

용접부 구조응력 측정 및 피로수명 평가에 관한 실험적 연구

Structural Stress and Fatigue Testing of Edge details

김 석훈*, 강 성원*, 김 명현*, 장 용원*, 하 우일**, 박 진수**

* 부산대학교 조선해양공학과

** 현대중공업 선박해양연구소

1. 서 론

현재 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 피로수명 곡선을 구해야 하는 번거로움이 있다. 핫스팟 응력의 경우 구조물의 응력 집중부(Hot Spot)로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 외삽법(Extrapolation)을 이용하여 구하고 이를 바탕으로 피로수명을 산정하는 방법으로 유한요소해석 시 요소크기에 민감한 것으로 알려져 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 기본적인 구조역학의 평형조건을 바탕으로 유한요소 해석에 있어 요소크기에 둔감하고 응력계산의 정도를 높이는 구조응력(Structural Stress, SS)방법이 제안되었다. 이 방법은 유한요소법을 이용한 수치해석을 통해 증명된 바 있으나, 구조응력을 이용하여 피로수명을 구하는 방법에 대한 실제 피로시험에 의한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 응력 집중부를 가지는 일련의 모델에 대하여 실제 피로실험을 실시하여 구조응력 및 핫스팟 응력을 이용하여 피로 수명평가에 대한 추정치와 실험에 의한 피로수명을 비교·검토하였다.

2. 실험 방법

Fig.1과 같이 시편을 준비하여 실험을 수행하였다. 보강판은 FCAW (Flux Cored Arc Welding)로 용접하여 필렛 용접부 다리길이(L_w)가 5mm 정도로 유지되도록 12종류의 시편을 제작하여 각각 두 개의 시편에 대해 실험을 실시하였다. Table 1은 시편의 상세 치수를 나타내었다.

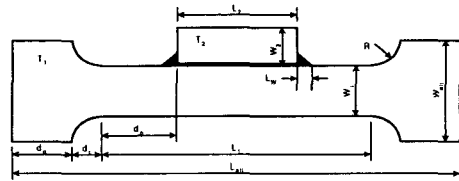


Fig.1 Dimension of test specimen

Table 1 Matrix of the dimension of specimen (Unit: mm)

No.	T ₁	T ₂	L ₁	L ₂	W ₁	W ₂	R	d ₀
1	10	10	350	50	50	25	45°	145
2	10	10	350	100	50	25	45°	120
3	10	10	350	200	50	25	45°	70
4	10	10	350	250	50	25	45°	50
5	10	10	350	50	90	25	45°	145
6	10	10	350	100	90	25	45°	120
7	10	10	350	200	90	25	45°	70
8	10	10	350	250	90	25	45°	50
9	15	10	350	50	50	25	45°	145
10	15	10	350	100	50	25	45°	120
11	15	10	350	200	50	25	45°	70
12	15	10	350	250	50	25	45°	50

또한, Fig.2와 같이 응력집중부인 용접 토우로부터의 응력분포를 구하기 위하여 각 시편 보강판(L₂)부분의 용접 토우로부터 일정거리에 걸쳐서 1축 2mm Strain Gauge를 22개~24개를 부착하여 항복응력(Design yield stress=235MPa)의 20% 및 50%의 인장하중에서 토우로부터의 응력 분포를 각각 측정하였다.

(Unit: mm)

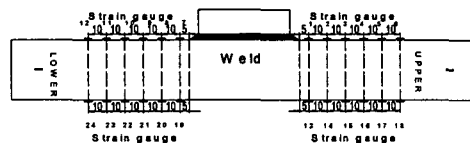


Fig.2 Strain gauge locations

Fig.3에는 보강판 길이가 100mm인 시편에 대해 용접토우부 근처에서의 응력 분포를 나타내었으며, 용접토우부에서 응력집중현상이 관찰되었다. 또

한, 일반적으로 보강판의 폭이 길수록 예상한 바대로 용접토우에서의 응력집중 현상이 커짐이 확인되었다.

