

선체 호퍼너클 구조의 최종강도 및 피로강도

김영한* · 정장영** · 백점기** · 김하수*** · 김도현***

* 부산대학교 공과대학 조선해양공학과 대학원

** 부산대학교 공과대학 조선해양공학과

*** 현대중공업(주) 구조설계부

Ultimate and Fatigue Strength of Ship Hopper Knuckles

Young Han Kim*, Jang Young Chung**, Jeom Kee Paik**, Ha Soo Kim*** and Doe Hyun Kim***

* Graduate School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan University, Pusan 609-735, Korea

** Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan University, Pusan 609-735, Korea

*** Hull Initial Design Department, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd., Ulsan, 682-792, Korea

Abstract

The aim of the present study is to investigate the characteristics of ultimate and fatigue strength of hopper knuckles in merchant vessels carrying bulk cargo or LNG/LPG. The ultimate strength test is undertaken on the hopper knuckle model, subject to end tip load. A series of fatigue tests are carried out on the hopper knuckle models varying the level of the nominal stresses. The elasto-plastic finite element analysis is performed to examine the distribution of hot spot stresses near weld toe and also the progressive collapse behavior of the test model. S-N curves are developed based on the fatigue test results.

(Received September 8, 1999)

Key Words : Ultimate strength, Fatigue strength, Hopper knuckle

1. 서 론

선체구조에는 용접이음부 등의 구조 불연속부가 무수히 존재하고 있으며, 반복 피로하중의 작용 하에서 이 같은 구조 불연속부에 피로균열이 빈번히 발생하고 있다. 또한, 과대한 하중의 작용 하에서 부분적으로 소성역이 발생 진전하여 구조가 전체적으로 붕괴할 가능성도 있다. 따라서, 구조설계단계에서 충분한 피로강도와 최종강도를 확보할 수 있는 합리적인 구조 설계 지침의 확립이 극히 중요하다.

과거, 선박의 경우 정적 응력해석이 주를 이루었으며¹⁻³⁾ 최근에 들어 선박이 대형화되고 고장력강의 사용빈도가 증가하면서 피로강도 평가에 관한 연구가 이루어져 왔으나 아직도 이에 관한 문제점이 완전히 규명되었다고는 말하기 어려운 실정이다⁷⁻¹⁴⁾.

본 연구에서는 inner bottom과 slop plate의 연결부인 hopper corner부 즉, hopper knuckle이 화물 적재 및 침수사고 등에 의해 큰 외력을 받을 때의 붕괴 거동 특성을 수치적 및 실험적으로 분석하였다. 또한, hopper knuckle에 대한 용접부의 잔류응력 및 mean-load를 고려한 피로강도 특성을 분석하기 위하여 피로실험을 수행하였으며, hopper knuckle과 유사한 형태의 구조접합부에 대해 제시된 기존의 피로강도 설계용 BS5400 S-N곡선⁴⁾과 본 피로 실험 결과를 비교하였다.

2. 구조모형 실험 및 유한요소해석

2.1 구조모형

본 연구에서 대상으로 하고 있는 hopper knuckle

의 구조모형은 횡단면의 증립축을 기준으로 상하 대칭적인 구조형태를 가지고 있다. 사용된 재료는 고장력강 (grade AH)으로 구조모형을 구성하는 판재의 두께는 모두 10mm이며, 용접은 일상적인 선체구조 건조 시와 유사하게 하였다.

Table 1과 Table 2에는 구조모형의 제작 시 적용한 용접조건과 재료의 화학성분을 나타내고 있다. Table 3에는 KS 규격⁵⁾에 따라 제작된 재료 인장시험편에 대한 인장시험 결과를 나타내고 있다.

