

수치해석을 통한 용접구조물의 구조응력 추정에 관한 연구

강성원*, 김명현^{†*}

부산대학교 조선해양공학과*

On the Numerical Procedure for Estimating Structural Stress of Welded Structures

Sung Won Kang* and Myung-Hyun Kim^{†*}

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University*

Abstract

A numerical procedure is proposed as a mesh-size insensitive structural stress definition that gives a stress state at a weld toe with relatively large mesh size. The structural stress values obtained using different finite element types, i.e. shell element and solid element, are examined for typical weld structures. The calculation procedures are performed using the balanced nodal forces and moments obtained from finite element solutions. A consistent formulation based on work equivalent argument has been implemented to transform the balanced nodal forces and moments from shell to line force and line moments at each nodal position. The mesh-insensitivity, the effect of distance δ (where the stress is calculated) and the potential limitations of the structural stress method are examined for various types of weldments. Based on the results from this study, it is expected to develop a more precise stress estimation technique for fatigue strength assessment of welded structures.

※Keywords: Fatigue design(피로설계), Finite element analysis(유한요소해석), Structural stress(구조응력), Hot spot stress(핫스팟 응력), S-N curve(피로수명선도)

1. 서론

일반적으로 용접구조물의 피로파괴는 주로 응력이 집중되는 용접부에서 발생되나 이러한 용접연결부에서는 고유응력의 특이성으로 인해 기존의 유한요소 해석 절차로는 정확한 응력을 추정할 수

접수일: 2005년 1월 11일, 승인일: 2005년 3월 22일

† 주저자, E-mail: kimm@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2486

없는 것으로 알려져 있다(Barsom and Vecchio 1997). 그 대신에 주로 국제용접기구(IIW) 및 각국의 선급에서 규정하고 있는 용접토우부로부터 일정거리 떨어져 있는 부분의 응력을 외삽하여 구하는 핫스팟 응력(hot spot stress, HSS)이 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 핫스팟 응력의 경우 유한요소 해석 시 요소 망(mesh) 크기 및 규정하고 있는 추정 방법에 따라 그 값이 많은 차이를 보인다(강성원 등 1996, 전유철 등 2001). 한편 최근 유한요소 해석에 있어 요소크기에 민감하지 않고 상대적으로 요소 크기가 크면서도 일관성 있게 응력을 추정할 수 있는 구조응력(structural stress, SS) 방법이 제안되었다(Dong 2001). 이 방법은 기본적인 역학적 평형조건을 바탕으로 용접부에서 일정 거리가 떨어진 부분에서의 응력을 구한 후 이를 이용하여 용접부 선단에서의 응력을 추정하는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 구조응력의 정의 및 수치 해석을 이용한 추정방법을 소개하고 응력 집중부를 가지는 일련의 모델에 대하여 기존의 핫스팟 응력 및 구조응력을 비교함으로써 용접구조물의 피로수명평가에 있어서 보다 정도 높은 피로수명을 예측하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 구조응력(structural stress, SS)과 핫스팟 응력(hot spot stress, HSS)

2.1 구조응력의 정의

일반적인 T형 필릿 용접부의 응력분포는 Fig. 1에서와 같이 용접토우부 끝단에서 최대이고 두께 방향으로 단순 감소하는 분포를 보인다. 그러나 이러한 용접토우부에서는 기하학적 불연속성 및 잔류응력 등의 용접 고유의 특성으로 인해 유한요소 해석 시 요소형상 및 분포에 민감하게 반응하기 때문에 정확한 응력을 추정하는 데 많은 어려움이 있다(강성원 등 2001). 따라서 보다 일관성 있는 응력 추정을 위해 용접 토우부에서의 응력 분포를 Fig. 2와 같이 막응력(membrane stress, σ_m)과 굽힘응력(bending stress, σ_b)으로 구성된 구조응력으로 나타낼 수 있으며 일정거리 떨어진 부분에서의 응력을 통해 역학적 평형조건을 바탕

