

1. 서론

반 잠수 시추선(Semi-Submersible Drilling Unit)은 해저 표면(Seabed)에 고정된 한 점을 기준으로 시추를 하는 동안 조류와 파도, 바람 등으로부터 움직임을 고정하기 위하여 수심에 따라 스러스터(Thruster)로 위치 고정하는 방법과 투양묘 장치(Anchoring System)의 파지력으로 위치 고정을 하는 방법이 있다. 만약, 해저 표면에 블로우 아웃 프리벤터(Blow Out preventer)가 설치된 직 상부에 반 잠수 시추선이 위치 하지 않는다면, 시추 관(Riser 또는 Drill string)이 휘어지게 되고, 블로우 아웃 프리벤터가 뽑히는 등 엄청난 재앙이 발생할 수 있다. 그러므로, 시추 작업을 수행하기 위하여 위치를 고정하는 수단은 매우 중요하다.

반 잠수 시추선은 수심이 낮은(Water depth 70~600m) 곳에서 주로 앵커(Anchor)의 파지력을 통하여 위치를 고정한다. 앵커를 반 잠수 시추선에 격납하는 지지구조물을 일반적으로 볼스터(Bolster)라 지칭 하며, 이 구조물의 구조적 안전성은 필히 검토 되어야 한다.



사고전

사고 후

Fig. 1 Accident of Floatel Superior 7 (2012) [1]

실례로 Fig. 1는 반 잠수 Floatel의 앵커가 볼스터에 격납하여 이동 중 과도한 윈치(Winch)의 인장력 및 극한의 해상 상태가 결합 되어 볼스터의 구조 붕괴를 초래하였다. 그 결과, 앵커가 어느 곳에도 구속되지 않은 자유 상태가 되어, 선체

(Pontoon/Column)를 손상시켜 반 잠수 시추선의 복원력을 상실하게 되어 전 선원이 대피한 사례이다. [1]

Floatel Superior 7 사고 이후 반 잠수 시추선의 발주 처 및 노르웨이 정부기관(Petroleum Safety Authority Norway)및 선급에서 볼스터의 구조적 안전성 평가를 요구 하고 있다.

2. 목적

반 잠수 시추선의 앵커 격납을 위한 볼스터 구조물의 구조적 안전성 평가를 목적으로 하고 있으며, 다음과 같은 내용을 검토 평가 하였다.

- I. 볼스터와 선체 항복 강도 평가
- II. 볼스터와 선체 연결 부위 용접 강도 및 Weak Link 평가
- III. 볼스터의 좌굴 및 Punching shear 평가
- IV. 피로하중 평가

3. 해석 모델

본 보고서에서는 현대중공업에서 건조중인 반 잠수 시추선에 탑재된 18톤 앵커 격납용 볼스터를 대상으로 구조 해석을 하였다. Table 1은 반 잠수 시추선의 기본 제원을 Fig. 2는 앵커와 볼스터의 위치를 나타내고 있다.

구조해석 부위의 응력을 구하기 위하여 Pre/post processor는 Hyper Mesh를 Solver는 NASTRAN을 이용하여 유한요소 해석을 수행 하였다. Fig. 3는 해석에 사용한 구조해석 모델 및 경계조건을 보여주고 있다.

Table 1 Principle dimension

Pontoons		Columns	
Length	122.56m	Corner columns	12.8 x17.2m
Breadth	17.2m	Center columns	11.52 x17.2m
Depth	11.4m		