Table 1 Welding conditions applied in fabrication of the structural model

Current	Voltage	Welding speed	Method
220 A	26 V	50 cm/min	Semi-automatic CO ₂

Table 2 Chemical composition of the high tensile steel (AH32) material

C	Si	Mn	P	S
0.16 %	0.18 %	0.96 %	0.12 %	0.03 %

Table 3 Mechanical properties of the high tensile steel (AH32) material

Young's modulus	Yield strength	Tensile strength	Rupture strain
206 GPa	358 MPa	490 MPa	0.26

2.2 최종강도 실험 및 유한요소해석

붕괴강도 실험은 500kN급 MTS 정적·동적 하중장치를 이용하여 수행하였으며 구조모형의 단부 근방에 1장의 평판을 추가로 부착하여 국부 구조강성을 증가시켜 수직방향으로 일정영역에 균일 분포하중을 구조모형이 붕괴하기까지 점진적으로 (하중속도: 0.05mm/sec) 하중을 증가시켰다. 실험 시 작용하중의 속도제어와 하중-변위 및 시간곡선 등의 데이터 취득은 PC를 이용하여 자동적으로 이루어진다.

유한요소해석은 ANSYS 프로그램⁶⁾을 이용하여 수행하였으며, 이때 초기결합의 영향은 고려하지 않았다. 재료의 항복은 등방성 von Mises 조건으로 항복 후의 거동은 인장시험 결과로부터 구한 진응력-진변형률을 5개의 직선으로 근사화하였다.

구조 모델링의 변화에 따른 구조거동의 특성을 분석하기 위하여 용접 비드부를 생략하고 판재부분만을 4-절점 쉘요소로 모델링 한 것과 판재부분 및 용접 비드

부 모두 8-절점 고체요소로 모델링 한 것을 비교해 보았다. 용접비드는 각장이 10mm인 삼각형으로 모델링하였고, 쉘 요소의 경우 shear의 영향이 고려되어지고 2×2의 integration point를 가지는 쉘 요소 (shell 43)를 이용하였다.

그 해석결과와 실험결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하며 쉘요소로 해석으로도 충분한 정도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

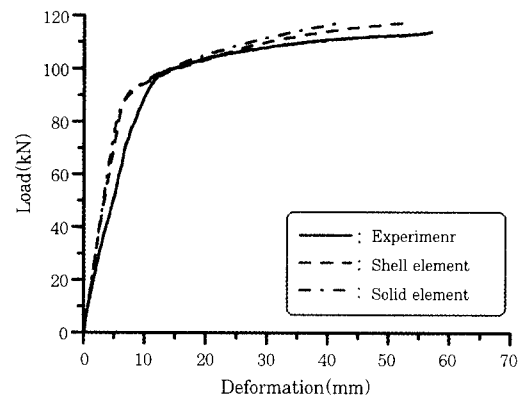


Fig. 1 Load-deflection curves of the hopper knuckle model

2.3 용접 잔류응력

선박의 경우 용접으로 인하여 용접부 근방에서는 항복응력에 가까운 초기 용접 잔류응력이 존재한다. 용접 잔류응력은 선박의 건조 후 수압시험 등의 정하중에 의한 인장응력을 유발하는 하중이력을 받으면 재료의 탄소성 거동에 의해 크게 변하게 된다⁸⁾. 따라서 선박의 피로강도에 관한 용접 잔류응력의 영향은 초기 용접 잔류응력 (As-welded) 분포가 아니라 하중이력에 의해 변화된 잔류응력 분포를 고려하는 것이 타당하다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 hopper knuckle 구조모형에 2축 게이지(FCA-1-11-1L, gauge length: 1mm)를 부착하고, 하중조건을 Table 4와 같이 hopper knuckle 부에서 초기 잔류응력 분포 (As-welded)와 재료 항복응력의 50% (0.5σ) 및 85% (0.85σ)의 하중을 가하였다. 잔류응력 측정은 각각에 대하여 절단기법 (10mm×10mm)으로 식 (1)을 이용하여 응력의 이완량을 측정하였다.

Fig. 3a~b는 각 하중이력을 가한 후의 각 방향에 대한 잔류응력 계측결과로서 재료 항복응력의 50%~85% 정도의 하중을 받으면 잔류응력이 거의 소멸됨을 알 수 있다.

