

### 1. 서론

Slurry Iron Sand Carrier(이하 Slurry Carrier)는 수분이 함유되어 있는 사철(iron-sand)을 운반하기 위하여 설계된 선박으로, 그림 1에 위치한 뉴질랜드 Taharoa Port 인근의 사철을 중국 등으로 운반하기 위하여 건조되는 선박이다.



Fig. 1 Taharoa Port of New Zealand

그림 2와 같은 모습과 입자를 가진 사철은 선박에 적재할 때 수분과의 비율을 50 대 50으로 섞어서 싣게 되고, 선박 내에 갖춰진 De-watering system을 통해 수분을 분리하여 배출시킨다. 수분 함유량이 일정 비율 이하가 되었을 때 출항이 가능하게 되고, 운항 중에도 화물의 수분이 점차 배출되어 목적지에 도착했을 때는 약 5% 가량의 수분만이 남게 된다.

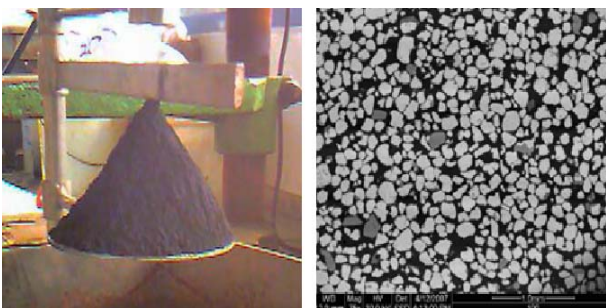


Fig. 2 Slurry Ore (Iron sand + Water)

수분 함유량이 변하는 동안 화물의 비중도 변하게 되는데, 표 1은 수분 함유량에 따른 화물의 비중에 대한 연구자료로 수분이 거의 없는 건조한 상태의 사철은 비중이 최대 4.6까지 증가될 수 있다.

Table 1 Includes weight of water (saturated) plus

Wet Bulk Density	Bulk Density at 100% Saturation. ( t/m <sup>3</sup> )
Minimum Bulk density	2.71 with a water content of 22%
Maximum Bulk density	3.30 with a water content of 12%
Average Bulk density	3.00 with a water content of 16%

그리고 Slurry Carrier는 구조적인 관점에서, De-watering System이 있다는 점을 제외하면 전반적인 화물의 특징이나 선박의 형상 등이 Ore Carrier와 유사한 것을 알 수 있다.

따라서 Slurry Carrier는 화물의 적재와 운항 시의 특성에 맞게 일반 운항 시의 비중인 3.3과 최대 비중인 4.6의 두 가지 화물에 대하여 구조 안정성 검증을 수행하여야 하며, Ore Carrier에 필요한 구조 및 피로 강도 검증도 함께 수행되어야 한다.

본 연구에서는 구조 강도 안정성 검증과 더불어 필요한 피로 강도에 대한 전반적인 검증과 피로 강도를 향상시키는 방안에 대한 연구를 수행하였다.

### 2. 선박의 일반적 특징

연구의 대상이 되는 Slurry Carrier는 그림 3과 같은 일반 배와의 형상을 가지고 있다.

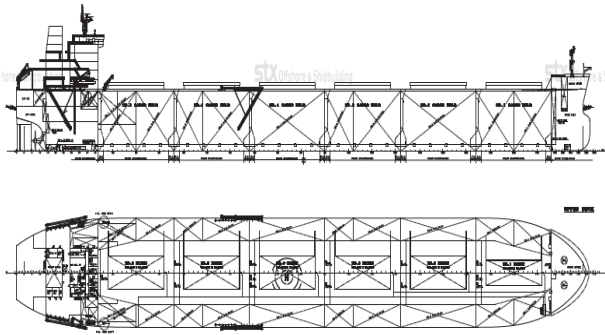


Fig. 3 General Arrangement

그리고 화물창의 형상과 Tight Bulkhead의 De-watering System 주요 구성은 그림 4와 같다.

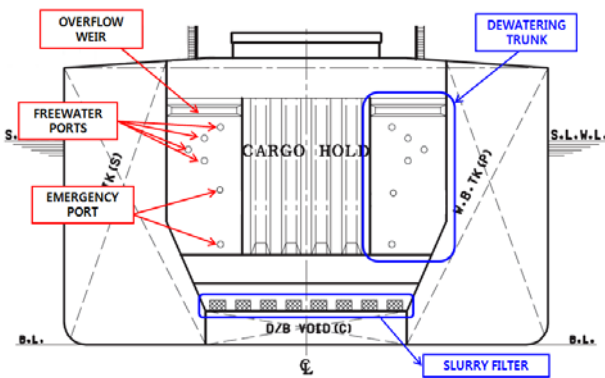


Fig. 4 Dewatering System

그리고 화물을 실을 때에는 그림 6에서 나타난 예시와 같이 Loading Sequence를 구성하여 절차에 맞게 적재를 유도하게 되며, 최종적으로 전 화물창에 골고루 화물을 실은 상태에서만 운항을 할 수 있게 된다. 일반 산적화물선과 같이 화물창 한 곳 또는 그 이상을 비운 상태로 운항을 하지는 않는다.

