

1989년도 가을

한국전산구조공학회 학술발표회 논문집

잔류응력하의 강구조물의 피로신뢰도

Fatigue Reliability of Steel Structures
in the Presence of Residual Stresses

조효남* 김두한** 허상구***
Cho Hyo Nam Kim Doo Han Heo Sang Gu

ABSTRACT

An extended model for the assessment of fatigue reliability of steel structures in the presence of residual stresses is developed. The model explicitly includes the uncertainties of the mean stress and residual stress in terms of the zero-mean equivalent stress-range. It is assumed that the fatigue life of welded joints follows the Weibull distribution. Based on the numerical illustrations, it is shown that the probability of fatigue failure and the allowable stress-range for fatigue design could be significantly affected by the presence of residual stresses. This effect may be represented through the mean stress at the welded joints.

1. 서 론

잔류응력의 존재는 강구조물의 피로수명에 중요한 인자라는 것은 널리 알려져 있다. 용접연결부 주위에서 잔류응력의 크기를 측정하는 것과 균열 성장률과 피로수명에 어떤 영향을 받는지 등에 대해 많은 연구 보고가 제시되었다 [1,2]. 잔류응력은 상세부위의 형태와 기하학적 모양, 용접절차, 용접조건, 하중환경, 온도 변화에 따른 수축과 확장에 대한 구속항 등 여러가지 요인에 영향을 받는다. 이러한 잔류응력의 영향을 고려한 피로모형은 상당수 제안되었으나 [3,4], 아직도 잔류응력의 영향을 효과적으로 반영한 피로신뢰성 모형은 충분치 못한 실정이다. 본 논문에서는 이러한 잔류응력의 영향을 고려한 실용적인 피로신뢰성 모형이 제안되었다. 이 모형은 이미 개발된 피로신뢰성 모형 [5]의 확장으로 볼 수 있다.

그리서, 용접 연결부의 피로 수명은 Weibull 분포를 갖는다고 가정하고, 영(零)인 평균등가응력범위의 분포는 Beta 분포에 의해 모델화하였다. 잔류응력의 존재는 피로파괴의 예측과 피로설계를 위한 허용응력범위의 결정에 커다란 영향이 있음을 보여 준다.

2. 등가 응력 범위

2.1 잔류응력의 영향

잔류응력은 용접연결부의 피로수명에 영향을 끼치는 중요한 인자이다. 이 같은 영향은 평균응력으로 나타낼 수 있다 [6]. 잔류응력에 기인한 평균응력의 변화는 피로수명에 영향을 주는 S-N 선도를 변화시킨다.

그러나, 용접연결부 주위에서 잔류응력의 크기와 분포를 결정하는 것은 매우 어렵다. 더우기, 이것은 용접연결부의 형태와 기하학적 모양, 하중조건 등 여러가지 요인에 지배된다. 그런데, 용접 연결부의

* 한양대학교 토목공학과 교수

*** 한양대학교 대학원 석사과정

** 서울산업대 토목공학과 조교수

열영향지역(Heat-Affected Zone)에서 잔류응력은 모재(Base Material)의 항복응력과 같은 경우가 많다. 잔류응력의 존재는 평균응력을 변화시키며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[6].

$$\sigma_m = \sigma_r + S_m ; \sigma_r \leq \sigma_y - \frac{S}{1-R}$$

$$\sigma_m = \sigma_y - \frac{S}{2} ; \sigma_r \geq \sigma_y - \frac{S}{1-R}$$

여기서, σ_r : 잔류응력
 σ_y : 모재의 항복응력
 S : 작용 응력범위
 $S_m = \frac{S}{2} \frac{1+R}{1-R}$: 평균 작용응력
 $R = \frac{S_{min}}{S_{max}}$: 응력비

2.2 등가 응력범위의 본포

많은 실험자료를 통해 용접연결부에서의 피로수명에 대한 평균응력의 영향은 근사적으로 여러가지 접근 방법이 제안되었다[7]. 이들 방법들은 작용응력범위, 평균응력과 강재의 극한 강도로 표시되는 영-평균 등가 응력범위의 개념을 택하고 있다. 이를 위한 보정 방정식은 Goodman 보정식(직선)과 Gerber 보정식(포물선)이 널리 사용되고 있다. 잔류응력에 의한 피로수명의 변화는 Gerber 보정식과 같 일치되므로, 여기서는 Gerber 식을 적용하였으며, 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\frac{S}{S_o} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

