

필릿 용접구조물의 피로해석을 위한 기준응력에 대한 비교 연구 -구조응력 및 핫스팟응력-

하청인*, 강성원**, 김명현[†]**, 김만수*, 손상용*, 허주호*

대우조선해양주식회사*
부산대학교 조선해양공학과**

A Comparative Study for the Fatigue Assessment of Fillet Weldments Using Structural Stress and Hot Spot Stress

Chung-In Ha*, Sung-Won Kang**, Myung-Hyun Kim[†]**, Man-Soo Kim*,
Sang-Yong Sohn* and Joo-Ho Heo*

Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co.,Ltd.*
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University**

Abstract

Fatigue strength assessments with two types of load carrying fillet weldment under out-of-plane bending load have been carried out by using both hot spot stress and structural stress methods. In this study, a derivation for the structural stress method using shell element models is discussed in detail. Finite element analysis using shell element models have been performed for the assessment of fatigue strength. As a result of the fatigue strength evaluation for load carrying transverse fillet weldment, hot spot stress method is found to be consistent with structural stress method and measurement. Hot spot stress, however, estimated for the load carrying longitudinal fillet weldment exhibit large variation with respect to mesh size and element type while the calculated structural stress for the longitudinal fillet weldment is relatively independent of mesh size. On the other hand, drawbacks and doubts associated with applying the structural stress method such as the guidance of virtual node method have been discussed.

※Keywords: Fatigue strength(피로강도), Hot spot stress(핫스팟응력), Structural stress(구조응력), Fillet weldment(필릿용접구조), Out-of-plane bending(면외 굽힘)

1. 서 론

선체 구조물은 대표적인 판 구조물로서, 다양한 형상의 중형부재가 용접으로 서로 연결되어 있다. 이러한 용접 이음부에는 작용 하중에 따라 면내 응력 및 면외 굽힘응력이 복합적으로 작용하고 결국 선박의 피로수명을 단축시키는 요인이 된다. 기존의 선체구조물에 대한 피로강도는 하중의 종류에 관계없이 판 부재 표면에서의 응력값과 축인장하중 실험 결과인 S-N선도를 이용하여 평가하여 왔다. 그러나 선체 구조와 같은 대규모 용접 구조물의 피로강도는 초기 균열보다는 일정 거리 진전된 균열에 의해 산정되므로 면내하중에 의한 피로강도와 면외 굽힘하중에 의한 피로강도는 판 두께 방향으로의 균열진전속도의 차이에 의해 분명 상이한 값을 가지게 된다(강성원 등 2003). 따라서 이런 경향을 고려하여 최근 면외 굽힘하중에 대한 피로강도의 연구가 다각도로 이루어지고 있다.

유한요소해석에 의한 용접 이음부의 피로설계 방법 중, 최근 선급을 중심으로 많이 사용하는 핫스팟응력(hot spot stress) 산정법은 용접 토우부 근방에서의 응력값을 토우부로 외삽하여 구한 기준 응력을 바탕으로 S-N 선도와 비교하여 용접구조물의 피로수명을 계산하는 방법이다. 그러나 이 방법은 응력 집중부 근처에서의 요소크기에 따라 매우 민감한 변화를 보일 뿐만 아니라 적분점에서 계산된 응력값을 임의의 위치로 내삽/외삽하는 방법에 따른 영향도 큰 것으로 알려져 있어 결국 요소의 크기 및 응력의 유도 방법에 대한 적절한 기준이 요구된다.

한편 Dong(2004)은 용접 토우부에 대해 요소크기에 민감하지 않은 구조응력 산정법을 제안했는데 이는 용접 토우부 근처의 유한요소해석 결과를 바탕으로 역학적 평형조건을 이용하여 용접 토우부 응력을 추정된 후 용접 토우부에서의 균열 진전율을 고려한 일련의 과정을 통해 다양한 작용 하중 모드 및 시험편 두께 변화에 대해 단일화된 S-N 선도의 구현이 가능하므로 다양한 형상의 용접부에 대한 피로거동의 정확한 산출이 가능하다.