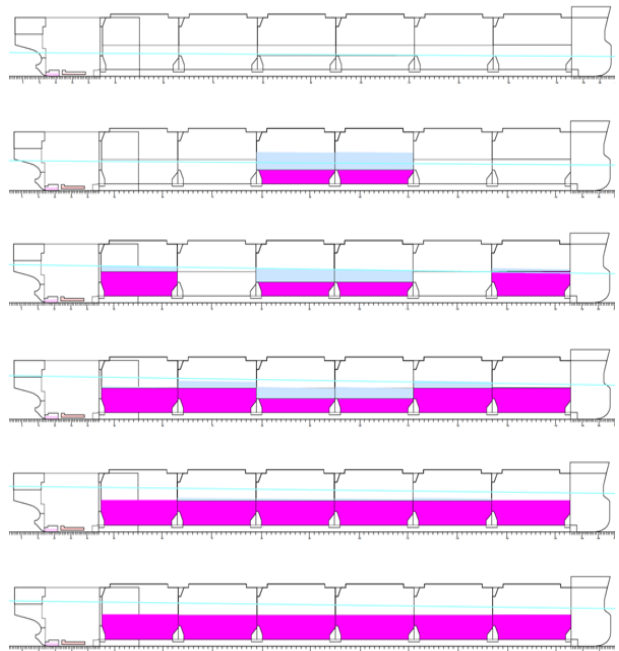


Fig. 6 Example of Loading Sequence

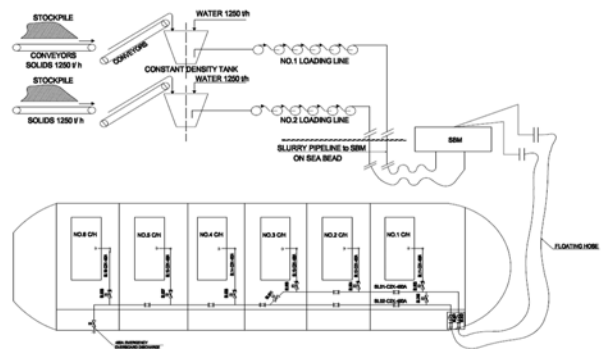


Fig. 5 Loading Diagram

화물을 적재하는 절차를 살펴보면 그림 5의 도표와 같이 원산지에서 채취한 사철을 물과 섞어 Pipe Line을 통해 인근 해상의 SBM(Single buoy Mooring)으로 보내고, 여기서 선박과 연결된 Floating Hose를 통해 선박의 각 화물창에 적재시키게 된다.

### 3. 연구 배경 및 범위

앞에서 살펴본 바와 같이 Slurry Carrier는 큰 비중을 가진 화물을 전 화물창에 동일하게 적재한 상태로 운송하며 화물창이 그림 7과 같은 Ore Carrier의 형상과 거의 유사한 특징을 가지고 있다.

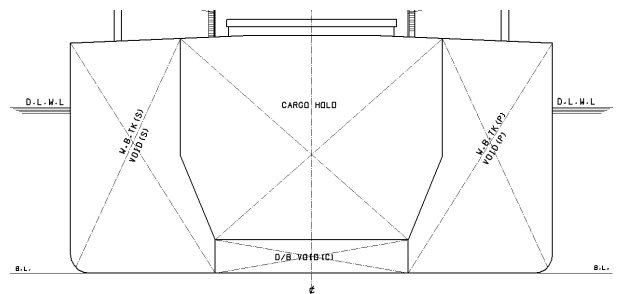


Fig. 7 Cargo Configuration of Ore Carrier

큰 비중의 화물을 싣는 대형 선박인 Ore Carrier에서 그림 8 ~ 9와 같이 Longitudinal과 Web frame 접합 부위의 Slot Edge, Stiffener의 Web 및 Scallop 등의 위치에서 피로파괴가 일어나는 사례가 발생하여 Ore Carrier와 유사한 구조적 특징을 가진 Slurry Carrier에 대한 피로 강도 검증과 이를 향상시킬 수 있는 설계 지침의 필요성이 대두되었다.