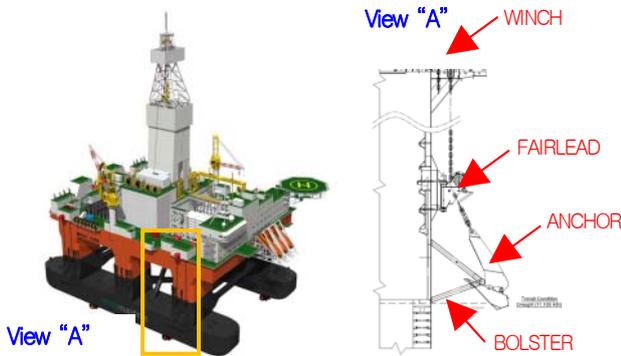


Fig. 2 반 잠수 시추선의 앵커 와 볼스터

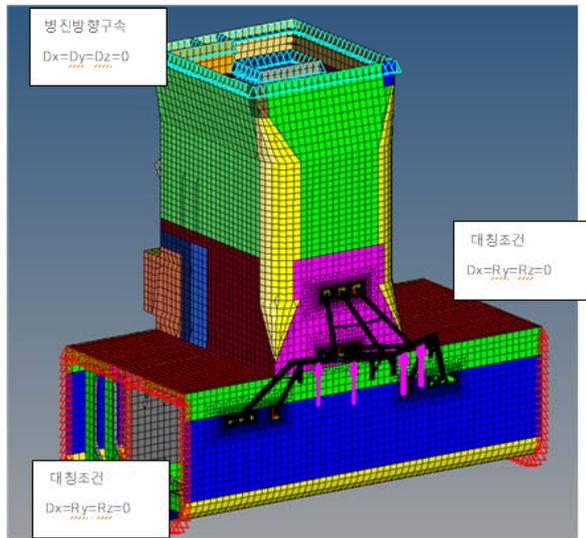


Fig. 3 FE Model (유한요소모델)

4. 하중 조건

4.1 환경 조건

유체역학 운동과 하중 해석 보고서[4]를 사용한다.

4.2 Wave 슬래밍(Slamming) 의한 하중

볼스터 구조의 지배적인 하중은 슬래밍 하중이다. 그 하중은 식 (1)과 같이 DNV-RP-C205[10]에서 제시한 슬래밍 압력으로 계산한다.

$$p_s = \frac{1}{2} \rho c_{Pa} v^2 \quad (1)$$

여기서,

ρ = mass density of fluid

c_{Pa} = space average slamming pressure coefficient

v = relative velocity between water and surface

4.3 Drag에 의한 하중

Drag에 의한 압력은 식 (2)을 따른다.

$$p_D = \frac{1}{2} \rho c_D v^2 \quad (2)$$

여기서,

ρ = mass density of fluid

c_D = drag coefficient(1.0)

v = incident flow velocity

4.4 앵커 윈치의 Pretension 하중

반 잠수 시추선 운항 중에는 앵커는 윈치의 Pretension Force에 의해 볼스터에 격납되며, 이는 볼스터에 하중이 전달된다.

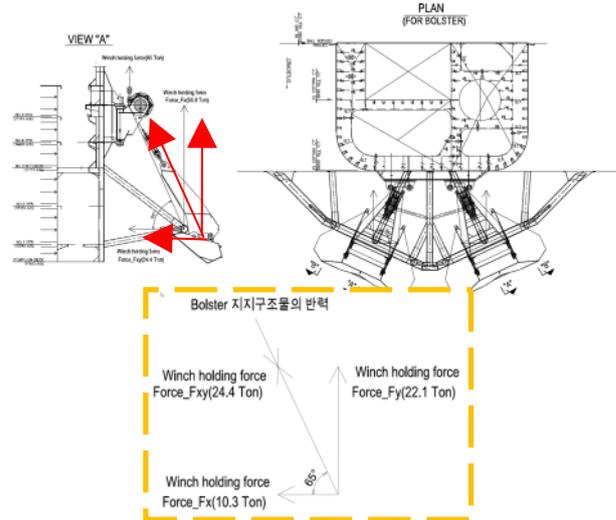


Fig. 4 앵커 윈치에 의한 Pretension

4.5 선체 외부 해수면 압력

해수면 압력은 DNV-OS-C103[7]를 따르면, 다음과 같다.

$$p_{d, ULS} = p_s \gamma_{f, G, Q} + p_e \gamma_{f, E} \quad (kN/m^2) \quad (3)$$

여기서,

$$p_s = \rho g_0 C_w (T_E - z_b) \quad (kN/m^2) \geq 0$$

$$p_e = \rho g_0 C_w (D_D - z_b) \quad (kN/m^2) \text{ for } z_b \geq T_E$$

$$p_e = \rho g_0 C_w (D_D - T_E) \quad (kN/m^2) \text{ for } z_b < T_E$$

T_E = extreme operational draught(m) measured vertically from the moulded baseline to the assigned load waterline

