

보강재를 가지는 용접부의 구조응력 측정 및 해석 Measurement and Analysis of Structure Stress for Gusset Weldments

박 상식*, 강 성원*, 김 명현*, 김 도형*, 장 용원*

* 부산대학교 조선해양공학과

1. 서 론

일반적으로 용접구조물의 피로설계는 공칭응력(nominal stress)과 핫스팟 응력(hot-spot stress, HSS)을 바탕으로 S-N선도를 기준으로 피로수명을 산정하고 있다. 하지만, 선박이나 해양구조물과 같이 복잡한 용접구조물의 경우에는 사실상 공칭응력의 추정이 어려울 뿐만 아니라, 유한요소 해석시 핫스팟 응력은 요소크기(mesh size)에 민감하게 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

최근에는 이러한 문제에 대해서 응력계산의 효율성을 높이고 유한요소 해석시 요소크기에 둔감한 구조응력(structural stress, SS)방법이 제안되었다. 이 방법은 구조역학의 평형조건을 바탕으로 용접부에서 일정거리 떨어진 부분에서 응력을 구한 뒤, 이를 이용하여 용접부 선단에서의 응력을 추정하는 것이다. 본 연구에서는 응력 집중부를 가지는 두 가지 피로시험편에 대하여 핫스팟 응력과 구조응력을 실험결과에 의한 수치를 비교하고, 또한 유한요소법을 이용하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 시험에 의한 응력 측정

시험편은 두 가지 형태로서 Fig. 1, 2에서 나타난 바와 같이 거셋(gusset)을 FCAW(flux cored arc welding)로 필렛 용접 하였으며 다리길이(leg length)는 5mm가 되도록 제작하였다. 그리고 응력집중이 예상되는 용접 토우(toe)로부터 5mm, 15mm 되는 위, 아래 부위에 일축 방향의 2mm 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하여 1000kgf~3000kgf 하중으로 $\Delta 500$ kgf의 간격으로 인장시험을 통해 변형률을 측정하였다.

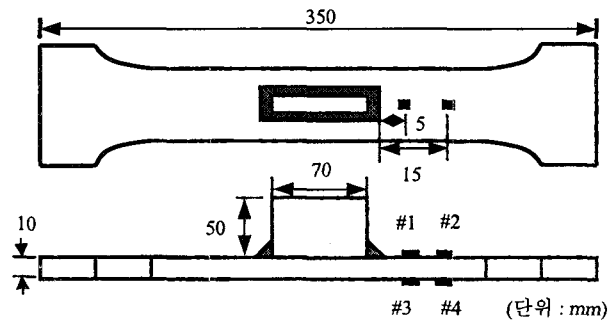


Fig. 1 Strain gauge locations of specimen "A"

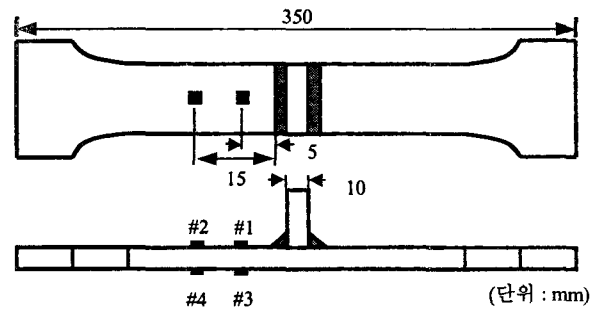


Fig. 2 Strain gauge locations of specimen "B"

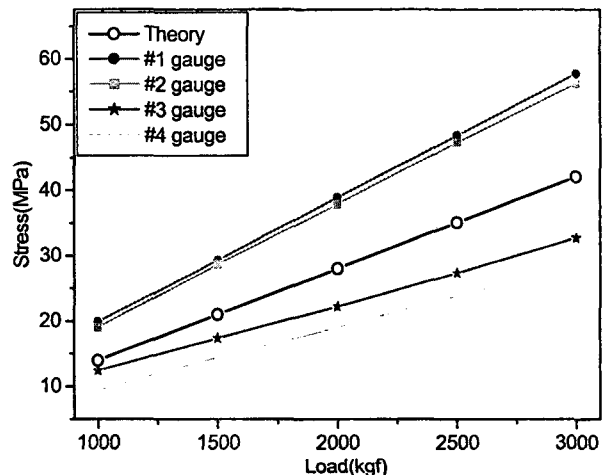


Fig. 3 Stress distribution of specimen "A"