Fig. 8 Fatigue Crack of Slot and Scallop

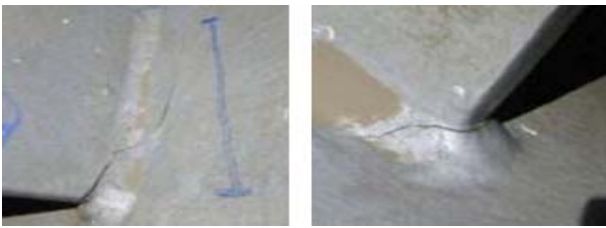


Fig. 9 Fatigue Crack of Web Stiffener

Slurry Carrier에 대한 별도의 피로 강도 검증 관련 규정이 마련되어 있지 않아 Ore Carrier의 피로 강도 검증 절차 및 요구 수준에 준하여 연구를 수행하기로 하고, 관련 규정은 Ore Carrier의 피로해석 적용방법에 대한 절차를 명확히 제시하고 있는 DNV Classification Notes No. 30.7, "Fatigue Assessment of Ship Structures" 을 적용하였다.

DNV Rule에서의 피로 강도 검증 절차는 선종에 관계없이 거의 동일하여 절차에 따라 수행하면서, 선박의 설계 수명 대비 Fraction of time 값은 표2와 같이 Ore Carrier의 값을 적용하였다.

Table 2 Fraction of time in DNV Rule (CN 30.7)

Table 3-5 Fraction of time in different conditions				
Vessel type	Bulk carriers larger than Panamax (*)	Panamax bulk carriers and smaller (*)	Vessels intend to carry ore cargoes mostly	Ore carrier
Alternate condition	0.25	0	0.5	0
Homogenous condition	0.25	0.5	0	0.5
Ballast condition	0.35	0.35	0.35	0.35

피로 강도 평가 위치는 High Stress Zone인 Stringer Toe, Tight Bulkhead 하부 부재들의 교차 부분, 그리고 피로파괴 발생이 우려 되는 Longitudinal과 Web frame의 교차 부분 등을 선정하였다. 그리고 피로해석을 통한 피로 강도 계산과 더불어 피로수명이 낮은 위치를 대상으로 응력 집중을 완화시킬 수 있는 형상 변경, 부재 치수의 적절 여부에 대한 판단 등 피로 강도를 향상시킬 수 있는 방안에 대한 설계 지침을 찾는 데 주력하였다.

## 4. 연구 절차

### 4.1 F.E Modeling

먼저 피로해석에 필요한 화물창 모델을 구현하기 위하여 그림 10과 같이 선박의 중앙부 화물창을 대상으로 앞 뒤 화물창의 절반까지 확장하여 Modeling을 수행하였다.

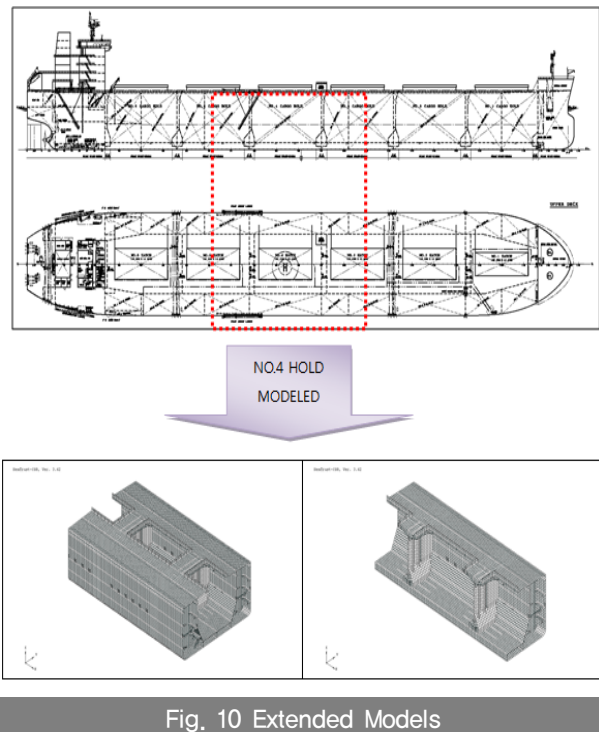


Fig. 10 Extended Models

이어서 피로 강도 평가 위치의 상세 형상을 구현하기 위하여 t x t 크기로 very fine mesh를 수행하였다. 각 위치의 모델은 그림 11 ~ 13과 같다.