C_w = reduction factor due to wave particle motion

D_D = vertical distance from the moulded baseline to the under of the deck structure

z_b = vertical distance from the moulded baseline to the load point

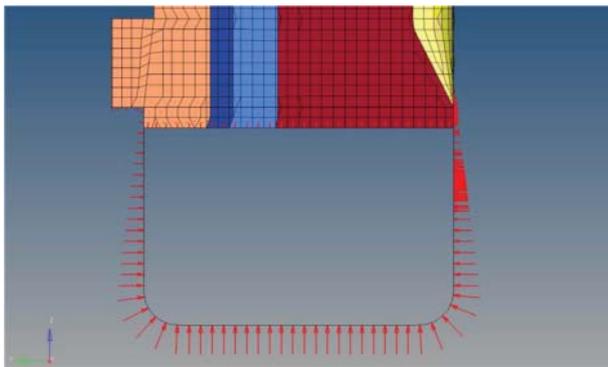


Fig. 5 External sea pressure

5. 해석 결과

5.1 볼스터와 선체 항복 강도 평가

볼스터 강재는 항복응력(Yield stress) 355 MPa 인 EH36 등급(grade) 강재를 사용하였으며, Table 2와 같이 Material factor를 적용하여 구조해석 결과를 검토 하였다. [6]

Table 2 Design criteria [6]	
Design criteria	Design load effect(≤ Design resistance
Material factor	1,15
Design resistance	309 MPa(355/1,15)

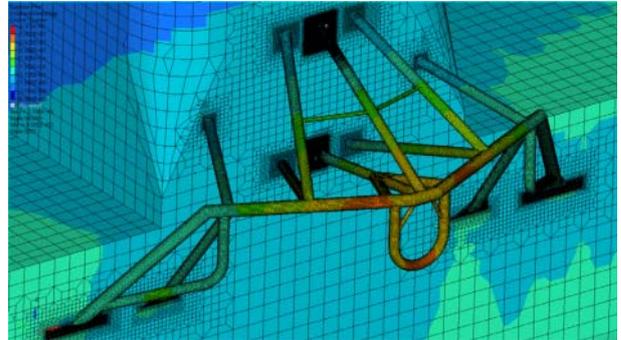


Fig. 6 Displacement of the bolster and pontoon (Magnitude)

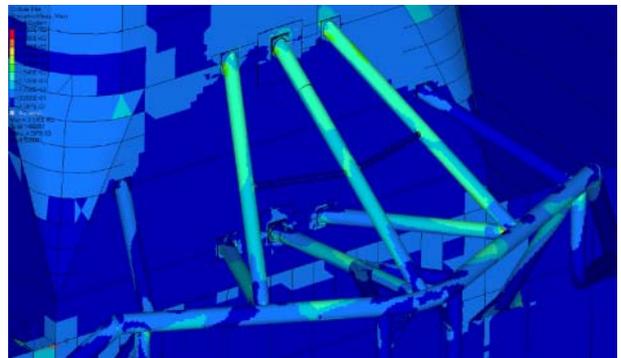


Fig. 7 Von Mises stress of the bolster on column and pontoon

Fig. 6는 볼스터와 선체의 변위를 보여 주며, Fig. 7는 응력 분포를 보여주고 있다. 둘 모두 설계 기준에 만족함을 볼 수 있다.

5.2 선체와 볼스터 연결 부위 용접 강도 및 Weak Link 평가

용접 부위(Fillet-welded joint, partial penetration welded joint) 응력은 DNV-OS-C101[6]에 규정에 따라 식(4)를 적용 하여 응력 분포의 조합하여 산정하며, 식(4)의 용접 부위 응력 성분은 Fig. 8 에서 보여 준다.

