

구조응력 및 핫스팟 응력을 이용한 8,100 TEU 컨테이너선 선측 종늑골구조의 피로 강도 평가에 대한 비교 연구

김성민*, 김명현†*, 강성원*, 편장훈*
김영남**, 김성근**, 이경언**, 김경래**

부산대학교 조선해양공학과*
(주)한진중공업 선체설계팀**

A Comparative Study for the Fatigue Assessment of Side Shell Longitudinals on
8,100 TEU Container Carrier using Hot Spot Stress and Structural Stress Approaches

Seong-Min Kim*, Myung-Hyun Kim†*, Sung-Won Kang*, Jang-Hoon Pyun*
Young-Nam Kim**, Sung-Geun Kim**, Kyong-Eon Lee** and Gyeng-Rae Kim**

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University*
Hanjin Heavy Industries & Construction CO., LTD.**

Abstract

Recently, a mesh-size insensitive structural stress definition (structural stress method) is proposed that gives a stress state at weld toe with a relatively large mesh size. The structural stress definition is based on the elementary structural mechanics theory and provides an effective measure of a stress state in front of weld toe. In this study, a fatigue strength assessment for a side shell connection of a container vessel using both the hot spot stress and the Battelle structural stress method was carried out. A consistent approach to compute the extrapolated hot spot stress for design purpose is described and current fatigue guidance is evaluated. Fatigue strength predicted by the two methodologies, e.g. hot spot stress and structural stress approaches, at hot spot locations of a typical ship structure are compared and discussed.

※Keywords: Fatigue design(피로 설계), Structural stress(구조응력), Hot spot stress(핫스팟 응력), Welded structures(용접 구조물), Fatigue life(피로 수명), Fatigue strength evaluation(피로강도 평가)

접수일: 2007년 7월 11일, 승인일: 2008년 4월 23일

† 교신저자: kimm@pusan.ac.kr, 051-510-2486

1. 서론

선박 해양 구조물은 대표적인 판 용접 구조물로

서, 다양한 중형부재가 용접으로 서로 연결되어 있다. 따라서 용접부 피로 파괴 문제에 직접적으로 노출되어 있어 이러한 부분의 피로 수명을 예측하기에는 많은 불확실성이 존재한다.

현재 용접 구조물의 피로설계에는 일반적으로 공칭응력(normal stress) 및 핫스팟 응력(hot spot stress)이 사용되고 있다. 공칭응력을 바탕으로 피로설계를 할 경우에는 각각의 용접부 형상에 대한 피로시험을 따로 수행하여 S-N 선도를 구해야 하는 번거로움이 있으며, 최근 선급을 중심으로 많이 사용하는 핫스팟 응력 산정법은 응력 집중부 근처에서의 요소크기에 따라 매우 민감한 변화를 보일 뿐만 아니라 적분점에서 계산된 응력값을 임의의 위치로 내삽/외삽하는 방법에 따른 영향도 큰 것으로 알려져 있어 결국 요소의 크기 및 응력의 유도 방법에 대한 적절한 기준이 요구된다 (Kim et al. 2005).

최근 유한요소 메쉬크기에 민감하지 않은 것으로 알려진 구조응력(structural stress)에 의한 방법이 소개되었는데 이는 용접 토우부 근처의 절점에서 계산된 등가 절점력을 바탕으로 역학적 평형 조건을 이용하여 요소내의 형상 함수를 이용하여 근사적으로 계산된 응력에 비해 상대적으로 정도가 높은 기준응력을 얻을 수 있다. 또한 파괴역학적 관점에서 용접 토우부에서의 균열진전율을 고려한 일련의 과정을 통해 다양한 작용 하중 모드 및 두께 변화에 대해 단일화 된 S-N 선도의 구현이 가능하므로 다양한 형상의 용접부에 대한 피로 거동의 산출이 가능한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 앞서 소개한 핫스팟 응력과 구조응력 기법을 통하여 8,100 TEU 컨테이너선의 선측외판 종강도구조(side shell longitudinal)에 대한 피로 수명을 간이 해석법을 통해 추정해보고 구조응력 기법의 실용가능성을 검토하고자 한다.