최근 구조응력에 대한 관심이 증대되는 가운데

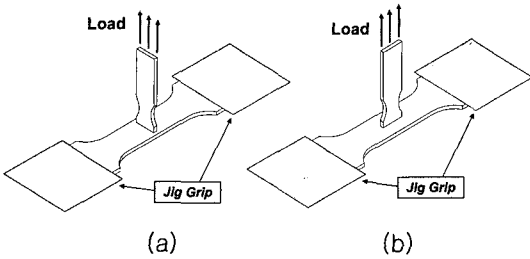
솔리드(solid) 요소를 이용한 유한요소해석을 통한 구조응력 기법 연구 및 핫스팟응력과의 비교 연구(강성원 등 2005, 강성원과 김명현 2005)등이 활발히 진행되고 있다. 그러나 지금까지 소개된 솔리드요소에 의한 방법은 현실적으로 선박 해양 구조물의 구조 및 피로 해석 적용에 적합하지 않을 뿐 아니라, 용접부 근처에서 정의된 요소 내의 응력을 이용하고 있기 때문에 기존의 핫스팟응력 기법이 가지고 있는 요소 크기의 민감도 문제에 여전히 노출이 되어 있다. 특히, 솔리드요소의 응력을 이용한 방법은 단순히 판 두께 방향의 2차원적 역학적 평형조건만을 고려하므로 3차원적 형상 변화를 가지는 실제 구조물에 대해서는 구조물의 폭 방향에 대한 역학적 평형조건을 추가적으로 고려해야 한다는 문제점을 가지고 있다(하청인 등 2005). 반면 쉘(shell)요소 모델을 이용한 구조응력 산정법은 요소 내의 응력이 아닌 용접 토우부에서 정의된 절점 변위로부터 직접 계산되는 등가 절점력을 이용하여 역학적 평형조건을 적용하므로 요소 내의 형상함수를 이용하여 계산되는 응력에 비해 요소 크기 및 종류에 대한 민감도가 낮은 장점을 가지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 면외 굽힘응력 상태에서의 하중 전달형 필릿 용접부의 피로 시험 결과를 바탕으로 선박 해양 구조물에서 주로 사용되는 쉘 요소에 의한 유한요소해석을 통해 얻은 핫스팟응력 및 구조응력을 이용하여 하중 전달형 필릿 용접구조물의 피로강도를 각각 산출하고 이들의 비교 검토를 통해 구조응력 적용에 있어서 그 타당성 및 정확성을 검증하였다. 또한 본 연구에서 제안된 순수 굽힘 하중모드 상태의 시험편 모델에 대한 피로시험결과를 바탕으로 구조응력 방법에 의한 피로수명 추정의 타당성을 검토하였다.

2. 대상 모델 및 유한요소해석

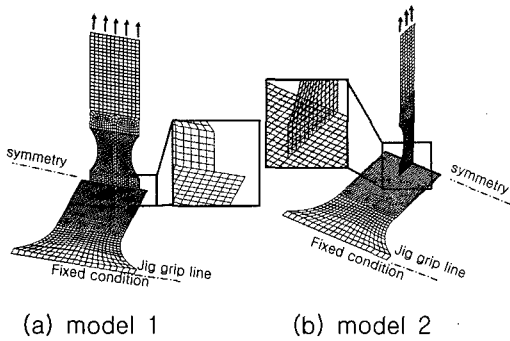
본 연구에 사용된 두 종류의 하중 전달형 필릿 용접구조물의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

상기 모델에 대한 유한요소해석은 상용 프로그램인 MSC. Patran/Nastran을 이용하였고 요소변화에 대한 사례연구를 위해 요소의 크기를



(a) Load-carrying transverse fillet weldment (model 1)
 (b) Load-carrying longitudinal fillet weldment (model 2)

Fig. 1 Models used for this study



(a) model 1 (b) model 2

Fig. 2 Finite element models

1.0t×1.0t, 0.5t×0.5t 및 0.25t×0.25t (단, t는 부재 두께)로 분류하였으며 요소의 종류는 4-node 및 8-node 쉘요소로 구분하였다. 해석에 사용된 유한요소모델은 Fig. 2와 같고 이때 용접 토우부의 비드 형상은 해석모델에 고려하지 않았다.

