

구조응력 기법을 이용한 Longi-Web 연결부의 피로강도 평가에 관한 기초 연구

A Study for Fatigue Strength Evaluation of Longi-web Connection using Structural Stress Method

김정환*, 강성원*, 김명현*, 김광석**, 강중규**, 허주호**

* 부산대학교 조선해양공학과

** 대우조선해양(주) 구조R&D팀

1. 서 론

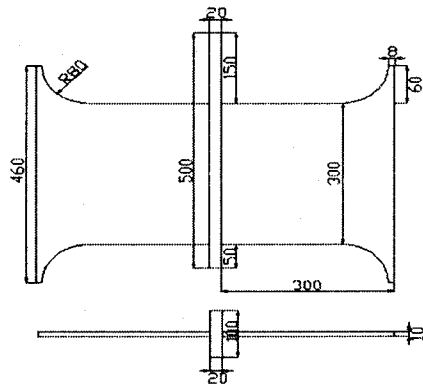
선박을 비롯한 각종 구조물의 피로파괴는 주로 응력이 집중되는 용접연결부에서 발생한다. 이러한 구조물의 피로설계에는 주로 공칭응력(Nominal Stress) 및 핫스팟 응력(Hot Spot Stress, HSS)이 사용되고 있다. 공칭응력을 바탕으로 구조물에 대한 피로설계를 할 경우에는 각 부재에 사용되는 각각의 용접부 형상에 대한 피로시험을 따로 수행하여 S-N곡선을 구해야 하는 번거로움이 있다. 또한, 핫스팟 응력의 경우는 구조물에 있어서 균열이 주로 불연속부나 용접부에서 발생하는 것에 기인하여 응력 집중부(Hot Spot)로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 외삽법(Extrapolation)을 이용하여 구하고 이를 바탕으로 피로수명을 산정하는 방법으로 유한요소해석 시 요소크기에 민감하며 변위의 올바른 전달을 위해 세세한 주의를 기울여야 하는 어려움이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 기본적인 구조역학의 평형조건을 바탕으로 유한요소 해석에 있어 요소크기에 둔감하고 응력계산의 정도를 높이는 구조응력(Structural Stress, SS) 방법이 제안되었다. 이 방법을 이용하여 다양한 형상의 용접부 S-N곡선을 단일 곡선으로 나타낼 수 있다. 이 방법은 유한요소법을 이용하여 현재 다양한 연구가 이루어지고 있으며 수치해석을 통한 그 적용성은 기존 연구에서 증명된 바 있으나, 실제 피로시험에 의한 검증은 부족한 형편이다. 본 연구에서는 응력 집중부를 가지는 Longi-web 연결부에 대하여 실제 피로실험을 실시하고 구조응력 및 핫스팟 응력을 이용하여 예측한 피로 수명과 실험에 의한 피로수명을 비교·검토하고자 한다.

2. 시험 절차

2.1 시험편 형상

본 연구에 사용된 시험편은 선박구조물에 적용되는 Longi-web 연결부로 용입의 정도에 따라 완전용입과 부분용입의 2가지 시험편으로 분류하여 실험을 수행하였다. 시험편의 용접은 현장에서 주로 사용하는 조건으로 실시되었으며 세부적인 조건은 Table. 1에 나타내었다. 시험편 각 부의 치수 Fig. 1과 같다.



(Unit: mm)

Fig. 1 Dimension of test specimen

Table. 1 Welding condition

Electric current	270 ~ 280 A
Voltage	30 ~ 31 V
Speed	30 ~ 50 (cm/min)
The amount of heat input	1.00 ~ 1.74 (KJ/mm)

2.2 유한요소해석

본 연구에 사용된 시험편 형상에 대하여 상용 프로그램을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 4-node shell요소이며 용접부 비드도 포함하여 모델링하였다. 해석에 사용된 경계조건 및 하중방향은 Fig. 6에 나타낸 바와 같다.

