

부하시 선단이 닫힌 균열의 개구거동 Opening Behavior of Tip-Closed Crack During Up-Loading

박 응준* 김 응준** 유 승현*

*아주대학교 기계및산업공학부, **대전산업대학교 신소재공학부

1. 서론

피로균열은 균열선단 근방의 소성역이나 압축 잔류응력에 의하여 무부하 상태에서 균열의 선단부가 닫혀 있고, 인장 하중에 의해 어느 일정 하중에서 균열 선단이 완전히 열리기까지 소요된 하중은 균열전파에 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 보고되어 있다⁽¹⁾.

본 연구에서는 이러한 보고의 타당성을 규명하는 기초적 연구로서 무부하 상태에서 닫혀 있던 균열의 선단부가 부하에 의해 열리기까지의 하중 범위에 있어서, 부하에 따른 균열형상 변화와 균열 선단 전방부의 역학적 거동을 수치 해석적으로 검토하였다.

2. 해석 모델 및 해석 방법

2.1 해석 모델

본 연구의 해석에 사용한 시험편의 형상 및 물성치는 전보⁽²⁾와 같다. 수치 해석에는 범용 유한 요소 해석 패키지인 ABAQUS Ver5.8을 이용한 유한 요소 해석법이 사용되었으며, 4-절점 평면응력 요소(CPS4; 4-node plane stress element)와 균열면의 접촉을 고려한 접촉요소(ISL21; 2-node line contact element)를 사용하였다. 시험편 형상의 대칭성과 균열면의 접촉응력 등을 고려하여 1/2모델로 하였다. 균열면의 마찰력은 고려치 않았으며, 균열면 및 균열 선단부의 요소의 크기는 0.05mm로 하였다. Fig. 1은 균열 선단부의 요소의 형상을 나타낸 것이다.

2.2 해석 방법

본 연구에서는 균열의 중앙부가 열려있고 균열선단부의 일정구간은 닫혀 있는 상태에서 부하(σ_p)에 의해 균열 중앙의 개구부가 균열선단 방향으로 확장되는 하중범위를 대상으로 하여, 하중 변화에 따른 균열형상의 변화와 함께 균열선단부의 닫혀 있는 균열면과 균열 선단 전방부의 응력 및 변형률을 검토하였다. 먼저 Fig. 2에서와 같이 무부하시 중앙부가 열려 있고 양 선단부가 닫혀 있는 균열의 형상을 유한 요소 해석에 의하여 재현하였다. 균열 선단부의 일정 구간에는 전보에서와 같이 압축 잔류응력에 해당하는 등분포 응력을 균열면에 수직방향으로 가하였다. 균열면에 가한 압축 잔류응력은 모델 시험편의 소재의 항복응력을 고려하여 80MPa로 하였다. 균열면의 응력은 유한 요소 해석에서 구한 접촉응력이다.

무부하 상태에서 선단부가 닫혀 있던 균열이 부하에 의해 열려가는 과정은 시험편 길이 방향으로 충분히 떨어진 위치에서 인장하중을 부과함으로써 재현하였다.

3. 해석 결과

Fig. 3은 부하에 의하여 균열 중앙의 개구부가 확장되어 균열선단이 열리기 전까지의 각 하중에서 얻어진 균열면과 균열 선단 전방부 균열연장선상(이후 균열선단 전방부라 함)의 하중방향 응력분포를 균열이 없는 모재 시험편에서의 하중방향 응력분포와 동시에 나타낸 것이다. 각 하중에서 얻어진 하중방향 응력분포를 살펴보면 부하에 의해 균열 중앙의 개구부가 균열선단부로 확장됨에 따라 접촉응력으로 구한 균열면의 하중방향 압축 응력분포는 그 크기가 점차 감소한다. 한편 요소로부터 구한 균열 선단 전방부의 하중방향 인장 응력분포는 균열선단부에서 모재의 결과와 비교해서 약간 응력이 상승하는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 균열 중앙 개구부의 확장에 기인한 것으로 추정된다.