2. 대상 선박 및 유한요소해석

본 연구의 대상이 되는 8,100 TEU 컨테이너선의 구조해석 모델 및 주요 제원은 각각 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

해석 위치는 Fig. 2와 같이 수밀격벽에 선측외

판 종강도구조가 통과하는 부분으로 동하중에 의해 피로 균열이 빈번하게 발생하는 발라스트 상태(ballast condition)에서의 해수면 높이($T_{act}=7.42m$) 부근의 종강도부재를 선정하였다. 상세 해석 부위에서는 t×t의 요소 크기로 나누었으며, 4 node shell 요소를 이용하였다. 핫스팟 응력에 의한 결과와 구조응력에 의한 결과 값을 비교해보기 위하여 응력집중이 예상되는 3군데 위치를 선정하여 Fig. 3에 HS(Hot Spot)1, HS2, HS3으로 나타내었다.

HS1, HS2에서는 반 타원형 균열, HS3에서는 모서리 균열이 발생할 것으로 예상된다.

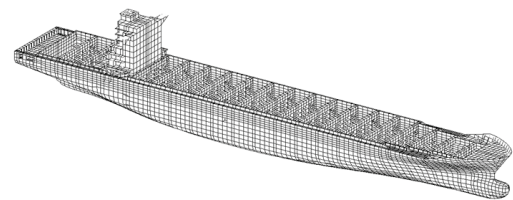


Fig. 1 Finite element of target vessel

Table 1 Main dimension of target vessel

Length of ship	305.356 m
Breadth of ship	42.8 m
Depth of ship	24.6 m
Draft, Fully loaded	14.47 m
Draft, Ballast loaded	7.42 m
Max. Speed	26.4 knot

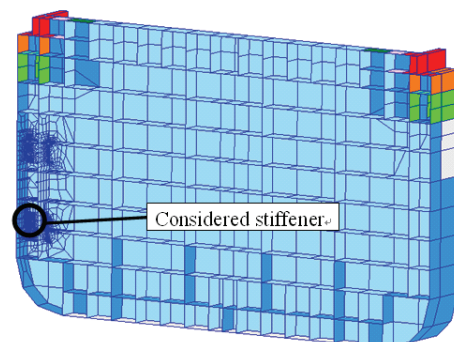


Fig. 2 Location of considering stiffener

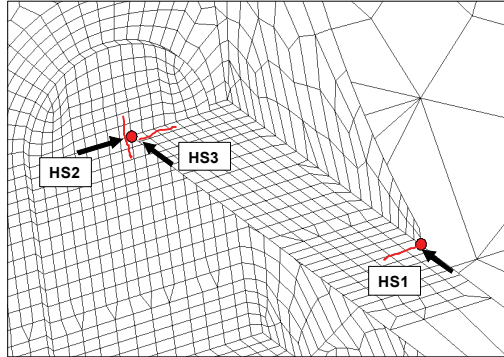


Fig. 3 Fatigue crack definition

3. 피로해석 방법

본 연구에 사용된 피로해석 방법은 간이 피로 해석 방법(simplified fatigue analysis)을 사용하였다(Shin 1998). DNV(2003)에서 제안한 방법을 이용해 계산되는 선체 구조의 피로 수명은 S-N data와 Palmgren-Miner 법칙에 의한 축적 손상율에 의해 구할 수 있다.

간이 피로해석의 경우 피로 수명 추정에 사용되는 응력 범위는 선급에서 규정하는 하중 조건에 따른 피로 강도 결과와 장기 응력 분포 함수를 이용하여 피로 수명을 추정하며 피로 손상율의 산정은 선형손상법칙을 이용한다. 구조응력을 이용하는 경우에는 기준응력으로 사용하는 notch 응력을 등가구조응력으로 대체하며 master S-N 선도를 이용하여 수명을 계산할 수 있다(Ha 2007).

Fig. 4에는 이러한 방법에 의한 일련의 과정을 나타내었다.

4. 피로설계하중 / 조합 응력

간이 피로해석을 위한 하중은 크게 global wave bending moment와 local load로 나뉜다. 즉, 선체 외판에 작용하는 external sea pressure와 tank boundary에 작용하는 internal pressure로 나눌 수 있다. 각각의 하중에 의한 응력 성분은 핫스팟 응력에 의해 산정할 수 있다.