여기서, S_o : 영인 평균 등가 응력범위
 σ_y : 모재의 극한강도

평균응력 σ_m 에 식(1)을 대입하고 S_o 에 의해 정리하면 다음과 같이 된다.

$$S_o = \frac{\sigma_u^2 S}{\sigma_u^2 - (\sigma_r + S_m)^2} \quad \sigma_r \leq \sigma_y - \frac{S}{1-R} \quad (3)$$

$$= \frac{\sigma_u^2 S}{\sigma_u^2 - (\sigma_y - S/2)^2} \quad \sigma_r \geq \sigma_y - \frac{S}{1-R}$$

식(3)에 표시되어 있는 기저 변수(Basic Variables)의 불확실량으로부터 S_o 의 불확실량을 추정할 수 있다. 응력범위가 일반적으로 상한치와 하한치를 갖기 때문에 S_o 의 확률분포를 Beta 분포로 모델링하는 것이 타당할 것이다.

3. 피로신뢰성 모형

3.1 피로수명의 본포

금속의 피로수명은 Weibull 분포로의 적합이 일반적으로 널리 사용되고 있다. Ang [5]에 의해 제안된 피로 파괴확률, P_F , 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_F = P(N \leq n) = F_N(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{E(n)} \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^k\right] \quad (4)$$

여기서, N, n : 반복회수로된 피로수명
 $E[n]$: 평균피로수명
 k : 형상모수(Weibull 경사)

형상모수 k 는 아래와 같은 식으로부터 구해진다.

$$\Omega_N = \frac{[\Gamma(1 + \frac{2}{k}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{k})]^{1/2}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (5)$$

여기서, Ω_N : 피로수명의 변동계수
 경험적으로 형상모수 k 는 다음과 같은 식으로 근사화된다[5].

$$k = \Omega_N^{-1.08} \quad (6)$$

3.2 평균 피로수명

평균피로수명은 일반적으로 상진폭 응력범위의 제하와 평균수명과의 S-N 선도로부터 구해진다. 그러나, 잔류응력을 고려한 경우에는 영-평균 등가 응력범위로부터 얻어지는 평균 S_o -N 회귀직선을 사용하여야 한다. 이러한 S_o -N 회귀직선은 상진폭 응력범위 제하를 일련의 피로시험을 행한 실험적 데이터로부터 얻을 수 있다[8]. 이런 S_o -N 회귀직선으로부터 Miner의 선형피해 가설을 적용시키면, 평균피로수명 $E[N]$ 은 다음과 같이 된다.

$$E[N] = \frac{C}{E[S_0^m]} \quad (7)$$

여기서, C : S₀-N 회귀직선의 절편
E[S₀^m] : 등가 응력범위 본포의 m차 모멘트

영-평균 응력범위 S₀가 Beta 본포를 갖는다고 하면, 이때의 m차 모멘트는 다음 식이 된다[5].

$$E[S_0^m] = S_{00}^m \frac{\Gamma(m+q) \Gamma(q+r)}{\Gamma(q) \Gamma(m+q+r)} \quad (8)$$

여기서 q, r : Beta 본포의 정상모수
S₀₀ : 등가 응력범위의 상한치

4. 통계적 불확실량

4.1 피로수명 예측을 위한 불확실량

피로수명을 계산하는데 필요한 총불확실량은 Ang 에 의해 다음과 같이 제안되었다[5].

$$\Omega_N^2 = \delta_N^2 + \Omega_S^2 + \Omega_C^2 + m \Delta_{S_0}^2 \quad (9)$$

여기서, δ_N : 피로데이터의 변동성에 관련된 불확실량
Ω_S : 피로모형의 이상화에 관련된 불확실량
Ω_C : S₀-N 회귀직선의 절편에서의 불확실량
Δ_{S₀} : 등가 응력범위의 적용에서의 불확실량
m : S₀-N 회귀직선의 역기울기

피로데이터의 변동성에 관련된 불확실량은 평균 등가 S₀-N 회귀직선에 대한 lnN의 조건부 표준편차로서 얻어진다.

Ω_C, Ω_S, Δ_{S₀}에 대한 불확실량들은 단순히 문헌[5]를 참조하였다. 이들 불확실량과 관련된 S₀-N 선도는 문헌[8]의 가용한 피로시험 데이터를 회귀분석하여 얻었다.

