

균열 진전에 따른 잔류응력 재분포 해석을 위한 수치해석 모델링

Numerical Modeling for the Analysis of Residual Stress Redistribution due to Crack Propagation

송 하 철* 이 창 현* 장 창 두**
Song, Ha-Cheol Lee, Chang-Hyun Jang, Chang-Doo

ABSTRACT

As the crack grows in the residual stress fields, the distribution of the residual stress is changed. In this study, a finite element modeling technique is developed to simulate the redistribution of residual stress due to crack propagation. To certify the accuracy, the crack propagation tests were carried out and the effective stress intensity factor range was evaluated considering the redistribution of residual stress from the FE analysis.

1. 서론

선박이나 해양구조물의 제작 공정상 필연적으로 수반되는 용접 및 선상가열 과정은 부재 내의 불균일한 온도 분포 및 이에 따른 국부적인 열 사이클에 의하여 잔류 소성 변형 및 잔류 응력을 생성시킨다.

잔류응력은 구조물의 피로 강도를 크게 저하시키는 요인이 된다고 알려져 있어, 잔류응력장에서 전파하는 피로 균열에 대하여 잔류응력이 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다[1]. 그러나 부재 내의 잔류응력은 피로 균열이 전파함에 따라 이완 및 재분포되는 특성을 가지고 있어, 균열 진전에 따른 잔류응력의 분포를 정확히 파악하여 파괴 특성 평가에 반영하는 연구가 선행되어야 한다[2].

잔류응력을 측정할 수 있는 실험적 기법으로는 응력 이완법, X선 회절법, 초음파법, 자화식 응력자시계 등 많은 방법이 소개되어 있다[3]. 그러나 균열 진전에 따른 초기 잔류응력의 재분포를 계속 추적해야 하는 본 과제 특성상 파괴적인 계측 기법은 수많은 시간과 경비를 요구하므로 적용하기가 곤란하며, 비파괴적 계측 기법도 측정 오차가 커지는 단점 등을 가지고 있다.

* 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

** 서울대학교 조선해양공학과 교수

따라서 본 연구에서는 유한요소법에 의한 열탄소성 해석을 수행하여 초기 잔류응력을 구현하고 균열 진전에 따른 잔류응력의 재분포를 시뮬레이션할 수 있는 수치해석 모델링 기법을 개발함으로써 상기한 단점을 극복하고자 한다. 아울러 응력 이완법의 하나인 천공법(hole drilling method)을 이용하여 초기 잔류응력을 수치 해석상의 결과와 비교하고, 균열 진전 실험을 수행해 해석상의 잔류응력 재분포 결과를 유효응력확대계수 범위 산정에 적용함으로써 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 균열 진전에 따른 잔류응력 재분포 해석을 위한 수치해석 모델링

2.1 해석 대상

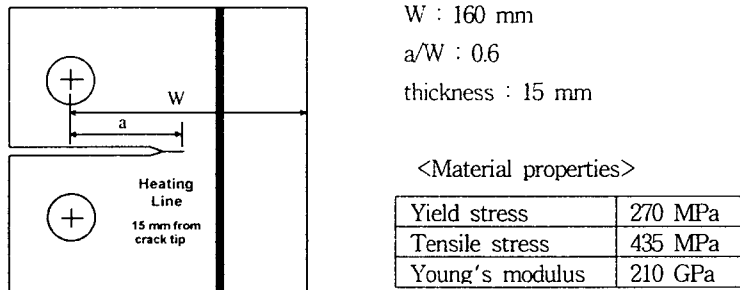


Fig.1 CT specimen for analysis and experiment

해석 및 실험을 위한 CT 시편은 15 mm 두께의 일반 구조용 압연강 SS400을 사용하였고 피로 균열 진전 실험에 대한 ASTM E647을 기준[4]으로 제작하였다. 재료의 기계적 성질을 파악하기 위해 인장 실험을 실시하였으며 그 결과는 Fig.1 과 같다.

시편의 종류는, 잔류응력이 피로 파괴 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 잔류응력이 존재하지 않는 시편과 균열 선단으로부터 15 mm 위치에 선상가열을 하여 인위적인 잔류응력을 생성시킨 시편 두 종류로 하였다. 가열 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Heating conditions

Gas pressure	Oxygen 55.2 kPa Propane 51.7 kPa
Heating line	15 mm from crack tip
Heating speed	10 mm/sec.
Torch tip clearance	21 mm
Heat input	1300 cal/sec.