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{\perp d}^2 + 3(\tau_{\parallel d}^2 + \tau_{\perp d}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma M_w} \quad (4)$$

그리고,

$$\sigma_{\perp d} = \frac{f_u}{\gamma M_w}$$

여기서,

$\sigma_{\perp d}$ = normal stress perpendicular to the throat
(including load factors)

$\tau_{\perp d}$ = shear stress (in plane of the throat) Perpendicular to the axis of the weld

$\tau_{\parallel d}$ = shear stress (in plane of the throat) parallel to the axis of the weld, see Fig. 8

f_u = nominal lowest ultimate tensile strength of the weaker part jointed part jointed

β_w = appropriate correlation factor

γM_w = material factor for welds

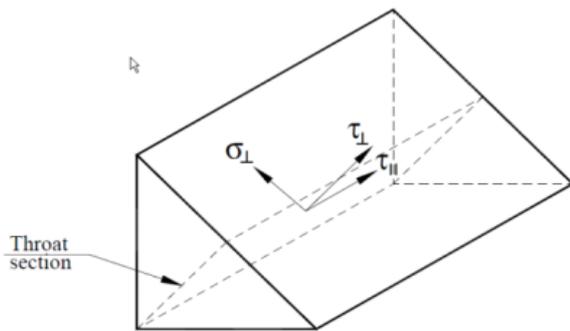


Fig. 8 Stresses on the throat section of a fillet weld

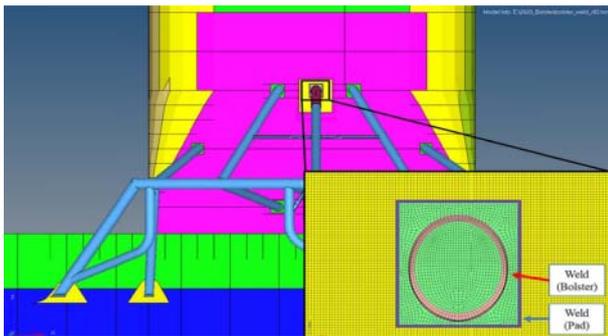


Fig. 9 Evaluation location

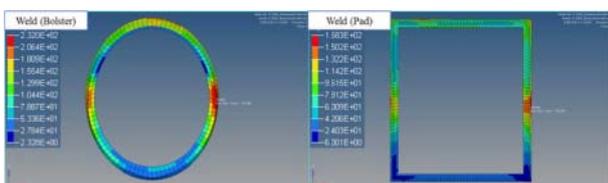


Fig. 10 von Mises stress distribution of weld

Fig. 10의 왼쪽은 볼스터와 더블플레이트 사이의 용접 부위의 응력분포를 보여주고 있으며, 오른쪽은 더블플레이트와 선체 사이의 용접 부위 응력분포를 보여 주고 있다. 이들 모두 설계 기준에 만족 하였다.

5.3 볼스터의 좌굴 및 Punching shear 평가

좌굴 및 Punching shear 강도 평가는 SACS 프로그램으로 사용하였으며, Fig. 11, 12와 같이 설계기준 1을 넘지 않아 만족함을 보여주고 있다.