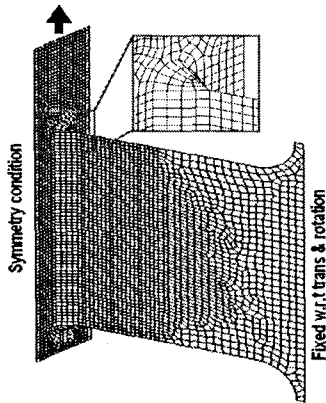


Fig. 3 Finite element model

2.3 피로 시험

피로시험은 정현파를 이용하여 응력비=0 및 주파수=2~3Hz 등의 조건으로 각각의 하중으로 수행하였으며 본 연구에서는 균열이 20mm까지 진전한 cycle을 최종수명으로 보았다. 각각의 시험편에 대한 피로시험 결과는 3장에서 다루었다.

3. 핫스팟 응력 및 구조응력

3.1 핫스팟 응력(Hot Spot Stress, HSS)

핫스팟 응력은 응력 집중부로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 외삽법(extrapolation)을 이용하여 구하고 이를 바탕으로 피로수명을 산정하는 방법이다. 본 연구에서는 Fig. 3의 유한요소 해석 결과를 바탕으로 식(1)과 같이 각 선급에서 사용하고 있는 방식을 적용하여 핫스팟 응력을 계산하였다[3].

$$\sigma_{HSS} = 1.5\sigma_1 - 0.5\sigma_2 \quad (1)$$

일반적으로 0.5t와 1.5t에서 계산된 핫스팟 응력을 바탕으로 용접부의 피로수명을 산정할 경우 FAT90 디자인 선도와 비교할 것이 추천되고 있다. 따라서 본 연구에서는 식(1)에 의해 계산된

핫스팟 응력을 바탕으로 그에 해당되는 피로수명을 FAT90 디자인 선도에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 완전용입된 시험편과 부분용입된 시험편 모두 FAT90 디자인 선도에 비교하였을 때 피로수명이 상대적으로 높게 평가된 것을 관찰할 수 있다.

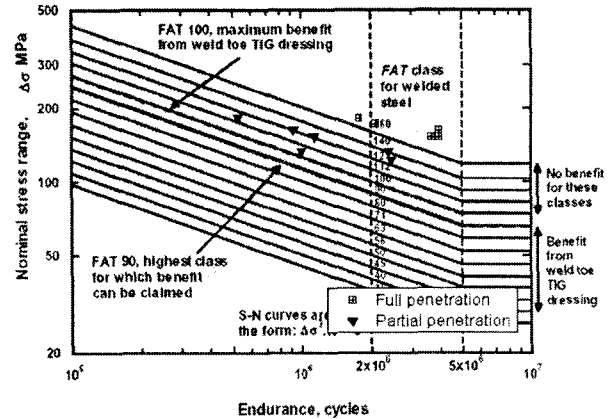


Fig. 4 Comparison of HSS and FAT class

3.2 구조 응력(Structural Stress, SS)

구조응력(Structural stress, σ_s)은 용접 토우부 근처에서 발생하는 응력 구배를 막응력(Membrane stress, σ_m)과 굽힘응력(Bending stress, σ_b)으로 나누어 이들의 합으로 정의할 수 있다. Shell 요소 모델의 경우, Fig. 5에서 보인 바와 같이 유한요소해석을 통해 절점 변위에서 얻을 수 있는 절점력(nodal force)과 절점 모멘트(nodal moment)를 등가일의 원리를 이용하여 식 (1)에 의해 선분포력(line force, f) 및 선분포 모멘트(line moment, m)를 계산한 후 식 (2)를 이용하여 각각 막응력(membrane stress, σ_m)과 굽힘응력(bending stress, σ_b)을 산정하여 구할 수 있다.