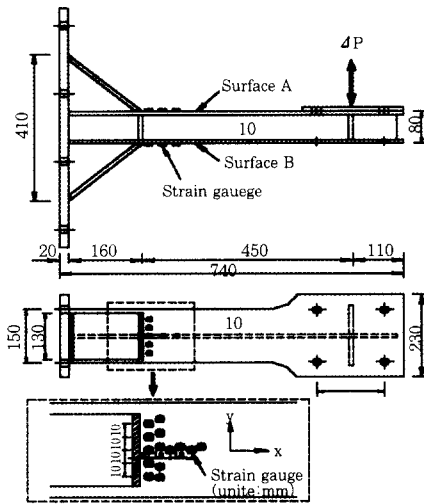


Fig. 2 Dimensions and strain gauge locations (■, ● indicates a location of the strain gauge mounted at surface A or B)

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\Delta \epsilon_x + \nu \Delta \epsilon_y) \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\Delta \epsilon_y + \nu \Delta \epsilon_x)$$

Table 4 Pre-loading processes before starting the fatigue test

Case No.	Condition	Pre-loading process
1	As-welded	0 ———
2	Pre-load corresponding to 50% of the yield stress is applied. $\Delta \sigma = \pm 0.5\sigma_y$ $\Delta p = \pm 58.36\text{kN}$	
3	Pre-load corresponding to 85% of the yield stress is applied. $\Delta \sigma = \pm 0.85\sigma_y$ $\Delta p = \pm 58.36\text{kN}$	

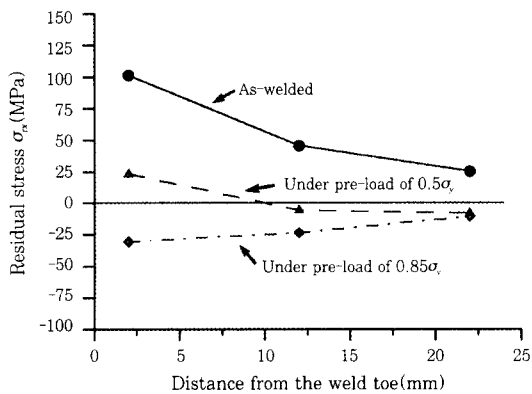


Fig. 3a Distribution of residual stress σ_x in the x direction at surface A

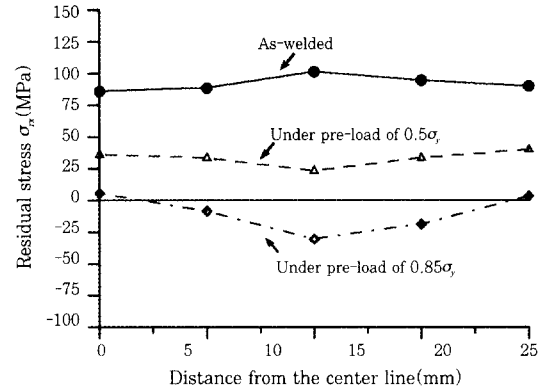


Fig. 3b Distribution of residual stress σ_x in the y direction at surface A

2.4 응력집중

선박 및 해양구조물은 여러 가지 용접이음형식과 하중조건을 갖는 구조물로서, 이런 구조물의 피로강도는 용접부의 형태, 야금학적 특성, 잔류응력 및 용접결합 등에 영향을 받지만 가장 큰 영향을 미치는 것은 구조물의 불연속부 및 용접이음부의 형상에 기인하는 피로 균열 발생부의 응력집중계수로 알려져 있으며, 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다⁹⁻¹¹⁾. 최근에는 hot spot 응력을 기준으로 피로강도 해석이 수행되고 있는데, 과거 공칭응력을 기준으로 하는 경우에는 용접부 이음형상에 따른 S-N선도가 필요하나, hot spot 응력을 기준으로 하는 경우에는 서로 다른 용접부 형상에 대하여 하나의 통일된 S-N 선도를 적용할 수 있어 복잡한 형태의 용접 이음부를 가진 구조물의 피로강도 평가 시 매우 유용하다.

