

선체 Longi-web 연결부의 피로강도 평가를 위한 구조응력 기법의 적용

김명현*, 강성원^{†*}, 김정환**, 김성민*, 김광석**, 강종규**, 허주호**

부산대학교 조선해양공학과*
대우조선해양(주) 구조R&D**

The Application of Structural Stress Method for the Fatigue Strength
Assessment of Longi-web Connections

Myung Hyun Kim*, Sung Won Kang^{†*}, Jeong Hwan Kim**, Seong Min Kim*,
Kwang Seok Kim**, Joong Kyoo Kang** and Joo Ho Heo**

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University*
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., Ship and Marine Structure R&D Team**

Abstract

Recently, a mesh-size insensitive structural stress definition that provides a stress state at weld toe with relatively larger mesh size compared to conventional approaches has been proposed. 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, as an experimental validation of structural stress method in obtaining the fatigue strength of weldments, a series of fatigue test has carried out for longi-web connections, which are representative of ship-like structures. Based on the result from this study, it is expected to develop a more precise fatigue strength evaluation technique and to reduce time and cost associated with the fatigue design of ship and offshore structures.

※Keywords: Fatigue strength assessment(피로강도평가), Structural stress(구조응력), Weld toe (용접 토우부), Longi-web connection(종횡부재 연결부)

1. 서론

각종 구조물의 대형화 추세에 따라 이에 대한 안정성 평가는 재해방지와 경제성의 두 측면에서 필수적으로 요구되고 있다. 특히 문제가 되는 용접

구조물의 경우는 재료 자체의 기본성질 뿐만 아니라 용접에 의한 응력집중부를 고려한 세심한 주의가 필요하다. 이러한 피로설계를 위한 기준응력으로 현재 공칭응력(nominal stress)이나 핫스팟 응력(hot spot stress)이 주로 사용되고 있다. 하지만 이러한 방법들은 각 부재에 사용되는 용접부 형상에 따른 피로시험을 수행하여 피로수명 곡선을 구해야 하는 번거로움이 있거나 유한요소 모델의 요소크기에 민감하다는 어려움이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 기본적인 구조역학의 평형조건을 바탕으로 유한요소 모델의 요소크기에 둔감하다고 알려진 구조응력 기법이 보고되고 있다(Dong et al. 2001). 이 방법은 다양한 형상의 용접부의 S-N 곡선을 단일 곡선으로 나타낼 수 있음을 유한요소법을 이용한 수치해석을 이용하여 증명된 바 있지만 실제 피로시험에 의한 검증은 부족한 실정이다(Kim et al. 2005). 또한, 본 연구에서 소개하는 shell요소를 이용한 구조응력 계산법은 현재 선박의 구조 및 피로 해석에 주로 사용되는 shell요소에 용접 비드모델을 추가하여 용입 부족부에 의한 루트 파손을 고려할 수 있는 방법이다(Ha et al. 2006). 따라서, 더욱 효율적이고 정확하게 용접부의 피로강도를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이러한 기법을 잘 반영할 수 있는 일련의 모델에 대하여 실제 피로시험을 실시하여 피로 수명평가에 대한 추정치와 실험에 의한 피로수명을 비교·검토하고자 한다.

2. 대상 모델 및 유한요소 해석

본 연구에 사용된 두 가지 종류의 longi-web connection(Load-carrying fillet welding connection)의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 또한 각각의 모델에 대하여 용접 방식에 따라 완전용입 용접한 시험편과 부분용입 용접한 시험편으로 나누어 총 4가지 형태로 분류하였으며 연구의 효율성을 위하여 시험에 사용된 4종류의 시험편을 Table 1과 같이 정의하여 사용하였다.

상기 모델에 대한 유한요소 해석은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 상용 프로그램을 이용하였으며 요소 변화에 대한 사례연구를 위하여 요소의 크기는

1.0t/1.0t 및 0.5t/0.5t로 분류하였고 요소의 종류는 4-node shell요소로 수행하였다(t: 판두께).

특히, PP모델의 경우 용입 부족부를 적절히 표현하기 위하여 Fig. 3에서 보는바와 같이 주판과 보강판 사이의 절점을 공유하지 않는 방법을 사용하였다(Battelle 2004).

