

피로해석을 통한 버트 용접 부위 비드 개선

서용석[†]*, 한상민*

삼성중공업(주)*

Fatigue Strength Assessment and Improvement of Butt Welding Bead

Yongsuk Suk[†]* and Sangmin Han*

Samsung Heavy Industries Co. Ltd.*

Abstract

A welding bead height is closely related to the efficiency of welding work, and the height of 3mm is used in the conventional practice of butt welding. In the present paper, the modification of bead height from 3mm to 6mm is considered to increase the efficiency and work productivity of butt welding on bottom plate (of BONGA FPSO actually built in SHI shipyard). Therefore, fatigue analysis has been carried out using simplified method based on the DNV Rules. It is found that the minimum fatigue life is about 594 years and the butt welding details with 6mm bead height has sufficient strength and resistance against fatigue.

※Keywords : Fatigue Analysis(피로해석), Butt Welding Bead(버트 용접 비드)

1. 서론

본 논문은 단순 피로해석 방법을 이용한 버트 용접 부위의 피로 강도 평가에 대하여 고려하였다. 삼성중공업(주)에서는 BONGA FPSO 선박을 건조하는 중에 기존의 3mm 용접을 6mm 로 증가시키는 방법으로 버트 용접 비드를 개선하고 용접에 투입되는 공수를 절감할 필요가 있었다. 이와 같은 조치가 선박 구조 안전성 측면에서 아무런 문제를 일으키지 않는다면, 그 근거를 밝히고 건조 중인

선박에 적용하고자 하였다. 따라서, 본 연구에서는 6mm 비드의 버트 용접 부에 대한 피로해석을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 피로강도 측면에서 구조 안전성을 검토하였다.

피로해석을 수행하는 방법으로는 DNV 선급(2003)의 단순 피로해석 프로시저를 적용하였다. FPSO 가 운용되는 해상 상태를 고려하여 운동해석을 수행하였고, 그 결과를 이용하여 하중을 계산하고 피로해석에 적용하였다.

BONGA FPSO 가 운용되는 곳은 비교적 잔잔한 해역이므로, 선저에 작용하는 하중은 유체 동압력이나 관성에 의한 횡압력보다는 파랑 굽힘 모멘트가 지배적일 것으로 추정된다. 따라서, 파랑 굽힘 모멘트만을 고려하여 피로 평가를 수행하여도 무

† 주저자, E-mail: yongsuk@samsung.com

Tel: 055-630-4747

방하겠지만, 보다 정확한 해석 결과를 도출하기 위하여 유체 동압력과 관성 횡압력도 고려하였다.

최대 굽힘 모멘트가 발생하는 운용(operating) 조건과 두 가지의 예선(towing) 조건을 고려하여 피로해석을 수행하였다.

2. 응력 집중 계수의 계산

2.1. 단차(taper)가 없는 경우

다음의 Fig. 1 은 용접 비드가 6mm 이고 각장이 20mm 인 단차 없는 버트 용접 부위를 나타내고 있다.

본 연구에서는 버트 용접 단면의 바깥 부분이 원의 형상을 따른다(Fig. 1 에서 위로 튀어나온 회색 부위의 바깥 선이 원주상에 있다)는 가정하에, 간단한 기하학적 원리를 이용하여 버트 용접 부위의 응력 집중 계수(stress concentration factor)를 계산한다.

원의 방정식은 다음과 같다.

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (1)$$

Fig. 1 의 조건을 고려하여 식 (1)의 미지수 a, b, r 을 구하면 다음의 Fig. 2 와 같은 원을 얻을 수 있다.

Fig. 2 에서 점 (-10, 0)의 용접 비드 각도를 구하면 다음과 같다.

