

유한요소법에 의한 피로균열 진전 시뮬레이션

구병춘*(한국철도기술연구원), 양승용(한국철도기술연구원), 박준서(한국철도기술연구원)

Simulation of Fatigue Crack Propagation by Finite Element Analysis

B. C. Goo(Rolling Stock, KRRI), S. Y. Yang(Rolling Stock, KRRI), J. S. Park((Rolling Stock, KRRI)

ABSTRACT

The effect of residual stress on fatigue crack growth was investigated in terms of finite element analysis. Simulations were performed on a CT specimen in plane strain. An interface-cohesive element that accounts for damage accumulation due to fatigue along the notch direction has been used. Numerical results show that fatigue crack growth rate slows down when compressive residual stress field exists in front of the crack tip.

Key Words : Cohesive zone(응집영역), Crack Propagation(균열진전), Fatigue(피로), Fictitious Crack Model(가상균열모델), Finite Element Analysis(유한요소법), Residual Stress(잔류응력), Welding(용접)

1. 서론

피로파괴에 의한 용접부의 균열 발생수명 예측과 균열의 진전해석은 피로파괴 분야에서 오랜 기간 동안 연구되고 있는 핵심 분야의 하나이다. 유용한 여러 해석 방법 중의 하나가 가상균열 모델(fictitious crack model)이다. 가상균열 모델은 Hillerborg [1]에 의해 제안된 모델로서 Dugdale-Barenblatt 균열모델을 확장한 것이다. 가상균열모델은 균열 선단부 손상영역(damage zone)에 대하여 균열을 인접한 두 면이 분리되는 현상으로 이상화하고 두 면 사이에 작용하는 견인력(traction)과 거리 사이의 구성방정식을 기술함으로써 균열의 발생 및 성장을 해석하는 기법이다.

본 연구에서는 기존의 비가역 가상균열 모델 [2-4]을 보완하여 반복적으로 작용하는 피로 하중의 영향이 균열 성장에 고려될 수 있도록 누적손상계수의 진화방정식을 추가함으로써 가상균열 구성방정식을 수정하였다. 개발한 모델을 이용하여 잔류응력분포가 피로균열에 미치는 영향을 해석하였다. 유한요소해석의 수행을 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Standard를 이용하였으며, 반복 하중에 의한 피로균열 진전을 시뮬레이션 하

여 잔류응력 및 응력확대계수 값이 변할 때 균열 성장이 변화하는 경향을 연구하였다.

2. 모델링 및 해석방법

Fig. 1은 해석 대상인 CT 시편의 1/2을 보여 준다. 평면변형률 상태의 2차원 균열에 대하여, 균열 전과 경로 A-B를 따라 응집영역(cohesive zone)을 가정하고 이 구간의 윗면과 아랫면 사이의 변위(displacement jump)와 견인력(traction) 사이의 관계를 구성방정식을 이용하여 기술하였다.

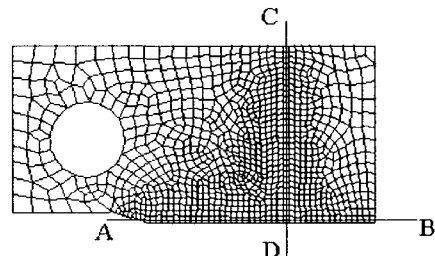


Fig. 1. FE model of a CT specimen

응집영역 구성방정식의 기초적인 형태는 Needleman [2]과 Rose 등에 [3] 의해 제안되었다. 응집영역을 따라 균열이 전파함에 따라 인접한 두 면은 초기의 완전히 밀착된 상태에서부터 벌어지게 되어 최종적으로 견인력이 완전히 소멸된 분리된 상태에 이르게 된다. De-Andres 등은 [4] 재료가 하중 부가 및 제하를 받는 경우에 대하여 응집영역에 작용하는 유효견인력 t 와 유효변위 δ 사이의 관계를 다음 식으로 가정하였다.

$$t = e\sigma_c \frac{\delta}{\delta_c} e^{-\frac{\delta}{\delta_c}} \text{ if } \delta = \delta_{\max} \text{ and } d\delta/dt \geq 0$$

$$t = \frac{t_{\max}}{\delta_{\max}} \delta \text{ if } \delta < \delta_{\max} \text{ and } d\delta/dt < 0$$

