

# 연속체 손상역학을 이용한 용접구조물 피로수명예측의 수치해석기법 개발

## Development of Numerical Analysis Method for Fatigue Life Prediction of Welded Structures using Continuum Damage Mechanics

이 치승\*, 전 민성\*\*, 이 제명\*

\*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

\*\*삼성중공업 조선해양연구소

### 1. 서 론

선박 및 해양구조물과 같은 산업용 구조물은 주로 금속재료로 이루어져 있다. 구조물의 형상을 이루기 위해 금속재료에 수많은 용접이 행해지며 이는 금속재료의 물리적 특성에 많은 변화를 가져온다. 그 중 가장 뚜렷이 나타나는 현상은 열 변형률(thermal strain)의 불일치로 인해 나타나는 잔류응력(residual stress)이며 이로 인해 용접구조물의 피로수명에 변화를 가져온다. 특히 용접부의 인장 잔류응력이 재료의 항복 응력에 도달하거나 이를 초과하게 되면 용접구조물의 피로수명은 급격히 줄어들게 된다<sup>1)</sup>. 따라서 용접구조물의 잔류응력 기구(mechanism)를 정확하게 파악해야만 현존 구조물 및 향후 설계될 구조물의 정확한 피로수명예측이 이루어진다.

Ueda<sup>2-3)</sup> 등은 고유변형률(inherent strain) 방법을 사용하여 버트용접(butt welding) 구조물과 T-조인트(T-joint) 및 I-조인트(I-joint) 용접구조물의 잔류응력 기구를 개발 및 예측하였는데 이는 기존의 실험적 방법이나 열유한요소해석(thermal finite element analysis)에 비해 시간 및 비용절감형 방법으로 간주되고 있다.

많은 연구에서 용접구조물의 피로수명을 예측하는 수치해석기법으로 유한요소해석을 채택하고 있으나 이는 해석 상의 상당한 시간이 요구된다. 또한 용접구조물의 재료피로시험을 통한 Wohler 곡선의 확보가 선행되어야 한다는 점에서 이러한 방법은 완전한 수치해석기법이라 보기 어렵다.

본 연구에서는 연속체 손상역학 및 용접구조물의 잔류응력 기구를 이용하여 용접구조물의 피로 손상 및 피로수명을 수치해석기법을 통하여 예측한다. 또한 이를 용접구조물의 피로시험결과와

비교함으로써 수치해석기법의 유용성 및 적합성을 검증한다.

### 2. 피로수명예측의 수치해석기법

#### 2.1 연속체 손상역학의 피로문제 적용

2.1.1 고사이클피로를 위한 손상발전방정식  
 준취성거동을 보이는 고사이클피로의 손상발전 방정식은 다음과 같다<sup>4-5)</sup>.

$$\dot{D} = \left( \frac{Y^\mu}{S_1} \right)^{S_2} \dot{p}^\mu \quad (1)$$

여기서

$Y^\mu$ : Strain energy release rate in microscale

$S_1$ : Damage strength material parameter

$S_2$ : Damage exponent material parameter

$\dot{p}^\mu$ : Plastic strain rate in microscale

미세범위(microscale)에서의 손상발전방정식인 식 (1)을 인장 및 압축에 따른 거시범위응력(mesoscopic stress)의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$dD = \left[ \frac{(\sigma_{eq} + k\sigma_f)^2 R_v^\mu}{2ES_1(1+k)^2(1-D)^2} \right]^{S_2} \frac{d\sigma_{eq}}{C(1+k)} \quad (2)$$

if  $\sigma_{eq} \geq \sigma_f, \sigma > 0$

$$dD = \left[ \frac{h(\sigma_{eq} + k\sigma_f)^2 R_v^\mu}{2ES_1(1+k)^2(1-hD)^2} \right]^{S_2} \frac{d\sigma_{eq}}{C(1+k)} \quad (3)$$

if  $\sigma_{eq} \geq \sigma_f, \sigma < 0$

$$R_v^\mu = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left[ \frac{\sigma_H(1+k)}{\sigma_{eq} + k\sigma_f} \right]^2 \quad (4)$$

여기서

$k=3aE/2C$ : Material parameter

$C$ : Kinematic hardening parameter

$\sigma_f$ : Fatigue limit stress

2.1.2 용접구조물의 피로수명예측

잔류응력으로 인해 외부로부터 피로하중을 받는 용접구조물의 등가응력(equivalent stress)은 재료의 그것과 다르다. 이를테면 양진인장압축의 피로하중(그림 1의 실선)을 받는 용접구조물은 구조물 내부의 잔류응력분포로 인해 더 이상 양진인장압축의 피로하중을 받는다고 볼 수 없으며 잔류응력과 피로하중을 모두 고려한 등가피로하중(그림 1의 점선)을 받는다고 보아야 한다.