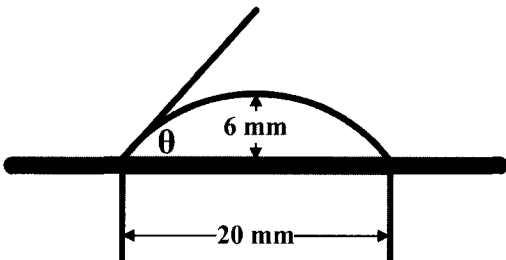


Fig. 1 Butt welding detail with bead height of 6mm and welding leg of 20mm

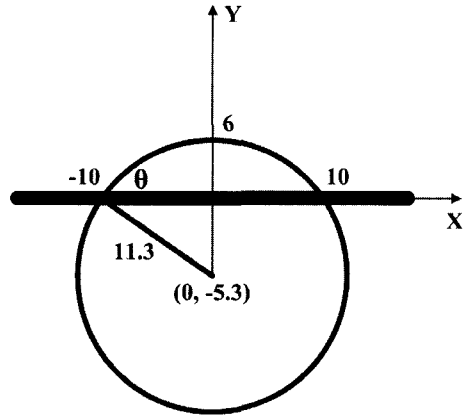


Fig. 2 Idealized shape of butt welding

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\left. \frac{dy}{dx} \right|_{\substack{x=-10 \\ y=0}} \right) = \tan^{-1} \left(\left. -\frac{x-a}{y-b} \right|_{\substack{x=-10 \\ y=0}} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(-\frac{-10-0}{0-(-5.3)} \right) = \tan^{-1}(1.88) \\ &= 61.9^\circ \end{aligned}$$

DNV 선급 규정(2003)에 따르면 다음의 식을 이용하여 응력 집중 계수를 구할 수 있다.

$$K_w = 1.0 + 0.5 \sqrt[4]{\tan \theta} \quad (2)$$

여기서,

K_w : 용접 형상에 의한 응력 집중 계수

θ : 버트 용접 비드의 각도

따라서, 용접 비드가 6mm 인 경우의 K_w 는 식 (2)에 의해 1.59 가 얻어지고, 다음과 같이 응력 집중 계수를 정리할 수 있다.

$$K_g = 1, \quad K_w = 1.59, \quad K_{te} = 1 \quad (3)$$

여기서,

K_g : 구조 형상에 의한 응력 집중 계수

K_w : 용접 형상에 의한 응력 집중 계수

K_{te} : 편심에 의한 응력 집중 계수

본 논문에서는 선각 거더(hull girder) 하중과 국부(local) 하중에 대하여 동일한 응력 집중 계수를 적용하였다.

2.2. 단차가 있는 경우

판 두께 변화에 의하여 버트 용접 부위에 단차가 존재하는 경우는 DNV 선급 규정(2003)에 의하여 다음과 같이 응력 집중 계수를 구할 수 있다.

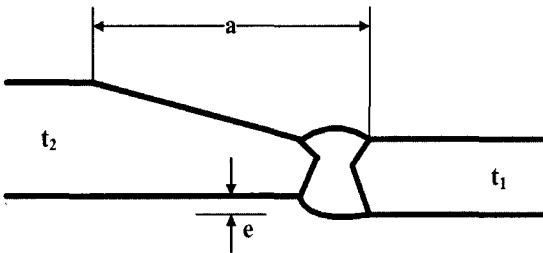


Fig. 3 Butt welding joint with taper

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$K_g = 1 + \frac{3 \frac{\Delta t}{t_1}}{1 + \left(1 + \frac{\Delta t}{t_1}\right)^3}$$

$$K_w = 1.4 \cdot \left(1 + \frac{\Delta t + e}{2a}\right)$$

$$K_{te} = 1 + \frac{6 \frac{e}{t_1}}{1 + \left(1 + \frac{\Delta t}{t_1}\right)^3} \quad (4)$$

여기서,

- e : 버트 용접된 두 판의 편심량
- a : 용접 부위를 포함한 단차의 길이
- K_g, K_w, K_{te} : 식 (3)의 설명과 동일

Table 1 Fatigue loading data

		without taper	with taper
The range of vertical wave bending moment amidship (KN-m)	Operating	7117586	
	Towing(1)	18105571	
	Towing(2)	14259188	
The range of hydrodynamic pressure (KN/m ²)	Operating	6.14	
	Towing(1)	14.29	
	Towing(2)	2.59	
The range of pressure of inertia force (KN/m ²)	Operating	5.74	
	Towing(1)	156.70	
	Towing(2)	112.55	
Section modulus (m ³)	Bottom	95.66	

3. 피로 설계 하중

피로 설계 하중을 산정하기 위하여 FPSO 가 운용되는 T&S 조건 중에서 최대 굽힘 모멘트가 발생하는 조건과 두 가지의 예선 조건을 고려하였다. 파랑 굽힘 모멘트는 스웰(swell) 파와 국부(local) 파에서 유발되는 두 가지의 경우로 나뉠 수 있다. 본 해석에서 고려한 하중 조건들을 다음의 Table 1 에 정리하였다.

