup> )	788.
Side & L. BHD,	Thickness(mm)	13.5
	Stiffener sec. modulus(cm <sup>3</sup> )	986.
WEB & T. WEB	Thickness(mm)	13.5
	Stiffener sec. modulus(cm <sup>3</sup> )	590.

### 3. 피로강도해석

#### 3.1 피로해석 절차

VLFS 구조물의 피로강도를 평가하기 위하여 본 연구에서는 스펙트럴 해석법을 적용하였다(한국선급 2005, Det Norske Veritas 2001).

적용된 스펙트럴 해석법은 단기 해상상태의 발현확률 파라자료를 기초로 하여 VLFS 구조물의 단기응답을 해석적 적분을 통하여 단기 피로손상도 및 장기 피로손상도를 계산하는 단기 해석적 방법(short-term closed form method) 이다. 이 해석법은 각 해상상태에 대한 피로손상을 S-N 선도(U.K. Den Code 의 해수상태 D class)와 Miner-Palmgren 의 선형누적손상법칙을 적용하여 해석적으로 계산하고, 선체구조물의 사용수명 동안 받는 총 피로손상은 주어진 해상상태의 발현확률을 고려하여 계산되는 피로손상의 총합으로 구하는 방법이다. Fig. 3은 본 연구에 적용된 스펙트럴 피로해석 절차를 나타낸다.

#### 3.2 파라자료 및 파 스펙트럼

Fig. 3 에서 보인 바와 같이 스펙트럴 해석법에 기초한 피로강도 해석은 VLFS 구조물의 설치 위

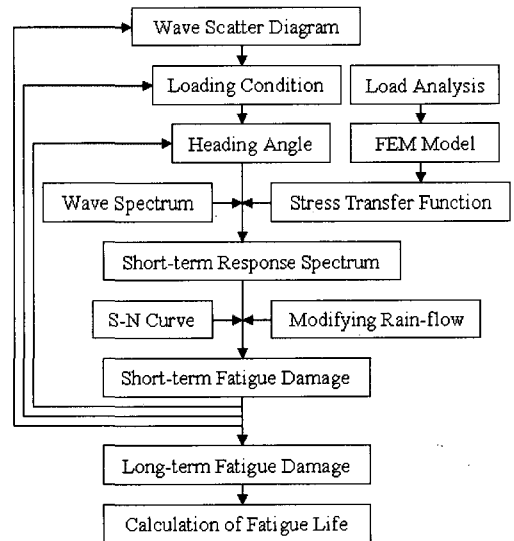


Fig. 3 Flowchart of fatigue analysis.

Table 3 Wave data: BMT Area 28 South direction.

SOUTH												
PERCENT OF OBS = 12.77%												
ZERO CROSSING PERIOD (s) SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	4	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13	Total
0.5	161	106	92	23	4	0	0	0	0	0	0	475
1.5	44	135	114	44	11	2	0	0	0	0	0	350
2.5	9	39	46	24	7	2	0	0	0	0	0	127
3.5	2	9	14	8	3	1	0	0	0	0	0	37
4.5	0	2	4	3	1	0	0	0	0	0	0	10
5.5	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	216	381	271	103	26	5	0					

치를 고려한 파랑자료(Wave data)의 선택과 하중 조건의 결정이 선행되어야 한다. 선박 혹은 타 해양구조물과는 달리 VLFS 구조물은 미리 정해진 특정 해안 지역 방파제 안에 설치되는 특징이 있다. 그러므로 VLFS 피로해석을 위한 파랑자료는 설치해역과 방파제 설치를 고려하여 선택하여야 한다. 본 연구에서는 가덕도 설치 지역과 방파제의 방향성을 고려하여 Table 3 에서 보이는 바와 같이 BMT Area 28 South Wave data 를 대상 파랑 자료로 선택하였다.

