

필릿 용접구조물의 피로해석을 위한 가상절점을 이용한 구조응력 기법적 고찰

A Study on the Fatigue Strength Evaluation for Fillet Weldment using Structural Stress with Virtual Node Method

하청인*, 강성원*, 김명현*, 김도형**

* 부산대학교 조선해양공학과

** 로이드 선급 협회

1. 서 론

일반적으로 용접 구조물의 용접 토우부 피로강도 산정에 많이 사용되는 기준응력으로 핫스팟응력(hot spot stress)은 유한 요소 해석에 사용되는 요소의 종류 및 크기에 따라 그 계산 결과값의 편차가 클 뿐 아니라 요소의 적분점에서 계산된 응력값을 내삽/외삽하는 방법에 따른 영향도 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 핫스팟응력에 의한 산정법의 대안으로 최근 Dong 등은 용접 토우부에 대해 요소크기에 민감하지 않은 구조응력(Structural stress)을 제안하고 있는데 이는 유한 요소 해석을 이용하여 용접 토우부의 등가 절점력을 이용하므로 요소크기 및 종류에 대한 민감도가 낮은 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 면외 굽힘 하중을 받는 하중 전달형 종방향 필릿 용접부에 대해 shell 요소 모델을 이용한 유한 요소 해석을 바탕으로 Dong이 제안한 구조응력을 계산하여 피로강도를 산출하였다. 이때 shell 요소 모델에 의한 구조응력 계산 시 용접부 끝단 효과(Weld end effect)를 고려하기 위해 가상 절점법(Virtual Node Method)을 적용하고 그 기준을 정립하였다.

2. 대상 모델 및 유한요소해석

본 연구에 사용된 하중 전달형 종방향 필릿 용접구조물의 형상을 Fig. 1(a)에 나타내었다. 상기 모델에 대한 유한 요소 해석은 상용 프로그램을 이용하여 요소크기는 1.0t/1.0t, 0.5t/0.5t 및 0.25t/0.25t로 분류하였고 요소의 종류는 4-node 및 8-node shell 요소로 구분하여 수행하였다. 해석에 사용된 유한 요소 모델은 Fig. 1(b)와 같으며 이때 용접부 비드 형상은 고려하지 않았다.

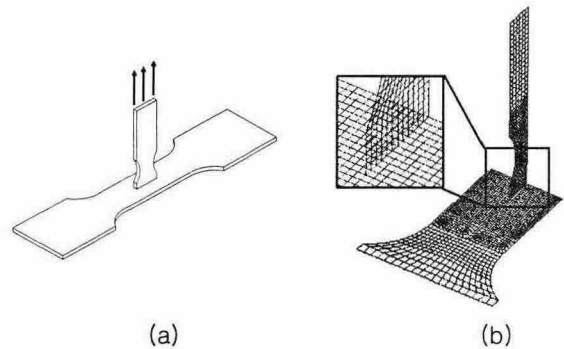


Fig. 1 Models for this study (a) & FE model (b)

3. Shell 요소를 이용한 구조응력

Fig. 2과 같은 일반적인 shell 요소 모델에 의한 용접선 및 용접 토우부에 대한 구조응력(structural stress, σ_s)은 먼저 각 절점 변위로부터 구한 절점력(nodal force)과 절점모멘트(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.

$$\{F\} = [L]\{f\} \quad (1)$$

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

여기서, $\{F\}$ 및 $\{f\}$ 는 절점력 및 선분포력을 각각 의미하며 $[L]$ 은 용접선에 대한 형상 함수를, t 는 판두께를 의미한다.

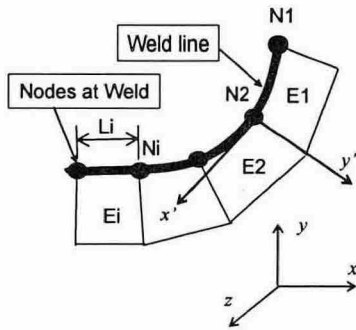


Fig. 2 FE model with weld line using shell element

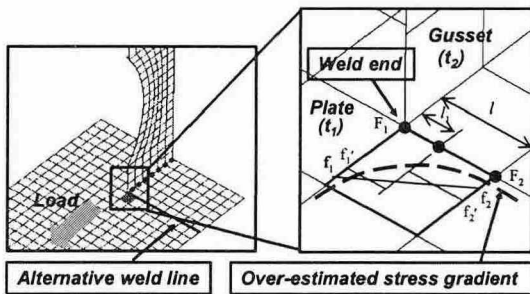


Fig. 3 Schematic for the Virtual node method

한편, 본 연구에서 제시된 용접구조물과 같이 용접부 비드 모델이 생략되어 용접선 방향이 용접부 끝단에서 급격히 변하는 경우, 선분포력 및 선분포모멘트의 벡터 방향의 급격한 변화로 인해 실제 실험 결과보다 과도한 응력구배가 발생한다. 이러한 용접부 끝단 효과를 해결하기 위해 Fig. 3과 같이 실제 용접선에 직각 방향의 가상 용접선을 따라 구조응력을 계산하되 용접 토우부의 shell 요소에 가상절점 (Virtual node)을 적용해야 한다. 즉, 가상절점을 기준으로 역학적 평형 조건을 만족하면서 구배가 없는 일정한 선분포력을 가진다는 가정 하에 식 (3)을 통해 새로운 선분포력을 구하여 구조응력을 계산할 수 있다.

