

이차원 하이브리드 특별 요소를 이용한 균열을 내포하는 용접점의 파단 해석

양춘휘* · 송정한* · 허 훈*

Fracture analysis of spot-welds with an edge crack using 2-D hybrid special finite element

C. H. Yang, J. H. Song and H. Huh

Abstract

In the present paper, a novel systematic method using the 2-D hybrid special finite elements containing an edge crack is employed to study the fracture behaviors of laser beam spot-welds in automotive structures. 2-D hybrid special finite elements each containing an edge crack can assure the high precision especially in the vicinity of crack tips and give a better description of its singularity with only one hybrid element surrounding one crack. Therefore, the numerical modeling of the laser beam spot-welds can be greatly simplified. Some numerical examples are provided to demonstrate the validity and versatility of the proposed method. All the lap-shear, lap-tension and angle clip specimens are analyzed and some useful fracture parameters (such as stress intensity factors, the initial direction of crack growth) are obtained simultaneously.

Key Words: spot-welds (점용접), hybrid special element (하이브리드 요소); stress intensity factors (응력 강도 계수);

1. 서론

점용접은 자동차 기술에 의해 대량생산에 적합하고 균일한 용접 품질 확보가 용이하므로 자동차, 철도 차량, 가전기 등에 널리 활용되고 있다. 특히 자동차의 경우 주요 구조의 대부분이 점용접으로 접합되어 있기 때문에 점용접의 파단 거동에 대한 이해가 구조물의 구조 강도나 충돌 해석을 수행하는데 있어서 필수적이다⁽¹⁾.

이러한 점용접점의 해석과 파단에 대한 정확한 예측은 고체역학에서 매우 난해한 문제로 알려져 있다. 차체 구조용 강판의 경우, 용접점의 파단은 하학적 대변형을 포함할 뿐 만 아니라, 용접과정

에서 온도 변화가 용접부 근처에서 기계적 성질을 변화시키므로, 용접점의 파단은 대변형에 의한 연성파단과 더불어 열영향부(heat affected zone)에서의 재료 강도의 분포상태와 변형경화 그리고 변형속도의 영향등을 고려해야 하는 문제가 된다. 뿐만 아니라 용접점 자체는 두 판재 사이의 기하학적 특이점으로 작용하고, 응력 집중을 수반하는 균열 형태의 결함으로 간주되기 때문이다. 이와 같은 이유로 용접점의 파단을 예측하는데 있어서 파괴역학적 접근도 고려되어야 한다⁽²⁾. 현재 이러한 용접점의 파단에 관한 연구는 이러한 미시적인 파단거동의 예측에 대한 어려움에도 불구하고 전체적인 구조물의 거동해석을 위하여 용접점의

* 한국과학기술원 기계공학과

파단을 거시적인 관점에서 연구하는 방법으로 대부분의 연구가 진행되고 있다⁽³⁾.

본 논문에서는 용접점의 균열 진전에 의한 미시적 파단을 하이브리드 특이 요소를 사용하여 예측해 보고자 하였다. 이를 위하여 균열 형태의 결함을 내포하는 용접점을 모델링하기 위하여 2차원 하이브리드 특이 요소를 개발하고 이를 사용하여 전단형 파단 모델(shear-lap fracture model)에 대하여 파단 해석을 수행하여 용접부의 응력 강도 계수를 계산, 균열의 성장을 예측해 보았다.

2. 이론

2.1 하이브리드 특별 요소

본 논문에서는 균열을 내포하는 용접점을 효과적으로 모사하기 위하여 하이브리드 특별 요소를 사용하였다. 하이브리드 특별 요소는 균열 선단에서의 응력의 특이성을 나타내기 위하여 Tong⁽⁴⁾이 제안한 혼합형 변분식을 기초로 유도하였다. Fig. 1 과 같이 선균열을 포함하는 사각 요소에 대하여 내부에 Muskhelishvili⁽⁵⁾의 응력 및 변형률에 대한 복소 포텐셜 함수를 부가하였다.

$$\Pi_p^e = \int_r \left(\frac{1}{2} \epsilon^T \mathbf{E} \epsilon - \bar{\mathbf{F}}^T \mathbf{u} \right) dV - \int_{\xi} \bar{\mathbf{T}}^T \bar{\mathbf{u}} ds - \int_{\eta} \mathbf{T}^T (\bar{\mathbf{u}} - \mathbf{u}) ds \quad (1)$$

$$\sigma_x + \sigma_y = 2 \left\{ \Phi'(z) + \overline{\Phi'(z)} \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_x - \sigma_y + 2i\tau_{xy} = 2 \left\{ z\Phi''(z) + \psi'(z) \right\} \quad (3)$$

$$2\mu(u_x + iu_y) = \kappa\Phi(z) - z\overline{\Phi'(z)} - \overline{\psi(z)} \quad (4)$$

이 복소 함수에 대하여 Fig. 2 와 같은 conformal mapping 을 수행하면 요소의 응력과 변위는 식 (5) 및 (6)로 표현되고 여기서 \mathbf{L} 은 경계에서 정의되는 형상함수 이고, \mathbf{q} 는 절점 변위이다.