불규칙한 해양파의 확률적 분포는 단기 해상상태에서 발생하는 파도를 정상적이라 가정하여 통계적 특성치의 파 스펙트럼으로 나타낸다. 본 연구에서는 구조물의 설치 지역이 해안이라는 특성과 방파제의 파 투과율을 고려하여 식 (1)의 수정 JONSWAP wave spectrum 을 적용하였다.

$$S'(\omega) = R(\omega)S(\omega) = \frac{1}{2\pi} R(\omega) \beta_j H_{1/3}^2 \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^{-5} T_p^{-4} \exp[-1.25(\omega/\omega_0)^{-4}] \times \exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\sigma^2\omega_0^2}\right] \gamma \tag{1}$$

여기서,

$$\beta_j = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}}$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & : \omega \leq \omega_0 \\ 0.09 & : \omega > \omega_0 \end{cases}$$

$$\gamma = 1$$

$\omega_0$  : peak wave frequency

$\omega$  : mean circular wave frequency

$H_{1/3}$  : significant wave height

$T_p$  : peak period (modal period)

$R(\omega)$  : reduction function of wave transmission effect by breakwater

Table 3 의 파도 중 95 % 범위내의 파가  $H_{1/3} < 0.5m$  라는 투과율 조건으로부터 식 (1)의 방파제 감소함수 R 을 도출할 수 있으며, 일련의 수치 실험을 통하여 구해진 값은 식 (2)에서 보이는 바와 같다.

$$R(\omega) = A + B\omega + C\omega^2 + D\omega^3 + E\omega^4 + F\omega^5 + G\omega^6 + H\omega^7 + I\omega^8 + J\omega^9 + K\omega^{10} \tag{2}$$

여기서,

- A = 1.00E+000
- B = 3.55E-001
- C = -7.36E+001
- D = 5.17E+002
- E = -1.81E+003
- F = 3.82E+003
- G = -5.15E+003
- H = 4.44E+003
- I = -2.38E+003
- J = 7.24E+002
- K = -9.51E+001

한편, 구조물의 단기 응답스펙트럼  $S_R(\omega/\theta)$  는 응력전달함수(stress transfer function)  $H(\omega/\theta)$  을 사용하여 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$S_R(\omega/\theta) = |H(\omega/\theta)|^2 S'(\omega) \tag{3}$$

여기서, 응력전달함수는 단위파고에 대한 구조물 특정부위에 작용하는 응력 범위이며, 특정 파입사각과 주파수에 대하여 유한요소해석법 등을 통해 구할 수 있다.

식(3)의 단기 응답스펙트럼이 구해지면 일련의 통계적 절차에 의해 장단기 피로수명을 평가할 수 있는데 이에 관한 자세한 관계식은 선체 구조해석 분야에서 잘 정리되어 있다(한국선급 2005).

3.3 유한요소해석 모델

위에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 VLFS 의 여러 구조 부분 중에서도 선저 및 갑판의 종통재가 횡격벽 혹은 주요 횡 강도부재와 만나는 부위만을 피로강도 해석 대상으로 하였는데, 이는 본 연결 부위가 전체 구조물의 초기설계에 가장 영향력이 큰 부분이기 때문이었다.

한편 VLFS 구조물 유니트 형태의 반복성 및 유니트 내 횡 강도 부재의 반복성을 고려할 때, 구조물 전체 범위를 해석 대상 범위로 하지 않고 대표적인 부위만을 따로 설정하여 해석을 수행하는 방법을 고려할 수 있다. 이는 유탄성 해석으로부터 계산된 변위를 해석 모델의 경계 절점에 강제 변위의 조건으로 외력을 가해주는 2 단계 부분구조해석 방법으로서 본 방법의 정도와 유용성에 관해서는 이미 연구된 바가 있다(이탁기 등 2004) 이러한 방법을 사용하게 되면 해석 모델링의 범위를 크게 축소할 수 있는 장점이 있어 해석의 효율성을 제고할 수 있게 된다.

대표적인 모델링 범위는 직접법에 의한 유탄성 해석결과(KIM et al. 2005)에 근거하여 모든 파랑

조건하에서 최대 y-방향 응력 (종통 보강재의 방향이 y 이므로) 발생점을 기준으로 하였다. Fig. 4 는 유탄성 해석 결과로서 입사파 각 90 도, 파 주파수 0.45 rad/sec 조건에서 y 방향 최대응력 100 MPa 이 발생함을 나타내고 있고, 이에 대응하는 위치는 x = 0, y = 100 m 지점이었다.