$e \approx 2.71828$ 이고 σ_c 및 δ_c 는 재료 상수이며, 두 면 사이의 2차원 변위벡터 $\delta = (\delta_s, \delta_n)$ 에 대하여 유효 변위 δ 는 다음과 같이 정의된다 (Fig. 2).

$$\delta = \sqrt{\beta^2 \delta_s^2 + \delta_n^2}$$

β 는 무게 인자이다. 부하 시에는 유효 견인력 t 가 곡선을 따라 변화하게 되지만, 제하 시에는 원점을 향하여 직선을 따라 변화하게 된다. 그 후 다시 하중을 가하면 견인력 t 는 δ 가 δ_{\max} 에 다다르기 전까지는 직선을 따라 증가하고 δ 가 δ_{\max} 를 넘어서면 다시 곡선을 따라 변화하게 된다. 균열면이 압축될 경우는 접촉 조건을 고려하여 두 면 사이의 변위에 대하여 선형의 반발력이 작용한다고 가정하였다. 즉 $\delta_n < 0$ 인 경우, 균열 면에 수직 방향 견인력 t_n 는 $t_n = k\delta_n$ 에 의해 결정되며, k 는 스프링 상수이다.

Fig. 3과 Fig. 4에 순수 인장 및 순수 전단이 작용하는 경우에 대하여 견인력-변위 곡선을 도시하였다. 위에서 설명한 바와 같이 가상균열 접촉면이 압축될 경우는 견인력이 변위에 대하여 선형적으로 변함을 볼 수 있다. 순수 전단의 경우는 전단 방향에 대하여 좌우 대칭적으로 전단 견인력이 발생하였다.

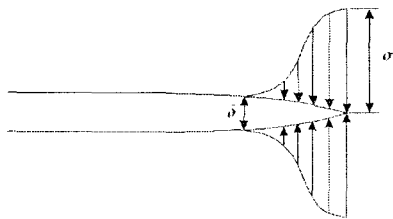


Fig. 2. Traction and displacement of the crack.

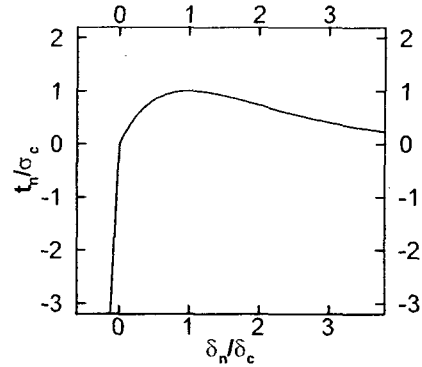


Fig. 3. Normal traction vs. normal displacement.

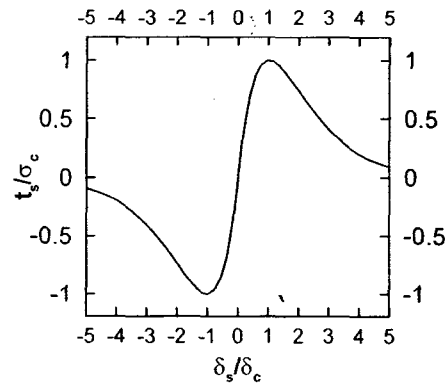


Fig. 4. Shear traction vs. shear displacement.

이상의 비가역 가상균열모델을 반복 하중을 받는 물체의 균열 진전에 적용하면 응집영역에 작용하는 견인력이 재료의 응집강도 σ_c 이하일 경우 균열은 성장하지 않으며 피로 수명은 무한히 길게 된다. 따라서 반복 하중을 받는 물체의 피로 파괴에 적용하기 위해서는 기존의 가상균열 모델에 반복 하중에 의한 피로 손상의 영향을 포함시킬 필요가 있다. Roe 등은 반복 하중에 의해 누적되는 미세 결함들이 재료의 응집강도를 떨어뜨린다고 가정하고 손상계수 D 를 이용하여 균열면의 응집강도 σ_c 를 다음과 같이 조절하였다.

$$\sigma_c = (1-D)\sigma_{c0}, \quad 0 \leq D \leq 1$$

σ_{c0} 는 피로 손상이 없는 초기 상태의 응집강도이다. 한편 손상계수 D 는 다음과 같은 누적 손상을

고려한 진화방정식 (evolution equation)을 시간에 대하여 적분함으로써 구하게 된다.