$$f_1' = \frac{1}{l \times l_1} [F_1(l_1 + l) + F_2(l_1 - l)] \quad (3)$$

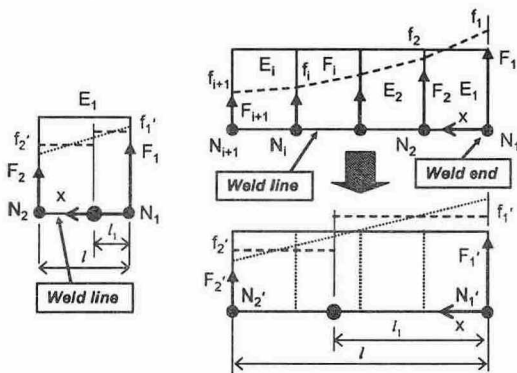


Fig. 4 Application of VNM with multiple elements

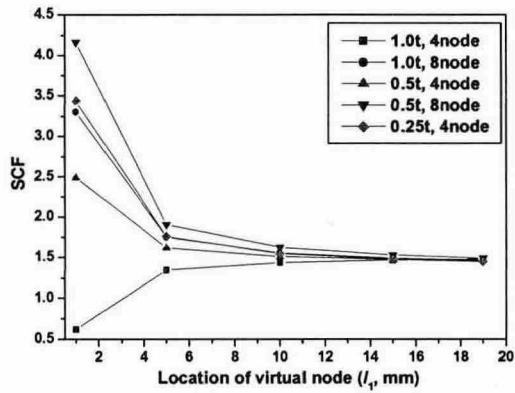
가상 절점이 적용되는 용접 끝단부의 요소의 크기가 작은 경우 그 적용 범위가 매우 제한적이다. 따라서 가상 절점의 적용 범위를 확장하기 위해서는 용접 끝단부의 요소 크기를 조절해야 한다. 즉, Fig. 4와 같이 몇 개의 요소를 가상의 단일 요소로 정의하고 이때 가상 요소의 절점에서 식(4) 및 (5)를 만족하는 새로운 절점력 및 절점모멘트를 구하여 식 (3)을 적용한다.

$$\sum_{i=1}^n F_{i+1} = \sum_{i=1}^2 F_i \quad (4)$$

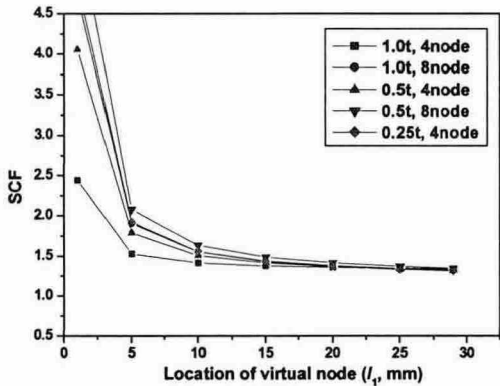
$$\sum_{i=1}^n F_{i+1}x = \sum_{i=1}^2 F_i x \quad (5)$$

이때 용접 토우부에서 가상절점까지 거리 l 에 대해 Dong은 피로 균열에 의한 파손 기준에 근거하여 $l \geq 2l_f$ 를 만족하도록 제시하고 있다. 그러나 이는 명확한 기준이라 할 수 없으므로 본 연구에서는 제시된 용접 구조물에 대해 l 및 l_f 의 변화에 따른 구조응력의 변화를 살펴보았다. Fig. 5에서와 같이 l 을 각각 20, 30, 40으로 분류하여 계산한 결과, 앞서 Dong이 제시한 $l \geq 2l_f$ 영역에서 구조응력의 변화가 큰 반면 오히려 $l < 2l_f$ 의 영역에서 안정적인 값을 보임을 알 수 있다. 그러나 l_f 이 커진다는 것은 용접 토우부에서 멀어짐을 의미하므로 자칫 응력 집중 영향 자체를 무시할 수 있으므로 주의해야 한다.

