

하중부하시 선단이 닫힌 균열의 역학적 거동

Mechanical Behavior of Tip-Closed Crack During Up-Loading

김 응준*, 박 응준**, 유 승현**

*대전산업대학교 신소재공학부, **아주대학교 기계및산업공학부

1. 서론

용접구조물의 용접이음부에 피로균열이 발생한 경우 균열선단은 균열선단 근방의 소성역이나 압축 잔류응력에 의하여 무부하 상태에서도 닫히게 된다. 이렇게 선단이 닫힌 균열은 인장 하중부하에 의하여 어느 일정 하중에서 완전히 열리게 되며 균열선단이 열리기까지 소요된 하중은 균열전파에 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 보고되어 왔다.⁽¹⁾

본 연구에서는 이러한 보고의 타당성을 규명함과 동시에 그 이론적 근거를 마련하기 위하여 무부하 상태에서 닫혀 있던 균열의 선단이 하중부하에 의하여 열리게 되기까지의 하중 범위를 대상으로 하여 하중부하에 따른 균열선단 근방 모재의 역학적 거동을 균열면의 역학적 불연속 문제에 중점을 두어 수치적으로 검토하였다.

2. 해석 모델 및 해석 방법

2-1 해석 모델

Fig. 1은 본 연구의 해석에 사용한 시험편의 형상을 나타낸 것이다. 시험편은 유한 판폭의 중앙에 균열이 존재하는 것으로 해석에 사용된 시험편의 물성치는 Table. 1과 같다. 유한 요소해석에 사용된 모델은 시험편 형상의 대칭성과 균열면의 접촉응력등을 고려하여 1/2모델로 하였고 사용된 요소(Element)는 판폭과 길이에 비해 두께가 얇은 경우의 문제에 적용되는 평면응력 요소로 하였다. 이러한 해석에는 범용 유한요소패키지인 ABAQUS (Version 5.8)를 사용하였으며 해석에 사용된 요소는 ABAQUS에서 추천하는 4-절점 평면 응력 요소(CPS4 ; 4-node bilinear element)와 접촉요소이다.

2-2 해석 방법

본 연구에서는 균열선단이 닫혀있는 상태, 즉 균열선단의 균열면이 접촉하고 있는 상태에서 하중부하에 의하여 균열 중앙의 개구부가 균열선단 방향으로 확장되어 어느 일정하중에서 균열선단이 열리기까지의 하중범위를 대상으로 하여 하중 변화에 대한 균열선단부의 닫혀 있는 균열면의 응력과 균열선단전방부(Ligament)의 응력의 변화를 검토하였다. 먼저 Fig. 2에서와 같이 무부하시 중앙부가 열려 있고 양 선단부가 닫혀 있는 균열의 형상을 유한요소 해석에 의하여 재현하였다. 균열 선단부의 일정 구간에는 Dugdale 모델⁽²⁾에서와 같이 압축 잔류응력에 해당하는 등분포 응력을 균열면에 수직방향으로 가하였으며 또한 균열 중앙부의 개구 현상은 균열 전방 소성역의 영향을 역시 Dugdale 모델에서와 같이 잔류응력으로 간주하여 이에 해당하는 압축 잔류응력을 균열선단부에 균열 중앙방향으로 가함으로써 재현을 시도하였다. 무부하 상태에서 선단부가 닫혀 있던 균열이 하중부하에 의하여 열려가는 과정은 Fig. 1에 도시한 것처럼 시험편 길이 방향으로 충분히 떨어진 위치에서 인장하중을 부과함으로써 재현하였다.

균열선단부의 일정 구간의 균열면과 균열선단에 가한 압축 잔류응력은 모델 시험편의 소재의 항복응력을 고려하여 80 MPa로 하였다. 또한 해석에 사용된 모델은 Fig. 1과 Fig. 2에서와 같이 잔류응력, 하중 및 기하학적 형상이 좌·우 대칭성을 가지므로 1/2 모델로 하였다. Fig. 3은 균열선단 부분의 유한요소모델을 나타낸 것으로 접촉하고 있는 균열면과 균열선단전방부의 요소길이는 0.25 mm로 하였다. 균열면의 접촉응력의 해석에는 마찰력은 고려하지 않았다.