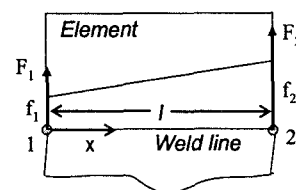


Fig. 5 Local line force from nodal force

$$\{F\} = [L]\{f\} \quad (2)$$

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y}{t} + \frac{6m_x}{t^2} \quad (3)$$

여기서, $\{F\}$ 및 $\{f\}$ 는 절점력 및 선분포력을 각각

의미하며 [L]은 용접선에 대한 형상 함수를, t는 판 두께를 의미한다.

본 연구에 제안된 모델에 대해 앞서 계산된 유한 요소해석을 통한 구조응력 결과를 바탕으로 식 (4)를 이용하여 등가 구조 응력을 구할 수 있다.

$$\Delta S_{eq} = \frac{SCF_{ss} \Delta \sigma_n}{t^{2-m} I(r)^m} \quad (4)$$

여기서 t=부재두께, m=3.6, I(r)=f(Δσb/Δσs) (구조 응력 진폭에 대한 굽힘응력 진폭의 비의 함수), Δσn은 공칭응력진폭, SCF_{ss}는 구조응력에 근거한 응력집중계수이다.

등가 구조응력이란 피로 시험 결과를 통합 피로 선도로 도출하기 위해 용접부 형상, 두께 및 하중조건을 고려한 응력 성분을 의미한다. 피로 시험 결과를 등가 구조 응력 성분으로 계산하여 통합 피로 선도와 비교한 내용을 Fig. 6에 나타내었다. 부분용입 용접 시험편과 완전용입 용접 시험편 두 경우 모두 통합 피로선도와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

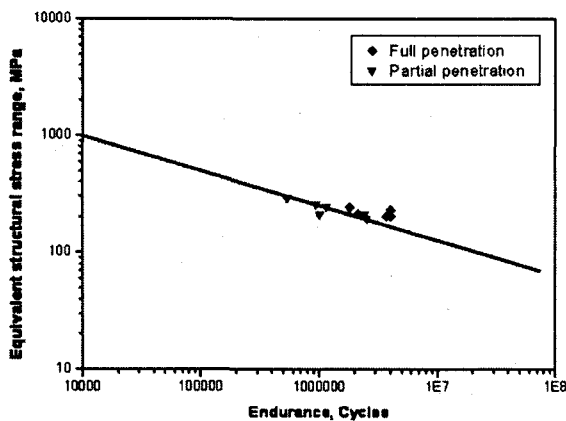


Fig. 6 S-N curve using equivalent structural stress

4. 결 론

본 연구는 선박에서 주로 사용되고 있는 Longi-web 연결부의 피로강도를 평가하기 위해 대표적으로 사용되는 핫스팟 응력 기법과 최근 제안된 요소크기에 둔감한 구조응력 기법을 이용하여 피로강도를 비교·평가하였다.

1) 핫스팟 응력 기법을 사용하는 경우, 부분용입 용접 시험편에서 실제 파괴가 주로 발생하는 용접 루트부에서의 응력 추정치가 불가능하므로 용접 토우부에서 구해진 응력값을 바탕으로 피로강도를 평가하였다. FAT90 디자인 선도에 비교하였을 때 피로수명이 상대적으로 높게 평가되는 경향을 보였다.

2) 구조 응력 기법을 사용할 때, 각 절점에서의 절점력을 이용하기 때문에 비드면에서의 구조응력 추정이 가능하며 용접부의 형상, 두께 및 하중조건을 고려한 등가 구조응력을 이용하여 통합 피로 선도와 비교 한 결과 두 경우의 시험편 모두 통합 피로선도와 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

후 기

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

참고문헌

1. Battelle Structural stress JIP Final Report. No. N004431-01, November 2003.
2. Dong, P. : A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Evaluation of Welded Joints, International Journal of Fatigue, Vol. 23/10, (2001) 865-876
3. Niemi, E. : Recommendations Concerning Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components, Abington Publishing, Cambridge(UK), IIS-IIW-1221-93, (1993)
4. Hyundai Heavy Industry- ASERC Final Report No. 2004-21-01, February 2004.