

3차원 유한요소법을 이용한 용접시편의 파괴 해석

Fracture analysis of weld specimen using 3-dimensional finite element method

양승용*, 구병준*

Seung-Yong Yang, Byeong-choon Goo

ABSTRACT

A specimen with residual stress due to welding was analyzed by three-dimensional cohesive zone model. The residual stress distribution was calculated by simulating welding process, and cohesive elements were located along crack propagation planes. Crack growth is possible since two planes of the cohesive element are separated beyond a maximum load carrying capacity. Stress fields around a crack tip are compared for specimens with and without residual stresses. Load-displacement curves and crack growth behaviors are also examined.

Key words: Cohesive zone model (접착영역모델), Weld specimen (용접시편), Residual stress (잔류응력)

1. 서론

철도차량 등 기계구조물은 용접에 의한 금속의 접합으로 이루어져 있으며, 구조물 내의 용접부는 잔류응력 및 응력집중 효과에 의해 취약부로 작용하고 구조물의 피로수명을 결정하는데 중요한 변수로 작용한다. 철도차량 용접부의 피로수명을 예측하기 위하여 응력-N 접근법(σ -N approach), 변형률-N 접근법(ϵ -N approach), 경도를 이용한 수명예측 등의 연구^(1,2,3)가 수행된바 있다. 이러한 방법들은 유한요소 해석을 통하여 용접에 의한 잔류응력을 예측하고 잔류응력의 영향을 고려할 수 있는 수명예측식을 개발하는 것을 주된 내용으로 하고있으며, 실험 결과와의 비교를 통하여 유용성이 검토된바 있다. 한편 용접부의 피로균열 성장에 따른 잔류응력 재분포를 해석하기 위하여 거슨 모델(modified Gurson model) 또는 접착영역모델(cohesive zone model) 등을 이용한 균열 성장 시뮬레이션 기법이 연구된바 있다^(4,5). 이러한 방법들은 하중에 의한 금속의 손상을 고려하여 균열 성장을 모사하는 기법으로서 균열 성장을 위해 경계조건을 강제적으로 부여하지 않더라도 하중의 크기에 따라 균열이 자연스럽게 성장하는 장점이 있다.

본 논문에서는 용접시편의 3차원 효과를 고려하기 위하여 시편을 3차원 유한요소법을 이용하여 모델링 하였으며 3차원 접착영역모델을 유도하였다. 노치효과를 최대한 제외한 상태에서 균열 전파에 미치는 잔류응력 만의 영향을 조사하기 위하여 시편 중앙에 원형의 구멍을 가지는 시편을 대상으로 하였으며 용접 잔류응력이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대하여 인장 하중에 의한 균열 성장 특성을 비교하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

2. 접착영역모델

접착영역모델(cohesive zone model)에서는 균열 생성을 두 개의 인접한 면의 분리로 이상화하여 다루게 된다. Fig.1의 2차원 균열에 대하여, 균열 전과 경도를 따라 접착영역(cohesive zone)을 가정하고 이 구간의 윗면과 아랫면 사이의 거리(displacement jump)와 전인력(traction) 사이의 관계를 구성방정식을 이용하여 기술한다. 접착영역 구성방정식의 기초적인 형태는 Needleman⁽⁶⁾과 Rose 등⁽⁷⁾에 의해 제안되었다. 접착영역을 따라 균열이 전파함에 따라 인접한 두면은 초기의 완전히 밀착된 상태에서부터 벌어지게 되어 최종적으로 전인력이 완전히 소멸된 분리된 상태에 이르게 된다. De-Andres 등⁽⁸⁾은 재료가 하중을 받는 경우에 대하여 접착영역에 작용하는 유효 전인력 t 와 유효 변위 δ 사이의 관계를 다음 식으로 가정하였다.

$$t = e\sigma_c \frac{\delta}{\delta_c} e^{-\frac{\delta}{\delta_c}}, \quad \text{단 } \delta_n \geq 0 \quad (1)$$

$e \approx 2.71828$ 이고 σ_c 및 δ_c 는 재료 상수이며, 두 면사이의 거리 벡터 $\delta = (\delta_x, \delta_y, \delta_n)$ 에 대하여 유효 변위 δ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\delta = \sqrt{\beta^2(\delta_x^2 + \delta_y^2) + \delta_n^2} \quad (2)$$