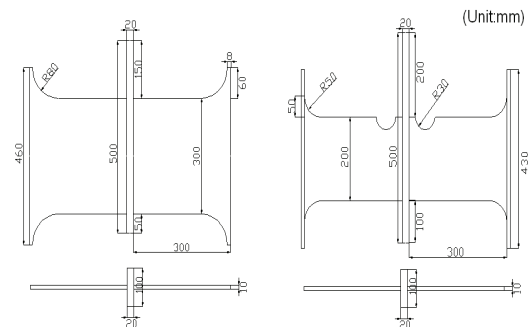
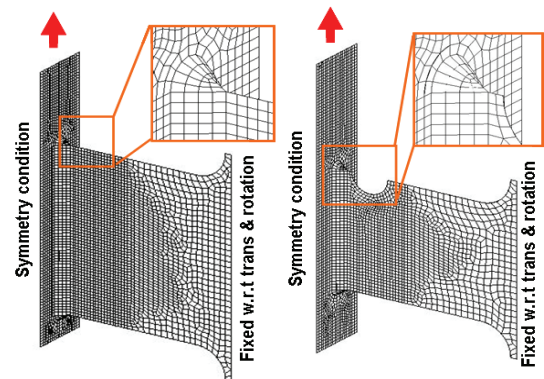


Fig. 1 Dimension of specimens

Table 1 Test models

| Spec. | Explanation | Full name |
|-------|-----------------|---------------------|
| KH | keyhole이 있는 시험편 | Key Hole |
| NH | keyhole이 없는 시험편 | No Hole |
| FP | 완전용입으로 용접된 시험편 | Full Penetration |
| PP | 부분용입으로 용접된 시험편 | Partial Penetration |



(a) NH specimen (b) KH specimen

Fig. 2 Finite element models

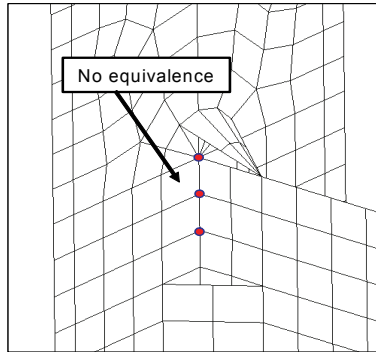


Fig. 3 No equivalence for non-welded root gap

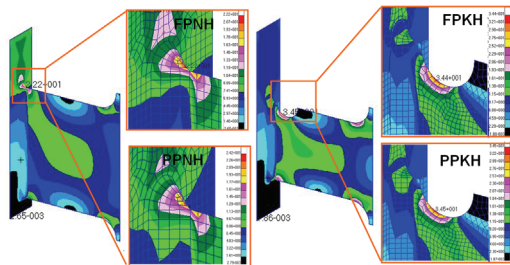


Fig. 4 Stress distributions at stress concentration area

유한요소 해석 결과 Fig. 4와 같이 NH시험편에서는 용접부 끝단, KH 시험편의 경우는 key hole이 위치한 부분에서 가장 높은 응력을 나타내었으며, 이 결과를 바탕으로 하여 구조응력 계산 위치를 선정하였다.

3. 피로시험

본 연구에 사용된 피로시험 장치는 최대용량 ±20 ton인 축인장 압축 유압서브 피로시험기(SAGINOMIYA, Japan)를 사용하였고, 피로하중의 파형은 정현파를 사용하였다. 하중제어 방식은 응력비 R=0에서 실험을 수행하였으며, 하중반복속도는 하중을 고려하여 2~3Hz에서 실시하였다. 또한 하중, 변위 및 변형률 값을 데이터 메모리 수집 장치를 이용하여 관찰하였다. 피로시험은 시험편의 균열이 20mm까지 진전될 때까지 실시하였

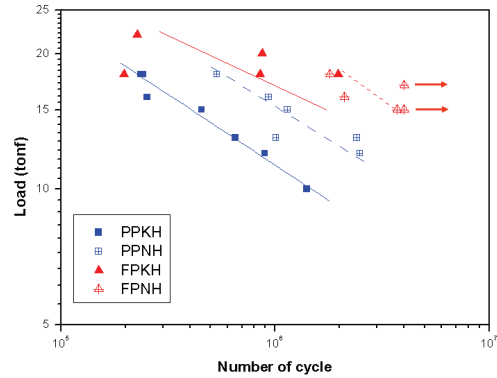


Fig. 5 Fatigue test results

으며 PPKH시험편의 경우는 완전 파단 될 때를 기준으로 하였다.

FPNH 시험편 5개, FPKH 시험편 5개, PPNH 시험편 6개, PPKH 시험편 7개, 총 23개의 시험편에 대하여 피로시험을 실시하였으며 각각의 시험편을 비교하여 하중과 파단수명 사이의 관계를 선도로 나타내었다. 각 모델에 대한 피로시험 결과는 Fig. 5과 같다.