Fig. 4는 Fig. 3으로부터 구한 균열면과 균열선단 전방부의 각 위치에서의 하중방향 응력의 변화량을 나타낸 것이다. 균열면과 균열 선단 전방부의 하중방향 응력의 변화량 분포에는 균열 선단의 위치에 어떠한 응력의 변화도 나타나지 않으므로 닫혀있는 균열면과 균열 선단 전방부는 역학적으로 동일한 것임을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 방법으로 구한 균열 선단 전방에서의 $\Delta\sigma_x, \Delta\epsilon_x, \Delta\epsilon_y$ 로부터 부하에 따른 균열 선단 전방의 임의의 위치에서의 $\sigma_y, \epsilon_y, \sigma_x, \epsilon_x$ 의 변화를 균열이 없는 모재의 경우와 비교하여 나타낸 것이다. (a),(b),(c),(d) 어느 경우에 있어서도 하중 증가에 따른 응력과 변형률은 증가하는 양상을 나타내고 있으며, Fig. 4에서 보인 바와 같이 응력과 변형률의 증가율은 균열 선단에 가까운 위치일수록 커지는 것을 알 수 있다. 특히 (d)에 나타낸 ϵ_x 의 결과는 하중 증가에 따라서 ϵ_x 가 곡선적으로 변화하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상은 Fig. 3에서 언급한 바와 같이 부하 중에 개구부가 균열선단 방향으로 확장되는 현상에서 비롯된 것으로 ϵ_x 가 개구부의 확장의 영향을 가장 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5(d)의 하중변화에 따른 ϵ_x 의 변화로부터, 부하에 따른 균열선단 위치의 변화를 검토한 것이다. 이동 거리는 균열 중앙부쪽으로의 이동을 양(+)으로 하였으며, 참고를 위해 모재에 같은 균열길이를 시험편 표면에 표시한 경우 균열 선단 표시 위치의 변화를 비교하여 나타내었다. 부하에 의하여 개구부가 확장됨에 따라 균열 선단의 위치는 모재의 표시 위치와의 차가 점차 커짐을 알 수 있으며, 변화 양상도 곡선을 나타내고 있다.

Fig. 7은 부하에 의하여 균열 중앙의 개구부가 확장되어 균열선단이 열리기 전까지의 각 하중에서 얻어진 균열의 형상 변화를 나타낸 것이다. 하중이 증가되면서 균열 중앙의 개구변위가 증가되고, 균열이 점차적으로 균열 선단쪽으로 열리게 되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 균열의 중앙부가 열려있고 균열선단부의 일정구간은 닫혀 있는 상태에서 부하에 의하여 균열 중앙의 개구부가 균열선단 방향으로 확장되어가는 하중 범위에서의 균열 형상의 변화 및 균열면과 균열선단 전방부에서의 응력, 변형률의 변화를 검토하여 다음과 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 균열 중앙의 개구부가 확장됨에 따라 균열선단전방부의 응력 및 변형률의 분포는 개구부가 확장됨에 따라 상승하는 결과를 나타내며 상승의 정도는 균열 선단에 근접할수록 커진다.
- 2) 균열면과 균열선단 전방부의 응력 및 변형률의 변화량 분포는, 닫혀 있는 균열면과 균열 선단 전방부가 역학적으로 동일한 것을 나타내고 있다.
- 3) 균열 선단부가 닫힌 균열은 부하에 의하여 균열 개구부가 확장됨에 따라 균열 선단의 위치가 균열 중앙부로 이동하는 경향을 보인다.