한편 전인력 벡터는 다음과 같이 기술된다.

$$\mathbf{t} = \frac{t}{\delta} \{ \beta^2(\delta_x \mathbf{n}_1 + \delta_y \mathbf{n}_2) + \delta_n \mathbf{n}_3 \} \quad (3)$$

β 는 무게 인자이고 δ_x 와 δ_y 는 전단방향 거리이고, δ_n 는 수직방향 거리이다. \mathbf{n}_i 는 해당 방향으로의 단위 벡터이다. 식 (1)의 전인력에 대응하는 포텐셜 함수는 다음과 같다.

$$\phi = e\sigma_c \delta_c \left[1 - \left(1 + \frac{\delta}{\delta_c} \right) e^{-\frac{\delta}{\delta_c}} \right] \quad (4)$$

이고, $t = \partial\phi/\partial\delta$ 의 관계가 있다.

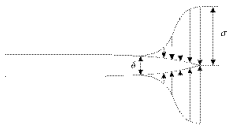


Fig.1. 접착영역모델

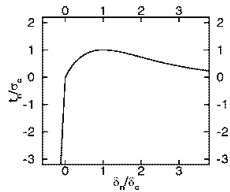


Fig.2. 접착영역의 응력-변위 관계

두 면이 압축된 경우는 접촉 조건을 고려하여 두 면 사이의 변위에 대하여 선행의 반발력이 작용한다고 가정하였다. 즉 $\delta_n < 0$ 인 경우, 균열 면에 수직 방향 전인력 t_n 는 $t_n = k\delta_n$ 에 의해 결정되며, 스프링 상수 k 는 $\delta_n \geq 0$ 인 경우에 대하여 기술된 (1)식의 극선부 전인력-변위

그래프의 원점에서 기울기에 확대 계수를 곱하여 구하였다. 본 논문에서는 확대 계수 2를 가정하였다. 한편 압축과 전단 변위가 동시에 작용하는 경우의 전단 견인력은 유효 변위를 (2)와 같이 정의한 후, $\delta_n \geq 0$ 인 경우와 같은 과정을 거쳐 구하게 된다. Fig. 2는 순수 인장하중을 받는 접촉영역의 응력-변위 곡선을 나타낸다.

3. 3차원 유한요소 모델

3차원 물체 내에서의 균열 성장을 고려하기 위하여 3차원 유한요소 사이의 경계면을 분리가 가능한 두 개의 면으로 이루어진 8절점 경계요소를 이용하여 모델링 하였고, 두 면을 이용하여 접촉영역을 정의하였다 (Fig 3 참조). 초기에 완전히 밀착된 두 면은 하중이 증가함에 따라 분리되게 된다. 경계요소에 대하여 다음 식과 같이 각각의 절점에서 두면이 분리된 양을 이용하여 거리벡터를 정의한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= \mathbf{x}_5 - \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{u}_2 &= \mathbf{x}_6 - \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{u}_3 &= \mathbf{x}_7 - \mathbf{x}_3 \\ \mathbf{u}_4 &= \mathbf{x}_8 - \mathbf{x}_4 \end{aligned} \quad (5)$$

두 면 사이의 중간면을 택하여 수직 벡터와 접선 벡터를 정의하고 이를 이용하여 각각의 경계면 요소에 대하여 $\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2 - \mathbf{n}_3$ 직교좌표계를 정의할 수 있다. 한편 $\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_3$ 실험실 좌표계와의 관계로부터 다음과 같은 좌표변환 행렬을 구할 수 있다.

$$\mathbf{T}^T = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{n}_1 & \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{n}_1 & \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{n}_2 & \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{n}_2 & \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{n}_2 \\ \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{n}_3 & \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{n}_3 & \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{n}_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

각각의 절점에서 윗면과 아래면 사이에 작용하는 견인력 벡터를 (3)식에 의해 구하기 위하여 수직 변위와 접선 변위가 필요하며 (5)식의 거리벡터 \mathbf{u}_i 를 좌표변환 하여 구할 수 있다.

$$\delta_i = \mathbf{T}^T \mathbf{u}_i, \quad \text{단 } i=1,2,3,4. \quad (7)$$

보간함수(interpolation function) N_i 를 이용하면 적분점에서의 변위 성분은 다음과 같다.

$$\delta(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^4 \delta_i N_i(\xi, \eta) \quad (8)$$