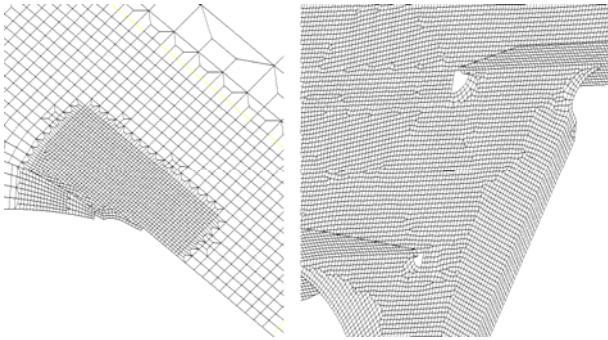


Fig. 11 F. E. Modeling i,w,o Stringer Toe

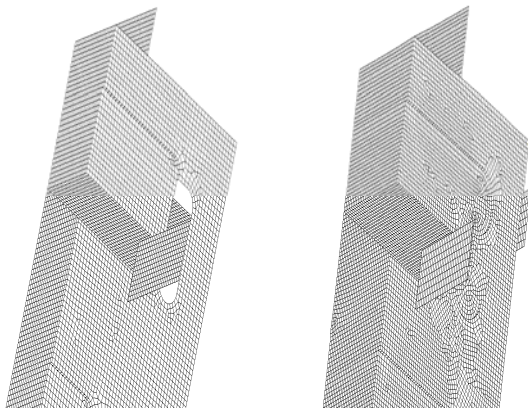


Fig. 12 F. E. Modeling i,w,o Longitudinal Connection

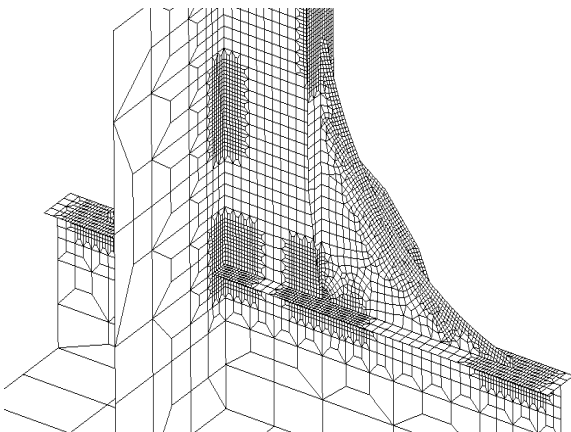
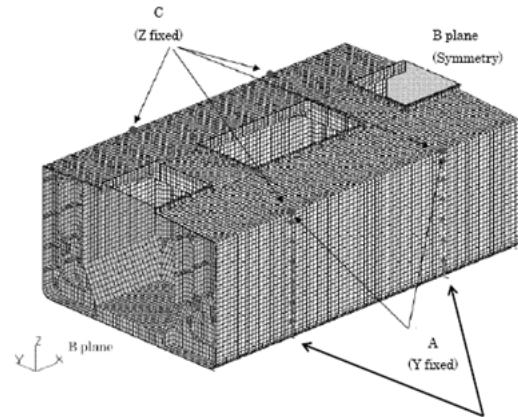


Fig. 13 F. E. Modeling i,w,o T.BHD Connection

## 4.2 Boundary Condition

피로해석을 위한 경계 조건은 그림 14와 같이 구조해석 시의 조건과 동일하게 적용하였다.



Location	$\delta x$	$\delta y$	$\delta z$	$\theta x$	$\theta y$	$\theta z$	Remark
A	0	1	0	0	0	0	0 : Free
B	1	0	0	0	1	1	1 : Fix
C	0	0	1	0	0	0	

Counter force to be applied in way of side shell and TBHD (Both Part and Starboard side) for canceling excessive stress at point C

Fig. 14 Boundary Condition

## 4.3 Loading Condition

하중 조건은 그림 15 ~ 16과 같이 피로 강도 계산에 필요한 Homogenous(Loaded)와 Ballast 상태의 두 가지에 맞추어 적용하였다. 화물의 비중이 운항 중에 변하는 것을 고려하여 강도 검증용으로 사용되는 비중 값 4.6과 운항 시 고려되는 비중 값 3.3을 각각 적용하여 더 보수적인 결과를 피로 계산에 사용하였다.