Global wave bending moment는 IACS에서 규정하고 있는 vertical wave bending moment와

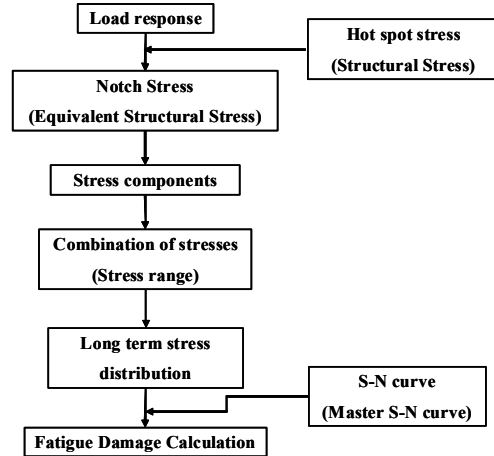


Fig. 4 Flow diagram for fatigue analysis procedures

Table 2 Loading cases for fatigue calculations

	Loading type	Loading condition
LC1	Vertical wave bending moment	Fully loaded / Ballast
LC2	Horizontal wave bending moment	Fully loaded
LC3	Horizontal wave bending moment	Ballast
LC4	Torsional wave moment	Fully loaded
LC5	Torsional wave moment	Ballast
LC6	External pressure	Fully loaded
LC7	External pressure	Ballast
LC8	Internal pressure	Ballast

horizontal wave bending moment를 사용하는데, 이는 10^{-8} 의 확률수준이므로 적절한 계수를 이용하여 10^{-4} 확률수준의 굽힘모멘트를 각각 구한 후 이를 이용하여 응력 성분을 산정한다. 또한 컨테이너선과 같이 대형개구부를 가지는 선형의 경우 비틀림(torsion)에 의한 영향을 고려해야 하므로 본 연구에서는 비틀림 파랑 모멘트(torsional wave moment)를 고려하였으며 Table 2와 같이 정리하였다.

각 하중에 의해 발생하는 응력은 핫스팟 응력과 구조응력을 사용하여 산정하였으며, 이 응력들을

기준응력이 되는 notch 응력과 등가구조응력으로 재산정한 후 조합된 조합응력(combined stress, $\Delta\sigma_0$)으로 피로 수명을 추정할 수 있다.

5. 핫스팟 응력

핫스팟 응력은 일정 거리 떨어진 위치에서의 응력을 산정하여 용접 토우부까지 선형 외삽하여 응력집중부에서의 기하학적 응력을 산정하는 방법이다. 본 연구에서는 Fig. 5에서와 같이 선급 등에서 가장 많이 사용되고 있는 0.5t, 1.5t 에서의 응력으로 선형 외삽하였다.

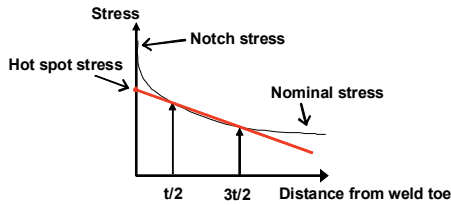


Fig. 5 Definition of hot spot stress according to with classification societies

기준응력이 되는 notch 응력을 산정하기 위해서 앞에서 구해진 핫스팟 응력에 용접부의 기하학적 형상을 고려한 응력집중계수 $K_w (= 1.5)$ 를 사용하였다. notch 응력을 기준으로 하여 DNV에서 제시하는 S-N 선도를 사용하였으며 식 (1)과 같이 표현된다(DNV 2003).

DNV curve lb
 $\log N_f = 12.76 - 3 \log \Delta\sigma$ (1)

6. 구조응력

용접부에서의 구조응력(structural stress, σ_s)은 shell 요소를 이용한 유한요소해석에 의해 구한 절점에서의 절점력(nodal force) 과 절점 모멘트(nodal moment) 로부터 막응력(membrane stress, σ_m)과 굽힘응력(bending stress, σ_b)을 각각 구하여 이들의 합으로 정의 할 수 있다. 즉, Fig. 6에서 보인바와 같이 shell 요소로 구성된 유

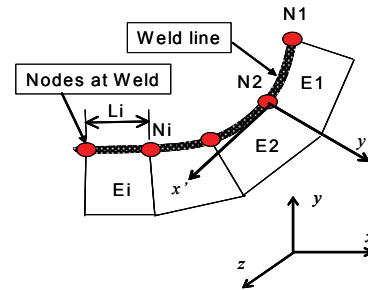


Fig. 6 FE model with weld line using shell element

한 요소 모델에서 계산된 절점력으로부터 용접선에 분포하는 선분포력(line force, f)은 등가일의 원리를 이용하여 식 (2) 와 같은 방법으로 계산할 수 있으며, 선분포 모멘트(line moment, m)도 동일한 방법으로 구할 수 있다.