3. 해석 결과

Fig. 4는 하중부하에 의하여 균열 중앙의 개구부가 확장되어 균열선단이 열리게 되기까지의 각 하중에서 얻어진 균열면과 균열선단전방부의 하중방향 응력분포를 나타낸 것이다. 비교를 위하여 균열이 없는 모재 시험편에서의 하중방향 응력분포를 동시에 나타내었다. 여기서 단혀 있는 균열면의 응력은 균열면과 균열선단에 작용시킨 압축 잔류응력으로부터 유한요소해석에 의하여 구한 접촉응력이다. 각 하중에서 얻어진 하중방향 응력분포는 하중부하에 의하여 균열 중앙의 개구부가 확장됨에 따라 접촉응력으로 구한 균열면의 하중방향 압축 응력분포는 그 크기가 점차적으로 감소되는 경향을 보이고 있다. 한편 요소로부터 구한 균열선단전방부의 하중방향 인장 응력분포는 균열선단부에서 현저한 응력집중을 보이지 않고 하중 증가에 비례하는 양상을 보이고 있다. 이러한 하중부하에 따른 균열선단전방부의 하중방향 응력은 그 크기와 분포 양상이 균열이 없는 모재 시험편에서 얻어진 해석결과와 같이 하중에 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 균열선단전방부의 균열 연장선(Section A)과 균열 연장선으로부터 수직 방향으로 6 mm 떨어진 단면(Section B)에서의 하중부하에 의한 하중방향응력 분포의 변화를 비교한 것이다. 하중이 증가되어 균열 중앙의 개구부가 확장되더라도 균열선단은 여전히 단혀 있으므로 Section A와 Section B의 하중방향 응력은 거의 일치하여 구분이 어려울 정도이며 이러한 결과는 Fig. 4에서 언급한 바와 같이 균열이 없는 모재 시험편에서의 결과와 같은 경향임을 알 수 있다.

Fig. 6은 하중부하에 의하여 균열 중앙의 개구부가 확장되어 균열선단이 열리게 되기까지의 각 하중에서 얻어진 균열면의 형상 변화를 나타낸 것이다. 하중이 증가되면서 균열 중앙의 개구변위가 증가되고, 균열이 점차적으로 균열 선단쪽으로 열리게 되는 것을 알 수 있다.

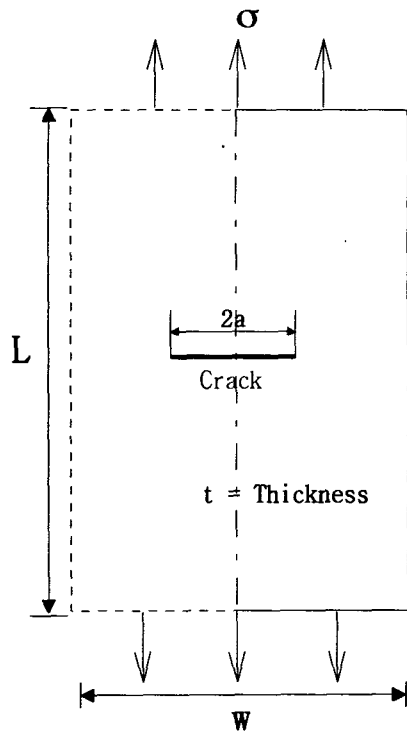
4. 결 론

무부하 상태에서 선단부가 단혀 있던 균열이 하중부하에 의하여 선단이 열리기 까지의 하중 범위에 대하여 하중의 증가에 따른 균열선단 근방의 하중방향 응력분포의 변화를 해석적으로 검토하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1). 단혀 있는 균열면에 작용하는 응력은 균열면의 접촉응력으로 구할 수 있다.
- 2). 균열 중앙부의 개구 현상은 균열 전방 소성역의 영향을 잔류응력으로 간주하여 이에 해당하는 압축 잔류응력을 균열선단부에 균열중앙방향으로 가함으로써 재현할 수 있다.
- 3). 하중부하에 의하여 균열 중앙의 개구부가 확장됨에 따라 접촉응력으로부터 구한 단혀 있는 균열면의 하중방향 응력의 크기는 점차적으로 감소하는 경향을 보인다.
- 4). 균열선단이 단혀 상태에서의 하중증가에 따른 균열선단전방부의 하중방향 응력은 그 크기와 분포 양상이 균열이 없는 모재 시험편에서 얻어진 결과와 같은 경향을 보인다.

