

# 손상역학 기반 전산피로시험법

## Computational Fatigue Test Method based on Damage Mechanics

이 치 승\* · 유 병 문\*\* · 이 제 명\*\*\*

Lee, Chi-Seung · Yoo, Byung-Moon · Lee, Jae-Myung

### 요 약

본 논문에서는 산업용 용접구조물의 피로성능 평가를 위한 시간 및 비용 절감형 전산피로시험법을 개발한다. 임의의 하중에 놓인 용접구조물의 성능저하 현상(균열발생 및 진전 등)을 손상역학에 기반하여 역학적으로 기술하고 자체개발한 유한요소해석코드에 탑재하여 이를 전산적으로 시뮬레이션한다. 정도 높은 용접구조물 전산피로시험법의 개발을 위해 용접잔류응력과 재료파라미터를 자체개발한 유한요소해석코드를 통해 구현한다. 개발된 전산피로시험법은 용접구조물의 피로시험 결과와 비교함으로써 제안 기법의 적합성 및 유용성을 검증한다.

**keywords** : 손상역학, 용접구조물, 용접잔류응력, 전산피로시험법, 피로

### 1. 서 론

임의의 정적/동적 하중 하에 놓인 산업용 구조물은 연성파괴, 취성파괴, 크리프파괴, 피로파괴 등 다양한 형태로 파손이 일어난다. 이들 가운데 피로파괴는 구조물에 작용하는 하중이 매우 낮음에도 불구하고 재료 내부에 피로손상(fatigue damage)이 누적되어 예상치 못한 시점에 파손이 갑작스럽게 일어난다는 점에서 여타 파괴에 비해 그 위험도가 매우 높다고 할 수 있다. 특히 산업용 구조물은 고열의 용접으로 인해 재료 내부적으로 큰 야금학적/역학적 변화를 겪게 되며, 용접부/열영향부에 발생하는 인장잔류응력은 용접구조물의 피로파괴를 현저히 증가시키는 원인으로 알려져 있다(Gurney, 1979).

용접구조물의 피로성능 및 피로수명평가를 규명하기 위해 많은 연구가 수행되었으나(Anderson 1995) 기존의 역학 모델로는 초기균열의 발생지점과 그 정도를 정의할 수 없을 뿐만 아니라 재료 내부의 손상의 발전 정도를 정량적으로 예측할 수 없는 단점이 존재한다. 최근 재료 내부의 성능저하 현상을 손상이라는 열역학 법칙에 근거한 재료 내부 상태변수를 통해 정량적으로 기술하는 시도가 이루어지고 있다(Lemaitre 1992).

본 논문에서는 산업용 용접구조물의 피로성능 평가를 위한 시간 및 비용 절감형 전산피로시험법을 개발한다. 임의의 하중에 놓인 용접구조물의 성능저하 현상(균열발생 및 진전 등)을 손상역학에 기반하여 역학적으로 기술하였으며 자체개발한 유한요소해석코드에 탑재하여 이를 전산적으로 시뮬레이션한다. 정도 높은 용접구조물 전산피로시험법의 개발을 위해 용접잔류응력과 재료파라미터를 자체개발한 유한요소해석코드를 통해

\* 부산대학교 조선해양공학과 박사과정 rich@pusan.ac.kr

\*\* 부산대학교 조선해양공학과 석사과정 bansl@pusan.ac.kr

\*\*\* 부산대학교 조선해양공학과 교수 jaemlee@pusan.ac.kr

구현한다. 개발된 전산피로시험법은 용접구조물의 피로시험 결과와 비교함으로써 제안 기법의 적합성 및 유용성을 검증한다.