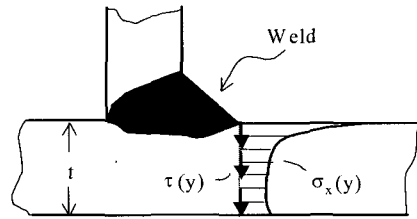


Fig. 1 Local stresses distribution at weld toe

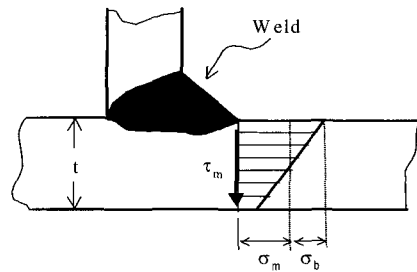


Fig. 2 Through-thickness structural stress definition

으로 보다 정도 높은 응력을 추정할 수 있다.

2.2 Solid 요소를 이용한 구조응력의 추정

Fig. 3은 T형 필릿 용접토우부에서의 구조응력의 정적 평형 분포를 나타낸 것으로 식 (1)과 같이 용접토우부 A-A단면의 구조응력은 막응력과 굽힘응력의 합으로 구성된다.

$$\sigma_s^{A-A} = \sigma_m^{A-A} + \sigma_b^{A-A} \quad (1)$$

또한 Fig. 4에서와 같이 A-A단면에서 거리 δ 만큼 떨어진 B-B단면에서의 수평응력성분(σ_x)과 전

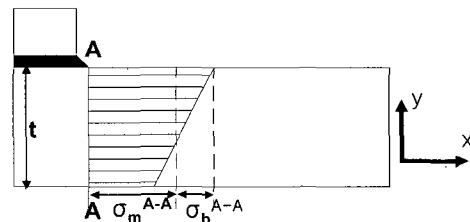


Fig. 3 Structural stress definition at weld toe

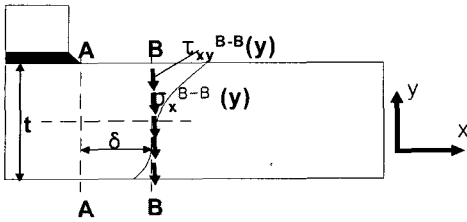


Fig. 4 Structural stresses calculation procedure

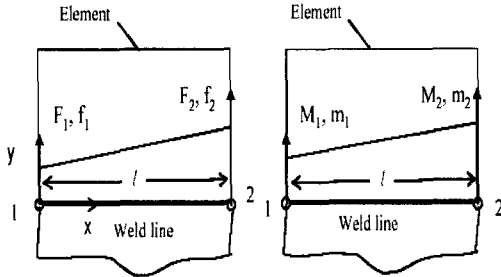


Fig. 5 Local line force and moment calculation from nodal force and moments

단응력성분(τ_{xy})은 유한요소 해석을 통해 직접 계산할 수 있다. 이를 이용하여 식 (2)와 (3)을 통해 A-A단면과 B-B단면 사이의 역학적 평형조건을 바탕으로 A-A단면의 막응력과 굽힘응력을 계산하여 구할 수 있다. 여기서 식 (2)는 x방향으로 힘의 평형을 의미하며 식 (3)은 모우멘트(moment)의 평형을 의미한다.

$$\sigma_m^{A-A} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_x^{B-B}(y) \cdot dy \quad (2)$$

$$\sigma_m^{A-A} \cdot \frac{t^2}{2} + \sigma_b^{A-A} \cdot \frac{t^2}{6} \quad (3)$$

$$= \int_0^t \sigma_x^{B-B}(y) \cdot y \cdot dy + \delta \int_0^t \tau_{xy}^{B-B}(y) \cdot dy$$

2.3 Shell/Plate 요소를 이용한 구조응력의 추정

Shell/Plate 요소를 통하여 구조응력을 계산할 경우에는 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 응력집중 부의 요소에서 각 절점에서 계산된 힘과 모우멘트

를 통해 추정할 수 있다.