3. 응력 계측 및 피로 시험

본 연구에서 고려하고 있는 필릿 용접구조물에 대한 유한요소해석 결과의 신뢰성을 검토하는 한편 구조응력을 바탕으로 구한 피로수명 예측결과와의 비교를 통한 피로해석의 검증을 위하여 총 30개의 시험편을 제작하여 정하중시험 및 피로시험을 각각 실시하였다. 피로시험에 사용된 시험편은 총 길이 640mm, 폭 80mm, 두께 10mm의 주부재(Main plate)와 두께 10mm인 거셋(Gusset)이 필릿 용접으로 구성되며(Fig. 3) 주부재의 양단은 그립(Grip)으로 고정되어 있다(Fig. 1). 양단 그립과 그립 사이 길이는 340mm이며 사용된 재료 물

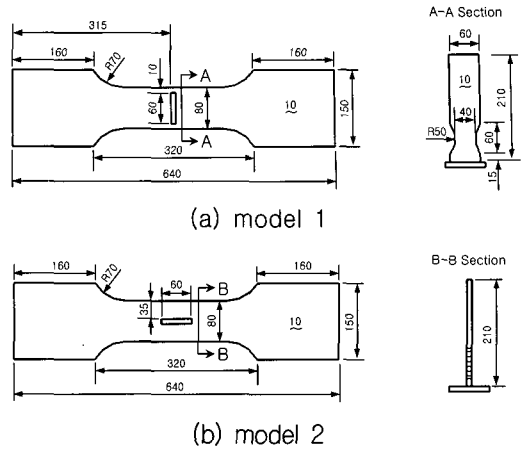


Fig. 3 Dimension of specimens

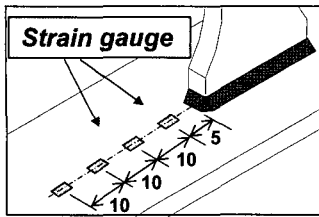
Table 1 Chemical composition & mechanical properties

C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)
0.13~0.17	0.15~0.18	0.46~0.65	0.012~0.019
	Yield Stress(MPa)	Ultimate Stress(MPa)	Elongation(%)
Mill sheet	299~336	441~468	28~30
Tensile test	290~299	427~457	34~36

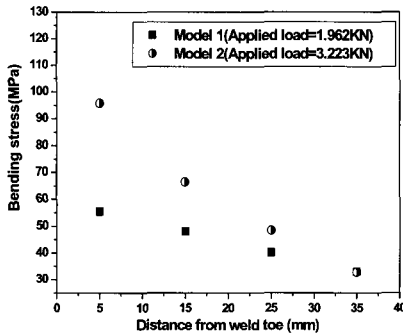
성치는 Table 1과 같다.

먼저, 해당 시험편의 정하중에 의한 굽힘 응력 분포는 용접 토우부에서 일정거리 떨어진 위치에 Fig. 4에 보인 바와 같이 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다. 이를 이용하여 핫스팟응력 기법에 따라 용접 토우부로부터 5mm, 15mm 떨어진 위치에서 측정된 응력을 외삽하여 응력집중계수 (Stress Concentration Factor, SCF)를 구할 수 있으며, 모델 1 및 2에 대하여 측정치를 바탕으로 구한 응력집중계수는 1.15 및 1.75로 각각 나타났 다(ISSC 2003).

각 시험편에 대한 피로시험은 일축 인장·압축 유압 서보 피로시험기(SAGINOMIYA, Japan)를 사용하여 완전 양진 하중 진폭으로 수행하였다. 피로 수명은 시험편이 완전 파단될 때로 정의하고 완전 파단 되지 않는 시험편의 경우 10⁷ 사이클을 피로 한도로 고려하였다. 각 모델에 대한 피로 시험 결과는 Fig. 5와 같다.