한 주기  $\Omega$ 에 해당하는 손상의 발전 정도  $dD/dN$ 을 응력의 인장-압축 거동에 따라 서로 다르게 유도되는 손상발전방정식인 식 (5)~(6)을 적용하여 적분의 형태로 나타내면 식 (7)~(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{Y_+^\mu}{S_1}\right)^{S_2} \dot{p}^\mu = \left[ \frac{(\sigma_{eq} + k\sigma_f)^2 R_v^\mu}{2ES_1(1+k)^2(1-D)^2} \right]^{S_2} \frac{d\sigma_{eq}}{C(1+k)} \quad (5)$$

$$\left(\frac{Y_-^\mu}{S_1}\right)^{S_2} \dot{p}^\mu = \left[ \frac{h(\sigma_{eq} + k\sigma_f)^2 R_v^\mu}{2ES_1(1+k)^2(1-hD)^2} \right]^{S_2} \frac{d\sigma_{eq}}{C(1+k)} \quad (6)$$

$$\frac{dD}{dN} = \int_{\Omega} \dot{D} dt \quad (7)$$

$$= 2 \int_{\sigma_R}^{\sigma_M + \sigma_R} \left(\frac{Y_+^\mu}{S_1}\right)^{S_2} \dot{p}^\mu dt + 2 \int_{-\sigma_M + \sigma_R}^{\sigma_R} \left(\frac{Y_+^\mu}{S_1}\right)^{S_2} \dot{p}^\mu dt - 2 \int_{-\sigma_M + \sigma_R}^0 \left(\frac{Y_+^\mu}{S_1}\right)^{S_2} \dot{p}^\mu dt + 2 \int_{-\sigma_M + \sigma_R}^0 \left(\frac{Y_-^\mu}{S_1}\right)^{S_2} \dot{p}^\mu dt$$

if  $-1 \leq R < 0$

$$\frac{dD}{dN} = \int_{\Omega} \dot{D} dt \quad (8)$$

$$= 2 \int_{\sigma_R}^{\sigma_M + \sigma_R} \left(\frac{Y_+^\mu}{S_1}\right)^{S_2} \dot{p}^\mu dt + 2 \int_{-\sigma_M + \sigma_R}^{\sigma_R} \left(\frac{Y_+^\mu}{S_1}\right)^{S_2} \dot{p}^\mu dt$$

if  $0 \leq R < 1$

여기서

$\sigma_M$ : Maximum stress

$\sigma_R$ : Residual stress

한편 마이크로 크랙 패쇄 효과를 고려한 하중의 인장-압축 거동에서 압축에 의한 효과는 매우 미미하므로 인장에 의한 효과만을 고려하여

식 (7)~(8)의 적분을 수행하면 한 주기에 대한 손상 증가를 구할 수 있다.

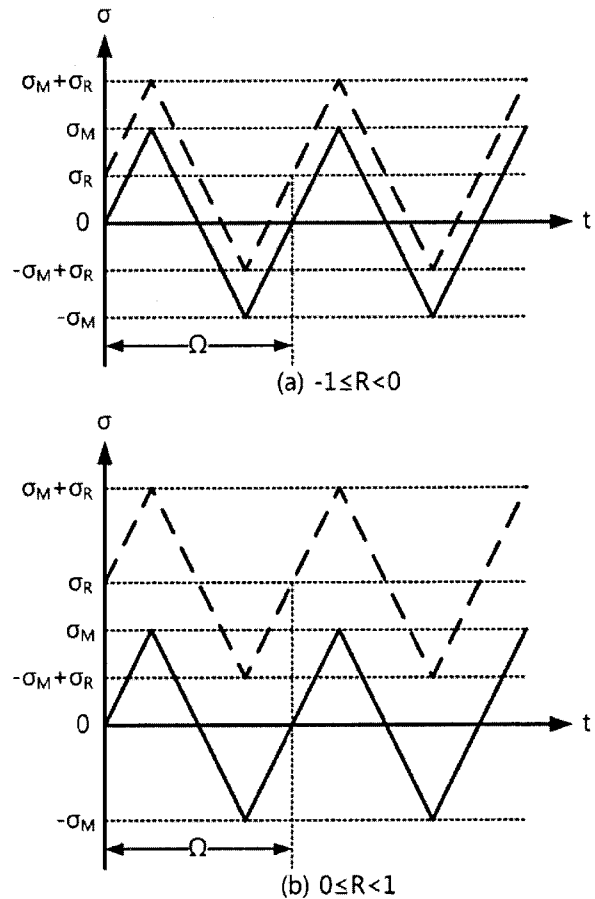


Fig. 1 Stress amplitude under cyclic tension-compression load condition and virtual stress amplitude under residual stress effects