따라서 본 연구에서는 이 위치를 중심으로, Fig. 5 에서 보이는 바와 같이, 60 m x 44 m (1.5 종통 격벽 간격과 8 개 web frame 간격에 해당)를 모델링 범위로 하였다. 피로해석 관심 응력집중부는 본 모델링 범위내 중앙 횡격벽과 이와 바로 인접한 Trans. Web frame 단면에 위치한 지점으로, Fig. 6 에서 보이는 바와 같이 각 단면의 갑판부 3 지점, 선저부 3 지점, 선측부 3 지점 등 총 18 개를 선정하였다. 관심 응력 집중부 주위는 hot-spot 응력을 도출하기 위하여 Fig. 7 에서 보이는 바와 같이 t x t 수준의 매우 상세 요소분할을 수행하였고, 기타 부위는 보강재 간격 정도의 coarse 요소분할을 수행하는 zooming mesh 기법을 사용하였다. 결과적으로 Fig. 5 의 전체 유한 요소 모델(ANSYS 2005)은 112,782 개의 요소로 구성되었고, 요소의 크기는 최소 4.5mm 에서 최대 0.8m 로 분포하였다.

3.4 Hot-spot 응력 및 응력전달함수

용접부 주위의 Hot-spot 응력은 용접도우 선단으로부터 0.5 t 와 1.5 t 떨어진 위치의 응력을 사용하여 식(4)와 같이 선형외삽법으로 계산할 수

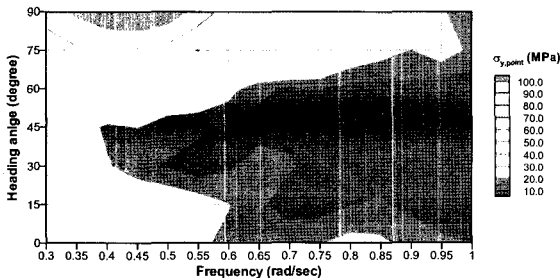


Fig. 4 Maximum y-dir. bending stress distribution

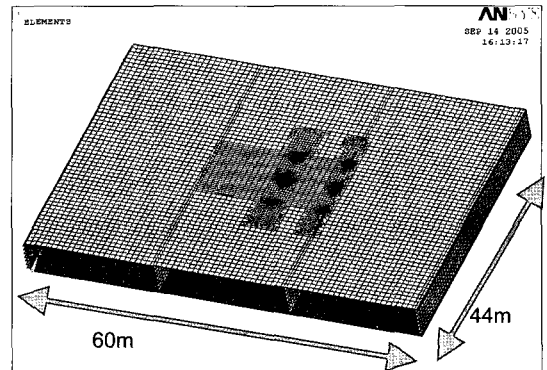


Fig. 5 Substructure model for fatigue analysis.

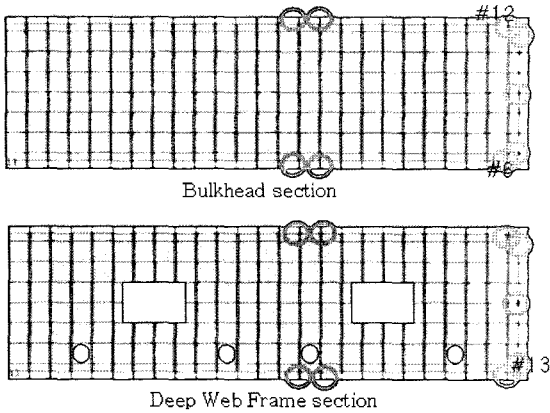


Fig. 6 Typical bulkhead and deep web frame section and concerned poison within section.