(a) Location of strain gauge (ex. of model 2)



(b) stress measurements

Fig. 4 Stress measurement by static test

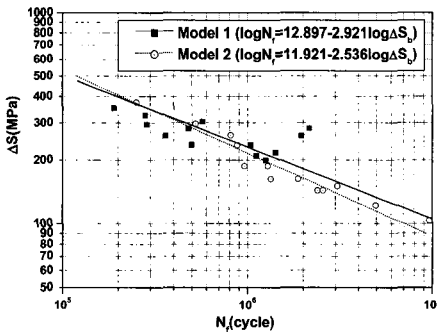


Fig. 5 Nominal stress based S-N curve

4. 핫스팟응력

용접 구조물의 응력 집중부의 응력은 직접 측정이 용이하지 못하므로 응력 집중부로부터 일정거리 떨어진 부분에서 구한 응력을 선형 외삽하여 계산된 핫스팟응력을 바탕으로 피로강도 및 수명을 산정할 수 있다. 현재 IIW(International Institute of Welding) 및 선급 등에서는 다양한 핫스팟응력 추정법(Niemi 2004)을 제시하고 있으나, 본 연구에서는 선급에서 대부분 적용하는 방법인 0.5t/1.5t에서의 선형 외삽법을 채택하였다.

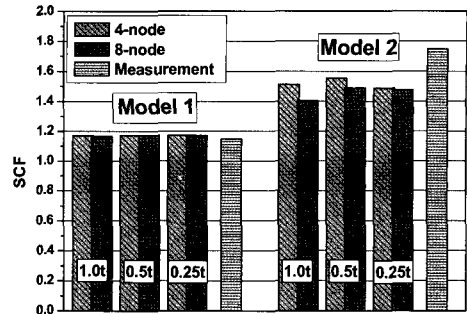


Fig. 6 Comparison of SCFHSS

Fig. 6에서는 유한요소해석 및 실제 측정치를 통하여 구한 핫스팟응력을 비교하였다. 모델 1의 경우 그 결과값이 요소의 변화에 민감하지 않으나 모델 2의 경우 요소 크기 및 종류에 따라 모델 1에 비해 상대적으로 큰 변화를 보이며 정하중 시험 측정치와도 차이를 보이는 것으로 나타났다.

5. 쉘요소를 이용한 구조응력

3차원 쉘요소를 이용하여 유한요소해석을 수행하는 경우, 유한요소법에 의해 구해진 구조물의 절점 변위(nodal displacement)와 요소의 강성행렬(element stiffness matrix)을 이용하여 식 (1)과 같이 각 절점에서 작용하는 등가절점력을 구할 수 있다(Logan 2000).

$$\{F^e\} = [K^e]\{u\} \tag{1}$$

여기서 $\{F^e\}$: 절점력 벡터, $[K^e]$: 요소 강성행렬, $\{u\}$: 절점 변위

이때, 용접 토우부에서의 구조응력(structural stress, σ_s)은 앞서 구한 각 절점에서의 절점력(nodal force, F)과 절점모멘트(nodal moment, M)로부터 막응력(membrane stress, σ_m)과 굽힘응력(bending stress, σ_b)을 각각 구하여 이들의 합으로 정의된다. 이때 절점력과 등가일의 원리를 이용하여 절점과 절점사이에 정의된 용접선에 따라 분포하는 단위길이 당 힘 즉, 선분포력(line force, f)을 계산할 수 있다. 즉, Fig. 7에서와 같

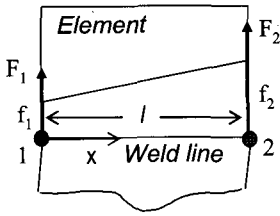


Fig. 7 Local line force from nodal force

이 절점력(F_1, F_2)과 선분포력(f_1, f_2)사이의 힘의 평형조건인 식(2)와 모멘트 평형조건인 식(3)을 만족하는 식(4)를 이용하여 계산할 수 있다. 선분포 모멘트(line moment, m)도 동일한 방법으로 절점 모멘트를 이용하여 구할 수 있다.

$$\sum F_{yi} + \int_0^l f_y(x) dx = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_{yi} x_i + \int_0^l f_y(x) x dx = 0 \quad (3)$$

$$f_{y1} = \frac{2}{l} (2F_{y1} - F_{y2}), f_{y2} = \frac{2}{l} (2F_{y2} - F_{y1}) \quad (4)$$

앞서 설명한 등가일의 원리를 Fig. 8과 같이 여러 개의 요소로 구성된 용접선에 확대 적용할 수 있으며 이는 식(4)의 중첩된 형태의 연립방정식인 식(5)로 표현할 수 있다. 계산에 적용되는 절점력은 Fig. 8의 국부좌표계(x', y', z')를 기준으로 한다.