4. 구조응력

4.1 Shell 요소를 이용한 구조응력

용접부에서의 구조응력(structural stress, σ_s)은 유한요소해석에 의해 구한 절점에서의 절점력(nodal force)과 절점모멘트(nodal moment)로부터 막응력(membrane stress, σ_m)과 굽힘응력(bending stress, σ_b)을 각각 구하여 이들의 합으로 정의할 수 있다. 즉, Fig. 6에서 보인바와 같이 shell 요소로 구성된 유한 요소 모델에서 계산된 절점력으로부터 용접선에 분포하는 선분포력(line force, f)은 등가일의 원리를 이용하여 식(1)과 같은 방법으로 계산할 수 있으며, 선분포모멘트(line moment, m)도 동일한 방법으로 구할 수 있다. 이렇게 구해진 선분포력을 이용하여 식 (2)와 같이 막응력과 굽힘응력으로 표현되는 구조응력을 구할 수 있다.

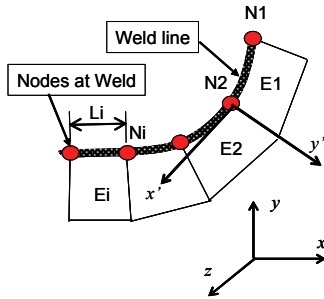


Fig. 6 FE model with weld line using shell element

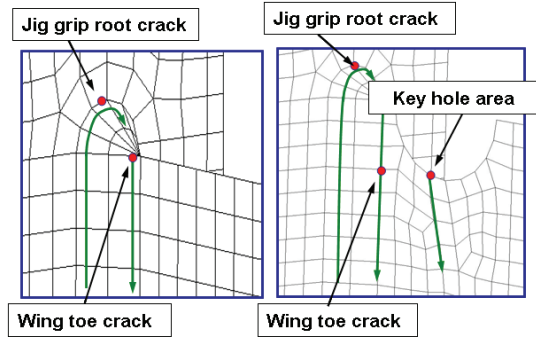
$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 \\ \frac{l_1}{6} & \frac{(l_1+l_2)}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{(l_2+l_3)}{3} & \frac{l_3}{6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y'}{t} + \frac{6m_x'}{t^2} \quad (2)$$

여기서 t: 판두께

본 연구에서 제시된 모델에 대하여 구조응력을 계산하였다. Fig. 7에서는 균열이 발생 가능한 위치를 고려하여 구조응력이 계산된 각각의 위치를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 각 부분에 대하여 편의상 Jig grip, Wing, Key hole로 이름을 정하였다. 예를 들어 Wing이 부착된 용접 토우부를 Wing toe라고 했으며 불완전용입 용접된 PP 시험편의 경우 계산된 Jig grip부의 용접 루트부를 Jig grip root라고 하였다. 4종류의 모델에 대하여 구조응력이 계산된 지점을 Table 2에 정리하였다. 각 위치에 대하여 계산된 구조응력 값을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 실험결과 FPKH 모델에 대해서는 실제 균열이 대부분 Wing toe에서 발견되었으므로 Wing toe부 또한 구조응력 계산에 포함되었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 구조응력 값은 유한요소 망의 크기에 상관없이 일정한 결과를 나타내는 것을 확인할

수 있다.



(a) NH specimen (b) KH specimen

Fig. 7 Locations for structural stress calculation

Table 2 Calculated locations

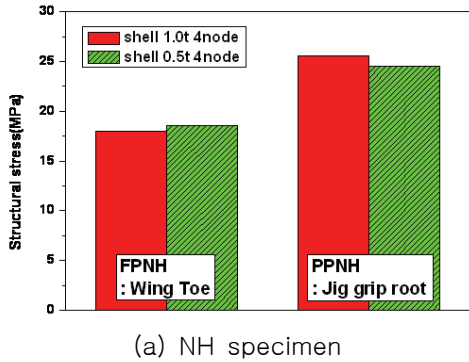
| Type | Location |
|------|--------------------|
| FPNH | Wing toe |
| PPNH | Jig grip root |
| FPKH | Key hole, Wing toe |
| PPKH | Jig grip root |

4.2 구조응력을 이용한 피로강도 평가

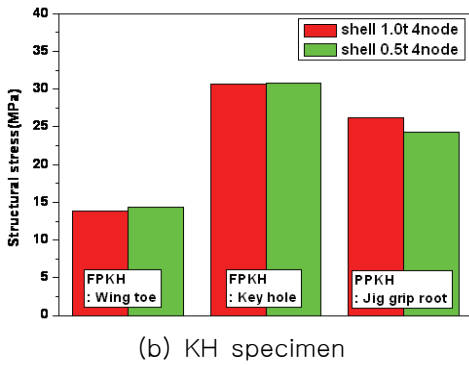
본 연구에서 고려한 4가지 종류의 모델에 대해 앞서 구한 유한요소해석에 대한 구조응력 결과를 바탕으로 식 (3)을 이용하여 판두께 및 하중모드 효과를 고려한 등가 구조응력을 구할 수 있다(Battelle 2004).

$$\Delta S_{eq} = \frac{SCF_{ss} \Delta \sigma_n}{t^{2-m} I(r)^{\frac{1}{m}}} \quad (3)$$

여기서 t=부재두께, m=3.6, I(r)=f(Δσ_b/Δσ_s) (구조응력 진폭에 대한 굽힘응력 진폭의 비의 함수), Δσ_n은 공칭응력진폭, SCF_{ss}는 구조응력에 근거한 응력집중계수이다.