## 2. 전산피로시험 절차

### 2.1. 전산피로시험 알고리즘

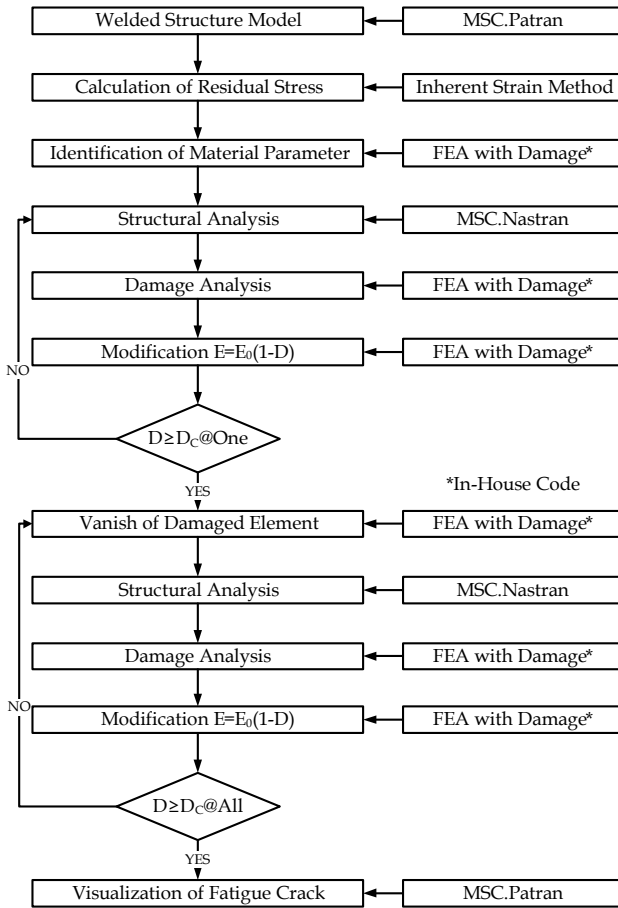


그림 1 전산피로시험 알고리즘

본 연구에서 개발된 전산피로시험 알고리즘을 그림 1에 보인다. 먼저, MSC.Patran<sup>®</sup>을 이용하여 용접구조물 유한요소모델을 모델링한 후, 고유변형도법을 통해 계산된 용접잔류응력 분포를 이에 삽입한다. 이어서, MSC.Nastran<sup>®</sup>을 통해 용접구조물의 구조해석을 수행한 후, 구조물의 응력-변형을 정보를 얻는다. 한편, 손상 연계 유한요소법 기반의 자체개발 유한요소 해석코드를 이용하여 용접구조물의 재료정수를 구한다. 최종적으로, 구조물의 응력-변형률 정보 및 재료정수를 바탕으로 용접구조물의 손상 해석을 수행한다. 반복된 구조-손상해석을 통해 용접구조물 유한요소모델의 요소 내부의 손상 값이 누적되며, 이 값이 임계손상값에 도달하게 되면 해당 요소의 강성을 손상의 양만큼 수정하게 된다. 수정된 용접구조물 유한요소모델 정보를 바탕으로 구조-손상해석을 계속 수행하게 되며 주요해석영역의 요소 내부 손상값이 임계 손상값에 도달하게 되면 해석을 종료하며 이 시점에서의 피로사이클수가 예측 피로수명이 된다.

### 2.2. 손상발전방정식

용접구조물의 피로성능 평가를 위한 손상발전방정식과 삼축 응력 함수(triaxiality function)는 다음과 같다.

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{2(R_{\nu}^{\mu})^{S_2} [(\sigma_M + k\sigma_f)^{2S_2+1} - [\sigma_f(1+k)]^{2S_2+1}]}{C(1+k)(2S_2+1)[2ES_1(1+k)^2(1-D)]^{S_2}} \quad (1)$$

$$R_{\nu}^{\mu} = \frac{2}{3}(1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left[ \frac{\sigma_H(1 + k)}{\sigma_{eq} + k\sigma_f} \right]^2 \quad (2)$$