파랑 굽힘 모멘트는 FPSO 가 운용되는 해역의 파랑 자료를 사용하여 회귀 주기(return period) 10 년을 기준으로 계산한다. 또한, 예선 조건에서도 실제의 파랑 자료를 사용하여 계산하였다.

4. 계산 결과

선저 판에 단차가 없는 경우(Case 1)와 단차가 있는 경우(Case 2)에 대하여 해석을 수행하였다.

Case 1 의 경우는 식 (3)의 응력 집중 계수를 사용하였고, Case 2 의 경우에는 식 (4)를 이용하여 계산하였다. 식 (4)에서 t_1 은 25mm t_2 는

45mm 이고, 단차의 길이 a 는 판 두께 차 ($\Delta t = t_2 - t_1$)의 세배를 적용하는 것이 일반적이므로 60mm 라고 할 수 있다. 또한, 편심은 없는 경우이므로, 다음과 같은 응력 집중 계수를 얻을 수 있다.

$$K_g = 1 + \frac{3 \cdot 20 / 25}{1 + (1 + 20 / 25)^3} = 1.351$$

$$K_w = 1.4 \cdot \left(1 + \frac{20 + 0}{2 \cdot 60}\right) = 1.633$$

$$K_{te} = 1 + \frac{6 \cdot 0 / 25}{1 + (1 + 20 / 25)^3} = 1.0$$

압력이 작용하는 판넬의 경계 조건이 단순지지 (simply supported)라는 가정하에 다음과 같은 식 (Huges, 1983)을 사용하여 유체 동압력(hydrodynamic pressure)과 관성력(inertia force)에 의한 횡압력(lateral pressure)을 계산하였다.

$$\Delta \sigma = 0.225 \cdot \Delta p \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2 \quad (5)$$

여기서, $b = 905\text{mm}$, $t = 25\text{mm}$ 이다.

총 피로 응력 범위(total fatigue stress range)는 DNV 선급 규정(2003)을 적용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_{VBM} + 0.6 \cdot \sqrt{(\Delta \sigma_{hydro}^2 + \Delta \sigma_{inertia}^2)} \quad (6)$$

식 (6)에서, 유체 동압력과 관성 횡압력 사이의 상관 계수는 무시하였다.

이와 같은 내용을 기반으로 피로해석을 수행하면, 다음의 Table 2 와 같이 단차가 있는 경우와 없는 경우의 버트 용접 부위에 대한 피로 손상율 (fatigue damage ratio)을 최대 굽힘 모멘트가 발생하는 운용 조건에서 얻을 수 있다.

Table 2 Fatigue damage ratio of butt welding details in operating condition

		without taper	with taper
Nominal stress range (N/mm ²)	V.B.M	74.41	74.41
	Hydro pres.	1.81	1.81
	Inertia pres.	1.69	1.69
SCF ($K_g \times K_w \times K_{te}$)		1.59	2.21
Fatigue stress range (N/mm ²)	V.B.M	118.31	164.45
	Hydro pres.	2.88	4.00
	Inertia pres.	2.69	3.73
Total fatigue stress range (N/mm ²)		120.67	167.73
S-N curve		Curve Ib welded joint	
Weibull shape parameter h		0.764	
Fatigue damage ratio*		0.0090	0.0242

* Effective coating life of 5 years is assumed.

같은 방법으로 다음의 Table 3 과 같이 첫 번째 예선 조건에서 버트 용접 부에 대한 피로 손상율을 계산할 수 있다.

같은 방법으로 Table 4 와 같이 두 번째 예선 조건에서 버트 용접 부에 대한 피로 손상율을 계산할 수 있다.

피로 손상을 계산할 때 적용한 S-N curve 는 용접을 고려한 DNV Ib curve 인데, 유효 도장 기간을 5년으로 가정하였다. 즉, 5년 동안은 도장에 의해 부식으로부터 보호되고, 그 이후는 부식에 완전히 노출된다고 가정하였다. 그러므로, Table 2, 3, 4 의 각 하중 조건에서 계산된 피로 손상율은 부식에 노출되지 않은 경우와 비교하여 2 배 큰 값이다.