2.2 수치 해석 모델링 기법

균열의 진전에 따른 잔류응력 재분포를 해석하기 위하여 먼저 시편에 선상가열을 하여 잔류응력을 유발하는 과정을 모델링하기 위한 열탄소성 해석을 수행하고, 균열을 진전시켜 가며 탄소성 해석을 수행하는 과정을 시뮬레이션하였다. 해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

2.2.1 열탄소성 해석

선상가열에 의한 잔류응력을 계산하기 위해, 재료의 비선형성을 고려한 과도(過渡) 열탄소성 해석(transient thermal elasto-plastic analysis)을 수행하였다. 유한요소로는 8절점 입체요소인 SOLID70을 이용하였고 균열이 전파될 영역은 조밀하게 분할하였다. 열원은 토오치와 같은 속력으로 이동하는 분포열속(distributed heat flux)으로 모델링하였고, 열속의 세기는 Gaussian 분포로 가정하였다[5].

2.2.2 균열 진전에 따른 잔류응력 재분포 해석

균열이 진전되면 재료 내부에는 불연속면이 생기고 잔류응력 분포도 변하게 된다. 이러한 균열 진전 현상을 모델링하기 위해 본 연구에서는 균열이 진전되는 면에 대칭 경계조건을 부여한 후, 이를 하나씩 제거하는 방법을 이용하였다. Fig.2 에서와 같이 먼저 열탄소성 해석을 마친 후, 균열을 중심으로 대칭인 절반의 요소들을 대칭 경계조건으로 치환하고 균열의 진전에 따라 균열 끝부분의 대칭 경계조건을 하나씩 풀어주었다.

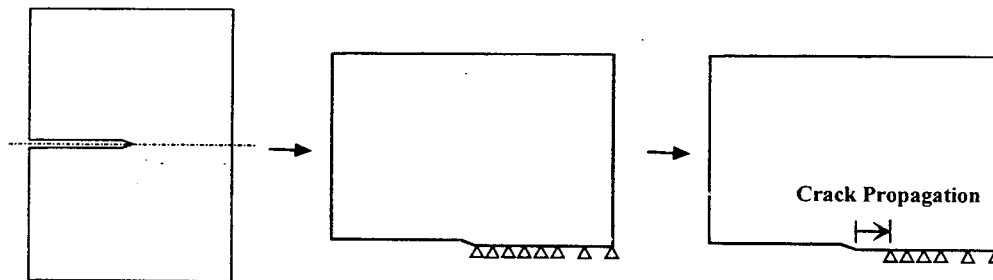
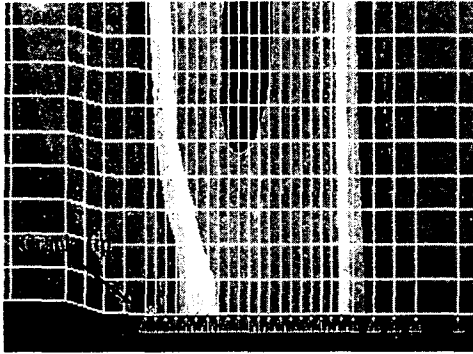


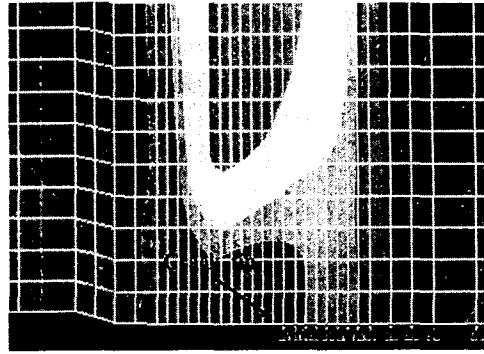
Fig.2 Modeling of crack propagation

2.3 해석 결과

수치해석의 결과는 Fig.3과 Fig.4에 정리하였다. Fig.3은 균열 선단이 노치로부터 6 mm 위치에 있을 때와 24 mm 위치에 있을 때의 가열선 방향 잔류응력의 분포 변화를 보여주고 있다. Fig.4는 초기 균열 선단에 존재하는 압축 잔류응력이 균열이 진전됨에 따라 인장 잔류응력으로 천이되어 가는 과정에 대해 균열 진전 방향으로의 잔류응력 분포를 도시한 것으로써 기존의 실험 논문과 매우 유사한 경향을 보여주고 있다[2][6].