그림 1은 응력해소(Stress Relieved)와 영-평균 등가 작용응력을 갖는 피로시험 데이터로부터 얻은 S₀-N 회귀직선을 보여준다.

표 1은 피로수명을 예측하는데 필요한 불확실량들을 나타낸다.

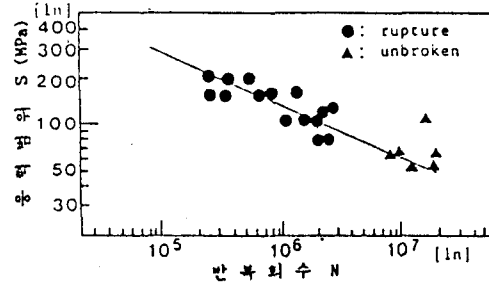


그림 1. S₀-N 회귀직선

표 1. 피로수명 예측을 위한 불확실량

Ω _S	δ _N	Ω _C	m	Δ _{S₀}	Ω _N
0.15	0.89	0.4	2.895	0.09	1.022

4.2 영-평균 등가 응력범위에서의 불확실량

식(3)을 1차 근사화하여 영-평균 등가 응력범위의 불확실량을 계산할 수 있다. 그러나, 불확실량을 더욱 정확히 계산하기 위해서는 Monte-Carlo Simulation을 사용할 수 있다. Simulation에서는 5개의 기저변수들의 본포를 기초로 각 랜덤 데이터를 발생시키고, 식(3)으로부터 S₀를 적합시키는데 필요한 랜덤 S₀ 데이터를 발생시킴으로서 불확실량이 구해진다. 표 2는 기저변수들의 통계량들을 보여준다. 잔류응력과 맞이음 용접한 모재강판(Base Plate)의 강도의 불확실량은 가용한 자료[9]로부터 얻었다. 그러나 연결부 형태와 구조물에 지배되는 평균작용응력범위 S_m는 피로수명에서 잔류응력의 영향을 계산하기 위해 영(零)으로 채택하였다.

표 2. 기저변수들의 통계량

변수	S	S _m	σ _r	σ _u	σ _y	S ₀
평균	56.14	0	199.2	600	332	63.1
C.O.V	0.31	0.2	0.32	0.05	0.06	0.4

5. 적용 및 고찰

5.1 피로신뢰성

피로파괴의 확률의 계산에 잔류응력의 영향을 고찰하기 위하여 문헌[5]에서 사용한 단순한 예제로 설명한다. 즉 문제는 맞이응용접된 강판(Steel Plate)에서 피로파괴의 확률을 구하는 것이다. 피로수명과 작용응력의 모수와 불확실량들은 표 1, 2에 주어져 있으며, 계산결과는 표 3에 요약해 놓았다. 표 3에서 보는 바와 같이 평균잔류응력이 $\sigma_r = 0.6\sigma_y$ 일때 피로수명은 거의 50%로 감소하며 피로파괴확률은 거의 2배로 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 잔류응력이 균열성장과 피로수명에 커다란 영향을 줌을 알 수 있다.

표 3. 잔존수명과 P_f 의 결과 비교

모 형	E(S ₀) E(S _r)	E[N]	P _f	
			5x10 ⁵	2x10 ⁶
작용고 류판려	3.356x10 ⁵	3.88x10 ⁶	0.127	0.410
작용고 류판려	1.696x10 ⁵	7.63x10 ⁶	0.069	0.239

그림 2는 잔류응력이 있을 때와 없을 때에 피로파괴확률은 크게 차이를 보여준다. 예를 들면, 잔류응력을 고려한 경우에 피로수명은 허용위험도($P_{f0} = 2.3\%$, $\beta_0 = 2.0$)에서 거의 50%나 줄어든다. 위의 사실로 용접연결부위의 실제적인 피로신뢰성을 계산하기 위해서는 잔류응력의 영향을 피로신뢰성 모형에 반영하여야 함을 보여준다.