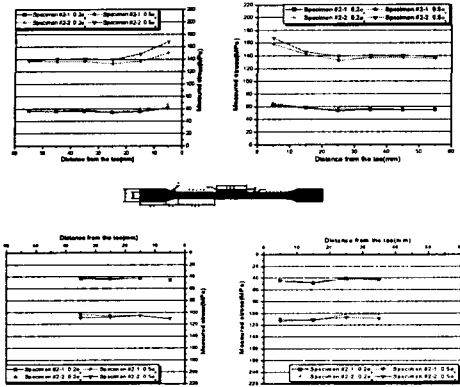


Fig.3 Stress distribution of specimens 2-1 and 2-2

3. 구조응력 및 핫스팟 응력의 비교

3.1 핫스팟 응력(Hot Spot Stress, HSS)

핫스팟 응력은 응력 집중부(Hot Spot)로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 외삽법(Extrapolation)을 이용하여 핫스팟 응력을 구하고 이를 바탕으로 피로수명을 산정하는 방법이다. 본 연구에서는 Niemi의 방법을 적용하여 다음 식(1)을 이용 핫스팟 응력을 구하였다.

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

Fig.4에서는 유한요소해석 및 실제측정치를 통하여 구한 핫스팟 응력을 비교하였다.

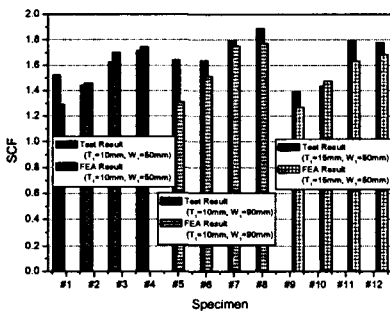


Fig.4 Comparison of HSS obtained from test and FEA
 측정결과 시편의 폭이 크고 시편두께가 작을수록 HSS값이 큰 값을 나타내었다. ($\sigma_{HS}(W1=90mm) > \sigma_{HS}(W1=50mm)$, $\sigma_{HS}(T1=10mm) > \sigma_{HS}(T1=15mm)$)

3.2 구조응력(Structural Stress, SS)

구조응력(Structural Stress, σ_s)은 막응력(Membrane

Stress, σ_m)과 굽힘응력(Bending Stress, σ_b)으로 구성된다. Fig.5와 같은 필렛 용접 토우부에서의 응력분포는 용접 토우부 끝단에서 최대이며 두께방향으로 단순 감소하는 분포를 보인다.

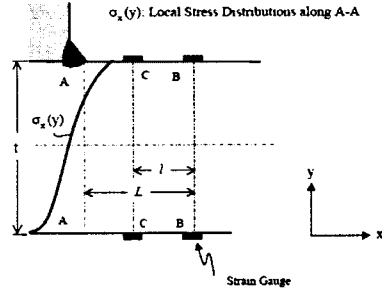


Fig.5 Illustration of structural stress measurement

용접 토우부끝단(A-A)의 구조응력은 strain gauge가 부착된 단면(B-B, C-C)의 측정값을 이용하여 다음 식(2)에 의해 계산된다.

$$\sigma_b = \sigma_b^B + \frac{L}{l}(\sigma_b^C - \sigma_b^B) \quad (2)$$

$$\sigma_s = \sigma_{t_o}^B + \frac{L}{l}(\sigma_b^C - \sigma_b^B)$$

Fig.6에서는 각 시편별 부착된 strain gauge를 이용하여 구한 구조응력을 나타내었다.

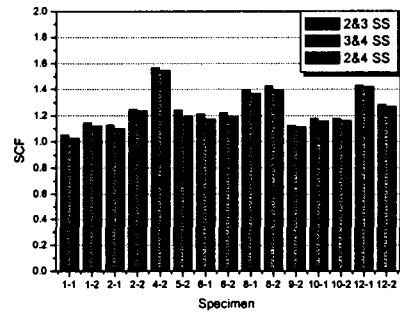


Fig.6 Structural stress of each specimen from measurements

또한, Fig.7에서는 응력해석을 통하여 유한요소 크기 및 용접토우로부터의 응력측정단면의 거리(δ)를 변화시켜 구한 구조응력을 비교하였다.

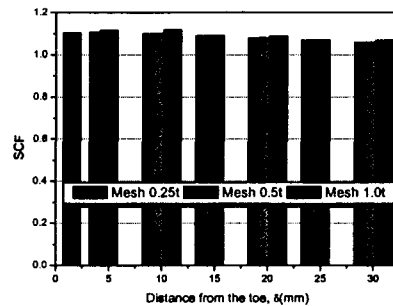


Fig.7 SCF with respect to distance and mesh size from the weld toe
 Fig.7에서 보인바와 같이 구조응력은 용접토우로부터

의 거리(δ) 및 요소크기에 크게 영향을 받지 않으며 용접도로부터 일정거리 떨어진 부분의 응력값을 통해서 응력집중부의 응력을 추정할 수 있음이 유한요소해석 및 실제 피로실험을 통해 확인되었다. 또한 보강판의 길이가 길어질수록 응력집중이 커짐을 알 수 있었다. Fig.8에 보인바와 같이 일반적으로 구조응력은 핫스팟 응력보다 낮은 값을 보였으며, 비교적 일정하였다.