단 $N_1 = 1/4(1-\xi)(1-\eta)$, $N_2 = 1/4(1+\xi)(1-\eta)$, $N_3 = 1/4(1+\xi)(1+\eta)$,

$N_4 = 1/4(1-\xi)(1+\eta)$ 이고,

적분점의 좌표는 $\mathbf{g}_1 = (-1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3})$, $\mathbf{g}_2 = (1/\sqrt{3}, -1/\sqrt{3})$, $\mathbf{g}_3 = (1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$,

$\mathbf{g}_4 = (-1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$ 이다.

j 번째 절점에서 i 번째 유한요소 좌표계 방향으로의 견인력 F_{ij} 는 다음과 같이 구해진다.

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^4 \left[J_k \frac{\partial \phi}{\partial \delta_i} N_j \right]_{\mathbf{g}_k} \quad (9)$$

$\{\cdot\}_{g_k}$ 은 적분점 k 에서 계산된 값을 의미하며, J_k 는 적분점 k 에 할당된 요소 면적이고, ϕ 는 (4)식에 정의된 포텐셜 함수이다. $\delta_1 = \delta_5$, $\delta_2 = \delta_4$, $\delta_3 = \delta_6$ 이다. 좌표변환행렬을 이용하면 실험실 좌표계 방향으로의 i 번째 절점에서의 견인력 벡터는 다음과 같다.

$$f_i = \mathbf{T}\mathbf{F}_i, \quad \text{단 } i=1,2,3,4. \quad (10)$$

각각의 유한요소에서의 강성행렬 $-\partial f/\partial u$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$A_{ijkl} = -\frac{\partial f_{ij}}{\partial u_{kl}} = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \sum_{r=1}^4 \left[J_r \frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta_m \partial \delta_n} N_j N_l \right]_{g_r} T_{rm} T_{ln} \quad (11)$$

u_{kl} 은 1 번째 절점에서 k 번째 실험실 좌표계 방향으로의 변위이다.

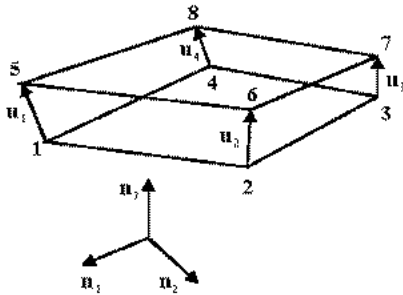


Fig.3. Node numbers and displacement vectors for 8-node interface element

Table 1. 접착영역모델 수치 파라미터 값

σ_c	800 MPa
δ_c	0.5 mm
β	1

4. 유한요소해석 결과

Fig. 4는 본 논문에서 고려한 용접시편의 형상과 유한요소 모델을 보여준다. 시편의 왼쪽과 오른쪽 끝에 인장하중이 가해지며 시편은 대칭성을 고려하여 위 절반만을 모델링하였다. 시편의 가운데 선을 따라 가열하여 잔류응력을 발생시키게 되며 최종적으로 중심에 원형 구멍을 뚫어 용접 노치를 제거하게 된다. 해석 소프트웨어는 ABAQUS를 사용하였으며, 용접해석을 위한 금속의 물성치는 참고문헌 (9)의 값을 이용하였고, 항복응력의 온도 의존성은 Fig.5 와 같이 가정하였다. 시편의 중심선에 2.77 mm/s 의 속도로 20 GJ/m³s 의 열량을 주입하였다. 온도해석 결과 용접과정 동안의 최고 온도는 대략 섭씨 1700도 정도 되었다. 인장하중에 의해 균열이 시편의 중심에서 인장 축에 수직인 방향으로 성장한다고 가정하였으며 균열 성장면을 따라 앞 절에서 기술한 경계요소를 분포시켰다. 접착영역의 물성치는 Table 1과 같이 가정하였다.