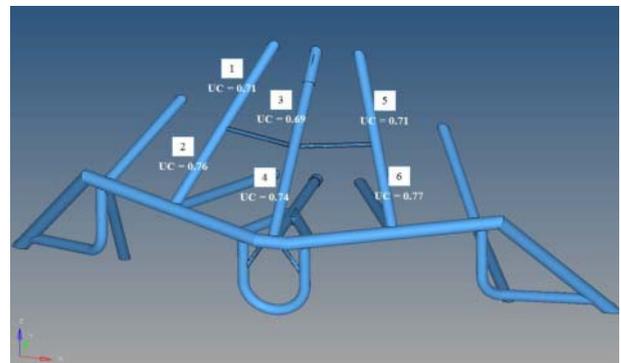


Fig. 11 Number of designated members

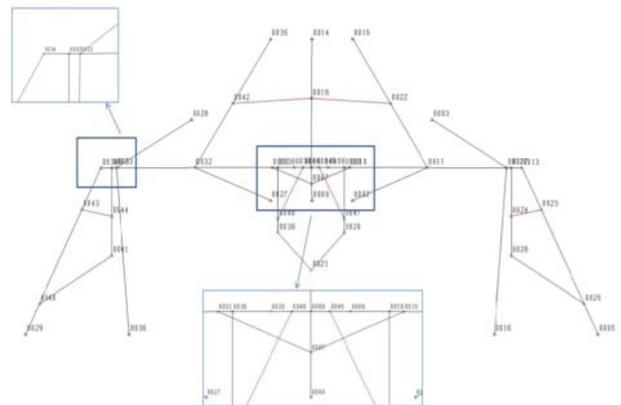


Fig. 12 Joint numbers for check of punching shear

5.4 피로하중 평가

피로 하중 평가는 Fig. 13과 같이 S-N곡선을 사용하였으며, FE 평가로부터 Hot spot 응력으로 평가 하였다.

피로 파괴 손상 식은 쌍 선형 S-N 곡선(Bi-linear S-N curves)식 (5)로 계산한다. [9]

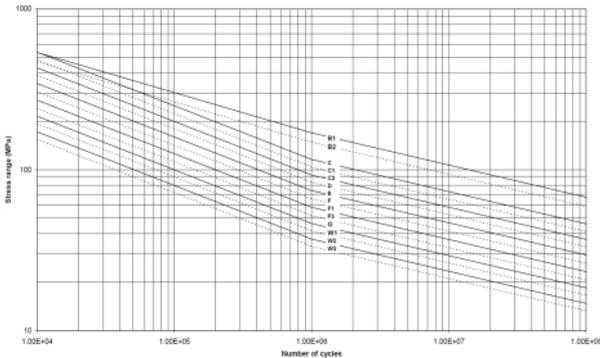


Fig. 13 S-N curves in seawater with cathodic protection [9]

$$D = v_0 T_d \left[\frac{q^{m_1}}{a_1} \Gamma \left(1 + \frac{m_1}{h}; \left(\frac{S_1}{q} \right)^h \right) + \frac{q^{m_2}}{a_2} \gamma \left(1 + \frac{m_2}{h}; \left(\frac{S_1}{q} \right)^h \right) \right] \leq \eta \quad (5)$$

여기서,

S_1 = Stress range for which change of slope of S-N curve occur

\bar{a}_1, m_1 = S-N fatigue parameter for 10^7 cycles (air condition)

\bar{a}_2, m_2 = S-N fatigue parameter for 10^7 cycles (air condition)

$\gamma(\cdot)$ = Incomplete gamma function, to be found in standard tables,

$\Gamma(\cdot)$ = Complementary incomplete gamma function, to be found in standard tables

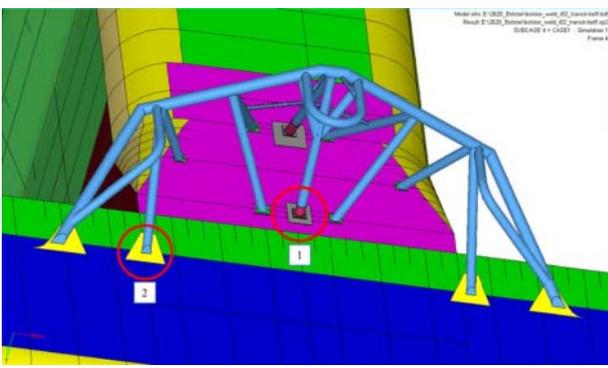


Fig. 14 Location number of fatigue evaluation area

Table 3, 4, 5의 해석 결과와 같이 설계 수명 20년을 만족함을 보여 준다.

Table 3 Fatigue evaluation point

Toe rack	
1	Weld between bolster and double pad (Bolster side)
1-1	Weld between bolster and double pad (Bolster side)
2	Weld between bolster and double pad (Pad side)
3	Weld between double pad and hull (Hull side)
4	Weld between bolster bracket and column shell (Location 2)
Root crack	
1	Weld throat between bolster and double pad
1-1	Weld throat between bolster and double pad