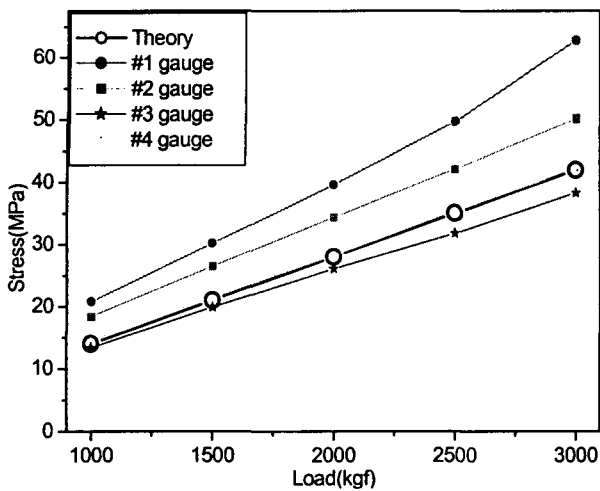


Fig. 4 Stress distribution of specimen "B"

하중 변화에 따른 위치별 응력분포를 Fig. 3, 4에서 나타내고 있다. 시험편 A에서는 거셋의 토우부로부터 5mm 부위에서 가장 높은 응력을 보였으며, 반대 면은 굽힘(bending)으로 인해 거셋이 부착된 부위와는 다르게 토우부로부터 15mm가 5mm 부위보다 응력이 높음을 알 수 있었다. 시험편 B의 경우는 거셋의 5mm, 15mm 부위에서 응력이 거의 비슷하였으며 반대 면의 응력은 공칭응력보다 낮음을 알 수 있었다.

2.2 핫스팟 응력과 구조응력의 비교

핫스팟 응력(σ_{HSS})은 응력 집중부로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 선형 외삽 하였으며, 본 실험에서는 DNV 선급에서 제시하고 있는 방법을 적용하여, 다음의 식 (1)로 핫스팟 응력을 산출하였다.

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

여기서, $\sigma_1 = 0.5$ [에서의 응력 및 $\sigma_2 = 1.5$ [에서의 응력을 나타낸다.

구조응력(σ_{SS})은 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 응력분포가 용접 토우부 끝단에서 최대이며 두께 방향으로 단순 분포하는 경향을 보일 것이며, 이를 막응력(membrane stress) 성분과 굽힘응력(bending stress) 성분으로 구분할 수 있다. 이때, 용접 토우부 끝단(A-A)의 구조응력은 스트레인 게이지가 부착된 단면(B-B, C-C)의 측정값

을 이용하여 막응력과 굽힘응력을 식 (2), (3)에서와 같이 구하여 이들의 합으로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_0^A = \sigma_0^B + \frac{L}{l} (\sigma_0^C - \sigma_0^B) \quad (2)$$

$$\sigma_0^A = \sigma_0^B + \frac{L}{l} (\sigma_0^C - \sigma_0^B) \quad (3)$$

$$\sigma_{SS}^A = \sigma_0^A + \sigma_0^B \quad (4)$$

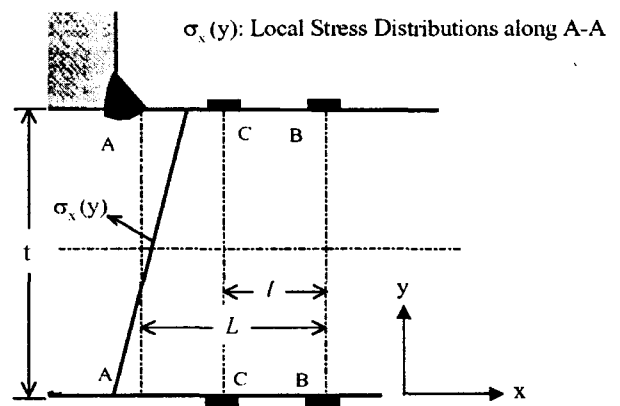


Fig. 5 SS cal. using experimental measurement

유한요소해석을 통한 구조응력 계산은 상용프로그램인 Ansys를 이용하였으며, solid element로 분할하고 요소크기를 달리하여 모델링 하였다. 구조응력은 Fig. 6에서 나타내는 바와 같이 이상화하여 식 (5), (6)과 같이 나타내어 계산할 수 있다.

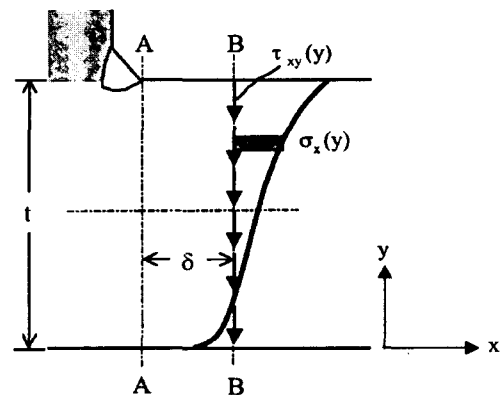


Fig. 6 SS calculation using FE method

$$\sigma_0 = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_0(\eta) d\eta \quad (5)$$

$$\sigma_0 \frac{I^2}{2} + \sigma_0 \frac{I^2}{6} = \int_0^0 \sigma_0(\theta) d\theta + \delta \int_0^0 \tau_{\theta\theta}(\theta) d\theta \quad (6)$$

시험편 A에 대한 응력측정 결과로부터 구한 용접 토우부 끝단에서의 핫스팟 응력과 구조응력 값을 유한요소 해석 결과값과 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 또한, 구조응력을 핫스팟 응력과 비교하여 요소의 크기에 별로 영향을 받지 않고 일정한 거리에서 떨어진 부분을 응력값을 통해서 응력집중부의 응력을 쉽게 유추할 수 있음을 Fig. 8을 통해서 알 수 있다.