일반적으로 구조물의 용접토우부에서는 응력집중이 발생하며 이곳에서의 응력집중계수 K_t 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_t = K_s \times K_w \quad (2)$$

여기서, K_s : 구조물의 기하학적 형상에 기인하는 구조적 응력집중계수

K_w : 용접비드의 형상에 기인하는 용접부의 응력집중계수

식 (2)의 응력집중계수 K_t 에 의하여 용접토우부에 발생하는 최대응력 σ_{peak} 는 공칭응력 σ_n 을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{peak} = K_t \times \sigma_n = (K_s \times K_w) \times \sigma_n \quad (3)$$

용접부의 피로강도는 국부적인 응력집중에 아주 민감

감하여 용접방법 및 용접부의 형상 등에 영향을 받으므로 σ_{peak} 를 기준으로 할 경우 통일적인 S-N선도의 도출이 어렵다. 따라서 용접부의 피로강도 해석은 K_t 대신 K_s 즉, 구조적 응력집중계수를 통해 계산되는 hot spot 응력을 기준으로 하며, K_w 의 영향은 피로시험 결과에 포함되어 있다고 가정한다.

Hot spot 응력을 구하는 방법은 여러 가지로 정의되어 있지만 일반적으로 용접토우부로부터 일정거리의 두 점을 선택하고 이 점에서의 응력 값을 용접토우부까지 선형외삽하여 구한 값으로 정의하는 것이 보통이다¹⁰⁻¹³⁾. 본 연구에서는 hopper knuckle 구조모델에 대하여 Fig. 4 에서처럼 용접토우부 즉, web 선상의 knuckle line으로부터 $t/2$ 와 $3t/2$ 지점의 응력을 선형외삽하여 hot spot 응력으로 정의하였다.

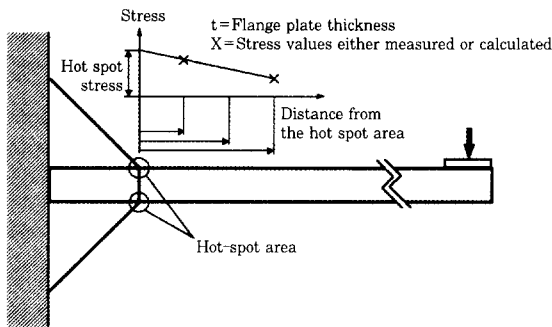


Fig. 4 Procedure for prediction of the hot spot stress

Hot spot 응력을 구하기 위한 유한요소 모델은 2.2 절에서 사용한 것과 동일하게 하였으며, 게이지를 붙여 탄성범위 내에서의 응력값을 측정하였다.

Fig. 5는 실험결과 및 유한요소해석 결과이다. Flange 두께의 0.5배, 1.5배 되는 점, 즉 5 mm, 15 mm에서의 응력값을 knuckle line까지 선형 외삽하여 hot spot 응력을 구한 것으로 shell element를 사용한 모델이 solid element를 사용한 모델보다 높은 응력값을 산출하며 이것은 Nagamoto 등¹⁴⁾과 유사한

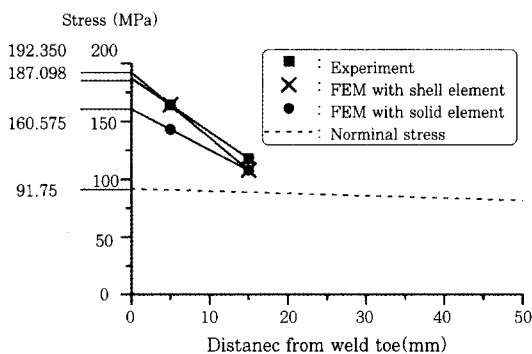


Fig. 5 Extrapolation for prediction of the hot spot stress

결과이다. 결과적으로 본 연구에서 사용한 구조모델에 대한 구조적 응력집중계수 K_s 는 1.75~2.10정도임을 알 수 있었다.