이렇게 구해진 선분포력을 이용하여 식 (3)과 같이 막응력과 굽힘응력으로 표현되는 구조응력을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & l_1 & 0 & 0 \\ 3 & 6 & & \\ l_1 & (l_1+l_2) & l_2 & 0 \\ 6 & 3 & 6 & \\ 0 & l_2 & (l_2+l_3) & l_3 \\ & 6 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_{y'}}{t} + \frac{6m_{x'}}{t^2} \quad (3)$$

여기서 t: 판 두께

위와 같은 방법은 용접 토우부에서 정의 할 수 있는 적절한 연속 용접선 안에 있는 경우에 해당한다. 하지만 본 연구에서는 shell 요소 모델을 이용하여 단순화 하는 과정에서 용접 비드부 형상 및 두께에 대한 기하학적 형상으로 고려하지 않으므로 용접 끝단부에서 하나의 절점으로 밖에 표현될 수 없다. 이런 경우에는 실제 피로 균열이 발

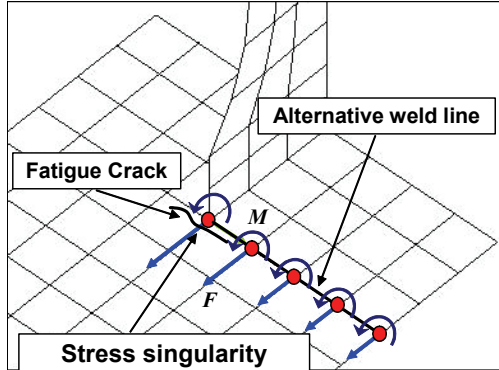


Fig. 7 Scheme of virtual node method

생활 방향으로 고려하여 계산에 필요한 새로운 대안 용접선을 지정하여 계산하며, 이러한 방법을 가상 절점법(virtual node method)라 하며 Fig. 7에 나타내었다.

구조응력방법에서 사용되는 기준응력은 앞에서 설명한 방법으로 산정된 구조응력에 하중에 대한 보정 및 판 두께에 대한 보정이 고려된 등가구조응력(equivalent structural stress, ΔS_{eq})으로 나타낼 수 있으며 식 (4)와 같다.

$$\Delta S_{eq} = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{2m} I(r)^{\frac{1}{m}}} \quad (4)$$

여기서 $t^{\frac{2-m}{2m}}$ 은 두께에 대한 보정항이며 $I(r)^{\frac{1}{m}}$ 은 균열 형태 및 하중에 대한 보정항으로

bending ratio($r = \frac{\sigma_b}{\sigma_s}$)에 의한 함수로 나타

난다. 본 연구에서는 반타원형 균열 및 모서리 균열에 대하여 각각 식 (5), 식 (6)과 같이 계산되었다 (Battelle 2004).

$$I(r)^{\frac{1}{m}} = -0.0732r^6 + 0.2132r^5 - 0.2063r^4 + 0.091r^3 + 0.0193r^2 - 0.014r + 1.1029 \quad (5)$$

$$I(r)^{\frac{1}{m}} = 0.0011r^6 + 0.0767r^5 - 0.0988r^4 + 0.0946r^3 + 0.0221r^2 - 0.014r + 1.223 \quad (6)$$

Dong et al.은 약 2000여개의 피로시험 결과에 대하여 등가구조응력을 산정하여 등가구조응력 대비 수명의 결과를 종합하여 master S-N 선도로 나타내었다. 본 연구에서 산정되는 수명은 master S-N 선도의 mean-2 standard deviation을 기준으로 하여 계산되었으며, mean master S-N 선도와 design master S-N 선도는 각각 식 (7), 식 (8)과 같다.

Mean Master S-N curve

$$\log N_f = 13.33 - 3.08 \log \Delta S_{eq} \quad (7)$$

Design Master S-N curve

$$\log N_f = 12.88 - 3.08 \log \Delta S_{eq} \quad (8)$$

7. 해석 결과

2장에서 정의된 응력 집중부에 대해 핫스팟 응력과 구조응력을 이용한 결과를 비교해 보면 Table 3, 4, 5에 나타난 바와 같이 비교적 잘 일치함을 확인 할 수 있다.