(a) crack tip : 6 mm from notch



(b) crack tip : 24 mm from notch

Fig.3 Residual stress redistribution due to crack propagation

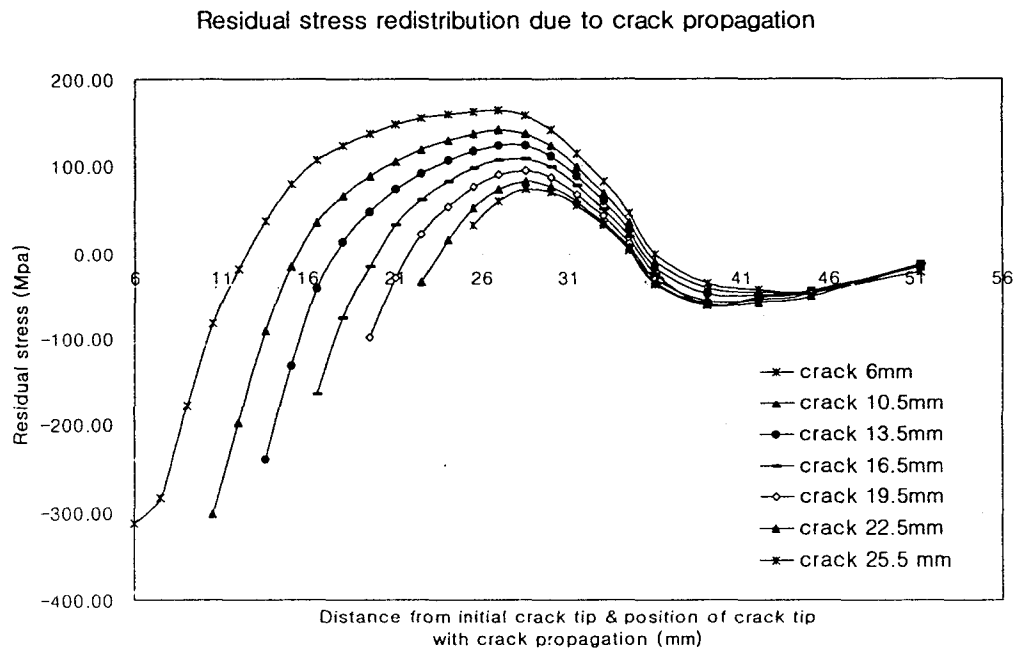


Fig.4 Residual stress redistribution due to crack propagation

3. 잔류응력 재분포 해석의 실험적 검증

3.1 천공법(hole drilling method)에 의한 초기 잔류응력 분포 측정

해석 결과의 검증을 위해 응력 이완법 중의 하나인 천공법을 이용하여 초기 잔류응력 분포를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 천공법에 의한 잔류응력 계측은 ASTM E837-92 [7]에 따라 수행하였으며, 잔류응력 계측 방법 중 매우 일반화되어 있는 방법인 바 상세한 유도 과정은 생략한다.

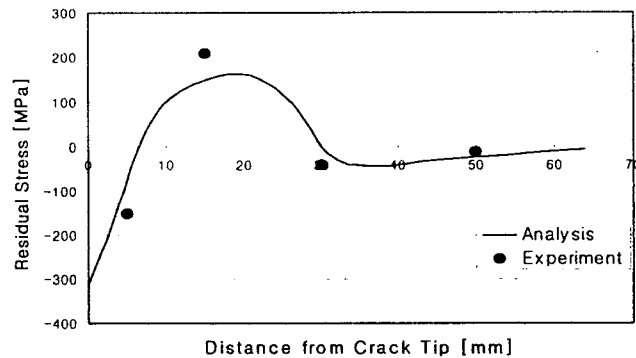


Fig.5 Results of initial residual stress

3.2 균열 진전 실험에 의한 수치해석 결과의 검증

균열 전파 속도에 미치는 잔류응력의 영향을 평가하기 위한 수단으로 그 타당성을 인정 받고 있는 방법으로는, 파괴역학에 근거하여 잔류응력에 의한 응력확대계수(K_{res})와 하중에 의한 응력확대계수(K_{appl})를 중첩시킨 유효응력확대계수($K_{eff}=K_{res}+K_{appl}$)를 정의하고, 유효응력확대계수의 범위가 피로 균열의 전파를 지배한다고 해석하는 방법이 있다. 이를 정의하기 위해서는 잔류응력장의 잔류응력 분포를 정확히 파악하여야 함은 물론이다.

아울러 실험이나 해석으로 구하여진 잔류응력 분포의 정확도를 유효응력확대계수 범위를 적용한 균열 진전 속도와 비교함으로써 검증할 수 있기 때문에 균열 전파법 역시 잔류응력의 크기를 평가하는 방법으로 활용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 잔류응력이 존재하지 않은 시편과 선상 가열에 의해 잔류응력이 내재하는 시편에 대해 각각 균열 진전 실험을 수행하였으며, 수치해석을 통해 구해진 잔류응력에 대한 응력확대계수와 외부 하중에 의한 응력확대계수를 중첩한 유효응력확대계수 범위를 산정하고, 이를 기준으로 균열 진전 속도를 재료의 피로 균열전파 특성곡선 상에 비교함으로써 해석 결과를 검증하였다.