Table 4 Fatigue damage

Evaluation point	S-N curve	Toe					Root	
		1	1-1	2	3	4	1	1-1
Thickness [mm]		19	19	35	25	19	10	10
Operation DP	$\Delta\sigma_{Hot\ spot}$ [MPa]	129	69	135	83	79	55	26
	Fatigue damage	0.29	0.01	0.50	0.04	0.03	0.40	0.01
Operation mooring	$\Delta\sigma_{Hot\ spot}$ [MPa]	79	18	91	39	54	33	5
	Fatigue damage	0.03	0.00	0.08	0.00	0.00	0.04	0.00
Transit Condition	$\Delta\sigma_{Hot\ spot}$ [MPa]	235	307	239	203	223	103	126
	Fatigue damage	3.7	9.8	5.1	2.1	3.0	5.2	10.8

Table 5 fatigue damage and fatigue life

	Scenario	Toe					Root	
		1	1-1	2	3	4	1	1-1
Fatigue damage	1	0.40	0.68	0.62	0.16	0.22	0.56	0.74
	2	0.53	0.68	0.81	0.18	0.23	0.73	0.75
	3	0.28	0.67	0.42	0.15	0.21	0.39	0.74
Fatigue life [years]	1	49.7	29.5	32.4	123.7	89.8	35.6	26.9
	2	38.0	29.2	24.6	112.3	85.7	27.3	26.7
	3	72.0	29.8	47.5	137.6	94.3	51.2	27.1

6. 결론

본 기술 보고서에서는 볼스터와 선체의 항복 강도, 용접 부 강도, 좌굴, Punching Shear 및 피로 평가 모두 허용 범위에 만족함을 확인하였다.

그뿐만 아니라, 볼스터와 선체 연결 용접 부위 평가에서 보여 주듯이 선체와 더블플레이트 사이 용접 부위 응력분포가 볼스터와 더블플레이트 사위의 용접 부위 응력분포가 작음을 보여주었다.

그러므로, 설계 기준 보다 과도한 외력에 의해 볼스터 파단이 진행 되어도, 선체 손상 없이 볼스터와 더블플레이트의 파

단이 먼저 진행 될 것으로 추정되며, 본 기술보고서의 목적인 선체와 볼스터의 Weak Link Philosophy에 만족하였다.

참고 문헌

1. PSA, Report from the investigation of the listing of Floatel Superior, 7 November 2012 on the Njord filed
2. Det Norske Veritas, 2013, "DNV SESAM User Manual WADAM: Wave Analysis by Diffraction and Morison Theory", Program version 9.01-014
3. Det Norske Veritas, 2013, "DNV SESAM User Manual POSTERSP: Postprocessor for Statistical Response Calculations", Program version 6.4-02
4. Moss Maritime, 2014, "Hydrodynamic motion and load analysis", Doc. No. 3547-MM-JR-200-001, Rev.09
5. Moss Maritime, 2014, "Transit Analysis", Doc. No. 3547-MM-NR-200-005, Rev.04
6. Det Norske Veritas, 2012, "Offshore Steel Structures, General(LRFD METHOD)", DNV-OS-C101.
7. Det Norske Veritas, 2012, "Column-Stabilized Unit", DNV-RP-C103.
8. Det Norske Veritas, 2012, "Buckling Strength of Plated Structures", DNV-RP-C201

9. Det Norske Veritas, 2012, "Fatigue Design of Offshore Steel Structures", DNV-RP-C203
10. Det Norske Veritas, 2012, "Environmental Conditions and Environmental Loads", DNV-RP-C205



김태준

- 1980년생
- 2014년 서울대학교 공학박사 (조선해양공)
- 현 재 : 현대중공업 조선사업본부 선박연구소 선박구조연구실 (구조설계부 파견중)
- 관심분야 : 구조설계, 최적설계, 피로강도평가 (Structural design, optimum design, fatigue strength assessment)
- 연 락 처 : 052-203-8613(울산), 02-746-5763(서울), 010-3725-3123
- E - mail : tj.kim@hhi.co.kr



권성일

- 1977년생
- 2014년 울산대학교 공학석사 (자동차선박설계기술)
- 현 재 : 현대중공업 조선사업본부 선장설계부
- 관심분야 : 저온 Pipe Behavior
- 연 락 처 : 052-202-4032
- E - mail : ksil18826@hhi.co.kr

International Journal of Naval Architecture
and Ocean Engineering

Impact Factor 2016년 : 0.606