이러한 결과로 볼 때, 구조응력은 주어진 용접 구조물에 대해서 고유 응력 매개변수로 사용될 수 있을 거라 사료된다.

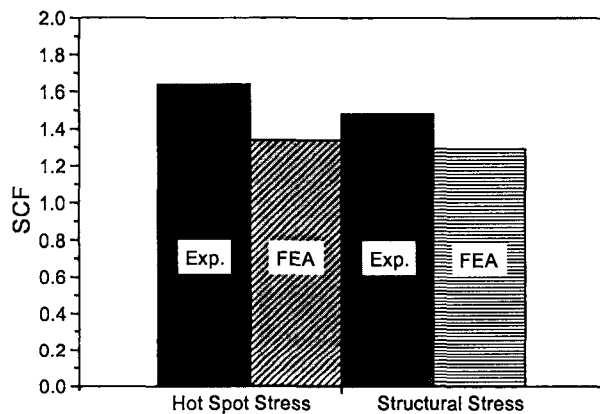


Fig. 7 Comparison of HSS and SS(Exp./FEA)

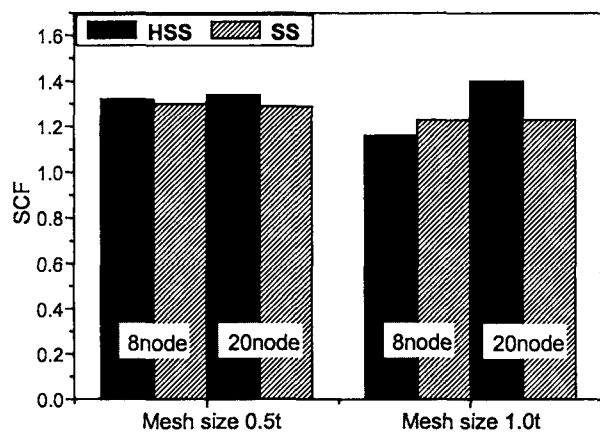


Fig. 8 Comparison of HSS and SS(mesh size)

3. 결 론

본 연구에서는 용접부의 응력집중부를 최근에 제안되어진 구조응력에 의해서 추정하는 방법을 시험편과 유한요소 해석을 수행하여 비교하여 보았다. 피로설계에 많이 사용되어지는 핫스팟 응력은 실제 실험 결과값과 유한요소해석 결과값이 다소 차이가 있었으며, 요소크기에 의한 차이도 확인을 할 수 있었다. 또한, 구조응력은 요소크기에 민감한 핫스팟 응력보다는 효율적인 방법이라는 하나 다양한 용접 구조물의 형상 및 하중모드에 대해서는 아직 충분한 검토가 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김종성, 진태은, 홍정균, Dong, P., 2003, "용접구조물의 피로설계를 위한 유한요소 해석 및 통합 피로선도 초안 개발", 대한기계학회논문집 A권, 제27권 제5호, pp. 724-733.
2. 김석훈, 강성원, 김명현, 장용원, 하우일, 박진수, 2004, "구조응력 및 핫스팟 응력을 이용한 용접구조물 피로수명 평가에 관한 연구", 선박해양 구조연구회 연구발표 논문집, pp. 59-72.
3. Niemi, E., 1999, "Structural Hot-Spot Stress Approachs to Fatigue Analysis of Welded Components-Designer's Guide", III Doc. XIII-1817-00, XV-1090-01, XIII-WG3-06-99.
4. Dong, P., Hong, J.K., Cao, Z., 2001, "A Mesh-Insensitive Structural Stress Procedure for Fatigue Evaluation of Welded Structures", IIW Doc. No. XII-1902-01/XV-1089-01, International Institute of Welding.
5. Dong, P., 2001, "A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Evaluation of Welded Joints", International Journal of Fatigue, Vol. 23/10, pp. 865-876.
6. Dong, P., 2003, Battelle Structural Stress JIP Final Report, No. N004431-01.
7. Dong, P., 2003, "Analysis of Hot Spot Stress and Alternative Structural Stress Methods", Proceeding of OMAE2003-37315, pp. 1-12