5. 참고문헌

- 1) W. Elber, The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP486, 1981, p.230~242
- 2) D. S. Dugdale, J. Mech. Phys. Solids, 8, 1960, p.100~104



L = 250 mm, a = 8 mm
w = 100 mm, t = 5 mm

Fig. 1 The configuration of the specimen

Table. 1 Material properties of the specimen

Material	E	ν
Steel(Isotropic)	210×10^3	0.25

E : Young's Modulus(MPa)

ν : Poisson's Ratio

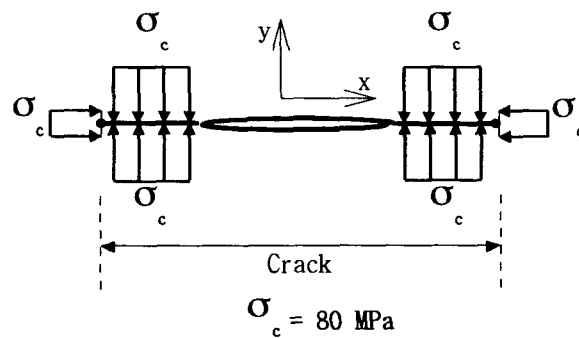


Fig. 2 The residual stress applied to the crack surface and crack tip

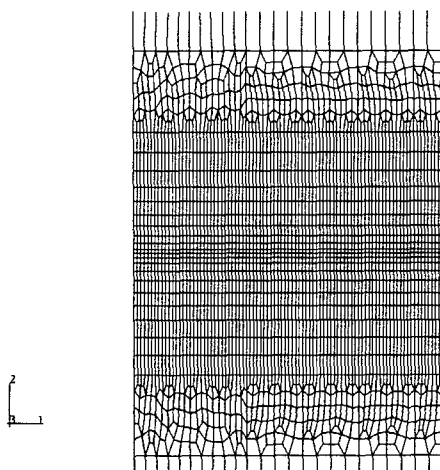


Fig. 3 Finite element mesh for analysis

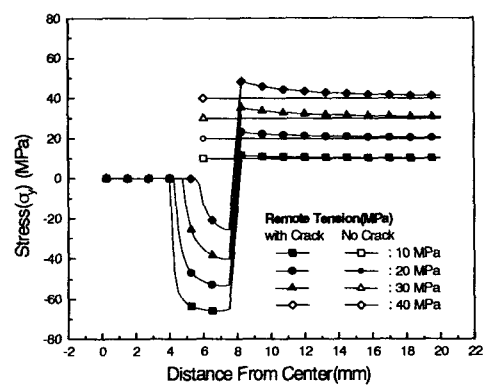


Fig. 4 Change of stress distribution subjected to up-loading

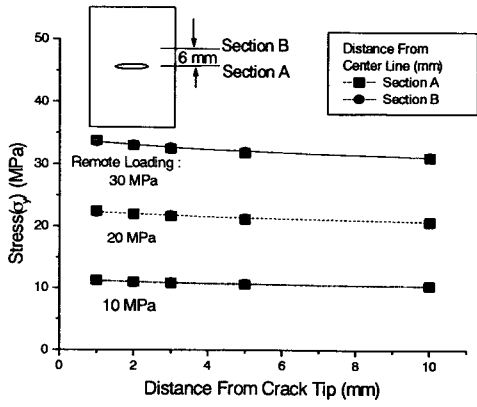


Fig. 5 Comparison of the stress distributions between Section A and Section B

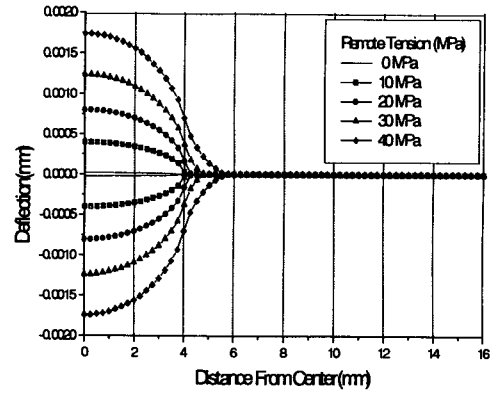


Fig. 6 Change of crack configuration during up-loading