피로 수명 산정을 위해서 Table 3, 4, 5에서 구해진 핫스팟 응력과 구조응력을 기준응력이 되는 notch 응력과 등가구조응력으로 재산정하여 DNV 피로선도와 design master S-N curve를 이용하여 수명을 추정하면 Table 6, 7, 8과 같으며 두 가지 방법에 의한 결과 값은 잘 일치함을 볼 수 있다.

Table 3 Results of hot spot and structural stresses at HS1

	HS1	
	HSS (MPa)	SS (MPa)
LC1	46.74	44.93
LC2	43.34	41.68
LC3	32.14	30.92
LC4	41.05	39.40
LC5	33.15	31.23
LC6	-38.95	-36.23
LC7	-20.08	-18.78
LC8	18.79	17.01

Table 4 Results of hot spot and structural stresses at HS2

	HS2	
	HSS (MPa)	SS (MPa)
LC1	15.08	19.99
LC2	18.98	17.79
LC3	14.07	13.53
LC4	9.71	8.75
LC5	7.85	7.07
LC6	-59.78	-66.38
LC7	-71.71	-84.25
LC8	-11.19	-17.08

Table 5 Results of hot spot and structural stresses at HS3

	HS3	
	HSS (MPa)	SS (MPa)
LC1	39.87	39.33
LC2	32.25	32.29
LC3	23.93	23.95
LC4	28.53	28.95
LC5	23.04	23.38
LC6	-5.16	-6.89
LC7	8.845	6.37
LC8	12.43	9.73

Table 6 Result of fatigue life at HS1

	HSS method		SS method	
	Full	Ballast	Full	Ballast
$\Delta\sigma_0$ (MPa)	198.4	134.9	191.1	130.3
Damage ratio	0.252	0.032	0.241	0.030
Life	35 years		37 years	

8. 결론

본 연구에서는 핫스팟 응력과 구조응력기법을 이용하여 8,100 TEU 컨테이너선의 선측중늑골 구조에 대한 피로 강도 평가를 수행하였다. 두 가지

Table 7 Result of fatigue life at HS2

	HSS method		SS method	
	Full	Ballast	Full	Ballast
$\Delta\sigma_0$ (MPa)	146.1	178.2	143.8	187.4
Damage ratio	0.100	0.074	0.102	0.092
Life	57 years		52 years	

Table 8 Result of fatigue life at HS3

	HSS method		SS method	
	Full	Ballast	Full	Ballast
$\Delta\sigma_0$ (MPa)	112.0	100.4	115.6	97.1
Damage ratio	0.045	0.013	0.051	0.012
Life	171 years		158 years	

방법에 의한 피로 수명의 결과는 10% 이내의 범위로 나타나 잘 일치함을 확인하였다.

선체구조의 피로 수명을 평가하는 방법에는 많은 불확실성이 내포되어 있다. 차후에는 구조응력기법을 통하여 보다 더 신뢰성 있는 평가 방법을 확립하기 위해서 요소 크기 및 요소 형상에 따른 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

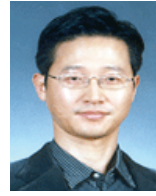
- Center for Welded Structures Research Battelle, 2004, "Mesh Insensitive Structural Stress Method for Fatigue Evaluation of Welded Structures," Battelle Structural Stress JIP Final Report No. N004431-01.
- DNV, 2003, Classification Note No. 30.7, "Fatigue Assessment of Ship Structures".
- Dong, P., Hong, J.K. and Cao, Z., 2001, "A Mesh Insensitive Stress Procedure for Fatigue Evaluation of Welded Structures,"

IIW Doc. No. X III-1902-01/X V-1089-01,
International Institute of Welding.

- Ha, C.I., 2007, A Study on the Fatigue Strength of Welded Joints using Structural Stress with consideration of Stress Singularity and its Application to the Fatigue Life Assessment of Ship Structures, M.S thesis, Pusan National University, Korea.
- Kim, Y.I., Kang, J.K. and Heo, J.H., 2005, "A Study on the Performance of Mesh Insensitive Structural Stress for Fatigue Strength Evaluation," Proceedings of the 2005 Spring Annual Meeting of the Naval Architects of Korea, pp. 965-970.
- Shin, C.H., 1998, "Simplified Fatigue Strength Assessment of Ship Structures," Journal of the Korean Welding Society, Vol. 16, No. 5, pp. 11-19.



< 김 성 민 >



< 김 명 현 >



< 강 성 원 >



< 편 장 훈 >



< 김 영 남 >



< 김 성 근 >



< 이 경 연 >



< 김 경 래 >