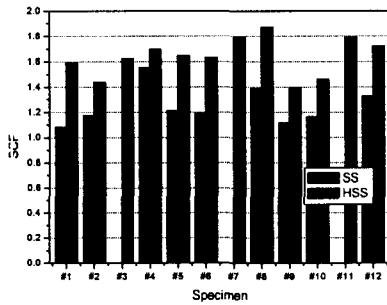


Fig.8 Comparison of structure stress and hot spot stress

4. 피로시험

피로실험은 정현파를 이용하여 주로 응력진폭=120MPa (단, Specimen1-1=100MPa, Specimen9-1=110MPa), 응력비=0.4 및 주파수=3Hz 등의 조건으로 피로실험을 수행하여 각 시편별 구조응력 및 최종파단수명을 바탕으로 S-N 선도를 작성하였다. Fig.9에서는 공칭응력을 이용한 S-N 선도를 나타내었다.

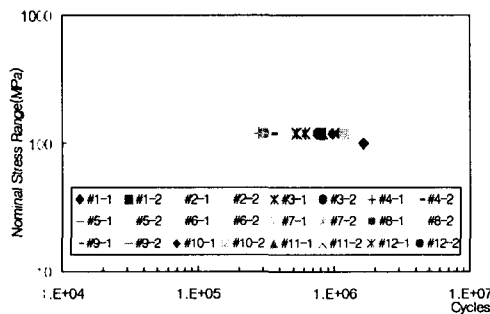


Fig.9 S-N curve using nominal stress vs. life

Fig.10과 Fig.11에서와 같이 구조응력을 이용한 S-N 선도는 통합피로선도와 일치함을 알 수 있었다.

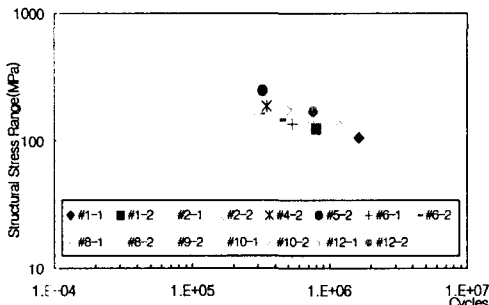


Fig.10 S-N curve using structural stress vs. life

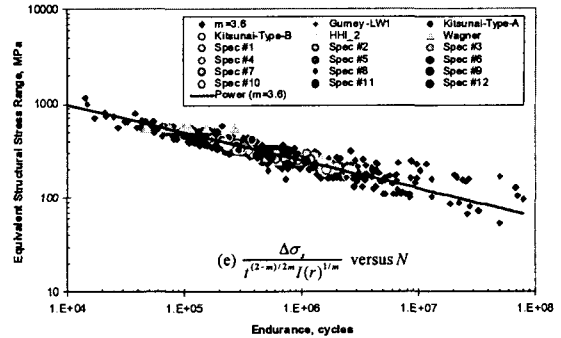


Fig.11 Correlation of all edge details with other small details using the equivalent structural stress range parameter

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 최근에 제안되고 있는 구조응력에 의한 피로설계의 방법을 실험을 통해 검증하였으며 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 보강판의 길이가 길어지고, 판 폭이 넓어짐에 따라 응력집중증가에 의해 피로수명이 단축되는 결과를 보였다.
- 2) 구조응력에 의한 피로설계방법의 실험적 검증을 통하여 유한요소해석 결과와 비교·분석한 결과 일치하였다.
- 3) 구조응력은 요소크기 및 거리에 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타내었다.
- 4) 핫스팟 응력은 유한요소망(Mesh)크기에 따라 차이를 보이며, 구조응력보다 비교적 큰 값을 보였다.
- 5) 구조응력을 이용한 피로수명선도 작성 시 비교적 좁은밴드를 형성하였으며 통합피로선도와 일치하였다.

참고문헌

1. 김종성, 진태은, 홍정균, Dong, P. : 용접구조물의 피로설계를 위한 유한요소 해석 및 통합 피로선도 초안 개발, 대한기계학회논문집 A권, 제27권 제5호, (2003) 724-733
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. Battelle Structural stress JIP Final Report. No. N004431-01, November 2003.
5. Hyundai Heavy Industry- ASERC Final Report No. 2004-21-01, February 2004.