요소 내에서 각 절점의 힘과 모우멘트는 평형을 이루고 있으며 이는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 또한, 식 (5)와 같이 요소 크기(l)에 따른 형상 함수 $N_i(x)$ 를 이용하여 line force를 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며 식 (7)에서는 각 절점에서의 line force 값을 나타낸 것이다. 여기서, $N_1(x)$ 는 요소 내 1절점에서의 형상함수이고 $N_2(x)$ 는 2절점에서의 형상함수이다.

$$\Sigma F_{yi} + \int_0^l f_y(x) dx = 0 \quad (4)$$

$$\Sigma F_{yi} x_i + \int_0^l f_y(x) \cdot x dx = 0$$

$$N_1(x) = \frac{l-x}{l}, N_2(x) = \frac{x}{l} \quad (5)$$

$$f_y(x) = \sum_{i=1}^2 f_{yi} N_i(x) \quad (6)$$

$$f_{y1} = \frac{2}{l} (2F_{y1} - F_{y2}) \quad (7)$$

$$f_{y2} = \frac{2}{l} (2F_{y2} - F_{y1})$$

모우멘트의 경우에도 같은 형상함수를 이용하여 각 절점에서의 line moment를 구할 수 있으며 식 (8)에서 각 절점에서의 line moment를 나타내었다.

$$m_{x1} = \frac{2}{l} (2M_{x1} - M_{x2}) \quad (8)$$

$$m_{x2} = \frac{2}{l} (2M_{x2} - M_{x1})$$

이를 바탕으로 역학적 평형조건에 의해 식 (9)와 같이 각 절점에서의 구조응력을 계산할 수 있다(Dong 2003).

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y}{t} + \frac{6m_x}{t^2} \quad (9)$$

2.4 핫스팟 응력의 추정

핫스팟 응력을 바탕으로 한 피로해석 기법은 응력 집중부로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 외삽하여 구한 응력을 바탕으로 용접구조물의 피로수명을 산정하는 방법으로 피로해석을 수행할 때 통상적으로 이용되고 있다. 일반적으로 외삽하여 구하는 핫스팟 응력은 i) 부재두께(t)의 0.4t 및 1t에 해당하는 위치에서의 응력을 외삽한 값 ii) 부재두께(t)의 0.5t 및 1.5t에서의 응력을 외삽한 값 iii) 부재두께(t)의 0.5t에서의 응력값을 이용하여 계산하는 방법들이 제안되어 있다(Niemi 1999).

2.5 Lap Joint 해석을 통한 구조응력과 핫스팟 응력의 비교

앞서 제시한 구조응력의 추정방법을 이용하여 Fig. 6과 같은 겹침 이음부 모델에 대하여 상용유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 요소 종류는 shell 4node, 8node 및 solid 20node를 각각 사용하여 요소 크기를 각각 0.5t/0.5t, 1.0t/1.0t(shell), 0.4t/0.5t, 0.4t/1.0t(solid)로 하여 유한요소 해석을 실시하였다. 이러한 해석 결과를 바탕으로 앞서 2.3절에서 기술한 방법을 따라 계산된 핫스팟 응력과 구조응력을 Fig. 7에 나타내었다. 핫스팟 응력값은 요소 종류 및 크기에 따라 차이를 보이는 반면 구조응력은 상대적으로 요소의 종류 및 크기에 둔감한 반응을 나타내었다.