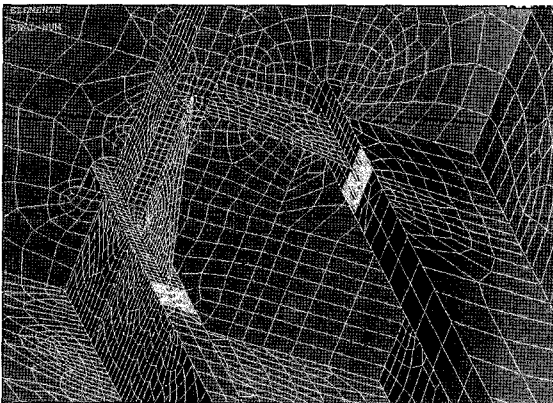


Fig. 7 Mesh division of hot spot region at bottom and side longitudinal connection part with transverse bulkhead section.

수 있다(Han et al. 1998, Han and Shin 2000) 여기서,  $t$  는 Fig. 8 에서 보이는 바와 같이 보강재의 플랜지 두께이며,  $\sigma(x)$  는 용접두우 선단으로부터 거리  $x$  만큼 떨어진 위치의 응력을 의미한다.

$$\sigma_{hot} = \frac{3\sigma(0.5t) - \sigma(1.5t)}{2} \quad (4)$$

여기서,

$$\sigma(x) = c_1(x)\sigma_1 + c_2(x)\sigma_2 + c_3(x)\sigma_3 + c_4(x)\sigma_4$$

$$c_1(x) = \frac{(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)}$$

$$c_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)}$$

$$c_3(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)}$$

$$c_4(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)}$$

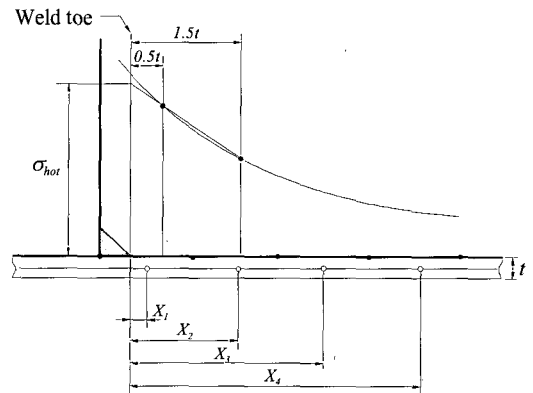


Fig. 8 Method of hot-spot stress calculation.

Fig. 9 는 VLFS 구조해석결과와 한 예로 용접비드 근방의 y 방향 응력분포를 보여준다. 해석조건은 파입사각 90°도와 파주파수 0.45 Hz 인 해양파의 경우이며, 관심부위는 #6 번 위치의 갑판/선저 보강재 이음부이다. 그림에서 최대응력이 작용하는 위치는 선저 보강재와 브라켓 연결부의 선단이며, 거리가 증가함에 따라 응력은 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 10 은 hot-spot 응력을 계산한 결과의 한 예이다. 이 그림에는 구조해석결과로부터 얻어진 용접비드 근방의 구조물 폭방향 응력분포와 식 (4)를 이용하여 계산한 용접비드선단의 응력분포 선도 및 이로부터 계산된 hot-spot 응력의 결과를 나타낸다.

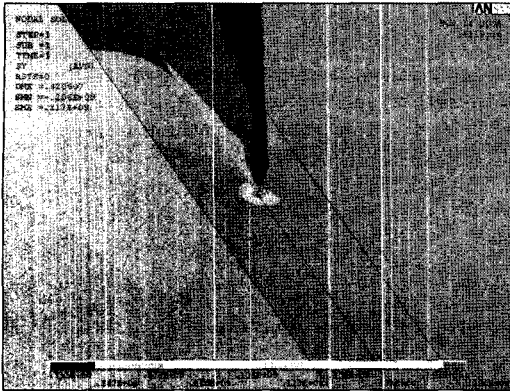


Fig. 9 An example of stress distribution result near the hot-spot point.