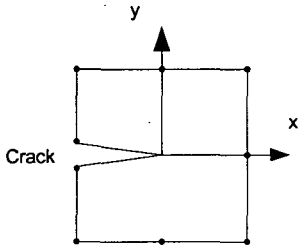


Fig. 1 The hybrid special elements with an edge crack

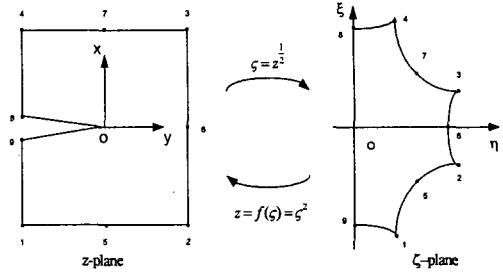


Fig. 2 Conformal mapping of the hybrid special elements with an edge crack

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [\mathbf{P}] \{\beta\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_x \\ \mathbf{P}_y \\ \mathbf{P}_{xy} \end{Bmatrix} \{\beta\} \quad (5)$$

$$\{\mathbf{T}\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_x \\ \mathbf{T}_y \end{Bmatrix} = [\hat{\mathbf{n}}] \{\sigma\} = [\mathbf{R}] \{\beta\} \quad \text{on } S_C$$

$$\bar{\mathbf{u}} = \begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \end{Bmatrix} = \mathbf{L} \mathbf{q} \quad (6)$$

따라서 위의 식들을 이용하면 식 (1)의 혼합형 변분식은 식 (7)과 같이 표현되며, 요소의 강성 행렬은 식 (8) 로 귀결된다.

$$\Pi_p^e = \frac{1}{2} \beta^T \mathbf{H} \beta - \beta^T \mathbf{G} \mathbf{q} \quad (7)$$

$$\text{where, } \mathbf{H} = \int_{S_c} \mathbf{R}^T \mathbf{U} ds \equiv \frac{1}{2} \int_{S_c} (\mathbf{R}^T \mathbf{U} + \mathbf{U}^T \mathbf{R}) ds$$

$$\mathbf{G} = \int_{S_c} \mathbf{R}^T \mathbf{L} ds$$

$$[\mathbf{K}]_h^e = [\mathbf{G}]^T [\mathbf{H}]^{-1} [\mathbf{G}] \quad (8)$$

2.2 응력 강도 계수의 계산

앞 절에서 설명한 하이브리드 특별요소를 사용하는 경우 균열 선단에서의 응력 강도 계수는 식 (5)를 이용하여 다음과 같이 쉽게 계산된다.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y |_{\theta=0} = \sqrt{2\pi} \hat{\beta}_I \quad (9)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy} |_{\theta=0} = \sqrt{2\pi} \tilde{\beta}_{II} \quad (10)$$

평면 문제의 경우, 변형에너지 밀도계수(strain energy density factor)는 식 (11)로 표현되며, 각 계수는 다음과 같다. 여기서 δ 는 균열이 진전하는 각도에 해당된다. 식 (11)에서 균열의 진전할 때 변형에너지 밀도계수가 최소가 된다고 하면 $\partial S / \partial \delta = 0$ 에서 균열 성장 각도 δ_0 를 계산할 수 있게 된다.

$$S = a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_I K_{II} + a_{22}K_{II}^2 \quad (11)$$

$$\text{where, } a_{11} = \frac{1}{16\mu} [(3 - 4\nu - \cos \delta)(1 + \cos \delta)]$$

$$a_{12} = \frac{1}{16\mu} 2 \sin \delta [\cos \delta - (1 - 2\nu)]$$

$$a_{22} = \frac{1}{16\mu} [4(1 - \nu)(1 - \sin \delta) + (1 + \cos \delta)(3 \cos \delta - 1)]$$

3. 유한 요소 해석

본 논문에서 구성한 하이브리드 특별 요소를 이용하여 Fig.3에 도시한 전단형 파단 모델(shear-lap fracture model)에 대하여 해석을 수행하였다. 즉 용접점 부위가 외 균열로 작용하여 용접부 가장자리가 균열의 선단이 되고, 그곳이 응력의 특이장이 되어 일어나는 파단 현상에 대하여 응력 특이장에서의 응력 강도 계수를 계산하고, 균열의 발생하는 각도를 예측하고자 하였다.