Fig. 6는 용접에 의해 초기에 시편에 존재하는 잔류응력의 분포를 도시한 것이다. 인장 방향으로의 최대 인장 응력은 대략 680 Mpa 정도 되었으며 최대 압축 응력은 대략 270 Mpa 정도로 계산되었다. Fig. 7은 시편 오른쪽 끝의 변위가 0.02546 m 일 때의 인장응력 분포를 도시한 것이다. 균열이 원형 홀의 응력 집중부에서 발생하여 시편 내부로 긴전한 상태를 확인 할 수 있다. 한편 Fig. 8은 용접잔류응력이 없는 시편에 인장하중이 작용하여 시편 오른쪽 끝의 변위가 0.03359 m 일 때의 인장응력 분포를 도시한 것이다. 균열 선단이 시편 내부로 성장하여 최대 인장응력이 시편 내부에 존재하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 용접에 의한 잔류응력이 있는 시편과 없는 시편에 인장하중이 가해졌을 때 시편 오른쪽 끝에서의 하중-변위 관계를 나타낸 그림이다. 용접 시편의 경우 순수 시편에 비하여 하중을 견디는 능력이 떨어지며 빨리 파단되는 것을 확인할 수 있다. 용접시편의 경우 시편 중앙의 원형 홀의 응력 집중부에 인장 잔류응력이 존재하여 외부의 인장하중에 쉽게 파단 되는 것으로 생각된다.

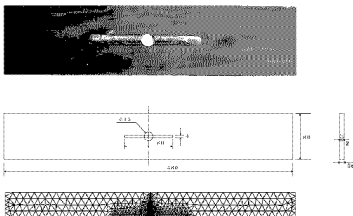


Fig.4. 용접시험 형상. 치수 및 유한요소모델. 시험의 대칭성을 고려하여 절반만 모델링 하였다.

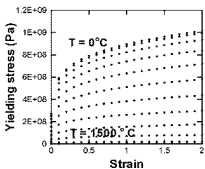


Fig.5. 광복용력-변형률 선도

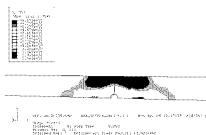


Fig. 6. 용접에 의한 잔류응력 분포

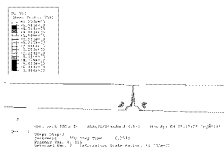


Fig. 7. $u=0.02545$ m 일 때의 인장응력 분포

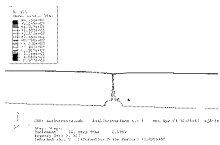


Fig. 8. $u=0.035359$ m 일 때의 인장응력 분포

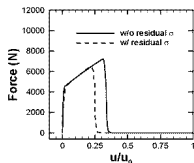


Fig. 9. 인장하중-변위 선도, $U_0=0.1m$

5. 결론

본 논문에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 집락영역모델을 구현하였으며 인장하중에 의한 균열의 발생 및 성장을 시뮬레이션 하였다. 또한 용접시편의 잔류응력 분포가 시편의 파단에 미치는 영향을 조사하였다. 용접에 의해 응력 집중부에 인장 잔류응력이 존재하는 경우 잔류응력이 없는 순수한 시편에 비하여 인장하중에 의해 쉽게 파단 되는 것을 확인할 수 있었다.

[참고문헌]

- (1) 구병준, 양승용, 2004, 잔류응력을 고려한 용접이음부의 피로수명 평가모델, 대한기계학회논문집A, Vol. 9, pp. 1328-1336.
- (2) B.C. Goo, S.Y. Yang, D.H. Lee, 2005, A simple strain-life approach for the fatigue life evaluation of welded joints with residual stresses. FEOFs.
- (3) 구병준, 이강우, 정용재, 2004, 열장 침부자를 위한 구조물 피로수명 평가방법, 한국원도학회 추계학술대회.
- (4) 양승용, 구병준, 김재훈, 2004, 수정 Gurson모델을 이용한 균열진전 해석, 한국원도학회 춘계학술대회.
- (5) 양승용, 구병준, 2003, 가상균열모델을 이용한 피로균열 전진해석, 한국원도학회 추계학술대회.
- (6) Needleman, A., 1987, A continuum model for void nucleation by inclusion debonding. J. Applied Mechanics 54, 525-531.
- (7) Rose, J.H., Ferrante, J., Smith, J.R., 1981, Universal binding energy curves for metals and bimetallic interfaces. Phy. Rev. Letters 47, 675.
- (8) De-Andres, A., Perez, J.L., Ortiz, M., 1999, Elastoplastic finite element analysis of three-dimensional fatigue crack growth in aluminum shafts subjected to axial loading. Int. J. Solids and Structures 36, 2231-2258.
- (9) 양승용, 구병준, 최성규, 2003, 절단에 따른 용접부 잔류응력 재분포 해석, 대한기계학회 추계학술대회.