Fig. 6은 각 시편에 대한 균열 진전 실험 결과를 보여주고 있으며 이미 잘 알려진 바와 같이 균열 선단에 압축 잔류응력이 존재하는 영역에 대해 균열 진전 속도가 매우 느려지는 현상을 보여주고 있다.

Fig. 7은 수치 해석으로부터 도출된 잔류응력의 영향을 고려한 유효응력확대계수 범위를 적용하여 균열전파 특성곡선을 구성하였으며 linear regression 선상에 매우 근접해 있어 적절한 잔류응력 재분포 해석이 수행되었음을 알 수 있다.

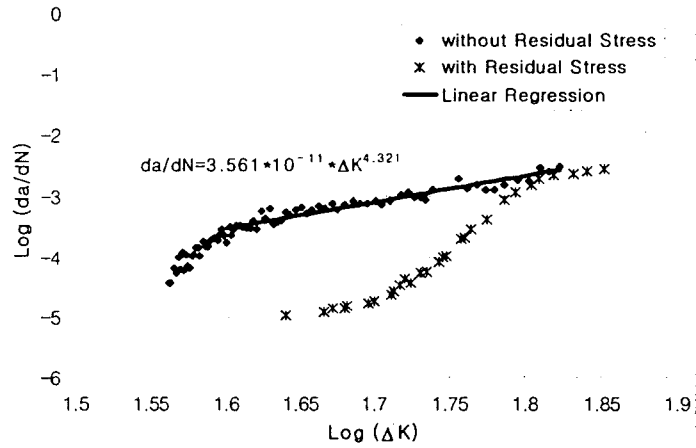


Fig. 6 Results of crack propagation

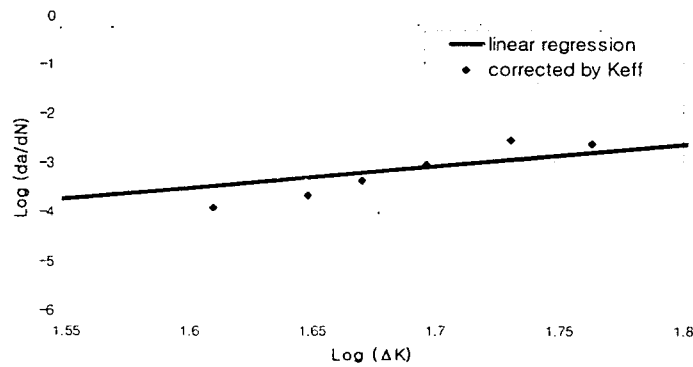


Fig. 7 Crack propagation curve corrected by effective stress intensity factor range considering the results of residual stress redistribution by analysis

4. 결론

본 연구에서는 균열 진전에 따른 잔류응력 분포의 변화를 추적할 수 있는 해석 모델을 개발하였고 잔류응력 평가법의 하나인 균열 전파 실험을 통해 해석 결과의 타당성을 검토하였다. 본 수치해석 모델을 이용하여 균열 발생 단계뿐만 아니라 균열 진전 과정에 대해서도 잔류응력의 영향을 정량적으로 판정할 수 있게 됨에 따라, 그간 대부분 실험에 의존해 왔던 잔류응력 재분포 현상을 보다 효율적으로 평가할 수 있는 기법을 제시하였다.

5. 후기

본 연구는 1998년도 서울대학교 해양시스템공학연구소 연구과제(해양시스템공학연구소 연구관리번호 '98-10)의 일부로써 서울대학교 발전기금의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

6. 참고문헌

- [1] 김응준, "용접잔류응력이 용접부 피로 강도에 미치는 영향의 정량적 평가방법" 대한용접학회지, 제 15권, 제 3호, 1997
- [2] 이용복, 정진성, "용접재의 잔류응력 재분포와 피로거동", 대한용접학회지, 제 15권, 제 3호, 1997
- [3] Jian Lu, "Handbook of Measurement of Residual Stresses", Society for Experimental Mechanics, 1996
- [4] ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rate"
- [5] 고대은, "열탄소성 해석 모델을 이용한 선상가열시의 판의 변형 예측에 관한 연구", 서울대학교 박사학위 논문, 1998
- [6] R. Galatolo and A. Lanciotti, " Fatigue crack propagation in residual stress fields of welded plates", Int. J. Fatigue, Vol. 19, No. 1, pp. 43-49, 1997
- [7] ASTM E837-92 "Standard Test Method for Determine Residual Stresses by Hole Drilling Strain Gage Method"