$$\dot{D} = \left| \frac{\dot{\delta}}{\delta_D} \left(\frac{t}{\sigma_c} - \frac{\sigma_f}{\sigma_{c0}} \right) H(\bar{\delta} - \delta_f) \right|, \dot{D} \geq 0$$

$\dot{\delta}$ 은 유효 변위의 시간에 대한 변화율이며 $\bar{\delta}$ 는 변위 증분의 절대치를 누적한 값이고 $H(\dots)$ 는 Heavyside 함수이다. σ_f 는 재료의 내구한도 (endurance limit)이고, δ_f 는 피로 손상이 누적되기 위해 필요한 최소 변위이며, δ_D 는 재료 상수이다.

3. 해석 결과

피로균열 성장에 미치는 압축 잔류응력의 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 1의 2차원 CT 시편에 잔류응력이 분포하지 않는 경우와 분포하는 경우에 대하여 가상균열 모델을 이용하여 피로균열 진전을 시뮬레이션 하였다. 잔류응력은 C-D 라인을 따라 용접을 한 경우를 유한요소 해석으로 수행하여 부가하였다[5]. Table 1에 가상균열 모델의 파라미터 값들을 나열하였다. 피로균열의 성장은 초기 두께가 0인 경계요소(interface element)를 시편의 대칭면을 따라 분포 시킨 후 경계요소에 응집영역 구성방정식을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 시편에 피로하중을 가하기 위하여 CT 시편 원형 홀의 상단에 주기 2초의 0과 Δ_{max} 사이를 오가는 삼각형 변위 하중을 가하였다.

Table 1. Material parameters.

σ_{c0}	1000 MPa	δ_D	0.5 mm
δ_c	0.05 mm	σ_f	150 MPa
δ_f	0.25 mm	k_s	2

먼저 잔류응력이 없는 경우의 피로균열 성장 해석결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 5는 시간에 따라 시편 대칭면 상에서 피로균열이 성장하는 모양을 시간-거리 선도로 나타낸 그림이다. Fig. 6은 응력확대계수 범위 ΔK 에 대한 피로균열의 성장 속도를 Log-Log 스케일에 나타낸 그림이다. 응력확대계수 범위는 동일한 시편, 균열 길이 및 하중 조건에 대하여 계산한 값이다. 균열의 성장 속도는 가상균열 모델을 이용한 균열 성장 시뮬레이션 결과로부터 구하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 피로균열 성장은 Paris의 멱함수 관계식 $da/dN = C(\Delta K)^n$ 으로 근사할 수 있음을 알 수 있으며 상수 n의 값은 대략 3.32로 계산 되었다.

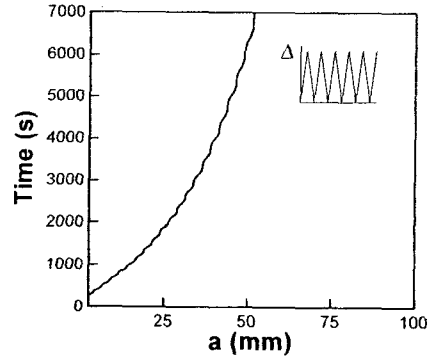


Fig. 5 Numerical fatigue crack growth for constant amplitude fatigue without residual stress before loading. Amplitude of the cyclic displacement loading is 0.1 mm.

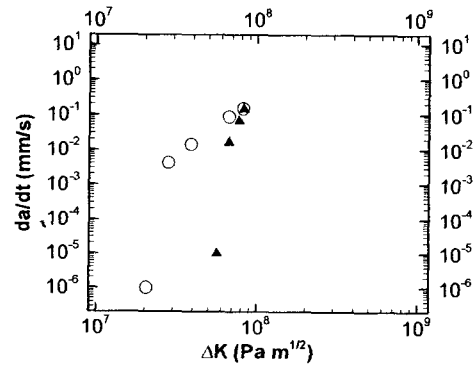


Fig. 6. Numerical fatigue crack growth rates with and without residual stress. Triangle: with residual stress. Circle: without compressive residual stress around the crack tip.