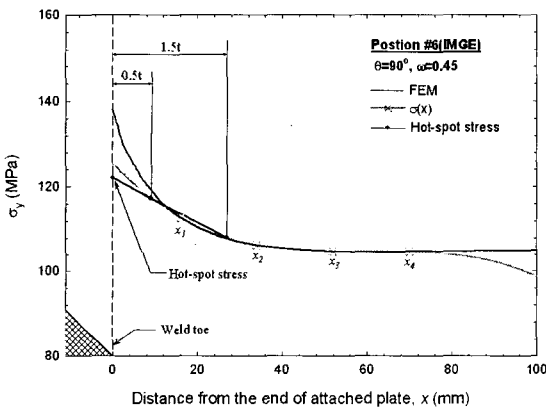


Fig. 10 An example of hot-spot stress calculation.

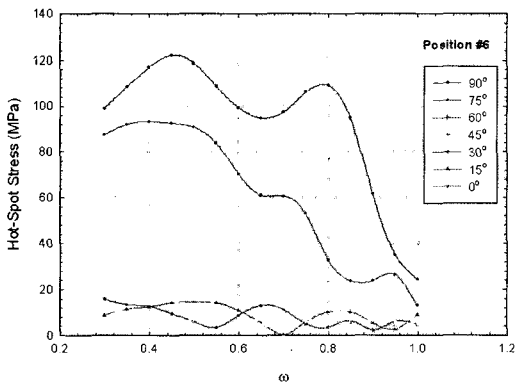


Fig. 11 Stress transfer function at point # 6.

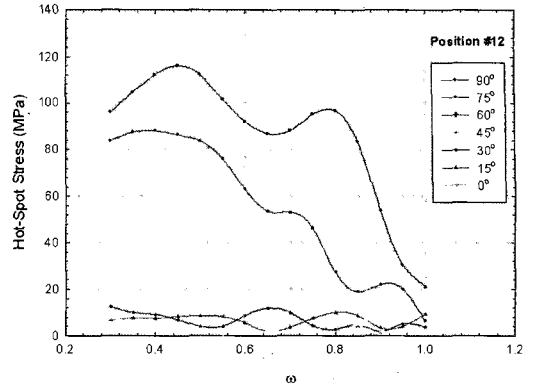


Fig. 12 Stress transfer function at point # 12.

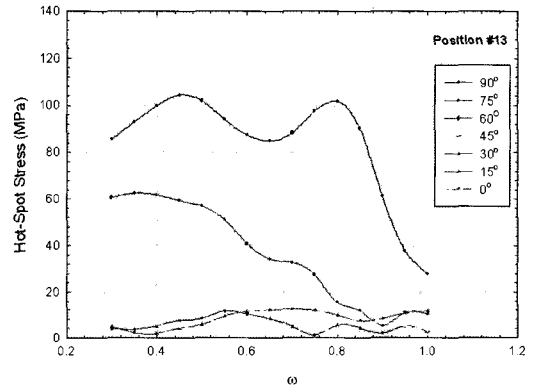


Fig. 13 Stress transfer function at point # 13.

전술한 18 개소 관심 위치 가운데 대표적으로 # 6, 12, 13의 위치에 대하여 계산된 응력 전달함수를 Fig. 11, 12, 13에서 보이고 있다. 이들은 모두 0°에서 90°까지 15° 간격의 7 가지 파 입사각과 0.3에서 1.0 Hz 까지 0.05 Hz 간격의 15 가지 파 주파수에 대하여 unit 파고를 대상으로 계산한 결과이다.

### 3.5 피로수명 평가 및 고찰

응력전달함수와 적용하고자 하는 파 스펙트럼 및 파랑자료가 결정되었으므로 장단기 피로해석을 수행할 수 있다. Table 4는 관심 부위 3 곳에 대한 피로손상도와 피로수명을 계산한 결과이다. 18 개 모든 점에 대한 해석결과를 본 논문에서 보이지는 않았지만 단면별 차이는 크지 않았



며, 선측판 부위보다 선저 및 갑판 부위의 피로 수명이 짧았다. 그리고, 최소 피로수명은 #6 위치에서 417 년으로 나타났다.