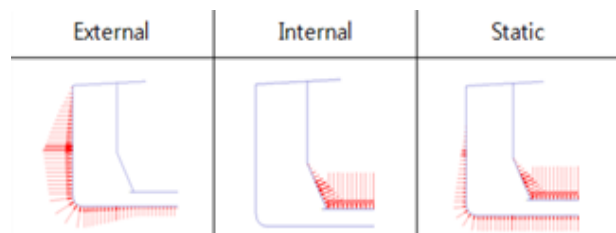


Fig. 15 Loading Condition of Loaded Case

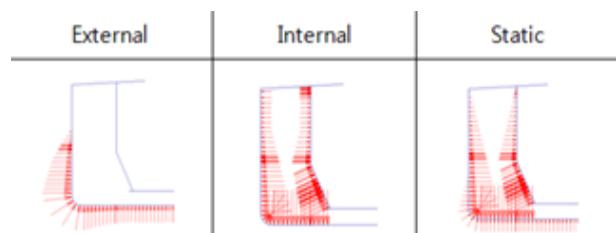


Fig. 16 Loading Condition of Ballast Case



그리고 파랑에 의한 Hull Girder Bending Moment는 모델에 직접 적용하지 않고 Rule의 계산식으로 Hull Girder Stress를 계산하였다. 이 값은 Load Case에서 나온 값에 부재 위치와 배치를 고려하여 종부재에 각각 더해주었다.

### 4.4 Evaluation

피로해석과 계산에 따라 도출된 응력값으로 피로 강도를 계산하여 World Wide 기준으로 설계수명이 20년 이상 되는지를 검증하였다.

피로 설계의 기준이 되는 허용응력 범위는 Rule에서 계산 기준으로 제시한 표 3과 그림 17의 S-N Curves를 바탕으로, 계산되는 부재의 Welding 여부에 따라 각각 적용하였다.

Table 3 S-N Parameters in DNV Rule (CN 30,7)

Table 2-1 S-N parameters for air or with cathodic protection					
S-N Curve	Material	$N \leq 10^7$		$N > 10^7$	
		$\log \bar{\sigma}$	m	$\log \bar{\sigma}$	m
I	Welded joint	12.164	3.0	15.606	5.0
III	Base Material	15.117	4.0	17.146	5.0

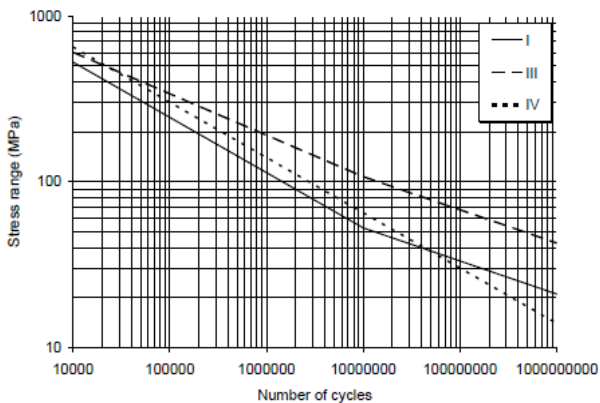


Fig. 17 S-N Curves in DNV Rule (CN 30,7)

## 5. 연구 결과 및 분석

### 5.1 Stringer Toe & Bracket Connection

Stringer Toe에 대한 연구는 Stringer의 Face Plate End와 Toe 끝의 용접 부분에 대해 Stringer End Bracket의 반경과 길이를 변경하면서 피로 강도에 미치는 영향을 분석하였다.

Table 4 Fatigue Life of STR Toe

Position		Fatigue Life(years)	
		Case1	Case2
Side Shell	No.2 STR	5,7	21,2
	No.3 STR	3,5	21,6
	No.4 STR	9,5	45,0
INNER HULL	No.2 STR	145,1	-
	No.3 STR	15,5	107,6
	No.4 STR	22,2	-

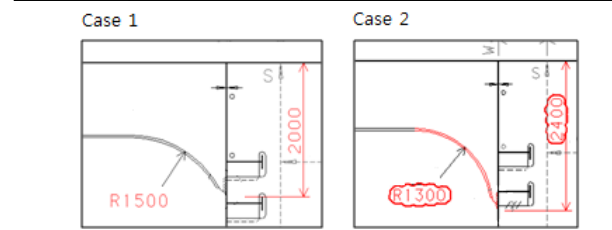


표 4는 위치와 Bracket 형상에 따른 피로 수명 비교 결과로 다양한 형상과 크기 중에서 피로 강도가 취약한 것과 최적화된 것을 대표적으로 나타내었다. 위치적으로는 해수압의 영향이 가장 큰 중앙 부분 Stringer 부근이 다른 높이의 Stringer보다 취약하였고, Inner Hull 부근 보다는 Side Shell에 위치한 Stringer가 더 취약한 경향을 보였다. 그리고 형상에 따라서는 Stringer End Bracket의 길이가 짧고 Radius가 클수록 끝 단의 응력 집중이 과도해져 피로 강도가 취약하게 나타나 응력을 완화 할 수 있는 형상으로 최적화 하였다.