2.5 피로강도 실험

피로강도 실험은 2.3절에서 설명한 잔류응력 완화효과와 선박에 있어서 수압 및 화물중량의 영향을 고려하기 위하여 Table 5와 같은 5개의 하중조건을 상정하여 pre-load와 mean-load를 조합한 반복하중을 가하였으며, 각 조건당 최소 14개 씩, 총 76개의 구조모델에 대하여 피로실험을 수행하였다.

본 연구에서는 100kN급 및 500kN급 MTS 정적·동적 하중장치를 이용하였으며, 하중속도는 실험하중에 따라 1~13Hz, 하중파형은 사인파로 수행하였고, 균열이 판 두께를 (flange의 두께 방향) 완전히 관통할 때까지 피로실험을 진행하였다. 단 균열이 발생하지 않은 경우는 반복수가 5×10^6 회 일 때 중지하였으며, 표면 균열길이는 염색침투액을 이용하여 육안으로 측정하였다.

Fig. 6은 hopper knuckle line의 일부분을 치과용 실리콘 고무를 이용하여 용접비드 형상을 본 뜨고 확대하여 프랭크 각(θ)과 곡률 (ρ)를 측정 한 것이다.

Table 5 Conditions for fatigue loading considered in the test

No.	Loading condition
1	Pre-load=0, Mean load=0
2	Pre-load=0.5σ, Mean load=0
3	Pre-load=0.85σ, Mean load=0
4	Pre-load=0.85σ, Mean load=0.5σ
5	Pre-load=0.85σ, Mean load=0.85σ

균열은 크게 2가지 형태로 발생하여 진전하였다. 첫 번째 경우는 균열이 knuckle line 가운데 근방의 용접토우부에서 발생하여 flange의 두께 방향으로 발달

형태로 진전한 경우이고, 두 번째 경우는 knuckle line 근방의 용접도우부 여러 곳에서 미소 균열이 발생하여 일정반복수가 지나면서 하나로 합쳐져 진전한 경우이다.

Fig. 7은 피로실험 결과와, 본 연구에서 수행한 구조 모형과 유사한 연결부를 가진 BS5400의 F 평균곡선 [4]과 비교하여 공칭응력과 hot spot 응력 기준을 동시에 나타낸 것이다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 공칭응력이 증가함에 따라 피로수명은 양대수좌표를 따라 직선적으로 감소하며, 실험데이터는 고하중에 비하여 저하중에서 분산 정도가 심하였다. 또한 잔류응력이 그대로 남은 경우, 즉 Condition 1과 BS5400을 비교하였을 때 저하중에서는 본 실험결과가 BS5400 보다 다소 높은 피로수명을 나타내고 있다.

식 (4)는 피로실험 데이터를 최소자승법으로 얻은 S-N선도 식이다.

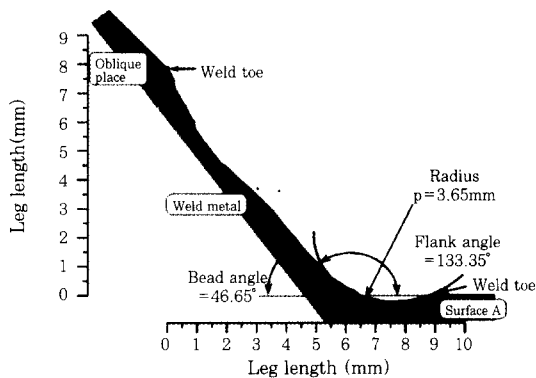


Fig. 6 Weld profile of hopper knuckle model

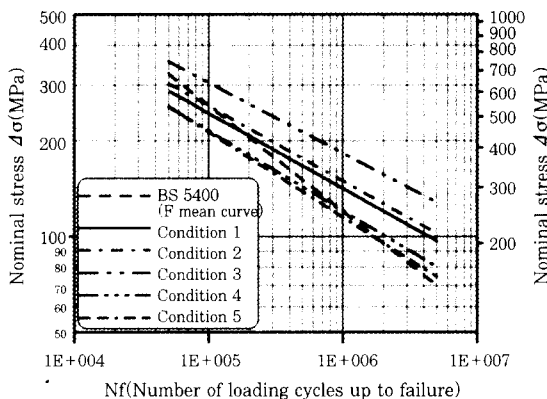


Fig. 7 S-N curves for the hopper knuckle model under various fatigue loading condition