5. 참고문헌

- 1) W. Elber, 'The Significance of Fatigue Crack Closure', ASTM STP486, pp.230~242, 1981
- 2) 김 응준, 박 응준, 유 승현, '하중부하시 선단이 닫힌 균열의 역학적 거동', 용접학회 추계학술발표대회, Vol. 34, pp. 280-283, 1999

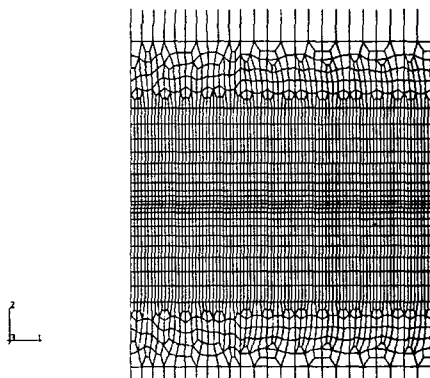


Fig. 1 Finite element mesh for analysis

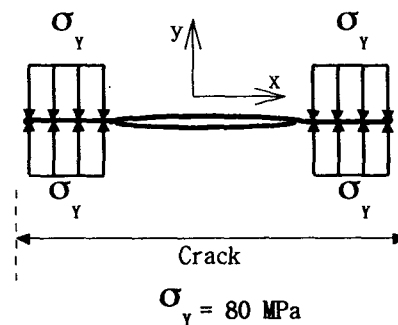


Fig. 2 The residual stress applied to the crack surface

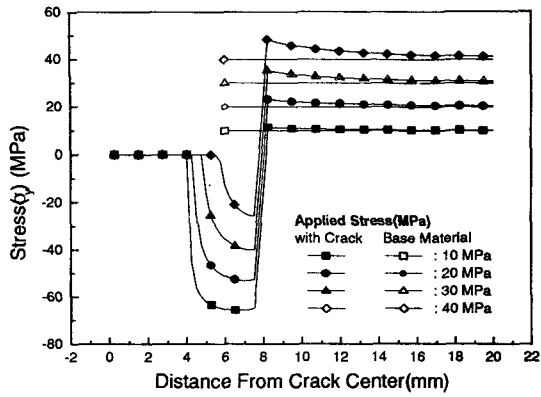


Fig. 3 Change of stress distribution subjected to up-loading

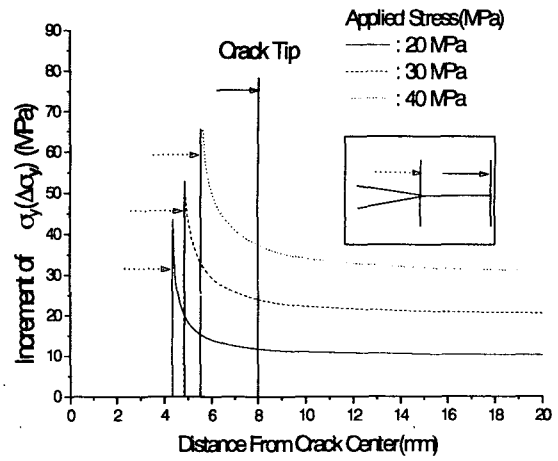
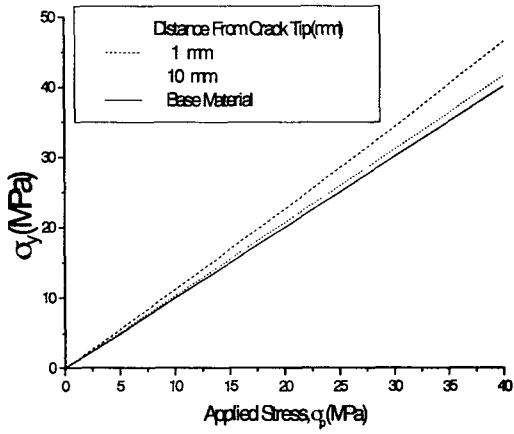
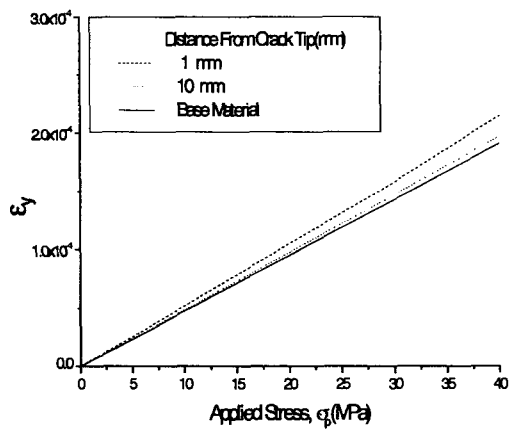