해석을 위한 유한요소 모델은 Fig. 4에 도시하였다. 본 논문에서는 전단형 파단 모델에 대하여 용접점의 반경을 각각 2.5 mm, 5 mm로 변화시켜 해석을 수행하였다. 각 용접점에 대하여 균열 선단을 내포하도록 용접점 부위는 앞 장에서 설명한 9절점 하이브리드 특이 요소를 사용하였으며, 그 외의 부분에서는 일반적인 4절점 등대개변수 요소를 사용하였다. 해석에 있어서 모든 조건은 2차원 탄성으로 가정하였으며 양 끝단에 균일한 하중을 부가하였다. 일반적으로 용접점 부위는 열영향부가 존재하여 재료강도의 분포상태가 다르나 본 논문에서는 강판과 용접부의 용접강도가 동일하다고 가정하였다. 즉 모든 요소에 대하여 탄성계수는 210 GPa, 포아송비는 0.3을 부가하였다. 균일한 하중 조건에서의 변형형상은 Fig. 5에 도시하였다.

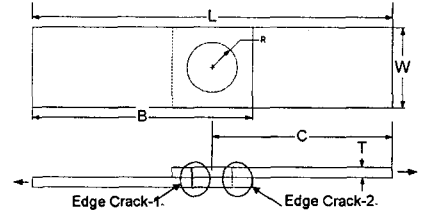


Fig. 3 Dimension of specimen of shear-lap model for the fracture analysis

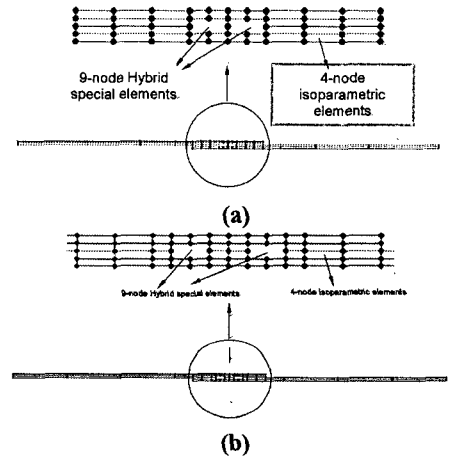


Fig. 4 Finite element model with special elements for the fracture analysis: (a) $r = 2.5$ mm; (b) $r = 5$ mm