### 2.3. 전산피로시험을 위한 유한요소모델

본 연구에서 수행된 전산피로시험 용접구조물 모델의 구조형상 및 유한요소모델을 그림 2에 보인다. 용접 구조물은 필릿(fillet)구조이며 CO<sub>2</sub>아크용접으로 접합되었다. 재료는 SM400B이며 탄성계수는 200GPa, 모재의 항복응력 및 인장강도는 각각 320MPa 및 490MPa이고, 용접부/열영향부의 항복응력 및 인장강도는 각각 520MPa 및 650MPa이다. 피로하중은 양진인장압축으로 작용하며 유한요소모델의 중앙부에 병진/회전 운동을 방지하는 최소한의 경계조건이 설정되어 있다. 그림 3에 고유변형도법으로 계산된 용접구조물의 플랜지 및 웹 방향 용접잔류응력분포와 실제 용접구조물의 용접잔류응력분포의 비교를 보이고 있다. 이는 구조-손상 해석 이전 유한요소모델에 초기응력으로 삽입된다.

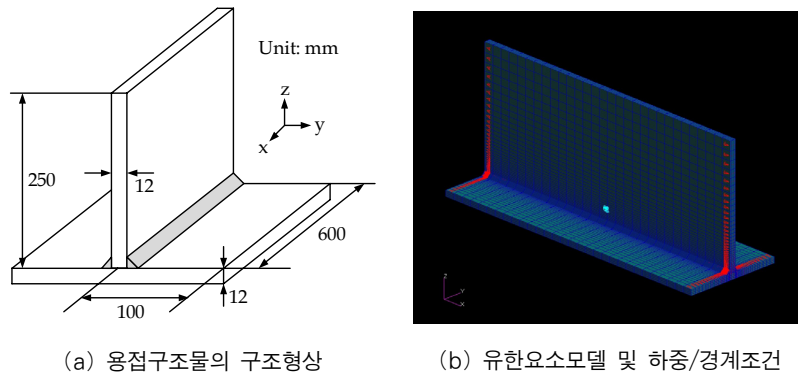


그림 2 용접구조물의 구조형상 및 유한요소모델

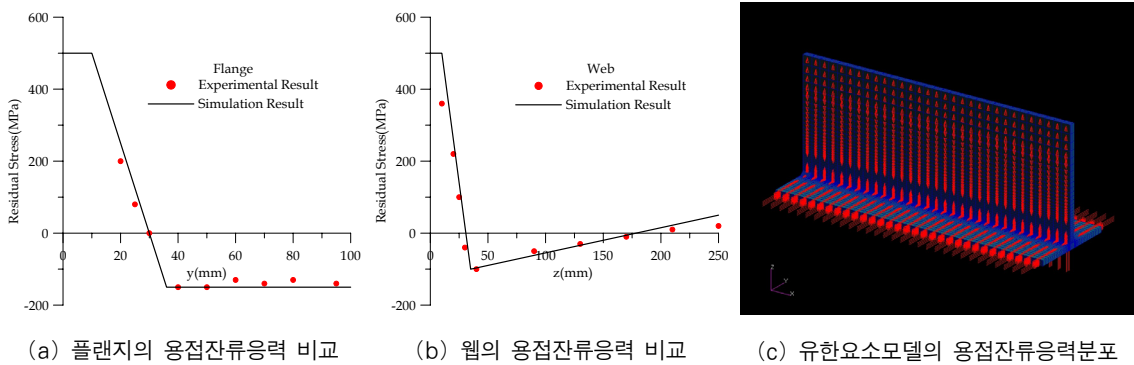


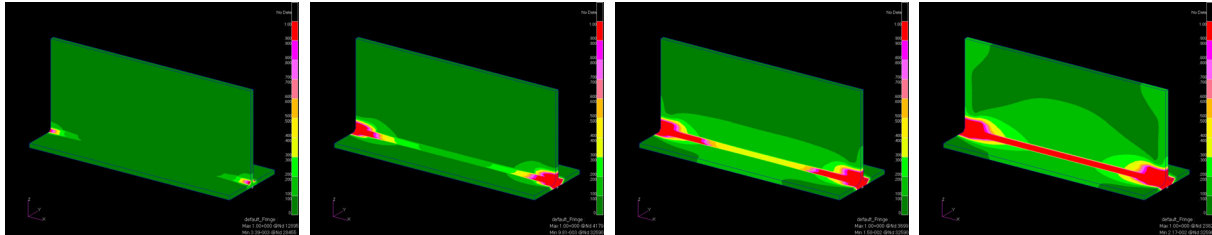
그림 3 용접구조물의 용접잔류응력분포 예측 및 이의 유한요소모델 적용

## 3. 전산피로시험 결과

제안기법을 통해 용접구조물의 전산피로시험을 수행하고 이를 피로시험결과와 비교함으로써 제안기법의 적합성 및 유용성을 검증한다. 그림 4는 100MPa의 응력진폭에 해당하는 피로하중이 작용할 때의 용접구조

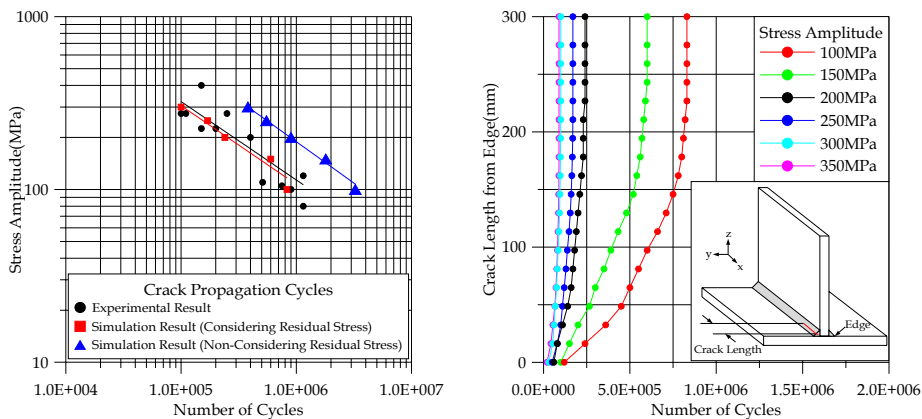
물의 용접부/열영향부에서의 균열발생에서 진전에 이르는 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 5는 전산피로시험을 통해 예측된 용접구조물의 피로수명 및 균열진전속도를 예측한 결과이다. 그림에 보인 바와 같이 피로수명은 매우 정밀하게 예측되었음을 확인할 수 있으며, 균열진전속도는 실제 피로시험 결과의 부재로 직접적으로 비교할 수는 없으나, 통상적인 금속재의 균열진전속도와 유사한 거동을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