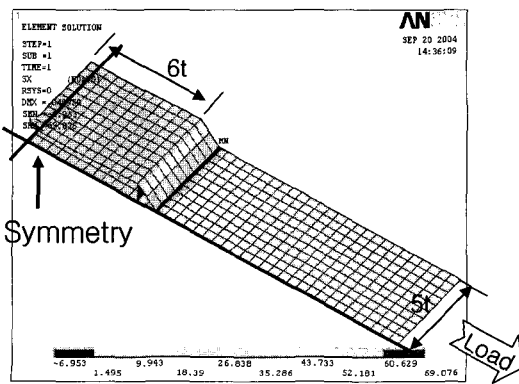


Fig. 6 Stress distribution obtained from FEA

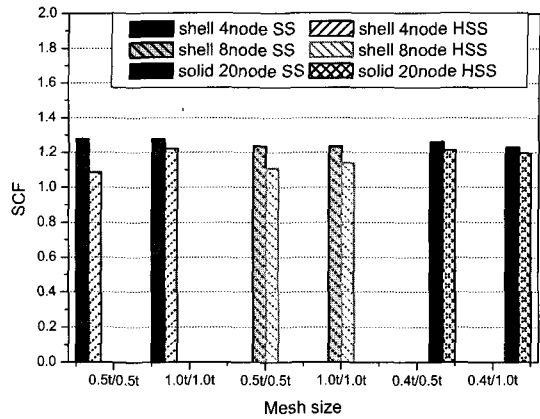


Fig. 7 Comparisons of the hot spot stress and structural stress

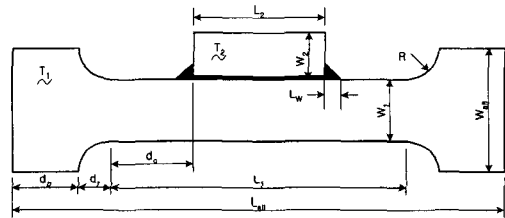


Fig. 8 Dimension of specimen

3. 구조응력과 핫스팟 응력의 비교를 통한 용접 구조물의 피로수명 평가

3.1 시험편 형상

Fig. 8과 같은 형상의 시험편에 대해 유한요소 해석 및 실제 피로시험을 수행하였다. 시험편 치수는 $L_{all}=600mm$, $W_{th}=100mm$, $d_0=85mm$, $d_1=40mm$ 로 일정하며, 보강판(L_2)의 길이를 Table 1에 표시한 바와 같이 변화시켜 제작하였다. 보강판은 FCAW(Flux Cord Arc Welding)로 필릿 용접부 다리길이(L_w)가 5mm정도로 용접하여 부착하였다. Table 1은 시험편의 상세 치수를 나타내었다.

3.2 핫스팟 응력과 구조응력의 비교

각각의 시험편에 대하여 solid 20 node 요소를 사용하여 요소 망 크기를 각각 0.125t/0.125t, 0.25t/0.25t, 0.5t/0.5t, 1.0t/1.0t로 변화시켜 가며 앞서 제시한 핫스팟 응력과 구조응력 방법에 따라

Table 1 Matrix of specimens size (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	145	145
6	10	10	350	100	90	25	145	120
7	10	10	350	200	90	25	145	70
8	10	10	350	250	90	25	145	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

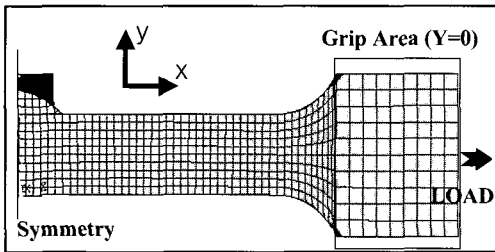


Fig. 9 Finite element model

계산하였다. Fig. 9는 해석에 사용된 유한요소 모델의 한 예를 보이고 있다.

그 중 시험편 No.1에 대한 용접도우부로부터의 응력 분포를 다양한 크기의 유한요소를 이용하여 구한 것을 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 일반적으로 잘 알려진 바와 같이 용접도우부에 근접한 부분에서의 응력 계산값이 커지는 한편, 특히 요소 크기가 작을수록 같은 지점에서 보다 큰 응력 값이 구해짐을 알 수 있다. 한편 계산된 응력을 바탕으로 앞서 제시한 각각의 핫스팟 응력 추정 방법에 따라 구한 응력을 Fig. 11에 비교하여 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이 핫스팟 응력의 경우 요소 크기 및 추정 방법에 따라 응력값이 민감하게 차이를 보임을 알 수 있다.