한편, 전술한 부분구조 모델링 기법을 포함하여 hot-spot 응력 수준을 추정하는 과정에서 여러 가지의 unknown factor 가 예상된다. 따라서 본 연구에서는 Table 5 에서 보이는 바와 같이, hot-spot 응력 추정하는 과정에서 예상되는 unknown factor 를 응력전달 함수(stress RAO: Response Amplitude Operator) 파라메타로 보고 이의 변화에 따르는 #6 에서의 피로수명을 계산하였다. Table 5 에서 알 수 있는 바와 같이 응력 RAO 를 2 배로 증가하는 경우 피로수명이 약 1/8 로 떨어짐을 알 수 있다. 구조물의 피로수명에 영향을 주는 또 다른 설계인자로는 방파제의 투과율을 들 수 있다. Table 6 은 방파제 투과율의 변화에 따르는 # 6 에서의 피로수명 변화를 보이고 있다. 투과율이  $H_{1/3} = 0.45$  m 에서  $H_{1/3} = 1.0$  m 으로 점차 높아지는 경우 대응하는 피로수명이 감소함을 알 수 있다.

Table 5 와 6 에서 알 수 있는 바와 같이 응력 RAO 의 인자를 1.2(이는 부분구조 모델링에 따르는 영향으로 간주됨(홍사영 등 2004)로 가정하더라도 본 시설계 구조물은 피로강도의 측면에서는 매우 안전함을 알 수 있다. 달리 말하면 초기설계 단계에서의 방파제 투과율의 최적값은 구조물의 피로강도 입장에서만 볼 때에는,  $H_{1/3} = 0.45$  m 가 아니라  $H_{1/3} = 0.75$  m 임을 알 수 있다. 물론 방파제 투과율 이외에도 방파제의 성능을 결정하는 기준으로는 피로강도 이외에도 방파제내 구조물의 연간 가동일수 등과 같은 다른 것이 영향을 줄 수도 있다.

Table 4 Damage factor and fatigue life of some concerned points.

Position	Damage Factor	Fatigue Life (year)
6 (Bottom)	0.120	417.6
12 (Deck)	0.097	513.1
13 (SIDE-BTM)	0.080	626.4

Table 5 Damage factor and fatigue life at point # 6 considering the unknown stress RAO factor's variance.

Stress RAO factor	Damage Factor	Fatigue Life (year)
1.0	0.120	417.6
1.2	0.207	241.7
1.4	0.329	152.1
1.6	0.491	101.8
2.0	0.959	52.2

Table 6 Damage factor and fatigue life at point # 6 considering breakwater's transmission factor.

Transmission factor of breakwater	Damage Factor	Fatigue Life (year)
$H_{1/3} = 0.45$ m	0.120	417.6
$H_{1/3} = 0.53$ m	0.190	262.0
$H_{1/3} = 0.61$ m	0.280	178.0
$H_{1/3} = 0.68$ m	0.390	128.0
$H_{1/3} = 0.75$ m	0.523	95.7
$H_{1/3} = 0.88$ m	0.857	58.4
$H_{1/3} = 1.00$ m	1.293	38.7

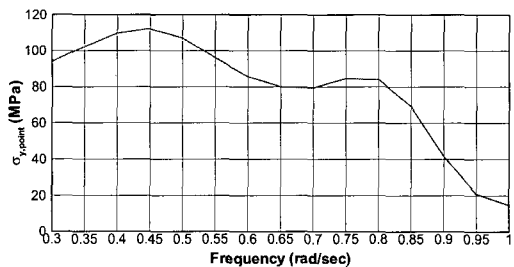


Fig. 14 Stress transfer function ( $90^{\circ}$  wave angle) at point # 6 directly derived from hydro-elastic response analysis.

한편, 본 연구를 통하여 얻어진 주요한 사실 하나를 여기서 기술하고자 한다. 사실 Fig. 12-14 에서 구해진 hot-spot 응력에 대한 응력전달 함수는 2 차원 유탄성 해석 결과로부터 직접 얻어진 응력 전달 함수와 매우 유사한 분포임을 확인할 수 있었다. 그 대표적인 예로서 Fig. 14 는 유탄성 해석으로부터 구해진  $90$  도 입사각에 대한 #6 위치의 응력전달함수를 나타내는 바, 이는 Fig. 12 의 결

과와 대응되는 것이다. 물론 절대값에는 응력집중의 영향 등으로 약간의 차이를 보이거나 그 분포형태는 동일함을 알 수 있다. 이는 역으로 말하면 설계 초기단계에서 응력집중현상, 구조해석 모델링의 차이 등에 관하여 적절한 응력 RAO 파라미터를 설정할 수만 있다면 유탄성 해석결과를 직접 이용하여 피로강도의 추정이 가능할 수도 있다는 것이다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 VLFS 의 구조설계과정에 피로강도 평가를 고려하는 방법론을 정립하였으며, 구체적인 설계 예를 통하여 방법론의 유용성을 확인하였다.