$$\begin{aligned}
 \text{Condition 1: } & \log(N_f) = 15.095 - 4.227 \cdot \log(\Delta\sigma) \\
 \text{Condition 2: } & \log(N_f) = 15.217 - 4.238 \cdot \log(\Delta\sigma) \\
 \text{Condition 3: } & \log(N_f) = 16.195 - 4.506 \cdot \log(\Delta\sigma) \\
 \text{Condition 4: } & \log(N_f) = 14.256 - 3.967 \cdot \log(\Delta\sigma) \\
 \text{Condition 5: } & \log(N_f) = 13.678 - 3.726 \cdot \log(\Delta\sigma)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

반복수가 5×10^6 회일 때를 피로한도로 가정하면 식 (4)로부터 Condition 1은 96.9 MPa, Condition 2는 102.3 MPa, Condition 3은 130.1 MPa, Condition 4는 80.3 MPa, Condition 5는 74.7 MPa를 얻을 수 있다.

Pre-load를 가한 후 피로실험을 행한 경우 (Condition 2, Condition 3)가 초기 잔류응력이 그대로 남아있는 경우 (Condition 1)보다 피로강도는 상승하며 Condition 3이 Condition 2보다 매우 효과적임을 알 수 있다. 피로실험으로 얻어진 데이터(피로한도)를 기초로 잔류응력 완화효과를 정량적으로 나타내기 위하여 Condition 1의 피로한도에 대한 Condition 2, Condition 3의 피로한도 증가비와 pre-load의 비를 나타내면 Fig. 8과 같은 증가하는 형태의 2차 함수를 얻을 수 있다.

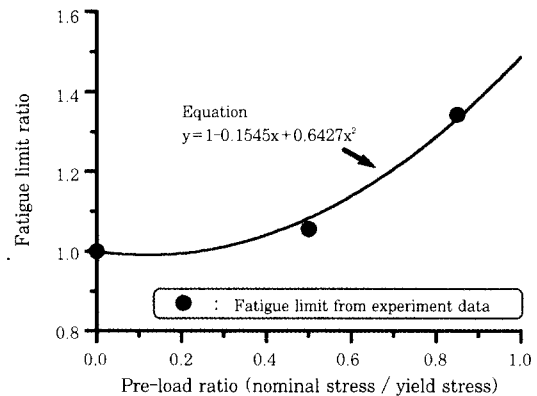


Fig. 8 Relation between fatigue limit and pre-

0.85 σ_y 의 pre-load를 가하여 잔류응력을 소멸시킨 후 일정한 하중의 mean-load를 부하한 상태에서 피로실험을 행한 경우는 (Condition 4, Condition 5) 초기 잔류응력이 그대로 남아있는 경우 (Condition 1)보다 피로강도는 저하하며 mean-load 크기의 영향은 크지 않지만 고하중에서 보다 저하중으로 갈수록 차이가 남을 알 수 있다.

Mean-load의 효과를 정량적으로 나타내기 위하여 Fig. 8과 동일한 방법으로 나타내면 Fig. 9와 같은 감소하는 형태의 2차 함수를 얻을 수 있다.

3. 결 론

본 연구를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 선체 hopper knuckle의 응력분포 및 붕괴강도를 유한요소법에 의해 해석하고자 할 때 판부재는 4-절점 쉘요소를 이용한 모델링으로도 충분한 정도의 해를 얻을 수 있다고 판단된다.

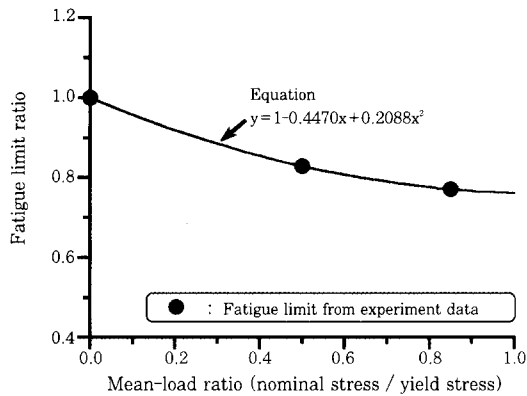


Fig. 9 Relation between fatigue limit and mean-load

2) 선체 hopper knuckle의 구조모형에 재료 항복응력의 50%~85% 정도의 하중을 가하면 잔류응력이 거의 소멸됨을 알 수 있다.