(a) NH specimen



(b) KH specimen

Fig. 8 Calculated Max. structural stress and corresponding location

등가 구조응력이란 피로수명 계산에서 고려되어야 하는 판두께 및 하중모드의 효과를 고려한 응력 성분을 의미하며 기존의 피로시험 결과를 식 (3)에 적용하여 단일 S-N 선도, 즉 통합 피로선도를 얻을 수 있다(Dong 2004). Fig. 9는 본 연구에서 고려된 4개의 모델에 대한 피로시험 결과를 등가 구조 응력 성분을 바탕으로 표시한 통합 피로 선도와 비교한 도표이다. 피로시험 결과를 S-N 선도로 나타내면 식 (4)로 유도되었으며 이때의 표준편차는 0.21이었다. 통합구조응력 S-N 선도식은 식 (5)와 같으며 실험결과는 통합피로선도의 ± 2 Standard deviation의 scatter band 이내에 위치함을 확인하였다.

$$\log N_f = 14.86 - 3.70 \log \Delta S_{eq} \quad (4)$$

$$\log N_f = 13.33 - 3.08 \log \Delta S_{eq} \quad (5)$$

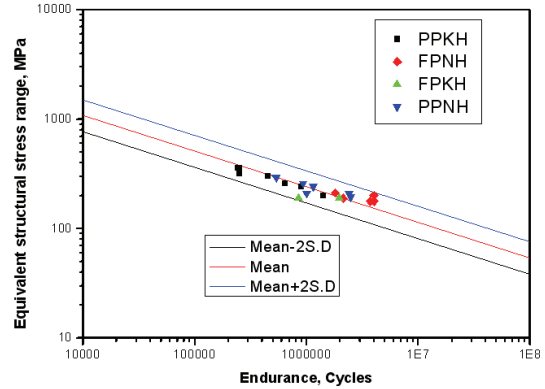


Fig. 9 Master S-N curve with equivalent SS

5. 결론

본 연구에서는 선박에서 주로 적용되는 4가지 종류의 Longi-web 연결부의 피로강도를 평가하기 위하여 일련의 피로시험을 실시하고 최근 제안된 구조응력 기법을 적용하여 피로 수명평가에 대한 추정치와 실험에 의한 피로수명을 비교·검토하였다.

(1) 각 모델에 대하여 shell 요소를 이용한 구조응력 기법으로 계산한 결과 유효요소 망 크기에 상관없이 일정한 값을 나타내었다.

(2) 4개의 모델에 대한 피로시험 결과를 등가 구조 응력 성분을 바탕으로 표시한 통합 피로 선도와 비교한 결과 4가지 모델 모두 통합 피로 선도와 잘 일치하는 경향을 보였다.

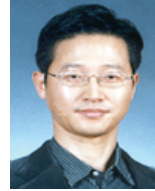
(3) Shell 요소를 이용하여 용접 비드부를 모델링함으로써 추정하기 어려운 불완전용입 용접된 용접 루트부의 응력을 구조응력 기법으로 계산할 수 있다. 따라서 다양한 시편형상과 하중형태를 갖는 추가적인 실험 및 요소크기 및 형상에 따른 구조응력 방법을 이용한 검증이 뒷받침 된다면 보다 정확하고 효율적인 기준응력 산정법으로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 부산대학교 첨단조선공학연구센터와 대우조선해양(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- Battelle, 2004, Battelle Structural stress JIP Final Report, No. N004431-01
- Dong, P., Hong, J. K. and Cao, Z., 2001, "A Mesh Insensitive Stress Procedure for Fatigue Evaluation of Welded Structures," IIW Doc. No. XIII-1902-01/XV-1089-01, International Institute of Welding
- Ha, C.I., Kang, S.W., Kim, M.H., Kim, M.S., Sohn, S.Y. and Heo, J.H., 2006, "A Comparative Study for the Fatigue Assessment of Fillet Weldments Using Structural Stress and Hot Spot Stress," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 4, pp. 476-483.
- 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.



< 김 명 현 >



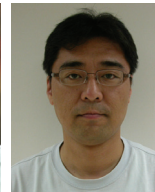
< 강 성 원 >



< 김 정 환 >



< 김 성 민 >



< 김 광 석 >



< 강 중 규 >



< 허 주 호 >