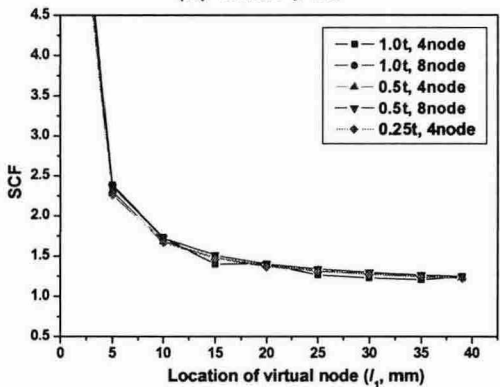
앞서 본바와 같이 l 및 l_f 의 변화에 따른 계산 결과의 편차가 크므로 Dong의 여러 기준 중 비교적 많이 채택하고 있는 $l = t_2$ (단, t_2 는 gusset의 두께)를 본 연구의 계산기준으로 채택하였다. 이때 gusset의 두께가 10mm이므로 $l_f = 10$ 을 기준으로 l 을 변화시켜가며 구조응력을 도출하였다. 그 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 $l = 2l_f$, $l = 3l_f$ 에 비해 $l = 4l_f$ 에서의 결과값이 요소의 크기 및 종류에 민감하지 않은 것으로 나타났으며 또한 정하중 시험(Fig. 7)에 의한 응력집중계수인 1.75와도 비교적 일치함을 알 수 있다. 따라서 면외 굽힘 하중을 받는 종방향 필릿 용접구조물에 대한 가상 절점법의 적용 조건은 $l = t_2$, $l = 4l_f$ 으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 구한 요소 크기에 대한 기준을 다른 여러 경우에 범용으로 적용하기에는 아직 관련 데이터의 부족 등의 한계가 있으므로 용접 비드부 모델을 적용한 shell 및 solid 요소 모델을 이용한 구조응력 결과 및 피로시험 결과를 바탕으로 가상절점법의 정확성 및 타당성에 대한 추가적인 연구가 요구된다.



(a) when $l=20$



(b) when $l=30$



(c) when $l=40$

Fig. 5 SCF_{ss} with respect to l, l_1

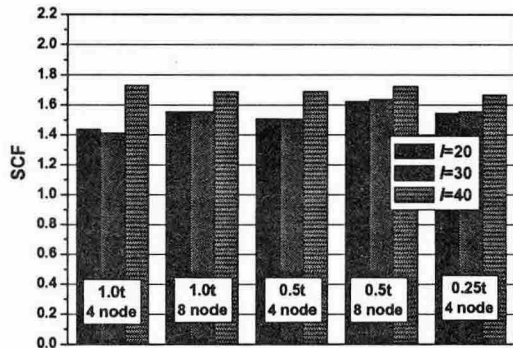


Fig. 6 SCF_{ss} when $l_1=10$

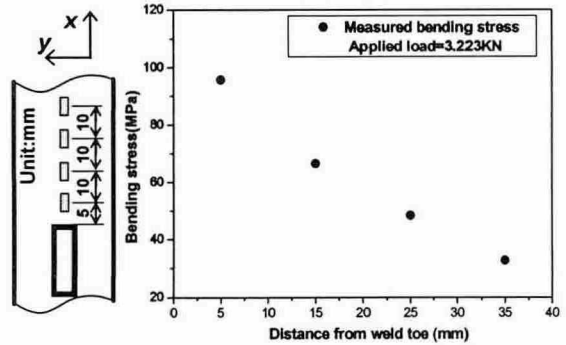


Fig. 7 Locations of strain gauges and corresponding stress measurements

4. 결 론

본 연구에서는 구조응력을 이용한 면의 굽힘하중을 받는 하중 전달형 필릿 용접구조물의 피로강도를 평가함에 있어서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가상절점법을 이용하여 shell 요소 모델의 구조응력을 계산하였으며 이때 주어진 구조에 대한 주요 파라미터들의 비교 검토를 통해 주어진 구조에 대한 최적의 파라미터 조건을 도출하였다. 또한 정하중 시험결과와 비교하여 계산된 피로강도 결과의 타당성을 검증하였다.
- 2) 구조응력 계산 시 요소의 조건에 따른 민감도는 거의 없었으나 기존에 제시된 가상 절점법의 적용 방식의 차이에 의한 구조응력 결과값의 편차가 있음이 확인 되었으므로 차후에 이에 대한 추가연구를 통한 명확한 기준 설정이 요구된다.

후기

본 연구는 ASERC 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. S. W. Kang, S. H. Han, W. S. Kim and Y. M. Paik : Fatigue Strength of Fillet Weldment under Out-of Plane Bending Load, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No.1, 2003, 28-35 (in Korean)
2. P. Dong : Battelle Structural stress JIP Final Report, No. N004431-01, 2003
3. Y. I. Kim, J. K. Kang and J. H. Heo : A study on the Performance of Mesh Insensitive Structural Stress for Fatigue Strength Evaluation, Proceedings of SNAK, 2005 (in Korean)