3) 선체 hopper knuckle의 구조모형에 대하여 hot spot 응력을 정립하고, 실험 및 유한요소해석을 통하여 구조적 응력집중계수 (K_s)는 1.75~2.10을 얻었다.

4) Pre-load를 가하여 잔류응력을 완화시킨 경우가 초기 잔류응력이 그대로 남아있는 경우보다 피로강도는 상승하며, pre-load의 크기는 재료의 항복강도값에 가까울수록 더욱 피로수명이 증가함을 알 수 있다.

5) 잔류응력을 소멸시킨 후 mean-load를 부하한 상태에서 피로시험을 행한 경우는 초기 잔류응력이 그대로 남아있는 경우보다 피로강도는 저하하며 mean-load 크기의 영향은 크지 않지만 고하중에서 저하중으로 갈수록 차이가 남을 알 수 있다.

6) 선박의 설계 시 pre-load 및 mean-load의 영향을 고려한 설계가 요구되며, 본 연구에서 개발된 S-N곡선은 실제 선박의 hopper knuckle 설계 시에 유용하게 활용할 수 있으리라 기대된다.

참고 문헌

1. T. Suzuki, R. Kanai, T. Nawata, H. Sugioka, M. Mori, M. Nakajima and S. Teramoto : Experimental test on the transverse strength of a large bulk carrier, J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 132(1972), pp. 307-321 (in Japanese).
2. A. Kawamura, D. Sakai, K. Hashimoto, M. Sonda, Y. Ohya and Y. Kuramoto : Full scale measurement and strength analysis of 60,000 DWT bulk carrier, Trans. of the West-Japan Society of Naval Architects, No. 69(1984), pp. 159-172 (in Japanese).
3. T. Inoue, T. Wada and F. Imakita : On the strength of the bilge hopper tanks of a bulk carrier, The Hitachi Zosen Technical Review, Vol. 39, No. 3(1978), pp. 41-47. (in Japanese).
4. BS 5400 : Steel, concrete and composite bridges, Part 10 code of practice for fatigue, 1980.
5. 한국 공업규격 : KS B-0801 금속재료 인장시험편, 1983.
6. ANSYS : ANSYS user's guide (ver. 5.2), Swanson analysis systems, Inc., 1994.
7. Y. K. Seung : Review of Fatigue strength Evaluation on weld joints of hull structure Journal of KWS, Vol. 12 No. 3, September 1994.
8. W. S. Kim : Residual stress & fatigue strength in welded ship structure, Journal of KWS, Vol. 15 No. 3, June 1997.
9. S. W. Kang, W. I. Ha, J. S. Shin, and J. S. Jae : A Study on stress concentration factor at fillet welded joint, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 33, No. 3, August 1996.
10. DnV : Geometric stress concentration factors in hopper knuckle of tankers, Technical report, Det Norske Veritas, August 1998.
11. DnV : Fatigue assessment of hopper knuckles in tankers - Strain measurement, Paper Series No. 98-P010, Det Norske Veritas, May 1998.
12. DnV : Fatigue assessment of ship structures, Technical report, Det Norske Veritas, September 1996.
13. J. Yagi, S. Machida, Y. Tomita, M. Matoba and T. Kawasaki : Definition of hot spot stress in welded plate type structure for fatigue assessment (1st Report), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 169, 1991 (in Japanese).
14. R. Nagamoto, M. Matoba, T. Kawasaki, K. Inoue, T. Hori, N. Iino and T. Fukuoka : Model fatigue test result of welded structural element and proposal for fatigue design procedure, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170, 1991 (in Japanese).