선박 및 일반 해양구조물에 적용하는 피로강도 해석 기법과 비교하여 방파제 효과, 구조물 설치 지역의 파랑자료 적용 방법 등을 도출하였다. 또한, VLFS 구조물 내 피로강도 평가 입장에서 관심 부위를 선정하는 방법과 부분구조 해석 모델링 및 zooming 기법에 의한 유한요소 구조해석 모델링 방법론을 설명하였으며 종통 보강재와 횡 강도 부재의 연결부 부근 응력집중부 hot-spot 응력 산정 기법을 기술하였다. 구체적인 수치 예를 통하여 방파제 투과율 효과와 응력 RAO 설계 인자가 VLFS 구조물의 피로강도에 미치는 영향을 고찰하였다.

본 연구에서 정립된 방법론과 수치결과는 추후 실제적인 VLFS 구조물의 구조설계에 유용하게 활용될 수 있으리라 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 해양수산부 연구개발사업인 ‘초대형 부유식 해상구조물 기술개발: VLFS 하부구조 최적 설계(II)’의 일부로 수행되었음을 밝혀둔다.

#### 참 고 문 헌

- 박성환, 이탁기, 홍사영, 2005, “ 폰툰식 VLFS 의 초기구조설계에 관한 연구,” 대한조선학회

논문집, 제 42 권, 제 6 호, pp. 644-653.

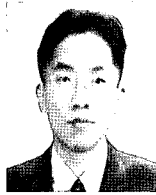
- 이탁기, 박성환, 홍사영, 2004, “ 등가판 모델을 이용한 VLFS 하부구조의 구조해석,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp.114- 118.
- 한국선급, 2005, 선급 및 강선규칙 적용지침, Part 3, “ 부록 3-3 선체 피로강도 평가 지침”
- 홍사영 등, 2004, 초대형 부유식 해상구조물 기술개발 (6 차년도 보고서), 해양수산부 연구개발사업 최종보고서, UCM00690-04099.
- ANSYS Inc. 2005, ANSYS Release 9.0.
- Det Norske Veritas , 2001, Fatigue Assessment of Ship Structures, DNV Classification Notes, No.30.7
- Han, S.H., Han, J. and Shin, B.C., 1998, "Fatigue Strength Estimation and Fatigue Design of Welded Members under Hot-Spot Stress Concept," Transaction of KSME Vol. A22, No. 11, pp. 2072-2083.
- Han, S.H. and Shin, B.C., 2000, "The Use of Hot Spot Stress for Estimating the Fatigue Strength of Welded Components," Steel Research 71, No. 11, pp. 466-473.
- Kim, B.W., Kyoung, J.H., Hong, S.Y. and Cho, S.K., 2005, “ Investigation of the Effect of Stiffness Distribution and Structure Shape on Hydroelastic Responses of Very Large Floating Structures,” Proceedings of 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, Vol. 1, pp. 210-217.
- Shigeru Tozawa, Akinobu Kawamura and Hiroshi Shirakihara, 1996, “ Technical Outline of Structural Design for Mega-Float,” Inter. Workshop on VLFS, Hayama, Japan, pp. 11- 18.
- Technological Research Association of Mega-Float, 1996-2000, “ The Study Report of Mega-Float in FY 1995-1999,” (in Japanese)



< 박 성 환 >



< 한 정 우 >



< 한 승 호 >



< 하 태 범 >



< 이 홍 구 >



< 홍 사 영 >



< 김 병 완 >



< 경 조 현 >