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{l_1}{6} & \frac{(l_1+l_2)}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{(l_2+l_3)}{3} & \frac{l_3}{6} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \frac{(l_{n-2}+l_{n-1})}{3} & \frac{l_{n-1}}{6} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \frac{l_{n-1}}{6} & \frac{l_{n-1}}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서, F_i : 절점력, f_i : 선분포력, l_{i-1} : 요소크기

이렇게 구해진 선분포력을 이용하여 식(6)과 같이 막응력을 구할 수 있고 동일한 방법으로 선분포모

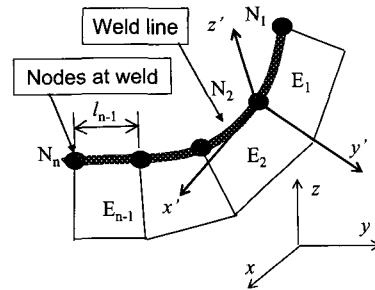


Fig. 8 FE model with weld line using shell element

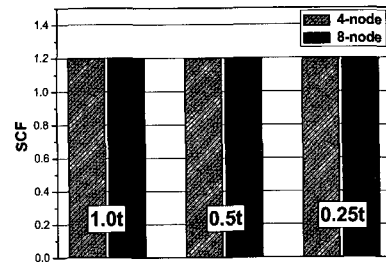


Fig. 9 Comparison of SCF_{SS} for model 1

멘트를 이용하여 굽힘응력을 구한 후 이들의 합으로 표현되는 구조응력을 구할 수 있다.

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

여기서 t: 판두께, f_y' : 선분포력, m_x' : 선분포모멘트

Fig. 9에서는 구조응력을 바탕으로 구한 모델 1에 대한 응력집중계수를 나타내고 있으며 요소의 크기나 종류에 관계없이 일관성 있게 응력집중계수가 도출됨을 알 수 있다.

한편 모델 2와 같이 용접 비드 모델이 생략되고 용접선 방향이 용접부 끝단에서 급격히 변하는 경우, 선분포력 및 선분포모멘트 벡터 방향의 급격한 변화에 의해 과도한 응력구배가 발생한다. 따라서 이러한 응력 특이점(stress singularity)에서의 용접부 끝단 효과(weld end effect)를 해결하기 위해 가상절점법(Virtual Node Method, VNM)

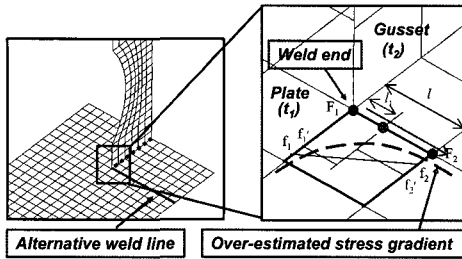


Fig. 10 Schematic for the virtual node method

을 적용하여 계산할 수 있으며 용접선은 Fig. 10 과 같이 균열 진전 방향을 고려한 가상 용접선 (alternative weld line)을 정의 할 수 있으며 이를 기준으로 선분포력 및 선분포모멘트를 구한다.