Table 3 Fatigue damage ratio of butt welding details in the 1st towing condition

		without taper	with taper
Nominal stress range (N/mm ²)	V.B.M	189.27	189.27
	Hydro pres.	4.21	4.21
	Inertia pres.	46.20	46.20
SCF ($K_g \times K_w \times K_{te}$)		1.59	2.21
Fatigue stress range (N/mm ²)	V.B.M	300.94	418.29
	Hydro pres.	6.69	9.30
	Inertia pres.	73.46	102.10
Total fatigue stress range (N/mm ²)		345.20	479.80
S-N curve		Curve Ib welded joint	
Weibull shape parameter h		0.764	
Fatigue damage ratio*		0.0024	0.0064

* Effective coating life of 5 years is assumed. Duration is assumed to be 83 days.

Table 4 Fatigue damage ratio of butt welding details in the 2nd towing condition

		without taper	with taper
Nominal stress range (N/mm ²)	V.B.M	149.06	149.06
	Hydro pres.	0.76	0.76
	Inertia pres.	33.19	33.19
SCF ($K_g \times K_w \times K_{te}$)		1.59	2.21
Fatigue stress range (N/mm ²)	V.B.M	237.01	329.42
	Hydro pres.	1.21	1.68
	Inertia pres.	52.77	73.35
Total fatigue stress range (N/mm ²)		268.68	373.44
S-N curve		Curve Ib welded joint	
Weibull shape parameter h		0.764	
Fatigue damage ratio*		0.0011	0.0030

* Effective coating life of 5 years is assumed. Duration is assumed to be 83 days.

Table 2, 3, 4 의 결과와 각 하중 조건의 지속 기간을 고려하여 버트 용접 부의 총 피로 손상을 (total fatigue damage ratio)과 피로 수명을 계산 하면, 다음의 Table 5 와 같다.

이상과 같은 결과를 보면, 버트 용접의 비드를 기존의 3mm 에서 6mm 로 증가시키더라도 피로 강도상에는 아무런 문제가 없음을 알 수 있다. 즉, 용접 비드가 6mm 로 증가된 상황에서도 594 년이라는 긴 피로 수명을 얻을 수 있어서, 실제 FPSO 에 안전하게 적용할 수 있음이 밝혀졌다.

Table 5 Results of fatigue analysis

	without taper	with taper
Total fatigue damage ratio	0.0125	0.0337
Fatigue life (years)	1594	594

5. 결론

본 연구에서는 생산성 향상을 위해 버트 용접 비드를 3mm 에서 6mm 로 증가시켰을 때, 용접

부위에 피로 강도상 문제가 발생할 수 있는가에 대하여 검토해 보았다.

DNV 선급 규정에 근거한 단순 피로해석 기법을 사용하여 피로 수명을 계산하되, FPSO 가 운용되는 해역과 예선 항로를 고려하여 피로 하중을 산정하였다. BONGA FPSO 는 비교적 잔잔한 해역에서 운용되므로, 선저에 작용하는 피로 하중은 파랑 굽힘 모멘트가 지배적이지만 추가적으로 유체 동압력과 관성에 의한 횡압력도 고려하였다.

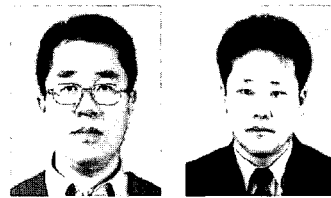
버트 용접 방법에서 판 두께의 단차가 없는 경우는 용접 부위의 기하학적 형상을 고려하여 응력 집중 계수를 계산하였고, 단차가 있는 경우는 DNV 선급 규정을 직접 적용하여 응력 집중 계수를 계산하였다.

T&S 운항 조건에서 최대 굽힘 모멘트가 발생하는 운용 조건과 두 가지의 예선 조건을 고려하고 DNV Ib S-N curve 를 적용하여 피로 해석을 수행한 결과, 594 년이라는 긴 피로 수명을 얻을 수 있

었다. 따라서, 버트 용접의 비드를 6mm 로 적용하더라도 피로 강도 상 아무런 문제가 없는 것으로 밝혀졌고, 그 결과를 실 호선에 적용하였다.

참 고 문 헌

- DNV Classification Notes No.30.7 FATIGUE ASSESSMENTS OF SHIP STRUCTURES, 2003.
- Hughes, O.F., A Rationally-Based, Computer-Aided, Optimization Approach, Ship Structural Design, John Wiley & Sons, Inc., 1983



< 서 용 석 >

< 한 상 민 >