다음은 Void 구간의 Stringer Face Plate와 Web Frame이 교차하는 지점에 대해 표 5의 Case 1과 같이 Face Plate가 Web Frame을 관통하지 않는 구조의 피로 강도 검증으로 그림 18에 표시한 교차 부분에 대해 각각 피로 해석을 수행하고 가장 취약한 부분에 대해 관통하는 구조로 변경 하여 비교하였다.

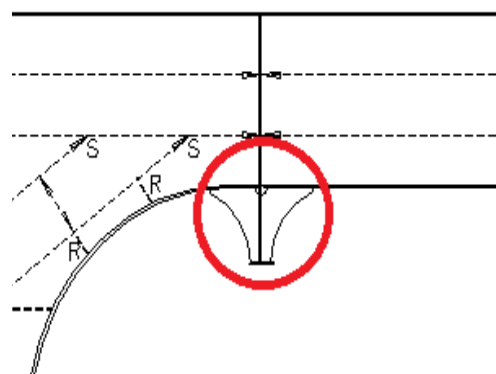
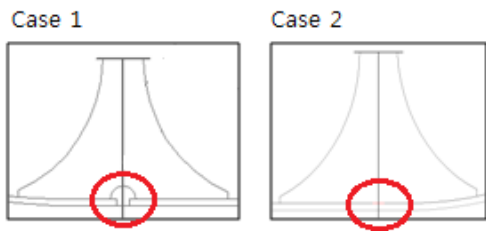


Fig. 18 Check Point of Stringer i.w.o Void Space

표 5의 결과에서 보는 바와 같이 Face Plate가 관통하지 않는 경우에 Key Hole 주변의 응력이 과도하게 집중되는 것을 확인하였고 Case 2와 같이 Face Plate를 관통시키는 구조나 Snip이 아닌 Bracket 형태로 Ending 처리하는 방향으로의 설계가 필요하다는 것을 검증하였다.

Table 5 Fatigue Life of STR Bracket i,w.o Void Space

Position		Fatigue Life(years)
Key Hole	Case1	4.0
	Case2	57.6



### 5.2 Web frame & Longitudinal Connection

Web frame과 Longitudinal의 교차 부분에 대한 피로 강도는 화물창 중앙부의 Web frame의 Longitudinal 중 크게 Lower Side Shell, Upper Side Shell, Hopper 그리고 Inner Hull의 네 구간으로 나누어 검증하였다.

먼저, Lower Side Shell 교차 부분은 당사 표준 Slot과 Collar Plate가 아래 방향으로 설치된 형상을 기본으로 검증하였다. 피로해석 결과에서 이 위치의 피로수명에 가장 큰 영향을 미치는 Scantling Draft에서 해상압에 의해 발생하는 변형을 살펴보면 그림 19와 같이 하부 방향으로 설치된 Collar Plate와 Web의 용접 부분과 이와 대각선의 Free Edge에서 과도한 압축으로 인해 응력이 집중되는 경향을 보여주었다. 그리고 이 부분에 대한 피로수명을 계산해보면 표 7의 Case 1과 같이 용접 부분에서 상당히 낮게 나오는 것을 확인 할 수 있었다.

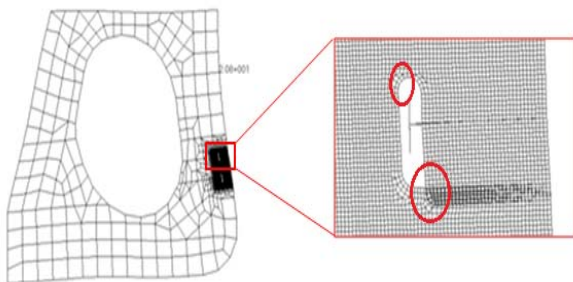
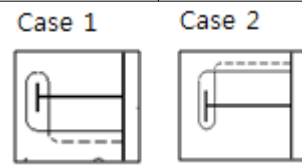


Fig. 19 Deformation at Loading Case (Loaded - External)

응력이 집중되는 Edge 부위에 용접을 피하는 방향으로 개선하기 위하여 Collar Plate의 방향을 표 6의 Case 2와 같이 반대로 바꾸어 주었고, 이로 인하여 피로 강도가 상당히 향상되는 것을 검증할 수 있었다.

Table 6 Fatigue Life of Side Shell Longitudinal (No.28)

Position		Fatigue Life(years)
L,NO.28 (Collar)	Case1	1.7
	Case2	24.6



다음으로, 그림 20과 같은 Upper Side Shell 상부 교차 부분은 Lower Side Shell 과 동일한 절차로 검증하였다.