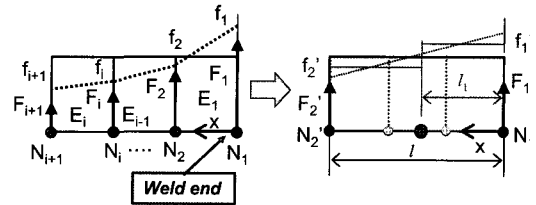
여기서 가상절점법은 Fig. 10과 같이 요소내의 절점 사이에 용접부 끝단에서 임의의 거리 l_1 만큼 떨어진 위치에 정의된 가상절점을 기준으로 양쪽 모두 각각 균일한 구배를 가진다는 가정 하에 역학적 평형조건을 만족하는 새로운 선분포력, f_1' 을 식(7)의 형태로 구한 후 이를 이용하여 구조응력을 계산하는 방법을 의미한다 (Dong 2004)

$$f_1' = \frac{1}{l \times l_1} [F_1(l_1 + l) + F_2(l_1 - l)] \quad (7)$$

여기서 l : 요소크기, l_1 : 용접끝단부에서 가상요소까지의 거리, F_1, F_2 : 요소 양단에서의 절점력

이때 유한요소의 크기가 판 두께의 2배보다 작은 경우, 가상절점의 적용 범위를 확장하기 위해 용접 끝단부 근처의 몇 개 요소를 Fig. 11와 같이 가상 단일요소로 변환할 수 있으며 이때 가상 단일요소의 양단의 새로운 절점력(F_1', F_2')은 기존의 요소의 절점력과 역학적 평형조건을 이용하여 구할 수 있다(하청인 등 2005).

이때 가상절점의 위치 l_1 에 대해 Dong(2004)은 피로 균열에 의한 파손 기준에 근거하여 l_1 에 대한 몇 가지 기준을 제시하고 있는데 본 연구에서는 가장 많이 사용되는 $l_1=t_2, l \geq 2l_1$ (단, t_2 는 gusset의 두께)을 토대로 모델 2에 대한 구조응력을 계산하였다.



(a) original element row (b) virtual single element
Fig. 11 Application of VNM with multiple elements

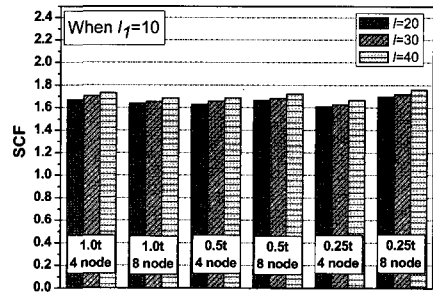


Fig. 12 SCFss for model 2 when $l_1=10$

본 연구에서 고려된 시험편의 gusset 두께는 10mm이므로 $l_1=10$ 을 기준으로 하여 가장 적절한 가상 요소의 크기의 l 을 결정하기 위해 요소의 크기를 변화시켜가며 구조응력을 도출하였다. Fig. 12에서도 알 수 있듯이 주어진 $l_1=t_2$ 에서 l 의 크기를 21~41로 변화 시켜가며 계산한 결과, 응력집중계수는 l 의 변화에 상관없는 일정한 결과값이 산출됨이 확인되었으며 또한 유한 요소 크기 및 종류에도 민감하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 모델 2와 같은 면외굽힘하중을 받는 필릿 용접구조물에 대한 가상절점법의 적용 조건은 앞서 Dong이 제시한 $l=t_2, l \geq 2l_1$ 이 적절함이 확인되었다. 그러나 본 연구에서 확인한 가상 절점 적용 기준을 다른 형상의 용접부 형상에 대해 범용으로 적용하기 위해서는 보다 다양한 가상절점법 적용 및 검증에 위한 피로시험 데이터 수집 등의 추가적인 연구가 요구된다.

6. 구조응력을 이용한 피로강도 평가

일반적으로 용접 구조물의 피로 수명은 균열 발생 단계(crack initiation stage)가 거의 존재하지 않으므로(Gurney 1979) 균열 진전(crack propagation)에 의한 최종 파단(final rapid failure)을 기준으로 평가하는데 이때 구조물 두께 및 하중모드에 따라 균열 성장에 큰 차이를 보이므로 앞서 구한 구조응력 만으로는 정확한 용접부 피로거동을 예측하기에는 충분하지 않다. 따라서 용접부 균열 성장을 비교적 정확히 예측 할 수 있는 응력확대계수(stress intensity factor)를 기반으로 한 균열 진전 모델을 이용하면 다양한 용접부 형상의 두께 및 하중모드 영향이 고려된 정확한 피로 수명 예측이 가능하다. 일반적으로 용접 구조물의 용접부에는 결함에 가까운 노치(notch)를 내재하고 있으므로 식 (8)과 같이 짧은 균열 ($a/t < 0.1$)의 거동을 고려할 수 있는 2단계 균열 진전 모델(two stage crack growth model)을 적용하여 용접부 피로 거동을 예측할 수 있으며(전유철 등 2001) 이는 노치 효과가 고려된 수정된 Paris 식으로 표현할 수 있다(Paris and Erdogan 1960).