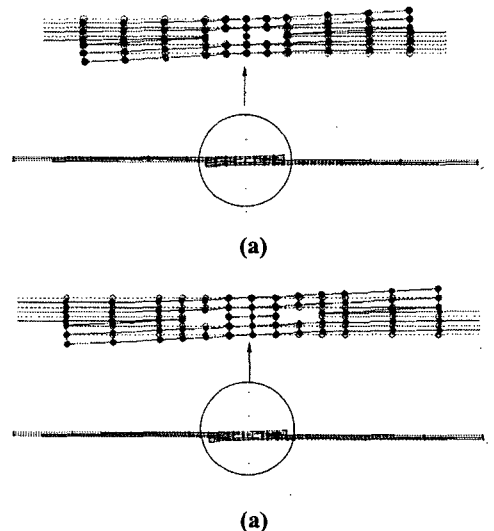


Fig. 5 Deformed shape of shear-lap model: (a) $r = 2.5$ mm; (b) $r = 5$ mm

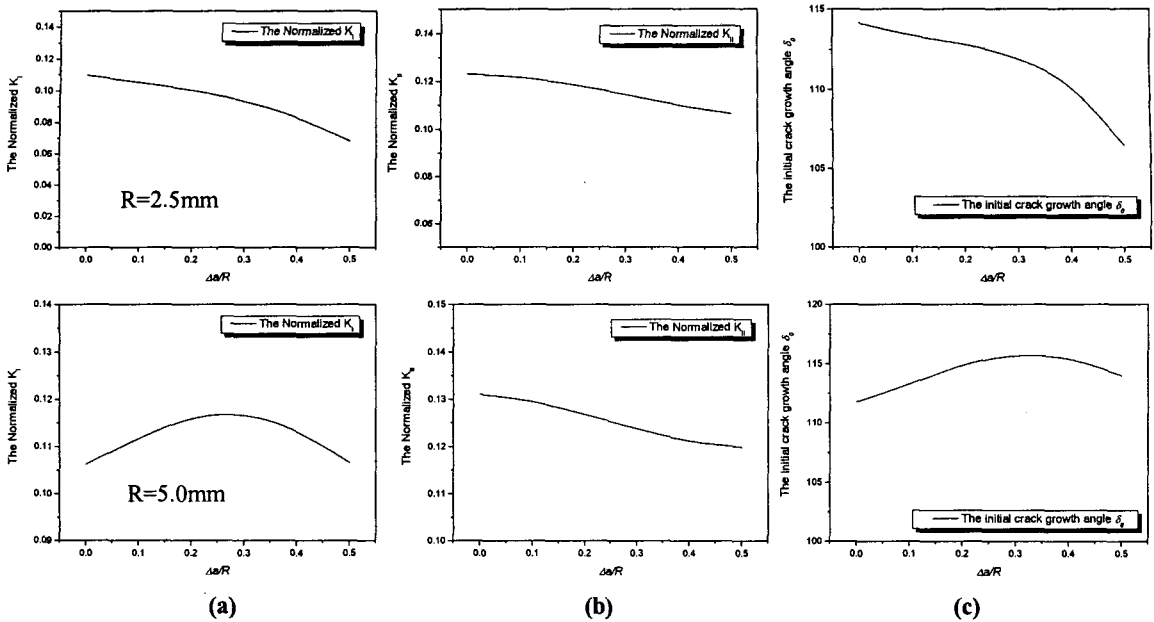


Fig. 6 Results of crack propagation for the shear lap model with different nugget size: (a) variation of stress intensity factor (mode I); (b) variation of stress intensity factor(mode II); (c) crack propagation angle.

Fig. 5의 변형형상을 통하여 전단형 모델의 경우 Mode II 뿐만 아니라 Mode I의 복합된 형태로 변형이 발생함을 알 수 있다. 각 변형 모드에 대한 응력 강도 계수 K_I 과 K_{II} 는 편의상 $\sqrt{2\pi\sigma_0}$ 로 나누어 정규화(normalize)하였다. 용접부 반경이 2.5 mm 인 경우, 정규화된 응력 강도 계수 K_I 과 K_{II} 는 각각 0.10980와 0.12300, 균열 전진 각도 δ_0 는 114.13877°로 계산되었다. 한편, 용접부 반경이 5.0 mm로 증가한 경우에는 K_I 과 K_{II} 는 각각 0.10628, 0.13105 이고 δ_0 는 111.79243°로 계산되었다. 균열 전진 과정에서 균열 성장에 따른 응력 강도 계수 및 전진 각도의 변화는 Fig. 6에 도시하였다.

4. 결론

본 논문에서는 균열을 내포하는 용접점의 미시적 파단에 대한 연구를 수행하기 위하여 하이브리드 특이 요소를 사용하여 응력 강도 계수 및 균열 전진 각도를 계산하였다. 용접점 내부의 결함을 모사하기 위하여 2차원 하이브리드 특이 요소를 개발하고 이를 사용하여 전단형 파단 모델 시편에 대하여 해석을 수행하여 점용접부의 응력 강도 계수를 계산하고 균열 전진에 따른 변화를 예측하였다. 그 결과 전단형 파단 모델은 Mode I

과 Mode II가 복합적으로 나타나며 용접부의 크기가 커 질수록 Mode II의 응력 강도 계수가 상대적으로 크게 나타나는 결과를 얻었다.

참고 문헌

1. 이태수, 이형일, 신수정, 1998 “용접점 파단의 정량적 모델 - I 파단조건”, 한국자동차공학회 논문집, Vol. 6, No. 8 pp. 40~52
2. Combesure, A., Delcroix, F., Clapain, L., Espanol, S., Eliot, P., 2003, “A finite element to simulate the failure of weld points on impact, International Journal of Impact Engineering”, Vol. 28, pp.783~802.
3. Chang, B., Shi, Y., and Lu, L., 2001, “Studies on the stress distribution and fatigue behavior of weld-bonded lap shear joints”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 108, pp. 307~313
4. Tong, P., 1970, 'New displacement hybrid finite element models for solid continua', Int. J. Num. Methods in Eng., Vol. 2, pp. 73~83.
5. Muskhelishvili, M.I., 1953, 'Some basic problems of the theory of elasticity', Nordhoff, Groningen, Holland.