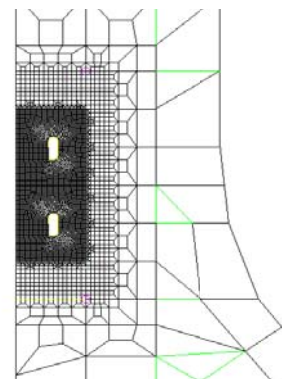


Fig. 20 Check Point of Side Shell Longitudinal (Upper Part)

이 위치도 유사한 경향을 나타내어 표 7과 같이 기본 Slot 방향의 응력 집중 부분에 용접을 피하는 방향으로 설계를 변경하여 피로 강도를 향상시킬 수 있었다.

Table 7 Fatigue Life of Side Shell Longitudinal (No.40)

Position		Fatigue Life(years)
L,NO.39 (Collar)	Case1	3.5
	Case2	20.7



Hopper Longitudinal의 교차 부분은 앞서 검증한 Side Shell 부분의 결과를 바탕으로 그림 21과 같이 상부 방향의 Slot을 기본 형상으로 두고 검증하였다.

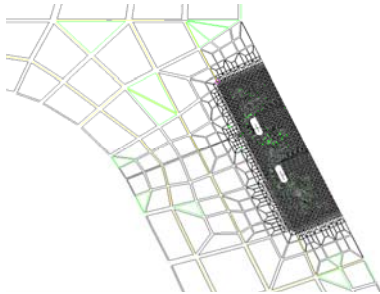


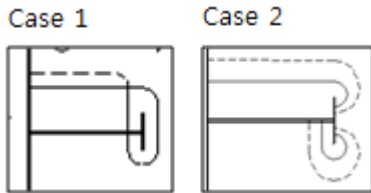
Fig. 21 Check Point of Hopper Longitudinal

이 부분의 Inner Bottom 방향 하부 위치는 피로 수명이 충분한 강도를 가지고 있었으나, 상부 두 위치는 Slot의 방향과 무관하게 피로 수명에 취약한 경향을 나타내었다.

이 부분의 설계는 Slot 부분에 대한 충분한 강도를 확보할 수 있는 방향으로 설계가 필요하여 표 8과 같이 Full Collar Type을 적용하도록 유도하였다.

Table 8 Fatigue Life of Hopper Longitudinal (No.32)

Position		Fatigue Life(years)
L_NO.32 (Collar)	Case1	3.2
	Case2	22.6



마지막으로 Inner Hull의 Longitudinal은 위치상 Slot 방향에 큰 영향이 없는 부분으로 판단하여 그림 22와 같이 하부 방향 Slot을 기본으로 검증하였으며, 표 9과 같이 적절한 피로 강도를 확보하고 있는 것을 확인 할 수 있었다.

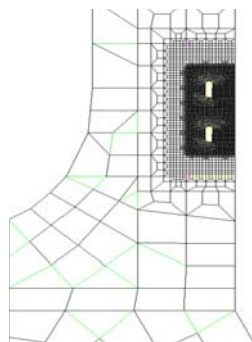


Fig. 22 Check Point of Inner Hull Longitudinal

Table 9 Fatigue Life of Inner Hull Longitudinal

Position	Fatigue Life (years)	Remark
L_NO.39	20.5	Collar
L_NO.45	21.7	Collar

### 5.3 Tight Bulkhead Connection

Tight Bulkhead 부분은 Vertical Stiffener와 Stringer의 교차 부분과 Tight Bulkhead가 Bottom Longitudinal과 만나는 교차 부분의 피로 강도를 검증하였다.

먼저, Vertical Stiffener와 Stringer의 교차 부분은 Slot에 Collar Plate가 부착된 형태를 기본으로 검증하였다.

이 부분의 피로 강도는 전반적으로 충분히 확보되어 있었으나, 그림 23와 같이 Stringer 중간에 설치된 Large Opening과 인접한 Stiffener의 Collar Plate 용접 부분이 표 10의 Case 1과 같이 Opening의 영향으로 피로 강도가 부족한 경향을 나타냈다. 그래서 Opening에 인접한 3개의 Stiffener를 Full Collar Type으로 변경하고 부족한 Shear Area를 보상하기 위해 판 두께를 증가시켜 표 10의 Case 2와 같이 피로 강도를 향상시켜 주었다.