한편 이에 반해 구조응력의 경우 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 유한요소 망의 크기 및 용접 도우부 응력을 구하기 위한 단면까지의 거리(δ)를 다르게 하더라도 크게 영향을 받지 않고 일정한 값

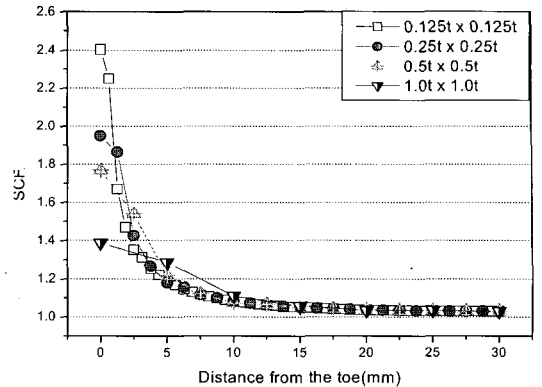


Fig. 10 Computed stress in the vicinity of the weld toe

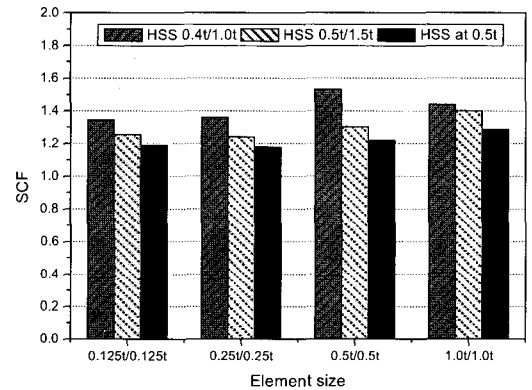


Fig. 11 Comparison of HSS obtained from each method and mesh size(specimen 1)

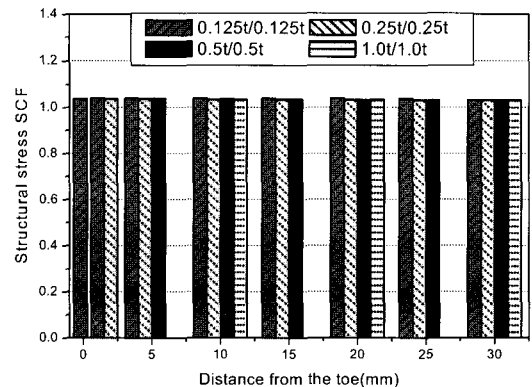


Fig. 12 Stress Concentration Factors for various mesh size and distance(δ)

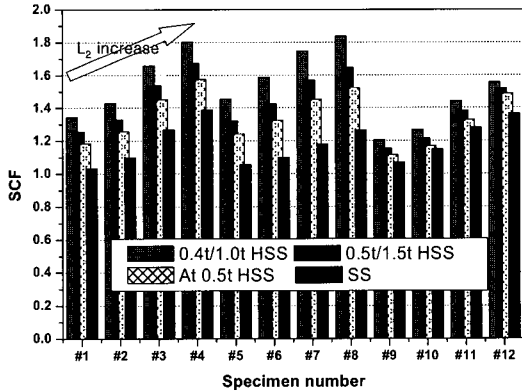


Fig. 13 Comparison of hot spot stress and structural stress for specimen 1~12

을 나타냈으며, 이를 통하여 용접토우로부터 일정 거리 떨어진 부분에서 계산된 응력값을 바탕으로 구조응력을 보다 일관성 있게 추정할 수 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 고려하고 있는 일련의 시험편에 대하여 구한 구조응력과 핫스팟 응력을 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 보강판(L₂)의 길이가 길어질수록 응력집중 증가에 의해 구조응력 및 핫스팟 응력값이 커지며, 시험편의 폭 및 두께에 따라 같은 응력조건에서도 다양한 응력집중 효과를 구현할 수 있었다.