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \quad (9)$$

$$\frac{2(R_v^\mu)^{S_2} [(\sigma_M + \sigma_R + k\sigma_f)^{2S_2+1} - [\sigma_f(1+k)]^{2S_2+1}]}{C(1+k)(2S_2+1)[2ES_1(1+k)^2(1-D)^2]^{S_2}}$$

if  $-1 \leq R < 0$

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{2(R_v^\mu)^{S_2} [(k\sigma_f)^{2S_2+1} - [\sigma_f(1+k)]^{2S_2+1}]}{C(1+k)(2S_2+1)[2ES_1(1+k)^2(1-D)^2]^{S_2}} \quad (10)$$

if  $0 \leq R < 1$

마지막으로 손상이 발생할 때까지의 반복하중  $N_R$ 에 대해 식 (9)~(10)을 주기에 대해 적분하면 다음과 같은 용접구조물의 피로수명예측식(fatigue life prediction equation)을 식 (11)~(12)와 같이 얻는다. 이는 용접구조물의 잔류응력과 피로한도 그리고 재료정수만으로 용접구조물의 피로수명을 수치해석적으로 예측할

수 있는 근사식이다.

$$N_R = \tag{11}$$

$$\frac{(2ES_1)^{S_2} C}{2(R_v^\mu)^{S_2} \left\{ \left( (\sigma_M + \sigma_R) \frac{1 + k \frac{\sigma_M + \sigma_R}{\sigma_f}}{1 + k} \right)^{2S_2 + 1} - \sigma_f^{2S_2 + 1} \right\}}$$

if  $-1 \leq R < 0$

$$N_R = \frac{(2ES_1)^{S_2} C}{2(R_v^\mu)^{S_2} \left\{ \left( \frac{1}{1+k} \right)^{2S_2 + 1} - \sigma_f^{2S_2 + 1} \right\}}$$

if  $0 \leq R < 1$

$$R_v^\mu = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left[ \frac{1+k}{3 \left( 1+k \frac{\sigma_f}{\sigma_M} \right)} \right]^2 \tag{13}$$

### 3. 수치해석기법의 검증

본 연구를 통해 새롭게 개발된 용접구조물의 피로수명예측의 수치해석기법의 유용성 및 적합성의 검증을 위해 T-조인트 용접구조물의 피로시험결과(용접구조물의 용접조건, 주요치수, 재료정수 등)를 인용하였다<sup>6)</sup>. 반복하중의 방향은 용접길이방향, 하중형태는 양진인장압축, 모재의 재료는 SM400B이다.

그림 2는 피로수명예측의 수치해석기법을 피로시험 결과와 비교한 Wohler곡선이다. 본 연구에서 제안한 용접구조물 피로수명예측의 수치해석기법이 실제 용접구조물의 피로수명과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결 론

본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 용접구조물의 잔류응력기구를 고유변형률을 통해 수치해석기법으로 파악한 후 이를 손상발전방정식에 적용함으로써 용접구조물의 피로수명을 예측하였다.
- 2) 역학적 수치해석 가운데 가장 난해한 물리적 거동인 고사이클피로 특히 용접구조물의 고사이클 피로를 연속체 손상역학을 이용하여 매우 정확하게 예측하였다.
- 3) 본 연구를 통해 새롭게 개발된 용접구조물

피로수명예측의 수치해석기법은 기존의 피로시험이나 유한요소해석 방법에 비해 시간 및 비용절감형 방법임을 확인하였다.

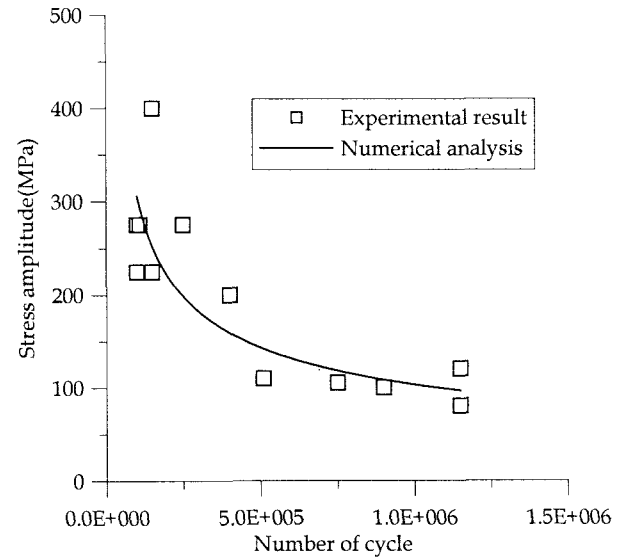


Fig. 2 Fatigue life prediction of T-joint welded structures

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

1. T.R. Gurney : Fatigue of Welded Structures(2nd Edition), Cambridge University Press, 1979, 1-456
2. Y. Ueda and M.G. Yuan : Journal of Engineering Materials and Technology, 115 (1993), 417-423
3. M.G. Yuan and Y. Ueda : Journal of Engineering Materials and Technology, 118 (1996), 417-423
4. J. Lemaitre : A Course on Damage Mechanics (2nd Edition), Springer-Verlag, 1992, 1-228
5. J. Lemaitre, J.P. Sermage and R. Desmorat : International Journal of Fracture, 97 (1999), 67-81
6. K. Thepvongsa, Y. Sonoda and H. Hikosaka : Fatigue Damage of Materials(1st Edition), WIT Press, 2003, 309-319