5.2 피로 저항 설계

피로저항설계의 안전모수에 대한 잔류

응력의 영향을 조사하였다. 종래의 피로설계는 특정 설계수명에 대응하는 허용응력범위에 기초를 두고 있다. 피로신뢰성모형을기초로 하여 허용최대 응력범위 S_a 는 다음과 같이 유도된다.

$$S_a \leq \left(\frac{C}{n_0 \gamma_f} \right)^{1/m} \xi \quad (10)$$

$$\text{여기서, } \gamma_f = \frac{\Gamma(1 + \Omega N^{1.08})}{[P_f(n_0)] \Omega N^{1.08}} \quad (11)$$

; 산포도 계수

$$\xi = \left[\frac{\Gamma(q) \Gamma(m+q+r)}{\Gamma(m+q) \Gamma(q+r)} \right]^{1/m} \quad (12)$$

; 랜덤 응력계수

n_0 ; 특정설계 수명

식(10)에서 γ_f 는 요구되는 평균수명에 대한 산포도를 나타내며, ξ 는 Beta 분포로부터 유도된 랜덤 응력인자이다. 그러나, 제안된 모형에서 식(10)에서의 모수들은 S_0 -N 회귀직선과 S_a 의 Beta 분포에 근거해 계산되어야 하며, 또한 식(10)으로부터 얻은 결과는 허용응력범위 S_{a0} 에 대응되며, 식(3)을 이용하여 S_a 로 대체시켜야 한다. 맞이응용접 플레이트에 대한 예제의 결과를 표 4에 수록하였다. 표 4는 잔류응력의 영향으로 허용응력범위가 91.80 MPa에서 72.51MPa로 줄어들음을 알 수 있다. 따라서, 잔류응력은 허용응력범위에 큰 영향을 주며, 신뢰성에 기초한 내피로 설계기준 개발에 반드시 고려하여야 함을 알 수 있다.

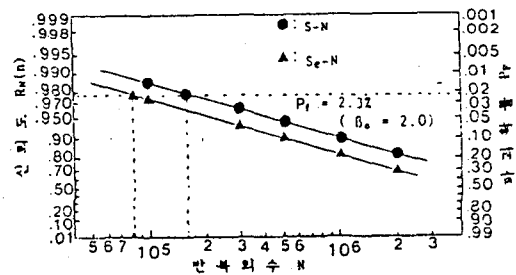


그림 2. 피로 신뢰성

표 4. 허용응력범위의 결과 비교

모 형	γt	ξ	S_a (MPa)
잔류응력 비고	10.676	1.815	72.51
잔류응력 비고	10.676	2.045	91.80

6. 결 론

용접연결부위의 잔류응력의 영향을 고려하기 위해 확장된 피로신뢰성 모형이 개발되었다. 피로파괴의 위험도와 내파로 설계에 대한 허용응력은 잔류응력의 존재에 커다란 영향을 받음을 알 수 있다. 그러나, 제안된 모형의 실제적인 적용성은 많은 실험 조사를 통해 잔류응력에 대한 통계 자료를 얻어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Glinka, G., "Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Amplitude Loads", Fracture Mechanics, ASTM STP 677, 1979, pp. 198-214.

[2] Kula, E. and Weiss, V., "Residual Stress and Stress Relaxation", Plenum Press, New York and London, 1982, pp. 49-59.

[3] Varanasi, S.R. and Whittaker, I.C., "Structural Reliability Prediction Method Considering Crack Growth and Residual Strength in Fatigue Cracking Growth under Spectrum Loads", ASTM STP 595, 1976, pp. 292-305.

[4] Ohta, A., Sasaki, E., Kosuge, M., and Nishijima, S., "Significance of Residual Stress in Fatigue Crack Propagation Behavior of Welded Joints", 4th International Conference on Structural Safety and Reliability, pp. 351-359.

[5] Ang, A.H-S., "Bases for Reliability Approach to Structural Fatigue", Proceedings the 2nd International Conference on Structural Safety and Reliability, Sep., 1977, pp. 97-114.

[6] Sarkani, S., and Lutes, L.D., "Residual Stress Effects in Fatigue of Welded Joints", Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 2, Feb., 1988, pp. 462-474.

[7] Almar-Næss, A., "Fatigue Handbook", Offshore Steel Structures, Tapir, Trondheim, 1985, pp. 157-236.

[8] Maddox, S. J., "Influence of Tensile Residual Stress on the Fatigue Behavior of Welded Joints in Steel", in Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776, 1982, pp. 63-96.

[9] Cramond, R., "A Probabilistic Analysis of Structural Reliability against Fatigue and Fracture", Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1974.

[10] Gurney, T.R., "Fatigue of Welded Structures", Cambridge University Press, 1979, pp. 226-243.