4. 피로수명곡선(S-N curve) 작성을 통한 용접구조물의 피로수명 평가

피로수명을 얻기 위하여 앞서 Table 1에 나타난 일련의 시험편에 대하여 각각 2개씩 총 24개의 시험편에 대한 피로시험을 실시하였다(김석훈 등 2004). 피로시험은 정현파를 이용하여 응력진폭 = 120MPa, 응력비 = 0.4 및 주파수 = 3Hz 등의 조건으로 피로시험을 수행하였다(단, Specimen 1-1=100MPa, 9-1=110MPa). 이를 바탕으로 Fig. 14에서는 공칭응력을 바탕으로 총 24개의 시험편에 대한 피로수명 곡선을 나타내었다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 동일한 응력범위에서의 피로시험 조건 하에서도 보강판의 길이, 주판의 두께 및 폭의 변화에 의한 응력집중의 차이에

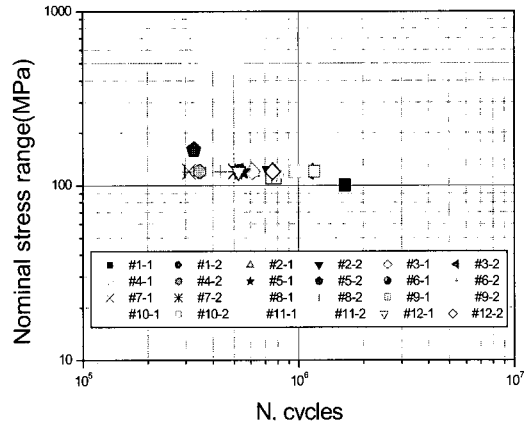


Fig. 14 Nominal stress vs. fatigue life

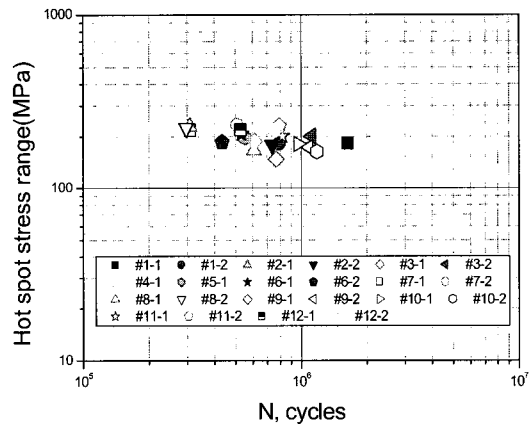


Fig. 15 Hot spot stress vs. fatigue life

의해 피로수명이 각각 다른 것을 알 수 있다.

한편 이러한 공칭응력을 바탕으로 각 시험편에 대하여 앞서 계산된 응력집중계수를 곱하여 핫스팟 응력과 구조응력을 구하고, 이를 바탕으로 한 피로수명 곡선을 Fig. 15 및 Fig. 16에 각각 나타내었다. Fig. 15에서 보인 바와 같이 핫스팟 응력을 바탕으로 구한 피로수명 곡선의 경우 응력집중에 따른 피로수명 차이를 구별하는데 있어 큰 효과를 보이지 못하는 반면, 구조응력을 바탕으로 한 경우 Fig. 16에 보인 바와 같이 상대적으로 핫스팟 응력을 이용한 S-N 곡선(Fig. 15)보다 시험편 형상에 따른, 즉 보강판의 길이 변화에 따른 응력집중 효과를 보다 명확하게 나타낼 수 있었

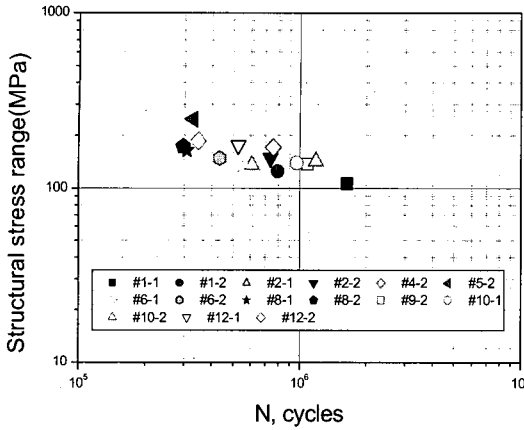


Fig. 16 Structural stress vs. fatigue life

다.