$$\frac{da}{dN} = C[f_1(\Delta K)_{a/t \leq 0.1} \times f_2(\Delta K)_{a/t > 0.1}] \tag{8}$$

$$= C(M_{kn})^n (\Delta K)^m$$

여기서 a: 균열길이, C,m: 재료 상수, ΔK: 응력 확대 계수 진폭, n=2

이때, M_{kn} 은 notch induced stress intensity magnification factor로써 노치의 영향이 고려된 응력확대계수(K)와 노치의 영향이 없는 응력확대 계수(K_n)의 비로써 식 (9)와 같이 정의된다.(Dong 2004).

$$M_{kn} = \frac{K(\text{with local notch effects})}{K_n(\text{through thk. } \sigma_m \text{ and } \sigma_b)} \tag{9}$$

따라서 응력확대계수 (ΔK)인 식 (10)을 식 (8)에 대입 후 적분하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\Delta K = \Delta \sigma_m f_m\left(\frac{a}{t}\right) + \Delta \sigma_b f_b\left(\frac{a}{t}\right) \tag{10}$$

여기서, $f_m(a/t)$, $f_b(a/t)$ 는 각각 막응력 진폭($\Delta \sigma_m$)과 굽힘응력 진폭($\Delta \sigma_b$)의 무차원 형상함수

이때 식 (11)의 $I(r)$ 함수는 식 (12)와 같으며 굽힘응력 진폭의 비 ($r = \Delta \sigma_b / \Delta \sigma_s$)에 대한 무차원 함수로써 하중 제어조건과 변위 제어조건에 대한 각각의 무차원 영향함수들을 대입하여 계산할 수 있으며 (김종성 2003) 이는 다양한 하중모드에 대한 피로 거동 특성을 효과적으로 표현할 수 있다.

$$N = \int_{a_i/t \rightarrow 0}^{a_f/t = 1} \frac{td(a/t)}{C(M_{kn})^n (\Delta K)^m} \tag{11}$$

$$= \frac{1}{C} t^{1 - \frac{m}{2}} (\Delta \sigma_s)^{-m} I(r)$$

$$I(r) = \int \frac{d(a/t)}{(M_{kn})^n \left[f_m\left(\frac{a}{t}\right) - r \left(f_m\left(\frac{a}{t}\right) - f_b\left(\frac{a}{t}\right) \right) \right]^m} \tag{12}$$

앞서 설명한 식 (11)을 응력 대비 피로수명 즉, S-N 선도의 형태로 정리하면 식 (13)과 같이 두께에 대한 보정항 및 하중모드에 대한 함수 $I(r)$ 를 반영한 등가구조응력, ΔS_{eq} 대비 피로수명의 관계식을 유도 할 수 있다.

$$\Delta S_{eq} = \frac{SCF_{ss} \Delta \sigma_n}{t^{\frac{2-m}{2m}} I(r)^{\frac{1}{m}}} = CN^{-\frac{1}{m}} \tag{13}$$

여기서 $m=3.6$, SCF_{ss} : 응력집중계수

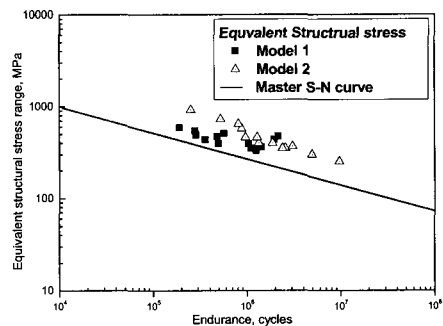


Fig. 13 Master S-N curve with Equivalent SS

이렇게 구한 등가 구조응력은 다양한 용접부 형상, 두께 및 하중 모드에 대한 피로 시험 결과를 하나의 좁은 scatter band로 구현할 수 있으므로 이를 통합 S-N 선도(Master S-N curve, Fig.13의 S-N 선도)로 정의할 수 있다.