다음으로 균열 선단 근방에 가열에 의한 압축 잔류응력이 존재하는 경우를 해석하였다. CD 선을 따른 가열에 의한 잔류응력 분포는 유한요소 열응력 해석결과를 사용하였다. 노치 선단에서 A-B 선을 따라 약 15 mm 떨어진 위치에서의 피로 균열 성장 속도를 Fig. 6에 도시하였다. 응력확대계수 범위 ΔK 는 잔류응력이 존재하지 않는 시편에 대한 값이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 압축잔류응력이 존재하는 시편의 경우 인장 반복 하중에 의한 피로균열 성장 속도가 현저히 감소함을 확인할 수 있다. 고전적인 피로균열 성장 해석에서는 잔류응력 장의 영향을 고려한 유효 응력확대계수 범위

ΔK_{eff} 를 계산하여 피로균열 성장 속도와 ΔK_{eff} 사이의 관계를 연구한다. 인장 반복하중이 압축잔류응력 장에 가해질 경우 ΔK_{eff} 의 값은 잔류응력이 없는 경우에 비하여 감소하게 되며 따라서 피로균열 성장 속도도 감소함을 예측할 수 있다.

Fig. 7은 하중 부가 이전에 잔류응력이 존재하지 않는 시편에 대하여 피로균열이 발생하여 시편 내부로 전파하였을 때 시편에 발생한 잔류응력 분포를 나타낸다. 피로균열에 의해 외부하중이 없는 상태에서 시편에는 미소한 잔류응력이 발생함을 볼 수 있다. Fig. 8은 가열에 의해 초기 잔류응력이 존재하는 경우, 잔류응력 장이 피로균열의 전파에 의해 재분포된 모양을 도시한 것이다. 피로균열이 시편 내부로 전파함에 따라 인장 잔류응력은 완화되지만 압축 잔류응력의 분포는 크게 변하지 않음을 확인할 수 있다.

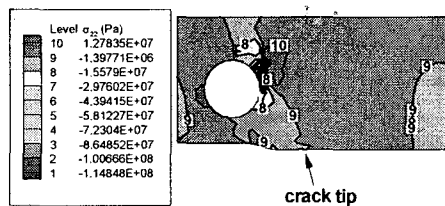


Fig. 7. Vertical residual stress distribution induced by crack closing after 125 cycles. This is for the case without initial residual stress before loading.

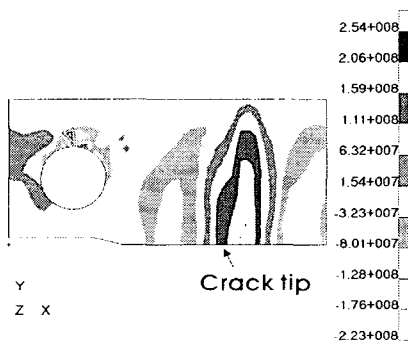


Fig. 8. Vertical residual stress distribution after 250 cycles. This is for the case with initial residual stress before loading.

4. 결론

본 연구에서는 피로하중의 영향을 고려한 가상균열 모델을 이용하여 압축 잔류응력이 존재하는 시편의 피로균열 성장을 유한요소법으로 시뮬레이션 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 피로하중의 영향을 고려할 수 있는 가상균열 모델 구성방정식을 수립하였으며, 이를 이용하여 반복 하중에 의한 피로균열의 성장을 시뮬레이션 할 수 있었다.
- (2) 균열 선단부에 압축 잔류응력이 존재할 경우 피로균열의 성장이 지연됨을 확인하였다.
- (3) 시뮬레이션에 의해 예측된 피로균열 진전은 기본적인 몇 개의 가정으로부터 Paris의 멱함수 관계식을 설명할 수 있어 Paris의 식에 대한 이론적 근거를 제시할 수 있는 가능성을 보였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. A. Hillerborg, "Application of the fictitious crack model to different materials." Int. J. Fract. Vol. 51, pp. 95-102, 1991.
2. A. Needleman, J. Appl. Mech. Vol. 54, p. 525, 1987.
3. J. H. Rose, J. Ferrante and J. R. Smith, Phy. Rev. Let. Vol. 47, p. 675, 1981.
4. A. de-Andres, J. L. Perez and M. Ortiz, Int. J. Sol. Struct. Vol. 36, p. 2231, 1999.
5. 구병춘 외, "철도차량 구조물의 잔존수명 평가 기술 개발," 과학기술부 국가지정연구실사업 보고서 No. M1-0203-00-0104, 2004. 6.