또한 구조응력을 바탕으로 한 피로수명 곡선 (Fig. 16)의 경우 핫스팟 응력을 바탕으로 한 피로수명 곡선(Fig. 15)에 비교하여 보다 좁은 폭의 밴드를 형성하여 일관성 있게 시험편 치수에 따른 피로수명의 차이를 고려하여 나타냈다. 이는 용접부 형상에 따라 분류하여 피로수명을 정의하는 방법 또는 인장·굽힘 등의 하중모드 변화에 따른 용접구조물의 피로수명의 변화를 단일 통합피로수명 곡선만으로 보다 정도 높게 추정할 수 있는 가능성을 보여주는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소 해석을 수행하여 핫스팟 응력 및 구조응력을 구하는 절차를 기술하고, 이를 일련의 용접시험편에 대하여 실제 수행한 피로시험 결과와의 비교를 통하여 보다 정도 높은 용접부 피로설계방법을 도출할 수 있는 방법으로서의 가능성을 조사하였다.

1) 핫스팟 응력의 경우 유한요소 해석 시 유한요소 크기 및 추정방법에 따라 민감한 변화를 나타낸 반면 구조응력의 경우 요소 크기 및 구조응력을 추정하기 위한 용접 토우부로부터의 거리(δ)에 관계없이 일정한 값을 나타내었다.

2) 구조응력을 이용한 피로수명선도를 작성한 경우 핫스팟 응력을 적용한 경우에 비하여 보강판

의 길이변화에 따른 응력집중효과를 보다 명확하게 나타낼 수 있었으며 핫스팟 응력을 이용한 피로선도 보다 좁은 폭의 밴드를 형성하여 일관성 있게 시험편 치수에 따른 피로수명의 차이를 고려하여 나타냈다..

3) 추정된 구조응력을 이용한 통합피로선도를 바탕으로 구조물의 두께, 용접부 형상 및 하중조건 등에 무관한 구조응력해석 방법을 통해 보다 일관성 있고 정도 높은 피로수명을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구의 일부는 한국과학재단의 첨단조선공학 연구센터 및 현대중공업 선박해양연구소의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 강성원, 하우일, 신종석, 제정신, 1996, "필릿용접 이용부의 응력집중계수에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 33권, 제 3호, pp. 1-7.
- 강성원, 김영욱, 김화수, 김도현, 2001, "Padding plate 용접구조의 인장 정하중 이력에 의한 용접잔류응력 변화 및 피로강도에의 영향," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 4호, pp. 75-82.
- 김석훈, 강성원, 김명현, 장용원, 하우일, 박진수, 2004, "구조응력 및 핫스팟 응력을 이용한 용접구조물 피로수명 평가에 관한 연구," 선박해양 구조연구회 연구발표 논문집, pp. 59-72.
- 전유철, 김유일, 강중규, 한중만, 2001, "피로시험 및 균열진전 해석을 통한 용접부의 피로수명 예측에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 3호, pp. 93-106.
- Barsom, J.M. and Vecchio, R.S., 1997, "Fatigue of Welded Structures," WRC Bulletin 376.
- 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.
- Dong, P., 2003, Battelle Structural stress JIP

Final Report, No. N004431-01.

- Niemi, E., 1999, "Structural Hot-Spot Stress Approachs to Fatigue Analysis of Welded Components-Designer's Guide," III Doc. XIII -1817-00, X V-1090-01, X III-WG3-06-99.



< 강 성 원 >



< 김 명 현 >