Fig. 13은 본 연구에서 고려한 2개의 모델에 대한 피로시험 결과를 통합 S-N 선도와 비교한 도표이다. 이때 모델 1의 경우, 통합 피로 선도와 비교적 일치하는 반면 모델 2의 경우, 통합 피로선도보다 다소 높은 피로수명 및 피로강도를 보이고 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 면외 굽힘하중이 작용하는 경우에 있어서 기존의 핫스팟응력 기법과 최근 제안된 구조응력 기법을 사용하여 하중 전달형 필릿 용접 구조물의 피로강도를 비교·평가하였다.

(1) 모델 1과 같이 gusset이 하중방향에 수직으로 위치하고 있는 용접구조물의 피로강도평가에 있어서 핫스팟응력 기법 및 구조응력 기법 모두 일관성 있는 결과를 나타내었다.

(2) 용접 끝단부에서 기준응력을 산정해야 하는 모델 2의 경우, 먼저 핫스팟응력은 요소의 크기 및 종류에 따른 편차 및 정하중시험과의 차이가 나타났다. 한편 구조응력의 경우, 용접부 끝단 효과를 고려하기 위해 $l = t_2$, $l > l_1$ 의 조건에서 가상 절점법을 적용하였으며 이때 계산된 결과값은 요소의 크기에 따른 민감도가 없음이 확인 되었다.

후 기

본 연구의 일부는 한국과학기술재단의 첨단조선공학 연구센터 및 대우조선해양주식회사의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 강성원, 한상혁, 김화수, 백영민, 2003, "필릿 용접부의 면외굽힘하중에 대한 피로강도," 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 1호, pp. 28-35.
- 강성원, 김명현, 김석훈, 허우일, 2005, "구조응력 및 핫스팟응력을 이용한 용접구조물 피로수명에 평가에 관한 실험적 연구," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 2호, pp. 138-144.

- 강성원, 김명현, 2005, "수치해석을 통한 용접구조물의 구조응력 추정에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 4호, pp. 388-395.
- 김종성, 진태은, 홍정균, Dong, P., 2003, "용접구조물의 피로설계를 위한 유한요소 해석 및 통합 피로선도 초안 개발," 대한기계학회 논문집 A권, 제 27권, 제 5호, pp.724-733.
- 전유철, 김유일, 강중규, 한종만, 2001, "피로실험 및 균열진전 해석을 통한 용접부의 피로수명 예측에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 3호, pp. 93-106.
- 하청인, 강성원, 김명현, 이제명, 2005, "구조응력 및 핫스팟응력을 적용한 용접부 면외 굽힘 피로강도 평가에 관한 비교 연구," 용접 강도 심포지움 연구 발표 논문집(대한 용접 학회), pp. 75-83.
- Dong, P., 2004, Battelle Structural stress JIP Final Report, No. N004431-01
- Gurney, T.R., 1979, "Fatigue of Welded Structure," Cambridge University Press, 2nd edition, pp.37
- ISSC, 2003, "Fagitgue Strength Assessment," Proceedings of the 15th ISSC, Vol. 2, pp. 293.
- Logan, D., 2000, "A First Course in the Finite Element Method," Brooks/Cole, USA.
- Niemi, E., 2004, "Structural Hot-Sport Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components-Designer's Guide," III Doc. X III -1817-00, X V-1090-01, X III-WG3-06-99
- Paris, P.C. and Erdogan, F., 1960, "A Ritical Analysis of Crack Propagation Laws," Journal of Basic Engineering, Vol. 85, pp. 528-534.



< 하 청 인 > < 강 성 원 > < 김 명 현 >



< 김 만 수 > < 손 상 용 > < 허 주 호 >