막대한 시간과 비용이 소요되는 피로시험과 비교할 때, 제안기법은 고효율·비용절감형 예측기법임을 확인하였으며, 본 연구의 기법이 용접구조물의 피로성능평가분야에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다.



(a) 120,000사이클, 균열발생 (a) 360,000사이클 (a) 600,000사이클 (a) 830,000사이클, 균열전파

그림 4 100MPa 응력진폭에서의 전산피로시험법에 의한 용접구조물의 균열발생 및 균열전파 시뮬레이션



(a) 전산피로시험법에 의한 피로수명 예측 (b) 전산피로시험법에 의한 균열진전속도 예측

그림 5 100MPa 응력진폭에서의 전산피로시험법에 의한 용접구조물의 피로수명 및 균열진전속도 예측

### 감사의 글

본 연구는 첨단조선공학연구센터(Advanced Ship Engineering Research Center)의 지원에 의해 수행되었으며 위 기관의 후원에 감사드립니다.

### 참고문헌

Gurney, T.R. (1979) Fatigue of Welded Structures, Cambridge University Press, New York.  
 Lemaitre, J. (1992) A Course on Damage Mechanics, Springer-Verlag, Berlin.  
 Anderson, T.L. (1995) Fracture Mechanics, CRC Press, New York.  
 Japan Society of Steel Construction (1995) Fatigue Design Recommendation for Steel Structures, Japanese Society of Steel Construction, Tokyo.