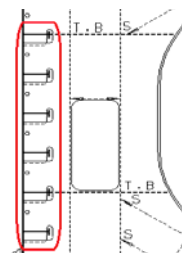
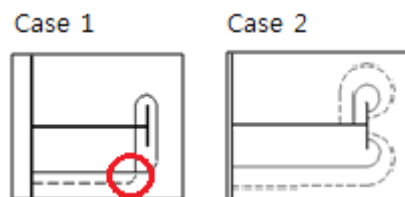


Fig.23 Check Point of T,BHD Vertical Stiffener

Table 10 Fatigue Life of T,BHD Vertical Stiffener

Position		Fatigue Life(years)
Collar	Case1	8.4
	Case2	23.9



그리고 그림 24와 같이 Tight Bulkhead가 Bottom Longitudinal과 만나는 교차 부분의 피로 강도를 검증하기 위하여 Ballast에 의한 변형이 가장 큰 위치를 선정하고 Bulkhead와 Longitudinal 사이에 설치된 Bracket의 끝 단 부분을 중점적으로 검증하였다. 이와 더불어, Tight Bulkhead의 앞/뒤 Web Frame의 하부에 설치된 Tripping Bracket의 Toe와 Heel 부분도 함께 검증하였다.

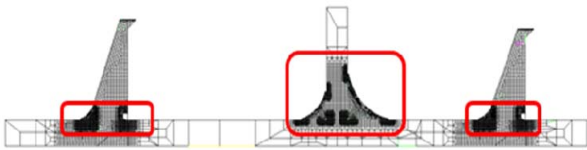


Fig.24 Check Point of T.BHD Vertical Stiffener

이 부분은 화물이나 해수압의 영향보다는 Ballast Tank에 의한 압력과 종방향 선체 Hull Girder Bending에 의한 응력이 지배적으로 작용하는 지역으로 피로해석 결과 표 11와 같이 충분한 피로 강도를 확보하고 있는 것을 확인하였다.

Table 11 Fatigue Life of T.BHD Lower Connection

Position		Fatigue Life(years)	Remark
T,BHD	FWD	49.6	V,Stiff.
	AFT	43.1	Long' l
FWD SEC		34.0	Long' l
AFT SEC		33.4	Long' l

## 5. 결론

Slurry Carrier는 Ore Carrier와 같이 비중이 높은 화물을 싣고 다니는 선박으로 선박의 안정성을 위하여 설계 시 피로 수명에 대한 검증이 동반되어야 하며, 피로 강도 향상을 위한 주요 방안은 다음과 같다.

1) Stringer Bracket Toe 부분은 대부분의 선박에서 응력이 집중되는 위치로 응력을 완화시키는 방안에 대한 다양한 연구가 필요하며 본 연구에서는 Bracket의 길이와 반경을 최적화시키는 방법으로 응력을 완화시키고 피로 강도를 향상시킬 수 있었다. 그리고 Stringer의 Face Plate와 Web frame이 교차되는 부분은 Face Plate를 관통시키는 방향으로 설계를 유도해야 할 것이다.

2) Web frame과 Longitudinal 교차 부분은 선박에 작용하는 하중에 의한 위치 별 변형의 분석을 통해 Slot

방향과 Full Collar Plate 설치 여부 등을 판단해야 한다. 이와 더불어, 최적화된 피로 설계를 위해서 Longitudinal 교차 부분에 Slot 공법 보다는 Slit 공법을 적용하여 Round Edge의 응력 집중 부분에 용접 작업을 피할 수 있도록 유도해 주어야 할 것이다.

3) Tight Bulkhead의 Vertical Stiffener의 Slot 주변에 Large Opening이 위치하는 경우 Full Collar Type을 적용하여 Shear Area를 보상해주고 응력이 집중될 수 있는 Slot의 Edge의 피로 강도를 향상시킬 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- DNV Rule, Classification Notes No. 30.7 "Fatigue Assessment of Ship Structures"
- NK Rule, Part C Hull Construction and Equipment, "Guidance for the Survey and Construction of Steel Ship"

### 김대훈



- 1981년생
- 2003년 한국항공대학교 기계설계학과 학사
- 현 재 : STX조선해양 구조기분설계 과장
- 관심분야 : 최적화 구조 설계, 피로 설계
- 연 락 처 : \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*
- E - mail : captainkdh@onestx.com

### 장철민



- 1985년생
- 2011년 부산대학교 조선해양공학과 학사
- 현 재 : STX조선해양 기술지원센터 대리
- 관심분야 : 피로 설계, 방진 설계
- 연 락 처 : \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*
- E - mail : cm\_jang@onestx.com

### 이규호



- 1971년생
- 2010년 부산대학교 경영대학원 MBA 석사
- 현 재 : STX조선해양 구조기분설계 부장
- 관심분야 : 최적화 구조 설계, 구조 안전 설계
- 연 락 처 : \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*
- E - mail : eekh@onestx.com

### 이상복



- 1970년생
- 1996년 울산대학교 조선해양공학과 석사
- 현 재 : STX조선해양 구조기분설계 부장
- 관심분야 : 최적화 구조 설계, 구조 안전 설계
- 연 락 처 : \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*
- E - mail : leesb@onestx.com