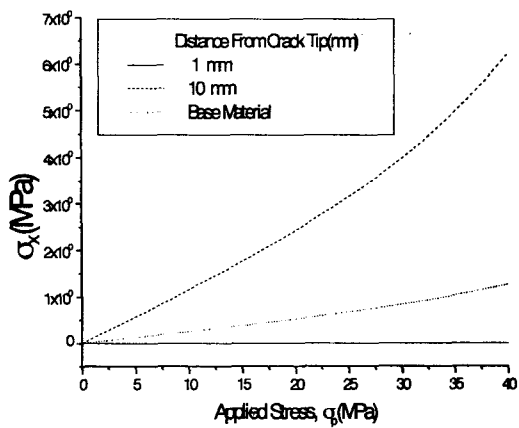
Fig. 4 Increment of $\sigma_y (\Delta \sigma_y)$ subjected to up-loading



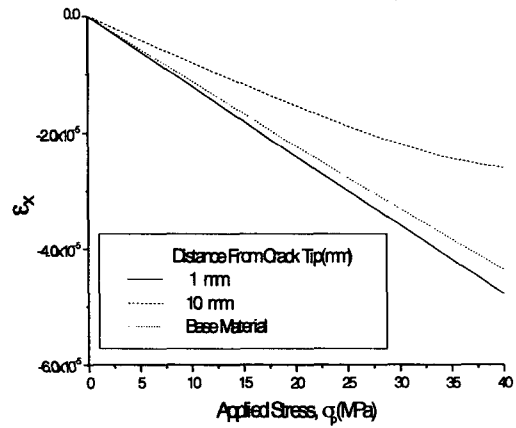
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 Variation of stress and strain subjected to up-loading

(a) σ_y vs. σ_p (b) ϵ_y vs. σ_p (c) σ_x vs. σ_p (d) ϵ_x vs. σ_p

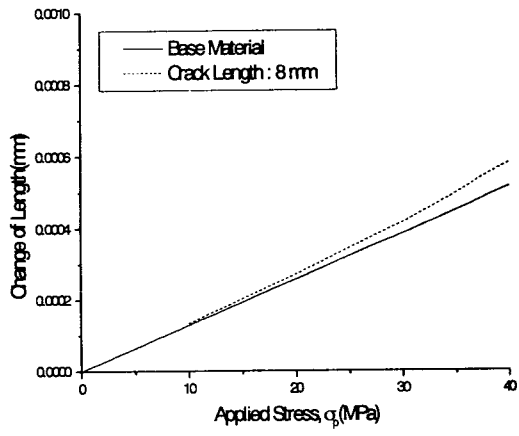


Fig. 6 Transition of crack tip subjected to up-loading

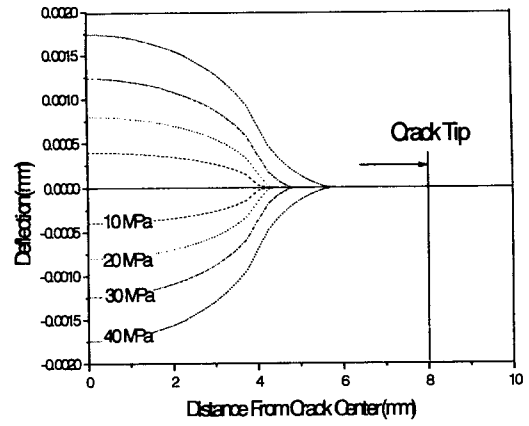


Fig. 7 Change of crack configuration during up-loading